

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响

张瑶^{1,2}, 王天齐^{1,2}, 牛硕¹, 杨阳^{1*}, 陈卫平^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 锌(Zn)肥应用在降低小麦镉(Cd)富集方面具有一定潜力, 但其作用机制不甚明确. 以北方碱性土壤为研究对象, 通过盆栽试验, 在土壤-小麦幼苗体系中, 探究施加不同含量锌肥后, Zn-Cd交互关系的变化, 及其对小麦幼苗累积Cd的影响. 结果表明, 施Zn不能显著降低各处理组小麦幼苗地上部Cd含量, 但在高Zn用量下, 地下部Cd含量较对照显著下降41.5%, 中用量组中施Zn量为 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可同时显著降低地上部(55.2%)及地下部Cd含量(53.5%). 当土壤镉锌比(Zn/Cd)为28.9, 施Zn后土壤Zn/Cd发生改变(变化范围在50.2~222.5), Zn-Cd交互作用对小麦富集转运Cd效应随之发生变化, 当土壤Zn/Cd<150时, Zn-Cd表现为拮抗作用, 此时地上部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $0.949\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且随Zn/Cd增加拮抗作用逐渐增强; 当土壤Zn/Cd>150, 此时地上部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $0.839\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn-Cd表现为协同作用, 若继续增加施Zn量会促进地上部累积更多Cd. 根据Zn-Cd交互特性, 科学合理利用Zn肥可有效降低小麦Cd污染风险.

关键词: 交互作用; 碱性土壤; 镉(Cd); 锌(Zn); 小麦幼苗

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2479-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305233

Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems

ZHANG Yao^{1,2}, WANG Tian-qi^{1,2}, NIU Shuo¹, YANG Yang^{1*}, CHEN Wei-ping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Zinc (Zn) fertilizer has the potential to reduce cadmium (Cd) accumulation in wheat, but its mechanism of action is not clear. In this study, using alkaline soil in northern China as the research object, a pot experiment was conducted to investigate the changes in the Zn-Cd interaction and its effect on Cd accumulation in wheat seedlings after applying different concentrations of Zn fertilizer in the soil-wheat seedling system. The results showed that Zn application did not significantly reduce the aboveground Cd content of wheat seedlings in each treatment group; however, under a high Zn dosage, the underground Cd content decreased significantly by 41.5% compared with that in the control group. In the group with a medium dosage of $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn application could significantly reduce both the aboveground (55.2%) and underground Cd content (53.5%). When the soil Zn / Cd ratio reached 28.9, the soil Zn / Cd ratio altered after Zn application (ranging from 50.2 to 222.5), and the Zn-Cd interaction effect on the Cd enrichment and transportation in wheat altered correspondingly. When the soil Zn / Cd ratio was less than 150, the Zn-Cd interaction showed an antagonistic effect, and the average aboveground Cd content was $0.949\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which gradually increased with the increase in Zn / Cd ratio. When the soil Zn / Cd ratio was greater than 150, the Zn-Cd interaction showed a synergistic effect, and the average aboveground Cd content was $0.839\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. If the Zn application continued to increase, it would promote the accumulation of more Cd in the aboveground part. Based on the Zn-Cd interaction characteristics, the scientific and reasonable use of Zn fertilizer can effectively reduce the risk of Cd contamination in wheat.

Key words: interactions; alkaline soil; cadmium(Cd); zinc(Zn); wheat seedlings

近年来我国工业高速发展, 耕地及农产品受重金属镉(Cd)污染问题日渐突出^[1]. 根据2014年国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》, 我国农田重金属以Cd污染最为严重, Cd污染土壤点位超标率达7.0%^[2]. Cd具有较强毒性, 长期食用Cd污染小麦产品会严重威胁人体健康, 近年来我国华北地区发生多起小麦籽粒Cd超标事件^[3]. Cd在人体肾脏中半衰期为 $10\sim 30\text{ a}$ ^[4], 即使在低剂量Cd长期暴露的情况下, 同样也对人体健康造成伤害^[5]. 据统计小麦贡献北方人群总膳食Cd摄入的29.8%^[6], 因此对北方小麦Cd污染的有效防治对于保障区域粮食安全和人体健康具有重要意义.

锌(Zn)与Cd处于同一副族, 具有相似的物理化学性质, 与Cd存在竞争关系^[7-9]. 很多人在生产实践中利用这两种元素的竞争关系来降低小麦籽粒中Cd

含量^[10]. 部分温室试验指出施加Zn肥可有效降低小麦Cd富集^[11-13], 但其在大田应用存在不确定性^[14]. Zhou等^[15]研究发现施加不同含量Zn后小麦籽粒Cd含量出现降低和不变两种情况. Sarwar等^[16]通过盆栽试验发现在中碱性土壤施Zn不能降低小麦籽粒中Cd含量. Nan等^[17]和牛硕等^[18]研究发现小麦中Cd含量会随着Zn施用量的增加而增加. 牛硕等^[18]研究还指出在大田中施加Zn肥能显著降低土壤Cd/Zn, 且施Zn对小麦籽粒Cd含量的效应随土壤Cd/Zn降低从拮抗作用变为协同作用. 当前通过施加Zn来治理

收稿日期: 2023-05-26; 修订日期: 2023-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277385); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28020103)

作者简介: 张瑶(1999~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: yaozhang2021_st@cees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yyang@cees.ac.cn

北方碱性土壤小麦 Cd 污染的措施尚不够科学完善。

基于此, 本研究针对北方碱性农田土壤, 通过盆栽试验研究不同 Zn 水平下小麦幼苗 Zn 和 Cd 含量差异, 以及 Zn 在土壤-小麦幼苗体系中土壤 Zn / Cd 对小麦幼苗吸收和转运 Cd 能力的影响, 以期为我国北方地区碱性土壤治理小麦 Cd 污染提供合理科学参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自河南省济源市 (112° 01' ~ 112° 45'E, 34° 53' ~ 35° 16'N) 某村农田表层 (0 ~ 20 cm) 土壤。采集的土壤经过自然风干后, 剔除杂物并混合均匀, 再研磨过筛保存。土壤类型为潮土。供试土壤理化性质见表 1。

供试土壤 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $1.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 严重超过农田 Cd 污染风险筛选值 [$0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 15618-2018)]。

1.2 盆栽试验

盆栽试验在济源市某温室内进行。每个处理施加不同含量的硫酸锌 ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 施加 Zn^{2+} 梯度设置为: 0、25、50、75、100、125、150、175、200 和 $225 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (分别对应施加 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0、 31.3×10^3 、 62.7×10^3 、 95.5×10^3 、 12.7×10^4 、 15.8×10^4 、 19.1×10^4 、 22.2×10^4 、 25.4×10^4 和 $28.5 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$), 共 10 个梯度, 分别标记为 Z_0 、 Z_{25} 、 Z_{50} 、 Z_{75} 、 Z_{100} 、 Z_{125} 、 Z_{150} 、 Z_{175} 、 Z_{200} 和 Z_{225} , 每个梯度设置 3 次重复, 其中 Z_0 为对照 (CK), Z_{25} 、 Z_{50} 和 Z_{75} 为低用量组 (L 组), Z_{100} 、 Z_{125} 和 Z_{150} 为中用量组 (M 组), Z_{175} 、 Z_{200} 和 Z_{225} 为高用量组 (H 组)。将供试土壤和对应含量的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 按比例混合均匀后装入塑料盆 (直径 16 cm, 高 17 cm) 中, 每盆装入 2 kg 混合后土壤, 稳定后每盆中施加 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ N}$ 、 $0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ 并翻土混匀。

供试小麦品种为“济麦 22”, 为当地种植优势品种。播种前, 小麦种子经消毒、清洗, 再用蒸馏水和去离子水各清洗 5 遍, 然后在实验室将种子催芽。待小麦发芽后, 在不同的处理组盆中分别播种小麦种子 24 粒。小麦生长过程中, 各处理随机排列。培养 15 d 后按不同处理分别收集盆栽土壤样品和小麦幼苗样品。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 样品收集

记录每盆盆栽出苗率和每株小麦幼苗株高, 并计算各处理的平均出苗率和平均株高。采集的小麦幼苗样品用去离子水冲洗干净并吸干水分, 将鲜样在 105°C 烘箱杀青 30 min 后, 再调至 65°C 烘至恒重, 将小麦幼苗分为地上部和地下部, 分别称量干重。植物样品粉碎过 100 目筛保存待测。土壤样品经自然风干后, 分别过 2 mm 及 0.149 mm 筛保存待测。

1.3.2 化学分析

采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消解植物样品^[19], $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 四酸法消解土壤样品测量土壤重金属含量^[20], 土壤有效态 Cd 采用二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 进行提取。应用 ICP-MS (NexION 300, Perkin Elmer, 美国) 及 ICP-OES (Prodigy7, Leeman, 美国) 分别测定样品 Cd 及 Zn 含量, 测定过程采用标准物质 (GSB-24 和 GSS-18) 进行质量控制, 测得回收率在 92.4% ~ 108.6%。

土壤 pH 采用电极法测定, 土水比为 1:2.5; 土壤阳离子交换量 (CEC) 采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定; 土壤总有机碳 (TOC) 利用 (银杯法元素分析仪) 测定。

1.4 数据分析

小麦幼苗 Cd 富集系数 (bioconcentration factor, BCF) 反映小麦幼苗从土壤富集 Cd 的能力, 可在一定程度上消除环境本底值造成的影响^[21], 计算公式如下:

$$\text{BCF} = \frac{C_{\text{underground}}}{C_{\text{soil}}} \quad (1)$$

式中, $C_{\text{underground}}$ 和 C_{soil} 分别表示小麦幼苗地下部 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 DW 计) 和土壤 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

小麦幼苗 Cd 转运系数 (translocation factor, TF) 用于表征小麦幼苗自身转运 Cd 的能力以及 Cd 分布规律^[22, 23], 计算公式如下:

$$\text{TF} = \frac{C_{\text{aboveground}}}{C_{\text{underground}}} \quad (2)$$

式中, $C_{\text{aboveground}}$ 和 $C_{\text{underground}}$ 分别表示小麦幼苗地上部和小麦幼苗地下部中 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 DW 计)。

应用单因素分析 (ANOVA) 进行显著性检验并采用 Duncan 法 ($P < 0.05$) 进行检验。使用 Origin 2022、SPSS Statistics 26 进行数据统计、分析与制图。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

项目	pH	CEC / $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	电导率 / $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$	$\omega(\text{TOC})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{碱解氮})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{速效钾})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{有效磷})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{Cd})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{Zn})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
数值	7.87±0.01	19.77±0.09	253.67±36.02	11.36±0.95	66.61±6.34	154.76±39.83	9.69±3.38	1.55±0.07	44.79±6.27

2 结果与讨论

2.1 土壤

施加不同含量 Zn 肥后土壤理化性质如表 2 所示. 不同含量 Zn 肥可以显著改变土壤 pH, 与 CK 相比, M 组和 H 组的 pH 分别显著下降 0.669% 和 1.07%; 但施加 Zn 肥并不能显著提高各处理 CEC; 相反施 Zn 后, 各处理 TOC 与 CK 相比均有所下降, 且 Zn 可以显著降低 L 组和 M 组的 TOC.

施加不同含量 Zn 肥后土壤 Cd 和 Zn 含量如图 1 所示. 与 CK 相比, 施加 Zn 肥后各处理组总 Cd 含量均有所下降, 下降幅度从高到低依次为 L 组、H 组和 M 组, 变化幅度在 2.82% ~ 3.04%; 而各处理组有效态 Cd 含量间变化幅度较小, 其中 L 组和 M 组分别下降 2.47% 和 0.878%, H 组则上升 2.77%, 这是因为高 Zn 水平下, Zn²⁺ 会置换被土壤胶体吸附的 Cd²⁺, 导致土壤中游离 Cd²⁺ 增加^[24]; 此外本研究施加 Zn 肥

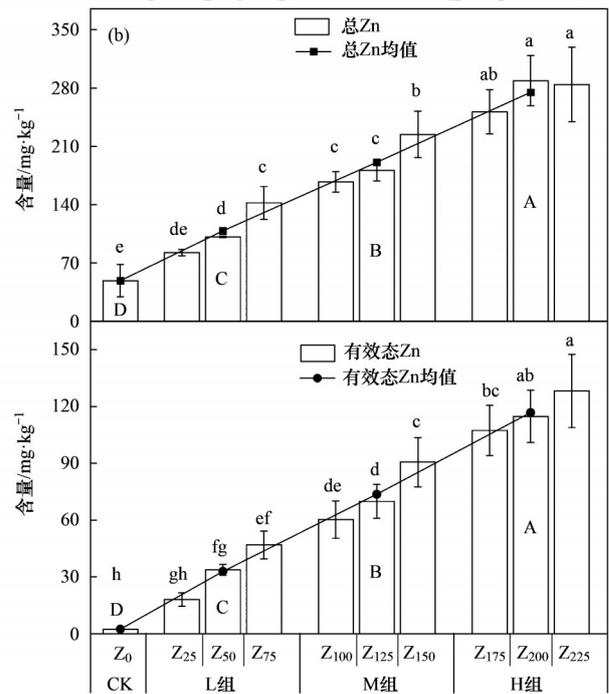
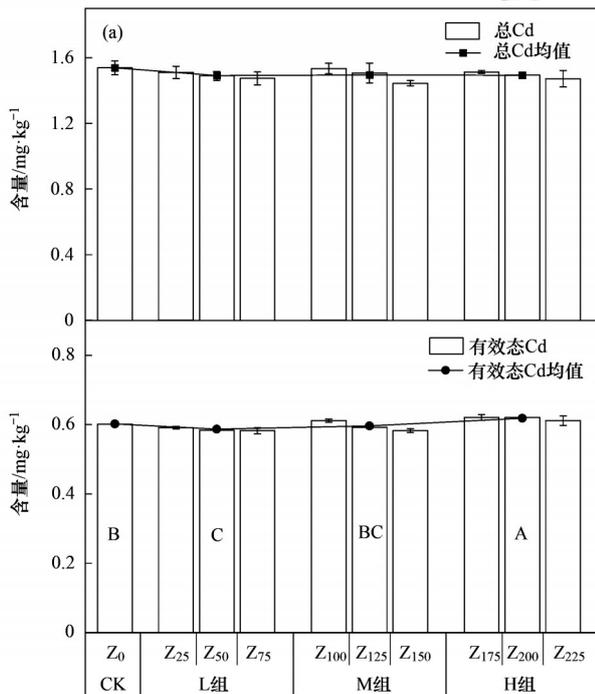
表 2 不同施 Zn 处理组下土壤理化性质¹⁾

Table 2 Soil physicochemical properties under different Zn application treatment groups

组别	pH	CEC/cmol·kg ⁻¹	ω(TOC)/g·kg ⁻¹
CK(Z ₀)	7.47±0.05A	19.61±0.06A	11.14±0.76A
L(Z ₂₅ 、Z ₅₀ 和Z ₇₅)	7.48±0.02A	19.64±0.19A	10.32±0.29B
M(Z ₁₀₀ 、Z ₁₂₅ 和Z ₁₅₀)	7.42±0.02B	19.77±0.12A	10.53±0.38B
H(Z ₁₇₅ 、Z ₂₀₀ 和Z ₂₂₅)	7.39±0.01B	19.76±0.10A	10.81±0.50AB
总平均值	7.43±0.04	19.71±0.15	10.61±0.49

1) 不同大写字母表示不同处理组之间具有显著差异(P<0.05)

含 SO₄²⁻ 能与土壤中 Cd²⁺ 形成 CdSO₄ 络合物, 也会使土壤有效态 Cd 含量增加^[25]. 各处理组土壤 Zn 含量随施加 Zn 肥的含量增加而逐渐增加, 且变化幅度较土壤 Cd 含量变动大, 施加 Zn 可以显著提高各处理组总 Zn 和有效态 Zn 含量, 其中 H 组中施 Zn 量为 225 mg·kg⁻¹ 时, 可同时最大程度达到显著提高土壤总 Zn 和有效态 Zn 含量的效果.



不同大写字母表示不同处理组之间具有显著差异, 不同小写字母表示不同处理之间具有显著差异(P<0.05)

图 1 施加不同含量 Zn 处理后土壤 Cd 和 Zn 的总量和有效态含量

Fig. 1 Total and effective state contents of soil Cd and Zn after treatment with different concentrations of Zn applications

2.2 小麦幼苗

不同施 Zn 处理组小麦幼苗生长特性如表 3 所示. 小麦幼苗地上部和地下部干重均随施 Zn 量的增加而增加, L 组和 M 组与对照相比对小麦生物量累积有抑制作用, H 组则促进地上部、地下部干重增加; 施加 Zn 后, L 组株高较对照下降 1.76%, 而 M 组和 H 组分别增长 2.94% 和 9.41%; 与 CK 相比, 各处理组出芽率均降低, 其中 M 组下降幅度最大为

11.9%. 施加不同含量 Zn 肥对小麦幼苗生长无显著影响.

图 2(a) 表示不同 Zn 处理下小麦幼苗地上部和地下部 Cd 含量变化情况. 施 Zn 不能显著降低地上部 Cd 含量, 各组较 CK 下降幅度在 14.2% ~ 32.1%, M 组地上部 ω(Cd) 最低, 为 0.771 mg·kg⁻¹, 且 M 组中施 Zn 量为 150 mg·kg⁻¹ 时, 相较于 CK 下降幅度最大, 为 55.2%; 不同处理组地下部 Cd 含量在 Zn 的作用下

表 3 不同施 Zn 处理组下小麦幼苗生长特性¹⁾

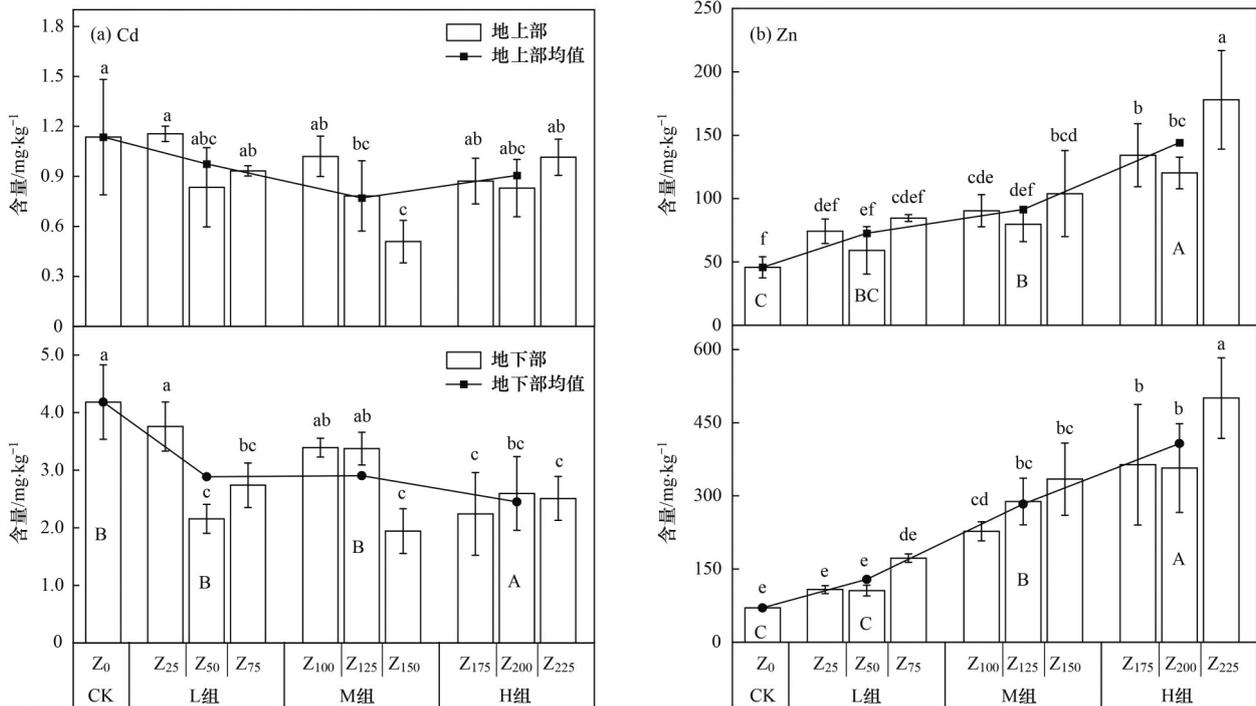
Table 3 Growth characteristics of wheat seedlings under different Zn application treatment groups

组别	干重 / g		株高 / cm	出芽率 / %
	地上部	地下部		
CK(Z ₀)	0.51±0.09A	0.32±0.04A	16.99±4.43A	93.05±8.67A
L(Z ₂₅ 、Z ₅₀ 和 Z ₇₅)	0.49±0.16A	0.27±0.05A	16.73±4.35A	85.18±20.64A
M(Z ₁₀₀ 、Z ₁₂₅ 和 Z ₁₅₀)	0.49±0.15A	0.30±0.07A	17.48±4.63A	81.94±17.80A
H(Z ₁₇₅ 、Z ₂₀₀ 和 Z ₂₂₅)	0.57±0.09A	0.33±0.04A	18.63±4.34A	92.13±6.40A
总平均值	0.52±0.13	0.30±0.06	17.58±5.00	87.08±15.56

1)不同大写字母表示不同处理组之间具有显著差异(P<0.05)

均能显著降低,变化幅度在 30.6%~41.5%,其中地下部 Cd 含量在施 Zn 量为 150 mg·kg⁻¹时,降低 53.5%。小麦吸收 Zn²⁺和 Cd²⁺由根细胞质膜中相同运输系统介导^[26],根际 Cd²⁺与 Zn²⁺形成竞争关系,同时 Zn²⁺能抑制小麦吸收 Cd²⁺相关蛋白的表达,从而抑制小麦根部对土壤 Cd²⁺吸收^[15]。如图 2(b)所示,小麦幼苗地上部和地下部 Zn 含量均随施 Zn 量增加而增加,Zn 肥能显著提高 H 组地上部和地下部 Zn 含量,其中当施 Zn 量为 225 mg·kg⁻¹时,相较于 CK 可最大程度

显著提高地上部和地下部 Zn 含量,此施肥量下,小麦幼苗地上部和地下部 Cd 含量分别下降 10.7%和 40.0%。由图 2(a)可知,小麦幼苗地下部和地上部 Cd 含量具有明显差异,这是因为小麦自身对 Cd 有一定防御机制,当 Cd²⁺被根系细胞及组织吸收后,再被转运到地上部的过程中,会和细胞壁、质膜、液泡和木质部中的蛋白质、多糖等物质形成螯合物滞留在根部^[27,28],此外该过程受 *PME14*、*ZIP*、*HMA3* 和 *PCSI* 等多种基因调控^[29]。



不同大写字母表示不同处理组之间具有显著差异,不同小写字母表示不同处理之间具有显著差异(P<0.05)

图 2 施加不同含量 Zn 处理后小麦地上部和地下部 Cd 和 Zn 含量

Fig. 2 Cd and Zn contents of wheat aboveground and underground after the application of different Zn concentrations

2.3 富集转运特征

图 3(a)表示施加不同含量 Zn 后小麦幼苗地下部对 Cd 的 BCF 变化情况.与对照相比施 Zn 各处理组 BCF 均有不同程度显著降低, Zn 可以抑制 Cd 在土壤-小麦幼苗体系的转移效率,其中 L 组和 M 组下降幅度均为 28.8%, H 组下降幅度最大,为 39.6%,施 Zn (除施用量为 25、100 和 125 mg·kg⁻¹)能显著降低

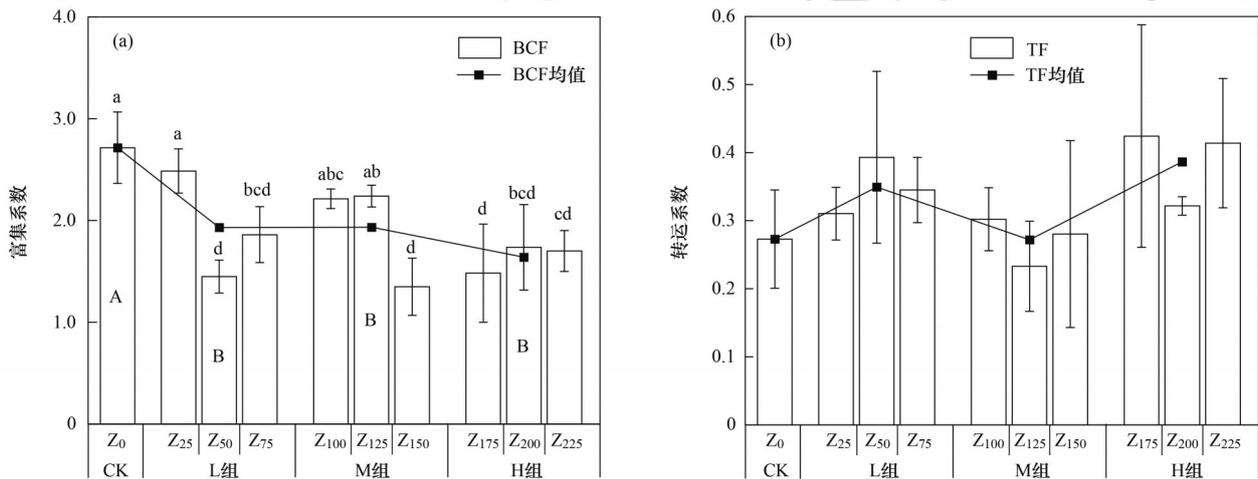
BCF,其中 M 组中施 Zn 量为 150mg·kg⁻¹时下降幅度最大,为 50.3%.图 3(b)表示施加不同含量 Zn 后小麦幼苗地下部 Cd 向地上部运输的 TF 变化情况,由图可知随着 Zn 施用量逐渐增加 TF 呈现先增大后降低再增大的变化趋势, M 组 TF 最低,为 0.272,与 CK 相比下降幅度为 0.376%,相反 H 组和 L 组分别增长 41.7%和 28.1%.当施 Zn 量低于或高于 M 组对应的

施 Zn 量时, Zn 从降低地下部小麦 Cd 向地上部的转移变成促进, 其中只有 M 组中施 Zn 量为 $125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, TF 下降幅度最大为 14.6%.

有研究指出, 在根部同时存在两个机制来介导小麦幼苗对 Cd^{2+} 的吸收, Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 在土壤和根部表面形成拮抗竞争关系, 直接抑制小麦幼苗对 Cd^{2+} 的吸收; 其次是 Zn^{2+} 下调根部 *TaNramp5* (内流转运基因) 和 *TaLCT1* 转运蛋白基因 (低亲和力阳离子通道) 的表达, 这有助于减少根部对 Cd^{2+} 的吸收^[24,30]; 与此同时小麦幼苗体内产生 Zn^{2+} 相关的转运载体促进 Zn^{2+} 在小麦体内由下至上的运输, 由于 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 共用转运体, 一定程度加剧 Cd^{2+} 从小麦幼苗地下部被运输到地上部^[31]. 低 Zn 用量下小麦幼苗富集能力下降但转运能力提升, 这可能与土壤-根部介导吸收机制和小麦体内运输机制有关; 当继续增加 Zn 用量 (达到本研究 M 组用量水平), Zn 继续抑制土壤 Cd 向地下部富集, 同时地下部 Cd 被抑制向地上部转移, 此时小麦幼苗的 TF 和地上部 Cd 均为最低; 随

着 Zn 不断施加, BCF 继续降低, TF 则由降低变为上升, 这是因为高 Zn 水平下, Zn-Cd 间在土壤-根部界面竞争增强, BCF 进一步下降, 但此时小麦根部吸收的 Zn^{2+} 形成 Zn-磷酸盐络合物存在于根部的液泡中, 导致小麦根部细胞中游离态 Cd^{2+} 含量增加, 促进 Cd^{2+} 向地上部转运^[16], TF 随之增加, 最终导致 H 组地上部 Cd 较 M 组增加 17.5%.

夏亦涛^[32]的研究指出小麦籽粒 Cd 含量与小麦幼苗转运 Cd 的 TF 呈显著正相关, 且苗期小麦 TF 一定程度能反映小麦成熟期籽粒 Cd 累积特征. 苗期小麦对环境因子最为敏感^[33], 苗期试验来进行小麦籽粒 Cd 低积累品种筛选以及最佳生理阻控剂选择, 具有时效短、条件可控和经济等优点^[12]. 碱性土壤会导致 Zn-Cd 竞争作用减弱, 若不断提升施 Zn 量, 由于过量 SO_4^{2-} 导致根际 Cd 有效性增加^[34], 导致小麦加强对 Cd 的吸收和富集. 治理碱性土壤小麦种植区 Cd 污染, 苗期控制小麦对 Cd 富集极为关键.



不同大写字母表示不同处理组之间具有显著差异, 不同小写字母表示不同处理之间具有显著差异 ($P < 0.05$)

图3 施加不同含量 Zn 处理后小麦地上部对 Cd 的 BCF 和 TF

Fig. 3 BCF and TF of Cd in wheat aboveground after the application of different concentrations of Zn treatments

2.4 Zn-Cd 交互关系

土壤 Zn / Cd 与小麦幼苗地上部、地下部 Cd 含量变化关系如图 4 所示. 施加 Zn 肥可以显著提高土壤 Zn / Cd 水平, L 组较对照土壤 Zn / Cd 显著提高 129%, 对应地上部 Cd 含量降低 14.2%, 当施 Zn 量达到 M 组乃至 H 组水平, 施 Zn 却不能显著降低地上部 Cd 含量.

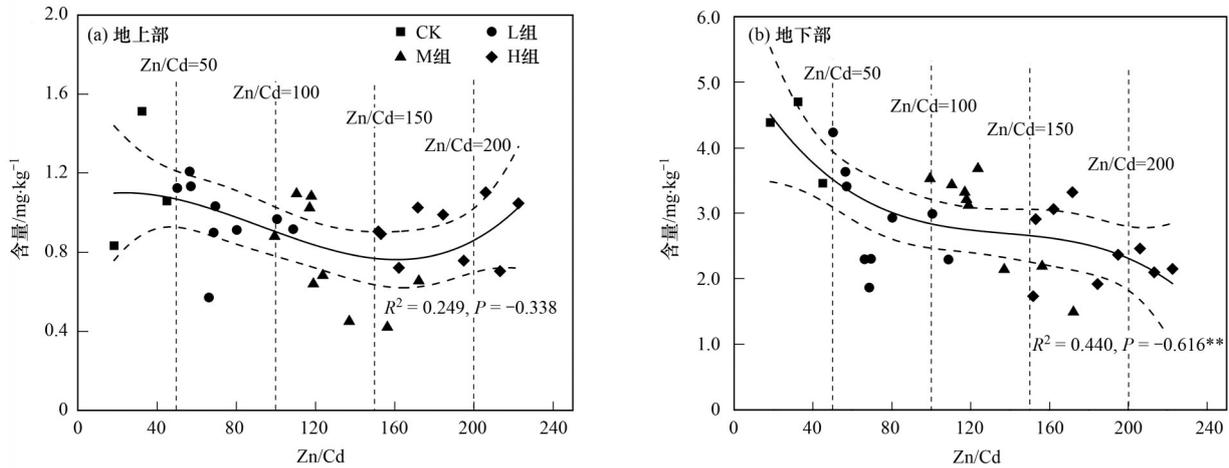
图 4(a) 所示, 当施 Zn 逐渐提高土壤 Zn / Cd 水平, 地上部 Cd 含量从下降趋势逐渐转变为上升趋势. 当不添加 Zn 时, 土壤 Zn / Cd 均小于 50, 地上部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $1.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 当土壤 Zn / Cd 为 50 ~ 100 时, 地上部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $0.971 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 Zn / Cd 与小麦 Cd 含量之间呈负相关关系, 这与王天

齐等^[35]研究的结论一致; 当土壤 Zn / Cd 为 100 ~ 150 时, 地上部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值继续降低到 $0.858 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 逐渐增加 Zn 施用量, 土壤 Zn / Cd 达到 150 ~ 200 区间时, 地上部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值继续降低到 $0.858 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn-Cd 拮抗作用增强, 从而降低地上部对 Cd 富集; 当土壤 Zn / Cd 超过 200, 地上部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值则升高至 $0.952 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 逐步提高 Zn 施用量, Zn 降 Cd 效应会逐步变成促进, 从而提升小麦幼苗地上部 Cd 含量, 再继续增加施 Zn 量反而使地上部加强对 Cd 的富集, Zn-Cd 交互关系从拮抗作用转变成协同作用, 这与牛硕等^[18]的研究结论一致.

由图 4(b) 可知, 随着土壤 Zn / Cd 提高, 地下部 Cd 含量持续下降. 当土壤 Zn / Cd < 50 时, 地下部

$\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $4.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 当施 Zn 增加土壤 Zn/Cd 至 50 ~ 100 和 100 ~ 150 区间时, 地下部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值均为 $3.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较 CK 下降 27.8%; 继续提高土壤 Zn/Cd 至 150 ~ 200 区间, 地下部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值降低至 $2.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较上一个区间下降 21.2%; 当土壤 Zn/Cd 超过 200, 地下部 $\omega(\text{Cd})$ 平均值达到 $2.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较上一个区间下降 5.88%。随

着土壤 Zn/Cd 逐渐增加, 地下部 Cd 含量整体呈现下降趋势, Zn-Cd 在根部一直表现为拮抗作用, 但是随着土壤 Zn/Cd 显著增加, 地下部 Cd 含量下降幅度逐渐减缓, 拮抗作用逐渐减弱, Sanaeiostovar 等^[36]的研究指出在较高 Zn 水平下, 小麦幼苗根系中过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化氢酶 (APX) 的活性提升。



**表示 1% 的显著性水平, 下同

图 4 土壤 Zn/Cd 与小麦地上部和地下部 Cd 含量的关系

Fig. 4 Relationship between soil Zn/Cd and aboveground and underground Cd content in wheat

土壤 Zn/Cd 与小麦幼苗对 Cd 富集转运的关系如图 5 所示, 其中图 5(a) 为土壤 Zn/Cd 与小麦幼苗对 Cd 的 BCF, 图 5(b) 为土壤 Zn/Cd 与小麦幼苗对 Cd 的 TF。土壤 Zn/Cd < 50, BCF 和 TF 均值分别为 3.45 和 0.272; 当土壤 Zn/Cd 为 50 ~ 100, BCF 和 TF 均值分别为 2.64 和 0.334; 当土壤 Zn/Cd 增加到 100 ~ 150, BCF 和 TF 均值分别为 2.61 和 0.286。由图 5 可知当土壤 Zn/Cd 处于 50 ~ 150 区间

时, 逐渐增加土壤 Zn/Cd, BCF 和 TF 大体均呈现逐步降低趋势, Zn-Cd 作用在土壤-根部和小麦幼苗体内均表现为拮抗作用; 持续增加 Zn 使土壤 Zn/Cd 超过 150 时, Zn-Cd 作用继续抑制土壤 Cd 向地下部富集, 相反促进地下部 Cd 向地上部转移, 这是因为小麦体内为吸收更多 Zn^{2+} 而产生相应的转运体, 同时促进 Cd^{2+} 在小麦体内向地上部的转运^[31]。

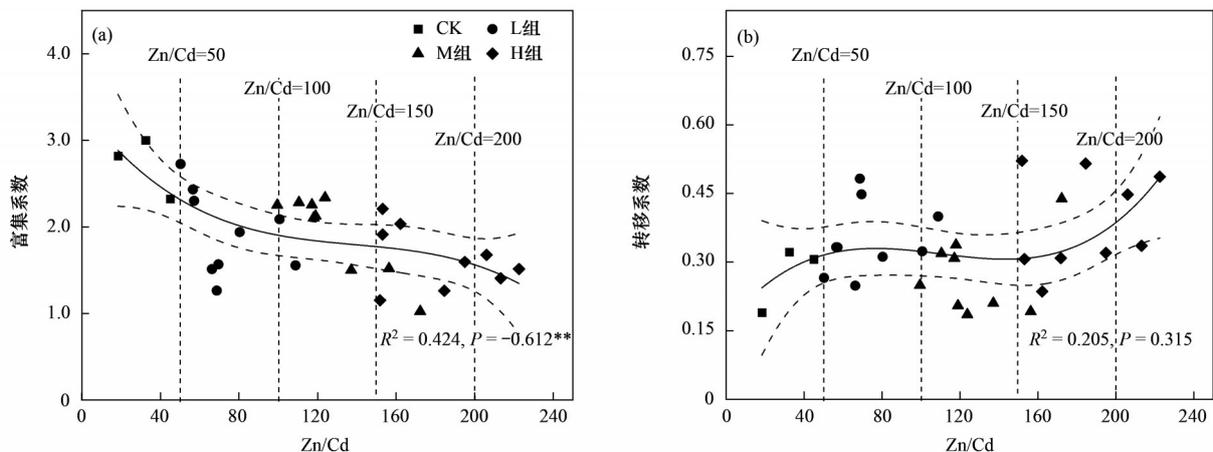


图 5 土壤 Zn/Cd 与小麦对 Cd 的 BCF 及 TF 的关系

Fig. 5 Relationship between soil Zn/Cd and BCF & TF of wheat in response to Cd

Chaney 等^[37]的研究指出当土壤 Zn/Cd 水平处于 100 时, 小麦中可食用部分能维持较低 Cd 水平, 但本研究发现当土壤 Zn/Cd 水平达到 161 时, 小麦幼

苗地上部 Cd 水平最低。除此之外 Yang 等^[38]的研究表明土壤 Zn/Cd 超过 120, 可以显著降低小麦籽粒 Cd 超过国家标准 ($0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以 DW 计, GB 2762-

2005) 的风险, 由此可知土壤 Zn / Cd 与小麦 Cd 含量之间关系存在不确定性. 本研究中小麦种植区土壤 Zn / Cd 水平较低, 约为 28.9, 且李艳玲等^[20]的研究表明研究区部分地区小麦超标率达 100%, 根据当地土壤特性以及施肥习惯, 施加 Zn 肥 $194 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (大约为 $24.6 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \text{ ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 才能达到最大程度降低小麦 Cd 含量的效果. 这是因为当地土壤为碱性, 施加的部分 Zn 被固定导致 Zn-Cd 间拮抗作用降低, 降 Cd 效果不佳; 但施加过多 Zn 肥, Zn-Cd 间协同作用则会促进小麦富集更多 Cd, 达不到降 Cd 目的.

3 结论

通过盆栽试验发现, 施加不同含量 Zn 可以不同程度降低小麦幼苗 Cd 含量, 且 Zn-Cd 交互作用会随土壤 Zn / Cd 变化而改变. 当土壤 Zn / Cd < 150, Zn-Cd 在土壤-根部和小麦幼苗体内均表现为拮抗作用; 当施 Zn 过量使土壤 Zn / Cd > 150, Zn-Cd 在小麦幼苗体内转变为协同作用. 鉴于本研究小麦种植区土壤为碱性, 建议施加 Zn 肥 $194 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可以最大程度降低小麦地上部 Cd 含量. 综上, 结合小麦种植地土壤理化性质, 在小麦苗期通过施加适量的 Zn 肥, 可以有效降低小麦 Cd 富集.

参考文献:

- [1] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, **55**(2): 261-272.
Chen W P, Yang Y, Xie T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(2): 261-272.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 2014.
- [3] Li X F. Technical solutions for the safe utilization of heavy metal-contaminated farmland in China: a critical review [J]. Land Degradation & Development, 2019, **30**(15): 1773-1784.
- [4] Nordberg G F. Historical perspectives on cadmium toxicology [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2009, **238**(3): 192-200.
- [5] 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.
- [6] 汪鹏, 赵方杰. 我国主要粮食作物中镉限量标准问题的若干思考[J]. 科学通报, 2022, **67**(27): 3252-3260.
Wang P, Zhao F J. China national food safety standards of cadmium in staple foods: issues and thinking[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, **67**(27): 3252-3260.
- [7] Qaswar M, Hussain S, Rengel Z. Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zinc-biofortified than standard wheat cultivar [J]. Science of the Total Environment, 2017, **605-606**: 454-460.
- [8] Rizwan M, Ali S, Rehman M Z U, et al. A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(7): 6279-6289.
- [9] Köleli N, Eker S, Cakmak I. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil[J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(3): 453-459.
- [10] Tavarez M, Macri A, Sankaran R P. Cadmium and zinc partitioning and accumulation during grain filling in two near isogenic lines of durum wheat [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, **97**: 461-469.
- [11] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration [J]. New Phytologist, 2005, **167**(2): 391-401.
- [12] 姚晨, 贾睿琪, 腊贵晓, 等. 镉与微量元素在小麦吸收过程中的相互影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, **41**(6): 1175-1183.
Yao C, Jia R Q, La G X, et al. Interaction between cadmium and trace elements in the wheat absorption process[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, **41**(6): 1175-1183.
- [13] 武超, 周顺江, 王华利, 等. 生物炭和锌对土壤镉赋存形态及小麦镉积累的影响[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(1): 202-210.
Wu C, Zhou S J, Wang H L, et al. Effects of biochar and zinc on soil cadmium fractions and wheat accumulation [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(1): 202-210.
- [14] Xing W Q, Cao E Z, Scheckel K G, et al. Influence of phosphate amendment and zinc foliar application on heavy metal accumulation in wheat and on soil extractability impacted by a lead smelter near Jiyuan, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(31): 31396-31406.
- [15] Zhou J, Zhang C, Du B Y, et al. Effects of zinc application on cadmium (Cd) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars [J]. Environmental Pollution, 2020, **265**. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115045.
- [16] Sarwar N, Ishaq W, Farid G, et al. Zinc - cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **122**: 528-536.
- [17] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. Science of the Total Environment, 2002, **285**(1-3): 187-195.
- [18] 牛硕, 王天齐, 杨阳, 等. 田间施用锌肥对小麦籽粒镉累积的影响及施用风险[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 984-990.
Niu S, Wang T Q, Yang Y, et al. Effect of zinc fertilizer application on cadmium accumulation in wheat grain and its application risk [J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 984-990.
- [19] Wang Y L, Xing W Q, Liang X F, et al. Effects of exogenous additives on wheat Cd accumulation, soil Cd availability and physicochemical properties in Cd-contaminated agricultural soils: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, **808**. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152090.
- [20] 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 等. 工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1432-1439.
Li Y L, Lu Y F, Chen W P, et al. Spatial-temporal variation and source change of heavy metals in the cropland soil in the industrial city[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- [21] Samsøe-Petersen L, Larsen E H, Larsen P B, et al. Uptake of trace elements and PAHs by fruit and vegetables from contaminated soils [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(14): 3057-3063.
- [22] Huang L K, Wang Q, Zhou Q Y, et al. Cadmium uptake from soil and transport by leafy vegetables: a meta-analysis [J]. Environmental Pollution, 2020, **264**. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114677.

- [23] Deng S Q, Ke T, Wu Y F, *et al.* Heavy metal exposure alters the uptake behavior of 16 priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by Pak Choi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(22): 13457-13468.
- [24] Salah S A, Barrington S F. Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plants (*Triticum aestivum*) Cd/Zn uptake and yield [J]. Agricultural Water Management, 2006, **82** (1-2): 177-192.
- [25] Shi G L, Lu H Y, Liu H, *et al.* Sulfate application decreases translocation of arsenic and cadmium within wheat (*Triticum aestivum* L.) plant [J]. Science of the Total Environment, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136665.
- [26] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, *et al.* Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings [J]. Physiologia plantarum, 2002, **116**(1): 73-78.
- [27] 郑绍建. 细胞壁在植物抗营养逆境中的作用及其分子生理机制 [J]. 中国科学: 生命科学, 2014, **44**(4): 334-341.
Zheng S J. The role of cell wall in plant resistance to nutritional stresses and the underlying physiological and molecular mechanisms [J]. Scientia Sinica Vitae, 2014, **44**(4): 334-341.
- [28] 晋海军, 王海霞. 植物对重金属镉的吸收与耐受机制研究进展 [J]. 中国农学通报, 2019, **35**(24): 52-57.
Jin H J, Wang H X. Plant absorption and tolerance mechanism to heavy metal cadmium: research progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, **35**(24): 52-57.
- [29] 王学华, 戴力. 作物根系镉滞留作用及其生理生化机制 [J]. 中国农业科学, 2016, **49**(22): 4323-4341.
Wang X H, Dai L. Immobilization effect and its physiology and biochemical mechanism of the cadmium in crop roots [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(22): 4323-4341.
- [30] 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 等. 基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 [J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2751-2757.
Wang T Q, Li Y L, Yang Y, *et al.* Risk prediction of cadmium and lead in wheat grains based on Bayes theorem [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2751-2757.
- [31] Farooq M, Ullah A, Usman M, *et al.* Application of zinc and biochar help to mitigate cadmium stress in bread wheat raised from seeds with high intrinsic zinc [J]. Chemosphere, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127652.
- [32] 夏亦涛. 小麦镉高低积累品种筛选及其镉吸收转运的差异机制 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
Xia Y T. Screening of high and low cadmium accumulation *Triticum aestivum* varieties and research on the difference and mechanism of cadmium absorption and transport [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [33] 孔令璇, 郭天亮, 王琪, 等. 不同品种小麦苗期吸收和转运镉的特性 [J]. 环境科学与技术, 2022, **45**(10): 36-43.
Kong L X, Guo T L, Wang Q, *et al.* Cadmium uptake and translocation characters of different wheat cultivars [J]. Environmental Science & Technology, 2022, **45**(10): 36-43.
- [34] Huang Q Q, Wang Y L, Qin X, *et al.* Soil application of manganese sulfate effectively reduces Cd bioavailability in Cd-contaminated soil and Cd translocation and accumulation in wheat [J]. Science of the Total Environment, 2022, **814**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152765.
- [35] 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 等. 碱性土壤锌镉比对小麦籽粒镉积累的影响 [J]. 环境科学学报, 2021, **41**(12): 5143-5149.
Wang T Q, Li Y L, Yang Y, *et al.* Effects of zinc-to-cadmium ratio on cadmium accumulation in wheat grains from alkaline soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(12): 5143-5149.
- [36] Sanaeiostovar A, Khoshgoftarmanesh A H, Shariatmadari H, *et al.* Combined effect of zinc and cadmium levels on root antioxidative responses in three different zinc-efficient wheat genotypes [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2012, **198** (4): 276-285.
- [37] Chaney R L. How does contamination of rice soils with Cd and Zn cause high incidence of human Cd disease in subsistence rice farmers [J]. Current Pollution Reports, 2015, **1**(1): 13-22.
- [38] Yang Y, Li Y L, Chen W P, *et al.* Dynamic interactions between soil cadmium and zinc affect cadmium phytoavailability to rice and wheat: regional investigation and risk modeling [J]. Environmental Pollution, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115613.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohu River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chang, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)