

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国 IV 天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究

薛粟尹, 李萍, 王胜利*, 南忠仁

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 以典型绿洲区土壤-植物系统为研究对象, 在大田条件下创建了干旱区绿洲土壤氟生态风险评估模型, 并运用此模型对白银市城郊土壤氟污染进行了风险评估, 具体表现为用潜在生态风险氟有效态含量评估模型(ER_{bc})评估绿洲区土壤氟污染生态风险。结果表明, 研究区生态风险指数介于 1.37 ~ 24.81, 绝大多数地点风险程度表现为很高到极高, 平均生态风险指数为 11.28, 风险程度为极高。白银市东大沟水浇地农田土壤需关注氟污染的修复。

关键词: 绿洲; 土壤; 小麦; 氟污染; 生态风险评估

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1075-06 DOI: 10.13227/j.hjx.2014.03.036

Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil

XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren

(College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to translocation regulation of fluoride in the typical oasis soil-plant system under field, an ecological risk assessment model of fluoride was established, and this model was used to assess ecological risk to fluoride pollution from suburban oasis soils in Baiyin City, which was specifically expressed with the potential ecological risk of bioavailability (ER_{bc}) model to assess ecological risk of fluoride pollution in oasis regions. Results showed that the ecological risk indices of fluoride pollution from this region were 1.37-24.81, the level of risk at most sites was high to very high, the average ecological risk index was 11.28, belonged to very high risk. This indicated that in the suburb soil of Baiyin City needs to be concerned about the remediation of fluoride pollution.

Key words: oasis; soil; wheat plant; fluoride pollution; ecological risk assessment technology

土壤污染给生态系统带来负效应, 影响土壤微生物区系、生态物种和微生物过程, 进而影响生态系统的结构与功能^[1]。生态风险评估是定量研究有毒污染物生态危害的重要手段, 可应用于土壤标准的制定, 因而受到各国环境研究者和决策者的高度重视。如美国能源部橡树岭实验室制定土壤生态受体毒性基准^[2]; 荷兰土壤环境标准(干预值)^[3]。目前用于生态风险评估的方法很多, 常见的有单因子指数法^[4]、内梅罗综合指数法^[5]、地积累指数法^[6]、潜在生态危害指数法^[7]等。其中, 潜在生态危害指数法在土壤或沉积物中的研究应用较为广泛^[8-10], 该方法是利用沉积学原理评价污染及其生态危害, 反映了某一特定环境中各类污染物的影响, 并以定量的方法划分出潜在危害程度等级。现有的生态风险评估技术多见于土壤重金属污染^[11-13], 而对于土壤氟污染的生态风险评估技术还鲜见报道。

随着绿洲经济社会和城市化的发展, 绿洲土壤特别是工矿型绿洲土壤受到了严重的氟污染, 如白银市东大沟和西大沟(向黄河排放废水的排污渠)流域的农田大部分为直接废水灌溉, 2008 年例行监

测东大沟观音崖断面 F 的浓度高达 $110.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[14], 远远超过 F 的农田灌溉水质国家标准 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[15]; 调查研究白银市污水灌溉对农田土壤质量的影响时发现东大沟流域农田土壤 F 的含量为 $276.55 \sim 4989.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $1689.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16,17]; 张静等^[18]通过对白银 5 岁和 12 岁儿童的龋患状况进行流行病学研究得出, 工业区 12 岁组儿童龋病发病率显著高于对照区同组水平, 且氟牙症指数处于流行边缘。近年来相继开展了一些绿洲区土壤氟污染的研究^[19-21], 涉及污染调查、形态分布、形态特征等, 但对绿洲土壤中氟元素污染评价问题仍鲜见报道, 因此急需建立适合干旱区绿洲土壤氟污染管理的风险评估技术。本研究初步以潜在生态危害指数法作为基础, 进行模型

收稿日期: 2013-07-16; 修订日期: 2013-08-15

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120211111018); 中央高校基本科研业务费专项(Lzujbky-2012-141); 国家自然科学基金项目(51178209, 91025015)

作者简介: 薛粟尹(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染与修复, E-mail: xuesy11@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangshengl@lzu.edu.cn

的创建和验证,以期构建干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估模型。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

工矿型绿洲,即在西北干旱区依托区域矿产资源开发而兴建起来的工矿型城市,属于人工绿洲^[22]。甘肃白银市是河西走廊绿洲里典型的工矿型绿洲,也是中国重要的有色金属冶炼加工与化工工业基地之一。城区工厂多且分布集中,废水废气排放量大。城郊耕地总面积 $1.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$,有效灌溉面积 $0.47 \times 10^4 \text{ hm}^2$,主要分布在城郊东、西两大沟流域冲洪积地面上,因干旱缺水,城郊农业生产中都有不同程度的利用含氟、含重金属污水灌溉的历史^[23]。

1.2 样品采集与制备

在白银东大沟流域的水浇地农田中,用网格布点法选取 15 个代表性的样点,匹配采集 0 ~ 20 cm 的表层土壤和小麦样品,装入塑料袋内,带回实验室。土样于室内自然风干,剔除动植物残体,研磨过 2 mm 筛子后装袋备用;植物样经去离子水清洗后,在 105℃ 杀青 2 h,分出麦粒部分,再在 80℃ 下烘干至恒重后称量、粉碎过 60 目筛待用。

1.3 分析测定方法

土壤总氟含量测定采用 NaOH 碱熔法^[24];土壤中赋存的氟根据文献所提供的连续分级浸提方法逐级提取^[25],依次为水溶态氟、可交换态氟、铁锰结合态氟、有机束缚态氟和残渣态氟;小麦麦粒中氟含量的测定采用 KNO_3 -KOH 浸提^[26],提取液中的氟离子含量用氟离子选择性电极法测定(雷磁 PF-1-01, 中国),见表 1。

表 1 供试土壤和小麦中各形态氟的含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 1 Contents of various fluoride forms in the soils and wheat plants/mg·kg⁻¹

编号	土壤						小麦 T-F
	T-F	Ws-F	Ex-F	Fe/Mn-F	Or-F	Res-F	
S1	276.55	3.46	0.08	2.48	1.94	268.60	2.25
S2	4 986.69	36.19	3.06	14.88	87.67	4 844.88	1.56
S3	1 753.65	27.38	1.27	13.64	67.76	1 643.59	1.97
S4	1 868.67	55.00	8.78	20.22	97.19	1 687.49	3.83
S5	3 365.56	59.29	4.63	26.50	60.14	3 215.01	2.80
S6	1 134.74	20.18	1.12	9.81	5.44	1 098.20	2.06
S7	1 289.49	28.18	1.72	9.81	6.66	1 243.11	2.06
S8	1 659.84	26.18	1.79	11.12	6.67	1 614.08	2.06
S9	1 557.69	18.07	1.17	9.43	5.67	1 523.35	1.81
S10	1 133.61	25.24	1.22	10.67	1.74	1 094.74	2.15
S11	1 135.42	18.06	0.94	7.06	0.63	1 108.74	3.63
S12	1 369.94	25.22	1.95	8.73	3.93	1 330.11	2.92
S13	1 063.84	21.76	1.12	4.29	0.45	1 036.21	2.92
S14	1 064.27	18.75	1.17	5.51	1.48	1 037.36	2.06
S15	998.97	21.74	1.27	6.23	2.05	967.69	2.04

1) T-F、Ws-F、Ex-F、Fe/Mn-F、O. M. -F、Res-F 分别代表总氟、水溶态氟、可交换态氟、铁锰结合氟、有机束缚态氟和残余态氟

2 评估方法与模型的建立

2.1 潜在生态危害指数法

2.1.1 基本原理

瑞典学者 Hakanson^[7]于 1980 年提出的潜在生态危害指数法是一种水体沉积物评估方法,其利用沉积学原理评价污染及其生态危害,反映了某一特定环境中各类污染物的影响,并以定量的方法划分出潜在危害程度等级。在土壤-植物系统中,植物根际圈存在土壤溶液,氟在土壤颗粒-土壤溶液体系中存在吸附-解吸平衡,与在河流沉积物-水体系统中的行为类似,因此该方法也适用于土壤氟生态风险

评估。近年来的研究表明,虽然土壤中元素总量是必不可少的评估因素,但仅依据总量评估将过高或过低地估计其潜在风险的程度,从而降低生态风险评估的可靠性。许多学者在利用潜在生态危害指数法进行土壤重金属污染生态风险评估时用重金属有效态含量代替总量进行评估^[27~29]。氟在土壤中也以不同的赋存形态存在,且在一定条件下相互转换、迁移,因此对于有效态的应用有两种情形:一是在污染指数表达式中用有效态含量代替总量;二是引进一个新的参数——有效性因子。

2.1.2 模型参数选择

(1) 土壤中氟的浓度风险表征——污染因子

(C_f)

污染因子(C_f)是表征土壤污染的重要指标,其表示为土壤中氟的总量与参照值的商:

$$C_f = C_d / C_0 \quad (1)$$

式中, C_d 为土壤中氟总量实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_0 为土壤中氟总量参照值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

污染因子(C_f)表示相对于参照值,污染土壤氟总量的富集程度,其值随着污染土壤中氟总量的增加而增加.

本模型选取绿洲土壤中氟含量背景值为参照值以避免由于参照土壤的背景值的差异降低其准确性.

如果用有效态含量代替总量,则污染因子(C_f)表达式如下:

$$C_f = C_{\text{bio-d}} / C_{\text{bio-0}} \quad (2)$$

式中, $C_{\text{bio-d}} = (F_1 + F_2)_d$ 为土壤中氟有效态含量实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{\text{bio-0}} = (F_1 + F_2)_0$ 为土壤中氟有效态含量参照值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; F_1 为连续提取法中氟水溶态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; F_2 为连续提取法中氟可交换态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $F_1 + F_2$ 为氟的生物有效态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

选择 $F_1 + F_2$ 为氟的生物有效态含量代替总量是因为在绿洲土壤中 F_1 、 F_2 是最易被植物所吸收的形态,与植物氟含量存在显著的相关关系^[30,31].

(2) 氟生物有效性对生态风险的贡献——生物有效性因子(B_f)

绿洲土壤氟污染生态风险主要暴露途径为:氟污染物→土壤→农作物→人类,风险评估分末端是对人类健康的潜在影响. 只有土壤中可能为农作物所吸收的那部分氟(氟有效态含量)才能对生物构成风险,并以土壤中氟生物有效态的含量来表征氟生物有效性. 考虑到土壤植物对氟吸收接近指数相关,尤其是本研究中小麦麦粒氟含量与其生物有效性(B_e)存在显著指数相关性(图1),因而 B_f 可以表示为不同的指数形式,可供选择. 由于土壤中氟的形态受控于土壤物理化学条件^[16,25],因此选取邻区同类型未受污染的土壤中氟含量为参照值,以避免由于参照土壤的物理化学性质差异而引入不确定性.

因此,在评估模型中,将土壤氟生物有效性以生物有效因子(B_f)分别表示如下:

$$B_f = (B_d / B_0)^{0.5} \quad (3)$$

$$B_f = (B_d / B_0) \quad (4)$$

$$B_f = (B_d / B_0)^2 \quad (5)$$

$$B_f = (B_d / B_0)^3 \quad (6)$$

$$B_f = (B_d / B_0)^4 \quad (7)$$

式中, B_f 为土壤氟元素的生物有效性因子,无量纲; B_d 为土壤样品中氟元素的生物有效性系数,无量纲; B_0 为参照土壤中氟元素的生物有效性系数,无量纲.

元素生物有效性系数(B_e)可表示为:

$$B_e = (F_1 + F_2) / T \quad (8)$$

式中, B_e 为氟元素生物有效性系数,无量纲; F_1 为连续提取法中氟水溶态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; F_2 为连续提取法中氟可交换态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; T 为连续提取法中氟总量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $F_1 + F_2$ 为氟的生物有效态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

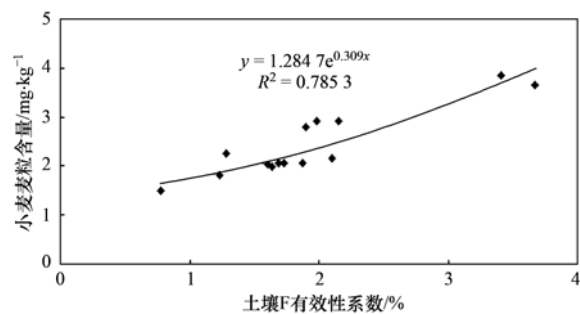


图1 氟污染下麦粒氟含量与土壤氟有效性系数之间相关关系

Fig. 1 Correlation between bioavailability coefficients of soil fluoride and grains

(3) 氟元素的生物毒性响应表征——毒性响应因子(T_r)

不同的元素具有不同的毒性响应因子,且生态风险指数随毒性响应因子的增大而增大^[32]. 本研究中,把氟作为单独元素,以氟丰度值为校正丰度数值,得到其毒性响应因子(T_r)为1.

2.2 ERI 评估模型探讨

本研究在绿洲土壤氟污染生态风险评估模型的构建中提出了3种潜在生态风险指数法模型,以供筛选和验证. 分别是潜在生态风险氟总量评估模型(ER_{tot})、潜在生态风险氟有效态含量评估模型(ER_{bc})、潜在生态风险氟有效性因子评估模型(ER_{bf}).

(1) 潜在生态风险氟总量评估模型(ER_{tot})

评估模型首先考虑绿洲土壤氟总量偏离参照值的程度,即相对参考区(未污染区)土壤,受评估区土壤的污染程度,即污染因子(C_f)同时考虑以氟元素自身对生物毒性响应(T_r)的贡献作为权重.

若以 ER_{tot} 表示氟的潜在风险因子,其模型表述为:

$$ER_{tot} = T_r \times C_f = T_r \times (C_d/C_0) \quad (9)$$

式中各字母的含义同公式(1)~(8),下同.

(2) 潜在生态风险氟有效态含量评估模型(ER_{bc})

模型首先考虑绿洲土壤氟有效态含量偏离参照土壤有效态含量的程度,即有效态含量污染因子(C_{f-bc}),以此用来表征相对参照土壤,受评估区土壤的氟污染程度.其次考虑以氟元素的毒性响应(T_r)的贡献作为权重.

若以 ER_{bc} 表示氟元素的潜在风险因子,其模型表述为:

$$ER_{bc} = T_r \times C_{f-bc} = T_r \times (C_{bio-d}/C_{bio-0}) \\ = T_r \times (F_1 + F_2)_d / (F_1 + F_2)_0 \quad (10)$$

(3) 潜在生态风险氟有效因子评估模型(ER_{bf})

评估模型首先考虑绿洲土壤氟元素总量相对参照值的累积程度,即相对参考区(未污染区)土壤,受评估土壤的污染程度,即污染因子(C_f).但是这个污染因子的强度并不能相对准确和灵敏地表征污染土壤的潜在风险,应以生物有效因子(B_f)对其进行修正.同时考虑以氟元素自身对生物的毒性响应(T_r)的贡献作为权重.

若以 ER_{bf} 表示氟元素的潜在风险因子,其模型表述为:

$$ER_{bf} = T_r \times B_f \times C_f \quad (11)$$

因为绿洲土壤氟生物有效性因子(B_f)有不同的表达式,因此潜在风险因子(ER_{bf})相应也有如下不同的表达式:

$$ER_{bf} = T_r \times B_f \times C_f = T_r \times C_f \times (B_d/B_0)^{0.5} \quad (12)$$

$$ER_{bf} = T_r \times B_f \times C_f = T_r \times C_f \times (B_d/B_0) \quad (13)$$

$$ER_{bf} = T_r \times B_f \times C_f = T_r \times C_f \times (B_d/B_0)^2 \quad (14)$$

$$ER_{bf} = T_r \times B_f \times C_f = T_r \times C_f \times (B_d/B_0)^3 \quad (15)$$

$$ER_{bf} = T_r \times B_f \times C_f = T_r \times C_f \times (B_d/B_0)^4 \quad (16)$$

(4) 潜在生态风险因子(指数)与评估指标分级

考虑到单一氟元素的毒性响应因子,本模型中潜在生态风险因子 E_r 以倍数形式表征风险的逐级增大,但对 Hakanson 潜在生态风险评估指标与分级

关系做了修正,以适应本研究的模型(见表2).

表2 本模型氟污染潜在风险评估指标与分级关系

C_f	污染程度	E_r	风险程度
$C_f < 1$	低	$E_r < 1$	A 低
$1 \leq C_f < 3$	中等	$1 \leq E_r < 2$	B 中等
$3 \leq C_f < 6$	较高	$2 \leq E_r < 4$	C 高
$C_f \geq 6$	很高	$4 \leq E_r < 8$	D 很高
		$E_r \geq 8$	E 极高

3 绿洲土壤氟污染生态风险评估模型的筛选与验证

本研究通过分析大田条件下典型绿洲区土壤中氟的含量与作物中可食部分积累的氟含量来对绿洲土壤氟污染生态风险评估模型进行筛选与验证,其依据是国家食品卫生标准中关于小麦麦粒中可食部分氟含量的限量 $< 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [33]. 为了与潜在生态风险评估法中的潜在风险因子中的风险分级对应,对食品卫生标准中关于小麦麦粒中氟含量的限量进行风险评估分级,如表3所示.

表3 小麦中可食部分氟含量的风险分级

作物	风险程度	F 含量限量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
小麦 GB $< 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	A 无	< 0.25
	B 低	$0.25 \sim 0.5$
	C 中等	$0.5 \sim 0.75$
	D 高	$0.75 \sim 1.0$
	E 极高	> 1.0

分析在白银东大沟流域采集的土壤样点氟的含量,对其氟污染分别用潜在生态风险氟总量评估模型(ER_{tot})、潜在生态风险氟有效态含量评估模型(ER_{bc})和潜在生态风险氟有效性因子评估模型(ER_{bf})进行生态风险评估;并与 GB 2762-2005 食品中污染物限量值(maximum levels of contaminations in foods, MLCF)进行比较,对模型进行筛选和验证.其中 ER_{bf} 模型中参数生物有效性因子 B_f 用 $B_f = (B_d/B_0)^{0.5}$ 表征,选择绿洲土壤中氟的背景值作为风险评估的参比值,为 $425 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [34]. 评估结果对比表明:以3种模型所计算的风险值与食品部分氟含量的限量值进行比较,吻合度由大到小的顺序为 $ER_{bc} > ER_{bf} > ER_{tot}$,表明 ER_{bc} 法能更好地评估白银市城郊绿洲土壤中氟的生态风险;因此此模型被选用(图2).

研究区生态风险指数介于 $1.37 \sim 24.81$ (表4),风险程度绝大多数地点表现为很高到极高,平均生

表 4 白银市城郊绿洲土壤中氟的生态风险评估结果

Table 4 Potential ecological risk assessment results of fluoride in Baiyin City								
编号	有效性				风险程度			
	系数 $B_e/\%$	ER_{tot}	ER_{bc}	ER_{bf}	MLCF	ER_{tot}	ER_{bc}	ER_{bf}
1	1.27	0.65	1.37	0.74	E 极高	A 低	B 中等	A 低
2	0.78	11.73	15.23	10.56	E 极高	E 极高	E 极高	E 极高
3	1.63	4.12	11.12	5.35	E 极高	D 很高	E 极高	D 很高
4	3.41	4.39	24.75	8.24	E 极高	D 很高	E 极高	E 极高
5	1.89	7.91	24.81	11.07	E 极高	D 很高	E 极高	E 极高
6	1.87	2.66	8.26	3.71	E 极高	C 高	E 极高	C 高
7	1.73	3.03	11.60	4.68	E 极高	C 高	E 极高	D 很高
8	1.68	3.90	10.85	5.14	E 极高	C 高	E 极高	D 很高
9	1.23	3.66	7.46	4.13	E 极高	C 高	D 很高	D 很高
10	2.11	2.66	10.26	4.13	E 极高	C 高	E 极高	D 很高
11	3.67	2.67	7.37	3.50	E 极高	C 高	D 很高	C 高
12	1.98	3.22	10.54	4.60	E 极高	C 高	E 极高	D 很高
13	2.15	2.50	8.88	3.72	E 极高	C 高	E 极高	C 高
14	1.87	2.50	7.73	3.47	E 极高	C 高	D 很高	C 高
15	2.30	2.35	8.93	3.619	E 极高	C 高	E 极高	C 高

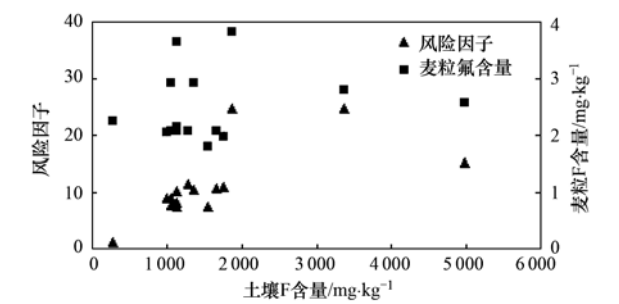


图 2 白银市城郊绿洲土壤中氟污染有效因子评估模型 ER_{bc}
Fig. 2 ER_{bc} model to assess ecological risk
of fluoride pollution in oasis regions

态风险指数为 11.28,风险程度为极高. 最小生态风险指数值出现在 1 号样点,风险程度最低,为对照土壤. 这表明,白银市东大沟水浇地农田土壤需关注氟污染的修复.

4 结论

通过对绿洲区大田条件下土壤作物系统氟污染生态风险评估模型的筛选与验选,构建了绿洲区土壤作物系统氟污染生态风险评估体系,具体表现为用潜在生态风险氟有效态含量评估模型(ER_{bc})评估绿洲区土壤氟污染生态风险. 评估结果表明研究区生态风险指数介于 1.37 ~ 24.81,绝大多数地点风险程度表现为很高到极高,平均生态风险指数为 11.28,风险程度为极高. 白银市东大沟水浇地农田土壤需关注氟污染的修复.

参考文献:

[1] Bradley E S, Suter G W, Efroymson R A. A guide to the ORNL ecotoxicological screening benchmarks; Background,

development, and application [EB/OL]. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, technical manuscripts, 1998.
[2] Efroymson R A, Will M E, Suter G W, *et al.* Toxicological benchmarks for screening contaminants of potential concern for effects on terrestrial plants: 1997 Revision[EB/OL]. http://www.esd.orn.lgov/programs/ecorisk/documents/tm_85r3.pdf, 2010. 03. 11.
[3] Verbruggen E M J, Posthumus R, Wezel A P. Ecotoxicological serious risk concentrations for soil, sediment and (ground) water; updated proposals for first series of compounds [EB/OL]. <http://www.rivm.nl/en>, 2010. 03. 11.
[4] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. 101-104.
[5] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
[6] 朱兰保, 盛蒂, 周开胜, 等. 应用地累积指数法评价淮河沉积物重金属污染[J]. 地下水, 2008, 30(5): 82-84.
[7] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
[8] 金德, 史永红, 高良敏. 应用生态风险指数法评价沉积物中重金属污染[J]. 山西建筑, 2010, 36(13): 335-336.
[9] Caeiro S, Costa M H, Fernandes F, *et al.* Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach [J]. Ecological Indicators, 2005, 5(2): 151-169.
[10] Boekhold A E. Ecological risk assessment in legislation on contaminated soil in the Netherlands [J]. Science of the Total Environment, 2008, 406(3): 518-522.
[11] 于文金, 邹欣庆, 朱大奎. 曹妃甸老龙口现代沉积环境及重金属污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1366-1376.
[12] 邴海健, 吴艳宏, 刘恩峰, 等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 675-683.

- [13] 王斌, 蒙海涛, 张震, 等. 天津近郊农田土壤重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. 环境研究与监测, 2010, **23**(4): 11-15.
- [14] 白银市环境监测总站. 甘肃省白银市环境监测年鉴(2011 年度)[Z], 2002.
- [15] GB 5084-2005, 农田灌溉水质标准[S].
- [16] 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 等. 干旱区工矿型绿洲城郊农田土壤氟的形态分布特征及其影响因素研究——以白银绿洲为例[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(12): 2407-2414.
- [17] 王国利, 刘长仲, 卢子扬, 等. 白银市污水灌溉对农田土壤质量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, (1): 79-82.
- [18] 张静, 赵望泓. 甘肃省某有色金属工业与非工业儿童患龋状况比较[J]. 中国学校卫生, 2007, **28**(12): 1094-1095.
- [19] Nan Z Z, Li J J, Zhang J M, *et al.* Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. Science of the Total Environment, 2002, **285**(1-3): 187-195.
- [20] 张贵彬, 蒋平安, 余艳华. 新疆奎屯垦区土壤氟污染调查[J]. 新疆农业大学学报, 2008, **31**(1): 57-59.
- [21] 艾尼瓦尔·买买提, 地理拜尔·苏力坦. 污灌土壤中氟及硫的形态分布特征[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(5): 238-244.
- [22] 南忠仁, 刘晓文, 赵转军, 等. 干旱区绿洲土壤作物系统重金属化学行为与生态风险评估研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. 3-4.
- [23] 刘娇, 曹靖, 南忠仁, 等. 白银市郊区重金属复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, **46**(5): 39-43.
- [24] 张东英, 周世厥. 离子选择电极法测定土壤中氟的方法改进[J]. 安徽农学通报, 2002, **8**(5): 48-49, 55.
- [25] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明, 等. 不同土壤中氟赋存形态特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2002, **23**(2): 104-108.
- [26] 杨倩, 史永松. 离子选择电极法测定植物中的氟化物[J]. 污染防治技术, 2004, **17**(2): 56-57.
- [27] 于瑞莲, 王荔娟, 胡恭任, 等. 晋江感潮河段沉积物重金属赋存形态及潜在生态风险[J]. 地球与环境, 2008, **36**(2): 113-118.
- [28] 李连芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染评价[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(2): 289-297.
- [29] 李泽琴, 侯佳渝, 王奖臻. 矿山环境土壤重金属污染潜在生态风险评价模型探讨[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(5): 509-516.
- [30] 吴代赦, 吴铁, 董瑞斌, 等. 植物对土壤中氟吸收、富集的研究进展[J]. 南昌大学学报(工科版), 2008, **6**(2): 103-111.
- [31] 李张伟. 粤东凤凰山茶区土壤氟化学形态特征及其影响因素[J]. 环境化学, 2011, **30**(8): 1469-1473.
- [32] 徐争启, 倪师军, 度先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- [33] GB 2762-2005, 食品中污染物限值[S].
- [34] 中国土壤环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 87-91, 99.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway ...	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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