植物资源与环境学报, 2020, **29**(4): 28-35
Journal of Plant Resources and Environment

武夷山市人工湿地再力花和花叶芦竹的重金属累积和迁移特点

郭汝凤[1], 李冠军[1], 刘鑫铭[1], 黄 婷[1], 林勇明[1], 吴承祯[2a,2b,①], 李 键[1,①]
(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002;
2. 武夷学院: a. 福建省生态产业绿色技术重点实验室, b. 生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘要: 以武夷山市生活污水处理厂人工湿地种植的再力花(*Thalia dealbata* Fraser)和花叶芦竹(*Arundo donax* var. *versicolor* Stokes)为研究对象,测定了不同生长时间(6月14日、8月2日、9月20日和11月8日)2种植物叶和茎中Mn、Cu、Cd、Zn、Cr和Pb含量,分析了2种植物6种重金属的累积和迁移特点以及生长时间与叶和茎中6种重金属含量的相关性。结果表明:再力花和花叶芦竹叶和茎中6种重金属含量总体上在9月20日或11月8日最高。再力花和花叶芦竹叶和茎中Mn、Cd和Zn含量在正常范围内或更低,Pb含量超出正常范围,Cu和Cr含量总体上在6月14日、8月2日和9月20日在正常范围内,在11月8日超出正常范围。总体上看,再力花的Mn、Cu、Zn和Cr迁移系数大于1,Cd和Pb迁移系数小于1;花叶芦竹的Mn和Cu迁移系数大于1,Cd、Cr、Zn和Pb迁移系数小于1。除再力花叶中Pb含量以及花叶芦竹叶中Cd含量和茎中Mn和Cd含量外,再力花和花叶芦竹生长时间与叶和茎中重金属含量呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关,且再力花生长时间与叶和茎中Mn、Cd和Zn含量的相关关系较好,而花叶芦竹生长时间与Cr含量的相关关系较好。综上所述,再力花和花叶芦竹中6种重金属的累积和迁移特点存在差异,属于多重金属耐性植物;在武夷山市人工湿地,建议将再力花用于Mn、Cd和Zn污染环境的修复,将花叶芦竹用于Cr污染环境的修复。

关键词: 武夷山市; 人工湿地; 再力花; 花叶芦竹; 重金属; 迁移系数

中图分类号: Q948.116; X53 **文献标志码**: A **文章编号**: 1674-7895(2020)04-0028-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.04.04

Accumulation and migration characteristics of heavy metal in *Thalia dealbata* and *Arundo donax* var. *versicolor* in constructed wetland of Wuyishan City GUO Rufeng[1], LI Guanjun[1], LIU Xinming[1], HUANG Ting[1], LIN Yongming[1], WU Chengzhen[2a,2b,①], LI Jian[1,①] (1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Wuyi University: a. Fujian Provincial Key Laboratory of Eco-Industrial Green Technology, b. College of Ecology and Resource Engineering, Nanping 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, **29**(4): 28-35

Abstract: Taking *Thalia dealbata* Fraser and *Arundo donax* var. *versicolor* Stokes planted in the constructed wetland of Domestic Sewage Treatment Plant of Wuyishan City as research objects, contents of Mn, Cu, Cd, Zn, Cr, and Pb in leaf and stem of both plants at different growth times (June 14th, August 2nd, September 20th, and November 8th) were determined, and accumulation and migration characteristics of 6 heavy metals and correlations of growth time with contents of 6 heavy metals in leaf and stem of both plants were analyzed. The results show that contents of 6 heavy metals in leaf and stem of *T. dealbata* and *A. donax* var. *versicolor* generally are the highest on September 20th or November 8th. Contents of Mn, Cd, and Zn in leaf and stem of *T. dealbata* and *A. donax* var. *versicolor* are within the

---

收稿日期: 2019-10-31
基金项目: 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2016055; CXZX2018122); 福建农林大学林学院林学高峰学科优秀博硕士培养工程(71201800781)
作者简介: 郭汝凤(1995—),女,广东湛江人,硕士研究生,主要从事自然资源管理和生态学方面的研究。
①通信作者 E-mail: fjwcz@126.com; hmilycau@163.com

normal range or lower, Pb content is out of the normal range, and in general, contents of Cu and Cr are within the normal range on June 14th, August 2nd, and September 20th, but out of the normal range on November 8th. In general, migration coefficients of Mn, Cu, Zn, and Cr of *T. dealbata* are greater than 1, while those of Cd and Pb are smaller than 1; those of Mn and Cu of *A. donax* var. *versicolor* are greater than 1, while those of Cd, Cr, Zn, and Pb are smaller than 1. Except for Pb content in leaf of *T. dealbata* and Cd content in leaf and Mn and Cd contents in stem of *A. donax* var. *versicolor*, growth time of *T. dealbata* and *A. donax* var. *versicolor* shows significant ($P<0.05$) or extremely significant ($P<0.01$) correlations with heavy metal content in leaf and stem, and correlations of growth time of *T. dealbata* with contents of Mn, Cd, and Zn in leaf and stem are relatively good, while that of growth time of *A. donax* var. *versicolor* with Cr content is relatively good. In conclusion, there are differences in accumulation and migration characteristics of 6 heavy metals of *T. dealbata* and *A. donax* var. *versicolor*, which are multi-heavy metal tolerant plants; in the constructed wetland of Wuyishan City, it is recommended to use *T. dealbata* in restoration of Mn, Cd, and Zn-polluted environment and *A. donax* var. *versicolor* in restoration of Cr-polluted environment.

Key words: Wuyishan City; constructed wetland; *Thalia dealbata* Fraser; *Arundo donax* var. *versicolor* Stokes; heavy metal; migration coefficient

随着中国城镇化进程的推进,环境污染问题越来越严重[1],尤其是重金属引起的土壤污染和水体污染[2]。自进入 21 世纪以来,中国的城镇化进程明显加速,武夷山成为世界自然与文化双遗产后,城镇化的步伐更加迅猛[3],加之伴随而来的人口快速增长以及资源和能源高速消耗[4],重金属污染物的产生和排放将不可避免[5]。重金属具有难降解、易累积和持续时间长等特点[6],易转化为毒性更强的烷基化合物,若被生物吸收进入食物链,将严重威胁人类的健康和生存[7]。人工湿地作为一种新型污水处理工艺,是由水体、基质、微生物和水生植物组成的复杂生态系统[8],可通过物理、生物和化学方法等协同作用有效去除污水中的 N、P、新型有机物及重金属等污染物[9],具有操作简单、运行成本低和可分散处理污水等优点[10]。植物是人工湿地中的重要组成部分[11],对去除重金属有至关重要的作用[12]。因此,利用人工湿地植物净化重金属对武夷山市重金属污染防治工作具有可行性及现实意义。

植物对重金属的吸收净化是一个极为复杂的物理、生物和化学过程[13-14],受植物种类、重金属毒性效应以及土壤性质(pH 值、有机质含量和阳离子交换量等)的影响[15-16]。近年来,通过湿地植物地上部的吸收累积作用去除重金属成为国内外学者关注的研究热点,许多湿地植物地上部对重金属具有很强的代谢和累积能力[17],通过收割植物地上部能够有效去除污染环境中的重金属[18]。不同湿地植物对重金属的吸收累积效果不同[19],同种植物对不同重金属的净化效果差异也很大[20]。Wong 等[21]研究认为,湿地植物对重金属的吸收和累积作用具有很强的地域性,不同区域的人工湿地系统应筛选出适宜当地的湿地植物进行种植,植物推广过程中应考虑湿地植物与生长环境的互作效应。因此,筛选出在武夷山市生长适应性强且对重金属净化效果好的人工湿地植物非常重要。由于人工湿地植物不同部位的生理结构和功能不同,其对化学元素的吸收和分配亦存在差异[22]。作者的前期研究结果表明:人工湿地植物对土壤 C、N、P 等营养元素的累积和分配特征存在差异[23],但武夷山市人工湿地植物对重金属的累积、分配及迁移特点尚不明确。

鉴于此,通过野外调查,以生长在武夷山市生活污水处理厂人工湿地的典型人工湿地植物再力花(*Thalia dealbata* Fraser)和花叶芦竹(*Arundo donax* var. *versicolor* Stokes)为研究对象,通过测定 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量,探讨 1 个生长季内 2 种植物不同器官对重金属的累积和迁移特点,并建立植物生长时间与重金属含量的线性回归关系,以期为人工湿地植物配置提供更好的植物种植方案,并为武夷山市重金属污染的生态修复和环境保护提供理论依据。

1　研究区概况和研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于福建省武夷山市生活污水处理厂人工湿地(地理坐标为东经 117°24′12″~118°02′50″、北纬27°32′36″~27°55′15″),属中亚热带湿润季风气候,四季分明,光热充足,雨量丰沛,年平均气温

19.7 ℃,1 月平均气温 7.8 ℃,7 月平均气温 27.8 ℃,年平均降水量 2 000 mm,且降水主要集中在夏季。武夷山市生活污水处理厂人工湿地占地面积 8 100 m^2,基质为砂石,基质孔隙度 55%,表层填料为粒径 0~3 mm 的砂土,填充厚度 20 cm。监测期间,该人工湿地水位 30 m,平均布水负荷 0.62 $m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,平均水力停留时间 7 d,主要种植植物为再力花和花叶芦竹。2 种植物每年 3 月开始萌芽生长,其中,再力花在 9 月进入生长旺盛期,花期为 4 月至10 月;花叶芦竹在 8 月进入生长旺盛期,花期为 9 月至 12 月;2 种植物均在 11 月进入枯落期,12 月对 2 种植物进行收割。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集和预处理 遵循典型性、代表性和可行性的原则,于 2014 年 4 月 26 日在武夷山市生活污水处理厂人工湿地设置 6 个面积 10 m×10 m 的采样点,分别于同年 6 月 14 日、8 月 2 日、9 月 20 日和 11 月 8 日(分别距离 4 月 26 日 7、14、21 和 28 周)采集再力花和花叶芦竹的地上部分,各采样点每种植物每次采集 3 株,每株植株作为 1 个重复,标记后带回实验室,洗净后将植株分成叶和茎 2 个部分,用牛皮纸包好,先置于 110 ℃条件下杀青 30 min,再置于 65 ℃条件下烘干至恒质量,经 FZ102 微型植物粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司)粉碎后过孔径2 mm 筛,备用。

1.2.2 重金属含量的测定 称取 1.000 g 植物样品,采用浓硫酸-高氯酸消煮法[24]消解,采用 TAS-990 原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)测定 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量,每个样品 3 个重复。

1.3 数据处理及统计分析

根据测定结果计算植物各重金属的迁移系数,计算公式为迁移系数=植物叶中重金属含量/植物茎中重金属含量[25]。

采用 EXCEL 2010、SPSS 22.0 和 R 语言软件进行数据处理和表格绘制。采用单因素方差分析和 *LSD*-*t* 检验进行差异显著性分析,建立植物生长时间(x,6 月14 日、8 月 2 日、9 月 20 日和 11 月 8 日依次赋值为 7、14、21 和 28)与其叶和茎中重金属含量(y)的线性关系,经统计学检验得到相应的拟合参数(r^2),并对相关系数进行显著性检验。

2 结果和分析

2.1 人工湿地再力花和花叶芦竹叶和茎中重金属含量的分析

不同生长时间人工湿地再力花和花叶芦竹叶和茎中重金属含量的比较结果见表 1。

2.1.1 再力花叶和茎中重金属含量的比较 由表 1 可见:再力花叶中 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量分别为 214.729~281.594、30.125~45.125、0.067~0.125、8.616~54.375、2.779~16.016 和 13.622~18.031 $mg \cdot kg^{-1}$,茎中 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量分别为 95.688~145.219、16.958~40.625、0.080~0.131、8.272~75.938、2.529~15.313 和 12.844~21.031 $mg \cdot kg^{-1}$。9 月 20 日,叶中 Mn 和 Cd 含量显著($P<0.05$)高于其他生长时间;9 月 20 日和 11 月 8 日,茎中 Mn 和 Cd 含量显著高于其他生长时间;11 月 8 日,叶和茎中 Cu、Zn、Cr 和 Pb 含量显著高于其他生长时间。

供试各生长时间再力花叶中 Mn 和 Cu 含量显著高于茎;6 月 14 日,叶中 Cd 含量与茎中 Cd 含量差异不显著,其他生长时间显著低于茎中 Cd 含量;11 月 8 日,叶中 Zn 含量显著低于茎中 Zn 含量,其他生长时间与茎中 Zn 含量差异不显著;供试各生长时间叶中 Cr 含量和茎中 Cr 含量差异不显著;6 月 14 日,叶中 Pb 含量显著高于茎中 Pb 含量,其他生长时间显著低于茎中 Pb 含量。

2.1.2 花叶芦竹叶和茎中重金属含量的比较 由表 1 还可见:花叶芦竹叶中 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量分别为 44.313~72.438、13.906~40.220、0.031~0.067、6.625~53.438、2.720~14.119 和 9.442~21.219 $mg \cdot kg^{-1}$,茎中 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量分别为 26.250~34.854、12.929~36.875、0.041~0.087、7.979~70.214、4.717~14.788 和 14.181~22.813 $mg \cdot kg^{-1}$。8 月2 日,叶中 Cd 含量显著高于其他生长时间;9 月 20 日,叶中 Zn 含量显著高于其他生长时间;11 月 8 日,叶中 Mn、Cu、Cr 和 Pb 含量显著高于其他生长时间。6 月 14 日,茎中 Mn 含量显著高于其他生长时间;8 月 2 日,茎中 Cd 含量显著高于其他生长时间;11 月 8 日,茎中 Cu、Zn、Cr 和 Pb 含量显著高于其他生长时间。

供试各生长时间花叶芦竹叶中 Mn 含量显著高

于茎中 Mn 含量,叶中 Cd、Cr 和 Pb 含量显著低于茎中 Cd、Cr 和 Pb 含量;9 月 20 日,叶中 Cu 含量与茎中 Cu 含量差异不显著,其他生长时间显著高于茎中 Cu 含量;6 月 14 日和 8 月 2 日,叶中 Zn 含量与茎中 Zn 含量差异不显著;9 月 20 日和 11 月 8 日,叶中 Zn 含量分别显著高于和低于茎中 Zn 含量。

表 1　不同生长时间人工湿地再力花和花叶芦竹叶和茎中重金属含量的比较($\bar{X}$±*SD*)[1)]

Table 1　Comparison on heavy metal content in leaf and stem of *Thalia dealbata* Fraser and *Arundo donax* var. *versicolor* Stokes in constructed wetland at different growth times ($\bar{X}$±*SD*)[1)]

日期 Date (MM-DD)	再力花叶中重金属含量/($mg \cdot kg^{-1}$) Heavy metal content in leaf of *Thalia dealbata*					
	Mn	Cu	Cd	Zn	Cr	Pb
06-14	214.729±5.795Ca	31.990±0.427Ca	0.095±0.002Ca	8.616±1.125Da	2.779±0.182Ca	15.333±0.708Ba
08-02	246.094±3.476Ba	35.938±0.407Ba	0.067±0.004Db	16.752±2.162Ca	4.066±0.406Ba	13.622±0.285Cb
09-20	281.594±6.161Aa	30.125±1.363Ca	0.125±0.001Ab	46.250±2.309Ba	3.556±0.393Ba	14.469±0.976BCb
11-08	251.813±6.088Ba	45.125±1.330Aa	0.117±0.003Bb	54.375±4.089Ab	16.016±0.356Aa	18.031±1.221Ab
日期 Date (MM-DD)	再力花茎中重金属含量/($mg \cdot kg^{-1}$) Heavy metal content in stem of *Thalia dealbata*					
	Mn	Cu	Cd	Zn	Cr	Pb
06-14	95.688±2.663Cb	16.958±0.479Db	0.098±0.001Ba	8.272±0.942Da	2.529±0.344Ca	12.844±0.617Db
08-02	106.250±6.256Bb	20.234±0.379Cb	0.080±0.005Ca	14.750±1.338Ca	3.700±0.365Ba	14.483±0.308Ca
09-20	145.219±4.106Ab	23.125±0.682Bb	0.131±0.003Aa	40.938±3.672Ba	3.328±0.362Ba	16.844±0.749Ba
11-08	137.500±5.236Ab	40.625±0.814Ab	0.126±0.002Aa	75.938±4.829Aa	15.313±0.257Aa	21.031±0.495Aa
日期 Date (MM-DD)	花叶芦竹叶中重金属含量/($mg \cdot kg^{-1}$) Heavy metal content in leaf of *Arundo donax* var. *versicolor*					
	Mn	Cu	Cd	Zn	Cr	Pb
06-14	56.115±4.641Ba	13.906±0.389Da	0.051±0.002Bb	11.442±1.284Ca	3.919±0.382Cb	9.442±0.762Cb
08-02	44.313±2.851Ca	21.563±0.503Ba	0.067±0.005Ab	6.625±1.141Da	2.720±0.395Cb	16.142±0.279Bb
09-20	56.750±4.585Ba	19.500±0.894Ca	0.031±0.003Db	53.438±1.753Aa	9.331±0.221Bb	15.625±0.679Bb
11-08	72.438±4.499Aa	40.220±1.261Aa	0.044±0.001Cb	46.563±2.179Bb	14.119±0.227Ab	21.219±0.475Ab
日期 Date (MM-DD)	花叶芦竹茎中重金属含量/($mg \cdot kg^{-1}$) Heavy metal content in stem of *Arundo donax* var. *versicolor*					
	Mn	Cu	Cd	Zn	Cr	Pb
06-14	34.854±3.112Ab	12.929±0.363Db	0.061±0.002Ba	13.397±0.990Ca	5.507±0.492Ca	14.181±0.786Ca
08-02	26.250±3.880Bb	20.375±0.415Bb	0.087±0.002Aa	7.979±1.338Da	4.717±0.464Da	18.941±0.537Ba
09-20	26.575±4.638Bb	17.049±1.791Ca	0.041±0.005Da	46.250±2.122Bb	9.959±0.218Ba	18.125±0.724Ba
11-08	26.875±3.074Bb	36.875±0.844Ab	0.048±0.001Ca	70.214±2.103Aa	14.788±0.125Aa	22.813±0.509Aa

1) 同列中不同大写字母表示同一植物同一器官中同一重金属含量在不同生长时间差异显著($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference in the same heavy metal content in the same organ of the same species at different growth times; 同列中不同小写字母表示同一生长时间同一植物不同器官中同一重金属含量差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference in the same heavy metal content in different organs of the same species at the same growth time.

2.2　人工湿地再力花和花叶芦竹中重金属的迁移特征

不同生长时间人工湿地再力花和花叶芦竹的重金属迁移系数见表 2。由表 2 可见:供试各生长时间再力花的 Mn、Cu 和 Cr 迁移系数大于 1,Cd 迁移系数小于 1;除 11 月 8 日的 Zn 迁移系数小于 1 外,其他生长时间的 Zn 迁移系数大于 1;除 6 月 14 日的 Pb 迁移系数大于 1 外,其他生长时间的 Pb 迁移系数小于 1。再力花 11 月 8 日的 Mn、Cu 和 Zn 迁移系数显著($P<0.05$)低于其他生长时间,8 月 2 日的 Cd 迁移系数显著低于其他生长时间;9 月 20 日与 11 月 8 日的 Pb 迁移系数差异不显著,但显著低于其他生长时间;不同生长时间的 Cr 迁移系数差异不显著。

由表 2 还可见:供试各生长时间花叶芦竹的 Mn 和 Cu 迁移系数大于 1,Cd、Cr 和 Pb 迁移系数小于 1;除 9 月 20 日的 Zn 迁移系数大于 1 外,其他生长时间的 Zn 迁移系数小于 1。花叶芦竹 11 月 8 日的 Mn、Cd 和 Pb 迁移系数以及 9 月 20 日的 Zn 迁移系数显著高于其他生长时间;不同生长时间的 Cu 迁移系数差异不显著;9 月 20 日和 11 月 8 日的 Cr 迁移系数差异不显著,但显著高于其他生长时间。

由表 2 还可见:再力花 6 种重金属平均迁移系数

从大到小依次为 Mn、Cu、Cr、Zn、Pb、Cd,花叶芦竹6种重金属平均迁移系数从大到小依次为 Mn、Cu、Zn、Pb、Cd、Cr。再力花和花叶芦竹的6种重金属平均迁移系数中 Mn 平均迁移系数均最大,分别为2.084和2.044,说明与其他5种重金属相比较,Mn 在这2种植物体内更容易迁移。同种重金属在不同植物体内的迁移能力存在差异,再力花除9月20日和11月8日的 Mn 和 Pb 迁移系数以及9月20日的 Zn 迁移系数低于花叶芦竹外,其他时间再力花的 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 迁移系数高于花叶芦竹,说明与花叶芦竹相比较,Cu、Cd 和 Cr 在再力花体内更容易发生迁移。

表2 不同生长时间人工湿地再力花和花叶芦竹重金属迁移系数的比较[1)]
Table 2 Comparison on migration coefficient of heavy metal of *Thalia dealbata* Fraser and *Arundo donax* var. *versicolor* Stokes in constructed wetland at different growth times[1)]

日期 Date (MM-DD)	再力花的重金属迁移系数 Migration coefficient of heavy metal of *Thalia dealbata*					
	Mn	Cu	Cd	Zn	Cr	Pb
06-14	2.244Aa	1.887Aa	0.970Aa	1.041Ba	1.106Aa	1.194Aa
08-02	2.320Aa	1.777Ba	0.845Ba	1.135Aa	1.099Aa	0.941Ba
09-20	1.939Ba	1.304Ca	0.953Aa	1.132Aa	1.068Aa	0.859Ca
11-08	1.832Cb	1.111Da	0.927Aa	0.716Ca	1.046Aa	0.857Cb
平均值 Mean	2.084	1.520	0.924	1.006	1.080	0.963
日期 Date (MM-DD)	花叶芦竹的重金属迁移系数 Migration coefficient of heavy metal of *Arundo donax* var. *versicolor*					
	Mn	Cu	Cd	Zn	Cr	Pb
06-14	1.611Cb	1.077Ab	0.827Bb	0.853Bb	0.711Bb	0.665Cb
08-02	1.702Cb	1.058Ab	0.772Ba	0.831Bb	0.575Cb	0.852Bb
09-20	2.158Ba	1.151Aa	0.773Ba	1.156Aa	0.937Ab	0.862Ba
11-08	2.706Aa	1.091Aa	0.921Aa	0.663Cb	0.955Ab	0.930Aa
平均值 Mean	2.044	1.094	0.823	0.876	0.794	0.827

1) 同列中不同大写字母表示同一植物同一重金属迁移系数在不同生长时间差异显著($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference in migration coefficient of the same heavy metal of the same species at different growth times; 同列中不同小写字母表示同一生长时间不同植物同一重金属迁移系数差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference in migration coefficient of the same heavy metal of different species at the same growth time.

2.3 人工湿地再力花和花叶芦竹生长时间与叶和茎中重金属含量的相关性分析

人工湿地再力花和花叶芦竹生长时间与叶和茎中重金属含量的拟合线性方程分别见表3和表4。

由表3可见:再力花生长时间除与叶中 Pb 含量的线性关系不显著外,与叶和茎中 Mn、Cu、Cd、Zn 和 Cr 含量以及茎中 Pb 含量的线性关系显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)。随着再力花生长,其叶和茎中 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量趋于增加,生长时间与叶中 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量的相关系数分别为0.408、0.353、0.314、0.919、0.609 和 0.239,与茎中上述6种重金属含量的相关系数分别为0.736、0.794、

表3 人工湿地再力花生长时间与叶和茎中重金属含量的拟合线性方程[1)]
Table 3 Fitting linear equation of growth time with heavy metal content in leaf and stem of *Thalia dealbata* Fraser in constructed wetland[1)]

重金属 Heavy metal	拟合线性方程 Fitting linear equation	r^2	F	P	重金属 Heavy metal	拟合线性方程 Fitting linear equation	r^2	F	P
Mn	$y_1=2.096x+211.870$	0.408	8.573	*	Mn	$y_s=2.349x+80.063$	0.736	31.737	**
Cu	$y_1=0.480x+27.396$	0.353	6.991	*	Cu	$y_s=1.056x+6.763$	0.794	43.457	**
Cd	$y_1=0.001x+0.071$	0.314	6.028	*	Cd	$y_s=0.001x+0.075$	0.460	10.387	**
Zn	$y_1=2.383x-10.196$	0.919	126.453	**	Zn	$y_s=3.274x-22.322$	0.909	111.118	**
Cr	$y_1=0.560x-3.195$	0.609	18.108	*	Cr	$y_s=0.543x-3.278$	0.613	18.403	*
Pb	$y_1=0.128x+13.128$	0.239	4.457		Pb	$y_s=0.385x+9.569$	0.928	142.691	**

1) y_1: 叶中重金属含量 Heavy metal content in leaf; y_s: 茎中重金属含量 Heavy metal content in stem; x: 生长时间 Growth time. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

表 4　人工湿地花叶芦竹生长时间与叶和茎中重金属含量的拟合线性方程1)

Table 4　Fitting linear equation of growth time with heavy metal content in leaf and stem of *Arundo donax* var. *versicolor* Stokes in constructed wetland1)

重金属 Heavy metal	拟合线性方程 Fitting linear equation	r^2	F	P	重金属 Heavy metal	拟合线性方程 Fitting linear equation	r^2	F	P
Mn	$y_1=0.878x+42.052$	0.364	7.301	*	Mn	$y_s=-0.337x+34.542$	0.245	4.573	
Cu	$y_1=1.098x+4.578$	0.727	30.357	**	Cu	$y_s=0.978x+4.679$	0.674	23.784	**
Cd	$y_1=0.001x+0.063$	0.162	3.134		Cd	$y_s=-0.001x+0.082$	0.234	4.356	
Zn	$y_1=2.174x-8.527$	0.640	20.572	*	Zn	$y_s=2.982x-17.725$	0.832	55.554	**
Cr	$y_1=0.532x-1.780$	0.816	49.922	**	Cr	$y_s=0.473x+0.472$	0.826	53.066	**
Pb	$y_1=0.498x+6.904$	0.843	60.076	**	Pb	$y_s=0.359x+12.245$	0.794	43.287	**

1) y_1：叶中重金属含量 Heavy metal content in leaf；y_s：茎中重金属含量 Heavy metal content in stem；x：生长时间 Growth time. *：$P<0.05$；**：$P<0.01$.

0.460、0.909、0.613 和 0.928。

由表 4 可见：花叶芦竹生长时间除与叶中 Cd 含量以及茎中 Mn 和 Cd 含量的线性关系不显著外，与叶和茎中 Cu、Zn、Cr 和 Pb 含量以及叶中 Mn 含量的线性关系显著或极显著。随着花叶芦竹生长，其茎中 Mn 和 Cd 含量趋于降低，茎中其他 4 种重金属含量和叶中 6 种重金属含量趋于增加，生长时间与叶中 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量的相关系数分别为 0.364、0.727、0.162、0.640、0.816 和 0.843，与茎中上述 6 种重金属含量的相关系数分别为 0.245、0.674、0.234、0.832、0.826 和 0.794。

经对比分析可知，再力花的生长时间与叶和茎中 Mn、Cd 和 Zn 含量的相关系数高于花叶芦竹，而与其叶和茎中 Cr 含量的相关系数低于花叶芦竹，说明再力花的生长时间与 Mn、Cd 和 Zn 含量的相关关系更好，而花叶芦竹的生长时间与 Cr 含量的相关关系更好。

3　讨论和结论

通常情况下，植物体内 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 含量的正常范围分别为 1～700、5～25、0.2～0.8、20～400、0.2～8.4 和 0.1～5.0 mg·kg^{-1}[26-27]。本研究中，再力花和花叶芦竹叶和茎中 Mn、Cd 和 Zn 含量在正常范围内或更低，Pb 含量超出正常范围，Cu 和 Cr 含量总体上在 6 月 14 日、8 月 2 日和 9 月 20 日在正常范围内，在 11 月 8 日超出正常范围，说明再力花和花叶芦竹对 Cu、Cr 和 Pb 具有较强的累积能力。此外，再力花和花叶芦竹对 6 种重金属吸收程度存在差异。与再力花相比，花叶芦竹的叶和茎中 Mn 含量较低，说明花叶芦竹的叶和茎对环境中 Mn 含量的变化响应较小，不适宜观测环境中 Mn 含量的动态变化。

植物对重金属的吸收与累积不但与植物对环境的响应机制有关，还与重金属本身的活动有关[28-29]。本研究中，不同重金属在再力花和花叶芦竹叶和茎中的吸收和累积特征存在明显差异。6 月 14 日，再力花叶和茎中 Cd 含量差异不显著，而在其他生长时间叶中 Cd 含量显著低于茎；各生长时间再力花叶中 Mn 和 Cu 含量显著高于茎。各生长时间花叶芦竹叶中 Cd 含量显著低于茎，Mn 含量显著高于茎；9 月 20 日，叶和茎中 Cu 含量差异不显著，其他生长时间叶中 Cu 含量显著高于茎。不同重金属在植物体内的迁移特性差异较大，通常用迁移系数表示植物对重金属的迁移能力，当迁移系数大于 1 时，说明植物体内（茎和叶）运输重金属的能力强[30]。本研究中，各生长时间再力花和花叶芦竹的 Cd 迁移系数均小于 1，Mn 和 Cu 迁移系数均大于 1，说明 Cd 在再力花和花叶芦竹体内的迁移受到明显抑制，迁移能力较弱，而 Mn 和 Cu 的迁移得到促进，迁移能力较强。相关研究结果表明：植物的重金属迁移系数很低说明植物在重金属污染环境下对重金属的吸收和迁移具有一定的协调性[31-32]，可通过逃避机制（如将重金属固定在茎部）获得对重金属污染的抗性[33]。Wei 等[34]认为，植物对部分重金属具有较高的排斥作用，采取限制重金属从茎部向叶部迁移的忍耐策略来应对重金属胁迫。据此推测，再力花和花叶芦竹可能通过采取这种忍耐策略抵御 Cd 胁迫，而这 2 种植物对 Mn 和 Cu 不排斥，利用质膜上的 Mn 和 Cu 转运蛋白将其从茎部转运到叶部[35]，从而促进 Mn 和 Cu 的迁移作用。

Mn、Cu 和 Zn 是植物生命活动过程中必不可少的生命元素[36-37]，Cd 和 Pb 是制约植物生长的有毒

元素[38]。本研究中,再力花和花叶芦竹的 Mn、Cu 和 Zn 迁移系数大于 Cd 和 Pb 迁移系数,说明 Cd 和 Pb 在再力花和花叶芦竹体内的迁移能力较弱,可能与二者将不利于自身生长的有害重金属 Cd 和 Pb 留在茎部,以减轻 Cd 和 Pb 对叶部的毒害机制有关[39]。本研究中,同一重金属在再力花和花叶芦竹体内的迁移能力也存在差异。总体上看,花叶芦竹的 6 种重金属迁移系数低于再力花,说明花叶芦竹对这 6 种重金属具有一定抗性[40],推测可能与其自身的耐性机制有关[41],如通过自身的生理机制调节,阻止重金属由茎向叶迁移,从而降低重金属对植株的毒害。

本研究中,再力花和花叶芦竹的生长时间与其体内的重金属含量存在一定的相关关系。随着植物的生长,再力花叶和茎中 Mn、Cd 和 Zn 含量趋于增加,再力花的生长时间与叶和茎中 Mn、Cd 和 Zn 含量的相关关系优于花叶芦竹;花叶芦竹叶和茎中 Cr 含量亦逐渐增加,花叶芦竹的生长时间与叶和茎中 Cr 含量的相关关系优于再力花,说明再力花和花叶芦竹对上述重金属的需求随着植物的生长逐渐增加,可根据再力花和花叶芦竹体内上述重金属含量的变化来评价其对重金属的去除效果[42]。因此,在武夷山市人工湿地植物配置中,再力花可以优先考虑用于 Mn、Cd 和 Zn 污染环境的修复,将花叶芦竹更适用于 Cr 污染环境的修复。

综上所述,再力花和花叶芦竹体内上述 6 种重金属含量随着植株的生长呈现显著差异;再力花和花叶芦竹对 Mn、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Pb 具有一定的吸收累积能力;在人工湿地植物配置时,建议将再力花作为 Mn、Cd 和 Zn 污染环境的修复植物,将花叶芦竹作为 Cr 污染环境的修复植物。值得注意的是,人工湿地植物叶和茎中重金属含量的变化与植物根系、土壤和水体中重金属关系密切,需对植物根系、土壤和水体中重金属展开更深入的研究。

参考文献:

[1] 丁国华, 郭丹蒂, 关 旸, 等. 重金属铅镉对濒危植物中华水韭(*Isoetes sinensis*)DNA 甲基化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 246-249.

[2] NAHMANI J, LAVELLE P. Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in a grassland of Northern France[J]. European Journal of Soil Biology, 2002, 38(3): 297-300.

[3] 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 等. 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2095-2103.

[4] 臧星华, 鲁垠涛, 姚 宏, 等. 城镇化进程对沈抚新区土壤重金属分布的影响及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 471-477.

[5] HU Y, LIU X, BAI J, et al. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20: 6150-6159.

[6] BEGUM A, AMIN M N, KANECO S, et al. Selected elemental composition of the muscle tissue of three species of fish, *Tilapia nilotica*, *Cirrhina mrigala* and *Clarius batrachus*, from the fresh water Dhanmondi Lake in Bangladesh[J]. Food Chemistry, 2005, 93(3): 439-443.

[7] 李 冰, 舒 艳, 李科林, 等. 人工湿地宽叶香蒲对重金属的累积与机理[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 2099-2108.

[8] 赵林丽, 邵学新, 吴 明, 等. 人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4236-4241.

[9] 梁 康, 王启烁, 王飞华, 等. 人工湿地处理生活污水的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 422-428.

[10] 冯 旭, 杨 扬, 郑 哲, 等. 回流立式组合人工湿地对农村混合废水中重金属的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 671-679.

[11] 周桑扬, 杨 凯, 吴晓芙, 等. 人工湿地植物去除废水中重金属的作用机制研究进展[J]. 湿地科学, 2016, 14(5): 717-724.

[12] ZHANG X, WANG T, XU Z, et al. Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122363.

[13] FRENCH C J, DICKINSON N M, PUTWAIN P D. Woody biomass phytoremediation of contaminated brownfield land [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(3): 387-395.

[14] 刘 玲, 方炎明, 王顺昌, 等. 淮南矿区大气及二球悬铃木叶片中重金属含量及其相关性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(1): 85-92.

[15] PLACEK A, GROBELAK A, KACPRZAK M. Improving the phytoremediation of heavy metals contaminated soil by use of sewage sludge [J]. International Journal of Phytoremediation, 2016, 18(6): 605-618.

[16] 马迎莉, 高 雨, 袁婷婷, 等. 重金属铬胁迫对髯毛箬竹光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 54-60.

[17] 马逍天, 梁仁君, 邱继彩, 等. 纳污湿地植物对底泥重金属吸收特性研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 165-170.

[18] 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.

[19] 赵丹慧, 王清波, 李 琦, 等. 不同湿地植物对三江平原农田退水重金属的去除效果[J]. 湿地科学与管理, 2019, 15(4): 43-47.

[20] 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.

[21] WONG S C，LI X D，ZHANG G，et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta，South China [J]. Environmental Pollution，2002，119(1)：33-44.

[22] GÜSEWELL S，KOERSELMAN W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. Perspectives in Plant Ecology，Evolution and Systematics，2002，5(1)：37-61.

[23] 郭汝凤，刘鑫铭，李冠军，等. 武夷山人工湿地系统植物生长期内土壤-植物碳氮磷变化特点[J]. 应用与环境生物学报，2020，26(2)：433-441.

[24] 康　薇，鲍建国，郑　进，等. 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物对重金属富集能力的分析[J]. 植物资源与环境学报，2014，23(1)：78-84.

[25] 刘兰英，陈丽华，黄　薇，等. 镉污染下稻谷不同部位重金属含量及迁移特征[J]. 福建农业学报，2018，33(7)：717-723.

[26] 徐德聪，孙庆业，沈章军，等. 铜尾矿库剑叶金鸡菊根际尾矿和植株的重金属元素含量及相关性分析[J]. 植物资源与环境学报，2018，27(1)：27-36.

[27] HAQUE N，PERALTA-VIDEA J R，JONES G L，et al. Screening the phytoremediation potential of desert broom (*Baccharis sarothroides* Gray) growing on mine tailings in Arizona，USA[J]. Environmental Pollution，2008，153(2)：362-368.

[28] 王爱霞，方炎明. 二球悬铃木不同器官对空气中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的累积作用[J]. 植物资源与环境学报，2015，24(2)：67-72.

[29] MATTINA M I，LANNUCCI-BERGER W，MUSANTE C，et al. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. Environmental Pollution，2003，124(3)：375-378.

[30] 邢　丹，刘鸿雁，于萍萍，等. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征[J]. 生态学报，2012，32(3)：796-804.

[31] NKOANE B M M，SAWULA G M，WIBETOE G，et al. Identification of Cu and Ni indicator plants from mineralised locations in Botswana[J]. Journal of Geochemical Exploration，2005，86(3)：130-142.

[32] DENG H，YE Z H，WONG M H. Accumulation of lead，zinc，copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China[J]. Environmental Pollution，2004，132(1)：29-40.

[33] GARBISU C，ALKORTA I. Phytoextraction：a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment [J]. Bioresource Technology，2001，77(3)：229-236.

[34] WEI S，ZHOU Q，WANG X. Identification of weed plants excluding the uptake of heavy metals [J]. Environment International，2005，31(6)：829-834.

[35] 柳　检，罗立强. As、Cd 和 Pb 植物根系吸收途径和影响因素研究现状与进展[J]. 岩矿测试，2015，34(3)：269-277.

[36] 母　悦，耿元波. 内蒙古羊草草原植物营养元素的含量特征[J]. 生态环境学报，2015，24(7)：1118-1124.

[37] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学，2015，48(17)：3477-3492.

[38] KHAN A，KHAN S，KHAN M A，et al. Heavy metals effects on plant growth and dietary intake of trace metals in vegetables cultivated in contaminated soil [J]. International Journal of Environmental Science and Technology，2019，16(5)：2295-2304.

[39] 王　婧，莫其锋，储双双，等. 污泥堆肥对园林植物合果芋(*Syngonium podophyllum*)生长及重金属吸收累积的影响[J]. 生态学杂志，2018，37(6)：1752-1758.

[40] KESHAVARZI A，KUMAR V. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran [J]. International Journal of Environmental Health Research，2019，29(5)：544-560.

[41] 罗松英，梁艺琼，陈碧珊，等. 徐闻南山镇红树林沉积物及红树植物中重金属的累积特征与迁移规律[J]. 热带地理，2019，39(3)：347-356.

[42] 刘　政，许中秋，张鑫洁，等. 刺楸年轮中重金属含量动态变化及富集特性[J]. 生态科学，2020，39(1)：128-135.

(责任编辑：张明霞)