

# 北京市海绵城市试点区雨水花园植物群落生态适应性及其应用效果

韩元<sup>1,2,3</sup>, 刘玲<sup>4</sup>, 姚一珍<sup>5</sup>, 吴斌<sup>6</sup>

[1.石家庄首创水汇环境治理有限公司,河北石家庄 051430; 2.北京首创生态环保集团股份有限公司,北京 100044; 3.北京水星环境有限公司,北京 101599; 4.河北大学生态环境学院(筹)河北省湿地近自然修复技术重点实验室,河北保定 071002; 5.天津大学建筑学院,天津 300110; 6.河北师范大学,河北石家庄 050024]

**摘要:** [目的] 针对已建成的城市雨水花园项目,从生物多样性的角度进行多指标调查评价,分析雨水花园植物的适应性及景观应用效果,旨在为北京地区雨水花园植物群落优化配置提供科学参考。[方法] 通过实地调研,分析和掌握雨水花园植物群落的多样性特征,在定量分析的基础上构建雨水花园植物群落景观评价模型对 15 个典型雨水花园植物群落进行分级和评价。[结果] ①北京市海绵城市试点建成区雨水花园草本植物共 20 科,43 属,45 种,优势科主要集中于菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、百合科(Liliaceae)、景天科(Crassulaceae)等。试点区各样地指数数值差异较小,各调查样地草本植物丰富度相似,植物物种集中性较一致。②试点区雨水花园植物群落景观综合评价总体处于较高水平,各样地中小区类雨水花园植物群落评价明显高于道路类雨水花园植物群落景观。受所在区域地表径流污染程度的影响,不同样地植物生长情况、群落构成有所差别。[结论] 未来还需加强对建成雨水花园植物的定期监测、评估,重视开发本土植物,筛选出优势物种,总结出结构稳定的植物群落配置模式与维护管理手段,为北京市雨水花园植物选择与配置提供科学参考。

**关键词:** 雨水花园; 植物群落; 生态适应性; 综合评价体系; 植物配置; 北京市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)04-0186-09

中图分类号: TU986.2

**文献参数:** 韩元, 刘玲, 姚一珍, 等.北京市海绵城市试点区雨水花园植物群落生态适应性及其应用效果[J].水土保持通报,2023,43(4):186-194.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.023; Han Yuan, Liu Ling, Yao Yizhen, et al. Ecological adaptability and application of rainwater garden plants in sponge city pilot area of Beijing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):186-194.

## Ecological Adaptability and Application of Rainwater Garden Plants in Sponge City Pilot Area of Beijing City

Han Yuan<sup>1,2,3</sup>, Liu Ling<sup>4</sup>, Yao Yizhen<sup>5</sup>, Wu Bin<sup>6</sup>

(1.Shijiazhuang Capital Aqua Environment Management Co., Ltd., Shijiazhuang,

Hebei 051430, China; 2.Beijing Capital Eco-environment Protection Group Co., Ltd.,

Beijing 100044, China; 3.Beijing Mercury Environment Co., Ltd., Beijing 100044, China;

4.Hebei Key Laboratory of Close-to-Nature Restoration Technology of Wetlands, College of

Ecology and Environment, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China; 5.School of Architecture,

Tianjin University, Tianjin 300110, China; 6.Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China)

**Abstract:** [Objective] The adaptability and landscape application effects of rainwater garden plants were studied using a multi-index from a biodiversity perspective in order to provide a scientific reference for the optimal allocation of rainwater garden plant communities in Beijing City. [Methods] A field investigation

收稿日期:2022-08-17

修回日期:2022-12-08

资助项目:石家庄市科技计划项目“人工湿地组合系统水生植物碳转化关键过程与固碳效应研究”(221240223A);河北省自然科学基金青年项目(D2021201003)

第一作者:韩元(1988—),男(汉族),山东省枣庄市人,硕士,高级工程师,主要从事生态景观、生态水环境、海绵城市研究。Email:495645241@qq.com。

was conducted to analyze and understand the diversity characteristics of rain garden plant communities. Quantitative analysis was used to construct a landscape evaluation model of rain garden plant communities to classify and evaluate 15 typical rain garden plant communities. [Results] ① There were 45 species of rain garden plants belonging to 43 genera and 20 families in Beijing sponge city pilot area. The dominant plant families were mainly Compositae, Gramineae, Liliaceae, Crassulaceae, etc. There was little difference in the index values of different plots in the pilot area, the richness of herbaceous plants was similar, and the concentration of plant species was consistent in the investigated plots. ② The comprehensive evaluation of the rain garden plant community landscape in the pilot area was at a high level, and the evaluation of the rain garden plant community landscape was significantly higher than that of road rain garden plant community landscape. Due to the influence of the pollution in surface runoff in the region causing differences in plant growth, the plant community structure was different at different sites. [Conclusion] In the future, it will be necessary to strengthen regular monitoring and evaluation of constructed rain garden plant communities, screen out dominant species, and summarize the stable plant community allocation patterns and maintenance management methods in order to provide a reference for the selection and configuration of rain garden plants in Beijing City.

**Keywords:** rain garden; plant community; ecological adaptability; comprehensive evaluation system; plant configuration; Beijing City

雨水花园(rain garden),是一种以自然方法削减径流、延迟洪峰并以分解、吸收、截留污染物等方式净化水质典型的生态基础设施<sup>[1-2]</sup>,是建设海绵城市、进行低影响开发和城市暴雨管理的重要手段<sup>[3-4]</sup>。植物作为雨水花园重要组成部分,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。同时,雨水花园中的植物还可作为动物的栖息地,缓解区域热岛效应,更为重要的是形成的植物群落可产生显著多样的景观元素,提高当地的生物多样性<sup>[5]</sup>。国外对于雨水花园的填料结构、蓄滞水量、污染削减等方面的研究较多<sup>[6-8]</sup>,近些年国内在雨水花园设计实践、雨水花园场地模型构建等方面的研究取得较大的进展,对于雨水花园植物研究主要集中在植物的种类、植物的选择配置、植物养护及去污能力等方面<sup>[9-12]</sup>,但从生物多样性角度分析雨水花园植物的适应性及景观效果研究相对较少。2020年底北京市已完成国家第二批海绵城市试点区建设示范工程,为探讨北京市雨水花园植物群落配置的适宜性和应用效果,以北京海绵城市试点建成区雨水花园草本植物群落为研究对象,从生物多样性角度调查雨水花园植物群落组成,分析和掌握植物群落的多样性特征,对植物群落结构、景观效果、雨水管理等功能进行综合评价,为后续北京地区雨水花园建设提供参考。

## 1 研究区概况

北京市海绵城市试点区位于北京市通州区两河片区,总规划面积 19.36 km<sup>2</sup>,其中建成区面积约 4.08 km<sup>2</sup>(不含水域面积)。试点区气候属温带大陆性半湿润季风气候区,春天干旱少雨、多风、蒸发强度大;夏季炎热多雨;秋季天高气爽;冬季干燥寒冷。多年平均降水量 535.9 mm,多年平均蒸发量为 1 308 mm。汛期(6—8月)降水量占全年降水量的 80%以上,多年平均气温 14.6℃。试点区表层土壤基本以粉质黏土为主,渗透系数基本在  $1.00 \times 10^{-4}$  cm/s 左右。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调查方法

2021年7—8月在植物生长旺盛季节,对试点建成区 12 006.26 m<sup>2</sup>的雨水花园草本植物群落进行全面勘察(如表 1 所示)。选出建设时间基本一致的 5 个项目,在每个项目中选择 3 个已完工且植物群落稳定的典型雨水花园进行调查研究。在每个雨水花园中设置 3 个 1 m×1 m 样方,本研究共设置 45 个样方。调查内容包括草本植物物种、株数/丛数、盖度、生长指标、绿化覆盖率、植物观赏特性记录并拍摄照片。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 根系分析系统分析草本植物根系长度、直径、面积、体积等。

表 1 调研雨水花园基本情况  
Table 1 Overview of investigated rain gardens

项目名称	建成年份	雨水花园建设基本情况	样方数	覆盖度/%	群落主要优势种
道路 A	2019	选择 3 个道路绿化带内雨水花园,以收集、滞蓄道路径流雨水为主,日常管护以浇洒和修剪为主	9	86	萱草、马蔺、千屈菜、花叶芒、狼尾草、八宝景天、玉簪
				84	
				79	
社区 A	2019	选择 3 个建筑楼前绿地内雨水花园,收集、滞蓄屋面、铺装雨水为主,日常管护以浇洒和修剪为主	9	79	八宝景天、鼠尾草、天人菊、高羊茅、萱草、狼尾草、松果菊、黑心金光菊
				60	
				93	
社区 B	2019	选择 3 个广场绿地内雨水花园,收集屋面和广场道路雨水,日常管护以浇洒和修剪为主	9	81	假龙头花、萱草、费菜、鸢尾、荷兰菊、高羊茅、玉簪、千屈菜
				82	
				79	
道路 B	2019	选择 3 个道路绿化带内雨水花园,收集、滞蓄道路径流雨水为主,日常管护以浇洒和修剪为主	9	72	芦苇、玉簪、萱草、千屈菜、鸢尾、八宝景天、金鸡菊、菊花
				79	
				79	
社区 C	2019	选择 3 个建筑楼前绿地内雨水花园,收集、滞蓄屋面雨水为主,日常管护以浇洒和修剪为主	9	83	千屈菜、景天、芦苇、马蔺、玉簪、八宝景天、金鸡菊、白车轴草、酢浆草
				78	
				82	

注:表中植物学名分别为萱草(*Hemerocallis fulva*),马蔺(*Iris lactea*),千屈菜(*Lythrum salicaria*),花叶芒(*Miscanthus sinensis*),狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*),八宝景天(*Hylotelephium erythrostictum*),玉簪(*Hosta plantaginea*),鼠尾草(*Salvia japonica*),天人菊(*Gaillardia pulchella*),高羊茅(*Festuca elata*),松果菊(*Echinacea purpurea*),黑心金光菊(*Rudbeckia hirta*),假龙头花(*Physostegia virginiana*),费菜(*Phe-dimuz aizoon*),鸢尾(*Iris tectorum*),荷兰菊(*Symphotrichum novi-belgii*),芦苇(*Phragmites australis*),金鸡菊(*Coreopsis basalis*),菊花(*Den-dranthema morifolium*),白车轴草(*Trifolium repens*),酢浆草(*Oxalis corniculata*)。

## 2.2 数据分析方法

(1) 物种多样性可以反映植物群落组成中物种的丰富程度,对样地草本植物多样性的测定采用以下指数和方法:

采用 Margalef 物种丰富度指数  $D_{ma}$ , 计算公式为:

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

式中:  $S$  为物种数目;  $N$  为群落中全部物种的个体数。

Simpson 指数:

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

式中:  $N$  为所有物种的个体总数;  $N_i$  为第  $i$  个物种的个体数。

Shannon-Weiner 指数:

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

式中:  $P_i$  为样品中属于第  $i$  种的个体的比例,如样品总个体数为  $N$ ,第  $i$  种个体数为  $n_i$ ,则  $P_i = n_i / N$

$$\text{Pielou 指数: } J = \left( - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \right) / \ln S$$

即  $JH' = H' / H'_{\max}$  (4)

式中:  $H'$  为实际观察的物种多样性指数;  $H'_{\max}$  为最大的物种多样性指数,  $H'_{\max} = \ln S$  ( $S$  为群落中的总物种数)。

## 3 雨水花园植物群落景观综合评价体系构建

### 3.1 雨水花园植物群落景观综合评价指标筛选与确定

为评价雨水花园植物群落配置的适宜性和景观效果,在查阅文献和实地调查的基础上,将 15 个不同植物配置的雨水花园植物群落作为评价对象,运用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)构建雨水花园植物群落景观评价模型进行综合分析,优化提升试点区雨水花园的植物群落配置模式。

雨水花园植物群落景观评价体系构建通过分析前人研究结果、实地调研与专家意见汇总等方式,将雨水花园植物群落景观  $A$  作为评价体系的目标层,将植物生物特性  $B_1$ , 雨水功能性  $B_2$  和景观观赏性  $B_3$  作为雨水花园植物群落景观的评价准则层<sup>[13-15]</sup>。植物生物特性指标层多为定量指标,选择植物多样性  $C_1$ , 植物生物量  $C_2$ , 覆盖度  $C_3$  及根系发达程度  $C_4$  作为生态指标。雨水功能性选择植物促进雨水下渗  $C_5$ , 雨水截留能力  $C_6$ , 污染物吸附净化能力  $C_7$  作为植物生态雨水功能指标。景观观赏性则选择群落配置  $C_8$ , 季相特征  $C_9$ , 环境协调性  $C_{10}$  等作为植物群落美学和景观方面评价因素(表 2)。

表 2 雨水花园植物群落景观综合评价指标体系

Table 2 Comprehensive evaluation index system of plant community landscape in rain gardens

目标层 A	准则层 B	指标层 C
景观水 评价花 园模 植物 A 群 落	植物生物特性 B <sub>1</sub>	植物多样性 C <sub>1</sub>
		植物生物量 C <sub>2</sub>
		根系发达程度 C <sub>3</sub>
		覆盖度 C <sub>4</sub>
	雨水功能性 B <sub>2</sub>	促进雨水下渗 C <sub>5</sub>
		雨水截留能力 C <sub>6</sub>
		污染物吸附净化能力 C <sub>7</sub>
	景观观赏性 B <sub>3</sub>	群落配置 C <sub>8</sub>
		季相特征 C <sub>9</sub>
		环境协调性 C <sub>10</sub>

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。邀请 15 位具有风景园林专业和海绵城市研究背景的专家和高级技术人员对评价指标进行评估赋分,通过对模型中低层的各个因素进行相对于高层重要性的两两比较,得出准则层 B<sub>1</sub> 对目标层 A 的判断矩阵、指标层 C<sub>1</sub>—C<sub>4</sub> 对准则层 B<sub>1</sub> 的判断矩阵、指标层 C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub> 对准则层 B<sub>2</sub> 的判断矩阵、指标层 C<sub>8</sub>—C<sub>10</sub> 对准则层 B<sub>3</sub> 的判断矩阵(表 3—6)。经计算,准则层指标对目标层的权重,指标层对准则层 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> 的权重,以及将准则层对于目标层的权重和指标层对于准则层的权重相乘得出指标层指标对于目标层的权重一致性比率(CR)均小于 0.1,通过了一致性检验。

表 3 准则层 B 对目标层 A 的判断矩阵及指标权重

Table 3 Judgment matrix and index weight of criterion layer B to target layer A

项目	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	W <sub>i</sub>
B <sub>1</sub>	1	3	5	0.648 3
B <sub>2</sub>	1/3	1	2	0.229 7
B <sub>3</sub>	1/5	1/2	1	0.122 0

表 4 指标层 C 对准则层 B<sub>1</sub> 的判断矩阵及指标权重Table 4 Judgment matrix and index weight of index layer C to criterion layer B<sub>1</sub>

项目	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	W <sub>1j</sub>
C <sub>11</sub>	1	2	3	4	0.466 8
C <sub>12</sub>	1/2	1	2	3	0.277 6
C <sub>13</sub>	1/3	1/2	1	2	0.160 3
C <sub>14</sub>	1/4	1/3	1/2	1	0.095 3

### 3.2 雨水花园植物群落景观综合评价指标量化与等级划分

通过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价

值。通过计算得到雨水花园植物群落景观的综合评价指数 CEI(comprehensive evaluation index),根据北京市海绵城市试点区 PPP 项目绩效考核要求,将雨水花园设施植物群落景观划分为 4 个等级,其中 I 级  $90\% \leq CEI \leq 100\%$ ,植物群落整体处于较高水平,植物群落整体生长状况良好,植物物种多样性丰富、搭配协调,群落结构稳定,季相变化明显,能与周边环境相协调;II 级为  $85\% \leq CEI < 90\%$ ,植物群落整体效果良好,物种较为丰富,植物配置合理,具有一定的观赏性,与周围环境较为协调;III 级为  $80\% \leq CEI < 85\%$ ,植物群落整体效果一般,植物配置结构较为合理,植物整体生长情况一般,与周围环境协调性一般;IV 级  $0 \leq CEI < 80\%$ ,表明植物长势较差,群落结构与物种多样性不好,植物配置与季相景观变化单一。

表 5 指标层 C 对准则层 B<sub>2</sub> 的判断矩阵及指标权重Table 5 Judgment matrix and index weight of indicator layer C to criterion layer B<sub>2</sub>

项目	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	W <sub>2j</sub>
C <sub>21</sub>	1	2	3	0.539 6
C <sub>22</sub>	1/2	1	2	0.297 0
C <sub>23</sub>	1/3	1/2	1	0.163 4

表 6 指标层 C 对准则层 B<sub>3</sub> 的判断矩阵及指标权重Table 6 Judgment matrix and index weight of criterion layer C from index layer B<sub>3</sub>

项目	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	C <sub>33</sub>	W <sub>3j</sub>
C <sub>31</sub>	1	3	4	0.625 0
C <sub>32</sub>	1/3	1	2	0.238 5
C <sub>33</sub>	1/4	1/2	1	0.136 5

## 4 结果与分析

### 4.1 雨水花园植物生物特性评价

4.1.1 雨水花园草本植物群落组成 根据本次群落调查和初步统计北京市海绵城市试点建成区雨水花园设施草本植物共 20 科,43 属,45 种,优势科为菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、百合科(Liliaceae)、景天科(Crassulaceae)等。其中种数最多的是菊科和禾本科分别占全部种的 31% 和 15.5%。本土植物占其中的 17 科 26 属 27 种,本土物种牛筋草(*Eleusine indica*)、狗尾草等植物演替生长,种间竞争和谐,这与狗尾草、牛筋草等具有发达的根状茎、繁殖快、耐淹耐旱性强等特点有关<sup>[16]</sup>。

4.1.2 雨水花园植物群落多样性分析 根据生物多样性原理,Margalef 丰富度指数主要反映群落中的物种数量,其数值越高表明该群落中所含植物种类越多<sup>[17]</sup>。由图 1 可以看出,物种丰富度指数介于(1~



2.57)之间,其中社区 A 各样地草本植物丰富度指数最大(2.25~2.57)。道路 A 各样地草本植物丰富度指数最小(1.0~1.2)。Shannon-Wiener 可反映稀有种的多样性指数,不同样地草本植物 Shannon-Wiener 多样性指数与 Margalef 丰富度指数差异性基本相似。社区 A 各样地雨水花园在满足控制径流雨水功能的基础上更注重社区植物配置的观赏性,草本植物多样性更丰富。道路 A 各样地雨水花园主要是控制道路径流雨水,植物配置更多考虑耐污、抗性较

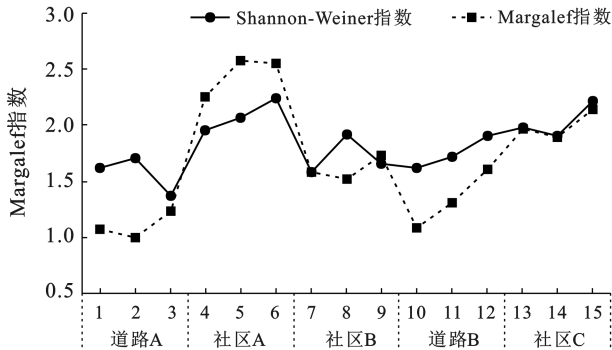


图 1 雨水花园植物群落多样性指数

Fig.1 Diversity index of plant community at rain gardens

4.1.3 雨水花园植物群落生物量和根系发达程度分析 研究表明植物茎叶对雨水具有截留作用,并且与植被层的覆盖程度、植物枝叶的茂密程度、冠幅大小及高度等呈正相关关系<sup>[18]</sup>。由图 2 可以看出,不同样地植物生长情况,每个样方植物生物量是所有植物生物量的总和,道路 B 中样地 10 植物地上生物量最大为 13 668.92 g,主要是芦苇和千屈菜地上生物量显著高于其他植物。植被地上生物量和覆盖度能大大提高雨水花园对雨水的滞留能力。因此道路 B 从植物地上部分生长状况角度分析,其茎叶对雨水滞留和削减能力更具优势。社区 B 中样地 7 植物地下生物量最大为 9 454.25 g,各样地平均植物地下生物量显著高于其他项目。植物地下生物量越大表明植物根系固土效果、吸收水分和土壤养分能力越强。

植物对径流污染的去除了主要是通过土壤和植物根系的过滤、截留和吸附等作用决定的<sup>[19]</sup>。植物根系构型对植被恢复以及土壤抗冲、抗蚀性均具有重要的作用,良好的根系构型是植被生态稳定性和土壤抗冲、抗蚀性的基础<sup>[20]</sup>。植物根系长度、根体积密度、根表面积密度和根生物量密度能更具象地反映根系分布状况和生长状况<sup>[21]</sup>。由图 3 可以看出,不同样地中植物根系生长的情况,根系生长指标对应的是每个样方各种植物的平均值,结果显示:植物根长由大到小排序为:社区 C>社区 B>道路 B>道路 A>社区 A,根表面积由大到小排序为:社区 B>社区 C>道

强的物种,植物种类较为单一。Simpson 指数反映物种集中程度,其数值越大,说明群落内植物数量分布越不均匀,优势种的地位越突出。由图 1 可以看出,社区 A 各样地草本植物 Simpson 指数最高(0.85~0.88),社区 B 各样地草本植物 Simpson 指数最低(0.59~0.72),各样地 Simpson 指数数值整体差异较小,说明优势种不明显。Pielou 指数与 Simpson 指数总体变化趋势相似,说明各样地植物群落的均匀度较一致,群落中各种类植物的分布较均匀。

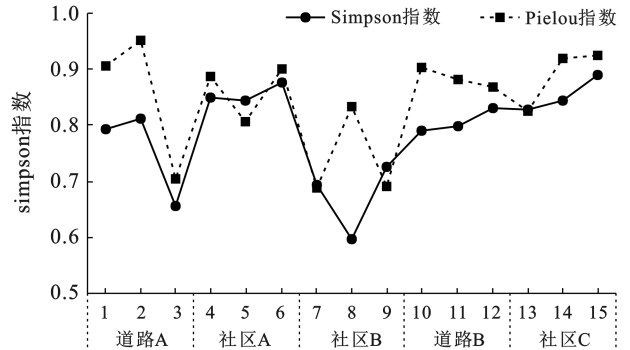


图 2 雨水花园植物地上和地下生物量

Fig.2 Rain garden plant aboveground and underground biomass

路 B>道路 A>社区 A,根体积由大到小排序为:社区 B>社区 A>道路 A>道路 B>社区 C。结合植物地下部分生物量数据,根系表面积及根系体积大的处理组,地下生物量也显著高于其他处理组。

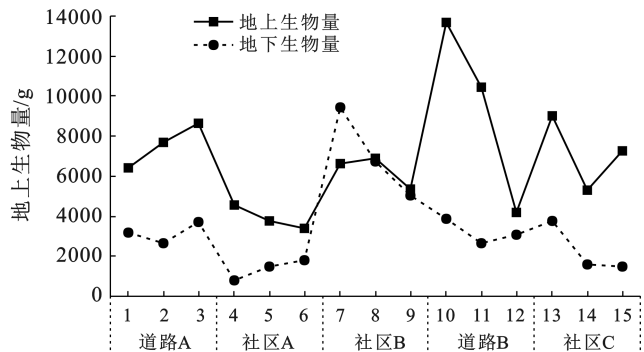
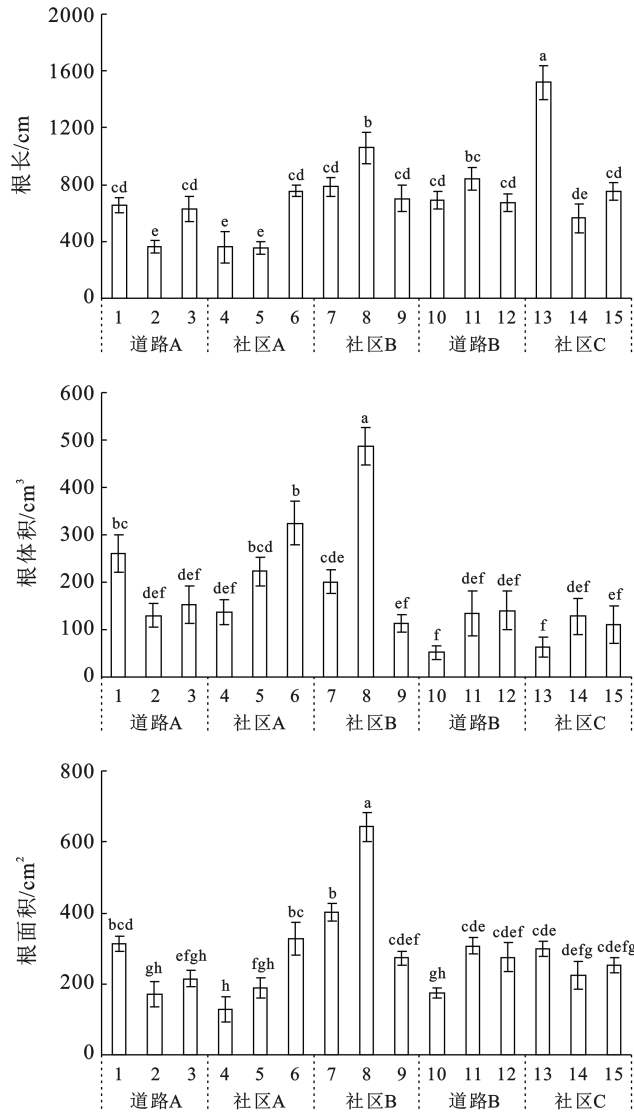


图 2 雨水花园植物地上和地下生物量

Fig.2 Rain garden plant aboveground and underground biomass

通过数据对比分析植物根体积与根系长度和根系表面积不完全一致。社区 B 各样地植物根系发达程度明显高于其他样地,而植物根长和根表面积相对较大的社区 C 植物根体积却明显低于其他 3 个项目,植物根长和根表面积最小的社区 A,根体积却明显高于其他 3 个项目。说明植物根系生长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<sup>[22]</sup>。



注:不同小写字母代表每个雨水花园间差异显著。

图 3 雨水花园植物根系生长情况

Fig.3 Root growth of rain garden plants

表 7 植物生物特性指标综合评价分值

Table 7 Comprehensive evaluation value of plant biological characteristics index

样地	编号	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
道路 A	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
社区 A	4	0.262	0.052	0.024	0.050	0.388
	5	0.268	0.051	0.032	0.038	0.390
	6	0.283	0.051	0.055	0.059	0.447
社区 B	7	0.204	0.157	0.051	0.051	0.463
	8	0.216	0.133	0.089	0.052	0.490
	9	0.213	0.101	0.037	0.050	0.402
道路 B	10	0.215	0.171	0.027	0.046	0.459
	11	0.224	0.128	0.043	0.050	0.445
	12	0.240	0.071	0.038	0.050	0.398
社区 C	13	0.249	0.125	0.053	0.053	0.479
	14	0.252	0.067	0.032	0.049	0.401
	15	0.274	0.085	0.037	0.052	0.448

4.1.4 雨水花园植物生物特性综合评价 雨水花园植物生物特性评价从生物多样性、植物生物量、覆盖度和植物根系 4 个方面进行综合评价,其中,生物多样性是雨水花园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(表 7),社区 B 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;也存在自然演替的本地植物狗尾草、灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*)、堇菜 (*Viola verecumda*) 等。道路 B 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。降雨期间雨水花园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。

#### 4.2 雨水花园雨水功能性与景观观赏性评价

4.2.1 雨水花园植物群落雨水功能性评价 通过定量计算和定性评价打分得出各雨水花园雨水功能性因子的得分。

如表 8 所示,道路 A 各样地植物雨水功能性综合评价指标得分最高。城市道路由于交通活动导致地表径流中含有大量的悬浮颗粒、有机污染物、重金属等,其地表径流中污染物浓度较高<sup>[23]</sup>。植物对地表径流的净化作用,一部分是由植物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<sup>[24]</sup>。道路绿化带内雨水花园以收集、滞蓄道路地表径流雨水为主,结合植物根系发达程度指标分析道路 A 各样地雨水花园植物适应能力强、根系发达、具有较强的净化能力。

4.2.2 雨水花园植物群落景观观赏性评价 如表 8 所示,雨水花园植物群落景观观赏性评价因子得分,社区 A 各 3 个样地植物群落配置评分最高,草本植物种类为 18 种,以禾本科和菊科为主,选择黑心菊、天人菊、松果菊等不同菊类植物混植,也有狼尾草等禾本科植物孤植、丛植、片植,形成新自然主义草本植物景观。

社区 C 各样地植物季相景观和环境协调性综合评分最高,草本植物 20 种,植物物种多样性丰富,高、中、低层植物混合搭配,形成多层次群落空间,花期从 4 月持续至 10 月具有较高的观赏价值。道路 A 各样地景观观赏性评价各项指标较低,道路类雨水花园植物的筛选与配置在注重生态功能同时还需提升植物群落观赏性。

表 8 雨水功能性与景观观赏性指标分值

Table 8 Values of rainwater function and landscape ornamental indexes

样地	编号	促进雨水下渗	雨水截留能力	污染物吸附净化能力	群落配置	季相特征	环境协调性
道路 A	1	0.90	0.94	0.82	0.53	0.73	0.73
	2	0.90	0.87	0.80	0.50	0.64	0.68
	3	0.90	0.88	0.78	0.61	0.76	0.77
社区 A	4	0.78	0.84	0.68	0.90	0.76	0.84
	5	0.78	0.83	0.76	0.95	0.83	0.87
	6	0.78	0.87	0.70	0.93	0.85	0.90
社区 B	7	0.73	0.77	0.55	0.72	0.87	0.92
	8	0.73	0.83	0.56	0.70	0.82	0.87
	9	0.73	0.78	0.58	0.77	0.83	0.89
道路 B	10	0.90	0.87	0.71	0.54	0.82	0.87
	11	0.90	0.90	0.67	0.60	0.89	0.93
	12	0.95	0.85	0.66	0.70	0.92	0.90
社区 C	13	0.90	0.88	0.80	0.83	0.90	0.90
	14	0.90	0.91	0.77	0.81	0.91	0.91
	15	0.90	0.95	0.75	0.87	0.95	0.95

### 4.3 雨水花园植物群落景观综合评价结果与分析

通过对 15 个雨水花园植物群落景观的植物生物特性、雨水功能性和景观观赏性综合评价得出结果与等级,如表 9 所示:属于 I 级植物群落的有 5 个,所占比例为 33.3%;属于 II 级植物群落有 4 个,所占比例为 26.7%;属于 III 级植物群落 5 个,所占比例为 33.3%;属于 IV 级植物群落 1 个,所占比例为 6.7%。由此可见,试点区雨水花园植物群落景观综合评价总体处于较高水平,各样地评价中小区类雨水花园植物群落明显高于道路类雨水花园植物群落景观,这是由于城市道路雨水径流存在严重的面源污染,且集中入渗的水量负荷与污染负荷强大,长期集中入渗使污染物在土壤和地下水中累积,受所在区域环境的影响,导致不同样地植物生长情况、群落构成有所差别<sup>[25-27]</sup>。

## 5 讨论

### 5.1 雨水花园植物群落应用现状总结分析

(1) 北京市海绵城市试点建成区雨水花园草本植物共 20 科 43 属 45 种,优势科主要集中于菊科、禾本科、百合科、景天科等,其中种数最多的是菊科和禾本科分别占全部种的 31% 和 15.5%。本土物种牛筋

草、狗尾草在植物群落演替过程中与引进植物竞争和谐,丰富了植物群落生态多样性。试点区各样地指数数值差异较小,调查各样地草本植物丰富度相似,植物物种集中性较一致。部分样地植物种类和结构模式较为单一,植物种类区分度不大。同时,乡土植物利用率不高,需要注重自然演替的乡土物种筛选与应用,提高植物物种的多样性。

(2) 对各样地植物多样性指数定量分析后构建雨水花园植物群落景观的评价模型,由评价结果得出,试点区雨水花园植物群落景观综合评价总体处于较高水平, I 级雨水花园植物群落比例为 33.3%, II 级雨水花园植物群落比例为 26.7%; III 级雨水花园植物群落比例为 33.3%; IV 级雨水花园植物群落比例为 6.7%。研究结果与龙佳<sup>[28]</sup>关于北京市低影响开发设施的植物景观研究结论一致。社区 C 中雨水花园各样地植物生物特性、雨水功能性和景观观赏性综合指数评价最高。通过调研分析部分样地存在如下问题: ①部分样地植物的选配未将植物生物特性与设施的滞蓄、下渗、净化等功能进行统筹考虑,与场地水文水质、土壤等环境条件不适应,植物设计的科学性有待提升。②道路类雨水花园受所在区域地表径流污染

程度的影响,部分植物抗逆性差,导致不同样地植物生长情况、群落构成有所差别,植物多样性单调。

③各样地景观观赏性评价指标中小区类雨水花园植

物群落明显高于道路类雨水花园植物群落,部分社区雨水花园植物群落结构不稳定、植物配置缺少层次变化,季相变化不突出,景观特色有待提升。

表9 雨水花园植物群落景观综合评价得分及等级

Table 9 Comprehensive evaluation scores and grades of rain garden plant community landscape

样地	编号	植物生物特性	雨水功能性	景观观赏性	综合评价	总分	等级
道路 A	1	0.411	0.087	0.149	0.647	81	Ⅲ
	2	0.400	0.085	0.137	0.622	78	Ⅳ
	3	0.391	0.085	0.164	0.640	80	Ⅲ
社区 A	4	0.388	0.090	0.190	0.668	84	Ⅲ
	5	0.390	0.091	0.186	0.668	83	Ⅲ
	6	0.447	0.092	0.189	0.728	91	I
社区 B	7	0.463	0.090	0.188	0.742	93	I
	8	0.490	0.092	0.184	0.766	96	I
	9	0.402	0.091	0.191	0.684	86	Ⅱ
道路 B	10	0.459	0.083	0.162	0.704	88	Ⅱ
	11	0.445	0.083	0.172	0.700	88	Ⅱ
	12	0.398	0.078	0.182	0.658	82	Ⅲ
社区 C	13	0.479	0.085	0.208	0.772	97	I
	14	0.401	0.085	0.214	0.701	88	Ⅱ
	15	0.448	0.086	0.219	0.753	94	I

## 5.2 雨水花园植物群落景观优化配置策略

在城市雨水花园植物群落景观的营造过程中,结合雨水花园设施的功能属性,应充分发挥植物生物学特性对雨水的削减、拦截、污染物的去除,同时考虑低维护、抗逆性强及提升植物物种多样性和景观特色的特性<sup>[28]</sup>。根据雨水花园植物群落景观评价模型的结果及制约因素有针对性对各样地雨水花园植物群落景观配置提出优化提升策略。

(1) 社区 C。雨水花园植物群落景观综合评价最高,调查样地草本植物 20 种,植物物种多样性丰富。引入植物生长状况良好,多年生草本搭配比例协调,群落结构稳定。不同高度植株均衡叠加,上层有株高大于 1 m 的芦苇、千屈菜,中层有玉簪、八宝景天、马蔺、金鸡菊等,下层地被有株高小于 10 cm 的白车轴草,形成多层次群落空间,花期从 4 月持续至 10 月具有较高的观赏价值。

(2) 社区 B。调查样地草本植物 19 种,雨水花园植物配置属于单层主题式空间结构<sup>[29]</sup>。植物群落高度在 30~80 cm 之间,植物选择同株高相近但花期不同的玉簪、鸢尾等混合搭配,在分散种植的基础上,选择假龙头花、荷兰菊等从体量和花色突出主题植物,在非主体区域布置禾本科草本植物,共同发挥生态功能。满足雨水功能的基础上能提升社区景观环境。

(3) 社区 A。调查样地草本植物 18 种,雨水花

园植物配置采用高低错落的多层分散式空间结构<sup>[29]</sup>。引入草本植物以禾本科和菊科为主,群落前景低矮空间选择阔叶麦冬(*Lorope platyphylla*)、八宝景天等,中景选择黑心菊、天人菊、松果菊丰富物种多样性,背景选择较高植物狼尾草,株高层层递进,竞相开放,丰富群落立面层次。不同高度层次的植被充分利用光照条件,竞相开放,互不遮挡,形成逐渐丰富的动态景观,植物种间通过自然竞争,最终形成相对稳定的有机群落<sup>[26]</sup>。

(4) 道路 B。草本植物群落物种为 14 种,植物物种较丰富,植物整体生长状况一般。群落有株高大于 1 m 的千屈菜,但植物优势种不突出,本土植物对引入植物生长竞争较强。为强化植物群落结构,丰富群落种类,需选择主题物种进行聚集种植,支撑群落结构,同时选择如八宝景天、菊花、萱草等补充中层植物,丰富季相景观,形成动态演替的可持续景观。现状雨水冲刷裸土较多应选择低矮地被如麦冬等均匀散落在植物群落中,使群落景观更加协调稳定。

(5) 道路 A。调查样地草本植物 12 种,植物群落结构简单,植物生长状况一般,植物群落需进一步优化配置,在现有植物配置的基础上将不同高度植株均衡叠加,形成多层次群落空间。由于设施受道路径流污染严重的影响,植物选择抗逆性较强的禾本科植物如狼尾草、细叶芒(*Miscanthus sinensis cv*)等,能够



耐涝、耐旱,净化径流雨水带来的面源污染。

## 6 结论

植物群落是雨水花园设施中重要的构成单位,不同的物种组成、生长特性、配置形式对设施的生态效益和景观价值具有重要影响<sup>[30]</sup>。通过对北京市海绵城市试点建成区雨水花园植物群落进行实地调研,建立雨水花园植物群落景观评价模型对试点区内植物的应用和生长情况进行及时的总结和反馈,有针对性地对各样地植物配置模式提出优化策略。后续还需对建成雨水花园植物的生长情况定期监测、评估植物群落适应性、筛选出优势物种,总结植物群落结构稳定的配置模式与维护管理手段,促进雨水花园在海绵城市建设中的推广应用,同时为北京地区后续雨水花园建设提供参考建议。

### [参 考 文 献]

- [1] Katsifarakis K L, Vafeiadis M, Theodossiou N. Sustainable drainage and urban landscape upgrading using rain gardens. Site selection in Thessaloniki, Greece [J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015(4): 338-347.
- [2] Basdeki A, Katsifarakis L, Katsifarakis K L. Rain gardens as integral parts of urban sewage systems; a case study in Thessaloniki, Greece [J]. *Procedia Engineering*, 2016,162:426-432.
- [3] 马晓菲,石龙宇.基于景感学的景感营造研究:以雨水花园为例[J].*生态学报*,2020,40(22):8167-8175.
- [4] 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[J].*生态学报*,2019,39(19):7311-7321.
- [5] 陈垚,杨威,王健斌,等.雨水生物滞留设施中植被的设计与养护[J].*中国给水排水*,2017,33(12):6.
- [6] 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.
- [7] Ishimatsu K, Ito K, Mitani Y, et al. Use of rain gardens for stormwater management in urban design and planning [J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2017, 13(1):205-212.
- [8] Vineyard D, Ingwersen W W, Hawkins T R, et al. Comparing green and grey infrastructure using life cycle cost and environmental impact: a rain garden case study in Cincinnati, OH [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources*, 2015,51(5):1342-1360.
- [9] 赵寒雪,殷利华.2005—2015 中国十年来雨水花园研究进展[J].*中国园林*,2016,32(10):60-64.
- [10] 杨阳,谌多.西北半干湿地区雨水花园植物应用及适宜性评价[J].*中国农学通报*,2021,37(2):54-60.
- [11] 李聪.西咸新区海绵城市植物选择与配置研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [12] 王佳,王思思,车伍,等.雨水花园植物的选择与设计[J].*北方园艺*,2012(19):77-81.
- [13] 孙明,杜小玉,杨炜茹.北京市公园绿地植物景观评价模型及其应用[J].*北京林业大学学报*,2010,32(S1): 163-167.
- [14] 刘本本,孙清琳,柳鑫,等.基于群决策和层次分析法的雄安新区公园绿地植物综合评价体系构建与物种筛选[J].*应用与环境生物学报*,2022,28(3):770-778.
- [15] 闫霄雯,李俊奇,郭晓鹏.绿色雨水基础设施适应性植物的选择和设计[J].*环境工程*,2020,38(6):170-175,251.
- [16] 张起鹏,王倩,张丽,等.黄河兰州段湿地植物多样性研究[J].*水土保持通报*,2012,32(3):240-244.
- [17] 李运国.南亚热带景观湖泊水、湿生植物筛选研究(I):水、湿生植物丰富度与多样性[J].*草原与草坪*,2021,41(3):137-142.
- [18] 龙佳.北京老城区建筑与小区绿地植被对雨水的截留效应研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
- [19] 郭超.雨水花园集中入渗对土壤和地下水影响的试验研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2019.
- [20] 向师庆,赵相华.北京主要造林树种的根系研究[J].*北京林学院学报*,1981(2):19-32.
- [21] 桑凯新.黄河下游河岸带典型植物根系结构特征及对土壤渗透性的影响[D].河南 郑州:河南农业大学 2020.
- [22] 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.
- [23] 张千千,李向全,王效科,等.城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J].*生态环境学报*,2014,23(2):352-358.
- [24] 霍炜洁,周怀东,刘玲花,等.土壤—植物系统对径流污染物截留的影响因子分析[J].*农业环境科学学报*,2013,32(4):798-804.
- [25] 李怀恩,贾斌凯,成波,等.海绵城市雨水径流集中入渗对土壤和地下水影响研究进展[J].*水科学展*,2019,30(4):589-600.
- [26] 商瑜,刘海龙.华北地区陆生园林植物去除道路径流污染物的实证研究[J].*中国园林*,2021,37(12):116-121.
- [27] 周媛,张立秋,杨龙,等.生物滞留设施运行常见问题及调控措施研究进展[J].*净水技术* 2022,41(9):26-34.
- [28] 龙佳,王思思,冯梦珂,等.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.
- [29] 朱玲,刘一达,王睿,等.新自然主义种植理念下的草本植物群落空间研究[J].*风景园林*,2020,27(2):72-76.
- [30] 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.