

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明	(2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹	(2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹	(2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明	(2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思吟, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双	(2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军	(2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启	(2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅	(2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂	(2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮	(2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞	(2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军	(2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰	(2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方	(2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇	(2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波	(2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红	(2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明	(2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥	(2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威	(2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab	(2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞	(2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂	(2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤	(2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣	(2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷	(2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲	(2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春	(2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇	(2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波	(2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞	(2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼	(2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮	(2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉	(2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明	(2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌	(2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬	(2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达	(2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华	(2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀	(2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元	(2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵	(2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇	(2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉	(2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅	(2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯	(2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚	(2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡现秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰	(2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成	(2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭	(2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森	(2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进	(2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰	(2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘	(2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍	(2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽	(2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷非凡	(3003)
《环境科学》征订启事(2480)	《环境科学》征稿简则(2538)	信息(2766, 2798, 2927)

P 对小麦 Cd 和 As 吸收与转运的影响

王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅*

(河南农业大学资源与环境学院, 河南省土壤污染修复重点实验室, 郑州 450002)

摘要: 为了探究磷(P)对小麦幼苗镉(Cd)和砷(As)吸收转运生理机制的影响,通过水培试验,以百农207为供试材料,研究了Cd和As胁迫条件下,外源供P和缺P处理对小麦幼苗生长、根系形态、光合参数、抗氧化系统、离子含量和根茎转移系数的影响。结果表明,与缺P处理相比,外源P供应显著增加As胁迫下小麦幼苗叶绿素的含量,促进根系的生长发育,提高了生物量,而对Cd胁迫下小麦幼苗的生长影响不显著。外源P供应时显著增加了Cd胁迫条件下根系的P和Cd含量,降低了地上部的P和Cd含量;同时显著提高了As胁迫条件下地上部的P和As含量以及As向地上部的转移系数。因此,供P与否对小麦幼苗Cd和As毒害的影响表现出明显的差异性;As胁迫时,外源供P提高了As向地上部的转运能力以及根系的CAT活性,降低了As对小麦的毒害,从而促进了小麦幼苗生物量的累积;而在Cd胁迫条件下,P与Cd之间表现出一定的协同效应,外源供P在一定程度上加重了Cd对小麦的毒害效应。

关键词: 磷(P); 镉(Cd); 砷(As); 小麦; 生理特性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2889-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205333

Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings

WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, HU Cai-xia, WANG Jun, LIU Hong-en, GAO Wei, QIN Shi-yu, SUI Fu-qing, LI Chang*

(Key Laboratory of Soil Pollution Prevention and Remediation of Henan Province, College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The aim of this study was to explore the effect of P on the physiological mechanism of Cd and As uptake and transport of wheat seedlings. Taking Bainong 207 as the test material, we investigated the effects of exogenous P supply and P deficiency treatment on the growth, root morphology, photosynthetic parameters, antioxidant system, ion content, and rhizome transfer coefficient of wheat seedlings under Cd and As stress using hydroponic experiments. The results showed that compared with that in the P deficiency treatment, the supply of exogenous P significantly increased the chlorophyll content of wheat seedlings under As stress, promoted the growth and development of roots, and increased biomass, whereas there were no significant effects on the growth of wheat seedlings under Cd stress. The contents of P and Cd in the root system under the condition of Cd stress were significantly increased by the supply of exogenous P, and the contents of P and Cd in the aboveground part were reduced. At the same time, the P and As content in the shoot and the transfer coefficient of As from the root to the shoot under As stress were significantly improved. Therefore, the effects of P on the poisoning of wheat Cd and As in this study showed obvious differences. Under As stress, exogenous P supply mainly promoted the growth of wheat seedlings by improving the transport of As from the root to the shoot and the CAT activity in the root system, reducing the poisoning of As in wheat. Under Cd stress, P and Cd showed a certain synergistic effect, and the toxic effect of Cd on wheat was aggravated to a certain extent after the supply of P.

Key words: phosphorus (P); cadmium (Cd); arsenic (As); wheat; physiological characteristics

根据2014年土壤调查公告显示,全国土壤污染总的点位超标率为16.1%,其中耕地土壤点位超标率达19.4%,而无机污染物镉(Cd)和砷(As)的点位超标率分别达7.0%和2.7%^[1,2]。Cd和As是环境中极具生物毒性的元素,具有极强的迁移性,广泛存在于水体和土壤中,可通过食物链在动物和人类体内富集,严重威胁人体健康^[3,4]。小麦是我国北方地区种植面积和产量最大的粮食作物之一,其主要通过根系吸收Cd和As并在体内积累,进而影响细胞结构、光合作用和酶活性等,严重时抑制作物生长,导致粮食减产以及籽粒Cd和As含量超标^[5,6]。

磷(P)是植物生长发育所必需的大量营养元素之一,是核酸、磷脂和ATP等功能性分子的重要成分,细胞内P稳态的调节对于植物生理生化过程至关重要^[7]。土壤中的P主要以无机P和有机P的形式存在,其中无机P占土壤总P的35%~70%,植物主要以 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 的形式吸收P。有研究表

明,P与Cd之间的互作结果仍存在争议。P缓解Cd毒害的机制主要包括增加土壤pH促进Cd的吸附、以 CdHPO_4 和 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 等形式发生沉淀、稀释效应中和Cd对植物的毒害、提高植物体内的抗氧化酶活性以及调节菌根的形成等^[8~10]。外源P通过缓解脂质过氧化降低了Cd对黑麦草的毒害效应^[11],施加P肥还能显著降低水稻成熟期根、叶和糙米的Cd含量^[12]。然而,也有研究发现外源P的施用促进小麦的生长,增加小麦中地上部和根部Cd含量,促进Cd由根系向地上部的转运^[13]。

由于P和As属同族元素,化学性质相似,因此对于P与As互作的研究更加广泛。P的存在不仅影

收稿日期: 2022-05-30; 修订日期: 2022-08-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700900); 河南省科技攻关项目(202102110213)

作者简介: 王云(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: wy19435@163.com

* 通信作者, E-mail: changli@henan.edu.cn

响植物对 As 的吸收,同时会影响其在植物体内的迁移转化.在水培条件下,植物对 As 的吸收受到 P 的显著抑制^[14~16],主要是由于 P 与 As 之间竞争结合植物根系细胞中的吸附位点^[17].而在土壤条件下,P 对植物吸收 As 的影响与水培结果存在差异性.一方面,P 可以抑制植物对 As 的吸收,另一方面,P 促进 As 在土壤中的有效性^[18].有研究表明,磷酸盐通过取代土壤结合位点上的 As,从而增加了 As 的有效性和植物的吸收^[19].Shi 等^[20]的研究发现小麦不同器官中根系 As 与 P 呈显著正相关,而籽粒 As 浓度与籽粒和秸秆 P 浓度呈负相关,这可能是因为磷酸盐抑制了 As 从根部向茎部的转运.因此,无论是 P 和 Cd 还是 P 和 As 之间互作的影响,常因作物类型、基因型、土壤类型和处理浓度不同等因素,导致结果各异.

因此,本文采用水培试验,通过研究外源 P 供应和缺 P 处理对 Cd 和 As 胁迫下小麦生长、元素吸收和抗氧化酶活性等方面的影响,揭示 P 调控小麦 Cd 和 As 吸收转运的生理机制,以期为进一步通过 P 肥的田间养分管理减少作物对 Cd 和 As 的积累提供理论指导和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

供试小麦品种为百农 207,用 10% 的 NaClO 溶液消毒 5 min,清洗干净后在去离子水中浸泡 24 h,将吸胀后的种子均匀地摆放在育苗盘上进行催芽.供试营养液为小麦营养液^[21],其基本配方为: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.1 mmol·L⁻¹、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.5 mmol·L⁻¹、KCl 1.5 mmol·L⁻¹、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1 mmol·L⁻¹、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1 μmol·L⁻¹、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1 μmol·L⁻¹、 H_3BO_3 10 μmol·L⁻¹、 $(\text{MH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.05 μmol·L⁻¹、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.05 μmol·L⁻¹ 和 Fe-EDTA 0.1 mmol·L⁻¹.

待长至两叶一心时,挑选长势均一的植株转移至盛有 2 L 小麦营养液的黑色塑料容器中,一穴一株,每个处理 5 个重复.试验在温湿可控的人工光照培养室中进行,温度为 (25 ± 5) °C,湿度 (75 ± 1) %,光照/黑暗时间分别为 14 h/10 h.首先使用 1/4 和 1/2 的小麦营养液分别培养 3 d 后,再进行缺 P、正常供 P 及 Cd 和 As 胁迫处理.本试验共设置 2 个供 P 水平:0 (−P) 和 0.2 mmol·L⁻¹ (+P),以 KH_2PO_4 的形式加入,2 个 Cd 和 As 胁迫水平:0 和 100 μmol·L⁻¹,以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的形式加入.每 3 d 更换一次营养液,定时观察小麦的生长状况,测量并记录小麦株高和根长.

1.2 样品采集

处理 7 d 时,每个处理随机收取 5 株鲜样,用于测定地上和地下部抗氧化酶活性.处理 21 d 时,进行拍照,测量株高和根长,称取植株鲜重后,一部分用于根系扫描和叶绿素含量测定;另一部分将植株的地上部和根部分别装到相对应标记好的信封里,放入烘箱 115 °C 下杀青 30 min,70 °C 烘干至恒重,用于测定干重与元素含量.

1.3 测定指标与方法

1.3.1 抗氧化酶活性的测定

参照王学奎等^[22]的方法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性 (氮蓝四唑法)、过氧化物酶 (POD) 活性 (愈创木酚法) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性 (紫外分光光度法).

1.3.2 SPAD 值和叶绿素含量的测定

使用 SPAD 色素分析仪 (SPAD-502 Plus) 分别在处理后的第 3、6、8 和 10 d 后对小麦的旗叶进行测定,每个叶片取 3 个不同部位进行测量,最终数据取 3 个测量值的平均值,并记录.小麦叶片叶绿素含量测定采用分光光度法进行^[14],叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素分别在酶标仪 (SpectraMax M2) 的 665、649 和 470 nm 波长下测定.

1.3.3 元素含量测定

将烘干样品粉碎,称取 0.25 g,置于消煮管中,采用 HNO_3 - HClO_4 (85:15, 体积比) 混酸提取,石墨消解炉 (EHD36, Lab Tech Ltd., USA) 消解样品后,用 ICP-MS (Agilent 7700, American) 测定小麦植株 Cd 和 As 含量. P 含量的测定采用钼锑抗比色法^[23],用酶标仪 (SpectraMax M2) 在 800 nm 的波长下进行测定.

1.4 数据统计与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 进行统计,采用 DPS V9.01 软件进行方差分析和差异显著性分析,采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 LSD 法进行多重比较 ($P < 0.05$),使用 Origin Pro 2018 进行做图.

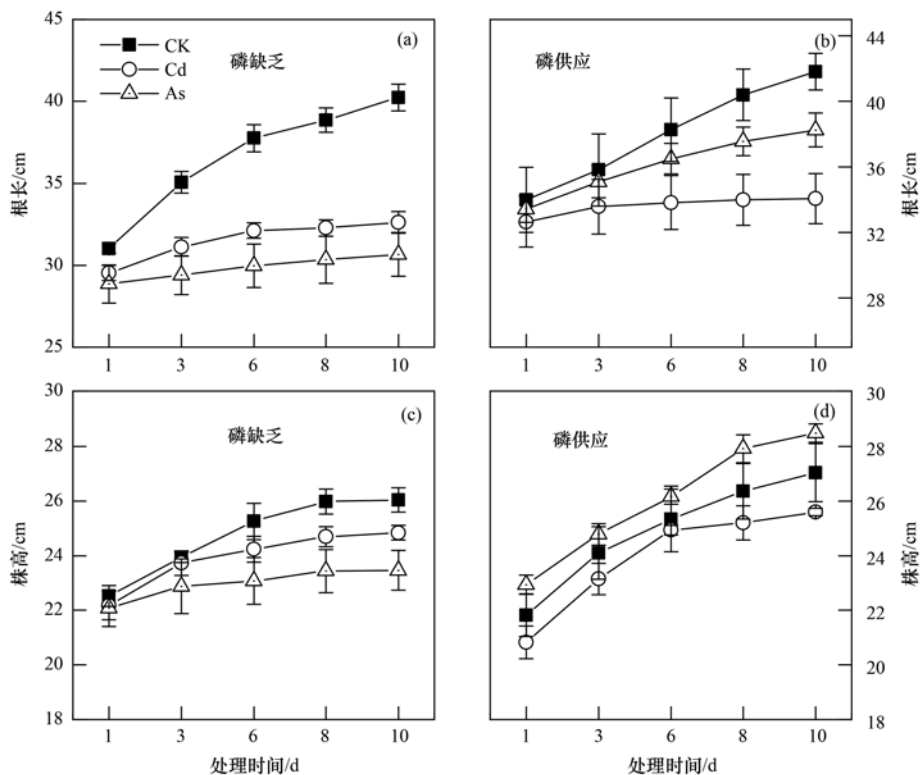
2 结果与分析

2.1 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦幼苗生长的影响

株高、根长和干物质重等指标是衡量植物生长的重要指标.为探究外源 P 对 Cd 和 As 胁迫下小麦幼苗生长的影响,本试验测定了不同处理下小麦的株高、根长、干物质质量和根系参数.由图 1 可以看出,在缺 P 条件下,与 CK 相比,Cd 和 As 处理均显著抑制了小麦的株高和根长;而在外源 P 供应条件

下,Cd 和 As 处理虽然抑制小麦幼苗根系的生长,但 As 胁迫下的小麦幼苗其株高高于 CK,表明当外源 P 供应时,缓解了 As 对小麦幼苗的毒害作用并促进了小麦幼苗株高的生长.对比不同处理下小麦幼苗干物质重的变化可以看出,其变化趋势与株高和根长相似.由图 2 可以看出在缺 P 条件下,Cd 和 As 胁迫条件下的根系和地上部干物质重显著

降低;而在外源 P 供应条件下,Cd 胁迫显著抑制小麦幼苗根系和地上部干物质积累,但是 As 胁迫处理则显著促进了小麦幼苗的生长.与缺 P 处理相比,As 胁迫下的小麦幼苗根系和地上部干重分别增加了 78.47% 和 83.14%,而 Cd 胁迫条件下小麦幼苗根系的干重则下降了 21.07%,地上部干重则无明显变化.



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

图 1 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦幼苗根长和株高的影响

Fig. 1 Effects of exogenous P supply on root length and plant height of wheat seedlings under Cd and As stress

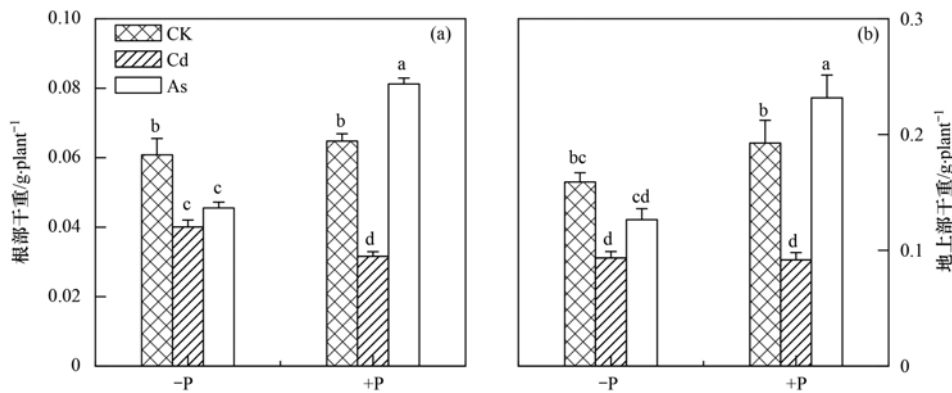


图 2 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦幼苗各部位干重的影响

Fig. 2 Effects of exogenous P supply on dry weight of wheat seedlings under Cd and As stress

由表 1 可知,在缺 P 条件下,与 CK 相比,Cd 胁迫显著降低了小麦幼苗的总根长、根表面积、根体积、根尖数和分根数,分别下降了 46.15%、43.75%、27.86%、58.41% 和 50.84%.而在 As 胁迫下,小麦幼苗根系的总根长、根尖数和分根数均显著降

低,降幅分别达到 30.33%、27.97% 和 30.98%.而 在外源 P 供应时,As 胁迫处理下的小麦幼苗总根长、根体积、根表面积、根尖数和分根数均显著促进,与缺 P 相比其增幅分别达到 175.79%、95.42%、103.14%、120.61% 和 192.49%,与之相对的是,在

Cd 胁迫的条件下,外源 P 供应对小麦幼苗根系的生长变化影响不明显. 表明外源 P 的供应显著促进了 As 胁迫下小麦幼苗的生长,而对 Cd 胁迫表现出相反的趋势.

表 1 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦根系参数的影响¹⁾

Table 1 Effects of exogenous P input on root parameters in wheat under Cd and As stress						
处理	总根长/cm	根表面积/cm ³	平均根直径/mm	根体积/cm ³	总根尖数	分根数
P0	CK	492.27 ± 76.66c	35.62 ± 3.18bc	0.233 ± 0.019c	0.207 ± 0.025c	949.67 ± 19.66b
	Cd100	235.50 ± 9.00e	20.04 ± 2.06d	0.262 ± 0.024ab	0.149 ± 0.015d	395.00 ± 51.18d
	As100	321.04 ± 24.95d	28.78 ± 2.65c	0.269 ± 0.016a	0.193 ± 0.012c	684.00 ± 12.12c
P0.2	CK	571.28 ± 21.01b	43.82 ± 1.72b	0.237 ± 0.010c	0.259 ± 0.012b	951.00 ± 33.51b
	Cd100	255.05 ± 7.98e	19.20 ± 1.25d	0.240 ± 0.014bc	0.115 ± 0.014d	469.50 ± 31.65d
	As100	944.55 ± 34.97a	58.46 ± 11.82a	0.216 ± 0.010c	0.377 ± 0.044a	1 509.00 ± 172.17a

1) P0 和 P0.2 分别表示外源 P 添加浓度分别为 0 和 0.2 mmol·L⁻¹, CK 表示外源 Cd 和 As 浓度为 0 μmol·L⁻¹, Cd100 表示外源 Cd 浓度为 100 μmol·L⁻¹, 外源 As 浓度为 0 μmol·L⁻¹, As100 表示外源 Cd 浓度为 0 μmol·L⁻¹, 外源 As 浓度为 100 μmol·L⁻¹; 数据为平均值 ± 标准差; 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦叶绿素含量和 SPAD 值的影响

由图 3(a)~3(d) 所示,在缺 P 条件下,小麦幼苗叶片光合色素含量在 Cd 和 As 胁迫时均表现出

不同程度的降低;在 Cd 胁迫下,外源 P 供应显著降低了叶片光合色素含量,其叶绿素 a、叶绿素 b、色素和类胡萝卜素含量分别降低了 27.27%、29.74%、20.89% 和 10.94%. 而在 As 胁迫处理下,外源 P 供应

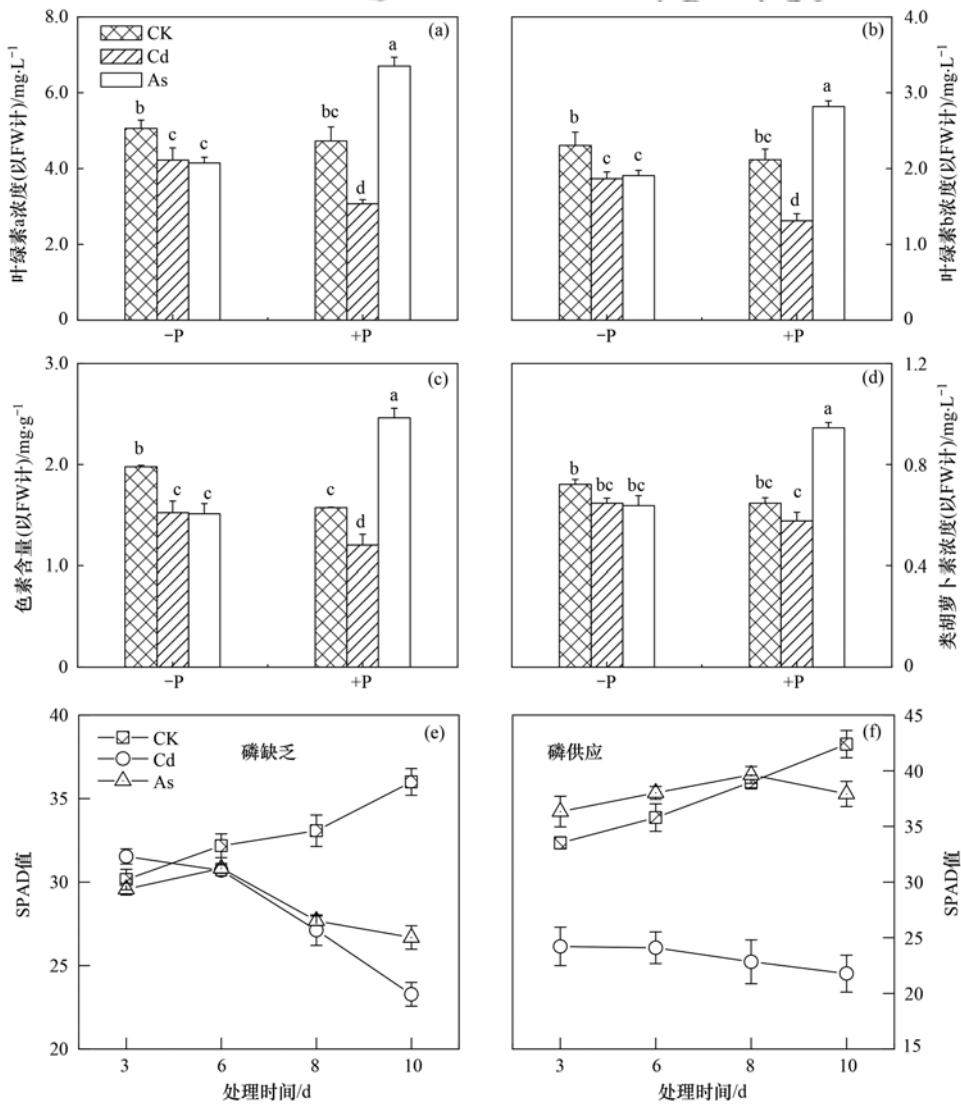


图 3 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦叶片光合色素和 SPAD 值的影响

Fig. 3 Effects of exogenous P input on photosynthetic pigments and SPAD in wheat leaves under Cd and As stress

显著增加了 As 胁迫条件下叶片叶绿素 a、叶绿素 b、色素和类胡萝卜素含量,与缺 P 处理相比,分别增加了 41.77%、33.12%、56.44% 和 45.98%,表明添加外源 P 促进了 As 胁迫下小麦幼苗叶片光合色素的合成.由图 3(e)和 3(f)所示,在缺 P 条件下,随着时间的推移,CK 处理下的 SPAD 逐渐增加,与 Cd 胁迫下小麦幼苗 SPAD 值一直降低的趋势不同,As 胁迫下小麦幼苗 SPAD 值在 0~6 d 先升高,6~10 d 逐渐降低;而外源 P 供应时,CK 处理下小麦幼苗在 10 d 时的 SPAD 值与 3 d 时相比增加了 26.49%,Cd 胁迫下降了 11.20%,而 As 胁迫处理下升高了 4.35%,且 As 胁迫下小麦幼苗 SPAD 值在 0~8 d 逐渐升高,在 8~10d 逐渐下降,表明外源 P 供应对 As 胁迫下小麦幼苗叶绿素含量有较为明显的缓解作用.

2.3 外源 P 供应对小麦各部位 P 含量和累积量的影响

由图 4 和表 2 可知,在缺 P 条件下,Cd 胁迫处理下的根系及地上部 P 含量均显著高于 CK 和 As

处理,而 3 个处理下的 P 累积量无明显差异.在 Cd 胁迫下,外源 P 供应显著增加了小麦幼苗根系 P 含量和累积量,分别增加了 80.92% 和 44.58%,但 P 在根系到地上的转运系数却显著降低,降幅达到 47.20%.而在 As 胁迫处理下,外源 P 供应显著增加小麦幼苗根系和地上部的 P 的含量和累积量,与缺 P 处理相比,其增幅分别达到 78.80%~83.05% 和 217.89%~236.73%.这表明在 As 胁迫下,外源 P 供应促进了 P 向地上部的转运;而 Cd 胁迫处理时表现出相反的趋势,这可能是由于在 Cd 胁迫条件下,小麦幼苗对 P 的转运能力降低,将更多的 P 富集在了根部,减少了 P 向地上部的迁移.

2.4 外源 P 供应对小麦各部位 Cd 和 As 含量及转移系数的影响

从图 5 和图 6 可以看出,不同 P 浓度处理对 Cd 和 As 胁迫条件下小麦幼苗 Cd 和 As 的吸收差异显著.在 Cd 胁迫条件下,外源 P 供应显著增加了小麦根系和地上部的 Cd 含量,分别达 213.30% 和

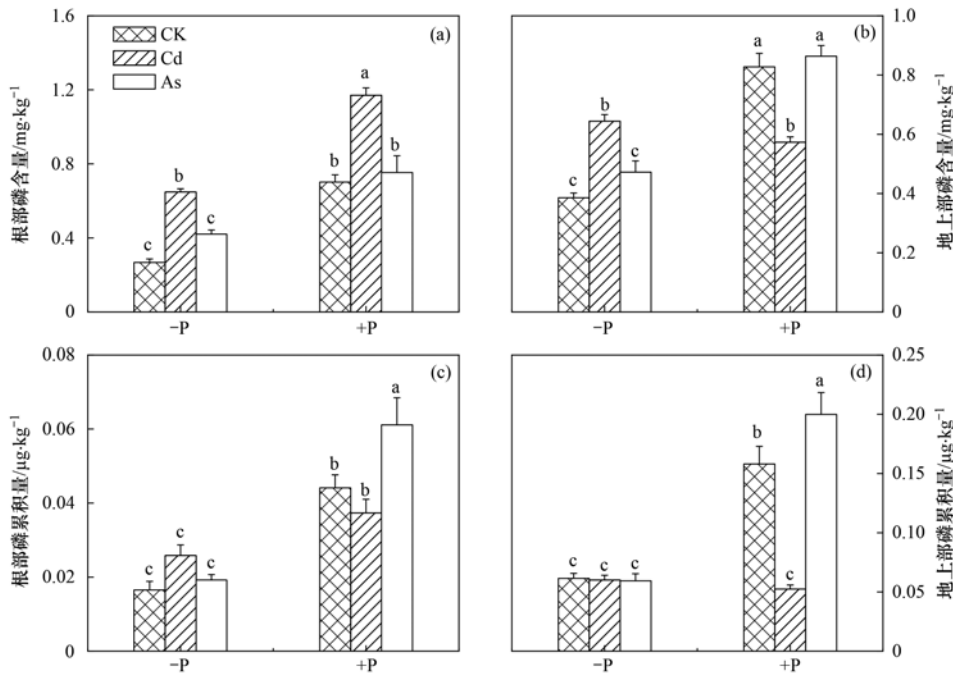


图 4 不同处理下小麦各部位 P 含量和累积量

Fig. 4 P content and accumulation of wheat plants with different treatments

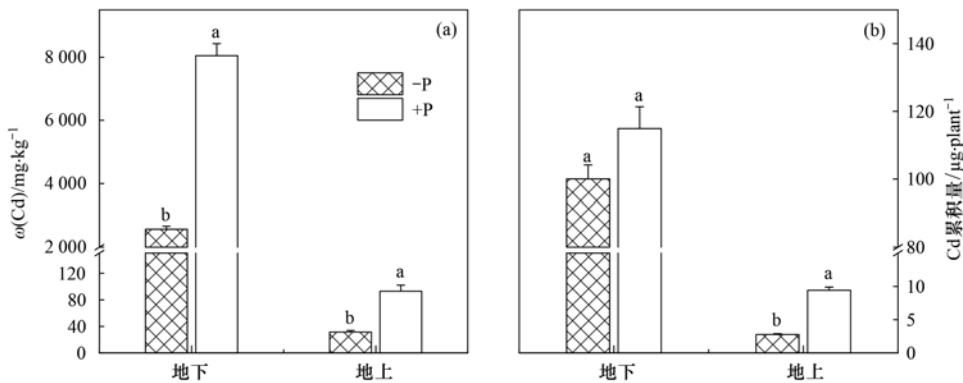
表 2 不同处理下小麦各部位之间 P 的转运系数¹⁾

Table 2 Translocation factors of P in various wheat tissues with different treatments

处理		TF _{根-地上}
P0	Cd0As0	1.452 4 ± 0.139 9a
	Cd100As0	1.011 4 ± 0.152 9c
	Cd0As100	1.118 9 ± 0.135 5c
P0.2	Cd0As0	1.183 6 ± 0.107 2bc
	Cd100As0	0.534 0 ± 0.066 9d
	Cd0As100	1.343 9 ± 0.065 7ab

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)

193.61%,同时其地上部 Cd 累积量增加了 240.66%,但不同外源 P 供应下的 Cd 转运系数差异不大,随供 P 浓度增加呈下降趋势.而在 As 处理条件下,随外源 P 的添加,小麦幼苗根系 As 含量和累积量均显著降低,降幅分别为 32.95% 和 41.15%,而地上部则与之相反,其地上部 As 含量和累积量显著增加,增幅分别达 87.49% 和 113.74%;由表 3 可以看出,外源 P 供应显著增加了 As 向地上部的转运,与缺 P 处理相比,As 转运系数增加 180.04%.表



不同小写字母表示同一部位不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图5 不同处理下小麦各部位 Cd 含量和累积量

Fig. 5 Cd content and accumulation of wheat plants with different treatments

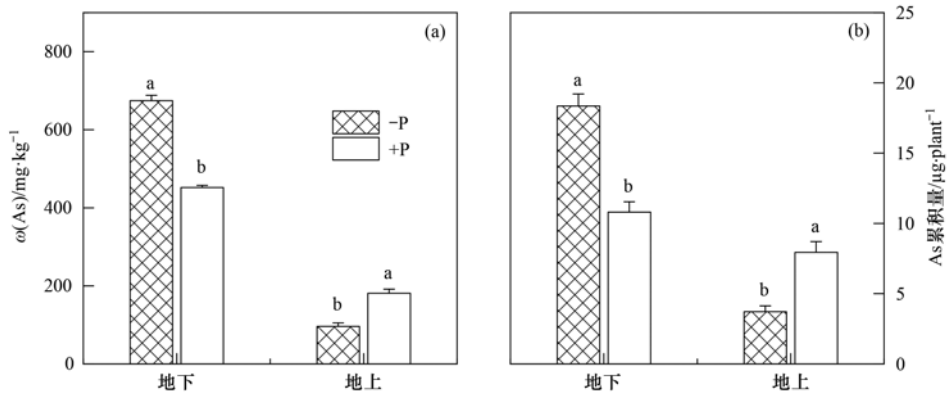


图6 不同处理下小麦各部位 As 含量和累积量

Fig. 6 As content and accumulation of wheat plants with different treatments

表3 不同处理下小麦各部位之间 Cd 和 As 的转运系数¹⁾

Table 3 Translocation factors of Cd and As in various wheat

tissues with different treatments

处理	TF _{根-地上}	
	Cd	As
P0	CK	—
	Cd100	0.012 7 ± 0.001 3a
	As100	—
P0.2	CK	—
	Cd100	0.011 5 ± 0.000 8a
	As100	0.399 9 ± 0.033 1a

1) P0 和 P0.2 分别表示外源 P 添加浓度分别为 0 和 0.2 mmol·L⁻¹, CK 表示外源 Cd 和 As 浓度为 0 μmol·L⁻¹, Cd100 表示外源 Cd 浓度 100 μmol·L⁻¹, 外源 As 浓度为 0 μmol·L⁻¹, As100 表示外源 Cd 浓度为 0 μmol·L⁻¹, 外源 As 浓度为 100 μmol·L⁻¹; “—”表示文章中没有相关数据; 数据为平均值 ± 标准差; 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

明外源 P 的供应促进了 As 向小麦地上部的转运, 提高了地上部对 As 的累积, 这可能与其解毒机制有关。

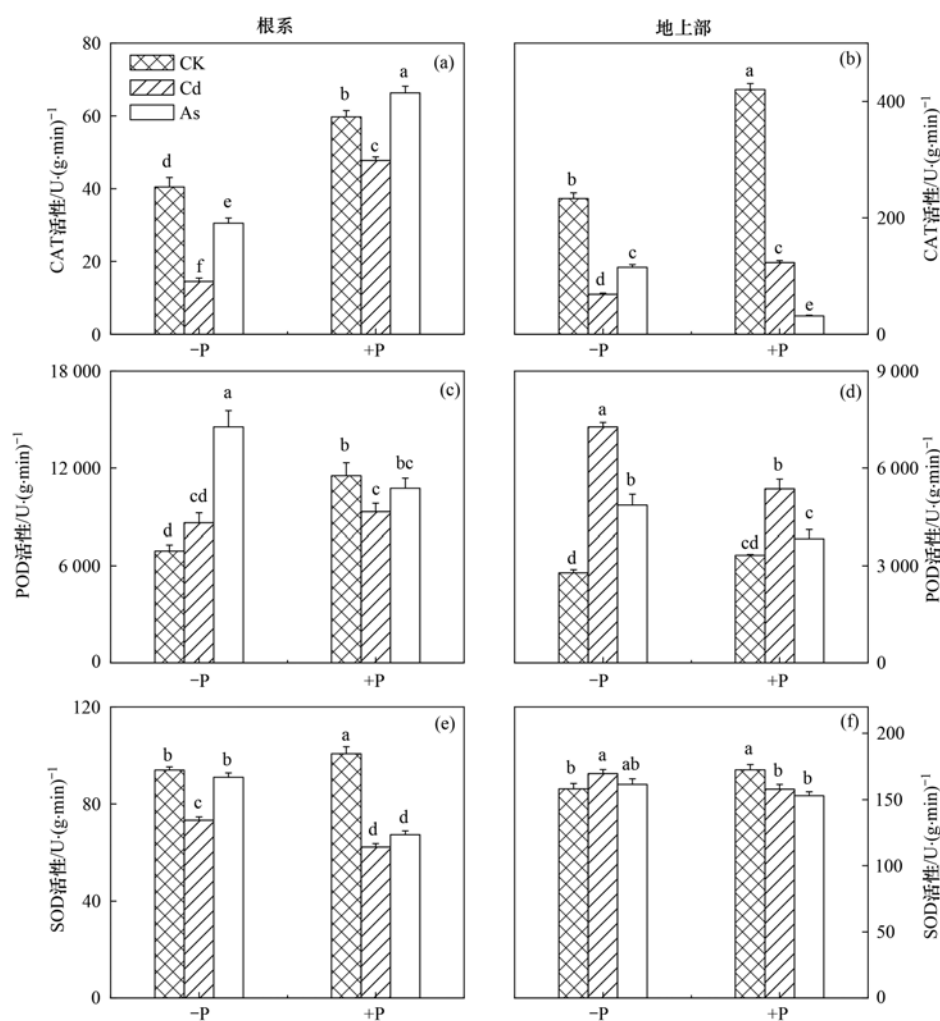
2.5 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦幼苗抗氧化酶系统的影响

结果表明(图 7), 与缺 P 处理相比, 外源 P 供应时其根系和地上部的 SOD、POD 和 CAT 活性均有

不同程度增加。在 Cd 胁迫条件下, 与缺 P 处理相比, 外源 P 供应对小麦幼苗根系和地上部 SOD 活性均表现为抑制作用, 分别降低了 15.02% 和 6.93%; 而提高了 CAT 的活性, 分别增加了 228.74% 和 79.56%。在 As 胁迫条件下, 与缺 P 处理相比, 外源 P 供应降低了小麦幼苗根系及地上部 SOD 和 POD 的活性, 降幅分别达到 5.42%~26.10% 和 21.05%~26.13%; 而对 CAT 活性的影响在根系与地上部表现出相反的趋势, 其在根系中的活性增加, 增幅达 117.49%, 而地上部活性显著降低 72.61%。结合 3 种抗氧化酶指标的变化, 表明外源 P 供应缓解了小麦幼苗受 Cd 和 As 的毒害作用, 通过降低小麦幼苗体内脂质过氧化, 减弱了重金属对小麦幼苗叶片和根系质膜的破坏程度。

3 讨论

作为植物重要营养元素的 P, 不仅构成了植物生命的基本骨架, 同时参与了植物体内的许多生理代谢过程^[24-26], 影响着植物对 Cd 和 As 的吸收和累积^[27,28]。本研究中, 外源 P 供应显著提高了 As 胁迫下小麦幼苗的生物量, 促进了小麦根系的生长发



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图7 外源 P 供应对 Cd 和 As 胁迫下小麦抗氧化酶系统的影响

Fig. 7 Effects of exogenous P supply on wheat antioxidant enzyme system under Cd and As stress

育,这一结果与薛培英等^[29]和杨玲等^[30]研究的结果相一致.由此可见,外源 P 供应在一定程度上能够缓解 As 胁迫对小麦幼苗的毒害作用,促进小麦等作物的正常生长发育.这可能是由于小麦对 As 的吸收主要通过 P 转运蛋白进行,外源 P 的添加有效降低了磷转运蛋白对重金属 As 的吸收,从而抑制其毒害作用^[31~33].而在 Cd ($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫条件下,外源 P 供应对小麦的生长并无缓解效应,表明在本研究中高浓度的 Cd 胁迫,已超出 P 缓解的临界浓度值,从而导致小麦幼苗的生长发育受到显著抑制.

有研究表明,外源 P 的添加可以提高叶绿素合成过程中 δ -氨基酮戊酸和胆色素原合成酶的活性,从而增加光合作用^[34].本研究中,外源 P 供应提高了 As 胁迫处理下小麦叶片中的叶绿素含量,促进了小麦生长而降低了 As 含量的累积,这一结果与水稻和大麦等的研究结果一致^[17],其原因可能是 P 与 As 竞争吸附了根质外体的吸附位点和原生质膜转运蛋白,从而抑制了根系 As 的吸收和累积^[14].霍洋

等^[35]研究发现,P 的添加会显著提高 Cd 胁迫下水稻的光合色素含量,促进生物量的累积,而本研究中 P 的添加却抑制了小麦幼苗叶片的光合色素含量,并提高了小麦幼苗对 Cd 的吸收(图3和图5),可能是由于高 Cd 水平下需要较多的磷酸根与之络合,而本研究 P 添加量不足以络合全部的 Cd 离子,而造成游离的 Cd 离子对小麦幼苗产生毒害作用,抑制小麦幼苗的光合作用,导致小麦幼苗的生物量降低^[36,37].

本研究发现,Cd 胁迫条件下,外源 P 供应促进了小麦植株中 Cd 的吸收和累积,说明 P 在一定范围内促进了小麦对 Cd 的吸收,这与刘文菊等^[38]研究的结果相一致,可能是由于生长介质中 P 浓度的添加,促进了小麦幼苗根系的生长发育,使根系与生长介质的接触面积增大,提高了根系吸收 Cd 的几率,从而促进了 Cd 的吸收^[39,40].有研究表明,添加外源 P ($10.0 \sim 45.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)能够增加水稻中的 Cd 吸收,促进 Cd 向地上部的转运.而在本研究中外源

P 供应并未显著影响 Cd 在小麦幼苗体内的转运能力,这可能是由于外源 P 供应后小麦根部吸收 P 量增加,加快了 P-ATPase 酶的代谢,提高了根系对 Cd 的络合能力,从而降低了 Cd 向地上部的转运^[41]。

As 胁迫条件下,外源 P 供应对小麦植株地上部和根部 As 含量的吸收和累积的影响与 Cd 胁迫处理呈现相反的结果:即降低了根系 As 的吸收和累积,促进了地上部 As 的吸收和累积,说明外源 P 供应处理促进了根部的 As 更多地转移到地上部,进而缓解 As 对根系的毒害作用,这一结果与张骞等^[42]在苋菜和雷鸣等^[43]在水稻上的研究结果相一致。P 的添加显著提高了根部的 As 向地上部的转运能力,同时也促进了光合色素含量的合成,增加了生物量和 P 的累积,表明在小麦幼苗的地上部 P 和 As 之间存在协同作用,供 P 促使 As 的迁移能力和生物可利用性增强^[37]。此外,也有研究表明 P 的添加能够抑制砷酸盐还原酶基因的表达,进而降低砷酸盐还原酶的活性,从而增强了 As 从根系向地上部的转运^[44~46]。

为了降低氧化应激反应,植株会通过激活体内的酶促和非酶促抗氧化系统的防御机制(SOD、POD 和 CAT 等)来减少活性氧的毒害作用^[47]。有研究表明,低浓度的 Cd 和 As 能够刺激植物的生长,而高浓度的 Cd 和 As 则会导致植株的正常生理代谢紊乱,抑制生长发育^[47,48]。P 的添加可以提高抗氧化酶活性从而减轻铝胁迫产生的 ROS 毒害^[49],但过高的 P 会加重 Cd 胁迫下的过氧化毒害^[50,51]。本研究结果表明,外源 P 供应后显著提高了 Cd 和 As 胁迫下小麦幼苗根系的 CAT 活性,可能是因为小麦幼苗根系接触到高浓度的 Cd²⁺ 时受到的毒害作用更强,根系的膜脂化程度增加,从而导致 CAT 酶活性增加,清除活性氧的能力也不断增加,以适应不良环境。在 Cd 和 As 胁迫下,外源 P 供应使小麦幼苗的 SOD 和 POD 活性受到不同程度的抑制,而 CAT 酶始终保持较高的活性,清除活性氧的能力不断增强,表明过氧化氢酶(CAT)在小麦幼苗根系受到 Cd 和 As 胁迫时发挥了主要作用。

4 结论

(1)外源 P 供应能够显著缓解 As 对小麦幼苗的毒害效应,明显增加了叶绿素和光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)的含量,促进根系的生长发育,提高了小麦幼苗的生物量。

(2)As 胁迫处理条件下,与缺 P 相比,外源 P 供应显著增加了小麦各部位的 P 含量与积累量,同时其转移系数增加了 180.04%;而根系 As 含量显著

降低,地上部 As 含量明显增加,其 As 转移系数明显增高。外源 P 供应下,将更多的 As 转移到地上部,可能与 P 缓解 As 毒害的机制有关。

(3)外源 P 供应对于缓解 Cd 胁迫条件下小麦幼苗的生长几乎没有效果,随外源 P 浓度的增加,小麦幼苗根系 P 含量显著增加,地上部 P 含量变化不大,同时其根系与地上部的 Cd 含量显著增加,P 与 Cd 交互在小麦幼苗体内表现出协同效应。

(4)在 Cd 和 As 胁迫条件下,外源 P 供应对于小麦幼苗根系和地上部的 SOD 和 POD 活性表现出不同程度降低,但是显著提高了根系的 CAT 的酶活性,与缺 P 相比,其酶活性分别提高了 228.74% 和 117.49%。

参考文献:

- [1] 郭修平, 郭庆海. “土十条”与土壤污染治理[J]. 生态经济, 2016, 32(2): 10-13.
- [2] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692. Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [3] 区惠平, 周柳强, 刘昔辉, 等. 不同施磷量对土壤-玉米系统中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1220-1225. Ou H P, Zhou L Q, Liu X H, et al. Effect of phosphate fertilizer on phytoavailability of cadmium in soil-corn system[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1220-1225.
- [4] 张子叶, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻对镉和砷的吸收转运规律研究[J]. 杂交水稻, 2020, 35(6): 68-74. Zhang Z Y, Ji X H, Xie Y H, et al. Studies on the uptake and transport dynamics of cadmium and arsenic in rice[J]. Hybrid Rice, 2020, 35(6): 68-74.
- [5] Yan S W, Wu F, Zhou S, et al. Zinc oxide nanoparticles alleviate the arsenic toxicity and decrease the accumulation of arsenic in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Bmc Plant Biology, 2021, 21(1), doi: 10.1186/s12870-021-02929-3.
- [6] 熊愈辉, 杨肖娥. 镉对植物毒害与植物耐镉机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(13): 2969-2971. Xiong Y H, Yang X E. Review of the toxic effects of cadmium on plants and their tolerant mechanism[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(13): 2969-2971.
- [7] 霍洋. 外源磷对水稻镉吸收和累积的影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. Huo Y. Mechanisms of cadmium uptake and accumulation in rice due to exogenous phosphorus[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.
- [8] Bolan N S, Adriano D C, Duraisamy P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition[J]. Plant and Soil, 2003, 250(1): 83-94.
- [9] Wang H, Wang P F, Zhang H. Use of phosphorus to alleviate stress induced by cadmium and zinc in two submerged macrophytes[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(10): 2176-2183.
- [10] Leung H M, Wu F Y, Cheung K C, et al. Synergistic effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate rock on heavy metal

- uptake and accumulation by an arsenic hyperaccumulator [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 497-507.
- [11] Jia H, Hou D Y, O'Connor D, *et al.* Exogenous phosphorus treatment facilitates chelation-mediated cadmium detoxification in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **389**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121849.
- [12] 赵艳玲. 镉胁迫和磷酸盐水平对水稻镉积累特性的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
Zhao Y L. Effects of cadmium stress and phosphate levels on the characteristics of cadmium accumulation in rice [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [13] 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.
- [14] Wang L H, Duan G L. Effect of external and internal phosphate status on arsenic toxicity and accumulation in rice seedlings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 346-351.
- [15] 耿春女, 朱永官, 罗启仕. 水稻基因型(94D-64)中磷对砷解毒生理机理的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1302-1306.
Geng C N, Zhu Y G, Luo Q S. Physiological mechanism of arsenate detoxification by phosphate in rice genotype 94D-64 [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(4): 1302-1306.
- [16] Kobayashi I, Fujiwara S, Shimogawara K, *et al.* High intracellular phosphorus contents exhibit a correlation with arsenate resistance in *Chlamydomonas* mutants [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2005, **46**(3): 489-496.
- [17] Anwar H M, Rengel Z, Damon P, *et al.* Arsenic-phosphorus interactions in the soil-plant-microbe system: dynamics of uptake, suppression and toxicity to plants [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 1003-1012.
- [18] Jiang W, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Evaluation of potential effects of soil available phosphorus on soil arsenic availability and paddy rice inorganic arsenic content [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **188**: 159-165.
- [19] Sadiq M. Arsenic chemistry in soils: an overview of thermodynamic predictions and field observations [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **93**(1-4): 117-136.
- [20] Shi G L, Zhu S, Bai S N, *et al.* The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **299**: 94-102.
- [21] 谭金娟. 小麦锌转运蛋白 TaHMA2 的功能分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
Tan J J. Functional analyses of TaHMA2, a zinc transporter in wheat [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [22] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
Wang X K, Huang J L. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Qiu W W, Xu T, Li X, *et al.* The influence of phosphorus on leaf function, cadmium accumulation and stress tolerance of poplar leaves under cadmium exposure [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, **204**, doi: 10.1016/j.envexpbot.2022.105087.
- [28] Tu S, Ma L Q. Interactive effects of pH, arsenic and phosphorus on uptake of As and P and growth of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. under hydroponic conditions [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, **50**(3): 243-251.
- [29] 薛培英, 刘文菊, 段桂兰, 等. 外源磷对苗期小麦和水稻根际砷形态及其生物有效性的影响 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(4): 2027-2034.
Xue P Y, Liu W J, Duan G L, *et al.* Effects of exogenous phosphorus on arsenic fractions in the rhizosphere and their bioavailability to rice and wheat seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(4): 2027-2034.
- [30] 杨玲, 连娟, 郭再华, 等. 砷胁迫下磷用量对不同磷效率水稻产量、生物量以及 P、As 含量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(8): 1627-1635.
Yang L, Lian J, Guo Z H, *et al.* Effect of phosphorus additions on grain yield, biomass and P and As concentration in different organs of three rice cultivars with different P-efficiencies under As-contaminated conditions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(8): 1627-1635.
- [31] Tu S, Ma L Q. Comparison of arsenic and phosphate uptake and distribution in arsenic hyperaccumulating and nonhyperaccumulating fern [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, **27**(7): 1227-1242.
- [32] Tu S, Ma L Q, MacDonald G E, *et al.* Effects of arsenic species and phosphorus on arsenic absorption, arsenate reduction and thiol formation in excised parts of *Pteris vittata* L. [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, **51**(2): 121-131.
- [33] Lei M, Wan X M, Huang Z C, *et al.* First evidence on different transportation modes of arsenic and phosphorus in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 1-7.
- [34] Arshad M, Ali S, Noman A, *et al.* Phosphorus amendment decreased cadmium (Cd) uptake and ameliorates chlorophyll contents, gas exchange attributes, antioxidants, and mineral nutrients in wheat (*Triticum aestivum* L.) under Cd stress [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, **62**(4): 533-546.
- [35] 霍洋, 仇银燕, 周航, 等. 外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4719-4725.
Huo Y, Qiu Y Y, Zhou H, *et al.* Effects of exogenous phosphorus on rice growth and cadmium accumulation and transportation under cadmium stress [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4719-4725.
- [36] 刘世亮, 刘忠珍, 介晓磊, 等. 施磷肥对 Cd 污染土壤中油麦菜生长及吸收重金属的影响 [J]. *河南农业大学学报*, 2005, **39**(1): 30-34.
Liu S L, Liu Z Z, Jie X L, *et al.* Influence of phosphate fertilizer

- application on lettuce plant growth and absorbing of heavymetals in cd polluted soil[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, **39**(1): 30-34.
- [37] 章爱群, 郭海如, 崔雪梅, 等. 主成分分析磷、砷交互作用对水稻生长的影响[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(7): 48-53.
- Zhang A Q, Guo H R, Cui X M, *et al.* Application of principal component analysis to studying the effects of phosphorus and arsenic interaction on the growth of rice [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(7): 48-53.
- [38] 刘文菊, 张西科, 谭俊璞, 等. 磷营养对苗期水稻地上部累积镉的影响[J]. *河北农业大学学报*, 1998, **21**(4): 28-32.
- Liu W J, Zhang X K, Tan J P, *et al.* The effect of P in nutrient solution on Cd accumulated by rice shoot in the seedling stage [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1998, **21**(4): 28-32.
- [39] 刘芳, 介晓磊, 孙巍峰, 等. 磷、镉交互作用对烟草生长及吸收积累磷、镉的影响[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(1): 116-120.
- Liu F, Jie X L, Sun W F, *et al.* Influence of P and Cd interaction on their accumulation in tobacco and tobacco growth [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(1): 116-120.
- [40] 刘忠珍. 石灰性土壤中磷与重金属(锌、镉)交互作用研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.
- Liu Z Z. Study on interaction of phosphate and heavy metal (zinc, cadmium) in calcareous soils [D]. Zhengzhou, Henan Agricultural University, 2004.
- [41] Palmgren M G, Harper J F. Pumping with plant P-type ATPases [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, **50**(S1): 883-893.
- [42] 张骞, 曾希柏, 苏世鸣, 等. 不同品种苋菜对砷的吸收能力及植株磷砷关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(10): 1888-1894.
- Zhang Q, Zeng X B, Su S M, *et al.* Arsenic uptake by different species of amaranth and the relationship between arsenic and phosphate in amaranth [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(10): 1888-1894.
- [43] 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 等. 含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3149-3154.
- Lei M, Zeng M, Liao B H, *et al.* Effects of phosphorus-containing substances on arsenic uptake by rice [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3149-3154.
- [44] 连娟, 郭再华, 贺立源. 砷胁迫下磷用量对不同磷效率水稻苗生长、磷和砷吸收的影响[J]. *中国水稻科学*, 2013, **27**(3): 273-279.
- Lian J, Guo Z H, He L Y. Effect of different P levels on the growth, P and As absorption of different P-efficiency rice varieties under As stress conditions at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, **27**(3): 273-279.
- [45] Duan G L, Zhou Y, Tong Y P, *et al.* A CDC25 homologue from rice functions as an arsenate reductase [J]. *New Phytologist*, 2007, **174**(2): 311-321.
- [46] Dhankher O P, Rosen B P, McKinney E C, *et al.* Hyperaccumulation of arsenic in the shoots of *Arabidopsis* silenced for arsenate reductase (ACR2) [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(14): 5413-5418.
- [47] 尹泽润, 罗宝利, 罗锋, 等. 镉胁迫下水培杞柳生理特性及镉吸收转运[J]. *草业科学*, 2021, **38**(10): 1900-1909.
- Yin Z R, Luo B L, Luo F, *et al.* Physiological characteristics and Cd absorption and transportation in *Salix integra* under Cd stress [J]. *Pratacultural Science*, 2021, **38**(10): 1900-1909.
- [48] 米艳华, 黎其万, 刘大会, 等. 砷对三七幼苗的毒害效应及临界值研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(7): 10-16.
- Mi Y H, Li Q W, Liu D H, *et al.* Toxicity and its threshold of arsenic to *Panax notoginseng* seedlings [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(7): 10-16.
- [49] 于姣姣, 夏丽丹, 殷丹阳, 等. 磷素对杉木幼苗耐铝性的影响机制[J]. *林业科学*, 2018, **54**(5): 36-47.
- Yu J D, Xia L D, Yin D Y, *et al.* Effects of phosphorus on aluminum tolerance of Chinese fir seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(5): 36-47.
- [50] 张皓. 重金属镉胁迫下氮磷对江蕨体内主要抗氧化酶活性的影响[J]. *环境监控与预警*, 2012, **4**(6): 46-49.
- Zhang H. The effect on the activity of gracilaria's antioxidant enzymes in different conditions of nitrogen and phosphorus under cadmium stress [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2012, **4**(6): 46-49.
- [51] 张晓璟, 刘吉振, 徐卫红, 等. 磷对不同辣椒品种镉积累、化学形态及生理特性的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1171-1176.
- Zhang X J, Liu J Z, Xu W H, *et al.* Effect of phosphorus on accumulation and chemical forms of cadmium, and physiological characterization in different varieties of *Capsicum annuum* L. [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1171-1176.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)