

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探

管伟豆¹, 郭堤¹, 王萍¹, 张增强¹, 李荣华^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业农村部西北植物营养与农业环境研究重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为探究我国北方镉(Cd)污染农田中玉米安全生产的土壤阈值以及产区划分, 于部分北方玉米主要产区(含不同程度Cd污染)收集了129套点对点的土壤-玉米样品, 分析了土壤理化性质与土壤、玉米籽粒Cd含量之间的相关性, 利用多元线性回归法和物种敏感度分布曲线法(SSD)推导不同土壤情景下土壤Cd的生态阈值, 并进行了玉米“宜产、限产、禁产”产区划分。结果表明, 研究区土壤与玉米籽粒中Cd含量超标分别为99.62%和49.61%; 玉米籽粒中Cd富集系数(BCF)与土壤pH、土壤有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)和土壤有效态Cd含量(DTPA浸提)均呈极显著相关性($P < 0.01$)。多元线性回归法的预测可解释因变量71.9%的变异性; 基于研究区土壤特性以及参考资料, 划分3种不同土壤情景分别为, 情景1: $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, 土壤 $\omega(\text{SOM}) = 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 $\text{CEC} = 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; 情景2: $7.5 < \text{pH} < 8.5$, 土壤 $\omega(\text{SOM}) = 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 $\text{CEC} = 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; 情景3: $\text{pH} \geq 8.5$, 土壤 $\omega(\text{SOM}) = 17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 $\text{CEC} = 17 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 利用SSD法中Logistic函数模型推导以上3种情景的粮食宜产区土壤Cd阈值分别为3.00、3.80和3.11 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 禁产区阈值为8.95、9.10和7.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 当土壤Cd含量介于宜产区阈值与禁产区阈值之间时该区域划分为粮食限产区; 玉米用于饲料使用时3种情景下的饲料宜产区阈值分别为14.94、18.90和15.55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 禁产区阈值分别为44.93、45.40和36.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 两者之间的区域为饲料限产区。以上方法和结果可为我国北方农田土壤的安全生产提供参考, 并为土壤生态阈值的标准制定提供科学依据。

关键词: 重金属镉; 富集系数(BCF); 定量关系; 阈值; 产区划分

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5958-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104165

Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China

GUAN Wei-dou¹, GUO Di¹, WANG Ping¹, ZHANG Zeng-qiang¹, LI Rong-hua^{1,2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore the soil thresholds and production area division of maize in cadmium (Cd) contaminated farmland in northern China, 129 pairs of point-to-point soil and maize samples were collected from various maize-production areas with different degrees of Cd pollution in northern China. The quantitative relationships between soil properties and Cd content in soil and maize grains were analyzed. Multiple linear regression and Species Sensitivity Distribution (SSD) curve methods were used to determine the thresholds of soil Cd under different soil scenarios, and to differentiate the 'suitable, limited, and forbidden' production areas of maize. The results showed that the content of Cd in the soil and maize grains exceeded the permissible limits of soil and food standards by 99.62% and 49.61%, respectively. The bioconcentration coefficient (BCF) of Cd in maize grains was significantly correlated with soil pH, soil organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC), and soil DTPA-Cd content ($P < 0.01$), respectively. The prediction formula established by multiple linear regression could explain 71.9% of the variation in the dependent variable. Based on the soil characteristics in northern maize-production areas, in this study, three typical soil scenarios were divided as follows: scenario 1: $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, $\omega(\text{SOM}) = 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CEC} = 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; scenario 2: $7.5 < \text{pH} < 8.5$, $\omega(\text{SOM}) = 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CEC} = 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; scenario 3: $\text{pH} \geq 8.5$, $\omega(\text{SOM}) = 17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CEC} = 17 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. According to the logistic function model of the SSD method, the soil Cd thresholds of suitable maize-producing areas were 3.00, 3.80, and 3.11 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and the soil Cd thresholds of the forbidden maize-producing areas were 8.95, 9.10, and 7.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The area with soil Cd content within a range of the suitable area thresholds and the forbidden area thresholds was considered as restricted for the maize-producing area. When maize was used as feed, the suitable production thresholds were 14.94, 18.90, and 15.55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and the forbidden thresholds were 44.93, 45.40, and 36.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The area between them was considered as a restricted feed-production area. The results in this study can provide technical support for the safer maize production and classification management of farmland soil in northern China's maize-producing areas.

Key words: Cd; bioconcentration coefficient(BCF); quantitative relationship; thresholds; production yield division

随着工业化与城市化的快速发展,矿产采冶等过程排放的重金属为我国农田土壤环境带来了巨大的考验.2014年国家环境保护部与国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,农田土壤重金属污染超标率达19.4%,并以镉(Cd)为主要

污染物,而据最新的中国粮食主产区土壤污染报告

收稿日期: 2021-04-17; 修订日期: 2021-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801101)

作者简介: 管伟豆(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为农业污染控制, E-mail: 825876480@qq.com

* 通信作者, E-mail: rh.lee@nwsuaf.edu.cn

分析则表明重金属点位超标率已达 21.49%, 每年因重金属污染无法食用的粮食超过了 2 000 万 t^[1,2], 这会对粮食安全和人体健康造成极大的威胁^[3,4]. 玉米作为我国北方地区的主要作物之一, 也是我国种植面积最大的旱田作物之一^[5,6]. 近年来, 有关玉米产区的重金属污染报道层出不穷. 周艳等^[7]对我国西南地区铅锌矿区的调研指出, 玉米籽粒中 Cd 平均含量达 0.21 mg·kg⁻¹, 超标率高达 60%. 王世玉等^[8]的研究发现, 我国部分典型污灌区农田的玉米籽粒中 Cd 含量达到 0.18 mg·kg⁻¹, 已不可食用. 陈凤等^[6]的研究也发现, 贵州省某典型矿区的玉米籽粒的 Cd 具有较大的健康风险. 为保证土壤资源利用和粮食安全生产, 国务院在 2016 年发布的《土壤污染行动计划》中将农用地土壤划分为 3 种类型: 优先保护类(宜产区)、安全利用类(限产区)以及严格管控类(禁产区)^[9]. 但由于我国经纬度跨度较大, 不同地区的土壤和作物类型均存在较大差异, 导致依据我国现行的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)及《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)标准规定, 部分地区仍无法实现土壤的准确风险评价^[10]. 例如, 朱志军等^[11]在对广西地区土壤-稻米系统的研究中指出, 实际中存在土壤 Cd 含量不超标而稻米籽粒 Cd 含量超标的情况. 由此可见, 探究土壤-作物系统重金属的定量关系是推导土壤阈值以及产区划分的重要前提. 另外, 重金属在土壤-作物系统中的转运及富集情况可能与作物不同品种本身的富集特性^[5]、区域气候条件、土壤质地和理化性质等因素有关^[12], 在探究土壤-作物系统重金属的定量关系时需考虑这些因素的影响^[13]. 物种敏感度分布(SSD)曲线法是一种统计学外推法, 可用于多重因素影响下的生态风险评估以及生态阈值推导, 常见的分布函数模型有 Log-logistic 和 Burn-III 等^[14,15]. 基于文献^[16]可知, SSD 曲线法在对于不同指标、不同量纲的复杂环境下推导某受体的土壤生态阈值具有良好的效果^[17]. 但目前对我国北方玉米产区土壤-玉米 Cd 的定量关系运用 SSD 曲线法进行的研究尚不多见, 有关在跨区域尺度下 Cd 污染土壤玉米生产阈值及产区划分仍少有报道. 为此, 本研究以我国北方部分玉米主产区为研究地点, 结合土壤-作物系统中各因素对玉米籽粒 Cd 的影响和定量关系, 利用多元线性回归法和 SSD 曲线法构建模型进行阈值推导, 进而划分不同玉米的产区, 以期为我国北方玉米主产区农田的分类分级管控及玉米安全生产提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 土壤与玉米样品采集

本研究中土壤及玉米的采样区选取原则为: ①研究区为我国北方玉米的主要产区与消费地, 取样区域为正常耕作的农田; ②研究区农田附近有冶炼厂、工业基地等污染源或曾进行污水灌溉, 农田可能短期或长期遭受不同程度的重金属污染或者未遭受污染. 基于这一原则, 本研究小组于 2017 ~ 2020 年的 10 ~ 11 月共 4 个阶段, 从陕西省西安市临潼区、宝鸡市凤县和渭南市潼关县共获取土壤-玉米样品 76 套, 甘肃省定西市临洮县、武威市民勤县和白银市平川区共获取样品 34 套, 河南省新乡市卫辉市获取样品 19 套, 共 129 套土壤-玉米有效样品, 采集的玉米样品的品种分别为盛玉 367、五谷 631、郑单 958、纪元 1 号和华农 887. 采样过程中根据实际地形和种植模式, 采用“S”型或梅花型布点法采集样品, 每个样品所在的田块区域的采样点至少布设 5 个样点并将样品混合, 土壤采样深度为 0 ~ 20 cm, 混合土样装入一次性塑封袋, 约 2.5 kg. 采集玉米时, 避免因人为或病虫害灾害等外在因素而损坏的植株, 采集的玉米样品保存于网状编织袋. 土壤和玉米样品对应编号, 并记录 GPS 坐标等信息.

1.2 样品处理与测定

土壤样品经自然风干除去植物残体、碎石等杂质, 研磨后分成两部分分别通过 0.1 mm 和 0.149 mm 的尼龙筛网备用; 从同一田地不同玉米棒上采集玉米籽粒混合后用自来水和蒸馏水分别冲洗 3 次, 装入信封置于 80℃ 的烘箱烘至恒重, 经充分研磨后, 过 0.149 mm 尼龙筛网备用. 土壤 pH 用 PHSJ-3F 型酸度计测定(水土比 2.5:1). 土壤 ω (SOM) 和土壤 CEC 以文献^[18]推荐的方法测定. 土壤 ω (黏粒)(<0.002 mm)使用 MS2000 型激光粒度仪测定. 土壤经王水-高氯酸(HCl:HNO₃:HClO₄ = 3:1:1)电热板消解后, 以日立 Z-5000 型石墨炉-原子吸收光谱仪测定 Cd 总量. 玉米样品经 HNO₃-H₂O₂(体积比 3:1)消解后, 以安捷伦 7900 型电感耦合等离子体质谱仪测定 Cd 含量. 实验中, 以标准物 GBW07406(GSS-6)和 GBW10012(GSB-3)进行内标质量控制, 每隔 20 个样品插入一组内标, 回收率在 96% ~ 108% 之间. 本实验中所用的试剂均为优级纯, 所有实验设定 3 个重复.

1.3 数据统计与处理

以 Excel 2020 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理和统计分析, 以皮尔森(Pearson)相关性分析法在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的水平下进行数据显著性检

验,以 Origin 2016 软件绘图并进行数据拟合.

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质、Cd 含量以及玉米籽粒 Cd 含量特征

表 1 为研究区的部分土壤理化性质. 由于研究的区域在我国北部,按照土壤酸碱度标准划分,所有土壤样品呈中性或碱性,pH 介于 7.46~9.22 之间,平均值 8.59,中位数 8.72,碱性土壤占比 99.22%. 土壤 $\omega(\text{SOM})$ 范围为 10.52~30.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 15.14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,中位数 13.57 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,根据《耕地质量等级》标准(GB/T 33469-2016)判断,研究区土壤条件适合农业种植. 变异系数反映某一特定指标的空间分布均匀程度,系数越高表示该指标的离散程度越大^[19,20]. 本研究中,因采样区域跨度较大,土壤 $\omega(\text{SOM})$ 的变异系数高达 26.55%. 土壤 CEC 介于 5.62~25.32 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值 16.48 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; 土壤 $\omega(\text{黏粒})$ 为 11.20%~26.39%,平均值与中位数分别为 17.09% 和 16.85%,属较高水平. 与土壤 $\omega(\text{SOM})$ 一样,土壤 CEC 和土壤 $\omega(\text{黏粒})$ 可能由于天然或人为因素的影响,变异系数较高,分别为 23.47% 和 15.59%.

在获得的 129 个土壤样品中, $\omega(\text{Cd 总量})$ 在 0.17~21.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均高于当地土壤 Cd 背景值,表明研究区域土壤受到了不同程度的污染,污染范围较广. 土壤 $\omega(\text{Cd 总量})$ 的平均值和中位数分别为 3.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 3.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高出《土壤环境质量

农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)规定的中性和碱性土壤污染风险筛选值 10 倍以上,超标率达 99.22%,属重度污染水平. 变异系数为 76.78%,说明不同区域土壤 Cd 空间分布差异较大,可能与局部地区存在点源污染如冶炼厂等有关. 通常来说,重金属在土壤中赋存的形态与土壤的基本理化性质有关,土壤中的重金属被植物所浸提的量取决于其生物有效性^[21],有效态 Cd 含量与 Cd 全量的比值为土壤中 Cd 的生物有效性系数,可以直观地反映 Cd 对土壤以及作物可能产生的影响^[22,23]. 研究区中土壤样品 $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 从 0.04~1.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均数与中位数分别为 0.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 参考土壤 Cd 总量,研究区土壤 Cd 生物有效性系数的平均值和中位数分别为 14.29% 和 9.03%,暗示了土壤 Cd 的迁移性和可利用性较低,这可能与当地的实际污染情况有关,也可能与土壤 pH 较高等因素有关.

玉米籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 0~1.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值和中位数分别为 0.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 参考《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)标准中规定的 0.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超标率为 49.61%,表明存在一定的人体安全风险. 其变异系数为 126.12%,属于极高的变异水平,说明研究区域内的玉米籽粒 Cd 含量空间分布差异较大,部分玉米已不可食用;同时,也说明了研究区域内的不同玉米品种的籽粒 Cd 富集能力之间存在较大差异.

表 1 土壤样品部分理化性质、DTPA-Cd 和 Cd 总量及对应玉米籽粒 Cd 含量特征($n=129$)

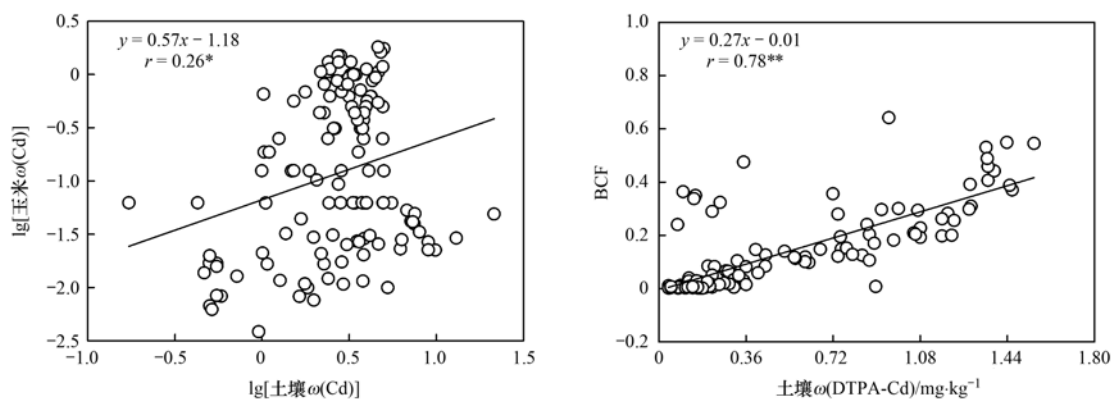
Table 1 Statistics of soil properties, DTPA-Cd extract able and total content of Cd in soil and related maize grains ($n=129$)

指标参数	最小值	最大值	平均数	标准偏差	中位数	变异系数/%
pH	7.46	9.22	8.59	0.39	8.72	4.58
土壤 $\omega(\text{SOM})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.52	30.54	15.14	4.02	13.57	26.55
土壤 CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.62	25.32	16.48	3.87	17.45	23.47
土壤 $\omega(\text{黏粒})/\%$	11.20	26.39	17.09	2.66	16.85	15.59
DTPA 提取量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.04	1.55	0.49	0.43	0.28	89.30
土壤 $\omega(\text{Cd 总量})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.17	21.43	3.43	2.63	3.10	76.78
玉米籽粒 $\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.00	1.81	0.36	0.45	0.1	126.12

2.2 土壤理化性质、Cd 含量与玉米籽粒 Cd 富集系数的相关性分析

在农田系统中,玉米对土壤中 Cd 的吸收和积累除受自身品种的特征影响外,主要取决于农田土壤的污染水平及理化性质^[2]. 为了解土壤 Cd 总量和玉米积累 Cd 含量间的关系,研究中首先对土壤 Cd 总量及玉米籽粒 Cd 含量数据进行对数转换,此后通过线性回归法建立相对关系(图 1). 经分析可知,土壤 Cd 总量与玉米籽粒 Cd 含量呈显著正相关关系($P<0.05, n=129$),说明随着土壤中 Cd 总量

的增加,玉米籽粒中 Cd 含量随之增加,该结果也与诸多研究报道相吻合. 此外,在本研究中,土壤 Cd 总量和玉米籽粒 Cd 含量之间虽呈显著相关关系,但相关系数较低($r=0.26^*$),这是由于本研究的区域为真实农田环境,比盆栽实验的环境条件更为复杂^[7,13]. 此外,对土壤 Cd 有效态含量(DTPA-Cd)和玉米籽粒 Cd 富集系数 BCF 之间的线性回归分析表明(图 1),土壤 DTPA-Cd 含量与 BCF 呈极显著性正相关关系($P<0.01$),相关系数 $r=0.78$,玉米籽粒 Cd 富集能力随土壤 DTPA-Cd 含量的增加而增大,



** 表示在 $P < 0.01$ 水平上极显著相关, * 表示在 $P < 0.05$ 水平上极显著相关

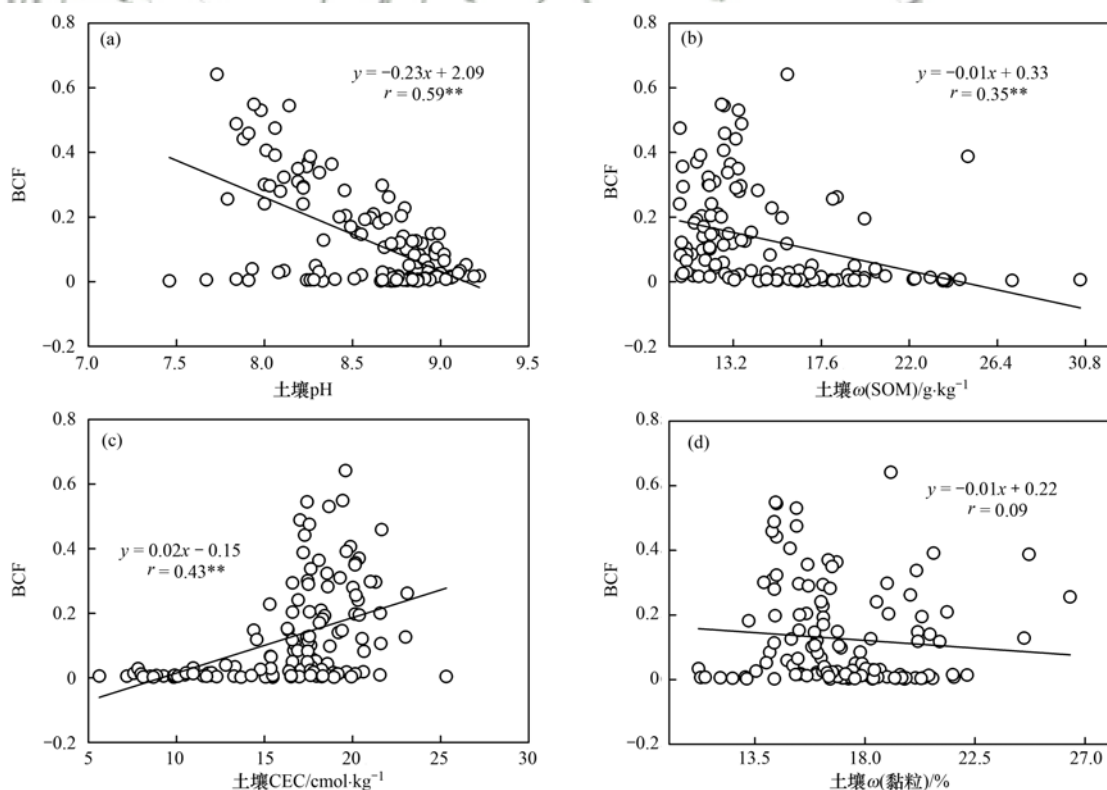
图1 玉米籽粒 Cd 含量与土壤 Cd 含量和土壤 DTPA-Cd 含量与 BCF 的相关关系 ($n = 129$)

Fig. 1 Relationship between Cd contents in soil and maize grains and the relationship between DTPA-Cd contents in soil and BCF ($n = 129$)

说明土壤 DTPA-Cd 含量也是影响玉米籽粒富集 Cd 的主控因子之一。

土壤理化性质是影响作物富集重金属的重要因素^[24], 其与玉米籽粒 Cd 富集系数 BCF 的关系如图 2 所示。从中可知, 玉米籽粒 Cd 积累量随着土壤 pH 的升高而下降, 土壤 pH 与 BCF 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 相关系数 $r = 0.59^{**}$ 。这是因为土壤在碱性条件下, 较高的 OH^- 含量会降低 Cd^{2+} 的活性, 使其难被玉米吸收, 从而减少了玉米 Cd 从地下向地上的转运量, 这一结果也与诸多学者的研究发现相印证^[25,26]。土壤 $\omega(\text{SOM})$ 与 BCF 之间也呈极显著负

相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数 $r = 0.35^{**}$ [图 2(b)], 表明了增加土壤有机质投入可抑制玉米籽粒对 Cd 的富集^[27], 这可能与 SOM 中的腐殖质等物质与 Cd^{2+} 形成络合物或沉淀, 从而降低了土壤 Cd 的生物有效性有关^[28]。一般而言, 土壤 CEC 增加会提供更多可以固定重金属离子的点位, 从而降低离子的迁移性^[29,30]。本研究中土壤 CEC 与 BCF 呈极显著正相关性 ($P < 0.01$), 相关系数 $r = 0.43^{**}$ [图 2(c)], 也是影响玉米籽粒富集 Cd 的主控因子之一, 即: 土壤中溶解性的 Cd 含量随着土壤 CEC 增大而增加, 使 Cd 更易于被作物吸收^[31]。本研究中土壤 $\omega(\text{黏粒})$ 与 BCF 间的相



** 表示在 $P < 0.01$ 水平上极显著相关

图2 土壤理化性质与 BCF 的相关关系 ($n = 129$)

Fig. 2 Relationship between properties of soil and BCF ($n = 129$)

关性不显著($r=0.09$),说明土壤 ω (黏粒)不是影响玉米籽粒富集 Cd 的主控因子。

2.3 模型建立及归一化处理的应用

基于 2.2 节中土壤理化性质、Cd 含量和玉米籽粒 Cd 富集系数的相关性分析结果,依次将主控因子引入回归方程(表 2)。当预测方程中只引入自变量土壤 DTPA-Cd 含量时,方程(1)可解释 77.6% 的变异,达到了极显著水平($P<0.01$);当再引入自变量土壤 pH 时,方程(2)的预测能力达到了 79.6% ($P<0.01$);继续将自变量 CEC 引入方程(3)后,可解释 83.4% 的变异($P<0.01$);再引入最后一个自变量土壤 ω (SOM)后,方程(4)的预测能力达到了最高水平,可解释 86.9% 的变异($P<0.01$)。当以土壤 pH、土壤

ω (SOM)和土壤 CEC 等土壤理化性质作为自变量时,方程(5)预测玉米籽粒 Cd 富集量也达到了极显著水平($P<0.01$),预测能力为 71.9%,此方程适用于不同标准土壤情景下土壤 Cd 阈值的推导。同时,对方程(4)做数学变化可得到等式:

$$BCF = 10^{[0.99 \lg(\text{DTPA-Cd}) - 0.43\text{pH} + 0.89 \lg(\text{CEC}) - 2 \lg(\text{SOM}) + 4.05]}$$

根据 GB 2762-2017 标准中规定的玉米籽粒 Cd 的临界值($0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)并代入上述等式,可得到反推土壤 Cd 含量的方程:

$$C_{\text{土壤Cd}} = 10^{[-0.99 \lg(\text{DTPA-Cd}) + 0.43\text{pH} - 0.89 \lg(\text{CEC}) + 2 \lg(\text{SOM}) - 5.05]}$$

此方程可根据涉及到的具体指标数值,计算我国玉米籽粒食品安全标准允许下的土壤 Cd 最大阈值。

表 2 玉米籽粒 Cd 富集系数多元回归预测方程¹⁾ ($n=129$)

Table 2 Multiple regression equation for predicting Cd enrichment coefficient of maize grain ($n=129$)

方程编号	方程	r
(1)	$\lg [BCF] = 1.37 \lg [\text{DTPA-Cd}] - 0.68$	0.78 **
(2)	$\lg [BCF] = 1.29 \lg [\text{DTPA-Cd}] - 0.35\text{pH} + 2.25$	0.80 **
(3)	$\lg [BCF] = 1.10 \lg [\text{DTPA-Cd}] - 0.37\text{pH} + 1.62 \lg [\text{CEC}] + 0.42$	0.83 **
(4)	$\lg [BCF] = 0.99 \lg [\text{DTPA-Cd}] - 0.43\text{pH} + 0.89 \lg [\text{CEC}] - 2 \lg [\text{SOM}] + 4.05$	0.87 **
(5)	$\lg [BCF] = -0.67\text{pH} - 2.88 \lg [\text{SOM}] + 1.79 \lg [\text{CEC}] - 0.60$	0.72 **

1) ** 表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关

我国北方土壤以碱性为主,因地域跨度较大导致各地区的土壤 ω (SOM)和土壤 CEC 等理化性质以及环境背景值、区域 Cd 污染分布差异性较大,因此在建立土壤生态阈值时需要考虑这些差异带来的影响^[10,32]。SSD 曲线法是基于物种本身固有的敏感度进行分析与推导,在其实际运用中常可将不同物种或同种物种的不同品种在不同条件的环境下通过归一化处理转化为统一标准,以此消除不同量纲指标引起的差异^[28]。参考文献[16]设定归一化条件为:

$$BCF_{\text{标准}} = BCF \times 10^{[a \times (\text{pH} - \text{pH}_1) + b \times \lg(\text{土壤性质} / \text{土壤性质}_1)]}$$

式中, $BCF_{\text{标准}}$ 为归一化至标准条件后的值; pH 为标准土壤条件下的值; BCF 、 pH_1 和土壤性质₁ 为实际土壤条件下的实测值; a 、 b 分别为土壤 pH 和土壤其它理化性质指标的影响程度系数(无量纲)。为了合理推导北方农田土壤 Cd 的不同生态阈值,结合本研究中实际土壤 pH、土壤 ω (SOM)、土壤 CEC 的范围、平均值与中位数以及前人^[15,33]利用 K-均值聚类分析得到的中国土壤典型情景,设定 3 种中国北方农田土壤的典型情景进行阈值推导。情景 1 为:中性土壤($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$),土壤 ω (SOM) = $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 CEC = $15 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;情景 2 为:碱性土壤($7.5 < \text{pH} < 8.5$),土壤 ω (SOM) = $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,

土壤 CEC = $20 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;情景 3 为:石灰性土壤($\text{pH} \geq 8.5$),土壤 ω (SOM) = $17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 CEC = $17 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。以表 2 中方程(5)作为土壤 Cd 富集预测模型,将情景 1~3 的土壤理化性质指标值分别代入方程(5),计算出 3 种典型情景下的 BCF 值。

2.4 阈值计算及产区分

危险浓度(HC)是 SSD 曲线法中的重要参数,代表某一污染物对特定物种的毒害程度。当污染物的有效浓度小于某一特定值所对应的概率如 HC5,则代表 95% 的该物种处于相对安全状态^[34]。参考前人的研究结果以及欧洲部分国家推荐的 HC 值^[34,35],本研究采用 HC5 与 HC50 对应的 Cd 浓度作为玉米产区的土壤阈值。以未归一化和 3 种情景下归一化处理后的 $1/BCF$ 由小到大排列作为横坐标,以其相对应的排列序数按公式: $P = 100Q/(n+1)$ 计算得到的累积频率作为纵坐标,式中, P 为累积频率, Q 为排列序数, n 为样本数(129),利用 Logistic 函数模型计算几种情景下 HC5 和 HC50 所对应的浓度,得到不同标准土壤情景下的推导结果,并绘制对应的 SSD 曲线。如图 3 所示,4 种不同情景下玉米对土壤 Cd 积累的敏感度分布拟合 SSD 曲线中,分布于曲线上端的点位代表该玉米品种对 Cd 的富集性较差难以出现超标情况,位于曲线下端的点位代表该部分玉米对 Cd 富集能力强易超标。4 种情景下大部分点位都位于 $1/BCF$ 值 0~120 之间,

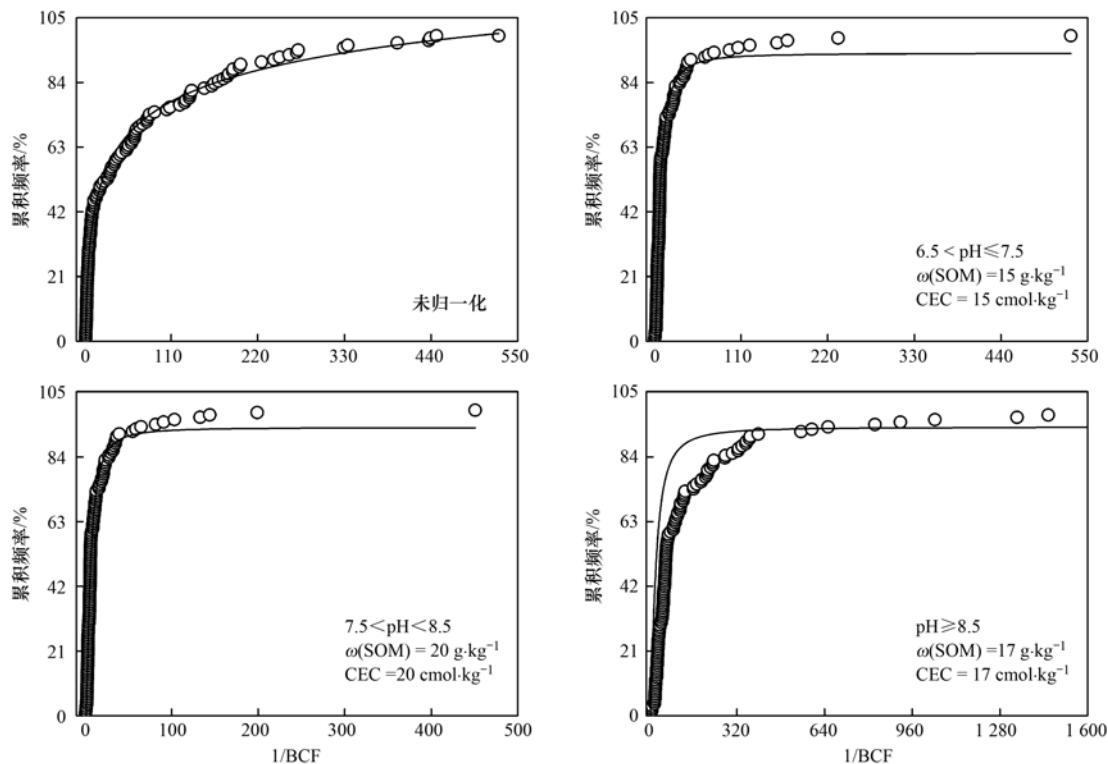


图3 北方玉米产区不同情景下玉米籽粒 Cd 的 SSD 曲线^[n = 129]

Fig. 3 Sensitivity distribution curves of maize in the maize-production area of northern China ($n = 129$)

表明了不同土壤理化性质条件下玉米对 Cd 的累积存在显著差异. 图4 为不同品种玉米对 Cd 的敏感性分布, 敏感性大小顺序为: 盛玉 367 < 五谷 631 < 郑单 958 < 纪元 1 号 < 华农 887. 相比而言, 盛玉 367 对土壤 Cd 的敏感度小, 富集程度低, 可作为优势品种进行大范围种植, 其它敏感度较大的品种需在有安全保障的农田土壤下进行种植.

种植绝大多数品种的玉米; 当土壤 Cd 浓度处于 HC5 与 HC50 对应浓度之间时, 将该区域划分为玉米的粮食限产区, 表明此时已有超过 5% 并且至多 50% 的玉米籽粒 Cd 含量已经超标. 此时应当对该区域的农业生产进行严格管控, 可以尝试种植敏感度较小的玉米品种如盛玉 367, 或者使用其他不易富集 Cd 的农作物和经济作物进行代替; 当土壤 Cd 浓度大于 HC50 对应的浓度时, 表明区域内至少一半的玉米无法食用, 此区域为粮食禁产区并应当禁止生产玉米或者其他农作物, 需要进行适当方式的土壤修复以恢复或者开展退耕还林等措施保证土地的可利用性.

由表 3 可知, 当土壤 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, 土壤 $\omega(\text{SOM}) = 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 $\text{CEC} = 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ (情景 1) 时, 土壤中 $\omega(\text{Cd}) \leq 3.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时该区域可作为玉米的粮食宜产区; 土壤 $\omega(\text{Cd}) \geq 8.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时该区域为粮食禁产区不可种植玉米; 当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 处于 $3.00 \sim 8.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间时为粮食限产区, 需要进行严格控制生产模式. 同样, 当土壤处于情景 2 时, 土壤 $\omega(\text{Cd}) < 3.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域可划分为粮食宜产区; 土壤 $\omega(\text{Cd}) > 9.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域划分为粮食禁产区, 土壤 $\omega(\text{Cd})$ 为 $3.80 \sim 9.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 划分为粮食限产区. 情景 3 同理.

同时考虑到玉米作为饲料成分的主要来源之

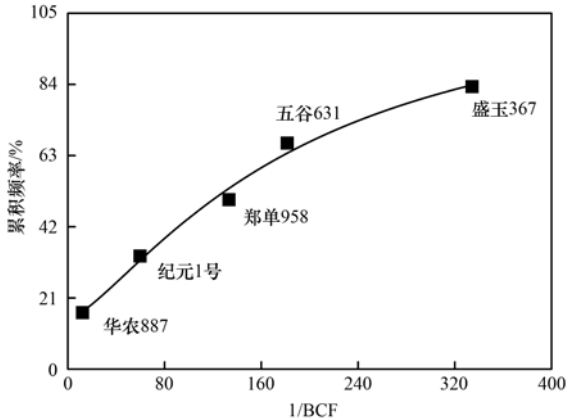


图4 北方玉米产区不同品种玉米籽粒 Cd 的 SSD 曲线

Fig. 4 Sensitivity distribution curves of different maize varieties in the maize-production area of northern China

Logistic 函数模型的计算结果如表 3 所示. 本研究中将 HC5 对应的土壤 Cd 浓度作为玉米的粮食宜产区生态阈值, 代表当土壤 Cd 浓度小于此值时可以保护 95% 的玉米籽粒中 Cd 含量不超过食品安全标准 GB 2762-2017 规定的 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可以广泛

一,参考饲料卫生标准(GB 13078-2017)中对于 Cd 的最低限值规定为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可以得出土壤环境处于情景 1、2 和 3 下玉米饲料宜产区阈值分别为 14.94 、 18.90 和 $15.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,禁产区阈值分别为 44.93 、 45.4 和 $36.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,两者之间的产区划分为饲料限产区。

表 3 基于 Logistic 模型计算不同情景下的土壤 Cd 阈值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 3 Cd thresholds values of soil under different situations
based on Logistic model fitting/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	粮食安全生产		饲料安全生产	
	HC5	HC50	HC5	HC50
情景 1	3.00	8.95	14.94	44.93
情景 2	3.80	9.10	18.90	45.40
情景 3	3.11	7.21	15.55	36.05
未归一化	2.33	6.54	11.65	32.69

通过大量的文献查阅分析后发现,有关玉米重金属的文献数据缺乏和本研究相似的针对性指标,并且部分研究缺乏与玉米相对应的土壤指标数据,导致难以采用已有报道数据对本研究获得模型进行验证.为此,本研究利用预测模型对本实验中的数据进行了验证分析.结果如图 5 所示.我国现行农用地标准 GB 15618-2018 中规定的农用地土壤污染风险管制值为 $3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$) 和 $4.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} > 7.5$),当土壤中 Cd 含量高于此值时食用农产品不符合标准且土壤污染风险处于较高水平,原则上应当禁止种植食用农产品.以情景 1 为例,本研究中推导的玉米粮食宜产区阈值为 $3.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与国家标准完全一致;当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 低于 $7.94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,有 49.61% 的玉米样品超出了国家食品安全标准限值 $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,此结果与预期保护 50% 的粮食安全生产相吻合;对于情景 2 和情景 3

的玉米粮食宜产区阈值分别为 $3.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($7.5 < \text{pH} < 8.5$) 和 $3.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} \geq 8.5$),均低于国家标准 $4.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} > 7.5$);同时,经计算,本研究所得玉米饲料产区的宜产阈值可以保护 71.32% 的饲料安全生产,即对难以满足粮食生产的土壤,可考虑用作饲料种植,以实现充分利用土地资源.虽然本研究推导的阈值在情景规定下的土壤环境中具有良好的适用性,但在实际情况中,应当根据不同产区、不同作物以及不同的土壤理化性质推导更为精确的土壤阈值作为当地标准,以指导农业生产和实现土地资源的充分利用。

3 结论

(1)玉米研究区内的土壤样品呈中性或碱性,土壤 $\omega(\text{SOM})$ 和土壤 CEC 的平均值分别为 $15.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $25.32\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.依据我国标准 GB 15618-2018 中农用地土壤污染风险筛选值和食品安全标准 GB 2762-2017 的规定,土壤 $\omega(\text{Cd})$ 超标率达 99.22% ,玉米籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 超标率达 49.61% .

(2)通过皮尔森相关性分析发现,玉米籽粒的富集系数 BCF 与土壤 pH 和土壤 $\omega(\text{SOM})$ 呈显著负相关性,与土壤 CEC 以及土壤 $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 均呈显著正相关。

(3)利用 SSD 曲线法的 Logistic 函数模型计算结果发现,本研究所涉及的 5 个玉米品种中敏感性最小的品种为盛玉 367,敏感性最大的品种为华农 887.归一化至 3 种土壤情景下[情景 1: $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$,土壤 $\omega(\text{SOM}) = 15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 CEC = $15\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;情景 2: $7.5 < \text{pH} < 8.5$,土壤 $\omega(\text{SOM}) = 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 CEC = $20\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;情景 3: $\text{pH} \geq 8.5$,土壤 $\omega(\text{SOM}) = 17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 CEC = $17\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$]的粮食宜产区阈值分别为 3.00 、 3.80 和 $3.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;禁产区阈值为 8.95 、 9.10 和 $7.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,当土壤 Cd 含量介于宜产区阈值与禁产区阈值之间时该区域划分为粮食限产区。

(4)为充分利用土地资源,对难以满足粮食生产的土壤,可考虑用作饲料种植.参考饲料卫生标准(GB 13078-2017)对于 Cd 的最低限值规定为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可以得出土壤环境处于情景 1、2、3 下饲料宜产区阈值分别为 14.94 、 18.90 和 $15.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,禁产区阈值分别为 44.93 、 45.40 和 $36.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于两者之间的区域划分为饲料限产区。

参考文献:

[1] 尚二萍,许尔琪,张红旗,等.中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J].环境科学,2018,39(10): 4670-4683.

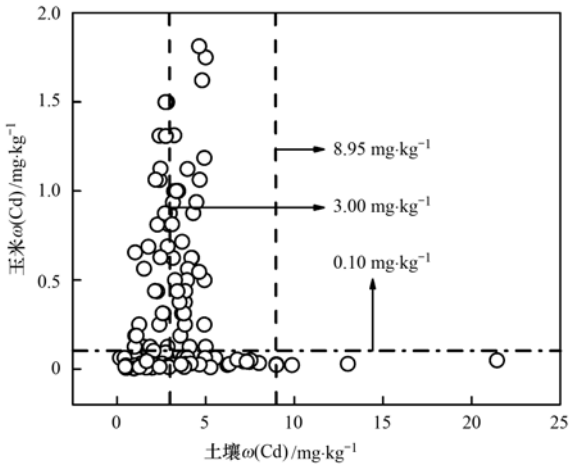


图 5 粮食产区中玉米籽粒和土壤样品 Cd 含量及预测阈值之间的关系

Fig. 5 Relationship among Cd contents of maize grains and related soil and thresholds of maize-production in grain-production area

- Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, *et al.* Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- [2] 管伟豆, 肖然, 李荣华, 等. 土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(5): 969-977.
- Guan W D, Xiao R, Li R H. *et al.* Investigations on the derivation of a safe wheat-producing threshold of soil Cd content and classification of Cd contaminated wheat-producing areas in northern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(5): 969-977.
- [3] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, *et al.* Plant science; the key to preventing slow cadmium poisoning[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, **18**(2): 92-99.
- [4] Khan M A, Khan S, Khan A, *et al.* Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 1591-1605.
- [5] 袁林, 刘颖, 兰玉书, 等. 不同玉米品种对镉吸收累积特性研究[J]. *四川农业大学学报*, 2018, **36**(1): 22-27.
- Yuan L, Liu Y, Lan Y S, *et al.* Variations of cadmium absorption and accumulation among corn cultivars of metal pollution in soil from Lead-Zinc mining area [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, **36**(1): 22-27.
- [6] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C G, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a Zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- [7] 周艳, 万金忠, 李群, 等. 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- Zhou Y, Wan J Z, Li Q, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of corn grains from a Pb-Zn mining area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- [8] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- Wang S Y, Wu W Y, Liu F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- [9] 中华人民共和国国务院. 土壤污染防治行动计划[EB/OL]. <http://www.huangdao.gov.cn/n10/upload/200731135715930216/200731135733214506.pdf>, 2021-04-01.
- [10] 周启星, 安婧, 何康信. 我国土壤环境基准研究与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(1): 1-6.
- Zhou Q X, An J, He K X, *et al.* Research and prospect on soil-environmental criteria in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(1): 1-6.
- [11] 朱志军, 杨寿山, 杨泽忠, 等. 广西桂平市稻田土壤酸化与镉污染风险评价探析[J]. *南方农业学报*, 2019, **50**(7): 1466-1471.
- Zhu Z J, Yang S S, Yang Z Z, *et al.* Risk assessment of soil acidification and cadmium pollution in paddy field of Guiping, Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, **50**(7): 1466-1471.
- [12] 宋波, 王佛鹏, 周浪, 等. 广西镉地球化学异常区水稻籽粒镉含量预测模型研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(12): 2672-2680.
- Song B, Wang F P, Zhou L, *et al.* Prediction model for cadmium concentrations in rice grain under the geochemical background of a cadmium anomaly area in Guangxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(12): 2672-2680.
- [13] 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 等. 冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- Wang Y W, Rui Y K, Li Z Y, *et al.* Characteristics of heavy metal absorption by winter wheat and its quantitative relationship with influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- [14] Ding C F, Ma Y B, Li X G, *et al.* Derivation of soil thresholds for lead applying species sensitivity distribution; a case study for root vegetables[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **303**: 21-27.
- [15] 王小庆, 韦东普, 黄占斌, 等. 物种敏感性分布法在土壤中铜生态阈值建立中的应用研究[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(6): 1787-1794.
- Wang X Q, Wei D P, Huang Z B, *et al.* Application of species sensitivity distribution in deriving of ecological thresholds for copper in soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(6): 1787-1794.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 生态安全土壤环境基准制定技术指南(征求意见稿)[EB/OL]. http://www.360doc.cn/article/37581541_775444393.html, 2021-04-01.
- [17] 孙在金, 赵淑婷, 林祥龙, 等. 基于物种敏感度分布法建立中国土壤中锑的环境基准[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(4): 774-781.
- Sun Z J, Zhao S T, Lin X L, *et al.* Deriving soils environmental criteria of antimony in China by species sensitivity distributions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(4): 774-781.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 陈志凡, 范礼东, 陈云增, 等. 城乡交错区农田土壤重金属总量及形态空间分布特征与源分析——以河南省某市东郊城乡交错区为例[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(4): 1317-1327.
- Chen Z F, Fan L D, Chen Y Z, *et al.* Spatial distribution and source analysis of heavy metals in agricultural soils in a Peri-urban area based on IDW interpolation and chemical fractions: a case study in Henan province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1317-1327.
- [20] 赵科理. 土壤-水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- Zhao K L. Spatial relationships of heavy metals in soil-rice system and the quantitative model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [21] 张云慧, 杜平, 何赢, 等. 基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4262-4269.
- Zhang Y H, Du P, He Y, *et al.* Derivation of the thresholds of available concentrations of heavy metals in soil based on agricultural product safety[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4262-4269.
- [22] 张成丽, 王阳, 白银雪, 等. 禹州市废旧煤矿周边土壤重金属总量及有效态分析与评价[J]. *安全与环境学报*, 2019, **19**(6): 2183-2191.
- Zhang C L, Wang Y, Bai Y X, *et al.* Analysis and assessment of total and available heavy metal of abandoned coal mined-off land-soils in Yuzhou City, Henan [J]. *Journal of Safety and*

- Environment, 2019, **19**(6): 2183-2191.
- [23] 熊孜, 赵会薇, 李菊梅, 等. 黄淮海平原小麦吸收镉与土壤可浸提镉间关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2275-2284.
- Xiong Z, Zhao H W, Li J M, *et al.* The relationship between cadmium in wheat plant and cadmium extracted by EDTA and diluted acids in soil in Huanghuaihai Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(12): 2275-2284.
- [24] 汤丽玲. 作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 699-703.
- Tang L L. Effects of soil properties on crop Cd uptake and prediction of Cd concentration in grains[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(2): 699-703.
- [25] 商和平, 李洋, 张涛, 等. 畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 314-324.
- Shang H P, Li Y, Zhang T, *et al.* Form tendency and bio-availability dynamics of Cu and Zn in different farm soils after application of organic fertilizer of livestock and poultry manures[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 314-324.
- [26] 孙国红, 李剑睿, 徐应明, 等. 不同水管理下镉污染红壤钝化修复稳定性及其对氮磷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(11): 2105-2113.
- Sun G H, Li J R, Xu Y M, *et al.* Effects of water management on cadmium stability and nitrogen and phosphorus availability in cadmium polluted red soil after immobilization remediation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(11): 2105-2113.
- [27] 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 等. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(3): 461-467.
- Wu M, Xu M G, Xu S H, *et al.* Effects of organic matter on the stabilization process of added cadmium and lead in red soil and black soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(3): 461-467.
- [28] Ding C F, Zhang T L, Wang X X, *et al.* Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, **61**(43): 10273-10282.
- [29] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(12): 2075-2081.
- Li J X, Wu L C, Zhang J, *et al.* Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(12): 2075-2081.
- [30] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 沿海滩涂区土壤重金属含量分布及其有效态影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(2): 287-298.
- Yao R J, Yang J S, Xie W P, *et al.* Content and bioavailability factors of soil heavy metals in mudflat coastal areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(2): 287-298.
- [31] 宋文恩, 陈世宝. 基于水稻根伸长的不同土壤中镉(Cd)毒性阈值(EC_x)及预测模型[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(17): 3434-3443.
- Song W E, Chen S B. The toxicity thresholds (EC_x) of cadmium (Cd) to rice cultivars as determined by root-elongation tests in soils and its predicted models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, **47**(17): 3434-3443.
- [32] 周启星, 王毅. 我国农业土壤质量基准建立的方法体系研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, **20**(S1): 38-44.
- Zhou Q X, Wang Y. Methodological systems of building agricultural soil quality criteria in China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, **20**(S1): 38-44.
- [33] 程青靓, 赵龙, 杨彦, 等. 我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 70-78.
- Cheng J L, Zhao L, Yang Y, *et al.* Classification methods for typical lead-contaminated rice production areas of the middle and lower Yangtze River in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 70-78.
- [34] Selck H, Bo R, Christoffersen K, *et al.* Comparing sensitivity of ecotoxicological effect endpoints between laboratory and field[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2002, **52**(2): 97-112.
- [35] 韩东锦, 赵龙, 张乃明, 等. SSD 法对西南碳酸盐岩母质区稻田土壤镉污染类型划分研究[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(2): 409-418.
- Han D J, Zhao L, Zhang N M, *et al.* Classification of Cd contaminated paddy soils in carbonate parent material area of southwest China by Species Sensitivity Distribution method (SSD)[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(2): 409-418.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)