不同挺水植物对4种水体底泥的净化能力*

区卓贤¹ 朱铧楠² 冼丽铧² 孙同高¹ 郭彩霞¹ 陈红跃²

(1. 广州紫荆林业规划设计有限公司,广东广州 510642; 2. 华南农业大学林学与风景园林学院,广东广州 510642)

摘要 在广州市的水体流域中,不同的水体底泥化学性质差异大,需要筛选出因地制宜的挺水植物,发挥其适应的景观价值和生态修复价值。因此研究选取广州市内河涌、湖库、小微水体、近海水体,采用常见的挺水植物风车草 Cyperus involucratus、翠芦莉 Ruellia simplex、菖蒲 Acorus calamus、再力花 Thalia dealbata、美人蕉 Canna indica 进行净化试验。试验共设置了 20 个处理,在 120 d 后测定底泥中有机质、全氮、全磷、全钾、铵态氮以及硝态氮含量,计算植物对底泥污染物的去除率,并采用有机污染指数法和综合污染指数法对底泥污染程度进行评价。研究结果表明,5 种植物对底泥的有机质去除率在1.89%~40.23%,对底泥的全氮、全磷、全钾去除率分别在 5.19%~36.30%、4.71%~48.48%、4.21%~40.78%,对底泥的铵态氮、硝态氮去除率在 14.80%~73.06%、13.75%~92.95%。5 种植物均能将河涌底泥净化至清洁程度;美人蕉在近海水体底泥中表现出最好的净化能力,能将近海水体底泥净化至轻度污染;翠芦莉和美人蕉在小微水体底泥和湖库底泥中表现出更好的净化效果。

关键词 挺水植物;水体底泥;污染物;净化能力

中图分类号: X53, S766 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 06-0095-09

DOI: 10. 20221/j. cnki. 2096-2053. 202406014

Study on the Purification Ability of Different Emergent Plants on Sediments of Four Water Bodies

OU Zhuoxian¹ ZHU Huanan² XIAN Lihua² SUN Tonggao¹ GUO Caixia¹ CHEN Hongyue²

- (1. Guangzhou Zijing Forestry Planning and Design Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510642, China;
- 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract In the water bodies of Guangzhou, the chemical properties of sediment vary significantly across different water bodies, necessitating the selection of suitable emergent plants tailored to local conditions to maximize their landscape value and ecological restoration potential. Therefore, this study selected river channels, lakes and reservoirs, small water bodies, and coastal water bodies within Guangzhou to conduct purification experiments using common emergent plants: *Cyperus involucratus*, *Ruellia simplex*, *Acorus calamus*, *Thalia dealbata*, and *Canna indica*. A total of 20 treatments were set up, and after 120 days, the contents of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen in the sed-

^{*}基金项目:广州市生态环境局项目(4400-H21374)。

第一作者: 区卓贤 (1995—), 男, 助理工程师, 从事林业调查和规划设计研究, E-mail: 986486867@ qq. com。

通信作者: 洗丽铧 (1987—), 女, 实验师, 从事园林植物与生态研究, E-mail: xianlihua@ scau. edu. cn。

iment were measured. The removal rates of pollutants from the sediment by the plants were calculated, and the pollution levels of the sediment were evaluated using the organic pollution index method and the comprehensive pollution index method. The results indicated that the five plant species achieved organic matter removal rates ranging from 1.89% to 40.23% in the sediment. The removal rates for total nitrogen, total phosphorus, and total potassium were 5.19% to 36.30%, 4.71% to 48.48%, and 4.21% to 40.78%, respectively. For ammonium nitrogen and nitrate nitrogen, the removal rates were 14.80% to 73.06% and 13.75% to 92.95%, respectively. All five plant species were able to purify the sediment in river channels to a clean level. *Canna indica* demonstrated the best purification ability in coastal water body sediment, reducing it to a mildly polluted state. *Ruellia simplex* and *Canna indica* showed better purification effects in the sediment of small water bodies and lakes and reservoirs.

Key words emergent plants; bottom sediments; pollutants; purification capacity

城市水体属于城市生态系统的一个重要组成部分,可以发挥出水体循环、水质涵养、水土保持、调节温湿度、改善城市气候等多种功能^[1]。黑臭水体已经成为当今水体污染最为常见的表现形式^[2]。广州作为代表性城市,河流密布且多流经居民区、工业区,底泥淤积污染重,消除黑臭任务艰巨^[3]。

在水体生态系统中,底泥是影响植物生长发育的重要约束因子,挺水植物的生长与底泥营养状况密切相关^[4-5]。底泥污染和水体污染是相互影响的,底泥污染物会随着水流、溶解、吸附等进入到水体中,底泥表面发生的一系列物理生化反应影响着水体自净、降解和迁移转化,在一定条件下会对水体造成二次污染^[5-6]。挺水植物能吸收水中氮磷,抑制有害藻类及底泥营养盐释放,但不同种类对底泥营养含量的适应性各异^[5]。广州市水体流域底泥化学性质差异显著,亟需因地制宜筛选挺水植物,以发挥其景观与生态修复双重价值,这是当前水体植物生态系统建设中的紧迫任务。

当前,挺水植物在吸收和富集水体底泥污染物方面的研究虽取得一定进展,但多数只是针对同种水体底泥不同种挺水植物净化能力研究,针对不同水体类型底泥的研究仍显不足。本研究选取广州市内4种典型挺水植物及4种水体底泥,深入探究其净化能力。旨在明确各种挺水植物去除底泥污染物的效能,为构建高效修复的水体挺水植物景观提供理论支撑与实践指导,并为广州市不同水体中挺水植物的科学选择与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与底泥取样点

广州市坐落于广东省中南部,位居珠江三角洲的北端,属亚热带季风气候,光照充足,雨量丰沛,气候宜人。全市总面积 7 434.4 km²,其中市区面积 3 843.43 km²。广州作为西江、北江、东江三大水系的交汇之地,紧邻南海,水资源丰富。市内水系发达,水域面积达 744 km²,中心城区拥有 231 条主要河涌,总长 913 km^[7]。

试验地位于华南农业大学启林北区苗圃,苗圃有塑料薄膜覆盖,不受降雨的影响,平均海拔20~60 m,年平均气温为20.2℃;降水多,年平均降水量为1700 mm^[8]。

1.2 研究材料

1.2.1 试验植物 按照植物耐水生或湿生、耐污染力强、根系发达、易成活、美观等原则,根据本试验的研究内容,筛选出以下 5 种挺水植物:风车草 Cyperus involucratus、翠芦莉 Ruellia simplex、菖蒲 Acorus calamus、再力花 Thalia dealbata和美人蕉 Canna indica,株高分别为 52、55、74、77 和 63 cm。5 种植物在苗圃内培养 20 d,令其适应环境,最后选择生长状况良好、生物量相近、生长势相近的植株为试验对象。

1.2.2 试验底泥 2022年8月,选择了4个具有代表性的水体底泥采样点:广州市天河区的一类河涌车陂涌(涌口至龙洞水库段,代表河涌水体),广州番禺区东郊的海鸥岛(代表近海水体),广州市华南农业大学校内的昭阳湖(代表小微水体),以及位于广州市天河区的筲箕窝水库(又名龙洞水库,代表湖库水体)。

为了避免部分水体受潮汐影响,因此选择 8:00—10:00 am 时间段对河涌、近海水体、小 微水体和湖库水体进行了底泥采样,每种水体选 择未经疏浚且距水岸 3~5 m 处取点,以避免地表 冲积物影响,各选择 3 个代表性采样点。采样时, 先铲除表层 20 cm 的底泥及杂质,再采集下层底 泥,并剔除石块、动植物残体、塑料等杂物,装 入编号的聚乙烯塑料袋中。底泥运回后,平均分 为 3 部分处理:一部分用于试验,经一天放置去 水后干燥备用;一部分进行理化性质分析;剩余 部分冷藏储存以备后续使用。

1.3 试验方法与指标测定

1.3.1 人工模拟试验 采用人工模拟园林水体的

室内试验,试验装置为塑料花盆,规格为:直径 0.21 m,高度 0.15 m,试验中底泥厚度约为 0.12 m,体积约 0.004 m³;试验用水为自来水,保持水面高出底泥,并将水完全注满至塑料花盆的容积极限。各植物分别选取 60 株,共 300 株,每种植物在每种底泥中种植 15 株,分别在植后 0、120 d取样测量相应指标。

1.3.2 底泥中的营养盐 在试验的 0 和 120 d 对底泥进行化学性质分析。底泥运回实验室后测定有机质 (OM)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、铵态氮 (NH⁴⁺) 和硝态氮 (NO³⁻) 含量。方法见表 1。

表 1 底泥测定指标和测定方法

Table 1 Sediment determination indicators and methods

序号 Number	项目 Project	分析方法 Analytical method	方法来源 Method source
1	有机质	燃烧氧化-滴定法[9]	НЈ 658—2013
2	全氮	凯氏定氮法[10]	НЈ 717—2014
3	全磷	碱熔-钼锑抗分光光度法[11]	НЈ 632—2011
4	全钾	硼氢化钾-硝酸银分光光度法[12]	GB/T 17135—1997
5	铵态氮	分光光度法[13]	НЈ 634—2012
6	硝态氮	分光光度法[14]	НЈ 634—2012

1.3.3 底泥污染评价 针对底泥污染现状的评价,目前用有机指数来评价底泥中的有机质污染水平,采用综合污染指数法评价底泥中全氮、全磷的污染程度^[15-16]。因此,本研究对试验 0 和 120 d 后的底泥采用有机指数评价法和综合污染指数评价法进行全氮、全磷、有机质污染评价,如表 2 和 3。

有机污染指数 (O_i) :

$$O_{\rm I} = 0.95T_{\rm N} + O_{\rm M}/1.724$$
 (1)

式 (1) 中: O_I 为有机污染指数; T_N 为全氮含量实际测定值 (%); O_M 为有机质含量实际测定值 (%)。

单项污染评价指数

$$S_{\rm r} = C_{\rm r}/C_{\rm 0r} \tag{2}$$

综合污染指数

$$F_{\rm F} = \sqrt{\frac{F^2 + F_{max}^2}{2}} \tag{3}$$

式 (2) (3) 中: S_x 为底泥中污染物 x 的污染指数; C_x 为底泥中污染物 x 的实际测量值 ($mg \cdot kg^{-1}$); C_{0x} 为该污染物 x 组分的评价标准 ($C_{0(TN)} = 0.055\%$, $C_{0(TP)} = 0.060\%$); F_F 为综

合污染指数;F 为底泥中全氮和全磷污染指数的平均值; F_{max} 为最大单项污染指数。

表 2 底泥有机污染指数分级评价标准[17]

Table 2 Sediment determination indicators and methods

有机指数 Organic Index	等级划分 Level division
$O_{\rm I} \leq 0.05$	清洁 Cleansing
$0.05 < O_1 \le 0.20$	轻度污染 Mild pollution
$0.20 < O_1 \le 0.50$	中度污染 Moderate pollution
$O_{\rm I} > 0.50$	重度污染 Severe pollution

1.3.4 底泥污染物去除率 水体底泥污染物质去除率 *R*, 计算公式为:

$$R = (C_x - C_{ox}) C_x \times 100\%$$
 (4)

式 (4) 中, C_x 为种植植物 120 d 后底泥污染物 x 的实际测量值, C_{ox} 为底泥本底污染物 x 的实际测量值。

1.3.5 数据分析 利用 Microsoft Excel 2010 软件, SPSS27.0 软件等进行试验数据的单因素方差分析以及 Duncan 多重比较,比较不同挺水植物对 4 种底泥的污染物去除率的差异显著性,显著水平 α=0.05。

表 3 底泥综合污染指数分级评价标准[18]

Table 3 Evaluation standard for classification of comprehensive sediment pollution index

等级划分 Level division	全氮污染指数 $S_{\scriptscriptstyle { m TN}}$	全磷污染指数 S_{TP}	综合污染指数 $F_{\scriptscriptstyle \mathrm{F}}$	综合污染等级 Comprehensive pollution grade
1	$S_{\text{TN}} \leq 1.0$	$S_{\text{TP}} \leq 0.5$	$F_{\rm F} \leq 1.0$	清洁
2	$1.0 < S_{TN} \le 1.5$	$0.5 < S_{TP} \le 1.0$	1. $0 < F_F \le 1.5$	轻度污染
3	1. $5 < S_{\text{TN}} \le 2.0$	$1.0 < S_{TP} \le 1.5$	1. $5 < F_F \le 2.0$	中度污染
4	$S_{\rm TN} > 2.0$	$S_{\text{TP}} > 1.5$	$F_{\rm F} > 2.0$	重度污染

2 结果与分析

2.1 4 种水体底泥本底营养物质分析

2.1.1 4种底泥初始化学性质 由表 4 可知, 近

海水体底泥的有机质、全氮、全磷、全钾和铵态 氮含量均高于其他3种底泥,且存在显著差异(P <0.05)。河涌底泥的有机质、全氮和铵态氮含量 最低,且与其他3种底泥有显著差异(P<0.05)。

表 4 广州市 4 种水体底泥的化学性质

Table 4 Physicochemical properties of sediments from four water bodies

指标 Index	河涌底泥 River sediment	近海水体底泥 Bottom sediment of nearshore water bodies	小微水体底泥 Bottom sediment of small and micro water bodies	湖库底泥 Lake and storage mud
有机质质量分数/ (g・kg ⁻¹)w _{roc}	2. 10±0. 02d	15. 21±0. 02a	5. 19±0. 33c	6. 13±0. 02b
全氮质量分数/ (g・kg ⁻¹) w _{tn}	0. 19±0. 00d	1. 15±0. 01a	0. 25±0. 00c	0.80±0.00b
全磷质量分数/ (g・kg ⁻¹) w _{TP}	0.75±0.00c	0. 94±0. 00a	0.89±0.00b	0. 13±0. 00d
全钾质量分数/ (g・kg ⁻¹) w _{tk}	15. 33±0. 06c	21. 04±0. 44a	5. 87±0. 03d	18. 68±0. 06b
铵态氮质量分数/ (mg・kg ⁻¹) w _{NH⁴⁺}	1. 70±0. 09c	8. 06±0. 00a	5. 31±0. 07b	5. 32±0. 06b
硝态氮质量分数/ (mg・kg ⁻¹) w _{NO} ³⁻	6. 27±0. 09a	0. 54±0. 14c	1.77±0.08b	0. 41±0. 09c

注:同一行不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P<0.05); 2022 年 8 月采集分析。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments (P < 0.05); collected and analyzed in August 2022.

- 2.1.2 4 种底泥有机污染指数分级 由表 5 可知, 4 种底泥的有机污染等级均为重度污染。
- 2.1.3 4种底泥综合污染指数分级 根据表 6 数据对比表 3 分级标准可知河涌与小微水体底泥的全氮为清洁, 湖库底泥轻度污染, 近海水体底泥重度污染; 全磷方面, 河涌与小微水体中度污染, 近海水体重度污染, 湖库底泥清洁。根据式 3 计算的 F_F 值, 由表 6 可知, 综合污染等级由轻至重依次为: 河涌底泥(轻度)、冰微水体底泥(中度)、近海水体底泥(重度)。

2.2 植物的底泥中净化能力分析

2.2.1 植物对底泥的有机质去除率 如表7所示, 5种挺水植物对4种底泥的有机质均有不同程度的

表 5 广州市 4 种水体底泥有机污染指数污染等级评价 Table 5 Evaluation of pollution level of sediment organic pollution index

	•	
水体底泥 Bottom sediment of water body	有机污染 指数 <i>O</i> _I	污染等级 Class of pollution
河涌底泥	1. 39	重度污染
近海水体底泥	9. 91	重度污染
小微水体底泥	3. 25	重度污染
湖库底泥	4. 31	重度污染

注: 2022 年 8 月采集分析。

Note: Collected and analyzed in August 2022.

去除作用。处理 120 d,风车草、翠芦莉、菖蒲和再力花均对河涌底泥的有机质去除率最高,且均

表 6 广州市 4 种水体底泥综合污染指数污染等级评价

Table 6 Comprehensive pollution index of sediment pollution level evaluation

水体底泥 Bottom sediment of water body	全氮污染指数 $S_{\scriptscriptstyle { m TN}}$	全磷污染指数 S_{TP}	综合污染 指数 $F_{\scriptscriptstyle \mathrm{F}}$	综合污染等级 Comprehensive pollution level
河涌底泥	0. 34	1. 25	1. 10	轻度污染
近海水体底泥	2. 08	1. 56	3. 83	重度污染
小微水体底泥	0. 45	1. 48	1. 55	中度污染
湖库底泥	1. 45	0. 21	1. 39	轻度污染

注: 2022 年 8 月采集分析。

Note: Collected and analyzed in August 2022.

与其他 3 种底泥之间存在显著差异 (P<0.05)。美人蕉对小微水体底泥的有机质去除率最高,且与其

他 3 种底泥之间有显著差异 (*P*<0.05), 而其他 3 种底泥之间无显著差异。

表 7 广州市不同挺水植物对 4 种水体底泥的有机质去除率 单位:%
Table 7 Organic matter removal rate of four types of sediments by different plants

植物名称 Plant name	河涌底泥 River sediment	近海水体底泥 Bottom sediment of nearshore water bodies	小微水体底泥 Bottom sediment of small and micro water bodies	湖库底泥 Lake and reservoir sediment
风车草	31. 90±18. 90a	11. 80±3. 91b	5. 11±2. 41b	16. 85±4. 89ab
翠芦莉	35. 99±2. 44a	6. 45±0. 35c	1.89±0.94c	15. 99±1. 27b
菖蒲	40. 23±3. 51a	18. 23±3. 35b	15. 86±5. 02b	7. 14±1. 74b
再力花	36. 16±5. 20a	19. 22±2. 09b	12. 74±1. 59bc	4. 52±0. 40c
美人蕉	13. 07±3. 83b	12. 48±1. 69b	38. 15±6. 86a	17. 81±2. 96b

注:同一行不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P<0.05);处理时间为 120 d。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments (P<0.05); the processing time is 120 days.

2.2.2 植物对底泥的全氮、全磷、全钾去除率 如表 8 所示,全氮去除率均为正值,且同种植物在 不同底泥中去除率有差异。风车草对湖库底泥去 除率最高,对小微水体最低;翠芦莉对近海水体 去除率最低;菖蒲对 4 种底泥去除率均衡;再力花 对近海水体去除率最佳;美人蕉对河涌底泥去除率最高。处理 120 d 后,全磷含量均下降,表明植 物有净化效果。风车草和美人蕉分别对近海水体 和小微水体底泥全磷去除能力最强;翠芦莉、菖蒲、再力花也各有最高去除率,但差异不显著。对于全钾,5种植物均在小微水体底泥中去除率最高;除美人蕉外,其他植物在除小微水体外其余底泥中去除率差异不大;美人蕉对河涌和近海水体底泥去除率相对较低,且无显著差异。

2.2.3 植物对底泥的铵态氮和硝态氮去除率 土壤氮素分有机与无机两种,有机氮需矿化为无机氮(如硝态氮、铵态氮)方能被植物吸收^[19]。如表9所示,不同植物对各类底泥中铵态氮和硝态氮的去除效果各异,风车草、美人蕉对小微水体底

泥铵态氮去除率最高;翠芦莉、菖蒲对河涌底泥铵态氮去除效果最佳;再力花对湖库底泥铵态氮去除率领先,且差异显著。对于硝态氮,风车草对湖库底泥去除率最高,与近海水体底泥差异显著 (P<0.05);翠芦莉对小微水体底泥去除率最低;菖蒲对湖库底泥、再力花与美人蕉对近海水体底泥的硝态氮去除率均表现最优。

2.2.4 不同植物对 4 种底泥有机污染等级的影响由表 10 可知,4 种底泥种植不同植物 120 d 后,O_I 值均较本底低,表明植物能吸收净化底泥有机质。降低程度因植物和底泥类型而异:风车草对近海水体底泥 O_I 降低最显著,与其他底泥差异大;翠芦莉对小微水体底泥降低最多,但各底泥间无显著差异;菖蒲对近海水体底泥降低最明显,而对湖库底泥降低最少;再力花和美人蕉均对近海水体底泥降低最多,分别对小微水体和河涌底泥降低最少,且这两种底泥间差异显著 (P<0.05)。

2.2.5 不同植物对 4 种底泥综合污染等级的影响 由表 11 可知,不同植物均对 4 种底泥有净化效果,

表 8 广州市不同挺水植物对 4 种水体底泥的全氮、全磷、全钾去除率 单位:%

Table 8 Total nitrogen, total phosphorus and total potassium removal rates of four types of sediments by different plants

指标 Index	植物名称 Plant name	河涌底泥 River sediment	近海水体底泥 Bottom sediment of nearshore water bodies	小微水体底泥 Bottom sediment of small and micro water bodies	湖库底泥 Lake and reservoir sediment
全氮质量分数 w _{tn}	风车草	20. 88±4. 97ab	19. 53±3. 96ab	8. 02±3. 31b	25. 80±5. 78a
	翠芦莉	29. 63±3. 85a	12. 85±0. 76b	23. 72±3. 56a	26. 45±3. 50a
	菖蒲	21. 77±1. 53a	14. 74±2. 97a	19. 50±4. 19a	17. 26±1. 52a
	再力花	20. 24±5. 07b	36. 30±5. 19a	5. 19±1. 62c	19. 67±4. 06b
	美人蕉	32. 93±3. 80a	27. 24±1. 44ab	16. 33±2. 26b	16. 59±6. 62b
全磷质量分数 w _{TP}	风车草	6. 58±3. 63b	30. 39±2. 09a	5. 26±2. 05b	3. 11±1. 58b
	翠芦莉	15. 52±3. 11bc	21. 41±0. 28b	37. 60±6. 99a	7. 12±2. 24c
	菖蒲	19. 33±5. 25ab	31. 88±7. 59a	10. 78±5. 10b	6. 08±2. 92b
	再力花	17. 29±2. 12b	28. $76 \pm 1.75a$	8. 92±1. 68c	4. 88±1. 47c
	美人蕉	10. 63±1. 83b	22. 56±4. 83b	48. 48±9. 22a	4. 71±0. 90b
全钾质量分数 w_{TK}	风车草	11.77±1.67b	5. 15±2. 30b	35. 50±4. 52a	12. 44±1. 75b
	翠芦莉	12. 98±4. 14b	6. 37±2. 58b	39. 25±4. 40a	11. 52±2. 71b
	菖蒲	16. 32±2. 23b	4. 21±1. 34b	31. 43±6. 05a	16. 03±3. 96b
	再力花	6. $31 \pm 1.05b$	11. 58±2. 08b	36. 23±8. 71a	17. 98±0. 43b
	美人蕉	5. 22±1. 76c	5. 18±2. 09c	40. 78±2. 34a	17. 64±4. 20b

注:同一行不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P<0.05);处理时间为 120 d。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments (P<0.05); the processing time is 120 days.

表 9 广州市不同挺水植物对 4 种水体底泥的铵态氮和硝态氮去除率 单位:%

Table 9 Removal rates of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen from four types of sediments by different plants

指标 Index	植物名称 Plant name	河涌底泥 River sediment	近海水体底泥 Bottom sediment of nearshore water bodies	小微水体底泥 Bottom sediment of small and micro water bodies	湖库底泥 Lake and reservoir sediment
铵态氮质量分数 w _{NH⁴⁺}	风车草	40. 00±3. 85ab	15. 87±2. 08c	49. 31±0. 69a	35. 42±3. 88b
	翠芦莉	68. 26±1. 59a	20. 34±4. 66c	49. 31±0. 69b	39. 48±5. 33b
	菖蒲	59. 05±5. 85a	19. 45±2. 78c	35. 69±7. 20b	42. 85±0. 94b
	再力花	36. 67±3. 33bc	47. 62±1. 19b	24. 49±4. 45c	69. 69±5. 78a
	美人蕉	40. 16±8. 55b	25. 59±8. 16b	73. 06±6. 53a	22. 82±12. 82b
硝态氮质量分数 $w_{NO^{3-}}$	风车草	14. 80±8. 83c	87. 50±3. 15a	$65.56 \pm 1.65b$	88. 75±1. 58a
	翠芦莉	91. 42±0. 12a	89. 92±2. 41a	53. 89±6. 28b	91. 78±2. 81a
	菖蒲	56. 88±13. 52b	82. 64±6. 46ab	66. 80±2. 35ab	89. 86±2. 64a
	再力花	13. 75±1. 52c	92. 95±1. 51a	54. 64±3. 95b	60. 28±16. 67b
	美人蕉	68. 60±12. 59a	69. 92±4. 10a	32. 06±6. 63b	47. 47±4. 30ab

注:同一行不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P<0.05);处理时间为 120 d。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments (P < 0.05); the processing time is 120 days.

翠芦莉和美人蕉吸氮磷能力强。风车草、菖蒲、 再力花和美人蕉分别将底泥综合污染等级净化至 不同程度,其中翠芦莉和美人蕉净化效果更显著, 多数达到清洁等级。风车草、菖蒲、再力花对底 泥综合污染指数的影响相似。

3 结论与讨论

4 种底泥的化学性质存在显著差异。有机质含量由高到低依次为:近海水体底泥、湖库底泥、小微水体底泥、河涌底泥,且均被评定为重度污

I abl	Table 10 Evaluation of pollution levels of organic pollution index of sediment by different plants				
挺水植物 Aquatic plant	水体底泥 Bottom sediment of water body	有机污染指数 $O_{\rm I}$ 值	$O_{\scriptscriptstyle m I}$ 降低值 $O_{\scriptscriptstyle m I}$ decrease value	有机污染等级 Organic pollution level	
风车草	河涌底泥	0. 97	0. 42±0. 11b	重度污染	
	近海水体底泥	8. 65	1. 26±0. 38a	重度污染	
	小微水体底泥	2. 79	0.46±0.11b	重度污染	
	湖库底泥	3. 90	0. 41±0. 28b	重度污染	
翠芦莉	河涌底泥	0. 90	0. 49±0. 03a	重度污染	
	近海水体底泥	9. 38	0. 53±0. 16a	重度污染	
	小微水体底泥	3. 07	0. 18±0. 06a	重度污染	
	湖库底泥	3. 71	0. 60±0. 23a	重度污染	
菖蒲	河涌底泥	0. 87	0. 52±0. 04a	重度污染	
	近海水体底泥	8. 77	1. 14±0. 53a	重度污染	
	小微水体底泥	2. 72	0. 53±0. 18a	重度污染	
	湖库底泥	3. 95	0. 36±0. 09a	重度污染	
再力花	河涌底泥	0. 93	0.46±0.06b	重度污染	
	近海水体底泥	8. 16	1. 75±0. 20a	重度污染	
	小微水体底泥	2. 94	$0.31\pm0.07b$	重度污染	
	湖库底泥	3. 89	0. 42±0. 08b	重度污染	
美人蕉	河涌底泥	1. 10	0. 29±0. 10b	重度污染	

表 10 广州市不同水体底泥有机污染指数污染等级评价
Table 10 Evaluation of pollution levels of organic pollution index of sediment by different plants

注:同一行不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P<0.05);处理时间为 120 d。

近海水体底泥

小微水体底泥

湖库底泥

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments (P<0.05); the processing time is 120 days.

8.51

2.28

3.48

染。就营养物质含量而言,河涌底泥和小微水体底泥全磷中度污染,湖库底泥则为全氮轻度污染,而近海水体底泥则同时遭受全氮和全磷的重度污染。综合污染指数评价显示,近海水体底泥污染程度为重度,小微水体底泥为中度,河涌底泥和湖库底泥则为轻度。地表径流与排污是近海水体主要污染来源,地表径流与排污是近海水体主要污染来源,农田化肥成为近海水体中的主要氮源,生活废水为主要磷源^[20]。由此可见,近海水体底泥可能受到严重的农田化肥和生活废水的污染。

5 种植物对底泥净化能力各异。它们均能有效 净化河涌底泥至清洁程度;美人蕉净化近海水体 底泥效果最佳,达轻度污染;翠芦莉与美人蕉对 小微水体及湖库底泥的净化优于其他 3 种植物。

水生植物可以改变底泥中污染物质含量,由 于在生长发育的过程中,植物对于营养物质的需 求存在差异,不同挺水植物对底泥中各营养物质 的净化率也存在差异^[21-22]。5 种植物均对底泥的有机质、污染物起到不同的去除效果,说明挺水植物可以增强有机质的矿化作用,加速有机质分解。李欢^[23] 等人研究表明,风车草、菖蒲、再力花对近海水体底泥全磷去除率最高,再力花对全氮去除率亦最优,与李欢等人研究相符。

1. 40±0. 16a

0.97±0.36ab

 $0.83 \pm 0.22ab$

重度污染

重度污染

重度污染

再者,植物吸收的氮素形态主要是铵态氮和硝态氮,且吸收铵态氮和硝态氮的偏向不同^[24-26]。有研究表明,湿地植物对铵态氮的吸收率可达14%~98%,对硝态氮的吸收率可达到96%,与本研究结果一致^[27-28]。风车草与美人蕉对小微水体底泥铵态氮去除率最大,翠芦莉和菖蒲对河涌底泥铵态氮去除率最大,再力花对湖库底泥铵态氮去除率最大。而风车草、翠芦莉和菖蒲对湖库底泥硝态氮去除率最大。由此可知,5种植物均在铵态氮和硝态氮含量较低的底泥中对其去除率

表 11 广州市不同水体底	泥综合污染指数污染等级评价
Table 11 Evaluation of pollution levels of different	plants on comprehensive pollution index of sediment
1.11.2.11	7-34 4K - 7 4-1

挺水植物 Aquatic plant	水体底泥 Bottom sediment of water body	全氮污染 指数 $S_{\scriptscriptstyle { m TN}}$	全磷污染 指数 $S_{ ext{TP}}$	综合污染 指数 $F_{\scriptscriptstyle extsf{F}}$	综合污染等级 Comprehensive pollution level
风车草	河涌底泥	0. 27	1. 17	0. 83	清洁
	近海水体底泥	1. 68	1. 09	1. 54	中度污染
	小微水体底泥	0. 37	1. 40	1. 09	轻度污染
	湖库底泥	1. 23	0. 20	1. 01	轻度污染
翠芦莉	河涌底泥	0. 24	0. 91	0. 65	清洁
	近海水体底泥	1. 77	1. 26	1. 65	中度污染
	小微水体底泥	0. 36	1. 07	0. 85	清洁
	湖库底泥	1. 16	0. 19	0. 95	清洁
菖蒲	河涌底泥	0. 27	1. 07	0. 76	清洁
	近海水体底泥	1. 85	1. 22	1. 70	中度污染
	小微水体底泥	0. 38	1. 32	1. 04	轻度污染
	湖库底泥	1. 25	0. 17	1. 01	轻度污染
再力花	河涌底泥	0. 29	1. 04	0. 81	清洁
	近海水体底泥	1. 51	1. 17	1. 58	中度污染
	小微水体底泥	0.38	1. 30	1. 02	轻度污染
	湖库底泥	1. 09	0. 20	0. 89	清洁
美人蕉	河涌底泥	0. 23	1. 12	0. 78	清洁
	近海水体底泥	1. 52	1. 12	1. 42	轻度污染
	小微水体底泥	0. 38	1. 09	0. 87	清洁
	湖库底泥	1. 21	0. 17	0. 98	清洁

注: 2022 年 8 月采集分析, 处理时间为 120 d。

Note: Collected and analyzed in August 2022, the processing time is 120 days.

达到最高值,这有可能是高浓度铵态氮和硝态氮的含量限制了植物的吸收能力^[29]。

本文通过底泥指标测定发现:近海水体底泥有机质、全氮、全磷、全钾、铵态氮含量最高,且按有机污染指数法为有机质重度污染;而综合污染指数法中,近海水体和小微水体底泥为中度污染,河涌与湖库底泥为轻度污染。种植 120 d 后,5 种植物均能降低底泥 O_1 值,且均可将河涌底泥净化至清洁;美人蕉对近海水体底泥净化效果最佳,达轻度污染;翠芦莉与美人蕉对小微水体和湖库底泥的净化效果优于其他植物。

参考文献

[1] 张列宇,王浩,李国文,等. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. 环境保护,2017,45(5):62-65.

- [2] 郭超,方何淇,王吉宁,等. 黑臭水体底泥重金属污染物特征及生态风险评价[J]. 人民长江,2022,53(11):20-26.
- [3] 郭曼,郭帅,李志能.广州市黑臭河涌底泥污染特征分析与评价[J].河北环境工程学院学报,2020,30(5):85-89
- [4] 方源,谢培,谭林,等.生境对挺水植物生长的影响及其 反馈作用机制综述[J].生态学杂志,2021,40(8):2610 -2619.
- [5] 刘琳. 闸坝影响下河流底泥氮污染的迁移转化与防控研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2022.
- [6] 张扬. 不同盐度、底泥及扰动条件下再生水补水景观水体水质变化[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- [7] 冯志丰. 基于文化地理学的广州地区传统村落与民居研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [8] 潘少君.广州市湿地植物评价与校园应用分析[D].广州:华南农业大学,2019.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 土壤-有机碳的测定-燃烧氧化-滴定法:HJ658—2013[S]. 北京:中国环境科学出版社出版,2013.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 土壤质量-全氮的测定-

- 凯氏法:HJ717—2014[S]. 北京:中国环境科学出版社出版,2014.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 土壤-总磷的测定-碱熔-钼锑抗分光光度法: HJ632—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社出版, 2011.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 土壤质量-总砷的测定-硼氢 化钾-硝酸银分光光度法: GB/T17135—1997[S]. 北京:中国环境科学出版社出版,1997.
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 土壤-氨氮,亚硝酸盐氮,硝酸盐氮的测定-氯化钾溶液提取-分光光度法: HJ634—2012[S]. 北京:中国环境科学出版社出版, 2012.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. 土壤-氨氮,亚硝酸盐氮,硝酸盐氮的测定-氯化钾溶液提取-分光光度法: HJ634—2012[S]. 北京:中国环境科学出版社出版, 2012.
- [15] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM, TN, TP 的现状与评价[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4): 319-324.
- [16] 岳维忠,黄小平,孙翠慈.珠江口表层沉积物中氮,磷的形态分布特征及污染评价[J].海洋与湖沼,2007,38(2):111-117.
- [17] 姜霞,王书航. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京: 科学出版社,2012.
- [18] MUDROCH A, AZCUE J. Manual of Aquatic Sediment Sampling [M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1995.
- [19] 陈敏旺. 吉林省农田耕层土壤速效氮磷钾养分的时空变化特征[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2018.
- [20] 王祺. 近海水体富营养化条件下氮磷对浒苔生长的影

- 响[J]. 安徽农业科学,2016,44(35):104-105.
- [21] 关秀婷,邵伯阳.3 种挺水植物对石佛寺人工湿地沉积物中有机质,氮,磷含量变化影响研究[J].海河水利,2019(1):23-29.
- [22] 孟婉蓉. 不同修复措施下湘江沉积物磷素释放模拟试验研究[D]. 宜昌:三峡大学,2022.
- [23] 李欢,吴蔚,罗芳丽,等.4种挺水植物,4种沉水植物及 其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的 作用比较[J].湿地科学,2016,14(2):163-172.
- [24] ANDERSEN K M, TURNER B L. Preferences or plasticity in nitrogen acquisition by understorey palms in a tropical montane forest [J]. Journal of ecology, 2013, 101(3):819-825.
- [25] BRITTO D T, KRONZUCKER H J. Ecological significance and complexity of n-source preference in plants [J]. Annals of botany, 2013, 112(6):957-963.
- [26] VAN KLEUNEN M, WEBER E, FISCHER M. A meta-analysis of trait differences between invasive and non-invasive plant species [J]. Ecology letters, 2010, 13(2): 235-245.
- [27] BOULDIN J L, FARRIS J L, MOORE M T, et al. Vegetative and structural characteristics of agricultural drainages in the mississippi delta landscapes [J]. Environmental pollution, 2004, 132(3):403-411.
- [28] 余红兵,戴桂金. 氮磷面源污染在沟渠中的迁移转化 机理[J]. 南方农业,2018,12(31):103-105.
- [29] 常诏峰,鲜玲,MUTHUISW,等. 三种高原常见沉水植物对不同浓度铵氮的生理响应机制研究[J]. 水生态学杂志,2022,43(6):108-115.