



中国建筑科学研究院有限公司技术报告

---

# 木结构建筑全寿命期碳排放计算 研究报告

中国建筑科学研究院有限公司

2019年6月

# 木结构建筑全寿命期碳排放计算 研究报告

主要编制人	徐伟、张时聪、杨芯岩	
校 审 人	张时聪	
报 告 编 号	20170109640180026	
编 制 日 期	2019 年 6 月 25 日	

## 目录

前 言 .....	1
一、建筑全寿命周期碳排放计算方法 .....	3
1.1 计算边界 .....	3
1.2 能源清单分析 .....	4
1.2.1 清单模型 .....	5
1.2.2 能源上游阶段清单分析结果 .....	6
1.3 建材生产碳排放核算方法 .....	9
1.4 建材运输阶段碳排放核算方法 .....	12
1.5 建造施工阶段碳排放核算方法 .....	14
1.6 建筑运行阶段碳排放核算方法 .....	15
1.7 建筑拆除阶段碳排放核算方法 .....	17
二、骊山下的院子全寿命期碳排放计算 .....	18
2.1 项目基本信息 .....	18
2.2 建筑材料碳排放 .....	20
2.3 运输碳排放 .....	23
2.4 建筑运行碳排放 .....	23
2.5 建筑建造及拆除碳排放 .....	24
2.6 碳排放计算结果 .....	25
三、清控人居科技示范楼全寿命期碳排放计算 .....	27
3.1 项目基本信息 .....	27
3.2 建筑材料碳排放 .....	28
3.3 运输碳排放 .....	30
3.4 建筑运行碳排放 .....	31
3.5 建筑建造及拆除碳排放 .....	32
3.6 碳排放计算结果 .....	32
四、北川羌族自治县红枫敬老院全寿命期碳排放计算 .....	34
4.1 项目基本信息 .....	34
4.2 建筑材料碳排放 .....	36
4.3 运输碳排放 .....	38
4.4 建筑运行碳排放 .....	39

4.5 建筑建造及拆除碳排放 .....	40
4.6 碳排放计算结果 .....	40
五、中加生态示范区枫丹园全寿命期碳排放计算 .....	42
5.1 项目基本信息 .....	42
5.2 建筑材料碳排放 .....	44
5.3 运输碳排放 .....	45
5.4 建筑运行碳排放 .....	45
5.5 碳排放计算结果 .....	46
六、幸福谷度假村全寿命期碳排放计算 .....	49
6.1 项目基本信息 .....	49
6.2 建筑材料碳排放 .....	51
6.3 运输碳排放 .....	53
6.4 建筑运行碳排放 .....	53
6.5 碳排放计算结果 .....	54
七、西郊宾馆意境园多功能厅全寿命期碳排放计算 .....	56
7.1 项目基本信息 .....	56
7.2 建筑材料碳排放 .....	58
7.3 运输碳排放 .....	59
7.4 建筑运行碳排放 .....	60
7.5 建筑建造及拆除碳排放 .....	61
7.6 碳排放计算结果 .....	61
八、上谷水郡会所全寿命期碳排放计算 .....	63
8.1 项目基本信息 .....	63
8.2 建筑材料碳排放 .....	64
8.3 运输碳排放 .....	66
8.4 建筑运行碳排放 .....	67
8.5 建筑建造及拆除碳排放 .....	68
8.6 碳排放计算结果 .....	68
九、计算结果比对 .....	70
十、结论 .....	76
参考文献 .....	77
附录 1: Summary of life cycle carbon emission assessment for wood frame construction ..	80

附录 2: Summary of life cycle carbon emission assessment – Courtyard under Lishan.....	84
附录 3: Summary of life cycle carbon emission assessment – THHSCG.....	89
附录 4: Summary of life cycle carbon emission assessment – Nursing home in Beichuan..	94
附录 5: Summary of life cycle carbon emission assessment – Xijiao Hotel.....	99

## 前 言

依托中国国家标准《建筑碳排放计算标准》GB/T51366-2019和加拿大The Athena Sustainable Materials Institute出版的“Brock Commons Tallwood House, University of British Columbia - An Environmental Building Declaration According to EN 15978 Standard”、“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Laminated Veneer Lumber Manufacture (LVL)”等相关木结构碳排放建筑研究报告，本研究对我国木结构建筑进行全寿命期碳排放计算。经征集、筛选，共有8栋木结构示范建筑纳入报告计算范围，它们分别为骊山下的院子、清控人居科技示范楼、北川红枫敬老院、中加生态示范区枫丹园、幸福谷度假村、西郊宾馆意境园、上谷水郡会所以及河北省建筑科技研发中心。由于受到收集数据完整性的限制，研究最终包含7个项目，覆盖寒冷及夏热冬冷气候区，建筑类型包括居住建筑、酒店、办公建筑、养老院、文旅建筑等多种建筑类型。

研究首先对建筑主材类型与数量、建筑围护结构构造、能源系统形式、室内环境设计参数等基本信息进行收集；其次，研究将木结构建筑全寿命期划分为建材生产、建材运输、建造施工、建筑运行和拆除5个阶段，分别对各个阶段的二氧化碳排放进行计算。此外，研究还与仅使用传统建材（钢筋、混凝土）的基准建筑进行比较，计算出各木结构建筑全寿命期的碳排放量较基准建筑的节省率。

研究结果显示，建筑在运行阶段碳排放占建筑全寿命期碳排放比例较大，为82.8%-95.4%。其他阶段碳排放为，建筑材料碳排放0.8%-12.1%、运输碳排放0.1%-0.3%、建造以及拆除碳排放1.9%-2.4%。

在木结构建筑中，由于木材的使用，减少了传统建材的使用量。如果与仅使用钢筋和混凝土的基准建筑相比，木材的使用可以使建材生产阶段碳排放降低48.9%-94.7%。从全寿命期的角度来看，与基准建筑的碳排放量相较，可节省8.6%-13.7%的二氧化碳排放。

经与项目方的研究讨论，在建材运输阶段碳排放的计算中，结果仅考虑了从木材加工工厂运输到项目所在地的碳排放，未包含将木材从加拿大海运至中国港

口，再从港口运往项目所在地的运输碳排放。如考虑此部分碳排放，从全寿命期的角度来讲，碳排放总量将增加1%左右。

加拿大The Athena Sustainable Materials Institute的专家对其中四个项目的计算进行了评审。经过几轮的探讨，计算方法及结果得到了Athena方面专家的认可，四份英文报告附在报告后。

本报告的研究方法和结果对计算我国木结构房屋碳排放具有广泛借鉴意义，为定量确定其节碳潜力奠定基础。研究的进行过程中，受到了示范工程项目方的大力支持，在此，要特别感谢以下专家提供的帮助：

史知广	设计主管	北科泰达投资发展有限公司
杜红	总经理	上海臻源木结构设计工程有限公司
谢白莎	品牌主管	上海隼执建筑科技有限公司
刁思杰	总经理	四川泽霖木结构工程有限公司
褚英男	主创建筑师	SUP素朴建筑工作室
付维舟	技术经理	加拿大木业协会
邹旭	副院长	天津市建筑设计院滨海分院
孙萍	建筑设计师	天津市建筑设计院滨海分院
曹继滔	工程部经理	天津泰明加德低碳住宅科技发展有限公司
Grant Finlayson	Operations Manager	The Athena Sustainable Materials Institute

## 一、建筑全寿命周期碳排放计算方法

寿命期评价方法（Life-cycle assessment, LCA）是用来评估一项产品从生产、使用到废弃或回收再利用等不同阶段造成的环境影响，又被叫做产品从摇篮到坟墓的环境影响评估方法。这里所谓的环境影响，<sup>[1]</sup>包括能源的使用、资源的消耗、污染排放等<sup>[1]</sup>。

国际标准化组织（ISO）将其定义为：汇总和评估一个产品（或服务）体系在其整个寿命期内的所有投入及产出对环境造成的和潜在的影响的方法，即将材料构件生产、规划与设计、建造与运输、运行与维护、拆除与处理全循环过程中物质能量流动所产生对环境影响的经济效益、社会效益和环境效益的综合评价。

### 1.1 计算边界

建筑的全寿命期是包含整个建筑的生命过程<sup>[2]</sup>，换句话说，建筑的全寿命期不仅仅包含建筑的使用阶段，还要包括以下五个阶段：

- 建材开采阶段：原材料的开采、运输
- 建材生产阶段：涉及建筑材料的生产、加工、运输等过程
- 建筑施工阶段：通过一系列工法将建筑材料构建成建筑实体的过程，通常来讲，该过程持续时间短但物质输入强度高
- 建筑使用阶段：是整个建筑生命历程中最漫长的阶段，运行中伴随有给排水、供暖、通风、空调、照明灯等所产生的能耗
- 建筑拆除回收阶段：建筑的拆除、废弃物的回收利用和处理

寿命期评价可分为全寿命期评价以及部分寿命期评价（图1.1）。这项研究的寿命期包括从摇篮到坟墓这一过程。



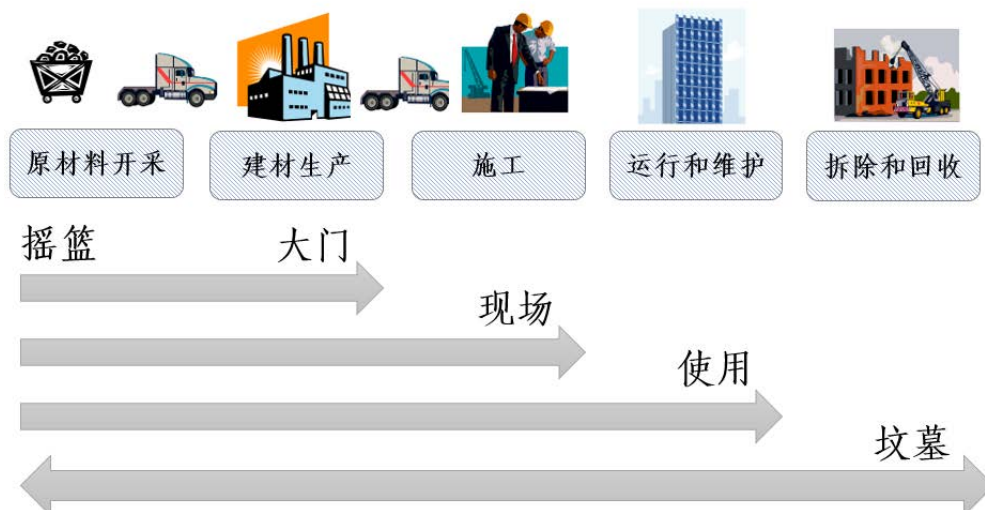


图1.1 建筑寿命期示意图

从计算对象上，以单体建筑为计算对象，对于群体建筑逐一计算单体建筑的能耗和二氧化碳排放并进行汇总。对于园区或小区的绿化、道路、主干线的供电、供水管道、排水管道等项目的施工过程中能耗不计入建筑建造能耗。

从建筑施工人、材、机三要素上，不计入施工人员劳动过程的二氧化碳排放，建筑材料工地现场内的移动和运输能耗、建筑施工机械设备场地内的安拆、移动和使用能耗计入建造过程二氧化碳排放。

## 1.2 能源清单分析

能源需要经过开采、运输、生产、配送等阶段才能投入使用，这一过程称为能源的上游阶段。根据对能源的定义，按照生产方式可分为一次能源和二次能源。一次能源指自然界原有的各形式的能源，如原煤、原油、天然气、水能、风能、太阳能、生物质能等。二次能源是对一次能源进行转化、加工而产生的能源，如电力、煤气、汽油、柴油、燃料油、焦炭、沼气等。由于能源在寿命期各阶段里也伴随着自身和其他能源的使用消耗，存在着能源的自身引用和互相引用，因此在计算过程中需要考虑能源上游阶段的能源消耗。例如生产一吨煤炭需要消耗大约一吨的原煤原料，电力和其他化石燃料。电力属于二次能源,我国大部分电力生产耗煤，这就出现了能源之间的互相引用过程。总的来说这些能源都可以追述到初始一次能源原煤、原油和天然气的消耗。

## 1.2.1 清单模型

### 1.2.1.1 能源消耗

根据能源生产特点，可以把能源生产过程分成三种类型。一是所有被处理的能源都作为过程燃料使用。二是被处理的能源有一部分作为过程的燃料，另一部分作为过程的原料。三是被处理的能源全部作为原料使用，但过程不发生任何的化学反应。

能源上游阶段的寿命期能耗包括能源本身所含的能量、该能源在生产时的耗能以及该能源在开采时的能耗。能源上游阶段的寿命期能耗 $E_{p,s}$ 的计算公式为：

$$E_{p,s} = \sum E_d(1 + E_{p\text{生产},i} + K \cdot E_{p\text{开采},i}) \quad (1.1)$$

$E_d$  - 生产单位能源直接消耗的能源量 (KJ/GJ)

$E_{p\text{生产},i}$  - 第*i*种燃料生产阶段的寿命期能耗 (KJ/GJ)

$E_{p\text{开采},i}$  - 第*i*种燃料开采阶段的寿命期能耗 (KJ/GJ)

$K$  - 损失系数

### 1.2.1.2 环境排放

在生产能源的过程中会产生温室气体，其组成为CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O，其总排放量 $P_c$ 由三部分组成，即过程的直接排放，以及生产和开采阶段的过程排放，可用下式表示：

$$P_{c,j} = \sum E_d(P_{d,i}^j + P_{c\text{生产},i}^j + K \cdot j P_{c\text{开采},i}^j) \quad (1.2)$$

$P_{d,i}^j$  - 第*i*种燃料燃烧第*j*中污染物的排放系数 (g/GJ)

$P_{c\text{生产},i}^j$  - 第*i*种燃料生产阶段第*j*中污染物的排放系数 (g/GJ)

$P_{c\text{开采},i}^j$  - 第*i*种燃料开采阶段第*j*中污染物的排放系数 (g/GJ)

## 1.2.2 能源上游阶段清单分析结果

### 1.2.2.1 能源生产过程能耗

以原煤为例，根据中国能源统计年鉴1990年中国共生产煤10.8亿吨，根据生产过程中消耗的主要原材料，可得到每生产1MJ原煤的能耗（表1.1）。

表1.1生产1MJ煤的能源消耗

	数量	单位	转化因子	转化后(MJ)	标准化数据
煤	$1.08 \times 10^9$	t	20908	$2.258 \times 10^{13}$	1
煤	$1 \times 10^7$	t	20908	$2.091 \times 10^{11}$	0.0093
电力	$2.996 \times 10^{10}$	kWh	11.839	$3.547 \times 10^{11}$	0.0157
公路运输	$5.19 \times 10^9$	t km	2.423	$1.257 \times 10^{10}$	0.0006

其他各类能源在生产过程中的能源消耗数据均采用上述方法进行处理，得到每生产计量单位的过程能源所需要的初级能源的清单（表1.2）

表1.2 生产1MJ过程能源所需的初级能源

	原煤	原油	天然气	柴油	火电
初级能源 (MJ)	1.026	1.062	1.033	2.297	2.014

### 1.2.2.2 化石能源的 CO<sub>2</sub> 排放因子

化石能源的利用贯穿于集成建筑寿命期各阶段。化石能源的主要成分是碳化合物，燃烧过程中大部分碳以CO<sub>2</sub>的形式排放，其他以非CO<sub>2</sub>的形式排放的气体最终会在大气中氧化成CO<sub>2</sub>。因此，化石能源燃烧的CO<sub>2</sub>排放量主要取决于燃料的碳含量，燃烧条件相对不重要。本文根据《2006年IPCC国家清单气体指南》中化石能源的主要温室气体排放系数计算出主要温室气体单位排放量，乘以其对应温室气体当量因子得出不同化石能源CO<sub>2</sub>当量排放因子<sup>[3]</sup>（表1.3）

表1.3 各种能源单位的CO<sub>2</sub>排放量

能源名称	单位	热值 (kJ/单位)	CO <sub>2</sub> 当量排放因子 (kg CO <sub>2</sub> eq /单位)
标煤	kg	29307	2.08
原煤	kg	20908	1.48
洗精煤	kg	26344	1.87
焦炭	kg	28435	2.95
原油	kg	41816	3.23
车用汽油	kg	43070	3.51
航空汽油	kg	43090	3.54
煤油	kg	43070	3.27
柴油	kg	42652	3.68
燃料油	kg	41816	3.75
天然气	m <sup>3</sup>	38931	2.36
液化石油气	m <sup>3</sup>	50179	3.78
焦炉煤气	m <sup>3</sup>	16726	0.84
炼厂干气	m <sup>3</sup>	46055	2.80
火电	kWh	12435	0.95

### 1.2.2.3 电能的 CO<sub>2</sub> 排放因子

电能作为二次能源，在生产中因消耗各种化石能源而引起二氧化碳排放，不同国家的电力生产工艺水平和电力生产结构各不相同，目前我国的主要发电方式为火力发电。火电发电比例越高，单位电能产生的CO<sub>2</sub>排放量就越大。不同国家工艺水平不同，电力生产结构不同（表1.4）。

表1.4 中外发电能源结构比较

国家	发电结构 (%)				
	煤电	油电	气电	核电	水电
中国	81.33	1.46	4.51	1.92	14.55
日本	26.03	10.58	24.1	27.76	8.01
德国	48.03	1.52	12.09	26.98	3.17
韩国	38.01	5.91	18.06	36.98	0.86

我国发展改革委员会气候司将电网边界统一划分为东北、华北、华东、华中、西北和南方区域电网，同时公布了各区域电网的CO<sub>2</sub>排放因子，见表1.5。

表1.5 2012年中国区域电网CO<sub>2</sub>排放因子 (kgCO<sub>2</sub>/kWh)

电网名称	覆盖省市	排放因子
华北区域电网	北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、蒙西（除赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟外的内蒙古其他地区）	0.8843
东北区域电网	辽宁省、吉林省、黑龙江省、蒙东（赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟）	0.7769
华东区域电网	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省	0.7035
华中区域电网	河南省、湖北省、湖南省、江西省、四川省、重庆市	0.5257
西北区域电网	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆自治区	0.6671
南方区域电网	广东省、广西壮族自治区、云南省、贵州省、海南省	0.5271

#### 1.2.2.4 温室气体的 CO<sub>2</sub> 排放因子

温室气体主要有二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、甲烷（CH<sub>4</sub>）、氮氧化物（N<sub>2</sub>O）、氢氟碳化物（HFC<sub>s</sub>）、全氟化碳（PFC<sub>s</sub>）和六氟化硫（SF<sub>6</sub>）等气体。分析建筑的二氧化碳排放量，本质是为了说明其对全球气候变暖带来的影响，上述几种温室气体对气候变化也有不同程度的影响，且通常都远大于 CO<sub>2</sub> 对气候变化的影响，因此，二氧化碳排放量不应仅仅考虑 CO<sub>2</sub> 的排放量，应包括所有对全球气候变暖造成影响的气体。IPCC 以二氧化碳气体的全球变暖潜能值（GWP）

为基准，将其他温室气体的 GWP 折算为 CO<sub>2</sub> 当量值，各温室气体的全球变暖潜能值见表 1.6。

表 1.6 全球变暖潜能特征当量因子

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	N <sub>2</sub> O	HFC <sub>s</sub>	PFC <sub>s</sub>	SF <sub>6</sub>
CO <sub>2</sub> 排放因子 (kg CO <sub>2</sub> eq/kg)	1	25	3	298	1430	12200	22800

### 1.3 建材生产碳排放核算方法

建筑材料是建筑的基础，建筑材料的生产、运输等过程消耗的能量在建筑能耗中占有相当大的比重。不同材料的选择对于建筑的环境负荷的影响非常大。建筑材料、构件、部品从原材料开采、加工制造、直至产品出厂并运输到施工现场，各个环节都会产生温室气体排放，这是建材的内含碳排放，可以通过建筑的设计、建材供应链的管理进行控制和削减。

现行国家标准《环境管理生命周期评价原则与框架》GB/T 24040、《环境管理生命周期评价要求与指南》GB/T 24044为建材的碳排放计算提供了标准方法。根据上述标准规定，建材生产及运输阶段碳排放计算的寿命期边界可选取“从摇篮到大门”，即从建筑材料的上游原材料、能源开采开始、包括建材生产全过程、到建筑材料出厂。

$$C_{SC} = \sum_{i=1}^n M_i \times F_i \quad (1.3)$$

式中：C<sub>sc</sub>——建材生产阶段碳排放（kg CO<sub>2</sub>e）；

M<sub>i</sub>——第i种主要建材的消耗量；

F<sub>i</sub>——第i种主要建材的碳排放因子（kg CO<sub>2</sub>e/单位建材数量）

建材生产及运输阶段的碳排放应至少包括主体结构材料、围护结构材料、粗装修用材料，如水泥、混凝土、钢材、墙体材料、保温材料、玻璃、铝型材、瓷砖、石材等。根据《建筑碳排放计算标准》，建材生产过程数据主要来自建材行业统计和文献资料，上游背景过程数据采用中国寿命期基础数据库

（2015），并按照ISO 14040s系列标准要求建立寿命期模型，使用IPCC第五次报告（2013）的二氧化碳当量值计算得到。

建材的碳排放因子受建材规格型号影响较大，并且随时间也有变化。计算时宜优先选用由建材生产商提供的且经第三方审核的建材碳足迹数据，或查询更新的中国寿命期基础数据库（CLCD）数据库。此外，部分学者已经进行了有益的尝试。中科院、清华大学、同济大学等一些科研机构和高校对钢材、水泥、平板玻璃、混凝土、木材等建材的寿命期清单进行了分析<sup>[4-8]</sup>

表 1.7 建筑材料碳排放因子

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子
普通硅酸盐水泥（市场平均）	735 kg CO <sub>2</sub> e/t
C30 混凝土	295 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
C50 混凝土	385 kg CO <sub>2</sub> e/ m <sup>3</sup>
石灰生产（市场平均）	1190 kg CO <sub>2</sub> e/t
消石灰（熟石灰、氢氧化钙）	747 kg CO <sub>2</sub> e/t
天然石膏	32.8 kg CO <sub>2</sub> e/t
砂（f=1.6~3.0）	2.51 kg CO <sub>2</sub> e/t
碎石（d=10~30mm）	2.18 kg CO <sub>2</sub> e/t
页岩石	5.08 kg CO <sub>2</sub> e/t
粘土	2.69 kg CO <sub>2</sub> e/t
混凝土砖（240mm×115mm×90mm）	847 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
蒸压粉煤灰砖（240mm×115mm×53mm）	341 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
烧结粉煤灰实心砖（240mm×115mm×53mm，掺入量为50%）	134 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
页岩实心砖（240mm×115mm×53mm）	292 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
页岩空心砖（240mm×115mm×53mm）	204 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
粘土空心砖（240mm×115mm×53mm）	250 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
煤矸石实心砖（240mm×115mm×53mm，90%掺入量）	22.8 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
煤矸石空心砖（240mm×115mm×53mm，90%掺入量）	16.0 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
炼钢生铁	1700 kg CO <sub>2</sub> e/t
铸造生铁	2280 kg CO <sub>2</sub> e/t
炼钢用铁合金（市场平均）	9530 kg CO <sub>2</sub> e/ t

转炉碳钢		1990 kg CO <sub>2</sub> e/t
电炉碳钢		3030 kg CO <sub>2</sub> e/t
普通碳钢（市场平均）		2050 kg CO <sub>2</sub> e/ t
热轧碳钢小型型钢		2310 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢中型型钢		2365 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢大型轨梁（方圆坯 管坯）		2340 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢大型轨梁（重轨 普通型钢）		2380 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢中厚板		2400 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢 H 钢		2350 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢宽带钢		2310 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢钢筋		2340 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢高线材		2375 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢棒材		2340 kg CO <sub>2</sub> e/t
螺旋埋弧焊管		2520 kg CO <sub>2</sub> e/t
大口径埋弧焊直缝钢管		2430 kg CO <sub>2</sub> e/t
焊接直缝钢管		2530 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢无缝钢管		3150 kg CO <sub>2</sub> e/t
冷轧冷拔碳钢无缝钢管		3680 kg CO <sub>2</sub> e/t
碳钢热镀锌板卷		3110 kg CO <sub>2</sub> e/t
碳钢电镀锌板卷		3020 kg CO <sub>2</sub> e/t
碳钢电镀锡板卷		2870 kg CO <sub>2</sub> e/t
酸洗板卷		1730 kg CO <sub>2</sub> e/t
冷轧碳钢板卷		2530 kg CO <sub>2</sub> e/t
冷硬碳钢板卷		2410 kg CO <sub>2</sub> e/t
平板玻璃		1130 kg CO <sub>2</sub> e/t
电解铝（全国平均电网电力）		20300 kg CO <sub>2</sub> e/t
铝板带		28500 kg CO <sub>2</sub> e/t
断桥铝合金窗	100%原生铝型材	254 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	原生铝：再生铝=7:3	194 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
铝木复合窗	100%原生铝型材	147 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	原生铝：再生铝=7:3	122.5 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
铝塑共挤窗		129.5 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
塑钢窗		121 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
PPR 管		3.72 kg CO <sub>2</sub> e/kg



PE 管	3.60 kg CO <sub>2</sub> e/kg
PVC-U 管	7.93 kg CO <sub>2</sub> e/kg
EPS 板	5640 kg CO <sub>2</sub> e/t
岩棉板	2370 kg CO <sub>2</sub> e/t
硬泡聚氨酯板	5220 kg CO <sub>2</sub> e/t
铝塑复合板	8.06 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
铜塑复合板	37.1 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
铜单板	218 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
普通聚苯乙烯	4620 kg CO <sub>2</sub> e/t
线性低密度聚乙烯	1990 kg CO <sub>2</sub> e/t
高密度聚乙烯	2620 kg CO <sub>2</sub> e/t
低密度聚乙烯	2810 kg CO <sub>2</sub> e/t
聚氯乙烯（市场平均）	7300 kg CO <sub>2</sub> e/t
自来水	0.168 kg CO <sub>2</sub> e/t

#### 1.4 建材运输阶段碳排放核算方法

建材运输阶段是指建材从生产厂家运到施工现场的阶段，该阶段的能耗及CO<sub>2</sub>排放主要是因为运输交通工具的能源消耗。

建材的运输一般都是公路运输，就近原则。能源运输主要包括以下几种方式：铁路、公路、船舶以及管道等。不同运输方式的能源消耗不同（表1.18）。现采用《中国交通年鉴2008》中给出的公路运输、水路运输和航空运输的平均能耗强度，换算成对应的CO<sub>2</sub>排放量。采用公路运输的方式时，从施工场地返回的车辆一般都是空荷，环境负荷是满载时的0.67倍，应对返回的货车进行相应的修正。

表1.8 各类运输方式的碳排放因子（kg CO<sub>2</sub>e/tkm）

运输方式类别	碳排放因子
轻型汽油货车运输（载重 2t）	0.334
中型汽油货车运输（载重 8t）	0.115
重型汽油货车运输(载重 10t)	0.104
重型汽油货车运输（载重 18t）	0.104

轻型柴油货车运输（载重 2t）	0.286
中型柴油货车运输（载重 8t）	0.179
重型柴油货车运输（载重 10t）	0.162
重型柴油货车运输（载重 18t）	0.129
重型柴油货车运输（载重 30t）	0.078
重型柴油货车运输(载重 46t)	0.057
电力机车运输	0.010
内燃机车运输	0.011
铁路运输-中国市场平均	0.010
液货船运输（载重 2000t）	0.019
干散货船运输(载重 2500t)	0.015
集装箱船运输（载重 200TEU）	0.012

建材运输阶段碳排放应按下式计算：

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i \times D_i \times T_i \quad (1.4)$$

式中：C<sub>ys</sub>——建材运输过程碳排放（kg CO<sub>2</sub>e）；

M<sub>i</sub>——第i种主要建材的消耗量（t）；

D<sub>i</sub>——第i种建材的平均运输距离（km）；

T<sub>i</sub>——第i种建材的运输方式下，单位重量运输距离的碳排放因子（kg CO<sub>2</sub>e/t·km）。

目前国内研究建材环境符合通常只包括其生产阶段，运输阶段的数据尚缺。根据台湾学者的相关统计数据，公路货运车辆使用的燃料97.5%以上皆为柴油，故假设所有货运车辆使用的燃料均为柴油。《建筑碳排放计算标准》中指出，主要建材的运输距离宜优先采用实际的建材运输距离。当建材实际运输距离未知时，混凝土的默认运输距离值应为40公里，其他建材的默认运输距离值为500公里。此外，国内相关学者也对内地的建材运输阶段能耗和CO<sub>2</sub>排放清单进行过研究<sup>[9]</sup>。

表1.9 主要建材平均运输距离 (km)

建材	平均运输距离 (km)
大型钢材	61.17
中小型材	61.17
热轧钢筋	61.17
冷轧钢筋	61.17
铁	72.66
铝	71.32
水泥P.I.52.5	52.72
水泥P.O.42.5	52.72
水泥P.S.32.5	52.72
混凝土	14.81
普通混凝土砌块	14.81
粉煤灰加气混凝土砌块	14.81
粉煤灰硅酸盐砌块	25.78
石灰	29.62
其他水泥制品	52.72
木材	34.03
建筑玻璃	74.08
EPS	25.78
涂料	50.35
实心黏土砖	25.78
空心黏土砖	25.78
实心灰砂砖	25.78
建筑陶瓷	37.02
石材板	25.78
砂	39.98
碎石	39.98
铝合金窗	56.48

### 1.5 建造施工阶段碳排放核算方法

施工阶段是指建材运到建筑场地后,现场营建的过程。施工阶段的能耗主要是各种机械设备用电,以及小部分液体燃料。施工现场的用电又分为施工区和生活区用电,前者包括塔吊、桩机、电焊机、卷扬机等,生活区用电包括工人的生活、办公等。公式1.8是依据施工工艺法计算建造施工阶段的能耗 $E_{pc}$ 。

$$C_{JZ} = \sum_{i=1}^n E_{jz,i} \times EF_i \quad (1.5)$$

式中： $C_{JZ}$ ——建筑建造阶段碳排放量（kg CO<sub>2</sub>e）；

$E_{jz, i}$ ——建筑建造阶段第  $i$  种能源总用量（kwh 或 kg）；

$EF_i$ ——第  $i$  种能源的碳排放因子（kgCO<sub>2</sub>/kwh 或 kgCO<sub>2</sub>/kg）

表 1.10 不同施工工艺的能耗和 CO<sub>2</sub> 排放量

施工工艺	单位	单位能耗 (MJ/单位)	CO <sub>2</sub> 排放量 (kg CO <sub>2</sub> /单位)
开挖、移除土方	m <sup>2</sup>	115.2	1.05
原地平整土方	m <sup>2</sup>	7.2	0.11
起重机搬运	t	10.8	0.054
水平运输	t km	37.8	0.19
填土碾压平整	m <sup>3</sup>	223	0.99
施工场地照明	建筑面积	46.8	9.7
破碎、构建拆除	m <sup>2</sup>	29.5	2.52

## 1.6 建筑运行阶段碳排放核算方法

根据国家标准《建筑碳排放计算标准》，建筑物运行阶段的碳排放量涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量、建筑碳汇的减碳量的计算。在建筑碳排放边界将不同的能量消耗换算为建筑物的碳排放量，并进行汇总，最终获得建筑物的碳排放量。变配电、建筑内家用电器、办公电器、炊事等受使用方式影响较大的建筑碳排放不确定性大，这部分碳排放量在总碳排放量中占比不高，不影响对设计阶段建筑方案碳排放强度优劣的判断，国际上通用做法在建筑碳排放计算不纳入家用电器、办公电器、炊事等的碳排放量。

根据国家标准《民用建筑设计通则》GB 50325对建筑设计使用年限划分为四类，其中普通建筑设计寿命为50年。因此，碳排放计算中采用的建筑设计寿命应与设计文件一致，当设计文件不能提供时，按50年计算。

建筑在运行阶段用能系统消耗电能、燃油、燃煤、燃气等形式的终端能源，建筑总用能根据不同类型的能源进行汇总，再根据不同能源的碳排放因子计算出建筑物用能系统的碳排放量。暖通空调系统能耗由冷热源的能耗、输配系统及末端空气处理设备能耗的能耗构成，输配系统包括冷冻水系统、冷却水系统、热水系统和风系统。建筑物生活热水年耗热量的计算根据建筑物的实际运行情况进行计算，需求量同室内人员的数量、使用习惯和活动类型有关。建筑碳排放计算采用的照明功率密度值应同设计文件一致，并将自然采光、控制方式和使用习惯等因素影响计入。电梯系统能耗与电梯速度、额定载重量、特定能量消耗等参数有关。可再生能源系统应包括太阳能生活热水系统、光伏系统、地源热泵系统和风力发电系统。地源热泵系统的能量消耗应主要体现在系统的效率上，因此在可再生能源系统的能量消耗中不再单独计算，而是在暖通空调系统中计算其节能性；对于太阳能光热或光伏发电、风力发电等系统的能耗则依据资源条件、系统类型、系统形式、系统效率计算不同系统的能量消耗。

建筑运行阶段单位建筑面积的总碳排放量（ $C_M$ ）应按下列公式计算：

$$C_M = \left( \sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i) - C_p \right) \times y \quad (1.6)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (1.7)$$

式中： $C_M$ ——建筑运行阶段碳排放量（ $\text{kgCO}_2$ ）；

$E_i$ ——建筑第*i*类能源年消耗量（单位/a）；

$EF_i$ ——第*i*类能源的碳排放因子，按本标准附录A取值；

$E_{i,j}$ ——*j*类系统的第*i*类能源消耗量（单位/a）；

$ER_{i,j}$ ——*j*类系统消耗由可再生能源系统提供的第*i*类能源量（单位/a）；

*i*——建筑消耗终端能源类型，包括电力、燃气、石油、市政热力等；

*j*——建筑用能系统类型，包括供暖空调、照明、生活热水系统等；

$C_p$ ——建筑绿地碳汇系统年减碳量（ $\text{kg CO}_2/\text{a}$ ）；

$y$ ——建筑设计寿命（a）；

## 1.7 建筑拆除阶段碳排放核算方法

建筑建造阶段是根据建筑设计文件、施工组织设计或施工方案，按相关标准通过一系列活动将投入到项目施工中的各种资源（包括人力、材料、机械、能源和技术）在时间和空间上合理组织，变成建筑实体的过程。建造阶段的能耗是在建造阶段各种施工机械、机具和设备使用的能耗，主要由两部分组成：一是构成工程实体的分部分项工程的建造能耗，二是为完成工程施工，发生于该工程施工前和施工过程中技术、生活、安全等方面非工程实体的各项措施的能耗。相应地，建筑建造阶段碳排放分为两部分：一是分部分项工程施工过程消耗的燃料、动力产生的碳排放；二是措施项目实施过程消耗燃料、动力产生的碳排放。

拆除阶段碳排放主要是场地内拆除设备及运输设备将建筑物肢解过程产生的能耗。建筑拆除方式包括人工拆除、机械拆除、爆破拆除和静力破损拆除等。大多数工程采用的是人工拆除和机械拆除。爆破拆除是指利用炸药在爆炸瞬间产生高温高压气体对外做功，来解体和破碎建筑物的方法。

建筑拆除阶段的单位建筑面积的碳排放量应按下式计算：

$$C_{CC} = \sum_{i=1}^n E_{cc,i} \times EF_i \quad (1.8)$$

式中： $C_{CC}$ ——建筑拆除阶段单位建筑面积的碳排放量（ $\text{kgCO}_2$ ）；  
 $E_{cc,i}$ ——建筑拆除阶段第  $i$  种能源总用量（ $\text{kWh}$  或  $\text{kg}$ ）；  
 $EF_i$ ——第  $i$  种能源的碳排放因子（ $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ），按本标准附录 A 确定；  
 $A$ ——建筑面积（ $\text{m}^2$ ）。

## 二、骊山下的院子全寿命期碳排放计算

### 2.1 项目基本信息

项目位于西安骊山脚下，临潼国家旅游度假区中，周边分布有华清池、烽火台和秦始皇陵等历史遗迹。设计扬骊山自然风光之优长，承历史之积淀，将日本枯山水禅意美学融入中国传统院落景观的营造之中，构筑空、灵、静的禅意景观，提供与颐养度假氛围相匹配的户外空间，打造独具一格的温泉养生社区。整体布局以院落空间为基础，传统院落为参照，在其中筑石造景，形成远山近水的院落空间境界。在景观空间的构筑方面，设计汲取骊山皇家园林的传统，强调景观空间的序列，以中轴对称、序列安排和数进院落布局等手法，形成层层递进的空间。





骊山下的院子为耐火等级为三级与四级之间的木结构公寓住宅楼建筑，设计使用年限50年。总建筑面积895.34m<sup>2</sup>（不含地下），建筑基地面积327.08m<sup>2</sup>。建筑层数为地上3层，建筑高度为9.85米。结构类型为轻木结构。

该建筑所属气候分区为寒冷B区，建筑节能设计如下：

1. 建筑体型系数：G型住宅：S=0.47
2. 屋面保温层为240mm厚玻璃棉，K=0.23W/(m.K)
3. 外墙构造为：外墙外保温140mm厚保温棉，K=0.27W/(m.K)  
三层外墙K=0.37W/(m.K)  
与非采暖房间相邻的内墙保温层为140厚玻璃棉  
与非采暖房间之间的楼板，内填240厚玻璃棉
4. 开敞阳台门；双层阳台木制外门，K=1.61W/(m<sup>2</sup>.K)<2.0W/(m<sup>2</sup>.K)
5. 外窗不同朝向窗墙面积比如下：G户型南向0.42北向：0.08东向：0.21西向：0.20；南向外门窗采用可见光透射比0.800中空玻璃铝包木窗，在线Low-E（5+12氩气+5）；传热系数K=1.8W/(m<sup>2</sup>.K) 其他外门窗采用中空玻璃铝包木窗，（5+12空气+5）K=2.5W/(m<sup>2</sup>.K) 单元门的传热



系数 $K=4W/(m^2.K)$  周边地面热阻 $R=0.89(m.K)/W$ 根据国家标准《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法》(GB/T7106-2008) 外窗及阳台门的气密性等级不应低于4级。中空玻璃的露点温度为-40度。外门窗框四周靠墙缝隙应采用高效保温材料填实并用建筑密封胶嵌缝。

## 2.2 建筑材料碳排放

根据项目方提供的数据，骊山下的院子项目主材清单如下表所示：

表2.1 项目所用材料数量

材料名称	规格 (mm)			单位	数量	损耗	总量	立方数	
	厚度	宽度	长度					小计	合计
防腐木	38	140	4880	根	44	5%	46	1.19	5.14
	38	89	4880	根	108	5%	113	1.86	
	38	184	4880	根	58	5%	61	2.08	
SPF	38	140	4880	根	444	5%	466	12.10	65.96
	38	89	4880	根	490	5%	515	8.50	
	38	140	3050	根	1870	5%	1964	31.87	
	38	89	3050	根	900	5%	945	9.75	
	38	235	4880	根	82	5%	86	3.75	
OSB 板	12	1220	2440	片	818	8%	883	31.54	43.20
	15	1220	2440	片	242	8%	261	11.65	
胶合木过梁	89	230	6000	根	4	5%	4	0.49	1.98
	140	152	2252	根	2	5%	2	0.10	
	89	302	5200	根	4	5%	4	0.56	
	89	241	3250	根	6	5%	6	0.42	
	140	230	3200	根	4	5%	4	0.41	

Athena可持续材料研究所（Athena Sustainable Materials Institute）在有关加拿大建筑材料碳排放方面做了大量的研究，本研究所涉及的加拿大木材碳排放清单均来源于该研究所的研究报告。

表2.2 加拿大木材碳排放清单

材料名称	防腐木 <sup>1</sup>	SPF <sup>2</sup>	OSB板 <sup>3</sup>	胶合木过梁 <sup>4</sup>
碳排放 (kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )	184.09	74.02	226.91	79.99

注：1. 数据来源为“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Glulam<sup>[10]</sup>”

2. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber<sup>[11]</sup>”

3. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board - OSB<sup>[12]</sup>”

4. 数据来源为“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Cross Laminated Timber (CLT)<sup>[13]</sup>”

因此，建筑材料碳排放计算结果为：

表2.3 加拿大木材碳排放计算结果

材料名称	防腐木	SPF	OSB板	胶合木过梁	
材料数量 (m <sup>3</sup> )	5.14	65.96	43.20	1.98	
建材碳排放	碳排放清单 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	184.09	74.02	226.91	79.99
	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e	946	4882	9802	158
	合计 kg CO <sub>2</sub> e	15789			

表2.4 建筑材料碳排放计算结果（普通建材）

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子		建材使用量		建材碳排放 kg CO2
	排放因子	单位	数量	单位	
C30 混凝土	295	kg CO2e/m3	105	m <sup>3</sup>	30975
热轧碳钢小型型钢	2310	kg CO2e/t	5	t	11550
热轧碳钢高线材	2375	kg CO2e/t	6.5	t	15438
铝木复合窗：原生铝： 再生铝=7:3	122.5	kg CO2e/m2	160	m <sup>2</sup>	19600
PPR 管	3.72	kg CO2e/kg	200	kg	744
PE 管	3.6	kg CO2e/kg	100	kg	360
PVC-U 管	7.93	kg CO2e/kg	150	kg	1190
EPS 板	5640	kg CO2e/t	0.67	t	3363
普通聚苯乙烯	4620	kg CO2e/t	0.1	t	462
<b>合计 kg CO2</b>					<b>83681</b>

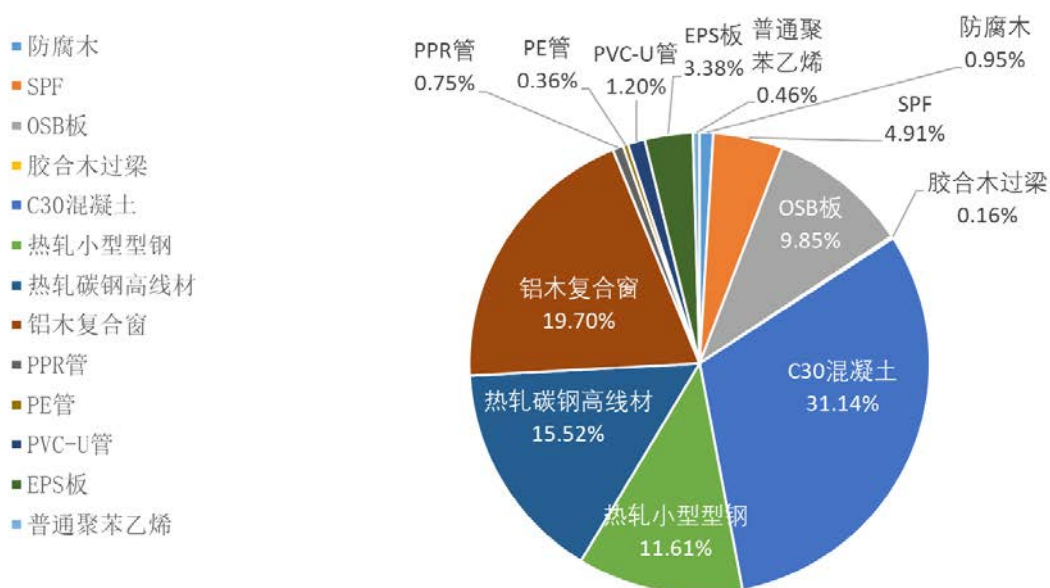


图2.1 建筑材料碳排放构成

## 2.3 运输碳排放

项目位于陕西省西安市，木材从工厂运输到工地的距离通过《中国木结构建筑行业企业目录》测算得出，其他普通建材的运输距离参照研究数据给出<sup>[9]</sup>。因此，运输碳排放的计算结果为：

表2.5 运输碳排放计算结果

建材	运输重量 (t)	运输方式	运输距离 (km)	碳排放因子 kg CO <sub>2</sub> e/t·km	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e
加材	53.99	陆运：重型柴油货车运输(载重 10t)	50	0.162	437
C30 混凝土	252.00	重型柴油货车运输(载重 46t)	40	0.057	575
热轧碳钢小型型钢	5.00	中型柴油货车运输(载重 8t)	61	0.179	55
热轧碳钢高线材	6.50	中型柴油货车运输(载重 8t)	61	0.179	71
PPR 管	0.20	轻型柴油货车运输(载重 2t)	500	0.286	29
PE 管	0.10	轻型柴油货车运输(载重 2t)	500	0.286	14
PVC-U 管	0.15	轻型柴油货车运输(载重 2t)	500	0.286	21
EPS 板	0.67	轻型柴油货车运输(载重 2t)	500	0.286	96
普通聚苯乙烯	0.10	轻型柴油货车运输(载重 2t)	500	0.286	14
<b>合计 kg CO<sub>2</sub>e</b>					<b>1312</b>

## 2.4 建筑运行碳排放

根据《陕西省居住建筑节能设计标准》(DBJ61-65-2011)、《民用建筑热工设计规范》(GB50176-93)、《建筑外门窗气密，水密，抗风压性能分级及检测方法》(GB/T 7106-2008)以及《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26-2010)，对该项目进行建筑节能设计计算。建筑总体热工性能如下表：

表2.6 建筑总体热工性能

朝向	面积	传热系数	遮阳系数	窗墙比
南向	97.46	1.80	0.37	0.42
北向	14.40	2.70	0.60	0.08
东向	46.12	2.39	0.59	0.21
西向	43.87	2.38	0.59	0.20
综合平均	201.85	2.12	0.49	0.24

根据计算结果，建筑采暖能耗为 $5.21\text{kgce}/\text{m}^2$ 。根据《中国建筑节能年度发展研究报告2017》数据显示，2015年城镇住宅不包括采暖部分的能耗平均值为 $9.1\text{kgce}/\text{m}^2$ 。因此可以估算出，本项目的建筑运行能耗约为 $14.3\text{kgce}/\text{m}^2$ 。《中国建筑节能年度发展研究报告2018》中指出，建筑运行阶段消耗的能源种类主要以电、煤、天然气为主。其中，城镇住宅和公共建筑这两类建筑中70%能源均为电，北方供暖分项中用煤的比例约为80%，本项目建筑运行阶段不能种类能源消耗如下表所示：

表2.7 建筑运行碳排放计算

建筑 面积 $\text{m}^2$	使用 年份 年	建筑运行能源消耗			耗煤碳排放 $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$	耗电碳排放 $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$	耗气碳排放 $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$
		耗煤量 $\text{kgce}/\text{m}^2\text{a}$	耗电量 $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ a}$	耗气量 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ a}$			
895	50	2.86	27.81	1.08	266310	833997	113594
		标煤碳排放 因子 $\text{kgCO}_2/\text{kg}$	西北电网碳 排放因子 $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$	天然气碳 排放因子 $\text{kgCO}_2/\text{m}^3$			
		2.08	0.67	2.36			
合计 $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$					1213900		

## 2.5 建筑建造及拆除碳排放

建筑建造及拆除碳排放占建筑全寿命期比例较少，其构成主要来自能源消耗。电耗主要来自钢筋工程、模板工程中各类材料的加工，混凝土工程中空压机和振捣器的使用，运输工程中塔吊的使用，以及外保温施工中电动吊篮的使用等环节。油耗主要来自施工现场混凝土泵车的使用。对于传统混凝土建筑而言，单位面积建筑建造碳排放从 $17$ 至 $168\text{kWh}/\text{m}^2$ 不等<sup>[14]</sup>，项目间差异很大<sup>[1, 14]</sup>。

<sup>15]</sup>，但单位面积建造碳排放与拆除碳排放差别不大。对于木结构建筑而言，加拿大已有研究表明，单位面积建造碳排放约为10 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。由于该项目缺少建造过程及拆除能源消耗清单，并根据我国的建筑业发展水平，假设单位面积建筑建造及拆除碳排放为30 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。因此，建筑建造及拆除碳排放均为20860 kg CO<sub>2</sub>e。

## 2.6 碳排放计算结果

根据以上章节中的计算方法和结果，根据由IPCC提出的全球变暖潜在系数（GWP）选择CO<sub>2</sub>当量排放因子作为二氧化碳排放指标，计算本项目全寿命周期不同阶段碳排放，计算结果如下表。通过比较可以得知，由于建筑运行碳排放而引起的二氧化碳排放在全寿命期碳排放中占有较大比例。建筑运行碳排放涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量。此外，建筑运行碳排放与建筑保温、门窗系统、楼面等具体建筑构件的材料和构造形式密切相关，也与使用者的行为习惯，如空调启停时间、开窗时间等，紧密相连。本项目年单位建筑面积碳排放为30.6kg CO<sub>2</sub> e /m<sup>2</sup>a。

表2.8 建筑全寿命期碳排放计算结果

不同阶段碳排放					总计 kg CO <sub>2</sub> e	50年使用期单位建 筑面积 kg CO <sub>2</sub> e /m <sup>2</sup> a
建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e		
99470	1312	26860	1213900	26860	1368403	30.6

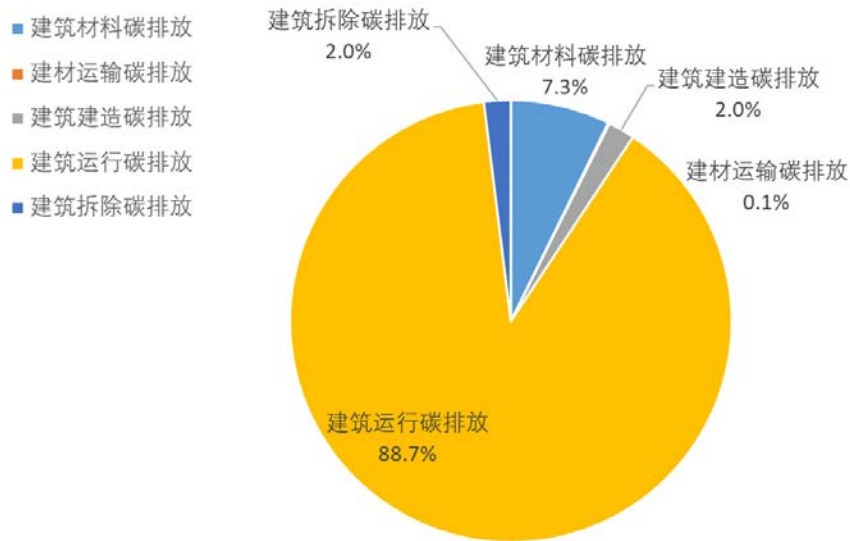


图2.2 建筑物寿命期各阶段碳排放占比

本项目建材碳排放阶段占整个寿命期的7.3%。从计算结果可以看出，由于木材引起的碳排放较传统建材，混凝土、水泥、钢材等比重较小，仅占全部建材碳排放的15.9%。混凝土、钢材和铝木复合窗的使用而导致的碳排放占比较大。

由于所有建材的运输距离都处于项目周边500公里以内，因此，由于运输而导致的碳排放量很小，仅占全寿命期总碳排放的0.1%。由于木材运输导致的碳排放占运输碳排放的33%。普通建材中混凝土的运输碳排放较高，占运输碳排放的44%。

## 三、清控人居科技示范楼全寿命期碳排放计算

### 3.1 项目基本信息

清控人居科技示范楼是在贵安新区政府支持下，清控人居建设集团与英国BRE机构合作的示范项目，目标为建成符合BREEAM标准的近零能耗示范实验建筑。建筑位于中国西南贵州省贵安新区生态文明创新园内西南角，与园区东北侧的优美的海绵城市生态景观延绵相接。建筑面积701m<sup>2</sup>，地上两层。建筑集展陈和游客接待中心一体，故功能上分为三大部分：大空间展陈区，对外接待会议区，以及内部办公区。

此项目是中国西南温和地区的可持续策略实验平台。整体建筑由木结构系统、轻钢箱体系统、设备系统、外表皮系统这四部分并行建造而成。木结构系统主要用于通高的展陈大空间；轻钢箱体系统则作为两侧的功能用房；设备系统则整合嵌装于建筑的双层表皮空腔之中，解放室内空间的同时，更为设备系统的展示、检修、更新、提供了便利。模块化的双层表皮系统则整合了当地藤编工艺与工业预制技术从而实现快速装配，不仅使建筑高度体现贵州当地的风土特色，更在一定程度上刺激并带动了当地的传统工艺经济的发展。







### 3.2 建筑材料碳排放

Athena可持续材料研究所（Athena Sustainable Materials Institute）在有关加拿大建筑材料碳排放方面做了大量的研究，本研究所涉及的加拿大木材碳排放清单均来源于该研究所的研究报告。根据项目方提供的数据，清控人居科技示范楼项目加材使用清单及加拿大木材碳排放计算结果如下表所示：

表3.1 加拿大木材碳排放计算结果

材料名称	防腐木 <sup>1</sup>	SPF <sup>2</sup>	OSB板 <sup>3</sup>	木瓦（红雪松）	红雪松挂板
------	------------------	------------------	-------------------	---------	-------

材料数量 (m3)		33.30	9.56	4.60	15.38	20.36
材料密度 (t/m3)		0.40	0.38	0.60	0.34	0.34
建材碳排放	碳排放清单 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	184.09	74.02	226.91	67	67
	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e	6130	708	1043	1031	1364
	合计 kg CO <sub>2</sub> e	10276				

注：1. 数据来源为“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Glulam<sup>[10]</sup>”

2.数据来源为 “A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber<sup>[11]</sup>”

3. 数据来源为 “A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board - OSB<sup>[12]</sup>”

表3.2 建筑材料碳排放计算结果（普通建材）

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子		建材使用量		建材碳排放 kg CO <sub>2</sub>
	排放因子	单位	数量	单位	
C30 混凝土	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	45.557	m <sup>3</sup>	13439
热轧碳钢中型型钢	2365	kg CO <sub>2</sub> e/t	1.347	t	3186
热轧碳钢中厚板	2400	kg CO <sub>2</sub> e/t	8.748	t	20995
冷轧碳钢板卷	2530	kg CO <sub>2</sub> e/t	10.018	t	25346
平板玻璃	1130	kg CO <sub>2</sub> e/t	3.7225	t	4206
断桥铝合金窗：原生铝：再生铝=7:3	194	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	31.6	m <sup>2</sup>	6130
铝木复合窗：原生铝：再生铝=7:3	122.5	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	50.7	m <sup>2</sup>	6211
PPR 管	3.72	kg CO <sub>2</sub> e/kg	162	kg	603
岩棉板	1980	kg CO <sub>2</sub> e/t	6.898	t	13658
<b>合计 kg CO<sub>2</sub></b>					93774

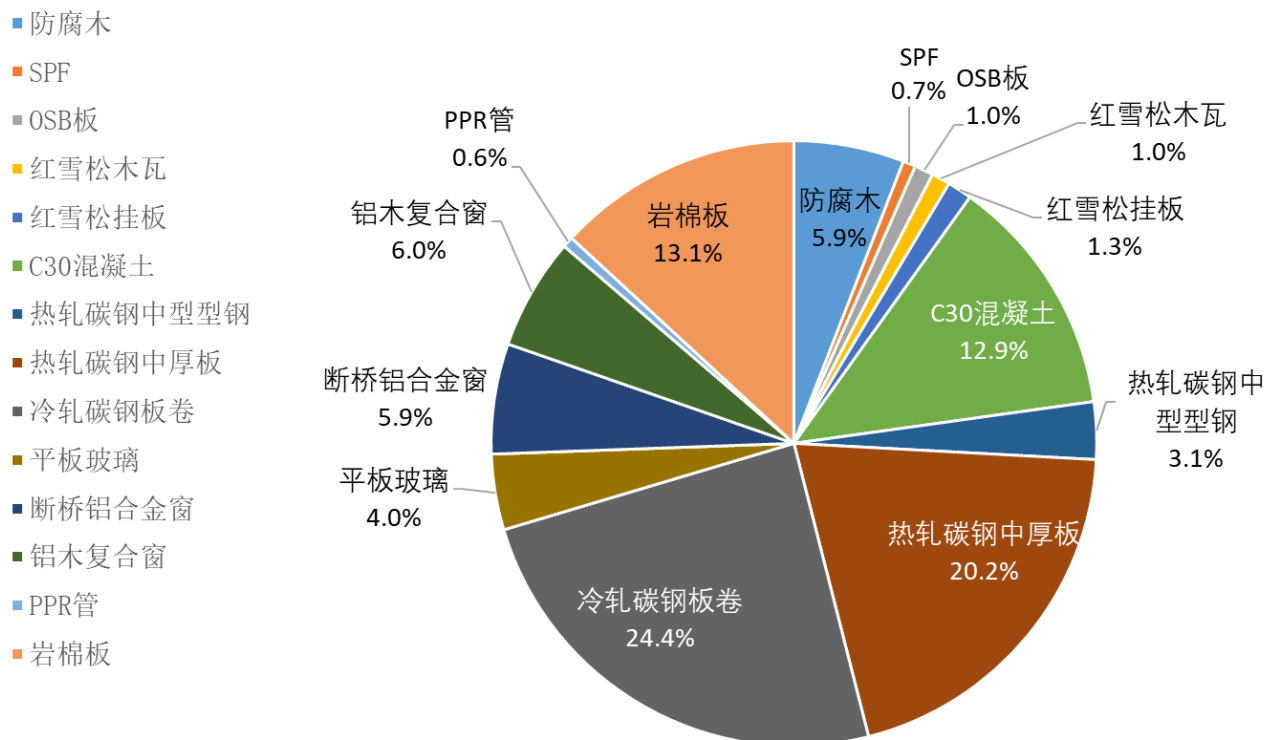


图3.1 建筑材料碳排放构成

### 3.3 运输碳排放

项目位于贵州省贵安新区，木材从工厂运输到工地的距离通过《中国木结构建筑行业企业目录》测算得出，其他普通建材的运输距离参照研究数据给出<sup>[9]</sup>。因此，运输碳排放的计算结果为：

表3.3 运输碳排放计算结果

建材	运输重量 (t)	运输方式	运输距离 (km)	碳排放因子 kg CO <sub>2</sub> e/t·km	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e
加材	31.83	陆运：重型柴油货车运输(载重 10t)	50	0.162	258
C30 混凝土	109.34	重型柴油货车运输(载重 46t)	53	0.057	330
热轧碳钢中型型钢	1.35	轻型柴油货车运输(载重 2t)	62	0.286	24

热轧碳钢中厚板	8.75	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	62	0.286	155
冷轧碳钢板卷	10.02	中型柴油货车运输 (载重 8t)	62	0.179	111
平板玻璃	3.72	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	74	0.286	79
岩棉板	6.90	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	500	0.286	986
合计					1943

### 3.4 建筑运行碳排放

本工程采暖供回水由生物质热水炉提供，采暖供回水温度 55/45℃。采暖热负荷计算按连续采暖设计，独栋建筑计算总热负荷为 27926KW，按采暖区域面积计算热指标为 46W/m<sup>2</sup>。室内为地板辐射采暖系统，分集水器设置在大厅两侧空腔内，地板辐射采暖埋地管采用采用聚丁烯管。

夏季空调为地道风送风+热泵除湿空调箱系统，提供室内空调通风量，由送风管道送入室内，排风为室内百叶自然排风+吊扇气流扰动排风。冬季地道风仅提供预热新风量，由送风管道送入室内。

夏季办公区设计温度 26℃、门厅区设计温度 28℃，相对湿度≤60%，冬季办公区设计温度 18℃、门厅区设计温度 16℃，新风量 30m<sup>3</sup>/p.h。冬季设定温度 20℃、开启时间每天 8:00-18:00。

根据计算结果，建筑全年能耗为129kwh<sub>热</sub>/m<sup>2</sup>，即38.7kWh<sub>电</sub>/m<sup>2</sup>。由前文所述，南方区域电网单位kWh碳排放因子为0.53kg CO<sub>2</sub> eq /kWh，因此可以求得建筑运行碳排放：

表3.4 建筑运行碳排放计算

年运行能耗 (kWh 电 m <sup>2</sup> a)	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	使用年份 (年)	总能耗量 (kWh 电)	标煤 CO <sub>2</sub> 当量排放因子 (kg CO <sub>2</sub> e /kWh)
38.7	701	50	1356435	0.53
建筑运行碳排放 kg CO <sub>2</sub> eq				714977

### 3.5 建筑建造及拆除碳排放

建筑建造及拆除碳排放占建筑全寿命期比例较少，其构成主要来自能源消耗。电耗主要来自钢筋工程、模板工程中各类材料的加工，混凝土工程中空压机和振捣器的使用，运输工程中塔吊的使用，以及外保温施工中电动吊篮的使用等环节。油耗主要来自施工现场混凝土泵车的使用。对于传统混凝土建筑而言，单位面积建筑建造碳排放从17至168kWh/m<sup>2</sup>不等<sup>[14]</sup>，项目间差异很大<sup>[1, 14, 15]</sup>，但单位面积建造碳排放与拆除碳排放差别不大。对于木结构建筑而言，加拿大已有研究表明，单位面积建造碳排放约为10 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。由于该项目缺少建造过程及拆除能源消耗清单，并根据我国的建筑业发展水平，假设单位面积建筑建造及拆除碳排放为30 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。因此，建筑建造及拆除碳排放均为21030 kg CO<sub>2</sub> e。

### 3.6 碳排放计算结果

根据以上章节中的计算方法和结果，根据由IPCC提出的全球变暖潜在系数（GWP）选择CO<sub>2</sub>当量排放因子作为二氧化碳排放指标，计算本项目全寿命周期不同阶段碳排放，计算结果如下表。通过比较可以得知，由于建筑运行碳排放而引起的二氧化碳排放在全寿命期碳排放中占有较大比例。建筑运行碳排放涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量。此外，建筑运行碳排放与建筑保温、门窗系统、楼面等具体建筑构件的材料和构造形式密切相关，也与使用者的行为习惯，如空调启停时间、开窗时间等，紧密相连。本项目年单位建筑面积碳排放为24.6kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>a。

表3.5 建筑全寿命期碳排放计算结果

不同阶段碳排放					总计 kg CO <sub>2</sub> e	50年使用期单位建 筑面积 kg CO <sub>2</sub> e /m <sup>2</sup> a
建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e		
104050	1943	21030	714977	21030	863030	24.6

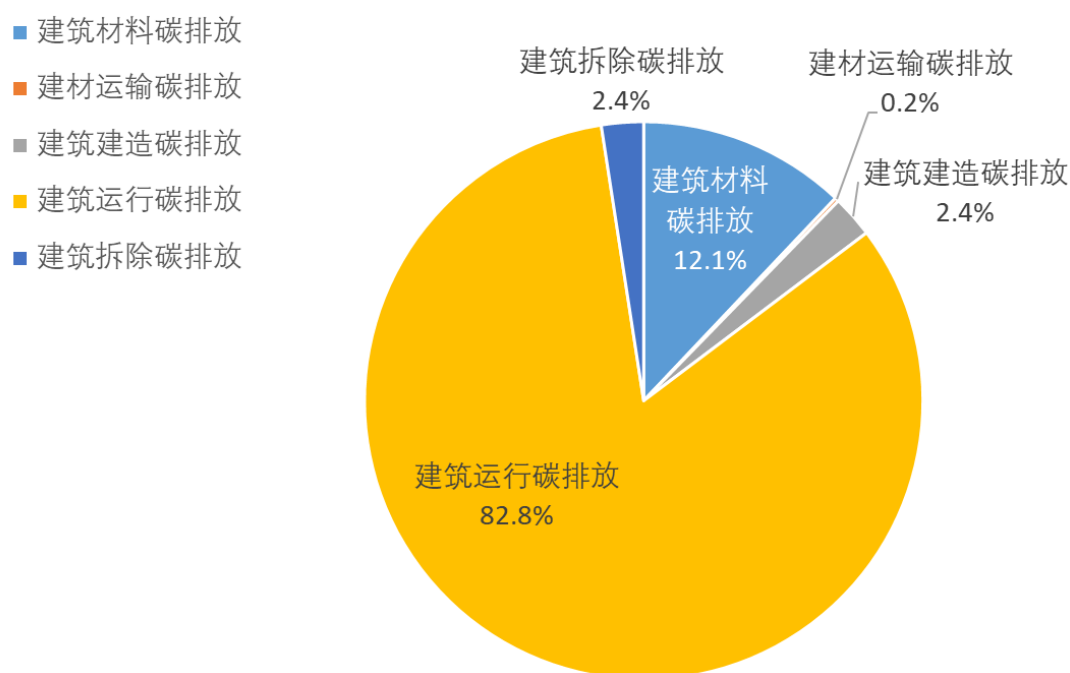


图3.2 建筑物寿命期各阶段碳排放占比

本项目建材碳排放阶段占整个寿命期的12.1%。从计算结果可以看出，由于木材引起的碳排放较传统建材，混凝土、水泥、钢材等比重较小，仅占全部建材碳排放的9.9%。水泥、混凝土和钢材的使用而导致的碳排放占比较大。

由于所有建材的运输距离都处于项目周边500公里以内，因此，由于运输而导致的碳排放量很小，仅占全寿命期总碳排放的0.2%。由于木材运输导致的碳排放占运输碳排放的13%。

## 四、北川羌族自治县红枫敬老院全寿命期碳排放计算

### 4.1 项目基本信息

512 汶川大地震发生后,加拿大不列颠哥伦比亚省政府与加拿大联邦政府于2008年6月联合宣布了价值800万加元的灾后重建项目,北川羌族红枫敬老院是重建的项目之一。北川县作为2008汶川大地震受灾最为严重的地区,当地约有200名孤老需要得到及时的安置和照料,县政府对该敬老院项目给予了高度重视。重建的敬老院采用了加拿大最先进的现代木结构建筑技术,以期达到最好的抗震和节能效果。

重建的敬老院位于四川省绵阳市北川羌族自治县擂鼓镇,总建筑面积5611.77m<sup>2</sup>,木结构部分面积为4297.14 m<sup>2</sup>。项目包括了92个双人间;16个单人间;12间员工宿舍;2间员工套房;另外设有医疗服务区、休闲娱乐区、食堂、设备间、办公区、门球场;室外健身器材;室外设绿化带、道路、健身路径、菜地等。项目于2012年1月竣工。



图 4.1 北川红枫敬老院鸟瞰图

北川羌族红枫敬老院采用了加拿大现代木结构建筑技术,由于这是专为在地震时受损严重的当地羌族居民所设计的,当地政府要求重建设计中要把羌族传统

木结构特色与现代木结构特点有机结合。因此建筑外观采用了石面材质，配以羌族符号及西藏符号来表达他们的文化。同时，大量的木材得以选用以代替石材，来建设本项目所需的这些建筑物。同时考虑在各楼中间及两端的塔楼墙面悬挂羌族人的标志性图案，在顶部设置羌族人的吉祥物白石装饰，充分体现了羌族特色、羌族文化，完全符合设计理念。

敬老院院区以主入口广场和社区公用建筑物为“核心”，以横贯东西的“礼仪轴”和纵向连接南北的“活动轴”为布局骨架。呈环绕式建筑群体，西南部和东南部为两栋老人住宿楼，东北部为职工宿舍楼，通过约600m有盖长廊连接周边，通过轴线串接各栋建筑，病人区域与职工区域独立分隔，生活后勤区独立空间，与社区公共建筑物紧密结合，形成了结构清晰、联系紧密、便捷高效的布局。采用平面及斜坡式结构连接各栋单体。本项目充分考虑到使老人生活方便，特别布置了适合残疾人的斜坡式坡道连接各单体。

敬老院在规划时将可能入住的老年人主要分为四类：能够独立生活的老年人；生活需要帮助的老年人；患有阿尔茨海默氏症或老年痴呆症的老年人；需要完全护理的老年人。第一类的老年人被安置在距离中心位置最远的地方，以给予他们足够的私人 and 自由活动的空间。而最后一类“需要完全护理的老年人”的房间在设计时充分考虑了护理和监测的方便性，距离中心位置（医护人员）最近。

敬老院采用园林式设计，具有良好的生态环境，对于生活在其中的院民起着陶冶情操、净化心灵的作用，还可以舒缓压力。整个敬老院基地上除了建筑及必要的活动场地外，均种植大树绿化，既美化敬老院内部环境，又能隔噪降温。各单体楼朝向正南，采光、日照、通风条件优良，窗地比为0.2，楼间距大于10m。





图 4.2 北川红枫敬老院实景图

红枫敬老院采用了现代轻型木结构体系。由于项目处于地震重灾区，因而对建筑的抗震要求非常高，抗震烈度设防为8度，而现代木结构的一大突出优势就是其优异的抗震性能。

## 4.2 建筑材料碳排放

Athena可持续材料研究所（Athena Sustainable Materials Institute）在有关加拿大建筑材料碳排放方面做了大量的研究，本研究所涉及的加拿大木材碳排放清单均来源于该研究所的研究报告。根据项目方提供的数据，北川红枫敬老院项目加材使用清单及加拿大木材碳排放计算结果如下表所示：

表4.1 建筑材料碳排放计算结果-木材

材料名称		防腐木 <sup>1</sup>	SPF <sup>2</sup>	OSB 板 <sup>3</sup>	LVL <sup>4</sup>
材料数量 (m <sup>3</sup> )		98.16	372.13	171.99	4.52
材料密度 (t/m <sup>3</sup> )		0.40	0.38	0.60	0.48
建材碳排放	碳排放清单	184.09	74.02	226.91	356.87
	单位	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>

碳排放 kg CO <sub>2</sub> e	18071	27545	39025	1612
合计 kg CO <sub>2</sub> e	86253			

注：1. 数据来源为“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Glulam<sup>[10]</sup>”

2. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber<sup>[11]</sup>”

3. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board - OSB<sup>[12]</sup>”

4. 数据来源为“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Laminated Veneer Lumber Manufacture (LVL)<sup>[16]</sup>”

表4.2 建筑材料碳排放计算结果（普通建材）

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子		建材使用量		建材碳排放 kg CO <sub>2</sub>
	排放因子	单位	数量	单位	
C30 混凝土	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	708	m <sup>3</sup>	208847
天然石膏	32.8	kg CO <sub>2</sub> e/t	255	t	8378
页岩空心砖	204	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	226	m <sup>3</sup>	46143
热轧碳钢小型型钢	2310	kg CO <sub>2</sub> e/t	82	t	189457
平板玻璃	1130	kg CO <sub>2</sub> e/t	1	t	1582
断桥铝合金窗：原生铝：再生铝=7:3	194	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	568	m <sup>2</sup>	110273
PE 管	3.6	kg CO <sub>2</sub> e/kg	616	kg	2219
PVC-U 管	7.93	kg CO <sub>2</sub> e/kg	916	kg	7267
<b>合计 kg CO<sub>2</sub></b>					<b>574166</b>

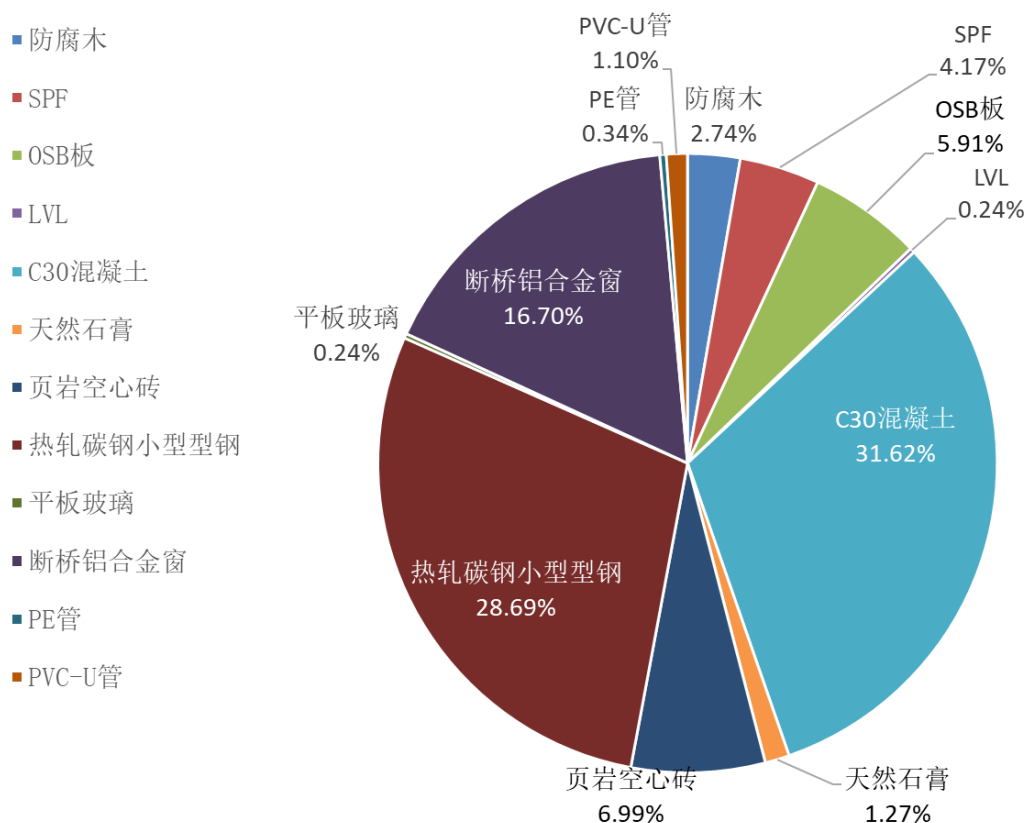


图4.3 建筑材料碳排放构成

### 4.3 运输碳排放

项目位于四川省绵阳市北川羌族自治县擂鼓镇，木材从工厂运输到工地的距离通过《中国木结构建筑行业企业目录》测算得出，其他普通建材的运输距离参照研究数据给出<sup>[9]</sup>。因此，运输碳排放的计算结果为：

表4.3 运输碳排放计算结果

建材	运输重量 (t)	运输方式	运输距离 (km)	碳排放因子 kg CO <sub>2</sub> e/t·km	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e
加材	286.03	陆运：重型柴油货车运输(载重 46t)	35	0.057	571
C30 混凝土	6684.00	重型柴油货车运输 (载重 46t)	15	0.057	5715
天然石膏	255.43	重型柴油货车运输 (载重 46t)	500	0.057	7280
页岩空心砖	226.19	重型柴油货车运输 (载重 46t)	26	0.057	335

热轧碳钢小型型钢	171.09	重型柴油货车运输 (载重 46t)	61	0.057	595
平板玻璃	1.40	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	74	0.286	30
PE 管	0.62	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	500	0.286	88
PVC-U 管	0.92	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	500	0.286	131
<b>合计 kg CO<sub>2</sub>e</b>					14744

#### 4.4 建筑运行碳排放

根据国家《建筑气候区划标准》GB50178-93，绵阳市属夏热冬冷气候区。绵阳市属亚热带季风性湿润气候，夏季最热月平均温度26.2℃，极端最高温度37℃，平均相对湿度80%，冬季最冷月平均温度5.2℃，极端最低温度-7.3℃，平均相对湿度83%，冬季日照率19%，常年主导风向东北风，风频61%。

依照《民用建筑热工设计规范》GB50176-93、《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ134-2001、《四川省居住建筑节能设计标准》DB51/T5027-2008，对该项目进行建筑节能设计计算。建筑总体热工性能如下表：

表4.4 建筑总体热工性能

部位	热惰性指标 D	总热阻(m <sup>2</sup> K/W)	传热系数 (w/m <sup>2</sup> K)
钢筋混凝土坡屋面	3.542	1.572	0.58
钢筋混凝土平屋面	2.71	1.3	0.69
木结构坡屋面	3.276	2.336	0.4
外墙主体	3.408	2.315	0.41

根据计算结果，建筑全年能耗为50.75kWh<sub>电</sub>/m<sup>2</sup>。由前文所述，华中区域电网单位kWh碳排放因子为0.53kg CO<sub>2</sub> e /kWh，因此可以求得建筑运行碳排放：

表4.5 建筑运行碳排放计算

年运行能耗 (kWh 电/m <sup>2</sup> a)	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	使用年份 (年)	总能耗量 (kWh 电)	标煤 CO <sub>2</sub> 当量排放因子 (kg CO <sub>2</sub> e /kWh)
50.75	4297.14	50	15577133	0.53
建筑运行碳排放				5747495

kg CO<sub>2</sub> e

#### 4.5 建筑建造及拆除碳排放

建筑建造及拆除碳排放占建筑全寿命期比例较少，其构成主要来自能源消耗。电耗主要来自钢筋工程、模板工程中各类材料的加工，混凝土工程中空压机和振捣器的使用，运输工程中塔吊的使用，以及外保温施工中电动吊篮的使用等环节。油耗主要来自施工现场混凝土泵车的使用。对于传统混凝土建筑而言，单位面积建筑建造碳排放从17至168kWh/m<sup>2</sup>不等<sup>[14]</sup>，项目间差异很大<sup>[1, 14, 15]</sup>，但单位面积建造碳排放与拆除碳排放差别不大。对于木结构建筑而言，加拿大已有研究表明，单位面积建造碳排放约为10 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。由于该项目缺少建造过程及拆除能源消耗清单，并根据我国的建筑业发展水平，假设单位面积建筑建造及拆除碳排放为30 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。因此，建筑建造及拆除碳排放均为128914 kg CO<sub>2</sub>e。

#### 4.6 碳排放计算结果

根据以上章节中的计算方法和结果，根据由IPCC提出的全球变暖潜在系数（GWP）选择CO<sub>2</sub>当量排放因子作为二氧化碳排放指标，计算本项目全寿命周期不同阶段碳排放，计算结果如下表。通过比较可以得知，由于建筑运行碳排放而引起的二氧化碳排放在全寿命期碳排放中占有较大比例。建筑运行碳排放涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量。此外，建筑运行碳排放与建筑保温、门窗系统、楼面等具体建筑构件的材料和构造形式密切相关，也与使用者的行为习惯，如空调启停时间、开窗时间等，紧密相连。本项目年单位建筑面积碳排放为46.4kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>a。

表4.6 建筑全寿命期碳排放计算结果

不同阶段碳排放					总计 kg CO <sub>2</sub> e	50年使用期单位建 筑面积 kg CO <sub>2</sub> e e/m <sup>2</sup> a
建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e		

660419	14434	128914	5747495	128914	6680177	31.1
--------	-------	--------	---------	--------	---------	------

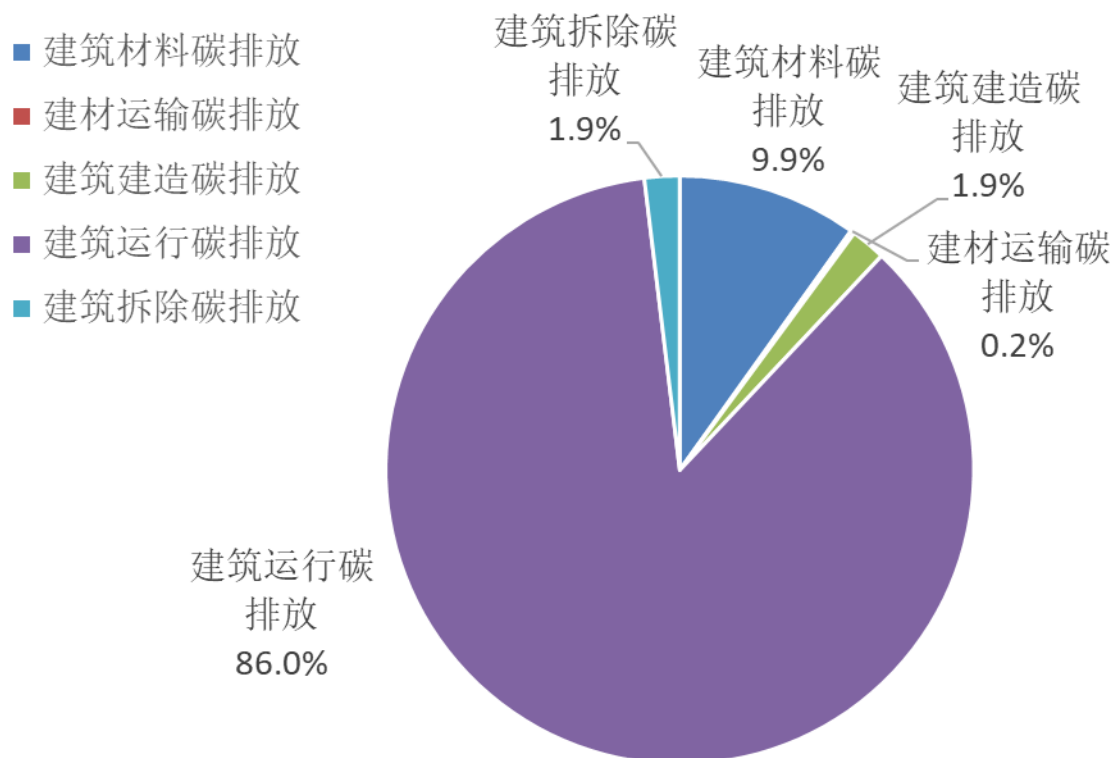


图4.4 建筑物寿命期各阶段碳排放占比

本项目建材碳排放阶段占整个寿命期的9.9%。从计算结果可以看出，由于木材引起的碳排放较传统建材，混凝土、水泥、钢材等比重较小，仅占全部建材碳排放的5.83%。混凝土、钢材和铝木复合窗的使用而导致的碳排放占比较大。

由于所有建材的运输距离都处于项目周边500公里以内，因此，由于运输而导致的碳排放量很小，仅占全寿命期总碳排放的0.2%。由于木材运输导致的碳排放占运输碳排放的3.9%。普通建材中混凝土的运输碳排放较高，占运输碳排放的38.8%。

## 五、中加生态示范区枫丹园全寿命期碳排放计算

### 5.1 项目基本信息

本项目为中国住房和城乡建设部和加拿大自然资源部合作示范性第一批木结构低层住宅，主体采用了加拿大原生木材。围护结构和室内环境设计方面引入了加拿大superE系统技术，整体低碳环保。2018年9月本项目获得国家绿色建筑二星标识，天津市生态城银奖级绿色建筑标识，并且获得加拿大权威的superE健康住宅认证证书。加拿大木业协会作为中加生态示范区的建设开发主体，秉承绿色环保，节能减排的理念，为推进木结构装配式建筑在我国的发展做出应有的贡献。





图5.1 项目实景图

项目坐落于天津市中新天津生态城起步区东侧，木结构低层建筑总建筑面积约3万 $\text{m}^2$ ，其中地上1.7万 $\text{m}^2$ ，地下1.3万 $\text{m}^2$ ，共24栋。使用设计年限为50年。本工程室内热环境参数满足国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50736的要求，在人员密集且人员密度较大的空调区域，别墅设置全热回收新风换气净化机，全热回收效率不小于55%，配备高效过滤模块，可有效清除PM2.5净化室内空气。有关建筑节能设计情况见下表：

表5.1 建筑节能设计情况

建筑围护结构构造	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 屋面：陶瓦+挂瓦条顺水条+SBS 改性沥青防水卷材+12mmOSB 板+A 级 235mm 木龙骨满填 235mm 岩棉板+24mm 石膏板</li> <li>✓ 外墙：面砖/纤维板+钢丝网抹灰+10 厚 FC 板+19*38 木龙骨+防水透气纸+15 厚 OSB 板+140 厚木龙骨(满填 R24 玻璃纤维棉)+15 厚耐火石膏板</li> </ul>
能源系统形式	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 市政供暖</li> <li>✓ 太阳能辅热系统</li> </ul>
室内环境设计参数	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 起居室、厨房、卫生间照度设计值均为 100lx，卧室 75 lx，显色指数 Ra 均为 80；</li> </ul>



	✓ 起居室、卧室设计温度 20°C，厨房设计温度 16°C，卫生间设计温度 25°C；房屋气密性 ACH 小于 1.5，各房间新风量为 18m <sup>3</sup> /时。
--	--

## 5.2 建筑材料碳排放

根据项目方提供的数据，中加生态示范区二组团项目（临海新城08-02-70地块）枫丹园为轻型木结构，墙体及楼盖主要采用SPF并辅以OSB板。其中，采用加拿大SPF约3000 m<sup>3</sup>，OSB板约6.5万m<sup>2</sup>（约合780立方米）。

Athena可持续材料研究所（Athena Sustainable Materials Institute）在有关加拿大建筑材料碳排放方面做了大量的研究，本研究所涉及的建筑材料碳排放清单均来源于该研究所的研究报告。

表5.2 建筑材料碳排放清单

材料名称	SPF <sup>1</sup>	OSB板 <sup>2</sup>
碳排放 (kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )	74.02	226.91

注：1. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber<sup>[11]</sup>”

2. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board - OSB<sup>[12]</sup>”

因此，建筑物化阶段碳排放计算结果为：

表5.3 建筑物化阶段碳排放计算结果-加材

材料名称		SPF	OSB 板
材料数量 (m <sup>3</sup> )		3000	780
建材碳排放	碳排放清单 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	74.02	226.91
	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e	222060	176990

	合计 kg CO <sub>2</sub> e	399050
--	----------------------------	--------

### 5.3 运输碳排放

项目位于天津市，木材从工厂运输到工地的距离通过《中国木结构建筑行业企业目录》测算得出，其他普通建材的运输距离参照研究数据给出<sup>[9]</sup>。因此，运输碳排放的计算结果为：

表5.4 运输碳排放计算结果

材料名称		SPF	OSB 板		
材料数量 (m <sup>3</sup> )		3000.00	780.00		
材料密度 (t/m <sup>3</sup> )		0.38	0.60		
运输碳排放	运输重量 t	运输方式	运输距离 km	碳排放因子 kg CO <sub>2</sub> e/t km	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e
加材	1608.00	陆运：重型柴油货车运输(载重 10t)	50	0.162	13025
合计 kg CO <sub>2</sub> e					13025

### 5.4 建筑运行碳排放

根据《天津市居住建筑节能设计标准》(DB29-1-2013)、《民用建筑热工设计规范》(GB50176-93)、《建筑外门窗气密，水密，抗风压性能分级及检测方法》(GB/T 7106-2008)、《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26-2010)等，对该项目进行建筑节能设计计算。建筑总体热工性能如下表：

表5.5 建筑总体热工性能

木结构建筑全寿命期碳排放计算研究报告

围护结构部位	传热系数限值K [W/(m²·K)]			设计作法传热系数Ki [W/(m²·K)]	做法说明						
	≤3层的建筑	(4~8)层的建筑	≥9层的建筑								
屋面	0.20	0.25		0.23	12mm胶合板+235mm岩棉板(235mm木龙骨)+24mm石膏板						
外墙	0.35	0.40	0.45	0.29	15mm胶合板+40mm真空绝热版+100mm岩棉板+15mm石膏板/15mm胶合板+140mm木龙骨+15mm石膏板/130mm岩棉板						
架空或外挑楼板	0.35	0.40		0.30/0.32	20mm挤塑聚苯板+18mm胶合板+140mm岩棉板(140mm木龙骨)/30mm挤塑聚苯板+100mm岩棉板						
分隔采暖与非采暖空间的楼板	0.50			0.46/0.25	30mm挤塑聚苯板+50mm矿物棉喷涂绝热层/235mm岩棉板(235mm木龙骨)						
分隔采暖与非采暖空间的隔墙	1.50										
分隔采暖与非采暖空间的门(非透明/透明)	1.5/3.0										
分户墙、分户楼板	1.50			0.31 /—	180mm岩棉板(180mm木龙骨)/—						
公共空间入口外门(非透明/透明)	1.2/3.0			1.20	节能门						
变形缝	0.60										
围护结构部位	保温材料层热阻 R [(m²·K)/W]										
周边地面	0.83		0.56		0.91	35mm挤塑聚苯板					
地下室外墙(与土壤接触的外墙)	0.91		0.61		0.99	35mm挤塑聚苯板					
外窗	传热系数K	外窗遮阳系数SCc	外窗综合遮阳系数SC	传热系数K	外窗遮阳系数SCc	外窗综合遮阳系数SC	传热系数K	外窗遮阳系数SCc	外窗综合遮阳系数SC	设计传热系数/外窗遮阳系数/外窗综合遮阳系数K/SCc/SC	
北向	1.5	—	1.8	—	1.8	—	—	—	1.5/0.46	断桥铝中空玻璃(5透明+12Ar+5透明+12Ar+5Low-E)	
东、西向(含凸窗)	窗墙面积比≤0.4	≥0.55	0.45	1.8	≥0.55	0.45	1.8	≥0.55	0.45	1.5/0.46/0.46	断桥铝中空玻璃(5透明+12Ar+5透明+12Ar+5Low-E)
	窗墙面积比>0.4		0.35			0.35			0.35	1.5/0.46/0.46	断桥铝中空玻璃(5透明+12Ar+5透明+12Ar+5Low-E)
南向(含凸窗)	2.0	—	2.3(2.2)	—	2.3(2.2)	—	—	—	1.5/0.46	断桥铝中空玻璃(5透明+12Ar+5透明+12Ar+5Low-E)	
各朝向最大窗墙面积比	南 0.49	东 0.05	西 0.05	北 0.28	各朝向窗墙面积比		南 0.34	东 0.02	西 0.02	北 0.12	

通过建筑热工性能得出，建筑物耗热量指标为11.74W/m<sup>2</sup>。根据《天津市居住建筑节能设计标准》(DB29-1-2013)，建筑采暖期天数为118天，因此得出建筑的供暖能耗为4.09kgce。根据《中国建筑节能年度发展研究报告2017》数据显示，2015年城镇住宅不包括采暖部分的能耗平均值为9.1 kgce/m<sup>2</sup>。因此可以估算出，本项目的建筑运行能耗约为13.2 kgce/m<sup>2</sup>。

表5.6 建筑运行碳排放计算

建筑面积 m <sup>2</sup>	使用年份 年	设计计算耗煤量(kg/m <sup>2</sup> )		耗煤量 kg CO <sub>2</sub> e	耗电量 kg CO <sub>2</sub> e
30000	50	14.3		12760800	33366667
		耗煤量(kgce/2)	耗电量(kWh/m <sup>2</sup> )		
		4.09	25.28		
		标煤 CO <sub>2</sub> 排放因子 (kg CO <sub>2</sub> e /kg)	华北电网 CO <sub>2</sub> 排放因子 (kgCO <sub>2</sub> /kWh)		
		2.08	0.88		
合计 kg CO <sub>2</sub> e				46127467	

5.5 碳排放计算结果

根据以上章节中的计算方法和结果，根据由IPCC提出的全球变暖潜在系数(GWP)选择CO<sub>2</sub>当量排放因子作为二氧化碳排放指标，计算本项目全寿命周期不同阶段碳排放，计算结果如下表。通过比较可以得知，由于建筑运行碳排

放而引起的二氧化碳排放在全寿命期碳排放中占有较大比例。建筑运行碳排放涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量。此外，建筑运行碳排放与建筑保温、门窗系统、楼面等具体建筑构件的材料和构造形式密切相关，也与使用者的行为习惯，如空调启停时间、开窗时间等，紧密相连。本项目年单位建筑面积碳排放为 $32.7 \text{ kg CO}_2 \text{ eq /m}^2\text{a}$ 。

表5.7 建筑全寿命期碳排放计算结果

不同阶段碳排放					总计 kg CO <sub>2</sub> e	50年使用期单位建 筑面积 kg CO <sub>2</sub> e e/m <sup>2</sup> a
建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e		
399050	13025	900000	46127467	900000	48339541	32.2

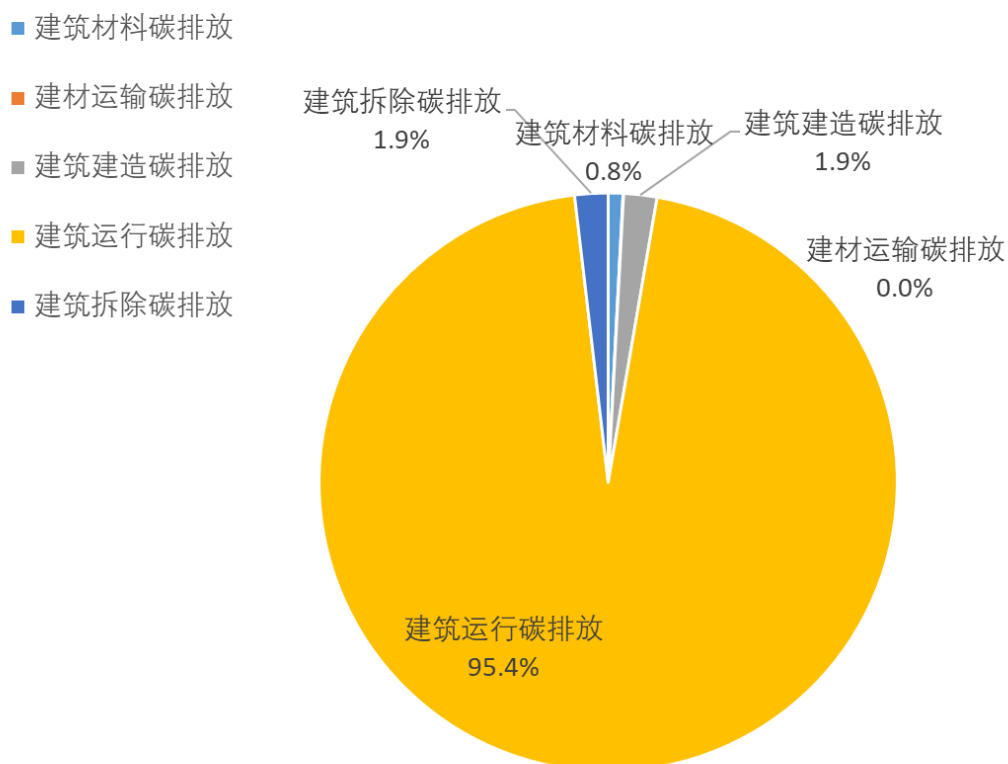


图5.2 建筑物寿命期各阶段碳排放占比

本项目由于建材中未使用传统建材，只使用了木材，因此建材碳排放阶段仅占整个寿命期的0.9%。由于所有建材的运输距离都处于项目周边500公里以内，因此，由于运输而导致的碳排放量很小。

## 六、幸福谷度假村全寿命期碳排放计算

### 6.1 项目基本信息

幸福谷旅游度假村是由一座总面积300余亩废弃砖厂建成，是集文化观光、休闲度假、中式婚庆、婚纱拍摄、农业种植、生态观光、水上娱乐、田园游乐、木屋别墅、户外拓展体验等交相呼应的综合性旅游度假小镇。

度假小镇拥有1000平方米典礼广场、可同时容纳200人就餐的汉式宴会厅及可同时容纳500人就餐的露天花园宴会厅，并配套浪漫花海、婚礼草坪、绣楼、龙凤殿等，提供一站式的婚礼定制服务。传统婚俗文化全体验，提供九大婚礼文化互动体验游戏，包括徒手摸鱼、桃园祈福、弓箭竞技、竞渡抢亲、王姬车驾、丹青传书、曲水流觞、纸鸢传情、掷箭投壶。让您在游戏中领略独具魅力的中华婚俗文化。田园度假生活全感受，溪水桃林、茶亭楼阁、菜田果园、水上乐园、主题客栈，处处相映成趣、美不胜收，让您梦回田园、畅享乡野生活。

由四川泽霖木结构工程有限公司提供整体土块规划、设计、承建的幸福谷（复古）主题特色小镇为复古文旅旗下品牌项目

项目位于资阳市临江镇红牌村六组气候温暖湿润、景色宜人,项目由主题婚礼木结构接待大厅、独栋木屋别墅、茶舍、木栈道等低密度木结构建筑构成。并最大限度提高建筑使用面积，建筑风格各不相同，但都贯穿自然，人文的主题，与自然环境融为一体，带给游客静谧、安宁的身心享受。

项目于2015年开建，2016年4月竣工。

主要构造做法及材料：

- 外墙（主体结构剪力墙）：140mm木龙骨+12mmOSB组合墙，云杉挂板；
- 内墙（剪力墙）：140mm木龙骨+12mmOSB组合墙，敷面15mm防火石膏板；
- 木楼层地面：40x140mm@406楼面格栅（内塞50厚保温棉）+40x90mmSPF木地板，10mm北欧云杉吊顶。

- 木屋盖：彩色沥青瓦（古黑色）+300g丙纶防水卷材+OSB结构板  
9.5mm+40\*50mmSPF龙骨+40\*90mm桁架（内填120保温棉）
- 120mm+10mm厚北欧云杉免漆扣板。

木结构在本项目中体现的优点：

保温隔热，节能；绿色环保（原材料、施工过程中、后期使用都能充分体现）；轻质、美观、设计灵活；建造噪音及粉尘低、施工周期短，可装配式大规模建造；抗震性能好、耐久；墙体变薄，增加室内使用空间，提升得房率。



图6.1 宴会厅单体透视图



图 6.2 住宿区单体透视图

## 6.2 建筑材料碳排放

Athena可持续材料研究所（Athena Sustainable Materials Institute）在有关加拿大建筑材料碳排放方面做了大量的研究，本研究所涉及的建筑材料碳排放清单均来源于该研究所的研究报告。

表6.1 建筑材料碳排放清单

材料名称	OSB板 <sup>2</sup>	SPF <sup>1</sup>	CLT板 <sup>[13]</sup>	挂板
碳排放 (kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )	1475	3908	399	5499

注：1. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber<sup>[11]</sup>”

2. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board - OSB<sup>[12]</sup>”

3. 数据来源为“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Cross Laminated Timber (CLT)<sup>[13]</sup>”

因此，建筑物化阶段碳排放计算结果为：

表6.2 建筑物化阶段碳排放计算结果-加材

材料名称		OSB 板	SPF	CLT	挂板
材料数量 (m <sup>3</sup> )		6.50	52.80	4.99	82.08
建材 碳排放	碳排放清单 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	226.91	74.02	79.99	67
	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e	1475	3908	399	5499
	合计 kg CO <sub>2</sub> e	11282			



表6.3 建筑物化阶段碳排放计算结果-普通建材

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子		建材使用量		建材碳排放 kg CO <sub>2</sub>
	排放因子	单位	数量	单位	
普通硅酸盐水泥	735	kg CO <sub>2</sub> e/t	3	t	2205
C30 混凝土	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	81.32	m <sup>3</sup>	23989
普通碳钢	2050	kg CO <sub>2</sub> e/t	12.18	t	24969
PPR 管	3.72	kg CO <sub>2</sub> e/kg	64.8	kg	241
PVC-U 管	7.93	kg CO <sub>2</sub> e/kg	445	kg	3529
合计 kg CO <sub>2</sub>					54933

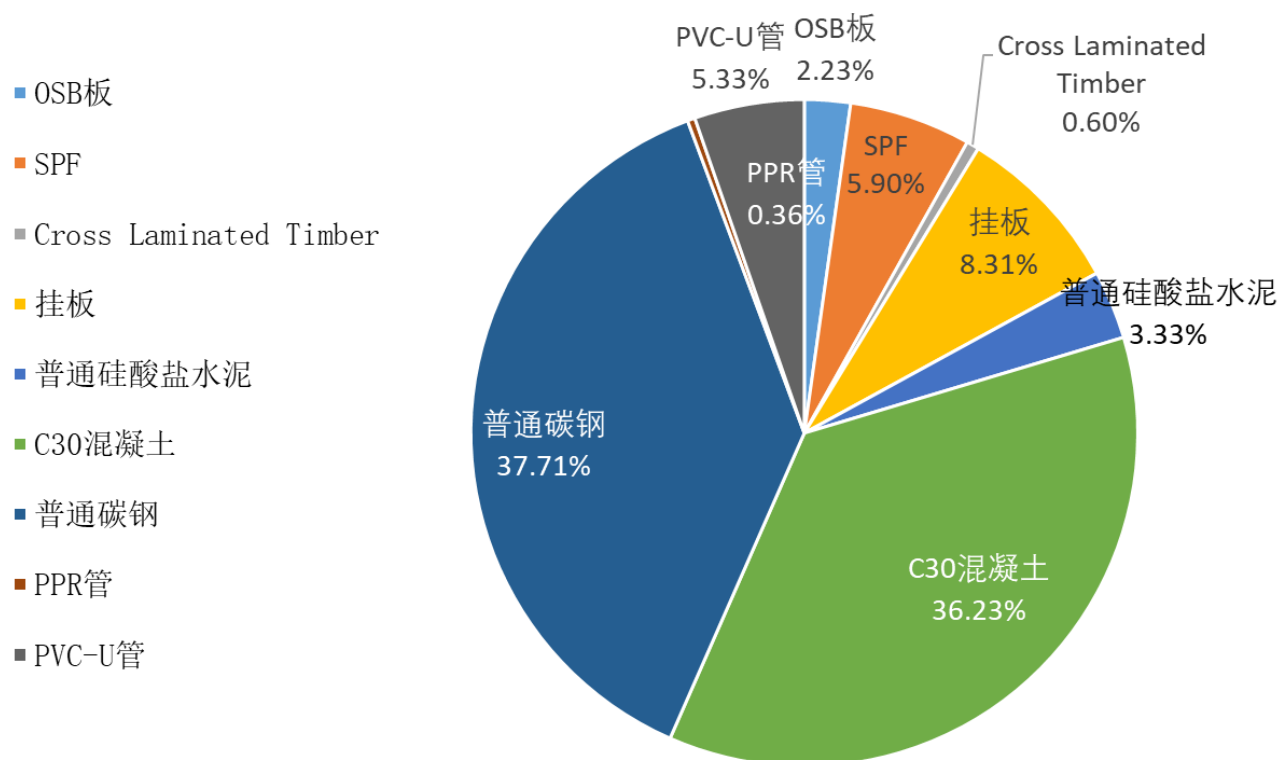


图6.3 建筑材料碳排放构成

### 6.3 运输碳排放

项目位于四川省，木材从工厂运输到工地的距离通过《中国木结构建筑行业企业目录》测算得出，其他普通建材的运输距离参照研究数据给出<sup>[9]</sup>。因此，运输碳排放的计算结果为：

表6.4 运输碳排放计算结果

建材	运输重量 (t)	运输方式	运输距离 (km)	碳排放因子 kg CO <sub>2</sub> e/t·km	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e
加材	54.27	陆运：重型柴油货车运输(载重 10t)	50	0.162	440
普通硅酸盐水泥	3.00	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	53	0.286	45
C30 混凝土	195.17	重型柴油货车运输 (载重 46t)	40	0.057	445
普通碳钢	12.18	中型柴油货车运输 (载重 8t)	61	0.179	133
PPR 管	0.60	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	500	0.286	86
PVC-U 管	0.40	轻型柴油货车运输 (载重 2t)	500	0.286	57
合计					1206

### 6.4 建筑运行碳排放

根据《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015)、《民用建筑热工设计规范》(GB50176)、《建筑外门窗气密，水密，抗风压性能分级及检测方法》(GB/T 7106-2008)以及《建筑幕墙》(GB/T 21086-2007)，对该项目进行建筑节能设计计算。通过建筑热工性能得出，建筑物全年供暖和空调总耗电量为30.63kWh/m<sup>2</sup>，约占建筑总能耗的六成<sup>[17]</sup>，因此可以计算出建筑年运行能耗为51.05 kWh/m<sup>2</sup>。

表6.5 建筑运行碳排放计算

年运行能耗 (kWh/m <sup>2</sup> a)	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	使用年份 (年)	总耗煤量 (kg)	标煤 CO <sub>2</sub> 当量排放因子 (kg CO <sub>2</sub> e /kg)
51.05	1172.5	50	1795684	0.53
建筑运行碳排放 kg CO <sub>2</sub> e				1577508

## 6.5 碳排放计算结果

根据以上章节中的计算方法和结果，根据由IPCC提出的全球变暖潜在系数（GWP）选择CO<sub>2</sub>当量排放因子作为二氧化碳排放指标，计算本项目全寿命周期不同阶段碳排放，计算结果如下表。通过比较可以得知，由于建筑运行碳排放而引起的二氧化碳排放在全寿命期碳排放中占有较大比例。建筑运行碳排放涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量。此外，建筑运行碳排放与建筑保温、门窗系统、楼面等具体建筑构件的材料和构造形式密切相关，也与使用者的行为习惯，如空调启停时间、开窗时间等，紧密相连。本项目年单位建筑面积碳排放为30.2 kg CO<sub>2</sub> eq /m<sup>2</sup>a。

表6.6 建筑全寿命期碳排放计算结果

不同阶段碳排放					总计 kg CO <sub>2</sub> e	50 年使用期单位建 筑面积 kg CO <sub>2</sub> e e/m <sup>2</sup> a
建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e		
<b>66215</b>	1206	35175	1577508	35175	1715279	28.7

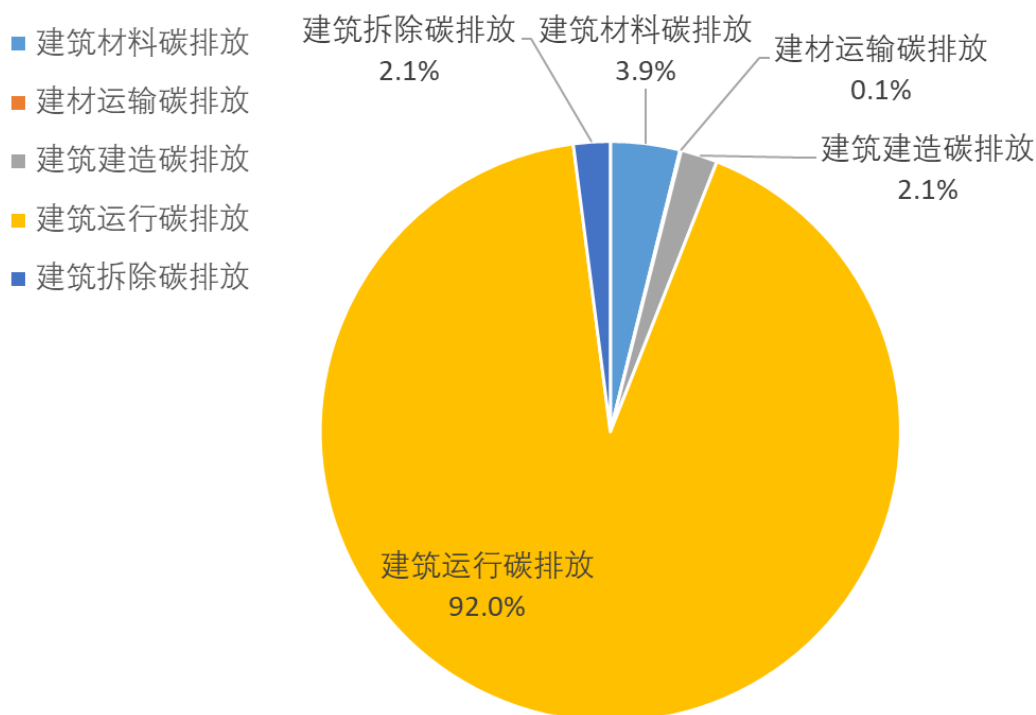


图6.4 建筑物寿命期各阶段碳排放占比

本项目建材碳排放阶段占整个寿命期的3.9%。从计算结果可以看出，由于木材引起的碳排放较传统建材，混凝土、钢材等比重较小，仅占全部建材碳排放的17%。混凝土、钢材的使用而导致的碳排放占比较大。

由于所有建材的运输距离都处于项目周边500公里以内，因此，由于运输而导致的碳排放量很小，仅占全寿命期总碳排放的0.1%。由于木材运输导致的碳排放占运输碳排放的36.4%。

## 七、西郊宾馆意境园多功能厅全寿命期碳排放计算

### 7.1 项目基本信息

西郊宾馆意境园多功能厅建于上海西郊宾馆内部，该宾馆占地广阔、环境优美、树木繁茂，自1960年建成以来即作为上海规模最大、等级最高的国家迎宾馆，曾接待诸多国内外政要，举办若干重大事件与活动，在上海当代城市发展中具有重要的地位。2016年，加拿大自然资源部、bc省林业厅与西郊宾馆所属的东湖集团关于进一步推动木结构发展达成协议，并将规划中的西郊宾馆意境园多功能厅作为实践案例，尝试木结构建筑的建造、应用与推广。经由加拿大木业协会与东湖集团前期选址、讨论及调研，推荐上海绿建建筑装饰设计有限公司负责该项目建筑设计，并由加拿大木业协会提供结构设计、现场监督等多方面支持。总部位于温哥华的Equilibrium Consulting Inc.也被聘请为结构计算和连接细节提供建议。



图7.1 西郊宾馆意境园

项目选址位于西郊宾馆内一座湖畔东侧，场地四周原有大量高大树木及小山丘，景观幽雅静谧。项目采用单层胶合木结构建筑，形态谦逊低调，空间细腻丰富，与所处在的环境充分契合。木结构及其施工方式的选择，使得整个建造过程尽量减少对场地的侵扰与破坏，最大限度地保留了原有的树木及景观氛围。木材这种生态材料的运用，使自然、绿色、可持续发展的建造理念真正得以实现。西郊宾馆意境园多功能厅总建筑面积约857平方米，主要功能为服务于宾馆客人的就餐或会议场所及其附属设施。建筑形式模拟了树木生长的姿态，结构柱与三角

形屋架自然交接、融为一体，柱网相互错动，形成三维的空间结构，进一步强化了空间的趣味性。屋面采用折板形态，尺度相等的折板相互错落拼合，几何逻辑清晰、简练，所形成的室内空间灵动且个性鲜明，兼具层次感与秩序感，同时又带有传统建筑质朴优雅的韵味。折板屋面顶部设置天窗，改善林间建筑幽暗的采光条件，当阳光从天窗照射下来，仿佛穿过树木的枝叶投下重重光晕。



图7.2 西郊宾馆意境园内部实景图

建筑以较小的建造代价，塑造了精彩的空间与迷人的形式，充分体现了木结构自然、温暖的质感，以及几何学与力学的美感。建筑室内装饰也以木材为主要材料，通过木格栅疏密相间的设置，呈现出中国古代写意山水画的线条与肌理，

隐喻了中国传统中对宁静、悠远的自然环境的向往，及其所代表的“天人合一”的理念与暗含的智慧与品德。主体框架使用了108.57立方米结构材级别的花旗松，这种木材的牢固性和木纹理，兼顾了建筑物的安全性和空间的美感。屋顶和墙面的装饰则用到了质地细腻的铁杉，总共42.68立方米。

## 7.2 建筑材料碳排放

Athena可持续材料研究所（Athena Sustainable Materials Institute）在有关加拿大建筑材料碳排放方面做了大量的研究，本研究所涉及的加拿大木材碳排放清单均来源于该研究所的研究报告。根据项目方提供的数据，西郊宾馆意境园项目加材使用清单及加拿大木材碳排放计算结果如下表所示：

表7.1 建筑材料碳排放计算结果（加拿大木材）

材料名称		SPF	胶合木	挂板
材料数量（m <sup>3</sup> ）		60.00	110.00	42.00
材料密度（t/m <sup>3</sup> ）		0.38	0.48	0.34
建材碳排放	碳排放清单	74.02	79.99	67
	单位	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e	4441	8799	2814
	合计 kg CO <sub>2</sub> e	2814		

表7.2 建筑材料碳排放计算结果（普通建材）

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子		建材使用量		建材碳排放 kg CO <sub>2</sub>
	排放因子	单位	数量	单位	
C30 混凝土	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	136.67	m <sup>3</sup>	40318
热轧碳钢小型型钢	2310	kg CO <sub>2</sub> e/t	22.5	t	51975

合计 kg CO <sub>2</sub>	92293
-----------------------	-------

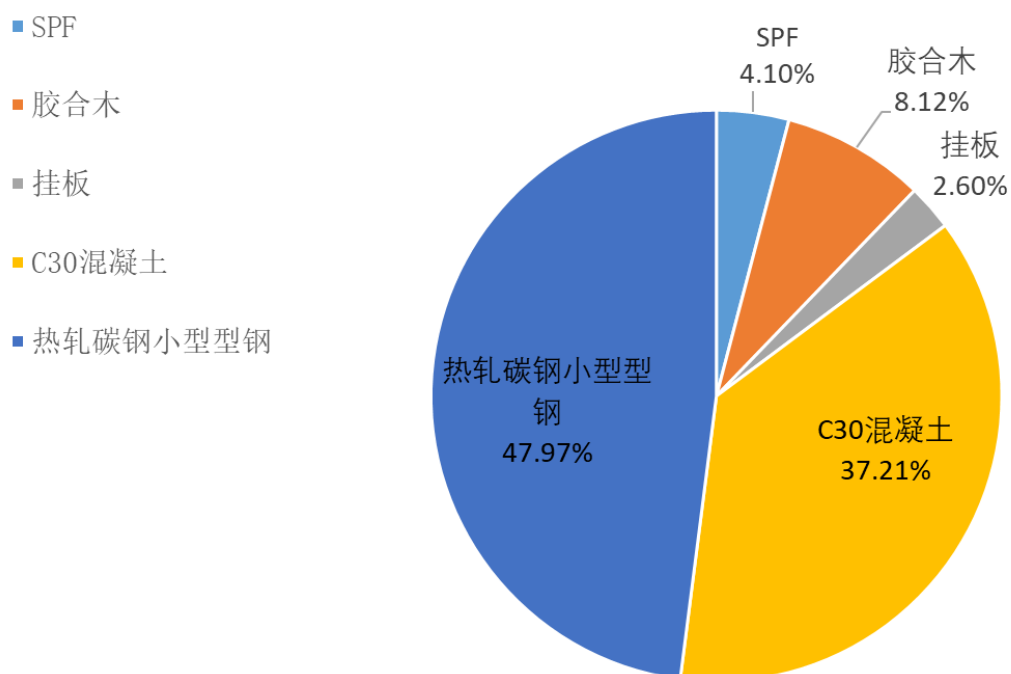


图7.3 建筑材料碳排放构成

### 7.3 运输碳排放

项目位于上海市，木材从工厂运输到工地的距离通过《中国木结构建筑行业企业目录》测算得出，其他普通建材的运输距离参照研究数据给出<sup>[9]</sup>。因此，运输碳排放的计算结果为：

表7.3 运输碳排放计算结果

建材	运输重量 (t)	运输方式	运输距离 (km)	碳排放因子 kg CO <sub>2</sub> e/t·km	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e
加材	89.88	陆运：重型柴油货车运输(载重 10t)	50	0.162	728
C30 混凝土	856.64	重型柴油货车运输(载重 46t)	40	0.057	1953
热轧碳钢小型型钢	25.00	重型柴油货车运输(载重 10t)	61	0.162	247



合计 kg CO <sub>2</sub> e	2928
-------------------------	------

#### 7.4 建筑运行碳排放

根据上海市《公共建筑节能设计标准》(DGJ08-107-2015)、《建筑幕墙》(GB/T 21086-2007)、《住宅建筑围护结构节能应用技术规程》DG/TJ08-206-2002等国家和地方标准, 对该项目建筑节能进行计算分析。建筑热工性能如下表:

表7.4 建筑热工性能

建筑构件	设计建筑实际值	允许权衡计算的基本要求
外墙平均传热系数 (W/(m <sup>2</sup> .K))	0.47	≤0.80
屋顶传热系数 (W/(m <sup>2</sup> .K))	0.38	≤0.50
外窗传热系数 (W/(m <sup>2</sup> .K))	2.2	≤2.2
屋顶透明部分传热系数 (W/(m <sup>2</sup> .K))	2.20	≤2.20
屋顶透明部分综合遮阳系数	0.29	≤0.40

根据计算结果, 建筑全年能耗为33kWh<sub>电</sub>/m<sup>2</sup>。由前文所述, 华东区域电网单位kWh碳排放因子为0.7kg CO<sub>2</sub> eq /kWh, 因此可以求得建筑运行碳排放:

表7.5 建筑运行碳排放计算

年运行能耗 (kWh 电 m <sup>2</sup> a)	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	使用年份 (年)	总能耗量 (kWh 电)	标煤 CO <sub>2</sub> 当量排放因子 (kg CO <sub>2</sub> e /kWh)
33	837.4	50	1381710	0.70
建筑运行碳排放 kg CO <sub>2</sub> eq				8210707

## 7.5 建筑建造及拆除碳排放

建筑建造及拆除碳排放占建筑全寿命期比例较少，其构成主要来自能源消耗。电耗主要来自钢筋工程、模板工程中各类材料的加工，混凝土工程中空压机和振捣器的使用，运输工程中塔吊的使用，以及外保温施工中电动吊篮的使用等环节。油耗主要来自施工现场混凝土泵车的使用。对于传统混凝土建筑而言，单位面积建筑建造碳排放从17至168kWh/m<sup>2</sup>不等<sup>[14]</sup>，项目间差异很大<sup>[1, 14, 15]</sup>，但单位面积建造碳排放与拆除碳排放差别不大。对于木结构建筑而言，加拿大已有研究表明，单位面积建造碳排放约为10 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。由于该项目缺少建造过程及拆除能源消耗清单，并根据我国的建筑业发展水平，假设单位面积建筑建造及拆除碳排放为30 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。因此，建筑建造及拆除碳排放均为25122 kg CO<sub>2</sub>e。

## 7.6 碳排放计算结果

根据以上章节中的计算方法和结果，根据由IPCC提出的全球变暖潜在系数（GWP）选择CO<sub>2</sub>当量排放因子作为二氧化碳排放指标，计算本项目全寿命周期不同阶段碳排放，计算结果如下表。通过比较可以得知，由于建筑运行碳排放而引起的二氧化碳排放在全寿命期碳排放中占有较大比例。建筑运行碳排放涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量。此外，建筑运行碳排放与建筑保温、门窗系统、楼面等具体建筑构件的材料和构造形式密切相关，也与使用者的行为习惯，如空调启停时间、开窗时间等，紧密相连。本项目年单位建筑面积碳排放为28.4kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>a。

表7.6 建筑全寿命期碳排放计算结果

不同阶段碳排放					总计 kg CO <sub>2</sub> e	50 年使用期单位建 筑面积 kg CO <sub>2</sub> e e/m <sup>2</sup> a
建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e		
95107	2928	25122	967197	25122	1115476	26.6

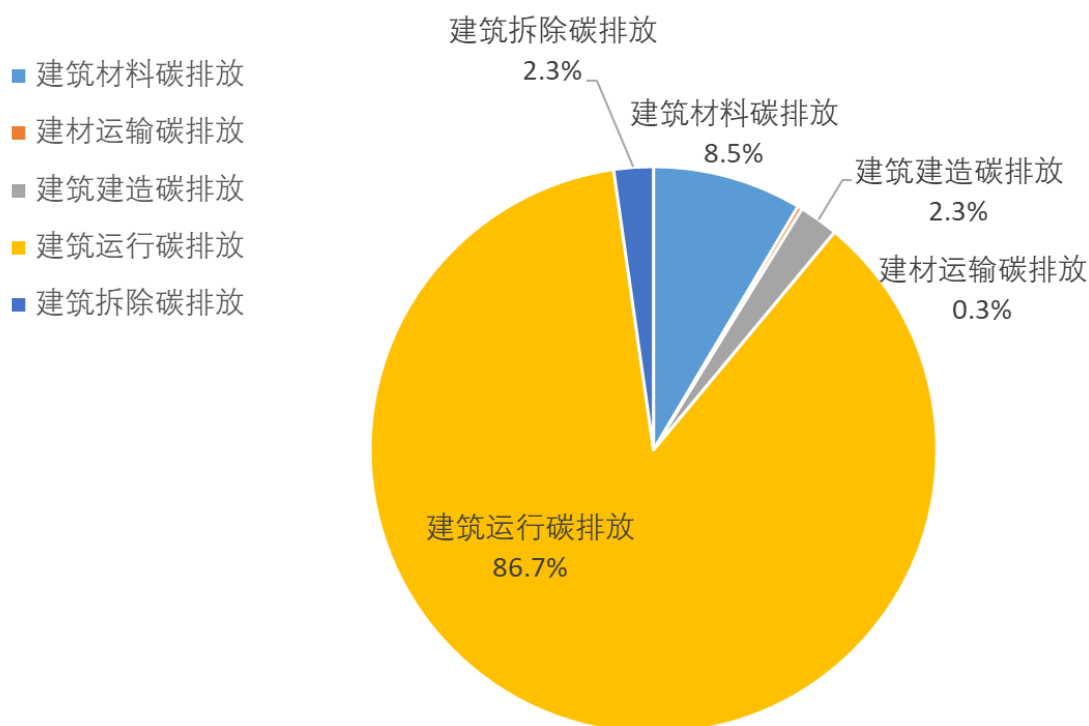


图7.4 建筑物寿命期各阶段碳排放占比

本项目建材碳排放阶段占整个寿命期的8.5%。从计算结果可以看出，由于木材引起的碳排放较传统建材，混凝土、水泥、钢材等比重较小，仅占全部建材碳排放的1.9%。混凝土、钢材和铝木复合窗的使用而导致的碳排放占比较大。

由于所有建材的运输距离都处于项目周边500公里以内，因此，由于运输而导致的碳排放量很小，仅占全寿命期总碳排放的0.3%。由于木材运输导致的碳排放占运输碳排放的24.8%。普通建材中混凝土的运输碳排放较高，占运输碳排放的66.7%。

## 八、上谷水郡会所全寿命期碳排放计算

### 8.1 项目基本信息

上谷水郡位于河北省怀来县小七营西部，占地面积3000亩，依官厅水库南岸而建。

建筑外形以加拿大红柏为材料，全木质的结构营造出清新怡人的自然气氛。建筑风格以北欧现代式为主，继承了尖屋顶、斜屋面，在此基础上增加了大面积的采光玻璃和现代派钢结构,整个空间宽敞、高大，简单却又具震撼力。建筑装修属简约大气派，内部外部的整体都以木的天然纹理为饰，本身柔和的色彩和细密的质感成就了建筑极佳的视觉享受及通风效果，给人古朴清新的感觉。怀来水上郡会所施工日期在冬季，当地日平均气温均在零下，风力时常在3级以上，给施工带来一定的阻碍，在确保工期以及人员安全的情况下，施工团队制定了专业的冬季施工技术方，且胶合梁连接点精准加工，所以能够在工期内准时完成建筑施工。





图 8.1 上谷水郡外观图

## 8.2 建筑材料碳排放

Athena可持续材料研究所（Athena Sustainable Materials Institute）在有关加拿大建筑材料碳排放方面做了大量的研究，本研究所涉及的加拿大木材碳排放清单均来源于该研究所的研究报告。根据项目方提供的数据，上谷水郡会所项目加材使用清单及加拿大木材碳排放计算结果如下表所示：

表8.1 加拿大木材碳排放计算结果

材料名称		防腐木 <sup>10</sup>	SPF <sup>11</sup>	OSB板 <sup>12</sup>
材料数量 (m <sup>3</sup> )		176.00	64.00	34.60
材料密度 (t/m <sup>3</sup> )		0.40	0.38	0.60
建材碳排放	碳排放清单 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	184.09	74.02	226.91
	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e	32400	4737	7851
	合计 kg CO <sub>2</sub> e	44988		

注：1. 数据来源为“A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Glulam<sup>[10]</sup>”

2. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber<sup>[11]</sup>”

3. 数据来源为“A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board - OSB<sup>[12]</sup>”

表8.2 建筑材料碳排放计算结果（普通建材）

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子		建材使用量		建材碳排放 kg CO <sub>2</sub>
	排放因子	单位	数量	单位	
普通硅酸盐水泥	735	kg CO <sub>2</sub> e/t	9.3	t	6836
蒸压粉煤灰砖	341	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	12	m <sup>3</sup>	4092
普通碳钢	2050	kg CO <sub>2</sub> e/t	11.5	t	23575
热轧碳钢棒材	2340	kg CO <sub>2</sub> e/t	5	t	11700
断桥铝合金窗	254	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	600	m <sup>2</sup>	152400
岩棉板	1980	kg CO <sub>2</sub> e/t	9	t	17820

自来水	0.168	kg CO <sub>2</sub> e/t	5	t	1
<b>合计 kg CO<sub>2</sub></b>					216423

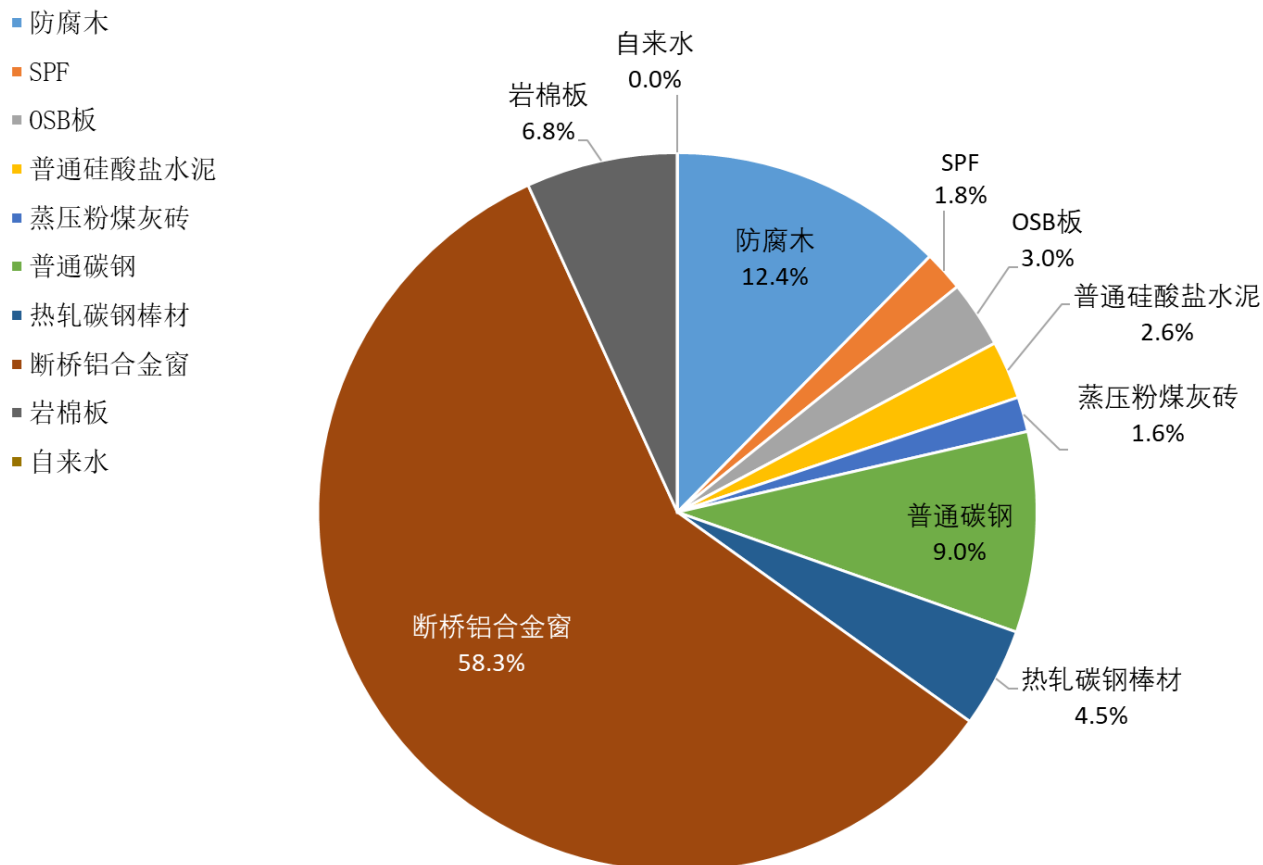


图8.2 建筑材料碳排放构成

### 8.3 运输碳排放

项目位于河北省怀来县小七营西部，木材从工厂运输到工地的距离通过《中国木结构建筑行业企业目录》测算得出，其他普通建材的运输距离参照研究数据给出<sup>[9]</sup>。因此，运输碳排放的计算结果为：

表8.3 运输碳排放计算结果

建材	运输重量 (t)	运输方式	运输距离 (km)	碳排放因子 kg CO <sub>2</sub> e/t·km	碳排放 kg CO <sub>2</sub> e
加材	115.48	陆运：重型柴油货车运输(载重 10t)	50	0.162	935
普通硅酸盐水泥	9.30	重型柴油货车运输(载重 10t)	53	0.162	80
蒸压粉煤灰砖	16.80	重型柴油货车运输(载重 10t)	14.8	0.162	40
普通碳钢	11.50	重型柴油货车运输(载重 10t)	62	0.162	116
热轧碳钢棒材	5.00	中型货车运输(载重 8t)	62	0.179	55
岩棉板	9.00	重型柴油货车运输(载重 10t)	500	0.162	729
合计					1956

#### 8.4 建筑运行碳排放

由于缺少建筑节能计算说明，假设本项目符合国家及地方建筑节能设计标准，对项目的运行能耗进行估算。建筑全年能耗为46kWh<sub>电</sub>/m<sup>2</sup>。由前文所述，华中区域电网单位kWh碳排放因子为0.88kg CO<sub>2</sub> e /kWh，因此可以求得建筑运行碳排放：

表8.4 建筑运行碳排放计算

年运行能耗 (kWh 电 m <sup>2</sup> a)	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	使用年份 (年)	总能耗量 (kWh 电)	标煤 CO <sub>2</sub> 当量排放因子 (kg CO <sub>2</sub> e /kWh)
46	2162	50	4972600	0.53
建筑运行碳排放 kg CO <sub>2</sub> e				2635478



## 8.5 建筑建造及拆除碳排放

建筑建造及拆除碳排放占建筑全寿命期比例较少，其构成主要来自能源消耗。电耗主要来自钢筋工程、模板工程中各类材料的加工，混凝土工程中空压机和振捣器的使用，运输工程中塔吊的使用，以及外保温施工中电动吊篮的使用等环节。油耗主要来自施工现场混凝土泵车的使用。对于传统混凝土建筑而言，单位面积建筑建造碳排放从17至168kWh/m<sup>2</sup>不等<sup>[14]</sup>，项目间差异很大<sup>[1, 14, 15]</sup>，但单位面积建造碳排放与拆除碳排放差别不大。对于木结构建筑而言，加拿大已有研究表明，单位面积建造碳排放约为10 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。由于该项目缺少建造过程及拆除能源消耗清单，并根据我国的建筑业发展水平，假设单位面积建筑建造及拆除碳排放为30 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。因此，建筑建造及拆除碳排放均为64860 kg CO<sub>2</sub> e。

## 8.6 碳排放计算结果

根据以上章节中的计算方法和结果，根据由IPCC提出的全球变暖潜在系数（GWP）选择CO<sub>2</sub>当量排放因子作为二氧化碳排放指标，计算本项目全寿命周期不同阶段碳排放，计算结果如下表。通过比较可以得知，由于建筑运行碳排放而引起的二氧化碳排放在全寿命期碳排放中占有较大比例。建筑运行碳排放涉及暖通空调、生活热水、照明等系统能源消耗产生的碳排放量及可再生能源系统产能的减碳量。此外，建筑运行碳排放与建筑保温、门窗系统、楼面等具体建筑构件的材料和构造形式密切相关，也与使用者的行为习惯，如空调启停时间、开窗时间等，紧密相连。本项目年单位建筑面积碳排放为44.1kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>a。

表8.5 建筑全寿命期碳排放计算结果

不同阶段碳排放					总计 kg CO <sub>2</sub> e	50 年使用期单位建 筑面积 kg CO <sub>2</sub> e e/m <sup>2</sup> a
建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e		
261412	1956	64860	2635478	64860	3028565	28.0

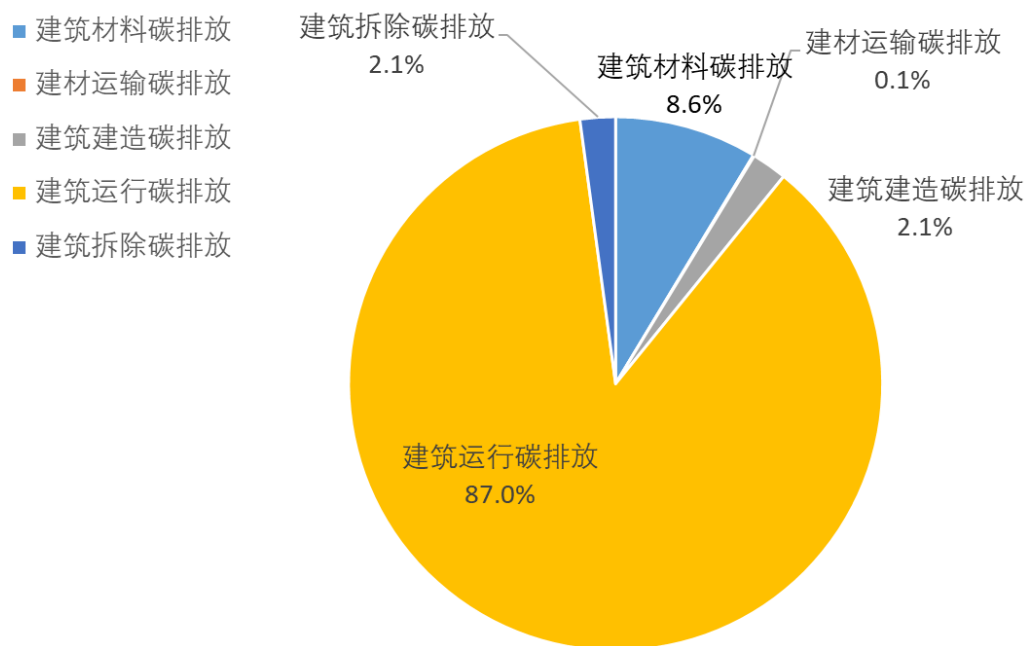


图8.3 建筑物寿命期各阶段碳排放占比

本项目建材碳排放阶段占整个寿命期的8.6%。从计算结果可以看出，由于木材引起的碳排放较传统建材，混凝土、水泥、钢材等比重较小，仅占全部建材碳排放的9.9%。水泥、混凝土和钢材的使用而导致的碳排放占比较大。

由于所有建材的运输距离都处于项目周边500公里以内，因此，由于运输而导致的碳排放量很小，不到全寿命期总碳排放的0.1%。由于木材运输导致的碳排放占运输碳排放的47.8%。

## 九、计算结果比对

轻型木结构建筑始于北美，长期以来以其在安全、舒适、耐久性能及装配及以下的优势，被公认为是一种较为成熟和先进的建筑构造形式，是欧美等地的主要建筑形式。在加拿大，The Athena Sustainable Materials Institute对于木结构全寿命周期碳排放做了大量的研究，并基于欧洲标准委员会标准EN 15978对部分加拿大木结构示范建筑全寿命期碳排放进行了研究。在我国，虽然已有研究对轻型木结构房屋碳排放总量计算方法进行研究<sup>[18]</sup>，但尚未形成只针对木结构房屋的碳排放计算标准。因此，本报告将依托中国国家标准《建筑碳排放计算标准》和加拿大The Athena Institute相关木结构碳排放建筑研究报告，对我国木结构示范建筑进行全寿命期碳排放计算。经征集、筛选，共有8栋木结构示范建筑拟纳入报告计算范围，他们分别为：

表9.1 木结构示范建筑信息

序号	项目名称	地点	建设时间	建筑面积	建筑功能
1	骊山下的院子	西安	2018	864 m <sup>2</sup>	别墅
2	清控人居科技示范楼	贵州省贵安市贵安新区	2015	701 m <sup>2</sup>	展示厅
3	北川羌族自治县红枫敬老院	四川绵阳市北川羌族自治县	2010-2011	4297 m <sup>2</sup>	养老院
4	中加生态示范区枫丹园	天津市滨海新区	2016-2018	30000 m <sup>2</sup>	住宅
5	幸福谷度假村	四川资阳	2016	1172.5 m <sup>2</sup>	文旅
6	西郊宾馆意境园多功能厅	上海	2011-2012	857 m <sup>2</sup>	宾馆
7	上谷水郡会所	河北省怀来县	2015 -2016	2162 m <sup>2</sup>	文旅
8	河北省建筑科技研发中心	河北省石家庄	2011-2012	6628 m <sup>2</sup>	办公楼

研究对建筑主材类型与数量、建筑围护结构构造、能源系统形式、室内环境设计参数等基本信息进行收集，用于全寿命期摊碳排放计算。根据对数据收集的限制，研究最终涵盖7个项目。河北省建筑科技研发中心项目由于收集信息不全，最终无法纳入计算。

对其余七个项目的建材生产碳排放、建材运输碳排放、建造施工碳排放、建筑运行碳排放以及建筑拆除碳排放全寿命期不同阶段碳排放进行计算，计算结果如下表所示：

表9.2 木结构建筑全寿命期碳排放计算结果

项目名称	不同阶段碳排放						50年使用期单位建筑面积 kg CO <sub>2</sub> e /m <sup>2</sup> a
	建筑材料 kg CO <sub>2</sub> e	运输 kg CO <sub>2</sub> e	建造 kg CO <sub>2</sub> e	建筑运行 kg CO <sub>2</sub> e	拆除 kg CO <sub>2</sub> e	总计 kg CO <sub>2</sub> e	
骊山下的院子	99470	1312	26860	1213900	26860	1368403	30.6
清控人居科技示范楼	104050	1943	21030	714977	21030	863030	24.6
北川羌族自治县红枫敬老院	660419.4	14434.26	128914.2	5747495	128914.2	6680177	31.1
中加生态示范区枫丹园	399050	13025	900000	46127467	900000	48339541	32.2
幸福谷度假村	66215	1206	35175	1577508	35175	1715279	28.7
西郊宾馆意境园多功能厅	95107	2928	25122	967197	25122	1115476	26.6
上谷水郡会所	261412	1956	64860	2635478	64860	3028565	28.0

由上表可以看出，我国木结构建筑在50年使用期内单位建筑面积碳排放从24.6到31.1 kg CO<sub>2</sub>e /m<sup>2</sup> a不等，平均为28.8 kg CO<sub>2</sub>e /m<sup>2</sup> a。根据Athena Sustainable Materials Institute提供的研究报告，一幢位于Price George的示范项目“Wood Innovation and Design Centre”，使用期同样为50年的一幢4820 m<sup>2</sup>的综合楼来讲，使用期内单位建筑面积的碳排放为40.6 kg CO<sub>2</sub>e /m<sup>2</sup> a，远大于我国木结构项目的碳排放。其主要原因为建筑运行阶段的碳排放较高。不同于发达国家的高舒适度和高保证率下的高能耗，我国建筑能耗特点为低舒适度和低保证率下的低能耗。研究表明，无论是人均建筑能耗还是单位面积建筑能耗，我国目前都远低于发达国家，这主要是由于我国的建筑形式和能源使用方式决定的<sup>[19, 20]</sup>。

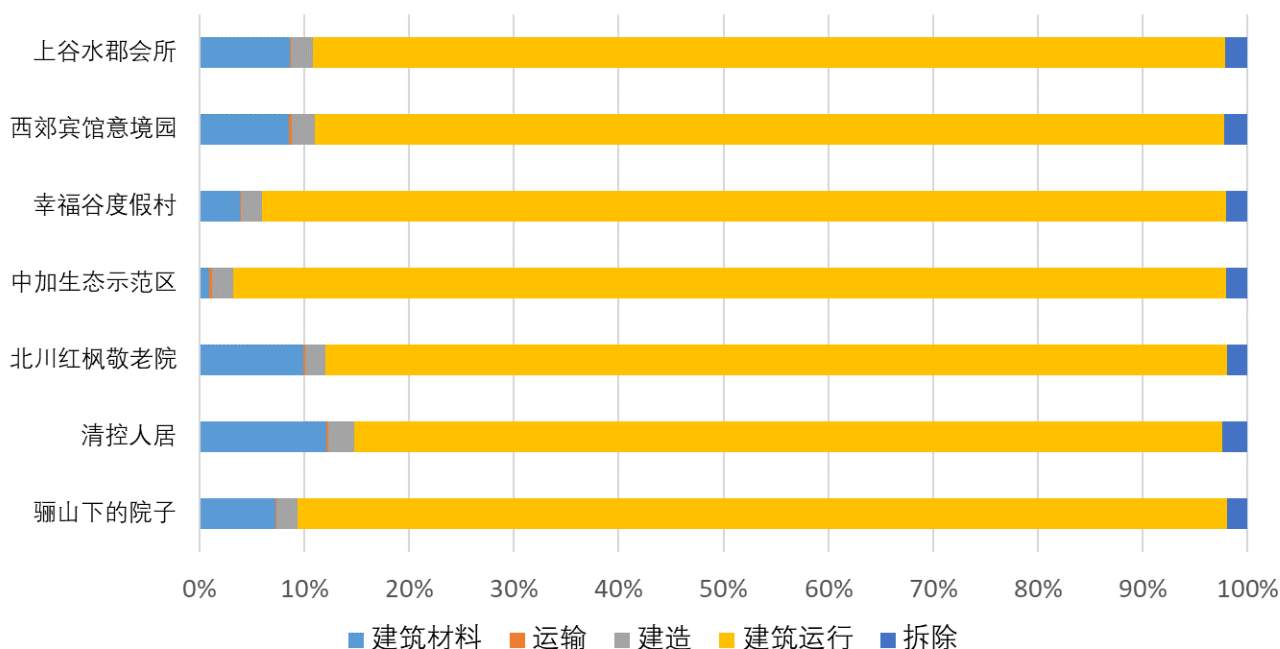


图9.1 木结构建筑全寿命期不同阶段碳排放占比

上图表明了所有木结构建筑全寿命期不同阶段的碳排放占比。建筑运行阶段碳排放占全寿命期碳排放从81.7%-98.8%，平均为88.4%。这与之前的研究结论一致，根据文献调研，建筑运行阶段的碳排放占比较大，约占全寿命期碳排放的80-85%<sup>[21]</sup>。根据Athena Sustainable Materials Institute提供的研究报告，“Wood Innovation and Design Centre”项目以及 UBC的Tallwood House项目运行阶段碳排放分别占全寿命期碳排放的89%<sup>[22]</sup>以及84%<sup>[23]</sup>。

其他阶段碳排放占比较少，建筑建材、运输、建造和拆除阶段碳排放平均占比为7.3%、0.1%、2.1%以及2.1%。Adalberth<sup>[24]</sup>在研究中同样指出，建筑运行碳排放占全寿命期的主要比例（80-90%），其次为建筑材料碳排放，约为10-20%，建材运输、建造和拆除阶段碳排放占比较小可以忽略。

木结构建筑能有效降低资源能耗，减少二氧化碳排放。从全寿命期的角度来看，建筑运行阶段的碳排放占比最大，但木结构建筑与传统钢筋、混凝土建筑的围护结构热工性能相同，使用的能源系统也相同，则运行阶段碳排放没有差别<sup>[25]</sup>。运输、建造和拆除阶段碳排放可忽略不计，木结构建筑与传统钢筋、混凝土建筑的节碳能力主要体现在建筑材料碳排放环节。

研究表明，钢筋和混凝土的碳排放占建筑材料碳排放中的绝大部分<sup>[26]</sup>。本研究的结果也表明，相较于木材，传统建材的碳排放量较大，除了中加生态示范区枫丹园项目没有混凝土和钢材的使用，上谷水郡会所也仅使用了钢材，没有混凝土消耗，其他项目由于混凝土和钢材产生的碳排放量占建筑材料碳排放的57%-96%不等。木结构建筑在建造过程中由于木材的使用，无疑减少了传统建材的使用，从而减少了二氧化碳排放量。

对于传统建筑来讲，钢筋和混凝土的使用量与建筑的结构形式、建筑类型、抗震等级、混凝土强度等方面决定的，不同建筑差别较大。对于钢材的使用量，谭泽先综合多种统计数据，编制出各类钢筋混凝土结构含钢量的一般范围表<sup>[27]</sup>。

表9.3 各类钢筋混凝土结构建筑含钢量范围

住宅建筑 (kg/m <sup>2</sup> )	框架			剪力墙		框-剪
	多层≤6层	小高层 7~11层	高层 ≥12层	小高层	高层	高层
	25~40	35~50	50~60	25~50	55~75	40~85
公共建筑 (kg/m <sup>2</sup> )	框架		剪力墙	框-剪		框(筒)-筒
	多层	高层	高层	高层	超高层	高层
综合楼	30~60	50~100	70~120	50~120	145~210	55~105
商厦	40~100	50~120	60~170	65~140	70~225	60~110

对于混凝土使用量，通过文献调研，单位面积的使用量从0.35-0.88m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>不等<sup>[1, 25, 28, 29]</sup>。考虑到收集的木结构建筑以一层和多层为主，因为假设不使用木材，

仅使用钢筋和混凝土的基准建筑混凝土消耗为 $0.5\text{m}^3/\text{m}^2$ ；钢材消耗为 $40\text{kg}/\text{m}^2$ ，可以得到如下结果：

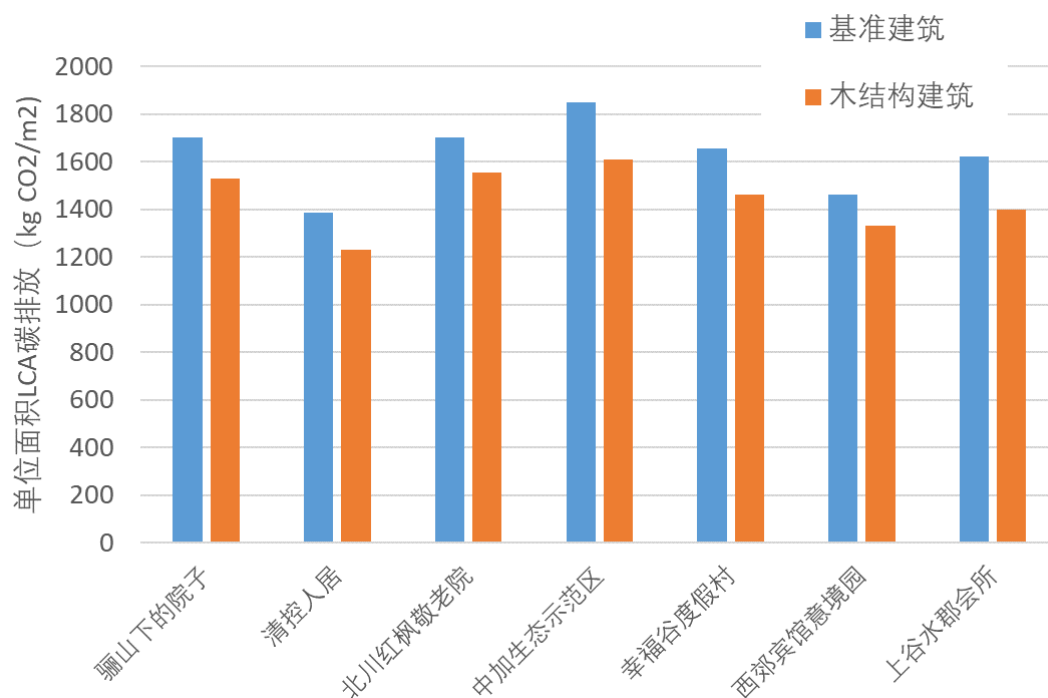


图9.2 使用传统建材和使用木材的示范建筑全寿命期单位面积碳排放量比较

表9.4 木结构建筑与基准建筑相比碳排放节省率

项目	面积 (m <sup>2</sup> )	节省碳排放* (kg CO <sub>2</sub> )	建材生产阶段节省率	全寿命期节省率
骊山下的院子	895	156927.5	61.20%	10.29%
清控人居科技示范楼	701	108190.3	50.98%	11.14%
北川羌族自治县红枫敬老院	4297	631671.5	48.89%	8.64%
中加生态示范区枫丹园	30000	7185000	94.74%	12.94%
幸福谷度假村	1173	228810.4	77.56%	11.77%
西郊宾馆意境园多功能厅	837	108489.7	53.29%	8.86%

上谷水郡会所	2162	479849	64.73%	13.68%
--------	------	--------	--------	--------

\*假设基准建筑混凝土消耗为 $0.5\text{m}^3/\text{m}^2$ ；钢材消耗为 $40\text{kg}/\text{m}^2$

从建材生产阶段来看，与仅使用钢筋和混凝土的基准建筑相比，由于木材的使用，可使得碳排放降低48.9%-94.7%，平均为64.5%。其中中加生态示范区的节省能力最强，为94.7%。全寿命期的角度来看，与基准建筑的碳排放量相较，所有木结构建筑中，由于中加生态示范区枫丹园完全没有使用到混凝土和钢材，因此全寿命期碳排放节省率最高，为12.9%。上谷水郡会所项目由于仅使用到了钢材，未使用混凝土，因为节省率也可达13.7%。其他建筑的全寿命期碳排放节省率为8.6-11.8%不等。平均而言，木结构建筑中由于木材的使用，可以使得全寿命期的碳排放节省11.0%。



## 十、结论

本研究以木结构建筑为研究对象，基于寿命期评价方法，对其全寿命期进行节能减排效益评估。

1) 将寿命期评价方法应用于木结构建筑的碳排放研究，把寿命期分为建筑建材生产阶段、建材运输阶段、建造施工阶段、建筑运行阶段以及建筑拆除阶段，并针对各个阶段的清单数据进行搜集整理，建立了木结构建筑碳排放评价计算模型。同时，通过查阅参考文献、统计资料等，收集并整理出木结构建筑寿命期评价过程中需要的相关基础数据，如主要建材的二氧化碳排放因子等。

2) 在建筑全寿命周期中，建筑在运行阶段碳排放占建筑全寿命期碳排放比例较大，为82.8%-95.4%。运行阶段碳排放与建筑构件的材料和构造形式、建筑能源系统的选择以及使用者的行为习惯有关。控制和减少运行阶段碳排放是减少建筑碳排放的重点和关键。其他阶段碳排放为，建筑材料碳排放0.8%-12.1%、运输碳排放0.1%-0.3%、建造以及拆除碳排放1.9%-2.4%。

3) 在木结构建筑中，由于木材的使用，减少了传统建材的使用量。如果与仅使用钢筋和混凝土的基准建筑相比，木材的使用可以使建材生产阶段碳排放降低48.9%-94.7%。从全寿命期的角度来看，与基准建筑的碳排放量相较，可节省8.6%-13.7%的二氧化碳排放。

## 参考文献

- [1] 曹新颖. 产业化住宅与传统住宅建设环境影响评价及比较研究 [D]; 清华大学, 2012
- [2] 尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算 [J]. 工程管理学报, 2010, 24(1): 7-12
- [3] 董蕾. 集成建筑生命周期能耗及 CO<sub>2</sub> 排放研究 [D]; 天津大学, 2012
- [4] 黄志甲, 冯雪峰, 张婷. 住宅建筑碳排放核算方法与应用 [J]. 建筑节能, 2014, 4(42): 48-52
- [5] 王婧, 张旭, 黄志甲. 基于 LCA 的建材生产能耗及污染物排放清单分析 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(6): 149-53
- [6] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究 [D]; 清华大学, 2004
- [7] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响的研究 [D]; 四川大学, 2005
- [8] 王松庆. 严寒地区居住建筑能耗的生命周期评价 [D]; 哈尔滨工业大学, 2007
- [9] 燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和 CO<sub>2</sub> 排放评价研究 [D]; 浙江大学, 2011
- [10] ATHENASMI. A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Glulam [R]. Canada, 2018
- [11] ATHENASMI. A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber [R], 2018
- [12] ATHENASMI. A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board - OSB [R], 2018
- [13] ATHENASMI. A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Cross Laminated Timber (CLT) [R], 2013

- [14] LEIF G, ANNA J, ROGER S. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42: 230-42
- [15] YOU F, DAN H, HAITAO Z, et al. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China—A case study of residential buildings [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8: 201-12
- [16] ATHENASMI. A Cradle-to-Gate LCA of Canadian Laminated Veneer Lumber Manufacture (LVL) [R], 2018
- [17] YANG X, ZHANG S, XU W. Impact of zero energy buildings on medium-to-long term building energy consumption in China [J]. *Energy Policy*, 2019, 129: 574-86
- [18] 郭伟, 姚涛, 张时聪, et al. 轻型木结构房屋碳排放总量计算方法研究 [J]. *建筑节能*, 2014, 42(9): 73-85
- [19] 江亿. 我国建筑节能战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2011, 13(6): 30-8
- [20] 杨秀. 基于能耗数据的中国建筑节能问题研究 [D]. 北京; 清华大学, 2009
- [21] F.CABEZA L, RINC N L, VILARI O V, et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 394-416
- [22] ATHENASMI. Wood Innovation and Design Center-An Environmental Building Declaration According to the EN 15978 Standard [R], 2015
- [23] ATHENASMI. Brock Commons Tallwood House, University of British Columbia - An Environmental Building Declaration According to EN 15978 Standard [R], 2018
- [24] ADALBERTH K. Energy use during the life cycle of buildings :a method [J]. *Building and Environment*, 1997, 4: 317-20
- [25] ADAM B R, FRANK C F L, RAYMOND J C. A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete [J]. *Buildings*, 2012, 2: 245-70

- [26] KOFOWOROLA O, GHEEWALA S. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 6: 498-511
- [27] 谭泽先. 钢筋混凝土结构含钢量的一般范围和合理控制方法 [J]. *建筑结构*, 2007, 37(7): 17-9
- [28] CHO S-H, CHAE C-U. A Study on Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions of Low-Carbon Building in South Korea [J]. *Sustainability*, 2016, 8(6): 579
- [29] TAE S, BAEK C, SHIN S. Life cycle CO<sub>2</sub> evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2011, 31: 253-60

### 附录 1: Summary of life cycle carbon emission assessment for wood frame construction

Relying on China's national standard "Standard for Building Carbon Emission Calculation" and related reports published by the Athena Institute, this report calculates the life cycle carbon emissions of wood buildings in China. There are 8 wooden structure projects are planned to be include in this report.

Table A.1 Selected wood frame buildings

No	Name	Location	Time	Area	Type
1	Courtyard under Lishan	Xi'an	2018	864 m <sup>2</sup>	Villa
2	THHSCG	Guizhou Province	2015	701 m <sup>2</sup>	Showroom
3	Nursing home	Sichuan Province	2010-2011	4297 m <sup>2</sup>	Nursing home
4	Sino-Canada demonstration project	Tianjin	2016-2018	30000 m <sup>2</sup>	Residential
5	Xingfu Valley Resort	Sichuan Province	2016	1172.5 m <sup>2</sup>	Tourism
6	Xijiao Hotel	Shanghai	2011-2012	857 m <sup>2</sup>	Hotel
7	Shanggu County club	Hebei Province	2015 -2016	2162 m <sup>2</sup>	Tourism
8	Hebei R&D Center	Hebei Province	2011-2012	6628 m <sup>2</sup>	Office

The study collects basic information of all the projects, such as quantity of building materials, building envelope, energy system and so on. Due to the incomplete information of the R&D center, the study eventually covered 7 projects. Calculations are conducted for these 7 projects from the aspects of product stage, transportation stage, construction stage, operational energy and demolition stage. The results can be shown below.

Table A.2 Life cycle carbon emissions

Projects	Stages					Total kg CO <sub>2</sub> e	Per occupant year per m <sup>2</sup> kg CO <sub>2</sub> e eq/m <sup>2</sup> a
	Product kg CO <sub>2</sub> e	Transportation kg CO <sub>2</sub> e	Construction kg CO <sub>2</sub> e	Operational energy kg CO <sub>2</sub> e	Demolition kg CO <sub>2</sub> e		
Courtyard under Lishan	99470	1312	26860	1213900	26860	1368403	30.6
THHSCG	104050	1943	21030	714977	21030	863030	24.6
Nursing home	660419	14434	128914	5747495	128914	6680177	31.1
Sino-Canada demonstration project	399050	13025	900000	46127467	900000	48339541	32.2
Xingfu Valley Resort	66215	1206	35175	1577508	35175	1715279	28.7
Xijiao Hotel	95107	2928	25122	967197	25122	1115476	26.6
County club	261412	1956	64860	2635478	64860	3028565	28.0

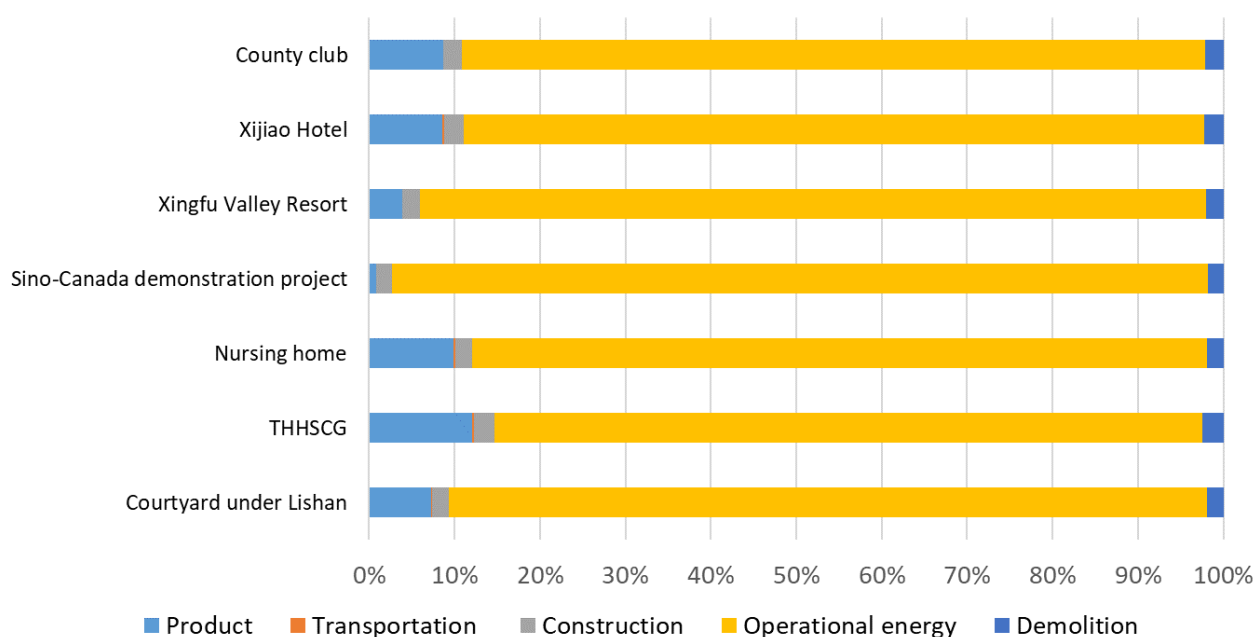


Figure A.1 Percentage of carbon emissions at different stages

The carbon emissions during the operational energy stage accounts for 81.7%-98.8% of the total life cycle carbon emissions, with average of 88.4%. For other stages, carbon emission for the production stage, transportation stage, construction stage and demolition stage accounts for 0.8-12.1%, 0.1-0.3%, 1.9-2.4% and 1.9-2.4%, respectively, of the life cycle carbon emissions.

Through literature review, we assume a reference building, which uses only concrete and steel, consumes concrete  $0.5\text{m}^3/\text{m}^2$  and steel  $40\text{kg}/\text{m}^2$ .

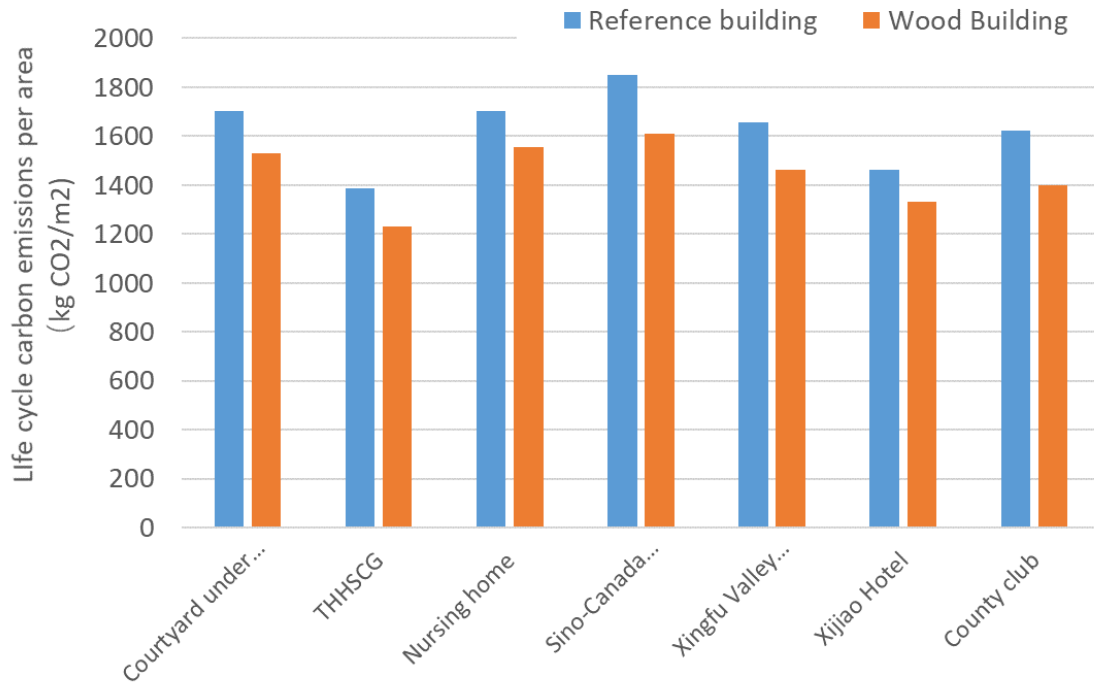


Figure A.2 Comparison of life cycle carbon emissions between the wood building and reference building

Table A.4 Carbon emission savings compared to reference buildings

Projects	Area (m <sup>2</sup> )	Carbon emission savings (kg CO <sub>2</sub> )	Product stage saving rate	LCA saving rate
Courtyard under Lishan	895	156927.5	61.20%	10.29%
THHSCG	701	108190.3	50.98%	11.14%
Nursing home	4297	631671.5	48.89%	8.64%
Sino-Canada demonstration project	30000	7185000	94.74%	12.94%
Xingfu Valley Resort	1173	228810.4	77.56%	11.77%
Xijiao Hotel	837	108489.7	53.29%	8.86%

County club	2162	479849	64.73%	13.68%
-------------	------	--------	--------	--------

For the product stage, compare to carbon emission of the reference building, it may reduce 48.9%-94.7% due to the usage of wood. From the life cycle point of view, the carbon emission may reduce 8.64%-13.68%, compare to the LCA carbon emission of the reference buildings.



## 附录 2: Summary of life cycle carbon emission assessment – Courtyard under Lishan

### 1. Methodologies

Life cycle carbon emission assessment of buildings is to determine how much carbon dioxide a building produces during its existence, starting from its construction and ending at its demolition. The calculation method is based on the Chinese national standards *Standard for Building Carbon Emission Calculation*, which will be officially released in 2019.

#### Product stage

Carbon emission during the product stage is based on the following equation:

$$C_{SC} = \sum_{i=1}^n M_i \times F_i \quad 1.1$$

in which  $C_{sc}$  represents carbon emission during the product stage (kg CO<sub>2</sub>e), which includes raw material supply, transport and manufacturing.  $M_i$  is consumption of material  $i$ , and  $F_i$  is carbon emission of material  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The materials include main structural materials, envelope materials and rough decoration materials.

#### Transportation stage

Carbon emission during the transportation stage is based on the following equation:

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i \times D_i \times T_i \quad 1.2$$

in which  $C_{ys}$  represents carbon emission during the transportation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $M_i$  is consumption of material  $i$  (t),  $D_i$  is average transportation distance for material  $i$  (km), and  $T_i$  is the carbon emission of material  $i$  under certain transportation method (kg CO<sub>2</sub>e/unit).

#### Construction stage

Carbon emission during the construction stage is based on the following equation:

$$C_{JZ} = \sum_{i=1}^n E_{jz,i} \times EF_i \quad 1.3$$

in which  $C_{jz}$  represents carbon emission during the construction stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{jz,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). Construction stage do not include the construction stage transportation.

The carbon emission due to construction transport should be calculated based on the method presented in transportation stages.

### **Operational Energy**

Carbon emission of the operational energy is based on the following equation:

$$C_M = (\sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i) - C_p) \times y \quad 1.4$$

in which  $C_M$  represents carbon emission during the operation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_i$  is annual consumption of energy  $i$  (unit/a),  $C_p$  is the carbon reduction by green area (kg CO<sub>2</sub>e/a), and  $y$  is the design life (a). The carbon emission due to maintenance or replacement of materials through the lifespan should be calculated based on the method presented in product and transportation stages.

### **Demolition stage**

Carbon emission during the demolition stage is based on the following equation:

$$C_{CC} = \sum_{i=1}^n E_{cc,i} \times EF_i \quad 1.5$$

in which  $C_{cc}$  represents carbon emission during the demolition stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{cc,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The carbon emission due to transportation in demolition stage should be calculated based on the method presented in transportation stage.

## **2. Results**

### **Project information**

Location	Xi'an, Shanxi province
Building type	Residential building
Design life	50 years
Building area	895.34 m <sup>2</sup>

### **Product stage**

Table 1. Carbon emission of Canadian wood

Materials	Canadian Glulam	SPF	OSB board	CLT
Quantities (m <sup>3</sup> )	5.14	65.96	43.20	1.98
Factor	184.09	74.02	226.91	79.99

<b>Carbon emission</b>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>				
	LCA kg CO <sub>2</sub> e	946	4882	9802	158
	Total kg CO <sub>2</sub> e	15789			

Table 2. Carbon emission of regular building materials

Materials	Inventory of materials		Consumption		Carbon emission kg CO <sub>2</sub>
	Factor	Unit	quantity	unit	
C30 Concrete	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	105	m <sup>3</sup>	30975
Hot rolled carbon small section steel	2310	kg CO <sub>2</sub> e/t	5	t	11550
Hot rolled carbon steel	2375	kg CO <sub>2</sub> e/t	6.5	t	15438
Aluminum wood window	122.5	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	160	m <sup>2</sup>	19600
PPR pipe	3.72	kg CO <sub>2</sub> e/kg	200	kg	744
PE pipe	3.6	kg CO <sub>2</sub> e/kg	100	kg	360
PVC-U pipe	7.93	kg CO <sub>2</sub> e/kg	150	kg	1190
EPS board	5640	kg CO <sub>2</sub> e/t	0.67	t	3363
Polystyrene	4620	kg CO <sub>2</sub> e/t	0.1	t	462
<b>Total kg CO<sub>2</sub></b>					<b>83681</b>

**Construction transport stage**

Table 3. Carbon emission of transport stage

material	weight (t)	method	distance (km)	Factor kg CO <sub>2</sub> e/t□km	Carbon emission kg CO <sub>2</sub> e
Wood	53.99	Shipping: Container ship(200TEU)	8467	0.012	5485
		Heavy diesel truck (10t)	1300	0.162	11370
C30 Concrete	252.00	Heavy diesel truck (46t)	40	0.057	575
Hot rolled carbon small section steel	5.00	Medium diesel truck (8t)	61	0.179	55
Hot rolled carbon steel	6.50	Medium diesel truck (8t)	61	0.179	71
Aluminum wood window	0.20	Light diesel truck (2t)	500	0.286	29
PPR pipe	0.10	Light diesel truck (2t)	500	0.286	14
PE pipe	0.15	Light diesel truck (2t)	500	0.286	21

PVC-U pipe	0.67	Light diesel truck (2t)	500	0.286	96
EPS board	0.10	Light diesel truck (2t)	500	0.286	14
<b>Total kg CO<sub>2</sub>e</b>					<b>17730</b>

### Operational energy

Table 4. Carbon emission of operation stage

Energy type	Consumption intensity	LCA carbon emission (kg CO <sub>2</sub> eq)
Coal	2.86 kgce/m <sup>2</sup> a	266310
Electricity	27.81 kWh/m <sup>2</sup> a	833997
Gas	1.08 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> a	113594
Total kg CO <sub>2</sub> eq		1213900

### Construction and Demolition stage

Since there is lack of energy consumption of these stages, based on existing study results and current construction standards in China, it is assumed that the carbon emission for both construction and demolition stage is 30 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, which is 26860 kg CO<sub>2</sub>.

### Summary

Table 5. Life cycle carbon emission of the projects

Product	Carbon emission for different stages kg CO <sub>2</sub> e				LCA	
	Transportation	Construction	Operation	Demolition	kg CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e eq/m <sup>2</sup> a
99470	17730	26860	1213900	26860	1368436	30.9

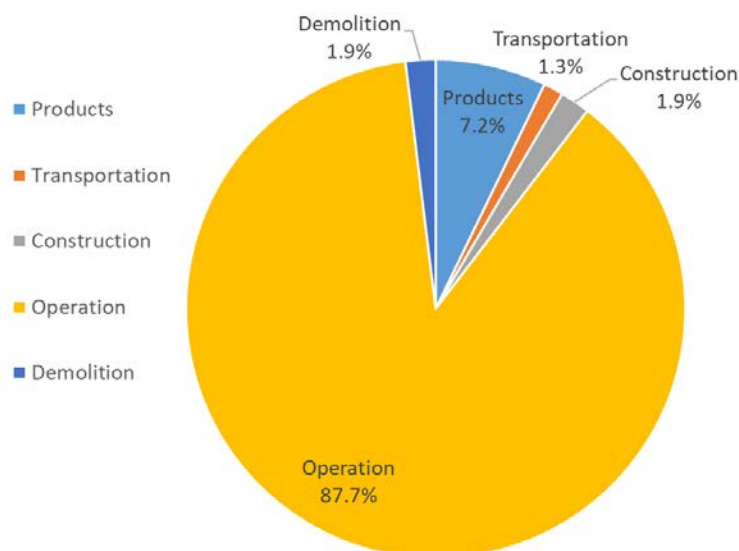


Figure 1. Percentage of carbon emission for different stages

1) From the life cycle point of view, majority of carbon emission (88.7%) is during the operation stage. The energy consumption during this stage is related to the performance of building envelopes, the energy system, human behaviors and so on.

2) In this project, carbon emission due to wood product only accounts for 15.87% of carbon emission in the production stage.

### 附录 3: Summary of life cycle carbon emission assessment – THHSCG

#### 1. Methodologies

Life cycle carbon emission assessment of buildings is to determine how much carbon dioxide a building produces during its existence, starting from its construction and ending at its demolition. The calculation method is based on the Chinese national standards *Standard for Building Carbon Emission Calculation*, which will be officially released in 2019.

#### Product stage

Carbon emission during the product stage is based on the following equation:

$$C_{SC} = \sum_{i=1}^n M_i \times F_i \quad 1.1$$

in which  $C_{sc}$  represents carbon emission during the product stage (kg CO<sub>2</sub>e), which includes raw material supply, transport and manufacturing;  $M_i$  is consumption of material  $i$ , and  $F_i$  is carbon emission of material  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The materials include main structural materials, envelope materials and rough decoration materials.

#### Transportation stage

Carbon emission during the transportation stage is based on the following equation:

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i \times D_i \times T_i \quad 1.2$$

in which  $C_{ys}$  represents carbon emission during the transportation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $M_i$  is consumption of material  $i$  (t),  $D_i$  is average transportation distance for material  $i$  (km), and  $T_i$  is the carbon emission of material  $i$  under certain transportation method (kg CO<sub>2</sub>e/unit).

#### Construction stage

Carbon emission during the construction stage is based on the following equation:

$$C_{JZ} = \sum_{i=1}^n E_{jz,i} \times EF_i \quad 1.3$$

in which  $C_{jz}$  represents carbon emission during the construction stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{jz,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). Construction stage do not include the construction stage transportation.

The carbon emission due to construction transport should be calculated based on the method presented in transportation stages.

### **Operational Energy**

Carbon emission of the operational energy is based on the following equation:

$$C_M = (\sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i) - C_p) \times y \quad 1.4$$

in which  $C_M$  represents carbon emission during the operation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_i$  is annual consumption of energy  $i$  (unit/a),  $C_p$  is the carbon reduction by green area (kg CO<sub>2</sub>e/a), and  $y$  is the design life (a). The carbon emission due to maintenance or replacement of materials through the lifespan should be calculated based on the method presented in product and transportation stages.

### **Demolition stage**

Carbon emission during the demolition stage is based on the following equation:

$$C_{CC} = \sum_{i=1}^n E_{cc,i} \times EF_i \quad 1.5$$

in which  $C_{CC}$  represents carbon emission during the demolition stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{cc,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The carbon emission due to transportation in demolition stage should be calculated based on the method presented in transportation stage.

## **2. Results**

### **Project information**

Location	Gui'an New Area, Guizhou Province
Building type	Public building
Design life	50 years
Building area	701 m <sup>2</sup>

### **Product stage**

Table 1. Carbon emission of Canadian wood

Materials	Canadian Glulam	SPF	OSB board	Red cedar shingles	Red cedar board
Quantities (m <sup>3</sup> )	33.30	9.56	4.60	15.38	20.36

<b>Carbon emission</b>	Factor kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	184.09	74.02	226.91	67	67
	LCA kg CO <sub>2</sub> e	6130	708	1043	1031	1364
	Total kg CO <sub>2</sub> e	10276				

Table 2. Carbon emission of regular building materials

Materials	Inventory of materials		Consumption		Carbon emission kg CO <sub>2</sub>
	Factor	Unit	quantity	unit	
C30 Concrete	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	45.557	m <sup>3</sup>	13439
Hot rolled carbon steel medium steel	2365	kg CO <sub>2</sub> e/t	1.347	t	3186
Hot rolled carbon steel plate	2400	kg CO <sub>2</sub> e/t	8.748	t	20995
Cold rolled carbon steel coil	2530	kg CO <sub>2</sub> e/t	10.018	t	25346
Glass	1130	kg CO <sub>2</sub> e/t	3.7225	t	4206
Aluminum window	194	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	31.6	m <sup>2</sup>	6130
Aluminum wood window	122.5	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	50.7	m <sup>2</sup>	6211
PPR pipe	3.72	kg CO <sub>2</sub> e/kg	162	kg	603
Rock wool board	1980	kg CO <sub>2</sub> e/t	6.898	t	13658
<b>Total kg CO<sub>2</sub></b>					<b>93774</b>

**Construction transport stage**

Table 3. Carbon emission of transport stage

material	weight (t)	method	distance (km)	Factor kg CO <sub>2</sub> e/t□km	Carbon emission kg CO <sub>2</sub> e
<b>Canadian wood</b>	31.83	Shipping: container ship (200TEU)	8467	0.012	3234
		Diesel truck (10t)	1800	0.162	9281
C30 Concrete	109.34	Diesel truck (46t)	53	0.057	330
Hot rolled carbon steel medium steel	1.35	Diesel truck (2t)	62	0.286	24
Hot rolled carbon steel plate	8.75	Diesel truck (2t)	62	0.286	155
Cold rolled carbon steel coil	10.02	Diesel truck (8t)	62	0.179	111
Glass	3.72	Diesel truck (2t)	74	0.286	79



Rock wool board	6.90	Diesel truck (2t)	500	0.286	986
<b>Total kg CO<sub>2</sub>e</b>					<b>14201</b>

### Operation energy

Table 4. Carbon emission of operation stage

Annual energy consumption (kWh <sub>elec</sub> /m <sup>2</sup> a)	Total energy consumption (kWh <sub>elec</sub> )	Factor (kg CO <sub>2</sub> eq /kWh <sub>elec</sub> )
38.7	1356435	0.53
Total kg CO <sub>2</sub> eq		714977

### Construction and Demolition stage

Since there is lack of energy consumption of these stages, based on existing study results and current construction standards in China, it is assumed that the carbon emission for both construction and demolition stage is 30 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, which is 21030 kg CO<sub>2</sub>.

### Summary

Table 5. Life cycle carbon emission of the projects

Carbon emission for different stages kg CO <sub>2</sub> e					LCA	
Product	Transportation	Construction	Operation	Demolition	kg CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e eq/m <sup>2</sup> a
<b>104050</b>	14201	21030	714977	21030	875287	25.0

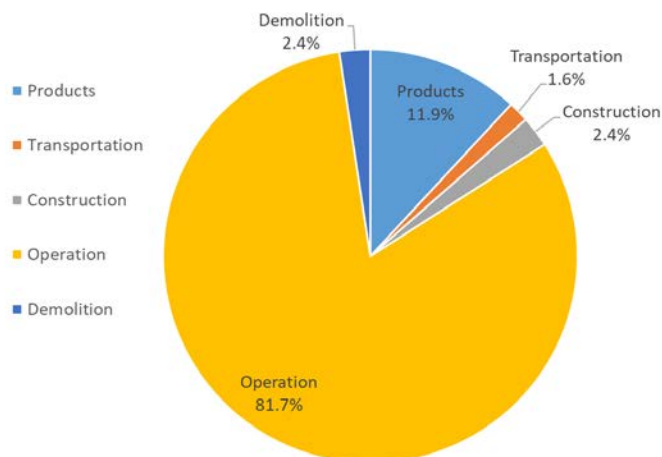


Figure 1. Percentage of carbon emission for different stages

- 1) From the life cycle point of view, majority of carbon emission (81.7%) is during the operation stage. The energy consumption during this stage is related to the performance of building envelopes, the energy system, human behaviors and so on.
- 2) In this project, carbon emission due to wood product only accounts for 9.9% of carbon emission in the production stage.

## 附录 4: Summary of life cycle carbon emission assessment – Nursing home in Beichuan

### 1. Methodologies

Life cycle carbon emission assessment of buildings is to determine how much carbon dioxide a building produces during its existence, starting from its construction and ending at its demolition. The calculation method is based on the Chinese national standards *Standard for Building Carbon Emission Calculation*, which will be officially released in 2019.

#### Product stage

Carbon emission during the product stage is based on the following equation:

$$C_{SC} = \sum_{i=1}^n M_i \times F_i \quad 1.1$$

in which  $C_{sc}$  represents carbon emission during the product stage (kg CO<sub>2</sub>e), which includes raw material supply, transport and manufacturing;  $M_i$  is consumption of material  $i$ , and  $F_i$  is carbon emission of material  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The materials include main structural materials, envelope materials and rough decoration materials.

#### Transportation stage

Carbon emission during the transportation stage is based on the following equation:

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i \times D_i \times T_i \quad 1.2$$

in which  $C_{ys}$  represents carbon emission during the transportation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $M_i$  is consumption of material  $i$  (t),  $D_i$  is average transportation distance for material  $i$  (km), and  $T_i$  is the carbon emission of material  $i$  under certain transportation method (kg CO<sub>2</sub>e/unit).

#### Construction stage

Carbon emission during the construction stage is based on the following equation:

$$C_{JZ} = \sum_{i=1}^n E_{jz,i} \times EF_i \quad 1.3$$

in which  $C_{jz}$  represents carbon emission during the construction stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{jz,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). Construction stage do not include the construction stage transportation.

The carbon emission due to construction transport should be calculated based on the method presented in transportation stages.

**Operational Energy**

Carbon emission of the operational energy is based on the following equation:

$$C_M = (\sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i) - C_p) \times y \quad 1.4$$

in which  $C_M$  represents carbon emission during the operation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_i$  is annual consumption of energy  $i$  (unit/a),  $C_p$  is the carbon reduction by green area (kg CO<sub>2</sub>e/a), and  $y$  is the design life (a). The carbon emission due to maintenance or replacement of materials through the lifespan should be calculated based on the method presented in product and transportation stages.

**Demolition stage**

Carbon emission during the demolition stage is based on the following equation:

$$C_{CC} = \sum_{i=1}^n E_{cc,i} \times EF_i \quad 1.5$$

in which  $C_{cc}$  represents carbon emission during the demolition stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{cc,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The carbon emission due to transportation in demolition stage should be calculated based on the method presented in transportation stage.

**2. Results**

**Project information**

Location	Mianyang, Sichuan Province
Building type	Public building
Design life	50 years
Building area	4297 m <sup>2</sup>

**Product stage**

Table 1. Carbon emission of Canadian wood

Materials	Canadian Glulam	SPF	OSB board	LVL
Quantities (m <sup>3</sup> )	98.16	372.13	171.99	4.52
Factor	184.09	74.02	226.91	356.87

<b>Carbon emission</b>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>				
	LCA kg CO <sub>2</sub> e	18071	27545	39025	1612
	Total kg CO <sub>2</sub> e	86253			

Table 2. Carbon emission of regular building materials

<b>Materials</b>	<b>Inventory of materials</b>		<b>Consumption</b>		<b>Carbon emission kg CO<sub>2</sub></b>
	Factor	Unit	quantity	unit	
C30 Concrete	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	708	m <sup>3</sup>	208847
Plaster	32.8	kg CO <sub>2</sub> e/t	255	t	8378
Shale hollow brick	204	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	226	m <sup>3</sup>	46143
Steel	2310	kg CO <sub>2</sub> e/t	82	t	189457
Glass	1130	kg CO <sub>2</sub> e/t	1	t	1582
Window	194	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	568	m <sup>2</sup>	110273
PE pipe	3.6	kg CO <sub>2</sub> e/kg	616	kg	2219
PVC-U	7.93	kg CO <sub>2</sub> e/kg	916	kg	7267
<b>Total kg CO<sub>2</sub></b>					<b>574166</b>

**Construction transport stage**

Table 3. Carbon emission of transport stage

<b>material</b>	<b>weight (t)</b>	<b>method</b>	<b>distance (km)</b>	<b>Factor kg CO<sub>2</sub>e/t□km</b>	<b>Carbon emission kg CO<sub>2</sub>e</b>
<b>Canadian wood</b>	286.03	Shipping: container ship (200TEU)	8467	0.012	29062
		Diesel truck (46t)	2000	0.057	32608
C30 Concrete	6684.00	Diesel truck (46t)	15	0.057	5715
Plaster	255.43	Diesel truck (46t)	500	0.057	7280
Shale hollow brick	226.19	Diesel truck (46t)	26	0.057	335
Steel	82.02	Diesel truck (46t)	61	0.057	285
Glass	1.40	Diesel truck (2t)	74	0.286	30
Window	0.62	Diesel truck (2t)	500	0.286	88
PE pipe	0.92	Diesel truck (2t)	500	0.286	131
<b>Total kg CO<sub>2</sub>e</b>					<b>75534</b>

**Operation energy**

Table 4. Carbon emission of operation stage

Annual energy consumption (kWh <sub>elec</sub> /m <sup>2</sup> a)	Total energy consumption (kWh <sub>elec</sub> )	Factor (kg CO <sub>2</sub> eq /kWh <sub>ele</sub> )
50.75	10903993	0.53
Total kg CO <sub>2</sub> eq		5747495

**Construction and Demolition stage**

Since there is lack of energy consumption of these stages, based on existing study results and current construction standards in China, it is assumed that the carbon emission for both construction and demolition stage is 30 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, which is 21030 kg CO<sub>2</sub>.

**Summary**

Table 5. Life cycle carbon emission of the projects

Carbon emission for different stages kg CO <sub>2</sub> eq					LCA	
Product	Transportation	Construction	Operation	Demolition	kg CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e eq/m <sup>2</sup> a
660419	75534	128914	5747495	128914	6741276	31.4

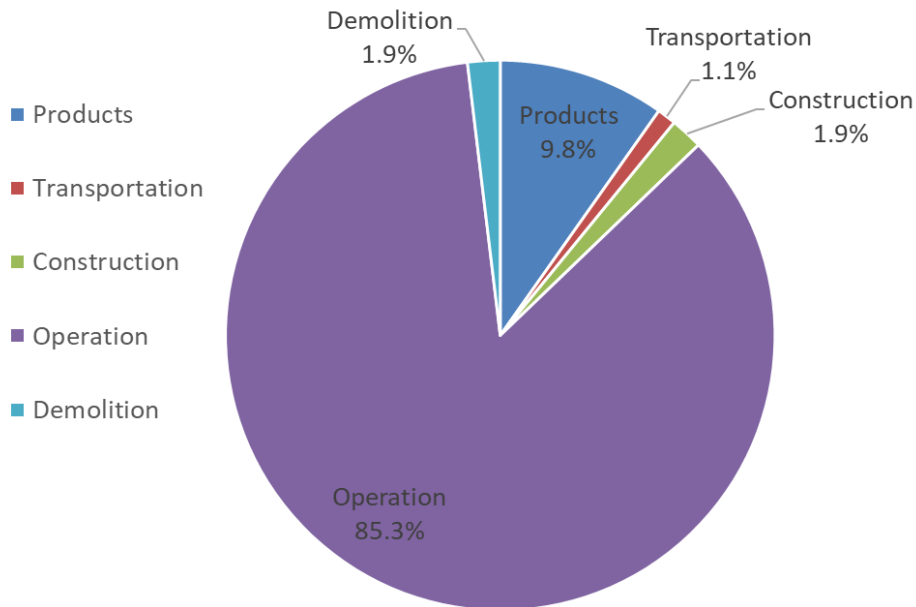


Figure 1. Percentage of carbon emission for different stages

- 1) From the life cycle point of view, majority of carbon emission (85.3%) is during the operation stage. The energy consumption during this stage is related to the performance of building envelopes, the energy system, human behaviors and so on.
- 2) In this project, carbon emission due to wood product only accounts for 13.06% of carbon emission in the production stage.

## 附录 5: Summary of life cycle carbon emission assessment – Xijiao Hotel

### 1. Methodologies

Life cycle carbon emission assessment of buildings is to determine how much carbon dioxide a building produces during its existence, starting from its construction and ending at its demolition. The calculation method is based on the Chinese national standards *Standard for Building Carbon Emission Calculation*, which will be officially released in 2019.

#### Product stage

Carbon emission during the product stage is based on the following equation:

$$C_{SC} = \sum_{i=1}^n M_i \times F_i \quad 1.1$$

in which  $C_{sc}$  represents carbon emission during the product stage (kg CO<sub>2</sub>e), which includes raw material supply, transport and manufacturing;  $M_i$  is consumption of material  $i$ , and  $F_i$  is carbon emission of material  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The materials include main structural materials, envelope materials and rough decoration materials.

#### Transportation stage

Carbon emission during the transportation stage is based on the following equation:

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i \times D_i \times T_i \quad 1.2$$

in which  $C_{ys}$  represents carbon emission during the transportation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $M_i$  is consumption of material  $i$  (t),  $D_i$  is average transportation distance for material  $i$  (km), and  $T_i$  is the carbon emission of material  $i$  under certain transportation method (kg CO<sub>2</sub>e/unit).

#### Construction stage

Carbon emission during the construction stage is based on the following equation:

$$C_{JZ} = \sum_{i=1}^n E_{jz,i} \times EF_i \quad 1.3$$

in which  $C_{jz}$  represents carbon emission during the construction stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{jz,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). Construction stage do not include the construction stage transportation.



The carbon emission due to construction transport should be calculated based on the method presented in transportation stages.

### **Operational Energy**

Carbon emission of the operational energy is based on the following equation:

$$C_M = (\sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i) - C_p) \times y \quad 1.4$$

in which  $C_M$  represents carbon emission during the operation stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_i$  is annual consumption of energy  $i$  (unit/a),  $C_p$  is the carbon reduction by green area (kg CO<sub>2</sub>e/a), and  $y$  is the design life (a). The carbon emission due to maintenance or replacement of materials through the lifespan should be calculated based on the method presented in product and transportation stages.

### **Demolition stage**

Carbon emission during the demolition stage is based on the following equation:

$$C_{CC} = \sum_{i=1}^n E_{cc,i} \times EF_i \quad 1.5$$

in which  $C_{cc}$  represents carbon emission during the demolition stage (kg CO<sub>2</sub>e);  $E_{cc,i}$  is consumption of energy  $i$  (kwh or kg), and  $EF_i$  is the carbon emission of energy  $i$  (kg CO<sub>2</sub>e/unit). The carbon emission due to transportation in demolition stage should be calculated based on the method presented in transportation stage.

## **2. Results**

### **Project information**

Location	Shanghai
Building type	Public building
Design life	50 years
Building area	837 m <sup>2</sup>

### **Product stage**

Table 1. Carbon emission of Canadian wood

Materials	SPF	CLT	Board
Quantities (m <sup>3</sup> )	60.00	110.00	42.00
Factor	74.02	79.99	67

<b>Carbon emission</b>	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>			
	LCA kg CO <sub>2</sub> e	4441	8799	2814
	Total kg CO <sub>2</sub> e	2814		

Table 2. Carbon emission of regular building materials

<b>Materials</b>	<b>Inventory of materials</b>		<b>Consumption</b>		<b>Carbon emission kg CO<sub>2</sub></b>
	Factor	Unit	quantity	unit	
C30 Concrete	295	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	136.67	m <sup>3</sup>	40318
Steel	2310	kg CO <sub>2</sub> e/t	22.5	t	51975
<b>Total kg CO<sub>2</sub></b>					92293

**Construction transport stage**

Table 3. Carbon emission of transport stage

<b>material</b>	<b>weight (t)</b>	<b>method</b>	<b>distance (km)</b>	<b>Factor kg CO<sub>2</sub>e/t□km</b>	<b>Carbon emission kg CO<sub>2</sub>e</b>
<b>Canadian wood</b>	89.88	Shipping: container ship (200TEU)	8467	0.012	9132
		Diesel truck (46t)	34	0.162	495
C30 Concrete	856.64	Diesel truck (46t)	40	0.057	1953
Steel	25.00	Diesel truck (10t)	61	0.162	247
<b>Total kg CO<sub>2</sub>e</b>					11827

**Operation energy**

Table 4. Carbon emission of operation stage

<b>Annual energy consumption (kWh<sub>elec</sub>/m<sup>2</sup>a)</b>	<b>Total energy consumption (kWh<sub>elec</sub>)</b>	<b>Factor (kg CO<sub>2</sub> eq /kWh<sub>ele</sub>)</b>
33	1381710	0.70
<b>Total kg CO<sub>2</sub> eq</b>		967197

**Construction and Demolition stage**

Since there is lack of energy consumption of these stages, based on existing study results and current construction standards in China, it is assumed that the carbon

emission for both construction and demolition stage is 30 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, which is 21030 kg CO<sub>2</sub>.

### Summary

Table 5. Life cycle carbon emission of the projects

Carbon emission for different stages kg CO <sub>2</sub> eq					LCA	
Product	Transportation	Construction	Operation	Demolition	kg CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e eq/m <sup>2</sup> a
<b>95107</b>	11827	25122	967197	25122	1124375	26.9

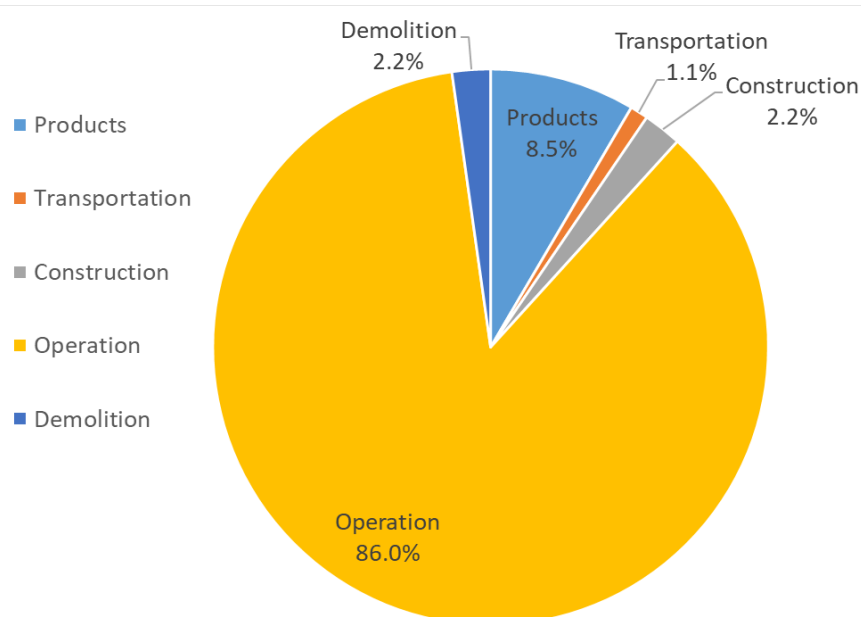


Figure 1. Percentage of carbon emission for different stages

- 1) From the life cycle point of view, majority of carbon emission (86.0%) is during the operation stage. The energy consumption during this stage is related to the performance of building envelopes, the energy system, human behaviors and so on.
- 2) In this project, carbon emission due to wood product only accounts for 2.96% of carbon emission in the production stage.