

典型菜地土壤汞在小白菜和胡萝卜可食部位的富集规律

孙芳芳^{1,2,3}, 文典^{1,2}, 王富华^{1,2*}, 刘香香^{1,2}, 王其枫^{1,2}, 王旭^{1,2}, 耿安静^{1,2}

1. 广东省农业科学院农产品质量安全与标准研究中心, 广东 广州 510640;

2. 农业部蔬菜水果质量监督检验测试中心(广州), 广东 广州 510640; 3. 深圳市环境科学研究院, 广东 深圳 518001

摘要: 对广东省蔬菜种植面积较大的 10 个城市典型菜地土壤和蔬菜(小白菜和胡萝卜)对应采样, 分析 217 个蔬菜可食部位中重金属汞(Hg)质量分数及对应土壤中 Hg 全量和有效态质量分数, 研究大田条件下小白菜和胡萝卜可食部位富集 Hg 的规律。结果表明, 广东省菜地土壤存在一定的 Hg 污染, 约 20% 的土壤超过国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)中二级标准值, 但小白菜和胡萝卜中 Hg 质量分数较低, 均值分别为 0.001 2 和 0.001 3 mg·kg⁻¹, 仅 2 个小白菜样品 Hg 质量分数超过国家食品卫生标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2005)中的限值 0.01 mg·kg⁻¹。TGA 提取的土壤有效态 Hg 质量分数与土壤 Hg 全量显著正相关, TGA 提取 Hg 量仅占土壤总 Hg 质量分数的 3%~4%。小白菜和胡萝卜对 Hg 的富集系数分别为 0.90% 和 0.94%, 表明土壤中绝大部分的 Hg 不易转化迁移、为蔬菜吸收。小白菜和胡萝卜可食部位 Hg 质量分数与土壤中 Hg 全量和有效态质量分数均存在显著的线性关系, 其中蔬菜与土壤 Hg 有效态质量分数的关系优于其与土壤 Hg 全量的关系。依据国家食品卫生标准, 通过拟合回归方程计算出的保障小白菜和胡萝卜质量安全的菜地土壤 Hg 有效态质量分数临界值分别为 0.038 和 0.063 mg·kg⁻¹。计算出的土壤 Hg 全量临界值远大于我国现行土壤环境质量的二级标准值, 表明该标准值对于保障广东省小白菜和胡萝卜质量安全来说可能过于严格。

关键词: 汞; 富集; 土壤临界值; 蔬菜; 广东

中图分类号: X825

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 09-1630-05

引用格式: 孙芳芳, 文典, 王富华, 刘香香, 王其枫, 王旭, 耿安静. 典型菜地土壤汞在小白菜和胡萝卜可食部位的富集规律[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1630-1634.

SUN Fangfang, WEN Dian, WANG Fuhua, LIU Xiangxiang, WANG Qifeng, WANG Xu, GENG Anjing. Accumulation of mercury in edible parts of pakchoi and carrot at typical vegetable plots [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1630-1634.

汞(Hg)是具有很强生物毒性的环境污染物, 在常温下为液态, 它的许多化合物具挥发性, 其特殊的物理、化学属性, 使其进入环境介质后, 不是固定在某一位置上, 而是在各环境介质间发生稀释扩散、迁移传输和转化^[1]。汞可在作物可食部分积累并进入食物链循环, 从而对人类健康造成潜在的或现实的威胁, 因而被联合国环境规划署(UNEP)列为全球性污染物, 对其污染危害的关注日益广泛。

植物可通过根部和叶片从环境中吸收汞^[2-3]。一般认为大气汞是植物汞的主要来源, 而土壤汞长期以来并未被认为是重要的环境汞源^[2-4]。然而, 越来越多的事实表明: 土壤汞无论其含量高低, 都能持续不断地向植物输送汞, 成为陆生食物链上的重要汞源^[5]。

热带土壤中 Hg 有 2 种可能来源, 一种是成土母质风化形成的来自岩石中的 Hg, 另一种是外源

Hg, 主要是自然界大气长期作用的输入以及过去和现在人类工业活动的输入^[6-7]。随着现代工农业的发展, 局部地区土壤汞质量分数大幅增加^[8]。我国目前汞污染耕地达到 3.2×10⁴ hm², 许多城郊的菜田土壤汞污染严重^[8-11]。我国土壤环境质量标准(GB15618—1995)中针对不同 pH 值的土壤设定了 Hg 的限制值^[12], 其中二级标准为保障农业生产、维护人体健康的土壤限制值, 但没有具体细化到不同的作物种类和土壤类型。而事实上, 不同作物对 Hg 的吸收积累规律不同^[5,10], 不考虑土壤重金属有效性和不同作物对土壤重金属吸收富集能力的差别, 用同一标准值评价不同性质的土壤和不同的作物种类, 存在一定的不合理性^[13]。

前人研究结果表明, 蔬菜中 Hg 质量分数与土壤中 Hg 质量分数关系密切^[14], 且蔬菜所吸收的 Hg 可有 60% 分布于可食部位^[4]。因此, 土壤 Hg 通过蔬菜向人体输送的危害不容忽视。广东省部分地区蔬

基金项目: 科技部“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BADB7B01); 广东省农业科学院院长基金(201120)

作者简介: 孙芳芳(1983年生), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事环境生态学与农产品质量安全研究。E-mail: sunffgz@163.com

*通信作者: 王富华(1962年生), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农产品质量安全研究。E-mail: wfhwqs@163.com

收稿日期: 2012-07-04

菜产地土壤^[8]和蔬菜可食部位 Hg 质量分数超标问题较为严重^[15]，因此有必要开展 Hg 在土壤—蔬菜系统的迁移规律研究。但之前一些类似研究多通过盆栽试验手段，不能反映田间真实条件^[16]。因此，本研究通过野外大田采样，以消费量较大的 2 种食用部位不同的蔬菜——小白菜和胡萝卜为对象，研究田间自然条件下 Hg 在土壤—蔬菜系统中的富集规律。在此基础上，依据《食品中污染物限量》(GB2762—2005)中规定的蔬菜中 Hg 限量值^[17]，计算本地区针对这 2 种蔬菜的土壤 Hg 限量值，为保障蔬菜质量安全，控制 Hg 经由食物链进入人体，以及制定基于农作物质量安全的土壤环境质量标准提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

广东省地处北纬 20°13'~25°31'，东经 109°41'~117°20'。全省陆地面积 17.81×10⁴ km²。大部分属亚热带季风气候，年平均气温为 18~23.2 °C，年降雨量一般为 1700 mm，沿海地区可达 1900~2000 mm。研究区土壤是在不同母岩基础上发育而成的，花岗岩为最主要的成土母岩，约占总面积的 40%，其次是石灰岩和砂岩^[18]。在湿热气候条件下，土壤的淋溶和淀积作用非常强烈，土壤可溶性盐、碱金属和碱土金属贫化，而明显富集铁铝氧化物和氢离子^[19]。最近 30 年来，广东省快速的城市化和工业化进程使得土壤中重金属质量分数较历史水平有明显的提高^[20]，土壤和农产品中重金属污染超标屡见报道^[21-22]。

1.2 样品采集

2010 年 8~12 月，在广东省蔬菜种植面积较大的 10 个城市：广州、东莞、深圳、珠海、惠州、中山、江门、韶关、湛江、潮州，选择典型菜地，进行蔬菜和土壤样品的一对一采集，共采集小白菜 *Brassica chinensis* L. 样品 171 个、胡萝卜 *Daucus carota* L. var. *sativa* DC. 46 个，对应的土壤样品 217 个。为避免偶然性，同一个样点采用多点混合采样法(5~10 个点)，土壤样品采集于耕作层(0~20 cm)，混合均匀后按四分法取 1 kg 左右装入聚乙烯封口袋。土壤样品于实验室内自然风干，剔除样品中的植物根系、有机残渣以及可见侵入体，经木棒碾碎，过 20 目筛，用以测定土壤 pH、有机质和有效态 Hg 质量分数；经四分法取部分土壤经研钵磨细至全部过 100 目筛，用以测定土壤 Hg 全量。在对应的土壤采样点采集收获期的蔬菜可食部分，蔬菜样品用去离子水洗净，晾干表面水分后，捣碎成浆于 -20°C 低温贮存待测。

1.3 样品分析测定

测定蔬菜样品的 Hg 质量分数、土壤样品的 pH、有机质和 Hg 质量分数(全量和有效态)。蔬菜样品 Hg 质量分数测定参照 GB/T 5009.17—2003《食品中总汞及有机汞的测定》^[23]。土壤样品 Hg 质量分数测定方法参照 GB/T 22105.1—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分：土壤中总汞的测定》^[24]。蔬菜和土壤 Hg 质量分数于原子荧光光谱仪(AFS-930, 北京吉天)上测定。测定过程中，抽取 20% 的样品进行平行双样测定。分别插入一定数目的国家标准物质进行质量监控(植物：GSB-5 和 GSB-6；土壤：GSS-3)。土壤有效态 Hg 质量分数用 TGA-Na₂HPO₄ 提取^[25]，具体方法为：(1)称取过 2 mm 筛土样 5.00 g，放入 100 mL 三角瓶中；(2)按 1:10 的土液比加入 50 mL 0.03% TGA-1/15 mol·L⁻¹ Na₂HPO₄ 浸提剂；(3)25 °C 振荡平衡 2 h (250 r·min⁻¹)；(4)4 °C 离心 (2000 r·min⁻¹) 5 min；(5)预先以滤纸过滤，再通过 0.45 μm 滤膜抽滤出溶液，于原子荧光光谱仪上机测定。土壤样品 pH 值以电位法测定(水土比为 2.5:1)，有机质测定采用重铬酸钾容量法。

1.4 统计分析

采用 SPSS15.0 对数据进行统计分析。运用 *t*-检验进行差异显著性检验，相关性分析选用 Pearson 方法，显著性水平设在 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤中 Hg 质量分数分布特征

土壤样品的 pH、有机质和 Hg 全量及有效态 Hg 质量分数结果见表 1。由表 1 可知，该地区菜地土壤普遍呈弱酸性，pH 值在 6 左右；有机质介于 0.34% 和 4.96% 之间，平均值在 2% 左右。小白菜和胡萝卜根部土壤 Hg 质量分数范围分别在 0.014~1.02 和 0.05~2.04 mg·kg⁻¹，平均值分别为 0.22 和 0.28 mg·kg⁻¹，远高于世界土壤 Hg 的平均值(0.03~0.1 mg·kg⁻¹)^[26]，是我国土壤 Hg 背景值(0.038 mg·kg⁻¹)的 5~7 倍^[27]，是华南红壤 Hg 平均值(0.069 mg·kg⁻¹)的 3~4 倍^[28]。与国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)中二级标准值(Hg: 0.30 mg·kg⁻¹, pH<6.5; 0.50 mg·kg⁻¹, 6.5<pH<7.5; 1.0 mg·kg⁻¹, pH>7.5)相比，小白菜根部土壤 Hg 超标 33 个(超标率为 19.3%)，胡萝卜根部土壤 Hg 超标 9 个(超标率为 19.6%)，表明该地区菜地土壤已经受到一定程度的 Hg 污染。土壤有效态 Hg 质量分数较低，小白菜和胡萝卜根部土壤有效态 Hg 质量分数范围分别为未检出~0.045 mg·kg⁻¹ 和 0.001~0.026 mg·kg⁻¹，平均值均为 0.006 mg·kg⁻¹。相关性分析结果表明，TGA 提取的土壤有效态 Hg 量与土壤 Hg 全量显著正相关：小白菜根部土壤有效态 Hg 量与

表1 广东省主要菜地土壤化学性质

Table 1 Chemical properties of soil in typical vegetable fields in Guangdong province

蔬菜地	pH	有机质/%	Hg 全量/(mg·kg ⁻¹)	有效态 Hg 质量分数/(mg·kg ⁻¹)	土壤 Hg 有效性系数
小白菜(n=171)	6.26±0.05 a	2.06±0.06 a	0.22±0.02	0.006±0.002	0.04±0.01
胡萝卜(n=46)	6.00±0.06 b	1.68±0.09 b	0.28±0.06	0.006±0.001	0.03±0.01

数据=均值±标准误差。同一列中不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)

Hg 全量的相关系数为 0.444 ($P<0.05$), 胡萝卜根部土壤有效态 Hg 量与 Hg 全量的相关系数为 0.572 ($P<0.01$), 表明土壤中有效态 Hg 质量分数可以在一定程度上指示土壤 Hg 水平。计算菜地土壤中 Hg 的有效性系数, 即有效态 Hg 占 Hg 全量的比例, 结果显示, 不论是小白菜还是胡萝卜菜地, 土壤中 TGA 提取的有效态 Hg 量较低, 仅占土壤总 Hg 的 3%~4%, 与陈玉娟等^[29]用 0.1 mol·L⁻¹ 稀盐酸和杨勇等^[16]用 0.005 mol·L⁻¹ DTPA 浸提的结果较为一致, 表明土壤中绝大部分的 Hg 不易转化迁移、被作物吸收。菜地土壤中 Hg 有效态质量分数与土壤理化性质 (pH 值、土壤有机质) 的相关性分析结果表明, 仅胡萝卜根部土壤中 Hg 有效态质量分数与土壤有机质呈显著正相关 (相关系数 $r=0.431$, $P<0.05$), 与其他因子无显著相关性。

2.2 蔬菜中Hg质量分数特征

由表 2 可知, 广东省主要蔬菜产地生产的小白菜和胡萝卜的 Hg 质量分数平均值差异不明显, 均约为 0.001 mg·kg⁻¹, 胡萝卜中 Hg 质量分数分布较之小白菜的更为均匀。依据国家食品卫生标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2005) 对蔬菜中 Hg 的限值: Hg 质量分数<0.01 mg·kg⁻¹, 本次抽取的 171 个小白菜中有 2 个样品的 Hg 质量分数超标, 超标率为 1.2%, 胡萝卜样品的 Hg 超标率为 0。相较于菜地土壤, 蔬菜中 Hg 污染程度较轻。

生物富集系数即蔬菜可食部位某污染物质量分数占土壤中该污染物质量分数的百分率, 能够较好地反映不同种类蔬菜对该污染物富集能力的强弱^[30]。小白菜和胡萝卜对 Hg 的富集系数分别为 0.90%和 0.94%, 二者无显著差异。根据汪雅各等^[31]评判蔬菜对重金属富集能力强弱的标准: 富集系数<1.5%的蔬菜为低富集, 1.5%<富集系数<4.5%为中

表2 蔬菜中Hg质量分数及富集系数

Table 2 Contents and accumulation coefficients of Hg in vegetables

样品	Hg 质量分数/(mg·kg ⁻¹)				超标样品数	富集系数/%	
	平均值	标准误差	最小值	最大值		平均值	标准误差
小白菜 (n=171)	0.001 2	0.001 7	ND	0.012 0	2	0.90	0.083
胡萝卜 (n=46)	0.001 3	0.001 1	ND	0.003 6	0	0.94	0.170

ND, 未检出

富集, 富集系数>4.5%为高富集, 本研究中小白菜和胡萝卜都属于对 Hg 低富集型蔬菜。²⁰³Hg 同位素试验也表明, 植物对 Hg 的吸收较少, 且 Hg 在植物体内的移动性相对较差^[32]。结合这 2 种蔬菜根部土壤中 Hg 质量分数的高超标率和蔬菜中 Hg 质量分数的极低超标率, 可能说明在低浓度汞污染土壤上种植这 2 种蔬菜的污染风险较小。

2.3 蔬菜中Hg质量分数与土壤Hg全量及有效态Hg质量分数的关系

小白菜和胡萝卜可食部位 Hg 质量分数与土壤 Hg 质量分数的线性回归结果见表 3。2 种蔬菜可食部位 Hg 质量分数都随土壤中 Hg 质量分数的增加而增加, 线性关系均达到显著水平。其他研究也分别在盆栽试验^[16]和农田^[33]中发现作物 Hg 与土壤 Hg 质量分数的显著相关关系, 表明土壤 Hg 污染经由蔬菜等农作物进入人体的潜在风险。但本研究中蔬菜 Hg 质量分数与土壤 Hg 全量的线性关系较弱, R^2 较低 (低于 0.15), 主要是由于土壤 Hg 全量中并非所有都可被蔬菜吸收利用, 大田条件下众多环境因子都会影响土壤中 Hg 的生物有效性和蔬菜对 Hg 的吸收^[34]。土壤 Hg 全量因而无法很好地提供蔬菜对 Hg 的吸收累积方面的信息, 而土壤有效态 Hg 质量分数更接近土壤中被作物吸收的部分, 理论上指示效果更好。回归分析结果显示, 蔬菜中 Hg 质量分数与土壤中 Hg 有效态质量分数的线性关系较好, 小白菜和胡萝卜的 R^2 分别达到 0.80 和 0.38, 明显优于蔬菜中 Hg 质量分数与土壤 Hg 全量的关系, 表明用土壤有效态 Hg 质量分数来表征土壤中 Hg 的生物有效性和生物毒性更加合理。

根据拟合的回归方程和蔬菜中 Hg 的安全限量标准 (0.01 mg·kg⁻¹), 分别计算适合小白菜和胡萝

表3 蔬菜可食部位Hg质量分数(y)与土壤Hg质量分数(x)的关系及土壤Hg临界值

Table 3 Relationship between Hg contents in edible parts of vegetables (y) and that in soils (x), and calculated threshold of Hg in soil

土壤 Hg	蔬菜	回归方程	R^2	土壤 Hg 临界值/(mg·kg ⁻¹)
Hg 全量	小白菜	$y=0.001 4x+0.000 9$	0.026 7*	6.50
	胡萝卜	$y=0.000 9x+0.001 1$	0.117 0*	9.89
有效态 Hg	小白菜	$y=0.258 5x+0.000 3$	0.800 9**	0.038
	胡萝卜	$y=0.152 0x+0.000 4$	0.377 9**	0.063

*显著相关($P<0.05$); **极显著相关($P<0.01$)

卜种植的土壤 Hg 质量分数临界值(表 3)。土壤 Hg 全量临界值为小白菜: $6.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 胡萝卜: $9.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 二者均远远大于我国土壤环境质量标准二级标准值。杨勇等^[16]根据盆栽试验也得出类似结果, 再结合野外调查中这 2 种蔬菜地土壤中 Hg 质量分数的高超标率和蔬菜中 Hg 的极低超标率, 表明我国现行土壤环境质量标准 Hg 限量值对于保障小白菜和胡萝卜安全生产来说可能过于严格。与杨勇等^[16]推算的种植胡萝卜的土壤 Hg 临界浓度 $3.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相比, 本研究推算的 Hg 全量阈值较高, 可能是由于大田条件下重金属的生物有效性低于盆栽试验中新加入的外源重金属的生物有效性^[35]。不同蔬菜对于土壤质量的要求存在差异, 因此可利用这些差异, 有区别、有选择地种植蔬菜, 利于降低土壤重金属对蔬菜的污染。但鉴于拟合的回归方程线性关系较弱, 本研究计算出的土壤 Hg 全量临界值尚需进一步验证才可用于指导实际生产。

关于土壤环境质量标准, 不少学者指出, 采用土壤有害元素全量阈值不够合理, 因为进入到土壤中的污染物有一部分被土壤组分牢固地吸附或进入土壤微孔隙而使其不能被生物体利用, 如果以污染物总量作为计算暴露剂量的基础数据而不考虑土壤的性质及其生物可利用性, 往往出现风险被高估的情况^[36]。因此, 理论上说, 以有效量作为土壤有害元素的阈值比全量合理^[37]。下面我们尝试以土壤重金属有效态质量分数作为土壤环境质量标准中的限量指标。根据拟合的回归方程和蔬菜中 Hg 的安全限量标准 ($0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 计算出的土壤 Hg 有效态质量分数临界值分别是: 小白菜为 $0.038 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 胡萝卜为 $0.063 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。文献中基于蔬菜质量安全的土壤 Hg 有效量临界值的报道很少, 无法进行比较。若以土壤中 Hg 的有效性系数(小白菜地土壤为 0.04, 胡萝卜菜地土壤为 0.03)简单推算回去, 则小白菜地土壤 Hg 全量临界值约为 $0.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 胡萝卜菜地土壤 Hg 全量临界值约为 $2.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。用该临界值对供试土壤进行检验, 发现在 171 个小白菜菜地土壤中, 有 2 个土壤的 Hg 质量分数超过推算的临界值 $0.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在 46 个胡萝卜菜地土壤中, 没有土壤 Hg 质量分数超过临界值, 这一结果与蔬菜样品 Hg 超标情况高度一致, 表明推算的 Hg 限量值存在较高的合理性和适用性。

综上, 土壤中重金属的植物有效性受土壤理化性质及作物种类等众多因素的影响, 而我国土壤环境质量标准(GB 15618—1995)仅限定了重金属的总量和 pH 值, 存在一定的不合理性, 需要制定基于农作物质量安全的土壤环境质量标准。土壤有效态含量指标可避免因土壤类型和理化性质的不同

而带来的生物有效性差异, 更接近土壤中可被作物吸收的部分, 从而使指标值的制定简单化^[37]。但土壤中 Hg 的提取测定尚无通用标准方法, 影响了土壤 Hg 有效态含量通用指标的制定。现阶段针对作物种类、基于土壤 Hg 有效态含量的区域性土壤质量标准更为现实。

3 结论

(1) 广东省主要菜地土壤受到 Hg 污染, 按照我国现行土壤环境质量标准(GB 15618—1995)二级标准, 超标率接近 20%, 但小白菜和胡萝卜可食部位 Hg 质量分数极少超标。

(2) TGA 提取的土壤有效态 Hg 质量分数与土壤 Hg 全量显著正相关, 表明 TGA 提取态 Hg 质量分数能很好地指示土壤 Hg 水平, 但 TGA 提取的有效态 Hg 仅占土壤总 Hg 的 3%~4%, 表明土壤中绝大部分的 Hg 不易转化迁移、被作物吸收。

(3) 小白菜和胡萝卜可食部位 Hg 质量分数与土壤中 Hg 全量和有效态 Hg 质量分数均存在显著的线性关系, 其中蔬菜与土壤有效态 Hg 质量分数的关系优于其与土壤 Hg 全量的关系。根据拟合的回归方程计算出的土壤 Hg 全量临界值超过我国现行土壤环境质量标准(GB 15618—1995)二级标准值, 表明该标准对于保障小白菜和胡萝卜安全生产来说过于严格。计算出的保障小白菜和胡萝卜质量安全的菜地土壤有效态 Hg 质量分数临界值分别为 0.038 和 $0.063 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] UNEP. Global mercury assessment[M]. Geneva: UNEP Chemicals, 2002: 3-20.
- [2] FLECK J A, GRIGAL D F, NATER E A. Mercury uptake by trees: an observational experiment[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 115(1):513-523.
- [3] SCHWESIG D, KREBS O. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem[J]. Plant and Soil, 2003, 253(2):445-455.
- [4] 刘德绍, 郭莉萍, 青长乐. 蔬菜对大气汞和土壤吸收的研究[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(6):23-25.
- [5] 洪春来, 贾彦博, 杨肖娥, 等. 农业土壤中汞的生物地球化学行为及其生态效应[J]. 土壤通报, 2007, 38(3):590-596.
- [6] GUEDRON S, GRIMALDI C, CHAUVEL C, et al. Weathering versus atmospheric contributions to mercury concentrations in French Guiana soils[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(11):2010-2022.
- [7] LIU Hongbin, GUO Pengtao, WU Wei, et al. Assessment of soil arsenic, chromium, mercury, and lead at an agricultural landscape scale[J]. Soil and Sediment Contamination, 2011, 20(8):995-1007.
- [8] 刘小瑜, 谢世友, 魏秀国, 等. 广州市主要蔬菜生产地汞含量调查及污染评价[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(15):3069-3071.
- [9] 侯明, 钱建平, 张力, 等. 桂林市菜地土壤—蔬菜汞污染研究和评价[J]. 生态环境, 2004, 13(4):575-577.
- [10] 钱建平, 张力, 陈华珍, 等. 桂林市菜地土壤—蔬菜系统汞污染研究[J]. 地球化学, 2009, 38(4):366-375.
- [11] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围农作物和蔬菜的汞污染及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):688-693.

- [12] 国家环境保护局. 中华人民共和国土壤环境质量标准(GB 15618—1995)[S]. 北京:中国标准出版社, 1995.
- [13] RECATALÁ L, SACRISTÁN D, ARBELO C, et al. Can a single and unique Cu soil quality standard be valid for different mediterranean agricultural soils under an accumulator crop? [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2012, 223(4):1503-1517.
- [14] 何江华, 魏秀国, 王少毅, 等. 广州市蔬菜地土壤—蔬菜中重金属Hg的含量及变化趋势[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(4):267-269.
- [15] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1):130-135.
- [16] 杨勇, 李花粉, 欧阳喜辉, 等. 汞在胡萝卜和白萝卜可食部位的富集规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1):156-159.
- [17] 中华人民共和国卫生部. 食品中污染物限量 (GB 2762—2005) [S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [18] 刘安世. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] LAN H X, HU R L, YUE Z Q, et al. Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21(4):353-364.
- [20] WONG S C, LI X D, ZHANG G, et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119(1):33-44.
- [21] 夏运生, 何江华, 万洪富. 广东省农产品污染状况分析[J]. *生态环境*, 2004, 13(1):109-111.
- [22] 袁晓博, 冯新斌, 仇广乐, 等. 中国大米汞含量研究[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3):318-323.
- [23] 中华人民共和国卫生部. 食品中总汞及有机汞的测定(GB/T 5009.17—2003) [S]. 北京:中国标准出版社, 2003.
- [24] 国家环境保护局. 中华人民共和国标准 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 (GB/T 22105.1—2008)[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [25] 黄玉芬. 土壤汞对作物的毒害及临界值研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011:33-36.
- [26] 王新, 周启星. 土壤 Hg 污染及修复技术研究[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(3):43-46.
- [27] 国家环境保护局. 环境背景值和环境容量研究[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [28] 迟清华. 汞在地壳、岩石和疏松沉积物中的分布[J]. *地球化学*, 2004, 33(6):641-648.
- [29] 陈玉娟, 温琰茂, 柴世伟. 珠江三角洲农业土壤重金属含量特征研究[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(3):75-78.
- [30] BAKER A J M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1/2/3/4):643-654.
- [31] 汪雅各, 张四荣. 无污染蔬菜生产的理论与实践[M]. 北京:中国农业出版社, 2001.
- [32] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1995.
- [33] 郭翠花, 张红, 杨国栋. 重工业城市农田生态系统中 Hg 污染及防治[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(4):245-247.
- [34] MCLAUGHLIN M, SMOLDERS E, DEGRYSE F, et al. Uptake of metals from soil into vegetables[C]//SWARTJES F. *Dealing with Contaminated Sites*. London: Springer, 2011:325-367.
- [35] YANG Y, ZHANG F S, LI H F, et al. Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2):1117-1122.
- [36] 章海波, 骆永明, 李志博, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究:III: 污染土壤的生态风险评估[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2):338-349.
- [37] 高树芳, 王果, 苏苗育, 等. 土壤环境质量基准中 Cd 限量指标的推算[J]. *福建农林大学学报:自然科学版*, 2006, 35(6):644-647.

Accumulation of mercury in edible parts of pakchoi and carrot at typical vegetable plots

SUN Fangfang^{1,2,3}, WEN Dian^{1,2}, WANG Fuhua^{1,2*}, LIU Xiangxiang^{1,2},
WANG Qifeng^{1,2}, WANG Xu^{1,2}, GENG Anjing^{1,2}

1. Research Center for Quality Safety and Standard of Agricultural Products, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Supervision and Testing Center for Vegetable and Fruit Quality, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China;

3. Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518001, China

Abstract: Two vegetable species, pakchoi (*Brassica chinensis* L.) and carrot (*Daucus carota* L. var. *sativa* DC.), and their rooting soils were sampled in vegetable plots in 10 cities of large vegetable producing area in Guangdong. The mercury (Hg) contents in vegetables and total and available Hg contents in soils were determined to study Hg accumulation in edible parts of vegetables under field conditions. The results showed that about 20% of the sampled soils had higher Hg contents than the class II threshold of Environmental quality standard for soils (GB 15618—1995), indicating soil Hg contamination. The pakchoi and carrot showed low Hg contents of 0.001 2 and 0.001 3 mg·kg⁻¹ respectively, with only 2 pakchoi samples exceeding the maximum level of Hg in vegetables (0.01 mg·kg⁻¹) set by national food hygiene standard (GB 2761—2005). Available Hg content extracted with TGA-Na₂HPO₄ in soil, positively correlated with total Hg, was about 3%~4% of total Hg content. The accumulation coefficients for Hg of pakchoi and carrot were 0.90% and 0.94% respectively, suggesting their low accumulating ability for Hg. Mercury contents accumulated in edible parts of pakchoi and carrot presented linear correlations with both total and TGA-extractable Hg contents in soil, with better fit when using TGA-extractable Hg than total Hg in soil. Based on the regression equations and the statutory limit of Hg in vegetables, the soil thresholds of TGA-extractable Hg were calculated to be 0.038 and 0.063 mg·kg⁻¹ for pakchoi and carrot, respectively. Calculated soil thresholds of total Hg were much higher than the class II limits of Environmental quality standard for soils, suggesting current soil quality standard might overestimate the risk of pakchoi and carrot being contaminated by Hg in Guangdong.

Key words: mercury (Hg); accumulation; soil threshold; vegetable; Guangdong