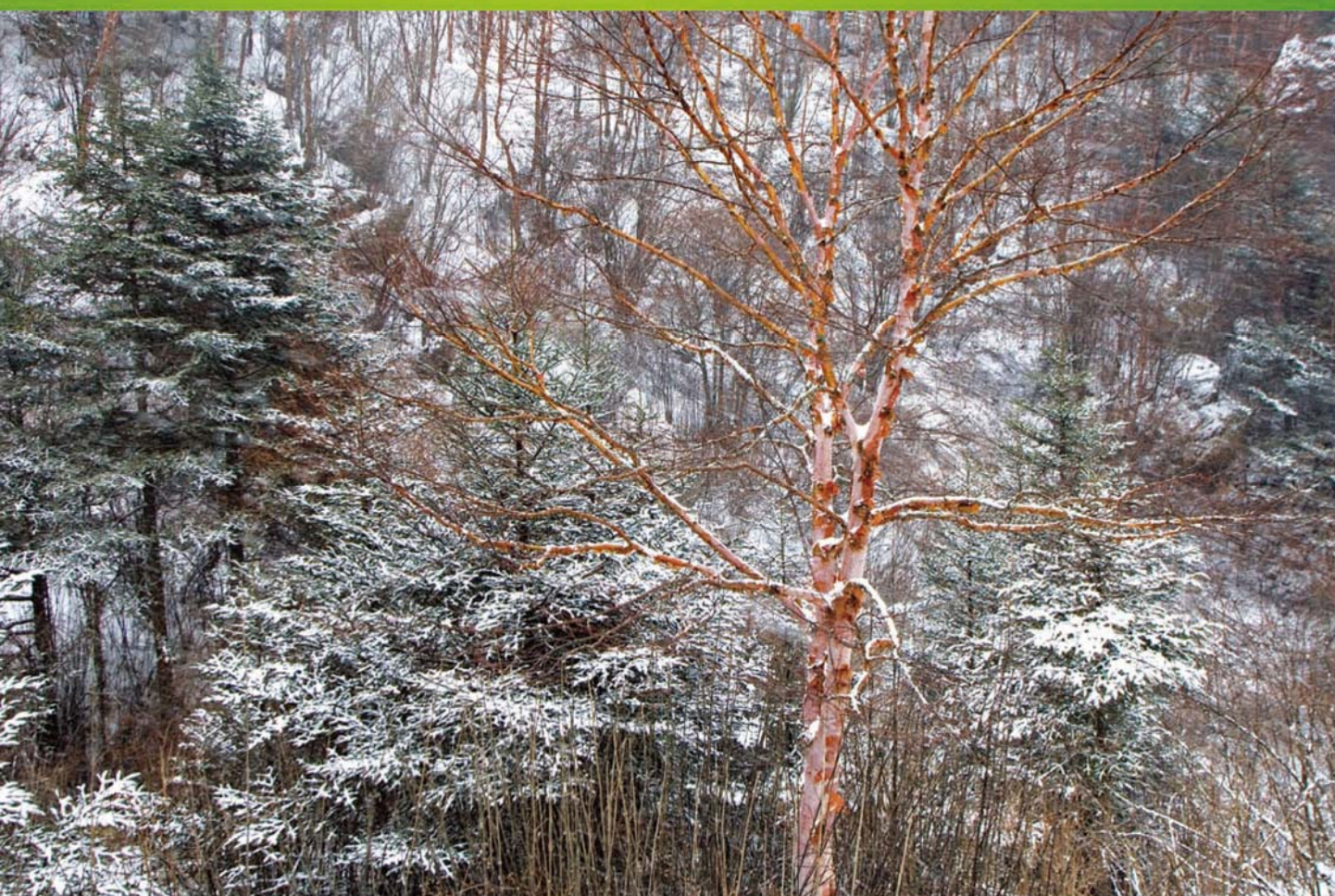


ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

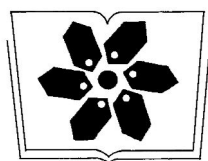
## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第8期 Vol.34 No.8 **2014**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 8 期 2014 年 4 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展..... 张武昌,李海波,丰美萍,等 (1897)
- 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展..... 王晓磊,王 成 (1910)
- 雪地生活跳虫研究进展..... 张 兵,倪 珍,常 亮,等 (1922)

### 个体与基础生态

- 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对  $\text{CO}_2$  浓度及土壤水分的响应.....  
..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (1937)
- 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.....  
..... 康根丽,杨玉盛,司友涛,等 (1946)
- 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态..... 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等 (1956)
- 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响 ..... 平 川,王传宽,全先奎 (1965)
- 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征 ..... 程立平,刘文兆,李 志 (1975)
- 土壤水分胁迫对拉瑞尔小枝水分参数的影响..... 张香凝,孙向阳,王保平,等 (1984)
- 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响..... 赵 顺,黄秋娴,李玉灵,等 (1994)
- 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系..... 李青山,王冬梅,信忠保,等 (2003)
- 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系..... 田 媛,塔西甫拉提·特依拜,李 彦,等 (2012)
- 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响..... 陶巧静,付 涛,项锡娜,等 (2020)
- 岩溶洞穴微生物沉积碳酸钙——以贵州石将军洞为例..... 蒋建建,刘子琦,贺秋芳,等 (2028)
- 桂东北稻区第七代褐飞虱迁飞规律及虫源分析..... 齐会会,张云慧,蒋春先,等 (2039)

### 种群、群落和生态系统

- 鄱阳湖区灰鹤越冬种群数量与分布动态及其影响因素..... 单继红,马建章,李言阔,等 (2050)
- 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响..... 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等 (2061)
- 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局 ..... 陈 云,王海亮,韩军旺,等 (2068)
- 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征 ..... 王肖颖,张 芳,李娟英,等 (2076)
- 云南花椒园中昆虫群落特征的海拔间差异分析..... 高 鑫,张立敏,张晓明,等 (2085)
- 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化..... 郭建国,赵龙浩,徐 丹,等 (2095)
- 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例 ..... 张 华,张 兰,赵传燕 (2102)

## 景观、区域和全球生态

- 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区…………… 张殷波,郭柳琳,王 伟,等 (2109)
- 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响…………… 刘 佳,同小娟,张劲松,等 (2118)
- 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配 …………… 杨玉姣,陈云明,曹 扬 (2128)
- 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势…………… 田大伦,李雄华,罗赵慧,等 (2137)

## 资源与产业生态

- 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估 …………… 吴燕明,吕高明,周 航,等 (2146)

## 城乡与社会生态

- 北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价 …………… 朱连滨,孔祥荣,吴 宪 (2155)
- 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响…………… 宋英石,李 锋,王效科,等 (2164)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 276 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 29 \* 2014-04



**封面图说:** 冷杉红桦混交林雪——冷杉是松科的一属,中国是冷杉属植物最多的国家,约 22 种 3 个变种。冷杉常常在高纬度地区至低纬度的亚高山至高山地带的阴坡、半阴坡及谷地形成纯林,或与性喜冷湿的云杉、落叶松、铁杉和某些松树及阔叶树组成针叶混交林或针阔混交林。冷杉具有较强的耐阴性,适应温凉和寒冷的气候,土壤以山地棕壤、暗棕壤为主。川西、滇北山区的冷杉林往往呈混交状态,冷杉红桦混交林为其中重要的类型。雪被对冷杉林型冬季土壤氮转化影响的研究对揭示高山森林对气候变化的响应及其适应机制提供重要的理论支持。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com



DOI: 10.5846/stxb201311182753

朱连滨,孔祥荣,吴宪.北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价.生态学报,2014,34(8):2155-2163.

作者:Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2155-2163.

## 北京市主要建筑保温材料生命周期 与环境经济效益评价

朱连滨<sup>1,2</sup>, 孔祥荣<sup>3,\*</sup>, 吴 宪<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学经济与管理学院, 北京 100022; 2. 北京市质量技术监督局, 北京 100029;

3. 北京建筑材料材料科学研究总院有限公司, 北京 100041)

**摘要:**在低碳、绿色、环保、生态成为当代城市文明的主题下,建筑保温材料作为建筑节能最主要的解决途径之一备受关注,以北京市 75% 节能 6 层模拟住宅为例,利用 DeST-h 软件计算得出其墙体传热系数  $K$  值为  $0.40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ,节约电量  $42.31 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ,通过计算可节约标煤  $17.09 \text{ kg/m}^2$ ,减少  $\text{CO}_2$  排放量  $42.19 \text{ kg/m}^2$ ,减少  $\text{SO}_2$  排放量  $1.27 \text{ kg/m}^2$ ,减少  $\text{NO}_x$  排放量  $0.635 \text{ kg/m}^2$ ,减少煤粉尘排放量  $11.5 \text{ kg/m}^2$ ,减少煤烟尘排放  $5.75 \text{ kg/m}^2$ ,环境效益  $36.66 \text{ 元/m}^2$ 。并利用生命周期原理进行简化计算出 4 种常见保温材料岩棉、XPS、EPS 和聚氨酯的 50a 建筑寿命周期中的总能耗分别为  $6.55 \times 10^6$ 、 $6.63 \times 10^6$ 、 $6.58 \times 10^6$ 、 $6.77 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2$ ,其中不同阶段能耗所占的比例从大到小依次为运行能耗>生产能耗>运输能耗。保温材料资金回收年限、环境效益回收年限和能耗回收年限的大小顺序:聚氨酯>XPS≈EPS>岩棉,三者顺序基本一致。并对建筑外墙保温材料科学评价与发展趋势进行探讨。

**关键词:**建筑外墙保温材料; DeST 软件; 建筑能耗; 生命周期评价; 碳交易; 绿色建筑

## Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing

ZHU Lianbin<sup>1,2</sup>, KONG Xiangrong<sup>3,\*</sup>, WU Xian<sup>2</sup>

1 School of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

2 Beijing Municipal Administration of Quality and Technology Supervision, Beijing 100029, China

3 Beijing Building Materials Academy of Sciences Research, Beijing 100041, China

**Abstract:** As the idea of low carbon, green, environmental protection and ecology becomes the civilization symbol of modern city, thermal insulation materials in buildings, as an effective way to reduce energy cost in architecture, have attracted numerous attentions up to now. In the present report, DeST-h software was adopted to investigate the energy saving model, which can save 75% energy cost, used in 6-floor housing in Beijing. The heat transfer coefficient ( $K$ ) was calculated to be  $0.40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , which means it can save about  $42.31 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  per square meter. Based on these calculations, it was found that  $17.09 \text{ kg}$  coal can be saved per square meter area in the building, resulting in reducing  $42.19 \text{ kg}$  carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ),  $1.27 \text{ kg}$  sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ),  $0.635 \text{ kg}$  nitrogen oxide ( $\text{NO}_x$ ),  $11.5 \text{ kg}$  coal powder dust and  $5.75 \text{ kg}$  coal smoke dust emission per square meter area in the building. These reductions generate — $36.66 \text{ RMB}$  profit per square meter area in building. In addition, the total energy savings of the four common thermal insulate materials (rock wool, XPS, EPS and Polyurethane) in 50 years was respectively calculated to be  $6.55 \times 10^6$ ,  $6.63 \times 10^6$ ,  $6.58 \times 10^6$ ,  $6.77 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2$ , where the proportion of energy consumption in different stages from large to small is operating energy consumption > production energy consumption > transportation energy consumption. The order of payback period of investment, environmental benefit payback period and energy payback period: polyurethane > XPS ≈ EPS > rock wool, the order is basically consistent. And the scientific evaluation and development trend of building external insulation materials are discussed.

**基金项目:**北京市科技新星计划项目(2011028);北京市优秀人才培养资助项目(2012D008006000004)

**收稿日期:**2013-11-18; **修订日期:**2014-03-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kxr0918@163.com

$10^6\text{kJ/m}^2$  based the theory of LCA. Furthermore, the energy consumption proportion differs at different stage. The largest one is operation energy consumption and followed by production energy consumption and transportation energy consumption. In addition, the total capital payback period of thermal insulator materials, environmental benefits and energy saving of these four kinds of materials are also different from each other. The longest capital payback period is found to be polyurethane and followed by XPX and EPS, and the shortest one is rock wool. What's more, the scientific evaluation and the developing trends on building's exterior all thermal insulation materials were also outlined in this report.

**Key Words:** Thermal insulation materials of buildings' exterior wall; DeST software; buildings energy consumption; life cycle assessment; carbon trading; green buildings

建筑节能对全国节能具有重要意义,墙体是围护结构的主体,要降低建筑的能耗,重要途径之一是墙体节能即建筑保温。外墙外保温材料作为建筑保温的重要功能材料,种类繁多,其绿色化和生态化是一个不可忽视的重要问题。微观的建筑能耗研究专注于特定或是典型的个体建筑能耗,又分为传统个体建筑热工分析和建筑“从摇篮到坟墓”生命周期评价(LCA)研究。其中,传统的个体建筑热工分析作为主流研究领域,主要研究建筑在运行阶段的能量消耗<sup>[1]</sup>。随着电脑辅助设计(CAD)技术的不断发展,计算机辅助模拟也逐渐被运用于建筑能耗研究领域。清华大学热能系空调教研组开发了一套集成于CAD之上的建筑热环境分析软件DeST(Designer'S Simulation Toolkits)<sup>[1]</sup>,该程序能够在模拟对象特定参数给定的条件下,模拟计算出该建筑全年的基础室内、自然室温、能耗负荷等。生命周期评价理论<sup>[2-11]</sup>既是一种评价方法,又是一种环境管理工具,在工业系统的可持续发展起到重要作用。但是,国内近年来有关建筑生命周期评价研究关于建筑运行能源消耗的分析的完整性和精度较低,往往不能代表真正意义上的建筑生命周期能耗研究。利用DeST软件计算建筑生命周运行能耗与LCA研究方法结合起来对建筑保温材料的有关评价鲜见报道。

保温材料种类选择、使用厚度和节能效果参数是目前重要的关注点之一,这是因为保温材料的选择不经关系到节约能源的问题,还关系到后续建筑垃圾造成的环境污染及人类的健康问题,需要综合考虑保温材料的资源能耗情况和生态破坏水平。根据不同地区因地制宜和生命周期原理分析选择合适的建筑外墙保温材料对建筑节能减碳具有重要的意义。李兆坚等<sup>[9]</sup>通过LCA理论研究保温材料的能耗回收期与寿命期之间的关系。谷立静等<sup>[10]</sup>研究

了北京地区住宅的运行能耗和环境负荷与保温厚度之间的关系。马丽萍等<sup>[11]</sup>,利用eBalance生命周期分析软件计算出我国典型摆锤法岩棉板功能单位产品的不可再生资源消耗、能源消耗和温室效应影响指标。

2013年1月1日北京市率先全国率先执行节能75%的设计标准,如何指导北京市建筑外墙保温材料健康有序的发展并为其其他地区提供借鉴,本文利用DeST-h软件对北京市75%节能居住建筑设计进行建模,并结合LCA评价研究方法对主要建筑外墙保温材料岩棉、XPS、EPS、聚氨酯保温板的生命周期评价、经济效益评价,为北京市外墙保温材料选择、发展和监管提供有益参考。

## 1 75%节能模型的DeST模拟计算

DeST-h是建筑环境及HVAC系统模拟的软件平台<sup>[12]</sup>,主要用于住宅建筑热特性的影响因素分析、住宅建筑热特性指标的计算、住宅建筑的全年动态负荷计算、住宅室温计算、末端设备系统经济性分析等领域。DeST-h软件不仅在冷热负荷的全年累计结果上能够算出令人满意的结果,在逐时动态室温的模拟上,也和其他国外软件计算的结果非常一致。

### 1.1 建筑模型

根据DB11/891—2012《北京居住建筑节能设计标准》建造一栋6层南北向的住宅建筑,建筑层高为2.8m,每层3个房间,每个房间尺寸为8.0m×12.0m,外围护结构总尺寸为24m×12m×16.8m(长×宽×高),建筑模型如图1所示。

### 1.2 热工参数设计

建筑地理位置模拟地点北京市。室外气象参数选择该建筑模型位于北京市东经116.3度,北纬39.8度,根据建筑热工分区,北京市属于寒冷地区。室外

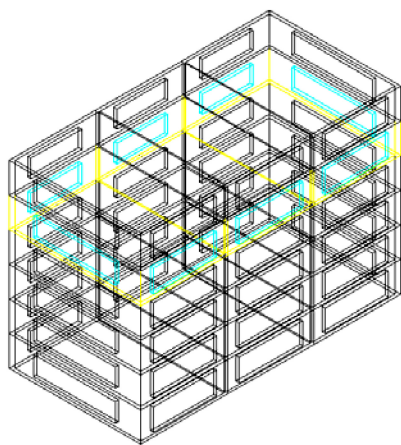


图1 建筑模型  
Fig.1 Building model

气象计算参数采用了北京地区典型气象年的室外气象参数。所有的气象数据是基于中国国家气象局对

193 个城市 20a 的实测数据通过一套随机算法模拟计算生成。外部气候参数基本信息和室内热环境设计指标分别见表 1 和表 2。

表 3 给出了模拟建筑的不同朝向的窗墙比和外窗传热系数,其中遮阳系数  $Sc = 0.45$ ,墙体材料参数假设砂浆和粉刷层平均导热系数为:  $0.151 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,密度  $668 \text{ kg/m}^3$ ,钢筋混凝土导热系数为  $1.547 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,密度为  $2400 \text{ kg/m}^3$ 。设计标准  $Q_h$  为  $10.5 \text{ W/m}^2$ 。

北京采暖季日期为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日,空调季日期为 6 月 1 日至 8 月 30 日。耗热量指标其它没有注明的数据,均为来源 DB11/891—2012《北京居住建筑节能设计标准》或软件默认值。通过 DeST 软件计算得到:外墙保温面积与建筑面积比值 32.7%,传热系数  $K$  值为  $0.40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 。

表 1 北京市气候参数

Table 1 Parameter climate in Beijing

城市 City	采暖度日数 Heating degree day	空调度日数 Cooling degree day	冬季空调室外 计算干球温度/ $^{\circ}\text{C}$ Winter air- conditioning outdoor design dry-bulb temperature	冬季采暖室外 计算干球温度/ $^{\circ}\text{C}$ Winter heating outdoor design dry-bulb temperature	夏季空调室外 计算干球温度/ $^{\circ}\text{C}$ Summer air- conditioning outdoor design dry-bulb temperature	夏季空调室外 计算湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$ Summer air- conditioning outdoor design wet-bulb temperature
北京	3066	50	-12	-9	33.2	26.4

表 2 全年室内热环境设计指标

Table 2 Annual Interior thermal environment design parameter

卧室和起居室 Bed room and living room	冬季采暖室内热环境设计指标 Winter heating Interior thermal environment Design Parameter		夏季空调室内热环境设计指标 Summer air-conditioning Interior thermal environment Design Paramete	
	设计温度 Design temperature	换气次数 Air circulation ratio once per hour	设计温度 Design temperature	换气次数 Air circulation ratio once per hour
	18 $^{\circ}\text{C}$	1 次/h	26 $^{\circ}\text{C}$	1 次/h

表 3 不同朝向的窗墙比和外窗传热系数

Table 3 Area ratio of window to wall in different orientations and external window heat transfer coefficient

朝向 Orientation	窗墙比 Area ratio of window to wall	外窗传热系数/ $(\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1})$ External window heat transfer coefficient
北 North	0.35	1.8
东 East	0.4	1.8
西 West	0.4	1.8
南 South	0.55	1.8

遮阳系数 shading coefficient;  $Sc = 0.5$

### 1.3 热工模拟与效益计算

表 4 给出了按照参考模型(未作外墙保温模型建筑)与 75%节能模型(外墙保温传热系数  $0.40 \text{ W}$

$\text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  模型建筑)的项目采暖和空调负荷统计。75%节能模型与参考模型相比,全年制热耗电量能减少  $42.96 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ,制冷耗电量能增加了浪费能

耗  $0.65 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , 但全年节约总能耗  $42.31 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。而  $1 \text{ m}^2$  保温板的每年节能高达  $129.39 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。根据国家统计局中国环境科学研究院资料 (2005 年) 每节约 1 度电, 就相应节约  $0.404 \text{ kg}$  标准煤, 同时减少污染排放  $0.997 \text{ kg}$  二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、 $0.03 \text{ kg}$  二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、 $0.015 \text{ kg}$  氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )、

$0.272 \text{ kg}$  碳粉尘、 $0.136 \text{ kg}$  烟尘。其中烟尘排放价值  $275.2 \text{ 元/t}$ ,  $\text{NO}_x$   $631.6 \text{ 元/t}$ , 二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )  $20000 \text{ 元/t}$ , 二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 减排价值  $160 \text{ 元/t}^{[13]}$ 。75% 节能模型与参考模型相比, 按照建筑面积计算, 其能源效益与经济效益比较见表 4。

表 4 75% 节能模型与参考模型能源效益与环境效益表

Table 4 Energy efficiency and environmental benefits tables of Reference model and 75% model of energy-saving project

项目 Items	参考模型 Reference model	75% 节能模型 75% model of energy- saving project	节能效益计算 Energy benefits
全年累计热负荷指标/( $\text{kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ) Total annual heating load indicators	72.78	29.82	节约能耗 $42.96 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ Energy saving $42.96 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$
全年累计冷负荷指标/( $\text{kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ) Total annual cooling load indicators	25.47	26.12	浪费能耗 $0.65 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ Energy wastomg $0.65 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$
折合标准煤消耗量/( $\text{kg/m}^2$ ) Consumption of standard coal equivalent	39.69	22.60	节约标煤 $17.09 \text{ kg/m}^2$ Saving of standard coal $17.09 \text{ kg/m}^2$
$\text{CO}_2$ 排量/( $\text{kg/m}^2$ ) $\text{CO}_2$ emission	97.96	55.77	减少排放 $42.19 \text{ kg/m}^2$ $\text{CO}_2$ emission reducing $42.19 \text{ kg/m}^2$
$\text{CO}_2$ 排量经济效益/( $\text{元/m}^2$ ) $\text{CO}_2$ emission benefits yuan/ $\text{m}^2$	15.67	8.92	节约费用 $6.75 \text{ 元/m}^2$ Saving benefits $6.75 \text{ yuan/m}^2$
$\text{SO}_2$ 排量/( $\text{kg/m}^2$ ) $\text{SO}_2$ emission	2.948	1.678	减少排放 $1.27 \text{ kg/m}^2$ $\text{SO}_2$ emission reducing
$\text{SO}_2$ 排量经济效益/( $\text{元/m}^2$ ) $\text{SO}_2$ emission benefits yuan/ $\text{m}^2$	58.96	33.56	节约费用 $25.4 \text{ 元/m}^2$ Saving benefits $25.4 \text{ yuan/m}^2$
$\text{NO}_x$ 排量/( $\text{kg/m}^2$ ) $\text{NO}_x$ emission	1.474	0.839	减少排放 $0.635 \text{ kg/m}^2$ $\text{NO}_x$ emission reducing $0.635 \text{ kg/m}^2$
$\text{NO}_x$ 排量经济效益/( $\text{元/m}^2$ ) $\text{NO}_x$ emission benefits yuan/ $\text{m}^2$	0.931	0.53	节约费用 $6.82 \text{ 元/m}^2$ Saving benefits $6.82 \text{ yuan/m}^2$
碳粉尘排量/( $\text{kg/m}^2$ ) Carbon dust emission	26.72	15.22	减少排放 $11.5 \text{ kg/m}^2$ Carbon dust emission reducing $11.5 \text{ kg/m}^2$
碳粉尘经济效益/( $\text{元/m}^2$ ) Carbon dust emission benefits yuan/ $\text{m}^2$	7.348	4.186	节约费用 $3.16 \text{ 元/m}^2$ Saving benefits $3.16 \text{ yuan/m}^2$
烟尘排量/( $\text{kg/m}^2$ ) smoke dust emission	13.36	7.61	减少排放 $5.75 \text{ kg/m}^2$ smoke dust emission reducing $5.75 \text{ kg/m}^2$
烟尘经济效益/( $\text{元/m}^2$ ) smoke dust emission benefits yuan/ $\text{m}^2$	3.674	2.903	节约费用 $0.771 \text{ 元/m}^2$ Saving benefits $0.771 \text{ yuan/m}^2$
综合排放经济费用/( $\text{元/m}^2$ ) Comprehensive economic costs of emissions	86.76	50.10	节省费用 $36.66 \text{ 元/m}^2$ Saving benefits $36.66 \text{ yuan/m}^2$

按照民用电价  $0.52 \text{ 元 kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$  进行计算

表 5 给出了几类保温材料投资成本建筑生命周期 50a 回收周期。从生产成本上考虑 XPS 板是最经济的, 生产成本大小依次为聚氨酯 > 岩棉 > XPS > EPS。从投资资金回收年限上看, 聚氨酯回收年限最长为 9.8a, 几种保温材料资金回收年限其大小顺序依次为聚氨酯 > XPS > EPS > 岩棉。而从预期环境效益上看, 岩棉环境效益回收年限为 2.2a, 几种保温材料环境效益回收年限大小依次为聚氨酯 > XPS = EPS > 岩棉。按照北京 75% 节能在所计算的保温厚度范

围内, 保温材料的生产投资成本在 3—10a 内可回收, 而环境负荷要 2—6a 才能回收。

按照北京市统计局发布的数据, 北京市 2012 年住宅竣工面积为  $1522.7 \text{ 万 m}^2$  来进行计算, 按照达到 75% 节能指标计算, 仅居住建筑每年可以节约  $26.02 \text{ 万 t/a}$  标煤, 减少  $\text{CO}_2$  排放量为  $64.24 \text{ 万 t/a}$ , 减少  $\text{SO}_2$  排放量  $1.93 \text{ 万 t/a}$ , 减少  $\text{NO}_x$  排放量  $0.97 \text{ 万 t/a}$ , 减少碳粉尘排放量  $17.5 \text{ 万 t/a}$ , 减少碳烟尘排放量  $8.76 \text{ 万 t/a}$ , 减少民用用电费用  $3.42 \text{ 亿元/a}$ , 潜在环



境效益 5.58 亿元/a, 计算结果表明北京地区 75% 外墙外保温系统节能具有较好的经济效益和环境效益。

表 5 几类保温材料投资成本建筑生命周期 50a 回收周期

Table 5 Several types of building insulation materials life cycle cost of investment payback period of 50 years

保温材料 Thermalinsulation material	生产成本/(元/m <sup>2</sup> ) Cost of production	使用寿命/a Service life	资金回收年限/a Capital payback	环境效益回收年限/a Environment benefit recycling age limit
岩棉 Rockwool	80	50	3.6	2.2
EPS	60.5	25	5.6	3.4
XPS	63.7	25	5.8	3.4
聚氨酯 Polyurethane	108	25	9.8	5.8

## 2.1 外墙保温材料的生命周期模型构建

本文中建筑物的生命周期总能耗可用下式计算<sup>[2,4,14-16]</sup>:

$$E_{\text{Tot}} = E_{\text{manu}} + E_{\text{erect}} + E_{\text{occup}} + E_{\text{demo}} + E_{\text{dis}} \quad (1)$$

式中,  $E_{\text{Tot}}$  为建筑物生命周期总能耗 (kJ/m<sup>2</sup>);  $E_{\text{manu}}$  为建材生产阶段总能耗 (kJ/m<sup>2</sup>);  $E_{\text{erect}}$  为建造施工阶段总能耗 (kJ/m<sup>2</sup>);  $E_{\text{occup}}$  为居住使用阶段总能耗 (kJ/m<sup>2</sup>);  $E_{\text{demo}}$  为破坏拆除阶段总能耗 (kJ/m<sup>2</sup>);  $E_{\text{dis}}$  为废旧建材处置阶段总能耗 (kJ/m<sup>2</sup>)。

其他材料如钢筋水泥具有一定的不可替代性, 而保温材料是节能的主体, 为此仅考虑保温材料, 并对生命周期模型进行合理简化<sup>[2,4]</sup>, 简化为 3 个阶段费用: 保温材料生产费用, 材料运输费用, 采暖空调运行费用。单位面积外墙的总费用由保温材料生产耗费, 运输耗费和建筑物采暖空调运行耗费 3 部分组成。即:

$$E_{\text{Tot}} = E_{\text{manu}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{use}} \quad (2)$$

式中,  $E_{\text{manu}}$  为保温材料生产阶段能耗 (kJ/m<sup>2</sup>); 包括保温材料直接的能耗和生产所需要的一次能源、开采、运输, 以及生产上一级材料的能耗。  $E_{\text{trans}}$  为保温材料运输阶段能耗 (kJ/m<sup>2</sup>);  $E_{\text{use}}$  为采暖空调运行能耗 (kJ/m<sup>2</sup>)。

保温材料生产阶段能耗  $E_{\text{manu}}$ :

$$E_{\text{manu}} = \rho \delta (1+w/100) E_p \quad (3)$$

如果考虑到建筑生命周期内的保温材料材料生产能耗:

$$E_{\text{manu}} = \rho \delta (1+w/100) E_p + [Y_{\text{bui}}/Y_{\text{mat}} - 1] \rho \delta (1+w/100) E_p \quad (4)$$

式中,  $w$  为在制造过程中保温材料被废弃的比率 (%),  $\rho$  为保温材料的密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $\delta$  为保温材料的

厚度 (m),  $E_p$  为单位建材的生产能耗 (kJ/m<sup>2</sup>)。

保温材料运输阶段的能耗  $E_{\text{trans}}$ :

$$E_{\text{trans}} = E_{\text{trans mat}} + E_{\text{trans renov}} + E_{\text{trans dis}} \quad (5)$$

$$E_{\text{trans mat}} = \rho \delta (1+w/100) D T_c \quad (6)$$

$$E_{\text{trans dis}} = \rho \delta (1+w/100) d T_c \quad (7)$$

$$E_{\text{trans renov}} = \rho \delta (1+w/100) (d+D) T_c \quad (8)$$

在建筑的整个生命周期当中 (参照普通建筑设计标准, 50a 寿命为准) 还应考虑可能更换时的保温材料运输的消耗。

$$E_{\text{trans}} = Y_{\text{bui}}/Y_{\text{mat}} \rho \delta (1+w/100) (d+D) T_c \quad (9)$$

式中,  $w$  为在制造过程中保温材料被废弃的比率 (%),  $\rho$  为保温材料的密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $\delta$  为保温材料的厚度 (m),  $D$  为保温材料从供应商运到建筑工地的平均距离 (km),  $d$  为运送保温材料维修所产生的废弃物到建筑垃圾掩埋场的距离 (km),  $T_c$  为运输单位保温材料的能耗 (kJ kg<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>)

建筑运行采暖制冷能耗  $E_{\text{use}}$ , 包含有采暖运行能耗和制冷运行能耗, 北京地区采暖度日数为 3066, 而空调度日数为 50, 在本文中制冷能耗与采暖能耗相比, 制冷能耗可以忽略不计。

$$E_{\text{use}} = 86.4 \text{HDD}_{\text{NHD}} Y_{\text{mat}} / [(R_w + \delta/\beta\lambda) \eta_{\text{NHD}}] \quad (10)$$

式中,  $\eta_{\text{NHD}}$  为供热系统运行效率,  $R_w$  为除保温层外墙体热阻之和,  $Y_{\text{mat}}$  为保温材料的使用寿命。

## 2.2 不同保温材料各阶段能耗计算

保温材料被废弃的比率  $w$  取值为 5, 保温材料当地制造, 运输方式为公路运输, 保温材料从供应商到建筑工地平均距离  $D$  和运送保温材料维修所产生的废弃物到建筑垃圾掩埋场的距离  $d$  均取值 50km, 燃烧为柴油, 运输能耗方式  $T_c$  为 1.84184 kJ kg<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup><sup>[17]</sup>, 北京市燃气炉热效率  $\eta_{\text{NHD}}$  取值 0.85。  $E_p$ 、



$\beta$ 、 $\rho$ 、 $\delta$  的取值按照表 6 进行取值。表 7 给出了几种保温材料各个阶段能耗。按照建筑寿命 50a, 岩棉无机保温材料使用寿命 50a, 有机保温材料使用寿命 25a 计算, 全生命周期内生产阶段能耗的大小顺序为聚氨酯>XPS=EPS>岩棉, 运输阶段能耗的大小顺序为岩棉>XPS>聚氨酯>EPS, 采暖运行阶段能耗相同, 全生命周期总能耗的大小顺序为聚氨酯>EPS>XPS>岩棉。表 8 给出了保温材料在建筑生命周期

50a 内各个阶段能耗所占周期总能耗比例, 对于同一种类保温材料而言, 其运行过程中能耗最大, 生产阶段能耗次之, 运输阶段能耗最少, 运输阶段的能耗与运行过程和生产阶段能耗相比可以忽略不计, 对于特定的建筑运行能耗为定值的情况下, 外墙保温材料在全生命周期的能耗很大程度上取决于保温材料生产阶段的能耗。

表 6 几种建筑保温材料的取值表

Table 6 Several of insulating materials the value list

保温材料 Thermal insulation material	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\beta$	$\rho/(kg/m^3)$	$c_p/(元/m^3)$	使用年限/a Service life	原始能源的 消耗/(MJ/kg) Primary energy consumption	使用厚度/m Thickness of using
岩棉 Rockwool	0.040	1.10	150	850	50	15—20	0.10
XPS	0.030	1.15	30	550	25	85—95	0.11
EPS	0.039	1.05	18	850	25	95—110	0.075
聚氨酯 Polyurethane	0.024	1.10	35	1800	25	115—120	0.06

部分数据来源 DB11/891—2012《北京居住建筑节能设计标准》附录 C

表 7 几种建筑保温材料建筑寿命 50 年各个阶段能耗

Table 7 Energy consumption of 50 years for each stage of thermal insulation materials for building life

保温材料 Thermalinsulation material	$E_{manu}/(kJ/m^2)$	$E_{trans}/(kJ/m^2)$	$E_{use}/(kJ/m^2)$	$E_{Tot}/(kJ/m^2)$
岩棉 Rockwool	$3.15 \times 10^5$	2901	$6.23 \times 10^6$	$6.55 \times 10^6$
EPS	$3.95 \times 10^5$	765	$6.23 \times 10^6$	$6.63 \times 10^6$
XPS	$3.95 \times 10^5$	870	$6.23 \times 10^6$	$6.58 \times 10^6$
聚氨酯 Polyurethane	$5.30 \times 10^5$	812	$6.23 \times 10^6$	$6.77 \times 10^6$

表 8 保温材料在建筑生命周期 50a 内各个阶段能耗所占周期总能耗比例

Table 8 Energy consumption ratio of 50 years for each stage of thermal insulation materials for building life

保温材料 Thermalinsulation material	$E_{manu}$	$E_{trans}$	$E_{use}$
岩棉 Rockwool/%	4.80	0.044	95.156
EPS/%	5.96	0.012	94.028
XPS/%	6.00	0.013	93.987
聚氨酯 Polyurethane	7.82	0.012	92.168

## 2.3 结果讨论

常见保温材料的生命周期能耗计算结果表明全生命周期内生产阶段能耗的大小顺序为聚氨酯>XPS=EPS>岩棉, 运输阶段能耗的大小顺序为岩棉>XPS>聚氨酯>EPS, 采暖运行阶段能耗相同, 全生命

周期总能耗的大小顺序为聚氨酯>EPS>XPS>岩棉。运输能耗和生产能耗及运行能耗相比可以忽略不计, 因此, 全生命周期能耗可以进一步简化为保温材料的生产能耗和保温材料运行过程中的运行能耗。建筑保温材料的全生命周期能耗可以进一步简化为:

$$E_{Tot} = E_{manu} + E_{use} \quad (11)$$

$$R_{energy} = E_{manu} / E_{YUse} \quad (12)$$

式中,  $R_{energy}$  表示能耗回收周期(a);  $E_{YUse}$  表示做保温措施时和未做保温建筑相比单位面积建筑节能能量( $kJ/m^2$ )。

根据式(10)计算的结果, 50a 建筑生命周期内实施 75% 节能时建筑运行能耗为  $6.23 \times 10^6 kJ/m^2$ , 而通过 DeST 软件计算的结果是参考模型和 75% 节能模型 50a 建筑生命周期内运行能耗为  $1.758 \times 10^7 kJ/m^2$ ,  $1.006 \times 10^7 kJ/m^2$ , 那也就意味着 50a 建筑生命周期内实施 75% 节能可以节约能耗  $7.52 \times 10^6 kJ/m^2$ , 这与利用式(10)计算的结果有 20.7% 的偏差, 式(10)的计算中略去了建筑制冷能耗。但随着建筑节能指标的提高, 制冷能耗反而会有所增加, 在某些程度上就不能忽略。

通过以上分析认为, 运用 DeST 软件计算出的建筑运行采暖制冷能耗  $E_{use}$  具有更好的参考作用。建

议建筑保温材料的全生命周期评价中对运行阶段的能耗进行修正。75%节能模型在 50a 建筑生命周期内每年可以节约能耗  $E_{Yuse}$  为  $1.504 \times 10^5 \text{ kJ/m}^2$ , 这样根据式 (12) 计算出按照北京 75% 节能的保温厚度范围, 岩棉、EPS、XPS 和聚氨酯建筑保温材料的能耗回

收期分别为 2.09、2.62、2.62 和 3.52a, 结果见表 10。几种建筑外墙保温材料的能耗回收期的大小顺序: 聚氨酯>XPS $\approx$ EPS>岩棉与保温材料资金回收年限及环境效益回收年限的顺序基本一致。

表 10 几种建筑保温材料建筑能耗回收年限表

Table 10 Energy consumption recovery period of several kinds of building insulation materials

保温材料 Thermalinsulation material	$E_{manu}/$ ( $\text{kJ/m}^2$ )	$E_{use}/$ ( $\text{kJ/m}^2$ )	$E_{Yuse}/$ ( $\text{kJ/m}^2$ )	能耗回收年限/a Energy consumption recovery period, year
岩棉 Rockwool	$3.15 \times 10^5$	$7.52 \times 10^6$	$1.504 \times 10^5$	2.09
EPS	$3.95 \times 10^5$	$7.52 \times 10^6$	$1.504 \times 10^5$	2.62
XPS	$3.95 \times 10^5$	$7.52 \times 10^6$	$1.504 \times 10^5$	2.62
聚氨酯 Polyurethane	$5.30 \times 10^5$	$7.52 \times 10^6$	$1.504 \times 10^5$	3.52

### 3 外保温材料科学评价与政策发展趋势

对建筑保温材料的科学评价仍是一个复杂而又非常值得研究的课题。王波等<sup>[18]</sup>提出了“生态建筑材料”的概念, 指在满足使用要求的前提下, 使得建筑材料的开发、生产和使用过程中的资源和能源消耗少, 对生态环境影响小, 可以再生循环利用的建筑的建筑材料。国外文献<sup>[19-25]</sup>在对保温材料进行 LCA 分析的同时, 还进行经济效益和环境效益评价, 显现出 LCA 与经济分析结合的发展趋势。可持续 LCA 研究更受到关注, 这和传统的 LCA 研究不同, 评价内容包括环境、经济、社会 3 个方面。环境方面包括并不仅限于能源消耗、地球变暖、人体毒性、光化学臭氧诱导、酸化、富营养化、非生物资源的枯竭、臭氧消耗、生态毒性、PM2.5、PM10 等; 经济方面包括采掘费、制造费、废弃物处理费、电费、设备费、燃料费、原料费、收入、运输费用、财税政策等; 社会方面包括工人收入、女性就业率、非法用工比例、工人健康检查就诊比例、事故率、童工、工人社会福利、差距(行业、收入)等。对建筑保温材料可持续性评价还需要做很多相关研究工作, 在保温材料的燃烧等级提高、导热系数降低、保温系统耐候性和耐火性能的提高等技术性问题还有待进一步加大研究。2012 年 7 月国家工业和信息化部在能源之星的产品评价实施方案中, 要求企业提供基于 LCA 的产品生态报告。工业和信息化部、发展改革委、环境保护部发布了《关于开展工业产品生态设计的指导意见》工信部联节

[2013]58 号文建议逐步建立产品生态设计基础数据库, 试行产品生命周期评价。但是, LCA 法开发时间长; 成本高; 需要用户提供完整的需求, 对于需求不确定情况不适应; 强调用户的参与, 但用户与开发人员的交流不够直接; 开发过程较为复杂, 不易适应环境的变化。

卓越质量观认为, 在可持续发展理念的基础上, 将资源节约、环境保护等内容增加到保温材料产品质量的内涵中, 环境经济效益评价已经成为衡量建筑保温材料质量和产业发展水平的重要方面之一, 其技术参数的保证对于环境经济效益评价、生态城市建设具有决定性作用。于此同时建筑保温材料在不断提升其生态化的同时, 也可能会引发建筑保温产品其他质量不确定性的风险, 如近年来频发的建筑外保温材料火灾事故和外墙外保温墙体脱落等。根据《环境保护部办公厅文件》环办(2009)121 号“关于严格控制新建使用含氢氯氟烃生产设施的通知”中发泡行业禁止新建以含氢氯氟烃为发泡剂的聚氨酯泡沫和挤出聚苯乙烯泡沫生产装置(线), 为建筑外保温材料寻找合适的绿色发泡剂是目前保温材料生产需要解决的任务之一。随着对有机保温材料燃烧性能的级别提高, 保温材料对无卤阻燃剂的需求也越来越强烈。新的保温材料阻燃体系, 添加以磷系化合物和金属氢氧化物为主无卤无公害阻燃剂或有硅系阻燃剂及氮系等新型阻燃剂, 燃烧时发烟量小, 不产生有毒、腐蚀性气体。对保温材料燃烧后的性能综合评价等技术指标也会在一定程度上影

响保温材料的选择与评价。

图 2 给出了建筑保温材料全生命周期中的过程及相关主体。如何从建筑保温材料的全生命周期过程中科学评价、促进建筑保温材料环境经济效益属性同时兼顾产品其他质量特性,有序推进我国生态化城镇建设,涉及到材料科学、质量管理、生态学、建筑设计及施工管理等多种学科,也同时涉及到产品质量监督部门、工商行政管理部门、建设管理部门、消防管理部门、环保管理部门、规划管理部门等政府管理部门,只有通过官、产、学、研等部门的通力合作才能全面开展建筑保温的循环经济,推行清洁生产,

实现整个城市的生态转型,从社会-经济-自然复合生态系统的视角来综合考虑城市的发展<sup>[26]</sup>。在我国碳减排的机遇和重要挑战下,政府作为指导者、监督者和推动者,需要通过制定合理的政策将推行绿色建筑的宏观动力真正转化为微观动力。以清洁生产和蓝天计划为前提,以建筑外墙保温材料的深入科学研究为基础,以全生命周期评价为工具,以企业诚信为根本,运用好碳交易市场导向和绿色建筑评价政府政策引导两个指挥棒,通过经济、立法、标准、财税等手段规范和推广绿色生态建筑保温材料,加快推进我国生态、低碳工业化和城镇化的进程。

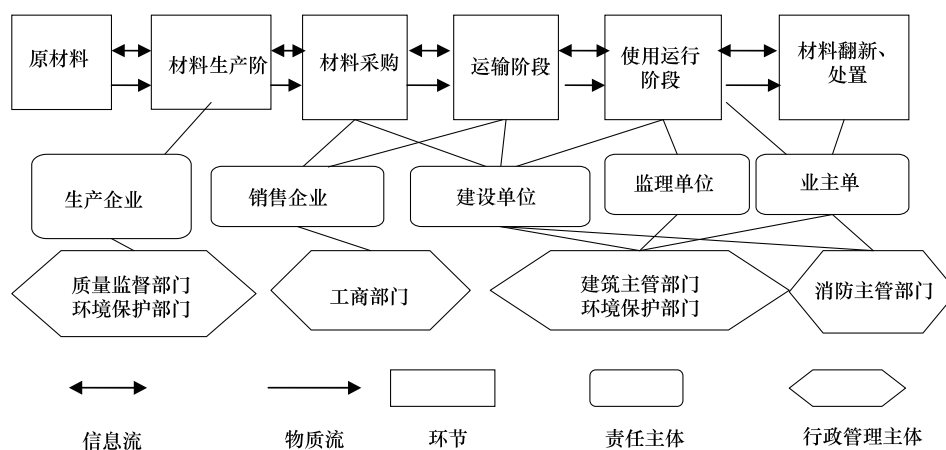


图 2 建筑保温材料生命周期流程及相关主体

Fig.2 Scheme of building insulation materials life cycle processes and related subject

## References:

- [1] Liu J R, Wang R S, Yang J X. Comparison of environmental effects of two family housing types. *City Environment and Ecology*, 2003, 16(2):34-64.
- [2] Wang F. Multidisciplinary optimization research in insulation thickness of building envelope based on cost [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [3] Ma M Z, Zhang X. Energy-saving emission reduction benefits of building insulation based on LCA. *Environmental Engineering*, 2008, 26(1), 88-89.
- [4] Li X F. Economic analysis on insulating layer thickness of exterior protected construction in North area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [5] Liu J L. The environmental impact evaluation of materials, Beijing: Science Press, 2002: 65-68.
- [6] The Ministry of construction college. Practical energy-saving building engineering technical measures. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 2-3, 40-41.
- [7] Li B, Zhang C N. Using Whole cycle principle to evaluate energy efficiency of exterior wall insulation scheme from economic aspect. *Building Science*, 2007, 23(6), 28-31.
- [8] Lian S, Wang Y L, Liu J P, Tang Y D, Zheng W H. Analysis on optimization of external wall structural system of residential buildings based on LCA. *Building Science*, 2010, 26(12): 97-101.
- [9] Li Z J. Analysis of air conditioning of life cycle energy consumption and resource of China's urban residential consumption [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [10] Gu L J, Lin B R, Zhu Y X. Increase the insulation effect on housing life cycle energy consumption and environmental load. *National Academic Conference on Heating, Ventilation, Air-conditioning and Refrigeration*, 2008: 120.
- [11] Ma L P, Jiang Q, Zhao C Z. Life cycle assessment of typical rockwool board production in China. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(2): 43-47.
- [12] Jiang Y. editor, Tsinghua University DeST development group. Building environment simulation system and analysis-DeST. Beijing: China Building Industry Press, 2005: 2-22.
- [13] Zhang J G, Liu H Y, Zhang J M, Dong L Y. Energy saving and



- emission reduction calculation and value analysis of energy-saving projects, *Energy of China*, 2009, 31(5):25-29.
- [14] Gu D J, Zhu Y X, Gu L J. Life cycle assessment for China building environment impacts. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006;46(12), 1953-1956.
- [15] Peng W Z. Study on Life Cycle Evaluation Technology Applied in Architecture Energy Consumption [D]. Taiwan: Chaoyang University of Technology, 2003:18-35.
- [16] Zhong P. Study of building life-cycle energy use and relevant environmental impacts[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [17] Zhao H, Jin H. Energy conservation multi-layer wall and heat insulating material. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 2001, 34(2):83-86.
- [18] Wang B, Wang Y F, Cui L. Life Cycle Assessment (LCA) and Eco-Building-Materials. *Chinese and Overseas Architecture*, 2003,6:107-109.
- [19] Edwards S, Bennett P. Buildings and Life cycle thinking. *Industry and Environment*, 2004, 26(2/3):57-61.
- [20] Niklaus K, Sebastian M. Life-cycle Analysis of Building Environment. *Industry and Environment*, 2004, 26(2/3):17-21.
- [21] Ramesh T, Prakash R, Shukla K.K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 2010,42(10):1592-1600.
- [22] Dylewski R, Adamczyk J. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments. *Energy and Buildings*, 2012, 54(12):88-95.
- [23] Ardente F, Beccali M, Cellura M, Mistretta M. Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings*, 2008, 40(1):1-10.
- [24] Verbeeck G, Hens H. Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis. *Building and Environment*, 2010, 45(4):964-967.
- [25] Verbeeck G, Hens H. Life cycle inventory of buildings: A calculation method. *Building and Environment*, 2010, 45(4):1037-1041.
- [26] Yin K, Wang R S, Yao L, Liang J. The eco-efficiency evaluation of the model city for environmental protection in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(19):5588-5598.
- 较. 城市环境与城市生态, 2003, 16(2):34-64.
- [2] 王飞. 基于成本的墙体保温层厚度多学科优化研究. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- [3] 马明珠, 张旭. 基于 LCA 研究建筑保温的节能减排效益. 环境工程, 2008, 26(1):88-89.
- [4] 李星峰. 北方地区建筑外围护结构保温层经济厚度分析. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [5] 刘江龙. 材料的环境影响评价. 北京:科学出版社, 2002:65.
- [6] 建设部干部学院. 实用建筑节能工程技术措施. 北京:中国电力出版社, 2008;2-3, 40-41.
- [7] 李斌, 张春因. 从经济角度运用全生命周期原理评价外墙外保温节能体系的能效. 建筑科学, 2007,23(6):28-31.
- [8] 梁爽, 王亚丽, 刘加平, 唐易达, 郑文亨. 基于全生命周期评价(LCA)的居住建筑外墙构造体系优化分析. 建筑科学, 2010, 26(12):97-101.
- [9] 李兆坚. 我国城镇住宅空调生命周期能耗与资源消耗分析. 北京:清华大学, 2007.
- [10] 谷立静, 林波荣, 朱颖心. 增加保温对住宅生命周期能耗及环境负荷的影响. 全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集:120.
- [11] 马丽萍, 蒋荃, 赵春芝. 我国典型岩棉板生产生命周期评价研究. 武汉理工大学学报, 2013, 35(2):43-47.
- [12] 江亿-主编, 清华大学 DeST 开发组-著, 建筑环境系统模拟分析方法-DeST. 北京:中国建筑工业出版社, 2005:2-22.
- [13] 张建国, 刘海燕, 张建民, 董路影. 节能项目节能量与减排量计算及价值分析. 中国能源, 2009, 31(5):25-29.
- [14] 顾道金, 朱颖心, 谷立静. 中国建筑环境影响的生命周期评价. 清华大学学报(自然科学版), 2006,46(12):1953-1956.
- [15] 彭文正. 以生命周期评估技术应用于建筑耗能之研究. 台湾:朝阳科技大学, 2003.
- [16] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究. 成都:四川大学, 2005.
- [17] 赵华, 金虹. 采暖建筑节能复合围护结构与保温材料经济性的研究. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(2):83-86.
- [18] 王波, 王燕飞, 崔玲. 生命周期评价(LCA)与生态建筑材料. 中外建筑, 2003(6):107-109.
- [26] 尹科, 王如松, 姚亮, 梁菁. 中国环保模范城市生态效率评价. 生态学报, 2011, 31(19):5588-5598.

#### 参考文献:

- [1] 刘晶茹, 王如松, 杨建新. 两种家庭住宅类型的环境影响比

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.8 Apr., 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Growth rates of marine planktonic ciliates; a review ..... ZHANG Wuchang, LI Haibo, FENG Meiping, et al (1897)
- Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter .....  
..... WANG Xiaolei, WANG Cheng (1910)
- A review of snow-living Collembola ..... ZHANG Bing, NI Zhen, CHANG Liang, et al (1922)

### Autecology & Fundamentals

- Photosynthetic responses to changes in CO<sub>2</sub> concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge  
islands in the Yellow River Delta, China ..... ZHANG Shuyong, XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (1937)
- Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia  
lanceolata* plantation ..... KANG Genli, YANG Yusheng, SI Youtao, et al (1946)
- Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation .....  
..... WANG Baoqi, LIU Zhili, QI Yujiao, et al (1956)
- Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees .....  
..... PING Chuan, WANG Chuankuan, et al (1965)
- Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland ... CHENG Liping, LIU Wenzhao, LI Zhi (1975)
- Water parameters of the branch of *Larrea tridentata* under different soil drought stress .....  
..... ZHANG Xiangning, SUN Xiangyang, WANG Baoping, et al (1984)
- Effects of shading treatments on photosynthetic characteristics of *Juniperus sabina* Ant. seedlings .....  
..... ZHAO Shun, HUANG Qiuxian, LI Yuling, et al (1994)
- Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties .....  
..... LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al (2003)
- The survival and above/below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling .....  
..... TIAN Yuan, TASHPOLAT · Tiyp, LI Yan, et al (2012)
- Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum* .....  
..... TAO Qiaojing, FU Tao, XIANG Xina, et al (2020)
- Karst cave bacterial calcium carbonate precipitation: the Shijiangjun Cave in Guizhou, China .....  
..... JIANG Jianjian, LIU Ziqi, HE Qiufang, et al (2028)
- Migration of the 7<sup>th</sup> generation of brown planthopper in northeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, and analysis of source  
areas ..... QI Huihui, ZHANG Yunhui, JIANG Chunxian, et al (2039)

### Population, Community and Ecosystem

- The dynamics and determinants of population size and spatial distribution of Common Cranes wintering in Poyang Lake .....  
..... SHAN Jihong, MA Jianzhang, LI Yankuo, et al (2050)
- Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan .....  
..... YIN Rui, XU Zhengfeng, WU Fuzhong, et al (2061)
- Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaolinling .....  
..... CHEN Yun, WANG Hailiang, HAN Junwang, et al (2068)
- Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012 .....  
..... WANG Xiaoying, ZHANG Fang, LI Juanying, et al (2076)
- Analysis of differences in insect communities at different altitudes in *Zanthoxylum bungeanum* gardens, Yunnan, China .....  
..... GAO Xin, ZHANG Limin, ZHANG Xiaoming, et al (2085)
- The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetland .....  
..... GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, et al (2095)

- Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of East Juyanhai .....  
..... ZHANG Hua, ZHANG Lan, ZHAO Chuanyan (2102)

### **Landscape, Regional and Global Ecology**

- Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain .....  
..... ZHANG Yinbo, GUO Liulin, WANG Wei, et al (2109)
- Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area .....  
..... LIU Jia, TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, et al (2118)
- Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau .....  
..... YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang (2128)
- Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniclata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland .....  
..... TIAN Dalun, Li Xionghua, LUO Zhaozhui, et al (2137)

### **Resource and Industrial Ecology**

- Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan .....  
..... WU Yanming, LV Gaoming, ZHOU Hang, on storage at different age (2146)

### **Urban, Rural and Social Ecology**

- Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing ...  
..... ZHU Lianbin, KONG Xiangrong, WU Xian (2155)
- Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba* .....  
..... SONG Yingshi, LI Feng, WANG Xiaoke, et al (2164)



# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 杨永兴

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 8 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 8 (April, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号

许 可 证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010) 62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

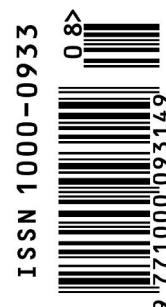
Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010) 64034563  
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元