

引用格式: 高广贤, 赵宝平, 刘义强, 等. 不同有机肥配施对小麦和燕麦镉积累、分配及转运的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(5): 0706-0715.
[GAO G X, ZHAO B P, LIU Y Q, et al. Effects of combined application of different organic fertilizers on cadmium accumulation, distribution, and transport in wheat and oat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(5): 0706-0715.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20220839

不同有机肥配施对小麦和燕麦镉积累、分配及转运的影响

高广贤¹, 赵宝平^{1*}, 刘义强¹, 鲁瑞英³, 王永宁², 郭晓宇²

(1 内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019; 2 内蒙古农牧业生态与资源保护中心, 呼和浩特 010000; 3 巴彦淖尔市耕地质量监测保护中心, 内蒙古巴彦淖尔 015000)

摘要 【目的】农田土壤镉污染严重威胁农产品质量安全, 探讨化肥减量同时配施不同有机肥条件下小麦和燕麦各器官镉积累、分配及转运特征, 对于指导作物合理施肥、保证农产品安全具有重要意义。【方法】在化肥施用减量 20% 基础上, 设厩肥 30 000 kg/hm² (AM)、生物有机肥 600 kg/hm² (BF)、厩肥 30 000 kg/hm² + 生物有机肥 600 kg/hm² (AM+BF) 及化肥正常施用量 (CK) 4 个施肥处理, 研究不同有机肥处理对小麦和燕麦镉积累、分配、转运特征的影响。【结果】(1) 与 CK 相比, 不同有机肥配施处理可使小麦和燕麦生物量增加 6.78%~11.00%; 同时可使各器官镉含量总体降低, 其中籽粒镉含量降低 11.76%~47.06%。(2) 各有机肥配施处理使各器官镉富集系数总体降低, 籽粒富集系数降低 0~38.46%; BF、AM+BF 处理根、茎、叶、穗镉向籽粒的转运系数分别降低 16.67%~42.86%、15.79%~42.03%、0~56.10%、6.82%~22.06%。(3) 燕麦灌浆期后茎秆镉含量下降伴随着籽粒镉含量上升; 燕麦抽穗期后各器官镉向籽粒的转移量、转移率、贡献率均以茎秆为最高。【结论】化肥减量配施有机肥可降低作物籽粒镉含量、富集系数和转运系数, 且对燕麦籽粒降镉效果优于小麦; 燕麦抽穗期后茎秆转运的镉是籽粒镉积累的主要来源。

关键词 小麦; 燕麦; 镉; 富集; 转运; 有机肥

中图分类号 Q945.78; S512.1; S512.6 文献标志码 A

Effects of combined application of different organic fertilizers on cadmium accumulation, distribution, and transport in wheat and oat

GAO Guangxian¹, ZHAO Baoping^{1*}, LIU Yiqiang¹,
LU Ruiying³, WANG Yongning², GUO Xiaoyu²

(1 College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2 Inner Mongolia Agriculture and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection Center, Hohhot 010000, China; 3 Bayannur Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract [Objective] Cadmium pollution in farmland soil poses a serious threat to the quality and safety of agricultural products. To explore the characteristics of cadmium accumulation, distribution, and transport in various organs of wheat and oat under different conditions of reduced chemical fertilizer and organic fertilizer application is of great importance in guiding appropriate fertilizer application on crops and ensuring

收稿日期: 2022-10-02; 修改稿收到日期: 2024-01-14

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-07); 内蒙古科技成果转化项目 (2020CG0032)

作者简介: 高广贤 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤与产地环境污染管控与修复研究。E-mail: 457573056@qq.com

* 通信作者: 赵宝平, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤与产地环境污染管控与修复研究。E-mail: zhaobaoping82@163.com

the safety of agricultural products. [Methods] Based on a 20% reduction in fertilizer application, four fertilization treatments were set up: Stable fertilizer 30 000 kg/hm² (AM), bioorganic fertilizer 600 kg/hm² (BF), stable fertilizer 30 000 kg/hm² + bioorganic fertilizer 600 kg/hm² (AM+BF), and normal fertilizer application (CK). The effects of the above four different organic fertilizer treatments on cadmium accumulation, distribution, and transport in wheat and oat were studied. [Results] (1) Compared with CK, different organic fertilizer combinations increased the biomass of wheat and oat by 6.78%–11.00%. At the same time, it reduced the overall cadmium content in various organs, with a decrease of 11.76%–47.06% in grain cadmium content. (2) The combined application of various organic fertilizers resulted in an overall decrease in the cadmium enrichment coefficient of various organs, with a decrease of 0–38.46% in the grain enrichment coefficient. The transport coefficients of cadmium from roots, stems, leaves, and panicles to grains were decreased by 16.67%–42.86%, 15.79%–42.03%, 0–56.10%, and 6.82%–22.06%, respectively in BF and AM+BF treatments. (3) The decrease in stem cadmium content after oat filling period was accompanied by an increase in grain cadmium content. The transfer amount, transfer rate, and contribution rate of cadmium from various organs to grains in oats after heading stage were the highest in the stem. [Conclusion] Reducing the amount of chemical fertilizers combined with organic fertilizers could reduce cadmium content, enrichment coefficient, and transport coefficient in crop grains, and the cadmium reduction effect on oat grains was better than that on wheat. The cadmium transported from the stem after the heading stage of oats was the main source of grain cadmium accumulation.

Key words wheat; oat; cadmium; enrichment; transport; organic fertilizer

农田土壤重金属污染严重威胁农产品质量和农田生态系统健康^[1]。中国南北方均存在不同程度的耕地土壤重金属 Cd 污染问题,不少省份和地区的土壤镉含量已经超过中国土壤环境质量标准三级标准^[2]。镉污染农田土壤面积已达 2 000 万 hm²,约占总耕地面积的 1/6,如由土壤镉超标而引起的“镉米”等事件也多有报道^[3],引起民众对土壤重金属污染的极大关注。土壤重金属污染不仅导致土壤生产力下降,而且会直接或间接危害人畜健康,对生态系统安全构成潜在威胁^[4]。如何调控治理镉污染,减轻或消除污染土壤对农产品品质安全的影响,进而减少其对人类的危害,实现农业可持续发展,是关系国计民生的重要课题。在化肥施用的基础上,开展不同有机肥配施措施下作物对重金属 Cd 吸收的研究对于指导作物合理施肥、保证农作物安全等方面均具有十分重要的意义。目前,有机肥对作物镉吸收的影响已有不少研究。有机肥的施用会减少作物籽粒镉吸收,阻止镉的迁移转运^[5];有机质施用于稻田后,可降低水稻对镉的积累^[6-7];有机肥对降低作物镉积累效果因有机肥种类而异,外源添加低浓度镉时施用猪粪、鸡粪较好,添加高浓度镉时施用蚯蚓粪效果更好^[8];鸡粪源有机肥施用对小白菜地上部分富集镉的能力和小白菜对镉的转移具有一定的抑制作用^[9]。迄今,河套灌区作为中国重要的作物主产区,区域内存在有色金属矿物开采,致使周边农田发生土壤重金属 Cd 超标及土壤盐渍化问题。目前基本农田需要保障,农

产品安全需要保证,土壤的安全利用至关重要,有关不同有机配施用对盐碱地镉污染农田麦类作物镉吸收和转运的影响情况还不明确。因此,本研究以小麦和燕麦为试材,探讨不同有机肥与化肥配施条件下小麦和燕麦镉积累、分配及转运特征的变化,确定最佳有机肥配施措施,以期为进一步完善化肥减量配施不同有机肥的施肥模式,以及有机肥配施促进作物安全生产提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试作物为 2020 年春小麦品种‘宁春 4 号’,生育期 90 d 左右;2021 年为内蒙古自治区主栽燕麦品种‘蒙燕 1 号’,生育期 90 d 左右,其籽粒、饲草的 Cd 积累量都较低。供试肥料包括磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)、复合肥(N 16%, P₂O₅ 16%, K₂O 16%)、生物有机肥(BF,有效活菌数≥2×10⁸ 个/g,黄腐酸≥10%,高活性有机质≥45%,pH 7.57)、厩肥(羊粪,AM,有机质≥25%,pH 7.34)。

1.2 试验地概况

试验于 2020—2021 年在内蒙古巴彦淖尔市某地进行,地处中温带,属高原大陆性气候,地势南高北低,年降水量 187.4 mm,年均气温 14.3℃,土壤类型为呈碱性的棕钙土,试验田由于有色金属矿山开采导致土壤重金属镉超标,2 年土壤全镉含量分别为 3.59 mg/kg 和 1.63 mg/kg,土壤镉污染等级高于国家环

境质量三级标准。试验地土壤养分概况:pH 7.9,阳离子交换量 17.7 cmol/kg,有机质 24.9 g/kg,全氮 1.4 g/kg,全磷 1.04 g/kg,全钾 10.7 g/kg,碱解氮 135 mg/kg,有效磷 41.8 mg/kg,速效钾 275.3 mg/kg。

1.3 试验设计

试验在化肥施用减量 20% 基础上,设置厩肥(羊粪,AM)、生物有机肥(BF)、厩肥+生物有机肥(AM+BF)以及化肥正常施用(CK)共 4 个处理,3 次重复,12 个小区,小区面积 50 m²,小麦试验与燕

麦试验在同一块试验地进行。2020 年小麦于 3 月 25 日播种,7 月 18 日收获,2021 年燕麦于 3 月 19 日播种,7 月 19 日收获,2 个作物整个生育期灌水 3 次,其他除草等措施均参照当地农民习惯进行。有机肥和化肥在播种前做底肥一次性施入,出苗后再无任何施肥;化肥及有机肥施用量如表 1 所示,尿素、磷酸二胺、复合肥中镉含量分别为 0.05 mg/kg、0.17 mg/kg、0.28 mg/kg,均未超标,生物有机肥及羊厩肥中未检测出镉。

表 1 各处理的肥料施用量

Table 1 Fertilizer application amount of each treatment

处理 Treatment	处理方式 Treatment method	化肥用量 Fertilizer dosage (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	有机肥用量 Amount of organic fertilizer
CK	100%化肥 100% fertilizer	475-260-45	0
BF	化肥减量 20%+生物有机肥 20% deduction of chemical fertilizer+bioorganic fertilizer	380-208-36	600
AM	化肥减量 20%+厩肥 20% deduction of chemical fertilizer+manure	380-208-36	30 000
AM+BF	化肥减量 20%+厩肥+生物有机肥 20% deduction of chemical fertilizer+manure+bioorganic fertilizer	380-208-36	30000+600

1.4 测定项目及方法

小麦于成熟期取样,燕麦于抽穗期到成熟期取样 6 次,每小区随机选取 20 株均匀一致的植株,将 4 个植株根、茎、叶、穗和籽粒均采用人工分离。其中,根部用剪刀分离,用自来水冲洗至表面无泥土和杂质,然后再用去离子水反复冲洗 3~5 次,用吸水纸将样品表面水分吸干。分离后的各器官分别放入纸袋中,于 105 °C 烘箱中杀青 30 min,85 °C 下烘干,称质量后用不锈钢粉碎机粉碎备用。

采用微波辅助消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法,测定抽穗期、灌浆期和成熟期根、茎、叶、穗和籽粒的 Cd 含量^[10],计算重金属富集系数和转移系数^[11]以及相关指标^[12-13]。

$$R_{CF} = C_o / C_s \quad (1)$$

$$R_{TF} = C_{ag} / C_{ug} \quad (2)$$

$$A_o = C_o m_{od} \quad (3)$$

$$R_{od} = A_o / A_p \times 100\% \quad (4)$$

$$T_o = A_{of} - A_{om} \quad (5)$$

$$R_{ot} = T_o / A_{of} \times 100\% \quad (6)$$

$$R_{oc} = T_o / A_{mk} \times 100\% \quad (7)$$

式中: R_{CF} 为富集系数; C_o 和 C_s 分别为器官和土壤中 Cd 含量; R_{TF} 为转运系数; C_{ag} 和 C_{ug} 分别为植物地上部和地下部 Cd 含量; A_o 为器官 Cd 累积量; m_{od} 为器官干物质质量; R_{od} 为器官的 Cd 分配比例; A_p 为单茎 Cd 累积量; T_o 为器官 Cd 转移量; A_{of} 和 A_{om} 分别为开

花期和成熟期营养器官 Cd 累积量; R_{ot} 为器官 Cd 转移率; R_{oc} 为器官 Cd 贡献率; A_{mk} 为成熟期籽粒 Cd 累积量。

采用 Excel 2019 进行整理与绘制图表,SPSS 25.0 进行显著性和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥配施对小麦和燕麦各器官生物量的影响

各有机肥配施处理小麦和燕麦植株各器官生物量和总生物量均比对照(CK)不同程度提高(表 2)。其中,BF、AM、AM+BF 处理的小麦植株各器官生物量和总生物量多与 CK 差异显著,并多以 BF、AM+BF 处理较高,而 AM 处理相对较低,如三者茎生物量分别显著增加 12.74%、6.33%、10.12%,籽粒生物量分别显著增加 7.29%、5.76%、9.77%,总生物量分别显著增加 11.00%、6.89%、10.77%。BF、AM、AM+BF 处理燕麦籽粒生物量比 CK 分别显著增加 6.98%、8.01%、10.36%,总生物量分别显著提高 6.78%、10.96%、7.03% ($P < 0.05$),AM+BF 处理根、叶生物量及 BF 处理茎生物量也比 CK 显著增加,而各处理穗颖生物量则无显著变化。可见,有机肥配施可增加小麦、燕麦各器官生物量及总生物量,其中处理 BF、AM+BF 表现较优。

表 2 有机肥配施处理下小麦、燕麦成熟期单株器官生物量及总生物量

Table 2 Organ biomass and total biomass of individual plant of wheat and oat with different organic fertilizer applications at mature stage

作物 Crop	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	穗颖 Spike	籽粒 Grain	总生物量 Total biomass
小麦 Wheat	CK	0.35±0.02c	1.15±0.05c	0.78±0.06b	0.64±0.02c	1.43±0.06b	4.35±0.18c
	BF	0.43±0.01a	1.29±0.03a	0.81±0.03ab	0.76±0.04a	1.54±0.05a	4.82±0.26a
	AM	0.37±0.03b	1.22±0.06b	0.82±0.05a	0.72±0.06b	1.52±0.09a	4.64±0.45b
	AM+BF	0.37±0.02b	1.26±0.04a	0.83±0.04a	0.78±0.06a	1.57±0.05a	4.81±0.35a
燕麦 Oat	CK	0.25±0.01b	0.93±0.02b	0.49±0.01c	0.32±0.03a	1.55±0.04b	3.54±0.05c
	BF	0.27±0.01b	1.00±0.03a	0.52±0.02c	0.34±0.04a	1.66±0.02a	3.78±0.08b
	AM	0.26±0.01b	0.94±0.03b	0.59±0.01a	0.32±0.01a	1.68±0.05a	3.79±0.04b
	AM+BF	0.30±0.01a	0.96±0.02ab	0.62±0.01b	0.34±0.02a	1.71±0.03a	3.93±0.03a

注:同种作物内不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著差异。下同。

Note: Different lowercase letters within the same crop indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same as below.

表 3 有机肥配施处理下小麦和燕麦成熟期各器官 Cd 含量

Table 3 Cd contents in various organs of wheat and oat under combined applications of organic fertilizers at mature period

作物 Crop	处理 Treatment	籽粒 Grain	穗颖 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
小麦 Wheat	CK	0.19±0.02a	0.43±0.01a	0.46±0.04c	0.28±0.02a	1.32±0.12a
	BF	0.12±0.01d	0.34±0.03a	0.65±0.03b	0.30±0.02a	1.39±0.09a
	AM	0.16±0.02b	0.40±0.01a	0.78±0.05a	0.29±0.01a	1.34±0.11a
	AM+BF	0.14±0.01c	0.35±0.02a	0.56±0.03b	0.36±0.01a	1.36±0.05a
燕麦 Oat	CK	0.17±0.01a	0.25±0.01a	0.47±0.02a	0.29±0.01a	1.34±0.06a
	BF	0.09±0.01c	0.17±0.01c	0.35±0.01b	0.18±0.01d	1.04±0.04c
	AM	0.15±0.01a	0.19±0.03bc	0.36±0.02b	0.21±0.01c	1.13±0.04b
	AM+BF	0.11±0.01b	0.25±0.01a	0.29±0.01c	0.25±0.01b	1.14±0.04b

2.2 不同有机肥配施对小麦和燕麦植株 Cd 含量的影响

2.2.1 成熟期小麦和燕麦各器官 Cd 含量

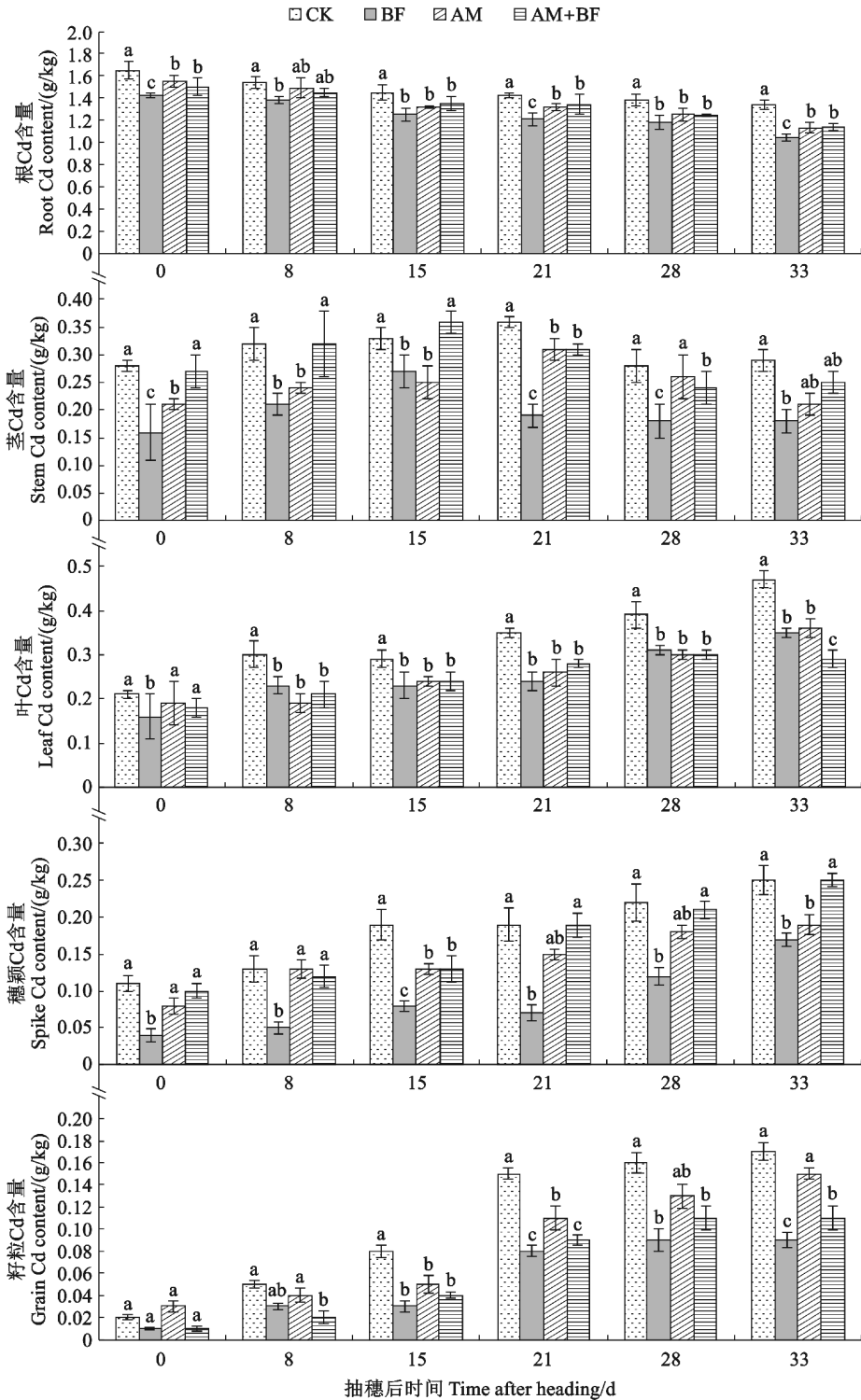
由表 3 可知,有机肥配施处理均可不同程度影响小麦和燕麦成熟期各器官镉含量,小麦和燕麦籽粒镉含量均高于国家农产品重金属镉标准限值(谷物碾磨加工品中镉含量 ≤ 0.1 mg/kg)。其中,小麦成熟期各器官镉含量表现为根>叶>穗颖>茎>籽粒;与 CK 相比,BF、AM、AM+BF 处理籽粒镉含量分别显著降低 36.84%、15.79%、26.32%,叶片镉含量则分别显著增加 41.30%、69.57%、21.74%,其余器官镉含量均无显著变化;AM 处理籽粒和叶片镉含量均显著高于 BF、AM+BF 处理。

燕麦各器官镉含量表现与小麦有所不同,表现为根>叶>茎>穗颖>籽粒。燕麦籽粒镉含量在 BF、AM+BF 处理下分别比 CK 显著降低 47.06%、35.29%,而在 AM 处理下无显著变化;穗颖镉含量在 BF、AM 处理分别比 CK 显著下降 32.00%、24.00%,而在 AM+BF 处理下无显著变化;叶、茎、根镉含量在各有机肥配施处理下均比 CK 显著降低,降幅分别为 23.4%~38.3%、13.79%~37.93%、

14.93%~22.39% ($P < 0.05$);BF 处理除叶片镉含量较高外,其余器官镉含量均显著低于 AM、AM+BF 处理。可见,有机肥配施可降低小麦和燕麦籽粒镉含量,且对燕麦各器官降镉效果好于小麦,并以 BF、AM+BF 处理表现较优。

2.2.2 抽穗后燕麦各器官 Cd 含量

燕麦抽穗后各器官的镉含量变化趋势不同(图 1)。其中,各有机肥配施处理根中镉含量在抽穗后均呈不断下降趋势,于成熟期达到最低值,说明根系中的镉在抽穗后稳定地向地上转运,成为镉的供给器官;各处理茎中镉含量在抽穗后呈先上升后下降的变化趋势,其中 BF、AM+BF 处理在抽穗后 15 d 达到峰值,CK、AM 处理在抽穗后 21 d 达到峰值,各处理达到峰值后迅速下降,即在灌浆前茎以吸收积累镉为主,而在灌浆后又将积累的镉大量转移到其他器官;各处理叶、穗和籽粒镉含量的变化趋势基本一致,即从抽穗后镉含量均不断增加,并以籽粒镉含量增幅最大。另外,在相同时间下,各器官镉含量在有机肥配施处理下均比同期对照不同程度降低,并多以 BF 处理降幅较大。可见,燕麦抽穗后根作为镉供给器官,叶、穗、籽粒作为镉累积器官,灌浆后籽粒中镉积累状况与茎镉含量变化有关。



同期不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异。

图 1 有机肥配施处理下燕麦抽穗后各器官 Cd 含量

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same time at 0.05 level.

Fig. 1 Cd contents in various organs of oat after heading under combined applications of organic fertilizers

2.3 有机肥配施对小麦和燕麦植株成熟期各器官 Cd 富集、分配和转运的影响

2.3.1 植株 Cd 富集特征

由表 4 可知,小麦成熟期各器官镉富集能力由大到小表现为根>叶>茎>籽粒。各有机肥配施处理的

小麦根系、茎秆、叶片的镉生物富集系数均比 CK 有不同程度升高,但仅叶片增幅均达到显著水平;BF、AM、AM+BF 处理籽粒镉生物富集系数比 CK 不同程度降低,降幅分别为 24.55%、8.02%和 14.42%,但仅 BF 达显著水平;各处理穗颖镉生物富集系数均无显著变化。

燕麦成熟期各器官镉富集能力大小关系与小麦表现一致,但燕麦各器官镉生物富集系数在各有有机肥配施处理下均比 CK 有不同程度下降,且大多达到显著水平,其中 BF、AM+BF 处理籽粒的镉生物富集系数较 CK 分别显著降了 39.69%、29.77% ($P < 0.05$)。说明配施有机肥对大麦和燕麦各器官镉的富集能力影响不尽相同,且对燕麦的影响更大,但均会不同程度削弱 2 种作物籽粒对镉的积累富集能力,并以 BF 处理效果最好。

表 4 不同有机肥配施下小麦、燕麦植株成熟期各器官富集系数

Table 4 Plant enrichment coefficients of various organs of wheat and oat under combined applications of organic fertilizers at mature period

作物 Crop	处理 Treatment	富集系数 Enrichment coefficient				
		籽粒 Grain	穗颖 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
小麦 Wheat	CK	0.12a	0.28a	0.30c	0.19b	0.86a
	BF	0.09b	0.26a	0.52ab	0.24ab	1.11a
	AM	0.11a	0.29a	0.56a	0.21b	0.97a
	AM+BF	0.11ab	0.27a	0.43b	0.27a	1.04a
燕麦 Oat	CK	0.13a	0.19a	0.37a	0.23a	1.05a
	BF	0.08b	0.15c	0.32b	0.17b	0.95b
	AM	0.13a	0.16bc	0.32b	0.19b	0.99ab
	AM+BF	0.09b	0.17b	0.23c	0.21a	0.96b

表 5 有机肥配施处理下小麦、燕麦成熟期 Cd 积累量在不同器官中的分配

Table 5 Distribution of Cd accumulation in different organs of wheat and oat under combined applications of organic fertilizers at maturity

作物 Crop	处理 Treatment	积累量 Accumulation/(kg/hm ²)					分配比例 Distribution proportion/%					
		籽粒 Grain	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	穗颖 Spike	总和 Sum	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	穗颖 Spike	总和 Sum
小麦 Wheat	CK	1.83b	1.30c	1.44c	1.10a	1.08a	6.74b	27.11b	19.24c	21.27d	16.31a	83.93c
	BF	2.37a	1.55b	2.10b	1.02a	0.72c	7.76a	30.49a	20.04b	27.01b	13.18c	90.73a
	AM	1.97b	1.42ab	2.58a	1.15a	0.95b	8.06a	24.39c	17.60d	31.92a	14.29b	88.19b
	AM+BF	2.01b	1.82a	1.86b	1.08a	0.87b	7.64a	26.31b	23.78a	24.34c	14.14b	88.86b
燕麦 Oat	CK	1.53a	1.09a	1.05a	0.94a	0.089a	4.69a	23.33a	22.34a	20.21b	1.39ab	67.27b
	BF	1.33b	1.00ab	0.97b	0.88b	0.062b	4.23c	23.72a	22.94a	20.81b	1.16b	68.63a
	AM	1.47a	0.99ab	0.92c	0.96a	0.08ab	4.39b	22.39a	20.95b	21.86a	1.25b	66.45b
	AM+BF	1.40b	0.97b	0.95bc	0.87b	0.08ab	4.26bc	22.69a	22.40a	20.44b	1.58a	67.12b

2.3.3 植株 Cd 转运特征

有机肥配施对作物各器官转运能力的影响不同(表 6)。BF、AM、AM+BF 处理降低了小麦籽粒、穗颖、籽粒/茎、籽粒/叶、籽粒/穗颖的转运系数,且除穗颖外比 CK 降幅均达到显著水平,籽粒、籽粒/茎、籽粒/叶和籽粒/穗颖转运系数比 CK 分别显著降低 18.1%~40.88%、18.04%~42.31%、39.94%

2.3.2 植株 Cd 分配特征

由表 5 可以看出,燕麦成熟期各器官镉积累量和分配比例均表现为籽粒>根>茎>叶>穗颖,表明成熟期籽粒是镉积累的中心。与 CK 相比,各有有机肥配施处理燕麦各器官镉积累量均不同程度降低,且 BF、AM+BF 处理降幅大多达到显著水平,籽粒镉积累量分别显著降低 13.07%、8.5%;各有有机肥配施处理燕麦营养器官镉分配比例与 CK 多无显著差异,其器官总和镉分配比例在 BF 处理下比 CK 显著提高 1.36 个百分点。

小麦成熟期各器官镉积累量和分配比例表现基本与燕麦一致,即籽粒仍是镉积累的中心(表 5)。其中,与 CK 相比,各有有机肥配施处理小麦籽粒、根、茎及总和镉积累量均显著增加,穗颖积累量显著降低,而叶积累量无显著变化;BF 处理小麦根、茎、叶镉分配比例均比 CK 显著增加,而其穗颖镉分配比例则显著降低;BF、AM、AM+BF 处理营养器官分配比例总和比 CK 分别显著提高了 8.1、5.08、5.87 个百分点。可见,有机肥配施可直接降低燕麦籽粒镉积累量,它虽然提高了小麦营养器官镉分配比例总和,致使根、茎镉积累量显著提高,间接降低镉向籽粒的分配积累,但仍提高了小麦籽粒镉积累量;有机肥配施有效可降低燕麦籽粒中镉积累,并以 BF 处理表现较优,但对小麦籽粒镉积累却有促进效果。

~56.28%和 5.79%~18.31%,并均以 BF 处理降幅最大;各有有机肥配施处理小麦茎和叶的转运系数分别比 CK 提高 0.79%~34.49%和 31.29%~67.14%,但茎的增幅未达显著水平。有机肥配施处理燕麦籽粒、穗颖、叶、茎各器官转运系数比 CK 有不同程度降低,且大多达显著水平,BF、AM+BF 处理籽粒转运系数分别显著降低 32.77%、22.89%;BF、AM+

BF 处理籽粒/茎、籽粒/叶、籽粒/穗颖转运系数均比 CK 显著降低,而 AM 处理则均显著升高。因此,增施有机肥处理增强了镉从小麦根系向茎和叶的转运能力,但削弱了小麦与燕麦镉从各器官向籽粒转运能力,其中以有机肥处理 BF 效果较优。

2.3.4 燕麦抽穗期后各器官中的 Cd 向籽粒中转运

籽粒中的镉来源于两部分:一部分为抽穗前吸收并储存在营养器官中,于抽穗后转移到籽粒中的镉;另一部分来自土壤中直接吸收转运到籽粒的镉。由表 7 可知,有机肥配施处理燕麦抽穗期和成熟期

各器官 Cd 积累量与 CK 相比基本上都有不同程度降低,镉转移量与转移率在根和茎中均表现为 AM+BF>AM>BF>CK,且各配施处理均与 CK 差异显著;BF、AM、AM+BF 处理根和茎对籽粒镉的贡献率均显著高于 CK,它们穗颖贡献率均低于 CK;各有机肥配施处理燕麦各器官对籽粒镉的贡献率均表现为茎>根。以上分析说明,抽穗后燕麦根、茎中镉均向籽粒转运,从转移量、转移率、贡献率综合看,茎中镉转运对籽粒中镉积累的影响更为明显,表明茎是营养器官中向籽粒转移镉最重要的器官。

表 6 有机肥配施处理下小麦、燕麦成熟期植株 Cd 转运系数

Table 6 Plant Cd transport coefficient of wheat and oat under combined applications of organic fertilizers at maturity

作物 Crop	处理 Treatment	转运系数 Transport coefficient						
		籽粒 Grain	穗颖 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	籽粒/茎 Grain/Stem	籽粒/叶 Grain/Leaf	籽粒/穗颖 Grain/Spike
小麦 Wheat	CK	0.14a	0.33a	0.35c	0.21a	0.69a	0.41a	0.44a
	BF	0.08c	0.24a	0.47ab	0.22a	0.40c	0.18c	0.36c
	AM	0.12b	0.30a	0.58a	0.22a	0.56b	0.20c	0.41b
	AM+BF	0.10b	0.28a	0.46bc	0.29a	0.40c	0.25b	0.41b
燕麦 Oat	CK	0.12a	0.18a	0.35a	0.22a	0.57b	0.36b	0.68b
	BF	0.08c	0.16b	0.34a	0.17b	0.48c	0.25c	0.53c
	AM	0.13a	0.17b	0.32b	0.19b	0.70a	0.41a	0.80a
	AM+BF	0.10b	0.18b	0.26c	0.22a	0.43c	0.37b	0.54c

注:籽粒/器官表示某器官向籽粒的转运系数。

Note: Grain/organ represent the transport coefficient from organ to grain.

表 7 有机肥配施处理下燕麦抽穗后营养器官中镉向籽粒中的转运

Table 7 Cadmium transport from vegetative organs to grains after heading of oat under combined applications of organic fertilizers

器官 Organ	处理 Treatment	镉积累量 Cadmium accumulation/(kg/hm ²)		镉转移量 Transfer amount of cadmium/(kg/hm ²)	镉转移率 Transfer rate of cadmium/%	对籽粒镉贡献率 Contribution rate to grain cadmium/%
		抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature period			
根 Root	CK	1.10±0.03a	1.09±0.05a	0.01d	0.91d	0.65d
	BF	1.03±0.01b	1.00±0.04ab	0.03c	2.91c	2.26c
	AM	1.03±0.02b	0.99±0.06ab	0.04b	3.88b	2.72b
	AM+BF	1.03±0.02b	0.97±0.05b	0.06a	5.83a	4.29a
茎 Stem	CK	1.17±0.03ab	1.05±0.01a	0.12d	10.26c	7.84d
	BF	1.13±0.05b	0.97±0.02b	0.16c	14.16b	12.03c
	AM	1.24±0.07ab	0.92±0.03c	0.32b	25.81a	21.77b
	AM+BF	1.31±0.09a	0.95±0.01bc	0.36a	27.48a	25.71a
叶 Leaf	CK	0.64±0.01a	0.94±0.01a	-0.30a	—	—
	BF	0.50±0.02d	0.88±0.01b	-0.38b	—	—
	AM	0.60±0.02b	0.96±0.02a	-0.36b	—	—
	AM+BF	0.56±0.01c	0.87±0.01b	-0.31a	—	—
穗颖 Spike	CK	0.062±0.003a	0.089±0.013a	-0.028b	—	—
	BF	0.047±0.003b	0.062±0.009b	-0.015a	—	—
	AM	0.053±0.003b	0.080±0.005ab	-0.027b	—	—
	AM+BF	0.065±0.004a	0.080±0.005ab	-0.015a	—	—

3 讨论

3.1 增施有机肥对小麦和燕麦 Cd 吸收及积累特性的影响

籽粒中积累的大部分 Cd 主要通过根系直接吸收和转运获得,少量来自其他营养器官的 Cd 通过再活化途径重新转运分配到籽粒中。化肥中含有多种重金属元素,长期施用会对植物吸收重金属产生影响,邓小红等^[14]通过增施氮素处理促进山杨对 Cd 的吸收与积累,提高叶片对镉的富集能力,与曹柳等^[15]在向日葵吸收 Cd 研究得到的结果一致。本试验中,在减量施用化肥的基础上配施不同有机肥降低了小麦和燕麦对 Cd 的吸收,但增施过多有机肥则提高了作物对 Cd 的吸收,植物对重金属的吸收主要取决于土壤中重金属的有效态含量。这可能是有机肥中的有机物质提高了土壤 pH,增加了有机质含量,土壤 pH 值增强了重金属 Cd 离子吸附力,有机质增加分解产生还原性物质,能够与重金属 Cd 形成络合、螯合物,导致 Cd 有效态含量下降,进而减少植物吸收^[16-17],这与钟明涛等^[18]通过施用菌肥改变 Cd 形态分布,降低棉花 Cd 吸收结果一致。刘建新等^[19]研究表明,抽穗期燕麦根部和地上部的 Cd 含量和 Cd 积累量会随 Cd^{2+} 浓度增加而增加。甘露等^[9]研究认为,小白菜根部更易富集 Cd。范晶晶等^[20]也证明不同有机物料均可有效促进水稻根对 Cd 的吸附。

本研究结果表明,小麦和燕麦的根 Cd 含量最高,最易富集镉。因为重金属离子跨液泡膜转运及其在液泡中固定是植物耐重金属的重要机理,重金属离子可在液泡和植物不同组织内被固定下来^[21],由于有机肥投入为土壤中微生物提供了养分,提高了微生物活性,促进根表铁膜的形成,提升了纤维素酶和过氧化氢酶活性,进而增强对 Cd 等重金属的吸附作用^[22]。

3.2 增施有机肥对小麦和燕麦 Cd 分配及转运特性的影响

转运系数可用于评价重金属从植物根部到地上部的转运,其值为植物地上部重金属含量与植物根部重金属含量的比值,由于茎、叶等部位均有类似根系的隔离机制,所以各部位镉分配自然不同。施用有机肥可改变土壤理化性状,进而影响 Cd 的分配和转运^[23-25];江巧君等^[26]研究表明,施用有机肥能增加颖壳和糠层的镉分配,减少精米中的镉分配;曹庭悦等^[27]通过硅、磷肥配施研究表明,配施会抑制水稻对镉的转运,水稻根部及茎叶部镉含量达到最低,且降低幅度高于单一元素施入处理。也有研究得出相反结果:有机肥可提升 Cd 由水稻根部向地上部的转运,显著提高水稻各部位 Cd 含量^[20]。本研究中,有机肥投入使得土壤营养元素增多,增强镉从小麦根系向茎秆和叶片的转运能力,茎秆是再活化转运镉贡献最大的器官,降低了小麦和燕麦根系向籽粒的转运能力。根表铁膜在植物吸收 Cd 的过程中既可能起到抑制作用,也可能扮演促进角色,这取决于根表铁膜的厚度和老化程度,与植物自身特性以及生长环境条件相关^[28],Cd 在植株内的运移过程受到养分供应状况、pH、土壤条件以及作物品种等多种因素综合作用^[29],部分镉也通过韧皮部转运,因此,小麦和燕麦根系向籽粒的转运能力降低可能受到多种因素直接或间接影响,但具体影响机制有待进一步研究。

4 结论

化肥减量配施有机肥可降低小麦和燕麦籽粒镉含量,且对燕麦各器官的降镉效果优于小麦,增施有机肥会削弱作物籽粒对镉的富集,同时会降低镉从作物各器官向籽粒转运能力。燕麦抽穗期后镉从茎向籽粒转运是籽粒镉积累的主要来源,其中籽粒降镉效果以生物有机肥处理表现最佳。

参考文献:

- [1] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
CHEN W P, YANG Y, XIE T, *et al.* Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 261-272.
- [2] WANG L P, WANG H T, LI T M, *et al.* A hybrid thermal

- error modeling method of heavy machine tools in Z-axis[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(1/4): 389-400.
- [3] 齐菲, 付同刚, 高会, 等. 污水灌溉农田土壤镉污染研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(1): 10-20.
QI F, FU T G, GAO H, *et al.* Review on cadmium pollution from sewage irrigation in farmland soil[J]. *Journal of Ecology*

- gy and Rural Environment*, 2022, 38(1): 10-20.
- [4] 陈兴帮, 陈熹, 吴国, 等. 萝卜对镉及其伴生金属镉的富集特征与光合生理响应[J]. 西北植物学报, 2022, 42(3): 453-461.
CHEN X B, CHEN X, WU G, *et al.* Enrichment characteristics and photosynthesis physiological responses of *Raphanus sativus* to uranium and its associated metal cadmium[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(3): 453-461.
- [5] 彭华, 田发祥, 魏维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1027-1033.
PENG H, TIAN F X, WEI W, *et al.* Effects of silicon fertilizer application on the cadmium and silicon content of rice at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1027-1033.
- [6] GUO X Y, ZHANG S Z, SHAN X Q, *et al.* Characterization of Pb, Cu, and Cd adsorption on particulate organic matter in soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(9): 2366-2373.
- [7] WONG J W C, LI K L, ZHOU L X, *et al.* The sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge[J]. *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 310-317.
- [8] 弓建泽, 张心然, 李志勇, 等. 有机肥施用和外源镉添加对土壤理化性质、油菜生长及其镉积累的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 679-685.
GONG J Z, ZHANG X R, LI Z Y, *et al.* Effects of organic fertilizer combined with exogenous cadmium addition on soil physical and chemical properties, rape growth and cadmium accumulation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3): 679-685.
- [9] 甘露, 蒋子阳, 黄柏豪, 等. 中度含镉鸡粪源有机肥对土壤镉积累及小白菜吸镉量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 208-214.
GAN L, JIANG Z Y, HUANG B H, *et al.* Effects of chicken manure source organic fertilizer of moderately cadmium-containing on cadmium accumulation in soil and cadmium absorption in Chinese cabbage[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4): 208-214.
- [10] 国务院卫生行政部门. GB 5009. 268—2016 食品安全国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] 范洪黎, 周卫. 镉超富集苋菜(*Amaranthus mangostanus* L.) 品种的筛选[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1316-1324.
FAN H L, ZHOU W. Screening of amaranth cultivars(*Amaranthus mangostanus* L.) for cadmium hyperaccumulation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(4): 1316-1324.
- [12] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 2143-2149.
ZHAO M X, ZHOU J B, YANG R, *et al.* Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2): 2143-2149.
- [13] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻产量、品质及氮肥利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2736-2746.
XU G W, TAN G L, WANG Z Q, *et al.* Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on grain yield and quality and nitrogen use efficiency in direct-seeding rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2736-2746.
- [14] 邓小红, 姬拉拉, 王健健. 施氮对镉胁迫下山杨幼苗叶片氮磷钾吸收及镉积累量的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(11): 1932-1939.
DENG X H, JI L L, WANG J J. Effect of nitrogen supplement on N, P, K uptake and Cd accumulation in leaves of *Populus davidiana* under cadmium stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(11): 1932-1939.
- [15] 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 等. 施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5189-5197.
CAO L, YANG J X, GUO J J, *et al.* Effect of fertilization on Cd absorption and accumulation of sunflower[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5189-5197.
- [16] 段海芹, 秦秦, 吕卫光, 等. 有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1486-1495.
DUAN H Q, QIN Q, LÜ W G, *et al.* Effects of long-term application of organic manure on contents of total and available cadmium in greenhouse soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1486-1495.
- [17] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 105-108.
WANG K F, PENG N, WANG K R, *et al.* Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1): 105-108.
- [18] 钟明涛, 李维弟, 朱永琪, 等. 生物炭和菌肥对土壤镉形态和棉花镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1172-1181.
ZHONG M T, LI W D, ZHU Y Q, *et al.* Effects of biochar and bacterial manure on cadmium forms in soil and cadmium absorption in cotton[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(5): 1172-1181.
- [19] 刘建新, 欧晓彬, 王金成. 裸燕麦对重金属镉(Cd)胁迫的生理生态响应及 Cd 累积特性[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(5): 621-629.
LIU J X, OU X B, WANG J C. Physiological-ecological responses of naked oat to cadmium(Cd) stress and Cd accumulation[J].

- Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(5): 621-629.
- [20] 范晶晶, 许超, 王辉, 等. 3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2143-2150.
- FAN J J, XU C, WANG H, *et al.* Effects of three organic materials on the availability of cadmium in soil and cadmium accumulation and translocation in rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2143-2150.
- [21] 王晓芳. 植物中重金属的生物效应[D]. 北京: 中国地质科学院, 2009.
- [22] ZHANG Q, ZHANG L, LIU T T, *et al.* The influence of Liming on cadmium accumulation in rice grains via iron-reducing bacteria [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 109-118.
- [23] 李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 等. 不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 2047-2055.
- LI K Y, ZHAO T T, CHEN J, *et al.* Effects of different organic materials on absorption and translocation of arsenic and cadmium in rice[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 2047-2055.
- [24] 杨蕾静, 黄运湘, 向艳艳, 等. 叶面喷施有机水溶肥锌与无机锌对水稻生长及镉吸收转运的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(7): 6-10.
- YANG L J, HUANG Y X, XIANG Y Y, *et al.* Effects of foliar spray of organic water-soluble Zn and inorganic Zn on rice growth and absorption and transportation of Cd[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(7): 6-10.
- [25] 赵家印, 席运官, 代慧杰, 等. 钝化剂与有机肥配施对土壤有效态重金属及其在生菜中累积的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(11): 1460-1467.
- ZHAO J Y, XI Y G, DAI H J, *et al.* Effects of compost combined with amendments on available copper and cadmium in soil and their accumulation in romaine [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(11): 1460-1467.
- [26] 江巧君, 周琴, 韩亮亮, 等. 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 9-14.
- JIANG Q J, ZHOU Q, HAN L L, *et al.* Effects of organic manure on uptake and distribution of cadmium in different rice genotypes under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2013, 32(1): 9-14.
- [27] 曹庭悦, 刘鸣达, 沃惜慧, 等. 硅、磷配施对水稻镉吸收转运的影响及其机制[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 37-44.
- CAO T Y, LIU M D, WO X H, *et al.* Effects of combined application of silicon and phosphorus on cadmium uptake and transport in rice and its mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 37-44.
- [28] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 358-363.
- LIU W J, ZHU Y G. Iron and Mn plaques on the surface of roots of wetland plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 358-363.
- [29] HART J J, WELCH R M, NORVELL W A, *et al.* Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars [J]. *Plant Physiology*, 1998, 116(4): 1413-1420.