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

■ 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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷　第 4 期
2021 年 4 月 15 日

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_x)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, 杨土士, 王雪梅, 刘婵芳 (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, 刘水桥, 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, 胡鹏抟, 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, 淡默, 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估 …… 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, 石浚哲, 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, 林建伟, 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, 邹晔锋, 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 …… 王晓曈, 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, 黄娴, 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)
地质高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)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第4期 2021年4月
Vol.42, No.4 Apr., 2021

地质高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*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 选取2种地质高背景农田土壤(马岭和云表),盆栽条件下种植7种不同水稻品种(宁两优1号、Y两优1号、深两优、泰两优、粤晶丝苗、油占八号和黄华占),分析比较不同水稻对 Cd 的吸收累积特征,并探究可能的影响因素. 结果表明:①两种地质高背景土壤下种植的7种水稻稻米 Cd 含量均未超标(GB 2762-2017),其中深两优稻米 Cd 含量最低; ②7种水稻稻米 Cd 含量均表现出在马岭土壤种植的高于在云表土壤种植的; ③冗余和相关分析发现,稻米 Cd 累积主要是受水稻株高、根表面积、土壤全 Cd 含量、抽穗期土壤 EC 和 Eh 等因素影响. 两种土壤中影响稻米 Cd 累积的主要因素存在差异:云表土壤下稻米 Cd 含量与水稻根长呈极显著相关; 马岭土壤下稻米 Cd 含量与水稻地上部生物量呈极显著相关.

关键词:水稻品种; 镉累积; 筛选; 地质高背景农田土壤; 盆栽种植

中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)04-2016-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202009003

Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds

DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, WEI Zhi-min, HU Feng, LI Hui-xin, XU Li*

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The cadmium (Cd) accumulation characteristics of seven rice varieties (Ningliangyou 1, Y Liangyou 1, Shenliangyou, Tailiangyou, Yuejingsimiao, Youzhanbahao, and Huang Huazhan) were studied by pot-culture experiments in two paddy soils (Maling, Yunbiao) with different high geological backgrounds, and the possible impacting factors were explored. The results indicated that: ① The grain Cd contents of the seven rice varieties grown in the two soils did not exceed the national food safety standard (GB 2762-2017), and the grain Cd content of Shengliangyou was the lowest; ② The grain Cd content of the seven rice varieties planted in the soil of Maling was higher than those of Yunbiao; ③ The redundancy analysis revealed that the accumulation of Cd in grains was influenced by the plant height, surface area of root, total cadmium in the soil, and EC and Eh of the soil during the heading stage. The correlation analysis indicated that the leading impacting factor of the grain Cd accumulation varied. In the Maling soil, the grain Cd content was primarily related to the rice root length, while it was related to the aboveground rice biomass in the Yunbiao soil.

Key words: rice variety; cadmium accumulation; screening; farmland soil with high geological background; potted planting

目前,重金属污染已经成为农业生产中面临的重要问题. 生态环境部门对30万 hm^2 基本农田保护区的土壤进行监控,发现农田土壤重金属超标率为12.1%[1]. 土壤重金属来源主要为人为来源与自然来源[2],前者为工业和农业活动造成,后者为成土母质本身重金属含量高而导致,也称地质高背景土壤[3],主要分布在我国的西南和中南等岩溶区[4]. 人为源的重金属有效性较高,易被作物吸收富集,而自然源的重金属多为成土母质本身所具有,重金属含量随不同地区土壤的富集类型不同存在差异[5],受成土母质和成土过程等成土因素影响,重金属生物有效性不明确. 目前有关农田重金属的研究多集中在人为源污染特征和风险,而关于地质高背景重金属污染报道较少.

镉(Cd)是人体的非必需元素[6],也是生物毒性最强的重金属元素之一,容易被植物吸收转移,且不能被降解,广泛存在于生态环境中[7]. 水稻作为我国重要的粮食作物[8],其对重金属具有很强的吸收性. Cd 污染不仅会导致粮食产量和质量下降,还会通过食物链对人类健康造成危害[9],早在20世纪,日本发生的"痛痛病"就是由于当地居民食用含 Cd 超标的大米所致[10]. 所以在应对农田土壤重金属污染时,既需要保证粮食产量,也需要保持粮食质量(重金属不超标),使得选育低重金属累积的水稻品种成为热点.

污染土壤上水稻稻米 Cd 累积的途径主要是由水稻根系吸收,经过木质部及韧皮部迁移,最终到达稻米籽粒[11]. 影响该过程的因素主要包括内在和外在两个方面:内在因素包括水稻品种和与 Cd 吸收有关基因的表达情况[12],薛涛[13]在湖南采矿区 Cd

收稿日期: 2020-09-01; **修订日期**: 2020-09-21
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800305)
作者简介: 代子雯(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染修复,E-mail:2018103089@njau.edu.cn
* 通信作者,E-mail:xuli602@njau.edu.cn

污染的农田上种植 18 种水稻品种，发现稻米 Cd 的累积最高为卓 201s/R2115 品种，稻米 Cd 含量达 0.450 mg·kg^{-1}，最低为长两优品种，稻米 Cd 含量为 0.085 mg·kg^{-1}，相差 5.3 倍；Takahashi 等[14]的研究得出 OsHMA2 的表达可以降低稻米 Cd 的浓度；Uraguchi 等[15]的研究发现控制 Cd 从节点向稻米转移的转运蛋白 OsLCT1 基因过量表达会提高稻米 Cd 积累. 外在因素包括土壤理化性质和农艺管理措施等，王一志等[16]和董霞等[17]比较不同土壤条件下水稻对外源 Cd 的累积特征，发现土壤 pH、有效态 Cd 含量和土壤质地等均对稻米 Cd 含量存在影响；Zhang 等[18]和李磊明[19]的研究发现干湿交替和施用硅肥等方法在保证水稻产量的同时，还可以显著减低稻米 Cd 的累积.

虽然前人对水稻的 Cd 累积特征及影响因素做了很多工作，但主要是针对人为来源重金属污染，而对于地质背景土壤下稻米 Cd 累积的影响因素研究较少. 对地质高背景土壤下水稻的研究多集中在大田采样的数据结果[3,20,21]，进行多件土壤-水稻 Cd 含量的模型预测，发现地质高背景下，土壤有效态 Cd、pH 值和有机质等也是稻米 Cd 累积的主要影响因子，但大田采样分析研究存在采集的水稻品种信息不全，不同水稻稻米 Cd 累积差异无法表现，以及农户种植方式差异导致土壤性状存在多样性的局限.

因此，本试验设置室内盆栽培养，选择 pH 值、Cd 含量特征不同的 2 种典型地质高背景土壤，选择 7 种水稻品种，比较研究不同土壤条件下，不同水稻稻米 Cd 的累积特征，并分析水稻特征和地质高背景土壤特征对稻米 Cd 累积的影响，以期为自然地质高背景污染土壤的防治以及农产品安全种植提供理论基础与科学依据.

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试土壤来自于广西省南宁市横县：云表镇（东经 109°17′37″，北纬 22°55′10″）；马岭镇（东经 109°18′55″，北纬 22°47′02″）. 调查资料横县为典型的喀斯特岩溶区，云表镇出露地层为第四纪桂平组，岩性为主要碎屑岩；马岭镇地层为中石炭纪大埔组，岩性以碳酸盐为主. 采样点多年种植水稻，附近无发达工业，重金属主要来源为成土母质. 本试验所采用的水稻品种来源于广西壮族自治区农业科学院及市场购买，包括广西本地种植品种和通用水稻品种，其中杂交稻品种包括：宁两优一号（NL）、Y 两优一号（YL）、深两优（S）和泰两优（T），常规稻水稻品种包括：粤晶丝苗（YJ）、油占八号（YZ）和黄华占（HH）. 采用育秧盘育秧，待水稻 3 叶期后，选择长势一致的秧苗进行移栽.

1.2　盆栽试验设计

盆栽试验于 2019 年 3 ~ 8 月在南京农业大学牌楼温室试验基地进行，设置 2 个土壤和 7 个水稻品种，每个处理 4 个重复，共计 56 盆. 土壤风干后（3.5 kg）过 10 目筛，转移至直径 25 cm、高 25 cm 的塑料桶中，加自来水使得土壤含水量维持在 70% 最大田间持水量平衡 1 周. 移栽前 1 d 施入生长所需的基肥：尿素 0.602 kg·盆$^{-1}$、过磷酸钙 1.75 kg·盆$^{-1}$、氯化钾 0.133 kg·盆$^{-1}$. 试验所用化学试剂均为优级纯，水稻全生育期进行常规淹水水分管理，本试验中水稻于 2019 年 3 月 17 日移栽，每盆 2 穴，每穴 1 苗.

1.3　样品的采集与保存

水稻样品：水稻成熟时，用不锈钢剪刀对水稻进行收割，盆中 2 株水稻分别采集，记录水稻的有效穗数、株高，然后将每盆水稻样品全部连根拔起，用超纯水反复冲洗，分为根、茎、叶和穗装入牛皮纸制的信封中，标记后在 105℃ 杀青 30 min 后在 75℃ 烘干至恒重，然后将穗上的稻米脱粒脱壳. 根系、茎、叶样品用不锈钢植物粉碎机粉碎，稻米用玛瑙研钵研磨成粉末状，过 100 目的尼龙筛后保存.

土壤样品：采集水稻根系土壤样品 1 kg，放在干净的牛皮纸上清除根系等杂物后放在阴凉处自然风干. 将风干后的土壤在玛瑙研钵上研磨过 20 目和 100 目的尼龙筛后自封袋保存.

1.4　测定方法

稻米 Cd 含量采用 $HNO_3 + H_2O_2$（优级纯）微波消解（体积比 4∶1），土壤全量重金属采用盐酸-硝酸-高氯酸-氢氟酸消解，土壤有效态 Cd 采用 0.1 mol·L^{-1} $CaCl_2$ 浸提，后用电感耦合等离子体光谱仪测定 Cd 含量. 分析过程中设置 3 组平行，植物以 GBW 07603（GSV-2）为标准物质，土壤使用 GBW 07404（GSS-4）控制测定质量，样品回收率均在 95% 以上.

土壤抽穗期和灌浆期的 pH、Eh 和 EC 采用土壤原位测定，其中 pH 采用型号为 pH30P-L 的加长刺入型 pH 测试笔测定，氧化还原电位采用型号 ORP30P 的刺入型 ORP 测试笔测定，电导率采用型号为 CON30 的防水型笔试电导率计测定.

1.5　数据处理

利用 Microsoft office Excel 2019 对数据进行整理和作图，SPSS 20.0 进行方差分析与相关分析，LSD 法进行显著性检验（$P < 0.05$），Canoco 5.0 对

数据进行冗余分析并作图.

2 结果与分析

2.1 水稻种植前土壤基本理化性质及 Cd 含量

由表 1 可见,云表土壤偏酸性,而马岭土壤偏碱性;马岭土壤有机质含量高于云表土壤;两种土壤 Cd 含量均高于中国土壤 Cd 环境背景值(0.07 $mg\cdot kg^{-1}$),马岭土壤总 Cd 含量远大于云表土壤,但有效态 Cd 低于云表土壤;除速效钾和有效镉含量外,马岭土壤的总氮、总磷、电导率均较云表土壤高.

表 1 供试土壤理化性质[1)]

Table 1 Physicochemical properties of the experimental soil

地点	pH	SOM/$g\cdot kg^{-1}$	TN/$g\cdot kg^{-1}$	TP/$g\cdot kg^{-1}$	AK/$g\cdot kg^{-1}$	EC/$\mu S\cdot cm^{-1}$	TCd/$mg\cdot kg^{-1}$	ACd/$mg\cdot kg^{-1}$
云表	6.47 ± 0.03	27.30 ± 4.68	1.67 ± 0.02	1.00 ± 0.23	142.58 ± 3.61	798.00 ± 5.72	0.16 ± 0.01	0.04 ± 0.00
马岭	7.52 ± 0.09	66.92 ± 2.76	3.47 ± 0.04	1.41 ± 0.05	118.02 ± 2.23	1 077.33 ± 14.52	2.66 ± 0.03	0.02 ± 0.00

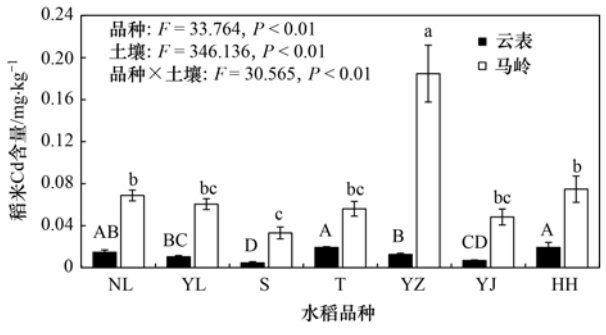
1)表中数据为 4 次重复的平均值 ± 标准误; SOM、TN、TP、AK、EC、TCd 和 ACd 分别代表土壤有机质、全氮、全磷、速效钾、电导率、总镉和有效镉含量,下同

2.2 不同品种水稻稻米的 Cd 累积情况

从图 1 中可以看出,云表土壤中种植的不同水稻稻米 Cd 含量在 0.01 ~ 0.02 $mg\cdot kg^{-1}$之间,马岭土壤中种植的不同稻米 Cd 含量在 0.03 ~ 0.19 $mg\cdot kg^{-1}$之间. 在云表土壤种植的 7 种水稻稻米 Cd 含量均低于在马岭土壤种植的.

两种土壤条件下,S 品种的水稻稻米 Cd 累积量均为最低,而 Cd 含量最高的品种有所不同,云表土壤中 T、HH 和 NL 品种水稻 Cd 积累最高,马岭土壤中 YZ 品种水稻 Cd 积累最高.

土壤和品种对稻米 Cd 累积的双因素方差分析结果可见,土壤性质与水稻品种对稻米 Cd 含量累积均有显著影响,且土壤性质和水稻品种之间存在交互作用.



同一大小写字母表示同一土壤不同水稻之间的显著差异($P<0.05$)

图 1 供试水稻稻米 Cd 含量

Fig. 1 Content of Cd in brown rice of different varieties

2.3 不同土壤下水稻的生长情况

农艺性状是评价水稻生长情况的重要指标[22],由表 2 可见不同土壤种植的水稻品种间存在差异. 总体来看,同一品种,在马岭土壤种植的株高和有效穗数高于在云表土壤种植的,而水稻地上、地下部生物量和根系指标(根长、根表面积、根体积和根平均直径,下同) 均低于云表土壤上种植的(YJ 品种除外).

云表土壤种植的 7 种水稻品种中,株高最高的品种为 NL,最低为 S;干穗重最高为 T,最低为 YJ;有效穗数最高为 HH,最低为 NL 和 YJ;地上部生物量最高为 NL,最低为 YZ;地下部最高的品种为 S,最低为 YJ;S 品种的根长、根表面积和根体积显著高于其余品种,YZ 品种的根长和根表面积最低,NL 的根体积最低;根平均直径最高为 T,最低为 YZ.

马岭土壤种植的 7 种水稻品种中,株高最高的品种为 NL,最低为 YZ;干穗重最高为 YJ,最低为 YZ;有效穗数最高为 T,最低为 NL、S 和 YZ;地上、下部生物量最高的品种为 YJ,最低为 YZ;YJ 品种的根长、根表面积和根体积明显最高,YZ 品种根长和根体积最低,T 品种的根表面积最低;根平均直径最高为 S,最低为 YZ.

2.4 不同土壤下水稻生长过程中土壤性质的变化

抽穗期与灌浆期为水稻重金属累积的关键时期,特别灌浆期是稻米质量的累积时期,也是根部重金属向上转移能力提高的时期[23]. 研究土壤抽穗期和灌浆期土壤理化性质的变化可有效地分析稻米 Cd 累积特征,本试验中抽穗期与灌浆期土壤的理化性质见表 3. 同一水稻品种在抽穗期和灌浆期均表现出马岭土壤 Eh、EC 和 pH 值高于云表土壤,YJ 品种土壤的 EC 值除外.

不同水稻品种对土壤的理化性质影响较大. 云表土壤上,在水稻抽穗期, Eh、EC 值最高为种植 YL 品种的土壤,最低为 YZ;土壤 pH 值最高为种植 YJ 和 HH 品种的土壤,最低为 YL. 水稻灌浆期,Eh 最高为种植 NL 品种的土壤,最低为 T;EC 最高为种植 S 品种的土壤,最低为 HH;pH 值最高为种植 NL 品种的土壤,最低为 HH.

马岭土壤上,水稻抽穗期和灌浆期 Eh 值最高均为种植 YL 品种的土壤,最低为 YJ;但是不同时期土壤 EC 和 pH 值变化趋势并不相同,水稻抽穗期,EC值最高为种植HH品种的土壤,最低为YJ,

表 2　两种土壤下不同水稻品种的农艺性状[1)]

Table 2　Agronomic traits of different rice cultivars

土壤	水稻品种	株高 /cm	干穗重 /g·pot^{-1}	有效穗数 /个	地上部生物量 /g·pot^{-1}	地下部生物量 /g·pot^{-1}	根长 /cm	根表面积 /cm^2	根体积 /cm^3	根平均直径/cm
云表	NL	115.00±4.36a	10.22±1.16d	9.00±0.00d	154.5±24.67a	65.27±2.78c	2 345.60±118.37bc	561.97±31.91c	10.78±1.22c	0.86±0.06d
	YL	101.83±1.61cd	15.53±2.09c	12.00±0.00cd	119.14±11.12a	80.83±14.21b	2 227.53±149.26bc	596.79±48.16c	12.72±0.93bc	0.85±0.01d
	S	97.53±3.45d	10.79±2.18d	15.00±0.00ab	130.51±19.73a	96.19±3.48a	3 371.15±245.76a	894.48±57.56a	21.01±0.61a	0.96±0.01b
	T	101.03±1.53cd	20.83±2.13a	13.00±4.58bc	146.18±47.09a	83.81±3.01ab	2 273.67±110.59bc	770.42±20.39b	20.80±0.56a	1.13±0.04a
	YZ	106.20±5.15bc	19.19±1.68ab	15.00±0.00ab	47.14±10.86b	54.38±6.71cd	2 140.53±221.98c	556.96±42.75c	11.57±0.84bc	0.82±0.05d
	YJ	109.83±1.89ab	4.94±0.68e	9.00±0.00d	110.22±4.94a	45.22±8.31d	2 592.50±123.38b	649.43±19.66c	13.64±0.65bc	0.87±0.01cd
	HH	99.83±1.57d	16.16±2.72bc	17.00±1.73a	151.37±43.06a	81.90±10.87ab	2 296.06±150.59bc	608.65±74.41c	14.39±0.31b	0.95±0.05bc
马岭	NL	123.97±1.33a	12.12±0.75ab	10.00±1.73b	84.91±10.32bc	28.77±8.69bc	1 574.96±147.66cd	358.32±5.64c	6.53±0.38c	0.73±0.06bcd
	YL	102.03±4.28b	14.24±2.57ab	13.00±1.73ab	104.70±10.55ab	57.09±36.30ab	1 189.45±196.23cd	621.50±85.95b	12.54±2.26b	0.98±0.25b
	S	101.70±3.67b	14.07±2.85ab	10.00±1.73b	81.73±11.16c	68.11±22.82a	1 790.94±383.21bc	708.66±108.42b	21.37±2.73a	1.24±0.06a
	T	102.63±1.36b	11.75±4.46ab	19.00±4.58a	80.48±23.43c	21.17±1.57c	1 295.52±251.25cd	282.49±52.32cd	4.91±0.57c	0.7±0.04cd
	YZ	85.50±5.77c	7.86±0.99b	10.00±1.73b	39.19±7.88d	11.06±6.34c	1 017.42±389.77d	170.77±58.21d	2.33±0.61c	0.55±0.07d
	YJ	103.93±0.70b	20.89±3.31a	14.00±3.46ab	108.24±7.97a	79.57±13.58a	3 794.66±32.57a	1 034.47±78.64a	23.68±1.75a	0.91±0.05bc
	HH	97.67±5.86b	16.74±14.48ab	16.00±7.55ab	70.06±3.23c	63.33±13.41a	2 203.84±279.47b	629.34±107.84b	12.77±0.99b	0.91±0.06bc

1)不同小写字母表示同一土壤下各指标之间不同品种的差异，($P<0.05$)，下同

表 3　水稻不同时期土壤 Eh、EC 与 pH 值

Table 3　Soil Eh, EC, and pH during different periods of rice growth

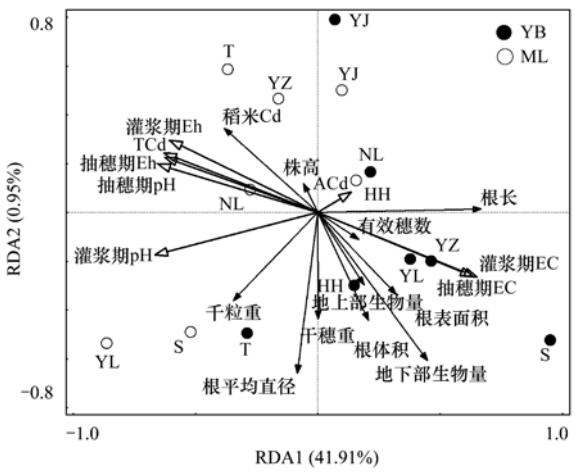
土壤	水稻品种	Eh(抽穗期) /mV	Eh(灌浆期) /mV	EC(抽穗期) /μS·cm^{-1}	EC(灌浆期) /μS·cm^{-1}	pH (抽穗期)	pH (灌浆期)
云表	NL	−156.00±10.23ab	−176.33±15.97a	668.33±34.2b	550.33±26.34a	6.38±0.00a	6.97±0.05a
	YL	−133.67±3.3a	−216.67±4.64c	803.00±48.64a	517.00±15.51ab	6.20±0.03b	6.95±0.01a
	S	−175.33±17.52b	−202.67±2.05bc	792.00±22.23a	587.33±17.56a	6.29±0.06ab	6.95±0.02a
	T	−156.33±10.87ab	−239.67±3.09d	676.67±32.29b	532.33±59.23a	6.35±0.05ab	6.89±0.04ab
	YZ	−176.00±4.55b	−236.67±4.99d	530.00±47.52c	436.33±13.67c	6.28±0.07ab	6.81±0.05a
	YJ	−172.33±11.15b	−195.67±1.7b	696.00±3.74b	460.67±3.86bc	6.40±0.06a	6.90±0.04ab
	HH	−151.67±27.76ab	−232.00±1.41d	703.33±13.1b	423.67±40.94c	6.40±0.02a	6.80±0.04ab
马岭	NL	−112.67±8.73b	−109.67±10.34b	1 006.67±139.51bc	621.00±128.29ab	7.08±0.02b	7.10±0.04c
	YL	−67.33±6.24a	−82.00±2.83a	788.67±192.77cd	637.33±96.31ab	7.21±0.04a	7.19±0.03ab
	S	−107.00±4.97b	−105.00±6.38b	1 199.33±136.54b	691.67±63.81ab	6.94±0.02c	7.25±0.01a
	T	−101.00±4.08b	−107.67±4.50b	711.67±59.45cd	551.67±3.30bc	6.72±0.03d	7.16±0.01bc
	YZ	−78.67±3.68a	−128.33±6.80c	1 228.67±47.13b	752.00±76.77a	7.19±0.01a	6.91±0.01d
	YJ	−132.67±10.34c	−129.33±1.70c	497.00±166.19d	419.33±48.75c	7.00±0.06bc	6.90±0.02d
	HH	−108.67±15.54b	−109.67±5.73b	1 603.33±144.95a	574.00±10.61bc	7.00±0.00bc	6.90±0.03d

pH 值最高为种植 YL 品种的土壤，最低为 T；水稻灌浆期，EC 值最高为种植 YZ 品种的土壤，最低为 YJ，pH 值最高为种植 S 品种的土壤，最低为 YJ 和 HH.

2.5　影响稻米 Cd 含量累积的相关因子

利用冗余分析(RDA)对水稻农艺性状、土壤指标与稻米 Cd 累积数据进行分析，见图 2. 发现 RDA1 和 RDA2 解释量分别为 41.91% 和 0.95%，受到水稻农艺性状和土壤化学性质的影响，云表、马岭水稻显著分离.

稻米 Cd 含量受到抽穗期土壤 pH、EC 和 Eh、灌浆期土壤 Eh 和 EC、土壤全 Cd、株高、有效穗数、地上及下部生物量、根体积和根表面积较强的影响，而水稻千粒重、灌浆期 pH 和土壤有效态 Cd 对其无显著影响.



YB、ML、TCd 和 ACd 分别表示云表、马岭、土壤全 Cd 和有效态 Cd

图 2　稻米 Cd 累积因素冗余分析(RDA)

Fig. 2　Redundancy analysis factors of Cd accumulation in rice(RDA)

将稻米 Cd 含量与水稻农艺性状和土壤指标进行相关性分析(表 4),得到云表土壤种植的水稻稻米 Cd 含量与水稻干穗重呈极显著正相关,与水稻根长呈极显著负相关关系,与根平均直径和抽穗期土壤 Eh 值存在显著正相关关系,与土壤全 Cd 呈显著负相关; 马岭土壤种植的水稻稻米 Cd 含量与水稻农艺性状均呈负相关关系,其中与地上部生物量、根体积、根表面积和根平均直径呈极显著负相关,与株高、干穗重和地下部生物量呈显著负相关,与抽穗期的 Eh 和 pH 值、灌浆期 EC 存在显著正相关关系,与灌浆期 pH 值存在极显著负相关关系. 两种土壤的有效态 Cd 含量与稻米 Cd 含量之间的相关性均不明显.

表 4 水稻稻米 Cd 含量与水稻农艺性状、土壤理化性质之间相关系数[1)]

Table 4 Correlation coefficients of heavy metal concentrations in rice grains with rice agronomic traits and various soil properties

指标	株高	干穗重	有效穗数	地上部生物量	地下部生物量	根体积	根长	根表面积
云表	0.016	0.598**	0.215	0.337	0.165	−0.021	−0.566**	−0.269
马岭	−0.521*	−0.445*	−0.202	−0.686**	−0.533*	−0.619**	−0.362	−0.587**

指标	根平均直径	抽穗期 Eh	灌浆期 Eh	抽穗期 EC	灌浆期 EC	抽穗期 pH	灌浆期 pH	$CaCl_2$-Cd	土壤全 Cd
云表	0.523*	0.471*	−0.421	−0.282	−0.335	0.254	−0.024	0.405	−0.893*
马岭	−0.643**	0.434*	−0.384	0.323	0.519*	0.481*	−0.585**	0.135	0.087

1) * 表示在 0.05 水平(双侧检验)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧检验)上显著相关

3 讨论

相比土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018),水田土壤 pH 值小于 6.5 时,Cd 含量的风险筛选值为 0.40 mg·kg^{-1}、大于 7.5 时风险筛选值为 0.80 mg·kg^{-1},管制值为 4.00 mg·kg^{-1},供试云表土壤 Cd 含量为 0.16 mg·kg^{-1}风险较低,马岭土壤 Cd 含量为 2.66 mg·kg^{-1},存在一定风险. 两种土壤 Cd 含量出现差异可能与地层形成时间有关,马岭土壤地层形成时间较云表土壤早,成土母质受到的风化淋溶程度更深,次生富集也就越大,所以其 Cd 的富集含量越高[5]. 虽然马岭土壤全 Cd 含量远高于云表土壤,但马岭土壤有效态 Cd 含量低于云表土壤,原因可能是马岭土壤中存在大量的铁锰结合颗粒,铁锰结合对重金属有较强的吸附作用[24]; 此外,云表土壤偏酸性,酸性土壤的氢离子通过吸附-解析作用释放土壤有效态 Cd[25]. 云表土壤 $CaCl_2$-Cd 含量占全 Cd 含量的 26.20%,马岭土壤 $CaCl_2$-Cd 含量占全 Cd 含量的 0.51%,相比外源添加或人为污染的土壤,Cd 在这两种地质高背景土壤上表现的生物有效性较低[3]. 同样马宏宏等[21]的研究通过采集广西碳酸盐区稻米和根系土样品 68 套,得出地质高背景区土壤重金属相比人为污染土壤重金属表现出全量高、有效态含量低的特点,刘旭等[26]的研究也发现横县 Cd 含量较高,但 Cd 的生物有效性系数较低,平均为 25.90%,而人为源的有效态 Cd 占总 Cd 的 1/3 左右[27],与本研究的结果一致.

本研究中,两种土壤种植的稻米 Cd 含量均未超过国家粮食安全标准中规定的稻米 Cd 限定标准值 0.20 mg·kg^{-1}(GB 2762-2017),特别是马岭土壤,即使其土壤全 Cd 含量达到 2.66 mg·kg^{-1},远超国家土壤污染风险值标准,但马岭土壤种植的 7 种稻米 Cd 均未超标,这与该地区土壤 pH 为碱性,且土壤富含铁锰结合颗粒,导致土壤中 Cd 的生物有效性较低有关[3]. 同一品种在云表土壤种植的稻米 Cd 含量均低于马岭土壤种植,而从土壤有效态 Cd 含量看,马岭土壤有效态 Cd 含量低于云表,相关性分析结果表明,云表稻米 Cd 含量与水稻根长负相关,云表土壤水稻植株长势较好,根系发达,Cd 更容易在根部积累. 而马岭土壤下稻米 Cd 含量与水稻生物量呈极显著负相关,生物量的减少,降低了对 Cd 的截留,可能导致水稻籽粒中 Cd 的积累. 冗余分析结果也显示稻米 Cd 含量与土壤总 Cd 含量存在正相关关系,马岭土壤总 Cd 含量远高于云表土壤,这与王梦梦等[28]的研究结果一致.

云表土壤上各品种稻米 Cd 含量依次为: T > HH > NL > YZ > YL > YJ > S; 马岭土壤上各品种稻米 Cd 含量依次为: YZ > HH > NL > YL > T > YJ > S. S 品种在两种土壤种植条件下均表现出稻米 Cd 含量最低,杜瑞英等[29]研究广东粤北矿区人为源污染为主的农田稻米 Cd 积累情况,使用与本试验相同的 S 水稻品系,得到 S 稻米 Cd 积累最高,与本研究的结果相反,这可能与其研究是基于水稻样品的采集分析,并未对土壤 Cd 含量及土壤性质进行测定,从而未能构建土壤-水稻积累规律有关,这也侧面证实土壤性质及重金属来源会影响水稻稻米 Cd 的累积特征. YZ 在两种土壤上稻米 Cd 积累表现出明显差异,YZ 品种在马岭土壤中稻米 Cd 积累最高,但在云表土壤中稻米 Cd 积累居中. 相关性表明马岭土壤中稻米 Cd 含量与株高显著负相关,YZ 品种在马岭土壤种植时,株高显著低于其他品种,这与易亚

科等[30]的发现一致，即土壤 pH 值在 4.00～8.00 的范围内，稻米 Cd 含量与株高存在极显著负相关性. 而在云表土壤中，稻米 Cd 含量与抽穗期 Eh 显著正相关，YZ 品种在云表土壤种植时，抽穗期 Eh 相对较低，抽穗期的低 Eh 会影响水稻稻米对 Cd 的积累[31]. 方差分析也表明水稻品种、土壤性质对稻米 Cd 含量均存在显著影响，这与杜瑞英等[29]和柯庆明等[32]的研究结果一致.

云表土壤种植的所有水稻的生物量和根系生长情况均优于马岭土壤种植的相应品种水稻，但云表土壤的有机质等养分含量低于马岭土壤，说明马岭土壤的高 Cd 含量会抑制水稻的生长. 研究表明 Cd 浓度大于 0.600 $mg \cdot kg^{-1}$ 会对水稻生长产生抑制作用[33]. 两种土壤下，S 品种的根系发育最佳，但稻米中的 Cd 积累均为最低，冗余和相关分析都表明根长、根体积和根表面积与稻米 Cd 含量呈负相关，这与根系是 Cd 累积的重要部位[34]，并且不影响地上部对地下部的转运比例有关[35].

水稻培养前后土壤 Eh、EC 值下降，这与长期淹水土壤含氧量减少有关[31]. 不同时期土壤 pH 不同，相比抽穗期 pH，云表灌浆期土壤 pH 升高，马岭土壤灌浆期 pH 降低，这与水稻培养过程会使土壤 pH 趋于中性有关[36]. 水稻品种会影响土壤的 Eh 和 EC，种植 YL 水稻会显著提高抽穗期马岭和云表土壤的 Eh 值，这与 YL 水稻在两种土壤条件下根系发育较好，根系泌氧能力较高有关[37]. 种植 S 品种显著提高马岭和云表土壤 EC 值，这与 S 水稻具有最高的根系生物量，根系分泌物增加有关[38].

相关性分析表明，云表土壤下稻米 Cd 含量与根长呈极显著负相关；而马岭土壤下稻米 Cd 含量与水稻生物量呈极显著负相关. 土壤 Cd 含量会影响水稻根长与水稻生物量[33]，在 Cd 含量偏低的云表土壤，水稻根系生长发育好[34]，根系的发育可以有效促进对土壤 Cd 的吸收，但并不改变地下部向地上部的转移[35]，同时根长的增加也为 Cd 在根系的累积提供更多的位点[39]，从而降低 Cd 向籽粒的运输和积累，表现出稻米 Cd 含量与根长的极显著负相关. 在 Cd 含量高的马岭土壤上，水稻地上部长势较弱，有研究表明水稻茎叶生物量是 Cd 截留的重要部位，水稻在吸收积累 Cd 时会优先分配到叶片中去，从而减少可食部分 Cd 的积累[40]，而马岭土壤由于土壤 Cd 含量高，水稻地上部长势弱，因此降低了对 Cd 的截留，导致水稻籽粒中 Cd 的积累多，表现出稻米 Cd 含量与水稻生物量极显著负相关.

4　结论

7 个水稻品种在 2 种地质高背景下种植稻米 Cd 含量均未超标. 马岭土壤种植的水稻稻米 Cd 含量累积均较云表土壤高. 水稻品种深两优在 2 种土壤下稻米 Cd 含量均为最低. 方差分析表明水稻品种和土壤性质对稻米 Cd 累积均存在显著影响. 冗余分析得到稻米 Cd 含量与抽穗期土壤 pH、EC 和 Eh、灌浆期土壤 Eh 和 EC、土壤全 Cd、株高、地上及下部生物量、根体积和根表面积具有较强的影响. 进一步相关性分析显示云表稻米 Cd 含量与根长存在极显著相关关系，马岭土壤稻米 Cd 含量与地上部生物量存在极显著相关关系.

参考文献：

[1] 王坤. 土壤重金属污染现状及修复技巧探讨[J]. 世界有色金属, 2019, (23): 276-277.
Wang K. Heavy metal pollution in farmland soil and remediation techniques[J]. World Nonferrous Metals, 2019, (23): 276-277.

[2] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al*. Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 140-147.

[3] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(1): 18-26.
Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, *et al*. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(1): 18-26.

[4] Kong X Y, Liu T, Yu Z H, *et al*. Heavy metal bioaccumulation in rice from a high geological background area in Guizhou Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(10): 2281.

[5] 孙斌, 魏志敏, 张力浩, 等. 地质高背景土壤重金属赋存特征及微生物群落结构差异[J]. 土壤学报, 2020, doi: 10.11766/trxb202001030003.
Sun B, Wei Z M, Zhang L H, *et al*. Distribution of heavy metals and microbial community structure in soils high in geological background value[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, doi: 10.11766/trxb202001030003.

[6] 吕运涛, 陈万明, 郝慧娟. 轻度污染农田土壤对稻米重金属污染的风险评价[J]. 农产品质量与安全, 2020, (3): 55-62.
Lü Y T, Chen W M, Hao H J. Risk assessment of heavy metal pollution in rice by slightly polluted farmland soil[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2020, (3): 55-62.

[7] 陈爱葵, 王茂意, 刘晓海, 等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. 生态科学, 2013, **32**(4): 514-522.
Chen A K, Wang M Y, Liu X H, *et al*. Research progress on the effect of cadmium on rice and its absorption and tolerance mechanisms[J]. Ecological Science, 2013, **32**(4): 514-522.

[8] 龚伟群, 潘根兴. 中国水稻生产中 cd 吸收及其健康风险的有关问题[J]. 科技导报, 2006, **24**(5): 43-48.
Gong W Q, Pan G X. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China[J]. Science & Technology Review, 2006, **24**(5): 43-48.

[9] 王素娟, 李正文, 廖秋佳, 等. 广西矿区土壤镉、铅污染状况研究[J]. 生态科学, 2008, **27**(1): 50-54.
Wang S J, Li Z W, Liao Q J, *et al*. A study on contamination

status of the Cd and Pb in the mines soil of Guangxi[J]. Ecological Science, 2008, **27**(1): 50-54.

[10] 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.

[11] Li H, Luo N, Yan W, *et al*. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 622-630.

[12] 周志波, 易亚科, 陈光辉. 水稻 cd 吸收、转运机理研究进展[J]. 作物杂志, 2017, (1): 14-19.
Zhou Z B, Yi Y K, Chen G H. Advances in Cd uptake and transport in rice[J]. Crops, 2017, (1): 14-19.

[13] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1818-1826.
Xue T, Liao X Y, Wang L Q, *et al*. Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1818-1826.

[14] Takahashi R, Ishimaru Y, Shimo H, *et al*. The OsHMA2 transporter is involved in root-to-shoot translocation of Zn and Cd in rice[J]. Plant, Cell & Environment, 2012, **35**(11): 1948-1957.

[15] Uraguchi S, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. Rice, 2012, **5**(1), doi: 10.1186/1939-8433-5-5.

[16] 王一志, 曹雪莹, 谭长银, 等. 不同土壤 pH 对红壤稻田镉形态及水稻镉积累的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, **40**(1): 10-16.
Wang Y Z, Cao X Y, Tan C Y, *et al*. Effects of different soil pH on cadmium fractions and cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Natural Science of Human Normal University, 2017, **40**(1): 10-16.

[17] 董霞, 李虹呈, 陈齐, 等. 不同母质土壤—水稻系统 Cd 吸收累积特征及差异[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(4): 342-348.
Dong X, Li H C, Chen Q, *et al*. Characteristics and differences of cadmium absorption and accumulation in different parent soil-rice systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(4): 342-348.

[18] Zhang Q, Chen H F, Huang D Y, *et al* Water managements limit heavy metal accumulation in rice: dual effects of iron-plaque formation and microbial communities[J]. Science of the Total Environment, 2019, **687**: 790-799.

[19] 李磊明. 农艺调控措施对水稻吸收累积镉砷的抑制效果[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
Li L M. Effects of agronomic regulation on inhibition of rice absorption and accumulation of Cd and As[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.

[20] 宋波, 王佛鹏, 周浪, 等. 广西镉地球化学异常区水稻籽粒镉含量预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(12): 2672-2680.
Song B, Wang F P, Zhou L *et al*. Prediction model for cadmium concentrations in rice grain under the geochemical background of a cadmium anomaly area in Guangxi[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(12): 2672-2680.

[21] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 449-459.
Ma H H, Peng M, Liu F, *et al*. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 449-459.

[22] 周健, 崔迪, 赵洙敏, 等. 不同年代水稻品种主要农艺性状的表型评价[J]. 植物遗传资源学报, 2019, **20**(6): 1566-1578.
Zhou J, Cui D, Jo S, *et al*. Phenotypic evaluation of main agronomic traits in rice varieties that were released over the past few decades[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, **20**(6): 1566-1578.

[23] 李冰. 水稻基因型和土壤条件对其吸收总汞和甲基汞的影响[D]. 广州: 中山大学, 2012.
Li B. Effects of genotypes and edaphic factors on mercury and methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2012.

[24] 刘凡, 谭文峰, 刘桂秋, 等. 几种土壤中铁锰结核的重金属离子吸附与锰矿物类型[J]. 土壤学报, 2002, **39**(5): 699-706.
Liu F, Tan W F, Liu G Q, *et al*. Adsorption of heavy metal ions on Fe-Mn nodules in several soils and types of Mn oxide minerals[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, **39**(5): 699-706.

[25] 谢宜. 不同 pH 稻田下土壤有效态镉与稻米镉含量的相关性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Xie Y. Study on the correlation between available cadmium in soil and cadmium content in rice under different pH paddy fields[D]. Changsha: Hunan University, 2019.

[26] 刘旭, 顾秋蓓, 杨琼, 等. 广西象州与横县碳酸盐岩分布区土壤中 Cd 形态分布特征及影响因素[J]. 现代地质, 2017, **31**(2): 374-385.
Liu X, Gu Q B, Yang Q, *et al*. Distribution and influencing factors of cadmium geochemical fractions of soils at carbonate covering area in Hengxian and Xiangzhou of Guangxi[J]. Geoscience, 2017, **31**(2): 374-385.

[27] 程钊. 鄱阳湖周边经济区土壤镉的含量与分布及其对水稻含镉量的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
Cheng Z. Chromium concentrations and distributions in Poyang lake and its peripheral economic zones and their impacts on chromium contents of rice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.

[28] 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.

[29] 杜瑞英, 文典, 赵迪, 等. Cd、Pb 和 As 在不同品种水稻籽粒中的富集特征研究[J]. 生物技术进展, 2016, **6**(2): 85-90.
Du R Y, Wen D, Zhao D, *et al*. The characteristics of Cd, Pb and As accumulation in rice grain of different variety[J]. Current Biotechnology, 2016, **6**(2): 85-90.

[30] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(3): 428-436.
Yi Y K, Zhou Z B, Chen G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(3): 428-436.

[31] Hu P J, Ouyang Y N, Wu L H, *et al*. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, **27**: 225-231.

[32] 柯庆明, 梁康迳, 朱燕, 等. 基因型与环境互作对食用稻米重金属积累特性遗传相关性的影响研究[J]. 中国生态农业

学报，2006，**14**(1)：24-27.
Ke Q M，Liang K J，Zhu Y，*et al*. Interactive effect of genotype and environment on the genetic covariance of characterization of heavy metal accumulation in edible rice grain (*Oryza sativa* L.) [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2006，**14**(1)：24-27.

[33] 孙聪. 水稻 Cd 毒害的敏感性分布及土壤主控因子研究[D]. 北京：中国农业科学院，2014.
Sun C. The research of species sensitivity distribution of Cd toxicity to rice cultivars and the main factors affecting in soils [D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2014.

[34] 刘侯俊，胡向白，张俊伶，等. 水稻根表铁膜吸附镉及植株吸收镉的动态[J]. 应用生态学报，2007，**18**(2)：425-430.
Liu H J，Hu X B，Zhang J L，*et al*. Dynamics of Cd adsorption on rice seedlings root surface with iron coating and Cd uptake by plant[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2007，**18**(2)：425-430.

[35] 邓丹，吴可为，邓泓. 根区通氧状况对水稻幼苗生长及吸收镉的影响[J]. 生态学报，2009，**29**(5)：2520-2526.
Deng D，Wu K W，Deng H. Effects of root zone oxygenation on growth and Cd accumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Acta Ecologica Sinica，2009，**29**(5)：2520-2526.

[36] 朱丹妹，刘岩，张丽，等. 不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报，2017，**36**(8)：1508-1517.
Zhu D M，Liu Y，Zhang L，*et al*. Effects of pH，Eh，Fe，and flooded time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil[J]. Journal of Agro-Environment Science，2017，**36**(8)：1508-1517.

[37] 封克，司江英，汪晓丽，等. 不同水分条件下水稻根解剖结构的比较分析[J]. 植物营养与肥料学报，2006，**12**(3)：346-351.
Feng K，Si J Y，Wang X L，*et al*. Comparative analysis on rice root anatomical structure under different soil moisture[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science，2006，**12**(3)：346-351.

[38] Kim S，Lim H，Lee I. Enhanced heavy metal phytoextraction by *Echinochloa crus-galli* using root exudates [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering，2010，**109**(1)：47-50.

[39] Zhang J，Sun W C，Li Z J，*et al*. Cadmium fate and tolerance in rice cultivars[J]. Agronomy for Sustainable Development，2009，**29**(3)：483-490.

[40] 梁芳，涂卫佳，薛清华，等. 石灰和钙镁磷肥施用对水稻生长与镉累积的影响[J]. 湖南有色金属，2018，**34**(2)：56-60.
Liang F，Tu W J，Xue Q H，*et al*. Effect of lime and calcium magnesium phosphate on the growth and uptake of Cd in rice[J]. Hunan Nonferrous Metals，2018，**34**(2)：56-60.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 4

Apr. 15, 2021

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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1626)

Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall ····· FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, *et al.* (1636)

Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust ····· LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, *et al.* (1642)

Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries ····· GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1668)

Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern ····· LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, *et al.* (1679)

Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China ····· LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, *et al.* (1688)

Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes ····· JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, *et al.* (1696)

Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang ····· ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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 Huai-jun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1861)

Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu ····· ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1901)

Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water ····· WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2024)

Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops ····· CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, *et al.* (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, *et al.* (2040)

Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice ····· LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2066)

Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables ····· ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, *et al.* (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, *et al.* (2089)