

土壤砷、铅和汞胁迫对纽荷尔脐橙不同器官中砷铅汞质量分数的影响

淳长品^{1,3}, 彭良志^{2*}, 雷霆², 曹立¹, 江才伦¹, 凌丽俐¹

(¹ 中国农业科学院柑桔研究所, ² 国家柑橘工程技术研究中心, 重庆 400712; ³ 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715)

摘要: 枳砧纽荷尔脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck.)盆栽苗,在碱性紫色石膏子土中单独或混合加入砷、铅、汞,以研究砷、铅、汞在植株器官组织中的分布与累积。在3 a的盆栽试验期间,土壤中的砷、铅、汞质量分数分别维持在添加质量分数的30%~86%、46%~64%和84%~118%。结果表明,不同重金属在植株不同器官部位质量分数不一样,砷和汞在植株器官组织中的质量分数表现相同特征,根系>叶片>枝干>果皮>果肉,而铅为:根系>枝干>叶片>果皮>果肉。高质量分数处理的根系中砷、铅和汞质量分数最高分别达到7.2、773.6、0.50 mg·kg⁻¹,而砷、铅和汞在果皮中最高质量分数仅分别为0.15、0.06、0.006 mg·kg⁻¹,果肉中最高质量分数分别为0.06、0.05、0.004 mg·kg⁻¹,砷、铅、汞在果实中的最高质量分数远低于国家绿色食品限值标准。未发现土壤砷+铅+汞混合处理对其在植株器官组织内的累积有任何拮抗或协同效应。

关键词: 纽荷尔脐橙; 重金属; 胁迫; 器官组织

中图分类号: S666.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-9980(2009)03-281-06

Study on the concentrations of As, Pb and Hg heavy metals in organs and tissues of Newhall navel orange trees under soil stress of As, Pb and Hg

CHUN Chang-pin^{1,3}, PENG Liang-zhi^{2*}, LEI Ting², CAO Li¹, JIANG Cai-lun¹, LING Li-li¹

(¹Citrus Research Institute, CAAS, Chongqing 400712 China; ²National Engineering Research Center for Citrus, Chongqing 400712 China; ³College of Horticulture and Landscape, Southwest University, Chongqing 400715 China)

Abstract: Pot culture experiment was carried out to study heavy metal (HM) uptake from the soil contaminated with As, Pb and Hg and HM accumulation in organs and tissues of the plant. Calcareous purple soil was employed for pot culture by young Newhall navel orange (*Citrus sinensis* Osb.) on trifoliolate orange (*Poncirus trifoliolate* Raf.) rootstock. In the beginning, different HM was applied into the soil and made the additional HM concentrations in the soil as follows: As (30, 60 and 120 mg·kg⁻¹), Pb (500, 1 000 and 2 000 mg·kg⁻¹), Hg (1.0, 2.0 and 4.0 mg·kg⁻¹), As+ Pb + Hg (40 mg·kg⁻¹As+500 mg·kg⁻¹ Pb+1.5 mg·kg⁻¹, and 80 mg·kg⁻¹ As+1 000 mg·kg⁻¹ Pb+3.0 mg·kg⁻¹ Hg). The potted soil of the control was not applied any additional HM, but it had natural base concentrations of As, Pb and Hg about 7.10, 24.19 and 0.16 mg·kg⁻¹, respectively. In spring 2004, one-year-old Newhall navel orange trees were planted in pots. During 3-year pot culture, the concentrations of As, Pb and Hg in potted soils were stably kept at about 30% to 86%, 46% to 64%, and 84% to 118% of their original additional concentrations, respectively. Results showed that 2 years after potted culture, the accumulated concentration of As and Hg in organs and tissues of plant had the same characteristics: roots> leaves > sticks > peel>pulp, and that of Pb was roots>sticks> leaves>peel>pulp. For the highest-stress groups, the highest As, Pb and Hg concentrations accumulated in roots were 7.2, 773.6 and 0.50 mg·kg⁻¹, respectively. However, the HM concentration accumulated in fruit peel and pulp was low. The highest As, Pb and Hg concentrations in fruit peel were only 0.15, 0.06 and 0.006 mg·kg⁻¹, respectively; and that in fruit pulp were only 0.06, 0.05 and 0.004 mg·kg⁻¹, respectively. The highest HM concentrations in orange fruit in this experiment were much lower than the maximum residue limits of China National Green Food Standard. As+ Pb+Hg treatment did not show antagonistic or synergistic effects on heavy metal accumulation in plant organs or tissues.

Key words: Newhall navel orange; Heavy metal; Stress; Organs and tissues

收稿日期: 2008-08-05 接受日期: 2009-02-15

基金项目: 重庆市委重大专项(CSTC2007AA1016); 国家科技支撑计划课题(2007BAD61B03, 2007BAD47B04); 公益性行业(农业)科研专项(nyhyzx07-023); 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项

作者简介: 淳长品, 男, 助理研究员, 主要从事柑橘栽培、生理研究工作。Tel: 023-68349725, E-mail: chunpzhi@163.com

* 通讯作者。Author for correspondence. Tel: 023-68247009, E-mail: pengchun@cta.cq.cn

随着矿产资源、城市污泥和生活垃圾大量利用,各种农药和化肥的施用,以及矿井中地下水、选矿水的农田灌溉,土壤遭受人为重金属污染越来越严重^[1-2],受重金属污染的果园土壤不仅会影响果树的生长发育,降低农产品的产量与质量,而且还会通过食物链影响人类的健康^[3-4]。在发达国家,已将柑橘生产中的重金属纳入果园的管理范畴^[5],我国在果园重金属方面研究主要集中在环境质量的评价方面^[6-9]。但是,在世界范围内,有关重金属在果树上的吸收和累积研究的报道还很少^[10-11],在柑橘方面仅有 Liebig 等^[12]研究砷水培试验对柠檬的影响。我们通过人为控制土壤重金属质量分数的盆栽试验,研究重金属在柑橘器官和果实中的质量分数,以期绿色和无公害柑橘生产产地环境的选择提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验土壤为碱性紫色石骨子土,pH 值 8.0,有机质 0.46%,CaCO₃ 质量分数为 4 727.9 mg·kg⁻¹,有效氮、磷和钾质量分数分别为 17.7 mg·kg⁻¹、16.4 mg·kg⁻¹ 和 52.2 mg·kg⁻¹,砷(As)、铅(Pb)和汞(Hg)基础质量分数分别为 7.10 mg·kg⁻¹、24.19 mg·kg⁻¹ 和 0.16 mg·kg⁻¹。试验树为 1 a 生枳砧纽荷尔脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck)嫁接苗。盆栽用陶瓷盆高 30 cm,上下直径分别为 34 cm 和 30 cm。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2004 年 4 月至 2007 年 3 月在中国农业科学院柑桔研究所进行,采用盆栽方法,土壤重金属胁迫处理分别设有砷(砷酸二氢钾)、汞(氯化汞)和铅(醋酸铅)单独处理或混合处理 11 个,编号分别为 As1、As2、As3、Hg1、Hg2、Hg3、Pb1、Pb2、Pb3、Mix1 和 Mix2,土壤砷、汞和铅添加质量分数分别为 30、60、120 mg·kg⁻¹,1.0、2.0、4.0 mg·kg⁻¹,500、1 000、2 000 mg·kg⁻¹,40 mg·kg⁻¹+1.5 mg·kg⁻¹+500 mg·kg⁻¹ 和 80 mg·kg⁻¹+3.0 mg·kg⁻¹+1 000 mg·kg⁻¹,对照(CK)土壤未添加任何重金属。共计 11 个处理和 1 个对照。土壤重金属添加方法如下:用 5 kg 纯净水将各药剂充分溶解后,用喷雾器均匀喷在土壤上,然后充分混匀,把已配制好的土壤装入陶瓷盆中,每盆 20 kg。选生长相对一致试验树,每盆栽 1 株,每个处理或对照各 9 株,共 108 株。将盆栽树露置于平整的地块,用砖和木条使其盆底离地面约 10 cm 高,盆中上层土壤距盆口约 5 cm,其余按常规栽培管理,即施春肥、夏肥和秋肥共每年 3 次,每次施

尿素 30 g(氮质量分数≥46%,四川泸天化股份有限公司生产)和硫酸钾 20 g(氧化钾质量分数≥50.0%,台湾中化化肥有限公司生产)。2005 年部分试验树开始结果,每株 2~5 个果不等。

1.2.2 样品采集 2005 年 10 月,采集土层深 20 cm 左右的土壤,每盆取 100 g,每 3 盆采集的土壤混为一个样,每个处理采 3 个样(3 次重复),在与土壤相应植株上采集当年生春梢叶片从顶端往下第 3 片,每个样品 90 枚叶片,于 12 月在相应植株上采集果实样品,每个果实样品 6 个果。2006 年 12 月,按上年同样方法采集土壤、叶片和果实样品。

2007 年 3 月实验结束时,将植株从盆中取出,清洗干净后,划分为主根($\Phi > 0.2$ cm)、细根($\Phi \leq 0.2$ cm)、主枝($\Phi > 1$ cm)、侧枝(0.4 cm $< \Phi \leq 1$ cm)、细枝($\Phi \leq 0.4$ cm)和叶片等不同器官。主枝和侧枝的韧皮部和木质部分开。

土壤样品带回实验室,摊在白纸上风干,捡出细根和石块,研细,分别过 2 mm 和 0.149 mm 的尼龙筛,装入聚乙烯塑料袋密封备用。所有植株器官带回实验室用清水清洗 3 遍后,然后用蒸馏水清洗 3 次,再用重蒸水清洗 3 次。将清洗好的样品用干净纱布吸干水分后,放入烘箱,105 °C 杀酶 30 min 后,在 75~80 °C 恒温下烘干至恒重,用不锈钢万能粉碎机磨细后放入聚乙烯塑料袋密封备用。果实按植株器官方法洗涤,称重后,把果皮与果肉分开,再分别称重,切碎混匀,用电动捣碎机捣碎,然后用塑料袋密封放入-20 °C 低温冰箱中贮藏备用,测定前用研钵研磨成匀浆。

1.3 铅、砷、汞测定

土壤中铅经硝酸—高氯酸—氢氟酸消解,采用火焰原子吸收法测定,而砷和汞经硝酸—硫酸消解,土壤中砷采用紫外可见分光光度法测定,汞用测汞仪测定,用 gss-7 国家标准土样作分析质量控制。柑橘器官和果实中铅、砷、汞分别按国标 GB/T5009.12-2003、GB/T5009.11-2003 和 GB/T5009.17-2003 测定。

2 结果与分析

2.1 不同处理对纽荷尔叶片和果实重金属质量分数的影响

2.1.1 土壤砷胁迫对叶片和果实中砷质量分数的影响 表 1 结果显示,与胁迫处理土壤的起始砷添加质量分数相比,1 a 后(2005 年)砷单独处理,土壤的砷质量分数大幅度减少,仅为起始添加质量分数的

34.45%~58.73%, 表明雨水对土壤添加砷的淋失作用明显, 添加质量分数越高, 淋失越多, 但不成比例关系, 而土壤对混合处理砷吸附能力较强, 为起始质量分数的 84.25% 和 83.23%。2006 年处理土壤中砷质量分数稍低于 2005 年, 说明 1 a 后处理土壤仍有少量砷流失。各处理的叶片砷质量分数随土壤砷质量分数的增加而增加, 2006 年 As1、As2、As3、Mix1 和 Mix2 叶片砷分别为对照的 20.50、38.50、47.83、19.00、28.50 倍。果肉中砷质量分数低于果皮, 土壤砷胁迫条件下, 果皮和果肉中的砷质量分数分别为对照的 1.74~3.44 倍和 4.67~10.33 倍, 全果砷质量分数 0.042~0.086 mg·kg⁻¹, 为对照的 2.63~5.38 倍, 经 Statgraphics 软件分析显著高于对照, 处理间差异不显著, 但均在国家绿色食品限值范围内 (0.2 mg·kg⁻¹)。2006 年与 2005 年相比, 各处理叶片和果实中砷质量分数相近。

2.1.2 土壤铅胁迫对叶片和果实中铅质量分数的影响 土壤中添加的铅也容易被雨水淋失, 1 a 后 (2005 年) 各处理土壤的铅质量分数远远小于各自的起始添加质量分数, 仅为起始添加质量分数的 57.05%~77.99%; 铅的添加质量分数越高, 淋失越多。2006 年处理土壤的铅质量分数在 2005 年基础上又略有减少, 说明 1 a 后处理土壤仍有部分铅流失。各处理叶片中铅均高于对照, 且表现出随土壤铅质量分数的增加而增加的趋势。2006 年 Pb1、Pb2、Pb3、Mix1 和 Mix2 叶片铅质量分数分别为对照的

1.20、1.61、2.33、1.34、1.14 倍。绝大多数处理果肉中铅质量分数低于果皮。土壤铅胁迫条件下, 果皮和果肉中的铅质量分数分别为对照的 0.76~1.45 倍和 0.56~1.39 倍, 全果铅质量分数 0.029~0.047 mg·kg⁻¹, 为对照的 0.76~2.14 倍, 除 Pb1 处理显著低于对照外, 其余处理差异不显著, 但均在国家绿色食品限值范围内 (0.2 mg·kg⁻¹)。2006 年与 2005 年相比, 各处理叶片和果实中铅质量分数相近。

2.1.3 土壤汞胁迫对叶片和果实中汞质量分数的影响 在试验期间, 多数处理的土壤汞质量分数还略高于各自的添加质量分数, 说明土壤对添加的汞有很强的吸附性, 几乎没有淋失, 由于存在土壤基础质量分数汞, 使处理的土壤汞质量分数略高于添加质量分数。总体而言, 叶片汞质量分数随土壤汞质量分数增加而增加, 处理叶片汞质量分数 0.16~0.31 mg·kg⁻¹ (表 1), 为对照的 0.95~2.38 倍。果皮中汞质量分数略高于果肉或与果肉相近。土壤汞胁迫条件下, 果皮和果肉中的汞质量分数分别为对照的 3.00~6.00 倍和 2.00~4.00 倍, 全果汞质量分数 0.003~0.005 mg·kg⁻¹, 显著高于对照, 为对照的 2.00~5.00 倍, 但均在国家绿色食品限值范围内 (0.01 mg·kg⁻¹)。2006 年与 2005 年相比, 各处理叶片和果实中汞质量分数相近。

未发现重金属混合处理土壤对纽荷尔叶片或果实的砷、铅和汞质量分数有任何拮抗或协同效应。

2.2 纽荷尔植株不同器官中的重金属质量分数

表 1 土壤重金属胁迫对纽荷尔脐橙叶片和果实重金属质量分数的影响

Table 1 The concentration of heavy metals in leaves and fruits of Newhall naval orange trees under heavy metal stress in soil

类型 Type of HM	处理 Treatment	土壤 Soil/mg·kg ⁻¹		叶片 Leaf/mg·kg ⁻¹		果实 Fruit/mg·kg ⁻¹			
		2005	2006	2005	2006	2005 全果 Whole fruit	2006 年果皮 Fruit peel	2006 年果肉 Fruit pulp	2006 年全果 Whole fruit
As	Ck	7.08 e	6.91 e	0.08 d	0.06 e	0.016	0.043 b	0.006 d	0.017 b
	As1	17.62 d	16.27 d	1.25 cd	1.23 d	0.086	0.148 a	0.045 abc	0.076 a
	As2	31.68 c	28.72 c	2.04 b	2.31 b	-	0.128 ab	0.060 ab	0.080 a
	As3	41.37 b	35.48 b	2.90 a	2.87 a	-	0.075 ab	0.042 bc	0.052 a
	Mix1	33.70 bc	34.25 b	0.97 d	1.14 d	0.042	0.098 ab	0.028 c	0.049 a
	Mix2	66.59 a	64.44 a	1.71 bc	1.71 c	0.062	0.079 ab	0.062 a	0.067 a
Pb	Ck	24.77 d	24.29 d	3.89 c	3.95 c	0.022	0.042 ab	0.036 ab	0.038 a
	Pb1	310.77 c	227.77 c	5.43 b	4.73 c	0.037	0.048 ab	0.020 b	0.029 b
	Pb2	779.91 b	645.44 b	6.42 b	6.37 b	0.047	0.054 ab	0.033 ab	0.040 a
	Pb3	1454.40 a	1098.63 a	9.28 a	9.19 a	0.043	0.032 c	0.050 a	0.045 a
	Mix1	285.26 c	238.50 c	4.56 c	5.29 bc	0.035	0.039 c	0.038 ab	0.037 a
	Mix2	765.20 b	630.38 b	5.50 b	4.52 c	0.045	0.061 a	0.034 b	0.042 a
Hg	Ck	0.18 e	0.14 e	0.22 b	0.13 d	0.002	0.001 e	0.001 d	0.001 d
	Hg1	1.15 e	1.18 e	0.21 b	0.16 d	0.005	0.003 d	0.003 b	0.003 c
	Hg2	1.78 c	1.89 c	0.24 ab	0.21 c	-	0.005 b	0.003 b	0.004 b
	Hg3	4.20 a	4.21 a	0.31 a	0.31 a	-	0.006 a	0.004 a	0.005 a
	Mix1	1.46 e	1.26 c	0.24 ab	0.19 cd	0.005	0.003 d	0.002 c	0.002 d
	Mix2	3.26 b	3.10 b	0.25 ab	0.25 b	0.005	0.004 c	0.003 b	0.003 c

注: 不同字母表示有显著差异 (下同)。

Note: The different letters means significant different, The same below.

2.2.1 土壤砷胁迫对植株不同器官砷质量分数的影响 从总体上看,砷在植株地下部分的质量分数高于地上部分,在枝条韧皮部中的质量分数高于木质部。各器官组织的砷质量分数从高到低依次为细根、叶片、主枝韧皮部、细枝、主根、侧枝韧皮部、侧枝木质部、主枝木质部、果皮和果肉(表 1,2)。与对照相比,土壤砷胁迫条件下,植株不同器官和组织的砷质量分数显著提高,尤其以细根和主根内砷质量分数增加最为明显,分别为对照 11.16~28.64 倍和 4.75~11.50 倍;最少的为侧枝木质部,是对照的 1.09~4.54 倍。随砷胁迫质量分数的增加,根内砷质量分数有明显增加的趋势,但地上部分的器官和组织内的砷质量分数与砷胁迫质量分数之间不呈正比增长。

2.2.2 土壤铅胁迫对植株不同器官铅质量分数的影响 铅在植株地下部分的质量分数总体上高于地上部分,在枝条韧皮部中的质量分数高于木质部。各器官组织的铅质量分数从高到低依次为细根、主枝韧皮部、主根、侧枝韧皮部、细枝、侧枝木质部、主枝木质部、叶片、果皮和果肉(表 1,2)。与对照相比,土壤铅胁迫条件下,植株不同器官和组织的铅质量分数显著提高,以细根内铅质量分数增加最为突出,为对

照的 12.39~51.23 倍;最少的为细枝,是对照的 0.57~4.54 倍。随铅胁迫质量分数的增加,植株各器官和组织内的铅质量分数明显增加,且表现出与土壤铅胁迫质量分数成正比增加的趋势。

2.2.3 土壤汞胁迫对植株不同器官汞质量分数的影响 汞在植株地下部分的质量分数也高于地上部分,但在枝条韧皮部和木质部中的质量分数基本接近,无明显的高低变化规律。各器官组织的汞质量分数从高到低依次为细根、主根、叶片、主枝木质部、主枝韧皮部、侧枝韧皮部、细枝、侧枝木质部、果皮和果肉(表 1,2)。与对照相比,土壤汞胁迫条件下,植株大多数器官或组织的汞质量分数都有显著提高,以细根和主根内汞质量分数增加最为突出,分别为对照的 5.80~10.00 倍和 2.14~12.57 倍;最少的主枝木质部,是对照的 0.66~1.33 倍。随土壤汞胁迫质量分数的增加,细根和主根的汞质量分数增加较为明显,其他器官或组织的汞质量分数增加的规律不如根部明显。

未发现重金属混合处理土壤对纽荷尔植株器官和组织的砷、铅和汞质量分数有任何拮抗或协同效应。

表 2 土壤重金属胁迫条件下纽荷尔脐橙植株器官组织中的重金属质量分数
Table 2 The concentration of heavy metals in organs and tissues of Newhall naval orange trees under heavy metal stress in soil

类型 Type of HM	处理 Treatment	细根 Fine roots	主根 Taproots	主枝木质部 Rough branch xylem	主枝韧皮部 Rough branch phloem	侧枝木质部 Lateral branch xylem	侧枝韧皮部 Lateral branch phloem	细枝 Twig
As	CK	0.25 c	0.04 c	0.03 d	0.13 c	0.06 b	0.07 d	0.08 c
	As1	5.26 a	0.19 b	0.10 a	0.35 ab	0.06 b	0.20 b	0.17 bc
	As2	7.13 a	0.21 b	0.08 ab	0.36 a	0.21 a	0.23 a	0.30 a
	As3	7.16 a	0.46 a	0.07 b	0.26 b	0.25 a	0.24 a	0.41 a
	Mix1	2.79 b	0.19 b	0.04 cd	0.35 ab	0.09 b	0.17 c	0.23 ab
	Mix2	3.30 b	0.20 b	0.06 bc	0.32 ab	0.08 b	0.17 bc	0.27 ab
Pb	CK	15.10 e	2.72 d	1.45 c	18.76 d	1.32 d	18.42 e	7.54 cd
	Pb1	310.84 e	21.54 c	8.60 b	27.40 c	6.60 c	25.74 e	4.32 d
	Pb2	523.29 b	43.51 b	10.83 b	33.69 b	12.13 b	30.78 b	19.30 b
	Pb3	773.55 a	68.61 a	23.63 a	47.87 a	22.75 a	48.37 a	34.22 a
	Mix1	258.52 cd	19.47 c	4.27 c	33.04 b	6.90 c	22.35 cd	10.44 c
	Mix2	187.10 d	23.83 c	8.13 b	32.33 b	8.22 c	21.95 d	12.59 c
Hg	CK	0.05 b	0.07 e	0.06 ab	0.02 c	0.02 c	0.02 b	0.02 c
	Hg1	0.32 a	0.21 c	0.08 a	0.03 b	0.04 a	0.04 a	0.02 c
	Hg2	0.50 a	0.44 b	0.06 ab	0.07 a	0.02 c	0.04 a	0.03 ab
	Hg3	0.42 a	0.88 a	0.04 b	0.04 b	0.03 b	0.04 a	0.03 ab
	Mix1	0.30 a	0.15 d	0.04 b	0.05 ab	0.03 b	0.04 a	0.03 ab
	Mix2	0.29 a	0.20 cd	0.06 ab	0.05 ab	0.02 c	0.02 b	0.04 a

3 讨 论

土壤重金属流失与土壤理化性质(如有机质、矿物质、酸碱度和阳离子代换量等)和重金属的形态密切相关^[13-16]。在本试验中,单独添加砷和铅较易被雨水淋失,而汞几乎没有损失,这可能是由于本试验土

壤 pH 值和 CaCO₃ 质量分数较高,土壤胶体负电荷多,有机质质量分数低有关。魏显有等^[14]研究表明土壤对砷(V)吸附随 pH 值升高而减少,高 pH 值使土壤对添加砷(V)吸附能力降低,从而流失较多;而简放陵^[15]研究砷的吸附与解吸认为: pH 值、CaCO₃、Ca²⁺、Mg²⁺和 K⁺是影响砷吸附的主要因素,但高 pH

值和 CaCO_3 紫色土吸附的砷不稳定易解吸。外源铅进入土壤后的化学行为受很多因素制约, 其中土壤有机质的络合及粘土矿物的吸附作用是主要因素, 铅在土壤中一般与有机质结合, 土壤有机质质量分数越高, 其吸附能力越强^[16], 由于供试土壤为紫色石膏子土壤, 其有机质较低, 对铅的吸附能力不强, 可能是造成本试验土壤中铅流失的主要原因。不同土壤对 Hg^{2+} 吸附量主要反应在自由能变, 自由能变越低, 汞的吸附能力越强^[17]。推测 Hg^{2+} 在高 pH 值和 CaCO_3 紫色土中易与 OH 形成沉淀或碳酸盐沉淀, 造成自由能降低, 因而不易流失。重金属在土壤中都有其最大吸附量, 当重金属吸附量达饱和时, 其吸附量就会明显减少, 多余的重金属会随雨水流失。因此, 高质量分数的重金属在土壤中流失量大, 可能与此相关。当三者重金属混合后加入土壤, 土壤对砷和铅的吸附能力有所增加, 推测是不同种类重金属混合施入土壤后, 影响土壤的理化性质和重金属的形态, 以及重金属离子之间相互竞争土壤中胶体电荷所致。

植株吸收、运转和累积重金属的能力取决于土壤理化性质、土壤中重金属质量分数以及植物种类^[1,14]。本试验砷、铅和汞在土壤中被植株吸收后主要集中在根部, 纽荷尔脐橙植株地下部质量分数明显高于地上部分(特别是细根部位), 这是由于植株根部与土壤直接接触, 且根部是吸收矿质营养的主要器官, 导致根系重金属质量分数大大高于地上部分。植株地上部分重金属质量分数不仅与土壤中重金属质量分数和根系吸收能力有关, 还取决于 As、Pb 和 Hg 向上迁移的能力; 另外, 柑橘植株是由地下部分的砧木和地上部分嫁接的接穗品种构成, 因此植株重金属的质量分数不仅与地上部分的品种有关, 甚至与地下部分的砧木的关系更为密切。根系吸收的矿质元素在植物体内主要是随蒸腾流沿木质部向上运输到植物各部位, 进行再次分配。张连忠等^[18]认为, 重金属进入根系后先与蛋白质、多糖和核酸等结合, 然后才向地上部分迁移, 试验结果表明, 分配到叶片的砷和汞质量分数明显高于其它器官和组织, 原因可能是由于叶片是蒸腾流的最主要原动力, 砷和汞进入根系后形成了有利于随蒸腾流向上运输的化合物, 向上运输过程中容易通过层层关卡的阻力到达叶片, 从而叶片砷和汞质量分数较高, 而铅则相反。研究结果显示纽荷尔脐橙植株韧皮部的重金属质量分数较高, 尤其是主枝韧皮部, 这与赵政阳等^[10]研究砷在苹果上的结果相似, 由此推测韧皮部可能是纽

荷尔植株地上部分重金属累积残留的主要部位。分配到果实中重金属明显低于其他器官, 可能原因, 一是果实是植株的末端, 运输距离最远; 二是运往果实要通过果柄, 运输方式改变会引起阻力增加, 从而导致重金属质量分数分配的差异。果皮重金属质量分数大于果肉, 可能原因是果实内重金属随蒸腾流转运至果皮, 水分蒸腾后重金属滞留在果皮; 另外, 空气中的少量重金属也可能被果面吸收。

4 结 论

不同重金属在植株不同器官部位质量分数不一样, 砷和汞在植株器官组织中的质量分数表现相同特征, 根系>叶片>枝干>果皮>果肉, 而铅为: 根系>枝干>叶片>果皮>果肉。随着土壤中重金属质量分数的提高, 植株地上部累积重金属能力有增加的趁势。土壤中重金属质量分数远远高于国家规定的绿色果品生产基地标准, 但果实中砷、铅和汞最高质量分数仅分别为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均低于国家绿色食品限值标准(分别为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

参考文献 References:

- [1] LUO Chun-ling, SHEN Zhen-guo. The mechanisms of heavy metal uptake and accumulation in plants[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2003, 20(1): 59-66.
罗春玲, 沈振国. 植物对重金属的吸收和利用[J]. 植物学通报, 2003, 20(1): 59-66.
- [2] SMITH E, NAIDU R, ALSTON A M. Arsenic in the soil environment: A review[J]. Adv. Agron, 1998, 64: 149-195.
- [3] CHEN Tong-bin, LIU Geng-ling. Effect of arsenic on rice (*Oryza sativa* L) growth and development and its mechanism[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1993, 26(6): 50-58.
陈同斌, 刘更另. 砷对水稻生长发育的影响及其原因[J]. 中国农业科学, 1993, 26(6): 50-58.
- [4] XU Hong-ning, XU Jia-lin. The effect of complex pollution of heavy metals in soil environment on the growth of wheat[J]. China Environmental Science, 1993, 13(5): 367-371.
徐红宁, 许嘉琳. 土壤环境中重金属复合污染对小麦的影响[J]. 中国环境科学, 1993, 13(5): 367-371.
- [5] PERYEA F J. Heavy metal contamination in deciduous tree fruit orchards: implications for mineral nutrient management[J]. ISHS Acta Horticulturae, IV International Symposium on Mineral Nutrition of Deciduous Fruit Crops, 2001, 564: 31-39.
- [6] HUANG Yun, LI Dao-gao, LI Qi-lin, XIE Jin-feng, ZENG Hong. Assessment of the soil environmental quality of the citrus orchards in Three Gorges Reservoir region[J]. Journal of Fruit Science, 2004, 21(3): 247-251.
黄昀, 李道高, 李其林, 谢金峰, 曾红. 三峡库区柑橘园土壤环

- 境质量研究[J]. 果树学报, 2004, 21(3): 247-251.
- [7] CHUN Chang-pin, PENG Liang-zhi, CAO Li, JIANG Cai-lun, LEI Ting. Preliminary study on the arsenic of soil and fruit in different orange orchards[J]. South China Fruits, 2005, 34(5): 13-14.
淳长品, 彭良志, 曹立, 江才伦, 雷霆. 不同柑橘园土壤和果实砷浓度初步分析[J]. 中国南方果树, 2005, 34(5): 13-14.
- [8] ZHANG Lin-sen, LIANG Jun, WU Chun-lin, DUAN Min, WANG Xi-ling, ZHAO Zheng-yang, ZHAO Suo-lao. Evaluation and concentration soil heavy metals in apple orchards of Shaxi province[J]. Journal of Fruit Science, 2004, 21(2): 103-105.
张林森, 梁俊, 武春林, 段敏, 王西玲, 赵政阳, 赵锁芳. 陕西苹果园土壤重金属浓度水平及其评价[J]. 果树学报, 2004, 21(2): 103-105.
- [9] FENG Jian-guo, TAO Xun, ZHANG An-sheng, YU Yi, XU Zhi-qiang, WANG Hong-tao, YAO Xi-lai, ZHANG Hong. The pollution of pesticides and heavy metal in apple orchards and its control countermeasures[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 1998, 14(3): 29-31.
冯建国, 陶训, 张安盛, 于毅, 徐志强, 王洪涛, 姚希来, 张洪. 苹果园农药和重金属污染及其治理对策[J]. 中国农学通报, 1998, 14(3): 29-31.
- [10] ZHAO Zheng-yang, ZHANG Cui-hua, LIANG Jun, LIU Zi-long, GAO Hua. Studies on arsenic pollution in the apple orchards applied asomate[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(5): 1117-1122.
赵政阳, 张翠花, 梁俊, 刘子龙, 高华. 施用农药福美砷对苹果果园砷污染的研究[J]. 园艺学报, 2007, 34(5): 1117-1122.
- [11] TRAPPE J E, STAHLY E A, BENSON N R, DUFF D M. Mycorrhizal deficiency of apple trees in high arsenic soils[J]. Hortscience, 1973, 8(1): 52-53.
- [12] LIEBIG G F J R, BRADFORD G R, VANSELOW A P. Effects of arsenic compounds on citrus plants in solution culture[J]. Soil Sci, 1959, 88: 342-348.
- [13] ZHANG Ming-kui, XIA Jian-qiang. Effects of soil heavy metal fractions on transport of metals in surface run off[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 85-88.
章明奎, 夏建强. 土壤重金属形态对径流中重金属流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 85-88.
- [14] WEI Xian-you, WANG Xiu-min, LIU Yun-hui, TAN Jian-xin. The study of the adsorptive behaviour of arsenic in soil and its form distribution[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1999, 22(3): 28-30, 55.
魏显有, 王秀敏, 刘云惠, 檀建新. 土壤中砷的吸附行为及其形态分布研究[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(3): 28-30, 55.
- [15] JIAN Fang-ling. Studies on arsenate adsorption and desorption and relation with purple soil properties[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1994, 3(3): 138-145.
简放陵. 砷的吸附解吸及其与土壤性质的关系[J]. 热带亚热带土壤科学, 1994, 3(3): 138-145.
- [16] YANG Jin-yan, YANG Xiao-e, HE Zhen-li, YANG Jin-ying. Advance in the studies of Pb adsorption and desorption in soils[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(1): 102-107.
杨金燕, 杨肖娥, 何振立, 杨金英. 土壤中铅的吸附—解吸行为研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 102-107.
- [17] YAO Ai-jun, QING Chang-le, MOU Shu-sen. Adsorption and bound characteristics of soil minerals with Hg[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(4): 129-131.
姚爱军, 青长乐, 牟树森. 土壤矿物对汞的吸附特性研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 129-131.
- [18] ZHANG Lian-zhong, LU Ke-guo, YANG Hong-qiang. The distribution and accumulation of cuprum and cadium in young apple tree [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(1): 111-114.
张连忠, 路克国, 杨洪强. 苹果幼树铜、镉分布特征与累积规律研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 111-114.

本刊开辟稿件“绿色通道”的启事

为了及时报道我国果树科学研究的重大成果与最新进展, 本刊开辟有部分稿件的绿色通道:

- 1、国家自然科学基金资助项目的论文;
- 2、国家攻关项目的论文;
- 3、国家 863 项目的论文;
- 4、国家 973 项目的论文;
- 5、“新品种选育快报”栏目的论文。

以上来稿请连同 150 元(每篇)稿件审理费一起寄来, 编辑部将及时送审, 2 个月内通知审定结果, 通过终审的稿件 4 个月之内刊出。稿酬优惠。欢迎踊跃投稿。

《果树学报》编辑部