

浙江省主要优势农产品产地土壤-农作物镉含量空间分布及相关性研究

朱有为¹, 段丽丽¹, 周 银², 黄 绚³

(1.浙江省种植业管理局, 浙江 杭州 310020; 2.浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310058; 3.浙江省环境保护科学设计研究院, 浙江 杭州 310007)

摘 要:针对目前土壤-农作物镉污染问题,以浙江省40个县(市、区)主要优势农产品产区为研究对象,在粮食、油菜、蔬菜种植地以及茶园和果园土壤中共采集898个单元土壤样品及相对应的五大类农作物,并对其镉含量进行分析评价;同时采用富集系数比较不同农作物对土壤重金属镉的吸收差异。结果表明,研究区产地土壤和农作物的镉含量存在一定程度超标,土壤超标率为10.69%,农作物超标率为4.57%。不同农作物对土壤镉的富集系数差异较大,变化范围在0.002~0.257之间。土壤-农作物镉含量的相关性并不显著。

关键词:土壤;农作物;空间分布;镉;浙江省

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)01-0079-06

doi: 10.13254/j.jare.2013.0187

Spatial Pattern and Interrelation of Total Cd in Soils and Crops Across the Agricultural Regions of Zhejiang Province, China

ZHU You-wei¹, DUAN Li-li¹, ZHOU Yin², HUANG Xuan³

(1.Zhejiang Management Bureau of Planting, Hangzhou 310020, China; 2.College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3.Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

Abstract: In the study, a total of 898 soil samples and the corresponding crops were collected from paddy field, vegetable land, tea garden and fruit land in Zhejiang province. The total Cd content of soils and crops were chemically analyzed in the laboratory. The difference of the concentration index among the five groups of crop was compared. The result showed that 10.63% of the whole soils were assessed as the polluted level according to the second grade of Standards for Soil Environmental Quality of China (GB 15618—1995), and 4.57% of the crops were polluted. The concentration index among the five groups of crops was obviously different, changing from 0.002 to 0.257, while no significant correlation of total Cd content existed between soils and the relative crops.

Keywords: soil; crop; spatial pattern; Cd; Zhejiang Province

镉(Cd)在土壤-植物系统中的迁移较为活跃^[1-2],土壤中的镉经作物吸收通过食物链对人和动物体产生潜在危害,同时镉也破坏农产品的营养成分,降低其营养价值^[3]。近年来随着我国工农业的快速发展,土壤-农作物镉污染越来越引起社会的关注。大量研究表明,我国部分农产品产区的土壤存在镉污染,如

1990年受镉污染的土壤就已超过1.3万hm²,但对其污染面积和程度存在不同的认识^[4-5]。以往很多研究都着重在工矿区周边或部分特定区域,如王凯荣等^[6]通过对中国16个工矿污染区农田土壤和稻米中镉含量的调查分析,认为这些地方受镉污染的程度已相当严重,并主要由金属采矿废弃物及矿山废水造成。但目前一般农区土壤-农作物重金属污染状况更受关注,据部分农区的调查表明土壤-农作物镉的污染分布当前仍还是存散点状,而不是普遍性。如王昌全等^[7]研究表明,成都平原(广汉、德阳、新都等)13个市(县、区)

收稿日期:2013-10-28

基金项目:浙江省农业地质环境调查项目(ZD-05);浙江省科技计划项目(2004C32066)

作者简介:朱有为(1964—),男,浙江人,高级农艺师,主要从事农业资源与环境保护研究工作。E-mail:13018941333@163.com

稻麦轮作区,稻米中镉含量超标达 8.70%;郑袁明等^[8]对北京市菜地、稻田、自然土等 595 个样地的土壤镉含量进行分析,与土壤基线值相比总超标率为 3.2%,其中果园有 9.5%样品超标。但是这些结论还需要更广范围的国家级、大流域级、省级等范围的土壤-作物重金属含量的长期动态监测和分析评价。

浙江省地处于长三角南翼,经济发达,城镇化水平高,各类中小企业在全省分布较广,环境压力大。同时浙江省人均耕地面积少,农产品产区的土壤-农作物安全问题尤为重要。本文通过对全省近 40 个县的主要优势农产品产地的土壤-农作物对应采样分析,从而在宏观上掌握浙江土壤和作物镉含量的空间分布特征,评价其污染程度及其土壤-作物镉含量之间的相互关系,这对深入了解浙江省农田土壤-农作物镉污染现状以及采取相应措施具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与测定

研究区覆盖浙江省 40 个县(市、区),按地理位置划分为浙北、浙中、浙南三区。其中浙北包括 15 个县(区),浙中包括 18 个县(区),浙南包括 7 个县(区)。根据各地优势农产品种植面积和主要品种分布等情况确定采样点数量,调查区共采取有效样点 898 个(表 1)。

1.1.1 土壤样品采集与测试

根据不同作物种植类型,采集不同深度的土壤样品。粮油类:0~20 cm;蔬菜类:0~15 cm;茶叶类:0~40 cm;水果类:0~40 cm。采用等离子体质谱法测定土壤镉全量的含量。

1.1.2 农作物样品采集与测试

在土壤采样点相对应位置采集农作物样品,采样植株不少于 20 株,取植株可食用部分。按国家标准《食品中镉的测定方法》(GB/T 5009.15—1996)进行农作物样品测定。

1.2 评价方法

1.2.1 土壤评价标准和方法

根据《中华人民共和国土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),采用单项指数法进行评价,其计算方法为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: P_i 为土壤中重金属 i 的单项指数; C_i 为土壤中重金属 i 的实测数据; S_i 为重金属 i 的评价标准。 $P_i \leq 1$ 时表示土壤重金属 i 未超标; $P_i > 1$ 时表示土壤重金

表 1 采样点分布概括

Table 1 Distribution of the samples

所属区域	县名	样点数量/个	所属区域	县名	样点数量/个
浙北	安吉	25	浙中	开化	35
	临安	24		常山	32
	嘉善	40		衢江	25
	秀州	20		江山	25
	秀城	33		柯城	7
	平湖	79		建德	13
	海盐	30		兰溪	14
	海宁	18		婺城	12
	桐乡	17		金东	10
	萧山	45		柯城	10
	上虞	14		永康	5
	绍兴	3		浦江	12
	越城	5		义乌	3
	慈溪	75		武义	10
	三门	8		东阳	10
浙南	临海	45		磐安	3
	黄岩	30		诸暨	70
	温岭	15		嵊州	9
	玉环	11		新昌	38
	泰顺	18	合计		898

属 i 超标, P_i 越大,超标程度越重,其受污染程度越高。

1.2.2 农作物评价标准确定

本文农作物评价所使用的标准以国家标准《食品中镉限量卫生标准》(GB 15201—1994)为主,其中规定了粮食、水果、蔬菜的食品含量标准。现行茶叶标准(国家及行标)指标较少,对于现行标准中没有的指标项,本研究以粮食相应元素标准值的 5 倍作为茶叶的卫生质量评价标准。国内外无油菜籽卫生质量标准,由于本次测定的是油菜籽(包括油及残渣)中元素含量,采用食用油标准显然欠妥,故评价以粮食卫生标准中标准值的 2 倍作为油菜籽卫生质量评价标准。本文的农作物评价标准见表 2。

表 2 评价所采用的农产品卫生标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Health standard for agricultural products ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

重金属	粮食	水果	蔬菜	茶叶	油菜籽
Cd	0.2	0.03	0.05	1.0	0.05

1.2.3 作物富集系数

通过富集系数来衡量不同作物对 Cd 吸收能力的差异,富集系数指作物可食用部分重金属含量与土

壤重金属含量之比^[9],来反映植物对重金属富集程度的高低或富集能力的强弱。

2 结果与分析

2.1 土壤镉含量统计结果

浙江调查区土壤中镉含量的平均值以衢州市最高,达 0.28 mg·kg⁻¹,温州的泰顺县最低,为 0.10 mg·kg⁻¹;全部样点的最大值出现在衢州市为 2.80 mg·kg⁻¹,最小值为宁波慈溪市的 0.05 mg·kg⁻¹,样点中最大值为最小值的 56 倍。另外绍兴、衢州和湖州土壤镉的变异系数较高,分别达 65%、60.26%和 52.14%,从而反映出当地土壤镉来源的复杂性,土壤镉可能受当地镉背景值影响较大或可能受到外来镉污染的干扰,局部地区存在镉的污染。此外大部分地区土壤镉变异系数较小,表明样点之间变化不大,数据离散程度不高。详见表 3。

2.2 土壤镉评价结果

调查区中 63.55%土壤符合土壤环境质量一级标准,89.31%土壤符合土壤环境质量二级标准。从图 1 可见,在浙北、浙中、浙南 3 个区域内,浙中土壤镉含量相对较高,浙北次之,浙南最低。镉含量较高的地方主要集中在衢州市北部、绍兴诸暨市南部和嘉兴市北部地区。衢州市、嘉兴市的大部分地区土壤镉含量都超过了土壤环境一级质量标准,杭州、台州、绍兴、金华市的部分调查区土壤镉含量超过了土壤环境一级质量标准,湖州的安吉县、宁波的慈溪市和温州的泰顺县的调查区内土壤镉含量都处于土壤环境一级质量标准之内。

对土壤样点进行重金属污染评价后镉超标情况如表 4 所示。浙北地区共有土壤样点 428 个,其中超标点位 32 个,超标率为 7.48%;浙中地区共有土壤样

点 343 个,其中超标点位 56 个,超标率为 16.33%;浙南地区共有土壤样点 127 个,其中超标点位 8 个,超标率为 6.30%。3 个地区超标率从大到小为浙中>浙北>浙南。

对土壤样点镉污染指数进行克里格插值分析,得到浙江省调查区土壤镉污染评价指数分布图(图 2)。根据土壤镉污染指数,将土壤镉评价分为 2 类,一类为 $P_i \leq 1$,另一类为 $P_i > 1$ 。从图 2 中可以看到,土壤镉污染超标分布与土壤镉含量高低一致。调查区的绝大部分地区的镉含量都处于安全状态,污染主要集中在衢州市北部、绍兴市南部以及嘉兴市小部分地区。衢州市北部土壤 Cd 超标源于当地母质,背景值高^[10],导致当地土壤 Cd 含量高于其他地区。而绍兴市与嘉兴市的土壤 Cd 可能源自于当地众多的电镀、能源中小企业。

2.3 作物镉含量评价结果

调查区农作物镉含量调查情况如表 5 所示。共有 40 个样品超标,总体超标率为 4.57%。以五大类农产品来分,超标率从高到低为蔬菜>油菜籽>水果>粮食>茶叶,分别为 10.57%、7.77%、2.47%、1.72%和 0.00%;以 3 个调查区来分,超标率从高到低为浙北>浙中>浙南,分别为 6.78%、3.20%、0.00%。茶叶中的所有样品镉含量均未超标;水果中,浙北和浙南均未检测到超标样品,浙中的 147 个样品中检测到有 7 个样品超标;蔬菜样品在 5 类农作物中超标最严重,在取

表 4 土壤镉污染评价结果
Table 4 The result of Cd pollution in soil

地区	样点总数/个	$P_i > 1$	超标率/%
浙北	428	32	7.48
浙中	343	56	16.33
浙南	127	8	6.30
总计	898	96	10.69

表 3 各地区土壤镉含量统计结果(mg·kg⁻¹)
Table 3 The statistic results of soil Cd content in different counties(mg·kg⁻¹)

地区	最小值	中值	最大值	均值	标准差	几何均值	变异系数/%	第一分位点	第三分位点	偏度	峰度
嘉兴	0.08	0.23	1.26	0.21	0.11	0.20	48.68	0.15	0.24	2.64	12.60
金华	0.07	0.19	0.63	0.18	0.06	0.17	33.00	0.14	0.20	0.42	2.67
绍兴	0.06	0.18	2.06	0.22	0.16	0.19	65.00	0.16	0.24	2.96	19.60
衢州	0.08	0.21	2.80	0.28	0.26	0.23	60.26	0.16	0.31	2.74	13.30
台州	0.08	0.15	0.59	0.19	0.09	0.18	42.91	0.15	0.21	1.58	5.60
杭州	0.07	0.15	0.57	0.16	0.06	0.15	35.91	0.12	0.19	0.95	4.89
湖州	0.06	0.12	0.403	0.14	0.07	0.13	52.14	0.09	0.16	2.08	7.79
宁波	0.05	0.14	0.23	0.14	0.03	0.13	22.14	0.12	0.15	-0.19	3.91
温州	0.07	0.099	0.16	0.10	0.02	0.10	22.12	0.09	0.12	0.68	2.96

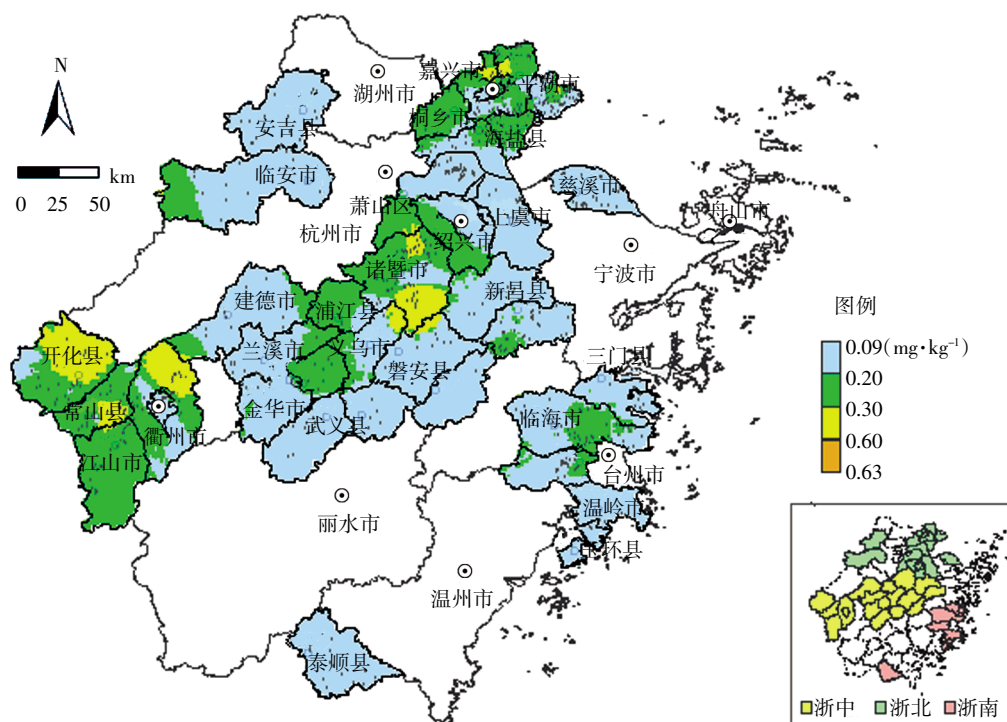


图 1 调查区土壤镉含量分布

Figure 1 Spatial distribution map of soil Cd content in the research area

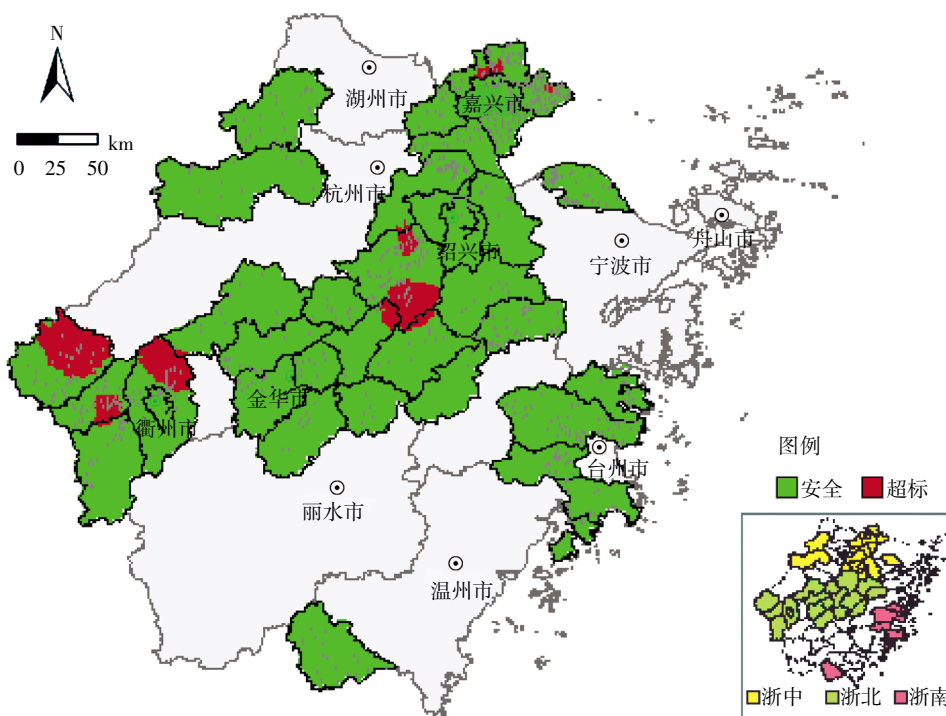


图 2 调查区土壤镉污染超标分布

Figure 2 Spatial distribution map of Cd pollution in research area

样的浙北和浙南地区均有超标现象。粮食的超标样品出现在浙中,97 个样品中共有 3 个样品超标。油菜籽样品均来自于浙北地区,超标率为 7.77%。

2.4 土壤与作物中镉含量关系

2.4.1 农作物富集系数

不同农作物对镉的富集系数见表 6。在调查的 19

种农作物中,富集系数变化范围为 0.002~0.257,不同种类农作物之间系数相差较大。富集系数大于 0.2 的有早稻、晚稻、春茶、葡萄、番茄和毛豆;富集系数小于 0.01 的有夏秋茶和茭白;富集系数大于 0.01 小于 0.1 的有柑桔、胡柚、包心菜、萝卜、蒲瓜、四季豆、西兰花和芋艿;富集系数大于 0.1 小于 0.2 的有油菜和青菜。从总体来看,虽然富集系数大于 0.2 的作物中,除春茶外均为果实型作物,但是同样也有蒲瓜、四季豆、梨等果实型作物的富集系数相对较小。

2.4.2 土壤-农作物镉相关性分析

图 3 展现了土壤镉全量含量与作物镉含量的相互关系。使用指数模型、线性模型、多项式模型、对数模型、幂函数模型等尝试建立土壤-作物镉数学模型。结果显示,土壤与果品、油菜籽、粮食、茶叶和蔬菜的最大相关系数分别为 0.14、0.23、0.04、0.17 和 0.08,相关系数均比较低,说明在研究区中土壤镉(全量)的含量高低对作物吸收和作物可食部分体内镉含量的积累关系并不显著。因此对于土壤镉有效态含量与作物镉的关系还需作进一步研究。彭雨敏等^[1]在辽河流域的研究表明土壤中镉全量含量与水稻、玉米、花生作物的相关系数分别只有 0.121、0.109 和 0.207,但是土壤镉有效态含量与作物镉的关系相对显著。

3 结论

(1)调查区土壤镉含量调查结果显示 89.31%的土壤处于安全范围内,污染比例为 10.69%。土壤镉含量的变化原因复杂多样,部分地区因地质背景特点或由于点源污染引起土壤镉含量异常。从调查情况分析,浙江省农产品产地土壤镉含量污染程度低,且无严重污染区域。

(2)调查区内农作物样品检测结果超标率为 4.57%,不同类型的农作物间超标情况各不相同,蔬菜的超标情况最严重,为 10.57%,而茶叶无超标现象。

(3)浙江省土壤镉含量相对处于较低水平,其含量的空间变异不足以引起作物的富集作用,因此土壤

表 6 农作物富集系数

Table 6 Results of Cd concentration index in agricultural plants

类别	样品名称	积累系数
粮食	早稻	0.231
	晚稻	0.257
油菜	油菜籽	0.136
茶叶	春茶	0.235
	夏秋茶	0.002
果品	柑桔	0.026
	胡柚	0.030
	梨	0.042
	葡萄	0.247
蔬菜	包心菜	0.026
	番茄	0.229
	茭白	0.004
	萝卜	0.098
	毛豆	0.231
	蒲瓜	0.023
	青菜	0.128
	四季豆	0.017
	西兰花	0.057
	芋艿	0.097

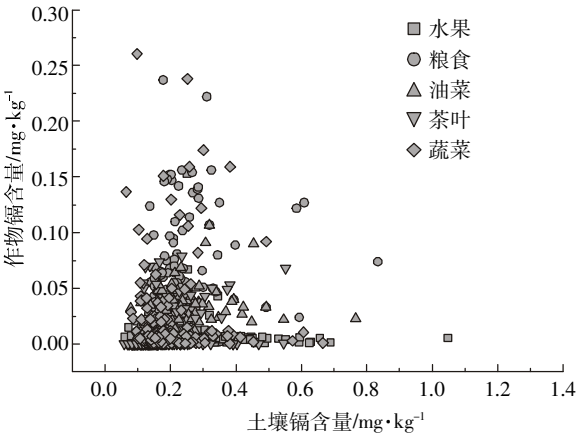


图 3 土壤镉全量含量与作物镉含量的相互关系

Figure 3 The relationship between the Cd content in soils and agricultural plants

表 5 调查区农作物镉含量调查超标情况

Table 5 The statistic results of Cd content in polluted agricultural plants

地区	水果		蔬菜		粮食		油菜籽		茶叶		合计
	数量/个	超标率/%	数量/个	超标率/%	数量/个	超标率/%	数量/个	超标率/%	数量/个	超标率/%	
浙北	27	0.00	190	11.05	77	0	103	7.77	31	0.00	6.78
浙中	147	4.76	18	5.56	97	3.09	0	—	81	0.00	3.20
浙南	109	0.00	0	—	0	—	0	—	18	0.00	0.00
总计	283	2.47	208	10.57	174	1.72	103	7.77	130	0.00	4.57

镉含量与作物可食部分镉含量的相互关系并不显著。不同种类的农作物,重金属富集系数差异明显,变化范围为 0.002~0.257,但富集系数与作物的类型与检测部位并无显著相关关系。

参考文献:

- [1] 董林林,赵先贵,巢世军,等. 镉污染土壤的植物吸收与修复研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2008,24(3):292-295.
DONG Lin-lin, ZHAO Xian-gui, CHAO Shi-jun, et al. Study on plants absorbing and phytoremediation of cd polluted soil[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2008, 24(3):292-295. (in Chinese)
- [2] 张红振,骆永明,章海波,等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学报, 2010,47(4):628-638.
ZHANG Hong-zhen, LUO Yong-ming, ZHANG Hai-bo, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards V. modeling of cadmium uptake in soil-crop systems for humanfood safety in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):628-638. (in Chinese)
- [3] 时永志,鲍征宇. 重金属镉与土壤生态环境[J]. 国土资源导刊,2005 (4):12-14.
SHI Yong-zhi, BAO Zheng-yu. Heavy metals cadmium and soil ecological environment[J]. *Land & Resources Herald*, 2005(4):12-14. (in Chinese)
- [4] 赵中秋,朱永官,蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. 生态环境,2005,14(2):282-286.
ZHAO Zhong-qiu, ZHU Yong-guan, CAI Yun-long. Transport and transformation of cadmium in soil-plant systems and the influence factors[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2005, 14(2):282-286. (in Chinese)
- [5] 詹杰,魏树和,牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报,2012,31(7):1257-1263.
ZHAN Jie, WEI Shu-he, NIU Rong-cheng. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1257-1263. (in Chinese)
- [6] 王凯荣,郭焱,何电源,等. 重金属污染对稻米品质的影响的研究[J]. 农业环境保护,1993,12(6):254-257.
WANG Kai-rong, GUO Yan, HE Dian-yuan, et al. Research of effects of heavy metal pollution on quality of rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1993, 12(6):254-257. (in Chinese)
- [7] 王昌全,代天飞,李冰,等. 稻麦轮作下水稻土重金属形态特征及其生物有效性[J]. 生态学报,2007,27(3):890-897.
WANG Chang-quan, DAI Tian-fei, LI Bing, et al. The speciation and bioavailability of heavy metals in paddy soils under the rice-wheat cultivation rotation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):890-897. (in Chinese)
- [8] 郑袁明,罗金发,陈同斌,等. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征[J]. 地理研究,2005,24(4):542-548.
ZHENG Yuan-ming, LUO Jin-fa, CHEN Tong-bin, et al. Cadmium accumulation in soils for different land uses in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(4):542-548. (in Chinese)
- [9] 陈红亮,龙黔,谭红. 贵州北部菜地土壤镉含量与蔬菜镉污染的关系[J]. 四川农业大学学报,2011,29(3):342-352.
CHEN Hong-liang, LONG Qian, TAN Hong. On the relation of cadmium concentration in vegetable soil to cadmium contamination in vegetables of northern Guizhou[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2011, 29(3):342-352. (in Chinese)
- [10] 戎秋涛,徐开勋,张一强. 浙江省主要类型土壤元素中的环境背景值[J]. 浙江大学学报,1992,26(2):172-178.
RONG Qiu-tao, XU Kai-xun, ZHANG Yi-qiang. Environmental background levels of trace elements in major soil categories in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang University*, 1992, 26(2):172-178. (in Chinese)
- [11] 彭雨敏,凌爽. 辽河流域土壤镉有效性的地球化学研究[J]. 地质调查与研究,2009,32(4):267-272.
PENG Yu-min, LING Shuang. Geochemical study on the validity of cadmium element in soil of the Liaohe river basin[J]. *Geological Survey and Research*, 2009, 32(4):267-272. (in Chinese)