

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 李幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征

王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 睢康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊*

(河北农业大学资源与环境科学学院, 省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北省农田生态环境重点实验室, 保定 071000)

摘要: 为了探究小麦开花后叶片和茎节对籽粒中镉(Cd)和砷(As)累积的影响效应, 采用田间小区试验, 研究了山农28(SN28)和济麦22(JM22)两个小麦品种地上部各器官Cd和As的分布规律和迁移特征。结果表明, 在灌浆期, 小麦地上部的Cd主要分布在节中, Cd由节间3到节2、节间2到节1和叶鞘1到节1的转运能力显著强于其他部位。在成熟期, Cd主要分布于叶片中, Cd由叶鞘到叶片和由节1到穗轴的转运能力显著增强。此外, JM22中颖壳到穗轴和穗轴到籽粒的Cd转运能力显著低于SN28, 使JM22的穗轴、颖壳和籽粒中Cd含量与SN28相比分别显著降低了22.3%、40.8%和44.4%。同时, 从灌浆期到成熟期小麦地上部的As主要分布于叶片中, 且JM22颖壳和籽粒中As含量显著低于SN28, 降幅分别为25.8%和33.3%。在灌浆期和成熟期, 小麦中As转运系数由叶鞘到节显著高于叶到叶鞘和节到节间, 平均增幅为438%和190%。此外, JM22中As由颖壳到籽粒和穗轴到籽粒的转运系数分别比SN28显著降低40.6%和44.4%。总之, 开花后小麦旗叶、节1和穗轴调控了Cd转运及其在籽粒的累积, 而小麦的叶3、旗叶、节1、颖壳和穗轴主要参与了As的转运及其在籽粒中的累积。

关键词: 镉(Cd); 砷(As); 小麦; 节; 旗叶; 穗轴; 灌浆期

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6328-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202212047

Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering

WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, FENG Liu-xu, SUI Kang-xin, GENG Li-ping, XUE Pei-ying, LIU Wen-ju*

(State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Key Laboratory of Ecological Environment of Farmland in Hebei, College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: To investigate the effects of leaves and stems on the accumulation and transport of cadmium (Cd) and arsenic (As) in wheat shoots after flowering, a field experiment was conducted in a typical Cd and As co-contaminated agricultural land to explore the distribution and translocation of Cd and As in the different parts of two wheat cultivars after flowering. The results showed that Cd was mainly distributed in the nodes of two varieties, and the translocation factors of Cd from internode 3 to node 2, from internode 2 to node 1, and from sheath 1 to node 1 were markedly higher than those of other aboveground parts during the grain-filling stage. However, Cd was mainly distributed in the leaves, and the translocation factors of Cd from sheath to leaf and from node 1 to rachis was significantly higher than those of other parts at the mature stage. In addition, the transport capacity of Cd from glume to rachis and from rachis to grain in JM22 was significantly lower than that in SN28, which significantly reduced Cd concentrations in the rachis, glume, and grain of JM22 by 22.3%, 40.8%, and 44.4%, respectively. Meanwhile, As was mainly distributed in the wheat leaves from the grain-filling stage to the mature stage, and As concentrations in the glume and grain of JM22 were 25.8% and 33.3% lower than those of SN28, respectively. Additionally, the translocation factors of As from the sheath to the node were significantly 438% and 190% higher than that from leaf to sheath and from node to internode during the whole grain filling stage and mature stage. Moreover, the translocation factors of As from glumes to grains and from rachis to grains in JM22 were 40.6% and 44.4% lower than that in SN28, respectively. In summary, flag leaf, node 1, and the rachis had regulated Cd transport and accumulation in wheat grains, whereas leaf 3, flag leaf, node 1, the glumes, and the rachis were mainly responsible for As transport and accumulation in wheat grains.

Key words: cadmium (Cd); arsenic (As); wheat; node; flag leaf; rachis; grain-filling stage

近年来,随着我国工业化、城市化和农业的快速发展,农田土壤重金属污染已成为国家重点关注的环境问题之一^[1,2]。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤点位超标率为19.4%,重金属为主要一类污染物,尤其是污水灌溉区超标点位占26.4%,主要重金属污染物为镉(Cd)和砷(As),农田Cd和As污染已被列为重点研究对象^[3]。土壤中累积的Cd和As可被农作物根系吸收并转移至可食部位,通过食物链威胁人体健康^[4~7]。华北平原是我国重要的农产品基地之一,但是长期的污水灌溉、冶炼、农药和化肥的盲目施用等人为活动使土壤中重金属累积,造成农田土壤重金属污

染^[8,9],且有研究表明土壤中的类金属As和重金属Cd易向农作物体内转移^[10~12]。小麦是我国第二大主粮作物,品种繁多且种植面积广,小麦清洁生产对保障国家粮食安全至关重要^[13,14]。然而,已有的研究发现小麦籽粒对土壤重金属Cd的积累能力较强,并可通过食物链对人体健康构成威胁^[15~17],因此,非常有必要采取有效措施来减少小麦根系对

收稿日期: 2022-12-06; 修订日期: 2023-01-20

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U21A2024); 河北省自然科学基金重点项目(C2021204097)

作者简介: 王秋实(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为作物抗重金属研究及应用, E-mail: iwangqiushi@163.com

* 通信作者, E-mail: liuwj@hebau.edu.cn

土壤中镉的吸收及其向籽粒中转运^[18~20]. 一般而言, 土壤中 Cd 和 As 主要通过两个途径向籽粒中转运, 其中木质部介导的 Cd 和 As 从根系直接向地上部转运是决定籽粒中 Cd 和 As 累积的关键过程之一, 即土壤溶液中的 Cd 和 As 经根系吸收后进入小麦体内, 通过质外体或共质体途径横向运输至木质部, 进而直接经木质部向小麦的地上部转移并积累于籽粒中; 同时, 韧皮部运输是决定小麦籽粒 Cd 和 As 运输的另一个重要途径, Cd 和 As 经植物根系吸收转运至地上部后, 其在茎节处由木质部转移至韧皮部, 进而由韧皮部重新分配和向上运输, 最终进入籽粒^[21,22]. 小麦开花后进入灌浆期, 这是小麦籽粒形成的关键生育期^[23], 在该时期 Cd 和 As 主要通过木质部还是韧皮部的途径向籽粒转运, 是揭示体内 Cd 和 As 转运控制籽粒中 Cd 和 As 富集的关键所在. 此外, Cd 由根系向地上部运输并最终在小麦籽粒中积累, 其由节向穗部和穗轴向籽粒的转运过程在调控小麦籽粒 Cd 积累及其品种差异方面发挥着重要作用^[24]. 然而, 对于在镉砷复合污染区种植的小麦而言, 究竟地上部的哪个或哪些部位在开花后进入灌浆期-成熟期控制着小麦籽粒 Cd 和 As 累积, 以及开花后 Cd 和 As 在小麦不同部位的迁移特征仍不清晰. 基于此, 本研究拟在镉砷复合污染的小麦种植区, 采用田间小区试验, 探索两个小麦品种 SN28 和 JM22 在灌浆前期、灌浆后期和成熟期, 地上不同部位 Cd 和 As 的分布及迁移特征, 以期为研发阻控镉砷进入小麦可食部位的关键技术和保障粮食安全提供理论和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于华北平原区某一因污灌和冶炼造成的镉砷复合污染农田, 当地以冬小麦-夏玉米一年两熟为主要种植制度. 该区域是受周边有色金属冶炼和污灌共同影响的典型农田, 有色金属铜冶炼厂生产期间废水排入旁边的河道, 对地表水体和地下水造成重金属镉砷污染, 污染物随灌溉水进入农田^[25~27]; 此外, 冶炼厂废气中的颗粒物负载的重金属也会随干湿沉降进入农田, 本试验开展时期该冶炼厂已关停 6 a. 土壤类型为中壤质潮土, 其表层土壤的基本理化性质如下: pH 7.64, ω (碱解氮) 87.8 mg·kg⁻¹, ω (有效磷) 31.4 mg·kg⁻¹, ω (速效钾) 341 mg·kg⁻¹, ω (有机质) 21.1 g·kg⁻¹, CEC 23.1 cmol·kg⁻¹, ω (Cd) 2.49 mg·kg⁻¹, ω (As) 106 mg·kg⁻¹.

1.2 供试材料

供试品种: 小麦品种为山农 28(SN28) 和济麦 22(JM22), 其中济麦 22 为笔者课题组筛选出的籽粒镉砷低积累的品种^[28].

1.3 试验设计

本试验于 2020 年 10 月 24 日至 2021 年 6 月 20 日在镉砷复合污染小麦种植区进行. 在种植两个小麦品种 JM22 和 SN28 的试验区(每个品种种植面积为 5.00 hm²), 分别随机划出 3 个小区(每个小区面积为 10 m × 10 m = 100 m²) 作为 3 个重复. 施肥、灌水和病虫害防治均按照当地农民的管理方式进行. 整个生育期小麦的灌溉方式为喷灌, 每次灌水量为 555 m³·hm⁻², 分别在小麦的越冬期、返青期、拔节期、抽穗开花期和灌浆期进行.

1.4 样品采集与测定

1.4.1 植物样品的采集

小麦开花后分别于灌浆前期(5 月 23 日)、灌浆后期(5 月 30 日)以及成熟期(6 月 19 日)按照 S 形在每个小区采集植株样品, 为了避免道路扬尘的影响, 选择采集样品区域为远离道路 40 m 的区域, 每个小区采集 3 个样点, 每个样点采集 5~10 株小麦. 将整株小麦样品用不锈钢铁锹挖出后, 将土壤轻轻抖落后放入自封袋, 尽快运回实验室. 将植株分为地上部、根部分别用自来水、蒸馏水和超纯水洗净, 使用吸水纸拭干表面水分. 然后将样品小麦地上部分为穗(spike)、倒一叶、倒二叶和倒三叶及其相关部位, 其中穗包括穗轴(rachis, RH)、颖壳(glume, GM)和籽粒(grain, GA); 倒一叶(旗叶)及其相关部位包括叶片(leaf 1, L1)、叶鞘 1(sheath 1, SH1)、节 1(node 1, N1)和倒一叶到穗之间的节间 1(internode 1, IN1), 依次往下分为倒二叶及其相关部位, 倒三叶及其相关部位(图 1)^[29]. 在烘箱中 85℃ 杀青 15 min, 然后于 65℃ 烘干至恒重^[25]. 各个部位的样品用研钵或不锈钢微型粉碎机粉碎后, 用于植株各部位中 Cd 和 As 含量的测定.

1.4.2 植株样品 Cd 和 As 含量的测定

植株样品均采用 HNO₃-H₂O₂ (5:2, 体积比) 消解, 消解后使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS) (PerkinElmer, NexION350X, USA) 测定植株不同部位 Cd 和 As 的含量^[30,31]. 测定小麦籽粒中 Cd 和 As 含量, 以国家一级标准物质(GBW 10011, 小麦粉)进行准确度和精密度控制, 并同步分析空白样品以去除试剂干扰, 其中 Cd 回收率为 95%~100%, As 回收率为 90%~95%, 均符合质量控制要求. 同时测定小麦植株地上部各部位 Cd 和 As 含量, 以国家一级标准绿茶粉(GBW 10052a)进行准确度和精密度

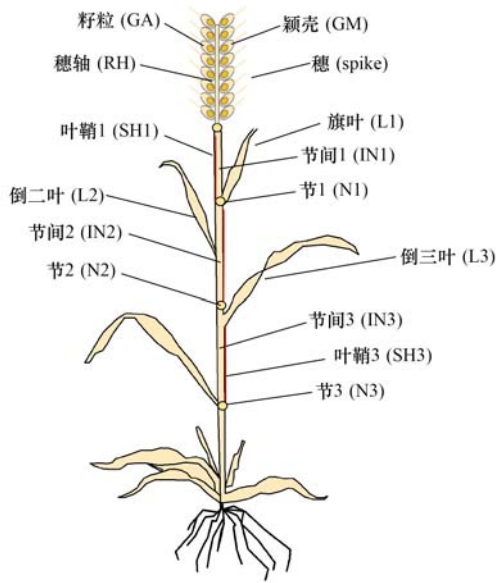


图1 小麦地上不同部位示意

Fig. 1 Different positions of wheat shoot

控制, Cd 回收率为 90%~95%, As 回收率为 90%~100%.

1.5 数据统计分析

1.5.1 转运系数

小麦中重金属 Cd 和 As 的转运系数按照如下公式进行计算:

$$TF_{i/j} = C_i / C_j$$

式中, $TF_{i/j}$ 表示重金属由小麦 j 部位向 i 部位的转移系数, C_i 为小麦 i 部位重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_j 为小麦 j 部位重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.5.2 数据统计方法

采用 Microsoft Excel 2016 制作图表, 使用 SPSS 18.0 进行数据分析, 采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 进行显著性检验, 采用最小显著差异法 (LSD) 进行小麦不同部位之间重金属含量和转运系数的差异显著性比较. 小麦籽粒与叶片和节重金属含量之间采用 Pearson 进行相关性分析, 独立样本 T 检验方法进行两个品种间 Cd 或 As 含量差异的显著性比较.

2 结果与分析

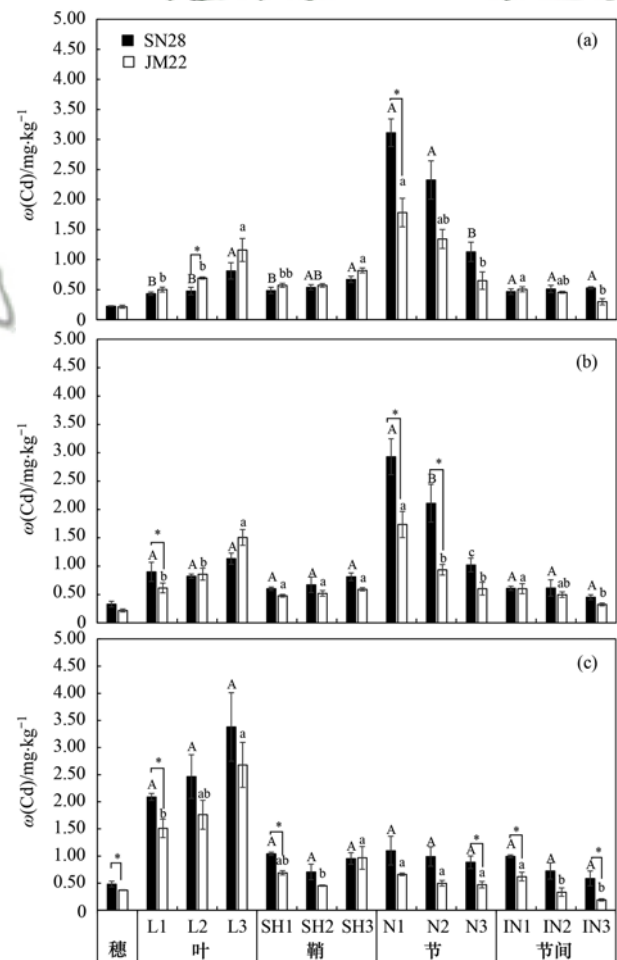
2.1 开花后不同生育时期小麦中 Cd 和 As 的分布特征

2.1.1 Cd 的分布特征

在小麦开花后采集灌浆前期、灌浆后期和成熟期的小麦样品, Cd 在小麦地上部各部位的含量分布情况如图 2 所示. 对 JM22 而言, 随着小麦叶片位置的降低, 3 个生育期叶片中 Cd 含量呈逐渐上升的趋势, 倒三叶中 Cd 含量最高且显著高于倒二叶和旗

叶, 平均增幅为 63.4%. 同时, 在灌浆前期和成熟期, JM22 的叶鞘 3 的 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $0.895 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他位置的叶鞘中 Cd 含量, 平均增幅为 56.5% [图 2(a) 和 2(c)]; 小麦品种 SN28 不同部位叶片和叶鞘 Cd 含量也呈现与 JM22 相似的趋势, 但是仅在灌浆前期达到显著水平 [图 2(a)], 这是由于灌浆前期小麦根系吸收的 Cd 优先向其基部叶片和叶鞘中转运所致. 此外, 成熟期 SN28 和 JM22 叶片 Cd 含量相对于灌浆前期显著增加, 增幅分别为 343% 和 141%, 并且 JM22 旗叶及其叶鞘中 Cd 含量显著低于 SN28 [图 2(c)].

节是植物体内 Cd 转运的关键部位, 一方面 Cd 被根系吸收后经节和节间向叶片转运, 而叶片中累积的 Cd 再分配进入韧皮部经节向穗部迁移, 另一方面, Cd 被根系吸收后横向运输至木质部, 通过木质部经节和节间直接转移至穗部. 结果表明, 灌浆



(a)、(b)和(c)分别为小麦灌浆前期、灌浆后期和成熟期不同部位 Cd 含量; 不同大写或小写字母分别表示 SN28 或 JM22 不同部位 Cd 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$); * 表示同一部位不同小麦品种间 Cd 含量差异显著 ($P < 0.05$)

图2 小麦开花后不同时期两个品种小麦不同部位 Cd 含量

Fig. 2 Cd concentrations in different parts of wheat shoot for two cultivars at different growing stages after flowering

前期和后期小麦节 1 中 Cd 含量显著高于其他部位 [图 2(a) 和 2(b)], 其中 Cd 含量存在节 > 节间的趋势. 对 JM22 而言, 在灌浆前期、灌浆后期和成熟期, 节和节间中 Cd 含量随着位置降低呈逐渐下降的趋势, 其中旗叶对应的节 1 与节间 1 中 Cd 含量最高, $\omega(\text{Cd})$ 平均值分别为 $1.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在灌浆前期和后期, 节 1 和节间 1 中 Cd 含量分别显著高于节 3 和节间 3, 平均增幅分别为 179% 和 79.0%; 对于 SN28 而言, 只有灌浆前期和后期节 1 中 $\omega(\text{Cd})$ 平均值为 $3.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于节 3 达 180% [图 2(a) 和 2(b)]. 此外, 随着小麦植株生长发育阶段的延长, 节中 Cd 含量逐渐下降, 成熟期 SN28 和 JM22 节中 Cd 含量比灌浆期分别降低 53.0% 和 57.7% [图 2(c)]. 穗中 Cd 含量在灌浆前期和后期显著低于其他部位, 在成熟期 SN28 穗中 Cd 含量显著高于 JM22, 增幅为 29.7%.

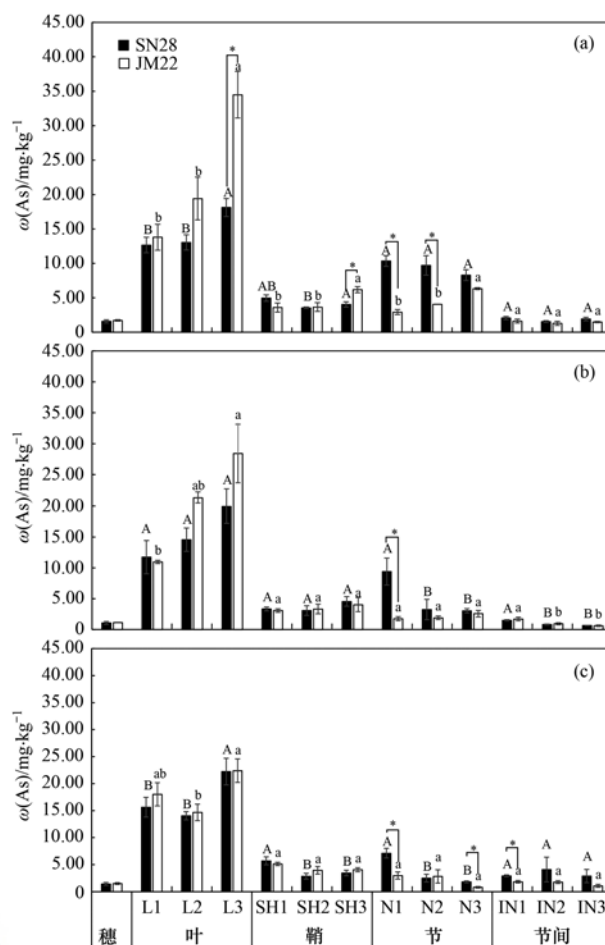
综上所述, 小麦旗叶、旗叶的叶鞘及节 1 (穗下第 1 个节) 对调控 Cd 在籽粒中的累积起了重要的作用.

2.1.2 As 的分布特征

As 在小麦地上部各部位的含量分布情况如图 3 所示, 比较灌浆前期、灌浆后期和成熟期小麦各部位的 As 含量发现, 两个品种小麦叶片中 As 含量显著高于其他部位. 对于 JM22 而言, 在灌浆前期和后期随着叶片位置降低, 其 As 含量均呈逐渐上升趋势, 叶 3 中 As 含量显著高于旗叶, 增幅达 154% [图 3(a) 和 3(b)], 叶片中 As 含量大小表现为: 灌浆前期 > 灌浆后期 > 成熟期; 此外, 叶鞘中 As 含量显著低于叶片, 平均含量仅为叶片的 20.2%. 对于 SN28 而言, 不同部位叶片 As 含量也呈现与 JM22 相似的趋势. 仅在灌浆前期叶片 3 和叶鞘 3 中 As 含量均表现为 JM22 显著高于 SN28, 增幅分别为 168% 和 53.3% [图 3(a)].

进一步分析节和节间中 As 含量发现, JM22 在灌浆前期节中 As 含量随着位置降低呈现着逐渐上升的趋势 [图 3(a)], 节 3 中 $\omega(\text{As})$ 为 $6.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他位置的节, 平均增幅为 81.7%; 同时, 在灌浆期每个节中 As 含量显著高于对应的节间. 成熟期不同部位的节和节间中 As 含量均没有显著变化; 对于 SN28 而言, 在小麦开花后节中 As 含量随着位置的降低则呈现着逐渐下降的趋势, 节 1 中 As 含量最高, 在灌浆后期和成熟期显著高于节 2 和节 3, 平均增幅分别为 189% 和 240%. 此外, 在 3 个时期, SN28 节 1 中 As 含量均显著高于 JM22. 综上所述, 小麦叶 3、叶鞘 3 和节 1 主要参与

了 As 在籽粒的累积.



(a)、(b) 和 (c) 分别为小麦灌浆前期、灌浆后期和成熟期不同部位 As 含量; 不同大写或小写字母分别表示 SN28 或 JM22 不同部位 As 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$); * 表示同一部位不同小麦品种间 As 含量差异显著 ($P < 0.05$)

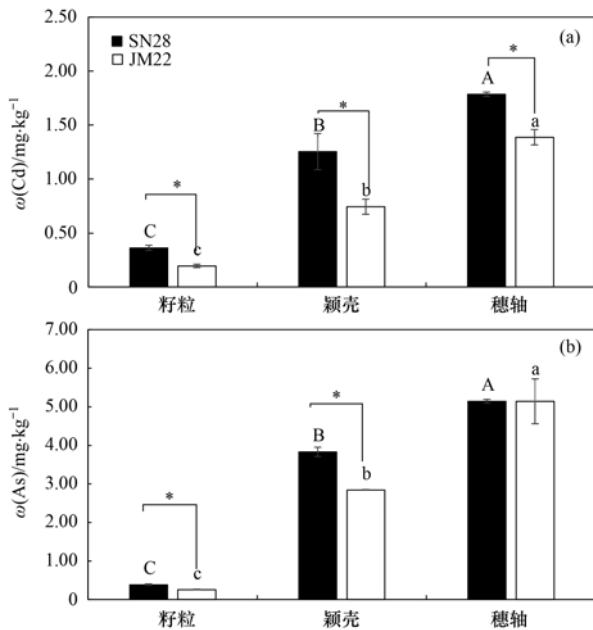
图 3 小麦开花后不同时期两个品种小麦不同部位 As 含量

Fig. 3 Arsenic concentrations in different parts of wheat shoot for two cultivars at different growing stages after flowering

2.2 成熟期小麦穗部 Cd 和 As 含量特征

在成熟期分析了小麦穗的穗轴、颖壳和籽粒中 Cd 和 As 含量 (图 4). 穗轴是与籽粒直接相连的部位, 也是 Cd 和 As 向籽粒运输的主要途径之一; 颖壳与小麦籽粒也直接相连, 对籽粒中 Cd 和 As 累积具有一定的贡献. 从穗子 3 个部位的 Cd 含量来看 [图 4(a)], JM22 和 SN28 籽粒中 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者比后者显著降低了 44.4%; 颖壳 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者比后者显著降低了 40.8%; 穗轴 Cd 含量分别为 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者比后者显著降低了 22.3%; 从穗子 3 个部位 As 含量来看 [图 4(b)], JM22 和 SN28 籽粒 $\omega(\text{As})$ 分别为 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, JM22 籽粒 As 含量相对于 SN28 显著降低了 33.3%; 进一步分析发现, 小麦颖壳与籽粒呈现相似的 As 累积趋势, 其

中 SN28 和 JM22 颖壳 $\omega(\text{As})$ 分别为 $3.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后者比前者显著降低了 25.8%; 两个品种穗轴中 As 含量没有显著差异。穗子不同部位中 Cd 和 As 含量的变化趋势为: 穗轴 > 颖壳 > 籽粒, 且具有显著性差异, 因此推断穗轴是调控穗部 Cd 和 As 向籽粒中累积的重要部位; 此外, SN28 颖壳和籽粒中 Cd 和 As 含量显著高于 JM22。



(a) 和 (b) 分别为小麦穗不同部位 Cd 和 As 含量; 不同大写字母或小写字母分别表示 SN28 或 JM22 不同部位 Cd 或 As 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$); * 表示同一部位不同小麦品种间 Cd 或 As 含量差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 小麦两个品种穗的不同部位 Cd 和 As 含量
Fig. 4 Concentrations of Cd and As in different parts of wheat spikes for two cultivars

2.3 开花后不同生育时期小麦中 Cd 和 As 的转运特征

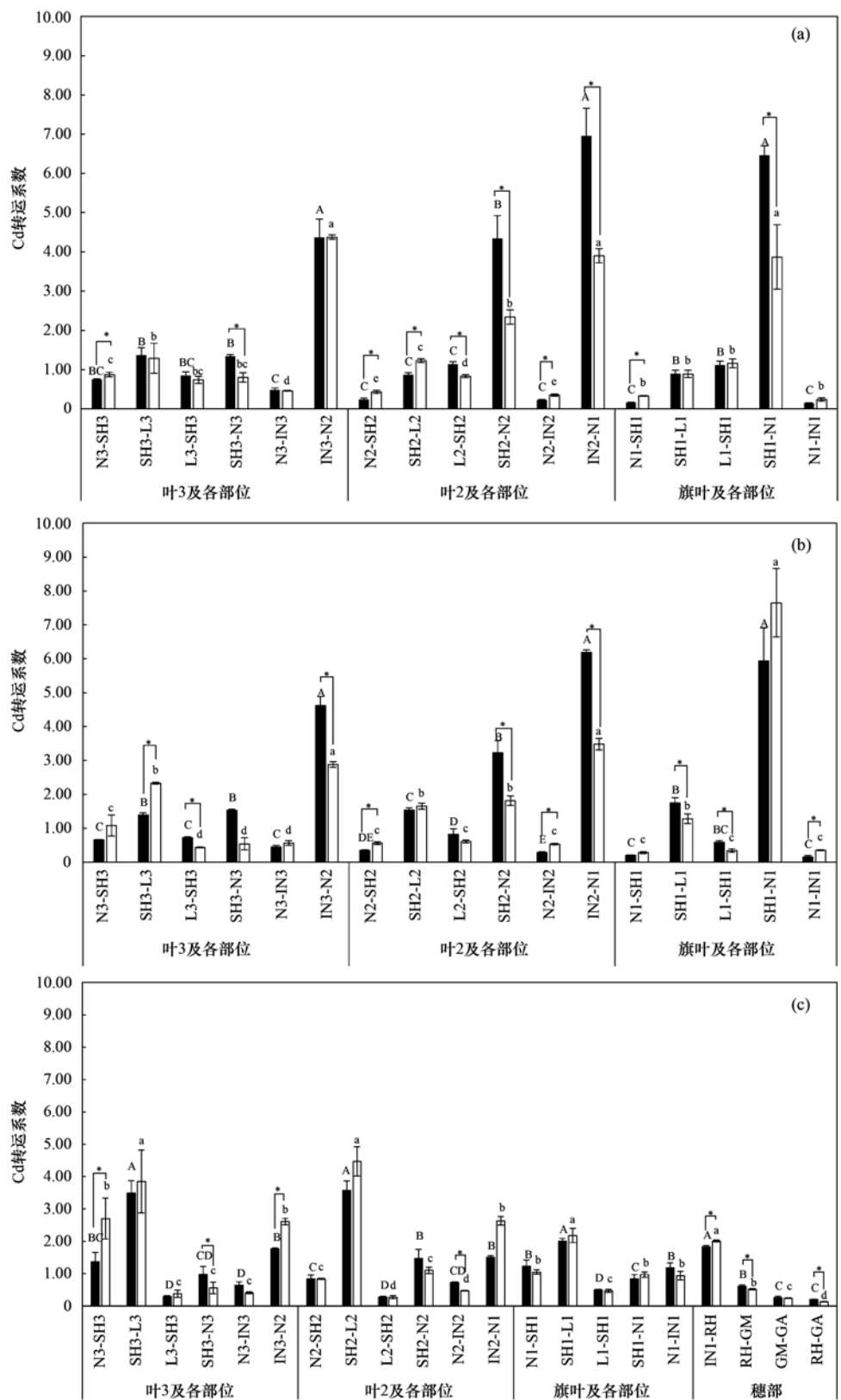
2.3.1 Cd 转运特征

转运系数 (TF) 表示重金属在植物不同部位之间的转运能力, 不同时期小麦不同部位之间 Cd 转运系数如图 5 所示。开花后 Cd 由下部叶片和节向穗部转运, 主要包括: Cd 从下部叶位的节经木质部进入相应的叶鞘和叶片, 并在叶片中累积, 叶片中的 Cd 可经韧皮部随同化产物的小分子一起运输至叶鞘和节, 节中的 Cd 可继续通过木质部或韧皮部运至该位置的节间和上一个叶位的节, 然后进行下一轮的运转, 最终进入穗部。本研究发现, 在灌浆期和成熟期两个品种小麦中的 Cd 经不同位置叶鞘进入叶片的能力较强, 显著高于 Cd 由节到叶鞘的转运, 这说明根系吸收的 Cd 主要通过节和节间的维管束系统进入叶片中累积; 从叶片中 Cd 再分配的外运结果来看, 在灌浆前期和灌浆后期, Cd 由小麦叶鞘

到节的转运系数显著高于叶到叶鞘和节到节间, 平均增幅分别为 326% 和 849%, 尤其是接近穗部的叶鞘 1 到节 1 的 Cd 转运能力最强, 比倒二叶和倒三叶的叶鞘到节转运系数分别显著提高 104% 和 470% [图 5(a) 和 5(b)]; 此外, Cd 在节与节间之间转运的主要特征为: 下部叶位的节间到上一个叶位的节 Cd 转运系数 (IN3-N2 和 IN2-N1) 显著高于同一叶位的节向节间的 Cd 转运系数 (N2-IN2 和 N1-IN1), 这说明 Cd 由节间向节的转运能力显著强于由节向外的转运能力; 同时, 比较两个小麦品种对 Cd 的转运能力发现, 在灌浆前期和灌浆后期, 尽管 JM22 中 Cd 由节 2 到节间 2 的转运系数显著高于 SN28, 但是 Cd 由节间 2 到节 1 和叶鞘到节的转运系数 JM22 远低于 SN28 [图 5(a) 和 5(b)]。综上分析, 在灌浆期 Cd 由叶鞘到节与节间到节的高转运和节到叶鞘与节到节间的低转运是调控籽粒中 Cd 累积的关键步骤, 可见节是 Cd 向籽粒中转运的重要“中转站”, 尤其是节 1。从成熟期各部位之间 Cd 的转运来看, SN28 穗轴到颖壳和穗轴到籽粒的 Cd 转运系数显著高于 JM22, 说明穗轴在 Cd 进入籽粒的过程中起着重要作用。

2.3.2 As 转运特征

As 在开花后不同生育时期各个部位之间的转运系数如图 6 所示, 其在小麦体内的运输途径与 Cd 类似, 且在灌浆期和成熟期两个品种小麦中 As 经不同位置叶鞘进入叶片的能力显著高于节到叶鞘的转运; 在灌浆前期、灌浆后期和成熟期, As 由小麦叶鞘到节的转运系数显著高于叶到叶鞘和节到节间的转运系数, 平均增幅为 438% 和 190%; 此外, 比较两个小麦品种 As 转运的差异发现, SN28 叶鞘向节的 As 转运系数显著高于 JM22, 说明在小麦开花后 As 主要通过叶鞘向节中运输并积累于节中; 然而, 在这 3 个时期 As 由节 1 到节间 1 的转运能力 JM22 显著强于 SN28, 而后节间 1 中的 As 继续向穗轴转运, 基于开花后两个品种体内 As 由叶鞘 1 到节 1 和节 1 到节间 1 转运能力存在相反的差异, 导致两个品种穗轴中 As 含量差异不显著; 同时, SN28 的节间 2 到节 1 的 As 转运系数显著高于 JM22, 造成 SN28 节 1 中 As 含量显著高于 JM22, 说明节 1 是负责 As 向籽粒运输的一个关键部位。进一步分析小麦穗部各器官之间的转运系数发现, As 由穗轴到颖壳、颖壳到籽粒和穗轴直接到籽粒的转运系数均表现为 SN28 显著高于 JM22, 说明穗轴和颖壳在 As 的转运中起着重要作用, 尤其是 JM22 穗轴到籽粒的 As 转运系数比 SN28 显著降低了 44.4%, 而颖壳到籽粒 As 转运系数则比 SN28 显



(a)、(b)和(c)分别为灌浆前期、灌浆后期和成熟期小麦不同部位之间 Cd 转运系数；不同大写字母或小写字母分别表示 SN28 或 JM22 不同部位之间 Cd 存在显著性差异 ($P < 0.05$)；* 表示相同部位不同小麦品种间 Cd 转运系数差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 开花后不同生育期在两个小麦品种不同部位之间 Cd 的转运系数

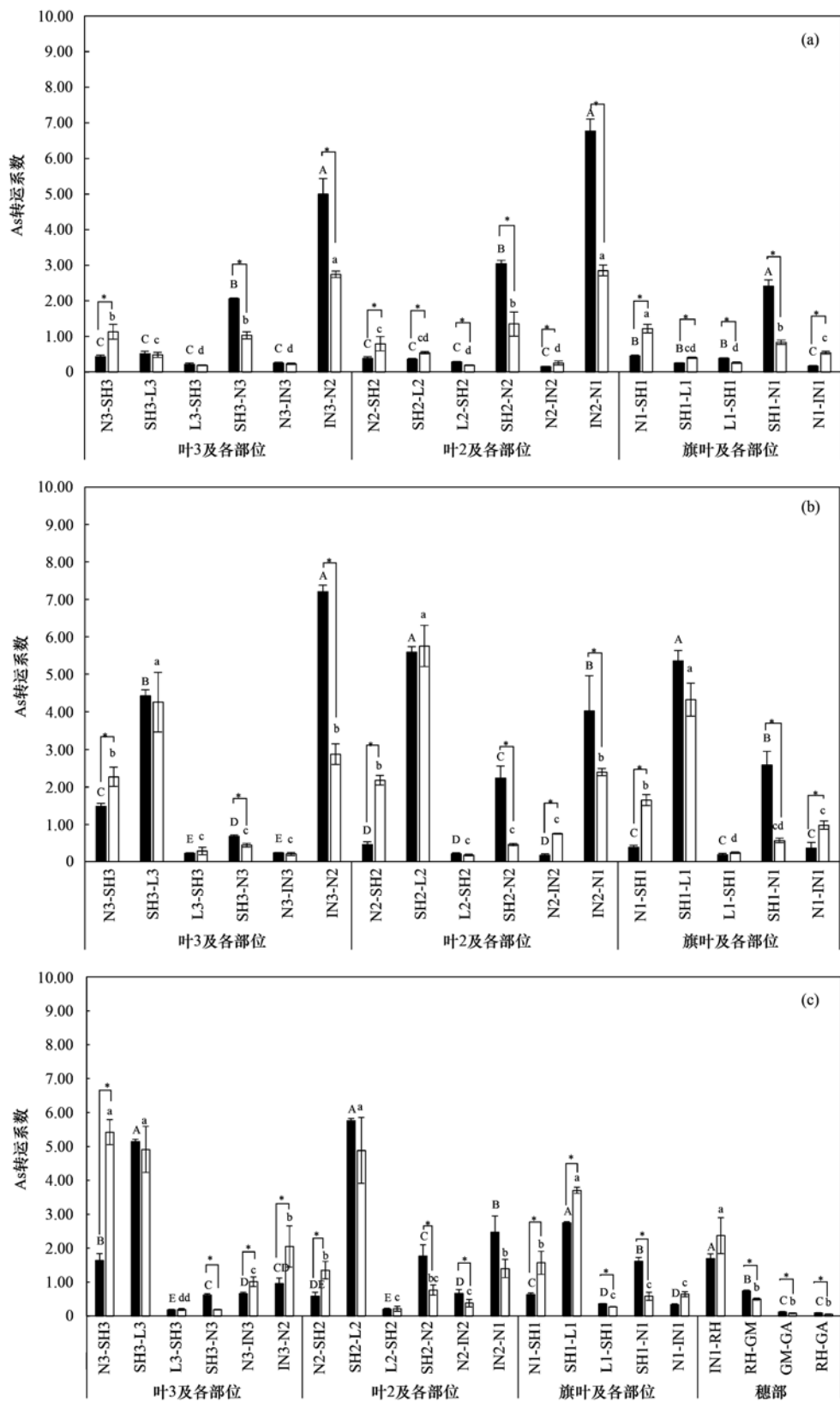
Fig. 5 Translocation factors of Cd in different parts of wheat shoots for two cultivars at different growing stages after flowering

著降低了 40.6%.

2.4 小麦籽粒与叶片和节之间 Cd 和 As 含量的关系

进一步分析成熟期两个品种小麦的节和叶片分

别与籽粒之间 Cd 含量的相关性发现,小麦节与籽粒的 Cd 含量之间、叶片与籽粒的 Cd 含量之间均呈显著正相关关系 ($P < 0.01$, $n = 18$) [图 7(a) 和 7



(a)、(b)和(c)分别为灌浆前期、灌浆后期和成熟期小麦不同部位之间 As 转运系数; 不同大写字母或小写字母分别表示 SN28 或 JM22 不同部位之间 As 存在显著性差异 ($P < 0.05$); * 表示相同部位之间不同小麦品种 As 转运系数差异 ($P < 0.05$)

图 6 开花后不同生育期 As 在两个小麦品种不同部位之间的转运系数

Fig. 6 Translocation factors of As in different parts of two wheat cultivars at different growing stages after flowering

(b)], 这说明籽粒对 Cd 累积能力的高低与叶片和节中 Cd 含量密不可分; 同时分析小麦节和叶片与籽粒之间 As 含量相关性, 发现小麦节与籽粒之间

As 含量呈现显著正相关关系 ($P < 0.01$, $n = 18$) [图 7(c)], 然而小麦叶片与籽粒之间 As 含量有负相关的趋势, 但相关性不显著 [图 7(d)]. 这说明 As 易

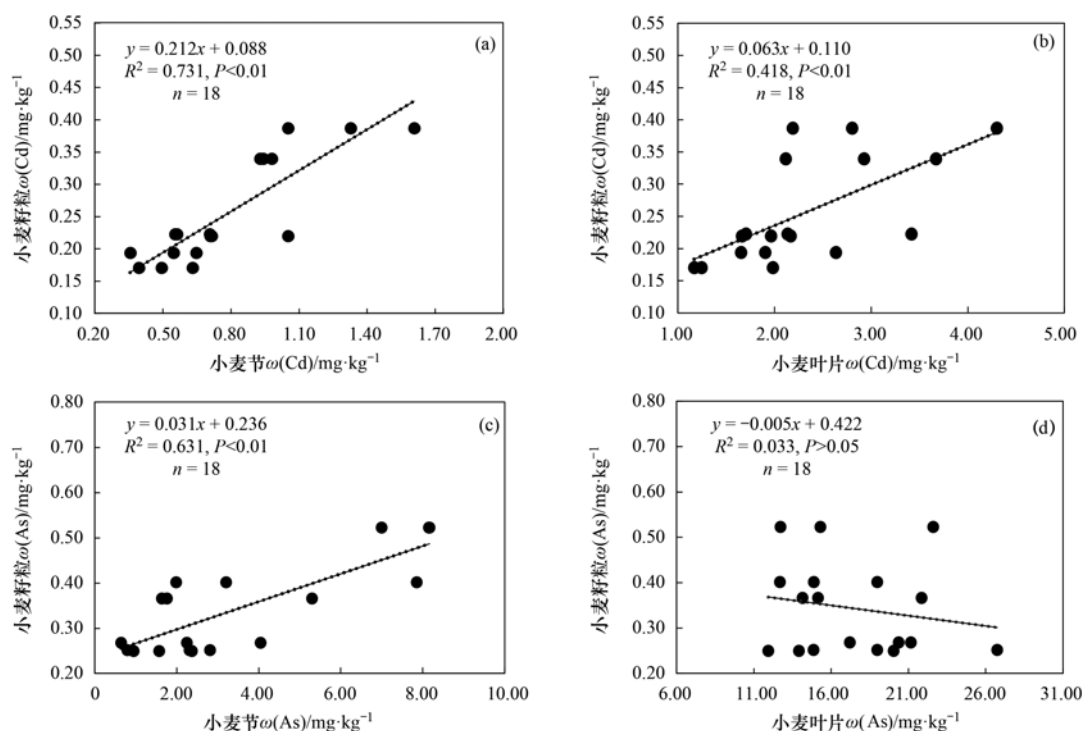


图7 小麦籽粒与节和叶片中镉砷含量之间的相关关系

Fig. 7 Relationships between Cd or As concentrations in grain and node or in grain and leaf

在叶片中累积的品种,As 向籽粒中转运较少,而节则对籽粒中 As 累积起着重要作用. 因此,进一步验证了小麦节是 Cd 和 As 向籽粒转运的重要部位.

3 讨论

已有研究表明水稻中 Cd 的韧皮部运输是决定稻米中 Cd 积累的重要环节,Cd 在茎节处可由木质部转移至韧皮部进行自下而上或自上而下的转运,叶片中累积的 Cd,尤其是旗叶中的 Cd 可通过韧皮部重新分配,经叶鞘、节 1、穗下节间进入穗轴乃至颖壳,最终进入水稻籽粒. 因此,水稻中节是木质部中 Cd 向韧皮部转运的重要部位,在 Cd 向上转运至籽粒起着重要作用^[32,33]. 本研究发现,与水稻同为禾本科单子叶植物的小麦,开花后地上部积累的 Cd 和 As 通过节、节间和叶片等器官的再分配后进入籽粒,随着在小麦植株地上部位置的升高,叶片和叶鞘中 Cd 和 As 含量呈现逐渐下降,而其在节和节间呈现逐渐升高的趋势,这表明土壤中的 Cd 和 As 被小麦根部吸收后更易于向基部的叶片和叶鞘以及顶部的节和节间输送.

灌浆期是小麦籽粒形成的关键生育时期,叶片中合成的光合产物通过韧皮部运输到籽粒,此过程同时伴随着营养元素以及重金属的迁移,最后进入籽粒积累^[34,35]. 通过分析相关研究发现,成熟期小麦中 Cd 由节间向相邻节转运系数显著高于节向相邻节间的转运系数^[36],而本研究结果进一步表明在

小麦灌浆前期、灌浆后期和成熟期这 3 个生育期,Cd 由节间运输至上一个叶位节的转运能力显著高于节向其同叶位节间的转运能力[图 5 (a) 和 5 (b)],但是成熟期仅在 Cd 低积累品种 JM22 中呈现出相似的 Cd 转运特征,这说明灌浆期旗叶的生命力及其转运光合产物的能力较强,可以将叶片中的 Cd 与光合产物一起通过节转运至穗部. 同时,节 1 中 Cd 含量达到最高,进一步说明节是限制 Cd 向小麦穗部转运的主要部位,尤其是节 1. 这可能是和节中转运蛋白的显著表达有关,相关研究表明水稻中 OsZIP7 转运体在茎节处参与调控 Cd 从木质部向韧皮部运输^[37]. 已有的研究表明 Cd 在水稻地上部的转运受到节的显著控制,尤其是穗下的第一节,这一点与本研究小麦的结果一致^[38,39]. 研究发现节 1 的扩散维管束 (DVB) 和转运维管束 (TVB) 的面积最小^[29],放大维管束 (EVB) 与叶片的木质部相连,如果节 DVB 太小则会导致节中更多的 Cd 通过 EVB 转移到叶片中^[40]. 由此可见,不同部位的节调控 Cd 运输的能力存在差异,可能是由于不同部位节中 DVB 和 TVB 面积大小不同所致,较大的维管束面积为 Cd 的运输提供更大的通道,导致更多的 Cd 向小麦籽粒中累积,反之亦然. 本研究中成熟期小麦叶片 Cd 含量高于其他部位,可能是由于 SN28 和 JM22 两个品种节中 DVB 的面积较小,导致根部吸收的 Cd 向上运输的过程中一部分积累于节,其中也有一部分 Cd 经节流向叶片. 通过对比两个品种发现 Cd

低累积品种 JM22 叶片 Cd 含量高于 SN28, 因此推测可能是由于更多的 Cd 转运至叶片并累积下来, 导致小麦籽粒中 Cd 含量下降所致. 同位素示踪试验发现, 小麦籽粒中 40%~45% 的 Cd 来源于叶片中 Cd 的活化再利用^[41]. 通过分析两品种小麦不同部位之间的转运系数, 发现在灌浆前期和灌浆后期 Cd 由叶鞘到节的转运能力显著强于叶到叶鞘和节到节间的转运, 并且 SN28 叶到叶鞘和叶鞘到节的转运系数显著高于 JM22, 这表明在灌浆期小麦叶片向叶鞘再到节这一途径是 Cd 向穗部运输的主要途径, 叶鞘到节的高转运与节到节间的低转运影响着 Cd 向小麦籽粒中运输. 进一步分析小麦穗各部位之间的 Cd 转运, 虽然 JM22 中 Cd 由节间到穗轴的转运系数显著高于 SN28, 然而其从穗轴到颖壳以及穗轴直接到籽粒的转运规律正好相反, 前人的研究也发现, 相对于高累积品种来说灌浆期低累积品种 Cd 由节间 1 到穗轴的转运能力更强^[42]. 这说明穗轴对 Cd 向籽粒运输起到了重要的抑制作用; 刘畅等^[36]也发现低累积品种籽粒、颖壳和穗轴的 Cd 富集能力显著低于高累积品种, 且相关的转运也显著低于高累积品种, 表明穗部累积少且向籽粒转运少是低累积品种籽粒 Cd 含量低的重要原因. 但是, 冯亚娟等^[43]对小麦各器官 Cd 积累分布规律研究发现, 低累积品种的颖壳对 Cd 具有很好的滞留作用, 低累积品种颖壳中 Cd 含量显著高于高累积品种, 这说明对于该试验的小麦品种而言, 颖壳调控着籽粒中 Cd 的累积.

不同品种之间籽粒和叶片 As 的积累能力存在很大的差异, 有研究发现在 As 污染环境种植水稻, 低累积品种叶片中 As 含量显著高于高累积品种, 这表明 As 低累积品种会优先将 As 转移至叶片当中, 进而影响籽粒中 As 的累积^[44], 这一点与本研究的结果相似, JM22 叶片中 As 含量在灌浆期高于 SN28, 但是成熟期籽粒中 As 含量却显著低于 SN28. 此外, 土壤施肥可有效降低水稻籽粒和秸秆中 As 含量^[45], 且在灌浆期向小麦叶片喷施硅能够有效降低小麦籽粒中的 As 含量^[46], 这也表明叶片是控制 As 向籽粒转运的关键部位之一. 本研究发现灌浆前期、灌浆后期和成熟期小麦叶片 As 含量显著高于其他部位, 是 As 累积的主要部位. 同时, 灌浆前期 JM22 倒三叶中 As 含量高于 SN28, 且前者 As 由叶片向叶鞘的转运能力显著低于后者, 因此, JM22 籽粒中 As 较低是由于 As 在旗叶中的滞留作用较强所致. 有研究通过对比水稻中不同部位的 As 含量发现, 倒三叶的 As 含量显著高于其他部位叶片 As 含量^[47], 这一点与本研究结果一致. 然而节与之呈现

相反的变化规律, 且节的 As 含量显著高于对应的节间, 同时开花后 3 个时期高累积品种 SN28 节 1 中 As 含量, 以及 As 由节间 2 向节 1 的转运能力均显著高于 JM22, 这表明节 1 是抑制 As 向上运输的关键位置; 此外, 颖壳也是阻控 As 向籽粒迁移的重要部位, 这与颖壳对 Cd 的滞留作用相似, 总之, 旗叶、节 1 和颖壳综合阻控了 As 向小麦籽粒的转运.

4 结论

(1) 开花后小麦中 Cd 主要分布在节, 且节 1 含量最高, 旗叶以及其叶鞘和节是控制小麦籽粒 Cd 累积的关键部位; 而小麦中 As 主要分布于叶片, 且叶片 3 含量最高, 小麦叶片 3、叶鞘 3 以及节 1 对 As 在小麦籽粒累积起了重要的作用.

(2) 节是控制 Cd、As 向各部位转运的重要枢纽; 旗叶的叶鞘到节 1、穗轴向颖壳、穗轴向籽粒的转运过程是限制 Cd 向小麦籽粒转运的关键过程; 旗叶和节 1 是负责 Cd 向籽粒转运的关键部位, 穗轴向籽粒的转运主要控制 As 向小麦籽粒中的转运.

参考文献:

- [1] Zhao F J, Tang Z, Song J J, *et al.* Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food[J]. *Molecular Plant*, 2022, **15**(1): 27-44.
- [2] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(5): 1137-1142.
Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): 1137-1142.
- [3] 徐长春, 郑戈, 林友华. “十三五”国家重点研发计划农田镉砷污染防治领域资助情况概述[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(7): 1321-1325.
Xu C C, Zheng G, Lin Y H. Brief introduction to research projects on prevention and control of cadmium and arsenic pollution in croplands supported by National Key R&D Program of China in 13th Five-Year Period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(7): 1321-1325.
- [4] Rezapour S, Atashpaz B, Moghaddam S S, *et al.* Heavy metal bioavailability and accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated with treated wastewater in calcareous soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **656**: 261-269.
- [5] Sui F Q, Zhao D K, Zhu H T, *et al.* Map-based cloning of a new total loss-of-function allele of *OsHMA3* causes high cadmium accumulation in rice grain[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, **70**(10): 2857-2871.
- [6] Wang P, Chen H P, Kopittke P M, *et al.* Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 1038-1048.
- [7] Liu N, Huang X M, Sun L M, *et al.* Screening stably low cadmium and moderately high micronutrients wheat cultivars under three different agricultural environments of China[J]. *Chemosphere*, 2020, **241**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.

- 125065.
- [8] Wei L, Ding Q, Guo H M, *et al.* Forms and mobility of heavy metals/metalloids in sewage-irrigated soils in the North China Plain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, **21**(1): 215-234.
- [9] Ma S J, Hu Y H, Zeng Q H, *et al.* Temporal changes of calcareous soil properties and their effects on cadmium uptake by wheat under wastewater irrigation for over 50 years [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127971.
- [10] Clemens S. Safer food through plant science: reducing toxic element accumulation in crops [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, **70**(20): 5537-5557.
- [11] Zhao F J, Wang P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies[J]. *Plant and Soil*, 2020, **446**(1-2): 1-21.
- [12] Du B Y, Zhou J, Lu B X, *et al.* Environmental and human health risks from cadmium exposure near an active lead-zinc mine and a copper smelter, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137585.
- [13] Liu W T, Liang L C, Zhang X, *et al.* Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(11): 8432-8441.
- [14] Sui F Q, Chang J D, Tang Z, *et al.* Nramp5 expression and functionality likely explain higher cadmium uptake in rice than in wheat and maize[J]. *Plant and Soil*, 2018, **433**(1-2): 377-389.
- [15] Ma J F, Shen R F, Shao J F. Transport of cadmium from soil to grain in cereal crops: a review[J]. *Pedosphere*, 2021, **31**(1): 3-10.
- [16] Li X F, Zhou D M. A meta-analysis on phenotypic variation in cadmium accumulation of rice and wheat: implications for food cadmium risk control[J]. *Pedosphere*, 2019, **29**(5): 545-553.
- [17] Zhuang Z, Niño-Savala A G, Mi Z D, *et al.* Cadmium accumulation in wheat and maize grains from China: interaction of soil properties, novel enrichment models and soil thresholds [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **275**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116623.
- [18] 孙丽娟, 秦秦, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(7): 1377-1386.
- Sun L J, Qin Q, Song K, *et al.* The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: a review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(7): 1377-1386.
- [19] Wu J W, Mock H P, Giehl R F H, *et al.* Silicon decreases cadmium concentrations by modulating root endodermal suberin development in wheat plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **364**: 581-590.
- [20] Chen H P, Zhang W W, Yang X P, *et al.* Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain[J]. *Chemosphere*, 2018, **207**: 699-707.
- [21] Liu Y K, Lu M, Tao Q, *et al.* A comparative study of root cadmium radial transport in seedlings of two wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes differing in grain cadmium accumulation [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115235.
- [22] Liu C X, Guttieri M J, Waters B M, *et al.* Cadmium concentration in terminal tissues as tools to select low-cadmium wheat[J]. *Plant and Soil*, 2018, **430**(1-2): 127-138.
- [23] 潘建清, 陆敏, 杨肖娥. 不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(4): 756-765.
- Pan J Q, Lu M, Yang X E. Variations in growth and cadmium accumulation among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars during the grain filling stage [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(4): 756-765.
- [24] Qiao K, Wang F H, Liang S, *et al.* New biofortification tool: wheat TaCNR5 enhances zinc and manganese tolerance and increases zinc and manganese accumulation in rice grains [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, **67**(35): 9877-9884.
- [25] 肖冰, 薛培英, 韦亮, 等. 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉砷铅污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al.* Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- [26] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *地学前缘*, 2021, **28**(4): 238-249.
- Zhang S R, Wang C Y, Liu J H, *et al.* Assessments of heavy metal pollution in soils of the southwestern Xiong'an District and its ecological risk[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(4): 238-249.
- [27] Zhang X Y, Geng L P, Gao P P, *et al.* Bioimaging of Pb by LA-ICP-MS and Pb isotopic compositions reveal distributions and origins of Pb in wheat grain [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **802**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149729.
- [28] 孙洪欣, 薛培英, 赵全利, 等. 镉、铅积累与转运在冬小麦品种间的差异[J]. *麦类作物学报*, 2015, **35**(8): 1161-1167.
- Sun H X, Xue P Y, Zhao Q L, *et al.* Differences of cadmium and lead accumulation and transportation among winter wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, **35**(8): 1161-1167.
- [29] Zhang L G, Zhang C, Du B Y, *et al.* Effects of node restriction on cadmium accumulation in eight Chinese wheat (*Triticum turgidum*) cultivars [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **725**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138358.
- [30] Gao P P, Xue P Y, Dong J W, *et al.* Contribution of PM_{2.5}-Pb in atmospheric fallout to Pb accumulation in Chinese cabbage leaves via stomata [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124356.
- [31] 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 等. 设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 481-489.
- Dong J W, Gao P P, Sun H X, *et al.* Characteristics and health risk assessment of cadmium, lead, and arsenic accumulation in leafy vegetables planted in a greenhouse [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 481-489.
- [32] Tan L T, Zhu Y X, Fan T, *et al.* OsZIP7 functions in xylem loading in roots and inter-vascular transfer in nodes to deliver Zn/Cd to grain in rice[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2019, **512**(1): 112-118.
- [33] Hao X H, Zeng M, Wang J, *et al.* A node-expressed transporter OsCCX2 is involved in grain cadmium accumulation of rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.

- 00476.
- [34] 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.
- [35] 熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(1): 36-44.
- Xiong Z, Li J M, Zhao H W, *et al.* Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(1): 36-44.
- [36] 刘畅, 徐应明, 黄青青, 等. 不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1596-1605.
- Liu C, Xu Y M, Huang Q Q, *et al.* Variations in cadmium accumulation and transport and ionic traits among different winter wheat varieties [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1596-1605.
- [37] Tian S Q, Liang S, Qiao K, *et al.* Co-expression of multiple heavy metal transporters changes the translocation, accumulation, and potential oxidative stress of Cd and Zn in rice (*Oryza sativa*) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **380**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120853.
- [38] Huang G X, Ding C F, Guo F Y, *et al.* The role of node restriction on cadmium accumulation in the brown rice of 12 Chinese rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, **65**(47): 10157-10164.
- [39] Feng X M, Han L, Chao D Y, *et al.* Ionic and transcriptomic analysis provides new insight into the distribution and transport of cadmium and arsenic in rice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **331**: 246-256.
- [40] Yamaji N, Ma J F. Node-controlled allocation of mineral elements in Poaceae [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2017, **39**: 18-24.
- [41] Yan B F, Nguyen C, Pokrovsky O S, *et al.* Cadmium allocation to grains in durum wheat exposed to low Cd concentrations in hydroponics [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **184**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109592.
- [42] Shi G L, Li D J, Wang Y F, *et al.* Accumulation and distribution of arsenic and cadmium in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different developmental stages [J]. Science of the Total Environment, 2019, **667**: 532-539.
- [43] 冯亚娟, 李廷轩, 蒲勇, 等. 不同镉积累类型小麦各器官镉积累分布规律及机理分析[J]. 作物学报, 2022, **48**(7): 1761-1770.
- Feng Y J, Li T X, Pu Y, *et al.* Characteristics of cadmium accumulation and distribution in different organs of wheat with different cadmium-accumulating type [J]. Acta Agronomica sinica, 2022, **48**(7): 1761-1770.
- [44] Chen Y, Moore K L, Miller A J, *et al.* The role of nodes in arsenic storage and distribution in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, **66**(13): 3717-3724.
- [45] Greger M, Landberg T. Silicon reduces cadmium and arsenic levels in field-grown crops [J]. Silicon, 2019, **11**(5): 2371-2375.
- [46] 张世杰, 孙洪欣, 薛培英, 等. 叶面施硅时期对冬小麦镉铅砷积累的阻控效应研究[J]. 河北农业大学学报, 2018, **41**(3): 1-6, 36.
- Zhang S J, Sun H X, Xue P Y, *et al.* Study on the effect of foliar application of silicon fertilizer on lead cadmium and arsenic accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2018, **41**(3): 1-6, 36.
- [47] 李道军. 砷和镉在小麦 (*Triticum aestivum* L.) 体内积累和分布及磷硅对小麦砷吸收和转运的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- Li D J. Arsenic (As) and cadmium (Cd) accumulation and distribution in wheat (*Triticum aestivum* L.) and the influence of phosphate and silicate [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)