

豆科绿肥作物对云南碱性土壤镉砷有效性的影响及其对镉砷富集能力

吕本春, 王应学, 杨伟, 王伟, 陈检锋, 尹梅, 陈华, 王志远, 付利波, 杨志新

引用本文:

吕本春, 王应学, 杨伟, 王伟, 陈检锋, 尹梅, 陈华, 王志远, 付利波, 杨志新. 豆科绿肥作物对云南碱性土壤镉砷有效性的影响及其对镉砷富集能力[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2212-2222.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0273>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2124-2133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0457>

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>

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>

猪场粪水施用对设施白菜及土壤重金属的影响

程娟, 刘沐衡, 肖能武, 杨柳, 社会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2559-2567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1030>

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

王风, 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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吕本春, 王应学, 杨伟, 等. 豆科绿肥作物对云南碱性土壤镉砷有效性的影响及其对镉砷富集能力[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2212-2222.

LÜ B C, WANG Y X, YANG W, et al. Effects of leguminous green manure crops on cadmium and arsenic availability and enrichment in alkaline soils in Yunnan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2212-2222.



开放科学 OSID

豆科绿肥作物对云南碱性土壤镉砷有效性的影响及其对镉砷富集能力

吕本春^{1,2}, 王应学¹, 杨伟³, 王伟¹, 陈检锋¹, 尹梅¹, 陈华¹, 王志远¹, 付利波^{1*}, 杨志新^{2*}

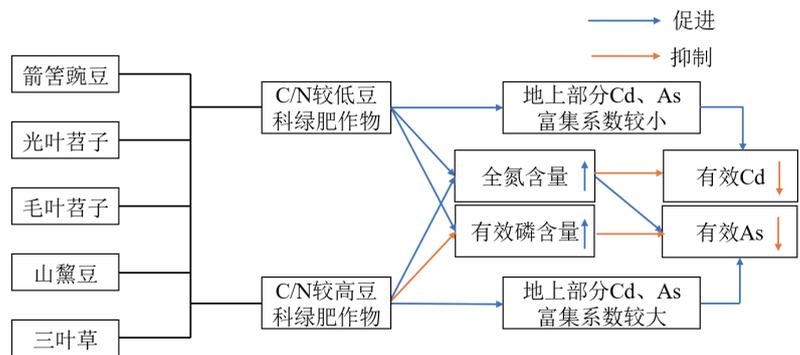
(1. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 2. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 3. 昆明市农产品质量安全中心, 昆明 650118)

摘要:为研究在镉(Cd)、砷(As)复合污染的碱性土壤中, 种植不同豆科绿肥作物对土壤Cd、As有效性的影响及其对Cd、As的富集能力, 采用大田试验, 种植箭筈豌豆(箭筈豌豆、西牧333、陇箭1号)、光叶苕子(东川光苕、宣威光苕、云苕8号、东川苕子)、毛叶苕子(蒙苕1号、鲁苕1号)、其他绿肥(褐皮山黧豆、绛三叶)等11种冬季豆科绿肥作物, 并以冬闲为对照, 于豆科绿肥盛花期及同期测定土壤理化性状, Cd、As有效性, 绿肥作物地上部Cd、As含量和富集系数。结果表明: 与冬闲相比, 种植西牧333的土壤全氮、有效磷含量分别

增加91.67%、36.60%, 鲜草产量最高, 为31 016 kg·hm⁻², 土壤有效态Cd、有效态As无显著变化, 对Cd、As富集能力较低, 富集系数为0.096和0.038。种植褐皮山黧豆的土壤全氮增加98.61%, 土壤有效磷降低31.07%, 鲜草产量较低, 为10 339 kg·hm⁻², 土壤有效态Cd无显著变化, 土壤有效态As降低32.82%, 对Cd、As富集能力较高, 富集系数为0.136和0.071。相关性分析表明, 土壤全氮与土壤有效态Cd呈极显著正相关、与有效态As呈极显著负相关, 土壤有效磷与土壤有效态As呈极显著正相关, 碳氮比与鲜草产量呈极显著负相关, 与地上部分Cd、As含量呈极显著正相关。在所有豆科绿肥作物中, 种植碳氮比较低的西牧333对Cd、As有效性无显著影响, 对Cd、As富集能力较低, 种植碳氮比较高的褐皮山黧豆对Cd有效性无显著影响, 但可显著降低土壤As有效性, 对Cd、As富集能力较高。

关键词:豆科; 绿肥作物; 镉; 砷; 有效性; 富集系数

中图分类号: X173; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)10-2212-11 doi:10.11654/jaes.2022-0273



收稿日期: 2022-03-23 录用日期: 2022-05-31

作者简介: 吕本春(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事绿肥对土壤重金属污染修复研究。E-mail: 1402495348@qq.com

王应学与吕本春同等贡献。

*通信作者: 付利波 E-mail: 1198276883@qq.com; 杨志新 E-mail: 1213594226@qq.com

基金项目: 国家绿肥产业技术体系昆明综合试验站项目(CARS-22-Z-14); 国家重点研发计划项目(2021YFD1700205); 昆明市农业农村局基金项目“种植制度优化与生物综合调控技术模式攻关研究”

Project supported: Kunming Comprehensive Experimental Station for National Green Manure Industrial Technology System of CARS (CARS-22-Z-14); The National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700205); Kunming agricultural and rural Bureau for "Research on planting system optimization and biological comprehensive regulation technology mode"

Effects of leguminous green manure crops on cadmium and arsenic availability and enrichment in alkaline soils in Yunnan, China

LÜ Benchun^{1,2}, WANG Yingxue¹, YANG Wei³, WANG Wei¹, CHEN Jianfeng¹, YIN Mei¹, CHEN Hua¹, WANG Zhiyuan¹, FU Libo^{1*}, YANG Zhixin^{2*}

(1. Institute of Agricultural Environment & Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Kunming Agricultural Products Quality and Safety Center, Kunming 650118, China)

Abstract: This study was conducted to evaluate the impact of different legume green manure crops on the cadmium-arsenic (Cd-As) availability and enrichment in Cd and As (Cd-As) co-contaminated soils, to provide a theoretical basis for the safe production of subsequent crops. A field experiment was used to carry out this investigation. The experiment consisted of twelve treatments, and include eleven types of winter legume green manure crops: smooth vetch (smooth vetch, Ximu 333, and Longjian 1), common vetch (Dongshan, Xuanwei, Yunshao 8, and Dongchuan common vetch), hairy vetch (Mengshao 1, and Lushao 1), other green manure (*Lathyrus sativus*, and crimson clover), and winter fallow as the control. Soil and plant samples were collected during the full bloom stage and at the same stage as the green manures. The soil physico-chemical properties, Cd and As availability, and the shoot Cd and As content of the green manures were measured, and the bioconcentration and translocation factors of green manures were calculated. The results showed that compared with the winter fallow, the contents of total nitrogen and available phosphorus in the soil planted with Ximu 333 increased by 91.67% and 36.60%, respectively. The fresh grass yield was the highest at 31 016 kg·hm⁻². There was no significant change in the available soil Cd and As, and the ability of the plant to enrich the soil Cd and As was lower (0.096 and 0.038, respectively). Planting *Lathyrus sativus* increased the total soil nitrogen by 98.61%, decreased the available soil phosphorus by 31.07%, and the yield of fresh grass was the lowest at 10 339 kg·hm⁻². There was no significant change in soil available Cd; however, soil available As decreased by 32.82%, and the ability of the plant to enrich the soil Cd and As was higher (0.136 and 0.071, respectively). Correlation analysis showed that the total soil nitrogen was significant positively correlated with the available soil Cd, and a significant negative correlation with available As. Additionally, the available soil phosphorus had a very significant positive correlation with available soil As, C/N had a very significant negative correlation with fresh grass yield, and a very significant positive correlation with the shoot Cd and As contents. Planting lower C/N Ximu 333 had no significant effect on the Cd and As availability, but had a lower Cd and As enrichment capacity. Planting higher C/N *Lathyrus sativus* has no significant effect on Cd availability, but can significantly reduce soil As availability, and has a higher Cd and As enrichment capacity.

Keywords: legume; green manure crop; cadmium; arsenic; availability; bioconcentration factor

《全国土壤污染状况调查公报》显示我国耕地土壤点位超标率达到了19.4%,其中土壤Cd、As超标率分别达7.0%、2.7%^[1]。Cd和As是土壤中两种常见的有毒元素,具有较高的土壤-食物链转移风险。在稻田土壤中,Cd和As具有相反的化学性质,Cd以阳离子的形式存在,具有失去电子的趋向,As主要以阴离子的形式存在,具有得到电子的趋向^[2]。由于土壤氧化还原电位对Cd和As的生物有效性有相反的影响^[3],因此同时减少Cd和As在作物中的积累是一个巨大的挑战。

绿肥是一种有机物在农业中的应用形式,种植绿肥作物后,可将其留作土壤表面的覆盖物或并入土壤中,以增加土壤肥力,改善土壤质量,减少土壤侵蚀、蒸发、封闭和结皮^[4]。绿肥作物种植和还田还可以在不增加化肥施用的情况下促进粮食生产^[5],并能缓解集约、连续常规耕作引起的土壤退化^[6]。在我国南方稻区,利用冬闲田种植绿肥作物能够合理利用光热资源,

并为后茬水稻提供大量有机养分,是传统的培肥增产措施^[7]。前人研究发现^[8-10],合理使用绿肥可改变土壤中Cd的赋存形态,从而降低土壤中重金属有效性及后茬作物重金属含量。种植油菜可降低土壤可溶态Cd含量,增加土壤难溶态Cd的含量^[11]。种植紫云英可促进土壤中酸可提取态Cd和可还原态Cd向残渣态Cd转化^[12]。因此种植绿肥作物可降低土壤有效态Cd含量,减少后茬作物对Cd的吸收。

绿肥一般可分为豆科绿肥和非豆科绿肥,其中豆科绿肥作物能与根瘤菌共生固氮,通过固定大气中的氮素并将其归还于土壤,从而达到减少化学氮肥施用的目的,被认为是可持续发展农业的重要模式之一^[13]。有研究表明^[14],豆科作物生物固氮作用容易释放H⁺到土壤中,从而诱导土壤酸化。土壤酸化容易使土壤中Cd的有效性增加,As的有效性降低。酸性土壤可能会增加作物对重金属的吸收,使得作物可食用部分重金属含量超过国家食品安全标准;而在碱性

土壤中,由于土壤中能够共同存在高活性的As和低活性的Cd,豆科绿肥作物的种植和翻压对土壤重金属活性变化可能会产生相反的结果,应当进一步研究探讨。

在绿肥-作物轮作系统中,以往研究主要关注绿肥翻压对土壤重金属有效性及不同作物对重金属吸收的影响,且重点以重金属Cd为研究对象,而对豆科绿肥作物种植影响土壤中重金属有效性的研究较少,且有关豆科绿肥作物对土壤Cd、As有效性的研究尚未见报道。本文选取11种典型的豆科绿肥作物,通过大田试验,研究在Cd、As复合污染的农田土壤中豆科绿肥作物对土壤Cd、As有效性的影响,从而为当地Cd、As复合污染农田豆科绿肥安全应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地点位于云南省昆明市东川区(102°47'~103°18'E,25°57'~26°32'N),试验土壤为冲积土,质地为砂土,土壤中Cd含量 $1.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,As含量 $31.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。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),土壤中重金属Cd、As含量筛选值为 $0.6、25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,风险管制值为 $4、100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本研究区域Cd、As含量分别为筛选值的2.60、1.26倍,而未超过风险管制值,属于轻度重金属Cd、As复合污染土壤。

供试豆科绿肥作物共11种(表1),均为广泛应用于田间实践的主栽豆科绿肥品种,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

采用大田试验研究不同豆科绿肥作物对Cd和As吸收的影响。试验田共设置11个绿肥处理和1个冬闲对照处理,各处理均重复3次,小区面积为 40 m^2 ($5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$),采用随机区组分布,小区与小区之间留有走道。于2020年11月10日播种,2021年4月15日刈割盛花期地上部分。箭筈豌豆、光叶苕子、毛叶苕子、

三叶草和山黧豆田间播种量分别为 $105、75、60、22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,各处理田间管理措施相同,绿肥作物不施肥。

1.3 样品采集

在绿肥盛花期时采用样方法采集植株地上部分样品,称质量计鲜草产量,并在样方中采用五点取样法采集0~20 cm的表层土壤样品。植株样品用清水冲洗干净后,再用去离子水洗净,在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱杀青30 min, $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱烘干至恒质量,粉碎备用。土壤样品装入自封袋中,一部分 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存,另一部分风干、磨碎后过 2 mm 和 0.149 mm 筛备用。

1.4 测定方法

土壤pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾按照《土壤农化分析》^[15]中的常规方法进行。土壤中全Cd含量采用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解-石墨炉原子吸收分光光度法测定^[15],全As含量采用王水消解-原子荧光分光光度法测定^[15]。土壤有效态Cd采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提-石墨炉原子吸收分光光度法测定^[16],有效态As采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-原子荧光分光光度法测定^[17]。植株样品全碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[15],植株样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮法消化后,采用凯氏定氮法测定植物的全氮含量、钼锑抗比色法测定植物的全磷含量、火焰光度法测定植物的全钾含量^[15]。植株全Cd含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解-石墨炉原子吸收分光光度法测定^[15],植株全As含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消解-原子荧光分光光度法测定^[15]。

每10个消解样品做一个平行并加入空白样和国家标准样品[土壤样品(GBW07456)、植物样品(GBW10010)]进行质量分析控制,质控样测定均值和偏差都在规定范围内,平行样测定值相对偏差均在10%以内。为保证精度,试验中所有玻璃器皿均使用10%硝酸浸泡一夜,然后用去离子水清洗干净。试验中所用试剂均为优级纯。

表1 供试豆科绿肥作物信息

Table 1 Information of the test leguminous green manure crops

绿肥品种 Cultivar	绿肥作物 Material	拉丁名 Latin name	绿肥品种 Cultivar	绿肥作物 Material	拉丁名 Latin name
箭筈豌豆	箭筈豌豆	<i>Vicia sativa</i> L.	光叶苕子	东川苕子	<i>Vicia villosa</i> Roth var.
箭筈豌豆	西牧333	<i>Vicia sativa</i> L.	毛叶苕子	蒙苕1号	<i>Vicia villosa</i> Roth
箭筈豌豆	陇箭1号	<i>Vicia sativa</i> L.	毛叶苕子	鲁苕1号	<i>Vicia villosa</i> Roth
光叶苕子	东山光苕	<i>Vicia villosa</i> Roth var.	山黧豆	褐皮山黧豆	<i>Lathyrus quinquenervius</i> Litv.
光叶苕子	宣威光苕	<i>Vicia villosa</i> Roth var.	三叶草	绛三叶	<i>Trifolium pretense</i> L.
光叶苕子	云苕8号	<i>Vicia villosa</i> Roth var.			

1.5 数据处理

Cd和As地上部分富集系数为:

$$AF_{Cd} = \text{地上部分Cd含量} / \text{土壤中Cd含量}$$

$$AF_{As} = \text{地上部分As含量} / \text{土壤中As含量}$$

所有数据的平均值、标准差采用 Microsoft Excel 2021 软件处理,采用 Duncan 新复极差法检验不同品种之间数据差异的显著性($P < 0.05$)。采用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析,并利用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 种植豆科绿肥作物对土壤理化性质的影响

由表2可知,种植不同豆科绿肥作物对土壤pH无显著影响,与冬闲相比,种植豆科绿肥作物后土壤有机质均有不同程度的下降,下降幅度为1.59%~32.49%,土壤全氮均有不同程度的增加,增加幅度为52.78%~111.11%。与冬闲相比,不同豆科绿肥作物对土壤速效养分的含量影响不同,其中,种植西牧333后土壤养分增幅最大,土壤有机质未显著降低,但土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量显著增加,增加幅度为91.67%、20.44%、36.60%和26.76%。

2.2 豆科绿肥作物鲜草产量

由图1可知,不同豆科绿肥作物鲜草产量存在显著差异,产量大小整体表现为箭筈豌豆>毛叶苕子>光叶苕子>其他绿肥。其中西牧333鲜草产量最大,为31 016 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;鲁苕1号次之,为26 013 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。褐皮山黧豆和绛三叶鲜草产量最小,分别为10 339和7 671 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.3 不同豆科绿肥作物地上部分养分含量和碳氮比

由图2可知,不同绿肥品种地上部分碳、氮、磷、钾含量存在显著差异。地上部分碳含量大小表现为其他绿肥>光叶苕子>毛叶苕子>箭筈豌豆,绿肥地上部分碳含量范围为365(绛三叶)~397 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (褐皮山黧豆),平均值为378 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,绿肥作物之间碳含量最大值为最小值的1.09倍。绿肥地上部分氮含量大小为箭筈豌豆>毛叶苕子>光叶苕子>其他绿肥,绿肥地上部分氮含量范围为14.61(褐皮山黧豆)~30.89 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (西牧333),平均值为19.55 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,绿肥作物之间氮含量最大值为最小值的2.11倍。绿肥地上部分磷

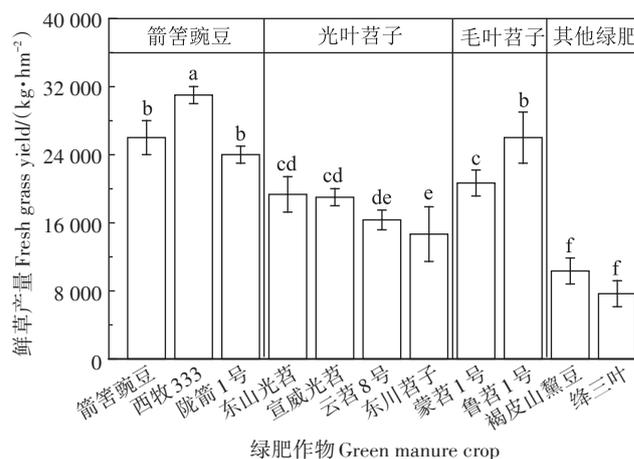


图1 不同豆科绿肥作物鲜草产量
Figure 1 Fresh grass yields of different green manure crops

表2 不同处理下土壤基础性状

Table 2 Soil basic properties in different green manure crop treatments

处理 Treatment	pH	有机质 SOM / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 TN / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 AN / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 AP / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 AK / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
冬闲	8.31±0.04a	10.71±0.21a	0.72±0.14g	62.83±1.28bc	15.19±2.01bc	76.52±0.99bc
箭筈豌豆	8.32±0.11a	10.54±0.11a	1.39±0.09bcd	64.33±7.02abc	12.68±2.85bcde	64.67±4.73cde
西牧333	8.28±0.14a	10.31±1.66a	1.38±0.09bcd	75.67±13.58a	20.75±1.56a	97.00±12.29a
陇箭1号	8.36±0.03a	7.23±0.63c	1.27±0.02de	61.00±6.00bc	17.17±2.67ab	89.67±17.04ab
东山光苕	8.29±0.08a	7.82±0.73c	1.10±0.06f	57.00±2.00cd	13.11±0.92bcde	76.00±2.65bc
宣威光苕	8.34±0.07a	7.65±0.74c	1.20±0.02ef	47.00±7.21d	11.32±0.51cde	66.67±3.06cde
云苕8号	8.30±0.05a	8.65±0.71bc	1.32±0.04cde	69.67±2.31ab	13.96±2.89bed	55.67±4.04e
东川苕子	8.25±0.06a	10.34±0.22a	1.62±0.08a	71.33±3.79ab	9.43±0.08e	59.67±4.62de
蒙苕1号	8.36±0.07a	8.61±0.62bc	1.45±0.16bc	71.67±8.33ab	15.52±4.48bc	71.33±8.33cd
鲁苕1号	8.32±0.07a	8.55±0.24bc	1.24±0.03def	67.67±3.06abc	14.67±3.27bcd	78.67±12.58bc
褐皮山黧豆	8.29±0.05a	9.60±0.39ab	1.43±0.09bc	67.00±4.00abc	10.47±0.62de	68.33±3.79cde
绛三叶	8.36±0.06a	8.50±1.63bc	1.52±0.10ab	57.67±4.16cd	13.77±2.06bcde	78.00±7.55bc

注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Value followed by different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

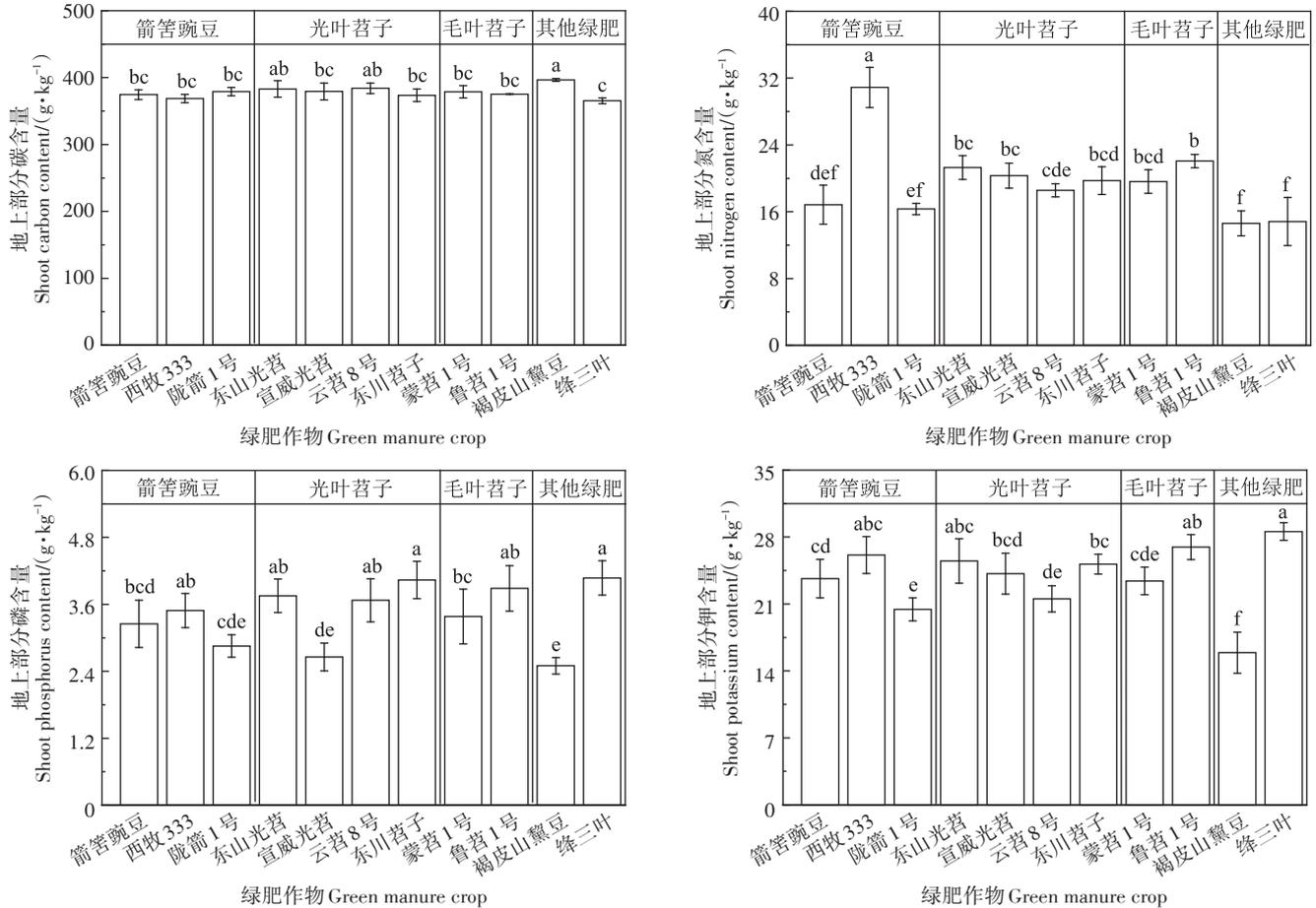


图2 不同豆科绿肥作物地上部分养分含量

Figure 2 Contents of nutrient of different green manure crops

含量大小为毛叶苕子>光叶苕子>其他绿肥>箭筈豌豆,绿肥地上部分磷含量范围为2.50(褐皮山黧豆)~4.07 g·kg⁻¹(绛三叶),平均值为3.41 g·kg⁻¹,绿肥作物之间磷含量最大值为最小值的1.63倍,其中西牧333与绛三叶无显著差异。绿肥地上部分钾含量大小为毛叶苕子>光叶苕子>箭筈豌豆>其他绿肥,地上部分钾含量范围为15.90(褐皮山黧豆)~28.58 g·kg⁻¹(绛三叶),平均值为23.77 g·kg⁻¹,绿肥作物之间钾含量最大值为最小值的1.80倍,其中西牧333与绛三叶无显著差异。综上可知,西牧333的氮、磷、钾含量较高,翻压后可有效增加土壤养分。

由图3可知,不同绿肥品种碳氮比存在显著差异。绿肥碳氮比含量范围为11.98(西牧333)~27.32(褐皮山黎豆),平均值为20.29,绿肥作物之间碳氮比最大值为最小值的2.28倍,其中西牧333碳氮比最低,翻压后供氮能力较强,有利于后茬作物的生长。

2.4 豆科绿肥作物-土壤体系中Cd、As的含量

由图4可知,冬闲土壤有效态Cd含量为0.49 mg·

kg⁻¹,种植不同绿肥作物的土壤有效态Cd含量间存在差异。冬闲土壤有效态As含量为1.31 mg·kg⁻¹,不同绿肥作物对土壤有效态As含量降低程度不同,其中,东川苕子和褐皮山黧豆降低土壤有效态As含量的效

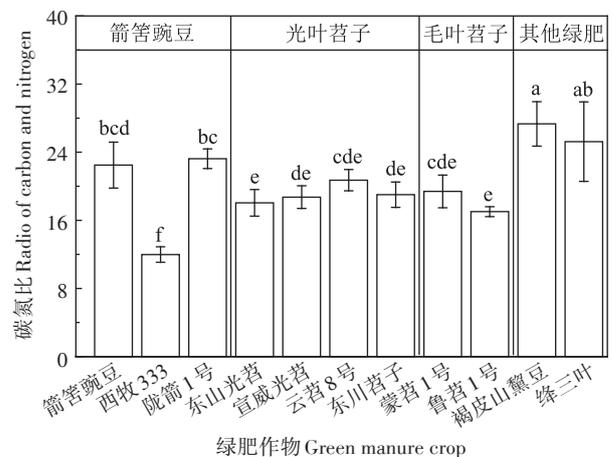


图3 不同豆科绿肥作物地上部分碳氮比

Figure 3 The ratio of carbon and nitrogen for different green manure crops

果最强,其土壤有效态As含量分别为 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相比冬闲降低幅度为33.89%和32.82%,种植箭筈豌豆和绛三叶降低幅度为19.85%和16.79%。

由图5可知,不同豆科绿肥作物地上部分Cd、As含量存在显著差异。绿肥作物地上部分Cd含量大小整体表现为其他绿肥>箭筈豌豆>光叶苕子>毛叶苕子,最高为箭筈豌豆($0.347 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低为云苕8号和蒙苕1号($0.167 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),绿肥作物之间Cd含量最大值为最小值的2.08倍。绿肥作物地上部分As含量大小整体表现为其他绿肥>箭筈豌豆>光叶苕子>毛叶苕子,最高为褐皮山黧豆($2.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低为陇箭1号($1.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),绿肥作物之间As含量最大值为最小值的2.21倍。

综上所述,11个绿肥作物地上部分Cd含量和As含量都低于《肥料中有毒有害物质的限量要求》(GB 38400—2019)($\text{Cd} < 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{As} < 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),表明其在重金属Cd、As复合污染土壤中是符合安全利用标准的有机肥料。

2.5 豆科绿肥作物对Cd、As的富集系数

由表3可知,不同豆科绿肥作物对Cd、As富集能力存在显著差异,绿肥作物对Cd和As的富集能力整体表现为其他绿肥>箭筈豌豆>光叶苕子>毛叶苕子。其中,对Cd富集系数最高的为箭筈豌豆(0.165),最低为云苕8号和蒙苕1号(0.079),最大值为最小值的2.09倍,西牧333和云苕8号与蒙苕1号Cd富集系数无显著差异。对As富集系数最高的为褐皮山黧豆

(0.071),最低为陇箭1号(0.032),最大值为最小值的2.22倍,西牧333与陇箭1号As富集系数无显著差异。研究表明西牧333在所有豆科绿肥作物中对Cd、

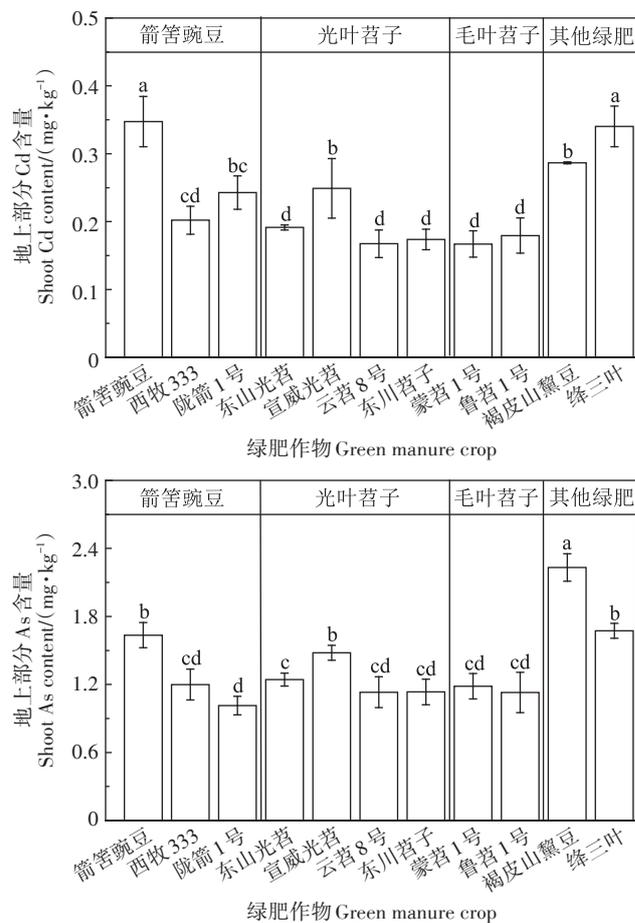


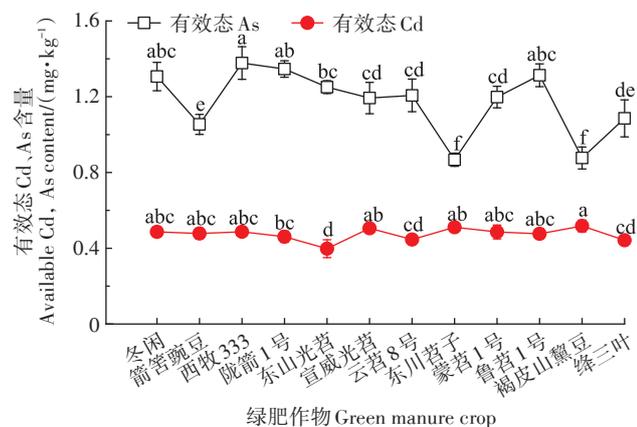
图5 不同豆科绿肥作物Cd、As含量

Figure 5 Cd, As contents of different green manure crops

表3 豆科绿肥作物Cd、As富集系数

Table 3 Cd, As bioconcentration factors of leguminous green manure crops

绿肥品种 Cultivar	绿肥作物 Materials	AF_{Cd}	AF_{As}
箭筈豌豆	箭筈豌豆	$0.165 \pm 0.018a$	$0.052 \pm 0.004bc$
	西牧333	$0.096 \pm 0.010cd$	$0.038 \pm 0.004de$
	陇箭1号	$0.115 \pm 0.012bc$	$0.032 \pm 0.003e$
	其他绿肥		
光叶苕子	东山光苕	$0.091 \pm 0.002d$	$0.039 \pm 0.002d$
	宣威光苕	$0.118 \pm 0.021b$	$0.047 \pm 0.002c$
	云苕8号	$0.079 \pm 0.010d$	$0.036 \pm 0.004de$
	东川苕子	$0.082 \pm 0.007d$	$0.036 \pm 0.004de$
毛叶苕子	蒙苕1号	$0.079 \pm 0.009d$	$0.038 \pm 0.004de$
	鲁苕1号	$0.085 \pm 0.012d$	$0.036 \pm 0.006de$
其他绿肥	褐皮山黧豆	$0.136 \pm 0.001b$	$0.071 \pm 0.004a$
	绛三叶	$0.161 \pm 0.014a$	$0.053 \pm 0.002b$



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$)

图4 豆科绿肥作物对土壤有效态Cd、As含量的影响

Figure 4 Effects of leguminous green manure crops on soil available Cd and As contents

As富集能力较低。

2.6 相关性分析

由表4可知,土壤有效态Cd与全氮呈极显著正相关($P<0.01$);土壤有效态As与产量、有效磷和速效钾呈极显著正相关($P<0.01$),与碳氮比和全氮呈极显著负相关($P<0.01$);地上部Cd与碳氮比呈极显著正相关($P<0.01$),与碱解氮呈显著负相关($P<0.05$);地上部As与碳氮比呈极显著正相关($P<0.01$),与产量呈极显著负相关($P<0.01$),与有效磷呈显著负相关。由土壤全氮与土壤有效态Cd相关系数最大,有效磷与土壤有效态As相关系数最大,碳氮比与地上部Cd和地上部As相关系数最大,可得出土壤全氮对土壤Cd含量的影响最大,土壤有效磷对土壤As含量影响最大,绿肥作物碳氮比对地上部分Cd、As含量影响最大。

由表5可知,产量与碳氮比呈极显著负相关($P<0.01$),与有效磷呈极显著正相关($P<0.01$),全氮与有

机质和碱解氮呈极显著正相关($P<0.01$),有效磷与速效钾呈极显著正相关($P<0.01$)。由产量与碳氮比相关系数最大、全氮与有机质相关系数最大,可得出绿肥植株碳氮比是影响其产量的主要因素,而绿肥作物下土壤全氮是影响土壤有机质变化的主要因素。

3 讨论

3.1 豆科绿肥作物对土壤性状的影响

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,且因其较高的生物量,在培肥地力、改良土壤结构等方面具有重要的作用^[18]。研究发现,种植豆科绿肥可以激活土壤养分、固定大气氮并增加土壤的有效养分浓度^[19]。本研究发现,与冬闲对照相比,豆科绿肥作物可提高土壤全氮52.78%~111.11%,这与程会丹等^[20]的研究结果相符。豆科绿肥作物根部聚集的大量根瘤菌,可通过富集大气中游离的氮来增加土壤中氮含量^[20]。在不同豆科绿肥作物的作用下,土壤有机质与全氮呈极显著的正相关,证实冬种绿肥可同时提高土壤全氮和有机质含量^[20]。这一方面是因为豆科绿肥作物根瘤菌固氮作用在增加土壤养分循环中氮的同时,还可以相应增加土壤有机质的含量,提高土壤地力^[21];另一方面,绿肥作物在生长过程中产生的一些分泌物和凋落物,增加了土壤中酶的活性,从而在其分解过程中同时增加了土壤有机质的含量^[22]。但在本研究中,土壤有机质相比冬闲降低了1.59%~32.49%,与上述的研究结果相反,可能是由于豆科绿肥作物的固氮作用降低了土壤基质中碳氮比^[5],引起“激发效应”,造成土壤原有有机质分解,不利于碳储存^[23]。程会丹等^[20]研究发现,低碳氮比紫云英的应用,有利于土壤微生物的利用并建成较大的微生物群落,从而加速了土壤原有有机碳的损失。另外土壤有机质的降低也与豆科绿肥作物对土壤有机质吸收、储存密切相关。两者的共同

表4 豆科绿肥作物产量、碳氮比与土壤有效态Cd、As及地上部Cd、As的相关分析

Table 4 Correlation analysis between yield, C/N ratio of leguminous green manure crops and soil available Cd, As contents, and shoot Cd, As contents

指标 Index	土壤有效态Cd Available Cd	土壤有效态As Available As	地上部Cd Shoot Cd	地上部As Shoot As
产量	0.041	0.630**	-0.265	-0.448**
碳氮比	0.002	-0.521**	0.578**	0.549**
有机质	0.338	-0.324	0.134	0.191
全氮	0.458**	-0.500**	0.119	0.172
碱解氮	0.150	0.018	-0.352*	-0.230
有效磷	-0.114	0.718**	-0.208	-0.423*
速效钾	-0.067	0.582**	0.043	-0.204

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。下同。
Note: * indicates significant correlation at $P<0.05$ level, ** indicates extremely significant correlation at $P<0.01$ level. The same below.

表5 豆科绿肥作物产量、碳氮比和土壤理化性状的相关分析

Table 5 Correlation analysis between yield, C/N ratio of leguminons green manure crops and soil physicochemical properties

指标 Index	产量 Yield	碳氮比 C/N	有机质 SOM	全氮 TN	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK
产量	1						
碳氮比 C/N	-0.641**	1					
有机质	0.080	-0.118	1				
全氮	-0.335	0.195	0.602**	1			
碱解氮	0.210	-0.221	0.505**	0.483**	1		
有效磷	0.511**	-0.441*	-0.021	-0.066	0.266	1	
速效钾	0.411*	-0.328	-0.023	-0.135	0.088	0.631**	1

作用抵消了绿肥固氮和凋落物对土壤有机质的积累作用,从而减少了土壤有机质含量。上述结果说明种植豆科绿肥作物虽然增加土壤氮素含量,但短期内可能会降低土壤中有机质含量。

此外,不同豆科绿肥作物对土壤中速效养分含量变化的影响有所不同。相关性分析表明豆科绿肥作物碳氮比与土壤有效磷含量呈显著的负相关,这与周国朋等^[23]发现绿肥可提高土壤有效磷含量的结论相似。这是由于碳氮比较低的绿肥作物根系活力较强,绿肥作物根系分泌的有机酸可活化土壤中难溶性矿物养分,从而提高养分有效性^[24-25]。这说明碳氮比较低的绿肥作物可增加土壤有效磷的含量。ZHOU等^[26]研究发现绿肥的种植有利于提高土壤全氮和矿质氮,这与本研究中土壤碱解氮与土壤总氮呈极显著正相关的研究结果相似,但相比冬闲,种植豆科绿肥不同程度降低了土壤速效养分含量,可能是由于绿肥的应用虽显著增加了土壤总氮的含量,但也显著提高了微生物的数量及活性,进而抑制土壤的氮素矿化,增加对土壤氮素的同化,从而降低土壤氮素可利用性^[27]。高菊生等^[28]研究发现长期种植紫云英可以使土壤有机质增加,从而结合更多的氮、磷,有效减少铝、铁等矿物对土壤中氮、磷的固定,同时也加速了土壤矿化而使有效养分释放加快。这与本研究结果相反,也从另一方面证实土壤速效养分降低与土壤有机质减少息息相关,说明豆科绿肥作物的种植容易消耗土壤速效养分,而种植碳氮比较低的绿肥作物有利于提高土壤肥力。

3.2 豆科绿肥作物对土壤Cd、As有效性的影响

在土壤环境中,Cd以金属阳离子的形式存在于孔隙水中,而As以水合阴离子的形式存在于孔隙水中^[29]。土壤pH是影响土壤中Cd、As活性最重要的环境因子之一,有研究表明^[30-32],随着土壤pH升高,土壤胶体表面可变负电荷增加,对Cd的吸附能力增强,而对As的解吸能力也增强,从而使得土壤Cd有效性增加,As有效性降低。但本研究结果表明,绿肥作物对土壤pH无显著影响,且pH与Cd、As有效性无相关性。这可能是由于绿肥作物根系分泌的有机酸对土壤pH的影响有限,同时本研究试验土壤为碱性土壤,在高pH土壤环境下,Cd的活性较低,而As的活性较高,因此其对Cd、As活性影响有限。本研究也发现,土壤全氮与土壤有效态Cd呈极显著正相关,与有效态As呈极显著负相关。这可能是由于豆科绿肥根系与根瘤菌共存增加了土壤氮含量,氮的氨化作用可

以促进 NH_4^+ 的形成,并与土壤中Cd产生离子交换,使得Cd的有效性增加^[33],同时 NH_4^+ 会增加土壤表面正电荷,从而增加对带负电荷的As的吸收,使得土壤中有效态As含量降低。这说明豆科绿肥作物可通过固氮作用增加土壤有效态Cd含量,降低土壤有效态As含量。

研究发现^[34],磷(P)和As属同族元素,化学性质类似,两者均以阴离子的形式存在于土壤中,同时P和As之间存在的竞争吸附关系影响了土壤中As的活化和迁移^[35]。王小玲等^[36]的研究表明, PO_4^{3-} 能够将 AsO_4^{3-} 从双电层的扩散层中和水合氧化物型表面部分置换出来,使得土壤对As的吸附位点被P占据,而造成土壤对As的吸附量降低。本研究发现,土壤有效磷与土壤有效态As呈显著正相关,这与上述研究观点相符,豆科绿肥作物可通过降低土壤有效磷含量,进一步降低土壤有效态As含量,而碳氮比较低的豆科绿肥作物可通过增加土壤有效磷含量,从而使土壤有效态As含量增加。土壤全氮与土壤有效态Cd的相关系数最高,土壤有效磷与土壤有效态As的相关系数最高,因此可得出,种植豆科绿肥作物可通过固氮作用增加土壤有效态Cd含量,降低土壤有效态As含量,而碳氮比低的豆科绿肥作物通过根系活化土壤磷容易增加土壤有效态Cd和有效态As含量。

3.3 不同豆科绿肥作物对Cd、As富集能力的影响

不同豆科绿肥作物对土壤中Cd、As吸收能力有所差异。箭筈豌豆和苕子地面覆盖度高,且吸收的Cd、As主要集中在地下部,从而阻止了过多的Cd、As集中在生物量较大的地上部^[18];山黧豆抗逆性强^[37],对Cd、As胁迫具有较强的耐受能力;三叶草生物量虽小,但繁殖能力强,其地上部分Cd、As富集能力较高^[38]。在本研究中,豆科绿肥作物对Cd和As的富集系数整体表现为其他绿肥>箭筈豌豆>光叶苕子>毛叶苕子,其中褐皮山黧豆对Cd、As富集系数较高,而西牧333对Cd、As富集系数较低,表明褐皮山黧豆对Cd、As富集能力较强,而西牧333对Cd、As富集能力较弱。

前人的研究表明,碳氮比是决定绿肥作物翻压后在土壤中可分解性的重要因素^[39]。高碳氮比(>20)绿肥作物的添加强化了土壤矿质氮的固定,从而降低了作物对土壤矿质氮的吸收,易造成作物生育前期吸氮困难^[40]。相比之下,低碳氮比的绿肥作物可提高后茬作物对氮的吸收,从而促进作物的生长发育。在本研究中,绿肥鲜草产量与碳氮比呈极显著负相关,同时碳氮比与地上部分Cd、As含量呈极显著的正相关,说

明碳氮比较低的豆科绿肥作物鲜草产量高且地上部分Cd、As含量较低,可推测碳氮比较低的豆科绿肥作物由于其鲜草产量较高,植株根系活力也较强,植物根系细胞壁与液泡容易对Cd、As起到拦截作用^[3],从而降低Cd、As向绿肥作物地上部分转运的能力,使得绿肥作物地上部分Cd、As含量降低。因此在所有豆科绿肥作物中,碳氮比较高的褐皮山黧豆由于其生物量小和Cd、As富集能力强,可作为重金属富集植物,有利于减轻土壤中Cd、As污染,而碳氮比较低的西牧333由于其重金属富集能力低、养分高、产量大,因此可翻压进入土壤促进后茬作物的生长发育,同时也可避免土壤中Cd活化带来的后茬作物Cd含量过高的风险。

本研究发现,豆科绿肥的固氮能力可以活化土壤中的Cd,但在不同豆科绿肥作用下,土壤有效态Cd与冬闲相比没有显著变化。豆科绿肥作物可活化土壤Cd,这与王赞等^[18]发现种植豆科绿肥作物可以降低土壤中有效态Cd含量的结论相反,可能是由于其试验结果是基于盆栽试验得出的,盆栽条件下植物根系接触的土壤空间有限,植物活化的重金属由于空间的限制,会被种植的植物吸收,而在田间条件下,植物根系接触的土壤空间更广泛,土壤中重金属活性的变化也会受到更多因素的影响^[41]。与冬闲相比有效态Cd无显著变化的原因可能是由于在较高pH下容易形成难溶性氢氧化镉 $[Cd(OH)_2]$ ^[42],绿肥对土壤Cd活化的影响较弱,同时豆科绿肥作物对Cd具有富集能力,两者共同作用抵消了豆科绿肥固氮对土壤Cd的活化,使得土壤有效态Cd无明显的改变。这说明土壤中Cd有效性的变化与土壤和绿肥作物的共同作用有关。虽然碳氮比较低的西牧333与碳氮比较高的褐皮山黧豆对Cd、As的富集能力相反,但与冬闲对照相比,西牧333对土壤中Cd和As的活性也无显著影响,褐皮山黧豆对土壤Cd的活性无显著影响,但可降低土壤As的活性。因此可考虑在冬闲时期,将两种绿肥同时期播种种植,待其盛花期时将西牧333翻压,褐皮山黧豆收割去除,这样既可以降低碱性土壤中As的含量,也可以实现后茬作物的安全生产利用。但考虑到两种绿肥作物对As、Cd活化/钝化的机理存在差异,实际的应用效果可能需通过后续试验予以验证。

4 结论

(1)种植碳氮比较低的西牧333对土壤中Cd、As

含量无显著影响,而种植碳氮比较高的褐皮山黧豆对土壤Cd含量也无显著影响,但可降低土壤中有效态As的含量。

(2)碳氮比较低的西牧333由于其重金属Cd、As富集能力低、养分高、产量大,因此翻压进入土壤可促进后茬作物的生长发育,同时也可避免土壤中Cd、As活化带来的后茬作物Cd、As含量过高的风险。而碳氮比较高的褐皮山黧豆由于其生物量小和Cd、As富集能力较强可作为重金属富集植物,有利于减少土壤中Cd、As污染。

(3)结合当地的种植制度,同时种植豆科绿肥作物西牧333与褐皮山黧豆是实现轻度Cd、As复合污染土壤作物安全生产的重要措施。

参考文献:

- [1] 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. National soil pollution status survey bulletin[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014.
- [2] 单天宇,刘秋辛,阎秀兰,等. 镉砷复合污染条件下镉低吸收水稻品种对镉和砷的吸收和累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 1938-1945. SHAN T Y, LIU Q X, YAN X L, et al. Cd and As absorption and transport characteristics of rice in a paddy field co-contaminated by Cd and As[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 1938-1945.
- [3] ZHAO F J, WANG P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies[J]. *Plant and Soil*, 2020, 446(1/2): 1-21.
- [4] FAGERIA N K. Green manuring in crop production[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30(5): 691-791.
- [5] YANG L, ZHOU X, LIAO Y, et al. Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake[J]. *Crop Science*, 2019, 59(2): 749-759.
- [6] LOU Y, XU M, WEI W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113(1): 70-73.
- [7] 高嵩涓,周国朋,曹卫东,等. 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): 2115-2126. GAO S J, ZHOU G P, CAO W D, et al. 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.
- [8] 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.
- [9] YANG W, GU J, ZOU J, et al. Impacts of rapeseed dregs on Cd avail-

- ability in contaminated acid soil and Cd translocation and accumulation in rice plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(20):20853-20861.
- [10] 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.
- [11] YONG S O, 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.
- [12] 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, 202:110-908.
- [13] 刘蕊, 常单娜, 高嵩涓, 等. 西北小麦与豆科绿肥间作体系箭筈豌豆和毛叶苕子生物固氮效率及氮素转移特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12):2184-2194. LIU R, CHANG D N, GAO S J, et al. Nitrogen fixation and transfer efficiency of common vetch and hairy vetch in wheat-vetch intercropping system in northwest China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12):2184-2194.
- [14] 徐仁扣, 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2):238-244. XU R K. Research progresses in soil acidification and its control[J]. *Soils*, 2015, 47(2):238-244.
- [15] 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.
- [16] ZHAN F D, ZENG W Z, YUAN X C, et al. Field experiment on the effects of sepiolite and biochar on the remediation of Cd and Pb-polluted farmlands around a Pb-Zn mine in Yunnan Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(8):7743-7751.
- [17] GU J F, ZHOU H, TANG H L, et al. Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under in situ remediation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171:451-459.
- [18] 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.
- [19] MBUTHIA L W, ACOSTA-MARTÍNEZ V, DEBRYUN J, et al. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 89:24-34.
- [20] 程会丹, 鲁艳红, 聂军, 等. 减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1259-1270. CHENG H D, LU Y H, NIE J, et al. Effects of reducing chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch on soil carbon and nitrogen in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6):1259-1270.
- [21] 曾希柏, 孙楠, 高菊生, 等. 双季稻田改制对作物生长及土壤养分的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6):1198-1205. ZENG X B, SUN N, GAO J S, et al. Effects of cropping system change for paddy field with double harvest rice on the crops growth and soil nutrient[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(6):1198-1205.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 林新坚, 兰忠明, 张辉, 等. 不同紫云英基因型根系分泌物中有机酸成分分析[J]. 草业学报, 2014, 23(4):146-152. LIN X J, LAN Z M, ZHANG H, et al. Organic acid composition analysis of root exudation of Chinese milk vetch genotypes[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(4):146-152.
- [25] 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]. *Cereal Research Communications*, 2008, 36(4):1259-1262.
- [26] 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 and Tillage Research*, 2020, 197:104-499.
- [27] ZHANG J B, ZHU T B, CAI Z C, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(1):75-85.
- [28] 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.
- [29] 姚保民, 王树卿, 李刚, 等. 田间水分管理和硅肥施用阻控水稻对镉和砷的积累[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8):2348-2356. YAO B M, WANG S Q, LI G, et al. Water management and silicon fertilizer application mitigate the accumulation of cadmium and arsenic in rice [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8):2348-2356.
- [30] 李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 等. 不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(4):2047-2055. LI K Y, ZHAO T T, CHEN J, et al. Effects of different organic materials on absorption and translocation of arsenic and cadmium in rice[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4):2047-2055.
- [31] 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.
- [32] YIN N, CUI Y, ZHANG Z, et al. Bioaccessibility and dynamic dissolution of arsenic in contaminated soils from Hunan, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(3):584-593.
- [33] GRÜTER R, COSTEROUSSÉ B, BERTONI A, et al. Green manure and long term fertilization effects on soil zinc and cadmium availability and uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) at different growth stages[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600:1330-1343.
- [34] 徐文义, 谢爱军, 李敏, 等. pH和磷的交互作用对稳定化土壤砷释放的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1):113-120. XU W Y, XIE A J, LI M, et al. Interaction effect of pH and phosphorus on arsenic release from stabilized soil[J]. *Soils*, 2019, 51(1):113-120.
- [35] ZENG X, WU P, SU S, et al. Phosphate has a differential influence on arsenate adsorption by soils with different properties[J]. *Plant Soil & Environment*, 2012, 58(9):405-411.
- [36] 王小玲, 马杰, 顾明华, 等. 砷和磷在不同污染类型土壤中的竞争吸附动力学[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4):694-699. WANG X L, MA J, GU M H, et al. Competitive adsorption kinetics of arsenic and phosphorus in different kinds of contaminated soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4):694-699.
- [37] 梁琴, 周泽弘, 马雪清, 等. 绿肥翻压与氮肥减施对水稻产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10):124-130. LIANG Q, ZHOU Z H, MA X Q, et al. Effects of green manure turning over and nitrogen reducing on rice yield, quality and soil fertility[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(10):124-130.
- [38] 刘勇, 刘燕, 杨丹, 等. 三叶草 (*Trifolium repens*) 用于土壤镉污染的修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2226-2232. LIU Y, LIU Y, YANG D, et al. Remediation potential of *Trifolium repens* used in cadmium contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2226-2232.
- [39] SOLTANI S, KHOSHGOFTARMANESH A H, AFYUNI M, et al. The effect of preceding crop on wheat grain zinc concentration and its relationship to total amino acids and dissolved organic carbon in rhizosphere soil solution[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(2):239-247.
- [40] 李勇, 曹红娣, 储亚云, 等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响[J]. 土壤, 2010, 42(4):569-573. LI Y, CAO H D, CHU Y Y, et al. Effects of wheat straw returning and nitrogen application model on rice yield and soil nitrogen supply[J]. *Soils*, 2010, 42(4):569-573.
- [41] 于玲玲, 朱俊艳, 黄青青, 等. 油菜-水稻轮作对作物吸收累积镉的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1):1-6. YU L L, ZHU J Y, HUANG Q Q, et al. Bioavailability of cadmium in the rotation system of oilseed rape and rice grown in Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1):1-6.
- [42] WANG G, ZHOU L. Application of green manure and pig manure to Cd-contaminated paddy soil increases the risk of Cd uptake by rice and Cd downward migration into groundwater: Field micro-plot trials [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(1):1-15.

(责任编辑:宋潇)