

Cd/Zn 及 Cd /Zn/Ni 复合污染对胡萝卜生长吸收特征的影响

赵转军, 南忠仁, 王胜利, 王兆炜, 杨一鸣

(西部环境教育部重点实验室, 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘 要:利用盆栽试验对胡萝卜在不同浓度 Cd/Zn 及 Cd/Zn/Ni 复合作用下的重金属吸收效应进行了研究。结果表明,在 Cd/Zn/Ni 和 Cd/Zn 复合污染条件下,胡萝卜茎叶和块茎干重与对照土壤比较均受到显著影响($P<0.05$),尤其是含 Ni 组合,在 Ni 浓度达到 $250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后,胡萝卜块茎和茎叶生物量都锐降($P<0.01$)。对比不同剂量下两组富集系数(EF)和转运系数(TF)的结果发现,含 Ni 组合中, Cd、Zn、Ni 3 种重金属在不同迁移界面以及不同浓度水平时的活性不同:在土壤-胡萝卜块茎迁移界面,当土壤中 Cd、Zn、Ni 浓度分别在 $0.35\sim 1.8$ 、 $50\sim 300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以及 $60\sim 250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间时,活性大小为 $\text{Cd}>\text{Zn}>\text{Ni}$;当其浓度分别达到 $3.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd)、 $600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Zn)以及 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Ni)时,活性大小变为 $\text{Zn}>\text{Ni}>\text{Cd}$;而在胡萝卜块茎-茎叶界面,Cd 的活性在任何浓度水平下始终最大,当 Zn、Ni 浓度分别在 $50\sim 180 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以及 $60\sim 170 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间时,活性大小为 $\text{Zn}>\text{Ni}$,但在此浓度之后 Ni 的作用突显,活性大小变为 $\text{Ni}>\text{Zn}$ 。非含 Ni 组合中,在两迁移界面和不同浓度水平下,两种重金属的迁移能力始终为 $\text{Cd}>\text{Zn}$ 。此外,在碱性较高的绿洲灌淤土中,Cd、Zn、Ni 之间的交互作用表现为 Ni 与 Cd 的拮抗作用,以及 Ni 与 Zn 的协同作用。

关键词: Cd; Zn; Ni; 交互作用; 胡萝卜; 绿洲土壤

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)04-0642-06

Growth and Absorption Responses of Carrots to Cd/Zn and Cd/Zn/Ni Stress

ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, WANG Zhao-wei, YANG Yi-ming

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, College of Resource and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to observe the effects of the bioavailability and uptake of heavy metals in different parts of carrots. This research tested 2 different combinations of heavy metals Cd/Zn/Ni and Cd/Zn. For each combination 8 different concentration scenarios were tested. The results showed that carrots' shoots and roots biomass were affected significantly ($P<0.05$) by the Cd/Zn/Ni and Cd/Zn co-contamination combinations. For the Cd/Zn/Ni combination, all tissues of the carrots decreased sharply ($P<0.01$) when the concentration of Ni reached $250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. This result exhibited Ni significant influence on carrots' growth. The calculated transfer ratio from roots to soil (EF) and the transfer ratio of shoots to roots (TF) showed that the activity level (or bioavailability) of these heavy metals varied with the concentration of the co-contaminant combination within the soil. For the Cd/Zn/Ni combinations with concentrations of $0.35<\text{Cd}<1.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $50<\text{Zn}<300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $60<\text{Ni}<250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd was the most bioavailable in the soil-roots interface. Zn was the next most bioavailable followed by Ni, i.e. in terms of bioavailability $\text{Cd}>\text{Zn}>\text{Ni}$. At a different concentration of the co-contaminants in the soil-roots interface, $3.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd, $600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Zn and $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Ni, the bioavailability followed this order $\text{Zn}>\text{Ni}>\text{Cd}$. While in the roots-shoots interface, the bioavailability was from greatest to least $\text{Cd}>\text{Zn}>\text{Ni}$ at concentrations of $0.35<\text{Cd}<1.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $50<\text{Zn}<180 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $60<\text{Ni}<170 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, but at higher concentrations for each heavy metal the bioavailability followed this order $\text{Cd}>\text{Ni}>\text{Zn}$. For co-contamination with the Cd-Zn combination, the bioavailability of these two heavy metals was always $\text{Cd}>\text{Zn}$ at all concentrations and interfaces. In addition, the interactions between Cd, Zn, and Ni were observed. Cd and Ni acted antagonistically and Zn and Ni acted synergistically with regards to uptake.

Keywords: Cd; Zn; Ni; interaction; *Daucus carota*; oasis soils

收稿日期: 2009-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC 40671167); 国家环境保护公益性项目(NEPCP 200809098); “973”项目(NKBRP(973); 2008CB417212)

作者简介: 赵转军(1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为污染过程与生态修复。E-mail: zhj_zhao@lzu.edu.cn

通讯作者: 南忠仁 E-mail: nanzhongren@lzu.edu.cn

在甘肃河西走廊地区,以有色金属冶炼和化工业为主的第二产业的发展对环境的影响是不容忽视的。河西走廊是中国主要的玉米制种产业带和甘肃省经济作物的主要产地^[1-2],该区属于干旱区,水资源匮乏,污水灌溉现象普遍存在,这在改善当地农民收益和提高水资源循环利用效率的同时,也引发了严重的污染问题^[3],其中,重金属污染较为突出^[4]。重金属通常具有不可降解性而难以从环境中消除,这为农作物吸收和进入人类食物链创造了有利的先天条件。在有色金属冶炼厂周围的耕作土壤中通常会出现 Cd、Zn、Ni 等重金属元素,其中 Cd 和 Ni 属于有毒元素,而 Zn 属于微量营养元素,但它在超过一定浓度限度后会对生物体产生有毒影响^[5-6]。这三种重金属均会通过土壤-农作物体系在蔬菜和谷物中积累^[7],也很容易对以它们为食的动物和人体产生毒害作用^[8]。

在土壤-作物系统中存在着复杂的生物化学反应^[9],故而影响重金属生物有效性的因素有很多,如土壤理化性质、作物种类、重金属的交互作用等^[10-12]。一般认为随着土壤中 pH 值、有机质、粘土含量的增加,重金属的生物活性会下降^[13-14]。根据同种重金属对不同蔬菜的毒理反馈试验研究,薛艳等^[10]指出,重金属对叶菜类蔬菜的有效性高于根菜类,如芹菜和菠菜相对萝卜来说有较强的富集重金属的能力。重金属之间的协同或拮抗作用也会大大改变重金属元素的生物活性,如低浓度的 Cd、Zn 在中性紫色土中会竞争结合位而呈现拮抗作用,但高浓度时的协同作用使元素活性迅速增强,毒害程度加大^[15]。Ting, Y P 等^[16]指出, Cd 会抑制植物对 Zn 的吸收,但在植物吸收 Cd 时, Zn 的存在并不产生影响。

综上所述,在土壤-作物系统中,影响作物吸收重金属的因素非常复杂,尽管目前已有很多在不同影响因素下的基础数据产生,但它们很多是受控于当地土壤和气候条件,并不基于特色地区,这种试验数据结果很难合理、正确地界定适应不同区域特色的重金属污染阈值,所以目前用来支持特色土壤环境质量政策制定的基础数据是极其令人期待的。在干旱区特定的气候条件下,绿洲土壤有着其特有的理化性质,这将导致重金属元素迁移转化规律的区域差异。本文主要以河西走廊临泽绿洲为研究区域,设计了 Cd/Zn、Cd/Zn/Ni 两种组合进行盆栽试验,通过对比分析来阐释绿洲土壤生境条件与 Cd、Zn、Ni 复合污染对重金属转移过程的影响,以期对指导干旱地区土壤环境质量标准指导值的制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

供试土壤为甘肃河西走廊张掖临泽绿洲灌淤土, pH 值为 8.16, 有机质含量为 1.50%, 阳离子交换量为 $8.10 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤全 Cd 含量为 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 Zn 含量为 $62.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 Ni 含量为 $53.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验采集绿洲耕作表面(0~20 cm)土壤晾干后过 2 mm 筛。设计时以研究区历史最高土壤污染浓度为界,按表 1 将不同剂量组合的重金属硝酸盐溶液加入 1.5 kg 干土中拌匀装入花盆,加水使土壤含水量为田间持水量的 60%,保持 2 d 后播入胡萝卜菜种,每种组合设 3 个平行,66 d 后分别取回土壤和胡萝卜样品。新鲜胡萝卜经清洗后分别称取根、株鲜重,并测其根长和株长。鲜样在 105 °C 杀青 20 min 后,再在 70 °C 下烘干 12 h,恒重后称量、粉碎过 60 目筛待用。土壤样品经风干、磨细后过 200 目筛,四分法取其中 50 g 待用。

1.2 分析测试

土壤重金属全量分析采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 三酸法消解,胡萝卜样品采用 GB/T 5009 中规定的 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 体系进行消解^[17]。所有消解液经 0.1% 的硝酸溶液定容至 50 mL 容量瓶,利用原子吸收光谱仪(Thermo Sollar M6 MKII)测定 Cd、Zn、Ni 含量。试验过程采用平行样、GSS-1 标准土样和 GSB-6 标准菠菜样进行质量控制,误差控制在 5% 以内,分析时采用国标溶液控制工作曲线。试剂均为优级纯试剂,试验器皿在使用前均经过 10% 硝酸浸泡 24 h 以上。分析时采用 SPSS13.0 和 Microsoft Excel 统计软件,统计方法是单因素方差分析,显著性检验方法是邓肯氏多范围检验和双尾 *T* 检验。

2 结果与讨论

2.1 两种组合下重金属污染对胡萝卜生长量的影响

植物样品的干物重可被用来评估重金属对植物的影响程度^[6]。在 Cd/Zn/Ni 和 Cd/Zn 两种复合污染组合下,胡萝卜茎叶和块茎干物重变化如表 1 所示。在 Cd/Zn/Ni 复合污染下,随着浓度的增加,与对照 TS0 相比,胡萝卜茎叶产量除了 TS1 水平外(相对产量增加了 49%),其余都呈现锐降趋势,相对产量最大下降了 99%(TS7 水平),但其中 TS2、TS3 水平降低不显著($P>0.05$);胡萝卜块茎产量与对照相比明显降低($P<0.05$),到较高浓度 TS7、TS8 水平时,生长量小至忽略不计。在 Cd/Zn 复合污染下,随着浓度的增加,与 TS0

表 1 两种重金属组合下胡萝卜各部位的干物重

Table 1 Influence of two different combinations of heavy metals on dry matter yield of carrot shoots and roots

处理水平	组合 A/mg·kg ⁻¹			茎叶/g·pot ⁻¹	块茎/g·pot ⁻¹	组合 B/mg·kg ⁻¹		茎叶/g·pot ⁻¹	块茎/g·pot ⁻¹
	Cd	Zn	Ni			Cd	Zn		
TS0	0	0	0	0.793±0.063b	0.708±0.077a	0	0	0.793±0.063b	0.708±0.077b
TS1	0.35	50	60	1.179±0.264a	0.605±0.099b	0.35	50	0.833±0.088b	0.447±0.061d
TS2	0.75	100	110	0.715±0.097b*	0.301±0.065c**	0.75	100	1.016±0.072a*	1.072±0.083a**
TS3	1.25	180	170	0.699±0.053b**	0.361±0.040c*	1.25	180	1.072±0.055a**	0.666±0.096bc*
TS4	1.8	300	250	0.102±0.030c**	0.022 3±0.009d**	1.8	300	0.778±0.085b**	0.573±0.070c**
TS5	2.5	450	350	0.032±0.017c**	0.004±0.002d**	2.5	450	0.786±0.087b**	0.618±0.039bc**
TS6	3.5	600	500	0.018±0.008c**	0.008±0.003d*	3.5	600	0.687±0.206b**	0.421±0.090d*
TS7	5	800	750	0.006±0.003c*	—	5	800	0.157±0.066d*	0.052±0.017f
TS8	7.5	1 000	1 100	0.010±0.004c*	—	7.5	1 000	0.329±0.088c*	0.216±0.047e

注: 小写字母不同则表示同一列数据中利用邓肯多范围检验结果达 0.05 显著水平; *, ** 表示同浓度水平下两组合在胡萝卜同部位干物重差异的显著性水平分别为 0.05 和 0.01。

相比,胡萝卜块茎产量除了 TS2 水平外(相对产量增加了 51%),其余均呈降低趋势,相对产量下降率最大为 93%(TS7 水平),但 TS3、TS5 水平降低不显著($P>0.05$);而对于地上部分的茎叶来说,变化趋势是在 TS1–TS3 水平显著增加($P<0.05$),在 TS4–TS6 水平有所降低,但结果不显著($P>0.05$);到了 TS7、TS8 产量则显著降低($P<0.05$)。在此组合所有浓度水平中,胡萝卜茎叶相对产量最大增加率为 35%(TS3 水平),最大下降率为 80%(TS7 水平)。至于两种组合中胡萝卜产量相对增加的情况,主要是由于浓度较低的重金属对植物生长的刺激作用造成的^[18–20]。

通过双尾 T 检验,可对两种组合下各相同浓度水平及胡萝卜同部位的生物量做对比研究,凸显 Ni 的作用。结果表明,在 TS2–TS8 浓度水平时,Cd/Zn/Ni (组合 A)的胡萝卜茎叶生物量均比 Cd/Zn (组合 B)明显降低($P<0.05$),其中,TS3–TS6 水平两组合对比差异的显著性水平达到 $P<0.01$ 。与 B 组合相比,A 组合茎叶生物量最大减少率 99.4%(TS5 水平)。在较低浓度的 TS1 水平,A 组合茎叶生物量比 B 组合高出 42%,但差异不显著。重金属污染会阻止根毛的生长,伤害植物的根系^[21],这造成了 A、B 组合下根系生物量的锐降。从表 1 可以看出,TS2–TS8 浓度 A 组合均明显较 B 组合对根系的毒害作用大($P<0.05$),产量分别比 B 组合产量低 45.87%~100%。和在胡萝卜茎叶中一样,TS1 水平时 A 组合下块茎生物量要比 B 组合多 35%,但差异不显著($P>0.05$)。这可能是因为低浓度重金属的促进生长作用大于 Ni 的抑制作用的原因^[22]。此外,在 Ni 水平达到 250 mg·kg⁻¹ 时,胡萝卜所有部位生物量均锐降,反映了 Ni 的参与对胡萝卜生长的巨

大影响。已有研究指出,过量的 Ni 会使植物出现褪绿症,造成植物干物重的降低^[23]。

2.2 Cd/Zn/Ni 交互作用对胡萝卜吸收重金属的影响

外源重金属通过土壤进入胡萝卜后,会在胡萝卜各部位重新分配,各部位重金属含量(以干重计)如表 2 所示。在 Cd/Zn/Ni 交互作用下,随着处理浓度的增加,3 种重金属在胡萝卜不同部位的含量与对照 TS0 相比呈显著增加的趋势($P<0.05$)。Cd 在胡萝卜各部分的分配规律为茎叶>块茎,这与 Cd 在 *Impatiens Balsamina* 和 *Calendula officinalis* 两种植物中的积累特性相反^[6],说明 Cd 在胡萝卜块茎–茎叶界面具有较强的迁移能力,这可能是因为胡萝卜对 Cd 的吸收,除了被动吸收外,还有代谢吸收的缘故^[24];Zn 在胡萝卜各部分的分配规律为在 TS0~TS2 浓度水平时,茎叶>块茎,但随着浓度的增加,块茎累积量明显高于茎叶。而 Ni 在胡萝卜各部位的分配规律并不明显,但总的来说,随着添加浓度的增加,浓度较低时(TS1~TS3)Ni 在胡萝卜各部位的含量增加较少,而浓度较高时,含量增加较多,尤其是达到 250 mg·kg⁻¹ 处理水平后,胡萝卜中含量相对激增,这与 Parida B K 等的研究中(土壤 pH 为 7.8)提到在胡芦巴(fenugreek)中 Ni 含量出现激增的浓度为 150 mg·kg⁻¹ 不同^[22],除了植物类型的原因外,造成差异的可能原因是绿洲灰钙土较高的 pH 值降低了 Ni 的有效性^[25]。

本文利用富集系数 EF (胡萝卜块茎中重金属含量/土壤中重金属含量)、转运系数 TF (胡萝卜茎叶中重金属含量/胡萝卜块茎中重金属含量)来表示重金属元素在土壤–胡萝卜体系土壤–根系界面、根–叶界面之间的迁移转化特征。 EF 、 TF 越大,表明重金属的迁移、

表 2 两种组合下重金属在胡萝卜不同部位的分布

Table 2 Concentration of two different combinations of heavy metals in carrot shoots and roots

处理水平		Cd/mg·kg ⁻¹		Zn/mg·kg ⁻¹		Ni/mg·kg ⁻¹	
		茎叶	块茎	茎叶	块茎	茎叶	块茎
TS0	组合 A	0.015±0.004d	0.012±0.005e	20.561±1.774f	16.221±2.547f	1.805±0.064g	2.425±0.298e
TS1		2.371±0.448b*	0.190±0.038de*	46.314±4.914e	37.519±2.499ef	13.335±2.700f	12.672±1.797d
TS2		3.408±0.406a**	0.366±0.070cd*	66.59±3.369de**	53.894±3.234de**	23.933±1.741e	22.612±1.580c
TS3		3.621±0.179a	3.812±0.270a**	60.046±5.719de*	63.56±5.394d	24.277±2.700e	29.554±3.390c
TS4		0.837±0.191c**	0.444±0.081bc**	60.985±3.900de**	157.333±10.312b**	41.330±3.632d	60.889±5.003b
TS5		0.463±0.057c**	—	80.556±6.301d	94.318±5.219c**	73.765±6.035c	59.091±4.728b
TS6		0.568±0.084c**	0.556±0.110b	120.739±8.780c	716.667±41.184a**	71.023±5.8308c	167.284±11.919a
TS7		—	—	677.586±29.599a**	—	99.138±4.300b	—
TS8		0.5051±0.081c*	—	539.899±12.827b**	—	153.535 4±19.574a	—
TS0	组合 B	0.015±0.004f	0.012±0.005e	20.561±1.774e	16.221±2.547e		
TS1		1.374±0.078d*	0.090±0.021e*	50.924±4.493d	40.199±3.399d		
TS2		1.492±0.085d**	0.070±0.009e*	45.081±3.740d**	34.314±3.600d**		
TS3		3.182±0.250	1.914±0.116b**	71.246±5.291c*	57.309±3.393c		
TS4		5.755±0.199c**	2.636±0.160a**	123.412±9.299a**	66.035±3.639c**		
TS5		4.149±0.432b**	2.558±0.337a	76.495±7.911c	67.301±4.726c**		
TS6		5.865±0.745a**	0.582±0.144d	108.521±8.331b	63.204±6.360c**		
TS7		1.369±0.273d	1.635±0.232c	108.026±8.189b**	154.519 2±10.160a		
TS8		0.767±0.091e*	0.531±0.098d	105.005±9.299b**	103.512±8.500b		

注：小写字母不同则表示同一列数据中利用邓肯多范围检验结果达 0.05 显著水平，*、** 表示同浓度水平下两组合在胡萝卜同部位重金属含量差异的显著性水平分别为 0.05 和 0.01。

输出能力越强^[10]。从表 3 可以看出,在土壤-胡萝卜块茎界面,3 种重金属的迁移能力特征为：在 TS1~TS4 水平,Cd>Zn>Ni;在 TS6 水平,Zn>Ni>Cd(TS7、TS8 块茎干重忽略不计故而无相应富集、转运系数);在胡萝卜块茎-茎叶界面,Cd 的迁移能力在 8 种梯度水平下始终最大,而 Zn 和 Ni 相比,在 TS1~TS3 水平时 Zn>Ni,而到 TS4 水平,也即 Ni 浓度达到 250 mg·kg⁻¹ 后

Ni 的作用凸显,表现为 Ni>Zn。

2.3 Cd/Zn 交互作用对胡萝卜吸收重金属的影响

在 Cd/Zn 复合作用下(见表 2,表 3),随着添加浓度的增加,Cd、Zn 在胡萝卜不同部位的含量与 TS0 相比呈显著增加趋势($P<0.05$)。和 Cd/Zn/Ni 交互作用下的影响一样,Cd 在胡萝卜各部分的分配规律依然为茎叶>块茎,表现出较高的迁移能力。而 Zn 在胡萝卜

表 3 绿洲土壤中供试胡萝卜的富集系数和转运系数

Table 3 The transfer ratio of roots to soil(EF) and shoots to roots(TF) of carrot in the oasis soils

处理水平	Cd				Zn				Ni	
	EFA	EFB	TFA	TFB	EFA	EFB	TFA	TFB	EFA	TFA
TS0	0.029±0.012	0.029±0.012	1.235±0.237	1.235±0.245	0.058±0.009	0.058±0.009	1.268±0.092	1.268±0.092	0.040±0.005	0.744±0.036
TS1	0.441±0.088	0.405±0.096	12.472±0.141*	15.356±2.936*	0.109±0.007**	0.232±0.020**	1.234±0.049	1.267±0.005	0.105±0.015	1.052±0.065
TS2	0.812±0.166**	0.075±0.011**	9.309±0.839**	21.341±1.849**	0.138±0.008*	0.108±0.011*	1.236±0.012*	1.314±0.029*	0.120±0.008	1.058±0.003
TS3	6.147±0.435**	2.332±0.142**	0.950±0.020**	1.663±0.030**	0.221±0.019*	0.138±0.008*	0.945±0.010*	1.243±0.019*	0.126±0.014	0.822±0.003
TS4	0.491±0.089**	2.478±0.150**	1.884±0.091*	2.183±0.057*	0.274±0.018**	0.113±0.006**	0.388±0.001**	1.869±0.038**	0.187±0.015	0.679±0.004
TS5	—	2.545±0.334	—	1.622±0.045	0.119±0.007	0.099±0.007	0.854±0.020*	1.137±0.038*	0.130±0.010	1.248±0.002
TS6	0.232±0.046	0.289±0.072	1.023±0.054**	10.081±1.310**	0.848±0.049**	0.063±0.006**	0.169±0.003**	1.717±0.042**	0.304±0.022	0.425±0.002
TS7	—	0.419±0.060	—	0.838±0.049	—	0.130±0.009	—	0.699±0.007	—	—
TS8	—	0.089±0.016	—	1.431±0.097	—	0.090±0.043	—	1.021±0.262	—	—

注：EFA、EFB 分别表明组合 A、B 的富集系数，TFA、TFB 分别表明组合 A、B 的转运系数；* 和 ** 表示同浓度水平下两组合富集系数和转运系数差异的显著性水平分别为 0.05 和 0.01。

各部位的分配规律则有所变化:除了 TS7 处理水平,其他浓度下均为茎叶>块茎。从表 3 可以看出,从总的趋势看,在土壤与胡萝卜块茎以及块茎与茎叶两个迁移界面上,两种重金属的迁移能力为 $Cd > Zn$,尤其是在胡萝卜根系-茎叶界面, Cd 元素的转运率超过 Zn 的 16 倍之多(TS2 水平)。

2.4 Ni 对胡萝卜吸收重金属的影响

对比 Cd/Zn/Ni、Cd/Zn 组合下胡萝卜吸收重金属的差异可以突显 Ni 的作用。从两组合下胡萝卜吸收 Cd、Zn 的情况来看(表 2), Ni 的参与,尤其是浓度达到 TS4 水平后,胡萝卜茎叶和块茎对 Cd 的吸收量相比同浓度水平出现明显降低($P < 0.01$),表现为 Ni 对胡萝卜吸收 Cd 的抑制作用。而 Ni 对胡萝卜块茎吸收 Zn 的影响是从 TS2 开始,在同浓度水平时吸收量明显增加,并在 TS4 水平时发生了显著的激增($P < 0.01$),说明 Ni 对胡萝卜块茎吸收 Zn 有促进作用。这和 Parida B K 等^[22]的研究相反,他提出随着 Ni 浓度的增加,胡芦巴(Fenugreek)根部和茎叶对 Zn 的吸收量越来越小,即 Ni 会抑制胡芦巴对 Zn 的吸收。此外,在 TS1 水平时,有 Ni 参与时块茎吸收的 Zn 量比无 Ni 时小,这和前面 Ni 对胡萝卜生物量影响一致,说明 Ni 在低浓度时对植物生长的促进作用要大于其毒害作用。另外从对比数值上看, Ni 对胡萝卜茎叶吸收量的影响并无规律性,这也从另一个角度说明, Ni 元素对胡萝卜根系的毒害要强于茎叶。

从两组合下 Cd、Zn 的富集转移情况看(表 3),在 TS4 水平前, Cd 元素的 $EFA > EFB$ ($P < 0.01$,但其中在 TS1 水平不显著),而到 TS4 水平后则反之($P < 0.01$)。Cd 元素的 TF 值在所有浓度水平($P < 0.05$)均为 $TFA < TFB$,这说明随着 Ni 的加入,尤其是到了 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度后,它的作用是降低 Cd 从土壤到胡萝卜块茎以及从块茎到茎叶的迁移率,即 Ni 的参与降低了 Cd 的活性。而对于 Zn 元素,在所有浓度水平下($P < 0.05$,但其中 TS5 的 EF 和 TS1 的 TF 的差异不显著),均为 $EFA > EFB$, $TFA < TFB$,这说明 Ni 显著提高了 Zn 从土壤到胡萝卜块茎中的迁移率,但却降低了 Zn 从胡萝卜块茎到茎叶的转化率,即 Ni 可以促进胡萝卜块茎对 Zn 的吸收,而抑制胡萝卜茎叶对 Zn 的吸收。另外,由于 Ni 对根系的毒害作用较强,总的来说,胡萝卜中的 Ni 和 Zn 在毒害方面的作用是叠加的。

3 结论

本文研究了绿洲灰钙土壤中 Cd/Zn/Ni、Cd/Zn 两

种复合污染条件下胡萝卜的生长及重金属迁移特征。通过两种组合的比较研究发现,在较低浓度时, Ni 对胡萝卜生长的促进作用较大,但随着浓度的增加, Ni 对胡萝卜各部位生长的毒害作用明显,尤其是对块茎。Ni 对胡萝卜各部位吸收 Cd 产生抑制作用,降低 Cd 在胡萝卜各界面上的迁移性;但对胡萝卜吸收 Zn 却产生促进作用,并促使 Zn 在土壤-胡萝卜块茎界面的迁移率增加,即 Cd、Zn、Ni 3 种重金属在绿洲土壤-胡萝卜体系中的复合作用表现为: Cd、Ni 的拮抗作用以及 Zn、Ni 的协同作用。此外,本试验含 Ni 组合中,胡萝卜干物重发生锐降和各部位重金属含量开始激增的起始浓度为 $\text{Ni} 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于其他研究结果^[22],这说明绿洲灰钙土壤较高的 pH 值降低了 Ni 的植物有效性。

参考文献:

- [1] Wang J S, Feng J Y, Yang L F, et al. Runoff-denoted drought index and its relationship to the yields of spring wheat in the arid area of Hexi Corridor, Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96 (4): 666-676.
- [2] 白晓军,周志龙,张财祥,等.河西走廊玉米制种基地选择中应注意的几个问题[J]. *甘肃农业科学与技术*, 2008, 33(10): 33-34.
BAI Xiao-jun, ZHOU Zhi-long, ZHANG Cai-xiang, et al. Some problems of choosing fertilizer corn base in Hexi corridor[J]. *Gansu Agr Sci and Techn*, 2008, 33(10): 33-34.
- [3] 王 拯.河西走廊工业化进程中的可持续发展问题初探[J]. *兰州铁道学院学报(社会科学版)*[J]. 2000, 19(5): 47-50.
WANG Zheng. Research on the problems of sustainable development in industrialization in the Hexi Corridor[J]. *Journal of Lanzhou Railway University(Social Sciences)*, 2000, 19(5): 47-50.
- [4] Arora M, Kiran B, Rani S, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111 (4): 811-815.
- [5] Eleni G P, Konstantinos G S, Dimitris L B. Impact of high cadmium and nickel soil concentration on selected physiological parameters of *Arundo donax* L[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43(4): 207-215.
- [6] Liu J N, Zhou Q X, Suna T, et al. Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(1): 261-267.
- [7] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. The effects of long-term irrigation using water on heavy metal contents of soils under vegetables[J]. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2005, 107(2-3): 151-156.
- [8] Alam M G M, Snow E T, Tanaka A. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Santa village, Bangladesh[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 308: 83-96.
- [9] Nanthi S B, Domy C A, Curtin D. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 78: 215-272.

- [10] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. 土壤, 2005, 37(1): 32–36.
- XUE Yan, SHEN Zhen-guo, ZHOU Dong-mei. Difference in heavy metal uptake between various vegetables and its mechanism [J]. *Soil*, 2005, 37(1): 32–36.
- [11] Wu F B, Zhang G P. Genotypic variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(6): 1163–1173.
- [12] Verma P, George K V, Singh H V, et al. Modeling cadmium accumulation in radish, carrot, spinach and cabbage[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31: 1652–1661.
- [13] Jung M C, Thornton I. Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine[J]. *Korea Appl Geochem*, 1996, 11(1–2): 53–59.
- [14] Rosselli W, Keller C, Boschi K. Phytoextraction capacity of trees growing on metal contaminated soil[J]. *Plant Soil*, 2003, 72: 256–265.
- [15] 朱波, 汪涛, 王艳强, 等. 锌、镉在紫色土中的竞争吸附[J]. 中国环境科学, 2006, 26(增刊): 73–77.
- ZHU Bo, WANG Tao, WANG Yan-qiang, et al. Competitive sorption-desorption of zinc and cadmium in purple soil[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(suppl): 73–77.
- [16] Ting Y P, Teo W K. Uptake of Cd and Zn by yeast: Effects of co-metal ion and physical and chemical treatments[J]. *Biores Technol*, 1994, 50: 113–117.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学出版社, 1999.
- LU Ru-kun. The agriculture chemistry analysis method of soil[M]. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1999.
- [18] Gisbert C, Clemente R, Navarro J, et al. Tolerance and accumulation of heavy metals by Brassicaceae species grown in contaminated soils from Mediterranean regions of Spain[J]. *Environ Exp Bot*, 2006, 56: 19–27.
- [19] Peralta-Videa J R, Rosa G, Gonzalez J H, et al. Effects of the growth stage on the heavy metal tolerance of alfalfa plants[J]. *Advance Environment Research*, 2004, 8(3–4): 679–685.
- [20] Lin Q, Shen K L, Zhao H M, et al. Growth response of *Zea mays* L. in pyrene copper co-contaminated soil and the fate of pollutants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150: 515–521.
- [21] 吕建波, 徐应明, 贾堤, 等. 土壤镉、铅污染对油菜生长行为及重金属累积效应的影响[J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11(2): 108–110.
- LV Jian-bo, XU Ying-ming, JIA Di, et al. Effect of Cd–Pb pollution on cole growth behavior and its accumulation effect of heavy metals in soil[J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2005, 11(2): 108–110.
- [22] Parida B K, Chhibba I M, Nayyar V K. Influence of nickel-contaminated soils on fenugreek (*Trigonella corniculata* L.) growth and mineral composition[J]. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98(2): 113–119.
- [23] Pandolfini T, Babbrielli R, Comparini C. Nickel toxicity and peroxidase activity in seedling of *Triticum aestivum* L. plant cell[J]. *Environment*, 1992, 15: 719–725.
- [24] 陈英旭, 林琦, 陆芳, 等. 萝卜根系对环境重金属铅、镉富集的修复作用[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2000, 26(1): 61–66.
- CHEN Ying-xu, LIN Qi, LU Fang, et al. Accumulation mechanism of Cd and Pb in radish roots[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University (Agric and Life Sci)*, 2000, 26(1): 61–66.
- [25] Antoniadis V, Robinson J S, Alloway B J. Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead, and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(4): 759–764.

致谢: 感谢中科院甘肃临泽农田生态系统国家野外科学观测研究站给予的大力支持!