

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

高硒高镉区土地安全区划方法

王锐^{1,2,3}, 侯宛苓³, 李雨潼³, 余涛⁴, 陈娟⁵

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038; 2. 重庆市土地质量地质调查重点实验室, 重庆 400038; 3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京) 数理学院, 北京 100083; 5. 北京大学医学部公共卫生学院, 北京 100191)

摘要: 湖北恩施地区土壤中硒资源非常丰富, 但土壤中也存在一定程度的镉污染风险, 为了科学地开发富硒资源, 选择典型高硒高镉区恩施市沙地乡为研究对象, 结合玉米镉硒吸收模型, 提出土地安全区划方法。对比硒的健康效应对土地安全区划结果的影响发现, 硒对镉的拮抗作用可以减少农耕区严格管控区面积, 提高土地利用效率。结合研究区各类农作物中镉硒的含量特征, 建议优先保护区及安全利用区大力发展富硒农产品, 结构调整区种植玉米与茶叶。

关键词: 镉; 硒; 吸收模型; 拮抗作用; 安全区划; 建议

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5524-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201905006

Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas

WANG Rui^{1,2,3}, HOU Wan-ling³, LI Yu-tong³, YU Tao⁴, CHEN Juan⁵

(1. Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China)

Abstract: The selenium in the soil of Enshi, Hubei Province, is very rich, but there is also a certain degree of cadmium pollution risk. To scientifically utilize selenium-rich resources, a typical high-selenium and high-cadmium area in Shashi Township, Enshi City was selected as the research object. Combined with the corn cadmium selenium absorption model, a land safety zoning method was proposed. Comparing the health effects of selenium with the results of land safety zoning, it was found that the antagonism of selenium on cadmium can reduce the area of strict control of agricultural areas, and improve land use efficiency. Combined with the characteristics of cadmium and selenium in various crops in the study area, it is recommended for priority protection areas and safe-use areas to vigorously develop selenium-enriched agricultural products, and grow corn and tea in the structural adjustment area.

Key words: cadmium; selenium; absorption model; antagonistic effect; safety zoning; suggestion

硒元素是人体以及动植物体重要的健康元素之一, 土壤及农作物中硒元素的含量与人类及动植物的健康息息相关^[1-3], 众所周知硒元素具有双重性, 硒元素的缺乏和过量摄入都会对人体造成危害, 硒元素的缺乏会导致大骨节病、克山病等疾病, 同时也会对人体的心血管系统造成影响, 而硒元素的过量摄入会引起硒中毒^[4, 5]。硒元素含量过高会导致植物发育不良, 蛋白质合成减少^[6-8]。重金属元素具有不可降解、可以通过土壤-作物-人体系统不断在人体中积累的特点, 对人体健康造成严重危害^[9-12]。硒对镉等重金属元素具有一定的拮抗作用, 一方面硒元素可以与镉等重金属元素发生反应, 生成重金属硒蛋白复合物, 该物质不易被人体及动物体吸收, 另一方面硒元素可以减缓重金属对生物体内抗氧化酶的抑制作用, 提高人体及动植物体自身的免疫能力和抗逆性^[13]。

湖北省恩施市土壤中硒元素的含量十分丰富, 居世界前列, 被称为“世界硒都”, 土壤及农作物中硒元素含量丰富^[14, 15], 受到地层分布等因素的影

响, 土壤中也存在不同程度的镉污染^[16], 土壤及农作物中镉元素的富集严重影响了富硒农业的发展。本文选择在典型高硒高镉区恩施市沙地乡开展土地安全区划方法研究, 以期对地区发展特色富硒产业提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沙地乡位于湖北省恩施市东北, 清江北部(图1), 地势由北到南逐渐降低, 海拔为 270 ~ 1 680 m。沙地乡行政区总面积为 189.2 km²。沙地乡位于建始县南部, 与新塘乡隔江对望, 气候适宜, 降水丰沛, 年平均气温为 15℃。研究区主要大宗农作物为玉米, 其次为烟叶、番茄、辣椒和土豆等, 水稻种植较少。

收稿日期: 2019-05-02; 修订日期: 2019-06-06

基金项目: 中南重点重金属高背景区土地质量地球化学调查项目 (DD20160323)

作者简介: 王锐(1994 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 1372661182@qq.com



图 1 研究区交通位置示意

Fig. 1 Traffic location map of the study area

1.2 采样方法与分析测试

在研究区内,采用 1: 50 000 比例尺,采集 0 ~ 20 cm 的表层土壤 839 件,根据研究区农作物种植情况,采集了 237 件农作物样品,其中包括 110 件玉米、40 件土豆、40 件辣椒、23 件红薯、16 件茶叶和 8 件水稻样品,并配套采集根系土。选择常住人口采集人体尿样 160 件。

土壤样品在自然条件下阴干。在样品干燥过程中要经常揉搓样品,以免胶结,并去除土壤中的砾石以及植物根系。干燥后的样品在过筛前用木槌轻轻敲打,以便使土壤样品恢复至自然粒级状态。样品晾干后用尼龙筛,截取 2 mm (10 目) 粒级的样品 500 g,装瓶。农作物样品及尿样采集后冷藏,并及时送至实验室进行测试分析。尿样分析测试由北京大学医学部完成,其余样品分析测试由安徽省地质实验研究所完成。

土壤样品测试质量控制:测试单位在样品分析测试过程中通过一级标准物质和样品重复样分析的方法来控制测试数据的质量。此外,工作人员在处理并分装好的样品中按照总样量的 5% 以密码样插入同类国家一级标准物质和重复样来进行分析对比,确保所测数据真实可靠。在土壤样品测定过程中采用国家标准物质 GSS- 4、GSS- 7、GSS- 8、GSS- 9、GSS- 12、GSS- 17、GSS- 21、GSS- 22、GSS- 24、GSS- 25、GSS- 26 和 GSS- 27 分析,监控测试分析的质量。以重复样分析结果评定本次分析精密度 (RD),以密码插入的同类国家一级标准物质的测试结果检验本次分析的准确度 (RE)。其中:

$$RE = \overline{\Delta \lg C}(\text{GBW}) = |\lg \bar{C}_i - \lg C_r| \quad (1)$$

$$RD = \frac{1/n \sum |C_1 - C_2|}{(C_1 + C_2)/2} \times 100\% \quad (2)$$

式中, C_1 和 C_2 为常规测试及重复样的测试分析结果; C_i 为某标准样的某次测试结果, C_r 为该标准样的标准值。

土壤样品的精密度和准确度计算见表 1。均需符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[17] 要求。

农作物样品准确度控制:每一批样品插入同类型标准物质 1~2 个与样品同时分析,并计算单个样品单次测试值的相对误差,要求相对误差 $\leq 30\%$ 。精密度控制:采用重复分析的方法控制样品分析的精密度,每件样品进行 100% 的重复分析,双份分析的相对双差 $\leq 30\%$ 。

土壤及农作物检出限分别见表 2 和表 3。样品回收率均为 100%。

采用石墨炉-原子吸收分光光度计(耶拿 Zeenit 700)测定在研究区常住人口中采集的尿 Cd 浓度,

表 1 土壤中各元素分析测试的精密度 (RD) 和准确度 (RE) 质量监控

Table 1 Precision (RD) and accuracy (RE) quality monitoring for analysis of each element in soil

元素	RE		RD		元素	RE		RD	
	<i>n</i>	数值/%	<i>n</i>	数值/%		<i>n</i>	数值/%	<i>n</i>	数值/%
As	12	0.03	40	4.19	Sr	12	0.19	40	-0.25
Cd	12	1.24	40	-3.43	Se	12	0.85	40	0.73
Cr	12	1.43	40	0.12	N	12	0.12	40	-3.86
Cu	12	0.62	40	0.29	P	12	1.44	40	-0.15
Ni	12	0.18	40	-0.76	B	12	1.25	40	3.07
Hg	12	0.33	40	0.36	F	12	0.45	40	3.29
Pb	12	0.26	40	0.72	Cl	12	1.49	40	-1.54
Zn	12	0.60	40	-0.03	I	12	0.40	40	1.74
K ₂ O	12	0.11	40	1.50	Mn	12	0.27	40	-0.54
CaO	12	0.26	40	5.67	Co	12	0.16	40	0.81
Al ₂ O ₃	12	1.28	40	-0.21	pH	4	0.56	40	0.00
Mo	12	0.16	40	-0.02	TOC	12	1.15	40	-1.39
V	12	0.47	40	0.17					

表 2 土壤样品指标分析方法检出限¹⁾
Table 2 Detection limit of indicator analysis method

指标	分析方法	检出限	指标	分析方法	检出限
As	AFS	0.2	Sr	XRF	1
Cd	ICP-MS	0.02	Se	AFS	0.01
Cr	ICP-AES	3	N	VOL	15
Cu	ICP-AES	1	P	XRF	8
Ni	ICP-MS	1	B	ES	1
Hg	AFS	0.000 5	F	ISE	50
Pb	XRF	2	Cl	XRF	10
Zn	XRF	1	I	COL	0.3
K ₂ O	ICP-AES	0.01 *	Mn	ICP-AES	5
CaO	ICP-AES	0.02 *	Co	ICP-MS	0.04
Al ₂ O ₃	COL	0.01 *	V	ICP-AES	2
Mo	ICP-MS	0.25	TOC	VOL	0.05 *
pH	ISE	0.10 **			

1) * 表示测试指标,单位为%,* * 无量纲,其余指标单位为mg·kg⁻¹

表 3 农作物样品分析检出限/mg·kg⁻¹
Table 3 Analysis and detection limits of crop samples/mg·kg⁻¹

项目	As	Se	Cd	Hg	Pb
检出限	0.01	0.005	0.000 1	0.000 5	0.005

单位为ng·mL⁻¹,检出限为0.001 ng·mL⁻¹,并利用尿标-8847重复检验,控制样品测试的准确度,尿镉测定结果用尿肌酐测定值进行校正.

数据处理方法:数据整理利用 Excel 完成,图件绘制利用 CorelDRAW12、ArcGIS10.2 和 IBM SPSS Statistics 20 完成.

2 结果与分析

2.1 玉米对镉硒的吸收模型

农作物对土壤元素的吸收程度,不仅取决于土壤中元素的含量,也会受到土壤中其他组分及理化性质的影响^[18],分析研究区主要大宗农作物玉米中镉、硒元素含量与对应根系土中各指标的相关关系,结果见表4.

玉米镉硒含量与根系土中镉硒含量显著相关,主要原因为玉米中的元素主要来源于土壤.玉米中镉的含量与土壤硒含量也存在一定的相关性,主要原因可能是因为土壤中硒与镉具有同源性.玉米硒含量与土壤 K₂O 含量及土壤 pH 均具有较好的相关性,主要原因为 K₂O 及土壤 pH 均为土壤性质的主要影响因素,对硒的生物有效性具有明显的控制^[19-21].

采用 SPSS 软件进行多元回归分析,得到玉米镉硒吸收模型,其方程如下:

lg(Cd_{com}) = 0.924 lg(Cd_{soil}) - 0.983 (3)

lg(Se_{com}) = 1.485 lg(Se_{soil}) - 0.064 2 lg K₂O + 0.071pH - 1.793 (4)

表 4 玉米镉、硒含量与根系土各指标相关性¹⁾

Table 4 Correlation between cadmium and selenium content in corns and various indicators of root soil

农作物指标	根系土测试指标	相关系数
Cd	Cl	0.258
	Al ₂ O ₃	-0.199
	CaO	0.148
	K ₂ O	-0.215
	Cd	0.552 **
	Se	0.592 *
	I	-0.158
	F	0.287
	TOC	-0.038
	pH	0.218
	Cl	0.027
	Al ₂ O ₃	0.130
Se	CaO	0.101
	K ₂ O	0.225 *
	Cd	0.420 **
	Se	0.632 **
	I	-0.113
	F	-0.004
	TOC	-0.001
	pH	0.169 *

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关,* * 表示在 0.01 水平上显著相关,n=110

式中,Cd_{com}为玉米籽实中镉含量(mg·kg⁻¹);Cd_{soil}为土壤中镉含量(mg·kg⁻¹);Se_{com}为玉米籽实中硒含量(mg·kg⁻¹);K₂O为土壤中K₂O含量(%);Se_{soil}为土壤中硒含量(mg·kg⁻¹);pH为土壤酸碱度(无量纲).回归方程使用F检验,式(3)中:F=51.859 >

$F_{0.05,1,108} = 3.93, R = 0.69$, 式(4)中: $F = 59.386 > F_{0.05,3,106} = 2.68, R = 0.792$.

利用上述回归方程,结合研究区表层土壤数据,对表层土壤采样点对应的玉米籽实镉硒含量进行预测. 参照《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[22]及《湖北省食品安全地方标准富有机硒食品硒含量要求》(DBS 42/002-2014)^[23]给出的玉米中镉的限量及富硒标准,以玉米样品镉限量及二倍限量,将镉预测值分为 ≤ 0.1 、 $0.1 \sim 0.2$ 和 $>0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 这3个区间,以玉米样品富硒及不富硒,将硒预测值分为 $<0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\geq 0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两个区间进行反距离权重法插值分析,得到相应的地球化学图,将本次研究采集的110件玉米籽实镉硒实测含量投图,结果见图2.

2.2 土地安全区划

依据“土地污染防治行动计划”给出的土地安全利用分类方法,将农用地划分为3个类别,安全区和轻微风险区划分为优先保护类,轻度和中度风险区的划分为安全利用类,重度风险区的划分为严格管控类. 结合《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[22]给出的作物中镉元素含量限值及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[24]给出的土壤镉元素风险筛选值,提出土地安全区划方法见表5. 利用该方法进行土地安全区划,结果见图3.

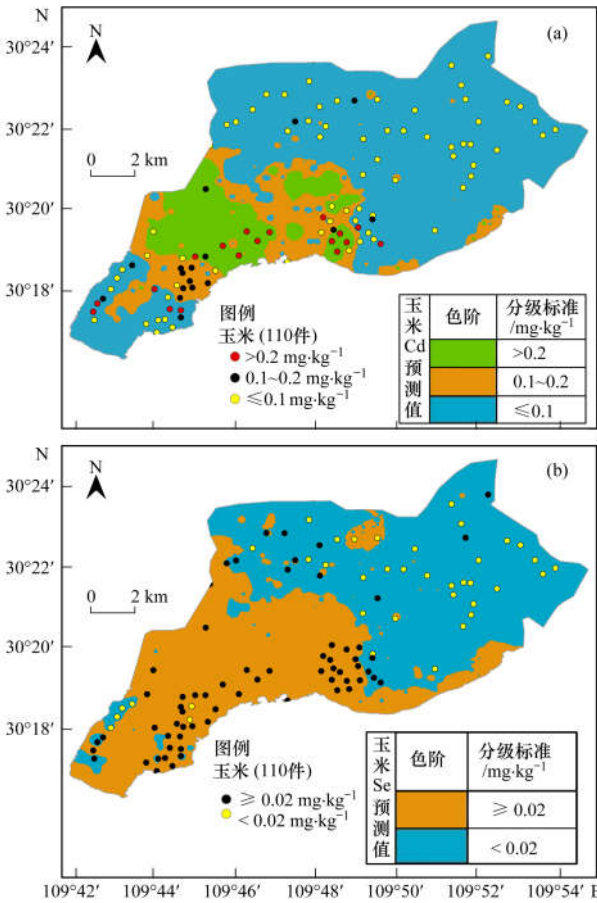


图2 玉米镉和硒含量预测
Fig. 2 Prediction map of corn cadmium and selenium contents

表5 土地安全区划方法¹⁾
Table 5 Land safety division method

		土壤 Cd 环境质量等级				
项目		$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$3 < P_i \leq 5$	$P_i > 5$
含义		安全	轻微风险	轻度风险	中度风险	重度风险
玉米 Cd 含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	≤ 0.1	优先保护	优先保护	优先保护	优先保护	安全利用
	$0.1 \sim 0.2$	安全利用	安全利用	安全利用	安全利用	严格管控
	> 0.2	结构调整	结构调整	严格管控	严格管控	严格管控

1) P_i = 实测值/风险筛选值

研究区为典型高硒区,土壤及农作物中硒含量丰富,硒对镉具有一定的拮抗作用,使得国标给出的限值很难适应沙地乡的实际状况. 建立尿 Cd (U-Cd, $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 以 Cr 计) 和通过玉米摄入镉的量 (C-Cd, $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$) 的回归方程,可以计算出恩施市沙地乡主要大宗农作物玉米中镉的安全限值,计算过程如下.

建立尿 Cd 和通过玉米摄入镉量的回归方程:
 $\lg(\text{U-Cd}) = 0.209 \lg(\text{C-Cd}) + 0.235$ (5)
回归方程使用 F 检验, $F = 59.386 > F_{0.05,3,106} = 2.68$, 因此,该方程通过在 0.05 水平下的显著性检验. R 为 0.792, 方程拟合程度较好.

根据欧洲食品安全局 (European Food Safety Authority, EFSA) 所使用的基准剂量 (benchmark

dose, BMD) 评估方法^[25], 利用 BMDs 软件计算得到以 $\beta_2\text{-MG}$ 为效应指标的 U-Cd 参考剂量为 $4.05 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 将此限值代入上述回归方程, 计算得到 C-Cd 限值为 $60.545 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$. 根据膳食调查结果, 恩施地区研究对象日均摄入玉米的量为 $212.5 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 则恩施地区玉米中镉的含量限值则为 $0.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 即恩施市沙地乡, 玉米样品中镉的安全限值为 $0.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB 2762-2017 给出的安全限值为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 将该值代入式(3)中, 可以得到研究区土壤中镉的风险筛选值为 $2.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 利用该方法得到的玉米中镉的限制以及土壤镉污染风险筛选值, 按照表 5 给出的方法重新进行土地安全区划, 结果见图 4.

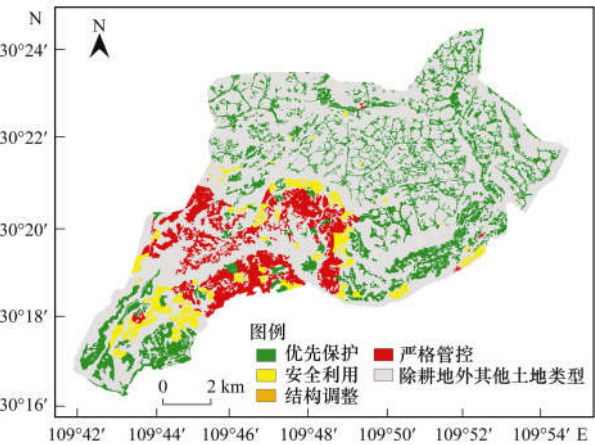


图3 基于国标土地安全区划

Fig. 3 Land safety zone map based on the national standard

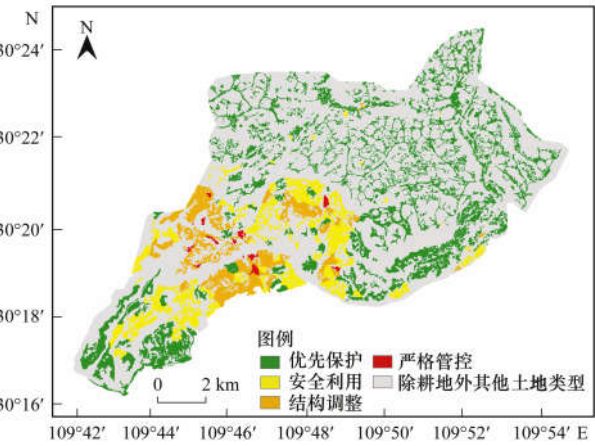


图4 基于硒健康效应土地安全区划

Fig. 4 Land safety zone map based on selenium health effects

3 讨论

调查发现,研究区广泛分布二叠系茅口组地层,该地层的主要岩石类型包括暗色硅质岩及炭质页岩,属于典型的黑色岩系区^[26],且研究区土壤中镉元素含量较高,出现了一定程度的镉超标现象^[27].分析研究区表层土壤中硒元素与镉元素含量关系发现(图5),二者呈明显正相关关系,主要原因为硒元素与镉元素在岩石中容易形成镉的硒化物,在成土过程中,金属硒化物发生分解,且研究区残坡积物分布广泛,成土母质搬运距离较近,土壤更多地继承了母岩的元素地球化学特征,参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[17],以及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[24]给出的我国农用地土壤污染风险筛选值及农用地土壤污染风险管制值,进行土壤硒镉地球化学等级划分,结果见图6,统计结果显示硒元素一等和二等面积所占比例高达86.96%.镉元素风险区面积所占比例为81.97%,管制区面积所占比例为13.20%,因此研究区属于典型高硒高镉区.

故在研究区开展土地安全区划研究,可以更安全、科学地利用富硒资源.

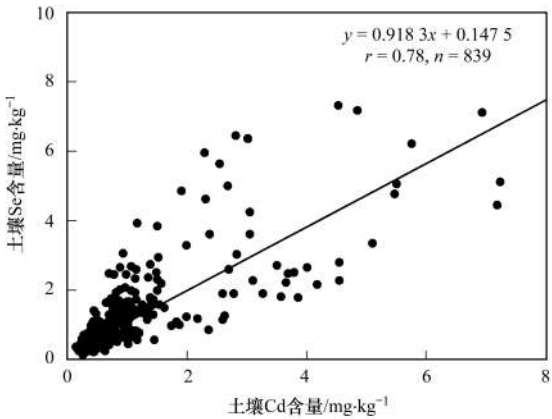


图5 研究区表层土壤硒和镉含量散点图

Fig. 5 Scatter plot of Se and Cd content in surface soil of the study area

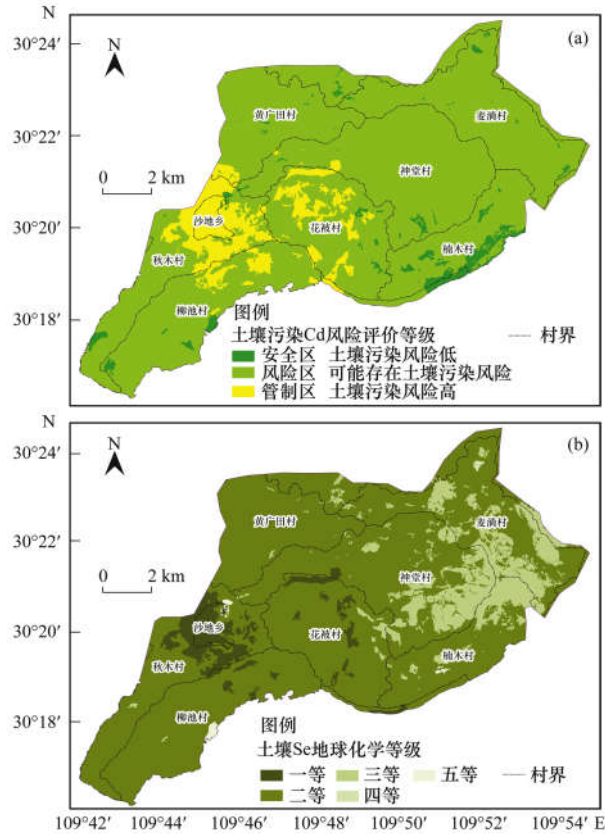


图6 研究区土壤镉和硒地球化学等级

Fig. 6 Geochemical grade map of soil cadmium and selenium in the study area

将吸收模型预测值与110件实测值进行对比发现,玉米镉和硒吸收模型预测的准确率分别为80.92%和83.64%,高估率分别为5.45%和0.91%,低估率分别为13.64%和15.45%(图7),模型预测准确率较高.

基于国标进行土地安全区划,得到耕地土壤中优先保护占比58.8%,安全利用占比13.8%,结构

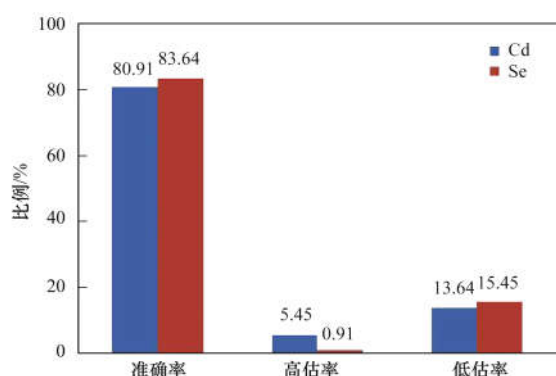


图7 玉米镉和硒含量预测结果柱状图

Fig. 7 Histogram of prediction results of cadmium and selenium content in corn

调整占比0,严格管控占比27.4%。考虑到硒的健康效应土地安全区划结果显示,耕地土壤中优先保护占比58.8%,安全利用占比22.9%,结构调整占比17.1,严格管控占比1.2%(图8)。对比以上两种结果可以看出,考虑到硒的健康效应时,严格管控区面积大幅度减少,可提高土地利用率。

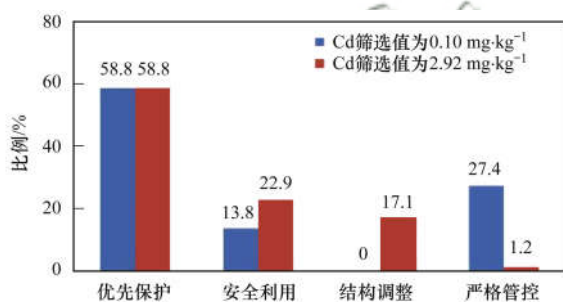


图8 两种区划结果对比

Fig. 8 Comparison of the results of the two divisions

统计研究区农作物镉与硒的富集系数(图9),从中可以看出,水稻镉的富集系数相对很高,而硒的富集系数较小,故研究区不建议种植水稻。玉米与茶叶样品中,镉的富集系数相对较低,而硒的富集系数相对较高。结合前文安全区划结果,优先保护区与安全利用区可大力开发富硒农产品,结构调整区

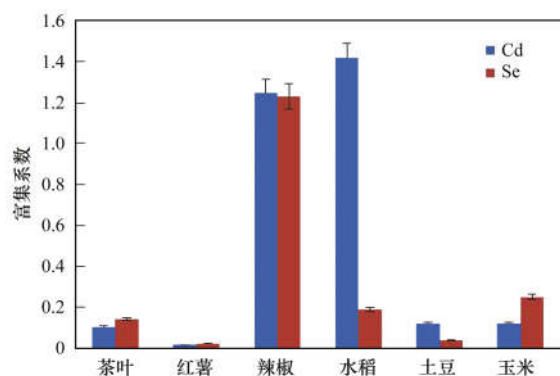


图9 研究区农作物硒和镉富集系数统计直方图

Fig. 9 Statistical histogram of selenium and cadmium enrichment coefficients in crops in the study area

建议种植玉米与茶叶。

4 结论

(1)结合玉米Cd吸收模型,基于《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)给出的作物中镉元素含量限值及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)给出的土壤镉元素风险筛选值,提出土地安全区划方法,进行土地安全区划可以得到研究区农耕地土壤中优先保护占比58.8%,安全利用占比13.8%,结构调整占比0,严格管控占比27.4%。考虑到硒对镉的拮抗作用进行安全区划,结构调整区面积提高17.1%,而严格管控区面积减少26.3%,很大程度的提高了土地利用效率。

(2)结合研究区各农作物中硒和镉的含量特征,建议优先保护区及安全利用区大力发展富硒农产品,结构调整区种植玉米与茶叶。

(3)研究区土壤主要继承了成土母质的元素地球化学特征,地球化学等级评价结果显示,土壤中硒元素富集的同时,镉含量也较高。因此,在研究区开展土地安全区划研究,有利于安全、科学地开发富硒资源。

参考文献:

- [1] Gidling C A. Selenium in agriculture and the environment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1984, **11**(1): 37-65.
- [2] Long Z D, Yuan L X, Hou Y Z, et al. Spatial variations in soil selenium and residential dietary selenium intake in a selenium-rich county, Shitai, Anhui, China[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, **50**(8): 111-116.
- [3] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. Lancet, 2000, **356**(9225): 233-241.
- [4] 李继云, 任尚学, 陈代中. 陕西省环境中的硒与大骨节病关系的研究[J]. 环境科学学报, 1982, **2**(2): 91-101.
- [5] 杨元, 杜宝珍. 陕西省环境中硒与克山病的发病关系[J]. 中国环境科学, 1983, **4**(2): 57-60.
- [6] Filek M, Zembala M, Hartikainen H, et al. Changes in wheat plastid membrane properties induced by cadmium and selenium in presence/absence of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2009, **96**(1): 19-28.
- [7] Hartikainen P, Soininen H, Reinikainen K J, et al. Neurotransmitter markers in the cerebrospinal fluid of normal subjects effects of aging and other confounding factors[J]. Journal of Neural Transmission, 1991, **84**(1-2): 103-117.
- [8] Sieprawska A, Komas A, Filek M. Involvement of selenium in protective mechanisms of plants under environmental stress conditions-review[J]. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, 2015, **57**(1): 9-20.
- [9] 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆喀什市城乡交错带耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境工程, 2018, **36**(4): 160-164.

- Ajigul M, Mamattursun E, Anwar M. Pollution risk assessment of heavy metals from farmland soils in urban-rural ecotone of Kashgar City, Xinjiang[J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(4): 160-164.
- [10] 边博, 周燕, 张琴. 太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1442-1450.
- Bian B, Zhou Y, Zhang Q. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals from river network sediment in western area of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1442-1450.
- [11] 王俊能, 赵学敏, 胡国成, 等. 广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 488-495.
- Wang J N, Zhao X M, Hu G C, *et al.* Distribution and bioaccumulation characteristics of cadmium in fish species from the Longjiang river in the Guangxi autonomous region [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 488-495.
- [12] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu basin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [13] 蔡黎新, 蔡碧忍. 硒摄入对大鼠脏器中硒、镉、铜、锌、锰含量的影响[J]. *中国公共卫生*, 2001, **17**(10): 893-894.
- Cai L X, Cai B R. Effect of Selenium, cadmium supplement on contents of Se, Cd, Cu, Zn, Mn in rat organ[J]. *China Public Health*, 2001, **17**(10): 893-894.
- [14] 彭小桂. 湖北省恩施市硒资源开发利用潜力浅析[J]. *资源环境与工程*, 2015, **29**(4): 436-441, 458.
- Peng X G. Analysis on utilization potential of selenium resource in Enshi, Hubei[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, **29**(4): 436-441, 458.
- [15] 王锐, 余涛, 杨忠芳, 等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(7): 1647-1654.
- Wang R, Yu T, Yang Z F, *et al.* Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(7): 1647-1654.
- [16] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- Ma H H, Yu T, Yang Z F, *et al.* Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- [17] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [18] 曾庆良, 余涛, 王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. *现代地质*, 2018, **32**(1): 105-112.
- Zeng Q L, Yu T, Wang R. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei [J]. *Geoscience*, 2018, **32**(1): 105-112.
- [19] Rohn I, Marschall T A, Kroepfl N, *et al.* Selenium species-dependent toxicity, bioavailability and metabolic transformations in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Metallomics*, 2018, **10**(6): 818-827.
- [20] Pouri S, Motamedi H, Honary S, *et al.* Biological synthesis of selenium nanoparticles and evaluation of their bioavailability[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2018, **60**(1): 13-18.
- [21] Yoshida S, Iwataka M, Fuchigami T, *et al.* *In vitro* assessment of bioavailability of selenium from a processed Japanese anchovy, Niboshi[J]. *Food Chemistry*, 2018, **269**: 436-441.
- [22] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [23] DBS 42/002-2014, 湖北省食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求[S].
- [24] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [25] European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the scientific committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic[J]. *EFSA Journal*, 2005, **3**(10): 282.
- [26] 温汉捷, 裴愉卓, 凌宏文, 等. 中国早古生代若干高硒黑色岩系中层状硅质岩的地球化学特征及其成因意义[J]. *沉积学报*, 2003, **21**(4): 619-626.
- Wen H J, Qiu Y Z, Ling H W, *et al.* Geochemistry and genesis of bedded cherts in some typical eopaleozoic high selenium black shales, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, **21**(4): 619-626.
- [27] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. *土壤*, 2018, **50**(6): 1119-1125.
- Yu T, Yang Z F, Wang R, *et al.* Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. *Soils*, 2018, **50**(6): 1119-1125.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)