ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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4期
2014年4月15日

目 次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 …… 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭(1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 …… 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶(1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 …… 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣(1230)
某焦化厂周边大气 PM_{10} 重金属来源及健康风险评价 …… 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽(1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 …… 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔骁勇,许群,宋现锋(1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 …… 孙成玲,谢绍东(1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 …… 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山(1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 …… 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强(1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 …… 王燕,朱春刚,许笛,丁士明(1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 …… 傅玲, 赵凯,王国祥,欧媛,范娴, 毛丽娜,张佳, 韩睿明(1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 …… 孙法圣,程品,张博(1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 …… 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬(1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 …… 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁(1297)
苦草(*Vallisneria natans*)根系对沉积物中各形态磷的影响 …… 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞(1304)
循环流廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 …… 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明(1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 …… 段伦超,王风贺,纪菅雪,张帆,赵斌,王国祥(1318)
再生水中5种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 …… 黄晶晶,汤芳,席劲瑛,庞宇辰,胡洪营(1326)
二级处理出水的 UV-TiO_2 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 …… 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜(1332)
水中 C_{60} 纳米颗粒的稳定性研究 …… 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛(1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 …… 赵应许, 纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽(1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复4-氯硝基苯污染地下水的研究 …… 付融冰(1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 …… 王琪,刘辉,姜林,唐军(1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 …… 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾运, 杨宏(1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 …… 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英(1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 …… 陈燕,黄芳,谢鑫源(1377)
电活性生物膜介导 Cu^{2+} 生物还原的试验研究 …… 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志(1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 …… 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳(1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 …… 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹(1399)
化学合成施氏矿物与 H_2O_2 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 …… 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥(1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 …… 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅(1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 …… 董慧峪,季民(1421)
锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 …… 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋轶锋(1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 …… 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊(1437)
碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 …… 徐冰洁,高品,薛罡,何梦琦,吴凡(1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解菲过程中细菌表面特性的变化 …… 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛(1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 …… 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建(1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 …… 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国(1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 …… 王娓敏,邓珀,邹华,梁婵娟(1468)
东北春大豆品种东生1号对臭氧胁迫的响应 …… 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠(1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 …… 吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香(1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 …… 陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华(1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 …… 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯芩,吴国平,魏复盛(1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 …… 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞(1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 …… 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊(1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 …… 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭(1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 …… 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赟,王美娥(1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 …… 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬(1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 …… 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡(1531)
SDBS/Na^+ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 …… 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹(1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 …… 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎(1548)
藻类水体 Cd^{2+} 毒性快速监测新方法研究 …… 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽(1555)
用于1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 …… 龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武(1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO_3^- 吸附性能的研究 …… 钟琼, 李欢(1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 …… 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤(1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 …… 杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹(1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 …… 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志(1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展 …… 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧(1602)
农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 …… 魏源送, 郁达伟,曹磊(1613)
《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响

王娓敏,邓玗,邹华,梁婵娟*
(江南大学环境与土木工程学院,无锡 214122)

摘要: 以水稻幼苗为材料,研究了不同质量浓度(1、100、1 000、3 000 μg·L^{-1})微囊藻毒素(MCs)在胁迫期和恢复期对水稻幼苗根系生长、吸收活力、抗氧化系统的影响以及 MCs 在水稻根部的积累. 结果表明,胁迫处理 7 d,MCs 在水稻根部的积累量与 MCs 质量浓度呈正相关. 1 μg·L^{-1} MCs 处理促进了根系生长,根系活力上升,过氧化氢酶(CAT)活性上升有效维持H_2O_2于正常水平; 100 μg·L^{-1} MCs 处理下,根系生长受抑,根系活力下降,CAT 无显著变化; 在高质量浓度(1 000 μg·L^{-1}、3 000 μg·L^{-1}) MCs 处理下,不仅根系生长受抑、根系活力下降,且 CAT 活性受抑,H_2O_2大量积累,膜质过氧化加剧. 相比胁迫期,恢复 7 d 后各处理组水稻根系 MCs 的积累量均低于胁迫期. 100 μg·L^{-1} MCs 处理组根系各生长指标、根系活力、丙二醛(MDA)、H_2O_2和 CAT 的变幅减小,优于胁迫期,显示出一定程度的恢复,而1 000 μg·L^{-1}和3 000 μg·L^{-1} MCs 处理组,根系生长与根系活力均低于胁迫期,氧化胁迫进一步加剧,表明高质量浓度(1 000 μg·L^{-1}和3 000 μg·L^{-1}) MCs 对水稻根系造成的伤害不可逆.

关键词:微囊藻毒素; 水稻; 过氧化氢酶; 生长; 根系活力
中图分类号: X503.231 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)04-1468-05 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.04.038

Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots

WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, LIANG Chan-juan
(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The effect of different concentrations (1, 100, 1 000 and 3 000 μg·L^{-1}) of microcystins (MCs) on growth, absorb activity, antioxidant system and its accumulation in roots of rice seedlings were studied. The results show that MCs accumulation was positively correlated with MCs concentration. After the treatment with 1 μg·L^{-1} MCs, the root growth and activity increased. Meanwhile, catalase (CAT) activity was increased to maintain H_2O_2 at normal levels. After the treatment with 100 μg·L^{-1} MCs, the root growth and activity were inhibited whereas CAT had no obvious change. High concentrations (1 000 μg·L^{-1} and 3 000 μg·L^{-1}) of MCs not only inhibited root growth and activity, but decreased CAT activity, leading to excessive H_2O_2 accumulation and membrane peroxidation. After a 7-day recovery, MCs accumulations in roots in all treatment groups were all lower than those measured during the stress period. For the 100 μg·L^{-1} MCs treated group, the inhibition on root growth and root activity, and membrane peroxidation were alleviated, better than those measured during the stress period. However, for 1 000 μg·L^{-1} and 3 000 μg·L^{-1} MCs treated groups, inhibition on root growth, root activity, and CAT activity were heavier than those during the stress period, and oxidation stress intensified further, indicating that the damage caused by high concentrations (1 000 μg·L^{-1} and 3 000 μg·L^{-1}) of MCs on rice roots was irreversible.

Key words: microcystins; rice; catalase; growth; root activity

水体富营养化日益加剧导致蓝藻水华频繁发生,水华藻类释放的不同类型毒素对生物有毒害作用,甚至引起毒性死亡,并有可能通过食物链威胁人类健康. 其中,微囊藻毒素(microcystins, MCs)是蓝藻水华中出现频率最高、产量最大和危害最严重的藻毒素[1]. 世界卫生组织(WHO)规定水体中 MCs 的最大安全剂量为 1 μg·L^{-1},然而自然界水体中 MCs 含量通常在 0.1 ~ 100 μg·L^{-1}内,当藻类大量死亡时 MCs 在短时间内可高达1 800 μg·L^{-1}[2,3]. 此外,MCs 具有生物积累效应,能够在水生植物、浮游动物、鱼类和贝类等水产品中富集,具有沿食物链传递的风险,因此,关于 MCs 对水生生物的影响研究较多[4,5]. 然而,MCs 也有可能通过灌溉进入农田生态系统,尤其是 MCs 能够抑制芥菜幼苗生长的首次报道后[6], MCs 对农作物生长、农产品产量和质量的影响也受到关注. 研究发现,MCs 不仅抑制油菜、菠菜和生菜等可食性植物的生长,还可以在体内富集[7~9]. 另外,Chen 等[10]发现 MCs 不仅可被植物吸收并在其体内积累,且能抑制植物体内保护酶的活性. 然而,大部分研究都集中在不同浓度或不同暴露时间 MCs 对农作物氧化胁迫以及在农作物体

收稿日期: 2013-08-26; **修订日期**: 2013-10-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(31370517,31000245); 江苏省自然科学基金项目(BK2011161)
作者简介: 王娓敏(1988 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生态学,E-mail: wwm523@sina.com
* 通讯联系人,E-mail:liangchanjuan@jiangnan.edu.cn

内富集的影响,却鲜有关于水体中 MCs 浓度发生变化(如阶段性暴发、湖泊底泥或农田土壤吸附 MCs)时对农作物的影响. 根系是植物吸收和运输生长所需水分和营养物质的重要器官,也是与 MCs 直接接触的器官. 鉴于此,本实验以粮食作物水稻作为研究试材,分析胁迫期和恢复期(无 MCs 胁迫)内 MCs 对水稻幼苗根系生长、生理生化的影响以及其在幼苗根部的积累,以期为客观评价灌溉水中的 MCs 对农作物生长的影响以及正确预测 MCs 进入食物链的安全风险提供基础信息.

1　材料与方法

1.1　藻毒素的制备

称取 1 g 干燥的藻粉,加入 40 mL 5% 的冰乙酸,室温抽提 2 h, 8 000 r·min^{-1}离心 10 min,沉淀用 40 mL 5% 冰乙酸继续搅拌抽提,重复 2 次,合并 3 次抽提的上清液,将粗提取液过 Sep-pak C18 柱(500 mg/6 mL, Waters corporation, 美国),富集步骤如下:10 mL 甲醇(100%)润洗,10 mL 纯水润洗,进样,10 mL 甲醇(100%)洗脱,旋转蒸发,收集 MCs 溶于 1 mL 纯水. 采用高效液相色谱法(ultimate 3000, Dionex corporation,美国)确定 MCs 的含量,紫外可见光检测器波长:238 nm,色谱柱温度:40℃,流动相为甲醇和 pH = 3 的磷酸盐缓冲液(二者的体积比为 57∶43),柱流速:1 mL·min^{-1}[11].

1.2　试材培养

供试水稻(*Oryza sativa*)为"淮稻 8 号". 挑选籽粒饱满的种子,0.1% $HgCl_2$ 消毒 10 min,然后用去离子水冲洗 3 次,去离子水浸泡 24 h 后置于 25℃恒温光照培养箱中催芽 4 d,将幼芽放在蛭石里培养 20 d 即幼苗长至 2 叶 1 心期时移入周转箱(6.88 L)中进行水培,营养液采用国际水稻研究所(IRRI)常规营养液配方,并略作修改[12]. 光照强度为 300 μE·(m·s)$^{-2}$,光照 12 h,昼/夜温度为 30℃/24℃,相对湿度为 60%. 营养液每隔 3 d 换 1 次,待幼苗长至 4 叶 1 心期时,选长势一致的水稻幼苗进行 MCs 胁迫处理.

1.3　实验设计

将高浓度的 MCs 母液用营养液分别稀释成不同浓度梯度,选取 4 个 MCs 浓度(1、100、1 000、3 000 μg·L^{-1}),以不含 MCs 的营养液作为对照(CK),每个处理 3 次重复. 在处理 7 d 后进行各指标的测定,然后将处理过的植株在对照组培养条件下恢复培养 7 d,再取样测定.

1.4　指标测定

1.4.1　水稻幼苗根部 MCs 含量的测定

处理第 7 d 和恢复 7 d 时取水稻幼苗根部组织,用去离子水洗涤 4 次以除去根部表面的 MCs,然后用吸水纸吸干表面水分,称取 0.5 g 根部组织用 2 mL 80% 的甲醇研磨然后超声破碎,离心 10 min. 富集步骤参考 1.1 节进行,最后利用试剂盒(Beacon Analytical Systems Inc.,美国)采用酶联免疫法确定 MCs 的总含量.

1.4.2　根系生长指标的测定

以单株为单位,选取各处理组中长势一致的水稻幼苗,取其根部组织,用去离子水洗涤 3 次后于电热恒温干燥箱中 100℃杀青 10 min,80℃烘 12 h 至恒重,称其干重; 水稻根系指标(根长,根表面积,根体积)则运用 WinRHZO (Pro 2009)根系图像分析系统软件进行测定[13].

1.4.3　生理生化指标的测定

根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)脱氢酶法,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定,过氧化氢(H_2O_2)含量采用硫酸钛法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾滴定法测定[14].

每个处理组重复 3 次,每次测定重复 3 次,所有数据均为 3 次独立实验的平均值 ± 标准误差(Mean ± SD),所有数据采用 SPSS 16.0 软件进行差异显著性分析,选择最小显著差法(LSD)进行多重比较.

2　结果与分析

2.1　MCs 在水稻根部的积累

由图 1 可知, MCs (1、100、1 000、3 000 μg·L^{-1})胁迫处理 7 d 后,MCs 在水稻根部的积累量分别为 20.6、219.2、225.4、287.2 μg·mg^{-1},呈明显的剂量-效应关系(相关性系数 R^2 = 0.685**). 当 MCs 浓度为3 000 μg·L^{-1}时,水稻根部的 MCs 含量最高,分别是 1、100、1 000 μg·L^{-1}处理组的 13.94、1.31、1.27 倍. 恢复期内,MCs 在根部的富集量依然与处理浓度呈正相关(相关系数 R^2 = 0.611*),但均小于相应处理在胁迫期时的富集量.

2.2　MCs 对水稻根系生长的影响

由表 1 可知, 胁迫期内, 当 MCs 浓度为 1 μg·L^{-1}时,根长、根体积和根干重均上升,上升幅度分别为 5.47%、8.39% 和 14.29%; 根表面积下降,降幅为 6.30%. 在浓度 1 000 μg·L^{-1}和 3 000 μg·L^{-1} MCs 处理下,根长、根表面积、根体积和根

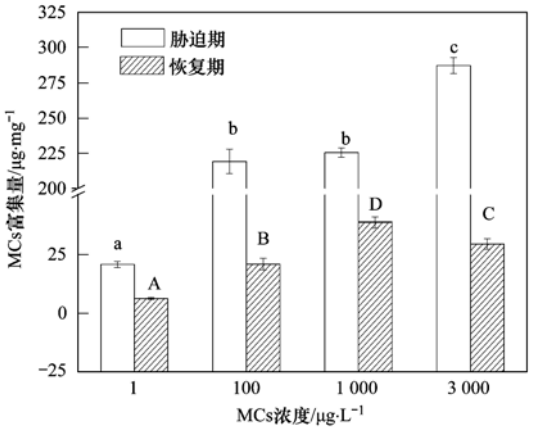
干重明显下降,降幅分别为 23.20% 和 28.53%、23.48% 和 26.00%、10.96% 和 12.82%、36.73% 和 44.90%. 恢复期内,根系指标在浓度 1 μg·L^{-1}和 100 μg·L^{-1} MCs 处理下均大于胁迫期,而在高浓度 MCs (≥1 000 μg·L^{-1})处理下,水稻根系指标仍然降低且均低于胁迫期.

2.3 MCs 对水稻根系活力的影响

由图 2 可知,胁迫期内,根系活力呈现"低促高抑"现象,当 MCs 浓度为 1 μg·L^{-1}时,根系活力上升 4.36%,当 MCs 浓度≥100 μg·L^{-1}时,根系活力下降,降幅分别为 43.98%、70.76% 和 87.47%. 恢复期内,当 MCs 浓度为 1 μg·L^{-1}时,根系活力增加,且大于胁迫期. 当 MCs 浓度为 100 μg·L^{-1}时,根系活力虽然低于 CK 但高于胁迫期,可见水稻根系活力有一定程度的缓解,但在高浓度(≥1 000 μg·L^{-1}) MCs 的处理下,水稻根系活力仍然降低且均低于胁迫期,伤害不可逆.

2.4 MCs 对水稻根系抗氧化系统的影响

由表 2 可知,胁迫期内,当 MCs 浓度为 1 μg·L^{-1}时,MDA 含量和H_2O_2含量没有显著变化,而 CAT 活性则显著上升(P < 0.05),当 MCs 浓度为 100 μg·L^{-1}时,CAT 活性未发生显著变化,但 MDA 含量和H_2O_2含量则上升. 在高浓度1 000 μg·L^{-1}和 3 000 μg·L^{-1} MCs 处理下,MDA、H_2O_2含量上升(P <0.05),且上升的幅度分别为 32.95% 和 52.94%、76.25% 和 131.88%,而 CAT 活性则明显下降,降幅分别为 48.12% 和 59.37%. 恢复期内,MDA 含量和H_2O_2含量均呈现先下降后上升的趋势,而 CAT 活性则呈现先上升后下降的趋势. 在 100 μg·L^{-1} MCs 处理下,MDA、H_2O_2含量和 CAT 活性均可恢复到正常水平,在高浓度(≥1 000 μg·L^{-1}) MCs 处理下,H_2O_2含量低于胁迫期,而 MDA 含量则高于胁迫期,CAT 活性则依然降低,且低于胁迫期.



不同字母表示各处理间差异显著(P <0.05),小(大)写字母分别表示胁迫期(恢复期)差异显著性,下同

图 1 MCs 在水稻幼苗根部的积累

Fig. 1 MCs accumulation in root of rice seedlings

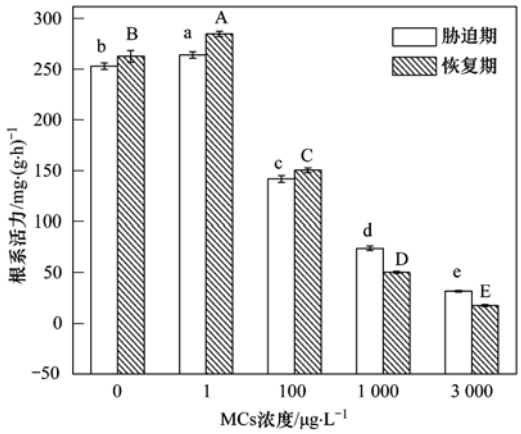


图 2 MCs 对水稻幼苗根系活力的影响

Fig. 2 Effects of MCs on root activity of rice seedlings

表 1 MCs 对水稻幼苗根系生长的影响[1)]

Table 1 Effects of MCs on root growth of rice seedlings

MCs 浓度 /μg·L^{-1}	根长/cm		根表面积/cm^2		根体积/cm^3		根干重/g·株$^{-1}$	
	7th	14th	7th	14th	7th	14th	7th	14th
0	555.61 ±0.86b (100.00)	592.55 ±3.11a (100.00)	56.78 ±2.00a (100.00)	57.63 ±5.05a (100.00)	0.429 ±0.007b (100.00)	0.416 ±0.003c (100.00)	0.098 ±0.004b (100.00)	0.108 ±0.014ab (100.00)
1	585.99 ±4.09a (105.47)	598.69 ±5.13a (101.03)	53.20 ±2.78b (93.70)	56.79 ±2.89a (98.55)	0.465 ±0.013a (108.39)	0.474 ±0.01a (113.85)	0.112 ±0.005a (114.29)	0.113 ±0.016a (104.63)
100	467.01 ±2.68c (84.05)	489.94 ±4.43b (82.68)	45.48 ±1.45c (80.10)	49.81 ±1.73b (86.43)	0.409 ±0.004c (95.34)	0.432 ±0.002b (103.76)	0.101 ±0.002b (103.06)	0.105 ±0.003b (97.22)
1 000	426.73 ±3.30d (76.80)	379.61 ±2.19d (64.06)	43.45 ±0.64cd (76.52)	40.28 ±1.09c (69.90)	0.382 ±0.012d (89.04)	0.366 ±0.008d (87.99)	0.062 ±0.002c (63.27)	0.036 ±0.005c (33.33)
3 000	397.11 ±4.66e (71.47)	372.58 ±1.61c (62.88)	42.02 ±1.00d (74.00)	35.17 ±1.29c (61.03)	0.374 ±0.007d (87.18)	0.346 ±0.008e (83.19)	0.054 ±0.002d (55.10)	0.035 ±0.009c (32.41)

表 2　MCs 对水稻幼苗根系 MDA、H_2O_2 含量及 CAT 活性的影响

Table 2　Effects of MCs on MDA contents, H_2O_2 contents and CAT activity of roots in rice seedlings

MCs 浓度 /μg·L^{-1}	MDA 含量/nmol·g^{-1}		H_2O_2 含量/μmol·g^{-1}		CAT 活性/mg·(g·min)$^{-1}$	
	7th	14th	7th	14th	7th	14th
0	13.96 ±0.13a (100.00)	13.86 ±0.39a (100.00)	3.20 ±0.19a (100.00)	3.64 ±0.05b (100.00)	3.41 ±0.06b (100.00)	3.20 ±0.04b (100.00)
1	12.75 ±0.09a (91.33)	12.61 ±0.47a (90.98)	2.73 ±0.08a (85.31)	2.64 ±0.03a (72.53)	3.90 ±0.09a (114.37)	3.72 ±0.04a (116.25)
100	16.55 ±0.25b (118.55)	15.89 ±0.13b (114.65)	4.36 ±0.05b (136.25)	4.17 ±0.06b (114.56)	3.30 ±0.08b (96.77)	3.15 ±0.04b (98.43)
1 000	18.58 ±0.21c (132.95)	18.52 ±0.07c (133.62)	5.64 ±0.02c (176.25)	5.69 ±0.08c (156.32)	2.66 ±0.08c (78.01)	1.66 ±0.03c (51.88)
3 000	21.35 ±0.38d (152.94)	22.45 ±0.16d (161.98)	7.42 ±0.16d (231.88)	7.99 ±0.05d (219.51)	2.16 ±0.03d (63.34)	1.30 ±0.02d (40.63)

3　讨论

3.1　MCs 在水稻根部的积累

MCs 可以在不同植物体内积累[15~18]，这也许就是 MCs 影响植物生长发育的最直接原因. 本实验结果显示，MCs 富集量与处理浓度（灌溉水中 MCs 浓度）呈显著正相关，MCs 处理浓度越高，MCs 的富集量就越大（图 1），表明灌溉水中 MCs 污染程度越严重，经可食性植物传递的风险就越大. 恢复处理 7 d，MCs 富集量依然与处理浓度呈正相关，富集量低于胁迫期的，这与恢复期的水稻生长较胁迫期更好（表 1），使得单位鲜重 MCs 的含量降低抑或 MCs 转移至水稻幼苗其他部位（茎、叶）有关[19,20].

3.2　MCs 对水稻根系的影响

植物根系起着吸收水分和各种营养物质的重要作用，因此，根系生长的好坏直接影响地上部分的生长和营养状况. MCs 胁迫处理下，根长、根体积、根干重和根系活力均呈现“低促高抑”的现象. 植物的生长主要依靠细胞的增大和数目的增加[21]，低浓度（1 μg·L^{-1}）的 MCs 可能刺激了植物根系细胞分裂促进了根系生长，根系活力上升，而高浓度 MCs 造成了根系生长受抑制，根系面积的减小导致根系活跃吸收面积降低，根系活力下降，最终影响植物对营养和水分的吸收，导致地上部生长受抑. Liu 等[22]也发现低浓度（<10 μg·L^{-1}）MCs 能够刺激油菜和白菜的生长而高浓度 MCs 则抑制生长. 这种“低促高抑”现象启示人们：灌溉时通过稀释、吸附等手段降低水体中 MCs 浓度可缓解 MCs 对植物造成的伤害. 恢复期内，100 μg·L^{-1} MCs 处理下，根系伤害有一定缓解，而高浓度（≥1 000 μg·L^{-1}）MCs 处理对水稻根系的伤害不可逆，这与 MCs 在水稻根部的高富集量有关（图 1）. MCs 毒性来自于本身且在植物体内大部分不易被降解，而富集在水稻根部的 MCs 可能通过抑制蛋白磷酸酶 1 和 2A 的活性，从而对水稻根部产生影响[23]，另一方面也可能通过引发活性氧代谢失衡，细胞代谢紊乱，体现为根系生长受抑.

3.3　MCs 对水稻抗氧化系统的影响

Peuthert 等[20]发现浓度为 5.0 μg·L^{-1} 的 MCs 导致 11 种农作物的细胞发生氧化胁迫作用，这与 MCs 抑制抗氧化酶活性有关. 笔者发现，当 MCs 浓度为 1 μg·L^{-1}时，CAT 活性能够有效维持H_2O_2含量在正常水平（表 2），可能原因是 MCs 胁迫引发水稻幼苗抗氧化系统的应激启动，CAT 活性升高有效清除了部分的H_2O_2，缓解了 MCs 胁迫，而在高浓度（≥1 000 μg·L^{-1}）MCs 处理下，CAT 活性受抑制，无法清除过量的H_2O_2，膜脂过氧化发生. 这和李慧明等[24]研究 MCs 对黑麦草生长、生理生化影响的结果一致. 高浓度 MCs 使抗氧化防御系统遭到破坏，无法清除体内过多的活性氧，氧化胁迫伤害发生，使得植物生长与生理代谢受抑. 恢复期内，100 μg·L^{-1} MCs 处理组的 MDA、H_2O_2 含量和 CAT 活性均恢复到正常水平，而高浓度（≥1 000 μg·L^{-1}）MCs 处理组的 CAT 活性不仅低于对照组，甚至低于胁迫期. 结合 MDA 含量呈现相同规律可知，CAT 活性无法恢复是促使膜质过氧化进一步恶化的主要原因. 高浓度 MCs 作用致使大量的H_2O_2积累，这不仅会直接引发膜脂过氧化，也可与 CAT 反应形成复合物，这种钝化形式抑制了 CAT 活性[25].

4　结论

（1）MCs 能被水稻吸收并富集，在植物体内造成膜脂过氧化，对水稻幼苗根系生长产生消极影响.

（2）恢复实验结果表明，在浓度（≤100 μg·L^{-1}）MCs 处理组根系生长、根系活力、CAT 活

性和膜质过氧化均有一定程度的恢复,高浓度(≥1 000 μg·L^{-1})MCs 处理组 CAT 活性进一步降低,膜脂过氧化加剧,根系受到的伤害不可逆.

(3) 低浓度 MCs (1 μg·L^{-1})促进植物生长,高浓度(≥1 000 μg·L^{-1})MCs 则会对植物造成不可逆伤害. 在水体富营养化尚不能有效遏制的前提下,降低灌溉水 MCs 浓度可减轻 MCs 对农作物的伤害.

参考文献:

[1] Hrudey S E, Peterson H G, Kenefick S L, *et al*. Toxin release from *Microcystis aeruginosa* after chemical treatment [J]. Water Science and Technology, 1993, **27**(3-4): 400-433.

[2] Lahti K, Rapala J, Färdig M, *et al*. Persistence of cyanobacterial hepatotoxin, microcystin-LR in particulate material and dissolved in lake water [J]. Water Research, 1997, **31**(5): 1005-1012.

[3] Jones G J, Orr P T. Release and degradation of microcystin following algicide treatment of a *Microcystis aeruginosa* bloom in a recreational lake, as determined by HPLC and protein phosphatase inhibition assay [J]. Water Research, 1994, **28**(4): 871-876.

[4] Ibelings B W, Chorus I. Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater "seafood" and its consequences for public health: A review [J]. Environmental Pollution, 2007, **150**(1): 177-192.

[5] Zhang D W, Xie P, Liu Y Q, *et al*. Spatial and temporal variations of microcystins in hepatopancreas of a freshwater snail from Lake Taihu [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(2): 466-472.

[6] Kós P, Gorzó G, Surányi G, *et al*. Simple and efficient method for isolation and measurement of cyanobacterial hepatotoxins by plant tests (*Sinapis alba* L.) [J]. Analytical Biochemistry, 1995, **225**(1): 49-53.

[7] Chen J Z, Song L R, Dai J, *et al*. Effects of microcystins on the growth and the activity of superoxide dismutase and peroxidase of rape (*Brassica napus* L.) and rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Toxicon, 2004, **43**(4): 393-400.

[8] Pflugmacher S, Aulhorn M, Grimm B. Influence of a cyanobacterial crude extract containing microcystin-LR on the physiology and antioxidative defence systems of different spinach variants [J]. New Phytologist, 2007, **175**(3): 482-489.

[9] Crush J R, Briggs L R, Sprosen J M, *et al*. Effects of irrigation with lake water containing microcystins on microcystin content and growth of ryegrass, clover, rape, and lettuce [J]. Environmental Toxicology, 2008, **23**(2): 246-252.

[10] Chen J Z, Dai J, Zhang H Y, *et al*. Bioaccumulation of microcystin and its oxidative stress in the apple (*Malus pumila*) [J]. Ecotoxicology, 2010, **19**(4): 796-803.

[11] BG/T 20466-2006, 水中微囊藻毒素的测定[S].

[12] 狄廷均, 朱毅勇, 仇美华, 等. 水稻根系细胞膜 H$^+$-ATPase 对铵硝营养的响应差异[J]. 中国水稻科学, 2007, **21**(4): 360-366.

[13] Sun Z G, Wang L H, Zhou Q, *et al*. Effects and mechanisms of the combined pollution of lanthanum and aicd rain on the root phenotype of soybean seedlings [J]. Chemosphere, 2013, **93**(2): 344-352.

[14] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008. 60-61, 184-187, 192-193.

[15] Pflugmacher S, Wiegand C, Beattie K A, *et al*. Uptake, effects, and metabolism of cyanobacterial toxins in the emergent reed plant *Phragmites australis* (cav.) trin. ex steud [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, **20**(4): 846-852.

[16] 薛延丰, 李慧明, 易能, 等. 微囊藻毒素(MC-RR)对白三叶种子萌发及幼苗生理生化特性影响[J]. 草业学报, 2009, **18**(6): 180-185.

[17] Mitrovic S M, Allis O, Furey A, *et al*. Bioaccumulation and harmful effects of microcystins-LR in the aquatic plants *Lemna minor* and *Wolffia arrhiza* and the filamentous alga *Chladophora fracta* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, **61**(3): 345-352.

[18] McElhiney J, Lawton L A, Leifert C. Investigations into the inhibitory effects of microcystins on plant growth, and the toxicity of plant tissues following exposure [J]. Toxicon, 2001, **39**(9): 1411-1420.

[19] Järvenpää S, Niinistö C L, Spoof L, *et al*. Effects of microcystins on broccoli and mustard, and analysis of accumulation toxin by liquid chromatography-maa spectrometry [J]. Toxicon, 2007, **49**(6): 865-874.

[20] Peuthert A, Chakrabarti S, Pflugmacher S. Uptake of microcystins-LR and - LF (cyanobacterial toxins) in seedlings of several important agricultural plant species and the correlation with cellular damage (lipid peroxidatin) [J]. Environmental Toxicology, 2007, **22**(4): 436-442.

[21] 宇克莉, 孟庆敏, 邹金华. 镉对玉米幼苗生长、叶绿素含量及细胞超微结构的影响[J]. 华北农学报, 2010, **25**(3): 118-123.

[22] Liu B B, Gong Y, Xiao B D, *et al*. A laboratory study on risk assessment of microcystin-RR in cropland [J]. Journal of Environmental Management, 2008, **86**(3): 566-574.

[23] 尹黎燕. 微囊藻毒素对高等植物的生态生理学效应研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005. 1-13.

[24] 李慧明, 干晓宇, 邓蕾, 等. 微囊藻毒素(MC-LR)在黑麦草幼苗体内的积累及对其生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(1): 49-53.

[25] 胡国霞. PEG 预处理对水分胁迫下水稻抗氧化系统的影响[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2011. 27-43.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 4

Apr. 15, 2014

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012 ····· WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, *et al.* (1215)

Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi ····· LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, *et al.* (1223)

Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban ····· WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, *et al.* (1230)

Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM_{10} from One Coking Plant ····· DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, *et al.* (1238)

Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration ····· LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, *et al.* (1245)

Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta ····· SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)

Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process ····· LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, *et al.* (1256)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China ····· ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, *et al.* (1263)

Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes ····· WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, *et al.* (1271)

Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input ····· FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, *et al.* (1278)

Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area ····· SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)

Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing ····· YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, *et al.* (1290)

Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing ····· LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, *et al.* (1297)

Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of *Vallisneria natans* ····· LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, *et al.* (1304)

Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland ····· PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, *et al.* (1311)

Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions ····· DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, *et al.* (1318)

Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water ····· HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, *et al.* (1326)

Photoreactivation of *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO_2 ····· WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, *et al.* (1332)

Stability of C_{60} Nanoparticles in Aquatic Systems ····· FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, *et al.* (1337)

Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions: XDLVO Approach ····· ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, *et al.* (1343)

Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H_2O_2) ····· FU Rong-bing (1351)

Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene ····· WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, *et al.* (1358)

Research on Removal Efficiency of Cd(Ⅱ)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter ····· WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, *et al.* (1366)

Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance ····· JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, *et al.* (1372)

Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of *Acidithiobacillus ferrooxidans* ····· CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)

Microbial Reduction of Cu^{2+} Mediated by Electroactive Biofilms ····· LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, *et al.* (1384)

Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards ····· CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, *et al.* (1391)

Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons ····· HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, *et al.* (1399)

Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H_2O_2 ····· WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, *et al.* (1407)

Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater ····· YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, *et al.* (1414)

Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge ····· DONG Hui-yu, JI Min (1421)

Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium *Aminobacter* sp. H1 and Its Oxidation Mechanism ····· YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, *et al.* (1428)

Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(Ⅱ)-Oxidizing Bacteria ····· WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, *et al.* (1437)

Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain *Pseudomonas* sp. I-24 via Co-Metabolism ····· XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, *et al.* (1443)

Using Flow Cytometry to Explore the Changes of *Sphingomonas* sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ····· ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, *et al.* (1449)

Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and *Chlorella vulgaris* ····· CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, *et al.* (1457)

Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of *Chlorella vulgaris* ····· WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, *et al.* (1462)

Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots ····· WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, *et al.* (1468)

Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O_3 Concentrations in Northeast China ····· ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, *et al.* (1473)

Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses ····· WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, *et al.* (1479)

Effects of Lead on the Growth and Reproduction of *Eisenia fetida* with Aged Soils ····· CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, *et al.* (1486)

Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research ····· ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, *et al.* (1491)

Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet ····· BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, *et al.* (1498)

Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area ····· XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, *et al.* (1502)

Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park ····· LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, *et al.* (1509)

Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area ····· ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, *et al.* (1516)

Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator ····· XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, *et al.* (1523)

Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai ····· ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, *et al.* (1531)

Impact of SDBS/Na^+ on Red Soil Colloidal Stability ····· TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, *et al.* (1540)

Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues ····· ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, *et al.* (1548)

Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd^{2+} by Algal in Water ····· DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, *et al.* (1555)

Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene ····· LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, *et al.* (1561)

Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate ····· ZHONG Qiong, LI Huan (1566)

Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites ····· LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, *et al.* (1576)

A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils ····· YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, *et al.* (1586)

Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment ····· ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, *et al.* (1597)

Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium ····· LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, *et al.* (1602)

Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength ····· WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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 4 月 15 日　35 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 4　Apr. 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