

DOI: 10.20103/j.stxb.202212293698

黄静,尹海伟,孔繁花,刘宏庆,孙涛.屋顶绿化生态系统调节服务与政策效应研究综述.生态学报,2023,43(22):9107-9120.

Huang J, Yin H W, Kong F H, Liu H Q, Sun T. Green roof ecosystem regulation service and policy promotion: a systematic review. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9107-9120.

屋顶绿化生态系统调节服务与政策效应研究综述

黄 静¹, 尹海伟², 孔繁花^{1,*}, 刘宏庆¹, 孙 涛³

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

3 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 屋顶绿化作为基于自然解决方案的一种生态战略,可以有效缓解城市的一系列生态环境问题。为了更好的挖掘屋顶绿化在城市生态系统中的应用潜力,需要从屋顶绿化生态系统调节服务出发,全面且定量地认识屋顶绿化与城市生态系统的关联机制。阐述了屋顶绿化的构成要素,屋顶绿化生态系统调节服务的内在机制;回顾了屋顶绿化生态系统主要调节服务与政策推动建设效果;从屋顶绿化推行制约因素及生态系统调节服务研究等方面进行了展望。目前,屋顶绿化研究主要侧重于环境调节服务。在水环境调节方面,当前多针对屋顶绿化的水环境调节功能开展研究,还需进一步从屋顶绿化生态系统水循环的角度探究,明确屋顶绿化在什么条件下是径流的污染源。在热环境调控方面,多数研究集中在量化屋顶绿化对城市热环境的影响,而驱动屋顶绿化降温效应的内在机制与城市热环境调节服务之间的定量联系还需深入研究。在建筑能耗方面,目前仍然缺乏建筑物的能源性能建模所需的屋顶绿化物理参数,需要基于长时间观测数据构建能量传输模型,从建筑-基质-植被-大气耦合的角度,综合研究屋顶绿化能量流动的过程与机制,明晰屋顶绿化与裸露屋顶之间的能量流动差异。在政策推动效应方面,我国屋顶绿化政策类型相对单一,缺乏覆盖整个屋顶绿化生命周期的推广政策。建议多维度、大范围的推动屋顶绿化建设,以期更好的改善城市生境。

关键词: 屋顶绿化;城市生态系统;政策效应;水环境;热环境

Green roof ecosystem regulation service and policy promotion: a systematic review

HUANG Jing¹, YIN Haiwei², KONG Fanhua^{1,*}, LIU Hongqing¹, SUN Tao³

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: As an ecological strategy of nature-based solution, green roofs can effectively alleviate a series of ecological environmental problems in urban cities. In order to better tap the application potential of green roofs in urban ecosystem, it is necessary to comprehensively and quantitatively understand the correlation mechanism between green roof and urban ecosystem starting from the regulation services of green roofs. Therefore, this paper firstly expounds the composition of green roofs, the internal mechanism of green roof ecosystem functions, reviews the green roof ecosystem functions and policy promotion effects and the prospect is put forward from the research status of the green roof ecosystem function and the policy promotion effect. The research field of green roof mainly focuses on the service effect of environmental regulation. In terms of

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878328,32171571);科技部国家重点研发计划项目(2017YFE0196000)

收稿日期: 2022-12-29; **采用日期:** 2023-06-28

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

water environment regulation, most studies are about the water environment regulation function of green roofs. It is necessary to further explore from the perspective of the water cycle of green roof ecosystems, and to clarify under what circumstances green roofs are runoff pollution sources. A problem that needs to be solved urgently. In terms of thermal environment regulation, most studies focus on quantifying the impact of green roofs on urban thermal environment, and there is still a lack of a comprehensive understanding of the mechanism driving the cooling effect of green roofs, which is also one of the difficulties in the study of thermal environment regulation functions. In terms of building energy consumption, the physical parameters of green roofs required for building energy performance modeling are still lacking. It is necessary to construct an energy transfer model from long-term observation data to clarify the energy flow difference between green roofs and bare roofs. From the perspective of building-substrate-vegetation-atmosphere, we need to comprehensively study the process mechanism of green roof energy flow, and clarify the difference between actual building energy consumption and simulated energy consumption. In terms of policy promotion effect, policy promotion is the main driving factor for the popularization of green roof. Compared with Europe and the United States, the promotion of roof greening policies in my country is relatively single, and there is a lack of promotion policies covering the entire roof greening life cycle. We can learn from Europe and the United States to promote the construction of roof greening in multiple dimensions and on a large scale, and increase promotion efforts, in order to improve the urban environment.

Key Words: green roof; urban ecosystem; policy effect; water environment; thermal environment

全球已有半数以上人口居住在城市,并预计将在 2050 年增至 66%^[1]。城市化在推动经济社会发展、提升公共服务水平等方面带来了诸多好处,但同时也带来了一系列生态环境问题^[2],如全球碳排放和能源消耗量大^[3-4],加剧气候变化^[5-7]、威胁人类健康^[8-9]等。城市化的影响已远远超出了城市本身,深刻地影响了世界各地的环境和气候,加剧了气候变化的影响^[10-11]。

随着居民对城市环境质量改善的需求日益提升,许多城市开始倡导采用基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)来应对各类生态环境问题^[12]。作为 NbS 的重要空间载体,绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)因其能够提供丰富的生态系统服务而备受关注^[13]。增加 GI 建设,重新将自然引入城市,已成为基于 NbS 有效治理和缓解城市化带来的系列负面问题的重要途径^[14]。许多国家和城市已在恢复、加强和创造各种形式 GI 方面投入了大量资源,但在高密度城市建成区用地矛盾日益突出,限制了地面 GI 的发展。作为新型 GI 的屋顶绿化^[15],因其不占用额外的土地资源,被认为是弥补城市绿色空间损失的最有力工具之一。据统计,建筑屋顶一般约占城市总面积的 20%—25%,在一些高密度城市甚至可达 40%—50%^[16]。

屋顶绿化具有重要的社会、经济与生态环境效应/效益,如减少雨水径流,缓解城市内涝^[17-18];降低大气与地表温度,减少城市热岛效应^[14,19];提高建筑物能源利用效率,降低因取暖和制冷带来的能源消耗^[20-21];减少空气污染^[22];减少温室气体排放^[23-24],提供生物栖息地,提升城市物种生物多样性^[25-26];构建绿地景观,使城市居民通过亲近大自然来改善心理健康^[27]等。由此可见,屋顶绿化在城市环境恢复中能够发挥关键作用^[28],因而全球许多国家与城市均颁布了推动屋顶绿化建设的政策和法规^[29-30],例如,德国通过国家立法、市政府法规和激励措施推动屋顶绿化快速发展,2003 年已有超过 14%的平屋顶铺装屋顶绿化^[31]。

为了更好地挖掘屋顶绿化在城市生态系统中的应用潜力,需要从屋顶绿化生态系统的功能出发,全面且定量地认识屋顶绿化与城市生态系统的关联机制。因此,本文首先阐述了屋顶绿化的起源与组成,屋顶绿化生态系统功能的内在机制,然后回顾了屋顶绿化生态系统功能与政策推动建设效果,最后从屋顶绿化发展制约因素及生态系统调节服务研究等方面进行了展望。

1 屋顶绿化生态系统服务

1.1 屋顶绿化起源与组成

德国能源危机开启了全球屋顶绿化新篇章。19 世纪 60 年代,德国受能源危机的影响^[32],率先开展了屋

屋顶绿化相关研究^[33]。至二十一世纪初,德国已经成为世界公认的屋顶绿化相关研究最全面最先进的国家^[34]。屋顶绿化亦称为绿色屋顶、生态屋顶、植被屋顶等,泛指部分或全部被植被覆盖的建筑物屋顶^[35]。屋顶绿化自上而下主要由五个部分组成(图1):1)植被层;2)基质层(类似于土壤的生长介质,保留水分和固定根系);3)过滤层(防止排水堵塞和减少基质损失);4)排水层(疏散多余的水);和5)保护层(阻止水和根系破坏屋顶)^[36]。根据其单位面积重量、基质层特点、维护要求、建造成本、植物类型和灌溉方式等,可分为粗放型屋顶绿化(extensive green roof)和集约型屋顶绿化(intensive green roof),也有学者增加半集约型屋顶绿化(semi-intensive green roof)作为第三类^[37]。物种丰富度、承重要求、施工范围和维护成本由粗放型到集约型逐级增加^[38]。

1.2 屋顶绿化生态系统调节服务内在机制

生态系统是指在一定的空间内生物和非生物成分通过物质循环和能量流动相互作用、相互依存而构成的生态单元,并与周围环境相互作用^[39]。生物与环境之间的交互作用是由复杂的能量流与能量转化驱动^[40]。屋顶绿化是一个空中的生态系统,与裸屋顶相比,因其自然组成成分形成的物理生化过程(图2),改变了屋顶表面的能量流动与物质循环,其对于城市环境的调节服务也会发生改变。

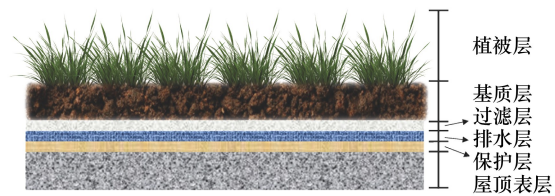


图1 屋顶绿化的组成示意图

Fig.1 The composition of the green roof layers

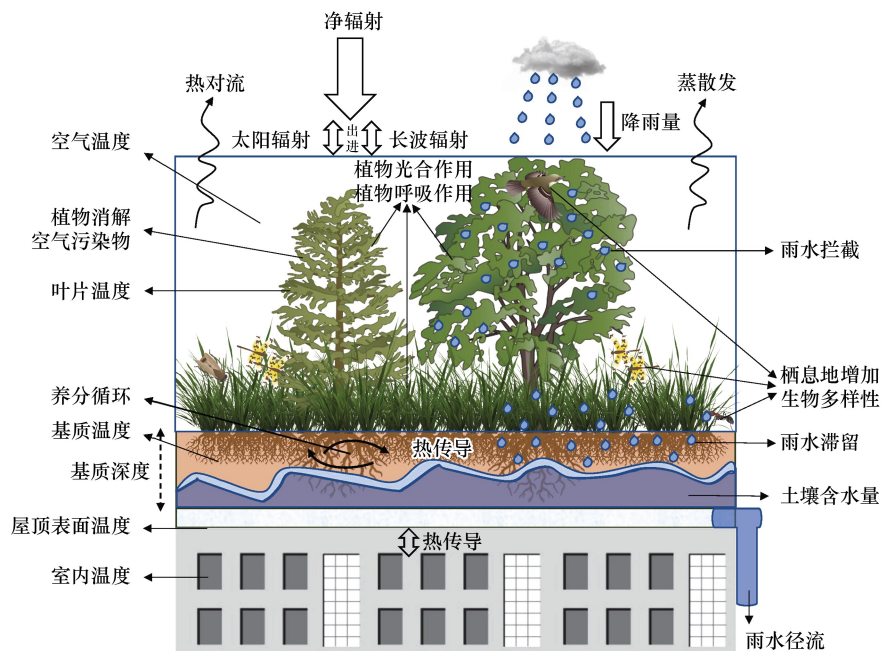


图2 屋顶绿化关键物理生化过程概念图

Fig.2 Key physical and biochemical processes of green roof

水循环方面,降雨发生时,裸屋顶表面会直接形成雨水径流汇入城市地下水管网;屋顶绿化植被层、土壤层、储水层都会在一定程度上减少雨水径流,缓解城市雨洪管理压力^[41]。热环境方面,屋顶绿化可以通过植被遮荫、降低潜热和增加蒸散有效降低区域空气温度^[42],提高热舒适性。建筑能耗方面,屋顶绿化的覆盖使得阳光无法直射到屋顶原有表面,有效阻止了建筑表面吸收能量^[43],且能够增加热容和减少屋顶表面的热对流,从而减少因取暖和制冷带来的能源消耗^[44]。另外,屋顶绿化植物能够通过吸附、吸收、阻挡、排放等方式,消解或增加空气中的污染物^[22,45];屋顶绿化作为自然外部环境和室内环境之间的构造边界,能够吸收屋顶上

不同类型屋顶绿化的水环境调节性能有所不同。粗放型、密集型屋顶绿化分别在特定条件下可以减少 60%、100% 的径流量^[52-53]。Speak 等人^[54]在曼彻斯特大学校园内的观测结果表明,密集型绿化屋顶平均径流截留率为 65.7%,而裸屋顶的平均径流截留率为 33.6%。屋顶坡度也是影响屋顶绿化雨水径流的重要原因。Getter 等人^[55]设置了 2%、7%、15% 和 25% 四种梯度的 12 个粗放型屋顶绿化试验台(2.44m×2.44m),结果表明坡度为 2% 的试验台径流截留效果高于坡度 25% 的试验台。

通常,降雨量越小,屋顶绿化的截流能力越强。葛德和张守红^[56]对不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益进行了观测,发现绿色屋顶径流削减率与降雨量呈显著负相关,降雨量小于 10mm 时,绿色屋顶径流削减率等于或接近 100%,当降雨量大于 81.4mm 时,径流削减率低于 55%。基质深度及其初始饱和度也是影响屋顶绿化降水截流能力的重要因素,200mm 基质深度的屋顶绿化能有效减少 42.8%—60.8% 的地表径流,而 150mm 基质深度的屋顶绿化仅能减少 13.8%—34.4% 的地表径流^[57]。

屋顶绿化对径流水质的调节性能也是近年来的研究热点^[58]。屋顶绿化基质对 Al、Fe、Cr、Cu、Ni、Zn、Cd、Pb 等多种金属离子具有较好的吸附能力,也显示了中和雨水酸性(雨水 pH 通常低于基质)的潜力^[59]。尽管屋顶绿化已被证实可以净化径流水质,但屋顶绿化可能会存在反作用^[60-61],一个新建成 3 个月屋顶绿化的径流试验和水质检测发现,其径流中污染物的浓度明显高于裸屋顶;张千千^[62]等人研究指出屋顶绿化虽然净化了一部分水质,但是增加了硝态氮和总氮的污染负荷。另外,植物种类、基质特征和当地生态环境也会影响屋顶绿化的水质调节性能^[63]。Monterusso 等人^[58]在密歇根大学的屋顶绿化实验中发现,径流中磷的释放浓度取决于屋顶绿化的植被组成,景天科植被会导致较高的磷释放,同时管理过程中施肥和土壤中微生物的生命活动等因素也会对屋顶绿化水质产生影响。

1.3.2 热环境

屋顶绿化降温性能的衡量指标主要是周边空气温度、地表温度以及热通量。城市化(urbanization)、气候变化(climate change)、长时间尺度(long term)是屋顶绿化近 10 年的热点研究关键词(表 1)。Wong 等人^[64]研究表明屋顶绿化可以使一定范围内的环境温度降低 1.5℃;由于植物的蒸腾作用,屋顶绿化周围的相对湿度也较高。屋顶绿化的降温效果与其面积盖度成正比^[65];当其基质层土壤含水量充足的时候,屋顶绿化会以潜热通量的形式耗散更多达到屋顶表面的能量^[66]。因而,在城市地区采用灌溉的屋顶绿化几乎可以完全抵消城市热效应指数的增加^[67]。同时,大面积的屋顶绿化足以保护原始屋顶各结构层免受极端温度的影响,延长建筑屋顶使用年限^[68]。

与空气温度相比,屋顶绿化对建筑表面温度降温效果更好,降温效果在 0.8—60℃ 之间。由于不同屋顶的植物种类、生长情况、面积、培养基质、所处气候类型等都有不同,也有学者用热振幅来衡量比较不同屋顶绿化间的降温效果。Dong 等人^[69]运用遥感影像获取的地表温度来表征屋顶绿化的降温效果,发现每增加 1000m² 的屋顶绿化,屋顶 100m 缓冲区的地表温度会降低 0.4℃。

在研究屋顶绿化降温效应作用机理的过程中,学者们开展了针对不同材质培养基质^[70]、不同种类植被^[71]、有无通风^[72]、有无灌溉等情况下的屋顶绿化相关研究。如植物的生物活性和表面反照率在抗热性中起着至关重要的作用^[73]。屋顶绿化与传统屋顶相比的关键特性是它具有较低的太阳辐射吸收率,使得建筑表面吸收太阳辐射能量减少,从而降低了建筑表面温度。颜色浅的植被也被证实比颜色深的植被具有更低的太阳辐射吸收率,其建筑表面温度降温效果更好。在夏季干燥炎热的气候区,需要通过灌溉使得植物在长期高温干旱的状态下维持生长^[74],保证植被正常的物理生化过程,实现更好的降温功能。叶面积指数较大的植被具有更好的降低建筑表面温度效果^[75]。

屋顶绿化的降温效应会受到距离的限制,只能影响离屋顶几米以内的范围。有相关研究发现其在白天会出现一定的增温效应^[76]。虽然屋顶绿化表现出短暂的白天升温效应,但季节性时间尺度上具有良好的降温效果,夏季降温量最大,其逐小时平均空气降温约 0.28℃^[77]。屋顶绿化植物对微气候的影响大概控制在距离植物表面 70cm 范围内^[78],且屋顶绿化的夜间的降温强度高于白天^[79]。

1.3.3 建筑能耗

屋顶绿化是生物气候研究中为数不多的建筑被动降温技术之一^[80]。能量(energy)、长时间(long term)、传质(mass transfer)更是屋顶绿化近 10 年来的研究热点(表 1)。吸收太阳辐射是建筑物形成城市热岛的主要原因之一^[81],屋顶绿化可以有效阻挡建筑物吸收太阳辐射,减少屋顶外表面的热对流通量并通过植被层和基质层存储部分热量,有助于夏季室内降温和冬季室内热量保持,从而降低能源消耗^[82]。在发达国家,建筑物空调使用需要消耗大量电能,如美国大约六分之一的电力是由暖通空调设备所产生^[44]。由于屋顶绿化的覆盖,建筑制冷平均节能效果约为 30%,供暖节能约为 14%^[83]。这是因为屋顶绿化对于建筑物而言是隔热装置,其减少了通过屋顶的热流^[84]。屋顶绿化对城市和地区的微气候,及其下方建筑的室内温度都能产生积极影响^[82]。在夏季有屋顶绿化的屋顶被动冷却效果提高了三倍,室内空气温度可降低 2℃,年能源需求减少 6%^[85],既有研究指出新加坡五层商业建筑建设的屋顶绿化使建筑年能耗降低 0.6%—14.5%^[86]。

目前,大多数关于屋顶绿化的能量研究大都集中在建筑节能方面^[20—21],对屋顶绿化辐射传输的物理生化过程研究仍较少。生物与环境之间的相互作用是由复杂的能量流和能量转换所驱动^[87],而这些相互作用也同样适用于屋顶绿化植被与周边城市环境之间的能量相互作用。目前,大多数屋顶绿化的传热传质模型都假设冠层和基质是均匀的,并且默认植物完全覆盖屋顶表面,没有考虑到植物生长的季节变化^[88]。量化屋顶绿化建筑节能的研究大都依赖于模拟数据或集成软件,且建筑物的能源性建模所需的屋顶绿化物理参数实际值仍存在缺失现象,而替代性参数的估计值会增加模拟的误差^[21]。同时,缓解城市高温策略建模的一个障碍是缺乏现场气象数据^[89]。Feng 等人^[90]虽然利用实际观测的气象数据,对屋顶绿化的日能量流进行了研究,但有机体对环境变化的反应是复杂的^[91],长时间尺度的研究仍然缺乏^[1]。Squier 等人^[92]根据实测数据,研究了土壤热通量的变化和季节性屋顶绿化的热性能,但并没有进行具体的屋顶绿化表面能量收支研究,长时间尺度的实际建筑能耗效果仍未被明确。

1.3.4 其他调节服务

屋顶绿化对空气污染物具有一定调节作用。屋顶绿化植物通过吸附、吸收、阻挡、排放等方式,可在一定程度上降低 CO、SO₂、NO₂ 等污染物,能够增加 VOCs,但降低或增加的程度并不一致^[93—95]。另外,不同类型的屋顶绿化对空气污染物的调节能力也不同,密集型屋顶绿化强于粗放型屋顶绿化^[96]。Tan 和 Sia^[97]在新加坡对比研究了有无屋顶绿化对空气中酸性气体污染物和颗粒物的浓度含量,结果表明 SO₂、NO₂ 略有减少,颗粒物的质量浓度显著升高但数量浓度略有下降。由于高精度监测设备造价高昂等原因,目前屋顶绿化空气质量的实地监测研究相对较少。

屋顶绿化作为自然外部环境和室内环境之间的人造介质,可以吸收屋顶上衍射的声波,增强屋顶系统的绝缘性^[46],进而减少城市交通噪声污染对居民的影响^[47—48]。Connolly 和 Hodgson^[98]对屋顶绿化不同基质深度、含水量和植物种类的降噪效果进行了探究,发现屋顶绿化相较于裸屋顶在声波低频和中频范围内可分别降低 10dB 和 20dB。与高楼层屋顶绿化相比,底层建筑的屋顶绿化具有更好的隔音效果,因为低楼层屋顶绿化可以更好的暴露在城市声环境中,形成有效的吸声表面^[94]。

2 屋顶绿化政策推动效应

2.1 屋顶绿化政策全球分布

政策是推动城市建设屋顶绿化的重要因素^[99]。图 3 为各国屋顶绿化研究与政策颁布分布概况图。由图 3 可知,开展屋顶绿化研究分布在欧洲、美洲、亚洲、大洋洲及部分非洲地区;而屋顶绿化政策颁布主要集中在欧洲、北美及亚洲地区。各个国家城市地理区位不同,面临的城市环境问题不同,制定的针对性政策也是有显著差异^[100—101]。

2.2 屋顶绿化政策制定内容与效应

2.2.1 欧洲屋顶绿化政策

20 世纪 70 年代,石油危机的出现令屋顶绿化发展迎来重要发展机遇。德国率先通过提供复杂的灌溉和

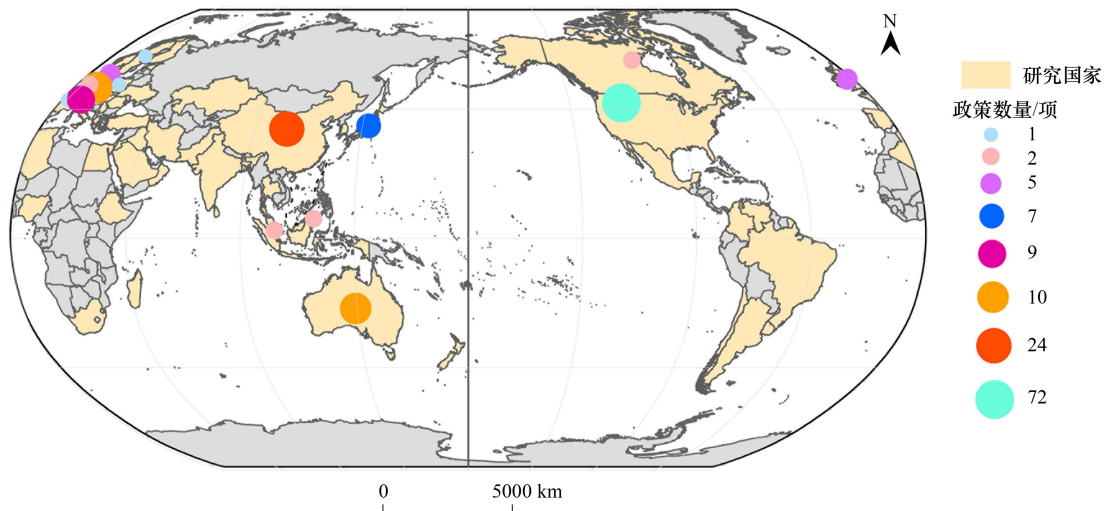


图 3 各国屋顶绿化研究与政策颁布数量分布图

Fig.3 Distribution Map of Green Roof Research and Policy Promulgation in the World

防护手段开创了新型、可靠的屋顶绿化应用技术^[102]。德国屋顶绿化协会(Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V, FBB)将屋顶绿化的推广建设政策分为直接财政奖励、间接财政奖励、生态补偿措施及纳入发展法规四种^[103],并对人口超过 1 万人城市的绿色基础设施政策进行了统计(表 2),发现德国近 39%的城市都颁布了屋顶绿化及立面绿化的相关政策,其中以间接财政奖励和纳入当地城市发展法规为主。2015 年,德国斯图加特总屋顶绿化面积 200 万 m²,人均屋顶绿化面积 3.38m²;德国慕尼黑总屋顶绿化面积近 315 万 m²,人均屋顶绿化面积 2.17m²;德国柏林总屋顶绿化面积 360 万 m²,人均屋顶绿化面积 1.11m²^[105]。目前,德国每年新建约 1000 万 m²的屋顶绿化,其中约 85%是粗放型屋顶绿化。

表 2 德国城市绿色基础设施政策统计^[104]

Table 2 Statistics on green infrastructure policies in German cities

绿化类型 Greening types	政策分类 Policy types	各年份政策数量 Number of policies by year					全国总城市数量 Total number of German cities
		2000—2004	2010	2012	2014	2016—2017	
屋顶绿化 Green roof	直接财政补贴	70	36	32	31	32	1488
	间接财政奖励	—	221	276	270	217	
	纳入发展法规	145	198	208	202	213	
	生态补偿措施	—	50	59	55	50	
立面绿化 Vertical green	直接财政补贴	—	32	30	25	28	
	纳入发展法规	—	188	187	172	135	

表格中数字表示城市数量;“—”表示无统计数值

1991 年,瑞士苏黎世颁布了推广建设屋顶绿化的政策《Green Roof Program》,要求所有未用作屋顶露台带有平屋顶的新建或翻新建筑物都必须建设屋顶绿化^[106]。这一政策有力推动了苏黎世屋顶绿化的建设进程。2002 年开展的克洛滕国际机场屋顶绿化建设项目^[107],是苏黎世最大的屋顶绿化建筑项目之一,充分响应了瑞士景观概念,即建筑应与自然景观兼容。瑞士作为与德国同期开展屋顶绿化的国家之一,其屋顶绿化发展速度更快,以巴塞尔为例,巴塞尔采用直接财政补贴与纳入发展法规政策,双维度推动屋顶绿化的发展建设,至 2015 年,总屋顶绿化面积 100 万 m²,人均屋顶绿化面积 5.71 m²,是同期德国柏林人均屋顶绿化面积的 5 倍^[105]。

2008 年,英国伦敦颁布了第一个屋顶绿化政策《living roofs and walls》^[108],而后从地区的生物多样性、应

对气候变化等方面相继颁布 5 项政策,大力推动伦敦屋顶绿化的发展建设。尽管相对于德国、瑞士等国政策颁布较晚,但是在多维政策的推动下,英国伦敦的屋顶绿化面积增长迅速,2017 年伦敦的屋顶绿化面积相较于 2016 年增加了 17%^[105],总面积达到 150 万 m²,人均屋顶绿化面积 0.17 m²,中央活动区的人均屋顶绿化面积达到了 1.26 m²;其中广泛型屋顶绿化占 75%,密集型屋顶绿化占 25%。

2014 年,欧洲地区屋顶绿化联合会(European Federation Green Roofs & Walls Associations, EFB)统计了部分欧洲国家的屋顶绿化分布现状(表 3),发现德国是欧洲地区建设屋顶绿化面积最多的国家,达到了 8600 万 m²,且以广泛型屋顶绿化为主;不同于奥地利、德国、瑞士及英国等国,匈牙利的屋顶绿化建设多以密集型为主,占总面积的 65%。

表 3 2014 年欧洲部分国家屋顶绿化现状统计^[109]

Table 3 Statistics of green roof in European countries in 2014

国家 Country	屋顶绿化总面积 Total area of green roof/m ²	屋顶绿化每年新增面积 Expansion area of green roof per year/m ²	广泛型屋顶绿化比例 Percentage of extensive green roof/%	密集型屋顶绿化比例 Percentage of intensive green roof/%
奥地利 Austria	4500000	500000	73	27
德国 Germany	86000000	8000000	85	15
匈牙利 Hungary	1250000	100000	35	65
斯堪的纳维亚 Scandinavia	—	600000	85	15
瑞士 Switzerland	—	1800000	95	5
英国 Britain	3700000	250000	80	20

“—”表示无统计数值

2.2.2 北美屋顶绿化政策

随着屋顶绿化效益被德国科研工作者证实,世界各国也开始了本国范围内屋顶绿化的相关研究。如美国、加拿大等国纷纷以德国为案例研究适合本国的屋顶绿化普及政策及科学研究方案^[34]。为了推动北美地区绿色基础设施建设,1999 年 Steven Peck 创建了北美屋顶绿化健康城市(Green Roofs for Healthy Cities, GRHC)协会,致力于通过教育、宣传、发展现状及举办活动让人们增强了解屋顶绿化带来的社会、经济及生态效益^[110]。

美国、加拿大推行拨款补助、减免税收为主的屋顶绿化建设激励政策。拨款补助一般为直接的财政补助,例如美国俄勒冈州、加拿大多伦多分别在《Green Investment Fund》、《Eco-Roof Incentive Program》中规定,对覆盖了屋顶绿化的建筑物进行资金补助;减免税收也是一种占比较高的激励方法,该方法主要集中在美国,因为美国很多州均通过征收雨水费的方式为雨水基础设施的运营、维护或改建提供资金。例如,美国俄勒冈州在法律文件《Stormwater Discount Program》中指出,通过实施雨水管理实践(包括屋顶绿化),物业可享受最高 100%的雨水公用事业费折扣。

根据 2015 年北美城市屋顶绿化的统计数据^[105],美国华盛顿总屋顶绿化面积 25 万 m²,人均屋顶绿化面积 0.37 m²;美国芝加哥总屋顶绿化面积约 51 万 m²,人均屋顶绿化面积 0.19 m²;多伦多加拿大总屋顶绿化面积 25 万 m²,人均屋顶绿化面积 0.09 m²。2018 年,美国华盛顿屋顶绿化面积约 70 万 m²,与 2015 年相比增长了近 3 倍^[111]。

2.2.3 亚洲屋顶绿化政策

相较于欧洲北美,亚洲区域开展屋顶绿化的研究相对较晚。日本东京是亚洲地区最先颁布相关政策鼓励城市开展及实施屋顶绿化的城市,从 2001 年起相继颁布了多个鼓励城市绿色基础设施建设的政策^[112],相关条例要求东京所有新的大于 1000 平方米的私人建筑和大于 250 平方米的公共建筑均必须具有至少 20%的屋顶绿化。同时,《The Green Building Program》与《Tokyo Green Plan》分别从开发商和经济鼓励的角度推进城市开展屋顶绿化建设。至 2015 年,日本东京屋顶绿化面积约 135 万平方米,与同期瑞士、英国伦敦屋顶绿化总

面积相当,但人均面积仅 0.1 平方米,与瑞士巴塞尔人均屋顶绿化面积相差近 57 倍^[105]。

2009 年以来新加坡颁布了《Skyrise Greenery Incentive Scheme, SGIS》和《Landscaping for Urban Spaces and High-Rises, LUSH》等政策,SGIS 为屋顶绿化与绿色墙体提供了高达 50% 的资金支持,LUSH 为绿色基础建筑提供其他的激励措施。同时,马来西亚借鉴美国绿色建筑评价体系(Leadership in Energy and Environmental Design, LEED),在 2009 年颁布了《Green Building Index, GBI》^[113],以 GBI 来对建筑物进行积分评级,屋顶绿化可以获得相应的积分。

2.2.4 中国屋顶绿化政策

目前,中国有 13 个省级行政区颁布了推进屋顶绿化建设的相关文件,也有的省会城市颁布了相关办法,如江苏南京和安徽合肥。我国最早颁布屋顶绿化条例的省是四川省,1994 年发布了《蓄水覆土种植屋面工程技术规范》文件。2004 年起中国香港也颁了各种条例,如《绿色和创新建筑》和《香港屋顶绿化技术指引,为屋顶绿化提供包含收益、设计、工厂选择、安装和维护的综合指南。直至 2010 年后,许多省市相对集中颁布了屋顶绿化的相关文件,如深圳在 2016 年颁布《深圳经济特区绿化条例》,屋顶绿化按照比例可折算为建筑工程项目的绿地面积;南京在 2014 年颁布《南京市立体绿化扶持资金使用管理办法》,以奖励金额的形式鼓励城市发展建设屋顶绿化;国内其余省市也颁布了规定性条例,要求满足相关条件的区域均建设屋顶绿化。以北京为例,2011 年北京市颁布了《北京市人民政府关于推进城市空间立体绿化建设工作的意见》,指出公共机构所属建筑,在符合建筑规范、满足建筑安全要求的前提下,应当实施屋顶绿化。至 2015 年,北京屋顶绿化总面积约 246 万 m^2 ,人均约 0.11 m^2 ^[114],与同期日本东京相当,但是与欧洲城市人均面积差距仍较大。

2.3 政策效应分析及对我国的启示

政策推动是屋顶绿化建设普及的主要驱动因素。如果没有支持性的政策,屋顶绿化不可能从局部应用发展到制度应用层面^[100]。欧洲地区颁布的政策类型众多。至 2021 年,德国人口超过 5 万的城市有 42% 都建设了屋顶绿化,其中 34% 有政策经济支持。北美诸多城市颁布了屋顶绿化推广政策,相关法律条例可以归并为六类,屋顶绿化规定性政策、纳入可持续发展法规、减免税金、分区奖励、直接资金鼓励和降低雨水费。减免税金与降低雨水费是服务于进行屋顶绿化安装的人,分区奖励的激励对象是开发商,直接资金鼓励的激励对象是城市,从资金鼓励政策发展建设至为了可持续发展的法规政策,系统性的激励与要求城市居民进行屋顶绿化的建设。

根据我国《城市居住区规划设计规范》要求居住区人均绿地面积应不低于 1.5 m^2 ^[115],城市绿地空间也是衡量健康城市的重要指标。至 2015 年,部分欧洲城市仅人均屋顶绿化面积就超过了 1.5 m^2 。我国屋顶绿化相关研究与美国同期开展,但国内屋顶绿化发展相对缓慢。目前,我国推广屋顶绿化的政策以规定性政策为主,建议组建屋顶绿化示范区,宣传推广屋顶绿化的诸多效益,提升民众的认知度,拓宽国内需求市场,制定多维屋顶绿化政策,覆盖多类人群,实现屋顶绿化的快速与可持续发展。

3 研究展望及未来需要解决的关键问题

3.1 制约屋顶绿化的发展因素

屋顶绿化在城市推行仍然会受到诸多因素的限制。目前,我国屋顶绿化的发展面临着维护成本高、设计和施工成本高、屋顶绿化使用安排不合理、开发商推广力度不够^[116]四大主要阻碍,其中维护成本高是我国城市实施屋顶绿化的最大阻碍。因而,引导诸多行业共同开发屋顶绿化的相关组件,有效降低建设和维护成本,从而助力城市屋顶绿化的可持续发展。

3.2 屋顶绿化与水环境

屋顶绿化具有重要的雨洪调节功能,但现有研究大多是其水环境调节功能的现象表征,鲜有研究者从屋顶绿化的构成角度深入解析屋顶绿化生态系统水循环的内在机理,致使学界至今仍未厘清屋顶绿化到底是径流污染的源还是汇。因此,基于源—流—汇理论,科学阐明屋顶绿化对径流污染的影响机理是当前亟需解

决的重要科学问题。

3.3 屋顶绿化与热环境

目前学界对驱动屋顶绿化降温效应机制仍缺乏全面理解,这也是屋顶绿化热环境调控功能研究的难点之一。因而,后续研究需要进一步厘清屋顶绿化生态系统要素间的相互作用,尤其是生长介质、土壤生物群和植被之间的关系,以及屋顶绿化生态系统水热之间的交互作用,从而科学阐明屋顶绿化降温效应的内在机制及其城市热环境调节服务之间的定量联系。

3.4 屋顶绿化与建筑能耗

区域气候预测模型对于确定未来气候变化对城市地区的影响至关重要^[117–118],因而有必要明晰屋顶绿化改变城市表面能量流的潜在物理过程^[119],进而准确理解其对城市环境气候变化的响应机理^[14]。这需要基于长时间观测数据构建能量传输模型,明晰屋顶绿化与裸露屋顶之间的能量流动差异,从建筑—基质—植被—大气耦合的角度,综合研究屋顶绿化能量流动的过程与机理。

3.5 屋顶绿化其他调节服务

屋顶绿化对空气质量影响的实测研究仍比较缺乏。丰富不同植被种类的实测案例研究、明确各项指标的响应机理、针对性优化模型经验参数,将是屋顶绿化对空气质量影响研究的重要发展趋势。此外,屋顶绿化对噪声的调节作用及其机理研究也需要进一步加强。

参考文献 (References):

- [1] Nations U. Revision of world urbanization prospects. United Nations: New York, NY, USA, 2018, 799.
- [2] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 城市化与城市生态环境关系研究综述与评价. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(3): 55-60.
- [3] 陈良侃, 陈明星, 张晓平, 程嘉梵. 宜居地球、碳中和与全球可持续城市化. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1370-1382.
- [4] 王雅晴, 谭德明, 张佳田, 孟楠, 韩宝龙, 欧阳志云. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析. 生态学报, 2020, 40(21): 7897-7907.
- [5] 袁宇锋, 翟盘茂. 全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知. 大气科学学报, 2022, 45(2): 161-166.
- [6] 陈明星, 先乐, 王朋岭, 丁子津. 气候变化与多维度可持续城市化. 地理学报, 2021, 76(8): 1895-1909.
- [7] 张雪艳, 何霄嘉, 马欣. 我国快速城市化进程中气候变化风险识别及其规避对策. 生态经济, 2018, 34(1): 138-140, 158.
- [8] 程杨, 杨林生, 李海蓉. 全球环境变化与人类健康. 地理科学进展, 2006, 25(2): 46-58.
- [9] 姜仁贵, 韩浩, 解建仓, 朱记伟, 李斌. 变化环境下城市暴雨洪涝研究进展. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 11-17.
- [10] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1219-1228.
- [11] 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠. 中国主要城市的城市化对局地增温的贡献. 环境科学, 2022, 43(5): 2822-2830.
- [12] 陈明星, 程嘉梵, 周园, 丁子津, 马海涛. 碳中和的缘起、实现路径与关键科学问题: 气候变化与可持续城市化. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1233-1246.
- [13] 周伟奇, 朱家骞. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述. 生态学报, 2022, 42(13): 5137-5151.
- [14] 姜之点, 彭立华, 杨小山, 姚灵烨, 朱春磊. 街区尺度屋顶绿化热效应及其与城市形态结构之间的关系. 生态学报, 2018, 38(19): 7120-7134.
- [15] 董菁, 左进, 李晨, 范大林, 吴元君. 城市再生视野下高密度城区生态空间规划方法——以厦门本岛立体绿化专项规划为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4412-4423.
- [16] Stovin V, Vesuviano G, Kasmin H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. Journal of Hydrology, 2012, 414/415: 148-161.
- [17] 凌子尧, 彭立华, 文慧. 不同城市功能区实施屋顶绿化的雨洪调控效应比较. 应用生态学报, 2023, 34(2): 491-498.
- [18] 董菁, 左进, 吝涛, 刘君涛, 王宁. 高度城市化地区屋顶绿化径流调控效益评价——以厦门岛为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2237-2250.
- [19] 邱国玉, 张晓楠. 21 世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战. 地球科学进展, 2019, 34(6): 640-649.
- [20] Susca T. Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. Building and Environment, 2019, 162: 106273.
- [21] Bevilacqua P. The effectiveness of green roofs in reducing building energy consumptions across different climates. A summary of literature results. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111523.
- [22] Arbid Y, Richard C, Sleiman M. Towards an experimental approach for measuring the removal of urban air pollutants by green roofs. Building and

- Environment, 2021, 205: 108286.
- [23] 吴霜, 杨潇, 李杨帆. 生态屋顶引领低碳潮流. 环境保护, 2010, 38(14): 67-69.
- [24] Tams L, Nehls T, Calheiros C S C. Rethinking green roofs- natural and recycled materials improve their carbon footprint. Building and Environment, 2022, 219: 109122.
- [25] 贺坤, 项耿铭, 韦捷峰, 吴威, 章银柯, 李小平. 城市绿色屋顶生物栖息生境设计与营建研究. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 263-267, 292.
- [26] Wang L W, Wang H, Wang Y C, Che Y, Ge Z W, Mao L F. The relationship between green roofs and urban biodiversity: a systematic review. Biodiversity and Conservation, 2022, 31(7): 1771-1796.
- [27] Ode Sang Å, Thorpert P, Fransson A M. Planning, designing, and managing green roofs and green walls for public health-an ecosystem services approach. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 804500.
- [28] 许萍, 车伍, 李俊奇. 屋顶绿化改善城市环境效果分析. 环境保护, 2004, 32(7): 41-44.
- [29] Dvorak B, Volder A. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. Landscape and Urban Planning, 2010, 96(4): 197-213.
- [30] Walker M. Why is it so difficult to design and build green roofs in Scotland? Journal of Architectural and Planning Research, 2014, 31(1): 27-42.
- [31] Castleton H F, Stovin V, Beck S B M, Davison J B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. Energy and Buildings, 2010, 42(10): 1582-1591.
- [32] Bevilacqua P, Bruno R, Arcuri N. Green roofs in a Mediterranean climate: energy performances based on in situ experimental data. Renewable Energy, 2020, 152: 1414-1430.
- [33] Bornkamm R. Vegetation und vegetations-entwicklung auf kiesdächern. Vegetatio, 1961, 10(1): 1-24.
- [34] Jungjohann A, Bühler R, Mehling M, Keeley M. How Germany became Europe's green leader: a look at four decades of sustainable policymaking. Solutions, 2011, 2(5): 2011.
- [35] Liu H Q, Kong F H, Yin H W, Middel A, Zheng X D, Huang J, Xu H R, Wang D, Wen Z H. Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: a bibliometric review. Building and Environment, 2021, 196: 107794.
- [36] Hashemi S S G, Bin Mahmud H, Ashraf M A. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 669-679.
- [37] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? Landscape and Urban Planning, 2006, 77(3): 217-226.
- [38] Besir A B, Cuce E. Green roofs and facades: a comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 915-939.
- [39] Grimm N B, Morgan Grove J, Pickett S T A, Redman C L. Integrated approaches to long-TermStudies of urban ecological systems. BioScience, 2000, 50(7): 571.
- [40] Odum E P. Fundamentals of ecology. 3d ed. Philadelphia: Saunders, 1971.
- [41] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. Ecological Engineering, 2009, 35(3): 369-380.
- [42] Zhang G C, He B J, Zhu Z Z, Dewancker B J. Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(2): 179.
- [43] Getter K L, Rowe D B, Andresen J A, Wichman I S. Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate. Energy and Buildings, 2011, 43(12): 3548-3557.
- [44] Lazzarin R M, Gasparella A, D'Ascanio A. Analysis of a green roof application to an industrial building. International Journal of Ambient Energy, 2003, 24(1): 35-43.
- [45] Viecco M, Jorquera H, Sharma A, Bustamante W, Fernando H J S, Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. Building and Environment, 2021, 204: 108120.
- [46] Van Renterghem T, Botteldooren D. In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs. Building and Environment, 2011, 46(3): 729-738.
- [47] Van Renterghem T, Botteldooren D. Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. Journal of Sound and Vibration, 2008, 317(3/4/5): 781-799.
- [48] Yang H S, Kang J, Choi M S. Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. Building and Environment, 2012, 50: 44-55.
- [49] Jacobs J, Berg M, Beenaerts N, Artois T. Biodiversity of Collembola on green roofs: a case study of three cities in Belgium. Ecological Engineering, 2022, 177: 106572.

- [50] Passaseo A, Pétremand G, Rochefort S, Castella E. Pollinator emerging from extensive green roofs: wild bees (Hymenoptera, Anthophila) And Hoverflies (Diptera, Syrphidae) in Geneva (Switzerland). *Urban Ecosystems*, 2020, 23(5): 1079-1086.
- [51] Patterson M. Under the green roof: Sustainable roofing produces bottom-line benefits. *Buildings*, 1997, 91(2): 64.
- [52] DeNardo J C, Jarrett A R, Manbeck H B, Beattie D J, Berghage R D. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(4): 1491-1496.
- [53] VanWoert N D, Rowe D B, Andresen J A, Rugh C L, Fernandez R T, Xiao L. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 1036-1044.
- [54] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, Smith C L. Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment*, 2013, 461/462: 28-38.
- [55] Getter K L, Rowe D B, Andresen J A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 2007, 31(4): 225-231.
- [56] 葛德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响. *环境科学*, 2018, 39(11): 5015-5023.
- [57] Lee J Y, Lee M J, Han M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*, 2015, 152: 171-176.
- [58] 陈小平, 黄佩, 周志翔, 高翊. 绿色屋顶径流调控研究进展. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2581-2590.
- [59] Vijayaraghavan K, Joshi U M, Balasubramanian R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Water Research*, 2012, 46(4): 1337-1345.
- [60] 王书敏, 何强, 张峻华, 李江. 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态. *生态学报*, 2012, 32(12): 3691-3700.
- [61] Vijayaraghavan K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 740-752.
- [62] 张千千, 王效科, 高勇, 万五星, 欧阳志云. 绿色屋面降雨径流水质及消减污染负荷研究. *生态学报*, 2015, 35(10): 3454-3463.
- [63] 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷. 植被对绿色屋顶径流量和水质影响. *环境科学*, 2019, 40(8): 3618-3625.
- [64] Wong N, Wong V, Chen Y, Lee S, Cheong D, Lim G T, Ong C L, Sia A. The thermal effects of plants on buildings. *Architectural Science Review*, 2002, 45: 337-348.
- [65] Song J Y, Wang Z H. Diurnal changes in urban boundary layer environment induced by urban greening. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(11): 114018.
- [66] Sun T, Grimmond C S B, Ni G H. How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(10): 5320-5335.
- [67] Tewari M, Yang J C, Kusaka H, Salamanca F, Watson C, Treinish L. Interaction of urban heat islands and heat waves under current and future climate conditions and their mitigation using green and cool roofs in New York City and Phoenix, Arizona. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(3): 034002.
- [68] Teemusk A, Mander M. The use of greenroofs for the mitigation of environmental problems in urban areas. *WIT Trans Ecol Environ*, 2006, 93: 3-17.
- [69] Dong J, Lin M X, Zuo J, Lin T, Liu J K, Sun C G, Luo J C. Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area—a case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255: 120152.
- [70] Porcaro M, Ruiz de Adana M, Comino F, Peña A, Martín-Consuegra E, Vanwalleghem T. Long term experimental analysis of thermal performance of extensive green roofs with different substrates in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 2019, 197: 18-33.
- [71] Huang Y Y, Chen C T, Liu W T. Thermal performance of extensive green roofs in a subtropical metropolitan area. *Energy and Buildings*, 2018, 159: 39-53.
- [72] Gagliano A, Detommaso M, Nocera F, Berardi U. The adoption of green roofs for the retrofitting of existing buildings in the Mediterranean climate. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2016, 7(2): 116-129.
- [73] Susca T, Gaffin S R, Dell'Osso G R. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2119-2126.
- [74] Teemusk A, Mander Ü. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia. *Building and Environment*, 2009, 44(3): 643-650.
- [75] Karachaliou P, Santamouris M, Pangalou H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy and Buildings*, 2016, 114: 256-264.
- [76] Yin H W, Kong F H, Dronova I, Middel A, James P. Investigation of extensive green roof outdoor spatio-temporal thermal performance during summer in a subtropical monsoon climate. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 133976.
- [77] Zheng X D, Kong F H, Yin H W, Middel A, Liu H Q, Wang D, Sun T, Lensky I. Outdoor thermal performance of green roofs across multiple

- time scales; a case study in subtropical China. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 70: 102909.
- [78] Wong N H, Chen Y, Ong C L, Sia A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 2003, 38(2): 261-270.
- [79] 陈佳宇, 尹海伟, 孔繁花. 绿色屋顶降温效应的多维时空变化特征. *生态学报*, 2020, 40(4): 1445-1454.
- [80] Theodosiou T G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 2003, 35(9): 909-917.
- [81] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(1): 120-128.
- [82] Niachou A, Papakonstantinou K, Santamouris M, Tsangrassoulis A, Mihalakakou G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 2001, 33(7): 719-729.
- [83] 郑馨竺, 周嘉欣, 王灿. 绿色屋顶的城市降温与建筑节能效果研究. *生态经济*, 2021, 37(2): 222-229.
- [84] Del Barrio E P. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 1998, 27(2): 179-193.
- [85] Jaffal I, Ouldboukhitine S E, Belarbi R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 2012, 43: 157-164.
- [86] Wong N H, Cheong D K W, Yan H, Soh J, Ong C L, Sia A. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 2003, 35(4): 353-364.
- [87] Molles M. *Ecology: concepts and applications fifth edition.*; McGraw-Hill Education, 2015.
- [88] Quezada-García S, Espinosa-Paredes G, Polo-Labarríos M A, Espinosa-Martínez E G, Escobedo-Izquierdo M A. Green roof heat and mass transfer mathematical models: a review. *Building and Environment*, 2020, 170: 106634.
- [89] McRae I, Freedman F, Rivera A, Li X W, Dou J J, Cruz I, Ren C, Dronova I, Fraker H, Bornstein R. Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. *Building and Environment*, 2020, 184: 107180.
- [90] Feng C, Meng Q L, Zhang Y F. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 2010, 42(6): 959-965.
- [91] Hughes L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(2): 56-61.
- [92] Squier M, Davidson C I. Heat flux and seasonal thermal performance of an extensive green roof. *Building and Environment*, 2016, 107: 235-244.
- [93] O'Donoghue R T, Broderick B M. C2-C6 background hydrocarbon concentrations monitored at a roof top and green park site, in Dublin city centre. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 132(1): 491-501.
- [94] Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2100-2110.
- [95] De Valck J, Beames A, Liekens I, Bettens M, Seuntjens P, Broekx S. Valuing urban ecosystem services in sustainable brownfield redevelopment. *Ecosystem Services*, 2019, 35: 139-149.
- [96] Currie B A, Bass B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(4): 409-422.
- [97] Tan P Y, Sia A. A pilot green roof research project in Singapore//Proceedings of third annual greening rooftops for sustainable communities conference, Awards and Trade Show, Washington, DC. 2005.
- [98] Connelly M, Hodgson M. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics*, 2013, 74(10): 1136-1143.
- [99] 多拉茜·罗摩, 蒋巧璐, 邓巧. 哥本哈根屋顶绿化政策将推动城市向绿色城市转变. *风景园林*, 2012(1): 113-117.
- [100] Brudermann T, Sangkakool T. Green roofs in temperate climate cities in Europe-An analysis of key decision factors. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 21: 224-234.
- [101] Sahota H. A Review of Green Roof Policy Development in Toronto and Chicago and The Co-Benefits of Green Roof Implementation. An Agency of the Government of Ontario. 2017.
- [102] Köhler M, Kaiser D. Evidence of the climate mitigation effect of green roofs—a 20-year weather study on an extensive green roof (EGR) in northeast Germany. *Buildings*, 2019, 9(7): 157.
- [103] Ngan G. *Green Roof Policies; Tools for Encouraging Sustainable Design.* Landscape Architecture Canada Foundation. 2004.
- [104] Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e. V. *bersicht der Umfrage-Ergebnisse*, 2016 [2023-6-15]. <https://www.gebaeudegruen.info/gruen/dachbegruenung/wirkungen-vorteile-fakten/foerderung-2016>
- [105] European Federation Green Roofs & Walls Associations. *Living roofs and walls from policy to practice*, 2019 [2023-6-15]. <https://livingroofs.org/wp-content/uploads/2019/04/LONDON-LIVING-ROOFS-WALLS-REPORT-2019.pdf>
- [106] Burszta-Adamiak E, Fialkiewicz W. A review of green roof incentives as motivators for the expansion of green infrastructure in European cities.

- Scientific Review Engineering and Environmental Studies; SREES, 2019, 28(4): 641-652.
- [107] Dock E at Zurich-Kloten International Airport (ZRH). Case study. Greenroofs.com, 2018 [2023-6-15]. <https://www.greenroofs.com/projects/dock-e-at-zrich-kloten-international-airport-zrh/>
- [108] London Government. Supporting London Plan Policy: Living Roofs and Walls, 2008 [2023-6-15]. <https://www.london.gov.uk/sites/default/files/living-roofs.pdf>
- [109] European Federation Green Roofs & Walls Associations. 2015 white paper, 2015 [2023-6-15]. https://efb-greenroof.eu/wp-content/uploads/2016/12/efb_whitepaper_2015.pdf
- [110] Steven Peck. Green Roofs for Healthy Cities, 1999 [2023-6-15]. <https://greenroofs.org/>
- [111] Green Roof for Healthy Cities. 2018 Annual Green Roof Industry Survey Executive Summary, 2019 [2023-6-15]. <https://static1.squarespace.com/static/58e3eef2994ca997dd56381/t/5d9e0f082012f31031312490/1570639629893/GreenRoofIndustrySurvey2019ExecutiveSummary.pdf>
- [112] Ismail Z, Aziz H A, Nasir N M, Taib M Z M. Comparative study on green roof mechanism in developed countries/////2012 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications. September 23-26, 2012. Bandung, Indonesia. IEEE, 2013: 678-683.
- [113] Algburi S M, Faieza A A, Baharudin B T H T. Review of green building index in Malaysia; existing work and challenges. Int J Appl Eng Res, 2016, 11(5): 3160-3167.
- [114] 程士榛. 北京市城区屋顶绿化建设现状及其未来设计策略研究[D]. 海口: 海南大学, 2019.
- [115] 建设部. 城市居住区规划设计规范: GB 50180-93. 中国建筑工业出版社, 1994.
- [116] Chen X, Shuai C Y, Chen Z H, Zhang Y. What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China? Science of the Total Environment, 2019, 654: 742-750.
- [117] Giorgi F, Mearns L O. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. Reviews of Geophysics, 1991, 29(2): 191.
- [118] Giorgi F. Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next? Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(11): 5696-5723.
- [119] Xie S P, Deser C, Vecchi G A, Collins M, Delworth T L, Hall A, Hawkins E, Johnson N C, Cassou C, Giannini A, Watanabe M. Towards predictive understanding of regional climate change. Nature Climate Change, 2015, 5(10): 921-930.