

光叶苕子配施不同钝化剂对娃娃菜生长及Cd富集的影响

阮彦楠, 吕本春, 杨伟, 王应学, 陈检锋, 尹梅, 陈华, 王伟, 梁志妹, 王志远, 付利波

引用本文:

阮彦楠, 吕本春, 杨伟, 王应学, 陈检锋, 尹梅, 陈华, 王伟, 梁志妹, 王志远, 付利波. 光叶苕子配施不同钝化剂对娃娃菜生长及Cd富集的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1465–1476.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0010>

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

王赟, 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>

钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563–572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>

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>

低温改性粉煤灰对土壤镉的钝化修复研究

赵航航, 杨阳, 黄训荣, 张贵宾, 李竞天, 吉普辉

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1642–1650 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1750>

设施菜地土壤镉钝化剂筛选及应用效果研究

王云丽, 石耀鹏, 赵文浩, 李令仪, 乔建晨, 王雨薇, 梁淑轩, 刘微

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1503–1510 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0303>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

阮彦楠, 吕本春, 杨伟, 等. 光叶苕子配施不同钝化剂对娃娃菜生长及Cd富集的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1465–1476.

RUAN Y N, LÜ B C, YANG W, et al. Effects of smooth vetch combined with different immobilization amendments on baby cabbage growth and Cd accumulation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1465–1476.

光叶苕子配施不同钝化剂对娃娃菜生长及Cd富集的影响

阮彦楠^{1,4}, 吕本春^{1,3}, 杨伟², 王应学¹, 陈检锋¹, 尹梅¹, 陈华¹, 王伟¹, 梁志妹⁵, 王志远^{1*}, 付利波^{1*}

(1. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 2. 昆明市农产品质量安全中心, 昆明 650118; 3. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 4. 昆明学院, 昆明 650214; 5. 昆明市农业科学研究院, 昆明 650118)

摘要:为通过豆科绿肥光叶苕子的合理利用来有效降低土壤重金属有效性及主作物重金属含量,本研究采用盆栽试验研究豆科绿肥光叶苕子配施不同钝化剂(生物炭、硅肥、钙镁磷肥)对娃娃菜产量、根系形态、光合作用及其Cd转运效应等的影响。结果表明,单施光叶苕子可增加娃娃菜产量和根冠比,显著增加了根表面积、根体积、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素,显著降低土壤有效Cd含量(23.20%, $P<0.05$),显著降低娃娃菜地上和地下Cd含量,分别降低了22.34%和15.83%。光叶苕子配施不同钝化剂显著增加地上部分生物量,且生物炭处理主要提高地上部生物量,增产效果好,而硅肥主要增加地下部分生物量;其次,光叶苕子配施钝化剂降低根表面积、根尖数、蒸腾速率、胞间CO₂和叶绿素含量;与单施光叶苕子相比,光叶苕子配施硅肥可增加土壤有效Cd含量(18.34%, $P<0.05$)和娃娃菜地下部分Cd含量(26.71%, $P<0.05$),但对地上部分Cd无显著影响;光叶苕子配施钙镁磷肥对土壤有效Cd和娃娃菜地下部分Cd含量无显著影响,但可增加地上部分Cd含量(31.22%, $P<0.05$)。在所有处理中,光叶苕子配施生物炭对土壤Cd钝化效果、娃娃菜地上和地下Cd含量降低效果最佳,分别为43.93%、14.57%和25.37%,因此推荐豆科绿肥光叶苕子与生物炭合理配施来降低Cd污染地区Cd活性和缓解Cd对娃娃菜的毒性。

关键词:光叶苕子;钝化剂;镉;污染土壤;娃娃菜;生长;转运

中图分类号:X173;S634.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)07-1465-12 doi:10.11654/jaes.2023-0010

Effects of smooth vetch combined with different immobilization amendments on baby cabbage growth and Cd accumulation

RUAN Yannan^{1,4}, LÜ Benchun^{1,3}, YANG Wei², WANG Yingxue¹, CHEN Jianfeng¹, YIN Mei¹, CHEN Hua¹, WANG Wei¹, LIANG Zhimei⁵, WANG Zhiyuan^{1*}, FU Libo^{1*}

(1. Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2. Kunming Agricultural Product Quality and Safety Center, Kunming 650118, China; 3. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. Kunming College, Kunming 650214, China; 5. Kunming Research Institute of Agricultural Sciences, Kunming 650118, China)

Abstract: The concentrations of heavy metals in soil and the heavy metal content in staple crops can be effectively reduced by rational

收稿日期:2023-01-05 录用日期:2023-02-27

作者简介:阮彦楠(1999—),男,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为植物重金属生物修复。E-mail:1759028933@qq.com

吕本春与第一作者同等贡献

*通信作者:王志远 E-mail:wzyaas@hotmail.com; 付利波 E-mail:1198276883@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1700205);国家绿肥产业技术体系昆明综合试验站项目(CARS-22-Z-14);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: The National Key Research & Development Project (2021YFD1700205); Kunming Comprehensive Experimental Station for National Green Manure Industrial Technology System of CARS (CARS-22-Z-14); Kunming Agricultural and Rural Bureau for “Research on Planting System Optimization and Biological Comprehensive Regulation Technology Mode”

utilization of leguminous green manure smooth vetch. In this study, a pot experiment was conducted to study the effects of leguminous green manure smooth vetch with different immobilization amendments (biochar, silicon fertilizer, and calcium magnesium phosphate fertilizer) on the yield, root morphology, photosynthesis, and cadmium transport of baby cabbage. Single application of smooth vetch increased the yield and root-shoot ratio of baby cabbage, significantly increased the root surface area, root volume, stomatal conductance, transpiration rate, and chlorophyll content, significantly reduced the soil available Cd content (23.20 %, $P<0.05$), and significantly reduced the Cd content in the aboveground and underground parts of baby cabbage by 22.34% and 15.83%, respectively. Smooth vetch application with different immobilization amendments, particularly biochar, significantly increased the aboveground biomass and had good yield-increasing effect, while the silicon fertilizer mainly increased the underground biomass. Smooth vetch application with immobilization amendments reduced root surface area, root tip number, transpiration rate, intercellular CO₂ content and chlorophyll content. Compared with the single application of smooth vetch, the application of smooth vetch combined with silicon fertilizer increased the available Cd content in soil (18.34%, $P<0.05$) and the Cd content in the underground part of baby cabbage (26.71%, $P<0.05$), but had no significant effect on the Cd content in the aboveground part; application of calcium magnesium phosphate fertilizer combined with vetch had no significant effect on soil available Cd and Cd content in underground part of baby cabbage, but increased Cd content in aboveground part (31.22%, $P<0.05$). Across all treatments, the combination of smooth vetch and biochar had the best effect on the passivation of soil Cd and the reduction of Cd content in the aboveground and underground parts of baby cabbage compared with the control, which were 43.93%, 14.57% and 25.37%, respectively. Therefore, it is recommended that leguminous green manure smooth vetch and biochar should be reasonably applied to reduce Cd activity and alleviate Cd toxicity to baby cabbage in Cd-contaminated areas.

Keywords: smooth vetch; immobilization amendment; cadmium; contaminated soil; baby cabbage; growth; transshipment

镉(Cd)是一种有强迁移性和生物毒性的重金属污染物,在植物体内累积,抑制植物光合作用、影响根系生长、降低农作物产量,进而危害人体健康^[1-2]。因此,降低农田土壤Cd的有效性,减少作物对Cd的吸收,成为土壤科学和环境科学领域研究的重点。生物炭、硅肥、钙镁磷肥等碱性钝化剂通过改变土壤中重金属形态,削弱其生物有效性和迁移性,从而降低土壤中重金属对动植物的毒害作用^[3-4]。张静静等^[5]通过施用生物炭材料增强土壤pH值来降低微碱性土壤中Cd含量;Prabagars等^[6]发现硅降低水稻根和茎叶中迁移性较强的乙醇提取态和去离子水提取态的Cd含量,促进难迁移的醋酸提取态和盐酸提取态Cd形态的生成,降低水稻体内Cd的迁移性;鄢德梅等^[4]研究发现在施用2 250 kg·hm⁻²钙镁磷肥的条件下,土壤中有效态Cd含量显著降低46.97%,糙米中Cd含量降低至0.04 mg·kg⁻¹。

绿肥在农田重金属污染修复中通过影响土壤中有机质含量、pH值、还原性铁和微生物群落^[7]等,减少土壤中的活性Cd,进而有效阻断农作物中的Cd含量。相关研究发现施加绿肥油菜显著降低土壤交换态Cd,增加土壤有机质和微生物碳、氮含量,有效减轻Cd在土壤中的毒性^[8-9]。因此,种植绿肥减少土壤Cd向农作物的迁移是一项经济有效的措施。但是也有部分研究发现绿肥翻压进入土壤中容易受到后茬作物根系分泌物的影响,根系分泌物对土壤的酸化作用容易抵消绿肥产生有机质对重金属的螯合作用,是

影响绿肥应用在土壤中重金属有效性的主要限制因素^[10-12]。另外绿肥翻压进入土壤中,在增加土壤中溶解有机物(DOM),降低Cd的有效性的同时,如果绿肥产生的DOM分解时间较长时,一旦超过作物的生长周期,绿肥所产生的有机质大部分仍为可溶性,这反而可能会增加重金属Cd对作物的毒性。由此可见,绿肥对交换态Cd的影响不尽相同,有必要进一步考虑绿肥与其他钝化效果较好的材料相结合来减少植物对活性Cd的响应。

前人研究发现,施加钝化剂容易增加土壤的pH值,而绿肥翻压后容易增加土壤中有机质含量,土壤pH值提高,可增加土壤胶体表面的负电荷,从而增强了土壤胶体对Cd离子的吸附能力,而有机质可通过络合、离子交换和沉淀等过程增强土壤对Cd的吸附能力,研究表明,土壤pH的提高可增加有机质表面的负电荷,使其更有效地络合Cd²⁺,从而可进一步降低土壤中Cd的活性,肖敏等^[13]研究发现,紫云英与石灰配施时,土壤Cd有效性和稻米Cd含量均显著降低。汤建等^[14]研究发现紫云英与生物炭配施既可提高水稻产量,也更能降低水稻籽粒中Cd的含量。另一种研究表明,施用钝化剂对绿肥腐解及氮、磷、钾养分释放具有促进作用,这是由于促进绿肥腐解的多数微生物适合在中性或微碱性环境中活动,施用石灰能中和腐解过程和后茬作物根系释放的有机酸等物质,为微生物的生长繁殖提供更有利环境^[15],从而增加微生物数量,促进绿肥腐解和氮、磷、钾养分的释放。因此可

推断出绿肥配施钝化剂有助于加快绿肥的腐解,从而有利于降低土壤和当季作物中Cd的有效性。综上可知,绿肥与钝化剂对Cd响应存在两方面的作用,一方面绿肥和钝化剂协同作用下,可进一步降低土壤有效Cd的含量,另一方面钝化剂有利于绿肥的腐解,有利于降低Cd的有效性。

以上绿肥配施钝化剂的相关研究主要集中在紫云英配施不同钝化剂上,目前已证明豆科绿肥光叶紫花苕(*Vicia villosa* var.)在降低土壤和作物有效Cd含量具有很大的应用潜力^[7,16],但对光叶紫花苕配施不同钝化剂对植物Cd的解毒作用尚未见系统报道。娃娃菜因其生长快、易栽培管理常被用作重金属污染相关研究的指示蔬菜作物。生物炭、硅肥、钙镁磷肥等钝化剂在修复酸性Cd污染土壤中应用广泛^[13-6],但对修复微碱性Cd污染土壤报道较少。因此,本文采用盆栽试验,以东川微碱性农田Cd污染土壤为供试土壤,娃娃菜为研究对象,探究旱地绿肥光叶紫花苕配施钝化剂生物炭、硅肥、钙镁磷肥对蔬菜产量、根系形态、光合作用及其Cd转运效应等的影响。本研究通过寻求最佳的缓解Cd毒害的绿肥配施钝化剂种类,以期为准评估绿肥与钝化剂配施体系对蔬菜生长和土壤重金属Cd有效性的影响提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验于云南省昆明市嵩明县农科院嵩明基地大棚内进行(25°28'N, 102°41'E)。该地区属于低纬亚热带高原季风气候,年平均气温和年平均降水量分别为11~22℃和899.8 mm。

盆栽土取自云南省昆明市东川区Cd污染农田(25°57'~26°32'N, 102°47'~103°18'E),海拔1 000 m。土壤类型为冲积土,pH值为7.54,土壤养分含量为有效磷15.2 mg·kg⁻¹、速效钾76.5 mg·kg⁻¹、碱解氮

62.8 mg·kg⁻¹、全磷1.52 g·kg⁻¹、全钾16.9 g·kg⁻¹、全氮1.37 g·kg⁻¹、有机质10.71 g·kg⁻¹。供试土壤Cd含量为1.56 mg·kg⁻¹,未超过GB 15618—2018的风险筛选值,故研究区域属于轻度重金属Cd污染农田。

供试蔬菜品种为高丽余娃娃菜(*Brassicapekinensis*),为当地广泛种植的蔬菜作物。供试豆科绿肥作物为光叶紫花苕(*Vicia villosa* var.),种子来源于国家绿肥产业技术体系昆明综合试验站。生物炭购自南京勤丰秸秆科技有限公司(全氮1.4 g·kg⁻¹、全磷1.4 g·kg⁻¹、全钾13.2 g·kg⁻¹、有机碳478 g·kg⁻¹、pH值10.16、Cd 0.026 mg·kg⁻¹),钙镁磷肥购自浙江农得惠肥业有限公司(P₂O₅ 15%、CaO 45%、SiO₂ 20%, MgO 12%、pH值9.79、Cd 0.04 mg·kg⁻¹),硅肥购自昆明懿堂春科技有限公司(SiO₂≥30%, pH值10.78, Cd含量0.013 mg·kg⁻¹)。盆栽装置盆体为PVC材质,高17.5 cm,内径18.5 cm。

1.2 试验设计

娃娃菜于2021年8月15日播种育苗,9月2日移栽。试验设5个处理,分别为:(1)空白(CK);(2)豆科绿肥光叶苕子(G);(3)光叶苕子+生物炭(GB);(4)光叶苕子+硅肥(GS);(5)光叶苕子+钙镁磷肥(GP);每个处理5个重复,共计25个盆栽,前期试验研究发现当绿肥光叶苕子用量为39.6 g·pot⁻¹时对降低土壤(23.20%)和蔬菜(22.34%)Cd含量效果最佳,而生物炭、硅肥和钙镁磷肥的用量参照改良张静静等^[5]的用量,具体施用量见表1,将豆科绿肥光叶紫花苕和钝化剂与土壤混合均匀后装盆,每盆土4 kg,定量浇去离子水,控制土壤含水量约为田间持水量的60%。装盆2周后,每盆移栽娃娃菜幼苗1株,娃娃菜生长期根据需要进行浇水施肥。收获后分别采集土壤与植株样品。

1.3 测试指标与方法

1.3.1 娃娃菜地上部指标

娃娃菜收获时先测定叶长、叶宽和叶片数,并计算根冠比和叶面积。于08:30—11:30使用SPAD-

表1 盆栽试验有机物料和钝化剂用量

Table 1 Pot experiment of organic materials and immobilization amendment dosage

处理 Treatment	有机物料 Organic material	钝化剂 Immobilization amendment	有机物料用量 Amount of organic material/(g·pot ⁻¹)	钝化剂用量 Immobilization amendment dosage/(g·pot ⁻¹)
CK	空白	—	—	—
G	光叶苕子(G)	—	39.600	—
GB	光叶苕子(G)	生物炭(B)	39.600	26.740
GS	光叶苕子(G)	硅肥(S)	39.600	3.960
GP	光叶苕子(G)	钙镁磷肥(P)	39.600	5.360

502叶绿素仪和便携式光合速率测定仪(LI-6400XT, 美国)测定同一叶位(第三片展开叶)叶片叶绿素含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。

1.3.2 娃娃菜地下部指标

自来水冲洗泥土后用去离子水清洗沥干水后测量地上部产量,并用EPSON PERFECTION V 700 仪扫描娃娃菜根系后用根分析软件 WinRHIZO-Pro 2013 (Regent Instruments Inc.)测定根长、根表面积、根体积、平均根系直径、根尖数和分枝数)。同时取植株样洗净晾干水分后置于烘箱、105 °C 杀青 30 min 后调制 70 °C 烘干至恒质量,分别称质量、记录地上部和地下部干物质量。不锈钢粉碎机粉碎烘干样品、混匀,过 0.25 mm 筛后备用。娃娃菜收获后采集 0~20 cm 表层土壤样,风干混匀后用玛瑙研钵反复磨细直至全部过 0.149 mm 孔径尼龙筛,装袋保存、备用。

1.3.3 土壤及娃娃菜 Cd 含量

土壤有效 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^[17]。植物 Cd 含量测定采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解-石墨炉原子吸收分光光度法测定^[18]。植物 Cd 累积特征用 Cd 累积量、富集系数(Enrichment coefficient, EC)、转运系数(Transfer factor, TF)表示^[19],植物 Cd 钝化特征用钝化效率表示^[16]:

$\text{Cd 累积量} = \text{娃娃菜 Cd 含量} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \times \text{娃娃菜生物量} (\text{kg})$;

$\text{富集系数} (EC) = \text{娃娃菜 Cd 含量} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{土壤 Cd 含量} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$;

$\text{转运系数} (TF) = \text{娃娃菜地上部分 Cd 含量} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{娃娃菜地下部分 Cd 含量} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$;

$\text{钝化效率} = (1 - Ce/Ci) \times 100\%$

式中: C_e 为钝化处理后单一金属元素有效态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_i 为对照处理单一金属元素有效态含量,

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.4 数据处理

所有数据的平均值、标准差采用 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 软件作图。

2 结果与分析

2.1 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜农艺性状的影响

由表 2 可见,与空白对照相比,单独施用光叶苕子显著增加娃娃菜地下部生物量、产量,分别增加 28.88% 和 80.38%,且地上部生物量、根冠比和叶片数也有一定增加,但差异不显著。与单施光叶苕子相比,光叶苕子配施生物炭、硅肥、钙镁磷肥显著增加娃娃菜地上部分生物量,增幅分别为 35.24%、17.70%、33.70%;光叶苕子配施三种不同钝化剂降低了娃娃菜地下部分生物量(41.44%、33.10%、31.69%)、叶片数(16.67%、27.78%、16.67%)和根冠比(56.76%、43.24%、48.65%),而光叶苕子和生物炭配施增加娃娃菜叶面积(30.05%)。

2.2 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜根系形态的影响

由图 1 可见,与空白对照相比,施用光叶苕子显著增加了娃娃菜根长、根表面积、根体积、根尖数和分枝数($P < 0.05$),分别增加 89.20%、43.24%、51.15%、85.16% 和 48.86%,但在一定程度上降低了娃娃菜的平均根系直径(19.83%, $P < 0.05$)。光叶苕子配施生物炭、硅肥、钙镁磷肥却显著减小了根表面积(54.82%、35.67%、43.31%, $P < 0.05$)、根尖数(47.98%、39.06%、52.06%, $P < 0.05$)和分枝数(48.91%、22.22%、56.11%, $P < 0.05$)。光叶苕子配施生物炭和硅肥则显著减小了娃娃菜根长($P < 0.05$),分别减小 61.09% 和 70.43%,但增加了娃娃菜平均根系直径,分别增加 42.56% 和

表 2 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜农艺性状的影响

Table 2 Effects of smooth vetcha combined with immobilization amendment on agronomic traits of baby cabbage

处理 Treatment	地上部 Ground/(g·plant ⁻¹)	地下部 Underground/(g·plant ⁻¹)	根冠比 r/t	产量 Output/(g·pot ⁻¹)	叶片数 Leaf number/(片·pot ⁻¹)	叶面积 Leaf area/(cm ² ·pot ⁻¹)
CK	11.620±0.260c	0.367±0.012b	0.032±0.400a	108.197±10.486c	16.000±1.000b	173.555±1.330b
G	12.940±0.560c	0.473±0.025a	0.037±0.390a	195.163±3.261a	18.000±0.600a	166.983±20.007b
GB	17.500±0.440a	0.277±0.021d	0.016±0.240d	200.327±5.371a	15.000±1.000b	217.165±21.978a
GS	15.230±0.870b	0.317±0.038cd	0.021±0.300b	156.113±9.963b	13.000±0.600c	101.010±16.334c
GP	17.300±1.250a	0.323±0.015c	0.019±0.180c	192.723±7.211a	15.000±1.000b	157.553±18.027b

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.

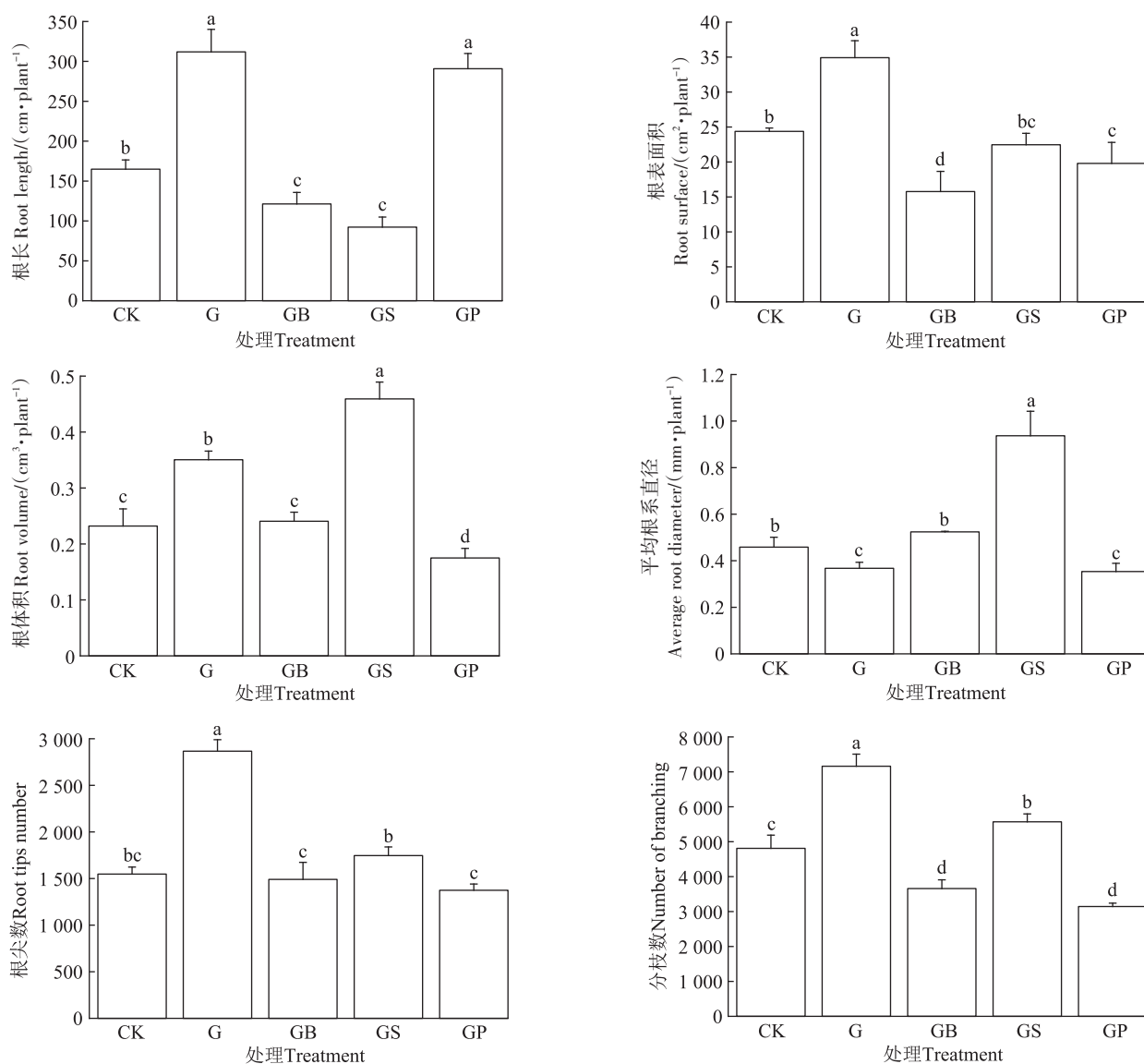
154.91%。而对娃娃菜根体积则存在不同程度的影响,光叶苕子配施硅肥最高,相比增加了30.99%,而光叶苕子配施生物炭和钙镁磷肥则是减小(31.37%和61.90%)。由此可见,与对照相比,施用光叶苕子可显著促进娃娃菜根部的生长发育,有利于植物地下生物量积累;而与单施光叶苕子处理相比,光叶苕子配施钝化剂则容易降低娃娃菜根表面积、根尖数和分枝数,进而减小植物地下生物量积累,但有利于娃娃菜地上部分有机物积累,其中光叶苕子配施硅肥能显著增加根体积和平均根系直径($P<0.05$),对娃娃菜地下

根系生长贡献较高,不利于提高其可食用部分产量。

2.3 光叶苕子配施钝化剂对光合作用和叶绿素含量的影响

光叶苕子单施和配施钝化剂对娃娃菜光合作用和叶绿素含量有不同的影响。由图2可知,与对照相比,单施光叶苕子处理增加了娃娃菜气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量,分别增加了76.33%、174.05%和10.05%。

与单施光叶苕子处理相比,光叶苕子配施生物炭、硅肥、钙镁磷肥显著降低蒸腾速率(17.62%~



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$). The same below.

图1 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜根系形态的影响

Figure 1 Effects of smooth vetcha combined with immobilization amendment on root morphology of baby cabbage

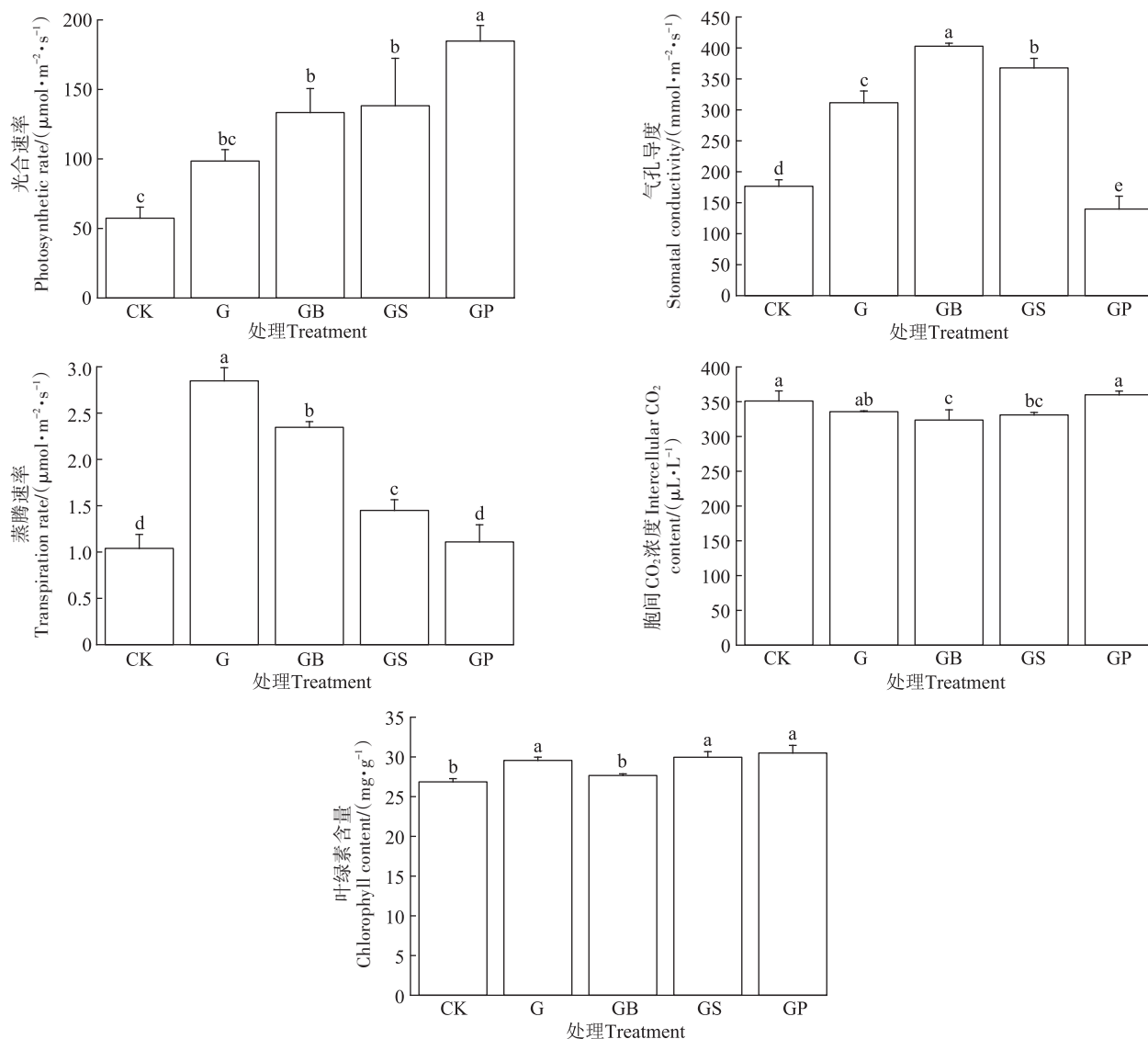


图2 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜光合作用和叶绿素含量的影响

Figure 2 Effects of smooth vetcha combined with immobilization amendment on photosynthesis and chlorophyll content of baby cabbage

61.05%, $P < 0.05$), 光叶苕子配施生物炭和硅肥又可显著增加气孔导度 (29.29%、18.06%, $P < 0.05$), 其中配施硅肥可显著降低娃娃菜 6.43% 的叶绿素含量。光叶苕子配施钙镁磷肥可显著增加光合速率和胞间 CO_2 浓度 ($P < 0.05$, 87.63% 和 7.25%), 可降低娃娃菜气孔导度 (55.10%)。综上可知, 与对照相比, 单独施用光叶苕子可增加娃娃菜部分光合指标, 利于光合产物的积累; 而光叶苕子配施钝化剂容易增加娃娃菜光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素, 也在一定程度上增加了娃娃菜光合指标, 但也存在降低了其胞间 CO_2 浓度。与单施光叶苕子相比, 光叶苕子配施钝化剂只增加了光合速率, 降低了蒸腾速率, 而其他光合指标配施不同钝化剂呈现不同的规律。

2.4 光叶苕子配施钝化剂对土壤-娃娃菜 Cd 含量的影响

光叶苕子单施和配施钝化剂对土壤重金属 Cd 有效态含量有不同的影响。由图 3 可知, 与空白对照相比, 单施光叶苕子和配施钝化剂均可降低土壤有效态 Cd 含量, 其中单施光叶苕子的降低幅度为 23.82%, 而在所有的处理中, 光叶苕子配施生物炭对土壤有效 Cd 钝化效果最佳, 差异最为明显, 降低幅度为 43.84%。其次在配施不同钝化剂处理中, 与单施光叶苕子、配施硅肥和钙镁磷肥处理相比, 光叶苕子和生物炭配施均可显著降低土壤有效 Cd 的含量, 效果最好; 与单施光叶苕子相比, 光叶苕子与硅肥配施却增加了 18.34% 的土壤有效 Cd 含量。

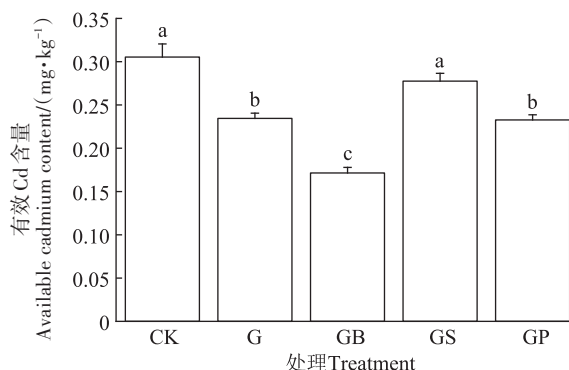


图3 光叶苕子配施钝化剂对土壤有效Cd含量的影响

Figure 3 Effects of smooth vetcha combined with immobilization amendment on soil available Cd content

光叶苕子单施和配施钝化剂对娃娃菜体内Cd含量与累积量有不同影响。由图4可知,与空白对照相比,单施光叶苕子可显著降低娃娃菜地上和地下部分Cd含量,分别降低22.34%和15.83%。与单施光叶苕子处理相比,光叶苕子配施生物炭、硅肥和钙镁磷肥处理可显著降低地下部分Cd累积量(48.13%、15.32%和26.40%),但增加了地上部分Cd累积量(48.80%、30.86%和74.99%),且钙镁磷肥处理地上部分Cd累积量为最高(31.21%, $P<0.05$);其中,光叶苕子和生物

炭配施可显著降低地下部分Cd含量(11.34%, $P<0.05$),显著低于配施硅肥和钙镁磷肥处理,而光叶苕子和硅肥配施则增加地下部分Cd含量(26.71%, $P<0.05$),显著高于其他配施处理。在所有的配施处理中,与空白对照相比,光叶苕子配施生物炭对降低娃娃菜地上和地下Cd含量差异最明显(14.56%和25.37%, $P<0.05$),效果最好。

综上可知,与空白对照相比,单施光叶苕子容易降低土壤有效Cd和娃娃菜Cd含量,特别是在降低地上部分Cd含量效果最好,而配施钝化剂均可降低土壤有效Cd含量,对地上和地下Cd含量影响不同,但配施生物炭效果最佳。光叶苕子配施硅肥较单施光叶苕子容易增加土壤有效Cd(18.34%)和娃娃菜地下部Cd含量(26.71%),地下部Cd含量甚至高于空白、配施生物炭和硅肥处理,说明硅肥易导致地下部Cd积累;配施钙镁磷肥对娃娃菜地上部Cd贡献最大,显著高于配施生物炭和硅肥处理,对降低娃娃菜可食用部分Cd效果最差;而光叶苕子配施生物炭可进一步降低土壤有效Cd含量,其中光叶苕子配施生物炭对钝化土壤中Cd、降解娃娃菜地上和地下部分Cd效果较好,较空白对照分别降低43.84%、14.56%和25.37%,在降低地上部分Cd含量上与配施硅肥差异

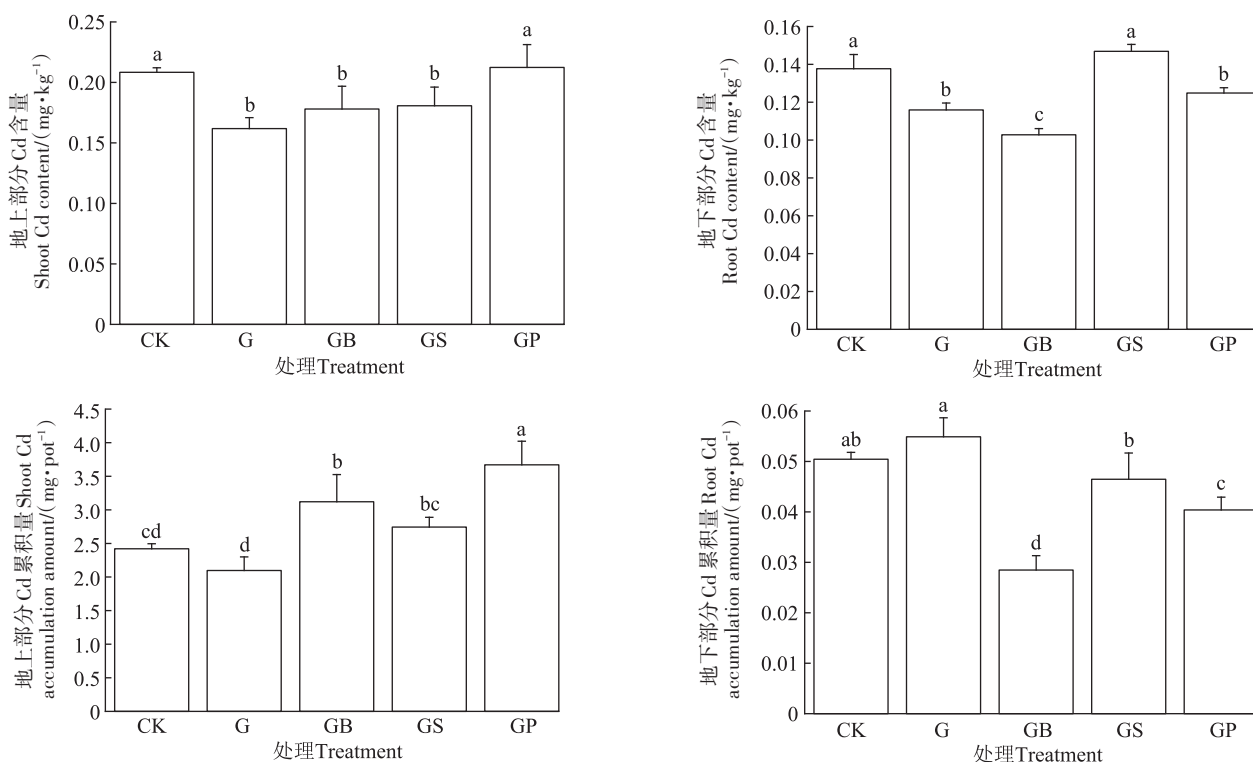


图4 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜Cd含量和累积量的影响

Figure 4 Effects of smooth vetcha combined with immobilization amendment on Cd content and accumulation in baby cabbages

不显著。

2.5 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜 Cd 富集和转运的影响

由表 3 可知,与对照相比,单施光叶苕子可降低 Cd 地上和地下富集系数和转运系数;与单施光叶苕子处理相比,光叶苕子配施生物炭增加了 Cd 地上富集系数、转运系数,降低了 Cd 地下富集系数,光叶苕子配施硅肥增加了地上和地下富集系数,降低了转运

表 3 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜 Cd 富集和转运的影响
Table 3 Effects of smooth vetcha combined with immobilization amendments on Cd accumulation and translocation in baby cabbage

处理 Treatment	BCF _{地上/土}	BCF _{地下/土}	TF _{地上/地下}
CK	1.100±0.020a	0.730±0.040a	1.520±0.080bc
G	0.850±0.050b	0.610±0.020b	1.400±0.120cd
GB	0.940±0.100b	0.540±0.020c	1.730±0.190a
GS	0.950±0.080b	0.780±0.020a	1.230±0.070d
GP	1.120±0.100a	0.660±0.010b	1.700±0.150ab

系数。光叶苕子配施钙镁磷肥增加了 Cd 地上、地下富集系数、转运系数。综合表明光叶苕子配施钝化剂容易增加娃娃菜植株对 Cd 的吸收和转运。

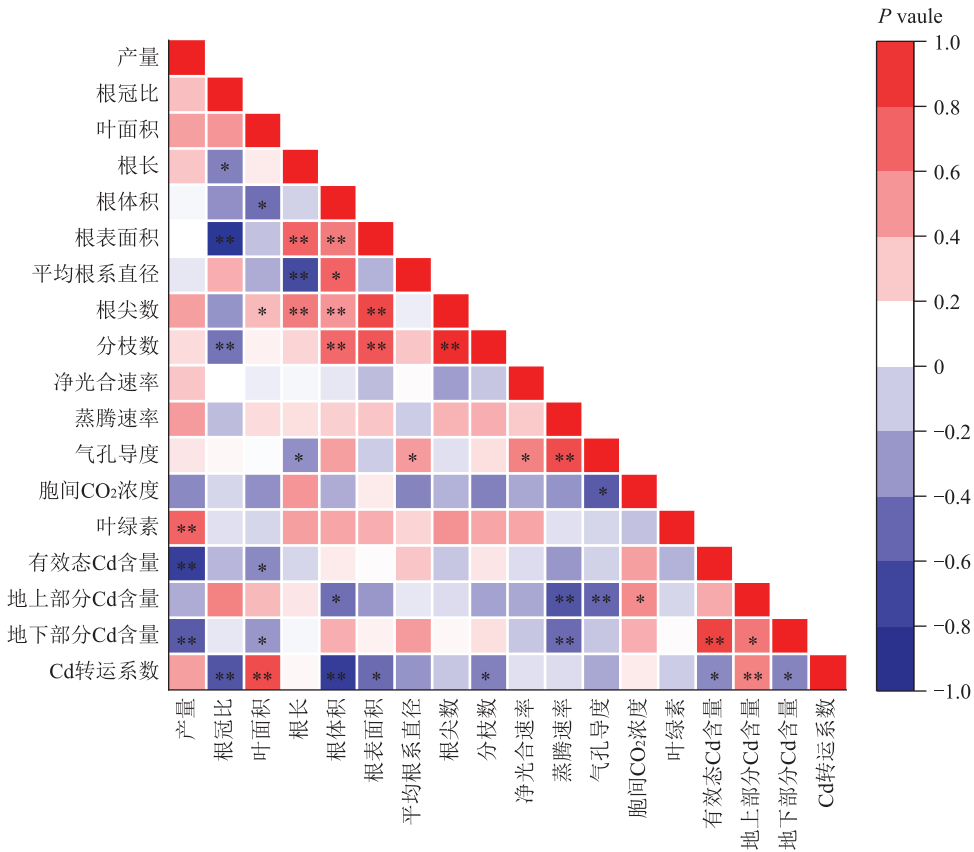
2.6 相关性分析和冗余分析

从图 5 可知,有效态 Cd 含量与产量和叶面积呈显著负相关,地上部分 Cd 含量与根体积、气孔导度和蒸腾速率呈显著负相关,与胞间 CO₂ 浓度呈显著正相关。地下部分 Cd 含量与产量、叶面积和蒸腾速率呈显著负相关。Cd 转运系数与叶面积呈显著正相关,与根冠比、根表面积、根体积和分枝数呈显著负相关。

3 讨论

3.1 光叶苕子与钝化剂配施对娃娃菜生长及 Cd 解毒的影响

根系是植物最先感知 Cd 等有毒物质的器官,土壤中 Cd 对植物的危害也首先表现在根系变化上。重金属 Cd 胁迫严重影响着植物根系的生长发育,而根系形态和结构的变化反过来会影响根系对 Cd 吸收和



*表示在 95% 水平显著相关,**表示在 99% 水平显著相关,双尾检验。
*means significant correlation at 95% level, ** means significant correlation at 99% level, two-tailed test.

图 5 植物生理因子与 Cd 生物有效性的相关性分析

Figure 5 Correlation between plant physiological factors and Cd bioavailability

木质部的装载效率,从而影响Cd在植物体内的转运和累积^[20-21]。有研究表明,Cd对植物的影响与其自身重金属含量有关,低含量有刺激作用,当含量超过一定量时就会抑制其生长发育,且随着含量升高抑制作用显著提高^[22]。前人研究发现,应用生物炭能够增加水稻根系生理功能,且根系指标随着生物炭施入量的加大而逐渐增加^[23]。这是由于生物炭特殊的孔隙结构具有较大的C/N,使其吸附Cd²⁺的同时也吸附大量的NH₄⁺和NO₃⁻,进而减少N素的淋溶损失^[24],保持长期供肥作用,从而促进植物根系生长发育。李明等^[25]的研究表明通过向重金属污染土壤中加入玉米秸秆生物炭能够通过静电效应吸附Cd²⁺,幼苗的根长和干物质随着生物炭的施用而增加,而根系中Cd的累积随着生物炭的施用而减少。而刘阿梅等^[26]的研究表明Cd污染土壤中添加生物炭促进了小青菜的生长发育,株高和鲜质量均显著增加,生物炭对蔬菜叶片生长的影响显著大于对根系的影响,这说明生物炭对蔬菜主要可食部位的产量有一定的促进作用。本研究发现,光叶苕子与生物炭配施根冠比和根表面积在所有处理中最小,为0.016 cm²·株⁻¹和15.773 cm²·株⁻¹,而这与前人研究的促进植物根系生长和干物质累积不同,推测可能是由于生物炭施用的比例过高造成土壤水分、养分的流失和土壤pH升高抑制了娃娃菜根的生长^[27],除根冠比外,与单施绿肥光叶苕子处理相比,光叶苕子配施生物炭还容易降低娃娃菜根长、根体积、根尖数和分枝数等根系参数,降低31.37%~61.09%,但是生物炭依然促进了娃娃菜的生长发育,地上部生物量、产量、叶面积在所有处理中最高,这与前人研究结果相同,主要原因可能是生物炭对地上部生长的影响显著大于对根系的影响,对娃娃菜主要可食部位的产量有一定的促进作用^[25-27]。另外,本研究还发现,光叶苕子与硅肥配施其根冠比、根体积和平均根系直径在所有处理中最大,而地上部生物量、产量和叶片数在所有处理中最低,且根表面积、根尖数和分枝数也显著大于光叶苕子配施生物炭处理($P < 0.05$),有研究表明,硅肥对植物地下根系生长有明显促进作用,增强了植株根系活力,但会降低植物部分产量和地上部生长^[28-29]。综上可推断出光叶苕子可显著增加土壤肥力,而生物炭的合理应用可减少养分流失,故两者结合施加,可在Cd污染土壤中长期持续为娃娃菜提供充足养分,进而满足植株地上部分的生长发育,提高主要可食部位的产量,但也可在苗期适量施用硅肥,增加植物根系生长,扩大养分吸收,后期适量

施用生物炭,增加地上部可食部位产量。

娃娃菜通过根系吸收重金属Cd,Cd向地上部分转运后容易影响植物光合作用,植物的光合作用对重金属Cd非常敏感,低含量的Cd就能抑制水稻、玉米等植物的光合作用,使植物的生长受阻,生物量降低^[30-31]。Cd²⁺可以通过部分阳离子通道进入细胞或阻滞细胞通道,同时干扰其各项功能。此外,Cd还能抑制原叶绿素酯还原酶的活性,干扰叶片中叶绿素的合成^[32]。研究表明,有机物料还田的适宜施用能增加玉米叶绿素含量、净光合速率、光合效率、蒸腾速率,使作物产量显著增加^[33]。这与本研究中发现光叶苕子能够增加光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量的结论一致,增加了10.05%~174.05%,这是由于Cd抑制了植物的光合作用,施加光叶苕子后这种抑制作用得到了缓解,且与空白对照相比,光叶苕子配施不同钝化剂光合速率和叶绿素含量存在不同程度的增加,地上部分Cd含量存在不同程度的减少,因此当叶片细胞中Cd含量降低时,植物光合速率、气孔导度、蒸腾速率与叶绿素含量也相应增加。

3.2 光叶苕子配施钝化剂对娃娃菜Cd累积的影响

生物炭含有较多的H⁺、Ca²⁺和K⁺等可交换态阳离子以及较大的比表面积,可通过离子交换作用将Cd固持于表面,从而降低Cd的有效性。硅肥能够显著增加土壤有效硅的含量,与Cd形成硅酸盐化合物,增加残渣态Cd的相对含量。而钙镁磷肥由于其含磷量高,还能提供钙、镁等必需元素,Ca²⁺、Mg²⁺与Cd²⁺共沉淀以及根表面Ca²⁺、Mg²⁺和Cd²⁺的竞争吸收,降低了Cd的有效性。在本研究中发现,光叶苕子和生物炭配施虽然降低了娃娃菜根系对Cd的吸收(降低48.13%),但却增加了Cd向地上部分的转运系数(增加1.730),同时光叶苕子与钙镁磷肥配施也增加了Cd向地上部分转运(增加1.700),且与单施光叶苕子处理相比,光叶苕子和钝化剂配施显著减小了根冠比、根表面积、根尖数和分枝数(56.11%~22.22%, $P < 0.05$)。在相关性分析中,叶面积与Cd转运系数呈显著正相关,而根冠比、根体积、根表面积和分枝数与Cd转运系数呈显著负相关,地上部分Cd含量与根体积也呈显著负相关,推测原因是光叶苕子与生物炭和钙镁磷肥配施阻碍了作物根系发育,而植物根系生长发育可以影响植株对重金属Cd的吸收,有利于重金属Cd与根系细胞壁和液泡等非活性部位相结合,从而减少Cd通过木质部向地上部分进行转运,降低Cd的毒害作用,从而使得地上部分Cd含量相应增

加^[23-25, 29];另一种原因可能是施用生物炭和钙镁磷肥会使叶面积增大,使地上部水分亏缺,渗透压增加,而引起地下部水分携带 Cd^{2+} 向地上部转移,造成Cd转运系数和地上部Cd含量相应增加^[34-35]。另外在本研究中发现,光叶苕子配施硅肥较单施光叶苕子容易增加土壤有效态Cd含量(18.34%)和娃娃菜地下部Cd含量(26.71%),可能原因是光叶苕子配施硅肥可增加土壤中微生物活性和数量,同时光叶苕子C/N较低容易产生激发效应,使土壤中原有的有机质被土壤中微生物分解,从而使得土壤中有机质含量降低,土壤中的Cd释放得到促进,从而Cd有效性增加^[7],而光叶苕子与硅肥配施却降低Cd向地上部分转运,这是由于外源硅能够抑制质外体运输途径,阻塞细胞壁孔隙度,影响Cd的质外体运输,从而降低Cd向地上部运输^[36-37]。因此,在光叶苕子和钝化剂配施体系中,单施光叶苕子对娃娃菜地上部分Cd含量降低效果最好,光叶苕子配施生物炭和硅肥对降低地上部分Cd含量无显著差异,生物炭处理略低于硅肥处理;而与空白对照处理相比,光叶苕子配施生物炭和硅肥可以显著降低地上部分Cd含量。另外本研究还发现地上部分Cd与气孔导度和蒸腾速率呈显著负相关,与胞间 CO_2 浓度呈显著正相关;有研究表明Cd含量升高能抑制光合作用相关酶的活性,破坏类囊体的堆叠并影响控制气孔保卫细胞开合的相关离子,而且由于光合作用的抑制,进而导致植物细胞间的 CO_2 利用率下降,最后导致胞间 CO_2 浓度升高^[30];而地下部分Cd含量与叶面积和蒸腾速率呈显著负相关,当地下部分Cd含量升高时,根系细胞壁破裂,抑制了营养物质的吸收,进而影响地上部生长和光化作用^[20-21]。

综上所述,豆科绿肥光叶苕子与钝化剂配施对Cd的影响不同,光叶苕子与生物炭配施可进一步降低Cd的有效性,减少娃娃菜根系对Cd的吸收,且显著低于硅肥处理,但容易增加娃娃菜Cd的转运系数;光叶苕子与硅肥配施容易增加土壤有效Cd含量,促进娃娃菜根系对Cd的吸收,降低Cd的转运系数。而光叶苕子与钙镁磷肥配施容易增加Cd的转运系数,增加了地上部分Cd含量。综合得出,光叶苕子和生物炭配施对土壤Cd修复和娃娃菜Cd解毒效果最佳,但应注意生物炭的合理用量。

4 结论

(1)豆科绿肥光叶苕子单施和配施生物炭可在微碱性Cd污染土壤中促进娃娃菜地上部分生长,提高

产量;而配施硅肥可增加植物地下部生长,扩大养分吸收,因此可在娃娃菜不同生长时期配施不同钝化剂最终实现增加地上部可食部位产量的目的。

(2)单施光叶苕子和配施钝化剂能够不同程度上减少地上部分Cd含量,降低其Cd毒害作用,增加植物光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量。

(3)与单施光叶苕子相比,光叶苕子配施生物炭对土壤有效Cd含量钝化效率为26.88%,可降低地下部分Cd含量11.34%,但对地上部分Cd无显著影响;光叶苕子配施硅肥可增加土壤有效Cd含量和娃娃菜地下部分Cd含量18.34%和26.71%,但对地上部分Cd含量无显著影响;光叶苕子配施钙镁磷肥对土壤有效Cd含量和娃娃菜地下部分Cd含量无显著影响,但可增加地上部分Cd含量31.22%。

(4)在所有处理中,光叶苕子配施生物炭较空白对照对土壤Cd钝化效果、娃娃菜地上和地下部分Cd含量降低效果最佳,分别为43.84%、14.56%和25.37%,因此推荐光叶苕子与生物炭合理配施来降低Cd污染地区Cd活性和缓解Cd对娃娃菜的毒性。

参考文献:

- [1] ANJUM A S, TANVEER M, HUSSAIN S, et al. Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): Consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(21): 17022-17030.
- [2] QIAN Y Z, CHEN C, ZHANG Q, et al. Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk[J]. *Food Control*, 2010, 21(12): 1757-1763.
- [3] 高子翔, 周航, 杨文弢, 等. 基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5299-5307. GAO Z X, ZHOU H, YANG W T, et al. Impacts of silicon fertilizer as base manure on cadmium bioavailability in soil and on cadmium accumulation in rice plants[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5299-5307.
- [4] 鄯德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1491-1497. YAN D M, GUO C H, HUANG F L, et al. Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1491-1497.
- [5] 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 等. 不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 460-468. ZHANG J J, ZHU S G, ZHU L N, et al. Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 460-468.
- [6] PRABAGAR S, HODSON M J, EVANS D E, et al. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) [J]. *Environmental and Experimental*

- Botany, 2011, 70(2/3):266–276.
- [7] 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.
- [8] YANG W T, ZHOU H, GU J F, et al. Application of rapeseed residue in creases soil organic matter, microbial biomass, and enzyme activity and mitigates cadmium pollution risk in paddy fields[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 264:114681.
- [9] 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.
- [10] 王良梅, 周立祥, 占新华, 等. 水田土壤中水溶性有机物的产生动态及对土壤中重金属活性的影响:田间微区试验[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5):858–864. WANG G M, ZHOU L X, ZHAN X H, et al. Dynamics of dissolved organic matter and its effect on metal availability in paddy soil: Field micro-plot trials[J]. *Environmental Science*, 2004, 24(5):858–864.
- [11] GRÜTER R, COSTEROUSSÉ B, BERTONI A, et al. Green manure and longterm 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.
- [12] XIE J, DONG A, LIU J, et al. Relevance of dissolved organic matter generated from green manuring of Chinese milk vetch in relation to watersoluble cadmium[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(16):16409–16421.
- [13] 肖敏, 范晶晶, 王华静, 等. 紫云英还田配施石灰对水稻镉吸收转运的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1):276–284. XIAO M, FAN J J, WANG H J, et al. Effect of Chinese milk vetch combined with lime on cadmium uptake and translocation in rice[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(1):276–284.
- [14] 汤建, 倪国荣, 王婉菁, 等. 紫云英翻压条件下生物炭施用量对水稻Cd迁移积累的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(6):1232–1240. TANG J, NI G R, WANG W Q, et al. Effect of biochar application rate on Cd accumulation and transportation in rice under the condition of rolling *Astragalus sinicus* into the soil[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(6):1232–1240.
- [15] HUANG T M, WANG Z H, HOU Y Y, et al. Effects of nitrogen application on decomposition and nutrient release of returned maize straw in Guanzhong Plain, Northwest China[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7):2261–2268.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:370–380. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2000:370–380.
- [19] ZU Y Q, LI Y, CHEN J J, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5):755–762.
- [20] VACULIK M, KONLECHNER C, LANGER I, et al. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 163(1):117–126.
- [21] LUX A, SOTTNÍKOVÁ A, OPATRŇÁ J, et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix clones* with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity[J]. *Physiol Plant*, 2004, 120(4):537–545.
- [22] 邹文桐. 铅镉复合胁迫对芥菜种子萌发、幼苗生长及光合色素含量的影响[J]. 种子, 2013, 32(3):41–45. ZOU W T. Effects of combined lead and cadmium on seed germination, seedling growth and leaf photosynthetic pigment contents of *Brassica Juncea*[J]. *Seed*, 2013, 32(3):41–45.
- [23] 曹莹, 周国驰, 王晓旭, 等. 生物炭对镉胁迫下花生根系形态学特性及根镉含量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(1):197–203. CAO Y, ZHOU G C, WANG X X, et al. Effects of biochar on root morphology and cadmium content in peanut under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(1):197–203.
- [24] CHAN K Y, ZWIETEN L V, MESZAROS I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Soil Research*, 2007, 45:629–634.
- [25] 李明, 王磊, 范婷婷, 等. 施用玉米秸秆生物炭对镉生物有效性及其胁迫下生菜生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6):1236–1243. LI M, WANG L, FAN T T, et al. Effects of biochar derived from corn-straw on cadmium bioavailability, and lettuce growth under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6):1236–1243.
- [26] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5):193–198, 204. LIU A M, XIANG Y C, TIAN D K, et al. Effects of biochar on plant growth and uptake of heavy metal cadmium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5):193–198, 204.
- [27] 朱自洋, 段文焱, 陈芳媛, 等. 干旱土壤中生物炭对黑麦草生长的促进机制[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1):352–359. ZHU Z Y, DUAN W Y, CHEN F Y, et al. The mechanism of biochar facilitate ryegrass growth in arid soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1):352–359.
- [28] 袁源远, 颜晓, 陈晨, 等. 硫、硅肥配施对铜污染下水稻幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(6):1220–1231. YUAN Y Y, YAN X, CHEN C, et al. Effects of sulfur and silicon fertilizers on growth and physiological characteristics of rice seedlings under copper contamination[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(6):1220–1231.

- [29] 贾慧, 韩莹琰, 刘杰, 等. 生菜对镉胁迫的生理响应及体内镉的累积分布[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1610–1618. JIA H, HAU Y Y, LIU J, et al. Physiological adaptations to cadmium stresses and cadmium accumulation in lettuce[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1610–1618.
- [30] 惠俊爱, 党志, 叶庆生. 镉胁迫对玉米光合特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 205–210. HUI J A, DANG Z, YE Q S. Influence of cadmium stress on photosynthetic characteristics of maize [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 205–210.
- [31] YING R R, QIU R R, TANG Y T, et al. Cadmium tolerance of carbon assimilation enzymes and chloroplast in Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(2): 81–87.
- [32] 刘杨, 齐明星, 王敏, 等. 不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 2024–2030. LIU Y, QI M X, WANG M, et al. Effects of different exogenous selenium species application on growth and cadmium uptake of pakchoi in cadmium contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 2024–2030.
- [33] 钱凤魁, 黄毅, 董婷, 等. 不同秸秆还田量对旱地土壤水肥和玉米生长与产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 61–65. QIAN F K, HUANG Y, DONG T, et al. Effect of crop residue incorporation on soil moisture and nutrient and maize growth and yield of arid farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 61–65.
- [34] PEREIRA J S, KOZLOWSKI T T. Influence of light intensity, temperature, and leaf area on stomatal aperture and water potential of woody plants[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, 7(1): 145–153.
- [35] DHANAPACKIAM S, ILYAS M. Leaf area and ion contents of *Sesbania grandiflora* under NaCl and Na₂SO₄ salinity[J]. *Indian Journal of Science & Technology*, 2010, 3(5): 561–563.
- [36] SHI X, ZHANG C, WANG H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1/2): 53–60.
- [37] CUNHA K P V D, NASCIMENTO C W A D. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2009, 197(1/2/3/4): 323.

(责任编辑: 叶飞)