

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



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, 崔晓勇, 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, 范嫻, 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 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 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, 王凤贺, 纪莹雪, 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, 席劲璇, 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, 任伯帆 (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, 顾远, 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 ₂ O 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多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> 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, 蒋铁锋 (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 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非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	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (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, 刘晚冰, 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, 李伯苓, 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, 赵赞, 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)	

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, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛*

(中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 伴随我国工农业生产的快速发展, 土壤污染物超标等问题逐年加剧, 由土壤镉污染导致水稻出现“镉米”等食品安全事件频发, 引起社会对土壤镉环境标准的广泛关注. 建立土壤环境标准是开展土壤环境质量现状评价的基础, 世界各国虽皆以镉对动植物和人体健康影响的最大允许值作为定值的基础依据, 但定值方法、标准应用目标各有侧重, 因而标准限值差异较大. 通过对国内外土壤重金属镉标准限值和我国土壤镉背景值的研究, 给出了全国各省级行政区域土壤表层镉背景含量范围值和部分土壤类型镉背景含量范围值; 报告了我国现行土壤镉环境质量标准存在的突出问题, 提出土壤环境质量标准中应设置土壤镉梯度标准限值、有效态与总量标准限值并存以及严格区分人为污染与高背景等建议.

关键词: 土壤污染; 重金属镉; 标准限值; 背景值; 有效态

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1491-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.042

Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research

ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, LI Bo-ling, WU Guo-ping, WEI Fu-sheng

(China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: With the rapid development of industrial and agricultural production in China, problems such as excessive soil pollutants worsen year by year, and soil cadmium pollution resulting from the emergence of “cadmium rice” and other food security incidents occur frequently. It causes the extensive concern of society on soil cadmium environmental standards. A soil environmental standard is the foundation for the evaluation of soil environmental quality. The maximum allowable value of cadmium that affects plant and animal and human health is regarded as the basis value all over the world; however, the certification methods and the goals of standard application are different, thus the standard limit has a great difference. Through the research on domestic and foreign soil cadmium standard limits and the soil cadmium background values in China, the soil cadmium background content range values of the provinces and of some types of soil are given. We report the outstanding problems existing in China's current environmental quality standard of soil cadmium. It is proposed that the soil environmental quality standard should allow the coexistence of gradient of soil cadmium standard limit, effective state and total standard limit, and anthropogenic pollution and background values exceeding the standard should be strictly distinguished.

Key words: soil pollution; heavy metal cadmium; standard limit; background value; effective state

我国土地资源短缺, 建立土壤环境标准是开展土壤环境质量现状评价的基础, 是指导土地利用规划和土壤污染治理, 保护土地资源的重要手段^[1]. 伴随我国工农业生产的快速发展, 土壤污染物超标等问题逐年加剧, 由土壤镉污染导致水稻出现“镉米”等食品安全事件频发, 引起社会对土壤环境标准的广泛关注^[2~5]. 如何正确认识和科学确定土壤污染物的标准限值, 更好地管理和利用土地资源, 实现保护土壤生态系统和人体健康的目标, 已成为急需解决的重要课题.

1 发达国家土壤环境中镉的标准限值

土壤环境镉标准值通常是基于多种可能暴露途径的生态风险评价或健康风险评价而制定的^[6~11], 由于土壤系统的复杂性, 土壤环境标准的制定需要

一个不断完善的过程, 世界各国在制定土壤环境镉标准时, 多以保护土壤基本功能、生态系统安全、人体健康等为目标^[12], 通常要考虑镉的化学毒性、环境背景值、影响迁移和暴露等环境因素, 确定土壤镉各级别标准限值. 各国制定土壤标准的依据基本相同, 即以镉对动植物和人体健康产生影响的允许值作为定值的基础依据, 但定值方法、标准应用目标各有侧重, 标准限值差异较大(见表1).

(1) 美国是国家制定导则, 由各州自行确定土壤镉标准限值, 由环保署颁布用于推导保护生态环

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2012-ZD-3-1)

作者简介: 赵晓军(1959~), 男, 研究员, 主要研究方向为生态、土壤环境监测, E-mail: zhaoxj@cncem.cn

* 通讯联系人, E-mail: weifsh@cae.cn

境和用于推导保护人体健康的土壤筛选导则 (soil screening guidance, SSG)^[13~16], 规定了生态土壤筛选值 (ecological soil screening values-plant) 为 $32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 人体健康土壤筛选值 (human health soil screening values-ingestion) 为 $70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 美国禁止杀虫剂中含有镉; 规定工作环境空气中镉尘限值为 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

(2) 英国环保署 (Environment Agency, EA) 2002 年按照土地利用类型, 考虑镉对人体健康和对植物的影响^[17], 制定了土壤质量指导值, 规定土壤污染“起始浓度”为 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但未给出土壤修复所需的“修复值”.

(3) 丹麦制定了由背景水平 $0.03 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、生态毒理学基准 (eco toxicological benchmark) $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、土壤质量基准 (soil quality benchmarks) $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 构成的标准限值体系, 以确保准确评判土地的利用目标和受污染程度^[18,19].

(4) 日本土壤标准以保护土壤和地下水为目标, 综合考虑土壤镉的生物活性, 在制定土壤标准中采用了浸出液 (将土壤和 10 倍量的水混合, 将污染物浸出) 标准, 实现了土壤镉有效态分析检测, 规定了土壤试样溶出量镉的标准限值为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、大米为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20,21].

(5) 荷兰国家土壤环境标准主要由土壤镉的目标值 (target value)、调解值 (intervention value)、最高允许浓度 (maximum permissible concentration,

MPC) 等构成, 荷兰国家土壤标准以保护生态系统和人体健康以及修复污染土壤为目标, 综合考虑了土壤质地和有机质组成, 构成了比较完善的标准体系^[22].

(6) 澳大利亚国家环境保护委员会 (National Environmental Protection Council, NEPC) 对于土壤镉设立了 A 级为土壤背景值 $0.04 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 B 级为土壤调查值 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23]. 一般来说, 当测定区域土壤污染物浓度符合 A 级时, 可认为未受到污染; 如高于 B 级, 表示该区域土壤环境需进行进一步调查. 由于澳大利亚不同地区的生态多样性, 各地还可以自行建立区域生态调研值 (regional ecologically investigation levels, REIL)

(7) 加拿大环境部长理事会 (The Canadian Council of Ministers of the Environment CCME) 制定的土壤环境质量标准名称单一, 称作土壤质量指导值, 其标准限值为 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但在标准制定时同时考虑了人体健康风险和生态风险两类受体, 一般用于初步判断污染场地是否需要进一步的详细风险评估.

(8) 瑞士现行标准是总量和有效态标准并用. 土壤镉总量的指导值 (guideline values) 为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 临界值 (the critical value) 为 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 农用地修复值 (repair value) 为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤镉可溶态指导值为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 临界值为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 农用地修复值为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24].

表 1 一些国家和地区土壤中镉的标准限值¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Cadmium standard limits of soil in some countries and regions/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

序号	国家和地区	土壤镉限值 (1)	土壤镉限值 (2)	备注
1	欧共体	1 ~ 3		
2	美国	3.56	32	(1)通用值;(2)生态筛选值
3	澳大利亚	0.04 ~ 2	3	(1)背景值;(2)环境调查值
4	中国台湾	2.5	5	(1)农产地监测基准值;(2)农产地管制标准值
5	英国	3.5	1	(1)农副业产地;(2)公园和运动场
6	日本	$0.01 (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1	(1)试样溶出标准;(2)大米标准
7	荷兰	0.8	12	(1)目标值;(2)调节值
8	加拿大	1.6	1.5	(1)国家标准;(2)北魁克省标准
9	丹麦	0.03 ~ 0.5	0.5	(1)背景水平;(2)土壤质量基准值
10	瑞士(总量)	0.8	2	(1)指导值;(2)临界值
	瑞士(可溶态)	0.02	0.1	(1)可溶态指导和临界值;(2)可溶态修复值
11	法国	2		
12	德国	3		
13	意大利	3		
14	前苏联	5		

1) 日本采用 1:10 试样水溶液标准; 瑞士可溶态采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaNO}_3$ 提取液 1:2.5 干重计算

从表 1 可以看出, 各国标准中镉的定值相差较大, 这是由于各国在以人体日允许摄入总量为基准

时,所采取的暴露方式、摄入途径(如食物、水、空气、尘土等)及其比例有所不同,计算确定的土壤最大允许浓度就相差甚远;加之最高允许浓度往往作为各国进行土壤污染修复的行动值,标准的制定势必受到土壤修复技术和经济能力的影响.另外,国际上对土壤质量标准限值的命名各不相同,如美国的土壤筛选值、加拿大的土壤质量指导值、澳大利亚土壤环境调查值、丹麦的土壤基准值、荷兰的土壤目标值和调解值等,各国命名虽然不同,但实际上是涵盖了两个层次的内容:一个是保护土壤生态功能,另一个层次是保护人体健康.如荷兰的目标值是指当低于此值时,对环境的影响可忽略,土壤具有完善的生态环境功能;调解值是指当高于此值时,有可能引起严重的污染事件,存在“潜在危险性”;一般土壤背景值多为评价基本标准;指导值主要以预防土壤污染为目的,保护对象为土壤生态功能;临界值代表可能存在风险的域值;修复值是绝对的限值,当土壤污染物总浓度或可溶态浓度超过修复值时,必须立即采取必要措施以规避风险.

2 我国各类标准中镉的限值比较

标准限值的选择是土壤环境质量评价的关键,现行《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)过于强调全国标准限值统一性,由于我国不同区域地球化学条件差异显著,土壤镉背景含量地区差异明显,采用同一标准限值来评价全国不同地区土壤环境质量显然不十分科学^[25~29].我国相关产地环境行业标准大多直接引用国标 GB 15618,在指标选取、确定标准限值方面大致相同,缺少各行业保护目标的暴露量评估试验.如:《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332-2006)、《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ 333-2006)、《无公害食品蔬菜产地环境条件》(NY 5010-2002)、《畜禽养殖产地环境评价规范》(HJ 568-2010)等(见表2)均属于直接引用国标 GB 15618.在《污染场地风险评估技术导则》(报批稿)中虽然给出了“住宅类用地土壤启动值和工业及其他用地土壤启动值”,但导则中缺少对各地方政府制定相应地方标准值的强制要求.

表 2 我国土壤镉的相关标准限值/mg·kg⁻¹
Table 2 Cadmium standard limits of soil in China/mg·kg⁻¹

标准	项目	镉标准限值
土壤环境质量标准(GB 15618-1995)	一级标准	0.2
	二级标准	0.3~0.6
	三级标准	1
食用农产品产地环境质量评价标准(HJ 332-2006)	pH 值 <6.5	0.3
	pH 值 6.5~7.5	0.3
	pH 值 >7.5	0.6
温室蔬菜产地环境质量评价标准(HJ 333-2006)	pH 值 <6.5	0.3
	pH 值 6.5~7.5	0.3
	pH 值 >7.5	0.4
无公害食品蔬菜产地环境条件(NY 5010-2002)	pH 值 <6.5	0.3
	pH 值 6.5~7.5	0.3
	pH 值 >7.5	0.6
畜禽养殖产地环境评价规范(HJ 568-2010)	pH 值 <6.5	0.3
	放牧区 pH 值 6.5~7.5	0.3
	pH 值 >7.5	0.6
	养殖场、养殖小区	1
污染场地风险评估技术导则(报批稿)	住宅类用地土壤启动值	6.8
	工业及其他用地土壤启动值	13
农用污泥中污染物控制标准(GB 4284-84)	最大浓度(pH <6.5)	5
	最大浓度(pH ≥6.5)	20

3 土壤镉背景含量范围值

3.1 土壤镉背景含量范围值计算

土壤环境背景值是在不受或很少受到人类活动

影响下的土壤化学组成或元素含量水平,是判定土壤是否受到外源污染的基本依据.由于我国土壤环境背景值成因复杂,元素含量空间分布差异明显,因此,土壤环境背景值对于一定区域来讲应该以范围

值表示^[30~32],其范围值获得方法为:首先在调查单元内尽可能地采集较多的代表性样本,然后采用地球化学统计法对样品的原始分析数据进行顺序量统计,确定含量最小值、最大值和数据分散程度,计算出均值和标准差,然后根据样品数据分布情况,若是近似对数正态分布的调查单元,采用几何均值和几何标准差确定 95% 置信度范围值,即:“95% 置信度范围值 = 几何均值/几何标准差的平方 ~ 几何均值

× 几何标准差的平方”;若是近似正态分布的调查单元,采用算术均值和算术标准差应用“ $\bar{X} \pm 2S$ ”公式计算 95% 置信度范围值. 全国各省(市、区)土壤表层镉样品数据均属于近似对数正态分布,因此,其 95% 置信度范围值应以几何均值和几何标准差计算,其结果见表 3,土壤环境背景范围值可作为各省(市、区)土壤环境质量评价的基准,用以保护土壤自然背景状态.

表 3 全国各省(市、区)土壤表层镉背景含量范围值¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Surface soil cadmium background content range value of the provinces (city, area) in China/mg·kg⁻¹

地区	最小值	最大值	几何平均	标准差	95% 置信度范围值	地区	最小值	最大值	几何平均	标准差	95% 置信度范围值
全国	0.001	13.430	0.074 0	2.118 0	0.017 ~ 0.332	江西	0.006	1.010	0.069 6	2.605 6	0.010 ~ 0.473
辽宁	0.001	0.412	0.090 8	1.829 0	0.027 ~ 0.304	湖北	0.016	8.220	0.113 7	2.504 2	0.018 ~ 0.713
河北	0.002	0.474	0.056 1	3.498 1	0.005 ~ 0.687	湖南	0.002	4.500	0.078 7	2.608 2	0.012 ~ 0.535
山东	0.021	0.204	0.074 5	1.660 1	0.027 ~ 0.205	陕西	0.031	0.249	0.088 6	1.435 9	0.043 ~ 0.183
江苏	0.008	2.470	0.050 1	3.190 4	0.005 ~ 0.510	四川	0.010	0.150	0.075 0	1.368 7	0.040 ~ 0.141
浙江	0.004	0.220	0.047 2	2.623 0	0.007 ~ 0.325	贵州	0.042	7.650	0.208 6	3.777 9	0.015 ~ 2.977
福建	0.016	0.447	0.053 8	2.103 5	0.013 ~ 0.238	云南	0.009	3.409	0.103 5	3.043 4	0.011 ~ 0.959
广东	0.004	2.286	0.040 8	2.214 3	0.008 ~ 0.200	宁夏	0.046	0.254	0.102 5	1.530 4	0.044 ~ 0.240
广西	0.006	13.430	0.079 1	3.995 6	0.005 ~ 1.263	甘肃	0.037	0.236	0.110 6	1.361 5	0.060 ~ 0.205
黑龙江	0.036	0.400	0.080 6	1.442 2	0.039 ~ 0.168	青海	0.073	0.264	0.132 9	1.266 5	0.083 ~ 0.213
吉林	0.013	0.429	0.091 4	1.496 2	0.041 ~ 0.205	新疆	0.016	1.634	0.103 7	1.711 3	0.035 ~ 0.304
内蒙古	0.004	0.214	0.037 4	2.552 1	0.006 ~ 0.244	西藏	0.006	0.583	0.077 5	1.347 3	0.043 ~ 0.141
山西	0.031	0.358	0.111 8	1.698 6	0.039 ~ 0.323	北京	0.005	0.339	0.053 4	2.541 3	0.008 ~ 0.345
河南	0.039	0.276	0.072 6	1.256 2	0.046 ~ 0.115	天津	0.054	0.943	0.087 0	1.285 7	0.053 ~ 0.144
安徽	0.020	0.344	0.083 7	1.702 0	0.029 ~ 0.243	上海	0.052	0.331	0.124 1	1.597 6	0.049 ~ 0.317

1) 根据《中国土壤元素背景值》中国环境科学出版社 1990 年,计算得出 95% 置信度范围值,未包括中国台湾、香港、澳门地区,下同

3.2 土壤镉背景含量区域分布不均

土壤成土母质类型是影响土壤镉背景值的重要因素之一,不同自然条件下发育的土类其土壤镉背景含量有明显的差异^[33~35],即使是同一土类由于发育母岩不同其背景元素含量也有很大不同,从全国 20 个主要土壤类型来看(见表 4),不同土壤类型镉背景含量差异显著,明显高于全国均值(0.074 mg·kg⁻¹)的土类有石灰土、水稻土、灰褐土、灰棕漠土;明显低于全国均值的土类有红壤、赤红壤、栗钙土等.

全世界多数土壤镉含量在 0.01 ~ 2.0 mg·kg⁻¹ 之间,中值为 0.35 mg·kg⁻¹,我国土壤的自然镉含量在 0.01 ~ 1.80 mg·kg⁻¹ 之间,平均为 0.163 mg·kg⁻¹,比世界多数土壤的平均镉含量低^[36]. 土壤中镉一般以可给态、交换态和难溶态存在,其对大气沉降和随水流迁移到土壤中的镉有较强的吸附力,吸附率在 85% ~ 95%,吸附的镉一般停留在表层 0 ~ 15 cm 土壤,15 cm 以下含量显著减少. 根据全国“七五”土壤背景值调查结果,我国土壤表层(0

~ 20 cm) 镉的背景含量最小值为 0.001 mg·kg⁻¹,最大值为 13.430 mg·kg⁻¹,相差巨大. 各省(市、区)土壤镉背景含量超过全国均值(0.074 mg·kg⁻¹)的有 20 个省(市、区),表层镉含量范围值如:贵州(0.015 ~ 2.977 mg·kg⁻¹)、广西(0.005 ~ 1.263 mg·kg⁻¹)、云南(0.011 ~ 0.959 mg·kg⁻¹)、湖北(0.018 ~ 0.713 mg·kg⁻¹)等省区最大值远高出执行国家标准,但其属高背景值,并非外来污染所致,各省(市、区)辖区内土壤镉含量分布也十分不均.

由于土壤背景值缺少环境学和生态学意义,并不能真正体现污染对土壤生态环境及人体健康造成危害的程度,土壤自然背景高与人为活动污染超标有本质上的不同,在制定标准和各类总结报告中不可混为一谈. 我国台湾省在 2011 年颁布的《土壤污染监测标准》中第二条规定:“本标准所列土壤中物质(包含镉等 8 种)浓度,受区域土壤地质条件及环境背景因素影响,经具体科学性数据研判,属非因外来污染而达本标准值,经中央主管机关同意,不适用本标准”. 即:自然背景超标土壤不执行该标准. 由

表 4 全国部分土壤类型(表层) 镉背景含量范围值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 4 Cadmium background content range value of some types of soil (surface) in China/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

土壤类型	最小值	最大值	几何平均	标准差	95% 置信度 范围值	土壤类型	最小值	最大值	几何平均	标准差	95% 置信度 范围值
石灰土	0.003	13.430	0.385	4.183 5	0.022 ~ 6.745	紫色土	0.010	0.710	0.075	2.022 1	0.018 ~ 0.307
水稻土	0.008	3.000	0.108	2.157 7	0.023 ~ 0.502	棕壤	0.001	0.485	0.078	1.772 7	0.025 ~ 0.245
灰褐土	0.006	0.301	0.127	1.535 9	0.054 ~ 0.300	黄棕壤	0.008	8.220	0.079	2.203 9	0.016 ~ 0.382
棕钙土	0.005	0.589	0.072	2.672 6	0.010 ~ 0.515	草甸土	0.005	0.300	0.074	1.692 1	0.026 ~ 0.211
栗钙土	0.002	0.303	0.041	3.377 5	0.004 ~ 0.463	黑土	0.004	0.165	0.073	1.412 3	0.037 ~ 0.146
灰棕漠土	0.005	0.257	0.103	1.429 5	0.051 ~ 0.211	灰钙土	0.026	0.172	0.083	1.416 6	0.041 ~ 0.167
白浆土	0.032	0.429	0.093	1.657 6	0.034 ~ 0.255	黄壤	0.005	4.500	0.064	2.003 0	0.016 ~ 0.258
潮土	0.005	0.943	0.085	1.937 5	0.023 ~ 0.320	绵土	0.006	0.249	0.093	1.346 5	0.052 ~ 0.169
黑钙土	0.005	0.393	0.087	2.117 1	0.019 ~ 0.389	红壤	0.002	4.500	0.047	2.204 0	0.010 ~ 0.229
褐土	0.002	0.583	0.081	1.957 1	0.021 ~ 0.310	赤红壤	0.005	0.505	0.033	2.306 6	0.006 ~ 0.176

此可见,台湾省是将土壤自然背景超标与人为污染超标区别对待的一个例证.同时,为了进一步防控土壤的外源污染,保护土壤生态环境安全和人体健康,还必须在土壤环境背景基准值之上制定第二级和第三级标准限值.

4 我国土壤镉标准的主要问题

4.1 标准中镉含量定值偏严

我国现行《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中规定耕地土壤执行二级标准,其中“镉”标准值为 $0.3\sim0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.而在国外的相应标准中荷兰和瑞士均为 $0.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、加拿大为 $1.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、台湾省食用作物农地管制基准值为 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、管制标准值为 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、澳大利亚环境调查值为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、欧共体规定为 $1\sim3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,综合比较我国标准可能偏严.应该根据我国各类土地利用目标进行土壤生态环境和人体健康风险评估,研究修订我国土壤镉的标准限值,以适应实际工作的需要.

4.2 土壤镉的超标与污染

土壤环境中镉含量的自然高背景值超标与人为污染超标有本质上的不同.目前,按照现行《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)评价土壤镉元素含量,会出现高背景值点位无外源污染超标情况.因为该国标中规定的镉元素标准值,是根据土壤中镉的平均背景含量及95%置信水平来确定的,该标准是我国首个土壤环境标准,在保护土壤环境方面起了重要作用.但是,我国地域辽阔,气候、植被、成土因素及土壤类型复杂多样,同一元素在不同区域、不同类型土壤中的背景含量存在较大差异,许多地区土壤自然背景值高于国家标准值,必然出现即使土壤没有受到外源污染其评价结果依然超标的现

象,应该使大家清楚地认识到以现行国标评价的结果超标不一定是污染.

4.3 土壤镉标准限值层次单一

现行《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中规定了“镉”有5个标准限值,但均属于同一层次,只是区分了不同土地利用类型和不同酸碱度条件下分别执行不同的标准限值.荷兰国家土壤环境标准分为目标值、调解值;瑞士制定了土壤镉总量的指导值、临界值、农用地污染修复值;澳大利亚国家对于土壤镉设立了A级为土壤背景值和B级为土壤调查值;丹麦制定了由背景水平值、生态基准值、土壤质量基准值三位一体的土壤质量标准限值;美国规定了生态土壤筛选值;人体健康土壤筛选值等.以上国家均制定了土壤镉标准的梯度限值,分别用以保护土地的不同利用目标.

4.4 土壤镉缺少有效态标准值

我国现行国家标准中镉是以全量制定的标准值,全量只能代表该元素的总贮量,并不能真正表达镉的供给水平.土壤中镉一般以可给态、交换态和难溶态存在,不同存在形态的镉其迁移、转化、吸附、解吸能力各不相同,其受土壤pH值和有机质含量影响较大.在监测与评价中有效态标准值无疑优于土壤镉全量值,因为有效态含量可以避免因土壤母质类型和土壤理化性质的不同而带来的实际危害差异,更能表达土壤功能及土壤环境质量的优劣程度.

5 建议

(1) 建议制修订适合我国现阶段土壤镉的各级标准值.以我国敏感人群对土壤重金属镉的每日允许摄入量(非致癌性污染物)或可接受风险水平(致癌性污染物)为基本出发点,根据不同土地利用

方式,确定暴露风险受体、暴露途径及迁移转化特性等参数,并进行模型计算,最后对计算的标准值再参考国外标准、结合国内经济技术水平进行必要的调整。

(2)当实测土壤镉含量值超过国家土壤标准限值时,建议首先与该地域土壤背景值比较,区别是外来污染还是自然高背景值,在确认是高背景情况下,应与有明显外源污染土壤区别对待;确系有污染源污染要进一步进行环境质量综合评价和各类风险评估。

(3)设立土壤镉的梯度标准限值。如:一级:土壤自然背景值(自然背景保护);二级:土壤环境指导值(受污染但可使用);三级:土壤污染修复值(高风险必须治理)。分别作为保护土壤功能自然背景,保护土壤生态环境和人体健康安全,开展污染土壤修复的标准值。对于不同用途土壤如:食用农产品产地、生态环境用地、住宅用地、工业用地等分别制定不同的标准限值,同时考虑镉的有效态标准值。

(4)将有效态标准限值与全量标准限值同时使用。在实际应用中,有效态标准限值的可靠性取决于有效态测定方法的可靠性,在常见的土壤有害元素中铜、镉、铅和锌的提取和测定方法比较成熟。总量标准值虽然不能反映元素的有效性,但它具有测定方法成熟、数据结果比较稳定等优点,因此,在现阶段将有效态标准限值与全量标准限值同时使用较为适宜。

参考文献:

- [1] 夏家洪. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996. 11-22.
- [2] 陈怀满,郑春荣,周东美,等. 土壤环境质量研究回顾与讨论[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4): 821-827.
- [3] 崔力拓,耿世刚,李志伟. 我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J]. 现代农业科技,2006,(11): 184-185.
- [4] Alexander M. Aging, bioavailability, and overestimation of risk from environmental pollutants[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(20): 4259-4265.
- [5] 王鸿飞. 环境镉污染及镉对环境暴露人群影响的研究[J]. 广东微量元素科学,2002,9(7): 24-26.
- [6] 土壤环境容量协作组. 中国主要类型土壤 Cd、Pb、Cu 和 As 主要生态学指标和临界含量[J]. 环境科学,1991,12(4): 29-34.
- [7] Fernandez M D, Vega M M, Tarzana J V, et al. Risk-based ecological soil quality criteria for the characterization of contaminated soils: Combination of chemical and biological tools[J]. Science of the Total Environment, 2006, 366(2-3): 466-484.
- [8] 孟凡乔,史雅娟,吴文良. 我国无污染农产品重(类)金属元素土壤环境质量标准的制定与研究进展[J]. 农业环境保护,2000,19(6): 356-359.
- [9] RIVM. Guidance document on deriving environmental risk limits in the Netherlands[R]. Beethoven, Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment, 2001.
- [10] 刘凤枝,师荣光,徐亚平,等. 耕地土壤重金属污染评价技术研究——以土壤中铅和镉污染为例[J]. 农业环境科学学报,2006,25(2): 422-426.
- [11] 高怀友,刘凤枝,赵玉杰. 中国农产品产地环境标准中存在的问题与对策研究[J]. 生态环境,2004,13(4): 691-693.
- [12] 王国庆,骆永明,宋静,等. 土壤环境质量指导值与标准研究 I: 国际动态及中国的修订考虑[J]. 土壤学报,2005,42(4): 666-673.
- [13] Gomes P C, Fontes M P F, Da Silva A G, et al. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(4): 1115-1121.
- [14] Hankard P, Bundy J, Spurgeon D, et al. Establishing principal soil quality parameters influencing earthworms in urban soils using bioassays[J]. Environmental Pollution, 2005, 133(2): 199-211.
- [15] 叶露,董丽娟,郑晓云,等. 美国的土壤污染防治体系分析与思考[J]. 江苏环境科技,2007,20(1): 59-61.
- [16] 陈梦舫,骆永明,宋静,等. 中、英、美污染场地风险评估导则异同与启示[J]. 环境监测管理与技术,2011,23(3): 14-18.
- [17] Davies B E. Heavy metal contaminant end soils in and old industrial area of Wales, Great Britain: source indent fiction through stat its cadet a interpretation[J]. Water Air and Soil Pollution, 1997, 94(1): 85-98.
- [18] 石俊仙,郜翻身,何江. 土壤环境质量铅镉基准值的研究综述[J]. 中国土壤与肥料,2006,(3): 10-15.
- [19] European Commission. Common implementation strategy for the water framework directive[R]. European Commission, 2009.
- [20] 齐文启,孙宗光,李国刚. 日本土壤环境质量标准的制定[J]. 上海环境科学,1997,16(3): 4-6.
- [21] 许建华. 日本《土壤污染对策法》与土壤环境监测[J]. 环境监测管理与技术,2006,18(4): 49-51.
- [22] 周国华,秦绪文,董岩翔. 土壤环境质量标准的制定原则与方法[J]. 地质通报,2005,24(8): 721-727.
- [23] 汪志国. 澳大利亚土壤污染状况及防治对策[J]. 北方环境,2004,29(5): 9-11.
- [24] Apple C, Ma L N. Concentration, pH, and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(2): 581-589.
- [25] 陈怀满. 土壤对镉的吸附与解吸——II. 吸附势与解吸势[J]. 土壤学报,1988,25(3): 227-235.
- [26] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报,2006,37(1): 137-143.
- [27] 蔡彦明,刘凤枝,王跃华,等. 我国土壤环境质量标准之探讨[J]. 农业环境科学学报,2006,25(S1): 403-406.
- [28] 袁建新,王云. 我国《土壤环境质量标准》现存问题及建议[J]. 中国环境监测,2000,16(5): 41-44.

- [29] 周启星, 罗义, 祝凌燕. 环境基准值的科学研究与我国环境标准的修订[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 1-5.
- [30] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- [31] 高怀友, 赵玉杰, 师荣光, 等. 区域土壤环境质量评价基准研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(S1): 342-345.
- [32] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤元素背景值[M]. 中国环境科学出版社, 1990. 87-99, 334-335.
- [33] 陈美军, 段增强, 林先贵. 中国土壤质量标准研究现状及展望[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 1059-1070.
- [34] 夏家淇, 骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(1): 1-6.
- [35] 夏增禄. 中国主要类型土壤若干重金属临界含量和环境容量区域分异的影响[J]. 土壤学报, 1994, **31**(2): 161-168.
- [36] 滕葳, 柳琪, 李倩, 等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. 38-44.

欢迎订阅 2014 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2014 年为 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (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 <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUO Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (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