

不同种植模式下添加伊利石对污染土壤的修复*

李雅倩^{1,2} 高雄飞^{1,2} 杨为中^{1,2} 孙思哲^{1,2} 杨媛羽^{1,2} 陈振华³马嘉伟^{1,2} 叶正钱^{1,2} 柳 丹^{1,2#}

(1.浙江农林大学省部共建亚热带森林培育国家重点实验室,浙江 杭州 311300;

2.浙江农林大学环境与资源学院,浙江省土壤污染生物修复重点实验室,浙江 杭州 311300;

3.景宁县农业农村局,浙江 丽水 323500)

摘要 为了探究伊利石与种植模式在重金属污染修复中的应用效果,采用室内盆栽试验,测定了植物的生理生化指标和土壤、植物的重金属含量,评价了不同种植模式下植物对重金属的吸收富集能力。结果表明,添加伊利石可以显著提高土壤 pH,枸骨(*Ilex cornuta* var. *fortunei*)与绿萝(*Epipremnum aureum*)间作模式有利于提高土壤的有机质含量,提高枸骨抗逆性。添加 1%(质量分数)伊利石后,各处理 Pb 有效态含量显著低于空白对照,而 Zn 有效态含量无显著性差异。枸骨与绿萝间作模式下,土壤有效态 Zn 含量显著高于绿萝单种,而与枸骨单种无显著差异。间作模式下,绿萝地上部 Pb 含量高于单种 107.92%,而地下部 Pb 较单种显著降低 19.69%。因此,枸骨与绿萝间作可显著提高绿萝对 Pb 的转运能力。

关键词 伊利石 重金属 枸骨 绿萝 单种 间作

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.05.010

Adding illite to repair contaminated soil under different planting modes LI Yaqian^{1,2}, GAO Xiongfei^{1,2}, YANG Weizhong^{1,2}, SUN Sizhe^{1,2}, YANG Yuanyu^{1,2}, CHEN Zhenhua³, MA Jiawei^{1,2}, YE Zhengqian^{1,2}, LIU Dan^{1,2}.
(1.State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou Zhejiang 311300;
2.Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, College of Environmental and Resource Sciences Zhejiang A&F University, Hangzhou Zhejiang 311300; 3.Agricultural and Rural Bureau of Jingning County, Lishui Zhejiang 323500)

Abstract: In order to explore the application efficiency of illite and different planting modes in the remediation of heavy metal pollution, the pot experiment was conducted to determine the physiological and biochemical indexes and heavy metal content of plants and soils. The ability of plants to absorb and concentrate heavy metals under different planting modes was evaluated. The results showed that the addition of illite could significantly increase the pH of the soil, and the intercropping mode of *Ilex cornuta* var. *fortunei* and *Epipremnum aureum* was beneficial to increase the organic matter content of the soil and improve the stress resistance of *Ilex cornuta* var. *fortunei*. After treatment with 1% (mass fraction) illite, the available Pb content in each treatment was significantly lower than that of control check, while there was no significant difference in the available Zn. The intercropping of *Epipremnum aureum* and *Ilex cornuta* var. *fortunei* had an advantage over the *Epipremnum aureum* monoculture in terms of improving the available Zn, but there was no significant difference with the *Ilex cornuta* var. *fortunei* monoculture. The Pb content in the aboveground part of the *Epipremnum aureum* was significantly higher than the monoculture (107.92%), while the Pb in the underground part was significantly reduced by 19.69%. In general, the intercropping of *Ilex cornuta* var. *fortunei* and *Epipremnum aureum* could significantly improve the transport ability of *Epipremnum aureum* to Pb.

Keywords: illite; heavy metal; *Ilex cornuta* var. *fortunei*; *Epipremnum aureum*; monoculture; intercropping

矿区资源的开采和冶炼伴随严重的重金属污染。重金属进入土壤后,影响动植物的生长,危害人类的身体健康,对环境产生不可估量的影响^[1-2]。其隐蔽性、长期性也导致了该问题无法从根本上解决。目前,重金属污染作为无机污染的一种,已引起了国

内外广大研究者的关注^[3-5]。对重金属污染的管控与治理,成了一项全球性的任务,而固化稳定化技术,是这一任务中重要的一环。

黏土矿物(如伊利石、膨润土等)因其储量大、成本低,成为固化稳定化技术的核心材料^{[6]846},可以降低

第一作者:李雅倩,女,1994年生,硕士研究生,主要从事重金属污染与防治方面的研究。# 通讯作者。

* 国家自然科学基金面上项目(No.31670617);浙江省重点研发计划项目(No.2018C03028);浙江农林大学学生科研训练项目(No. KX20180083)。

低土壤中重金属的活性和有效性,从而降低生态风险和重金属对植物、动物和人类的毒害作用^[7]。而相对于单一种植,间作可以促进植物对土壤中养分的吸收和对水分、阳光、空气的利用效率^[8]。在间作模式下,植物地下根系之间相互作用,能够改变植物根系的分泌物组成、土壤酶活性和微生物活动等,间接改变土壤中重金属的有效性,从而影响植物对重金属的可利用度^[9]。

现有研究集中于黏土矿物对溶液中重金属的离子吸附^[10],对黏土矿物钝化土壤重金属的研究较少,间作模式也大体上基于农作物间作^[11]及超积累植物和非超积累植物的组合^[12],缺乏重度污染下不同生态位景观植物的种植模式探究。前期野外调查发现,枸骨(*Ilex cornuta* var. *fortunei*)对重金属具有极强的耐性,适宜在重度污染的土壤中生长。基于此,本研究选取枸骨和绿萝(*Epipremnum aureum*)作为间作植物,联合伊利石进行盆栽试验,探究不同种植模式下添加伊利石对重金属污染土壤的修复效果,对矿区生态环境修复具有借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

盆栽试验中的土壤于2019年3月采自上虞银山铅锌矿附近,采集0~20 cm的耕层土壤进行试验,其理化性质如表1所示。将采集的土壤置于阴凉干燥处自然风干,捡出土壤中的石块及动植物残体,过5 mm尼龙筛备用。

1.2 室内盆栽试验

盆栽试验于2019年3月18日至5月18日进行,盆栽试验容器为内径26.5 cm的塑料盆,伊利石添加量为1%(质量分数),与土壤混匀后装盆,每盆装土3 kg,稳定1周后备用。试验共设5个处理:未添加伊利石、无植物(记为CK);添加伊利石、无植物(记为无植物);添加伊利石、枸骨单种(记为枸骨单种);添加伊利石、绿萝单种(记为绿萝单种);添加伊利石、枸骨绿萝间作(记为枸骨绿萝间作)。每组设置3个重复,共15盆。单种模式每盆种植5株植物,间作模式每盆种植枸骨3株、绿萝4株,挑选长势相同、生长健壮的幼苗移栽,植株在温室内自然光

照条件下生长,生长期保持田间持水量的60%左右,生长两个月后收获进行测定。

1.3 样品测定与分析

植物样品先后用自来水和去离子水洗净,并用20 mmol/L的乙二胺四乙酸(EDTA)浸泡15 min左右除去根系表面吸附的重金属离子,去离子水冲洗干净,吸干表面水分,将样品分成地上部与地下部,置于105℃杀青30 min后70℃下烘2 d左右,粉碎研磨备用。丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定,脯氨酸含量采用茚三酮比色法测定,植物重金属全量采用硝酸消解/电感耦合等离子光谱(ICP-OES)法测定^[13-14]。

将土壤样品自然风干,除去样品中的动植物残体,研磨后过筛备用。土壤基本理化性质测定均参考文献^[15],土壤重金属全量的测定采用王水-高氯酸消解/ICP-OES法^[16],土壤中不同形态重金属采用BCR分级提取法浸提。

2 数据处理与分析

对试验数据进行方差分析(ANOVA)以及最小显著性差异(LSD)分析。植物转运系数、富集系数的计算参考文献^[17]。

3 结果与分析

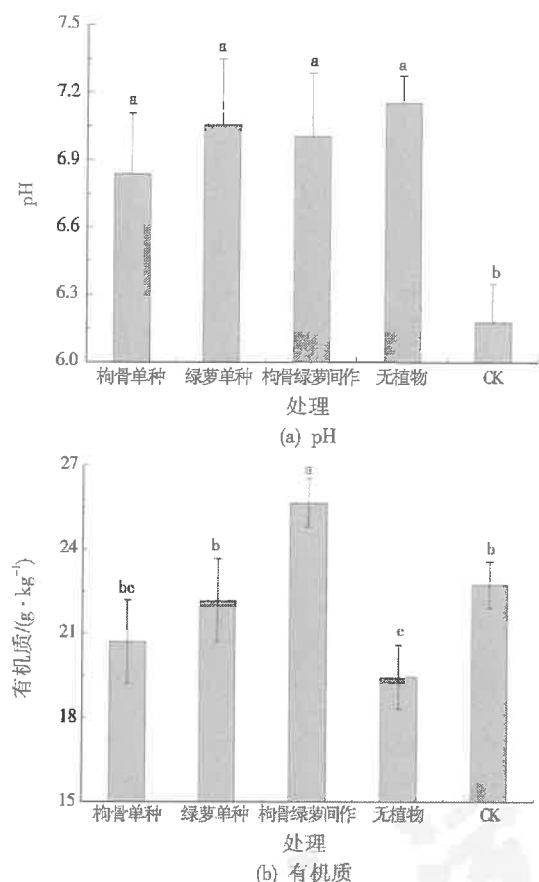
3.1 不同种植模式下添加伊利石对土壤pH、有机质的影响

不同种植模式下添加伊利石,土壤pH和有机质含量不同(见图1)。与CK相比,添加伊利石可以显著增高土壤pH($p<0.05$),改良土壤酸性。不同种植模式下各处理的土壤pH总体表现为无植物>绿萝单种>枸骨绿萝间作>枸骨单种。绿萝单种的土壤相比枸骨单种和枸骨绿萝间作的土壤,pH分别提高了0.22、0.06。与CK相比,添加伊利石会显著降低土壤中有机质含量($p<0.05$),而种植植物可以在一定程度上提高土壤有机质含量,其中,枸骨绿萝间作的土壤有机质含量显著高于两种植物单种的土壤($p<0.05$)。

3.2 不同种植模式下添加伊利石对植物生理指标的影响

表1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of the tested soil

项目	pH	碱解氮 /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	有机质 /(g·kg ⁻¹)	Pb全量 /(mg·kg ⁻¹)	Zn全量 /(mg·kg ⁻¹)
数值	5.89	42	0.049	200	20.41	25 069.30	1 199.09



注:字母标记指示同一指标在不同种植模式下的差异性,字母不同代表差异显著($p < 0.05$),下同。

图1 不同种植模式下添加伊利石对土壤 pH 与有机质的影响
Fig.1 Effect of adding illite on soil pH and organic matter content under different planting modes

不同种植模式下,脯氨酸与丙二醛的含量不同(见图2)。间作模式下的枸骨脯氨酸含量比单种模式显著增高($p < 0.05$),而绿萝无明显差异。枸骨与绿萝体内丙二醛含量分别低于单种模式 18.74% 和 32.62%,但总体差异不显著。

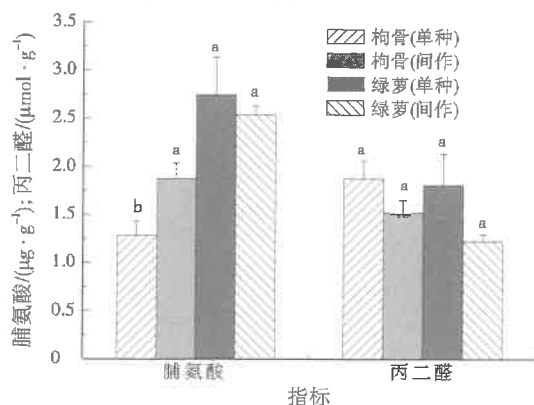


图2 不同种植模式下脯氨酸、丙二醛变化
Fig.2 Proline and malondialdehyde content under different planting modes

3.3 不同种植模式下添加伊利石对土壤重金属有效态的影响

图3为不同种植模式下添加伊利石,土壤重金

属有效态的变化情况。与CK相比,添加伊利石的各处理中土壤重金属有效态Pb含量显著降低($p < 0.05$),枸骨单种、绿萝单种、枸骨绿萝间作和无植物分别低于CK 29.97%、32.21%、31.97%和 32.49%,而有效态Zn含量之间大体上无显著差异,在 104.37~110.70 mg/kg波动。不同种植模式下,各处理之间土壤有效态Pb含量差异不显著,间作模式下,土壤有效态Zn含量显著高于无植物和绿萝单种($p < 0.05$),而与枸骨单种无显著性差异。

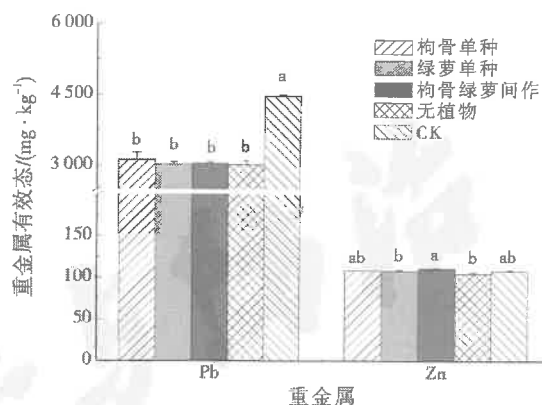


图3 不同种植模式下土壤重金属有效态变化
Fig.3 Changes of available contents of heavy metals in soil under different planting modes

3.4 不同种植模式下添加伊利石对植物重金属含量和积累量的影响

不同种植模式下,添加伊利石对植物地上部和地下部重金属的影响如图4所示。无论何种种植模式下,植物体内的Pb含量表现为绿萝>枸骨($p < 0.05$),而Zn在地下部表现为枸骨>绿萝,在地下部表现为绿萝>枸骨($p < 0.05$)。间作模式下,绿萝地上部Pb含量高出单种模式 107.92% ($p < 0.05$),达到 725.50 mg/kg,地下部Pb较单种模式降低 19.69% ($p < 0.05$),达到 920.62 mg/kg;而枸骨地上部Pb含量与单种模式相比无显著性差异,地上部Zn较单种模式提高 39.58% ($p < 0.05$)。可见,这两种植物间作促进了Pb从绿萝地下部到地上部的转运,但总体规律还是地下部>地上部。

表2列出了不同种植模式下添加伊利石,植物对重金属的积累量变化。间作模式下,枸骨Pb、Zn总积累量分别显著低于单种模式 21.90% 和 10.85%。绿萝在间作模式下,Zn总积累量降低,但差异不显著,Pb总积累量显著降低($p < 0.05$)。除绿萝间作地下部Pb积累量显著低于单种模式外,不同种植模式下枸骨和绿萝地上部Pb、Zn和地下部Zn均无显著性差异。

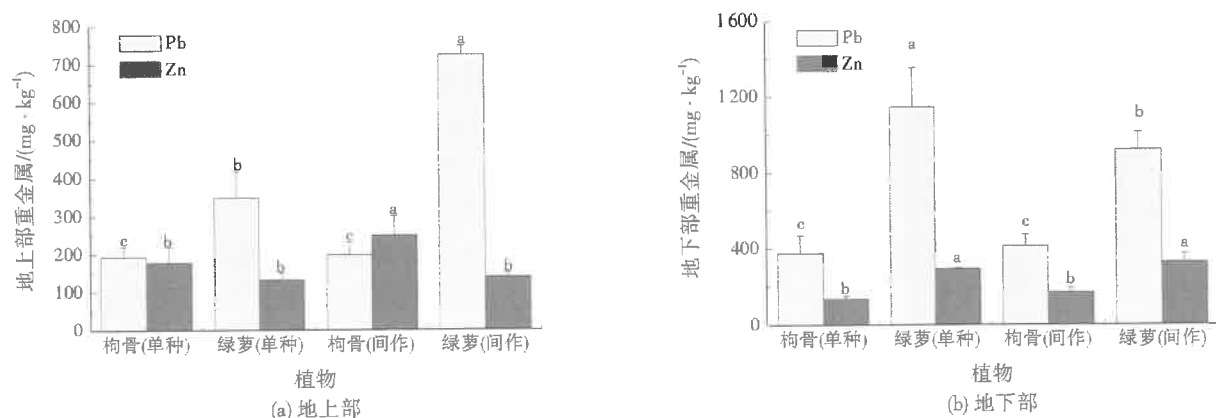


图4 不同种植模式下添加伊利石对植物重金属的影响
Fig.4 Effect of adding illite on the heavy metal content of plants under different planting modes

表2 不同种植模式下植物对重金属的积累量变化
Table 2 Changes in accumulation of heavy metals in plants under different planting modes

植物	Pb 总积累量 /(mg·株 ⁻¹)	Zn 总积累量 /(mg·株 ⁻¹)	地上部 Pb 积累量 /(mg·株 ⁻¹)	地下部 Pb 积累量 /(mg·株 ⁻¹)	地上部 Zn 积累量 /(mg·株 ⁻¹)	地下部 Zn 积累量 /(mg·株 ⁻¹)
枸骨(单种)	0.959±0.048b	0.691±0.235a	0.544±0.067a	0.415±0.063c	0.538±0.184a	0.153±0.053bc
枸骨(间作)	0.750±0.272b	0.617±0.242a	0.399±0.243a	0.351±0.048c	0.475±0.233a	0.142±0.027c
绿萝(单种)	1.561±0.125a	0.467±0.028b	0.510±0.076a	1.051±0.088a	0.194±0.025b	0.273±0.048a
绿萝(间作)	1.144±0.114b	0.324±0.059b	0.524±0.119a	0.620±0.033b	0.100±0.024b	0.224±0.055ab

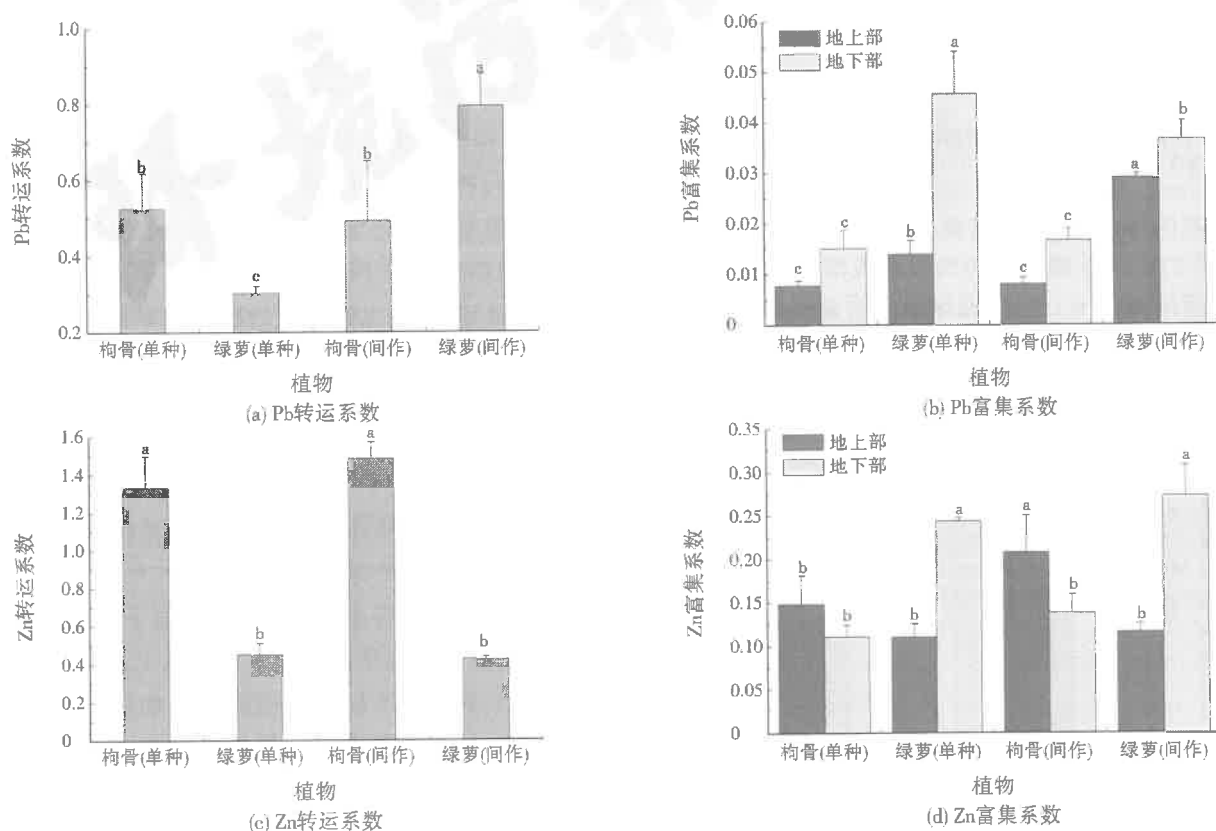


图5 不同种植模式下添加伊利石对植物重金属富集转运能力的影响
Fig.5 Effect of adding illite on plant enrichment and transport capacity under different planting modes

3.5 不同种植模式下添加伊利石对植物富集转运能力的影响

由图5可以看出,间作模式下绿萝对Pb的转

运能力显著提高,枸骨对Pb的转运能力无显著性差异,说明枸骨与绿萝间作可以促进绿萝对Pb的转运。两种植物对Zn的转运在不同种植模式下无

显著性差异。两种植物对 Pb 的富集能力均表现为地下部 > 地上部, 枸骨对 Zn 的富集规律为地上部 > 地下部。间作模式下枸骨对 Pb 的富集几乎无影响, 但显著促进绿萝地上部对 Pb 的富集, 降低地下部对 Pb 的富集, 这一规律与转运系数反映的规律一致。此外, 间作能够显著促进枸骨地上部对 Zn 的富集 ($p < 0.05$)。

4 讨论

4.1 对土壤 pH、有机质的影响

已有研究表明, 添加合适的矿物改良剂可以提高土壤的 pH^[18], 还可以增加土壤黏土矿物含量^[19], 提高土壤速效养分含量^[20], 从而明显提高土壤储蓄养分、缓冲调控和污染净化的能力。孙约兵等^[21]的盆栽试验表明, 添加海泡石可以增加酶活性和微生物数量, 一定程度上可以改善土壤环境质量。间作可以促进土壤团粒结构的形成和营养物质含量的增加, 提高土壤的保蓄性, 改良土壤质地, 提升土壤肥力^[22]。在间作模式下, 选用在生态位上互补的植物, 可以将间作优势发挥到最大。

添加伊利石, 土壤的 pH 显著增加, 与前人的研究结果一致。种植植物的处理下, pH 低于无植物处理, 这可能是因为植物根系分泌低分子有机酸, 对土壤性质产生影响所致^[23]。添加伊利石, 土壤中有有机质含量降低, 种植植物有机质含量增高, 且间作模式有机质含量均大于单种模式, 说明枸骨与绿萝间作比单一种植对土壤的改良效果更好。谢英荷等^[24]也得出枣麦间作下有机质含量高于单种, 达到了极显著水平, 说明选取适宜的两种植物间作可以提高土壤有机质含量, 改良土壤质地, 提升土壤肥力^[25]。

4.2 对植物生理指标的影响

脯氨酸是植物体蛋白质的重要组成部分之一, 以游离状态广泛存在于植物体中。在外界环境胁迫下, 脯氨酸在植物体内大量积累。除了作为重要的渗透调节物质外, 脯氨酸还在稳定大分子结构、减少氧胁迫及调节细胞氧化还原势等方面起重要作用^[26]。丙二醛是膜脂过氧化物酶作用的分解产物, 可以反映外界因素胁迫下植物膜系统的受害程度^[27], 这两个指标可以反映植物的抗逆性与受损伤程度。

间作能够显著提高枸骨体内的脯氨酸含量, 说明间作可以缓解重金属对枸骨的胁迫, 增强枸骨抗逆性能。杨宏伟等^[28]研究干旱胁迫下与百喜草 (*Paspalum notatum*) 间作对油橄榄 (*Olea europaea*) 抗旱生理的影响, 发现随着干旱胁迫的加剧,

间作能显著提高油橄榄叶片脯氨酸含量, 说明与百喜草间作能提高油橄榄叶片细胞的渗透调节能力和保水能力, 增强了油橄榄的抗逆性能。于保港等^[29]研究了间作对莎草 (*Cyperus glomeratus* L.)、蚕豆 (*Vicia faba* L.) 生理指标与重金属形态分布的影响, 结果表明, 间作与单种相比, 两种植物体内的丙二醛含量均无显著性差异, 与本试验结果一致。这一结果可能与植物对逆境胁迫的响应机制等有关。

4.3 对土壤重金属有效态的影响

重金属对生物的毒性主要是通过有效态产生, 而黏土矿物的添加可以影响土壤中微环境, 改变重金属赋存状态, 黏土矿物本身也可以自溶产生阴离子, 结合壤中的重金属阳离子, 进行表面吸附与离子配位, 进而大幅度降低土壤中重金属的有效性, 改变重金属的生物可利用性和移动性, 缓解重金属胁迫^[30]。张金秀等^[31]探究了 3 种黏土矿物(钠基膨润土、硅藻土、沸石)添加对蚕豆生长和土壤重金属含量的影响, 结果表明, 施用黏土矿物对土壤中的 Cd、Pb、Cu 有显著钝化作用。也有研究表明, 施用不同用量的黏土矿物-生物炭复合改良剂, 能够显著降低土壤中二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 提取态 Cd 的含量, 同时也显著降低了小白菜中的 Cd 含量^[31]。

间作模式下土壤有效态 Zn 显著高于无植物与绿萝单种, 推测植物根系分泌物能够对重金属有效态产生影响, 而间作模式下植物根系相互作用, 改变了根系分泌物中有机酸的种类和含量, 土壤有效态重金属含量也因此受到影响^[32]。

4.4 对植物重金属含量和积累量的影响

间作能促进绿萝地上部对 Pb 的积累, 降低其地下部对 Pb 的积累, 说明间作能够促进 Pb 在绿萝体内从地下部到地上部的转运, 但对 Zn 大体无影响。秦丽^[32]发现续断菊 (*Sonchus asper*) 与玉米间作显著促进了续断菊对 Cd、Pb 的吸收累积, 却降低了玉米体内 Cd、Pb 的累积量。这是因为不同种类植物及植物不同器官组织对重金属的吸收与积累会有明显差异^[33]。

4.5 对植物富集转运能力的影响

根据植物对重金属的吸收及重金属在植物体内的分布情况, 大体上可以将植物分为 3 种类型, 富集型、根部囤积型和规避型。富集型植物从土壤中主动吸收富集重金属; 根部囤积型植物表现为将重金属大量富集在植物根部, 少量或极少向地上部转移; 规避型植物则将重金属沉积在根系表面, 抵制重金属进入植物体内^[34]。富集系数和转运系数可以表征植

物从土壤中吸收重金属及重金属从根到地上部的迁移能力,可以反映植物的吸收机制和植物类型^[35]。

枸骨为 Pb 根部囤积型植物、Zn 富集型植物,而绿萝对两种重金属都表现为根部囤积型。间作能显著促进绿萝地上部对 Pb 的富集,降低地下部对 Pb 的富集,说明枸骨与绿萝间作可以显著提高绿萝对 Pb 的转运能力,这一规律与转运系数反映的规律一致。

5 结 论

(1) 添加伊利石后,土壤 pH 显著增高,而有机质含量显著降低,而枸骨与绿萝间作可以提高土壤有机质含量,改良土壤质地,提升土壤肥力。

(2) 间作可以缓解重金属对枸骨的胁迫,增强枸骨抗逆性能。

(3) 与 CK 相比,添加伊利石,有效态 Pb 显著降低,有效态 Zn 无显著性差异。不同种植模式下,有效态 Pb 含量差异不显著,间作模式下有效态 Zn 含量显著高于无植物和绿萝单种。

(4) 间作模式下枸骨 Pb 总积累量、Zn 总积累量低于单种,而绿萝的 Zn 总积累量无显著变化,Pb 总积累量显著降低。

(5) 枸骨为 Pb 根部囤积型、Zn 富集型;而绿萝对两种重金属均表现为根部囤积型。枸骨与绿萝间作能够显著提高绿萝地上部 Pb 富集和对 Pb 的转运能力。

参考文献:

- [1] XU W J, SHAFI M, PENTTINEN P, et al. Bioavailability of heavy metals in contaminated soil as affected by different mass ratios of biochars [J]. *Environmental Technology*, 2019, 9: 1-9.
- [2] EDEBALI S. Advanced sorption process applications [M]. New York: IntechOpen, 2019.
- [3] MARRUGO NEGRETE J, PINEDO HERNÁNDEZ J, DÍEZ S. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia [J]. *Environmental Research*, 2017, 154: 380-388.
- [4] VAN OOSTEN M J, MAGGIO A. Functional biology of halophytes in the phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 111: 135-146.
- [5] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 [J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 710-716.
- [6] 张金秀, 何永美, 李博, 等. 三种黏土矿物对蚕豆生长和重金属含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4).
- [7] WANG R, SHAFI M, MA J, et al. Effect of amendments on contaminated soil of multiple heavy metals and accumulation of heavy metals in plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 28695-28704.
- [8] 孟楠, 王萌, 陈莉, 等. 不同草本植物间作对 Cd 污染土壤的修复效果 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2618-2624.

- [9] 郭雄飞. 重金属胁迫下生物炭和间作对刨花润楠生长及根系形态的影响 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 337-344, 351.
- [10] AL ESSA K, KHALILI F. Heavy metals adsorption from aqueous solutions onto unmodified and modified jordanian kaolinite clay: batch and column techniques [J]. *American Journal of Applied Chemistry*, 2018, 6(1): 25-34.
- [11] 曾露苹, 周飞, 陈羽如, 等. 木薯和花生间作对 Cd 吸收及根区速效养分的影响 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 303-309.
- [12] 刘晨, 郭佳, 赵敏, 等. 毛竹幼苗与伴矿景天间作对铜镉锌转运积累的影响 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(5): 615-622.
- [13] 刘羽, 郭文强. 中华结缕草和皱叶酸模对重金属铅和镉胁迫的生理生化响应 [J]. *土壤通报*, 2016, 47(3): 730-737.
- [14] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 [J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3845-3853.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 林艳. 不同产地硅藻土对土壤镉污染的原位化学固定效果研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [17] 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.
- [18] 梁媛, 李飞跃, 杨帆, 等. 含磷材料及生物炭对复合重金属污染土壤修复效果与修复机理 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(12): 2377-2383.
- [19] 陈功宁. 矿物质钝化剂对重金属污染红壤的修复效应及机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [20] 刘玉环, 闫治斌, 王学, 等. 功能型土壤改良剂对灰棕荒漠土的改良效果 [J]. *土壤通报*, 2018, 49(1): 150-158.
- [21] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 [J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4720-4726.
- [22] 姜玉超. 玉米花生间作对土壤肥力特性的影响 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
- [23] 徐炜杰, 郭佳, 赵敏, 等. 重金属污染土壤植物根系分泌物研究进展 [J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(6): 1137-1148.
- [24] 谢英荷, 洪坚平, 卜玉山, 等. 枣麦间作对土壤肥力的影响 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 22(3): 203-205.
- [25] 柳欣茹, 包兴国, 王志刚, 等. 灌漠土上连续间作对作物生产力和土壤化学肥力的影响 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 951-962.
- [26] 柴民伟. 外来种互花米草和黄顶菊对重金属和盐碱胁迫的生态响应 [D]. 天津: 南开大学, 2013.
- [27] 胡国涛, 杨兴, 陈小米, 等. 速生树种竹柳对重金属胁迫的生理响应 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3870-3875.
- [28] 杨宏伟, 李自龙, 梁恕坤, 等. 间作百喜草对油橄榄根际微环境及抗旱生理的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(3): 455-461.
- [29] 于保港, 秦丽, 湛方栋, 等. 间作对莎草与蚕豆体内铅镉锌化学形态分布的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 621-631.
- [30] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 721-728.
- [31] LI H, OU J Y, WANG X D, et al. Immobilization of soil cadmium using combined amendments of illite/smectite clay with bone chars [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 20723-20731.
- [32] 秦丽. 间作系统中续断菊与作物 Cd、Pb 累积特征和根系分泌低分子有机酸机理 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2017.
- [33] 夏建国, 兰海霞. 镉胁迫对蒙山茶树生长及叶片生理指标的影响 [J]. *茶叶科学*, 2008, 28(1): 56-61.
- [34] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征 [J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1146-1151.
- [35] 顾燕青, 顾优丽, 白倩, 等. 杭州市菜地蔬菜对土壤重金属的富集特性研究 [J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(4): 401-410.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2019-07-31)