文章编号:1000-5641(2014)03-0117-08

不同水生植物配置模式对垃圾渗滤液尾水的净化效果

方燕辉, 郭雪艳, 范欣婷, 达良俊
(华东师范大学 环境科学系,上海 200241)

摘要: 根据上海老港垃圾填埋场渗滤液尾水的水质特性,研究黄菖蒲、菖蒲和再力花 3 种挺水植物在不同配置模式下,在室内静水实验中,其植物的生物量变化及对尾水的 TN、TP 和 COD 净化效果. 结果表明,植物对渗滤液尾水的 TN 和 TP 净化效果显著,去除率均在 75.1%以上,对 COD 的去除率最高为 62.8%;其中,3 种植物混合模式对 TN 和 TP 净化效果优于两两混植和单种种植,对 COD 净化效果差异性不显著. 另外,净化效果与植物生物量、单位富集量和不同植物间的协同净化作用密切相关. 因此,在净化水体时,有必要结合实际情况,针对性地进行植物配置模式优化,以确保净化效果更有效.

关键词: 水生植物; 配置模式; 渗滤液尾水; 净化
中图分类号: Q948 **文献标识码**: A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-5641.2014.03.013

Purification effect of different aquatic plant configuration modes to the landfill leachate tail water

FANG Yan-hui, GUO Xue-yan, FAN Xin-ting, DA Liang-jun
(*Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai* 200241, *China*)

Abstract: Based on the water quality of landfill leachate tail water of the Laogang Garbage Landfill in Shanghai, the purification effect to TN, TP and COD in the tail water and biomass changes of three emerged plants *Acorus calamus*, *Iris pseudacorus* and *Thalia dealbata* in different configuration modes under hydrostatic conditions were investigated. Results showed that the purification effect to TN, TP of leachate tail water was distinct, the removal rate being over 75.1%, while the COD removal rate belows 62.8%. TN, TP purification effect of the three plant mixed mode was superior to that of the two mixed modes and the single plant mode; but there are no significant differences to COD removal rate among different modes. It is necessary to consider the actual conditions to select suitable plant configuration mode to ensure more effective purification efficiency because the purification effect is closely related to plant biomass, enrichment of unit volume, and different cooperative purification between plants in purifying water

收稿日期:2013-03
基金项目:国家自然科学基金(40971041);上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字(2011)第 1-6 号)
第一作者:方燕辉,女,硕士研究生,研究方向为城市生态学. E-mail: fangyanhui1988@126.com.
通信作者:达良俊,男,教授,博士生导师,研究方向为生态学. E-mail: ljda@des.ecnu.edu.cn.

body.

Key words: aquatic plants; configuration mode; landfill leachate tail water; purification

0 引 言

随着人们生活水平的提高,城市生活垃圾产量也在快速增加.在处理垃圾时,垃圾渗滤液是卫生填埋法处理时产生的二次污染物,其中含有大量的有机污染物、重金属离子和某些有毒物质,成分较复杂,是一种污染性极强的高浓度有机废水[1].垃圾渗滤液尾水是指垃圾渗滤液经填埋场各级处理之后排放的污水.研究表明,利用人工湿地对渗滤液尾水处理,具有运行成本低 、易于维护、提高生物多样性、对水力负荷和污染物负荷的波动具较强的耐受能力及美化环境等优势[2].在国外,水生植物修复在近几十年已经广泛应用于人工湿地系统,并日益受到重视.在美国,600 多处人工湿地工程用于处理市政、工业和农业废水[3],纽约州 Ithaca 填埋场在 1989 年开始采用潜流式湿地处理垃圾渗滤液.挪威、加拿大、英国、斯洛文尼亚和澳大利亚等许多国家都成功地应用了人工湿地系统工艺处理垃圾渗滤液[4].在国内,深圳白泥坑于 1996 年建立第一个人工湿地污水处理系统[5].虽然人工湿地的应用已非常广泛,但上海老港垃圾填埋场是国内仅有的处理工艺实例.围绕水生植物对城市污水的净化人们开展了专门的研究.达良俊等研究了凤眼莲不同部位对重金属的吸收、吸附作用[6],刘利华等研究了挺水植物在不同富营养化水平下生长及氮磷吸收能力[7],杨珏等研究了挺水植物在不同浓度垃圾渗滤液尾中对植物的生长状况和净化效果的影响[8],金树权等对 10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力进行比较[9].城市污水净化中逐渐将植物应用于对垃圾渗滤液的处理,夏汉平等研究了水生植物对渗滤液净化能力及在不同浓度下耐受性[10,11],刘鸣达等研究了凤眼莲对垃圾渗滤液中的 COD、NH_3-N 和 TP 的去除能力[12].侯晓龙等研究了 3 种水生植物分别对垃圾渗滤液尾水中重金属的去除能力[13].但水生植物研究多集中在筛选少量单一植物的净化效果上,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.

在人工湿地中对植物的选择和配置是该研究的重点,本文采用 3 种挺水植物的不同配置模式,研究对渗滤液尾水处理的净化效果,为人工湿地水生植物修复技术的推广与应用提供一定的实践参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

老港垃圾填埋场位于北纬 31°01′,东经 120°15′,北联长江口,南距杭州湾 20 km,位于上海市中心东南约 60 km 的东海之滨,地处市郊南汇区境内.该场已实施了 4 期工程,总占地 671 hm^2,是目前国内最大的滩涂型城市生活垃圾填埋场.日处理生活垃圾约 8 000 t,占全市垃圾出量的 70%以上,前 3 期工程已建成.上海老港填埋场采用厌氧塘 + 兼氧塘 + 曝气塘 + 芦苇湿地的工艺处理垃圾渗滤液,存在的主要问题是运行能耗高,出水不达标.

1.2 实验材料

选取上海常见 3 种挺水植物——黄菖蒲(*Iris tectorum*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和再力花(*Thalia dealbata*)为试验对象,为使植株规格保持一致,样本统一采购于上海洪东花木园

艺有限公司.

垃圾渗滤液取自老港垃圾填埋场，参照《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889—2008)选定各项分析指标：化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)、总汞(Hg)、总镉(Cd)、总铬(Cr)、六价铬(Cr^{6+})、总砷(As)和总铅(Pb)[7]. 分析结果表明：其中重金属含量较低，低于 ICP 检出限，对植物生长无影响；NH_4^+-N、TN、TP 和 COD 的平均值分别为 18.73 mg/L、29.71 mg/L、0.34 mg/L 和 215.36 mg/L，其中 TN、NH_4^+-N 和 COD 高于《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889—2008)的排放限值. 本实验用渗滤液尾水初始浓度的中浓度 (见表 1).

表 1　供试渗滤液尾水浓度、初始水质指标

Tab.1　Initial value of leachate tail water quality indices of the experimental sample and emission value limit　　mg·L^{-1}

试验水样	TN	TP	COD
100%尾水	70.11	0.74	258.26
中浓度(50%尾水+50%自来水)	35.77	0.35	101.20
排放限值	40.00	3.00	100.00

1.3　不同植物配置模式的处理方法

实验采用浮板栽培方式，以泡沫板为浮板，方形 PVC 桶为容器. 植物经过 15 d 缓苗后进行栽植，将黄菖蒲(简称为 H)、菖蒲(简称为 C)和再力花(简称为 Z)进行混合种植实验，并与单种植物的实验结果对比(共 7 种处理). 每种处理重复 3 次，完全随机排列，并设置空白对照，对照为桶内放置相应体积和浓度实验用水，水面上只放泡沫板，不种植物. 根据植物的生长特点确定各植物栽种孔穴的大小、间距，每个处理将植株约 240 g 种植于孔中，使根部完全浸没于水体中，最后用海绵填充小孔以固定植物.

1.4　植物采样与水质测定指标及方法

每 7 d 测定实验用水的理化指标(TN、TP 和 COD)，试验时间为 35 d，直至浓度曲线趋于平缓. 在实验始末分别测定植物体氮磷含量及植株生物量变化.

水质分析：按照国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》(国家环保总局，2002) 测定化学需氧量、总氮和总磷等指标. COD 测定采用重铬酸钾法；TN 测定采用过硫酸钾紫外分光光度法；TP 采用钼酸铵分光光度法.

植物体氮磷含量测定：每种植物随机采取 3 株，烘干研磨，每株植物干样取 3 个平行样，用标准凯氏法进行消解，Skalar 流动注射分析仪进行氮磷测定.

2　结果与分析

2.1　不同组合配置模式下渗滤液尾水的净化效果

当处理时间达到 35 d，尾水中的各项指标基本达到稳定. 总体 C+H+Z 组合模式净化效果较好，两两混植中 C+Z 组合较好，单植模式中黄菖蒲较差(见图 1).

各处理对 TN 净化效果显示：C+H+Z 组合＞菖蒲＞C+Z 组合＞C+H 组合＞H+Z 组合＞黄菖蒲＞再力花＞对照，去除率均 75.1%以上. C+H+Z 组合去除率最高，显著高于 H+Z 组合；菖蒲与其他植物混植时与单植比较，差异不显著；黄菖蒲和再力花在与其他

植物混植时显著优于单植组合;C + H 组合效果显著大于 H + Z 组合;单组组合中,再力花效果最差.

各处理对 TP 的净化效果显示:C + Z 组合>C + H + Z 组合>再力花>C + H 组合>菖蒲>黄菖蒲>H + Z 组合>对照. C + Z 组合去除率最高,达到 93.5%,3 种植物混植时次之,达到 88.6%;单组组合中,黄菖蒲效果最差.

各处理对 COD 的净化效果显示:C + Z 组合>菖蒲>再力花>C + H + Z 组合>C + H 组合>黄菖蒲>H + Z 组合>对照. C + Z 组合去处效果较好,达到 62.8%,但 H + Z 组合效果较差,仅为 18.2%. 经统计分析,独立样本 T 检验,各处理组间均无显著性差异($P>0.05$).

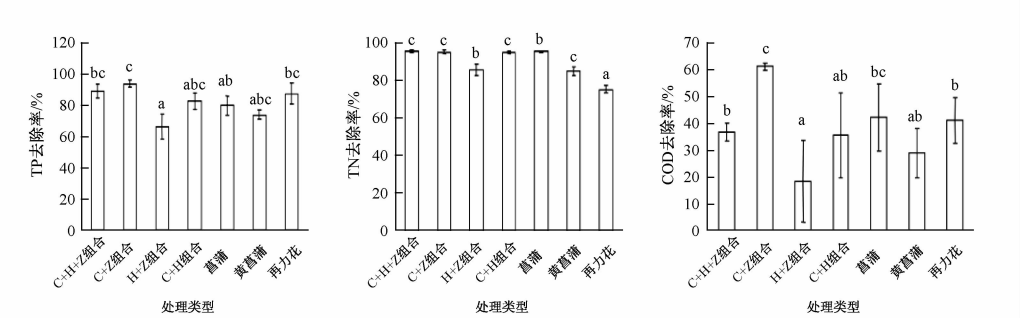


图 1 不同配置的水生植物对垃圾渗滤液的 TN、TP 和 COD 的处理效果

Fig. 1 Purification efficiency to medium concentrations of leachate tail water under different configuration modes

2.2 不同组合配置模式下植物的生物量指标变化

随着植物在尾水中生长,与其他植物混植时,3 种植物生物量均增加,高于单植(见图 2).

菖蒲混植时干重增长率均大于单种种植时. C + H 组合>C + Z 组合>C + H + Z 组合>菖蒲;最高达 62.7%,表明菖蒲在两两混植的配置中生物量增长较大.

黄菖蒲混植时干重增长率也均大于单种种植时. C + H + Z 组合>C + H 组合>H + Z 组合>黄菖蒲,最高达 83.4%,表明黄菖蒲在 3 种混植时生物量增长大于两两混植和单植.

再力花的生物量增长与菖蒲相似,混植时均显示增大,且在两两混植的配置中生物量增长较大,C + Z 组合>H + Z 组合>C + H + Z 组合>再力花.

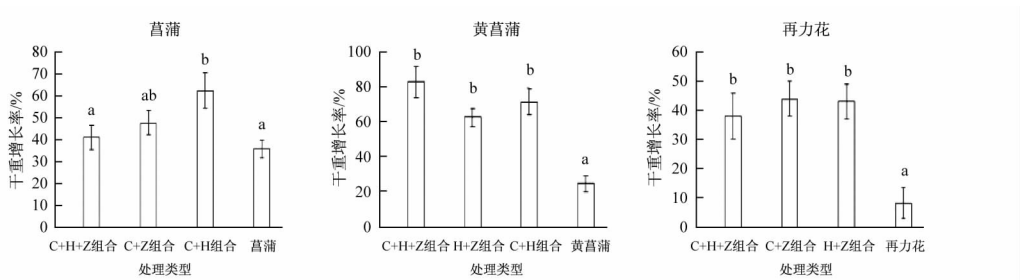


图 2 不同组合配置模式下菖蒲、黄菖蒲和再力花的干重增长率

Fig. 2 DW growth rate of *Acorus calamus*, *Iris pseudacorus* and *Thalia dealbata* in different configuration modes

2.3　不同组合配置模式下植物体的氮磷富集量

菖蒲的单位干重氮富集量：C + Z 组合＞C + H 组合＞C + H + Z 组合＞菖蒲. 3 种植物混植时，菖蒲的单位干重氮富集量最大，达 12.85 mg/g，约是单植时的 5 倍；两两混植时，其单位干重氮富集量约为单种种植时的 3 倍. 菖蒲的单位干重磷富集量：C + H + Z 组合＞菖蒲＞C + Z 组合＞C + H 组合. 3 种植物混植时，菖蒲的磷单位干重磷富集量最大，达到 0.49 mg/g；其次是单种混植(见图 3).

黄菖蒲的单位干重氮富集量：C + H + Z 组合＞H + Z 组合＞黄菖蒲＞C + H 组合. 3 种植物混植时，黄菖蒲的单位干重氮富集量最大，达 6.82 mg/g；与菖蒲混植时，单位干重氮富集量最小，仅为 2.81 mg/g. 黄菖蒲的单位干重磷富集量：H + Z 组合＞C + H + Z 组合＞黄菖蒲＞C + H 组合. 与再力花混植时，黄菖蒲的单位干重磷富集量最大，达到 0.45 mg/g；而与菖蒲混植时，单位干重磷富集量最小，仅为 0.04 mg/g(见图 3).

再力花的单位干重氮富集量：再力花＞C + H + Z 组合＞H + Z 组合＞C + Z 组合. 单种植物种植时，再力花的单位干重氮富集量最大，达到 7.64 mg/g；与菖蒲混植时，其单位干重氮富集量最小，仅 3.80 mg/g. 再力花的单位干重磷富集量：再力花＞C + H + Z 组合＞H + Z 组合＞C + Z 组合. 单种植物种植时，再力花的单位干重磷富集量最大，达到 0.35 mg/g；与菖蒲混植时，其单位干重磷富集量最小，仅 0.18 mg/g(见图 3).

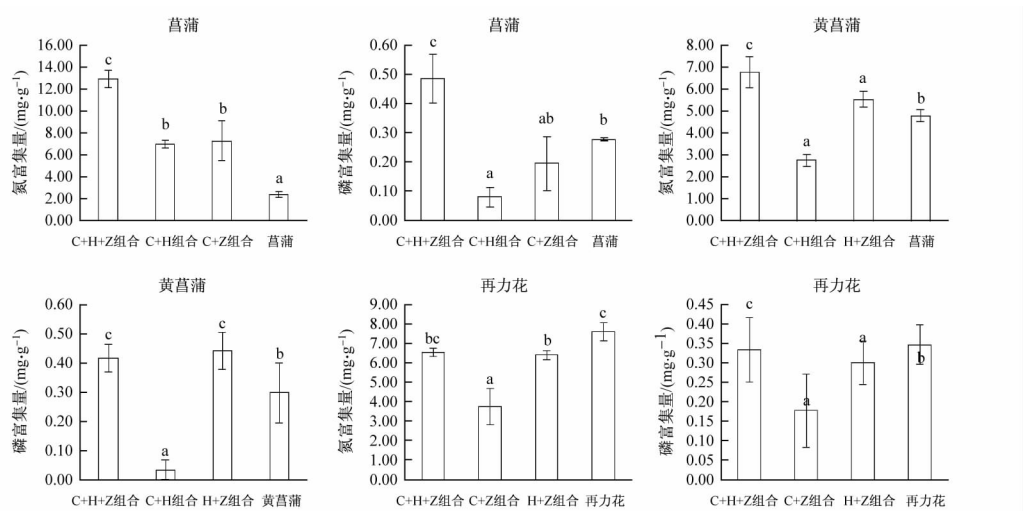


图 3　不同组合中菖蒲、黄菖蒲和再力花的氮磷富集量比较

Fig. 3　The compare of plant nitrogen enrichment and phosphorus enrichment of *Acorus calamus*, *Iris pseudacorus and Thalia dealbata* among different groups

各处理的植物体总氮富集量：C + H + Z 组合＞C + H 组合＞H + Z 组合＞菖蒲＞再力花＞C + Z 组合＞黄菖蒲. 3 种植物混植时，植物体总氮富集量高达 480.50 mg，污水中总氮的去除量为 34.44 mg/L，高于两两混植时以及单种种植时，差异极显著. 黄菖蒲单独种植时，植物体总氮富集量最小，仅为 209.90 mg. H + C 组合和 H + Z 组合中，植物体总氮富集量都高于黄菖蒲单独种植时，差异显著. 菖蒲单独种植时，植物体总氮富集量高于其与再力花混植时，差异显著(见图 4).

各处理的植物体总磷富集量：C + H + Z 组合＞再力花＞H + Z 组合＞黄菖蒲＞菖蒲＞

C+Z 组合>C+H 组合.3 种植物混植时,植物体总磷富集量高达 76.92 mg,污水中总磷的去除量为 0.30 mg/L,高于两两混植时以及单种种植时,差异极显著.菖蒲黄菖蒲混植时,植物体总磷富集量最小,仅为 1.42 mg.菖蒲和黄菖蒲单独种植时,植物体总磷富集量高于其混植时,差异极显著.菖蒲单独种植时,植物体总磷富集量也高于其与再力花混植时,差异极显著.再力花单独种植时,植物体总磷富集量高于菖蒲再力花混植时,差异显著(见图 4).

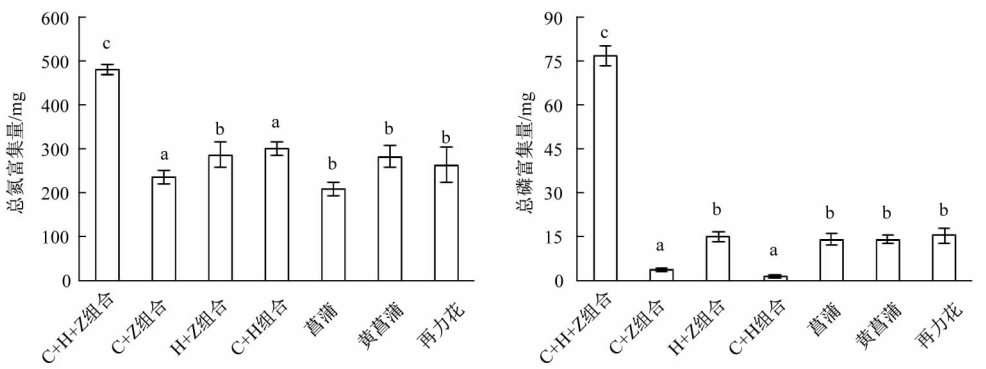


图 4 各处理植物体的总氮和总磷富集量比较

Fig. 4 The compare of total plant nitrogen enrichment and total plant phosphorus enrichment among different groups

3 讨 论

3.1 不同组合配置模式对植物的生长状况影响

植物的生物量指标能够表征在尾水中不同植物配置对植物生长状态的影响,反应出对尾水的耐受能力,也是决定水生植物水质净化能力的重要因素之一[13].实验中菖蒲、黄菖蒲和再力花混植时干重增长率均显示增大,单植时增长最小.与罗固源等[15]研究结果相似,植物混种有互相促进的优势.不同水生植物的根际微生物、根系类型和释氧速率都不相同,在协同净化的过程中,混植相较于单种种植,能为其他植物提供更好的生境条件,降低渗滤液尾水的胁迫程度,改善系统的机构与功能,同时也增强了系统对病虫害的抵抗力[16],从而促进植物生长,使之形成一个较为稳定的水体净化系统,较大地提高水生植物对渗滤液尾水的净化效果.

3.2 不同组合配置模式对渗滤液尾水的净化能力

水生植物对氮磷的去除主要受植物根际—微生物系统的共同作用,1977 年德国学者 Kickuth R 提出根区法理论,由于水生植物为植物根区的好氧、兼氧和厌氧微生物提供了各自的小生境,有利于硝化菌、反硝化菌和聚磷微生物的生长,促进硝化、反硝化反应和微生物对磷的过量积累作用,达到除氮、磷的效果[17].对 COD 的去除有植物的同化吸收,主要是微生物对有机物的分解.因此,混植时植物根形态各异,空间生态位重叠较单植时小,为更多根际和根际微生物提供条件,植物间可取长补短协同作用,提高植物根系对营养物质的吸附能力.

菖蒲、黄菖蒲和再力花 3 种水生植物混植时,渗滤液尾水的 TN 和 TP 最终去除率整体

大于单种植物种植时；两两混植时，渗滤液尾水的 TN 和 TP 最终去除率大多较单种种植时显著提高. 韩潇源研究了湿地水生植物高效净化氮磷污水的效果[18]，Coleman 等比较研究了宽叶香蒲、灯心草和水葱 3 种植物混植和单独种植对污水磷的净化效果[19]，彭婉婷[20]和李淑英[21]等利用不同的植物组合研究富营养化水体中 TN 和 TP 的去除效果，均得出相似结论，表明三者混合种植比分别单独种植具有更好的净化效果[22].

但也有研究表明，净化效果因植物种类的不同，提高也不尽一致. 本实验中，菖蒲单植组合对 TN 的净化效果优与其他两两混合组合效果，而 H + Z 组合却优于各自单植组合. 对 TP 的净化效果中，除 C + Z 组合外，再力花单植组合优于其他两两组合和单植组合，而 H + Z 组合效果与单植组合比较又较差. 王春景研究表明，菰和菖蒲的混合种植体系对富营养化水体的净化效果与单独种植体系无明显差异，且菖蒲单植时对总氮的去除率高于两两混植，但对总磷的去除效果低于混植[23]. 这与赵建刚研究关于多种群落湿地对 TP 的净化效果优于单种群落湿地，而单种群落湿地对 TN 的净化效果又强于多种群落湿地[24]亦相似. 对水体净化效果不仅与植物生物量、单位富集量相关，还可能与不同植物之间的协同净化和化感作用等密切联系.

对 COD 的去除，植物混植和单植时差异不明显，主要因为 COD 的去除效果除受微生物影响外，也可能受水温、pH 值、光照和有机物形态等影响. 因此，在实际应用中还应重视渗滤液尾水中污染物质含量和种类选择具体的植物及配置方式.

4　结　　论

（1）植物混种有互相促进的优势，菖蒲、黄菖蒲和再力花混植时净生物量均显示增大，单植时增长最小. 研究表明，水生植物的氮、磷累积量一定程度上与植物的生物量呈正比，水生植物只有在生物量增加时才能有效地吸收氮磷等营养物质，通过不断收割水生植物才能维持新生水生植物对氮、磷的持续吸收. 另外，在人工湿地净化水质研究中，通过植物之间的组合，在提高去污能力基础上还可适当增加景观效果.

（2）不同植物间协同净化效果不同. 对 TN 的去除率，菖蒲、黄菖蒲和再力花 3 种水生植物混植时最好，菖蒲单植其次，其他两种混植效果均优于单植，协同净化效应对于后两者效果明显. 对 TP 的去除率，C + Z、C + Z + H 效果较好，再力花单植效果优于其他两种单植组合，黄菖蒲与其他两种植物两两混植时，协同净化效果较差. 对 COD 的去除，植物混植和单植时差异不明显. 因而，通过不同植物的搭配，可有效针对性地进行水体修复，针对氮磷含量均较高的水体，可选择 3 种混合模式，对于氮含量较高的水体还可选择以菖蒲单植模式为主，对于磷含量较高的水体可选择再力花单植模式为主，其他组合辅助的配置模式.

[参　考　文　献]

[1] 付智娟，刘亚敏，孙桂琴. 垃圾渗滤液的处理技术及其研究方向[J]. 江西化工，2005(4)：68-71.

[2] 周益洪，周恭民，梅亚青. 人工湿地处理垃圾渗滤液[J]. 环境卫生工程，2005，13(3)：10-13.

[3] USEPE. Guilding Principle of Constructed Treatment Wetland：Providing for Water Wuality and Wildlife Habitat [M]. Washington DC：USEPA，Office of Wetlands，Oceans and Watershed，2000.

[4] MULAMOOTTIL G，MCBEAN E A，ROVERS F. Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates [M]. USA：CRC Press，1998：63-69.

[5] 陈韫真，叶纪良. 深圳白泥坑、雁田人工湿地污水处理场[J]. 电力环境保护，1996，12(1)：47-51.

[6] 达良俊,陈鸣. 凤眼莲不同部位对重金属的吸收、吸附作用研究[J]. 上海环境学,2003,22(11): 765-767.
[7] 刘利华,郭雪艳,达良俊. 不同富营养化水平对挺水植物生长及氮磷吸收能力的影响[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2012(6):39-45.
[8] 杨珏. 不同水生植物配置模式对垃圾填埋场渗滤液尾水的净化能力研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.
[9] 金树权,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.
[10] 夏汉平. 香根草和水花生对垃圾污水中 N、P、Cl 的吸收效果[J]. 植物生态学报,2000, 24(5): 613-616.
[11] 夏汉平,敖惠修,刘世忠,等. 应用香根草对垃圾场进行植被恢复及净化垃圾污水的研究[J]. 广州环境科学,2003,17(1):34-37.
[12] 刘鸣达,赵玉婷. 凤眼莲去除垃圾渗滤液中的 COD、NH_3-N 和 P[J]. 环境工程学报,2012,6(6):1875-1879.
[13] 侯晓龙,马祥庆. 水生植物对垃圾渗滤液中重金属的吸附效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2007,26(6):2262-2266.
[14] GB16889—2008 生活垃圾填埋场污染控制标准[S]. 北京:中华人民共和国环境保护部,2008.
[15] 罗固源,肖华,韩金奎,等. 人工浮床处理重污染河水的效能分析[J]. 重庆大学学报,2008, 31(8): 932,936.
[16] 陈明利,吴晓芙,陈永华,等. 景观型人工湿地污水处理系统构建及植物脱氮效应研究[J]. 环境科学,2010,31(3):660-666.
[17] KICKUTH R. Degradation and Incorporation of Nutrients from Rural Wastewaters by Plant Rhizosphere under Limbic Conditions[M]. London:Commission of the European Communities, 1977: 335-343.
[18] 韩潇源,宋志文,李培英. 高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合湖泊科学[J]. 2008, 20(6): 741-747.
[19] COLEMAN J, HENCH K, GARBUTT K, et al. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001, 128: 283-295.
[20] 彭婉婷,邹琳,段维波,等. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效[J]. 环境科学学报,2012 ,32(3):612-617.
[21] 李淑英,周元清,胡承,等. 水生植物组合后根际微生物及水净化研究[J]. 环境科学与技术, 2010,33(3):148-151.
[22] 高吉喜,叶春,杜娟,等. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学, 1997,17(3): 247-251.
[23] 王春景,杨海军,刘国经,等. 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):40-41.
[24] 赵建刚,陈章和. 单种和多种群落湿地对污水的净化效果和植物生长生物量研究[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(2):203-206.

(责任编辑 张 晶)