

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

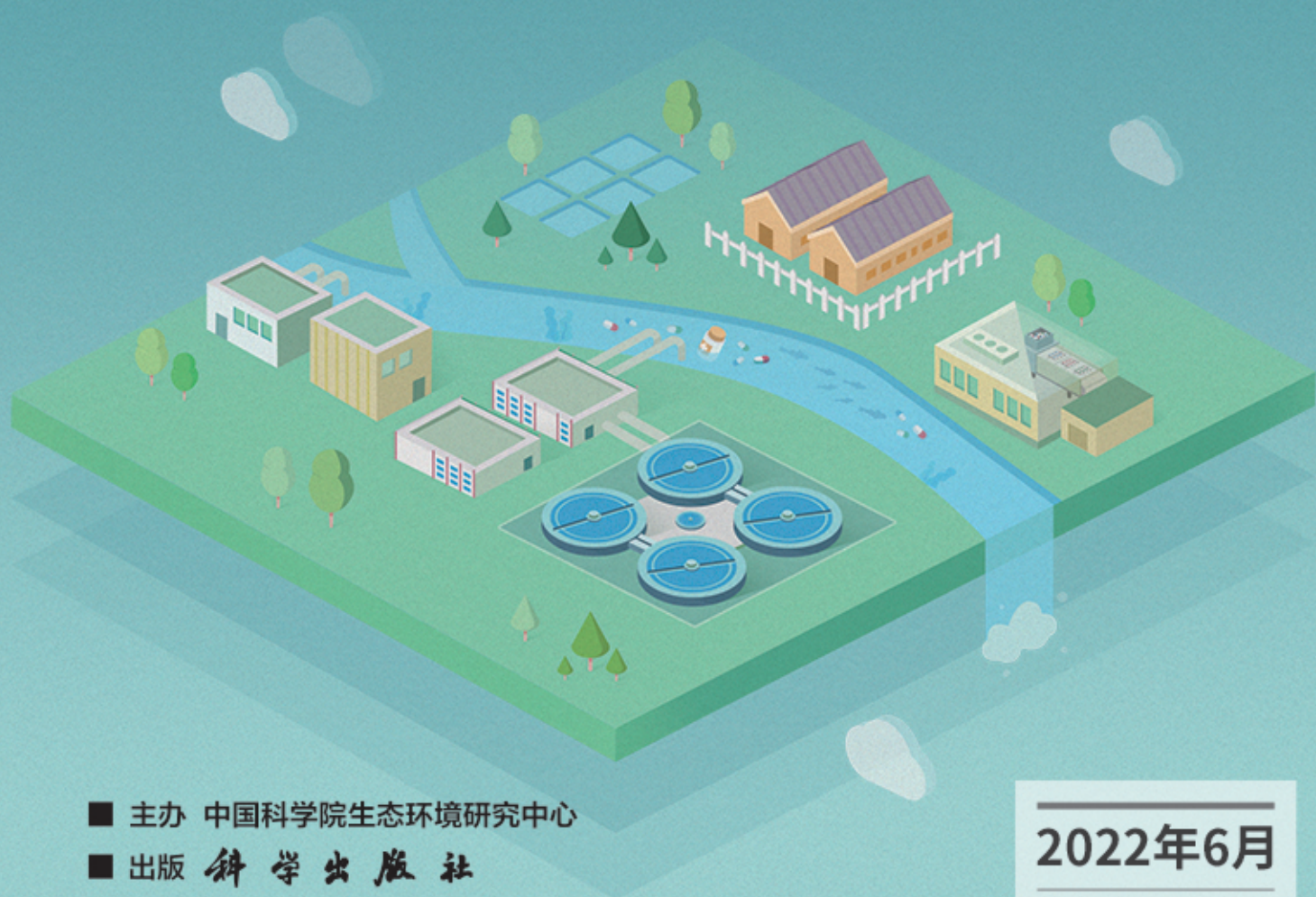
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜祺, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响

谭文韬¹, 霍洋¹, 周航^{1,2*}, 仇银燕¹, 曾鹏^{1,2}, 辜娇峰^{1,2}, 廖柏寒^{1,2}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 糙米品质安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 磷(P)是作物生长的必需营养元素, Cd污染耕地中P盈亏对水稻Cd吸收转运的影响和效应还不清晰. 通过水培试验施加不同水平的P(NaH_2PO_4), 研究Cd胁迫下, 缺P($1.5 \sim 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以P元素计, 下同)和富P($12.0 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对水稻Cd吸收、转运和累积的影响. 结果表明: ① Cd胁迫下, $\rho(\text{P})$ 的增加($1.5 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 水稻生物量无明显变化, 叶片光合色素(叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素)的含量先上升后下降, 高浓度的P抑制光合色素的合成; ② 在缺P和富P条件下, 随着P浓度的提高, 水稻各部位Cd的含量增加, 尤其是糙米中Cd含量分别显著增加132.1%和191.2%; ③ 糙米的P/Cd比值在缺P和富P下呈现分段减少规律, 同时糙米中Cd含量与P/Cd呈显著($P < 0.01$)负相关. Cd胁迫下, 水稻缺P和富P时提高P浓度均会促进水稻根系对Cd的吸收与转运, 提高Cd在地上部位的累积, 增加糙米Cd超标的风险.

关键词: 磷; 镉; 水稻; 转运; 累积

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3308-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202110118

Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice

TAN Wen-tao¹, HUO Yang¹, ZHOU Hang^{1,2*}, QIU Yin-yan¹, ZENG Peng^{1,2}, GU Jiao-feng^{1,2}, LIAO Bo-han^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Engineering Laboratory for Control of Rice Quality and Safety, Changsha 410004, China)

Abstract: Phosphorus (P) is an essential nutrient element for crop growth. The effects of P surplus or deficit on Cd absorption and transport in rice in Cd-polluted farmland is not clear. The effects of P deficiency and P sufficiency on Cd uptake, transport, and accumulation in rice under Cd stress were investigated by applying different levels of phosphorus (NaH_2PO_4) in a hydroponic experiment. The results showed that: ① with the increase in $\rho(\text{P})$ ($1.5 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the biomass in all parts of the rice plants had no obvious change, and the contents of photosynthetic pigment (chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoid) firstly ascended and then descended; high concentrations of P inhibited the synthesis of photosynthetic pigments. ② Under Cd stress, when the P was deficient ($1.5 \sim 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) or sufficient ($12.0 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the Cd content in different parts of the rice increased with the increase in P addition level, and the maximum increase in Cd content in brown rice was 132.1% and 191.2%, respectively. ③ The P/Cd of brown rice showed a piecewise decreasing rule under P deficiency and P sufficiency, and the Cd content in brown rice was significantly negatively correlated with P/Cd ($P < 0.01$). These results indicated that elevating phosphorus concentration when rice was under both the conditions of P deficiency and P sufficiency could promote the uptake and transport of Cd by rice roots under Cd stress, thus increasing the accumulation of Cd in aboveground parts and the risk of excessive Cd in rice.

Key words: phosphorus (P); cadmium (Cd); rice; translocation; accumulation

镉(cadmium, Cd)是一种具有高毒性的重金属,是土壤重金属污染的主要元素之一^[1,2]. 土壤Cd污染主要来源于工矿业废渣和废水的排放,以及农药和化肥的不当使用^[3]. 稻米Cd含量超标一直是公众关注的焦点. 为了消除或减少土壤Cd污染对水稻生产以及人类健康的负面影响,已有学者对必需营养元素影响土壤-水稻系统中Cd的吸收、迁移、转运过程开展了研究,如水稻Cd累积受到铁、锰、钙、锌和硅等元素的影响^[4~8],这些元素可与Cd竞争相关转运蛋白,减少水稻中Cd的累积^[9~12]. 铁和锰能促进水稻根表铁膜的形成,影响根部Cd吸收^[13,14],钙可与土壤溶液中的 Cd^{2+} 在水稻根表面竞争吸收^[15],锌是Cd在水稻根系的主要竞争阳离子^[16].

磷(phosphorus, P)是植物生长的必需元素^[17],是ATP、RNA、DNA和磷脂等基本生物分子的主要组成部分,几乎影响着植物的每一个发育和生化过

程^[18]. 尽管土壤中P总含量很高,但生物可利用的无机磷酸盐缺乏限制了农业生产,因此农业上常施用P肥增加水稻产量,改善稻米品质. 然而,过量施用P肥会导致P的流失和富营养化^[19]. 有研究表明,P对水稻体内Cd的吸收、转运、分布和累积存在促进或抑制效果^[20,21]. Adhikari等^[22]的研究发现施用磷酸钙 $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$ 显著降低了水稻植株Cd含量,并提高了鲜重、根重、株高和叶绿素含量. Lee等^[23]在Cd污染稻田土壤中施用磷酸二氢钾(KH_2PO_4),结果发现,随着P肥施用量的增加($0 \sim 390 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),水稻籽粒、茎和根中Cd含量显著降低. 然而,有研究表明,在缺P和富P条件下, Cd在

收稿日期: 2021-10-15; 修订日期: 2021-10-31

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ31159); 湖南省重点研发计划项目(2021NK2027); 湖南省科技人才托举工程项目(2019TJ-N05)

作者简介: 谭文韬(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为水稻镉的吸收与转运机制, E-mail: tanwentao@163.com

* 通信作者, E-mail: zhouhang4607@163.com

水稻中的含量没有明显变化^[24], 甚至外施 P 导致水稻 Cd 累积量的增加^[25]. 如 Liu 等^[26] 的研究表明增施外源 P 可显著增加水稻幼苗芽和根中 Cd 含量. 以上研究表明, 在 Cd 污染耕地中 P 盈亏对水稻 Cd 吸收转运的影响还不清晰. 本文通过水培试验, 研究 Cd 胁迫下, 缺 P 和富 P 条件下水稻 Cd 积累和转运的影响, 以期对 Cd 污染稻田科学合理施用 P 肥提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为湖南省常规晚籼稻黄华占, 水稻种子由湖南亚华种业有限公司提供. 试验前, 将颗粒饱满的水稻种子用 10% 的 H_2O_2 溶液表面灭菌 15 min, 以去离子水洗涤 5 次后浸泡 24 h, 覆盖纱布于 $(30 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的暗室内培养 48 h. 萌发后的幼苗移入 1/4 强度的木村 B 培养液^[27], 在 $30^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ (昼/夜) 温度周期, 相对湿度 80%, 14 h/10 h (昼/夜) 光照周期环境下, 培养至三叶一心水稻幼苗.

1.2 试验设计

水稻水培试验通过向营养液中添加氯化镉 ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{H}_2\text{O}$, 分析纯) 模拟 Cd 胁迫环境, $\rho(\text{Cd})$ 为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 Cd 元素计). 在水稻营养液为缺 P [营养液中 $\rho(\text{P}) \leq 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 和富 P [营养液中 $\rho(\text{P}) \geq 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 两种状态^[28] 中进行 Cd 胁迫处理, 其中缺 P 状态下营养液中设置 3 个 P 处理, $\rho(\text{P})$ 分别为 1.5、3.0 和 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 富 P 状态下营养液中设置 3 个 P 处理, $\rho(\text{P})$ 分别为 12.0、24.0 和 $48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 营养液中 P 的添加均为 NaH_2PO_4 (分析纯), 以 P 元素计. 试验共 6 个处理, 均重复 3 次, 共计 18 盆, 各试验处理编号分别记为 P1.5、P3、P6、P12、P24 和 P48.

2019 年 7 月 24 日, 挑选长势一致的水稻幼苗, 以白色海绵包裹住茎部底端, 固定于黑色泡沫板 (一板三穴, 一穴二株), 移栽至含有 12 L 木村 B 营养液的圆柱形黑色塑料桶中, 按照试验设计分别在营养液中添加 Cd 和不同浓度的 P. 水稻培养过程中每 3 d 换一次营养液, 以 $1.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HNO_3 和 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 调节营养液 pH 至 5.5 (弱酸性为水稻生长最适 pH 范围)^[29], 同时防止营养液中生成沉淀^[30], 培养至水稻成熟. 本试验开展场地为中南林业科技大学露天盆栽试验区, 水稻生长光热条件为自然条件, 根据常规农艺措施对水稻进行喷施农药、除虫和追肥.

1.3 样品采集

2019 年 11 月 17 日, 采集成熟水稻样品, 先后用

清水和去离子水多次洗涤至无营养液残留, 将水稻根、茎、叶、谷壳和糙米分离并分装, 留取一部分水稻鲜叶于 4°C 下冷藏保存, 待测光合色素含量. 水稻各部位于通风处晾干, 在鼓风干燥箱中于 105°C 杀青 30 min, 于 70°C 烘干至恒重. 将烘干后的水稻各部位样品称干重, 粉碎, 置于塑料密封袋中保存备用.

1.4 样品分析与测定

水稻各部位 Cd 含量采用干灰化法消解^[31], 同时做 3 组空白试验, 消解液中 Cd 浓度以电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP 6300, ThermoFisher) 测定, 以湖南大米 [GBW 10045 (GSB-23)] 进行质量控制分析, Cd 的回收率为 94.9% ~ 103.8%. 水稻各部位 P 含量采用湿式消解钼锑抗比色法^[32]、以紫外可见分光光度计 (UV2600, UNIC) 在波长为 700 nm 测定, P 回收率为 97.0% ~ 99.5%. 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素以紫外可见光光度计分别在 665、647 和 470 nm 波长下测定.

1.5 数据分析

试验数据以 Office Excel 2019 和 IBM SPSS 26 进行分析, 所有数据均以 OriginPro 9.0 绘图. 表格数据表示为平均值 $\pm$ 标准偏差 ($n = 3$), 同列数据不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$). 采用单因素 ANOVA 中 Duncan 多重比较法分析各处理差异 ($P < 0.05$). Pearson 线性相关分析用于调查数据之间的关系, 以两个显著性水平 (0.05 和 0.01) 呈现结果.

水稻各部位的 Cd 积累量由以下公式计算:

$$M_i = C_i \times B_i$$

式中, C 为各部位 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B 为各部位干重, g; M 为各部位 Cd 累积量, μg ; i 表示水稻各部位, 根、茎、叶、谷壳和糙米.

水稻各部位间转运能力以转运系数 (translocation factor, TF) 表示, 即后一部位 Cd 含量 (C) 与前一部位 Cd 含量的比值, 如 $\text{TF}_{\text{根-茎}} = C_{\text{茎}}/C_{\text{根}}$.

2 结果与分析

2.1 水稻缺 P 和富 P 对水稻生长和叶片光合色素的影响

由表 1 可知, Cd 胁迫下水稻缺 P 和富 P 状况对其各部位生物量及总生物量的影响不显著 ($P < 0.05$). 在水稻缺 P 条件下, 随 $\rho(\text{P})$ 的增加 ($1.5 \sim 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 各处理水稻各部位生物量影响不显著; 而在水稻富 P 条件下, 随 $\rho(\text{P})$ 增加 ($12.0 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 各处理水稻各部位生物量变化表现为先增加后减少, 且 $\text{P24} > \text{P48} > \text{P12}$. 糙米生物量是

评估水稻产量的重要指标,在水稻缺 P 和富 P 条件下,随着营养液中 $\rho(P)$ 的提高 (1.5 ~ 48.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),糙米生物量的范围为 13.4 ~ 17.6 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,其中 P24 处理下糙米生物量最大。

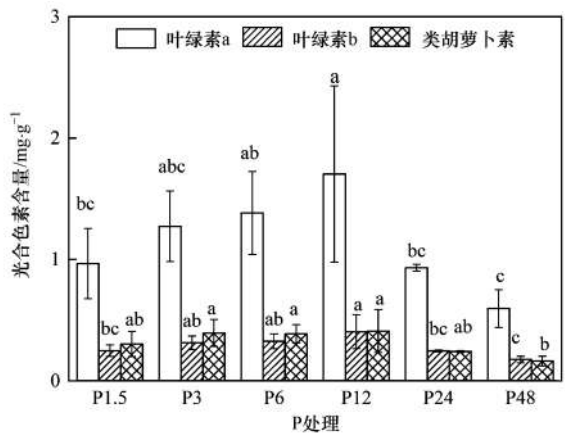
表 1 各处理对水稻生物量的影响¹⁾

Table 1 Effects of different treatments on biomass of rice plants

处理	水稻各部位生物量/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$					
	根	茎	叶	谷壳	糙米	总生物量
P1.5	$2.8 \pm 1.4\text{a}$	$13.9 \pm 5.5\text{a}$	$8.8 \pm 2.6\text{a}$	$6.6 \pm 2.1\text{a}$	$14.3 \pm 0.5\text{a}$	$46.3 \pm 11.4\text{a}$
P3	$2.6 \pm 1.1\text{a}$	$17.5 \pm 0.9\text{a}$	$9.2 \pm 0.3\text{a}$	$5.0 \pm 1.1\text{a}$	$15.0 \pm 5.2\text{a}$	$49.3 \pm 7.5\text{a}$
P6	$2.7 \pm 0.8\text{a}$	$14.7 \pm 3.2\text{a}$	$8.4 \pm 1.4\text{a}$	$6.1 \pm 1.5\text{a}$	$15.3 \pm 3.1\text{a}$	$47.2 \pm 4.8\text{a}$
P12	$2.2 \pm 0.9\text{a}$	$13.8 \pm 3.5\text{a}$	$8.2 \pm 2.0\text{a}$	$4.6 \pm 1.6\text{a}$	$13.4 \pm 3.6\text{a}$	$42.1 \pm 11.0\text{a}$
P24	$2.2 \pm 0.9\text{a}$	$18.8 \pm 0.2\text{a}$	$10.4 \pm 3.5\text{a}$	$5.8 \pm 1.2\text{a}$	$17.6 \pm 3.5\text{a}$	$54.8 \pm 3.5\text{a}$
P48	$2.2 \pm 0.4\text{a}$	$15.5 \pm 4.9\text{a}$	$10.0 \pm 1.1\text{a}$	$5.6 \pm 2.9\text{a}$	$15.6 \pm 2.4\text{a}$	$48.9 \pm 5.1\text{a}$

1) 数据为平均值 $\pm$ 标准误差; 同列数据不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

光合作用是植物吸收光能转化为生物能的主要机制^[33],因此光合色素的含量对水稻生长有重要影响^[34].图 1 为各处理水稻鲜叶片中光合色素含量.在 Cd 胁迫且水稻缺 P 和富 P 条件下,随着 $\rho(P)$ 的提高 (1.5 ~ 48.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),光合色素 (叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素) 的含量呈现先上升后下降的趋势,均在 P12 处理下达到最高含量,分别为 1.70、0.40 和 0.41 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$.水稻缺 P 条件下 ($\leq 6.0 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),当 $\rho(P)$ 从 1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 6.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,叶片中光合色素含量提高,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的最大增幅分别为 43.2%、31.0% 和 28.2%;而当水稻富 P 条件下 ($\geq 12.0 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\rho(P)$ 从 12.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 48.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,叶片中光合色素含量逐渐下降,3 种光合色素含量的最大降幅分别为 65.1%、56.6% 和 60.4%.上述结果说明, Cd 胁迫且水稻缺 P 条件下,增加 P 可促进水稻叶片光合色素的合成,而富 P 条件下,增加 P 则抑制水稻叶片光合色素的合成。



不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同

图 1 各处理水稻光合色素含量

Fig. 1 Contents of photosynthetic pigment in rice leaves with different treatments

2.2 水稻缺 P 和富 P 对水稻各部位 Cd 含量的影响

从图 2 可知,水稻缺 P 和富 P 条件下,各处理水

稻根、茎、叶、谷壳和糙米中的 Cd 含量变化显著.水稻缺 P 条件下 ($\leq 6.0 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随各处理 $\rho(P)$ 的提高 (1.5 ~ 6.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),水稻根、茎、谷壳和糙米中 Cd 含量逐渐增加,最大增幅分别为 191.4%、86.4%、73.3% 和 132.1%,而水稻叶中 Cd 含量在 P3 处理下达到最大值.在水稻富 P 条件下 ($\geq 12.0 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随 $\rho(P)$ 的提高 (12.0 ~ 48.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),水稻根、茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量增加,最大增幅分别为 217.0%、194.6%、606.5%、35.9% 和 191.2%.这说明水稻缺 P 和富 P 条件下 P 均促进了水稻各部位对 Cd 的吸收,其中 P1.5 处理下糙米 $\omega(\text{Cd})$ 最低,为 0.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 P48 处理下糙米中

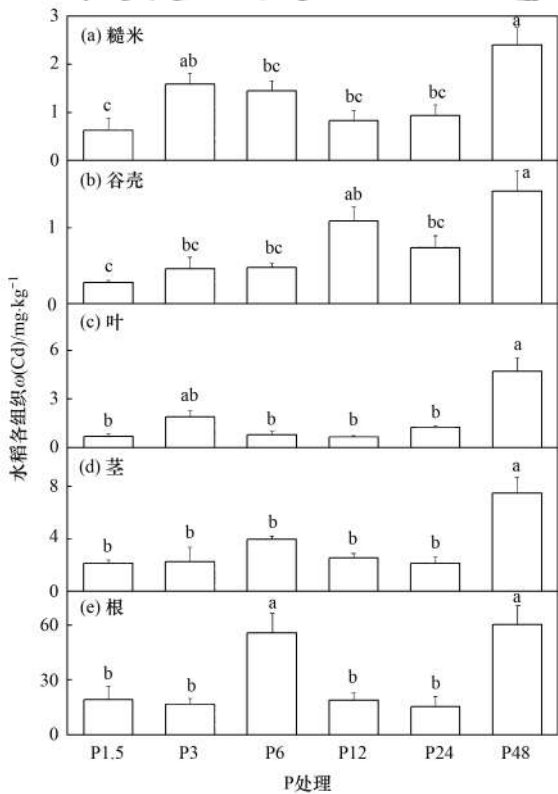


图 2 不同处理下水稻各部位 Cd 含量

Fig. 2 Content of Cd in different tissues of rice plants with different treatments

$\omega(\text{Cd})$ 最高, 达 $2.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 水稻缺 P 和富 P 对各部位 Cd 积累的影响

Cd 胁迫下缺 P 和富 P 处理水稻各部位中 Cd 的累积量见图 3。各部位 Cd 累积量占总累积的比例差异结果表明, 根是水稻吸收和积累 Cd 的主要部位 (31.7% ~ 62.7%), 其次是茎 (24.2% ~ 37.0%) 和糙米 (8.9% ~ 18.8%), 叶和谷壳中 Cd 累积量较低。在缺 P ($\leq 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和富 P ($\geq 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下, 水稻 Cd 累积量呈现出分段增加趋势。在水稻缺 P 条件下, 随着 $\rho(\text{P})$ 由 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 地上部位 Cd 的累积量提高了 80.4% ~ 94.3%, 其中糙米累积量提高了 115.1% ~ 132.0%; 水稻各部位在 P6 处理下均达到最大值, 其中根系和糙米 Cd 累积量分别为 $151.5 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $22.2 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。在水稻富 P 条件下, 当 $\rho(\text{P})$ 由 $12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 地上部位 Cd 累积量提高了 30.0% ~ 268.9%, 其中糙米累积量提高了 39.9% ~ 214.4%; 水稻各部位在 P48 处理下均达到最大值, 其中根系和糙米 Cd 累积量分别为 $132.0 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $37.6 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

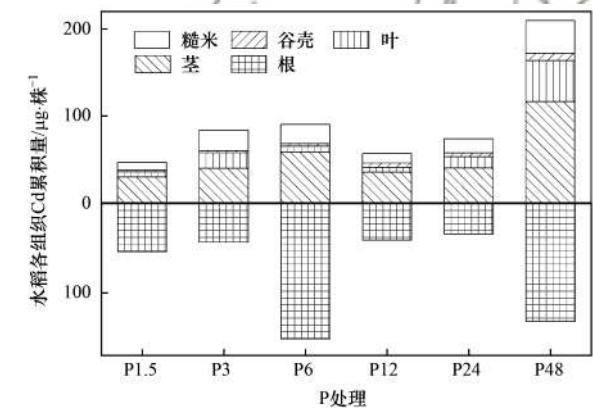


图 3 不同处理下水稻各部位 Cd 累积量
Fig. 3 Cd accumulation in rice tissues under different treatments

2.4 水稻各部位之间 Cd 的转运系数

转运系数表示 Cd 在水稻不同部位间的迁移能力。P 浓度水平可影响各部位之间 Cd 的转运系数。从图 4 可知, $\text{TF}_{\text{根-茎}}$ 的转运系数为 0.071 ~ 0.139, 低于地上部位之间的转运系数。地上部位茎与各部位间转运系数大小顺序为: $\text{TF}_{\text{茎-叶}} > \text{TF}_{\text{茎-糙米}} > \text{TF}_{\text{茎-谷壳}}$,

表明茎中 Cd 向叶转运的能力强于向糙米和谷壳转运能力。水稻缺 P 和富 P 条件下, P 浓度增加对 $\text{TF}_{\text{根-茎}}$ 没有明显影响。 $\text{TF}_{\text{茎-叶}}$ 、 $\text{TF}_{\text{茎-糙米}}$ 和 $\text{TF}_{\text{茎-谷壳}}$ 的变化趋势基本一致, 在水稻缺 P ($\leq 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件时, 随 P 浓度上升均呈现先增加后减少, P6 下最低; 水稻富 P ($\geq 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件时, 随 P 浓度上升, 茎向各部位间转运系数变化趋势不一, 其中 $\text{TF}_{\text{茎-谷壳}}$ 呈逐渐降低趋势, 而 $\text{TF}_{\text{茎-叶}}$ 持续增加。

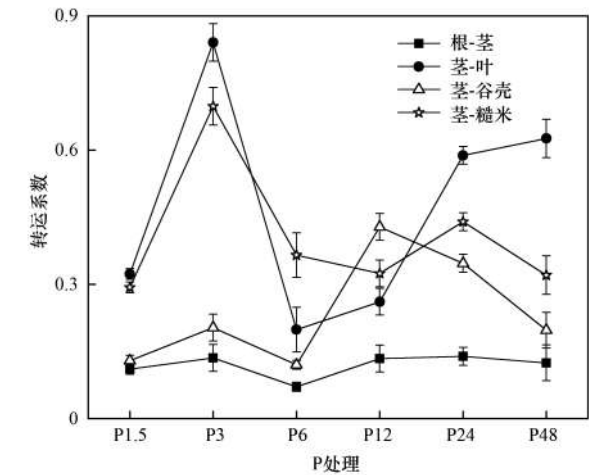


图 4 水稻各部位间 Cd 的转运系数
Fig. 4 Translocation factors of Cd among various rice tissues

2.5 水稻各部位 P/Cd

P/Cd 可以反映水稻各部位 P 和 Cd 增加量之间的相对关系。表 2 中水稻各部位 P/Cd 的大小顺序为: 糙米 > 谷壳 > 叶 > 茎 > 根。在缺 P ($\leq 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和富 P ($\geq 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 两种浓度范围内, 根和茎中 P/Cd 具有相同的变化规律, 随 P 浓度提高 P/Cd 均先增加后减少; 叶片和谷壳 P/Cd 的变化规律不明显, 但 P48 相较 P1.5 处理显著减少; 而糙米 P/Cd 分别在缺 P ($\leq 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和富 P ($\geq 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下表现为分段下降趋势。这表明, 水稻在缺 P 和富 P 条件下, 提高 P 浓度会促进水稻根、茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 的累积。

进一步分析了谷壳和糙米中 Cd 与 P/Cd 的相关性。各处理下, 谷壳 Cd 含量与 P/Cd 呈显著负相关关系, 糙米 Cd 含量与 P/Cd 呈极显著负相关关系 (图 5), 其相关系数分别为 $R^2_{\text{谷壳}} = 0.8356$ 和 $R^2_{\text{糙米}} =$

表 2 各处理下水稻各部位 P/Cd

处理	水稻各部位 P/Cd				
	根	茎	叶	谷壳	糙米
P1.5	59.9 ± 17.2bc	424.9 ± 68.7d	1 120.9 ± 377.0c	3 147.3 ± 167.9a	3 035.0 ± 250.8b
P3	74.6 ± 12.3b	878.4 ± 252.5bc	736.3 ± 65.7d	2 502.7 ± 870.8ab	1 833.7 ± 220.8d
P6	30.8 ± 7.9c	586.0 ± 123.4cd	2 572.8 ± 171.6a	2 496.7 ± 390.6ab	1 893.0 ± 113.8d
P12	74.5 ± 18.5b	1 009.1 ± 107.9b	2 572.6 ± 143.8a	1 134.8 ± 379.1c	4 355.5 ± 271.5a
P24	117.7 ± 41.6a	1 329.1 ± 253.4a	1 637.8 ± 276.6b	1 692.3 ± 387.9bc	2 482.1 ± 433.3c
P48	53.6 ± 4.6bc	503.5 ± 67.1d	490.8 ± 11.4d	1 222.0 ± 410.4c	1 247.2 ± 291.3e

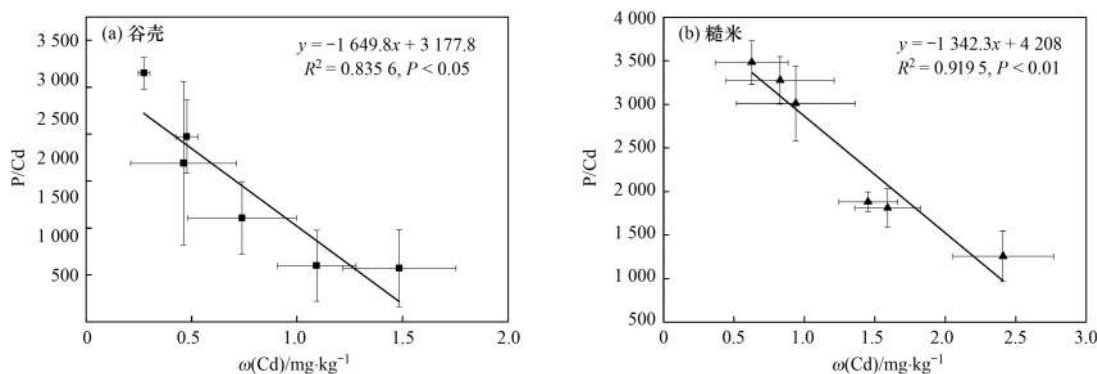


图5 水稻谷壳和糙米中 Cd 含量与 P/Cd 的关系

Fig. 5 Relationship between Cd concentrations and P/Cd in husk and brown rice

0.9195. 这些结果表明,水稻谷壳和糙米中 Cd 含量随其 P 含量增加而显著增加。

3 讨论

P 是水稻生长的必需元素,也是光合色素的重要组成部分,影响水稻叶片光合作用,促进水稻生长,并增加水稻的生物量^[35,36]. 本研究中,在水稻缺 P ($\leq 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和富 P ($\geq 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下, Cd ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫对水稻各部位生物量变化无明显影响(表 1),而水稻各部位 Cd 含量及 Cd 累积量均呈上升趋势(图 2 和图 3). 这与已有研究报道的施用 P 促进水稻生长而降低水稻 Cd 积累的“稀释效应”^[37] 相反. 其原因在于本研究中 Cd 胁迫下,提高 $\rho(\text{P})$ ($1.5 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 促进了水稻各部位 Cd 积累,从而抑制水稻叶片光合作用,对水稻生长产生毒害作用. 水稻叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量在 $\rho(\text{P})$ 为 $1.5 \sim 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内上升(图 1),水稻茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量亦呈上升趋势(图 2),继续提高 $\rho(\text{P})$ ($12.0 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),叶片中 Cd 含量进一步上升,过量 Cd 会破坏叶绿体结构,导致光合色素含量下降(图 1). 这说明 Cd 胁迫下,水稻缺 P 状况时适当提高 P 浓度有利于水稻叶片中光合色素的合成,而水稻富 P 状况时,过量 P 导致 Cd 含量提高,反而抑制了光合色素的合成^[38,39]. 此外,本研究的水培溶液中 $\rho(\text{Cd})$ 为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,各处理水稻各部位 P 含量均增加,且水稻各部位中 Cd 含量均较高,尤其是糙米中 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.63 \sim 2.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且糙米中 Cd 含量与 P/Cd 呈极显著负相关关系(图 5),这表明 Cd 胁迫下,糙米中 P 与 Cd 存在协同作用,糙米中 P 含量的增加显著提高了 Cd 的累积,说明水培条件下全生育期 Cd 胁迫对水稻生长产生明显毒害效应明显高于中重度 Cd 污染稻田土壤. 大量研究表明,过量 Cd 会损伤水稻根尖细胞核,影响 RNA 的合成,抑制酶的活性,减少 Fe 元素的转运等^[40,41].

根系是水稻吸收 Cd 的重要部位^[42]. 本研究结果中,根中 Cd 含量、累积量和 P/Cd 均表现出缺 P 和富 P 下的分段变化,并均在 P6 和 P48 处理附近较突出(图 2、图 3 和表 2). 这些结果说明,水稻缺 P 和富 P 时, P 对 Cd 在根中的吸收均表现出较大的协同作用,高 P 水平促进了 Cd 在水稻各部位中的累积,同时分段变化也表明,缺 P 和富 P 时根系可能存在不同的 Cd 吸收转运机制. 有研究表明, P 促进 Cd 在水稻根系中的吸收可能与根系中相关转运基因的表达式有关,其中转运基因 *OsNramp1* 和 *OsNramp5* 参与根系中 Cd 的转运过程^[24]. *OsNramp1* 是缺 P 状态下植物根系吸收 Cd 的主要转运体^[43]. 本研究中,水稻缺 P 状态下,随 $\rho(\text{P})$ 的提高 ($1.5 \sim 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),水稻各部位 Cd 含量均增加,但根部 Cd 增加量远高于茎、叶、谷壳和糙米部位 Cd 增加量,因此水稻各部位间转运系数先上升后下降,这可能是缺 P 信号促进了 *OsNramp1* 基因的表达,导致根中 Cd 含量显著增加. *OsNramp5* 是水稻根细胞中参与吸收 Cd 的主要转运体,也负责 Cd 从根向地上部位的转运^[44],而 P 的施入会促进 *OsNramp5* 基因的表达^[45]. 水稻富 P 状态下,持续提高 $\rho(\text{P})$ ($12.0 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 提高了各部位间转运系数,因此高浓度的 P 可能促进 *OsNramp5* 基因的表达,从而促进了水稻对 Cd 的积累,并增加了 Cd 从根向地上部位的转运(图 4). 同时, P 会促进根系生长和植物的蒸腾作用,进而促进水稻对 Cd 的吸收和从根到地上部位的转运作用^[46]. 显然,在 Cd 胁迫下,水稻缺 P 和富 P 时, P 浓度的提高促进了 Cd 在根系中的累积,且增强了 Cd 从根向茎、糙米中的转运. 各处理间水稻各部位 Cd 含量的变化表明,水稻 P 与 Cd 的累积存在协同作用. 本研究结果显示,水稻各部位 Cd 含量在 P6 ~ P12 处理间突降, P6 处理下水稻对 Cd 的累积明显高于 P12 处理,这说明 Cd 胁迫下 $\rho(\text{P})$ 在 $6.0 \sim 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是水稻 Cd 吸收转运调控的关键区域. P 对水稻吸收 Cd 的影响

不是单纯的促进或抑制作用,最适宜的 P 浓度添加水平可能与 P 对水稻对 Cd 吸收转运的影响相关,需要进一步研究复杂的 P-Cd-水稻相互作用,以更清楚地了解 P 水平影响水稻吸收和转运 Cd 的机制。

4 结论

(1) 水培试验 Cd 胁迫 ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, $\rho(\text{P})$ 的提高 ($1.5 \sim 48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对水稻生物量无明显影响, P 对糙米产量增加的贡献较低; 在 $\rho(\text{P})$ 为 $12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下, 水稻叶片光合色素含量最高, 缺 P 和富 P 均抑制光合色素的合成。

(2) P 添加水平对 Cd 在水稻中的吸收和累积呈现分段增加趋势, 在水稻缺 P ($\leq 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和富 P ($\geq 12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 状态下, 提高 P 浓度均会增加水稻各部位 Cd 的累积, 糙米中 Cd 含量在缺 P 和富 P 下最高增幅分别为 132.1% 和 191.2%。

(3) 在水稻缺 P 和富 P 条件下, 增加 P 浓度均会促进 Cd 从根向地上部位转运, 且茎中 Cd 向叶转运的能力强于向糙米和谷壳转运的能力; 糙米的 P/Cd 比值在缺 P 和富 P 下呈现分段减少规律, 增加 P 会促进糙米对 Cd 的累积。

参考文献:

- [1] Yang J L, Li K, Zheng W, *et al.* Characterization of early transcriptional responses to cadmium in the root and leaf of Cd-resistant *Salix matsudana* Koidz[J]. BMC Genomics, 2015, **16** (1), doi: 10.1186/s12864-015-1923-4.
- [2] Liu X D, Liu F, Huang W H, *et al.* Quantitative determination of Cd in soil using laser-induced breakdown spectroscopy in air and Ar conditions[J]. Molecules, 2018, **23** (10), doi: 10.3390/molecules23102492.
- [3] Yin A G, Yang Z Y, Ebbs S, *et al.* Effects of phosphorus on chemical forms of Cd in plants of four spinach (*Spinacia oleracea* L.) cultivars differing in Cd accumulation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23** (6): 5753-5762.
- [4] Chen Z, Tang Y T, Zhou C, *et al.* Mechanisms of Fe biofortification and mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown hydroponically with Fe chelate fertilization[J]. Chemosphere, 2017, **175**: 275-285.
- [5] 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 等. 叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻富集镉的影响机制[J]. 环境科学, 2021, **42** (2): 932-940.
- [6] Zhou Y M, Huang Y Y, Liu X Y, *et al.* Effect and mechanism of foliar application nano- MnO_2 on cadmium enrichment of rice[J]. Environmental Science, 2021, **42** (2): 932-940.
- [7] Zhang S, Li Q, Nazir M M, *et al.* Calcium plays a double-edged role in modulating cadmium uptake and translocation in rice[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, **21** (21), doi: 10.3390/ijms21218058.
- [8] Wang H, Xu C, Luo Z C, *et al.* Foliar application of Zn can reduce Cd concentrations in rice (*Oryza sativa* L.) under field conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25** (29): 29287-29294.
- [9] Bari M A, Prity S A, Das U, *et al.* Silicon induces phytochelatin and ROS scavengers facilitating cadmium detoxification in rice[J]. Plant Biology, 2020, **22** (3): 472-479.
- [10] Zhao Z Q, Zhu Y G, Cai Y L. Effects of zinc on cadmium uptake by spring wheat (*Triticum aestivum*, L.): long-time hydroponic study and short-time ^{109}Cd tracing study[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2005, **6** (7): 643-648.
- [11] Shao G S, Chen M X, Wang W X, *et al.* Iron nutrition affects cadmium accumulation and toxicity in rice plants[J]. Plant Growth Regulation, 2007, **53** (1): 33-42.
- [12] Tian S K, Lu L L, Zhang J, *et al.* Calcium protects roots of *Sedum alfredii* H. against cadmium-induced oxidative stress[J]. Chemosphere, 2011, **84** (1): 63-69.
- [13] Wu D Z, Yamaji N, Yamane M, *et al.* The HvNramp5 transporter mediates uptake of cadmium and manganese, but not iron[J]. Plant Physiology, 2016, **172** (3): 1899-1910.
- [14] Fu Y Q, Yang X J, Shen H. Root iron plaque alleviates cadmium toxicity to rice (*Oryza sativa*) seedlings[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **161**: 534-541.
- [15] 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.
- [16] 王小蒙, 丁永祯, 郑向群, 等. 根施钙镁磷肥与叶喷硅/硒联合调控水稻镉吸收[J]. 环境工程学报, 2016, **10** (11): 6383-6391.
- [17] Wang X M, Ding Y Z, Zheng X Q, *et al.* Cadmium uptake in paddy rice under combined regulation of soil application of calcium magnesium phosphate and leaf spraying of Si/Se[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10** (11): 6383-6391.
- [18] Huang G X, Ding C F, Zhou Z G, *et al.* A tillering application of zinc fertilizer based on basal stabilization reduces Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **167**: 338-344.
- [19] Liu Y, Xie Y R, Wang H, *et al.* Light and ethylene coordinately regulate the phosphate starvation response through transcriptional regulation of *PHOSPHATE STARVATION RESPONSE1* [J]. The Plant Cell, 2017, **29** (9): 2269-2284.
- [20] Oropeza-Aburto A, Cruz-Ramírez A, Acevedo-Hernández G J, *et al.* Functional analysis of the *Arabidopsis* *PLDZ2* promoter reveals an evolutionarily conserved low-Pi-responsive transcriptional enhancer element[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, **63** (5): 2189-2202.
- [21] Akram M S, Shahid M, Tariq M, *et al.* Deciphering *Staphylococcus sciuri* SAT-17 mediated anti-oxidative defense mechanisms and growth modulations in salt stressed maize (*Zea mays* L.) [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, **7**, doi: 10.3389/fmicb.2016.00867.
- [22] Jung H I, Chae M J, Kong M S, *et al.* Effect of phosphorus on the cadmium transfer and ROS-scavenging capacity of rice seedlings[J]. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 2017, **50** (4): 203-214.
- [23] Gao X P, Flaten D N, Tenuta M, *et al.* Soil solution dynamics and plant uptake of cadmium and zinc by durum wheat following phosphate fertilization[J]. Plant and Soil, 2011, **338** (1-2): 423-434.
- [24] Adhikari A, Lee K E, Khan M A, *et al.* Effect of silicate and phosphate solubilizing rhizobacterium *Enterobacter ludwigii* GAK2 on *Oryza sativa* L. under cadmium stress [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2020, **30** (1): 118-126.
- [25] Lee H H, Kim K K, Lee Y B, *et al.* Effect of phosphate

- application on cadmium extractability and its uptake by rice cultivated in contaminated paddy soil [J]. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 2016, **35**(4): 235-240.
- [24] Wang X Q, Ruan W Y, Yi K K. Internal phosphate starvation signaling and external phosphate availability have no obvious effect on the accumulation of cadmium in rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, **18**(9): 2153-2161.
- [25] Seshadri B, Bolan N S, Wijesekara H, *et al.* Phosphorus-cadmium interactions in paddy soils [J]. *Geoderma*, 2016, **270**: 43-59.
- [26] Liu H J, Zhang J L, Christie P, *et al.* Influence of external zinc and phosphorus supply on Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings with root surface iron plaque [J]. *Plant and Soil*, 2007, **300**(1-2): 105-115.
- [27] Li Y Y, Yu S H, Zhou X B. Effects of phosphorus on absorption and transport of selenium in rice seedlings [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(14): 13755-13761.
- [28] 黄文方, 陈晓阳, 邢承华, 等. 磷对水稻耐铝性及根尖细胞壁组分的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2013, **27**(2): 161-167.
- Huang W F, Chen X Y, Xing C H, *et al.* Effects of phosphorus on aluminum tolerance and cell wall polysaccharide components in rice root tips [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, **27**(2): 161-167.
- [29] 朱春权, 徐青山, 曹小闯, 等. 不同属性特征基质对早稻秧苗耐低温的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2021, **35**(5): 503-512.
- Zhu C Q, Xu Q S, Cao X C, *et al.* Effects of substrates with different properties on chilling tolerance of early rice seedlings [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, **35**(5): 503-512.
- [30] Joy J, Silvestri A P, Franke R, *et al.* Calcium and phosphate compatibility in low-osmolarity parenteral nutrition admixtures intended for peripheral vein administration [J]. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 2010, **34**(1): 46-54.
- [31] 王倩倩, 贾润语, 李虹呈, 等. Cd胁迫水培试验下水稻糙米Cd累积的关键生育时期 [J]. *中国农业科学*, 2018, **51**(23): 4424-4433.
- Wang Q Q, Jia R Y, Li H C, *et al.* Key growth stage of Cd accumulation in brown rice through a hydroponic experiment with Cd stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(23): 4424-4433.
- [32] Sayantan D, Shardendu. Phosphorus amendment competitively prevents chromium uptake and mitigates its toxicity in *Spinacea oleracea* L. [J]. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2015, **53**(6): 395-405.
- [33] 李娜, 张峰举, 许兴, 等. 增温对宁夏北部春小麦叶片光合作用的影响 [J]. *生态学报*, 2019, **39**(24): 9101-9110.
- Li N, Zhang F J, Xu X, *et al.* Effects of elevated temperature on photosynthesis of spring wheat in northern Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(24): 9101-9110.
- [34] Ali Q, Ali S, El-Esawi M A, *et al.* Foliar spray of Fe-Asp confers better drought tolerance in sunflower as compared with FeSO₄: Yield traits, osmotic adjustment, and antioxidative defense mechanisms [J]. *Biomolecules*, 2020, **10**(9), doi: 10.3390/biom10091217.
- [35] Siebers N, Siangliw M, Tongcumpou C. Cadmium uptake and subcellular distribution in rice plants as affected by phosphorus: soil and hydroponic experiments [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, **13**(4): 833-844.
- [36] Zhu Z G, Li G R, Yan C H, *et al.* DRL1, encoding a NAC transcription factor, is involved in leaf senescence in grapevine [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, **20**(11), doi: 10.3390/ijms20112678.
- [37] 黄洋, 郭晓, 胡学玉. 生物质炭对磷镉富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2861-2868.
- Huang Y, Guo X, Hu X Y. Effects of biochar on bioavailability of two elements in phosphorus and cadmium-enriched soil and accumulation of cadmium in crops [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2861-2868.
- [38] Fu Y, Mason A S, Zhang Y F, *et al.* MicroRNA-mRNA expression profiles and their potential role in cadmium stress response in *Brassica napus* [J]. *BMC Plant Biology*, 2019, **19**(1), doi: 10.1186/s12870-019-2189-9.
- [39] Hattab S, Dridi B, Chouba L, *et al.* Photosynthesis and growth responses of pea *Pisum sativum* L. under heavy metals stress [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(11): 1552-1556.
- [40] Huang Y M, Chen H Q, Reinfelder J R, *et al.* A transcriptomic (RNA-seq) analysis of genes responsive to both cadmium and arsenic stress in rice root [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 445-460.
- [41] Di Toppi L S, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, **41**(2): 105-130.
- [42] 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.
- [43] Wang H O, Wang T, Ahmad I. Involvement of phosphate supplies in different transcriptional regulation pathway of *Oryza sativa* L.'s antioxidative system in response to arsenite and cadmium stress [J]. *Ecotoxicology*, 2015, **24**(6): 1259-1268.
- [44] Wang T K, Li Y X, Fu Y F, *et al.* Mutation at different sites of metal transporter gene *OsNramp5* affects Cd accumulation and related agronomic traits in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fpls.2019.01081.
- [45] 曹庭悦, 刘鸣达, 沃惜慧, 等. 硅、磷配施对水稻镉吸收转运的影响及其机制 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(1): 37-44.
- Cao T Y, Liu M D, Wo X H, *et al.* Effects of combined application of silicon and phosphorus on cadmium uptake and transport in rice and its mechanisms [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(1): 37-44.
- [46] Gutsch A, Hendrix S, Guerriero G, *et al.* Long-term Cd exposure alters the metabolite profile in stem tissue of *Medicago sativa* [J]. *Cells*, 2020, **9**(12), doi: 10.3390/cells9122707.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)