嘉兴市石臼漾水源生态湿地运行过程中植物多样性研究

沈亚强[1],魏宏斌[2],程旺大[1]*,张红梅[1],王为东[3],尹澄清[3]

(1. 浙江省嘉兴市农业科学研究院,嘉兴 314016; 2. 嘉兴市水利投资有限公司,嘉兴 314000; 3. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要:浙江省嘉兴市石臼漾水源生态湿地是目前全国最大的水源保护湿地之一. 为了解已实际运行 2.5 a 的石臼漾水源生态湿地植被现状,于 2010 年 10~11 月,采用样地法和样方法对湿地植被进行了系统调查,以期为水源生态湿地植被管理提供理论支持. 对群落的物种组成、多样性变化以及生物质生产量进行了分析. 共采集到湿地植物 70 种,隶属于 28 科 62 属. 其中湿生 26 种,中生植物 20 种,挺水植物 14 种,沉水植物 4 种,漂浮植物 6 种. 与运行初期相比,湿地植物种类显著增加,由原先 15 种增加至 70 种. 采用 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数作为物种多样性指标,分析了湿地湖岸带植物群落物种多样性的空间分布特点,结果显示东升路以南湿地湖岸带区域植物物种多样性(Simpson 指数为0.468 3,Shannon-Wiener 指数为0.835 2)高于北郊河以西湿地湖岸带区域(Simpson 指数为0.357 6,Shannon-Wiener 指数为0.660 4). 对湿地植被的数量特征进行了分析,结果表明东升路以南湿地根孔区植物长势好于北郊河以西区域,而北郊河以西区域湖岸带植被更加丰富. 根孔生态净化区植被平均生物量(干重)约为 1.73 kg·m^{-2},植被总面积约为 9.12×10^4 m^2,估算总生物量(干重)约为 157.8 t; 湖岸带区域植被平均生物量(干重)约为 0.83 kg·m^{-2},植被总面积约为 3.75×10^4 m^2,估算总生物量(干重)约为 31.1 t.

关键词:城市水源生态湿地; 根孔生态净化区; 群落类型; 密度; 生物量

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)10-2883-08

Diversity of Plant in Jiaxing Shijiuyang Ecological Wetland for Drinking Water During Operation

SHEN Ya-qiang[1], WEI Hong-bin[2], CHENG Wang-da[1], ZHANG Hong-mei[1], WANG Wei-dong[3], YIN Cheng-qing[3]

(1. Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Zhejiang Province, Jiaxing 314016, China; 2. Jiaxing Water Resources Investment Co. Ltd., Jiaxing 314000, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The Shijiuyang ecological wetland for drinking water of Jiaxing City, Zhejiang Province is one of the biggest constructed wetlands for water resource protection in China. To ensure a deep understanding of the present status of the wetland vegetation of Shijiuyang ecological wetland which has been run for 2.5 years and provide support for the vegetation management of ecological wetland, systematic investigation was carried out by using plot method and quadrat method in October to November, 2010. The species composition, dynamics of plant diversity and the biomass production during operation were analyzed. Altogether 70 species belonging to 28 families and 62 genera were recorded. Among them, there were 26 wetland plants, 20 mesophytes, 14 emergent, 4 submerged, 6 floating ones. Compared with the preliminary stage, the species numbers of wetland plants increased significantly from 15 species to 70 species. The spatial pattern of riparian species diversity was examined by adopting the Simpson index and Shannon-Wiener index as species diversity indices. The results showed that the riparian species diversity was higher in the west of the Beijiaohe river (Simpson index = 0.468 3, Shannon-Wiener index = 0.835 2) than that in the south of the Dongsheng Road (Simpson index = 0.357 6, Shannon-Wiener index = 0.660 4). The analyses of quantitative characteristics of wetland vegetation showed that the plants in the root-channel purification zone in the south of the Dongsheng Road grew better than those in the west of the Beijiaohe river. With regard to the riparian vegetation, the riparian plants in the west of the Beijiaohe river were more abundant. The mean biomass production (dry weight) in the root-channel purification zone was 1.73 kg·m^{-2} and the total area was 9.12×10^4 m^2, so the total biomass production was estimated to be 157.8 t. In the same way, the mean riparian vegetation biomass production (dry weight) was 0.83 kg·m^{-2} and the total vegetation area was 3.75×10^4 m^2, so the total riparian vegetation biomass production (dry weight) was estimated as 31.1 t.

Key words: ecological wetland for city drinking water; root-channel purification zone; community type; density; biomass

收稿日期:2010-12-13;修订日期:2011-02-21

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07421-001); 浙江省重大科技专项社会发展重点项目(2006C13057); 浙江省嘉兴市科技局项目(2007AZ1013)

作者简介:沈亚强(1984~),男,硕士,助理农艺师,主要研究方向为水生植物生态学,E-mail: shenyaqiang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chwd228@163.com

饮用水水质安全保障的关键是水源保护和修复[1~3]. 饮用水源地保护对于减少饮用水处理成本和提高饮用水质量具有至关重要的作用[4,5]. 湿地是水陆相互作用形成的独特生态系统,是重要的生存环境和自然界最富生物多样性的生态景观之一[6~8]. 健康的湿地是水-土-植物-微生物的耦合系统,具有很强的净化功能,因此被广泛应用于水源地保护和水体生态修复. 湿地植被是湿地生态系统的核心,湿地植被的生态特征综合反映了湿地生态环境的基本特点和功能特性[9~13]. 目前,在人工湿地研究中,对植物的研究是一个重点[14,15],然而,关于人工湿地中植物的研究多集中于植物的净化作用上[16~21],对于人工湿地植物多样性及群落特征研究相对较少. 而对植物多样性及群落特征的研究对于人工湿地的构建与长期运行具有重要指导作用.

嘉兴市位于长江三角洲南翼杭嘉湖平原,属于典型的江南平原河网地区. 石臼漾水源生态湿地位于嘉兴市区西北角、北郊河两侧. 该生态湿地工程总面积 1.087×10^6 m^2,是全国最大的水源保护湿地之一. 工程于 2007 年 1 月开工建设,2008 年 7 月大部分建成并投入试运行,2009 年 4 月全部建成,6 月正式投入运行. 该工程为我国微污染水源水质改善提供了成功范例,所取得的成果具有很好的应用前景. 但由于工程本身处于运行初期,国内外可供借鉴的经验也较少,因此仍存在一些问题需要进行深入研究分析. 特别是对于湿地植物,缺乏系统的研究. 鉴于此,本研究对石臼漾生态湿地植被进行了调查分析,相关结果有望为水源生态湿地植被管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及采样点的设置

石臼漾水源生态湿地位于嘉兴市区西北角,北郊河两侧,东侧部分介于新 320 国道与昌盛路之间,南至新塍塘,北至雁泾港,总面积 1.087×10^6 m^2. 工程主要由 5 个功能区组成,这 5 个功能区块分别为:Ⅰ预处理区,Ⅱ高新技术应用区,Ⅲ湿地根孔生态净化区,Ⅳ深度净化区以及Ⅴ达标引水区. 一期工程主要由预处理区(入塘系统)、湿地根孔生态净化区、深度净化区(二湖系统)、达标饮水区和新技术试验区等单元组成,高新技术应用区的试验方案研究在试验区内开展,待成熟后再向大工程区推广.

于 2010 年 10 ~ 11 月对石臼漾水源生态湿地东升路以南以及北郊河以西区域湿地植被进行了调查. 主要调查范围为根孔生态净化区以及部分湖岸带区域. 在湿地根孔生态净化区选择了 23 个植物床进行调查取样,同时在深度净化区以及根孔净化区的湖岸带区域选择 21 条样带对挺水植物群落进行了调查,各样带及样点的分布见图 1.

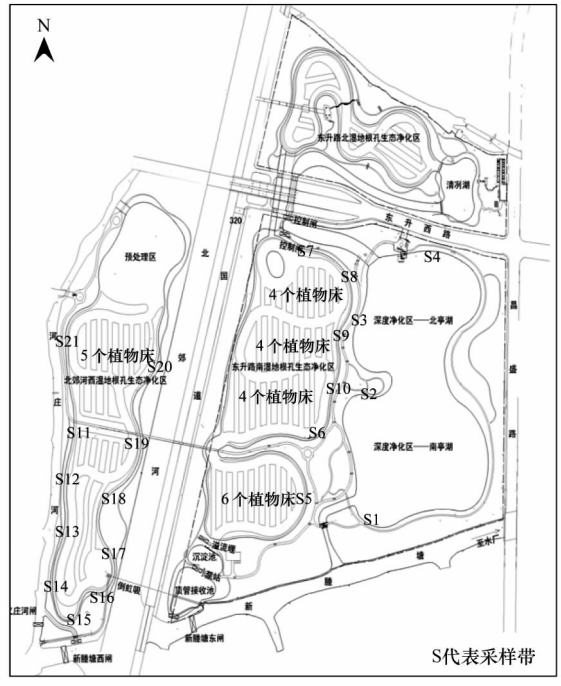

图 1 嘉兴市石臼漾水源生态湿地采样点分布

Fig. 1 Distribution of the sampling plots in Jiaxing Shijiuyang ecological wetland for drinking water

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法

调查时采用样地法结合样方法进行调查,对于根孔生态净化区,选取 23 个植物床进行调查,每个植物床设置 2 ~ 3 个样方,样方面积为 1 m × 1 m. 对于湖岸带区域,设置若干样地,每个样地视植被分布情况,设 1 ~ 5 个样方,样方面积为 1 m × 1 m,分别记录样方内植物种的名称、株数、株高等指标,采用收割法收割植株地上部分,称量其鲜重,并取部分样品带回实验室,放入80℃的烘箱中烘至恒重,称重(干重),计算含水量.

在植被调查的同时广泛采集标本,鉴定并记录植物种类组成,同时对标本进行拍照记录. 挺水植物可直接用手或用手持式镰刀采集,浮叶植物和漂浮植物可直接用手或抄网采集.

1.2.2 群落命名

群落的命名采用优势种原则:即以各群落优势种的名称作为该群落的名称.

物种优势度根据频度和生物量来确定[22]:

优势度(DV) = (相对频度 + 相对生物量)/2 × 100%

相对频度(RF) = 该物种的频度/所有物种频度之和 ×100%

相对生物量(RB) = 该物种的生物量/所有物种生物量之和 ×100%

1.2.3　群落植物多样性指标计算

选用 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数来测定湿地植物群落多样性状况. 多样性指数的计算公式如下[23]:

Simpson 指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^{S} (P_i)^2$

Shannon-Wiener 指数: $H = - \sum_{i=1}^{S} (P_i)\ln(P_i)$

式中,D 为 Simpson 指数; H 为 Shannon-Wiener 指数; S 为每一样方的物种总数,即丰富度指数; P_i 为第 i 个种在样方中的相对多度.

1.2.4　数据分析

采用 Statistica 6.0 和 Excel 进行数据分析.

2　结果与讨论

2.1　物种多样性变化

本次调查共采集到水生及中生维管束植物 70 种(表 1),隶属于 28 科 62 属. 其中蕨类植物 1 种; 被子植物 27 科,61 属,69 种. 按生活型分,漂浮植物 6 种,占总种类数的 8.6%; 挺水植物 14 种,占总种类数的 20.0%; 湿生植物 26 种,占总种类数的 37.1%; 中生植物 20 种,占总种类数的 28.6%; 沉水植物 4 种. 从植物区系按科所含种类数上看,禾本科(Gramineae)种类最多,为 16 种; 其次为菊科(Compositae),共 9 种. 从属的统计上看,蓼属(*Polygonum*)植物最多,共 4 种; 其次为稗属(*Echinochloa*),共 3 种.

石臼漾水源生态湿地原先人工栽植植物 15 种. 与之相比,目前,石臼漾水源生态湿地植物多样性增加显著,共增加 55 种(3.7)倍,所增加种类绝大多数系嘉兴地区本地种,这说明在湿地构筑时其土壤种子库资源已经较为丰富,这是物质基础,同时当地合适的气候条件和适宜湿地运行的水文条件亦为这些植物自然繁衍提供了保障. 另外,通过风、水流以及鸟类传播等,也使得不少植物种类有机会进入湿地繁衍. 所增加植物种类中禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)、蓼科(Polygonaceae)、旋花科(Convolvulaceae)等占了很大比重. 禾本科植物共增加 13 种,是原先栽种植物种类数的 4.3 倍,菊科植物增加 9 种,蓼科和旋花科植物均增加 5 种. 菊科、蓼科和旋花科植物原先并未栽种,均为迁入种类. 这些衍生的植物在湿地中点缀分布于原先栽植植物斑块之间或其周缘,绝大多数种类分布面积较小. 湿地植物种类的增加对湿地生态系统的功能有深刻影响,多样性越高,群落生产力、湿地生态系统稳定性和抗入侵能力也就越高[24,25]. 可以预见,随着植物演替,石臼漾水源生态湿地植物多样性还将继续增加.

另外,这些自然迁入的植物种类繁殖、扩散能力较强,对不同生境条件也都具有一定的适应能力,因此,在环境条件适宜的情况下,比较容易扩展种群. 在这些自然迁入湿地的种类中,有一些植物属于外来种,如喜旱莲子草和凤眼莲等,虽然这些植物具有一定的净化能力,但是它们在湿地中扩展过快,影响了其他植物生长,同时也使得湿地景观效果变差. 因此,建议对于这些植物应控制其分布区域并及时收割去除. 其他衍生种类在湿地中表现为个体小,与配置种相比不占优势,对斑块景观效果也无负面影响,同时对净化效果也有一定贡献,因此,对于这些植物,则可任其自由生长,无需管理.

2.2　湿地植物群落类型

根据调查,石臼漾水源生态湿地主要植物群落类型大致分为以下 17 大类.

凤眼莲群落:凤眼莲群落在石臼漾水源生态湿地分布面积广,几乎占据绝大部分的水面区域. 甚至在部分区域,其优势度达到 100%,如北郊河以西预处理区.

喜旱莲子草 + 水鳖群落:该群落主要分布于根孔生态净化区各植物床之间的河道内,分布面积广,部分区域甚至占据整个河道水面.

金鱼藻群落、苦草群落以及穗状狐尾藻群落:苦草群落和穗状狐尾藻群落主要见于深度净化区浅水区内,金鱼藻在各区域都有一定零星、极少量分布. 这些沉水植物群落多为单优群落,优势种优势度达 100%,分布水深在 1.5 m 以下.

喜旱莲子草 + 芦苇 + 双穗雀稗群落:群落优势种为喜旱莲子草、芦苇和双穗雀稗,优势种优势度分别为 68.2%、54.5%、52.3%,常见的伴生种主要为香蒲、葎草等. 该群落在湿地有较广泛的分布,多见于水边或距离水流较近的区域.

双穗雀稗 + 喜旱莲子草群落:优势种双穗雀稗和喜旱莲子草的优势度分别为 85.0% 和 59.6%,群

表 1 石臼漾水源生态湿地植物种类名录[1)]

Table 1 Species list of wetland vegetation in Shijiuyang ecological wetland for drinking water

种类	2008 年	2010 年	生活型	种类	2008 年	2010 年	生活型
蕨类植物门 Pteridophyta				一年蓬 *Erigeron annuus*		+	M
满江红科 Azollaceae				苣荬菜 *Sonchus arvensis*		+	M
满江红 *Azolla imbricata*		+	F	蒲公英 *Taraxacum mongolicum*		+	H
种子植物门 Spermatophyta				狼把草 *Bidens tripartita*		+	H
双子叶植物纲 Dicotyledoneae				黄花蒿 *Artemisia annua*		+	M
桑科 Moraceae				艾蒿 *A. argyi*		+	H
葎草 *Humulus scandens*		+	M	单子叶植物纲 Monocotyledoneae			
蓼科 Polygonaceae				水鳖科 Hydrocharitaceae			
水蓼 *Polygonum hydropiper*		+	E	水鳖 *Hydrocharis dubia*		+	F
酸模叶蓼 *P. lapathifolium*		+	H	黑藻 *Hydrilla verticillata*	+	+	S
西伯利亚蓼 *P. sibiricum*		+	M	苦草 *Vallisneria natans*	+	+	S
杠板归 *P. perfoliatum*		+	H	鸭跖草科 Commelinaceae			
齿果酸模 *Rumex dentatus*		+	H	鸭跖草 *Commelina communis*		+	H
苋科 Amaranthaceae				泽泻科 Alismataceae			
反枝苋 *Amaranthus retroflexus*		+	M	慈姑 *Sagittaria trifolia* var. sinensis	+	+	E
喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides*		+	E	香蒲科 Typhaceae			
睡莲科 Nymphaeaceae				香蒲 *Typha orientalis*	+	+	E
莲 *Nelumbo nucifera*	+		E	美人蕉科 Cannaceae			
睡莲 *Nymphaea tetragona*	+		Fl	美人蕉 *Canna indica*	+	+	H
金鱼藻科 Ceratophyllaceae				鸢尾科 Iridaceae			
金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*		+	S	鸢尾 *Iris tectorum*	+	+	H
毛茛科 Ranunculaceae				莎草科 Cyperaceae			
石龙芮 *Ranunculus sceleratus*		+	H	异型莎草 *Cyperus difformis*		+	H
小二仙草科 Haloragidaceae				水莎草 *Juncellus serotinus*		+	H
穗状狐尾藻 *Myriophyllum spicatum*		+	S	砖子苗 *Mariscus umbellatus*		+	H
十字花科 Cruciferae				水葱 *Schoenoplectus tabernaemontani*	+	+	E
荠 *Capsella bursapastoris*		+	M	禾本科 Gramineae			
豆科 Leguminosae				马唐 *Digitaria sanguinalis*		+	H
广布野豌豆 *Vicia cracca*		+	H	牛筋草 *Eleusine indica*		+	M
白三叶 *Ttifolium repens*	+	+	H	狗尾草 *Setaria viridis*		+	M
合萌 *Aeschynomene indica*		+	M	金色狗尾草 *S. lutescens*		+	M
野大豆 *Glycine soja*		+	M	茵草 *Beckmannia syzigachne*		+	H
千屈菜科 Lythraceae				稗 *Echinochloa crusgalli*		+	E
千屈菜 *Lythrum salicaria*	+	+	E	长芒稗 *E. caudata*		+	H
圆叶节节菜 *Rotala rotundifolia*		+	E	无芒稗 *E. crusgalli* var. mitis		+	H
柳叶菜科 Onagraceae				双穗雀稗 *Paspalum paspaloides*		+	H
水龙 *Ludwigia adscendens*		+	E	千金子 *Leptochloa chinensis*		+	H
锦葵科 Malvaceae				大画眉草 *Eragrostis cilianensis*		+	H
苘麻 *Abutilon theophrasti*		+	M	白茅 *Imperata cylindrical* var. *major*		+	H
伞形科 Umbelliferae				芦苇 *Phragmites australis*	+	+	E
水芹 *Oenanthe javanica*	+	+	E	芦竹 *Arundo donax*	+	+	H
旋花科 Convolvulaceae				菰 *Zizania caduciflora*	+	+	E
田旋花 *Convolvulus arvensis*		+	M	水禾 *Hygroryza aristata*		+	F
打碗花 *Calystegia hederacea*		+	M	天南星科 Araceae			
篱打碗花 *C. sepium*		+	M	菖蒲 *Acorus calamus*	+	+	E
裂叶牵牛 *Pharbitis nil*		+	M	浮萍科 Lemnaceae			
蕹菜 *Ipomoea aquatica*		+	E	浮萍 *Lemna minor*		+	F
茄科 Salanaceae				紫萍 *Spirodela polyrrhiza*		+	F
龙葵 *Solanum nigrum*		+	M	雨久花科 Pontederiaceae			F
菊科 Compositae				凤眼莲 *Eichhornia crassipes*		+	F
苍耳 *Xanthium sibiricum*		+	M	灯心草科 Juncaceae			
鳢肠 *Eclipta prostrata*		+	H	灯心草 *Juncus effusus*		+	H
小白酒草 *Conyza canadensis*		+	M				

1)“+”表示调查中有采集到；H 为湿生植物；F 为漂浮植物；Fl 为浮叶根生植物；E 为挺水植物；S 为沉水植物；M 为中生植物

落主要的伴生种为芦苇、合萌、葎草等. 主要分布于靠近水边的区域.

喜旱莲子草 + 双穗雀稗 + 灯芯草群落:群落优势种为喜旱莲子草、双穗雀稗和灯芯草,3 种植物优势度分别为 75.0%、51.5%、45.2%,主要伴生种为合萌、香蒲以及水蓼. 主要见于东升路以南湿地湖岸带区域,距离水流距离约 1 m 左右.

双穗雀稗 + 灯芯草 + 喜旱莲子草 + 合萌群落:群落优势种双穗雀稗、灯芯草、喜旱莲子草和合萌的优势度分别为 80.1%、60.2%、54.9% 和 52.0%,群落常见伴生种为水蓼、砖子苗、白茅等. 主要见于东升路以南湿地湖岸带区域,距离水流距离约为 2 m,土壤湿润.

双穗雀稗群落:双穗雀稗优势度为 48.8%,群落主要伴生种为喜旱莲子草、芦苇、香蒲以及扛板归. 该群落在深度净化区的湖岸带区域有较多分布,分布区域距离水流的距离范围约为 0 ~ 5 m.

双穗雀稗 + 芦苇 + 香蒲群落:优势种双穗雀稗、芦苇以及香蒲优势度均为 33.3%. 主要分布于部分湖岸带浅水区域(水深 0.2 m 以下)以及靠近水边的地区.

香蒲 + 芦苇群落:香蒲优势度为 83.4%,芦苇优势度为 66.6%. 主要分布于湖岸带浅水(水深 0.3 m 以下)及近水区域(距离水流范围为 0 ~ 0.3 m).

芦苇群落:为芦苇单优群落,优势度达 100%. 主要分布于根孔生态净化区以及部分湖岸带区域,分布面积最广,生物量最高. 芦苇群落分布最大水深约为 0.5 m.

香蒲群落:亦为单优群落,主要分布于根孔区以及北郊河以西湿地的湖岸带区域. 分布面积、生物量仅次于芦苇群落. 该群落分布的最大水深约为 0.6 m.

菰群落:为单优群落,在湿地分布不多,主要见于根孔区一些植物床以及部分湖岸带区域.

水葱群落:为单优群落,水葱主要配置于根孔区的一些植物床上,靠近水边.

菖蒲群落:常与香蒲生长在一起,在北郊河以西湿地有一定分布,东升路以南湿地部分分布则相对较少.

从湿地植物群落类型可以看出,目前石臼漾水源生态湿地主要以芦苇、香蒲、喜旱莲子草、双穗雀稗等植物种类组成的单优或共优挺水植物群落以及凤眼莲等组成的漂浮植物群落为主. 湿地植物群落的主要优势种中除了芦苇、香蒲、菖蒲、水葱、菰等人工栽种种类以外,还有不少为自然迁入种类,如合萌、双穗雀稗、喜旱莲子草、凤眼莲、水鳖等,这说明迁入种类种群数量正不断发展壮大,其在湿地中尤其是湖岸带区域的生态地位正在不断加强,甚至部分植物在其所在层片已占有绝对优势地位,如凤眼莲. 但从整体上看,人工配置的植物种类仍是石臼漾水源生态湿地植物群落结构的主体.

2.3　各主要群落的植物多样性

对石臼漾水源生态湿地主要植物群落的多样性进行了分析(表 2). 结果表明,双穗雀稗群落的多样性最高,其 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数都是最高的,这主要是由于双穗雀稗群落中各种植物的分布比较均匀. 其次分别为双穗雀稗 + 灯芯草 + 喜旱莲子草 + 合萌群落和喜旱莲子草 + 双穗雀稗 + 灯芯草群落,这主要得益于其丰富的物种数和较为复杂的群落结构. 从空间上看,东升路以南湿地湖岸带区域植物多样性(Simpson 指数为 0.468 3, Shannon-Wiener 指数为0.835 2)高于北郊河以西湿地湖岸带区域(Simpson 指数为 0.357 6, Shannon-Wiener 指数为0.660 4),这主要是因为东升路以南湿地湖岸带区域植被发展更好,水生、湿生植物种类丰富,各种植物分布相对更加均匀,群落结构也更为复杂.

表 2　石臼漾水源生态湿地主要植物群落多样性

Table 2　Diversity of dominant plant communities in Shijiuyang ecological wetland for drinking water

群落类型	物种数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数
凤眼莲群落	2	0.018	0.032 5
喜旱莲子草 + 水鳖群落	2	0.170 1	0.311 4
金鱼藻群落	1	0	0
苦草群落	1	0	0
穗状狐尾藻群落	1	0	0
喜旱莲子草 + 芦苇 + 双穗雀稗群落	3	0.373 7	0.601 4
双穗雀稗 + 喜旱莲子草群落	5	0.477 7	0.868 2
喜旱莲子草 + 双穗雀稗 + 灯芯草群落	6	0.526 1	0.956 8
双穗雀稗 + 灯芯草 + 喜旱莲子草 + 合萌群落	8	0.530 4	1.097 1
双穗雀稗群落	6	0.707 1	1.322 1
双穗雀稗 + 芦苇 + 香蒲群落	3	0.314 4	0.599 2
香蒲 + 芦苇群落	2	0.465 7	0.658 1
芦苇群落	2	0.091 7	0.160 3
香蒲群落	3	0.357 6	0.660 4
菰群落	1	0	0
水葱群落	1	0	0
菖蒲群落	1	0	0

2.4 湿地植被数量特征

2.4.1 根孔生态净化区植株高度

表 3 为根孔生态净化区植物植株高度的基本统计特征,从中可看出,石臼漾水源生态湿地根孔区植物床内植物平均株高为 2.37 m,植株高度最低为 1.1 m,最高为 3.4 m.

表 3 石臼漾水源生态湿地根孔生态净化区植物株高的基本统计特征

Table 3 Statistical characteristics of plant height in the root-channel purification zone of Shijiuyang ecological wetland for drinking water

样本数	平均值	中位数	最小值	最大值	25% 位数	75% 位数	标准差	标准误	变异系数/%
62	2.37	2.40	1.10	3.40	2.00	2.65	0.48	0.06	20

2.4.2 根孔生态净化区植物密度

表 4 显示了根孔生态净化区植物密度的基本统计特征. 根孔区植物床内植物平均密度为 72 ind·m^{-2},密度变化范围为 21 ~ 113 ind·m^{-2}. 从空间上看,北郊河以西区域植物床植物密度稍高于东升路以南区域. 从近 2 年收割情况看,根孔区植被密度正在逐年增大,目前,已呈现一定过密趋势. 本次调查发现,在湿地主体-根孔区,由于密度过大,对光、营养等的竞争加剧,不少植株在未成熟之前就已经开始死亡衰败,从而降低了净化效率. 因此,对于根孔净化区植被应及时进行收割,并处理和利用,同时今后亦可尝试进行多茬收割,这样也能提高湿地净化效能.

表 4 根孔生态净化区植物密度的基本统计特征

Table 4 Statistical characteristics of plant density in the root-channel purification zone

样本数	平均值	中位数	最小值	最大值	25% 位数	75% 位数	标准差	标准误	变异系数/%
17	72	67	21	113	56	89	26.01	6.31	36

2.4.3 生物量

漂浮植被生物量:凤眼莲在分布区其平均生物量(干重)为 0.9 kg·m^{-2},凤眼莲分布总面积约 5.13 × 10^4 m^2,估算凤眼莲总生物量(干重)约为 46.2 t. 喜旱莲子草分布区域平均生物量(干重)约 0.9 kg·m^{-2},总分布面积约 1.87 × 10^4 m^2,估算总生物量(干重)约为 16.8 t. 水鳖分布区域约平均生物量(鲜重)为 0.87 kg·m^{-2}.

根孔生态净化区植被生物量:图 2 显示了根孔生态净化区各植物床植物生物量的频数分布,从中可以看出多数植物床平均生物量(干重)在 1.6 ~ 2.0 kg·m^{-2}范围内,生物量(干重)变化范围为 0.46 ~ 2.62 kg·m^{-2}. 根孔生态净化区植被平均生物量(干重)约为 1.73 kg·m^{-2},植被总面积约为 9.12 × 10^4 m^2,估算得出总生物量(干重)约为 157.8 t. 由于根孔生态净化区植物每年都会进行收割,因此根孔生态净化区植被总生物量亦即该区域植物1 a的生物质生长总量. 图 3 为各调查植物床的平均生物量(干重),1 ~ 18 号植物床位于东升路以南湿地,19 ~ 23 号植物床位于北郊河以西湿地. 从整体上看,东升路以南湿地根孔生态净化区植物床平均生物量大于北郊河以西湿地根孔生态净化区植物床的平均生物量.

湖岸带区域植被生物量:湖岸带区域植被生物量(干重)变化范围为 0.18 ~ 2.15 kg·m^{-2},多数区域生物量(干重)在 0.6 kg·m^{-2}以上(图 4). 湖岸带区域挺水及湿生植物平均生物量(干重)约为 0.83 kg·m^{-2},植被总面积约为 3.75 × 10^4 m^2,估算湿地湖岸带区域总生物量约为 31.1 t(干重). 从区域上看,北郊河以西区域湖岸带植被生物量高于其它区域,这是因为北郊河以西区域岸带区域香蒲、芦苇分布较多.

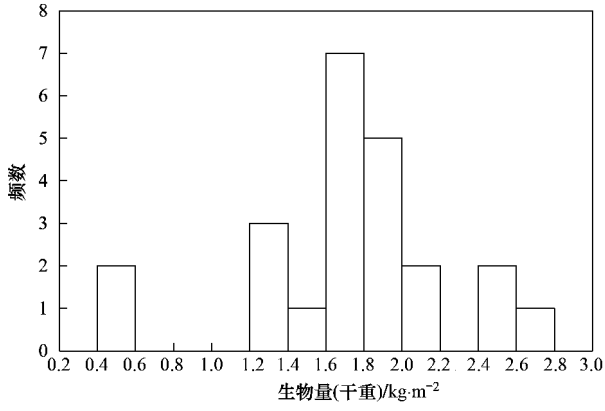

图 2 根孔生态净化区挺水植物生物量(干重)的频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of plant biomass (dry weight) in the root-channel purification zone

2.4.4 植株重量

图 5 显示了石臼漾生态湿地根孔生态净化区内植株的平均重量(干重),可以看出东升路以南湿地根孔区植物平均单株重量(干重)高于北郊河以西

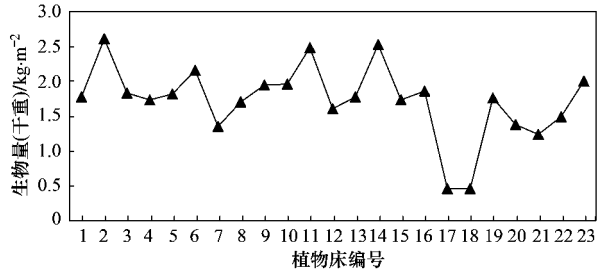

图 **3**　根孔生态净化区挺水植物生物量(干重)

Fig. 3　Biomass of emergent plants (dry weight) in the root-channel purification zone

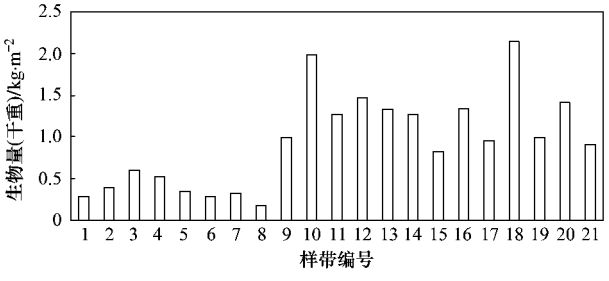

图 **4**　湖岸带区域植被生物量

Fig. 4　Biomass of plants in the riparian zone

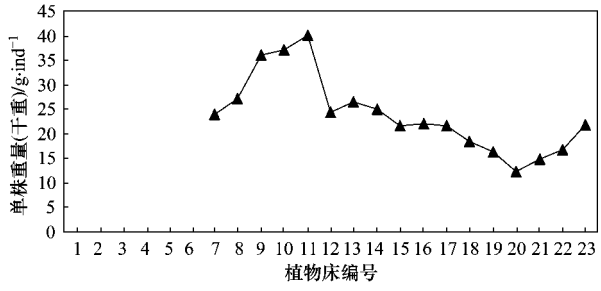

图 **5**　根孔生态净化区植物平均单株重量

Fig. 5　Dry weight of individual plant in the root-channel purification zone

湿地根孔区植物平均单株重量(干重). 调查中发现,北郊河以西区域根孔区植株明显偏小,同时植物床上中等大小个体占了很大比例.

3　结论

(1)共采集到水生及中生维管束植物共 70 种,隶属于 28 科 62 属,主要以湿生及中生植物为主. 与运行初始相比,植物种类增加显著,共增加 3.7 倍. 所增加种类绝大多数系嘉兴地区本地种,且禾本科、菊科、蓼科、旋花科等占了很大比重.

(2)从优势群落类型上看,石臼漾水源生态湿地主要以芦苇、香蒲、喜旱莲子草等植物种类组成的单优或共优挺水植物群落以及凤眼莲等组成的漂浮植物群落为主. 各主要植物群落中,双穗雀稗群落的多样性最高. 空间分布上看,东升路以南湿地湖岸带区域植物多样性高于北郊河以西湿地湖岸带区域.

(3)石臼漾水源生态湿地凤眼莲平均生物量(干重)为 0.9 kg·m^{-2},总生物量(干重)约为 46.2 t. 根孔生态净化区植物平均株高 2.37 m,平均密度 71 ind·m^{-2},平均生物量(干重)约为 1.73 kg·m^{-2},植被总面积约为 9.12 × 10^4 m^2,估算总生物量(干重)约为 157.8 t. 总体来看,东升路以南区域根孔区植被长势好于北郊河以西区域,生物量、植株大小都较北郊河以西区域高,北郊河以西区域密度则相对要高. 湖岸带区域挺水及湿生植物总生物量(干重)约为 31.1 t.

致谢:在本研究过程中,嘉兴市水利局规划建设处苏胜利处长、陈志力副处长以及嘉兴市水利投资有限公司张荣斌总经理给予了大力帮助和支持,在此表示感谢.

参考文献:

[1] Probe P. The Source Water Protection Primer[M]. Toronto: Pollution Probe, 2004.

[2] 杨爱玲,朱颜明. 城市地表饮用水源保护研究进展[J]. 地理科学,2000,**20**(1):72-77.

[3] 赵旭,杨志峰,徐琳瑜. 饮用水源保护区生态服务补偿研究与应用[J]. 生态学报,2008,**28**(7):3152-3159.

[4] 尹澄清,周春东,刘俊新,等. 构筑湿地净化南方河网地区微污染水源——以嘉兴市生态湿地工程为例[A]. 见:第四届海峡两岸饮用水安全控制技术及管理研讨会论文集[C]. 上海,2007. 345-350.

[5] 尹澄清,苏胜利,张荣斌,等. 以河网作为水源的污染问题和湿地净化[J]. 环境科学学报,2010,**30**(8):1-4.

[6] 王瑞山,王毅勇,杨青,等. 我国湿地资源现状、问题及对策[J]. 资源科学,2000,**22**(1):9-13.

[7] 余国营. 湿地研究的若干基本科学问题初论[J]. 地理科学进展,2001,**20**(2):177-183.

[8] 郭雪莲,吕宪国,郗敏. 植物在湿地养分循环中的作用[J]. 生态学杂志,2007,**26**(10):1628-1633.

[9] 陈宜瑜. 中国湿地研究[M]. 长春:吉林出版社,1995.

[10] 王树功,黎夏,周永章. 湿地植被生物量测算方法研究进展[J]. 地理与地理信息科学,2004,**20**(5):104-109.

[11] 吴东丽,上官铁梁,张金屯,等. 滹沱河流域湿地植被的数量分类和排序[J]. 西北植物学报,2005,**25**(4):648-654.

[12] 张江英,周华荣,高梅. 白杨河-艾里克湖湿地及周边植物群落与环境因子的关系[J]. 干旱区地理,2007,**30**(1):101-107.

[13] 肖德荣,田昆,张利权. 滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系[J]. 生态学报,2008,**28**(7):3116-3124.

[14] 成水平,吴振斌,况琪军. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学,2002,**14**(2):179-184.

[15] 张玲,李广贺,张旭,等. 滇池人工湿地的植物群落学特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2005,**14**(5):570-573.

[16] 尹炜,李培军,裘巧俊,等. 植物吸收在人工湿地去除氮、磷中的贡献[J]. 生态学杂志,2006,**25**(2):218-221.

[17] 李晓东,孙铁珩,李海波,等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报,2007,**27**(3):1226-1232.

[18] 陈永华,吴晓芙,陈明利,等. 人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价[J]. 环境科学,2010,**31**(8):1789-1794.

[19] Greenway M, Woolley A. Changes in plant biomass and nutrient removal over 3 years in a constructed wetland in Cairns, Australia [J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(11-12): 303-310.

[20] Gottschall N, Boutin C, Crolla A, *et al*. The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada [J]. Ecological Engineering, 2007, **29**(2): 154-163.

[21] Iamchaturapatr J, Yi S W, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2007, **29**(3): 287-293.

[22] 陈洪达. 武汉东湖水生维管束植物群落结构和动态[J]. 海洋与湖沼,1980,**11**(3):275-283.

[23] 马克平. 生物群落多样性的测度方法Ⅰα多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性,1994,**2**(4):231-239.

[24] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability [J]. Ecology, 1996, **77**(2): 350-363.

[25] Kennedy T A, Naeem S, Howe K M, *et al*. Biodiversity as a barrier to ecological invasion[J]. Nature, 2002, **417**: 636-638.