

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

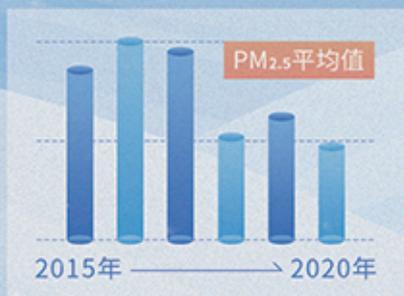
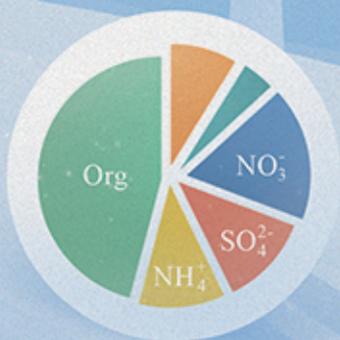
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM_{2.5} 污染特征分析..... 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)

天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析..... 郝困, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)

长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响..... 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)

滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价..... 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)

典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性..... 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓雨, 徐勃, 耿春梅(3934)

大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源..... 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径..... 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)

京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估..... 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)

2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征..... 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)

钢铁生产行业二氧化硫污染特征变化及其排放因子..... 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)

长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价..... 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)

基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析..... 鹿阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军(4008)

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例..... 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算..... 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)

河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响..... 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源..... 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价..... 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)

天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策..... 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例..... 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽(4097)

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析..... 杜瑛琦, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)

太湖氧化亚氮(N₂O)排放特征及潜在驱动因素..... 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价..... 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果..... 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)

环境 pH 条件下 Fe²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素..... 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)

新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价..... 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)

宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征..... 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素..... 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法..... 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)

姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估..... 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测..... 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)

柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险..... 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性..... 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞瑛, 赵海洋(4232)

橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力..... 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力..... 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)

连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响..... 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响..... 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响..... 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春(4292)

水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系..... 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强(4301)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响..... 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响..... 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)

基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响..... 鹿发虎, 李晓琦, 段荆阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)

汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子..... 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)

岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较..... 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松(4353)

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素..... 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响..... 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)

秸秆还田配施生物炭对关中原夏玉米产量和土壤 N₂O 排放的影响..... 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响..... 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响..... 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比..... 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)

《环境科学》征订启事(4211) 《环境科学》征稿简则(4312) 信息(3922, 4031, 4107)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响

郑沈¹, 黄道友¹, 李波¹, 马天池^{1,2}, 许超¹, 朱奇宏¹, 朱捍华¹, 张泉^{1*}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 探究外源铁(Fe)在水稻镉(Cd)阻控效应方面的研究对保障粮食安全具有重要意义. 通过水培实验,研究了3种Fe浓度(5、50和500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA- Na_2Fe)对水稻Cd的积累效应和根系微生物群落结构的影响. 结果表明,环境Fe浓度的增加促使水稻根表铁膜的形成,缺Fe和Fe充裕情况下均会促进根表铁膜对Cd的吸附固定. 和正常Fe相比,缺Fe促进根Cd和地上部Cd累积,分别增加了49.76%和15.68%;而Fe充裕促进了根Cd的积累,增加了18.39%,但显著降低地上部Cd的含量,降低幅度为35.95%. 采用16S rRNA高通量测序测定根系微生物群落结构并通过PCA、LEfSe和RDA等分析方法发现,和正常Fe相比,缺Fe环境会降低根系微生物的丰富度和均匀度,在门水平下Proteobacteria和Bacteroidetes为优势菌群,缺Fe抑制Bacteroidetes相对丰度的增加,Fe充裕使Proteobacteria相对丰度降低. 而在属水平功能微生物*Ensifer*、*Rhodopila*、*Bdellovibrio*和*Dyella*等的相对丰度在不同处理下发生改变,可能通过影响根表铁膜的形成和其他生化过程继而影响水稻对Cd的吸收和积累. 并且缺Fe环境对微生物功能影响高于Fe充裕环境. 为探寻不同Fe环境下调控水稻根系微生物的群落结构变化,以降低水稻对Cd的吸收转运能力,进而为Fe对Cd的阻控机制提供理论依据,并为我国南方稻田Cd污染治理提供重要参考.

关键词: 外源Fe; 镉(Cd); 根表铁膜; 微生物群落结构; 功能微生物

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4313-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202110165

Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice

ZHENG Shen¹, HUANG Dao-you¹, LI Bo¹, MA Tian-chi^{1,2}, XU Chao¹, ZHU Qi-hong¹, ZHU Han-hua¹, ZHANG Quan^{1*}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Exploring the effects of exogenous iron (Fe) on cadmium (Cd) in rice is of great significance for ensuring food security. The accumulation of Cd and the changes in the microbial community structure in rice roots under three Fe concentrations (5, 50, and 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA- Na_2Fe) were studied through a hydroponic experiment. The results showed that the increase in the environmental Fe concentration promoted the formation of iron plaque on the rice roots, and both Fe-deficiency and Fe-sufficiency would enhance the adsorption and fixation of Cd on the root surface. Compared with that of normal Fe levels (50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), Fe deficiency increased Cd accumulation in rice roots and shoots by 49.76% and 15.68%, respectively. Although Fe sufficiency also increased Cd accumulation in the roots by 18.39%, the Cd concentration in shoots was significantly reduced by 35.95% compared with that of the normal Fe. 16S rRNA high-throughput sequencing was used to determine the root microbial community structure, and through PCA, LEfSe, and RDA analysis, it was found that compared with normal Fe, an Fe-deficient environment reduced the abundance and uniformity of root microbes. Proteobacteria and Bacteroidetes at the phylum level were the dominant flora, Fe deficiency inhibited the increase in the relative abundance of Bacteroidetes, and high-concentration Fe reduced the relative abundance of Proteobacteria. At the genus level, the relative abundance of functional microorganisms *Ensifer*, *Rhodopila*, *Bdellovibrio*, and *Dyella* were different under different Fe environments, which may have affected the absorption and accumulation of Cd by rice by affecting the formation of Fe plaque on the root and other biochemical processes. In addition, the effect of an Fe-deficient environment on microbial functions was higher than that of the Fe sufficient environment. This study investigated the changes in the rice root microbial community structure and the ability of rice to absorb and transport Cd under different Fe environments, which provided a theoretical basis and an important reference for the inhibition of Fe on Cd accumulation in rice in Cd-polluted paddy soil in southern China.

Key words: exogenous iron (Fe); cadmium (Cd); Fe plaque; microbial community structure; functional microbial

随着城市化进程的加快,城市生活污水和工业废水的肆意排放,导致土壤重金属污染问题日益严重. 镉(Cd)是一种毒性很强的重金属,它可以通过食物链进入人体最终破坏人体机能^[1~3]. 水稻是一种高积累Cd的农作物,在污染地区种植水稻很容易使Cd在籽粒中富集^[4],并造成稻米Cd的超标. 有研究表明在数万份样本的调查中水稻的平均Cd含量是小麦和其他谷物的3~8倍^[5],因此优化水稻

降Cd技术对Cd污染区域的稻米安全利用具有重要意义.

铁(Fe)是动植物生长发育的必需元素,有研究

收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2021-12-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807145); 湖南省自然科学基金青年科学基金项目(2019JJ5070); 湖南创新型省份建设专项(2020NK01)

作者简介: 郑沈(1993~),男,硕士,工程师,主要研究方向农田重金属污染治理, E-mail: 546260371@qq.com

* 通信作者, E-mail: quanzhang@isa. ac. cn

表明植物对 Cd 的吸收、转运及累积和 Fe 营养代谢途径密切相关^[6-11]。当土壤由氧化状态向还原状态转变时,环境 Fe 矿物会消耗电子(e^-)和质子(H^+)发生还原反应,Fe 由 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ^[12]。而农田水稻根系依靠根部氧化酶、分泌氧化物、氧气和根部氧化性微生物等,将一部分的二价 Fe 氧化成不溶于水的三价 Fe,最终沉积于根系表面形成根表铁膜^[13,14]。水稻根表铁膜会将 Cd 吸附于根表并截控重金属 Cd 向根内转运^[15,16]。董明芳等^[17]的研究添加 $4.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe^{2+} 使水稻幼苗根表铁膜中 Fe 元素显著增加 114.9%,地上部 Cd 显著降低 16.8%。刘丹青等^[18]的研究发现缺 Fe 环境会抑制根表铁膜的形成,并促进水稻对 Cd 的吸收。施 Fe 对水稻降 Cd 的研究已经有了大量的报道,而不同浓度 Fe 环境对水稻根系微生物的群落结构及功能微生物对水稻 Cd 含量、根表铁膜的形成和根表 Cd 的吸附等影响鲜见研究。本实验通过不同浓度 Fe 环境调控水稻根系微生物群落结构的研究,探究水稻根表铁膜形成对水稻 Cd 吸收积累的影响,以期通过调控 Fe 浓度来降低水稻 Cd 含量。

1 材料与方法

1.1 供试材料和实验设计

将挑选好丰满的水稻种子在 75% 乙醇中浸泡 30 s,于 2.5% 次氯酸钠中浸泡 1 min 进行表面灭菌后,再用去离子水清洗。然后将水稻种子于 30℃ 黑暗条件下用去离子水浸泡 24 h,并盖上湿纱布保湿保温。将露白的水稻种子播种于湿润沙盘中,待发芽 3 周后,将大小均匀的稻苗移栽到避光装有 50 L pH 值为 5.5 的营养液塑料容器中^[19]。将水稻幼苗种植在有光照的生长室: 25~30℃、16 h/8 h 明/暗循环、300~320 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 光强和 70% 的相对湿度 (RH)。两周后,幼苗用 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (缺 Fe, 即 5Fe)、50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (正常 Fe, 即 50Fe) 和 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Fe 充裕, 即 500Fe) EDTA- Na_2Fe 和 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 的水培溶液中处理一周后取样。所有实验均设置 3 个生物学重复。水培营养液每 3 d 更换一次,每天用 pH 计测量。

1.2 植株和根表金属的测定

将水稻植株用自来水和去离子水洗涤后,样品(分为根和地上部)于 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘干至恒定重量。将干燥的水稻组织研磨成细粉,称取 0.2 g 样品加入含有 8 mL 浓 HNO_3 和 1 mL H_2O_2 ($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2=8:1$) 的微波消解管中,然后通过微波消解提取矿物元素^[20]。随后,使用 ICP-MS (电感耦合等离子体发射光谱仪) (Varian, 美国) 分析提

取物。

用去离子水充分清洗每个新鲜采集的水稻根样品,采用亚硫酸盐-柠檬酸盐-碳酸氢盐 (DCB) 方法用于提取沉淀在水稻根表面的 Fe 和 Cd^[21]。首先,将每个根样品浸入 45 mL DCB 溶液 ($3.0 \text{ g Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 、 $0.11 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 和 $0.27 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 中 3 h。然后将根用去离子水冲洗 3 次以上,并将洗脱液加入提取剂中,定容到 100 mL 的容量瓶。过滤 DCB 提取物并通过 ICP-MS 分析金属浓度。提取后将水稻根部在 70℃ 下烘干至恒重,然后进行微波消化,步骤同上。

1.3 DNA 提取、PCR 扩增和测序

使用无菌水冲洗新鲜收集的水稻根部,然后在离心管 (50 mL) 中用 50 mL 无菌磷酸缓冲盐溶液 PBS 在 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 摇床振荡 0.5 h,相同步骤进行 3 次至水稻根表无任何残留,用无菌滤纸吸取根系表面水分,根系用于后期微生物 16S rRNA 高通量测序^[22]。委托联川公司进行 DNA 提取和测序,采用 CTAB 法提取根系样品 DNA,以无菌水作为对照。随后,采用稍加修饰后的引物 515F (5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGTWTCTAAT-3') 对细菌 16S rRNA 基因在 V3-V4 区进行扩增。在每个样本中,通用测序引物和特定的条形码被用来标记引物的 5' 末端。为 PCR 程序准备了 25 μL 系统,其中包括 2.5 μL 各自的引物、12.5 μL PCR 预混物和 25 ng 模板 DNA,用 PCR 级水稀释。此外,PCR 在以下条件下进行,98℃ 初始变性 30 s; 98℃ 变性 10 s, 54℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 45 s, 35 个循环; 在 72℃ 下进行 10 min 的最终延伸。通过 2% (质量分数) 琼脂糖凝胶电泳 (AGE) 解析后,AMPure XT 用于纯化 PCR 扩增子,而 Qubit 用于定量。此外,250PE MiSeq 运行用于对扩增子库进行测序。

1.4 统计分析

采用 RDP classifier 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析,并在不同分类水平下统计每个样品的群落组成。用 Omicstudio 平台 (<http://www.omicstudio.cn/>) 进行水稻根内微生物群落分析。数据分析基于 SPSS 21.0,利用方差分析法 (ANOVA) 和 LSD 法 ($P < 0.05$) 进行差异分析。每个图形值代表平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 水稻组织中 Cd 含量和转运系数

水稻植株 Cd 在不同处理中出现显著差异 (表 1)。和 50Fe 相比,5Fe 处理的水稻根 Cd 含量和地

上部 Cd 含量出现显著的增加 ($P < 0.05$), 增加的幅度分别为 49.76% 和 15.68%。和 50Fe 相比, 500Fe 处理的水稻根 Cd 含量显著增加了 18.39% ($P < 0.05$); 但地上部 Cd 含量显著降低了 35.95% ($P < 0.05$)。因此, 缺 Fe 环境会促进水稻植株对 Cd 的富集, 而 Fe 充裕会促进根对 Cd 的累积, 抑制地上部

Cd 的富集。施加不同浓度的 Fe 对水稻根到地上部 Cd 的转运具有显著的影响。和 50Fe 相比, 5Fe 和 500Fe 的转运系数均会出现显著地降低 ($P < 0.05$), 降低的幅度为 22.04% 和 45.66%。因此, 水稻在过低或者过高含量的 Fe 环境中均会抑制 Cd 由根向地上部的运输。

表 1 不同处理对水稻 Cd 含量、转运系数、根表铁膜和根表 Cd 含量的影响¹⁾

Table 1 Effects of different treatments on rice Cd content, transport coefficient, Fe plaque on the root, and Cd content on the root surface

不同处理	地上部 Cd /mg·kg ⁻¹	根 Cd /mg·kg ⁻¹	转运系数 (TC)	DCB-Fe /mg·kg ⁻¹	DCB-Cd /mg·kg ⁻¹
5Fe	58.50 ± 4.59a	625.76 ± 66.88a	0.09 ± 0.02b	76.06 ± 7.20c	32.58 ± 11.35b
50Fe	50.57 ± 1.41b	417.85 ± 26.02c	0.12 ± 0.00a	92.52 ± 0.34b	21.13 ± 1.87c
500Fe	32.39 ± 6.11c	494.69 ± 55.10b	0.07 ± 0.01c	118.90 ± 12.25a	49.75 ± 7.35a

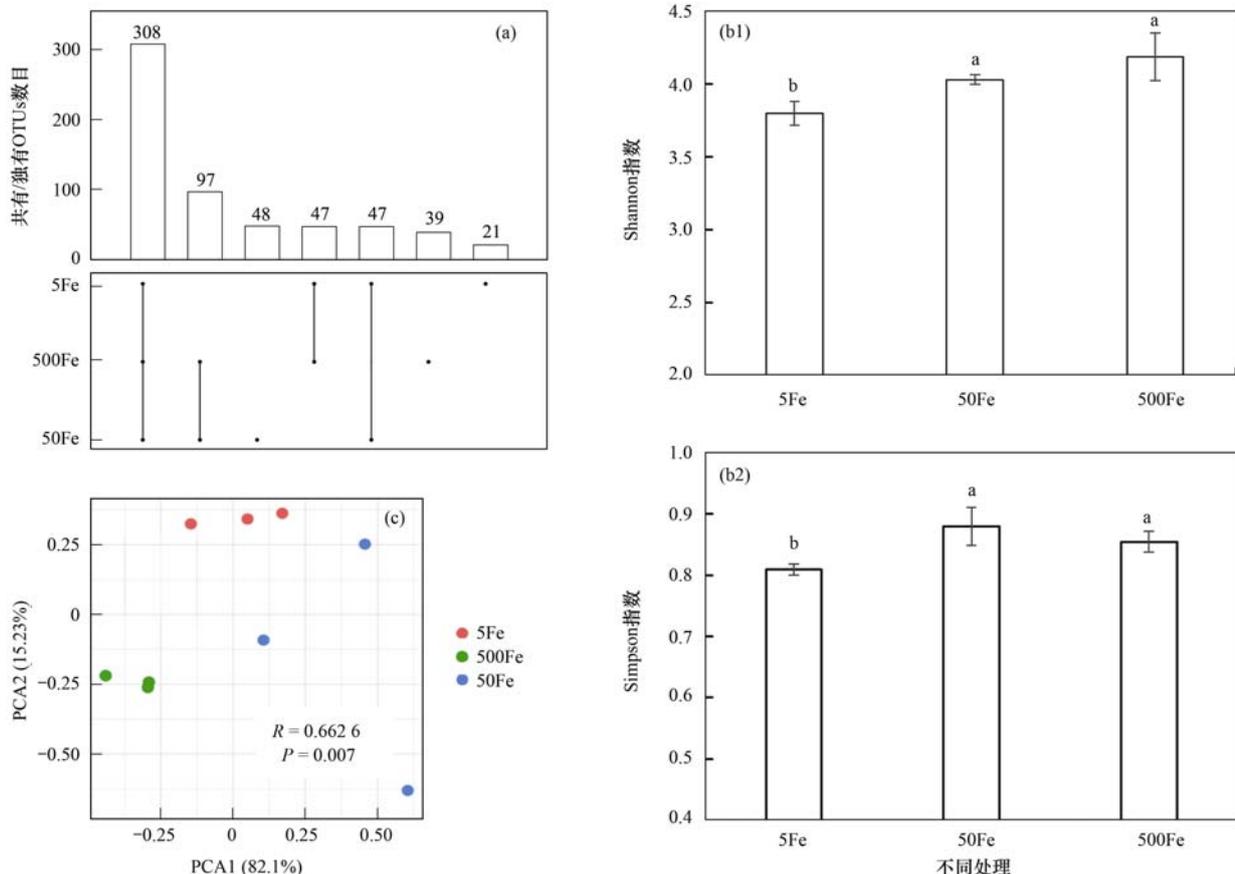
1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

施加不同浓度的 Fe 对根表铁膜的形成具有显著的影响 (表 1)。和 50Fe 相比, 5Fe 处理的水稻 DCB-Fe 显著降低 ($P < 0.05$), 且降低了 17.79%; 而 500Fe 处理的 DCB-Fe 显著增加 ($P < 0.05$), 增加的幅度为 28.51%。随着 Fe 浓度的增加会促进水稻根表铁膜的形成。水稻根表铁膜对 Cd 的吸附在不同处理中也出现显著的差异 ($P < 0.05$), 和 50Fe 相比, 5Fe 和 500Fe 处理的水稻 DCB-Cd 含量均出现

显著的增加 ($P < 0.05$), 分别增加了 54.19% 和 135.45%。这似乎表明水稻根系环境过低或者过高含量的 Fe 均会促进根表铁膜对 Cd 的吸附。

2.2 根系微生物的 α 和 β 多样性分析

水稻根系微生物在不同处理下 OTUs 数量、均匀度、丰富度和微生物结构均出现显著的改变 [图 1(a)]。3 个处理共检测到 607 个 OTUs, 其中 OTUs 数量最多的处理是 50Fe, 数量为 500, 占总 OTUs 的



(a) 不同处理对 OTUs 数量的影响 (Upset 图); (b) 微生物 α 多样性分析, 柱子上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); (c) 微生物 β 多样性分析

图 1 不同浓度 Fe 的应用对水稻根内微生物的影响

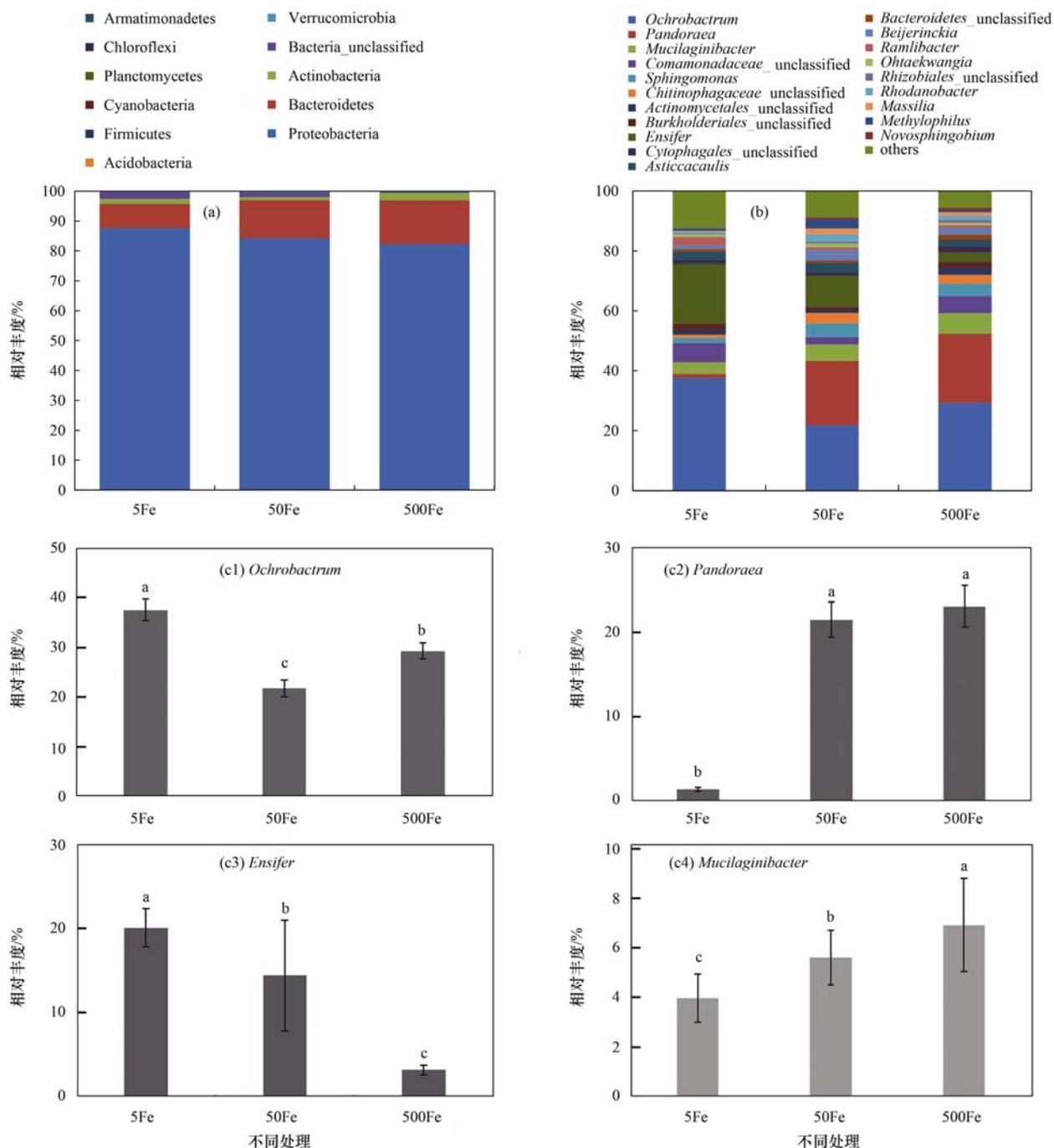
Fig. 1 Application of different concentrations of iron affects the microorganisms in rice roots

82.37%. 最少的 OTUs 数量是 5Fe 处理, 数量为 423, 占总 OTUs 的 69.69%. 3 个处理共有的 OTUs 数量是 308, 而 50Fe 处理独有的 OTUs 数量最多, 为 48, 处理 5Fe 独有的 OTUs 数量最少, 为 21. 对不同处理下水稻根内微生物进行 Shannon 分析和 Simpson 分析发现, 5Fe 的 Shannon 指数和 Simpson 指数均出现显著地降低 ($P < 0.05$). 缺 Fe 环境不仅会降低水稻根系微生物的种类而且使其均匀度和丰富度也出现降低. 此外, 对根系微生物进行主成分分

析 (PCA), 主成分一的解释度为 82.1%, 主成分二的解释度为 15.23%, 总解释度为 97.33% [图 1(c)]. 不同浓度的 Fe 环境使水稻根系微生物的群落结构出现明显的差异.

2.3 根系微生物的群落组成

根内微生物在门水平共检测到 11 种微生物 [图 2(a)], 在不同处理 (5Fe、50Fe 和 500Fe) 下相对丰度最高的是变形菌门 (Proteobacteria), 相对丰度分别为 87.61%、84.24% 和 82.31%. 其次是拟杆



(a) 门水平微生物群落组成; (b) 属水平前 20 种微生物群落组成; (c) 属水平 4 种高丰度微生物差异分析,

柱子上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 门和属水平微生物群落组成

Fig. 2 Microbial community composition at the phylum and genus level

菌门 (Bacteroidetes), 其丰度在 5Fe、50Fe 和 500Fe 处理下分别为 8.11%、12.70% 和 14.57%。前两种优势菌群的相对丰度在 3 种 Fe 环境下分别达到 95.72%、96.94% 和 96.88%。在不同浓度 Fe 处理下水稻根内微生物主要是由变形菌门 (Proteobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 组成, 而 Actinobacteria、Bacteria_unclassified、Firmicutes、Verrucomicrobia、Acidobacteria、Cyanobacteria、Planctomycetes、Chloroflexi 和 Armatimonadetes 的丰度均处于劣势。缺 Fe 抑制 Bacteroidetes 相对丰度的增加, Fe 充裕使 Proteobacteria 的相对丰度出现降低。此外, 在属水平上检测的根系微生物的群落组成具有显著差异 [图 2(b)]。其中根系具有高丰度的优势微生物物种有 *Ochrobactrum*、*Pandoraea*、*Ensifer* 和 *Muccilaginibacter* [图 2(c)]。在 3 种浓度 Fe (5Fe、50Fe 和 500Fe) 处理下, 4 种优势微生物总的相对丰度分别为 62.98%、59.50% 和 62.47%。缺 Fe 环境显著降低了 *Pandoraea* 和 *Muccilaginibacter* 的相对丰度, Fe 充裕显著降低了 *Ensifer* 的相对丰度。这些根内微生物的相对丰度根据环境 Fe 水平发生显著变化 [图 2(b) 和 2(c)]。

2.4 根系微生物差异分析和功能预测

进行 LEfSe (线性判别分析) 分析以确定各组之间的显著差异 [图 3(a)]。LEfSe 算法检测到 16 个高度分化的分类分支作为生物标志物。在属水平上, *Rhodopila*、*Bdellovibrio* 和 *Dyella* 是活性生物标志物, 在不同处理下表现出显著差异。此外, 桑基图展示了不同处理下门和属水平微生物之间的对应关系 [图 3(b)]。属水平的主要优势微生物 *Ochrobactrum*、*Pandoraea* 和 *Ensifer* 同属于变形菌门 (Proteobacteria), 而 *Muccilaginibacter* 属于拟杆菌门 (Bacteroidetes)。缺 Fe 会促进 Proteobacteria 下的 *Ochrobactrum* 的相对丰度增加, 而抑制 *Pandoraea* 的生存, Fe 充裕会抑制 Proteobacteria 下的 *Ensifer* 的生存。

本研究采用 PICRUSt 方法研究了所有样本的 KEGG 通路 (图 4)。微生物具有的锌转运蛋白相关功能、锌镉转运体和细胞分裂蛋白表达等具有显著的差异。缺 Fe 环境促进了锌转运系统的发生而抑制锌镉转运体的运行, 细胞分裂蛋白在缺 Fe 环境均出现低丰度的表达。这似乎表明缺 Fe 环境对微生物功能的影响要高于 Fe 充裕环境下。

2.5 水稻各部位相关性和 RDA 分析

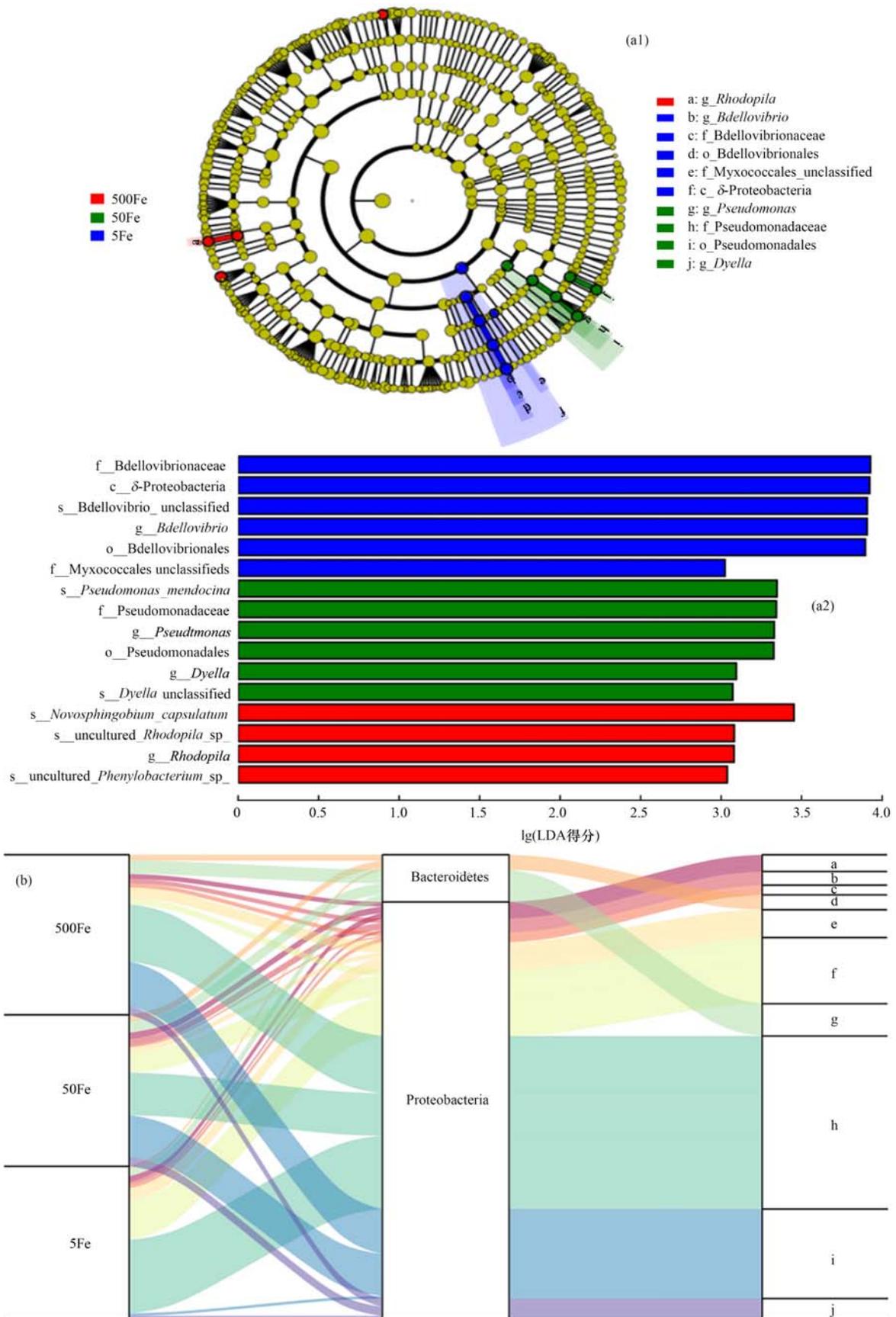
水稻植株 Cd、DCB-Cd、DCB-Fe 和转运系数之间存在显著的相关关系 [$P < 0.05$, 图 5(a)]。地上部 Cd 和 DCB-Cd 之间存在显著的负相关关系 ($P <$

0.05), 和 DCB-Fe 之间具有极显著的负相关关系 ($P < 0.01$), 而和 TC 存在显著的正相关关系 ($P < 0.05$); TC 和 DCB-Cd 之间具有极显著的负相关关系 ($P < 0.01$)。地上部 Cd 受根表铁膜和根表 Cd 的负调控, 而转运系数对地上部 Cd 有正效应, 根表 Cd 对根 Cd 向地上部 Cd 的转运具有很强的抑制作用。此外, 对 4 种差异的功能微生物和环境因子根 Cd、地上部 Cd、TC、DCB-Cd 和 DCB-Fe 进行冗余分析 (RDA) 分析 [图 5(b)], 发现 DCB-Cd 和 DCB-Fe 与 *Dyella* 和 *Rhodopila* 具有正向的相关关系, 地上部 Cd 和 TC 与 *Dyella* 呈负相关; 地上部 Cd 和根 Cd 与 *Ensifer* 和 *Bdellovibrio* 之间具有正向的相关关系。功能微生物与根表铁膜的形成、根表对 Cd 的吸附和 Cd 向地上部的转运均有相关性。

3 讨论

3.1 环境 Fe 对根表铁膜和植株 Cd 积累的作用

Fe 肥的施加会使土壤 Cd 生物有效性发生改变, 影响作物对 Cd 的吸收和转运^[23]。刘文菊等^[24]的研究表明, 水稻根表泌氧形成的 Fe 氧化物对根际环境中的 Cd 离子有吸附作用, 根表铁膜吸附 Cd 后促进了水稻对 Cd 的吸收。但刘侯俊等^[25]的研究认为, 水稻处于高浓度的 Fe 离子环境中, 根系表面铁膜积累了大量的 Fe 和 Mn 化合物, 可抑制水稻对 Cd 的吸收。本实验随着环境 Fe 浓度的增加促进了铁膜的形成, 并使根表铁膜对 Cd 的吸附强度增加 (表 1)。刘丹青等^[18]的研究发现在缺 Fe 环境下根表铁膜数量显著降低, 而 DCB-Cd 含量显著增加, 和本研究结果一致。在 Fe 充裕环境下水稻根系积累了更多的 Cd (表 1), 这表明根表铁膜对根系中 Cd 的隔离能力有限, 水稻植株的 Fe 营养水平和根表铁膜中 Cd 的吸收有关^[26]。杜艳艳等^[27]的研究指出, 根表铁膜超过一定阈值 ($20 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 后, 可加速根系吸收重金属。对于植物体内 Cd 的积累可归因于 Fe 和 Zn 等金属阳离子转运系统的意外摄取^[28-30], 有研究已经证明了这一点^[31-33]。在缺 Fe 环境中植株部分可诱导有关 Fe 吸收和转运基因的表达, 且在增加 Fe 吸收的同时促进 Cd 的吸收^[34]。本研究发现缺 Fe 使根系累积了更多的 Cd, 尽管转移系数降低, 但是地上部累积的 Cd 还是比正常 Fe 处理高 (表 1)。而在 Fe 充裕环境中水稻根对 Cd 的吸收显著增加, 且 Fe 充裕环境促进根表铁膜形成, 增加了 Cd 的吸附或共沉淀^[19,35,36], 降低了根向地上部的转移, 继而使地上部 Cd 累积减少。因此, 环境 Fe 浓度的变化影响水稻对 Cd 的吸收和转运与根表铁膜的形成有关。



(a)不同处理下线性判别分析(LEfSe分析); (b)不同处理下门和属水平的桑基图, a. *Asticcacaulis*; b. *Beijerinckia*; c. *Burkholderiales_unclassified*; d. *Chitinophagaceae_unclassified*; e. *Comamonadaceae_unclassified*; f. *Ensifer*; g. *Mucilaginibacter*; h. *Ochrobactrum*; i. *Pandoraea*; j. *Sphingomonas*

图3 根系微生物差异分析

Fig. 3 Root microbial difference analysis

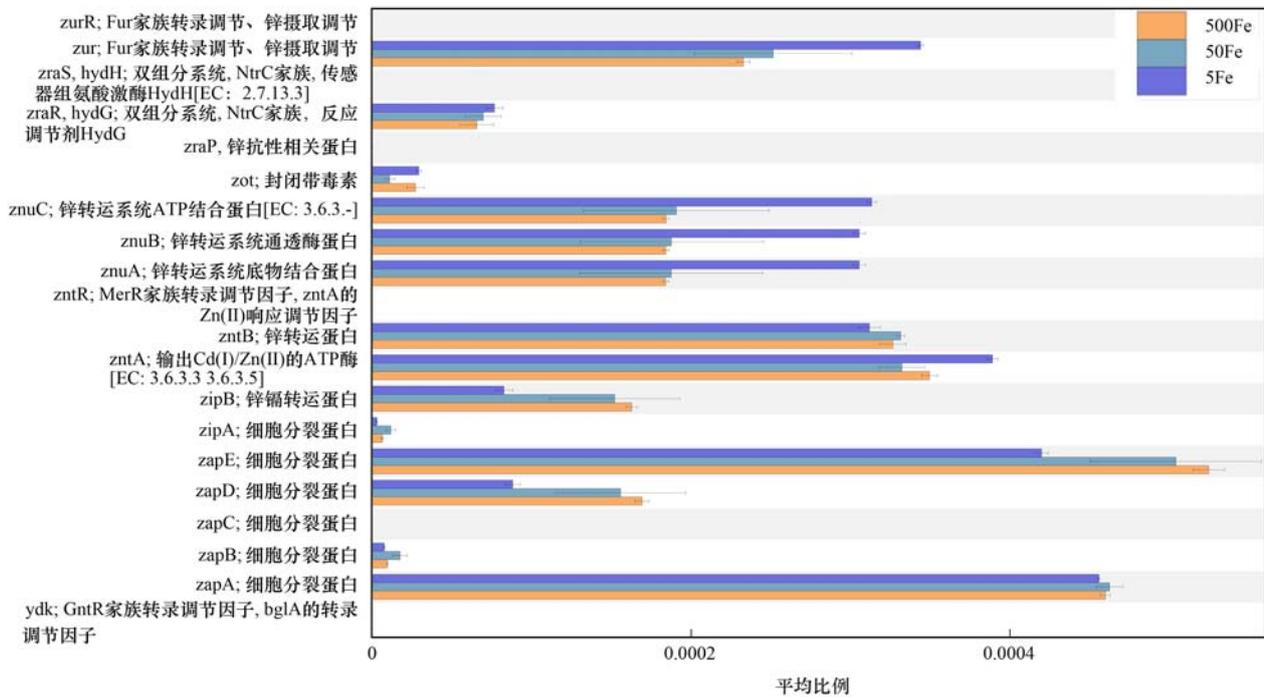
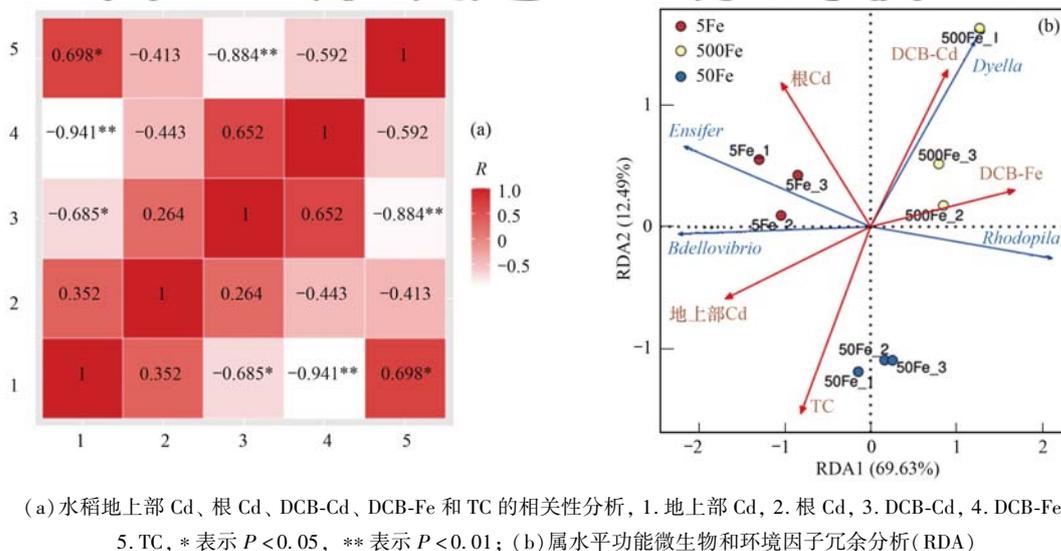


图 4 不同处理下 KEGG 通路分析

Fig. 4 KEGG pathway analysis under different treatments



(a) 水稻地上部 Cd、根 Cd、DCB-Cd、DCB-Fe 和 TC 的相关性分析, 1. 地上部 Cd, 2. 根 Cd, 3. DCB-Cd, 4. DCB-Fe,

5. TC, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; (b) 属水平功能微生物和环境因子冗余分析 (RDA)

图 5 微生物的相关性和 RDA 分析

Fig. 5 Correlation analysis and RDA analysis

3.2 环境 Fe 对水稻根系微生物群落结构和功能的影响

植物生长所必需的营养元素可以通过根际微生物的作用将这些元素转变成植物较易吸收的形态, 且帮助植物抵御高温、高盐、重金属等环境的胁迫^[37-39]. 本研究在缺 Fe 和 Fe 充裕环境中均改变了水稻根系微生物的群落结构(图 2), 在不同处理下门水平的两种优势菌群相对丰度发生改变, 缺 Fe 抑制 Bacteroidetes 相对丰度的增加, Fe 充裕使 Proteobacteria 的相对丰度出现降低. 属水平微生物, 如: *Ensifer*、*Rhodopila*、*Bdellovibrio* 和 *Dyella* 等均表

现出显著差异. 有研究发现, 在这些根系细菌中, *Ensifer* 可以耐受潜在的毒性金属 (Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Ni^{2+}), 同时也可以产生一种植物生长激素 IAA 去除 Cd^{2+} 和 Cr^{6+} ^[40]; *Rhodopila* 和 Fe 氧化酶的关系最密切, 具有更强的抵抗重金属胁迫的能力^[41,42]; 而 *Bdellovibrio* 和 *Dyella* 参与 Cd 毒性和细胞壁成分的降解^[43,44]. 本研究中 *Ensifer* 在 Fe 充裕环境下相对丰度显著降低, *Rhodopila* 在 Fe 充裕环境下相对丰度却显著增加, *Bdellovibrio* 在缺 Fe 环境相对丰度显著增加. 表明高浓度 Fe 环境不利于 *Ensifer* 和 *Bdellovibrio* 在根内的生存, 而有助于 *Rhodopila* 的繁殖. 微生物

Dyella 和 *Rhodopila* 与根表铁膜的形成和根表 Cd 的吸附存在相关性[图 5(b)]. 而 Fe 充裕环境下 *Ensifer* 丰度的降低可能直接或间接影响了 Cd 从根系向地上部的转运. 研究表明, 功能微生物会促进根表铁膜的形成, 进而降低水稻重金属含量^[45]. 因此, 环境 Fe 条件的变化通过改变上述独特根系细菌的相对丰度来影响金属元素如 Fe 等的生理生化过程, 继而影响根表铁膜的形成和水稻对 Cd 的吸收和积累. 更重要的是, 从根系微生物和植物相互作用的角度来看, Cd 污染环境有所改善.

4 结论

(1) 环境 Fe 浓度的增加促进根表铁膜的形成, 缺 Fe 或 Fe 充裕会增强根表铁膜对 Cd 的吸附.

(2) 缺 Fe 会促进 Cd 向根部迁移, 并促进了地上部 Cd 积累, Fe 充裕也会促进 Cd 向根部迁移, 但铁膜的形成抑制了地上部 Cd 的累积.

(3) 缺 Fe 环境会降低根内微生物的均匀度和丰富度. 在门水平根系的优势菌群为变形菌门和拟杆菌门, 缺 Fe 抑制 Bacteroidetes 相对丰度的增加, Fe 充裕使 Proteobacteria 的相对丰度出现降低.

(4) Fe 浓度通过影响 *Ensifer*、*Rhodopila*、*Bdellovibrio* 和 *Dyella* 等功能微生物的相对丰度来影响根系金属元素形态转化的关键生化过程, 继而影响水稻对 Cd 的吸收和积累. 缺 Fe 环境对微生物功能影响高于 Fe 充裕环境.

参考文献:

- [1] Gu Y, Wang P, Zhang S, *et al.* Chemical speciation and distribution of cadmium in rice grain and implications for bioavailability to humans [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(19): 12072-12080.
- [2] Kiran, Bharti R, Sharma R. Effect of heavy metals: an overview [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.278.
- [3] Renu K, Chakraborty R, Myakala H, *et al.* Molecular mechanism of heavy metals (Lead, Chromium, Arsenic, Mercury, Nickel and Cadmium)- induced hepatotoxicity - a review [J]. *Chemosphere*, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129735.
- [4] Irshad M K, Noman A, Alhathloul H A S, *et al.* Goethite-modified biochar ameliorates the growth of rice (*Oryza sativa* L.) plants by suppressing Cd and As-induced oxidative stress in Cd and As co-contaminated paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137086.
- [5] Song Y, Wang Y B N, Mao W F, *et al.* Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0177978.
- [6] Sun W J, Zhang J C, Ji X L, *et al.* Low nitrate alleviates iron deficiency by regulating iron homeostasis in apple [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, **44**(6): 1869-1884.
- [7] Wang X Q, Du Y H, Li F B, *et al.* Unique feature of Fe-OM complexes for limiting Cd accumulation in grains by target-regulating gene expression in rice tissues [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **424**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127361.
- [8] Guha T, Barman S, Mukherjee A, *et al.* Nano-scale zero valent iron modulates Fe/Cd transporters and immobilizes soil Cd for production of Cd free rice [J]. *Chemosphere*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127533.
- [9] Liu H J, Yang L, Li N, *et al.* Cadmium toxicity reduction in rice (*Oryza sativa* L.) through iron addition during primary reaction of photosynthesis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **200**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110746.
- [10] Han Y, Ling Q, Dong F Q, *et al.* Iron and copper micronutrients influences cadmium accumulation in rice grains by altering its transport and allocation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **777**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146118.
- [11] Lombi E, Tearall K L, Howarth J R, *et al.* Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant Physiology*, 2002, **128**(4): 1359-1367.
- [12] 李姣, 刘璐, 杨斌, 等. 镉及镉与铁、锌互作对水稻生长的影响 [J]. *华北农学报*, 2018, **33**(1): 217-223.
Li J, Liu L, Yang B, *et al.* Effects of cadmium concentration and interaction of cadmium with iron and zinc interaction on rice growth [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, **33**(1): 217-223.
- [13] 郑芸芸, 李忠意, 李九玉, 等. 铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响 [J]. *土壤学报*, 2015, **52**(3): 690-696.
Zheng Y Y, Li Z Y, Li J Y, *et al.* Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice roots [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(3): 690-696.
- [14] Liu H J, Zhang J L, Christie P, *et al.* Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **394**(2-3): 361-368.
- [15] Liu N, Lou X G, Li X, *et al.* Rhizosphere dissolved organic matter and iron plaque modified by organic amendments and its relations to cadmium bioavailability and accumulation in rice [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148216.
- [16] Deng X, Yang Y, Zeng H Y, *et al.* Variations in iron plaque, root morphology and metal bioavailability response to seedling establishment methods and their impacts on Cd and Pb accumulation and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121343.
- [17] 董明芳, 郭军康, 冯人伟, 等. Fe²⁺ 和 Mn²⁺ 对水稻根表铁膜及镉吸收转运的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(3): 249-253.
Dong M F, Guo J K, Feng R W, *et al.* Effects of Fe²⁺ and Mn²⁺ on rice root iron plaque formation and Cd uptake and transportation [J]. *Environmental Pollution & Prevention*, 2017, **39**(3): 249-253.
- [18] 刘丹青, 陈雪, 葛滢. 缺 Fe 预处理对 Fe、Cd 根际吸附与水稻吸收和转运的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(2): 224-230.
Liu D Q, Chen X, Ge Y. Adsorption of iron and cadmium in rhizosphere and their uptake and translocation in rice pretreated with iron deficiency [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(2): 224-230.
- [19] Zhang Q, Chen H F, Xu C, *et al.* Heavy metal uptake in rice is

- regulated by pH-dependent iron plaque formation and the expression of the metal transporter genes[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **162**: 392-398.
- [20] Zhen S, Shuai H, Xu C, *et al.* Foliar application of Zn reduces Cd accumulation in grains of late rice by regulating the antioxidant system, enhancing Cd chelation onto cell wall of leaves, and inhibiting Cd translocation in rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **770**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145302.
- [21] Wu Y, Yang L, Gong H, *et al.* Contrasting effects of iron plaque on the bioavailability of metallic and sulfidized silver nanoparticles to rice[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.113969.
- [22] Zhang J Y, Liu Y X, Zhang N, *et al.* *NRT1.1B* is associated with root microbiota composition and nitrogen use in field-grown rice[J]. *Nature Biotechnology*, 2019, **37**(6): 676-684.
- [23] 上官宇先, 陈琨, 喻华, 等. 不同铁肥及其施用方法对水稻籽粒镉吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(7): 1440-1449.
Shangguan Y X, Chen K, Yu H, *et al.* Effects of different iron fertilizers and application times on cadmium absorption in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(7): 1440-1449.
- [24] 刘文菊, 张西科, 张福锁. 根表铁氧化物和缺铁根分泌物对水稻吸收镉的影响[J]. *土壤学报*, 1999, **36**(4): 463-469.
Liu W J, Zhang X K, Zhang F S. Effects of Iron oxides and root iron exudates on cadmium uptake by rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(4): 463-469.
- [25] 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.
- [26] Liu H J, Zhang J L, Zhang F S, *et al.* Role of iron plaque in Cd uptake by and translocation within rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in solution culture [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **59**(3): 314-320.
- [27] 杜艳艳, 王欣, 谢伟城, 等. 负载铁生物炭对土壤-水稻系统 As 溶出特性与生物有效性的影响与机理解析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(8): 3158-3168.
Du Y Y, Wang X, Xie W C, *et al.* Effects and mechanisms of Fe-impregnated biochar on arsenic solubility and bioavailability in soil-rice system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 3158-3168.
- [28] Li S S, Lei X Q, Qin L Y, *et al.* Fe(III) reduction due to low pe + pH contributes to reducing Cd transfer within a soil-rice system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125668.
- [29] Wu X, Chen J H, Yue X M, *et al.* The zinc-regulated protein (ZIP) family genes and glutathione s-transferase (GST) family genes play roles in Cd resistance and accumulation of pak choi (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **183**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109571.
- [30] Jing Y L, Chen X, Chai S Y, *et al.* *TpIRT1* from Polish wheat (*Triticum polonicum* L.) enhances the accumulation of Fe, Mn, Co, and Cd in Arabidopsis. *Plant Science*, 2021, **312**, doi: 10.1016/j.plantsci.2021.111058.
- [31] Satoh-Nagasawa N, Mori M, Nakazawa N, *et al.* Mutations in rice (*Oryza sativa*) heavy metal ATPase 2 (*OsHMA2*) restrict the translocation of zinc and cadmium [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2012, **53**(1): 213-224.
- [32] 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.
- [33] Yamaji N, Xia J X, Mitani-Ueno N, *et al.* Preferential delivery of zinc to developing tissues in rice is mediated by P-type heavy metal ATPase OsHMA2 [J]. *Plant Physiology*, 2013, **162**(2): 927-939.
- [34] 万亚男, 张燕, 余焱, 等. 铁营养状况对黄瓜幼苗吸收转运镉和锌的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(3): 409-414.
Wan Y N, Zhang Y, Yu Y, *et al.* Effects of iron supply on cadmium and zinc uptake and translocation by cucumber seedlings [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(3): 409-414.
- [35] Xiao A W, Li W C, Ye Z H. Effects of Fe-oxidizing bacteria (FeOB) on iron plaque formation, As concentrations and speciation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **190**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110136.
- [36] Li S S, Chen S B, Wang M, *et al.* Iron fractions responsible for the variation of Cd bioavailability in paddy soil under variable pe + pH conditions[J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126355.
- [37] Shah K, Kumar R G, Verma S, *et al.* Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, **161**(6): 1135-1144.
- [38] Philippot L, Raaijmakers J M, Lemanceau P, *et al.* Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, **11**(11): 789-799.
- [39] Mendes R, Kruijt M, De Bruijn I, *et al.* Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria [J]. *Science*, 2011, **332**(6033): 1097-1100.
- [40] Ali B, Sabri A N, Ljung K, *et al.* Auxin production by plant associated bacteria: Impact on endogenous IAA content and growth of *Triticum aestivum* L. [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2009, **48**(5): 542-547.
- [41] Minari G D, Saran L M, Lima Constancio M T, *et al.* Bioremediation potential of new cadmium, chromium, and nickel-resistant bacteria isolated from tropical agricultural soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **204**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111038.
- [42] Ambler R P, Meyer T E, Kamen M D. Amino acid sequence of a high redox potential Ferredoxin (HiPIP) from the purple phototrophic bacterium *Rhodospila globiformis*, which has the highest known redox potential of its class [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1993, **306**(1): 215-222.
- [43] Imhoff J F, Rahn T, Künzel S, *et al.* New insights into the metabolic potential of the phototrophic purple bacterium *Rhodospila globiformis* DSM 161^T from its draft genome sequence and evidence for a vanadium-dependent nitrogenase [J]. *Archives of Microbiology*, 2018, **200**(6): 847-857.
- [44] Desiderato J G, Alvarenga D O, Constancio M T L, *et al.* The genome sequence of *Dyella jiangningensis* FCAV SCS01 from a lignocellulose-decomposing microbial consortium metagenome reveals potential for biotechnological applications [J]. *Genetics and Molecular Biology*, 2018, **41**(2): 507-513.
- [45] Dong M F, Feng R W, Wang R G, *et al.* Inoculation of Fe/Mn-oxidizing bacteria enhances Fe/Mn plaque formation and reduces Cd and As accumulation in rice plant tissues [J]. *Plant and Soil*, 2016, **404**(1-2): 75-83.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water; A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)