

土壤调理剂种类及施用量对石灰性褐土镉有效性及小麦镉吸收的影响

王雪晴,赵欧亚,刘蕾,肖广敏,孙世友,侯利敏,王策,王凌,茹淑华

(河北省农林科学院农业资源环境研究所/农田环境修复河北工程研究中心/河北省肥料工程技术研究中心,河北石家庄 050051)

摘要:为探讨施用土壤调理剂对镉(Cd)污染石灰性褐土的钝化效果,通过盆栽试验,以不施用土壤调理剂为对照(CK),选择4种土壤调理剂(无机类调理剂、有机无机复合类调理剂、铁改性有机类调理剂和巯基改性黏土矿物类调理剂,分别用SF、GF、IMP和SGP表示)为对象,每种调理剂分别设置两个施用量(SF:0.75%和1.5%;GF:1.5%和3.0%;IMP:1.5%和3.0%;SGP:0.75%和1.5%),分析了土壤调理剂种类及施用量对种植在Cd污染石灰性褐土上小麦(*Triticum aestivum* L.)各器官干重和Cd含量、籽粒微量元素和Si含量、土壤有效态Cd含量和土壤化学性质的影响。结果表明,与CK相比,施用土壤调理剂处理后小麦根、茎秆、叶片和颖壳的干重与小麦籽粒Fe和Cu含量均无显著变化,而IMP和SGP处理的籽粒干重均显著增加;施用土壤调理剂处理均显著降低了小麦各器官Cd含量,且高剂量处理的效果均优于低剂量处理,其中1.5%SGP处理的小麦籽粒Cd降幅最大(90.25%);除3.0%IMP处理外,其余施用土壤调理剂处理均可显著降低小麦籽粒Zn含量;IMP和SF处理可显著降低小麦籽粒Mn含量;3.0%IMP、1.5%SF、GF和SGP处理的小麦籽粒Si含量均显著升高。与CK相比,SF、GF和SGP处理均显著降低土壤有效态Cd含量(降幅24.71%~92.37%),其中0.75%SGP处理的效果最佳;SF、GF、3.0%IMP处理均显著提高了土壤pH值(0.27~2.24),除SF处理外,其他施用土壤调理剂处理均显著提高了土壤有机质含量;0.75%SF处理对土壤电导率无显著影响,但显著降低土壤有效锌、有效锰、有效铜和有效铁含量,显著增加有效Si含量。综合考虑土壤调理剂对土壤化学性质、土壤Cd的钝化效果、小麦籽粒Cd吸收和对小麦产量的影响,推荐0.75%SGP为Cd污染石灰性褐土上最佳土壤调理剂。

关键词: 镉污染;土壤调理剂;小麦;石灰性土壤;镉有效性;镉吸收

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)06-0799-09

Effects of Soil Amendment Type and Application Dose on Cadmium Availability in Calcareous Cinnamon Soil and Cadmium Uptake by Wheat

WANG Xueqing, ZHAO Ouya, LIU Lei, XIAO Guangmin, SUN Shiyu,
HOU Limin, WANG Ce, WANG Ling, RU Shuhua

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Science/ Hebei Engineering Research Center for Farmland Environmental Restoration/ Hebei Fertilizer Technology Innovation Center, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract: To explore the immobilization effects of soil amendments on cadmium (Cd)-contaminated calcareous cinnamon soil, a pot experiment was conducted with no soil amendment application as the control (CK). Four types of soil amendments (inorganic amendment, organic-inorganic composite amendment, iron-modified organic amendment, and thiol-modified clay mineral amendment, designated as SF, GF, IMP, and SGP, respectively) were selected, with two application dose levels for each amendment (SF: 0.75% and 1.5%; GF: 1.5% and 3.0%; IMP: 1.5% and 3.0%; SGP: 0.75% and

收稿日期:2024-06-18 修回日期:2024-08-01

基金项目:河北省农林科学院科技创新专项(2022KJ CXZX-ZHS-9);国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFD1901304-10);河北省农林科学院科技创新人才队伍建设项目(C23R1105)

第一作者 E-mail:wangxueqing2011@163.com(王雪晴)

通讯作者 E-mail:shuhuaru@163.com(茹淑华)

1.5%)。The effects of amendment type and application dose on the dry weight and Cd content of wheat (*Triticum aestivum* L.) organs, grain trace elements and Si content, soil available Cd content, and soil chemical properties were analyzed. The results showed that compared with CK, the dry weight of wheat roots, stems, leaves, and glumes, as well as the Fe and Cu contents in wheat grains, did not change significantly after soil amendment application. However, the grain dry weight under IMP and SGP treatments increased significantly. All soil amendment treatments significantly reduced the Cd content in wheat organs, with high-dose treatments showing better effects than low-dose treatments. The 1.5% SGP treatment resulted in the largest reduction in grain Cd content (90.25%). Except for the 3.0% IMP treatment, all other soil amendment treatments significantly reduced the Zn content in wheat grains. IMP and SF treatments significantly reduced the Mn content in wheat grains. The 3.0% IMP, 1.5% SF, GF, and SGP treatments significantly increased the Si content in wheat grains. SF, GF, and SGP treatments significantly reduced the soil available Cd content (reduction range: 24.71%–92.37%), with the 0.75% SGP treatment showing the best effect. SF, GF, and 3.0% IMP treatments significantly increased soil pH (0.27–2.24). Except for the SF treatment, all other soil amendment treatments significantly increased soil organic matter content. The 0.75% SF treatment had no significant effect on soil electrical conductivity, but significantly reduced the content of available zinc, manganese, copper, and iron while significantly increasing available Si content. Considering the effects of soil amendments on soil chemical properties, Cd immobilization, Cd uptake in wheat grains, and wheat yield, the 0.75% SGP treatment is recommended as the optimal soil amendment for Cd-contaminated calcareous cinnamon soil.

Keywords: Cadmium pollution; Soil amendment; Wheat; Calcareous soil; Cadmium availability; Cadmium uptake

土壤重金属污染已成为严重的生态环境问题,制约农业的可持续发展,威胁着粮食安全^[1]。根据 2014 年调查结果显示,中国土壤污染总超标率为 16.1%,其中无机污染物超标点位占全部超标点位的 82.8%,而重金属镉(Cd)的点位超标率(7.0%)最高^[2]。小麦(*Triticum aestivum* L.)是世界上广泛种植的粮食作物之一,占世界粮食总量的 40%^[3]。研究发现,中国 50 个小麦主产区污染农田中 52%为 Cd 污染,在河北、河南等地均发现了 Cd 污染的小麦^[4]。因此,修复重金属 Cd 污染土壤,以减少小麦对 Cd 的吸收,对于粮食安全至关重要。

土壤原位钝化技术是向土壤中加入钝化剂材料,通过沉淀、吸附或络合作用来降低重金属的有效性及迁移性,从而减少重金属元素对动植物的毒害^[5],是当前 Cd 污染耕地安全利用的关键技术之一。作物可食部位 Cd 含量除受到土壤总 Cd 含量的影响外,还与土壤有效态 Cd 含量、土壤类型、pH 值、有机质含量等多种因素相关^[6-7]。目前,有关南方水稻安全生产 Cd 原位钝化技术的研究较多,主要通过调节酸性土壤 pH 值来降低

土壤重金属有效态活性,达到一定的修复效果^[8-11],而对于北方石灰性褐土 Cd 原位钝化技术研究相对较少^[12-13]。由于北方土壤多呈中碱性,采取提高 pH 值来治理 Cd 污染效果不佳,需要通过调理剂与重金属间的络合、沉淀作用形成较难溶解的化合物,或通过离子交换和表面吸附固定^[14]。但其效果不稳定、施用量大、成本高等因素限制了土壤调理剂的田间推广应用^[15-17]。因此,开展适宜于北方石灰性褐土 Cd 轻中度污染农田小麦安全生产的土壤调理剂筛选具有重要意义。本研究以重金属 Cd 污染的石灰性褐土为研究对象,探究土壤调理剂种类及施用剂量对土壤化学性质、土壤 Cd 的有效性 & 小麦对 Cd 吸收积累的影响,以便筛选出 Cd 污染下适宜石灰性褐土的土壤调理剂和最佳添加比例,为 Cd 污染农田的安全生产提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为石灰性褐土,取自河北省行唐县贝村 Cd 污染农田,种植制度为小麦—玉米轮作,

Cd 污染来源为周边工矿企业的大气沉降。供试土壤 pH 值为 6.50, 土壤总 Cd 含量为 $3.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤有效态 Cd 含量为 $2.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018), 该土壤为重度 Cd 污染土壤。土壤有机质、全氮、全磷、全钾的含量分别为 $24.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $22.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤经风干后过 3 mm 孔径塑料筛备用。供试小麦品种为济麦 22。

1.2 试验设计

试验采用盆栽方法, 以不施加任何土壤调理剂为对照(CK), 选择 4 种土壤调理剂(无机类调理剂、有机无机复合类调理剂、铁改性有机类调理剂和硫基改性黏土矿物类调理剂, 分别用 SF、GF、IMP 和 SGP 表示), 每种土壤调理剂设置两个施用量(SF: 0.75% 和 1.5%; GF: 1.5% 和 3.0%; IMP: 1.5% 和 3.0%; SGP: 0.75% 和 1.5%), 共 9 个处理。4 种土壤调理剂中, SF 主要成分为贝壳粉, pH 值 10.54; GF 中有机质 $\geq 20\%$, $\text{CaO} \geq 25\%$, $\text{SiO}_2 \geq 20\%$, $\text{MgO} \geq 4\%$, pH 值 9.41; IMP 主要成分是铁、木本泥炭, pH 值 8~10, 有机物总量 $\geq 60\%$; SGP 主要成分为 CaO 1.21%, Al_2O_3 10.43%, MgO 20.48%, SiO_2 64.42%。土壤调理剂的施用量(土壤质量的比例)根据预试验以及前期研究结果设置^[18-19]。每个处理重复 3 次。盆栽所用塑料盆的内径和盆高分别为 20 cm 和 25 cm, 每盆装土 10 kg, 施底肥 N $0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 P_2O_5 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 K_2O $0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 施入形态分别为尿素、过磷酸钙、氯化钾。将肥料和调理剂与土壤充分混匀, 于 2021 年 10 月 15 日播种, 每盆播种小麦 20 株, 生长过程中用自来水浇灌, 各处理灌水量保持一致, 2022 年 5 月 25 日收获。

1.3 样品采集与测定

成熟期取整盆小麦样, 沿小麦植株基部切下, 将植株分为根、茎秆、叶片、籽粒和颖壳共 5 部分, 于 70°C 烘干至恒重, 称取各部位干重。样品粉碎后用 HNO_3 消化, 分别采用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪和 ICP-OES 电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定植物样品中 Cd、Fe、Mn、Cu、Zn、Si 的含量, 每批均加入国家标准物质小麦粉(GBW 10011a)进行质量控制。

小麦收获后, 将每盆土混合均匀, 采用多点法采集土壤样品约 1 000 g, 风干研磨后分别过 2

mm 筛和 0.149 mm 尼龙筛备用。土壤有效态 Cd 含量用 DTPA 溶液浸提法测定; 土壤 pH 值用电位法测定; 土壤电导率通过电导法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加热法测定; 土壤全氮采用凯氏定氮法; 土壤全磷含量采用 NaOH 熔融, 钼锑抗比色法测定; 土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。土壤微量元素有效态含量采用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法测定。土壤有效态 Si 含量采用柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法测定。土壤总 Cd 含量分析采用 HNO_3 -HCl-HF 微波消解测定, 每批样品均加入相应土壤标准物质(GBW07553)进行质量控制。

1.4 计算公式

Cd 的富集系数 = 小麦各器官 Cd 含量 / 土壤 Cd 含量

小麦各器官 Cd 降低率 = $(\text{CK 处理各器官 Cd 含量} - \text{施用土壤调理剂处理各器官 Cd 含量}) / \text{CK 各器官 Cd 含量} \times 100\%$

土壤有效态 Cd 降低率 = $(\text{CK 处理土壤有效态 Cd 含量} - \text{施用土壤调理剂处理的土壤有效态 Cd 含量}) / \text{CK 处理土壤有效态 Cd 含量} \times 100\%$

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 处理数据, 用 SPSS 18.0 软件进行统计检验(Duncan 法)。

2 结果与分析

2.1 土壤调理剂对小麦各器官干重的影响

施用土壤调理剂对小麦茎秆和籽粒干重均有显著的影响, 对根、叶和颖壳干重的影响较小(表 1)。与 CK 相比, 施用土壤调理剂处理的小麦根、茎秆、叶片和颖壳干重均无显著变化; 1.5%IMP、3.0%IMP、0.75%SGP 和 1.5%SGP 处理的小麦籽粒干重均显著增加, 增幅分别为 6.00%、7.59%、2.97% 和 3.95%。这表明施用适量的 IMP 和 SGP 可促进小麦籽粒产量提高。

2.2 土壤调理剂对小麦各器官 Cd 含量的影响

小麦各器官 Cd 含量总体表现为叶片 > 茎秆 > 根 > 颖壳 > 籽粒(图 1)。与 CK 相比, 施用土壤调理剂处理的小麦根、茎秆、叶片、颖壳和籽粒 Cd 含量均显著降低, 降幅分别为 28.95%~82.24%、15.75%~87.65%、15.07%~84.83%、

11.60%~87.97%和 17.15%~90.25%。其中,施用 SGP 对小麦籽粒 Cd 含量的降低效果最明显,0.75%SGP 和 1.5%SGP 处理分别降低了 83.03%和 90.25%;其次是 GF,1.5%GF 和 3.0%

GF 处理分别降低了 71.58%和 80.99%;施用 IMP 的效果最差。此外,对于同一种土壤调理剂,高施用量下小麦各器官 Cd 含量的降低效果总体上优于低施用量。

表 1 不同土壤调理剂下小麦各器官干重

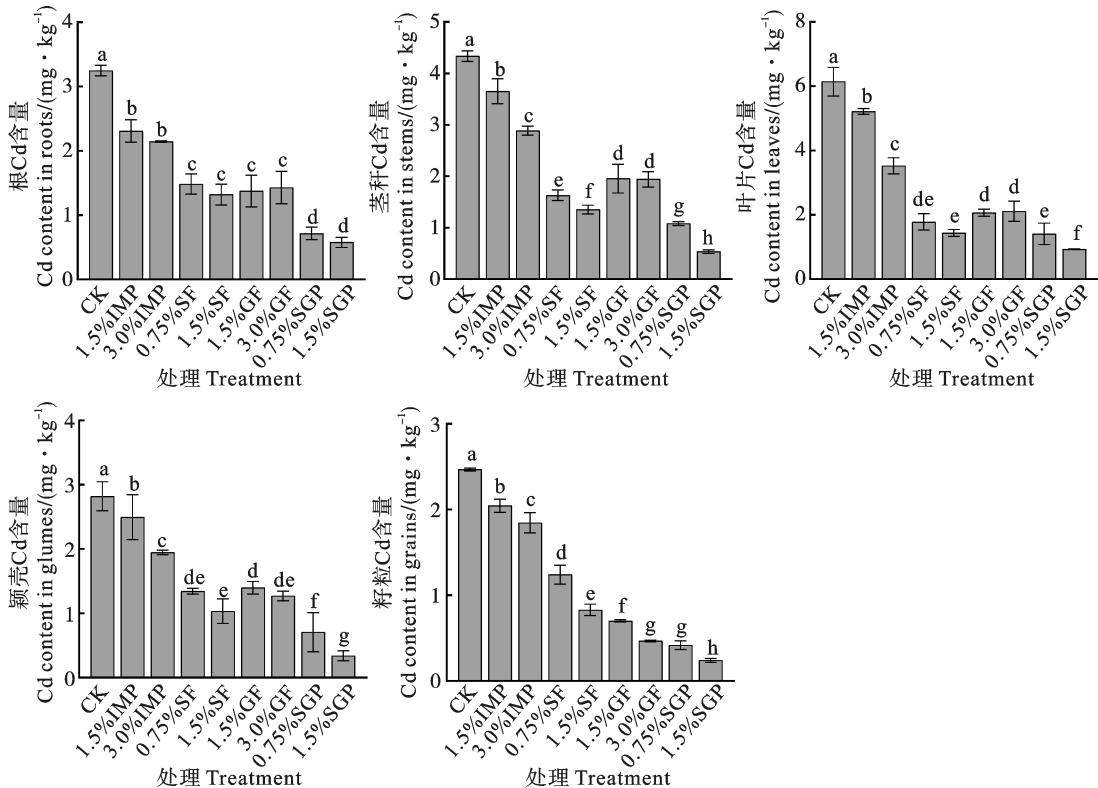
Table 1 Dry weight of each organ of wheat under different soil amendments

g · pot⁻¹

处理 Treatment	小麦器官 Organ of wheat				
	根 Root	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume	籽粒 Grain
CK	2.95±0.24ab	8.63±0.35abc	5.78±0.28a	6.07±0.47ab	23.54±0.38d
1.5%IMP	2.65±0.18ab	8.67±0.20abc	5.57±0.35a	6.18±0.72ab	24.95±0.57ab
3.0%IMP	3.13±0.54a	9.25±0.41a	5.85±0.43a	6.46±0.75a	25.33±0.27a
0.75%SF	2.62±0.26ab	8.33±0.54bc	5.41±0.17a	5.90±0.43ab	23.29±0.30d
1.5%SF	2.40±0.18b	8.31±0.41bc	5.22±0.55a	5.19±0.33b	23.00±0.22d
1.5%GF	2.63±0.51ab	7.95±0.76c	5.19±0.53a	5.45±0.39ab	23.29±0.41d
3.0%GF	2.92±0.45ab	7.97±0.39bc	5.20±0.17a	5.77±0.77ab	23.48±0.47d
0.75%SGP	3.16±0.24a	8.77±0.14ab	5.52±0.10a	5.96±0.09ab	24.24±0.15c
1.5%SGP	3.14±0.14a	8.62±0.08abc	5.61±0.29a	6.09±0.55ab	24.47±0.26c

同列数值后不同字母表示处理之间差异显著(P<0.05)。表 2~表 5 同。

Different letters after the values in the same columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same in tables 2-5.



图柱上不同字母代表处理之间差异显著(P<0.05)。图 2 同。

Different letters above columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same in figure 2.

图 1 不同土壤调理剂下小麦各器官 Cd 含量

Fig. 1 Cd content in each organ of wheat under different soil amendments

2.3 土壤调理剂对小麦各器官 Cd 富集系数的影响

小麦不同器官 Cd 的富集系数均表现为叶片 > 茎秆 > 根 > 颖壳 > 籽粒(表 2)。与 CK 相比,施用土壤调理剂处理的根、茎秆、叶片、颖壳和籽粒的 Cd 富集系数均显著降低,降幅分别为 28.95%~82.24%、15.75%~87.65%、15.07%~84.83%、11.60%~87.97%和 17.15%~90.25%。4 种土壤调理剂对小麦籽粒 Cd 富集能力降低效果表现为 SGP>GF>SF>IMP,且高施用量效果优于低施用量。这说明施用土壤调理剂可有效减少小麦对土壤 Cd 的吸收和在器官中的累积。

2.4 土壤调理剂对小麦籽粒微量元素和 Si 含量的影响

施用土壤调理剂对小麦籽粒 Fe、Mn、Cu、Zn 和 Si 含量也有一定的影响(表 3)。与 CK 相比,

所有施用调理剂处理的小麦籽粒 Fe 和 Cu 含量均无显著变化;IMP、SF 处理的 Mn 含量显著降低(降幅 22.71%~55.22%),3.0%GF、SGP 处理的 Mn 含量显著增加(增幅 24.12%~74.79%),1.5%GF 处理的 Mn 含量无显著变化;1.5%IMP、SF、GF、SGP 处理的 Zn 含量均显著降低(降幅 6.82%~41.56%);3.0%IMP 处理的 Zn 含量无显著变化;3.0%IMP、1.5%SF、GF、SGP 处理的 Si 含量均显著升高(增幅 18.86%~40.90%),1.5%IMP 和 0.75%SF 处理的 Si 含量无显著变化。

2.5 土壤调理剂对土壤有效态 Cd 含量的影响

与 CK 相比,施用土壤调理剂(除 IMP 外)后土壤有效态 Cd 含量均显著降低,降幅为 24.71%~92.37%(图 2)。其中,SGP 对土壤有效态 Cd 含量降低效果最佳,0.75%SGP 和 1.5%SGP 处理分别降低 92.37%和 90.65%;其次为 GF,1.5%

表 2 不同土壤调理剂下小麦各器官的 Cd 富集系数

Table 2 Cd bio-enrichment coefficient of each organ in wheat under different soil amendments

处理 Treatment	小麦各器官 Cd 富集系数 Cd bio-enrichment coefficient of each organ in wheat				
	根 Root	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glum	籽粒 Grain
CK	0.79±0.02a	1.05±0.03a	1.49±0.11a	0.69±0.06a	0.60±0.004a
1.5%IMP	0.56±0.04b	0.89±0.06b	1.27±0.02b	0.61±0.08b	0.50±0.02b
3.0%IMP	0.52±0.002b	0.70±0.02c	0.86±0.06c	0.47±0.01c	0.45±0.03c
0.75%SF	0.36±0.04c	0.40±0.03e	0.43±0.06de	0.33±0.01de	0.30±0.03d
1.5%SF	0.32±0.04c	0.33±0.02f	0.35±0.03e	0.25±0.05e	0.20±0.02e
1.5%GF	0.33±0.06c	0.47±0.07d	0.50±0.03d	0.34±0.02d	0.17±0.003f
3.0%GF	0.35±0.06c	0.47±0.04d	0.51±0.08d	0.31±0.02de	0.11±0.003g
0.75%SGP	0.17±0.02d	0.26±0.01g	0.34±0.08f	0.17±0.07f	0.10±0.01g
1.5%SGP	0.14±0.02d	0.13±0.01h	0.23±0.002g	0.08±0.02g	0.06±0.01h

表 3 不同土壤调理剂下小麦籽粒微量元素和 Si 含量

Table 3 Trace element and Si contents in wheat grains under different soil amendments

处理 Treatment	Fe/(mg·kg ⁻¹)	Mn/(mg·kg ⁻¹)	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Si/(mg·kg ⁻¹)
CK	41.88±4.06ab	34.71±2.30d	13.66±0.41abcd	139.88±3.68a	54.70±4.38e
1.5%IMP	43.02±0.53ab	26.83±1.68e	13.47±0.38bcd	130.34±0.96bc	63.51±3.53de
3.0%IMP	38.79±1.28b	19.63±2.55ef	13.33±0.11cd	134.64±3.70ab	67.68±6.62bcd
0.75%SF	39.63±0.74b	15.54±4.54f	13.84±0.75abc	106.23±9.21d	55.63±2.89e
1.5%SF	40.93±0.41ab	23.82±2.53e	13.92±0.15abc	81.75±3.62f	67.16±1.31bcd
1.5%GF	42.43±0.80ab	35.41±3.09cd	14.35±0.56a	91.11±3.65e	73.59±5.94abc
3.0%GF	44.93±3.76a	60.67±10.56a	14.24±0.27ab	92.32±1.93e	77.07±6.71a
0.75%SGP	41.75±3.29ab	43.08±1.80bc	12.89±0.40d	103.77±5.73d	65.02±8.46cd
1.5%SGP	44.53±2.30a	44.20±4.70b	13.44±0.11bcd	123.08±2.54c	75.09±5.36ab

GF、3.0%GF 处理分别降低 44.34%和 54.96%；最后为 SF,0.75%SF 和 1.5%SF 处理分别降低 24.71%和 28.42%。

2.6 土壤调理剂对土壤化学性质的影响

施用土壤调理剂显著影响土壤理化性质(表 4)。与 CK 相比,0.75%SF、1.5%SF、1.5%GF、3.0%GF、3.0%IMP 处理的土壤 pH 显著升高,其中 3.0%GF 处理最高,1.5%IMP、0.75%SGP 和 1.5%SGP 处理的土壤 pH 值无显著变化;1.5%SGP 处理的土壤电导率显著升高,其他施用土壤调理剂处理均无显著变化;除 0.75%SF 和 1.5%SF 处理外,其他处理的土壤有机质含量均显著增加,增幅为 6.72%~55.58%,其中 3.0%IMP 处理增幅最大;IMP 处理的土壤全氮含量显著升高,1.5%SF 处理的土壤全磷含量显著增加,其他处理均无显著变化;除 1.5%IMP、0.75%SGP 和 1.5%SGP 处理外,其他处理的土壤速效磷含量均显著增加,增幅为 16.52%~107.92%,

其中 3.0%GF 处理增幅最大;除 1.5%IMP、0.75%SGP 和 1.5%SGP 处理外,其他处理土壤速效钾含量均显著增加,增幅为 13.92%~116.03%,其中 3.0%GF 处理最高。

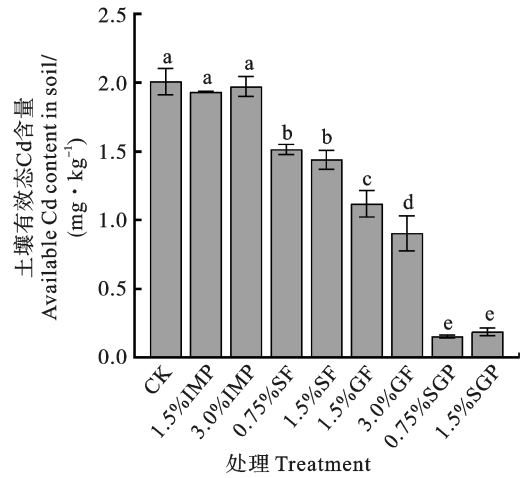


图 2 不同土壤调理剂下土壤有效镉含量

Fig. 2 Soil available Cd content under different soil amendments

表 4 不同土壤调理剂下土壤化学性质

Table 4 Chemical properties of soil under different soil amendments

处理 Treatment	pH	电导率 Electrical conductivity/ (us · cm ⁻¹)	有机质 Organicmatter/ (g · kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g · kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g · kg ⁻¹)	速效磷 Available P/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg · kg ⁻¹)
CK	6.50±0.10f	410.4±43.3b	25.06±0.37f	1.85±0.08c	0.96±0.01b	14.77±0.95e	158.0±10.0e
1.5%IMP	6.62±0.18ef	413.9±29.0b	31.62±0.13b	2.04±0.06a	0.96±0.05b	14.97±0.87e	167.3±4.6de
3.0%IMP	6.67±0.07e	444.0±74.3b	38.99±0.54a	2.02±0.10ab	1.00±0.05b	17.21±1.04d	180.0±5.3d
0.75%SF	7.83±0.22d	429.4±39.9b	24.12±0.27g	1.90±0.05abc	1.05±0.04ab	17.55±0.10d	182.0±12.2d
1.5%SF	8.12±0.05c	441.0±58.4b	24.29±0.34fg	1.93±0.07abc	1.12±0.03a	18.99±0.76c	209.3±9.2c
1.5%GF	8.41±0.11b	448.8±59.1b	26.74±0.43e	1.80±0.05c	1.03±0.11ab	24.74±0.59b	281.3±24.1b
3.0%GF	8.64±0.04a	435.3±57.9b	29.36±0.99c	1.90±0.14abc	1.03±0.03ab	30.71±0.86a	341.3±19.7a
0.75%SGP	6.54±0.09ef	464.2±62.9ab	27.83±0.39de	1.87±0.08bc	1.00±0.02b	14.76±0.82e	164.0±4.0de
1.5%SGP	6.53±0.15ef	539.3±21.9a	27.33±0.32de	1.87±0.13bc	1.00±0.09b	15.01±0.48e	172.0±3.5de

2.7 土壤调理剂对土壤有效态微量元素和 Si 含量的影响

施用土壤调理剂后土壤有效态微量元素和 Si 含量也发生了一定的变化(表 5)。与 CK 相比,GF 处理的土壤有效态 Mn 含量显著升高,1.5%GF、3.0%GF 处理的土壤有效态 Mn 含量分别提高 0.16 倍和 1.69 倍,其他施用土壤调理剂处理的土壤有效态 Mn 含量均显著降低,其中 SF 处

理的土壤有效态 Mn 含量最低;所有施用土壤调理剂处理均显著降低了土壤有效态 Zn 含量,显著提高土壤有效态 Si 含量,GF 处理的土壤有效态 Si 含量最高,1.5%GF、3.0%GF 处理分别是 CK 的 2.08 倍和 4.78 倍;除 3.0%IMP 处理外,其他施用土壤调理剂处理的土壤有效态 Fe 和 Cu 含量均显著降低,其中 GF 处理的土壤有效态 Fe 含量最低,SGP 处理的土壤有效态 Cu 含量最低。

表 5 不同土壤调理剂下土壤有效态微量元素和 Si 含量

Table 5 Contents of available trace elements and Si in soil under different soil amendments

处理 Treatment	有效态锰 Available Mn/ (mg · kg ⁻¹)	有效态锌 Available Zn/ (mg · kg ⁻¹)	有效态铁 Available Fe/ (mg · kg ⁻¹)	有效态铜 Available Cu/ (mg · kg ⁻¹)	有效态硅 Available Si/ (mg · kg ⁻¹)
CK	5.31±0.65c	90.55±1.42a	28.32±1.00a	6.53±0.11a	11.04±0.29f
1.5%IMP	2.69±0.51e	81.44±1.45b	26.51±1.95b	6.05±0.18b	13.32±0.50e
3.0%IMP	2.66±0.42e	84.23±1.24b	29.74±0.47a	6.17±0.11ab	13.76±0.51e
0.75%SF	0.35±0.04f	54.60±2.28e	13.76±1.73c	5.31±0.24c	17.06±0.53c
1.5%SF	0.65±0.18f	51.21±0.96f	13.90±0.69c	4.82±0.44d	16.90±0.27c
1.5%GF	6.14±0.22b	47.55±0.81g	5.19±0.20d	4.91±0.08d	41.56±0.92b
3.0%GF	14.26±0.49a	35.64±0.65h	3.65±0.17d	4.63±0.06d	52.76±0.90a
0.75%SGP	3.76±0.36d	60.63±2.79d	26.43±0.33b	4.23±0.22e	16.32±0.67c
1.5%SGP	3.90±0.32d	69.89±3.76c	25.99±0.78b	4.56±0.26de	15.09±0.31d

3 讨论

3.1 土壤调理剂对土壤有效态 Cd 含量和小麦 Cd 吸收的影响

土壤原位钝化是当前 Cd 污染耕地安全利用的关键技术之一,通过向土壤中添加土壤调理剂来降低 Cd 的移动性和生物有效性,从而降低 Cd 在作物中的积累量。土壤 pH 是影响土壤重金属 Cd 迁移性和生物有效性的重要因素之一,与土壤有效态 Cd 含量呈负相关^[18-19]。施用碱性材料会使土壤 pH 值升高,增加土壤表面负电荷数量,增强土壤对 Cd²⁺ 的吸附^[20],同时施用碱性材料会促进 Cd 的碳酸盐或氢氧化物沉淀生成,降低 Cd 的溶解度^[21]。本研究所用 IMP、SF、GF 均为偏碱性材料钝化剂,与 CK 相比,此 3 种土壤调理剂施用后土壤 pH 值均有不同程度升高,其中 SF 和 GF 处理的土壤 pH 值显著升高 1.33~2.14,这可能是直接导致土壤有效态 Cd 含量降低的主要原因,进而小麦植株各器官 Cd 含量显著降低。土壤有机质含量也是影响土壤 Cd 生物有效性的主要因素之一。有机质富含活性官能团,如羧基和羟基等,可增强土壤对 Cd 的吸附作用,还可与 Cd 形成难溶性络合物,降低 Cd 在土壤中的迁移性^[22]。本研究所用 GF、IMP 均为含有机物料的碱性钝化剂,除了提高土壤 pH 值外,还可以增加土壤有机质含量。在降低小麦籽粒 Cd 含量和土壤有效态 Cd 含量的效果上,GF 的效果明显好于无机类调理剂 SF。有机类钝化剂其表面富含活性官能团,可与重金属发生络合反应,形成稳定不易分解的重金属络合物,降低土壤重金属的活性^[23-24]。在本研究中,IMP 除了含大量腐殖质

(具有大量的活性官能团,如羧基、醇羟基和酚羟基等)外,其成分还有零价铁,具有较高的反应活性。添加 IMP 后土壤有机质含量显著增加,小麦植株各部位 Cd 含量显著降低,这与杜衍红等^[25]在水稻上的研究结果相一致。

另外,吸附和络合作用是改变土壤重金属赋存形态的重要方式^[26]。一方面,SGP 中的黏土矿物通过离子吸附等作用来降低土壤重金属移动性和生物有效性^[27-28]。另一方面,其富含的巯基官能团是 Cd²⁺ 的主要吸附位点,可通过单齿或双齿配位形式络合固定 Cd²⁺,这主要是因为巯基中亲核 S 与 Cd²⁺ 之间存在较强作用力^[29]。也有研究发现,施用巯基改性黏土矿物可增加土壤黏粒表面负电荷,增强土壤黏粒对 Cd²⁺ 的吸附固定^[30]。本研究中施用 SGP 对小麦各器官 Cd 含量和土壤有效态 Cd 含量的降低效果均最为明显,0.75%SGP 和 1.5%SGP 处理的小麦籽粒 Cd 含量分别降低了 83.03%和 90.25%,土壤有效态 Cd 含量分别降低了 92.37%和 90.65%,这可能与其对土壤 Cd 的吸附和固定直接相关,这与前人对改性坡缕石在蔬菜和水稻上的研究结果基本一致^[31-32]。

3.2 土壤调理剂对小麦籽粒微量元素和 Si 含量的影响

微量营养元素 Fe、Mn、Cu、Zn 等在植物体内含量虽低,但对于植物生长发育至关重要。Cd 是植物的非必需元素,植物主要通过 Fe、Mn、Zn 等二价金属离子的转运体来吸收转运 Cd^[33]。此外,有研究表明,植物体内 Cd 含量与 Fe、Zn、Cu 含量呈显著正相关,与 Mn 含量呈显著负相关^[34-35]。究其原因,一方面,施用土壤调理剂在降

低土壤 Cd 生物有效性的同时可能会影响土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 的有效性,进而会影响小麦对 Fe、Mn、Cu、Zn 的吸收;另一方面,由于钝化剂的理化性质或者本身可能含有 Fe、Mn 等微量元素,施用后造成土壤中微量元素有效性的升高或降低,进而会影响小麦对 Cd 的吸收。本研究中,由于施用 3%GF 后土壤有效态 Mn 含量显著增加,促进了小麦对 Mn 的吸收,进一步抑制小麦对 Cd 的吸收。另外,施用 SGP 显著促进了小麦对 Mn 的吸收,导致土壤有效态 Mn 含量显著下降,进而抑制小麦对 Cd 的吸收。除 3.0%IMP 处理外,所有处理小麦籽粒 Zn 含量显著降低,这可能是由于施用土壤调理剂会降低土壤中 Cd 有效性,同时减弱土壤中 Zn 的有效性。因此,在重金属 Cd 污染土壤钝化过程中,需要关注施用土壤调理剂对植物吸收 Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素的影响。此外,Si 是植物营养的有益元素可促进植物生长发育,提高作物产量和品质。Si 可以抑制水稻籽粒对 Cd 的吸收^[36],本研究中 GF 和 SGP 中均富含 Si 元素,施用后土壤有效态 Si 含量和小麦籽粒 Si 含量均显著升高,这可能是小麦籽粒 Cd 含量显著下降的主要原因之一。

4 结论

与 CK 相比,施用 SF、GF、IMP 和 SGP 后小麦根、茎秆、叶片、颖壳和籽粒中的 Cd 含量均显著降低,降幅分别为 28.95%~82.24%、15.75%~87.65%、15.07%~84.83%、11.60%~87.97%和 17.15%~90.25%。除 IMP 外,其他处理的土壤有效态 Cd 含量均显著降低,降幅为 24.71%~92.37%。SGP 在降低小麦籽粒 Cd 含量和土壤有效态 Cd 含量的效果最明显,GF 的效果次之,IMP 的效果最差。综合考虑土壤调理剂对土壤化学性质、土壤 Cd 的钝化效果、小麦籽粒 Cd 吸收和对小麦产量的影响,推荐 0.75%SGP 为北方镉污染石灰性褐土上最佳土壤调理剂及施用量。

参考文献:

- [1] YANG Z H, DONG C D, CHEN C W, *et al.* Using poly-glutamic acid as soil-washing agent to remediate heavy metal-contaminated soils [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(6): 5231.
- [2] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部,国土资源部, 2014. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of the national survey of soil pollution [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014.
- [3] SALIM N, RAZA A. Nutrient use efficiency (NUE) for sustainable wheat production: A review [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43(2): 297.
- [4] 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. 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.
- [5] 曾晓舵,王向琴,涂新红,等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1900. ZENG X D, WANG X Q, TU X H, *et al.* Research progress on speciation and physiological control of heavy metal in soil-plant system [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9): 1900.
- [6] 李娟. 安全利用类轻中度镉污染农田土壤原位调理修复应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. LI J. Application study on in-situ remediation of safe use farmland soil with mild to moderate Cd contamination [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [7] 黄奇,李江涛,葛颖,等. 不同钝化剂处理对稻米镉积累的影响及其时效性评价[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(2): 396. HUANG Q, LI J T, GE Y, *et al.* Effect of different passivation agents on cadmium accumulation in rice and its time-effect evaluation [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(2): 396.
- [8] 李超,艾绍英,唐明灯,等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2143. LI C, AIS Y, TANG M D, *et al.* Effects of a mineral conditioner on the forms of Cd in paddy soil and Cd uptake by rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2143.
- [9] 唐乐斌,刘新彩,宋波,等. 基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 429. TANG L B, LIU X C, SONG B, *et al.* Response of cadmium in soil-rice to different conditioners based on field trials [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 429.
- [10] 曹迟,鲍广灵,陶荣浩,等. 不同调理剂对富硒高镉农田水稻降镉增硒效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2155. CAO C, BAO G L, TAO R H, *et al.* Effects of different conditioners on reducing cadmium and increasing selenium in rice in selenium-rich and high-cadmium farmland rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2155.
- [11] 邱炜,周通,李远,等. 改性及复合黏土矿物调理剂对土壤镉有效性和稻米镉含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 654. QIU W, ZHOU T, LI Y, *et al.* Effects of the modified and compounded clay mineral conditioners on cadmium availability in soil and cadmium content in brown rice [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(5): 654.
- [12] 张静静,朱爽阁,朱利楠,等. 不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 460. ZHANG J J, ZHU S G, ZHU L N, *et al.* Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 460.
- [13] 周芬,刘源,李中阳,等. 调理剂与耕作栽培措施修复镉污染麦田土壤效果研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(13): 120. ZHOU F, LIU Y, LI Z Y, *et al.* Remediation effects of conditioners and cultivation measures on cadmium-contaminated wheat field [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(13): 120.

- [14]解晓露,袁 鑫,朱晓龙,等.中碱性镉污染农田原位钝化修复材料研究进展[J].土壤通报,2018,49(5):1254.
XIE X L, YUAN C, ZHU X L, *et al.* *In-situ* passivation remediation materials in cadmium contaminated alkaline agricultural soil: A review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5): 1254.
- [15]黎红亮,袁 鑫,符云聪,等.钝化剂对中碱性农田土壤重金属镉及其在小麦中累积的影响[J].生态与农村环境学报,2023,39(2):244.
LI H L, YUAN C, FU Y C, *et al.* The effect of soil passivator on heavy metal cadmium in alkaline farmland soil and its accumulation in wheat [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(2): 244.
- [16]GONG L, WANG J, ABBAS T, *et al.* Immobilization of exchangeable Cd in soil using mixed amendment and its effect on soil microbial communities under paddy upland rotation system [J]. *Chemosphere*, 2021, 262: 127828.
- [17]赵莎莎,肖广全,陈玉成,等.不同施用量石灰和生物炭对稻田镉污染钝化的延续效应[J].水土保持学报,2021,35(1):334.
ZHAO S S, XIAO G Q, CHEN Y C, *et al.* Continuous effect of different application rates of lime and biochar on the passivation of cadmium pollution in paddy fields [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 334.
- [18]茹淑华,赵欧亚,侯利敏,等.8种钝化剂产品对不同镉污染土壤理化性质和镉有效性的影响[J].生态环境学报,2021,30(10):2085.
RU S H, ZHAO O Y, HOU L M, *et al.* Effects of eight kinds of passivators on properties and cadmium availability in different cadmium-contaminated soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(10): 2085.
- [19]茹淑华,侯利敏,赵欧亚,等.钝化剂种类和添加比例对土壤镉钝化效果和小白菜吸收镉的影响[J].华北农学报,2020,35(S1):274.
RU S H, HOU L M, ZHAO O Y, *et al.* Effects of passivator types and adding proportion on soil cadmium passivation effect and cadmium absorption by Chinese cabbage [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(S1): 274.
- [20]赵一鸣,董颖博,林海,等.土壤理化性质对重金属形态的影响[J].农业工程,2018,8(12):38.
ZHAO Y M, DONG Y B, LIN H, *et al.* Influence of soil physical and chemical properties on forms of heavy metals [J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(12): 38.
- [21]刘 娟,张乃明,袁启慧.不同钝化剂对铅镉复合污染土壤钝化效果及影响因素研究[J].生态环境学报,2021,30(8):1732.
LIU J, ZHANG N M, YUAN Q H. Passivation effect and influencing factors of different passivators on lead-cadmium compound contaminated soils [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(8): 1732.
- [22]张 磊,郑永红,张治国,等.土壤中镉的吸附解吸研究进展[J].应用化工,2021,50(7):1942.
ZHANG L, ZHENG Y H, ZHANG Z G, *et al.* Research progress on adsorption and desorption of cadmium in soil [J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(7): 1942.
- [23]ALAM M, HUSSAIN Z, KHAN A, *et al.* The effects of organic amendments on heavy metals bioavailability in mine impacted soil and associated human health risk [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 262: 109067.
- [24]宋明言,袁再健,黄 斌,等.生物炭对红壤团聚体吸附Cd的影响研究[J].生态环境学报,2021,30(12):2402.
SONG Y Y, YUAN Z J, HUANG B, *et al.* Studies on the influence of biochar on the adsorption of Cd onto red soil aggregates [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(12): 2402.
- [25]杜衍红,王向琴,刘传平,等.铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田的修复效果研究[J].农业现代化研究,2021,42(2):311.
DU Y H, WANG X Q, LIU C P, *et al.* Study on the simultaneous remediation of Cd and As contamination in the paddy soil by applying iron modified woody peat [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(2): 311.
- [26]邢金峰,仓 龙,任静华.重金属污染农田土壤化学钝化修复的稳定性研究进展[J].土壤,2019,51(2):224.
XING J F, CANG L, REN J H. Remediation stability of *in situ* chemical immobilization of heavy metals contaminated soil: A review [J]. *Soils*, 2019, 51(2): 224.
- [27]朱 维,刘代欢,陈建清,等.黏土矿物在土壤重金属污染中的应用研究进展[J].土壤通报,2018,49(2):499.
ZHU W, LIU D H, CHEN J Q, *et al.* Research progress on the application of clay minerals in the remediation of cadmium polluted farmland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(2): 499.
- [28]陶 玲,管天成,刘瑞珍,等.热改性坡缕石对土壤Cd污染的钝化修复研究[J].农业环境科学学报,2021,40(4):782.
TAO L, GUAN T C, LIU R Z, *et al.* Stabilization remediation of cadmium contaminated soil by using heat-modified palygorskite [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 782.
- [29]LIANG X, QIN X, HUANG Q, *et al.* Mercapto functionalized sepiolite: A novel and efficient immobilization agent for cadmium polluted soil [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(63): 39955.
- [30]LIANG X, LI N, HE L, *et al.* Inhibition of Cd accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in alkaline soil using mercapto-modified attapulgite [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 818.
- [31]尹秀玲.巯基修饰坡缕石对降低作物镉吸收的影响及机理研究[D].长春:吉林大学,2018.
YIN X L. Effects of mercapto modified on reducing cadmium uptake of crops and its mechanism [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [32]何丽质,徐应明,宋常志,等.巯基化坡缕石对碱性土壤镉污染的快速钝化修复效应[J].农业环境科学学报,2021,40(2):319.
HE L Z, XU Y M, SONG C Z, *et al.* Using thiolated palygorskite to remediate Cd-contaminated alkaline soil via rapid immobilization [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 319.
- [33]MA J F, SHEN R F, SHAO J F. Transport of cadmium from soil to grain in cereal crops: A review [J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1): 3.
- [34]LIU J G, LIANG J S, LI K Q, *et al.* Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1467.
- [35]CHANG J D, HUANG S, YAMAJI N, *et al.* OsNRAMP1 transporter contributes to cadmium and manganese uptake in rice [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2020, 43(10): 2476.
- [36]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.
CHEN Z, TIEB Q, LEI M, *et al.* Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2762.