

绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响

王赞, 付利波, 梁海, 章子含, 杨伟, 何正海, 高嵩涓, 曹卫东

引用本文:

王赞, 付利波, 梁海, 等. 绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2124–2133.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0457>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响

范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143–2150 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187>

磷灰石、石灰对Cd胁迫下黑麦草根形态及Cd吸收影响研究

杜志敏, 向凌云, 杜凯敏, 杨文玲, 王继雯, 雷高, 郭雪白, 郭亮, 周静, 巩涛, 陈国参, 甄静

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 92–101 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0376>

生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响

王凤, 王梦露, 许堃, 董旭, 虞娜, 张玉龙, 党秀丽

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 907–914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1599>

EDTA与耐性细菌对黑麦草吸收复合污染红壤中铅镉的影响

史鼎鼎, 梁小迪, 徐少慧, 蒋代华, 黄智刚

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1634–1641 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1349>

DGT和化学提取法评价贵州赫章土法炼锌区污染土壤中镉的植物吸收有效性

高慧, 宋静, 吕明超, 张厦, 张强, 刘灵飞, 龙健

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 1992–1999 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0473>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王赞, 付利波, 梁海, 等. 绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2124–2133.

WANG Y, FU L B, LIANG H, et al. Effects of green manure crops on cadmium availability in dryland soils in Yunnan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10): 2124–2133.



开放科学 OSID

绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响

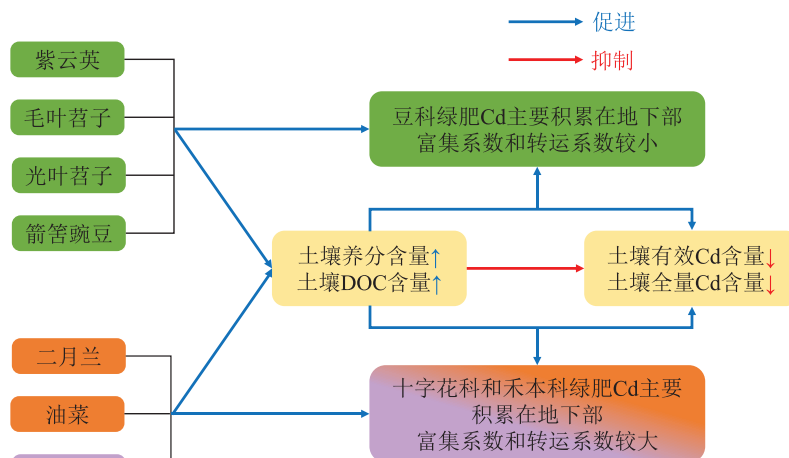
王赞¹, 付利波², 梁海¹, 章子含¹, 杨伟⁴, 何正海⁵, 高嵩涓^{1*}, 曹卫东^{3*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 4. 昆明市农产品质量安全中心, 昆明 650118; 5. 富宁县农业农村局, 云南 富宁 663400)

摘要: 研究不同绿肥作物对云南旱地中度镉(Cd)污染土壤(平均全Cd含量 $1.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中Cd有效性和植物对Cd吸收、转运的影响, 为当地基于绿肥的农作物安全生产措施提供理论支撑。采用盆栽试验, 设8个处理: 种植紫云英、毛叶苕子、光叶苕子、箭筈豌豆、二月兰、油菜、黑麦草等7种冬季绿肥作物和冬闲对照, 于绿肥盛花期及同期测试土壤理化性状、Cd有效性、绿肥作物地上部与地下部Cd含量和富集系数、转运系数。结果表明: 与冬闲相比, 种植紫云英和黑麦草土壤可溶性有机碳(DOC)含量分别增加29.3%和33.7%。7种绿肥作物均显著降低土壤有效Cd和全量Cd含量, 其中箭筈豌豆、光叶苕子、黑麦草处理的土壤有效Cd相比冬闲分别下降了32.1%、29.2%和33.0%; 紫云英、毛叶苕子、光叶苕子和箭筈豌豆土壤全量Cd分别下降45.4%、34.9%、34.5%和33.2%。4种豆科绿肥Cd主要积累在地下部, 且富集系数和转运系数较小; 禾本科与十字花科绿肥Cd主要集中在地上部, 富集系数和转运系数均显著高于豆科绿肥, 其中二月兰富集系数最高, 为0.813, 油菜转运系数最高, 为0.772。土壤养分对土壤有效Cd有显著正影响; 土壤DOC对植株地上部Cd含量有显著负影响, 说明DOC含量的升高可以降低植株Cd含量。种植豆科绿肥在显著改善土壤养分、提高土壤质量的同时, 能够降低土壤有效Cd含量, 且富集系数和转运系数较低。

关键词: 绿肥; 镉; 有效性; 可溶性有机质

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2021)10-2124-10 **doi:** 10.11654/jaes.2021-0457



Effects of green manure crops on cadmium availability in dryland soils in Yunnan, China

WANG Yun¹, FU Libo², LIANG Hai¹, ZHANG Zihan¹, YANG Wei⁴, HE Zhenghai⁵, GAO Songjuan^{1*}, CAO Weidong^{3*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 3. Key Laboratory of Plant Nutrition and

收稿日期: 2021-04-16 录用日期: 2021-06-15

作者简介: 王赞(1995—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事绿肥效应与机制研究。E-mail: 2019103002@njau.edu.cn

*通信作者: 高嵩涓 E-mail: gaosongjuan@njau.edu.cn; 曹卫东 E-mail: caoweidong@caas.cn

基金项目: 国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22); 昆明市基金项目: 农用地重金属污染防控模式攻关及应用研究

Project supported: The Earmarked Fund for Modern Agro-Industry Technology Research System-Green Manure(CARS-22); The Kunming Fund Project: PR and Application Research on Prevention and Control Mode of Heavy Metal Pollution in Agricultural Land

Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Kunming Agricultural Products Quality and Safety Center, Kunming 650118, China; 5. Agricultural and Rural Bureau of Funing County, Funing 663400, China)

Abstract: This study investigated the impact of different green manure crops on the availability, absorption and transportation of cadmium (Cd) in moderately Cd-contaminated soil (average total Cd content=1.21 mg·kg⁻¹), to provide theoretical support to green manure-based soil safety production methods in Yunnan dryland. A pot experiment was used to carry out this investigation; the experiment consisted of eight treatments, including seven types of winter green manure crops (i.e., Chinese milk vetch, hairy vetch, common vetch, smooth vetch, February orchid, rape, ryegrass), and winter fallow as the control. Soils and plants were sampled during the full bloom stage and the same stage as the green manures. The soil physico-chemical properties, Cd availability, and the Cd content in the roots and shoots of the green manures were measured; then, the bioconcentration and translocation factors of green manures were calculated. Compared with the control, the soil dissolved organic carbon (DOC) content of the Chinese milk vetch and ryegrass treatments increased by 29.3% and 33.7%, respectively. The seven green manure crops all significantly reduced available soil Cd content, in which the available Cd in the soil treated with common vetch, smooth vetch, and ryegrass decreased by 32.1%, 29.2%, and 33.0%, respectively. The total Cd in soil treated with Chinese milk vetch, hairy vetch, common vetch, and smooth vetch decreased by 45.4%, 34.9%, 34.5%, and 33.2%, respectively. The four types of leguminous green manure mainly accumulated Cd in the roots, and the bioconcentration and translocation factors were lower than the other legume types. The Cd in the gramineous and cruciferous green manures was mainly concentrated in the shoots, and the bioconcentration and translocation factors were significantly higher than the leguminous green manure. Among them, the bioconcentration factor of the February orchid was the highest (0.813), and the translocation factor of rape was the highest (0.772). Soil nutrients had significant positive impacts on the available soil Cd, whereas DOC had a relatively significant negative impact on the Cd content of plant shoots. This indicates that an increase in DOC content may reduce the Cd content of plants. Planting leguminous green manure, particularly smooth vetch, improves soil nutrients and quality and reduces the soil available Cd content with a lower bioconcentration factor and translocation factor.

Keywords: green manure; cadmium; availability; dissolved organic matter

镉(Cd)是一种有强迁移性和生物毒性的重金属污染物,较易从土壤转移到富集系数较高的植物中^[1-2],进而影响植物的生理特征,并对作物的生长产生抑制作用^[3]。目前,Cd原位化学钝化固定修复技术是降低Cd向食物链的迁移污染风险、修复中轻度重金属土壤污染的重要技术^[4-6],能够降低土壤中Cd的有效性,减少作物对Cd的吸收,实现作物安全生产和保护生态环境。

种植绿肥是一种传统的培肥增产措施,在保障作物高产稳产和构建良好农业生态环境中发挥着不可替代的作用^[7-9]。冬种绿肥能够改善土壤肥力、减少化肥施用量,是农业清洁生产的重要手段^[10-11]。应用绿肥可以减少Cd在土壤中的积累,阻控Cd向植物体内迁移,进而降低后茬作物中的Cd含量^[12-14],还可改变土壤中Cd的赋存形态,通过降低土壤中Cd生物有效态含量来减弱其生物有效性^[15]。种植肥用油菜可使稻田土壤中Cd有效性降低5%~14%^[16],种植紫云英可以促进土壤中的酸可提取态Cd和可还原态Cd向残渣态Cd转化,增加土壤中Cd的稳定性,从而削弱土壤中Cd向植物中的转化能力^[17]。MOHAMED等^[18]在研究中也得出了相同的结论,种植绿肥显著降低了土壤中

可溶性/交换性Cd的含量,增加了土壤中有机结合态和无机沉淀态Cd的含量。可见通过种植绿肥降低土壤Cd向作物的迁移是一种经济有效的措施。

云南省部分地区土壤重金属污染较严重,农业生产环境脆弱^[19]。种植绿肥是当地普遍采用的耕作措施,以蔬菜/玉米-绿肥轮作种植制度为主,但不同绿肥对土壤Cd活性的影响尚不明确。本文选取4种典型豆科绿肥(紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆、光叶苕子)、2种典型十字花科绿肥(二月兰、油菜)和1种典型禾本科绿肥(黑麦草),通过盆栽试验研究不同绿肥作物对云南旱地中度污染土壤中Cd有效性,以及不同绿肥作物对Cd吸收转运的影响及其差异,探究土壤-绿肥互作体系中Cd的生物有效性,寻求提高土壤肥力和降低土壤Cd活性的有效手段,筛选评价较适宜的绿肥作物,为基于绿肥的农业安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区及试验材料

云南省昆明市东川区位于云贵高原北部边缘(102°47'~103°18'E, 25°57'~26°32'N),海拔695 m。

土壤类型为沉积土,质地为砂土。土壤经风干、混匀、磨碎后过2 mm筛备用。

Cd污染土壤采集自区内农田耕层(0~20 cm),Cd平均含量为 $1.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,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),呈现中度污染等级。供试土壤理化性质为pH 8.35,有机质 $9.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $18.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效Cd $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全量Cd $1.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试绿肥作物为紫云英(弋江籽)、毛叶苕子(皖苕)、箭筈豌豆(陇箭1号)、光叶苕子(云光早苕)、二月兰、绿肥油菜(中肥油1号)和黑麦草,均为广泛应用于田间实践的主栽绿肥品种,种子来源于国家绿肥产业技术体系种质资源库。

1.2 试验设计

盆栽试验在南京农业大学温室进行,采用直径30.8 cm、高21 cm的白色PVC圆盆种植绿肥作物,每盆装8 kg供试土壤。紫云英、光叶苕子、毛叶苕子、箭筈豌豆、二月兰、油菜和黑麦草的播种量分别为0.56、0.84、1.10、2.24、0.14、0.42 $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 和0.42 $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$,另设冬闲对照,每处理设5个重复。2019年11月26日装盆、播种,绿肥生长期以称重法保持土壤含水量为田间持水量的60%。

1.3 样品采集及指标测定

于绿肥盛花期及同期,即绿肥生物量最大的时期(2020年4月10日)采集植株和土壤样品。植株全盆收获后分成地上部与地下部(根系),地下部植株清水冲洗干净后再用去离子水冲洗,于 105°C 杀青30 min, 70°C 烘干至恒质量,称量质量、粉碎后备用。植株样品采集后,全盆土混匀采取土壤样品,一部分 4°C 保存,一部分风干、磨碎后过2 mm和0.149 mm筛备用。紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆、光叶苕子、二月兰、油菜和黑麦草在收获时的生物量(鲜质量)分别为69.61、86.74、86.75、93.54、91.99、133.53 $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 和123.00 $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。

土壤pH值采用5:1水土比,电位法测定^[20];土壤有效磷(AP)采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠提取-钼锑钒比色法测定^[20];土壤速效钾(AK)采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸铵浸提-原子吸收法测定^[20];无机氮(Nmin)采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钾浸提,连续流动分析仪(SAN++, Skalar, 荷兰)测定;可溶性有机质(DOM)采用超纯水浸提(水土比5:1),振荡、离心后上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜,所得滤液采用TOC分析仪(TOC-L CPH, 岛津, 日本)测定

可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)含量。

土壤有效态Cd采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 浸提,振荡、离心后上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜,ICP-MS(NexlON 2000, PerkinElmer, 美国)测定^[21];土壤全量Cd采用硝酸、盐酸、氢氟酸、高氯酸四酸消解,消解液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜后,ICP-MS测定^[22];植株Cd用采用硝酸-过氧化氢(4:1)微波消解后,过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜,ICP-MS测定^[23]。土壤Cd测定过程中以国家标准物质GBW07404a(GSS-4a)控制样品质量,植株Cd测定过程中以国家标准物质GBW10045a(GSB-23a)控制样品质量,回收率均控制在95%以上。

1.4 富集系数与转运系数

富集系数表征植物对重金属富集能力的强弱,转运系数表征植株将重金属从地下部向地上部运输的能力大小,当转运系数 >1 时,表明重金属多集中在植株的地上部,转运系数 <1 时,表明重金属多集中在地下部。

富集系数(BCF)为植株地上部Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与土壤中Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的商;转运系数(TF)为植株地上部Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与植株地下部Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的商。

1.5 数据统计与分析

采用SPSS 21.0进行方差分析和相关性分析,采用Duncan法,在 $P<0.05$ 水平下进行差异显著性检验,Origin 8.5作图。

2 结果与分析

2.1 不同绿肥作物对土壤基础性状的影响

不同绿肥作物对土壤pH、有机质和全氮含量无显著影响(表1)。与冬闲相比,种植绿肥后土壤有效磷、速效钾和无机氮均有不同程度下降,其中,种植黑麦草后有效养分降低最多,有效磷、速效钾、无机氮分别降低14.8%、29.4%和96.0%。

2.2 不同绿肥作物对土壤DOC和DON含量的影响

与冬闲相比,种植紫云英和黑麦草显著增加土壤DOC含量(图1),分别增加了29.3%和33.7%;种植毛叶苕子、箭筈豌豆和光叶苕子也不同程度的增加了土壤DOC含量,增幅分别为7.1%、17.5%和2.8%。与冬闲相比,种植7种绿肥均显著降低了土壤DON含量,其中种植黑麦草和油菜后降幅最高,分别降低了78.4%和77.4%(图1)。

2.3 不同绿肥作物对土壤Cd有效性的影响

由图2可知,冬闲处理的土壤有效Cd含量为

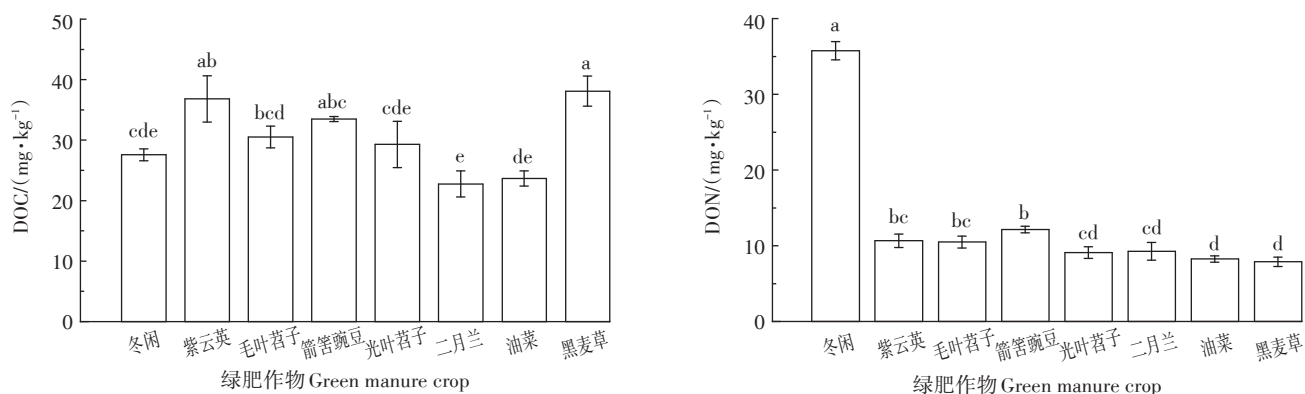
表1 不同处理下的土壤基础性状

Table 1 Soil basic properties in different green manure crops

处理 Treatment	pH	有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)	无机氮 Nmin/ (mg·kg ⁻¹)
冬闲	8.56±0.08a	9.94±0.34a	0.54±0.02a	19.23±0.37ab	94.00±1.47a	27.81±1.98a
紫云英	8.59±0.04a	9.74±0.55a	0.67±0.04a	19.97±0.80a	80.20±4.81abc	3.83±0.43bc
毛叶苕子	8.55±0.02a	9.99±0.41a	0.52±0.03a	18.43±0.58abc	76.00±3.62bc	5.26±0.63b
箭筈豌豆	8.51±0.10a	9.71±0.39a	0.55±0.05a	16.97±0.87c	75.00±2.45bc	4.49±0.50b
光叶苕子	8.51±0.06a	10.62±0.33a	0.61±0.11a	17.65±0.62bc	82.60±3.87ab	3.87±0.27bc
二月兰	8.57±0.07a	9.70±0.27a	0.58±0.03a	18.05±0.71abc	82.00±4.09ab	4.40±0.17b
油菜	8.53±0.04a	10.46±0.23a	0.69±0.01a	17.33±0.74bc	90.40±4.04a	3.67±0.09bc
黑麦草	8.49±0.08a	9.52±0.37a	0.54±0.06a	16.39±0.66c	66.40±7.27c	1.11±0.49c

注:不同小写字母表示不同绿肥作物处理间差异显著($n=5, P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different green manure crops ($n=5, P<0.05$). The same below.



不同小写字母表示不同绿肥作物处理间差异显著($n=5, P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among different green manure crops ($n=5, P<0.05$). The same below

图1 不同绿肥作物对土壤DOC和DON含量的影响

Figure 1 Effects of different green manure crops on soil DOM and DON contents

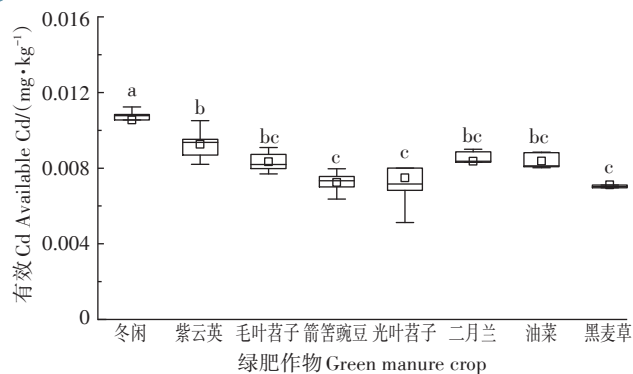
0.010 6 mg·kg⁻¹,相对冬闲处理,种植不同绿肥作物均显著降低了土壤有效Cd的含量,下降幅度为12.3%~33.0%。其中,箭筈豌豆、光叶苕子和黑麦草降低土壤有效Cd的能力最强,3个处理的土壤有效Cd含量分别为0.007 2、0.007 5 mg·kg⁻¹和0.007 1 mg·kg⁻¹,相比冬闲分别显著下降了32.1%、29.2%和33.0%。

不同绿肥作物均能显著降低土壤全量Cd(图3),冬闲土壤全量Cd含量为1.19 mg·kg⁻¹,种植紫云英土壤全量Cd(0.65 mg·kg⁻¹)下降范围最大,降幅达45.4%;种植毛叶苕子、箭筈豌豆和光叶苕子土壤全量Cd分别下降34.9%、34.5%和33.2%;种植二月兰、黑麦草和油菜分别下降0.35、0.36 mg·kg⁻¹和0.30 mg·kg⁻¹。

2.4 不同绿肥作物地上部与地下部Cd含量

不同绿肥作物地上部与地下部Cd含量有较大差异,总体表现为地下部远高于地上部(图4)。4种豆

科绿肥(紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆和光叶苕子)的地上部Cd含量显著低于另外3种非豆科绿肥(二月兰、黑麦草和油菜)。紫云英地上部Cd含量最低,为0.05 mg·kg⁻¹;二月兰最高,达0.59 mg·kg⁻¹,是紫云英处理的11.8倍。地下部则表现出相反的趋势,紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆和光叶苕子的地下部Cd含量显著高于二月兰、黑麦草和油菜,其中,油菜地下部Cd含量最低,为0.83 mg·kg⁻¹,紫云英地下部Cd含量最高,为油菜处理7.1倍,达5.91 mg·kg⁻¹。植物中Cd的积累量能够更好地反映植物对Cd的吸收能力。紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆和光叶苕子等4种豆科作物地上部对Cd的积累量分别为0.77、2.54、5.71 μg·盆⁻¹和2.26 μg·盆⁻¹,二月兰、油菜和黑麦草地上部的Cd累积量分别为15.15、24.10 μg·盆⁻¹和17.43 μg·盆⁻¹,禾本科绿肥和十字花科绿肥地上部Cd积累量显著高于豆科绿肥。



箱线图中箱体中间实线代表数据的中值,箱体内部正方形点代表平均值,上、下边缘分别代表75和25百分位数,上、下误差线分别代表95和5百分位数。下同

The solid line and dot within each box represent the median and mean values of all data, respectively. The top and bottom edges represent the 75 and 25 percentiles, the top and bottom error bars represent the 95 and 5 percentiles. The same below

图2 不同绿肥作物对土壤有效Cd含量的影响

Figure 2 Effects of different green manure crops on soil available Cd content

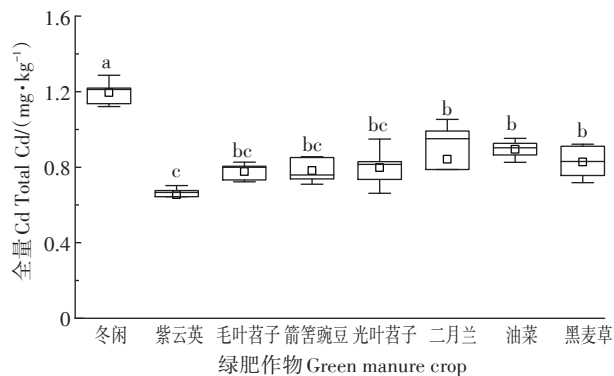


图3 不同绿肥作物对土壤全量Cd含量的影响

Figure 3 Effects of different green manure crops on soil total Cd content

2.5 不同绿肥作物的富集系数和转运系数

不同绿肥作物富集系数和转运系数存在较大的差异(表2)。非豆科绿肥(二月兰、黑麦草和油菜)的富集系数和转运系数均高于豆科绿肥(紫云英、箭筈豌豆、毛叶苕子和光叶苕子)。紫云英的富集系数最低,为0.074;二月兰的富集系数最高,为0.813,是紫云英的11.0倍。油菜的转运系数最高,为0.772;紫云英转运系数最低,仅为0.008。说明二月兰、油菜和黑麦草的富集与转运能力显著高于其他4种豆科绿肥。

2.6 不同绿肥作物Cd含量的影响因素

偏最小二乘法路径模型(PLS-PM)结果(图5)显示,不同绿肥作物对土壤养分、DOC、DON、植株地上部

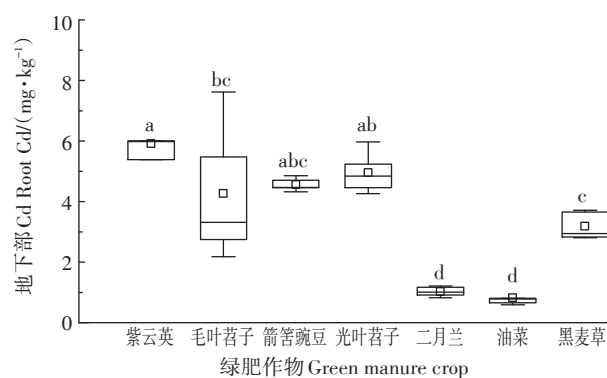
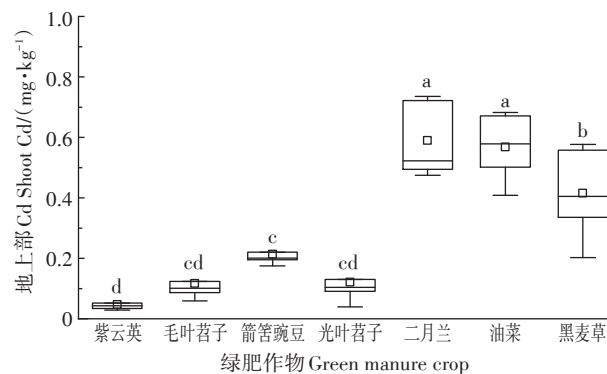


图4 不同绿肥作物地上部与地下部Cd含量

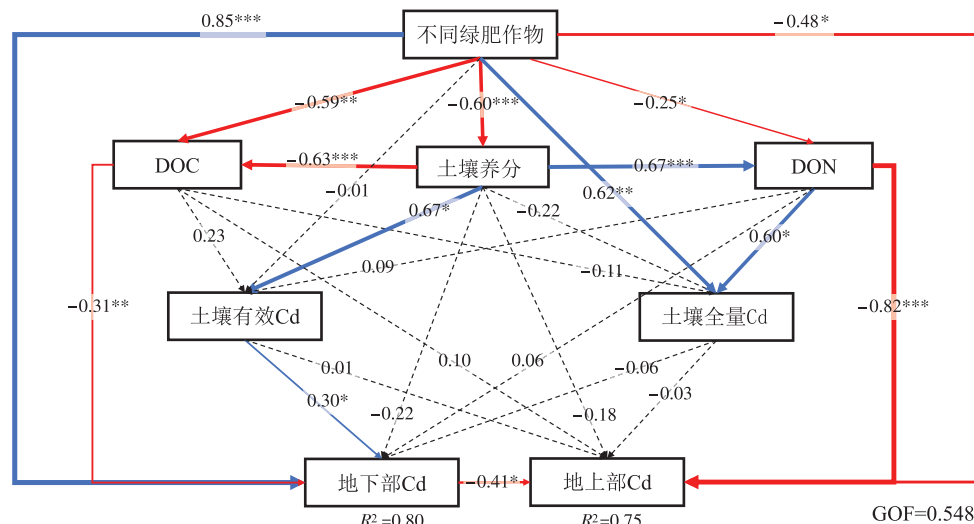
Figure 4 The content of Cd in shoot and root of different green manures

表2 不同绿肥作物的富集系数和转运系数

Table 2 Bioconcentration and translocation factors of different green manure crops

处理 Treatment	富集系数 Bioconcentration factor	转运系数 Translocation factor
紫云英	0.074±0.015d	0.008±0.001b
毛叶苕子	0.150±0.033d	0.028±0.003b
箭筈豌豆	0.273±0.019cd	0.047±0.004b
光叶苕子	0.156±0.047d	0.025±0.008b
二月兰	0.813±0.225a	0.587±0.068a
油菜	0.636±0.057ab	0.772±0.149a
黑麦草	0.505±0.080bc	0.137±0.029b

Cd含量有显著负影响,路径系数分别为-0.60、-0.59、-0.25和-0.48;对土壤全量Cd和植株地下部Cd含量有显著正影响。土壤养分对土壤有效Cd有显著正影响。DOC对地下部Cd含量有显著负影响,路径系数为-0.31,而土壤有效Cd对植株地下部Cd含量则有显著正影响。DON和植株地下部Cd含量均会对植株地上部Cd含量产生负影响,路径系数分别为-0.82和-0.41,其中DON对地上部Cd含量的影响更大,说



箭头旁数值为标准化的路径系数,实线表示影响显著,虚线表示影响不显著;蓝色表示正相关,红色表示负相关;

GOF值表示模型的拟合优度。*为 $P < 0.05$; **为 $P < 0.01$; ***为 $P < 0.001$

Numbers next to the arrows are the standardized path coefficients. A solid-line path indicates that the effect is significant and a dashed-line path indicates that the effect is not significant. Blue is a positive correlation, red is a negative correlation. The value of GOF indicates the goodness of fit of the model.

* indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; *** indicates $P < 0.001$

图5 不同绿肥作物与土壤养分和Cd活性的相互作用

Figure 5 Interactions between green manure and soil nutrients and Cd activity

明土壤DOC和DON含量的变化会影响地上部植株Cd含量。

3 讨论

3.1 不同绿肥对土壤性状及Cd有效性的影响

绿肥已在我国华北、西北和西南地区广泛种植,构建了确保作物高产稳产的绿肥生产利用体系和以绿肥为基础的农作物清洁生产及养分管理技术体系,并取得了显著的社会效益和经济效益^[8]。不同绿肥作物由于其自身特点不同,对土壤性状的影响有一定差异。豆科绿肥具有生物固氮作用,与十字花科和禾本科绿肥相比培育土壤氮库能力更强^[24];十字花科绿肥能够活化土壤中的缓效态磷素、钾素,富磷、富钾效果显著^[25];禾本科绿肥具有生物量大和生产快速的特点,能够有效地积累土壤养分^[26]。

绿肥生长过程中,根系与土壤互作产生的根系分泌物会促使土壤中难溶的磷、钾转化为作物可以吸收利用的有效磷和速效钾,提高土壤磷钾的有效性^[27-29]。豆科绿肥因其生物固氮能力和较高的生物量,在培肥地力、改良土壤结构等方面具有重要的作用^[30]。光叶苕子具有较强的耐旱和耐贫瘠能力,是云南旱地常用的一种豆科绿肥,在烟草及农作物的轮作中应用较多。种植光叶苕子可以降低土壤容重,提升土壤肥力和土壤酶活性,提高土壤养分利用率,增强

土壤供氮能力^[31-32],为农作物的生长发育创造良好的土壤环境。

植株对Cd的吸收主要取决于土壤中有效Cd含量的大小,有效Cd含量与土壤理化性质紧密相关^[33-34]。种植绿肥可改变Cd交换态组分在土壤中的迁移和转化过程,降低土壤中可溶性/交换性Cd的含量,增加土壤中有有机结合态和无机沉淀态Cd的含量^[35-36]。有研究指出,pH和有机质是影响土壤Cd有效性的关键因素^[17,36],在0~30 cm的土层中,Cd含量与速效钾、无机氮含量呈正相关,与有效磷含量呈负相关,说明速效钾和无机氮会促进Cd的积累并抑制作物对Cd的吸收,从而导致土壤中Cd含量升高,而有效磷会促进作物对Cd的吸收,导致土壤Cd含量下降^[37]。本研究中种植绿肥主要通过改变土壤理化性质和DOC含量来降低土壤Cd活性。

在这些因素中,土壤DOM对土壤中Cd含量的影响最大。DOM是土壤中最活跃的活性养分,能有效影响重金属物质的迁移与活性,对土壤肥力和Cd迁移具有十分重要的作用^[38-39]。土壤中的DOM主要通过形成金属-有机络合物来改变土壤中重金属的赋存形态,影响其在土壤中的迁移转化,使得重金属植物毒性降低,控制其在土壤环境中的溶解与迁移^[40-42]。本研究中,种植4种豆科绿肥(紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆、光叶苕子)和禾本科绿肥黑麦草均在

一定程度上提高了土壤DOC含量、降低了土壤有效Cd含量,验证了DOC在降低有效Cd中的作用。前人研究表明,当土壤DOM的分子量较高、芳香性较强时,能降低Cd的迁移性^[43],种植绿肥可以增加土壤DOM的芳香性、疏水性、腐殖化程度和平均分子量,使其更趋于稳定^[44-46],绿肥对DOM性状的影响,可能是其降低Cd生物有效性的作用机制。土壤DOM与植株地上部和地下部Cd存在极显著负相关关系,这可能是由于绿肥生长过程中根系产生的DOM与土壤中游离的重金属离子相互作用,改变Cd在土壤颗粒中的吸附过程,并通过螯合、络合等化学作用形成有机质-重金属配合体,抑制土壤对Cd的吸附^[47-48]。DOM增加有助于促进重金属向更稳定的残渣态的转化,改变土壤中重金属的活性,降低重金属在土壤中的迁移率、溶解度和生物利用度,进而减少植物对重金属的吸收^[49-50]。

3.2 不同绿肥作物对Cd吸收和转运的影响

不同绿肥作物均能在一定程度上降低土壤有效Cd和全量Cd含量。与冬闲相比,箭筈豌豆、光叶苕子和黑麦草对土壤有效Cd降低效果最好。7种绿肥作物对土壤全量Cd的影响有较大的差异,产生此结果的原因可能是不同绿肥作物根系对土壤中Cd的吸收能力不同,且根系分泌的有机酸能够通过改变土壤环境进而影响土壤中Cd的生物有效性^[51],并且植物根系分泌的低分子量有机酸能与Cd结合形成低分子络合物,从而增加土壤中Cd的溶解,与土壤中的Cd²⁺形成硫化镉,从而降低Cd的活性。有研究指出^[52],豆科绿肥和黑麦草具有较强的降低土壤Cd有效性的能力,与本文研究结果一致。

植物的种类、生物量和发育阶段等均会影响Cd在植物体内的积累,从而导致富集系数和转运系数的差异。例如,紫云英通过改变土壤性质和微生物群落降低土壤Cd生物有效性^[17];箭筈豌豆和苕子地面覆盖度高,且吸收的Cd主要集中在地下部,从而阻止过多的Cd集中在生物量较大的地上部;油菜可维持重金属污染水稻土的有机质含量,改善土壤理化性质,降低重金属的植物有效性^[16];二月兰对Cd胁迫具有较强的耐受能力^[53];黑麦草由于其有较大的生物量,可以从土壤中吸收较多的Cd。

本研究中7种绿肥作物的转运系数均<1,即Cd都集中在地下部,地上部Cd含量较低。且禾本科与十字花科绿肥作物的转运系数显著高于豆科绿肥,从土壤中吸附的Cd主要富集在地下部,与前人研究结

果一致^[54]。两种十字花科绿肥(油菜和二月兰)以及禾本科绿肥黑麦草的富集系数和转运系数显著高于另外4种豆科绿肥,且十字花科绿肥富集和转运能力最强,可能是由于其种植后增加了土壤微生物群落,优势菌群相对丰富,土壤微生物的多样性提高,从而增强了对Cd的富集和转运能力^[16]。豆科绿肥的Cd积累规律主要表现为地下部>地上部,而十字花科和禾本科绿肥主要表现为地上部>地下部,由于地上部生物量大于地下部,因此需要选择富集系数和转运系数较低的豆科绿肥,既达到提高土壤肥力的目的,又能在一定程度上降低土壤Cd含量,避免在翻压后绿肥腐解,土壤中Cd活化带来的后茬作物Cd含量过高的风险。

本研究针对云南省东川区的种植制度,选择了7种适宜当地种植的绿肥作物进行筛选评价,虽然盆栽试验能够在控制条件下精细管理,但与田间实际仍有差异,其结果有一定的局限性,将在今后的研究中开展进一步的田间验证试验,以明确田间状况下不同绿肥作物对土壤中重金属的影响。

4 结论

(1)在云南旱地种植绿肥作物,特别是豆科绿肥能减少土壤有效态Cd和全量Cd含量,有效降低土壤Cd生物有效性。

(2)豆科绿肥的富集系数和转运系数较低,Cd积累规律主要表现为地下部>地上部,Cd累积在生物量较小的地下部。

(3)土壤可溶性有机质对Cd有效性有较大影响,可溶性有机质的升高可以降低地上部植株Cd含量。

(4)结合当地的种植制度,种植豆科绿肥紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆、光叶苕子是实现Cd中度污染土壤作物安全生产的重要措施。

参考文献:

- [1] LI Z Y, MA Z W, KUIJP T J V D, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 843-853.
- [2] SONG W E, CHEN S B, LIU J F, et al. Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(9): 1845-1854.
- [3] LIU F, LIU X N, DING C, et al. The dynamic simulation of rice growth parameters under cadmium stress with the assimilation of multi-period spectral indices and crop model[J]. *Field Crops Research*, 2015, 183: 225-234.

- [4] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1214-1222. WANG L Q, LUO L, MA Y B, et al. Research progress on in-situ passivation remediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5): 1214-1222.
- [5] 曾希柏, 苏世鸣, 马世铭, 等. 我国农田生态系统重金属的循环与调控[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2418-2426. ZENG X B, SU S M, MA S M, et al. Heavy metals cycling and its regulation in China cropland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2418-2426.
- [6] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194. ZENG X B, XU J M, HUANG Q Y, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 186-194.
- [7] 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.
- [8] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461. CAO W D, BAO X G, XU C X, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1450-1461.
- [9] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2115-26. GAO S J, ZHOU G P, CAO W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2115-2126.
- [10] ZHOU G P, GAO S J, LU Y H, et al. Co-incorporation of green manure and rice straw improves rice production, soil chemical, biochemical and microbiological properties in a typical paddy field in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 197: 104499.
- [11] YANG L, BAI J S, LIU J, et al. Green manuring effect on changes of soil nitrogen fractions, maize growth, and nutrient uptake[J]. *Agronomy*, 2018, 8(11): 261.
- [12] JUANG K W, HO P C, YU C H. Short-term effects of compost amendment on the fractionation of cadmium in soil and cadmium accumulation in rice plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(5): 1696-1708.
- [13] NAWAB J, KHAN S, AAMIR M, et al. Organic amendments impact the availability of heavy metal(loid)s in mine-impacted soil and their phytoremediation by *Penistum americanum* and *Sorghum bicolor*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(3): 2381-2390.
- [14] LEE S S, LIM J E, ABDd EL-AZEEM S A M, et al. Heavy metal immobilization in soil near abandoned mines using eggshell waste and rapeseed residue[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(3): 1719-1726.
- [15] 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 sinicus* on cadmium effectiveness in paddy soil and cadmium accumulation in rice plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(16): 105-111.
- [16] OK Y S, USMAN A R A, LEE S S, et al. Effects of rapeseed residue on lead and cadmium availability and uptake by rice plants in heavy metal contaminated paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(4): 677-682.
- [17] ZHANG S Y, DENG Y, FU S D, et al. Reduction mechanism of Cd accumulation in rice grain by Chinese milk vetch residue: Insight into microbial community[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202: 110908.
- [18] MOHAMED I, AHAMADOU B, LI M, et al. Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 973-982.
- [19] 刘义富, 毛昆明. 云南部分矿区及尾矿土壤和植物Cd污染调查分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1486-1490. LIU Y F, MAO K M. Investigation and analysis on Cd contamination of soils and plants in some mine areas and tailings in Yunnan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(6): 1486-1490.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] 冯艳红, 张亚, 应蓉蓉, 等. 不同提取剂对土壤中重金属有效态的提取效果研究[C]//中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷). 北京: 中国环境科学学会, 2018. FENG Y H, ZHANG Y, YING R R, et al. Study on the extraction effect of different extractants on the effective state of heavy metals in soil[C]//Proceedings of Chinese Society for Environmental Sciences. Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2018.
- [22] 杨进. 土壤中金属元素分析的不同消解方法比较[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(增刊2): 184-188. YANG J. Study on different acid digestion methods in the analysis of heavy metals in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(Suppl 2): 184-188.
- [23] ALLEN S E. Analysis of vegetation and other organic materials[M]//Chemical analysis of ecological materials. London: Blackwell Scientific Publications, 1989: 46-61.
- [24] 杨璐. 紫云英种植及与稻草协同利用的减肥效应和紫云英固氮调控机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. YANG L. Effects of Chinese milk vetch planting and co-incorporation with rice straw on fertilizer reduction and their regulating mechanisms of biological nitrogen fixation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [25] 李红燕, 胡铁成, 曹群虎, 等. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1310-1318. LI H Y, HU T C, CAO Q H, et al. Effect of improving soil fertility by planting different green manures in different patterns in dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1310-1318.

- [26] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1209-1216. YANG B J, HUANG G Q, WANG C, et al. Effects of winter green manure cultivation on rice yield and soil fertility in paddy field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10): 1209-1216.
- [27] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157-163. ZHOU G P, XIE Z J, CAO W D, et al. Co-incorporation of high rice stubble and Chinese milk vetch improving soil fertility and yield of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 157-163.
- [28] 兰忠明, 林新坚, 张伟光, 等. 缺磷对紫云英根系分泌物产生及难溶性磷活化的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1521-1531. LAN Z M, LIN X J, ZHANG W G, et al. Effect of P deficiency on the emergence of *Astragalus* L. root exudates and mobilization of sparingly soluble phosphorus[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1521-1531.
- [29] EICHLER-LOEBERMANN B, SCHIEMENZ K, MAKADI M, et al. Nutrient cycling by using residues of bio-energy production - effects of biomass ashes on plant and soil parameters[J]. *Alps-adria Scientific Workshop*, 2008, 36: 1259-1262.
- [30] 赵娜, 赵护兵, 曹群虎, 等. 渭北旱区夏闲期豆科绿肥对土壤肥力性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 124-128. ZHAO N, ZHAO H B, CAO Q H, et al. Effect of green manure on soil fertility properties in summer fallow period in Weibei dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 124-128.
- [31] 陈正刚, 崔宏浩, 张钦, 等. 光叶苕子与化肥减量配施对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(3): 411-416. CHEN Z G, CUI H H, ZHANG Q, et al. Effects of burying *Vicia villosa* Roth var and chemical fertilizer reduction on soil fertility and corn yield[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, 37(3): 411-416.
- [32] 赵彩衣, 王媛媛, 董青君, 等. 不同水肥处理对苕子和后茬玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 161-166. ZHAO C Y, WANG Y Y, DONG Q J, et al. Influence of different irrigation and fertilization treatments on the growth of *Vicia villosa* Roth var and later-cropping maize and soil fertility[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 161-166.
- [33] LI Z W, LI L Q, PAN G X. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1/2): 165-173.
- [34] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 改良剂对烟草吸收土壤中镉铅影响的研究[J]. 土壤学报, 2006(2): 233-239. HU Z S, ZHANG G Y, WANG G Z, et al. Effects of soil amendments on cadmium and lead contents in tobacco[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006(2): 233-239.
- [35] 周利军, 武琳, 林小兵, 等. 土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5098-5106. ZHOU L J, WU L, LIN X B, et al. Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 5098-5106.
- [36] TANG W, ZHONG H, XIAO L, et al. Inhibitory effects of rice residues amendment on Cd phytoavailability: A matter of Cd-organic matter interactions[J]. *Chemosphere*, 2017, 186: 227-234.
- [37] 于平, 王梓龙, 盛杰, 等. 土壤氮磷钾与镉空间分布及其相关性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 17-25. YU P, WANG Z L, SHENG J, et al. Spatial distribution and correlation of soil available potassium, nitrogen, phosphorus and cadmium[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(5): 17-25.
- [38] LIU Y, LI F B, XIA W, et al. Association between ferrous iron accumulation and pentachlorophenol degradation at the paddy soil-water interface in the presence of exogenous low-molecular-weight dissolved organic carbon[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(11): 1547-1555.
- [39] 吕本春, 付利波, 湛方栋, 等. 绿肥作物矿化分解对土壤镉有效性的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 431-441. LÜ B C, FU L B, ZHAN F D, et al. Research advance on the effect of mineralization and decomposition of green manure crops on soil cadmium availability[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 431-441.
- [40] 郭微, 戴九兰, 王仁卿. 溶解性有机质影响土壤吸附重金属的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 761-768. GUO W, DAI J L, WANG R Q. Progress in the effect of dissolved organic matter on adsorption of heavy metals by soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 761-768.
- [41] SCHMITT D, SARAVIA F, FRIMMEL F H, et al. NOM-facilitated transport of metal ions in aquifers: Importance of complex-dissociation kinetics and colloid formation[J]. *Water Research*, 2003, 37(15): 3541-3550.
- [42] 贺前锋, 桂娟, 刘代欢, 等. 淹水稻田中土壤性质的变化及其对土壤镉活性影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2260-2268. HE Q F, GUI J, LIU D H, et al. Research progress of soil property's changes and its impacts on soil cadmium activity in flooded paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2260-2268.
- [43] 余贵芬, 蒋新, 孙磊, 等. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. 生态学报, 2002(5): 770-776. YU G F, JIANG X, SUN L, et al. A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002(5): 770-776.
- [44] GAO S J, GAO J S, CAO W D, et al. Effects of long-term green manure application on the content and structure of dissolved organic matter in red paddy soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(8): 1852-1860.
- [45] 常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北灌漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 220-225. CHANG D N, CAO W D, BAO X G, et al. Long-term different fertilizations changed the chemical and spectrum characteristics of DOM of the irrigation-desert soil in north-western China [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 220-225.
- [46] XIE J, DONG A Q, LIU J, et al. Relevance of dissolved organic matter generated from green manuring of Chinese milk vetch in relation to water-soluble cadmium[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(16): 16409-16421.
- [47] LIU C C, LIN Y C. Reclamation of copper-contaminated soil using EDTA or citric acid coupled with dissolved organic matter solution ex-

- tracted from distillery sludge[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 97–101.
- [48] ZHANG J, HUA P, KREBS P. The influences of dissolved organic matter and surfactant on the desorption of Cu and Zn from road-deposited sediment[J]. *Chemosphere*, 2016, 150: 63–70.
- [49] KHAN M A, KHAN S, KHAN A, et al. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 1591–1605.
- [50] YIN B K, ZHOU L, YIN B, et al. Effects of organic amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth and uptake of heavy metals in contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 537–546.
- [51] SUN R L, ZHOU Q X. Heavy metal tolerance and hyperaccumulation of higher plants and their molecular mechanisms: A review[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(3): 497–504.
- [52] 李希铭, 李金波, 宋桂龙, 等. 35 份草本植物镉吸收与富集特征比较[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 760–770. LI X M, LI J B, SONG G L, et al. Cadmium tolerance and absorption characteristic of herbaceous plants[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(4): 760–770.
- [53] 向涛. 草本花卉对镉污染土壤修复研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. XIANG T. Study on remedial of Cd-contaminated soil by herbaceous flowers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [54] 尹炳奎, 黄满红, 张大磊, 等. 菜籽饼施加对镉-铜污染土壤中重金属形态转化及其植物有效性的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3879–3883. YIN B K, HUANG M H, ZHANG D L, et al. Effects of rapeseed cake on cadmium and copper forms and its phytoavailability in heavy metals contaminated paddy soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(6): 3879–3883.