

4 种水生植物配置模式对铅污染的净化效应

庄静静, 金振锐, 王晓冰, 郭 晖*

(新乡学院生命科学技术学院, 新乡 453003)

摘 要: 通过盆栽试验, 研究花叶芦竹、石菖蒲、水生鸢尾和美人蕉在不同配置模式下, 其植物根系活力、叶绿素含量及对水体和土壤铅的净化效果。结果表明, 在不同配置模式下, 根系活力变化的大小依次为 4 种植物混种> 3 种植物混种> 2 种植物混种> 单种植物。4 种水生植物的叶绿素 a、b 和总叶绿素含量均表现为混种模式> 单种模式。在 4 种水生植物的混种模式中, 包含花叶芦竹和美人蕉的组合模式中水体铅含量和土壤铅含量较低。其中, 花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种模式中, 水体和土壤铅含量分别为 0.10 和 8.15 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。花叶芦竹和美人蕉由于其根系的特点, 使花叶芦竹的地上部分铅含量较高, 而美人蕉的地下部分铅含量较高。且在与这 2 种水生植物混种的模式中, 这种效应更加明显。综合考虑净化效果和经济因素, 认为花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种模式对铅污染的净化效果最好。

关键词: 铅污染; 水生植物; 根系活力; 净化效果

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)06-1003-07

The purification effect of configuration mode of four aquatic plants on lead pollution

ZHUANG Jingjing, JIN Zhenrui, WANG Xiaobing, GUO Hui

(School of Life Science and Technology, Xinxiang University, Xinxiang 453003)

Abstract: In order to analyze the purification effect of different configuration modes on lead pollution, a pot experiment was conducted to study root activity, chlorophyll content, lead content in water, plant and soil of four plants (*Arundo donax*, *Acorus tatarinowii*, *Iris tectorum*, *Canna indica*). The results showed the value of root activity in mixed species of four plants>mixed species of three plants>mixed species of two plants>single plant under different configuration modes. The contents of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll in the four aquatic plants showed that the mixed mode>the single mode. Among the four mixed modes of the aquatic plants, the mixed modes, including *Arundo donax* and *Canna indica*, had the lowest lead content in water and soil. The lead content of *Arundo donax*, *Acorus tatarinowii* and *Canna indica* was 0.10 and 8.15 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ in water and soil, respectively. Due to the root characteristics of *Arundo donax* and *Canna indica*, *Arundo donax* had a higher lead content in the aboveground and *Canna indica* in the underground parts. In the mixed mode with the two aquatic plants, the effect was more obviously. Considering the purification effect and economic factors, the mixed species of *Arundo donax*, *Acorus tatarinowii* and *Canna indica* have the best purification effect on lead pollution.

Key words: lead pollution; aquatic plants; root activity; purification effect

随着工业的迅速发展, 大量的污染水体被排放到水域当中, 加剧了水体中重金属的积累。重金属不能像有机化合物那样可自然降解或生物降解, 往往在水体中或沉积到水域底部, 或被水生植物吸收, 并通过食物链积累损害动物和人类的健康, 所以治理净化重金属污染水体已迫在眉睫^[1]。

铅 (Pb) 作为毒性最大的重金属之一, 也是最

为常见的重金属污染物之一^[2], 其污染特点具有较强的累积性、不可逆性及难治理性^[3]。植物修复技术 (phytoremediation) 是一种新兴的治理重金属污染的绿色生物技术^[4], 它不仅高效低耗、不易造成二次污染, 同时还具有美化景观的作用。因此, 在清除水体和土壤重金属污染方面有着广泛的应用前景^[5]。

收稿日期: 2019-04-13

基金项目: 河南省科技攻关项目 (182102110031) 和新乡市科技攻关项目 (CXGG17016) 共同资助。

作者简介: 庄静静, 博士, 讲师。E-mail: zhuangjingnd@126.com

* 通信作者: 郭 晖, 副教授。E-mail: 290711657@qq.com

水生植物是营造我国水生态环境的一种重要植物材料,其作为河道景观的重要组成部分,不仅具有重要的景观效果,还具有多重的生态意义。与非观赏性植物相比,利用观赏性花卉植物进行铅污染土壤修复,不仅能降低土壤中铅含量,同时还能达到美化环境的目的^[6]。然而,目前关于水生植物研究多集中在筛选少量单一植物的净化效果上^[2,7-9],而对兼顾美观效果进行不同植物配置模式的相关研究甚少,且在实际工程实例中更是如此^[10]。

为此,笔者选取对重金属铅有一定耐性的4种本地水生观赏植物,花叶芦竹(*Arundo donax*)、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)、水生鸢尾(*Iris tectorum*)和美人蕉(*Canna indica*),在水体铅污染下进行不同配置模式种植,研究不同配置模式下4种水生植物对铅污染的净化效果,以期进一步探讨水生植物对重金属耐性研究和铅富集植物的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物选取长势基本一致的花叶芦竹、石菖蒲、水生鸢尾和美人蕉,均采购于新乡市花卉市场。供试污泥采用新乡学院校区内的池塘污泥,取回底泥后将其混匀、风干,用作盆栽底泥。试验培养用

水取自新乡学院自来水,重金属添加形式为固体硝酸铅颗粒($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$),为分析纯试剂。

1.2 试验设计

2018年6月,将供试土壤剔除杂物后自然风干,装至50 cm×35 cm(直径×高)的培养盆内,每盆装土50 kg,厚度约10 cm。选取生长健壮,高度基本一致的幼苗入盆移栽。选取标准:花叶芦竹苗高10 cm左右;石菖蒲和水生鸢尾均为4片真叶展开,苗高5 cm左右;美人蕉为块茎,仅露1~2个芽。铅处理水平为500 mg·kg⁻¹,试验共设置15个处理,单种模式4个:花叶芦竹单种(A)、石菖蒲单种(B)、水生鸢尾单种(C)、美人蕉单种(D);1+1配置模式6个:花叶芦竹+石菖蒲混种(T₁)、花叶芦竹+水生鸢尾混种(T₂)、花叶芦竹+美人蕉混种(T₃)、石菖蒲+水生鸢尾混种(T₄)、石菖蒲+美人蕉混种(T₅)、水生鸢尾+美人蕉混种(T₆);1+1+1配置模式4个:花叶芦竹+石菖蒲+水生鸢尾混种(E₁)、花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种(E₂)、花叶芦竹+水生鸢尾+美人蕉混种(E₃)、石菖蒲+水生鸢尾+美人蕉混种(E₄);1+1+1+1配置模式1个:花叶芦竹+石菖蒲+水生鸢尾+美人蕉混种(F)。每个配置模式相同的条件下每种植物均设3个平行样,每种水生植物各取24株,共96株。

表1 不同配置模式下栽培环境的基本特性

Table 1 Basic characteristics of cultivation environment in different configuration modes

处理 Treatment	水温/°C Water temperature	水体 pH 值 Water pH value	土壤 pH 值 Soil pH value	土壤 C 含量/% Soil carbon content	水体铅含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ Lead content in water	土壤铅含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ Lead content in soil
A	20.02±0.10	8.03±0.04	8.57±0.03	0.14±0.01	0.27±0.07	0.53±0.06
B	19.87±0.05	8.06±0.09	8.58±0.03	0.13±0.01	0.31±0.06	0.57±0.09
C	19.94±0.09	8.05±0.07	8.57±0.03	0.12±0.01	0.27±0.15	0.53±0.10
D	19.97±0.08	8.04±0.07	8.59±0.05	0.13±0.01	0.31±0.15	0.57±0.13
T ₁	20.03±0.11	7.88±0.13	8.59±0.04	0.37±0.06	0.27±0.07	0.53±0.06
T ₂	20.21±0.70	8.05±0.06	8.58±0.03	0.36±0.06	0.28±0.06	0.54±0.09
T ₃	19.96±0.16	8.04±0.07	8.61±0.09	0.37±0.05	0.30±0.07	0.56±0.09
T ₄	19.99±0.10	7.99±0.02	8.64±0.05	0.35±0.06	0.32±0.04	0.58±0.08
T ₅	20.39±0.68	8.02±0.08	8.59±0.02	0.38±0.06	0.37±0.02	0.63±0.09
T ₆	20.23±0.70	8.03±0.01	8.64±0.06	0.36±0.06	0.29±0.05	0.55±0.09
E ₁	20.05±0.21	7.87±0.17	8.59±0.04	0.37±0.05	0.36±0.05	0.62±0.10
E ₂	20.23±0.80	8.03±0.06	8.58±0.03	0.35±0.06	0.32±0.03	0.58±0.08
E ₃	19.98±0.27	8.03±0.09	8.61±0.09	0.38±0.06	0.28±0.14	0.54±0.08
E ₄	20.01±0.21	7.98±0.06	8.64±0.05	0.36±0.06	0.34±0.17	0.60±0.12
F	20.05±0.26	7.96±0.09	8.57±0.06	0.43±0.10	0.31±0.17	0.57±0.11

注:图中数据为平均值±标准差值,下同

Note: The data in the table are the average ± SD, and the same below

1.3 测定指标及方法

2018年8月,将幼苗取出,冲洗干净。根系活力测定采用TTC法测定^[11];叶绿素含量测定采用丙

酮提取法^[12];铅含量测定采用酸硝解法^[13],使用TAS-990火焰原子化法原子吸收光谱仪(北京普析通用仪器有限责任公司,中国)进行测定。不同配

置模式下栽培环境的基本特性见表 1。

1.4 数据统计分析

所有数据采用 Excel 2013 软件和 SPSS 13.0 统计软件进行处理, 图形采用 Origin 8.0 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同配置模式下水生植物的生物量及根冠比

由表 2 可知, 在不同配置模式下, 植物的地上部分和地下部分的鲜质量和干质量差异较大, 但其根冠比均表现为混种模式>单种模式。在单种模式中, 美人蕉由于其自身的根系特点, 使其根冠比最大。石菖蒲和水生鸢尾的地上部分鲜质量和干质量与地下部分的差值较大, 其差值分别为 4.57、1.97 和 4.78、0.72。在 2 种植物混种模式中, 4 种水生植物的地上部分和地下部分的鲜质量和干质量都明显增加, 且其变化趋势也表现为包含美人蕉的混种模式中, 地下部分的鲜质量和干质量值都较高; 在 2

种植物混种模式中, 石菖蒲+水生鸢尾混种模式的根冠比比美人蕉混种模式大, 这可能是由于石菖蒲和水生鸢尾的地上部分和地下部分较小, 而美人蕉的地上部分和地下部分较大, 使根冠比的变化趋势与单种模式不同, 但其差异较小, 差值仅为 0.53。在 3 种植物混种模式中, 植物地上部分和地下部分的鲜质量和干质量变化趋势与 2 种植物混种模式相同, 均发生了增加。石菖蒲+水生鸢尾+美人蕉混种模式的地上部分和地下部分鲜重较大, 其根冠比与花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种的差值为 0.76。差异性分析也表明, 4 种植物混种模式的地上部分鲜质量与 3 种植物混种模式(花叶芦竹+水生鸢尾+美人蕉混种; 石菖蒲+水生鸢尾+美人蕉混种)之间差异性不显著 ($P>0.05$)。根冠比的差异性分析结果表明, 4 种植物混种模式的差异性与花叶芦竹、石菖蒲单种之间不显著 ($P>0.05$), 而与 3 种植物混种模式之间差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同配置模式下植物的生物量及根冠比
Table 2 Biomass and root-shoot ratio in different configuration modes

处理 Treatment	地上部分/mg Aboveground part		地下部分/mg Underground part		根冠比 Root/shoot ratio
	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	
A	8.61±0.62 ^f	3.32±0.37 ^{fg}	3.32±0.37 ⁱ	1.22±0.14 ^h	0.69±0.01 ^g
B	7.41±0.70 ^{fg}	2.84±0.58 ^{gh}	2.84±0.58 ⁱ	0.87±0.02 ⁱ	0.60±0.09 ^g
C	5.78±0.37 ^h	1.00±0.28 ^h	1.00±0.28 ^j	0.28±0.05 ^j	0.25±0.11 ^h
D	6.14±0.09 ^{gh}	8.65±0.10 ^h	8.65±0.10 ^{fg}	3.25±0.07 ^d	2.56±0.14 ^a
T ₁	14.06±1.45 ^{cd}	3.18±0.25 ^b	5.80±0.37 ^h	2.01±0.13 ^f	0.63±0.01 ^g
T ₂	13.11±0.70 ^{de}	3.24±0.18 ^b	5.98±0.58 ^h	1.83±0.17 ^f	0.57±0.02 ^g
T ₃	12.95±0.93 ^{de}	2.88±0.38 ^{bc}	5.89±0.28 ^h	1.07±0.05 ^h	0.38±0.06 ^h
T ₄	12.44±0.09 ^e	2.05±0.07 ^{defg}	13.69±0.10 ^d	4.04±0.06 ^b	1.98±0.05 ^b
T ₅	15.29±0.17 ^c	2.42±0.20 ^{cdef}	15.73±0.18 ^c	2.89±0.11 ^e	1.20±0.06 ^e
T ₆	15.21±0.38 ^c	1.93±0.07 ^{efgh}	12.91±0.18 ^c	2.81±0.08 ^e	1.45±0.04 ^{cd}
E ₁	20.96±1.94 ^{ab}	3.98±0.28 ^a	8.28±0.37 ^g	3.60±0.12 ^c	0.91±0.03 ^f
E ₂	19.67±1.34 ^b	4.04±0.17 ^a	9.12±0.58 ^f	3.42±0.18 ^{cd}	0.85±0.01 ^f
E ₃	22.07±1.29 ^a	3.22±0.23 ^b	19.92±0.18 ^a	4.48±0.13 ^a	1.39±0.07 ^d
E ₄	22.06±1.25 ^a	2.74±0.08 ^{bcd}	17.17±0.18 ^b	4.40±0.09 ^a	1.61±0.04 ^c
F	21.68±0.43 ^a	2.57±1.36 ^{bcde}	8.28±0.37 ^g	1.44±0.12 ^g	0.65±0.26 ^g

注: 不同小写字母表示同一测定指标不同配置模式之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

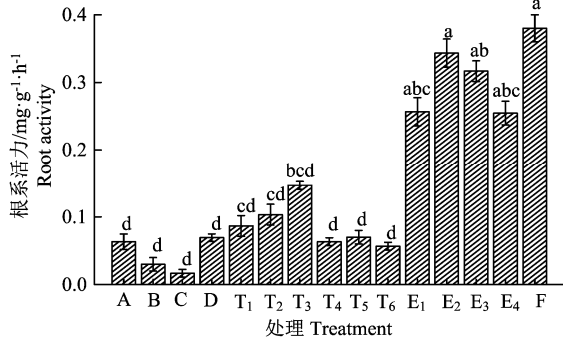
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different configuration modes of the same measurement index ($P < 0.05$). The same below

2.2 不同配置模式下水生植物的根系活力变化

根系活力可以用来衡量根吸收、合成代谢的能力^[14]。由图 1 可知, 在单种模式中, 花叶芦竹和美人蕉的根系活力值较高, 其值分别为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这主要与花叶芦竹和美人蕉根茎发达, 高浓度铅污染对其影响作用较小有关。差异性分析也表明(图 1), 4 种植物混种模式与 3 种植物混种模式(花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种)之间

差异性不显著 ($P>0.05$), 与单种模式和 2 种植物混种模式之间差异性显著 ($P<0.05$)。这表明在混种模式下, 由于植物对铅的综合吸收能力使其对植物的毒害作用有所下降, 从而增加其根系活力值。在 3 种植物混种模式中, 花叶芦竹+石菖蒲+水生鸢尾混种模式和石菖蒲+水生鸢尾+美人蕉混种模式与 2 种植物混种模式(花叶芦竹+美人蕉混种)之间差异性不显著 ($P>0.05$), 而与其他 2 种植物混种模式差异

性显著 ($P < 0.05$)。这更加表明, 在存在花叶芦竹和美人蕉的混种模式中, 其对铅的吸收和抗性要明显高于其他配置模式。在单种模式中, 4 种水生植物的根系活力之间差异不显著 ($P > 0.05$), 但花叶芦竹和美人蕉的根系活力值明显高于石菖蒲和水生鸢尾, 其差值分别为 0.03 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。总的来说, 在不同配置模式中, 4 种植物混种模式 $>$ 3 种植物混种模式 $>$ 2 种植物混种模式 $>$ 单种模式, 而且在包含花叶芦竹和美人蕉的配置模式中, 3 种植物的混种模式其对铅的吸收能力与 4 种植物混种模式相近。



不同小写字母表示同一测定指标不同配置模式之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences between different configuration modes of the same measurement index ($P < 0.05$). The same below

图 1 不同配置模式下水生植物的根系活力

Figure 1 Root activity of the aquatic plants in different configuration modes

2.3 不同配置模式下水生植物的叶绿素含量变化

重金属胁迫会使叶绿素的含量降低, 植物在不同重金属胁迫下其光合作用和叶绿素含量的变化是不同的, 其含量可表征植物生理状况^[15]。由图 2 可知, 在不同配置模式中, 各模式之间的叶绿素 a 含量变化并不明显, 但 3 种植物混种模式 (石菖蒲+水生鸢尾+美人蕉混种) 与其他配置模式之间差异性显著 ($P < 0.05$)。在 3 种植物混种模式中, 除花叶芦竹+水生鸢尾+美人蕉混种模式外, 其他 3 种配置模式与 4 种植物混种模式之间叶绿素 a 含量差异性不显著 ($P > 0.05$)。2 种植物的混种模式 (石菖蒲+美人蕉混种) 与单种模式之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 且与 2 种单种模式 (石菖蒲单种、美人蕉单种) 的差值分别为 0.01 和 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在单种模式中, 花叶芦竹的叶绿素 a 含量与其他 3 种植物之间的差异性不显著 ($P > 0.05$), 且其值仅为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这可能与花叶芦竹的自身生长特性有关。从不同配置模式的叶绿素 a 含量来看, 3 种植物的

配置模式和 4 种植物的配置模式的叶绿素 a 含量相近, 而 2 种植物的混种模式, 虽与 3 种植物配置模式差异不显著, 但这种不显著性差异主要存在于花叶芦竹+美人蕉混种、石菖蒲+水生鸢尾混种和石菖蒲+美人蕉混种。

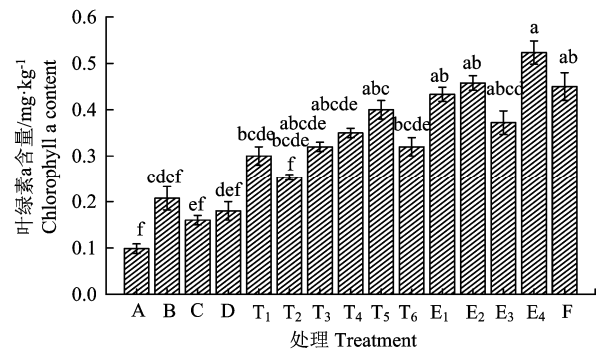


图 2 不同配置模式下水生植物的叶绿素 a 含量

Figure 2 Chlorophyll a contents in the aquatic plants under different configuration modes

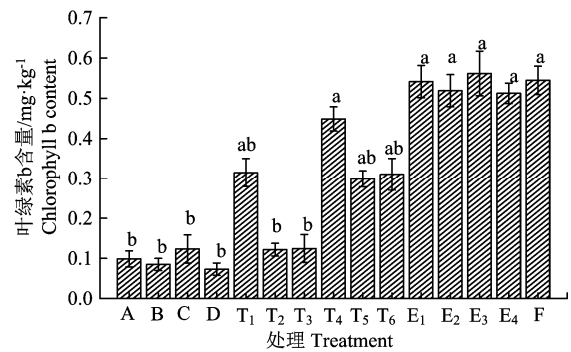


图 3 不同配置模式下水生植物的叶绿素 b 含量

Figure 3 Chlorophyll b contents in the aquatic plants under different configuration modes

由图 3 可知, 在不同配置模式下, 叶绿素 b 含量的变化特征要比叶绿素 a 含量明显。4 种植物混种模式与 3 种植物混种模式之间叶绿素 b 含量差异性不显著 ($P > 0.05$), 而与 2 种植物混种模式和单种植物模式之间差异性显著 ($P < 0.05$)。石菖蒲+水生鸢尾混种模式与 4 种植物混种模式的叶绿素 b 含量之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 其差值为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 2 种植物混种模式中, 石菖蒲+水生鸢尾混种模式与花叶芦竹+水生鸢尾混种模式、花叶芦竹+美人蕉混种模式之间叶绿素 b 含量差异性显著 ($P < 0.05$), 其差值均为 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在单种模式中, 4 种水生植物 (花叶芦竹、石菖蒲、水生鸢尾、美人蕉) 的叶绿素 b 含量之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 其值分别为 0.10 、 0.08 、 0.12 和 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由图 4 可知, 在不同配置模式下, 4 种水生植物配置模式的总叶绿素含量变化趋势基本表现为 3 种植物混种 $>$ 4 种植物混种 $>$ 2 种植物混种 $>$ 单种模

式。4 种植物混种模式与单种模式之间总叶绿素含量差异性显著 ($P < 0.05$), 而与 3 种植物混种模式 (石菖蒲+水生鸢尾+美人蕉混种模式) 之间差异不显著 ($P > 0.05$), 其差值仅为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。3 种植物混种模式 (花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种模式、花叶芦竹+水生鸢尾+美人蕉混种模式) 与 2 种植物混种模式 (花叶芦竹+石菖蒲混种模式、花叶芦竹+水生鸢尾混种模式) 之间差异显著 ($P < 0.05$), 而与其他 2 种植物混种模式之间差异不显著 ($P > 0.05$)。在单种模式中, 水生鸢尾单种与 2 种植物混种模式 (花叶芦竹+石菖蒲混种模式、花叶芦竹+水生鸢尾混种模式) 之间总叶绿素含量差异不显著 ($P > 0.05$), 其差值分别为 0.16 和 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总的来说, 混种模式的 4 种水生植物的叶绿素 a、b 和总叶绿素含量要高于单种。

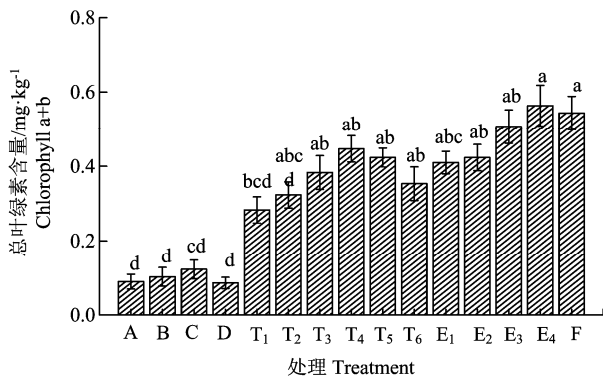


图 4 不同配置模式下水生植物的总叶绿素含量

Figure 4 Total chlorophyll contents in the aquatic plants under different configuration modes

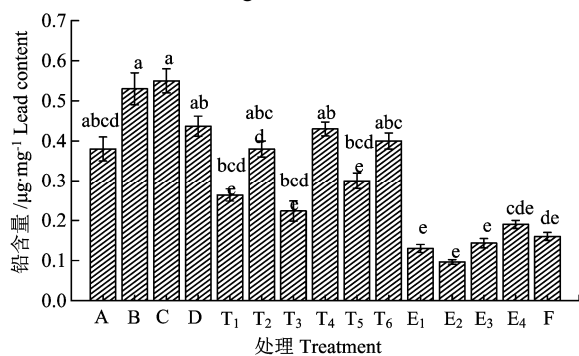


图 5 不同配置模式下水体中铅含量

Figure 5 Lead contents in the water under different configuration modes

2.4 不同配置模式下水体中铅含量变化

水生植物能够吸收重金属污染物, 净化环境且具有较高的观赏价值和经济价值^[9]。由图 5 可知, 水体中铅含量变化趋势为单种模式 > 2 种植物混种 > 3 种植物混种 > 4 种植物混种。在单种模式中, 石菖蒲和水生鸢尾单种与其他 3 种植物混种模式之间差

异性显著 ($P < 0.05$), 其值分别为 0.53 和 $0.55 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。花叶芦竹和美人蕉单种模式与 2 种植物混种模式 (花叶芦竹+水生鸢尾混种、石菖蒲+水生鸢尾混种、水生鸢尾+美人蕉混种) 之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 它们的值变化范围为 $0.38 \sim 0.44 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。在 2 种植物混种模式中, 花叶芦竹+美人蕉混种的水体中铅含量最低, 为 $0.22 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。3 种植物混种模式的水体铅含量与 4 种植物混种模式之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 但与单种模式之间的差异性显著 ($P < 0.05$)。3 种植物混种模式中, 花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种中水体的铅含量明显低于其他 3 种植物混种模式, 其差值分别为 0.03 、 0.05 和 $0.09 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种模式虽与 4 种植物混种模式之间的差异性不显著 ($P > 0.05$), 但其水体中铅含量最低。

2.5 不同配置模式下植物体内的铅含量

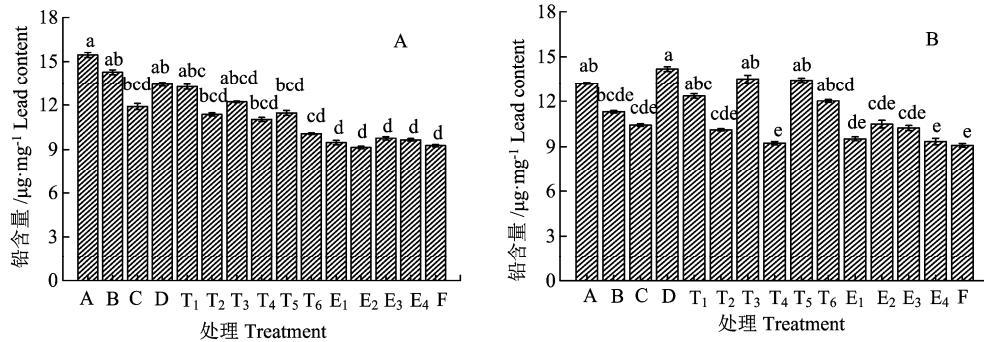
对 4 种水生植物在不同配置模式下地上部分和地下部分的铅含量进行分析, 结果(图 6A)表明, 4 种配置模式的地上部分铅含量变化特征为: 4 种植物混种模式 < 3 种植物混种模式 < 2 种植物混种模式 < 单种植物模式, 其值范围为 $9.14 \sim 15.45 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。水生鸢尾单种模式的地上部分铅含量与 3 种植物混种模式、4 种植物混种模式之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 且其与 4 种植物混种模式的地上部分铅含量差值为 $2.64 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。在单种模式中, 花叶芦竹的地上部分铅含量与水生鸢尾之间差异性显著 ($P < 0.05$), 其差值为 $3.55 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

由图 6B 可知, 地下部分铅含量变化趋势与地上部分铅含量相比差异较大。在单种模式中, 美人蕉的地上部分铅含量最大, 其值为 $14.48 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。它与花叶芦竹单种模式之间的差异性不显著 ($P > 0.05$), 差值为 $2.03 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。在 2 种植物混种模式中, 石菖蒲+水生鸢尾的地下部分铅含量最低, 且与 4 种植物混种模式之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 其值为 $9.24 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。虽然 3 种植物配置模式与 4 种植物配置模式之间差异性不显著 ($P > 0.05$), 但 4 种植物配置模式的地下部分铅含量最低, 与 3 种植物配置模式的最小差值为 $0.25 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。通过对植物体地上部分和地下部分铅含量的分析可知, 在不同配置模式中, 包含水生鸢尾和石菖蒲的模式中, 其地上部分铅含量较大, 而包含花叶芦竹和美人蕉的模式中其地下部分铅含量最大, 这与水生鸢尾和美人蕉的形态特性有关。美人蕉的块茎较大, 对铅的吸收主要集中于地下部分, 而水生鸢尾的根茎较小, 对铅的吸收主要集中于地上部分^[1]。

2.6 不同配置模式下土壤中的铅含量变化

不同植物配置模式的土壤中铅含量可反映不同配置的水生植物对土壤中铅污染的净化能力(如图7所示)。在不同植物配置模式下,土壤中铅含量的变化趋势大致为:4种植物混种模式<3种植物混种模式<2种植物混种模式<单种植物模式,其变化范围为6.28~15.27 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。在单种模式中,水生鸢尾的土壤中铅含量最高,与花叶芦竹和美人蕉之间差异性显著($P<0.05$),它们之间的差值分别为4.11和2.92 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。在2种植物混种模式中,花叶芦竹+石菖蒲

混种、花叶芦竹+美人蕉混种与单种模式和其他2种植物混种模式之间差异性显著($P<0.05$),其值变化范围为8.70~10.93 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。3种植物配置模式中,花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种与4种植物配置模式之间差异性不显著($P>0.05$),其差值为0.45 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。由图7可知,在不同配置模式中,存在花叶芦竹和美人蕉的组合中,其土壤铅含量都较低,这与水体中铅含量的测量结果基本相一致,这更加说明花叶芦竹和美人蕉对铅污染的吸收和净化能力要优于石菖蒲和水生鸢尾。



A. 植物地上部分铅含量; B. 植物地下部分铅含量

A. Lead content in the aboveground part of the aquatic plant; B. Lead content in the underground part of the aquatic plant

图6 不同配置模式下植物体内的铅含量

Figure 6 Lead contents in the aquatic plants under different configuration modes

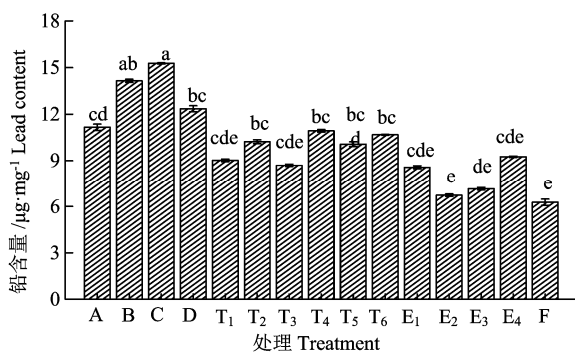


图7 不同配置模式下土壤中的铅含量

Figure 7 Lead content in the soil under different configuration modes

3 讨论与结论

3.1 水生植物对铅污染的适应性

在植物体内受到重金属胁迫时,植物的生长状况能够较好且直观地反映出植物对重金属胁迫的抗性以及所受胁迫的程度。在本研究中,不同配置模式下,4种植物在铅污染土壤中,均可正常生长,但根系活力之间存在明显差异,总体表现为:4种植物混种模式>3种植物混种模式>2种植物混种模式>单种模式。这说明植物的组合技术有利于缓解植物受到铅胁迫时的综合作用。白彦真等^[16]对14种本土草本植物根系活力的研究中指出,在500

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 铅处理下,植物通过增强其根系活力来维持根系的正常生理功能,来延缓重金属的毒害作用。刁锐琦^[14]和姜成等^[17]对水葱和凤仙花的生理特征的研究结果也显示,当铅浓度达到800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,水葱的根系活力将下降。在本研究中,花叶芦竹因其根系发达、生物量大,极大地疏松和改善了土壤,对污染土壤结构稳定能力强于石菖蒲、水生鸢尾和美人蕉,使其对铅耐受性优于石菖蒲、水生鸢尾和美人蕉。因此,在包含花叶芦竹的配置模式中,其根系活力要强于其他配置模式。

叶绿素是植物进行光合作用的重要色素,叶绿素含量可以作为评价植物生长状况的重要参数^[15]。本研究中,混种模式的叶绿素a、b和总叶绿素含量明显优于单种模式。张丽雨等^[18]的研究表明,铅胁迫能降低喜盐鸢尾(*Iris halophila*)和金鸡菊(*Coreopsis drummondii*)的叶绿素含量。刘秀梅等^[19]也认为,高浓度的铅污染,由于破坏叶绿素合成过程并影响了叶绿素酶的活性,从而抑制了叶绿素的生物合成,使叶绿素含量发生下降。而在本研究中,组合配置模式降低了铅对水生植物的胁迫作用,低浓度铅促进了叶绿素的生成或使少数的叶绿素a处于激发状态,增强了其对光能的利用率。由

此可知, 植物组合配置模式在铅污染处理下对植物的生长抑制作用较小。

3.2 水生植物对铅的净化效果

植物对重金属元素的吸收和迁移能力会因不同的物种和栽植地区而不同。这主要是由于植物本身的遗传结构决定了其对金属元素的吸收或迁移能力, 但这种吸收或迁移的能力也会因其所处环境的变化而呈现增强或弱化的趋势。在本研究中, 在不同配置模式中, 水体中铅含量和土壤中铅含量都表现为混种模式小于单种模式, 这表明混种配置模式对铅污染的修复和净化能力要强于单种模式。在混种模式中, 花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉配置模式的水体中铅含量最低, 造成这种现象的原因, 一方面是混种模式降低了铅浓度, 另一方面是由于花叶芦竹和美人蕉庞大的地下根茎, 使得对铅的吸收能力较强。李芳柏和吴启堂^[20]及黎华寿等^[21]的研究结果表明, 美人蕉在含重金属废水中的适应性最强, 这主要与美人蕉比较耐水栽有关。因此, 认为它是水体修复很好的植物^[22]。

根系是植物直接接触土壤的器官, 也是植物吸收重金属的主要器官^[23], 而且植物对铅的吸收主要以被动吸收为主。铅一旦进入根系, 可贮存在根部或运输到地上部分。在本研究中, 对植物地上部分和地下部分铅含量的分析结果表明, 花叶芦竹的地上部分铅含量最高, 而美人蕉的地下部分铅含量最高, 其值分别为 15.48 和 14.18 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。在不同配置模式下, 混种模式中植物地上部分和地下部分铅含量要低于单种模式。骆永明^[24]对金属污染土壤的植物修复研究中指出, 即使当外源铅处理达到 4 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 植物地上部分铅含量也不超过 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Liu 等^[25]在印度芥菜 (*Brassica juncea*) 对铅的吸收研究中也发现, 印度芥菜根部积累了大量的铅, 只有极少部分运输到地上部。在本研究中, 在不同配置模式下, 植物地上部分和地下部分铅含量的分布规律与大多数研究结果^[7,9,19]结果相一致。

4 种水生植物的土壤中铅含量可反映不同水生植物对土壤中铅污染的净化能力。在研究中, 3 种植物混种模式 (花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种) 与 4 种植物混种模式之间差异性不显著 ($P<0.05$)。不同配置下, 混种模式的土壤中铅含量要低于单种模式, 其最大差值为 7.42 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。何芳芳^[1]和纪美辰等^[8]的研究中也指出, 美人蕉、菖蒲和鸢尾对铅污染的净化效果较好。因此, 考虑净化效果和经济因素, 本研究认为花叶芦竹+石菖蒲+美人蕉混种模式是在铅污染水体中的净化效果最优的种植模式。

参考文献:

- [1] 何芳芳, 陈雅顺, 张德刚, 等. 六种观赏型水生植物对水体中铜、锌、铅的净化研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(2): 327-328, 332.
- [2] 陈兰钗, 方扬, 靳艳玲, 等. 浮萍 (*Lemna aequinoctialis*) 干粉对 Pb^{2+} 的吸附[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(6): 1046-1052.
- [3] 朱红霞, 贾艳蕾, 景华宇, 等. 混种 3 种观赏植物对白三叶铅积累的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 291-296, 302.
- [4] 成杰民, 俞协治. 蚯蚓在植物修复铜、镉污染土壤中的作用[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(3): 352-355.
- [5] 王丽萍, 张健, 胡红玲, 等. 巨菌草对镉污染土壤的修复特性[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(4): 725-732.
- [6] 邵泽强, 李翠兰, 张晋京, 等. 花卉植物修复铅污染土壤的研究现状及展望[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(9): 23-25.
- [7] 孙瑞莲, 刘健. 3 种挺水植物对污水的净化效果及生理响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 926-932.
- [8] 纪美辰, 张继权, 彭越, 等. 水培条件下几种水生植物对铅的抗性研究[J]. 生物技术通报, 2017, 33(8): 120-125.
- [9] 黄永杰, 刘登义, 王友保, 等. 八种水生植物对重金属富集能力的比较研究[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 541-545.
- [10] 方燕辉, 郭雪艳, 范欣婷, 等. 不同水生植物配置模式对垃圾渗滤液尾水的净化效果[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2014(3): 117-124.
- [11] 白宝璋, 金锦子, 白崧, 等. 玉米根系活力 TTC 测定法的改良[J]. 玉米科学, 1994, 2(4): 44-47.
- [12] 张宪政. 植物叶绿素含量测定方法比较研究[J]. 沈阳农学院学报, 1985, 16(4): 81-84.
- [13] 穆丽, 唐清, 瞻月晨, 等. 原子吸收法测定马齿苋中八种矿物元素[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(4): 130-131, 175.
- [14] 刁锐琦. 铅污染对水葱生理特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(2): 39-42.
- [15] 朱宇林, 曹福亮, 汪贵斌, 等. Cd、Pb 胁迫对银杏光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1): 47-50.
- [16] 白彦真, 谢英荷, 陈灿灿, 等. 铅对 14 种本土草本植物根系生长及根系活力的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 75-77.
- [17] 姜成, 申晓慧, 程艳, 等. 凤仙花种子对重金属铅的耐性研究[J]. 种子, 2009, 28(9): 16-19.
- [18] 张丽丽, 赵九洲, 赵婷婷, 等. 重金属铅和镉对溪荪生理特性的影响[J]. 湿地科学, 2011, 9(2): 198-202.
- [19] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 553-537.
- [20] 李芳柏, 吴启堂. 无土栽培美人蕉等植物处理生活废水的研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(1): 88-92.
- [21] 黎华寿, 聂呈荣, 方文杰, 等. 浮床栽培植物生长特性的研究[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2003, 24(2): 12-15.
- [22] 王忠全, 温琰茂, 黄兆霆, 等. 几种植物处理含重金属废水的适应性研究[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 540-544.
- [23] 马东兵, 高志敏, 马青, 等. 土壤铅污染及其植物修复研究[J]. 四川林勘设计, 2014(4): 32-36.
- [24] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5): 261-265, 280.
- [25] LIU D H, JIANG W S, LIU C J, et al. Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard *Brassica juncea* L. [J]. Bioresource Technol, 2000, 71(3): 273-277.