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

双奖期刊

2022年3月
第43卷 第3期
Vol.43 No.3

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第3期
2022年3月15日

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, 郝囝, 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, 高璟赟, 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, 叶秣麟, 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_1 中重金属浓度、来源及健康风险评估 …… 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝囡, 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, 刀谞, 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, 黄志炯, 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疫情期间雄安地区 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 …… 李源漣, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李莺(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, 黄燚, 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, 张钘, 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, 张浏, 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, 赵华珅, 高占啟, 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 …… 胡愈炘, 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, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)
天津市滨海河流 N_2O 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, 华佩, 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, 孙晨翔, 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 …… 刘书淮, 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-农作物系统锑迁移转换特征及污染评价 …… 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矿区土壤中重金属的阻控效应 …… 杨士, 刘祖文, 龙焙, 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-微生物负载生物质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, 任彧仲, 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/铈锰改性生物炭对 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草地土壤呼吸的影响 …… 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_2O 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氨挥发的影响 …… 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 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)
《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第3期 2022年3月
Vol.43, No.3 Mar., 2022

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性

任超[1,2], 任彧仲[1,2], 王浩[1], 朱利文[1], 李竞天[1], 杜倩倩[1], 李萍[1]
(1. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 洛阳 471000; 2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室, 洛阳 471000)

摘要: 通过盆栽试验筛选籽粒 Cd 低积累型小麦品种,为重金属污染耕地安全利用提供技术支撑. 试验研究了 119 个小麦品种植株各部位分别在 1.5 mg·kg^{-1}(低含量)和 4.0 mg·kg^{-1}(高含量)Cd 污染土壤条件下对 Cd 的富集和转运特性,并探讨了小麦不同器官 Cd 含量的相关性和土壤 Cd 含量与小麦吸收 Cd 的关系. 结果表明:①供试小麦品种根、茎、叶和籽粒积累和转运 Cd 的能力存在显著差异(P<0.05). 在 Cd 低含量条件下小麦植株各部位富集 Cd 能力为:叶>茎≈根>籽粒,在高含量胁迫条件下小麦植株各部位富集 Cd 能力为:叶>根>茎>籽粒,不同含量条件下小麦植株各部位转运 Cd 能力均为:叶>茎>籽粒. 小麦地上部 Cd 含量与土壤 Cd 全量和离子交换态 Cd 含量均呈极显著正相关关系(P<0.01),且与盆栽试验条件下较强的蒸腾作用密切相关. ②小麦根、茎、叶和籽粒 BCF_{Cd} 与对应土壤 Cd 含量相关系数 r 为 −0.267 ~ −0.645,呈极显著负相关关系(P<0.01),表明随着土壤 Cd 含量的增高,小麦植株各器官对 Cd 的迁移积累程度呈下降趋势,且茎部 BCF_{Cd} 与土壤 Cd 含量的负相关性明显高于根、叶和籽粒,说明小麦植株对 Cd 的富集很大程度上取决于茎部的积累和运输. ③低含量组和高含量组小麦根与茎、根与叶、根与籽粒、茎与叶、茎与籽粒和叶与籽粒 Cd 含量相关系数 r 为 0.450 ~ 0.763,呈极显著正相关关系(P<0.01),表明小麦各器官之间存在密切的转运关系,且根向茎和茎向叶转运的程度高于茎向籽粒和叶向籽粒的转运程度. ④采用聚类分析与富集和转运系数排序对照优选法,在土壤 ω(Cd)1.5 mg·kg^{-1}和 4.0 mg·kg^{-1}条件下,分别筛选出 16 个和 11 个 Cd 低积累小麦品种,其中洛旱 7 号可作为低中高含量下 Cd 低积累优选小麦品种.

关键词:土壤镉污染; 小麦; 镉胁迫; 低积累; 富集; 转运
中图分类号: X171.5; X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)03-1606-14 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202105010

Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress

REN Chao[1,2], REN Yu-zhong[1,2], WANG Hao[1], ZHU Li-wen[1], LI Jing-tian[1], DU Qian-qian[1], LI Ping[1]
(1. No.1 Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Henan Bureau of Geoexploration and Mineral Development, Luoyang 471000, China; 2. Key Laboratory of Au-Ag-Polymetallic Deposit Series and Deep-seated Metallogenic Prognosis of Henan Province, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to provide technical support for the safe utilization of heavy metal-polluted farmland, we screened wheat varieties with a low accumulation of Cd in grain via a pot experiment. For this purpose, we respectively investigated the enrichment and transport characteristics of Cd in various plant parts of 119 wheat varieties under the conditions of 1.5 mg·kg^{-1} (low content) and 4.0 mg·kg^{-1} (high content) Cd-contaminated soil and explored the correlation between the Cd content of different organs of wheat and the relationship between Cd content in soil and the uptake of Cd by wheat. The results showed that: ① there were significant differences in the ability to accumulate and transport Cd in roots, stems, leaves, and grains of tested wheat varieties (P<0.05). Under the condition of low Cd content, the Cd enrichment ability of each part of the wheat plant was as follows: leaf>stem ≈root>grain; under high-content stress conditions, the Cd enrichment ability of each part of the wheat plant was: leaf>root>stem>grain; under different content conditions, the Cd transport ability of each part of the wheat plant was: leaf>stem>grain. Cd content in the wheat shoot was positively correlated with total Cd content and ion-exchangeable Cd content in soil (P<0.01) and was closely related to strong transpiration under the pot experiment. ② The correlation coefficient r of BCF_{Cd} of wheat roots, stems, leaves, and grain was −0.267 to −0.645, showing a very significant negative correlation (P<0.01), indicating that with the increase in soil Cd content, the migration and accumulation degree of Cd in wheat plant organs showed a downward trend. Moreover, the negative correlation between BCF_{Cd} and soil Cd content in stems was significantly higher than that in roots, leaves, and grains, indicating that the enrichment of Cd in wheat plants largely depended on the accumulation and transportation of stems. ③ The correlation coefficient r of Cd content between the root and stem, root and leaf, root and grain, stem and leaf, stem and grain, and leaf and grain in low-and high-content groups was 0.450-0.763, showing a very significant positive correlation (P<0.01), indicating that there was a close transport relationship among the wheat organs, and the degree of translocation from the root to stem and stem to leaf was higher than that from the stem to grain and leaf to grain. ④ Using cluster analysis and enrichment and translocation coefficient sequencing, this study screened 16 and 11 wheat varieties with low Cd accumulation under the soil cadmium content of 1.5 mg·kg^{-1} and 4.0 mg·kg^{-1}, respectively. Among them, Luohan 7 could be used as the optimal wheat variety with low Cd accumulation under the conditions of low-, medium-, and high-Cd content.

Key words: soil cadmium pollution; wheat; cadmium stresses; low accumulation; enrichment; transshipment

镉(Cd)是环境中毒性最高的元素之一,被列为人类第一类致癌物[1],Cd 具有较高的土壤-植物移动性,容易在植物组织中积累[2],并通过食物链对人类健康构成严重威胁,已成为环境和健康领域关注的焦点[3,4]. 当前我国部分区域农田土壤 Cd 污染形势严峻[5],谷类作物对土壤中 Cd 富集能力较

收稿日期: 2021-05-03; **修订日期**: 2021-08-22
基金项目: 中央土壤污染防治专项(2110402-农村环境保护)
作者简介: 任超(1987 ~),男,工程师,主要研究方向为土壤污染修复,E-mail:renchaodkyy@163.com

强[6]，由此引发的农产品安全问题频发，而低积累作物是目前农田土壤安全利用的重要研究方向，可实现边生产边修复的 PCA 技术模式，综合效益高. 小麦作为我国第二大粮食作物，品种多、生态型和基因型差异都很大[7]. 有研究表明，小麦 Cd 耐性以及 Cd 在小麦不同器官的积累与分布存在显著的品种差异[8,9].

河南是中国重要的小麦生产区，小麦产量占全国总产量的三分之一，其小麦类型在全国极具代表性[10]. 近年来，在河南新乡和济源等地相继出现“镉麦”事件[11,12]，农产品重金属污染潜在生态风险增高，已对小麦生产安全造成影响. 据计量统计[13]，国内外针对稻田重金属污染修复研究较多，而有关小麦农田修复治理的研究偏少，2010 年以后关于麦田重金属污染农田修复的关注度升高，正逐渐成为学者的热点研究对象. 我国北方主要种植模式为小麦-玉米轮作，相关研究发现小麦的重金属富集系数普遍大于玉米的富集系数[14]，表明小麦对重金属比玉米更敏感，富集能力更强，其超标风险也更大. 在实现北方重金属污染农田安全利用的技术措施中，低积累小麦品种替代种植不仅降 Cd 效果较好且易于实现和推广，是处理轻中度 Cd 污染农田的最有效方法. 但谷物中 Cd 的吸收、转运和积累是一个复杂的过程，受许多基因控制和环境因素的影响，迄今为止，在世界范围内只有少数的低镉硬粒小麦品种被鉴定[15]，而植物 Cd 吸收、转运和积累相关机制的基础研究仍然是碎片化的[16]. 目前关于不同镉含量胁迫条件下小麦植株根、茎、叶和籽粒 Cd 积累特性的研究报道较少，本文以近几年河南地区大面积推广种植的 119 个小麦品种为研究对象，通过盆栽试验，重点研究了在 1.5 $mg\cdot kg^{-1}$（低含量）和 4.0 $mg\cdot kg^{-1}$（高含量）两个 Cd 污染水平下，不同小麦品种对 Cd 的富集和转运特性，进而筛选出 Cd 低积累小麦品种，以期为我国小麦主产区 Cd 污染耕地的安全利用提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　供试材料

1.1.1　供试土壤

供试土壤（低含量）采自河南省栾川县石宝沟 SBG-17 号污染农田 0～20 cm 耕层土壤，土壤除杂和风干后，过 10 目筛备用，土壤类型为褐土，质地为粉砂质壤土. 土壤的基本理化性质：pH 值为 7.96，阳离子交换量为 10.98 $cmol\cdot kg^{-1}$，ω（有机质）为 19.76 $g\cdot kg^{-1}$，ω（全氮）为 0.80 $g\cdot kg^{-1}$，ω（全磷）为 7.91 $g\cdot kg^{-1}$，ω（全钾）为 12.94 $g\cdot kg^{-1}$，ω（碱解氮）为 61.28 $mg\cdot kg^{-1}$，ω（有效磷）为 24.29 $mg\cdot kg^{-1}$，ω（速效钾）为 115.09 $mg\cdot kg^{-1}$. 高含量污染土壤是在低含量污染供试土壤基础上定量添加 $CdCl_2\cdot 2.5H_2O$ 水溶液混匀制备，在室温条件下放置 7 d 后备用. 低含量与高含量土壤 pH、全 Cd 和各形态 Cd 含量见表 1.

表 1　供试土壤 pH、Cd 全量和各形态 Cd 含量

Table 1　The pH, the total amount of Cd, and the contents of various forms of Cd in the soils

土壤类型	pH	ω/$mg\cdot kg^{-1}$							
		Cd 全量	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	腐殖酸结合态	强有机结合态	硅酸盐残渣态
低含量	7.96	1.537	0.008	0.272	0.206	0.135	0.286	0.284	0.271
高含量	7.98	3.973	0.008	1.356	1.099	0.459	0.445	0.105	0.287

1.1.2　供试小麦品种

根据 2019 年河南省小麦品种布局利用意见（河南省种子站豫种〔2019〕52 号文），本试验选取河南省北部麦区、中南部麦区、东部麦区、南部麦区和旱作麦区主要推广种植的 119 个小麦品种作为供试小麦，编号为 1～119（见表 2），种子购自河南丰正农业科技有限公司.

1.2　试验设计

采用盆栽试验，分别在低含量和高含量 Cd 污染土壤上种植供试小麦，每个供试小麦品种设低含量组与高含量组，高含量组设 3 次重复，共 476 盆，每盆装土 9 kg，施用 500 $mg\cdot kg^{-1}$ 复合肥（N、P 和 K 各 15%）作为土壤基肥添加，播种 2 行，行距 10 cm，每行 5 穴，每穴播种 3 粒，出苗后间苗. 并于拔节期和孕穗期向土壤中追施 200 $mg\cdot kg^{-1}$ 尿素，生长期土壤含水量保持田间持水量的 60%～70%.

1.3　样品采集与测定

待小麦成熟后协同采集成熟期小麦和土壤样品. 土壤样品经自然风干、过 2 mm 尼龙筛粗磨、过 1 mm 和 0.15 mm 尼龙筛细磨后备用；小麦植株样品分根、茎、叶和籽粒这 4 部分取样，经去离子水清洗、自然晾干和籽粒去皮后磨碎（过 0.25～0.40 mm 尼龙筛）混匀后备用. 土壤样品进行理化性质、全 Cd 含量和镉不同形态含量测定，小麦植株样品进行全 Cd 含量测定. 土壤 pH 采用玻璃电极法，机械组成采用密度计法，有机质采用重铬酸钾容量法，阳离子交换量采用氯化铵-乙酸铵交换法，全氮采用凯氏定氮法，全磷和全钾采用四酸消解-电感耦合等

表 2 供试小麦品种

Table 2 Cultivars of wheat

编号	品种	编号	品种	编号	品种	编号	品种	编号	品种	编号	品种
1	新麦 36	21	西农 20	41	阜麦 0908	61	驻麦 762	81	龙科 1221	101	濉 1216
2	百农 207	22	洛麦 29	42	济麦 21	62	许科 108	82	烟农 19	102	机麦 1
3	丰德存麦 21	23	郑麦 113	43	徐麦 14017	63	郑麦 135	83	万丰 269	103	郑麦 369
4	丰德存麦 20	24	西农 928	44	山农 116	64	囤麦 257	84	良星 66	104	存麦 8
5	新麦 26	25	百农 AK58	45	黎丰 6	65	众麦 7	85	洛旱 2	105	丰德存麦 5
6	许科 168	26	百农 201	46	轮选 2000	66	良星 77	86	洛旱 20	106	安农 859
7	郑麦 366	27	周麦 28	47	西农 235	67	航裕 33	87	洛旱 10	107	益科麦 17118
8	中麦 578	28	洛麦 26	48	益科麦 18036	68	宝亮 5	88	洛旱 22	108	华皖麦 18
9	扬麦 20	29	藁优 5218	49	紫麦 19	69	科麦 2	89	洛旱 9	109	淮麦 20
10	泛育麦 17	30	郑麦 158	50	瑞泉麦 32	70	豫农 804	90	洛旱 8	110	国禾麦 19
11	郑麦 583	31	中麦 895	51	顺麦 13	71	郑麦 162	91	洛旱 17	111	中麦 66
12	西农 979	32	周麦 36	52	稷麦 68	72	德研 0518	92	洛旱 6	112	华成 3077
13	焦麦 266	33	周麦 32	53	顶梁柱 31	73	涡麦 77	93	洛旱 19	113	珍麦 3
14	偃展 4110	34	百农 4199	54	益科麦 5	74	益科麦 1506	94	洛旱 1	114	富豫 186
15	丰德存麦 1	35	漯麦 18	55	科大 1026	75	齐育麦 36	95	洛旱 7	115	小偃 54
16	郑麦 9023	36	周麦 22	56	柳麦 521	76	徐麦 15019	96	洛麦 27	116	创麦 58
17	周麦 30	37	怀川 916	57	濮麦 8062	77	隆平麦 3	97	洛麦 34	117	高优 503
18	郑麦 379	38	西农 511	58	范麦 27	78	轮选 125	98	洛麦 28	118	藁优 5766
19	泛麦 8	39	中麦 175	59	华成 5157	79	范麦 26	99	洛麦 23	119	豫研麦 11
20	洛旱 11	40	安科 157	60	新农 9799	80	涡麦 606	100	郑麦 0943		

离子体发射光谱法(ICP-OES),碱解氮采用碱解-扩散法,有效磷采用碳酸氢钠浸提-电感耦合等离子体发射光谱法,速效钾采用乙酸铵浸提-电感耦合等离子体发射光谱法. 重金属 Cd 全量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),Cd 各形态含量采用 Tessier 修正顺序七步提取-电感耦合等离子体发射光谱法.

1.4 数据统计分析

对样品测试数据进行分类整理,采用 Excel 2019、Origin 2018 和 SPSS 26 等软件进行数据整理、统计分析和绘图分析.

富集系数(BCF_{Cd}) = 小麦各部位 Cd 含量/土壤中 Cd 含量

转运系数(TF_{Cd}) = 小麦地上各部位 Cd 含量/小麦根部 Cd 含量

2 结果与分析

2.1 不同小麦品种植株各部位 Cd 含量分布规律

低含量组不同小麦品种根、茎、叶和籽粒的 ω(Cd)范围分别为 1.31 ~ 5.27、1.25 ~ 5.49、1.55 ~ 7.85 和 0.34 ~ 2.93 $mg\cdot kg^{-1}$. 高含量组不同小麦品种根、茎、叶和籽粒 ω(Cd)范围分别为 4.52 ~ 18.91、3.68 ~ 14.35、5.00 ~ 24.80 和 1.43 ~ 7.26 $mg\cdot kg^{-1}$. 由图 1 ~ 4 可知,119 个小麦品种不同部位 Cd 含量总体呈现叶 > 根 > 茎 > 籽粒的规律,所有品种籽粒 Cd 含量均超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)谷物 Cd 限值 0.1 $mg\cdot kg^{-1}$. 低含量组与高含量组植株地上部 ω(Cd)

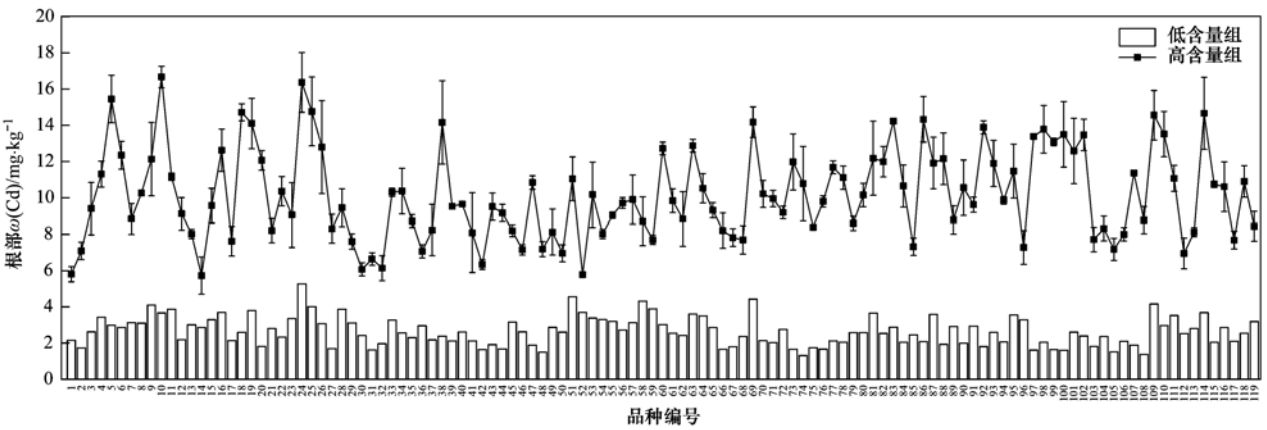


图 1 不同小麦品种根 Cd 含量

Fig. 1 Cd content in roots of different wheat varieties

分别为 3.14 ~ 14.19 mg·kg^{-1} 和 13.42 ~ 41.02 mg·kg^{-1}，表明在 ω(Cd)为 4.0 mg·kg^{-1}水平下所有小麦品种植株地上部对 Cd 的积累量均明显高于低含量组.

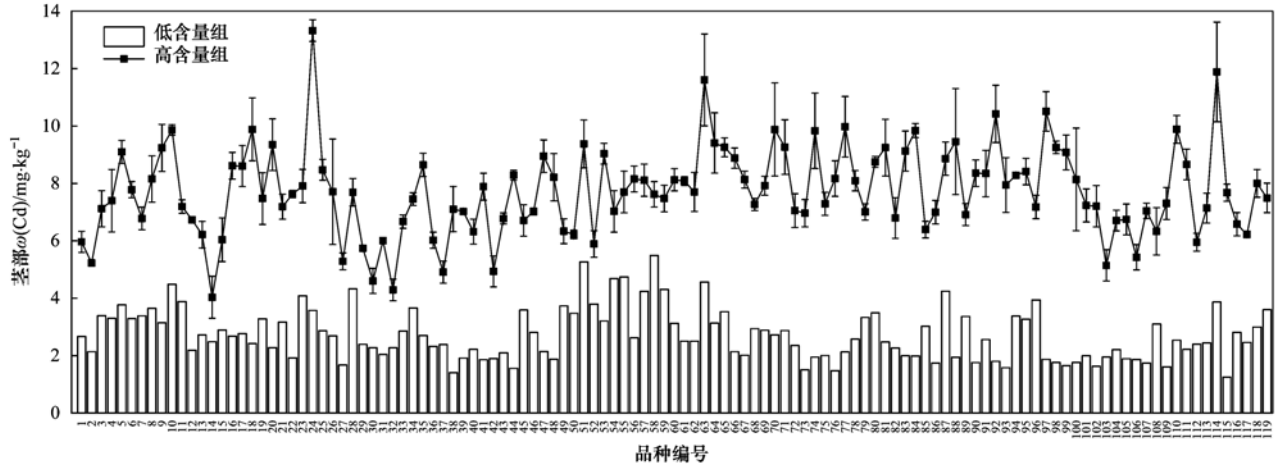


图 2　不同小麦品种茎 Cd 含量

Fig. 2　Cd content in stems of different wheat varieties

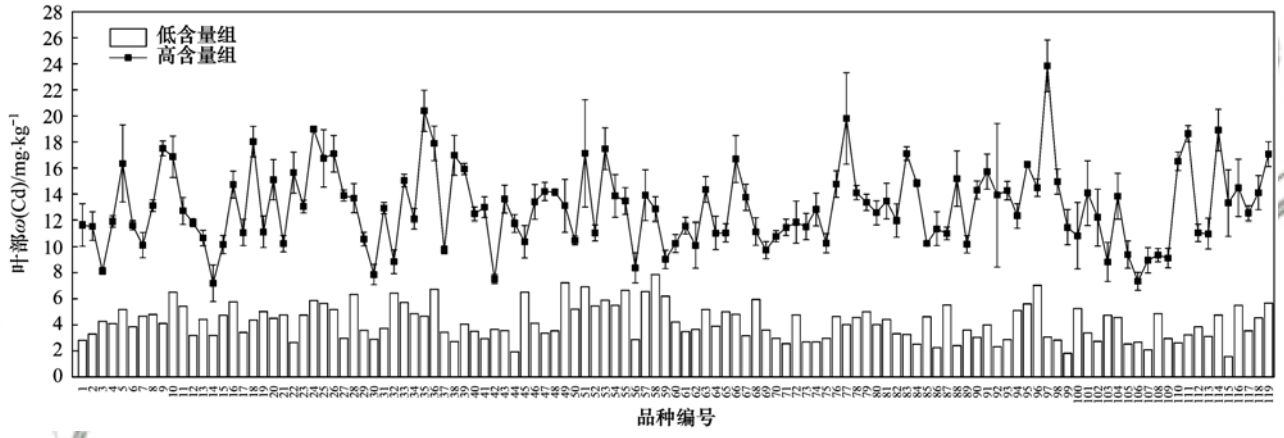


图 3　不同小麦品种叶 Cd 含量

Fig. 3　Cd content in leaves of different wheat varieties

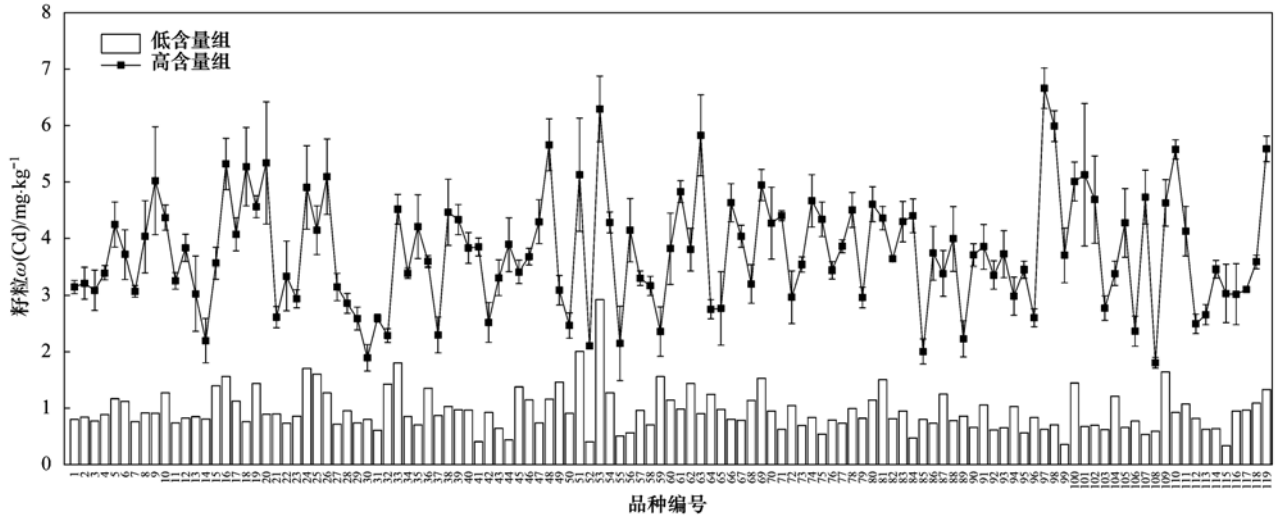


图 4　不同小麦品种籽粒 Cd 含量

Fig. 4　Cd content in grain of different wheat varieties

2.2　不同小麦品种籽粒 Cd 含量的聚类分析

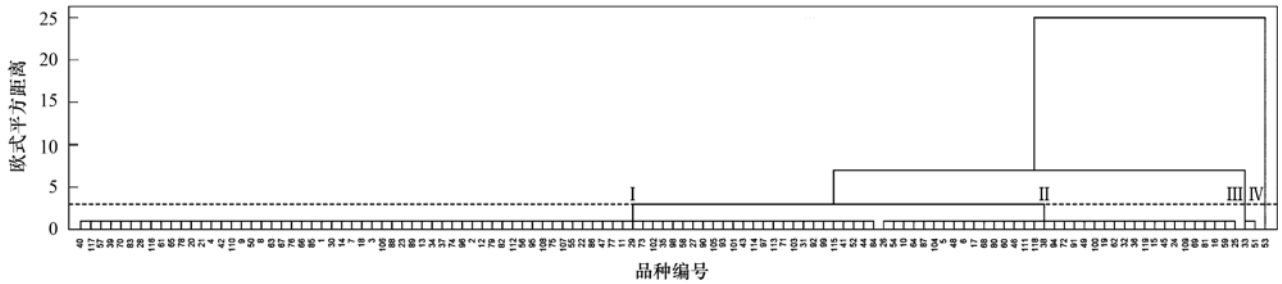
由表 3、图 5 和图 6 可知，通过聚类到低含量组和高含量组综合分析，划分为 4 类，低含量组第一类为低积累类群共 80 个品种，籽粒 ω(Cd)为 0.34 ~

0.99 mg·kg^{-1},平均值为 0.75 mg·kg^{-1}; 第二类为中等积累类群共 36 个品种,籽粒 ω(Cd)为 1.03 ~ 1.70 mg·kg^{-1},平均值为 1.30 mg·kg^{-1}; 第三类为高积累类群共 2 个品种,籽粒 ω(Cd)为 1.80 ~ 2.00 mg·kg^{-1},平均值为 1.90 mg·kg^{-1}; 第四类为极高积累类群共 1 个品种,籽粒 ω(Cd)为 2.93 mg·kg^{-1}. 高含量组第一类为低积累类群共 23 个品种,籽粒 ω(Cd)为 1.80 ~ 2.86 mg·kg^{-1},平均值为 2.41 mg·kg^{-1}; 第二类为中等积累类群共 48 个品种,籽粒 ω(Cd)为 2.94 ~ 3.89 mg·kg^{-1},平均值为 3.42 mg·kg^{-1}; 第三类为高积累类群共 30 个品种,籽粒 ω(Cd)为 3.99 ~ 4.73 mg·kg^{-1},平均值为 4.35 mg·kg^{-1}; 第四类为极高积累类群共 8 个品种,籽粒 ω(Cd)为 4.83 ~ 6.66 mg·kg^{-1},平均值为 5.42 mg·kg^{-1}. 高含量组与低含量组相比,低积累类群品种数量呈减少趋势,而高积累类群品种数量呈增加趋势,说明在 Cd 低含量条件下,不同基因型小麦籽粒 Cd 积累的差异性并不明显,而随着土壤 Cd 含量的提升,在高含量组 Cd 胁迫作用下,导致部分小麦品种籽粒由 Cd 低积累类群向高积累类群变化的趋势明显. 聚类分析同时属于低含量组和高含量组的 Cd 低积累类群品种为 14、21、28、29、30、31、37、42、50、52、55、65、85、89、96、103、106、108、112 和 113 号共 20 个品种.

表 3 低含量组与高含量组供试小麦品种籽粒 Cd 含量聚类分析

Table 3 Cluster analysis of Cd content in grains of wheat varieties tested in low and high content groups

分组	低积累类群 聚类Ⅰ	中等积累类群 聚类Ⅱ	高积累类群 聚类Ⅲ	极高积累类群 聚类Ⅳ	聚类Ⅴ	聚类Ⅵ
低含量组	1、2、3、4、7、8、9、11、12、13、14、18、20、21、22、23、27、28、29、30、31、34、35、37、39、40、41、42、43、44、47、50、52、55、56、57、58、61、63、65、66、67、70、71、73、74、75、76、77、78、79、82、83、84、85、86、88、89、90、92、93、95、96、97、98、99、101、102、103、105、106、107、108、110、112、113、114、115 和 117	5、6、10、15、16、17、19、24、25、26、32、36、38、45、46、48、49、54、59、60、62、64、68、69、72、80、81、87、91、94、100、104、109、111、118 和 119	33 和 51	53	—	—
高含量组	14、21、28、29、30、31、32、37、42、50、52、55、59、64、65、85、89、96、103、106、108、112 和 113	1、2、3、4、6、7、11、12、13、15、22、23、27、34、36、40、41、43、44、45、46、49、57、58、60、62、68、72、73、76、77、79、82、86、87、90、91、92、93、94、95、99、104、114、115、116、117 和 118	5、8、10、17、19、25、33、35、38、39、47、54、56、66、67、70、71、74、75、78、80、81、83、84、88、102、105、107、109 和 111	9、24、26、51、61、69、100 和 101	16、18、20、48、63、98、110 和 119	53 和 97



虚线表示欧式平方距离为 3

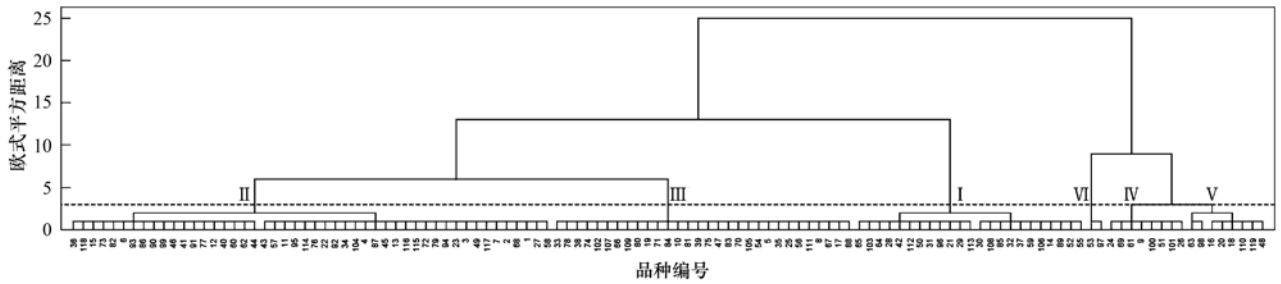
图 5 低含量组小麦籽粒 Cd 含量聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of Cd content in wheat grain of low content group

2.3 不同小麦品种对 Cd 的富集和转运特性分析

2.3.1 不同小麦品种对 Cd 的富集特性分析

盆栽试验条件下,供试的 119 个小麦品种不同植株部位 BCF_{Cd}具有显著差异($P<0.05$). 其中低含量组 119 个品种根、茎、叶和籽粒的 BCF_{Cd}分别为 0.93 ~ 3.59、0.55 ~ 4.91、1.00 ~ 6.88 和 0.25 ~ 1.58,平均值分别为 1.81、1.89、2.86 和 0.64,低含量组小麦植株各部位富集 Cd 能力为:叶 > 茎≈根 > 籽粒; 高含量组 119 个品种根、茎、叶和籽粒 BCF_{Cd}分别为 1.25 ~ 4.89、1.01 ~ 3.78、1.54 ~



虚线表示欧式平方距离为 3

图 6　高含量组小麦籽粒 Cd 含量聚类分析

Fig. 6　Cluster analysis of Cd content in wheat grain of high content group

6.08 和 0.44 ~ 1.90，平均值分别为 2.63、2.02、3.38 和 0.98，高含量组小麦植株各部位富集 Cd 能力为：叶 > 根 > 茎 > 籽粒. 由图 7 可知，高含量组与低含量组相比，小麦不同器官的 BCF_{Cd} 整体呈现不同程度的增长趋势. 由图 8 可知，按照 $BCF_{Cd} < 0.5$、$0.5 < BCF_{Cd} < 1$ 和 $BCF_{Cd} > 1$ 分别划分为低、中等和高富集区间，其中低含量组各区间（低、中等和高）频数分别为 27、86 和 6，籽粒低富集区间品种为 7、11、29、31、37、38、41、52、58、66、76、81、84、85、90、93、95、96、99、103、105、107、108、112、113、114 和 115 号，高含量组各区间（低、中等和高）频数分别为 3、69 和 47，籽粒低富集区间品种为 30、52 和 108 号.

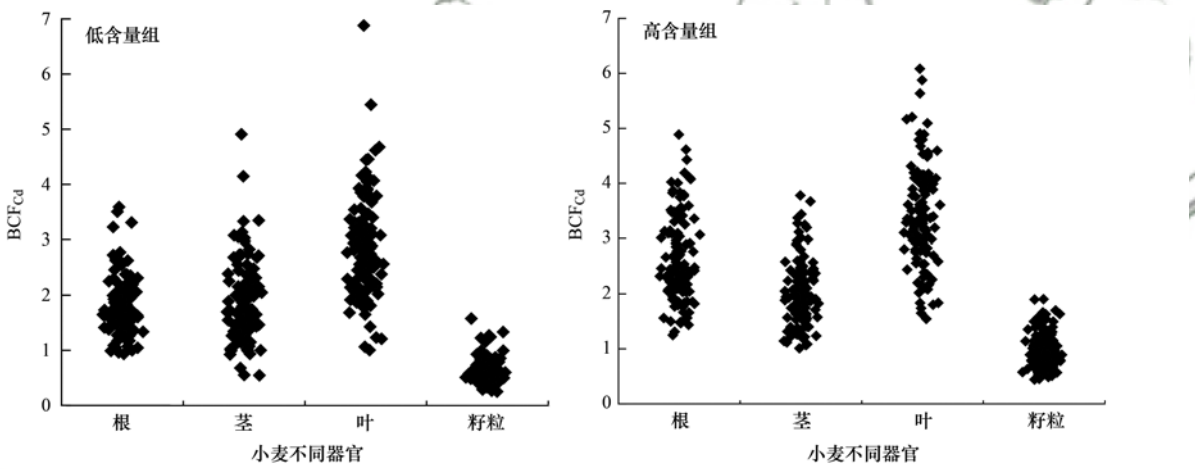


图 7　小麦根、茎、叶和籽粒 Cd 富集系数分布

Fig. 7　Distribution of Cd enrichment coefficients in roots, stems, leaves, and grains of wheat

图 9 为小麦不同器官 Cd 富集系数与土壤 Cd 含量线性拟合结果，在土壤 ω(Cd) 为 1.5 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 4.0 $mg \cdot kg^{-1}$ 水平下小麦根、茎、叶和籽粒的 BCF_{Cd} 与对应土壤 Cd 含量均呈极显著负相关（$P < 0.01$），这与以往的研究结果一致[17]. 低含量组相关性排序为：茎（$r = -0.491^{**}$）> 根（$r = -0.431^{**}$）> 叶（$r = -0.416^{**}$）> 籽粒（$r = -0.267^{**}$），高含量组相关性排序为：茎（$r = -0.645^{**}$）> 叶（$r = -0.521^{**}$）> 籽粒（$r = -0.507^{**}$）≈ 根（$r = -0.505^{**}$）. 总体来看，高含量组土壤 Cd 含量与小麦不同器官 BCF_{Cd} 的负相关性均高于低含量组，且随着土壤 Cd 含量的增加，籽粒 BCF_{Cd} 与土壤 Cd 含量负相关性明显增强，表明随着土壤 Cd 总量的增高，虽然土壤 Cd 迁移积累到小麦植株各器官的 Cd 含量在增加，但小麦植株各器官对 Cd 的迁移积累程度呈下降趋势.

2.3.2　不同小麦品种对 Cd 的转运特性分析

盆栽试验条件下，供试的 119 个小麦品种不同植株部位 TF_{Cd} 具有显著差异（$P < 0.05$）. 其中低含量组 119 个品种茎、叶和籽粒 TF_{Cd} 分别为 0.39 ~ 2.26、0.71 ~ 3.53 和 0.11 ~ 0.90，平均值分别为 1.05、1.64 和 0.37；高含量组 119 个品种茎、叶和籽粒 TF_{Cd} 分别为 0.49 ~ 1.14、0.63 ~ 2.53 和 0.21 ~ 0.79，平均值分别为 0.78、1.33 和 0.38. 由图 10 可知，低含量组与高含量组小麦植株各部位转运 Cd 能力均为：叶 > 茎 > 籽粒，且高含量组与低含量组相比，小麦茎和叶 TF_{Cd} 整体呈下降趋势，籽粒 TF_{Cd} 变化不大. 由图 11 可知，按照 $TF_{Cd} < 0.5$ 和 $0.5 < TF_{Cd} < 1$ 分别划分为低和中等转运区间. 其中低含量组各转运区间（低和中等）频数分别为 108 和 11，籽粒中等转运区间品种为 17、32、33、42、48、49、53、62、74、100 和 104 号，籽粒 TF_{Cd} 相对较高；高含量

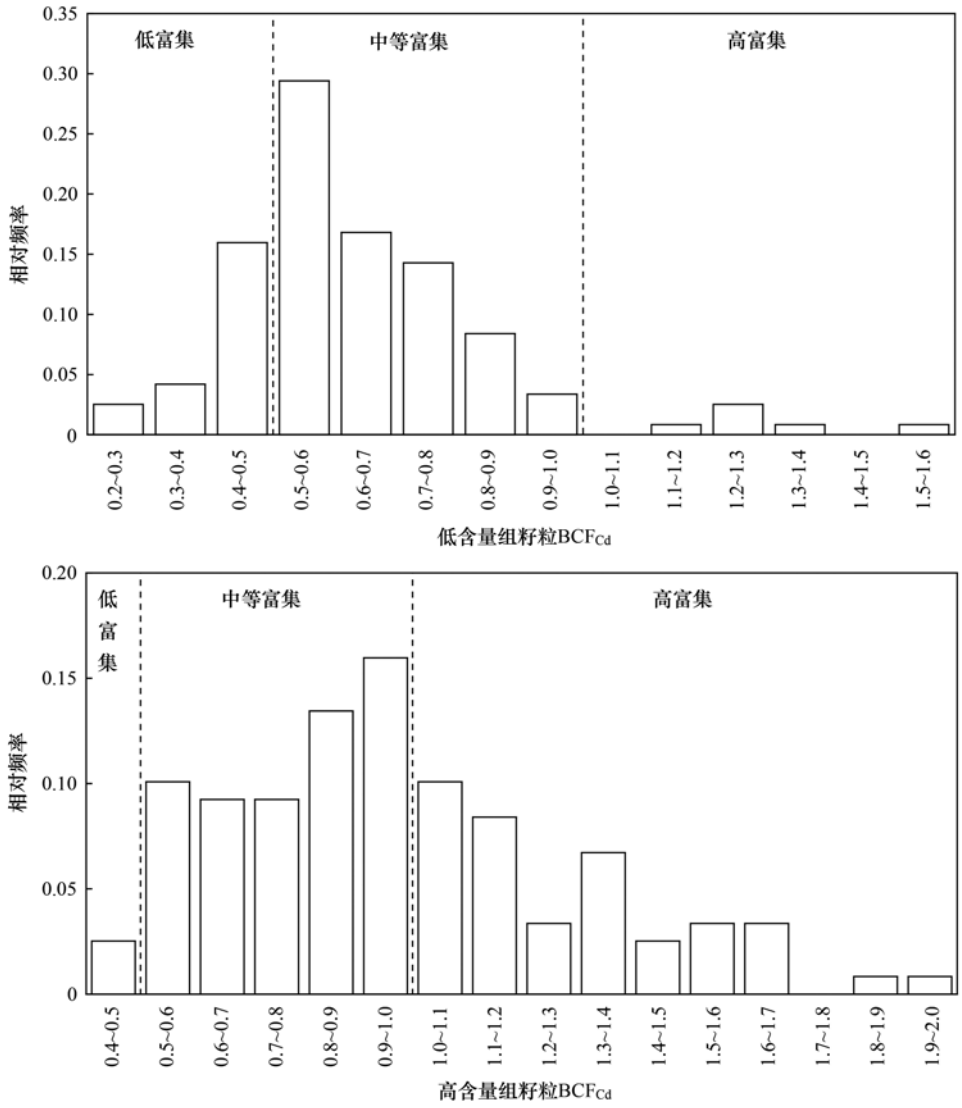


图 8 籽粒 Cd 富集系数相对频率直方分布

Fig. 8 Relative frequency of Cd enrichment factor was distributed in a straight square

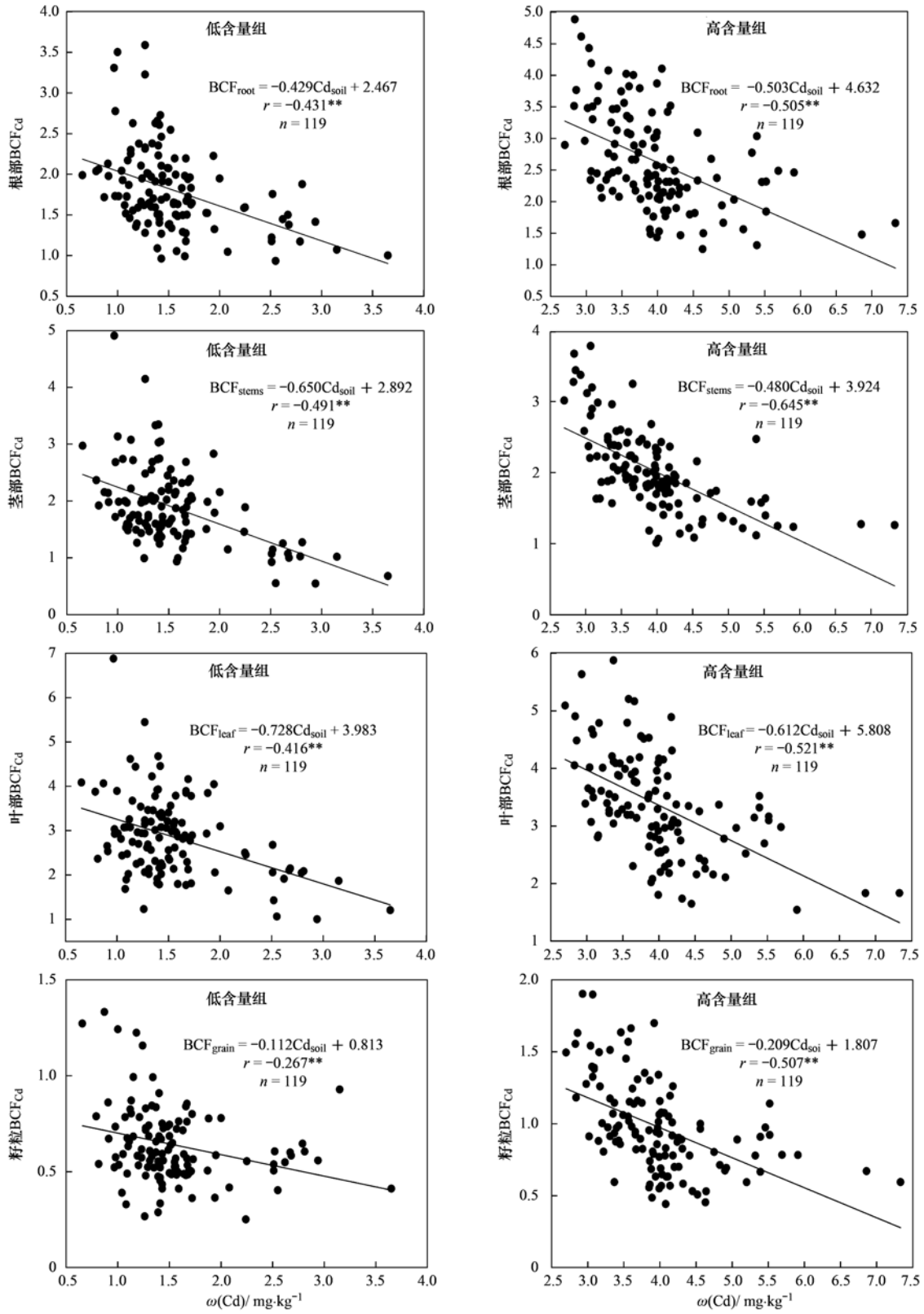
各转运区间(低、中等)频数分别为 107、12,籽粒中等转运区间品种为 1、17、36、46、48、53、54、66、67、75、105 和 119 号,籽粒 TF_{Cd} 相对较高. 当土壤 ω(Cd)从 1.5 mg·kg^{-1}升高到 4.0 mg·kg^{-1}时,小麦茎和叶转运系数整体呈下降趋势,这与熊孜等[18]的研究结果一致.

2.4 小麦各部位 Cd 含量之间的相关性

图 12 和图 13 分别是低含量组和高含量组小麦各部位 Cd 含量之间的线性拟合结果. 在 ω(Cd)为 1.5 mg·kg^{-1}和 4.0 mg·kg^{-1}水平下小麦茎与叶、根与茎、根与叶、根与籽粒、茎与籽粒和叶与籽粒 Cd 含量均呈现极显著正相关关系($P<0.01$),低含量组相关性排序为茎与叶($r=0.763^{**}$)>根与茎($r=0.685^{**}$)>根与叶($r=0.564^{**}$)>根与籽粒($r=0.501^{**}$)>叶与籽粒($r=0.496^{**}$)>茎与籽粒($r=0.309^{**}$),高含量组相关性排序为根与茎($r=0.670^{**}$)>茎与籽粒($r=0.603^{**}$)>茎与叶($r=0.598^{**}$)>根与籽粒($r=0.578^{**}$)>叶与籽粒($r=0.551^{**}$)>根与叶($r=0.450^{**}$). 这一现象表明小麦根、茎、叶和籽粒之间存在密切的转运关系,且根向茎和茎向叶转运的程度高于茎向籽粒、叶向籽粒的转运程度. 但随着土壤 Cd 含量的升高,根与茎、茎与籽粒的相关性明显增强,说明小麦籽粒中 Cd 的积累,与根系-茎叶界面对重金属的迁移以及 Cd 在茎秆中的运输有关,根在与茎、叶和籽粒等地上部 Cd 转运过程中起到了关键作用[19]. 根系细胞质膜上的金属转运蛋白是根系镉吸收的主要转运体,在金属吸收、易位和细胞内转运中发挥了重要作用[20, 21].

3 讨论

由图 14 可知,不同小麦品种各器官 Cd 含量在土壤 ω(Cd)为 1.5 mg·kg^{-1}表现为:叶>茎≈根>籽粒,在土壤 ω(Cd)为 4.0 mg·kg^{-1}表现为:叶>根



** 表示在 0.01 水平上极显著相关(P < 0.01)

图 9　低含量组和高含量组土壤 Cd 含量与小麦各器官富集系数相关性

Fig. 9　Correlation between soil Cd content and the enrichment coefficient of wheat organs in low and high content groups

> 茎 > 籽粒，不同器官间分配比例显著不同(P < 0.05)．根、茎和叶 Cd 含量均明显高于籽粒，说明不同小麦品种 Cd 从茎叶转移到籽粒的过程受到明显阻滞作用，但阻滞程度的不同体现在不同小麦基因型对 Cd 的耐性(高含量 Cd 条件下减小其毒害)和避性(减少吸收量)[22]，限制向地上部的转运是植物应对 Cd 胁迫的重要防御方式[23]．本研究与以往研究的差异性体现在根、茎和叶的 Cd 含量关系，无论

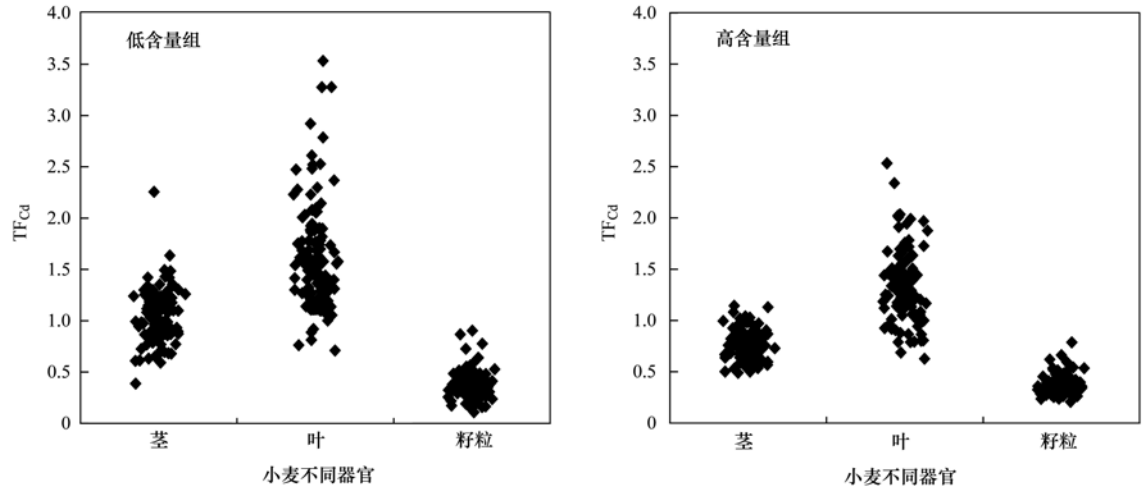


图 10 小麦茎、叶和籽粒 Cd 转运系数分布

Fig. 10 Distribution of Cd transport coefficient in stems, leaves, and grain of wheat

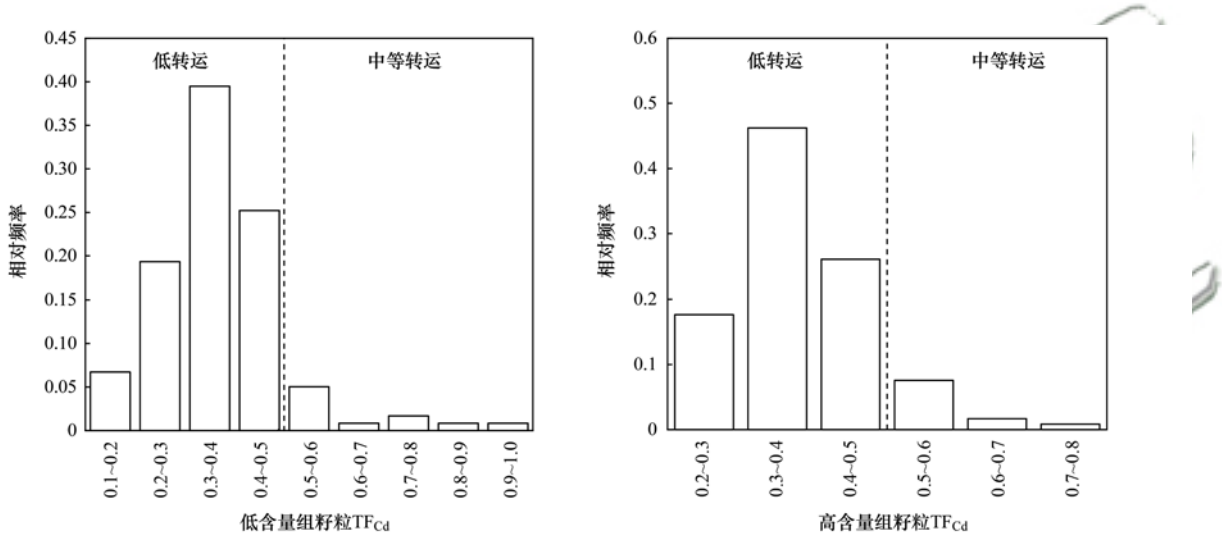
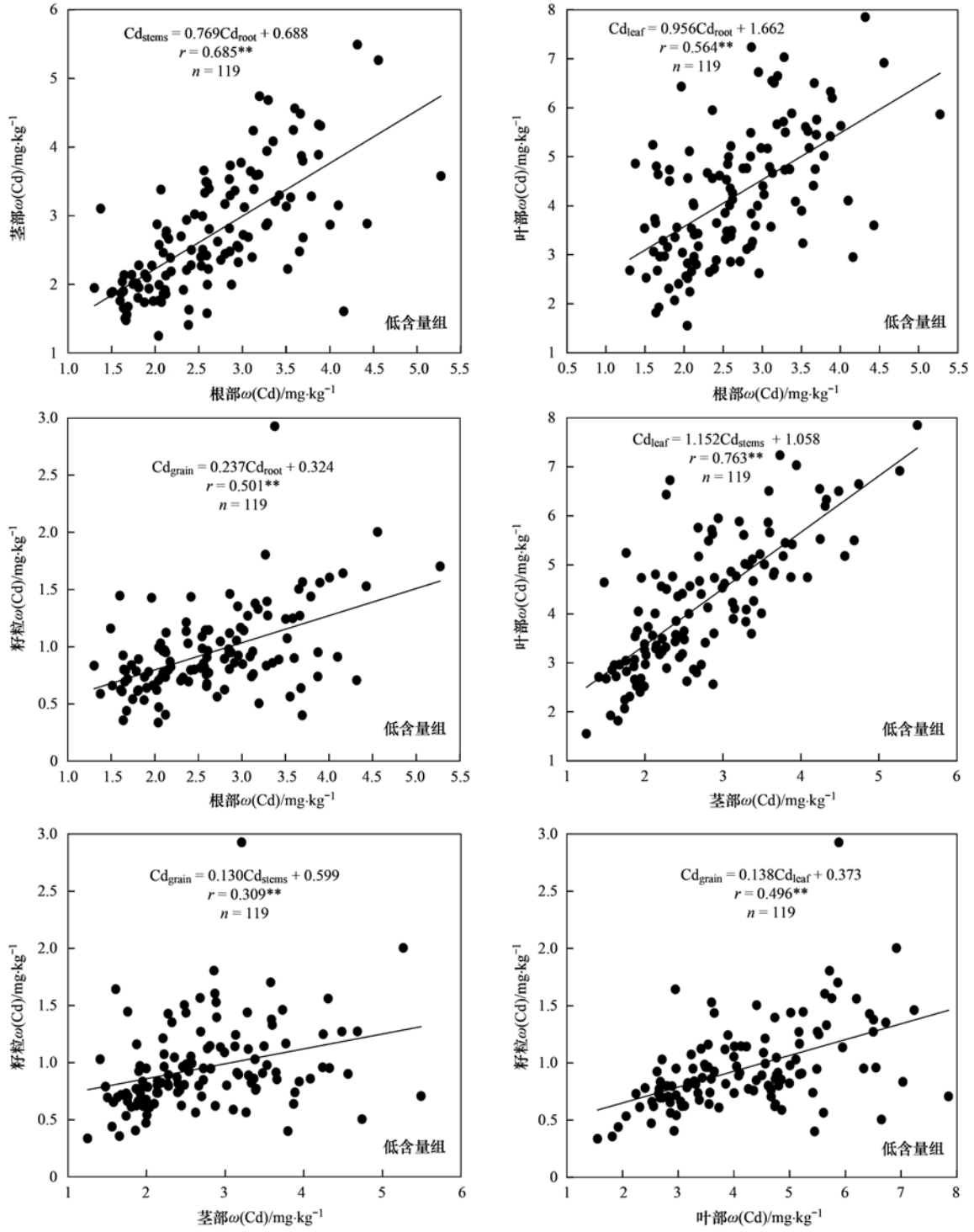


图 11 籽粒 Cd 转运系数相对频率直方分布

Fig. 11 Relative frequency of Cd transport coefficient in grain as distributed in square

低含量组还是高含量组均表现出小麦叶部 Cd 含量高于根部的整体趋势. 分析可能存在两方面原因:一是供试土壤的 ω(离子交换态 Cd)较高(低含量组为 0.348 mg·kg^{-1}、高含量组为 1.380 mg·kg^{-1}),且低含量和高含量组小麦地上部分 Cd 含量与土壤 Cd 含量相关系数 r 分别为 0.464 和 0.710,与 Cd 离子交换态含量相关系数 r 分别为 0.881 和 0.595,均呈极显著正相关关系($P<0.01$),小麦吸收的 Cd 出现在植株地上部分积累现象,质膜定位的金属转运蛋白可能协助 Cd 进入木质部[24],在植株中的过表达增加了叶片中 Cd 的积累,而降低了根系中 Cd 的水平[25]. 另外,一种类似防御素的蛋白质也被发现参与禾谷类作物叶片中 Cd 的积累,它通过螯合作用促进 Cd 分泌到细胞外部,然后装载到木质部并进行长距离运输,导致大部分 Cd 积累在叶片而不是籽粒中[26]. 二是通常认为 Cd 被根系吸收后在植物体内主要以自由离子形式在木质部流液中运输到其他部位[27],根部 Cd^{2+} 通过内皮层和内层的凯氏带进入根部维管束,而进入维管束的 Cd^{2+} 可能是在蒸腾作用下向地上部分运输,且 Cd 在植物体内长距离运输的速率受蒸腾作用的影响[28]. 由于本研究盆栽试验条件下蒸腾作用较强,叶片细胞中的 Cd 可能主要来源于从维管束到叶片组织的水分迁移,说明蒸腾作用对叶片中重金属的累积起到了重要作用,蒸腾作用越强,重金属向茎叶中的运输也越快越多. 不同基因型小麦的凯氏带结构及木质部、韧皮部内部化合物种类和含量不同,造成蒸腾作用存在差异,这些差异导致不同小麦品种对重金属的吸收存在显著差异,为筛选重金属低积累小麦品种提供了理论基础[29]. 另外,本研究发现 119 个品种中 10 个旱作品种(西农 928、中麦 175 和洛旱系列)Cd 的积累量相对较低,这可能与耐旱小麦品种控制蒸腾作用的运输机制有关. 目前,关于 Cd 的分布状态研究,多数集中在根部,对其他组织中的研究较少,且



** 表示在 0.01 水平上极显著相关($P < 0.01$),下同

图 12　低含量组小麦不同部位 Cd 含量相关性

Fig. 12　Correlation of Cd content in different parts of wheat in low content groups

小麦植株对 Cd 的吸收、运输和积累的机制尚无统一定论,仍需要进一步的深入研究.

本研究中 119 个品种 Cd 积累量在品种间具有显著差异($P < 0.05$),而部分品种在 2 组不同污染含量条件下籽粒 Cd 积累特性也表现出明显的差异性. 土壤 Cd 含量较低时,低镉品种根系对 Cd 的吸收能力较弱的特征表现更为突出,而当土壤 Cd 含量增高时,部分低镉品种对 Cd 的富集和转运能力增强,表现出高含量胁迫条件下抗性不足的特点,导致少量品种(如良星 66、益科麦 17118)在低含量组中属低镉品种,高含量组中属中高镉品种,而部分低镉品种(如洛旱 7)仍能保持低富集、低转运的能力,表现出高含量胁迫条件下 Cd 低积累的稳定性. 从筛选结果来看,不同小麦品种的高低积累是相对的,存在不同 Cd 污染含量条件下的适应性问题. 随着土壤 Cd 含量的增加,低积累类群与高积累类群

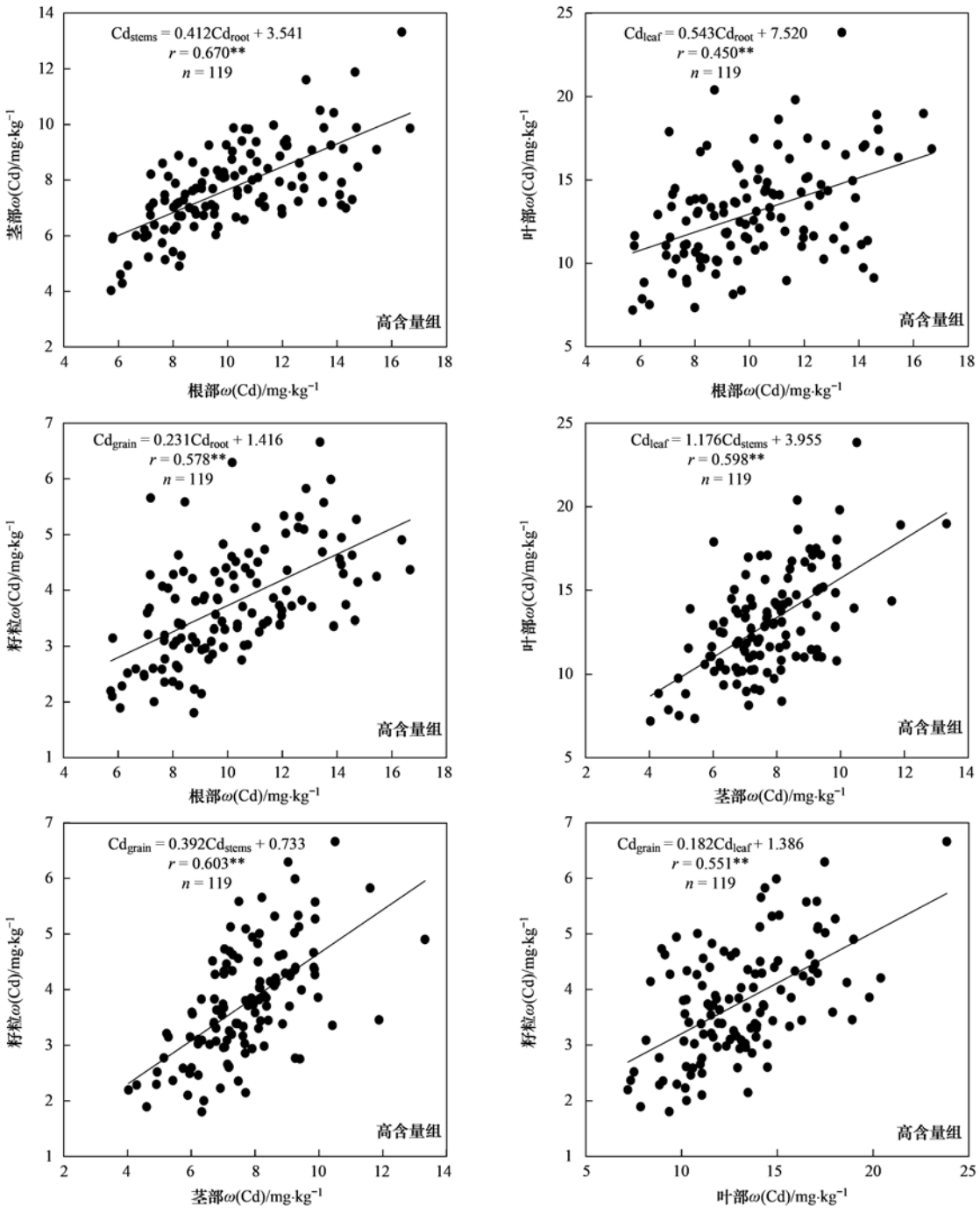
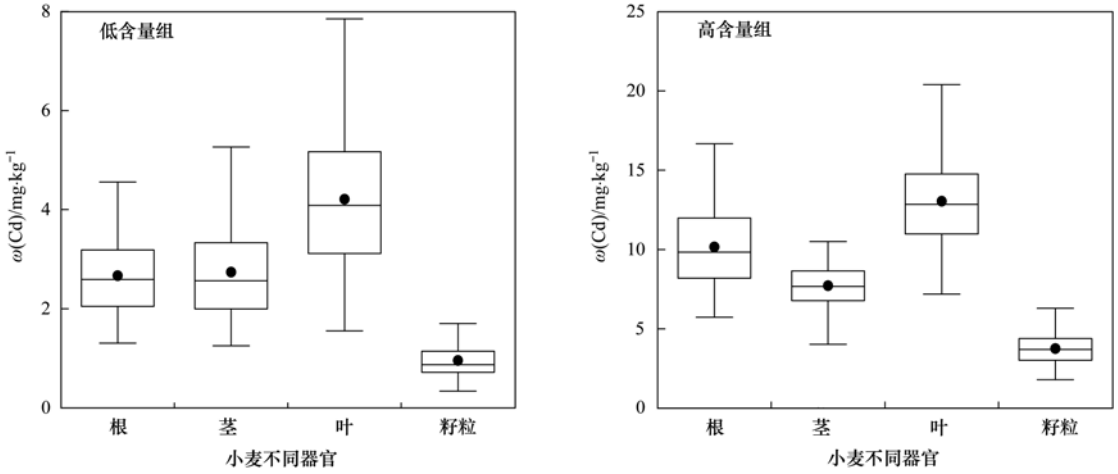


图 13 高含量组小麦不同部位 Cd 含量相关性

Fig. 13 Correlation of Cd content in different parts of wheat in high content group

的稳定性逐渐显现. 故考量一个品种的 Cd 低积累特性,要考虑该品种在不同污染含量条件下低积累的稳定性. 土壤 ω(Cd)为 1.5 mg·kg^{-1}是我国农用地土壤污染风险筛选值的 2.5 倍(pH > 7.5), 4.0 mg·kg^{-1}已达到风险管控值限值,相关研究显示影响小麦生长的土壤 ω(Cd)阈值为 3 ~ 5 mg·kg^{-1}[30],而本研究中高含量组 Cd 含量已达到阈值水平,Cd 的毒害作用可能导致小麦 Cd 阻控机制被激活,不同基因型小麦对 Cd 胁迫的防御响应方式和耐受程度不尽相同,而同一品种在低于阈值和超过阈值条件下表现出吸收的差异. 小麦籽粒的低镉特性与土壤有效态 Cd 含量,根系对 Cd 的吸收能力,Cd 从根向茎和叶的转移能力,Cd 从茎和叶向籽粒的再转移能力等多个因素相关[31,32]. 本研究中 Cd 积累作用相对较弱与相对较强的小麦品种对 Cd 的吸收差异主要在于根部-茎叶和茎叶-籽粒这 2 个转运过程.

小麦对重金属的吸收和积累受遗传因子和多种环境因子共同调控[33]. 到目前为止,文献[34]提出了筛选作物重金属积累程度的标准,但低镉积累小



矩形盒底端、中横线和顶端分别表示下四分位数、中位数和上四分位数；上下边缘（短横线）分别表示非异常范围内的最大和最小值；实心圆点表示均值

图 14　低含量组与高含量组小麦不同部位 Cd 含量对比

Fig. 14　Comparison of Cd content in different parts of wheat in low content group and high content group

麦品种的筛选方法和标准尚未统一，亟需建立稳定实用的低积累小麦品种筛选标准. 本研究采用聚类分析法与富集和转运系数排序法相结合，对照优选确定低积累特性的小麦品种. 优选条件同时满足：①聚类分析为籽粒低积累类群品种；②籽粒 BCF_{Cd} < 1 且排序较低的 30 个品种（小于 119 个品种 BCF_{Cd} 下四分位数）；③籽粒 TF_{Cd} < 1 且排序较低的 30 个品种（小于 119 个品种 TF_{Cd} 下四分位数）. 由表 4 可知，低含量组 Cd 低积累品种为郑麦 366、郑麦 583、郑麦 113、藁优 5218、阜麦 0908、稷麦 68、范麦 27、良星 66、洛旱 19、洛旱 7、洛麦 27、洛麦 23、益科麦 17118、珍麦 3、富豫 186 和小偃 54，高含量组 Cd 低积累品种为洛麦 26、怀川 916、科大 1026、华成 5157、众麦 7、洛旱 2、洛旱 9、洛旱 1、洛旱 7、安农 859 和华皖麦 18，同时属于低、高含量组 Cd 低积累品种为洛旱 7 号. 由于田间环境经常发现土壤镉超标与对应作物中镉超标不一致的现象[35]，且筛选的低镉积累小麦品种在不同土壤 Cd 含量条件下籽粒 Cd 积累能力会发生改变，故以上筛选出的 Cd 低积累品种还需通过更多田间试验对低积累品种的田间重现性和环境稳定性进一步验证研究.

表 4　低积累小麦品种筛选结果

Table 4　Screening results of wheat varieties with low accumulation

分组	籽粒低积累类群	BCF < 1 且小于下四分位数的品种	TF < 1 且小于下四分位数的品种	叠加后筛选出 相对低积累品种
低含量组	1、2、3、4、7、8、9、11、12、13、14、18、20、21、22、23、27、28、29、30、31、34、35、37、39、40、41、42、43、44、47、50、52、55、56、57、58、61、63、65、66、67、70、71、73、74、75、76、77、78、79、82、83、84、85、86、88、89、90、92、93、95、96、97、98、99、101、102、103、105、106、107、108、110、112、113、114、115 和 117	7、11、23、26、29、31、37、38、41、52、58、66、76、81、84、85、90、93、95、96、99、103、105、107、108、112、113、114、115 和 116	3、4、7、9、11、13、14、18、23、28、29、41、44、52、55、56、58、63、84、89、93、95、96、99、101、102、107、113、114 和 115	7、11、23、29、41、52、58、84、93、95、96、99、107、113、114 和 115
高含量组	14、21、28、29、30、31、32、37、42、50、52、55、59、64、65、85、89、96、103、106、108、112 和 113	7、14、21、23、28、29、30、32、36、37、42、43、45、49、50、52、55、59、65、80、81、85、89、94、95、96、106、108、112 和 113	4、5、6、10、11、24、25、28、37、55、59、60、64、65、73、82、83、85、86、87、89、92、94、95、99、106、108、114、115 和 116	28、37、55、59、65、85、89、94、95、106 和 108

4　结论

（1）土壤 ω(Cd) 为 1.5 mg·kg^{-1} 和 4.0 mg·kg^{-1} 水平下小麦植株各部位富集 Cd 能力分别为：叶 > 茎≈根 > 籽粒、叶 > 根 > 茎 > 籽粒，转运 Cd 能力均为：叶 > 茎 > 籽粒. 小麦地上部 Cd 含量与土壤 Cd 全量和离子交换态 Cd 含量均呈极显著正相关关系（P < 0.01），且与盆栽试验条件下较强的蒸腾作用密切相关.

（2）小麦根、茎、叶和籽粒 BCF_{Cd} 与对应土壤

Cd 含量相关系数 r 为 $-0.267 \sim -0.645$,呈极显著负相关关系($P<0.01$),表明随着土壤 Cd 含量的升高,小麦植株对 Cd 的富集能力呈减弱趋势. 茎部与土壤 Cd 含量的负相关性明显高于根、叶和籽粒,说明茎部的积累和运输在小麦植株地上部 Cd 的富集过程中起了关键作用.

(3)小麦根与茎、根与叶、根与籽粒、茎与叶、茎与籽粒和叶与籽粒 Cd 含量相关系数 r 为 0.450 ~0.763,呈极显著正相关关系($P<0.01$),表明小麦各器官之间存在密切的转运关系且具有一定的差异性.

(4)采用聚类分析与富集和转运系数排序对照优选法,分别在土壤 ω(Cd)为 1.5 $mg\cdot kg^{-1}$ 和 4.0 $mg\cdot kg^{-1}$ 条件下筛选出 16 个和 11 个 Cd 低积累小麦品种,其中洛旱 7 号小麦品种可作为低中高含量下 Cd 低积累优选小麦品种,说明在不同 Cd 污染含量条件下筛选 Cd 低积累小麦品种的方式是可行的.

参考文献:

[1] Rizwan M, Ali S, Zia ur Rehman M, *et al*. Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* crop species: A review [J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 1175-1191.

[2] Song W E, Chen S B, Liu J F, *et al*. Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, **14**(9): 1845-1854.

[3] 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 等. 黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3917-3926.
Kang G H, Zhang P Y, Li Y Y, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in wheat grains cultivated in Kaifeng irrigation area of the yellow river [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3917-3926.

[4] 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.

[5] Shi T R, Zhang Y Y, Gong Y W, *et al*. Status of cadmium accumulation in agricultural soils across China (1975-2016): from temporal and spatial variations to risk assessment [J]. Chemosphere, 2019, **230**: 136-143.

[6] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4647-4653.
Chen X H, Shen G X, Bai Y J, *et al*. Accumulation of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4647-4653.

[7] 明毅, 张锡洲, 余海英. 小麦籽粒镉积累差异评价[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(22): 4219-4229.
Ming Y, Zhang X Z, Yu H Y. The evaluation of Cd accumulation in grains of different wheat materials[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(22): 4219-4229.

[8] 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.

[9] 陈亚茹, 张巧凤, 付必胜, 等. 中国小麦微核心种质籽粒铅、镉、锌积累差异性分析及低积累品种筛选[J]. 南京农业大学学报, 2017, **40**(3): 393-399.
Chen Y R, Zhang Q F, Fu B S, *et al*. Differences of lead, cadmium and zinc accumulation among Chinese wheat mini-core collections germplasms and screening for low Pb, Cd and Zn accumulative cultivars in grains [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, **40**(3): 393-399.

[10] 熊孜, 赵会薇, 李菊梅, 等. 黄淮海平原小麦吸收镉与土壤可浸提镉间关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2275-2284.
Xiong Z, Zhao H W, Li J M, *et al*. The relationship between cadmium in wheat plant and cadmium extracted by EDTA and diluted acids in soil in Huanghuaihai Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(12): 2275-2284.

[11] Zaid I U, Zheng X, Li X F. Breeding low-cadmium wheat: progress and perspectives[J]. Agronomy, 2018, **8**(11), doi: 10.3390/agronomy8110249.

[12] Guo G H, Lei M, Wang Y W, *et al*. Accumulation of As, Cd, and Pb in sixteen wheat cultivars grown in contaminated soils and associated health risk assessment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(11), doi: 10.3390/ijerph15112601.

[13] 王娟, 苏德纯. 基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(3): 493-500.
Wang J, Su D C. Analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies in wheat and maize fields based on bibliometrics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(3): 493-500.

[14] Yang G H, Zhu G Y, Li H L, *et al*. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, **17**(8): 1861-1870.

[15] Yue J Y, Wei X J, Wang H Z. Cadmium tolerant and sensitive wheat lines: their differences in pollutant accumulation, cell damage, and autophagy[J]. Biologia Plantarum, 2018, **62**(2): 379-387.

[16] Chen Q, Wu F B. Breeding for low cadmium accumulation cereals[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2020, **21**(6): 442-459.

[17] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2032-2039.
Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al*. Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2032-2039.

[18] 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.

[19] Hirzel J, Retamal-Salgado J, Walter I, *et al*. Cadmium accumulation and distribution in plants of three durum wheat cultivars under different agricultural environments in Chile[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **72**(1): 77-88.

[20] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, *et al*. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice [J]. The Plant Cell, 2012, **24**(5): 2155-2167.

[21] 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.

[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] 薛永, 王苑螈, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(3): 528-534.
Xue Y, Wang Y Y, Yao Q H, *et al*. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(3): 528-534.

[24] Peng F, Wang C, Zhu J S, *et al*. Expression of TpNRAMP5, a metal transporter from Polish wheat (*Triticum polonicum* L.), enhances the accumulation of Cd, Co and Mn in transgenic *Arabidopsis* plants[J]. Planta, 2018, **247**(6): 1395-1406.

[25] Takahashi R, Ishimaru Y, Senoura T, *et al*. The OsNRAMP1 iron transporter is involved in Cd accumulation in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, **62**(14): 4843-4850.

[26] Luo J S, Huang J, Zeng D L, *et al*. A defensin-like protein drives cadmium efflux and allocation in rice [J]. Nature Communications, 2018, **9**(1), doi: 10.1038/s41467-018-03088-0.

[27] Florijn P J, Nelemans J A, Van Beusichem M L. The influence of the form of nitrogen nutrition on uptake and distribution of cadmium in lettuce varieties [J]. Journal of Plant Nutrition, 1992, **15**(11): 2405-2416.

[28] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(5): 1317-1321.
Zhang Y X, Yu F, Zhang Y Y, *et al*. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, **16**(5): 1317-1321.

[29] 张彪, 段恩忠, 师振亚, 等. 不同玉米品种镉积累及运移差异性研究[J]. 河南农业科学, 2017, **46**(9): 25-29.
Zhang B, Duan E Z, Shi Z Y, *et al*. Study on the differences in cadmium accumulation and transport among maize cultivars[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, **46**(9): 25-29.

[30] 杨玉敏, 张庆玉, 杨武云, 等. 镉胁迫对不同基因型小麦产量及构成因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(3): 532-538.
Yang Y M, Zhang Q Y, Yang W Y, *et al*. Effect of cadmium stress on yield and yield components of different wheat genotypes [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, **17**(3): 532-538.

[31] Harris N S, Taylor G J. Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, **52**(360): 1473-1481.

[32] Naeem A, Saifullah, Zia-ur-Rehman M, *et al*. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes [J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 126-135.

[33] 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 等. 冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1482-1490.
Wang Y W, Rui Y K, Li Z Y, *et al*. Characteristics of heavy metal absorption by winter wheat and its quantitative relationship with influencing factors[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1482-1490.

[34] Liu W T, Zhou Q X, Zhang Y L, *et al*. Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(3): 781-788.

[35] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究Ⅴ. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学报, 2010, **47**(4): 628-638.
Zhang H Z, Luo Y M, Zhang H B, *et al*. Study on soil environmental quality guidelines and standards v. modeling of cadmium uptake in soil-crop systems for human food safety in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(4): 628-638.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 3

Mar. 15, 2022

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, *et al.* (1129)

Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, *et al.* (1140)

Source Analysis of Ambient $PM_{2.5}$ in Wuhan City Based on Random Forest Model ····· ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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-rui, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1286)

Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province ····· QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, *et al.* (1296)

Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking ····· LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, *et al.* (1307)

Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants ····· YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, *et al.* (1315)

Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China ····· LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1356)

Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries ····· ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, *et al.* (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, *et al.* (1384)

Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia ····· LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, *et al.* (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, *et al.* (1404)

Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin ····· HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, *et al.* (1414)

Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangsu Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain ····· SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, *et al.* (1424)

Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River ····· SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, *et al.* (1434)

Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the *Grus leucogeranus* Reserve of Poyang Lake ····· LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, *et al.* (1447)

Influence of Microplastics on the Development of Proteus Biofilm ····· TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, *et al.* (1455)

Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangsu Lake ····· LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, *et al.* (1463)

Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics ····· SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, *et al.* (1472)

Diffusive Fluxes and Controls of N_2O from Coastal Rivers in Tianjin City ····· TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, *et al.* (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, *et al.* (1492)

Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level ····· QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, *et al.* (1500)

Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network ····· JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, *et al.* (1512)

Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism ····· ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qiang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1567)

Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM ····· MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, *et al.* (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, *et al.* (1584)

Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionomic Traits Among Different Winter Wheat Varieties ····· LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, *et al.* (1596)

Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress ····· REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, *et al.* (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, *et al.* (1620)

Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil ····· SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, *et al.* (1630)

Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by *Solanum nigrum* L. and on the Soil Bacterial Community Structure ····· LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, *et al.* (1641)

Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland ····· HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, *et al.* (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, *et al.* (1657)

Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N_2O and N_2 Emission in a Winter Wheat Field ····· PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, *et al.* (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, *et al.* (1678)

Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis ····· RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, *et al.* (1688)