

建筑与小区生物滞留设施植物群落景观 评价与植物配置分析

——以北京市通州区海绵城市试点区为例

韩元¹, 刘玲^{2,3}, 赵利¹, 孟莹莹¹, 冯昶栋³, 李雨晴⁴

[1. 北控水务(中国)投资有限公司, 北京 100102; 2. 河北大学 生命科学学院 生态与环境治理研究所, 河北 保定 071002;
3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 4. 清华大学 环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084]

摘要: [目的] 评价建筑与小区绿色低影响开发(LID)生物滞留设施的植物群落配置适宜性和景观效果, 为北京地区生物滞留设施植物群落景观应用提供实践参考。[方法] 以北京市通州区海绵城市试点区建成项目中生物滞留设施为研究对象, 基于专家咨询、现场植被调查, 应用层次分析法提出了生物滞留设施植物群落景观评价因素, 从3个准则层和10个指标层构建体系, 采用此模型评价了15个具有代表性生物滞留设施, 45个样本的植物群落景观。[结果] 生物多样性是生物滞留设施植物景观评价的关键性指标, 5个示范工程中 Bobo 自由城草本植物 Simpson 多样性、Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度指数最高, 多样性指数分别为 2.09, 0.86, 0.87。通州海绵城市试点区生物滞留设施植物群落景观总体处于较高水平, I 级生物滞留设施植物景观 5 个, II 级植物景观 4 个, 各占评价样方的 33.3% 和 26.7%; III 级景观 5 个, 占评价样方的 33.3%; IV 级景观 1 个, 占评价样方的 6.7%。实际应用中评价效果较好, 适宜性高的植物包括玉簪(*Hosta plantaginea*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、八宝景天(*Hylotelephium erythrostictum*)和狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)等, 季相景观出现频率较高的植物包括鸢尾(*Iris tectorum*)、八宝景天、荷兰菊(*Symphyotrichum novi-belgii*)等。[结论] 在植物群落配置中, 应注重 LID 设施与植物配置功能的匹配, 重视乡土植物开发与利用构建植物群落、考虑植物的层次和形态, 增加不同季节植物景观的多样性。

关键词: 生物滞留设施; 植物群落; 层次分析; 配置模式

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)05-0125-09

中图分类号: TU986.2

文献参数: 韩元, 刘玲, 赵利, 等. 建筑与小区生物滞留设施植物群落景观评价与植物配置分析[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 125-133. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200927.003; Han Yuan, Liu Ling, Zhao Li, et al. Plant community landscape evaluation and plant configuration analysis of bio-retention facilities in buildings and communities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 125-133.

Plant Community Landscape Evaluation and Plant Configuration Analysis of Bio-retention Facilities in Buildings and Communities

—A Case Study at Sponge City Pilot Area in Tongzhou District, Beijing City

Han Yuan¹, Liu Ling^{2,3}, Zhao Li¹, Meng Yingying¹, Feng Changdong³, Li Yuqing⁴

(1. Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing 100102, China; 2. Institute of Ecology and Environmental Governance, College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China;

3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. State Key Joint

Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: [Objective] The suitability of the plant community configuration and landscape effect of green low impact development (LID) bio-retention facilities in buildings and residential areas was evaluated to provide a practical reference for the landscape application of bio-retention facility plant communities in Beijing City. [Methods] The bio-retention facilities of the sponge city pilot at Tongzhou District, Beijing City, were examined

收稿日期: 2020-06-09

修回日期: 2020-07-07

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“北京城市副中心高品质水生态与水环境技术综合集成研究”(2017ZX07103-007); 北京市通州区科技计划项目“通州区海绵城市建设关键技术研发及适宜性技术评估”(KJ2019CX059)

第一作者: 韩元(1988—), 男(汉族), 山东省枣庄市人, 硕士, 主要从事生态景观、绿色基础设施、海绵城市研究。Email: hanyuan@bewg.net.cn。

as the research object based on expert consultation and a field vegetation survey. The analytic hierarchy process was used to propose the factors for the evaluation of the plant landscape in bio-retention facilities, and the system was constructed from three criteria layers and 10 index layers. This model was used to evaluate the plant suitability of 45 samples of 15 biological retention measures. [Results] The biodiversity was a key indicator for the evaluation of plant landscapes in bio-retention facilities. Among the five sponge city pilots, the Simpson diversity of herbaceous plants, and the Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness index were the higher for the Bobo pilot, with diversity indexes of 2.09, 0.86, and 0.87, respectively. The plant community landscape of the biological retention facilities in Tongzhou sponge city pilot area was at a high level. The plant landscape for five biological retention facilities was grade I, whereas four, five, and one were of grade II, III and IV, which accounted for 33.3%, 26.7%, 33.3% and 6.7% of the evaluation units, respectively. The plants with good evaluation effects and high suitability for practical applications included *Hosta plantaginea*, *Lythrum salicaria*, *Hylotelephium erythrostictum*, and *Pennisetum alopecuroides*. The plants with a high frequency in a seasonal landscape included *Iris tectorum*, *Hylotelephium erythrostictum*, and *Symphytotrichum novi-belgii*. [Conclusion] In the plant community configuration, it is necessary to pay attention to matching the LID facilities and plant configuration functions, and the development and utilization of native plants to construct the plant community. The plant hierarchy and plant morphology, and ways to increase the diversity of the plant landscape in different seasons, should also be considered.

Keywords: bio-retention facilities; plant community; analytic hierarchy process; configuration mode

海绵城市(sponge city)作为一种新型城市环境规划理念,旨在使用不同的低影响开发(low impact development, LID)设施,实现资源与环境的协调发展^[1]。LID设施主要功能是通过削减洪峰流量与径流量,延长峰现时间量等,在源头上对雨水进行处理,从而降低城市开发对自然水文循环系统的影响^[2]。低影响开发技术在建筑与小区等城市空间具有很强实际应用效果,不仅处理源头雨水径流,而且注重一定景观性而受到推崇。生物滞留技术作为最有效的LID技术之一,应用植物、微生物与土壤等复合属性,达到净化雨水和补充地下水的目的^[3]。植物是生物滞留设施的重要组成部分,主要发挥雨水集蓄和生态景观展示的功能。在生物滞留结构中,植物生长可以改良土壤结构、吸收营养物质、影响根际微生物与理化特征^[4-9]。目前,国内外对于生物滞留设施的研究大多停留在其结构、蓄滞水量、污染削减等方面,对植物选择配置、生态功能的研究相对较少。已有研究表明,雨水花园和生物滞留设施中植物对污染物去除效果与植物生长速度、生物量、根系发达程度具有正相关性^[10-12]。因此对植物群落结构、景观效果、雨水管理等功能进行综合评估体系,是生物滞留设施植物景观研究的热点问题。

生物滞留设施中植被层是提供观赏价值和景观生态价值的来源^[13],同时具有截留雨水、降低地表径流流速和径流峰值、促进土壤渗透以及削减径流中的污染物等多种功能。目前,通过植物的种类、应用频

度、观赏特性、植物配置情况^[14]进行低影响开发设施植物应用现状的研究较多,但从生物多样性角度评价生物滞留设施景观效果研究相对较少。而在气候条件、基质条件等多种因素影响下,植被对生物滞留设施调控过程的影响十分复杂^[15],生物滞留设施的径流调控功能主要通过滞留雨水来实现,植被层截留雨水和基质层蓄滞作用是雨水滞留能力重要组成部分^[14]。植被群落生物多样性、生物量和覆盖度等特征决定了生物滞留设施植被层的雨水截留能力,因而也会影响径流调控效益。

随着国家30个海绵城市试点区建设的推进,各试点区对于植物的应用和配置还处于摸索和总结期,未针对植物选择与配置考虑效果与实践的应用情况。为探讨北京市通州区海绵城市试点区中生物滞留设施在植物选择的适宜性与运行效果,结合通州地区降雨径流特征、土壤和植物特点,本研究以北京市通州区海绵城市试点区为例,通过构建植物群落景观评价模型,结合生物滞留设施植物样本调查监测,对试点工程中15个典型生物滞留设施植物群落进行评价,以为建筑与小区中选择及优化生物滞留设施植物材料及配置提供参考依据。

1 研究区概况

研究区通州区位于北京城市副中心两河片区,西南起北运河,北到运潮减河,东至规划春宜路,总面积19.36 km²,建成区改造面积7.21 km²。通州区地处永定河、潮白河冲积洪积平原,地势平坦。根据地勘

测量建成区表层土质以粉质黏土为主,往下依次是细砂、中砂、粗砂等,综合竖向渗透系数根据不同土质分布厚度有所区别,最大达到 1.58×10^{-3} cm/s,最小 2.72×10^{-6} cm/s。通州区属大陆性季风气候区,受冬、夏季风影响,形成春季干旱多风、夏季炎热多雨,年平均温度 11.3 °C,多年平均降水量 541.3 mm。

2 材料与方法

2.1 样方调查

如表 1 所示,根据植物群落调查的样地选择及相关研究方法,2019 年 9 月在对通州海绵城市试点区全面踏查的基础上,选择建筑与小区内已完工 2 a 以上且植物群落稳定的项目,同时以收集屋面和道路的雨水为主,进水量及水质污染负荷等条件相似的绿地内的生物滞留设施进行调研。如表 1,选出紫荆园、Bobo 自由城、北京小学通州分校、荔景园、牡丹园 5 个示范工程中 15 个具有代表性的生物滞留设施通

过调查和信息采集对植物群落景观进行评价,在每个生物滞中设置 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方,本研究共设置 45 个样方。在每个样方内分别统计草本植物物种的名称、株数/丛数、盖度、生长指标、绿化覆盖率并拍摄照片。

(1) 植物生长指标。采用称量生物量鲜重,采集样方中每种植物,分别测定地上和地下部分鲜重。植物根系扫描系统,通过 WinRHIZO 根系分析系统分析植物根系,分析根系长度、直径、面积、体积等。

(2) 植物季相。根据每种植物在四季的生长过程中,叶、花、果的形状和色彩随季节而变化,将季相变化分为无季相变化、2 种、3 种、4 种和多种共计 5 种季相变化,分别评 2,4,6,8,10 分。

(3) 植物乡土性。根据是否为乡土植物常用植物、乡土植物、长期栽培应用、新引进品种和入侵物种进行判断,分别评 10,8,6,4,2 分。建设成本、养护需求根据工程设计中相关建设成本和养护成本进行评分。

表 1 北京市通州区海绵城市试点区示范工程生物滞留设施概况

| 项目名称 | 项目类型 | 项目规模/ m ² | 生物滞留设施 建成时间 | 生物滞留设施功能 | 样方数 | 生物滞留设施种植 植物品种 |
|----------|------|-------------------------|----------------|--|-----|---|
| 紫荆园 | 住宅小区 | 116 100 | 201706 | 建筑楼前绿地内设置溢流型生物滞留池,收集、滞蓄屋面雨水; | 9 | 狼尾草、马蔺 (<i>Iris lactea</i>)、千屈菜、萱草 (<i> Hemerocallis fulva</i>)、玉簪、花叶芒 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、八宝景天、牛膝菊 (<i>Galinsoga parvi flora</i>)、金鸡菊 (<i>Coreopsis drummondii</i>) |
| Bobo 自由城 | 住宅小区 | 151 288 | 201706 | 小区庭院绿地内设置溢流型、下渗型两种生物滞留池,对建筑屋面、庭院铺装雨水收集和净化; | 9 | 鼠尾草 (<i>Salvia japonica</i>)、天人菊 (<i>Gaillardia pulchella</i>)、高羊茅 (<i>Festuca elata</i>)、萱草、八宝景天、狼尾草、松果菊 (<i>Echinacea purpurea</i>)、黑心金光菊 (<i>Rudbeckia hirta</i>) |
| 北京小学通州分校 | 公共建筑 | 21 585 | 201709 | 教学楼间庭院内绿地设置溢流型生物滞留池,对屋面、庭院铺装雨水收集存储; | 9 | 假龙头花 (<i>Physostegia virginiana</i>)、费菜 (<i>Phedimus aizoon</i>)、玉簪、萱草、鸢尾、荷兰菊、高羊茅、千屈菜 |
| 荔景园 | 住宅小区 | 72 400 | 201709 | 小区绿地内设置溢流型生物滞留池,收集屋面、广场道路雨水 | 9 | 玉簪、芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、千屈菜、鸢尾、八宝景天、菊花 (<i>Chrysanthemum morifolium</i>)、萱草、金鸡菊 |
| 牡丹园 | 住宅小区 | 135 800 | 201709 | 建筑楼前绿地内设置溢流型生物滞留池,收集、滞蓄屋面雨水; | 9 | 景天、芦苇、千屈菜、玉簪、八宝景天、马蔺、金鸡菊、白车轴草 (<i>Trifolium repens</i>)、酢浆草 (<i>Oxalis corniculata</i>) |

2.2 数据处理

植物丰富度指数是反映生物滞留设施中植物丰富程度的指标。物种多样性指标是衡量一个地区植物多样性的依据。

采用 Margalef 物种丰富度指数 D_{ma} :

$$D_{ma} = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

Simpson 指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n N_i(N_i - 1) / N(N - 1) \quad (2)$$

Shannon-Weiner 指数:

$$H' = \sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i) \quad (3)$$

Pielou 指数:

$$J = (- \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i) / \ln S$$

$$\text{即 } J_{H'} = H' / H'_{\max} \quad (4)$$

式中: S 为所有物种数; N 为所有物种数量总和; D 为物种的 Simpson 指数; H' 为物种的 Shannon-Weiner 指数; J 为 Pielou 指数; N_i 为某物种总数; P_i 为属于物种 i 的个体在全部个体中的比例。植物

群落物种多样性为实测值,对样地中植物丰富度指数、均匀度指数和多样性指数的平均值进行标准化处理,使其转化为 $[0,1]$ 区间的数值,综合反映物种丰富度、均匀度和多样性的平均水平。

3 评价体系构建

3.1 评价指标筛选与确定

为了评价生物滞留设施植物景观设计的有效性,已有研究在植物景观评价方法中将指标分为定性和定量两大类,其中,在公园植物景观评价模型体系中将准则层分为生态效益、美学质量和服务功能^[16]。本研究在层次分析法中,初步选择将生物滞留设施植物群落景观作为评价体系的目标层,将生态功能、景观效益、经济效益 3 项作为评价体系的准则层。生态功能指标层各项因素大多能定量计算,考虑到植物群落稳定性、改善土壤功能、抗逆性等方面,选择植物生物量、植物多样性、植物覆盖度、根系发达程度等作为生态功能指标。景观效益指标层选择群落配置、季相景观、环境协调性等,作为植物群落美学和景观方面评价因素。经济效益指标层从建设成本、乡土性、养护需求等方面进行评价。将所有初选指标以问卷的形式发送给园林设计、园林植物、生态环境等领域 15 位专家和高级技术人员,经过两轮,确定了一级指标及 3 个二级指标;初步选取了 15 项三级指标,通过专家和专业人员打分法选择最佳指标,发放问卷 30 份,回收 27 份,有效卷 25 份,按照得分由高到底的顺序打分,选定 10 个三级指标,综合前人研究成果,构建生物滞留设施植物群落 AHP 评价模型(见图 1)。

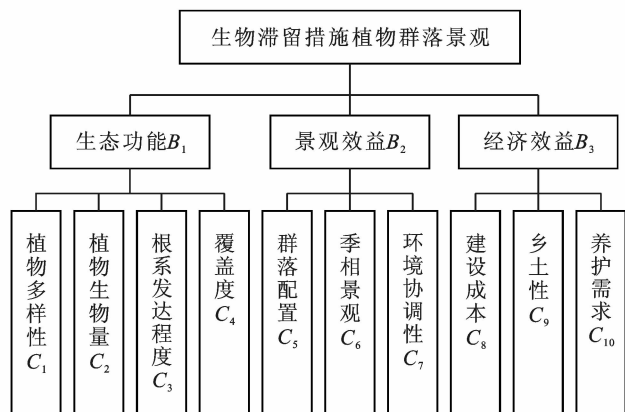


图 1 生物滞留设施植物群落景观评价指标体系

3.2 评价指标的权重

层次分析法通过建立判断矩阵及其一致性检验,根据矩阵的特征向量确定指标权重。层次结构模型判断矩阵通常采用 1—9 标度法对每层指标进行两两

比较。本研究采取专业人员群体判断的方法是克服主观因素影响,将 15 位专家对各指标的标度结果取平均值,得出准则层 B 对目标层 A 的判断矩阵、指标层 $C_1—C_4$ 对准则层 B_1 的判断矩阵、指标层 $C_5—C_7$ 对准则层 B_2 的判断矩阵,指标层 $C_8—C_{10}$ 对准则层 B_3 的判断矩阵(见表 2)。

表 2 评价指标权重及一致性检验结果

| 层次模型 | 判断矩阵 | | | | |
|---------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| A—B | B_i | B_1 | B_2 | B_3 | W_i |
| | B_1 | 1 | 3 | 5 | 0.648 3 |
| | B_2 | 1/3 | 1 | 2 | 0.229 7 |
| | B_3 | 1/5 | 1/2 | 1 | 0.122 0 |
| $B_1—C$ | $B_1 C_{1j}$ | C_{11} | C_{12} | C_{13} | C_{14} |
| | C_{11} | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | C_{12} | 1/2 | 1 | 2 | 3 |
| | C_{13} | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 |
| $B_2—C$ | $B_2 C_{2j}$ | C_{21} | C_{22} | C_{23} | W_{2j} |
| | C_{21} | 1 | 2 | 3 | 0.539 6 |
| | C_{22} | 1/2 | 1 | 2 | 0.297 0 |
| | C_{23} | 1/3 | 1/2 | 1 | 0.163 4 |
| $B_3—C$ | $B_3 C_{3j}$ | C_{31} | C_{32} | C_{33} | W_{3j} |
| | C_{31} | 1 | 3 | 4 | 0.625 0 |
| | C_{32} | 1/3 | 1 | 2 | 0.238 5 |
| | C_{33} | 1/4 | 1/2 | 1 | 0.136 5 |

注:A为目标层;B为准则层(其中, B_1 为生态功能; B_2 为景观效益; B_3 为经济效益);C为指标层。

B_1, B_2, B_3 的一致性比率 CR 均小于 0.1,通过了一致性检验。其中,准则层指标对目标层的权重分别为 0.648 3,0.229 7,0.122 0, $C_{11}—C_{14}$ 对 B_1 的权重分别为 0.466 8,0.277 6,0.160 3,0.095 3, $C_{21}—C_{23}$ 对 B_2 的权重分别为 0.539 6,0.297 0,0.163 4, $C_{31}—C_{33}$ 对 B_3 的权重分别为 0.625 0,0.238 5,0.136 5。准则层、指标层的权重相乘得出指标层指标对于目标层的权重分别为 0.302 6,0.180 0,0.103 9,0.061 8,0.123 9,0.068 2,0.037 5,0.076 3,0.029 1,0.016 7,层次总排序的 $CR < 0.1$,也通过了一致性检验。

3.3 评价指标量化与评价分级

生物滞留设施植物群落景观作为评价体系的目标层,通过景观综合评价指数法统计和分析准则层和指标层评价结果,确定各植物群落评价因子的水平值,与评价因子的权重值相乘,得到各植物群落的综合评分值。运用公式 $CEI = S/SO \times 100\%$,将生物滞留设施植物群落景观划分为不同等级(CEI 为综合评价指数;S 为评价分数值;SO 为理想值),并以差值

百分比分级法划分为 I, II, III, IV, 共 4 个等级^[17](见表 3)。

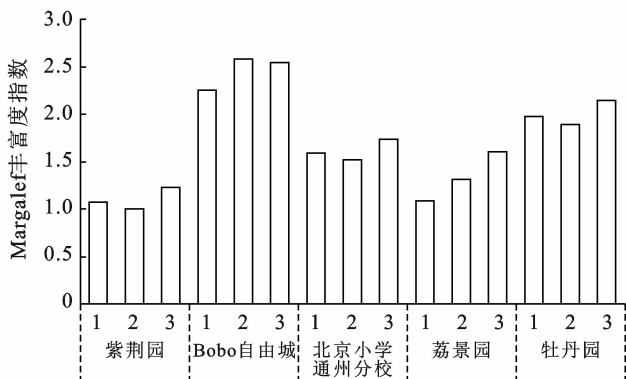
表 3 生物滞留设施植物群落景观评价等级

| 等级评分标准 | 100~90 | 90~85 | 85~80 | <80 |
|------------|--------|-------|-------|-----|
| 植物群落景观评价等级 | I | II | III | IV |

4 生物滞留设施植物群落景观评价

4.1 生态功能评价

4.1.1 生物多样性评价 本研究选择 Marglef 丰富度、Simpson 多样性、Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度综合评价生物滞留设施中草本植物多样性水平。如图 2 所示, Bobo 自由城调查样地的 Marglef 丰富度指数最高, 指数数值为 2.24~2.57, 其次为牡丹园, Marglef 丰富度指数为 1.89~2.14, 紫荆园丰富度指数平均值最低, 仅为 1.10, 表明 Bobo 自由城草本植物多样性更为丰富, 紫荆园和荔景园草本植物种类较为单一。不同工程中的生物滞留设施中草本植物的植物 Shannon-Wiener 多样性指数, 与丰富度指数的差异性基本一致(见图 3)。其中, 草本植物 Simpson 多样性、Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度指数最高的是 Bobo 自由城, 多样性指数分别为 2.09, 0.86, 0.87。Shannon-Wiener 多样性指数最低紫荆园, 数值为 1.52。Simpson 多样性和 Pielou 均匀度指数最低的为北京小学通州分校, 数值分别为 0.67, 0.72。根据多样性指数, 可以有针对性地调整植物配置。



注:横坐标上数字 1,2,3 为样地代码。下同。

图 2 生物滞留设施植物丰富度

4.1.2 植物生物量和覆盖度评价 图 4 所示为不同生物滞留设施植物生长情况, 结果显示, 地上生物量由大到小排序为:荔景园>紫荆园>牡丹园>北京小学通州分校>Bobo 自由城, 地下生物量由大到小排

序为:北京小学通州分校>荔景园>紫荆园>牡丹园>bobo 自由城。北京小学通州分校植物地下生物量显著高于其他示范点。北京小学通州分校各样地平均植物地下生物量为 $7\ 071 \pm 1\ 824\ \text{g}$, 显著高于其他 4 个试点植物地下生物量($p < 0.05$)。荔景园植物各样地平均地上生物量为 $9\ 431 \pm 3\ 940\ \text{g}$, Bobo 自由城各样地平均地上生物量为 $3\ 916 \pm 491\ \text{g}$, 显著低于其他试点植物地上生物量($p < 0.05$)。荔景园样地 1 的植物地上生物量显著大于其他样地, 主要是芦苇和千屈菜地上生物量显著高于其他植物, 两种植物的地上生物量之和占样地总地上生物量的 83%。

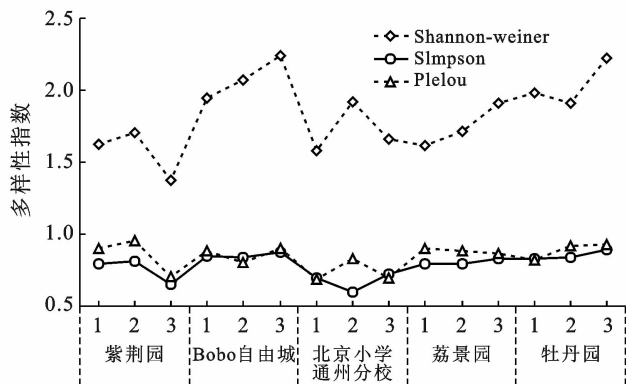


图 3 生物滞留设施植物多样性指数

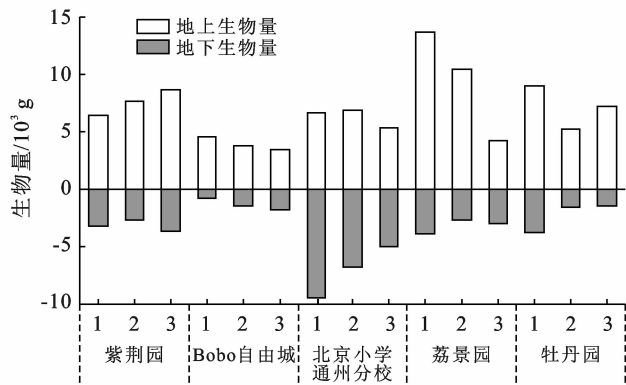


图 4 生物滞留设施植物地上和地下生物量

4.1.3 植物根系发达程度 植物根系形态分布与土壤环境密切相关, 通过植物根系生长情况, 也可反映土壤结构、基质养分等微环境特征^[18]。表 4 为不同生物滞留设施试点土壤中植物根系生长的影响情况。根系长度是决定根系固定土壤、吸收水分和养分的重要指标, 通过对比各样方, 牡丹园植物根系长度最大, 各样方植物根系总长度的平均值为 945 cm, 其次为北京小学通州分校的植物根系总长的平均值为 850 cm, 显著高于其他处理组($p < 0.05$)。根系生长与基质养分条件具有相关性, 植物根系生长与土壤养分含量在一定范围内呈正相关; 然而在缺乏营养的土壤或基质

条件下,根系通过外延以汲取养分,扩大分布范围以维持植物生长需要^[19]。

表 4 植物覆盖度与根系指标

| 样地 | 覆盖度/ % | 根长/ cm | 根表 面积/cm ² | 根体积/ cm ³ |
|--------------|-----------|-----------|--------------------------|-------------------------|
| 紫荆园 | 1 | 86 | 655 | 313 |
| | 2 | 84 | 365 | 171 |
| | 3 | 79 | 631 | 215 |
| Bobo 自由城 | 1 | 79 | 359 | 128 |
| | 2 | 60 | 351 | 188 |
| | 3 | 93 | 757 | 326 |
| 北京小学 通州分校 | 1 | 81 | 786 | 401 |
| | 2 | 82 | 1 060 | 642 |
| | 3 | 79 | 703 | 273 |
| 荔景园 | 1 | 72 | 690 | 174 |
| | 2 | 79 | 839 | 306 |
| | 3 | 79 | 674 | 275 |
| 牡丹园 | 1 | 83 | 1 520 | 298 |
| | 2 | 78 | 562 | 223 |
| | 3 | 82 | 754 | 253 |

根系表面积反映植物吸收土壤中水分和养分的能力,根系吸收营养物质能力与表面积呈正相关。如结果所示,北京小学通州分校植物根系表面积最大,同根系长度一致,Bobo 自由城植物根系表面积最小。根系表面积大,吸收根际土壤养分量相对较大,结合植物地上和地下部分生物量数据,根系表面积大的处理组,地下生物量也显著高于其他处理组,植物对养分的吸收使根系生物量积累。根体积作为决定根系空间分布的重要指标,可以反映植物生长情况及植物固土效果,根体积数据与根系长度和根系表面积不完全一致,北京小学通州分校试点植物根体积最大,各样地植物根系总体积平均值为 267 cm³,而根系体积相对较大的紫荆园和 Bobo 自由城,根系长度和根系表面积却显著低于其他 3 个试点,说明土壤养分条件低导致根系外延生长,但由于养分状况差,植物根系生物量无法累积,所以导致对照组根体积较小,与根系长度呈反比。根体积、根部质量较大的植物,根吸收养分多分配至植物根系部分,可以促进植物耐旱性^[20]。

4.1.4 生态功能综合评价 生物滞留设施植物生态功能评价从生物多样性、植物生物量、植物覆盖度和植物根系 4 个方面进行综合评价(见表 5),其中,生物多样性是生物滞留设施植物群落景观评价的关键性指标。通过综合分析 15 个样地植物相关指标,北京小学通州分校各样地植物生态功能综合评价指标得

分最高,草本植物种类为 19 种,其中玉簪、八宝景天、千屈菜、鸢尾为耐湿植物;假龙头花、萱草、荷兰菊、费菜等植物耐旱且适应能力强;也存在自然演替的当地植物狗尾草、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、堇菜(*Viola vercumda*)等。根据层次分析法分析结果表明,生物滞留设施的植物生态功能还取决于植物生长情况、植物覆盖情况,同时应该考虑植物对环境的适应能力,而植物根系分布情况对植物抗性、土壤渗透性、雨水净化功能具有密切影响^[21]。研究表明草本植物的茎叶具有降水截留作用,并且对最大雨水截留量与植被的株高、覆盖度和生物量呈正相关关系^[22]。因此,在相同的基质层配置情况下,地上植被生物量和覆盖度大的生物滞留设施对雨水滞留能力高。北京小学通州分校和荔景园从植物地上部分生长状况与景观配置角度,其雨水滞留和洪峰削减能力更具优势。植物对地表径流的净化效果,一部分是由植物地上部分以及表层根系的拦截作用,其次是由植物根系对营养物质的吸收能力决定的,其中,降雨期间生物滞留设施对雨水污染物的去除主要是通过土壤和植物根系的过滤、截留和吸附等作用。根据评价结果,紫荆园生物滞留设施中植物根系发达程度优于其他试点。

表 5 生态功能指标综合评价

| 样地 | 生物 多样性 | 植物 生物量 | 植物 覆盖度 | 植物根系 发达程度 | 评价 得分 | |
|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------|-------|
| 紫荆园 | 1 | 0.215 | 0.094 | 0.048 | 0.054 | 0.411 |
| | 2 | 0.221 | 0.101 | 0.025 | 0.053 | 0.400 |
| | 3 | 0.185 | 0.121 | 0.035 | 0.050 | 0.391 |
| Bobo 自由城 | 1 | 0.262 | 0.052 | 0.024 | 0.050 | 0.388 |
| | 2 | 0.268 | 0.051 | 0.032 | 0.038 | 0.390 |
| | 3 | 0.283 | 0.051 | 0.055 | 0.059 | 0.447 |
| 北京小学 通州分校 | 1 | 0.204 | 0.157 | 0.051 | 0.051 | 0.463 |
| | 2 | 0.216 | 0.133 | 0.089 | 0.052 | 0.490 |
| | 3 | 0.213 | 0.101 | 0.037 | 0.050 | 0.402 |
| 荔景园 | 1 | 0.215 | 0.171 | 0.027 | 0.046 | 0.459 |
| | 2 | 0.224 | 0.128 | 0.043 | 0.050 | 0.445 |
| | 3 | 0.240 | 0.071 | 0.038 | 0.050 | 0.398 |
| 牡丹园 | 1 | 0.249 | 0.125 | 0.053 | 0.053 | 0.479 |
| | 2 | 0.252 | 0.067 | 0.032 | 0.049 | 0.401 |
| | 3 | 0.274 | 0.085 | 0.037 | 0.052 | 0.448 |

4.2 景观效益与经济效益评价

通过定量计算和定性评价打分,得出各生物滞留设施景观效益、经济效益评价因子的得分(见表 6)。

植物配置评分最高的是 Bobo 自由城 3 个样地,牡丹园的样地植物季相景观和景观层次性评分最高,紫荆园植物配置、季相景观和景观层次性评分均最低。紫荆园、荔景园、牡丹园生物滞留设施建设成本、乡土性两项指标的评分,均高于 Bobo 自由城和北京小学通州分校。北京小学通州分校的养护需求最高,相反该指标的评分最低。

表 6 植物景观效益与经济效益指标得分

| 样地 | 群落配置 | 季相景观 | 景观层次性 | 建设成本 | 乡土性 | 养护需求 | |
|----------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 紫荆园 | 1 | 0.53 | 0.73 | 0.73 | 0.90 | 0.94 | 0.82 |
| | 2 | 0.50 | 0.64 | 0.68 | 0.90 | 0.87 | 0.80 |
| | 3 | 0.61 | 0.76 | 0.77 | 0.90 | 0.88 | 0.78 |
| Bobo 自由城 | 1 | 0.90 | 0.76 | 0.84 | 0.78 | 0.84 | 0.68 |
| | 2 | 0.95 | 0.83 | 0.87 | 0.78 | 0.83 | 0.76 |
| | 3 | 0.93 | 0.85 | 0.90 | 0.78 | 0.87 | 0.70 |
| 北京小学通州分校 | 1 | 0.72 | 0.87 | 0.92 | 0.73 | 0.77 | 0.55 |
| | 2 | 0.70 | 0.82 | 0.87 | 0.73 | 0.83 | 0.56 |
| | 3 | 0.77 | 0.83 | 0.89 | 0.73 | 0.78 | 0.58 |
| 荔景园 | 1 | 0.54 | 0.82 | 0.87 | 0.90 | 0.87 | 0.71 |
| | 2 | 0.60 | 0.89 | 0.93 | 0.90 | 0.90 | 0.67 |
| | 3 | 0.70 | 0.92 | 0.90 | 0.95 | 0.85 | 0.66 |
| 牡丹园 | 1 | 0.83 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.88 | 0.80 |
| | 2 | 0.81 | 0.91 | 0.91 | 0.90 | 0.91 | 0.77 |
| | 3 | 0.87 | 0.95 | 0.95 | 0.90 | 0.95 | 0.75 |

4.3 植物群落景观综合评价

各生物滞留设施生态功能、景观效益、经济效益评价因子的得分和综合评价结果见表 7。牡丹园生物滞留设施植物景观综合评价得分最高,排名第一,其次为北京小学通州分校、Bobo 自由城和荔景园,紫荆园综合评价得分最低。从评价结果看,Ⅰ级生物滞留设施植物景观 5 个,占评价样方的 33.3%;Ⅱ级植物景观 4 个,占评价样方的 26.7%;Ⅲ级景观 5 个,占评价样方的 33.3%;Ⅳ级景观 1 个,占评价样方的 6.7%。北京市通州区海绵城市试点区生物滞留设施植物群落景观总体处于较高水平。

牡丹园、北京小学通州分校、Bobo 自由城的部分生物滞留设施调查样地的植物群落景观评价Ⅰ级,植物群落整体生长状况极好,群落内的多年生草本搭配比例协调,群落结构稳定,植物季相配置丰富。自然演替的当地植物种类丰富,能与引进的植物种间竞争和谐,使植物景观富有差异性和生态丰富性。适度的养护管理可以保持植物生态系统的物种多样性和结构功能稳定,群落层次富有变化且植物种类间过渡自然,能很好的与周边环境相协调^[23]。

植物景观评价Ⅰ级的牡丹园,从植物配置结构来看,包括株高大于 1 m 的芦苇、千屈菜,也有株高小于 10 cm 的千根草(*Euphorbia thymifolia*)、酢浆草。根据植物季相特征,花期 4—6 月的鸢尾、马蔺等 4 种,花期 7—10 月的金鸡菊、八宝景天、玉簪等 5 种。

北京小学通州分校、荔景园等生物滞留设施调查样地中植物景观评价为Ⅱ级,植物群落结构较为合理,植物整体生长状况较好,植物种类较丰富,物种多样性和季相色彩变化较为丰富,植物景观功能与周边环境相协调。

Bobo 自由城、荔景园和紫荆园的部分生物滞留设施调查样地的植物群落景观评价为Ⅲ级,植物群落尚保持一定的生态稳定,但植物整体生长状况一般,植物多样性和植物搭配比例协调性相对较差,当地一年生植物狗尾草、牛筋草(*Eleusine indica*)等更新较多,景观配置的植物在群落内部植物种间竞争中处于劣势,生态系统的结构功能和生物多样性不好,季节观赏性一般。

表 7 生物滞留设施植物景观综合评价得分

| 样地 | 生态功能 | 景观效益 | 经济效益 | 综合评价 | 评价等级 | | |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|----|---|
| 紫荆园 | 1 | 0.411 | 0.149 | 0.087 | 0.647 | 81 | Ⅲ |
| | 2 | 0.400 | 0.137 | 0.085 | 0.622 | 78 | Ⅳ |
| | 3 | 0.391 | 0.164 | 0.085 | 0.640 | 80 | Ⅲ |
| Bobo 自由城 | 1 | 0.388 | 0.190 | 0.090 | 0.668 | 84 | Ⅲ |
| | 2 | 0.390 | 0.186 | 0.091 | 0.668 | 83 | Ⅲ |
| | 3 | 0.447 | 0.189 | 0.092 | 0.728 | 91 | Ⅰ |
| 北京小学通州分校 | 1 | 0.463 | 0.188 | 0.090 | 0.742 | 93 | Ⅰ |
| | 2 | 0.490 | 0.184 | 0.092 | 0.766 | 96 | Ⅰ |
| | 3 | 0.402 | 0.191 | 0.091 | 0.684 | 86 | Ⅱ |
| 荔景园 | 1 | 0.459 | 0.162 | 0.083 | 0.704 | 88 | Ⅱ |
| | 2 | 0.445 | 0.172 | 0.083 | 0.700 | 88 | Ⅱ |
| | 3 | 0.398 | 0.182 | 0.078 | 0.658 | 82 | Ⅲ |
| 牡丹园 | 1 | 0.479 | 0.208 | 0.085 | 0.772 | 97 | Ⅰ |
| | 2 | 0.401 | 0.214 | 0.085 | 0.701 | 88 | Ⅱ |
| | 3 | 0.448 | 0.219 | 0.086 | 0.753 | 94 | Ⅰ |

紫荆园的生物滞留设施有一处调查样地植物景观评价为Ⅳ级。植物生长状况较差,植物配置不协调,植物多样性较差,当地植物和引进植物种类均较少,且长势不好,植物配置单一且季相景观变化不明显。

4.4 生物滞留设施植物群落景观优化配置策略

生物滞留设施植物景观配置在保障雨水管理和

径流污染控制的前提下,从提升植物群落生态适宜性和景观功能角度进行优化配置^[21]。随着景观设计引入新自然主义草本植物景观概念,海绵城市景观设计更加注重植物景观生态美学,可持续、低维护的自然主义生态种植^[24]。生物滞留设施种植主要是选取在可以适应场地原生境条件的同时,也能够与系统中的各生物要素和非生物要素协同共生的植物品种,通过混植来展示植物的自然野趣的景观视觉效果,强调群落多样性的建立与表达^[25]。针对我国海绵城市建设特征,植物景观配置需要考虑本土植物和引入植物的生态功能。根据评价结果与分析,为5个示范工程中生物滞留设施植物群落景观提供可参考的优化配置模式。

(1) 紫荆园。调查样地草本植物种类为12种,其中,引入植物主要包括狼尾草、马蔺、千屈菜、萱草、玉簪等,植物演替生长的本土植物包括牛筋草、萝藦(*Metaplexis japonica*)等。在适当的人为养护条件下,人工种植引入植物仍处于主导地位,没有过度的本土植物演替生长。在现有植物基础上进一步优化植物群落配置,主要考虑植物的形态和层次,季相景观的丰富程度,通过配置不同花期的植物,突出夏、秋两季可观赏性。生物滞留设施的草本植物,与绿地景观中常绿与落叶树种相结合,整体乔、灌、草搭配比例协调,植物栽植与地形很好的相结合,发挥涵养水分、保持水土的功能^[22]。

(2) Bobo自由城。调查样地草本植物种类为18种,引入植物种类丰富,包括鼠尾草、天人菊、黑心金光菊、松果菊、萱草、八宝景天等,植物花期长,可做到三季有花可赏,植物种类搭配合理。本土植物有狗尾草、牛筋草、苋菜、千根草等演替生长,种间竞争和谐,引入植物生长状况良好,提高物种多样性。

(3) 北京小学通州分校。植物配置丰富,草本植物19种,根据地形变化搭配不同植物,草本植物群落种植比例适宜,以假龙头花、费菜、玉簪、鸢尾等引入植物为主,季相变化明显,植物配置层次过渡自然。

(4) 荔景园。草本植物群落物种为14种,丰富程度相对较低,本土植物狗尾草、诸葛菜(*Orychophragmus violaceus*)、牛筋草、委陵菜(*Potentilla chinensis*)等生长旺盛,对引入植物生长具有较强竞争作用,为优化群落内部植物物种协调,可增加种植鸢尾、八宝景天、菊花、萱草等植物,增加不同季节景观植物多样性。

(5) 牡丹园。调查区域植物物种丰富,调查范围内草本植物20种,错落有致,草本植物群落更好的体现新自然主义景观。引入植物生长状况良好,与本土

植物间竞争和谐。草本植物配置构图协调,具有较高观赏价值。

5 讨论与结论

植物景观是绿色雨水基础设施中具有生命力的要素,具有多样性变化及动态变化的特征。植物群落是生物滞留设施中重要的构成单位,不同的物种组成、生长特性、配置形式对生物滞留设施的生态效益和景观价值具有重要影响。通过建立生物滞留设施植物群落景观评价体系,通过定量和定向的指标分析、验证试点区生物滞留设施的建设应用现况具有指导及反馈的意义。从结果分析得到以下结论:

(1) 总结关于通州区海绵城市试点区生物滞留设施植物群落景观总体处于较高水平,I级生物滞留设施植物景观5个,占评价样方的33.3%;II级植物景观4个,占评价样方的26.7%;III级景观5个,占评价样方的33.3%;IV级景观1个,占评价样方的6.7%。从多样性指数分析可知,Simpson指数反映物种集中程度,本研究5个试点指数值差异较小。Shannon-Wiener可反映稀有种的多样性指数,在bobo自由城调查样地的指数数值显著高于其他试点样地。Pielou指数与Simpson指数有很高一致性,各海绵城市试点植物均匀度较一致。各试点调查样地草本植物丰富度相似,植物物种集中性较一致。

(2) 15个样地共有常用草本植物达到20种,植物配置多考虑耐湿耐淹、雨水净化、季相变化等生态和景观功能;其中实际应用中评价效果较好、适宜性高的植物包括玉簪、千屈菜、八宝景天和狼尾草等,季相景观出现频率较高的植物包括鸢尾、八宝景天、荷兰菊等。研究结果与冯梦珂^[21]关于北京市生物滞留设施植物景观研究结论一致。

(3) 通过调查与评价结果与分析,提出5个示范项目生物滞留设施植物景观优化配置:注重低影响开发设施与植物配置功能的匹配、重视乡土植物开发与利用构建植物群落、考虑植物的层次和形态,增加不同季节植物景观的多样性等。

在后续生物滞留设施植物配置中,应科学地进行规划,加强本土植物和引入植物演替特征研究及筛选。加强生物滞留设施的跟踪和调查,进一步研究分析植物对基质结构特征、污染物净化的响应关系,在保证植物多样性丰富的同时,营造物种稳定、功能健全的生态系统,实现生物滞留设施的健康运行,及时的总结和评价通州海绵城市试点区的经验对北京地区生物滞留设施植物群落景观建设提供实践参考依据。

[参 考 文 献]

- [1] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 建设科技, 2015(1):11-18.
- [2] 王俊岭, 魏江涛, 张雅君, 等. 基于海绵城市建设的低影响开发技术的功能分析[J]. 环境工程, 2016, 34(9):56-60.
- [3] 任建武, 翟玮, 王媛媛, 等. 深圳海绵城市建设生物滞留带植物筛选[J]. 天津农业科学, 2017, 23(3):97-102.
- [4] Read J, Wevill T, Fletcher T, et al. Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. *Water Research*, 2008, 42(4/5):893-902.
- [5] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2012, 223(7):4253-4273.
- [6] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, et al. Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal [J]. *Water Environment Research*, 2006, 78(3):284-293.
- [7] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, et al. Water quality improvement through bioretention: Lead, copper, and zinc removal [J]. *Water Environment Research*, 2003, 75(1):73-82.
- [8] Reddy K R, Xie T, Dastgheibi S. PAHs removal from urban storm water runoff by different filter materials [J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2014, 18(2):04014008.
- [9] Dietz M E, Clausen J C. Saturation to improve pollutant retention in a rain garden [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(4):1335-1340.
- [10] Lucas W C, Greenway M. Nutrient retention in vegetated and nonvegetated bioretention mesocosms [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(5):613-623.
- [11] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3/4):310-321.
- [12] Read J, Fletcher T D, Wevill T, et al. Plant traits that enhance pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 12(1):34-53.
- [13] Hunt W F, Lord B, Loh B, et al. Plant selection for bioretention systems and stormwater treatment practices [M]. Singapore: Springer Singapore, 2015.
- [14] 龙佳, 王思思, 冯梦珂. 北京市低影响开发设施植物应用现状与评价优化[J]. 环境工程, 2020, 38(4):89-95.
- [15] Morash J, Wright A N, Lebleu C, et al. Increasing sustainability of residential areas using rain gardens to improve pollutant capture, biodiversity and ecosystem resilience [J]. *Sustainability*, 2019, 11(12): 3269-3287.
- [16] 李华威, 穆博, 康艳, 等. 公园绿地植物景观综合评价与实证研究[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(6):838-842.
- [17] 谭铭智. 人工植物群落调查方法设计与评价探讨[J]. 中国林业产业, 2016(1):168-169.
- [18] Lynch J. Root architecture and plant productivity [J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(1):7-13.
- [19] Gaiotti F, Marcuzzo P, Belfiore N, et al. Influence of compost addition on soil properties, root growth and vine performances of *Vitis vinifera* cv Cabernet sauvignon [J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225:88-95.
- [20] 平亚琴, 海江波, 陈欣宇, 等. 不同基因型油菜成熟期根系特征及其与根际土壤养分关系[J]. 西北农业学报, 2017, 26(5):718-727.
- [21] 冯梦珂. 低影响开发设施的植物景观评价与优化研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
- [22] Nagase A, Dunnett N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(3): 356-363.
- [23] 宁惠娟, 邵锋, 孙茜茜, 等. 基于 AHP 法的杭州花港观鱼公园植物景观评价[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(4): 717-724.
- [24] Hitchmough J, Dunnett N. Introduction to naturalistic planting in urban landscapes [C]// Dunnett N, Hitchmough J. *The Dynamic Landscape: Ecology, Design and Management of Urban Naturalistic Vegetation*, London: Spon Press, 2003.
- [25] 袁嘉, 杜春兰. 新自然主义草本植物景观在城市雨水花园中的应用与设计[J]. 风景园林, 2017(5):22-27.