

## 矿质型叶面阻隔剂对春小麦镉吸收转运的阻控效果

王清宇<sup>1</sup>, 刘美英<sup>1\*</sup>, 郝孟婕<sup>1</sup>, 赵宝平<sup>2</sup>, 关世羽<sup>1,3</sup>, 王永宁<sup>4</sup>, 鲁瑞英<sup>5</sup>

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 3. 赤峰应用技术职业学院, 内蒙古 赤峰 024000; 4. 内蒙古农牧业生态与资源保护中心, 内蒙古 呼和浩特 010000; 5. 巴彦淖尔市农牧业生态与资源保护中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015199)

**摘要:** 为研究喷施不同叶面阻隔剂对北方田间春小麦镉的阻控效果, 以‘永良4号’为材料, 采用田间试验研究方法, 于分蘖期、孕穗期向小麦喷施4种不同矿质元素型叶面阻隔剂, 分别为混合型(MAC)、锰锌元素型(MZ)、硫元素型(S)、硅元素型(Si), 同时设置清水喷施为对照, 通过测定小麦各器官镉含量分析不同叶面阻隔剂对小麦镉的阻控效果。结果表明:(1)与清水对照相比较, 4种不同矿质元素型叶面阻隔剂均有效降低小麦籽粒中的镉含量, 其中, MZ、S处理使籽粒降镉效果显著, 4种叶面阻隔剂的降镉能力为MZ>S>Si>MAC, 籽粒镉含量分别降低了47.7%、40.1%、33.3%和26.5%。(2)小麦各器官镉富集系数的表现为根>茎>叶>颖壳>籽粒, 叶面喷施4种矿质元素型阻隔剂后均抑制了小麦籽粒的富集能力, 而MAC和MZ处理增加了小麦根部的富集能力, 抑制了叶片中镉的累积。(3)MAC和MZ处理阻隔剂抑制了镉从根至茎部的转移, S和Si处理主要抑制叶至籽粒部的镉转运。因此, 在通过叶面喷施阻隔剂阻隔小麦镉的污染方面, 可以选取喷施MZ型和S型叶面阻隔剂。

**关键词:** 叶面阻隔剂; 春小麦; 镉含量; 富集转运

镉是植物生长非必需的微量元素, 具有生物毒性强的特点, 人体摄入少量的镉就会产生危害<sup>[1]</sup>。在2014年国家发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国耕地土壤污染物点位超标率为19.4%, 其中, 镉的点位超标率为7.0%, 是耕地土壤的首要污染物。小麦是我国第二大粮食作物, 在粮食生产中占有重要地位, 但由于小麦根系向地上部转运镉的能力是水稻的4倍左右, 因此, 其籽粒极易富集镉<sup>[2]</sup>, 且小麦植株内镉含量较高时, 镉亦会对小麦产生毒害, 阻碍其生长发育<sup>[3]</sup>。当前研发的阻控作物镉累积的技术多针对水稻, 对于降低小麦植株尤其是籽粒中镉含量技术的研究较少<sup>[4]</sup>。

目前阻控作物镉累积的技术有土壤钝化、土壤淋洗、农艺调控、叶面阻隔技术等<sup>[5]</sup>, 其中叶面阻隔技术因成本低、环境友好、无二次污染、高效

增产, 具有大面积应用于中轻度重金属污染农田的潜力。叶面阻隔技术是向植物叶面喷施阻隔剂, 通过阻隔剂改变镉元素在植物体内的分配, 抑制镉元素向植株可食部位运输, 从而降低农产品中镉的含量<sup>[6-7]</sup>。目前阻隔剂类型有矿质元素型叶面阻隔剂、有机型叶面阻隔剂、重金属螯合剂等。作为一种常见的矿质元素型叶面阻隔剂, 硅元素叶面阻隔剂被大量运用在水稻作物上, 叶面喷施硅能显著地降低水稻籽粒的镉浓度, 并且促进水稻生长发育, 减少镉对水稻的毒害<sup>[8-10]</sup>。除此之外, 丁凌云等<sup>[11]</sup>研究表明, 喷施磷酸二氢钾可降低重金属对作物的毒害, 也能提高水稻产量, 降低镉在稻米中的含量。闫秀秀等<sup>[12]</sup>通过试验表明, 喷施锰元素型叶面阻隔剂可抑制油菜根部对镉的吸收, 减少叶用油菜地上部镉浓度。

综上, 有关叶面阻隔剂阻控作物镉含量的研究多用于水稻作物, 且大多为盆栽试验。在实际生产过程中, 田间条件较复杂, 且针对我国北方石灰性土壤地区中轻度镉污染麦田施用叶面阻隔剂的研究缺乏数据支持。本研究通过喷施不同叶面阻隔剂, 研究叶面阻隔剂对小麦镉吸收、转运的阻控效果,

收稿日期: 2023-08-10; 录用日期: 2023-09-22

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(CARS-07); 农业农村部耕地重金属污染防治联合攻关项目。

作者简介: 王清宇(1996-), 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: 1014699176@qq.com。

通讯作者: 刘美英, E-mail: liumeiyingimau@163.com。

为叶面喷施技术在同类型污染土壤作物的安全利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验田位于内蒙古西部某矿区附近农田, 试验于 2021 年 3 月开展, 该试验地土壤 pH 为 8.06, 土壤镉全量为 2.66 mg/kg, 有机质为 21.9 g/kg, 速效钾为 283 mg/kg, 有效磷为 53 mg/kg、碱解氮为 134 mg/kg。供试小麦品种为‘永良 4 号’。整个生育期内, 土壤施肥、灌水与当地保持一致, 在小麦成熟期采样。

### 1.2 试验设计

试验采用完全随机设计, 小区面积为 20 m<sup>2</sup>。选用 4 种叶面阻隔剂, 均是严格按照相应阻隔剂产品的喷施浓度及用量执行, 分别为硅元素型(主要成分是二氧化硅, 佛山市铁人环保科技有限公司生产)、混合元素型(含有多种营养元素, 由中国农业科学院根据植物养分需求规律自行研制而成)、锰锌元素型(主要成分是锰和锌, 湖南美鑫隆环保科技有限公司生产)、硫元素型(主要成分是硫化钠, 天津市北联精细化学品开发有限责任公司生产的分析纯硫化钠试剂), 对照组用清水喷施, 共有 5 个处理, 每个处理重复 3 次, 各处理等体积喷施, 具体喷施浓度见表 1, 于分蘖期与孕穗期选择晴天的傍晚用手持式喷雾器喷施。

### 1.3 样品采集与测定

在小麦成熟期采集植株, 按根、茎、叶、颖壳、籽粒进行分类, 在实验室内 105℃ 杀青 30 min 后, 70℃ 烘干至恒重, 研磨过筛, 进行消解, 过

滤液用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 7500c, Agilent, USA)测定样品镉含量。

表 1 供试叶面阻隔剂情况

阻隔剂类型	处理	主要成分	浓度
对照	CK	清水	—
硅元素型	Si	SiO <sub>2</sub>	0.5 g/L
锰锌元素型	MZ	锰锌元素	8 g/L
混合元素型	MAC	多种元素	2 mL/L
硫元素型	S	S 元素	0.5 g/L

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2019 制作图表; 采用 SAS 9.4 进行单因素方差分析。

转运系数 = B 器官中镉含量 / A 器官中镉含量

富集系数 = 小麦各器官镉含量 / 土壤中的镉含量

## 2 结果与分析

### 2.1 不同叶面阻隔剂对春小麦器官镉含量的影响

由表 2 可见, 喷施叶面阻隔剂与 CK 相比, MAC、MZ、Si 处理均提高了小麦根部的镉含量, 分别提高了 28.1%、41.7%、9.7%, 其中 MZ 处理效果显著。在小麦叶器官中, MAC、MZ、S 处理使叶部镉含量降低了 13.4% ~ 34.8%, 其中, MAC、MZ 处理的降低效果显著。在小麦茎与颖壳中, 各处理与 CK 相比没有显著差异。在小麦籽粒中镉含量与 CK 相比, 各处理均使籽粒中镉含量降低, 其中 S、MZ 处理与 CK 相比差异显著。由此说明, 小麦叶面喷施阻隔剂均能减少籽粒中镉含量, 确保可食用部位的食物安全。

表 2 喷施叶面阻隔剂后春小麦各器官镉含量

(mg/kg)

处理	根	茎	叶	颖壳	籽粒
CK	0.640 ± 0.052c	0.555 ± 0.007a	0.589 ± 0.050a	0.462 ± 0.050a	0.132 ± 0.041a
MAC	0.820 ± 0.085ab	0.545 ± 0.026a	0.409 ± 0.030b	0.435 ± 0.040a	0.097 ± 0.017ab
MZ	0.907 ± 0.081a	0.523 ± 0.046a	0.384 ± 0.013b	0.412 ± 0.038a	0.069 ± 0.006b
S	0.618 ± 0.077c	0.537 ± 0.036a	0.510 ± 0.042a	0.426 ± 0.070a	0.079 ± 0.003b
Si	0.702 ± 0.098bc	0.560 ± 0.034a	0.598 ± 0.045a	0.521 ± 0.030a	0.088 ± 0.002ab

注: 不同小写字母表示同一器官镉含量在不同处理下具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 不同叶面阻隔剂对春小麦器官镉富集系数的影响

表 3 为喷施叶面阻隔剂对春小麦体内镉富集系数的影响, 富集系数能够反映镉在各个器官积

累的程度。MZ 与 CK、S、Si 处理相比, 富集系数差异显著, 说明 MZ 处理增强了小麦根部的富集能力。在茎和颖壳中, 各处理与 CK 相比没有显著差异。对于叶的富集系数, MAC、MZ 处理与 CK、

表 3 喷施叶面阻隔剂后春小麦各器官镉的富集系数

处理	根	茎	叶	颖壳	籽粒
CK	0.24 ± 0.020c	0.21 ± 0.003a	0.22 ± 0.020a	0.17 ± 0.020a	0.050 ± 0.016a
MAC	0.31 ± 0.032ab	0.20 ± 0.010a	0.15 ± 0.012b	0.16 ± 0.016a	0.037 ± 0.006ab
MZ	0.34 ± 0.030a	0.20 ± 0.017a	0.14 ± 0.005b	0.16 ± 0.014a	0.026 ± 0.002b
S	0.23 ± 0.029c	0.20 ± 0.014a	0.19 ± 0.016a	0.16 ± 0.027a	0.030 ± 0.001b
Si	0.26 ± 0.037bc	0.21 ± 0.013a	0.22 ± 0.017a	0.20 ± 0.010a	0.033 ± 0.0007ab

S、Si 处理相比，富集系数显著降低。在籽粒中，各处理与 CK 相比富集系数均有降低，且 S、MZ 处理效果显著。总体来说，MAC、MZ 处理均提高了小麦根部的富集能力，降低了叶片与籽粒的富集能力；与 CK 相比，S 处理各器官镉的富集系数虽无显著差异，但均小于 CK，说明 S 元素能够整体减弱小麦对镉的吸收。

2.3 不同叶面阻隔剂对春小麦镉转运系数的影响

由表 4 可知，喷施叶面阻隔剂后，MAC、MZ 处理均能降低小麦根部到茎部的转运系数，且与 CK、S、Si 处理相比差异显著。在茎至叶的转运系数中 MAC、MZ 处理也小于 CK 以及其他处理，说明 MAC、MZ 处理与其他处理相比主要是阻隔根部至茎部以及茎部至叶部的镉运输。而在叶至籽粒转运中，S、Si 处理对比 CK 以及其他处理其系数最小，可见，S 及 Si 处理主要是降低叶部向籽粒转运镉，进而阻控镉离子向籽粒转移。

表 4 喷施叶面阻隔剂后春小麦各器官镉的转运系数

处理	根 - 茎	茎 - 叶	叶 - 籽粒
CK	0.87	1.06	0.22
MAC	0.67	0.75	0.23
MZ	0.58	0.73	0.18
S	0.87	0.95	0.16
Si	0.81	1.07	0.15

2.4 叶面阻隔剂对镉在小麦植株内分布的影响

图 1 为喷施叶面阻隔剂后小麦各器官中镉的分布比例，CK 处理镉在小麦体内的分布规律为根 > 茎 > 叶 > 颖壳 > 籽粒，而喷施叶面阻隔剂后与 CK 相比小麦根部镉分布比例增高，籽粒中镉分布比例均小于 CK，且差异显著。喷施叶面阻隔剂处理的镉在茎的分布比例与 CK 相比没有明显差异，说明叶面阻隔剂对镉在小麦茎中的分布没有影响。综上所述，进一步说明了叶面阻隔剂提高了镉

在小麦根部的富集，进而降低镉在小麦籽粒中的含量。

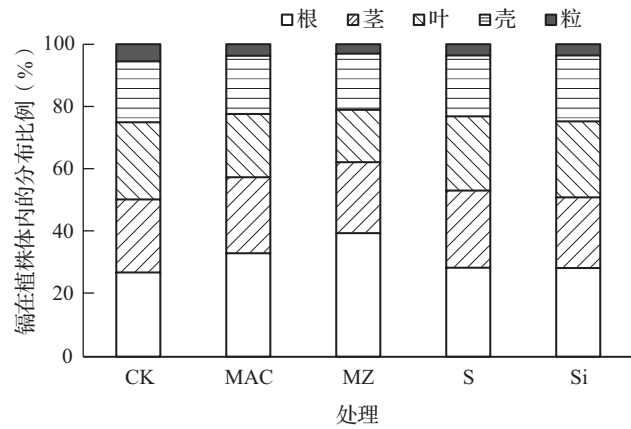


图 1 喷施叶面阻隔剂小麦镉在各器官中的分布

3 讨论

3.1 叶面阻隔剂对春小麦镉含量的影响

叶面喷施应用于农业增产已经有上百年的历史，关于阻控重金属污染的应用方面研究时间较短<sup>[13]</sup>。本研究，不同元素型的叶面阻隔剂均能抑制镉元素向小麦籽粒中的运输，但在小麦各部位中，不同矿质元素叶面阻隔剂的阻控效果不同。

MZ 处理显著降低籽粒、叶片中镉含量。这是由于作为植物的必需营养元素，锰、锌元素在植物光合作用以及其他代谢等方面有着重要作用，植株在吸收锰、锌离子时与镉离子使用的是相同载体蛋白，所以喷施锰、锌能够通过调节植物生理功能以及拮抗作用来缓解镉的毒害<sup>[14]</sup>。闫秀秀等<sup>[12]</sup>研究发现，喷施硫酸锰和醋酸锰处理降低叶用油菜镉含量，喷施锰肥显著降低叶用油菜总镉累积量。喷施锰、锌类叶面阻隔剂可降低作物籽粒中的镉含量，尹晓辉等<sup>[15]</sup>研究结果与本研究结果相似，施用基肥和叶面喷施硫酸锰、螯合锰、碳酸锰均能降低糙米中镉的含量。索炎炎等<sup>[16]</sup>研究表明，在含有镉的土壤中，叶面喷施硫酸锌可使水稻糙米镉含量显

著降低, 王林等<sup>[17]</sup>研究发现, 在正常施用锌元素下, 喷施 3.52 g/L 硫酸锌可使叶用油菜地上部镉含量降低 27.22%。其他研究说明, 喷施硫酸锌和硫酸锰的单一和复配处理均可显著降低小麦籽粒镉含量<sup>[18]</sup>。S 处理与 CK 相比显著降低小麦籽粒中镉含量, 硫元素在植株体内可合成富含巯基的蛋白质和非蛋白类硫基物质与重金属螯合<sup>[19]</sup>, 降低镉的移动性, 减少镉向籽粒中的运输。赵娜娜等<sup>[20]</sup>研究说明了喷施不同形态的硫元素均能降低水稻籽粒中镉含量, 其中 Cys (—SH 形态硫) 处理效果最为显著, —SH 形态硫可在植株内直接与镉离子结合, 从而将镉离子固定下来, 其他形态硫需要在植株内进行氧化还原形成含硫基物质后固定镉离子。刘家豪<sup>[6]</sup>通过叶面喷施硫使水稻籽粒中镉含量显著降低, 说明叶面喷施硫能够提升实际光化学效率, 在一定程度上可以缓解镉对水稻光合系统功能的损伤。Si 处理降低小麦籽粒中镉含量约 33%, 尽管硅不被认为是高等植物的必需元素, 但已有研究表明硅能够促进植物生长, 在镉胁迫环境下, 硅可以缓解镉对植物的毒害<sup>[21]</sup>, 且硅可以进行硅化作用与镉形成沉淀, 从而降低镉的转运<sup>[22]</sup>。有研究表明, 喷施无机硅叶面肥减少了水稻叶面对镉的富集<sup>[23]</sup>。张明辉等<sup>[24]</sup>通过施用硅和硒缓解了镉对小麦叶片光参数的影响, 在硅和硒的协同作用下显著抑制镉从地下部向上部的运输, 增强了小麦细胞壁螯合镉的能力。

### 3.2 叶面阻隔剂对春小麦镉富集与转运的影响

本研究中各器官富集系数的表现为根 > 茎 > 叶 > 颖壳 > 籽粒。有学者研究也表明, 根部富集系数最高, 其次为茎、叶片及籽粒<sup>[25]</sup>。其中除 S 处理外, 其他处理均使根部富集系数增加, 叶片的富集系数降低。这说明其他 3 种处理可能通过增强小麦根细胞壁对镉的固定来降低镉向其他器官的转移。S 处理下的小麦各器官镉富集系数均低于 CK, 说明喷施硫元素能够抑制小麦对镉的吸收, 降低小麦植株体内的镉累积量。

在小麦植株镉转运系数分析中, MAC、Si 以及 MZ 处理与 CK 相比均使根至茎部转运系数降低, 其中 MZ 处理转运系数最低, 这说明各处理都能阻隔镉从地下部向地上部的转运, 在茎至叶部转运中, MAC、S 以及 MZ 处理与 CK 相比转运系数减小, 这说明 3 种处理均抑制镉从茎向叶部的转运。硅元素可以增厚细胞壁, 或在

液泡中与镉形成沉淀, 抑制镉的转移<sup>[26]</sup>。范成五等<sup>[27]</sup>研究表明, 叶面喷施硅酸钠溶液能够降低镉从根部至茎部的转运, 且溶液浓度越高转运系数越低。彭华等<sup>[28]</sup>研究结果表明, 硅元素能够降低水稻根部至茎部的转运系数, 抑制镉元素的转移。锰与镉在植株体内具有相同的吸收和转运途径, 所以锰和镉之间互为拮抗作用<sup>[29]</sup>, 锌可以在植株体内与镉竞争离子通道, 从而直接抑制镉的吸收和转运<sup>[30]</sup>。前人研究<sup>[15, 31]</sup>也说明, 叶面喷施锰、锌能够降低水稻和烟草植株中镉从根到地上部的转运以及地上部之间的转运。故不同元素对于植物镉的抑制途径不同。

## 4 结论

(1) 喷施 4 种不同的叶面阻隔剂均能降低春小麦籽粒中镉含量, 使其降低到 0.1 mg/kg 以下, 达到国家食品安全标准, 其中, 锰锌处理和硫处理效果显著。

(2) 喷施不同叶面阻隔剂均降低了镉在小麦籽粒中的富集, 增加了镉在小麦根部的富集, 对镉在小麦茎和颖壳的富集能力没有显著影响。

(3) 喷施不同叶面阻隔剂均降低根至茎和叶至籽粒的转运系数, 硫和硅处理对抑制镉从叶至籽粒转移效果显著。

## 参考文献:

- [1] Zeng X X, Xu H, Lu J J, et al. The immobilization of soil cadmium by the combined amendment of bacteria and hydroxyapatite [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1): 2189–2197.
- [2] 史高玲, 周东美, 余向阳, 等. 水稻和小麦累积镉和砷的机制与阻控对策 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37 (5): 1333–1343.
- [3] 孟自力, 贾斌, 尹海燕, 等. 镉胁迫对小麦生长发育的影响 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34 (23): 26–32.
- [4] Zhou J, Zhang C, Du B Y, et al. Effects of zinc application on cadmium (Cd) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265 (Part A): 15045.
- [5] 王丽, 和淑娟. 镉污染农用地安全利用技术研究与运用 [J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44 (5): 134–137.
- [6] 刘家豪. 叶面阻隔剂对水稻镉吸收及转运的影响机制 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [7] 张梅华, 姜朵朵, 刘洪, 等. 叶面肥对农作物阻镉效应机制

- 研究进展 [J]. 大麦与谷类科学, 2017, 34 (3): 1-5.
- [8] 戴青云, 刘代欢, 王德新, 等. 硅对水稻生长的影响及其缓解镉毒害机理研究进展 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(5): 86-92.
- [9] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 调理剂及农艺措施对污染稻田中水稻吸收镉的影响 [J]. 中国农业科学, 2020, 53 (3): 574-584.
- [10] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 [J]. 环境科学, 2014, 35 (7): 2762-2770.
- [11] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响 [J]. 生态环境, 2006 (6): 1204-1208.
- [12] 闫秀秀, 徐应明, 王林, 等. 喷施不同形态锰肥对叶用油菜镉累积及亚细胞分布的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (8): 1872-1881.
- [13] Liu C, Li F, Luo C, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161: 1466-1472.
- [14] Rahman A, Nahar K, Hasanuzzaman M, et al. Manganese-induced cadmium stress tolerance in rice seedlings: Coordinated action of antioxidant defense, glyoxalase system and nutrient homeostasis [J]. Comptes Rendus Biologies, 2016, 339 (11/12): 462-474.
- [15] 尹晓辉, 邹慧玲, 方雅瑜, 等. 施锰方式对水稻吸收累积镉的影响研究 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8): 8-12, 42.
- [16] 索炎炎, 吴士文, 朱骏杰, 等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2012, 38 (4): 449-458.
- [17] 王林, 谷朋磊, 李然, 等. 喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39 (6): 2944-2952.
- [18] 陶雪莹, 徐应明, 王林, 等. 喷施硫酸锰和硫酸锌对小麦籽粒镉锰锌生物可给性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (10): 2181-2189.
- [19] 孙琴, 王晓蓉, 袁信芳. 有机酸存在下小麦体内 Cd 的生物毒性和植物络合素 (PCs) 合成的关系 [J]. 生态学报, 2004, 24 (12): 2804-2809.
- [20] 赵娜娜, 彭鸥, 刘玉玲, 等. 不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (7): 1387-1401.
- [21] Riaz M, Kamran M, Rizwan M, et al. Cadmium uptake and translocation: selenium and silicon roles in Cd detoxification for the production of low Cd crops: A critical review [J]. Chemosphere, 2021, 273: 129690.
- [22] 刘春成, 李中阳, 胡超, 等. 逆境条件下硅肥调控效应研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (4): 337-346.
- [23] 张宇鹏, 谭笑潇, 陈晓远, 等. 无机硅叶面肥及土壤调理剂对水稻铅、镉吸收的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (2): 388-393.
- [24] 张明辉, 时曼丽. 硒、硅对镉胁迫下小麦生长、生理特性及镉分布的影响 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (17): 66-73.
- [25] 刘畅, 徐应明, 黄青青, 等. 不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 [J]. 环境科学, 2022, 43 (3): 1596-1605.
- [26] Muhammad A, Shafagat A, Muhammad R, et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 119: 186-197.
- [27] 范成五, 柴冠群, 刘桂华, 等. 叶面喷施硅对辣椒镉阻控效果 [J]. 北方园艺, 2021 (23): 57-62.
- [28] 彭华, 邓凯, 石宇, 等. 连续施硅对双季稻镉硅累积效应的影响 [J]. 环境科学, 2022, 43 (8): 4271-4281.
- [29] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. A dual role of Se on Cd toxicity: evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice. [J]. Biological Trace Element Research, 2013, 151 (1): 113-121.
- [30] 韩潇潇, 任兴华, 王培培, 等. 叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (8): 1809-1817.
- [31] 刘领, 悦飞雪, 李继伟, 等. 镉胁迫下生物炭与锌/钾叶面肥促进烟草生长降低镉富集的协同效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (6): 982-990.

**Effects of different mineral element type leaf barrier agents on the absorption and transport of cadmium in spring wheat**

WANG Qing-yu<sup>1</sup>, LIU Mei-ying<sup>1\*</sup>, HAO Meng-jie<sup>1</sup>, ZHAO Bao-ping<sup>2</sup>, GUAN Shi-yu<sup>1, 3</sup>, WANG Yong-ning<sup>4</sup>, LU Rui-ying<sup>5</sup> (1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010011; 2. College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019; 3. Chifeng Applied Sciences Polytechnic, Chi Feng Inner Mongolia 024000; 4. Inner Mongolia Agricultural and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection Center, Hohhot Inner Mongolia 010000; 5. Bayannur Agricultural and Animal Husbandry Ecology and Resource Conservation Center, Bayannur, Inner Mongolia 015199)

**Abstract:** In order to study the effect of spraying different foliar barrier on the control of cadmium in spring wheat in northern fields, 'Yongliang 4' was used as the material, and four different mineral elemental foliar barrier agents were sprayed on

wheat at the tillering stage and the spike stage, namely, mixed type (MAC), manganese-zinc elemental type (MZ), sulphur elemental type (S), and silicon elemental type (Si), and the foliar barrier agents were applied at the tillering stage and spike stage, at the same time, water spraying was set as the control, and the blocking and controlling effects of different foliar barrier agents on cadmium in wheat were analyzed by determining the cadmium content in various organs of wheat. The results showed that: (1) Compared with the water control, four different mineral element type of foliar barrier agents effectively reduced the cadmium content in wheat grains, of which, MZ, S treatment made the cadmium reduced in the grains significantly, and the cadmium reduction ability of the four foliar barrier agents was ranked as  $MZ > S > Si > MAC$ , which reduced the cadmium content in the grains by 47.7%, 40.1%, 33.3% and 26.5%, respectively. (2) The Cd enrichment coefficients of various organs of wheat were ranked as  $root > stem > leaf > glume > seed$ , and the foliar spraying of all four mineral-element-based barrier agents inhibited the enrichment ability of wheat seed, while MAC and MZ increased the enrichment ability of wheat root and inhibited the accumulation of Cd in leaves. (3) MAC and MZ barrier agents inhibited cadmium transfer from root to stem, while S and Si treatments mainly inhibited cadmium transport from leaf to seed. Therefore, in terms of blocking Cd contamination in wheat by foliar spraying of barrier agents, spraying of MZ and S types of foliar barrier agents could be selected.

**Key words:** foliar barrier agents; spring wheat; cadmium content; enrichment and transport