

DOI: 10.20103/j.stxb.202405271231

杨赏赏,黎晓星,张珍明,周颖,张家春.种植方式对 Cd 污染土壤-植物系统修复效果的影响研究进展.生态学报,2025,45(8):3614-3625.

Yang S S, Li X X, Zhang Z M, Zhou Y, Zhang J C. Progress of research on the influence of planting method on the remediation effect of Cd-contaminated soil-plant system. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3614-3625.

# 种植方式对 Cd 污染土壤-植物系统修复效果的影响研究进展

杨赏赏<sup>1,2</sup>, 黎晓星<sup>1,2</sup>, 张珍明<sup>3</sup>, 周颖<sup>2</sup>, 张家春<sup>1,2,\*</sup>

1 贵州中医药大学, 贵阳 550025

2 贵州省植物园, 贵阳 550004

3 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025

**摘要:**为探索能有效修复土壤镉(Cd)污染、显著降低土壤 Cd 含量的种植方式,通过中国知网搜集和整理相关文献资料,系统研究了近年来不同种植方式对不同地区、不同土层土壤 Cd 的含量、形态、生物有效性及修复效率和植物 Cd 含量、富集转运 Cd 的影响,并对有关机制及其对生物有效性的影响进行简要分析。结果表明,不同种植方式下土壤 Cd 含量、植物 Cd 含量、修复效率存在显著差异,不同种植方式对不同地区的土壤修复效率有着不同的区域适用性;不同种植方式不同土层土壤 Cd 赋存形态含量存在显著差异,单作和间作条件下,土壤可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态 Cd 含量显著高于轮作和连作。研究综述了不同种植方式对土壤-植物系统重金属 Cd 污染修复的影响,对于深入理解种植方式在土壤重金属污染修复中的作用具有重要意义。未来应进一步加强对不同土壤及植物类型,在不同种植方式下土壤-植物系统中 Cd 含量和形态变化规律的深入研究,以验证和补充现有结论。

**关键词:**种植方式;土壤;重金属;Cd;植物修复

## Progress of research on the influence of planting method on the remediation effect of Cd-contaminated soil-plant system

YANG Shangshang<sup>1,2</sup>, LI Xiaoxing<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhenming<sup>3</sup>, ZHOU Ying<sup>2</sup>, ZHANG Jiachun<sup>1,2,\*</sup>

1 Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China

2 Guizhou Botanical Garden, Guiyang 550004, China

3 College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** This paper systematically investigated the impact of various planting methods on soil Cd levels, forms, bioavailability, and remediation efficiency, as well as plant Cd content, enrichment, and transfer across different regions and soil strata. The aim was to identify planting techniques capable of effectively mitigating soil cadmium (Cd) contamination and substantially lowering soil Cd levels. This was achieved by gathering and synthesizing relevant data and literature from the China National Knowledge Network. The relevant mechanisms and their effects on bioavailability were briefly examined. The findings revealed substantial variations in soil and plant Cd concentrations, along with restoration efficiency, across different planting strategies. Additionally, they indicated that tailored planting strategies could enhance local soil restoration efficacy. The exchangeable, reducible, oxidizable, and residual Cd contents in the soil were significantly greater under single and intercropping conditions than they were under rotation and continuous cropping. This study investigated the effects of

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]一般491)

收稿日期:2024-05-27; 网络出版日期:2025-01-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjiachun198806@163.com

different planting tactics on the remediation of heavy metal Cd contamination in soil-plant systems in order to gain a better understanding of the role that planting techniques play in cleaning up heavy metal pollution in soil. Future research on Cd content and speciation within the soil-plant system across diverse plant and soil types, along with various planting practices, will be essential to corroborate and reinforce the present conclusions.

**Key Words:** planting method; soil; heavy metal; cadmium; phytoremediation

随着人类对土壤资源的不断挖掘和使用,不可避免地导致了土壤质量退化,特别是土壤重金属污染问题的不断恶化。镉(Cd)被认为是五大有毒重金属污染中的首要污染物<sup>[1]</sup>,在土壤中的积累会改变土壤的组成、结构和功能,导致土壤质量退化,并且会通过抑制农作物的根系生长和光合作用,从而抑制农作物生长,导致农产品产量和质量的降低<sup>[2]</sup>。此外,频繁暴露于 Cd 元素中,会显著增加人体患上疾病的风险<sup>[3]</sup>。为保证人体健康防治未病,重金属 Cd 污染的修复已迫在眉睫。目前,土壤 Cd 污染的修复主要采用物理、化学和生物三种方式。其中,生物修复可分为植物修复和微生物修复。植物修复具备成本低廉、操作方便、环保友好等诸多优势<sup>[4]</sup>,并且自然界中大量的 Cd 超富集植物,为植物修复提供了宝贵的原材料<sup>[5]</sup>。

植物修复技术在田间的实践应用表明,通过运用合理的化学调控和农艺措施等,能够进一步提高植物地上部的生物量以及 Cd 的积累量<sup>[6]</sup>。常见的农艺调控措施包括合理的水分管理和多种种植方式,这些措施有助于促进植物生长发育,提高土壤重金属的生物有效性和超积累植物的修复效率,有效降低土壤重金属的污染浓度,同时还能够带来一定的经济效益<sup>[7]</sup>。农业生产中常见的种植方式有:单作、间作、套作、轮作和连作等。选择合适的种植方式是解决土壤重金属污染问题的关键所在,对不同种植方式下土壤重金属的修复效果进行评价有助于在植物修复时选择合适的种植方式。土壤重金属的生物有效性反映了土壤重金属的存在形式以及植物对其吸收的过程,可以更准确地评估其对人体和环境所造成的危害程度<sup>[8]</sup>。在不同种植模式下,土壤中水分含量、pH 值、有机质和氧化还原状况等指标均呈现变化,并会对重金属的生物有效性以及迁移转化规律产生影响<sup>[9]</sup>。

本研究通过收集整理运用植物修复技术在不同种植方式下对土壤-植物系统 Cd 污染进行修复的文献,主要从两个方面进行综述:不同种植方式对土壤、植物 Cd 含量的影响,以及不同种植方式对土壤 Cd 形态及植物富集转运 Cd 的影响;进一步选用 Cd 的生物有效性、土壤修复效率为评价指标,还简要概述了不同种植方式对 Cd 污染植物修复效果及生物有效性的影响。本研究旨在探索能够有效修复土壤 Cd 污染、显著降低土壤 Cd 含量的种植方式,并对相关机制及生物有效性的影响进行探究,为未来土壤重金属污染植物修复研究提供有价值的参考。

## 1 种植方式对土壤-植物系统 Cd 含量的影响

土壤重金属总量是评估土壤污染程度的重要指标之一,能够更全面地反映土壤重金属污染的状况<sup>[10]</sup>。种植方式对土壤的理化性质可产生一定的影响,进一步影响植物对土壤重金属 Cd 的吸收,并以此影响土壤重金属 Cd 全量和土壤的修复效率。植物在土壤生长的过程中,通过化学合成和有机物质的输入等多种方式,对土壤理化性质产生影响,这些影响不仅体现在对土壤结构、质地和养分状况的影响,还会进一步改变土壤对植物所需养分的供给能力。同时,土壤理化性质的改变也会对植物的生长状况、根系发育及重金属的吸收产生重要影响<sup>[11]</sup>。不同种植方式对土壤-植物系统 Cd 全量有着不同的影响。有研究发现间作可提高对土壤净化率或能降低土壤 Cd 全量<sup>[12-13]</sup>。

### 1.1 种植方式对土壤 Cd 全量的影响

不同的种植方式对土壤 Cd 全量的影响不同,在合理的种植方式下,能降低土壤 Cd 全量的同时对土壤重金属污染也能起到修复作用。能凤娇等<sup>[14]</sup>将超积累植物伴矿景天与芹菜进行间作处理,发现伴矿景天生长

旺盛,土壤 Cd 含量降低 50.00%,显著高于单作处理,且芹菜中 Cd 含量明显低于国家标准。卫泽斌等<sup>[15]</sup>通过研究混合螯合剂的不同施加方式对土壤重金属污染进行套作修复,发现东南景天和玉米套种后(不经过混合螯合剂淋洗),土壤 Cd 含量降低幅度为 14.62%。

对不同种植方式下<sup>[3,14-22]</sup>土壤 Cd 含量、土壤修复效率(土壤修复效率=种植前后土壤 Cd 含量之差/种植前土壤 Cd 含量 $\times$ 100%)进行统计,结果见图 1。由图 1 可知,不同种植方式下,种植前后土壤 Cd 含量均表现为间作>单作>套作>轮作>连作;土壤平均修复效率表现为套作>轮作>间作>单作>连作。间作模式下种植前后土壤 Cd 含量均为最高,是种植前单作的 1.48 倍、套作的 3.42 倍、轮作的 4.45 倍和连作的 12.71 倍,是种植后单作的 1.52 倍、套作的 3.73 倍、轮作的 5.21 倍和连作的 10.93 倍。而且,不同种植方式种植前后土壤 Cd 含量变化趋势相同,这表明不同种植方式种植后土壤 Cd 含量差异与种植前土壤 Cd 含量差异密切相关。在土壤修复效率方面,不同种植方式下,单作、间作、轮作、套作与连作之间的修复效率存在显著差异。其中,套作的土壤修复效率较高,套作的土壤 Cd 修复效率是单作的 1.55 倍、间作的 1.53 倍、轮作的 1.28 倍以及连作的-1.46 倍,这充分说明了套作在减轻土壤 Cd 污染方面的有效性。此外,在选择物种搭配时,要注意时间、生长条件、光照等方面的因素,选择合适的植物或者农作物进行种植。例如,可以根据作物的高矮、喜阳或喜阴、早熟或晚熟等特性进行搭配,以进一步提高各种种植方式在土壤修复中的效率<sup>[23]</sup>。

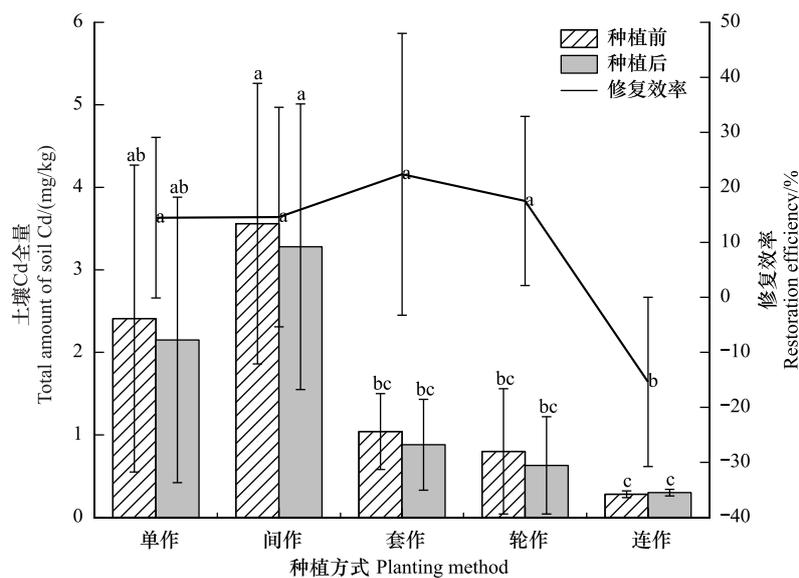


图 1 不同种植方式对土壤 Cd 含量及修复效率的影响(根据文献<sup>[3,14-22]</sup>绘制)

Fig.1 Effects of different planting methods on total Cd content and restoration efficiency of soil (Based on reference<sup>[3,14-22]</sup>)

不同小写字母表示不同种植方式间差异显著( $P < 0.05$ )

对不同地区不同种植方式下土壤的修复效率进行统计分析<sup>[3,14-21,24]</sup>(表 1)。由表 1 可知,在广东省,采用套作方式种植时土壤修复效率高于连作和轮作,表明套作在广东省土壤修复方面有一定优势。而在湖南省,轮作条件下的土壤修复效率要高于套作,这可能与湖南省的气候、土壤条件及作物种植结构有关。浙江省间作条件下的修复效率可高达 68.42%,广西省间作条件下的修复效率可达 22.37%,江苏省间作条件下的修复效率为 2.82%。由此说明,不同地区由于气候、土壤等自然条件的差异,以及作物种植技术和管理水平的不同,会导致土壤修复效率呈现出一定的地区差异。因此,在制定土壤修复策略时,应充分考虑地区特点,选择适合当地的种植方式和技术手段,以提高土壤修复效率。

农田生态系统中的 Cd 集中分布在 0—20cm 层土壤中,主要通过水在土壤中迁移,随着土层深度的增加显著减少<sup>[25]</sup>。采用不同种植方式对不同土层土壤 Cd 含量和修复效率的影响也不同。通过对在不同土层上连作、轮作或套作后土壤的 Cd 含量及修复效率<sup>[22,26]</sup>进行统计见表 2。在 0—20cm 的土壤层上,连作、轮作或

套作后土壤平均修复效率分别为 3.84%、10.97% 和 26.25%，这表明在表层土壤中，套作在减少土壤 Cd 全量上表现出较高的效率。而在 20—40cm 的土壤层上，连作、轮作和套作方式的平均修复效率分别为 27.88%、8.73% 和 25.65%，与表层土壤相比，这一土层上连作方式的修复效率有所提高，轮作方式的修复效率则有所下降，而套作方式在深层土壤中的修复效率仍然较高。连作对于 20—40cm 土壤层的修复效率更高，这可能是由于连作方式下植物根系在深层土壤中的分布更为广泛，从而更有效地吸收和固定 Cd 元素。从土壤 Cd 全量的角度来看，在 0—20cm 土层上种植后土壤 Cd 含量呈现出套作>轮作>连作的趋势，在 20—40cm 土层上种植后土壤 Cd 含量则呈现出套作>轮作=连作的趋势。套作后土壤 Cd 全量显著高于连作和轮作，这可能是由于种植前各种种植方式土壤 Cd 的背景值存在差异造成的。而在不同土层不同种植方式下，土壤 Cd 修复效率没有显著差异。

表 1 不同地区不同种植模式下土壤平均修复效率

Table 1 Average soil remediation efficiency under different cropping patterns in different regions

地区 Area	种植模式 Planting method	平均修复效率 Average repair efficiency/%	地区 Area	种植模式 Planting method	平均修复效率 Average repair efficiency/%	
广东省	套作	14.62	浙江省	间作	68.42	
	连作	3.86		广西省	间作	22.27
	轮作	10.96		江苏省	间作	2.82
湖南省	套作	0.91				
	轮作	8.12				

根据文献<sup>[3,14-21,24]</sup>整理

表 2 不同土层上连作、轮作和套作对土壤 Cd 全量及修复效率的影响

Table 2 Effects of continuous cropping, rotation and intercropping on total Cd content and restoration efficiency of soil in different soil layers

土层 Soil layer	0—20cm			20—40cm		
	连作 Continuous cropping	轮作 Crop rotation	套作 Intercropping	连作 Continuous cropping	轮作 Crop rotation	套作 Intercropping
土壤 Cd 全量 Total amount of Cd in soil/(mg/kg)	0.25±0.07b	0.27±0.05b	0.77±0.73a	0.14±0.05b	0.14±0.07b	0.47±0.26a
平均修复效率 Average repair efficiency/%	3.84±26.07a	10.97±17.08a	26.25±35.00a	27.88±17.01a	8.73±47.04a	25.65±19.02a

表中数据均为“平均值±标准差”；同行不同小写字母表示不同种植方式间差异显著( $P<0.05$ )，根据文献<sup>[22,26]</sup>整理

综上所述，在不同土层上采用不同的种植方式对土壤 Cd 全量及修复效率具有一定影响。在不同土层上，采用合理的种植方式可以有效地降低土壤中的 Cd 含量，提高土壤修复效率。因此，在农田管理和土壤修复实践中，应充分考虑种植土层和种植方式对土壤 Cd 全量的影响，以制定科学合理的种植策略和修复措施。

## 1.2 种植方式对植物 Cd 含量的影响

种植方式的改变对植物吸收 Cd 的含量也具有影响。通过采取合理的种植方式，可以有效降低经济植物体内的 Cd 含量，同时提高富集植物对 Cd 的吸收能力，实现对土壤 Cd 污染的修复。不同种植方式对植物体内 Cd 含量的影响呈现出多样化的特点。孟楠等<sup>[27]</sup>研究表明，在不同草本植物与空心菜间作的系统中，除高丹草、苏丹草、狼尾草会降低空心菜茎叶 Cd 吸收积累水平外，其他如菊苣、籽粒苋、三叶草、紫花苜蓿及紫云英与空心菜间作时，会对空心菜茎叶中的 Cd 含量产生促进作用。徐双圆等<sup>[28]</sup>利用四种 Cd 超富集植物与大豆、油菜和小麦三种常规作物在 Cd 污染农田土壤中进行单作和套作修复试验，结果显示，与油菜套作后，四种超富集植物的 Cd 吸收量均有所增加；与小麦套作后，东南景天对 Cd 的吸收有所增加，龙葵和苋菜对 Cd 的吸收变化不显著，说明与油菜和小麦套作均能促进东南景天对 Cd 的吸收；与大豆套作后，伴矿景天减少了大豆根部 Cd 含量，苋菜和龙葵显著降低了大豆茎、叶部分的 Cd 含量。

对不同种植方式下，经济植物 Cd 含量进行统计<sup>[3,10,15-19,21,24,29-30]</sup>（图 2）。由图 2 可知，不同种植方式对

植物体内 Cd 的积累具有显著影响,连作条件下经济植物 Cd 含量显著高于单作和套作。不同种植方式下经济植物体内 Cd 含量的表现为连作>轮作>间作>单作>套作;连作条件下植物 Cd 含量最高,为单作的 3.03 倍、间作的 1.87 倍、套作的 4.77 倍和轮作的 1.81 倍。连作条件下,植物可能更容易吸收土壤中的 Cd 元素,导致其含量显著升高。相比之下,单作、套作和间作等种植方式可能通过改善土壤环境、增加生物多样性等方式,有效地降低了植物对 Cd 的吸收和积累。

有研究表明,相较于其它重金属,植物更容易吸收累积 Cd<sup>[31]</sup>。不同植物对 Cd 的吸收、分配和积累效应不同。对不同种植方式下植物 Cd 含量<sup>[3,15,17,20—21,26]</sup>进行统计见表 3。由表 3 可知,各植物不同种植方式下体内的 Cd 含量不同。不同种植方式下各经济植物 Cd 含量表现为玉米:单作>套作,油菜:单作>间作>轮作,黄瓜:轮作>连作,水稻:连作>轮作,菜心:轮作=连作;富集植物 Cd 含量表现为东南景天:轮作>单作>套作,伴矿景天:单作>间作。植物在不同种植方式下对 Cd 的吸收累积呈现出不同的特点,这可能是由于植物体本身所含物质性质的差异所导致的。在实际种植过程中,应根据植物种类和种植模式的特点,采取合理的农业管理措施,以降低经济植物对 Cd 的吸收和积累,保障农产品的安全和质量。

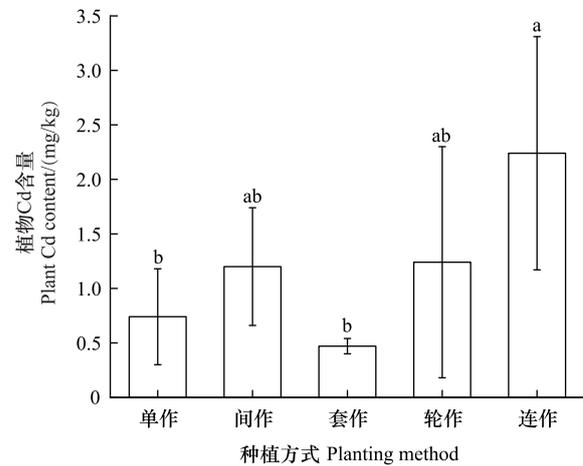


图 2 不同种植方式对经济植物 Cd 含量的影响 (根据文献<sup>[3,10,15—19,21,24,29—30]</sup>绘制)

Fig.2 Effect of different planting methods on cadmium content of economic plants (Based on references<sup>[3,10,15—19,21,24,29—30]</sup>)

表 3 不同种植模式下植物中 Cd 含量/(mg/kg)

Table 3 Cadmium content in plants under different cropping patterns

植物 Plant		单作 Single cropping	间作 Interplanting	套作 Intercropping	轮作 Crop rotation	连作 Continuous cropping
经济植物 Economic plant	玉米	0.66	—	0.40	—	—
	油菜	1.03	0.93	—	0.67	—
	黄瓜	—	—	—	0.01	0.00
	水稻	—	—	—	1.70	2.13
	菜心	—	—	—	0.05	0.05
富集植物 Accumulator	东南景天	12.07	—	9.12	23.37	—
	伴矿景天	0.91	0.78	—	—	—

根据文献<sup>[3,15,17,20—21,26]</sup>整理

## 2 种植方式对土壤 Cd 形态及植物富集转运的影响

Cd 在土壤中的赋存形态包括可交换态、可氧化态、可还原态、残渣态。交换态 Cd 所占比例较大,活性也较高,在植物对 Cd 的吸收中起决定作用<sup>[32—33]</sup>。当可交换态含量降低时,在一定条件下其他形态重金属也可被植物利用,不同重金属及不同植物类型间存在差异性。各形态之间存在着一个由吸附-解吸、相互转化等物理、化学和生物过程共同构成的动态平衡机制<sup>[34]</sup>。重金属的赋存形态及有效性可以更好的决定其在植株和生物体中的富集能力和毒性,而生物有效性是衡量植物吸收和利用效率的重要指标。研究表明通过改变土壤理化性质影响重金属的赋存形态、降低重金属离子在土壤中的有效性和植株对其的转运,是降低重金属在植物体内富集的重要途径<sup>[35—36]</sup>。通过合理调控土壤环境,可以更有效地控制重金属在植物体内的积累,从而保障农产品的安全和人类健康。

## 2.1 种植方式对土壤 Cd 形态的影响

不同种植方式对土壤 Cd 形态及其含量的影响不同。在田间试验中,谭建波等<sup>[37]</sup>选择续断菊和蚕豆两种植物,研究间作和单作两种植模式对土壤重金属 Cd 形态分布的影响,发现与单作模式相比,在成熟期采用间作模式会使得土壤中的可交换态 Cd 含量减少,但其他形态 Cd 含量无明显变化。陈永勤等<sup>[38]</sup>的实验结果验证了不同种植方式对土壤中 Cd 形态含量的影响,通过在受 Cd 污染的土壤中种植番茄,并与黑麦草进行套种,可以显著减少土壤中的可交换态 Cd、碳酸盐态 Cd、铁锰氧化态 Cd 以及 Cd 全量。由此表明,通过合理的种植模式选择,可以有效地调控土壤中 Cd 形态含量的分布,从而为土壤重金属污染的修复和治理提供科学依据。

通过对不同种植方式下 Cd 不同赋存形态的含量<sup>[17-18]</sup>进行统计,并以酸溶态、可还原态和可氧化态质量分数所占总量的比例对 Cd 生物有效性指数进行计算见表 4。由表 4 可知,轮作和连作条件下,土壤 Cd 赋存形态均表现为可交换态>可还原态>可氧化态>残渣态。轮作土壤中可交换态、可还原态和可氧化态 Cd 含量均高于连作,残渣态 Cd 含量与连作土壤相等;轮作条件下 Cd 可交换态、可还原态、可氧化态分别是连作的 1.20 倍、1.11 倍、1.33 倍,这一结果与李富荣等<sup>[39]</sup>的研究结果一致。间作条件下土壤 Cd 赋存形态表现为可还原态>弱酸提取态>残渣态>可氧化态;单作条件下表现为弱酸提取态>可还原态>残渣态>可氧化态。间作土壤中弱酸态、可氧化态 Cd 含量低于单作,可还原态 Cd 含量高于单作,残渣态 Cd 含量与单作土壤相等。间作土壤中可还原态、可氧化态、弱酸提取态 Cd 分别是单作的 1.16 倍、0.88 倍、0.96 倍。单作和间作条件下,土壤可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态 Cd 含量显著高于轮作和连作。不同种植方式下土壤中 Cd 赋存形态的含量存在差异,这可能与种植方式、土壤环境、作物种类及相互作用等多种因素有关。生物有效性的统计表明在不同种植方式下,土壤 Cd 的生物有效性表现为间作>单作>轮作>连作,但不同种植方式间没有显著差异。

表 4 不同种植条件下对土壤 Cd 赋存形态含量的影响

Table 4 Effect of different planting conditions on the content of cadmium fugitive forms in soil

种植模式 Cropping patterns	土壤 Cd 赋存形态含量 Soil Cd occurrence form content/(mg/kg)				生物有效性指数 Bioavailability index/%
	可交换态 (弱酸提取态) Exchangeable state (weak acid extraction state)	可还原态 Reducible state	可氧化态 Oxidizable state	残渣态 Residue state	
轮作 Crop rotation	0.18±0.03b	0.10±0.02b	0.04±0.01b	0.02±0.00b	93.91±0.92a
连作 Continuous cropping	0.15±0.04b	0.09±0.04b	0.03±0.00b	0.02±0.00b	93.17±2.95a
间作 Interplanting	1.90±0.27a	2.06±0.23a	0.21±0.03a	0.25±0.01a	94.23±0.61a
单作 Single cropping	2.00±0.23a	1.77±0.39a	0.24±0.04a	0.25±0.01a	94.08±0.49a

表中数据均为“平均值±标准差”;同列不同小写字母表示不同种植方式间差异显著( $P<0.05$ );根据文献<sup>[17-18]</sup>整理

种植模式对不同土层土壤 Cd 赋存形态含量的影响也不同。杨凯<sup>[26]</sup>研究表明,在水稻种植连作处理下,底层土壤残渣态 Cd 含量以及耕作层土壤中可交换态、可氧化态和残渣态 Cd 含量均呈显著降低趋势。对不同土层土壤 Cd 赋存形态含量<sup>[26,40]</sup>及生物有效性指数进行统计见表 5。由表 5 可知,轮作或连作条件下 0—20cm 土层 Cd 各赋存形态的含量均高于 20—40cm 土层;在 0—20cm 和 20—40cm 土层上连作,土壤中各 Cd 形态含量表现为可交换态>可还原态>可氧化态>残渣态。在 0—20cm 和 20—40cm 土层上轮作,土壤中各 Cd 形态含量表现为可交换态>可还原态>残渣态>可氧化态。0—20cm 土层上轮作 Cd 各赋存形态的含量均高于连作;轮作土壤 Cd 可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态含量分别是连作的 1.00 倍、1.22 倍、1.33 倍和 2.50 倍。20—40cm 土层上连作条件下 Cd 可交换态含量高于轮作,而可还原态、可氧化态和残渣态 Cd 含量均低于轮作;轮作土壤中 Cd 可还原态、可氧化态和残渣态 Cd 分别是连作的 1.50 倍、1.50 倍和 4.00 倍。0—20cm 土

层上连作、轮作土壤可交换态 Cd 高于 20—40cm 土层上连作,但与 20—40cm 土层上连作无显著差异。0—20cm 土层上轮作土壤可还原态和可氧化态 Cd 含量显著高于 20—40cm 土层上连作、轮作,0—20cm 土层上连作土壤可还原态 Cd 含量显著高于 20—40cm 土层。不同土层上连作或轮作,土壤中残渣态 Cd 含量无显著差异。土壤 Cd 生物有效性指数表明,不同土层上连作条件下 Cd 生物有效性均高于轮作,且 0—20cm 土层上连作和轮作的生物有效性指数均高于 20—40cm 土层。但在不同土层上连作或轮作土壤中 Cd 的生物有效性之间没有显著差异。

表 5 连作和轮作对不同土层中土壤 Cd 形态的影响

Table 5 Effect of continuous cropping and crop rotation on soil cadmium patterns in different soil horizons

土层 Soil layer	Cd 形态含量 Cd form content/ (mg/kg)	种植方式 Planting method			
		连作 Continuous cropping	生物有效性指数 Bioavailability index/%	轮作 Crop rotation	生物有效性指数 Bioavailability index/%
0—20cm	可交换态 Cd	0.15±0.04ab	93.17±2.95a	0.15±0.04a	90.82±8.57a
	可还原态 Cd	0.09±0.04ab		0.11±0.02a	
	可氧化态 Cd	0.03±0.00ab		0.04±0.00a	
	残渣态 Cd	0.02±0.00a		0.05±0.04a	
20—40cm	可交换态 Cd	0.11±0.03ab	92.37±3.49a	0.08±0.05b	84.63±18.05a
	可还原态 Cd	0.04±0.02c		0.06±0.03bc	
	可氧化态 Cd	0.02±0.01b		0.03±0.01b	
	残渣态 Cd	0.01±0.00a		0.04±0.04a	

表中数据均为“平均值±标准差”;同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),根据文献<sup>[26,40]</sup>整理

## 2.2 种植方式对植物富集转运 Cd 的影响

不同的种植方式会对植物生长及重金属的吸收富集产生不同的影响。如马婵华<sup>[41]</sup>的研究表明,黑麦草在单作模式下具有较高的 Cd 富集能力,富集系数为 0.75;但在与大蒜套种模式下,大蒜对黑麦草吸收 Cd 产生了负面影响,导致黑麦草的 Cd 吸收量相较于单作减少了 7.10%。同一植物体的不同组织、器官之间,Cd 的富集转运规律一般也存在差异。陈哲明等<sup>[1]</sup>研究了不同种植模式对马铃薯植株 Cd 积累的影响,发现同一处理不同时期马铃薯茎叶的 Cd 生物富集系数为 10.15—13.25,显著高于块茎的生物富集系数(0.82—0.92)。此外,有研究表明将富集植物与经济作物进行间(套)作,能够提高富集植物的生物量。例如,蒋成爱等<sup>[42]</sup>在中轻度 Cd 污染土壤上将东南景天分别与玉米和大豆间作,发现东南景天地上部生物量显著提高,增加量分别为单种的 47.00% 和 42.00%。

植物的修复潜力通常由植物的生物富集系数和转运系数所共同决定。对不同种植方式下植物的富集转运系数<sup>[12,18,21,24,26,28—29,43—44]</sup>进行计算统计见图 3。由图 3 可知,不同种植模式下植物对 Cd 的富集系数表现为套作>轮作>单作>间作,转运系数表现为轮作>套作>单作>间作。套作的富集系数显著高于单作、间作和轮作,轮作的转运系数显著高于单作和间作。套作的富集系数分别是单作的 5.37 倍、间作的 5.61 倍、轮作的 3.41 倍。轮作的转运系数分别是单作的 2.77 倍、间作的 4.00 倍、套作的 1.59 倍。这表明轮作模式在 Cd 转运方面具有显著的优势,能够有效提高植物对 Cd 的转运效率。

综上所述,不同种植方式下植物的修复潜力存在显著差异。套作在 Cd 富集方面表现出较高的性能,而轮作则在 Cd 转运方面表现出较高的性能。因此,在实际应用中,可以根据具体需求选择合适的种植方式,以充分发挥植物的修复潜力。

此外,有研究指出筛选适宜的大生物量且具有一定 Cd 富集转运能力的经济植物进行植物修复,能达到接近甚至超越超累积植物的 Cd 去除效果<sup>[45]</sup>。为具体了解各种种植方式对植物生物量的影响,对各种种植方式下植物地上、地下部的生物量<sup>[14—15,18,20,22,46—48]</sup>进行统计见表 6。由表 6 可知,不同种植方式地上部生物量含量表现为套作>间作>轮作>单作,地下部生物量含量表现为间作>单作>轮作;但不同种植方式下,植物地上、

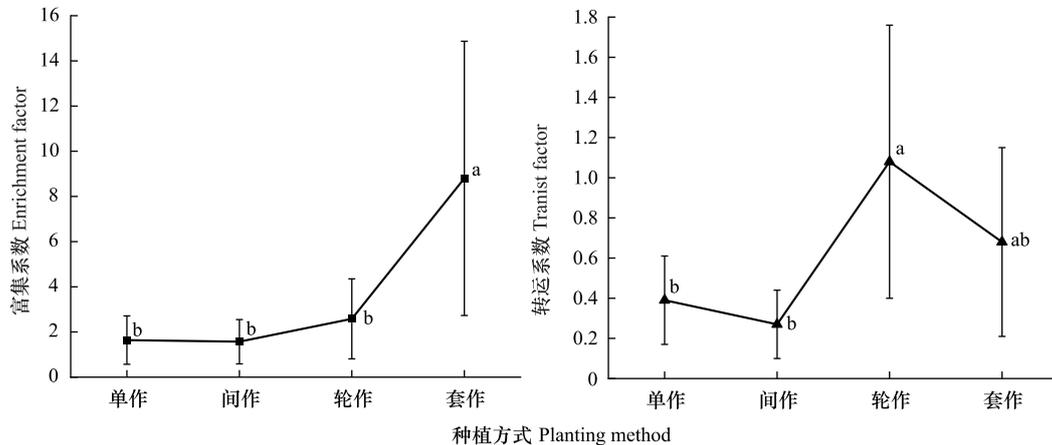


图3 不同种植方式对修复植物富集转运 Cd 的影响(根据文献<sup>[12,18,21,24,28-29,43-44]</sup>绘制)

Fig.3 Effect of different planting methods on the enrichment and translocation of Cd by plants (Based on references <sup>[12,18,21,24,28-29,43-44]</sup>)

地下部生物量无显著差异。值得注意的是,不同种植方式地上部生物量均普遍高于地下部,这一发现可为进一步研究植物修复技术的应用提供了有益的参考。

综上所述,在实际应用中,可以考虑采用套作种植方式来提高植物修复的效果。同时,还需要进一步研究和优化其他种植方式,为环境保护和生态修复做出更大的贡献。

表6 不同种植方式下植物地上、地下部生物量含量/(g/株)

Table 6 Aboveground and belowground biomass content of plants under different planting methods

种植方式 Planting methods	地上部 Above-ground	地下部 Sub-ground	种植方式 Planting methods	地上部 Above-ground	地下部 Sub-ground
单作 Single cropping	11.98±18.39a	2.70±4.23a	轮作 Crop rotation	13.60±1.56a	1.46±0.93a
间作 Interplanting	20.99±25.06a	4.76±6.28a	套作 Intercropping	27.29±36.88a	—

表中数据均为“平均值±标准差”;同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),根据文献<sup>[14-15,18,20,22,46-48]</sup>整理

### 3 种植方式对土壤 Cd 污染修复效果的影响机制

生物有效性是评价土壤和植物体内重金属环境与健康效应的有效指标,有研究表明土壤理化性质(如土壤质地、有机质和 pH 等)是决定重金属生物有效性的主要影响因子<sup>[49]</sup>。而通过实施农艺措施,可以改变土壤理化性质,影响土壤中重金属的生物有效性和迁移,减少重金属在农作物中的富集,同时提高作物的产量和品质,实现农业安全生产的目标<sup>[50]</sup>。艾亥麦提·艾麦尔江等<sup>[51]</sup>对不同种植模式下,土壤理化性质及微生物特征进行研究,发现种植模式的变化直接显著作用于土壤理化性质,从而间接影响土壤微生物特征,可能原因是种植作物的改变引起农田管理措施的变化,直接改变土壤结构和养分,而微生物是土壤中最敏感的物质,对土壤理化性质的变化立即产生积极反应,从而进一步改变土壤性质。李志军等<sup>[52]</sup>通过不同栽培方式探索对蒙古黄芪土壤理化性质、土壤菌落及其药效品质的影响,发现连作栽培蒙古黄芪根际土壤有机质、全氮及土壤酶活性显著降低;连作栽培的蒙古黄芪根际土壤中细菌群落多样性和丰度显著低于轮作栽培和仿野生栽培,轮作栽培蒙古黄芪根际土壤中菌落多样性显著低于仿野生栽培,而轮作栽培蒙古黄芪根际土壤中菌落丰度显著高于仿野生栽培。由此可见,各种种植方式对土壤的理化特性及其微生物群落的影响存在显著差异,这种差异进而影响了土壤-植物系统中重金属 Cd 的含量及其形态,最终造成不同种植方式在土壤 Cd 污染修复效果上的差异。

此外,研究表明<sup>[53]</sup>土壤的理化性质中 pH 和有机质是影响 Cd 吸附的重要因子;这与郭思宇等<sup>[54]</sup>的观点

一致。且不同植物在不同 pH 土壤上吸收 Cd 的能力也不同。如 Huang 等<sup>[55]</sup>通过对比 5 种超积累植物籽粒菟、青苜、龙葵、商陆和伴矿景天在酸性和碱性土壤中对 Cd 的提取效率时,发现在酸性土壤中籽粒菟、龙葵和商陆的提取效率要高于碱性土壤中,而伴矿景天在碱性土壤中的提取效率最佳,且在碱性土壤中植物更倾向于通过分泌更多的低分子量有机酸来增加根际有效 Cd 含量。土壤 pH 不仅影响土壤中物质的存在形态和迁移转化,还会影响土壤微生物的活性、有机物的分解、营养元素的释放、植物的生长发育、土壤污染与净化等。Huang 等<sup>[56]</sup>田间试验研究表明油菜-水稻轮作改善了土壤微生物群落组成,细菌和放线菌的数量明显增多,真菌数量减少;而油菜-玉米-油菜轮作较油菜单作生物量和 Cd 含量均明显提高。万家悦等<sup>[57]</sup>的研究结果还表明间作会改变土壤 pH 值,恢复土壤酶活性,从而影响土壤 Cd 的生物有效性及其作物吸收特性。此外,改变土壤 pH 还可以改变土壤重金属的吸附位、吸附表面的稳定性、存在形态和配位性能等,进而影响土壤中重金属的化学行为<sup>[58]</sup>,影响修复效果的差异。

有机质与 Cd 存在强烈的空间集群特征,能与 Cd 发生离子交换、吸附、螯合、絮凝、沉淀等一系列反应。宋波等<sup>[59]</sup>研究者认为有机质对 Cd 污染土壤修复影响机制可分为环境化学机制和生理生化机制两种。前者主要是有机质通过改变土壤负电荷量、pH 值等土壤理化性质,以提高土壤对 Cd 的吸附作用,降低土壤对 Cd 的解吸能力,使 Cd 被吸附到土壤内部或表面,增强土壤对 Cd 的固持能力;后者是土壤有机质络合土壤 Cd 离子,或直接吸附土壤 Cd 离子,形成稳定的金属螯合物,降低 Cd 在土壤中的生物有效性和可迁移性,达到固定土壤 Cd 的目的。

此外,根据相关研究指出<sup>[60]</sup>Cd 在土壤中的形态还受到氧化还原电位(Eh)、阳离子交换量(CEC)、无机和有机阴离子配体、矿物类型、有机质含量、吸附位点强度以及总量的影响。这一观点与江水英等<sup>[61]</sup>的研究结论相契合。同时,闫帅成等的研究也表明<sup>[62]</sup>,通常情况下,当土壤呈现酸性、有机质含量较高、温度较高、阳离子交换容量较小、氧化还原电位较低等条件时,均会促使土壤中有效态 Cd 的释放,从而进一步加剧 Cd 污染的严重性。然而,这些影响因素及其作用机制仍需进一步深入研究和验证,以更全面地理解 Cd 在土壤中的行为特性及其对环境的影响。

#### 4 讨论与展望

植物修复有助于控制土壤重金属污染且不会对生态系统造成不利影响。而土壤重金属污染主要为复合污染<sup>[63]</sup>,这也使土壤重金属污染的修复增加了一定的挑战。在日后的研究中应更加关注土壤重金属复合污染的问题,并积极探索能够同时富集多种重金属的超积累植物,以期通过植物修复技术提升对复合污染土壤的修复效果。此外,超积累植物在实际应用中普遍面临着地区适应性差异、回收处置技术不成熟以及经济效益不明显等问题<sup>[64-65]</sup>。近年来,国内外学者陆续开展了超富集植物生物质的处置技术研究,主要有焚烧法、热解法、压缩填埋法、液相萃取法、堆肥法等<sup>[66]</sup>。其中,液相萃取技术具有设备要求低、易于现场实施的优点,是一项具有实际应用潜力的技术。然而,目前这项技术未见深入研究。

本研究发现种植前后不同种植模式下土壤 Cd 含量呈现间作>单作>套作>轮作>连作的趋势,土壤平均修复效率呈现套作>轮作>间作>单作>连作的趋势。然而,李博等<sup>[67]</sup>在施秉县太子参种植区的研究结果却显示,连作模式下的土壤 Cd 含量最高,其次是套作和轮作,间作最低,这种差异可能源于土壤 Cd 全量的背景值不同。此外,本研究的对象主要为玉米、水稻等经济作物及超积累植物,并未涵盖太子参等药用作物。未来在相关领域的研究中,应进一步加强不同种植方式对中药材 Cd 含量影响的深入研究,以验证和补充现有结论。此外,有相关研究表明<sup>[50]</sup>,不同类型土壤对 Cd<sup>2+</sup>的吸附能力大小不同,表现也不同:黑龙江黑土>蒙古灌溉土>湖北新洲潮土>湖北咸宁红壤。而本研究未对不同土壤类型进行调查研究。另外,在对 Cd 污染土壤采用植物提取修复时,会出现植物对土壤中 Cd 的修复效率会随修复年限的增加而降低的现象,后期应加强修复年限对土壤 Cd 污染修复效率的影响研究。

植物通过化合物的合成及有机物质的投入影响土壤的理化特性。同时,土壤的理化特性也会影响土壤对

植物所需养分的供给能力,从而对植物的生长及 Cd 元素的吸收产生作用<sup>[6]</sup>。本研究发现不同种植方式下各经济植物的 Cd 含量表现为连作>轮作>间作>单作>套作。连作条件下经济植物的 Cd 含量显著高于单作和套作,这可能是由于连作方式下,植物根系在同一土壤中连续生长,导致土壤中的 Cd 元素不断累积在根系周围,进而被植物吸收并积累在体内。此外,有研究表明种植方式会对土壤的水分含量、pH 值及氧化还原条件等理化特性产生影响,从而降低重金属被植物吸收的风险<sup>[68]</sup>。重金属在不同种植环境中的活性形态积累效果也存在显著差异<sup>[39]</sup>。本研究中单作和间作条件下,土壤可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态 Cd 含量显著高于轮作和连作,但不同种植方式下土壤 Cd 的生物有效性无显著差异,这可能是由于土壤中其他成分对 Cd 的吸附、解吸、沉淀和溶解等过程产生了影响,从而调节了 Cd 的生物有效性。在不同的种植模式下,土壤的水分含量及状态、pH 值、有机质含量以及氧化还原条件等因素均会发生变化,这些变化会对重金属的生物有效性及其迁移转化特性产生影响<sup>[9]</sup>。一般而言,Cd 在 pH 值较低的酸性土壤中展现出较高的生物有效性,而随着 pH 值的上升,其生物有效性则会相应减弱<sup>[62]</sup>。农业种植模式对土壤质量、生物多样性、碳储存和水资源管理有重要影响<sup>[69-70]</sup>。在实际应用中,种植模式的优化需综合考虑适宜的种植密度、施肥用量、种植时间等因素,这些关键因素对于提升土壤修复效果具有重要意义。此外,针对大面积、中低污染程度的农田土壤,还可采取联合修复技术与农艺调控措施结合可以在保证修复效果的基础上降低修复成本。

#### 参考文献 (References):

- [1] 陈哲明,罗宇,刘明月,曹樑,熊兴耀,胡新喜. 栽培模式对马铃薯植株镉积累和产量及品质的影响. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2016,42(3): 238-241.
- [2] 杜俊,鲁先科,蔡奎,闫丽娜,栾文楼,宋泽峰,赵志瑞,栾卓然,阎秀兰,杨潇. 土壤、植物中镉污染与治理技术研究现状与展望. 中国地质, 2024,52(1):131-158.
- [3] 杨耀东,陈玉梅,涂鹏飞,曾清如. 经济作物轮作模式下镉污染农田修复潜力. 生态环境学报,2023,32(3): 627-634.
- [4] 熊娟,王依涵,陈畅,侯静涛,许运,汪明霞,谭文峰. 伴矿景天修复农田土壤镉污染的研究进展. 农业环境科学学报,2022,41(3): 441-454.
- [5] 卢红玲,肖光辉,刘青山,彭新德. 土壤镉污染现状及其治理措施研究进展. 南方农业学报,2014,45(11): 1986-1993.
- [6] 曹雪莹,谭长银,蔡润众,程学宇,刘路路,张学文,黄硕需. 植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力. 农业环境科学学报,2022,41(4): 765-773.
- [7] 邹嘉成,牛莹新,宋付朋,邢晓飞,陈国卫,诸葛玉平,娄燕宏. 钾肥强化植物间作修复镉锌污染土壤效应研究. 农业环境科学学报,2022,41(2): 304-312.
- [8] 陈伟,魏志莹,杨秀雯,易佳佩,秦超杰,景一鸣,郭军,张家泉,罗泽娇,祁士华. 土壤重金属植物有效性的化学评价法综述. 农业环境科学学报,2024,43(11): 2615-2626.
- [9] 刘凯,张健,杨万勤,吴福忠,刘洋,李勇,胡开波,王守强,左明华. 不同农业种植模式土壤-作物系统中 Zn 的分配与迁移. 四川农业大学学报,2012,30(1): 30-36.
- [10] 王亮. 不同套作模式对作物镉富集转运和土壤性状的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学,2022.
- [11] Kulmatiski A, Kardol P. Getting plant-soil feedbacks out of the greenhouse: experimental and conceptual approaches//Progress in Botany. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,2008: 449-472.
- [12] 霍文敏,邹草,王丽,范洪黎. 间作条件下超积累和非超积累植物对重金属镉的积累研究. 中国土壤与肥料,2019(3): 165-171.
- [13] 李丹丹,杨军,杨武年,郭俊婷,杨俊兴,郑国砥,万小铭,陈同斌. 八宝景天-柑橘间作降低柑橘根际土壤镉含量以减少对镉的吸收. 植物营养与肥料学报,2020,26(5): 891-900.
- [14] 能凤娇,吴龙华,刘鸿雁,任婧,刘五星,骆永明. 芹菜与伴矿景天间作对污泥农用镉污染土壤化学与微生物性质的影响. 应用生态学报,2013,24(5): 1428-1434.
- [15] 卫泽斌,郭晓芳,吴启堂,陈晓红. 混合螯合剂的不同施加方式对重金属污染土壤套种修复效果的影响. 华南农业大学学报,2016,37(1): 29-34.
- [16] 涂鹏飞,谭可夫,陈璘涵,杨洋,袁婧,陈奕暄,杨耀东,曾清如. 红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤 Cd 的能力. 农业资源与环境学报,2020,37(4): 609-614.
- [17] 文典,李富荣,赵洁,王富华,杜应琼,疏仁宗,李波,何舞. 菜稻菜轮作模式对土壤 Cd 形态分布的影响研究. 热带作物学报,2014,35(7): 1272-1277.

- [18] 冯子龙. 玉米与香根草、伴矿景天间作对重金属 Cd、Pb 污染土壤的修复研究[D]. 温州: 温州大学, 2017.
- [19] 谭可夫, 涂鹏飞, 杨洋, 袁婧, 陈璘涵, 曾清如. 烟草-红叶甜菜轮作对镉污染农田的修复潜力试验. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 440-448.
- [20] 游少鸿, 徐瑜, 赵阳, 杨佳节, 刘杰, 赵婕, 陈喆. 间作对伴矿景天与油菜修复镉污染土壤的影响. 桂林理工大学学报, 2023, 43(2): 296-302.
- [21] 唐云鹏, 胡胜男, 陈镔, 杨文俊, 陈璘涵, 马桥, 曾清如. 三季油料作物轮作模式安全利用镉污染农田及其经济效益评估. 环境工程学报, 2023, 17(8): 2655-2664.
- [22] 周建利, 吴启堂, 卫泽斌, 郭晓方, 丘锦荣, 黄柱坚. 套种条件下混合螯合剂对污染土壤 Cd 淋滤行为的影响. 环境科学, 2011, 32(11): 3440-3447.
- [23] 杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 徐瑜, 刘杰, 陈喆. 间套轮作超积累植物技术模式修复 Cd 污染土壤的研究进展. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2122-2133.
- [24] 杨耀东. 多季经济作物轮作对镉污染农田修复潜力的比较[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [25] 喻华, 秦鱼生, 陈琨, 曾祥忠, 张焱, 李丽君, 涂仕华. 水稻土镉形态分布特征及其生物效应研究. 西南农业学报, 2017, 30(2): 452-457.
- [26] 杨凯. 东莞菜稻菜轮作对土壤 Cd、Pb、As 形态分布及其生物有效性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [27] 孟楠, 王萌, 陈莉, 郑涵, 陈世宝. 不同草本植物间作对 Cd 污染土壤的修复效果. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2618-2624.
- [28] 徐双圆, 朱家辉, 王栋茹, 占新华. 植物套作系统修复镉污染农田土壤的效应——以苏南地区为例. 中国环境科学, 2024, 44(6): 3289-3300.
- [29] 游梦, 邹茸, 王丽, 王楷, 范洪黎. 不同富集植物与小麦间作对镉吸收转运的影响. 中国土壤与肥料, 2022(4): 201-208.
- [30] 吴飞龙, 苏德纯. 油菜连作及施用堆肥对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 658-662.
- [31] 汪鹏, 赵方杰. 土壤-水稻系统中镉迁移与阻控. 南京农业大学学报, 2022, 45(5): 990-1000.
- [32] 陈媛. 土壤中镉及镉的赋存形态研究进展. 广东微量元素科学, 2007, 14(7): 7-13.
- [33] 熊愈辉. 镉在土壤-植物系统中的形态与迁移特性研究进展. 安徽农业科学, 2008, 36(30): 13355-13357, 13414.
- [34] 孔国添, 蒙辉远, 李广豪, 熊涛, 柳勇, 徐润生, 吕业成, 何江华. 珠江三角洲城郊菜地耕层土壤中 Cd、Pb 赋存形态及其相互关系. 土壤通报, 2008, 39(3): 652-659.
- [35] Zhou J, Du B Y, Liu H L, Cui H B, Zhang W T, Fan X J, Cui J, Zhou J. The bioavailability and contribution of the newly deposited heavy metals (copper and lead) from atmosphere to rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Hazardous Materials, 2020, 384: 121285.
- [36] Zhou J, Liu H Y, Du B Y, Shang L H, Yang J B, Wang Y S. Influence of soil mercury concentration and fraction on bioaccumulation process of inorganic mercury and methylmercury in rice (*Oryza sativa* L.). Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(8): 6144-6154.
- [37] 谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 李元, 祖艳群. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与 Cd 形态分布状况研究. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 53-60.
- [38] 陈永勤, 徐卫红, 江玲, 迟荪琳, 秦余丽, 陈序根, 赵婉伊, 张进忠, 熊治庭. 黑麦草与丛枝菌根对番茄 Cd 质量分数及根际 Cd 形态的影响. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(4): 34-39.
- [39] 李富荣, 赵洁, 文典, 杜应琼, 王富华, 杨锐, 朱娜. 不同种植模式对土壤重金属铅、镉形态分布的影响. 广东农业科学, 2015, 42(9): 56-61.
- [40] 余雪莲. 成都平原土壤剖面镉累积及其形态分布特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [41] 马婵华. 黑麦草植物对农田重金属镉污染土壤的修复效果研究. 现代农业科技, 2019(3): 148, 152.
- [42] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 龙新宪. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响. 中国环境科学, 2009, 29(9): 985-990.
- [43] 陈奕暄, 邓潇, 杨洋, 曾清如. 亚麻-水稻轮作模式对镉污染土壤修复潜力研究. 作物研究, 2022, 36(2): 126-131.
- [44] 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.
- [45] 杨勇, 王巍, 江荣风, 李花粉. 超积累植物与高生物量植物提取镉效率的比较. 生态学报, 2009, 29(5): 2732-2737.
- [46] 吴乐诗, 余柏仲, 李冬琴, 黎华寿, 陈桂葵. 菜心与东南景天间作修复镉污染农田的生态效应. 农业环境科学学报, 2024, 43(7): 1483-1491.
- [47] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 王艳红, 杨少海, 罗英健, 余丹妮. 轮间作对伴矿景天和苋菜生物量及 Cd 含量的影响. 广东农业科学, 2012, 39(13): 35-37.
- [48] 关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 朱仁凤, 赵婕, 张亚冰, 吴龙华. 间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 347-354.
- [49] 樊瑾, 王融融, 丛士翔, 常文静, 余海龙, 黄菊莹. 不同重金属污染水平下生物结皮及下层土壤细菌群落的差异性分析. 生态学报, 2024, 44(1): 416-427.
- [50] 陈浩楠. 龙葵-葱间作对镉污染农田土壤修复效果及其温室气体排放研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.

- [51] 艾亥麦提·艾麦尔江,黄佳,徐华勤,陈法霖,肖金讯,成志军,杨友才. 不同种植模式对土壤理化性质及微生物特征的影响. 南方农业学报, 2022, 53(12): 3369-3379.
- [52] 李志军,孙德智,贾俊英,庄得凤,郭园,李旭新,包金花,杨恒山. 不同栽培方式对蒙古黄芪药效品质及土壤微生物的影响. 时珍国医国药, 2024, 35(1): 197-200.
- [53] 黄爽,张仁铎,张家应,潘蓉. 土壤理化性质对吸附重金属镉的影响. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 19-22.
- [54] 郭思宇,王海娟,王宏镡. 重金属污染土壤间作修复的研究进展. 中国生态农业学报:中英文, 2021, 29(5): 890-902.
- [55] Huang R, Dong M L, Mao P, Zhuang P, Paz-Ferreiro J, Li Y X, Li Y W, Hu X Y, Netherway P, Li Z A. Evaluation of phytoremediation potential of five Cd (hyper)accumulators in two Cd contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137581.
- [56] Huang S H, Rao G S, Ashraf U, He L X, Zhang Z Z, Zhang H L, Mo Z W, Pan S G, Tang X R. Application of inorganic passivators reduced Cd contents in brown rice in oilseed rape-rice rotation under Cd contaminated soil. *Chemosphere*, 2020, 259: 127404.
- [57] 万家悦,贺希格都楞,彭位华,安玲瑶,江琼,杨佳敏,朱诚. 玉米与番茄间作对土壤镉吸收的影响. 生物工程学报, 2020, 36(3): 518-528.
- [58] 陈楠,张昊,杨慧敏,魏祥东. 土壤 pH 对土壤镉形态及稻米镉积累的影响. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2018, 44(2): 176-182, 209.
- [59] 宋波,曾炜铨. 土壤有机质对镉污染土壤修复的影响. 土壤通报, 2015, 46(4): 1018-1024.
- [60] 张力浩,白姣杰,田瑞云,王国昌,游来勇,梁家妮,慈凯东,刘梦丽,寇乐勇,周伶俐,周俊,吴大付,孙斌,周静. 中国北方碱性农田土壤镉污染修复:现状与挑战. 土壤学报, 2024, 61(2): 348-360.
- [61] 江水英,肖化云,吴声东. 影响土壤中镉的植物有效性的因素及镉污染土壤的植物修复. 中国土壤与肥料, 2008(2): 6-10.
- [62] 闫帅成,张克峰,刘雷,商静静,王志垠. 土壤中镉的形态及其影响因素研究进展. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S2): 354-358.
- [63] 孙浩,周春财,徐仲雨,王兴明,刘桂建. 淮北矿区土壤重金属空间分布与环境评价. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(7): 560-566.
- [64] 李旭,晁赢,阎祥慧,罗锋,于金鹏,娄燕宏,诸葛玉平,王会,潘红,杨全刚. 植物修复技术治理农田土壤重金属污染的研究进展. 河南农业科学, 2022, 51(12): 10-18.
- [65] 李吉锋. 超累积植物修复矿区土壤重金属污染研究进展. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 138-143.
- [66] 雷龙,崔晓荧,庄萍,李泳兴,李应文,李志安. 重金属污染农田修复植物龙葵与伴矿景天的生物质处置技术. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2356-2367.
- [67] 李博,何腾兵,樊博,张皓,林昌虎. 不同种植方式太子参土壤中重金属的分布. 西北农业学报, 2013, 22(8): 59-64.
- [68] 范明生,江荣风,张福锁,吕世华,刘学军. 水旱轮作系统作物养分管理策略. 应用生态学报, 2008, 19(2): 424-432.
- [69] 陈志霞,喻阳华,吴银菇. 黔中石漠化区大理石矿山不同植被恢复对土壤养分及化学计量的影响. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2021, 39(1): 95-102.
- [70] 杨再福,喻会平,刘杰,刘育栋,朱勇,涂勇. 烟草间作万寿菊对根结线虫的控制及土壤线虫群落的影响. 山地农业生物学报, 2021, 40(2): 16-20.