

# 目次

京津冀及其周边地区PM <sub>2.5</sub> 和臭氧的时空变化及多尺度社会经济驱动因素分析	燕丽, 宋小涵, 雷宇, 田贺忠 (6207)
基于过程分析的京津冀地区气象条件变化对PM <sub>2.5</sub> 浓度改善的影响	张国斌, 曹靖原, 邱雄辉, 彭林 (6219)
北京市PM <sub>2.5</sub> 携带重金属污染特征、来源及健康风险变化与政策效果评估	张炜, 吕童, 刘建伟, 高越, 周旭, 曹红斌 (6229)
苏州市PM <sub>2.5</sub> 和O <sub>3</sub> 污染特征、输送路径及潜在源区分析	杨洁, 郑嘉兴, 徐婷婷, 吴雨涟, 阚诗烨, 沈春其, 邵智娟 (6238)
基于OMI卫星与地面观测数据的广东省臭氧生成敏感性分析	梁艳妮, 王兴会, 亓淑旻, 许建敏, 刘润 (6248)
漯河市夏季大气挥发性有机物变化特征和来源解析	黄竞钢, 薛爽, 牛大伟, 郑之龄, 马志强, 林伟立 (6255)
基于人为源排放与空气质量响应关系的源排放清单动态更新方法	舍静, 蒋莉, 姚桂蓉, 陈强, 李光耀, 朱禹寰, 刘嘉, 孙伟 (6267)
基于Catboost模型的广东省近地面NO <sub>2</sub> 浓度估算	张洪飞, 杜宁, 王莉, 张显云, 龚德才, 李隆 (6276)
南京市冬夏季HONO浓度水平及生成机制	张奕, 曹芳, 范美益, 项妍琨, 李翰宇, 薛永文, 章炎麟 (6286)
北京城区气传花粉含量分季节预测模型	郑祚芳, 王耀庭, 祁文, 高华 (6294)
“双碳”战略下低碳经济与高质量发展协同效应:以京津冀城市群为例	刘志华, 袁庆禄, 李翠, 高磊, 徐军委 (6301)
城市群减排降碳与经济高质量发展的耦合及交互响应关系	陈小龙, 狄乾斌, 梁晨露 (6313)
江苏省电力行业不同低碳发展路径的二氧化碳与大气污染物协同减排效益分析	邢晓雯, 黄琳, 胡建林 (6326)
中国钢铁行业碳排放:达峰情景与中和路径	张攀路, 都沁军, 张凯旋, 田文涛 (6336)
基于3类空间变化的阿克苏河流域碳排放轨迹及生态环境效应	高凡, 曹燕, 韩方红, 何兵 (6344)
甘青地区碳减排潜力分析及绿色发展路径探讨	刘莉娜, 高峰, 曲建升, 赵培庆, 尹常亮, 周华坤, 王宝, 张中华 (6354)
基于碳收支格局及其转换态势的区域碳失衡风险分析	吉佳宇, 谢志祥, 赵荣钦, 肖连刚, 肖千虎, 蔡辰 (6365)
长江经济带农业碳补偿率的时空演进特征及碳补偿潜力预测	唐菁, 易露, 曾庆均 (6378)
基于空间视角的交通运输规模对交通碳排放的影响路径	李云燕, 张雪莹 (6392)
混行环境下的交通碳排放测算与演化规律	马书红, 段超杰, 杨磊, 戴学臻 (6403)
北方县城家庭碳排放影响因素及减排成本分析:以河北丰宁县为例	马晋龙, 曹梦莹, 葛蓓清 (6412)
基于家庭生活方式转型意愿的消费侧碳减排潜力差异性分析	潘艺, 祝锦霞, 杨丽霞, 石薇, 邱乐丰, 吴绍华, 秦玉洁 (6422)
基于遥感生态指数的粤港澳生态环境质量与土地利用变化空间关系	陈智勇, 吴耀炜, 林港特, 龚建周 (6433)
黄河上中游流域植被净初级生产力空间特征及驱动因素分析	李雪, 于坤霞, 徐国策, 李鹏, 李占斌, 时鹏 (6448)
宁夏沿黄城市带植被覆盖度时空变化及驱动力分析	余洁, 余璐, 沈爱红, 石云, 赵娜, 张凤红, 何洪源, 吴涛, 李红霞, 马益婷, 王彤 (6458)
湖北省生态系统服务供需时空演变特征及其多尺度的空间平衡与匹配分析	余昊轩, 汤江龙, 陈荣清 (6477)
黑龙江省生态系统服务价值估算及其生态安全格局构建	崔嵩, 杜显磊, 贾朝阳, 付强, 刘东 (6489)
时序遥感支持下宁波市耕地生态质量扭转过程及驱动力分析	胡茗, 孙超, 赵赛帅, 张书, 沈星如, 史柯 (6501)
1990~2020年塔里木河流域土地利用变化及其对碳储量的影响	田梓祎, 高凡, 何兵, 韩方红 (6514)
独流减河不同植被缓冲带土壤有机碳的空间分布特征及其季节变化	张天昱, 张彦, 贾琪, 周爽, 李天乐, 李从笑, 刘福德 (6527)
城市化对绿地土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响:以江西省南昌市为例	张佛熠, 蔡昌永明, 钟嘉琳, 黄菲, 李心, 李心妍, 刘玮, 王琼 (6538)
不同改性玉米秸秆生物炭对黄土丘陵区土壤水力特性的影响	畅芳玲, 张沛祯, 姚宗路, 罗娟, 赵立欣, 霍丽丽, 刘奋武 (6546)
珠江三角洲北江饮用水源地新污染物的非靶向筛查与生态风险评估	王芝玉, 李秋, 张扬忠, 陈振国, 肖力, 罗焰, 邓耀熔, 梁东海, 汪晓军 (6555)
融贯三步法甄别再生水优先控制污染物	王飞鹏, 彭霜, 桂源, 安麒文, 赵晓宇, 魏东斌, 杜宇国 (6565)
寒旱区高盐湖泊溶解性有机质的光学特征及来源解析	王世欢, 史小红, 赵胜男, 陶玉龙, 孙标, 冯伟莹, 张生 (6574)
三峡库区典型农业小流域土壤中抗生素的时空分布与生态风险	方镜人, 母悦, 唐柏彬, 郭春会, 黄纬斌, 雍晴, 王正, 张进忠 (6583)
养殖场及周边环境介质中抗生素生态风险及微生物多样性特征	韩宇柔, 徐卫红 (6594)
基于稳定氮氧同位素的黄河流域内蒙古段水体转化关系	裴森森, 罗艳云, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 段利民, 苗平, 王国强, 刘廷玺 (6604)
洱海上游表流人工湿地对水体微塑料赋存特征的影响	王化, 梁启斌, 戴柳云, 王艳霞, 李晓琳, 侯磊 (6616)
厦门后溪流域微塑料污染特征及风险评估	刘启明, 林锦美, 黄云凤, 黄宁, 李思, 梁海涛, 林明华 (6625)
土壤-地下水中微塑料的转化行为及环境效应	张颖, 杨硕, 曾瑜苹, 陈艺, 蒲生彦 (6632)
聚苯乙烯微塑料对连续种植小白菜生长及品质的影响	阳祝庆, 杨敏, 黄道友, 黄敏, 朱奇宏 (6645)
基于作物累积砷镉差异的超标农区优先种植作物筛选	任艳欣, 耿志席, 宋宁宁, 张婷, 张楠, 吴翠霞, 刘微, 曾希柏, 苏世鸣 (6654)
水溶性壳聚糖强化三七景天修复Cd/Pb单一或复合污染土壤机制	郭俊梅, 卫月星, 王柳月, 刘晓娜, 钱天伟, 郑国砥, 杨俊兴, 陈同斌, 郭冰欣 (6665)
钙肥配施生物炭-铁锰复合材料对酸化水稻土中镉砷的钝化	孙淇, 吴骥子, 吴秋产, 连斌, 袁峰, 赵科理 (6677)
外源物质对杂交狼尾草和油菜植物修复重金属污染土壤及温室气体排放的影响	何川黔, 高波, 张杏锋, 陈敏妮, 虞乾魁, 胡茂盛, 陈虹旭, 梁焯禧, 易海峰, 张鹏伟 (6689)
土壤-蔬菜系统中抗生素耐药基因污染研究进展与展望	牟美蓉, 杨凤霞, 杨铭, 张克强 (6704)
铁基材料强化市政污泥厌氧消化效能及机制的研究进展	吕龙义, 靳梦婷, 魏子苗, 高文芳, 孙丽 (6713)
黄河兰州段城市饮用水源地土壤重金属污染及其溯源的多指标综合分析	李军, 高占栋, 马利邦, 马静, 张鸣, 马晓红, 臧飞, 李旭 (6723)
河套平原腹地土壤硒的赋存形态特征及生物有效性	李永春, 刘玖芬, 李雪珍, 张栋, 陈国栋, 杜雨春子, 周文辉 (6734)
白膜覆盖下增效氮肥对春玉米土壤质量、微生物代谢和生态功能多样性的影响	杨睿哲, 杨泽, 徐灵颖, 张璟玥, 王菊, 张绪成, 王红丽, 李廷亮, 王朝辉, 李紫燕 (6745)
不同灌丛根际土壤和根内生细菌的群落结构特征	郝建华, 张秀娟, 李君剑 (6756)
微丝菌致膨的种群动态及关键影响因素	苏高新, 齐嵘, 肖淑敏, 窦殿程, 郭宇新, 高嘉 (6766)
中国农业温室气体排放时空异质性的影响机制解析	苏萌, 夏琳琳 (6775)

# 基于作物累积砷镉差异的超标农区优先种植作物筛选

任艳欣<sup>1,2</sup>, 耿志席<sup>3</sup>, 宋宁宁<sup>1</sup>, 张婷<sup>2</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 吴翠霞<sup>2</sup>, 刘微<sup>4</sup>, 曾希柏<sup>2</sup>, 苏世鸣<sup>2\*</sup>

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业农村部农业生态环境重点实验室, 北京 100081; 3. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 4. 河北大学化学与材料科学学院, 保定 071002)

**摘要:** 开展重金属低累积作物筛选及替代种植可有效降低农产品重金属累积风险,然而,当前研究更多关注于单一重金属低累积作物的筛选,目标作物方面也更多地关注单一类型作物及其品种,对于不同作物类型的砷(As)和镉(Cd)累积差异及低累积作物种植优先推荐清单的研究还未见报道.利用文献数据Meta分析与野外调查相结合的方法开展了相关工作,结果表明,水稻籽粒 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 范围分别为0.11~0.624 mg·kg<sup>-1</sup>和0.01~1.935 mg·kg<sup>-1</sup>,相同污染程度下,水稻相比玉米和叶菜类、瓜果类、根茎类蔬菜对As和Cd的累积风险相对更高;部分叶类蔬菜 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 存在明显超标现象,且其品种间As和Cd累积能力差异相比其他类型作物更大;玉米、瓜果类蔬菜、根茎类蔬菜替代水稻种植后其可食部位As和Cd累积风险的降低效果更加明显.综合上述结果,构建了基于污染分级的低累积作物种植优先推荐清单,并利用野外调查结果证明其具有一定的合理性.研究结果可为As和Cd污染农区种植作物类型或品种的优化选择及安全生产提供有效参考.

**关键词:** 砷镉复合污染; 低累积; 水稻; 蔬菜; 玉米; 种植区划

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)11-6654-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202310125

## Screening for the Priority Crops in Over-standard Planting Region Based on the Difference in Arsenic and Cadmium Accumulated in Crops

REN Yan-xin<sup>1,2</sup>, GENG Zhi-xi<sup>3</sup>, SONG Ning-ning<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>2</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, WU Cui-xia<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>4</sup>, ZENG Xi-bai<sup>2</sup>, SU Shi-ming<sup>2\*</sup>

(1. School of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 4. College of Chemistry and Materials Science, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** Conducting the screening and replanting of crops with low accumulation of heavy metals can effectively reduce the risk of heavy metal accumulation in agricultural products. However, current research focuses more on the screening of crops with low accumulation of a single heavy metal. Target crops also focus more on single-type crops and varieties. Research on the accumulation differences in arsenic and cadmium in different crop types and the priority recommendation list for the planting of low-accumulation crops is limited. This study used a combination of literature data meta-analysis and field survey methods to conduct the relevant work. The results showed that the range of arsenic and cadmium content in rice grains was 0.11~0.624 mg·kg<sup>-1</sup> and 0.01~1.935 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. Under the same pollution level, rice had a relatively higher risk of accumulating arsenic and cadmium than that in maize and leafy vegetables, fruit vegetables, and root and tuber vegetables. Some leafy vegetables had significantly higher arsenic and cadmium levels, and the difference in arsenic and cadmium accumulation ability between varieties of leafy vegetables was greater than that of other types of crops. The risk of arsenic and cadmium accumulation in the edible parts of maize, fruit vegetables, and root and tuber vegetables after replacing rice cultivation was more significant. Based on the above results, a priority recommendation list for the planting of low-accumulation crops based on pollution level was constructed. Field survey results showed that the list was reasonable to a certain extent. The relevant results of this study can provide effective reference for the optimization of crop type or variety selection and safe production in arsenic and cadmium-polluted soils.

**Key words:** arsenic and cadmium compound contamination; low accumulation; rice; vegetable; maize; planting regionalization

农田重金属污染影响农产品产量及质量,进而通过食物链威胁人体健康<sup>[1]</sup>.根据2014年全国土壤污染状况调查公报,我国土壤污染总点位超标率为16.1%,其中耕地土壤点位超标率达到了19.4%,镉(Cd)和砷(As)均为主要的无机污染物,工矿业和农业等人为活动以及土壤高背景环境是造成土壤重金属污染的主要原因<sup>[2]</sup>.2022年,中共中央、国务院关于做好2022年全面推进乡村振兴重点工作的意见中进一步明确:“要加强农用地土壤Cd等重金属污染源头防治,强化受污染耕地安全利用和风险管控”<sup>[3]</sup>.农田土壤As和Cd复合污染在我国西南、华南等地区分布广泛<sup>[4]</sup>,亦是当前重金属污染治理的重点和难点之

一,这主要是因为土壤As和Cd有效性随土壤氧化还原电位及酸碱度变化呈现相反的变化规律<sup>[5]</sup>.因此,实现土壤As和Cd有效性同步降低,保障农产品安全生产面临较大的挑战性.

目前,多种方法被用于农田土壤As和Cd污染修复,例如施用可同步降低土壤As和Cd有效性的化学钝化剂<sup>[6-8]</sup>、农田水分管理<sup>[9-12]</sup>和叶面肥施用<sup>[13]</sup>等.以上方式在一定程度上有助于同步降低作物对As和

收稿日期: 2023-10-17; 修订日期: 2024-01-16

基金项目: 贵州省科技计划项目(QKHZC[2023]217); 中国农业科学院创新工程项目(CAAS-ASTIP-2021-IEDA)

作者简介: 任艳欣(1999-),女,硕士,主要研究方向为农田土壤重金属退化及污染修复, E-mail: renyanxin1999@163.com

\* 通信作者, E-mail: sushiming@caas.cn

Cd的累积风险,但是在实施过程中存在成本相对较高、成效稳定性较差等问题,不利于污染农田的持续性安全利用<sup>[14]</sup>. 重金属低累积作物替代种植被认为是降低作物可食部分重金属累积风险的有效方法之一<sup>[15]</sup>. 基于作物不同类型或品种间对As或Cd累积能力的差异,在污染农田开展同步低累积As和Cd作物替代种植,有助于促进污染区农产品安全生产<sup>[16]</sup>. 例如Duan等<sup>[17]</sup>研究发现,在471个水稻品种中,稻米As和Cd含量差异分别可以达到10~32倍和2.5~4.0倍,分别鉴定出As和Cd的低累积水稻品种6个和8个,通过替代种植的方式可有效降低水稻籽粒As和Cd累积风险;Yi等<sup>[18]</sup>研究了68个小麦品种籽粒镉、铁和锌含量差异及籽粒Cd与营养元素、农艺性状的潜在关系,最终筛选出宁麦11号、徐麦35号、宝麦6号和爱康58号等具有低Cd高产特性的小麦品种;Cao等<sup>[19]</sup>研究表明,39个玉米品种籽粒As和Cd含量变化差异分别高达29.7倍和7.5倍,其中品种甜加糯3号、黄糯香、西兴白糯2号和白糯5号等均表现出相对更优的同步低累积As和Cd特性;高鑫等<sup>[20]</sup>对京津冀地区不同类型蔬菜对Cd的累积能力差异进行了比较,认为叶类蔬菜相对瓜果类具有更高的Cd累积风险,瓜果类蔬菜是Cd污染设施土壤上推荐种植的蔬菜类型;Alexander等<sup>[21]</sup>研究了6种常见蔬菜Cd、Cu、Pb和Zn积累的基因型差异,发现胡萝卜和豌豆品种的Cd和Cu含量差异显著,胡萝卜品种的Zn也存在显著差异. 豆类(豆科)倾向于低积累型,块根蔬菜(伞形植物科和百合科)倾向于中积累型,叶菜(菊科和藜科)倾向于高积累型. 综上,当前相关研究大多数关注于单一重金属元素例如As或者Cd低累积作物的筛选,目标作物方面也更多地关注水稻、小麦、玉米和蔬菜等同一类型作物不同品种间对重金属的累积差异. 对于As和Cd复合污染农田,开展不同类型作物累积As和Cd差异的比较研究,目前还鲜见报道. 本研究首先通过已有数据收集与整理,分析不同作物类型或品种累积As和Cd差异,利用Meta分析量化替代种植后作物可食部位As和Cd累积变化效应,进而制定基于As和Cd复合污染分级的作物优先种植推荐清单,最后通过实地采样调查对推荐清单开展验证优化,相关结果对As和Cd复合污染农田通过低累积作物种植及合理种植区划,降低农产品As和Cd累积风险,保障污染区农业安全生产有重要应用价值.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据库建立

本研究对2000~2023年的461篇相关文献进行了检索与分析,以确定不同作物对土壤As和Cd累积

的差异. 从中国知网(CNKI)、万方数据、Web of Science和Science Direct中检索相关文献,搜索关键内容主要包括土壤、砷、镉和对应的作物种类名称,具体内容见表1. 此外,选择符合以下标准的文献数据纳入数据库:①供试土壤有明确的As或Cd含量信息;②供试作物有明确的可食用部位As或Cd含量信息;③数据来源为大田试验、盆栽试验;④供试土壤 $\omega(\text{As}) \leq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cd}) \leq 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,且供试土壤重金属来源为非人为外源添加. 最终获得总有效文献数量为461篇,其中中文文献331篇,英文文献130篇.

已有数据以数值形式呈现的直接提取,以图形方式呈现的数据通过Web Plot Digitizer软件提取. 提取的数据通过Excel软件构建数据库,主要包括文献名称、作者、研究地点、土壤As和Cd含量、植物类型品种、作物可食用部位As和Cd含量等. 为了分析作物在不同土壤污染程度下的累积能力差异,将土壤分别按照As和Cd含量水平划分为4个污染等级,其中 $\omega(\text{As})$ 划分为0~30、30~60、60~90和90~150  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cd})$ 划分为0~0.3、0.3~0.6、0.6~0.9和0.9~1.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;作物类型划分为水稻、玉米、叶类蔬菜、瓜果类蔬菜和根茎类蔬菜5大类,共计20种作物类型,其中叶类蔬菜包括油菜、菠菜、空心菜、白菜、青菜、芹菜、茼蒿、生菜和茼蒿,瓜果类蔬菜包括辣椒、茄子、西红柿、黄瓜和冬瓜,根茎类蔬菜包括萝卜、胡萝卜、马铃薯和红薯. 对于其中以干重方式计量的叶类蔬菜As和Cd含量数据,统一以平均含水量90%为基础将其换算为鲜重,瓜果类蔬菜以平均含水量95%进行换算,根茎类蔬菜中马铃薯和红薯以平均含水量60%进行换算,萝卜和胡萝卜以平均含水量80%进行换算. 对于水稻籽粒总As数据,以无机As占总As比例65%(以无机占比范围10%~90%取平均值获得)统一换算为无机As含量<sup>[22]</sup>,以方便与国家食品卫生标准中水稻无机As限量值进行比较.

### 1.2 调查采样

为进一步验证构建的基于不同污染情景下的低累积作物推荐清单合理性,选取湖南省浏阳市永和镇矿区为调查区域,于2023年6月至8月共采集了41个不同作物可食用部位样品以及该作物根际土壤样品,包括12个作物种类,分别为:水稻、玉米、空心菜、茼蒿、辣椒、茄子、豆角、西红柿、黄豆、黄瓜、苦瓜和四季豆等. 作物及其根际土壤样品均采用五点取样法采集混匀,带回实验室分析检测. 土壤样品及时干燥、研磨并过100目筛处理;新鲜的植物样品加入冰块保鲜运回实验室,经称量鲜重后放入烘箱杀青(105℃)处理<sup>[23]</sup>,然后烘干至恒重.

表1 数据收集关键信息及参考文献数量统计  
Table 1 Key information of data collection and number of references

作物	关键检索信息	中国知网+万方数据		Web of Science/Science Direct(英文期刊)	采用文献总数
		期刊	学位论文		
水稻	土壤、As、Cd 和水稻	45	4	57	106
玉米	土壤、As、Cd 和玉米	19	2	10	31
叶类蔬菜	油菜	28	0	0	28
	菠菜	16	0	3	19
	空心菜	11	1	0	11
	白菜	43	0	8	51
	青菜	12	0	0	12
	芹菜	9	0	4	13
	茼蒿	5	0	7	13
	生菜	18	0	1	19
	茼蒿	8	0	0	8
	辣椒	13	0	1	14
瓜果类蔬菜	茄子	15	0	6	21
	西红柿	20	0	4	24
	黄瓜	12	0	4	16
	冬瓜	11	0	0	11
	萝卜	16	0	8	24
根茎类蔬菜	胡萝卜	5	0	1	6
	马铃薯	10	0	13	23
	红薯	8	0	3	11
总数量		324	7	130	461

1.3 样品分析

土壤总 As 和总 Cd 含量测定参考 HJ 781-2016 进行:称取 0.5g 左右的样品置于聚四氟乙烯坩埚中,采用浓盐酸:浓硝酸:氢氟酸:高氯酸为 5:5:5:3 的方法消解处理;植株总 As 和总 Cd 含量的测定消解参考 HJ 781-2016:称取样品 0.5 g 于三角瓶中,采用硝酸:高氯酸:硫酸=8:2:1 的方法消解,用 0.22 μm 注射过滤器过滤.水稻籽粒无机 As 采用硝酸:高氯酸:硫酸=4:1:1.5 微波消解的方法提取<sup>[24]</sup>,利用高效液相-电感耦合等离子体质谱仪(HPLC-ICP-MS, Optima 5300DV, 美国)进行无机 As 含量测定;其他土壤及植物待测样总 As 和总 Cd 含量分别利用原子荧光(HG-AFS 9120, 吉天, 北京)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Optima 5300DV, 美国)进行测定<sup>[25,26]</sup>.样品分析过程中,采用土壤标准样品(GBW07408)和植物标准样品(GBW10045)进行质量控制,土壤标准品总 As 和总 Cd 含量回收率平均值分别为 89.4% 和 91.2%,植物标准品总 As 和总 Cd 回收率平均值分别为 79.1% 和 83.6%.

1.4 数据分析

本实验数据采用 Excel 进行计算, IBM SPSS Statistics 23 进行相关性、异质性分析,采用 Origin 2018 等软件进行制图.

作物可食用部位重金属含量累积能力用富集系

数 BCF 进行表示:

$$BCF = \frac{C_{crop}}{C_{soil}}$$

式中,  $C_{crop}$  为作物可食用部位重金属含量,  $C_{soil}$  为土壤重金属含量.效应量计算为水稻与其他类作物可食用部位重金属含量的自然对数效应( $\ln RR$ )<sup>[27]</sup>,以水稻为基准,反映了替代种植的效果大小.计算公式如下:

$$\ln RR = \ln \left( \frac{M_i}{M_e} \right) = \ln M_i - \ln M_e$$

式中,  $\ln RR$  为效应值(量化现象强度的数值)的大小,  $M_e$  和  $M_i$  分别为水稻和其他作物的重金属含量.效应值的大小表示以替代水稻为基准的贡献率,负值表示替代后降低可食部位重金属含量效应情况,正值则相反.为了进一步验证数据可行性,  $\ln RR$  通过计算方差进一步加权:

$$Var = \frac{SD_i^2}{n_i M_i^2} + \frac{SD_e^2}{n_e M_e^2}$$

式中,  $SD_e$  和  $SD_i$  分别为水稻和其他作物的标准差,  $n_e$  和  $n_i$  分别为总样本个数.此外,本研究利用 Metawin 2.1 计算获得均值及 95% 置信区间范围<sup>[28]</sup>.使用 Metawin 2.1 计算的失安全系数用于表征数据结果倚倚情况,失安全系数大于或等于  $5N+10$  ( $N$  为研究案例个数)时,则表明是具有统计学意义的数据结果.

使用漏斗图表现效应大小表征数据偏倚情况。

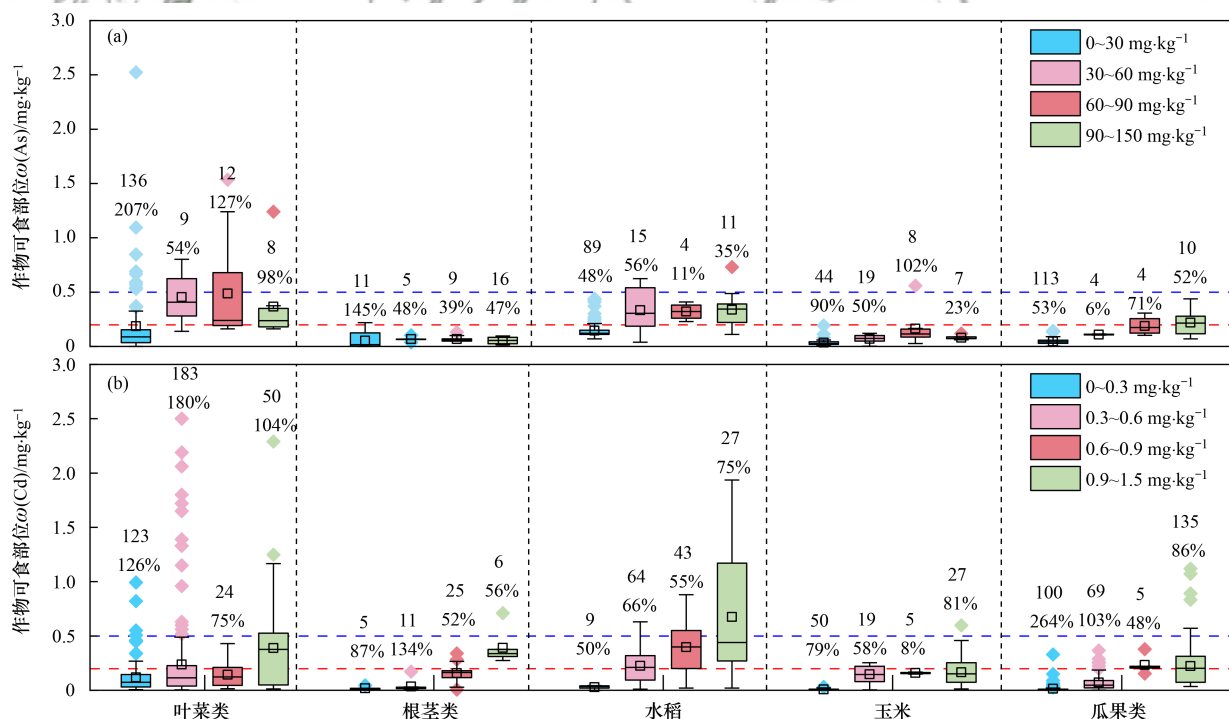
## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型作物可食部位砷镉含量

作物可食部位 As 和 Cd 含量总体呈现出随土壤 As 和 Cd 增加而增加的趋势,且不同作物可食部位 As 和 Cd 含量差异明显(图 1)。在相同污染程度下,水稻相比玉米、叶菜类、瓜果类和根茎类蔬菜对 As 和 Cd 的累积风险相对更高。当土壤  $\omega(\text{As})$  为 0~30  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,部分水稻品种籽粒 As 含量超过国家食品卫生标准限定值(0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),最高可达 0.44  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 1(a)]。当土壤  $\omega(\text{As})$  为 30~150  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,水稻籽粒 As 含量平均值均高于限定值(0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),表明存在较高的籽粒 As 超标风险;不同蔬菜类型比较来看,叶类蔬菜对 As 的累积风险相对于其他蔬菜更高。当土壤  $\omega(\text{As})$  范围分别为 0~30、30~60、60~90 和 90~150  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,叶类蔬菜可食部位  $\omega(\text{As})$  平均值分别为 0.19、0.45、0.48 和 0.37  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均低于国家食品卫生标准限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。但叶类蔬菜品种间 As 含量差异较大,各土壤 As 含量范围内均存在不同程度的叶类蔬菜 As 超标现象。例如当土壤  $\omega(\text{As})$  超过 30  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,菠菜、油菜和空心菜可食部位  $\omega(\text{As})$  平均值分别达到 2.64、0.49 和 2.19  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,接近或超过叶类蔬菜 As 含量限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );不同土壤 As 含量下,玉米、瓜果类及根茎类蔬菜可食部位  $\omega(\text{As})$  平

均值均低于限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。当土壤  $\omega(\text{As})$  为 60~90  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,仅发现一例玉米品种其籽粒 As 含量超过该限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。进一步分析相同作物类型不同品种间可食部位 As 含量变异系数,发现叶类蔬菜品种间 As 累积能力差异相对更大[图 1(a)]。

当土壤  $\omega(\text{Cd})$  为 0~0.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,水稻籽粒平均  $\omega(\text{Cd})$  为 0.03  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,未超过国家食品卫生标准限定值(0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) [图 1(b)]。当土壤  $\omega(\text{Cd})$  范围分别为 0.3~0.6、0.6~0.9 和 0.9~1.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,水稻籽粒  $\omega(\text{Cd})$  平均值分别为 0.23、0.40 和 0.78  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均超过标准限定值(0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );当土壤  $\omega(\text{Cd})$  范围分别为 0~0.3、0.3~0.6、0.6~0.9 和 0.9~1.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,叶类蔬菜可食部位  $\omega(\text{Cd})$  平均值分别为 0.12、0.24、0.14 和 0.40  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均未超过其标准限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。此外,蔬菜品种间 Cd 累积差异相对较大,部分蔬菜如油菜  $\omega(\text{Cd})$  最高可达 0.78  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是标准限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的 1.56 倍;生菜  $\omega(\text{Cd})$  最高可达 2.61  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是标准限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的 5.22 倍;当土壤  $\omega(\text{Cd})$  低于 0.9  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,玉米、瓜果类及根茎类蔬菜可食部位  $\omega(\text{Cd})$  平均值均低于标准限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。当土壤  $\omega(\text{Cd})$  为 0.9~1.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,仅部分玉米、瓜果类和根茎类蔬菜其可食部位 Cd 含量超过标准限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。进一步分析相同作物类型不同品种间可食部位 Cd 含量变异系数,发现叶类蔬菜品种间 Cd 累积能力差异更大,而其他类型作物相对较小[图 1(b)]。



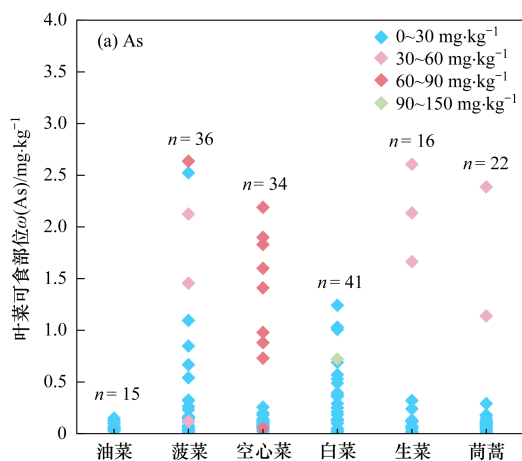
蓝色虚线表示玉米及蔬菜可食用部位 As 和 Cd 含量的国家食品卫生标准限定值(0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),红色虚线表示水稻籽粒无机 As 和 Cd 含量的国家食品卫生标准限定值(0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );箱式图上方数据分别表示样本数量及重金属含量变异系数(CV,百分数)

图 1 不同类型作物可食用部位 As 和 Cd 含量

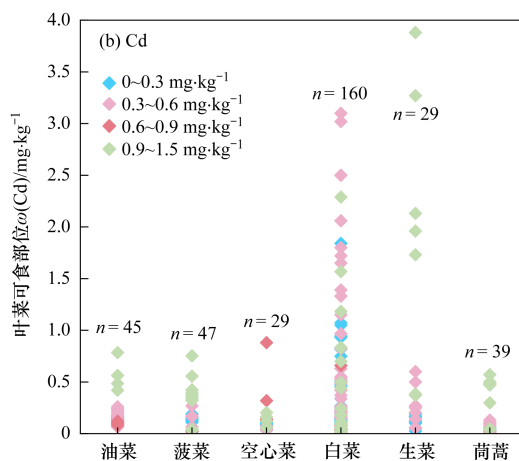
Fig. 1 As and Cd concentrations in edible parts of different types of crops

## 2.2 不同叶类蔬菜对砷镉累积能力比较

针对不同叶类蔬菜可食部位 As 或 Cd 含量变异较大的现象,本文挑选了具有代表性的 6 种叶菜进行分析,结果如图 2 所示.不同叶类蔬菜可食部位 As 或 Cd 含量受蔬菜类型及土壤 As 或 Cd 含量影响较大.当土壤  $\omega(\text{As})$  低于  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,部分菠菜和白菜的  $\omega(\text{As})$  明显超过限定值( $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),而油菜、空心菜、生菜和茼蒿整体相对较低;当土壤  $\omega(\text{As})$  高于 30



$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,菠菜、空心菜、白菜、生菜和茼蒿可食部位 As 含量均出现超过限定值现象;当土壤  $\omega(\text{Cd})$  低于  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,白菜  $\omega(\text{Cd})$  明显超过限定值( $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).当土壤  $\omega(\text{Cd})$  为  $0.3 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,油菜、菠菜、空心菜和茼蒿可食部位 Cd 含量均低于限定值,而白菜和生菜其可食部位 Cd 含量超过限定值.当土壤  $\omega(\text{Cd})$  高于  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,上述 6 种叶菜其可食部位 Cd 含量均出现超过限定值现象.



黑色和红色虚线代表叶类蔬菜可食部位 As 和 Cd 含量的国家食品卫生标准限定值( $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); n 表示样本数

图 2 不同叶类蔬菜可食部位 As 和 Cd 含量

Fig. 2 As and Cd concentration in the edible parts of different leafy vegetables

## 2.3 不同类型作物对砷镉富集能力效应差异

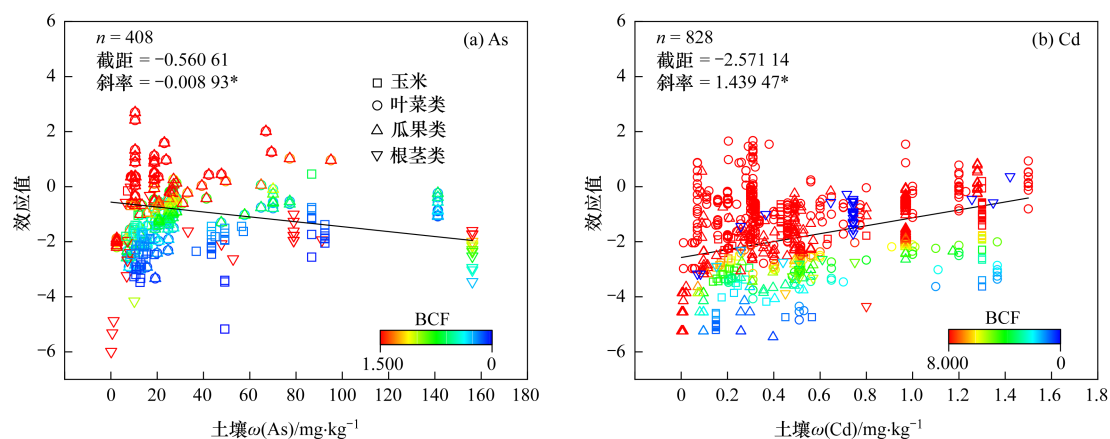
为了探究各类型作物相对于水稻对重金属累积能力大小,本文建立了回归分析模型,结果如图 3 所示.与土壤 As 或 Cd 污染情况下替代种植效应的 0 线(替代作物为水稻时)比较,叶类蔬菜及部分瓜果类蔬菜的 As 或 Cd 累积效应值均高于 0 线,表明该类型作物的部分品种存在相对较高的 As 或 Cd 累积风险.进一步分析来看,随着土壤 As 含量增加,土壤 As 含量对作物替代水稻效应大小有显著的负作用,这表明随着土壤 As 污染程度的增加,替代水稻种植后作物可食用部位 As 含量降低的效应更加显著.不同作物类型比较来看,玉米及根茎类蔬菜替代水稻种植的效应值主要呈现负数,表明利用该两类作物开展水稻替代种植的效应更加明显.不同作物对 As 的 BCF 存在显著差异.结果表明,玉米对 As 累积的 BCF 范围为  $0.0001 \sim 0.0264$ ,叶类蔬菜为  $0.0004 \sim 0.3164$ ,瓜果类蔬菜为  $0.0003 \sim 1.4127$ ,根茎类蔬菜为  $0.0001 \sim 0.2555$ ,玉米及根茎类蔬菜对 As 的 BCF 相对更低.此外,随着土壤 Cd 含量增加,土壤 Cd 含量与作物替代种植水稻的效应大小呈现正相关,该结果与土壤 As 污染情况相反.这表明随着土壤 Cd 含量增加,替代水稻种植后作物可食部位 Cd 含量降低的效应逐渐减少.当土壤  $\omega(\text{Cd})$  为  $1.0 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,该替

代效应值仍为负数,表明该条件下替代水稻种植后仍然具有一定程度的减低 Cd 累积的效应.从不同作物对 Cd 的 BCF 范围来看,玉米对 Cd 累积的 BCF 范围为  $0.00693 \sim 0.57698$ ,叶类蔬菜为  $0.00725 \sim 8.065$ ,瓜果类蔬菜为  $0.00388 \sim 3.6667$ ,根茎类蔬菜为  $0.00725 \sim 0.50035$ ,玉米及根茎类蔬菜对 Cd 累积的 BCF 相对更低.

## 2.4 不同类型作物替代水稻种植降低砷镉累积效应

本文分别计算了土壤 As(400 个有效数据)和 Cd(820 个有效数据)含量及对应作物可食部位重金属含量替代水稻种植之后的效应值大小.如图 4 所示,漏斗图的大多数样本数据点均匀分布在漏斗两侧,表明没有发生偏倚,其失安全系数远高于阈值( $5N+10$ ),表明效应值数据可靠性较好,被推翻的概率较小,数据具有统计学意义,可使用性强.

进一步量化了不同类型作物替代水稻种植后降低可食部位 As 和 Cd 含量的效应,结果如图 5 所示.替代水稻种植后各目标作物可食部位 As 或 Cd 含量的变化率大多数呈负数,表明代替水稻种植整体上有助于降低作物可食部位 As 和 Cd 含量.对于 As 或 Cd 污染土壤,玉米、瓜果类蔬菜和根茎类蔬菜替代水稻种植效果均更明显.当土壤  $\omega(\text{As})$  分别为



根据作物对 As 和 Cd 累积能力数据拟合曲线判断与效应大小之间的关系;符号的颜色深浅表示重金属富集系数 BCF 的大小; $n$  表示样本数;\*表示  $P < 0.05$

图3 作物富集 As 和 Cd 的效应大小与土壤污染程度的关系

Fig. 3 Relationship between the effect size of crop As and Cd and the degree of soil pollution

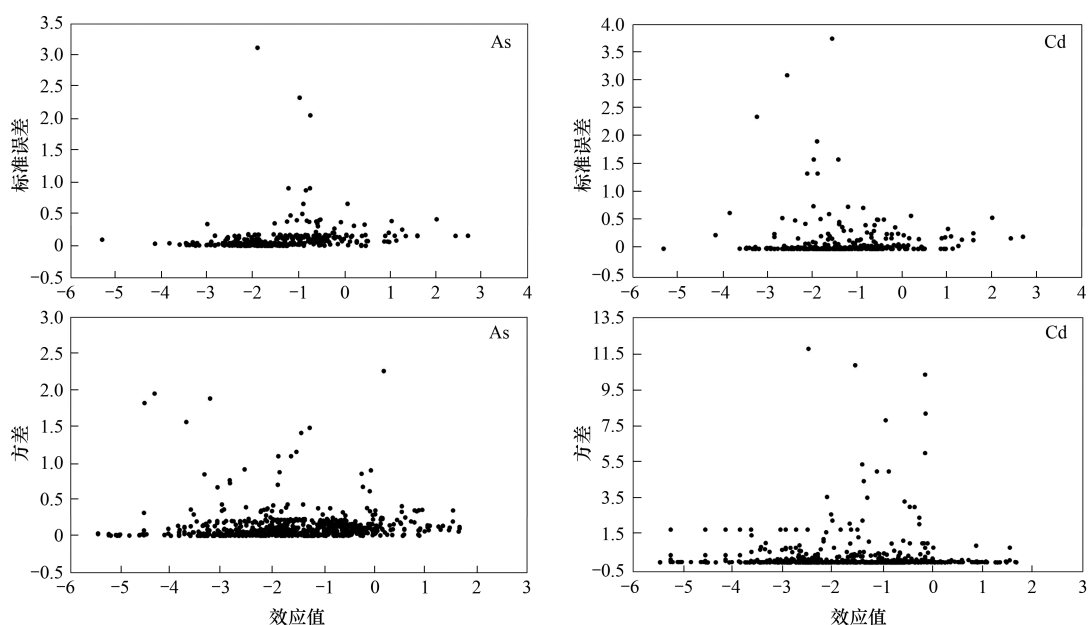


图4 作物 As 和 Cd 的 lnRR 大小对样本标准误差和方差效应的影响

Fig. 4 Effects of crop As and Cd lnRR size on sample standard error and variance

0~30、30~60、60~90 和 90~150  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,玉米替代水稻后其可食部位 As 含量平均减少率分别为 18.9%、44.2%、42.2% 和 39.5%,瓜果类蔬菜平均减少量分别为 17.8%、40.3%、38.1% 和 25.6%,根茎类蔬菜平均减少量分别为 17.0%、44.5%、51.7% 和 42.2%,而叶菜类蔬菜替代水稻后其可食部位 As 含量平均减少量为 3.6%、5.8%、0.6% 和 10.8%;当土壤  $\omega(\text{Cd})$  分别为 0~0.3、0.3~0.6、0.6~0.9 和 0.9~1.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,玉米替代水稻种植后其可食部位 Cd 含量平均减少量分别为 2.0%、7.7%、23.7% 和 61.0%,瓜果类蔬菜平均减少量分别为 1.4%、15.3%、15.0% 和 55.7%,根茎类蔬菜平均减少量分别为 1.0%、19.1%、23.8% 和 34.5%。当土壤  $\omega(\text{Cd})$  为 0~0.3  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.3~0.6  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,叶类蔬菜可食部位 Cd 含量平均

值高于水稻籽粒 Cd 含量平均值,替代种植降镉效果并不明显。当土壤  $\omega(\text{Cd})$  为 0.6~0.9  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.9~1.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,叶类蔬菜替代水稻种植后其可食部位 Cd 含量降低效果更加明显,平均减少量分别为 25.3% 和 37.4%。

## 2.5 砷镉复合污染农田优先种植作物推荐清单

根据不同污染程度下作物可食部位 As 和 Cd 积累风险差异,构建了作物类型优先种植推荐清单,如图 6 所示。当土壤  $\omega(\text{As})$  和  $\omega(\text{Cd})$  分别为 0~150  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0~1.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,玉米、茼蒿、芹菜和根茎类作物均为相对安全的作物类型。除上述作物类型外,当土壤  $\omega(\text{As})$  为 0~30  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cd})$  为 0~0.6  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,油菜、空心菜、生菜及瓜果类蔬菜基本上可实现安全生产,个别水稻品种其籽粒 As 或 Cd 含量存在超

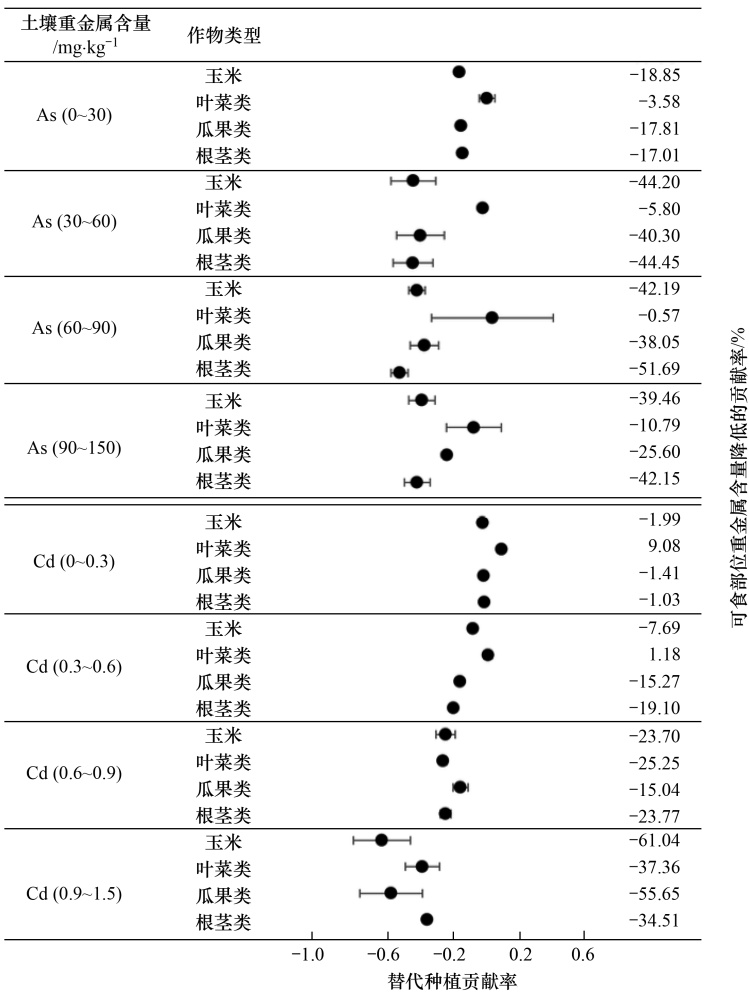


图5 不同类型作物替代水稻种植后对降低可食部位As和Cd含量的贡献率

Fig. 5 Contribution rate of different types of crops to the reduction of As and Cd contents in edible parts after rice substitution

标现象,需要根据实际生产情况予以特殊关注;当土壤 $\omega(\text{As}) > 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或者 $\omega(\text{Cd}) > 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,建议优先种植根茎类蔬菜及玉米,且需特别关注部分叶菜类蔬菜的种植,如菠菜不适合种植于土壤 $\omega(\text{As}) > 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\omega(\text{Cd}) > 0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤,油菜不适合种植于 $\omega(\text{As}) > 90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\omega(\text{Cd}) > 0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤,空心菜不适合种植于 $\omega(\text{As}) > 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤,生菜不适合种植于 $\omega(\text{As}) > 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\omega(\text{Cd}) > 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤.

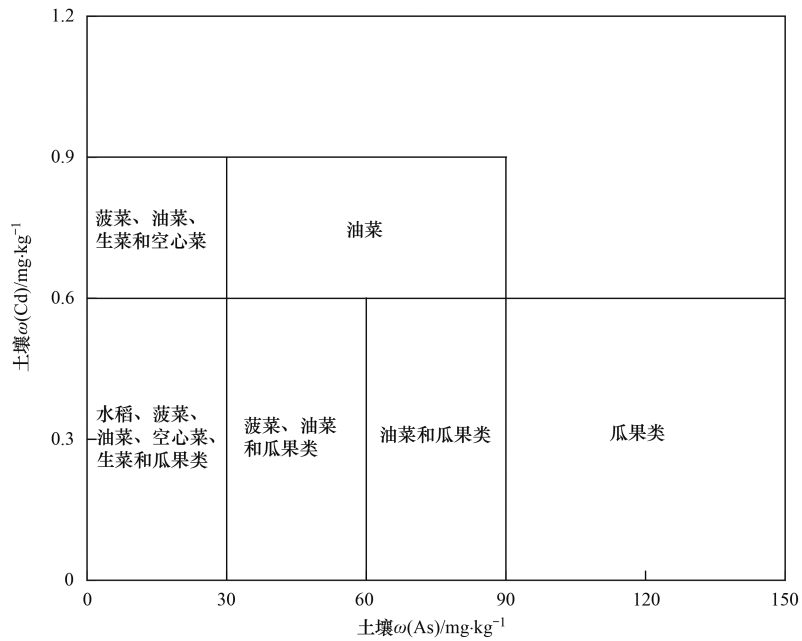
2.6 野外调查验证

利用野外调查采样进一步验证了上述推荐的优先种植作物清单的合理性,结果如图7所示,当土壤 $\omega(\text{As})$ 为 $19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻籽粒 $\omega(\text{As})$ 为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均接近国家食品卫生标准限定值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,表明土壤As和Cd相对低污染程度下,水稻籽粒As和Cd仍存在超标风险;各调查样点情况下,玉米籽粒As或Cd含量均低于国家食品卫生标准值;土壤 $\omega(\text{Cd})$ 超过 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,瓜果类蔬菜可食部

位 $\omega(\text{Cd})$ 存在超过限定值 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的现象,其中主要为瓜果类作物;土壤 $\omega(\text{As})$ 超过 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\omega(\text{Cd})$ 超过 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶类蔬菜As或Cd含量接近或超过国家标准限定值,其中当土壤 $\omega(\text{As})$ 为 $95.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,茼蒿 $\omega(\text{As})$ 达 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,空心菜 $\omega(\text{Cd})$ 达 $2.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,后者与图6中结果相左.总体来看,调查采样结果与上述构建的优先种植作物推荐清单有较好的一致性.

3 讨论

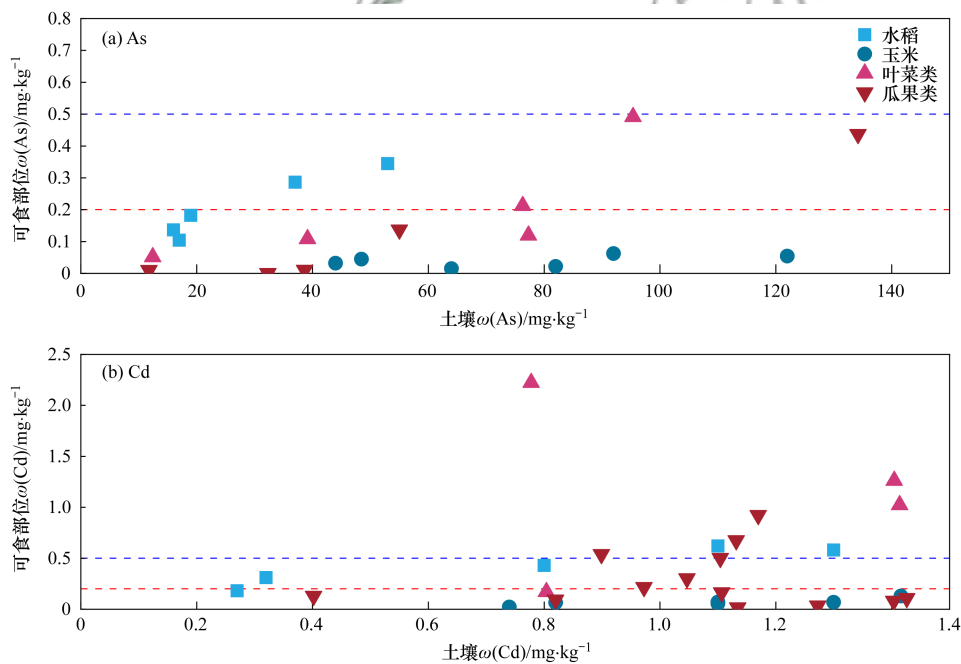
作物类型或品种间差异以及土壤重金属含量水平在很大程度上决定着农产品可食部位重金属累积风险<sup>[29]</sup>.基于不同作物类型或品种的重金属累积差异,通过合理区划种植,对降低农产品可食部位重金属累积风险,保障污染农产品安全生产有重要现实意义<sup>[30]</sup>.本研究利用文献调查数据结合Meta分析等方法,研究了不同土壤As和Cd污染程度下20种常见作物对As和Cd的累积效应,制定了基于污染分级的作物优先种植推荐清单.同等土壤污染情况下不同



所选土壤砷镉浓度范围内玉米、茼蒿、芹菜和根茎类作物均推荐种植

图 6 As 和 Cd 复合污染农田优先种植作物推荐清单

Fig. 6 A list of recommended crops for priority planting in As and Cd compound contamination



蓝色虚线表示玉米及蔬菜可食用部位 As 和 Cd 含量的国家食品卫生标准限定值( $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  
红色虚线表示水稻籽粒无机 As 和 Cd 含量的国家食品卫生标准限定值( $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

图 7 野外调查分析不同作物可食用部位 As 和 Cd 含量

Fig. 7 Field investigation analysis of As and Cd content in edible part of different crops

类型作物比较来看,水稻对 As 和 Cd 的敏感性都较高,而玉米、瓜果类蔬菜和根茎类蔬菜具有相对更低的 As 和 Cd 累积能力,这与已有报道的结果相一致<sup>[31]</sup>.这主要是由于在稻田淹水条件下 As 主要以活性相对更高的亚砷酸盐形态存在,增加了 As 的生物有效性<sup>[32]</sup>,同时基于水稻喜硅喜磷特性,亚砷酸盐和砷酸盐可分别通过硅和磷的吸收通道蛋白进入根系,增加

了水稻对 As 的吸收<sup>[33]</sup>.而水稻对 Cd 的吸收可以通过锰、锌等元素的通道蛋白进入胞内,促进其对 Cd 的吸收<sup>[34]</sup>.作物对重金属吸收的遗传变异和对不利生长环境的内在抗性是造成同等污染情况下作物对重金属累积风险差异的重要原因<sup>[35]</sup>.当土壤  $\omega(\text{As})$  超过  $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,水稻籽粒  $\omega(\text{As})$  为  $0.11\sim0.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,相比国家标准中无机 As 限量值( $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )超出最高可

达4.8倍,是全球水稻籽粒平均无机 $\omega(\text{As})$   $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的1.1~6.24倍.当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 超过  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 为  $0.01 \sim 1.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相比国家标准中Cd限量值( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )超出最高可达9.7倍.野外调查工作中亦发现,当土壤 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别低于  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻籽粒As和Cd含量亦存在超标风险,可选择As和Cd低累积水稻品种开展替代种植.当土壤 $\omega(\text{As})$ 超过  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,可根据各区域农业生产需要,进行水田更改旱地开展替代种植.淹水稻田更改为旱地后,亚硝酸盐快速氧化成为砷酸盐,后者更易被土壤胶体吸附,减少了As在土壤中的生物有效性及毒性,有利于降低作物As累积风险<sup>[36]</sup>.

同等土壤污染情况下叶类蔬菜可食部位As和Cd含量明显高于瓜果类和根茎类蔬菜<sup>[37]</sup>,叶菜As含量约为瓜果类或根茎类蔬菜的12.0~18.4倍.叶类蔬菜具有相对更高的As和Cd累积风险,这可能是因为叶类蔬菜根系向叶部转运As和Cd的距离相对更短,缺少如茎等组织的生理阻隔作用,更易于As和Cd累积<sup>[38]</sup>.叶片作为蔬菜进行光合作用的主要部位,由于蒸腾作用强,重金属流向叶片较多<sup>[39~41]</sup>,亦是造成叶类蔬菜对As和Cd累积风险较大的原因.此外,董俊文等<sup>[42]</sup>对不同粒径大气颗粒物中重金属Cd和As分析发现,Cd和As含量均在 $\text{PM}_{2.5}$ 中达到最高值,亦可能是造成叶类蔬菜叶片As和Cd累积的重要原因.进一步分析不同叶菜类型对As和Cd累积能力表明,芹菜和茼蒿的As和Cd累积能力均相对较小,因此认为在As和Cd污染旱地土壤中较适宜种植.Zeng等<sup>[43]</sup>研究发现,土壤 $\omega(\text{As})$ 高达  $156.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,4种茼蒿品种 $\omega(\text{As})$ 范围为  $0.08 \sim 0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远低于国家标准限量值( $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).白菜、菠菜、油菜和生菜是Cd的高转运和高累积型作物,这也与相关研究的结果一致<sup>[44]</sup>.当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 高于  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶类蔬菜替代水稻种植后其可食部位Cd含量降低效果更加明显.这可能与该污染情况下水稻相对叶类蔬菜更易于累积Cd有关.本研究中,当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 为  $0.3 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 平均值( $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )与叶类蔬菜可食部位 $\omega(\text{Cd})$ 平均值( $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )无明显差异,当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 为  $0.6 \sim 0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 平均值( $0.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),约是叶类蔬菜 $\omega(\text{Cd})$ 平均值( $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的2.86倍.

不同土壤As污染程度下瓜果类和根茎类蔬菜可食部位As含量均低于国家标准限量值,表明在As污染的土壤上种植该类型蔬菜具有一定的可行性.瓜果类和根茎类蔬菜因自身结构及生理机能等原因对As累积能力相对较弱,例如,植物组织中含有硫醇类化合物的富集可以有效阻隔细胞内As,减少其向可

食部位的转运<sup>[45]</sup>;瓜果类蔬菜较大的生物量及从根至可食部位的长距离运输有利于通过生理阻隔减轻对As的吸收<sup>[46]</sup>.当土壤 $\omega(\text{Cd})$ 超过  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,瓜果类蔬菜食用部位Cd含量表现出相对较高的超标风险,尤其是茄科作物.Zhou等<sup>[47]</sup>研究发现茄科类蔬菜对Cd的累积能力较强.李富荣等<sup>[48]</sup>研究结果亦表明3种茄果类蔬菜对Cd吸收富集能力强于Cr、Pb、As和Hg元素,表明Cd相对更易在茄果蔬菜体内累积.这可能是因为茄科作物与Cd超累积植物龙葵同属茄科茄属,在Cd吸收与转运相关基因方面具有类似的遗传背景<sup>[49]</sup>,相关机制仍需进一步探讨.

不同土壤污染程度下玉米籽粒 $\omega(\text{As})$ 范围为  $0.006 \sim 0.191 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , $\omega(\text{Cd})$ 范围为  $0.001 \sim 0.633 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,大部分玉米籽粒As和Cd含量均远低于国家标准限定值,表明玉米品种整体上适合不同污染程度的耕地,即使在高污染程度下亦适宜种植.但研究亦发现个别玉米样品Cd含量超标,可能原因是玉米受该样点土壤Cd胶体性质、品种特异等因素影响产生富集现象<sup>[50]</sup>.玉米籽粒对As和Cd的低累积效应可能与As和Cd在玉米根内的区隔化及其较低的向地上部转运能力有关<sup>[51]</sup>.Cao等<sup>[52]</sup>研究表明,不同玉米品种均对As表现出低累积能力,但甜玉米相对糯玉米、杂交玉米具有相对较高的累积,建议在As污染区尽量避免种植甜玉米.此外,相对其他作物类型,玉米籽粒As或Cd累积变异系数相对更小,表明玉米对As和Cd的低累积能力在不同品种间具有较好的稳定性<sup>[53]</sup>.

总体来看,本文提出了基于污染分级的低累积作物优先种植推荐清单,在一定程度上有利于As和Cd污染农区作物类型或品种的优化选择及安全生产.但在实际生产中仍存在一定的局限性,一是该推荐清单是基于文献数据收集整理,考虑不同区域土壤、气候及种植作物类型或品种的差异性,在实际应用中仍需进一步因地制宜优化;二是本文仅考虑了作物可食部位As或Cd累积风险差异,As或Cd高污染农田对作物生长可能存在的毒害效应以及对作物产量的影响亦值得进一步考虑;三是替代作物及其种植区划还需考虑当地农户的意愿,以及替代种植后对经济、社会及生态效益等因素产生的影响,以便保障农业生产的可持续.总之,通过基于低累积作物替代种植的种植区划有利于降低农产品中As和Cd的累积风险,同步结合必要的农艺或化学调控等措施有助于实现As和Cd污染农区的安全生产.

#### 4 结论

(1)基于文献数据分析,相同污染程度下,水稻

相比玉米、叶菜类、瓜果类和根茎类蔬菜对 As 和 Cd 的累积风险相对更高,叶类蔬菜同一类型或不同品种间对 As 和 Cd 的累积能力差异更大,玉米、瓜果类(除茄科外)和根茎类蔬菜是相对安全的作物类型。

(2)土壤 As 和 Cd 污染程度越严重,作物替代水稻种植后其可食部位 As 含量的降低效应越显著,但其降低 Cd 含量的效应越低;基于 Meta 分析进一步明确了不同类型作物替代水稻种植后降低可食部位 As 和 Cd 累积的量化效应。

(3)构建了基于污染分级的 As 和 Cd 低累积作物优先种植推荐清单,野外调查结果表明其具有一定的合理性,可为 As 和 Cd 污染农区种植作物类型的优化选择提供有效参考。

#### 参考文献:

- [1] 蔡美芳,李开明,谢丹平,等.我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J].环境科学与技术,2014,37(S2):223-230.  
Cai M F, Li K M, Xie D P, et al. The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(S2): 223-230.
- [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:中华人民共和国政府,2014.
- [3] 中共中央国务院关于做好二〇二二年全面推进乡村振兴重点工作的意见[N].人民日报,2022-02-23(001).
- [4] Tong S M, Li H R, Wang L, et al. Concentration, Spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019—A systematic review[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(9), doi: 10.3390/ijerph17093099.
- [5] Han R X, Wang Z, Wang S Q, et al. A combined strategy to mitigate the accumulation of arsenic and cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Science of the Total Environment, 2023, 896, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165226.
- [6] 殷飞,王海娟,李燕燕,等.不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J].农业环境科学学报,2015,34(3):438-448.  
Yin F, Wang H J, Li Y Y, et al. Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(3): 438-448.
- [7] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J].生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.  
Fan T, Ye W L, Chen H Y, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(10): 1727-1736.
- [8] 曹心德,魏晓欣,代革联,等.土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J].环境工程学报,2011,5(7):1441-1453.  
Cao X D, Wei X X, Dai G L, et al. Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: a review [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(7): 1441-1453.
- [9] Zheng S A, Zhang M K. Effect of moisture regime on the redistribution of heavy metals in paddy soil [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(3): 434-443.
- [10] Sun P, Qu C C, Xiong Z Q, et al. Organic fertilization integrated with water management to remediate As and Cd contamination in a paddy soil [J]. Science of the Total Environment, 2023, 886, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163992.
- [11] 王荣萍,张雪霞,郑煜基,等.水分管理对重金属在水稻根区及在水稻中积累的影响[J].生态环境学报,2013,22(12):1956-1961.  
Wang R P, Zhang X X, Zheng Y J, et al. Accumulation of heavy metal in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(12): 1956-1961.
- [12] 李林峰,王艳红,李义纯,等.调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应[J].环境科学,2022,43(1):472-480.  
Li L F, Wang Y H, Li Y C, et al. Inhibitory effects of soil amendment coupled with water management on the accumulation of Cd and Pb in double-cropping rice [J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 472-480.
- [13] Cui H, Tang S T, Huang S Q, et al. Simultaneous mitigation of arsenic and cadmium accumulation in rice grains by foliar inhibitor with ZIF-8@Ge-132 [J]. Science of the Total Environment, 2023, 860, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160307.
- [14] Xu C, Chen Y P, Su C C, et al. Microbial characteristics response to the soil quality of newly created farmland on the Loess Plateau [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(31): 42290-42299.
- [15] Requejo R, Tena M. Intra-specific variability in the response of maize to arsenic exposure [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(18): 10574-10582.
- [16] Rai P K, Lee S S, Zhang M, et al. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms, and management [J]. Environment International, 2019, 125: 365-385.
- [17] Duan G L, Shao G S, Tang Z, et al. Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars [J]. Rice, 2017, 10(1), doi: 10.1186/s12284-017-0149-2.
- [18] Yi Q S, Wang Y, Yi C, et al. Agronomic and ionomics indicators of high-yield, mineral-dense, and low-Cd grains of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 261, doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.115120.
- [19] Cao X X, Gao X, Zeng X B, et al. Seeking for an optimal strategy to avoid arsenic and cadmium over-accumulation in crops: soil management vs cultivar selection in a case study with maize [J]. Chemosphere, 2021, 272, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129891.
- [20] 高鑫,颜蒙蒙,曾希柏,等.京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征[J].农业环境科学学报,2018,37(11):2541-2548.  
Gao X, Yan M M, Zeng X B, et al. Cadmium accumulation characteristics of different vegetables in greenhouse soils in the Beijing, Tianjin, and Hebei (BTH) Area, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(11): 2541-2548.
- [21] Alexander P D, Alloway B J, Dourado A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables [J]. Environmental Pollution, 2006, 144(3): 736-745.
- [22] 赵方杰.水稻砷的吸收机理及阻控对策[J].植物生理学报,2014,50(5):569-576.  
Zhao F J. Mechanisms of arsenic uptake by rice and mitigation strategies [J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(5): 569-576.
- [23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].(第三版).北京:中国农业出版社,2000.
- [24] Yu H Y, Li F B, Liu C S, et al. Iron redox cycling coupled to transformation and immobilization of heavy metals: implications for paddy rice safety in the red soil of South China [J]. Advances in Agronomy, 2016, 137: 279-317.
- [25] Yan M M, Zeng X B, Wang J, et al. Dissolved organic matter differentially influences arsenic methylation and volatilization in paddy soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 388, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121795.
- [26] Cruz S M, Schmidt L, Dalla Nora F M, et al. Microwave-induced combustion method for the determination of trace and ultratrace element impurities in graphite samples by ICP-OES and ICP-MS [J]. Microchemical Journal, 2015, 123: 28-32.
- [27] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S, et al. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [28] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. MetaWin: statistical

- software for meta-analysis, version 2 [R]. Sunderland: Sinauer Associates, 2000.
- [29] 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.
- [30] 王擎运, 张佳宝, 信秀丽, 等. 长期不同施肥方式对砷在典型壤质潮土及作物中累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(10): 1295-1302.
- Wang Q Y, Zhang J B, Xin X L, *et al.* Effects of long-term fertilization on As (arsenate) accumulation in typical fluvo-aquic soils and crops [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(10): 1295-1302.
- [31] Williams P N, Villada A, Deacon C, *et al.* Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(19): 6854-6859.
- [32] 曾希柏, 苏世鸣, 吴翠霞, 等. 农田土壤中砷的来源及调控研究与展望[J]. 中国农业科技导报, 2014, **16**(2): 85-91.
- Zeng X B, Su S M, Wu C X, *et al.* Research and prospect of arsenic source and its regulation in arable land soil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, **16**(2): 85-91.
- [33] 高智群, 张美剑, 赵科理, 等. 土壤-水稻系统重金属空间异质性研究——以浙江省嵊州市为例[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 215-224.
- Gao Z Q, Zhang M J, Zhao K L, *et al.* Heavy metal contamination in soil-rice system and its spatial variation in Shengzhou City [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 215-224.
- [34] 方波, 肖腾伟, 苏娜娜, 等. 水稻镉吸收及其在各器官间转运积累的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2021, **35**(3): 225-237.
- Fang B, Xiao T W, Su N N, *et al.* Research progress on cadmium uptake and its transport and accumulation among organs in rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021, **35**(3): 225-237.
- [35] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3996-4003.
- Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Simulation of the absorption, migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3996-4003.
- [36] Gu J F, Zhou H, Tang H L, *et al.* Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under *in situ* remediation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **171**: 451-459.
- [37] 欧阳喜辉, 赵玉杰, 刘凤枝, 等. 不同种类蔬菜对土壤镉吸收能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **27**(1): 67-70.
- Ouyang X H, Zhao Y J, Liu F Z, *et al.* Absorption ability of different types of vegetables for soil Cd in Beijing [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **27**(1): 67-70.
- [38] Nabulo G, Young S D, Black C R. Assessing risk to human health from tropical leafy vegetables grown on contaminated urban soils [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(22): 5338-5351.
- [39] Marchiol L, Assolari S, Sacco P, *et al.* Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2004, **132**(1): 21-27.
- [40] Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, *et al.* Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status [J]. The Plant Journal, 2002, **32**(4): 539-548.
- [41] Zhou H, Zeng M, Zhou X, *et al.* Assessment of heavy metal contamination and bioaccumulation in soybean plants from mining and smelting areas of southern Hunan province, China [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2013, **32**(12): 2719-2727.
- [42] 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 等. 设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 481-489.
- Dong J W, Gao P P, Sun H X, *et al.* Characteristics and health risk assessment of cadmium, lead, and arsenic accumulation in leafy vegetables planted in a greenhouse [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 481-489.
- [43] Zeng X B, Bai L Y, Gao X, *et al.* Agricultural planning by selecting food crops with low arsenic accumulation to efficiently reduce arsenic exposure to human health in an arsenic-polluted mining region [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **308**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127403.
- [44] 孟媛. 几种植类蔬菜对镉砷的富集效应及其耐性机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- Meng Y. Accumulation of cadmium and arsenic in different leafy vegetables and tolerant mechanism [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [45] Rahman M A, Hasegawa H. Aquatic arsenic: phytoremediation using floating macrophytes [J]. Chemosphere, 2011, **83**(5): 633-646.
- [46] Muchuweti M, Birkett J W, Chinyanga E, *et al.* Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, **112**(1): 41-48.
- [47] Zhou H, Yang W T, Zhou X, *et al.* Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, **13**(3), doi: 10.3390/ijerph13030289.
- [48] 李富荣, 李敏, 杜应琼, 等. 茄果类蔬菜对其产地土壤重金属的吸收富集与安全阈值研究[J]. 农产品质量与安全, 2018, (1): 52-58.
- Li F R, Li M, Du Y Q, *et al.* Residual behavior and dietary risk assessment of lambda-cyhalothrin in papaya [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2018, (1): 52-58.
- [49] 杨晓远, 王海娟, 王宏媛. 龙葵(*Solanum nigrum* L.)超富集镉的生理和分子机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2020, **15**(6): 72-81.
- Yang X Y, Wang H J, Wang H B. Advances in physiological and molecular mechanisms of cadmium hyperaccumulation by *Solanum nigrum* L. [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, **15**(6): 72-81.
- [50] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1671-1676.
- Chen J J, Yu W, Zu Y Q, *et al.* Variety difference of Cd accumulation and translocation in *Zea mays* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(10): 1671-1676.
- [51] Wang B B, Lin Z C, Li X, *et al.* Genome-wide selection and genetic improvement during modern maize breeding [J]. Nature Genetics, 2020, **52**(6): 565-571.
- [52] Cao X X, Bai L Y, Zeng X B, *et al.* Is maize suitable for substitution planting in arsenic-contaminated farmlands? [J]. Plant, Soil and Environment, 2019, **65**(9): 425-434.
- [53] 任超, 肖建辉, 李竞天, 等. 不同玉米品种Cd、Pb、Zn和As积累与转运特性[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4232-4252.
- Ren C, Xiao J H, Li J T, *et al.* Accumulation and transport characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in different maize varieties [J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4232-4252.

## CONTENTS

Analysis of Spatiotemporal Changes and Multi-scale Socio-economic Driving Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surroundings	YAN Li, SONG Xiao-han, LEI Yu, <i>et al.</i> (6207)
Impact of Change in Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> Air Quality Improvement in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	ZHANG Guo-bin, CAO Jing-yuan, QIU Xiong-hui, <i>et al.</i> (6219)
Characteristics, Sources, and Health Risk Changes of Heavy Metal Pollution Carried by PM <sub>2.5</sub> in Beijing and Evaluation of Policy Effectiveness	ZHANG Wei, LÜ Tong, LIU Jian-wei, <i>et al.</i> (6229)
Characteristics, Transport Routes, and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Suzhou	YANG Jie, ZHENG Jia-xing, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (6238)
Sensitivity Analysis of Ozone Generation in Guangdong Province Based on OMI Satellite and Ground Observation Data	LIANG Yan-ni, WANG Xing-hui, QI Shu-min, <i>et al.</i> (6248)
Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Luohe City During Summer	HUANG Jing-gang, XUE Shuang, NIU Da-wei, <i>et al.</i> (6255)
Method for Dynamic Updating of Source Emission Inventories Based on the Response Relationship Between Anthropogenic Source Emissions and Air Quality	SHE Jing, JIANG Li, YAO Gui-rong, <i>et al.</i> (6267)
Estimation of Near-surface NO <sub>2</sub> Concentration in Guangdong Province Based on Catboost Model	ZHANG Hong-fei, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (6276)
Atmospheric HONO Concentration Levels and Generation Mechanisms in Nanjing in Winter and Summer	ZHANG Yi, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i> (6286)
Seasonal Prediction Model for Airborne Pollen Content in Beijing Urban Area	ZHENG Zuo-fang, WANG Yao-ting, QI Wen, <i>et al.</i> (6294)
Research on the Synergistic Effect of Low-carbon Economy and High-quality Development Under the "Dual-carbon" Strategy: A Case Study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	LIU Zhi-hua, YUAN Qing-lu, LI Cui, <i>et al.</i> (6301)
Coupling Relationship and Interactive Response between Pollution Control and Carbon Emission Reduction and High-quality Economic Development in China's Urban Agglomerations	CHEN Xiao-long, DI Qian-bin, LIANG Chen-lu (6313)
Synergistic Emission Reduction of Carbon Dioxide and Atmospheric Pollutants Under Different Low-carbon Development Scenarios of the Power Industry in Jiangsu Province	XING Xiao-wen, HUANG Lin, HU Jian-lin (6326)
Carbon Emission for China's Iron and Steel Industry: Peak Scenarios and Neutralization Pathways	ZHANG Pan-lu, DU Qin-jun, ZHANG Kai-xuan, <i>et al.</i> (6336)
Carbon Emission Trajectory and Eco-environment Effects in the Aksu River Basin Based on Agriculture-town-ecological Space Changes	GAO Fan, CAO Yan, HAN Fang-hong, <i>et al.</i> (6344)
Analysis of Carbon Emission Reduction Potential and Discussion on the Green Development Path in Gansu-Qinghai Regions	LIU Li-na, GAO Feng, QU Jian-sheng, <i>et al.</i> (6354)
Risk Analysis of Regional Carbon Imbalance Based on Carbon Budget Pattern and Its Transformation Trend	Ji Jia-yu, XIE Zhi-xiang, ZHAO Rong-qin, <i>et al.</i> (6365)
Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Agricultural Carbon Offset Rate and Prediction of Carbon Offset Potential in the Yangtze River Economic Belt	TANG Jing, YI Lu, ZENG Qing-jun (6378)
Mechanism of Transportation Capacity Influence on Carbon Emission of Transportation Sector at China Provincial Scale from a Spatial Perspectiv	LI Yun-yan, ZHANG Xue-ying (6392)
Calculation and Evolution of Traffic Carbon Emission in a Mixed Traffic Environment	MA Shu-hong, DUAN Chao-jie, YANG Lei, <i>et al.</i> (6403)
Carbon Emission Influencing Factors and Abatement Cost Calculation of Households in Northern Counties: A Case Study of Fengning County, Hebei	MA Jin-long, CAO Meng-ying, GE Bei-qing (6412)
Quantifying the Carbon Reduction Difference Based on Households' Willingness to Transform Their Lifestyles from the Micro Perspective	PAN Yi, ZHU Jin-xia, YANG Li-xia, <i>et al.</i> (6422)
Spatial Relationship between Eco-environment Quality and Land Use Change in Guangdong Province-Hong Kong-Macao, China Based on Remote Sensing-based Ecological Index	CHEN Zhi-yong, WU Yao-wei, LIN Gang-te, <i>et al.</i> (6433)
Spatial Characteristics and Driving Factors of Net Primary Productivity of Vegetation in the Upper and Middle Yellow River Basin	LI Xue, YU Kun-xia, XU Guo-ce, <i>et al.</i> (6448)
Spatiotemporal Changes and Driving Force Analysis of Vegetation Cover in the Urban Belt Along the Yellow River in Ningxia	SHE Jie, SHE Lu, SHEN Ai-hong, <i>et al.</i> (6458)
Spatiotemporal Evolution Characteristics and Multi-scale Spatial Balance and Matching Analysis of Ecosystem Service Supply and Demand in Hubei Province	YU Hao-xuan, TANG Jiang-long, CHEN Rong-qing (6477)
Ecosystem Service Value Estimation and Ecological Security Pattern in Heilongjiang Province	CUI Song, DU Xian-lei, JIA Zhao-yang, <i>et al.</i> (6489)
Reversal Process and Driving Force Analysis for Arable Land Ecological Quality in Ningbo Using Time-series Remote Sensing Technology	HU Ming, SUN Chao, ZHAO Sai-shuai, <i>et al.</i> (6501)
Land use Change and Its Impact on Carbon Stock in the Tarim River Basin from 1990 to 2020	TIAN Zi-yi, GAO Fan, HE Bing, <i>et al.</i> (6514)
Characteristics of Spatial Distribution of Soil Organic Carbon and Its Seasonal Change of Different Vegetation Buffer Zones in Duliujian River	ZHANG Tian-yu, ZHANG Yan, JIA Qi, <i>et al.</i> (6527)
Impacts of Urbanization on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon Content in Urban Greenspaces: A Case Study of Nanchang City, Jiangxi Province	ZHANG Fo-yi, CAI Chang-yong-ming, ZHONG Jia-lin, <i>et al.</i> (6538)
Effects of Different Modified Corn Straw Biochar on Soil Hydraulic Properties in Hilly Loess Areas	CHANG Fang-ling, ZHANG Pei-zhen, YAO Zong-lu, <i>et al.</i> (6546)
Non-targeted Screening and Ecological Risk Assessment of Emerging Contaminants in Beijiag Drinking Water Source of the Pearl River Delta	WANG Zhi-yu, LI Qiu, ZHANG Yang-zhong, <i>et al.</i> (6555)
Integrated Three-steps Method for Identifying Priority Pollutants in Reclaimed Water	WANG Fei-peng, PENG Shuang, GUI Yuan, <i>et al.</i> (6565)
Optical Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Hypersaline Lakes in Cold and Arid Regions	WANG Shi-huan, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (6574)
Spatial-temporal Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in the Soils of a Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	FANG Jing-ren, MU Yue, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (6583)
Ecological Risk and Microbial Diversity Characteristics of Antibiotics in Farm and Surrounding Environmental Media	HAN Yu-rou, XU Wei-hong (6594)
Water Transformation Relationship in Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin Based on Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes	PEI Sen-sen, LUO Yan-yun, PAN Hao, <i>et al.</i> (6604)
Effect of Free Water Surface Constructed Wetland on the Occurrence Characteristics of Microplastics in Water in the Upper Reaches of the Erhai Lake	WANG Hua, LIANG Qi-bin, DAI Liu-yun, <i>et al.</i> (6616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in the Xiamen Houxi River Watershed	LIU Qi-ming, LIN Jin-mei, HUANG Yun-feng, <i>et al.</i> (6625)
Transformation Behavior and Environmental Effects of Microplastics in Soil-groundwater	ZHANG Ying, YANG Shuo, ZENG Yu-ping, <i>et al.</i> (6632)
Effects of Polyethylene Microplastics on the Growth and Quality of <i>Brassica campestris</i> L. in a Three-season Consecutive Cultivation	YANG Zhu-qing, YANG Min, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (6645)
Screening for the Priority Crops in Over-standard Planting Region Based on the Difference in Arsenic and Cadmium Accumulated in Crops	REN Yan-xin, GENG Zhi-xi, SONG Ning-ning, <i>et al.</i> (6654)
Effect and Mechanism of Water-soluble Chitosan Promoting Phytoremediation of Cd and/or Pb-contaminated Soils by <i>Sedum aizoon</i> L.	GUO Jun-mei, WEI Yue-xing, WANG Liu-yue, <i>et al.</i> (6665)
Passivation of Cadmium and Arsenic in Acidified Paddy Soil by Calcium Fertilizer with Biochar-ferromanganese Composites	SUN Qi, WU Ji-zi, WU Qiu-chan, <i>et al.</i> (6677)
Effects of Exogenous Substances on the Remediation of Soil Contaminated by Heavy Metals and Greenhouse Gas Emissions by <i>Pennisetum americanum</i> × <i>Pennisetum purpureum</i> and <i>Helianthus annuus</i>	HE Chuan-qian, GAO Bo, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i> (6689)
Research Progress and Prospect of Antibiotic Resistance Gene Contamination in Soil-vegetable System	MU Mei-rui, YANG Feng-xia, YANG Ming, <i>et al.</i> (6704)
Research Progress on the Efficiency and Mechanism of Iron-based Materials for Enhancing Anaerobic Digestion of Municipal Sludge	LÜ Long-yi, JIN Meng-ting, WEI Zi-yin, <i>et al.</i> (6713)
Multiproxy Comprehensive Analysis for Source Apportionment and Pollution of Heavy Metals in Urban Drinking-water Source Soils from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, GAO Zhan-dong, MA Li-bang, <i>et al.</i> (6723)
Selenium Occurrence Characteristics and Bioavailability of Soil in the Hinterland of the Hetao Plain	LI Yong-chun, LIU Jiu-fen, LI Xue-zhen, <i>et al.</i> (6734)
Effects of Enhanced-efficiency Nitrogen Fertilizers on Soil Quality, Microbial Metabolism, and Soil Ecosystem Multifunctionality of Spring Maize Under White Plastic Film Mulching	YANG Rui-zhe, YANG Ze, XU Ling-ying, <i>et al.</i> (6745)
Characterization of the Community Structure of Rhizosphere Soil and Root-endophytic Bacteria in Different Shrubs	HAO Jian-hua, ZHANG Xiu-juan, LI Jun-jian (6756)
Population Dynamics and Key Influencing Factors of <i>Microthrix parvicella</i> Caused Sludge Bulking	SU Gao-xin, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (6766)
Analysis of the Influencing Mechanism of Space-time Heterogeneity of Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in China	SU Meng, XIA Lin-lin (6775)