

翻压紫云英对双季稻产量、镉吸收及转运的影响

朱启东^{1,2}, 鲁艳红^{1,3}, 廖育林^{1,3}, 高雅洁^{1,3}, 谢雪^{1,3}, 孙玉桃^{1,3}, 曹卫东⁴, 聂军^{1,3*}

(1 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125; 2 湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南长沙 410128; 3 农业农村部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙 410125; 4 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】探讨紫云英在水稻生产中的增产降镉(Cd)效应以及降Cd的生理机制。【方法】5年田间微区定位试验设4个处理: 不施任何肥料(CK)、翻压紫云英(GM)、单施化肥(F)和紫云英翻压配施化肥(F+GM), 翻压紫云英的处理冬闲田种植紫云英, 作为绿肥在早稻插秧前翻压还田。在双季稻分蘖期、灌浆期和成熟期采集水稻植株样品, 分为根、茎叶、籽粒3个部分, 测定其Cd含量。【结果】1) 与CK相比, F+GM与F处理5年水稻产量显著增加, GM处理从2017年起增产显著; 与F处理相比, F+GM处理5年水稻均增产, 其中2016与2020年显著增产。2) 翻压紫云英对水稻同一部位在不同时期的降Cd效应不同。早稻GM处理根Cd含量在分蘖期、灌浆期和成熟期均显著低于CK, 晚稻则无显著差异; 早稻的GM处理茎叶Cd含量在灌浆期显著低于CK, 晚稻的无显著差异; 早稻的GM处理籽粒Cd含量在灌浆期和成熟期均显著低于CK(分别降低85.7%和57.6%), 晚稻的无显著差异。早稻的F+GM处理根Cd含量在分蘖期、灌浆期和成熟期均显著低于F处理, 晚稻的则无显著差异; 早稻的F+GM处理茎叶Cd含量在分蘖期显著低于F处理, 晚稻的无显著差异。3) 翻压紫云英下水稻不同时期Cd转运有差异。早稻分蘖期F+GM处理的根-茎叶Cd转运系数显著高于CK与F处理, 成熟期GM处理的茎叶-籽粒Cd转运系数显著低于CK, 降幅为52.2%; 晚稻则无显著差异。4) F+GM和GM处理根与籽粒Cd累积量均较低, 其根部累积量显著低于F处理; GM处理早稻籽粒Cd累积量显著低于F处理; 而F+GM晚稻茎叶Cd累积量则显著高于CK。F+GM与GM处理籽粒Cd分配比例低于CK与F处理, F+GM处理的茎叶Cd分配比例高于F处理, GM处理的茎叶Cd分配比例高于CK。5) 早稻各处理的土壤总Cd含量差异不显著, 晚稻则表现为GM处理显著低于CK。早稻的GM与F+GM处理土壤有效Cd含量显著低于CK, 晚稻的则无显著差异。【结论】翻压紫云英可增加水稻产量, 同时具有较好的降Cd效应。翻压紫云英的降Cd生理机制为: 一是可降低土壤有效Cd含量, 从而降低水稻Cd含量; 二是可降低茎叶-籽粒间的Cd转运系数, 减弱向籽粒的转运能力, 降低水稻籽粒中Cd的累积, 进而生产出Cd含量低于国家安全限量的稻米。

关键词: 紫云英; 双季稻; 产量; 降镉

Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) on yield, cadmium absorption and translocation of double-cropping rice

ZHU Qi-dong^{1,2}, LU Yan-hong^{1,3}, LIAO Yu-lin^{1,3}, GAO Ya-jie^{1,3}, XIE Xue^{1,3}, SUN Yu-tao^{1,3}, CAO Wei-dong⁴, NIE Jun^{1,3*}

[1 Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410125, China; 2 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3 Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha, Hunan 410125, China; 4 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China]

Abstract: 【Objectives】We assessed the effects of milk vetch on rice yield, mitigation of cadmium (Cd) toxicity in rice, and the physiological mechanism underlying Cd mitigation. 【Methods】A 5-year field micro-compartment experiment was conducted. The experimental treatments were fertilizer-free (CK), milk vetch

收稿日期: 2021-04-21 接受日期: 2021-09-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700200); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-22-G-11); 国家自然科学基金联合基金项目(U19A2046); 湖南省农业科技创新资金项目(2020CX69, 2020CX68)。

联系方式: 朱启东 E-mail: zqd3726@126.com; *通信作者 聂军 E-mail: niejun197@163.com

(GM), chemical fertilizer (F), and milk vetch with chemical fertilizer (F+GM). The milk vetch was returned to the field as winter planting green manure. Rice plant material was sampled at tillering, filling and maturity stage of double-cropping rice. Cd content in root, stem and leaf, and grain were analyzed. The pH, total Cd and available Cd content in 0–20 cm soil layer were analyzed after rice harvest. **【 Results 】** 1) Compared with CK, the rice yield of F+GM and F treatment increased significantly, GM treatment increased significantly from 2017. Compared with F, the rice yield of F+GM treatment increased, especially in 2016 and 2020. 2) The Cd reduction effects of returning milk vetch on the same part of rice at different stages were different. The Cd content of early rice root of GM treatment was significantly lower than CK in tillering, filling and maturity stage, but there was no significant difference in late rice. The Cd content in stem and leaf of early rice GM treatment was significantly lower than CK at grain filling stage, but there was no significant difference in late rice. The content of Cd in grain of early rice, GM treatment was significantly lower than that of CK at grain filling and maturity stage (decreased by 85.7% and 57.6% respectively), and there was no significant difference in late rice. The Cd content of root in early rice, F+GM treatment was significantly lower than F at tillering, filling and maturity stage, but there was no significant difference in late rice. The Cd content in stem and leaf of early rice F+GM treatment was significantly lower than that of F at tillering stage, but there was no significant difference in late rice. 3) There were differences in Cd transport in rice at different stages under the return milk vetch. In early rice, the root-stem leaf Cd transport coefficient of F+GM treatment was significantly higher than F and CK at tillering stage. The stem and leaf-grain Cd transport coefficient of GM treatment was significantly lower than CK at maturity, with a decrease of 52.2%. There was no significant difference in late rice. 4) The accumulation of Cd in the roots of F+GM and GM treatments was significantly lower than that of F; the Cd accumulation of early rice grains in GM treatment was significantly lower than that of F; and the Cd accumulation of stems and leaves of F+GM late rice was significantly higher than that of CK. The distribution ratio of Cd in the grains of F+GM and GM is lower than that of CK and F, the distribution ratio of Cd in stems and leaves of F+GM is higher than that of F, and the distribution ratio of Cd in stems and leaves of GM is higher than that of CK. 5) There was no significant difference in soil total Cd content among early rice, while GM treatment was significantly lower than CK in late rice. Compared with CK, the soil available Cd of early rice of GM and F+GM was decreased significantly, and no significant difference in late rice. **【 Conclusions 】** Returning milk vetch to soil proved to be effective in increasing rice yield and decreasing Cd content in rice. The two reasons for the positive effects of the milk vetch were: (1) the decreased availability of soil Cd reduced Cd absorption by rice; and (2) the reduced transport coefficient of Cd from stems and leaves to grains at maturing stage made the rice Cd content lower than the safety limit recommended by the National standard.

Key words: milk vetch; double cropping rice; yield increase; Cd reduction

近年来随着城镇化和工业的快速发展,工业“三废”排放量逐渐增大,同时为满足我国巨大的粮食数量需求,农业生产也在迅速发展,生产过程中产生的废弃物也在快速增加,内外因素作用下,我国农业生态环境中的重金属含量逐步增加。重金属元素经过作物吸收富集,通过食物链进入人体^[1],对我国粮食安全和居民健康形成严重的威胁^[2],以重金属 Cd 的危害最为严重,现已成为农田重金属污染的主要来源之一^[3-4]。在这样的形势下,必须尽早抑制 Cd 污染在我国农业生产中的威胁,以保证我国粮食质量安全。

紫云英属于豆科绿肥,是一种较为优质的有机肥源,紫云英的种植利用对我国农业生产有着重要作用,其有利于培肥土壤^[5]、改善土壤质量^[6-7]、增加产量^[8]。同时,紫云英的利用有效提高稻田土壤有机质含量^[9],而有机质会对土壤 Cd 离子产生一定的吸附效果^[10],有机质含量较高的土壤对 Cd 离子的吸附更强。此外,紫云英还田可改善土壤的 pH^[11],进而改变土壤 Cd 离子的活性。

当前对于紫云英还田对后季作物 Cd 累积的影响效果仍不是很明确。吴浩杰等^[12]认为在 Cd 污染地区翻压紫云英,可使稻谷、稻草及整株水稻 Cd 含量分

别下降 23.8%、50.2% 和 40.8%。紫云英还田有效降低水稻对 Cd 的吸收^[13], 缓解 Cd 污染对水稻造成的负面影响。而范晶晶等^[14]则认为紫云英还田后, 水稻根对 Cd 的吸收量增加 4.22%。值得注意的是, 前人的研究重点是关注 Cd 在水稻植株中的累积, 对于在紫云英的利用下 Cd 进入水稻植株体内的转运与分配方面关注相对较少。而水稻各部分对 Cd 的积累能力存在很大差异^[15-16]。为进一步明确紫云英还田对水稻 Cd 吸收的影响以及对水稻植株体内 Cd 转运与分配的影响, 本研究采用田间微区试验, 研究在轻度 Cd 污染稻田土壤上, 连续 5 年翻压紫云英对水稻产量及其不同部位 Cd 含量与稻田土壤 Cd 含量的影响, 探讨连续 5 年紫云英还田对水稻籽粒产量及水稻 Cd 吸收与转运的影响。为指导处于轻度 Cd 污染双季稻区域如何进行农业安全生产提供有力理论依据, 对于保证我国粮食安全、改善农业生态环境具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

本试验开始于 2016 年, 试验地点位于湖南省农业科学院土壤肥料研究所试验基地, 该地位于季风气候区, 年降水量在 1400 mm 左右, 降水主要集中在春、夏两季, 平均气温为 16.8℃。供试土壤为第四纪红土发育而成的红黄泥, 其基础理化性状: pH 6.26, 有机质 31.5 g/kg、全氮 1.86 g/kg、全磷 0.74 g/kg、全钾 12.5 g/kg, 水解性氮 213 mg/kg、有效磷 31.3 mg/kg、速效钾 111 mg/kg; 总 Cd 含量 0.351 mg/kg、有效 Cd 含量 0.125 mg/kg。试验所用早稻为常规稻 ‘湘早籼 32 号’, 晚稻为杂交稻 ‘深优 9586’。

1.2 试验设计

本试验为田间微区试验, 小区面积为 1.34 m×1.69 m=2.25 m², 随机区组设计, 3 次重复, 4 个处理: 1) CK, 不施用任何肥料; 2) GM, 原田翻压紫云英, 紫云英播种量为 37.5 kg/hm²; 3) F, 施用化肥, 化肥施用量为早稻 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm², 晚稻为 N 180 kg/hm²、P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²; 4) F+GM, 施用化肥且翻压紫云英, 化肥用量同 F 处理, 紫云英播种量同 GM 处理。氮、磷和钾肥分别用尿素、钙镁磷肥和氯化钾, 氮肥分两次分别在每年早、晚稻移栽前 (70%) 和分蘖期 (30%) 施用, 磷肥全部在每年早、晚稻移栽前

基施, 钾肥分两次分别在每年早、晚稻移栽前 (50%) 和分蘖期 (50%) 施用, 基肥于水稻移栽前 1 天施入, 立即用铁齿耙耙入表土下 5 cm 的深度, 追肥为移栽后 10~15 天。紫云英于每年早稻移栽前 7 天鲜草翻压入田。移栽密度早、晚稻均为 20 cm×20 cm。其他田间管理措施与当地常规管理一致。

1.3 分析测定项目

试验开展前采集 0—20 cm 土层土样, 用于测定分析土壤的基本理化性质。从 2016 至 2020 年, 每年早、晚稻成熟后将水稻收割, 每个小区单打单晒, 进行测产。在 2020 年双季稻的 3 个生育时期 (分蘖期、灌浆期和成熟期) 采集水稻植株样, 每个小区采集具有代表性的 3 蔸植株样, 分成根、茎叶、籽粒 3 部位后置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘干至恒重, 粉碎, 测定其 Cd 含量。双季稻成熟收割后使用竹子做的土钻采集土壤样品, 每个小区采用五点取样法取土 5 钻, 各小区单独混匀后置于阴凉处晾干, 磨碎先过 0.90 mm 筛, 用于测定土壤 pH 和有效 Cd 含量, 再过 0.15 mm 筛, 用于测定全 Cd 含量, 分析测定方法参考《土壤农化分析 (第三版)》^[17]。

1.4 计算方法

Cd 的转运系数 (Cd transport coefficient)_(A-B)=B 器官中 Cd 含量/A 器官中 Cd 含量^[18]

1.5 数据处理与统计分析

数据处理用 Microsoft Excel 2010, 统计分析用 SPSS 20, 制图则用 Origin 9 软件。

2 结果与分析

2.1 翻压紫云英对双季稻产量的影响

图 1 可看出, 与 CK 相比, F 和 F+GM 处理可显著增加双季稻产量, GM 处理也从 2017 年起增产达到显著水平。与 F 处理相比, F+GM 处理双季稻各年产量均有增加, 2016 和 2020 年增产达到了显著水平; 与 GM 处理相比, F 和 F+GM 处理 5 年水稻增产均达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.2 翻压紫云英对双季稻 Cd 含量的影响

2.2.1 翻压紫云英对早稻植株 Cd 含量的影响 由表 1 可知, 早稻植株 Cd 含量随着水稻生育期推移而增加, 植株各部位 Cd 含量的高低顺序为根>茎叶>籽粒。3 个生育期, CK 处理植株 Cd 含量均处于最高; 单施化肥 (F 处理) 对分蘖期茎叶和根部的 Cd 含

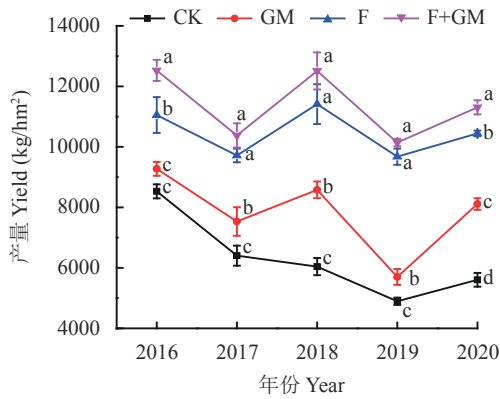


图 1 2016—2020 年双季稻产量年际变化

Fig. 1 Annual variation of double-cropping rice yield from 2016 to 2020

[注 (Note): CK—无肥对照 No fertilizer control; F—单施化肥 Only applying chemical fertilizer; GM—翻压紫云英 Planting and returning milk vetch; F+GM—化肥配合紫云英翻压 Chemical fertilizer plus milk vetch returning. 折线上不同小写字母表示同一年处理间产量差异显著 (Duncan, $P < 0.05$) Different small letters above the lines indicate significant difference among treatments in the same year (Duncan, $P < 0.05$).]

量无显著影响,但显著降低了灌浆期籽粒、茎叶和根部的 Cd 含量,显著降低了成熟期根部和籽粒中的 Cd 含量。GM 与 CK 相比,GM 早稻根部 Cd 含量在分蘖期、灌浆期和成熟期均显著低于 CK ($P < 0.05$);茎叶 Cd 含量只在灌浆期显著低于 CK;GM

处理灌浆期和成熟期籽粒 Cd 含量均显著低于 CK ($P < 0.05$),降幅分别达到了 85.7% 和 57.6%。GM 与 F 处理相比,除了成熟期茎叶 Cd 含量高于 F 处理之外,GM 植株 Cd 含量均低于 F 处理,分蘖期根 Cd 含量 GM 显著低于 F 处理,且 GM 处理灌浆期和成熟期籽粒 Cd 含量分别比 F 处理降低 20.0% 和 33.3%。F+GM 与 CK 相比,F+GM 处理 Cd 含量均低于 CK,除了成熟期的茎叶 Cd 含量外,其余均达到显著差异水平 ($P < 0.05$),F+GM 处理的灌浆期和成熟期籽粒 Cd 含量分别比 CK 降低 92.9%、48.5%。F+GM 与 F 处理相比,F+GM 处理的植株 Cd 含量均低于 F,其中根部 Cd 含量的差异均达到显著水平 ($P < 0.05$),F+GM 处理的灌浆期和成熟期籽粒 Cd 含量低于 F,降幅分别为 60.0%、19.0%。

CK 与 F 处理早稻成熟期籽粒 Cd 含量均高于 0.2 mg/kg 的国家限量标准 (GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》),存在安全风险,而 GM 与 F+GM 处理低于该限量,食用安全。

2.2.2 翻压紫云英对晚稻植株 Cd 含量的影响 表 2 表明,晚稻植株 Cd 含量也是根>茎叶>籽粒,植株 Cd 含量随着晚稻生育期推移而增加。F 处理的晚稻植株 Cd 含量在 3 个时期均是最高,但是成熟期籽粒 Cd 含量与对照差异不显著。

GM 处理植株 Cd 含量与 CK 没有显著差异,茎

表 1 不同处理早稻植株 Cd 含量 (mg/kg)

Table 1 Cd content in early rice with different treatments

部位 Part	处理 Treatment	分蘖期 Tillering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
籽粒 Grain	CK		0.28±0.03 a	0.33±0.05 a
	GM		0.04±0.02 b	0.14±0.05 b
	F		0.05±0.02 b	0.21±0.05 b
	F+GM		0.02±0.01 b	0.17±0.06 b
茎叶 Stem and leaf	CK	0.07±0.01 a	0.82±0.22 a	1.48±0.14 a
	GM	0.05±0.01 ab	0.08±0.01 b	1.35±0.50 a
	F	0.07±0.01 a	0.12±0.06 b	1.24±0.18 a
	F+GM	0.04±0.01 b	0.05±0.03 b	0.93±0.21 a
根 Root	CK	0.56±0.07 a	2.54±0.32 a	8.71±0.12 a
	GM	0.28±0.03 b	0.50±0.01 b	5.49±0.04 b
	F	0.56±0.04 a	0.54±0.03 b	5.63±0.38 b
	F+GM	0.20±0.03 b	0.12±0.02 c	3.91±0.19 c

注 (Note): CK—无肥对照 No fertilizer control; F—单施化肥 Only applying chemical fertilizer; GM—翻压紫云英 Planting and returning milk vetch; F+GM—化肥配合紫云英翻压 Chemical fertilizer plus milk vetch returning. 同列数据后不同字母表示同一部位处理间差异达 0.05 显著水平 (Duncan, $P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant difference among treatments in the same part at 0.05 level (Duncan, $P < 0.05$).

表 2 不同处理晚稻植株 Cd 含量 (mg/kg)
Table 2 Cd content in late rice with different treatments

部位 Part	处理 Treatment	分蘖期 Tillering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
籽粒 Grain	CK		0.03±0.02 b	0.04±0.01 a
	GM		0.06±0.00 b	0.06±0.01 a
	F		0.14±0.07 a	0.08±0.04 a
	F+GM		0.07±0.01 ab	0.06±0.05 a
茎叶 Stem and leaf	CK	0.04±0.00 b	0.07±0.01 a	0.28±0.02 a
	GM	0.05±0.01 ab	0.14±0.01 a	0.43±0.04 a
	F	0.09±0.02 a	0.33±0.15 a	0.43±0.13 a
	F+GM	0.06±0.02 ab	0.21±0.20 a	0.40±0.16 a
根 Root	CK	0.27±0.03 a	0.40±0.12 b	1.94±0.07 b
	GM	0.28±0.00 a	0.62±0.03 ab	1.96±0.40 b
	F	0.52±0.22 a	2.12±0.50 a	2.68±0.23 a
	F+GM	0.36±0.05 a	1.80±1.19 ab	2.32±0.16 ab

注 (Note): CK—无肥对照 No fertilizer control; F—单施化肥 Only applying chemical fertilizer; GM—翻压紫云英 Planting and returning milk vetch; F+GM—化肥配合紫云英翻压 Chemical fertilizer plus milk vetch returning. 同列数据后不同字母表示同一部位处理间差异达 0.05 显著水平 (Duncan, $P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant difference among treatments in the same part at 0.05 level (Duncan, $P < 0.05$).

叶 Cd 含量与 F 处理无显著差异, 灌浆期籽粒和成熟期根部 Cd 含量显著低于 F 处理 ($P < 0.05$)。F+GM 与 F 处理相比, 3 个时期各部位 Cd 含量均无显著差异。

2.3 翻压紫云英对双季稻 Cd 转运系数和分配比例的影响

2.3.1 翻压紫云英对双季稻 Cd 转运系数的影响
植株 A 部位向 B 部位转运能力的强弱可以用 A-B 转

运系数来表征, 转运系数小则表示两部位间的转运能力较弱^[9]。由表 3 可知, 与 CK 相比, GM 处理显著降低早稻成熟期茎叶-籽粒的转运系数, 降幅为 52.2% ($P < 0.05$); GM 处理早稻成熟期茎叶-籽粒转运系数比 F 处理下降了 35.3%。F+GM 处理灌浆期和成熟期的茎叶-籽粒转运系数分别比 CK 下降 35.1% 和 26.1%; F+GM 处理灌浆期茎叶-籽粒间转运系数比 F 处理下降 46.7%。

表 3 不同处理早、晚稻 Cd 转运系数
Table 3 Cd transport coefficient of early and late rice under different treatments

类型 Type	处理 Treatment	分蘖期 Tillering	灌浆期 Filling		成熟期 Maturity	
		根-茎叶	根-茎叶	茎叶-籽粒	根-茎叶	茎叶-籽粒
		Root-Stem and leaf	Root-Stem and leaf	Stem and leaf-Grain	Root-Stem and leaf	Stem and leaf-Grain
早稻 Early rice	CK	0.13±0.03 b	0.34±0.12 a	0.37±0.09 a	0.17±0.02 a	0.23±0.05 a
	GM	0.17±0.00 ab	0.17±0.02 a	0.41±0.15 a	0.25±0.09 a	0.11±0.01 b
	F	0.12±0.01 b	0.22±0.09 a	0.45±0.05 a	0.22±0.03 a	0.17±0.02 ab
	F+GM	0.19±0.04 a	0.46±0.23 a	0.24±0.10 a	0.24±0.07 a	0.17±0.03 ab
晚稻 Late rice	CK	0.16±0.02 a	0.18±0.05 ab	0.48±0.18 a	0.14±0.01 a	0.15±0.06 a
	GM	0.19±0.04 a	0.23±0.02 a	0.42±0.04 a	0.22±0.02 a	0.13±0.03 a
	F	0.25±0.20 a	0.16±0.08 ab	0.44±0.03 a	0.16±0.04 a	0.18±0.03 a
	F+GM	0.17±0.07 a	0.10±0.03 b	0.78±0.52 a	0.17±0.06 a	0.12±0.07 a

注 (Note): CK—无肥对照 No fertilizer control; F—单施化肥 Only applying chemical fertilizer; GM—翻压紫云英 Planting and returning milk vetch; F+GM—化肥配合紫云英翻压 Chemical fertilizer plus milk vetch returning. 同列数据后不同字母表示同一水稻类型处理间差异达 0.05 显著水平 (Duncan, $P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant difference among treatments in the same rice type at 0.05 level (Duncan, $P < 0.05$).

GM 处理的晚稻灌浆期和成熟期的茎叶-籽粒 Cd 转运系数分别比 CK 降低 12.5% 和 13.3%，分别比 F 处理 4.5% 和 27.8%。F+GM 处理期茎叶-籽粒 Cd 转运系数比 CK 下降 20.0%，比 F 处理下降 33.3%。

2.3.2 翻压紫云英对双季稻 Cd 累积量与分配比例的影响 由表 4 可知，各处理早稻成熟期根部与籽粒的 Cd 累积量和分配比例的差异明显，尤其是根系 Cd 累积量差异多达显著水平 ($P < 0.05$)。GM 处理早稻根部 Cd 累积量低于 CK，其根部、籽粒 Cd 分配比例均低于 CK，而茎叶分配比例则高于 CK；GM 处理早稻根、籽粒 Cd 累积量及分配比例均低于 F 处理，而茎叶 Cd 分配比例则高于 F 处理。F+GM 处理根部 Cd 累积量低于 CK，其根部与籽粒 Cd 分配比例也低于 CK，茎叶 Cd 分配比例则高于 CK；F+GM 处理根部 Cd 累积量低于 F，其根部与籽粒 Cd 分配比例均低于 F，茎叶分配比例则高于 F。早稻根、籽粒 Cd 累积量与分配比例最低的分别是 F+GM 和 GM 处理，而茎叶 Cd 分配比例则是 F+GM、GM 处理较高。

GM 处理的晚稻成熟期根部 Cd 累积量低于 F 处理，F+GM 处理根部 Cd 累积量也低于 F。GM 处理根部与籽粒 Cd 分配比例低于 CK，而茎叶 Cd 分配比例则高于 CK。F+GM 处理根部与籽粒 Cd 分配比例低于 F，其茎叶 Cd 分配比例则高于 F。晚稻 F+GM 处理根部与籽粒 Cd 分配比例最低，而茎叶

Cd 分配比例则是最高。

2.4 翻压紫云英对稻田土壤 pH 与 Cd 含量的影响

表 5 显示，GM 与 F+GM 处理早稻成熟期土壤 pH 显著低于 F 与 CK ($P < 0.05$)，各处理的早稻土壤总 Cd 含量差异不显著，GM 与 F+GM 处理的早稻土壤有效 Cd 显著低于 CK ($P < 0.05$)。

与 F 相比，GM 晚稻成熟期土壤 pH 高于 F，GM 处理晚稻土壤总 Cd 含量显著低于 CK；GM 与 F+GM 处理晚稻土壤有效 Cd 含量均较低，但与其他处理无显著差异。

3 讨论

3.1 翻压紫云英对水稻的增产降 Cd 效应

施肥为水稻提供了生长发育所需的养分，水稻获得增产。紫云英作为绿肥，翻压还田对水稻的增产作用已得到广泛验证^[20-23]，与常规化肥相比，翻压紫云英配施化肥更有利于水稻产量形成与稳定^[24-25]。此外，前人通过长期定位试验研究发现，翻压紫云英的增产效应随翻压年限的增加也有所增强^[23,26-27]。本研究结果表明，与 CK 相比，F+GM 与 GM 处理的水稻产量显著增加；与 F 相比，F+GM 处理的水稻产量增加；所有处理中产量最高的是 F+GM 处理。当不施用化肥时，翻压紫云英使水稻增产；施用化肥时，紫云英的利用也可使水稻增产。随着种

表 4 不同处理早、晚稻成熟期植株各部位 Cd 累积量与分配比例

Table 4 The accumulation and distribution ratio of Cd in each part of the early and late rice at maturity stage under different treatments

类型 Type	处理 Treatment	根部 Root		茎叶 Stem and leaf		籽粒 Grain	
		累积量	分配比例	累积量	分配比例	累积量	分配比例
		Accumulation ($\times 10^{-3}$ mg/hole)	Distribution ratio (%)	Accumulation ($\times 10^{-3}$ mg/hole)	Distribution ratio (%)	Accumulation ($\times 10^{-3}$ mg/hole)	Distribution ratio (%)
早稻 Early rice	CK	8.3 $\pm$ 0.5 b	36.6	11.0 $\pm$ 0.7 a	48.3	3.4 $\pm$ 0.4 ab	15.0
	GM	6.4 $\pm$ 0.5 c	30.9	13.6 $\pm$ 4.9 a	58.5	2.5 $\pm$ 0.9 b	10.7
	F	10.7 $\pm$ 0.5 a	33.4	16.6 $\pm$ 2.4 a	51.1	5.1 $\pm$ 1.1 a	15.0
	F+GM	6.4 $\pm$ 0.4 c	29.5	12.6 $\pm$ 2.5 a	56.1	3.3 $\pm$ 1.0 ab	14.4
晚稻 Later rice	CK	1.9 $\pm$ 0.1 d	36.4	2.7 $\pm$ 0.3 b	53.0	0.5 $\pm$ 0.1 b	10.6
	GM	3.0 $\pm$ 0.4 c	30.7	5.9 $\pm$ 1.0 b	60.5	0.9 $\pm$ 0.6 ab	8.7
	F	6.7 $\pm$ 0.5 a	25.3	18.2 $\pm$ 5.8 a	63.9	3.1 $\pm$ 1.2 a	10.9
	F+GM	5.2 $\pm$ 0.2 b	24.9	14.7 $\pm$ 3.2 a	67.7	1.8 $\pm$ 1.3 ab	7.4

注 (Note): CK—无肥对照 No fertilizer control; F—单施化肥 Only applying chemical fertilizer; GM—翻压紫云英 Planting and returning milk vetch; F+GM—化肥配合紫云英翻压 Chemical fertilizer plus milk vetch returning. 同列数据后不同字母表示同一水稻类型处理间差异达 0.05 显著水平 (Duncan, $P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant difference among treatments in the same rice type at 0.05 level (Duncan, $P < 0.05$).

表 5 不同处理土壤 pH、总 Cd 及有效 Cd 含量
Table 5 Soil pH, total Cd and available Cd content in different treatments

类型 Type	处理 Treatment	pH	总 Cd (mg/kg) Total Cd	有效 Cd (mg/kg) Available Cd
早稻 Early rice	CK	6.23±0.05 a	0.30±0.01 a	0.21±0.01 a
	GM	5.93±0.01 b	0.25±0.02 a	0.16±0.01 b
	F	6.18±0.13 a	0.25±0.02 a	0.16±0.01 b
	F+GM	5.92±0.15 b	0.25±0.03 a	0.17±0.02 b
晚稻 Late rice	CK	6.26±0.05 a	0.30±0.00 a	0.20±0.02 a
	GM	6.17±0.10 ab	0.23±0.03 b	0.17±0.01 a
	F	6.05±0.10 ab	0.28±0.02 ab	0.20±0.03 a
	F+GM	6.01±0.10 b	0.25±0.04 ab	0.19±0.00 a

注 (Note): CK—无肥对照 No fertilizer control; F—单施化肥 Only applying chemical fertilizer; GM—翻压紫云英 Planting and returning milk vetch; F+GM—化肥配合紫云英翻压 Chemical fertilizer plus milk vetch returning. 同列数据后不同字母表示同一水稻类型不同处理间差异达 0.05 显著水平 (Duncan, $P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant difference among treatments in same rice type at 0.05 level (Duncan, $P < 0.05$).

植年限增加, CK 处理的产量逐渐下降, GM 处理的产量则无显著下降趋势, 说明紫云英有利于水稻产量的稳定与增加。

根系是植物吸收 Cd 的关键部位^[28], 水稻不同器官 Cd 含量差异极大, 通常表现为根系>茎叶>籽粒^[29], 水稻根部 Cd 含量是籽粒的 20~40 倍、穗轴的 10~18 倍、叶片的 4~13 倍^[30], 本研究得出类似的结果。本研究中 F+GM 处理的早、晚稻根部 Cd 含量低于 F 处理, GM 处理的早稻根部 Cd 含量低于 CK; F+GM 处理的早、晚稻茎叶 Cd 含量低于 F 处理; GM 处理的早稻茎叶 Cd 含量低于 CK。F+GM 处理的籽粒 Cd 含量低于 F 处理, GM 处理的籽粒 Cd 含量低于 F 处理。范美蓉等^[31]的研究结果表明, 紫云英还田有效提高了水稻产量的同时, 使稻草 Cd 含量降低 39.1%, 使稻谷 Cd 含量降低 43.5%。说明翻压紫云英具有降低水稻 Cd 含量的作用。F 的早稻 Cd 含量低于 CK, 但 F 早稻的 Cd 累积量高于 CK, 说明化肥的施用增加水稻的 Cd 累积^[32], 但其 Cd 含量却有所下降, 这可能是由于化肥的施用促进水稻生长发育, 使其生物产量较高, 产生了一定的稀释效应^[12]。如 F 处理的籽粒产量较高, 其籽粒 Cd 累积量也较高, 而 F 处理的籽粒 Cd 含量却低于 CK, 而晚稻无此现象可能与水稻的品种有关^[18, 33]。此外, F+GM 与 GM 的水稻 Cd 累积量低于 CK 或 F, 说明紫云英翻压还田降低水稻对 Cd 的吸收积累。

施用普通化肥后水稻产量固然得到保证与增加, 但其存在一定的 Cd 污染风险。而单施紫云英的

水稻产量虽然低于单施化肥处理, 但紫云英的翻压降低了水稻中的 Cd 含量。紫云英与化肥配施水稻产量高于单施化肥, 同时其对水稻也具备较好的降 Cd 效应。

3.2 翻压紫云英降低水稻 Cd 吸收的生理机制

水稻吸收的 Cd 主要是土壤中活性较高的交换态 Cd^[34], 土壤有效 Cd 含量较高会促进水稻 Cd 吸收^[35], 说明通过控制土壤有效 Cd 含量可以限制水稻对 Cd 的吸收。刘昭兵等^[36]的研究表明, 水稻茎叶与籽粒的 Cd 含量下降是土壤有效 Cd 含量降低导致的。本研究的结果表明, GM 与 F+GM 处理早稻土壤有效 Cd 含量显著低于 CK, GM 与 F+GM 处理晚稻土壤有效 Cd 含量低于 CK 但不显著。说明翻压紫云英后, 水稻 Cd 含量与累积量下降, 与稻田土壤有效 Cd 含量降低有关, 紫云英的利用使土壤有效 Cd 含量下降, 土壤中 Cd 的有效性降低, 水稻对 Cd 的吸收受到影响, 水稻根的 Cd 含量下降, 致使茎叶与籽粒的 Cd 含量下降。此外, 本研究还发现紫云英的利用降低了当季水稻 (早稻) 土壤 pH, 前人在这方面进行了很多研究, 目前尚无较为明确且统一的结论, 如: 王阳等^[37]研究认为紫云英还田提升土壤 pH; 有研究则认为, 紫云英的种植利用会导致早稻收获期土壤 pH 的降低^[38]。相关研究表明, 土壤 pH 与有效 Cd 含量存在负相关关系^[39]。薛毅等^[40]的研究则认为施用有机肥, 土壤有效 Cd 下降, 同时土壤 pH 也降低 0.1~0.4 个单位; 本研究中的紫云英作为天然有机肥, 改善土壤的效果与薛毅等^[40]的研究结

果相似,可能与土壤类型有关,其具体机理尚未明确,有待进一步深入研究。

Cd 进入水稻植株后,大部分集中累积在根与茎叶等部位,仅少量的 Cd 进入到籽粒^[41]。不同部位的 Cd 累积量主要是受部位间 Cd 转运速率的影响,根部吸收与根部向地上部的转运是影响水稻茎叶、籽粒 Cd 累积的主要因素^[42]。因为当水稻根部对 Cd 吸收较快,而根向地上部的转运较慢,根部 Cd 累积量会较高;反之,地上部如籽粒的 Cd 累积量则较高^[43-44]。本研究结果表明,F+GM 和 GM 处理各部位的 Cd 累积量均低于 F,说明与单施化肥相比,紫云英的利用均降低了水稻的 Cd 累积,这与秸秆等有机物料还田的结果^[45]相似。通过早稻 Cd 累积量的数据(表 4),F+GM 与 GM 处理的根部、籽粒 Cd 累积量低于 CK,而其茎叶的 Cd 累积量则高于 CK,表明紫云英的利用对水稻 Cd 的分布产生一定的影响。此外,从各部位的 Cd 分配比例来看,各处理的籽粒 Cd 分配比例较低,其中 CK 与 F 两个处理的籽粒 Cd 分配比例一致,而 F+GM 与 GM 处理的籽粒 Cd 分配比例低于 CK 与 F,F+GM 与 GM 处理籽粒 Cd 分配比例降低的这部分则是转移到了茎叶中,印证了紫云英的还田影响水稻 Cd 的分布与分配。同时 F+GM 和 GM 处理茎叶-籽粒的 Cd 转运系数低于 CK 与 F,表明紫云英的利用降低了水稻茎叶-籽粒的 Cd 转运系数,减弱茎叶-籽粒的 Cd 转运能力,茎叶-籽粒的 Cd 转运量减少,导致茎叶的 Cd 累积量上升,分配占比增多,而籽粒的 Cd 累积量下降,分配占比减少。

4 结论

翻压紫云英增加水稻产量,同时具有较好的降 Cd 效应。紫云英的翻压对水稻的降 Cd 生理机制为:一是降低了土壤有效 Cd 含量,从而降低水稻 Cd 含量;二是降低茎叶-籽粒的 Cd 转运系数,减弱 Cd 向籽粒的转运能力,降低水稻籽粒 Cd 累积与分配,生产出 Cd 含量低于国家安全限量的稻米。

参 考 文 献:

- [1] Sponza D, Karaoglu N. Environmental geochemistry and pollution studies of Aliaga metal industry district[J]. *Environment International*, 2002, 27: 541-555.
- [2] Davis R D. Cadmium—a complex environmental problem. Part II. Cadmium in sludges used as fertilizer[J]. *Experientia*, 1984, 40(2): 117-126.
- [3] Yu H, Wang J, Fang W, *et al.* Cadmium accumulation in different

- rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2-3): 302-309.
- [4] 胡培松. 土壤有毒重金属镉毒害及镉低积累型水稻筛选与改良[J]. *中国稻米*, 2004, (2): 10-12.
- Hu P S. The toxicity of soil toxic heavy metal cadmium and the screening and improvement of low cadmium accumulation rice[J]. *China Rice*, 2004, (2): 10-12.
- [5] 高菊生, 黄晶, 杨志长, 等. 绿肥稻草联合还田显著提高土壤有机质含量稳定氮素供应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 472-480.
- Gao J S, Huang J, Yang Z C, *et al.* Improving organic matter content and nitrogen supply stability of double cropping rice field through co-incorporation of green manure and rice straw[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 472-480.
- [6] 杨曾平, 徐明岗, 聂军, 等. 长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 92-97, 102.
- Yang Z P, Xu M G, Nie J, *et al.* Effect of long-term winter planting-green manure on reddish paddy soil quality and comprehensive evaluation under double-rice cropping system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 92-97, 102.
- [7] 聂鑫, 鲁艳红, 廖育林, 等. 化肥减施下紫云英不同翻压量对水稳性团聚体及双季稻产量的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(6): 155-164.
- Nie X, Lu Y H, Liao Y L, *et al.* Effects of the incorporation of various amounts of Chinese milk vetch and reducing chemical fertilizer on water-stable aggregates and yield in double cropping rice system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(6): 155-164.
- [8] 周兴, 廖育林, 鲁艳红, 等. 减量施肥下紫云英与稻草协同利用对双季稻产量和经济效益的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 43(5): 469-474.
- Zhou X, Liao Y L, Lu Y H, *et al.* Effects of Chinese milk vetch and rice straw synergistic dispatching on grain yield and economic benefit of double cropping rice system under fertilizer reduction[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 43(5): 469-474.
- [9] 周兴, 谢坚, 廖育林, 等. 基于紫云英利用的化肥施用方式对水稻产量和土壤碳氮含量的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 39(2): 188-193.
- Zhou X, Xie J, Liao Y L, *et al.* Effects of fertilizer management on rice yield, soil organic carbon and total nitrogen based on utilizing the milk vetch[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2013, 39(2): 188-193.
- [10] Bunzl K, Schmid W, Sansoni B. Kinetics of ion exchange in soil organic matter. IV. Adsorption and desorption of Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Ca^{2+} by peat[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 27(1): 32-41.
- [11] 陈怀满, 熊毅. 紫云英和稻草对土壤溶液 pH 和 Eh 的影响[J]. *土壤*, 1984, (5): 189.
- Chen H M, Xiong Y. Effects of milk vetch and rice straw on pH and Eh of soil solution[J]. *Soils*, 1984, (5): 189.
- [12] 吴浩杰, 周兴, 鲁艳红, 等. 紫云英翻压对稻田土壤镉有效性及水稻镉积累的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(16): 105-111.
- Wu H J, Zhou X, Lu Y H, *et al.* Effects of *Astragalus smicus* on cadmium effectiveness in paddy soil and cadmium accumulation in

- rice plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(16): 105–111.
- [13] 吴浩杰, 周兴, 鲁艳红, 等. 绿肥作物对耕地镉污染修复机理综述[J]. *湖南农业科学*, 2016, (4): 115–118.
- Wu H J, Zhou X, Lu Y H, *et al.* Review of remediation mechanism of cadmium pollution cultivated land by planting green manure[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016, (4): 115–118.
- [14] 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.
- [15] 孙聪, 陈世宝, 宋文恩, 等. 不同品种水稻对土壤中镉的富集特征及敏感性分布(SSD)[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(12): 2384–2394.
- Sun C, Chen S B, Song W E, *et al.* Accumulation characteristics of cadmium by rice cultivars in soils and its species sensitivity distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12): 2384–2394.
- [16] 张路, 张锡洲, 李廷轩, 等. Cd胁迫对水稻亲本材料Cd吸收分配的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2288–2295.
- Zhang L, Zhang X Z, Li T X, *et al.* Effect of cadmium stress on uptake and distribution of cadmium in different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2288–2295.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015, 375–377.
- Bao S D. Soil and agrochemical analysis (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015, 375–377.
- [18] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6): 1028–1033.
- Cai Q L, Lin D S, Wang G, *et al.* Difference in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1028–1033.
- [19] 李芹, 张曼, 张锡洲, 等. 水稻镉安全材料分蘖期根部镉积累分布特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(3): 443–452.
- Li Q, Zhang M, Zhang X Z, *et al.* Accumulation and distribution characteristics of Cd in roots of cadmium-safe rice line at tillering stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 443–452.
- [20] 黄晶, 高菊生, 刘淑军, 等. 冬种紫云英对水稻产量及其养分吸收的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (1): 88–92.
- Huang J, Gao J S, Liu S J, *et al.* Effect of Chinese milk vetch in winter on rice yield and its nutrient uptake[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, (1): 88–92.
- [21] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 343–349.
- Gao J S, Xu M G, Dong C H, *et al.* Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 343–349.
- [22] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4542–4548.
- Gao J S, Cao W D, Li D C, *et al.* Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4542–4548.
- [23] 高菊生, 曹卫东, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2010, 24(6): 672–676.
- Gao J S, Cao W D, Dong C H, *et al.* Effects of long-term rice-rice-green manure rotation on rice yield[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(6): 672–676.
- [24] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 190–195, 201.
- Liao Y L, Lu Y H, Xie J, *et al.* Effects of combined application of controlled release nitrogen fertilizer and Chinese milk vetch on yield and nitrogen uptake of early rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 190–195, 201.
- [25] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 紫云英与尿素或控释尿素配施对双季稻产量及氮钾利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 360–368.
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Effect of different incorporation of Chinese milk vetch coupled with urea or controlled release urea on yield and nitrogen and potassium nutrient use efficiency in double-cropping rice system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(2): 360–368.
- [26] 张成兰, 吕玉虎, 刘春增, 等. 紫云英配施减量化肥对水稻产量稳定性的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(3): 136–142.
- Zhang C L, Lü Y H, Liu C Z, *et al.* Effects of Chinese milk vetch coupled with application of reduced chemical fertilizer on stability of rice yield[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(3): 136–142.
- [27] 唐杉, 王允青, 赵决建, 等. 紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 3086–3093.
- Tang S, Wang Y Q, Zhao J J, *et al.* Effect of milk vetch application on double cropping rice yield and yield stability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11): 3086–3093.
- [28] DalCorso G, Farinati S, Maistri S, Furini A. How plants cope with cadmium: Staking all on metabolism and gene expression[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(10): 1268–1280.
- [29] 唐非, 雷鸣, 唐贞, 等. 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6): 1092–1098.
- Tang F, Lei M, Tang Z, *et al.* Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1092–1098.
- [30] 文志琦, 赵艳玲, 崔冠男, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(8): 1280–1286.
- Wen Z Q, Zhao Y L, Cui G N, *et al.* Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1280–1286.
- [31] 范美蓉, 张春霞, 廖育林, 等. 不同品种紫云英对镉污染土壤水稻生长累积效应的研究[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(20): 72–76.
- Fan M R, Zhang C X, Liao Y L, *et al.* Chinese milk vetch varieties: Accumulation effect on the rice growth in cadmium contaminated soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(20): 72–76.
- [32] 何其辉, 谭长银, 曹雪莹, 等. 肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(5): 942–951.
- He Q H, Tan C Y, Cao X Y, *et al.* Effects of fertilizer on the availability of heavy metals in soil and its accumulation in rice seedlings[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(5): 942–951.

- [33] 邓伟, 张玉烛, 敖和军, 等. 不同镉积累型水稻品种苗期镉积累及转运变化特征[J]. *中国稻米*, 2018, 24(4): 86–90.
- Deng W, Zhang Y Z, Ao H J, *et al.* Cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars at seedling stage[J]. *China Rice*, 2018, 24(4): 86–90.
- [34] 刘春梅, 罗盛国, 刘元英. 硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 190–199.
- Liu C M, Luo S G, Liu Y Y. Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold regions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 190–199.
- [35] 周静, 杨洋, 孟桂元, 等. 不同镉污染土壤下水稻镉富集与转运效率[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 89–94.
- Zhou J, Yang Y, Meng G Y, *et al.* Cadmium accumulation and translocation efficiency of rice under different cadmium-polluted soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1): 89–94.
- [36] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1585–1590.
- Liu Z B, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1585–1590.
- [37] 王阳, 刘恩玲, 王奇赞, 等. 紫云英还田对水稻镉和铅吸收积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 189–193.
- Wang Y, Liu E L, Wang Q Z, *et al.* Effects of milk vetch on cadmium and lead accumulation in rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 189–193.
- [38] 张珺潼, 曹卫东, 徐昌旭, 等. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012, (1): 19–25.
- Zhang J T, Cao W D, Xu C X, *et al.* Effects of incorporation of milk vetch (*Astragalus sinicus*) on microbial populations and activities of paddy soil in Jiangxi[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (1): 19–25.
- [39] 周亮, 肖峰, 肖欢, 等. 施用石灰降低污染稻田上双季稻镉积累的效
- 果[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(4): 780–791.
- Zhou L, Xiao F, Xiao H, *et al.* Effects of lime on cadmium accumulation of double-season rice in paddy fields with different cadmium pollution degrees[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(4): 780–791.
- [40] 薛毅, 盛浩, 黄勇, 等. 湘东地区双季稻施用有机肥对土壤镉活性及镉米镉含量的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5): 1203–1210.
- Xue Y, Sheng H, Huang Y, *et al.* Effects of organic fertilizer application on cadmium activity of soil and cadmium content of rice in a double cropping paddy field in eastern Hunan Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(5): 1203–1210.
- [41] 贺敏杰, 蔡昆争, 王维, 等. 硅素分期施用对土壤镉形态和水稻镉累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(8): 1651–1659.
- He M J, Cai K Z, Wang W, *et al.* Effects of split silicon application on the fractions of Cd in soil and its accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1651–1659.
- [42] 李鹏, 葛滢, 吴龙华, 等. 两种籽粒镉含量不同水稻的镉吸收转运及其生理效应差异初探[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(3): 291–296.
- Li P, Ge Y, Wu L H, *et al.* Uptake and translocation of cadmium and its physiological effects in two rice cultivars different in grain cadmium concentration[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(3): 291–296.
- [43] Ueno D, Yamaji N, Kono I, *et al.* Gene limiting cadmium accumulation in rice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(38): 16500–16505.
- [44] Uruguchi S, Fujiwara T. Rice breaks ground for cadmium-free cereals[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16(3): 328–334.
- [45] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 212–218.
- Zhang Y L, Shen Q R, Jiang Y. Effect of organic manure on the amelioration of Cd-pollution soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 212–218.