

DOI: 10.5846/stxb202012153189

韩宝龙, 束承继, 蔡文博, 贾倩, 王效科, 欧阳志云. 植被群落特征对城市生态系统服务的影响研究进展. 生态学报, 2021, 41(24): 9978-9989.

Han B L, Shu C J, Cai W B, Jia Q, Wang X K, Ouyang Z Y. Research Advances in the impact of vegetation community characteristics on urban ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9978-9989.

## 植被群落特征对城市生态系统服务的影响研究进展

韩宝龙<sup>1,\*</sup>, 束承继<sup>1,2</sup>, 蔡文博<sup>1</sup>, 贾倩<sup>2</sup>, 王效科<sup>1</sup>, 欧阳志云<sup>1</sup>

1 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

2 西南大学园艺园林学院, 重庆 400100

**摘要:**生态空间(林地、灌木、草地、水体)所产生的生态系统服务极大的改善了人类的生存环境,在城市绿地破碎化日益严重、绿地质量逐渐降低、乡土植物逐渐减少、入侵风险逐渐加剧等生态背景下,如何维持稳定而持续增长的城市生态系统服务供给,一直困扰着当下从事城市生态学领域研究的学者和城市管理者。植被群落作为城市绿地系统的基本组成单元,在绿地破碎化趋势下,可作为研究内容来探讨城市生态系统服务维持或提升策略;植被群落泛指城市中常见的、具有明显边界的、按照一定分布规则的植物群落单元,既包括道路绿地、居住区绿地、公园绿地等,也包括城市郊野自然林地。但对植被群落生态功能的研究也多停留在对某一生态问题的简单相关性研究,缺乏系统性和整体性。从微观层面的植被群落角度,整合相关文献研究,介绍了受植被群落特征影响的 6 种典型城市生态系统服务,综述了植被群落特征对这 6 种城市生态系统服务的影响机理,对植被群落特征因子进行总结、归类,从树种特性、垂直结构、水平结构、其他 4 个角度构建了“植被群落特征因子对城市生态系统服务影响关系表”。最后面向典型生态系统服务提升提出了城市低质量植被群落地区的营建和更新原则,以期为今后城市园林部门、规划部门制定城市绿地系统规划提供基础性技术支持。

**关键词:**植被群落;城市生态系统服务;影响机理;指导原则

## Research Advances in the impact of vegetation community characteristics on urban ecosystem services

HAN Baolong<sup>1,\*</sup>, SHU Chengji<sup>1,2</sup>, CAI Wenbo<sup>1</sup>, JIA Qian<sup>2</sup>, WANG Xiaoke<sup>1</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>1</sup>

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

2 College of Horticulture and Gardens, Southwest University, Chongqing 400100, China

**Abstract:** The ecosystem services generated by ecological spaces (woodlands, shrubs, grasslands, and water bodies) have greatly improved the human living environment. In the context of increasing fragmentation of urban green spaces, decreasing quality of green spaces, diminishing native plants and increasing risk of invasion, how to maintain a stable and sustainable increase in the supply of urban ecosystem services has been troubling scholars and urban managers. As a basic component of urban green space systems, vegetation communities can be used as a research component to explore strategies for maintaining or enhancing urban ecosystem services in the context of green space fragmentation; vegetation communities refer to common urban plant community units with distinct boundaries and according to certain distribution rules, including both road green space, residential green space and park green space, as well as natural woodland in the urban countryside. while studies on the ecological functions of vegetation communities were mostly confined to simple correlation studies of a certain ecological problem, lacking in a systematic and holistic approach. This paper introduces six typical urban ecosystem services

基金项目:国家自然科学基金青年项目(71804180)

收稿日期:2020-12-15; 网络出版日期:2021-08-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: blhan@cees.ac.cn

that are influenced by vegetation community characteristics from the perspective of urban vegetation communities at the micro level, integrating relevant literature studies. This is followed by an overview of the mechanisms by which vegetation community characteristics affect these six urban ecosystem services, and a summary and categorisation of vegetation community characteristics factors. A table of relationships between vegetation community characteristics and urban ecosystem services was then constructed from four perspectives: tree species characteristics, vertical structure, horizontal structure and others. Finally, the principles for the establishment and renewal of urban low-quality vegetation communities are proposed for the enhancement of typical ecosystem services, with the aim of providing basic technical support for urban landscape departments and planning departments in their future planning of urban green space systems.

**Key Words:** vegetation communities; urban ecosystem services; mechanisms of influence; guiding principles

不断加快的城市化进程,在缓解区域人为活动压力、集约利用土地资源、促进城市经济高效发展的同时,也会对生态环境产生负面影响<sup>[1]</sup>,如热岛效应<sup>[2]</sup>、交通噪音<sup>[3]</sup>、暴雨径流<sup>[4]</sup>以及由此引起的面源污染<sup>[5]</sup>等问题;不仅如此,高度硬质化的城市地表环境还会导致城市的生物多样性的降低<sup>[6]</sup>、植物景观功能削弱<sup>[7]</sup>等,从而进一步影响城市居民身心健康<sup>[8]</sup>。自生态系统服务概念提出以来,城市管理者 and 广大学者就城市绿地生态系统对城市生态环境问题缓解作用开展了许多研究,已取得较多研究成果。Alavipanah 等利用遥感和土地利用/土地覆盖(LULC)数据,评估了温暖时期德国慕尼黑不同城市绿地生态系统的降温效果,发现城市植被的降温效果是非线性的,且植被覆盖比例在 70%到 80%之间的地区,地表温度(LST)的降温效果显著且更强<sup>[9]</sup>;同样利用地理空间数据,Di 等对 20 年来波波-迪乌拉索的城市化和 LST 进行了时空上的研究,结果显示绿色生态空间的 LST 确实低于邻近不透水的城市化地区<sup>[10]</sup>;Zhang 等利用北京市绿地空间第七次调查数据,结合雨水径流系数法和经济评价方法,对城市绿地减少雨水径流的经济效益进行了评估<sup>[11]</sup>;Villeneuve 等利用 NDVI 数据和城市绿地空间数据,结合加拿大死亡率数据库的死亡记录信息,对安大略地区绿地空间和人群致死率的关系进行了研究,发现城市环境中的绿色空间与死亡率的长期降低有关<sup>[12]</sup>。以上作者对于城市绿地-生态系统服务的关系研究均基于城市大尺度遥感数据和统计数据,从静态角度分析特定土地利用类型对城市生态的影响,从动态角度探讨土地利用与城市生态发展的时空变化规律,这也是目前学界进行生态系统服务研究的主流方法,研究成果用于指导宏观尺度上城市绿地系统规划的制定与修改。而在城市扩张导致城市绿地破碎化的背景下,如何在微观层面上开展生态系统服务提升工作,值得思考。

“植被群落”泛指城市中常见的、具有明显边界的、按照一定规则分布的植物群落单元,既包括道路绿地、居住区绿地、公园绿地等,也包括城市郊野自然林地。植被群落作为组成城市绿地系统的基本单元,可作为研究对象以提高城市生态系统服务质量,由于生态系统服务类型众多,本文所关注“城市”生态系统服务,重点围绕城市人居环境需求开展,包括“缓解热岛效应”、“调节暴雨径流”、“减少面源污染”、“削减交通噪音”、“人居身心健康”、“生物多样性保护”;同样,传统的植被群落特征研究过于关注小尺度植物景观美学效果,而忽略了其对城市整体生态系统服务的支撑功能。对植被群落特征-生态系统服务关系进行研究,诸如树种组成、垂直结构、分布形状、群落面积、冠层密度等,可以从微观<sup>[13]</sup>层面指导植被群落优化,自下而上的强化城市绿地生态系统服务功能,目前也已有部分学者从事这方面的研究,仅围绕个别影响参数,整体而言缺乏系统性。本文在大量查阅国内外相关研究结果的基础上,综述了植被群落特征对于城市生态系统服务功能的影响机制,同时建立“植被群落特征因子对城市生态系统服务影响关系表”,对不同用地类型如何优化植被群落特征以提高生态系统服务供给能力提出了一般性原则,为今后深入开展相关研究工作奠定基础,为园林绿化部门的植被更新与维护提供科学指导。

## 1 受植被群落特征影响的城市生态系统服务

生态系统服务依据其价值分类可概括的分为直接价值和间接价值,前者提供生态系统产品,为人类提供

食物、工业原材料、药品等可以商品化的服务;后者支撑与维持人类赖以生存的生态环境,如我国生态系统对城市产生的气候调节、水源涵养、水土保持、土壤肥力的更新与维持、营养物的循环、二氧化碳的固定等难以商品化的服务<sup>[14]</sup>。本文主要结合植被群落特征(树种特性、垂直结构、水平结构、冠层结构等),对后者中受植被群落特征影响的城市生态系统服务进行讨论:缓解热岛效应、调节暴雨径流、减少面源污染、消减交通噪音、人居身心健康和生物多样性保护,进而从城市生态系统服务提升的角度探讨植被群落优化一般性原则。

城市热岛是指城市温度高于周边地区或农村地区的一种现象,这种现象是城市化进程中人类活动与环境相互作用而形成的一种特殊的区域环境特征<sup>[15]</sup>。而城市绿地系统对于缓解城市热岛效应具有公认的显著的效果。城市地表降温增湿的实现,主要来自于作为城市绿地系统基本单元的植被群落植物叶片的蒸腾作用、对太阳辐射的吸收反射作用以及群落整体的遮蔽降温作用<sup>[16]</sup>;高速城市化的过程中,不透水地表面积的增加改变了城市下垫面条件,导致了城市暴雨径流现象的加剧,使得城市内涝频发<sup>[17]</sup>,而城市绿地可从截留、蓄积、下渗等方面对降雨压力进行缓解,而缓解能力则受基本单元植被群落特征的影响;面源污染一般是指污染物经过降雨或融雪的径流,被冲刷和自然携带到河流、湖泊、湿地、滨岸和地下水中所形成的污染<sup>[18]</sup>,而城市绿地不仅可以通过调节径流对污染物进行截留,其内部的植物组成对截留的污染物也有一定的消解作用<sup>[19]</sup>;在城市道路快速发展和居民汽车保有量持续上升的大背景下,城市交通噪音问题日益严重,亟需解决。切断传播途径是目前较为常见的解决措施,与修建声屏障、防噪堤的高成本和低普及性相比,绿化带消减交通噪音则成为一种简便、易行、可靠的方法<sup>[20]</sup>;人居身心健康和生物多样性指数是城市是否良性发展的重要判定指标,在城市居民自杀率上升<sup>[21]</sup>、环境污染诱发疾病频发<sup>[22]</sup>、生物多样性降低<sup>[23]</sup>等背景下,如何求得人与生物在城市中生活环境问题的最优解,是学界在研究城市绿地系统和植被群落设计时所必须要思考的。

植被群落特征对于上述 6 种城市生态系统服务的供给存在显著的影响,如何进行植被群落优化以提升城市生态系统服务功能是值得学界思考和研究的问题。目前已有一些学者参与其中,采取不同的研究方法,对植物群落特征-城市生态系统服务功能影响机制进行了研究,并提出了相应的优化方案。

## 2 植被群落对各类生态系统服务的影响

### 2.1 缓解热岛效应

城市绿地缓解热岛效应服务能力主要受其基本构成单元(植被群落)的植物类型、垂直结构、水平结构、冠层结构等特征影响。植物种类不同,植物叶片的蒸腾作用、对太阳辐射的吸收反射作用及树冠的遮蔽降温作用也不尽相同。陈丽文等<sup>[16]</sup>和李凤霞等<sup>[24]</sup>在各自的研究中分别应用仪器分析法和样点实测法,对不同植物的增湿降温能力进行了测定比较,发现不同植物在城市局部微气候中降温增湿的能力存在差异,且随着季节的变化而动态变化;Smithers 等<sup>[25]</sup>也从树种层面,对不同树种在世界温带地区提供城市降温的相对能力数据进行了整合,开发出了一种实用的方法来选择那些在这方面有最大潜力的树种。这些植物增湿降温能力的差异主要源自于它们冠幅、叶面积指数、反射率、气孔导度等特征差异。

植被群落作为不同种类植物组成的综合体,其结构特征无疑也会对群落整体的缓解热岛效应能力产生影响。植被群落结构一般可分为垂直结构、水平结构和冠层结构。垂直结构指植物群落的垂直配置状态,成层现象是其最显著的特征。按植物的生活型把植被结构从底部到顶部划分为地被层、草本层、灌木层和乔木层 4 个基本层次<sup>[26]</sup>。实测法是目前国内外学者常采用的方法<sup>[26-27]</sup>。陈朱等<sup>[28]</sup>在对上海市 15 个公园进行进行样方实测后,对乔-灌-草、乔-草、草地 3 类群落结构的减温效果进行测定比对,发现不同植物群落结构类型的降温效果确存在差异,其中乔-灌-草复合型降温效果最好;高吉喜等<sup>[29]</sup>在研究北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响机制时,通过对 24 个典型绿地群落夏季降温增湿效果的实测,也得出了类似的结论;对于乔木、灌木、草本单独三者之间降温能力的比较,Sodoudi 等<sup>[30]</sup>通过实测结合 ENVI-met 模型模拟以及 Duncan 等<sup>[31]</sup>通过遥感影像研究不同植被类型的降温程度时发现,降温能力依次为:乔木、灌木、草本。水平结构也是在进行植被群落设计时需着重考虑的特征。水平结构的构成参数主要为斑块形状指数、斑块面积和斑块周长

等。斑块面积和斑块周长对降温能力的影响机制,学界研究所得结论较为相似,均一致认为存在正相关关系<sup>[32-35]</sup>,不过仍有部分学者在研究过程中注意到了植被斑块面积与降温能力之间的阈值效应<sup>[36-37]</sup>,绿地斑块的降温效应在面积达到某一临界值后会趋于平缓,其中的影响机制还有待进一步研究,斑块形状指数对于植被群落降温效应的影响,国内外学者研究结论分歧较大,存在正相关<sup>[35-36]</sup>、无明显相关<sup>[38]</sup>、负相关<sup>[39]</sup>三种观点。冠层结构主要包含叶面积指数、冠幅、郁闭度等参数,关于这3个参数对于植被群落降温效应的影响研究已经非常成熟,研究证明叶面积指数、冠幅、郁闭度3个参数<sup>[40-43]</sup>与植被群落降温效应之间存在正相关关系,且叶面积指数和郁闭度存在影响阈值。

## 2.2 调节暴雨径流

已经有许多学者就植被群落特征对于径流削减的影响机制进行了研究。植被群落主要通过截留蓄积、土壤改造来对暴雨径流进行调节,受树冠特征、郁闭度、根系特征等诸多因素的影响。

其中截留蓄积可分为林冠截留和枯落物截留两部分。游宇等<sup>[44]</sup>对8种园林乔木林冠的雨水截留作用进行研究,发现在16场降雨中国槐、雪松及银杏的总林冠截留体积明显大于其他5种树木,且在不同降雨量条件下,针叶乔木林冠截留率始终高于大型和小型阔叶乔木;而尹剑红<sup>[45]</sup>在11种园林地被植物冠层截留特征的研究中,也发现了单位面积条件下,不同园林地被植物因冠层特征的不同产生的截留量的差异。在树冠特征的研究基础上,部分学者对植被群落的郁闭度与截留量之间的关系进行了研究<sup>[46-48]</sup>,研究表明植被群落郁闭度越大,林冠和枯落物对暴雨的截留作用就越强。

植被群落根系对径流的影响主要是通过改造土壤结构来实现的,根系的存在可以疏松土质,降雨加速下渗<sup>[49]</sup>,且一般根系发达、须根粗壮的植物能通过膨胀、延伸等作用在土壤中形成大孔隙通道,并能延伸至土壤表面形成优先流,从而维持土壤的渗透性能<sup>[50]</sup>,唐正光<sup>[51]</sup>在研究中发现,植被群落的根系层可以显著提高群落内的岩土体中大孔隙的数量和规模,从而大大提高了岩土体的降雨入渗能力;李建兴等<sup>[52]</sup>也通过对根长密度和土壤饱和持水量关系的研究,发现了两者之间存在正相关关系,间接说明了根长密度高的植被群落对土壤的改造能力更强,可以更好的减少地表径流的产生。

## 2.3 减少面源污染

由降雨引起的地表产流含有悬浮物、营养物、重金属、毒性有机物等污染物,若没有截留措施干预,便会进入水体,造成面源污染<sup>[53-54]</sup>。植被群落可从削减地表产流、污染物净化两方面来对面源污染进行控制,其效果受植物种类、种植密度、群落层次等因素制约。削减地表产流2.2部分已从植被群落的截留蓄积和土壤改造两方面进行了阐述,本节将对植被群落的污染物净化能力进行综述。

植被群落组成中,不同植物对于面源污染的净化能力各不相同。Read等<sup>[55]</sup>对原产于澳大利亚的20种植物的水污染物(总氮(TN)、总磷(TP))净化效果进行了实验研究,发现各植物间的净化能力存在显著差异;杨帆等<sup>[56]</sup>研究了10种不同植物对水质(TN、TP)的净化能力,TN、TP浓度(以质量浓度计)为2.08—3.03、0.56—0.77 mg/L时,不同植物对水质的净化能力也存在一定的差异。在另外的一项实验研究中Read等<sup>[57]</sup>更进一步提出了不同植物种类间根系特征差异与面源污染净化能力差异之间的关系,一般来说与最长根的长度、生根深度、总根长和根质量有关,均为正相关。另外植被群落的种植密度也对其面源污染控制能力有一定影响,吕建等<sup>[58]</sup>在河岸缓冲带对三种种植密度(400株/hm<sup>2</sup>、1000株/hm<sup>2</sup>和1600株/hm<sup>2</sup>)的杨树人工林的无机氮去除效果进行了研究,发现1600株/hm<sup>2</sup>杨树人工林缓冲带对径流水中铵态氮和硝态氮的去除能力最强,而400株/hm<sup>2</sup>缓冲带去除效果较差;胡颖<sup>[59]</sup>在研究河流、沟渠旁植物群落对N、P的自然净化效果时,也发现了植物密度和TN、TP去除率之间存在正相关关系;种植密度同样对植被群落的重金属富集能力产生影响,朱胜男等<sup>[60]</sup>对30 m×20 m、25 m×20 m、20 m×20 m 3种不同种植行间距的紫苏群落铅富集能力进行了实验检测,经方差分析发现,铅富集量总体上随种植密度的增大而增大。另外,植物群落配置方式也是制约面源污染控制能力的因素之一<sup>[61-63]</sup>,吴健等<sup>[64]</sup>对草+灌、草+乔、草+灌+乔三种配置方式的固体悬浮物、TN、TP三种面源污染的去效果进行了研究,从面源污染防治试验结果来看,选择的三种植被组合模式以草+灌+乔的群落配

置模式为最优;刘宏伟等<sup>[65]</sup>对裸土、草本、乔+草三种样地的重金属去除效果研究后也发现了类似的结论,乔木-草本植物混合配置样地对铜离子的去除效果稳定,且平均去除率最高。

所以在进行植被群落营建或优化时,为实现其减少面源污染能力的最大化,可适当考虑选用根系发达、根质量高的树种,同时适当增大种植密度,且尽量避免群落植物生活型单一化,可采用乔+灌+草结合的复合式群落配置模式。

#### 2.4 削减交通噪音

城市中交通噪音主要由来往车辆的喇叭声、胎噪及道路施工等组成。许多学者的研究已经证实了植被覆盖对于交通噪音的削减作用<sup>[66-68]</sup>。同样的,植被群落在交通噪音削减服务方面也表现出树种和结构的差异性,通过文献搜集分析,我们可从这两方面对植被群落的降噪机制进行综述。

树种对于植被群落噪音削减能力的影响主要体现在植物树冠特征、分枝点高低和叶面积指数等特征差异上。目前,有关树种树冠特征对整体植被群落降噪能力的影响的研究成果存在一定的争议,存在针叶树种强于阔叶树种与阔叶树种强于针叶树种两种观点。Karbalaei 等<sup>[66]</sup>在对不同树种的降噪能力研究中,发现在夏季阔叶树相较于针叶树的降噪能力更强,但吴淑杰等<sup>[67]</sup>和张明丽等<sup>[68]</sup>在各自的研究中都认为针叶类树种的降噪能力要强于阔叶类树种,有学者<sup>[69-70]</sup>进一步研究了不同噪声频率等级条件下,不同树种的降噪能力,发现对于 500 Hz—2 kHz 之间的噪音,降噪能力受叶片数量影响较大,所以针叶类树种的降噪效果更好,对于 2kHz 以上的高频噪音,阔叶类树种的降噪效果更好。对于叶面积指数、分枝点高低与树种降噪能力之间关系的研究,张庆费等<sup>[71]</sup>在对上海植物园样地进行实测的基础上,对叶面积指数、平均枝下高、平均高度、盖度、平均冠幅、平均间距、裸地率、平均胸径 8 个潜在因子进行相对衰减量相关性分析后发现,叶面积指数与平均枝下高 2 个因子的相关性位居前两名,且叶面积指数越高、分枝点越低,降噪效果越好,巴成宝<sup>[72]</sup>利用回归分析研究不同大小乔木植株减噪能力时,也发现了相似的现象,且枝下高和叶面积指数 2 个因子与减噪能力之间的  $R^2$  分别为 0.964 和 0.953。

植被群落的降噪能力也受结构特征的影响。垂直结构上,陈龙等<sup>[73]</sup>在 5 个宽度级别上分别对 4 类不同结构绿地样点进行实测,发现乔灌草复合结构的道路绿地降噪能力要强于纯乔木结构或纯灌木结构,纯草坪结构的降噪能力最弱, Karbalaei 等<sup>[66]</sup>用同样的方法测定了不同宽度级别上不同种类构成绿地的降噪效果,发现乔灌复合结构在 100 m 的宽度水平上降噪效果最强,可降低 44 dB;水平结构上,绿地的降噪能力主要受宽度影响,一般来说绿地宽度越大,其降噪能力就越强<sup>[74]</sup>;另外, Martínez-Sala 等<sup>[75]</sup>在研究中证实,对植物间进行合理的排列、布置可以有效地改善它们的隔声降噪能力,这与声波在传播中与植物带枝叶所产生的共振和衍射有关,而明雷等<sup>[76]</sup>进一步研究重庆主城区常见三种道路景观植物的降噪效果后发现,对单一植物种,植物间交叉排列的绿化带对交通噪声的衰减效果比平行排列好。

#### 2.5 人居身心健康

相较于上述生态系统服务功能,植被群落特征对人居身心健康服务影响的研究起步较晚,城市居民压力伴随着城市化的发展不断增加,越来越多的研究证实了人群身心健康与植被群落间存在正向关系<sup>[77]</sup>,两者之间的影响机理研究目前多集中在绿视率、芬多精以及生态效益提升带来的疾病降低 3 方面。

黄俐琳等<sup>[78]</sup>将绿视率作为评价公园绿道植被群落康养能力的主要因子,绿视率越高,植被群落康养能力得分越高,Boers 等<sup>[79]</sup>以荷兰乌特勒支为例,利用统计数据研究了当地精神障碍患者的居住环境,发现绿色空间小、绿视率低的区域,精神障碍患者人数较高,从侧面证实了绿视率与人群身心健康之间的正向关系, Nutsford 等<sup>[80]</sup>通过对新西兰焦虑/情绪障碍治疗数量与绿地距离和社区内绿地比例之间的关系进行研究后,发现了同样的规律,绿地可达性越高、社区绿地比例越高,焦虑/情绪障碍治疗数量越低。

芬多精(phytoncider),又名植物杀菌素(phytoncide),是指植物的花、叶、木材、根、芽等油性细胞在自然状态下释放出的,可对其他有机体产生影响的挥发性或非挥发性的气态有机物 VOCs,它可以增强人体免疫力,明显抑制癌细胞生长,具有特殊的医学功能<sup>[81]</sup>,林静等<sup>[82]</sup>采样测定了五种康养植物芬多精成分及含量,

发现芬多精对环境保护和人体保健具有杀菌抑菌、净化空气、调节人体生理指标等生态功能, Lim 等<sup>[83]</sup>通过提取日本扁柏的芬多精经过实验后发现, 芬多精可以有效地抑制血管平滑肌细胞的增殖和迁移, 而后者正是动脉粥样硬化和血管成形术后再狭窄发生、发展的重要原因, Hiroaki 等<sup>[84]</sup>在芬多精溶液的黑色素抑制效应研究中发现, 芬多精溶液对于生物体的黑色素生成具有抑制作用。

重工业大发展背景下部分城市空气质量急剧下降, 由此引发的呼吸道疾病成为目前城市居民所要面临的重大致死疾病之一。Dadvand 等<sup>[85]</sup>调查了巴塞罗那的 39 所学校校内绿化度和空气污染指数, 经研究发现, 学校内部和周边的绿化程度与学校内部和周边的空气污染水平呈负相关, 政策制定者和健康专家应从绿化角度出发出台政策降低学生因空气污染暴露的致死率, Shen 等<sup>[22]</sup>以台湾地区为研究对象, 采用偏最小二乘模型, 探讨植被群落结构特征通过净化空气污染物对呼吸道疾病致死率产生的不同影响, 发现通过增加植被群落的最大绿色斑块百分比可以降低肺炎和慢性呼吸道疾病的死亡率, 熊林云<sup>[86]</sup>在研究上海市郊城市绿地特性与居民呼吸健康关系后发现, 居民所在周边绿地植被覆盖度越高, 居民呼吸健康状况越好, 且植被群落结构层次越丰富, 对呼吸健康的效益就越大。

## 2.6 生物多样性保护

城市生物多样性是植被群落质量的重要评判标准, 不断升高的硬化地表面积挤压了原有城市生物生存空间。为实现城市扩张过程中的人与自然和谐发展, 需为城市生物多样性保护创造适宜的生境条件。植被群落作为城市绿地系统的基本组成单元, 其特征的改变会第一时间影响到生物的栖息状态, 我们可从食源性植物、入侵植物风险、植物多样性三方面探讨植被群落特征对生物多样性保护的影响。

食源植物不仅可以为鸟类等动物提供栖息之地, 还对动物的生存与繁殖具有重要作用。洗丽铎等<sup>[87]</sup>调查了广州市 12 处城市绿地食源树种的应用, 观察鸟类及蜂蝶类的取食情况, 发现其主要取食部位为植物的花蜜、果实与嫩叶, 观赏与被取食的时间主要集中在春夏季, 以香樟、羊蹄甲、木槿、海桐等植物为主; 食源植物在兼顾观赏性和生态性的基础上, 对于鸟类等动物的取食具有重要的意义, 根据王勇等<sup>[88]</sup>对植被群落种类组成以及对鸟类等动物的研究, 在城市生态系统中, 对食源植物的合理利用和开发不仅有助于形成视觉、听觉、嗅觉相结合的生态景观, 丰富市民的感官和体验感, 还有利于鸟类等动物的生存繁殖, 丰富城市生物多样性; Ferger 等<sup>[89]</sup>以坦桑尼亚的乞力马扎罗山为例, 沿海拔 870—4550 m 的梯度记录了鸟类物种的丰富性, 并对当地的气候条件、植被结构和食物资源的可得性进行了量化分析, 运用路径分析法分析了它们对所有鸟类、食腐动物和食虫动物物种丰富性的直接和间接影响, 发现植被结构和食物资源的可得性对生物物种丰富度模式具有显著的影响。

随着全国各地贸易往来的不断频繁以及人们对观赏植物资源的引种、培育和利用, 植被群落结构不断丰富, 城市生物多样性逐渐增加, 大量外来植物被引进到城市之中<sup>[90]</sup>。但由于全国各地不同植物所需的生长环境不同, 许多植物及其品种在引种后使得城市中乡土植物失去一定程度的生长优势, 对城市生物多样性具有极大危害, 如马缨丹<sup>[91]</sup>、野罂粟<sup>[92]</sup>、含羞草等<sup>[92]</sup>, 会造成城市中生物多样性减少的现象<sup>[93]</sup>。Bezemer 等<sup>[94]</sup>比较受入侵植物影响生境中本地植物和入侵植物上的昆虫多样性分布后发现, 入侵植物上的昆虫的丰富度通常较低; van Hengstum 等<sup>[95]</sup>认为入侵植物会对当地动植物群落产生重大影响, 且对 56 项关于植物入侵对节肢动物群落丰富度影响的研究进行了元分析, 发现节肢动物多样性的丧失通常与植物物种丰富度的丧失直接相关, 而入侵植物的扩散是多样性和丰富度降低的主要驱动因素。

植物是组成植被群落空间的基本单元, 多样化的植物组成也有助于植被群落生物多样性的保护。Heyman<sup>[96]</sup>在瑞典西南部的韦斯特拉-戈塔兰县进行的管理试验中发现, 如果大面积清除林下植物, 会对鸟类的数量产生负面影响, 且与“成片”清理的地块相比, “完全”清除林下的地块, 林下繁殖鸟的总密度下降更多; Eisenhauer 等<sup>[97]</sup>通过调查示范草原建立 2 年、4 年和 6 年后土壤微生物和土壤动物群的表现, 研究植物多样性和关键功能群的存在对土壤生物群的影响变化, 发现植物的多样性, 从物种和数量上来说, 对微生物多样性是一个非常重要的因素, 且功能群落丰富度, 是影响土壤生物群落的最重要的植物群落属性; 彭李菁等<sup>[98]</sup>选

取广州市信园为研究个案,同时先取市内有代表性的 5 个生态园林区作对比进行植物多样性调查,计算物种多样性指数(SW 指数),并把计算结果分别与园区内其它生物多样性的调查结果进行分析,发现鸟类、其他小型动物的种类数随植物 SW 指数上升呈现增高趋势,即植物多样性决定动物物种丰富程度。

## 2.7 总结

在进行城市生态空间与生态系统服务关系研究时,土地利用/土地覆盖(LULC)凭借获取的便捷性、呈现的直观性,一直被广泛运用,研究成果的应用多停留在指导宏观层面的绿地系统规划,而在城市绿地斑块逐渐破碎化的趋势下,为实现生态系统服务功能稳步提升,微观层面的植被群落优化研究应受到重视。

从上述内容看,植被群落特征对生态系统服务的影响因子可以归为两大类:树种与结构,其中树种因子又包含叶面积指数、分枝点高低、根系特征、树冠特征、化学物质生成等若干因子,结构因子包含垂直结构、水平结构、冠层结构等若干因子。植被群落主要通过植物体的蒸腾作用与群落整体的遮蔽作用缓解热岛效应,叶面积指数、冠幅、郁闭度、群落面积和周长等参数与植被群落的降温效应均存在正向关系,不过叶面积指数和郁闭度存在影响阈值;暴雨径流与面源污染均与降雨量有关,所以可通过加强植被群落的截留蓄积能力同时增强调节暴雨径流服务与减少面源污染服务,针叶乔木林冠截留率普遍大于大型和小型阔叶乔木,郁闭度越高,群落截留蓄积能力也就越强,此外,根系强弱、根长密度大小与群落的调节暴雨径流服务能力之间存在正向关系,最长根的长度、生根深度、总根长和根质量与群落的减少面源污染服务能力之间存在正向关系,且科学的群落种植密度与多层次配置模式也可增强群落的减少面源污染服务能力;树种层面,植被群落对交通噪音的削减能力主要受植物体分枝点高度、叶面积指数和树冠特征的影响,且低分枝点、高叶面积指数的植物具有更强的噪音削减能力,而面对不同的噪音频率时,不同树冠特征的植物表现不一,500 Hz—2 kHz 之间的噪音,针叶类树种的降噪效果更好,2 kHz 以上的高频噪音,阔叶类树种的降噪效果更好;在提升城市人居身心健康方面,高芬多精挥发量的植物体对人群生理健康具有更好的改善效果,高绿视率的城市绿地可以极大的改善城市居民的精神心里状况,而高植被覆盖度可以明显的降低肺炎和慢性呼吸道疾病的死亡率;城市生物多样性与城市所用树种中食源植物的占比同样存在正向关系,除此之外,外来入侵植物对本地生态环境的破坏,打破原有的生态平衡,会造成生物多样性降低,而在科学合理的树种规划指导下,增加植物物种多样性为更多的潜在适生生物提供了合适的生活环境,进而增加了生物多样性。

在进行以生态系统服务提升为目的的植被群落优化时,需遵循整体最优原则,即以群落主体功能为主,制定优化方案调整植被群落内部各项特征因子,实现生态系统服务的整体提升。除以上综述内容介绍的各服务主要影响因子,在查阅大量学术研究成果的基础上,编制表 1 说明城市生态系统服务-植被群落特征因子关系表,可为今后植被群落营建与更新提供技术指导。

## 3 讨论

城市绿地破碎化背景下如何提升城市生态系统服务成为广大学者与城市管理者所面临的一大难题。除了基于土地利用/植被覆盖、NDVI、NPP 等传统遥感数据研究城市生态系统变化以指导宏观层面的绿地系统规划外,学者们还需关注微观尺度的植被群落数据,研究植被群落特征差异与生态系统服务变化之间的关系,从微观层面指导城市管理者制定完善的植被群落整体优化策略,也为宏观尺度的绿地系统规划的有效实施奠定基础。相关的研究尝试与成果已经出现,张德顺等<sup>[99]</sup>以上海市为例建立了“植物功能性状-生态系统服务”评价框架,为园林树种的选择和树种规划提供了一种客观理性的方法;Lavorel 等<sup>[100]</sup>通过对法国阿尔卑斯山中部 Villar d'Arene 南面山坡生态空间进行研究后发现,基于非生物变量和植物特征构建的生态系统服务评估模型,相较于单纯 LULC 数据更能精细地表现相关的生态系统属性。本文综述了目前学界关于植被群落特征如何影响生态系统服务的主流观点,多为定性研究,将来或许可以进一步探索参数化、空间化后的植被群落特征与生态系统服务之间的量化关系。基于以上内容,在符合景观要求的条件下,面向生态系统服务提升的植被群落优化可遵循以下几个原则:

表 1 植被群落特征因子对城市生态系统服务影响关系表

Table 1 Table of relationships between vegetation community characterization factors and urban ecosystem services

因子 Factors			服务 Services					
			缓解热岛效应 Heat-island relieving	暴雨径流调节 Stormwater runoff regulation	减少面源污染 Non-point resource pollution retention	削减交通噪音 Reducing traffic noise	人居身心健康 Physical and mental health	生物多样性保护 Biodiversity conservation
树种特性 Characteristics of the tree species	反射率	高	+	∅	∅	∅	∅	∅
		低	-					
	气孔导度	高	+	∅	∅	∅	∅	∅
		低	-					
树冠特征	针叶		∅	+	+	0.5kHz—2kHz	∅	∅
	阔叶			-	-	>2kHz		
根系特征	深、长、高质量发达根系		∅	+	+	∅	∅	∅
	浅、短、低质量欠发达根系			-	-			
分枝点	高		∅	∅	∅	-	∅	∅
	低					+		
芬多精	浓度高		∅	∅	∅	∅	+	∅
	浓度低						-	
可食性	有		∅	∅	∅	∅	∅	+
	无							-
垂直结构 Vertical structures	结构层次	复杂	+	+	+	+	∅	∅
		单一	-	-	-	-		
	绿视率	高	+	+	+	+	+	∅
		低	-	-	-	-	-	
水平结构 Horizontal structure	面积	大	+	+	+	+	∅	∅
		小	-	-	-	-		
	周长	长	+	∅	∅	∅	∅	∅
		短	-					
密度	高		+	+	+	+	∅	∅
	低		-	-	-	-		
排列	平行		∅	∅	∅	-	∅	∅
	交错					+		
乔木覆盖度	高		+	+	+	+	+	∅
	低		-	-	-	-	-	
冠层结构 Canopy structure	叶面积指数	高	+	+	+	+	∅	∅
		低	-	-	-	-		
	郁闭度	高	+	+	+	+	∅	∅
		低	-	-	-	-		
冠幅	大		+	+	+	+	∅	∅
	小		-	-	-	-		
其他 Other	入侵风险	高	∅	∅	∅	∅	∅	-
		低						+
	植物多样性	高	∅	∅	∅	∅	∅	+
		低						-

+代表此生态系统服务功能与对应的植被特征因子存在正向关系;-代表此生态系统服务功能与对应的植被特征因子存在负向关系;∅代表未有文献证明此生态系统服务功能与对应的植被特征因子存在关系

(1) 在以缓解热岛效应服务为主体功能的城市区域,如分布在城市内的山体、公园、绿地等,进行植被群落构建时,在树种规划上应选择高反射率、高气孔导度的树种,垂直方向丰富群落结构层次,水平方向尽可能

扩大群落配置面积,适当提高种植密度和乔木覆盖度,冠层结构上增加叶面积指数、郁闭度和冠幅,同时林缘线设计不应执着于规则式延伸,适当结合自然,收放自如。

(2)在以暴雨径流调节为主体功能的城市区域,如降水集中区域、台风多发区、城市低洼区域等,进行植被群落构建时,树种规划上应选择根系发达的深根性针叶树种,采用多层次、复合式群落配置模式,水平结构上适当提高群落面积、种植密度、乔木覆盖度,冠层结构上增加叶面积指数、郁闭度和冠幅。

(3)在以减少面源污染为主体功能的城市区域,如农业区、工业区等,面向截留蓄积能力提升的植被群落构建方法与暴雨径流调节植被群落构建方法相同,此外,应考虑长度、生根深度、总根长和根质量较大的污染净化能力较高的树种。

(4)在以削减交通噪音为主体功能的城市区域,如城市主干道、铁路、车站旁,进行植被群落构建时,树种规划上应选择分枝点较低的树种,同时根据实地噪声频率,选择针叶树种(500 Hz—2 kHz)或阔叶树种(2 kHz以上),垂直方向采用多层次、复合式群落配置模式,水平方向除了适当提高群落面积、种植密度和乔木覆盖度外,排列方式以交叉排列为优,冠层结构上同前四种服务一样,增加叶面积指数、郁闭度和冠幅。

(5)在以维持人居身心健康为主体功能的城市区域,如医院、养老院、居民社区、学校等,进行植被群落构建时,树种规划上应选择芬多精挥发含量丰富的树种,垂直方向进行群落配置时,应提高群落绿视率。

(6)在以生物多样性保护为主体功能的城市区域,如城市公园绿地、郊野森林公园、居住区游园等,进行植被群落构建时,基于人与自然和谐共生理念,树种规划上应考虑植物的可食性,花、果、叶等可为生物提供食物来源,同时要重视入侵植物的防治工作,维护群落内部的生态稳定性,此外,应科学的提高群落内植物多样性,为更多的生物提供合适的生存环境。

(7)在进行面向城市生态系统服务提升的植被群落优化时,要遵循整体最优原则,同时兼顾实地的主要生态系统服务功能。许多生态系统服务提升的群落优化方案存在相似性,在进行实际群落构建时可统筹考虑,共同提升。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 杜乐山,刘海燕,徐靖,张凤春,李俊生. 城市化与生态系统服务的双向影响综述. 生态科学, 2017, 36(6): 233-240.
- [ 2 ] 葛荣凤,王京丽,张力小,田光进,冯悦怡. 北京市城市化进程中热环境响应. 生态学报, 2016, 36(19): 6040-6049.
- [ 3 ] 甘卫星,朱光婷. 城市化的环境危机及其对策. 环境保护, 2010, (11): 47-48.
- [ 4 ] 姜芊孜,俞孔坚,王志芳. 城市化背景下陂塘水文调节能力变化研究. 中国农村水利水电, 2019, (12): 52-59, 64-64.
- [ 5 ] 尹澄清. 城市面源污染问题: 我国城市化进程的新挑战——代“城市面源污染研究”专栏序言. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1053-1056.
- [ 6 ] McDonald R I, Kareiva P, Forman R T T. The implications of current and future urbanization for global protected areas and biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 2008, 141(6): 1695-1703.
- [ 7 ] 乔磊, 矫明阳, 董丽. 城市化进程中青岛地区地域性植物景观的营建. 黑龙江农业科学, 2011, (5): 79-82.
- [ 8 ] 陈丹妮. 城镇化对居民健康的影响——基于 CHARLS 数据的实证研究. 金融发展评论, 2018, (2): 101-117.
- [ 9 ] Alavipanah S, Wegmann M, Qureshi S, Weng Q H, Koellner T. The role of vegetation in mitigating urban land surface temperatures: a case study of Munich, Germany during the warm season. *Sustainability*, 2015, 7(4): 4689-4706.
- [ 10 ] Di Leo N, Escobedo F J, Dubbeling M. The role of urban green infrastructure in mitigating land surface temperature in Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. *Environment, Development and Sustainability*, 2016, 18(2): 373-392.
- [ 11 ] Zhang B, Xie G D, Zhang C Q, Zhang J. The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: a case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, 2012, 100: 65-71.
- [ 12 ] Villeneuve P J, Jerrett M, Su J G, Burnett R T, Chen H, Wheeler A J, Goldberg M S. A cohort study relating urban green space with mortality in Ontario, Canada. *Environmental Research*, 2012, 115: 51-58.
- [ 13 ] 高玉福, 荣立苹. 城市公共绿地降温增湿效益研究综述. 浙江林业科技, 2017, 37(3): 72-78.
- [ 14 ] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [ 15 ] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958, 84(359): 70-72.
- [ 16 ] 陈丽文, 尹娟. 十一种园林植物增湿降温效应研究. 北方园艺, 2016, (20): 67-70.
- [ 17 ] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究. 生态学报, 2016, 36(6): 1686-1697.

- [18] 周早弘. 农业面源污染实证分析与政策选择[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [19] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 常杰. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献. 生态学报, 2004, 24(8): 1720-1725.
- [20] 王玮璐, 郭小平, 汪明勇, 张平. 绿化带对交通噪音衰减效果的研究进展. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 240-244.
- [21] 徐文彬, 姜潮, 贾树华. 自杀率与社会经济关系研究进展. 中国公共卫生, 2017, 33(2): 328-332.
- [22] Shen Y S, Lung S C C. Mediation pathways and effects of green structures on respiratory mortality via reducing air pollution. Scientific Reports, 2017, 7: 42854.
- [23] 毛齐正, 马克明, 邬建国, 唐荣莉, 张育新, 罗上华, 宝乐, 蔡小虎. 城市生物多样性分布格局研究进展. 生态学报, 2013, 33(4): 1051-1064.
- [24] 李凤霞, 石辉, 魏峰远, 刘剑华, 冯晓刚. 不同绿化树种景观格局对城市局部小气候的影响. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2017, 36(1): 69-74.
- [25] Smithers R J, Doick K J, Burton A, Sibille R, Steinbach D, Harris R, Groves L, Blicharska M. Comparing the relative abilities of tree species to cool the urban environment. Urban Ecosystems, 2018, 21(5): 851-862.
- [26] 崔凤娇, 邵锋, 齐锋, 王誉洁, 张泰龙, 余海盈. 植被对城市热岛效应影响的研究进展. 浙江农林大学学报, 2020, 37(1): 171-181.
- [27] Zhang Z, Lv Y M, Pan H T. Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(3): 323-329.
- [28] 陈朱, 陈方敏, 朱飞鸽, 曹璐, 沈兴华, 李俊祥. 面积与植物群落结构对城市公园气温的影响. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2590-2596.
- [29] 高吉喜, 宋婷, 张彪, 韩永伟, 高馨婷, 冯朝阳. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响. 资源科学, 2016, 38(6): 1028-1038.
- [30] Sodoudi S, Zhang H W, Chi X L, Müller F, Li H D. The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 34: 85-96.
- [31] Duncan J M A, Boruff B, Saunders A, Sun Q, Hurley J, Amati M. Turning down the heat: an enhanced understanding of the relationship between urban vegetation and surface temperature at the city scale. Science of the Total Environment, 2019, 656: 118-128.
- [32] 张波, 郭晋平, 刘艳红. 太原市城市绿地斑块植被特征和形态特征的热环境效应研究. 中国园林, 2010, 26(1): 92-96.
- [33] 武小钢, 蔺银鼎, 闫海冰, 郝兴宇. 城市绿地降温增湿效应与其结构特征相关性研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1469-1473.
- [34] 刘华, 宋涛, 李培培. 合肥城市主要绿地类型小气候调节作用初析. 城市环境与城市生态, 2009, 22(6): 39-42.
- [35] Jaganmohan M, Knapp S, Buchmann C M, Schwarz N. The bigger, the better? the influence of urban green space design on cooling effects for residential areas. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(1): 134-145.
- [36] 贾刘强, 邱建. 基于遥感的城市绿地斑块热环境效应研究——以成都市为例. 中国园林, 2009, 25(12): 97-101.
- [37] 袁振, 吴相利, 臧淑英, 吴长山, 李苗. 基于 TM 影像的哈尔滨市主城区绿地降温作用研究. 地理科学, 2017, 37(10): 1600-1608.
- [38] 李海峰, 李永树, 卢正, 刘雪婷, 彭文甫. 绿地景观热环境效应的遥感研究. 测绘科学, 2018, 43(1): 66-72.
- [39] Feyisa G L, Dons K, Meilby H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect; an example from Addis Ababa. Landscape and Urban Planning, 2014, 123: 87-95.
- [40] 张明丽, 秦俊, 胡永红. 上海市植物群落降温增湿效果的研究. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 39-43.
- [41] 章莉, 詹庆明, 蓝玉良. 基于微气候模拟的武汉居住小区植被降温通风效应研究. 中国园林, 2019, 35(3): 92-96.
- [42] 秦仲, 李湛东, 成仿云, 沙海峰. 夏季栎树群落冠层结构对其环境温湿度的调节作用. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1634-1640.
- [43] Xiang D X, Li D, Yan H N, Yang N, Xiong Y M. The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 428-439.
- [44] 游宇, 车伍, 张伟, 罗乙兹. 8 种园林乔木林冠对雨水截留作用的研究. 中国给水排水, 2018, 34(9): 121-127.
- [45] 尹剑红. 广州市 11 种园林地被植物冠层截留特征研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2016.
- [46] 张焜, 张洪江, 程金花, 张静雯, 王贤, 宋楠. 重庆四面山暖性针叶林林冠截留及其影响因素. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 32-35.
- [47] 周彬, 韩海荣, 康峰峰, 程小琴, 宋娅丽, 刘可, 李勇. 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征. 生态学报, 2013, 33(5): 1645-1653.
- [48] 宋小帅, 康峰峰, 韩海荣, 于晓文, 周彬, 程小琴. 太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应. 水土保持通报, 2014, 34(3): 102-108.
- [49] Aubertin G M. Nature and Extent of Macropores in Forest Soils and Their Influence on Subsurface Water Movement. Upper Darby: Northeastern Forest Experiment Station, 1971.
- [50] 陈垚, 杨威, 王健斌, 潘伟亮. 雨水生物滞留设施中植被的设计与养护. 中国给水排水, 2017, 33(12): 6-11.
- [51] 唐正光. 降雨入渗影响因素与滑坡的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [52] 李建兴, 谌芸, 何丙辉, 陶俊, 李天阳. 不同草本的根系分布特征及对土壤水分状况的影响. 水土保持通报, 2013, 33(1): 81-86, 91-91.
- [53] 陈莎, 陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟. 水资源保护, 2018, 34(5): 13-19.

- [54] 李平, 王晟. 生物滞留技术控制城市面源污染的作用与机理. 环境工程, 2014, 32(3): 75-79.
- [55] Read J, Wevill T, Fletcher T, Deletic A. Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems. *Water Research*, 2008, 42(4/5): 893-902.
- [56] 杨帆, 刘赢男, 焉志远, 隋心, 袁磊, 倪红伟. 阿什河流域 10 种水生植物对水质氮磷的净化能力比较. 环境科学研究, 2018, 31(4): 708-714.
- [57] Read J, Fletcher T D, Wevill T, Deletic A. Plant traits that enhance pollutant removal from stormwater in biofiltration systems. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 12(1): 34-53.
- [58] 吕建, 吴永波, 余昱莹, 菲安敏, 陈欢. 不同密度杨树人工林河岸缓冲带对无机氮的去除效果. 生态科学, 2019, 38(2): 146-154.
- [59] 胡颖. 河流和沟渠对氮磷的自然净化效果的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [60] 朱胜男, 陈楠, 郑新宇, 肖清铁, 汪敦飞, 王玉洁, 吕昭君, 樊荣荣, 吕荣海, 林瑞余. 种植密度、施肥及种植方式对紫苏铅富集能力的影响. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2020, 49(3): 399-406.
- [61] Lloyd A, Law B, Goldingay R. Bat activity on riparian zones and upper slopes in Australian timber production forests and the effectiveness of riparian buffers. *Biological Conservation*, 2006, 129(2): 207-220.
- [62] Weller D E, Jordan T E, Correll D L. Heuristic models for material discharge from landscapes with riparian buffers. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1156-1169.
- [63] 王珊珊, 张帅, 王诗乐, 沈海龙, 高大文. 河岸带乔木树种配置方式对面源污染物  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除效果. 森林工程, 2014, 30(4): 27-30.
- [64] 吴健, 王敏, 吴建强, 杨泽生, 唐浩. 滨岸缓冲带植物群落优化配置试验研究. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 42-45, 52-52.
- [65] 刘宏伟, 梁红, 高伟峰, 沈海龙, 高大文. 河岸缓冲带不同植被配置方式对重金属的净化效果. 土壤通报, 2018, 49(3): 727-735.
- [66] Karbalaee S S, Karimi E, Naji H R, Ghasempoori S M, Hosseini S M, Abdollahi M. Investigation of the traffic noise attenuation provided by roadside green belts. *Fluctuation and Noise Letters*, 2015, 14(4): 1550036.
- [67] 吴淑杰, 韩喜林. 林冠降噪机理的探讨. 中国林业, 2003, (7A): 34-34, 14-14.
- [68] 张明丽, 胡永红, 秦俊. 城市植物群落的降噪效果分析. 植物资源与环境学报, 2006, 15(2): 25-28.
- [69] 刘佳妮. 园林植物降噪功能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [70] 袁玲. 植物结构对交通噪声衰减频谱特性的影响. 噪声与振动控制, 2008, 28(5): 154-156, 167-167.
- [71] 张庆费, 郑思俊, 夏楠, 吴海萍, 张明丽, 李明胜. 上海城市绿地植物群落降噪功能及其影响因子. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2295-2300.
- [72] 巴成宝. 北京部分园林植物降噪及其影响因子研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [73] 陈龙, 谢高地, 盖力强, 裴厦, 张昌顺, 张彪, 肖玉. 道路绿地消减噪声服务功能研究——以北京市为例. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1526-1534.
- [74] Van Renterghem T, Attenborough K, Maennel M, Defrance J, Horoshenkov K, Kang J, Bashir I, Taherzadeh S, Altreuther B, Khan A, Smyrnova Y, Yang H S. Measured light vehicle noise reduction by hedges. *Applied Acoustics*, 2014, 78: 19-27.
- [75] Martínez-Sala R, Rubio C, García-Raffi L M, Sánchez-Pérez J V, Sánchez-Pérez E A, Llinares J. Control of noise by trees arranged like sonic crystals. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 291(1/2): 100-106.
- [76] 明雷, 郑洁, 程浩, 张振国. 常青道路景观配置对交通噪声的衰减效果. 环境污染与防治, 2012, 34(1): 15-18.
- [77] Branas C C, Cheney R A, MacDonald J M, Tam V W, Jackson T D, Ten Have T R. A Difference-in-differences analysis of health, safety, and greening vacant urban space. *American Journal of Epidemiology*, 2011, 174(11): 1296-1306.
- [78] 黄俐琳, 袁媛, 陈清西. 漳州郊野公园绿道康养指标评价分析. 南方农业, 2020, 14(22): 59-66.
- [79] Boers S, Hagoort K, Scheepers F, Helbich M. Does residential green and blue space promote recovery in psychotic disorders? a cross-sectional study in the province of Utrecht, the Netherlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(10): 2195.
- [80] Nutsford D, Pearson A L, Kingham S. An ecological study investigating the association between access to urban green space and mental health. *Public Health*, 2013, 127(11): 1005-1011.
- [81] 吴楚材, 吴章文, 罗江滨. 植物精气研究. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [82] 林静, 简毅, 骆宗诗, 何家敏, 李谨宵. 5 种康养植物芬多精成分及含量研究. 四川林业科技, 2018, 39(6): 13-19.
- [83] Lim L, Jang Y S, Yun J J, Song H. Phytoncide, nanochemicals from *Chamaecyparis obtusa*, inhibits proliferation and migration of vascular smooth muscle cells. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, 15(1): 112-115.
- [84] Fujimori H, Hisama M, Shibayama H, Kawase A, Iwaki M. Inhibitory effects of phytoncide solution on melanin biosynthesis. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2010, 74(5): 918-922.
- [85] Dadvand P, Rivas I, Basagaña X, Alvarez-Pedrerol M, Su J, De Castro Pascual M, Amato F, Jerret M, Querol X, Sunyer J, Nieuwenhuijsen M J. The association between greenness and traffic-related air pollution at schools. *Science of the Total Environment*, 2015, 523: 59-63.

- [86] 熊林云. 上海市郊城市绿地特性与居民呼吸健康关系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [87] 洗丽铎, 徐彬瑜, 翁殊斐, 冯志坚. 广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(2): 142-147.
- [88] 王勇, 许洁, 杨刚, 李宏庆, 吴时英, 唐海明, 马波, 王正寰. 城市公共绿地常见木本植物组成对鸟类群落的影响. 生物多样性, 2014, 22(2): 196-207.
- [89] Ferger S W, Schleuning M, Hemp A, Howell K M, Böhning-Gaese K. Food resources and vegetation structure mediate climatic effects on species richness of birds. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(5): 541-549.
- [90] 孙卫邦, 向其柏. 谈生物入侵与外来观赏植物的引种利用. 中国园林, 2004, 20(9): 54-56.
- [91] 李玉霞, 尚春琼, 朱珣之. 入侵植物马缨丹研究进展. 生物安全学报, 2019, 28(2): 103-110.
- [92] 李振宇, 解焱. 中国外来入侵种[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [93] 王宁, 杨洪宇, 祁珊珊, 孙见凡, 戴志聪, 杜道林. 外来植物入侵的生物多样性响应及其生态防控综述. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 13-17.
- [94] Bezemer T M, Harvey J A, Cronin J T. Response of native insect communities to invasive plants. *Annual Review of Entomology*, 2014, 59: 119-141.
- [95] van Hengstum T, Hooftman D A P, Oostermeijer J G B, van Tienderen P H. Impact of plant invasions on local arthropod communities: a meta-analysis. *Journal of Ecology*, 2014, 102(1): 4-11.
- [96] Heyman E. Clearance of understory in urban woodlands: assessing impact on bird abundance and diversity. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(1): 125-131.
- [97] Eisenhauer N, Milcu A, Sabais A C W, Bessler H, Brenner J, Engels C, Klärner B, Maraun M, Partsch S, Roscher C, Schonert F, Temperton V M, Thomisch K, Weigelt A, Weisser W W, Scheu S. Plant diversity surpasses plant functional groups and plant productivity as driver of soil biota in the long term. *PLoS One*, 2011, 6(1): e16055.
- [98] 彭李菁, 钟智扬, 吴小鹏, 何恺明, 刘立翔. 广州市园林植物多样性及其效应的调查研究. 生态科学, 2001, 20(4): 86-93.
- [99] 张德顺, 刘鸣. 基于“植物功能性状-生态系统服务”评价框架的园林树种选择方法——以上海为例. 中国园林, 2020, 36(2): 106-111.
- [100] Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, Colace M P, Garden D, Girel J, Pellet G, Douzet R. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 135-147.