

# 黄土沟壑地区典型窑洞建筑全生命周期碳排放计算方法

韩晓莉, 宋功明

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 以黄土沟壑地区典型的传统民居平地箍窑为例, 通过建构该地区传统建筑全生命周期碳排放量的计算方法, 并与同规模现代绿色住宅建筑每平米全生命周期建筑碳排放量进行比较, 以量化方法分析传统地域建筑的生态效应. 研究表明, 窑洞建筑在使用过程中碳排放量减少是相对于建筑自身碳排放量减少更为重要的减排因素. 传统窑洞使用低效能的燃料使其在与现代绿色建筑全生命周期碳排放比较中失去优势, 传统建筑生态效应的发挥仍需依赖整个生命周期高效率的能源使用.

**关键词:** 全生命周期碳排放; 窑洞建筑; 黄土沟壑地区; 计算方法

**中图分类号:** TU981

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2017)02-0242-05

## Calculation method of whole life cycle carbon emissions of Yaodong in ravine of Loess Plateau

HAN Xiaoli, SONG Gongming

(College of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;)

**Abstract:** This article takes Yaodong in Ravine of the Loess Plateau which is made of sandstone, as an example, and establishes carbon emissions calculation method of traditional Yaodong in the whole life cycle. By comparing with carbon emissions of green residential building, this paper interprets ecological effect of traditional regional architecture. Research shows that the whole life cycle carbon emissions of Yaodong depends on energy efficiency in the process of building use stage, ecological effect of traditional architecture is not only decided by energy efficiency in process of material production and construction, but also by energy efficiency in use stage of building.

**Key words:** whole life cycle carbon emissions; Yaodong; ravine of loess plateau; method of calculation

气候变化的潜在威胁已经引起全球关注, 由人类活动造成的碳排放增加被认为是导致气候变化的主要原因<sup>[1]</sup>. 与建筑有关的碳排放约占总排放量的 38%, 因此, 建筑领域节能减排意义重大<sup>[2]</sup>. 中国政府承诺到 2020 年, 我国单位 GDP 碳排放比 2005 年下降 40%~45%. 在建筑领域, 正确计算包括新建建筑与传统建筑全生命周期的碳排放量, 对于清晰认识节能减排的效果作用巨大<sup>[3]</sup>. 建筑全生命周期能耗与碳排放量的科学计算和评价有助于提高我国建筑行业的发展水平和改善生态环境<sup>[4]</sup>.

建筑全生命周期的碳排放是指把建筑产品的全生命周期看成一个系统, 该系统在消耗能源、资源的同时, 向外界环境排放碳, 其排放的总碳

量包括建筑物生命周期物化阶段、使用阶段以及拆除处置阶段的碳排放<sup>[5]</sup>. 建筑低碳排放应追溯其整个生命周期(Building Life Cycle)的“低能耗、低污染、低排放”, 也就是说从建筑材料的生产、加工和建筑安装施工, 运行维护及拆除处置整个过程, 见表 1.

建筑全生命周期评价(LCA)方法就是用来测量建筑产品从提取原材料, 通过加工、制造、翻新和最终处置整个生命周期的环境影响<sup>[6]</sup>. 国际标准化组织(ISO)在 2006 年 7 月发布有关全生命周期评价(Life cycle assessment)原则与框架(标准 14040), 该标准包括了 LCA 的定义与研究范围、生命周期清单分析(LCI)阶段及生命周期影响评价(LCIA)阶段及各阶段间的关系.

**收稿日期:** 2015-11-30

**修改稿日期:** 2017-03-20

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51478374); 国家留学基金委员会资助项目(CSC); 榆林市科技局产学研合作基金资助项目(2012cxy3-9)

**作者简介:** 韩晓莉(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为黄土沟壑区绿色营建及其生态修复. E-mail: songjingchen001@126.com.

表 1 建筑全生命周期碳排放的主要内容  
Tab. 1 Whole life cycle carbon emissions of building

物化阶段		碳排放	
建材生产	施工阶段	使用阶段	拆除处置阶段
建筑材料及构配件在生产制造、加工、搬运过程中所产生的碳排放	施工机具及辅助材料生产的碳排放	采暖通风、空调照明等设备运行修缮时的碳排放	建筑陈旧破损拆除时使用爆破和施工机具的碳排放
			建筑垃圾焚毁、掩埋等处置时产生的碳排放

该标准并未对 LCA 的计算技术和各阶段的方法学进行明确规定. ISO 14040 作为全球碳排放计算的框架性文件, 在各领域碳排放值的计算中都起到基础性作用<sup>[7]</sup>. LEED、BREEAM、DGNB 等建筑领域较为成熟的绿色建筑评价体系, 涉及建筑 LCA 计算方面都与该标准有直接联系, 是评价得分的基础. 生命周期评价的目的是报告相关的产品或过程所有重要环境影响, Bre 对建材建立了从生产到拆除 60 年生命周期的碳及污染排放的数据模型及材料认证(BRE EPD)体系. 我国本土建筑材料环境产品认证(Environmental Product Declarations)及碳排放因子的材料库(Green Guide)几近空白, 更不用说各个环节的互相联通. 本研究参照英国的 BREEAM 体系, 建立对建筑环境十大影响因素<sup>[8]</sup>之一的建筑全生命周期碳排放的计算方法, 并对在整个评价体系中占 12.5%, 在碳足迹计算中占比高于 50% 的十个部分中居第三位的材料部分(Mat)进行量化评估, 建立适合我国本土地域性建筑材料碳足迹的计算和评估方法<sup>[9]</sup>.

基于建构建筑全生命周期碳排放量计算方法的基础上, 对传统民居<sup>[10]</sup>与现代绿色住宅建筑每平方米全生命周期碳排放进行比较, 定量化分析窑洞从建材开采、生产、运输到使用全过程碳排放的状况. 2012 年我国住房和城乡建设部的科学技术项目“中国建筑物碳排放通用计算方法研究”, 提出建材生产过程、建造过程、运行过程三个部分各自的碳排放计算方法<sup>[11]</sup>, 并评定万通天津中新生态城项目(获得三星认证)中典型建筑单位面积碳排放强度为每年 45.7 kg/m<sup>2</sup>, 远低于同期设计或建造的建筑平均碳排放量每年 81.16 kg/m<sup>2</sup>, 减排率达 43.69%.

通过对黄土沟壑区典型窑洞——石砌箍窑, 从原材料开采、加工、运输、营建、使用及废弃全过程材料、能源等消耗量的统计, 将这些统计数据依据行业基准 CO<sub>2</sub> 体系, 转换为单位面积 CO<sub>2</sub> 的排放量, 将该数据与以上绿色居住建筑三星标准进行比较, 从而客观评价传统窑洞建筑的

单位面积全生命周期 CO<sub>2</sub> 排放量生态效应及其可持续发展中应注重改进的方面. 研究利用国际通行的绿色建筑评价体系评价传统地域建筑全生命周期碳排放, 有助于中国本土建筑及材料行业的可持续发展.

## 1 黄土沟壑区典型窑洞建设阶段碳排放量的计算

我国黄土沟壑区传统窑洞民居按建筑材料的不同可以划分为三类, 土窑洞、砖窑洞和石砌箍窑. 目前该地区新建窑洞多为石砌箍窑, 这主要其兼顾美观及材料工艺的特点. 相比于土窑洞为确保安全对原生土层(当地俗称老黄土)场地特殊的要求不同, 砖窑和石砌箍窑对场地的要求较低, 但由于黄土沟壑区烧制灰砖耗费大量的燃料, 且砖窑的耐久性及美观程度较石砌箍窑差, 因此, 就地取材利用当地砂岩建造的石砌箍窑受到居民欢迎. 对这种在当地较为普遍的营建趋势, 以可持续发展的视角定量化分析其全生命周期的碳排放状况, 能够对该地区建设活动的科学评估和指导起到积极的推动作用<sup>[12]</sup>.

黄土沟壑区典型石砌箍窑建设阶段的碳排放量计算可以细分为三个步骤: (1)基础参数的确定; (2)建筑建设阶段材料及能源消耗量的确定; (3)建筑建设阶段 CO<sub>2</sub> 排放量的确定.

基础参数的确定主要根据 20 年来气象资料及建筑能耗统计资料的均值来确定.

### 1.1 基础参数的确定

黄土沟壑区典型地域延安基础数据见表 2. 该基础参数包括自然参数和内部负荷参数, 自然参数中包括室外基础温度和室内达到人体热舒适标准所设定的温度, 基础温度与目标温度之间, 根据建筑行业标准查出建筑温度调节所消耗的能量(约 20 W/m<sup>2</sup>), 加上照明能耗(8 W/m<sup>2</sup>)、电气设备(16 W/m<sup>2</sup>)就是建筑内部总的能量负荷.

表2 黄土沟壑区典型地域基础数据(延安 E109°28' N36°36')<sup>[13]</sup>/°C  
Tab. 2 Basic data of typical cities in the ravine of the Loess Plateau /°C

自然参数					内部负荷				
最热月平均温度	最冷月平均气温	极端最高温度	极端最低温度	冬季室外计算温度	年平均空气温度	夏季冬季室内设定温度	照明 W/m <sup>2</sup>	电气设备 W/m <sup>2</sup>	供暖 W/m <sup>2</sup>
22.9	-6.7	39.7	-25.4	-14	9.7	26~20	8	16	20

窑洞建设是以间来计算材料和工程量的,对于传统窑洞匠人而言,材料的用量以体积来计算。窑洞建筑由黄土、砂岩、木材、玻璃等材料建成,通过核算材料的体积用量和密度,考虑材料施工损耗及材料生产运输等因素,得出每种材料的重量,而根据这些基本建筑材料的 CO<sub>2</sub> 系数,可以计算出建筑中所用材料生产建造过程中相应的二氧化碳排放量,进而得出材料生产阶段总碳排放量。材料碳排放量的计算时间按 100a 考虑,每年的碳排放量即为其 1/100。这一数据除以每孔窑洞的面积即为每平方米窑洞在材料生产阶段每年的碳排放量。经计算窑洞在材料生产与建造部分的碳排放量为 31.55 t。

### 1.2 建筑建设阶段材料及能源消耗量的确定

黄土沟壑区窑洞建筑与现代城市居住建筑相比,其详细的材料和能源消耗资料较少,基础数据必须经过实际调查方能获得,见表 2。本文通过对窑洞营建过程(图 1-图 4)的数据调查,确定了窑洞的材料用量,见表 3。



图1 石砌箍窑的石作工艺  
Fig. 1 Stone of Yaodong



图2 石砌箍窑的支模工艺  
Fig. 2 The template of Yaodong



图3 石砌箍窑的覆土过程  
Fig. 3 Earthwork of Yaodong

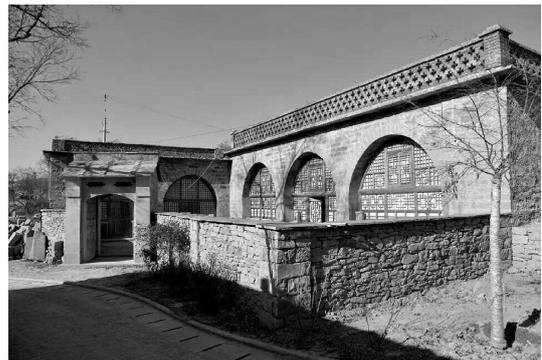


图4 石砌箍窑的最终效果  
Fig. 4 The final image of Yaodong

表3 每间窑洞的建材开采、生产阶段碳排放清单

Tab. 3 Carbon emissions inventory of Yaodong in materials production, production stage

	建材						合计
	石材	木材	生土	水泥	玻璃	白沙	
用量/t	115	0.528	75.2	7	0.15	72.8	
CO <sub>2</sub> 系数	0.24	0.2	<0.001	0.5	1.40	<0.001	
CO <sub>2</sub> 量/t	27.6	0.1	0.07	3.5	0.21	0.07	31.55

注: 其中各种建筑材料的密度: 砂岩 2.3t/m<sup>3</sup>、木材 0.440 t/m<sup>3</sup>、生土 1.6t/m<sup>3</sup>、石灰 2.7 t/m<sup>3</sup>、水泥 3.10~3.15 t/m<sup>3</sup>、玻璃 2.5~3.0 t/m<sup>3</sup>、白沙 2.6 t/m<sup>3</sup>。来源: <https://wenku.baidu.com/view/2f34066627d3240c8447ef40.html>

### 1.3 建筑建设阶段 CO<sub>2</sub> 排放量的确定

建筑建设阶段材料及能源消耗量的确定根据传统窑洞建筑营建过程所具有朴素的标准化特征, 因而可将施工企业材料用量及施工过程中的能耗等统计数据相加, 并借助 BREEAM 对基本能源类型碳排放因子系数的参考值, 确定出建筑建设阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量。

在确定窑洞建筑全生命周期材料消耗及能量消耗量过程中, 由于窑洞的主要建筑材料是本地砂岩, 其单位碳排放因子未收录在资料库中<sup>[14]</sup>, 因而需通过调查其在开采、加工和运输阶段的耗电量, 在运输阶段的耗油量以及建设阶段的电力消耗等数据, 再通过基准电、油的 CO<sub>2</sub> 系数进行碳排放量计算。

## 2 黄土沟壑地区典型窑洞建筑全生命周期碳排放量计算与分析

通过将窑洞建筑全生命周期碳排放量划分为材料生产与建造、使用过程、维护与更新、拆除和重新利用四大阶段, 分别加以计算:

(1) 材料生产与建造: 主要指原料提取、生产、运输、建造过程中的碳排放量。将以上建筑建设阶段材料生产与营建过程的碳排放量相加, 就是窑洞建筑材料生产和建设阶段的碳排放量。

(2) 使用过程: 主要包含建筑采暖, 通风, 照明等维持建筑正常使用功能的能耗<sup>[15]</sup>。对于建筑使用部分的碳排放量计算, 要根据建筑在使用

过程中的能耗, 区分不同能源种类(石油、煤、电、天然气及可再生能源等), 计算其一次性能源消耗量, 然后折算出相应的二氧化碳排放量。以延安市为例<sup>[16]</sup>, 由于窑洞冬暖夏凉, 夏季室内温度约在 21~22 ℃ 之间因而不需要制冷, 没有空调的冷负荷。而冬季室内温度在 10 ℃ 左右, 主要依靠室内局部(如炕、电暖气等)在夜晚特定时间加热, 其能耗主要为煤耗和电耗, 在采暖、照明和设备能耗三个方面所产生的排放量。通过综合调查得到窑洞建筑全年的热负荷及照明、设备耗电量, 经以下公式计算得到:

$$P_u = (P_{CH} + P_I) \times N \quad (1)$$

其中:  $P_u$  为建筑使用阶段的碳排放;  $P_{CH}$  为每年采暖能耗产生的碳排放;  $P_I$  为每年照明设备能耗产生的碳排放;  $N$  为建筑的使用年限。

$$P_{CH} = Q_Y \times E_m \quad (2)$$

其中:  $Q_Y$  为每孔窑洞年耗煤量( $t$ );  $E_m$  为标煤的碳排放因子(注: 取 2.69 kg/kg);

$$P_I = (E_{IV} + E_{EY}) \times F \times E_e \quad (3)$$

其中:  $E_{IV}$ 、 $E_{EY}$  为建筑的年照明、年设备耗电量( $kw \cdot h$ );  $F$  为节能设备修正系数;  $E_e$  为电力碳排放系数(注: 取 0.7 kg/kw·h)。

经计算, 窑洞使用阶段的碳排放结果, 见表 4。可见, 建筑使用阶段总碳排放量  $P_u$  是采暖能耗的碳排放  $P_{CH}$  与照明设备能耗产生的碳排放  $P_I$  之和。

表 4 窑洞在使用阶段碳排放清单

Tab. 4 Carbon emissions of Yaodong in use stage

$P_{CH}$ 采暖能耗的碳排放 $P_{CH} = Q_Y \times E_m$		$P_I$ 照明设备能耗产生的碳排放 [ $P_I = (E_{IV} + E_{EY}) \times F \times E_e$ ]			$P_u$ 为建筑使用阶段总碳排放/t	
		照明耗电 $E_{IV}/$ kw·h	设备耗电 $E_{EY}/$ kw·h	$N$ —建筑使用 年限/a	总耗能 $E_{IV}$ + $E_{EY}$	
能源消耗量	1.5 t 标煤	20	20	100	3.28×100	
CO <sub>2</sub> 量/t	2.9	0.19	0.19	100	328	328

注: 标煤 CO<sub>2</sub> 系数 2.6, 木材 CO<sub>2</sub> 系数 2.46, 1L 汽油 CO<sub>2</sub> 系数为 2.3kg, 1kw·hCO<sub>2</sub> 系数为 0.03 千克。

(3) 维护与更新: 是指在建筑使用寿命内, 为保证建筑正常使用, 进行必要的更新和维护、设备更换等。窑洞材料和设备相对简单, 使用寿命较长, 每 10 年需要翻新一次, 仅需要涂料和乳胶漆。调查建筑使用周期内需要更换的材料的体积, 推算出建筑在使用寿命内维护与更新的碳排放量数据。

(4) 拆除和重新利用: 建筑达到使用寿命周期终点拆除时的二氧化碳排放量, 分别计算可回收利用建筑材料和设备及需要加工处理的建筑垃圾数量, 计算建筑拆除和重新利用过程中的碳排放量。窑洞不需要拆除, 废弃后可做养殖场、库房、冷藏室等, 门窗多用于生火, 对环境影响

很小。

由此可见, 窑洞在材料开采、使用、更新和废弃四个阶段碳排放量分别占 8.7%、91%、0.02%、0.01%, 见表 5。窑洞建筑单位面积碳排放强度为每年 12.1kg/m<sup>2</sup>, 与万通天津中新生态城项目(获得三星认证)中典型建筑单位面积碳排放强度为每年 45.7 kg/m<sup>2</sup> 相比具有较大的优势。但窑洞建筑全生命周期内每年的碳排放量为 138.5 kg/m<sup>2</sup>, 其碳排放主要集中在使用过程中利用煤炭等低效能源进行采暖造成的。尽管由于窑洞中火炕与灶台是相通, 一部分热量用于做饭等活动, 但从建筑设计角度而言, 改变人们在使用过程中能源消耗的类型和效率比建筑

营建过程中材料消耗在节能减排中具有更为重要的意义。

表5 窑洞全生命周期的碳排放

Tab. 5 Whole life cycle carbon emissions of Yaodong

	全生命周期				合计
	建材开采 生产阶段	建筑使用 阶段	维护与 更新	拆除和 重新利用	
碳排放/t	31.55	328	0.345	0.1	360
比例/%	8.7	91	0.02	0.01	100

### 3 结语

黄土沟壑地区典型窑洞建筑全生命周期碳排放的计算方法是在节能减排这一国际化语境下,通过量化方法客观衡量传统窑洞建筑的生态效应。这一方法将地域基本气候数据、室内热舒适性标准、建筑材料生产能耗、建筑工程量等统计数据有机整合,对于我国本土地域建筑碳足迹的评价具有借鉴意义。结合国际绿色建筑评价体系量化方法计算传统地域建筑全生命周期碳排放量,通过对黄土沟壑区典型窑洞全生命周期碳排放量的计算,指出传统绿色建筑必须减少过程中低效率能源的使用,才能确保全生命周期的碳排放量低于当前绿色建筑的碳排放量的水平。窑洞建筑的生态优势不仅只根据其碳足迹来衡量,而在于同时考虑绿色建筑十个环境影响评估指标的生态效果,但即使对于以保温隔热效果见长的传统窑洞而言,亦必须在高效清洁能源的利用、门窗等建筑构件进行节能化改造,才能真正实现绿色可持续发展。

这一研究不仅为我国传统地域建筑生态性提供了科学并为国际接受的定量化的计算方法,亦明确了我国建筑及其相关领域未来节能减排的侧重点。未来建筑领域的节能减排的重点必将从增量建筑转向对存量建筑的关注,从前端控制走向过程控制,从重前期建设走向重后期管理。后续建筑碳排放与人的利用方式、生活标准和习惯之间的关系成为未来全生命周期碳排放研究的关键点。

### 参考文献 References

[1] JONATHAN J. B, PATRICK L, GREGORY N, et al. Health and climate benefits of different energy-efficiency and renewable energy choices[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 6(8): 100-105.

[2] 茹继平, 刘加平, 曲久辉, 等. 建筑、环境与土木工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 28-32.

RU Jiping, LIU Jiaping, QU Jiuhui et al. *Architecture, environment and civil engineering* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2011: 28-32.

[3] 姚润明, 昆·斯蒂摩斯, 李百战. 可持续发展的城市与建筑设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

YAO Runming, Koen Steemers, LI Baizhan. *Sustainable urban and architecture design* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006.

[4] JIANG Bing, SUN Zhenqing, LIU Meiqin. China's energy development strategy under the low-carbon economy[J]. *Energy*, 2010, 35(11): 4257-4264.

[5] Mark Deakin, Peter Nijkamp, Gordon Mitchell et al. *The environmental assessment methods* [M], England: Routledge, 2005: 202-208.

[6] Stuart Barlow. *Guide to BREEAM*[M]. London: RIBA Publishing, 2011: 228.

[7] WATSON S, CHESHIRE W, THOMSON M, The environmental brief: pathways for green design [M]. London: Taylor & Francis, 2006.

[8] Medineckiene, Milena. Multi-criteria decision-making system for sustainable building assessment/certification[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, 15(1): 11.

[9] DOMINIK W, GUAN Dabo, LIU Zhu, et al. Unequal household carbon footprints in China[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(12): 75-80.

[10] CHEN G Q., CHEN H., CHEN Z M., et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(1): 583-595.

[11] 韩晓莉, 宋功明. 基于地域适应机制的黄土沟壑地貌小城镇邻山住区公共空间建构研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

HAN Xiaoli, SONG Gongming. Study on model of public space in residential district located in small-sized cities adapted to landform in a Ra-vine of Loess Plateau [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015, 06.

[12] 王玉, 张宏, 董凌. 零能耗太阳能住宅产品的建筑全生命周期碳排放分析[J]. *华中建筑*, 2015, 33(5): 68-71.

WANG Yu, ZHANG Hong, DONG Ling. Analysis on carbon emissions of zero solar energy consumption residential products' whole life cycle [J]. *Huazhong Architecture*, 2015, 33(5): 68-71.

[13] 延安市气象局. 延安气象与服务[Z]. <http://www.docin.com/p-473223900.html>/Meteorology bureau of Yanan. Yanan meteorology and service.

[14] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市能源消费碳排放分析[J]. *环境科学研究*, 2008, 22(8): 984-986.

LIU Min, ZHANG Weiguo, YU Lizhong. Carbon emission from energy consumption in Shanghai city[J]. *Research of Environment Sciences*, 2008, 22(8): 984-986.

[15] 马超, 刘艳峰, 王登甲, 等. 西北农村住宅建筑热工性能及节能策略分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(3): 427-432.

MA Chao, LIU Yanfeng, WANG Dengjia, et al. Analysis of thermal performance and energy saving strategy of rural residence building in northwest China [J]. *J. Xi'an University of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2015, 47(3): 427-432.

[16] 宋功明, 韩晓莉. 适水土而生——黄土沟壑地区古城雨洪治理经验内涵解读[J]. *建筑与文化*, 2014, 116(8): 84-86.

SONG Gongming, HAN Xiaoli. Survival of the fittest of soil and water conservation: traditional experience of flood and strom water management of ancient cities of Shanbei in the valley of Loess Plateau[J]. *Architecture & Culture* 2014, 116(08): 84-86.

(编辑 沈波)