

# 知识图谱视角下绿色低碳建筑研究动态

何清华<sup>1 2</sup>, 王 歌<sup>1 2</sup>

(1. 同济大学经济与管理学院, 上海 200092; 2. 同济大学复杂工程管理研究院, 上海 200092)

**摘要:** 从“低碳”到“零碳”, 建筑业的“绿色发酵”不断持续, 绿色低碳建筑已成为资源科学、低碳经济等领域的热点议题。然而, 目前针对绿色低碳建筑的研究动态尚未有定量、深入的分析与归纳, 不利于系统把握其发展现状及趋势。以 SCI 和 SSCI 中 1998—2015 年发表的 591 篇期刊文献为数据来源, 运用共词分析、社会网络分析、多维尺度分析等方法, 探测绿色低碳建筑领域的研究热点和时区分布态势, 最后形成对中国建筑业低碳转型的若干启示。

**关键词:** 绿色建筑; 低碳建筑; 共词分析; 社会网络分析; 知识图谱

**中图分类号:** F407.9 **文献标识码:** A

DOI:10.13580/j.cnki.fstc.2015.10.025

## The Developments and Trends of Green and Low-Carbon Building Study Based on Scientometric Map

He Qinghua<sup>1 2</sup>, Wang Ge<sup>1 2</sup>

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Research Institute of Complex Engineering & Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The “green fermentation” of construction industry continues from “low carbon” to “zero carbon”. Research on green and low-carbon building has become a hot issue in the field of resources science and low carbon economy. However, research on green and low-carbon building doesn't engage in quantitative and in-depth analysis on developments in this field at present, and is not conducive to acquire the state and trends of green and low-carbon building. Based on 591 articles covered by the SCI/SSCI databases between 1998 and 2015, this study uses co-word analysis, social network analysis, multidimensional scaling analysis to draw the scientometric map and probe hotspots as well as time-zone distribution of research network in the field of green and low-carbon building. Lastly, several recommendations for low-carbon transformation of China's construction industry are provided.

**Key words:** Green building; Low-carbon building; Co-word analysis; Social network analysis; Scientometric map

基金项目: 国家自然科学基金项目“重大基础设施工程的组织行为与模式创新研究”(7139052)、“重大工程组织公民形为形成动因、效能涌现及培育研究”(71571137)。

收稿日期: 2015-05-20

作者简介: 何清华(1971-), 男, 浙江东阳人, 同济大学经济与管理学院教授、博士生导师; 研究方向: 建设工程项目管理、精益建设。

“绿色建筑”的概念系由“生态建筑”演化而来,但“绿色化”的实现则源于可持续发展理念的提出。诞生于1990年的BREEAM是世界上第一部绿色建筑评价标准,此后美国、加拿大、日本、澳大利亚、德国、中国等相继制定出各自的绿色建筑评价体系,同时与绿色建筑相关的新技术、新材料和新产品也在快速发展,从而使绿色建筑从理念到实践逐步完善和成熟。

后金融危机时期“低碳经济”的迅速崛起引发全社会对低碳相关领域的关注,如“低碳建筑”、“低碳城市”和“低碳设计”等。目前全世界建筑物能源消耗占社会能源消耗总量的40%,是工业能耗的1.5倍<sup>[1]</sup>,因此推动低碳建筑的发展迫在眉睫。“低碳建筑”与“绿色建筑”在内涵和目标上是基本一致的,只是切入点、侧重点和技术选择上有所差异<sup>[2]</sup>,因此本文将两者归为同一研究范畴予以考虑,目的在于从更广的视角探讨绿色低碳情境下的建筑发展“新常态”。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本文选择美国科学信息研究所(ISI)出版的SCI和SSCI引文索引作为数据来源,以主题=(“green building\*”或“low carbon building\*”或“low-carbon building\*”)为检索表达式,选择“Article”为文献精简类型,不限时间跨度进行检索(数据更新至2015-03-30),经过筛选后,最终得到591篇期刊文献。

通过Web of Science创建的引文报告和GPS Visualizer可视化定位工具对文献进行系统梳理,归纳出绿色低碳建筑研究的时空分布特征。如图1所示,左侧柱形图表示绿色低碳建筑领域每年发表的文献量,右侧柱形图表示该领域每年参考文献的引引量,可以发现文献分布整体上呈显著的偏态聚集形态,2005年之前仅有零星的相关研究,2010年之后则出现“爆发性”增长,而这与绿色低碳建筑发展的国际背景相吻合。

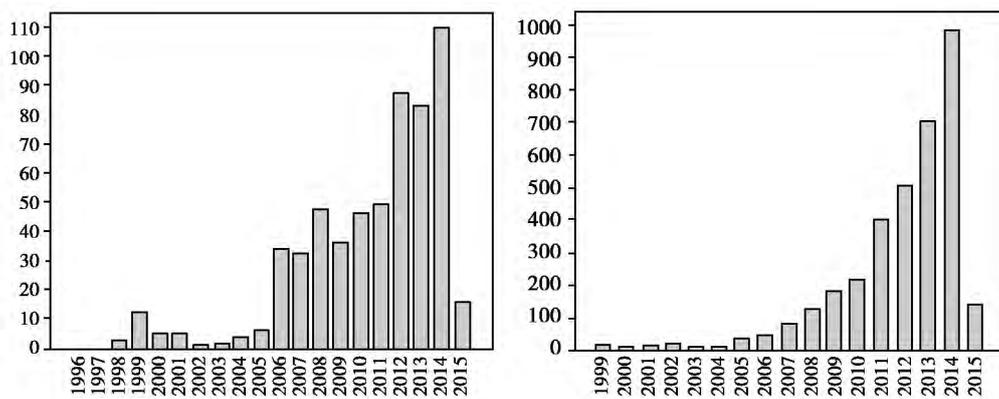


图1 绿色低碳建筑研究的时间分布(截至到2015-03-30)

文献的来源地区集中于北美、西欧和东亚国家,非洲、南美洲和大洋洲的分布相对零散,反映出绿色低碳建筑已成为国际化的研究领域。东亚地区的文献主要集中于中日韩三国,说明绿色低碳建筑领域已引起国内学者的关注,相关研究成果在国际上具有一定的影响力。

### 1.2 研究方法

在数据处理过程中,首先运用Bibexcel从文献题录信息中提取关键词。为保证数据的有效

性和准确性,需要对关键词进行预处理,比如将“green building”和“green buildings”合并为“green building”,然后选择出现频次超过2次的关键词作为研究对象,共得到131个。其次,按照出现频次高低及变化率对关键词进行归类,然后对关键词共现网络展开分析,包括网络密度、中心性和成分构成。最后,依据关键词共现矩阵绘制知识图谱,从研究热点和时区分布两个维度探讨绿色低碳建筑研究的主题

脉系及发展趋势。

## 2 绿色低碳建筑研究共词网络分析

### 2.1 关键词分类

首先通过 CiteSpace 软件，按照年份绘制出每

个关键词频次的变化折线图。然后结合关键词的出现频次和变化率，将其划分为六种类型<sup>[3]</sup>，从而全面反映绿色低碳建筑研究的热点变迁和前沿趋势，如表 1 所示。

表 1 绿色低碳建筑研究关键词分类

| 类别 | 平缓  | 波动  | 陡增                                   |
|----|---|---|--------------------------------------|
| 高频 | green building; sustainability  | design; performance                             | LEED; energy                         |
| 中频 | sustainable development; built environment  | environmental assessment; sustainable buildings | sustainable design; renewable energy |
| 低频 | augmented reality models; carbon store; low-carbon building design; occupant comfort; environmental governance; energy simulation |   |                                      |

高频平缓和中频平缓型表示，关键词较早受到学者的关注，频次变化率呈平稳状态，通常属于绿色低碳建筑研究的基础词或特征词，如绿色建筑、可持续性、可持续发展和建筑环境。高频波动型关键词同样是绿色低碳建筑研究中的热点，但易受其他领域新方法的影响，在相关方法逐渐普及后，频次增长趋缓甚至有所下降，从而呈现波动态势，比如“设计”是决定建筑功能的关键因素，随着信息技术的发展，BIM 在设计中的应用逐渐从 3 维拓展到 N 维，除构建 3D 模型外，还将进度控制、成本管理、建筑性能分析等纳入到不同维度中，由此关键词“设计”在 BIM 应用的前中后阶段呈明显的波动态势。“性能”的频次变化情况同“设计”相类似，在 LEED 等评估体系逐渐普及后，经历了波动式的发展过程。高频陡增和中频陡增型关键词是近年来涌现出的热点，通常代表研究领域的前沿方向，如 LEED 在 2007 年仅出现 2 次，而 2014 年则涨至 8 次，与之相对应的是 LEED 从 1.0 实验版到 2.2 正式版再到 4.0 正式版的发展历程，应用范围也从公共建筑拓展至各类民用建筑。

通过 CiteSpace 的突现词检测功能，发现“能源”的突现值是所有关键词中最高的，随着可再生能源的发展和节能技术的进步，其已成为绿色低碳建筑研究的热点方向之一。低频关键词表示相关内容尚未引起学界的注意，还处于萌芽阶段的研究内容，如增强现实模型、碳仓储、低碳建筑设计、居住舒适度和环境治理等，随着低碳经济的发展和智慧城市的建设，可以预见与以上主

题相关的研究将进一步升温。

### 2.2 网络指标测算

(1) 网络密度和中心性。关键词共现网络的整体密度偏低，仅为 0.0923，说明该领域的研究内容过于分散，呈现低关联、低聚集性的状况，缺乏清晰的脉络<sup>[4]</sup>。“中心性”是社会网络分析的研究重点之一。度数中心度反映点的直接关系数，该值越大，则说明该关键词与其他关键词的共现频率越高，越接近网络的中心。根据关键词的度数中心度排序，除文献基础词及特征词（绿色建筑、可持续性、可持续发展、能源、经济等）外，发现 LEED、环境评估、建筑性能、环境绩效、环境评价方法、可持续设计和建筑后评估等成为研究者关注的热点。中间中心度反映点的中介作用，该值越大，则说明该关键词对其他关键词共现的影响越大。度数中心度和中间中心度排名前 15 的关键词基本一致，仅有环境评价方法、可持续设计、环境影响和施工 4 个关键词例外，表明大部分的研究热点同时具有较强的“资源控制力”，对其他节点的影响较大。

(2) 成分分析。运用 Ucinet 对二值化处理后的数据进行成分分析，发现全部关键词由 77 个成分构成，存在 1 个强成分（包括 53 个节点），以及 76 个弱成分。成分分析与网络密度分析的结果相一致，表明绿色低碳建筑研究的知识点较为分散。

### 2.3 多维尺度分析

通过多维尺度分析，能够更好地描述绿色低碳建筑研究的关键词聚类情况，揭示隐藏在文献背后的研究结构。通过统计高频词在同一篇文献

的出现次数,反映不同主题词的关联度,实现对知识结构、研究热点和学科发现的动态分析。在多维尺度分析中,以 Stress 和 RSQ 作为反映拟合度优劣的指标,其中压力系数 Stress 越小模型拟合越好,而 RSQ 越大模型拟合越好。本文 Stress 系数为

0.16669,小于 0.2,说明拟合良好;同时 RSQ 为 0.90037,远大于 0.6 的经验值,亦表明模型拟合良好。高频关键词主要聚集在三块相对集中的区域(如图 2 虚线框所示),分别代表绿色低碳建筑研究的主要关注点。

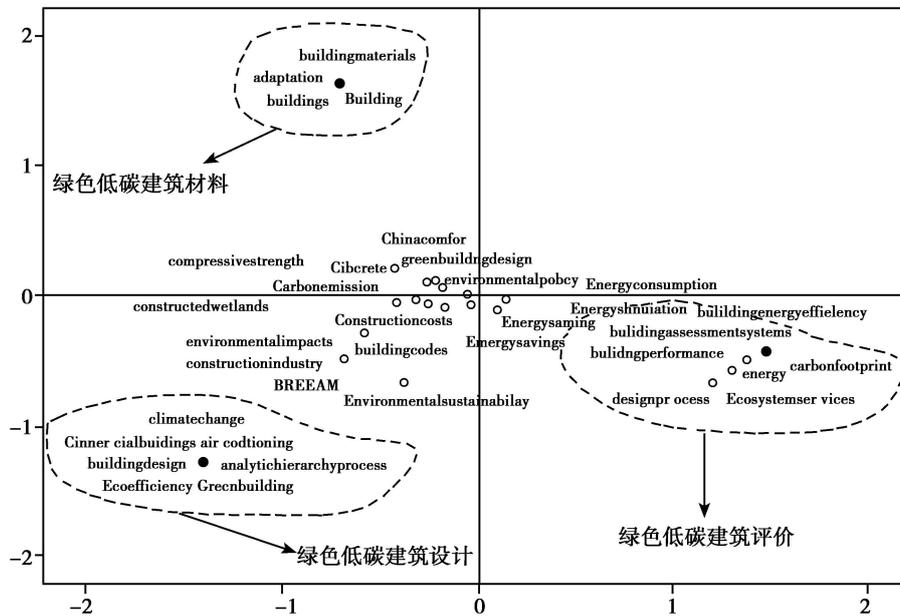


图 2 多维尺度分析

### 3 绿色低碳建筑研究知识图谱绘制

#### 3.1 绿色低碳建筑研究热点子网络

目前关于绿色低碳建筑的交叉研究较为普遍,尚未形成脉络清晰的结构体系,有必要对研究的热点领域进行系统梳理。根据高中心性关键词的相关性及其在整体网络中的分布情况,筛选出 2 个关键节点,包括可持续性和环境评估。以可持续性为中心的子网共包含 41 个节点,涵盖可恢复性、可持续设计、生态系统服务、温室气体排放、气候变化、碳足迹等内容,网络密度为 0.222,占整体网规模的 39.8%,是绿色低碳建筑研究中最核心的主题。2012 年以来,在绿色低碳建筑的研究中关键词“可恢复性”与“可持续性”多次共现。与可持续理念相比,可恢复理念应用于建筑领域的时间较晚,早期的研究集中于技术层面,重点从灾害防御角度,解决建筑从不利状态恢复至原态的问题<sup>[5]</sup>。在气候变化、意外事故、国际恐怖主义等危机的不断挑战下,建筑可持续性目标的实现需要可恢复性手段的保证,两者是有机结合、

协调一致的。温室气体排放在建筑的施工和运营过程中扮演着重要角色。一方面,温室气体的排放水平是衡量建筑可持续性的重要标准。另一方面,温室气体排放所引起的气候灾害会直接影响到建筑的可恢复性。未来需从可持续性和可恢复性的双重视角,进行灾害管理、气候变化与温室气体排放的相互作用机制研究,确定温室气体碳排放的等级及阈值,并将上述成果引入到绿色低碳建筑的运营标准制定中。

环境评估子网络共包含 26 个节点,重点关注不同类型的环境评价方法,涵盖美国 (LEED)、加拿大 (GBTool)、英国 (BREEAM)、瑞典 (Eco-effect)、香港 (BEAM Plus) 等国家或地区的建筑环境评价系统。在所有的建筑环境评价系统中,最核心的部分主要来自于指标权重的设计<sup>[6]</sup>。目前,在绿色低碳建筑的评价体系中,“柔性”类指标的发展正成为一种趋势。比如,LEED 专门设置“区域优先”类别,根据建筑所在地的环境发展需要,在评价体系中给予指定的核心指标以额

外加分<sup>[7]</sup>。国内2014年版的《绿色建筑评价标准》是在2006版的基础上修订而成，新增施工管理类指标，并设有加分项，鼓励绿色低碳技术的应用创新，但7类指标的权重仍是固定值，可调整性差，这也是后续版本中需要解决的重要问题。如果参照LEED的做法，在国内2014版《绿色建筑评价标准》中设置“区域优先”类别，允许各省市在不改变整体评价框架的基础上，对部分核心指标予以适当的额外加分，从而更符合不同地区的发展现状和实际需要。

### 3.2 绿色低碳建筑研究热点时区分布图

从时区分布图（见图3）可以发现，在2005年之前绿色低碳建筑还没有得到学者的广泛关注，而随着能源紧张、环境污染、全球气候变暖等问题日益严峻，有关绿色低碳建筑的研究在2010年之后大量涌现，其中可持续性和LEED一直是研究的焦点，而近年来居住舒适度、居住者满意水平、建筑后评价等日益受到关注，体现出精益化、人本化的发展趋势。在“以人为本”思想的驱动下，未来绿色低碳建筑将与智能建筑及智慧城市的发展相融合，核心在于降低能耗的同时最大程度满足居住者的使用需求，提高其居住体验的满意度，如图3右上角的虚线框所示。

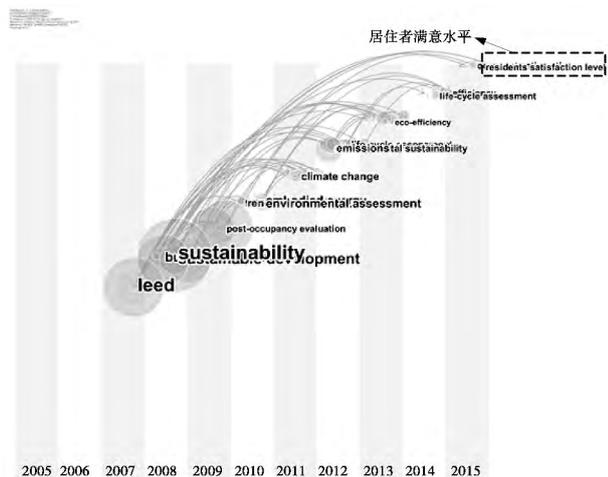


图3 绿色低碳建筑研究热点时区分布图

## 4 政策启示

通过对绿色低碳建筑领域的文献计量分析，得出以下结论：①现阶段绿色低碳建筑呈现向“宜居性”发展的态势，不仅关注能源利用效率，而且更多强调居住舒适度和满意水平，围绕居住者行为展

开的研究逐渐增多。②绿色低碳建筑庞杂的研究内容凸显出其跨学科的融合特性和生命力，研究焦点主要集中于绿色低碳建筑材料、绿色低碳建筑设计和绿色低碳建筑评价三方面。③可持续性和环境评估是绿色低碳建筑研究的热点分支，其中核心主题“可持续性”正不断与其他发展理念（如“可恢复性”）相结合。④绿色低碳建筑的研究具有鲜明的时代特征，2010年之后相关文献数量井喷式增长，而这都与国际背景和标志性大事件（如哥本哈根的联合国气候变化大会）相吻合。节能减排目标的确定使建筑业低碳转型的压力骤增，“零碳建筑”成为绿色低碳建筑发展过程中更加具有时代特征的研究方向。为推动国内建筑业的创新发展，依据以上研究结论提出三点政策建议：

(1) 关注居住者的行为习惯，完善建筑室内环境的后评价体系。中国2015年起施行的新版《绿色建筑评价标准》的适用范围已扩展至各类民用建筑，但在室内环境质量的运行评价中尚缺乏对居住舒适性的有效考量。根据欧洲标准EN15211的说明，建筑环境不适性的程度与实际温度和舒适温度的差异大小有关。在室内湿热环境的后评价中，如果能够引入PD<sub>H</sub>（Percentage of Dissatisfaction of Heat）等指数<sup>[8]</sup>，则可以量化反映建筑使用中的温度舒适度。同时，在不同地区由于气候条件和居住者行为习惯（如日常通风方式的选择）的差异，室内环境受室外因素影响的程度不同，因此在评估环境舒适度时需适当兼顾区域特殊性。

(2) 建立建筑碳排放量的云计算平台，解决绿色低碳建筑设计和运营间的“鸿沟”。绿色低碳建筑的设计和评价处于工程项目生命周期的不同阶段，两者之间往往存在节能减排效果的巨大落差。英国的CarbonBuzz云计算平台通过集成工程项目利益相关者所提供的大量数据（如建筑运营期间的水电燃气费用），发现运营阶段碳排放量的实际值通常比设计阶段的预期值高50%以上<sup>[9]</sup>。美国的USGBC也指出经过LEED认证的建筑在使用中的能耗表现远远低于预期的水平，在部分案例中实际能耗甚至达到预期能耗的两倍<sup>[10]</sup>。因此，“贴标签”式的绿色认证并不能有效解决建筑运营期的高能耗问题，从而需要引入跟踪建筑碳排放表现的云计算平台，有针对性地分析能耗偏离设

计目标的原因和问题。比如,在国内可以尝试建立开源式的能耗分析平台,允许用户以匿名方式上传相关数据并评价建筑的实际碳排放表现。通过“滚雪球”式的数据积累,该平台能够为设计方和运营方提供相对科学的能耗参考标准。

(3) 明确零碳建筑的定义和范围,制定发展零碳建筑的试点计划和时间表。发展零碳建筑首先要解决概念界定的问题。Atanasiu 等<sup>[11]</sup>提出在定义零碳建筑过程中存在诸多挑战,比如零碳建筑和零能耗建筑的区别,能源效率与可再生能源供给的平衡,以及在不同气候条件和建筑类型中的适用性等。中国在制定发展零碳建筑的政策时,需要先明确建筑能源消耗的具体范围,避免模糊

界定所造成的建筑市场“无所适从”,像英国就经历了从“完全零碳”到仅限定管制能源(加热、制冷、通风、照明、热水)的转变<sup>[12]</sup>。对于发展零碳建筑不同国家和地区都制定了相应的目标和时间表<sup>[13]</sup>,比如欧盟规定所有新建建筑要在2021年之前达到接近零能耗的要求,其中政府投资项目要在2019年之前实现;英国要求新建住宅和非住宅项目分别于2016年和2019年实现零碳排放;美国的加利福尼亚州规定新建住宅和商业项目分别于2020年和2030年实现能源消耗的净值为零。国内可以先在政府投资项目和部分地区进行零碳建筑试点,然后再推出不同类型建筑的零碳排放时间表。

## 参考文献:

- [1] Janda K B. Buildings don't Use Energy: People Do[J]. *Architectural Science Review* 2011, 54(1): 15-22.
- [2] 姜虹, 李俊明. 中国发展低碳建筑的困境与对策[J]. *中国人口·资源与环境* 2011, 20(12): 72-75.
- [3] 刘泽照, 张谦, 黄杰. 基于 SNA 的国际大数据研究结构态势[J]. *科学学与科学技术管理* 2014, 35(11): 40-47.
- [4] 王成城, 蒋海萍, 吴婷等. 中国低碳研究领域知识图谱: 基于共词网络的计量研究[J]. *中国人口·资源与环境* 2013, 23(9): 19-27.
- [5] Bruneau M, Reinhorn A. Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities[J]. *Earthquake Spectra* 2007, 23(1): 41-62.
- [6] Ding G K C. Sustainable Construction—The Role of Environmental Assessment Tools[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(3): 451-464.
- [7] Huang K T, Huang W P, Lin T P, et al. Implementation of Green Building Specification Credits for Better Thermal Conditions in Naturally Ventilated School Buildings[J]. *Building and Environment* 2015.
- [8] Pei Z, Lin B, Liu Y, et al. Comparative Study on the Indoor Environment Quality of Green Office Buildings in China with a Long-term Field Measurement and Investigation[J]. *Building and Environment* 2015, 84: 80-88.
- [9] Energy performance of LEED for New Construction Buildings[M]. Vancouver: New Buildings Institute 2008.
- [10] Suzer O. A Comparative Review of Environmental Concern Prioritization: LEED vs other Major Certification Systems[J]. *Journal of Environmental Management* 2015, 154: 266-283.
- [11] Atanasiu B, Boermans T, Thomsen K E, et al. Principles for Nearly Zero-Energy Buildings—Executive Summary: Paving the Way for Effective Implementation of Policy Requirements[R]. BPIE—Buildings Performance Institute Europe 2011.
- [12] HM Government. Carbon management plan 2011 to 15: a summary [EB/OL]. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/98870/carbon-management-plan-summary.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/98870/carbon-management-plan-summary.pdf) 2011-07-12/2015-06-15.
- [13] Pan W, Ning Y. A Socio-technical Framework of Zero-carbon Building Policies[J]. *Building Research & Information* 2015, 43(1): 94-110.

(责任编辑 刘传忠)