

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)

2015年北京大气VOCs时空分布及反应活性特征 张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)

北京市建筑类涂料VOCs排放清单编制技术方法及应用 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)

基于实测的建筑类涂料挥发性有机物(VOCs)含量水平及组分特征 高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)

2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)

北京市大气环境PM_{2.5}和PM₁₀及其碳质组分季节变化特征及来源分析 樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)

南京春季北郊地区大气PM_{2.5}中主要化学组分及碳同位素特征 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)

热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物 马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)

杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系 王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)

基于远程通讯技术的混动公交车SCR系统运行及NO_x排放特征 杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)

基于环境风险排序的流域优先污染物筛选 李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)

重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)

黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征 宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)

脱甲河水系N₂O关键产生过程及氮素来源探讨 赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)

生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响 王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)

黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复 史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)

城市黑臭水体的吸收特性分析 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)

岷江上游水体中DOM光谱特征的季节变化 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)

防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征 林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)

基于δ¹⁵N和δ¹⁸O的农业区地下水河硝酸盐污染源 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)

垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征 彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)

铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为 梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)

基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)

AAO工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性 李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)

抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除 李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)

磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧氨氧化菌对废水氨氮去除的影响 刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)

海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能 杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)

低温下A²/O-BAF反硝化除磷脱氮特性 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)

O₃-BAC深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析 张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)

基于MBR不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)

3种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)

硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制 张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)

包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析 杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)

中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)

典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)

秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)

不同肥料施用对设施蔬菜地NH₃挥发和N₂O排放的影响 山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)

施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)

长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响 王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)

典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征 陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)

凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)

天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)

水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响 万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)

窖水中微生物降解污染物的关键细菌 杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)

砷氧化菌对胡敏酸络合As(III)的氧化作用 李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)

海域高温油田1株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制 杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)

1株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌Zobellella sp. B307的分离及脱氮特性 白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岩然 (4793)

1株镰刀菌属KY123915的分离及其对17β-雌二醇的降解特性 吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)

氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响 李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)

林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析 任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)

DEP对蚯蚓抗氧化酶系的影响及DNA损伤 平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)

生活垃圾焚烧飞灰矿物学特性及重金属分布 李建陶, 曾鸣 (4834)

《环境科学》征订启事(4429) 《环境科学》征稿简则(4471) 信息(4529, 4777, 4816)

黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复

史广宇^{1,2}, 李中义¹, 张路², 程媛媛¹, 陈宏伟³, 施维林^{1*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 苏州科技大学化学生物与材料工程学院, 苏州 215009)

摘要: 探讨了黑麦草对水体中镉-壬基酚 (Cd-NP) 复合污染的生理响应及修复作用。结果表明, 单一 Cd 污染情况下, 高浓度 Cd²⁺ (10 mg·L⁻¹) 对黑麦草的生物量和叶绿素含量均有显著的抑制作用, 植株过氧化物酶 (POD) 和多酚氧化酶 (PPO) 活性显著增大。单一 NP 污染情况下, 黑麦草的生物量、叶绿素含量和 MDA 含量均无显著性变化; 高浓度 NP (5 mg·L⁻¹) 存在下, 植株 POD 活性显著增大。当黑麦草受到复合污染胁迫时, 高浓度 NP 的加入降低了 Cd 的抑制作用, 使黑麦草的 MDA 含量有所回落, 植株 PPO 活性有所下降。Cd²⁺ 浓度为 1 mg·L⁻¹ 时, 黑麦草对 Cd²⁺ 有较好的去除效果, 12 h 的去除率达到了 55.3%。吸收时间超过 12 h, 高浓度 NP 对黑麦草吸收 Cd²⁺ 有较显著的促进作用。NP 浓度对植株地下部分 Cd²⁺ 吸收量有极显著影响, 转移系数随着 NP 浓度增大而呈现上升趋势。NP 浓度为 5 mg·L⁻¹ 时, 黑麦草对 NP 的吸收效果较好, 24 h 的吸收率为 44.6%。低浓度 Cd²⁺ 的加入对黑麦草去除 NP 无显著性影响, 而高浓度 Cd²⁺ 的加入对黑麦草吸收和降解 NP 均有极为显著的抑制作用。

关键词: 黑麦草; 壬基酚; 镉; 生理响应; 植物修复

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4512-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201712234

Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects

SHI Guang-yu^{1,2}, LI Zhong-yi¹, ZHANG Lu², CHENG Yuan-yuan¹, CHEN Hong-wei³, SHI Wei-lin^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. School of Chemistry, Biology and Materials Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Physiological responses of ryegrass in cadmium-nonylphenol (Cd-NP) co-contaminated water, as well as the phytoremediation effect were studied under laboratory conditions. The experiment revealed that the biomass and chlorophyll content of ryegrass significantly declined at high concentrations of Cd²⁺ (10 mg·L⁻¹), while POD and PPO activities significantly increased. No significant changes to the biomass, chlorophyll content and MDA of ryegrass were observed in the presence of NP. POD activities significantly increased at high concentrations of NP (5 mg·L⁻¹). The addition of high NP concentrate reduced the inhibition of Cd under co-contaminated stress, the MDA content and PPO activities both reduced. The experiment also revealed that the removal rate of Cd²⁺ by ryegrass reached 55.3% after 12 h. The absorption efficiency was improved by high NP concentration. Absorption efficiency of Cd²⁺ by the subterranean part of the plant significantly increased in presence of NP, and the absorption efficiency increased with the increase of NP concentration. The absorption rate of NP was 44.6% after 24 h at NP concentration of 5 mg·L⁻¹. The removal rate was slightly influenced at low concentrations of Cd²⁺, but significant inhibition of absorption and degradation was observed at high concentrations of Cd²⁺.

Key words: ryegrass; nonylphenol; Cd; physiological responses; phytoremediation

壬基酚 (nonylphenol, NP) 属于典型的酚类内分泌干扰物, 是壬基酚聚氧乙烯醚 (NPEOs) 较为稳定的降解产物之一, 后者是目前全球广泛应用的一类非离子表面活性剂^[1,2]。大量 NPEOs 通过生活与工业废水的排放、污泥处置、农田灌溉和施肥进入到环境中, 经过微生物降解, 生成了比母体毒性更大、疏水性更强、更难生物降解的 NP^[3,4]。

有研究表明, NP 极易通过污水灌溉或污泥农用的形式进入环境, 一些发达国家污水处理厂中的活性污泥 NP 最高可达到 100 mg·kg⁻¹^[5]。镉 (Cd) 作为工业生产中最为广泛使用的重金属类物质极易

进入环境, 与 NP 形成复合污染^[6,7]。Zhou 等^[8] 在德国的 5 条河流中均检测到 NP 的存在, 同时在该区域内的饮用水中 Cd 的含量达到了 30 μg·L⁻¹。刘清云等^[9] 对珠三角地区典型城市 13 家污水处理厂污泥中 NP 的调查显示, NP 含量范围在 0.45 ~ 65.17 mg·kg⁻¹ 之间。该研究还检测出该 13 家污

收稿日期: 2017-12-28; 修订日期: 2018-03-26

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20150287); 苏州市科技局科技计划项目 (SS201723); 苏州市科技局项目 (SNG201614); 江苏省特色优势学科二期项目

作者简介: 史广宇 (1985 ~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境污染生物技术, E-mail: shigylove@126.com

* 通信作者, E-mail: weilin-shi@163.com

水处理厂污泥样中 Cd 的几何平均值为 $2.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。植物修复通过植物提取吸收、转化分解等方式去除环境中的污染物。近些年,已有学者开始了植物修复环境中复合污染的研究^[10,11]。然而,关于该类研究目前主要集中于多环芳烃等持久性有机污染物与重金属的复合污染控制方面^[12,13],对 NP 与重金属复合污染的研究报道则较少。因此,开展在重金属与 NP 复合污染胁迫下,植物生理响应及修复方面的研究,对阐明植物修复复合污染的机理具有较重要意义。

本文通过水培实验,以 NP 和 Cd 为代表污染物,探讨黑麦草在 Cd 和 NP 复合污染下的生理生化变化以及对两种污染物的吸收和去除效果,以期探明植物抵抗 NP-Cd 复合污染毒性的机制,进而为有机物-重金属复合污染环境的修复提供一定的科学依据。

1 材料与方 法

1.1 实验试剂与材料

1.1.1 实验试剂

NP(纯度 98%)、HPLC 级甲醇购于 Sigma Aldrich 公司;储备液:用色谱纯甲醇溶解,配制成 $1\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液, 4°C 保存待用。 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 购自上海化学试剂厂,为 AR 级。 $1\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 母液由 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶于高纯水得到。

1.1.2 供试植物

宽叶型四倍体一年生黑麦草 (*Lolium multiflorum* Lam), 品种为邦德,其种子购自江苏四季青种业有限公司。前期实验表明,黑麦草对 Cd 和 NP 均有较好的去除能力。

1.2 实验方法

1.2.1 黑麦草的培养

黑麦草种子经 10% H_2O_2 溶液消毒 20 min, 用双蒸水清洗干净后浸种 2 h, 再转移至恒温培养箱中 28°C 下避光催芽。当幼苗达到 2 cm 的时候, 将幼芽移栽到半强度 Hoagland 营养液育苗。培育 1 周后待黑麦草幼苗具有完善的根系时用于实验。

1.2.2 水培实验

将 NP 和 Cd 储备液按比例加入去离子水中, 振荡均匀后, 定容至 300 mL 于 500 mL 烧杯中。Cd²⁺ 与 NP 的最终浓度如表 1 所示, 分别用 NO、NI、Nh 代表 NP 浓度, C0、C1、Ch 代表 Cd²⁺ 浓度。选择生长良好且长势一致的植株, 清洗干净根系后在去离子水中浸泡 10 min, 用滤纸吸干表面水分, 取定量黑麦草放入上述烧杯中, 每个烧杯投放的黑麦草鲜

重保持一致, 约 5.50 ~ 5.60 g, 用定植杯固定, 保持根部充分浸入水中使根系浸于溶液中, 用锡纸包裹瓶壁使溶液和根系避光。该实验在控温控光的装置下进行, 实验过程中及时补充蒸馏水, 以维持液面高度; 定期改变各个烧杯的位置, 以排除环境位置引起的误差, 培养 10 d 后取样分析。

表 1 不同处理中 NP 和 Cd²⁺ 的浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of NP and Cd²⁺ used in different treatments/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

编号	NP	Cd ²⁺	编号	NP	Cd ²⁺
NOC0	0	0	NIc1	0.5	1
NOc1	0	1	NICh	0.5	10
NOCh	0	10	NhC0	5	0
NIC0	0.5	0	NhC1	5	1
			NhCh	5	10

1.2.3 植物生理指标测定

植物叶绿素含量测定采用丙酮提取、分光光度法, 植物丙二醛 (MDA) 含量采用双组分分光光度法, 过氧化物酶活性和多酚氧化酶活性测定均参照卢晓丹^[14]的方法。

1.2.4 NP 对黑麦草吸收 Cd²⁺ 的影响

水培体系中 Cd²⁺ 的浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 向其中加入一定量的 NP 储备液, 使体系中 NP 的最终浓度分别为 0、0.5、5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 每间隔一定时间进行取样, 分别测定水体和植物体内 Cd²⁺ 的含量。

植物对 Cd 的去除率 = (水中 Cd 初始含量 - 水中 Cd 剩余含量) / 水中 Cd 初始含量 × 100%

1.2.5 Cd²⁺ 对黑麦草吸收 NP 的影响

水培体系中 NP 的浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 向其中加入一定量的 Cd²⁺ 储备液, 使体系中 Cd²⁺ 的最终浓度分别为 0、1、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 每间隔一定时间进行取样, 分别测定水体和植物体内 NP 的含量。

1.2.6 Cd 的测定

植物样品: 测定植株中的 Cd 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比 4:1) 法消解, 原子吸收分光光度计测定。

水样: 取 1 mL 水样用 3% 的稀硝酸定容后用原子吸收分光光度法测定 Cd 的含量。

1.2.7 NP 的测定

采用超声波辅助萃取法对水体和植物中的 NP 进行提取。

植物样: 将植物冷冻干燥处理 12 h, 加入 20 mL 乙酸乙酯, 超声萃取 2 次, 移出有机相, 经旋转蒸发器 40°C 蒸发至干。再加入 10 mL 色谱级乙醇, 置于漩涡振荡器上振荡 60 s, 将振荡后的溶液转移至色谱进样瓶。

水样: 用 $5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 调节培养液 pH 为 2.0, 加入等体积的乙酸乙酯, 超声萃取 2 次, 移出有机相, 过无水硫酸钠脱水, 后经旋转蒸发器 40°C 蒸发至干. 再加入 10 mL 色谱级乙醇, 置于漩涡振荡器上振荡 60 s, 将振荡后的溶液转移至色谱进样瓶.

样品采用 GC-MS 检测, 色谱和质谱条件参照 Mariusz Krupinski 的方法^[15], 由于样品浓度较低, 进样时不进行分流处理.

1.3 数据分析

用 Spss 13.0 软件对数据进行统计分析, 结果用平均值 \pm 标准差 (Means \pm SD) 表示.

2 结果与讨论

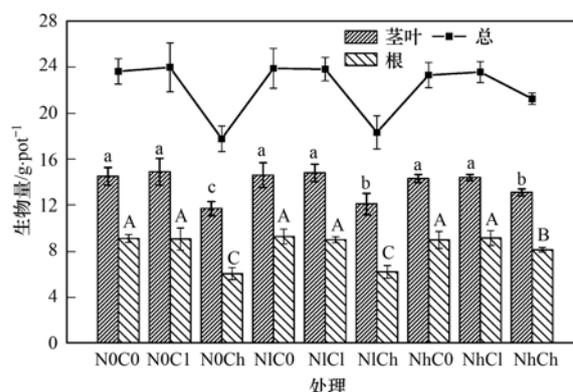
2.1 污染物胁迫对黑麦草生物量的影响

水培 10 d 后, 不同处理条件下黑麦草地上部分(茎叶)、地下部分(根)和完整植株的鲜重变化情况如图 1 所示. 黑麦草地上部分和地下部分的鲜重变化趋势一致. 单一 Cd^{2+} 污染情况下, 低浓度 Cd^{2+} ($1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对黑麦草的生物量无显著性影响 ($P > 0.05$), 而高浓度 Cd^{2+} ($10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对黑麦草的生长有极显著的抑制作用 ($P < 0.01$), 10 d 后黑麦草茎叶和根的生物量分别下降 19.3% 和 33.5%, Cd^{2+} 对黑麦草根部的影响大于茎叶. 在高含量 Cd^{2+} 胁迫下, 黑麦草植株叶片与对照相比均未出现萎蔫变黄迹象. 秦丽等^[16]研究了 Cd 对超累积植物续断菊生长生理的影响, 结果表明, $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 处理下, 续断菊地上部和地下部的生物量显著降低了 73% 和 65%, 上述实验结果表明黑麦草对 Cd 有较好的耐受性. 单一 NP 污染情况下, 黑麦草的生物量随着 NP 加入无显著性变化, 可能原因是 NP 具有雌激素效应, 其对动物的影响更大^[17], NP 在水体中的溶解度仅为 $5.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 不利于植物的吸收和运输, 因此对黑麦草的生物量影响不显著. 当黑麦草受到复合污染胁迫时, 高浓度 NP ($5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的加入降低了 Cd^{2+} 的抑制作用, NhCh 作用下, 黑麦草茎叶和根的生物量与对照组相比仅下降了 9.7% 和 10.8%, 可能是 NP 的加入缓解了 Cd 对黑麦草的毒害作用. 有机物和重金属复合污染环境中, 两者对植物可表现协同、拮抗等作用, Zhang 等^[18]的研究也表明添加菲、苈可缓解 Cd 对灯心草的毒害作用.

2.2 污染物胁迫下黑麦草的生理响应

2.2.1 黑麦草叶绿素和丙二醛含量

叶绿素含量高低将直接影响光合作用的强弱及



数据之间的显著性差异用 Duncan 检验 ($P < 0.05$), 字母不同表示处理间有显著差异, 字母相同表示处理间无显著差异, 下同

图 1 不同处理对黑麦草生长的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on ryegrass growth

物质合成速率的高低, 污染物能通过降低叶绿素的含量、改变叶绿体的超微结构、抑制光合作用的含量, 造成植物生长减慢, 作物产量下降^[19]. 不同处理条件下黑麦草叶片中的叶绿素及丙二醛(MDA)含量变化如图 2 所示. 单一 Cd 污染情况下, 低浓度 Cd^{2+} ($1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的存在对黑麦草的叶绿素含量有较显著的抑制作用 ($P < 0.05$), 而高浓度 Cd^{2+} ($10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对黑麦草的叶绿素含量有极显著的抑制作用 ($P < 0.01$), 10 d 后总叶绿素含量下降 40.1%. 研究表明, 重金属的积累抑制叶绿素酸酐还原酶和影响氨基- γ -戊酮酸的合成, 从而影响叶绿素的生物合成; 同时使叶绿体膜系统在结构上受到破坏, 导致叶绿素总量下降^[20]. 单一 NP 污染情况下, 黑麦草的叶绿素含量随着 NP 加入无显著性变化 ($P > 0.05$). 当黑麦草受到复合污染胁迫时, 其叶绿素变化趋势与差异基本与单一 Cd 污染情况相同, 这一结果进一步说明 NP 的加入对植物叶绿素的影响不大.

MDA 是植物抵抗逆境条件下的产物, 其含量往往能反映植物细胞膜过氧化程度以及植物对逆境条件反应的强弱. 如图 2 所示, 在单一 Cd 胁迫和复合污染条件下, 高浓度 Cd^{2+} ($10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的加入均使黑麦草 MDA 含量显著增加, 与 NOCo 相比, MDA 分别增加了 80.1% (NOCh)、69.9% (NiCh) 和 46.8% (NhCh). 相关研究表明, 重金属胁迫可诱导活性氧产生, 并使植株出现氧化损伤症状, 增加 MDA 含量^[21]. 与叶绿素含量变化趋势相同, 单一 NP 的加入对黑麦草 MDA 无显著性影响, 然而复合污染条件下, $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NP 的加入使黑麦草 MDA 从 0.079 下降到 0.065, 这一结果表明 NP 的加入缓解了 Cd 的毒性, 膜酯过氧化水平有所恢复, 膜系

统的稳定性下降减缓, 植物组织和细胞所受到的伤害减弱。

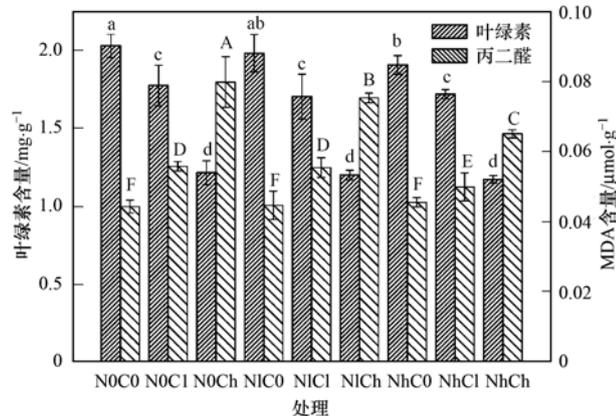


图2 不同处理对黑麦草叶绿素和丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on chlorophyll and MDA in ryegrass

2.2.2 黑麦草体内抗氧化酶活性

大量研究表明, 植物体在污染物胁迫下可产生大量活性氧自由基^[22,23]. 植物过氧化物酶(POD)可将植物体内过氧化氢催化为氧气和水, 从而降低过氧化氢的含量, 酶的活性与植物体内过氧化氢浓度有关^[24].

由图3可知, 单一Cd污染条件下, 随着水体中Cd含量增大, 黑麦草植株中POD活性与空白(N0C0)相比均显著增大($P_1 < 0.05$, $P_2 < 0.01$), 分别增大了15.1%、72.4%. 结果表明, 随着 Cd^{2+} 含量增大, 促使植株产生了大量的POD以抵抗Cd的胁迫作用. 单一NP污染条件下, 低浓度NP的存在($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对植株中的POD无显著性影响($P > 0.05$). 当NP浓度达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 植株中POD活性与空白相比显著增大($P < 0.01$), 增幅为27.8%, 表明NP进入植物体内后, 植株产生了大量的POD. 复合污染条件下, NhCh与N0C0相比, 植株POD活性显著增大($P < 0.01$). 相关研究表明, POD对植物的保护作用存在阈值, 当污染物超过一定浓度时, 植株的抗氧化酶系统会受到破坏, POD值会随之下降^[25]. POD保护作用的阈值与污染物种类、浓度以及植物自身性质有关. 本研究使用植物黑麦草在 $Cd \ 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $NP \ 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 存在下未达到其POD保护阈值, 这一结果说明在该浓度下黑麦草能够通过自身调节正常生长。

多酚氧化酶(PPO)与植物的生长、抗病性、光合作用有关. 图3反映了不同污染物胁迫下黑麦草PPO的活性变化. 单Cd污染条件下, PPO的变化

趋势与POD相似, 随着 Cd^{2+} 含量增大, 植株产生了大量的PPO. 一般情况下, 植物可通过清除体内氧自由基使细胞免受伤害, 但当植物体内氧自由基过量时便引起伤害^[26]. 单NP污染条件下, 处理10d后, 黑麦草PPO含量无显著性变化($P > 0.05$). 复合污染条件下, Cd^{2+} 含量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、NP含量分别为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 植株PPO活性与空白相比均显著增大($P < 0.01$). 随着NP含量增大, 植株中PPO活性有所下降. 这一结果说明NP的加入抑制了Cd对植株的毒性, 从而减少了用以抵抗外援胁迫的PPO含量. 虽然植株的过氧化物酶保护机制受到一定程度的抑制, 但其酶活性仍高于空白对照。

两种酶活性变化表明, 由于不同污染物的致毒途径不同, 导致不同的抗氧化酶对污染物胁迫的响应不同。

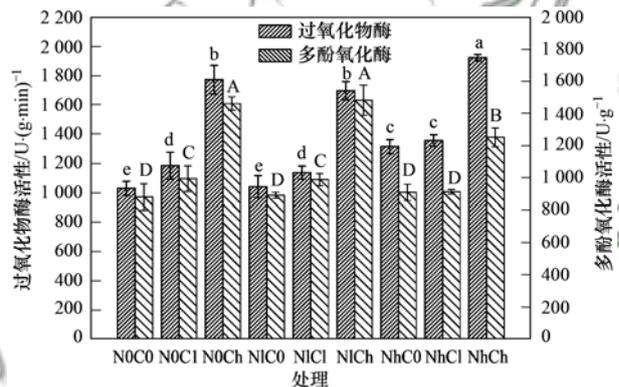


图3 不同处理对黑麦草叶绿素和丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on POD and PPO activities in ryegrass

2.3 黑麦草对水体中污染物的去除作用

2.3.1 NP对黑麦草吸收 Cd^{2+} 的影响

黑麦草对 Cd^{2+} 吸收量的时间变化动态如图4(a)所示. 在水溶液中 Cd^{2+} 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 黑麦草对 Cd^{2+} 有较好的去除效果, 12h的去除率达到了55.3%. 黑麦草对 Cd^{2+} 的吸收量随着时间的延长而增加, 然而增加幅度却随吸收时间的延长而减弱. 植物对重金属的吸收过程可以分为2个阶段: ①快速吸收阶段, 此过程发生在污染物处理的初期; ②慢速吸收阶段, 此过程发生在快速吸收阶段后. 黑麦草对 Cd^{2+} 快速吸收阶段历时为12h. 吸收初期, NP的加入对黑麦草吸收 Cd^{2+} 无显著性影响, 当吸收时间超过12h, 根据方差分析可知, 高浓度NP对黑麦草吸收Cd有较为显著的促进作用($P < 0.05$).

如图4(b)所示, NP浓度对黑麦草地下部分有极显著影响($P < 0.01$), 但对植株地上部分仅有显著影响($P < 0.05$). 采用转移系数(植物地上部分污染物含量/植物地下部分污染物含量)表示植物对重金属的转运能力, 转移系数随着水体中 NP浓度的增大而呈现上升趋势. 复合污染情况下, 随着

NP浓度增大, 植株地上部分 Cd^{2+} 含量随之增多, 而地下部分 Cd^{2+} 含量有所降低. 上述结果说明 NP的存在在一定程度上可促进黑麦草对 Cd^{2+} 的蓄积和转运. 一些研究也表明重金属和有机污染物的交互作用能影响植物对重金属的吸收和积累, 如砒和 Zn 复合污染就能促进印度芥菜对 Zn 的吸收^[27].

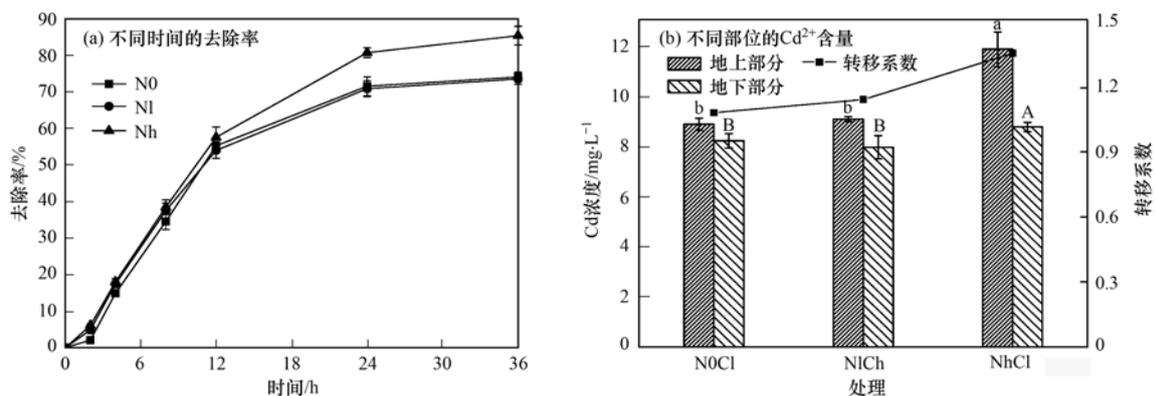


图4 NP对黑麦草吸收 Cd^{2+} 的影响

Fig. 4 Removal rate of Cd^{2+} under different concentrations of NP by ryegrass

2.3.2 Cd^{2+} 对黑麦草去除 NP 的影响

植物对环境中有机的去除分为植物吸收和降解两个过程, 黑麦草对 NP 去除率的时间变化动态如图5所示. 其中:

植物对 NP 的吸收量 = 植物体内 NP 含量

植物对 NP 的降解量 = 水中 NP 初始含量 - 植物体内 NP 量 - 水中 NP 剩余含量

水环境中 NP 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 黑麦草对 NP 的吸收效果较好, 24 h 的吸收率为 44.6%, 但其对 NP 的降解效果较差, 72 h 的降解率仅为 20.6%. 与黑麦草吸收 Cd^{2+} 的实验结论相似, NP 的吸收量

随着时间的延长而增加, 而增加幅度随处理时间的延长而减弱. 但是黑麦草对 NP 的快速吸收阶段历时较长, 为 24 h. 低浓度 Cd^{2+} 的加入对黑麦草去除 NP 无显著性影响, 而高浓度 Cd^{2+} 的加入对黑麦草去除 NP 有极为显著的抑制作用 ($P < 0.01$). 24 h、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 存在下, NP 的吸收率降低了 14.1%. 72 h, 黑麦草对 NP 的降解率下降了 6.1%, 仅为 14.7%. 这可能是因为植物体内的一些氧化酶受到 Cd 的胁迫, 降低酶促生理活动影响植物新陈代谢过程, 从而抑制了植物对 NP 的吸收和转运.

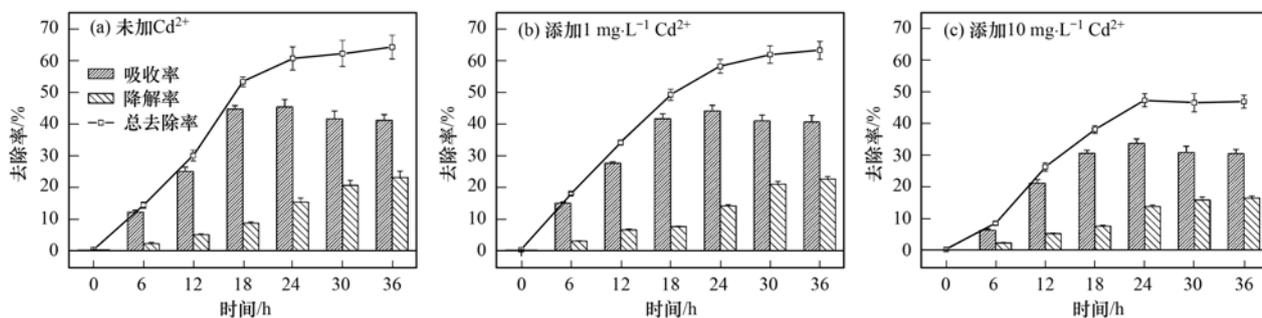


图5 96 h 内 Cd^{2+} 对黑麦草吸收和降解 NP 的影响

Fig. 5 Adsorption and degradation of NP under different concentrations of Cd^{2+} by ryegrass at 96 h

3 结论

(1) 黑麦草地上部分和地下部分的鲜重变化趋势一致. 单一 Cd 污染情况下, 高浓度 Cd^{2+} 对黑麦草的生长有显著的抑制作用. 单一 NP 污染情况下,

黑麦草的生物量无显著性变化. 当黑麦草受到复合污染胁迫时, 高浓度 NP 的加入降低了 Cd^{2+} 的抑制作用.

(2) 单一 Cd 污染情况下, Cd^{2+} 对黑麦草叶绿素含量有显著的抑制作用. 单一 NP 污染情况下,

黑麦草的叶绿素含量无显著性差异. 当黑麦草受到复合污染胁迫时, 其叶绿素变化趋势与差异基本与单一 Cd 污染情况相同. 与叶绿素含量变化不同, 高浓度 Cd²⁺ 的加入使 MDA 含量显著增加. NP 的加入缓解了 Cd 的毒性, 使黑麦草的 MDA 含量有所回落.

(3) 单一 Cd 污染条件下, 黑麦草中 POD 和 PPO 活性与空白相比均显著增大. 单一 NP 污染条件下, 低浓度 NP 对植株的 POD 和 PPO 活性均无显著性影响. 当 NP 浓度达到 5 mg·L⁻¹ 时, 植株 POD 活性显著升高, 而 PPO 活性无明显变化. 复合污染条件下, 当 Cd²⁺ 为 10 mg·L⁻¹, 随着 NP 含量增大, 植株中 PPO 活性有所下降.

(4) 黑麦草对 1 mg·L⁻¹ Cd²⁺ 有较好的去除效果, 12 h 的去除率为 55.3%. Cd²⁺ 的吸收量随时间的延长而增加, 然而增加幅度随吸收时间的延长而减弱. 当吸收时间超过 12 h, 高浓度 NP 对黑麦草吸收 Cd²⁺ 有较为显著的促进作用. NP 对植株地下部分吸收 Cd²⁺ 有极显著影响, 转移系数随着 NP 浓度的增大而呈现上升趋势. 黑麦草对 5 mg·L⁻¹ NP 的吸收效果较好, 24 h 的吸收率为 44.6%. 高浓度 Cd²⁺ 对黑麦草吸收和降解 NP 均有极为显著的抑制作用.

参考文献:

- [1] Noorimotlagh Z, Haghighi N J, Ahmadi Moghadam M, et al. An updated systematic review on the possible effect of nonylphenol on male fertility [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(4): 3298-3314.
- [2] Chokwe T B, Okonkwo J O, Sibali L L. Distribution, exposure pathways, sources and toxicity of nonylphenol and nonylphenol ethoxylates in the environment [J]. Water SA, 2017, **43**(4): 529.
- [3] Lu Z J, Gan J. Analysis, toxicity, occurrence and biodegradation of nonylphenol isomers: a review [J]. Environment International, 2014, **73**: 334-345.
- [4] 吴天伟, 孙艺, 崔蓉, 等. 内分泌干扰物壬基酚与辛基酚的污染现状与毒性的研究进展 [J]. 环境化学, 2017, **36**(5): 951-959.
- Wu T W, Sun Y, Cui R, et al. Environmental occurrences and toxicity of endocrine disrupters nonylphenol and octylphenol [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(5): 951-959.
- [5] Kwak J I, Moon J, Kim D, et al. Species sensitivity distributions for nonylphenol to estimate soil hazardous concentration [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(23): 13957-13966.
- [6] Wang L, Kang Y, Liang S Y, et al. Synergistic effect of co-exposure to cadmium (II) and 4-n-nonylphenol on growth inhibition and oxidative stress of *Chlorella sorokiniana* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **154**: 145-153.
- [7] Xu P, Lai C, Zeng G M, et al. Enhanced bioremediation of 4-nonylphenol and cadmium co-contaminated sediment by composting with *Phanerochaete chrysosporium* inocula [J]. Bioresource Technology, 2018, **250**: 625-634.
- [8] Zhou G J, Peng F Q, Yang B, et al. Cellular responses and bioremoval of nonylphenol and octylphenol in the freshwater green microalga *Scenedesmus obliquus* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **87**: 10-16.
- [9] 刘清云, 丘锦荣, 周志洪, 等. 珠三角城市污泥中壬基酚及重金属特征分析 [J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2072-2078.
- Liu Q Y, Qiu J R, Zhou Z H, et al. Residual nonylphenol and heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plants in Pearl River Delta region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2072-2078.
- [10] Chen F, Tan M, Ma J, et al. Efficient remediation of PAH-metal co-contaminated soil using microbial-plant combination: a greenhouse study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **302**: 250-261.
- [11] 万玉山, 陈艳秋, 吕浩, 等. 植物对 Cd-B[α]P 复合污染土壤的修复 [J]. 环境工程学报, 2017, **11**(6): 3866-3872.
- Wan Y S, Chen Y Q, Lyu H, et al. Phytoremediation of Cd-B[α]P compound contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(6): 3866-3872.
- [12] 杨悦锁, 陈煜, 李盼盼, 等. 土壤、地下水中重金属和多环芳烃复合污染及修复研究进展 [J]. 化工学报, 2017, **68**(6): 2219-2232.
- Yang Y S, Chen Y, Li P P, et al. Research progress on co-contamination and remediation of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and groundwater [J]. CIESC Journal, 2017, **68**(6): 2219-2232.
- [13] 张杏丽, 邹威, 周启星. 镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 [J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 3045-3055.
- Zhang X L, Zou W, Zhou Q X. Competence of Cd phyto remediation in Cd-OCDF co-contaminated soil using *Mirabilis jalapa* L [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 3045-3055.
- [14] 卢晓丹, 高彦征, 凌婉婷, 等. 多环芳烃对黑麦草体内过氧化物酶和多酚氧化酶的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(5): 1969-1973.
- Lu X D, Gao Y Z, Ling W T, et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on POD and PPO in *Lolium multiflorum* lam [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(5): 1969-1973.
- [15] Krupiński M, Janicki T, Palecz B, et al. Biodegradation and utilization of 4-n-nonylphenol by *Aspergillus versicolor* as a sole carbon and energy source [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **280**: 678-684.
- [16] 秦丽, 祖艳群, 李元. Cd 对超累积植物续断菊生长生理的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(S1): 48-52.
- Qin L, Zu Y Q, Li Y. Effects of Cd on the physiological characteristics and growth of the *Sonchus asper* L. hill [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(S1): 48-52.
- [17] Sayed A E D H, Ismail R F K. Endocrine disruption, oxidative stress, and testicular damage induced by 4-nonylphenol in *Clarias gariepinus*: the protective role of *Cydonia oblonga* [J]. Fish

- Physiology and Biochemistry, 2017, **43**(4): 1095-1104.
- [18] Zhang Z H, Rengel Z, Meney K, *et al.* Polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) mediate cadmium toxicity to an emergent wetland species[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(1-2): 119-126.
- [19] Shahabivand S, Parvaneh A, Aliloo A A. Root endophytic fungus *Piriformospora indica* affected growth, cadmium partitioning and chlorophyll fluorescence of sunflower under cadmium toxicity[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **145**: 496-502.
- [20] Gupta D K, Huang H G, Corpas F J. Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(4): 2150-2161.
- [21] 吕俊, 尹华, 叶锦韶, 等. 杂交狼尾草对土壤锌/十溴联苯醚复合污染的生理响应及修复[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(12): 2369-2376.
- Lü J, Yin H, Ye J S, *et al.* Physiological responses and phytoremediation effects of *Pennisetum americanum* on Zn/BDE-209 co-contaminated soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(12): 2369-2376.
- [22] Riaz L, Mahmood T, Coyne M S, *et al.* Physiological and antioxidant response of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings to fluoroquinolone antibiotics[J]. Chemosphere, 2017, **177**: 250-257.
- [23] 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 等. 褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1675-1682.
- Liu S X, Huang Y Z, Luo Z J, *et al.* Alleviation effects of exogenous melatonin on Ni toxicity in rice seedlings [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1675-1682.
- [24] Loix C, Huybrechts M, Vangronsveld J, *et al.* Reciprocal interactions between cadmium-induced cell wall responses and oxidative stress in plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, **8**: 1867.
- [25] 孙成芬, 马丽, 盛连喜, 等. 土壤镉污染对玉米苗期生长和生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(3): 443-448.
- Sun C F, Ma L, Sheng L X, *et al.* Soil naphthalene pollution stress on corn (*Zea mays* L.) seedling physiological effect[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(3): 443-448.
- [26] 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 等. 黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 4044-4053.
- Dong B B, Chen Y Y, Hui H X, *et al.* Characterization of Cr tolerance and accumulation in *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) voigt [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 4044-4053.
- [27] Batty L C, Anslow M. Effect of a polycyclic aromatic hydrocarbon on the phytoremediation of zinc by two plant species (*Brassica juncea* and *Festuca arundinacea*) [J]. International Journal of Phytoremediation, 2008, **10**(3): 236-251.



CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(<i>Comammox Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China; Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17β-estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Composting of Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)