

设施栽培条件下蔬菜含硒状况及其健康风险评估^①

符明明^{1,2}, 贾萌萌^{1,2}, 胡文友¹, 黄 标^{1*}

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 设施栽培条件下土壤性质变化剧烈, 其对作物吸收硒(Se)的影响值得研究。本文通过对南京市典型设施蔬菜种植基地土壤及对应植物样品进行取样分析, 探讨高强度利用模式下土壤 Se 的存在形态以及不同蔬菜类型对 Se 吸收的差异, 分析蔬菜 Se 含量与土壤 Se 存在形态及土壤性质之间的关系, 并对长期设施栽培条件下蔬菜 Se 的摄入健康风险进行评价。结果表明, 不同蔬菜可食部分对 Se 的富集能力表现为叶菜类(平均含 Se 量为 60 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 干重) > 根茎类(30 $\mu\text{g}/\text{kg}$) > 茄果类(26 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。蔬菜可食部分 Se 含量随土壤有机质及有机结合态 Se 含量的增加而降低。研究区域有机肥的大量施入引起的有机结合态 Se 含量的增加可能是降低 Se 有效性的最重要原因。

关键词: 蔬菜; 硒; 有机结合态; 蔬菜大棚

中图分类号: S154.4

硒(Se)是人体所必需的元素之一, 维持着人体正常的生长、代谢活动。Se 是人体内多种酶的重要组成部分, 在调节细胞氧化还原状态、清除体内自由基、预防癌症等生物学功能上发挥着重要作用, 被称为主宰生命的元素^[1]。然而, 从全国尺度上看, 我国土壤含 Se 水平较低, 缺 Se 面积广大。中国地质调查局在 20 世纪 80 年代进行的调查分析结果显示, 我国 72% 的地区处于缺 Se 或低 Se 地区, 2/3 的人口存在不同程度的 Se 摄入不足。因而, 保证人体足够的 Se 摄入量, 防止 Se 缺乏疾病的发生成为广泛关注的焦点。

Se 的摄入不足主要归咎于较低的环境 Se 含量, 这直接导致食物中 Se 含量偏低^[2]。植物类食品中的 Se 主要来源于土壤, 而植物对 Se 的吸收、富集与土壤中 Se 的丰缺、形态以及土壤性质有直接关系^[3]。不同存在形态的 Se 的化学及生物学特性有所差异, 其植物有效性也存在很大区别。水溶及交换性 Se 一般被认为是能够直接被植物所吸收利用的 Se, 有机结合态 Se 也是重要的潜在有效 Se 库, 而其他形态 Se 的有效性较差, 一般不能被植物直接吸收利用^[4]。土壤性质也会直接或者通过影响 Se 在土壤中的存在形态而影响植物对 Se 的吸收。土壤 pH、有机质、竞争离子的类型及浓度等理化性质都会对 Se 的有效性产生影响。有研究表明, 高 pH 有利于 Se 向可溶形

态的转化, 增加 Se 的有效性^[5-6]。有机质能够与土壤中的 Se 进行螯合反应, 改变 Se 在土壤中的存在形态^[7-8]。竞争离子的存在能够和吸附状态的 Se 竞争吸附位点, 影响 Se 在固液两相之间的平衡^[9-10]。一些元素的存在也会对 Se 的吸收、利用产生影响^[11]。

蔬菜在我国居民的饮食结构中占有举足轻重的地位, 它能为人体提供多种维生素、矿物质以及膳食纤维等, 是人们日常饮食的必需品。近些年来设施蔬菜在我国发展迅速, 在 2010 年, 我国以蔬菜种植为主体的设施农业的面积已经达到 467 万 hm^2 , 达世界第一。然而, 虽然我国的设施蔬菜的种植面积大, 但却存在水、肥管理措施不恰当的问题^[12]。土壤酸化、盐化问题严重, 养分过度积累, 影响到设施蔬菜的可持续发展, 也影响着系统内元素的循环过程^[13-15]。在该种利用模式下, 土壤 Se 的存在形态如何变化、植物对土壤 Se 的吸收利用是否会受到影响都鲜有报道。因此本研究以设施蔬菜种植系统作为研究对象, 研究高强度设施蔬菜种植模式对土壤 Se 的存在形态以及蔬菜对 Se 吸收的影响, 并对人体摄入设施蔬菜的健康风险进行评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择南京市江宁区谷里街道设施蔬菜种植基地

基金项目: 国家自然科学基金项目(41473073)和环保公益性行业科研专项项目(201409044)资助。

* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 符明明(1986—), 男, 辽宁鞍山人, 博士研究生, 主要从事土壤元素地球化学研究工作。E-mail: fumingming1234@126.com

作为研究对象。基地位于南京市南缘,生产的蔬菜主要供给南京市市区。该区域为亚热带季风气候,年平均温度为 15.4℃,年降雨量为 1 100 mm。土壤类型为发育于第四纪黄土的水耕人为土,土壤较黏呈酸性到中性反应。基地有较长的水稻耕作历史,近 20 年,设施农业在该区域逐步发展。目前,该设施蔬菜种植基地为公司化管理,农户以承租的方式使用设施

蔬菜种植设施进行生产活动。随着蔬菜需求量的增加,设施蔬菜种植规模不断扩大,设施蔬菜大棚的种植年限从 0 年(刚建成)到 10 余年不等。田间调查显示,养分元素的投入以复合肥和有机肥为主,复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15)的投入量约为 3~4 t/hm²,鸡粪及其他类型有机肥料的施用量约为 15 和 4 t/hm²。研究区域土壤的基本理化性质列于表 1。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Soil properties of the study field

	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	有效钾(mg/kg)
平均值	4.93	28.2	1.64	108.38	217.54
变化范围	3.99~6.74	20.05~36.78	1.07~2.63	19.40~234.00	91.80~487.00

1.2 样品采集

根据设施蔬菜的种植年限,对基地不同区域的设施蔬菜种植土壤进行了采样分析。采样在 2012 年春季进行,采集了 45 个 0~20 cm 的土壤耕层样品。采集土壤样品的地区种植年限为 0~>10 年不等。土壤样品采集选用五点混合采样法,在选取的样点周围随机选取 5 个采样点利用不锈钢土钻进行取样。取样后将 5 个样点的土壤混合均匀,利用四分法取得 1 kg 土壤样品带回实验室进行后续处理。样品带回后,置于阴凉干燥避光处自然风干,之后剔除根系和石子。利用木槌研磨至全部土壤通过 2.0 mm 的尼龙筛。然后,取其中约 100 g 土壤用玛瑙研钵研磨并全部通过 0.149 mm 尼龙筛。研磨后的土壤样品置于阴凉干燥处放置待测。

在采集土壤样品的同时,也对土壤取样点对应的蔬菜可食用部分进行采样。蔬菜分为叶菜类、根茎类和茄果类 3 种类型。采集的 45 个植物样品包括 29 个叶菜类蔬菜、12 个根茎类蔬菜和 4 个茄果类蔬菜。叶菜类蔬菜类型为上海青、小白菜、苦菊、菊花脑、茼蒿;根茎类蔬菜的类型为茼蒿、萝卜;茄果类蔬菜为辣椒。取回的样品首先利用自来水冲洗掉表面的泥土等杂物,再以蒸馏水冲洗,最后用超纯水冲净,用滤纸吸干表面水分。之后在 65~70 °C 条件下烘干并以不锈钢球磨仪粉碎后收集于洁净的自封袋内待测。

1.3 样品分析

通过 2.0 mm 尼龙筛的土壤进行 pH、有效磷(Olsen-P)、速效钾的测定;通过 0.149 mm 尼龙筛的土壤进行土壤有机质、全 Se 以及 Se 结合状态的测定。常规土壤性质的测定参照鲁如坤^[16]的分析方法进行测定。土壤 pH 采用土水比 1:2.5,利用 pH 计进行测定(PHS-3C,上海精密科学仪器有限公司)。土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加加热法测定;速效磷采

用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH₄Ac 提取,火焰光度计进行测定(FP650,上海精密科学仪器有限公司)。土壤全 Se 采用硝酸-盐酸混合消解的方法进行测定,方法参照《土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定》(HJ680-2013)。蔬菜中的 Se 采用硝酸-高氯酸消化、盐酸还原法进行测定。土壤中 Se 的结合状态的测定参照 Qin 等^[17]的方法,对土壤水溶及交换态、有机结合态 Se 进行提取测定。溶液中 Se 的测定采用氢化物发生-原子荧光法进行测定(AFS-230,北京海光仪器有限公司)。

试验所用的硝酸、高氯酸、盐酸、硫酸、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾为优级纯;乙酸铵、硫酸亚铁、重铬酸钾为分析纯;水为超纯水,由美国 Millipore 公司的纯水设备制备。在测定过程中,样品设置重复,同时在测定过程中加入空白对照、标准物质以减少测定误差。土壤标准物质选用 GBW07401 和 GBW07412,蔬菜标准物质采用 GBW10021 和 GBW10023。测定的结果显示,标准物质的测定值均在允许误差范围内,结果准确可靠。

1.4 数据处理

常规的统计分析及图表绘制利用 Microsoft Excel 软件进行处理。相关分析及回归分析等采用 SPSS 16.0 进行统计分析。

人体通过蔬菜摄入的 Se 的健康风险评价通过相关参数计算得出。根据世界卫生组织(1996)的建议值 40 μg 作为每日的 Se 摄入量建议值。蔬菜日摄入量参照中国营养学会提出的中国居民平衡膳食宝塔中中等能量(约 10 000 KJ)膳食结构中蔬菜的摄入量为 450 g 进行计算。成人每日通过蔬菜摄入 Se 含量以及 Se 的富集系数通过如下公式进行计算:

每日通过蔬菜摄入 Se 含量(μg/d)=蔬菜的日摄入量(kg/d,鲜重)×5%×蔬菜中 Se 含量(μg/kg,干重)

富集系数 = 蔬菜 Se 浓度($\mu\text{g}/\text{kg}$)/土壤 Se 浓度($\mu\text{g}/\text{kg}$)。

2 结果与讨论

2.1 蔬菜可食用部分硒含量

植物可食用部分的 Se 含量体现着土壤中 Se 的有效性,同时也影响着食用人群对 Se 的吸收。表 2 为不同类型蔬菜可食用部分的含 Se 量。结果显示,不同蔬菜的可食用部分 Se 含量差异较大,变异范围在 19 ~ 80 $\mu\text{g}/\text{kg}$,平均值为 50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。对比 3 种不同类型的蔬菜,叶菜类蔬菜含 Se 量最高,平均含 Se 量达到 60 $\mu\text{g}/\text{kg}$;其次是根茎类蔬菜,平均含 Se 量达到 30 $\mu\text{g}/\text{kg}$;含 Se 量最低的为茄果类蔬菜,其平均含 Se 量为 26 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。该结果表明,叶菜类蔬菜可食用部分 Se 的含量更高,其对土壤中 Se 的富集能力明显高于根茎类及茄果类蔬菜。该结果与张喜琦等^[18]对山东寿光地区蔬菜的含 Se 状况研究结果基本一致。然而,即使是同一蔬菜类型,各不同蔬菜在富 Se 能力上也存在差异。对于叶菜类蔬菜,含 Se 量最高的是上海青,平均 Se 含量为 64 $\mu\text{g}/\text{kg}$;其次是菊花脑和茼蒿,其平均 Se 含量均为 56 $\mu\text{g}/\text{kg}$;小白菜的含 Se 量最低,平均含 Se 量为 48 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。根茎类的茼蒿和萝卜的含 Se 量较为接近,平均值均为 31 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。茄果类的蔬菜仅有辣椒样品,平均含 Se 量为 26 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。与山东寿光地区的蔬菜 Se 含量的对比显示,其辣椒的含 Se 量基本与本研究持平,而其白菜的含 Se 量略高于本研究^[18]。蔬菜可食部分的 Se 富集系数的结果表明,叶菜类蔬菜、根茎类蔬菜以及茄果类蔬菜的平均富集系数分别为:0.20、0.11 和 0.09。叶菜类蔬菜的富集系数明显高于根茎类和茄果类蔬菜,但 3 种类型蔬菜的富集系数普遍较低。前人在澄迈的研究显示,小白菜、上海青等叶菜类蔬菜的 Se 的富集系数 >0.54,高于本研究中的富集系数^[19]。该结果表明,同种类型蔬菜在不同土壤中也因为环境条件的差异而有所不同。Sirichakwal 等^[20]曾对亚洲地区的食物含 Se 状况进行研究,结果表明在各类食物中新鲜蔬菜的含 Se 量处于较低水平。Lp 和 Ganther^[21]的研究认为,植物中的含 Se 状况与植物体内含 S 氨基酸及其衍生物的含量之间存在着密切的关系。这些氨基酸及其衍生物中的 S 可被体内的 Se 所取代,促进 Se 在植物体内的固定,进而提高植物体内的 Se 含量。因而,蛋白质含量丰富的蔬菜中 Se 的含量会相对较高。

2.2 设施菜地土壤硒含量及结合状态

土壤总 Se 含量在一定程度上能够反映土壤 Se

表 2 不同蔬菜中 Se 的含量
Table 2 Selenium contents in different vegetables

种类	品种	样本数	平均值±标准差 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	变化范围 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
叶菜类	青菜	18	64.2 ± 8.0 a	50.5 ~ 80
	菊花脑	3	56.3 ± 3.8 ab	52 ~ 59
	茼蒿	2	56.0 ± 0.0 ab	56
	苦菊	2	53.0 ± 4.2 ab	50 ~ 56
	白菜	4	47.5 ± 7.1 b	38 ~ 53
根茎类	茼蒿	7	30.6 ± 11.7 c	18.5 ~ 45
	萝卜	5	30.3 ± 7.3 c	21.5 ~ 39
茄果类	辣椒	4	26.4 ± 7.2 c	18.5 ~ 35.5

注:同列数据小写字母不同表示差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

的总体水平。在研究区域,土壤耕层的总 Se 含量为 0.308 mg/kg,变化范围为 0.230 ~ 0.581 mg/kg。在世界范围内,土壤总 Se 的变化范围总体集中在 0.01 ~ 2 mg/kg,平均值为 0.4 mg/kg^[22]。研究区域土壤 Se 的含量略低于世界土壤 Se 的平均水平。

然而,土壤的总 Se 状况不足以反映土壤 Se 的植物有效性,不同结合状态 Se 的移动性及植物有效性存在较大差异。水溶及交换性 Se、有机结合态 Se 是土壤 Se 的重要结合形态,其含量的多少直接影响植物对土壤 Se 的吸收、利用。本研究利用连续提取法对土壤中的水溶及交换性 Se、有机结合态 Se 进行了分析。结果显示,土壤中的水溶及交换性 Se 的变化范围在 0.025 ~ 0.048 mg/kg,平均值为 0.036 mg/kg,约占土壤总 Se 含量的 10% 左右。该结果与前人的研究结果较为一致^[23]。有机结合态 Se 的含量较高,其含量约为水溶及交换性 Se 含量的 3 倍,平均含量 0.092 mg/kg,变化范围为 0.073 ~ 0.113 mg/kg,约占土壤总 Se 含量的 30% 左右。在前人的研究中,不同土壤中有机结合态 Se 的含量差异较大,其占总 Se 含量的百分率从 3% ~ 60% 不等^[24-26]。一般认为,土壤有机结合态 Se 的含量受土壤有机质含量影响较大,有机质含量较高的土壤其有机结合态 Se 的含量也较高^[26-27]。在本研究中,土壤有机结合态 Se 与有机质含量之间也表现出类似的特征,土壤有机结合态 Se 含量随着土壤有机质含量的升高而升高,二者间存在显著的正相关关系(图 1)。该结果表明,高强度设施栽培条件下土壤有机质的累积提高了土壤有机结合态 Se 的含量。

2.3 蔬菜硒含量及其影响因素

蔬菜对 Se 的吸收不仅与土壤中 Se 的含量及存在形态密切相关,也受到土壤性质的影响。在土壤中,水溶及交换性 Se 主要以硒酸盐、亚硒酸盐等无机形态存在^[28]。前人研究表明,土壤中的 P 与 Se 由于在

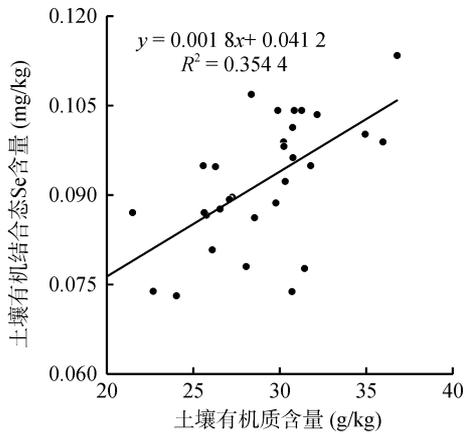


图 1 土壤有机质含量与土壤有机结合态 Se 含量之间的关系
Fig. 1 Relationship between soil organic matter content and organic bound Se content

结构上较为相似,因此土壤中 P 含量较高时会抑制 Se 在土壤的吸附,促进 Se 从土壤颗粒的解吸,增加 Se 的移动性及生物有效性^[29-30]。然而,在本研究中,土壤中水溶及交换性 Se 含量却并未随土壤 P 含量的升高而升高。相反,土壤中的水溶及交换性 Se 的含量随着土壤 P 含量的增高而降低,二者呈显著的负相关关系。产生这种结果的原因可能是土壤中较高含量的 P 抑制了 Se 在土壤的吸附,增加了溶液中的 Se 含量,促进溶液中的活性 Se 与土壤有机质结合进而转化为有机结合态 Se^[8, 31]。通常,有机结合态 Se 能与土壤中的水溶及交换性 Se 互为转化,达到动态平衡。然而,有机结合态 Se 中仅有一部分以低分子量形式存在的 Se 能够被植物直接吸收利用,大部分有机结合态 Se 则不能被植物直接吸收利用^[32-33]。因而,在一定程度上,水溶及交换性 Se 含量的降低、有机结合态 Se 含量的升高会降低 Se 的有效性。这也就解释了蔬菜可食用部分 Se 含量随土壤有机结合态 Se 含量的增加而降低,以及二者显著的负相关关系(图 2)。

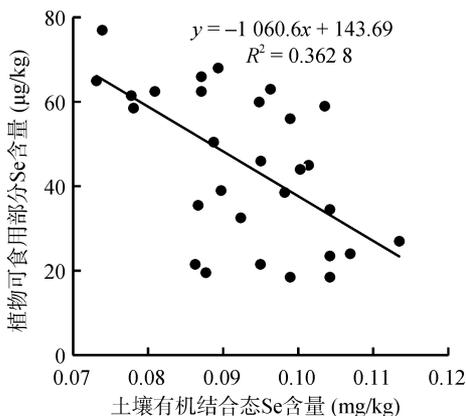


图 2 土壤有机结合态 Se 含量与植物可食用部分 Se 含量之间的关系

Fig. 2 Relationship between soil organic bound Se content and vegetable Se content

2.4 设施蔬菜的健康风险评价

食物中的 Se 含量在一定程度上决定了人体对 Se 的摄入量。当人体长期食用低 Se 含量的食物时,可能造成 Se 摄入量的不足,引起缺 Se 疾病的发生^[34]。在 Se 的日摄入量标准制定上,不同国家的规定有所不同。一般来说成人每日至少需要摄入 20 µg Se 才能有效防止缺 Se 症状的发生,至少需要 40 µg 的摄入量以满足体内含 Se 酶类的正常表达。如果要想达到减少癌症患病风险的程度,成人每日需 Se 量可能需要达到 300 µg^[22]。在世界范围内,Se 的日摄入量的建议值在 30 ~ 100 µg 之间^[35]。美国的日推荐摄入量为男性 70 µg/d、女性 55 µg/d。在英国,Se 的日摄入量建议值为男性 70 µg/d、女性 60 µg/d。世界卫生组织(1996)的建议量较低,认为 40 µg 的 Se 摄入量能够满足大部分成年人的需求^[2]。

依据中国营养学会提出的中国居民平衡膳食宝塔推荐,在中等能量(约 10 000 KJ)膳食结构中蔬菜的摄入量为 450 g 左右。常见蔬菜的测定结果表明,蔬菜含水量一般为 88% ~ 97%,按照蔬菜含水量为 95% 计算,每天摄入的蔬菜的干重约为 22.5 g。由此推算,每日通过单纯摄入叶菜类、根茎类或茄果类蔬菜获得的 Se 的含量分别为 1.35、0.675 和 0.585 µg,仅占建议日 Se 摄入量 40 µg 的 3.3%、1.7% 和 1.43%。可见,通过蔬菜获取的 Se 的含量仅占人体日 Se 建议摄入量的极小部分。

3 结论

研究区域的总 Se 含量处于略低于世界土壤总 Se 含量的水平。不同类型蔬菜对 Se 的富集能力存在差异,富集能力的顺序为叶菜类 > 根茎类 > 茄果类,同类型蔬菜的不同品种在富 Se 能力上也存在差异。研究区域蔬菜可食用部分 Se 含量较低,对人体 Se 的供给能力有限。高强度设施种植条件引起的有机质的积累提高了土壤有机结合态 Se 的含量,降低了 Se 的植物有效性,引起蔬菜可食用部分 Se 含量的降低,增加了人体缺 Se 风险。

参考文献:

- [1] 张均华,朱练峰,禹盛苗,等. 稻田硒循环转化与水稻硒营养研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2 900-2 906
- [2] Combs G F. Selenium in global food systems[J]. British Journal of Nutrition, 2001, 85(5): 517-547
- [3] Antanaitis A, Lubyte J, Antanaitis S, et al. Selenium concentration dependence on soil properties[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2008, 6(1): 163-167

- [4] Gleyzes C, Tellier S, Astruc M. Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: A review of sequential extraction procedures[J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2002, 21(6-7): 451-467
- [5] Kim S S, Min J H, Lee J K, et al. Effects of pH and anions on the sorption of selenium ions onto magnetite[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, 104: 1-6
- [6] 杨旒, 宗良纲, 严佳, 等. 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(6): 1 069-1 075
- [7] Gustafsson J P, Johnsson L. The association between selenium and humic substances in forested ecosystems - laboratory evidence[J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 1994, 8(2): 141-147
- [8] Ogaard A F, Sogn T A, Eich-Greatorex S. Effect of cattle manure on selenate and selenite retention in soil[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 76(1): 39-48
- [9] Eich-Greatorex S, Krogstad T, Sogn T A. Effect of phosphorus status of the soil on selenium availability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(3): 337-344
- [10] Dhillon S K, Dhillon K S. Selenium adsorption in soils as influenced by different anions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 2000, 163(6): 577-582
- [11] 张木, 胡承孝, 孙学成, 等. 钼硒配施对小白菜钼硒形态及硒价态的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 894-900
- [12] Liang L Z, Zhao X Q, Yi X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River delta, China[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(2): 161-168
- [13] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in south-eastern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(1): 73-84
- [14] Xu A M, Zhang Y L, Li Z Y, et al. Nutrient accumulation in the soils under sun-light greenhouses of Xi'an area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 193-196
- [15] 周鑫斌, 于淑慧, 谢德体. pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1 069-1 077
- [16] 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, 1999
- [17] Qin H B, Zhu J M, Su H. Selenium fractions in organic matter from se-rich soils and weathered stone coal in selenosis areas of China[J]. *Chemosphere*, 2012, 86(6): 626-633
- [18] 张喜琦, 张卉, 王骏, 等. 不同蔬菜中硒累积量及硒生物富集能力差异研究[J]. *江苏农业科学*, 2009, 37(4): 170-171
- [19] 肖钰杰, 罗盛旭, 王雅娟, 等. 澄迈蔬菜中硒镉铅富集特征及硒影响效应[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(8): 76-79
- [20] Sirichakwal P P, Puwastien P, Polngam J, et al. Selenium content of thai foods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2005, 18(1): 47-59
- [21] Lp C, Ganther H E. Novel strategies in selenium cancer chemoprevention research, in selenium in biology and human health[M]. New York: Springer-Verlag, 1994: 169-180
- [22] Fernandez-Martinez A, Charlet L. Selenium environmental cycling and bioavailability: A structural chemist point of view[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2009, 8(1): 81-110
- [23] Keskinen R, Ekholm P, Yli-Halla M, et al. Efficiency of different methods in extracting selenium from agricultural soils of Finland[J]. *Geoderma*, 2009, 153(1-2): 87-93
- [24] Yamada H, Kamada A, Usuki M, et al. Total selenium content of agricultural soils in Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(5): 616-622
- [25] Zhang Y Q, Moore J N. Selenium fractionation and speciation in a wetland system[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(8): 2 613-2 619
- [26] 何振立, 杨肖娥, 祝军, 等. 中国几种土壤中的有机态硒及其分布特征[J]. *环境科学学报*, 1993, 13(3): 281-287
- [27] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1 356-1 364
- [28] Wang S S, Liang D L, Wang D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427-428: 159-164
- [29] He Z L, Yang X E, Zhu Z X, et al. Effect of phosphate on the sorption, desorption and plant-availability of selenium in soil[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 39(3): 189-197
- [30] Nakamaru Y, Tagami K, Uchida S. Effect of phosphate addition on the sorption-desorption reaction of selenium in Japanese agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(1): 109-115
- [31] Gustafsson J P, Johnsson L. Selenium retention in the organic-matter of Swedish forest soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1992, 43(3): 461-472
- [32] Zayed A, Lytle C M, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants[J]. *Planta*, 1998, 206(2): 284-292
- [33] Williams M C, Mayland H F. Selenium absorption by 2-grooved milkvetch and western wheatgrass from selenomethionine, selenocystine, and selenite[J]. *Journal of Range Management*, 1992, 45(4): 374-378
- [34] Foster L H, Sumar S. Selenium in health and disease: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1997, 37(3): 211-228
- [35] Keskinen R, Raty M, Yli-Halla M. Selenium fractions in selenate-fertilized field soils of Finland[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 91(1): 17-29

Effect of Greenhouse Vegetable Cultivation Under Intensive Utilized Conditions on Selenium Content in Vegetables

FU Mingming^{1,2}, JIA Mengmeng^{1,2}, HU Wenyong¹, HUANG Biao^{1*}

(1 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Little information is available on the effects of intensive greenhouse cultivation on selenium (Se) content in vegetables. This study was conducted in a typical greenhouse vegetable cultivation field in Nanjing. Soil samples as well as corresponding vegetables were collected, and Se contents were analyzed to reveal the factors affecting vegetable Se content. The health risk of Se intake through vegetables was also evaluated. The results showed that the contents of Se in vegetables varied with vegetable species and followed the order: leafy vegetable > tuber vegetable > fruit vegetable. Vegetable Se content decreased with increased soil organic matter (OM) content and organic bound Se content. This might be due to the large amounts of organic fertilizer input, which increased soil OM content as well as organic bound Se content, and thus decreased soil Se availability. The background soil Se level in study area was low. The decrease in vegetable Se content induced by application of organic fertilizer increased the health risk of Se deficiency to human.

Key words: Vegetable; Selenium; Organic bound; Greenhouse