

福建省蔬菜产地土壤汞污染状况及其影响因素

洪曾纯^{1,2}, 郭永玲², 王 果^{2*}

(1.三明市农产品质量安全检验检测中心, 福建 三明 365000; 2.福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘要:研究了福建省 12 个县(市、区)郊区部分菜地土壤的汞污染状况,讨论了影响土壤汞累积及汞有效性的主要土壤学性质。结果表明:调查的菜地土壤全汞含量范围为 0.038~1.81 mg·kg⁻¹,其中有 33.04%的土壤全汞含量超出国家土壤环境质量二级标准。土壤全汞含量与土壤粘粒、粉粒、有机质含量及 CEC 之间均呈极显著的正相关,说明这些土壤性质有利于汞在土壤中的累积。土壤有效汞含量范围为 0.003~0.095 mg·kg⁻¹,与土壤全汞含量之间呈极显著的线性正相关。土壤汞有效度随土壤有机质的增加而降低,表明有机质是影响土壤汞有效性的主要土壤学性质。

关键词:菜地土壤;汞;污染;福建省

中图分类号:X833

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)02-0198-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0264

Mercury Pollution and its Influencing Factors of Vegetable Soils in Fujian Province, China

HONG Zeng-chun^{1,2}, GUO Yong-ling², WANG Guo^{2*}

(1.Sanming Inspection and Testing Centre for Agricultural Product Quality and Safety, Sanming 365000, China; 2.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: An investigation on mercury pollution of the soils was carried out over the vegetable fields at the suburbs of 12 countries of Fujian Province. The main soil properties which influenced the accumulation and the availability of soil mercury were discussed. Results showed that soil total mercury of the vegetable fields was 0.038~1.81 mg·kg⁻¹, and 33.04% of the total soil mercury of the soil samples exceeded the National Secondary Standard for acidic agricultural soils. Total soil mercury had significant and positive correlations with the contents of clay, silt, organic matter, as well as CEC of the soils, indicating that these soil properties were in favour of the accumulation of mercury in the soils. The available soil mercury was between 0.003 mg·kg⁻¹ and 0.095 mg·kg⁻¹, showing a significant and positive correlation with total soil mercury. The availability fractions of soil mercury decreased with increasing soil organic matter, suggesting that organic matter was the major soil property which influenced the availability of mercury in the soils.

Keywords: vegetable soil; mercury; pollution; Fujian Province

汞是一种毒性很强、人体非必需的元素,广泛分布于自然界中,在采矿、化工、制造和造纸等行业中广泛应用。由于工业废水、废气、废渣的排放和污灌等,汞以不同途径进入并累积于土壤,造成不同程度的土壤汞污染,尤其是菜地土壤^[1-3]。蔬菜质量安全与土壤环境有着密切的关系,土壤重金属污染不仅影响蔬菜的生长和品质,还会通过食物链危及人类的生命和健康^[4-6]。近几年已有不少关于福建省菜园土壤重金属污染的研究^[7-9],但对于全省性的菜园土壤汞元素系统的

研究尚少见。本研究通过采集福建省不同区域 12 个县(市、区)的郊区部分蔬菜产地土壤,测定土壤汞全量和有效量,同时测定土壤 pH 值、有机质、粘粒含量和 CEC 等常规理化指标,分析采样区蔬菜产地土壤汞的污染现状,并对土壤汞含量及其有效性的影响因素进行分析,旨在为福建省菜园土壤的可持续利用以及土壤重金属汞污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

土壤样品采自福建省古田县、蕉城区、新罗区、连城县、延平区、尤溪县、龙海市、安溪县、福州市郊区、长乐市、闽侯县和福清市等 12 个县(市、区)的郊区蔬

收稿日期:2014-10-08

作者简介:洪曾纯(1983—),男,福建南安人,农推硕士,农艺师,主要从事农业产地环境监测、农产品质量安全检测工作。

E-mail: 21447341@qq.com

* 通信作者:王 果 E-mail: 1400619353@qq.com

菜产地,共采集 227 个样品。采样时间从 2010 年 1 月至 2010 年 9 月,采样时采用多点取样法采集混合表层土样(0~20 cm),应避开公路、房屋、工厂、废物堆等明显的污染源。采集的土样带回实验室,经自然风干后,拣出可见的植物根系和残体杂物,用木棍研碎混匀后过 2 mm 尼龙筛。再用四分法从<2 mm 的土样中缩分出大约 30 g 土样,用玛瑙研钵研磨至全部通过 0.149 mm 的尼龙筛,土样装袋备用。

1.2 分析测定方法

1.2.1 土壤有效 Hg 含量的测定

称取土样 5 g 左右(精确至 0.01 g)于 200 mL 塑料瓶中,加入(25±2)℃的 50 mL 0.03%TGA-1/15 mol·L⁻¹ Na₂HPO₄ 浸提剂(9.40 g 磷酸氢二钠溶解于水中,吸取 0.3 mL 硫代乙醇酸于已溶的磷酸氢二钠溶液中,转移、定容至 1 L 容量瓶),在(25±2)℃条件下,以(250±10) r·min⁻¹ 振荡 2 h,立即过滤或者离心,即为待测液。用原子荧光分光光度计(AFS-230E,北京科创海光仪器有限公司)测定有效 Hg 含量^[10]。

1.2.2 土壤总 Hg 含量的测定

称取土样 0.2 g 左右(精确至 0.000 1 g)于 50 mL 具塞比色管中,加入 10 mL 王水,加塞摇匀,于沸水浴中加热消解 2 h,取出冷却,加入 10 mL 保存液(0.05%重铬酸钾、5%硝酸),定容,放置澄清。同时做空白试验。用原子荧光分光光度计测定总 Hg 含量。

1.2.3 土壤常规理化性质测定

土壤有机质测定采用油浴加热重铬酸钾氧化-容量法,土壤 pH 值测定采用电位法,土壤粒级含量测定采用比重计法,阳离子交换量(CEC)测定采用中性醋酸盐法。

1.3 质量控制

为了保证检测数据的准确可靠,在对土壤样品分析过程中,采取带入土壤国家标准物质(GBW07401)和 20%平行样进行质量控制。

1.4 评价方法

采用单项污染指数(P_i)法评价,计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: P_i 为某重金属的污染指数; C_i 为土壤中该重金属的全量(mg·kg⁻¹); S_i 为该重金属的评价标准。

本文采用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中酸性土壤的二级限量指标(≤0.3 mg·kg⁻¹)作为评价标准。

1.5 数据处理方法

试验数据采用 DPS 软件和 Excel 软件进行处理。

2 结果与讨论

2.1 土壤汞的含量及其影响因素

2.1.1 土壤汞含量及土壤理化性质

供试土壤的基本性质见表 1。从表 1 可见,供试土壤平均 pH 值为 5.68,总体偏酸,但最高的土壤 pH 值达到 7.54,呈微碱性。有机质含量平均为 30.86 g·kg⁻¹,总体比较丰富。土壤的保肥能力较低,CEC 平均值仅为 9.67 cmol·kg⁻¹。从表 2 可知,土壤总汞含量范围为 0.038~1.81 mg·kg⁻¹,平均值为 0.283 mg·kg⁻¹,为我国土壤汞背景值(0.04 mg·kg⁻¹)^[11]的 7.08 倍,为我国华南红壤总汞平均含量(0.069 mg·kg⁻¹)^[12]的 4.10 倍,亦高于福建省土壤汞背景值(0.081 mg·kg⁻¹)^[13]。不同县(市、区)区土壤全汞含量差别很大,最大值与最小值最多相差 11.8 倍,且土壤总汞含量变异明显,表明各地菜园土壤已受到不同程度的汞污染。根据国家土壤环境质量标准 GB 15618—1995 中酸性土壤全汞的二级标准(≤0.3 mg·kg⁻¹)进行的单因子污染指数评

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soils

项目	含量范围	平均值 ± 标准差
pH 值	3.30~7.54	5.68 ± 0.79
有机质含量/g·kg ⁻¹	2.08~79.41	30.86 ± 12.41
CEC/cmole·kg ⁻¹	3.42~17.50	9.67 ± 3.18
<0.002 mm 粒级含量/%	5.62~41.97	19.16 ± 7.25
0.002~0.02 mm 粒级含量/%	3.91~52.54	23.06 ± 9.01
0.02~2.0 mm 粒级含量/%	11.28~89.57	57.78 ± 14.38

表 2 土壤全汞含量的统计特征值

Table 2 Statistical characteristics of total mercury contents in the soil

采样地	样品数	含量范围 / mg·kg ⁻¹	平均值 ± 标准差 / mg·kg ⁻¹	变异系数 / %
福清市	4	0.049~0.27	0.14 ± 0.10	0.67
闽侯县	30	0.038~0.45	0.16 ± 0.11	0.66
安溪县	23	0.040~0.40	0.17 ± 0.09	0.56
尤溪县	23	0.13~0.36	0.21 ± 0.07	0.31
长乐市	11	0.057~0.52	0.27 ± 0.15	0.57
新罗区	52	0.068~0.79	0.27 ± 0.17	0.63
福州市郊区	34	0.079~0.81	0.29 ± 0.18	0.62
古田县	4	0.086~0.91	0.31 ± 0.4	1.29
蕉城区	3	0.28~0.40	0.34 ± 0.06	0.19
连城县	18	0.11~0.86	0.34 ± 0.18	0.54
延平区	14	0.14~0.70	0.35 ± 0.17	0.48
龙海市	11	0.23~1.81	0.91 ± 0.43	0.47

价结果表明(表 3),土壤平均污染指数在 0.48~3.02 范围内,除福清市外,其余各调查区均存在土壤汞污染,其中新罗区、福州市郊区、连城县、延平区、龙海市存在中度土壤汞污染,龙海市有 45.45% 的样品存在重度土壤汞污染。总的来看,全省各土壤采样点 66.96% 是安全的,25.11% 属于轻污染,4.85% 属于中污染,3.08% 属于重污染。33.04% 的供试土壤遭受了不同程度的汞污染,这可能与郊区菜地靠近城区,长期受城市污水、垃圾的影响,并曾经施用含汞肥料和含汞农药有关。不同县(市、区)的蔬菜产地土壤全汞含量从高到低依次为:龙海市>延平区>蕉城区、连城县>古田县>福州市郊区>长乐市、新罗区>尤溪县>安溪县>闽侯县>福清市(表 2),其中龙海市、延平区、蕉城区、连城县和古田县调查区表层土壤全汞平均含量已经超出国家土壤环境质量的二级限量指标($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.1.2 影响土壤全汞含量的主要土壤性质

土壤中汞的含量主要取决于污染源汞的输入,但汞在土壤中的保持和转化则与土壤性质密切相关。从表 4 可见,供试土壤全汞含量与粘粒($<0.002 \text{ mm}$)、粉粒($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)含量之间均呈极显著线性正相关,而与砂粒($0.02 \sim 2.0 \text{ mm}$)含量之间呈极显著线性负相关。细土颗粒对汞的吸附固定能力较强,砂粒对汞的吸附固定能力很弱^[12],粘粒和粉粒含量高的土壤中汞较易被保持,所以土壤汞含量较高;而砂粒含量高意味着粘粒和粉粒含量低,对汞的保持能力较低,所以土壤汞含量低。依据国际制将供试土壤分为砂土、壤

土、黏壤土和黏土 4 种质地类型,黏质土全汞平均含量最高($0.481 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),与黏壤土、壤土和砂土全汞含量之间存在极显著差异(表 5),表明黏土具有较强的吸附固定 Hg 的能力。砂土全汞平均含量最低($0.058 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这与徐小逊等^[14]的研究一致。砂土全汞含量与黏壤土、壤土相比,并不存在显著差异,这可能与砂土的样本数偏少有关($n=4$)。

土壤阳离子交换量是决定土壤对阳离子的吸附固定能力的重要土壤性质,因此在建立重金属在土壤

表 4 土壤全汞含量与土壤理化参数之间的相关系数($n=208$)

Table 4 Correlation coefficients between soil properties and total soil Hg ($n=208$)

项目	相关系数(r)
有机质 $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.257**
$<0.002 \text{ mm}$ 粒级含量 $/\%$	0.501**
$0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$ 粒级含量 $/\%$	0.321**
$0.02 \sim 2.0 \text{ mm}$ 粒级含量 $/\%$	-0.454**
CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.431**

表 5 不同质地土壤中汞含量状况

Table 5 Total Hg contents in the soils with different soil textures

质地类型	样品数	含量范围 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 $\pm$ 标准差 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
黏土类	39	0.081~1.807	$0.481 \pm 0.411 \text{ Aa}$
黏壤土类	111	0.040~0.912	$0.265 \pm 0.166 \text{ Bb}$
壤土类	54	0.041~0.787	$0.207 \pm 0.136 \text{ Bb}$
砂土类	4	0.038~0.079	$0.058 \pm 0.021 \text{ Bb}$

注:统计分析采用多重比较方法;不同大写字母表示差异达 1% 显著水平;不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。

表 3 土壤全汞的单因子污染指数(P_i)

Table 3 Single pollution indices of total soil Hg (P_i)

采样地	范围	平均值	各污染等级比例 $/\%$			
			安全($P_i \leq 1$)	轻污染($1 < P_i \leq 2$)	中污染($2 < P_i \leq 3$)	重污染($P_i > 3$)
福清市	0.16~0.88	0.48	100	0	0	0
闽侯县	0.13~1.51	0.53	90	10	0	0
安溪县	0.13~1.34	0.55	91.3	8.7	0	0
尤溪县	0.44~1.21	0.69	86.96	13.04	0	0
长乐市	0.19~1.73	0.9	63.64	36.36	0	0
新罗区	0.23~2.62	0.91	61.54	34.62	3.85	0
福州市郊区	0.26~2.71	0.97	61.76	32.35	5.88	0
古田县	0.29~3.04	1.04	75	15	0	0
蕉城区	0.92~1.34	1.14	33.33	66.67	0	0
连城县	0.38~2.87	1.14	50	38.89	11.11	0
延平区	0.46~2.33	1.15	50	42.86	7.14	0
龙海市	0.77~6.02	3.02	9.09	9.09	36.36	45.45
全省	0.13~6.02	0.92	66.96	25.11	4.85	3.08

中的最高容许量时必须考虑土壤 CEC^[15]。在我国土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中,就对不同 CEC 的土壤规定了不同限量指标。供试土壤全汞含量与土壤 CEC 值之间存在着极显著的线性正相关关系(表 4),说明 CEC 含量高的土壤有利于汞在土壤中的累积,与陈文娟等^[16]的研究结果一致。

土壤有机质是土壤吸附固定汞的重要基质^[17]。有报道称土壤有机质增加 1%, 汞的固定率可提高 30%^[18]。统计表明,供试土壤全汞含量与土壤有机质含量间呈极显著线性正相关(表 4),说明有机质含量高的土壤有利于汞的富集。一般认为土壤 pH 值是影响土壤对汞的吸附的重要因素,pH 值升高会促进土壤对汞的吸附^[19]。但在本研究中,供试土壤的 pH 值与土壤全汞含量之间并无显著相关,这可能与供试土壤的 pH 值差异不大有关(大部分土壤的 pH 值介于 4.5~7.0 之间)。

2.2 土壤汞的有效性及其影响因素

土壤重金属的有效态是指易被植物吸收利用的形态。重金属有效态在土壤中容易转化和迁移,易被植物吸收而进入食物链,对人类和环境造成危害。研究表明,土壤重金属的危害主要来自重金属的有效态^[20-21]。从表 6 可知,供试蔬菜产地土壤有效汞含量范围为 0.003~0.095 mg·kg⁻¹,平均值为 0.021 mg·kg⁻¹。土壤汞的有效度是指土壤有效汞含量与土壤全汞含量的比值,供试土壤汞有效度介于 1.33%~28.06%之间,平均值为 9.07%。对土壤汞的吸附和解吸产生影响的因素都不同程度地影响土壤汞的有效度^[15,22]。

表 6 土壤有效汞含量的统计特征值
Table 6 Statistical characteristics of the available mercury contents in the soil

样品数	含量范围 /mg·kg ⁻¹	平均值 ± 标准差 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%
227	0.003~0.095	0.021 ± 0.014	0.69

土壤有机质含量的高低不仅决定土壤的营养状况,而且影响土壤中重金属的移动性及生物有效性。有研究表明,低分子的有机质能提高土壤汞的有效性^[23-24],而大分子的有机质则降低土壤汞的有效性^[25-26]。对供试土壤有机质与土壤汞有效度进行的相关性分析结果表明二者之间存在极显著的线性负相关(图 1)。从前文可知,有机质含量高的土壤由于对汞有较强的吸附固定能力,可以提高土壤汞的含量。图 1 结果显示,较高的有机质含量不仅提高土壤汞富集,还由于对汞其较强的吸附固定能力降低了土壤汞的有

效度。土壤全汞含量与土壤有效汞含量之间存在极显著的线性正相关关系,相关系数 $r=0.922^{**}$ ($n=227$),表明随着土壤全汞含量的增高,土壤有效汞的含量也增高。土壤汞有效度和土壤全汞含量之间呈极显著的负相关关系(图 2),表明土壤汞有效度随着土壤全汞含量的增加而降低,土壤汞有效度不但会随土壤全汞含量的增加而降低,而且其降低速率随土壤全汞含量的增加而趋缓。虽然土壤有机质含量、粘粒和粉粒含量以及 CEC 的提高均能促进土壤汞的富集,但统计分析结果则表明 CEC、粘粒和粉粒含量与土壤汞有效度之间的相关性不强,未显示出显著的相关。

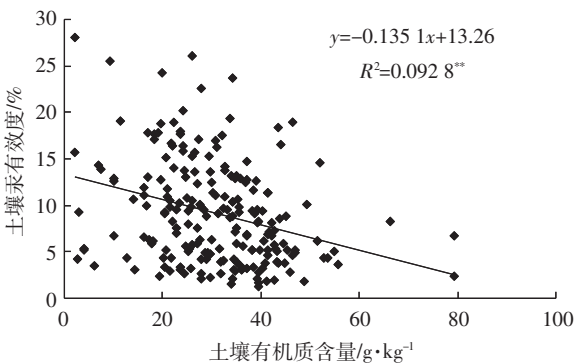


图 1 土壤汞有效度与土壤有机质含量关系
Figure 1 Relationship between the available Hg and soil organic matter

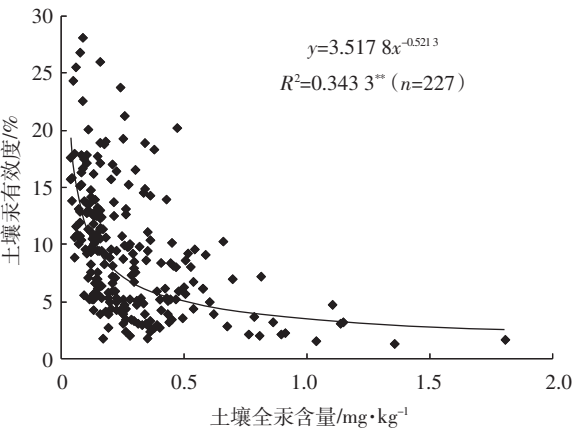


图 2 土壤汞有效度与土壤全汞含量关系
Figure 2 Relationship between the available Hg and total soil Hg

3 结论

(1) 采样区菜园土壤全汞含量范围为 0.038~1.81 mg·kg⁻¹,平均值为 0.283 mg·kg⁻¹。按照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中酸性土壤汞的二级限量指标,有 33.04%的供试土壤的全汞含量超过二级标准,

说明各地菜园土壤已受到不同程度的汞污染。

(2) 采样区菜园土壤有效汞含量范围为 $0.003 \sim 0.095 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤全汞含量与土壤有效汞含量之间具有极显著的线性正相关关系, 表明随着土壤全汞含量的增加, 土壤有效汞的含量也增加。

(3) 采样区土壤汞全量与土壤有机质、CEC、粘粒 ($<0.002 \text{ mm}$)、粉粒 ($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$) 含量呈极显著的正相关, 与土壤砂粒 ($0.02 \sim 2.0 \text{ mm}$) 含量间呈极显著的负相关, 说明汞在土壤中的累积与有机质含量、CEC、质地等密切相关。

(4) 采样区土壤汞有效度随土壤有机质的增加而降低, 而与 CEC、粘粒和粉粒含量之间不呈显著相关, 表明土壤有机质是影响土壤汞的有效性的主要土壤学性质。

参考文献:

- [1] 禹红红, 胡学玉. 武汉市郊区设施蔬菜地土壤重金属含量及其生态风险[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 582-585.
YU Hong-hong, HU Xue-yu. Contents of heavy metals in greenhouse soil around Wuhan suburb and their potential ecological risk[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2012, 18(4): 582-585. (in Chinese)
- [2] 李爱权, 薛琦, 田静思, 等. 城市近郊蔬菜基地土壤中重金属含量的调查研究[J]. 山西农业科学, 2013, 41(5): 470-472, 487.
LI Ai-quan, XUE Qi, TIAN Jing-si, et al. Investigation on the heavy metal content in the soil in a vegetables base in suburb[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, 41(5): 470-472, 487. (in Chinese)
- [3] 袁大伟, 何七勇, 郑宪清, 等. 上海松江区蔬菜田土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 上海农业学报, 2013, 29(4): 42-46.
YUAN Da-wei, HE Qi-yong, ZHENG Xian-qing, et al. The heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Songjiang District of Shanghai[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2013, 29(4): 42-46. (in Chinese)
- [4] 豆长明, 徐德聪, 周晓铁, 等. 铜陵矿区周边土壤-蔬菜系统中重金属的转移特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 920-927.
DOU Chang-ming, XU De-cong, ZHOU Xiao-tie, et al. Transfer of heavy metals in soil and vegetable systems nearby Tongling mining area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 920-927. (in Chinese)
- [5] Turkdogan M K, Kilicel F, Kara K, et al. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2003, 13(3): 175-179.
- [6] Alam M G M, Snow E T, Tanaka A. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 308: 83-96.
- [7] 余江, 黄志勇, 陈兰. 福建省部分菜园土壤及蔬菜重金属含量的测量及污染评价[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 985-989.
YU Jiang, HUANG Zhi-yong, CHEN Lan. Heavy metal contents and pollution assessment of soils and vegetables sampled in Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 985-989. (in Chinese)
- [8] 许静. 福建省典型菜园土壤重金属现状及防治措施研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
XU Jing. Studies on heavy metal profiles of typical harden soil in Fujian and its remediation strategies[D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese)
- [9] 郑洪萍. 闽东南土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2013(1): 32-37.
ZHENG Hong-ping. Spatial variability and pollution assessment of heavy metals in southeastern Fujian soil[J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 2013(1): 32-37. (in Chinese)
- [10] 黄玉芬, 王果, 刘坤, 等. 酸性土壤有效汞提取方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1566-1570.
HUANG Yu-fen, WANG Guo, LIU Kun, et al. Extraction method for available mercury in acid soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8): 1566-1570. (in Chinese)
- [11] 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.
HONG Chun-lai, JIA Yan-bo, YANG Xiao-e, et al. Biogeochemistry and ecological effect of mercury in agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 590-596. (in Chinese)
- [12] 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): 369-378.
QIAN Jian-ping, ZHANG Li, CHEN Hua-zhen, et al. Mercury pollution in soil-vegetable system of vegetable districts in Guilin[J]. *Geochimica*, 2009, 38(4): 369-378. (in Chinese)
- [13] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1992, 13(4): 70-75.
CHEN Zhen-jin, CHEN Chun-xiu, LIU Yong-qing, et al. Soil environmental background concentrations in Fujian Province[J]. *Environmental Science*, 1992, 13(4): 70-75. (in Chinese)
- [14] 徐小逊, 张世熔, 李丹阳, 等. 川中典型丘陵区土壤砷和汞空间变异特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1320-1325.
XU Xiao-xun, ZHANG Shi-rong, LI Dan-yang, et al. Spatial variability characteristics and influencing factors of soil arsenic and mercury in the typical hilly region of central Sichuan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1320-1325. (in Chinese)
- [15] 鲁艳兵, 温琰茂. 施用污泥的土壤重金属元素有效性的影响因素[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 68-71.
LU Yan-bing, WEN Yan-mao. The factors affecting the availability of heavy metals of sewage sludge applied to soil[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1998, 7(1): 68-71. (in Chinese)
- [16] 陈文娟, 方凤满, 余健, 等. 安徽芜湖市土壤汞污染评价及影响因素分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 168-172.
CHEN Wen-juan, FANG Feng-man, YU Jian, et al. Environmental pollution assessment of soil Hg and influence factors in Wuhu, Anhui Province[J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2009, 32(2): 168-172. (in Chinese)
- [17] 闫双堆, 卜玉山, 刘利军, 等. 不同腐植酸物质对土壤中汞的固定作

- 用及植物吸收的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(1): 101-105.
- YAN Shuang-dui, BU Yu-shan, LIU Li-jun, et al. Effects of different humic acid materials on mercury fixation in soil and mercury absorption by plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1): 101-105. (in Chinese)
- [18] 荆延德, 赵石萍, 何振立. 土壤中汞的吸附-解吸行为研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1270-1274.
- JING Yan-de, ZHAO Shi-ping, HE Zhen-li. A review on the studies on mercury adsorption-desorption behavior in the soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5): 1270-1274. (in Chinese)
- [19] 章明奎, 符娟林, 顾国平, 等. 长三角和珠三角土壤中汞的化学形态、转化和吸附特性[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 1-5.
- ZHANG Ming-kui, FU Juan-lin, GU Guo-ping, et al. Chemical forms, transformation and adsorption of mercury in the soils of the Changjiang Delta and Zhujiang Delta[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(2): 1-5. (in Chinese)
- [20] 李海华, 刘建武, 李树人, 等. 土壤-植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(1): 30-34.
- LI Hai-hua, LIU Jian-wu, LI Shu-ren, et al. The present progress of research on heavy metal pollution and plant enrichment in soil-plant system[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2000, 34(1): 30-34. (in Chinese)
- [21] 尚爱安, 刘玉荣, 梁重山. 土壤中重金属的生物有效性研究进展[J]. 土壤, 2000(6): 294-314.
- SHANG Ai-an, LIU Yu-rong, LIANG Chong-shan. Progress in study of the bioavailability of heavy metals in soils[J]. *Soil*, 2000(6): 294-314. (in Chinese)
- [22] 孟昭福, 张增强, 张一平, 等. 几种污泥中重金属生物有效性及其影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 115-118.
- MENG Zhao-fu, ZHANG Zeng-qiang, ZHANG Yi-ping, et al. Bioavailability of heavy metals and affecting factors in sewage sludge[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 115-118. (in Chinese)
- [23] 刘俊华, 王文华, 彭 安. 土壤中汞生物有效性的研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 216-220.
- LIU Jun-hua, WANG Wen-hua, PENG An, et al. Bioavailability of mercury in soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(4): 216-220. (in Chinese)
- [24] 余贵芬, 青长乐, 吴泓涛, 等. 腐植酸结合汞在土壤中的分布特征[J]. 中国环境科学, 2002, 22(2): 179-183.
- YU Gui-fen, QING Chang-le, WU Hong-tao, et al. Characteristics of humic acids bound Hg distribution in soils[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(2): 179-183. (in Chinese)
- [25] Wang D Y, Qing C L, Guo T Y. Effects of humic acid on transport and transformation of mercury in soil-plant systems[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, 95(1-4): 35-43.
- [26] Rogers R D, Mcfarlane J C. Impact factors of mercury volatile from soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1979(8): 255-260.