

# 低碳城市建设背景下日本近20年屋顶绿化研究进展

## Progress of Green Roofs Research in Japan in the Past 20 Years in the Context of Low Carbon City Construction

张恒 张艺川 詹永杰 李俐

ZHANG Heng, ZHANG Yichuan, ZHAN Yongjie, LI Li

基金项目: 福建省科技引导性项目“高度城镇化地区乡村微景观建设关键技术研究与应用”(编号: 2022N0013)

### 摘要

屋顶绿化对改善城市热岛效应和减碳意义重大, 是日本建设低碳城市及实现“碳达峰”的有效举措。通过文献计量学方法分析 Web of Science™ 和 J-stage 两大数据库中日本近 20 年的屋顶绿化研究文献, 并与日本屋顶绿化政策、法规出台的时间节点进行对照, 将日本屋顶绿化研究分为 3 个时期: 低碳研究初始阶段(2000—2005 年)、低碳研究发展阶段(2006—2013 年)、低碳研究探索阶段(2014—2023 年)。同时运用文献计量学中高频词研究方法, 解析不同时期日本屋顶绿化研究内容, 总结各时期研究特点, 为我国屋顶绿化提供启示: 完善法规政策、明确责任主体, 推动地方出台激励措施并建立公众参与机制; 加强地区适应性植物培育配置研究, 深化节能减碳评价研究, 重视废弃物应用研究。

### Abstract

Green roofs are crucial for improving the urban heat island effect and reducing carbon emissions, serving as an effective means for Japan to construct a low-carbon city and reach carbon peak. This paper employs the bibliometric method to analyze the green roof research literature in Japan from 2000 to 2023 in the Web of Science™ and J-stage databases and compares it with the timeline of relevant policies and regulations. The research is classified into three stages: the initial stage (2000-2005), the development stage (2006-2013), and the exploration stage (2014-2023). By using the bibliometric high-frequency word research method, the research contents and characteristics of each stage are explored. Implications for China are as follows: in policy, improve laws, clarify responsibilities, promote local incentives and public participation; in technology, enhance research on plant cultivation and configuration, deepen energy and carbon assessment, and focus on waste utilization.

### 文章亮点

1) 系统分析日本屋顶绿化政策演变, 揭示技术与政策互动; 2) 利用文献计量学方法深入探讨研究热点, 定量分析技术创新; 3) 提出中国屋顶绿化可借鉴日本经验, 推动低碳城市建设。

### 关键词

低碳城市; 屋顶绿化; 城市绿地; 双碳目标; 节能减碳

### Keywords

Low-carbon city; Green roofs; Urban green space; Carbon peaking and carbon neutrality goals; Energy conservation and carbon reduction

收稿日期: 2024-03-25

修回日期: 2024-07-30

国际能源署数据显示, 2023 年全球二氧化碳排放总量已达 374 亿吨, 由此引发的气候变暖、城市热岛效应等问题日益突出。在第 75 届联合国大会上, 中国提出了“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的目标。我国城

市的碳排放占全国总碳排放量的 80%, 已成为碳排放的主体<sup>[1]</sup>。增加绿地面积是缓解气候变暖和城市热岛效应等问题的有效策略。但中国许多城市发展呈现高密度特征, 地面用地紧张。而屋顶绿化作为绿色基础设施, 能充分利用城市剩

余空间，为城市增加绿量。屋顶绿化既是对城市绿地的有效补充，也是节能减碳的有效手段。研究表明，屋顶绿化能使建筑每年的能耗节约至少 15%<sup>[2]</sup>，且当城市的屋顶绿化率达到 70% 以上，城市上空的 CO<sub>2</sub> 含量将下降 80%<sup>[3]</sup>。

日本城市化率较高，城市绿地增量空间较少。日本推行屋顶绿化，增加城市绿量，使其早在 2013 年实现了碳达峰目标。2000 年至 2022 年，日本屋顶绿化面积增长了约 41 倍，达到 593.8 hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。目前我国屋顶绿化的理论研究和技术标准不够完善，体系尚未健全<sup>[5]</sup>。通过借鉴日本屋顶绿化研究与实践，分析其不同阶段的特征和研究热点，为我国屋顶绿化研究与低碳城市建设提供宝贵参考。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 数据来源

屋顶绿化通过固碳与减碳 2 种方式减少城市碳排量（图 1），其效果与植物、种植基质和屋顶构造密切相关。因此，文献检索主题词包括“屋顶绿化+植物”“屋顶绿化+种植基质”“屋顶绿化+屋顶构造”。此外，考虑到屋顶绿化具有隔热降温作用，能减少空调能耗，实现 CO<sub>2</sub> 减排，二次检索的主题词为“屋顶绿化+CO<sub>2</sub>”“屋顶绿化+热环境”“屋顶绿化+空调”“屋顶绿化+降温效果”，以确保数据源的精准性和完整性。最终收集了 2000—2023 年关于日本屋顶绿化的 410 篇期刊论文，包含 142 篇来自 Web of Science<sup>TM</sup> 核心合集的英文文献，268 篇来自 J-stage (Japan Science and Technology Information Aggregator, Electronic) 的日文文献。

### 1.2 研究方法

基于 Web of Science<sup>TM</sup> 和 J-stage 数据库的检索结果，本研究采用文献计量学方法分析日本屋顶绿化的研究现状，并使用 NoteExpress 和 Excel 统计关键词的频次、聚类情况。研究中的高频关键词根据 Donohue 于 1973 年提出的高频词与低频词界分公式  $T=0.5 \times (-1 + \sqrt{1+8 \times I_1})$  计算得到，式中  $T$  表示高频关键词的频次， $I_1$  表示某时期仅出现一次的关键词数量。

## 2 日本近 20 年屋顶绿化研究进展

综合考虑日本屋顶绿化研究发文情况（图 2）及政策发布节点（图 3），日本 2000 年之后的屋顶绿化研究可分为初始（2000—2005 年）、发展（2006—2013 年）和探索（2014—2023 年）3 个阶段。关键词分析显示，“简单式屋顶绿化”“热环境改善”“热岛效应”“节能减碳”等关键词在各研究阶段均为高频词（表 1），表明研究热点具有延续性，但各阶段的研究重点有所不同。

### 2.1 初始阶段（2000—2005 年）

2000—2005 年属于日本屋顶绿化低碳研究的初始阶段，该阶段研究与政策紧密相关。2000 年，日本国会颁布《循环型社会形成推进基本法》（循环型社会形成推进基本法），提出建设“低碳社会”“循环型社会”的愿景。同年，东京

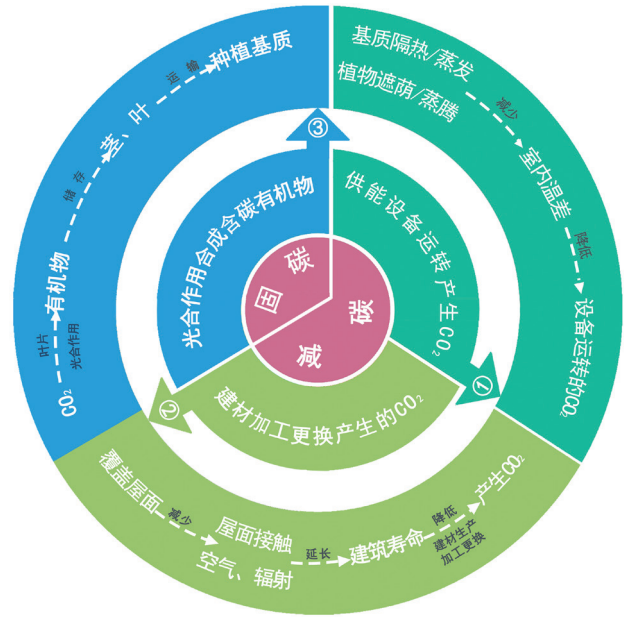


图 1 屋顶绿化的固碳减碳作用

Fig.1 The carbon sequestration and carbon reduction effects of green roofs

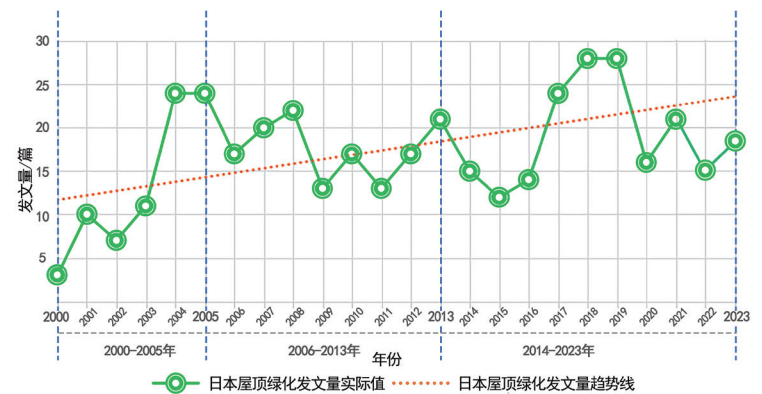


图 2 日本近 20 年屋顶绿化相关文章数量

Fig.2 The number of research articles related to green roofs in Japan over the past 20 years

表 1 日本屋顶绿化研究的持续高频词汇（2000—2023 年）

Tab.1 Continued high frequency vocabulary of green roofs research in Japan from 2000 to 2023

关键词	频次			总频次
	2000—2005	2006—2013	2014—2023	
简单式屋顶绿化	11	15	17	43
热环境改善	14	7	15	36
热岛效应	9	5	25	39
节能减碳	8	15	12	35

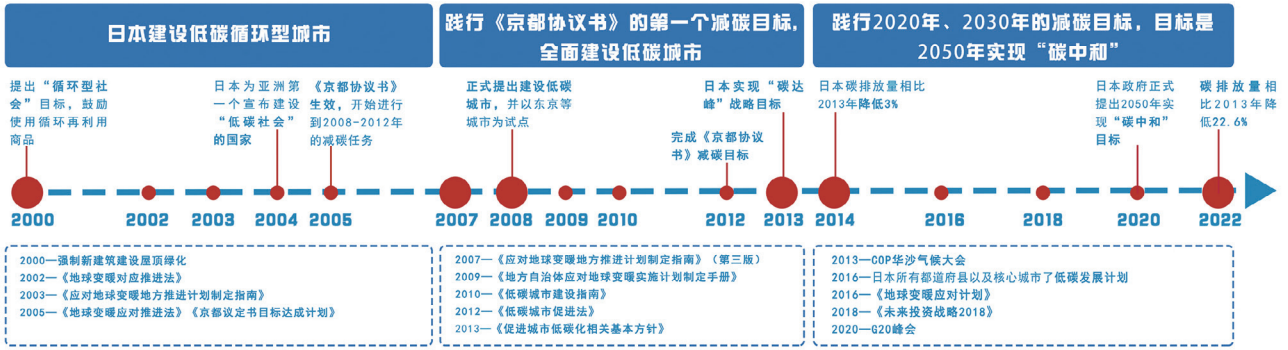


图3 日本近20年重要政策发布节点和社会发展目标

Fig.3 Important policy releases and social development goals in Japan over the past 20 years

都等地推行强制性法规, 要求超过 1 000 m<sup>2</sup> 的新建筑至少有 20% 的屋顶绿化<sup>[6]</sup>。2001 年, 日本国土交通省修订《城市绿地保护法》(都市绿地保全法), 引入容积率补偿、赞助金、低率融资等优惠政策。到 2005 年, 东京都、大阪府等地出台了 40 余项激励性政策, 涵盖绿地面积计算、费用融资、费用补助、容积率补偿和技术指导等内容。面对政府颁布的屋顶绿化强制性法规与激励政策, 企业为了减轻建设压力, 多采用成本低廉、建成速度快的简单式屋顶绿化。日本学者也由此开始低成本轻质化屋顶绿化及循环型材料应用的研究, 以降低建设成本、降低资源消耗, 推进循环型社会的构建。

2000—2005 年, 日本屋顶绿化研究发文量为 79 篇, 占总量的 19.2%, 其中 2003—2004 年增长显著(图 4)。利用 NoteExpress 和 Excel 提取出 39 个关键词, 总频次 199 次, 高频关键词 16 个 ( $T \geq 4$ )。关键词分析显示, 本时期的研究集中在控制屋顶绿化成本和降低建筑能耗, 研究热点可归纳为“改善室内外热环境”“简单式屋顶绿化的轻质化”“废弃物循环利用研究”(图 5)。

### 2.1.1 改善室内外热环境

此阶段主要从屋顶绿化的植物选择、种植基质、夏季的节能优势上, 讨论屋顶绿化改善室内外热环境的相关内容。Nyuk Hien Wong 研究<sup>[7]</sup>表明, 不同陆生植物的降温效果为 21~30.5℃, 与叶面积指数呈正相关。Morihiro Aizaki<sup>[8]</sup>发现, 湿生与陆生植物的降温效果可相差 10℃。小濑博之<sup>[9]</sup>发现结缕草 *Zoysia japonica* 的降温效果比景天科植物高 0.8~1.6℃。Nami Yamamoto<sup>[10]</sup>、山田宏之<sup>[11]</sup>发现改良后的泥炭制成种植基质的降温效果更佳, 保水能力更强。小濑博之<sup>[9]</sup>研究指出, 厚 70 mm 的基质的降温效果为厚 150 mm 的基质的一半, 但厚 150 mm 与厚 200 mm 的基质降温效果相差不大, 这说明基质厚度与降温隔热效果正相关, 但存在最佳厚度。山口隆子<sup>[12]</sup>、Shuichi Aoki<sup>[13]</sup>发现提高灌溉频率可提升蒸散效果, 使屋顶绿化温度在夏季降低 15~18℃, 进入房间的热通量减少 13%~45%, 室内温度降低 5~10℃, 空调能耗减少 15%~67.4%。仙川诚<sup>[14]</sup>研究发现, 在夏季晴天, 绿化

后的屋面温度可维持在 30℃以下, 热通量相比绿化前减少 87.5%, 空调能耗降低 28%。

### 2.1.2 简单式屋顶绿化的轻质化

简单式屋顶绿化因种植和养护成本低、政策支持以及企

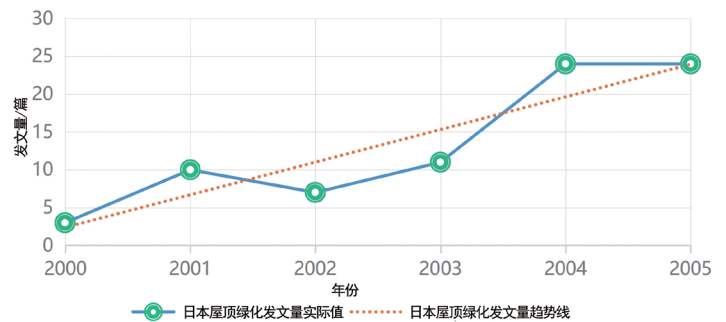


图4 2000—2005 年的日本屋顶绿化发文量

Fig.4 The number of publications on green roofs in Japan from 2000 to 2005

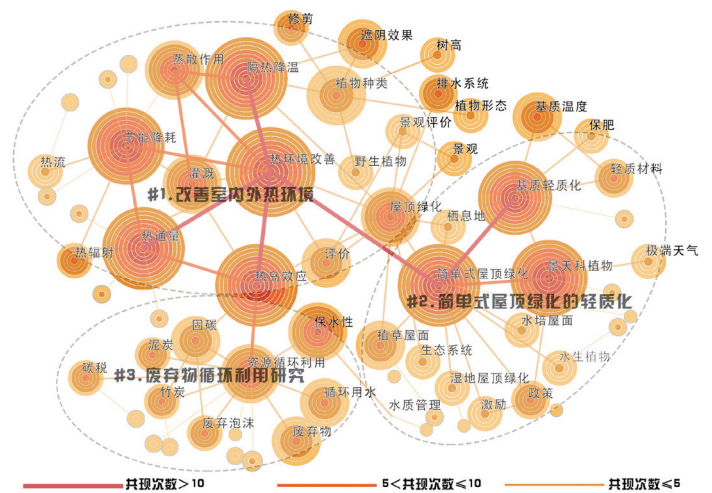


图5 2000—2005 年屋顶绿化关键词的聚类图谱

Fig.5 Clustering map of green roofs keywords from 2000 to 2005



业投资风险较小, 适合在高度城市化的日本推广。在基质轻质化方面, 杉本英夫<sup>[15]</sup>、田洼祐子<sup>[16]</sup>通过在厚 5~10 cm 的人工基质中增加底部灌溉系统和保水剂, 实现了草本植物的稳定生长, 与传统基质相比, 减少了 10~20 cm 的厚度。在植物选择方面, 景天科植物因抗极端天气、低基质厚度要求和低维护成本而成为研究的常用植物。Ikusei Misaka<sup>[17]</sup>、Nami Yamamoto<sup>[10]</sup>对景天科植物的蒸散机制、灌溉需求、补种季节及节能减碳效果进行了深入研究。

### 2.1.3 废弃物循环利用研究

为实现日本 2000 年提出的“循环型社会”战略, 相关学者提出在屋顶绿化中循环利用废弃资源, 以降低成本并减少碳排放。在 2000—2005 年, 泥炭、竹炭及发泡废玻璃等废弃物被用于基质改良。木村裕喜<sup>[18]</sup>发现, 泥炭与珍珠岩混合的基质不仅能维持植物正常生长, 其饱和含水量比普通基质高 15%, 保水性更佳。藤井真奈美<sup>[19]</sup>在屋顶绿化的种植基质中加入竹炭作为实验组, 与无竹炭的对照组进行生长状态对比实验, 结果对照组的植物大量枯死, 实验组的植物基本维持正常生长。Taisuke Inui<sup>[20]</sup>、Yoshio Miyoshi<sup>[21]</sup>以发泡废玻璃和塑料为原料研发的 FWG (Foamed Waste Glass) 人工基质, 具有轻质、孔隙率高、保水保肥能力强等优点, 减轻了屋顶负荷。在实际应用中, 神奈川县的 Arbain Bio 川崎 1 号大楼的屋顶绿化采用了 30% 黑土与 70% 珍珠岩混合的培养基, 在无灌溉条件下实现了 4 种地被植物在厚 15 cm 的土层中稳定生长。

2000—2005 年的研究表明, 日本通过立法推动了屋顶绿化的发展, 企业在政策扶持下广泛采用简单式屋顶绿化以实现成本效益最大化。同时, 学者们在基质轻质化和废弃物循环利用方面取得了创新进展, 屋顶绿化在改善热环境方面的相关研究展现出节能优势。这些研究不仅推动了日本屋顶绿化技术的发展, 也为日本低碳城市建设提供了有力支持。

## 2.2 发展阶段 (2006—2013 年)

2006—2013 年, 日本积极应对全球变暖和城市热岛效益, 成功实现了《京都协议书》(京都议定书) 规定的减碳目标, 2013 年碳排放量达到峰值。这期间, 日本政府发布了多项指导性政策以促进屋顶绿化的实施, 如 2011 年发布的《建设低碳社会行动计划》(低炭素社会づくり行動計画) 和《绿色经济与社会变革》(緑の経済と社会の变革) 报告, 将节能减碳作为各领域研究的重点, 进一步加大了屋顶绿化的政策支持力度, 并提高公众参与度。2013 年, 日本政府发布《低碳城市促进法》(都市の低炭素化の促進に関する法律) 和《缓解热岛效应的城市发展指导方针》(ヒートアイランド現象緩和に向けた都市づくりガイドライン), 进一步明确屋顶绿化作为减碳和缓解热岛效应的手段, 并通过实践手册和示范项目推广屋顶绿化。此外, 大阪府、仙台市等地也出台了地方性激励政策, 内容涉及绿化面积补偿和费用补助。

这一时期日本屋顶绿化研究发文量为 140 篇, 占总量的 34.1% (图 6), 屋顶绿化面积从 135.5 hm<sup>2</sup> 增长至 251.9 hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>, 年均增长约 1.4 倍。通过文献分析提取出 67 个关键词, 总频次 346 次, 其中高频关键词 16 个 ( $T \geq 4$ )。

结合高频关键词、关键词共现图谱的聚类情况 (图 7) 和文章具体研究内容, 总结本时期的研究热点为“植物选择与配置研究”“节能减碳效果研究”“废弃物循环利用深入研究”。

### 2.2.1 植物选择与配置研究

优化植物选择与配置能使屋顶绿化进一步减少室内能耗, 提升减碳效果。Nigel Dunnett<sup>[22]</sup>研究发现, 多种植物组合的屋顶绿化可在夏季实现最高 12℃ 的降温, 而单一植物仅为 3.8℃。Nyuk Hien Wong<sup>[23]</sup>、Steve Kardinal Jusuf<sup>[24]</sup>通过 ENVI-met 仿真模型发现, 结缕草与灌木组合的降温节能效果优于单独种植结缕草, 这是由于不同高度的植物搭配形成的复杂空气层结构能有效削弱太阳辐射。抗旱植物如景天科植物, 能在干旱环境中减少水分蒸散, 维持较高的基质含水量, 支持周围植物的生长。Nigel Dunnett<sup>[22]</sup>、Ayako Nagase<sup>[25]</sup>的研究表明, 将景天科植物与其他植物混种, 能极大增强屋顶绿化抗极端天气的能力, 从而保证屋顶绿化的生态稳定性。在实际应用中, 东京的学校法人实践学园的屋顶绿化种植了 19 种以上的植物, 包括中乔木、矮乔木、地被植物。在 2009 年竣工后, 该屋顶绿化一年内减少二氧化碳 71.22 kg, 屋顶温度从 55℃ 降低至 25~30℃。

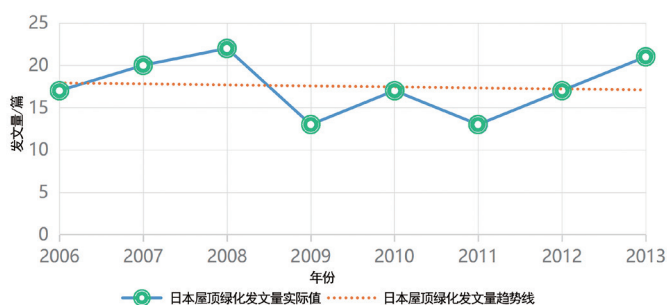


图 6 2006—2014 年日本屋顶绿化发文量

Fig.6 The number of publications on green roofs in Japan from 2006 to 2014

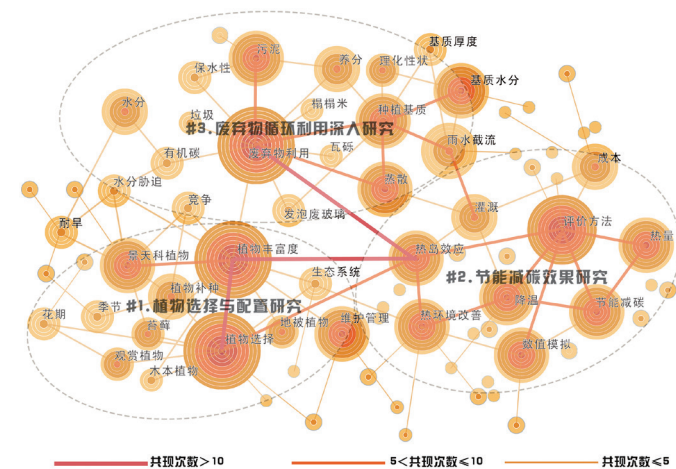


图 7 2006—2013 年的屋顶绿化关键词聚类图谱

Fig.7 Clustering map of green roofs keywords from 2006 to 2013

### 2.2.2 节能减碳效果研究

对屋顶绿化节能减碳能力的量化研究是该时期的研究热点。学者们通过实测结合 AUSSSM<sup>[26]</sup>、CFD<sup>[27]</sup>、CM-BEM<sup>[28-29]</sup>、Erdas-Imagine<sup>[30]</sup>、WRF<sup>[31]</sup>、ENVI-met<sup>[23, 30]</sup> 等模型，模拟屋顶绿化对建筑室内外和街区空间的降温效果，并将数据转换为 CO<sub>2</sub> 减排量<sup>[32]</sup>（表 2）。此外，在城市尺度上，Takanori Watanabe<sup>[31]</sup> 通过 GIS 获取屋顶数据，结合 WRF 模型模拟东京 23 区在屋顶绿化覆盖率为 20%、35%、50% 以及 100% 时的夏季 CO<sub>2</sub> 减排量，分别为 1.06 万吨/月、1.67 万吨/月、2.2 万吨/月和 3.2 万吨/月。当覆盖率达 100% 时，CO<sub>2</sub> 月减排量占东京 CO<sub>2</sub> 月排放量的 34%，最高降温达 2.5°C。这些研究表明，屋顶绿化节能减碳的量化评估方法多样，研究尺度更为全面，提升了评估的精确性。

### 2.2.3 废弃物循环利用的深入研究

由于城市建设增加了废弃物排放量，且传统焚烧处理方式污染严重，废弃物的环保处理迫在眉睫。该时期，学者们研究将废弃物循环利用作为种植基质，如椰子壳、废弃榻榻米<sup>[33]</sup>、建筑垃圾、废弃活性污泥<sup>[34]</sup>、泡沫塑料<sup>[35]</sup>、火山灰粘土<sup>[36]</sup> 和废旧轮胎等。经废弃物改造后的种植基质不仅有利于植物生长，而且更为环保。在实际应用中，2009 年竣工的熊谷组总部大楼屋顶绿化采用了“remixsoil”人工轻量土，这是由建筑回收材料和木材碎片混合而成的再生土壤，保水性能优异，即使无灌溉，也能保障植物仍能生长良好，有效减少了环境负荷，实现资源的循环利用。

总体来说，2006—2013 年日本屋顶绿化研究的低碳主题鲜明，论文发表数量较前一时期显著上升。首先，研究量化评估屋顶绿化在不同尺度室内外环境的降温和减排效果，为政策制定和新技术开发提供了依据。其次，对废弃物循环利用的研究，丰富了废弃物利用类型，提升其利用效率，有助于日本低碳城市建设。此外，植物选择与配置的研究为提升屋顶绿化的减碳效益提供了技术指导，复合种植、景天科植物和结缕草成为该时期研究重点。

### 2.3 探索阶段（2014—2023 年）

2013 年日本实现碳达峰后，碳排放量持续下降。这一时期，国土交通省依据《促进城市低碳化相关法律》（都市の低炭素化の促進に関する法律）制定了低碳建筑物认证制度，要求 2020—2030 年所有新建住宅实现“零排放”。屋顶绿化作为关键措施得到广泛推广。各地逐步完善屋顶绿化补贴标准，21 个行政区明确了建设标准与补贴金额，如大阪府提供最高 300 万日元、川崎市提供最高 50 万日元的补贴。2020 年 10 月日本国会施政演说上，日本首相菅义伟承诺 2030 年碳排放量较 2013 年降低 46%，日本政府在修订后的《全球变暖对策推进法》（地球温暖化対策推進法）中明确了 2050 年实现碳中和的目标。屋顶绿化成为实现该目标的重要举措。该时期的研究重点聚焦于提升屋顶绿化的固碳减碳效果以及新技术应用。

这一时期的屋顶绿化研究发文量为 191 篇，占总量的 46.7%，其中 2015—2018 年发文增速尤为显著（图 8）。分析提取出 76 个关键词，总频次为 337 次，高频关键词 15 个（ $T \geq 4$ ）。通过分析高频关键词、关键词聚类情况（图 9）

表 2 节能减碳效果的主要模拟软件与模型

Tab.2 The main simulation software and models for energy conservation and carbon reduction effects

方法类型	适用场景	作者及发文时间
AUSSSM	计算街区尺度下与室外空气相互作用的空调负荷	平野勇二郎等（2011）
CFD	模拟预测建有屋顶绿化的建筑或街区的空气温度分布情况	Harunori Yoshida 等（2006）
CM-BEM	模拟屋顶绿化对街区、城市的节能减碳效果	近藤裕昭等（2006），Yukihiro Kikegawa 等（2006）
Erdas-Imagine	处理遥感图像，获取一定区域的屋顶面积	Manat Srivanit 等（2013）
WRF	模拟屋顶绿化建设后的城市、街区、建筑尺度的气温变化	Takanori Watanabe 等（2009）
ENVI-met	模拟屋顶绿化对中小尺度范围内的微气候影响	Nyuk Hien Wong 等（2007），Manat Srivanit 等（2013）



图 8 2014—2023 年日本屋顶绿化发文量

Fig.8 The number of publications on green roofs in Japan from 2014 to 2023

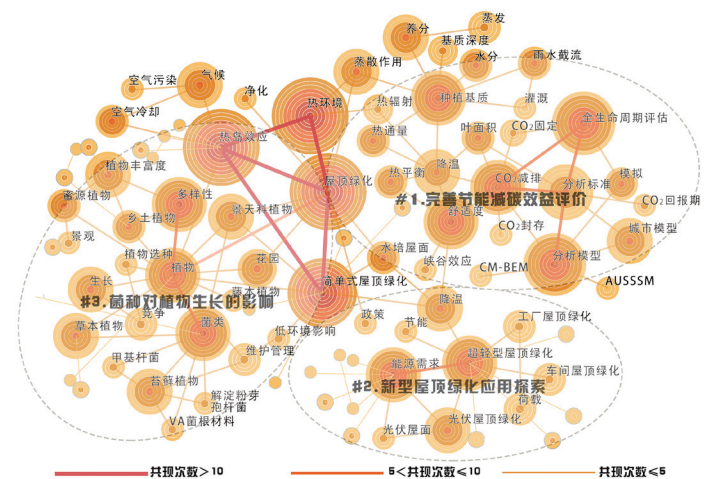


图 9 2014—2023 年的屋顶绿化关键词聚类图谱

Fig.9 Clustering map of green roofs keywords from 2014 to 2023



和文章内容可总结, 研究热点包括“完善节能减碳效益评价”“新型屋顶绿化应用探索”“菌种对植物的生长影响”。

### 2.3.1 完善节能减碳效益评价

首先, 以往的屋顶绿化节能减碳效益评价常忽略建设及维护过程中产生的CO<sub>2</sub>, 导致净效益被高估。为解决这一问题, 本时期日本引入了全生命周期法(LCA, Life Cycle Assessment), 完善了节能减碳评价。Takanori Kuronuma<sup>[37]</sup>通过LCA证实, 屋顶绿化在建成13~32年后可通过固碳作用抵消初始CO<sub>2</sub>排放。平野勇二郎<sup>[38]</sup>运用CM-BEM耦合模型量化水泵供能和灌溉的CO<sub>2</sub>排放量, 发现其占制冷设备减排量的8%, 证明即使考虑增加灌溉功能, 屋顶绿化仍具减排效果。其次, 该时期完善了对影响屋顶绿化节能减碳效益评价的相关因素的研究。Yujiro Hirano<sup>[39]</sup>、Tobi Eniolu Morakinyo<sup>[40]</sup>和Ohashi Yukitaka<sup>[41]</sup>结合宏观和微观尺度, 评估了屋顶绿化的节能减碳效果, 研究表明, 街区空间的降温幅度、节能减碳效果均与屋顶绿化覆盖率呈正相关, 与建筑高度呈负相关。当建筑的高度(H)和街道宽度(W)之比为0.4~0.6时, 降温效果最佳; 当建筑高度超过60 m, 降温效果可忽略不计。Tatsuya Matsuoka<sup>[42]</sup>、Gaochuan Zhang<sup>[43]</sup>、Yang He<sup>[44]</sup>、Kentaro Yasui<sup>[45]</sup>通过量化研究证实了植物叶面积指数、植物高度、基质厚度、基质孔隙率等因素与屋顶绿化的降温减碳效果均呈正相关。

### 2.3.2 新型屋顶绿化应用探索

为了进一步发挥屋顶绿化的固碳减碳潜力, 日本学者开展了对超轻型和光伏(PV, photovoltaic)屋顶绿化的研究。超轻型屋顶绿化主要用于工厂、车间等单层轻型建筑, Daisuke Tachibana<sup>[46]</sup>提出通过分散种植基质荷载, 如利用藤本植物实现墙面与屋顶绿化一体化的技术, 使屋面负荷降低至普通薄层屋顶绿化的1/4~1/3, 实现夏季屋顶平均降温10℃。成田健一<sup>[47]</sup>研究表明, 超轻型屋顶绿化技术在缺乏隔热层的单层建筑中尤为有

效, 能大幅降低空调需求。自2010年此技术提出以来, 到2022年, 日本工厂、仓库、车间的屋顶绿化面积与总屋顶绿化面积的比值增长至28.0% (图10), 超轻型屋顶绿化成为主流类型。光伏屋顶绿化则结合光伏屋面与喜阴植物, 实现就地发电, 减少了建筑对电力的依赖和碳排放。Chr Lamnatou<sup>[48]</sup>研究显示, 光伏屋顶绿化可将光伏屋面的发电量提升0.08%~8.3%。东惠辅<sup>[49]</sup>在东京的一栋8层建筑的对比实验中发现, 双层屋顶、屋顶绿化与PV发电系统三者结合的建筑节能效果最佳, 其中PV板能为室内空调系统提供47%的清洁电力, 显著降低了建筑对传统能源的依赖。

### 2.3.3 菌种对植物生长的影响

屋顶绿化的固碳减碳效果依赖于植物的光合作用、蒸腾作用和隔热功能, 因此确保植物的良好生长至关重要。引入特定菌种促进植物生长, 可以提高屋顶绿化植物存活率和生态系统稳定性, 增强固碳减碳效果<sup>[50]</sup>。在屋顶绿化中, 苔藓类植物因抗旱能力和防止水土流失的特性而被广泛使用, 故保证苔藓植物的存活率成为本时期研究重点<sup>[51]</sup>。Akio Tani<sup>[52]</sup>的实验表明, 甲基杆菌与苔藓类植物能相互促进生长。Mako Tamura<sup>[53]</sup>研究发现, 在基质中加入解淀粉芽孢杆菌能保护

苔藓类植物免受翠雀小核菌损害, 加入VA菌根材料则加速了草本植物的生长。

总之, 2014—2023年, 在相关政策推动下日本屋顶绿化研究进入了低碳新技术探索阶段。引入全生命周期评价方法和完善屋顶绿化减碳效益影响因素研究, 优化了屋顶绿化节能减碳效益评价。超轻型屋顶绿化和光伏屋顶绿化等技术的发展进一步提高了屋顶绿化节能减碳的效果。同时, 对特定菌种的研究增强了植物存活率和生态系统稳定性, 增强了屋顶绿化的固碳能力。该时期研究促进了屋顶绿化的广泛应用和城市低碳可持续发展。

## 3 结论

日本作为亚洲首个提出建设低碳社会的国家, 在屋顶绿化方面不断完善政策、优化技术和评价体系, 为其广泛应用奠定了基础。首先, 持续完善的屋顶绿化政策推动了屋顶绿化的发展。在近20年的发展过程中, 日本最初依靠强制性法规推动屋顶绿化发展, 而后逐步出台激励性政策, 为屋顶绿化提供资金保障, 这使得屋顶绿化技术体系不断完善, 建设成本降低, 减碳效果提升。同时, 日本在种植基质轻质化、废弃物循环利用、植物选择与配置等方面的研究, 为屋顶绿化

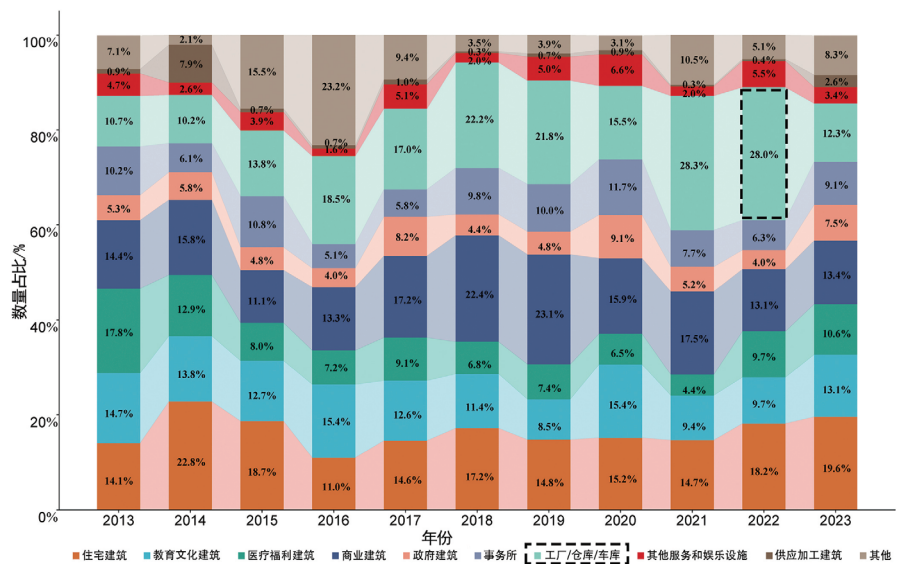


图10 不同建筑类型的屋顶绿化面积比例变化

Fig.10 Changes in the proportion of green roof area for different building types

的创新发展提供了有力支持。最后，引入全生命周期评估方法和完善评价节能减碳效益影响因素研究，进一步明确了屋顶绿化的经济与生态效益。

本文的研究创新在于补充了国内对日本 2000 年后屋顶绿化发展的研究。目前已有文献指出日本在屋顶绿化领域的领先地位，但多为宏观性概述，缺乏对其具体发展过程的深入探讨。本文通过文献计量学方法，系统分析了 2000—2023 年日本屋顶绿化研究的阶段性变化与特征，揭示了各时期的研究热点和政策背景；并通过高频词分析的定量研究方法，深入探讨了日本在研究热点与技术创新上的具体进展，为我国屋顶绿化建设提供参考。

然而，本文也存在研究局限。数据来源主要依赖于 Web of Science™ 和 J-stage，可能会影响结论的全面性。同时本文缺乏对日本与我国相关案例的深入对比研究。

目前，中国屋顶绿化的政策更多集中在宏观层面，缺乏针对公众参与、责任分工、城乡统筹、资金保障的政策支持。同时，屋顶绿化面临植物种类单一、植物存活率低、景观和生态效益欠佳的问题；另外，在屋顶绿化建设和养护阶段，存在缺乏专业技术指导、技术标准不统一、重视短期效果而忽视长期生态效益、建成后无有效养护、存续期受限等问题。未来我国屋顶绿化的研究可借鉴日本经验，结合我国实际情况，提出更具针对性的建议，推动我国屋顶绿化的发展，助力低碳城市建设。

注：图 10 改绘自参考文献 [4]，其余均为作者自绘。

## 参考文献：

[1] 宇恒可持续交通研究中心，中国国土勘测规划院，生态环境部环境规划院. 国土空间用地结构对大气污染物与碳排放的影响研究 [R/OL]. (2021-05-11) [2023-05-11]. <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-lccp-20210711-3-zh>.

[2] PECK S W, LALLAGHAN C, KUHN M E, et al. Green backs from Green roofs: Forging a New Industry in Canada[R]. Toronto: Canada Mortgage and Housing Corp, 1999.

[3] 李骄娴. 南京市屋顶绿化生态效益研究——以南京紫东国际创意园区为例 [D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

[4] 日本国土交通省. 令和元年全国屋上・壁面绿化施工実績調査 [EB/OL]. (2020-12-24) [2023-05-11]. [https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi10\\_hh\\_000472.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi10_hh_000472.html).

[5] 简兴, 鲍敏, 王雪娟. 屋顶绿化研究现状与展望 [J]. 世界林业研究, 2021, 34 (6) : 14-19.

[6] 孙健, 李亚齐, 胡春, 等. 日本屋顶绿化建设对我国的启示 [J]. 广东农业科学, 2012, 39 (11) : 65-68.

[7] WONG N H, CHEN Y, ONG C L, et al. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment[J]. Building and environment, 2003, 38 (2) : 261-270.

[8] AIZAKI M, SUMITA A. Effect of hydrophytes on the control of water temperature in model wetland type green roof garden[J]. Environmental Science (Japan), 2005, 18 (5) : 535-540.

[9] 小瀬博之. A-26 土壤と植物の種類による屋上緑化の植物の生育状況と温度変化に関する研究 [C]// 空気調和・衛生工学会. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集. 東京: 空気調和・衛生工学会, 2004.

[10] YAMAMOTO N, KAWASHIMA S, MURAKAMI A, et al. Effects of the vegetation density and the irrigation of rooftop greening with *Sedum mexicanum* Britton on local thermal conditions and heat flux balance[J]. Journal of The Japanese Institute of Landscape Architecture, 2004, 67 (5) : 443-446.

[11] 山田宏之, 養父志乃夫, 中島敦司, 等. 屋上緑化による熱遮蔽効果の解析 [J]. ランドスケープ研究, 2004, 67 (5) : 453-456.

[12] 山口隆子, 横山仁, 石井康一郎. 軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果 [J]. ランドスケープ研究, 2005, 68 (5) : 509-512.

[13] AOKI S, MIZUNO S. F-15 Study on the Effect of Rooftop Greening in Reducing the Air-conditioning Load of a Building[C]// Technical Papers of Annual Meeting the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan. Sapporo: Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 2005: 445-448.

[14] 仙川誠, 大橋一正, 瀬尾播元, 等. B-45 屋上緑化による環境改善効果に関する研究:(第 1 報) 既往の研究の整理と屋上緑化前における実測調査 [C]// 空気調和・衛生工学会. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集. 東京: 空気調和・衛生工学会, 2003.

[15] 杉本英夫, 赤川宏幸, 等. テキスタイルを利用した底面灌水方式による屋上緑化システム [J]. ジオシンセティック技術情報, 2002, 18 (2) : 39-45.

[16] 田窪祐子, 小口深志. 人工軽量土壌を用いた屋上緑化における土壌厚と各種植生との関係 [J]. 日本緑化工学会誌, 2001, 27 (1) : 193-196.

[17] MISAKA I, ISHII K, YOKOYAMA H, et al. Evaluation of effects of light and thin type rooftop greening on mitigating heat island[J]. AU Journal of Technology and Design, 2005, 21: 195-198.

[18] 木村裕喜, 瀬川正俊, 金児晴信, 等. 屋上緑化の薄層基盤における乾燥とコウライシバの生育 [J]. 日本緑化工学会誌, 2003, 29 (1) : 212-214.

[19] 藤井真奈美, 中根周歩, 中坪孝之. 屋上緑化土壌における竹炭の利用とその植栽植生の生育 [C]// 日本生態学会. 日本生態学会第 52 回大会講演要旨集. [s.l.]: 日本生態学会, 2005.

[20] INUI T, MIZUNIWA C, KONDO M. Potential of Foamed Waste Glass Material as Molding for Roof Planting[J]. Journal of The Japanese Institute of Landscape Architecture, 2004, 67 (5) : 479-482.

[21] MIYOSHI Y, TAKAMATSU T, TANABE H, et al. 913 Development of Base for Rooftop Planting Made of Discarded Colored Glass Bottles[J]. The Proceedings of Conference of Kansai Branch, 2008, 83: 9-13.

[22] DUNNETT N, NAGASE A, BOOTH R, et al. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments[J]. Urban Ecosystems, 2008, 11: 385-398.

[23] WONG N H, JUSUF S K, LA WIN A A, et al. Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics[J]. Building and environment, 2007, 42 (8) : 2949-2970.

[24] WONG N H, JUSUF S K. GIS-based greenery evaluation on campus master plan[J]. Landscape and urban planning, 2008, 84 (2) : 166-182.

[25] NAGASE A, DUNNETT N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure[J]. Landscape and urban planning, 2011, 104 (3-4) : 356-363.

[26] 平野勇二郎, 藤田社, 文屋信太郎, 等. 低炭素都市への展開を目指した都市・街区単位の各種施策導入効果 - 川崎市における冷房エネルギー消費削減に関する検討 [J]. 環境科学会誌, 2011,

24 (4) : 255-268.

[27]TAKAHASHI K, YOSHIDA H, TANAKA Y, et al. Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation[J]. Energy and buildings, 2004, 36 (8) : 771-779.

[28]KIKEGAWA Y, GENCHI Y, KONDO H, et al. Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning[J]. Applied Energy, 2006, 83 (6) : 649-668.

[29] 近藤裕昭, 亀卦川幸浩, 玄地裕, 等. 都市気候・ビルエネルギー連成モデルによるヒートアイランド対策の評価 [C]// 日本ヒートアイランド学会. 日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.1. 東京: 日本ヒートアイランド学会事務局, 2006.

[30]SRIVANIT M, HOKAO K. Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer[J]. Building and environment, 2013, 66: 158-172.

[31]WATANABE T, IZUMI T, MATSUYAMA H. Numerical study on effects of rooftop greening on moderating air temperature in Tokyo metropolitan area[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research), 2011, 67 (2) : 101-113.

[32]CHEN H, OOKA R, HUANG H, et al. Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation[J]. Building and Environment, 2009, 44 (11) : 2290-2299.

[33] 伊藤文喜, 石川龍二. 廃棄古置のマット化による屋上緑化技術の開発に関する研究 [J]. 日本緑化工学会誌, 2013, 39 (1) : 158-161.

[34]KADUICHI, KITAGAWA, SHIZUO, et al. Development of porous ceramic panel for light and thin rooftop greening with using excess textile dyeing sludge[J]. Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, 2012, 37 (3) : 433-436.

[35] 加藤正広. フェノール樹脂発泡体混合培養土を用いたヒメイワダレソウ (Phyla canescens (Kunth) Greene) ロールマットの特性 [J]. 日本緑化工学会誌, 2016, 42 (1) : 195-196.

[36] 安福規之, 落合英俊, 大嶺聖, 等. 廃棄発泡スチロールと火山灰質土を活かした屋上緑化植栽基盤の開発 [J]. 日本緑化工学会誌, 2007, 33 (1) : 140-145.

[37]KURONUMA T, WATANABE H, ISHIHARA T, et al. CO<sub>2</sub> payoff of extensive green roofs with different vegetation species[J]. Sustainability, 2018, 10 (7) : 2256.

[38] 平野勇二郎. オフィスビル街区における屋上緑化の CO<sub>2</sub> 削減効果のシミュレーション評価 [C]// 空気調和・衛生工学会. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集平成 26 年度大会 (秋田) 学術講演論文集第 10 巻都市・環境編. 東京: 空気調和・衛生工学会, 2014.

[39]HIRANO Y, TANIKAWA H, FUJITA T. Numerical simulation of rooftop evapotranspiration and CO<sub>2</sub> reduction effects of buildings with green roofs[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1, 2015, 71 (4) : 439-444.

[40]MORAKINYO T E, DAHANAYAKE K W D K C, NG E, et al. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study[J]. Energy and Buildings, 2017, 145: 226-237.

[41]OHASHI Y, IHARA T, KIKEGAWA Y, et al. Numerical simulations of influence of heat island countermeasures on outdoor human heat stress in the 23 wards of Tokyo, Japan[J]. Energy and Buildings, 2016, 114: 104-111.

[42]TATSUYA M, KAZUAKI T, TOSHIYA O. Leaf traits of Sedum species used for green roofs and its influence on evapotranspiration[J]. Journal of the Japanese Society of

Revegetation Technology, 2017, 43: 115-120.

[43]ZHANG G, HE B J, ZHU Z, et al. Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates[J]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16 (2) : 179.

[44]HE Y, YU H, OZAKI A, et al. Influence of plant and soil layer on energy balance and thermal performance of green roof system[J]. Energy, 2017, 141: 1285-1299.

[45]YASUI K, TANAKA A, ITO K, et al. Experimental and numerical analyses of temperature-reducing-effect by heat of water evaporation on a moss-greening ceramic utilizing waste silica[J]. Materials, 2018, 11 (9) : 1548.

[46]TACHIBANA D, NAOKI S, KIKUCHI S, et al. Trial application of factory rooftop greening system with ultra-lightweight substrate[J]. AIJ Journal of Technology and Design, 2010, 16(32): 411-414.

[47] 成田健一. 緑化をめぐる議論～緑のカーテン・屋上緑化・公園緑地の冷気形成 [J]. 日本不動産学会誌, 2015, 29 (3) : 50-55.

[48]LAMNATOU C, CHEMISANA D. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 264-280.

[49] 東恵輔, 趙旺熙, 岩本静男. 屋上緑化・二重屋根・PV 発電による空調消費エネルギー削減効果の検討 [C]// 空気調和・衛生工学会. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集平成 27 年度大会 (大阪) 学術講演論文集第 5 巻熱負荷・外皮性能・シミュレーション編. 東京: 空気調和・衛生工学会, 2015.

[50]FULTHORPE R, MACIVOR J S, JIA P, et al. The green roof microbiome: Improving plant survival for ecosystem service delivery[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2018, 6: 5.

[51]TAKIKAWA Y, KIDA S, ASAYAMA F, et al. Defence responses of *Aphanogma patens* (Hedw.) Lindb. to inoculation with *Pythium aphanidermatum*[J]. Journal of Bryology, 2015, 37 (1) : 1-7.

[52]TANI A, TAKAI Y, SUZUKAWA I, et al. Practical application of methanol-mediated mutualistic symbiosis between *Methylobacterium* species and a roof greening moss, *Racomitrium japonicum*[J]. PLoS One, 2012, 7 (3) : e33800.

[53]TAMURA M, TANABE M, VALKONEN J P T, et al. Sunagoke moss (*Racomitrium japonicum*) used for greening roofs is severely damaged by *Sclerotium delphinii* and protected by a putative *Bacillus amyloliquefaciens* isolate[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 372.

---

## 作者简介:

张恒 /1975 年生 / 男 / 湖北黄冈人 / 博士 / 华侨大学建筑学院 (厦门 361021) / 副教授 / 研究方向为景观建筑设计、低碳景观设计

张艺川 /2000 年生 / 女 / 四川泸州人 / 华侨大学建筑学院 (厦门 361021) / 在读硕士研究生 / 专业方向为低碳景观设计

詹永杰 /1997 年生 / 男 / 贵州毕节人 / 硕士 / 成都市建筑设计研究院有限公司 (成都 610000) / 专业方向为景观建筑设计

李俐 /1976 年生 / 女 / 湖南长沙人 / 硕士 / 华侨大学建筑学院 (厦门 361021) / 副教授 / 研究方向为低碳景观设计