形式、功能与认知: 建筑绿化在绿色建筑与生态城市中的角色

周铁军^{①②*}, 王大川^{①②}, 熊健吾^{①②}

① 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

② 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400045

* E-mail: arch_ztj@cqu.edu.cn

收稿日期: 2014-12-04; 接受日期: 2015-01-12

国家“十二五”科技攻关课题(课题号: 2013BAJ11B01)资助项目

摘要 在当代城市高密度发展条件下, 生态城市、可持续发展、绿色建筑等语义背景下, 建筑绿化提供了将人工建成环境与自然环境相结合的契机, 是近年来发展迅速的一个领域. 城市绿化设施, 包括城市公园、街道种植、绿色走廊、建筑绿化、私人花园等, 被认为对于改善城市环境、维持城市生态系统、净化城市土壤、空气质量等均具有至关重要的作用. 作为城市绿化设施的组成部分, 建筑绿化在城市环境中扮演何种角色, 与其他绿化设施类型是否具有同等的价值? 近期的一些研究和文献综述强调了建筑绿化对于建筑单体热工性能改善或建筑美学价值, 较少有研究从城市角度综合评估建筑绿化的贡献; 目前国内的建筑实践也极少有从城市规划层面对建筑绿化进行设计. 本文通过文献回顾近年来建筑绿化领域的相关研究成果, 以科学的证据来理解建筑绿化在城市内不同尺度下扮演的角色, 包括它对于绿色建筑本身的意义以及在生态城市环境、社会和经济方面的特征与贡献. 依据文献线索, 构建了建筑绿化的类型、功能与生态城市要素, 以及相互关系和作用的跨学科概念性框架, 并提出未来在此领域的研究和实践方向.

关键词

建筑绿化
绿色建筑
生态城市
屋面绿化
垂直绿化

1 概述

据中国国家统计局的最新报告^[1], 中国的城市化率从 1978 年的 17.92% 已经增加到 2013 年的 53.7%, 预计 2030 年, 将达到 65%^[2]. 我国快速城市化发展进程改善了大量居民的生活质量, 促进了城市经济、工业发展, 带动了农业现代化发展, 同时由于在发展过程中环境保护意识不强, 城市基础设施落后, 造成了城市内环境污染严重, 空气质量下降, 极端天气频发

等问题, 直接或间接地影响到了城市的经济、社会发展^[3]. 因此, 快速城市化发展进程对于城市的生态可持续发展带来了严重挑战. 从建设层面的城市生态可持续是一个复杂的课题, 它涉及到城市规划、建筑设计、城市绿化、交通运输系统、水资源管理、空气质量控制、能源控制、废物利用、生态保护和许多其他相互关联的问题. 在此之中, 城市绿化设施建设作为保护和恢复因城市建设破坏自然生态系统的有效方法, 始终被认为是解决城市生态问题的重要要素

引用格式: 周铁军, 王大川, 熊健吾. 形式、功能与认知: 建筑绿化在绿色建筑与生态城市中的角色. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 951–963
Zhou T J, Wang D C, Xiong J W, et al. Form, function and cognition: A review of the role of building integrated vegetation in green building and ecological city (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 951–963, doi: 10.1360/N092014-00423

之一,并持续地为城市未来发展的生态环境、社会和经济效益提供机会^[4]。城市绿化设施除去具有一些显而易见的环境效益,许多学术研究和城市建设实践通过许多直接和量化的数据证明了城市绿化设施的经济和社会效益。城市绿化设施能减少城市基础设施成本,包括洪水控制、污染物处理、雨水排放系统等。例如,20世纪90年代至今,纽约市通过购买并保护卡茨基尔山脉(Catskill mountains)的湿地,节省了污水过滤与处理需花费的约40~60亿美元;李雪铭等人^[5]通过实证研究发现,大连市的绿地建设对城市GDP发展具有提升效果。近年来一系列研究也强调了城市生态系统对城市社会的重要性^[6,7]。对于城市中的居民个体而言,个人幸福与健康水平主要与社会经济地位息息相关^[8],同时临床和实证研究也发现绿色空间对城市居民的心理和健康也具有重要影响,例如,绿色空间对城市居民寿命具有积极作用^[9,10];乌里希的研究证明了“自然恢复假说”:自然环境相对于压抑的城市环境对于疾病患者具有更好的恢复作用^[11];绿色空间还能减少城市居民的压力和焦虑,增加幸福度感受^[12]等。

绿色设施对于创造更宜人的城市来说具有不可估量的好处,对于目前各国城市发展来说,城市绿化建设都是一个非常现实的目标。城市中,建筑物既是城市的主体部分,同时也占据了城市中超过1/5的陆地表面^[13]。采用生态优先的原则进行规划、建筑设计和景观设计可以将不同建筑的屋顶、外围护结构、庭院、街道和开发空间通过绿化联系起来,形成连续整体的绿色空间为整个城市环境服务。因此建筑绿化必然需要扮演一个关键的角色,与其他城市绿化设施一起形成整体的城市绿化。然而,在目前我国的城市建设实践中,由于快速而又粗糙的开发模式,有价值的建筑本身及其相关空间,例如屋顶、墙面、露台、阳台、院落等,并没有被有效利用;许多能够成为绿色空间的道路、车库顶板、高架桥墩、中庭等最后都被硬质表面覆盖。在学术领域,近期的研究主要强调了建筑绿化对单体建筑的美学价值、作为建筑外围护结构的一部分所具有的降低能耗和改善环境的价值^[14~16],而较少研究了从城市角度对建筑绿化进行分析。

本文从建筑绿化作为整个城市绿化设施的一个重要组成部分这一角度出发,主要通过文献回顾,了解建筑绿化领域的最新研究与发展动态,从不同尺

度来理解建筑绿化与建筑和城市的关系。

2 研究方法

电子文献数据库(包括但不限于:ISI Web of Knowledge, IEEE, ScienceDirect, Scopus, Engineering Village, SpringerLink, CNKI, 万方数据库等)最初被用于相关文献的搜索,设置了两组关键词:“建筑绿化(building green 或 building vegetation)”、“屋面绿化(planted roofs 或 green roofs)”、“墙面绿化(green metopes 或 green walls)”和“绿色建筑(green building)”、“生态城市(ecological city)”、“城市环境(city environment)”、“社会效益(social benefits)”、“经济效益(economic benefits)”相互组合进行搜索。通过识别所查文献研究的具体领域,属于城市建筑环境、城市生态与健康和城市经济与社会的范围,并且符合经过审查、原创性研究的标准,来筛选最终综述所选用文章。文献回顾显示了建筑绿化、绿色建筑、生态城市之间的一些要素与关系,通过梳理这些要素与关系来建立一套跨学科的概念性框架。

3 建筑绿化概念定义与特征

现代建筑绿化技术是学习并延续了自古以来便存在的建筑绿化工程和实例,例如,地中海地区从公元前1000年开始出现垂直花园,通过幼发拉底河文明向东传播,其中最著名的例子是公元前6世纪的古巴比伦空中花园(图1)^[17];早期屋面绿化主要发展于18~19世纪的北欧寒冷地区(图2),一些研究者认为是由于气候适合草坪种植和建筑保温需求而出现^[18]。现代以植物为主体的建筑广泛始于80年代以德国为主的欧洲城市^[17],如艾米利奥·安巴斯(Emilio Ambasz)、百水(Hundertwasser)、奥斯瓦尔德·马蒂亚斯·翁格尔斯(Oswald Mathias Ungers)等一批自然派建筑师的作品(图3)在这一时期开始出现。近年来,越来越多的国家和地区认识到建筑绿化在审美、环境、经济和社会中的效益,通过立法或政策鼓励来努力创造和维持城市中的绿色空间^[19]。

建筑绿化可定义为在建筑内部或外部空间根据不同立地条件,为达到美学、环境、绿色产品或者安全等目的,选择各类适宜植物,进行不同类型绿化种植的整合。建筑绿化工程必须考虑当地气候特征和

图 1 欧洲 19 世纪未知画家所作的古巴比伦空中花园彩版画

图 2 冰岛的传统屋面绿化住宅

图 3 屋面绿化

(a) 轻型屋面绿化, 重庆大学建筑城规学院; (b) 密集型屋面绿化, 日本大阪难波公园

环境特征, 选择合适的绿化类型和植物配置, 以避免造成环境破坏^[18]. 建筑绿化一般按种植形式可分为: 水平绿化系统(主要为屋面绿化, 如图 3, 还包括地下车库顶面绿化、中庭绿化、室内绿化等)、垂直绿化系统(墙面绿化, 如图 4)和建筑物附近相关空间的绿化(小区绿化、建筑围护结构周围绿化等, 如图 5).

4 建筑绿化与绿色建筑

4.1 建筑绿化与绿色建筑的目标

近年来, 许多国家和地区都开始有系统地评价建筑对经济、环境和社会的影响, 并鼓励市场和开发商建造绿色建筑. 较为著名的绿色建筑评价标准有美国 LEED、英国绿色建筑评价体系 BREEAM、日本建筑物综合环境性能评价体系 CASBEE、台湾 EEWH 和中国《绿色建筑评价标准》等. 绿色建筑理念要求在建筑的全生命周期内产生最大的环境经济效益, 同时提供舒适的活动空间. 根据美国国家环

保局的阐述, 绿色建筑中“绿色”二字包含的潜在涵义即绿色建筑的目标如表 1^[20].

在绿色建筑中使用建筑绿化并不是一个新的概

图 4 垂直绿化

(a) 植物表皮(green facade)垂直绿化系统, 重庆北碚天奇花园; (b) 种植墙面(living wall)垂直绿化系统, 马德里现代艺术中心

图5 巴黎国家图书馆种植庭院

建筑间的绿化介质通过阴影和植物蒸发影响可以起到降温作用,并优化建筑通风

念,绿色建筑的最初概念便与环境保护、节省能源及减少碳排放等概念相关^[21],意味着人类环境与自然环境与生俱来的联系,早期的绿色建筑设计师广泛参与了绿色屋顶运动(green roof movement)、倡导绿色外观设计^[22]等建筑设计界的思潮。当代的绿色建筑发展已经汇集了大量技术的实践和研究,强调能源节约利用和可再生,减少并最终消除建筑物对环境 and 人类健康的影响仍是其核心主题。采用植物和树木补偿建筑生命周期的碳排放、减少雨水径流、提高维护结构热工性能、降温隔热和改善环境等方面至今是其他技术手段不可替代的方法,另外采用屋顶绿化的项目参评 LEED 等评价标准可以获得额外的加分^[23]。那么建筑绿化在绿色建筑中扮演何种角色来帮助绿色建筑实现其环境、经济和社会效益呢?

综述所查的文献中,绝大部分建筑绿化与绿色建筑的相关研究着重于其节能与环境效益,这也是绿色建筑关注的核心主题,同时建筑绿化在节能与环境部分的效益也直接或间接与绿色建筑的经济效益和社会效益相关。例如,建筑绿化对建筑能耗的节

省可直接减少建筑全生命周期内的用能成本;建筑绿化能减少噪音,优化空气质量必然对于提高建筑内外空间的舒适性和健康性具有帮助。近 20 年来,一系列研究通过实测、模型或文献引用的方法研究了建筑绿化在各个方面直接或间接帮助绿色建筑实现其目标。如图 6 为一系列已确认的建筑绿化功能以及它们与绿色建筑在能源环境、经济、社会三方面目标的关系,可以看出作为绿色建筑的可选技术手段,建筑绿化对绿色建筑的各个目标均有帮助和积极意义,下面将分类阐述建筑绿化一系列功能的现有研究进展和结论。

4.2 建筑绿化的节能与环境效益

4.2.1 热环境改善与节能性

绿色植物天然具有吸收太阳光能并不断生长的能力,因此植物用于建筑空间可以阻挡并吸收太阳辐射,是无污染,自我维护,低成本,被动式的墙体保温隔热材料^[24]。当代高密度的城市环境和热量排放导致了城市热岛效应,造成了低纬度地区许多城市夏季酷热,污染严重。一项研究表明,在城市树木密集种植区域,如公园,温度比其他地区低 2℃~4℃^[25]。植物保温隔热功能的主要原理为:在植物层面,夏季可为建筑立面提供遮挡,同时许多植物的树叶会提高其太阳角度,形成百叶通风效应,另外植物的蒸发和蒸腾作用为建筑提供额外的降温;冬季植物在一定程度上阻绝了外部空气,这取决于所用植物和密度,高密度的常绿植物墙面绿化最多可达 30%的阻绝效果^[13];植物还可保护建筑围护结构,维持其保持干燥,免受酸雨等影响。在绿化构造层面,构造层在一定程度上等效于建筑外围护结构的保温隔热层,一定程度增加了外围护结构的保温系数,特别是屋面绿化^[26]。热工性能取决于绿化种类^[27]。

Alexandri 和 Jones^[28]的一项研究发现,地中海地

表1 绿色建筑的目标

能源环境效益		经济效益	社会效益
①促进和保护生态系统多样性;	①减少建筑全生命周期运行成本;	②优化全生命周期能耗使用效率,减少能耗成本。	①提高舒适性和健康性;
②减少建筑使用过程的污染排放;			②提升建筑美观;
③保障空气和水的的天质量;			③减少对当地基础设施和社会资源的使用;
④保护自然资源;			④提高建筑全生命周期内的使用质量。
⑤节省能源;			
⑥产生再生能源。

图6 建筑绿化的功能对应绿色建筑在能源环境、经济和社会三方面的目标因子

区采用了屋面绿化与墙面绿化的建筑可达到夏季4.5℃的降温,可以大大减少 HVAC 的制冷时间;唐鸣放等人^[24]的研究发现,重庆地区草地式屋顶绿化等效热阻为 0.56 m² K/W,且气温越高,日照辐射越强,隔热效果越好;Zhou 等人^[29]的研究发现,长江流域一层平房屋面在进行一体化组合式屋面改造后,夏季每日空调能耗将减少 0.124 (kW h)/m² 冬季能减少 0.238 (kW h)/m²;Bartfelder 的 Köhler^[30]的研究发现,绿化墙面的夏季温度比普通墙面低 2℃~6℃;近期另外两项研究发现,地中海地区绿化墙面的潜在降温能力可达到 10.8℃^[31],新加坡地区可达到 11.6℃^[32];Perini 等人^[18]的一项研究表明了墙面绿化对于建筑的夏季通风具有帮助,同时绿化墙面的等效热阻为 0.09 m² K/W;室内植物可以增加室内空气湿度,在干燥地区夏季可以达到更好的降温作用^[33]。

4.2.2 雨水利用与保护

近年来,城市内极端气候频繁出现,强降雨给城市基础设施带来了极大的压力,经常出现城市内洪涝成灾,街道积水。研究发现,森林中的降水 95%被吸收,而城市中只有 25%^[34],雨水径流不断混入城市

中硬质表面的污染物,如油、盐、重金属、农药等。Corbett 等人^[35]发现城市雨水径流的水质接近污水甚至更差。

屋面绿化系统可以显著地减少雨水径流,减少径流总量、衰减洪峰流量、富集雨水^[36,37],Getter 和 Rowe^[38]认为绿化屋顶对环境能够产生的最大效益就是减少雨水径流;根据屋面绿化的类型,可以达到减少 60%~100%屋面雨水径流效果^[39];Kolb^[40]的报告中发现 45%的雨水可以通过屋面绿化土壤搜集最终蒸发或被植物吸收实现生态循环;雨水也是极有用的资源,可用作清洁、灌溉,提高水资源利用效率,李胜等人^[41]研究了利用屋面绿化收集雨水并用于建筑和景观用水的方法;减少雨水径流以减缓城市排水设施压力另一方面体现在延迟雨水径流的作用上,绿化屋面可以延迟雨水径流 95 min^[42]~4 h^[43]。

4.2.3 空气治理

我国许多人口密集地区都出现雾霾状况,很大程度与空气中的微尘颗粒(PM)有关,其中直径小于 2.5 μm 微尘颗粒可以进入更深的呼吸道部位甚至是肺部,引起城市居民健康问题^[44]。植物通过叶片对较

小微尘颗粒($<10\ \mu\text{m}$)的吸附,能较好过滤空气中的固体悬浮颗粒和部分气态污染物,这些污染物被吸收部分经由雨水被冲刷至土壤中^[45],植物可以吸收 CO_2 ,产生 O_2 ,提高空气中氧含量。

德国的一项研究发现,建筑绿化可以明显减少建筑室内被附近柴油发电机造成的空气污染^[46]; Tan 和 Sia^[47]发现,绿化屋顶处的空气中相对于其他地方减少了37%的二氧化硫和21%的亚硝酸物质; Peck 和 Kuhn^[48]估算出,建筑绿化对微尘颗粒的消除能力可以达到每年 $0.2\ \text{kg}/\text{m}^2$ 。

4.2.4 噪声控制

城市内坚硬的表面反射各种声音给建筑内带来噪声,充足的研究表明,长期暴露在噪声中容易造成人的听力障碍、高血压、心脏病、睡眠障碍以及一系列心理问题^[49]。据研究,植物对于吸收人耳较为敏感的声音频段特别有效,同时能提供让人愉悦的声音^[50];其中柳树吸收噪声最为有效,3 m 的柳墙相对于等高的普通墙体其吸声效果几乎是后者的2倍^[13]。法兰克福一项研究表明,轻型绿化屋面可减少噪音水平达到5 dB^[51],另一项研究表明,密集型绿化屋面可减少40 dB 噪声^[48]。

4.2.5 生态维持

建筑外部绿化特别是垂直绿化和轻型屋面绿化等公众不可直接接触之处,给许多生物,包括鸟类、昆虫和微生物提供了不受干扰的栖息地,对维持城市的生态多样性具有帮助。从设计角度来讲,鸟类、蝴蝶等昆虫与建筑绿化的互动从视觉上也为建筑增添了很多趣味。巴塞尔一项对17处绿化屋面的生物多样性研究发现了78种蜘蛛和254种甲虫,其中18%被列为稀有或濒危^[52];西柏林一处50年老屋顶绿化的研究中发现了大量的草蜢、甲虫和其他昆虫,瑞士一处90年的老屋顶绿化发现了9种兰花科和大量其他稀有植物^[53]; Monterusso 等人^[54]认为建筑绿化是保护和恢复本地原生植物物种的一种有效的潜在方法。

4.2.6 碳排放

建筑碳排放综合了建筑在全生命周期内建设和运行所耗费能源产生的 CO_2 指标。如前文所言,植物具有吸收 CO_2 产生 O_2 的作用,同时建筑绿化通过为建筑围护结构提供遮阳、部分隔绝与外部环境热交

换、增加围护结构热阻和保温系数以及调节通风为建筑提供节能。Getter 等人^[55]的研究表明,屋顶绿化的固碳量可达到 $375\ \text{gC}/(\text{m}^2\ \text{d})$;赵沛楠^[56]计算得出,在建筑全生命周期内,建筑附近的绿化固碳值为 $600\ \text{kg}/\text{m}^2$ 。

4.3 建筑绿化其他效益

对于绿色建筑而言,提供舒适的环境和节约能源是核心主题,从建筑学的意义,绿色建筑同时能够兼具经济性并具有吸引使用者的外观和内部空间才能称之为好的绿色建筑。尽管绿色建筑的初期投入成本较普通的建筑普遍更高,但考虑运行成本的全生命周期建筑的经济性也是绿色建筑目前被部分开发商接受的原因之一^[57]。建筑绿化除了通过能耗和环境所带来的直接和间接效益之外,许多研究也探讨了建筑绿化在材料和维护层面的经济效益,提升生活居住空间健康和舒适度和美学价值等。

4.3.1 美学价值

建筑外围护结构的绿化一个最直观的好处便是它对人有视觉吸引力,科学的证据表明,当人看到绿色植物和自然景色时,会产生血压降低、肌肉放松、心理压力减轻并增加积极的情感^[58]。尽管很少有量化的研究证明建筑绿化在美学上更优于传统建筑, Kuo 和 Sullivan^[59]的一项研究发现,在拥有更好绿化的城市居民区中的居民表现出更少的恐惧、粗鲁和暴力行为;植物为建筑提供了更丰富的设计创意和更协调的外观,例如2010年的上海世博会,许多建筑屋顶和墙面都采用了大面积的建筑绿化,给参观者留下了深刻的印象^[60]。

4.3.2 经济效益

建筑绿化的节能效益直接减少了建筑运行的用能成本, Gupta 等人^[61]的一项研究发现,墙面绿化可以节省夏季5%的用能成本; Zhou 等人^[29]的一项测试报告表明,上海普通平房 $19.35\ \text{m}^2$ 房间采用容器式屋顶绿化能够在夏季制冷期日节电 $2.35\ \text{kW}\cdot\text{h}$,冬季采暖期日节电 $2.1\ \text{kW}\cdot\text{h}$ 。

在材料和维护层面,建筑绿化也有较大的经济效益。外围护结构绿化可能高达普通外围护结构两倍的材料和施工成本,然而,植物和构造层可以起到保护外围护结构的作用,减少维护成本,提高使用寿命^[38]。例如,传统屋面的寿命通常为20年,而采用绿

化屋面的寿命可达到 40 年以上, 额外的初期投入可以获得长期的经济节省^[38]; Kosareo 和 Ries^[62]对比研究了非绿化屋面和绿化屋面, 发现非绿化屋面的全生命周期成本不低于绿化屋面; 除此之外, 另一个潜在的经济价值虽然难以量化, 但建筑绿化的美学特征更能吸引投资者、业主或承租人的青睐, 在政府决策层面, 有可能更助于获得行政规划审批, 为开发商创造经济价值^[13].

4.3.3 健康与舒适性

如前文所言, 建筑绿化对于提升建筑内外空间的健康和舒适性主要是因为: 建筑绿化可以通过如降低噪声、过滤污染物、改善空气质量来优化建筑内外空间微气候, 为建筑内外部提供更舒适的人工环境与自然环境相结合的空间; 绿化植物对人的生理和心理方面都具有积极的影响^[58]; 部分类型的建筑绿化如可进入的屋面绿化、庭院提供给城市居民可亲密互动、层次丰富的空间. 日本难波公园通过层次错落的建筑设计, 在 1 楼到 8 楼的屋顶都实现了可进入的绿化空间, 并且融入了的大树、岩石、悬崖、草坪、溪流、瀑布池塘及露台等自然元素, 给建筑内的人一种融入自然的感受^[63]; 对于病人, 乌尔里希证明了“自然恢复假说”, 他的一项研究发现, 医院病房中能够看到室外绿色空间的病人相对于只能看到砖墙的病人平均住院时间要少 24 h^[64].

5 建筑绿化与生态城市

5.1 城市绿化设施与城市生态

从古至今, 城市的发展为了美观和娱乐休闲空间的需要, 一向十分注重绿化空间的保护和创造. 在过去数十年来, 由于人类对自然的改造忽视了对生态环境的保护, 地球的生态环境在许多方面都在恶化, 例如由于 CO₂ 上升造成全球变暖^[65]. 世界各国已经认识到, 城市绿化空间的意义不仅仅是美学和娱乐, 而是与城市的生态、可持续发展及应对气候变化息息相关^[19].

城市绿化在对于城市的最主要贡献为对城市环境的改善, 包括减少城市热岛效应、减少雨水径流、增加生物多样性、应对极端气候变化、改善城市空气质量等, 在此基础上, 也直接或间接地为城市社会带来积极影响^[66,67]. 许多相关研究都具体证实了城市绿

化的这些效益, 现有研究进展和结论如下.

5.1.1 环境方面

城市内任何一个完整的绿色基础设施都可以以不同的方式对生态系统做出贡献, 并在整体上, 直接地影响整个城市范围内的生态系统和气候环境^[68].

首先是城市的生态多样性问题, 研究已经证明, 物种丰富的生态系统和地区相对于匮乏地区具有更高的生产效率和抵御外来风险的能力, 生态多样性是一个地区生态健康的重要指标^[69], 城市绿化设施维持了城市各种物种生存所需要的栖息地和资源, 对于维持城市的生态多样性具有重要意义.

其次, 城市绿化在气候、空气质量和水调节方面的功能让城市受益. 城市作为“热岛”, 往往比周边郊区温度更高, 城市内部的建筑物、道路和其他密封面能够吸收和储存太阳热量, 大部分硬质材料的热导系数比湿土要高^[13], 同时植物可以吸收热量对周围环境降温, 因此城市绿化设施有助于在垂直方向上混合空气, 坚硬表明上的暖空气上升, 冷空气取而代之, 这是城市绿化设施减少热岛效益的主要原理^[13]; 由于城市建筑减缓了空气的整体流动, 加之城市内部的湍流效应(通常是高层建筑的影响), 形成空气的口袋效应, 造成城市污染物难以散发, 城市绿化设施也通过上述原理为城市内带来新鲜空气^[13], 另外城市绿化设施能够过滤和净化城市空气中的微尘颗粒和有害气体, 达到净化城市空气的作用^[53]; 绿色植物通过将土壤中的水分带入空气, 可以加湿空气; 如前文所言, 城市绿化设施包括屋顶绿化, 可以减少雨水径流, 可以大大减缓城市排水设施的压力, 土壤的保水作用以及植物的吸收利用使水进入城市的生态循环中, 避免造成污染, 额外的雨水再利用系统减少了城市水资源的压力^[30].

5.1.2 社会经济方面

城市绿化设施在经济社会方面的效益难以被直接量化, 除了和环境方面通过城市基础设施、能源、水资源等方面节省间接或直接创造的巨大经济社会效益之外, 研究表明绿化设施能直接为周边地区创造更高价值, 业主和寻租者往往愿意为具有良好绿化设施周围的固定资产支付更高的价格^[70], 同时建筑绿化设施能够保护建筑围护结构, 减少建筑运行成本, 这些都将直接为政府和私人建造者带来积极

利益; 城市绿化设施在保障城市居民健康、减灾防灾和预防犯罪方面都具有一定积极影响, Tzoulas 等人^[71]的综述表明, 城市绿化基础设施是影响城市公共健康的一个重要因素, 并且在医疗投入、行为节能等方面直接为城市创造经济效益; Kuo 和 Sullivan^[59]的研究表明, 城市绿化对于减少城市犯罪具有潜在意义, 需要更多的研究来证实其因果关系. 在社会经济方面的效益, 其他的一些实际研究数据与案例, 在概述中也有提到.

5.2 建筑绿化与生态城市的概念模型框架: 角色与未来

城市高密度的发展和昂贵的城市地价造成城市内大面积的绿化设施成本过高且发展受限. 建筑在城市内占用了超过 1/5 的陆地表面^[13], 并且在立体层面上具有巨大的表面面积. 这对植被与建筑一体化的建筑绿化作为城市绿化设施的一部分为城市环境、经济和社会产生效益提供了巨大的潜力. 例如, 在华盛顿哥伦比亚特区, 如果现有屋顶的 20% 采用屋面绿化, 产生的效益相当于种植 17000 颗行道树^[72], 模型显示, 芝加哥地区如果全面采用屋顶绿化可以减少 417309.26 kg 的氮氧化物和 517100.61 kg 的硫氧化物, 大大改善城市空气质量^[73]. 2000 年以来, 世界许多城市开始采用建筑绿化技术来积极应对城市的各种问题, 出台鼓励或强制性的建筑绿化的政策, 如表 2^[19].

为了总结文献中的线索, 并进一步推动在这一领域的研究, 本节构建一个跨学科的联系建筑绿化要素、功能和生态城市之间关系的概念性框架.

图 7 左上角部分显示了建筑绿化的主要三种形式, 包括水平绿化、垂直绿化, 三者相互一起形成建

筑与植物一体化的建筑绿化; 右上角为已证实的建筑绿化与其他城市绿化一起在城市中发挥的功能, 功能内的相互联系和影响的各因素用双箭头连接; 下面部分为生态城市的三个方面: 环境生态、经济生态、社会生态, 建筑绿化和其他城市绿化通过自身功能对城市生态三个方面的若干子要素形成积极影响.

近年来技术进步、成本降低、人们观念改变以及政府政策的鼓励正推动建筑绿化的发展. 作为城市绿化设施的一部分, 建筑绿化与其他城市绿化类型一起在不同的城市尺度下发挥各种功能, 建筑绿化在城市中功能的形成机制和最终效果, 仍然缺乏量化的数据和准确的模型. 以德国为代表的欧洲国家在屋顶绿化率上近几年以每年 10%~15% 的速度增长, 相关数据研究和政策规范制定都较为全面^[38]. 然而就我国而言, 这方面的研究还比较落后, 最重要的是由于气候差异这些研究数据并不能直接借用, 因此未来的研究中应当注重不同类型的建筑绿化在城市中发挥功能的具有具体量化数据的形成机制应当仔细研究, 并通过相关功能进行反馈评价不同类型的建筑绿化之间的差异, 各自优劣. 该框架在环境方面, 一系列研究表明建筑绿化可以优化城市空气、水质量, 调节气候, 节能固碳, 保持和维护生态多样性等; 经济方面, 包括了在能源、材料、城市项目全生命周期成本和基础设施方面建筑绿化可以对城市产生效益; 社会方面, 建筑绿化可以提升城市居民健康, 为城市提供附加产品(如农产品), 提供就业机会和对居民有教育作用. 但目前仍然仅有较少的研究量化和实证城市建筑绿化与城市生态之间的关系, 特别是在经济方面, 如何量化建筑绿化带来的效益是较为困难的问题, 但该结论能直接指导政府、私人在城市建设问题上的决策. 对城市生态各要素影响的量化研究

表 2 世界各国城市在建筑绿化上的政策或措施

城市	国家	建筑绿化措施
芝加哥	美国	2000 年开始, 所有的公共和私人建筑进行屋面绿化将得到政府资助
纽约	美国	一年 48 \$/m ² 的减税额度, 每建筑最高可达 10 万美元
多伦多	加拿大	2010 年开始的新建建筑, 超过 2000 m ² 的屋顶必须进行绿化; 绿化建筑进行 50 \$/m ² 的现金退税, 每项目最高可达 10 万美元
哥本哈根	丹麦	2009 年开始, 所有屋顶小于 30° 的公共屋顶必须进行绿化
伦敦	英国	税收优惠; 实行新伦敦计划, 预期所有的企业建筑都实行屋面和垂直绿化
东京	日本	提出到 2020 年实现全市 30 km ² 的屋顶绿化面积; 超过 1000 m ² 的私人建筑屋顶和超过 250 m ² 的公共建筑屋顶必须实现至少 20% 的绿化面积

图7 建筑绿化类型、功能与城市生态相关因子的概念模型

结论也能用于反馈评价建筑绿化不同类型、不同功能在实现城市生态效益上的差异与优劣,可用于指导形成城市绿化设施的最佳配置。相信未来的研究将在此框架上添加更多的子要素集,提供更明确的建筑绿化不同类型、功能和城市生态各要素之间的相互影响关系与作用。

生态城市是建立在人类和自然关系上的城市发展认识观,是按照生态资源和环境可持续发展原则建立起来的人类环境、经济、社会与自然协调发展的城市发展理念^[74]。生态城市需要在上层规划上对城市发展目标、人口、产业、交通等层面进行详细的设计,绿化空间不可能单独成为城市生态发展和解决城市弊病的唯一灵丹妙药。但如前文所述城市绿化设施带给城市的利益以及在城市中的缺乏让它成为一个非常宝贵的资源,建筑绿化在理论和技术上的发展为此带来了巨大的机会。建筑绿化在建筑单体层面和街区层面固然具有巨大的优点,但对于大尺度的城市整体环境而言,少量和局部的建筑绿化毕竟难以成气候。因此最有价值的选择,是通过建筑绿化在城市中的推广和应用,建立一个点、线、面连续的绿化建筑网络,形成城市景观空间立体的斑块、廊

道和基质模型,形成有规模的城市绿化空间,提高城市绿化量,并与其他城市绿化设施一起,为城市的生态发展持续地提供效益。

6 结论

1) 建筑绿化是未来城市可持续发展和抵消人类改造自然造成的自然环境破坏的有效潜在方法。如今,相关的应用实践与学术研究已经证明了建筑绿化对于建筑单体到整个城市尺度都具有较大的环境、经济和社会效益。

2) 建筑绿化是绿色建筑本身的重要组成部分,因此跨学科合作包括建筑设计与技术、风景园林、植物学、生态学等应当以建筑与植物一体化的设计思维在设计一开始就介入,而不是分离的设计方式。在技术层面上,跨学科的研究应当努力解决建筑绿化一体化的设计方法、各绿化类型低成本的建造和维护技术、不同气候条件下如何在建筑绿化上实现生态多样性最大化的多元植物配置等问题。

3) 作为城市绿化设施的一部分,建筑绿化占有举足轻重的作用,与其他城市绿化设施一起为城市

生态服务, 因此城市规划层面, 不仅仅是绿地规划, 同样应当将建筑绿化纳入指标范围。

4) 建筑绿化对于城市经济和社会具有巨大的效益, 政府和建设单位应当重视对建筑绿化的支持、鼓励和引导, 出台相关强制性规范、政策或经济方面的鼓励措施等, 并制定适应地域性气候和生态特征的建筑绿化标准化设计和建造方法。

5) 建筑绿化在功能以及对不同尺度城市的效益上缺乏量化和实证的研究, 这类研究是指导建筑绿化用于城市生态发展的理论基础。因此, 国内跨学科的学术界应当广泛开展各种基于地域性气候条件、生态条件等背景下的相关实验、实测和模型研究, 获得数据以最优化的配置让建筑绿化更好地为城市服务。

参考文献

- 1 牛文元. 中国新型城市化报告. 北京: 科学出版社, 2013. 249–283
- 2 中国发展研究基金会. 中国发展报告 2010: 促进人的发展的中国新型城市化战略. 北京: 人民出版社, 2010. 3–20
- 3 孔铎, 刘士林. 2013 中国都市化进程焦点问题的解读与阐释. 学术界, 2013, 8: 201–210
- 4 Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. *Renew Resour J*, 2002, 20: 12–17
- 5 李雪铭, 常静, 刘敬华, 等. 城市绿地系统对经济发展提升作用的机制——与大连市实证研究. *干旱区资源与环境*, 2002, 16: 17–23
- 6 Cook E M, Hall S J, Larson K L. Residential landscapes as social-ecological systems: a synthesis of multi-scalar interactions between people and their home environment. *Urban Ecosyst*, 2012, 15: 19–52
- 7 Yli-Pelkonen V, Kohl J. The role of local ecological knowledge in sustainable urban planning: perspectives from Finland. *Sustain Sci Pract Policy*, 2005, 1: 3–14
- 8 Grundy E, Sloggett A. Health inequalities in the older population: the role of personal capital, social resources and socio-economic circumstances. *Soc Sci Med*, 2003, 56: 935–947
- 9 Takano T, Nakamura K, Watanabe M. Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas: the importance of walkable green spaces. *J Epidemiol Commun H*, 2002, 56: 913–918
- 10 Tanaka A, Takano T, Nakamura K, et al. Health levels influenced by urban residential conditions in a megacity-Tokyo. *Urban Stud*, 1996, 33: 879–894
- 11 Ulrich R S. Visual landscapes and psychological well-being. *Landscape Res*, 1979, 4: 17–23
- 12 Smardon R C. Perception and aesthetics of the urban environment: Review of the role of vegetation. *Landscape Urban Plan*, 1988, 15: 85–106
- 13 Johnston J, Newton J. A Guide to Using Plants on Roofs, Walls and Pavements. London: Greater London Authority, 2004. 9–13
- 14 杨程程. 屋顶绿化综合评价模型的建立与应用研究——以上海市屋顶绿化为例. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2011. 1–12
- 15 侯亚楠, 朱春, 杨思佳. 建筑绿化与绿色建筑. *绿色建筑*, 2013, 5: 27–29
- 16 Santamouris M, Pavlou C, Doukas P, et al. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy*, 2007, 32: 1781–1788
- 17 Köhler M. Green facades-a view back and some visions. *Urban Ecosyst*, 2008, 11: 423–436
- 18 Perini K, Ottel M, Haas E M, et al. Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *OJE*, 2011, 1: 1
- 19 Ranade A. Building integrated vegetation: Redefining the landscape or chasing a mirage. *Lux Research Report SBM-R-12-3*. 2012
- 20 Kibert C J. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. 3rd ed. Toronto: John Wiley & Sons, 2012. 143–173
- 21 Mao X P, Lu H M, Liu Q M. A comparison study of mainstream sustainable/green building rating tools in the world. In: Wang Z T, Reid R D, Liu F, eds. *International Conference on Management and Service Science (MASS 2009)*. New York: Curran Associates Inc, 2009. 20–22
- 22 Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecol Eng*, 2010, 36: 351–360
- 23 Cottrell M. Guide to the LEED Green Associate V4 Exam. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. 90–100
- 24 唐鸣放, 杨真静, 郑开丽. 屋顶绿化隔热等效热阻. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2007, 30: 1–3
- 25 Onishi A, Cao X, Ito T, et al. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban For Urban Gre*, 2010, 9: 323–332
- 26 Parizotto S, Lamberts R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianpolis city, Southern Brazil. *Energy Build*, 2011, 43: 1712–1722
- 27 Sailor D J. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy Build*, 2008, 40: 1466–1478

- 28 Alexandri E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Build Environ*, 2008, 43: 480–493
- 29 Zhou T J, Xiong J W, Ke S Z. Research on the Green-Roof renovation strategy of existing buildings in the Changjiang River basin of China. In: Atsushi D, eds. *The First International Conference of International Alliance for Sustainable Urbanization and Regeneration (IASUR) —“Sustainable Society as Our Challenge”*. Chiba: University of Tokyo Press, 2014. 85–92
- 30 Bartfelder F, Köhler M. Experimentelle Untersuchungen zur Funktion von Fassadenbegrünungen. Dissertation for the Doctoral Degree. Berlin: Freie Universität Berlin, 1987. 56–122
- 31 Eumorfopoulou E A, Kontoleon K J. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Build Environ*, 2009, 44: 1024–1038
- 32 Wong N H, Tan A Y, Chen Y, et al. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build Environ*, 2010, 45: 663–672
- 33 Relf D. *The Role of Horticulture in Human Well-Being and Social Development*. Portland: Timber Press, 1992. 93–105
- 34 Scholz-Barth K. Green roofs: Stormwater management from the top down. *Environ Des Constr*, 2001, 4: 1–10
- 35 Corbett C W, Wahl M, Porter D E, et al. Nonpoint source runoff modeling a comparison of a forested watershed and an urban watershed on the South Carolina coast. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1997, 213: 133–149
- 36 Fioretti R, Palla A, Lanza L G, et al. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Build Environ*, 2010, 45: 1890–1904
- 37 Palla A, Gnecco I, Lanza L G. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *J Hydro*, 2009, 379: 193–204
- 38 Getter K L, Rowe D B. The role of extensive green roofs in sustainable development. *Hortscience*, 2006, 41: 1276–1285
- 39 Denardo J C, Jarrett A R, Manbeck H B, et al. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *T ASAE*, 2005, 48: 1491–1496
- 40 Kolb W. Good reasons for roof planting-Green roofs and rainwater. In: Junge-Berberovic R, Baechtiger J B, Simpson W J, eds. *International Conference on Urban Horticulture*, Vol 643. Waedenswil: Acta Horticulturae, 2002. 295–300
- 41 李胜, 张帆, 仇银豪. 运用屋顶绿化构建雨水回用系统. *安徽农业科学*. 2008, 36: 1817–1818
- 42 Liu K. Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation. In: Thomas W, eds. *Proceedings of the 18th International Convention of the Roof Consultants Institute*. Tampa FL: Roof Consultants Institute, 2003. 93–103
- 43 Moran A, Hunt B, Jennings G. A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth. In: Bizier P, Debarry P, eds. *World Water & Environmental Resources Congress 2003*. Reston, VA: Environmental and Water Resources Institute, 2004. 1–10
- 44 Sørensen M, Autrup H, Hertel O, et al. Personal exposure to PM_{2.5} and biomarkers of DNA damage. *Cancer Epidem Biomar*. 2003, 12: 191–196
- 45 Querol X, Alastuey A, Rodriguez S, et al. Monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} around primary particulate anthropogenic emission sources. *Atmos Environ*, 2001, 35: 845–858
- 46 Liesecke H J, Borgwardt H. Abbau von Luftschadstoffen durch extensive Dachbegrünungen. *Stadt Grün*, 1997, 33: 245v251
- 47 Tan P Y, Sia A. A pilot green roof research project in Singapore. In: Kiers H, Velazquez L, eds. *Proceedings of Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*. Toronto: The Cardinal Group, 2005. 1–13
- 48 Peck S W, Kuhn M. *Design Guidelines for Green Roofs*. Toronto: Ontario Association of Architects, 2003. 15–16
- 49 Passchier-Vermeer W, Passchier W F. Noise exposure and public health. *Environ Health Persp*, 2000, 108: 123
- 50 Aylor D. Noise reduction by vegetation and ground. *J Acoust Sco Am*, 1972, 51: 197–205
- 51 Dunnett N, Kingsbury N. *Planting Green Roofs and Living walls*. 2nd ed. Portland: Timber Press, 2004. 67–83
- 52 Brenneisen S. The benefits of biodiversity from green roofs: key design consequences. In: Acks K, eds. *Proceedings of the 1st North American Green Roof Conference, Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Chicago: Abbeville Press Inc, 2003. 323–329
- 53 Brenneisen S. Green roofs, how nature returns to the city. In: Junge-Berberovic R, Baechtiger J B, Simpson W J, eds. *International Conference on Urban Horticulture*, Vol 643. Waedenswil: Acta Horticulturae, 2002. 289–293
- 54 Monterusso M A, Rowe D B, Rugh C L. Establishment and persistence of Sedum spp. and native taxa for green roof applications. *Hortscience*, 2005, 40: 391–396
- 55 Getter K L, Rowe D B, Robertson G P, et al. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 7564–7570
- 56 赵沛楠. 低碳评估: 量化建筑碳排放. *中国投资*, 2010, 3: 90–92

- 57 陈偲勤. 从经济学视角分析绿色建筑的全寿命周期成本与效益以及发展对策. 建筑节能, 2009, 10: 53–56
- 58 Ulrich R S, Simons R F. Recovery from stress during exposure to everyday outdoor environments. In: Wineman J, Barnes R, Zimring C, eds. *The Costs of Not Knowing: Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Environmental Design Research Association*. Washington DC: Environmental Design Research Association, 1986. 115–122
- 59 Kuo F E, Sullivan W C. Environment and crime in the inner city does vegetation reduce crime. *Environ Behav*, 2001, 33: 343–367
- 60 马涛. 建筑环境的立体绿化研究——以上海世博园为例. 硕士学位论文. 杭州: 浙江农林大学, 2011. 30–52
- 61 Gupta A, Hall M R, Hopfe C J, et al. Building integrated vegetation as an energy conservation measure applied to non-domestic building typology in the uk. In: Hensen J L, Roberto L, eds. *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Sydney: Routledge, 2011. 949–956
- 62 Kosareo L, Ries R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Build Environ*, 2007, 42: 2606–2613
- 63 李燕珠. 难波公园-将绿洲植入商场. 房地产导刊, 2010, 4: 39
- 64 Ulrich R. View through a window may influence recovery. *Science*, 1984, 224: 224–225
- 65 McCarthy J J. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridgeshire: Cambridge University Press, 2001. 75–104
- 66 Wolf K L. Ergonomics of the city: Green infrastructure and social benefits. In: Kollin C, eds. *Proceedings of the 11th National Urban Forest Conference*, Vol 115. Washington DC: American Forests, 2003. 256–261
- 67 Vandermeulen V, Verspecht A, Vermeire B, et al. The use of economic valuation to create public support for green infrastructure investments in urban areas. *Landscape Urban Plan*, 2011, 103: 198–206
- 68 Flores A, Pickett S T, Zipperer W C, et al. Adopting a modern ecological view of the metropolitan landscape: the case of a greenspace system for the New York City region. *Landscape Urban Plan*, 1998, 39: 295–308
- 69 Loreau M, Naeem S, Inchausti P. *Biodiversity and ecosystem functioning: synthesis and perspectives*. Oxford: Oxford University Press, 2002. 209–220
- 70 Anderson L M, Cordell H K. Influence of trees on residential property values in Athens, Georgia (USA): A survey based on actual sales prices. *Landscape Urban Plan*, 1988, 15: 153–164
- 71 Tzoulas K, Korpela K, Venn S, et al. Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review. *Landscape Urban Plan*, 2007, 81: 167–178
- 72 Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environ Pollut*, 2011, 159: 2100–2110
- 73 Laberge K M. Urban oasis: Chicago's City Hall green roof. In: Acks K, eds. *Proceedings of the 1st North American Green Roof Conference, Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Chicago: Abbeville Press Inc, 2003. 29–30
- 74 Mostafavi M, Doherty G. *Ecological Urbanism*. Baden: Lars Müller Publishers, 2010. 208–216

Form, function and cognition: A review of the role of building Integrated vegetation in green building and ecological city

ZHOU TieJun^{1,2}, WANG DaChuan^{1,2} & XIONG JianWu^{1,2}

¹ Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing 400045, China;

² Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, China

Under the conditions of high-density developing contemporary urban, in the context of eco-city, sustainable development and green building, building Integrated vegetation (BIV) provides an opportunity combining the artificial built environment and the natural environment. It is a rapidly developing subject in recent years. Urban green infrastructure, including parks, street trees, green corridors, BIV, private gardens and so on, has been believed to be important in improving urban environment, maintaining urban ecological system, purification of city water and air, etc. As a part of urban green infrastructure, what exactly the role of BIV in urban environment? Does it hold equal value as the others. Some recent studies and reviews have highlighted the positive role of BIV in improving thermal performance or aesthetic value of single building. Few research has performed comprehensive assessment of BIV contribute to entire city and few current architecture practice has designed BIV from the aspect of urban planning. Through review of recent research in the area of BIV, our study try to understand the role of BIV in different scale of city with scientific evidence, including its meaning to green building and its characteristics and contributions to the environment, economic and social of entire ecological city. Based on the literature clues, a conceptual framework of relationships of types of BIV, its functions and elements of ecological city is presented. With that, directions for future research and practice in this area are proposed.

building integrated vegetation, green building, ecological city, green roof, vertical green

doi: 10.1360/N092014-00423