ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第2期
2014年2月15日

目 次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 …… 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏(401)
北京城区 $PM_{2.5}$ 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 …… 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥(411)
北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 …… 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清(418)
北京市 $PM_{5.0}$ 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 …… 王艳慧,肖瑶(428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 …… 谢小芳,孙在,杨文俊(436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 …… 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋(442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 …… 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娴(451)
忻州市环境空气 PM_{10} 中有机碳和元素碳污染特征分析 …… 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娴,杨花(458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 …… 青宪,苏原,苏青,张素坤,任明忠(464)
燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 排放危害度评价模型建立及案例分析 … 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知溥,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征 …… 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强(475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析 …… 李正泉, 马浩, 毛裕定, 冯涛(481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究 …… 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔(490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 …… 贾龙, 徐永福(495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 …… 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 …… 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邰俊,陈檬(513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究 …… 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山(520)
国Ⅴ柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 …… 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛(526)
翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 …… 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉熹,韩圣慧,万合锋(533)
$CuBr_2$ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 …… 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平(541)
浙闽沿岸海域总溶解态无机锑的分布及影响因素研究 …… 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹(547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 …… 贾海峰,郭羽(555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价 …… 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟(562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 …… 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳(569)
太滆南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 …… 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛(577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 …… 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉(585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 …… 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊(592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 …… 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋(597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 …… 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振(605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 …… 李佳, 林建伟, 詹艳慧, 陈祖梅, 王鹏钧(611)
四环素光催化降解特性与选择性研究 …… 宋晨怡,尹大强(619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 …… 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖(626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 …… 杨赛,周启星,华涛(633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 …… 李彬,王志伟,安莹,吴志超(643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 …… 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德(651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究 …… 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳(657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 …… 赵兴兴,于水利,王哲(663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 …… 胡晓婧,藏婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟(669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 …… 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹(678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 …… 郭鹏然, 雷永乾, 蔡大川, 张涛, 吴锐, 潘佳钏 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 …… 张小敏,张秀英,钟太洋,江洪(692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 …… 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄(704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 …… 章迪,曹善平,孙建林,曾辉(711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 …… 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇锋,徐笠,吕永龙(719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 …… 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒(727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 …… 尹雪,陈家军,吕策(733)
Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 …… 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江(740)
$n(NO_3^-\text{-N})/n(NO_2^-\text{-N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 …… 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌(746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 …… 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云(753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 …… 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 …… 朱艾嘉, 许战洲, 柳圭泽, 邓丽杰, 方宏达, 黄良民(764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 …… 王艳,马泽民,吴石金(770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 …… 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰(780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羰基硫排放动态研究 …… 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青(786)
农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施 …… 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 徐会娟, 贾炎(792)
《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价

陈永华,吴晓芙*,郝君,陈明利,朱光玉
(中南林业科技大学环境科学与工程研究中心,长沙 410004)

摘要: 为了解决亚热带地区人工湿地植物的冬季草本植物地上部分枯死的问题,本研究引入 16 种木本植物到潜流人工湿地中进行净化潜力筛选与评价,并对木本植物的适应形态特性、生理特性、氮磷积累量指标进行了聚类分析. 结果表明,测试木本植物的成活率、株高增幅、根长增幅、根系活力、叶绿素含量、超氧化歧化酶、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶、生长量、氮磷平均浓度、氮磷的积累量都存在很大差异. 采用建立的净化潜力评价体系将测试植物聚类分为 3 大类,较强的有夹竹桃、木槿,中等的有:棕榈、小叶迎春、栀子花、六月雪、龟甲冬青,较弱的有:大叶冬青、常春藤、金森女贞、金叶女贞、金边七里香、七里香、桂花、十大功劳、红叶石楠.

关键词:潜流型人工湿地; 木本植物; 聚类分析; 净化潜力
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)02-0585-07

Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area

CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, CHEN Ming-li, ZHU Guang-Yu
(Institute of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to solve the problem that wetland herbaceous plants tend to die during winter in subtropics areas, selection and purification potential evaluation experiments were carried out by introducing into the constructed wetlands 16 species of woody wetland plants. Cluster analysis was performed by including the morphological characteristics, physiological characteristics, as well as nitrogen and phosphorus accumulation of the woody wetland plants. The results indicated that there were significant differences among the tested woody plants in their survival rate, height increase, root length increase and vigor, Chlorophyll content, Superoxide dismutase, Malonaldehyde, Proline, Peroxidase, biomass, average concentration and accumulation of nitrogen and phosphorus. Based on the established evaluation system, the tested plants were clustered into 3 groups. The plants in the 1st group possessing high purification potentials are *Nerium oleander* and *Hibiscus syriacus*. Those in the 2nd group possessing moderate purification potentials are *Trachycarpus fortune*, *Llex latifolia* Thunb., *Gardenia jasminoides*, *Serissa foetida* and *Ilex crenatacv* Convexa. And those in the 3rd group with low purification potentials are *Jasminum udiflorum*, *Hedera helix*, *Ligustrum vicaryi*, *Ligustrum lucidum*, *Buxus sempervives*, *Murraya paniculata*, *Osmanthus fragrans*, *Mahoniafortune* and *Photinia serrulata*.

Key words: vertical flow constructed wetlands; woody plant; clustering analysis; purification potential

潜流型人工湿地作为人工湿地的一种类型,因其污水处理效率高,占地面积相对较少,因而在污水处理中得到了广泛的应用[1~3]. 植物是潜流人工湿地的重要组成部分,通过吸收、吸附、过滤、富集作用去除污染物[4]. 此外,植物还可以起到固定床体表面[5]、为微生物提供良好的根区环境[6,7]、提高填料基质的过滤效率[8]、抗冲击负荷[9],为系统的稳定处理效果提供保障.

但是,从目前已有的人工湿地工程实践来看,在冬季时,除了华南温暖地区的植物没有出现由于低温致地上部枯死外,我国大部分地区的人工湿地植物都会出现地上部枯死的问题,出现这种问题的基本原因是目前应用的潜流人工湿地植物主要为芦苇(*Phragmites australis*)、美人蕉(*Canna indica*)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、香蒲(*Typha angustifolia*)、水葱(*Scirpus validus*)、水芹(*Oenanthe javanica*)、姜花(*Hedychium coronarium*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)等单一草本水生植物类型[10~12],到了冬季寒冷低温季节,就必然会出现冬季时绝大多数草本植物地上部枯死的现象,由于冬季植物效应的丧失,从而影响冬季人工湿地污水处理和景观效果. 因此,寒冷气候条件下人工湿地植物的应用是湿地技术的难点,也会极大地限制了人工湿地技术的推广应用.

解决人工湿地冬季植物问题的对策主要有采用

收稿日期: 2013-07-03; **修订日期**: 2013-08-20
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC09B03); 湖南省教育厅科学研究项目(13B147); 湖南省环保科技项目(湘财建指【2012】-347); 湖南省环境科学与工程重点学科建设项目
作者简介: 陈永华(1977~),男,博士,副教授,主要研究方向为污染生态修复,E-mail:chenyonghua3333@163.com
* 通讯联系人, E-mail:wuxiaofu530911@vip.163.com

覆盖保温[13]、强化升温[14]和筛选出冬季抗寒湿地植物[15,16]. 从经济和景观效果的角度来看,比较理想的对策还是能够筛选出冬季抗寒植物,但从现有的研究和工程实践来看,在草本湿地植物中筛选出冬季地上部不枯死的植物非常难,根本原因是由于草本湿地植物在亚热带地区的冬季决大多数完成一年的生长周期后地上部枯死,少数抗寒性较强的草本水生植物在夏季抗高温强光能力又差[12,17]. 为此,本研究提出在潜流人工湿地中引入木本陆生植物来解决目前冬季大部分草本水生植物地上部分枯死的问题,而且经过初步实验发现利用潜流人工湿地运行水位在表面填料的 10 ~ 20 cm 以下的特点,木本植物经过根系驯化诱导后可以适应潜流人工湿地环境[18,19],因此,本研究通过对潜流人工湿地环境下木本植物筛选与评价分析,开辟出人工湿地筛选的新思路,以期为木本植物应用于潜流人工湿地提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 实验系统

2010 年 4 月将收集的木本植物共计 24 种(表 1),引入到潜流人工湿地中,观察存活率和生长状况. 经过 1 a 初筛, 2011 年 4 月将能够成活的植物作为实验物种 16 种(表 2)种植在潜流人工湿地单元,湿地单元:长 × 宽 × 深 = 2 × 1 × 1(m),床体深 1 m 包括:下部填充粒径为 3 ~ 5 cm 的石灰石 40 cm,上面铺 5 cm 河沙,然后铺沸石 15 cm,最上层再铺约 10 cm 的细沙. 16 种植物沿水流方向平行排列种植在潜流湿地中,每种植物 5 株,植物栽植密度 20 cm × 20 cm. 由于水流通过布水管均匀流入,因此整个潜流人工湿地实验区具有相似的水力负荷,从而保证植物具有相似的生长环境. 经预处理后进入潜流湿地(实验)处理单元的污水主要水质指标为: COD 108.26 ~ 125.74 $mg \cdot L^{-1}$; TN 39.53 ~ 44.47 $mg \cdot L^{-1}$; TP 2.09 ~ 2.43 $mg \cdot L^{-1}$. 实验期间系统在室外自然条件下连续运行,水力负荷保持为 0.5 $m \cdot d^{-1}$,水力停留时间为 19 h. 经过 12 个月后一次性测定各项指标.

1.2 测定方法

1.2.1 植物适应形态与生理特性指标测定

植株成活率、株高、根长、根系活力、叶绿素含量、超氧化歧化酶、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶是反映植物适应形态与生理特性的主要指标. 株高增加值采用实验前后 5 株植物的最高株高的平均数差值计算,根系增加值采用实验前后 5 株植物的最长根平均数差值计算,根系活力、叶绿素含量、超氧化歧化酶、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶含量的测定方法参照文献[20].

1.2.2 去污能力指标测定

植物生长量的测定: 植物生长量是反映植物吸收 N、P 能力的重要指标之一. 每种植物在种前称重,经过 12 个月的生长以后再称重,将待测样品在 80℃烘箱中烘至恒重后称重,计算单株平均生长量.

植物氮磷积累量的测定:植物氮磷积累量表示植物从湿地系统中带走的氮磷量,是直接反映植物的净化潜力的重要指标. 将植物样品用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮制备成溶液, 总氮含量用过硫酸钾氧化吸光光度法测定[21]; 总磷用钒钼蓝法测定[22]. 植物氮磷积累量(PA)的计算公式为:

$$PA = PC \times PB \quad (1)$$

式中,PA 为植物氮磷积累量,PC 为植物氮磷浓度,PB 为植物生长量.

1.2.3 数据处理方法

文中数据采用统计之林(Forstat)2.0 软件进行处理[23].

2 结果与分析

2.1 第一年 24 种植物的在潜流型人工湿地环境下的初筛情况

由表 1 可以看出, 24 种通过 1 a 在潜流式人工湿地的生长,有些植物由于不适应该地区温度、水生环境等各种因素出现死亡现象,而有些植物却可以适应成活下来, 1 a 后笔者统计了成活率(表 1). 由表 1 可以看出能够在潜流人工湿地环境下成活的植物有:夹竹桃、小叶迎春、大叶冬青、常春藤、金森女贞、金叶女贞、金边七里香、七里香、木槿、桂花、六月雪、龟甲冬青、栀子花、十大功劳、红叶石楠、棕榈共 16 种. 第二年将这 16 种植物引入潜流型人工湿地进行适应能力与生理特性、生长量和氮磷积累量、聚类分析与净化潜力的评价研究.

2.2 第二年 16 种植物在潜流人工湿地环境下的筛选与评价

2.2.1 植物的适应形态特性比较

植物的成活率、株高增幅、根长增幅是湿地植物的适应能力强弱的形态学特性指标之一,是植物适应能力强弱的最直接的反映. 16 种植物种植在生活污水中生长 12 个月后,各项指标情况见表 2. 从中可知,16种植物的成活率与第一年的初筛结

表 1　24 种木本植物在潜流人工湿地中的成活率比较

Table 1　Comparison of the survival rate of the 24 woody plant species

植物名称	拉丁文	种植颗数/颗	收获颗数/颗	成活率/%
夹竹桃	*Nerium oleander*	5	5	100
小叶迎春	*Llex latifolia* Thunb.	5	3	60
大叶冬青	*Jasminum udiflorum*	5	4	90
常春藤	*Hedera helix*	5	3	60
金森女贞	*Ligustrum vicaryi*	5	5	100
金叶女贞	*Ligustrum lucidum*	5	5	100
八角金盘	*Fatsia japonica*	5	0	0
冬青	*Ilex purpurea* Hassk	5	0	0
金边七里香	*Buxus sempervives*	5	3	60
七里香	*Murraya paniculata*	5	4	90
木槿	*Hibiscus syriacus*	5	5	100
桂花	*Osmanthus fragrans*	5	4	90
六月雪	*Serissa foetida*	5	5	100
龟甲冬青	*Ilex crenatacv*. Convexa	5	5	100
栀子花	*Gardenia jasminoides*	5	5	100
杜鹃	*Rhododendron*	5	0	0
十大功劳	*Mahoniafortune*	5	3	60
南天竹	*Nandina domestica*	5	0	0
红继木	*Loropetalum chinense*	5	0	0
火棘	*Pyracantha fortuneana*	5	0	0
紫薇	*Lagerstroemia indica*	5	0	0
红叶石楠	*Photinia serrulata*	5	2	60
棕榈	*Trachycarpus fortune*	5	3	80
月季	*Rose chinese* Jacq	5	0	0

表 2　16 种木本植物在潜流人工湿地中的适应形态特性比较

Table 2　Comparison of the physiological characteristics of the 16 plant species

编号	植物	成活率/%	株高增幅/cm	根长增幅/cm
1	夹竹桃	100	95	71
2	小叶迎春	60	5	13
3	大叶冬青	80	2	16
4	常春藤	60	15	1
5	金森女贞	100	16	25
6	金叶女贞	100	99	29
7	金边七里香	60	2	24
8	七里香	80	1	5
9	木槿	100	113	75
10	桂花	80	8	10
11	六月雪	100	1	10
12	龟甲冬青	100	8	5
13	栀子花	80	59	34
14	十大功劳	60	2	1
15	红叶石楠	40	2	7
16	棕榈	80	18	30

果基本一致,说明了实验具有较好的重复性. 16 种植物中具有较高成活率的有:夹竹桃、金森女贞、金叶女贞、木槿、六月雪、龟甲冬青. 从株高增加值来看,增幅最多的有:木槿、金叶女贞、夹竹桃这3 种,增幅都在 90 cm 以上; 株高增幅较小,在 10 cm 以内的有:七里香、六月雪、大叶冬青、金边七里香、十大功劳、红叶石楠、小叶迎春、桂花、龟甲冬青这 9 种. 从根长增幅来看, 16 种植物根长增幅最多的有:夹竹桃、木槿这 2 种,增幅都在 70 cm 以上; 增幅较小,在 10 cm 以内的有:常春藤、十大功劳、七里香、龟甲冬青、红叶石楠、桂花、六月雪这 7 种. 整体趋势来看,植物的成活率、株高增幅、根长增幅这 3 个指标都较强是夹竹桃、木槿这 2 种植物,并出现较好的一致性.

2.2.2　植物的适应生理特性比较

根系活力、叶绿素含量、超氧化歧化酶、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶的变化是植物适应能力强弱的生理表现指标之一[16,24]. 16 种木本植物在潜流人工湿地中的适应生理特性指标情况见表 3. 从中可以看出,根系活力、叶绿素含量这 2 个指标中夹竹桃、木槿、栀子花、棕榈都较高,且有较好的一致性; 超氧化歧化酶、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶这 4 个生理特性反应指标总体上没有很明显的规律性,但是个别指标也有较强的一致性,如棕榈同时表现出较高的脯氨酸、过氧化物酶含量,这与棕榈较强的适应能力一致.

表 3 16 种木本植物在潜流人工湿地中的适应形态特性比较

Table 3 Comparison of the physiological characteristics of the 16 plant species

编号	植物	根系活力 /mg·(g·h)$^{-1}$	叶绿素含量 /mg·g^{-1}	丙二醛含量 /nmol·g^{-1}	超氧化歧化酶活力 (以 FW 计)/U·(g·h)$^{-1}$	脯氨酸含量 /μg·mg^{-1}	过氧化活性 /U·(g·min)$^{-1}$
1	夹竹桃	16.58	1.21	2.26	1.66	2.51	4.67
2	小叶迎春	2.33	1.73	3.34	1.17	4.77	4.67
3	大叶冬青	0.83	1.1	1.96	2.7	21.2	2.33
4	常春藤	13.58	1.59	2.98	4.13	4.06	8.33
5	金森女贞	2.08	0.88	1.9	1.72	1.92	3.00
6	金叶女贞	3.58	0.48	1.1	1.14	9.89	7.00
7	金边七里香	9.08	1.1	1.85	1.98	15.25	29.00
8	七里香	15.33	1.17	2.18	3.07	18.35	12.67
9	木槿	22.83	1.63	3.4	0.59	8.46	24.67
10	桂花	1.83	1.07	1.73	1.53	9.3	9.67
11	六月雪	1.83	3.21	3.83	0.8	29.89	13.67
12	龟甲冬青	13.33	1.85	3.35	0.39	7.87	21.33
13	栀子花	7.58	1.61	3.34	0.97	55.89	1.00
14	十大功劳	1.58	1.3	2.1	3.04	95.25	2.00
15	红叶石楠	1.08	1.41	2.53	2.53	6.92	5.67
16	棕榈	0.58	2.24	4.43	0.61	98.58	40.00

2.2.3 植物生长量和氮磷积累量比较

植物氮磷积累量表示植物从湿地系统中带走的氮磷量,是直接反映植物的净化潜力的重要指标之一,其大小由生长量大小和植物内氮磷浓度决定. 从 16 种湿地植物的氮磷积累量比较(表 4)来看, 16 种植物平均生长量与氮磷积累量有很好的一致性,生长量较大的依次为:夹竹桃、栀子花、金叶女贞、木槿、棕榈、六月雪、大叶冬青,都在 80 g·株$^{-1}$以上; 由于植物氮磷平均含量差异较大,导致植物氮磷积累量也有较大差异,但是基本规律一致,生长量较强的 7 种植物也具有很强的植物氮磷积累量,尤其是夹竹桃、栀子花、金叶女贞、木槿、大叶冬青这 5 种表现出平均生长量与氮磷积累量有很好的一致性. 而且有很多研究显示,生物量与氮、磷积累量的相关性优于植物体内氮、磷浓度[4,25],说明要提高植物对污染物的直接吸收功能,主要是依靠提高植物的生长量来增加植物氮磷积累量. 本实验也反映了氮、磷的积累能力与生长量具有很好的相关性.

表 4 16 种湿地植物的氮磷积累量比较

Table 4 Compartment on N and P accumulation quantity of the 16 plant species

编号	植物名称	平均生长量 /g·株$^{-1}$	植物氮磷平均含量/mg·g^{-1}		植物氮磷积累量/mg·株$^{-1}$	
			N	P	N	P
1	夹竹桃	663.46	21.25	1.36	14 098.53	902.31
2	小叶迎春	60.64	2.17	0.62	131.59	37.60
3	大叶冬青	84.8	41.29	3.25	3501.39	275.60
4	常春藤	11.6	12.36	1.23	143.38	14.27
5	金森女贞	18.19	18.19	2.31	330.88	42.02
6	金叶女贞	213.66	17.36	1.15	3 709.14	245.71
7	金边七里香	6.12	8.07	2.36	49.39	14.44
8	七里香	10.63	9.55	2.08	101.52	22.11
9	木槿	166.78	10.23	2.95	1 706.16	492.00
10	桂花	31.27	35.18	2.23	1 100.08	69.73
11	六月雪	118.44	23.61	0.35	2 796.37	41.45
12	龟甲冬青	45.83	22.06	1.02	1 011.01	46.75
13	栀子花	256.03	15.06	0.32	3 855.81	81.93
14	十大功劳	23.25	4.05	3.37	94.16	78.35
15	红叶石楠	21.83	8.25	3.65	180.10	79.68
16	棕榈	141.75	13.55	0.35	1 920.71	49.61

2.2.4　湿地植物的聚类分析与净化潜力的综合评价

从实验植物上述的单一指标强弱可看出，不同指标间的强弱排名有一定相关性，但也存在着显著的差异，其说明采用单一的指标不能科学客观地反映植物的抗寒能力与污水净化潜力. 因此，本研究对反映植物净化潜力的适应形态与生理特性（成活率、株高增幅、根长增幅、根系活力、叶绿素含量、超氧化歧化酶、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶）和去污能力（植物生长量、植物氮平均浓度、植物磷平均浓度、植物对氮的积累能力、植物对磷的积累能力）两方面共 14 项指标对 16 种植物进行聚类分析（图 1）.

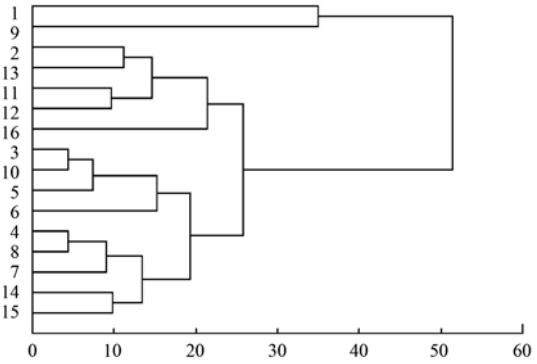

图 1　16 种植物采用净化潜力评价指标聚类

Fig. 1　Clustering of purification potential evaluation indicators of the 16 kinds plant

本研究采用了 8 种系统聚类方法进行分析，分析结果表明：平均距离法、类平均距离法、最长距离法、离差平方和法、可变法这 5 种系统聚类分析的效果是一样的，结果可以将植物分为 3 大类：最强有 1（夹竹桃）、9（木槿），中等的有：16（棕榈）、2（小叶迎春）、13（栀子花）、11（六月雪）、12（龟甲冬青），较弱有 3（大叶冬青）、4（常春藤）、5（金森女贞）、6（金叶女贞）、7（金边七里香）、8（七里香）、10（桂花）、14（十大功劳）、15（红叶石楠）.

3　讨论

本研究中的木本植物相对一般水生草本植物而言具有更好的抗寒性，可以较好地解决人工湿地冬季草本植物地上部枯死而造成污水处理与景观效果较差的问题，但是，木本植物相对水生草本植物而言，最大的困难是木本植物很难适应人工湿地水生缺氧的环境，要解决木本植物适应潜流人工湿地环境，取决于两方面因素，一方面是潜流人工湿地运行水位调节（外因），也就是说必须将潜流人工湿地的水位调节到正常水位（运行水位在表面填料的 10 ~ 20 cm 以下），避免长时间超水位运行，这样可以保障木本植物有适应潜流人工湿地的生存缓冲空间（表面填料的 10 ~ 20 cm）；另一方面是植物的适应能力的强弱（内因），也就是说取决于木本植物对潜流人工湿地相对缺氧环境的适应能力，一般水生植物具有很强的耐缺氧的湿地环境的能力，木本植物大部分品种不耐缺氧的湿地环境.

但是，也有人研究发现有些木本植物也具有很强的耐缺氧湿地环境的能力，如柳树[26]、水杉等木本植物[27]，但是品种有限，利用木本植物建立的人工湿地，通过合理地抚育管理和短轮伐期的采收，可以把富余的氮、磷等元素彻底从污染生态系统中转移出，进而进行生物质能源的开发利用，避免实际应用中，由于常见水生草本湿地植物大多经济效益不高，在湿地运行操作中需要持续的投入费用，这就导致了很可能草本湿地植物到了秋季无人收割、植物茎叶部腐烂倒伏等问题，这样被草本湿地植物吸收和固定的氮、磷等元素又回到了湿地系统中. 另外，木本植物还具有更多的优点，如抗寒性强、根系更发达、生物量更大、耐修剪等. 本研究中把 24 种园林植物引入潜流人工湿地，扩大了植物的筛选范围，有利于人工湿地技术在更大范围内的推广. 笔者认为在潜流人工湿地系统中可以合理地搭配草本植物与木本植物的空间，做到既考虑植物的适应性，还考虑植物的净化效果，充分发挥草本植物与木本植物的优势，构建一个合理的植物立体与时空植物系统.

在木本植物筛选与评价指标体系中本研究重点考虑了植物净化潜力的适应形态与生理特性（成活率、株高增幅、根长增幅、根系活力、叶绿素含量、超氧化歧化酶、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶）和去污能力（植物生长量、植物氮平均浓度、植物磷平均浓度、植物对氮的积累能力、植物对磷的积累能力）两方面共 14 项客观数据指标，没有考虑主观打分赋值的指标，如：生物安全、景观价值、生态价值等指标，从指标体系的完整性与科学性来说，可以考虑结合主观打分等指标，但是考虑到主观打分的个人差异，赋值大小等主观因素差异，因此，本研究也没有将这些主观指标纳入筛选与评价指标体系，但是在木本植物应用的时候还是要考虑植物的生物安全与景观价值、生态价值等问题.

植物氮磷积累量是表示植物从湿地系统中带走的氮磷量，是直接反映植物的净化潜力的重要指标

之一,其大小由生长量和植物氮磷浓度决定,一般每种植物体内 N、P 含量是一定的,因此,要提高植物对污染物的直接吸收功能,主要是依靠提高植物的生长量来增加植物氮磷积累量. 很多研究表明,生物量的大小决定了植物植物氮磷积累量,蒋跃平等[28]的研究也发现植物的氮磷积累量与浓度及生物量之间均存在显著相关,可以直接以生物量为指标选择人工湿地植物. 刘育等[29]研究芦苇湿地不同生物量处理生活污水中三氮的研究结果也表明,在芦苇湿地污水处理系统中,一般情况下湿地植物的生物量越大,其净化污水中三氮能力就越强. 吕改云等[30]研究证明刈割可以促进人工湿地风车草的再生能力和分蘖能力,增加地上部分的生物量和氮磷贮存量,提高人工湿地对污水的净化效果. 本实验也反映了氮、磷的积累能力与生长量具有很好的相关性. 因此,在以后的研究中还可以进一步加大植物的筛选范围,争取筛选出更多净化潜力强的木本植物应用到潜流人工湿地系统.

4 结论

(1)16 种植物可以作为亚热带地区潜流型人工湿地应用的木本植物:夹竹桃、小叶迎春、大叶冬青、常春藤、金森女贞、金叶女贞、金边七里香、七里香、木槿、桂花、六月雪、龟甲冬青、栀子花、十大功劳、红叶石楠、棕榈.

(2)采用反映植物净化潜力的适应形态、生理特性和去污能力三方面建立的净化潜力评价体系可用于亚热带地区潜流型人工湿地应用的木本植物筛选与评价,本实验的 16 种木本植物分为 3 大类,第一类为最强:夹竹桃、木槿; 第二类为中等:棕榈、小叶迎春、栀子花、六月雪、龟甲冬青; 第三类为较弱:大叶冬青、常春藤、金森女贞、金叶女贞、金边七里香、七里香、桂花、十大功劳、红叶石楠.

参考文献:

[1] House C H, Bergmann B A, Stomp A M, *et al*. Combining constructed wetlands and aquatic and soil filters for reclamation and reuse of water[J]. Ecological Engineering, 1999, **12**(1-2): 27-38.

[2] Fanl L, Hai R, Wang W, *et al*. Application of computational fluid dynamic to model the hydraulic performance of subsurface flow wetland[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(2): 1415-1422.

[3] 任峰, 陆忆夏, 刘琴, 等. 复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 570-575.

[4] 陈永华, 吴晓芙, 何钢, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物效应与基质酶活性[J]. 生态学报, 2009, **29**(11): 6051-6058.

[5] Rogers K H, Breen P H, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants[J]. Research Journal of Water Pollution Control Federation, 1991, **63**(7): 934-941.

[6] Picard C R, Fraser L H, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(9): 1039-1047.

[7] 陈永华, 吴晓芙, 张珍妮, 等. 人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性[J]. 生态学报, 2012, **32**(22): 7247-7254.

[8] Brix H, Schierup H H, Arias C A. Twenty years experience with constructed wetland system in Denmark what did wetland [J]. Water Science & Technology, 2007, **56**(3): 63-68.

[9] Edwards K R, Cižková H, Zemanová K, *et al*. Plant growth and microbial processes in a constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea* [J]. Ecological Engineering, 2006, **27**(2): 153-165.

[10] 陈永华, 吴晓芙, 蒋丽鹃, 等. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(8): 1549-1554.

[11] 邓辅唐, 李强, 卿小燕, 等. 湿地植物及其工程应用[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2007.

[12] 李强, 徐晔春. 湿地植物[M]. 广州: 南方日报出版社, 2009.

[13] 刘学燕, 代明利, 刘培斌, 等. 人工湿地在我国北方地区冬季应用的研究[J]. 农业环境科学报, 2004, **23**(6): 1077-1081.

[14] 张建, 邵文生, 何苗, 等. 潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1560-1564.

[15] 时应征, 王晓, 栾晓丽, 等. 耐寒人工湿地植物石龙芮和酸模联用研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(2): 268-270.

[16] 陈永华, 吴晓芙, 陈明利, 等. 人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1789-1794.

[17] Karathanasis A D, Potter C L, Coyne M S. Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater [J]. Ecological Engineering, 2003, **20**(2): 157-169.

[18] 陈永华, 吴晓芙. 人工湿地植物配置与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.

[19] 郝君, 陈永华, 吴晓芙, 等. 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的根系诱导[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(12): 46-50.

[20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 119-120, 164-165.

[21] 吴建之, 葛滢, 王晓月. 过硫酸钾氧化分光光度法测定植物总氮[J]. 理化检验—化学分册, 2000, **36**(4): 166-167.

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出

版社，2000. 207-237.
[23] 唐守正，郎奎建，李海奎. 统计和生物数学模式计算(ForStat)教程[M]. 北京：科学出版社，2009.
[24] 李宗辉，唐文浩，宋志文. 人工湿地处理污水时水生植物形态和生理特性对污水长期浸泡的响应[J]. 环境科学学报，2007，**27**(1)：75-79.
[25] 李建娜，胡曰利，吴晓芙，等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮磷吸收富集能力研究[J]. 环境污染与防治，2007，**29**(7)：506-509.
[26] 赵珊，张军，陈沉，等. 木本植物作为人工湿地植物的可行性试验[J]. 净水技术，2012，**31**(1)：73-79.
[27] 陈静，孔德平，范亦农，等. 滇池湖滨带湿生乔木湿地构建技术研究[J]. 环境科学与技术，2012，**35**(12)：100-103.
[28] 蒋跃平，葛滢，岳春雷，等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报，2004，**24**(8)：1718-1723.
[29] 刘育，夏北成. 芦苇湿地不同生物量处理生活污水中三氮[J]. 环境科学与技术，2006，**29**(4)：98-99.
[30] 吕改云，何怀东，杨丹菁，等. 刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响[J]. 生态学报，2012，**32**(15) 4932-4939.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2013 年 9 月 27 日，中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2012 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2012 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分 77. 8，排名第一，总被引频次6 489，影响因子 1. 156.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系，计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等)，采用层次分析法确定重要指标的权重，分学科对每种期刊进行综合评定，计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异，使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果，2012 年度《环境科学》综合评价总分 77. 8，在被统计的 30 种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 2

Feb. 15, 2014

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China ····· WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, *et al.* (401)

Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in $PM_{2.5}$ and Source Analysis in Beijing ····· TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, *et al.* (411)

Temporal and Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing ····· ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, *et al.* (418)

Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on $PM_{5.0}$ Inhalable Particulate in Beijing ····· WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)

Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring ····· XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)

Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing ····· WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, *et al.* (442)

Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles ····· WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, *et al.* (451)

Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM_{10} in Xinzhou City ····· SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, *et al.* (458)

Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou ····· QING Xian, SU Yuan, SU Qing, *et al.* (464)

Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis ····· SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, *et al.* (470)

Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea ····· XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, *et al.* (475)

Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data ····· LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, *et al.* (481)

Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area ····· HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, *et al.* (490)

Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation ····· JIA Long, XU Yong-fu (495)

Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China ····· DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, *et al.* (504)

Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area ····· QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, *et al.* (513)

Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter ····· HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, *et al.* (520)

Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends ····· LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, *et al.* (526)

Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting ····· ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, *et al.* (533)

Oxidation of Mercury by $CuBr_2$ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition ····· HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, *et al.* (541)

Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian ····· ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, *et al.* (547)

Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study ····· JIA Hai-feng, GUO Yu (555)

Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain ····· GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, *et al.* (562)

Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary ····· ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, *et al.* (569)

Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary ····· MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, *et al.* (577)

Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area ····· CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, *et al.* (585)

Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands ····· BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, *et al.* (592)

Impacts of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of *Microcystis aeruginosa* ····· ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, *et al.* (597)

Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water ····· TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, *et al.* (605)

Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite ····· LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (611)

Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride ····· SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)

Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System ····· FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, *et al.* (626)

Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety ····· YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)

Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment ····· LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, *et al.* (643)

Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter ····· LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, *et al.* (651)

Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process ····· CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, Det *al.* (657)

Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes ····· ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)

Biosorption Characteristics of Cu^{2+} by Spent Substrate of Pleurotus Oyster ····· HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, *et al.* (669)

Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition ····· WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, *et al.* (678)

Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou ····· GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, *et al.* (684)

Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China ····· ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, *et al.* (692)

Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site ····· ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, *et al.* (704)

Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China ····· ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, *et al.* (711)

Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River ····· TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, *et al.* (719)

Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants ····· ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, *et al.* (727)

Impact of Compounded Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites ····· YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)

Characterization of Manganese Oxidation by *Pseudomonas* sp. QJX-1 ····· ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, *et al.* (740)

Effects of the Ratio of NO_3^--N to NO_2^--N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture ····· CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, *et al.* (746)

Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou ····· GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, *et al.* (753)

Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles ····· ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, *et al.* (759)

Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea ····· ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, *et al.* (764)

Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on *Eisenia foetida* ····· WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)

Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System ····· LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, *et al.* (780)

Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from *Suaeda salsa* Marsh in the Yellow River Estuary ····· LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, *et al.* (786)

Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies ····· ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, *et al.* (792)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2014 年 2 月 15 日　35 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 2　Feb. 15, 2014

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订　购　处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行