

Differences among Wetland Plants Species in Lead Accumulation and Distribution from Lead-Polluted Wastewater in Constructed Wetlands

Yuankang Liu, Yuwei Guo, Jianguo Liu*

School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou Jiangsu
Email: *liujianguo@cczu.edu.cn

Received: Apr. 22nd, 2020; accepted: May 14th, 2020; published: May 21st, 2020

Abstract

The differences among ten wetland plant species in lead (Pb) quantity accumulation and distribution were studied under moderate (1.5 mg/L) and heavy (3.0 mg/L) water Pb stress and in constructed wetlands. The results showed that the differences among the wetland plant species were large in Pb accumulations in aboveground parts, underground parts and whole plants. The biggest differences were 9.3~9.7 times for Pb accumulation in aboveground parts, 10.5~12.3 times for Pb accumulation in underground parts, and 8.6~9.2 times for Pb accumulation in whole plants. Between 1.5 mg/L of lead-contaminated wastewater treatment and 3.0 mg/L of lead-contaminated wastewater treatment, the correlation of these lead accumulations was very strong and reached an extremely significant level ($P < 0.01$). The correlations between aboveground parts and underground parts in Pb accumulation were also positive and significant ($P < 0.05$ or 0.01). The results indicate that the abilities of wetland plants in Pb uptake and accumulation remain consistent under different water Pb levels. The wetland plant species with higher Pb accumulations in aboveground parts may accumulate more Pb in underground parts also. But the differences among the wetland plant species in Pb distribution proportions in aboveground parts and underground parts were relatively small. The biggest differences were about 1.5 times for Pb distribution proportions in aboveground parts, and more than 3 times for Pb distribution proportions in underground parts. Therefore, it is better to select suitable wetland plants for the treatment of Pb-polluted wastewater according to their Pb accumulations. Furthermore, the Pb accumulations in aboveground parts are more meaningful, because aboveground parts can be harvested and removed from wetland easily. From the view of comprehensive consideration on the Pb quantity accumulations in aboveground parts and in whole plants, the plant species *Zizania latifolia* and *Alternanthera philoxeroides* are outstanding. They are suitable wetland plants to be used in the treatment of Pb-polluted wastewater with constructed wetland.

Keywords

Lead (Pb), Wetland Plant, Accumulation, Water Pollution, Wastewater Treatment

铅污染废水中不同湿地植物对铅积累及分配的差异

刘远康, 郭雨薇, 刘建国*

常州大学, 环境与安全工程学院, 江苏 常州

Email: *liujianguo@cczu.edu.cn

收稿日期: 2020年4月22日; 录用日期: 2020年5月14日; 发布日期: 2020年5月21日

摘要

通过建造人工湿地并设置不同水平的铅污染废水(1.5 mg/L及3.0 mg/L), 研究了十种湿地植物对铅吸收积累及分配的差异。结果表明, 供试十种湿地植物间的铅积累能力存在很大差异。不同植物种类间地上部、地下部、全株铅积累量的最大差异(积累量最大植物与积累量最小植物的比值)分别达到9.3~9.7倍、10.5~12.3倍、8.6~9.2倍。分析表明, 1.5 mg/L铅污染废水处理与3.0 mg/L铅污染废水处理之间, 这些铅积累量的相关性都很强, 达到极显著水平($P < 0.01$); 而且, 地上部与地下部之间铅积累量的相关性也很好, 达到显著或极显著水平($P < 0.05$ or 0.01)。该结果说明, 湿地植物的铅积累能力在不同铅污染水平下保持一致。但十种湿地植物间铅分配的差异相对较小, 铅积累量在地上部及地下部分配比例的最大差异分别只有1.5倍左右及3倍多一点。因此, 通过植物的铅积累量来筛选用于处理铅污染废水的湿地植物种类比较适宜, 而湿地植物地上部铅积累量比地下部更有意义, 因为地上部分易于收集处理。根据本研究结果, 综合考虑植物地上部及全株铅积累量, 有2种植物的铅积累能力明显突出, 即茭笋(*Zizania latifolia*)及空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)。在利用人工湿地工程技术处理铅污染废水时, 这2种湿地植物有较好的应用前景。

关键词

铅, 湿地植物, 积累, 水体污染, 污水处理

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 随着我国工业、农业、第三产业及城市化进程的快速发展, 水体重金属污染问题越来越严重。在水生生态系统中, 重金属会通过生物积累及生物放大作用在水生食物链上传递, 最后威胁到人类健康[1]。由于铅污染分布范围广及对生物的毒性强, 已成为最重要的重金属污染物之一[2]。铅对人体有很强的毒性, 过量的铅会对人体的多种系统产生危害, 如神经系统、骨骼系统、血液循环系统、内分泌系统、免疫系统等等[3]。因此, 环境中铅污染问题已引起国内外的广泛关注, 很多国家(包括我国)及国际组织已将铅列为优先控制的污染物[4]。铅不但对人体和动物有很高的毒性, 对植物的生长发育也会产生不良影响。据研究, 过量的铅会干扰或抑制植物的光合作用、呼吸作用、对营养物质的吸收利用, 并

会影响多种重要酶类的活性[1] [5]。

在污水的处理方面,我国目前采用的方法存在不足之处,如污水处理厂广泛采用的活性污泥法及相关处理技术,存在投资大、能耗高、工艺复杂等问题,特别是对重金属污染废水的处理效果不理想。而近年来发展较快的人工湿地处理技术被认为是一项很有发展前途的污水处理技术,它具有投资小、能耗低、工艺简单易操作、处理效果好等优点,特别是对重金属污染废水的处理,近年来越来越多地被采用[1] [6]。

在人工湿地处理技术中,湿地植物是重要的构件,被认为是最主要的生物构成成分。因为植物一方面可以直接吸收、积累、降解污水中的污染物;另一方面,植物的生命活动可以改变根际环境,从而影响水生生态系统中污染物的活性及毒性。因此,湿地中的湿地植物可以通过一系列生物、物理及生物化学过程,对污水中的污染物产生净化作用。据研究,一些湿地植物对污水中高浓度的重金属污染物有很强的耐性,而且能够在植物体内吸收积累高浓度的重金属,这些植物在利用人工湿地处理重金属污染废水时,可以发挥重要作用,如甘蓝型油菜(*Brassica napus*) [7] [8]。而在对水体中重金属的吸收、运转分配及积累能力方面,不同种类的湿地植物间及同种植物的不同基因型之间都存在很大差异[9] [10]。因此,利用人工湿地技术对重金属污染废水进行处理或对重金属污染水体进行修复时,筛选并应用一些对目标重金属耐性强、生物量高、积累量多的湿地植物种类或基因型非常重要。本研究以常州市郊湿地中常见的十种湿地植物为材料,对不同种类湿地植物吸收积累污水中铅的能力进行了比较研究。研究结果将对铅污染废水的人工湿地处理工艺有参考或应用价值。

2. 材料与方 法

2.1. 人工湿地池构建

在常州市郊野外构建小型人工湿地池,共建造 6 个湿地池,每个面积 2 m² (1 m × 2 m),池壁高 50 cm,池内填 25 cm 厚土壤。土壤取自未受污染湿地,风干后过孔径 5 mm 筛,去除石块和杂质。通过检测,该土壤酸碱度适中(pH 6.87),有机质含量较高(2.95%)。土壤样品风干过筛后,经 H₂O₂-HF-HNO₃-HClO₄ 消解,用原子吸收分光光度法测定铅含量,其铅含量为 33.8 mg/kg。湿地池建造完成填入土壤后,用水浸泡一个月以上(水面高于土面 5 cm),然后再移栽采集选择好的湿地植物幼苗。

2.2. 湿地植物采集及试验设计

根据本课题组的前期研究[11],在常州市郊选择采集 10 种常见的湿地植物(分属于 7 个科),这些植物的中文名称及学名见表 1。

Table 1. The species of the wetland plants used in this experiment

表 1. 实验用湿地植物名及学名

代号	植物名	学名	代号	植物名	学名
A	茭笋	<i>Zizania latifolia</i> (Griseb.) Stapf	F	碎米莎草	<i>Cyperus iria</i> L.
B	芦苇	<i>Phragmites communis</i> Trin.	G	日照飘拂草	<i>Fimbristylis miliacea</i> (L.) Vahl
C	柳叶箬	<i>Isachne globosa</i> (Thunb.) Kuntze	H	田皂角	<i>Aeschynomene indica</i> L.
D	辣蓼	<i>Polygonum hydropiper</i> L.	I	鸭舌草	<i>Monochoria vaginalis</i> (Burm. f.) Presl
E	鳢肠	<i>Eclipta prostrata</i> L.	J	空心莲子草	<i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.) Griseb

在采集的湿地植物中,选择大小基本一致的幼苗(苗高 10~20 cm)栽入准备好的湿地池,每池每种植

物栽 3 株, 植物随机均匀分布。

人工配制铅污染废水。根据文献资料及课题组前期研究, 污水中铅浓度设计为 2 个污染水平, 分别为 1.5 mg/L (中度铅污染) 和 3.0 mg/L (重度铅污染), 用分析纯 PbCl_2 配制。在湿地植物移栽到湿地池后的第 15 天、22 天、29 天将配制好的铅污染废水加入湿地池, 每个水平的铅污染废水加入 2 个湿地池, 每次每池铅污染废水加入量为 160 L。另 2 个湿地池同时加入未加铅的自来水作为对照。在整个湿地植物生长期(6 月 10 日~7 月 30 日), 保持湿地中水层深度 5~8 cm。

2.3. 湿地植物取样与测定

在湿地植物移栽后的第 50 天, 对湿地植物全株进行取样。植株先用自来水清洗, 再用去离子水清洗。将清洗好的湿地植物分为地上部分及地下部分, 分别装纸袋, 用烘箱在 105℃ 下杀青 30 min, 再在 70℃ 下烘干至恒重。对烘干样品称重计算生物量, 再将样品用不锈钢粉碎机粉碎, 过 100 目筛。粉碎过筛后的样品用密封袋装好待测, 样品经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解后用原子吸收分光光度法测定铅含量。

2.4. 统计分析

数据分析用 Excel 2016 进行, 相关性显著水平采用 $P_{0.05}$ 和 $P_{0.01}$ 。

3. 结果与讨论

3.1. 不同湿地植物地上部铅积累的差异

不同铅污染水平下(1.5, 3.0 mg/L)十种湿地植物地上部分对铅的吸收积累量见图 1。

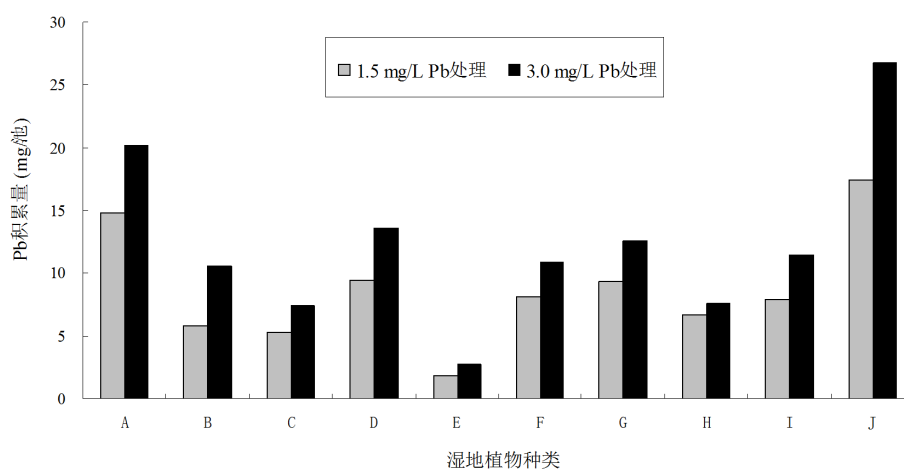


Figure 1. Pb accumulations in aboveground parts of different wetland plants
图 1. 不同湿地植物地上部铅积累量

不同湿地植物间地上部铅积累量的差异很大。十种湿地植物中, 地上部铅积累量最大的是空心莲子草(代号 J), 在 1.5、3.0 mg/L 铅污染废水处理下, 地上部铅积累量分别为 17.45 mg/池、26.73 mg/池; 地上部铅积累量最小的是鳢肠(代号 E), 在 1.5、3.0 mg/L 铅污染废水处理下, 地上部铅积累量分别只有 1.87 mg/池、2.75 mg/池。在 1.5、3.0 mg/L 铅污染废水处理下, 十种湿地植物地上部铅积累量的最大差异分别达到 9.3 倍、9.7 倍(积累量最大植物与积累量最小植物的比值)。有 2 种植物地上部铅积累量明显高于其他植物, 分别是空心莲子草(代号 J)和茭笋(代号 A), 在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下高于 10 mg/池, 在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下高于 20 mg/池。

就这十种湿地植物地上部铅积累量来说, 1.5 mg/L 铅污染废水处理与 3.0 mg/L 铅污染废水处理之间的相关性很强, 相关系数高达 0.9831, 达到极显著水平($P < 0.01$)。

3.2. 不同湿地植物地下部铅积累的差异

在铅污染废水中, 不同湿地植物地下部铅积累量的差异见图 2。在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下, 十种湿地植物地下部铅积累量为 0.80 mg/池~8.41 mg/池, 不同植物间的最大差异达到 10.5 倍; 在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下, 十种湿地植物地下部铅积累量为 1.03 mg/池~12.69 mg/池, 不同植物间的最大差异达到 12.3 倍。有 3 种植物地下部铅积累量明显高于其他植物, 分别是菱笋(代号 A)、鸭舌草(代号 I)和空心莲子草(代号 J), 在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下地下部铅积累都高于 5 mg/池, 在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下都高于 7 mg/池。可以看出, 十种湿地植物之间地下部铅积累量的差异幅度要高于地上部铅积累量的差异幅度。

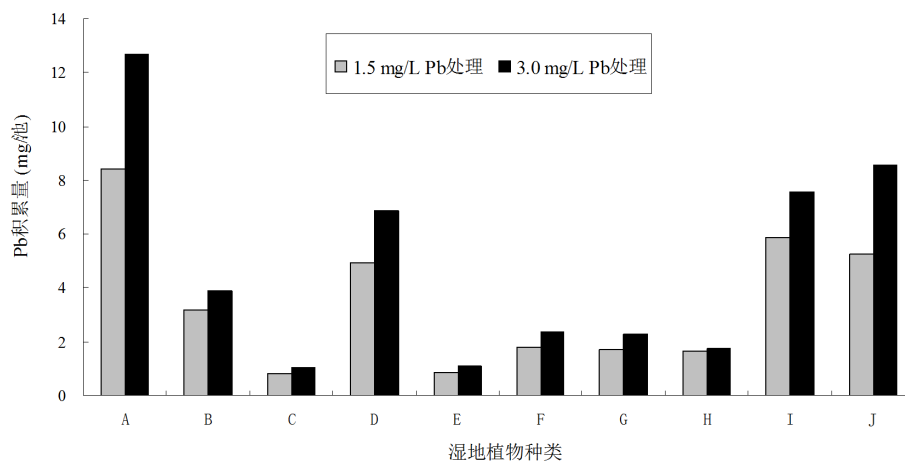


Figure 2. Pb accumulations in underground parts of different wetland plants
图 2. 不同湿地植物地下部铅积累量

就这十种湿地植物地下部铅积累量来说, 1.5 mg/L 铅污染废水处理与 3.0 mg/L 铅污染废水处理之间的相关性也很强, 相关系数高达 0.9907, 相关性达到极显著水平($P < 0.01$)。关于地上部与地下部之间铅积累量的关系, 相关分析表明, 在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下地上部与地下部之间铅积累量的相关系数为 0.7270, 相关性达到显著水平($P < 0.05$); 在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下的相关系数为 0.7894, 相关性达到极显著水平($P < 0.01$)。

3.3. 不同湿地植物全株铅积累的差异

十种湿地植物间全株铅积累量的差异也很大(图 3)。在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下, 全株铅积累量最大的植物为菱笋(代号 A), 积累量达到 23.22 mg/池; 全株铅积累量最小的植物是鳢肠(代号 E), 积累量只有 2.71 mg/池; 十种湿地植物间全株铅积累量的最大差异为 8.6 倍。在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下, 全株铅积累量最大的植物为空心莲子草(代号 J), 积累量达到 35.28 mg/池; 全株铅积累量最小的植物为的是鳢肠(代号 E), 积累量只有 3.82 mg/池; 十种湿地植物间全株铅积累量的最大差异为 9.2 倍。有 2 种植物全株铅积累量明显高于其他植物, 分别是菱笋(代号 A)和空心莲子草(代号 J), 在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下高于 20 mg/池, 在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下高于 30 mg/池。

就这十种湿地植物的全株铅积累量来说, 1.5 mg/L 铅污染废水处理与 3.0 mg/L 铅污染废水处理之间的相关性也很强, 相关系数高达 0.9913, 相关性达到极显著水平($P < 0.01$)。

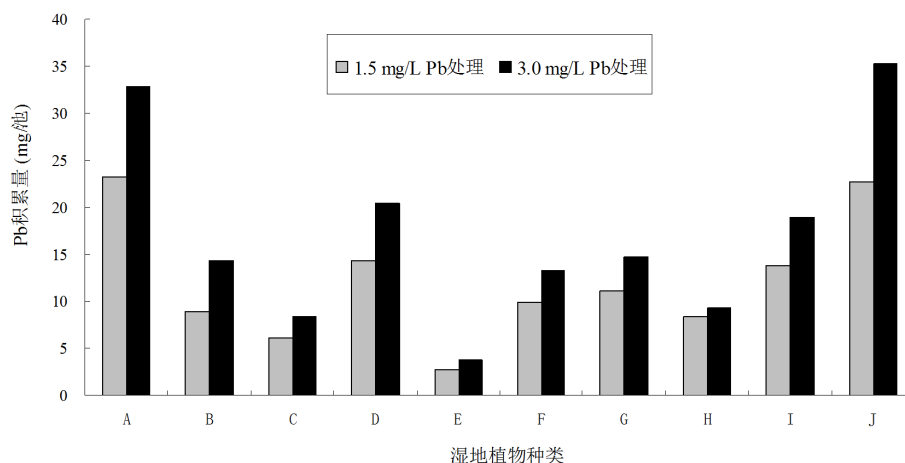


Figure 3. Pb accumulations in whole plants of different wetland plants

图 3. 不同湿地植物全株铅积累量

3.4. 不同湿地植物间铅分配的差异

不同湿地植物铅积累量在地上部的分配比例见图 4。

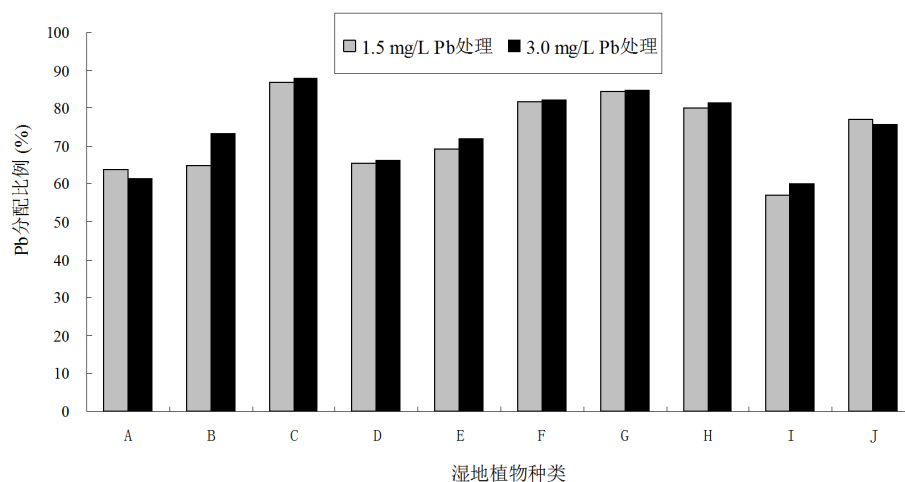


Figure 4. Pb distribution proportions in aboveground parts of different wetland plants

图 4. 不同湿地植物铅积累量在地上部的分配比例

可以看出，铅在湿地植物地上部的分配比例比较高，所有植物都高于 50%，平均达到 70%以上。在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下，铅在湿地植物地上部的分配比例介于 57.19%至 86.85%，十种湿地植物间的最大差异为 1.52 倍；在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下，铅在湿地植物地上部的分配比例介于 60.19%至 87.76%，十种湿地植物间的最大差异为 1.46 倍。十种湿地植物铅积累量在地下部的分配比例比较低，基本都在 40%以下，平均只有 25%左右(图 5)。在 1.5 mg/L 铅污染废水处理下，铅在湿地植物地下部的分配比例介于 13.15%至 42.81%，十种湿地植物间的最大差异为 3.48 倍；在 3.0 mg/L 铅污染废水处理下，铅在湿地植物地下部的分配比例介于 12.24%至 39.81%，十种湿地植物间的最大差异为 3.25 倍。因此，湿地植物积累的铅在地上部的分配比例大大高于在地下部的分配比例，而不同湿地植物间地下部铅分配比例的差异幅度高于地上部分配比例的差异幅度，但不同湿地植物间铅分配的差异幅度大大小于铅积累量的差异幅度。

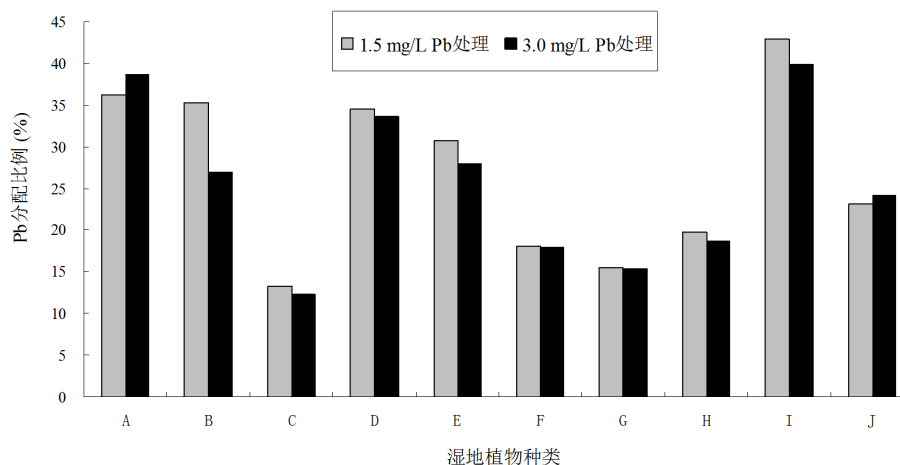


Figure 5. Pb distribution proportions in underground parts of different wetland plants
图 5. 不同湿地植物铅积累量在地下部的分配比例

在各种污水处理工程技术中,人工湿地处理技术被认为是一种很有发展前途的技术,因为人工湿地可以发挥多种自然净化的优势,如植物净化功能、微生物降解功能等等[12]。在人工湿地中种植适宜的湿地植物种类,可以大量吸收废水中的重金属,然后通过定期收获湿地植物进行集中处理,可以将这些重金属从水体中去除[13]。据研究报道,通过人工湿地处理技术,可以去除重金属污染废水中 87%的锰、49%的钴、95%的铜、85%的砷及 92%的铅[1]。自 20 世纪 90 年代以来,人工湿地被成功应用于处理多种污染废水,如采矿酸性废水、工农业生产废水、食品加工废水、高速公路径流水、污泥脱水等[14]。然而,有一些研究也表明,湿地植物对重金属的吸收积累能力及重金属在植物体内的迁移分配特性,随湿地植物种类的不同及重金属种类的不同而有很大差异[15] [16]。

本研究表明,不同湿地植物间铅积累能力存在很大差异,供试十种湿地植物间地上部、地下部及全株铅积累量的最大差异达 10 倍左右。进一步分析表明,不同铅污染水平间植物地上部、地下部及全株铅积累量的相关性很强,相关系数高达 0.98 以上,都达到极显著水平($P < 0.01$),说明这些植物的铅积累能力在不同铅污染程度的废水中保持稳定。分析还表明,这些植物地上部与地下部之间铅积累量的相关性也较好,达到显著或极显著水平($P < 0.05$ 或 0.01)。这些研究结果为选择在铅污染废水中对铅吸收积累能力强的植物种类提供了可行性。但本研究也发现,不同湿地植物间铅分配的差异相对较小,十种湿地植物间地上部铅分配比例的最大差异为 1.5 倍左右,地下部铅分配比例差异为 3 倍左右,大大小于不同湿地植物间铅积累量的差异幅度。因此,在利用人工湿地工程技术处理铅污染废水时,宜根据湿地植物在铅污染废水中的铅积累量来进行选择。由于湿地植物的地上部分比地下部分更容易收获和去除,而且本研究也表明,湿地植物地上部铅积累量占全株铅积累量的大部分(平均达到 70%以上),所以湿地植物地上部铅积累量比地下部铅积累量更有意义。因此,在选择铅积累能力强的湿地植物时,可以根据地上部铅积累量,再综合考虑全株铅积累量来进行选择。根据本研究结果,有 2 种植物地上部及全株的铅积累量都显著高于其他植物,分别是茭笋(*Zizania latifolia*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)。在应用人工湿地工程技术处理铅污染废水时,这 2 种植物是较理想的选择。

4. 结论

在中度(1.5 mg/L)及重度(3.0 mg/L)铅污染废水中,十种湿地植物间的铅积累能力差异很大。其地上部铅积累量的最大差异达到 9.3~9.7 倍,地下部铅积累量的最大差异达到 10.5~12.3 倍,全株铅积累量的最大差异达到 8.6~9.2 倍。而且这些植物的铅积累能力在不同铅污染水平下保持一致。这为筛选出在铅污染

废水中吸收积累铅能力强的湿地植物种类提供了可行性。而这些湿地植物间铅分配的差异相对较小，十种湿地植物间地上部铅分配比例的最大差异为 1.5 倍左右，地下部铅分配比例差异达到 3 倍以上。根据铅污染废水中湿地植物地上部及全株铅积累量进行综合衡量，本研究中有 2 种植物：茭笋(*Zizania latifolia*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)表现突出，在利用人工湿地工程技术处理铅污染废水时，适宜作为候选植物进行应用。

参考文献

- [1] Rai, U.N., Tripathi, R.D., Singh, N.K., Upadhyay, A.K., Dwivedi, S., Shukla, M.K., *et al.* (2013) Constructed Wetland as an Ecotechnological Tool for Pollution Treatment for Conservation of Ganga River. *Bioresource Technology*, **148**, 535-541. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.005>
- [2] Chanu, L.B. and Gupta, A. (2016) Phytoremediation of Lead Using *Ipomoea aquatica* Forsk. in Hydroponic Solution. *Chemosphere*, **156**, 407-411. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.001>
- [3] Li, Z.Y., Ma, Z.W., Kuijp, T.J., Yuan, Z.W. and Huang, L. (2014) A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Mines in China: Pollution and Health Risk Assessment. *Science of the Total Environment*, **468-469**, 843-853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>
- [4] Rodrigues, S.M., Cruz, N., Coelho, C., Henriques, B., Carvalho, L., Duarte, A.C., *et al.* (2013) Risk Assessment for Cd, Cu, Pb and Zn in Urban Soils: Chemical Availability as the Central Concept. *Environmental Pollution*, **183**, 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.006>
- [5] Bharwana, S.A., Ali, S., Farooq, M.A., Ali, B., Iqbal, N., Abbas, F., *et al.* (2014) Hydrogen Sulfide Ameliorates Lead-Induced Morphological, Photosynthetic, Oxidative Damages and Biochemical Changes in Cotton. *Environmental Science and Pollution Research*, **21**, 717-731. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1920-6>
- [6] Tao, W., Sauba, K., Fattah, K.P. and Smith, J.R. (2017) Designing Constructed Wetlands for Reclamation of Pretreated Wastewater and Stormwater. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **16**, 37-57. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9419-5>
- [7] Shakoor, M.B., Ali, S., Hameed, A., Farid, M., Hussain, S., Yasmeen, T., *et al.* (2014) Citric Acid Improves Lead (Pb) Phytoextraction in *Brassica napus* L. by Mitigating Pb-Induced Morphological and Biochemical Damages. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **109**, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.07.033>
- [8] Ehsan, S., Ali, S., Noureen, S., Mahmood, K., Farid, M., Ishaque, W., *et al.* (2014) Citric Acid Assisted Phytoremediation of Cadmium by *Brassica napus* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **106**, 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.007>
- [9] Qian, Y., Gallagher, F.J., Feng, H. and Wu, M.Y. (2012) A Geochemical Study of Toxic Metal Translocation in an Urban Brownfield Wetland. *Environmental Pollution*, **166**, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.02.027>
- [10] Liu, J.G., Qu, P., Zhang, W., Dong, Y., Li, L. and Wang, M.X. (2014) Variations among Rice Cultivars in Subcellular Distribution of Cd: The Relationship between Translocation and Grain Accumulation. *Environmental and Experimental Botany*, **107**, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.05.004>
- [11] Liu, Y., Chu, K. and Liu, J. (2020) Differences among Ten Wetland Plant Species in the Tolerances of Lead-Polluted Water. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*, **6**, 1-5.
- [12] Liu, J., Dong, B., Cui, Y., Zhou, W. and Liu, F. (2020) An Exploration of Plant Characteristics for Plant Species Selection in Wetlands. *Ecological Engineering*, **143**, Article ID: 105674. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105674>
- [13] Vymazal, J. and Březinová, T. (2016) Accumulation of Heavy Metals in Aboveground Biomass of *Phragmites australis* in Horizontal Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Chemical Engineering Journal*, **290**, 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.108>
- [14] Guo, X., Cui, X. and Li, H. (2020) Effects of Fillers Combined with Biosorbents on Nutrient and Heavy Metal Removal from Biogas Slurry in Constructed Wetlands. *Science of the Total Environment*, **703**, Article ID: 134788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134788>
- [15] Vymazal, J. (2016) Concentration Is Not Enough to Evaluate Accumulation of Heavy Metals and Nutrients in Plants. *Science of the Total Environment*, **544**, 495-498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.011>
- [16] Zhang, S., Bai, J., Wang, W., Huang, L., Zhang, G. and Wang, D. (2018) Heavy Metal Contents and Transfer Capacities of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in the Yellow River Delta, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, **104**, 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.02.011>