

DOI: 10.5846/stxb202204120966

石龙宇, 杜玫, 刘玲玉. 垂直绿化生态效益研究综述. 生态学报, 2023, 43(12): 5200-5210.

Shi L Y, Du M, Liu L Y. A review of ecological benefits of vertical greenery system. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5200-5210.

垂直绿化生态效益研究综述

石龙宇^{1,*}, 杜玫^{1,2}, 刘玲玉^{1,2,3}

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国社会科学院生态文明研究所, 北京 100710

摘要: 全球气候变化和城市化背景下城市生态环境问题越发凸显, 面对日趋紧张的土地资源现状, 垂直绿化建设成为重要的城市绿地补充手段, 对改善城市环境具有重要意义。垂直绿化具有多种生态效益, 且其效益发挥受到多因素共同影响。如何统筹协调生态效益和影响因素之间的复杂关系, 以使其综合生态效益最大化, 是当前垂直绿化建设亟待解决的科学问题之一。基于文献综述法归纳了不同生态效益的机制及其关键影响因素, 并对多效益和多影响因素进行了综合分析。结果表明, 垂直绿化具有缓解城市热岛、建筑节能减排、固碳、净化空气、降噪、截留雨水和支持生物多样性等七种主要生态效益, 并受到植被特征、设施结构特征、气象条件、空间格局等多方面因素的共同影响。基于对效益和影响因素的综合分析, 进一步提出了两点规划思路: 首先, 关注环境需求和效益供给的耦合关系能够更加科学合理地指导区域垂直绿化建设布局。其次, 关注生态效益间的关系, 以区域关键生态环境问题为导向进行效益权衡并结合考虑其影响因素的重要性程度能为规划设计提供有效建议。

关键词: 垂直绿化; 生态效益; 影响因素; 规划设计; 协同权衡; 生态基础设施

A review of ecological benefits of vertical greenery system

SHI Longyu^{1,*}, DU Mei^{1,2}, LIU Lingyu^{1,2,3}

1 Key laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Research Institute for Eco-civilization, Beijing 100710, China

Abstract: Global climate change and urbanization contribute to the increasing deterioration of urban ecological environment. With the growing shortage of urban land resources, the construction of vertical greenery system has played an important role in increasing urban green space, which is of great significance to improve the urban environment. The vertical greenery system has multiple ecological benefits which are greatly affected by various factors in the meantime. Facing a complex relationship network between multiple ecological benefits and influencing factors, it is of urgent need to figure out an optimal solution on coordinating the complex relationship between ecological benefits and influencing factors, so as to maximize the comprehensive ecological benefits of currently vertical greening construction. Therefore, we summarized the mechanisms of different ecological benefits and their key influencing factors based on systematic literature review, and then made a comprehensive analysis of vertical greenery system's multi-benefits and various influencing factors in this paper. Seven main ecological benefits of vertical greenery system were summarized, including alleviating urban heat island, conserving building energy and carbon emission, fixing carbon, purifying air, reducing noise, intercepting rainwater, and maintaining biodiversity. At the same time, several factors, including vegetation characteristics, facilities structure characteristics, meteorological conditions, and spatial pattern, etc., showed significant impacts on the display of ecological benefits.

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA23030201)

收稿日期: 2022-04-12; **网络出版日期:** 2023-02-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyshi@iue.ac.cn

Furthermore, based on the comprehensive analysis of benefits and influencing factors, we put forward two planning views: Firstly, more attention is needed to pay on the coupling relationship between environmental demand and benefit supply, which could effectively provide scientific and reasonable guidance on the layout of regional vertical greenery system construction. Secondly, more attention is needed to pay on the relationship between ecological benefits, and more efforts should be made to trade off between 7 ecological benefits by taking the regional key ecological environmental issues as the orientation, and also recognize the importance degree of their influencing factors. The combined results will be able to provide effective suggestions on the design strategies of vertical greenery system to maximize comprehensive benefits.

Key Words: vertical greenery system; ecological benefits; influencing factors; planning and design; synergism and trade-off; ecological infrastructure

全球气候变化和城市化导致城市生态系统服务退化,增加了灾害的频率、强度和暴露程度,加剧灾害风险,对城市环境造成的负面影响越发凸显^[1-2]。各领域试图通过城市规划、交通、能源、建筑、生态基础设施建设等方面的措施应对气候变化,其中生态基础设施能同时提供小气候调节、空气净化、雨洪管理等多种生态系统服务,有助于提高生态系统弹性、减少碳排放,在适应和缓解全球气候变化中发挥了至关重要的作用^[1,3]。然而,人们对生态基础设施需求的增加和用地供给不足之间的矛盾日益突出,促使科学家、规划者和工程师向立体空间探寻可能的解决方案,研究范围逐渐从绿色屋顶扩展到垂直绿化。垂直绿化,国际上常称 Vertical Greenery System,简称 VGS,是一种建设在立面上的生态基础设施,能在不占用土地资源的情况下增加绿地面积,是重要的城市绿地补充手段^[4-5]。

VGS 具有生态、社会和经济三大效益^[4,6-7]。本文重点关注 VGS 的生态效益。生态效益被定义为“生态系统及其变化引起的人类生存和社会经济发展条件的改善程度”^[8]。借鉴王效科等人的狭义生态效益观点,本文所述的 VGS 生态效益是指 VGS 建设所带来的人类生存环境的改善,主要包括其提供的生态系统服务中的调节和支持服务,不包含经济效益和社会效益。

研究表明,VGS 具有多种生态效益^[9-12],且效益之间并不独立,可能存在协同或冲突关系;效益发挥受到多种因素的共同影响^[1,13-14],形成了复杂的关系网络,某一影响因素的改变将作用于整体效益的发挥。而 VGS 效益的提供有赖于较高的建设和运维成本^[15-17],这决定了城市规划及管理者应重视前期的规划设计,统筹协调多个效益使其建设的综合效益最大化。但目前人们对多个效益之间如何相互联系以及如何进行统筹规划并未做系统详细的说明^[4,7]。现有对 VGS 生态效益的研究较为分散,大多仅关注单一效益,易低估整体功能^[6,18];部分综述虽含括多个效益,但缺乏梳理各个效益间的联系^[18]。因此,本文以 VGS 生态效益为研究对象,基于文献综述法,通过梳理国内外 VGS 生态效益相关研究,归纳了 VGS 多个生态效益的机制及影响因素;同时建立效益与影响因素关系表,探寻各效益之间的联系;并在此基础上提出多效益综合分析的研究思路,试图探索最大化综合效益的解决方案,以期 VGS 的规划设计提供建议。

1 VGS 定义及分类

VGS 是指利用植物进行垂直表面绿化,包含植物、基质和构件在内的系统设施,又称绿色墙壁、垂直花园、立体绿化等^[6]。基于结构特征差异,VGS 主要分为绿色立面 (green façade,以下简称 GF) 和活墙 (living wall,以下简称 LW) 两大类(如图 1 所示),并在植物种类、生长方式、生态效益及成本等方面有不同表现。GF 所选植物为攀援植物,一般根植于地面,能在建筑围护结构上自然生长。其特点是组成元素少、质量轻、技术难度



图 1 VGS 分类

Fig.1 VGS Classification

低、易于安装、成本低,但植被全墙面覆盖所需时间较长^[6]。常用植物有地锦(*Parthenocissus tricuspidata*)、凌霄(*Campsis grandiflora*)、洋常春藤(*Hedera helix*)、炮仗花(*Pyrostegia venusta*)等^[19]。根据植物是否需要依靠攀援支撑介质,又将 GF 分为直接 GF(direct green facade)和间接 GF(indirect green facade)^[20–21]。LW 所选植物一般为草本和小灌木,在预制模块化的容器中种植后再安装到墙面上,依靠容器内的基质或营养液支持生长^[17, 21]。其特点是适应性强、可选植物种类多、形式灵活、更换速度快,但技术难度相对较大、建设和维护成本高^[22]。常用植物有垂盆草(*Sedum sarmentosum*)、佛甲草(*Sedum lineare*)等多肉植物,肾蕨(*Nephrolepis cordifolia*)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris*)等蕨类植物,吊兰(*Chlorophytum comosum*)、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、三色堇(*Viola tricolor*)等草本植物,细叶萼距花(*Cuphea hyssopifolia*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)等小灌木^[19]。根据其种植槽的材料差异,又大致分为装配式模块化 LW 和连续式毛毡袋 LW,分别由可拆卸的刚性种植容器和连续的柔性织物组成^[6, 20]。

2 VGS 生态效益研究进展

通过对已有文献的总结梳理,本文将 VGS 的生态效益概括为缓解城市热岛、建筑节能减排、固碳、净化空气、降噪、截留雨水和支持生物多样性七种类型,并归纳梳理各个效益发生的机制和影响因素,更新研究进展。

2.1 缓解城市热岛

VGS 已被证明是缓解城市热岛的有效手段,对改善室内外热环境有积极作用。遮阴、蒸散、隔热是影响其降温效益的主要机制^[21, 23]。首先,植被覆盖直接提供遮阴,减少墙面接受到的太阳辐射量。其次,植物蒸腾和基质水分蒸发吸热,将输入的辐射能量转化为潜热,降低周围环境气温^[24–25]。再者,VGS 与墙壁之间形成的空气层使建筑表面的风速下降并降低导热系数^[26]。

VGS 的降温效益受气象背景及建筑空间格局的影响。归因于温湿度及接收到的太阳辐射量差异,不同气候区、季节、昼夜、建筑格局、朝向等背景下 VGS 的降温效果不同,如表 1 所示。大多数学者认为,炎热干燥地区 VGS 的降温效果较相对凉爽潮湿地区显著^[27–28];如相同设施条件下,炎热干旱的利雅得,气温平均下降 3.4 °C,而在凉爽潮湿的莫斯科,仅下降 1.7 °C^[28]。季节、昼夜、建筑密度、朝向等通过日照时数及辐射强度来共同影响墙面接受到的总太阳辐射量,辐射量越大,降温幅度越大^[27–33]。建筑格局对降温效益影响的研究较少,部分研究表明街区形态的密度和高度会影响 VGS 的降温效果^[34],高密度街区的降温效果较低密度好^[33, 35]。

设施类型和植物特征也对 VGS 降温效益产生影响。GF 和 LW 由于具有不同的结构特征和植物特征,一般情况下,LW 的降温效果较 GF 显著^[36]。一项对八种不同 VGS 的对比研究表明,LW 将墙体表面的平均温度降低了 6–12 °C;而 GF 只降低了 4.36 °C^[37]。LW 的基质一方面提高遮光率,降低导热系数;另一方面基质含水量越高,蒸发降温越显著^[18, 21, 38]。除此之外,LW 上可以密集种植草本和小灌木,与攀援植物相比具有更高的植被厚度和冠层密度。植物特征方面,植物物种^[12]、覆盖率、冠层密度、植被厚度、叶片角度和叶片大小^[39]的影响不容忽视。覆盖率是影响降温效益的关键特征^[30, 40],覆盖率越高,降温效果越强^[41]。冠层密度常被叶面积指数、冠层深度或叶层数表示^[22],大部分研究将叶面积指数作为表征植物特性的指标之一,认为其与降温能力呈正相关^[5, 42–43]。Yin 等人的研究表明,降温效果和覆盖率线性相关,而与植被厚度、点密度和绿化立面体积呈幂函数关系^[40]。叶倾角越小,太阳辐射的透射率越低^[42]。

2.2 建筑节能减排

随着节能减碳需求的增加^[44],人们对 VGS 热效益的认识逐步从物理降温上升到建筑内部的节能,缓解城市热岛和建筑节能减排的机制大致相同,本质都是 VGS 产生的热效益,其通过夏季降温和冬季保温的方式降低建筑的制冷和加热能耗,进而减少由于能源消费所产生的碳排放^[45–49],如表 1 所示。

各机制在不同时间段对 VGS 建筑节能效益产生的影响有所差异,如表 2 所示。遮阴和蒸散在冬夏两季对建筑节能产生截然相反的影响,隔热在多数时间有助于节能。夏季白天,遮阴通常对建筑节能起到最主要

的作用^[21,29],夜间则更多受蒸散和隔热的影响^[38]。夏季夜间 VGS 隔热对建筑能耗的影响尚存争议,有学者认为更低的导热系数提升保温性能,可能不利于室内散热,增加能耗^[31]。但总体来说,夜间可能增加的能耗相较于白天节约的能耗少得多^[23]。冬季 VGS 则通过权衡建筑热量获取和损失影响能耗。蒸发导致的热损失可能会增加制热需求^[51—52],但多数学者认为减少的热量损失大于减少的热量获取,最终减少制热能耗^[26, 31, 49, 53]。

表 1 VGS 热效益相关研究案例
Table 1 Research cases about VGS thermal benefits

参考文献 References	类型 Type	气候区 ^a Climatic zone	地点 Places	植物名称 Plant names	朝向 Orientation	外墙温度降低 ^b Exterior wall temperature decreases/℃	室外气温降低 Outdoor temperature decreases/℃	节能率 Energy saving rate/%
[38]	GF	Cfb	德国柏林	爬山虎	西南	Ran=0.1~11.3、 Ave=3.3	—	—
	LW			常春藤	东	Ran=0~12.3、 Ave=3.7	—	—
	LW			何首乌	西	Ran=-0.8~6.6、 Ave=2.4	—	—
[26]	GF	Cfb	荷兰代尔夫特	常春藤	西北	Ave=1.2	Ave=0.8	—
	GF		荷兰鹿特丹	常春藤	东北	Ave=2.73	Ave=1.1, Max=2.7	—
	LW		荷兰本特赫伊曾	常绿草本	西	—	Ave=-0.3	—
[37]	LW	Af	新加坡	草本小灌木	—	Ran=6.0—12.0	Max=3.3	—
	GF			攀援植物	—	Ave=4.4	Max=2.1	—
[28]	GF	Bwh	沙特利雅得	常春藤	南	Ave=14.3、 Max=18.7	Ave=3.4、 Max=5.1	—
	GF	Dfb	俄罗斯莫斯科	常春藤	南	Ave=5.6、 Max=9.8	Ave=1.7、 Max=2.6	—
[30]	GF	Cfa	中国重庆	牵牛花、落葵、丝瓜	西	—	—	Ave=11.5
[35]	LW	Cfa	中国南京	常春藤、肾蕨、玉簪	西	—	Ran=0.1—0.3	Ran=3.2—11.0
[23]	GF	Cfa	中国广州	炮仗花	西	—	Ave=1.1, Max=2.7	Ran=1.6—29.5
[49]	GF	Cwa	中国香港	爬山虎	—	—	—	Ave=76.0
[50]	LW	Csa	西班牙莱里达	小灌木	东、西、南	Ran=17.0—21.5	—	Ave=58.9
	GF			常春藤	东、西、南	Ran=10.7~13.9	—	Ave=33.8

a 气候区分类基于柯本气候分类法; b “Ave”:平均值;“Max”:最大值;“Ran”:范围

表 2 VGS 建筑节能机制在不同时间段的影响
Table 2 Influence of VGS building energy conserving mechanism in different time periods

时间段 Time period	遮阴 Shading	蒸散 Evapotranspiration	隔热 Insulation
夏季白天 Summer daytime	+	+	+
夏季夜间 Summer night	na	+	+/-
冬季白天 Winter daytime	-	-	+
冬季夜间 Winter night	na	-	+

“+”:利于节能;“-”:不利于节能;“na”:不存在该影响

总体上 VGS 对建筑的冬季保温效果不如夏季降温的显著^[50,54],LW 和间接 GF 在制冷期的节能率分别为 58.9%和 33.8%,而在制热期仅为 4.2%和 1.9%^[50]。由于 VGS 影响全年的建筑热效应,其在夏季和冬季的节能效果应统筹考虑,夏季应注重增加蒸散和遮阴,冬季则相反并提升隔热效果。因此,VGS 建设可针对不同地区的气候特点和主要目标进行合理规划,如:冬季寒冷但没有内部供暖的建筑物,在北向建设 VGS^[55];而在

气候干热地区,应更多建设在建筑的东西方向^[53]。

2.3 固碳

除了通过节约建筑能耗的方式减碳,VGS 还能通过植物和土壤的捕获及封存直接固碳^[43, 53, 56],研究表明每平方米 VGS 每年固碳量约为 61 g—253 gCO₂^[57]。植物在固碳效益中发挥了主要作用^[43],其特征是影响 VGS 固碳效益的关键因素。植被类型上,木本较多肉和草本植物的固碳能力强^[39],高浓度情况下 C₃比 C₄类型的植物能吸收更多 CO₂^[58]。形态方面,叶密度、覆盖率与固碳能力呈正相关^[43];Charoenkit 等人认为覆盖度大于 95%的 VGS 具有良好的固碳性能;根系长、茎干高、双子叶、叶绿素丰富的植物固碳效果更佳^[58];叶片大小对固碳效益的影响争议较大,结论尚不一致^[39, 43, 58]。

2.4 净化空气

VGS 通过物理和化学两种途径进行空气净化。物理方面,VGS 形成的立面植被地形影响表面阻力和周围气流模式,影响周围空气污染物的扩散和沉积^[59–61]。化学方面,气态污染物进入气孔后被吸收或与叶片内部的物质发生化学反应^[62–63],从而达到净化的效果。此外,VGS 降低空气温度、减少二氧化碳排放也有助于间接减少空气污染^[64]。

外部环境因素影响空气净化效果,如街道峡谷的纵横比、气象条件、设施高度、污染物浓度、颗粒物大小等。大纵横比的街道峡谷环境下,由于风速较低且污染物积累,VGS 空气净化效果较好^[65]。高强度降雨有利于叶片表面的颗粒物冲刷^[66];相对湿度与 PM₁₀和 SO₂的沉积速度呈负相关^[62]。VGS 不同高度处的空气净化效果尚存争议,有研究表明 VGS 的净化效果与高度负相关^[61, 67];但也有研究认为不同高度的空气质量无显著差异^[60, 68]。空气中的颗粒物和 SO₂吸附量与污染物浓度呈正相关^[69–70];颗粒物直径越小,则 VGS 叶片上吸附的颗粒越多。

植被特征影响 VGS 空气净化效果,如:植被起伏形成的设施表面粗糙度、叶片大小、密度、叶表面粗糙度等。设施表面粗糙的 VGS 更有利于颗粒物的沉积^[59]。较小的叶片和针叶的颗粒物沉积较多,而宽叶上较少^[71];冠层密度、叶面积密度、叶片气孔密度与污染物去除率呈正相关^[60, 65, 71]。叶片表面粗糙度方面尚有争议,有学者认为蜡质叶片较粗糙的毛叶能收集更多的颗粒物^[72],有学者则认为叶毛有助于滞尘^[63, 69, 71]。

2.5 降噪

VGS 能延缓声波传递时间并削弱噪声音量,具有显著的隔音潜力,其降噪效益的产生主要依靠吸声和隔声两个途径。由于它蓬松多孔的结构特征,与多种常见的建筑隔音材料相比,VGS 吸声性能较强而隔音性能较弱^[73]。

一方面,VGS 的噪声削减效果在不同声源频率下有所差异。VGS 在高频时对散射有较大影响,中频时则更多地影响吸收^[74];吸声系数随着频率的增加而增加^[53, 75–76]。另一方面,基质、基板、植被特征及设施的高度、与其他降噪措施的组合形式等也会对 VGS 系统的声学性能产生影响^[75]。LW 的主要吸声材料是基质土壤,基质越厚,低频段的吸声系数越高^[76]。密闭基板有利于增强隔声性能,LW 在缩小模块化部件之间缝隙之后的加权隔声指数提升了 3 dB^[73]。植被覆盖率与吸声系数成正比^[75];增加植被厚度和密度有利于提升降噪能力^[76]。VGS 对建筑上层和邻近街道噪声削减的作用较显著,建设在建筑上层立面上能发挥更大效果^[77]。此外,单独的 VGS 降噪效果相对较弱,与其他降噪措施相结合能产生更大效益;研究表明 VGS 与绿色屋顶及绿色女儿墙的组合降噪效果最佳^[78]。

2.6 截留雨水

VGS 通过枝叶拦截和基质存蓄减少径流、延缓洪峰,降低内涝风险。由于其垂直安装在建筑立面上,排水速度较快,单位面积的蓄水能力可能有限,但它具有可建设空间大的优势,在雨洪管理中的作用值得被重视^[79]。VGS 类型、气象条件、植物特征等影响雨水截留效果。LW 较 GF 的截留能力强。小降雨量条件下 VGS 的缓冲截留效果较好^[80]。植物生物量是最为关键的影响因素^[81];生长茂密和稀疏的两种 VGS 的截留率分别为 54%—94%和 10%—55%,初始径流延迟时间分别为 30 min 和 15 min^[80];显然,管理养护良好、生物量

大的 VGS 截留效果更优。木质植物得益于其分支结构特征较草本植物更适合蓄水;表皮粗糙度、叶片疏水性等特征也会影响单株植物的储水容量^[81]。

2.7 支持生物多样性

VGS 可支持多种植物在立面空间生长,形成多样的植物群落,有助于提升立面空间植物物种多样性;其营造的环境可能为鸟类、节肢动物、微生物等提供食物和栖息地^[82];并在景观尺度上充当“垫脚石”,增加城市绿地网络的连通性,帮助物种进行移动和扩散^[83—85]。VGS 支持生物多样性方面的研究对象多为动植物,近期已有学者关注其对微生物的影响,Zhou 等人研究发现 VGS 叶面是微生物向室内转移的关键介质,为微生物的传播提供便利^[86],增加了室内环境的微生物多样性。这既可能增加人们接触致病微生物的风险^[86],也可能增加接触有益微生物的机会^[87],其对人体健康的影响尚待进一步研究。除了人工配置植物,近年来还有学者尝试借鉴城市墙体自生植物群落提出近自然的应用模式,来提升其稳定性和多样性^[82]。

VGS 中的生物多样性支持效益受设施和植被类型影响,在不同时段产生差异。一方面,LW 便于搭配多种草本、小灌木,其植物物种丰富度通常高于 GF。另一方面,相比于 GF 营造的较为单一的环境,LW 的支持作用通常更佳。Madre 等人研究发现,由苔藓、草本和灌木组成的凉爽潮湿的 LW 中甲虫和蜘蛛较多,物种丰富度较高;而由地锦攀援的较为干燥的 GF 中物种丰富度较低^[84]。植被类型和时段方面,VGS 冬季常绿植物上的鸟类活动明显多于落叶植物,而在夏季没有显著差异^[88]。

2.8 小结

VGS 各个效益由不同的机制产生,多种因素通过机制最终影响效益的发挥。表 3 对 VGS 各生态效益的机制进行了总结。如表所示,除缓解城市热岛、夏季降温 and 冬季保温效益,VGS 其他效益的形成机制各异。然而不论是何种机制,都有可能受到相同因素的影响;如植物覆盖率的变化可同时影响遮阴、蒸散、植物捕获、植物吸收、吸声等,进而影响多个效益的发挥。同时,影响 VGS 效益发挥的因素也是多样的,使得影响因素和效益之间形成了复杂的关系网络,即某一影响因素的改变将作用于整体效益的发挥。因此,有必要对各个效益和影响因素之间的关系进行梳理,这将是统筹协调多效益进行综合分析的理论依据。

表 3 VGS 各生态效益的机制

Table 3 Mechanism of each ecological benefit

生态效益 Ecological benefits	缓解城市热岛 Alleviate urban heat island	建筑节能减排		固碳 Fix carbon	净化空气 Purify air	降噪 Reduce noise	截留雨水 Intercept rainwater	支持生物多样性 Maintain biodiversity
		Conserve building energy and carbon emission						
		夏季降温	冬季保温					
		Cool in summer	Insulate in winter					
机制	遮阴	遮阴	遮阴	植物捕获	扩散	吸声	拦截	提供生境
Mechanism	蒸散	蒸散	蒸散	土壤捕获	沉积	隔声	存蓄	提供食物
	隔热	隔热	隔热		植物吸收		蒸发	“垫脚石”

3 VGS 各生态效益及影响因素综合分析

3.1 VGS 各生态效益及影响因素关系的归纳梳理

根据现有研究,表 4 梳理了各影响因素和生态效益之间的关系。首先,将影响因素归纳为设施特征和环境背景两类;设施特征包括结构特征、植被特征、空间格局,环境背景包括气象条件、建筑格局。其次,将影响因素与生态效益之间的关系梳理为正相关、负相关、可能相关但尚未证实(不清楚)、不相关四种。另外,还基于效益受各因素影响的程度,设置三个重要性程度等级,“*”越多则表示该因素的影响越重要。各个生态效益并非孤立存在,一个因素的改变可能作用于多个效益的发挥,使效益之间形成协同、冲突和不相关三种关系。如覆盖率的增加将对七个效益带来一致的促进作用,形成协同关系;而设施高度的升高可能将提升夏季降温 and 降噪效益而降低空气净化效益,从而产生冲突。对上述关系的梳理将为多效益综合分析提供理论依据。

表 4 VGS 各生态效益与影响因素的关系

Table 4 Relationship between ecological benefits and influencing factors

类别 Type	影响因素 Influencing factor	建筑节能减排 Conserve building energy and carbon emission		固碳 Fix carbon	净化空气 Purify air	降噪 Reduce noise	截留雨水 Intercept rainwater	支持生物 多样性 Maintain biodiversity
		夏季降温 Cool in summer	冬季保温 Insulate in winter					
设施特征 Facility characteristic	结构特征	LW>GF	+	+	不清楚	+	+	+
		气腔	+	+	不清楚	+	+	+
		基质	+	+	不清楚	+	+	不清楚
植被特征	覆盖率	+	+	+	+	+	+	+
		冠层密度	+	+	+	+	+	不清楚
		常绿>落叶	不清楚	+	不清楚	不清楚	+	+
		草本>木本	不清楚	不清楚	+	不清楚	+	不清楚
		空间格局	设施高度	+	不清楚	不清楚	+	不清楚
		气象条件	太阳辐射	+	+	不清楚	不清楚	不清楚
环境背景 Environmental background	气象条件	温度	+	+	不清楚	不清楚	不清楚	不清楚
		湿度	+	+	不清楚	不清楚	不清楚	+
		风速	+	+	不清楚	不清楚	不清楚	不清楚
		降雨强度	不清楚	不清楚	不清楚	不清楚	不清楚	不清楚
		建筑格局	街区高度	+	+	不清楚	不清楚	不清楚
		街区高度	+	+	不清楚	不清楚	不清楚	不清楚

“>”表示前者较后者效果更佳。“*”的数量表示该影响因素的重要程度,依次表示为:“*”重要、“**”比较重要、“***”非常重要;“+”表示为正相关关系;“-”表示为负相关关系;“不清楚”表示为有可能相关但尚未被证实;“不相关”表示为二者之间没有相关关系

3.2 供需耦合指导建设布局

如表 4 所示,环境背景影响 VGS 的效益发挥。在夏季太阳辐射强烈、炎热干燥的地区,VGS 能更好地降温节能,而在冬季太阳辐射弱且寒冷的地区能更好地保温节能。一般情况下,冬冷夏热地区有更多的建筑节能需求,此时夏季降温和冬季保温效益的供需关系耦合程度较高,非常适宜建设 VGS。雨水截留能力与降雨强度和风速呈负相关,但降雨强度和风速较大的地区通常由于内涝易发从而具有较高的雨水截留需求,二者呈现较低的供需耦合度。然而在城市环境中,向立面空间寻找补充的截留方案对缓解内涝风险仍然具有一定的意义,该情况下可从其他角度寻找效益提升途径,如选择受降雨强度和风速影响较小的背风向来减小供需耦合程度较低导致的效益削弱。VGS 所处的环境背景影响其生态系统服务供给并决定其环境需求,供给和需求的耦合最终作用于实际效益的发挥;供需耦合度可作为建设区域优先级筛选的依据,耦合程度越高,建设适宜性越强;耦合程度较低时,也可通过其他途径优化其立面空间布局。

3.3 效益权衡及影响因素重要性指导规划设计

如表 4 所示,特定因素影响下,各效益间存在协同或冲突关系。覆盖率、冠层密度、基质及风速的改变能同时对多数效益产生一致的影响,选择常绿或落叶植物将对冬季保温、截留雨水和支持生物多样性效益产生一致影响的同时不损害其他效益。这些因素的优化可以产生协同效益。而设施高度、湿度、风速的改变将使夏季降温和空气净化效益产生冲突。

各效益受多种因素不同程度的影响。夏季降温和冬季保温受基质、覆盖率、冠层密度、太阳辐射、温度等因素的影响较大,而受降雨强度的影响较小;固碳和降噪效益受到植被特征的影响较大而受环境背景因素的影响较小;净化空气和截留雨水效益主要受到植被特征、风速及降雨强度的影响。总的来说,植物覆盖率、冠层密度、基质和风速将对多数效益产生较大影响,而气腔和降雨强度产生的影响则相对次要。

各个效益通过影响因素产生错综复杂的联系,规划设计时应分析多种效益间的关系,注重协同效益的发挥。产生冲突时则因地制宜,以区域内关键的生态环境问题为导向对不同效益需求进行权衡,确定重要目标。

并结合冲突因素的重要性程度进行措施优先级筛选,有针对性地优先提升关键影响因素。

4 结论与展望

4.1 结论

首先,本文系统地梳理了各生态效益的机制及其关键影响因素,并对 VGS 各生态效益与各影响因素的关系进行了总结,为多效益的综合分析提供了理论依据。VGS 具有缓解城市热岛、建筑节能减排、固碳、净化空气、降噪、截留雨水和支持生物多样性等七种生态效益,并受到植被特征、设施结构特征、气象条件、空间格局等多方面因素的影响。各效益与影响因素之间形成复杂的关系网络,某一影响因素的改变将作用于整体效益的发挥,使效益之间形成协同、冲突和不相关三种关系。其次,基于上述分析进一步提出了供需耦合指导建设布局 and 效益权衡及影响因素重要性指导规划设计两个观点,为多效益统筹的综合规划提供研究思路。第一,关注需求和供给的耦合关系能够更加科学合理地指导生态建设布局。供需耦合度可作为建设区域优先级筛选的依据,耦合程度越高,建设适宜性越强。第二,关注多种因素影响下生态效益间的关系,结合效益权衡及影响因素重要性程度能为规划设计提供有效建议。规划设计时应注重协同效益的发挥,产生冲突时则宜以区域内关键的生态环境问题为导向对不同效益需求进行权衡,确定重要目标。并结合冲突因素的重要性程度进行措施优先级筛选,有针对性地优先提升关键影响因素。

4.2 展望

国内外关于 VGS 生态效益的研究已取得一定进展,但仍存在需完善之处。效益方面,VGS 固碳、截留雨水、支持生物多样性等效益的研究相对不足;净化空气效益方面的研究集中关注 VGS 对颗粒物的影响,应加强对其他污染物的关注;截留雨水效益的研究中所监测的降雨事件普遍偏小易导致截留效果偏高,需更多地关注大雨暴雨时 VGS 的截留效果。在影响因素上,一方面表 4 中仅展示了已有研究中较为常见的几项影响因素,仍然存在其他因素尚待发掘。如 VGS 的发展使城市绿地从平面空间扩展到立面空间,其二、三维空间格局如何影响效益发挥是值得探讨的话题。另一方面,表中仍存在较多不清楚的效益间作用关系有待进一步探索。

本文为多效益统筹的综合规划提出两点思路,但上述不足将在一定程度上影响综合效益分析结果的全面性和准确,仍然需要更为深入的探索。首先,未来需要更多的研究补充完善表格中尚不清楚的内容和其他影响因素以支持更加全面科学的综合分析。再者,除了作为建设区域优先级筛选的依据,供需耦合度可能还将有助于进行效益权衡,有待进一步探讨。最后,供需耦合和效益权衡二者不是孤立而是相互联系的,未来需要进行结合,以更好地为最大化综合效益提供建议。

参考文献(References):

- [1] Sharifi A. Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141642.
- [2] UNDDR. Climate change drives disaster risk. [2022-03-21]. <https://www.preventionweb.net/understanding-disaster-risk/risk-drivers/climate-change>.
- [3] 韩林桅, 张森, 石龙宇. 生态基础设施的定义、内涵及其服务能力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(19): 7311-7321.
- [4] Pérez-Urrestarazu L, Fernández-Cañero R, Franco-Salas A, Egea G. Vertical greening systems and sustainable cities. *Journal of Urban Technology*, 2015, 22(4): 65-85.
- [5] 史宝刚, 尹海伟, 孔繁花, 刘佳. 基于 envi-met 模型的南京市新街口地区垂直绿化降温效应评价. *现代城市研究*, 2021, (12): 125-132.
- [6] Medl A, Stangl R, Florineth F. Vertical greening systems - a review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, 2017, 125: 227-239.
- [7] Ling T Y, Chiang Y C. Well-being, health and urban coherence-advancing vertical greening approach toward resilience: A design practice consideration. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 187-197.
- [8] 王效科, 杨宁, 吴凡, 任玉芬, 王思远, 薄乖民, 蒋高明, 王玉宽, 孙玉军, 张路, 欧阳志云. 生态效益及其特性. *生态学报*, 2019, 39(15): 5433-5441.

- [9] 汪元凤, 董仁才, 肖艳兰, 岳敏慧, 王朋, 段昌群, 刘嫦娥. 从景感生态学视角分析城市立体绿化内涵与功能——以深圳市为例. 生态学报, 2020, 40(22): 8085-8092.
- [10] 陈明, 戴菲, 殷利华. 基于内容分析法的中国垂直绿化研究进展. 风景园林, 2018, 25(5): 104-109.
- [11] 刘凌, 刘加平. 建筑垂直绿化生态效应研究. 建筑科学, 2009, 25(10): 81-84.
- [12] 黎国健, 丁少江, 周旭平. 华南 12 种垂直绿化植物的生态效应. 华南农业大学学报, 2008, 29(2): 11-15.
- [13] Ghazalli A J, Brack C, Bai X M, Said I. Physical and non-physical benefits of vertical greenery systems: A review. Journal of Urban Technology, 2019, 26(4): 53-78.
- [14] Sharifi A. Trade-offs and conflicts between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 122813.
- [15] Huang Z Y, Tan C L, Lu Y J, Wong N H. Holistic analysis and prediction of life cycle cost for vertical greenery systems in singapore. Building and Environment, 2021, 196: 107735.
- [16] Manso M, Teotónio I, Silva C M, Cruz C O. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110111.
- [17] Perini K, Rosasco P. Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. Building and Environment, 2013, 70: 110-121.
- [18] Bustami R A, Belusko M, Ward J, Beecham S. Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. Building and Environment, 2018, 146: 226-237.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T236—2015 垂直绿化工程技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [20] Besir A B, Cuce E. Green roofs and facades: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 915-939.
- [21] Koch K, Ysebaert T, Denys S, Samson R. Urban heat stress mitigation potential of green walls: A review. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 55: 126843.
- [22] Hunter A M, Williams N S G, Rayner J P, Aye L, Hes D, Livesley S J. Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. Ecological Engineering, 2014, 63: 102-113.
- [23] Zhang L, Deng Z C, Liang L S, Zhang Y, Meng Q L, Wang J S, Santamouris M. Thermal behavior of a vertical green facade and its impact on the indoor and outdoor thermal environment. Energy and Buildings, 2019, 204: 109502.
- [24] Koc C B, Osmond P, Peters A. Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. Solar Energy, 2018, 166: 486-508.
- [25] 理查德·福尔曼. 城市生态学——城市之科学. 郭建国, 译. 北京: 高等教育出版社, 2017: 178-178.
- [26] Perini K, Ottelé M, Fraaij A L A, Haas E M, Raiteri R. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. Building and Environment, 2011, 46(11): 2287-2294.
- [27] Kokogiannakis G, Darkwa J, Badeka S, Li Y L. Experimental comparison of green facade with outdoor test cells during a hot humid season. Energy and Buildings, 2019, 185: 196-209.
- [28] Alexandri E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. Building and Environment, 2008, 43(4): 480-493.
- [29] Convertino F, Vox G, Schettini E. Evaluation of the cooling effect provided by a green facade as nature-based system for buildings. Building and Environment, 2021, 203: 108099.
- [30] Zheng X, Dai T C, Tang M F. An experimental study of vertical greenery systems for window shading for energy saving in summer. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120708.
- [31] Djedjig R, Belarbi R, Bozonnet E. Experimental study of green walls impacts on buildings in summer and winter under an oceanic climate. Energy and Buildings, 2017, 150: 403-411.
- [32] Mazzali U, Peron F, Romagnoni P, Pulselli R M, Bastianoni S. Experimental investigation on the energy performance of living walls in a temperate climate. Building and Environment, 2013, 64: 57-66.
- [33] 季桐. 城市中心高密度街区垂直绿化热舒适影响因素研究——以广州琶洲西区为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [34] Morakinyo T E, Lai A, Lau K K L, Ng E. Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 37: 42-55.
- [35] Peng L L H, Jiang Z D, Yang X S, Wang Q Q, He Y F, Chen S S. Energy savings of block-scale facade greening for different urban forms. Applied Energy, 2020, 279: 115844.
- [36] 陈宇, 宋双双, 侯雅楠. 南京市夏季垂直绿化对人体舒适度的影响探究. 中国园林, 2020, 36(9): 64-69.
- [37] Wong N H, Kwang Tan A Y, Chen Y, Sekar K, Tan P Y, Chan D, Chiang K, Wong N C. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. Building and Environment, 2010, 45(3): 663-672.

- [38] Hoelscher M T, Nehls T, Jänicke B, Wessolek G. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 2016, 114: 283-290.
- [39] Charoenkit S, Yiemwattana S, Rachapradit N. Plant characteristics and the potential for living walls to reduce temperatures and sequester carbon. *Energy and Buildings*, 2020, 225: 110286.
- [40] Yin H W, Kong F H, Middel A, Dronova I, Xu H L, James P. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. *Building and Environment*, 2017, 116: 195-206.
- [41] Koyama T, Yoshinaga M, Hayashi H, Maeda K I, Yamauchi A. Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, 2013, 66: 96-103.
- [42] Chen Q Y, Ding Q, Liu X H. Establishment and validation of a solar radiation model for a living wall system. *Energy and Buildings*, 2019, 195: 105-115.
- [43] Charoenkit S, Yiemwattana S. Role of specific plant characteristics on thermal and carbon sequestration properties of living walls in tropical climate. *Building and Environment*, 2017, 115: 67-79.
- [44] IEA. Building envelopes. (2021) [2022-03-21]. <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>.
- [45] 吕伟娅, 陈吉. 模块式立体绿化对建筑节能的影响研究. *建筑科学*, 2012, 28(10): 46-50.
- [46] 梁丽莎. 广州地区攀援垂直绿化降温及节能效益研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [47] Wong N H, Tan A Y K, Tan P Y, Wong N C. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, 2009, 41(12): 1401-1408.
- [48] Perini K, Bazzocchi F, Croci L, Magliocco A, Cattaneo E. The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 2017, 143: 35-42.
- [49] Wong I, Baldwin A N. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. *Building and Environment*, 2016, 97: 34-39.
- [50] Coma J, Pérez G, De Gracia A, Burés S, Urrestarazu M, Cabeza L F. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 2017, 111: 228-237.
- [51] 郑伯红, 李家宇, 饶继发, 戚智勇, 郑舰. 湘南住区垂直绿化的冬季节能绩效研究. *华中农业大学学报*, 2021, 40(3): 195-202.
- [52] Raji B, Tenpierik M J, Van Den Dobbelsteen A. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 610-623.
- [53] 徐诺. 夏热冬冷地区垂直绿化的适应性及其生态服务功能评估[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [54] Bakhshoodeh R, Ocampo C, Oldham C. Thermal performance of green façades: Review and analysis of published data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 155: 11744.
- [55] Nan X G, Yan H, Wu R W, Shi Y, Bao Z Y. Assessing the thermal performance of living wall systems in wet and cold climates during the winter. *Energy and Buildings*, 2020, 208: 109680.
- [56] 张迎辉, 姜成平, 赵文飞, 韩俊, 王迎, 王华田. 城市垂直绿化植物爬山虎的生态效应. *浙江林学院学报*, 2006, 23(6): 669-672.
- [57] Pan L. Carbon Sequestration and Thermal Performance of Vertical Greening[D]. Hong Kong, China: The Chinese University of Hong Kong, 2016.
- [58] Zaid S M, Perisamy E, Hussein H, Myeda N E, Zainon N. Vertical greenery system in urban tropical climate and its carbon sequestration potential: A review. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 57-70.
- [59] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Topographical structures in planting design of living walls affect their ability to immobilise traffic-based particulate matter. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 644-649.
- [60] Tong Z M, Baldauf R W, Isakov V, Deshmukh P, Zhang K M. Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 920-927.
- [61] Morakinyo T E, Lam Y F, Hao S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement. *Journal of Environmental Management*, 2016, 182: 595-605.
- [62] Joshi S V, Ghosh S. On the air cleansing efficiency of an extended green wall: A CFD analysis of mechanistic details of transport processes. *Journal of Theoretical Biology*, 2014, 361: 101-110.
- [63] Tomson M, Kumar P, Barwise Y, Perez P, Forehead H, French K, Morawska L, Watts J F. Green infrastructure for air quality improvement in street canyons. *Environment International*, 2021, 146: 106288.
- [64] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the united states. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3-4): 115-123.
- [65] Abhijith K V, Kumar P, Gallagher J, McNabola A, Baldauf R, Pilla F, Broderick B, Di Sabatino S, Pulvirenti B. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments-a review. *Atmospheric Environment*, 2017, 162: 71-86.
- [66] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. The impact of rainfall in remobilising particulate matter accumulated on leaves of four evergreen

- species grown on a green screen and a living wall. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 35: 21-31.
- [67] 毛敏, 刘拾尘, 陈秋瑜. 垂直绿化对街道峡谷内 $PM_{2.5}$ 的影响研究. *华中建筑*, 2020, 38(6): 63-67.
- [68] Ottel  M, Van Bohemen H D, Fraaij A L A. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 154-162.
- [69] 吕东蓬. 三种垂直绿化植物滞尘效应与其对光合作用影响的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [70] 邱靖. 三种垂直绿化植物净化大气中 SO_2 能力研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [71] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Quantification of the traffic-generated particulate matter capture by plant species in a living wall and evaluation of the important leaf characteristics. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1012-1024.
- [72] Perini K, Ottel  M, Giulini S, Magliocco A, Rocciotello E. Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 268-276.
- [73] Azkorra Z, Pérez G, Coma J, Cabeza L F, Bures S,  lvaro J E, Erkoreka A, Urrestarazu M. Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied Acoustics*, 2015, 89: 46-56.
- [74] Pérez G, Coma J, Barreneche C, De Gracia A, Urrestarazu M, Bur s S, Cabeza L F. Acoustic insulation capacity of vertical greenery systems for buildings. *Applied Acoustics*, 2016, 110: 218-226.
- [75] Wong N H, Tan A Y K, Tan P Y, Chiang K, Wong N C. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 2010, 45(2): 411-420.
- [76] Davis M J M, Tenpierik M J, Ramírez F R, Pérez M E. More than just a green facade: The sound absorption properties of a vertical garden with and without plants. *Building and Environment*, 2017, 116: 64-72.
- [77] Guillaume G, Gauvreau B, L'Hermite P. Numerical study of the impact of vegetation coverings on sound levels and time decays in a canyon street model. *Science of the Total Environment*, 2015, 502: 22-30.
- [78] Van Renterghem T, Hornikx M, Forssen J, Botteldooren D. The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment*, 2013, 61: 34-44.
- [79] Kew B, Pennypacker E, Echols S. Can greenwalls contribute to stormwater management? A study of cistern storage greenwall first flush capture? *Journal of Green Building*, 2014, 9(3): 85-99.
- [80] Tiwary A, Godsmark K, Smethurst J. Field evaluation of precipitation interception potential of green façades. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 69-75.
- [81] Smets V, Akkermans W, Verbeiren B, Hermy M, Somers B. Ex-situ estimation of interception storage capacity of small urban plant species. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 869-883.
- [82] 刘瑞雪, 许晓雪, 袁磊. 新自然主义生态种植设计理念下的城市墙体自生植物在垂直绿化中的应用. *中国园林*, 2020, 36(4): 111-116.
- [83] Collins R, Schaafsma M, Hudson M D. The value of green walls to urban biodiversity. *Land Use Policy*, 2017, 64: 114-123.
- [84] Madre F, Clergeau P, Machon N, Vergnes A. Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 3: 222-233.
- [85] Mayrand F, Clergeau P. Green roofs and green walls for biodiversity conservation: A contribution to urban connectivity? *Sustainability*, 2018, 10(4): 985.
- [86] Zhou S Y D, Zhang Q, Neilson R, Giles M, Li H, Yang X R, Su J Q, Zhu Y G. Vertical distribution of antibiotic resistance genes in an urban green facade. *Environment International*, 2021, 152: 106502.
- [87] Selway C A, Mills J G, Weinstein P, Skelly C, Yadav S, Lowe A, Breed M F, Weyrich L S. Transfer of environmental microbes to the skin and respiratory tract of humans after urban green space exposure. *Environment International*, 2020, 145: 106084.
- [88] Chiquet C, Dover J W, Mitchell P. Birds and the urban environment: The value of green walls. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(3): 453-462.