

# 污泥有机肥长期农用污染土壤的伴矿景天吸取修复

高文娅<sup>1,2</sup>, 邓林<sup>1,2</sup>, 李柱<sup>2</sup>, 吴龙华<sup>2</sup>, 刘鸿雁<sup>1</sup>, 骆永明<sup>2,3</sup>

1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025
2. 南京土壤研究所, 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008
3. 烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003

**摘要** 在污泥有机肥长期农用土壤上种植伴矿景天,与常规的玉米-小麦-胡萝卜轮作处理比较,田间试验探讨了连续植物修复效率和污泥有机肥长期施用导致的重金属污染土壤上农产品的污染风险。结果表明,长期污泥农用土壤上农作物和超积累植物生长良好,与未施用污泥肥料处理相比,继续施用条件下“玉米-小麦-胡萝卜”轮作作物中Zn、Cd浓度有所上升,且小麦、胡萝卜中Cd浓度均超过国家食品安全标准。种植Zn、Cd超积累植物伴矿景天吸取修复处理下土壤中重金属浓度显著降低,土壤全量Cd下降56.0%;继续施用污泥条件下土壤全量Cd下降仍可达48.4%。证明在施用污泥条件下,种植伴矿景天和农作物,能够实现污泥安全处置、促进农作物生长和污染重金属高效吸取修复的3重目标。

**关键词** 污泥有机肥;伴矿景天;重金属污染;植物修复

污泥有机肥含有大量有机质和氮磷钾等植物生长所需的营养元素,对作物生长起到良好的增产效果,同时也可改善土壤理化性状,因此农用已成为一种有效的污泥处理方式<sup>[1-3]</sup>。但污泥农用同时也会造成有毒有害元素或物质的积累并产生危害,倍受国内外学者关注<sup>[4-7]</sup>,马学文等<sup>[8]</sup>的研究显示,施用堆肥污泥后土壤和植物中的一些重金属如Cd、Pb等的浓度显著增加。

植物修复技术因其绿色环保等优点,被广泛用于修复污泥污染土壤。黄庆等<sup>[9]</sup>的研究表明,黄花、红花和白花茉莉品种具有明显不同的锌积累特征和修复污泥锌污染的能力。黑亮等<sup>[10]</sup>利用超积累植物东南景天与玉米单/套作修复污泥污染土壤,较单作处理显著提高了Zn、Cd的植物吸取修复效率,而且生产出的玉米籽粒也符合食品和饲料的重金属卫生标准。对污泥不当施用或长期农用地土壤重金属污染等问题,尚未有农艺与植物吸取修复联合应用的田间试验研究,污泥农用引起的土壤重金属污染也尚无高效的去除修复技术应用案例。伴矿景天是Zn、Cd超积累植物<sup>[11,12]</sup>,具有生物量大、生长速度快、Zn和Cd吸收积累能力强等优点,在Cd、Zn污染土壤修复方面具有广泛应用前景,也已有利用伴矿景天对污泥农用污染土壤进行盆栽修复的研究<sup>[13]</sup>,但在田间条件下,对污泥农用土壤进行超积累植物修复和作物生产等研究则未有报道。因此,有必要在大田开展污泥土地合理施用及

修复研究。

本研究选择污泥长期农用导致的Zn、Cd污染土壤,种植伴矿景天或常规的玉米-小麦-胡萝卜轮作,并设置持续施用污泥肥料的处理,连续3年田间微区试验探讨植物、土壤Zn和Cd浓度变化,对污泥农用的可行性和植物吸取修复进行分析。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自浙江宁波慈溪某长期施用污泥有机肥的菜地,采集0~15 cm表层土壤,经风干、混匀,运至浙江杭州试验基地内,备用。土壤基本理化性质:pH值6.70,有机质62.1 g·kg<sup>-1</sup>,全量氮、磷、钾分别为2.86、4.36和29.4 g·kg<sup>-1</sup>;全量Cd、Zn分别为0.64和448 mg·kg<sup>-1</sup>;醋酸铵提取态Cd、Zn分别为80.0 μg·kg<sup>-1</sup>和10.6 mg·kg<sup>-1</sup>。供试玉米、小麦和胡萝卜种子购自南京秋田种业研究所,供试伴矿景天幼苗采自浙江淳安,供试污泥有机肥购自浙江慈溪。

### 1.2 试验设计

试验在浙江杭州郊区进行,将混匀的污染土壤平铺于预先埋设好的PVC框内,框四周埋入土壤10 cm,污泥污染土壤为30 cm厚。试验共设5个处理,分别用A、B、C、D、E表示。A对照:不种任何作物,定期除草,将割掉的草放在原微区中;

收稿日期:2015-08-04;修回日期:2015-11-16

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA101402-2)

作者简介:高文娅,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染与修复,电子信箱:916759186@qq.com

引用格式:高文娅,邓林,李柱,等.污泥有机肥长期农用污染土壤的伴矿景天吸取修复[J].科技导报,2016,34(2):241-246;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.041

B: 小麦-玉米-胡萝卜轮作; C: 施污泥, 小麦-玉米-胡萝卜轮作, 施污泥 300 kg(干基)·亩<sup>-1</sup>·次<sup>-1</sup>(相当于 500 g·m<sup>-2</sup>·次<sup>-1</sup>), 每年 5 月、9 月小麦、玉米收获后各施 1 次; D: 种植伴矿景天; E: 施污泥, 种植伴矿景天, 施污泥 300 kg(干基)·亩<sup>-1</sup>·次<sup>-1</sup>(相当于 500 g·m<sup>-2</sup>·次<sup>-1</sup>), 每年 5 月、9 月各施 1 次。小麦的行株距为 5 cm×5 cm, 萝卜的行株距为 10 cm×10 cm, 玉米的行株距为 30 cm×30 cm, 伴矿景天的行株距为 15 cm×15 cm。试验始于 2012 年 1 月, 2014 年 12 月结束。试验每处理 4 次重复, 每个微区面积 3(1.5×2.0) m<sup>2</sup>, 共 20 个微区, 总面积 60 m<sup>2</sup>。施加尿素 0.25 kg·微区<sup>-1</sup>·次<sup>-1</sup>, 每种作物种植季各施加 1 次。

### 1.3 样品采集与处理

试验过程中, 2013、2014 年 6 月各采集土壤样品 1 次, 采集 0~15 cm 表层土壤。地上部伴矿景天 2012、2013、2014 每年 8 月分别收获 1 次; 轮作农作物胡萝卜 2012、2014 年 10 月各收获 1 次, 2013 年因洪水未长; 小麦 2013、2014 年 5 月收获 1 次; 玉米 2012、2013、2014 年 8 月分别收获 1 次。玉米、小麦、胡萝卜和伴矿景天称取鲜重后, 分别用自来水、去离子水洗涤, 105℃杀青 30 min, 80℃烘至恒重, 称量, 粉碎, 备用。土壤样品采用 5 点混合取样, 风干、过 10 目及 100 目尼龙筛, 备用。

### 1.4 样品分析和测定

参照《土壤农化分析》对土壤理化性质: 含水量、土壤 pH

值、有机质、全氮、全磷、全钾进行测定, 结果以土壤烘干基计算, 土壤 Zn、Cd 全量采用 HCl-HNO<sub>3</sub>(优级纯, 体积比 1:1) 消化。植物 Zn、Cd 全量采用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(优级纯, 体积比 3:1) 消化, 原子吸收分光光度计(Varian SpectrAA 220FS(火焰)、220Z(石墨炉))测定 Zn、Cd 质量分数。采用国家标准参比物质(土壤: GBW07406; 植物: GBW07603)进行分析质量控制, 所用试剂均为优级纯, 标准样品测定结果均在允许范围内。

Zn、Cd 提取态采用 1 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAc(pH 值 7.0)按 1:5 的土液比连续震荡 16 h, 3000 r·min<sup>-1</sup>离心 5 min, 将上清液过滤, 用火焰原子吸收法测定 Zn、Cd 浓度。

### 1.5 数据处理与分析

采用 Execl 2007 和 SPSS 13.0 软件对数据进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同农作物的生物量变化

长期污泥农用土壤中农作物和超积累植物均能良好生长。随着试验年限的增加, 玉米-小麦-胡萝卜轮作处理中植物生物量差异不显著; 与未施用污泥肥料处理相比, 继续施用污泥肥料处理作物生物量有所增加, 但差异不显著(表 1)。

表 1 不同处理植物的生物量  
Table 1 Plant shoot biomass in different treatments (kg·plot<sup>-1</sup>)

处理代号	处理内容	植物	部位	2012 年	2013 年	2014 年
B	农作物轮作 不施污泥	玉米	秸秆	4.42±0.40a	4.09±0.79a	4.72±1.49a
			籽粒	1.46±0.30a	1.60±0.37a	1.89±0.27a
		小麦	秸秆	—	6.32±0.40a	7.48±0.91a
			籽粒	—	3.67±0.25a	4.39±0.25a
		胡萝卜	叶	2.46±0.36a	Δ	2.76±0.43a
			块茎	1.53±0.18a	Δ	2.30±0.33a
C	农作物轮作 施用污泥	玉米	秸秆	4.85±0.69a	4.55±1.06a	4.92±1.12a
			籽粒	1.79±0.37a	1.94±0.17a	2.01±0.23a
		小麦	秸秆	—	7.62±0.54a	8.38±0.53a
			籽粒	—	4.74±0.16a	5.05±0.37a
		胡萝卜	叶	2.78±0.31a	Δ	3.10±0.47a
			块茎	1.67±0.20a	Δ	2.81±0.51a
D	吸取修复 不施污泥	伴矿景天	0.67±0.03a	0.87±0.05a	0.81±0.06a	
E	吸取修复 施用污泥	伴矿景天	0.76±0.07a	0.72±0.09a	0.80±0.09a	

注: 数据表示为平均值±标准差。同行不同字母表示不同年限间差异显著(P<0.05)。“—”表示没有种植小麦; “Δ”表示遭遇洪水没有收获到胡萝卜。下表同。

## 2.2 不同处理植物中 Zn、Cd 浓度变化

与未施用污泥肥料处理相比,继续施用污泥肥料处理作物中 Zn、Cd 浓度均有所增加,但差异不显著,这可能是由于污泥增加了土壤中养分元素,促进植物生长,同时施用污泥也带入锌镉污染物(表2)。

表2 不同处理作物 Zn、Cd 浓度变化

Table 2 Zinc and cadmium concentrations in plant shoots in different treatments ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

处理		2012	2013	2014		
Zn	玉米	秸秆	142±22a	121±18a	141±9a	
		籽粒	46.2±4.3a	46.7±3.2a	25.0±3.1b	
	不施 污泥	小麦	秸秆	—	193±32a	137±39a
			籽粒	—	117±27a	94.3±22.0a
	农作物 轮作	胡萝卜	叶	128±9a	Δ	92.4±9.1b
			块茎	113±17a	Δ	56.4±14.0b
		玉米	秸秆	166±5a	164±23a	143±14b
			籽粒	44.7±2.5a	47.2±3.2a	26.0±3.0a
	施用 污泥	小麦	秸秆	—	198±44a	147±13a
			籽粒	—	153±25a	116±18a
		胡萝卜	叶	132±4a	Δ	102±9b
			块茎	134±27a	Δ	65.2±11.8b
吸取 修复	不施 污泥	伴矿景天	5989±1754a	4044±620a	4144±713a	
		施用 污泥	伴矿景天	5075±806a	4491±893a	4848±416a
Cd	玉米	秸秆	0.68±0.06a	0.64±0.11ab	0.48±0.05b	
		籽粒	0.03±0.01a	0.03±0.01a	0.03±0.04a	
	不施 污泥	小麦	秸秆	—	0.86±0.10a	0.43±0.10b
			籽粒	—	0.21±0.04a	0.17±0.07a
	农作物 轮作	胡萝卜	叶	0.48±0.21a	Δ	0.45±0.07a
			块茎	0.52±0.07a	Δ	0.32±0.12b
		玉米	秸秆	0.72±0.05a	0.70±0.20ab	0.55±0.14ab
			籽粒	0.04±0.01a	0.03±0.02a	0.01±0.00a
	施用 污泥	小麦	秸秆	—	0.88±0.18a	0.40±0.12b
			籽粒	—	0.21±0.12a	0.19±0.06b
		胡萝卜	叶	0.66±0.17a	Δ	0.50±0.15b
			块茎	0.60±0.13a	Δ	0.32±0.10b
吸取 修复	不施 污泥	伴矿景天	17.6±3.3a	11.2±2.3a	13.0±3.9a	
		施用 污泥	伴矿景天	16.9±3.7a	10.3±0.9a	15.3±3.7a

随着处理年限的增加,玉米-小麦-胡萝卜轮作处理中土壤 Zn、Cd 浓度有所降低,但差异不显著,这可能是由于植物吸收带走了土壤中的部分 Zn、Cd,从而降低作物对 Zn、Cd 的吸收。但小麦籽粒和胡萝卜果实中 Cd 的平均浓度分别达到  $0.19\pm 0.01$  和  $0.44\pm 0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,仍超过了  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的国家食品的安全限值(GB 2762—2012)<sup>[14]</sup>。

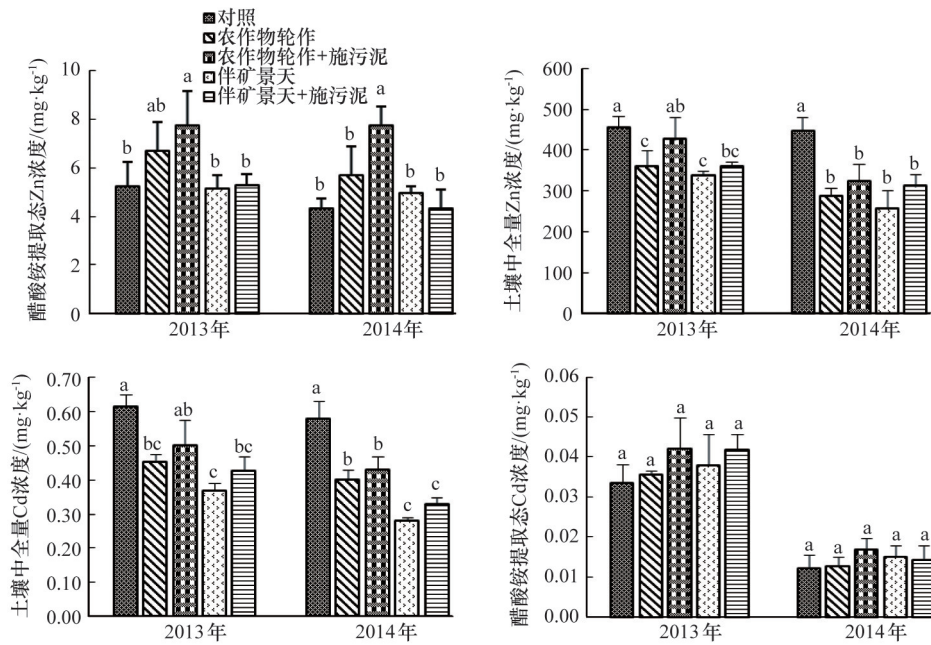
长期污泥农用导致农作物中 Zn、Cd 浓度增加,小麦、胡萝卜的 Cd 浓度均超过国家食品安全标准。因此,污泥农用在增加农作物产量的同时,也给农业生产带来了风险。利用超积累植物伴矿景天对这类污染土壤进行修复,伴矿景天生长良好且不同年际间差异不显著(表1)。伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度要远高于玉米、小麦和胡萝卜等农作物。随着处理年限的增加,继续施用污泥与否对伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度无显著影响,说明污泥农用对伴矿景天的 Zn、Cd 吸取修复无明显影响。

## 2.3 不同处理污染土壤 Zn、Cd 浓度变化

与未种任何植物的对照土壤相比,种植农作物或伴矿景天均使土壤中 Zn、Cd 浓度显著降低,且伴矿景天吸取修复的降幅显著大于农作物轮作处理(图1)。至2014年,种植伴矿景天处理土壤 Cd 浓度已从  $0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  降到  $0.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,降低效率达 56.0%。而每年继续施用污泥肥料处理的土壤中 Zn、Cd 浓度降至  $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤全量 Cd 仍下降了 48.4%。2012 年土壤的醋酸铵提取态 Zn、Cd 浓度分别为  $10.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,醋酸铵提取态 Zn、Cd 浓度随修复年限增加而降低,也即土壤中有效 Zn、Cd 浓度依次降低。各处理醋酸铵提取态 Zn 浓度显著高于对照,但醋酸铵提取态 Cd 浓度与对照无显著差异。

## 3 讨论

由于污泥含有很高的有机质以及植物必须的大量及微量营养元素,可为植物生长提供养分,增加土壤有机质,因此适量施用能促进各种蔬菜、小麦、水稻、玉米等生长<sup>[15-17]</sup>。在长期污泥农用土壤上进行普通农作物的栽培试验,发现在该污染土壤上玉米-胡萝卜-小麦均能很好地生长,且继续施用污泥肥料对作物的生长无显著不良影响,再次证明了污泥农用的可行性。与对照相比,农作物轮作处理显著降低了土壤中 Zn、Cd 浓度,说明土壤中重金属有一部分被农作物吸收和带走。继续施用污泥肥料使玉米-小麦-胡萝卜轮作处理中植物的 Zn、Cd 负荷更高、风险更大,其中小麦籽粒和胡萝卜果实中 Cd 的平均浓度分别达到  $0.19\pm 0.01$  和  $0.44\pm 0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均超过了国家食品安全限值( $0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。肖玲等<sup>[18]</sup>研究表明,小麦对 Zn、Cd 的吸收能力较强,容易转移到茎叶中。宋波等<sup>[19]</sup>研究发现,小白菜、辣椒、茄子、萝卜和大白菜 Cd 富集系数较高,其抗 Cd 污染能力较弱,本试验结果与之一致。污泥农工会增加土壤及作物中重金属浓度<sup>[20]</sup>,由此可见,污泥农用在增加农作物产量的同时,也增加了农作物中的



不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图1 不同处理下土壤中全量和醋酸铵提取态Zn、Cd浓度变化

Fig. 1 Total zinc and NH<sub>4</sub>Ac extractable cadmium concentrations in different treatments

Zn、Cd浓度,给农作物安全生产带来风险,限制了污泥大量农用的前景。

因此,研发有效的生物修复技术以去除污泥长期农用地土壤中的重金属,恢复土壤的良好生态系统,是实现区域农业安全生产的重要条件。重金属植物修复因其具有安全、高效、经济和环境友好等优点已成为世界土壤污染修复的热点<sup>[21]</sup>。对污泥有机肥长期农用的重金属污染土壤开展超积累植物伴矿景天长期吸取修复,土壤中Zn、Cd浓度均显著下降,其中种植伴矿景天处理土壤的Cd浓度由0.64降至0.28 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤全量Cd下降56.0%,对土壤Cd的去除修复效率远高于农作物。而在模拟现实生产时,继续施用污泥对植物生长并未有明显影响,但农作物的重金属浓度明显升高、污染风险增大。超积累植物修复处理能降低土壤中Zn、Cd浓度,土壤全量Cd下降48.4%,证明伴矿景天修复适用于污泥长期农用导致的Zn、Cd污染土壤。由伴矿景天生物量及地上部Cd浓度计算得到的3年间总的植物吸取修复效率为8.6%,显著低于土壤中Cd的降低率,这可能与超积累植物生长条件下活化的土壤Cd被地表径流、下渗水等带走有关,有待深入研究。

在修复过程中,为不影响生产,可采用边生产边修复的种植模式。有研究表明,用重金属超积累植物与普通作物间套作,可达到提高超积累植物的生物量和重金属吸收的效果。Wu等<sup>[22]</sup>将重金属超积累植物与低积累农作物玉米套种,结果发现间套作不仅能显著提高超积累植物的重金属吸取修复效率且能够生产出符合卫生标准的饲料粮食。李娜等<sup>[23]</sup>

将铜积累植物海州香薷分别与玉米和高粱套作,结果发现玉米和高粱Cu、Zn、Pb、Cd浓度均未超过国家食品卫生标准,且玉米中重金属积累低于高粱。蒋成爱等<sup>[24]</sup>在受Zn、Cd、Pb污染的土壤中,将Zn、Cd超积累东南景天(*Sedum alfredii*)与玉米、黑麦草、大豆套作,发现与玉米和大豆的套作显著地提高了东南景天地上部分对Zn的吸收,混作后显著降低了玉米和黑麦草对Cd和Zn的吸收。有研究认为间作使植物产量增加的原因是种间竞争作用提高了植物对水分、光照、土壤养分等资源的有效利用<sup>[25-27]</sup>。田间试验中,玉米中重金属Zn、Cd浓度始终未超过国家食品安全限值,所以长期施用污泥重金属Zn、Cd污染的土壤在超积累植物伴矿景天修复的过程中与玉米套作,可达到高效修复-安全生产的目的。

#### 4 结论

与对照相比,玉米-小麦-胡萝卜轮作处理降低了土壤中重金属浓度,且随着种植年限的增加,土壤重金属浓度逐年下降。继续连续施加污泥可增加作物产量,也增加了土壤重金属负荷,增大了农作物的重金属污染风险,致使小麦、胡萝卜中Cd浓度均超过国家食品安全标准。

种植Zn、Cd超积累植物伴矿景天,在继续施用污泥或停止施用下均能显著降低土壤中重金属浓度,3年内使土壤全量Cd分别下降48.4%和56.0%。

在实际田间生产中,在不间断污泥农用的前提下,Zn、Cd超积累植物伴矿景天与玉米套作,既减轻了污泥肥料带来的重金属污染风险,也可促进生产和降低农产品中重金属浓

度,实现污泥有机肥、农业安全生产和污染重金属吸取修复等的3重目标。

#### 参考文献(References)

- [1] 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 等. 论城市污泥农用资源化与可持续发展[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 157-160.  
Mo Cehui, Wu Qitang, Cai Quanying, et al. Utilization of municipal sludge in agriculture and sustainable development[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1): 157-160.
- [2] 陈桂梅, 刘善江, 张定媛, 等. 污泥堆肥的应用及在农业中的发展趋势[J]. 中国农业通报, 2010, 26(24): 301-306.  
Chen Guimei, Liu Shanjiang, Zhang Dingyuan, et al. Application and development of sewage sludge compost in agriculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(24): 301-306.
- [3] Debosz K, Petersen S O, Kure L K, et al. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 19(3): 237-248.
- [4] 陈秋丽, 张朝升, 张可方, 等. 城市污水处理厂的污泥农用对土壤的重金属影响[J]. 污染防治技术, 2008, 21(1): 23-25.  
Chen Qiuli, Zhang Chaosheng, Zhang Kefang, et al. Effects of sewage sludge application to farming on heavy metals in soil[J]. Pollution Control Technology, 2008, 21(1): 23-25.
- [5] 任婧, 程苗苗, 李瑞, 等. 不同类型土壤小麦-水稻轮作体系施用含重金属污泥的环境效应[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 376-381.  
Ren Jing, Cheng Miaomiao, Li Rui, et al. Environmental effects of applying heavy metal-containing municipal sewage sludge on wheat rice rotation system on different types of soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 376-381.
- [6] González M, Mingorance M D, Sánchez L, et al. Pesticide adsorption on a calcareous soil modified with sewage sludge and quaternary alkyl-ammonium cationic surfactants[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2008, 15(1): 8-14.
- [7] Vulkan R, Mingelgrin U, Ben-Asher J, et al. Copper and zinc speciation in the solution of a soil-sludge mixture[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 193-203.
- [8] 马学文, 翁焕新, 章金骏. 中国城市污泥重金属和养分的区域特征及变化[J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1306-1313.  
Ma Xuewen, Weng Huanxin, Zhang Jinjun. Regional characteristics and trend of heavy metals and nutrients of sewage sludge in China[J]. China Environmental Science, 2011, 31(8): 1306-1313.
- [9] 黄庆, 柯玉诗, 姚建武, 等. 药用植物紫花茉莉对农用污泥锌污染的修复研究[J]. 广州农业科学, 2005, 4: 56-58.  
Huang Qing, Ke Yushi, Yao Jianwu, et al. Study on the phytoremediation of zinc contaminated soil by officinal *Mirabilis jalapa* L.[J]. Guangzhou Agricultural Science, 2005, 4: 56-58.
- [10] 黑亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 东南景天和玉米套Zn污染污泥的处理效应[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 852-857.  
Hei Liang, Wu Qitang, Long Xinxian, et al. Effect of co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge[J]. Environmental Science, 2007, 28(4): 852-857.
- [11] 吴龙华, 周守标, 毕德, 等. 中国景天科植物一新种伴矿景天[J]. 土壤, 2006, 38(5): 632-633.  
Wu Longhua, Zhou Shoubiao, Bi De, et al. *Sedum plumbizincicola*, A new species of the Crassulaceae from Zhejiang, China[J]. Soils, 2006, 38(5): 632-633.
- [12] 吴龙华, 李娜, 毕德, 等. 锌镉复合污染土壤的植物修复方法, 中国: ZL 20071002038015[P]. 2007-10-10.  
Wu Longhua, Li Na, Bi De, et al. Phytoremediation methods of zinc and cadmium composite pollution soil: China: ZL 20071002038015[P]. 2007-10-10.
- [13] 能凤娇, 吴龙华, 刘鸿雁, 等. 芹菜与伴矿景天间作对污泥农用锌镉污染土壤化学与微生物性质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1428-1432.  
Nai Fengjiao, Wu Longhua, Liu Hongyan, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* and *Apium graveolens* on the soil chemical and microbiological properties under the contamination of zinc and cadmium from sewage sludge application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1428-1432.
- [14] GB 2762—2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 国家卫生部, 2012.  
GB 2762—2012 Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: National Ministry of Health of China, 2012.
- [15] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 蜈蚣草超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.  
Chen Tongbin, Wei Chaoyang, Huang Zechun, et al. Centipede grass a kind of arsenic hyperaccumulation plants and its accumulation characteristics of arsenic[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(3): 207-210.
- [16] 陈同斌, 李艳霞, 金燕, 等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 643-648.  
Chen Tongbin, Li Yanxia, Jin Yan, et al. The effects of compound fertilizer made from municipal sewage sludge compost on n p k and heavy metals uptake of wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 643-648.
- [17] 李瑞, 吴龙华, 杨俊波, 等. 贵州省典型城市污水处理厂污泥养分与重金属含量调查[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 787-796.  
Li Rui, Wu Longhua, Yang Junbo, et al. Major nutrients and heavy metals of municipal sewage sludge in Guizhou Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(4): 787-796.
- [18] 肖玲, 李岗, 郝卫平. 土施污泥对小麦生长的影响研究[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(1): 89-92.  
Xiao Ling, Li Gang, Hao Weiping. The research on the influence of the wheat growth in the soil with sewage sludge[J]. Journal of Northwestern Agricultural University, 1994, 22(1): 89-92.
- [19] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343-1353.  
Song Bo, Chen Tongbin, Zheng Yuanming, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(8): 1343-1353.
- [20] 梅忠, 宋晓英, 赵华. 施用污泥堆肥对土壤和小白菜重金属积累的影响[J]. 广东微量元素科学, 2009, 16(1): 31-35.  
Mei Zhong, Song Xiaoying, Zhao Hua. Heavy metal accumulation in *Brassicape kinensis* and in soil amended with sewage sludge compost [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2009, 16(1): 31-35.
- [21] Jadia C D, Fulekar M H. Phytoremediation of heavy metal: Recent techniques[J]. Africa Journal Biotechnology, 2009, 8(6): 921-928.
- [22] Wu Q T, Wei Z B, Ouyang Y. Phytoextraction of metal contaminated soil by hyperaccumulator *Sedum alfredii* H: effects of chelator and co-planting [J]. Water Air Soil Pollut, 2007, 180: 131-139.

- [23] 李娜. 重金属污染土壤的伴矿景天吸取修复及其农艺调控措施[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2008.  
Li Na. Phytoextraction of heavy metal contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies[D]. Nan Jing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [24] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9): 985-990.  
Jiang Cheng'ai, Wu Qitang, Wu Shunhui, et al. Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. China Environmental Science, 2009, 29(9): 985-990.
- [25] 廖红, 严小龙. 高级植物营养学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 24-26.  
Liao Hong, Yan Xiaolong. Senior Plant Nutrition[M]. Beijing: Science Press, 2003: 24-26.
- [26] Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. Yield performance and land-use efficiency of barley and fababean mixed cropping in Ethiopian highlands[J]. Europe Journal Agronomy, 2006, 25: 202-207.
- [27] Daellenbach G C, Kerridge P C, Wolfe M S, et al. Plant productivity in cassava-based mixed cropping systems in Colombian hillside farms [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 105: 595-614.

## Phytoremediation of cadmium/zinc contaminated agricultural soil by long term application of sewage sludge manure using *Sedum plumbizincicola*

GAO Wenya<sup>1,2</sup>, DENG Lin<sup>1,2</sup>, LI Zhu<sup>2</sup>, WU Longhua<sup>2</sup>, LIU Hongyan<sup>1</sup>, LUO Yongming<sup>2,3</sup>

1. College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China
2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
3. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

**Abstract** To compare with the conventional maize-wheat-carrot crop rotation model, a two-year field plot experiment of planting *Sedum plumbizincicola*, cadmium and zinc hyperaccumulator, has been carried out to study the safe agricultural production and repeated phytoremediation efficiency of a Zn/Cd contaminated soil as resulted from long-term application of sewage sludge containing manure. The results show that crops and *S. plumbizincicola* grow well in the soil under long-term application of sewage sludge manure. Compared with the control, the Zn and Cd concentrations in corn-wheat-carrots crop rotation system are all increased, but the Cd concentrations in wheat and carrots exceed and fail to meet the National Food Quality Standard. The Zn and Cd concentrations in soil under *S. plumbizincicola* treatments decrease markedly. The phytoremediation efficiency of Cd by *S. plumbizincicola* is 56.0%, while for the treatment of "continuous application of sewage sludge manure", the phytoremediation efficiency is still as high as 48.4%. So under conditions of application of sewage sludge, planting with *S. plumbizincicola* and corn, the triple objectives of safe handling of sludge, promoting crop growth, and high phytoextraction efficiency could be achieved altogether.

**Keywords** sludge manure; *Sedum plumbizincicola*; heavy metal pollution; phytoremediation

(责任编辑 王媛媛)