

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202202027



改良生土技术下的浙江省乡村 建筑物化阶段减碳策略

贺宇豪¹, 张明珍², 任卫中², 李志昊³, 吴正旺¹

- (1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;
2. 厦门东南乡建咨询有限公司, 福建 厦门 361000;
3. 中国建筑设计研究院有限公司, 北京 100037)

摘要: 针对当前浙江省乡村建筑物化阶段碳排放长时间处于较高水平的问题,在调整材料配比、做法的基础上,改良传统生土技术,首先,在建筑材料生产阶段,使用改良夯土、改良三合土、竹片泥墙、轻质填充土、生土抹面等代替工业材料;然后,在材料运输阶段,通过就地取材代替车辆运输;最后,将节省的造价用于抵消碳汇。为验证技术的有效性,依托泥土学校进行实践,研究表明:用改良生土技术建造乡村建筑能够在浙江省发挥显著的减碳作用,在浙江省乡村建筑物化阶段运用改良生土技术具有巨大减碳潜力。

关键词: 改良生土技术; 乡村建筑; 减碳策略; 碳中和; 浙江省

中图分类号: TU 361; TU 521.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)03-0346-10

Carbon Reduction Strategy of Rural Building Stage in Zhejiang Province Under Improved Raw Soil Technology

HE Yuhao¹, ZHANG Mingzhen², REN Weizhong²,
LI Zhihao³, WU Zhengwang¹

- (1. School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Xiamen Southeast Rural Construction Consulting Limited Company, Xiamen 361000, China;
3. China Architectural Design and Research Institute, Beijing 100037, China)

Abstract: In order to reduce the high level carbon emission in the rural building stage in Zhejiang Province for a long time, the traditional raw soil technology is improved on the basis of adjusting the material ratio and practice. In the production stage of building materials, improved rammed earth, improved tabia, bamboo mud wall, light filling soil and raw soil plastering are used to replace industrial materials. In the stage of material transportation, local materials are used instead of vehicle transportation. The cost savings will be used to offset carbon sink. In order to verify the effectiveness of the technology, relying on the practice of soil school, the research results show that the construction of rural buildings with improved raw soil technology can play a significant role in reducing carbon in Zhejiang Province, and the application of improved raw soil technology in the stage of rural buildings in Zhejiang Province has great potential for reducing carbon.

Keywords: improved raw soil technology; rural buildings; carbon reduction strategy; carbon neutralization; Zhejiang Province

收稿日期: 2022-02-26

通信作者: 吴正旺(1972-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事生态规划与设计的研究。E-mail: wuzhengwang@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51378018); 华侨大学科研基金资助项目(605-50X19022)

建筑物几乎消耗了全球 40% 的能源^[1],其中,建筑物化阶段的碳排放具有时间集中、排放量大的特点^[2-3].生土材料的加工能耗和碳排放量分别为黏土砖和混凝土的 3% 和 9%^[4].如何运用生土技术促进乡村建筑物化阶段减碳,是一个值得研究的问题^[5].

国外生土建筑研究起步较早,哥伦比亚和会主房研究计划、法国 CRA Terre 研究中心^[6]等组织促进了生土工业化^[7].南非博茨瓦纳大学的 Alfred^[8]、意大利卡迪利亚大学的 Achenza^[9]等实现了生土材料改性.国内对生土建筑的研究起步较晚,建筑大师任震英、昆明理工大学的柏文峰等致力于新型生土技术研究^[10].中国美术学院、北京建筑大学等高校长期专注于生土建筑的推广^[11].当前国内外的生土建筑研究大多集中于材料性能测试和地域文化的梳理,对乡村建筑物化阶段的减碳策略研究较少.

浙江省乡村建筑面积约为 317 635.3 万 m²^[12],拥有巨大的节能减排潜力^[13].针对当前浙江省乡村建筑物化阶段碳排放长时间处于较高水平的问题,本文依照时间维度,将浙江省乡村建筑物化阶段减碳策略分为建筑材料生产阶段、建筑材料运输阶段和建筑建造阶段减碳策略,其中,在建筑材料生产阶段,使用改良夯土墙、改良三合土、竹片泥墙、轻质填充土和生土抹面等替代混凝土砖、混凝土、水泥、工业涂料、工业保温材料及工业隔声材料;在建筑材料运输阶段,使用坡地、废料、地下取土法和竹加工厂废料获取纤维法减少卡车运输;在建筑建造阶段,用节省下的造价转化碳汇,抵消环境成本.

1 建筑材料生产阶段减碳策略

经多年实践,归纳了运用天然材料建造现代建筑的改良生土技术.该技术由改良夯土墙、改良三合土、竹片泥墙、轻质填充土和生土抹面 5 项技术组成,具有就地取材、技术简单、便于推广的优点,主要用于替代乡村建筑中的混凝土砖、混凝土、水泥、工业涂料、工业保温材料及工业隔声材料,最大程度减少工业材料在建筑材料生产阶段对生态环境的影响^[14].改良生土技术及其应用,如表 1 所示.

表 1 改良生土技术及其应用
Tab. 1 Improved raw soil technology and its application

位置	原有工业材料	原有单位碳排放	改良方法	改良后的单位碳排放
地面	水泥、地砖	214.09 kgCO ₂ e · m ⁻²	使用改良三合土地面	28.01 kgCO ₂ e · m ⁻²
屋面	屋顶保温材料	7.55 kgCO ₂ e · m ⁻²	制作含有轻质填充土层的保温屋面	0.002 kgCO ₂ e · m ⁻²
外墙	黏土砖与混凝土	206.34 kgCO ₂ e · m ⁻²	使用改良夯土墙	82.25 kgCO ₂ e · m ⁻²
内墙	涂料层	18 475 kgCO ₂ e · t ⁻¹ (材料)	使用生土抹面	1 986.80 kgCO ₂ e · t ⁻¹ (材料)
	隔声板	504.63 kgCO ₂ e · m ⁻²	使用竹片泥墙	0.01 kgCO ₂ e · m ⁻²

1.1 使用改良夯土墙代替黏土砖及混凝土墙

1.1.1 改变材料成分降低材料生产阶段碳排放 现代乡村建筑的墙体大多由砖或混凝土制成,在材料生产阶段会产生大量碳排放,以乡村民房为例,大约需要的混凝土砖、粘土焙烧、水泥等材料在生产阶段会排放 CO₂ 约 0.2 t · m⁻².改良后的夯土墙由黏土、石灰、骨料(卵石和沙子)组成,课题组以 3 组不同建筑的墙体作为实验对象,3 种材料的质量比分别为 4.5 : 4.5 : 1.0(1 号),7 : 2 : 1(2 号),4 : 5 : 1(3 号),经过 15 a 的观察,改良后的夯土墙效果对比,如图 1 所示.



图 1 改良后的夯土墙效果对比

Fig. 1 Effect comparison of improved rammed earth wall

由图 1 可知:2 号墙虽然材质更天然,但墙体中部距地 3 m 处出现了长 2 m,深 5 mm 的裂缝;1 号

墙与 3 号墙裂缝较少,但石灰作为工业材料不利于减碳建设. 因此,该地区使用 4.5 : 4.5 : 1.0 的材料质量比为佳. 经过此番改良材料的单位碳排放大约降低了 $123.27\text{ kgCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-2}$,降低至原来的 20%.

1.1.2 改良夯土墙替代混凝土砖实践(以泥土学校天然居为例) 泥土学校的天然居结构为夯土墙承重,室内使用天然材料木材作为楼板,将横梁插入夯土墙使其固定,在建造过程少有工业材料的使用,建成后室内平均温度比村内砖砌建筑高约 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 改良生土技术在天然居中的应用,如图 2 所示. 由此可知,使用夯土墙代替混凝土砖的效果良好.



图 2 改良生土技术在天然居中的应用

Fig. 2 Application of improved raw soil technology in natural soil

1.1.3 碳排放减量测算(以泥土学校粮仓为例) 粮仓的建筑面积为 100 m^2 ,高 3.8 m ,采用改良夯土墙作为承重墙和内部隔墙,墙体体积约为 117.12 m^3 ,生土材料约用 49 t ;石灰约用 10 t ,骨料的卵石约用 49 t . 若使用工业材料在浙江省乡村建设 1 栋 100 m^2 的现代建筑,参考同村的砖砌民房(用于仓库),大约使用混凝土砖 60 t ,因此,根据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[15],建筑材料生产阶段的碳排放量公式为

$$C_{\text{sc}} = \sum_{i=1}^n M_i F_i. \tag{1}$$

式(1)中: C_{sc} 为建筑材料生产阶段碳排放, kgCO_2e ; M_i 为第 i 种主要建材的消耗量; F_i 为第 i 种主要建材的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{单位建材数量}^{-1}$.

改良夯土墙减碳效果统计表,如表 2 所示. 由表 2 可知:在浙江省乡村自建民房时,将建筑师可以控制的部分使用改良夯土墙代替砖墙,可以在建筑材料生产阶段将碳排放减少至原来的 40%,减少单位碳排放 $124.08\text{ kgCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-2}$. 若在浙江省乡村中大力推广该技术,有利于生态环境的保护.

表 2 改良夯土墙减碳效果统计表				
Tab.2 Statistics of carbon reduction effect of improved rammed earth wall				
粮仓	耗材	用量	生产方式	生产碳排放/kgCO ₂ e
改良夯土墙	黏土	49.25 t	就地挖取	—
	石灰	10.94 t	煅烧石灰石	8 175.17
	骨料	49.25 t	附近挖取	—
砖墙	混凝土砖	60.80 m ³	粘土焙烧	20 428.80
	水泥	0.10 t	两磨一烧	73.19
	砂	0.11 t	石料制砂	0.28

1.2 使用改良三合土代替混凝土路面

1.2.1 改变材料成分降低材料生产阶段碳排放 路面的建造需要消耗大量混凝土,改良三合土可以在一定程度上代替混凝土路面.改良的三合土按照黏土:细沙:粗砂:石灰为 1:2:4:3 的质量比制成,减少了混凝土造成的碳排放.

1.2.2 改良三合土替代混凝土的应用(以泥土学校庭院路面为例) 泥土学校的庭院大量使用改良三合土路面,能够同时起到渗水路面和天然防洪堤的作用.15 a 来,门口河水历史最高水位未能越过路面,雨止积水能快速自动排干,在梅雨季节仍能保持相对干燥,当环境气温发生剧烈变化时,路面温度也能保持相对恒定.同时,三合土路面的力学性能和耐久性也经受住了时间的考验.在泥土学校建设过程中,路面常年经受满载中型汽油货车进出,在建设完成后,部分路面也作为内部停车场使用.

改良生土技术与庭院结合的展示图,如图 3 所示.15 a 来,泥土学校的改良三合土路面没有产生明显裂痕,也无需维修.因此,使用改良三合土替代混凝土效果良好.

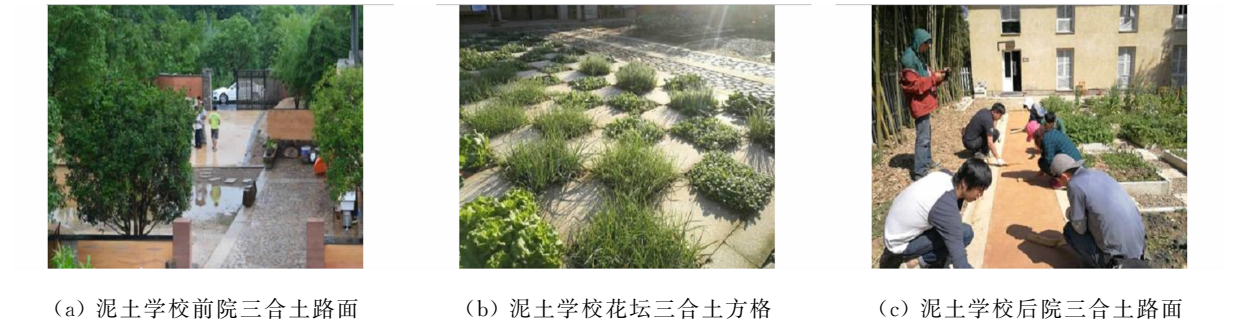


图 3 改良生土技术与庭院结合的展示图

Fig.3 Combination of improved raw soil technology and courtyard

1.2.3 碳排放减少量测算(以泥土学校庭院路面为例) 改良三合土减碳效果统计表,如表 3 所示.由表 3 可知:在浙江省乡村庭院建造中使用改良三合土代替混凝土,可以减排至原来的 12%,减少单位碳排放 178.86 kgCO₂e·m⁻².

表 3 改良三合土减碳效果统计表				
Tab.3 Statistics of carbon reduction effect of improved tabia				
庭院	耗材	用量	生产方式	生产碳排放/kgCO ₂ e
改良三合土	黏土	1.01 t	就地挖取	—
	细砂	2.02 t	购买	5.07
	粗砂	4.04 t	购买	10.15
	石灰	3.03 t	购买	2 264.81
混凝土路面	C30 混凝土	57.75 m ³	购买	17 036.25

1.3 使用竹片泥墙代替工业隔声材料

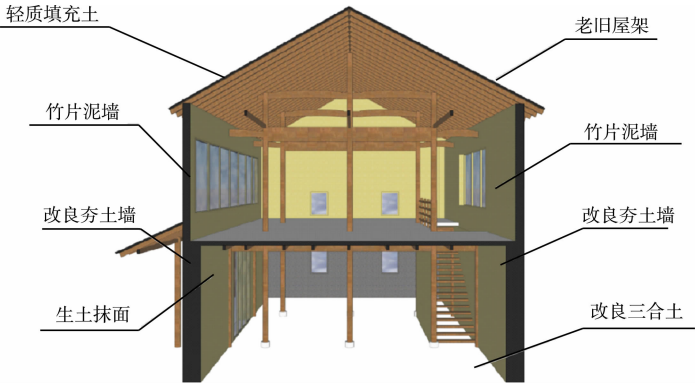
1.3.1 改变材料成分降低材料生产阶段碳排放 隔音材料的生产会排出大量的 CO₂.将竹片与生土结合,把有机物与黏土搭配,制作生态环保的竹片泥墙,可减少 CO₂ 的排放.竹片泥墙板根据实际需要,用榫卯或金属件连接拼合,满足房屋建设中的内部隔断、装饰墙面等需求.制作时首先将竹纤维过筛子,将 2~3 cm 纤维筛出与生土、石灰混合,再用细钉将加工好的竹片与木制龙骨固定,形成竹片井.空隙处使用搅拌好的轻质填充土填充.竹片泥墙展示图,如图 4 所示.



图 4 竹片泥墙展示图

Fig. 4 Bamboo mud wall

1.3.2 竹片泥墙代替隔声材料的应用(以泥土学校文村楼为例) 泥土学校文村楼二层的室内空间可在来访宾客较多时作为教室使用,非工作日也经常作为办公空间供管理人员使用.文村楼二层使用竹片泥墙提升隔声性能,经过现场测量,厚度为 15 cm 的墙体的隔声效果满足 GB 50118—2010《民用建筑隔声设计规范》^[16]中对一般教室间的隔声量要求^[17].应用竹片泥墙的教室,如图 5 所示.



(d) 文村楼改良生土技术应用剖透视

图 5 应用竹片泥墙的教室

Fig. 5 Classroom with bamboo mud wall

1.3.3 碳排放减少量测算(以泥土学校文村楼为例) 在乡村公共建筑中,对隔声有要求的建筑隔墙通常购买隔声板.以聚氯乙烯隔声板为例,使用竹片泥墙代替工业隔声材料能够减少单位碳排放 503.70 kgCO₂e · m⁻².竹片泥墙减碳效果统计表,如表 4 所示.

表 4 竹片泥墙减碳效果统计表
Tab. 4 Statistics of carbon reduction effect of bamboo mud wall

文村楼隔声墙	耗材	用量/t	生产方式	生产碳排放/kgCO ₂ e
竹片泥墙	竹片	9.20	砍伐切割	—
	植物纤维	1.42	竹加工废料	—
	黄泥	0.47	就地挖取	—
工业隔声材料	聚氯乙烯隔声板	6.55	购买	47 781.13

1.4 使用轻质填充土代替工业保温材料

1.4.1 改变材料成分降低材料生产阶段碳排放 乡村建筑使用的保温材料大多是工业纤维类材料. 将竹纤维剁碎后与生土混合, 制成的纤维砖和填充材料具有保温功能. 轻质填充土的配方为植物纤维与黄泥汤的质量比为 3 : 1, 成型后的密度约为 400 kg · m⁻³. 运用轻质填充土的屋顶, 如图 6 所示.



(a) 德意楼屋顶分层 (b) 德意楼屋顶轻质填充土 (c) 文村楼屋顶轻质填充土

图 6 运用轻质填充土的屋顶
Fig. 6 Roof with light filling soil

1.4.2 轻质填充土代替工业保温材料的应用(以泥土学校德意楼为例) 德意楼是使用生土材料建造的现代民居, 其屋顶使用厚度为 7 cm 的轻质填充土以增加保温效果. 德意楼示意图, 如图 7 所示.



(a) 德意楼夯土墙 (b) 德意楼外立面 (c) 德意楼屋顶

图 7 德意楼示意图
Fig. 7 Deyi building

选择 2021 年 1 月 19 日—2 月 20 日(冬季)对德意楼和普通民居室内进行连续的温度测量, 2 个房间的大小均为 15 m², 平均每天测量 3 次, 共得到 3 组 258 个数据, 如图 8 所示. 图 8 中: θ 为温度. 由图 8

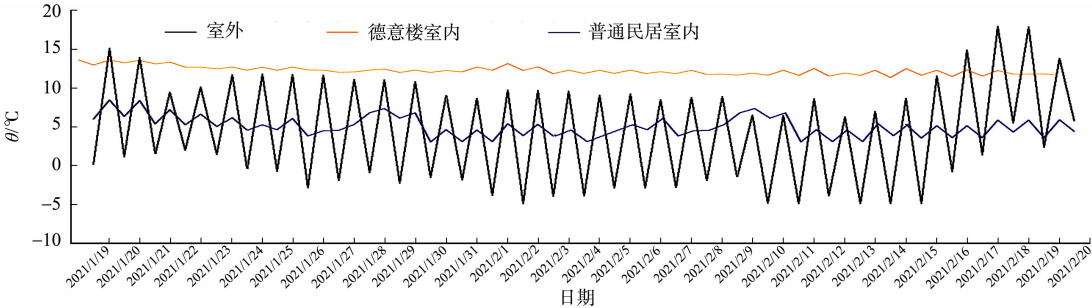


图 8 德意楼与普通民居 1 月 19 日—2 月 20 日室内温度实测
Fig. 8 Measured indoor temperature of Deyi building and ordinary residential buildings during Jan. 19 to Feb. 20

可知:在 1 个月内,普通民居室内的平均温度约为 5 ℃,而生土建筑室内的平均温度约为 14 ℃,若通过空调取暖达到人体舒适温度平均每天可节约 24 kW·h 的电^[18].按照 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,每节省 1 kW·h 的电可以减少碳排放 0.785 kgCO₂e,则应用改良生土技术的乡村建筑在用电方面每年可节省单位碳排放 452.16 kgCO₂e·m⁻².

1.4.3 碳排放减少量测算(以泥土学校德意楼为例) 德意楼的屋顶面积为 204 m²,即在浙江省乡村采用轻质填充土作为保温材料,在材料生产方面可以减少单位碳排放 7.53 kgCO₂e·m⁻².轻质填充土减碳效果统计表,如表 5 所示.

表 5 轻质填充土减碳效果统计表
Tab.5 Statistics of carbon reduction effect of light filling soil

德意楼	耗材	用量/t	生产方式	生产碳排放/kgCO ₂ e
轻质填充土	植物纤维	3.06	竹加工废料	—
	黄泥	1.02	就地挖取	—
工业保温材料	聚苯乙烯泡沫塑料	0.31	工业生产	1 536.12

1.5 使用生土抹面代替工业涂料及水泥砂浆

1.5.1 改变材料成分降低材料生产阶段碳排放 现代乡村的墙体常使用涂料或水泥砂浆抹面,这些材料不仅在生产过程中会产生大量碳排放,个别品牌还会产生有毒物质,不利于人体健康.改良后的生土用于内墙抹面,墙面细腻且容易做造型,能够在一定程度上替代工业产品.泥土质感比涂料质感更加天然,还可以根据需要选取多种土壤将抹面调制为不同色彩,我国南方红、黄、青、紫、白等各色土壤均有分布,用这些生土进行内墙抹面,地域特色比较浓郁.改良生土抹面展示图,如图 9 所示.



(a) 浙江安吉余村“两山”展览馆生土抹面 (b) 得意楼室内生土抹面 (c) 不同颜色生土抹面展示块

图 9 改良生土抹面展示图

Fig.9 Improved raw soil plastering

1.5.2 碳排放减少量测算 生土抹面减碳效果统计表,如表 6 所示.计算可知,在建筑中使用生土抹面代替涂料(以聚苯乙烯为例)可以将碳排放降低至 10%,减少单位碳排放约 4 951.40 kgCO₂e·t⁻¹.

表 6 生土抹面减碳效果统计表
Tab.6 Statistics of carbon reduction effect of raw soil plastering

生土抹面墙体	耗材	用量/t	生产方式	生产碳排放/kgCO ₂ e
生土抹面	砂	0.55	购买	1.37
	土	0.36	就地挖取	—
	石灰	0.09	购买	67.23
涂料	聚苯乙烯	1.00	购买	5 020.00

2 建筑材料运输阶段减碳策略

在资源分布不集中的乡村中使用工业建材需要长途运输,但乡村自身也是生态资源丰富的地区.通过长期实践,践行以不破坏生态环境为前提、就地获取建筑材料的方法.

2.1 于坡地、废料、地下室中取土

1) 坡地取土.浙江地区丘陵坡地较多,首先寻找附近的高坡或丘陵斜坡处,要求该坡地长度超过 50 m,使用挖掘工具从低处去除地表熟土,从距地表深度 0.3~0.5 m 处开始取土,随后将移出的地表土回填,恢复原有风貌(图 10(a)).

2) 工程废料取土. 在乡村道路或建筑工程结束后, 会滞留大量废弃土堆, 经实践, 工程废弃土壤经过处理能够用于夯土墙, 具体方法为去除滞留土堆 0.1 m 厚表层土, 随后取土(图 10(b)).

3) 地下室取土. 乡村生活中为了方便储存货物往往需要挖掘地窖或地下室. 经实践, 地下室开挖中的土壤能够用于夯土墙材料, 方法为挖去地表 0.4 m 表层土, 随后, 使用大型挖掘工具进行取土, 同时制造地下室空间.



(a) 坡底取土



(b) 工程废料取土

图 10 取土方法

Fig. 10 Soil borrowing methods

取来的土通常被用于墙体、地面, 材料运输阶段的碳排放公式为

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i. \tag{2}$$

式(2)中: C_{ys} 为建材运输过程碳排放, kgCO_2e ; M_i 为第 i 种主要建材的消耗量, t ; D_i 为第 i 种建材平均运输距离, km ; T_i 为第 i 种建材的运输方式下, 单位质量运输距离的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$.

取土运输减碳效果统计表, 如表 7 所示. 由图 7 可知: 取土策略能够一定程度地降低墙体、地面带来的材料运输碳排放, 分别减少单位碳排放 $0.81, 7.22 \text{ kgCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-2}$, 随着工程量和耗材的增加, 减碳能力会相应地提升. 然而, 针对距建材城较近、工程量较小的乡村而言, 该策略则优势不足. 因此, 在实际应用中应具体问题具体分析.

表 7 取土运输减碳效果统计表

Tab. 7 Statistics of carbon reduction effect of soil borrowing transportation

位置	构造	耗材	用量	获取地点	运输方式	运输距离/km	运输碳排放/ kgCO_2e	应用项目
墙体	改良夯土墙	黏土	49.25 t	就地获取	—	—	—	泥土学校粮仓
		石灰	10.94 t	安吉第一水泥厂	中型汽油货车(8 t)	40	50.34	
		骨料	49.25 t	附近获取	推车	0.5	—	
	砖墙	混凝土砖	60.80 m^3	秦汉砖厂	中型汽油货车(8 t)	11	129.21	
		水泥	0.10 t	安吉第一水泥厂	轻型汽油货车(2 t)	40	1.33	
		砂	0.11 t	安吉恒瑞砂厂	轻型汽油货车(2 t)	24	0.89	
地面	改良三合土	黏土	1.01 t	就地获取	—	—	—	泥土学校庭院
		细砂	2.02 t	安吉恒瑞砂厂	中型汽油货车(8 t)	24	5.58	
		粗砂	4.04 t	安吉恒瑞砂厂	中型汽油货车(8 t)	24	11.16	
		石灰	3.03 t	安吉第一水泥厂	中型汽油货车(8 t)	40	13.95	
	混凝土路面	C30 混凝土	57.75 m^3	安吉第一水泥厂	中型汽油货车(8 t)	40	626.93	

2.2 于加工厂废料中获取纤维

浙江省竹资源丰富, 竹产业发达. 在竹制品加工生产线上会出现大量竹纤维废料, 收集、处理附近村内竹加工厂的相关废料, 使其成为隔声、保温材料, 可减少工业建材的长途运输. 竹纤维运输减碳效果统计表, 如表 8 所示.

由表 8 可知: 使用就近获取的竹纤维废料制作轻质填充土, 每立方米的隔声、保温材料能够在材料运输中分别减少单位碳排放 $0.010, 0.002 \text{ kgCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-2}$. 数据表明, 该策略减碳效果不明显, 这是因为相关工业材料本身较轻, 所以单位质量的运输碳排放不高. 同时, 乡村竹加工厂的废料有限, 当工期有限时, 仍需外部购买竹纤维以保证材料的供应.

表 8 竹纤维运输减碳效果统计表
Tab. 8 Statistics of carbon reduction effect of bamboo fiber transportation

功能	构造	耗材	用量/t	获取地点	运输方式	运输距离/km	运输碳排放/kgCO ₂ e	应用项目
隔声	竹片泥墙	竹片	9.20	乡村竹加工场	中型汽油货车(8 t)	1	1.06	泥土学校文村楼
		植物纤维	1.42	乡村竹加工场	轻型汽油货车(2 t)	1	0.16	
		黄泥	0.47	就地获取	—	—	—	
	工业隔声材料	聚氯乙烯隔声板	6.55	南浔国际建材城	中型汽油货车(8 t)	117	88.07	
保温	轻质填充土	植物纤维	3.06	乡村竹加工场	中型汽油货车(8 t)	1	0.35	泥土学校德意楼屋顶
		黄泥	1.02	就地获取	—	—	—	
	工业保温材料	聚苯乙烯泡沫塑料	0.31	南浔国际建材城	中型汽油货车(8 t)	117	4.12	

3 建筑建造阶段减碳策略

泥土学校占地面积约为 2 000 m²,总建筑面积为 760 m².泥土学校俯视图,如图 11 所示.学校内拥有休闲、展览、办公教学、居住等多种现代功能的乡村建筑,总造价(含装修)只有 33.5 万元^[19],既能起到示范的作用,又具有实用意义.如果使用砖混结构建造同样规格的学校,至少需要花费 240 万元^[20].

泥土学校建筑明细表,如表 9 所示.根据国际一般碳汇价格水平,中国的碳排放权交易市场 2021-07-16 的全国碳交易价格为 52.78 元·t⁻¹,泥土学校节省的 206.5 万元人民币能够转换为 39 124.67 t 碳汇.由此可知,在乡村应用生土技术建造 2 层以下建筑时,平均每平方米建筑节约的价格大约可转化 51.48 t 碳汇.



图 11 泥土学校俯视图
Fig. 11 Top view of soil school

表 9 泥土学校建筑明细表
Tab. 9 List of soil school buildings

建筑明细	天然居	文村楼	德意楼	粮仓	合计
建筑用途	接待	教室	民宿	储藏	—
建筑面积/m ²	200	200	260	100	760
生土技术应用部位	改良夯土墙做维护结构和部分承重墙,轻质填充土制作保温屋顶和保温墙体	竹片泥墙做隔断墙,轻质填充土做保温填充材料	改良夯土墙承重,三合土隔音地面,室内泥土抹面	改良夯土墙承重,室内三合土地面	—
建筑层数	2	2	2	1	—
造价/万元	8.0	6.5	16.0	3.0	33.5

4 结论

- 提出改良的生土技术并应用于浙江省乡村建筑中,该技术能在乡村区域建筑建造中实现建筑减碳.
- 1) 由于材料源于自然且循环方便,因此,改良生土技术有利于生态环境保护.
 - 2) 在浙江省乡村建筑的材料生产阶段中,改良后的生土技术具有优良的减碳效果,墙体方面可减少单位碳排放 124.08 kgCO₂e·m⁻²,庭院硬化方面可减少单位碳排放 178.86 kgCO₂e·m⁻²,隔声材料方面能够减少单位碳排放 503.70 kgCO₂e·m⁻².
 - 3) 在材料运输阶段,改良生土技术的减碳量随工程量的增加而增加,但在小型工程中应酌情考虑.
 - 4) 在建筑建造阶段,应用改良生土技术虽然耗时较长,但在总造价方面存在一定优势,平均每平方米建筑节省的价格可转化 51.48 t 碳汇.
 - 5) 采用改良生土技术建造的建筑具备良好的热工性能,虽然生土保温材料的生产运输减碳效果不

显著,但按照 GB/T51366—2019《建筑碳排放计算标准》,每节省 $1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电可以减少碳排放 $0.785\text{ kgCO}_2\text{e}$,则应用改良生土技术的乡村建筑在用电方面每年可节省单位碳排放 $452.16\text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$.

6) 改良后的生土技术的碳排放主要集中在材料生产阶段中石灰生产产生的碳排放,随着研究的进一步深入,应探索更加低碳环保的生土材料代替石灰,以期应用于乡村建筑中.

参考文献:

- [1] BARONCINI C,BOCCIA O,CHELLA F,*et al.* Experimental analysis on a $1:2$ scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission[J]. Solar Energy,2010,84(2):296-307. DOI:10.1016/j.solener.2009.11.011.
- [2] 仓玉洁,罗智星,杨柳,等.城市住宅建筑物化阶段建材碳排放研究[J].城市建筑,2018(17):17-21. DOI:10.19892/j.cnki.csjz.2018.17.004.
- [3] 许静,姜青苗,余丰毅,等.石材固废资源化利用的碳减排效益研究[J].福建师范大学学报(自然科学版),2022,38(4):55-62. DOI:10.12046/j.issn.1000-5277.2022.04.007.
- [4] 冯勇.河南省济源市里河村垛土建筑营造方式研究[D].郑州:中原工学院,2020.
- [5] 赵辰.建筑师所面对的当下中国乡村复兴[J].建筑师,2016(5):6-7.
- [6] 王沛钦,郑山锁,柴俊,等.走向生土建筑结构[J].工业建筑,2008,45(3):101-105. DOI:10.13204/j.gyjz200803027.
- [7] 吴瑞,张驰,王毛真.国际生土建筑中心的生土建筑教育与推广[J].建筑学报,2016(4):14-17. DOI:10.3969/j.issn.0529-1399.2016.04.003.
- [8] 卢家成,刘嘉良,李威翰,等.生土建筑与材料研究现状[J].材料导报,2020,34(增刊2):1269-1272.
- [9] ACHENZA M,FENU L. On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction[J]. Materials and Structures,2006,39(1):21-27. DOI:10.1617/s11527-005-9000-0.
- [10] 江陈,白羽,柏文峰,等.不同加强型夯土墙体拟静力试验研究[J].工程抗震与加固改造,2019,41(4):93-98,86. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2019.04.013.
- [11] 孟祥武,苏醒,骆婧.国外生土建筑发展对我国的启示与借鉴[J].西部人居环境学刊,2019,34(1):104-110. DOI:10.13791/j.cnki.hsfwest.20190113.
- [12] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2005.
- [13] 崔馨文,崔陇鹏,邢闯,等.乡愁·乡建:四川德阳的生土营造实践[J].建筑与文化,2017(12):18-23. DOI:10.3969/j.issn.1672-4909.2017.12.003.
- [14] 陈荣淋,周克民.运用响应面法的工程废土综合改性优化[J].华侨大学学报(自然科学版),2021,42(3):312-321. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202009010.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑隔声设计规范:GB 50118—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [17] 史睿超.传统生土麦秸建筑墙体现代化研究[D].青岛:青岛理工大学,2012.
- [18] 高源,胡可,岳晓鹏,等.北方乡村住宅节能与热舒适的形体参数多目标优化设计[J].华侨大学学报(自然科学版),2021,42(5):619-627. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202101026.
- [19] 张明珍,任卫中.泥土再造[J].新建筑,2016(4):57-60. DOI:10.3969/j.issn.1000-3959.2016.04.013.
- [20] 贺宇豪,张明珍,任卫中,等.传统生土技术改良策略及应用:基于乡村振兴中建筑实践的思考[J].新建筑,2021(5):38-43. DOI:10.12069/j.na.202105038.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)