

东莞市某工业镇不同利用方式土壤铜含量特征及生态风险评价

曾彩明¹, 吴翠玉², 邓杰帆¹, 李军辉², 王澍桓², 刘纪莹², 刘金环², 贾重建^{2,3*}

(1. 东莞市环境科学研究所, 广东东莞 523009; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; 3. 广东生态工程职业学院, 广东广州 510520)

摘要 [目的]为了了解东莞市某工业镇土壤铜(Cu)的污染现状,对东莞某工业镇不同土地利用方式(菜地、果园、林地、荒地)123个表层土壤样品及27个果蔬样品进行了调查。[方法]采用原子吸收法测定土壤和农产品可食部分的Cu含量,利用单因子指数法、地累积指数法和潜在生态指数法进行分析和评价。[结果]研究区域土壤Cu的平均含量为51.20 mg/kg,有73.17%的样点土壤Cu含量超过广东省土壤自然背景值;有16.63%的样点Cu含量高于农用地土壤污染风险管控标准筛选值(GB 15618—2018),且均为菜地土壤。不同种类农产品Cu含量和迁移系数平均值均表现为水果类>叶菜类>茄果类,但无显著性差异。[结论]不同利用方式土壤Cu含量、污染指数、地累积指数、潜在生态危害指数平均值均为菜地最高。研究区域菜地土壤Cu污染最为严重,应引起足够重视。

关键词 铜;利用方式;污染程度;潜在生态风险评价;东莞市

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)13-0061-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.13.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Content and Ecological Risk Assessment of Cu in Soils under Different Land Uses in an Industrial Town of Dongguan CityZENG Cai-ming¹, WU Cui-yu², DENG Jie-fan¹ et al (1. Institute of Environmental Science Research, Dongguan, Guangdong 523009; 2. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642)

Abstract [Objective] An investigation was carried out in order to reveal the characteristics of copper (Cu) contamination in soils and agro-products in an industrial town in Dongguan of Guangdong Province. A total of 123 agricultural soils and 27 agro-products were sampled under four different land uses including vegetable field, orchard, woodland and uncultivated land. [Method] Cu concentration in soils and agro-products were determined by using atomic absorption spectroscopy, and Cu pollution status was assessed by three evaluation methods (index of single factor, index of geo-accumulation and potential ecological risk index). [Result] The average concentration of Cu in soils was 51.20 mg/kg, with 73.17% of tested samples above the background value of natural soil in Guangdong and 16.63% above the maximum allowable concentration of agricultural soil in China (GB 15618—2018), and all of them were vegetable field. The Cu average concentration and transfer coefficient of different agro-products followed the same order: fruits > leafy vegetables > solanaceous fruit vegetables, while no significant difference emerged. [Conclusion] The average values of index of single factor, geo-accumulation index and potential ecological risk index in vegetable field under different land uses were highest. Thus, the worst pollution at vegetable field found in the areas should be adequately addressed.

Key words Cu; Land use; Pollution degree; Potential ecological risk assessment; Dongguan City

近年来,随着公众健康意识的增强,土壤重金属污染备受关注^[1]。铜(Cu)是生命所必需的微量元素^[2],但其过量则会产生危害作用^[3-5]。有研究表明,过量的Cu会干扰细胞代谢和离子平衡对植物产生毒害作用^[6],也会导致人体引起癌症、免疫功能损伤等疾病^[4]。根据2014年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[7]显示我国土壤中Cu的点位超标率为2.1%,在8种无机污染物种位列第4位,污染形式严峻。

东莞作为广东经济发达的城市,由于城市化、工业化的快速发展,导致了“三废”的大量产生,而“三废”未得到有效处理的排放以及垃圾和河涌底泥的农用,致使含重金属的污染物直接或间接地进入农田土壤^[8],给当地环境造成了一定的压力。东莞市土壤重金属的相关研究已有众多相关报道^[9-11],但目前有关不同土地利用方式土壤Cu含量特征及其生态风险评价的报道尚不多见。由于不同土地利用方式对土壤重金属累积可产生重要影响^[12-13],基于此,笔者对东莞市某工业镇不同土地利用方式土壤-农产品系统Cu进行

调查和评价,了解研究区域不同土地利用方式土壤Cu的累积、分布及其生态影响,以期在当地农用地Cu污染的有效防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理 在东莞市某工业镇选取不同土地利用类型(菜地、果园、林地、荒地)的地块,进行样点布设,并且利用GPS准确定位。按照梅花布点5点混合法,用竹片采集表层土壤(0~15 cm)样品,四分法取1 kg装入样品袋中。共采集表层土壤样品123个,其中菜地83个、荒地3个、果园26个、林地11个。样品经室内自然风干之后,使用玛瑙研钵研磨分别过10目和100目尼龙筛贮存,待测。

在种植有时令农产品的地块同时采集可食部分农产品,共计27个,其中叶菜类(通心菜、菜心、番薯叶)10个、瓜果类(莴苣、水瓜、茄子)10个、水果类(香蕉、龙眼、木瓜、芒果)7个,放入提前准备有冰块储藏箱中低温保存以保鲜,带回实验室后进行预处理,去除虫咬、老残部分,用自来水冲洗去除污泥等,用蒸馏水洗净,并用纱布揩干水分,可食用部分立即碾碎分析。

1.2 分析方法 土壤pH采用电位法测定(水土比2.5:1.0)^[14];土壤Cu按照GB/T 17138—1997^[15],经HCl-HNO₃-HClO₄-HF消解后用火焰原子吸收分光光度法测定。农产品Cu的测定参照GB 5009.13—2017^[16],经HNO₃-HClO₄消解

基金项目 广东省省级科技计划项目(2013B020700002)。**作者简介** 曾彩明(1982—),男,江西赣州人,工程师,硕士,从事环境污染治理研究。*通信作者,博士,从事土壤重金属环境化学研究。**收稿日期** 2018-12-13; **修回日期** 2018-12-24

后用火焰原子吸收法测定。样品分析过程中,土壤和农产品分析通过空白、平行和标准物质(土壤标准物质 GSS-4 和 GSS-24、GSB-6 菠菜和 GSB-26 芹菜)来进行质量控制。平行间的相对误差均小于 10%。

1.3 评价方法 为分析土壤 Cu 累积和污染程度,分别以广东省自然土壤背景值^[17]和《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)^[18]为评价标准(表 1)。

表 1 土壤 Cu 污染评价标准

利用方式 Land use	mg/kg	
	pH≤6.5	pH>6.5
果园 Orchard	150	200
其他 Other	50	100
背景值 Background value	17	17

1.3.1 污染评价。主要采用单因子污染指数法和地累积指数法来评价研究区域土壤 Cu 污染状况。单因子污染指数法计算公式:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 表示土壤或农产品重金属元素 i 的污染指数; C_i 表示土壤或农产品重金属元素 i 的实测含量(mg/kg); S_i 表示土壤或农产品重金属元素 i 的限量标准(表 1)。根据 P_i 大小,可以将污染程度分为 5 个水平: $P_i < 0.7$,安全; $0.7 < P_i \leq 1.0$,警戒级; $1.0 < P_i \leq 2.0$,轻污染; $2.3 < P_i \leq 3.0$,中污染; $P_i > 3.0$,重污染。

地累积污染指数法计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (1.5 B_i)] \quad (2)$$

式中, I_{geo} 表示土壤重金属元素 i 的地累积指数; C_i 表示土壤重金属元素 i 的实测值(mg/kg); B_i 表示土壤重金属元素 i 的背景值(表 1);1.5 是修正系数。根据 I_{geo} 大小,可以将污染程度分为 7 个水平: $I_{geo} \leq 0$,污染; $0 < I_{geo} \leq 1$,轻污染; $1 < I_{geo} \leq 2$,中污染; $2 < I_{geo} \leq 3$,中强污染; $3 < I_{geo} \leq 4$,强污染; $4 < I_{geo} \leq 5$,较强污染; $I_{geo} > 5$,极强污染。

表 2 土壤 pH 及 Cu 含量统计特征

Table 2 Description statistics of soil pH and Cu content

利用方式 Land use	pH				Cu 含量 Cu content/mg/kg			
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV//%	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV//%
菜地 Vegetable field	4.06	8.08	6.15±0.81 b	13.25	8.66	683.06	65.21±114.18 a	175.11
果园 Orchard	3.81	7.98	5.60±1.19 b	21.21	7.80	84.58	22.75±16.21 a	71.25
林地 Woodland	4.34	8.29	6.27±1.33 b	21.25	7.38	49.15	22.58±11.40 a	50.50
荒地 Wasteland	6.16	8.28	7.51±1.17 a	15.59	12.97	16.70	15.30±2.03 a	13.29
所有区域 All areas	3.81	8.29	6.08±1.00	16.53	7.38	683.06	51.20±96.12 a	187.73

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$)

2.2 农产品 Cu 含量及迁移特征 从图 1A 可以看出,供试所有农产品 Cu 含量为 0.31~1.90 mg/kg,平均含量为 0.85 mg/kg。不同种类农产品 Cu 含量平均值由大到小依次为水果类、叶菜类、茄果类,三者之间无显著性差异。农产品对重金属的吸收和积累特征,众多研究者采用农产品中重金

1.3.2 潜在生态风险评价。潜在生态风险指数法是瑞典学者 Hakanson^[19]提出的,单金属潜在生态危害指数计算公式:

$$E_r^i = T_r^i C_f^i = T_r^i C_i^i / C_n^i \quad (3)$$

式中, E_r^i 为土壤中第 i 种重金属的潜在生态危害指数; T_r^i 为第 i 种重金属元素毒性系数,反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度; C_f^i 为第 i 种重金属元素的污染系数; C_i^i 为土壤重金属元素含量实测值(mg/kg); C_n^i 为重金属参比值。土壤重金属含量越大,重金属的毒性水平越高,潜在生态危害指数 E_r^i 值越大,表明其潜在危害也越大,具体风险程度分级标准分为 5 个水平: $E_r^i < 40$,轻微; $40 \leq E_r^i < 80$,中等; $80 \leq E_r^i < 160$,强; $160 \leq E_r^i < 320$,很强; $E_r^i \geq 320$,极强。用 Hakanson^[19]制定的标准化重金属毒性系数(Cu 的毒性系数 $T_r = 5$)为评价依据。为了相对反映特定区域的分域性,参比值采用广东省土壤自然背景值(表 1)。

1.4 数据处理与分析 采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 20.0 和 Origin 2016 软件进行相关的图表处理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 和 Cu 含量特征 对 123 个土壤 pH 及 Cu 含量进行分析,含量范围、均值、标准差、变异系数等统计特征见表 2。由表 2 可知,研究区域土壤 pH 为 3.81~8.29,平均值为 6.08,有 66.7%的样点土壤 pH<6.5,即有 2/3 的土壤偏酸性;不同利用方式间土壤 pH 平均值表现为荒地>林地>菜地>果园。土壤重金属 Cu 含量为 7.38~683.06 mg/kg,平均值为 51.20 mg/kg,有 73.17%的样点土壤 Cu 含量超过广东省土壤自然背景值,表明研究区土壤重金属 Cu 的累积现象已经比较严重。与土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018)比较,有 16.63%的样点 Cu 含量高于筛选值,且均为菜地土壤。土壤 Cu 含量在不同利用方式间的大小顺序为菜地>果园>林地>荒地,但无显著性差异。

变异系数可以反映采样总体中各样点之间的平均变异程度^[20]。表 2 表明,菜地、果园土壤 Cu 的变异系数达 65%以上,远大于林地和荒地土壤的 Cu 变异系数。说明菜地和果园受外界的干扰比较显著,空间分异较大。

属的含量与相应土壤重金属含量的比值来表示^[21],该研究中将农产品 Cu 含量与相应土壤的比值称之为迁移系数,迁移系数可以大致反映出不同种类农产品对 Cu 的吸收情况,迁移系数越大,表明农产品越容易从土壤中吸收该元素,即该元素的迁移能力越强。从图 1B 可以看出,Cu 在土壤-农

产品间的迁移系数为 0.003 9~0.104 3,平均值为 0.034 7。不同种类农产品 Cu 迁移系数平均值由大到小依次为水果

类、叶菜类、茄果类,但无显著性差异,这与各类农产品 Cu 含量的大小顺序一致。

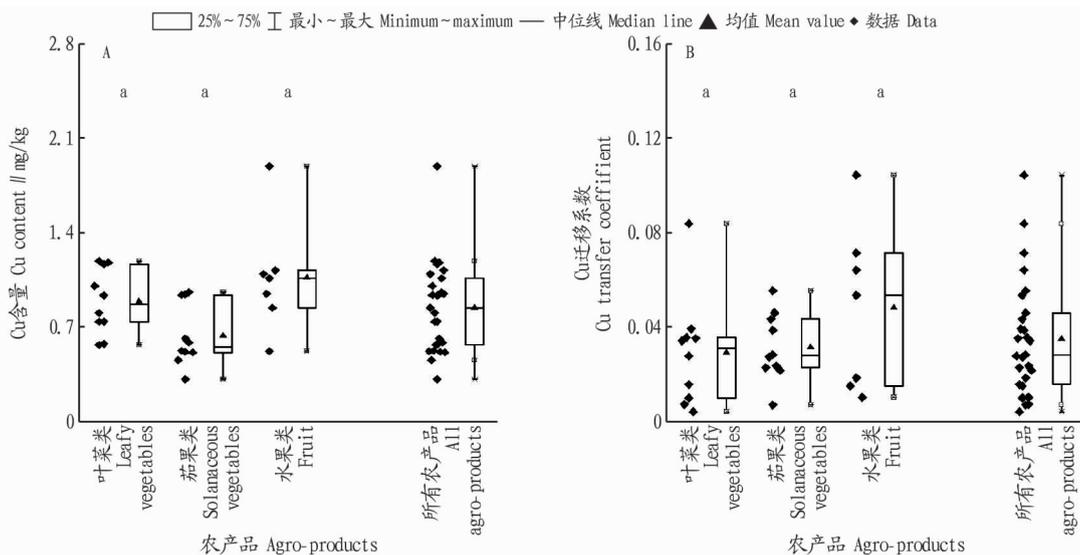


图 1 农产品 Cu 含量(A)及迁移系数(B)箱线图

Fig. 1 Cu content (A) and transfer coefficient (B) in agro-products

2.3 土壤 Cu 污染评价 以《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中土壤污染风险筛选值为依据,计算 Cu 污染指数,结果见表 3。从表 3 可以看出,研究区土壤 Cu 污染指数为 0.05~9.69,平均值为 0.75,14.63%的样点处于轻污染~重污染水平,且均为菜地,其他 3 种利用方式土壤 Cu 处于安全或警戒级水平。菜地的 Cu 污染指数与其他 3 种利用方式相比,无显著性差异。

由表 3 可知,研究区土壤 Cu 地累积指数为-1.79~4.74,平均值为 0.19,45.53%的样点处于轻污染及以上的水平。除了菜地,其他 3 种利用方式土壤 Cu 地累积指数平均值均小于 0。可见,研究区菜地受人类活动的影响程度大于

其他 3 种利用方式。

从土壤 Cu 潜在生态危害指数结果来看(表 3),研究区土壤 Cu 潜在生态危害指数为 2.17~200.99,平均值为 15.06,仅有 6.50%的样点土壤处于中等及以上污染水平。果园、林地、荒地 Cu 的潜在生态危害指数均小于 40,处于轻微风险程度,菜地土壤也仅有 9.64%的样点 Cu 潜在生态危害指数 ≥ 40 。这一结果表明研究区土壤 Cu 的生态风险整体较低,但也有个别样点土壤 Cu 的生态风险程度较高,不可忽视。方差分析结果显示,菜地土壤 Cu 潜在生态危害指数与其他 3 种利用方式无显著差异。

表 3 土壤 Cu 污染评价结果

Table 3 Evaluated results of Cu in soils

利用方式 Land use	单因子污染指数 Single factor pollution index			地累积指数 Geo-accumulation index			潜在生态危害指数 Potential ecological hazard index		
	范围 Range	均值±标准差 Mean±SD	污染程度 Pollution degree	范围 Range	均值±标准差 Mean±SD	污染程度 Pollution degree	范围 Range	均值±标准差 Mean±SD	污染程度 Pollution degree
菜地 Vegetable field	0.09~9.69	1.01±1.56 a	安全~重污染	-1.56~4.74	0.48±1.35 a	无~较强污染	2.55~200.90	19.18±33.58 a	轻微~很强
果园 Orchard	0.05~0.42	0.14±0.08 a	安全	-1.71~1.73	-0.38±0.74 a	无~中污染	2.30~24.88	6.69±4.77 a	轻微
林地 Woodland	0.11~0.98	0.35±0.24 a	安全~警戒级	-1.79~0.95	-0.35±0.75 a	无~轻污染	2.17~14.46	6.64±3.35 a	轻微
荒地 Wasteland	0.16~0.26	0.20±0.05 a	安全	-0.98~-0.61	-0.75±0.20 a	无	3.81~4.91	4.50±0.60 a	轻微
所有区域 All areas	0.05~9.69	0.75±1.34	安全~重污染	-1.79~4.74	0.19±1.25	无~较强污染	2.17~200.99	15.06±28.27	轻微~极强

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

3 结论与讨论

土壤中 Cu 的来源包括矿物自然风化和人类活动 2 个部分,即与土壤母质、地貌类型、环境污染、土地利用类型和土地管理水平有关^[5],由人类活动引起的农田土壤中 Cu 累积的途径广泛。我国污水农用灌溉现象比较普遍,有研究表明^[22-23],污水灌溉、大气沉降、磷肥、有机肥以及灌溉水是农田 Cu 积累的重要途径。研究区域土壤 Cu 的平均含量为 51.20 mg/kg,是广东省土壤自然背景值(17 mg/kg)的

3.0 倍,也明显高于前人对东莞农田土壤的研究结果(21.82 mg/kg)^[9],说明近年来该工业镇农田土壤 Cu 含量主要受到人为工业和农业生产活动等因素的影响,出现明显富集,研究中有 73.17%的土壤 Cu 含量高于背景值,说明累积现象比较严重;有 16.63%的样点土壤 Cu 含量高于农用地土壤污染风险管控标准筛选值(GB 15618—2018),且均为菜地土壤。不同利用方式土壤 Cu 含量表现为菜地>果园>林地>荒地,这是由于菜地土壤复种指数高、耕作强度大、肥料农药

使用量大、灌水频率高,受人类农业生产活动影响最为强烈,林地和荒地土壤受人为活动干扰强度低,果园土壤介于两者之间。这与管滨等^[24]在不同土地利用类型中Cu含量的研究结果相似,即菜地Cu含量均高于其他利用方式。Li等^[25]研究表明林地土壤Cu含量显著低于果园和菜地。

土壤中重金属是造成蔬菜重金属污染的主要因素,且通过食物链被动物富集,直接或间接地威胁人类安全和健康^[11,26]。由于作物主要是通过根系从土壤溶液中吸收元素^[27],不同农产品因对水分的需求不同而导致对重金属的吸收以及体内运移效率有很大差异。不同种类农产品Cu含量和迁移系数存在一定的差别,但无显著性差异,其平均值均表现为水果类>叶菜类>茄果类。

采用单因子污染指数法、地累积污染指数法及潜在生态风险指数法对研究区域土壤Cu进行评价,结果显示,有14.63%的样点土壤Cu污染指数处于轻污染以上水平,45.53%的样点Cu地累积指数处于轻污染以上的水平,6.50%的样点土壤Cu潜在生态危害指数处于中等及以上风险程度。不同利用方式之间相比发现菜地土壤的污染指数、地累积指数及潜在生态危害指数均大于其他利用方式。由此表明研究区域菜地土壤Cu污染最为严重,同时也处于一定的潜在生态风险程度,应引起足够重视,尤其是菜地,应当通过合理施肥、农药以及灌溉等措施管控区域土壤污染。

参考文献

- [1] 陈卫平,杨阳,谢天,等.中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J].土壤学报,2018,55(2):261-272.
- [2] 郑袁明,宋波,陈同斌,等.北京市菜地土壤和蔬菜中铜含量及其健康风险[J].农业环境科学学报,2006,25(5):1093-1101.
- [3] 王松华,杨志敏,徐朗莱.植物铜素毒害及其抗性机制研究进展[J].生态环境,2003,12(3):336-341.
- [4] BOST M, HOUDART S, OBERLI M, et al. Dietary copper and human health: Current evidence and unresolved issues[J]. Journal of trace elements in medicine & biology, 2016, 35: 107-115.
- [5] 张琼,陆鑫眉,戴清霞,等.平和典型蜜柚果园土壤铜分布及与果树铜累积关系[J].福建农业学报,2018,38(1):81-86.
- [6] 王狄,李锋民,熊治廷,等.铜的植物毒性与植物蓄积的关系[J].生态环境学报,2000,9(2):146-148.
- [7] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报(2014年4月17日)[J].环境教育,2014,20(6):8-10.
- [8] 夏运生,万洪富,杨国义,等.东莞市不同区域菜地土壤重金属污染状况研究[J].生态环境,2004,13(2):170-172.
- [9] 蔡立梅,马瑾,周永章,等.东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J].地理学报,2008,63(9):994-1003.
- [10] 蔡立梅,马瑾,周永章,等.东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J].环境科学,2008,29(12):3496-3502.
- [11] 窦磊,马瑾,周永章,等.乡镇企业密集区菜地土壤重金属含量分布特征及生态效应:以东莞市为例[J].农业环境科学学报,2007,26(5):2048-2056.
- [12] 贾亚男,袁道先.不同土地利用方式对贵州岩溶土壤微量重金属元素含量的影响[J].土壤通报,2007,38(6):1174-1177.
- [13] 钟来元,郭良珍.不同利用方式农用地土壤重金属污染状况及其动态变化特征:以广东省徐闻县为例[J].生态环境学报,2011,20(12):1934-1939.
- [14] 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,2000:12-483.
- [15] 国家环境保护局,国家技术监督局.土壤质量铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法:GB/T 17138—1997[S].北京:中国标准出版社,1997.
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理局.食品中的铜测定:GB 5009.13—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [17] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:330-381.
- [18] 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:中国环境出版社,2018.
- [19] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8):975-1001.
- [20] 钟晓兰,周生路,李江涛,等.长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征:以江苏省太仓市为例[J].土壤学报,2007,44(1):33-40.
- [21] CUI Y J, ZHU Y G, ZHAI R H, et al. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China[J]. Environment international, 2004, 30(6):785-791.
- [22] KHAN S, CAO Q, ZHENG Y M, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. Environmental pollution, 2008, 152(3):686-692.
- [23] 王婷,张倩,杨海雪,等.农田土壤中铜的来源分析及控制阈值研究[J].生态毒理学报,2014,9(4):774-784.
- [24] 管滨,孙虎.不同土地利用类型下土壤铜累积状况及其污染风险控制[J].山东农业科学,2015,47(4):83-87.
- [25] LI J, LU Y, YIN W, et al. Distribution of heavy metals in agricultural soils near a petrochemical complex in Guangzhou, China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2009, 153(1):365-375.
- [26] ALEXANDER P D, ALLOWAY B J, DOURADO A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables[J]. Environmental pollution, 2006, 144(3):736-745.
- [27] 李军辉,卢瑛,尹伟,等.佛山市某工业区周边蔬菜重金属富集特征的研究[J].华南农业大学学报,2008,29(4):17-20.