

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                   |                                             |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 编者按 .....                                                         | ( 403 )                                     |
| 我国化学品的风险评价及风险管理 .....                                             | 王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 ( 404 )                     |
| 土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 .....                                     | 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 ( 413 )                         |
| 中国 2000 ~ 2010 年生态足迹变化特征及影响因素 .....                               | 黄宝荣,崔书红,李颖明 ( 420 )                         |
| 关中地区冬季 PM <sub>2.5</sub> 中碳气溶胶的污染特征及来源解析 .....                    | 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 ( 427 )              |
| 利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 .....                                  | 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 ( 434 ) |
| 南京夏季市区 VOCs 特征及 O <sub>3</sub> 生成潜势的相关性分析 .....                   | 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 ( 443 )   |
| 北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 .....                                        | 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 ( 452 )                 |
| 重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 .....                                    | 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 ( 459 )               |
| 三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 .....                                          | 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 ( 466 )           |
| 长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 .....                                         | 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 ( 475 )                      |
| 青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 .....                                     | 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 ( 482 )       |
| 西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 .....                                       | 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 ( 490 )                  |
| 坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 .....                               | 余成,陈爽,张路 ( 499 )                            |
| 近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 .....                                      | 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 ( 507 )                  |
| 舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征 .....                                     | 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 ( 513 )              |
| 模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 .....                                          | 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 ( 520 )           |
| 中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 .....                                       | 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 ( 527 )                   |
| 江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 .....                              | 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 ( 534 )                    |
| 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 .....                                             | 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 ( 542 )                  |
| 合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析 .....                                 | 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 ( 548 )                     |
| 桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 .....                                          | 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 ( 558 )          |
| 苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 .....                                   | 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 ( 565 )                       |
| 洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 .....                                 | 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 ( 573 )          |
| 三峡库区消落带水体 CDOM 中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 .....                       | 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 ( 580 )                |
| pH 对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 .....                                    | 王辉,孙波,关小红 ( 588 )                           |
| EDTA 对 Pd/Fe 体系还原脱氯 2,4-D 的影响 .....                               | 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 ( 595 )                      |
| 镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 .....                                        | 王婷,朱春山,胡承志 ( 602 )                          |
| 微生物对砷的氧化还原竞争 .....                                                | 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 ( 609 )              |
| 处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 .....                                     | 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 ( 615 )                  |
| 污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 .....                                        | 景明,王磊 ( 622 )                               |
| 异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 ..... | 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 ( 630 )               |
| 基于新一代测序技术的 A <sup>2</sup> O 与 BIOLAK 活性污泥宏基因组比较分析 .....           | 田美,刘汉湖,申欣 ( 638 )                           |
| 1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 .....                                 | 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 ( 647 )                  |
| 纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究 .....                     | 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 ( 655 )                   |
| 3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性 .....                            | 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 ( 662 )              |
| 合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 .....                                 | 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 ( 668 )              |
| 芦苇秸秆生物炭对水中菲和 1,1-二氯乙烯的吸附特性 .....                                  | 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 ( 680 )                   |
| 芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 .....                                     | 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 ( 689 )             |
| 季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 .....                                       | 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 ( 697 )            |
| 增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 .....                                     | 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 ( 703 )                       |
| 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 .....                              | 王幼奇,白一茹,王建军 ( 710 )                         |
| 不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 .....                                     | 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 ( 717 )                     |
| 紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素 .....                                    | 王强,宋娇艳,曾微,王法 ( 726 )                        |
| 几种修复措施对 Cd 淋失及土壤剖面运移影响 .....                                      | 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 ( 734 )                 |
| 河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 .....                           | 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 ( 740 )           |
| 湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响 .....                                | 罗鹏程,李航,王曙光 ( 750 )                          |
| 溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 .....                                             | 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 ( 756 )                     |
| 自组装哑铃状 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 .....     | 黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 ( 765 )      |
| 盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及 N <sub>2</sub> O 产生的影响 .....                | 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 ( 775 )                   |
| 污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例 .....                             | 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 ( 782 )               |
| 《环境科学》征订启事 (557) 《环境科学》征稿简则 (594) 信息 (419,442,781)                |                                             |

# 湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响

罗鹏程<sup>1</sup>, 李航<sup>1</sup>, 王曙光<sup>1,2\*</sup>

(1. 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029; 2. 北京市高等学校环境污染控制与资源化工程研究中心, 北京 100029)

**摘要:** 湿生植物在城市景观绿化和美化中应用越来越多,但也经常遭遇环境污染胁迫的问题。大量研究证实丛枝菌根 (AM) 可提高陆生植物耐受环境污染胁迫的能力,但对湿生植物的影响却鲜有认识。通过水培实验,探索接种 AM 真菌 (*Glomus etunicatum*) 对香蒲 (*Typha latifolia*) 耐受  $\text{Cd}^{2+}$  (0、2.5、5.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 胁迫的影响,旨在为评估菌根技术能否用于提高湿生植物抗耐环境污染胁迫的能力提供参考。结果表明,在湿生环境中 AM 真菌可与香蒲建立良好的共生关系,侵染率高于 30%,但菌根化香蒲移入水溶液 1 个月后侵染率均呈下降趋势,最大下降 25.5% ( $P < 0.05$ )。AM 增加了香蒲子叶的色素含量和 POD 酶活性,提高了根系的泌氧速率,但仅显著促进了 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$  下香蒲的生长。虽然高浓度  $\text{Cd}^{2+}$  抑制了香蒲的生长且侵染率下降,但 AM 仍能促进两个  $\text{Cd}^{2+}$  浓度下香蒲对 Cd 的吸收,地上、地下部 Cd 含量最大增加 40.24% 和 56.52%。本研究表明,AM 具有增强湿生植物抗耐和修复环境重金属污染的潜力。

**关键词:** 香蒲; 丛枝菌根 (AM); Cd; 湿生环境; 菌根侵染率

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0750-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.02.046

## Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment

LUO Peng-cheng<sup>1</sup>, LI Hang<sup>1</sup>, WANG Shu-guang<sup>1,2\*</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Research Center for Environmental Pollution Control and Resource Engineering in Beijing City, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Hygrophytes are planted more and more in landscaping and greening in many cities, but they often encounter threat from environmental pollution. Arbuscular mycorrhiza (AM) have been confirmed to enhance the tolerance of terrestrial plants to environmental pollution in many previous studies, but it is unclear how they affect hygrophytes. In the present study, a hydroponic culture experiment was carried out to investigate the effects of AM fungi (*Glomus etunicatum*) inoculation on the tolerance of cattail (*Typha latifolia*) to different concentrations  $\text{Cd}^{2+}$  (0, 2.5, 5.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). The aim was to provide reference for evaluating whether mycorrhizal technology can be used to enhance the tolerance of hygrophytes to environmental pollution. The results showed that symbiotic association was well established between AM fungi and cattail roots, and the mycorrhizal colonization rates (MCR) were beyond 30%. However, MCR presented downward trend one month after mycorrhizal cattails were transported to solution, and the maximal decrease was 25.5% ( $P < 0.05$ ). AM increased pigment concentrations and peroxidase (POD) activity in cattail leaves, and also increased roots radial oxygen loss. However, AM only produced significant effect on increase of fresh weight in 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$  solution. Although plant growth was inhibited by 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$  and MCR was lower, AM increased Cd uptake of cattail at the two  $\text{Cd}^{2+}$  levels, and the maximal increments were 40.24% and 56.52% in aboveground and underground parts, respectively. This study indicates that AM has potential to enhance the tolerance of hygrophytes to environmental pollution and might be used to remedy heavy metal pollution.

**Key words:** cattail; arbuscular mycorrhiza; Cd; aquatic environment; mycorrhizal colonization rate

随着我国城镇化的快速推进和人们对环境质量要求的提高,城市景观美化和环境污染治理需求越来越大。湿生植物兼具景观绿化、美化和环境污染净化的多重作用,因此,应用量急剧增加。然而,由于土壤或水体污染、土壤质地差(如建筑垃圾、贫瘠土壤)、病虫害等问题<sup>[1,2]</sup>,湿生植物应用过程中经常遇到长势差、外观差、功能差等问题,不但增加使用和养护成本而且难以达到预期目的。如何增强湿生植物对上述环境的适应和耐受能力成为有效发挥湿生植物功能和作用的关键。

众所周知,丛枝菌根 (AM) 真菌可促进陆生宿主植物的生长,增强宿主植物的抗逆和耐污染胁迫能力,并在贫瘠土壤植被恢复、污染土壤修复等方面显示出良好应用前景<sup>[3~5]</sup>。近几年的调查发现,湿生环境中不仅有丰富的 AM 真菌孢子,而且可侵染多种湿生植物根系形成 AM 共生结构<sup>[6~8]</sup>,但该

收稿日期: 2015-08-23; 修订日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201528)

作者简介: 罗鹏程 (1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境微生物, E-mail: 514301414@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: shgwang2013@126.com

AM 是否具有类似陆生植物 AM 的功能还不清楚. 目前,有少量湿生植物 AM 功能的研究主要集中在对植物生长和矿质养分吸收两个方面,但还没有一致的结论,如对植物生长无影响<sup>[6,9]</sup>、抑制<sup>[10]</sup>或促进<sup>[11,12]</sup>;对湿生植物吸收磷素有促进作用<sup>[9,13,14]</sup>,但对吸收氮素却有促进<sup>[15]</sup>或抑制<sup>[16]</sup>的报道.也有少许研究关注了 AM 对湿生植物水污染净化、耐污染胁迫等的影响<sup>[8,17,18]</sup>,但由于数量有限,还难以得出有价值的结论,无法评估 AM 对湿生植物抗耐环境污染胁迫的影响.基于增强湿生植物抗污染能力的巨大需求,很有必要开展 AM 对湿生植物耐环境污染胁迫影响的研究.

镉(Cd)是污染环境中最常见的重金属之一,对生物毒害作用较大.本研究以幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*)为供试 AM 真菌,以香蒲(*Typha latifolia*)为宿主植物,以 Cd 为目标污染物,考察水培条件下 AM 对香蒲生长和重金属吸收等的影响,以期评估菌根技术能否增强湿生植物抗耐环境污染胁迫的能力提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试植物

香蒲(*Typha latifolia*)幼苗取自北京冬夏园艺场(通州区宋家庄镇)湿生植物苗木基地.选取大小接近的香蒲苗(15 cm 左右),先将其根状茎剪成大小接近的三角形,每个三角形根状茎上保留 2 个约 4 cm 长的小根,以减少土著 AM 真菌对根系侵染的影响,然后将修理过的香蒲苗栽种到装有灭菌河沙、淹水 10 cm 的塑料盆(直径 50 cm),生长适应 2 周后,再次从中选取大小接近、长势良好的香蒲苗作为实验用苗,在河沙中完成 AM 真菌侵染过程.

### 1.2 AM 真菌

根据之前的实验结果<sup>[7]</sup>,选用幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*)为供试 AM 真菌,菌剂为外生菌丝、孢子和根段组成的复合体.将筛选出来的香蒲苗接种 AM 真菌,AM 菌剂接种量为基质重量的 7%,混合方式接种,不接种对照加等量的灭菌菌剂.沙培时间为 30 d.

### 1.3 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度

$\text{Cd}^{2+}$  浓度为 0、2.5、5.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (以  $\text{Cd}^{2+}$  计,以  $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$  形态加入).将目标质量的  $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$  加入修正后的 Hogland 营养液(磷浓度降低 50%,其它成分浓度不变),充分混匀后倒入 2 L 带盖塑料盆中,将香蒲移入培养液中,放在自然光照

环境下生长,持续时间为 30 d.期间每天补充损失的营养液,每周更换一次含  $\text{Cd}^{2+}$  新营养液.

### 1.4 实验处理

实验共设 6 个处理,即 3 个  $\text{Cd}^{2+}$  浓度(0、2.5、5.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和 2 个 AM 真菌处理(接种和不接种),每个处理 4 个重复.接种 AM 真菌 30 d 后,部分香蒲苗根系用于测定菌根侵染率,其他幼苗称量湿重后移入含不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  的 Hogland 营养液,每盆移入 1 株香蒲苗.实验于 2013 年 6 月在户外自然光照条件下进行,30 d 后结束实验,于实验结束前 1 d,测试根系泌氧速率.收获实验后,先将香蒲根系浸泡在去离子水中 24 h,并间隔性轻轻摇动和更换去离子水,以除去根系上吸附的  $\text{Cd}^{2+}$ .然后称量总鲜重,部分根系用于菌根侵染率测定,部分叶子用于叶绿素、POD 活性的测定,剩余的香蒲地上、地下部烘干用于重金属 Cd 含量的测定.

### 1.5 分析方法

菌根侵染率测定采用曲利苯蓝染色-交叉划线法<sup>[19]</sup>,根系泌氧速率测定采用柠檬酸钛分光光度法<sup>[20]</sup>,POD 活性测定采用愈创木酚法<sup>[21]</sup>,叶绿素测定采用丙酮提取-分光光度法,植物 Cd 含量测定采用 ICP-OES 法.

### 1.6 统计方法

不同处理间差异的显著性用 SPSS 13.0 软件进行统计分析, $P < 0.05$  表示差异显著.

## 2 结果与分析

### 2.1 菌根侵染率

由图 1 可见,接种 AM 真菌 1 个月后香蒲根系的菌根侵染率超过 30%,表明 AM 真菌与香蒲建立了良好的共生关系.但移入溶液 1 个月后,无论是否存在  $\text{Cd}^{2+}$  污染,菌根侵染率均比移栽前不同程度地下降,最大下降 25.5%. $\text{Cd}^{2+}$  浓度的增加并没有显著影响菌根侵染率,可能与该菌耐 Cd 胁迫能力较强或  $\text{Cd}^{2+}$  浓度不够高有关.未接种处理由于部分幼苗根系被土著 AM 真菌侵染,发现个别根系有较低(<3%)侵染率,但由于侵染率远低于接种处理,故忽略不计.

### 2.2 生物量

由于在沙培中建立 AM 共生结构期间,菌根化和非菌根化香蒲在生物量上已表现出一些差异,为了准确反映 AM 对  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫下植物生长的影响,选用了鲜重增加量作为评价指标,即实验结束时的植物鲜重与移栽溶液前的鲜重差值.如图 2 所示,未

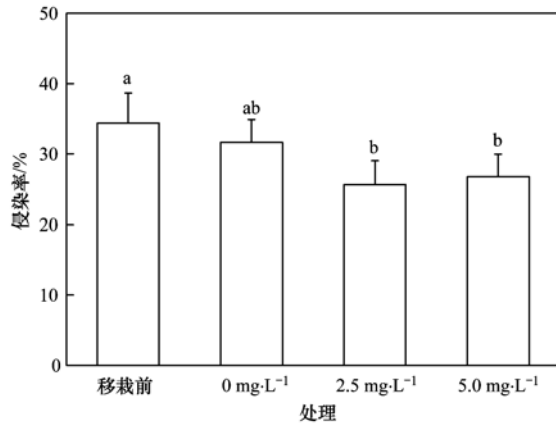
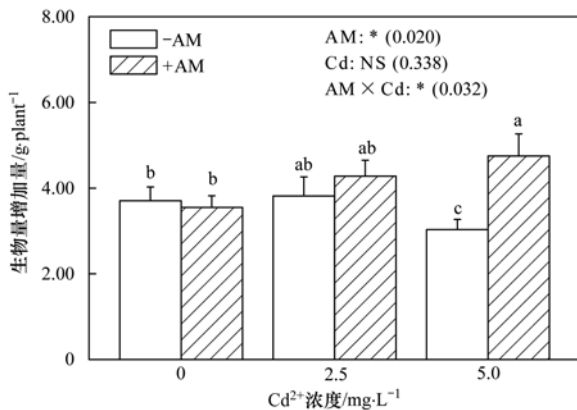


图1 香蒲菌根侵染率的变化

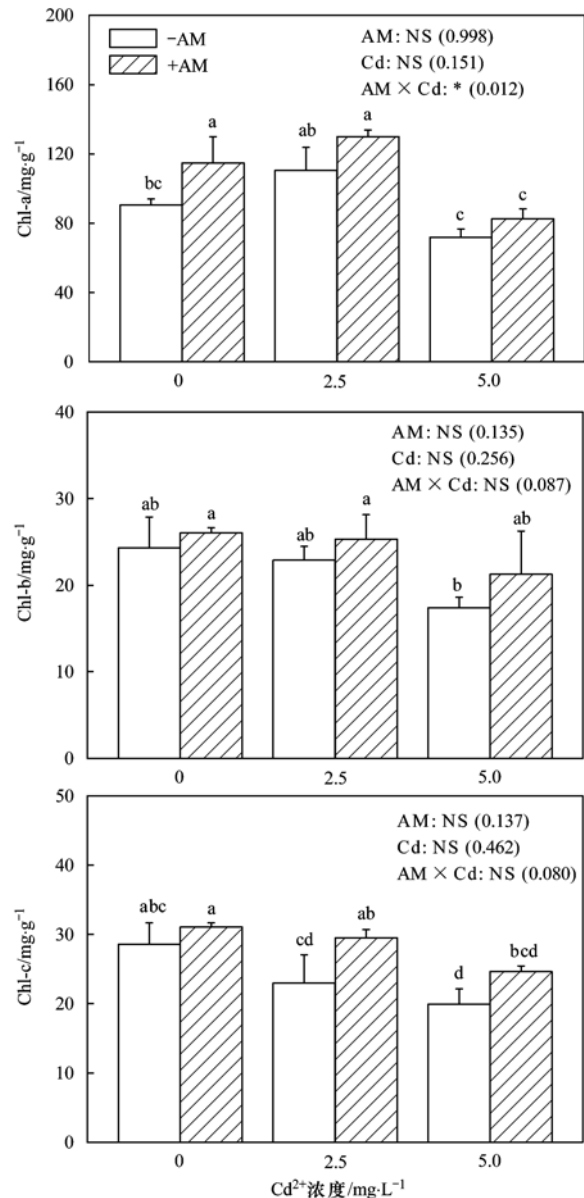
Fig. 1 Change of mycorrhizal colonization rate in cattail root

接种 AM 真菌时,香蒲生物量仅在  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  时显著下降,表明该浓度对香蒲生长产生了明显胁迫. 接种 AM 真菌并没使 0 和  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  时的香蒲生物量显著增加,但却明显促进了  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  时香蒲的生长,比不接种增加 56.7%,表明  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫明显存在时 AM 可促进宿主植物的生长. 统计分析结果显示,AM 和 Cd 处理间存在交互影响,这与  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫导致的生物量下降和 AM 导致的生物量增加有关.

图2 不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  溶液中 AM 对香蒲生物量增加量的影响Fig. 2 Effects of AM on the increment of cattail biomass in solution with different  $\text{Cd}^{2+}$  concentrations

### 2.3 叶绿素

从图 3 可以看出,未接种 AM 真菌时,随  $\text{Cd}^{2+}$  浓度的增加 3 种叶绿素含量总体呈下降趋势,特别是  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  影响相对较大. 接种 AM 真菌后,不管是否存在  $\text{Cd}^{2+}$ ,与未接种相比 3 种色素含量都得到了不同程度的提高,虽然只有部分差异达显著水平,但结合香蒲生物量的变化(图 2),可判断 AM 对提高湿生植物的光合作用有积极意义. 统计分析结果表明,除 AM 和  $\text{Cd}^{2+}$  对 Chl-a 有显著交互影响

图3 不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  溶液中 AM 对香蒲色素含量的影响Fig. 3 Effects of AM on pigment contents of cattail in solution with different  $\text{Cd}^{2+}$  concentrations

外,其他不存在显著的单因素或交互影响.

### 2.4 POD 酶活性

POD 酶可参与植物光合作用、呼吸作用等过程,可保护或减轻植物受到的胁迫,对植物抗耐环境胁迫有积极意义. 从图 4 可以看出,不管是否存在  $\text{Cd}^{2+}$ ,POD 活性均在  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  时活性最高,这是由于该酶是诱导酶,适当的胁迫可刺激 POD 的活性,对植物起到保护作用,但当胁迫达到一定强度后,POD 活性会急剧下降,所以  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  时 POD 活性反而较低. 不管是否存在  $\text{Cd}^{2+}$ ,接种 AM 真菌都提高了 POD 活性,虽然仅在  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  时达到显著水平,但表明接种 AM 真菌具有提

高湿生植物基础 POD 酶活性和胁迫存在时 POD 潜在诱导活性的可能, 这对植物抗耐环境胁迫有积极意义. 统计分析结果表明, AM 和  $\text{Cd}^{2+}$  对 POD 活性有显著的单因素和交互影响.

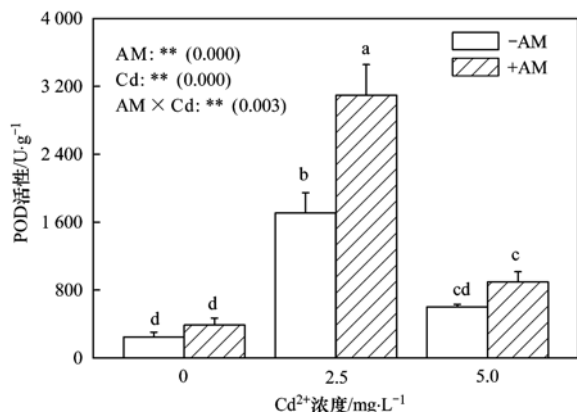


图 4 不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  溶液中 AM 对香蒲 POD 酶活性的影响

Fig. 4 Effects of AM on POD activity of cattail in solution with different  $\text{Cd}^{2+}$  concentrations

## 2.5 泌氧速率

泌氧速率是很多湿生植物的独有特征, 对植物适应厌氧或低氧环境有非常重要的作用. 对 AM 真菌来说, 湿生植物的泌氧速率可能更为重要, 其将影响 AM 真菌侵染湿生植物根系所需的氧化还原电位. 从图 5 可以看出, 未接种 AM 真菌时,  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$  对根系泌氧速率没显著影响, 但  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$  却导致泌氧速率显著下降, 这可能与  $\text{Cd}^{2+}$  对植物根系的伤害有关. 不管  $\text{Cd}^{2+}$  是否存在, 接种 AM 真菌都显著提高了香蒲根系的泌氧速率, 分别增加 25.2%、13.2% 和 29.8%, 这可能与根系内外生菌丝的存在促进了氧气向外的扩散有关.

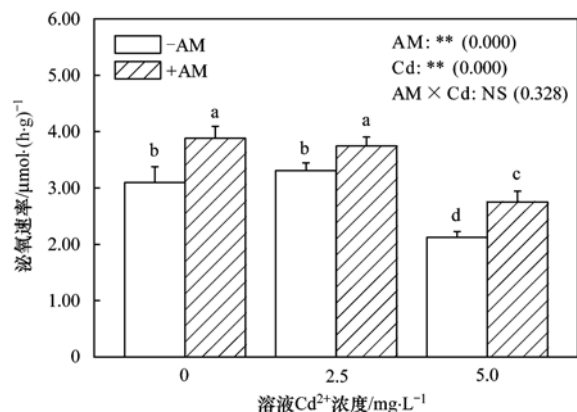


图 5 AM 对不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  下香蒲根系泌氧速率的影响

Fig. 5 Effects of AM on rate of roots radial oxygen loss of cattail in solution with different  $\text{Cd}^{2+}$  concentrations

## 2.6 Cd 吸收与分配

在未添加  $\text{Cd}^{2+}$  的处理中, 未在植物体内检测到

Cd 的存在. 在添加  $\text{Cd}^{2+}$  的处理中, 未接种 AM 真菌时, 香蒲地上和地下部 Cd 含量并没有随着溶液中  $\text{Cd}^{2+}$  浓度的增加而增加, 反而显著下降 ( $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 或呈下降趋势 ( $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) (图 6), 后者可能是由于  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$  导致植物根系受到伤害, 吸收能力下降. 接种 AM 真菌后香蒲地上、地下部 Cd 含量均得到不同程度的提高, 地上部 Cd 含量分别增加了 3.31% 和 40.24%, 地下部分别增加了 56.52% 和 25.21%, 表明即使在根系受损情况下, AM 仍具有促进植物吸收 Cd 的潜力, 这对水污染治理有积极意义.

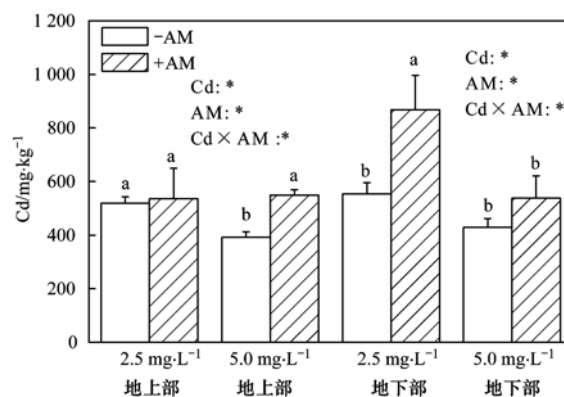


图 6 AM 对不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  下香蒲地上及地下  $\text{Cd}^{2+}$  含量的影响

Fig. 6 Effects of AM on  $\text{Cd}^{2+}$  contents in aboveground and underground parts of cattail in solution with different  $\text{Cd}^{2+}$  concentrations

## 3 讨论

### 3.1 AM 真菌对香蒲根系的侵染

AM 发挥作用的前提是 AM 真菌对宿主植物的有效侵染. 对于湿生生境来说, 氧含量 (或氧化还原电位) 和 AM 真菌与根系的有效接触是两个非常关键的影响因素. 有报道指出, 湿生植物根系所处基质氧化还原电位高于 250mV 才可形成 AM 结构<sup>[22]</sup>, 本研究发现香蒲形成 AM 后根系泌氧速率明显提高 (图 5), 这将改善根际氧含量和氧化还原电位, 有利于 AM 真菌的繁殖 (菌丝和孢子) 和对新生根系的侵染. 由于 AM 菌丝、孢子质量较小, 在淹水的湿生环境中, 与根系有效接触比较困难, 尤其对浮水植物来说难度更大, 本实验采用侵染好的植物不存在这个问题. 溶液中培养 1 个月后的侵染率下降, 可能与以下原因有关: ①新生根系与 AM 真菌菌丝、孢子等有效接触不够; ②更换培养液时扰断部分外生菌丝, 并使外生菌丝、孢子随废液流失; ③植物由河沙基质换成营养液, 淹水深度增加, 氧化

还原电位下降,这在笔者之前的研究中已经予以证实<sup>[7]</sup>.

虽然  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  影响了香蒲的生长(图2),但与  $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$  比并没有明显降低菌根侵染率,这与之前的一些陆生植物研究结果并不一致,如田野等<sup>[23]</sup>发现  $\text{Cd}^{2+}$  浓度明显降低 AM 真菌 *Glomus mosseae* 对黑麦草的侵染. 这可能与该菌对  $\text{Cd}^{2+}$  不敏感或  $\text{Cd}^{2+}$  浓度不够高有关. 有关重金属对菌根侵染率的影响在陆生环境中已经进行了很多研究,证实来源不同的 AM 真菌对重金属敏感性差异很大<sup>[4,24]</sup>.

### 3.2 香蒲 AM 的功能

接种 AM 真菌后,不管胁迫是否存在,香蒲叶片色素含量(图3)、POD 酶活性(图4)都得到了增加,表明 AM 对提高湿生植物光合作用、增强植物的耐污染胁迫能力有积极作用,这与 AM 对陆生植物的影响类似<sup>[4]</sup>. 但上述作用并没有促进无  $\text{Cd}^{2+}$  条件下香蒲的生长(图2),可能是因为培养液中富含植物生长所需的各种营养元素,AM 虽能对植物生理生态产生部分影响,但在生物量上表现不出具体变化. 在  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫明显存在时( $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),AM 对香蒲生长的促进作用较为明显地体现出来,差异达到显著水平,这是因为 AM 对宿主植物的影响不仅是通过营养状况,还包括基因调控、次生物质、污染物吸收调控等,当胁迫存在影响植物对养分的吸收时,AM 的功能便得以体现<sup>[4]</sup>.

AM 提高了香蒲地上和地下部的 Cd 含量,特别是在植物根系受到  $\text{Cd}^{2+}$  伤害的情况下,AM 仍能促进植物生长,增加对 Cd 的吸收,这对重金属污染修复来说有重要意义. AM 促进植物对重金属的吸收,又能使植物忍受重金属的毒害,相关影响机制在陆生植物上已得到了较好解析<sup>[4,25]</sup>,如菌丝、细胞壁对重金属的吸附和固定,AM 真菌对植物生理生态过程的改变,使菌根化植物有了更强的重金属耐受能力. 此外,李光辉等<sup>[26]</sup>发现湿地植物对废水及底泥中重金属的吸收积累能力在相当大的程度上取决于其根系的泌氧能力,而本研究证实 AM 能显著提高香蒲的泌氧能力,表明这可能也是 AM 促进香蒲吸收重金属的机制之一. 但本结果与 Zheng 等<sup>[8]</sup>的结果相反,他们发现 AM 真菌降低了芦苇(*Phragmites australis*)对重金属的吸收,这可能与宿主植物、实验基质条件等有关. 除了本研究中涉及的重金属胁迫,曹明竹等<sup>[18]</sup>还发现 AM 可缓解阿特拉津对芦苇生长和生理的胁迫,这些都表明,AM 对

增强湿生植物的抗污染胁迫能力有很大的潜力. 当然,由于研究数量和深度有限,有关影响因素、影响机制还不清楚,面对环境中普遍存在的复合污染,这种植物-微生物协同机制是否还能发挥作用,还需要开展更多的研究予以证实.

## 4 结论

(1) AM 真菌能在淹水条件下完成对香蒲的侵染,侵染率超过 30%,但移入培养液后菌根侵染率呈不同程度的下降趋势. 本研究中两个水平的  $\text{Cd}^{2+}$  均没降低侵染率.

(2) AM 提高香蒲叶片色素含量和 POD 酶活性,提高根系泌氧速率,促进  $\text{Cd}^{2+}$  ( $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 胁迫下香蒲的生长,但对无  $\text{Cd}^{2+}$  和低  $\text{Cd}^{2+}$  ( $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 溶液中香蒲没有显著促生长作用.

(3) AM 可促进香蒲对 Cd 的吸收,特别是在香蒲生长受到抑制时仍能促进其对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸收.

致谢:感谢北京冬夏园艺场为本实验提供香蒲和其他湿生植物苗木,并在栽培技术上给予指导.

### 参考文献:

- [1] 张超兰, 陈文慧, 韦必幅, 等. 几种湿地植物对重金属镉胁迫的生理生化响应[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1458-1461.
- [2] 宁静, 鲁敏, 裴翡翠, 等. 人工湿地植物受污水胁迫存在的问题与解决对策[J]. 山东建筑大学学报, 2011, 26(2): 149-152.
- [3] Leung H M, Wang Z W, Ye Z H, et al. Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: a review[J]. Pedosphere, 2013, 23(5): 549-563.
- [4] Garg N, Bhandari P. Cadmium toxicity in crop plants and its alleviation by arbuscular mycorrhizal (AM) fungi: An overview[J]. Plant Biosystems, 2014, 148(4): 609-621.
- [5] Willis A, Rodrigues B F, Harris P J C. The Ecology of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2013, 32(1): 1-20.
- [6] Stevens K J, Wellner M R, Acevedo M F. Dark septate endophyte and arbuscular mycorrhizal status of vegetation colonizing a bottomland hardwood forest after a 100 year flood[J]. Aquatic Botany, 2010, 92(2): 105-111.
- [7] 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光. 淹水时长对 3 种丛枝菌根(AM)真菌侵染 2 种湿地植物的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 263-270.
- [8] Zheng S, Wang C, Shen Z, et al. Role of extrinsic arbuscular mycorrhizal fungi in heavy metal-contaminated wetlands with various soil moisture levels[J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(3): 208-214.
- [9] 郭江源, 郭伟, 毕娜, 等. 丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1481-

- 1488.
- [10] Dunham R M, Ray A M, Inouye R S. Growth, physiology, and chemistry of mycorrhizal and nonmycorrhizal *Typha latifolia* seedlings[J]. Wetlands, 2003, **23**(4): 890-896.
- [11] Fraser L H, Feinstein L M. Effects of mycorrhizal inoculant, N: P supply ratio, and water depth on the growth and biomass allocation of three wetland plant species[J]. Canadian Journal of Botany, 2005, **83**(9): 1117-1125.
- [12] Neto D, Carvalho L M, Cruz C, *et al.* How do mycorrhizas affect C and N relationships in flooded *Aster tripolium* plants? [J]. Plant and Soil, 2006, **279**(1): 51-63.
- [13] Likar M, Regvar M, Mandic-Mulec I, *et al.* Diversity and seasonal variations of mycorrhiza and rhizosphere bacteria in three common plant species at the Slovenian Ljubljana Marsh [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, **45**(6): 573-583.
- [14] Radhika K P, Rodrigues B F. Arbuscular mycorrhizae in association with aquatic and marshy plant species in Goa, India [J]. Aquatic Botany, 2007, **86**(3): 291-294.
- [15] Solaiman M Z, Hirata H. Glomus-wetland rice mycorrhizas influenced by nursery inoculation techniques under high fertility soil conditions [J]. Biology and Fertility of Soil, 1998, **27**(1): 92-96.
- [16] Stevens K, Spender S, Peterson R. Phosphorus, arbuscular mycorrhizal fungi and performance of the wetland plant *Lythrum salicaria* L. under inundated conditions[J]. Mycorrhiza, 2002, **12**(6): 277-283.
- [17] 李世阳. 芦苇菌根真菌依赖性及其联合环境修复功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [18] 曹明竹, 王立, 马放, 等. 丛枝菌根真菌对阿特拉津胁迫下芦苇生长及生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, **43**(17): 138-141.
- [19] McGonigle T P, Miller M H, Evans D G, *et al.* A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi [J]. New Phytologist, 1990, **115**(3): 495-501.
- [20] 刘志宽, 牛快快, 马青兰, 等. 8 种湿地植物根部泌氧速率的研究[J]. 贵州农业科学, 2010, **38**(4): 47-50.
- [21] 张巍巍, 郑飞翔, 王效科, 等. 大气臭氧浓度升高对水稻叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(11): 2485-2489.
- [22] Beck-Nielsen D, Madsen T V. Occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhiza in aquatic macrophytes from lakes and streams[J]. Aquatic Botany, 2001, **71**(2): 141-148.
- [23] 田野, 张会慧, 孟祥英, 等. 镉(Cd)污染土壤接种丛枝菌根真菌(*Glomus mosseae*)对黑麦草生长和光合的影响[J]. 草地学报, 2013, **21**(1): 135-141.
- [24] Pawlowska T E, Charvat I. Heavy-metal stress and developmental patterns of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70**(11): 6643-6649.
- [25] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理[J]. 生态学报, 2013, **33**(13): 3898-3906.
- [26] 李光辉, 何长欢, 刘建国. 不同湿地植物的根系泌氧作用与重金属吸收[J]. 水资源保护, 2010, **26**(1): 17-20.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Editor's comment .....                                                                                                                                                                                                                 | ( 403 )                                                            |
| Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China .....                                                                                                                                                                        | WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> ( 404 )      |
| Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution .....                                                                                                                                   | WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng ( 413 )                    |
| Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010 .....                                                                                                                            | HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming ( 420 )                 |
| Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Guanzhong Area .....                                                                                                               | TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> ( 427 )   |
| Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS .....                                                                                                                                             | LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> ( 434 )   |
| Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District .....                                                                                                           | YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> ( 443 ) |
| Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area .....                                                                                                                     | MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 452 )     |
| Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing .....                                                                                                  | DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> ( 459 )    |
| Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China .....                                                                                                     | ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> ( 466 )       |
| Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha .....                                                                                                                                           | XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> ( 475 )    |
| Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau .....                                                                                                                                   | SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> ( 482 )        |
| Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet .....                                                                                                                                        | GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> ( 490 )          |
| Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika .....                                                                                      | YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu ( 499 )                            |
| Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang .....                                                                                                                           | SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> ( 507 )    |
| Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China .....                                                                                           | ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> ( 513 )      |
| Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch .....                                                                                                                                                  | LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> ( 520 )      |
| Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed .....                                                                                                                                | WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> ( 527 )     |
| Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province .....                                                                                | HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> ( 534 )              |
| Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake .....                                                                                                                                                  | XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> ( 542 )   |
| Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China .....                                                                                                   | PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> ( 548 )       |
| Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay .....                                                                                                                                | ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> ( 558 )       |
| Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou .....                                                                                                                  | LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> ( 565 )             |
| Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors .....                                                                                                            | LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> ( 573 ) |
| Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible ( UV-Vis ) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter ( CDOM ) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas ..... | JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> ( 580 )         |
| Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate .....                                                                                                                                                                | WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong ( 588 )                           |
| Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe .....                                                                                                                                                                | ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> ( 595 )       |
| Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property .....                                                                                                                                                 | WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi ( 602 )                     |
| Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic .....                                                                                                                                                                         | YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 609 ) |
| Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland( SSFCW ) for Processing of Aquaculture Waster Water .....                                                                                         | ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> ( 615 )    |
| Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria .....                                                                                                           | JING Ming, WANG Lei ( 622 )                                        |
| Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02 .....                                              | SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> ( 630 )            |
| Comparative Metagenomics of BIOLAK and A <sup>2</sup> O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology .....                                                                                                          | TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin ( 638 )                             |
| Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment .....                                                                             | SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> ( 647 )    |
| Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe .....                                                                                                                  | SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> ( 655 )          |
| Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water .....                                                                                                                | XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> ( 662 )        |
| Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions .....                                                                                                                 | FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> ( 668 )      |
| Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions .....                                                                                                                     | WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> ( 680 )      |
| Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge .....                                                                                                                               | ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> ( 689 )   |
| Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period .....                                                                  | LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> ( 697 )           |
| Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland .....                                                                                                                      | CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> ( 703 )            |
| Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City .....                                                                                                                   | WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu ( 710 )                       |
| Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas .....                                                                                | ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> ( 717 )                |
| Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil .....                                                                                                                              | WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> ( 726 )         |
| Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies .....                                                                                              | LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> ( 734 )    |
| Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province .....                                                                  | WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> ( 740 )           |
| Effect of Arbuscular Mycorrhiza ( AM ) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment .....                                                                                                                               | LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang ( 750 )                    |
| Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms .....                                                                                                                                                                              | WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 756 )  |
| Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls .....                                                         | HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> ( 765 )      |
| Impact of Salinity on Leachate Treatment and N <sub>2</sub> O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor .....                                                                                                                  | LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 775 )      |
| Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method .....                                                                             | DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> ( 782 )    |

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行