

# 水生观赏植物对城市污水的修复研究

曾小梅<sup>1</sup>, 刘 鹏<sup>2</sup>, 张晓斌<sup>2</sup>

(1. 金华职业技术学院, 浙江 金华 321007; 2. 浙江师范大学 植物学实验室, 浙江 金华 321004)

**摘 要:**将黄花鸢尾、石菖蒲、菖蒲、千屈菜、泽泻、玉带草 6 种水生观赏植物种植于模拟人工湿地系统中,对城市污水进行绿色修复研究。分别在第 5 天、第 10 天、第 15 天测定污水中总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、重金属元素(Cr,Pb,Cd)的含量,研究水生观赏植物对城市污水的处理效果和修复能力。结果表明:各植物系统对 TN,TP,COD,BOD<sub>5</sub> 以及重金属 Cr,Pb,Cd 去除效率随时间的推移逐渐上升,至第 15 天去除效率分别达 88.1%,95.9%,90.6%,86.7%,78.1%,83.2%,91.4%以上。各植物系统对各种污染物的去除效率呈现一定差异,处理时间的不同对植物的修复效果也存在一定影响。6 种水生观赏植物中,综合净化能力以黄花鸢尾和石菖蒲最为突出,是值得推荐的城市污水修复植物。

**关键词:**水生观赏植物; 城市污水; 植物修复; 重金属

**中图分类号:**Q945.17; X703; X173

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)05-0349-05

## Phytoremediation of Urban Wastewater by Ornamental Hydrophytes

ZENG Xiaomei<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>2</sup>, ZHANG Xiaobin<sup>2</sup>

(1. Jinhua Polytechnic, Jinhua, Zhejiang 321007, China;

2. Key Laboratory of Botany, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

**Abstract:**Based on the constructed wetland systems simulated with *Iris pseudacorus*, *Acorus gramineus*, *Acorus calamus*, *Lythrum salicaria*, *Alisma orientale* and *Reinekea carnea*, the study on the phytoremediation effect of urban wastewater was carried out. We determined TN, TP, COD, BOD<sub>5</sub> and heavy metals (Cr, Pb, Cd) on the 5th day, 10th day and 15th day, and investigated the phytoremediation effect of urban wastewater. Results indicated that scavenging efficiency of all treating-systems to TN, TP, COD, BOD<sub>5</sub> and heavy metals (Cr, Pb, Cd) in the wastewater increased gradually over time, which were above 88.1%, 95.9%, 90.6%, 86.7%, 78.1%, 83.2% and 91.4%, respectively, on the 15th day. This was mainly caused by differences in plant physiological structures and functions, while components in the wastewater also affected the phytoremediation. On the other hand, abilities of plants to scavenge nutrients varied in different treating time. In view of either scavenging efficiency or contribution of plants than other plants, *Acorus gramineus* and *Iris pseudacorus* are good species for bio-remediation of composite-polluted water such as urban wastewater.

**Keywords:**ornamental hydrophytes; urban wastewater; phytoremediation; heavy metal

随着工业化的不断发展,城市废水中重金属及营养元素 N、P 含量日益增加,重金属污染和水体富营养化逐渐加剧。当前广泛使用的传统处理方法在处理含重金属废水时存在成本高、反应慢、易造成二次污染、低浓度废水处理难等缺点<sup>[1]</sup>。而水体修复生态工程作为一种低耗、无破坏性的方法,可以较好地解决这个问题。据统计,近年来人工湿地处理污水的研究文献不断增加<sup>[2]</sup>。

水生植物是人工湿地系统的关键组成部分,不同

种类植物吸收污染物能力和根系泌氧性能也就不同。可以利用一些植物萃取、稳定、降解水体污染物来达到降低污染水体的危险<sup>[3]</sup>。目前,国内外学者对湿地植物的研究大都集中于芦苇(*Phragmites australis*)、灯心草(*Juncus effusus*)和香蒲(*Typha minima*)等少数几种植物,研究这些植物对污水中 N、P、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、化学需氧量(COD)的去除效果,而较少涉及到具有较高市场开发前景的植物对污水的去除和利用水生观赏植物处理城市污水中的重金属。有研究表明

一些水生观赏植物如鸢尾(*Iris pseudacorus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria* L.)等对污水有较强的适应性<sup>[4-5]</sup>;具有较大根系生物量的美人蕉(*Canna indica*)净化生活污水的效果及对污水中重金属的综合耐性均强于芦苇<sup>[6-7]</sup>。水生观赏植物萃取及积累重金属的能力因种类不同而存在差异。如槐叶萍(*Salvinia natans*)可以在体内专一地积累 Hg<sup>[8]</sup>;而水萍(*Spirodela polyrhiza*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)则非专一地积累 Cr, Mn, Cu, Fe, Pb, Cd 等多种重金属<sup>[9]</sup>。对城市污水开展水生观赏植物综合修复研究,在探讨水生观赏植物在城市污水生物修复作用的同时,还可以带来一定的经济效益,有助于环保事业的公益化和商业化。本试验是在模拟人工湿地环境中进行,选取黄花鸢尾(*Iris pseudacorus*)、石菖蒲(*Acorus gramineus*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、千屈菜、泽泻(*Alisma orientale*)、玉带草(*Reinekea carnea*)6 种水生观赏植物净化富营养化和低浓度重金属污染的城市污水,为筛选去污

能力强、又能产生一定经济效益的水生观赏植物种类提供一定的参考,为水体污染的修复生态工程选取植物类型提供借鉴依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以玉带草、石菖蒲、泽泻、菖蒲、黄花鸢尾、千屈菜 6 种水生观赏植物为材料。选取苗高 10~15 cm,生长稳定、基本一致的植株,洗净后放到直径为 20 cm,高为 23 cm 的塑料桶内进行适应性生长。用盐酸把桶内基质(粗砂)浸泡 12 h,然后用蒸馏水清洗 5 次后置于桶中,每桶粗砂高 12 cm。用蒸馏水浇灌适应性生长期的植物,维持水位高出粗砂 8 cm。

试验水样取自金华某工厂出水口,水质状况劣于国家环保局制定的《地面水环境质量标准》(GB3838—88)的第 V 类水。表 1 为试验期间进水的主要污染因子浓度。

表 1 污水中主要污染指标浓度

污染因子	Cr	Pb	Cd	TN	TP	BOD <sub>5</sub>	COD
浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.201	0.211	0.021	34.07	4.43	234	359

### 1.2 方法

试验分两组进行:(1) 试验组,栽培已备好的植物;(2) CK 组,不栽培植物。试验组中每组每个桶中放 3 棵植物,用于处理高于基质 8 cm 的污水,每组试验重复 4 次。在污水处理进行到第 5 天、第 10 天、第 15 天的时候,分别采样测定。

按照国家环境保护局制定的标准方法:碱性过硫酸钾氧化法测定水中 TN,钼酸铵分光光度法测定水中 TP(GB11893—89)<sup>[10]</sup>;用岛津生产的 AA—670 型原子吸收分光光度计测定污水中重金属 Cr, Pb, Cd;BOD<sub>5</sub> 的测定选用江苏江分电分析仪器有限公司生产的 890 型微机测定仪测定;COD 的测定选用 Hanna 公司生产的化学耗氧量测定仪测定。

采用去除率作为净化效果的指标,去除率=(水样初始值—采样测定值)/水样初始值×100%。采用植物贡献率描述植物部分,植物贡献率=(试验组的去除率—CK 的去除率)/CK 组的去除率<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 水生观赏植物对 TN 的净化效果

在人工湿地中,去除总氮的主要途径包括根系滞留、植物组织和根际微生物吸收、根系附近硝化与反硝化等作用,影响植物除氮效率的因素有床体结构、污染类型、植物种类、气候条件、水力停留时间、季节

性温度变化等<sup>[12]</sup>。由表 2 可以看出,不同时间处理下,各试验植物对污水中的 TN 净化效果不同。到第 5 天时,与 CK 组相比黄花鸢尾和石菖蒲达到了极显著水平,玉带草、菖蒲和泽泻达到了显著水平。到第 10 天时,试验组与 CK 组都存在极显著差异,其中以黄花鸢尾和石菖蒲的去除率最大,分别为 91.6%,91.4%,表明这两种植物去除 N 的能力较突出。到第 15 天,黄花鸢尾和石菖蒲仍然保持极显著水平,玉带草、泽泻、菖蒲、千屈菜 4 种植物的净化效果与 CK 组相比也均达到了显著水平。可以看出,这 6 种植物都能适应含氮污水,对 TN 的吸收净化能力较强,且能保持长时间的去除效果,其中以石菖蒲和黄花鸢尾的去除效果最好。

有植物系统对 TN 的去除率明显高于无植物系统,一方面是因为植物通过中空的茎对根系附近区域充氧,依次形成好氧、兼氧和厌氧微区,这样在相近区域同时存在硝化和反硝化环境,使整个脱氮过程顺利进行;而在无植物系统中,邻近区域基本上是单一的厌氧或好氧环境,硝化产物不能很快地传递到厌氧区进行反硝化脱氮,故总体的除氮能力不如有植物系统<sup>[13]</sup>。另一方面,有植物系统还可通过植物生长过程中对 N 的摄取来去除污水中的 N。但总的来说植物摄取 N 的量在系统除氮过程中所占比重不大,系统对 N 的去除主要是靠微生物的作用<sup>[14]</sup>。

表 2 各种植物在不同时间对污水中 TN 的去除率 %

时间	CK	玉带草	菖蒲	泽泻	千屈菜	石菖蒲	黄花鸢尾
5 d	55.0±1.97	63.8±2.32*	66.6±3.13*	64.2±1.68*	61.3±0.86	70.8±0.01**	71.0±3.36**
10 d	64.4±2.13	85.6±0.30**	84.9±0.43**	85.0±0.25**	85.5±0.97**	88.6±0.42**	88.4±0.27**
15 d	71.9±2.54	88.1±0.75*	88.4±0.19*	88.5±0.58*	88.9±3.64*	91.4±0.82**	91.6±0.01**

注:\*表示差异显著(0.01< p < 0.05),\*\*表示差异极显著(p < 0.01),下表同。

2.2 水生观赏植物对 TP 的净化效果

由表 3 可见,各种植物对污水中总磷的净化效果的动态变化类似于总氮,都是随时间延长净化效果呈上升趋势。到第 5 天时黄花鸢尾处理效果最好,与 CK 相比其去除率达到了极显著水平,是 CK 组的 166.73%。到第 10 天时,各植物的 TP 去除率与对照相比均达到显著

性差异水平。到第 15 天,6 种植物对污水中 TP 的去除率接近极值,TP 的浓度基本平衡,每组试验 TP 的去除率超过了 95%,其中黄花鸢尾效果最明显,去除率高达 98.5%;跟总氮相比,6 种植物对总磷的适应力更强,净化效果更好,周期更短。6 种植物中黄花鸢尾对 TP 的适应和净化能力最强,石菖蒲第二。

表 3 各种植物在不同时间对污水中 TP 的去除率 %

时间	CK	菖蒲	千屈菜	玉带草	泽泻	石菖蒲	黄花鸢尾
5 d	52.1±2.18	80.8±12.8*	75.1±22.4*	73.6±0.01*	69.5±12.8*	84.9±12.8*	86.9±6.40**
10 d	75.8±9.60	93.9±5.12**	91.3±14.7*	93.1±7.68*	88.5±12.2*	94.7±1.28**	95.2±3.20**
15 d	86.9±2.18	95.9±2.95**	97.0±0.38**	97.0±5.25**	97.2±0.38**	98.0±2.49**	98.5±1.54**

研究表明,在人工湿地中,磷素的去除主要依靠基质的吸附、沉淀、水生观赏植物的吸收及微生物的同化等作用<sup>[15]</sup>。在我们的研究中,湿地系统显示了很高的去磷效率。经推测,这一结果可能与下面几方面有关:一方面,金属离子与水体中的磷结合形成稳定的化合物<sup>[16]</sup>,促进基质除磷能力增强。另一方面,P 既能被植物吸收也能被根系微生物同化。多种营养物质(包含 P 在内)的迁移是由于水生植物根系具有强大的吸附能力。黄花鸢尾和石菖蒲在试验期间地上部分长势较茂盛,根系较其他植物发达,因此在 TN,TP 的净化效率上占据一定优势。

CK 相比,增加 10.8%以上,达到极显著水平,尤其是黄花鸢尾和石菖蒲效果非常明显。6 种植物到第 5 天时对 COD 的去除率差异亦不明显,到第 10 天、第 15 天时,6 种植物对 COD 的去除效果较好,与 CK 组都呈现出极显著差异,其中黄花鸢尾和石菖蒲分别高达 92.0%,91.2%,其他 4 种植物对 COD 的去除率相当。

2.3 水生观赏植物对 BOD<sub>5</sub>,COD 的净化效果

由表 4 可以看出,栽培植物试验组的 BOD<sub>5</sub>,COD 去除率都超过 CK 组。到第 5 天,CK 组和试验组对 BOD<sub>5</sub> 的去除率差异不明显,只有石菖蒲、菖蒲和黄花鸢尾达到显著性差异;到第 10 天时,6 种植物对 BOD<sub>5</sub> 的去除效果均较好,与 CK 组都呈现出显著差异;到第 15 天时,试验组植物的 BOD<sub>5</sub> 去除率与

湿地对有机污染物有较强的降解能力。城市污水中所含的可溶性有机物通过植物根系生物膜的吸附、吸收及生物降解过程被分解去除;不溶性有机物可通过沉淀过滤作用被湿地截流下来后,既可以通过好氧微生物进行降解,也通过厌氧微生物进行降解,主要取决于基质中 O<sub>2</sub> 浓度<sup>[17]</sup>。而氧气可以通过水生观赏植物的中空导管从叶向根系输送至根际,促进了好氧微生物对湿地中有机物的降解。石菖蒲和黄花鸢尾等水生观赏植物的叶结构中空,具有大量的导管,使植物在湿地有机污染物去除方面的重要作用得到了很好的印证。

表 4 各种植物在不同时间对污水中 BOD<sub>5</sub>,COD 的去除率 %

污水指标	时间	CK	玉带草	石菖蒲	泽泻	菖蒲	黄花鸢尾	千屈菜
BOD <sub>5</sub>	5 d	63.7±3.42	69.0±2.68	71.4±1.42*	69.3±1.76	70.1±2.19*	72.5±2.50*	70.0±2.78
	10 d	72.5±1.50	80.7±1.99*	84.1±1.79**	80.9±1.79*	81.7±2.50**	84.8±1.50**	82.4±1.27**
	15 d	81.8±1.33	90.6±0.73**	92.3±1.35**	91.2±0.89**	91.3±1.37**	93.2±0.85**	90.8±1.13**
COD	5 d	52.8±2.55	58.7±3.76*	61.7±2.12**	58.4±1.69*	58.3±2.94*	61.2±2.25**	58.9±1.17**
	10 d	69.5±3.76	78.7±2.74**	84.0±3.00**	79.0±2.31**	79.5±1.57**	84.6±1.57**	80.6±2.23**
	15 d	78.2±2.53	87.3±2.53**	91.2±2.01**	88.3±1.07**	86.7±1.09**	92.0±2.68**	88.7±2.52**

2.4 时间对各植物吸收营养元素及净化有机物效率的影响

各植物系统对 TN,TP,COD,BOD<sub>5</sub> 的去除效率随时间的推移逐渐上升,但植物对净化富营养污染物

各污染物能力的变化却并不完全如此(图 1)。本试验以植物贡献率的变化来反映不同处理时间对植物吸收营养元素和净化有机污染物效率的影响。对 TN,COD,BOD<sub>5</sub> 而言,玉带草、石菖蒲、泽泻、菖蒲、

黄花鸢尾、千屈菜 6 种植物的贡献率都随时间出现先上升后下降的现象。此结果表明,一定浓度的污染物对植物存在一定的毒害作用,但是经过一段的适应期,植物的净化能力也随之提高,经过 10 d 净化后,水样中污染物的浓度会明显下降。

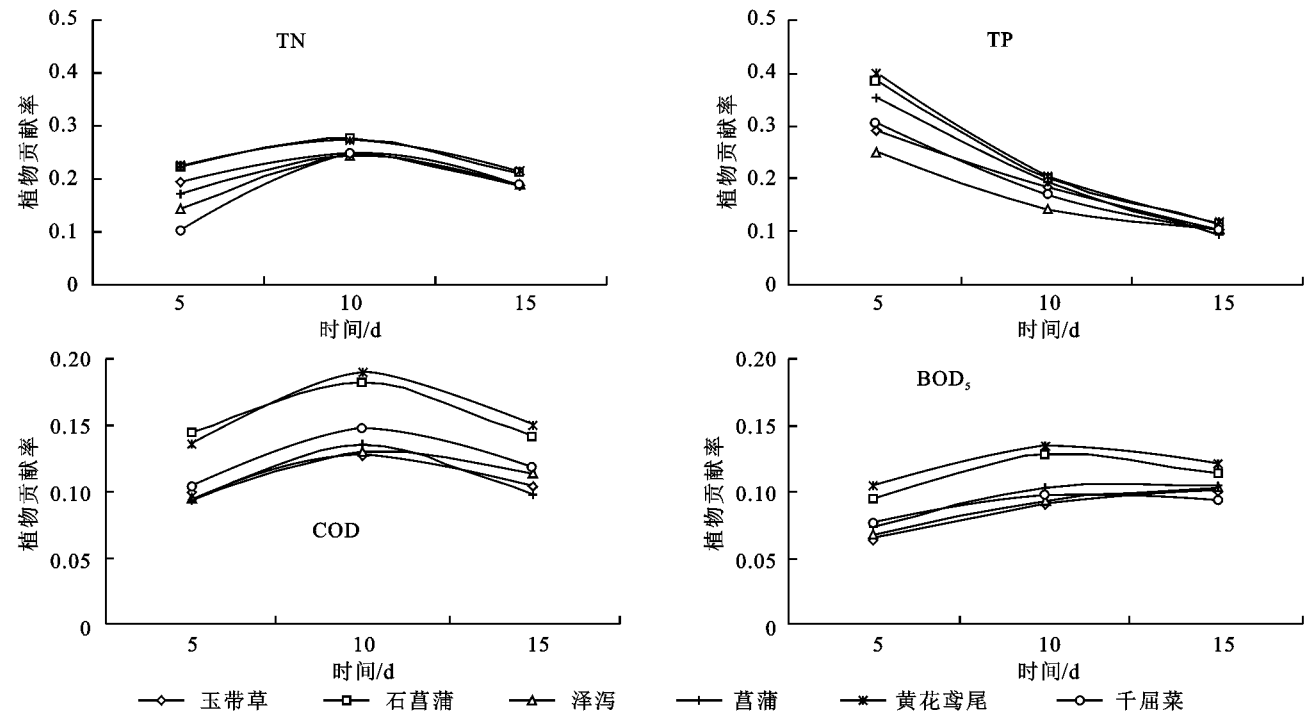


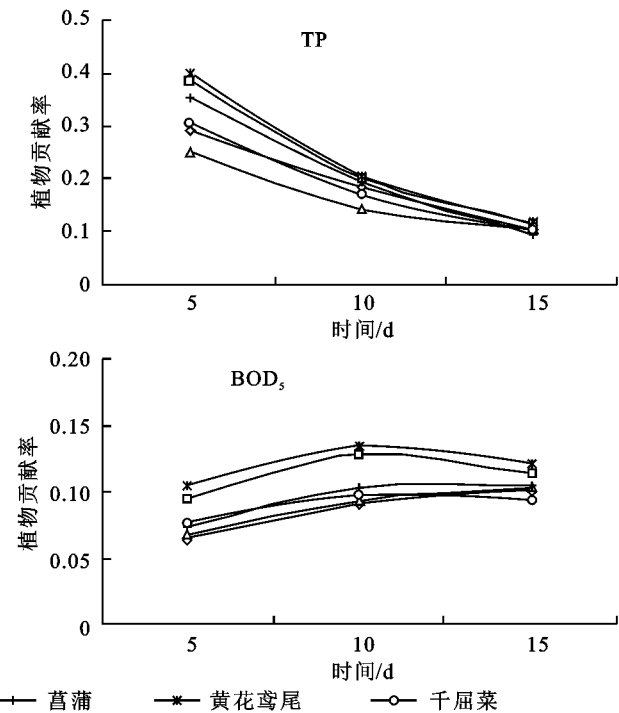
图 1 各种植物在不同时间的植物贡献率

2.5 水生观赏植物对重金属的去除效果

由图 2 可以看出,6 种植物对重金属 Cr,Pb,Cd 的去除均有一定效果,但 6 种植物对 3 种重金属的去除效率存在明显差异。对 Cr 的去除效率为黄花鸢尾>菖蒲>石菖蒲>千屈菜>玉带草>泽泻,对 Pb 的去除效率黄花鸢尾>石菖蒲>菖蒲>千屈菜>泽泻>玉带草,对 Cd 的去除效率千屈菜>玉带草>黄花鸢尾>石菖蒲>泽泻>菖蒲。6 种植物中,对重金属 Cr,Pb,Cd 的去除效果都较高的是黄花鸢尾,与 CK 组相比分别高 24.6%,21.3%,14.3%,去除能力为 Cd<Pb<Cr。另外,石菖蒲和菖蒲对 Cr,Pb,Cd 的去除也具有显著效果;而玉带草和泽泻对 Cr,Pb 去除效果均不显著,但对 Cd 的去除效果达到了显著水平。

本试验所用的水生观赏植物对污水中低含量的 Cr,Pb,Cd 的净化具有显著效果,尽管高浓度的 Cr,Pb,Cd 都被证实能够阻碍植物的生长和发育<sup>[18-19]</sup>。重金属污染的植物修复净化主要有植物稳定、植物萃取、植物转化、植物挥发、植物过滤等作用<sup>[20]</sup>。其中,植物萃取在重金属净化中的作用相对较弱<sup>[21]</sup>,而植物能为重金属提供沉降位点,因此稳定作用可能是关键作用之一<sup>[22]</sup>。另外,Mitsch<sup>[22]</sup>,Raskin<sup>[23]</sup>等认为,植物滤过也称根际过滤,是利用植物修复技术净化污

染水体中重金属过程中最为重要的作用。另一方面,供试 6 种水生观赏植物对重金属净化效果间存在显著差异,其原因除植物长势的不同之外,可能还包括植物对湿地生态环境中不同离子的选择和排斥机理等,深入研究仍有待开展。



染水体中重金属过程中最为重要的作用。另一方面,供试 6 种水生观赏植物对重金属净化效果间存在显著差异,其原因除植物长势的不同之外,可能还包括植物对湿地生态环境中不同离子的选择和排斥机理等,深入研究仍有待开展。

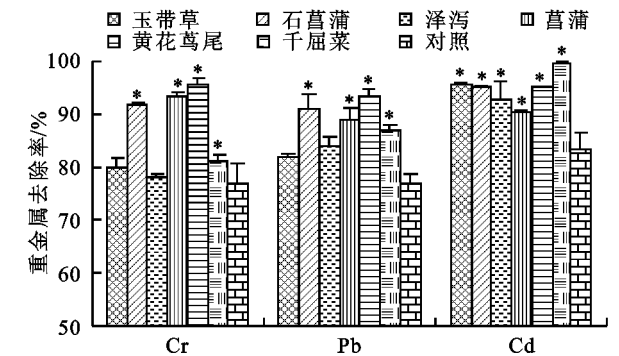


图 2 第 15 天各种植物对重金属的总去除率

3 结论

玉带草、石菖蒲、泽泻、菖蒲、黄花鸢尾、千屈菜 6 种水生观赏植物都能适应含氮污水,对水体中 TN 的修复净化效果较好,且能保持长时间的去除效果。跟 TN 相比,6 种植物对 TP 的适应力更强,净化效果更

好,去除时间更短。6种植物对COD, BOD<sub>5</sub>去除率存在一定差异。其中石菖蒲、黄花鸢尾对TN, TP, COD, BOD<sub>5</sub>的去除效果非常明显,达到极显著水平。

停留时间影响水生观赏植物修复净化污染物的效果,且随污染物类型及浓度不同而发生变化。对BOD<sub>5</sub>, COD, TN来说,6种植物其贡献率均呈现出随停留时间的延长先上升后下降。但是对总磷的去除效果,6种植物都是在第5天达到最大贡献率,且对TP的贡献率明显高于其他污染物。

6种植物对重金属Cr, Pb, Cd均有一定的净化效果,但是对3种重金属的去除效率存在明显差异。黄花鸢尾对3种重金属的去除率较高,石菖蒲和菖蒲对这3种重金属的去除也具有显著效果。

黄花鸢尾和石菖蒲为非专一性积累水生观赏植物,能有效地修复净化中低浓度废水。因此,推荐黄花鸢尾和石菖蒲作为城市污水修复植物。

#### 参考文献:

- [1] 邹照华,何素芳,韩彩芸,等. 重金属废水处理技术研究进展[J]. 水处理技术,2010,36(6):17-21.
- [2] 高敬. 我国人工湿地研究文献统计分析[J]. 农业图书情报学刊,2006,18(5):125-127.
- [3] Shanker A K, Cervantes C, Loza-Tavera H, et al. Chromium toxicity in plants[J]. Environment International,2005,31(5):739-753.
- [4] 袁东海,高士详,任全进,等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报,2004,18(4):77-80.
- [5] 柳骅,夏宜平,邓云兰. 千屈菜对富营养化水体中磷的去除作用[J]. 园艺学报,2003,30(5):579.
- [6] 赵建刚,杨琼,陈章和,等. 几种湿地植物根系统生物量研究[J]. 中国环境科学,2003,23(3):290-294.
- [7] 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.
- [8] Sen A K, Mondal N G. *Salvinia natans*: As the scavenger of Hg(II)[J]. Water, Air, and Soil Pollution,1987,34(4):439-446.
- [9] Rai U N, Sinha S, Tripathi R D, et al. Wastewater treatability potential of some aquatic macrophytes: Removal of heavy metals[J]. Ecological Engineering,1995,5(1):5-12.
- [10] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [11] 张晓斌. 植物修复在水环境污染治理中的研究[D]. 浙江金华:浙江师范大学,2007.
- [12] 汤显强,黄岁樑. 人工湿地去污机理及其国内外应用现状[J]. 水处理技术,2007,33(2):9-13.
- [13] 张虎成,俞穆清,田卫,等. 人工湿地生态系统中氮的净化机理及其影响因素研究进展[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(4):163-168.
- [14] 赵素芬,谢胜军. 下行流人工湿地去除生活污水中氮磷的研究[J]. 江苏环境科技,2007,20(4):8-10.
- [15] 胡智勇,陆开宏,梁晶晶. 根际微生物在污染水体植物修复中的作用[J]. 环境科学与技术,2010,33(5):75-80.
- [16] 王荣,贺锋,徐栋,等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(6E):12-18.
- [17] IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. Constructed Wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation [C]// Kadlec R H, Knight R L, Vymazal J, et al. Scientific and Technical. London: International Water Association,2000.
- [18] Uveges J L, Corbett A L, Mal T K. Effects of lead contamination on the growth of *Lythrum salicaria* (purple loosestrife) [J]. Environmental Pollution, 2002,120(2):319-323.
- [19] Singh R P, Tripathi R D, Dabas S, et al. Effect of lead on growth and nitrate assimilation of *Vigna radiata* (L.) Wilczek seedlings in a salt affected environment[J]. Chemosphere,2003,52(7):1245-1250.
- [20] 徐礼生,吴龙华,高贵珍,等. 重金属污染土壤的植物修复及其机理研究进展[J]. 地球与环境,2010,38(3):372-377.
- [21] Mays P A, Edwards G S. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage[J]. Ecological Engineering,2001,16(4):487-500.
- [22] Mitsch W J, Wise K M. Water quality, fate of metals, and predictive model validation of a constructed wetland treating acid mine drainage[J]. Water Research, 1998,32(6):1888-1900.
- [23] Raskin I, Smith R D, Salt D E. Phytoremediation of metals: Using plants to remove pollutants from the environment[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997,8(2):221-226.