

天津近郊与远郊菜地中硒与重金属差异性研究

谢薇^{1,2}, 杨耀栋^{1,2*}, 侯佳渝³, 李国成^{1,2}, 菅桂芹^{1,2}

(1. 天津市地质矿产测试中心, 天津 300191; 2. 国土资源部天津矿产资源

监督检测中心, 天津 300191; 3. 天津市规划和自然资源局地质事务中心, 天津 300042)

摘要 在天津近郊与远郊各选1块具有代表性菜地,同步采集土壤与蔬菜样品,分析土壤与蔬菜中的Se与重金属含量特征,同时对蔬菜中Se与重金属元素进行相关性分析。结果表明,近郊与远郊菜地表层土壤Se的平均含量分别为0.93和0.35 mg/kg,各自达到富硒土壤和足硒土壤标准。近郊菜地中Cd、Hg、Cu和Zn的平均含量分别为1.29、1.26、110.07和272.73 mg/kg,均远高于天津市的背景值,而且Cd和Cu的含量高于风险筛选值;远郊菜地中仅Hg的含量高于背景值。近郊菜地和远郊菜地中均以毛豆的Se含量最高,近郊菜地中葱是最富集Cd和Hg的蔬菜种类,而远郊菜地中则以叶类蔬菜中的Cd和Hg含量较高。蔬菜中Se和Cd、Hg、Zn和Cu的相关性在2块菜地中表现完全一致,此外,Se与Hg呈显著的负相关,而Se与Zn和Cu则表现出明显的正相关性。

关键词 天津; 菜地; 硒; 重金属

中图分类号 X173; X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)20-0088-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.20.023



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Difference of Selenium and Heavy Metals in Suburban and Outer Suburban Vegetable Fields of TianjinXIE Wei^{1,2}, YANG Yao-dong^{1,2}, HOU Jia-yu³ et al (1. Tianjin Geological Mineral Test Center, Tianjin 300191; 2. Tianjin Supervision Center of Geology of Mineral Resources, The Ministry of Land and Resources, Tianjin 300191; 3. Tianjin Planning and Natural Resources Bureau Geological Center, Tianjin 300042)

Abstract A representative vegetable field was selected in suburb and outer suburb respectively of Tianjin. Soil and vegetable samples were collected together to analyze the characteristics of selenium and heavy metals in soil and vegetable, and the correlation between selenium and heavy metals in vegetable was analyzed. The results showed that the average selenium contents of surface soil in suburb and outer suburb were 0.93, 0.35 mg/kg, respectively, which met the selenium-rich soil and sufficient selenium soil standards. The average contents of Cd, Hg, Cu and Zn in suburb vegetable field were 1.29, 1.26, 110.07 and 272.73 mg/kg, respectively, which were much higher than the background values of Tianjin, and the contents of Cd and Cu were higher than the risk screening values. Only Hg in outer suburban vegetable field was higher than the background value. In suburban vegetable field and outer suburban vegetable field, the selenium content of soybean was the highest. In suburban vegetable field, green Chinese onion was the most cadmium and mercury-rich vegetable category, while in outer suburban vegetable field, leafy vegetables had the highest cadmium and mercury content. The correlation between selenium and cadmium, mercury, zinc and copper in vegetable was identical in the two vegetable plots. In addition, selenium was negatively correlated with mercury, while selenium was positively correlated with zinc and copper.

Key words Tianjin; Vegetable field; Selenium; Heavy metal

硒是人体必需的微量元素,在人体免疫系统中起着重要作用,人体缺硒可引发多种疾病^[1]。蔬菜摄入是人体获取硒元素的有效方式之一,但是当蔬菜中的重金属含量超过标准限值时,往往会给人体健康带来安全隐患。硒与镉、汞、锌和铜等元素间存在复杂的交互作用,这种相互作用能减少或增加蔬菜对重金属元素的吸收或改变重金属的生物学毒性。已有多位学者在盆栽试验中对硒与重金属的相互作用进行了研究,段小华等^[2]研究表明,适度提高硒浓度促进茶叶锌的积累;谢建治等^[3]也发现,低含量的锌与镉对小白菜生物量表现为协同增产作用,而高含量的锌与镉对小白菜生长表现为拮抗作用;郭锋等^[4]的研究表明,不同浓度的硒可以缓解镉胁迫对菠菜的抑制作用;李云云等^[5]发现,硒显著降低了水稻根部汞的含量及汞在水稻中的转移系数。盆栽试验中硒与重金属往往表现出较好的相关性,但是农作物在大田种植时,往往会受到多种因素的影响和制约,硒与重金属的相关性如何需要进一步研究。笔者在天津市选取2块有代表性的菜地,对土壤与蔬菜中的硒与重金属含量,及硒与重金属的相关性进行分析,以期对硒元素降低重金属的毒性研

究提供理论基础,为绿色富硒农作物开发提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 菜地概况 在天津市的近郊和远郊各选取1块有代表性的菜地进行研究,2块菜地种植同种类型相同品种的蔬菜,包括叶类蔬菜:茴香、香菜、油菜和菠菜;根茎类蔬菜:胡萝卜、早萝卜和青萝卜;块茎类蔬菜:马铃薯和红薯;葱蒜类蔬菜:葱;豆类蔬菜:毛豆。菜地中每个小区面积为3 m×1 m,小区间隔1 m,各种蔬菜随机排列,蔬菜的施肥、浇水及田间管理完全按照当地的种植习惯,并于蔬菜成熟期同步采集蔬菜与土壤样品。

1.2 样品采集 为保证采集的土壤样品具有代表性,在每小区内按“S”形布点法采集0~20 cm的表层土壤子样,去除杂草、石块等杂物后,每5个子样组合为1件小区样品,每件样品1 kg。

在近郊与远郊菜地各采集土壤剖面1条,以20 cm为间隔,由地表依次向下采集。近郊菜地采样深度为140 cm,采集样品7件;远郊菜地采样深度为200 cm,采集样品10件。

蔬菜样品与土壤样品同步采集,蔬菜样品采集可食用部分,每小区内均由10个子样混合为1件样品,每件样品大于3 kg。

1.3 样品加工与测试 土壤样品在25℃阴凉通风处自然风

作者简介 谢薇(1987—),女,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,研究方向:环境地球化学。*通信作者,高级工程师,硕士,从事地球化学及水文、工程和环境地质研究。

收稿日期 2019-07-12

干,剔除样品中植物根系、残渣和石砾后,研磨过 20 目筛,置于干燥器内保存,备用。

先剔除蔬菜样品已萎蔫部分,用自来水和蒸馏水依次清洗样品,清洗干净、擦干后立即称其鲜样质量。然后将鲜样置于冷冻干燥机中进行冷冻干燥,待样品完全干燥后,称重,计算干湿比。干样用高速破碎机制成粉样后,放入牛皮纸袋中,置于干燥器内保存,备用。

土壤 pH 测定采用电位法;土壤硒与重金属按美国 EPA 3052 相关方法进行消化后测定。蔬菜经 HNO_3 微波消解后与土壤样品同步测定^[6]。Se 和 Hg 元素采用原子荧光光谱仪测定,Cd、Zn 和 Cu 采用等离子体质谱仪测定。为了保证测试结果的准确性,进行样品测试时,同时进行空白、平行样及标准样品试验,每件蔬菜样品均进行 3 次重复测试。土壤标准样品 GBW07425、GBW07428、GBW07453、GBW07456 以及蔬菜标准样品 GBW10015、GBW10048 的测试值均满足不确定度要求。土壤与蔬菜样品均由国土资源部天津矿产资源监督检测中心测试分析。

1.4 数据处理 应用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS19.0 软件对数据进行处理;Golden Software Grapher 7 绘制垂向剖面图。

2 结果与分析

2.1 表层土壤中硒与重金属含量 由表 1 可知,近郊菜地土壤 Se 平均含量为 0.93 mg/kg,达到富硒土壤 (Se ≥

0.4 mg/kg) 标准;远郊菜地土壤 Se 平均含量为 0.35 mg/kg,达到足硒土壤 (0.175 mg/kg ≤ Se < 0.4 mg/kg) 标准^[7]。此次研究发现有机肥中含有丰富的 Se (表 2),而近郊菜地有机肥施用量高达 75 t/hm²,因此土壤中的 Se 含量显著高于远郊菜地。

近郊菜地中 Cd、Hg、Cu 和 Zn 平均含量分别为 1.29、1.26、110.07 和 272.73 mg/kg,4 种重金属含量均远高于天津市的背景值,而且 Cd 和 Cu 含量高于风险筛选值^[8]。远郊菜地中 Cu 和 Zn 含量均低于天津市背景值,Cd 含量与背景值几乎持平,Hg 含量高于背景值。对比 2 块菜地,近郊菜地的 Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量分别是远郊的 7.6、7.9、4.5 和 4.1 倍。1985—1988 年,周艺敏等^[9]对天津市城郊菜地土壤的重金属进行调查研究可知,Cd、Hg、Cu 和 Zn 平均含量分别为 0.79、1.974、61.45 和 127.39 mg/kg。说明经过 30 多年的发展,天津近郊菜地的 Hg 含量有所降低,Cd、Cu 和 Zn 含量明显升高。山东潍坊菜地中 Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量分别为 0.27、0.04、30.53 和 102.80 mg/kg^[10];北京菜地中 Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量分别为 0.24、0.08、24.96 和 89.92 mg/kg^[11];沈阳新民设施菜地土壤中 Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量分别为 0.17、0.24、24.21 和 83.53 mg/kg^[12];贵州省菜地 Cd 平均含量为 0.385 mg/kg^[13]。可见,上述地区菜地中 Cd、Cu 和 Zn 含量均高于天津市远郊菜地,但低于近郊菜地,近郊菜地中 Cd、Cu 和 Zn 累积现象比较明显。

表 1 土壤中硒与重金属含量

Table 1 Content of selenium and heavy metals in soil

mg/kg

项目 Item	Se	Cd	Hg	Cu	Zn
近郊 Suburb	0.93	1.29	1.26	110.07	272.73
远郊 Outer suburb	0.35	0.17	0.16	24.34	66.65
背景值 Background value	0.22	0.16	0.04	30.55	86.30
风险筛选值 Risk screening value	—	0.6/0.3	3.4/1.8	100/50	300/200

注:近郊研究区 pH>7.5;远郊研究区 5.5<pH≤6.5;表格中风险筛选值为近郊/远郊

Note:The suburban research area pH>7.5;the outer suburb research area 5.5<pH≤6.5;therefore the risk screening value in the table is suburban/outskirts

表 2 肥料中重金属含量

Table 2 Concentration of heavy metals in fertilizers

mg/kg

肥料 Fertilizer		Se	Cd	Hg	Zn	Cu
有机肥 Organic fertilizer	牛粪	0.781	0.291	0.082	205.0	40.0
	猪粪	1.130	0.860	0.082	1 327.6	983.8
	鸡粪	1.220	0.243	0.055	582.1	101.3
化肥 Chemical fertilizer	复合肥	0.008	0.093	0.024	40.0	9.2
	二铵	N.D	0.385	0.031	180.4	10.2
	尿素	N.D	0.001	0.032	26.4	4.2

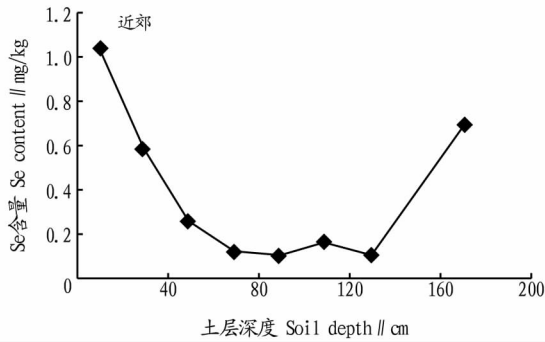
注:N.D 未检出

Note:N.D was not detected

近郊菜地地处天津市主要蔬菜生产基地的集中区,每年施入土壤中的有机肥主要是养殖场所产生的鸡粪和猪粪等半腐熟或新鲜的畜禽粪便,而有研究发现这些粪肥中含有大量的 Cd、Hg、Cu 和 Zn 等重金属^[14-17],这些重金属主要来源于饲料添加剂,此次采集的肥料样品也证实这一点,因此施用大量的有机肥可能是近郊土壤重金属累积的原因之一。

当然,施用化肥也会引起土壤重金属的累积,此次检测的二铵中 Cd 和 Zn 含量均高于天津市背景值,且是背景值的 2 倍多。已有的研究成果表明,磷肥对土壤中 Cd 累积的贡献率可以达 54%~58%^[18]。这也说明在提高土壤肥力的同时,肥料也会引入一些重金属元素,李见云等^[19]以及刘莘等^[20]对山东寿光设施菜地土壤的研究都证实了这一点。

2.2 剖面土壤中硒与重金属含量 近郊与远郊菜地的土壤剖面都表现为硒在表层富集的现象(图1),深层含量相对较小。硒的表聚作用可能与成土过程中根系吸收和生物积累



作用有关,此外,也可能与外源硒输入后与土壤中腐殖酸形成稳定的络合物而存在于土壤表层有关^[21-22]。

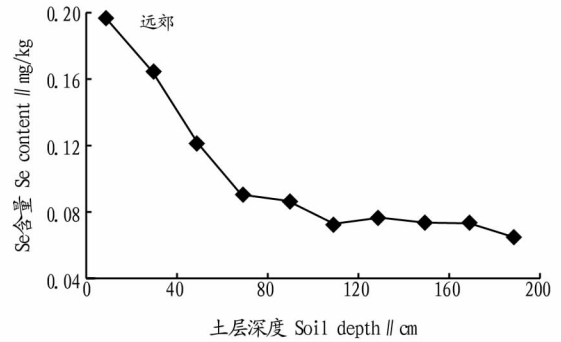


图1 近郊与远郊菜地中Se含量垂向分布

Fig.1 Vertical distribution of Se content in suburban and outer suburban vegetable field

随着深度的增加,近郊菜地中4种重金属的含量变化趋势与Se完全一致(图2),即先下降再升高。Cd、Hg、Zn和Cu在120~150 cm厚土层的含量分别比0~20 cm厚土层中的含量下降了87%、97%、77%和80%。4种重金属元素在150~200 cm厚土层的含量较120~150 cm厚土层的含量均显著增加,但都低于0~20 cm厚土层的含量。4种元素明显的表层

积聚现象也进一步说明近郊菜地中4种重金属均有外源输入。远郊菜地中Cd、Zn和Cu呈现不规则的变化,Hg含量则呈较明显的自上而下逐渐降低的垂直变化趋势,但总体来说,远郊菜地中4种重金属在0~20 cm厚土层均有一定的积累现象,其中Cd和Hg的累积程度较强。

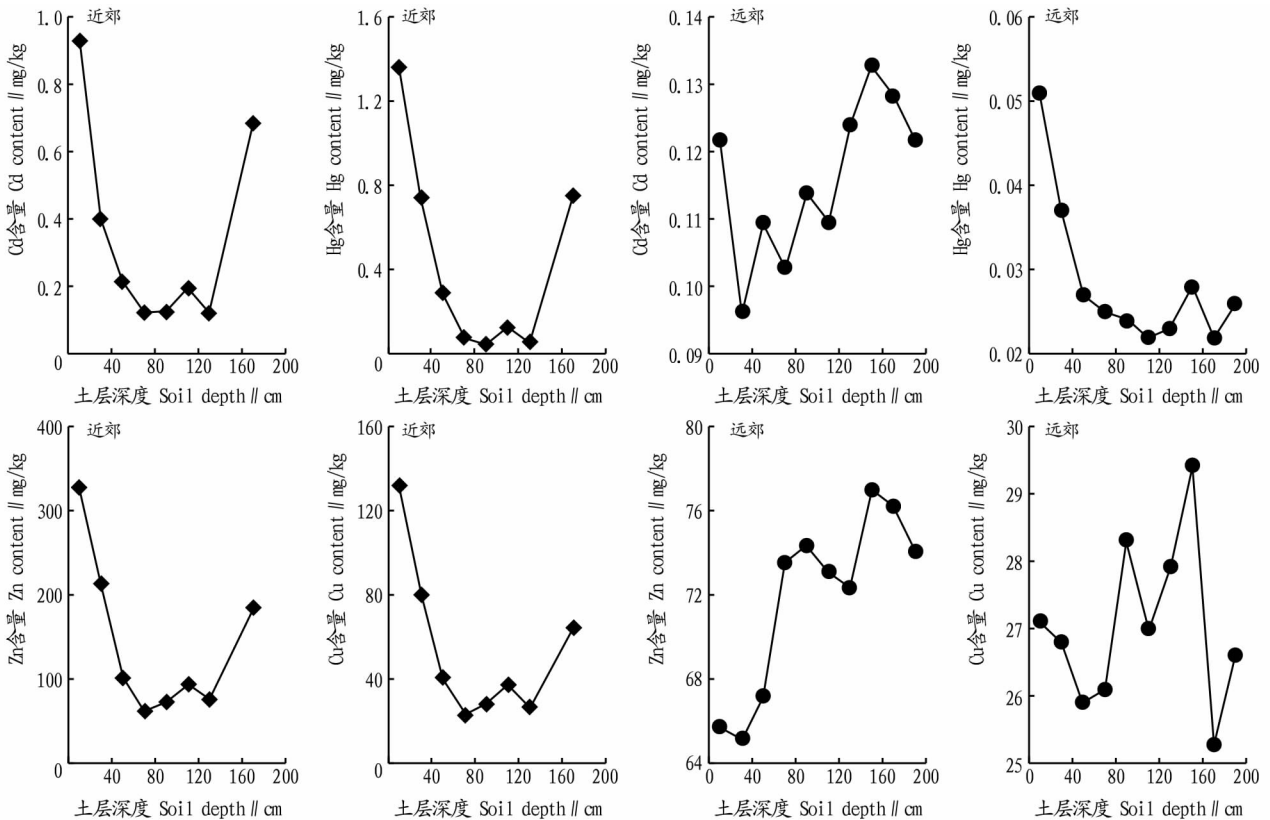


图2 近郊与远郊土壤剖面重金属含量

Fig.2 Vertical distribution of heavy metal contents in suburban and outer suburban vegetable field

2.3 蔬菜中硒与重金属含量 近郊菜地毛豆和青萝卜中的Se含量较高(图3),分别为0.131、0.106 mg/kg;胡萝卜和马铃薯中的Se含量次之,分别为0.045、0.037 mg/kg;油菜中的Se含量最低。说明近郊菜地出产的蔬菜中以豆类蔬菜的Se含量最高,其次为根茎类蔬菜,叶类蔬菜中的Se含量最低。

与近郊菜地类似,远郊菜地中同样以毛豆中的Se含量最高,毛豆为豆科植物,属于聚硒植物,因此对Se具有较强的吸收能力^[23]。对比2个地区同种类型的蔬菜,均以近郊菜地蔬菜中的Se含量偏高,而且参照《湖北省关于富硒食品地方标准》(DB 42/211—2002),近郊菜地除了油菜,其余蔬菜均达

到富硒蔬菜(≥ 0.01 mg/kg)标准,而远郊菜地仅有毛豆、马铃薯和茴香达到富硒蔬菜标准。说明富硒土壤具有培育天然富硒蔬菜的潜在优势,应加强开发利用。

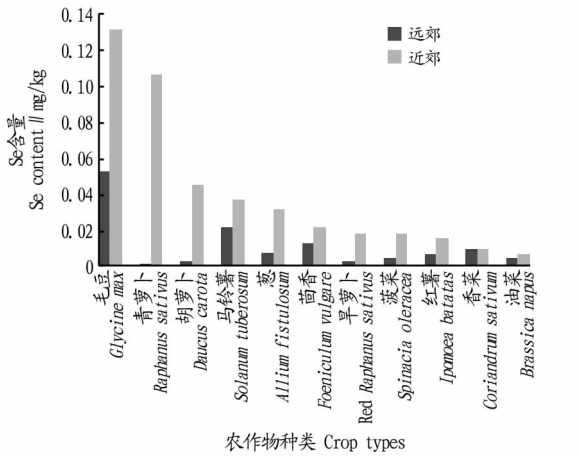
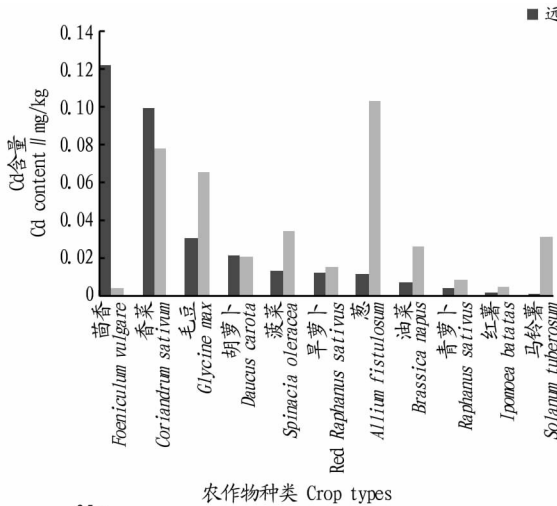


图3 不同种类蔬菜中的Se含量

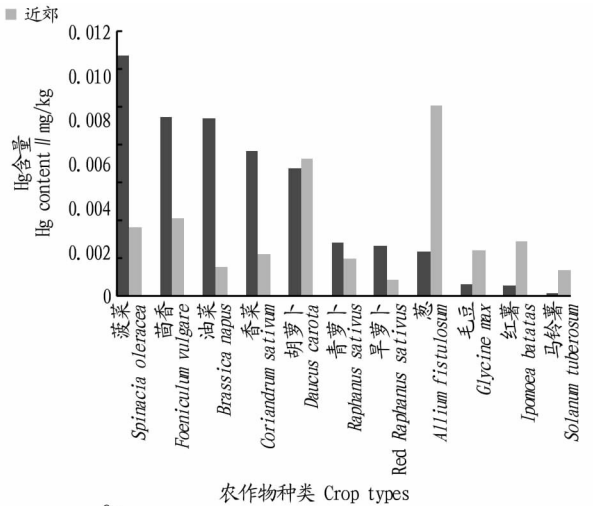
Fig.3 Content of Se in various vegetables

近郊菜地种植的蔬菜中,葱富集的Cd和Hg含量均为最高(图4),分别高于远郊菜地葱中同种元素的含量。远郊菜地中则以叶类蔬菜中的Cd和Hg含量较高,根茎类蔬菜含量次之。这与王丽凤等^[24]对沈阳市蔬菜的研究结果及 Jinadasa等^[25]对悉尼市29种蔬菜的分析结果相一致,即叶菜类的重金属含量大于根茎类。远郊菜地土壤的Hg含量显著低于近郊菜地,但是叶类和根茎类蔬菜中的Hg含量几乎都高于近郊菜地,说明蔬菜对重金属元素的吸收、富集不仅受限于蔬菜种类和土壤重金属含量,而且还受到重金属元素形态、土壤黏粒含量、有机质含量和pH等理化性质以及栽培农艺措施的制约^[26]。

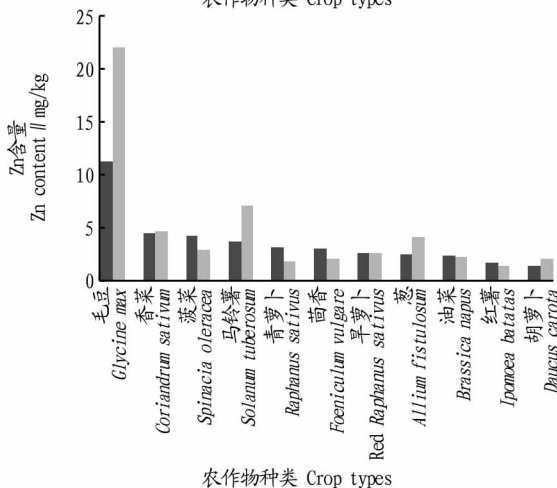
2块菜地中均以毛豆中的Zn含量最高,显著高于其他种类蔬菜中的Zn含量,其他种类蔬菜中的Zn含量在2个地区则较为接近。与Zn元素类似,2个地区中毛豆的Cu含量均最高,明显高于其他种类蔬菜。近郊蔬菜中仅茴香和红薯中的Cu含量低于远郊菜地,其余种类蔬菜中的Cu含量均高于远郊菜地。



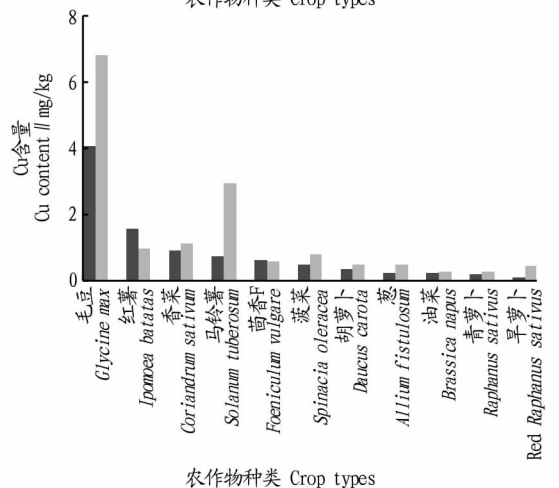
农作物种类 Crop types



农作物种类 Crop types



农作物种类 Crop types



农作物种类 Crop types

图4 远郊与近郊蔬菜中重金属元素含量

Fig.4 Heavy metal contents of vegetable in suburb and outer suburb

2.4 蔬菜中硒与重金属相关性 Se与Cd、Hg和Cu在蔬菜中表现出的交互作用在2块菜地中完全一致(图5、6)。有报道指出,在植物系统中Se、Cd间存在一定的拮抗关系,在水

稻幼苗的水培试验中,研究表明Se能减轻Cd对幼苗的伤害^[27]。在生菜的栽培试验中叶面喷Se减少了蛋白结合态Cd的积累^[28]。Se之所以抑制植物对Cd的吸收是因为Se

增加了谷胱甘肽过氧化物酶的合成,相应地减少了Cd络合蛋白的合成,进而减少了Cd的吸收。但该研究中,Se与Cd

并未表现出相关性($P < 0.01$),产生不同结果的原因可能与种植作物类型、品种以及作物种植环境等有关。

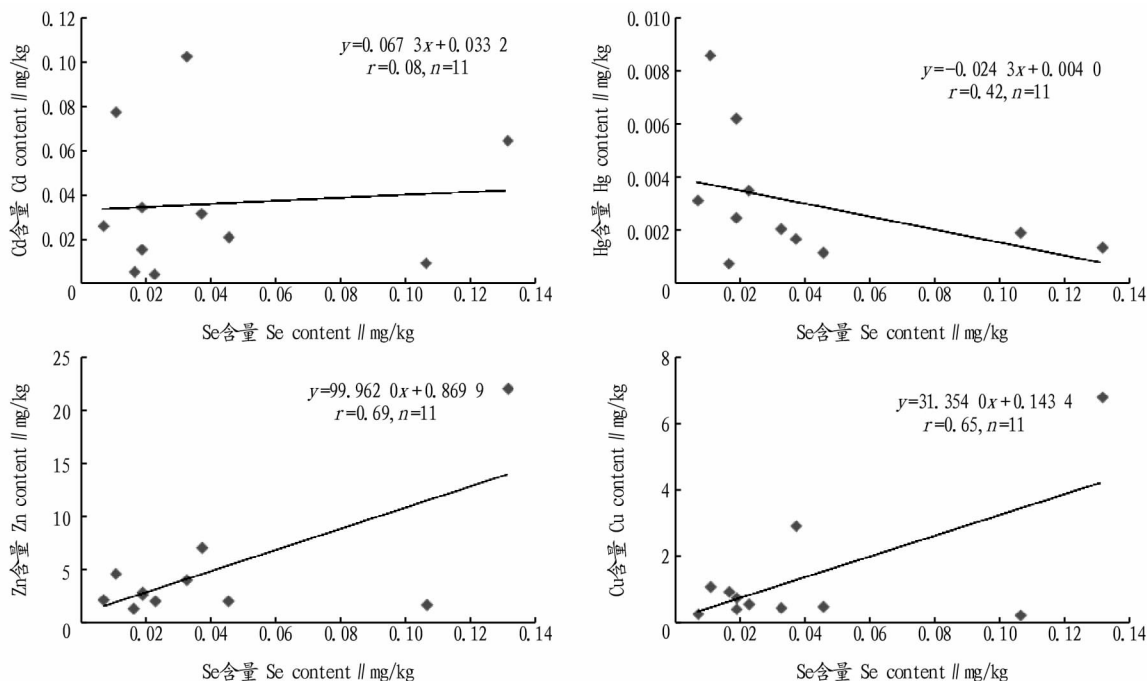


图5 近郊蔬菜中Se与重金属相关性

Fig.5 Correlation between selenium and heavy metals of vegetable in suburb

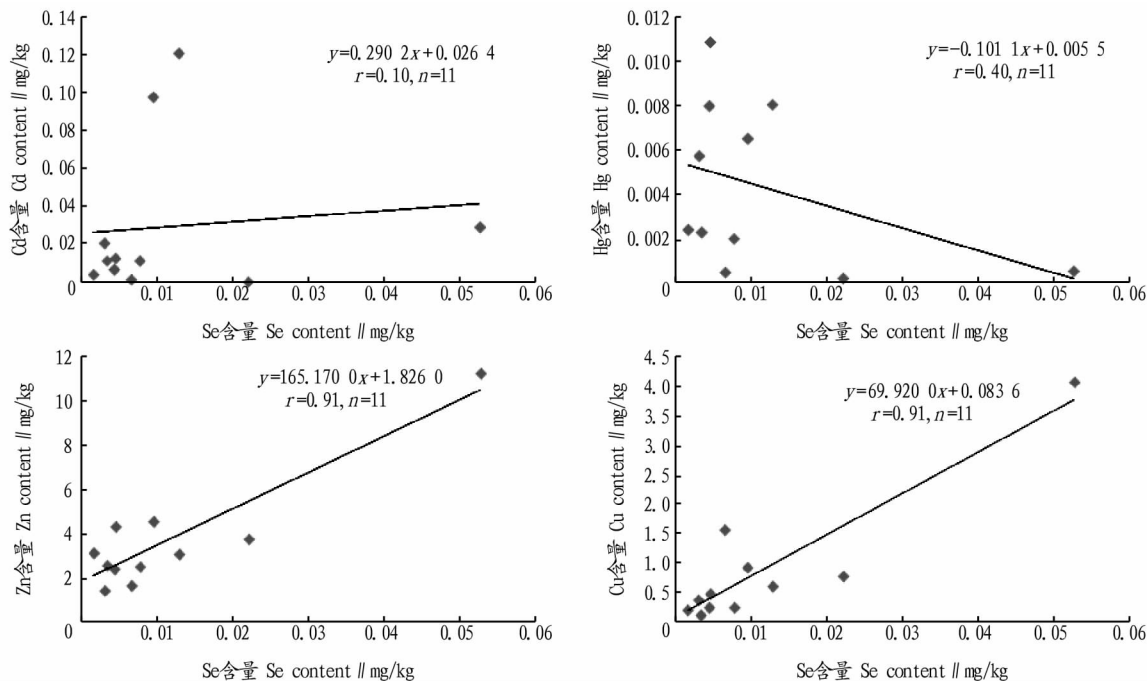


图6 远郊蔬菜中Se与重金属相关性

Fig.6 Correlation between selenium and heavy metals of vegetable in outer suburb

Shanker等^[29]早期开展的试验证实,在含有 $HgCl_2$ 溶液的土壤里面,添加亚硒酸盐后,番茄和萝卜对Hg的富集会较少;而且,Se还能显著降低萝卜根部对Hg的吸收和转运,从而缓解Hg对萝卜的毒性。在实验室模拟控制情况下,开展大豆、芥菜和大葱的Se、Hg作用研究时,均发现增加根部土壤Se的供给能显著抑制无机Hg在植物根部以上部位的蓄

积^[30-35]。该研究中Se与Hg的负相关性显著($P < 0.01$),其原因可能是由于Se和Hg作用形成了难溶的Hg-Se复合物沉淀,从而抑制了植物对Hg的吸收。

该研究的2块菜地中Se与Zn均表现出较好的相关性($P < 0.01$),说明Se对植物Zn元素的吸收具有促进作用,这与前人的研究结果较为一致。段晓琴等^[36]在盆栽研究中发

现,在土壤中合理配施 Se、Zn 肥对 Se、Zn 在植物体内的积累及生理效应有一定的协同作用,在土壤中施用 Se、Zn 肥后,油菜中的 Se、Zn 含量显著增加;王建伟等^[37]研究发现,Se、Zn 肥配施显著提高了黄土高原小白菜 Se、Zn 含量。同样,该研究中 Se、Cu 在促进作物吸收中表现为协同作用($P < 0.01$),胡斌等^[38]在对小白菜进行研究时发现,Cu ≤ 400 mg/kg 时,可以促进小白菜对 Se 的吸收;Se ≤ 10 mg/kg 时,则可以促进小白菜对 Cu 的吸收。

3 结论

(1) 近郊菜地土壤 Se 的平均含量为 0.93 mg/kg,达到富硒土壤标准;远郊菜地土壤 Se 的平均含量为 0.35 mg/kg,达到足硒土壤标准。

(2) 近郊菜地中 Cd、Hg、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 1.29、1.26、110.07 和 272.73 mg/kg,均远高于天津市的背景值,而且 Cd 和 Cu 含量高于风险筛选值。远郊菜地中仅 Hg 的含量高于背景值。

(3) 2 块菜地中均以毛豆的 Se 含量最高,高于其他种类蔬菜;近郊菜地除了油菜,其余蔬菜均达到富 Se 蔬菜标准,而远郊菜地仅有毛豆、马铃薯和茴香达到富 Se 蔬菜标准。

(4) 近郊菜地种植的蔬菜中,葱富集的 Cd 和 Hg 含量均为最高;远郊菜地中则以叶类蔬菜中的 Cd 和 Hg 含量较高,根茎类蔬菜次之,块茎类蔬菜中的含量最低。2 块菜地中均以毛豆中的 Zn 和 Cu 含量最高。

(5) Se 与 Cd、Hg、Zn、Cu 在蔬菜中表现出的交互作用在 2 块菜地中完全一致,即 Se 与 Cd 相互作用不显著;Se 与 Hg 表现为拮抗作用;Se 与 Zn 和 Cu 表现为协同作用。

参考文献

[1] 王玉荣,贾玮,胡承孝,等.油菜 Se 的富集特征及其与土壤 Se 的关系[J].环境科学学报,2018,38(1):336-342.

[2] 段小华,陈淑芳.锌 Se 交互作用对茶叶锌 Se 积累及主要化学品质成分的影响[J].江苏农业科学,2018,46(15):99-102.

[3] 谢建治,张书廷,赵新华,等.潮褐土 Cd 锌复合污染对小白菜生长的影响[J].天津大学学报,2008,38(5):426-431.

[4] 郭锋,樊文华,冯两蕊,等.Se 对 Cd 胁迫下菠菜生理特征性、元素含量及 Cd 吸收转运的影响[J].环境科学学报,2014,34(2):524-531.

[5] 李云云,赵甲亭,高愈希,等.根表铁膜的形成和添加 Se 对水稻吸收转运无机 Hg 和甲基 Hg 的影响[J].生态毒理学报,2014,9(5):972-977.

[6] EPA.Method 3052;Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices [S].Washington DC:Environmental Protection Agency,1996.

[7] 谭见安.环境 Se 与健康[M].北京:人民卫生出版社,1989:219-224.

[8] 生态环境部国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S].北京:中国环境科学出版社,2018.

[9] 周艺敏,张金盛,任顺荣,等.天津市园田土壤和几种蔬菜中重金属含量状况的调查研究[J].农业环境保护,1990,9(6):30-34.

[10] 张怀志,冀宏杰,徐爱国,等.潍坊市菜地重金属调查与环境风险评估研究[J].生态环境学报,2017,26(12):2154-2160.

[11] 索琳娜,刘宝存,赵同科,等.北京市菜地土壤重金属现状分析与评价[J].农业工程学报,2016,32(9):179-186.

[12] 郭畔,宋雪英,刘伟健,等.沈阳市新民设施菜地土壤重金属污染特征分析[J].农业环境科学学报,2019,38(4):835-844.

[13] 许华杰,谭红,谢锋,等.贵州省菜地土壤和蔬菜中 Cd 含量的分析与研究[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):674-678.

[14] 贾月慧,郭家选,刘杰,等.北京郊区设施菜地剖面中重金属的分布特征[J].农业资源与环境学报,2015,32(3):282-288.

[15] 谢薇,杨耀栋,侯佳渝.天津某菜地土壤—蔬菜中 Se 与重金属含量特征及绿色富 Se 蔬菜筛选[J].环境化学,2018,37(12):2790-2799.

[16] 刘荣乐,李书田,王秀斌,等.我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J].农业环境科学学报,2005,24(2):392-397.

[17] 姜萍,金盛杨,郝秀珍,等.重金属在猪饲料—粪便—土壤—蔬菜中的分布特征研究[J].农业环境科学学报,2010,29(5):942-947.

[18] 何振立.污染及有益元素的土壤化学平衡[M].北京:中国环境科学出版社,1998:129-130.

[19] 李见云,侯彦林,王新民,等.温室土壤剖面养分特征及重金属含量演变趋势研究[J].中国生态农业学报,2006,14(3):43-45.

[20] 刘苹,杨力,于淑芳,等.寿光市蔬菜大棚土壤重金属含量的环境质量评价[J].环境科学研究,2008,21(5):66-71.

[21] 王金达,于君宝,张学林.黄土高原土壤中 Se 等元素的地球化学特征[J].地理科学,2000,20(5):469-473.

[22] 孙朝,侯青叶,杨忠芳,等.典型土壤环境中 Se 的迁移转化影响因素研究:以四川省成都经济区为例[J].中国地质,2010,37(6):1760-1768.

[23] 冶军,褚贵新,杨国辉,等.Se 肥基施对胡萝卜产量及品质的效应研究[J].安徽农业科学,2009,37(12):5440-5441.

[24] 王丽凤,白俊贵.沈阳市蔬菜污染调查及防治途径研究[J].农业环境保护,1994,13(2):84-88.

[25] JINADASA K B P N, MILAM P J, HAWKINS C A, et al. Heavy metals in the environment—survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia [J]. J Environ Qual, 1997, 26: 924-933.

[26] 柳勇,何江华,王少毅,等.广州市蔬菜地重金属剂对蔬菜富集重金属的影响:以菜心为例[J].生态环境,2003,12(3):273-276.

[27] 周启星,高拯民.作物籽实中 Cd 与锌的交互作用及其机理的研究[J].农业环境保护,1994,13(4):148-151.

[28] 华路,白玲玉,韦东普,等.有机肥 Cd 锌交互作用对土壤 Cd 锌形态和小麦生长的影响[J].中国环境科学,2002,22(4):346-350.

[29] SHANKER K, MISHRA S, SRIVASTAVA S, et al. Study of mercury-selenium (Hg-Se) interactions and their impact on Hg uptake by the radish (*Raphanus sativus*) plant [J]. Food Chem Toxicol, 1996, 34(9): 883-886.

[30] YATHAVAKILLA S K V, CARUSO J A. A study of Se-Hg antagonism in *Glycine max* (soybean) roots by exclusion and reversed phase HPLC-ICPMS [J]. Anal Bioanal Chem, 2007, 389(3): 715-723.

[31] MOUNICOU S, SHAH M, MEIJA J, et al. Localization and speciation of selenium and mercury in *Brassica juncea*—implications for Se-Hg antagonism [J]. J Anal Atom Spectrom, 2006, 21(4): 404-412.

[32] MOUNICOU S, VONDERHEIDE A P, SHANN J R, et al. Comparing a selenium accumulator plant (*Brassica juncea*) to a nonaccumulator plant (*Helianthus annuus*) to investigate selenium-containing proteins [J]. Anal Bioanal Chem, 2006, 386(5): 1367-1378.

[33] AFTON S E, CARUSO J A. The effect of Se antagonism on the metabolic fate of Hg in *Allium fistulosum* [J]. J Anal Atom Spectrom, 2009, 24(6): 759-766.

[34] ZHAO J T, GAO Y X, LI Y F, et al. Selenium inhibits the phytotoxicity of mercury in garlic (*Allium sativum*) [J]. Environ Res, 2013, 125: 75-81.

[35] ZHAO J T, HU Y, GAO Y X, et al. Mercury modulates selenium activity via altering its accumulation and speciation in garlic (*Allium sativum*) [J]. Metallomics, 2013, 5(7): 896-903.

[36] 段晓琴,赵永亮.锌 Se 微肥对油菜苗期锌、Se 积累及生理效应的影响[J].江苏农业科学,2009(4):106,147.

[37] 王建伟,王朝辉,毛晖,等. Se 锌钼对黄土高原马铃薯和小白菜产量及营养元素与 SeCd 含量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2114-2120.

[38] 胡斌,梁东丽,赵文龙,等.土壤铜 Se 复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响[J].环境科学,2012,33(8):2817-2824.