

特约专栏

基于生命周期评价的绿色建筑选材研究

刘 宇, 张宇峰, 孙燕琼, 龚先政

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘 要: 我国建筑业能耗占全国总能耗的40%以上, 建筑中由于围护结构热传导而产生的空调与供暖能耗占建筑全生命周期能耗的70%以上, 节能建筑材料的开发与应用是建筑节能的关键。以对建筑保温性能具有关键作用的外墙外保温材料、建筑玻璃窗与墙体材料为研究对象, 利用生命周期评价方法定量分析典型节能建材从矿石开采、材料生产、运输、使用直至最终废弃全生命周期过程的资源消耗与环境影响, 据此进行低环境负荷材料的择优, 为绿色建筑的科学选材提供理论与数据支撑。

关键词: 建筑材料; 生命周期评价; 绿色建筑

中图分类号: TU5; X820.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)10-0769-07

Materials Selection for Green Building Based on Life Cycle Assessment

LIU Yu, ZHANG Yufeng, SUN Yanqiong, GONG Xianzheng

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Over 40% society energy consumption is contributed by the construction industry, where the building materials play an important role in the energy saving performance of a building. Research reveals that the energy consuming of air conditioning and heating system has taken 70% of the overall building energy consumption through all its life cycle, mainly due to the thermal transmission of building envelope structure. Therefore, this paper focuses on the exterior heat insulators, windows and wall materials, which are critical to building heat-insulating property, to study their resource consuming and environment impact during the life cycle from mining, production, transportation, utility, until disposal. In the end, the author aims to provide a robust rationale and database to optimize environmental friendly material selection for the green building.

Key words: building materials; life cycle assessment; green building

1 研究背景

建筑业是我国经济发展的支柱产业之一。据统计, 每年我国建筑业能耗占全国总能耗的40%以上, 由耗能带来的污染物排放量亦十分巨大。随着全社会对环境问题的日益关注, 在全生命周期内最大限度节约资源能源、减少污染、保护环境已经成为建筑业发展的趋势。

建筑材料是构成建筑的物质基础, 绿色建筑的发展离不开相应建筑材料的支持, 无论建筑物化阶段还是其运行阶段的环境影响, 均与建筑材料的性能以及环境影

响有着密切的关系^[1]。建筑中由于围护结构热传导而产生空调与供暖能耗占建筑全生命周期能耗的70%以上^[2]。因此, 节能建筑材料的开发与应用是建筑节能的关键^[3], 通过科学的方法选取材料达到最优的建筑节能效果, 对绿色建筑的推广具有重要意义。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种通过量化与评估对象相关的能源消耗、物质消耗和污染物排放, 来评估某一产品、过程或事件环境负荷的方法。近些年, 随着建筑节能的发展, 国内研究人员使用该方法开展了大量针对新型节能建材的研究: 周骏贵等人对新型墙体材料的全生命周期评价研究进行了综述^[4]; 李斌运用生命周期评价方法, 分析了外墙外保温体系从设计、施工、使用到废弃全过程的成本, 计算了该体系的生命周期成本与补偿年限^[5]; 肖君利用生命周期评价方法分析了岩棉板和聚苯乙烯挤塑板在生产、使用和拆除阶段的资源、能源消耗及污染物排放情况, 从社会支付

收稿日期: 2016-02-07

基金项目: 北京市自然科学基金(2164056),

第一作者: 刘 宇, 男, 1984年生, 博士,

Email: liuyu@bjut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.10.02

意愿角度衡量环境影响程度^[6]；陈文娟基于生命周期评价方法分析了浮法玻璃生产的资源与能耗情况，量化了富氧燃烧技术的节能减排潜力^[7]；马丽丽^[8]、赵春芝^[9]、马丽萍^[10]、郭鹿^[11]、王波^[12]等人分别对纸面石膏板、铝塑板及单铝板、聚苯板、铜塑铝板和纯铜板等建筑材料开展了环境负荷研究。

国外学者也基于生命周期评价方法对节能建筑材料开展了相关研究。Afif Hasan^[13]计算了外墙保温材料的全生命周期节能成本，结果显示，根据墙体结构的不同，岩棉保温材料的投资回收期在 1 年到 1.7 年之间，而聚苯板的投资回收期在 1.3 年到 2.3 年之间；Amaryllis Audenaert^[14]用 Eco-indicator 99 方法对一栋 19 层低能耗建筑进行生命周期评价，结果显示，保温隔热材料的选择影响建筑的生态指数，使用聚苯板比使用岩棉板的建筑生态指数高 15%；Ashwin Sabapathy^[15]、Christopher Koroneos^[16]分别对印度与希腊的烧结砖产品进行了环境影响对比；Mueller A^[17]、Kurama H^[18]、Huberman N^[19]等人则对加气混凝土砌块从矿物开采到循环回收过程的环境负荷开展了相关研究。

本文从建筑选材的角度出发，以对建筑保温性能具有关键作用的外墙外保温材料、建筑玻璃窗与墙体三类节能建筑材料产品为研究对象，利用生命周期评价方法

定量分析典型节能建材产品从矿石开采、材料生产、运输、使用直至最终废弃全生命周期过程的资源消耗与环境影响，据此进行低环境负荷材料的择优，为绿色建筑的选材提供理论与数据支撑。

2 研究方法

本文基于 ISO14040 系列标准规范的生命周期评价方法与技术框架开展研究。按照国际标准化组织的定义，生命周期评价是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[20]。这里的产品系统是通过物质和能量联系起来的，具有一种或多种特定功能的单元过程集合。生命周期是指产品系统中前后衔接的一系列阶段，从原材料的获取或自然资源的生成，直至最终处置。

节能建筑材料产品的生命周期涉及多个环节，需要大量数据来支撑整个评价过程。通过与相关行业专家进行研讨，制定环境负荷数据的收集计划、系统边界与质量控制规范，见表 1 所示。数据收集阶段将行业协会、企业、设计部门的调研数据与统计资料(年鉴、行业报告)的统计数据相结合，涵盖矿石开采、能源生产、运输、材料生产与废物处置等重要环节。通过数据质量控制与评价方法对所收集的数据进行审核、表征并分析数据的代表性、完整性、准确性和时效性。

表 1 数据收集范围与方式
Table 1 The scope and methods of data collection

Process	Item	Data collection methods
Basic processes	Resource exploitation	Energy consumption and emissions of limestone, clay, sand and other raw materials during mining processes. Materials environmental impact database—Sinocenter developed by Beijing University of Technology
	Energy generation	1) Sinocenter database; 2) Calculating the environmental load inventory of electricity generation according to the national statistics data.
	Transportation	1) Transport modes and distances of ores and products; 2) Energy consumption and emissions during transportation. 1) Investigating in typical enterprise; 2) Sinocenter database.
Waste treatment	Stacking and landfill	1) Energy consumption and emission of waste treatment; 2) Harmful substances (such as heavy metal) emit to the soil and groundwater. 1) Investigating in typical stacking and landfill site; 2) National standards and literature data.
Materials production	Wall materials production	Resource/energy consumption and pollutant emissions of solid/hollow brick and building block production. Investigating in typical enterprise and Sinocenter database.
	Insulation materials production	Resource/energy consumption and pollutant emissions of EPS board and rock wool board production. Investigating in typical enterprise and Sinocenter database.
	Window materials production	Resource/energy consumption and pollutant emissions of glass and window frame material (aluminum, etc.) production. Investigating in typical enterprise and Sinocenter database.
Parts production	Parts production	Resource/energy consumption and pollutant emissions of building materials parts in assembly process Investigating in typical enterprise

根据节能建筑材料的环境负荷特点, 构建环境影响评价指标体系, 见表 2 所示。通过数据收集定量化典型外保温材料、建筑玻璃窗、墙体材料全生命周期的资源、能源消耗与污染物排放量, 利用评价模型与指标体系将由此造成的重要环境问题基于自然科学进行综合表征, 据此比较同一种建筑结构采用不同材料对建筑整体环境负荷的影响, 实现对节能建筑材料的科学择优。

表 2 环境影响评价指标体系

Indicators	Item	Unit
Abiotic resource depletion (ADP)	Clay, sandstone, coal, oil, gas, et al.	Sb eq.
Global Warming (GWP)	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , et al.	CO ₂ eq.
Acidification (AP)	SO ₂ , NO _x , et al.	SO ₂ eq.
Photochemical oxidation (POCP)	CO, NMVOC, et al.	C ₂ H ₄ eq.
Eutrophication (EP)	COD, PO ₄ ³⁻ , et al.	PO ₄ ³⁻ eq.
Human toxicity (HTP)	PM, heavy metal, et al.	(1,4)-DCB eq.

3 基于生命周期评价的典型外墙外保温材料选材研究

墙体外保温技术是建筑节能的重要手段, 可有效消除墙体中的热桥, 达到优异的绝热效果, 同时消除冷凝, 保持室温稳定性, 提高居住舒适性。从材料可燃性的角度, 墙体外保温材料主要分为三类, 即可燃的有机保温材料、难燃的有机-无机复合型保温材料和不可燃的无机保温材料。有机保温材料以聚苯乙烯泡沫 (EPS) 板为代表, 具有优越的保温隔热性能, 但防火性能相对较差; 无机保温材料以岩棉板为代表, 其保温性能弱于有机保温材料, 但具有良好的防火性能。本文通过分析 EPS 板和岩棉板的全生命周期环境负荷, 对比两类典型外墙外保温材料在达到相同保温性能与防火等级情况下的环境影响, 据此指导外墙外保温材料的科学择优。

3.1 相同保温效果下两种保温系统的环境影响比较

根据北京地区居住建筑节能标准与对墙体围护结构热工设计的要求, 将目标建筑的外墙传热系数设定为 0.40 W/(m²·K), 基层墙体设定为 200 mm 的钢筋混凝土墙, 保温板与基层墙体通过聚合物水泥砂浆粘结, 且粘结面积不小于 40%。功能单位选取为安全粘贴在 200 mm 钢筋混凝土墙基层墙体上, 且保证墙体传热系数为 0.40 W/(m²·K) 的 1 m² EPS 薄抹灰外墙外保温系统以及岩棉薄抹灰外墙外保温系统。为达到设定的外墙传热系数, 两种保温系统的 EPS 板和

岩棉板用量分别为 9 kg/m² 和 17.33 kg/m²; 粘结砂浆用量分别为 7.5 kg/m² 和 9 kg/m²; 抹面砂浆、锚栓、玻璃纤维网格布和涂料的用量均为 9, 0.18, 0.2 和 0.2 kg/m²。据此计算相同保温性能时两种外保温系统的环境影响, 见图 1 所示。

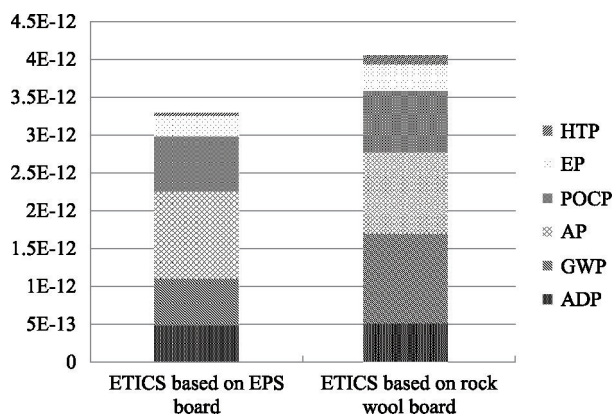


图 1 具有相同保温性能时两种外保温系统的环境影响归一化结果

Fig. 1 The environmental impact of two external thermal insulation composite systems in the same insulation performance

结果显示, 酸化和光化学烟雾为外保温系统最主要的环境影响, 主要是由材料生产过程排放的 SO₂ 与 NO_x 所致; 两种系统中不可再生资源消耗和水体富营养化影响相差不大, 原因为对这两种环境影响起决定作用的干混砂浆用量基本相同; 岩棉外保温系统的温室效应和人体健康损害两种环境影响明显高于 EPS 系统, 由于岩棉板在生产过程的能耗远高于相同功能单位的 EPS 板, 直接导致大量温室气体的排放和人体健康损害的产生。综合环境影响指标的对比结果显示, 岩棉外保温系统的环境影响比相同保温性能的 EPS 外保温系统高 23.3%。

3.2 综合考虑保温性能和阻燃性能的两类保温系统的环境影响比较

外墙外保温系统在满足围护结构保温性能的同时, 还应兼顾系统本身的阻燃性能。因此, 对比两种保温系统环境影响时, 需要综合考虑材料的隔热性和阻燃性。本文设定表征材料隔热性能和阻燃性能的综合指标: 1/(导热系数×材料燃烧增长速率指数), 单位为 [(m²·K·s)/W²]。岩棉为 A 级不燃材料, 导热系数 0.040 W/(m²·K), 燃烧增长速率指数 ≤120 W/s, EPS 板导热系数 0.039 W/(m²·K), 燃烧性能等级 B1, 燃烧增长速率指数 ≤250 W/s。以此为基准, 对比相同保温和阻燃性综合指标下 EPS 外保温系统和岩棉外保温系统的环境影响, 见图 2 所示。结果显示, EPS 外保温系统的环境负荷比岩棉外保温系统高 15.8%。

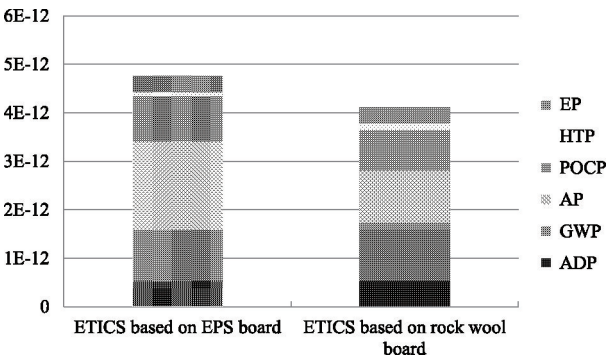


图 2 综合指标下两种外保温系统的环境影响归一化结果
Fig. 2 The environmental impact of two external thermal insulation composite systems in the composite indicator

综上，若仅考虑墙体的保温性能，EPS 薄抹灰外墙外保温系统的环境协调性优于岩棉薄抹灰外墙外保温系统；但是在综合考虑保温性能和阻燃性能的情况下，岩棉外保温系统则优于 EPS 外保温系统。

4 基于生命周期评价的典型建筑玻璃窗选材研究

玻璃窗是建筑的重要组成部分，不仅起到美观装饰作用，还具有采光、保温、隔声等功能。本文以铝合金窗、断桥铝合金窗、塑钢窗、木塑复合窗和再生木塑复合窗 5 类典型玻璃窗为研究对象，其规格为 1500 mm×1500 mm 外墙用平开窗，玻璃类型为 5+12A+5 Low-E 中空玻璃，使用增塑 PVC 密封胶条和硅酮密封胶，五金件均选用 Q235 钢材。生产每平米各类型玻璃窗所需材料见表 3 所示。

根据确定的数据调研方案，对表 3 中各类材料生产的基础清单、玻璃窗组装电耗、以及部件运输过程的能耗与污染物排放进行计算，据此分析 5 种玻璃窗生产造成的主要环境影响，见表 4 所示。

表 3 生产每平米窗所需材料(kg)
Table 3 Materials requirement of the 1 m² window(kg)

Materials	Aluminum alloy window	Bridge-cut aluminum alloy window	PVC window	Wood-plastic composites window	Recycled wood-plastic composites window
Aluminum extrusions	8.5	7.9	—	—	—
PA66 insulation strip	—	0.9	—	—	—
PVC-U profiles	—	—	8.80	—	—
Steel	—	—	5.1	—	—
Wood-plastic composite profiles	—	—	—	4.45	—
Recycled Wood-plastic composite profiles	—	—	—	—	4.5
Glass *	0.8	0.77	0.75	0.68	0.68
Hardware fittings	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3
Sealant	0.5	1.86	1.70	1.50	1.60
Gaskets	3.5	3.0	3.5	4.2	4.3

* Unit is m²

表 4 各玻璃窗生产过程的环境影响评价结果
Table 4 The environmental impact assessment results of the windows

Environmental impact categories	Unit	Aluminum alloy window	Bridge-cut aluminum alloy window	PVC window	Wood-plastic composites window	Recycled wood-plastic composites window
ADP	kg Sb eq.	3.95E-02	3.77E-02	3.13E-02	2.81E-02	2.78E-02
GWP	kg CO ₂ eq.	4.33E+02	4.07E+02	1.59E+02	8.38E+01	7.25E+01
AP	kg SO ₂ eq.	3.27E+00	3.06E+00	9.80E-01	5.79E-01	5.14E-01
POCP	kg C ₂ H ₄ eq.	3.71E-01	3.47E-01	9.64E-02	5.43E-02	3.97E-02
HTP	kg PO ₄ ²⁻ eq.	1.91E+01	1.78E+01	1.46E+00	8.35E-01	7.68E-01
EP	kg (1,4)-DCB eq.	2.65E-01	2.50E-01	1.23E-01	7.18E-02	6.32E-02

在建筑玻璃窗的使用阶段，因两侧存在温差引发热交换，需要由空调或暖气提供额外热量来进行补偿以维持适宜的室内环境，用其表征玻璃窗在使用阶段的能源消耗。对于夏季制冷建筑物中玻璃窗产生的能耗，同时考虑内外温差引起的玻璃窗热传导以及太阳辐射引起的传热；对于冬季采暖建筑中玻璃窗产生的能耗，仅考虑内外温差引起的玻璃窗热传导。铝合金窗、断桥铝合金窗、塑钢窗、木塑复合窗和再生木塑复合窗的传热系数分别为 2.6, 2.1, 2.0, 1.9 和 1.9 $W/(m^2 \cdot K)$ 。假定建筑内制热和制冷均通过空调完成，空调的制冷系数为 2.6，制热系数为 1.8，据此计算出玻璃窗造成的夏季制冷和冬季制暖能耗，见表 5 所示。

由于各类型玻璃窗寿命不同，因此需要将它们放置在整个建筑的生命周期中考虑。假定建筑寿命为 70 年，铝合金窗、断桥铝合金窗的使用寿命分别为 40 年和 50 年，塑钢窗、木塑复合窗以及再生木塑复合窗的使用寿命为 30 年，玻璃窗在使用寿命到期后需要更换。以此计算出每类玻璃窗在建筑服役周期中的年平均环境影响，见图 3 所示。

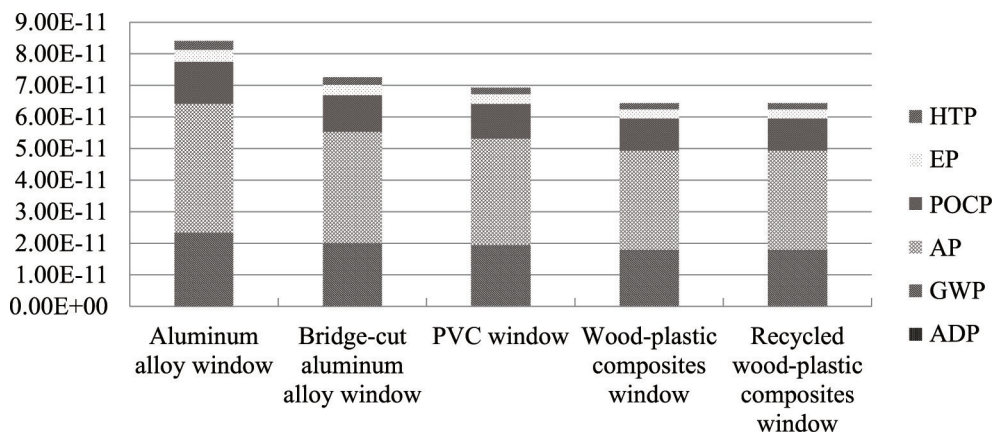


图 3 玻璃窗的年平均环境影响评价结果

Fig. 3 The annual average environmental impact assessment results of the windows

5 基于生命周期评价的典型墙体材料选材研究

近些年来，我国以保护土地、节约能源为目的，大力开展墙体材料改革，新型墙体材料不断涌现。本文选取粘土实心砖、利废空心砖、加气混凝土砌块和轻集料混凝土砌块 4 类典型墙体材料为研究对象，对比不同墙体材料的选取对建筑环境负荷的影响，其基本信息见表 6 所示。系统边界定义为从原料开采至材料出厂，即“从摇篮到大门”。

研究的功能单位定义为 1 m^2 具有相同保温性能的围护结构。由于 4 种典型墙体材料的导热系数不同，由它

表 5 各类型玻璃窗使用阶段每年的能耗 (MJ)

Table 5 Energy consumption of the windows in use phase per year (MJ)

Type	Energy consumption
Aluminum alloy window	4.20E+03
Bridge-cut aluminum alloy window	3.63E+03
PVC window	3.49E+03
Wood-plastic composites window	3.26E+03
Recycled wood-plastic composites window	3.26E+03

结果显示，各类玻璃窗的使用阶段均占全生命周期环境影响的 90% 以上，因此玻璃窗的隔热性能对其环境影响具有主导作用。由于使用阶段对环境影响的支配性贡献，各类玻璃窗的环境影响分布基本相同，其中 AP、GWP 和 POCP 贡献较大，分别为 48%，28% 和 15% 左右，而 ADP、HTP 和 EP 所占比例均低于 5%，各类环境影响均主要源于使用阶段的电耗以及发电过程的污染物排放。各类玻璃窗的对比结果显示，再生木塑复合窗的环境影响最小，其次是木塑复合窗和塑钢窗，铝合金窗的环境影响最大。断桥铝合金窗、塑钢窗、木塑复合窗以及再生木塑复合窗的环境影响分别比铝合金窗减少 13%、18%、23% 和 23%。

们砌筑的具有相同保温性能的围护结构也有所差异。调研的 4 种墙体材料的导热系数分别为 0.8, 0.5, 0.2 和 0.28 $W/(m \cdot K)$ ，以粘土实心砖砌筑成三七墙为基准，

表 6 典型墙体材料产品的基本信息

Table 6 Basic information of typical wall materials

Products	Size /mm	Thermal conductivity / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	Density / $kg \cdot m^{-3}$
Clay solid brick	240×115×53	0.8	1700
Hollow brick	190×190×90	0.5	900
Aerated concrete block	600×240×200	0.20	600
Lightweight aggregate concrete block	390×190×190	0.28	800

将利废空心砖砌筑的二四墙围护结构、加气混凝土砌块砌筑的 150 mm 厚围护结构以及轻集料混凝土砌块砌筑的 190 mm 厚围护结构设计成与基准具有同样的保温效果。不同材料围护结构的环境影响评价结果如图 4 所示。

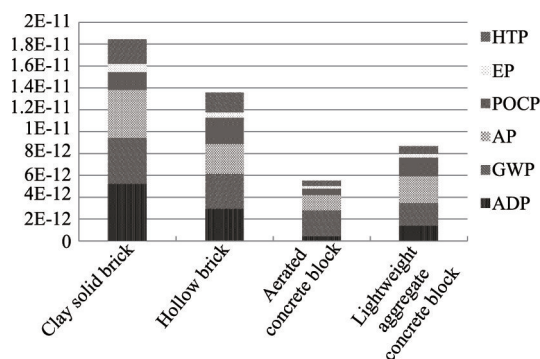


图 4 不同材料围护结构的环境影响评价结果

Fig. 4 The environmental impact of the building envelopes with different materials

各类环境影响的分析结果显示，粘土实心砖生产造成的不可再生资源耗竭影响最大，主要源于大量粘土的消耗，空心砖与轻集料混凝土砌块次之；两类烧结砖的温室效应影响较大，主要源于能源燃烧产生的 CO_2 和 CH_4 排放，而加气混凝土砌块在石灰生产和水泥生产中碳酸盐矿物的分解会排放大量温室气体，导致其温室效应大于轻集料混凝土砌块；酸化效应主要由化石能源燃烧所排放的 SO_2 和 NO_x 引起，粘土实心砖与利废空心砖的酸性气体排放主要来自烧砖过程煤的燃烧，而轻集料混凝土中陶粒的烧结及水泥生产过程产生大量 SO_2 和 NO_x ，导致其酸化效应也较显著，加气混凝土砌块的酸化效应最小；在光化学烟雾影响中，利废空心砖和轻集料混凝土砌块围护结构由于生产过程中 NMVOC 和 CO 的排放量较大，其影响大于粘土实心砖围护结构；粘土实心砖的水体富营养化影响最大，其主导物质是化石能源燃烧造成的 NO_x 排放；人体健康影响的主导物质是粉尘、 SO_2 和 NO_x ，两类烧结砖的人体健康影响大于两类砌块。

不同墙体材料的环境影响的对比结果显示，粘土实心砖作为传统建筑材料，其生产能耗高、资源消耗多、环境污染大，使用粘土实心砖的围护结构具有最大的环境影响。相比粘土实心砖，采用利废空心砖、加气混凝土砌块和轻集料混凝土砌块的建筑围护结构，环境影响分别降低 34%、70% 和 56%。在具有相同保温性能的情况下，采用加气混凝土砌块围护结构具有最优的环境表现。

6 结 论

本文以对建筑保温性能具有关键作用的外墙外保温材料、建筑玻璃窗与墙体材料为研究对象，通过收集典

型节能建材从矿石开采、材料生产、运输、使用、直至最终废弃全生命周期过程的资源、能源消耗与污染物排放数据，利用生命周期评价方法定量分析其环境影响，据此进行低环境负荷材料的择优。

对于建筑外墙外保温材料，若仅考虑墙体的保温性能，EPS 薄抹灰外墙外保温系统的环境协调性优于岩棉薄抹灰外墙外保温系统；但是在综合考虑保温性能和阻燃性能的情况下，岩棉外保温系统则优于 EPS 外保温系统。

对于建筑玻璃窗，再生木塑复合窗和木塑复合窗的年平均环境影响较低，比铝合金窗减少 23% 左右；5 类玻璃窗使用阶段的环境影响均占据主导地位，采用新型材料降低传热系数是改善玻璃窗全生命周期环境表现的有效途径。

对于建筑墙体材料，在具有相同保温性能的情况下，加气混凝土砌块的总环境影响最小，实心粘土砖最大，为加气混凝土砌块的 3 倍以上。

绿色建筑的选材不仅需要材料生产相关过程的资源消耗与环境排放，还需要考虑材料在具体建筑结构中的性能，两者缺一不可。生命周期评价方法能科学、全面地定量评价建筑材料全生命周期的环境影响，确定在实现相同功能的前提下采用何种建筑材料能够获得最优的环境效益。基于生命周期评价方法对节能建材的环境影响分析，不仅有助于新型建筑材料的开发，而且可对绿色建筑的选材提供有力方法与数据支持。

参考文献 References

- [1] Chang Yuan (常远), Wang Yaowu (王要武). *China Civil Engineering Journal* (土木工程学报) [J], 2011 (05): 136-143.
- [2] Qian Bozhang (钱伯章), Zhu Janfang (朱建芳). *Building Energy Efficiency* (建筑节能) [J], 2009 (02): 56-60.
- [3] Liu Wanwen (刘万闻). *New Technology & New Products of China* (中国新技术新产品) [J], 2010 (10): 193.
- [4] Zhou Jungui (周骏贵), Hu Qilong (胡启龙), Lv Peijuan (吕佩娟), et al. *Building Block & Block Construction* (建筑砌块与砌块建筑) [J], 2011 (06): 50-54.
- [5] Li Bing (李斌), Zhang Chunnan (张春因). *Building Science* (建筑科学) [J], 2007 (06): 28-31.
- [6] Xiao Jun (肖君), Zhao Ping (赵平), Liu Rui (刘睿). *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报) [J], 2013 (01): 138-141.
- [7] Chen Wenjuan (陈文娟). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [8] Ma Lili (马丽丽). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [9] Zhao Chunzhi (赵春芝). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. China: China Building Materials Academy, 2005.
- [10] Ma Liping (马丽萍), Jiang Quan (蒋荃), Zhao Chunzhi (赵春

- 芝). *New Building Materials* (新型建筑材料) [J], 2014 (01): 18–21.
- [11] Guo Lu (郭 鹿). *China Building Materials Science & Technology* (中国建材科技) [J], 2007 (06): 7–11.
- [12] Wang Bo (王 波), Wang Yanfei (王燕飞), Cui Ling (崔 玲). *Chinese and Overseas Architecture* (中外建筑) [J], 2003 (6): 107–109.
- [13] Hasan A. *Applied Energy* [J], 1999, 63 (2): 115–124.
- [14] Audenaert A, De Cleyn S H, Buyle M. *Energy and Buildings* [J], 2012, 47: 68–73.
- [15] Sabapathy A, Maithel S. *Building and Environment* [J], 2013, 64: 107–117.
- [16] Koroneos C, Dompros A. *Building and Environment* [J], 2007, 42 (5): 2114–2123.
- [17] Mueller A, Sokolova S N, Vereshagin V I. *Construction and Building Materials* [J], 2008, 22 (4): 703–712.
- [18] Kurama H, Top U B, Karakurt C. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2009, 209 (2): 767–773.
- [19] Huberman N, Pearlmutter D. *Energy and Buildings* [J], 2008, 40 (5): 837–848.
- [20] International Organization for Standardization (ISO), ISO 14044. *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines* [S], 2006.

(编辑 惠 琼)