

南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险*

胡文友¹ 黄 标^{1†} 马宏卫² 陈 永³ 董隼睿⁴

(1 土壤环境与污染修复重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 南京市耕地质量保护站, 南京 210036)

(3 Texas A&M University, Department of Soil & Crop Sciences, College Station, TX 77843, USA)

(4 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘 要 选取南京市典型设施蔬菜生产系统为研究对象,研究了设施土壤-蔬菜系统中镉和汞的累积特征,评价了不同类型蔬菜中镉和汞的暴露风险,提出了基于健康风险的设施菜地土壤镉和汞的环境质量基准。结果表明:(1)设施菜地表层土壤中镉和汞产生了明显累积,且土壤汞的平均含量超过了温室蔬菜产地环境质量评价标准;(2)叶菜类蔬菜对镉和汞的富集能力最强,部分叶菜中的镉和汞含量超过了食品中污染物限量标准;(3)研究区有约 21.2%的蔬菜具有镉的潜在人体摄入风险,蔬菜中汞的风险概率约为 1%,不同蔬菜镉和汞的人体摄入风险排序为叶菜>根茎>茄果;(4)不同蔬菜类型土壤镉和汞的环境质量基准值差异较大,因此在今后的标准修订时可考虑针对不同蔬菜类型分别制定设施菜地土壤重金属环境质量基准。

关键词 设施蔬菜产地;镉;汞;富集系数;健康风险评估;环境质量基准

中图分类号 X53 **文献标识码** A

蔬菜在人们日常饮食结构中占有重要地位,其质量的优劣直接关系到我国的“菜篮子”安全及人们的身体健康。近年来,中国设施蔬菜生产发展迅速,生产规模不断扩大,已经成为中国蔬菜生产中的主要方式^[1-2]。设施蔬菜生产中大量使用重金属含量较高的化肥和有机肥,导致土壤重金属累积甚至超标的现象^[3-4]。因此,设施蔬菜产地土壤和蔬菜中重金属的累积与健康风险越来越受到人们的格外关注^[5-7]。现行温室蔬菜产地环境质量评价标准是从总体上对温室蔬菜产地环境进行评价和管理,并不针对具体作物,也没有考虑重金属的植物有效性和人体健康风险。因此,根据土壤类型和作物吸收等特性,尽快制定适合我国国情的土壤环境质量标准,已经成为当前重金属等相关研究的迫切需求^[8-9]。

本文选取南方具有代表性的南京一典型设施塑料大棚蔬菜生产基地,在前期系统调研和研究结果的基础上^[10-11],以土壤-蔬菜系统中镉和汞为研究对象,分析这两种元素在土壤-蔬菜系统中的累

积与迁移特征,评价不同蔬菜中镉和汞的人体摄入风险,在此基础上建立了基于健康风险的设施蔬菜产地土壤镉和汞的环境质量基准。本研究在重金属的人体健康风险评价和土壤重金属环境质量基准的制定方面具有一定的创新性和方法学意义,研究结果将为管理部门进行设施农业土壤环境管理,保障设施蔬菜安全和人体健康提供管理和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于南京市郊一典型设施蔬菜生产基地,该基地位于长江的高阶地上,成土母质为第四纪黄土,土壤类型为长期种植水稻而形成的水耕人为土,土壤普遍呈酸性。该地区属北亚热带季风气候区,年平均气温 15.7℃,年平均降水量为 1 000 ~ 1 100 mm。该基地成立于 2006 年,由稻麦轮作地转换而来。最初,由一公司经营,沿着中部和南部村

* 国家自然科学基金项目(41101491;U1202236)和环保公益性行业科研专项项目(201409044)资助

† 通讯作者, Tel: 025-86881296, E-mail: bhuang@issas.ac.cn

作者简介: 胡文友(1983—),男,安徽淮南人,博士,副研究员,主要从事土壤环境地球化学与风险评估方面的研究。E-mail: wyhu@issas.ac.cn

收稿日期: 2014-01-02; 收到修改稿日期: 2014-06-13

庄周边交通及水源较为方便的区域开始进行设施蔬菜生产,同时由河流及道路分割的东边区域种植年限也相对较早,之后逐渐有来自安徽和苏北的种

植户来此租地种植蔬菜,并逐渐向周围拓展(图1)。目前,蔬菜种植面积约 167 hm²,农户约 160 多户。

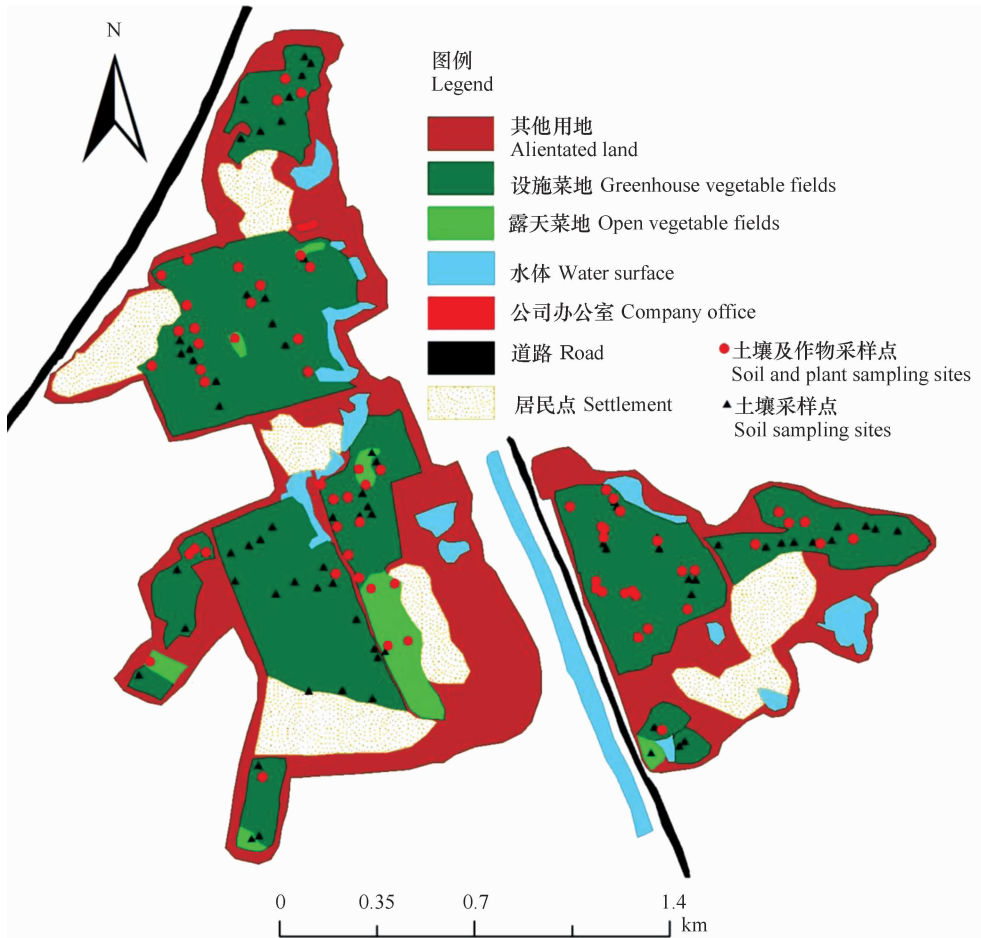


图1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling sites

1.2 田间调查与采样

在进行采样前,对研究区的设施蔬菜类型、种植方式、不同蔬菜的施肥量及产量进行系统调查,调查结果见表1。调查结果显示,研究区以叶菜种植为主,根茎和茄果为辅,一般种植户一年之内可有多种轮作模式。研究区施肥量很大,有机肥主要施用鸡粪和商品有机肥为主,少部分农户施用菜籽饼,其中鸡粪用量最大;化肥以复合肥、尿素和磷肥为主。茄果类蔬菜的施肥量和产量最高,平均施肥量为 6 015 kg hm⁻² a⁻¹,平均产量可达 90 000 kg hm⁻² a⁻¹。

土壤和蔬菜样品采集于 2011 年 12 月,在设施

蔬菜基地相对均匀地采集了 140 个代表性的表层土壤样品,每个样点用 GPS 定位。采样时,使用不锈钢锹在大约 600 m² 范围的塑料大棚或露天菜地内随机采集靠近蔬菜根部的 5 个表层土壤,混合均匀后缩分至 1 ~ 2 kg 装入自封袋混合成一个混合样品。在采集表层土壤的 3 个设施菜地和 3 个露天菜地,分别采集 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 不同剖面的土壤样品。在采集土壤样品的同时,还采集了与土壤样品相对应的 62 个蔬菜样品,每个蔬菜样品的采集与土壤样品的采集一样,取 5 个采样点的混合样。采集到的蔬菜类型包括叶菜类 40 个、根茎类 16 个和茄果类 6 个。

表 1 研究区设施蔬菜种类、施肥量及产量

Table 1 Type of greenhouse vegetables, fertilization rates and vegetable yields in the study area

蔬菜类型 Type of vegetable	肥料施用量 Rate of fertilizer (kg hm ⁻² a ⁻¹)		平均产量 Mean yield (kg hm ⁻² a ⁻¹)	蔬菜名称 Name of vegetable
	有机肥 Organic fertilizer	化肥 Inorganic fertilizer		
	叶菜 Leafy vegetables	3 135	870	48 000
根茎 Root/tuber vegetables	3 020	990	54 000	莴笋、萝卜、大蒜 Lettuce, Radish, Garlic
茄果 Solanaceous vegetable	4 530	1 485	90 000	辣椒、西红柿、黄瓜 Chilli, Tomato, Cucumber

1.3 样品处理及分析

野外采集的土壤样品经风干后,在室内剔除石块、植物根茎等杂质,研磨分别过 2 mm、0.3 mm 和 0.149 mm 筛,供土壤 pH、有机质等基本理化性质和镉、汞的全量分析。蔬菜样品采集后先用蒸馏水冲洗干净,然后再用去离子水冲洗一次,待水晾干后称重,放入 60℃ 烘箱中烘干,取出样品再称重,获得蔬菜样品的干鲜比。烘干后的蔬菜样品粉碎装入密封纸袋,保存在干燥器中供重金属全量分析之用。土壤 pH 用 PHS-3C 型酸度计进行测定;有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[12];土壤镉全量采用硝酸-高氯酸-氢氟酸消化,电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定,土壤汞全量采用王水消化,原子荧光光谱法(AFS)测定。蔬菜镉含量采用 ICP-MS 法测定,蔬菜汞含量采用硝酸-高氯酸消化,AFS 法测定。所有实验用品均经稀酸和王水浸泡,减少器皿对镉和汞的吸附;实验用水均为去离子超纯水。每批样品各有三个空白样品和标准物质与样品同步分析。

1.4 蔬菜摄入途径的健康风险评估

蔬菜重金属富集系数(Bioconcentration factor),即蔬菜可食部分的重金属含量与土壤中重金属含量的分数比值,来衡量由于蔬菜的重金属质量分数与土壤中的重金属质量分数的相关性。蔬菜中重金属的健康风险评估采用国际通用的目标危害商法。目标危害商(Target hazard quotient, THQ)是美国环境保护署于 2000 年建立的一种评价人群健康风险的方法,用以评价人体摄入重金属等污染物而产生的非致癌风险^[13-15]。该方法假定污染物吸收剂量等于摄入剂量,以测定的污染物人体摄入量

与参考剂量的比值作为评价标准。由于本文仅计算蔬菜摄入途径的暴露风险,而未考虑其他暴露途径和风险。因此,如果该值小于 1,则说明暴露人群对重金属通过蔬菜摄入途径的风险可以接受,反之,暴露人群很可能经受明显的负面影响^[13]。目标危害商的计算公式如下:

$$THQ = \frac{EDI}{RfD} = \frac{C_{veg} \times IR_{veg} \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD}$$

式中,EDI 为重金属的估计每日摄入量(mg kg⁻¹ d⁻¹);RfD(mg kg⁻¹ d⁻¹)为重金属的每日允许摄入量,镉和汞的 RfD 值分别为 0.001 和 0.000 3 mg kg⁻¹ d⁻¹^[13];C_{veg}(mg kg⁻¹,蔬菜鲜重,对数正态分布)为不同蔬菜中重金属的平均含量;EF(365 d a⁻¹,均匀分布)为暴露频率;ED 为暴露持续时间(70 a,三角分布);IR_{veg}为我国成人每日蔬菜平均摄入量(0.355 kg d⁻¹,对数正态分布)^[16];BW 为我国成人的平均体重(60.3 kg,对数正态分布)^[16];AT 为平均暴露时间(d,365 × 暴露持续时间,三角分布)。本文为了便于统一比较不同类型蔬菜重金属的摄入风险,选取每日食用蔬菜量较多的成人作为敏感受体,并假设成人每日摄入叶菜、根茎和茄果类蔬菜的量一致,均为 0.355 kg d⁻¹。

1.5 数据处理

研究区及采样点分布图由 ArcGIS9.3 软件的地统计模块(Geostatistical Analyst)完成;土壤重金属含量的频数分布和不同类型蔬菜重金属的目标危害商箱形图采用 SPSS17.0 软件来完成;土壤重金属的剖面分布图采用 Origin8.0 软件完成;蔬菜健康风险评估和不同暴露参数的敏感性分析采用 Crystal Ball 7.2 风险评估软件中的蒙特卡罗模拟方法,运

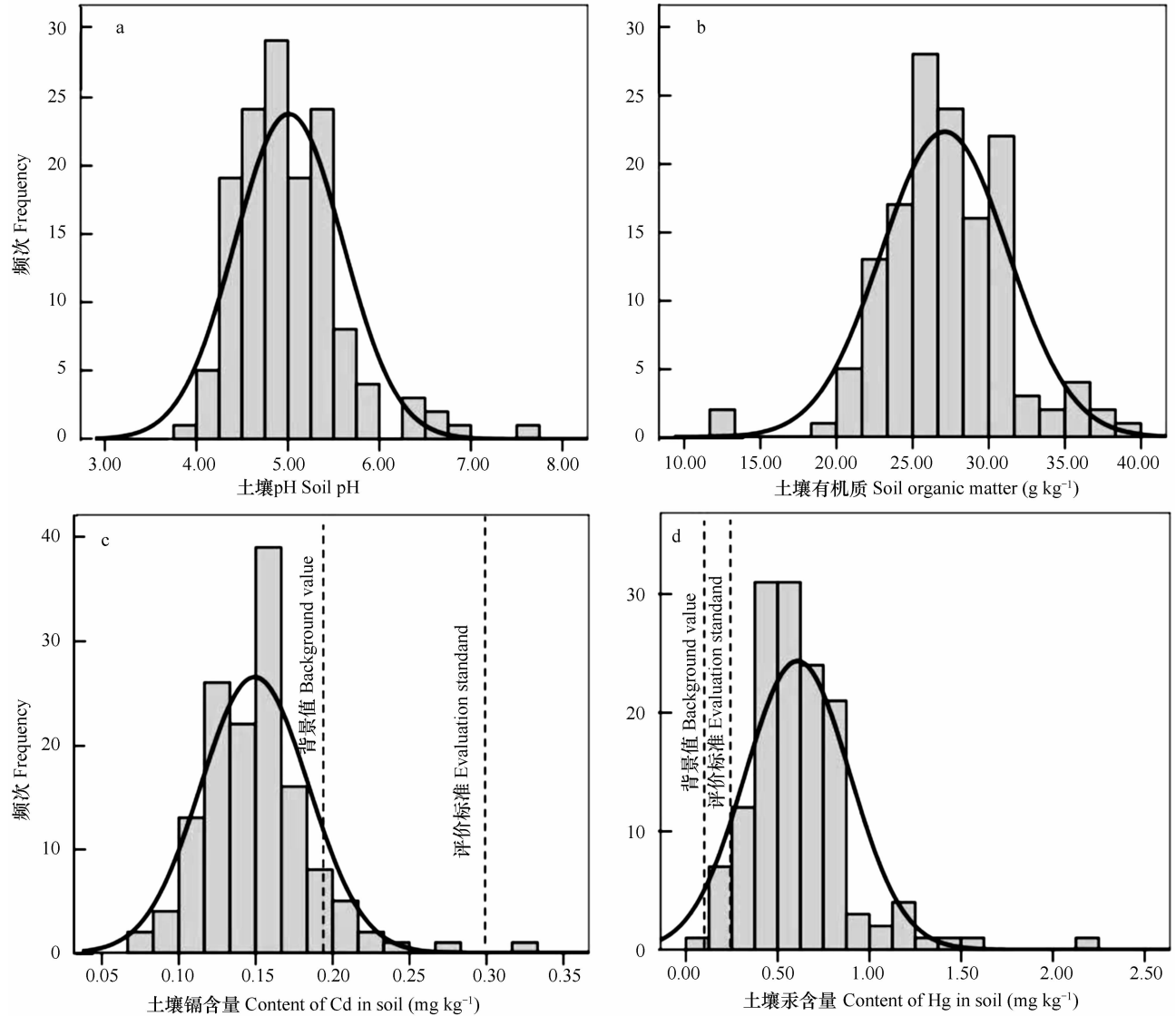
行 10 000 次。

2 结果与讨论

2.1 设施菜地土壤镉和汞的累积与分布特征

从研究区土壤基本性质可看出,土壤 pH 平均为 5.01,整体呈酸性,最低至 3.99。有机质相对较高,平均达 27.11 g kg^{-1} (图 2)。从土壤重金属含量的频数分布来看,土壤镉和汞分布均存在一定的近

正态分布。对比南京市土壤重金属背景值,研究区土壤镉和汞具有明显的累积^[17]。参照温室蔬菜产地环境质量评价标准^[18],研究区土壤汞平均值和 90% 的土壤样点中汞含量超过该标准,最高值超过标准 8.72 倍,1% 的土壤样点中镉含量超过评价标准。与北方日光温室和南方塑料大棚设施土壤相比^[19-21],该地区土壤镉的含量水平较低,土壤汞的含量水平较高。



注:背景值为南京市土壤背景值;评价标准为温室蔬菜产地环境质量评价标准 Note: Background is soil background values of Nanjing; Evaluation standard is environment quality evaluation standard for farmland of greenhouse vegetables production

图 2 土壤基本性质及镉和汞含量的频数分布

Fig. 2 Soil properties and frequency distribution of Cd and Hg contents in the soil

从研究区土壤镉和汞含量的剖面分布来看(图 3),土壤中镉和汞主要累积在表层土壤,随着剖面深度的增加而显著降低。设施菜地浅层土壤中的

镉和汞含量明显高于露天菜地,深层土壤中的镉和汞含量与露天菜地接近,表明设施蔬菜生产方式对浅层土壤中镉和汞的累积具有一定的影响^[22]。从

对研究区采集的肥料中镉和汞含量的分析来看,土壤中的镉主要来源于磷肥、化肥和商品有机肥的施用,土壤中的汞主要来源于商品有机肥的施用。因此,除自然母质来源以外,设施土壤镉和汞主要来

源于镉和汞含量较高的肥料的使用^[11,23],此外,含汞农药和农膜的使用可能也会对土壤汞的累积产生一定影响。

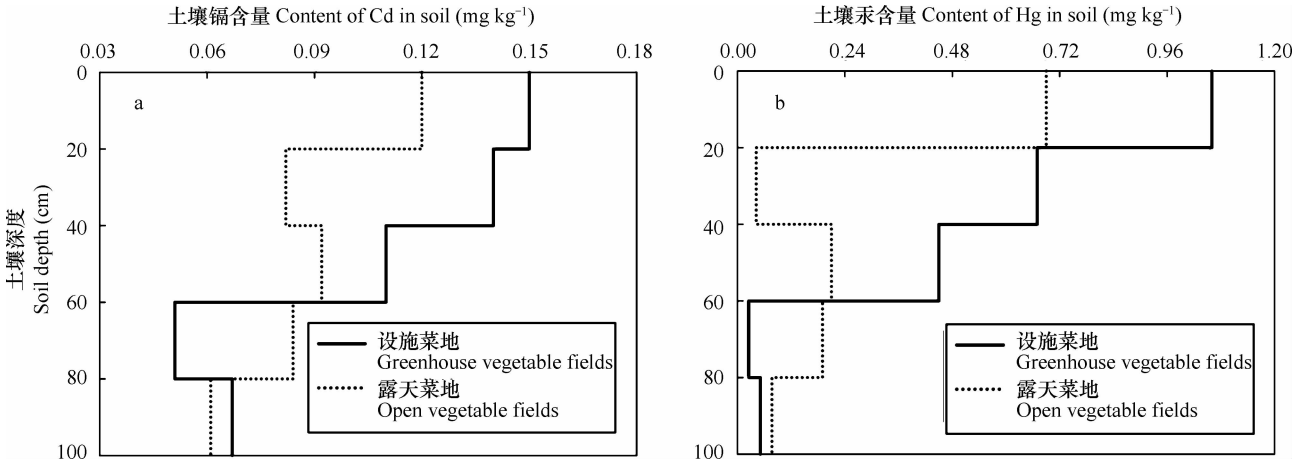


图3 土壤镉和汞含量的剖面分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of Cd and Hg in soil profile

2.2 不同设施蔬菜类型镉和汞的富集特征

土壤重金属超标是否导致作物吸收量的增加,是人们关注的热点,其中作物重金属吸收量与土壤重金属含量的相关关系研究是基于农产品安全的土壤环境基准建立的重要依据。从本文的结果看(表2),研究区不同类型蔬菜重金属含量及富集系数的平均值存在明显的差异,蔬菜镉和汞的平均含量及富集系数均表现为叶菜类 > 根茎类 > 茄果类,表明叶菜对镉和汞的富集能力最强^[24]。参照食品安全国家标准,食品中污染物限量标准^[25],各类蔬菜镉的平均含量虽未超标,但部分叶菜(苦苣和菊

花脑)和根茎(大蒜)中镉含量出现超标现象,最高超标分别达2.73倍和1.25倍。虽然研究区土壤中镉含量普遍较低,但由于其较低的pH,导致蔬菜对土壤镉具有较强的富集能力。对汞元素而言,其土壤中的含量虽然普遍偏高,但蔬菜对土壤汞的富集能力很低,仅有个别叶菜(苦苣和菊花脑)中汞的含量超过了食品中污染物限量标准。因此,建议在研究区土壤镉和汞其含量较高的区域尽量多种植富集能力较低的叶菜或者根茎和茄果类蔬菜,以降低土壤中镉和汞向蔬菜系统的迁移。

表2 不同类型蔬菜中镉和汞含量(mg kg⁻¹,鲜重)及其富集系数

Table 2 Contents (mg kg⁻¹ FW) and bioconcentration factors (BCF) of Cd and Hg in different types of vegetables

类型 Type	叶菜 (n = 40) Leafy vegetables		根茎 (n = 16) Root/tuber vegetables		茄果 (n = 6) Solanaceous vegetable	
	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range
蔬菜镉 Vegetable Cd	0.082 ± 0.117	0.008 ~ 0.546	0.030 ± 0.031	0.005 ~ 0.125	0.012 ± 0.005	0.009 ~ 0.021
镉富集系数 CdBCF ¹⁾	0.580 ± 0.796	0.050 ~ 3.415	0.211 ± 0.199	0.026 ~ 0.834	0.095 ± 0.052	0.039 ~ 0.165
限量标准 ²⁾ Limit standard	0.2		0.1		0.05	
蔬菜汞 Vegetable Hg	0.003 ± 0.002	0.000 ~ 0.013	0.0012 ± 0.0016	0.0003 ~ 0.0071	0.0005 ± 0.0002	0.0003 ~ 0.0008
汞富集系数 HgBCF ¹⁾	0.006 ± 0.005	0.000 ~ 0.023	0.002 ± 0.003	0.000 ~ 0.013	0.001 ± 0.001	0.000 ~ 0.002
限量标准 ²⁾ Limit standard	0.01		0.01		0.01	

1) BCF: Bioconcentration factor; 2) 食品安全国家标准,食品中污染物限量 National food safety standard, Maximum level of contaminants in food

2.3 设施蔬菜镉和汞累积的健康风险评估

应用基于蒙特卡罗模拟技术的 Crystal Ball 7.2 风险评估软件开展设施蔬菜镉和汞的膳食暴露评估。评估中使用的各种暴露参数对应的概率分布采用软件提供的标准分布函数来表示。图 4 为蔬菜中镉和汞目标危害商的概率分布情况。结果表明,

以目标危害商小于 1 为可接受风险水平,研究区有约 21.2% 的蔬菜具有镉的潜在人体摄入风险;虽然研究区土壤汞的含量较高,且大部分超过现有标准,但蔬菜中汞的健康风险较低,仅有约 1% 的蔬菜具有汞的潜在人体摄入风险。

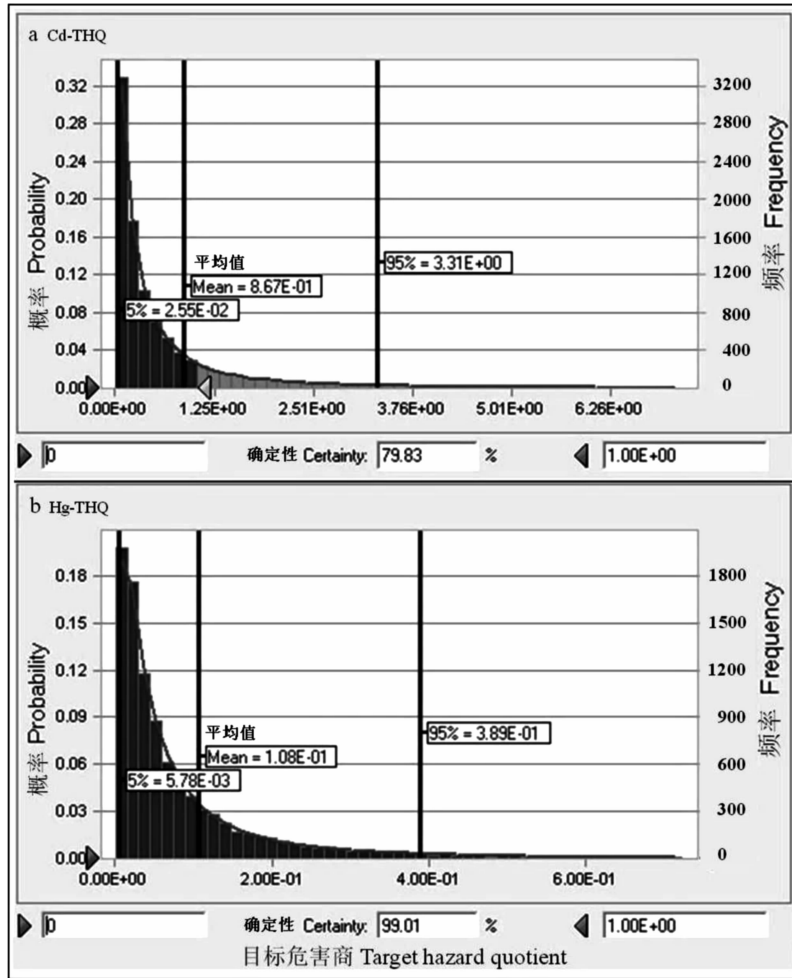


图 4 蔬菜中镉和汞目标危害商的概率分布

Fig. 4 Probability distribution of target hazard quotient for Cd and Hg in vegetables

从图 5 可以看出,不同蔬中镉和汞暴露风险排序为叶菜 > 根茎 > 茄果。叶菜类的苦苣和菊花脑 中镉摄入风险较高,最大目标危害商分别高达 3.08 和 1.28。该评价结果与这两种蔬菜对镉的累积和富集系数结果完全一致。根茎类的大蒜和茄果类的辣椒镉摄入风险较高,但均在安全阈值以内。叶菜类的苦苣、菊花脑和芹菜,根茎类的大蒜,茄果类的辣椒中汞具有较高的人群摄入风险,但均在安全范围以内。值得注意的是,菊花脑是南京地区的特产蔬菜,也是南京市民非常喜爱的蔬菜类型之一。因此,为了降低菊花脑等叶菜中重金属的摄入风

险,建议人们日常食用蔬菜过程中,尽量选择多种不同类型和重金属富集能力的蔬菜,以降低和分散重金属通过蔬菜进入人体的摄入风险。

运用蒙特卡罗敏感性评价方法对影响蔬菜中镉和汞健康风险评价结果的输入参数进行敏感性分析。从敏感性分析结果(图 6)来看,对蔬菜中镉和汞的风险贡献率较大的是蔬菜摄入量(IR_{veg}),贡献率分别为 55.1% 和 44.8%,其次是蔬菜中镉和汞的浓度(C_{veg}),贡献率分别为 22.9% 和 30.7%。平均暴露时间(AT)对蔬菜中镉和汞的风险贡献率分别为 -17.9% 和 -21.3%。说明蔬菜中镉和汞的含

量和每日蔬菜摄入量是影响居民蔬菜摄入风险的主要因素。因此,应加强蔬菜中重金属污染物检

测,同时限制镉和汞超标或含量高的蔬菜流入市场,以控制整体蔬菜重金属在安全范围内。

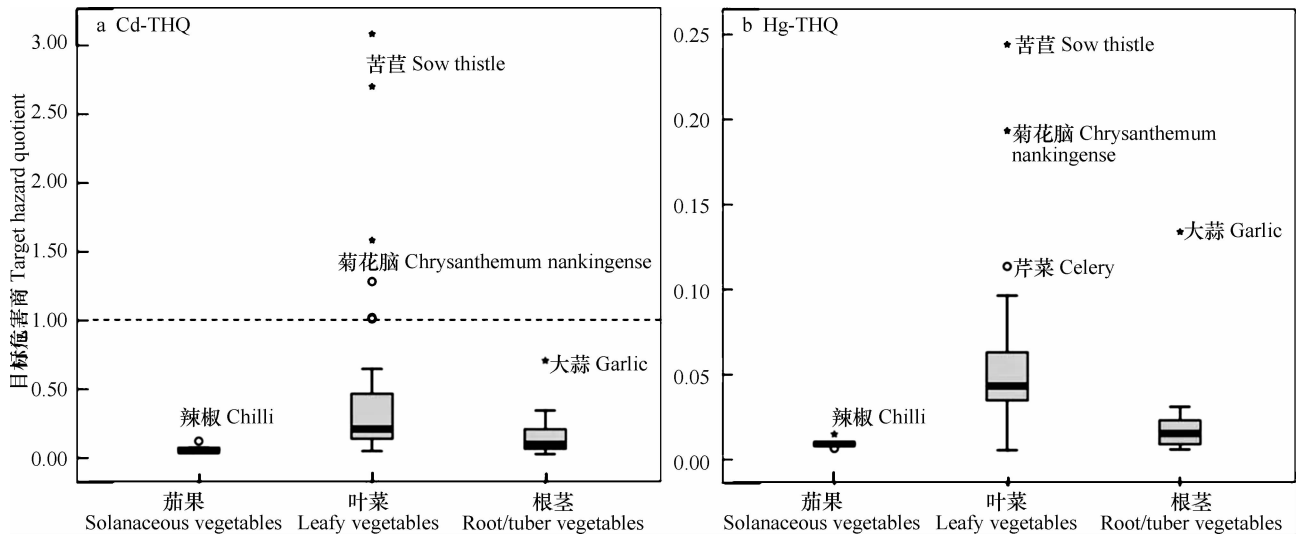
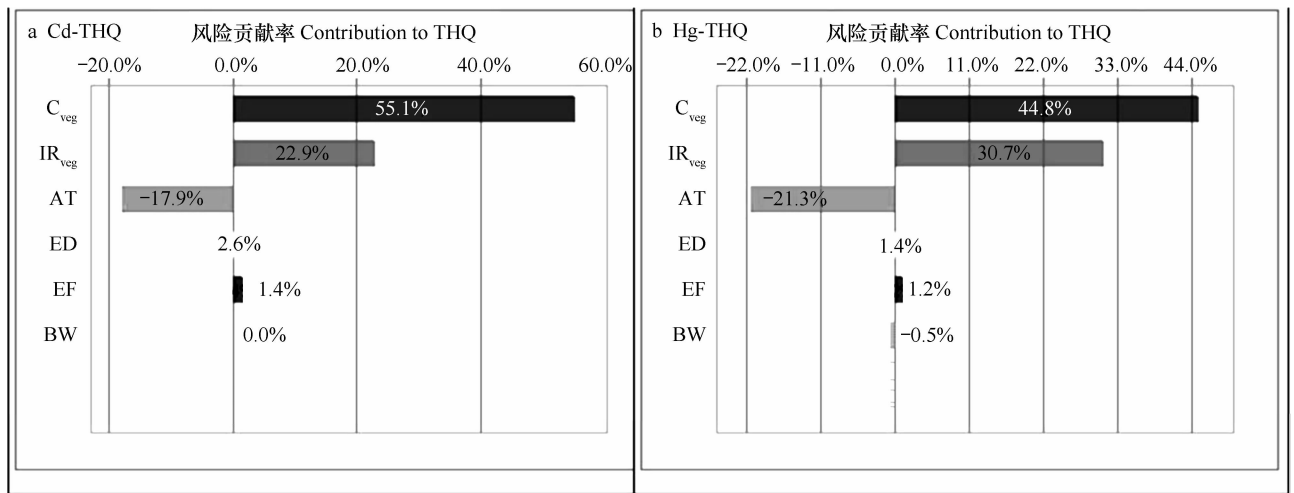


图 5 不同类型蔬菜镉和汞的目标危害商比较

Fig. 5 Comparison between types of vegetables in target hazard quotient of Cd and Hg



C_{veg} : 蔬菜中重金属含量 Content of heavy metals in vegetable; IR_{veg} : 每日蔬菜摄入量 Daily intake rate of vegetables;
 AT: 平均暴露时间 Averaging time; ED: 暴露持续时间 Exposure duration; EF: 暴露频率 Exposure frequency;
 BW: 平均体重 Average body weight.

图 6 不同暴露参数对蔬菜镉和汞摄入风险的贡献排序

Fig. 6 Contribution of different exposure parameters to target hazard quotient of Cd and Hg in vegetables

2.4 基于健康风险的设施菜地土壤镉和汞的环境质量基准

目前对土壤生态和健康风险基准的研究大多集中在通过室内模拟与预测分析,而室内模拟的结果并不能真实反映田间自然条件下土壤-蔬菜系统的生态效应和风险^[26]。因此,建立基于田间实际调查和监测结果的设施土壤环境质量基准具有更好的指导和现实意义。本文根据蔬菜镉和汞富

集系数的计算公式,利用我国食品中镉和汞的限量标准值与研究区蔬菜镉和汞富集系数平均值(表 2)的比值,推导出基于蔬菜食品标准的土壤镉和汞的环境质量基准(表 3);根据目标危害商的评价公式和不同类型蔬菜中重金属的平均含量(表 2),假定目标危害商为 1 和不同蔬菜的每日平均摄入量一致,推导出基于蔬菜摄入风险的土壤镉和汞的环境质量基准(表 3)。

从表 3 可以看出,除种植叶菜土壤中镉的环境质量基准以外,基于富集系数和蔬菜食品标准的推导结果明显低于基于蔬菜摄入风险的土壤镉和汞环境质量基准的推导结果,说明基于蔬菜食品标准推导的土壤镉和汞环境质量基准更为严格。造成这种结果的差异主要是由于两种推导方法的依据不同,前者是依据富集系数和中国食品中污染物限量标准,后者是依据镉和汞的人体摄入风险,且两种推导方法均具有一定的不确定性。此外,本文只考虑了蔬菜作为单一摄入途径的健康风险,没有考虑其他途径的暴露风险,也在一定程度上增加了基准推导的不确定性。对照温室蔬菜产地土壤环境质量标准^[18]中的一级标准,在 pH 小于 6.5 的情况下,生产叶菜类蔬菜地土壤中镉的健康风险阈值接近或略高于温室蔬菜产地土壤环境质量标准中的

一级标准,该结果与谢正苗等^[27]报道的中国蔬菜地土壤镉的健康风险基准基本一致。土壤中汞的健康风险阈值显著高于温室蔬菜产地土壤环境质量标准以及谢正苗等^[27]报道的中国蔬菜地土壤汞的健康风险基准。生产根茎和茄果类蔬菜地土壤中镉和汞的健康风险阈值明显高于生产叶菜类蔬菜地。可见,目前的温室蔬菜产地环境质量评价标准没有很好地考虑重金属在不同类型蔬菜中的生物有效性和人体健康风险。因此,我国设施土壤重金属标准在保障食品安全和人体健康的安全阈值框架下,需要进一步研究和制定针对不同蔬菜类型的土壤镉和汞的限量标准。此外,可针对不同区域土壤背景、土壤 pH 和不同蔬菜类型分别制定土壤重金属质量基准,用于指导不同区域的设施蔬菜生产和环境管理。

表 3 基于健康风险的设施蔬菜产地土壤镉和汞的环境质量基准

Table 3 Environmental quality criteria for Cd and Hg in greenhouse vegetable soils based on health risk (mg kg⁻¹)

基准类型 Type of criteria	元素 Element	叶菜 Leafy vegetable	根茎 Root/tuber vegetable	茄果 Solanaceous vegetable
基于蔬菜食品标准 Based on vegetable safety standard	Cd	0.34	0.47	0.53
	Hg	1.71	4.83	10.22
基于蔬菜摄入风险 Based on vegetable target hazard quotient	Cd	0.31	0.84	1.86
	Hg	8.86	26.57	53.14

3 结 论

研究区土壤-蔬菜系统中镉和汞的累积与富集特征表明,设施蔬菜生产已引起了土壤中镉和汞的明显累积,导致部分土壤和蔬菜样品中镉和汞含量超过了温室蔬菜产地环境质量和食品中污染物限量标准。虽然研究区土壤中镉含量普遍较低,但蔬菜对其依然具有较强的富集能力,导致蔬菜中镉的潜在暴露风险较高;土壤汞含量虽然普遍偏高,但蔬菜对其的富集能力较低,因此蔬菜中汞的健康风险较低。相比根茎和茄果类蔬菜,叶菜具有更高的镉和汞富集能力及其健康风险。蔬菜中镉和汞的含量和每日蔬菜摄入量是影响居民蔬菜镉和汞摄入风险的主要因素。因此,对于镉和汞等重金属含量较高的土壤,应选择合适的蔬菜种类进行种植,如选择对重金属吸收能力较低的根茎和茄果类蔬菜,以降低镉和汞等重金属进入食物链的风险。基于富集系数和蔬菜食品标准推导的土壤镉和汞环境质量基准更为严格,且更接近于现有温室

蔬菜产地环境质量评价标准。建议今后标准修订时可针对不同蔬菜类型分别制定土壤重金属环境质量基准,用于指导不同设施蔬菜的生产和环境管理。

参 考 文 献

- [1] Chang J, Wu X, Liu A Q, et al. Assessment of net ecosystem services of plastic greenhouse vegetable cultivation in China. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 740—748
- [2] 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. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(1): 73—84
- [3] Bai L Y, Zeng X B, Li L F, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and sources analysis. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(11): 1650—1658
- [4] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2507—2517. Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2507—2517
- [5] Zheng N, Wang Q, Zhang X, et al. Population health risk due to

- dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao City, China. *Science of the Total Environment*, 2007, 387(1): 96—104
- [6] Singh S, Zacharias M, Kalpana S, et al. Heavy metals accumulation and distribution pattern in different vegetable crops. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2012, 4(4): 75—81
- [7] Berti W R, Guiseppi-Elie A, Quinn E, et al. Evaluation of garden crop mercury uptake and potential exposure from consumption of garden crops grown on floodplain soils. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2013, 19(1): 215—231
- [8] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考. *土壤学报*, 2013, 50(1):186—194. Zeng X B, Xu J M, Huang Q Y, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmland of China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1):186—194.
- [9] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, et al. Heavy metal transfer from soil to vegetable in southern Jiangsu Province, China. *Pedosphere*, 2009, 19(3): 305—311
- [10] 陈永, 黄标, 胡文友, 等. 设施蔬菜生产系统重金属积累特征及生态效应. *土壤学报*, 2013, 50(4): 693—702. Chen Y, Huang B, Hu W Y, et al. Heavy metal accumulation in greenhouse vegetable production systems and its ecological effects (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 693—702
- [11] Hu W Y, Chen Y, Huang B, et al. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from a typical greenhouse vegetable production system in China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, 20(5): 1264—1280
- [12] 鲁如坤, 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 1999. Lu R K. Analytical methods for soil and agronomic chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [13] USEPA, United States, Environmental Protection Agency. Integrated risk information system (IRIS) from <http://www.epa.gov/ncea/iris/index.html>, 2007
- [14] Liu H, Probst A, Liao B. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Science of the Total Environment*, 2005, 339(1): 153—166
- [15] Zhuang P, McBride M B, Xia H, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1551—1561
- [16] 翟凤英. 中国居民膳食结构与营养状况变迁的追踪研究. 北京:科学出版社, 2008:131—375. Zhuo F Y. Longitudinal study of Chinese dietary structure and nutritional status changes (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008:131—375
- [17] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册. 北京:中国环境科学出版社, 1989. Li J, Zheng C J. The handbook of the environmental background values (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1989
- [18] 国家环境保护总局, 温室蔬菜产地环境质量评价标准 (HJ333—2006). 北京:中国环境科学出版社, 2007. Environmental quality evaluation standard for farmland of greenhouse vegetables production (HJ333—2006) (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 2007
- [19] 段永蕙, 史静, 张乃明, 等. 设施土壤重金属污染物累积的影响因素分析. *土壤*, 2008, 40(3): 469—473. Duan Y H, Shi J, Zhang N M, et al. Accumulation of heavy metals and its influential factors in greenhouse soils (In Chinese). *Soils*, 2008, 40(3): 469—473
- [20] 席晋峰, 俞杏珍, 周立祥, 等. 不同地区城郊用地土壤重金属含量特征的比较. *土壤*, 2011, 43(5): 769—775. Xi J F, Yu X Z, Zhou L X, et al. Comparison of soil heavy metal pollution in suburb fields of different regions (In Chinese). *Soils*, 2011, 43(5): 769—775
- [21] 毛明翠, 黄标, 李元, 等. 我国北方典型日光温室蔬菜生产系统土壤重金属积累趋势. *土壤学报*, 2013, 50(4): 835—841. Mao M C, Huang B, Li Y, et al. Trends of heavy metals accumulation in soils for vegetable farming in sunlight greenhouse in north China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 835—841
- [22] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析. *中国农业科学*, 2010, 43(1): 96—104. Bai L Y, Zeng X B, Li L F, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 96—104
- [23] 李树辉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 设施菜地重金属的剖面分布特征. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2397—2402. Li S H, Zeng X B, Li L F, et al. Distribution characteristics of heavy metals in soil profile of facility vegetable fields (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2397—2402
- [24] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1343—1353. Song B, Chen T B, Zheng Y M, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1343—1353
- [25] 食品安全国家标准, 食品中污染物限量 (GB2762—2012). 北京:中国标准出版社, 2012. National food safety standard, Maximum level of contaminants in food (GB2762—2012) (In Chinese). Beijing: China Standard Press, 2012
- [26] 许中坚, 邱喜阳, 冯涛, 等. 酸雨地区蔬菜对重金属的吸收及重金属健康风险基准的估算. *水土保持学报*, 2008, 22(4): 179—184. Xu Z J, Qiu X Y, Feng T, et al. Uptake of heavy metals by vegetables and estimation of guidelines for health risk to heavy metals in vegetable plantation soil in acid rain area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4): 179—184
- [27] 谢正苗, 李静, 陈建军, 等. 中国蔬菜地土壤重金属健康风险基准的研究. *生态毒理学报*, 2006, 1(2): 172—179. Xie Z M, Li J, Chen J J, et al. Study on guidelines for health risk to heavy metals in vegetable plantation (In Chinese). *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(2): 172—179

HEALTH RISK OF ACCUMULATION OF CADMIUM AND MERCURY IN GREENHOUSE VEGETABLE PRODUCTION SYSTEMS TYPICAL OF SOUTH CHINA

Hu Wenyu¹ Huang Biao^{1†} Ma Hongwei² Chen Yong³ Dong Lurui⁴

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Cultivated Land Quality Protection Station of Nanjing, Nanjing 210036, China)

(3 Texas A&M University, Department of Soil & Crop Sciences, College Station, TX 77843, USA)

(4 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract In recent years, greenhouse vegetable production has been growing rapidly, making up a sizeable proportion of the vegetable production in China. Excessive uptake of heavy metals by vegetables may pose potential risks to human health. Therefore, vegetable safety has aroused increasing concerns in the country. To ensure food safety, it is essential to know how heavy metals (Cd and Hg) accumulate in the greenhouse vegetable production system and pose health risks. The study on this subject may provide some scientific basis for heavy metals health risk assessment of Cd and Hg in the greenhouse vegetable system and decision-making in environmental management. Currently, the standard used for environment of environmental quality of greenhouse vegetable fields fails to take into account vegetable-type-specific bioavailability and human health risk of heavy metals. Hence, it is of critical importance to the management and production of safe greenhouse vegetables to have the standard for environmental quality evaluation of greenhouse vegetable fields established as soon as possible, based on crop-specific bioavailability and human health risks of heavy metals.

For that end, a greenhouse vegetable production system typical of the Nanjing area was selected as a case for study on characteristics of Cd and Hg accumulation in the greenhouse soil-vegetable system, and exposure risks of Cd and Hg in vegetables relative to type, and environmental quality criteria were proposed for Cd and Hg in greenhouse vegetable fields based on the standard for vegetable and food hygiene and health risks of vegetable ingestion. Results show: (1) Cd and Hg accumulation was apparent in the topsoil of the greenhouse vegetable field, with the average content of Hg exceeding the Environment Quality Evaluation Standard for greenhouse vegetables production fields; (2) leafy vegetables were the highest in Cd and Hg enrichment capacity, and followed by root/tuber vegetables and then solanaceous vegetables; and some leafy vegetables were found to contain Cd and Hg higher than the upper limit of the standard for food hygiene; According to sensitivity analysis, the main contribution of different exposure parameters to target hazard quotient for Cd and Hg was concentration of Cd and Hg in vegetables (C_{veg}) and daily intake of Cd and Hg through ingestion of greenhouse vegetables (IR_{veg}). (3) approximately 21.2% of the greenhouse vegetables produced in the studied region were likely to pose potential Cd exposure risk through vegetable ingestion and only 1% in the case of Hg, Cd and Hg exposure risks varied with the type of vegetable, displaying an order of leafy vegetables > root/tuber vegetables > solanaceous vegetables; and (4) As environmental quality criteria of soil Cd and Hg vary sharply with the type of vegetables, it is essential to formulate vegetable-type-specific criteria separately for environmental quality evaluation of heavy metals in greenhouse vegetable fields in amending the standard for environmental quality evaluation of agricultural fields in future.

The findings of this study suggest that as vegetables vary sharply in Cd and Hg enrichment capacity with the type, in soils relatively high in Cd and Hg, it is advisable to grow suitable vegetables, like root/tuber or solanaceous vegetables that are relatively lower in heavy metal absorption capacity, so as to lower the risk of Cd and Hg entering the food chain. The environmental quality criteria for Cd and Hg in greenhouse vegetable soils based on the Cd and Hg bioconcentration factors of vegetables and vegetable safety standard would be stricter than that based on vegetable target hazard quotient of Cd and Hg, and more approximate to the current environmental quality evaluation standard for farmland of greenhouse vegetables production in China. The findings of this study will facilitate better understanding of the accumulation characteristics and health risks of heavy metals in greenhouse vegetable production systems. Further study should focus on phyto-

availability of Cd and Hg to greenhouse vegetables, and establishment of environmental quality evaluation standard for greenhouse vegetable production fields relative to soil type and vegetable type for better management of the greenhouse vegetables production in different regions of China.

Key words Greenhouse vegetable fields; Cd; Hg; Bioconcentration factor; Health risk assessment; Environmental quality criteria

(责任编辑:汪叔生)