

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国锋, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α -FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收锕钍沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响

马微¹, 鲍艳宇^{1,2,*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 教育部环境污染过程与基准重点实验室, 天津 300071; 2. 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要: 采用水培法研究了水稻根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响。结果表明, 水稻根表的铁氧化物胶膜生成量随溶液中 Fe^{2+} 质量浓度的增加而增加。营养液中添加诺氟沙星之后, 根表铁膜量不同程度地降低, 且随着添加诺氟沙星质量浓度的增加铁膜减少量有所增加。根表诺氟沙星含量与根表铁膜含量具有相关性, 且相关性系数为 0.959 (诺氟沙星 = $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 0.987 (诺氟沙星 = $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 根内诺氟沙星含量以及地上部诺氟沙星含量, 与根表铁膜含量没有显著相关性。添加不同质量浓度的诺氟沙星, 水稻根表、根内以及地上部所含诺氟沙星的质量分数: 水稻根表为 87.7% ~ 97.6%, 根内为 0.8% ~ 4.8%, 地上部为 1.5% ~ 7.5%, 根表诺氟沙星远远大于根内以及地上部的诺氟沙星含量。因此, 水稻根表形成的铁氧化物胶膜在一定程度上是一个诺氟沙星富集库, 但是并没有对诺氟沙星迁移到水稻根内和地上部起到明显的促进或抑制作用。

关键词: 铁氧化物胶膜; 水稻; 诺氟沙星; 根表; 累积

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2259-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.06.046

Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice

MA Wei¹, BAO Yan-yu^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Remediation & Pollution Control for Urban Ecological Environment, Tianjin 300071, China)

Abstract: In anaerobic condition, release of oxygen by roots to rhizosphere caused the formation of red plaque of iron oxides or hydroxides on the root surface of rice. The effect of iron plaque on norfloxacin uptake was investigated with solution culture in greenhouse, and the results are showed in the following. The content of iron plaque increased with the increase of Fe^{2+} concentration in medium. After the addition of norfloxacin in nutrient solution, the content of iron plaques on the root surface decreased to different degree, and the reduction of iron plaques was increasing with the increase of norfloxacin mass concentration. Significant relationships were found between the iron plaques and norfloxacin on the root surface, and the correlation coefficients were 0.959 (norfloxacin mass concentration was $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and 0.987 (norfloxacin mass concentration was $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), respectively, however, the norfloxacin contents in roots and shoots had no significant correlation with the iron plaques. After addition of different mass concentrations of norfloxacin, the quality distribution percentages of norfloxacin on the root surface and in roots and shoots were 87.7% - 97.6%, 0.8% - 4.8%, 1.5% - 7.5%, respectively, the norfloxacin content on the root surface was far greater than those in roots and shoots. It was therefore concluded that iron plaque on roots was a norfloxacin reservoir for rice plant but had no significant effect on the transfer of norfloxacin to roots and shoots of the rice plant.

Key words: iron plaque; rice (*Oryza sativa*); norfloxacin; root surface; accumulation

长期以来, 抗生素被大量用于医疗和畜禽养殖, 在保障人类健康和促进畜牧业发展方面起了重要作用。但研究表明, 抗生素摄入后在体内残留量极少, 85% 以上以原药和代谢产物的形式经由病人和动物的粪尿排出体外^[1]。这些含有喹诺酮类抗生素的畜禽废弃物或以有机肥形式施入农田, 导致土壤和表层水抗生素污染, 破坏土壤微生物群落结构和功能, 并被农作物吸收累积, 最终通过食物链影响其中的植物、动物和微生物的正常生命活动^[2,3]。喹诺酮类抗生素已在环境、动物性食品和食用蔬菜中有不同程度的检出^[4-7]。在喹诺酮类抗生素中, 环丙沙星、氧氟沙星和诺氟沙星的生产量最大, 约占生产

总量的 98%^[8,9]。因此, 环境中的此类抗生素对植物的生态风险性更高, 尤其是对水稻等农作物的危害更大, 进而可能通过食物链对人类产生影响。

植物为了适应淹水条件, 根系会生成大量通气组织, 将大气中的氧气通过叶片输送到根系, 其根系一般具有氧化能力, 可在根际形成氧化环境。研究表明, 淹水环境会有大量的 Fe^{2+} 存在, 耐淹水植物如水

收稿日期: 2014-11-24; 修订日期: 2015-01-15

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (13JCQNJC09000); 国家自然科学基金重点项目 (21037002); 天津市自然科学基金重点项目 (13JCZDJC35900)

作者简介: 马微 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: maweixiaoxiao@163.com

* 通讯联系人, E-mail: baoyanyu@nankai.edu.cn

稻等,其根系的氧化作用可在根表形成明显的铁氧化物胶膜^[10~13],铁膜也被认为是水稻应对长期淹水造成的还原状态下高浓度 Fe^{2+} 的一种适应机制^[14~16]. 铁膜是一种两性胶体,可通过吸附和共沉淀等作用,影响某些阴、阳离子在土壤中的化学行为和生物有效性,从而影响植物对这些元素的吸收^[17],已有很多研究报道了根表铁膜对水稻吸收累积 P、Zn、As 的影响^[18~24]. 目前对于铁胶膜对抗生素迁移转化的影响的研究鲜有报道. 诺氟沙星是两性化合物^[25],可能更容易被氧化物胶膜吸附,因此本试验采用溶液培养法,研究不同 Fe^{2+} 质量浓度和不同诺氟沙星质量浓度对水稻根表铁膜形成的影响,进而探究根表铁膜含量及不同质量浓度诺氟沙星对水稻根表、根内及地上部吸收诺氟沙星的规律,以期对抗生素在作物体内吸收累积的界面调控提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 供试材料

诺氟沙星标准品(纯度 99.0%,购自天津鼎国生物技术有限责任公司);乙腈为 HPLC 级试剂,购自天津康科德科技有限公司;其他化学试剂均为分析纯;试验用水:营养液用水为蒸馏水,高效液相测定用水为 Milli-Q 超纯水仪制备.

1.2 试验设计

将水稻种子(品种 津原 E28)用 30% H_2O_2 消毒 30 min 后,用蒸馏水浸泡 24 h,播于润湿的单层纱布上,水稻出苗 10 d 后,挑选出生长一致的幼苗移栽到 1.2 L 的塑料盆中,每盆 6 株幼苗,每个盆中供应 1/4 强度的国际水稻所水稻营养液,体积为 1 L. 营养液组分为: NH_4NO_3 114.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 50.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 K_2SO_4 89.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 CaCl_2 158.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 405 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 7.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 H_3BO_3 4.62 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.175 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.155 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Fe-EDTA 1.128 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 营养液 pH 值调至 5.0,每 3 d 更换一次营养液. 从第二次营养液开始,分 4 个质量浓度加入 Fe-EDTA,使得 Fe^{2+} 质量浓度为 1.128、10、50、70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第 3 d 观察即有铁膜在水稻根表形成,更换第六次营养液之前,取一批水稻测根表形成的铁氧化物胶膜含量. 从第 6 次营养液开始,停止添加不同质量浓度的 Fe^{2+} ,分 3 个质量浓度 0、10、50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 加入诺氟沙星,培养一个月后收获. 每次试验均以每盆中 6 株水稻进行测定.

上述各处理均重复 3 次.

1.3 研究方法

1.3.1 根表铁膜和诺氟沙星测定

将植株从营养液中取出,用去离子水冲洗 3 次,然后从茎基部将水稻根系和地上部分开. 地上部装入袋中. 根系用 DCB (dithionite-citrate-bicarbonate method) 法^[26]提取根表铁膜中的 Fe 和诺氟沙星,具体方法为:将用去离子水洗干净后的水稻根系放入 150 mL 三角瓶中,加入 0.3 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 40 mL, 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 5 mL, 3 g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, 振荡 3 h,将根用去离子水洗净后装入袋中,溶液转移至 100 mL 容量瓶中定容. 用火焰法原子吸收测定其中的铁含量,用高效液相色谱仪(HPLC)测定其中的诺氟沙星.

1.3.2 植株中诺氟沙星含量测定

水稻的根系及地上部植株样品放入冷冻干燥机,于 -65°C 冷冻干燥 24 ~ 48 h^[27,28]. 取适量干燥后的作物样品置于瓷质研钵中,加入少许石英砂,制备作物浆液于 50 mL 离心管中,加入乙腈:丙酮:冰乙酸(体积比)=80:20:4的提取液 10 mL,旋涡振荡均匀后,置于振荡器上提取 25 min,离心(2 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)20 min,取上清液,离心管中剩下的残渣用上述方法重复提取一次. 合并上清液,用 10 mL 乙腈饱和的正己烷液-液萃取上清液 2 次,去除脂类物质,提高回收率. 收集下层液体于浓缩瓶中,于旋转蒸发仪上浓缩近干,用乙腈/0.086 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸(15/85,体积比)定容至 5 mL 隔夜沉渣. 吸取 1 mL 过 0.22 μm 滤膜后待测^[29]. 此方法对水稻植株中诺氟沙星的回收率可达到 74.4% $\pm$ 4.9%.

1.3.3 诺氟沙星测定的高效液相色谱条件

Waters 高效液相色谱仪,具荧光检测器;色谱柱为 C_{18} (4.6 mm $\times$ 250 mm, 5 μm);激发波长 280 nm,发射波长 450 nm;柱温 35°C ;进样量 20 μL ;流动相:乙腈/磷酸(0.086 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 15/85 体积比);流速:1.0 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,分析时间为 15 min.

1.4 统计分析

图表制作采用 Origin 8.5,所有结果为 3 次平行试验数据的平均值,差异显著性和相关性分析采用 IBM SPSS Statistics 20(Duncan 法)进行检验,统计显著性设为 $P < 0.05$.

2 结果与讨论

2.1 水稻株高、根长、根系及地上部干重

诺氟沙星未存在条件下,对于溶液中 Fe^{2+} 对水稻生长的影响,当 Fe^{2+} 的质量浓度在 1.128 ~ 10

mg·L⁻¹范围内,随着 Fe²⁺ 质量浓度的增加,水稻株高、根系干重、地上部干重均显著性增加,而对根长并无显著影响. 当质量浓度超过这个范围,并未对水稻上述指标产生显著性影响(表 1). 营养液中添加的 Fe²⁺ 质量浓度相同的情况下,随着添加的诺氟沙星质量浓度的增加,株高、根长、根系及地上部干重基本都呈减小的趋势,对株高达到了显著性差异,而对根长、根系及地上部干重仅在个别处理组产生显著影响;营养液中诺氟沙星质量浓度相同

时,株高、根长、根系及地上部干重随着溶液中 Fe²⁺ 质量浓度的增加呈先增加后减小的趋势. 可见溶液中诺氟沙星的存在会对水稻的生长产生抑制作用,且这种抑制作用与诺氟沙星的质量浓度呈正相关. 在诺氟沙星质量浓度相同的条件下,Fe²⁺ 的质量浓度在一定范围内,随着 Fe²⁺ 质量浓度的增加,会促进水稻的生长,当质量浓度超过这个浓度范围,高质量浓度的 Fe²⁺ 会对水稻的生长产生抑制作用(表 1).

表 1 水稻株高、根长、根系及地上部干重¹⁾

处理组		水稻植株特征			
Fe ²⁺ 质量浓度 /mg·L ⁻¹	诺氟沙星质量浓度 /mg·L ⁻¹	株高 /cm	根长 /cm	根系干重 /mg	地上部干重 /mg
1. 128	0	36. 1 ± 1. 72 b	21. 4 ± 1. 66 a	56. 40 ± 2. 570 bcd	235. 9 ± 18. 87 cd
	10	27. 9 ± 1. 50 cd	14. 6 ± 0. 460 bc	35. 37 ± 4. 500 d	184. 4 ± 38. 07 de
	50	25. 7 ± 0. 450 de	14. 8 ± 0. 930 bc	34. 17 ± 5. 300 d	149. 4 ± 33. 36 e
10. 0	0	41. 3 ± 0. 970 a	22. 5 ± 0. 650 a	80. 63 ± 10. 39 a	353. 3 ± 55. 01 a
	10	31. 2 ± 2. 37 c	13. 4 ± 0. 800 cd	45. 73 ± 7. 220 cd	302. 6 ± 45. 48 ab
	50	26. 1 ± 0. 810 de	16. 3 ± 1. 88 b	46. 90 ± 9. 350 cd	203. 5 ± 28. 66 cde
50. 0	0	35. 9 ± 2. 84 b	21. 3 ± 1. 36 a	72. 80 ± 8. 180 ab	237. 6 ± 30. 09 cd
	10	27. 7 ± 2. 89 cd	12. 4 ± 1. 37 cd	44. 90 ± 4. 260 cd	173. 6 ± 50. 46 cd
	50	23. 1 ± 2. 67 e	12. 5 ± 1. 41 cd	47. 03 ± 2. 890 cd	143. 9 ± 19. 58 e
70. 0	0	34. 9 ± 1. 71 b	20. 9 ± 0. 670 a	72. 47 ± 13. 44 ab	255. 5 ± 40. 81 bc
	10	27. 9 ± 1. 31 cd	11. 7 ± 1. 63 d	44. 27 ± 10. 32 cd	221. 1 ± 27. 62 cd
	50	25. 3 ± 1. 50 de	11. 7 ± 1. 67 d	64. 90 ± 30. 58 abc	187. 8 ± 24. 07 cde

1) 多重比较采用 Duncan 法,不同小写字母表示同一 Fe²⁺ 水平下不同诺氟沙星添加或同一诺氟沙星水平不同 Fe²⁺ 添加条件下,水稻株高或根长或根系或地上部干重具有显著性差异($P < 0. 05$)

2. 2 诺氟沙星对水稻根表铁氧化物胶膜含量的影响

研究表明,在营养液中添加 Fe-EDTA 之后,水稻根表可形成红色的铁氧化物胶膜. 图 1 是加入不同质量浓度的 Fe²⁺ 后,用 DCB 从水稻根表提取出的铁量. 从中可以看出,由于加入的 Fe²⁺ 质量浓度不同,水稻根表铁氧化物的淀积量也不相同,加入的 Fe²⁺ 质量浓度越大,根表沉积的铁氧化物越多,这与之前的报道一致^[30]. 根表铁膜含量与添加 Fe²⁺ 质量浓度呈对数相关,相关性系数为 0. 999 6 ($n = 4, P < 0. 01$) (图 1).

根表铁膜形成且稳定一段时间之后,在营养液中停止添加 Fe-EDTA,加入不同质量浓度诺氟沙星,培养一个月. 用 DCB 从水稻根表提取铁,从试验结果可以看出,水稻根表的铁膜含量较停止添加 Fe-EDTA 之前有明显减少,且随着添加的诺氟沙星质量浓度的增加,根表铁膜的减少量有所增加(图 2). 根表铁膜减少量与诺氟沙星质量浓度的相关性系数为 0. 854 (Fe²⁺ 质量浓度为 1. 128 mg·L⁻¹, $n = 9$),

0. 982 (Fe²⁺ 质量浓度为 10 mg·L⁻¹, $n = 9$), 0. 992 (Fe²⁺ 质量浓度为 50 mg·L⁻¹, $n = 9$), 0. 290 (Fe²⁺ 质量浓度为 70 mg·L⁻¹, $n = 9$), 可见在 Fe²⁺ 质量浓度添加为 1. 128、10、50 mg·L⁻¹ 时,根表铁膜减少量与诺氟沙星质量浓度呈显著相关. 在未添加诺氟沙星的条件下,水稻根表铁膜含量在 Fe²⁺ 添加质量浓度为 1. 128 ~ 50 mg·L⁻¹ 时,保持和添加诺氟沙星之前一样的增加趋势,在 Fe²⁺ 为 70 mg·L⁻¹ 时,根表铁膜含量突然下降,与添加诺氟沙星的质量浓度为 10 mg·L⁻¹ 时一致. 在诺氟沙星质量浓度为 50 mg·L⁻¹ 时,根表铁膜含量没有很好的规律性(图 2). 据报道,铁氧化物能够通过络合作用对四环素类抗生素具有强烈的吸附和固定作用^[31~33]. 由于铁氧化物胶膜是两性胶体,诺氟沙星与四环素类抗生素一样均为两性化合物,所以可能是由于诺氟沙星与铁离子形成了络合物,促进了根系铁胶膜的释放. 值得注意的是,当 Fe²⁺ 和诺氟沙星添加质量浓度较高时,对水稻,尤其是水稻根部的正常生长产生了很大

影响,所以测定根表各项指标时,这些处理组的规律与其他正常生长的水稻会有一定的差别.

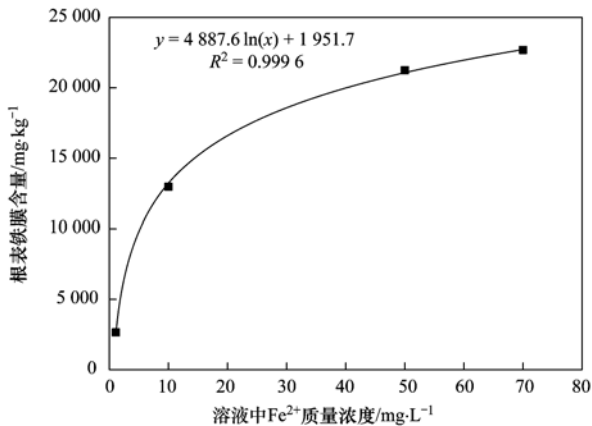
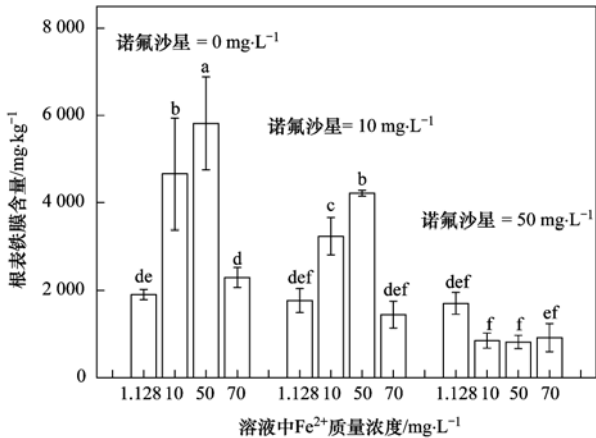


图 1 不同 Fe^{2+} 质量浓度诱导生成的水稻根表铁氧化物胶膜含量
Fig. 1 Effect of different Fe^{2+} mass concentration in culture solution on the content of iron plaque on the root surface of the rice plant



图中不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同
图 2 诺氟沙星对水稻根表铁氧化物胶膜含量的影响
Fig. 2 Effect of norfloxacin in culture solution on the content of iron plaque on the root surface of the rice plant

2.3 根表铁胶膜对水稻根表、根内及地上部诺氟沙星含量的影响

营养液中添加诺氟沙星培养一个月后,测定 DCB 从根表提取的诺氟沙星以及水稻根内及地上部的诺氟沙星. 对于水稻根表的诺氟沙星含量,随着根表沉积的铁氧化物越多,其富集量也越大. 水稻根内和地上部的诺氟沙星随着根表铁膜含量的变化以及根表诺氟沙星富集量的变化,并没有表现出很好的规律性. 根表、根内以及地上部的诺氟沙星含量都随着介质中添加诺氟沙星含量的增加而有所增加,除了 Fe^{2+} 添加为 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的根表诺氟沙星和地上部诺氟沙星,其他处理组的增加均达到显著水平. 这种结果的出现可能由于较高质量浓度的

Fe^{2+} 诱导生成的铁膜含量增加,但是水稻根表铁膜覆盖的根表面积并没有增加且由于水稻的生长状况较差,根表面积较其他处理组有所减少,使得诺氟沙星与根表铁膜结合的量减少,地上部吸收的诺氟沙星含量也受到影响. 已有报道指出,根表铁膜的形成可以富集介质中的 Zn 和 P,但是对水稻吸收 Zn 和 P 并不总是其促进作用,这取决于根表铁膜的含量,根表铁膜太厚或者太薄均不利于水稻对这些物质的吸收^[18]. 由结果可以看出(图 3),水稻根表沉积的氧化物胶膜对水稻根部及地上部吸收诺氟沙星没有明显的影响. 对于铁氧化

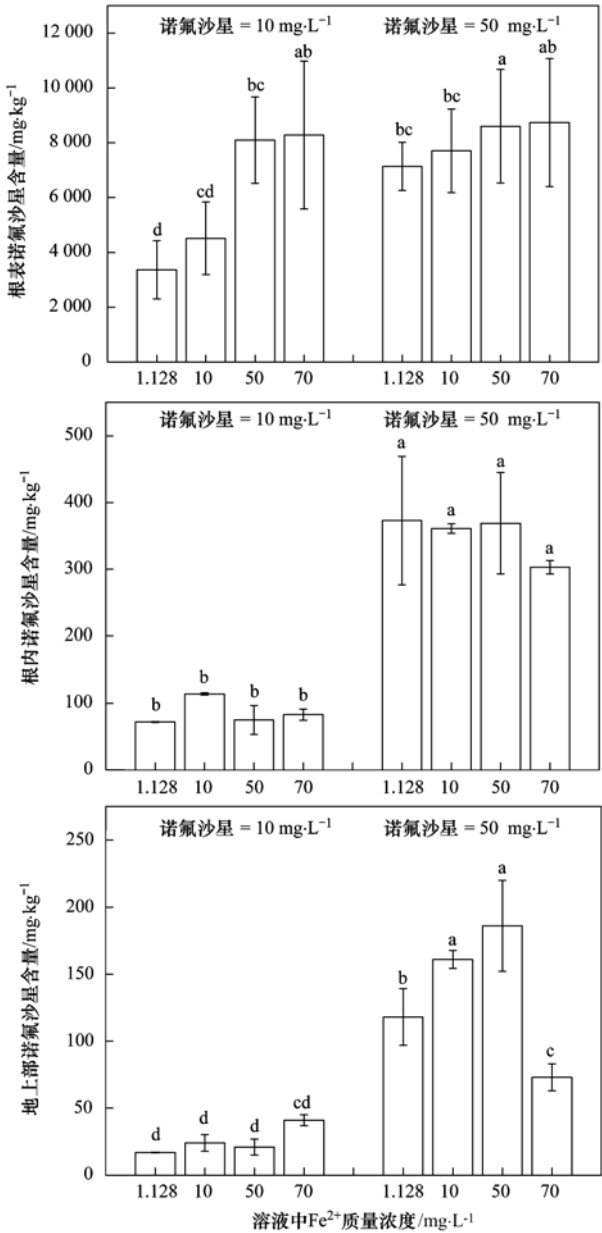


图 3 水稻根表、根内及地上部诺氟沙星含量
Fig. 3 Norfloxacin concentrations in DCB, roots and shoots of the rice plant

物胶膜,一方面,可以吸附、氧化还原、固定土壤溶液中存在的大量金属阳离子,并成为这些离子进入根系组织的障碍层,减少植物对其进行吸收和转运;另一方面,作为两性胶体,胶膜表面也可以吸附土壤中的金属阴离子等.但是,对于铁氧化物胶膜对于诺氟沙星在根系向植物体内的传输仍需要进一步机制性的讨论.

2.4 根表铁氧化物胶膜量与根表、根内、地上部的诺氟沙星含量之间的相关关系

当溶液中添加的诺氟沙星质量浓度为 10 mg·L⁻¹以及 50 mg·L⁻¹时,根表铁膜含量与根表诺氟沙星含量均具有显著相关性,表明随着胶膜量的

增加,胶膜内诺氟沙星量增加.根表铁膜含量与根内诺氟沙星含量的相关系数在诺氟沙星质量浓度为 10 mg·L⁻¹时为 0.682,诺氟沙星质量浓度为 50 mg·L⁻¹时为 -0.606;根表铁膜含量与地上部诺氟沙星含量的相关系数在诺氟沙星质量浓度为 10 mg·L⁻¹时为 0.045,诺氟沙星质量浓度为 50 mg·L⁻¹时为 0.000,表明根内及地上部的诺氟沙星含量与根表铁膜含量没有显著相关性.根内诺氟沙星与地上部诺氟沙星含量也没有显著相关性(表 2).结果表明,根表铁膜可以富集介质中的诺氟沙星,但是对水稻根部及地上部吸收诺氟沙星并没有起到明显的促进或者抑制作用.

表 2 根表铁氧化物胶膜量与根表、根内、地上部的诺氟沙星含量的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients among the content of iron plaque on the root surface and norfloxacin concentrations in DCB, roots and shoots of the rice plant

诺氟沙星	类型	根表铁膜	根表诺氟沙星	根内诺氟沙星	地上部诺氟沙星
10 mg·L ⁻¹	根表铁膜	1.000 *	0.959 *	0.682	0.045
	根表诺氟沙星		1.000 *	0.637	-0.240
	根内诺氟沙星			1.000 *	0.131
	地上部诺氟沙星				1.000 *
50 mg·L ⁻¹	根表铁膜	1.000 *	0.987 *	-0.606	0.000
	根表诺氟沙星		1.000 *	-0.625	-0.070
	根内诺氟沙星			1.000 *	0.775
	地上部诺氟沙星				1.000 *

1) ± 标准误差 (n = 12), * 表示 P < 0.05

2.5 诺氟沙星在水稻根表、根内以及地上部质量分配

试验结果表明,当营养液中添加的诺氟沙星质量浓度相同时,随着营养液中 Fe²⁺ 质量浓度的增加,根表诺氟沙星所占百分比逐渐增加,而根内和地上部诺氟沙星所占百分比逐渐减少.当添加的 Fe²⁺ 相同时,随着营养液中诺氟沙星质量浓度增加,根表诺氟沙星所占百分数减少,根内和地上部诺氟沙星所占百分数增加.对于所有的处理组,根表诺氟沙星所占的百分比为 87.7% ~ 97.6%,根内诺氟沙星所占百分比为 0.8% ~ 4.8%,地上部诺氟沙星所占百分比为 1.5% ~ 7.5%.对于任意处理组来说,根表诺氟沙星所占百分比远大于根内及地上部的诺氟沙星百分比,同时,地上部诺氟沙星所占百分比均大于根内诺氟沙星所占百分比.随着诺氟沙星质量浓度增加,根内和地上部诺氟沙星质量分配百分比增加,可能是由于溶液中较高质量浓度的诺氟沙星使得根表铁膜的下降量增加,最终导致根表富集的诺氟沙星降低(图 4).

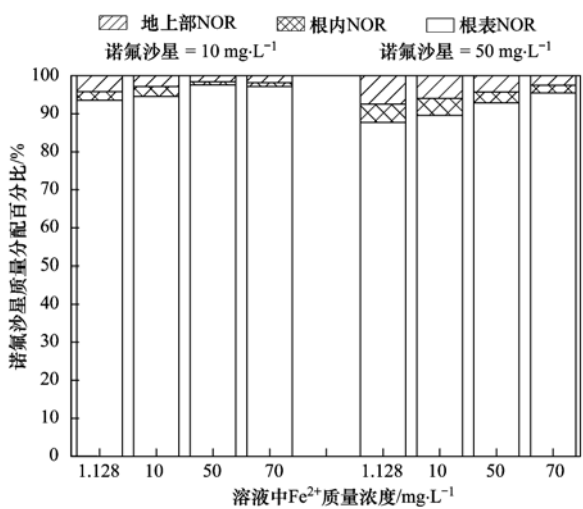


图 4 诺氟沙星在水稻根表、根内以及地上部质量分配的百分比
Fig. 4 Quality percentage distribution of norfloxacin in DCB, roots and shoots of the rice plant

3 结论

(1) 溶液中存在诺氟沙星会对水稻的生长产生抑制作用,且这种抑制作用与诺氟沙星的质量浓度

呈正相关. 在诺氟沙星质量浓度相同的条件下, Fe^{2+} 的质量浓度在一定范围内, 随着 Fe^{2+} 质量浓度的增加, 会促进水稻的生长, 当质量浓度超过这个范围, 高质量浓度的 Fe^{2+} 会对水稻的生长产生抑制作用.

(2) 随着溶液中添加 Fe^{2+} 质量浓度增加, 在水稻根表形成的铁氧化物胶膜含量增加, 且根表铁膜含量与添加 Fe^{2+} 质量浓度呈对数相关, 相关性系数为 0.999 6. 溶液中添加诺氟沙星之后, 根表铁膜的含量会降低, 且铁膜下降量随着诺氟沙星质量浓度增加而增加.

(3) 添加相同质量浓度的诺氟沙星, 水稻根表诺氟沙星含量随着水稻根表铁膜含量的增加而增加, 但是根内及地上部诺氟沙星含量与水稻根表铁膜没有相关性. 添加不同质量浓度的诺氟沙星, 水稻根表、根内以及地上部诺氟沙星质量分配的百分比为: 水稻根表 87.7% ~ 97.6%, 根内 0.8% ~ 4.8%, 地上部 1.5% ~ 7.5%, 根表诺氟沙星远远大于根内以及地上部的诺氟沙星含量. 由此可以看出, 水稻根表铁氧化物胶膜在一定程度上是一个诺氟沙星富集库, 但对诺氟沙星迁移到根内及地上部没有明显的促进或者抑制作用.

参考文献:

- [1] Hartmann A, Alder A C, Koller T, *et al.* Identification of fluoroquinolone antibiotics as the main source of *umuC* genotoxicity in native hospital wastewater [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(3): 377-382.
- [2] Thiele-Bruhn S, Beck I C. Effects of sulfonamide and tetracycline antibiotics on soil microbial activity and microbial biomass [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(4): 457-465.
- [3] 刘晓强, 欧阳五庆, 李引乾, 等. 氟喹诺酮类药物的耐药现状及对策[J]. *动物医学进展*, 2004, **25**(5): 24-27.
- [4] 马驿, 陈杖榴. 猪场及其周围环境中恩诺沙星残留的检测[J]. *中兽医医药杂志*, 2007, **26**(6): 11-16.
- [5] 张劲强, 董元华. 诺氟沙星在 4 种土壤中的吸附-解吸特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(9): 2134-2140.
- [6] 邵义萍, 莫测辉, 李彦文, 等. 长期施用粪肥土壤中喹诺酮类抗生素的含量与分布特征[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(6): 816-821.
- [7] 邵义萍, 莫测辉, 吴小莲, 等. 绿色和有机蔬菜基地土壤中喹诺酮类抗生素的污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(1): 125-130.
- [8] Björnerot L, Franklin A, Tysén E. Usage of antibacterial and antiparasitic drugs in animals in Sweden between 1988 and 1993 [J]. *The Veterinary Record*, 1996, **139**(12): 282-286.
- [9] 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 等. 北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4257-4266.
- [10] Armstrong W. The oxidising activity of roots in waterlogged soils [J]. *Physiologia Plantarum*, 1967, **20**(4): 920-926.
- [11] Jiang F Y, Chen X, Luo A C. Iron plaque formation on wetland plants and its influence on phosphorus, calcium and metal uptake [J]. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(4): 879-890.
- [12] Armstrong W. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants [J]. *Nature*, 1964, **204**(4960): 801-802.
- [13] Chen C C, Dixon J B, Turner F T. Iron coatings on rice roots: morphology and models of development [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 1113-1119.
- [14] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(6): 1527-1534.
- [15] Cai M Z, Zhang S N, Xing C H, *et al.* Interaction between iron plaque and root border cells ameliorates aluminum toxicity of *Oryza sativa* differing in aluminum tolerance [J]. *Plant and Soil*, 2012, **353**(1-2): 155-167.
- [16] Liu H, Zhang J, Christie P, *et al.* Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **394**(2-3): 361-368.
- [17] 何春娥, 刘学军, 张福锁. 植物根表铁膜的形成及其营养与生态环境效应[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(6): 1069-1073.
- [18] 张福锁, 李晓林, 王敬国, 等. 环境胁迫与植物根际营养[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 278-298.
- [19] Yamaguchi N, Ohkura T, Takahashi Y, *et al.* Arsenic distribution and speciation near rice roots influenced by iron plaques and redox conditions of the soil matrix [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1549-1556.
- [20] Zhou H, Zeng M, Zhou X, *et al.* Heavy metal translocation and accumulation in iron plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. *Plant and Soil*, 2015, **386**(1-2): 317-329.
- [21] Chen Z, Zhu Y G, Liu W J, *et al.* Direct evidence showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (*Oryza sativa*) roots [J]. *New Phytologist*, 2005, **165**(1): 91-97.
- [22] Bravin M N, Travassac F, Le Floch M, *et al.* Oxygen input controls the spatial and temporal dynamics of arsenic at the surface of a flooded paddy soil and in the rhizosphere of lowland rice (*Oryza sativa* L.): A microcosm study [J]. *Plant and Soil*, 2008, **312**(1-2): 207-218.
- [23] Hossain M B, Jahiruddin M, Loeppert R H, *et al.* The effects of iron plaque and phosphorus on yield and arsenic accumulation in rice [J]. *Plant and Soil*, 2009, **317**(1-2): 167-176.
- [24] 郭伟, 林咸永, 程旺大. 不同地区土壤中分蘖期水稻根表铁氧化物的形成及其对砷吸收的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 496-502.
- [25] Ross D L, Riley C M. Physicochemical properties of the fluoroquinolone antimicrobials. II. Acid ionization constants and their relationship to structure [J]. *International Journal of*

- Pharmaceutics, 1992, **83**(1-3): 267-272.
- [26] Otte M L, Rozema J, Koster L, *et al.* Iron plaque on roots of *Aster tripolium* L.: interaction with zinc uptake [J]. New Phytologist, 1989, **111**(2): 309-317.
- [27] 李伟明. 土霉素在土壤-植物系统的迁移转化研究[D]. 天津: 南开大学, 2013. 22-25.
- [28] Chen R F, Shen R F, Gu P, *et al.* Response of rice (*Oryza sativa*) with root surface iron plaque under aluminium stress [J]. Annals of Botany, 2006, **98**(2): 389-395.
- [29] 段晓洁. 喹诺酮类抗生素在蔬菜体内迁移和积累的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012. 13-20.
- [30] 张西科, 张福锁, 毛达如. 水稻根表铁氧化物胶膜对水稻吸收磷的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, **3**(4): 295-299.
- [31] Zhao Y P, Geng J J, Wang X R, *et al.* Adsorption of tetracycline onto goethite in the presence of metal cations and humic substances [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, **361**(1): 247-251.
- [32] Cheng G, Karthikeyan K G. Interaction of Tetracycline with Aluminum and Iron Hydrous Oxides [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(8): 2660-2667.
- [33] Figueroa R A, Mackay A A. Sorption of Oxytetracycline to Iron Oxides and Iron Oxide-Rich Soils [J]. Environmental Science Technology, 2005, **39**(17): 6664-6671.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行