

# 植物在修复、固定和重建水生、陆生生态系统中的应用\*

Andreas SCHAEFFER<sup>1</sup>, 陈忠礼<sup>1</sup>, Mathias EBEL<sup>1</sup>, Michael EVANGELOU<sup>1</sup>, Henner HOLLERT<sup>1</sup>,  
Martina ROß-NICKOLL<sup>1</sup>, Burkhard SCHMIDT<sup>1</sup>, 袁野<sup>1</sup>, Gottfried LENNARTZ<sup>2</sup>  
(1. 亚琛工业大学, 德国 亚琛 52076; 2. GAIAC 生态系统分析与评估研究所, 德国 亚琛 52072)

**摘要:**植物能够吸收或降解污染物来修复受污染的土壤和水体<sup>[1-2]</sup>,还能固定土壤、泥沙防止侵蚀和污染物从固体介质中释放<sup>[3]</sup>。众多无机和有机污染物都能被对其有耐性且生物量大的植物有效降解。例如,凤眼莲能吸收和净化来自金矿采掘废水的氰化物,这类废水含各种氰化物以及重金属元素的浓度达到导致生物体产生毒性效应的水平。检测表明氰化物对凤眼莲的半数致死剂量(LC50)为13 mg/L,将经过高浓度氰化物废水驯化后的凤眼莲放在野外小型湿地进行试验,结果显示这类植物对氰化物的降解效率更高。放射性同位素试验发现氰化物分子中的C和N原子经过植物代谢合成天冬酰胺,从而将有毒性的氰化物转化为无毒的产物<sup>[4]</sup>。尾矿场也可以用植物来修复,一方面植物可以过滤污染物浓度很高的渗滤液,另一方面栽种植物可以固定边坡减少侵蚀。将高覆盖度植被的概念应用在一个尾矿场上,通过种植北美黄杉使其全年都维持较高的蒸腾效率来减少渗滤液。而边坡的固定首先需要在坡面安置固定、菱形的新鲜柳条编织成的笼状网格,其后覆上土壤并喷播能在生长期对固定土壤发挥作用的草本、灌木以及树木种子。这项技术同样适用于河岸侵蚀防护。

**关键词:**植物修复;氰化物废料;土壤固定;渗滤液减量;侵蚀控制

**中图分类号:**X171;Q948.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2012)03-0001-03

植物修复是以对某种或某些污染物具有忍耐性和累积这些物质为基础,利用植物体及其共生的根际生境来清除污染物,达到净化环境的一门技术。具有环境友好、费用低廉、功效长久等优点。本文以近年来开展的相关项目研究实例,简单叙述植物修复技术在保护和修复水生、陆生生态系统中的应用。

## 1 植物净化金矿开采的氰化物废水

植物可以通过吸收和降解污染物来净化土壤或水体<sup>[1-2]</sup>,同时其密布的根系能固定土壤和泥沙<sup>[3]</sup>,防止土壤侵蚀和最大程度地减少污染物从土壤等固体介质中释放出来(见彩色插图Ⅲ页图1)。

许多无机和有机污染物都能被对它们有较强耐受性、生物量高的植物有效地吸收降解。例如,凤眼莲(*Eichornia crassipes*)能提取和净化来自金矿采掘

废水的氰化物,这类废水中各类氰化物及重金属元素浓度达到导致生物体产生毒性效应的水平。在诸如金矿开采废水的储存池中,含高浓度的游离态以及络合态氰化物,总浓度达400 mg/L。

世界范围内由于金矿开采导致的污染事故都与使用氰化法提金技术相关(见彩色插图Ⅲ页图2),氰化物是该类废水的处理重点。植物修复技术特别适用于那些以小企业开发为主的金矿开采区,为了避免化学法处理废水产生的高成本,可以采用植物修复技术取代例如过氧化氢法这种低技术含量的工艺。笔者致力于开发简而易而高效的技术来处理氰化物废水。

经过植物毒性测试,以植物呼吸率为测试终点,明确氰化物对凤眼莲的半数致死剂量(LC50)为13 mg/L(见彩色插图Ⅲ页图3)<sup>[4]</sup>。野外小型湿地试

\* 收稿日期:2012-02-15 网络出版时间 2012-5-26 12:13

资助项目:联邦德国研究基金;德国联邦科技部(BMBF)基金

作者简介:Andreas SCHAEFFER,男,教授,博士,主要从事环境化学与污染修复研究。

网络出版地址:[http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.1\\_001.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.1_001.html)

验发现在高浓度氰化物废水中驯化过的凤眼莲对降解氰化物的效率显著提高了。通过 $^{14}\text{C}$ 标记的氰化物(10 mg/L)试验发现即使是剪枝(分株)繁殖的凤眼莲也能有效地降解氰化物(见图4)。放射性同位素试验发现氰分子中的C和N原子经过植物代谢合成天冬酰胺,这样就将含有毒性的氰化物转化为无毒产物<sup>[4]</sup>。

凤眼莲对氰化物更高地去除效率已经在野外小型湿地(规格为103 L)试验中得到验证:以氰化物含量为10~15 mg/L的污水进行两次试验,第一次试验发现20 h后样品中氰化物含量低于检测限(见图5),而在没有放置植物的污水中氰化物含量没有明显的变化。

研究认为凤眼莲是高效的水体净化的植物,但由于其极强的生态入侵能力,必须限制在人工湿地或者垃圾场的池塘中才能应用。

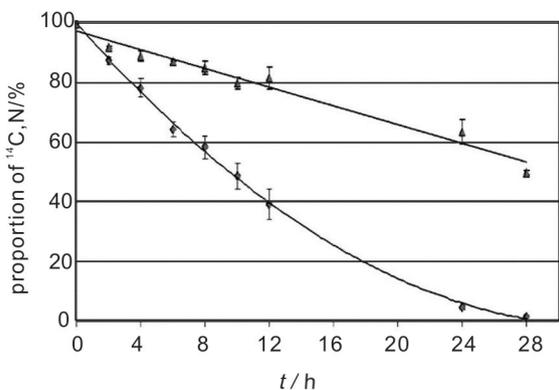


图4 氰化物降解试验,0.5g 凤眼莲叶组织放置在15mL 高压灭菌后的霍格兰培养液中

Fig. 4 Degradation of 10mg/L cyanide. 0.5 g leaf cuttings were placed in 15 mL autoclaved Hoagland solution.

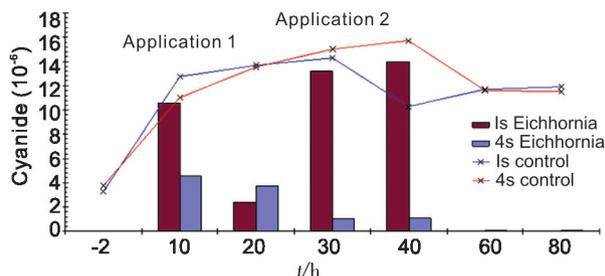


图5 小型湿地中凤眼莲对氰化物废水的修复(湿地长6m,宽0.7m,水深0.3m)

Fig. 5 Cyanide phytoremediation in a pilot scale wetland (6 m length, 0.7 m width, water column 0.3 m) planted with waterhyacinths.

## 2 植物固定和重建陆生生态系统

生物工程是以植物活体或残体为原料,如种子、个体、种群以及群落体系作为工程技术手段。目前土壤生物工程在德国被广泛应用于防治土壤侵蚀、滑坡以及堤坝固定。土壤生物工程能够使生态系统更为完善并在自然演替中保持平衡,例如自我动态调节,无需人为添加养分等。在处于执行阶段的一个项目中,使用生物工程技术来固定工业垃圾场(尾矿场)边坡区域,同时减少有毒垃圾渗滤液的产生。

垃圾填埋场也可以用植物来修复,一方面可以过滤含高浓度污染物的渗滤液,另一方面可以固定边坡减少侵蚀。项目执行地 Rhenania 尾矿场位于德国的亚琛和科隆之间,在1944年以前这里曾经是开采钾肥的场地,后来由剩余尾矿堆积成为尾矿场。由于硫化物和重金属残留成分的浸出,当地地表水和地下水受到严重污染(见彩色插图Ⅲ页图6)。

经过对这个尾矿场进行植物修复,多年之后,这个尾矿场经过自然演替已经成为伴有零星灌木及草本的白桦林(见彩色插图Ⅳ页图7)。尾矿场植物修复规划<sup>[5]</sup>主要目标是减少渗滤液的产生。渗滤液产生量越少,处理受污染的渗滤液的费用也就越少。

渗滤液的减量化一般有两种途径,基本上两种方式减少渗滤液都是可行的(见彩色插图Ⅳ页图7):一种方法是使用排水和阻挡层来储存渗滤液;另外一种方法是提高尾矿场的植被覆盖来减少渗滤液的产生。后者的优势在于能显著降低成本并且对于生态系统具有可持续性。此外,在尾矿场斜坡种植茂密的植被能够固定土壤使其免受侵蚀。

对污染地地表径流水溶性硫化物监测表明:冬季的浸出量最高,原因是桦木林在冬季蒸腾效率最小。由于气候变化该区域的降水将增加25%,渗滤液产生量也将提高(见彩色插图Ⅳ页图8)。因此,尾矿场污染物浸出的浓度也会相应地增大<sup>[7]</sup>。

在落叶阔叶林中,冬季降雨量与渗滤液产生量几乎持平。具有连续而高效的蒸腾效率,能深扎根以增强防风能力,对污染物有较强的耐受性的树种最适合用于尾矿场。北美黄杉被认为是高度符合这些标准的树种。另外北美黄杉还可以在白桦林林荫下生长且耐干旱。

如果将北美黄杉—白桦林这个生态体系考虑在内,可以预测 Rhenania 尾矿场的渗滤液产生量。随着时间的推移 20 年后渗滤液将会受两个因素影响而减少。然而植物修复的成功取决于几个因素,例如北美黄杉的生长率、可能受病虫害的侵扰、营养缺乏以及在白桦林内种植的成活率等。

尽管存在潜在的风险,尾矿场管理者决定采纳植物修复这个方案。自 2010 年开始,15 000 株 3 年树龄的北美黄杉已经分散种植在白桦林中,一年后北美黄杉生长势头良好(见彩色插图 IV 页图 9)。

植物修复规划下一阶段的重要目标,是要防止尾矿场边坡侵蚀。为了实现这个目标,管理者使用了生物工程技术。柴笼技术已经在非常陡峭的山坡和河流堤岸中得到验证。柳树枝条经常被用于编织这种柴笼,而用新鲜或者干燥的树枝等来编织柴笼都是可以的。由柴笼围成的网格能够永久地固定土壤结构以及减少侵蚀(见彩色插图 IV 页图 10)。

当柴笼网格安置完毕,如有必要中空部分可用土壤填满。其后,网格固定区域将采用喷播技术,这是一种将粘合剂、营养盐、切碎的秸秆和各种植物种子混合在一起的撒播技术。除了草本植物的种子,灌木和树木的种子也可以使用。这项技术能快速大面积播种(见彩色插图 IV 页图 11、12)。按照这个方案,陡坡得到保护免受侵蚀。

### 3 小结

植物修复是绿色、高效、成本低廉的技术。本文简单介绍两个实例,分别讲述植物在修复水生和陆生生态系统中的作用。植物修复技术能在保护和修复受损生态系统中发挥显著作用。

**致谢:**对德国联邦教育及科研部的支持表示感谢!

### 参考文献:

- [1] Evangelou M W H, Ebel M, Schäffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents: A review [J]. *Chemosphere*, 2007, 68, 989-1003.
- [2] Cunningham S D, Todd A A, Schwab A P. Advances in Agronomy, Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants [J]. Hsu FC, 1996, 56, 55-114.
- [3] Mendez M O, Maier R M. Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments-An Emerging Remediation Technology [J]. *Environ Health Perspect*, 2008, 116 (3): 278-283.
- [4] Ebel M, Evangelou M, Schäffer A. Cyanide phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. *Chemosphere*, 2006, 66, 816-823.
- [5] Heitfeld M, Rosner P, Luka H, et al. Sanitation plan for the Rhenania dump site. Sanierungsplan Rhenania Halde [Z]. Maßnahmen zur Reduzierung der Sickerwasserneubildung im Bereich der Rhenania Halde in Stolberg-Atsch, 2010.
- [6] Konold W. Qualified Recultivation [R]. Proceedings, Institute for Landscape Cultivation, Freiburg, Germany, 2005.
- [7] Kropp J. Climate change in North-Rhine-Westfalia [Z]. Potsdam Institute for climate impact research, 2009.

(责任编辑 欧红叶)

(中文翻译 陈忠礼)