

麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及锌镉吸收性的影响^{*}

赵冰^{1,2} 沈丽波² 程苗苗² 王松凤² 吴龙华^{2**} 周守标¹ 骆永明²

(¹安徽师范大学生命科学学院重要生物资源保护与利用安徽省重点实验室, 安徽芜湖 241000; ²中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

摘 要 采用黑龙江黑土、河南潮土和浙江水稻土等我国粮食主产区典型土壤开展盆栽试验, 研究小麦/伴矿景天间作、水稻轮作模式下 Zn、Cd 超积累植物伴矿景天对当季小麦和后茬水稻生长及重金属吸收性的影响, 探索粮食作物主产区污染土壤边生产边修复技术的可行性. 结果表明: 麦季间作伴矿景天, 土壤硝酸钠提取态 Zn、Cd 浓度较小麦单作处理显著提高, 间作处理下水稻土、潮土与黑土的提取态 Zn 较单作处理分别提高 55%、32% 和 110%, 水稻土与黑土提取态 Cd 较单作分别提高 38% 和 110%, 潮土的提取态 Cd 与对照处理没有差异. 间作处理水稻土、潮土和黑土上小麦地上部重金属浓度是单作处理的 1.1~1.9 倍. 麦季间作伴矿景天对后茬水稻生长及其地上部重金属吸收性无显著影响, 虽然后茬水稻糙米中 Cd 含量仍高于 0.2 mg·kg⁻¹ 的“食品中污染物限量”标准, 但种植过伴矿景天处理的水稻糙米重金属与前季单作小麦处理相比呈下降趋势. 表明通过伴矿景天/小麦-水稻的间作和轮作种植模式, 可吸取修复污染土壤中有害重金属, 降低后茬水稻的食物链风险.

关键词 粮食作物 伴矿景天 间作 轮作 重金属

文章编号 1001-9332(2011)10-2725-07 **中图分类号** X53 **文献标识码** A

Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat-rice rotation on the crops growth and their heavy metals uptake from different soil types. ZHAO Bing^{1,2}, SHEN Li-bo², CHENG Miao-miao², WANG Song-feng², WU Long-hua², ZHOU Shou-biao¹, LUO Yong-ming² (¹Anhui Provincial Key Laboratory of Biological Resources Conservation and Utilization, College of Life Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China; ²Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(10): 2725-2731.

Abstract: A pot experiment with heavy metals- contaminated black soil from Heilongjiang Province, alluvial soil from Henan Province, and paddy soil from Zhejiang Province was conducted to study the effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat (*Triticum aestivum*)-rice (*Oryza sativa*) rotation on the growth of the crops and their heavy metals uptake, aimed to explore the feasibility of simultaneous grain production and heavy metals- contaminated soil phytoremediation in main food crop production areas of this country. Comparing with monoculture *T. aestivum*, intercropping *S. plumbizincicola* increased the soil NaNO₃-extractable Zn and Cd significantly, with the increment of extractable Zn in test paddy soil, alluvial soil, and black soil being 55%, 32% and 110%, and that of extractable Cd in test paddy soil and black soil being 38% and 110%, respectively. The heavy metals concentration in *T. aestivum* shoots under intercropping *S. plumbizincicola* was 0.1-0.9 times higher than that under monoculture *T. aestivum*, but the intercropping had little effects on the rice growth and its heavy metals uptake. Though the Cd concentration in rice grain after *S. plumbizincicola* planting was still higher than 0.2 mg·kg⁻¹ (the limit of Cd in food standard), it presented a decreasing trend, as compared with that after monoculture *T. aestivum*. Therefore, intercropping *S. plumbizincicola* in wheat growth season under wheat-rice rota-

^{*} 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-YW-G-053) 和国家自然科学基金重大国际合作项目 (40821140539) 资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: lhwu@issas.ac.cn

2011-02-17 收稿, 2011-07-01 接受.

tion could benefit the phytoremediation of heavy metals- contaminated soil, and decrease the food-chain risk of rotated rice.

Key words: food crop; *Sedum plumbizincicola*; intercropping; rotation; heavy metal.

土壤是人类赖以生存的最基本的自然资源之一,土壤重金属污染将影响土壤的正常功能^[1-2],若土壤中重金属污染物达到一定毒性水平,被人类直接或通过食物链等方式间接摄取,将对人类健康造成严重威胁^[3-4].我国受 Cd、As、Cr、Zn 等重金属污染的耕地面积近 2000 万 hm²,约占耕地总面积的 1/5,东南地区、华南地区、长江三角洲地区农田均受到严重的重金属污染^[5-6].

植物修复技术是利用超积累植物从被污染的环境介质中去除重金属污染物或降低重金属污染风险的一类新技术^[7].伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)是近年发现的一种具有超积累锌和镉能力的景天科植物新种^[8],并建立了多种修复模式^[9].间作、轮作是我国传统的农业措施之一,小麦与水稻轮作也是比较常见的一种种植方式,但该轮作模式下麦季间作修复植物对小麦及后茬水稻生长及污染金属吸收性的影响,则尚未有报道.因此,本研究以黑龙江黑土、河南潮土和浙江水稻土等我国粮食主产区典型土壤作为试验用土,以期通过小麦-伴矿景天间作、水稻轮作的种植模式,最大程度地减小对粮食生产的影响,并降低重金属污染物的食物链风险,探索出农田重金属低污染土壤的边生产边修复治理新模式.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦品种为镇麦 5 号,购自江苏省农业科学院;供试水稻品种为中香一号,由中国水稻研究所提供;供试伴矿景天种子采自浙江杭州郊区.3 种植物中小麦为直接播种,水稻与伴矿景天均在中国科学院南京土壤研究所植物生长室进行育苗,其中伴矿景天育苗基质为蛭石与珍珠岩(1:1 混合),用霍格兰营养液进行培养,待幼苗长出 6 片真叶时,挑选生长健壮、长势一致、根系健全的健康植株进行移栽.

供试 3 种土壤分别为嘉兴(浙江)水稻土、封丘(河南)潮土、海伦(黑龙江)黑土,2008 年 6 月采集农田表层 0~20 cm 土壤,经风干后混匀、磨碎、过 2 mm 尼龙筛,分别添加 Cd 2 mg·kg⁻¹,2008 年和 2009 年种植水稻 2 季.2009 年 10 月底水稻收获后测定 3 种土壤的全量 Cd,供试土壤全量 Cd 及其他基本理化性质见表 1.

1.2 试验设计

盆栽试验在温室进行,共设 6 个处理,即 3 种土壤类型、每种类型土壤分为“小麦/水稻单作(W-R)”和“小麦-伴矿景天间作/水稻单作(W/S-R)”两种轮作方式.试验每盆装土 1.5 kg(烘干基),4 次重复,共 24 盆,随机区组排列.小麦与伴矿景天间作试验中,小麦单作处理每盆定苗 6 株,间作种植伴矿景天的处理每盆小麦定苗 3 株、伴矿景天移苗 3 株.2009 年 12 月 5 日移栽伴矿景天,12 月 10 日播种小麦,出苗 1 周后定苗,于 2010 年 3 月 11 日与 4 月 20 日追肥,两次均为每盆尿素 1.5 g、磷酸二氢钾 1 g,2010 年 5 月 26 日小麦与伴矿景天同时收获.2010 年 6 月 21 日将浸种、催芽后的水稻种子直播入盆,播种两周后每盆保留长势一致的健壮苗 5 株.分别于 2010 年 7 月 12 日和 8 月 14 日各施追肥 1 次,用量为每盆尿素 1 g、硫酸钾 1 g,于 2010 年 10 月 13 日水稻成熟后收获,分别取土壤、植物样,测定水稻秸秆和糙米中重金属及土壤提取态重金属浓度.小麦、水稻均用去离子水浇灌,麦季保持土壤含水量在最大田间持水量的 70% 左右,水稻季出苗后维持水层约 2 cm.

收获后的小麦、伴矿景天、水稻分别用自来水、去离子水洗涤,然后 105 ℃ 杀青 30 min,在 80 ℃ 下烘干,称量,不锈钢粉碎机粉碎,备用.

植物样品重金属浓度采用 HNO₃:HClO₄ 混酸(3:2)消化,原子吸收分光光度计(火焰;Varian

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Basic physic-chemical property of the tested soils

土壤类型 Soil type	pH	有机碳 Organic C (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	全锌 Total Zn (mg·kg ⁻¹)	全镉 Total Cd (mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC [cmol(+)·kg ⁻¹]
黑土 Black soil	6.22	40.6	2.87	1.08	16.9	79.8	1.47	40.1
潮土 Alluvial soil	8.32	9.9	1.02	0.92	15.2	56.7	1.28	7.8
水稻土 Paddy soil	6.76	16.2	1.72	0.82	15.6	89.9	1.16	18.6

220FS、石墨炉;Varian 220Z)测定。

土壤样品采回后风干,过 1 mm 尼龙筛,将土壤与 0.1 mol · L⁻¹ NaNO₃ 按 1 : 2.5 的土液比在翻转型振荡机上以 120 r · min⁻¹ 的速度振荡 2 h,温度保持在 (20±2) °C;振荡后在离心机上 3000 r · min⁻¹ 离心 10 min,将上清液过 0.45 μm 滤膜,滤液用原子吸收分光光度计测定 Zn、Cd 浓度。

1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 及 SPSS 13.0 软件进行数据统计,LSD 法检测差异显著性,显著性水平设定为 α=0.05。

2 结果与讨论

2.1 小麦与伴矿景天生物量

相同类型土壤上(表 2),间作伴矿景天显著提高了小麦单株秸秆和籽粒生物量(P<0.05),但 3 种土壤类型之间的小麦单株秸秆与籽粒质量没有显著差异,只是黑土上小麦生长好于水稻土和潮土。潮土上与小麦间作的伴矿景天相对其他两种土壤生长较缓慢、长势略差,地上部生物量明显小于黑土和水稻土上的伴矿景天(P<0.05),这可能与潮土的有机质含量低、土壤肥力较差有关。

2.2 不同类型土壤上小麦与伴矿景天植株体内重金属浓度变化

3 种类型土壤上间作处理下小麦籽粒中 Zn、Cd 浓度均高于单作处理(表 3),间作处理下水稻土、潮土和黑土上小麦籽粒中 Zn 浓度分别为单作处理的 1.2、1.4 和 1.4 倍,Cd 浓度分别为单作处理的 1.7、1.5 和 1.9 倍,其中只有潮土上两个处理小麦籽粒的 Cd 浓度差异未达到显著水平。小麦秸秆中 Zn、Cd 浓度也有相同的变化趋势,但水稻土上两个处理籽粒 Zn 浓度和黑土上籽粒 Cd 浓度差异显著(P<

0.05)。3 种类型土壤间小麦籽粒和秸秆中 Zn、Cd 浓度差异不显著。有研究表明,超积累植物根系分泌物可增加或分泌某种特殊有机物,或植物根毛能直接从土壤颗粒上交换吸附重金属,以促进土壤重金属元素的溶解和植物对重金属的吸收^[10-12]。王激清等^[9]将 Cd 积累植物印度芥菜和普通油菜品种互作种植发现,互作对印度芥菜吸收 Cd 的能力与单作相比无明显差异,却可使油菜地上部 Cd 浓度显著增大。沈丽波等^[13]的伴矿景天与水稻轮作修复试验也发现,种植伴矿景天后水稻地上部 Zn、Cd 浓度显著高于未种植伴矿景天的处理。黑亮等^[14]的超积累植物东南景天与玉米间作试验发现,与单作相比,间作使玉米籽粒中 Zn、Cd 浓度降低,东南景天地上部 Zn、Cd 浓度升高。本研究结果有所不同,原因可能是由于不同农作物及不同超积累植物的特性有所不同。

表 2 小麦与伴矿景天地上部分生物量
Table 2 Shoot biomass of *Triticum aestivum* and *Sedum plumbizincicola*

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	单株小麦 秸秆质量 Straw mass per plant (g)	单株小麦 籽粒质量 Grain mass per plant (g)	伴矿景天 <i>S. plumbizi- ncicola</i> (g · pot ⁻¹)
水稻土	W-R	2.5±0.4d	2.6±0.5de	—
Paddy soil	W/S-R	4.2±0.1b	4.4±0.3b	4.2±2.4a
潮土	W-R	1.7±0.5e	1.8±0.3e	—
Alluvial soil	W/S-R	3.5±0.2c	3.6±0.4c	0.9±0.5b
黑土	W-R	2.7±0.3d	2.7±0.2d	—
Black soil	W/S-R	5.9±0.5a	5.4±1.0a	3.6±0.9a
F 值	土壤类型	0.53	0.43	5.29*
F value	Soil type			

W-R:小麦/水稻单作 Wheat/Rice monoculture; W/S-R:小麦-伴矿景天间作/水稻单作 Wheat-*S. plumbizincicola* intercropping/Rice monoculture。同列同一土壤数据后不同字母表示差异达显著水平(P<0.05) Different letters of the same soils in the same column meant significant difference at 0.05 level。* P<0.05。下同 The same below。

表 3 小麦与伴矿景天地上部分 Zn、Cd 浓度
Table 3 Zn and Cd concentrations in *Triticum aestivum* and *Sedum plumbizincicola* shoots (mg · kg⁻¹)

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	小麦中重金属 Heavy metal in wheat				伴矿景天中重金属 Heavy metal in <i>S. plumbizincicola</i>	
		秸秆 Straw		籽粒 Grain		Zn	Cd
		Zn	Cd	Zn	Cd		
水稻土	W-R	48.5±7.1b	0.83±0.14b	35.7±4.2b	0.53±0.09c	—	—
Paddy soil	W/S-R	62.1±7.5a	0.99±0.15b	42.4±5.2a	0.89±0.16b	272±53b	61±16b
潮土	W-R	33.5±6.1c	0.36±0.17c	20.3±0.6d	0.29±0.10d	—	—
Alluvial soil	W/S-R	35.2±6.4c	0.52±0.18c	27.7±1.7c	0.44±0.12cd	184±60b	53±23b
黑土	W-R	41.9±6.1bc	0.81±0.06b	25.6±3.6c	0.64±0.16c	—	—
Black soil	W/S-R	50.0±7.8b	1.41±0.23a	36.2±2.9b	1.24±0.14a	561±62a	161±34a
F 值	土壤类型	5.24	3.35	3.20	1.96	45.53**	22.36**
F value	Soil type						

** P<0.01。下同 The same below。

伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度均以黑土为最高(表 3),极显著高于水稻土、潮土($P<0.01$). 土壤有机质含量高可以增加某些重金属如 Zn、Cd 等的溶解性,从而提高植物对重金属的吸收量^[15-19]. 王艮梅等^[20]研究发现,绿肥和猪粪施入 Cu 污染土壤后显著提高了土壤中水溶性有机质浓度,进而使土壤水溶性 Cu 浓度大幅提高,也提高了 Cu 在黑麦草中的浓度和累积量. 本试验 3 种土壤以黑土的有机质含量为最高(表 1)、潮土最低,这可能是 3 种土壤间小麦和伴矿景天对 Zn、Cd 吸收存在差异的主要原因.

2.3 不同类型土壤上水稻生物量的差异

同一类型土壤的两个处理中,种植过伴矿景天的处理其后茬水稻的秸秆和籽粒产量与未种植伴矿景天的处理相比呈略下降趋势(表 4),但只有黑土上两个处理的水稻籽粒间作处理比单作处理下降了 25%,差异达到了显著水平($P<0.05$). 说明前季种植伴矿景天对后季水稻产量存在一定的负面影响,以肥力高的土壤尤为明显. 3 种类型土壤上水稻地上部产量和小麦季趋势基本一致,仍以黑土最高,其次为水稻土和潮土($P<0.01$),说明除重金属对作物的影响外,3 种土壤中有有机质含量的高低可能仍是影响作物地上部产量的重要因素^[21-22].

2.4 不同类型土壤上水稻地上部重金属浓度变化

由表 5 可见,土壤类型对水稻秸秆中 Zn、Cd 浓度具有显著影响($P<0.05$),且仍以对黑土上水稻的影响显著高于水稻土和潮土,而同一土壤上的两个处理水稻秸秆中 Zn、Cd 浓度无显著差异. 除潮土上苍糠中 Zn 是前茬间作处理比单作处理显著降低外,其余处理糙米和苍糠中 Zn 浓度差异均不显著. 对 Cd 而言,土壤类型对水稻地上部积累量的影响均达到显著水平,且土壤类型对苍糠中 Cd 浓度的影响极显著($P<0.01$). 糙米中 Cd 浓度以黑土和水稻土

上高于潮土,这可能与两种土壤的理化性质差异较大有关. 有研究表明,有机物产生的可溶性有机质可减少土壤对重金属的吸附,增强重金属的活性和迁移能力^[17,23-24],导致植物对重金属的吸收性增加. 水稻地上部 Cd 浓度存在明显的土壤类型间差异性,且按黑土>水稻土>潮土的顺序递减(表 5),与土壤有机质含量的趋势相一致,表明土壤有机质等性质的差异对超积累植物吸取修复及粮食作物生长均有显著作用.

水稻土和黑土上前茬种植伴矿景天与否对水稻糙米中 Cd 浓度并无明显影响,但潮土上前茬种植伴矿景天使后茬水稻糙米中 Cd 浓度显著下降,说明在这 3 种土壤上麦季间作伴矿景天使后茬水稻糙米中 Cd 浓度升高的可能性不大. 因此,在水稻土、潮土和黑土上麦季间作种植伴矿景天、后茬种植水稻,可达到吸取修复 Cd 污染农田土壤又不显著增大后季作物可食部分食物链风险的双重效果.

由于小麦地上部 Zn、Cd 吸收性大于水稻^[25-28],通过同前一季小麦地上部的重金属吸收,虽然间作种植伴矿景天可使后茬水稻对 Zn、Cd 的吸收略降,但因供试土壤 Cd 总量较高,水稻糙米中 Cd 浓度仍高于“食品中污染物限量”标准($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 但如按本试验种植模式修复 Cd 污染土壤,或是冬季

表 4 水稻地上部分生物量
Table 4 Shoot biomass of *Oryza sativa* ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	糙米 Grain	秸秆 Straw
水稻土 Paddy soil	W-R	20.1±4.2ab	18.2±1.2bc
潮土 Alluvial soil	W/S-R	15.7±2.1bc	17.3±4.1c
黑土 Black soil	W-R	15.1±2.8bc	13.9±2.6c
	W/S-R	13.6±3.8c	14.2±1.6c
	W-R	23.9±4.6a	23.6±2.3a
	W/S-R	22.1±3.4ab	17.9±4.2bc
F 值	土壤类型	69.81**	2.19
F value	Soil type		

表 5 水稻地上部 Zn、Cd 浓度
Table 5 Zn and Cd concentrations in *Oryza sativa* shoot ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	糙米 Grain		苍糠 Husk		秸秆 Straw	
		Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd
水稻土	W-R	32.2±3.5abc	0.63±0.04ab	25.5±2.2ab	0.54±0.07b	76.8±5.9ab	1.32±0.16a
Paddy soil	W/S-R	33.1±5.5ab	0.58±0.06b	27.6±3.6ab	0.45±0.05c	66.0±15.1bc	1.26±0.07ab
潮土	W-R	30.2±3.4bc	0.45±0.03c	21.8±1.4b	0.21±0.03d	53.7±5.8cd	1.05±0.13bc
Alluvial soil	W/S-R	26.9±2.8c	0.38±0.05d	31.3±9.1a	0.18±0.04d	42.3±2.2d	0.98±0.10c
黑土	W-R	30.6±3.0abc	0.66±0.01a	27.6±2.7ab	0.64±0.03a	88.2±6.3a	1.22±0.18ab
Black soil	W/S-R	36.1±3.0a	0.65±0.01a	27.7±5.1ab	0.62±0.01a	85.5±16.9a	1.13±0.14abc
F 值	土壤类型	1.89	27.89*	0.05	69.96**	18.13*	12.8*
F value	Soil type						

单作伴矿景天^[13]以增大吸取修复强度,则经过数年的轮作种植伴矿景天和粮食作物,可达到既降低后茬作物的食物链风险又修复土壤 Zn、Cd 污染的目的。

2.5 土壤硝酸钠提取态重金属浓度变化

土壤重金属的存在形态被区分为交换态、碳酸盐结合态、铁锰结合态、残渣态、有机结合态 5 种形态^[29],硝酸钠提取的重金属为植物可直接吸收利用态^[30]。由图 1 可见,种植伴矿景天使 3 种类型土壤的硝酸钠提取态 Zn、Cd 较小麦单作处理高,且水稻土与黑土上间作处理比单作处理土壤硝酸钠提取态 Cd 分别上升 38.0% 和 29.0%,差异显著 ($P < 0.05$),这是由于超积累植物伴矿景天的根系活化了土壤中的难溶性 Zn、Cd 之故^[9,13,31],这也可能是间作伴矿景天使小麦地上部 Zn、Cd 吸收量升高的直接原因。水稻收获后,无论麦季是否间作伴矿景天,3 种土壤的硝酸钠提取态 Zn、Cd 已无显著差异,且硝酸钠提取态 Zn、Cd 比小麦收获时略降,表明种植伴矿景天活化了土壤 Zn、Cd,但这种活化作用的持续时间并不长,对后茬作物水稻的食物链风险无显著影响。

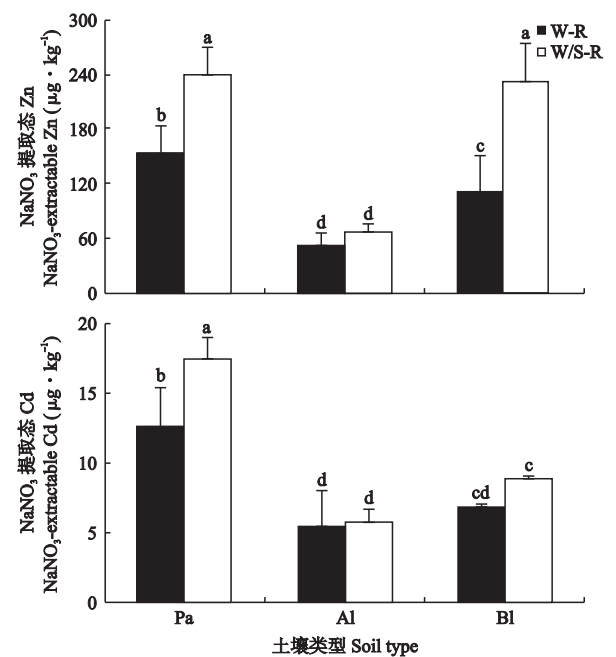


图 1 小麦收获后土壤硝酸钠提取态 Zn、Cd 浓度
Fig.1 Soil NaNO₃-extractable Zn and Cd concentrations after the harvest of *Triticum aestivum*.
Pa:水稻土 Paddy soil; Al:潮土 Alluvial soil; Bl:黑土 Black soil. W-R:小麦/水稻单作 Wheat/Rice monoculture; W/S-R:小麦-伴矿景天间作/水稻单作 Wheat-S. *plumbizincicola* intercropping/Rice monoculture. 图中柱子上不同字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$) Different letters on the top of each column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

分析土壤硝酸钠提取态与小麦、水稻籽粒部分 Zn、Cd 浓度发现,小麦籽粒中 Zn 与土壤 NaNO₃-Zn 呈极显著正相关[麦粒 Zn (mg·kg⁻¹) = 0.1273 × NaNO₃-Zn (mg·kg⁻¹) + 27.91, $r = 0.843$, $n = 24$, $P < 0.01$],而麦粒中 Cd 与土壤 NaNO₃-Cd 则无显著相关性;但随着土壤 NaNO₃-Cd 浓度的增大,黑土上小麦籽粒对 Cd 的吸收效率明显高于水稻土和潮土上的小麦籽粒,表明土壤中重金属有效性与因土壤类型不同所致的理化性质差异有显著关系。水稻季土壤硝酸钠提取态 Zn、Cd 与糙米中 Zn、Cd 浓度[糙米 Zn (mg·kg⁻¹) = 0.39 × NaNO₃-Zn (mg·kg⁻¹) + 23.46, $r = 0.631$;糙米 Cd (mg·kg⁻¹) = 0.0601 × NaNO₃-Cd (µg·kg⁻¹) + 0.4141, $r = 0.914$]也呈极显著正相关($n = 24$, $P < 0.01$)。说明硝酸钠提取土壤中 Zn、Cd 浓度可表征其植物有效性,土壤中硝酸钠提取态 Zn、Cd 浓度高是导致水稻和小麦籽粒中 Zn、Cd 浓度升高的直接原因。

不同类型土壤因其 pH、土壤颗粒组成与质地等的不同而导致其对重金属的吸附和固定作用不同^[32-35]。3 种土壤在麦季与水稻季 Zn、Cd 有效态含量的不同可能由于淹水与否土壤氧化还原状况不同所致^[36]。土壤中水溶性有机质 (DOM) 含量也是影响重金属吸附性的重要因素之一^[14]。陈同斌等^[37]研究发现,DOM 对土壤中 Cd 的吸附行为具有明显的抑制作用,从而提高 Cd 的活性和迁移能力。本试验研究结果与其试验结果相似,水稻土和黑土中 Cd 的提取态浓度高于潮土 (图 1、图 2),而提取态重金属离子浓度越高越利于植物根系的吸收、转运与积累^[38],从而导致水稻土和黑土上生长的小麦和水稻体内 Zn、Cd 浓度高于潮土。当然,也可能与潮土的养分供应能力低于黑土和水稻土有关。因此,伴矿景天-小麦间作模式修复土壤重金属要因地制宜,应用于不同土壤还需要进一步探讨其技术条件。伴矿景天与小麦间作种植后小麦地上部重金属浓度均有不同程度提高,根据种植作物后土壤 Zn、Cd 有效态的测定结果分析,土壤中有有效态 Zn、Cd 浓度的上升是导致小麦体内 Zn、Cd 浓度升高的直接原因^[29],因此,在小麦-伴矿景天收获后如施用一定量的钙镁磷肥等肥料^[13],将可明显降低修复植物对土壤重金属的活化作用,并降低超积累植物对后茬粮食作物的重金属积累风险。

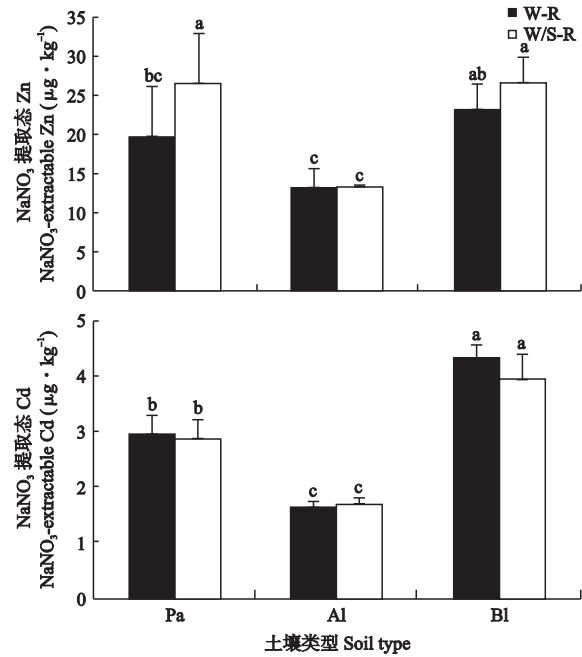


图2 水稻收获后土壤硝酸钠提取态 Zn、Cd 浓度
Fig. 2 Soil NaNO₃-extractable Zn and Cd concentrations after the harvest of *Oryza sativa*.

3 结 论

在麦季间作种植超积累植物伴矿景天,可在不显著影响粮食作物产量的前提下实现对污染土壤中 Zn、Cd 的吸取修复,但超积累植物间作也增大了小麦对土壤中重金属的吸收性;伴矿景天间作种植与否对后茬作物水稻地上部 Zn、Cd 浓度的影响较小,水稻地上部 Zn、Cd 浓度没有显著差异,且水稻收获后土壤中的 Zn、Cd 有效态浓度显著下降. 伴矿景天/小麦间作-水稻轮作种植可实现利用伴矿景天修复 Zn、Cd 污染土壤,达到边生产边修复的效果.

由于 3 种土壤类型之间有机质等理化性质的不同,对重金属的吸附和活化效果各有差异,关于不同类型土壤上的最佳修复模式还有待于进一步研究和探讨.

参考文献

[1] Luo Q (罗 强), Ren Y-B (任永波), Zheng C-G (郑传刚). Research on heavy metal pollution in soil and control. *World Science-Technology Research & Development* (世界科技研究与发展), 2004, **26**(2): 42–46 (in Chinese)

[2] Xu L (徐 笠), Chang J (常 江), Du Y (杜 艳), *et al.* Assessment on heavy metal pollution in soils of Anhui Province by Matter Element Analysis Model. *Soils* (土壤), 2009, **41**(6): 875–879 (in Chinese)

[3] Sun Y-J (孙英杰), Song J (宋 菁), He Y-H (何亚

红). Research progress of washing agents used for remediation of heavy metal contaminated soil. *Journal of Qingdao Technological University* (青岛理工大学学报), 2009, **30**(5): 75–78 (in Chinese)

[4] Grasso D, Butkus MA, O’ Sullivan D, *et al.* Soil washing design methodology for a lead contaminated sandy soil. *Water Research*, 1997, **31**: 3045–3056

[5] Xu M-G (徐明岗), Liu P (刘 平), Song Z-G (宋正国), *et al.* Progress in fertilization on behavior of heavy metals in contaminated soils. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2006, **25**(suppl.): 328–333 (in Chinese)

[6] Wang X-J (王先进). Chinese Authorities Concerning How China Feed Chinese Better. Beijing: China Financial & Economic Press, 1997: 203–204 (in Chinese)

[7] Liao X-Y (廖晓勇), Chen T-B (陈同斌), Yan X-L (阎秀兰), *et al.* Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(6): 881–893 (in Chinese)

[8] Wu L-H (吴龙华), Zhou S-B (周守标), Bi D (毕德), *et al.* *Sedum plumbizincicola*, a new species of the *Crassulaceae* from Zhejiang, China. *Soils* (土壤), 2006, **38**(5): 632–633 (in Chinese)

[9] Wang J-Q (王激清), Ru S-H (茹淑华), Su D-C (苏德纯). Effects of Indian mustard and oilseed rape co-cropping on absorbing insoluble cadmium of contaminated soil. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2004, **24**(5): 890–894 (in Chinese)

[10] Reeves RD, Brooks RR. European species of *Thlaspi* L. (Cruciferae) as indicators of nickel and zinc. *Journal of Geochemical Exploration*, 1983, **18**: 275–283

[11] Li H-F (李花粉). Heavy metals pollution in rhizosphere. *Review of China Agricultural Science and Technology* (中国农业科技导报), 2000, **2**(4): 54–59 (in Chinese)

[12] Xu W-H (徐卫红), Huang H (黄 河), Wang A-H (王爱华). Advance in studies on activation of heavy metal by root exudates and mechanism. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, **15**(1): 184–189 (in Chinese)

[13] Shen L-B (沈丽波), Wu L-H (吴龙华), Tan W-N (谭维娜), *et al.* Effects of *Sedum plumbizincicola*-*Oryza sativa* rotation and phosphate amendment on Cd and Zn uptake by *O. sativa*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2952–2958 (in Chinese)

[14] Hei L (黑 亮), Wu Q-T (吴启堂), Long X-X (龙新宪), *et al.* Effect of co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge. *Environmental Science* (环境科学), 2007, **28**(4): 852–858 (in Chinese)

[15] Zhou J-M (周江敏), Dai J-Y (代静玉), Pan G-X (潘根兴). Characterization of dissolved organic matters in soil and its significance for environment. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2003, **22**(6): 731–735 (in Chinese)

- [16] Ding C (丁 春), Guan W (关 伟). The structural characteristics of DOC in the soil and behavior of heavy metals on soil. *Anhui Chemical Industry* (安徽化工), 2009, **35**(4): 66–68 (in Chinese)
- [17] Li T-Q (李廷强), Yang X-E (杨肖娥). Soil dissolved organic matter and its effect on chemical and biological behaviors of soil heavy metals. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 1083–1087 (in Chinese)
- [18] Giusquiani PL, Concezzi L, Businelli M, *et al.* Fate of pig sludge liquid fraction in calcareous soil: Agricultural and environmental implications. *Journal of Environment Quality*, 1998, **27**: 364–371
- [19] Kalbitz K, Wennich R. Mobilization of heavy metal and in polluted wetland soil and its dependence on dissolved organic matter. *Science of the Total Environment*, 1998, **209**: 27–39
- [20] Wang G-M (王艮梅), Zhou L-X (周立祥). The dynamics of dissolved organic matter and associated water-soluble Cu in two Cu-contaminated soils amended with various organic matters. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2003, **23**(4): 452–457 (in Chinese)
- [21] Zhang L (张 璐), Lian H-Z (廉鸿志), Yu W-T (宇万太), *et al.* Yield-increase efficiency of using recycled nutrients in agro-ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9**(1): 37–40 (in Chinese)
- [22] Liu T-X (刘天学), Ji X-E (纪秀娥). Effects of crop straw burning on soil organic matter and soil microbes. *Soils* (土壤), 2003, **35**(4): 347–348 (in Chinese)
- [23] Joadan RN, Yonge DR, Hathhorn WE. Enhanced mobility of Pb in the presence of dissolved natural organic matter. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1997, **29**: 59–80
- [24] Pohlman AA, McColl JG. Soluble organics from forest litter and their role in metal dissolution. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, **52**: 265–271
- [25] Li Z-W (李正文), Zhang Y-L (张艳玲), Pan G-X (潘根兴), *et al.* Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake. *Environmental Science* (环境科学), 2003, **24**(3): 112–115 (in Chinese)
- [26] Ji S-Q (季书勤), Guo R (郭 瑞), Wang H-F (王汉芳), *et al.* Estimate of pollution by heavy metals on wheat in Henan and the rule of cadmium absorption in wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2006, **26**(6): 154–157 (in Chinese)
- [27] Wei C-F (魏朝富), Gao M (高 明), Che F-C (车福才), *et al.* Levels of heavy metals in low-middle yield soils and their effects on wheat uptake in Three Gorges Reservoir area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2003, **12**(2): 145–152 (in Chinese)
- [28] Qi Y-B (齐雁冰), Huang B (黄 标), Yang Y-F (杨玉峰), *et al.* Heavy metal accumulation characteristics and risk assessment of rice grain in different regions of Suzhou City, China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2010, **29**(4): 659–665 (in Chinese)
- [29] Xu W-H (徐卫红), Wang H-X (王宏信), Liu H (刘怀), *et al.* Effects of individual and combined pollution of Cd and Zn on root exudates and rhizosphere Zn and Cd fractions in ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Environmental Science* (环境科学), 2007, **28**(9): 2089–2095 (in Chinese)
- [30] Pueyo M, Lopez-Sanchez JF, Rauret G. Assessment of CaCl_2 , NaNO_3 and NH_4NO_3 extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **504**: 217–226
- [31] Lu H-L (卢豪良), Yan C-L (严重玲). Exudation of low-molecular-weight-organic acids by *Kandelia candel* (L.) Druce roots and implication on heavy metal bio-availability in mangrove sediments. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(10): 4173–4181 (in Chinese)
- [32] Eriksson J, Oborn I, Jansson G, *et al.* Factors influencing Cd-content in crops: Results from Swedish field investigations. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 1996, **26**: 125–133
- [33] Liao M (廖 敏), Chen X-H (陈雪花), Chen C-L (陈承利), *et al.* The influence of lead contamination on soil-microbial activity and community structure diversity in a soil-greenhouse system. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(2): 220–227 (in Chinese)
- [34] McLaughlin MJ, Palmer LT, Tiller KG, *et al.* Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. *Journal of Environment Quality*, 1994, **23**: 1013–1018
- [35] Mench M, Baize D, Mocquot B. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne District, Burgundy, France. *Environmental Pollution*, 1997, **95**: 93–103
- [36] Mu R-X (牟仁祥), Chen M-X (陈铭学), Zhu Z-W (朱智伟), *et al.* Advance in the researches on heavy metals in rice. *Ecology and Environment* (生态环境), 2004, **13**(3): 417–419 (in Chinese)
- [37] Chen T-B (陈同斌), Chen Z-J (陈志军). Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(2): 183–186 (in Chinese)
- [38] Sukreeyapongse O, Holm PE, Strobel BW, *et al.* pH-dependent release of cadmium, copper and lead from natural and sludge-amended soils. *Journal of Environment Quality*, 2002, **31**: 1901–1909

作者简介 赵 冰,男,1985年生,硕士.主要从事重金属污染土壤修复研究. E-mail: 277237144@qq.com

责任编辑 肖 红