

饮用水源人工湿地运行初期水生植物繁衍研究

郑军^{1,2}, 马欣堂³, 周岚⁴, 周庆源³, 汪仲琼^{1,2}, 王为东^{1*}, 尹澄清¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 4. 嘉兴市河道管理处, 嘉兴 314001)

摘要: 研究了大规模的城市饮用水源人工湿地运行初期水生植物繁衍特性和改进措施. 建立了嘉兴市石臼漾生态湿地水生维管束植物名录, 分析了水生植物的种类、分布面积、群落结构和生物量, 旨在揭示石臼漾湿地运行初期其水生植物繁衍情况和群落结构特征, 探讨水生植被的优化管理措施. 石臼漾湿地现存水生维管束植物共计 25 科 41 属 49 种, 远超过初始人工栽植的 13 种. 湿地目前以湿生植物 (20 种) 与挺水植物 (17 种) 为主, 占湿地植物种类总数的 75.5%. 人工栽植以挺水植物为主, 占 69.2%; 而自然繁衍的以湿生植物为主, 占 47.2%. 石臼漾湿地水生植物群落的水平分布属于典型的群丛复合体. 除合萌群落外, 其余群落的优势种均系人工栽植, 衍生物种呈点缀分布, 所占面积份额较小. 湿地不同构造分区因生境不同水生植被存在较大差异. 石臼漾湿地运行初期水生植物生物量采用群丛法计算为 167.7 t. 湿地演替初期植物正朝着多样性较快增加的方向发展, 这为日后植物群落结构的稳定性提供了物质基础. 根据石臼漾湿地运行初期水生植物的繁衍特性, 提出了水生植物系统优化管理的建议, 以期为同类型生态水源地的植被建设提供借鉴.

关键词: 人工湿地; 水生植物; 多样性; 生物量; 群落结构; 演替; 优化管理

中图分类号: X171; Q143 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)08-2247-07

Development Characteristics of Aquatic Plants in a Constructed Wetland for Treating Urban Drinking Water Source at Its Initial Operation Stage

ZHENG Jun^{1,2}, MA Xin-tang³, ZHOU Lan⁴, ZHOU Qing-yuan³, WANG Zhong-qiong^{1,2}, WANG Wei-dong¹, YIN Cheng-qing¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 4. River Management Division of Jiaxing City, Jiaxing 314001, China)

Abstract: The development characteristics and improvement measures of aquatic plants were studied in Shijiuyang Constructed Wetland (SCW) at its initial operation stage. SCW was a large-scale wetland aiming to help relieve the source water pollution in Jiaxing City. A checklist of vascular plants in SCW was built, and species composition, life forms, biomass and association distributions were examined. Our objectives were to examine the diversity and community structure of aquatic plants in SCW at its initial operation stage, and to find out the possible hydrophyte improvement measures. The survey results showed that there were 49 vascular plant species belonging to 41 genera, 25 families in SCW, which greatly exceeded the artificially transplanted 13 species. The life forms of present aquatic plants in SCW were dominated by hygrophilous plants (20 species) and emerged plants (17 species), which accounted for 75.5% of the total number of aquatic plants. The aquatic plants transplanted artificially were dominated by emerged plants (accounted for 69.2%), while those naturally developed were predominated by hygrophilous plants (accounted for 47.2%). The horizontal distribution of aquatic plant community in SCW was mixed in the form of mosaics, which made up typical association complex. Except association *Aeschynomene indica* L., the dominant species of other associations were all those transplanted artificially. The naturally grown species scattered throughout the SCW and only occupied a small percentage. A marked difference was detected on the species and species richness of aquatic plants in different regions of SCW. Biomass of aquatic plant associations in SCW was 167.7 t. SCW has shown a trend of succession heading for quick increase of plant diversity at the primary operation stage. This trend provides a good material base for the future stable community of aquatic plants in SCW. According to the current status of aquatic plants, some suggestions were put forward on the further optimization and utilization of aquatic plant systems in SCW.

Key words: constructed wetland; aquatic plants; diversity; biomass; community structure; succession; optimization and utilization

收稿日期: 2010-09-12; 修订日期: 2010-12-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50639070); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2009CB421103); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07421-001, 2008ZX07101-006-08)

作者简介: 郑军 (1982 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湿地水环境研究与源水生态工程, E-mail: 2008zjzj@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wdwangh@yahoo.com

目前,我国许多城市水源因超富营养化和臭味问题等,极大增加了饮用水制水成本和潜在的安全隐患^[1]. 人工湿地具有低投资、便于维护、净化效果明显等独特优势^[2~4],有望在水源生态净化和预处理中获得应用. 其中水生植物是水生生态系统污染净化的主体^[5,6]. 湿地植物的种类、结构及生态特征等能综合反映湿地生态环境的基本特点、功能特征和演替阶段^[7,8]. 目前,人工湿地用于饮用水源的保护已有相关研究^[9~13],但针对大规模的城市饮用水源生态湿地运行初期水生植物的繁衍特性研究尚未见报道.

浙江省嘉兴市地处南方平原河网地区,受上游客水和自身的污染,呈现典型的水质型缺水. 为解决饮用水水源水质问题,嘉兴市建造了目前国内最大的城市饮用水源生态型水质净化湿地系统——石臼漾生态湿地. 一期工程占地规模 110 hm²,每日提供净化原水 24 万 t,并贮存超过 60 万 t 的水厂备用水. 工程于 2007 年 4 月开工建设,其中北郊河以东

区域于 2008 年 7 月投入试运行,北郊河以西区域于 2009 年 1 月投入试运行,目前整个湿地系统运行良好. 有关石臼漾湿地的具体构成情况参见文献^[14]. 为揭示石臼漾湿地水生植物现状,开展了运行初期全区范围内水生植物繁衍特性研究,包括湿地水生植物的种类、分布面积、群落结构和生物量等,并提出了石臼漾湿地水生植物优化管理建议,以期在城市饮用水源人工湿地的植被建设提供参考.

1 材料与方法

2009 年 9 月对湿地全区范围内的水生植物进行了系统普查和样本采集. 植物种类鉴定和分类学研究、数据库建立以及群落结构分析等工作于 2009 年 9~12 月完成. 水生植物的种类鉴定参考相关图志^[15~17]. 为便于描述和交流,对人工湿地构造分区进行了划分(图 1),北郊河以西的区域(预处理区和湿地根孔生态净化区)为西区,北郊河以东分为 3 个区域,分别为:东升西路以北的区域(湿地根孔生

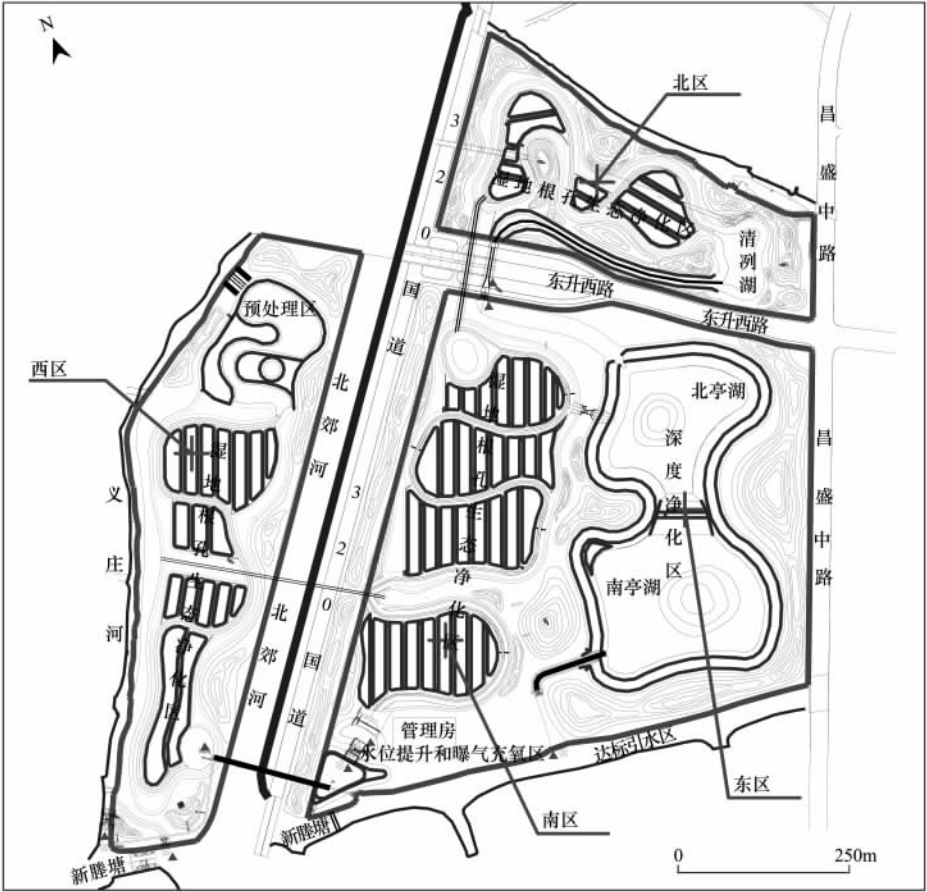


图 1 嘉兴石臼漾湿地平面布置和分区示意

Fig. 1 Plan view and zoning diagram of Shijiuyang Wetland in Jiaxing City

态净化区和清冽湖)为北区,东升西路以南的湿地根孔生态净化区以及水位提升和曝气充氧区为南区,东升西路以南的深度净化区(北亭湖、南亭湖)以及达标引水区为东区.根据路线调查法和典型调查(各植物床)相结合的原则,估算各水生植物群落的分布面积(m²).在各植物群落中划出 2 m×2 m 面积的样方,按种计算植株数目,选取其中有代表性的 10~30 株称重,取平均值换算出群落的单位面积生物量(kg·m⁻²).全湿地水生植物生物量用群丛法计算^[18,19].

2 结果与分析

2.1 石臼漾湿地水生植物的种类组成和科属分布

2009 年 9 月,按上述分区在石臼漾湿地范围内

全面调查了各区块的水生植物.结果显示,湿地共有水生维管束植物 49 种,隶属于 25 科 41 属,按科计,禾本科(11 种)最多,占水生维管束植物总数的 22.4%,莎草科(4 种)、豆科(4 种)、菊科(4 种)次之.详细的植物名录见表 1.与人工栽植的 13 种相比,水生植物种质资源库已有较大扩充.人工栽植的 13 种中禾本科占 4 种,其余 9 种属于其它 9 科,每科各 1 种.自然繁衍的 36 种在科和属的分布为:禾本科 7 种,豆科和菊科各 4 种,蓼科、莎草科和水鳖科各 3 种,柳叶菜科 2 种,其余 10 种分属 10 科,每科各 1 种;稗属、蓼属和莎草属植物最多,每属各 3 种,丁香蓼属和豇豆属各 2 种,其余 23 种归于其它 23 个属.

表 1 嘉兴石臼漾湿地维管束植物名录

Table 1 Vascular plant checklist of Shijiuyang Wetland in Jiaxing City

科	属	种	科	属	种
茨藻科	茨藻属	茨藻 <i>Najas marina</i> L.	鸢尾科	鸢尾属	鸢尾 <i>Iris tectorum</i> Maxim.
浮萍科	紫萍属	紫萍 <i>Spirodela polyrrhiza</i> (L.) Schleid.	泽泻科	慈姑属	慈姑 <i>Sagittaria trifolia</i> L. var. <i>sinensis</i> (Sims) Makino
禾本科	稗属	稗 <i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	豆科	大豆属	野大豆 <i>Glycine soja</i> Sieb. et Zucc.
禾本科	稗属	芒稗 <i>Echinochloa colonum</i> (L.) Link	豆科	豇豆属	无中名 <i>Vigna nepalensis</i> Tateishi & Maxted
禾本科	稗属	长芒稗 <i>Echinochloa caudata</i> Roshev.	豆科	豇豆属	长叶豇豆 <i>Vigna luteola</i> (Jacq.) Benth.
禾本科	狗尾草属	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	豆科	合萌属	合萌 <i>Aeschynomene indica</i> Linn.
禾本科	菰属	菰 <i>Zizania caduciflora</i> (Turcz.) Hand. -Mazz.	葫芦科	盒子草属	盒子草 <i>Actinostemma lobatum</i> (Maxim.) Maxim.
禾本科	芦苇属	芦苇 <i>Phragmites australis</i> Trin.	金鱼藻科	金鱼藻属	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i> L.
禾本科	芦竹属	芦竹 <i>Arundo donax</i> L.	菊科	苍耳属	苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i> Patrín.
禾本科	芒属	荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i> (Maxim.) Benth.	菊科	鬼针草属	狼把草 <i>Bidens tripartita</i> L.
禾本科	千金子属	千金子 <i>Leptochloa chinensis</i> (L.) Nees	菊科	鳢肠属	鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.
禾本科	雀稗属	雀稗 <i>Paspalum thunbergii</i> Kunth	菊科	紫菀属	钻形紫菀 <i>Aster subulatus</i> Michx.
禾本科	水禾属	水禾 <i>Hygroryza aristata</i> (Retz.) Nees	蓼科	蓼属	杠板归 <i>Polygonum perfoliatum</i> L.
美人蕉科	美人蕉属	美人蕉 <i>Canna indica</i> L.	蓼科	蓼属	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> Linn.
莎草科	莎草属	聚穗莎草 <i>Cyperus glomeratus</i> Linn.	蓼科	蓼属	酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i> Linn.
莎草科	莎草属	疏穗莎草 <i>Cyperus distans</i> Linn. f.	柳叶菜科	丁香蓼属	毛草龙 <i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) Raven
莎草科	莎草属	碎米莎草 <i>Cyperus iria</i> Linn.	柳叶菜科	丁香蓼属	水龙 <i>Ludwigia adscendens</i> (L.) Hara
莎草科	水葱属	水葱 <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> (C. C. Gmel.) Palla	千屈菜科	千屈菜属	千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i> L.
水鳖科	黑藻属	黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle	大麻科	葎草属	葎草 <i>Humulus scandens</i> (Lour.) Merr.
水鳖科	苦草属	苦草 <i>Vallisneria natans</i> (Lour.) Hara	睡莲科	水盾草属	水盾草 <i>Cabomba caroliniana</i> Gray
水鳖科	水鳖属	水鳖 <i>Hydrocharis dubia</i> (Bl.) Backer	苋科	莲子草属	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.) Griseb
天南星科	菖蒲属	菖蒲 <i>Acorus calamus</i> L.	小二仙草科	狐尾藻属	粉绿狐尾藻 <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde.
香蒲科	香蒲属	香蒲 <i>Typha orientalis</i> Presl	荨麻科	苕麻属	苕麻 <i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaud
眼子菜科	眼子菜属	眼子菜 <i>Potamogeton distinctus</i> A. Bennett	苹科	苹属	苹 <i>Marsilea quadrifolia</i> L.
雨久花科	凤眼莲属	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms. Laub.			

2.2 石臼漾湿地水生植被面积与生活型分布

目前,石臼漾湿地水生植被面积约占湿地水域(含植物床)面积的 28.9%,占整个湿地面积(包括水域和陆地部分)的 16.6%.就湿地运行初期(1.5 a)而言,水生植被覆盖率相对较高.石臼漾湿地水生植物生活型分布列于表 2.现有水生植

物按生活型划分,湿生植物、挺水植物种类较多,分别为 20 种和 17 种,两者相加占湿地植物种类总数的 75.5%;而沉水植物、漂浮植物种类相对较少,二者之和占湿地植物种类总数的 22.4%.按水生植物的来源划分,人工栽植植物的生活型分布分别为:挺水植物 9 种,占 69.2%,湿生植物 3 种,

占 23.1% , 漂浮植物 1 种 ; 自然繁衍植物的生活型分布分别为 : 湿生植物 17 种 , 占 47.2% , 挺水植物 8 种 , 占 22.2% , 沉水植物 5 种 , 占 13.9% , 漂浮植

物 5 种 , 占 13.9% , 浮叶植物 1 种 . 这说明人工栽植以挺水植物为主 , 而自然繁衍的水生植物中湿生植物占据绝对优势 .

表 2 石臼漾湿地水生植物生活型分布
Table 2 Life form distributions of aquatic plants in Shijiuyang Wetland

生活型	湿生植物	挺水植物	浮叶植物	沉水植物	漂浮植物	总计
种类数目	20	17	1	5	6	49
所占比例 / %	40.8	34.7	2.0	10.2	12.3	100

2.2.1 湿生植物

石臼漾湿地现存水生植物中湿生植物种类最多 , 共 20 种 , 占水生维管束植物总数的 40.8% . 湿地南区和北区湿生植物主要有豆科的野大豆、合萌、蓼科的酸模叶蓼和杠板归等 . 其中豆科的合萌属于自然生长繁衍的当地植物 , 生长茂盛 , 平均株高达 2.7 m , 平均株径 8.2 mm . 湿地西区的湿生植物种类较南区和北区更为丰富 , 有莎草科的疏穗莎草、碎米莎草、蓼科的酸模叶蓼 , 还有禾本科的芦竹和菊科的鳢肠等 .

2.2.2 挺水植物

就整个石臼漾湿地而言 , 目前的水生植被主要由挺水植物组成 , 挺水植物面积约占水生植被面积的 85.0% , 种类数目占全部水生植物的 34.7% . 南区和北区分布较广的优势群落为芦苇群落、香蒲群落和水葱群落 , 在根孔生态净化区形成较大面积的群落 , 约占 60.0% ~ 70.0% ; 群落斑块中点缀的次优势植物种有菖蒲、菰、慈姑等 , 其面积约占 10.0% ~ 15.0% . 2008 年 5 ~ 6 月种植的芦苇平均株高达 2.7 m , 平均株径达 7.6 mm , 期间于 2008 年秋冬之交对湿地植物进行了全面刈割 . 西区湿地内分布较广的为芦苇、鳢尾和菰群落 , 点缀的次优势植物种有香蒲、水葱和稗 (自然衍生) 等 . 2009 年 5 ~ 6 月种植的芦苇 , 在生长近半年时其平均株高达 1.1 m , 平均株径达 4.5 mm , 长势良好 .

2.2.3 浮叶植物

石臼漾湿地自然繁衍出 1 种浮叶植物 , 即眼子菜 , 隶属眼子菜科 , 眼子菜属 , 多年生浮水草本 .

2.2.4 沉水植物

石臼漾湿地现有沉水植物全部发现于湿地西区 . 沉水植物主要有金鱼藻群落和水盾草群落 , 其余沉水植物如黑藻、苦草、茨藻等在湿地引水河道——亦庄河与西区的砾石堵头附近仅有零星分布 .

2.2.5 漂浮植物

漂浮植物主要有水鳖、水禾、水龙和凤眼莲群落 , 主要分布在湿地西区、南区和北区植物床-沟壕系统的局部静水区域 , 而南区内宽度 20 m 左右的大

沟因流速快 , 除部分沟段的岸边带分布有少量水龙群落和凤眼莲群落外 , 基本无漂浮植物分布 . 漂浮植物群落多为单优种 , 伴生有零星的苹、紫萍等 .

综上所述 , 石臼漾湿地现有水生植被中伴生种类较少或为单优群落 . 水生植物分布呈人工配置块状或条状样式 . 单个植物床上水生植物群丛大致上呈现“连续性”分布 , 主要水生植物群丛之间基本仍遵从人工栽种时所设置的“嵌式分布” (mosaic distribution) , 而在不同植物床之间的水生植物群丛呈“间断性”分布 . 但是 , 相对于湿地运行初期而言 , 部分地方如湿地西区植物床-沟壕系统的局部静水区域中可以见到自岸边向水体方向由湿生植物、挺水植物、浮叶植物、沉水植物和漂浮植物组成的空间连续分布格局 , 即水生植物群落的成层现象 , 湿地水生植物良性演替的趋势已初见端倪 .

2.3 石臼漾湿地水生植物主要群丛类型和群丛生物量

嘉兴石臼漾湿地建成运行 1.5 a , 湿地内水生植物群落分布较不均匀 , 如果按断面法计算则每一个采样点的数据均对整个湿地生物量的计算产生影响 , 结果导致总生物量的偏高 , 故采用群丛法来计算生物量 . 另外 , 湿地内浮叶植物、漂浮植物与沉水植物的种类、分布面积极少 , 因此石臼漾湿地水生植物群落生物量主要统计挺水植物和湿生植物 .

根据植被分类原则^[20] , 把层片结构相同 , 各层片优势种或共优种相同的植物群落联合为群丛 . 石臼漾湿地水生植物群丛主要分成 7 种类型 , 其优势种和常见伴生种列于表 3 . 除合萌群落外 , 其余群落的优势种均系人工栽植 , 衍生物种呈点缀分布 , 所占面积份额较小 . 与部分自然湿地相似 , 湿地水生植物群落的水平分布具有明显的复合性特征 , 属典型的群落复合体 , 亦称群丛复合体 (association complex) . 按接受统计的水生植物群丛生物量 (表 4) 从大到小排列为 : 合萌-芦苇群丛、芦苇群丛、合萌群丛、芦苇-菰群丛、芦苇-香蒲群丛、菰群丛、芦苇-鳢尾群丛 . 湿地净化的主体是根孔生态净化区 , 由植物床-沟壕-

根孔结构系统组成,植物床是水生植物赖以生长发育的主要载体.通过抽样法对湿地 61 个植物床中的 29 个植物床进行群丛分布统计,所调查的水生植物

群丛面积为 $5.5 \times 10^{-2} \text{ km}^2$,占全湿地面积(不包括湿地陆地部分)的 8.8%,水生植物生物量采用群丛法计算为 167.7 t.

表 3 石臼漾湿地主要水生植物群丛的优势种和常见伴生种

Table 3 Dominant species and accompanying species of aquatic plant associations in Shijiuyang Wetland

群丛名称	优势种	常见伴生种
菰群丛	菰	芦苇
合萌-芦苇群丛	合萌、芦苇	水葱、喜旱莲子草
合萌群丛	合萌	芦苇、香蒲、水葱、莎草、蓼、喜旱莲子草
芦苇-合萌群丛	芦苇、合萌	芦竹、水葱、菰、喜旱莲子草、凤眼莲
芦苇群丛	芦苇	合萌、香蒲、鸢尾、莎草、稗、喜旱莲子草、凤眼莲
芦苇-香蒲群丛	芦苇、香蒲	稗、荻、喜旱莲子草、凤眼莲、水鳖
香蒲群丛	香蒲	菰、喜旱莲子草

表 4 石臼漾湿地主要水生植物群丛分布面积和生物量(鲜重)

Table 4 Area and biomass of aquatic plant associations in Shijiuyang Wetland (fresh weight)

名称	面积/m ²	覆盖率/%	单位面积生物量 /kg·m ⁻²	群丛生物量/kg	群丛生物量比例 /%
合萌群丛	6 183.9	8.8	6.4	39 267.5	23.4
芦苇群丛	18 593.8	26.4	2.2	40 720.5	24.3
菰群丛	4 383.8	6.2	2.0	8 855.2	5.3
合萌-芦苇群丛	11 593.6	16.4	8.1	46 686.9	27.8
芦苇-菰群丛	6 767.3	9.6	2.1	14 390.1	8.6
芦苇-香蒲群丛	3 141.5	4.5	3.2	9 919.2	5.9
芦苇-鸢尾群丛	3 934.8	5.6	2.0	7 869.6	4.7
总计	54 598.7	77.4	3.1	167 709.0	100.0

3 讨论

3.1 石臼漾湿地运行初期水生植物繁衍特性及其演替趋势

石臼漾湿地运行初期植物多样性增加较为显著,从原先栽植的 13 种变为 49 种,共增加了 36 种(2.77 倍),衍生植物中湿生植物为 17 种,约略相当于衍生的沉水植物(5)、漂浮植物(5)、挺水植物(8)种类数的总和.石臼漾湿地项目区历史上原以种植水稻为主,在湿地构筑之前主要栽植果树及绿化树苗,并有少量棉花、菜地,地块植被生长茂盛.这样的背景土壤以及在湿地构筑时引入的少量周边土壤(主要来自河道疏浚以及邻近沼泽地带)为湿地建成后的植物演替提供了物质基础.同时,湿地入水亦可能带入少量浮叶植物、沉水植物、漂浮植物等植物种源.但前期的土壤物质基础决定了湿地的衍生植物物种以湿生植物为主.

此外,湿地主要水生植物群落中除合萌群落外,其余群落的优势植物物种均为人工栽植种.衍生的植物种类多呈点缀分布,主要分布在栽植植物斑块之间或周缘,其面积较小.但是,在湿地运行初期即自然繁衍了许多种类水生植物,并且植物床-沟壕系

统的局部静水区域出现了水生植物群落的成层现象,这暗示在湿地演替初期植物正朝着多样性较快的方向增加,这样一种态势为日后湿地植物群落结构的稳定提供了很好的物质基础.以往研究表明,太湖湖滨带在生态恢复 5 a 后生态恢复过程完成近半,15 a 后系统已基本上恢复到自然湿地状态,初期的演替过程对后期的恢复进程有着重要的意义^[21].实践证明,生态湿地构建初期其植物组成、分布格局基本上能够决定最终的稳定状态,这在天津泰达生态型水源地的运行过程中已经得到验证.石臼漾湿地面积巨大且四周由自然河道及 320 国道线等干线隔离,核心区域受人为扰动较少,再加上生态湿地构建之初所创造的各项有利条件,加速了其自然演替的进程.因此,在湿地运行初期,水生植物系统的初期演替就已经开展,当然演替的稳定阶段需要十年甚至数十年才能达到,这要求在石臼漾湿地日后运行过程中作进一步的跟踪研究.

3.2 石臼漾湿地不同构造分区水生植被及生境差异分析

石臼漾湿地南区、北区植物分布密集,生物量所占比例高,但植物种类较单一.其中豆科植物合萌(俗称田皂角),属于自然繁衍的本土植物,其根茎

长有根茎瘤,自身具固氮能力^[22],在运行初期的湿地内生长茂盛,与芦苇群落处于竞争关系,总体竞争趋势朝单一化发展。湿地西区较南区、北区水生植物更丰富,湿地内植物床与沟壕相接的边缘地带、浅水沼泽边缘集中了大多数的植物种,形成以禾本科、莎草科或菊科植物为主的小群落。

石臼漾湿地规模达 110 hm²,是目前国内最大的城市饮用水源人工湿地,不同的构造分区其生境条件差异丰富多样。其一,湿地西区水动力条件的相对稳定使多种水生植物得以生存和繁衍^[23]。湿地西区距离进水河道——亦庄河最近,且属于自流式进水,内部水位稳定,最快流速 5~10 cm/s;而湿地南区、北区人工控制水泵启闭属于动力提水,水流流速最快可达 100~120 cm/s,并受石臼漾自来水厂供水波动影响,湿地内部水位变动幅度较大,事实上,湿地运行调控也正是利用水位的昼夜波动、具有一定的变幅(如 40 cm)来提高湿地净化水质的功效,变动的水位与快的流速这些大的人为干扰使湿地南、北区的生境条件较不稳定。其二,西区湿地栖息地、底质等小生境的多样性有利于各种生态位的植物生长。据观察,西区湿地中水生植物种类最为丰富的地点是植物床-沟壕系统的静水区域的砾石堵头两侧,以及植物床与沟壕四周相接的边缘地带。这些区域水位深浅不一,生长介质丰富多样,水文交换作用频繁,为水生植物创造了复杂多样的生境条件^[24]。其三,湿地不同构造分区水体水质指标差异显著,尤其是溶解氧(DO)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)等水质指标沿湿地水流方向空间变化明显,这些要素都构成了石臼漾湿地生境条件的差异,并最终引起水生植物的繁衍差异^[25]。

3.3 石臼漾湿地水生植物优化管理建议

根据石臼漾湿地水生植被的现状,结合湿地的演替方向和生态型水源地的目标需求,提出石臼漾湿地水生植物下一步的优化管理建议:①南区、北区合萌-芦苇群落为主的植物床内,人为清除掉一定量的合萌,修补整理湿地植物床体,补植相应区域的芦苇,尽量培育芦苇成为植物床上的优势植物,以更好地发挥水源生态湿地的水质净化功能;②根据湿地不同功能区不同单元的水位深度选择种植不同种类的沉水植物。在湿地西区以自然繁衍为主,加以人工辅助,在已有沉水植物金鱼藻、黑藻和茨藻等自然群落的基础上,适当引进更多种净污能力较好的沉水植物、漂浮植物和浮叶植物,如菹草、萍蓬草、睡莲和芡实等,引进后可以优化群落结构,丰富湿地西区水

生植物多样性;湿地南区和北区以人工试植为主,诱导繁衍,重点将西区发现的沉水植物先锋物种苦草和金鱼藻等引入南区和北区,先在植物床-沟壕系统内的静水浅水区域进行试植,待生长稳定后诱导繁衍至湿地更大范围;③扩大多种水生植物的种植面积。目前,石臼漾湿地已经引种的许多水生植物如菹蒲、香蒲和水生鸢尾等植物的数量较少,具备较强净污能力的沉水植物如苦草、黑藻和金鱼藻等也仅有数量较少的自然群落,建议下一步进行较大面积的人工栽植。

4 结论

(1)石臼漾湿地是目前国内最大的城市饮用水源生态湿地,运行初期调查发现水生维管束植物共计 25 科 41 属 49 种,远超过初始人工栽植的 13 种。湿地目前以湿生植物与挺水植物为主,占湿地植物种类总数的 75.5%。人工栽植的水生植物以挺水植物为主,而自然繁衍的以湿生植物占绝对优势。

(2)湿地不同构造分区因水位、流速、生长介质等生境条件的不同使水生植被存在较大差异。在水平分布上,石臼漾湿地水生植物群落呈现典型的群丛复合体。

(3)石臼漾湿地水生植物群丛主要可分成 7 种类型,除合萌外,其余群丛的优势种均系人工栽植,衍生物种呈点缀分布。湿地水生植物生物量采用群从法计算为 167.7 t,其中合萌-芦苇群丛的生物量最大。

(4)提出石臼漾湿地水生植物优化管理建议,包括抑制合萌生长,培植芦苇成为湿地植物床的优势植物,引种净污能力较好的先锋沉水植物如苦草、菹草等,进一步扩大多种水生植物的种植面积。

致谢:本研究中水生植物种类鉴定得到中国科学院植物研究所陈艺林研究员、李安仁研究员、梁松筠研究员、朱相云研究员、杜玉芬高级实验师等的大力帮助,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 李勇,张晓健,陈超.我国饮用水中嗅味问题及其研究进展[J].环境科学,2009,30(2):583-588.
- [2] Kadlec R H, Knight R L. Treatment Wetlands [M]. Boca Raton, Florida: Lewis publishers, 1996. 40-43.
- [3] Solano M L, Soriano P, Ciria M P. Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(1): 109-118.
- [4] 刘家宝,莫凤鸾,雷志洪,等.垂直流人工湿地系统保护饮用

水源的实例[J]. 给水排水,2005,31(4):10-13.

[5] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 11-17.

[6] 白峰青,郑丙辉,田自强. 水生植物在水污染控制中的生态效应[J]. 环境科学与技术,2004,27(4):99-100.

[7] Cardinale B J, Palmer M A, Collins S L. Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecific facilitation [J]. Nature, 2002, 415(6870): 426-429.

[8] 石晓丹,阮晓红,邢雅囡,等. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2008,29(11):2999-3008.

[9] 秦伯强,胡维平,刘正文,等. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报,2007,27(1):5-12.

[10] Kadlec R H, Knight R L, Vymazal J, *et al.* Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation [M]. US: IWA Publishing, 2000. 67-85.

[11] Ayaz S C, Akca L. Treatment of wastewater by constructed wetland in small settlements [J]. Water Science and Technology, 2000, 41(1): 69-72.

[12] Ayaz S C, Akca L. Treatment of wastewater by natural systems [J]. Environment International, 2001, 26(3): 189-195.

[13] 陈洪斌,梅翔,高廷耀,等. 受污染源水的生物预处理中试研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2001,29(10):1240-1245.

[14] 尹澄清,苏胜利,张荣斌,等. 以河网作为城市水源的污染问题和湿地净化[J]. 环境科学学报,2010,30(8):1583-1586.

[15] 颜素珠. 中国水生高等植物图说[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 335.

[16] 中国科学院武汉植物研究所. 中国水生维管束植物图谱[M]. 武汉: 湖北人民出版社,1983. 683.

[17] 孙祥钟. 中国植物志[M]. (第八卷). 北京: 科学出版社, 1992.

[18] 潘文斌,蔡庆华. 保安湖莲群丛分布格局分形特征的初步研究[J]. 水生生物学报,2000,24(5):405-411.

[19] 李峰,谢永宏,杨刚,等. 白洋淀水生植被初步调查[J]. 应用生态学报,2008,19(7):1597-1603.

[20] 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980. 151-152.

[21] 卢金伟. 太湖梅梁湾滨湖区典型退化湿地恢复过程研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2006.

[22] 赖志强. 美国合萌的特征特性与栽培利用[J]. 广西农业科学,1995,17(5):233-234.

[23] 朱宜平,张海平,李飞鹏,等. 水动力对浮游生物影响的围隔研究[J]. 环境科学,2010,31(1):69-75.

[24] Polishchuk L V. Contribution analysis of disturbance-caused changes in phytoplankton diversity [J]. Ecology, 1999, 80(2): 721-725.

[25] 孙金水,Wing-Hong W O,戴纪翠,等. 深圳湾海域浮游植物的生态特征[J]. 环境科学,2010,31(1):63-68.