

陈星旺, 杨 华, 蔡雄飞, 等. 不同生育期施用牡蛎壳粉对小麦籽粒镉积累的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(2): 243-250.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.02.006

## 不同生育期施用牡蛎壳粉对小麦籽粒镉积累的影响

陈星旺<sup>1,2</sup>, 杨 华<sup>1,2</sup>, 蔡雄飞<sup>1,2</sup>, 赵慧芳<sup>1,2</sup>, 肖彩霞<sup>1,2</sup>, 瞿朝正<sup>1,2</sup>, 王胜利<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 减少作物可食用部位镉(Cd)积累是降低人体Cd暴露风险的有效途径。牡蛎壳粉因能改善土壤酸化程度、促进作物增产和减少Cd在作物中的积累而备受关注。为明确不同生育期施用牡蛎壳粉对小麦籽粒Cd富集的影响,本研究设置不施用牡蛎壳粉(CK)、拔节期施用牡蛎壳粉和抽穗期施用牡蛎壳粉3个处理,分析不同生育期施用牡蛎壳粉对小麦各器官Cd积累和分配的影响。结果表明:拔节期施用牡蛎壳粉和抽穗期施用牡蛎壳粉都能显著增加小麦千粒质量及地上部干质量,小麦籽粒Cd含量分别降低24.9%和37.7%。2个时期施用牡蛎壳粉处理对籽粒总Cd吸收量影响不大,籽粒中Cd的分配比例略有增加。抽穗期施用牡蛎壳粉能更有效促进Cd在穗下节间的积累。总之,抽穗期是小麦籽粒中Cd积累的关键期,此时施用牡蛎壳粉能增加Cd在穗下节间的滞留,减轻Cd对小麦植株生长的胁迫,小麦籽粒产量增加,从而导致小麦籽粒Cd含量的降低。

**关键词:** 小麦; 牡蛎壳粉; 镉含量

**中图分类号:** X171; S513.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2024)02-0243-08

## Effects of oyster shell powder applying at different growth stages on cadmium accumulation in wheat grains

CHEN Xing-wang<sup>1,2</sup>, YANG Hua<sup>1,2</sup>, CAI Xiong-fei<sup>1,2</sup>, ZHAO Hui-fang<sup>1,2</sup>, XIAO Cai-xia<sup>1,2</sup>,  
QU Chao-zheng<sup>1,2</sup>, WANG Sheng-li<sup>1,2</sup>

(1. School of the Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** Reducing the accumulation of cadmium (Cd) in edible parts of crops is an effective way to reduce the risk of human Cd exposure. Oyster shell powder has attracted much attention because it can improve soil acidification, promote crop yield and reduce the accumulation of Cd in crops. In order to clarify the effect of oyster shell powder application at different growth stages on Cd accumulation in wheat grains, three treatments were set up in this study: no oyster shell

powder application (CK), oyster shell powder application at jointing stage and oyster shell powder application at heading stage. The effects of oyster shell powder application at different growth stages on Cd accumulation and distribution in wheat organs were analyzed. The results showed that the application of oyster shell powder at jointing stage and heading stage could significantly increase the 1 000-grain weight and shoot dry weight of wheat, and the

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42367002); 贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目[黔教合KY字(2022)165号]; 贵州省科技计划项目[黔科合基础-ZK(2022)一般325]

作者简介: 陈星旺(1998-), 男, 贵州黄平人, 硕士研究生, 主要从事重金属污染农用地安全利用研究。(E-mail) 1492836411@qq.com

通讯作者: 杨 华, (E-mail) yanghua102106@126.com

Cd content in wheat grains decreased by 24.9% and 37.7%, respectively. The application of oyster shell powder in the two periods had little effect on the total Cd uptake in the grains, and the distribution ratio of Cd in the grains increased slightly. The application of oyster shell powder at heading stage could more effectively promote the accumulation of Cd in the internodes under the ear. In conclusion, the heading stage was the key period for Cd accumulation in wheat grains. The application of oyster shell powder during this period could increase the retention of Cd in the internodes below the spike, reduce the stress of Cd on the growth of wheat plants, increase the yield of wheat grains, and lead to the decrease of Cd content in wheat grains.

**Key words:** wheat; oyster shell powder; cadmium content

镉(Cd)是自然环境中毒性最强的重金属元素之一,属于第 I 类致癌物质<sup>[1]</sup>。如果人体长期摄入大量 Cd 会引发骨质疏松、肾功能障碍、癌症等诸多疾病<sup>[2-3]</sup>。人体暴露 Cd 主要通过食物摄入、呼吸吸入以及皮肤接触等途径<sup>[4]</sup>。对于非吸烟人群来说,食物摄入是人体暴露 Cd 的最主要途径<sup>[5-6]</sup>。据 2014 年《全国土壤污染调查公告》显示,中国耕地土壤中重金属点位超标率为 19.4%,其中 Cd 位居所有污染物之首,污染面积占全国耕地总面积的 7%<sup>[7]</sup>。由于 Cd 在环境中具有普遍性和较强的移动性,土壤中 Cd 很容易被作物吸收,并在籽粒中积累,最终通过食物链对人体健康造成威胁<sup>[8]</sup>。小麦是中国三大粮食作物之一,2022 年小麦种植面积为  $2.35 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,总产量达  $1.377 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[9]</sup>。小麦对 Cd 较为敏感,尽管其根系吸收 Cd 的能力不如水稻,但其茎秆转运 Cd 的能力更强,籽粒富集的 Cd 更多<sup>[10]</sup>。大量研究结果表明小麦籽粒中 Cd 含量受土壤中 Cd 污染水平的影响。在 Cd 污染区域种植的小麦,其籽粒 Cd 含量极可能超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)所规定的限值。王怡雯等<sup>[11]</sup>通过对中国河北保定、河南新乡小麦主产区 50 份小麦籽粒样品进行分析,发现 55% 的样品 Cd 含量超标。Li 等<sup>[12]</sup>对贵州 102 份小麦籽粒样品 Cd 含量分析发现,小麦籽粒 Cd 含量为 0.012 mg/kg~0.573 mg/kg,超标率为 45.1%。肖冰等<sup>[13]</sup>对种植在受冶炼厂、污水灌溉、道路交通共同影响的耕地中小麦籽粒 Cd 含量进行分析,发现 76.6% 籽粒样品 Cd 含量超过国家食品安全标准所规定的限值。因此,降低小麦籽粒中 Cd 的积累,对保障粮食生产安全和人体健康有着重要的意义。

牡蛎(*Ostrea gigas thunberg*)是常见的海产经济贝类。2022 年,中国牡蛎产量高达  $6.2 \times 10^6 \text{ t}$ <sup>[14]</sup>。食用后丢弃的牡蛎壳不仅占用土地资源,同时其有机质降解会滋生大量病原微生物并产生恶臭气体,

从而造成严重的环境污染<sup>[14-16]</sup>。牡蛎壳由最外层的贝壳硬蛋白及内层的棱柱层和珍珠层构成<sup>[17]</sup>,两部分均以碳酸钙为主要成分<sup>[18]</sup>。同时,牡蛎壳还含有丰富的 Fe、Mn、Zn、Se 等微量元素、有机质和氨基酸<sup>[19]</sup>。近年来,利用牡蛎壳作为土壤调理剂实现作物增产和降低作物 Cd 富集的研究结果已有报道<sup>[20-22]</sup>。Tefera 等<sup>[23]</sup>研究结果表明,施用牡蛎壳粉能显著提高水稻的产量,大幅度降低水稻籽粒 Cd 含量。Yang 等<sup>[24]</sup>研究发现,施用 1 g/kg 牡蛎壳粉能提高水稻产量 19.8%,并降低水稻籽粒 Cd 含量 43.5%。

拔节期至成熟期是小麦籽粒 Cd 积累的关键时期<sup>[25]</sup>。然而,不同生育时期施用牡蛎壳粉对小麦籽粒 Cd 积累的影响机制尚不清楚。为此,本研究通过盆栽试验,分析拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉对小麦各组织中 Cd 含量及分配比例的影响,进一步明确施用牡蛎壳粉降低小麦籽粒 Cd 含量的敏感期及机制,旨在为 Cd 污染耕地的安全生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

从贵阳清镇市犀牛村水稻田采集 0~20 cm 表层土,土壤 pH 6.02、有机质含量 21.2 g/kg、阳离子交换容量 8.16 mmol/kg、总氮含量 0.72 g/kg、总磷含量 586.2 mg/kg、总钾含量 0.74 g/kg、全 Cd 含量 0.44 mg/kg。将采集到的土壤剔除石块和植物残渣,自然晾干后过 2 mm 筛,然后装入 30 个口径 26.5 cm、高 23.0 cm 的聚乙烯盆中。每盆装土 7.5 kg 后,加入 4.5 mg  $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$  并混合均匀,喷洒水分保持土壤 60% 含水率,自然老化 30 d 后施入基肥(尿素 0.25 g、过磷酸钙 0.60 g、硫酸钾 0.375 g)并进行小麦播种。供试小麦品种为 Cd 低积累品种尧麦 16<sup>[26]</sup>,种子由山西省农业科学院提供。每盆播种 6 粒挑选的饱满种子,于小麦两叶期定苗,每

盆保留 3 株健壮苗。播种后 30 d 和 50 d 每盆分别追施 0.25 g 尿素。

牡蛎壳粉购自福建玛塔生态科技有限公司,其 pH 8.5、 $\text{CaCO}_3$  含量 96.1% 以上,未检出 Cd。试验设不添加牡蛎壳粉(CK)、拔节期每盆添加 7.5 g 牡蛎壳粉(CdJ)和抽穗期每盆添加 7.5 g 牡蛎壳粉(CdH)3 个处理,每处理 10 盆。

小麦成熟后,每处理选择长势中等的 3 盆进行测定。用清水将小麦根系冲洗干净后,先测定株高,然后按图 1 将小麦植株进行器官分离,烘干后得到各器官干质量及籽粒千粒质量、地上部干质量、根干质量等农艺参数。考虑到供试小麦成熟期一般仅有 4 个伸长节间,倒 4 叶较小,研究中测定的器官主要有籽粒、颖壳(含穗轴)、4 个节间(含叶鞘)、3 张叶片(叶片 I、叶片 II、叶片 III)、3 个节(节 I、节 II、节 III)和根等。

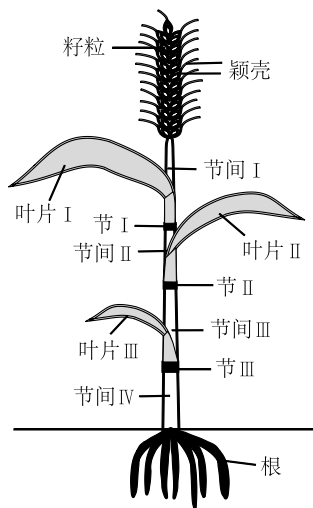


图 1 小麦各部位示意图

Fig.1 Schematic diagram of various parts of wheat

## 1.2 样品中金属元素含量的测定

将自然风干后的植物样品进行研磨粉碎后,准确称取 0.2 g 样品,加入 10 ml 体积比为 4:1 的纯硝酸( $\text{HNO}_3$ )与高氯酸( $\text{HClO}_4$ )混合溶液,静置 12 h 后于电热板上消解。用 NexION 2000 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司产品)测定样品中 Cd 的含量,用 GGX-800 型原子吸收分光光度计(北京海光仪器有限公司产品)测定样品中 Ca、Fe 和 Zn 的含量。

## 1.3 数据处理

测得各器官干质量和 Cd 含量后,根据植株各

器官的 Cd 质量与植株总 Cd 质量比得到各器官 Cd 分配比例;采用加权法计算小麦茎鞘和叶片平均 Cd 含量<sup>[27]</sup>:

$$\text{茎鞘平均 Cd 含量} = \frac{\sum_{i=1}^4 CdI_i \times WI_i + \sum_{i=1}^3 CdN_i \times WN_i}{\sum_{i=1}^4 WI_i + \sum_{i=1}^3 WN_i}$$

$$\text{叶片平均 Cd 含量} = \frac{\sum_{i=1}^3 CdL_i \times WL_i}{\sum_{i=1}^3 WL_i}$$

式中, $WI_i$ 、 $WN_i$ 、 $WL_i$  分别为第  $i$  位的节间干质量、节干质量、叶片干质量, $CdI_i$ 、 $CdN_i$ 、 $CdL_i$  分别为第  $i$  位的节间、节、叶片 Cd 含量。

采用 SPSS 22.0 进行数据处理及统计分析,利用 Duncan's 检验分析不同处理差异显著性,利用 OriginPro 2022 进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育期施用牡蛎壳粉对小麦农艺性状及 Cd 吸收总量的影响

不同生育期施用牡蛎壳粉对小麦成熟期农艺性状及 Cd 吸收总量的影响如表 1 所示。从表中可以看出,与对照(CK)相比,拔节期施用牡蛎壳粉处理(CdJ)和抽穗期施用牡蛎壳粉处理(CdH)的小麦籽粒千粒质量分别增加 11.4% 和 13.7%,地上部干质量分别增加 35.5% 和 63.3%,差异显著。且抽穗期施用牡蛎壳粉处理的地上部干质量比拔节期施用牡蛎壳粉处理增加更为显著。而施用牡蛎壳粉对株高和根部干质量均没有显著影响。与 CK 相比,拔节期施用牡蛎壳粉处理和抽穗期施用牡蛎壳粉处理小麦 Cd 吸收总量略有增加,但差异均未达到显著水平。

### 2.2 小麦各器官中 Cd 含量

不同生育期施用牡蛎壳粉对小麦各器官中 Cd 含量的影响如图 2 所示。与 CK 相比,拔节期施用牡蛎壳粉和抽穗期施用牡蛎壳粉均能降低根、叶片、颖壳和籽粒中的 Cd 含量(图 2A)。拔节期施用牡蛎壳粉处理的小麦根、叶片、颖壳和籽粒中 Cd 含量分别比 CK 降低 25.4%、16.5%、28.5%、24.9%;抽穗期施用牡蛎壳粉处理的小麦根、颖壳和籽粒中 Cd 含量减少效果比拔节期更为显著,分别比 CK 降低 42.2%、40.3%、37.7%。与 CK 相比,抽穗期施用牡蛎壳粉处理的小麦茎中 Cd 含量得到了显著增加,

增加量达 27.4%。

3 个处理的小麦穗下节间(节间 I)中 Cd 含量均高于其他节间(图 2B)。与 CK 相比,拔节期施用牡蛎壳粉处理对各节间 Cd 含量没有显著影响,而抽穗期施用牡蛎壳粉处理能显著增加穗下节间的

Cd 含量,降低节间 II 和节间 III 的 Cd 含量,降幅分别为 30.1%和 43.2%。3 个处理的小麦倒 3 叶叶片(叶片 III)和倒 1 节(节 I)的 Cd 含量均表现为最高,但施用牡蛎壳粉处理对各叶片和各节的 Cd 含量均没有显著影响。

表 1 不同处理对小麦成熟期农艺性状及 Cd 吸收总量的影响

Table 1 Effects of different treatments on agronomic traits and total Cd absorption of wheat at maturity stage

处理	指标				
	株高 (cm)	千粒质量 (g)	根部干质量 (g, 1 盆)	地上部干质量 (g, 1 盆)	Cd 总吸收量 ( $\mu\text{g}$ , 1 盆)
CK	50.82 $\pm$ 1.04a	40.8 $\pm$ 1.27b	2.52 $\pm$ 0.06a	10.11 $\pm$ 0.72c	17.79 $\pm$ 1.41a
CdJ	51.72 $\pm$ 2.68a	45.4 $\pm$ 0.53a	2.56 $\pm$ 0.53a	13.70 $\pm$ 1.86b	19.14 $\pm$ 2.37a
CdH	53.70 $\pm$ 1.67a	46.3 $\pm$ 1.05a	2.60 $\pm$ 0.16a	16.51 $\pm$ 0.30a	21.65 $\pm$ 3.44a

CK、CdJ、CdH 分别为不施用牡蛎壳粉对照、拔节期施用牡蛎壳粉和抽穗期施用牡蛎壳粉处理;同一列后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

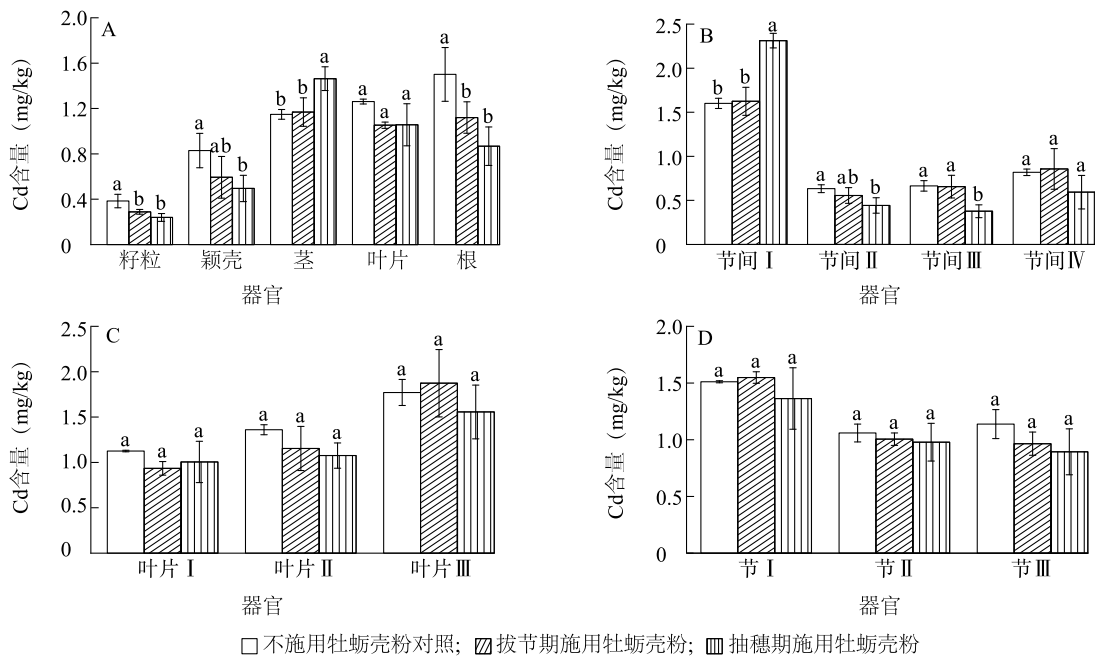


图 2 不同处理对小麦各器官 Cd 含量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on Cd content in different organs of wheat

### 2.3 不同处理下小麦各器官 Cd 分布特征

不同处理对小麦各器官中 Cd 分布的影响如图 3 所示。与 CK 相比,拔节期施用牡蛎壳粉处理和抽穗期施用牡蛎壳粉处理均降低了 Cd 在根和颖壳的分配比例,其中根由 21.4% 分别降至 14.7% 和 11.4%,颖壳由 23.6% 分别降至 19.0% 和 18.4%。拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉处理均使节 Cd 分配比例有所增加,其中倒 1 节增加最为明显,且抽穗期

施用牡蛎壳粉处理比拔节期施用牡蛎壳粉处理增加效果更显著。与 CK 相比,拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉处理使叶片 II、叶片 III Cd 分配比例有不同程度的降低,但叶片 I Cd 分配比例有略微增加。拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉处理增加了节间中 Cd 的分布(除节间 IV 外),其中穗下节间 Cd 分配系数分别由 11.7% 增加至 17.9% 和 23.6%,籽粒 Cd 分配比例略微增加。



## 2.4 小麦各器官中 Ca、Zn、Fe 含量

不同生育期施用牡蛎壳粉处理后,小麦各器官中 Ca、Zn、Fe 含量的变化如表 2 所示。与 CK 相比,拔节期施用牡蛎壳粉处理能显著增加根部 Ca 含量,增加约 28.2%;抽穗期施用牡蛎壳粉处理能显著增加倒 1 叶(叶片 I)Ca 含量,增量为 58.1%,而其他器官的 Ca 含量虽有增加或减少,但均未达到显著水平。拔节期施用牡蛎壳粉处理各组织 Zn 含量与 CK 基本无显著差异,但抽穗期施用牡蛎壳粉处理穗下节间(节间 I)、倒 2 叶(叶片 II)及根的 Zn 含量显著下降,分别减少 56.7%、14.8%、45.3%;而倒 1 节(节 I)的 Zn 含量显著增加 56.9%,其他器官的 Zn 含量与 CK 基本无差异。与 CK 相比,抽穗期施用牡蛎壳粉处理倒 3 节间(节间 III)Fe 含量显著降低,减少量为 81.0%。其他处理的 Fe 含量与 CK 差异不大。但值得注意的是,抽穗期施用牡蛎壳粉处理,穗下节间(节间 I)的 Fe 含量比拔节期施用牡蛎壳粉处理显著减少。

表 2 不同处理小麦各器官中 Ca、Zn、Fe 等元素的含量

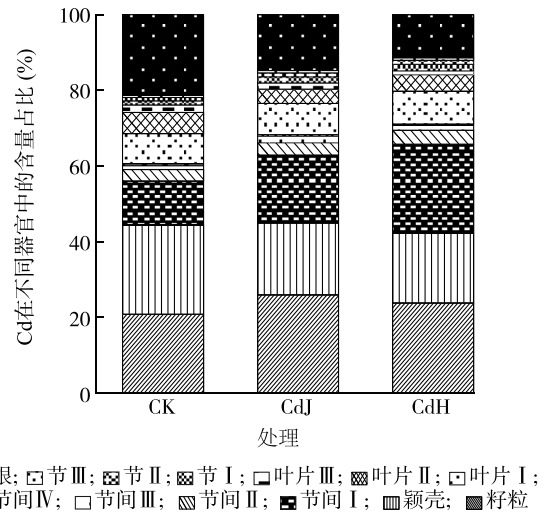
Table 2 Contents of Ca, Zn, Fe in different organs of wheat under different treatments

组织	Ca 含量 (mg/kg)			Zn 含量 (mg/kg)			Fe 含量 (mg/kg)		
	CK	CdJ	CdH	CK	CdJ	CdH	CK	CdJ	CdH
籽粒	126.93a	180.52a	201.86a	16.87a	12.58a	18.69a	98.96a	91.31a	73.06a
颖壳	136.10a	64.96a	91.45a	20.95a	19.32a	15.78a	129.54a	182.92a	136.77a
节间 I	875.04a	835.17a	794.68a	10.01a	8.03ab	4.34b	29.74ab	30.61a	14.54b
节间 II	203.78a	295.87a	177.65a	1.73a	1.67a	2.20a	29.24a	19.36a	44.49a
节间 III	223.31a	396.52a	221.06a	3.65a	3.49a	1.39a	83.89a	42.87ab	15.93b
节间 IV	367.52a	332.47a	303.84a	7.25a	9.99a	7.66a	64.16a	72.74a	43.70a
叶片 I	1 368.42b	1 993.89ab	2 162.90a	20.70a	18.66a	18.15a	162.28a	209.55a	211.80a
叶片 II	1 678.93a	1 953.32a	1 483.82a	21.21a	21.51a	18.08b	374.65a	387.84a	376.34a
叶片 III	2 122.51a	2 855.99a	2 850.73a	25.92a	25.53a	28.92a	1 804.64a	2 171.48a	2 405.84a
节 I	923.79a	900.27a	860.32a	15.87b	17.53b	24.90a	35.40a	78.13a	72.89a
节 II	652.26a	567.32a	630.14a	9.78a	10.29a	5.88a	42.61a	51.33a	56.57a
节 III	164.34a	193.56a	214.23a	5.55a	5.83a	8.62a	253.19a	269.66a	337.15a
根	265.90b	340.92a	236.99b	17.70a	19.07a	9.70b	4 490.47a	4 570.59a	4 058.59a

CK、CdJ、CdH 分别为不施用牡蛎壳粉对照、拔节期施用牡蛎壳粉和抽穗期施用牡蛎壳粉处理;不同小写字母表示同一器官相同元素不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

大量研究结果证实,牡蛎壳粉具有促进作物增产的功能。例如,罗华汉等<sup>[28]</sup>发现水稻产量随着牡



CK、CdJ、CdH 分别为不施用牡蛎壳粉对照、拔节期施用牡蛎壳粉和抽穗期施用牡蛎壳粉处理。

图 3 不同处理对小麦各器官中 Cd 分布的影响

Fig.3 Effects of different treatments on Cd distribution in different organs of wheat

蛎壳粉施用量的增加而增产 14.8%~22.9%。Tefera 等<sup>[23]</sup>施用牡蛎壳粉促进高 Cd 积累型水稻增产 21%,低 Cd 积累型水稻增产 34%。严建辉<sup>[29]</sup>研究发现,在黄泥田中施用牡蛎壳粉土壤调理剂,花生产

量及各项农艺性状均明显增加。本研究结果表明,拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉处理均能促进小麦千粒质量增加。牡蛎壳粉作为一种生物质材料,不仅能为植物生长提供所需的营养物质,同时还能提高土壤肥力<sup>[24,30-31]</sup>。因此,牡蛎壳粉促进小麦千粒质量增加的原因可能在于其矿质元素、多糖、氨基酸及蛋白质等营养物质被作物吸收利用。牡蛎壳粉作为碱性的土壤改良剂,能够显著缓和土壤的酸化程度<sup>[29]</sup>,并通过调节土壤 pH 及其他理化性质改善土壤微生物群落结构<sup>[32]</sup>。另外,施用牡蛎壳粉还可以使土壤保持较好的透气性,有效促进植物对土壤养分的吸收,进而提高作物产量与品质<sup>[33]</sup>。本试验还证实抽穗期施用牡蛎壳粉比拔节期施用更能提高小麦产量,这可能是由于灌浆期是小麦籽粒形成的关键时期,在抽穗期施用牡蛎壳粉,能为小麦籽粒的形成提供大量营养物质,进而促进籽粒中淀粉、蛋白质、纤维素等化合物的合成<sup>[34]</sup>。

以往的研究结果表明施用牡蛎壳粉可以显著降低作物中 Cd 含量<sup>[21,35]</sup>。本研究结果也证实施用牡蛎壳粉能有效降低小麦各器官中的 Cd 含量。牡蛎壳粉主要成分是  $\text{CaCO}_3$ ,其可能与  $\text{Cd}^{2+}$  发生沉淀/共沉淀和络合反应,降低土壤中可溶态 Cd 的含量<sup>[36]</sup>。Yang 等<sup>[24]</sup>研究发现,施用牡蛎壳粉能增加土壤中可氧化态和残渣态 Cd 含量,提高土壤 pH 值,降低可提取态和可还原态 Cd 含量,同时施用牡蛎壳粉能下调水稻根系中 *OsNramp5*、*OsNramp1*、*OsIRT1* 和 *OsHMA2* 等 Cd 吸收和转运相关基因的表达水平<sup>[24]</sup>,从而降低 Cd 在水稻籽粒中的积累。因此,牡蛎壳粉降低 Cd 在小麦籽粒中的积累,一方面可能归因于其能降低土壤中 Cd 的生物有效性,另一方面可能归因于其抑制了小麦吸收和转运 Cd 相关基因的表达。

韧皮部的转运是小麦籽粒 Cd 积累的主要来源<sup>[37]</sup>。节是小麦阻控 Cd 向上运输的重要部位,其中节 I 的阻隔效果最好<sup>[38]</sup>。本试验也证实,无论是否施用牡蛎壳粉处理,节 I 中 Cd 含量远高于下部节间及节,表明节 I 对 Cd 有较强的滞留作用。同时,抽穗期施用牡蛎壳粉处理能显著增加 Cd 在节 I 的分配比例。Uraguchi 等<sup>[39]</sup>研究发现水稻 *OsLCT1* 基因与韧皮部 Cd 转运相关,且主要在节 I 表达,水稻生殖生长阶段比营养生长阶段的表达量要高。Clemens 等<sup>[40]</sup>通过敲除 *OsLCT1*,发现水稻籽粒

中 Cd 含量能降低 50%。因此,通过调控小麦 *TaLCT1* 基因的表达,下降 Cd 的转运水平是降低小麦籽粒 Cd 积累的重要途径。

拔节期至成熟期是小麦 Cd 吸收和转运的关键生育期<sup>[25]</sup>。张世杰等<sup>[41]</sup>研究证实,拔节期和抽穗期施用硅肥能有效降低小麦籽粒中 Cd 的积累。本研究结果表明,拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉小麦籽粒总 Cd 吸收量并没有减少,籽粒中 Cd 的分配比例亦略有增加,但由于拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉能增加籽粒千粒重和地上部干质量,进而使得籽粒中 Cd 含量显著减少。因此,施用牡蛎壳粉能减轻 Cd 胁迫,促进小麦植株生长,从而导致小麦籽粒 Cd 含量降低。小麦植株中各器官 Cd 的积累和分配是决定籽粒 Cd 含量的重要因素<sup>[42-44]</sup>。史高玲等<sup>[45]</sup>研究发现小麦籽粒 Cd 的积累与茎秆对 Cd 的滞留有关,节间长度越长、生物量越大,其滞留 Cd 的量越多,因而导致转运到籽粒中的 Cd 越少。本研究亦发现抽穗期施用牡蛎壳粉能有效增加 Cd 在穗下节间的积累。即抽穗期施用牡蛎壳粉能阻碍 Cd 向穗部的转移。此外,Fujimaki 等<sup>[46]</sup>研究发现,Cd 能与木质部中有机化合物结合,从而导致植物液流速度的减缓,造成 Cd 在茎和叶中积累。本研究对这方面的机制还有待进一步分析。

## 4 结 论

Cd 胁迫环境中,拔节期和抽穗期施用牡蛎壳粉能显著促进小麦植株生长,虽然小麦籽粒 Cd 的吸收总量没有显著变化、分配比例略有增加,但小麦千粒质量和地上部生物量的增加更为显著,从而使得小麦籽粒的 Cd 含量得到下降,且抽穗期施用牡蛎壳粉效果更佳。

## 参考文献:

- [1] IARC. Agents classified by the IARC monographs [EB/OL]. [2023-12-01]. <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>.
- [2] ZHANG H, REYNOLDS M. Cadmium exposure in living organisms; a short review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 678:761-767.
- [3] GUNADASA S G, TIGHE M K, WILSON S C. Arsenic and cadmium and associated risk in farm soils of the dry zone Sri Lanka where chronic Kidney disease of unknown etiology (CKDu) is Endemic[J]. Exposure and Health, 2021, 14(3):543-556.
- [4] JAISHANKAR M, TSETEN T, ANBALAGAN N, et al. Toxicity,

- mechanism and health effects of some heavy metals[J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2014, 7(2): 60-72.
- [5] CLEMENS S. Safer food through plant science: reducing toxic element accumulation in crops[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(20): 5537-5557.
- [6] ZHAO D, WANG P, ZHAO F J. Dietary cadmium exposure, risks to human health and mitigation strategies[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2023, 53(8): 939-963.
- [7] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 国土资源通讯, 2014(8): 26-29.
- [8] ZHOU J, GAO M, CUI H B, et al. Influence of silicon and selenium and contribution of the node to cadmium allocation and toxicity in rice[J]. *Acs Agricultural Science & Technology*, 2021, 1(5): 550-557.
- [9] 国家统计局. 2023 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [10] YANG J L, CANG L, WANG X, et al. Field survey study on the difference in Cd accumulation capacity of rice and wheat in rice-wheat rotation area[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 2082-2092.
- [11] 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.
- [12] LI X X, ZHOU L X, ZHANG C, et al. Spatial distribution and risk assessment of fluorine and cadmium in rice, corn, and wheat grains in most karst regions of Guizhou province, China[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1014147.
- [13] 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铅污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2869-2877.
- [14] 智研咨询. 2023 年中国牡蛎产业供需及进出口现状: 养殖面积和产量大幅度增长[EB/OL]. [2023-11-27]. <https://www.chyxx.com/industry/1165076.html>.
- [15] 刘超, 陈素华, 杨周驰昊, 等. 基于牡蛎壳制备水下超疏油海绵及其油水分离应用[J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(3): 77-85.
- [16] CHUNG K H, JUNG S C, PARK B G. Eco-friendly deicer prepared from waste oyster shells and its deicing properties with metal corrosion[J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(21): 3360-3368.
- [17] HA S, LEE J W, CHOI S H, et al. Calcination characteristics of oyster shells and their comparison with limestone from the perspective of waste recycling[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019, 21(5): 1075-1084.
- [18] SILVA T H, MESQUITA-GUIMARÃES J, HENRIQUES B, et al. The potential use of oyster shell waste in new value-added by-product[J]. *Resources*, 2019, 8(1): 1-15.
- [19] 代银平, 王雪莹, 叶伟宗, 等. 贝壳废弃物的资源化利用研究[J]. *资源开发与市场*, 2017, 33(2): 203-208.
- [20] LEE C H, LEE D K, ALI M A, et al. Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials[J]. *Waste Management*, 2008, 28(12): 2702-2708.
- [21] HONG C O, KIM S Y, GUTIERREZ J, et al. Comparison of oyster shell and calcium hydroxide as liming materials for immobilizing cadmium in upland soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(5): 491-498.
- [22] ZENG T, GUO J, LI Y, et al. Oyster shell amendment reduces cadmium and lead availability and uptake by rice in contaminated paddy soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(29): 44582-44596.
- [23] TEFERA W, SEIFU W, TIAN S. Coconut shell-derived biochar and oyster shell powder alter rhizosphere soil biochemical properties and Cd uptake of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 20(10): 10835-10846.
- [24] YANG H, CHEN X W, XIAO C X, et al. Application of oyster shell powder reduces cadmium accumulation by inhibiting the expression of genes responsible for cadmium uptake and translocation in rice[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2023, 30(41): 93519-93530.
- [25] 姚澄, 周天宇, 易超, 等. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(9): 1955-1965.
- [26] 肖亚涛. 冬小麦籽粒镉低积累品种的生产特性及其低积累机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [27] 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.
- [28] 罗华汉, 柳开楼, 余跑兰, 等. 牡蛎壳粉对水稻产量和土壤重金属钝化的影响[J]. *中国稻米*, 2016, 22(3): 30-33.
- [29] 严建辉. 牡蛎壳土壤调理剂对黄泥田花生产量及土壤酸化改良的影响[J]. *农学学报*, 2019, 9(11): 17-20.
- [30] 林荣晓, 苏永昌, 刘淑集, 等. 牡蛎壳在水质改良中的应用[J]. *福建水产*, 2012, 34(5): 428-431.
- [31] 王淇. 牡蛎壳废弃物综合利用探讨[J]. *科技资讯*, 2018, 16(21): 107-108.
- [32] HUANG H Y, LIU H K, ZHANG R F, et al. Effect of slow-released biomass alkaline amendments oyster shell on microecology in acidic heavy metal contaminated paddy soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115683.
- [33] 刘顺梅. 牡蛎壳土壤调理剂对北沙参生理生化影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [34] RUAN Y L. Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2014, 65(1): 33-67.
- [35] 曾涛, 郭京霞, 王果. 牡蛎壳粉对水稻吸收累积镉的影响[C]//中国土壤学会. 2019 年中国土壤学会土壤环境专业委员会、土壤化学专业委员会联合学术研讨会论文摘要集. 北京: 中国土壤学会, 2019: 23.
- [36] ZHENG X K, ZOU M Y, ZHANG B W, et al. Remediation of Cd-, Pb-, Cu-, and Zn-contaminated soil using cow bone meal

- and oyster shell meal[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 229: 113073.
- [37] TANAKA K, FUJIMAKI S, FUJIWARA T, et al. Quantitative estimation of the contribution of the phloem in cadmium transport to grains in rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(1): 72-77.
- [38] 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(5): 246-256.
- [39] URAGUCHI S, KAMIYA T, SAKAMOTO T, et al. Low-affinity cation transporter (OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(52): 20959-20964.
- [40] CLEMENS S, MA J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2016, 67(1): 489-512.
- [41] 张世杰, 孙洪欣, 薛培英, 等. 叶面施硅时期对冬小麦镉铅砷累积的阻控效应研究[J]. *河北农业大学学报*, 2018, 41(3): 1-6, 36.
- [42] 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.
- [43] YAN B F, NGUYEN C, POKROVSKY O S, et al. Contribution of remobilization to the loading of cadmium in durum wheat grains: impact of post-anthesis nitrogen supply[J]. *Plant and Soil*, 2018, 424(1/2): 591-606.
- [44] 任超, 任彧仲, 王浩, 等. 镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1606-1619.
- [45] 史高玲, 马鸿翔, 娄来清, 等. 小麦株高和茎秆不同部位砷镉磷含量与籽粒砷镉磷含量的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(1): 8-15.
- [46] FUJIMAKI S, SUZUI N, ISHIOKA N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. *Plant Physiology*, 2010, 152(4): 1796-1806.

(责任编辑:石春林)