

重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子 间作和轮作修复*

居述云^{1,2} 汪洁^{2,3} 宓彦彦^{2,4} 李柱² 陈亚华^{1**} 吴龙华² 骆永明^{2,5}

(¹南京农业大学生命科学院, 南京 210095; ²中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; ³中国科学院大学, 北京 100049; ⁴湖南师范大学, 长沙 410012; ⁵中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

摘要 在重金属污染土壤上开展田间微区试验, 研究伴矿景天/小麦间作、茄子轮作种植模式下锌镉超积累植物伴矿景天对当季小麦和后茬茄子生长及重金属吸收的影响, 探索边生产边修复的可行性。结果表明: 间作处理下小麦籽粒、茄子植物体和伴矿景天地上部生物量均无明显影响; 麦季间作伴矿景天能显著降低小麦籽粒中重金属浓度, 间作小麦籽粒与单作相比降低了 52.4%; 麦季间作伴矿景天也有效降低了后茬茄子对重金属的吸收, 茄子果实中镉浓度显著低于单作; 作物在与伴矿景天间作的情况下也能显著减少土壤中重金属浓度, 其中间作处理全量镉比对照降低了 24.3%, 达到了较好的修复效果。因此, 麦季间作伴矿景天既能有效减少污染土壤中重金属浓度, 又能降低小麦及后茬茄子的重金属污染风险, 为土壤修复与生产兼顾的修复模式提供理论支持。

关键词 植物修复; 农作物; 重金属; 间作; 轮作

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)8-2181-06

Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena*. JU Shu-yun^{1,2}, WANG Jie^{2,3}, SEHN Li-bo^{2,4}, LI Zhu², CHEN Ya-hua^{1**}, WU Long-hua², LUO Yong-ming^{2,5} (¹College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴Hunan Normal University, Changsha 410012, China; ⁵Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(8): 2181-2186.

Abstract: A field plot experiment was conducted to study the effect of *Sedum plumbizincicola* on metal uptake by an intercropping crop of *Triticum aestivum* and a following crop of *Solanum melongena* in the subsequent growing season from heavy metal polluted soil, and to explore potential cropping systems for simultaneous remediation of contaminated soils and production of agricultural crops. The results showed that in the intercropping treatment, there was no difference in biomass of *S. melongena* or *S. plumbizincicola*. Intercropping with *S. plumbizincicola* significantly decreased Cd concentrations in *T. aestivum* by 52.4% compared to the monoculture treatment, and metal concentrations in the following crop of *S. melongena* also decreased markedly. Compared to the control, soil total Cd concentration in the intercropping treatment declined by 24.3%, showing highly efficient Cd removal. These results suggest that a cropping system consisting of intercropping *S. plumbizincicola* and *T. aestivum* and then rotating with *S. melongena* might realize the combined benefits of phytoremediation of metal polluted soil and the simultaneous safe production of food.

Key words: phytoremediation; crops; heavy metals; intercropping; rotation.

* 国家高技术研究发展计划项目(2012AA101402-2)和国家自然科学基金项目(41325003)资助。

** 通讯作者 E-mail: yahuachen@njau.edu.cn

收稿日期: 2015-01-02 接受日期: 2015-04-20

在众多重金属污染土壤修复方式中,植物修复以其原位修复、成本低、不破坏土壤结构、不引起二次污染等优点表现出了广阔的市场前景(骆永明,1999;沈振国等,2000;Chaney *et al.*,1997;McGrath *et al.*,2003)。但是单独用超积累植物修复污染土壤需要时间长,采取吸收重金属少或运输到食用部位少的低积累作物与超积累植物同时种植,有可能在修复污染土壤的同时收获符合卫生标准的饲料或其他产品,成为一种不需要间断农业生产、较经济合理地处理利用方法(卫泽斌等,2005)。近年来,围绕边生产边修复的理念,植物间作修复技术的研究越来越多(宓彦彦,2013;能凤娇等,2013;张晓斌等,2013),但结果却不尽相同。李凝玉等(2008)研究7种作物与玉米间作后吸收重金属的结果发现,4种豆科作物大幅提高玉米对镉(Cd)的积累量,玉米草和籽粒苋则降低了玉米对Cd的积累。黑亮等(2007)研究发现,东南景天和玉米套种显著提高了超积累东南景天提取锌(Zn)和Cd的效率,而且生产出的玉米籽粒重金属含量符合食品和饲料卫生标准。叶菲(2007)在研究镉超积累植物油菜对小白菜生长环境净化效果及其机理时发现,油菜对Cd的积累作用减轻了Cd对小白菜的毒害作用。

伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)是近年发现的一种具有锌镉超积累能力的景天科植物新种(吴龙华等,2006;刘玲等,2009;Wu *et al.*,2013),并建立了多种修复模式(沈丽波等,2010;胡鹏杰等,2011;唐明灯等,2012;任婧等,2013)。茄子(*Solanum melongena*)是最常食用的蔬菜之一,它分布广,生长快,产量高,在中国栽培面积约4500 hm²(李植良等,2006)。茄子根是典型的直根型、深根系,与伴矿景天不同,并且相对于叶菜类,果菜类对重金属的生物富集系数较低(江解增等,2006)。目前已有少量对伴矿景天与作物间作的报道。赵冰等(2011)研究发现,伴矿景天与水稻轮作种植可吸取修复污染土壤中有害重金属,同时降低后茬水稻的食物链风险;但伴矿景天与小麦(*Triticum aestivum*)等须根型植物间作时,由于2种植物的根系生长层交叉,存在明显的养分竞争关系,且由于伴矿景天根系对土壤中重金属的活化作用,可能导致与之间作的小麦的重金属吸收性增大。而任婧(2012)将伴矿景天与芹菜间作5茬发现,间作对伴矿景天地上部Zn、Cd浓度无明显影响,但显著降低了芹菜地上部Zn、Cd浓度,且随着收获次数的增加,芹菜地上部Zn浓

度有增加趋势,Cd浓度则呈降低趋势。小麦是一种温带长日照植物,适应范围较广,与伴矿景天间作不仅可以提高土地利用效率、减少光能的浪费,而且有望在污染土壤进行安全生产。

间作、轮作是中国传统的农业措施之一,已有较多研究(黄益宗等,2006;金立敏等,2009;向言词等,2010;刘领,2011)。选择茄子与小麦轮作是因为它们具有根系深浅不同,需肥特性差异大,互不传染病虫害等特点,且小麦与茄子轮作模式下麦季间作伴矿景天对小麦及后茬茄子生长及重金属吸收性的影响尚未有报道。本研究拟通过田间微区试验探明麦季间作伴矿景天对小麦生长及重金属吸收性的影响,该间作模式对后茬茄子生长及重金属积累性的影响,以期获得符合国家食品安全标准的粮食,同时减少对后茬蔬菜的污染风险,为田间试验实现边生产边修复模式提供数据支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

试验地位于浙江省杭州郊区,属于亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候,全年温暖湿润,年平均温度16℃,年平均降水量1425 mm,集中于5月和6月。试验地为农田土壤,由于经过处于上风向的金属冶炼厂的长期污水灌溉,导致土壤多种重金属超标,Cd、Zn浓度分别为 3.04 ± 0.11 和 1299 ± 96 mg·kg⁻¹,超过国家土壤环境质量三级标准(Cd 1.00 mg·kg⁻¹;Zn 500 mg·kg⁻¹) 204%、160%,为重污染土壤。

1.2 供试材料

供试伴矿景天采自浙江杭州郊区,挑选大小一致、生长健壮植株,摘取生长相似的枝条进行扦插种植。同时预留伴矿景天枝条,经自来水、去离子水冲洗干净,105℃杀青30 min,80℃下烘干至恒重,测定其干重及Zn、Cd浓度,以此作为定植前伴矿景天重金属吸收量(干重×重金属浓度)。茄子幼苗中重金属浓度极低,因而本研究忽略不计。小麦品种为镇麦5号,购自江苏省农业科学院,直接播种。试验所用土壤为农田土壤,其基本理化性质为:土壤pH 7.24,有机碳含量为29.1 g·kg⁻¹,阳离子交换量(CEC)为11.8 cmol(+)·kg⁻¹,全量N、P、K分别为2.21、0.22和22.9 g·kg⁻¹。

1.3 田间微域试验设计

试验设4个处理:(1)对照(CK);(2)伴矿景天

单作(Sp);(3)小麦-茄子轮作(Ta-Sm);(4)伴矿景天/小麦间作-茄子轮作(Ta/Sp-Sm)。将直径40 cm硬质塑料桶埋于土中,高于地表10 cm,桶中填满土。每个处理4次重复,随机排列。单作处理伴矿景天、小麦和茄子每盆分别种植6、6和3株,间作种植伴矿景天的处理每盆伴矿景天、小麦和茄子分别种植3、3和1株。

2012年6月9日移栽伴矿景天和茄子,同日播种小麦,出苗1周后定苗。于2013年5月22日收获伴矿景天地上部,2013年6月29日收获小麦地上部,茄子根据果实成熟时间分别于2013年6月19日、8月5日、8月28日采集3批茄子果实,并于9月26日收取茄子植株。于2013年9月26日收获全部植物样后采集表层0~15 cm土壤。收获的植物地上部样品分别用自来水,去离子水洗净,105℃杀青30 min,85℃烘干至恒重称干重,其中景天洗净擦干后称鲜重。植物样品用不锈钢粉碎机磨碎,备测,同一株茄子不同批次收取的果实作为一个样品,茄子茎秆和根分开处理。采集的土壤样品经风干后混匀,磨碎,过2和0.15 mm尼龙筛。

1.4 重金属分析

全量分析:分别称取植物和土壤样品0.5和0.2 g,植物和土壤样品经高压罐分别用 H_2O_2 - HNO_3 (2 mL: 6 mL)和 HCl - HNO_3 (5 mL: 5 mL)消解,定容,过滤。土壤有效态分析:采用 $1 mol \cdot L^{-1} NH_4OAc$ (pH 7.0)提取,土液比1:5,240 r·min⁻¹振荡16 h后,过滤。

原子吸收分光光度计[Varian SpectraAA220FS(火焰)、220Z(石墨炉)]测定滤液中Zn、Cd浓度。测定过程所用试剂均为优级纯,用国家参比物质(GBW 10043和GBW 10014)和空白进行分析质量控制,标准样品测定结果在允许误差范围。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2010软件和SPSS 16.0进行相关数据统计,用最小显著差异法(LSD)进行差

异显著性比较, $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 伴矿景天地上部、小麦及茄子植物体生物量

表1为收获后伴矿景天、小麦地上部及茄子植物体的生物量。间作处理使小麦秸秆生物量相比单作降低11.2%,但对伴矿景天、茄子和小麦籽粒的生物量均无显著影响。说明小麦-伴矿景天间作、茄子轮作连续种植模式既能保证伴矿景天正常生长,又不会使小麦籽粒减产,且对后茬茄子生长无明显影响。

2.2 伴矿景天地上部锌镉浓度及吸收量

间作处理下伴矿景天地上部Zn浓度为 $1.75 \pm 0.18 g \cdot kg^{-1}$,较单作处理的 $2.39 \pm 0.23 g \cdot kg^{-1}$ 降低了26.8%,Cd浓度则无显著差异。但与小麦间作则会导致伴矿景天地上部Zn、Cd吸收量分别从单作的 230 ± 30 和 $4.24 \pm 0.28 mg \cdot pot^{-1}$ 降低到 153 ± 20 和 $3.08 \pm 0.48 mg \cdot pot^{-1}$,下降幅度分别为33.3%、27.4%。说明间作处理下的种间竞争作用使伴矿景天地上部的重金属吸收性受到了不同程度的影响。

2.3 小麦地上部锌镉浓度及吸收量

从图1可知,伴矿景天间作对小麦秸秆和籽粒中Zn浓度无明显影响,且地上部Zn浓度较高,籽粒中Zn浓度超过 $50 mg \cdot kg^{-1}$ 。间作超积累植物显著降低了小麦籽粒中的Cd浓度,相比单作降低52.4%。根据《食品中污染物限量标准》(2012),小麦籽粒Cd浓度仍高于标准($0.1 mg \cdot kg^{-1}$),尚不能食用。间作处理下的小麦秸秆Zn、Cd吸收量相比单作略有下降,但差异不显著。

2.4 茄子地上部锌镉浓度

Zn在茄子植株体内浓度分布趋势为根>茎叶,且不同处理下茄子植物体Zn浓度均无显著性差异(表2)。Cd的分布情况则不同,茄子体内Cd浓度为茎叶>根,且间作处理下茄子中Cd均低于单作处理,其中茄子果实中Cd较单作处理下降35.7%。根

表1 小麦、伴矿景天地上部及茄子生物量

Table 1 Biomass of *Triticum aestivum*, *Sedum plumbizincicola* shoots and *Solanum melongena* plants

处理	伴矿景天 ($kg \cdot pot^{-1}$ FW)	茄子($g \cdot pot^{-1}$ FW)			小麦($g \cdot pot^{-1}$ DW)	
		茎叶	根	果实	秸秆	籽粒
Sp	1.51 ± 0.49 a	-	-	-	-	-
Ta-Sm	-	28.4 ± 4.4 a	6.78 ± 1.0 a	23.4 ± 4.7 a	30.4 ± 0.9 a	6.80 ± 1.23 a
Ta/Sp-Sm	1.34 ± 0.30 a	22.5 ± 2.2 a	6.07 ± 0.6 a	22.5 ± 3.3 a	27.0 ± 0.8 b	7.51 ± 0.96 a

所有数据均以平均值±标准差表示。同列数据中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。-表示无相应植物种植。Sp为伴矿景天单作;Ta-Sm为小麦-茄子轮作;Ta/Sp-Sm为伴矿景天/小麦间作-茄子轮作。

据《食品中污染物限量标准》，茄子果实 Cd 限量 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$ ，所以尚不能食用。如供试土壤为重金属污染程度较低，则间作超积累植物有望实

现茄子等果菜类作物的安全生产。

2.5 土壤中锌镉浓度变化

图2为植物收获后土壤中全量和有效态 Zn、Cd

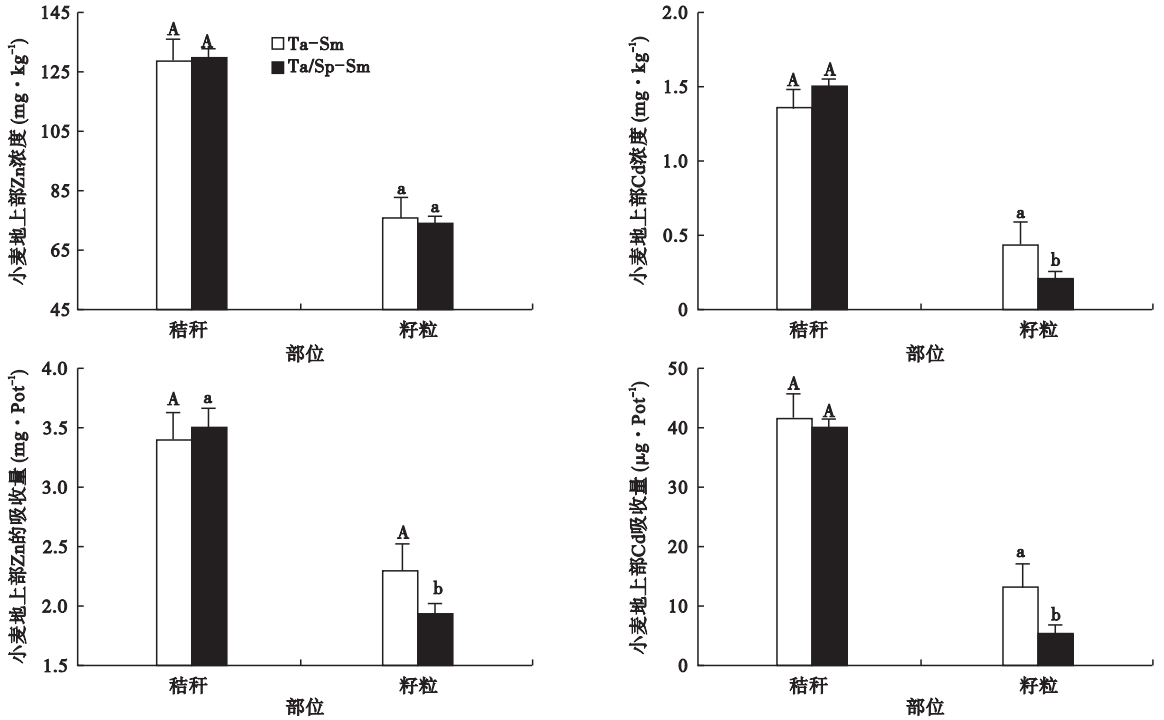


图1 小麦地上部 Zn、Cd 浓度及吸收量

Fig.1 Concentration and uptake of Zn and Cd in *Triticum aestivum* shoots

不同大、小写字母表示同一种样品在不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$), Ta-Sm 为小麦-茄子轮作; Ta/Sp-Sm 为伴矿景天/小麦间作-茄子轮作。

表2 茄子植物体内锌镉浓度变化

Table 2 Concentration of Zn and Cd in *Solanum melongena* plants

处理	茎叶 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		根 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		果实 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$)	
	Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd
Ta-Sm	244±13 a	2.90±0.29 a	331±21 a	1.74±0.14 a	2.69±0.13 a	0.14±0.01 a
Ta/Sp-Sm	231±18 a	2.07±0.25 b	268±21 ab	1.20±0.12 b	2.47±0.18 a	0.09±0.01 b

同列数据中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Ta-Sm 为小麦-茄子轮作; Ta/Sp-Sm 为伴矿景天/小麦间作-茄子轮作。

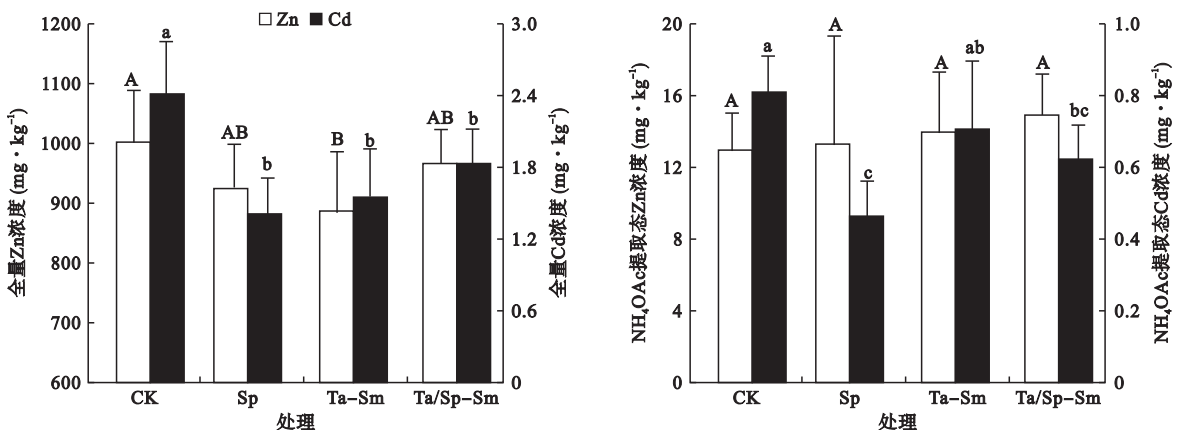


图2 土壤中全量及 NH_4OAc 提取态锌镉浓度

Fig.2 Concentrations of total and NH_4OAc extractable Zn and Cd in soils

不同大、小写字母表示同一种样品在不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。Sp 为伴矿景天单作; Ta-Sm 为小麦-茄子轮作; Ta/Sp-Sm 为伴矿景天/小麦间作-茄子轮作。

浓度。除小麦-茄子轮作处理下全量 Zn 低于对照外,其余不同处理下 Zn 浓度均无显著差异。土壤 Cd 的浓度变化则较为明显,全量 Cd 均显著低于对照,伴矿景天单作处理、小麦-茄子轮作处理、伴矿景天间作小麦并与茄子轮作处理,全量 Cd 较对照的下降幅度分别为 42.0%、35.6%、24.3%。有效态 Cd 除小麦-茄子轮作处理外,伴矿景天单作处理及伴矿景天间作小麦并与茄子轮作处理分别较对照降低了 43.1% 和 24.0%。

3 讨论

3.1 修复模式对植物生物量及锌镉浓度的影响

间作系统中由于不同作物竞争养分的能力不同,不同作物吸收养分峰值的时间不同,成熟期不同,不同作物扎根深度不同和根系分布不同,因而可以利用不同土壤层次、区域和不同形态的养分,降低种间的营养竞争,促进间作作物养分利用优势的形成(肖靖秀等,2005)。本研究表明,小麦和伴矿景天间作对小麦籽粒和伴矿景天地上部生物量相比单作无明显影响,但小麦秸秆生物量有所减小。说明伴矿景天间作小麦后,其在生长过程中根系与小麦根系争夺养分,致使两者出现竞争(Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001),影响了小麦秸秆的生长。这与赵冰(2011)将伴矿景天与小麦间作于水稻土、潮土和黑土上,3 种土壤上间作处理均增加了小麦秸秆和籽粒的生物量的研究结果并不完全一致,说明种间竞争能力可能也与土壤性质有关。不同于小麦和大多数的蔬菜,茄子作为深根系作物可忽略养分竞争现象,本研究结果也印证了这一点。

与伴矿景天间作使小麦籽粒中 Cd 浓度及 Zn、Cd 吸收量均显著低于单作处理,且茄子体内 Cd 浓度也表现为间作处理显著降低。说明伴矿景天的竞争性吸收有效地缓减了小麦的 Zn、Cd 污染风险,同时也降低了后茬茄子对 Cd 的吸收。这与任婧(2012)的研究结果一致,间作伴矿景天使小麦籽粒中 Cd 浓度降低 52.4%,显著低于小麦单作处理。玉米和东南景天间作,使玉米籽粒及茎叶中 Zn、Cd 浓度下降,得到了重金属含量符合食品和饲料卫生标准的玉米籽粒(Liu *et al.*, 2005; 黑亮等, 2007; Wu *et al.*, 2007)。

3.2 修复模式对土壤锌镉浓度的影响

植物对与其间作的超积累植物重金属吸收的影响因植物的种类而异(蒋成爱等, 2009)。安玲遥

(2012)认为,植物可通过根系分泌物、土壤微生物、土壤酶活性、土壤 pH 值等多种方式影响植物对重金属的吸收,对于间套作如何影响植物对重金属的吸收还有待进一步研究。王激清等(2004)将印度芥菜与油菜间作,在添加 CdCO₃ 的土壤上,印度芥菜活化了土壤中部分不溶性的 Cd,增加了油菜对 Cd 的吸收,说明 2 种植物间作的互作作用对植物重金属吸收性的影响是多样的。本研究表明,植物根系均有活化土壤 Zn、Cd 的作用,且能有效降低土壤重金属浓度。其中,间作处理和伴矿景天单作处理的土壤提取态 Cd 较对照均有显著降低,说明间作处理同样具有修复 Cd 污染土壤的作用,同时作物在与伴矿景天间作的情况下对 Cd 的吸收量更低,能增加作物的安全性。黑亮等(2007)研究发现,超积累植物东南景天和玉米半透膜隔开的套种处理中,东南景天一侧的污泥水溶态较低,而玉米一侧的污泥中水溶态浓度保持较高,玉米根系对污泥具有明显的酸化作用,而东南景天单独种植对污泥无显著的酸化作用,表明超积累植物并不是依赖于根际酸化作用来实现对重金属的超积累,而是通过玉米根系降低溶液 pH,从而增加土壤溶液中 Zn、Cd 浓度,促进东南景天吸收重金属。Whiting 等(2001)将遏蓝菜(*Noccaea caerulea*)与其相近品种 *N. arvanse* 混作,土壤施用 ZnO 处理,当根系可以自由接触时, *N. arvanse* 的生物量可增加 30%,同时其地上部 Zn 浓度降低 2/3。Gove 等(2002)将遏蓝菜与普通大麦混作,发现间作处理大麦地上部 Cd 浓度比单作高 2.4 倍,相反降低了对 Zn 的吸收,且超积累植物改变了根际重金属生物有效性。蒋成爱等(2009)在植物收获后对土壤进行 CaCl₂ 浸提发现,空白和植物单种处理下土壤有效态重金属浓度显著高于东南景天间作处理。本研究结果与上述研究不完全一致,表明不同的修复模式和不同植物的修复效果可能各不相同,其原因有待进一步探明。

4 结论

小麦-伴矿景天间作、茄子轮作种植,对小麦籽粒、茄子和伴矿景天地上部生物量均无明显影响;小麦与伴矿景天间作能显著降低麦粒重金属浓度,减少小麦的重金属积累风险,也有效降低了后茬茄子的重金属吸收性。因此,麦季间作伴矿景天既能降低土壤中重金属浓度,又能减少小麦重金属安全风险,并有降低后茬茄子果实中重金属浓度的趋势,为

土壤修复与生产并行的模式提供理论支持。

参考文献

- 安玲遥. 2012. 作物间作对重金属吸收的影响及其机制的研究(硕士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 黑亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 2007. 东南景天和玉米套种对Zn污染污泥的处理效应. 环境科学, **28**(4): 258-858.
- 胡鹏杰, 吴龙华, 骆永明. 2011. 重金属污染土壤及场地的植物修复技术发展与应用. 环境监测管理与技术, **23**(3): 39-42.
- 黄益宗, 朱永官, 胡莹, 等. 2006. 玉米和羽扇豆、鹰嘴豆间作对作物吸收积累Pb、Cd的影响. 生态学报, **26**(5): 1478-1485.
- 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 2009. 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, **29**(9): 985-990.
- 江解增, 许学宏, 余云飞, 等. 2006. 蔬菜对重金属生物富集程度的初步研究. 中国蔬菜, (7): 8-11.
- 金立敏, 成海钟, 朱晓国, 等. 2009. 欧洲水仙与景天类植物间作模式的探讨. 安徽农业科学, **37**(9): 4012-4013.
- 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 等. 2008. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响. 应用生态学报, **19**(6): 1369-1373.
- 骆永明. 1999. 金属污染土壤的植物修复. 土壤, **31**(5): 261-265.
- 李植良, 黎振兴, 黄智文, 等. 2006. 我国茄子生产和育种现状及今后育种研究对策. 广东农业科学, (1): 24-26.
- 刘领. 2011. 种间根际相互作用下植物对土壤重金属污染的响应特征及其机理研究(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 刘玲, 吴龙华, 李娜, 等. 2009. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响. 环境科学, **30**(11): 3422-3426.
- 宓彦彦. 2013. 重金属污染土壤的植物联合修复及其农业综合利用技术研究(硕士学位论文). 长沙: 湖南师范大学.
- 能凤娇, 吴龙华, 刘鸿雁, 等. 2013. 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, **24**(5): 1428-1434.
- 任婧. 2012. 污泥土地处置土壤镉污染及植物间作修复研究(硕士学位论文). 贵阳: 贵州大学.
- 任婧, 吴龙华, 刘鸿雁, 等. 2013. 调控剂对镉污染土壤植物修复效率及后茬蔬菜重金属吸收的影响. 土壤, **45**(2): 233-238.
- 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 2010. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻镉吸收的影响. 应用生态学报, **21**(11): 2952-2958.
- 沈振国, 陈怀满. 2000. 土壤重金属污染生物修复的研究进展. 农村生态环境, **16**(2): 39-44.
- 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 2012. 轮间作对伴矿景天和苜蓿生物量及Cd含量的影响. 广东农业科学, (13): 35-37.
- 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 2004. 印度芥菜和油菜互作对各自吸收土壤中难溶态镉的影响. 环境科学学报, **24**(5): 890-894.
- 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪. 2005. 利用套种和混合添加剂修复重金属污染土壤. 农业环境科学学报, **24**(6): 1262-1263.
- 吴龙华, 周守标, 毕德, 等. 2006. 中国景天科植物一新种——伴矿景天. 土壤, **38**(5): 632-633.
- 向言词, 官春云, 黄璜, 等. 2010. 作物间作对油菜积累镉与铅的影响. 水土保持学报, **24**(3): 50-55.
- 肖靖秀, 郑毅. 2005. 间套作系统中作物的养分吸收利用与病虫害控制. 中国农学通报, **21**(3): 151-154.
- 叶菲. 2007. 镉超积累植物油菜对小白菜生长环境净化效果及其机理(硕士学位论文). 长沙: 湖南大学.
- 张晓斌, 梁宵, 占新华, 等. 2013. 菲污染土壤黑麦草/苜蓿间作修复效应. 环境工程学报, **7**(5): 1974-1978.
- 赵冰, 沈丽波, 程苗苗, 等. 2011. 麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及镉吸收性的影响. 应用生态学报, **22**(10): 2725-2731.
- Chaney RL, Malik M, Li YM, et al. 1997. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, **8**: 279-284.
- Gove B, Hutchison JJ, Young SD, et al. 2002. Uptake of metals by plants sharing a rhizosphere with the hyperaccumulation *Thlaspi caerulescens*. *International Journal of Phytoremediation*, **4**: 267-281.
- Haugaard-Nielsen H, Ambus P, Jesen ES. 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Research*, **70**: 101-109.
- Liu XM, Wu QT, Banks MK. 2005. Effect of simultaneous establishment of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on heavy metal accumulation in plants. *International Journal of Phytoremediation*, **7**: 43-53.
- McGrath SP, Zhao FJ. 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, **14**: 277-282.
- Whiting SN, Leake JR, McGrath S, et al. 2001. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of co-cropped *Thlaspi arvense*. *Environment Science and Technology*, **35**: 3237-3241.
- Wu LH, Liu YJ, Zhou SB, et al. 2013. *Sedum plumbizincicola* X.H. Guo et S.B. Zhou ex L.H. Wu (Crassulaceae): A new species from Zhejiang Province, China. *Plant Systematics and Evolution*, **299**: 487-498.
- Wu QT, Wei ZB, Ou YY. 2007. Phytoextraction of metal contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting. *Water, Air, and Soil Pollution*, **180**: 131-139.

作者简介 居述云,男,1988年生,硕士研究生,从事土壤重金属污染与植物修复研究。E-mail: 2012116007@njau.edu.cn
责任编辑 魏中青