

常见水生植物对富营养化和重金属复合污染水体的修复效果研究

王敏, 唐景春, 王斐

(南开大学 环境科学与工程学院/环境污染过程与基准教育部重点实验室,
天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要: 选取大沽排污河原位生态修复工程现场的6种修复植物旱生美人蕉、水生美人蕉、旱伞草、鸢尾、马蔺、菖蒲为研究对象,通过温室培养试验研究了这6种植物对水中氮磷和重金属Cd、Pb复合污染的修复效果。试验结果表明,所选6种植物在复合污染水体中对营养物质和重金属Cd、Pb均表现出较好的修复效果。经50d修复后,各植物对总氮TN的去除率为53.90%~94.75%,对总磷TP的去除率为46.76%~85.10%;对Cd的去除率达到90.39%~99.47%。其中,菖蒲、鸢尾、马蔺对总氮的修复能力较好;鸢尾、美人蕉和马蔺对氨氮的修复效果较好;而旱伞草、美人蕉和马蔺对总磷的修复能力最强。所有修复植物对Cd和Pb的富集系数都远远大于1,对Cd、Pb表现出很强的富集能力,可作为Cd、Pb超富集植物来修复水体中的重金属Cd、Pb污染。

关键词: 水生植物; 富营养化; 重金属; 植物修复; 污染水体

中图分类号: X522; X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)02-0050-07

Remediation effect of common aquatic plants on the combined water pollution of eutrophication and heavy metals

WANG Min, TANG Jingchun, WANG Fei

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education / Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The paper selected six kinds of plants including canna generalis, canna glauca, cyperus alternifolius, iris tectorum, iris lacteal, acorus calamus linn from situ ecological restoration engineering field of Dagou sewage river as research object. Greenhouse cultivation test was carried out to study the remediation effect of six plants on nitrogen, phosphorus and heavy metal of Cd and Pb. The result showed that all the 6 plants showed good remediation effects on the water pollution. The removal rates of the plants are 53.90~94.75% to TN, 46.76~85.10% to TP, and 90.39~99.47% to Cd. Acorus calamus linn, iris tectorum and Iris lacteal shows good remediation effect on TN; the remediation effects of iris tectorum, canna and iris lacteal on NH_4^+ -N are better; and cyperus alternifolius, canna and iris lacteal are best choices on TP remediation. The enrichment factor of six kinds of plants on Cd and Pb is far greater than 1, which means strong accumulation ability of plants on Cd and Pb. The plants can be used as hyperaccumulator of Cd and Pb to deal with the heavy metal pollution in contaminated water body.

Key words: aquatic plants; eutrophication; heavy metal; phytoremediation; polluted water body

0 引言

大沽排污河一直是天津市的主要市政污水接纳水体,近年来大沽河的富营养化现象愈发严重,河道生态修复与重建工作刻不容缓。为了实现大沽排污河污染控制与修复,保持水体的环境和生态功能,对

河道进行了现场生态工程示范,在控制河段通过种植各种水生植物来修复河水,净化水质。

很多研究发现,水生植物具有明显去除氮磷的效果^[1-2],可以对富营养化水体的氮磷进行吸收,供自身生长和新陈代谢使用。例如,美人蕉对氮磷的吸收能力较强,具有较高的水质净化能力,可以作为

收稿日期:2012-12-22

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31270544);天津市科技创新专项资金项目(08FDZDSF03402);天津市科技支撑重点项目(11ZCGYSF01400)及中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介:王敏(1987-),女,山东人,硕士研究生,研究方向:生态修复。

通讯作者:唐景春(1968-),男,天津人,教授,博士,研究方向:生态修复,从事环境生物学方面的教学与科研工作。

水体富营养化防治的浮床栽培植物来进行推广应用^[3-4]。水生植物不仅能有效去除氮磷,在重金属废水净化上也很有效。据研究发现,多种水生植物对水中的重金属具有很强的富集能力^[5-6]。重金属Cd、Pb是环境中重要的污染物,在自然界中常常共同存在构成复合污染^[7]。重金属多为非降解型有毒物质,不具备自然净化能力,一旦进入水体就很难从中去除。目前利用植物进行土壤重金属修复的研究较多^[8-11],但在水体重金属修复的应用还不是很多,植物对重金属的有效吸收和积累能力以及在废水处理中的应用越来越受到关注。任珺等^[12]发现水葱、菖蒲、芦苇均能够有效吸收水体中的Cd,均可作为植物修复重金属污染水体的遴选物种,用于重金属Cd污染水体的生物修复。

水体污染往往是多种污染物共存,特别是N、P等有机污染物与重金属的复合污染是其一大特点。本研究针对河道的富营养化和重金属复合污染问题,选取了修复现场种植的6种水生挺水植物进行了室内静态水培试验,比较研究了6种植物在富营养化和Cd、Pb复合污染水体中的修复效果,以期水生植物在河道生态工程中的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验用水

试验用水于2011年5月7号取自天津市大沽排污河,该河道一直是天津市海河以南主要市政污水接纳水体,长期作为天津市城市污水和工业废水的排水通道。为了避免河水富营养化改善河道水质,在该水域实施了河道原位生态修复工程。试验用水中含总氮47.8 mg/L、总磷1.77 mg/L。

1.2 供试植物

本实验根据水生植物修复技术用到的植物类型,对大沽河道原位生态修复现场的6种水生植物进行了研究:旱生美人蕉(*Canna generalis*)、水生美人蕉(*Canna glauca*)、旱伞草(*Cyperus alternifolius*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、马蔺(*Iris lactea*)、菖蒲(*Acorus calamus* Linn)。植物幼苗均购自河北廊坊某花卉公司,试验前对所有植物进行3 d的预培养以恢复根系。

1.3 试验方法

试验设6种水生植物和空白对照共7个处理,对照不种植植物,所有处理均设3个重复。采用1L的容器进行水培试验,每个处理根据植物种类的不同放置1~3株植物。试验期间不添加N、P,植物营养完全来源于富营养化水体;每个处理人为添加重

金属Cd、Pb,使得Cd浓度为1 mg/L、Pb浓度为10 mg/L,以模拟水体N、P和重金属复合污染环境。试验在温室进行,有充足光照,通过添加蒸馏水补充蒸发、蒸腾和采样所耗的水分。试验持续时间50 d,每10 d采集一次水样进行分析,以确定水生植物对水中氮磷以及重金属Cd、Pb的去除效果。

1.4 指标测定

通过检测富营养化和重金属Cd、Pb复合污染水体处理前后的TN、NH₄⁺-N、TP、Cd、Pb等指标来监测6种植物对复合污染水体的修复效果。依照《水和废水监测分析方法》^[13]对采集水样进行氮磷、重金属指标测定,计算水质氮磷、重金属去除率,并对各水样进行营养状态评价。氨氮采用纳氏试剂比色法,总氮采用过硫酸钾-紫外分光光度法,总磷采用钼锑抗分光光度法测定,Cd、Pb采用火焰原子吸收法测定。试验过程中,观察植物的生长情况,对收割后植物进行植物鲜重、茎长和根长等生长指标测量,并测定植物体氮磷含量和重金属Cd、Pb含量。植物样品采用浓硫酸和浓高氯酸(10:1)消煮后,用半微量凯氏定氮法测定全氮,钼锑抗比色法测定全磷;采用微波消解火焰原子吸收法测定植物体的Cd、Pb。

测定收获后植物根茎叶中Cd、Pb含量,计算富集系数、转移系数。

挺水、湿生植物转移系数 = 植物地上部重金属含量/根部该元素含量

挺水、湿生植物富集系数 = 植物地上部(或根)重金属含量/溶液该元素含量

富集量 = 植物对重金属的吸收量/植物干重(mg/kg)

1.5 数据处理与分析

数据计算和图表绘制利用Excel 2003和origin 8.0软件完成。

2 结果

2.1 植物生长情况

6种水生植物在经过去离子水预培养3 d后,均生长良好。经过50 d的氮磷、重金属复合污染水体的培养后,生长状况产生差异,6种水生植物的生物量和茎长、根长变化分别如图1和图2所示。美人蕉、菖蒲等各植物在相同氮磷和重金属污染程度水样中表现出不同的生长状况。由图可以看出,培养前后植物的茎长、根长和生物量大都有所增加。植物在污染水体中生长50 d后,美人蕉、旱伞草和鸢尾的

生物量都有所增加,马蔺和菖蒲的生物量变小。其中鸢尾的适应情况最好,生物量增加了 10.13 g,增长率达到 32.94%;菖蒲生长情况最差,植株出现一定程度的衰败死亡,呈现负增长;其他植物的增长幅度也较小。说明重金属 Cd、Pb 对马蔺和菖蒲的毒害作用较大,美人蕉、旱伞草、鸢尾对该复合污染水体的耐受性较强。

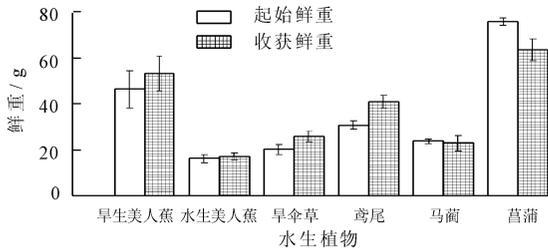


图1 水生植物生物量变化

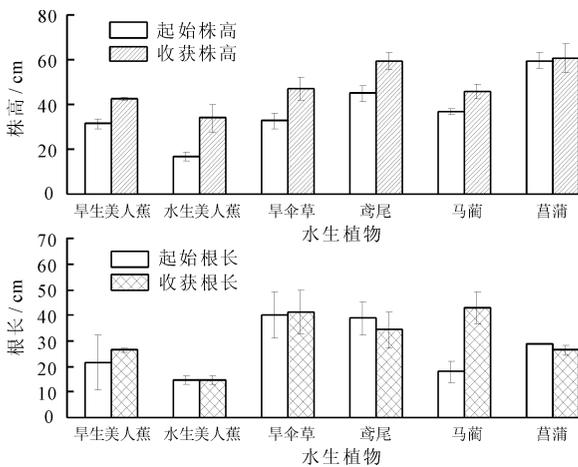


图2 水生植物株高、根长变化

实验过程中,各植物的株高和根长均增加,只有鸢尾和菖蒲的根长负增加。其中美人蕉、旱伞草、鸢尾和菖蒲的株高增量相近,均在 10 cm 以上;菖蒲的株高和根长几乎没有变化。株高增加幅度大于根长,说明污染水体对根的毒害作用大于对地上部的毒害。从各植物的生长状态看,植物地上部和根部的生长变化幅度均不明显,这和生物量的结果相对应。各植物对污染水体的适应状况不同,菖蒲生长状况最为不好,实验过程中出现萎蔫。

2.2 不同水生植物对复合污染水体营养盐的修复

2.2.1 对总氮的修复 利用植物净化富营养化水体对营养盐的去除效果不尽相同。6种植物在修复过程中 TN 的浓度变化如图 3。由图可知,各处理 TN 浓度随着时间的推移均呈明显下降趋势,各植物在污染水体修复过程中对 TN 都有较好的去除效果(表 1)。其中鸢尾、菖蒲对 TN 的修复效果最好,使水中 TN 浓度从 47.80 mg/L 降到 2.51 mg/L 和 1.97

mg/L,基本达到了地表水环境质量标准 V 类水标准 (GB3838-2002),去除率高达 94.75% 和 95.88%。其次修复效果也较好的是马蔺和旱伞草,经 50d 修复后浓度降至 4.96 mg/L 和 7.87 mg/L,修复后浓度距离地表水 V 类水标准相差不大,去除率为 89.62% 和 83.54%。两种美人蕉修复效果相似,次于另外四种实验植物,但效果也较好,去除率也能达到 50% 多。

随着修复时间的延长,各处理水中 TN 的浓度变化趋势相同,即随着修复时间的推移而逐步降低。在一定的修复时间范围内(10 d),6种植物在复合污染水体修复中具有较好的效果,在修复 10 d 后 TN 浓度趋于平稳,降低幅度不明显。在此复合污染水体中 6种植物对 TN 的修复效果顺序为菖蒲 > 鸢尾 > 马蔺 > 旱伞草 > 旱生美人蕉 > 水生美人蕉。

表1 不同植物对水中营养物质的去除率比较 %

	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
CK	46.72	92.08	55.68
旱生美人蕉	65.86	84.46	69.76
水生美人蕉	53.90	84.33	49.51
旱伞草	83.54	75.22	85.10
鸢尾	94.75	85.39	46.76
马蔺	89.62	83.64	69.03
菖蒲	95.88	65.00	54.98

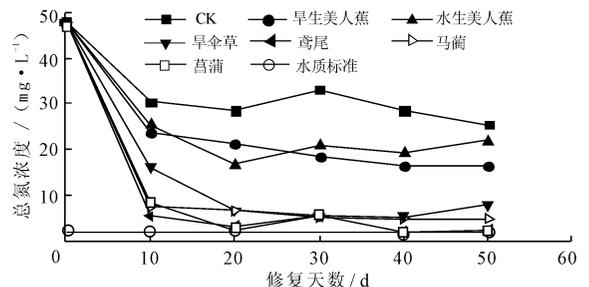


图3 不同水生植物对水体 TN 的修复效果

2.2.2 对氨氮的修复 水中氨氮的去除情况整体趋势与总氮类似,但存在一定的差异。在修复 10 d 后,水中的氨氮浓度从 14.77 mg/L 急剧下降到 2.5 mg/L 左右,之后随着修复时间的延长趋于平稳,净化后期一直维持在一个很低的水平,整体上先小幅度升高然后降低。不同的水生植物对水中氮的去除效果有差别,但是差别不明显。在经过 50 d 处理后,氨氮浓度均在 2~5 mg/L 左右,接近地表水环境质量标准 V 类水水质标准 (GB3838-2002)。去除率达到 65%~85.39% (表 1),相比之下菖蒲对氨氮的去除效果稍差。

但对照不同种类植物的处理系统氨氮的降低趋

势与各植物处理类似,氨氮浓度也降到了水质标准左右。水中氨氮的去除途径有植物吸收、吸附和挥发、硝化和反硝化作用等,其中最有效的途径是硝化和反硝化作用。这说明之前原水里的微生物含量很高,硝化反硝化作用明显,即使未种植植物,氨氮也通过其他途径得到了修复。所以实际上本实验中植物对氨氮的修复效果不很明显。经50d修复实验后,6种植物对氨氮的修复效果顺序为鸢尾>早生美人蕉>水生美人蕉>马蔺>早伞草>菖蒲。

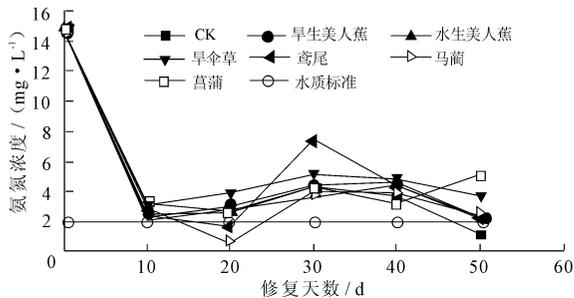


图4 不同水生植物对水体氨氮的修复效果

2.2.3 对总磷的修复 由图5看出,水中总磷的去除情况整体趋势与总氮、氨氮不同。在修复20d后,水中的TP浓度从1.77 mg/L下降到0.21~0.73 mg/L,之后随着修复时间的延长总磷又大幅增加到1.36~2.47 mg/L(修复40d),最终经50d修复结束后浓度又降低至0.47~0.85 mg/L,接近地表水环境质量标准Ⅴ类水水质标准(GB3838-2002)去除率为46.76%~85.10%(表1)。不同的水生植物对水中氮的去除效果有一定差别。在经过50d处理后,相比之下早伞草的去除效果最好,修复后浓度低于地表水Ⅴ类水标准,去除率为85.10%;早生美人蕉和马蔺对TP的修复效果相当,去除率为69%左右;而鸢尾和水生美人蕉对TP的修复效果最差,甚至低于对照未种植植物处理组的去除率。

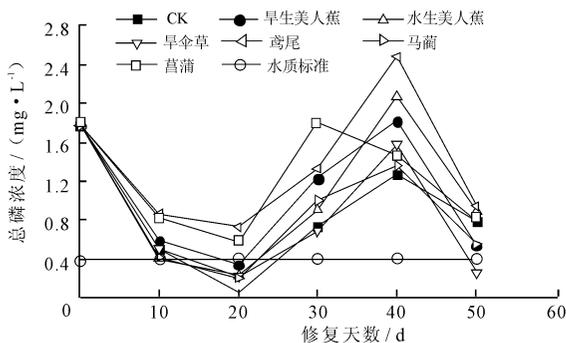


图5 不同水生植物对水体TP的修复效果

水生植物对磷的去除途径包括植物吸收、沉淀、吸附作用和微生物固定等^[14]。无植物对照TP也有

一定去除可能是因为TP中包括了颗粒态的磷以及水培过程中沉降等作用,也有可能是富营养化水体中藻类作用的结果。虽然对照也随着时间推移在变化,但经50d修复后的浓度高于大部分植物处理组,说明早伞草、马蔺、早生美人蕉和菖蒲对TP有明显的去除作用。经50d修复后,6种植物对TP的修复效果顺序为早伞草>早生美人蕉>马蔺>菖蒲>水生美人蕉>鸢尾。

2.3 不同水生植物对重金属Cd、Pb的修复

2.3.1 水体中重金属的变化 6种水生植物对重金属离子的去除率和修复前后Cd、Pb的浓度变化情况分别如图6和表2所示。由图可知,6种植物对Cd、Pb的去除率表现出一定的差异性,其中对Cd的去除作用相差较为明显,而对Pb的去除差异较小。经50d植物修复后,各植物处理组的Cd、Pb浓度均接近或达到地表水Ⅴ类水排放标准。培养期间,6种水生植物均表现出一定的中毒症状,说明当Cd为1 mg/L、Pb为10 mg/L联合作用时,经过50d的培养对这6种植物产生了不同程度的毒害作用。

6种植物对Cd都具有明显的净化效果。鸢尾、马蔺和菖蒲对Cd的净化效果最佳,去除率可达到95%以上,经过50d的修复Cd浓度由1.017 mg/L降至0.05~0.030 mg/L,已经接近地表水环境质量标准Ⅴ类水水质标准(GB3838-2002),其中菖蒲修复组Cd浓度降到了水质标准以下,效果最好。净化效果也较好的其次是美人蕉,Cd去除率达93.60%~95.39%,修复后浓度降到0.047~0.065 mg/L。相比之下效果最不好的是早伞草,但Cd去除率也相当高为90.39%。

6种植物对Pb的去除率均达到了98%,且不同植物对Pb的去除率差异较小,经50d修复后Pb的浓度由10.01降至0.045~0.106 mg/L,与地表水环境质量标准Ⅴ类水水质标准(GB3838-2002)甚为相近。但是6种植物对Pb的去除率与对照组差异较小,对照组的去除率也很高,可能是因为Pb的浓度受到了环境因素的影响而降低,如氧化还原电位、pH值、各种无机及有机组分的种类和浓度等。原因一方面可能是水的pH偏高,生成了氢氧化物或碳酸盐等难溶物质沉淀或络合物,使水中游离金属离子浓度降低;一方面可能是水中的腐殖质等溶解有机物和无机或有机悬浮颗粒螯合或吸附了水中的Pb,随后转移到底部沉积物中;还有可能是微生物的作用,水中含有能吸附或降解Pb的微生物使得Pb的离子浓度降低。对照组和修复组的水

中 Pb 去除率均达到了 98% 且差异不大,没有明显表现出 6 种植物对 Pb 的去除作用,而可能是其他原因致使水中 Pb 的浓度降低,但这并不说明植物对 Pb 的净化作用不好,任珺等的研究结果就表明,菖蒲可用于高浓度的 Pb 污染水体的植物修复^[15],应该进行环境因素控制继续深入研究植物对 Pb 的修复效果。

表 2 不同水生植物对污染水体中 Cd、Pb 修复后浓度变化 mg/L

	Cd			Pb		
	修复前	修复后	水质标准	修复前	修复后	水质标准
CK	1.017	0.275	0.01	10.01	0.158	0.10
早生美人蕉	1.017	0.065	0.01	10.01	0.091	0.10
水生美人蕉	1.017	0.047	0.01	10.01	0.098	0.10
早伞草	1.017	0.098	0.01	10.01	0.106	0.10
鸢尾	1.017	0.014	0.01	10.01	0.083	0.10
马蔺	1.017	0.030	0.01	10.01	0.106	0.10
菖蒲	1.017	0.005	0.01	10.01	0.045	0.10

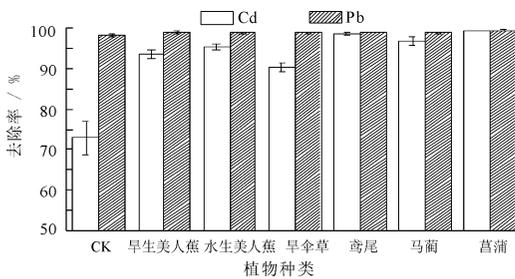


图 6 不同水生植物对水体中 Cd、Pb 的去除率

2.3.2 不同水生植物对复合污染水体重金属 Cd、Pb 的吸收富集 当水体中 Pb 与 Cd 共存时,对植物的毒性作用会发生协同效应,使中毒更为严重。同一植物对不同重金属离子的耐受上限是不同的,不同植物对同一重金属离子的耐受能力也是不同的,因此这些都导致植物对重金属的富集能力的差异。供试植株均由植株公司通过配制的营养液人工培养,在移栽试验前体内 Cd、Pb 含量均未检出。修复试验结束后植物体内重金属 Cd、Pb 的富集量如图 7、图 8 所示。

由图可见,相同氮磷和重金属复合污染情况下,植株体内的镉富集量各不相同。在相同培养时间下同种植物不同部位对 Cd 的吸收存在差异,植株地下部分 Cd 含量显著高于地上部分 Cd 含量,差别最大的是鸢尾,根部 Cd 含量是地上部的 15.46 倍,而差别最小的水生美人蕉也达到 4.64 倍。说明重金属离子被水生植物吸收后,大部分停留在根部,少量向茎叶部分发生了迁移。6 种植物体内的重金属离子分布基本一致,地上部和根部的 Cd 含量大小

趋势类似。地上部分马蔺 Cd 含量最高为 52.88 mg/kg,其次是水生美人蕉和早伞草 Cd 含量较为接近为 25 mg/kg 左右,富集量较小的是早生美人蕉和鸢尾,最小的是菖蒲。根部和地上部分呈现出类似的 Cd 含量大小趋势,其中鸢尾的根部 Cd 富集量最大,为 228.33 mg/kg,而菖蒲的富集量最小 85.37 mg/kg。在此复合污染水体中 6 种植物对重金属 Cd 的累积量大小顺序为鸢尾 > 马蔺 > 早伞草 > 水生美人蕉 > 早生美人蕉 > 菖蒲。

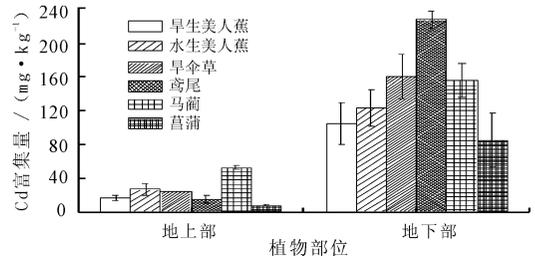


图 7 不同水生植物对重金属 Cd 的富集能力比较

由图 8 可知,相同氮磷和重金属复合污染情况下,植株体内的 Pb 富集量各不相同。跟 Cd 富集情况类似,各植物的根部 Pb 含量均远远高于地上部 Pb 含量。其中差别较大的是鸢尾和菖蒲,根部 Pb 含量分别是地上部的 18.36 倍和 30.92 倍,而差别较小的有美人蕉和马蔺也分别达到 6.93、6.22 和 3.61 倍。说明与 Cd 相同,Pb 被水生植物吸收后,也大部分停留在根部,少量向茎叶部分迁移。6 种植物体内的 Pb 分布基本一致,地上部和根部的 Pd 含量大小趋势类似。地上部分马蔺 Pb 含量最高为 320.19 mg/kg,早生美人蕉、水生美人蕉、早伞草、鸢尾 4 种植物 Pb 含量相当为 59.04 ~ 84.40 mg/kg,富集量最小的是菖蒲,这跟 Cd 富集情况类似。根部和地上部分呈现出类似的 Pb 含量大小趋势,其中鸢尾的根部 Pb 富集量最大,为 1229.25 mg/kg,而水生美人蕉的富集量最 366.91 mg/kg,在根部的 Pb 富集情况仍跟 Cd 呈现出相同规律。在此复合污染水体中 6 种植物对重金属 Pb 的富集量大小顺序为马蔺 > 鸢尾 > 早伞草 > 菖蒲 > 早生美人蕉 > 水生美人蕉。

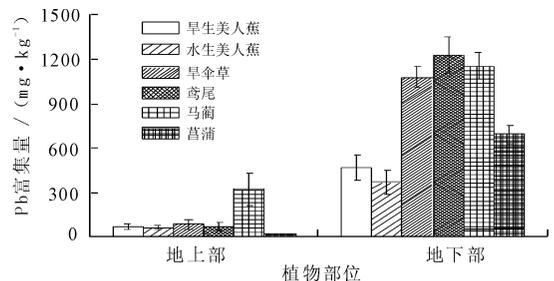


图 8 不同水生植物对重金属 Pb 的富集能力比较

3 讨论

试验表明,所选择的水生植物对污染水体氮磷均具有很好的修复效果,去除率均较高,具有良好的营养化水体净化能力。对氮磷的净化能力根据植物种类的不同而呈现出一定的差异性,菖蒲、鸢尾、马蔺对总氮的修复能力较好;鸢尾、美人蕉和马蔺对氨氮的修复效果较好;而旱伞草、旱生美人蕉和马蔺对总磷的修复能力最强。总的来说,马蔺和鸢尾对氮磷营养物质的修复能力较强。各植物对氮磷的修复能力不一致,存在一定差别,原因可能是由于水体中加入了重金属 Cd、Pb,对植物产生了不同程度的毒害作用,影响了植物的氮磷吸收能力。由于对氮磷的修复途径和机理的不同,6种水生植物的氮磷的修复能力也不同,水生植物对氮的去除效果总体上比磷好,这可能是由于氮在水体中有更多的去除途径或是各处理中微生物含量高硝化和反硝化作用强烈的缘故。

水体中磷素的去除可以通过沉淀吸附及植物的吸收等作用,而水体中氮素的去除有沉积吸附、植物吸收、生物硝化和反硝化等更多种途径^[16]。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在N元素中的比例较大时植物优先吸收水样中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,因此水中的氨氮比总氮先降低。N的去除尽管有植物的吸收,但是硝化和反硝化作用仍是主要的去除机制,在厌氧或者缺氧的情况下,总氮中有60%~95%是通过反硝化去除的^[17]。因此供试水体中TN的去除是微生物与水生植物共同完成的,细菌在水质净化中对氮的去除起着重要作用,而植物根区可以为微生物提供生存场所和降解营养物质的条件,从而促进微生物对磷的同化吸收和过量积累^[18],植物的生理代谢活动直接关系到营养物质的迁移转化过程。所以污染水体中重金属对植物的不同毒害作用影响着其对氮磷营养物质的修复。

试验表明,这6种水生植物都能一定程度地去除水体中的镉离子,且去除能力较强,但由于植物种类的不同净化能力有一定差别。其中菖蒲表现了最强的净化能力,旱伞草相对最弱。6种植物对Pb的去除作用没有明显表现出来,可能是水体环境因素pH、悬浮颗粒物以及微生物等影响到了水中Pb的浓度。影响水生植物去除重金属的因素有:植物生活型、生物量、株龄、处理时间、重金属种类、初始浓度、温度、pH、其他离子等^[19]。由于植物种类、生物量、株龄等因素造成不同水生植物对Cd、Pb不同的净化效果。

一般植物对Cd的积累多集中在根部,而地上部分相对含量较低,这可能是因为根部首先直接接触水体,通过吸收和吸附累积了大量重金属,而一些植物通过根部某种机制将重金属累积在根部而阻止其转移到地上部。可见水中Cd的去除主要靠植物根部的吸收和吸附作用。挺水植物大多有粗壮的根系,还有许多发达的不定根,其主要通过根系从污染水体中蓄积重金属,根部净化效果明显大于叶部,鸢尾、菖蒲等都属于挺水植物。重金属在水生植物体内的分布趋向于根部积累,这同Stolts等研究结果相符^[20],将有害离子积累于根部可能是为了防止对地上部新陈代谢等的毒害。表3为6种水生植物对重金属Cd、Pb的富集系数和转移系数。由表可以看出,各植物根部对Cd和Pb的富集系数均远大于地上部富集系数,各植物的Cd、Pb转移系数均小于1,且值都很小在0.03~0.34之间,说明该6种植物均不能有效地将根部的重金属转移至地上部。不同植物以及同一植物不同部位对Cd、Pb的富集能力具有明显差异。所有的修复植物对Cd和Pb的富集系数都远远大于1,富集系数越大,其富集能力越强^[21-22],表明6种试验植物都对Cd、Pb具有很强的富集能力,能有效修复水体中的重金属Cd、Pb。对Cd富集系数最高的是鸢尾根部(224.51),富集系数相比最低的是菖蒲根部(83.94);对Pb富集系数最高的是鸢尾根部(122.80),富集系数相比最低的是水生美人蕉根部(36.65)。另外各植物对Cd的富集系数和转移系数均大于对Pb的富集系数和转移系数,这说明这6种植物对Cd的富集能力和根部向地上部转移运输能力均比对Pb的强。

表3 水生植物对重金属Cd、Pb的富集系数和转移系数

植物名称	部位	富集系数		转移系数	
		BF _{Cd}	BF _{Pb}	TF _{Cd}	TF _{Pb}
旱生美人蕉	茎叶	16.03	6.72	0.16	0.14
	根	103.27	46.57		
水生美人蕉	茎叶	26.05	5.90	0.22	0.16
	根	120.94	36.65		
旱伞草	茎叶	24.16	8.23	0.15	0.08
	根	157.75	107.54		
鸢尾	茎叶	14.53	6.69	0.06	0.05
	根	224.51	122.80		
马蔺	茎叶	51.99	31.99	0.34	0.28
	根	153.14	115.41		
菖蒲	茎叶	7.39	2.24	0.09	0.03
	根	83.94	69.12		

筛选超富集植物的标准主要包括3点:一是临

界含量特征,即超富集重金属的临界含量规定为: Zn 和 Mn 为 10000 mg / kg, Pb、Cu、Ni、Co 和 As 为 1000 mg / kg, Cd 为 100 mg / kg, Au 为 1 mg / kg, 或者是体内重金属含量超过正常植物 10 ~ 500 倍; 二是富集系数大于 1^[23]; 三是转移系数大于 1。根据第二条标准,这 6 种植物都能作为 Cd、Pb 超富集植物来修复水体中的重金属 Cd、Pb 污染。在自然环境中,很多植物可以蓄积、吸收大量重金属,这其中水生植物对重金属的累积作用尤为明显,可以作为指示物种和富集物种。利用水生植物对重金属污染水体进行修复净化的研究很多^[24-26]。本试验中的 6 种水生植物对 Cd、Pb 都具有很强的富集能力,这也和很过相关研究的结果吻合。

参考文献:

- [1] 黄亮, 吴乃成, 唐涛, 等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J]. 中国环境科学, 2010, 30(增刊):1-6.
- [2] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 11(8):1351-1353.
- [3] 吴建强, 王敏, 吴建, 等. 4 种浮床植物吸收水体氮磷能力试验研究[J]. 环境科学, 2011, 32(4):995-999.
- [4] 金数权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1571-1575.
- [5] 叶雪均, 邱数敏. 3 种草本植物对 Pb-Cd 污染水体的修复研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(5):1023-1026.
- [6] 华建峰, 胡李娟, 张垂胜, 等. 3 种水生植物对锰污染水体修复作用的研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9):2160-2165.
- [7] 周启星. 复合污染生态学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1995.
- [8] Wei Shuhe, Li Yunmei, Zhou Qixing, et al. Effect of fertilizer amendments on phytoremediation of Cd-contaminated soil by a newly discovered hyperaccumulator *Solanum nigrum* L[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1-3):269-273.
- [9] Sun Yuebing, Zhou Qixing, Diao Chunyan. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L[J]. Bioresource Technology. 2008, 99(5):1103-1110.
- [10] Sun Yuebing, Zhou Qixing, Wang Lin, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2-3):808-814.
- [11] Joonki Y, Cao Xinde, Zhou Qingxing, et al. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site[J]. Science of The Total Environment, 2006, 368(2-3):456-464.
- [12] 任珺, 陶玲, 杨倩, 等. 芦苇、菖蒲和水葱对水体中 Cd 富集能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1757-1762.
- [13] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会编. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 周小平, 王建国, 薛利红, 等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11):2199-2203.
- [15] 任珺, 陶玲, 杨倩. 芦苇、菖蒲和水葱对水体中 Pb²⁺ 富集能力的研究[J]. 湿地科学, 2009, 7(3):255-260.
- [16] 王春景, 杨海军, 刘国经. 菰和菖蒲对富营养化水体净化效率的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1):40-44.
- [17] Lee C G, Fletcher T D, Sun G Z. Nitrogen removal in constructed wetland systems[J]. Engineering Life Science, 2009, 9(1):11-22.
- [18] Stottmeister U, Wiener A. Effects of plants and microorganism in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Biotechnology Advances, 2003, 22:93-117.
- [19] 王谦, 成水平. 大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5):96-102.
- [20] Stoltz E, Gregor M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland species growing in submerged mine tailings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 47:271-280.
- [21] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 农田杂草的重金属超积累特性研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1):105-109.
- [22] Mattina M J 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.
- [23] Zu Yanqun, Li Yuan, Chritian S, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China[J]. Environment International, 2004, 30(4):567-576.
- [24] 申华, 黄鹤忠, 张皓, 等. 3 种观赏水草对水体镉污染修复效果的比较研究[J]. 水生态学, 2008, 29(1):52-55.
- [25] 潘义宏, 王宏斌, 谷兆萍, 等. 大型水生植物对重金属的富集与转移[J]. 生态学报, 2010, 30(30):6430-6441.
- [26] 李至刚, 李素丽, 梅利民, 等. 美人蕉 (*Canna indica* Linn.) 和芦苇 (*Phragmites australis* L.) 人工湿地对含铬生活污水的净化效果及植物的生理生态变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):358-365.