

垂直流人工湿地去除重金属的研究

成水平^{1,2} Wolfgang Grosse² 吴振斌¹

Friedhelm Karrenbrock³ Manfred Thoennesen⁴

1.中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉市

2.University of Cologne, Institute of Botany, Koeln(Germany)

3.GEW Koeln AG, Water Laboratory, Koeln(Germany)

4. University of Cologne, Institute of Geography, Koeln(Germany)

摘 要

本文调查了垂直下行-上行流人工湿地对污水中重金属铝、镉、铜、锰、铅和锌的去除作用。连续五个月的试验运行显示,人工湿地出水中除锰外未检测出其他几种重金属。栽种于下行池的莎草(*Cyperus alternifolius*)富集了大量重金属,特别是生长在表层如地毯般的须根中,接着是根、地下茎、枝条。进入人工湿地中重金属,30%以上的铜和锰富集在植物中,其他种金属为5%~15%。湿地植物在吸收去除污水中重金属发挥了重要作用。而通过对人工湿地基质剖面分析,5 cm的上层吸附了更多的重金属,该层吸附的铜和锌是底层10倍左右。结果表明种植*C. alternifolius*的垂直流人工湿地对污水中重金属具有很好的去除效果。

关键词:人工湿地,重金属,去除,富集, (*Cyperus alternifolius*) 水污染

壹、前 言

由于工业化进程,对金属的需求不断增加,也导致大量的重金属泄入生物圈。水体中的重金属污染是一个严重的环境问题,危害到水生态系,直接威胁饮用水的安全生产和人类健康。与有机污染物不同的是,重金属不能被降解,只能被转移。植物修复(phytoremediation)是指通过植物摄取,转移、降低或固定有毒重金属,从而达到清洁水体和土壤的目的^[1-3]。人工湿地是一种廉价有效的水处理系统,不仅可降解城市污水、暴雨径流和农业溢流中的有机和营养物质^[4, 5],还可去除矿渣水和特殊行业污水中的金属^[6-8]。

本文应用种植热带、亚热带植物的人工湿地去除污水中低浓度重金属(大致为世界卫生组织饮用水标准的三倍),改善水质,保证饮用水的安全生产。并研究湿地植物在去除重金属的功能和重金属在湿地中归趋。

贰、材料与方 法

一、试验模型

以建立在科隆大学温室中的垂直下行-上行流人工湿地为试验模型。该系统为串联的两个 1 m×1 m×1 m 的池组成, 底层 15 cm 厚为石头(直径 40~80 mm), 上部为细砂(粒径 0~4 mm), 其中下行池砂深 55 cm, 上行池砂深 45 cm。下行池填料高于上行池填料 10 cm。详细设计按吴振斌等*和文献^[9~11]。两池分别植入 *Cyperus alternifolius* L. 和 *Villarisa exaltata* (Sims) F. v. Muell。

二、含重金属人工污水的配置

系统日进水 240 L, 分 6 次间歇性注入。进水中 Al, Cd, Cu, Mn, Pb 和 Zn 的浓度分别为 0.79, 0.009, 1.04, 0.302, 0.010 3 和 4.25 mg/L。试剂为 $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$, $Cd(CH_3COO)_2 \cdot 2 H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$, $MnCl_2 \cdot 4 H_2O$, $Pb(NO_3)_2$ 和 $ZnCl_2$ (分析纯, E. Merck, Germany)。人工污水包括蔗糖和盐类, 浓度(mg/L)为: 蔗糖 22.5; Na_2CO_3 2.1; KCl 1.75; NH_4Cl 5.95; NaCl 3.75; KH_2PO_4 3.51; $MgSO_4$ 1.25。

三、水样分析

分别在试验开始后的第 36, 79, 120 和 150 天, 取进水、两池间水和出水, 应用 ICP-MS(Type: PE ELAN 6000, PERKIN ELMER, USA)分析重金属浓度。仪器检出限 Al, Cd, Cu, Mn, Pb 和 Zn 分别为: 0.04, 0.000 1, 0.02, 0.001, 0.000 5, 0.02 mg/L。

四、植物样分析

由于两池间水样只检出锰, 因此只调查下行池植物 *C. alternifolius* 富集重金属的情况。取植物器官样在 70 °C 烘干, 称重、磨成粉状, 65% HNO_3 消解^[12]用于重金属含量分析。Al, Cu, Mn 和 Zn 采用火焰法(AAS, PE 3100, PERKIN ELMER, USA), Cd 和 Pb 采用石墨炉法(SIMAAS, PE 6000, PERKIN ELMER, USA)。

五、基质样分析

在试验开始后的 167 天, 分别取上层(0~5 cm)、中层(25~30 cm)和底层(50~55 cm)基质分析重金属含量, 采用 $HCl:HNO_3=3:1$ 的混合溶液消解, 分析方法与仪器同植物样。

叁、结果与讨论

一、对重金属的去除效果

人工湿地去除污水中重金属的效果见表 1 和 2。

* 吴振斌, 成水平, 付贵萍等, 进行过垂直流人工湿地的设计及净化功能研究。

表 1 人工湿地对污水中重金属的去除率

时间*	36 天	79 天	120 天	150 天
Al	-	>92.2	>95.9	>95.6
Cd	>99.8	>98.6	>99.1	>99.1
Cu	>97.2	>97.9	>98.4	>98.4
Mn	-	>99.5	-	42.2
Pb	>95.2	>94.4	>95.7	>95.0
Zn	>99.4	>99.4	>99.6	>99.7

表 2 系统运行 150 天时出水重金属浓度 (mg/L)

水样	Al	Cd	Cu	Mn	Pb	Zn
进水	0.90	0.011 3	1.26	0.364	0.009 9	5.45
两池间水样	<0.04	<0.000 1	<0.02	0.363	<0.000 5	<0.02
出水	<0.04	<0.000 1	<0.02	0.211	<0.000 5	<0.02
WHO 标准	0.2	0.003	1.0	0.1	0.01	3.0

由表 1 可知, 锰的去除率在 79 天运行后为 99.5%, 在 5 个月后为 42.2%, 而其他重金属的去除率接近 100%, 两池间水和系统出水中未检出 Al, Cd, Cu, Pb 和 Zn (表 2), 表明系统具有很好的重金属去除能力, 可用于矿区和工业污水的处理。

二、植物对重金属的富集

植物各器官富集重金属的情况见表 3。除 Cd 最高含量在根外, 其他金属最高含量发生在须根。须根富集的 Cu 是枝条的 2 000 倍, Al、Mn、Pb、Zn 和 Cd 分别为: 120、70、60、60 和 30 倍。

通过对植物不同器官富集重金属占系统接纳的百分比分析, 30% 以上的铜和锰被下行池中的 *C. alternifolius* 摄取, 其他金属为 5%~15%。湿地植物在去除污水重金属起了重要的摄取作用。植物地下部分是摄取重金属的主要器官, 特别是生长在基质表层如地毯式的须根, 起着重要作用。由此, 表层的须根可通过铲除基质表层而收获, 从而将吸附的重金属转移回收。该研究显示 *C. alternifolius* 对 Cu 和 Mn 污染的修复具有巨大潜力。

三、基质吸附重金属的状况

除锰外, 水体中其他金属主要在下行池被清除, 因此调查了下行池基质吸附重金属的情况 (表 4)。从剖面分析结果来看, 除铝和铅外, 表层基质比底层吸附了更多的重金属。表层 Zn 和 Cu 含量是底层的 10 倍以上。

* 这里时间指试验开始后的天数。

表 3 下行池 *Cyperus alternifolius* 器官中重金属含量 (mg/kg DW)

器官	Al	Cd	Cu	Mn	Pb	Zn
叶	27.0 (2.6)*	0.3 (<0.1)	7.1 (0.3)	68.9 (0.9)	1.2 (0.4)	77.3 (2.4)
枝	9.8 (0.2)	<0.1 (<0.1)	7.6 (0.1)	62.7 (2.7)	0.7 (0.1)	35.5 (0.8)
根状茎	192.2 (2.0)	1.6 (0.1)	308.9 (16.3)	35.4 (1.6)	3.1 (0.3)	749.6 (30.4)
主根	595.6 (4.9)	9.2 (0.7)	2608.6 (380.4)	120.8 (5.1)	6.2 (0.3)	2491.6 (220.6)
须根	3237.9 (72.4)	8.4 (0.4)	15601.9 (238.1)	4850.3 (505.5)	74.0 (1.3)	4565.4 (12.9)

表 4 垂直流人工湿地下行池基质重金属含量 (mg/kg)

基质深度(cm)	Al	Cd	Cu	Mn	Pb	Zn
0~5	3407 (61)*	1.14 (0.12)	58.9 (0.6)	229.0	7.745 (1.648)	248.0 (8.5)
25~30	3255 (191)	0.64	4.3 (0.8)	166.7 (29.7)	8.380	137.2 (12.5)
50~55	3205 (379)	0.49	5.7 (0.2)	120.5 (56.3)	10.140 (0.820)	37.5 (3.5)

肆、结 论

该研究表明, 种植热带、亚热带植物 *Cyperus alternifolius* 的垂直下行-上行流人工湿地具有很好的去除污水中重金属能力。由此可知, 该处理单元适合于处理工业污水, 保护水生态系; 在以地下水为饮用水源的富重金属地段, 可作为饮用水的预处理, 保证饮用水生产的安全。尽管 *C. alternifolius* 富集重金属主要集中在地下器官, 但因其生长和富集特征, 仍不失为植物修复的一种好的植物种类。*C. alternifolius* 须根富集了大量的重金属且在湿地氧化表层形成稠密的生长层, 这样, 吸附的重金属便可以较容易地从湿地中转移。在处理阶段性结束时, 挖除湿地表层几厘米的基质, 带出富含重金属的须根, 从而转移了重金属。结合 *C. alternifolius* 人工湿地单元循环处理冲淋水进行受污染土壤的冲淋, 预期将为植物修复有利的手段。

* 括号内为标准差。

致 谢

本研究受欧盟国际合作项目 (ERBIC18CT960059) 和中国科学院与德国马普学会交流计划的赞助。

参 考 文 献

- [1] Rai, U N, S Sinha, et al. Wastewater treatability potential of some aquatic macrophytes: Removal of heavy metals. *Ecological Engineering*, 1995, 5: 5~12
- [2] Salt, D E, M Blaylock, et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants, *Biotechnology*, 1995,13:468~474
- [3] Sharma, S, J P Gaur. Potential of Lemna polyrhiza for removal of heavy metals. *Ecological Engineering*, 1995,4(1):37~45
- [4] Rodgers, J H jr, A Dunn. Developing design guidelines for constructed wetlands to remove pesticides from agricultural runoff. *Ecological Engineering*, 1992, 1:83~95
- [5] Lakatos G, M K Kiss, M Kiss, et al. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in Hungary. *Water Science and Technology*, 1997,35(5):331~336
- [6] Crites, R W, G D Dombeck, et al. Removal of metals and ammonia in constructed wetlands. *Water Environment Research*, 1997,69(2):132~135
- [7] Obarska-Pempkoeiak H, K Klimkowska. Distribution of nutrients and heavy metals in a constructed wetland system. *Chemosphere*, 1999,39(2):303~312
- [8] Tang S. Experimental study of a constructed wetland for treatment of acidic wastewater from an iron mine in China. *Ecological Engineering*,1993,2: 253~259
- [9] Grosse W, F W Wissing, R Perfler, et al. Water quality improvement in tropical and subtropical areas for reuse and rehabilitation of aquatic ecosystems. In: J P Lobo Ferreira and F.J. Tilak Viegas (Eds) S&T co-operation with Asia in the area of sustainable management of natural resources. Proceedings of a co-ordination meeting, Beijing, China, eBook,1998
- [10] Grosse W, F W Wissing, R Perfler, et al. Water quality improvement in tropical and subtropical areas for reuse and rehabilitation of aquatic ecosystems. In: Ye-Shi Cao and Amy Toh (Eds). Selected Proceedings of the conference on urban environmental management. Singapore, 1998
- [11] Perfler R, J Laber, G Langergraber, et al. Constructed wetlands for rehabilitation and reuse of surface waters in tropical and subtropical areas. *Water Science & Technology*, 1999,40(3):155~162
- [12] Kotz L, G Kaiser, P Tschoepel, et al. Aufschluss biologischer Matrices fuer die Bestimmung sehr niedriger Spurenelementgehalte bei begrenzter Einwaage mit Salpetersaeure unter Druck in einem Teflongefaess. *Zeitschrift fuer Analytische Chemie* 260. 1972:207~209