

钾肥强化植物间作修复镉锌污染土壤效应研究

邹嘉成, 牛莹新, 宋付朋, 邢晓飞, 陈国卫, 诸葛玉平, 娄燕宏

引用本文:

邹嘉成, 牛莹新, 宋付朋, 等. 钾肥强化植物间作修复镉锌污染土壤效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 304–312.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0667>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2762–2770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>

钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响

陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 李博, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2103–2110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1446>

间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响

关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 朱仁凤, 赵婕, 张亚冰, 吴龙华

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 347–354 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0916>

不同增强试剂对二维电场下伴矿景天修复镉污染土壤的影响

樊广萍, 姚澄, 周东美, 张振华, 童非, 史高玲, 张维国, 陈未, 李江叶, 刘丽珠, 李云涛, 高岩

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2669–2680 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0398>

不同浓度及不同来源纳米银对伴矿景天生长及重金属吸收的影响研究

王朝阳, 马婷婷, 周通, 李柱, 吴龙华, 周守标, 骆永明

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 250–256 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1039>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

邹嘉成, 牛莹新, 宋付朋, 等. 钾肥强化植物间作修复镉锌污染土壤效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 304–312.

ZOU J C, NIU Y X, SONG F P, et al. Intensification of the intercropping effect of phytoremediation of soil contaminated with cadmium and zinc using potassium fertilizer[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(2): 304–312.



开放科学 OSID

钾肥强化植物间作修复镉锌污染土壤效应研究

邹嘉成¹, 牛莹新¹, 宋付朋^{1*}, 邢晓飞², 陈国卫³, 诸葛玉平¹, 姜燕宏¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018; 2. 山东省农业技术推广中心, 济南 250100; 3. 德州市自然资源局, 山东 德州 253000)

摘要:小麦间作伴矿景天是一种原位绿色、边生产边修复重金属污染土壤的有效方式,施用钾肥是保障小麦增产的主要措施之一。为了研究不同类型和用量的钾肥对小麦间作伴矿景天修复镉(Cd)、锌(Zn)污染土壤的强化效果,采用室外盆栽试验方法,以不施钾肥为对照处理,研究了不同类型钾肥(氯化钾、硫酸钾)及施用量(50、100 mg·kg⁻¹和200 mg·kg⁻¹,以K₂O计)对土壤pH和Cd、Zn含量、小麦和伴矿景天幼苗生物量及其Cd、Zn积累量的影响。结果表明:相较于对照处理,施用氯化钾和硫酸钾均能降低土壤pH,且施用量增至200 mg·kg⁻¹时土壤pH值降幅最大,分别降低了0.322和0.411。氯化钾和硫酸钾对土壤有效态Cd、Zn含量的提升效果均随施用量的提高而增强,均提高了小麦幼苗与伴矿景天生物量并促进了对Cd、Zn的积累。施用钾肥后,土壤Cd的去除率在15.1%~23.8%,土壤Zn的去除率在1.75%~4.70%。研究表明,施用钾肥均对小麦间作伴矿景天修复土壤Cd、Zn污染具有良好的强化效应,且氯化钾施用量200 mg·kg⁻¹的修复效果优于其他处理。

关键词:间作;钾肥;施用水平;镉锌污染;小麦幼苗;伴矿景天

中图分类号:X53;X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)02-0304-09 doi:10.11654/jaes.2021-0667

Intensification of the intercropping effect of phytoremediation of soil contaminated with cadmium and zinc using potassium fertilizer

ZOU Jiacheng¹, NIU Yingxin¹, SONG Fupeng^{1*}, XING Xiaofei², CHEN Guowei³, ZHUGE Yuping¹, LOU Yanhong¹

(1. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Shandong Provincial Agricultural Technology Extension Center, Jinan 250100, China; 3. Dezhou Natural Resources Bureau & Forestry Bureau, Dezhou 253000, China)

Abstract: Intercropping wheat (*Triticum aestivum* L.) and *Sedum plumbizincicola* is an effective method for *in situ* green production and remediation for phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. The application of potassium fertilizer is one of the agronomic practices that increases wheat yield. In this study, a pot experiment was carried out to investigate the effects of potassium fertilizers on the amendment of cadmium (Cd) and zinc (Zn) contaminated soils using wheat and *Sedum plumbizincicola* intercrops. The effects of different application levels (50, 100 mg·kg⁻¹, and 200 mg·kg⁻¹, calculated in K₂O) of potassium chloride or potassium sulfate on soil pH, the concentration of Cd and Zn in the soil, and the biomass and Cd and Zn concentrations in wheat and *Sedum plumbizincicola* was evaluated. Corresponding treatments without the application of potassium fertilizers were used as the control. The results showed that increasing the application of potassium chloride or potassium sulfate decreased soil pH by 0.322 and 0.411 units, respectively. In addition, it increased soil available Cd and Zn concentration, plant biomass, and Cd and Zn concentration in wheat and *Sedum plumbizincicola* seedlings when compared with the control. Furthermore, the application of potassium fertilizer increased the removal rate of soil Cd and Zn from 15.1% to

收稿日期:2021-06-10 录用日期:2021-09-10

作者简介:邹嘉成(1997—),男,福建政和人,硕士研究生,从事土壤重金属植物修复研究。E-mail:zjc18865381510@163.com

*通信作者:宋付朋 E-mail:fpsong@126.com

基金项目:山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2018ZC2363)

Project supported: The Project of Key Basic Research of Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (ZR2018ZC2363)

23.8% and from 1.75% to 4.70%, respectively. This study shows that potassium fertilizer enhances soil amendment when wheat and *Sedum plumbizincicola* intercrops are grown in Cd and Zn contaminated soils. It can be concluded that the application of potassium chloride at 200 mg·kg⁻¹ achieves the best results.

Keywords: intercropping; potassium fertilizer; application level; Cd and Zn contamination; wheat seedling; *Sedum plumbizincicola*

近年来,工业的快速发展以及长期滥用化肥与农药等导致农田土壤重金属污染加重,不仅造成了作物产量与品质的下降,而且严重危及人类的健康与生命安全^[1]。Cd是毒性极强的重金属污染物之一^[2],会干扰植物的光合作用,致使植物生长缓慢甚至死亡^[3-4]。Zn是植物生长发育必需的微量营养素^[5],参与多种酶(如醇脱氢酶、碳酸酐酶、RNA聚合酶等)的合成^[6-7],但是土壤中存在过量的Zn会打破植物体内的化学平衡^[8],对植物根系造成不可逆的损伤,从而抑制整株植物的生长发育^[9]。据统计,我国有29个省区市发现了铅锌矿床并进行了逐步开采,但由于开采技术不成熟及尾矿的堆积,导致土壤中Zn的含量升高,而伴生元素Cd也大量残留在土壤中,造成严重的Cd-Zn复合污染,致使周边环境质量下降^[10]。杨茹月等^[11]的相关研究指出,我国受Cd、Zn重金属复合污染的土壤面积已达 2.00×10^7 hm²,受重金属污染的粮食多达 1.20×10^7 t,经济损失超过了200亿元,严重影响了我国的农业健康发展。因此,为了保障人类健康,促进农业绿色发展,必须采取科学高效的方法解决土壤重金属污染难题。

传统的土壤修复技术如使用钝化剂或在土壤中添加客土等措施^[12]在污染面积小、污染程度较重的地区修复效果较好,但是这些技术往往投资昂贵,而且大多数只能暂缓重金属危害,无法彻底消除,甚至有的可能会造成二次污染^[13]。超积累植物修复技术作为一种绿色可持续的原位修复方式,近年来成为了土壤污染修复领域的研究热点,其具备修复成本低、耐受性强、不破坏土壤结构等优点,受到了国内外学者的广泛关注^[14]。柏佳等^[15]的研究表明,土壤重金属会被超积累植物根系分泌的有机酸活化,进而被超积累植物所吸收。不过,单种种植超积累植物存在着修复年限长、超积累植物生长缓慢以及农民的经济利益无法保障等问题,制约了超积累植物修复技术在实际农田生产中的推广和应用^[16]。通过农艺调控措施促进植物生长和提高重金属植物有效性是强化超积累植物修复效率的重要措施。合理的水分管理与不同的种植模式是常用的两种农艺调控措施,可以促进植物的生长发育,提高土壤中重金属的生物有效性,显著

提高超积累植物的修复效率,有效降低土壤重金属的污染浓度,同时获得一定的经济产出^[17-18]。施肥技术是保障农作物增产的重要农艺措施之一,同时也是植物修复过程中十分必要的强化手段。钾是植物必需营养元素,显著促进植物的生长发育,合理施用钾肥,在促进植物生长发育的同时还能有效改变土壤中的重金属活性,提高植物的修复效率^[19]。沈丽波等^[20]研究了养分调控对伴矿景天生长及Cd、Zn吸收的影响,发现增施钾肥显著提高了伴矿景天的地上部Cd、Zn的含量。此外,郭俊梅等^[21]探究了田间条件下增施肥料对八宝景天Cd修复效率的影响,结果表明高钾水平下八宝景天地上部的Cd含量较不施肥处理提高了29.3%,八宝景天的Cd修复效率显著提升。LIN等^[22]也发现施用钾肥能够显著提高龙葵地上部Cd含量。以上研究表明,施用钾肥是强化超积累植物修复土壤重金属污染的重要措施之一。

目前大部分研究仅重点关注了施肥对超积累植物修复效率的影响,或者是不同间作模式对超积累植物和作物吸收Cd、Zn的影响,而对施用钾肥强化超积累植物间作作物修复重金属污染土壤的效果缺乏全面系统的研究。因此,本试验选择小麦(*Triticum aestivum* L.)与伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)间作,通过研究不同类型钾肥及其施用量对重金属污染农田土壤pH和Cd、Zn有效性,以及对小麦与伴矿景天的生长发育和重金属Cd、Zn吸收的影响,探讨既能促进植株生长,又能取得良好的Cd、Zn污染土壤修复效果的最优钾肥类型及用量,为提高植物修复效率、促进小麦生长发育提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小麦品种为我国黄淮北片麦区大面积推广种植的济麦22^[23]。

供试超积累植物为伴矿景天^[24],由中国科学院南京土壤研究所提供。

供试肥料:氯化钾(K₂O≥60%),购自华垦国际贸易有限公司;硫酸钾(K₂O≥52%),购自山东青上化工有限公司。

供试土壤:采集自某一化工厂附近的污染农田表层土壤(0~20 cm),置于室内避光风干,去除石块等杂质后,粉碎磨细,分别过1 mm和0.15 mm尼龙网筛,密封保存。土壤发生类型为潮土,土壤基本理化性质和重金属含量测定结果如下:土壤pH 8.18,有机质含量 $18.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全氮含量 $1.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效磷含量 $18.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效钾含量 $257 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全量Cd含量 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全量Zn含量 $907 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效态Cd含量 $0.221 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效态Zn含量 $47.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

盆栽试验在山东省泰安市山东农业大学资源与环境学院实验站内进行。试验用盆为长方形塑料盆(长35 cm,宽25 cm,高15 cm),每盆装风干土4 kg。试验共设7个处理,每个处理3次重复,共计21盆(表1)。

表1 盆栽试验设计

Table 1 Design of pot experiment

处理 Treatment	K ₂ O用量 K ₂ O dose/(mg·kg ⁻¹)	肥料用量 Fertilizer dose/(mg·kg ⁻¹)	肥料类型 Fertilizer type
CK	0	0	无
LK1	50	83.3	氯化钾
MK1	100	166.7	氯化钾
HK1	200	333.3	氯化钾
LK2	50	96.2	硫酸钾
MK2	100	192.3	硫酸钾
HK2	200	384.6	硫酸钾

试验于2019年4月5日开始,肥料与土壤混匀后一次性装入试验用盆,每盆施入氮肥(尿素N 46%)2.5 g、磷肥(过磷酸钙P₂O₅ 12%)4.5 g。小麦撒播种植,覆土3~4 cm,伴矿景天扦插种植,生长一周后进行间苗,每盆留长势良好且一致的4株小麦和4株伴矿景天。定期补充蒸馏水,盆栽土壤含水量保持在田间最大持水量的70%左右。

小麦和伴矿景天生长90 d后(2019年7月4日),采集土壤和植株样品。采集的土壤样品置于阴凉通风处自然风干,粉碎磨细后过1 mm和0.15 mm尼龙网筛,密封保存备用;植株样品用蒸馏水洗净,放入烘箱105 ℃杀青30 min,并在75 ℃下烘干48 h至恒质量。烘干后,用不锈钢粉碎机粉碎磨细,过1 mm尼龙网筛,密封备用。

1.3 测定项目与方法

土壤pH值采用电位法测定(水土比为2.5:1)^[25]。

土壤Cd、Zn有效态含量采用二乙烯三胺五乙酸

(DTPA)萃取法测定^[26]。利用HCl-HNO₃-HF-HClO₄混合土壤样品,消化后采用原子吸收分光光度计(AA-7000,岛津,日本)测定土壤样品中Cd和Zn的总含量^[27]。

植株Cd、Zn含量测定:称取0.5 g植物样品,与HNO₃-HClO₄混合消化,待样品消解完全,冷却至室温后转移到25 mL容量瓶中,定容,采用原子吸收分光光度计(AA-7000,岛津,日本)测定植物Cd、Zn含量。

1.4 数据分析

试验数据采用Origin 2018做图和SAS 9.3统计软件进行统计分析和差异显著性比较,多重比较采用LSD法($P < 0.05$)。

单位质量土壤中植株Cd、Zn积累量(mg)=植株Cd、Zn浓度(mg·kg⁻¹)×单位质量土壤中植株生物量(g)×10³

土壤Cd、Zn去除率(%)=(种植前土壤全量Cd、Zn含量-收获后土壤全量Cd、Zn含量)/种植前土壤全量Cd、Zn含量

2 结果与分析

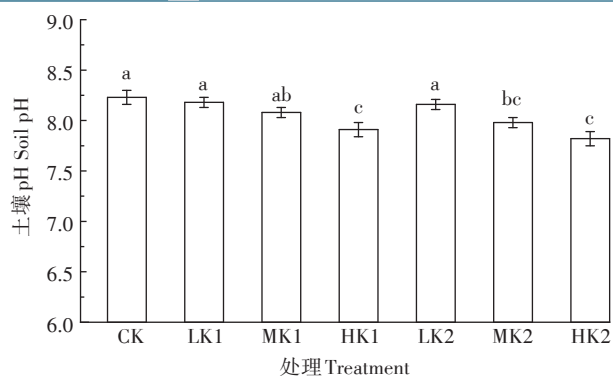
2.1 对土壤pH的影响

不同类型和用量的钾肥施入土壤后对土壤酸碱度的影响显著。随着钾肥施用量的增加,土壤pH逐渐降低(图1)。施用高量氯化钾和硫酸钾处理(HK1和HK2)土壤pH值均显著低于对照处理(CK),分别下降了0.322和0.411。中量硫酸钾处理(MK2)土壤pH值显著低于对照处理,但与中量氯化钾处理(MK1)之间并无明显差异。而低量的氯化钾和硫酸钾处理(LK1和LK2)土壤pH值与对照处理(CK)无显著差异。

2.2 对土壤重金属Cd、Zn含量的影响

不同钾肥处理土壤重金属Cd含量差异显著(图2A)。施用钾肥后土壤总Cd含量范围在0.97~1.08 mg·kg⁻¹,而对照处理(CK)土壤总Cd含量是1.14 mg·kg⁻¹。MK1和HK1处理土壤总Cd含量均显著降低,较CK处理分别下降了8.8%和14.9%。LK1、LK2、MK2和HK2处理土壤总Cd的含量与CK处理的差异不显著。

与CK处理相比,各钾肥处理土壤有效态Cd含量出现了不同程度的提高(图2A)。CK处理土壤有效态Cd含量在所有处理中最低,仅为0.18 mg·kg⁻¹。LK2处理土壤有效态Cd含量略高于CK处理,两者之间的差异并未达到显著水平($P < 0.05$)。土壤有效态



不同小写字母表示不同钾肥处理差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图1 不同钾肥处理土壤pH值

Figure 1 Soil pH in different fertilizer treatments

Cd含量以HK1处理为最高,较CK处理提高了52.6%。LK1、MK1、MK2和HK2处理之间土壤有效Cd含量无显著差异,但均显著高于CK处理,有效态Cd含量提高了16.7%~27.8%。

土壤总Zn含量呈现出随钾肥施用量的增加而逐渐降低的趋势(图2B)。在所有处理中,土壤总Zn含量的降幅最大的为HK1处理,与CK处理相比下降了3.5%。MK1和HK2处理之间土壤总Zn含量未呈现出显著差异,但均显著低于CK处理,分别降低了1.7%和1.8%。LK1、LK2和MK2处理间土壤总Zn含量无显著差异,且均与CK处理无显著差异。

不同类型和用量的钾肥施入土壤后,土壤有效态

Zn含量均出现了不同程度提高(图2B)。MK1、HK1和HK2处理之间土壤有效态Zn含量未达到显著差异水平,但均显著高于CK处理,分别为CK处理有效态Zn含量的1.30、1.52倍和1.34倍。另外LK1、LK2和MK2处理土壤有效态Zn含量与CK处理处于同一水平,均无明显差异。

在所有试验处理中,土壤重金属Cd和Zn有效化百分比(有效态含量/总含量)的范围分别是15.9%~28.4%和5.3%~8.3%。不同处理土壤重金属Cd的有效化百分比顺序为:HK1>MK1>HK2>MK2>LK1>LK2>CK;而不同处理土壤重金属Zn的有效化百分比顺序为:HK1>HK2>MK1>LK1>MK2>LK2>CK。说明施用钾肥对土壤重金属Cd、Zn均具有较强的活化效果,且类型和施用量不同,活化效果不同。

2.3 对小麦幼苗的生长及Cd、Zn吸收的影响

不同类型与用量的钾肥施入土壤后,对小麦生长的影响差异显著(表2)。在所有处理中,小麦幼苗生物量较高的处理分别是HK1和HK2,两者分别是CK处理小麦幼苗生物量的1.26倍和1.29倍。而MK1和MK2处理小麦幼苗的生物量尽管低于HK1和HK2处理,但两个中量处理相较于CK处理仍显著提高了20.2%和13.3%。LK1和LK2处理小麦幼苗的生物量较CK处理略有增加,增幅分别为10.1%和7.3%。

各处理间小麦幼苗体内的Cd浓度差异均不显著,而不同处理小麦幼苗Cd积累量存在差异(表2)。HK1和HK2处理小麦幼苗Cd积累量较CK处理有显

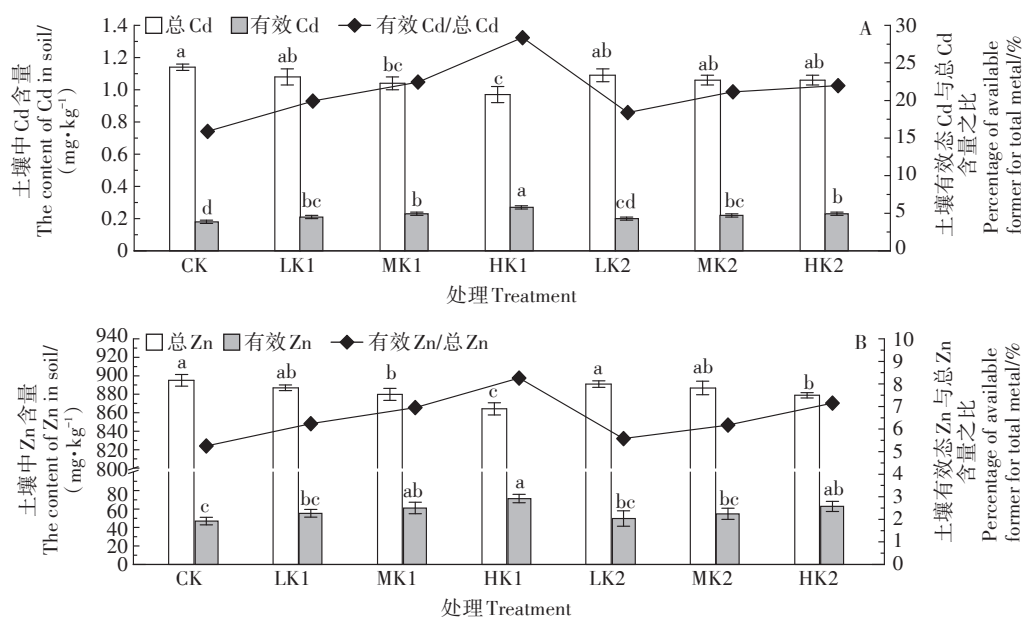


图2 不同钾肥处理土壤重金属的含量

Figure 2 The content of heavy metals in soil in different K-fertilizer treatments

著的提升,提升的幅度分别为44.0%和38.5%。其余处理小麦幼苗Cd积累量之间均无显著差异。

HK1和HK2处理小麦幼苗Zn积累量均显著高于其他处理(MK1处理除外),表明高量的氯化钾和硫酸钾能够显著促进小麦吸收重金属Zn。MK1和MK2处理间小麦幼苗Zn积累量未达到显著差异水平,但均显著高于CK处理($P<0.05$)。不同处理小麦幼苗Zn浓度差异情况不同,HK1、MK1和HK2处理小麦幼苗Zn浓度显著高于CK处理,而LK1、MK1和MK2处理小麦幼苗Zn浓度和CK处理小麦幼苗Zn浓度并无显著差异。

2.4 对伴矿景天的生长及Cd、Zn吸收的影响

不同类型和用量的钾肥对伴矿景天的生长具有促进作用,且伴矿景天的生物量随着施用量的增加而增大(表3)。施用高量氯化钾(HK1)和中、高量硫酸钾(MK2和HK2)均显著促进了伴矿景天的生长,伴矿景天的生物量较对照处理(CK)分别显著提升了17.6%、13.3%和21.8%。LK1、MK1和LK2处理伴矿景天的生物量较CK处理增加了5.0%~10.6%,但差异未达到显著水平。

不同类型和用量的钾肥处理伴矿景天的Cd、Zn

浓度和积累量存在差异(表3)。MK1、HK1、MK2和HK2处理伴矿景天Cd、Zn浓度及积累量均显著高于CK处理,而LK1和LK2处理伴矿景天Cd、Zn浓度与CK处理差异均未达到显著水平($P>0.05$)。在所有处理中,HK1处理伴矿景天Zn浓度和Cd积累量显著高于其他处理。LK2处理伴矿景天Cd积累量显著高于CK处理,而LK1处理伴矿景天Cd积累量与CK处理无显著差异,这说明低量的硫酸钾能促进伴矿景天对Cd的吸收,而低量的氯化钾作用不明显。MK1、HK1、MK2和HK2处理伴矿景天Zn积累量相近,处理之间差异不显著,但均显著高于CK处理;而LK1和LK2处理伴矿景天的Zn积累量与CK处理均无明显差异。

2.5 对土壤重金属Cd、Zn去除率的影响

不同处理土壤Cd、Zn的去除率不同(表4)。与其他处理相比,HK1和MK1处理土壤Cd去除率较高,分别比CK处理高出了13.2个和7.8个百分点;HK1处理土壤Zn去除率显著高于其他处理,比CK处理提高了3.40个百分点。MK1和HK2处理土壤Cd、Zn去除率之间无显著差异,但两者均显著高于CK处理。LK1、LK2和MK2处理土壤Zn去除率无显著差异。

表2 不同钾肥处理小麦幼苗的生物量及Cd、Zn含量

Table 2 Biomass and the content of Cd and Zn in wheat seedlings in different K-fertilizer treatments

处理 Treatment	生物量/(g·盆 ⁻¹) Biomass/(g·pot ⁻¹)	Cd浓度 Cd concentration/(mg·kg ⁻¹)	Zn浓度 Zn concentration/(g·kg ⁻¹)	Cd积累量 Cd accumulation/(μg·kg ⁻¹)	Zn积累量 Zn accumulation/(mg·kg ⁻¹)
CK	4.65±0.342c	0.784±0.145a	0.092±0.003c	0.91±0.26b	0.108±0.008d
LK1	5.12±0.244bc	0.810±0.085a	0.097±0.003bc	1.03±0.10ab	0.122±0.005bcd
MK1	5.59±0.276ab	0.836±0.102a	0.107±0.010ab	1.17±0.16ab	0.140±0.012ab
HK1	5.86±0.264a	0.890±0.043a	0.122±0.009a	1.31±0.10a	0.159±0.010a
LK2	4.99±0.337bc	0.801±0.016a	0.093±0.003c	1.00±0.07ab	0.116±0.008cd
MK2	5.27±0.220b	0.812±0.095a	0.099±0.003bc	1.07±0.12ab	0.131±0.007bc
HK2	6.01±0.466a	0.837±0.047a	0.106±0.007ab	1.26±0.08a	0.155±0.009a

注:同一列中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

表3 不同钾肥处理伴矿景天的生物量及Cd、Zn含量

Table 3 Biomass and the content of Cd and Zn in *S. plumbizincicola* in different K-fertilizer treatments

处理 Treatment	生物量/(g·盆 ⁻¹) Biomass/(g·pot ⁻¹)	Cd浓度 Cd concentration/(mg·kg ⁻¹)	Zn浓度 Zn concentration/(g·kg ⁻¹)	Cd积累量 Cd accumulation/(μg·kg ⁻¹)	Zn积累量 Zn accumulation/(mg·kg ⁻¹)
CK	5.18±0.39c	142±5d	8.73±0.08d	165±11e	11.3±0.8c
LK1	5.44±0.07bc	138±4cd	8.81±0.13cd	188±8de	12.0±0.2bc
MK1	5.73±0.19abc	171±9ab	9.09±0.09b	244±8c	13.0±0.3ab
HK1	6.09±0.33ab	188±12a	9.35±0.19a	297±31a	14.2±0.8a
LK2	5.62±0.09bc	136±5cd	8.68±0.08d	192±4d	12.2±0.3bc
MK2	5.87±0.29ab	158±17bc	8.97±0.16bc	232±32c	13.2±0.4ab
HK2	6.31±0.57a	171±20ab	9.10±0.06b	273±55b	14.4±1.4a

表4 土壤Cd、Zn去除率(%)

Table 4 Removal rates of soil Cd and Zn(%)

处理 Treatment	Cd去除率 Removal rate of Cd	Zn去除率 Removal rate of Zn
CK	10.6±2.4c	1.30±0.70c
LK1	15.1±1.0bc	2.20±0.34bc
MK1	18.4±2.0ab	3.78±0.72b
HK1	23.8±4.7a	4.70±0.72a
LK2	13.9±1.7bc	1.75±0.39c
MK2	16.9±1.7bc	2.21±0.81bc
HK2	16.9±4.3bc	3.08±0.31b

2.6 对不同指标的方差分析

钾肥类型和钾肥用量的双因素分析结果表明,钾肥类型和用量是土壤重金属含量和有效态含量及其重金属去除率的两个重要影响因素(表5),而钾肥用量是影响土壤pH、小麦幼苗和伴矿景天生物量、小麦幼苗Zn浓度和伴矿景天Cd、Zn浓度以及小麦幼苗和伴矿景天Cd、Zn积累量的主要影响因子(表5)。钾肥类型和用量的交互作用对土壤和植株指标无显著影响。

3 讨论

通常来说,植物修复技术对土壤重金属污染的治理效果与超积累植物密切相关。伴矿景天是近年来发现的一种超积累植物,具有生长快速、生物量高、对土壤重金属Cd与Zn富集量大、修复重金属污染土壤能力强等特点^[28]。因此,本研究选择小麦与伴矿景天间作种植修复污染土壤,遵循“边生产、边修复”的理念,以期在修复污染土壤的同时进行农业生产。试验选择施用氯化钾和硫酸钾两种钾肥和3个不同用量,研究不同钾肥类型与施用量对小麦间作伴矿景天修复Cd、Zn污染土壤的强化效应。

在本试验条件下,施用氯化钾和硫酸钾均降低了土壤pH值,其中,高量的氯化钾和硫酸钾降低土壤pH值的效果最优。施入钾肥后,土壤pH值下降的原因可能是K⁺能够将土壤胶体上的H⁺置换出来^[29],且随着钾肥施用量的增加,进入土壤中的K⁺增多,置换出的H⁺也增多,因此呈现出土壤pH值随钾肥用量增加而降低的趋势。土壤pH值降低也有可能受小麦幼苗和伴矿景天的根系分泌某些类型的低分子量有机酸的影响^[30],这些有机酸可以解离出H⁺^[31],从而导致土壤pH值下降。但也有研究发现氯化钾与硫酸钾能够提高土壤pH值,如王林等^[32]在进行硫酸铵和氯化钾强化龙葵(*Solanum nigrum* L.)修复Cd污染土壤效

表5 钾肥类型与钾肥用量对土壤及植株指标的方差分析

Table 5 The variance analysis of K-fertilizer type and dose on different indexes of soil and plant

变异来源 Source of variation	钾肥类型 Fertilizer type	钾肥用量 Fertilizer dose	类型×用量 Type×dose
土壤pH Soil pH	ns	**	ns
土壤总Cd Total soil Cd	*	*	ns
土壤总Zn Total soil Zn	**	**	ns
土壤有效态Cd Soil available Cd	**	**	ns
土壤有效态Zn Soil available Zn	*	**	ns
土壤Cd去除率 Removal rate of Cd	*	*	ns
土壤Zn去除率 Removal rate of Zn	**	**	ns
小麦幼苗 生物量 Biomass	ns	**	ns
Wheat seedling Cd浓度 Cd concentration	ns	ns	ns
Zn浓度 Zn concentration	ns	**	ns
Cd积累量 Cd accumulation	ns	*	ns
Zn积累量 Zn accumulation	ns	**	ns
伴矿景天 生物量 Biomass	ns	**	ns
<i>Sedum plumbizincicola</i> Cd浓度 Cd concentration	ns	**	ns
Zn浓度 Zn concentration	*	**	ns
Cd积累量 Cd accumulation	ns	**	ns
Zn积累量 Zn accumulation	ns	**	ns

注:ns代表P>0.05,*代表P<0.05,**代表P<0.01。

Note: ns represents P>0.05, * represents P<0.05, and ** represents P<0.01.

果的试验时,发现施用氯化钾使土壤pH值升高,其认为氯化钾中的K⁺会提高土壤的盐基饱和度,而土壤pH值在一定范围内与盐基饱和度成正比关系,因此施用钾肥可能会提高土壤pH值;刘平^[33]的研究结果也指出,向土壤中添加磷酸二氢钾一个月后,土壤pH值呈现上升趋势。因此,土壤pH值的降低或升高可能与钾肥的类型和施用量有关。除此之外,土壤pH值还受土壤类型、气候条件、小麦与伴矿景天品种等因素的影响,有待进一步研究。

施用氯化钾和硫酸钾能提高土壤中有效态Cd、Zn含量,且随着钾肥用量的提升,土壤有效态Cd、Zn含量持续升高。出现这些结果可能是由于钾肥中携带的K⁺在土壤颗粒表面中与Cd、Zn发生了交换作用,

钾肥用量的上升引起了重金属Cd、Zn的可给性增强,土壤Cd、Zn的有效态含量升高;其次,钾肥中 K^+ 的伴随阴离子能够促进土壤重金属形态转化和溶解^[34],增强了重金属的植物有效性。本试验中,氯化钾的伴随阴离子 Cl^- 具有很强的配位能力,能够与重金属元素形成相对稳定的络合物^[35],如 $CdCl^+$ 和 $ZnCl^+$ 等,促使Cd、Zn向土壤溶液迁移,从而提高了土壤Cd、Zn的有效态含量。TU等^[36]以及ELOUEAR等^[37]的研究均表明施用氯化钾增加了土壤中可提取态Cd、Zn的含量。土壤pH值也是影响土壤重金属有效性的重要因素之一。一般认为,随着土壤pH值增大,土壤重金属活性逐渐降低,重金属的植物有效性不断下降^[38-39]。本试验各钾肥处理的土壤pH值随着用量增高而降低,均低于对照处理,因此呈现出施用钾肥后土壤重金属Cd、Zn的有效态含量逐渐增高的趋势。

在本试验条件下,不同类型的钾肥在同等施肥用量条件下对重金属有效性的影响具有显著差异。试验结果表明施用氯化钾提高土壤有效态Cd、Zn含量的效果强于硫酸钾,这可能是因为硫酸钾的 SO_4^{2-} 对土壤Cd、Zn的配位吸附能力低于氯化钾的 Cl^- ^[40],从土壤胶体上争夺Cd、Zn,迁移进入土壤溶液的少,导致硫酸钾处理中土壤有效态Cd、Zn含量低于高量氯化钾处理。此外,值得注意的是,施用钾肥后土壤中有效态Cd的比例高于Zn(图2),这说明尽管土壤中Cd含量较低,但却能带来较高的环境风险^[41]。

施用不同类型和用量的钾肥促进了小麦幼苗和伴矿景天对Cd、Zn的吸收,尤其是当氯化钾和硫酸钾的施用量达到高量时,小麦幼苗和伴矿景天Cd、Zn积累量远高于其他用量水平下的积累量,且高量氯化钾对强化伴矿景天积累Cd的效果最为显著。薛培英等^[42]和赵晶等^[43]的研究结果与本试验一致,均发现氯化钾和硫酸钾明显提高了小麦的生物量,促进了小麦对Cd的积累。沈丽波等^[44]在研究养分调控对伴矿景天生长及Cd、Zn吸收的影响中指出,施用高量钾肥会显著促进伴矿景天的生长及其对Cd、Zn的吸收。小麦幼苗和伴矿景天的Cd、Zn积累量上升主要有两个原因,其一是施用钾肥有助于小麦幼苗和伴矿景天的生长发育,其生物量随着钾肥施用量的上升而逐渐增大,促使小麦幼苗和伴矿景天能从土壤中吸收更多的Cd和Zn;其二是施入氯化钾和硫酸钾后,两者的伴随离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 与 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 结合,降低了土壤对Cd、Zn的吸附,提高了有效态Cd、Zn含量,促进了小麦幼苗和伴矿景天对Cd和Zn的吸收与积累。

在本试验条件下,随着氯化钾和硫酸钾施用量的增加,伴矿景天体内Cd、Zn浓度和小麦体内的Zn浓度均显著提升,且伴矿景天Cd、Zn浓度均显著高于小麦;而不同处理小麦体内Cd浓度之间无显著差异,小麦Zn浓度之间差异显著。这可能是由于氯化钾和硫酸钾能够显著促进超积累植物伴矿景天的快速生长,促进了其从土壤环境中吸收更多的Cd,与小麦幼苗产生了竞争性吸收,从而抑制小麦幼苗对Cd的吸收。另外,施用钾肥后小麦幼苗生物量增加,引起的“稀释效应”也缓解了小麦幼苗体内Cd浓度的上升,从而导致了小麦体内Cd浓度变化不明显。这与陈苏等^[45]的研究结果一致。各处理之间小麦幼苗体内Zn浓度的差异可能是不同处理小麦幼苗生物量的差异导致的;同时由于土壤中Zn含量远高于Cd含量,土壤中存在足量的Zn供小麦幼苗和伴矿景天吸收,即使小麦幼苗和伴矿景天对Zn的吸收存在竞争以及生物“稀释效应”,也不足以影响小麦幼苗对Zn的吸收和积累,从而使不同处理小麦Zn浓度产生差异。

各钾肥处理土壤Cd、Zn含量较对照处理均有下降,这说明施用氯化钾与硫酸钾后,提高了小麦和伴矿景天的修复效率,土壤Cd、Zn去除率上升。当氯化钾施用量增加至中、高量时,土壤Cd、Zn的去除率高于其他处理,对重金属Cd、Zn污染土壤的修复效果显著。SCHMIDT等^[46]的研究表明,施用硫酸铵和氯化钾能显著提高植物和超积累植物修复Cd、Zn污染的效率,这与本试验的研究结果一致。本试验钾肥提高Cd、Zn去除率主要是由于钾肥促进了小麦和伴矿景天生长,且带入的伴随阴离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 可通过和土壤重金属离子配位结合从而促进重金属离子从土壤胶体迁移进入土壤溶液,促进了植物吸收,从而降低了土壤Cd、Zn含量。由于 SO_4^{2-} 与重金属离子配位结合能力低于 Cl^- ,施用硫酸钾的土壤中重金属Cd、Zn的植物有效性低于施用氯化钾的土壤,因此施用氯化钾处理的土壤重金属Cd、Zn的去除率要高于施用硫酸钾处理。

4 结论

(1)随着氯化钾和硫酸钾施用量的增大,土壤pH和土壤Cd、Zn含量逐渐降低,土壤有效态Cd、Zn含量逐渐升高。

(2)在小麦间作伴矿景天的种植模式下,施用氯化钾和硫酸钾提高了小麦幼苗和伴矿景天的生物量,与对照处理相比,提升幅度范围分别为7.3%~29.2%

和5.0%~21.8%。

(3)施用高量氯化钾与硫酸钾均能显著提高小麦幼苗Cd、Zn积累量。中、高量的氯化钾和硫酸钾提高伴矿景天Cd、Zn积累量的效果优于其他施肥处理。

(4)氯化钾施用量 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 既能够降低土壤pH,又能提高伴矿景天的Cd、Zn积累量及其修复效率,并促进小麦幼苗的生长,是方法简单、可操作性强、具有实用价值的强化小麦间作伴矿景天修复Cd、Zn污染农田土壤的施肥技术措施。

参考文献:

- [1] 何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1734–1740. HE Y, DU P, SHI J, et al. Evaluation of the effect of heavy metal immobilization remediation—field experiment study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1734–1740.
- [2] ZU Y Q, QIN L, ZHAN F D, et al. Intercropping of *Sonchus asper* and *Vicia faba* affects plant cadmium accumulation and root responses[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(4): 457–465.
- [3] XU L L, DONG Y J, KONG J, et al. Effects of root and foliar applications of exogenous NO on alleviating cadmium toxicity in lettuce seedlings[J]. *Plant Growth Regul*, 2014, 72: 39–50.
- [4] XU L L, FAN Z Y, DONG Y J, et al. Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on physiological characteristics of two peanut cultivars under cadmium stress[J]. *Biol Plant*, 2015, 59: 171–182.
- [5] ANITHA L, BRAMARI G S, KALPANA P. Effect of supplementation of *Spirulina platensis* to enhance the zinc status in plants of *Amaranthus gangeticus*, *Phaseolus aureus* and tomato[J]. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2016, 7(6): 289–299.
- [6] AHMAD R, ISHAQUE W, KHAN M, et al. Relief role of lysine chelated zinc (Zn) on 6-week-old maize plants under tannery wastewater irrigation stress[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(14): 5161.
- [7] LÓPEZ-MILLÁN A F, ELLIS D R, GRUSAK M A. Effect of zinc and manganese supply on the activities of superoxide dismutase and carbonic anhydrase in *Medicago truncatula* wild type and *raz* mutant plants[J]. *Plant Sci*, 2005, 168: 1015–1022.
- [8] MICHAEL P I, KRISHNASWAMY M. The effect of zinc stress combined with high irradiance stress on membrane damage and antioxidative response in bean seedlings[J]. *Environ Exp Bot*, 2011, 74: 171–177.
- [9] PRIETO M J, ACEVEDO S O A, PRIETO G F, et al. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Biodiversity International Journal*, 2018, 2: 362–376.
- [10] 李小林, 颜森, 张小平, 等. 铅锌矿区重金属污染对微生物数量及放线菌群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 468–475. LI X L, YAN S, ZHANG X P, et al. Response of microbe quantity and actinomycetes community of heavy metal contaminated soils in lead-zinc mine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 468–475.
- [11] 杨茹月, 李彤彤, 杨天华, 等. 植物基因工程修复土壤重金属污染研究进展[J]. 环境科学研究, 2019, 32(8): 1294–1303. YANG R Y, LI T T, YANG T H, et al. Advances in enhanced phytoremediation by genetic engineering technology for heavy metal pollution in soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(8): 1294–1303.
- [12] MANOJ S R, KARTHIK C, KADIRVELU K, et al. Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: A review[J]. *J Environ Manage*, 2020, 254: 109779.
- [13] HUANG B, XIN J, DAI H, et al. Root morphological responses of three hot pepper cultivars to Cd exposure and their correlations with Cd accumulation[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2015, 22: 1151–1159.
- [14] 郭媛, 邱财生, 龙松华, 等. 不同黄麻品种对重金属污染农田镉的富集和转移效率研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1929–1935. GUO Y, QIU C S, LONG S H, et al. Cadmium accumulation and translocation in different jute (*Corchorus capsularis* L.) cultivars growing in heavy metal contaminated paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1929–1935.
- [15] 柏佳, 谭长银, 曹雪莹, 等. 3种有机酸对伴矿景天修复效率及土壤微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 318–324. BAI J, TAN C Y, CAO X Y, et al. Effect of three organic acids on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola* and soil microbial quantity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 318–324.
- [16] 赵涛, 刘登彪, 郑俊宇, 等. 不同钙镁比处理对三种超富集植物生长及吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 440–448. ZHAO T, LIU D B, ZHENG J Y, et al. Effects of Ca/Mg ratios on growth and heavy metal uptake of three hyperaccumulators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 440–448.
- [17] 彭曦. 镉污染农田土壤植物修复的强化措施及其效果研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020. PENG X. Study on strengthening measures and effects of phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020.
- [18] 杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2122–2133. YANG J J, YOU S H, WU J L, et al. Research progress of intercropping, interplanting, and crop rotation models on remediation of cadmium contaminated soil by hyperaccumulators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2122–2133.
- [19] 李凝玉, 李志安, 庄萍, 等. 施肥对两种苋菜吸收积累镉的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5937–5942. LI N Y, LI Z A, ZHUANG P, et al. Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible *Amaranthus* herbs[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18): 5937–5942.
- [20] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及锌镉吸收性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 221–225. SHEN L B, WU L H, HAN X R, et al. Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 221–225.
- [21] 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 等. 田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4226–4233. GUO J M, YANG J X, YANG J, et al. Effect of nutrient regulation and control on Cd accumulation efficiency of *Hylotelephium spectabile* under field conditions[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4226–4233.
- [22] LIN W, ZHOU Q X, SUN Y B. Intensification of *Solanum nigrum* L. remedying cadmium contaminated soils by nitrogen and potassium fer-

- tilizers[J]. *China Environ Sci*, 2008, 28(10): 915-920.
- [23] 李豪圣, 刘建军, 宋建民, 等. 高产稳产抗病广适型小麦新品种——济麦22[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(4): 744. LI H S, LIU J J, SONG J M, et al. Wheat cultivar Jimai 22 with high yield, stable productivity, good disease resistance and wide adaptability[J]. *J Triticeae Crops*, 2007, 27(4): 744.
- [24] FAN Y, LI Z, ZHOU T, et al. Phytoextraction potential of soils highly polluted with cadmium using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Int J Phytoremediation*, 2019, 21: 733-741.
- [25] BIAN F Y, ZHONG Z K, WU S C, et al. Comparison of heavy metal phytoremediation in monoculture and intercropping systems of *Phytolacca praecox* and *Sedum plumbizincicola* in polluted soil[J]. *Int J Phytoremediation*, 2018, 20: 490-498.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 226-230. BAO S D. Agricultural soil analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 226-230.
- [27] WANG Y, YAN W B, GUO H, et al. Trace element analysis and associated risk assessment in mining area soils from Zhexi river plain, Zhejiang, China[J]. *Environmental Forensics*, 2017, 18: 318-330.
- [28] 周显勇, 刘鸿雁, 刘艳萍, 等. 植物修复重金属和抗生素复合污染土壤微生物数量和酶活性的变化[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1248-1255. ZHOU X Y, LIU H Y, LIU Y P, et al. Changes in microbial populations and enzyme activity under phytoremediation in soil co-contaminated with heavy metals and antibiotics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1248-1255.
- [29] 赵晶. 不同氮磷钾肥对土壤镉有效性和小麦吸收镉的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2009. ZHAO J. Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on availability of soil cadmium and cadmium uptake by wheat[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2009.
- [30] LUO Q, SUN L N, HU X M. Metabonomics study on root exudates of cadmium hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. *Chin J Analytical Chemistry*, 2015, 43: 7-12.
- [31] 陆红飞, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 外源有机酸对土壤pH值、酶活性和Cd迁移转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 542-553. LU H F, QIAO D M, QI X B, et al. Effects of exogenous organic acids on soil pH, enzyme activity, and cadmium migration and transformation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 542-553.
- [32] 王林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 915-920. WANG L, ZHOU Q X, SUN Y B. Intensification of *Solanum nigrum* L. remedying cadmium contaminated soils by nitrogen and potassium fertilizers[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(10): 915-920.
- [33] 刘平. 钾肥伴随阴离子对土壤铅和镉有效性的影响及其机制[D]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2006. LIU P. Effect of accompanying anions in potassium fertilizers on phytoavailability of Pb and Cd in soil and its mechanisms[D]. Beijing: Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, 2006.
- [34] 黄荣, 徐应明, 黄青青, 等. 二种钾肥对海泡石钝化修复镉污染土壤效应影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1249-1256. HUANG R, XU Y M, HUANG Q Q, et al. Effect of potassium fertilizers on immobilization remediation of Cd-polluted soils using sepiolite[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(8): 1249-1256.
- [35] WEGGLER K, MCLAUGHLIN M J, GRAHAM R D. Effect of chloride in soil solution on the plant availability of biosolid-borne cadmium[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33: 496-504.
- [36] TU C, ZHENG C R, CHEN H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 133-138.
- [37] ELOUEAR Z, BOUHAMED F, BOUJELBEN N, et al. Application of sheep manure and potassium fertilizer to contaminated soil and its effect on zinc, cadmium and lead accumulation by alfalfa plants[J]. *Sustainable Environment Research*, 2016, 26(3): 131-135.
- [38] TAO S, CHEN Y J, XU F L, et al. Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 447-454.
- [39] 曹雪莹, 谭长银, 谢雨呈, 等. 土壤pH和Cd全量对伴矿景天修复效率的影响[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1604-1612. CAO X Y, TAN C Y, XIE Y C, et al. Effect of soil pH and total cadmium concentration of soil on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(9): 1604-1612.
- [40] ZHAO Z Q, ZHU Y G, LI H Y, et al. Effects of forms and rates of potassium fertilizers on cadmium uptake by two cultivars of spring wheat (*Triticum aestivum*, L.)[J]. *Environment International*, 2003, 29: 973-978.
- [41] CHIBUIKE G U, OBIORA S C. Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods[J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014: 1-12.
- [42] 薛培英, 张桂银, 褚卓栋, 等. 钾肥对小麦根际土壤镉的吸收及其植物毒性的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1424-1428. XUE P Y, ZHANG G Y, CHU Z D, et al. Effect of potassium fertilizers on the absorption of cadmium in rhizosphere soils and its phytotoxicity[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1424-1428.
- [43] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 953-961. ZHAO J, FENG W Q, QIN Y S, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 953-961.
- [44] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻镉吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2952-2958. SHEN L B, WU L H, TAN W N, et al. Effects of *Sedum plumbizincicola* - *Oryza sativa* rotation and phosphate amendment on Cd and Zn uptake by *O. sativa*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2952-2958.
- [45] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 182-188. CHEN S, SUN L N, SUN T H, et al. Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 182-188.
- [46] SCHMIDT U. Enhancing phytoextraction: The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(6): 1939-1954.