

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

影响不同农作物镉富集系数的土壤因素

陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯*

(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要: 农作物的 Cd 富集系数 (BCF) 受多种因素影响。为明确田间条件下不同农作物的 Cd 富集系数特征差异及土壤性质对其影响, 分别在我国水稻、小麦和玉米主产区不同污染程度的地块上作物收获期采集土壤和作物籽粒点对点样品, 研究水稻、小麦、夏玉米和春玉米的 Cd 富集系数特征及土壤性质对不同农作物的 Cd 富集系数的影响, 并通过多元回归方程建立以上农作物 Cd 富集系数与土壤性质的定量关系。结果表明, 在田间土壤中 Cd 含量范围为 $0.15 \sim 2.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下, 水稻、小麦、夏玉米和春玉米 Cd 富集系数的均值分别为 0.915、0.155、0.113 和 0.102, 水稻明显高于小麦和玉米, 春玉米的 Cd 富集系数最低。土壤中的 Cd 含量与小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 呈极显著负相关; 土壤有机质 (SOM) 与小麦、夏玉米 BCF 之间的关系呈极显著负相关; 土壤 pH 和阳离子交换量 (CEC) 对作物 BCF 也有影响。引入土壤 Cd 含量、pH、SOM、CEC 等因素, 建立水稻、小麦、夏玉米和春玉米的 Cd 富集系数预测方程。水稻、小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 预测方程相关系数分别为 0.423^* 、 0.796^{**} 、 0.826^{**} 和 0.551^{**} , 均达到显著或极显著水平, 可以较好地预测不同土壤条件下不同农作物的 BCF 值。

关键词: 镉; 富集系数; 小麦; 玉米; 水稻; 土壤性质

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-2031-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202008161

Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops

CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, YAO Qi-xing, SU De-chun*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Pollution Prevention Control and Remediation, College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The Cd bioaccumulation factor (BCF) of crops is affected by many aspects. In order to clarify the differences in the Cd bioaccumulation factor characteristics of different crops under field conditions and the influence of soil properties, point-to-point samples of soil and crop grains were collected during crop harvesting on plots with varying pollution levels in the primary production areas of rice, wheat, and maize in China. The characteristics of the Cd bioaccumulation factors of rice, wheat, summer maize, and spring maize and the effects of soil properties on the Cd bioaccumulation factors of different crops were studied, and the quantitative relationship between the Cd bioaccumulation factors and soil properties was established through multiple regression equations. The results revealed that the average BCF values of Cd in rice, wheat, summer maize, and spring maize were 0.915, 0.155, 0.113, and 0.102, respectively, with the Cd content in the field soil of $0.15 \sim 2.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Rice is significantly higher than wheat and maize, and spring maize has the lowest Cd bioaccumulation factor. The Cd content in the soil is extremely negatively correlated with the BCF of wheat, summer maize, and spring maize. The relationship between soil organic matter (SOM) and the BCF of wheat and summer maize demonstrated a significant negative correlation. The soil pH and cation exchange capacity (CEC) also affect the BCF of crops. Introducing the soil Cd content, pH, SOM, CEC, and other factors, the Cd bioaccumulation factor prediction equations of rice, wheat, summer maize, and spring maize were established. The correlation coefficients of the BCF prediction equations for rice, wheat, summer maize, and spring maize are 0.423^* , 0.796^{**} , 0.826^{**} , and 0.551^{**} , respectively. The above models reached significant or extremely significant levels, which can better predict the BCF value of different crops under varying soil conditions.

Key words: cadmium; bioaccumulation factor; wheat; maize; rice; soil properties

水稻、小麦和玉米是我国最主要的三大粮食作物, 农田土壤污染不仅对土壤环境造成了较大威胁^[1,2], 也为粮食作物的安全生产带来了冲击和挑战。据统计, 我国每年受重金属污染的耕地约有 $1 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 这直接导致了 $1 \times 10^7 \text{ t}$ 的粮食被不同程度污染, 从而造成直接 200 余亿元的经济损失^[3]。2014 年全国污染普查土壤污染状况公报显示, 全国土壤总的超标率为 16.1%^[4], 其中以镉 (Cd) 污染最为严重, 点位超标率达到了 7.0%。Cd 是五毒元素之首, 其生物利用度比其他重金属元素高得多^[5,6]。这也使其更容易进入作物体内再通过食物链转移到人体中, 从而对环境和人体健康造成巨大

的危害^[7]。

我国南方稻田 Cd 污染较严重^[8~10]。Wang 等^[11]对湖南水稻的研究结果表明, 样品超标率均大于 50%, 其中长沙某地水稻中镉超标率为 76%, 湘潭某地的超标率为 87%, 益阳某区的超标率为 56%^[12~14]。邵金秋等^[15]对历史污灌区石家庄某地的小麦进行了测定, 结果显示小麦籽粒中平均 Cd 含量虽未超标, 但已出现明显的累积现象。有研究表

收稿日期: 2020-08-15; 修订日期: 2020-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0801103)

作者简介: 陈洁 (1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制与修复, E-mail: chenjie97065@163.com

* 通信作者, E-mail: dcsu@cau.edu.cn

明,陕西潼关某地农田 83.6% 的土壤已经受到了不同程度的重金属污染,研究区的玉米 Cd 超标率均在 40% 左右^[16]。

作物 Cd 富集系数 (BCF) 是指农作物籽粒 Cd 含量与土壤中 Cd 含量的比值,其常被用作描述 Cd 迁移特征和预测植物组织中 Cd 浓度^[17]。BCF 值也可以反映作物籽粒中 Cd 富集和积累情况^[18],其值越大,作物对 Cd 的富集、累积能力越强,食品安全受到的威胁越大。王珊珊等^[19]研究了玉米、水稻对土壤 Cd 的富集,结果表明水稻对镉的富集能力尤为明显,富集系数大于 0.5 的样品占到 40% 以上,因此水稻的安全生产更应该引起关注。不同作物类型、品种的 BCF 值差异较大,在实际生产中,可根据不同作物的 BCF 值特征差异进行作物种植的调整以保障粮食的安全生产。熊孜等^[20]通过研究不同品种小麦的 Cd 富集系数,确定了适合在不同 Cd 污染程度的土壤上种植的品种。邓婷等^[21]研究了 6 个玉米品种对 Cd 富集系数的差异后发现,华彩糯 3 号和广红糯 8 号茎叶富集系数较高,可作为 Cd 高富集玉米品种;仲糯 1 号籽粒富集系数低,可用作粮食或饲料。作物对 Cd 的富集与土壤 Cd 污染程度、土壤酸化、水分管理和品种也有密切关系^[11]。作物 BCF 值除与作物自身生物学特性有直接关系外也与土壤性质、外界环境等有密切关系。土壤 Cd 含量、pH、有机质 (SOM)、阳离子交换量 (CEC)、黏土含量、Ca 含量、有效 Si 含量、Fe 含量和气候等都会影响 BCF 值。但黏土含量与土壤 CEC 值有关,Ca 含量和有效 Si 含量都会通过改变土壤 pH^[22]来影响 BCF 值,土壤中的 Fe 则是通过参与氧化还原和羟基配位过程来间接影响。而气候等外界环境又是很难人为控制的。土壤 Cd 含量、土壤 pH、SOM 和 CEC 是影响作物 Cd 生物积累的最直接的土壤因素^[23]。Li 等^[24]对土壤性质进行分析,通过建立水稻的 BCF 值与土壤 pH 和 OC 含量的关系模型,筛选可以安全种植的水稻。

本文通过在我国水稻、小麦和玉米主产区不同 Cd 污染程度的地块采集点对点的土壤-作物样品,研究田间条件下不同作物的 Cd 富集系数特征和差异,并通过多元回归研究不同土壤性质对作物 Cd 富集系数的影响,通过作物种植结构调整和土壤调控措施,以期降低作物对 Cd 吸收来保障粮食作物的安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤和样品采样

晚稻收获时在我国湖南某地区 60 块稻田采集

60 对土壤和对应的晚稻样品,品种为丰源优 299;小麦收获时在我国小麦主产区河北、河南某地不同污染程度麦田中采集 50 对土壤-小麦点对点样品,小麦品种为济麦 22、沧麦 119、河农 6549 和石麦 22;夏玉米收获时在我国河北、河南不同污染程度夏玉米田中采集 30 对土壤-夏玉米点对点样品,夏玉米品种为郑单 958;春玉米收获时在我国春玉米主产区辽宁某地不同污染程度春玉米田中采集 65 对土壤-春玉米点对点样品,春玉米品种为致泰 3 号和东单 1331。

采样点选点要求为:① 采样区周围已无明显的重金属污染源;② 作物样品生长时的灌溉和肥料施用情况基本相同;③ 每对采样的结果代表一块地的污染情况。

土壤样品采集原则:① 采用“S”形采样法进行布点取样,每个样至少是 5 个取土点的混合均匀品。采样深度为 0~20 cm,混合土样质量为 1.5 kg 左右;② 采样时除去 1 cm 的表土和植被落叶;农作物样品采集原则:① “S”形布点法采样,采样点与土壤的采样点为一一对应关系;② 被采样品生长良好,无生长不良、病虫害等威胁,减少误差产生;③ 采集后将样品放入指定样品袋,并标明采样时间、采样人、采样地点等内容。土壤和农作物样品采集后统一放置在密闭、干燥条件下保存并及时进行检测。

1.2 样品处理与测定

将采集的土壤样品分别均匀摊倒在牛皮纸上,用木棒碾碎、翻动使均匀风干。采用四分法取出一部分风干混匀后的样品,继续碾压破碎后过 1 mm 孔径筛,存于塑封袋中,用于测定土壤 pH 和 CEC;剩余的样品再次利用四分法进行取舍,取出的过 0.149 mm 孔径筛,用于测定 SOM 和土壤 Cd 含量。采集的水稻、小麦和玉米样品在 105℃ 杀青 30 min 再调至 75℃ 继续烘干至恒重。将烘干后作物籽粒脱壳粉碎,转入塑封袋中编号,用于测定农作物籽粒中的 Cd 含量。

依据 NY/T 1121.2-2006 采用玻璃电极法在水土比为 2.5:1 时测定土壤样品的 pH,土壤有机质含量的测定采用 NY/T 295-1995 中的重铬酸钾氧化法,土壤阳离子交换量采用乙酸铵法进行测定。土壤和农作物籽粒中的 Cd 含量在样品经过硝酸-高氯酸微波消解后用电感耦合等离子体质谱法测定。测 Cd 元素时,土壤样品的标准物质为 GBW-07410,回收率为 102%;农作物籽粒分析使用的标准物质为 GBW10049 (GSB-27),回收率为 105%~112%。

1.3 生物富集系数 BCF 的计算

BCF 用农作物籽粒中的 Cd 含量与土壤中 Cd 含量的比值表示：

$$BCF = Cd_{Grain}/Cd_{Soil} \tag{1}$$

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2010、IBM SPSS 25.0 和 Origin 2017 等数据处理软件对采集样品的基础数据进行处理和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 不同农作物 Cd 富集系数(BCF)特征

水稻、小麦、夏玉米和春玉米这 4 种农作物的 Cd 富集系数 BCF 值特征如表 1 所示。水稻籽粒中 Cd 含量的范围为 0.02 ~ 2.00 mg·kg⁻¹，按《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的 0.2 mg·kg⁻¹划分，有 46 个样品超标，超标率为 76.67%，最高超标 10 倍；小麦籽粒中 Cd 含量的范围为 0.03 ~ 0.39 mg·kg⁻¹，按规定的 0.1 mg·kg⁻¹划分，有 26 个样品超标，超标率为 52.00%，最高超标 3.9 倍；夏玉米籽粒中 Cd 含量的范围为 0.06 ~ 0.67 mg·kg⁻¹，与规定的 0.1 mg·kg⁻¹相比，有 17 个样品超标，超标率为 56.67%，最高超标 6.7 倍；春玉米籽粒中 Cd 含量的范围为 0.01 ~ 0.27 mg·kg⁻¹，有 11 个样品超标，超标率为 16.92%，最高

超过标准规定 0.1 mg·kg⁻¹ 的 2.7 倍。水稻的 BCF 属于正态分布，其余均为对数正态分布。60 个水稻样品的 BCF 范围为 0.032 ~ 3.519，变异系数为 77.38%，为中等变异强度。50 个小麦样品的 BCF 范围为 0.033 ~ 1.000，变异系数为 78.95%，为中等变异强度。30 个夏玉米样品的 BCF 范围为 0.031 ~ 0.870，变异系数为 117.14%，呈现出强变异性。65 个春玉米样品的 BCF 范围为 0.029 ~ 0.574，变异系数为 88.37%，也为中等变异强度。夏玉米的 BCF 变异程度最高，表明该农作物样本间的 BCF 值离散程度较大，数据分散，这也可能与其样本数较少有关；春玉米、小麦和水稻属同一变异强度。数据的分布类型符合正态分布的用算术均值 ± 标准差表示，符合对数正态分布则用几何均值 ± 标准差表示。水稻、小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 均值分别为 0.915 ± 0.708、0.190 ± 0.150、0.175 ± 0.205 和 0.129 ± 0.114。数值显示，对于水稻、小麦、夏玉米和春玉米这 4 种不同的农作物，其 BCF 值有较大差异。水稻与小麦的土壤 Cd 含量大致相同，而水稻的 BCF 值远高于小麦，这说明水稻富集 Cd 的能力更强，玉米的 BCF 值低于水稻和小麦，春玉米 BCF 低于夏玉米，表明春玉米富集 Cd 的能力最弱。综上所述，水稻的 BCF 值最高，其次是小麦和夏玉米，春玉米的 Cd 富集系数最小。

表1 不同农作物 Cd 富集系数(BCF)的特征值

Table 1 Characteristic values of Cd bioaccumulation factors (BCF) of different crops										
作物种类	样本数	籽粒 Cd 范围 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 范围 /mg·kg ⁻¹	BCF 范围	分布类型	中位数	几何平均值	算术平均值	标准差	变异系数 /%
水稻	60	0.02 ~ 2.00	0.15 ~ 2.54	0.032 ~ 3.519	正态分布	0.763	0.626	0.915	0.708	77.38
小麦	50	0.03 ~ 0.39	0.15 ~ 2.66	0.033 ~ 1.000	对数正态	0.160	0.155	0.190	0.150	78.95
夏玉米	30	0.06 ~ 0.67	0.23 ~ 2.43	0.031 ~ 0.870	对数正态	0.092	0.113	0.175	0.205	117.14
春玉米	65	0.01 ~ 0.27	0.17 ~ 1.75	0.029 ~ 0.574	对数正态	0.094	0.102	0.129	0.114	88.37

不同农作物 BCF 分位值如表 2 所示。在水稻样本中 BCF 的 50% 分位值为 0.763，小麦 BCF 的 50% 分位值为 0.160，夏玉米 BCF 的 50% 分位值为 0.092，春玉米 BCF 的 50% 分位值为 0.094。4 种农作物的 BCF 在同一分位处差距也较大，水稻 BCF 的 50% 分位值是小麦 BCF 的 4.77 倍，夏玉米 BCF 的 8.29 倍，春玉米 BCF 的 8.12 倍。水稻 BCF 的 75% 分位值达到 1.273，表明至少有 25% 的水稻样本 BCF 大于 1，富集 Cd 能力极强，其籽粒中 Cd 含量高

于土壤中的含量。小麦、春玉米和夏玉米则未出现 BCF 大于 1 的情况，表明这 3 种作物富集 Cd 能力较弱。小麦的 BCF 最大为 1，但其 95% 分位值仅为 0.392，说明小麦 BCF 较大的样本数量极少。夏玉米 BCF 的 90% 分位值为 0.427，95% 分位值为 0.855，春玉米的 90% 分位值为 0.248，95% 分位值为 0.484，在 5% 的分位区间里，夏玉米的 Cd 富集系数增长 2 倍，春玉米的 Cd 富集系数增长 1.95 倍，说明较高 Cd 富集能力的玉米样本也较少。

表2 不同农作物 Cd 富集系数的百分位数值

Table 2 Percentile values of Cd bioaccumulation factors of different crops									
作物种类	样本数	分布类型	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
水稻	60	正态分布	0.051	0.134	0.426	0.763	1.273	1.992	2.329
小麦	50	对数正态	0.062	0.065	0.100	0.160	0.233	0.366	0.392
夏玉米	30	对数正态	0.026	0.037	0.057	0.092	0.212	0.427	0.855
春玉米	65	对数正态	0.042	0.050	0.064	0.094	0.146	0.248	0.484

2.2 不同农作物 BCF 值与土壤 Cd 含量的关系

分别对采集的 60 对水稻、50 对小麦、30 对夏玉米和 65 对春玉米样品进行 BCF 值与土壤 Cd 含量之间的线性拟合,结果如图 1 所示.从中可以看出,4 种作物的 BCF 值与土壤 Cd 含量之间都呈现出负相关关系.富集系数由作物中 Cd 含量与土壤中 Cd 含量的比值表示,当土壤中 Cd 含量的增量大于作物中的 Cd 含量时,即会显示出负相关的关系.但水稻 BCF 与土壤中 Cd 含量值之间的相关系数 r 仅为 -0.247 ($n=60$) 且并不具有显著性.小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 与土壤 Cd 含量则都达到了极显著的水平 ($P < 0.01$).夏玉米 BCF 与土壤 Cd 含

量相关性最高,相关系数 r 达到了 -0.578^{**} ($n=30$),即夏玉米土壤 Cd 含量影响其 BCF 的程度为 57.8%;小麦 BCF 值与土壤 Cd 含量的相关系数 r 为 -0.494^{**} ($n=50$),控制着小麦 BCF 值 49.4% 的变异;春玉米 BCF 值与土壤 Cd 含量其相关性较差, r 为 -0.346^{**} ($n=65$).虽然小麦、夏玉米、春玉米的 BCF 值与土壤 Cd 含量极显著相关,但他们的相关系数都不高,这间接证明了作物 BCF 是一个综合性指数,其值的大小还受到其他土壤性质的影响.另外,BCF 值也与作物籽粒中 Cd 含量息息相关.而作物籽粒中的 Cd 与土壤中有效态 Cd 含量有较强的关系,而并非土壤中的全 Cd 含量^[25~27].

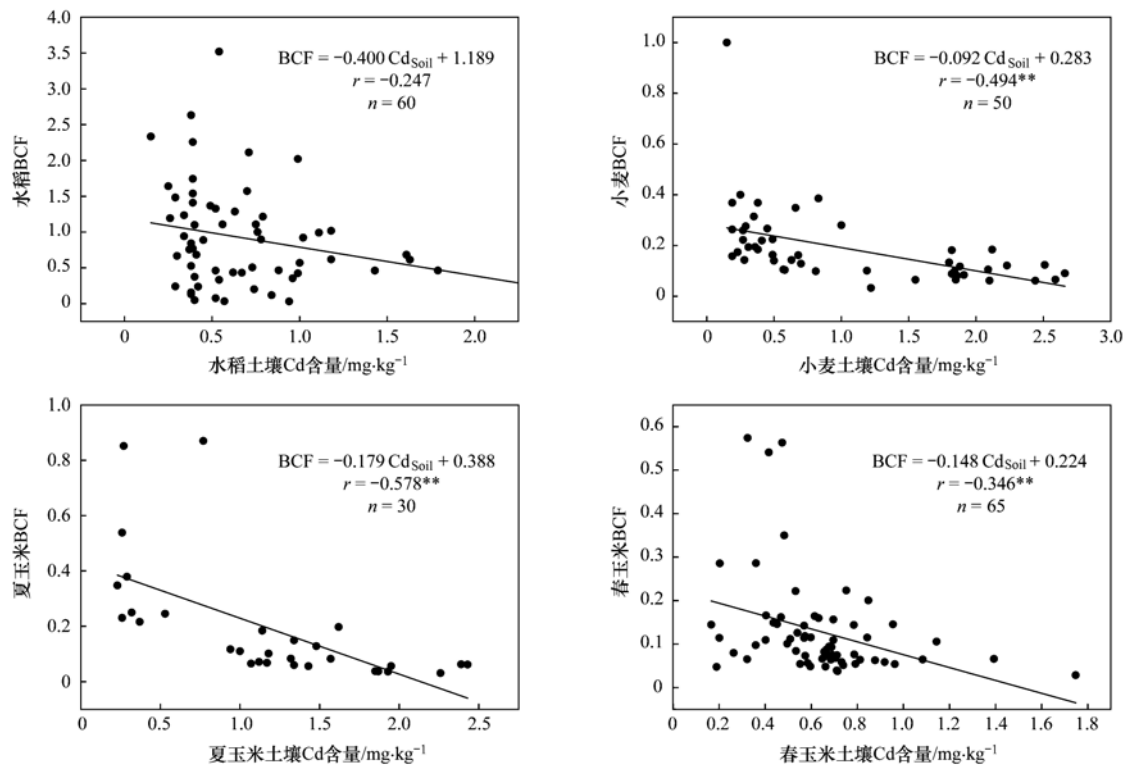


图1 不同作物 BCF 与土壤 Cd 含量关系

Fig. 1 Relationship between the BCF of different crops and soil Cd content

2.3 不同农作物 BCF 值与土壤 pH 的关系

图2中对水稻、小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 值与土壤 pH 之间的关系进行了线性拟合.从中可知,4 个拟合方程均未达到显著性相关水平.对于水稻和春玉米,BCF 与土壤的 pH 之间呈负相关关系,小麦和夏玉米的 BCF 与土壤 pH 之间则呈现正相关关系,并且图2中所有回归模型拟合皆较差,相关系数 r 均小于 0.2.这表明土壤 pH 对 4 种农作物 BCF 的影响程度均低于 20%.李志涛等^[28]研究了稻米 Cd 富集系数的影响因素,结果表明,pH 可以改变 Cd 在土壤-溶液体系中的分配从而影响其有效性^[29~31],因此影响着水稻对 Cd 的吸收并且该因素成为影响水稻富集系数的最重要的原因.同样在孙

宗全等^[32]的研究中,小麦的 BCF 与土壤 pH 也存在显著负相关的关系.杨华^[33]采用 BCF 与 pH 的关系模型较好地预测了玉米籽粒富集重金属情况.但在本研究中,BCF 与 pH 的关系与前面学者的有些不同,这可能与本采样点田间条件和每种作物非单一作物品种有关.除此之外,pH 对土壤中 Cd 有效性的影响较为复杂.王梦梦等^[34]的研究发现,土壤 pH 对水稻籽粒中 Cd 含量的影响并不是单一的趋势,因此 pH 与 BCF 之间也可能不是简单的线性关系.

2.4 不同农作物 BCF 值与土壤有机质(SOM)含量的关系

图3显示了4种农作物土壤 BCF 值与 SOM 之间的关系.从趋势上看,水稻、小麦、夏玉米和春玉米

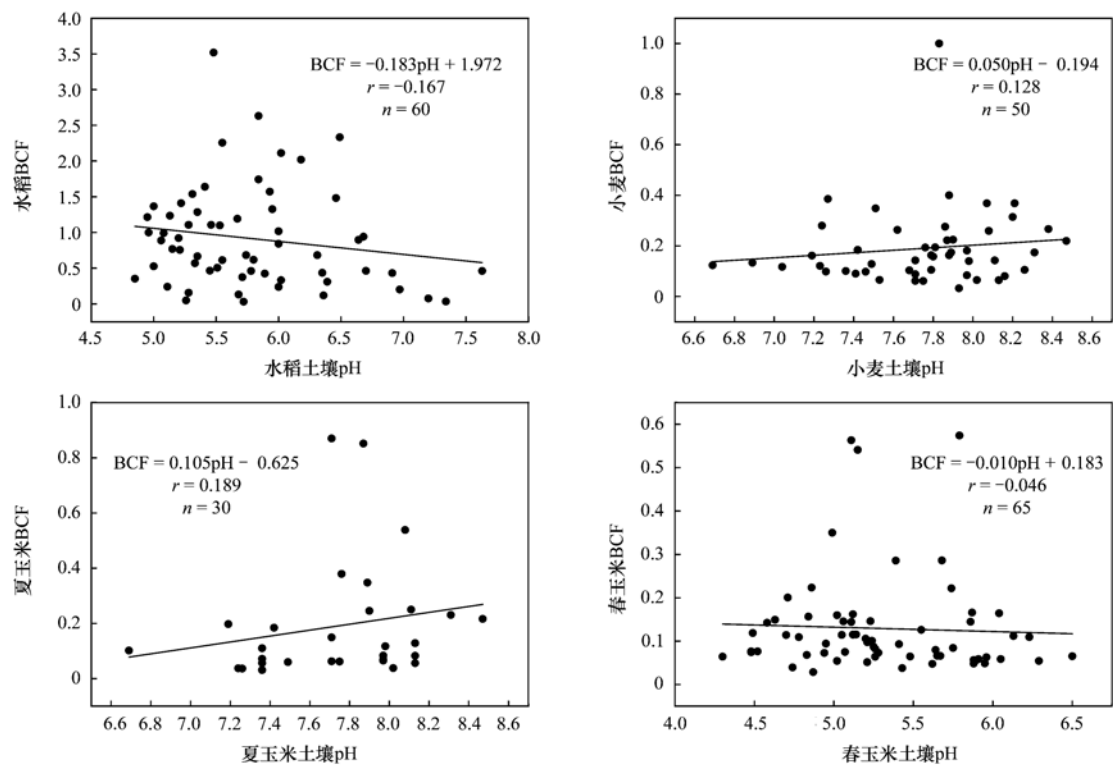


图 2 不同作物 BCF 与土壤 pH 含量关系
Fig. 2 Relationship between the BCF of different crops and soil pH content

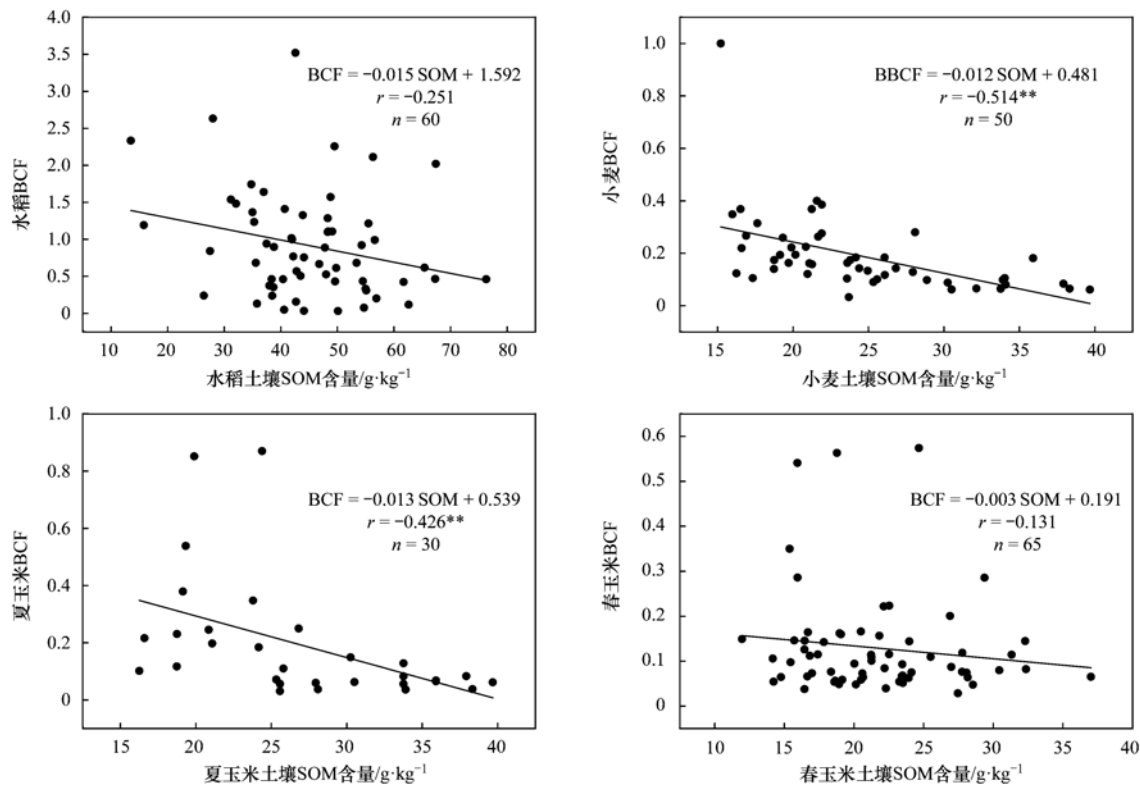


图 3 不同作物 BCF 与土壤 SOM 含量关系
Fig. 3 Relationship between the BCF of different crops and soil SOM content

的 BCF 值与土壤有机质含量均有负相关的关系. 小麦 BCF 值与 SOM 之间达到极显著相关的水平 ($P < 0.01$), 相关系数 $r = -0.514^{**}$ ($n = 50$). 对于夏玉米来说也有相同的趋势, 相关性也为极显著 ($P < 0.01$), 相关系数 $r = -0.426^{**}$ ($n = 30$). 水稻和春玉米 BCF 与 SOM 之间关系并不显著, 相关系数也较低, r 分别为 -0.251 和 -0.131 . 相关系数的差异说明小麦和夏玉米的 BCF 受 SOM 影响较大, 而水

稻和春玉米的 SOM 则控制其 BCF 值变异的能力较弱. SOM 是作物吸收 Cd 的重要影响因素^[35], 因此它也影响着农作物的 BCF 值. 李婧等^[36]的研究表明, SOM 与重金属 Cd 有显著的相关性. 曹会聪等^[37]的研究发现, 东北黑土地区的 SOM 与土壤中黏土矿物一起吸附重金属, 限制了其移动性和生物有效性. 高文文等^[38]研究了 SOM 含量对冻融黑土中 Cd 的影响, 结果显示, 随着 SOM 含量的增加, Cd 向更稳定的形态进行转化的趋势更加明显, 土壤中重金属 Cd 的生物有效态含量降低, 从而抑制作物对其吸收. 在本研究中, 随着 SOM 含量的增加, 4 种农作物的 BCF 值都呈现下降的趋势, 上述学者得到的结论即可解释这种现象.

2.5 不同农作物 BCF 值与土壤阳离子交换量 (CEC) 的关系

水稻、小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 值与土壤 CEC 含量关系如图 4 所示. 4 种作物的 BCF 值随 CEC 的增加而逐渐减小. 研究认为 CEC 含量的提高增加了 Cd 在土壤中的吸附能力^[39], 降低了其向作物中迁移的能力. 与无机胶体相比, 土壤腐殖质对 Cd 离子的表面吸附和螯合能力较强, 是不可忽视的影响作物中重金属含量的物质. 在本研究中, CEC 含量与 BCF 之间呈现负相关的关系, 但 4 种作物的 BCF 与 CEC 之间并未达到显著水平, 而且相关系数

都较低. 水稻、小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 值与土壤 CEC 的相关系数 r 分别为 -0.248 ($n = 60$)、 -0.185 ($n = 50$)、 -0.230 ($n = 30$) 和 -0.195 ($n = 65$), 这表明水稻的 BCF 值受 CEC 影响程度大于夏玉米和春玉米, 小麦 BCF 受其影响最小. 在大田条件下, 土壤 CEC 的含量会影响农作物的 BCF 值, 但由于作用机制复杂, 无法用简单的一元线性方程表示.

2.6 影响不同农作物 BCF 值的土壤因素多元线性预测方程的建立

上述研究表明, 土壤不同的理化性质对不同农作物的 BCF 值影响是不同的. 小麦、夏玉米和春玉米的 BCF 值均与其土壤中的 Cd 含量达到了极显著线性相关. 与之相同, 小麦和夏玉米的 BCF 值与对应的土壤 SOM 也呈现出极显著的相关关系. 但是对于这些一元线性拟合的方程, BCF 与土壤性质之间的相关系数都较低, 无法实现较为精确的预测. 另一方面, 土壤 pH 和 CEC 值虽未与任何一种作物的 BCF 值形成显著性相关的关系, 但依然对 BCF 值存在影响, 只是因为这种影响无法用单一的趋势表示. 因此, 以土壤 Cd 含量和土壤性质为变量, 建立不同农作物 BCF 的对数多元线性回归拟合方程模型 (表 3), 用来更为综合精确地预测不同土壤因素对不同农作物 BCF 值的影响.

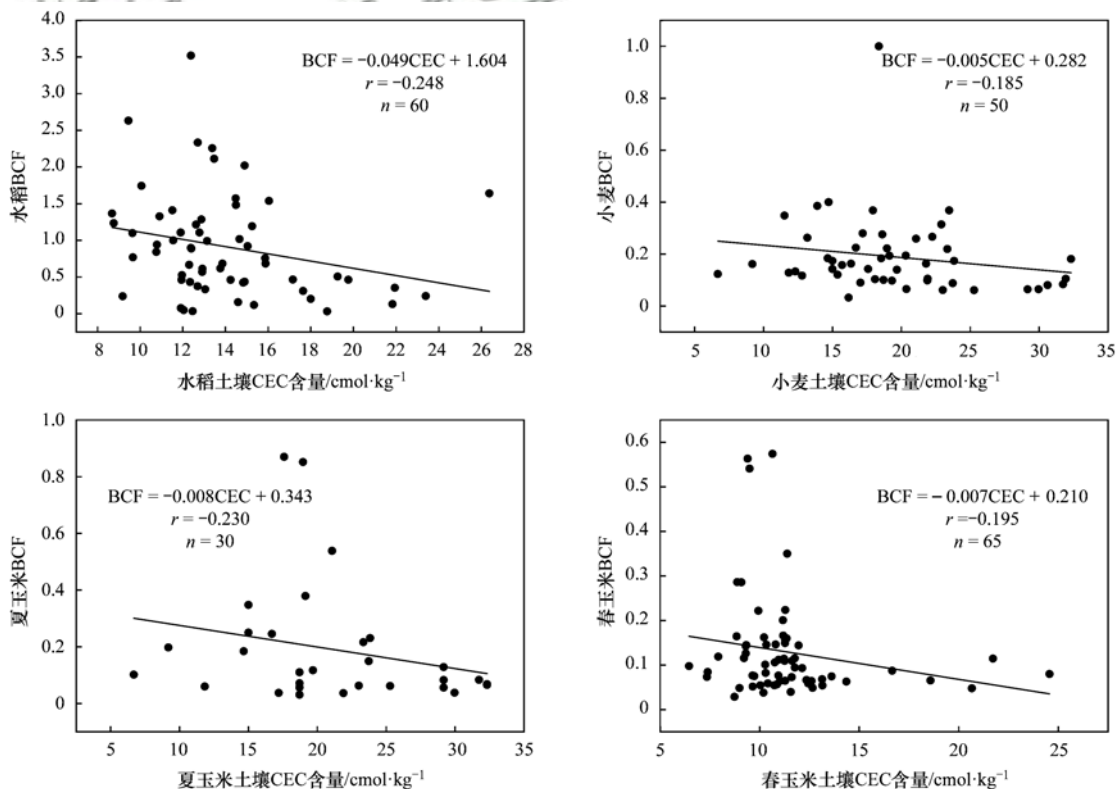


图 4 不同作物 BCF 与土壤 CEC 含量关系

Fig. 4 Relationship between the BCF of different crops and soil CEC content

表3 不同农作物 Cd 富集系数的多元预测方程¹⁾

Table 3 Multivariate prediction equations for Cd bioconcentration coefficients of different crops

农作物种类	方程式编号	拟合模型	相关系数(<i>r</i>)
湖南水稻 (<i>n</i> = 60)	(1)	$\lg\text{BCF} = -0.325 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.279$	0.175
	(2)	$\lg\text{BCF} = -0.228 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.170\text{pH} + 0.728$	0.298
	(3)	$\lg\text{BCF} = 0.019 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.173\text{pH} - 0.675 \lg\text{SOM} + 1.904$	0.334
	(4)	$\lg\text{BCF} = 0.193 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.175\text{pH} - 0.817 \lg\text{SOM} - 1.169 \lg\text{CEC} + 3.517$	0.423 *
河北、河南小麦 (<i>n</i> = 50)	(5)	$\lg\text{BCF} = -0.489 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.881$	0.693 **
	(6)	$\lg\text{BCF} = -0.566 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.170\text{pH} + 0.423$	0.726 **
	(7)	$\lg\text{BCF} = -0.407 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.127\text{pH} - 0.762 \lg\text{SOM} + 1.162$	0.763 **
	(8)	$\lg\text{BCF} = -0.483 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.391\text{pH} - 1.242 \lg\text{SOM} + 0.910 \lg\text{CEC} + 2.697$	0.796 **
河北、河南夏玉米 (<i>n</i> = 30)	(9)	$\lg\text{BCF} = -0.985 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.935$	0.812 **
	(10)	$\lg\text{BCF} = -1.037 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.094\text{pH} - 0.208$	0.816 **
	(11)	$\lg\text{BCF} = -0.897 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.026\text{pH} - 0.470 \lg\text{SOM} - 0.066$	0.821 **
	(12)	$\lg\text{BCF} = -0.852 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} + 0.116\text{pH} - 0.187 \lg\text{SOM} - 0.492 \lg\text{CEC} - 0.925$	0.826 **
辽宁春玉米 (<i>n</i> = 65)	(13)	$\lg\text{BCF} = -0.565 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 1.124$	0.392 **
	(14)	$\lg\text{BCF} = -0.637 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.113\text{pH} - 0.538$	0.442 **
	(15)	$\lg\text{BCF} = -0.757 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.114\text{pH} - 0.769 \lg\text{SOM} + 0.453$	0.520 **
	(16)	$\lg\text{BCF} = -0.774 \lg\text{Cd}_{\text{soil}} - 0.104\text{pH} - 0.573 \lg\text{SOM} - 0.549 \lg\text{CEC} + 0.711$	0.551 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

在水稻模型拟合中,土壤 Cd 含量作为模型的基础变量,只能控制方程 17.5% 的变异程度,引入 pH 后预测能力可提升至 29.8%。在此基础上加入 SOM 的因素,方程拟合度进一步提升,但此前 3 个模型都未达到显著性水平。最后,在土壤 Cd 含量、pH、SOM 和 CEC 共同作用下,水稻 BCF 与这些因素呈现出显著相关($P < 0.05$)并且将预测能力提升至 42.3%。因此方程式(4)是能预测水稻 BCF 值的最优模型。与水稻不同,小麦、夏玉米和春玉米这 3 种农作物在基础变量土壤 Cd 含量的控制下,即能与对应的 BCF 值达到极显著相关水平($P < 0.01$)。随着影响因子个数的增加,模型控制变异的程度也不断增加,当引入全部因素后,小麦、夏玉米和春玉米的预测方程相关系数分别达到了 0.796 ** ($P < 0.01$)、0.826 ** ($P < 0.01$)和 0.551 ** ($P < 0.01$)。综上所述,方程式(8)是用来预测小麦 BCF 的最优模型,方程式(12)对夏玉米的 BCF 值有较好地预测能力,同样春玉米 BCF 值的预测可以根据方程式(16)进行。

水稻、小麦、夏玉米和春玉米这 4 种农作物 BCF 的预测方程模型差异也较大,模型对水稻的预测能力远小于其他 3 种作物,而小麦和夏玉米的预测能力接近。对于水稻来说,土壤 Cd 含量并不是影响其 BCF 值的主要因素,在单个因素作用下,二者之间的关系不显著且相关度很低。随着其他因素引入,虽然提高了方程的预测能力,但这 4 个因素对水稻 BCF 值影响并不强烈。和君强等^[40]也研究了水稻 BCF 与土壤性质之间的关系,结果表明土壤 pH、全 Cd 含量、SOM 均与 BCF 呈极显著相关关系且 pH 的影响

作用大于全 Cd 含量和 SOM。由本研究可知,小麦和夏玉米的主要控制因素都为土壤 Cd 含量和 SOM 值,且在小麦的预测模型中,SOM 控制程度高于土壤 Cd 含量,夏玉米正好相反。代允超^[41]通过引入 pH、CEC、OC、CaCO₃、黏土和氧化铁等变量构建了预测小麦 BCF 值的方程,该方程与本研究模型的相关系数较为接近。Yang 等^[42]则建立了玉米 BCF 与土壤 pH 之间的关系,由于以盆栽形式进行,其最优模型的相关系数达到 0.9 以上。而在本研究中春玉米模型的预测能力则更多由土壤 Cd 含量决定,pH、SOM 和 CEC 的加入后的共同作用使模型效果进一步优化。

3 结论

(1) 镉污染农田田间采集的 60 对水稻、50 对小麦、30 对夏玉米和 65 对春玉米样品的富集系数 (BCF) 均值分别为 0.915、0.155、0.113 和 0.102,水稻的 BCF 最高,其次是小麦,春玉米最低。

(2) 田间条件下,小麦、夏玉米和春玉米 BCF 值与对应的土壤 Cd 含量呈极显著负相关关系,相关系数分别为 -0.494 **、-0.578 ** 和 -0.346 **;小麦和夏玉米 BCF 值与土壤 SOM 含量呈极显著负相关关系,相关系数分别为 -0.514 ** 和 -0.426 **,水稻 BCF 值与对应的土壤 Cd 含量、土壤 pH、SOM 和 CEC 关系均不显著。

(3) 土壤 Cd 含量、SOM、pH 和 CEC 均对 4 种作物 BCF 值有影响。采用对数多元线性回归方程模型,以土壤 Cd 含量、pH、SOM 和 CEC 为变量进行拟合可以较好地预测水稻、小麦、夏玉米和春玉米的

BCF 值.

参考文献:

- [1] Huang Y, Wang L Y, Wang W J, *et al.* Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **652**: 3034-3042.
- [2] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X M, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [3] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. *中国科学院院刊*, 2014, **29**(3): 315-320, 350. Zhou J J, Zhou J, Feng R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2014, **29**(3): 315-320, 350.
- [4] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(9): 1689-1692. Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [5] Hettiarachchi G M, Pierzynski G M. Soil lead bioavailability and in situ remediation of lead-contaminated soils: a review [J]. *Environmental Progress*, 2004, **23**(1): 78-93.
- [6] Vromman D, Martínez J P, Kumar M, *et al.* Comparative effects of arsenite (As(III)) and arsenate (As(V)) on whole plants and cell lines of the arsenic-resistant halophyte plant species *Atriplex atacamensis* [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(34): 34473-34486.
- [7] 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.
- [8] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, southern China[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 346-351.
- [9] Williams P N, Lei M, Sun G X, *et al.* Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted Paddy Rice: Hunan, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(3): 637-642.
- [10] Zhang W L, Du Y, Zhai M M, *et al.* Cadmium exposure and its health effects: a 19-year follow-up study of a polluted area in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 224-228.
- [11] Wang P, Chen H P, Kopittke P M, *et al.* Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 1038-1048.
- [12] Zhu H H, Chen C, Xu C, *et al.* Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 99-106.
- [13] Chen H P, Yang X P, Wang P, *et al.* Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: a case study in Xiangtan, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 271-277.
- [14] Du Y, Hu X F, Wu X H, *et al.* Effects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan province, Central South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(12): 9843-9856.
- [15] 邵金秋, 刘楚琛, 阎秀兰, 等. 河北省典型污灌区农田镉污染特征及环境风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 917-927.
- [16] Shao J Q, Liu C C, Yan X L, *et al.* Cadmium distribution characteristics and environmental risk assessment in typical sewage irrigation area of Hebei Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 917-927.
- [17] 王爽, 李荣华, 张增强, 等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(9): 2313-2320. Wang S, Li R H, Zhang Z Q, *et al.* Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(9): 2313-2320.
- [18] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2018, **37**(1): 43-52. Li J, Zhu L X, Kang Z Q. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, **37**(1): 43-52.
- [19] Wang Z H, Liu X Y, Qin H Y. Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, **200**: 159-166.
- [20] 王姗姗, 王颜红, 王世成, 等. 辽北地区农田土壤-作物系统中 Cd、Pb 的分布及富集特征[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(5): 1175-1179. Wang S S, Wang Y H, Wang S C, *et al.* Distribution and accumulation of heavy metals in agricultural soil-crop systems of Tieling area, Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, **41**(5): 1175-1179.
- [21] 熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(1): 36-44. Xiong Z, Li J M, Zhao H W, *et al.* Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(1): 36-44.
- [22] 邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(6): 1265-1271. Deng T, Wu J L, Lu W S, *et al.* Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(6): 1265-1271.
- [23] 彭华, 田发祥, 魏维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(6): 1027-1033. Peng H, Tian F X, Wei W, *et al.* Effects of silicon fertilizer application on the cadmium and silicon content of rice at different growth stages [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(6): 1027-1033.
- [24] Römkens P F A M, Guo H Y, Chu C L, *et al.* Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2435-2444.
- [25] Li K, Cao C L, Ma Y B, *et al.* Identification of cadmium bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.) by the soil-plant transfer model and species sensitivity distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **692**: 1022-1028.
- [26] 陈岭啸, 宋垠先, 袁旭音, 等. 长江三角洲典型地区土壤-水

- 稻系统中 Cd 的分布及其迁移制约因素[J]. 地球科学与环境学报, 2011, **33**(3): 288-295.
- Chen L X, Song Y X, Yuan X Y, *et al.* Distribution of Cd and impact factors on the migration in soil-rice system in typical area of Yangtze river delta region[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, **33**(3): 288-295.
- [26] 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.
- [27] Sterckeman T, Perriguet J, Caël M, *et al.* Applying a mechanistic model to cadmium uptake by *Zea mays* and *Thlaspi caerulescens*: consequences for the assessment of the soil quantity and capacity factors[J]. Plant and Soil, 2004, **262**(1-2): 289-302.
- [28] 李志涛, 王夏晖, 赵玉杰, 等. 南方典型区域水稻镉富集系数差异影响因素探析[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(10): 1-7.
- Li Z T, Wang X H, Zhao Y J, *et al.* Analysis of the difference and causes in rice cadmium uptake factor in typical south region [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(10): 1-7.
- [29] 张法英, 周鸿凯, 吕建慧, 等. 湛江水稻生产环境及其稻米中 Cd 的安全性评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(3): 510-515.
- Zhang F Y, Zhou H K, Lv J H, *et al.* Safety evaluation of cadmium in rice production area: a case study in Zhanjiang city of Guangdong province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(3): 510-515.
- [30] Ye X X, Li H Y, Ma Y B, *et al.* The bioaccumulation of Cd in rice grains in paddy soils as affected and predicted by soil properties[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(8): 1407-1416.
- [31] 林繁, 赵玉杰, 邓仕槐, 等. 透析膜和凝胶膜生物有效态镉提取性能比较[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(8): 1546-1552.
- Lin F, Zhao Y J, Deng S H, *et al.* Comparative study of dialysis membranes and hydrogels for extracting bioavailable cadmium [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(8): 1546-1552.
- [32] 孙宗全, 李合莲, 于修乐, 等. 不同作物对土壤中铬的富集能力的差异[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, **33**(3): 255-260, 265.
- Sun Z Q, Li H L, Yu X L, *et al.* Bioconcentration ability of chromium in soil by different crops[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2019, **33**(3): 255-260, 265.
- [33] 杨华. 玉米籽粒富集土壤中典型重金属预测模型的建立及种间外推[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014. 10-19.
- Yang H. The development of prediction models for typical heavy metals transfer from soil to corn grain and cross-species extrapolation [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2014. 10-19.
- [34] 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- [35] 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.
- [36] 李婧, 李素艳, 孙向阳, 等. 北京市朝阳区(五环内)绿地土壤重金属分布特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(3): 311-317.
- Li J, Li S Y, Sun X Y, *et al.* Characteristics of distribution of soil heavy metals in Wuhuan, Chaoyang district, Beijing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(3): 311-317.
- [37] 曹会聪, 王金达, 张学林. 东北地区污染黑土中重金属与有机质的关联作用[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 36-41.
- Cao H C, Wang J D, Zhang X L. Study on the association between heavy metals and organic matter in polluted black soil in Northeast China [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, **20**(1): 36-41.
- [38] 高文文, 刘景双, 王洋. 有机质对冻融黑土重金属 Zn 赋存形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(1): 147-151.
- Gao W W, Liu J S, Wang Y. Effect of organic matter on fractional transformation of Zn in black soils under freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, **18**(1): 147-151.
- [39] 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.
- [40] 和君强, 贺前鋒, 刘代欢, 等. 土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型——以长沙某地水稻土为例[J]. 土壤学报, 2017, **54**(5): 1181-1194.
- He J Q, He Q F, Liu D H, *et al.* Major factors affecting threshold of soil Cd for food health safety and relevant prediction models: a case study of paddy soil in Changsha [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(5): 1181-1194.
- [41] 代允超. 土壤中镉、砷生物有效性影响因素及评价方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. 34-38.
- Dai Y C. The research of affecting factors and evaluation methods of cadmium and Arsenic bioavailability in soils[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. 34-38.
- [42] Yang H, Li Z J, Lu L, *et al.* Cross-species extrapolation of prediction models for cadmium transfer from soil to corn grain [J]. PLoS One, 2013, **8**(12), doi: 10.1371/journal.pone.0080855.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)