

石井净水厂8种湿地植物的净化和固碳功能研究

Research on Purification and Carbon Fixation Functions of 8 Kinds of Wetland Plants in Shijing Water Treatment Plant

张碧媛 林妍栏* 林雯 代色平 李智琦

ZHANG Biyuan, LIN Yanlan*, LIN Wen, DAI Seping, LI Zhiqi

基金项目: 广州市林业和园林局部门预算项目林业园林科学技术研究经费-广州市湿地碳汇计量方法研究 (编号: 穗财环〔2022〕9号); 广州市市政工程设计研究总院有限公司科技开发项目“园林湿地土壤固碳能力提升研究”“基于提升碳汇功能的园林湿地生态优化研究”; 广州市人工湿地生态修复关键技术研究 (编号: 2024KJQT007)

摘要

为掌握不同湿地水生植物在人工湿地中的净化和固碳能力, 对广州市石井净水厂人工湿地中8种植物、土壤和水质进行取样分析。结果显示, 石井净水厂水质优良, 土壤营养元素丰富, 重金属含量低。其植物元素富集能力分析表明, 睡莲 *Nymphaea tetragona*、苦草 *Vallisneria natans*、美人蕉 *Canna indica*、黑藻 *Hydrilla verticillata*、梭鱼草 *Pontederia cordata* 对氮元素富集能力较强; 苦草、睡莲对磷元素富集能力较强; 美人蕉和梭鱼草对钾元素富集能力较强。综合植物单株尺度与单位面积尺度分析可知, 美人蕉、水竹芋 *Thalia dealbata*、睡莲固碳能力突出, 睡莲可有效净化富营养化水体和土壤, 梭鱼草、水竹芋、睡莲和美人蕉对重金属铜、锌、锰、镍元素积累量较大。优化湿地植物配置可增强湿地碳汇功能, 提高湿地对污染的抗性。

Abstract

In order to grasp the purification capacity and carbon sequestration capacity of different wetland aquatic plants in artificial wetlands, this study sampled and analysed eight species of plants, soil and water quality in the artificial wetland of Shijing Water Treatment Plant in Guangzhou City. The results show that the water quality of the Shijing Water Treatment Plant is excellent, and the soil is rich in nutrients and low in heavy metals. The analysis of the enrichment capacity of plant elements reveals that *Nymphaea tetragona*, *Vallisneria natans*, *Canna indica*, *Hydrilla verticillata* and *Pontederia cordata* possess a strong ability to enrich nitrogen; *Vallisneria natans*, and *Nymphaea tetragona* have a strong capacity for accumulating phosphorus; *Canna indica* and *Pontederia cordata* have a strong ability of enriching potassium. Combining the analyses of single plant scale and unit area scale, *Canna indica*, *Thalia dealbata* and *Nymphaea tetragona* have outstanding carbon sequestration capacity, *Nymphaea tetragona* can effectively purify eutrophic water bodies and soil. *Pontederia cordata*, *Thalia dealbata*, *Nymphaea tetragona* and *Canna indica* have a greater accumulation of heavy metals copper, zinc, manganese and nickel. Optimising wetland plant configuration can enhance the carbon sink function of wetlands and improve their resistance to pollution.

文章亮点

1) 开展实际自然条件下人工湿地植物碳汇功能和净化功能的研究; 2) 分别从植物单株尺度、单位面积尺度综合评价湿地植物在生长期内对各元素的累积情况; 3) 筛选出具有强固碳能力和净化能力的湿地植物, 为人工湿地植物的选择与应用提供参考。

关键词

人工湿地; 水生植物; 生态效益; 水质净化; 固碳; 生物富集

Keywords

Artificial wetlands; Aquatic plant; Ecological benefit; Water quality purification; Carbon fixation; Biological enrichment

收稿日期: 2024-04-07

修回日期: 2024-08-19

湿地植物指植株部分或全部可以生活在水体或高含水量基质中的植物,根据其生存习性可以分为挺水植物、浮水植物以及沉水植物^[1]。湿地植物作为人工湿地生态系统的重要组成部分,在水质净化和碳汇吸收方面发挥着不可忽视的重要作用^[2]。湿地植物的净化功能通常表现为3个方面:1)对污水中的营养元素直接吸收、吸附与富集。湿地植物具有生长迅速、吸收能力强的特点,能够直接吸收与利用污水中的营养元素。通过收割湿地植物,可以达到净化湿地水质的目的^[3]。2)根区放氧。湿地土壤长期处于缺氧条件,导致铁、锰等还原态元素和有机物质浓度上升,严重时危害植物生长发育。而湿地植物能够将光合作用产生的氧气运输到根部,在植物根系周围还原性介质的作用下形成氧化态微环境,这有利于湿地植物净化重金属元素^[4]。3)增强和维持介质的水力传输能力。湿地植物的根系具有较强的穿透能力和扩张能力,能够增强湿地土壤的水力传输能力,有效防止湿地土壤淤积和板结,进而增强对湿地水质的净化效果^[3]。

此外,湿地植物通过光合作用将大气中CO₂转化为有机质并存储在自身体内的过程,是湿地发挥碳汇功能的重要途径之一^[5]。研究湿地植物碳汇功能,掌握不同湿地植物的碳汇能力,对优化湿地植物景观配置、提升湿地生态系统植物固碳潜力、丰富湿地生态系统碳循环理论等有重要意义。

目前关于湿地植物净化功能以及

固碳能力的研究,较多集中于室内人工控制条件下的实验^[6],而对于在实际自然条件下人工湿地中所应用的植物的碳汇功能和净化功能的研究相对较少。鉴于此,本研究聚焦于广州市石井净水厂的人工湿地,选取了该湿地中8种代表性湿地植物作为研究对象,从植物单株尺度、单位面积尺度综合评价湿地植物在生长期内对各元素累积、富集的特性,以期筛选出具有强固碳能力和净化能力的湿地植物,为增强湿地碳汇功能和净化功能提供科学依据,为人工湿地构建过程中湿地植物的选择与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为位于广州市白云区石槎路的石井净水厂(113°14'56"E, 23°12'5"N),占地14.6 hm²,负责

处理广州净水管网大坦沙系统中新市涌、白云一线以北地区约33 km²居民区的生活污水。为减少地面设施对周边居民区的干扰,2010年广州便尝试将净水设施做地埋式处理。2018年石井净水厂开始投入运营,进一步深化“地下建厂地上建园”的理念,优化地下净水设施,同时对地面作公园化建设和管理,通过设置人工湿地,引入乔灌木和水生植物增加城市绿地面积,成为新型生态化地埋式净水厂的典范。

1.2 样品采集与测定

本研究在石井净水厂选取8种代表性湿地植物,每种植物设置3个1 m×1 m的样方,分别于2023年第一季度2月16日与第二季度5月30日对8种植物样方内的数量和种类进行统计,同时采集植物株高等基本信息(表1、图1)。

表1 植物基本信息
Tab.1 Basic information of plants

植物名称	科名	第一季度平均株高/m	第二季度平均株高/m	数量/(株/m ²)
美人蕉 <i>Canna indica</i>	美人蕉科	0.6	1.5	40
苦草 <i>Vallisneria natans</i>	水鳖科	0.3	0.7	30
黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>	水鳖科	0.2	0.4	30
梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i>	雨久花科	0.5	1.2	50
花叶芦竹 <i>Arundo donax</i> 'Versicolor'	禾本科	1.0	2.4	30
风车草 <i>Cyperus involucreatus</i>	莎草科	0.5	1.0	20
水竹芋 <i>Thalia dealbata</i>	竹芋科	0.8	2.0	40
睡莲 <i>Nymphaea tetragona</i>	睡莲科	0.4	0.6	30



a. 湿地水样采集



b. 湿地植物采集



c. 湿地土壤采集

图1 采样现场

Fig.1 Photographs of field sampling

在样地内采集 3 株生长状况良好、大小相似的植物全株，将其洗净泥土，烘干至恒重，以测定其生物量。接着使用微型植物粉碎机粉碎植物，并通过孔径 2 mm 的筛子筛选，最后将筛选后的粉末装袋备用。

土壤取样深度分别为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm，每个土层深度重复采集 3 个样品，在剔除土壤样品中的根系杂质后，将样品烘干至恒量，过筛。

植物样品和土壤样品分别用浓硝酸-高氯酸消煮法和浓硫酸-高氯酸消煮法进行消煮，制备成待测液。植物和土壤的氮元素使用元素分析仪测定，磷元素采用钼锑比色法测定，铅、镉、铁、锰含量测定采用石墨炉原子吸收分光光度法，汞含量测定采用冷原子吸收分光光度法，砷含量测定采用原子荧光法，镍、铜、铬、锌含量测定采用火焰原子吸收分光光度法^[7]。

每季度采集 3 个水样，对水样溶解氧 (DO)、五日生化需氧量 (BOD₅)、化学需氧量 (COD_{Cr})、氨氮、总氮、总磷、锰、铜、锌、铅、镉、铬、砷、汞等指标进行检测，检测方法依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel2019 对植物单株元素积累量 PA ^[8]、植物单位面积元素积累量 PD ^[6] 和植物元素富集系数 BCF ^[9] 进行计算，公式如下：

$$PA = PC \times PB \quad (1)$$

$$PD = PA \times M \quad (2)$$

$$BCF = PC / S \quad (3)$$

式 (1) 中， PC 为植物某元素含量 (mg/g)， PB 为植物生物量 (g/株)。式 (2) 中， M 为植物单位面积的种植数量 (株/m²)。式 (3) 中， S 为植物对应土壤中该元素的含量 (mg/g)。 BCF 可以反映植物对土壤中该元素吸收积累的难易程度，当 $BCF > 1$ 时表示植物体内的某元素含量高于植物生长环境中的该元素含量，说明该植物的生长有利于修复土壤污染^[9]。

之后采用 SPSS19.0 软件对植物单株尺度、单位面积尺度元素积累量进行

K-均值聚类分析，以综合评价植物对各元素的积累量。

2 结果与分析

2.1 湿地水质分析结果

依据地表水环境质量标准，石井净水厂两个季度水样 pH 值均在正常范围内，DO、BOD₅、锰、铜、锌、铅、镉、铬、砷及汞含量均达国家 I 类水质标准，氨氮含量均达 II 类水质标准，COD_{Cr}、总氮含量均达国家 III 类水质标准。与第一季度相比，第二季度水样总磷含量有所增加，总氮指标虽仍为 III 类水质标准，但含量有所下降，这可能与两次采样间广州降雨量增大有关 (表 2)。

2.2 湿地土壤分析结果

根据 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 3 个深度的土壤样品分析结果，所有土壤样品 pH 值均在 6.61~6.92，铁元素在湿地土壤中含量最高，钾元素次之，氮、磷元素含量最低。随土层深度的增加，湿地土壤第一季度有机质含量逐渐下降，铁元素含量呈上升趋势，两个季度氮、磷、钾 3 种元素的含量无明显变化 (图 2)。

重金属元素中锰元素含量最高，铬、锌元素含量次之，镉、汞元素含量最低。其中随土层深度的增加，铜、铅、镉、镍、砷及汞 6 种元素含量的差异不明显，锰元素含量随土层深度的增加均呈先减后增的趋势，且第二

表 2 水样检测结果

Tab.2 Water sample test results

指标	第一季度	第二季度	指标	第一季度	第二季度
pH	7.91	8.20	锰 / (mg/L)	0.0027	0.0058
DO / (mg/L)	8.1190	7.5280	铜 / (mg/L)	0.0007	0.0015
BOD ₅ / (mg/L)	0.7690	1.2370	锌 / (mg/L)	0.0035	0.0038
COD _{Cr} / (mg/L)	15.8120	17.2520	铅 / (mg/L)	0.0006	0.0004
氨氮 / (mg/L)	0.2850	0.5030	镉 / (mg/L)	0.0000	0.0001
硝态氮 / (mg/L)	2.5980	0.0600	铬 / (mg/L)	0.0007	0.0005
总氮 / (mg/L)	0.9013	0.6026	镍 / (mg/L)	0.0037	0.0034
总磷 / (mg/L)	0.0158	0.0175	砷 / (mg/L)	0.0008	0.0005
铁 / (mg/L)	0.1747	0.0717	汞 / (mg/L)	0.0000	0.0000

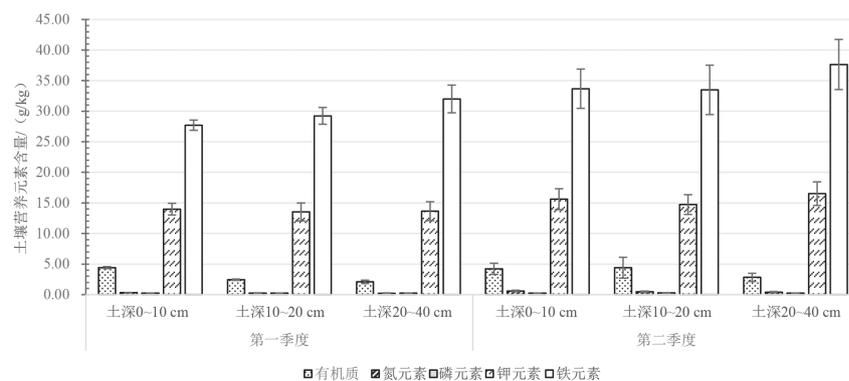


图 2 湿地土壤营养元素含量

Fig.2 Nutrient content of wetland soils

季度锰元素含量高于第一季度。依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018），石井净水厂中土壤重金属铜、锌、铅、镉、铬、镍、汞7种元素含量均达到国家标准（铜≤100 mg/kg、锌≤250 mg/kg、铅≤140 mg/kg、镉≤0.6 mg/kg、铬≤300 mg/kg、镍≤100 mg/kg、汞≤0.6 mg/kg）。

2.3 不同湿地植物各元素积累量分析

2.3.1 不同湿地植物生物量差异

植物生物量随着植物的生长而逐渐增加（表3），其中水竹芋、美人蕉生物量增长幅度最大，与第一季度相比分别增长2.73、2.47倍，苦草、梭鱼草、黑藻、花叶芦竹、风车草增长幅度差异不大，睡莲生物量增长幅度最小。

2.3.2 湿地植物大量元素积累量

对植物样品各元素含量进行检测，发现氮、磷、钾元素在植物体内大量积累，在植物生长发育过程中起到至关重要的作用^[10]，对改善湿地水质和土壤富营养化具有重要意义^[11]。计算植物单株氮、磷、钾元素积累量（表4），发现8种湿地植物对钾元素的积累量最大，氮元素次之，对磷元素的积累量最少，且不同湿地植物对氮、磷、钾元

素的积累量存在显著差异（ $P<0.05$ ）。与第一季度相比，8种湿地植物第二季度单株氮、磷、钾元素含量均有不同幅度增长，睡莲、美人蕉的氮元素积累量增长较快，睡莲、

表3 湿地植物单株生物量
Tab.3 Individual biomass of wetland plants

单位: g/株

种类	生物量		
	第一季度	第二季度	增长倍数
美人蕉	37.72±3.14	130.71±29.79	2.47
苦草	9.80±2.66	24.89±8.98	1.54
梭鱼草	38.42±11.67	106.98±34.58	1.78
黑藻	8.11±2.31	21.51±8.13	1.65
花叶芦竹	34.74±10.69	84.90±13.65	1.44
风车草	8.23±1.14	21.75±4.79	1.64
水竹芋	35.32±5.88	131.78±41.79	2.73
睡莲	55.91±7.13	117.20±112.54	1.10

表4 湿地植物大量元素积累量
Tab.4 Accumulation of macroelements in wetland plants

时间	种类	单株植物大量元素含量 / (mg/株)			单位面积大量元素含量 / (g/m ²)		
		氮元素	磷元素	钾元素	氮元素	磷元素	钾元素
第一季度	美人蕉	259.19±30.68b	19.93±3.24b	731.90±153.45a	10.37±3.19b	0.80±0.21b	29.28±9.35a
	苦草	85.16±2.55de	9.87±1.65c	108.75±19.08e	2.55±1.01c	0.30±0.06c	3.26±1.05cd
	梭鱼草	311.63±4.78b	29.01±5.76b	574.50±123.46b	15.58±4.87a	1.45±0.33a	28.73±8.56a
	黑藻	48.59±1.46e	3.20±1.02d	62.83±16.90e	1.46±0.86c	0.10±0.04cd	1.88±0.41d
	花叶芦竹	159.37±14.97c	6.76±1.95cd	213.91±25.45d	4.78±1.03c	0.20±0.08c	6.42±2.01c
	风车草	43.72±0.87e	3.31±0.98d	85.62±18.73e	0.87±0.31c	0.07±0.03d	1.71±0.32d
	水竹芋	198.56±15.58bc	22.93±9.91b	529.32±30.68bc	9.93±1.85b	1.15±0.25ab	26.47±7.87a
	睡莲	499.08±9.93a	47.52±10.31a	377.03±76.33cd	14.97±3.67a	1.43±0.30a	11.31±2.91b
第二季度	美人蕉	607.41±24.30b	36.02±10.82b	1371.72±79.67a	24.30±4.53a	1.44±0.27c	54.87±8.56b
	苦草	169.58±5.09e	12.01±3.24c	195.78±34.29d	5.09±1.56c	0.36±0.08de	5.87±1.69e
	梭鱼草	460.29±8.32c	42.48±9.87b	1557.85±178.63a	23.01±3.94a	2.12±0.38b	77.89±13.08a
	黑藻	169.39±5.08e	15.73±3.65c	205.44±62.96d	5.08±1.79c	0.47±0.06d	6.16±2.03e
	花叶芦竹	277.21±28.13d	33.53±10.85b	549.13±80.11c	8.32±2.18c	1.01±0.15c	16.47±3.02d
	风车草	67.95±1.36f	3.61±1.02d	183.24±50.93d	1.36±0.72d	0.07±0.02e	3.66±0.98e
	水竹芋	351.81±23.01cd	30.23±9.54b	923.73±106.76b	17.59±3.97b	1.51±0.33c	46.19±10.34bc
	睡莲	937.51±17.59a	97.33±12.67a	1241.09±215.98a	28.13±4.01a	2.92±0.41a	37.23±8.98c

注: 不同字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

花叶芦竹的磷元素积累量增长最多，梭鱼草、睡莲的钾元素积累量增长幅度最大，风车草、苦草的单株氮、磷、钾元素增长量最小。

不同植物每平方米氮、磷、钾元素积累量计算结果显示，与第一季度相比，8种湿地植物在第二季度的单位面积氮、磷、钾元素积累量均有所增长，且不同植物间存在显著差异 ($P<0.05$)。其中美人蕉、睡莲的单位面积氮元素增长量最大，睡莲、花叶芦竹的单位面积磷元素积累增长量较大，梭鱼草、睡莲、美人蕉的单位面积钾元素增长量较大，风车草的单位面积氮、磷、钾元素增长量最低。

2.3.3 湿地植物微量元素积累量

铜、锌、锰、镍是维持植物正常生长发育的必需微量元素^[12]，但此类元素若过量则会造成水体、土壤污染，破坏湿地生态系统，给水生动植物带来不可逆的危害^[13]。对石井净水厂8种植物单株铜、锌、锰、镍元素积累量进行计算(表5)，植物对锰元素的积累量最高，对铜、锌、镍元素的积累量较少，且两个季度中不同湿地植物对铜、

锌、锰、镍元素的单株积累量均存在显著差异 ($P<0.05$)。与第一季度相比，梭鱼草、美人蕉、水竹芋、睡莲、花叶芦竹、黑藻和风车草在第二季度的4种微量元素积累量均有所增长。其中，梭鱼草、睡莲、美人蕉的铜元素积累量较大，美人蕉、水竹芋、睡莲的锌元素积累量较大，梭鱼草、水竹芋的锰元素积累量较大，苦草、水竹芋的镍元素积累量最大，风车草为单株铜、锌、锰、镍元素积累量最低的植物。

与第一季度相比，美人蕉、梭鱼草、水竹芋、睡莲、黑藻与风车草在第二季度的单位面积微量元素积累量均有所增长，而花叶芦竹的单位面积镍元素含量下降，苦草的单位面积铜元素含量下降，且第一、第二季度中不同植物的单位面积铜、锌、锰、镍元素积累量存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.3.4 湿地植物污染元素积累量

铅、铬、砷元素会在湿地中沉积，给湿地水体和土壤中的动植物、微生物等带来诸多不利影响，破坏湿地生态

表5 湿地植物微量元素积累量
Tab.5 Trace element accumulation in wetland plants

时间	种类	单株植物微量元素含量 / (mg/株)				单位面积微量元素含量 / (mg/m ²)			
		铜元素	锌元素	锰元素	镍元素	铜元素	锌元素	锰元素	镍元素
第一 季度	梭鱼草	0.37±0.07a	0.86±0.15ab	7.77±1.88a	0.08±0.02ab	18.55±3.29a	42.94±9.02a	388.58±85.46a	3.82±0.86b
	美人蕉	0.27±0.05b	0.65±0.12b	7.13±1.32a	0.03±0.01d	10.95±1.76b	25.93±6.65b	285.00±54.29b	1.23±0.28c
	水竹芋	0.06±0.02c	0.57±0.10b	5.26±2.31b	0.11±0.03a	3.24±0.92d	28.57±6.59b	263.25±60.49b	5.59±1.02a
	睡莲	0.20±0.04b	1.12±0.21a	1.64±0.50c	0.05±0.01c	6.05±1.00c	33.73±7.93b	49.21±10.32c	1.49±0.35c
	花叶芦竹	0.04±0.01c	0.22±0.09c	0.81±0.19cd	0.06±0.01bc	1.20±0.23de	6.58±1.85c	24.44±4.39d	1.91±0.47c
	苦草	0.22±0.05b	0.26±0.06c	0.76±0.20d	0.10±0.02a	6.69±1.20c	7.82±1.32c	22.86±5.89d	2.98±0.37bc
	黑藻	0.05±0.01c	0.23±0.06c	0.37±0.07de	0.06±0.01bc	1.53±0.25de	6.88±1.06c	11.16±2.58e	1.89±0.23c
	风车草	0.01±0.003c	0.04±0.01d	0.11±0.03e	0.01±0.01e	0.24±0.04e	0.78±0.14d	2.27±0.48e	0.08±0.03d
第二 季度	梭鱼草	0.81±0.12a	1.26±0.28c	14.61±3.08b	0.12±0.03b	40.48±7.01a	63.18±9.76c	730.67±100.43b	6.24±0.82b
	美人蕉	0.43±0.08b	2.21±0.37b	8.97±2.13c	0.12±0.03bc	17.05±3.65b	88.49±20.68b	358.77±86.50c	4.99±0.97c
	水竹芋	0.24±0.05c	2.25±0.30b	39.34±7.56a	0.16±0.03a	11.79±3.36b	112.59±24.60a	1967.16±308.77a	8.02±1.12a
	睡莲	0.44±0.10b	3.33±0.67a	5.41±1.21cd	0.07±0.02d	13.07±2.87b	99.98±19.07ab	162.34±31.89d	1.98±0.65e
	花叶芦竹	0.18±0.04cd	0.77±0.12d	1.58±0.50e	0.06±0.02d	5.48±1.79c	23.12±5.02d	47.34±9.85e	1.83±0.41e
	苦草	0.13±0.03d	0.75±0.25d	3.31±0.75d	0.15±0.03ab	3.81±0.96c	22.60±5.32d	99.35±25.71d	4.49±0.86cd
	黑藻	0.11±0.02d	0.73±0.14d	3.29±0.70d	0.11±0.03c	3.19±1.01c	21.84±5.15d	98.75±26.58d	3.34±0.72d
	风车草	0.02±0.01e	0.09±0.02e	0.34±0.07f	0.02±0.014e	0.32±0.08e	1.87±0.36e	6.89±1.62f	0.17±0.03f

注：不同字母表示差异显著， $P<0.05$ 。

系统平衡，在湿地生物体内不断积累并最终给人类带来危害^[14]。而植物可以富集湿地土壤和水体中的污染元素，降低污染元素的有效性和迁移性，使其不能够为其他生物体所用，从而达到钝化、隔断污染元素进入人类食物链，净化湿地水体和土壤的目的^[15-16]。

对8种湿地植物的单株铅、铬、砷元素积累量进行计算（表6），发现第二季度美人蕉、苦草、梭鱼草、黑藻、风车草、睡莲的铅、铬、砷元素积累量均有所增长，其中黑藻的铅元素积累增长量最大，美人蕉的铬元素积累增长量最大，苦草的砷元素积累量增长幅度最大。

8种湿地植物对铬元素的单位面积积累量最高，对铅、砷元素的积累量较低。其中，美人蕉、梭鱼草、睡莲、苦草、黑藻和风车草在第二季度的铅、铬、砷元素积累量较第一季度有所增加，美人蕉、梭鱼草的单位面积铅元素积累量最大，美人蕉、水竹芋的单位面积铬元素积累量较高，梭鱼草、苦草的单位面积砷元素积累量较高。

2.4 湿地植物固碳能力分析

绿色植物通过光合作用，吸收大气中的二氧化碳，并将其固定在植物体内，从而降低大气中二氧化碳浓度，实现碳

汇作用。而植物体内固碳量是评价植物碳汇能力的重要指标^[5]。根据本研究测量计算，有机碳为8种湿地植物体内积累量最多的元素，且随着植物生物量不断提高，固碳量在第二季度显著增加。其中，睡莲、梭鱼草、花叶芦竹、美人蕉、水竹芋的固碳能力较强，苦草、风车草、黑藻的固碳能力较弱（图3）。

对不同植物单位面积固碳量的计算结果（图4）显示，8种湿地植物第一季度有机碳积累量为22.95 g/m²~270.02 g/m²，第二季度固碳量为66.19 g/m²~937.49 g/m²。其中，美人蕉、花叶芦竹、水竹芋、睡莲和梭鱼草的单位面积有机碳积累量较大，苦草、黑藻、风车草的有机碳积累量较小。

2.5 湿地植物各元素积累量聚类分析

对石井净水厂8种湿地植物两个季度单株尺度和单位面积尺度大量元素、微量元素以及污染元素积累量进行K-均值聚类分析，将8种湿地植物按“较强、中等、较弱”3个元素积累能力等级进行分类（表7）。对聚类结果的类别进行方差分析，得到各类别间距离差异的概率值均小于0.05，即聚类效果好。

表6 湿地植物污染元素积累量
Tab.6 Accumulation of pollutant elements in wetland plants

时间	种类	单株植物微量元素含量 / (μg/株)			单位面积微量元素含量 / (mg/m ²)		
		铅元素	铬元素	砷元素	铅元素	铬元素	砷元素
第一 季度	美人蕉	15.93±4.01b	51.65±10.33c	6.91±1.66b	0.64±0.23b	2.07±1.13b	0.28±0.08c
	苦草	7.50±2.16c	9.03±2.45de	4.56±1.00b	0.23±0.09c	0.27±0.06cd	0.14±0.04cd
	梭鱼草	5.45±1.98c	13.84±3.91d	2.85±0.76bc	0.27±0.08c	0.69±0.20c	0.14±0.03cd
	黑藻	8.23±2.01c	9.73±1.93de	14.22±4.32b	0.25±0.07c	0.29±0.05cd	0.43±0.18c
	花叶芦竹	28.39±5.03a	83.13±17.43b	121.34±25.65a	0.85±0.19b	2.49±0.62b	3.64±1.25b
	风车草	0.91±0.25d	4.25±1.03e	0.55±0.10c	0.02±0.01e	0.08±0.02d	0.02±0.01d
	水竹芋	24.42±4.67ab	159.55±55.70a	107.12±20.34a	1.22±0.35a	7.98±2.54a	5.36±1.30a
	睡莲	4.31±1.24c	20.63±4.26d	4.41±0.95b	0.13±0.05d	0.62±0.25cd	0.13±0.03cd
第二 季度	美人蕉	66.95±10.43ab	369.53±51.29a	36.20±7.64b	2.68±1.01a	14.78±3.22b	1.45±0.36ab
	苦草	58.60±9.92b	89.05±18.38d	54.34±10.23a	1.76±0.45c	2.67±0.66d	1.63±0.32a
	梭鱼草	56.39±12.88b	134.59±22.96c	31.98±6.47b	2.82±0.81a	6.73±1.95c	1.60±0.56a
	黑藻	73.97±13.26a	41.16±5.87e	39.08±8.69b	2.22±0.58b	1.23±0.41d	1.17±0.31b
	花叶芦竹	15.23±2.96d	174.04±28.61b	3.24±0.63d	0.46±0.12e	5.22±1.32c	0.10±0.03c
	风车草	6.35±1.54e	22.84±3.01e	3.76±0.55d	0.13±0.08f	0.46±0.13e	0.08±0.02c
	水竹芋	64.18±11.88ab	425.87±79.19a	36.63±8.11b	3.21±1.15a	21.29±4.51a	1.83±0.48a
	睡莲	34.42±6.21c	85.12±17.57d	21.74±4.38c	1.03±0.23d	2.55±0.51d	0.65±0.16b

注：不同字母表示差异显著，P<0.05。

2.6 湿地植物各元素富集能力

分析石井净水厂中湿地植物对土壤 10 种元素的富集能力, 结果显示植物对氮元素的富集能力最强, 对磷元素的富集能力次之, 对钾、锰元素的富集能力再次之, 对铜、锌、铅、铬、镍、砷元素的富集能力较弱 (表 8)。

石井净水厂第一、二季度数据显示, 睡莲、苦草、美人蕉、黑藻、梭鱼草为氮元素富集能力较强的植物种类, 花叶芦竹、风车草、水竹芋的氮元素富集能力较弱; 苦草、睡莲富集磷元素能力较强; 富集钾元素能力较强的植物为美人蕉和梭鱼草, 钾元素富集能力最弱的植物为花叶芦竹; 苦草、梭鱼草的铜元素富集能力最强; 苦草、黑藻的锌元素富集能力最强。第一、二季度美人蕉、梭鱼草、风车草、睡莲的铅、铬、镍、砷元素富集系数较低, 均小于 1.00。

3 讨论

3.1 湿地植物对不同元素的富集特征

植物对不同元素的富集能力从高到低排序依次为氮、磷、钾、锌、锰、铜、砷、镍、铬、铅。其中, 氮元素富集能力较强的植物有睡莲、苦草、美人蕉、黑藻、梭鱼草等; 磷元素富

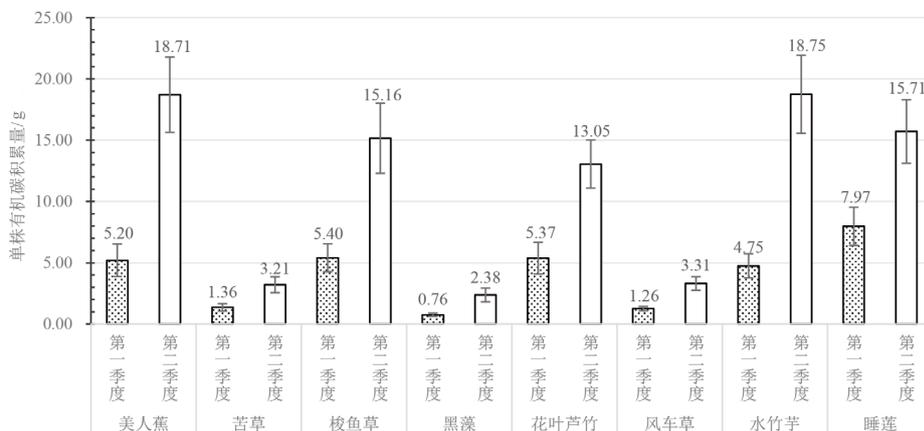


图 3 湿地植物单株固碳量

Fig.3 Carbon fixation per plant by wetland plants

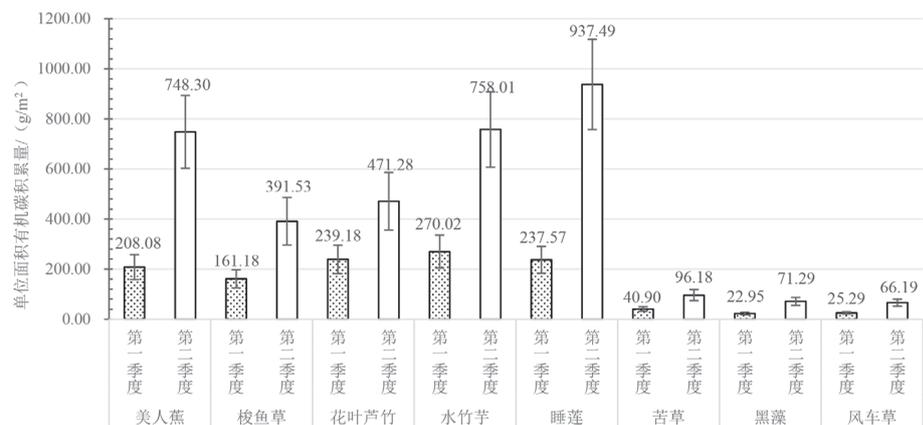


图 4 湿地植物单位面积固碳量

Fig.4 Carbon fixation per unit area by wetland plants

表 7 8 种湿地植物元素积累量分类

Tab.7 Classification of elemental accumulation in eight wetland plants

元素积累种类	较强	中等	较弱
有机碳	美人蕉、水竹芋、睡莲	梭鱼草、花叶芦竹	苦草、黑藻、风车草
氮元素	睡莲	美人蕉、梭鱼草、花叶芦竹、水竹芋	苦草、黑藻、风车草
磷元素	睡莲	美人蕉、梭鱼草、花叶芦竹、水竹芋	苦草、黑藻、风车草
钾元素	美人蕉、梭鱼草	水竹芋、睡莲	苦草、黑藻、花叶芦竹、风车草
铜元素	梭鱼草	美人蕉、水竹芋、睡莲	苦草、黑藻、花叶芦竹、风车草
锌元素	水竹芋、睡莲	美人蕉、梭鱼草	苦草、黑藻、花叶芦竹、风车草
锰元素	水竹芋	美人蕉、梭鱼草	苦草、黑藻、花叶芦竹、风车草、睡莲
镍元素	水竹芋	美人蕉、苦草、梭鱼草、黑藻	花叶芦竹、风车草、睡莲
铅元素	美人蕉、黑藻、水竹芋	苦草、梭鱼草、花叶芦竹、睡莲	风车草
铬元素	水竹芋	美人蕉、花叶芦竹	苦草、梭鱼草、黑藻、睡莲、风车草
砷元素	花叶芦竹、水竹芋	美人蕉、苦草、梭鱼草、黑藻	风车草、睡莲

集能力较强的植物有苦草、睡莲；钾元素富集能力较强的植物为美人蕉和梭鱼草；苦草、梭鱼草对铜元素富集能力最强；苦草、黑藻对锌元素富集能力最强。苦草通过其发达的根系吸附和吸收氮、磷等元素，同时在根系泌氧和微生物的协同作用下，促进元素分解和转化，从而有效净化湿地土壤和水体^[17]。胡聪等^[18]、尚媛媛等^[19]的研究同样发现苦草可能更适合作为净化湿地水体和土壤的先锋物种。

3.2 湿地植物对不同元素的综合积累量

通过 K-均值聚类分析发现，睡莲吸收氮、磷元素能力较强，睡莲的大面积种植有利于净化富营养化的湿地水体和土壤，这与张倩妮等^[20]的研究结果基本一致。梭鱼草、水竹芋、睡莲大面积种植可提高湿地对微量元素超标造成的铜、锌、锰、镍污染的抗性。美人蕉、水竹芋、花叶芦竹、梭鱼草等可用于铅、铬等污染元素超标的湿地水体和土壤的净化。

4 结论

研究发现石井净水厂水质总体较好，水样各项指标均达国家Ⅲ类水质标准以上，湿地土壤中营养元素较为丰富，重金属元素含量均低于国家标准。但不同湿地植物对不同元素的净化能力存在显著差异，可根据湿地的实际污染情况针对性选择湿地植物，例如苦草、睡莲等植物可应用于富营养化的湿地中；水竹芋、美人蕉、梭鱼草等植物可用于净化铜、锌、锰、镍、铅、铬等元素污染的湿地。此外，一般生物量

较大的湿地植物，例如睡莲、水竹芋、美人蕉等，其有机碳积累量亦较大，从而表现出较强的碳汇能力。

湿地植物固碳和净化是一个复杂的过程，本研究从植物单株尺度、单位面积尺度综合分析了湿地植物在生长期对各元素的累积情况，初步筛选出具有强固碳能力和净化能力的湿地植物。但本研究尚未得到针对沉水植物、浮水植物、挺水植物三类湿地植物净化能力的规律。下一步将继续对广州市常见湿地植物固碳功能与净化功能进行深入研究，以期为今后湿地修复、增强湿地生态服务功能提供科学参考。

注：本文图表均为作者自摄自绘。

参考文献：

- [1] 彭定人, 李汉维, 覃永华, 等. 广西荔浦荔江国家湿地公园植物多样性研究 [J]. 亚热带植物科学, 2020, 49 (1): 52-59.
- [2] 罗慧莹, 肖以华, 佟富春. 广东三水云东海国家级湿地公园秋冬季鸟类多样性研究 [J]. 广东园林, 2021, 43 (1): 22-26.
- [3] 李峰平, 魏红阳, 马喆, 等. 人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展 [J]. 湿地科学, 2017, 15 (6): 849-854.
- [4] 李莹, 张洲, 杨高明, 等. 湿地植物根系泌氧能力和根表铁膜与根系吸收重金属的关系 [J]. 生态环境学报, 2022, 31 (8): 1657-1666.
- [5] 徐松浚, 徐正春. 广州市湿地植被碳汇功能研究 [J]. 湿地科学, 2015, 13 (2): 190-196.
- [6] 张靖雨, 汪邦稳, 龙昶宇, 等. 湿地植物对农村生活污水中氮磷

表 8 8 种湿地植物元素富集系数
Tab.8 Elemental enrichment coefficients of eight wetland plants

时间	种类	氮元素	磷元素	钾元素	铜元素	锌元素	锰元素	铅元素	铬元素	镍元素	砷元素
第一季度	美人蕉	78.56b	6.13c	4.24a	0.94b	1.04c	2.35a	0.00c	0.05c	0.12d	0.10cd
	苦草	99.30a	11.68a	2.43c	2.94a	1.60a	0.97d	0.10a	0.04c	1.53a	0.25c
	梭鱼草	92.74a	8.76bc	3.27b	1.25b	1.35b	2.51a	0.00c	0.01e	0.30c	0.04d
	黑藻	69.41bc	4.64d	1.72d	0.82b	1.73a	0.58de	0.02b	0.05c	1.19b	0.96b
	花叶芦竹	52.48d	2.26e	1.35d	0.15c	0.38d	0.29ef	0.00c	0.09b	0.28c	1.90a
	风车草	60.92c	4.68d	2.28c	0.19c	0.29d	0.17f	0.00c	0.02d	0.07d	0.04d
	水竹芋	64.28c	7.53c	3.28b	0.24c	0.98c	1.85c	0.00c	0.18a	0.48c	1.65a
	睡莲	102.02a	9.86ab	1.47d	0.47c	1.21bc	0.36e	0.00c	0.01e	0.13d	0.04d
第二季度	美人蕉	28.54b	1.69d	2.02ab	0.41c	0.94b	0.57c	0.00c	0.09a	0.16b	0.15b
	苦草	41.85a	5.74b	1.51bc	0.65b	1.68a	1.10b	0.07a	0.12a	0.98a	1.19a
	梭鱼草	26.43b	4.72b	2.80a	0.96a	0.66c	1.13b	0.00c	0.04c	0.10bc	0.16b
	黑藻	48.37a	8.69a	1.83b	0.63b	1.88a	1.26b	0.01b	0.06b	0.84a	0.99a
	花叶芦竹	20.06c	4.69b	1.24c	0.27cd	0.50c	0.15d	0.00c	0.07b	0.12b	0.02c
	风车草	19.19c	1.97d	1.62bc	0.09e	0.24d	0.13d	0.00c	0.03c	0.06c	0.09b
	水竹芋	16.40c	2.73c	1.35c	0.23d	0.95b	2.46a	0.00c	0.11a	0.20b	0.15b
	睡莲	49.14a	9.87a	2.03ab	0.47bc	1.58a	0.38c	0.00c	0.02c	0.09bc	0.10b

注：不同字母表示差异显著， $P < 0.05$ 。

的净化作用[J].水土保持通报,2021,41(5):15-22,114.

[7]中华人民共和国生态环境部.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S].北京:中国环境出版集团,2018.

[8]刘冉,甘淳丹,赵海燕,等.四种大型湿地植物对水产养殖废水中矿质元素和重金属富集特征的影响[J].南京农业大学学报,2017,40(5):859-866.

[9]XU J, ZHENG L, XU L, et al. Uptake and allocation of selected metals by dominant vegetation in Poyang Lake wetland: From rhizosphere to plant tissues[J]. Catena, 2020, 189: 104477-104477.

[10]CHOUDHARY S, CHOUDHARY S, UPADHYAY K A, et al. Accumulation and Partitioning Pattern of Nutrients in Rice Grown in Vertisol under IPNS-STCR based Nutrient Management[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2021, 40(47):1-9.

[11]周玥,韩玉国,张梦,等.4种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J].应用生态学报,2016,27(10):3353-3360.

[12]曾珍,陈万生,肖莹.植物必需金属离子对药用植物次生代谢产物生物合成的作用[J].植物生理学报,2022,58(4):597-606.

[13]WANG S F, ZHAO Y, GUO J H, et al. Antioxidative response in leaves and allelochemical changes in root exudates of Ricinus communis under Cu, Zn, and Cd stress[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(32):32747-32755.

[14]严莉,李龙山,倪细炉,等.5种湿地植物对土壤重金属的富集转运特征[J].西北植物学报,2016,36(10):2078-2085.

[15]周晓声,娄厦,RADNAEVA L D,等.植物对土壤重金属富集特性研究进展[J].生态毒理学报,2022,17(3):400-410.

[16]罗倩,林凤莲,袁锋,等.人工湿地植物根际微生物对4种污水重金属元素的净化能力[J].西南农业学报,2022,35(1):176-185.

[17]张梅婷,刘晋仙,苏嘉贺,等.苦草叶表附生和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素[J].环境科学,2023,44(1):252-261.

[18]胡聪,胡刚,张忠华,等.广西澄江喀斯特湿地沉水植物碳、氮、磷化学计量特征[J].生态学报,2021,41(13):5300-5308.

[19]尚媛媛,关保华,郑建伟,等.沉水植物苦草和轮叶黑藻对水环境的影响[J].中国农学通报,2016,32(28):55-159.

[20]张倩妮,陈永华,杨皓然,等.29种水生植物对农村生活污水净化能力研究[J].农业资源与环境学报,2019,36(3):392-402.

作者简介:

张碧媛/1997年生/女/辽宁朝阳人/硕士/广州市林业和园林科学研究院,广东广州城市生态系统国家定位观测研究站(广州510405)/专业方向为园林植物应用研究

(*通信作者)林妍栏/1982年生/女/广东广州人/硕士/广州市市政工程设计研究总院有限公司(广州510060)/高级工程师/专业方向为园林设计、园林生态/E-mail:52622183@qq.com

林雯/1987年生/女/江西赣州人/博士/广州市林业和园林科学研究院,广东广州城市生态系统国家定位观测研究站(广州510405)/高级工程师/专业方向为城市湿地生态修复及林业碳汇

代色平/1975年生/女/福建莆田人/博士/广州市林业和园林科学研究院,广东广州城市生态系统国家定位观测研究站(广州510405)/教授级高级工程师/专业方向为园林植物应用

李智琦/1979年生/女/湖北武汉人/博士/广州市林业和园林科学研究院,广东广州城市生态系统国家定位观测研究站(广州510405)/高级工程师/专业方向为城市生态、生物多样性研究