

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期
Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM _{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析	蔡子颖,郝国,韩素芹,唐颖潇,杨旭,樊文雁,姚青,邱晓滨(1129)
天津市PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及来源分析	肖致美,徐虹,高璟,蔡子颖,毕温凯,李鹏,杨宁,邓小文,戴运峰(1140)
基于随机森林模型的武汉市城区大气PM _{2.5} 来源解析	张志豪,陈楠,祝波,陶卉婷,成海容(1151)
华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析	任秀龙,胡伟,吴春苗,胡偲豪,高娜娜,张崇崇,岳亮,王金喜,樊景森,牛红亚(1159)
“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征	吴安南,黄小娟,何仁江,李金建,叶林麟,吴涛,肖智丹,刘子锐,王跃思,张小玲,张军科(1170)
郑州市典型污染过程PM ₁₀ 中重金属浓度、来源及健康风险评估	翟诗婷,王申博,张栋,赵孝因,杨洁茹,刘洋,陈红阳,张瑞芹(1180)
长江经济带PM _{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测	王丽丽,刘笑杰,李丁,孙颖琦(1190)
长三角地区PM _{2.5} 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应	周丽霞,吴涛,蒋国俊,张建珍,濮励杰,徐飞,解雪峰(1201)
“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析	朱媛媛,王晓斐,汪巍,刀谔,王帅,陈善荣(1212)
基于小波变换的山西省PM _{2.5} 污染特征及影响因素	张可可,胡冬梅,闫雨龙,彭林,段小琳,尹浩,王凯,邓萌杰(1226)
中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估	赵楠,卢毅敏(1235)
湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别	刘妍妍,杨雷峰,谢丹平,泽仁央宗,黄志烟,杨俊,赵鹏,韩静磊,贾文超,袁自冰(1246)
山东半岛近地面O ₃ 浓度时空变化及潜在源区解析	李乐,刘旻霞,肖仕锐,王思远,米佳乐(1256)
COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析	刘新军,王淑娟,刘程,范莉茹,付翠轻,齐堃,宿文康(1268)
淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析	王帅,王秀艳,杨文,王雨燕,白瑾丰,程颖(1277)
淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较	秦涛,徐勃,王信梧,李丽明,杨文,王晓丽,耿春梅(1286)
四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单	钱骏,韩丽,陈军辉,王斌,姜涛,徐晨曦,李英杰,王成辉,王波(1296)
餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征	李源,吴爱华,童梦雪,栾胜基,李骞(1307)
堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构	于奥园,邢礼军,孙兴滨,仇天雷,王旭明,高敏(1315)
城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路	李廷昆,冯银厂,毕晓辉,张裕芬,吴建会(1323)
黄河干流水质评价与时空变化分析	刘彦龙,郑易安(1332)
典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例	王超,叶秋,贾伯阳,何文战,党超军,黄焱,杜浪(1346)
三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响	黄伟,张研,罗晓佼,张磊(1356)
派河及其支流溶解性有机质分子组成特征	詹亚,尹浩,冯景伟,冯艾荣,胡艳云,张刘,郑刘根(1365)
粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素	崔新月,莫武秋,廖建波(1375)
骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价	龚润强,赵华璋,高占欣,胡冠九,卜元卿,张圣虎,邱慧(1384)
宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估	李富娟,高礼,李凌云,郑兰香,陶红,杨桂钦(1394)
百年以来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应	龚雄虎,赵中华,丁琪琪,张路,姚书春,薛滨(1404)
长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异	胡愈忻,张静,黄杰,段春建,李天翠,刘威,王英才,胡圣(1414)
河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征	史玉娇,李文宝,张博尧,姚国旺,史小红(1424)
不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响	舒旺,王鹏,丁明军,张华,黄高翔,聂明华(1434)
鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征	刘淑丽,简敏菲,邹龙,胡启武(1447)
微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响	陶辉,戚怡婷,于多,杨兰,顾颖,厉彦辉(1455)
乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律	刘禹,史小红,张生,郝若男,孙标,赵胜男(1463)
老化前后微塑料对富里酸的吸附	宋亚丽,俞娅,郝磊,汪华,朱文芳(1472)
天津市滨海河流N、O ₃ 扩散通量及控制因子	汤梦瑶,胡晓康,王洪伟,王云仓,常素云,王松庆,钟继承(1481)
铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响	陈鑫童,郝庆菊,熊艳芳,胡剑,江长胜(1492)
降雨径流污染风险等级识别与优化方法	齐小天,张质明,赵鑫,胡文翰,刘迪(1500)
基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析	江杉杉,王臻宇,高权,杨愿愿,高方舟,胡佩,应光国(1512)
聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(Ⅲ)的选择性吸附效果与机制	赵文金,张顺,安晓强,兰华春,刘会娟,曲久辉(1521)
F/M对活性污泥微生物生态网络的影响	张冰,孙展翔,文湘华(1529)
城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例	刘书准,王德伟,施泽明,唐亮,章凤英,廖程,李晓雨,徐文斌(1535)
基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估	王蕊,陈楠,张二喜(1546)
湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转化特征及污染评价	张龙,宋波,黄凤艳,肖乃川,顿梦杰(1558)
生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应	杨士,刘祖文,龙培,毕永顺,林苑,左华伟(1567)
溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤	闵涛,罗彤,陈丽丽,茹思博,李俊华(1577)
铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制	连斌,吴骥子,赵科理,叶正钱,袁峰(1584)
不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异	刘畅,徐应明,黄青青,陶雪莹,王林,孙约兵,赵立杰(1596)
镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性	任超,任成仲,王浩,朱利文,李竞天,杜倩倩,李萍(1606)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响	刘坤和,薛玉琴,竹兰萍,徐飞,朱志豪,张拓,张富斌(1620)
蚯蚓/钾锰改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响	苏倩倩,李莲芳,朱昌雄,叶婧,刘雪,耿兵,田云龙,黄晓雅(1630)
DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响	罗洋,孙丽,刘方,任军,郭金梅,闫修民(1641)
地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响	胡志娥,肖谋良,王双,童瑶瑶,鲁顺保,陈剑平,葛体达(1649)
增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响	王兴,钟泽坤,朱玉帆,王佳懿,杨改河,任成杰,韩新辉(1657)
秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田N ₂ O和N ₂ 排放的影响	彭毅,李惠通,张少维,阳婷,王筱斐,周春菊,王林权(1668)
基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氮挥发的影响	赵政鑫,王晓云,田雅洁,王锐,赵青,蔡焕杰(1678)
施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析	冉继伟,肖琼,黄敏,蔡岸冬,张文菊(1688)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异

刘畅^{1,2}, 徐应明^{1,2}, 黄青青^{1,2}, 陶雪莹^{1,2}, 王林^{1,2*}, 孙约兵^{1,2}, 赵立杰^{1,2}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部产地环境污染防控重点实验室, 天津 300191)

摘要: 为揭示影响冬小麦籽粒镉(Cd)含量品种差异的关键因素,通过大田试验种植3种Cd低积累小麦和2种Cd高积累小麦,研究不同品种各器官Cd的富集转运特征及离子组特征,并通过相关性分析和主成分分析探讨造成不同冬小麦品种籽粒Cd含量差异的关键器官、关键过程及关键元素。结果表明,颖壳、穗轴、节间1和节点1等器官的Cd富集系数,以及穗轴到籽粒、穗轴到颖壳、节间1到穗轴和节点1到节间1等转运过程的Cd转运系数,均与籽粒Cd富集系数显著相关,在主成分分析中Cd高低积累小麦品种的区分上贡献较大,且在高低积累品种间存在显著差异,因此这4个器官是影响小麦籽粒Cd含量基因型差异的关键器官,而这4个过程是控制小麦籽粒Cd累积品种差异的关键过程。离子组分析表明,在影响小麦籽粒Cd累积品种差异的关键器官中Mg和Mn的富集系数,以及关键转运过程中Mo、Cr和Pb的转运系数,均与籽粒Cd富集系数显著相关,且在主成分分析中高低积累小麦品种区分方面贡献较大,因此在上述关键器官和转运过程中,Mg、Mn、Mo、Cr和Pb是影响小麦籽粒Cd累积品种差异的关键元素。

关键词: 小麦; 镉(Cd); 基因型差异; 富集系数; 转运系数; 离子组

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1596-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202107062

Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties

LIU Chang^{1,2}, XU Ying-ming^{1,2}, HUANG Qing-qing^{1,2}, TAO Xue-ying^{1,2}, WANG Lin^{1,2*}, SUN Yue-bing^{1,2}, ZHAO Li-jie^{1,2}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: A field trial was conducted to identify the key factors affecting intraspecific variation in the cadmium (Cd) content in the grain of winter wheat. Three wheat cultivars with low Cd accumulation and two wheat cultivars with high Cd accumulation were planted. The Cd accumulation and transport and ionic traits were examined in different organs of the tested wheat cultivars. Additionally, correlation analysis and principal component analysis were used to identify the key plant organs, translocation pathways, and elements that determine the intraspecific variation in the Cd content in wheat grain. The results showed that the bioaccumulation factors of Cd in glume, rachis, internode 1, and node 1, as well as the transport factors of Cd from rachis to grain, from rachis to glume, from internode 1 to rachis, and from node 1 to internode 1, were significantly correlated with Cd bioaccumulation factors in grain. The above-mentioned bioaccumulation factors and transport factors of Cd made a great contribution to the principal components that could discriminate between the wheat cultivars with low and high Cd accumulation and were significantly different among cultivars. Therefore, glume, rachis, internode 1, and node 1 were the key organs affecting the genotype differences in Cd content in wheat grain, and Cd translocation from rachis to grain, from rachis to glume, from internode 1 to rachis, and from node 1 to internode 1 were the key pathways controlling the variety differences in Cd accumulation in wheat grain. The analysis of wheat ionome showed that the bioaccumulation factors of Mg and Mn in the key organs and the transport factors of Mo, Cr, and Pb in the key transport pathways were significantly correlated with the bioaccumulation factor of Cd in wheat grain and contributed greatly to the differentiation between the wheat cultivars with low and high Cd accumulation in the principal component analyses. Thus, in the above-mentioned key organs and transport pathways, Mg, Mn, Mo, Cr, and Pb were the key elements affecting the genotype differences in Cd content in wheat grain.

Key words: wheat; cadmium(Cd); genotype differences; bioaccumulation factor; transport factor; ionome

小麦是全球主要粮食作物之一,我国是世界上小麦产量和消费量最大的国家^[1],保障小麦质量安全对于我国主粮安全生产具有重要意义。然而,小麦是一种易于累积镉(Cd)的作物。有调查显示,小麦籽粒的Cd富集系数(均值0.237, $n=641$)明显高于水稻(均值0.145, $n=331$)^[2]。近年来,农田土壤Cd污染引发的小麦籽粒Cd含量超标问题频发,在河南省新乡市^[3]、甘肃省白银市^[4]、河北省石家庄市^[5]和天津市^[6]都有报道。因此,解决小麦Cd污染问题迫在眉睫。

有研究表明,基于小麦Cd累积的基因型差异,选用Cd低积累小麦品种是降低小麦籽粒Cd含量

的有效方法,而揭示小麦在根、节间、节点和穗轴等器官吸收转运Cd的生物学机制对于Cd低积累小麦选育和应用具有重要指导价值^[7,8]。前人研究发现,Cd由根部向地上部^[9]、节点向穗部^[10]和穗轴向籽粒^[11]等转运过程在影响小麦籽粒Cd积累及其品种差异方面发挥重要作用,但究竟哪个器官或转运过程在控制小麦籽粒Cd含量及其基因型差异

收稿日期: 2021-07-08; 修订日期: 2021-08-11

基金项目: 中国农科院科技创新工程项目(CAAS-CXGC-xym-2018); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03-25); 国家自然科学基金项目(41571322)

作者简介: 刘畅(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染农田安全利用, E-mail: 1002572596@qq.com

* 通信作者, E-mail: wanglin2017@caas.cn

方面发挥最关键的作用,至今尚未形成统一的认识.植物离子组学是研究植物体内无机元素组成的新兴组学技术^[12,13].近年来小麦离子组学研究主要关注品种、环境和农艺措施对其离子组的影响,这些研究为基于食品营养与安全的科学养分管理提供了重要依据^[14-17].Cd 是一种植物非必需的重金属元素,常与 Fe、Mn、Ca 和 Zn 等元素发生拮抗或协同作用^[18,19].通过离子组学方法研究小麦体内 Cd 与其他元素在吸收转运过程中的交互作用,不仅有助于揭示小麦累积 Cd 的分子生物学机制,也可以为施肥调控小麦 Cd 累积提供重要依据,然而这方面的研究还鲜见报道.

针对日益严重的小麦 Cd 污染问题,本研究在前期筛选试验的基础上,选择 3 个 Cd 低积累和 2 个 Cd 高积累冬小麦品种,通过大田试验,分析不同冬小麦品种各器官的 Cd 富集系数、相邻器官间的 Cd 转运系数和离子组特征,并通过相关性分析和主成分分析方法,揭示影响小麦籽粒 Cd 含量基因型差异的关键器官、关键过程和关键元素,以期小麦 Cd 污染治理和安全利用提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试品种

本试验地块选择河南省新乡市某电池企业周边农田,该农田因污水灌溉而导致 Cd 污染.供试土壤类型为石灰性潮土,基本理化性质如下: pH 8.14, ω (有机质)为 23.61 g·kg⁻¹, ω (碱解氮)、 ω (速效磷)和 ω (速效钾)分别为 128.31、64.24 和 213.56 mg·kg⁻¹,土壤无机元素组成为: Mg、Al、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Cd 和 Pb,含量分别为 1 707.67、14 874.18、8 764.39、10 362.70、309.49、216.81、6 999.27、22.73、5.85、31.38、23.48、0.88、2.98 和 17.06 mg·kg⁻¹.供试冬小麦品种包括 Cd 低积累冬小麦 3 种,即: 良星 99(德州市良星种子研究所)、济麦 22(山东省农科院作物研究所)和鑫麦 296(山东鑫丰种业有限公司),以及 Cd 高积累冬小麦 2 种,即石家庄 8 号(石家庄市农科院)和尧麦 16 号(山西省农科院小麦研究所).

1.2 试验设计与方法

由于需要布置其他研究内容,试验面积有限,供试小麦中有 3 个品种(鑫麦 296、石家庄 8 号和尧麦 16 号)种植 2 个小区,其余 2 个品种(良星 99 和济麦 22)种植 3 个小区;试验小区采用随机区组排列.每个小区面积为 30 m² (10 m×3 m),小区之间通过田埂和 0.5 m 宽的隔离行区隔.冬小麦于 2019 年 9 月下旬播种,2020 年 5 月底收获.试验田间管理参

照当地传统措施,在小麦播种前按照 N 150 kg·hm⁻² 和 P₂O₅ 100 kg·hm⁻² 施用尿素和过磷酸钙作为基肥,在小麦越冬前、返青、拔节和灌浆期使用地下水(未检出 Cd)灌溉.

1.3 样品处理与离子组分析

在小麦收获时,每个小区采用 5 点法采集 30 株小麦样品,并采用抖根法采集根际土样.所采集的小麦样品用人工分为籽粒、颖壳、穗轴、节间、节点、叶片和根系等器官,其中节间从上到下依次分为节间 1 到节间 5,节点从上到下依次分为节点 1 到节点 4,这样小麦植株共分成 14 个部位.每个部位用自来水和去离子水清洗,之后将各部位在 75℃ 下烘干至恒重,分别称重,粉碎混匀备用.土壤样品自然风干,研磨并过 15 目和 100 目筛备用.

小麦样品每份称取 0.25 g 加入 8 mL 优级纯 HNO₃,土壤样品每份称取 0.25 g 加入 8 mL 优级纯 HNO₃ 和 4 mL 优级纯 HF,在电热消解仪(Digi Block ED54,北京莱伯泰科)上消解^[20],消解后样品中的 Mg、Al、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Cd 和 Pb 等元素含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, ICAP-Qc, Thermo Fisher Scientific, Germany)测定.在小麦和土壤样品元素分析过程中,采用添加试剂空白、标准物质和在线内标(Ge、In 和 Bi)等手段进行质量控制;其中植物分析的标准物质包括国家粮食局科学研究院提供的小麦粉标准品 GBW08503c 和美国国家标准与技术研究院(NIST)提供的菠菜叶标准品 SRM1750a,土壤分析的标准物质包括中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所提供的土壤标准品 GBW07456 和 NIST 提供的 SRM 2586;分析结果表明,标准品中各元素含量的测定值均在其标准值范围内.

1.4 数据统计分析

为了排除大田中土壤元素含量空间分布不均匀带来的影响,计算各元素的富集系数,方法如下:

$$\text{富集系数(BF)} = \frac{\text{小麦各部位元素含量}}{\text{土壤元素含量}}$$

为了表征元素在小麦体内的转运过程,计算其转运系数,方法如下:

$$\text{转运系数(TF)} = \frac{\text{部位 1 元素含量}}{\text{部位 2 元素含量}}$$

试验数据利用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 16.05 软件进行统计分析.采用单因素方差分析和最小显著性差异(LSD)法分析不同品种相关指标的差异显著性,采用 Pearson 相关系数法研究不同指标间的相关性,采用主成分分析研究小麦镉富集转运和离子组特征.数据图采用 Origin 2019 绘制.

2 结果与分析

2.1 不同冬小麦品种镉富集特征差异

5 个冬小麦品种各器官的 Cd 含量如表 1 所示,其中,良星 99 和济麦 22 籽粒 Cd 含量低于食品安全标准限值($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[21],而鑫麦 296、尧麦 16 号和石家庄 8 号籽粒 Cd 含量则明显高于该限值. 5 个冬小麦品种各器官的 Cd 富集系数如图 1 所示. 对比不同器官发现,根部的 Cd 富集系数最高,均值为 0.970; 其次为节点、节间和叶片; 颖壳的 Cd 富集系数最低,均值为 0.072. 此外,各节点的 Cd 富集系数均明显高于相邻的节间,例如节点 1 和节间 1 的 Cd 富集系数均值分别为 0.223 和 0.187. 对比不同小麦品种各器官的 Cd 富集系数变化规律发现,在 2 个高积累品种中,节间 5~节间 1 和节点 4~节点 1 的 Cd 富集系数呈现明显的递增趋势,特别是尧麦 16 号; 而在 3 个低积累品种中,各节间和节点的 Cd

富集系数则相差较小. 除了鑫麦 296 以外,低积累小麦颖壳和籽粒的 Cd 富集系数相近,而高积累小麦的籽粒 Cd 富集系数明显高于颖壳.

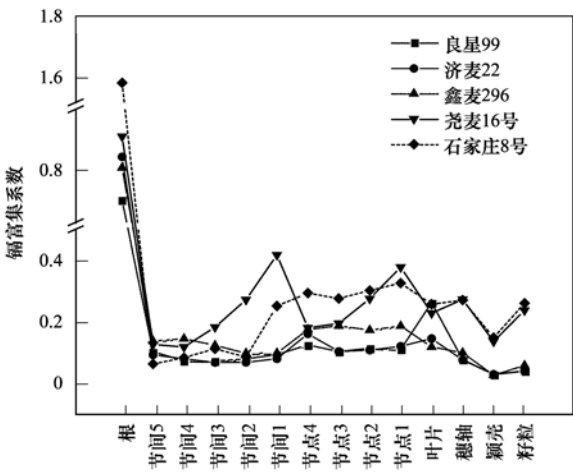


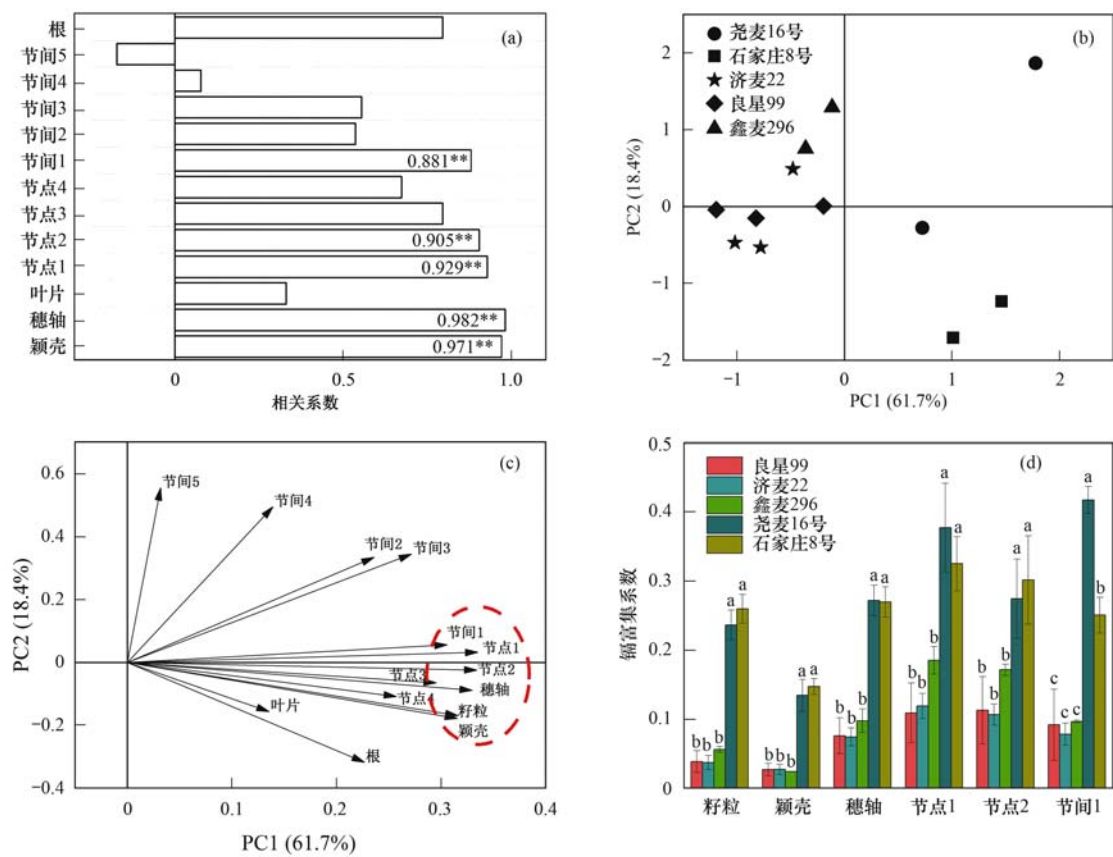
图1 小麦不同器官的 Cd 富集系数
Fig. 1 Bioaccumulation factors of Cd in different organs of wheat

表 1 小麦不同器官的 Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 1 Cd content in different organs of wheat/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	良星 99	济麦 22	鑫麦 296	尧麦 16 号	石家庄 8 号
籽粒	0.080 ± 0.010	0.091 ± 0.001	0.216 ± 0.012	0.766 ± 0.005	0.700 ± 0.030
颖壳	0.057 ± 0.002	0.066 ± 0.009	0.094 ± 0.012	0.440 ± 0.113	0.397 ± 0.046
穗轴	0.106 ± 0.015	0.185 ± 0.019	0.383 ± 0.116	0.887 ± 0.148	0.726 ± 0.032
节间 1	0.185 ± 0.048	0.194 ± 0.15	0.375 ± 0.057	1.771 ± 0.083	1.063 ± 0.110
节间 2	0.161 ± 0.019	0.167 ± 0.024	0.372 ± 0.020	1.15 ± 0.437	0.355 ± 0.036
节间 3	0.149 ± 0.024	0.164 ± 0.01	0.468 ± 0.008	0.769 ± 0.459	0.469 ± 0.087
节间 4	0.156 ± 0.030	0.191 ± 0.037	0.556 ± 0.041	0.494 ± 0.384	0.347 ± 0.106
节间 5	0.225 ± 0.061	0.214 ± 0.050	0.518 ± 0.086	0.528 ± 0.166	0.259 ± 0.010
节点 1	0.228 ± 0.018	0.299 ± 0.043	0.714 ± 0.016	1.237 ± 0.315	0.875 ± 0.073
节点 2	0.234 ± 0.027	0.268 ± 0.037	0.664 ± 0.055	0.901 ± 0.263	0.810 ± 0.142
节点 3	0.217 ± 0.020	0.258 ± 0.058	0.713 ± 0.041	0.635 ± 0.183	0.739 ± 0.133
节点 4	0.264 ± 0.011	0.388 ± 0.053	0.667 ± 0.039	0.592 ± 0.243	0.786 ± 0.148
叶片	0.525 ± 0.146	0.370 ± 0.139	0.452 ± 0.032	0.742 ± 0.136	0.690 ± 0.038
根系	1.517 ± 0.344	2.111 ± 0.255	3.129 ± 0.227	2.971 ± 0.464	4.288 ± 1.072

将小麦的籽粒 Cd 富集系数与其他器官的 Cd 富集系数进行相关性分析[图 2(a)],结果表明,颖壳、穗轴、节点 1、节点 2 和节间 1 等 5 个器官的 Cd 富集系数与籽粒的呈极显著正相关($P < 0.01$). 对 5 个小麦品种各器官的 Cd 富集系数进行主成分分析,所提取的前两个主成分(PC1 和 PC2)特征值分别为 8.63 和 2.57,均大于 1,对总方差的累积贡献率达 80.1%,这足以反映供试品种 Cd 富集特征的绝大部分信息. 各品种在 PC1 和 PC2 上得分结果[图 2(b)]表明,在 PC1 对应的坐标轴上,5 个品种的得分出现了明显分异,其中高积累品种石家庄 8 号和尧麦 16 号得分范围为 0.72~1.77,皆分布在正方向;而低积累品种良星 99、济麦 22 和鑫麦 296 得分范围为 $-0.11 \sim -1.19$,全部分布在负方向;

这表明 PC1 可以有效区分 Cd 高低积累小麦品种. 图 2(c)给出了不同器官即各因子在前两个主成分的载荷值,它代表了各因子在主成分中的权重,值越大,该因子对主成分的贡献越大;其中节点 2、节点 1、节间 1、穗轴、颖壳和籽粒在 PC1 上具有较大载荷,其载荷值范围为 0.31~0.34. 这表明,上述 6 个器官在区分不同 Cd 累积能力小麦品种上发挥重要作用. 由图 2(d)可知,对于节点 2、节点 1、节间 1、穗轴、颖壳和籽粒等 6 个器官的 Cd 富集系数, Cd 高积累品种均显著高于低积累品种($P < 0.05$). 综上所述,节点 2、节点 1、节间 1、穗轴和颖壳这 5 个器官的 Cd 富集与籽粒 Cd 累积显著相关,在 Cd 高低积累小麦品种的区分上贡献较大,且在高低积累品种间存在显著差异,因此这 5 个器官可能是造成



(a)中**表示与籽粒Cd富集系数极显著相关($P < 0.01$);(c)中红圈表示在主成分1中载荷较高的器官;
(d)中不同小写字母表示在同一器官上不同小麦品种的Cd富集系数有显著差异($P < 0.05$)

图2 小麦不同器官Cd富集系数的相关性分析、主成分分析和方差分析

Fig. 2 Correlation analysis, principal component analysis, and analysis of variance of Cd bioaccumulation factors in different organs of wheat

小麦籽粒Cd含量基因型差异的关键器官.

2.2 不同冬小麦品种镉转运特征差异

小麦相邻器官间的Cd转运系数如图3所示.在不同器官间的Cd转运系数中,从根到节间5的Cd转运系数最低,均值为0.13;除尧麦16号外,其余品种从节间2到节点1的Cd转运系数最高,均值为1.90;此外,除了尧麦16号,其余品种从节点4到节间1的7个Cd转运系数呈现W型变化规律,其中从节间向相邻节点的转运系数较高,而从节点向相邻节间的转运系数较低.

将小麦相邻器官间的Cd转运系数与籽粒Cd富集系数进行相关性分析[图4(a)],结果表明,穗轴到籽粒、穗轴到颖壳和节点1到节间1的Cd转运系数与籽粒Cd富集系数呈极显著正相关($P < 0.01$),而节间1到穗轴的转运系数与其呈极显著负相关.对5种小麦相邻器官的Cd转运系数进行主成分分析,所提取的PC1和PC2的特征值分别为4.94和4.29,均大于1,累积方差贡献率达77.0%.各小麦品种在PC1和PC2上得分结果表明[图4(b)],在PC2对应的坐标轴上,5个品种的得分出现了明显分异,2个高积累品种得分范围为0.96~1.70,

均分布在其正方向上;而3个低积累品种得分范围为-0.07~-1.30,均分布在其负方向上.不同Cd转运系数在PC1和PC2上的载荷值分析表明[图4(c)],穗轴到籽粒、穗轴到颖壳和节点1到节间1的转运系数在PC2正方向上具有较高载荷,载荷值范围为0.42~0.46;而节间1到穗轴的转运系数则

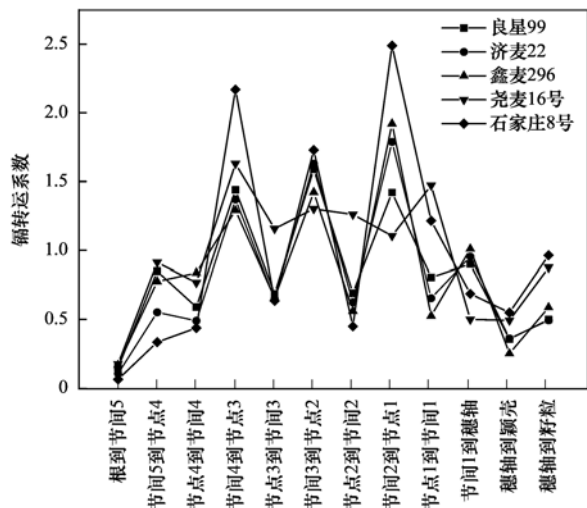
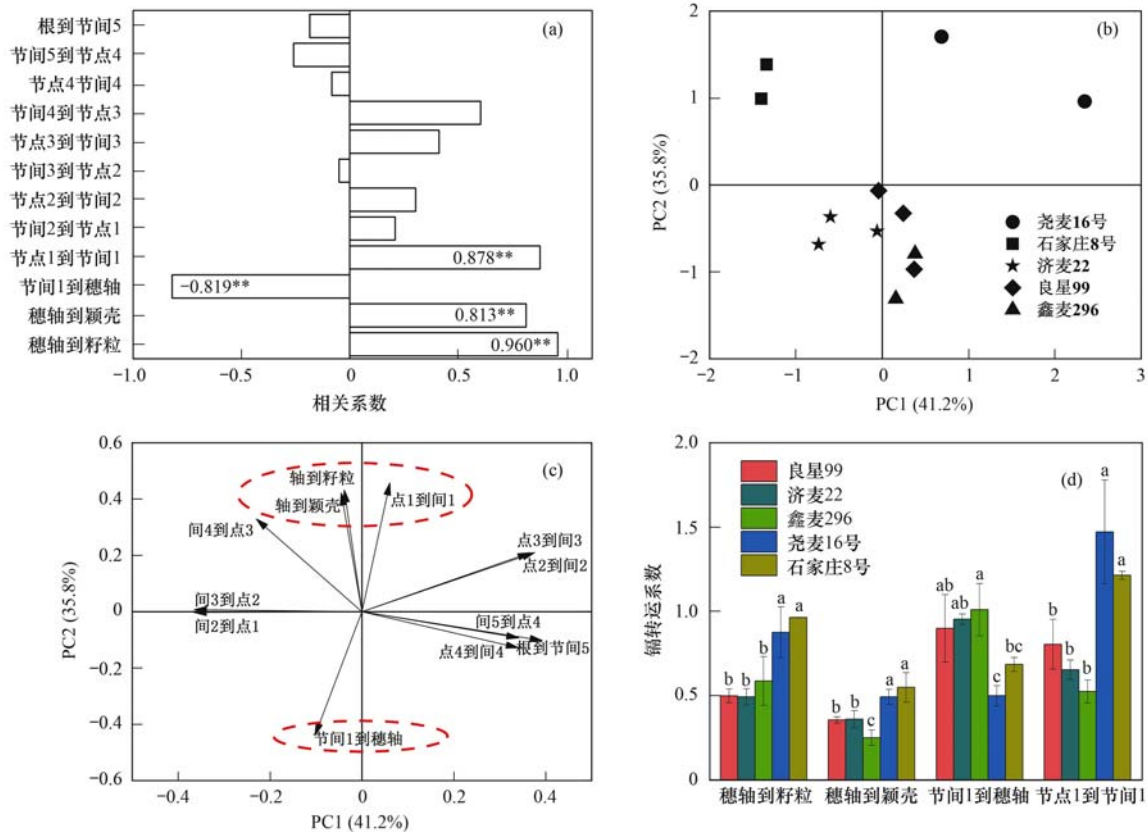


图3 小麦不同器官间的Cd转运系数

Fig. 3 Transport factors of Cd between different organs of wheat

在 PC2 的负方向上具有较高载荷 (-0.44); 这说明, 上述 4 个转运过程在区分 Cd 高低积累小麦品种上发挥重要作用. 由图 4(d) 可知, 高积累小麦品种的 3 个 Cd 转运系数, 即穗轴到籽粒、穗轴到颖壳和节点 1 到节间 1, 均显著高于低积累品种 ($P <$

0.05), 而节间 1 到穗轴的 Cd 转运系数则呈现相反规律. 总之, 上述 3 个分析结果表明, Cd 在穗轴到籽粒、穗轴到颖壳、节间 1 到穗轴和节点 1 到节间 1 的转运过程可能是造成小麦籽粒 Cd 积累品种差异的关键过程.



(a) 中 ** 表示与籽粒 Cd 富集系数极显著相关 ($P < 0.01$); (c) 中红圈表示在主成分 2 中载荷较高的转运过程;

(d) 中不同小写字母表示在不同小麦品种的 Cd 转运系数有显著差异 ($P < 0.05$)

图 4 小麦器官间 Cd 转运系数的相关性分析、主成分分析和方差分析

Fig. 4 Correlation analysis, principal component analysis, and variance analysis of Cd transport factors between different organs of wheat

2.3 不同冬小麦品种的离子组特征差异

在确定影响小麦籽粒 Cd 积累基因型差异的关键器官和转运过程的基础上, 本研究分析了小麦相应器官和根际土壤的 13 种元素含量, 计算了这些元素在籽粒、颖壳、穗轴、节点 1、节点 2 和节间 1 等 6 个器官的富集系数, 以及穗轴到籽粒、穗轴到颖壳、节间 1 到穗轴和节点 1 到节间 1 等 4 个过程的转运系数, 并以此为基础, 通过相关性分析和主成分分析研究各小麦品种的离子组特征. 由于节点 2 各元素富集系数的主成分分析不能有效区分 Cd 高低积累品种, 因此其相关性分析和主成分分析结果没有列出.

本研究以各元素在籽粒中的富集系数和穗轴到籽粒的转运系数为例, 介绍不同元素在小麦体内的富集转运特征. 如图 5 所示, 根据小麦籽粒对元素的富集能力可将 14 种元素分为 4 类: 高富集型、中等富集型、较低富集型和低富集型 [见图 5(a) ~ 5(d)]. 在高富集型中, Mg 和 K 属于植物必需的大量

营养元素, 土壤和籽粒中含量都很高; 而 Zn 和 Mo 属于植物必需微量元素, 在土壤和籽粒中含量均较低, 特别是 Mo. 在中等富集型中, 高积累品种的 Cu 富集系数均明显高于低积累品种, 而 Mn 的富集系数却相反. 在低富集型中, Fe 和 Al 在土壤中含量极高 (数量级为 10^5), 而在籽粒中含量比土壤中低 10^3 倍. 根据不同元素从穗轴向籽粒的转运系数可将 14 种元素分为 3 类: 转运能力强、转运能力中等和转运能力低 [见图 5(e) ~ 5(g)]. 其中, 高积累品种 Mg 和 K 的转运系数明显低于低积累品种, 而其 Cu、Pb、Mo 的转运系数则明显高于低积累品种.

将各元素的富集系数、转运系数与籽粒的 Cd 富集系数进行相关性分析, 结果如表 2 所示. 对于富集系数, 除颖壳外, 其余器官中 Mn 与籽粒的 Cd 富集系数均呈显著负相关 ($P < 0.05$); 而除籽粒外, 其余器官中 Mg 与籽粒的 Cd 富集系数均呈显著正相关. 对于转运系数, Mo 在 4 个关键转运过程的转

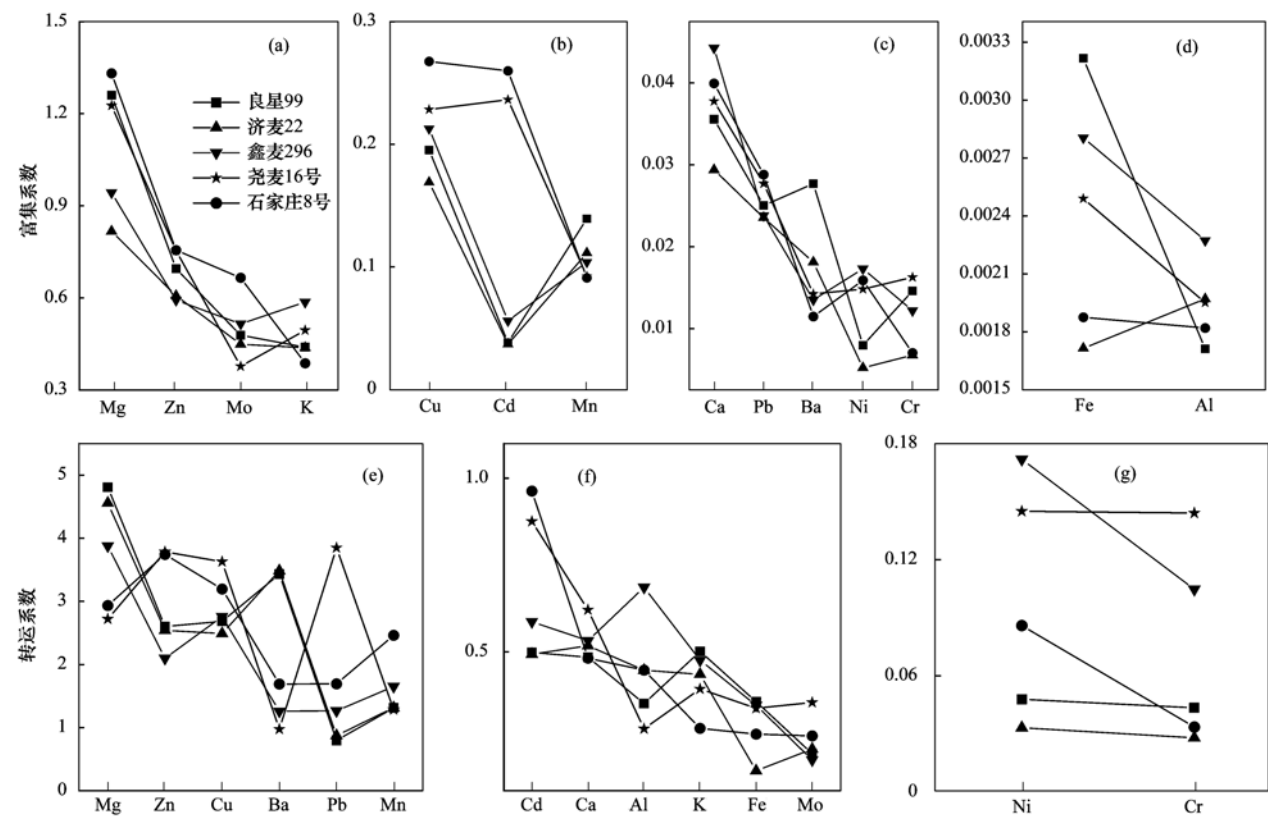


图5 不同元素在小麦籽粒的富集系数以及从穗轴到籽粒的转运系数

Fig. 5 Bioaccumulation factors of different elements in wheat grains and transport factors of different elements from spike to grain

运系数均与籽粒 Cd 富集系数显著相关,其中,节间 1 到穗轴为负相关,其余为正相关; K 在穗轴到籽粒的转运系数与籽粒 Cd 富集系数呈显著负相关,而在穗轴到颖壳和节间 1 到穗轴的转运系数则与其呈显著正相关; Pb 在穗轴到籽粒和穗轴到颖壳的转运系数与籽粒 Cd 富集系数呈显著正相关,而在节间 1 到穗轴的转运系数则与其呈显著负相关;另外,Cr 和 Cu 也各有 2 个转运系数与籽粒 Cd 富集系数显著相关. 总的来看,Mg 和 Mn 在关键部位的富集与籽粒 Cd 富集具有显著的相关性,而 Mo、K、Pb、Cr 和 Cu 则在关键转运过程中与 Cd 呈现显著的相关性.

将各元素的富集系数和转运系数分别进行主成分分析,结果表明,9 个主成分分析中某个主成分均能区分 Cd 高低积累小麦品种,各元素在这类主成分中的载荷值如表3所示,其中载荷较高的元素

表2 小麦体内不同元素的富集系数、转运系数与籽粒 Cd 富集系数的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between bioaccumulation factors and transport factors of different elements and Cd bioaccumulation factors of grain in wheat

	籽粒	颖壳	穗轴	节间 1	节点 1	穗轴到籽粒	穗轴到颖壳	节间 1 到穗轴	节点 1 到节间 1
Cd	1.000	0.971 **	0.982 **	0.948 **	0.929 **	0.960 ** ¹⁾	0.814 **	0.821 **	0.878 **
Al	-0.028	0.650 *	0.373	0.228	0.159	-0.232	0.171	0.061	0.107
Ba	-0.420	0.000	0.460	-0.683 *	0.038	-0.492	0.117	0.536	-0.801 **
Ca	0.342	0.604 *	0.146	0.375	-0.062	0.232	0.584 *	-0.066	0.423
Cr	-0.025	-0.027	-0.432	0.540	-0.284	0.277	0.486	-0.633 *	0.710 **
Cu	0.756 **	0.283	0.152	-0.420	-0.003	0.644 *	0.173	0.494	-0.594 *
Fe	-0.182	-0.151	-0.287	0.154	0.232	0.065	0.001	-0.303	0.005
K	-0.249	-0.464	0.548	0.223	-0.534	-0.667 *	0.726 **	0.590 *	0.545
Mg	0.462	0.806 **	0.887 **	0.684 *	0.871 **	-0.859 **	0.208	0.361	0.007
Mn	-0.721 **	-0.315	-0.670 *	-0.737 **	-0.781 **	0.561	0.432	0.684 *	0.440
Mo	0.248	0.266	-0.327	0.561	-0.198	0.611 *	0.607 *	-0.727 **	0.759 **
Ni	0.430	0.399	-0.116	0.462	0.491	0.340	0.396	-0.407	0.519
Pb	0.425	0.329	-0.675 *	0.337	0.250	0.741 *	0.604 *	-0.593 *	-0.254
Zn	0.503	-0.046	-0.575	-0.446	0.180	0.640 *	0.339	0.084	-0.450

1) n=12, * 表示 P<0.05, ** 表示 P<0.01

表 3 小麦体内不同元素的富集系数与转运系数在主成分分析中的载荷值

Table 3 Loading values of bioaccumulation factors and transport factors of different elements in wheat in different principal components

	籽粒 PC1(28.8%) ¹⁾	颖壳 PC1(39.8%)	穗轴 PC1(34.1%)	节间 1 PC1(38.3%)	节点 1 PC2(19.9%)	穗轴到籽粒 PC1(43.1%)	穗轴到颖壳 PC1(48.1%)	节间 1 到穗轴 PC1(34.1%)	节点 1 到节间 1 PC1(30.9%)
Cd	0.910²⁾	0.818	-0.81	0.378	-0.352	0.321	0.245	0.344	0.384
Al	-0.109	0.847	0.016	0.296	0.176	-0.080	0.085	0.039	0.152
Ba	-0.514	0.666	-0.090	-0.319	-0.150	-0.256	-0.116	-0.417	-0.278
Ca	0.155	0.497	-0.168	0.281	0.242	0.276	0.366	0.198	0.287
Cr	0.047	-0.114	0.538	0.334	0.272	0.307	0.362	0.345	0.398
Cu	0.748	0.042	-0.238	-0.072	0.261	0.369	0.279	0.034	-0.223
Fe	-0.101	-0.063	0.171	0.277	0.158	0.104	-0.031	0.135	0.092
K	-0.090	-0.712	-0.681	0.134	0.378	-0.101	-0.027	-0.219	0.286
Mg	0.111	0.671	-0.608	0.354	-0.412	-0.301	0.230	0.112	0.090
Mn	-0.89	-0.117	0.920	-0.226	0.303	0.106	0.295	-0.335	0.269
Mo	0.126	-0.153	0.033	0.150	0.356	0.328	0.356	0.385	0.358
Ni	0.551	0.071	0.078	0.234	-0.145	0.298	0.348	0.305	0.339
Pb	0.520	0.254	0.724	0.321	-0.060	0.347	0.265	0.338	-0.077
Zn	0.624	0.088	0.513	-0.144	0.204	0.278	0.342	0.023	-0.207

1) 括号内表示在主成分分析中能区分 Cd 高低积累小麦品种的主成分及其方差贡献率; 2) 黑字体表示该元素相应主成分上载荷值较高

在品种区分中起主要作用. 在元素富集系数的主成分分析中, K 在颖壳、穗轴和节点 1 的主成分上有较高载荷; Mg 在颖壳、穗轴、节间 1 和节点 1 的主成分上有较高的载荷; Mn 在籽粒、穗轴、节间 1 和节点 1 的主成分上有较高的载荷. 在元素转运系数的主成分分析中, Cr 和 Mo 在 4 个转运系数的主成分上有较高的载荷; 而 Ni 和 Pb 分别在 3 个和 2 个转运系数的主成分上具有较高的载荷. 综合相关性分析和主成分分析结果, 在影响小麦籽粒 Cd 含量的关键器官中, Mg 和 Mn 发挥较为重要的作用; 在影响小麦 Cd 累积的关键转运过程中, Mo、Cr 和 Pb 发挥较为重要的作用.

3 讨论

Cd 在小麦体内的迁移可以分为根部吸收、茎部转运和穗部分配这 3 个主要过程, 它们在影响籽粒 Cd 积累和其基因型差异方面发挥不同作用^[11]. 本研究发现, 小麦不同器官中根部的 Cd 富集系数最大(图 1), 而在相邻器官间的 Cd 转运系数中根部到节间 5 的值最小(图 3), 这表明小麦能将吸收的大部分 Cd 固定在根部, 以减少其对地上部的毒害, 这与张大众等^[22]的研究结果一致. 在本研究中, 根部的 Cd 富集系数虽然在高低积累品种间有明显差异(图 1), 但是其与籽粒的 Cd 富集系数并无显著的相关性, 在主成分分析中区分高低积累品种方面也没有发挥重要作用. 另外, 根部到节间 5 的 Cd 转运系数在品种间没有明显差异. 这些结果表明, 在本研究中, 根部的 Cd 吸收以及向茎部的转运过程并不是影响小麦籽粒 Cd 积累基因型差异的关键因素. Zhang 等^[10]的研究通过大田试验也发现高积累小麦

品种根部 Cd 含量显著高于低积累品种, 这一点与本研究结果一致; 而 Shi 等^[11]和 Hart 等^[23]的研究认为, 根部向地上部转运过程是影响小麦 Cd 累积基因型差异的关键因素, 本研究与这两个研究结果不同, 一方面可能与供试品种和培养环境不同有关, 另一方面上述研究计算转运系数是用整个地上部或茎部与根部的 Cd 含量比值, 而本研究是用紧邻根的节间与根部的 Cd 含量比值.

茎部是小麦地上部 Cd 转运的主要通道, 其中节间主要负责 Cd 的运输, 而节点主要负责 Cd 的截留和再分配^[10]. 本研究中, Cd 高低积累小麦在靠近根部的节间和节点 Cd 富集系数相近, 但由于高积累小麦节间和节点的 Cd 富集系数从下到上存在明显的递增趋势, 导致两类小麦的 Cd 富集系数在节间 1 和节点 1 处出现显著差异[图 2(d)]. Shi 等^[11]在 Cd 高低积累小麦品种的不同节(包含节点和节间)上和 Zhang 等^[10]在 Cd 高积累小麦的不同节点上也发现了相似的 Cd 含量递增现象, 出现这一现象可能是由于在生长后期 Cd 易于从小麦茎基部的节转运出去, 从而导致该部位 Cd 含量降低^[11]; 另外, 高积累小麦在上部节点和节间积累更多的 Cd 表明其茎部向上转运 Cd 的能力明显强于低积累品种. 本研究还发现, 供试小麦从节间 4 到节点 1 的 7 个 Cd 转运系数呈现 W 形变化特征, 这是因为相邻的节点比节间的 Cd 含量高所致(图 1 和图 3), 这与 Zhang 等^[10]的研究结果一致. 综合茎部不同器官的 Cd 富集和转运特征可知, Cd 在节点 1 和节间 1 的富集和转运是影响籽粒 Cd 积累基因型差异的关键因素. 其中, 节点 1 的 Cd 富集系数均值在地上部最高, 而且低积累品种节点 1 到节间 1 的转运系数显

著低于高积累品种,这表明低积累品种的节点 1 对 Cd 具有较强的拦截和固定能力,能有效阻止 Cd 由茎部向穗部迁移;Feng 等^[24]的研究也发现水稻节点 1 的 Cd 含量在地上部最高,这可能与该部位镉解毒相关基因表达量较高有关.低积累品种节间 1 的 Cd 富集系数也显著低于高积累品种,但是其节间 1 到穗轴的 Cd 转运系数却显著高于高积累品种,而且该参数与籽粒 Cd 累积负相关;Shi 等^[11]的研究也发现,在灌浆期低积累小麦穗轴与节间 1 的 Cd 含量比值显著高于高积累品种;出现这一现象的原因有待进一步研究.

在小麦的穗部,穗轴向下连接茎部,上部附着籽粒和颖壳,是 Cd 由茎部向穗部转运的主要通道^[25].本研究在穗部,穗轴的 Cd 富集系数均值最高,而且 Cd 在穗轴的富集以及向籽粒和颖壳的转运与籽粒 Cd 累积均呈极显著正相关(表 2),这表明 Cd 在穗轴的富集和转运是影响籽粒镉含量高低的关键因素.本研究发现,低积累品种在穗部 3 个器官的 Cd 富集系数均显著低于高积累品种,且相关转运系数也显著低于高积累品种(图 2 和 4),这表明 Cd 在穗部累积少且向籽粒转运少是低积累品种籽粒 Cd 含量低的重要原因;Shi 等^[11]的研究也发现,在成熟期低积累小麦节间 1、旗叶和穗轴向籽粒转运较少的 Cd,这是其 Cd 含量低的关键原因.综上所述,节点 1、节间 1、穗轴和颖壳等 4 个器官和相应的 4 个转运过程在决定小麦籽粒 Cd 积累基因型差异中发挥重要作用,这为下一步开展分子生物学机制研究提供了目标,而且由于这些部位都分布靠上,这也为喷施叶面调理剂,阻控这些部位向籽粒转运 Cd 提供了重要依据.

对于在 Cd 污染土壤中生长的小麦,其离子组特征可以反映 Cd 与其他元素在富集转运过程中的交互作用. Mg 是植物必需的常量元素,它在多种酶激活方面发挥重要作用^[26]. 本研究发现,4 个器官的 Mg 与籽粒 Cd 的富集系数呈显著正相关(表 2). Feng 等^[24]的研究也发现,在水稻所有节点中 Cd 与 Mg 的含量都显著正相关. 这种正相关性可能是由于这些器官,特别是节点 1 和节间 1 中富集了大量的 Cd,为了缓解 Cd 毒害,需要合成植物螯合肽(PCs)结合 Cd 并将其转运到液泡中阻隔,而 Mg-ATP 既是谷胱甘肽(PCs 的合成前体)合成酶的激活物,同时也为转运过程提供能量^[27,28],因此这些器官同时积累大量的 Mg; Singh 等^[29]的研究表明,充足的 Mg 供应可以有效缓解 Cd 毒害对小麦的氧化胁迫并促进生长. Mn 是植物必需的微量元素,在小麦体内 Mn 和 Cd 的吸收转运会共用载体蛋白 TaNramp5,因此

二者的富集转运常表现为拮抗作用^[30]. 本研究也发现, Mn 在小麦 4 个器官中与籽粒 Cd 富集呈显著负相关(表 2),这一结果为施用 Mn 肥降低小麦 Cd 累积提供了重要依据. Wang 等^[31]的研究表明,土施 $MnSO_4$ 通过显著降低 Cd 在小麦节间 1、节点 1 和穗轴的富集,显著减少籽粒 Cd 含量,这与本研究的结果一致. Mo 也是植物必需的微量元素,本研究发现 Mo 在关键转运过程的转运系数与籽粒 Cd 富集系数呈显著正相关(表 2);肖艳辉等^[32]和张振明等^[33]的研究也发现,在培养液中添加 Mo 可以显著提高茴香和油菜体内的 Cd 含量. 另外,本研究还发现, Cr 和 Pb 在关键过程的转运系数与籽粒 Cd 富集有显著的正相关性(表 2),这一结果表明在复合污染条件下,小麦富集 Cd 的同时也可能富集 Cr 和 Pb,需要特别注意. 综上所述,通过分析小麦体内离子组特征,本研究找到了影响小麦籽粒 Cd 积累基因型差异的关键元素;在这些元素中, Mn 能抑制小麦籽粒对 Cd 的富集,实际应用中可以通过施用 Mn 肥来降低籽粒 Cd 含量,而 Mg 和 Mo 可能促进小麦籽粒对 Cd 的富集,在补充这些养分时需要注意 Cd 累积情况.

4 结论

(1)冬小麦颖壳、穗轴、节间 1 和节点 1 等 4 个器官的 Cd 富集系数,以及穗轴到籽粒、穗轴到颖壳、节间 1 到穗轴和节点 1 到节间 1 等 4 个转运过程的 Cd 转运系数,均与籽粒 Cd 富集系数显著相关,在主成分分析中 Cd 高低积累小麦品种的区分上贡献较大,且在高低积累品种间存在显著差异,因此这 4 个器官是影响小麦籽粒 Cd 积累基因型差异的关键器官,而这 4 个过程是控制冬小麦籽粒 Cd 累积品种差异的关键过程.

(2)在影响冬小麦籽粒 Cd 累积品种差异的关键器官中 Mg 和 Mn 的富集系数,以及关键转运过程中 Mo、Cr 和 Pb 的转运系数,均与籽粒 Cd 富集系数显著相关,且在主成分分析中高低积累小麦品种区分方面贡献较大,因此在上述关键器官和转运过程中, Mg、Mn、Mo、Cr 和 Pb 是影响小麦籽粒 Cd 累积品种差异的关键元素.

参考文献:

- [1] Jin H, Zhang Y, Li G Y, *et al.* Effects of allelic variation of HMW-GS and LMW-GS on mixograph properties and Chinese noodle and steamed bread qualities in a set of Aroona near-isogenic wheat lines[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, **57** (1): 146-152.
- [2] 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.

- [3] Zaid I U, Zheng X, Li X F. Breeding low-cadmium wheat: progress and perspectives[J]. *Agronomy*, 2018, **8**(11), doi: 10.3390/agronomy8110249.
- [4] 王婷, 倪鼎文. 白银区农田土壤 Cd 污染研究概述[J]. *甘肃农业科技*, 2015, (9): 80-84.
- [5] 吴端阳. 石家庄污灌区小麦玉米重金属污染现状及其健康风险评价[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2015.
Wu D Y. The pollution status and health risk assessment of heavy metals from the sewage-irrigated wheat and corn in Shijiazhuang [D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2015.
- [6] 孙亚芳, 王祖伟, 孟伟庆, 等. 天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(4): 679-685.
Sun Y F, Wang Z W, Meng W Q, *et al.* Contents and health risk assessment of heavy metals in wheat and rice grown in Tianjin sewage irrigation Area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(4): 679-685.
- [7] Zafar A, Khan Z I, Liu W Y, *et al.* Bioaccumulation of cadmium in different genotypes of wheat crops irrigated with different sources of water in agricultural regions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(2): 2468-2478.
- [8] 肖亚涛. 冬小麦苗期对镉胁迫的响应及阻控机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
Xiao Y T. The response and control mechanism of cadmium stress during seedlings stage of winter wheat [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [9] Harris N S, Taylor G J. Cadmium uptake and partitioning in durum wheat during grain filling[J]. *BMC Plant Biology*, 2013, **13**(1), doi: 10.1186/1471-2229-13-103.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Salt D E, Baxter I, Lahner B. Ionomics and the study of the plant ionome[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, **59**: 709-733.
- [13] 沙之敏, 赵峥, 卢琳芳, 等. 植物离子组学研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(5): 1370-1377.
Sha Z M, Zhao Z, Lu L F, *et al.* Research progress on ionomics of plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, **23**(5): 1370-1377.
- [14] Suarez-Tapia A, Kucheryavskiy S V, Christensen B T, *et al.* Limitation of multi-elemental fingerprinting of wheat grains: effect of cultivar, sowing date, and nutrient management[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, **76**: 76-84.
- [15] Bermudez G M A, Jasan R, Plá R, *et al.* Heavy metals and trace elements in atmospheric fall-out: their relationship with topsoil and wheat element composition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **213-214**: 447-456.
- [16] Broberg M C, Högy P, Pleijel H. CO₂-induced changes in wheat grain composition: meta-analysis and response functions [J]. *Agronomy*, 2017, **7**(2), doi: 10.3390/agronomy7020032.
- [17] Smith E G, Janzen H H, Ellert B H. Effect of fertilizer and cropping system on grain nutrient concentrations in spring wheat [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2018, **98**(1): 125-131.
- [18] Yue J Y, Zhang X, Liu N. RETRACTED ARTICLE: cadmium permeates through calcium channels and activates transcriptomic complexity in wheat roots in response to cadmium stress [J]. *Genes & Genomics*, 2017, **39**(2): 183-196.
- [19] 董明芳, 郭军康, 冯人伟, 等. Fe²⁺ 和 Mn²⁺ 对水稻根表铁膜及镉吸收转运的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(3): 249-253.
Dong M F, Guo J K, Feng R W, *et al.* Effects of Fe²⁺ and Mn²⁺ on rice root iron plaque formation and Cd uptake and transportation [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, **39**(3): 249-253.
- [20] 闫秀秀, 徐应明, 王林, 等. 叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5151-5159.
Yan X X, Xu Y M, Wang L, *et al.* Effects of intercropping of *Brassica chinensis* L. and *Tagetes patula* L. on the growth and cadmium accumulation of plants [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5151-5159.
- [21] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [22] 张大众, 杨海川, 菅明阳, 等. Cd 胁迫下小麦的形态生理响应及 Cd 积累分布特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(9): 2031-2040.
Zhang D Z, Yang H C, Jian M Y, *et al.* Physiological response and Cd accumulation and distribution characteristics of wheat under Cd stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(9): 2031-2040.
- [23] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, *et al.* Characterization of cadmium uptake, translocation and storage in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration [J]. *New Phytologist*, 2006, **172**(2): 261-271.
- [24] Feng X M, Han L, Chao D Y, *et al.* Ionomic 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.
- [25] 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.
- [26] Shaul O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg [J]. *Biomaterials*, 2002, **15**(3): 307-321.
- [27] Salt D E, Rauser W E. MgATP-dependent transport of phytochelatin across the tonoplast of oat roots [J]. *Plant Physiology*, 1995, **107**(4): 1293-1301.
- [28] 陆景陵. 植物营养学-上册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [29] Singh V, Tripathi B N, Sharma V. Interaction of Mg with heavy metals (Cu, Cd) in *T. aestivum* with special reference to oxidative and proline metabolism [J]. *Journal of Plant Research*, 2016, **129**(3): 487-497.
- [30] 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): 377-389.
- [31] Wang Y L, Xu Y M, Liang X F, *et al.* Soil application of manganese sulfate could reduce wheat Cd accumulation in Cd contaminated soil by the modulation of the key tissues and ionomic of wheat [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **770**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145328.
- [32] 肖艳辉, 何金明, 潘春香, 等. 茴香对镉胁迫下钼硼锌协同处理的响应及精油组分的影响 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(9): 1570-1575.
Xiao Y H, He J M, Pan C X, *et al.* Effects of molybdenum,

boron and zinc coordination treatment on response and essential oil components of fennel plant under cadmium stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(9): 1570-1575.

- [33] 张振明, 肖艳辉, 何金明, 等. 钼对低镉水平下小白菜的生长及镉含量的影响 [J]. 韶关学院学报(自然科学), 2015,

36(4): 36-40.

Zhang Z M, Xiao Y H, He J M, *et al.* Effect of molybdenum on growth and cadmium content in Chinese white cabbage under low cadmium concentration medium [J]. *Journal of Shaoguan University (Natural Science)*, 2015, **36**(4): 36-40.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2+26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qi, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(Ⅱ) and As(Ⅲ)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)