

白玉杰, 沈根祥, 陈小华, 等. 三种蔬菜对镍累积转运规律及食用安全研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1619–1625.

BAI Yu-jie, SHEN Gen-xiang, CHEN Xiao-hua, et al. Accumulation and transport of nickel in three vegetable crops and their edible safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1619–1625.

三种蔬菜对镍累积转运规律及食用安全研究

白玉杰¹, 沈根祥^{2*}, 陈小华², 郭春霞², 钱晓雍², 赵晓祥¹, 周忠强³

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201020; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 华东理工大学资源与环境学院, 上海 200237)

摘要: 为了解三种蔬菜(黄瓜、豇豆、青椒)体内镍(Ni)累积转运规律及食用安全, 采用盆栽实验研究了不同浓度Ni处理[原土(对照)、200、350、500、650、800 mg·kg⁻¹]对三种蔬菜生物量、体内分配特征及富集规律的影响。结果表明:(1) Ni对三种蔬菜生长的影响因蔬菜品种不同而不同。在试验浓度范围促进黄瓜的生长; 低浓度Ni促进青椒和豇豆生长, 当土壤中Ni浓度为650 mg·kg⁻¹时青椒和豇豆的生长受到抑制。(2) 在所研究土壤Ni浓度条件下三种蔬菜各部位Ni含量分布不同, 青椒和豇豆中根>茎叶>可食部分; 黄瓜中茎叶>根>可食部分。三种蔬菜中Ni由根部向可食部位转运能力豇豆>黄瓜>青椒; 根部向茎叶转运能力黄瓜>豇豆>青椒。(3) 黄瓜、豇豆、青椒可食部分Ni累积量与土壤中Ni投加量呈显著正相关关系(r^2 分别为0.973、0.984、0.992, $P<0.05$)。三种蔬菜可食部分Ni含量高于基于美国环境保护署(USEPA)推荐的Ni人体最大允许摄入量所推导的新鲜蔬菜中Ni的安全阈值(成人3.58 mg·kg⁻¹, 儿童2.83 mg·kg⁻¹)。Ni在豇豆中的富集能力高于黄瓜和青椒, 更容易超过食品安全阈值, Ni污染土壤要避免种植豇豆。

关键词: 镍; 食用蔬菜; 累积特征; 转运规律; 食用安全

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)08-1619-07 doi:10.11654/jaes.2017-1565

Accumulation and transport of nickel in three vegetable crops and their edible safety

BAI Yu-jie¹, SHEN Gen-xiang^{2*}, CHEN Xiao-hua², GUO Chun-xia², QIAN Xiao-yong², ZHAO Xiao-xiang¹, ZHOU Zhong-qiang³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201020, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. College of Resources and Environment, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In the present study, the accumulation characteristics of nickel (Ni) in three kinds of vegetable crops (cucumber, cowpea and green pepper) and their safety for ingestion were investigated. A pot experiment was carried out with six different dosages of Ni (control, 200, 350, 500, 650, and 800 mg·kg⁻¹) to investigate the effects of Ni on the biomass and accumulation of Ni in different parts of the vegetable crops. The results showed that: (1) The effects of Ni on the growth of three vegetable crops differed. The growth of cucumber was promoted by Ni at the concentration range tested. Relatively low concentration of Ni promoted the growth of green pepper and cowpea. Furthermore, the growth of green pepper and cowpea was inhibited when the concentration of Ni in soil was above 650 mg·kg⁻¹. (2) The amount of Ni in different parts of the vegetable crops was different. In green peppers and cowpea, Ni accumulation was in the order of root> stem and leaf> fruit, while, in cucumber, the accumulation was in the order of stem and leaf> root> fruit. The transportation rate of Ni from root to edible parts was in the order of cowpea>cucumber>green pepper, and that from root to stem and leaf was in the order of cucumber> cowpea> green pepper. (3) The accumulation of Ni in the edible parts positively correlated with the amount of Ni in soil (R^2 was 0.973, 0.984, and 0.992,

收稿日期: 2017-11-13 录用日期: 2018-02-08

作者简介: 白玉杰(1993—), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 从事受损生态环境修复研究。E-mail: 18302153857@163.com

*通信作者: 沈根祥 E-mail: shengx@saes.sh.cn

基金项目: 上海市科委重大科技攻关项目(17DZ1202003); 上海市环保重大科研项目(2016-08)

Project supported: Key Fund Project of Shanghai Science and Technology Committee (17DZ1202003); Key Fund Project of Shanghai Environment Protection Bureau(2016-08)

respectively, $P < 0.05$). The concentration of Ni in the edible parts was higher than the safety threshold of Ni in fresh vegetables based on the maximum allowable intake of Ni for humans recommended by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) (adult $3.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; children $2.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The concentration of Ni in cowpea exceeds the food safety threshold with high probability. Therefore planting cowpea in Ni contaminated soils is not recommended.

Keywords: nickel; edible vegetable; accumulation characteristic; transport rule; food safety

长期以来,由于我国经济发展方式粗放和产业结构布局不合理,污染物排放总量居高不下,部分地区土壤重金属污染严重,对农产品质量和人体健康构成了严重威胁^[1]。土壤重金属污染不仅影响农作物生长,更为重要的是土壤中重金属经植物吸收和转运后进入食物链被动物和人类吸收并在体内累积,最终对动物和人产生极强的毒害作用^[2]。随着工业的不断发展,越来越多的镍被释放到环境中引起大气、水、土壤环境中镍的累积^[3]。镍是某些高等植物必需营养元素,但在过量的情况下镍也是一种有毒的化学物质^[4-5]。世界卫生组织(WTO)所属的国际癌症研究机构(IACR)公布的39种(类)对人致癌物质中镍被列为其中之一。为控制镍对人体危害世界上许多国家已制订了镍的排放标准,工业方面镍对人体的危害已经逐渐为人们所认识并加以控制^[6]。农业方面作物中镍主要来源于土壤,杨国义等对珠江三角洲典型区域农业土壤中镍含量进行调查,结果表明有24.9%的土壤样品中镍含量超过国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)的二级标准,镍已经成为仅次于汞的重要污染物^[7-8]。目前国家大力推进低效工业用地复垦减量化工作,但缺乏基于食用农产品质量安全的低效工业用地复垦农用土壤环境质量分级标准体系。一些低效工业用地可能会有镍污染,而国家《土壤污染风险管控标准农用地土壤污染风险筛选值和管制值》中镍只有筛选值($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),没有管制值。关于镍对农作物毒性及在农作物体内累积转运规律前人进行了一些研究,已有的研究证明:不同作物品种对镍的累积量各有差异,玉米对镍的富集能力最强,叶菜类蔬菜对镍富集能力较高,瓜果根茎类镍富集能力最低^[9-11]。作物中镍含量与土壤镍含量间有较好的相关性^[12-13]。目前大多数研究主要集中在田间土壤和作物的镍污染分布及污染程度的调查以及配制低浓度镍的盆栽实验。有关高浓度镍污染土壤与作物中镍含量及转运规律的研究还不够深入。

本文通过盆栽实验探讨镍对黄瓜、豇豆、青椒3种人们日常餐桌上蔬菜的影响,研究镍在3种蔬菜体内累积迁移规律。为合理利用镍污染土壤提供理论

依据,以此依据为基础形成基于食用农产品质量安全的低效工业用地复垦农用土壤环境质量分级标准体系,为指导无公害蔬菜生产及利用生物修复技术治理土壤镍污染提供理论支持,对土壤镍污染防治及农产品安全生产具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 材料

盆栽试验于2017年在上海市青浦现代智能农业园进行。前期选取需要复垦为农用地的某电镀厂表土(理化性质及重金属含量见表1~表2),经风干、磨碎后作为供试土。选用镍作为污染重金属,以分析纯试剂硝酸镍配制成盐溶液加入到供试土中模拟污染土,混匀进行盆栽实验。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples

pH	阳离子交换量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	水解性氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
5.7	14	31.9	734.2	253.4	868.5

表2 供试土壤重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Heavy metals concentration of soil samples($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

分析指标	铜	铬	镍	锌	铅	镉	砷	汞
含量	121	191	126	969	42	0.23	9.69	0.10

供试蔬菜选用人们餐桌上常见的3种不同类型蔬菜,黄瓜(*Cucumis sativus* L.)、豇豆(*Vigna unguiculata*)、青椒(*Capsicum annuum* L.)。

1.2 盆栽实验设计

参考土壤环境质量标准(GB 15618—1995 三级标准)以及文献报道,每种蔬菜盆栽实验设5个梯度同时设空白对照(原土)共6个处理,每个处理设3个平行,共计54盆。土壤中镍浓度设计为200、350、500、650、800 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,按照设定的标准浓度称取相应质量的硝酸镍加水稀释至一定量与土壤充分混合、拌匀,每个处理施相同的有机肥以底部带有空隙的塑料盆进行实验,盆底加盆托防露土。塑料盆直径30 cm,

高约25 cm,每盆供试土壤5 kg。盆栽露天放置,生长期根据实际情况定量浇水,各盆栽采取一致的管理。

1.3 样品采集与分析方法

土壤稳定一周后进行育苗,蔬菜生长期保持土壤湿度为田间持水量60%。实验开始后每日早上观察幼苗的生长发育状况,9~15周进行采摘称重确定农作物产量。

土壤测定:四分法取土样,风干、研磨、过筛。pH值、有机质、CEC、N、P、K等均参照《土壤农业化学分析方法》进行测定^[4]。土壤中重金属指标采用火焰原子吸收分光光度计法(Agilent 280 AA)测定。

蔬菜可食部分镍含量测定:按照GB/T 5009.138—2017推荐方法,采集盆栽蔬菜样品可食部分,用自来水冲洗干净,再以去离子水冲洗,用滤纸吸去表面水份后用食品加工器粉碎,制成待测样放入塑料瓶中,冷冻保存用火焰原子吸收分光光度计法(Agilent 280 AA)测定镍含量。

根、茎叶镍含量测定:按照GB/T 5009.138—2017推荐方法,植物样洗净风干后分取根、茎叶粉碎,经浓硝酸-高氯酸消化,用火焰原子吸收分光光度计法(Agilent 280 AA)测定镍含量。

1.4 数据处理方法

数据处理及统计分析使用Excel 2007和SPSS 12.0,作图使用Origin 9.0。

1.5 农产品中镍限量赋值方法

我国有关蔬菜、水果及粮食的卫生标准中还没有具体对镍的含量作出限定,本研究使用靶标危害指数法(Target hazard quotients, THQ)推算新鲜蔬菜中镍限量值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。具体计算公式为:

$$THQ = (C \times EF \times ED \times IR) / (BW \times AT \times RfD) \times 10^{-3}$$

式中: C 为新鲜蔬菜中污染物的平均含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; EF 为暴露频率, $365\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$; ED 为暴露年数, 70 a ; IR 为我国每日新鲜蔬菜摄入量,成人摄入量按 $335\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$,儿童摄入量按 $232\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$; BW 为我国人体的平均体重,成人体重按 60 kg 计,儿童体重按 33 kg 计; AT 为平均暴露时间, $365\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ ×暴露年数 a 。 RfD 为经口摄入参考剂量(Reference dose),主要参考美国国家环保局(EPA)综合风险信息系统(IRIS)及其他来源针对主要污染指标的参考剂量,镍为 $0.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[15-16]。

当 THQ 值 ≤ 1 ,表明人体对目标区生长的蔬菜消费基本不产生健康风险; THQ 值 > 1 时,可引起人体健康风险。这里设置 $THQ=1$,按上述公式推算出新鲜蔬

菜镍的限量值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度镍处理土壤对3种蔬菜生物量的影响

根据实验设计在不同浓度镍污染处理的土壤中种植黄瓜、豇豆、青椒3种蔬菜,待蔬菜成熟后采摘蔬菜可食部分,用去离子水清洗,称重,确定生物量。由图1可知,在所研究的镍浓度条件下,由于3种蔬菜类型不同镍对其生物量的影响也不同。随着土壤中镍含量的增加,黄瓜生物量呈增长趋势;青椒和豇豆生物量先增加后减少。当土壤中镍浓度为 $650\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到青椒和豇豆的生长抑制浓度,开始抑制青椒、豇豆生长,实验浓度范围没达到黄瓜生长抑制浓度。通过对玉米、紫花苜蓿、小白菜、莴笋等作物实验发现低浓度镍促进植株生长,高浓度镍抑制生长,生物量表现出先增后减的趋势,由于作物类型不同抑制浓度也不同^[17-20]。原因分析可能为低含量的镍对蔬菜生长有积极的“刺激作用”,改善氮素利用,促进植物体内一些酶的活性,促进植物生长^[21]。当超过某一阈值时,通过抑制作物的细胞分裂和伸长,刺激和抑制一些酶的活性影响组织蛋白质合成、降低光合作用和呼吸作用、伤害细胞膜系统,出现生长迟缓、植株矮小、产量下降甚至死亡等症^[22]。

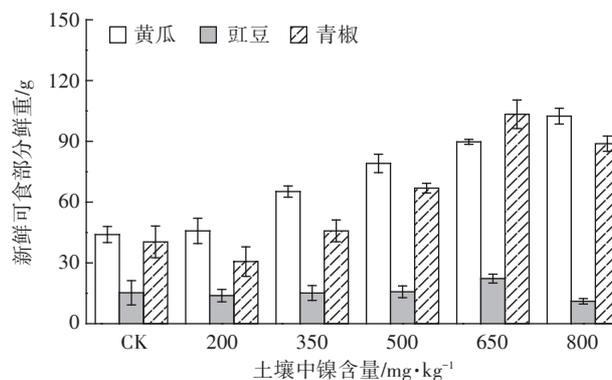


图1 3种蔬菜新鲜可食部分鲜重

Figure 1 Fresh weight of edible parts in three kinds of vegetable

2.2 3种蔬菜体内镍分布规律及转运特征

对3种蔬菜根、茎叶、可食部分镍含量分析发现茎叶和根中镍含量远远高于可食部分镍含量(图2)。由于3种蔬菜属于不同的品种,相同部位镍含量存在差异。黄瓜茎叶中镍含量最高,豇豆根部和可食部分镍含量最高。在相同的镍污染浓度下黄瓜、豇豆对镍的累积量高于青椒,镍容易在黄瓜茎叶、豇豆根部和

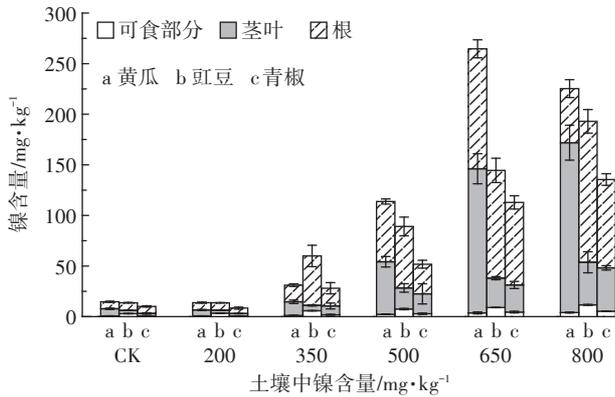


图2 3种蔬菜体内各部位镍含量

Figure 2 Concentrations of Ni in the tissues of three vegetables

可食部分累积。作物对重金属的吸收与积累存在物种、品种和同一作物不同器官的差异^[23-26]。

重金属对作物的毒害是因为它被植物吸收并向植株地上部运输^[27]。在初步了解3种蔬菜各不同部位镍含量的基础上,采用转运系数来更准确地反映镍向蔬菜不同部位的迁移规律。转运系数(TF)用于表征重金属通过根部向地上不同器官转运的能力^[28],转运系数越大表明重金属从根系向地上器官转运能力越强,重金属转运系数越小,说明重金属越易于在根部累积。根-茎叶转运系数为茎叶和根系中重金属含量比值,根-可食部分转运系数为可食部分与根系中重金属含量比值。对3种蔬菜根-可食部分转运系数和根-茎叶转运系数的研究发现(图3),青椒根-可食部分、根-茎叶的转运系数分别为0.05~0.12、0.3~0.7;黄瓜根-可食部分、根-茎叶的转运系数分别为0.02~0.1、0.8~3;豇豆根-可食部分、根-茎叶的转运系数分别为0.08~0.5、0.27~0.45。在所研究的镍浓度范围内,青椒根-可食部分转运系数减少,根-茎叶转运系

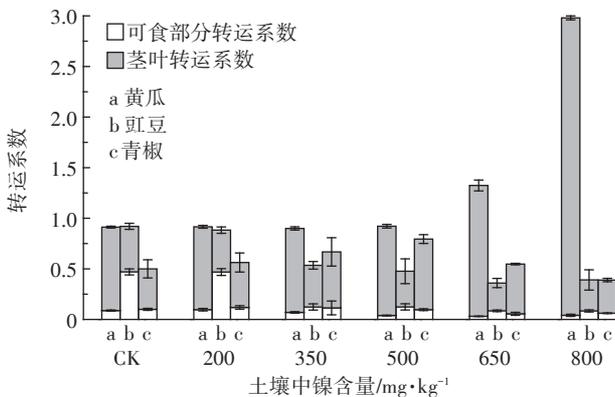


图3 镍在3种蔬菜体内各部位转运系数

Figure 3 Transport coefficients of Ni in different parts of three vegetables

数先增加后减少,当土壤中镍浓度为500 mg·kg⁻¹时根-茎叶转运系数达到最大;黄瓜根-可食部分转运系数减小,根-茎叶转运系数增加;豇豆根-可食部分、根-茎叶转运系数降低。镍在3种蔬菜中由根向茎叶转运比根向可食部分转运容易,豇豆根-可食部分转运系数高于青椒和黄瓜;黄瓜根-茎叶转运系数高于青椒和豇豆。由于不同作物生长特性及遗传特性的不同所以对土壤重金属的吸收、富集表现出显著的差异性^[29]。通过转运系数进一步说明了重金属向作物不同部位转运的能力存在品种差异。

2.3 3种蔬菜可食部分镍富集规律与食用安全分析

作物对重金属的吸收能力通过富集系数(Bioconcentration coefficient, BCF)量化表现^[30-31]。富集系数(BAFs)通常能直观的表示植物对重金属的吸收累积能力,富集系数=植株重金属含量(mg·kg⁻¹)/土壤重金属含量(mg·kg⁻¹),一般来说作物对重金属的富集系数越小,则表明其吸收重金属的能力越差,抗土壤重金属污染的能力则较强^[32-33]。3种蔬菜可食部分富集系数表现出明显的差异(图4)。豇豆可食部分的富集系数接近青椒、黄瓜的2倍。豇豆可食部分富集系数呈下降趋势最高为0.017;青椒和黄瓜可食部分富集系数在0.003~0.007范围内,青椒和黄瓜可食部分富集系数表现为先增加后减少的趋势,当土壤中镍浓度为650 mg·kg⁻¹时达到最大:青椒为0.006 9,黄瓜为0.005 6。北京市蔬菜和菜地土壤镍含量状况大规模调查发现云架豆镍富集系数较高,黄瓜、辣椒次之^[34]。蔡莎莎通过对不同种类的蔬菜对镍的富集能力研究发现蔬菜对镍的富集系数为0.003 4~0.017 7^[35]。黄瓜、豇豆、青椒可食部分镍含量与土壤中镍投加量呈显著正相关关系,回归方程分别为 $y=0.005x-0.5$ 、 $y=$

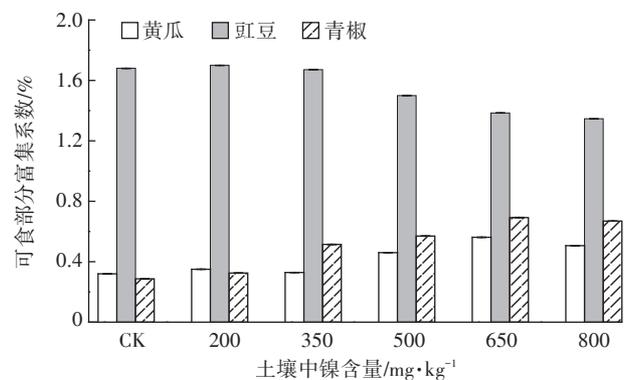


图4 3种蔬菜可食部分镍富集系数

Figure 4 Bioconcentration factor of Ni in edible parts of three vegetables

$0.013x + 0.689$ 、 $y=0.008x-1.003$, r^2 为 0.973、0.984、0.992, $P<0.05$ 。在镍作用下,生物量较小的豇豆可食部分表现出镍的高累积,且对镍的累积随土壤中镍含量增加而增加。青椒、黄瓜同为茄果类蔬菜,体内镍累积量与累积趋势相似,累积量均低于豇豆,累积趋势较缓。作物吸收重金属,主要取决于作物本身的遗传因素^[36-38]。

目前我国有关蔬菜、水果及粮食的卫生标准中尚未对镍含量做出限定,只有油脂及其制品中镍的限量标准(GB 2762—2017, $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。根据美国国家环境保护署(USEPA)推荐镍的人体最大允许摄入量(RfD) $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 可推算出新鲜蔬菜可食部分镍限量值(成年人 $3.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 儿童 $2.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。当土壤中镍含量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤环境质量三级标准)时,豇豆中镍含量已达到成人食用新鲜蔬菜镍的限值,随着土壤中镍含量的增加,3种蔬菜可食部分镍含量均增加,当土壤中镍含量达 $650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时3种蔬菜中镍含量都超过成人食用新鲜蔬菜镍含量限值(图5)。在所研究土壤镍浓度范围内,3种蔬菜的生长没有受到明显抑制且都没有表现出毒性效应。加拿大的科尔伯恩港(Port Colborne)附近的某镍冶炼厂周边田间试验表明:当土壤中镍含量远高于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时仍未观察到燕麦受其毒害的影响^[39]。镍污染土壤种植的蔬菜虽然表现良好的生长趋势,但其体内镍含量可能已经超过食品安全限值。镍污染土壤农用种植作物要做好品种选择,避免种植豇豆等高富集镍的作物,选择种植食用部位镍累积少的作物能有效降低农产品污染风险保证食品卫生安全。同时对于中度镍污染土壤,可以种植高富集镍植物把污染土壤中的镍含量降到允许范围然后进行农用。重金属超量

积累植物具有很高的吸收和积累重金属的能力,至今已发现400多种植物能够超量积累各种重金属,其中就以超量积累镍的植物最多^[40]。

3 结论

(1)低浓度镍污染土壤对蔬菜生长、产量影响不明显,甚至有促进作用。由于3种蔬菜类型不同,镍对3种蔬菜生长的抑制浓度也不同,黄瓜生长抑制浓度高于青椒和豇豆。

(2)在整个蔬菜植株中,根、茎叶的镍含量约占总量的95%,可食部分的镍含量占5%。黄瓜中镍主要累积在茎叶,青椒、豇豆中镍主要累积在根部。土壤中镍浓度的增加提升了根向茎叶运输镍的能力,根向可食部分的运输能力降低。

(3)随着土壤中镍含量增加,3种蔬菜可食部分镍含量表现为增加趋势与土壤中镍含量呈显著正相关关系。3种蔬菜可食部分对镍的富集能力不同,生物量较小的豇豆表现出镍的高累积。

(4)镍富集系数低的蔬菜品种种植在镍含量相对较高的土壤中其可食部分吸收的镍也不容易超标。因此,在种植蔬菜时,应根据土壤镍含量状况和蔬菜镍的富集能力进行蔬菜品种的选择,尤其值得注意的是豆类蔬菜抗镍污染能力较弱。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. 2014-04-17. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
The Environmental Protection Department, the Ministry of Land and Resources Issued. National soil pollution survey Bulletin[R/OL]. 2014-04-17. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [2] Wilson B, Pyatt F B. Heavy metal bioaccumulation by the important food plant, *Olea europaea* L. in an ancient metalliferous polluted area of Cyprus[J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2007, 78(5):390-394.
- [3] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311(1/2/3):205.
- [4] 刘国栋. 植物营养元素—Ni[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1):103-108.
LIU Guo-dong. Ni: A nutrition element for higher plant growth[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2001, 7(1):103-108.
- [5] Allen H E, Yanqing L, Toro D M D. Ecotoxicity of Ni in soil[J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, 72(1):367-371.
- [6] 张镜清. 谈谈镍的毒性和含镍废水的治理[J]. *电镀与环保*, 1987(4):39-40.

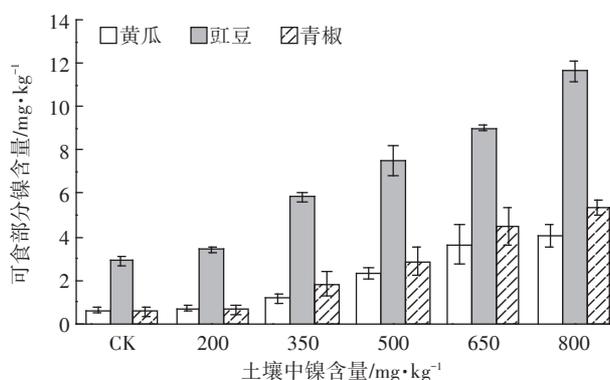


图5 3种蔬菜新鲜可食部分镍含量

Figure 5 Ni content in fresh edible parts of three kinds of vegetable

- ZHANG Jing-qing. The toxicity of Ni and the treatment of wastewater containing Ni[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 1987(4):39-40.
- [7] 廖金凤. 海南省土壤中的镍[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 17(增刊2):20-23.
- LIAO Jin-feng. Ni in soils of Hainan Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1998, 17(Suppl 2):20-23.
- [8] 杨国义, 罗 薇, 张天彬, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中镍的含量分布特征[J]. 生态环境学报, 2007, 16(3):818-821.
- YANG Guo-yi, LUO Wei, ZHANG Tian-bin, et al. Distribution of Ni content in agricultural soils in a typical area of the Pearl River[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):818-821.
- [9] 白晓瑞, 唐景春, 师荣光, 等. 基于蒙特卡洛的土壤镍污染及健康风险分析[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(5):123-126.
- BAI Xiao-rui, TANG Jing-chun, SHI Rong-guang, et al. Analysis of soil Ni pollution and health risk based on monte carlo[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(5):123-126.
- [10] 关 卉, 王金生, 万洪富, 等. 雷州半岛农业土壤与作物镍含量及其潜在健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):213-218.
- GUAN Hui, WANG Jing-sheng, WAN Hong-fu, et al. Content of Ni in agricultural soils and crops in Leizhou Peninsula and the potential risk to human health[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):213-218.
- [11] 赵 勇, 李红娟, 孙治强, 等. 土壤、蔬菜Cd污染相关性分析与土壤污染阈限值研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7):149-153.
- ZHAO Yong, LI Hong-juan, SUN Zhi-qiang, et al. Correlation analysis of Cd pollution in vegetables and soils and the soil pollution threshold[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7):149-153.
- [12] 杜应琼, 何江华, 陈俊坚, 等. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及对其生长的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(1):51-55.
- DU Ying-qiong, HE Jiang-hua, CHEN Jun-jian, et al. Effects of heavy metals of Pb, Cd and Cr on the growth of vegetables and their uptake[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(1):51-55.
- [13] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇, 等. Cd、Pb污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1):63-68.
- ZONG Liang-gang, SUN Jing-ke, SHEN Qian-yu, et al. Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1):63-68.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:309-311.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:309-311.
- [15] Environmental Protection Agency (EPA). Acid digestion of sediments sludge and soils[EB/OL]. EPA 3050B. <https://www.epa.gov>.
- [16] Huang M, Zhou S, Sun B, et al. Heavy metals in wheat grain: Assessment of potential health risk for inhabitants in Kunshan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1/2/3):54-61.
- [17] 王海华, 康 健, 曾富华, 等. 高浓度镍对水稻幼苗生长及酶活性的影响[J]. 作物学报, 2001, 27(6):953-957.
- WANG Hai-hua, KANG Jian, ZENG Fu-hua, et al. Effects of high concentration Ni on growth and enzyme activity of rice seedlings[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6):953-957.
- [18] 康立娟, 谢忠雷. 镍对玉米和水稻污染效应及累积规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2315-2318.
- KANG Li-juan, XIE Zhong-lei. Pollution effects and accumulation rules of Ni in corn and rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2315-2318.
- [19] 柴琳琳. 重金属Ni、Co在紫花苜蓿和新疆某地土壤中的累积特征研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2013.
- CHAI Lin-lin. A study on the accumulation effects of heavy metal Ni, cobalt in the growth of alfalfa and the soil in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013.
- [20] 马建军, 于凤鸣, 朱京涛, 等. 潮土施镍对小白菜的生物效应及其临界值研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(3):64-67.
- MA Jian-jun, YU Feng-ming, ZHU Jing-tao, et al. Biological effects on Chinese cabbage and critical concentration of Ni application in the calcareous soil[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(3):64-67.
- [21] 杨定清, 傅绍清, 青长乐. 镍的作物效应及临界值研究[J]. 四川环境, 1994(1):19-23.
- YANG Ding-qing, FU Shao-qing, QING Chang-le. Study on the crop effect and threshold of Ni[J]. *Sichuan Environment*, 1994(1):19-23.
- [22] 赵建忠, 李 冉, 封朝晖. 镉在小白菜体内的累积规律及其生物效应的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4):40-43.
- ZHAO Jian-zhong, LI Ran, FENG Zhao-hui. A study on the physiological effects of cadmium on bok choy and its accumulation therein [J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2009(4):40-43.
- [23] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. 中国环境科学, 29(1):63-67.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Variety differences of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):63-67.
- [24] 邵 云, 姜丽娜, 李向力, 等. 五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J]. 生态环境, 2005, 14(2):204-207.
- SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Xiang-li, et al. Distribution characteristics of five heavy metals in different organs of wheat[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2):204-207.
- [25] 王兆炜, 南忠仁, 赵转军, 等. 干旱区绿洲土壤Cd、Zn、Ni复合污染对芹菜生长及重金属积累的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(2):138-143.
- WANG Zhao-wei, NAN Zhong-ren, ZHAO Zhuan-jun, et al. Effects of cadmium, zinc and Ni on celery growth and bioaccumulation of heavy metals in contaminated arid oasis soils[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(2):138-143.
- [26] 唐 茜, 叶善蓉, 陈能武, 等. 茶树对镍的吸收积累[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(10):73-78.
- TANG Qian, YE Shan-rong, CHEN Neng-wu, et al. Absorption and accumulation of Ni in tea plants[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2008, 30(10):73-78.
- [27] 王晓娟, 王文斌, 杨 龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23):7921-7929.
- WANG Xiao-juan, WANG Wen-bin, YANG Long, et al. Transport

- mechanism and regulation mechanism of cadmium (Cd) in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23):7921-7929.
- [28] 刘克, 和文祥, 张红, 等. 镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8):1441-1448.
- LIU Ke, HE Wen-xiang, ZHANG Hong, et al. Cadmium accumulation and translocation in wheat and grain Cd prediction[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1441-1448.
- [29] 孙洪欣, 赵全利, 薛培英, 等. 不同夏玉米品种对镉、铅积累与转运的差异性田间研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12):2068-2074.
- SUN Hong-xin, ZHAO Quan-li, XUE Pei-ying, et al. Field study on accumulation and translocation of cadmium and lead in different summer maize varieties[J]. *Ecology and Environment*, 2015, 24(12):2068-2074.
- [30] Zu Y Q, Li Y, Schwartz C, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China[J]. *Environment International*, 2004, 30(4):567-576.
- [31] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, 13(5):468-474.
- [32] 曾露苹, 秦俊豪, 董淑玉, 等. 不同木薯品种对重金属 Cu Zn Cd 累积差异及健康风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6):1044-1052.
- ZENG Lu-ping, QIN Jun-hao, DONG Shu-yu, et al. Accumulation and health risk analysis of heavy metals Cu, Zn and Cd in different cassava varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1044-1052.
- [33] 刘香香, 文典, 王其枫, 等. 广东省不同种类蔬菜与土壤镉污染相关性及其阈值研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(10):109-115.
- LIU Xiang-xiang, WEN Dian, WANG Qi-feng, et al. Study on correlation and threshold of cadmium pollution in different vegetables and soils in Guangdong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(10):109-115.
- [34] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镍含量及其健康风险[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(3):1589-1597.
- CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. Ni content and its health risk in vegetable soil and vegetable in Beijing City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3):1589-1597.
- [35] 蔡莎莎. 不同作物对重金属吸收累积特征及胁迫响应的研究[D]. 广州:暨南大学, 2007.
- CAI Sha-sha. Heavy metal accumulation in different crops and their responses to pollution stress[D]. Guangzhou:Jinan University, 2007.
- [36] Norton G J, Duan G, Dasgupta T, et al. Environmental and genetic control of arsenic accumulation and speciation in rice grain: Comparing a range of common cultivars grown in contaminated sites across bangladesh, China, and India[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21):8381-8386.
- [37] 段桂兰, 张红梅, 刘云霞, 等. 水稻基因类型与生长环境对精米中砷积累的影响[J]. *生态毒理学报*, 2013, 8(2):156-162.
- DUAN Gui-lan, ZHANG Hong-mei, LIU Yun-xia, et al. Effects of genotype and growth environment of rice on arsenic accumulation in polished rice[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(2):156-162.
- [38] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米 (*Zea mays*) 品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(1):16-23.
- DU Cai-yan, ZHANG Nai-ming, LEI Bao-kun, et al. Differences in accumulation and translocation of cadmium and zinc in different maize (*Zea mays*) varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1):16-23.
- [39] Dan T, Hale B, Johnson D, et al. Toxicity thresholds for oat (*Avena sativa* L.) grown in Ni-impacted agricultural soils near port colborne, ontario, Canada[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(3):389-398.
- [40] 罗春玲, 沈振国. 植物对重金属的吸收和分布[J]. *植物学报*, 2003, 20(1):59-66.
- LUO Chun-ling, SHEN Zhen-guo. The mechanisms of heavy metal uptake and accumulation in plants[J]. *Bulletin of Botany*, 2003, 20(1):59-66.