

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.06.004

湖州市东南部农田土壤重金属分布特征及污染评价

陈小磊,徐明星,简中华

(浙江省地质调查院,浙江 杭州 311203)

摘要:以湖州市东南部农田土壤为研究对象,采用地统计学方法对土壤重金属空间变异特征进行研究,利用单因子污染指数、尼梅罗综合污染指数、地质累积指数和潜在生态风险指数开展污染评价。结果表明,该地区土壤Cd均值高于国家土壤环境标准(Ⅱ),土壤重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg)质量比高于背景值。研究区土壤污染程度不高,由西向东Hg污染逐渐增强,Cd污染集中在南浔镇东南部和练市镇中部。土壤Hg、Cd地质累积指数分别为0.50、0.11,为轻-中度污染水平;土壤重金属单因子污染趋势由高到低依次为Cd、Hg、Ni、Zn、Cu、Cr、As、Pb,尼梅罗综合污染指数显示未达到污染水平,仅南浔镇中部、善链镇南部和旧馆镇与双林镇交界处出现轻度及以上污染;Cd的潜在生态风险程度为中等,综合潜在生态风险为轻微等级。土壤污染主要来源于农业生产活动和工业废弃物。

关键词:土壤重金属;空间分布;污染评价;农田;湖州市

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)06-0495-08

The spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in arable land in southeast of Huzhou

CHEN Xiaolei, XU Mingxing, JIAN Zhonghua

(Zhejiang institute of geological survey, Hangzhou 311203, China)

Abstract: Case study is performed on the arable land soil in the southeast of Huzhou in this paper, the spatial distribution characteristics of soil heavy metals are studied using the Geostatistical method, in which soil pollution conditions are evaluated using single pollution index, Nemerow complex pollution index, index of geoaccumulation and potential ecological risk index. The results show that the average content of Cd in this area is higher than that of national soil environmental standard (Ⅱ), and the contents of heavy metals (Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg) are higher than the background values. It is also found that the soil pollution degree of the research area is not high, Hg pollution degree appears to increase from the west area to the east area, and Cd pollution is concentrated in the southeast of Nanxun and the middle of Lianshi. The geoaccumulation indices of Hg and Cd are 0.50 and 0.11, respectively, which belonged to light-moderate pollution. The single pollution index of each heavy metal in soil is as follow: Cd(1.47) > Hg(0.69) > Ni(0.66) > Zn(0.41) > Cu(0.31) > Cr(0.27) > As(0.25) > Pb(0.11). The Nemerow complex pollution index suggests that the pollution condition of the arable soil is insignificant, only the soil in the middle of Nanxun, the south of Shanlian, and the junction area between Jiuguan and Shuanglin is lightly polluted. The potential pollution risk of Cd appears to be moderate and the comprehensive ecological pollution risk shows to be in a light level. The soil pollutions are supposed to be mainly from agricultural activities and industrial wastes.

Key words: heavy metals in soil; spatial distribution; pollution assessment; arable land; Huzhou city

收稿日期: 2016-12-07
基金项目: 湖州市市本级农业地质环境调查项目(【省资】2013003); 浙江省基本农田土地质量地球化学监测试点项目(1212011080001150012-08)
作者简介: 陈小磊(1988—),男,工程师,硕士,主要从事环境地球化学、农业地质研究。E-mail: cxiaolei@sina.cn
通信作者: 徐明星,高级工程师。E-mail: xumingxing535005@163.com

土壤是人类赖以生存的基础,是农作物生长的载体,是不可再生资源。随着工业的发展,“三废”排放日益增加,农业生产过程中农药过量使用,土壤环境的污染状况日益严重,其中,重金属是最常见的污染物,其在土壤中的积累严重影响土壤可持续性的发展,重金属在农作物中的累积,直接威胁农产品的安全性^[1-7]。我国每年因重金属污染导致粮食作物大量减产,被重金属污染的粮食超过1 000万t,严重影响粮食的产量与质量^[8]。目前,农田土壤重金属污染已经成为国内外关注的热点,在长三角地区工业发展引起的环境问题尤为突出,农田土壤重金属污染引起农产品污染对人类健康造成了不良影响,严重制约农业可持续发展^[9-14]。

湖州市位于浙江省北部,是我国著名的鱼米之乡,该地区为湖沼相、河湖相和滨海相沉积平原。当地农业生产发达,水稻和桑蚕是两大主要品种,渔业和养殖业紧随其后,湖州市东南部地区工业发达,该地区曾汇集多家大型企业,包括电子、纺织、木材加工等数十个门类;城市工业化对土壤质量以及人类的生产环境造成极大的危害^[15-17]。本文以湖州市东南部地区为研究对象,针对该地区农用土壤中重金属的分布特征和污染情况进行研究,查明农田土壤重金属污染现状,为合理规划土地利用方式提供科学依据。

1 研究区概况

湖州市地处浙江省北部,北接太湖,东临江苏省、嘉兴市。地理坐标为E119°14'~E120°29',N30°22'~N31°11';全市面积5 818 km²,境内西部地区地势较高,为山地丘陵区,中部和东部为平原区,占全区面积四分之三。年均气温15.5~16℃,月均气温24.6℃。雨水充沛,年均降雨日142~155 d,年均降水量1 273.7 mm;湖州市东部地区为水网平原耕地,以水田为主。

经过实地调查,选取农田面积占有量较大的地区作为研究区,分别位于旧馆镇、石淙镇、双林镇、练市镇、善琰镇以及南浔镇南部地区。水稻成熟时期,在研究区采集了水稻田耕作层土壤(0~20 cm)样品,共计103件;样品采集采用梅花取样法进行组合,采用竹铲采集耕作层土壤约2 kg,采样时利用GPS导航和定位,利用Mapgis6.7对采样点数据进行处理,形成采样分布图,如图1所示。

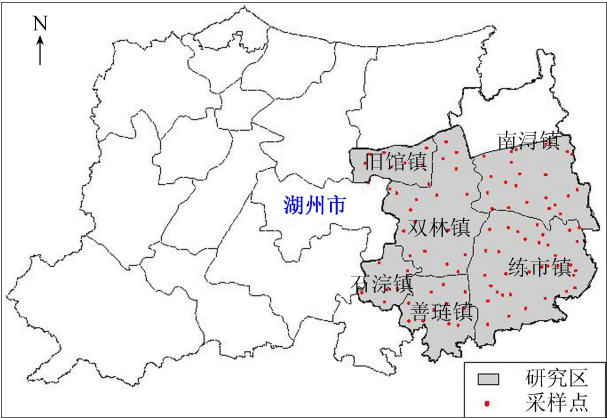


图1 采样点示意图
Fig.1 Locations of sampling points

2 样品分析测试及研究方法

土壤样品在室温下自然风干,碾磨过2 mm尼龙筛,用于土壤理化性质分析,从2 mm的土壤样品中取200 g,用玛瑙研钵粉碎。过100目筛,装至样品瓶保存备用。

样品分析测试由国土资源部杭州矿产资源监督检测中心完成。土壤理化性质采用常规分析方法^[18],土壤pH值采用1:2.5土水比测定,土壤有机质采用重铬酸钾法测定,土壤质地采用比重计沉降法测定,土壤阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定,土壤重金属全量采用HF-HNO₃-HClO₄体系消解,采用火焰原子吸收分光光度法(AFS)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定Pb、Cu、Ni、Zn、Cd、Cr,采用原子荧光光谱法测Hg、As测试,分析所用试剂均为优级纯。分析测试质量控制按照文献^[19-20]执行。

采用地质累积指数法^[21-24]、单因子指数法^[25]、尼梅罗综合污染指数法^[26]和潜在生态危害指数法^[27-28]对重金属进行分级与污染评价。

采用SPSS 19对实验数据进行描述性统计和相关性分析,采用地统计学方法分析重金属元素的空间变异特征,采用Mapgis6.7绘制土壤重金属和污染评价分布特征图。

3 研究结果与讨论

3.1 土壤重金属总体特征

表1为研究区土壤重金属质量比描述性统计结果。土壤中Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg的平均质量比分别为82.34 mg/kg、32.58 mg/kg、30.80 mg/kg、102.20 mg/kg、0.44 mg/kg、32.74 mg/kg、0.33 mg/kg,高于湖州市

土壤背景值^[29];As 平均质量比为 6.25 mg/kg,低于湖州市土壤背景值。研究发现,善链镇 Hg、Zn 污染区域为同一地区,练市镇中部 Cd、Cr 高值区分布范围一致,研究区 Ni、As 的分布情况类似。

表 1 土壤重金属描述统计分析

Table 1 Descriptive statistics analysis of soil heavy metals

元素	均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数/ %	极小值/ (mg·kg ⁻¹)	极大值/ (mg·kg ⁻¹)	背景值/ (mg·kg ⁻¹)	标准值/ (mg·kg ⁻¹)
Cr	82.34	17.86	21.70	50.00	231.00	66.30	300.0
Ni	32.58	5.06	15.53	17.20	43.30	27.20	50.0
Cu	30.80	11.93	38.74	12.40	103.00	25.50	100.0
Zn	102.20	34.49	33.75	62.00	352.00	73.60	250.0
Cd	0.44	2.16	495.79	0.10	23.90	0.15	0.30
Pb	32.74	5.69	17.39	22.50	48.70	30.40	300.0
As	6.25	1.18	18.90	3.06	10.30	7.51	25.0
Hg	0.33	0.21	64.62	0.09	1.11	0.13	0.5

研究区域重金属变异系数从大到小依次为 Cd、Hg、Cu、Zn、Cr、As、Pb、Ni,其中,Cd 的变异系数为 495.79%,属于强变异性,其他重金属元素变异性属于中等变异。研究区域土壤 Cd、Hg 质量比受到外界影响较大,存在一定程度污染,与陈春宵等^[29]的研究结果一致。

3.2 土壤重金属空间变异分析

为研究土壤重金属的空间变异情况,采用地统计方法对土壤重金属空间结构和变异程度进行分析(表 2),根据决定系数和残差选择变异函数的拟合模型。

表 2 土壤重金属变异函数理论模型及相关参数

Table 2 The theoretical models of semivariogram and relevant parameters for soil heavy metals

土壤重金属	分布类型	理论模型	块金值	基台值	块基比/%	变程/km	决定系数
Cr	对数正态分布	高斯模型	214.000	938.900	22.79	49.26	0.690
Ni	正态分布	高斯模型	12.500	47.760	26.17	31.09	0.986
Cu	对数正态分布	球状模型	0.157	0.383	6.63	10.57	0.902
Pb	正态分布	高斯模型	23.900	88.800	26.91	66.03	0.912
As	正态分布	高斯模型	0.954	2.757	34.60	40.51	0.918
Hg	对数正态分布	高斯模型	0.098	0.239	43.90	12.73	0.985
Zn	对数正态分布	高斯模型	0.325	0.822	29.71	12.06	0.957
Cd	对数正态分布	球状模型	0.003	0.019	22.79	3.69	0.511

研究区土壤重金属 Cr、Ni、Pb、As、Hg、Zn 均符合高斯模型,Cu、Cd 符合球状模型;Cr、Cu、Cd 块基比小于 25%,空间自相关性较强,受地质背景、成土母质等结构性变异影响;Ni、Pb、As、Hg、Zn 的块基比介于 25%~75%之间,表现出中等空间相关性,说明这些元素除了受地质背景和结构性因素影响外,还受人为因素影响;其中 Cu、Hg、Zn、Cd 变程较小,说明局部地区土壤 Cu、Hg、Zn、Cd 质量比受外界环境影响较大,尤其是土壤 Cd 质量比变程为 3.69 km,说明仅在此范围内存在空间自相关性,超出此范围,空间自相关性消失。

3.3 土壤重金属空间分布

总体来看,研究区 Hg 和 Cd 污染较为严重(图 2),局部地区 Cu 质量比较高,Cr、Pb、Ni、As 质量比均未超过国家二级标准。

研究区土壤中 Hg 污染地区出现在南浔镇、练市镇和善链镇,污染区呈岛状分布,由高值区向四周扩散。Cu 污染区出现在练市镇中部,高值区位于练市镇中部和善链镇与练市镇交界处,呈岛状分布;土壤 Cd 污染较为严重,污染地区主要分布在南浔镇东南部和练市镇中部,轻微污染地区分布在双林镇、善链镇和旧馆镇居民区;Zn 污染区位于善链镇与练市镇交界处;土壤中 Cr、Pb、Ni、As 质量比较低,未出现污染现象,Cr、Ni 的空间分布较为相似,高值区出现在南浔镇东南部和练市镇中部;Pb 质量比较高的地区为主湖州市练市镇与其他地区交界处;研究区土壤中 As 质量比较低,南浔镇东南部和练市镇中部存在小范围 As 高值区。

3.4 土壤重金属污染评价

以湖州市土壤背景值为标准,计算研究区重金属地质累积指数。研究区土壤重金属 Hg、Cd 地质累积指数均值分别为 0.50、0.11,为轻-中度污染水平,其他重金属地质累积指数均值小于 0。以 GB15618—1995《土壤

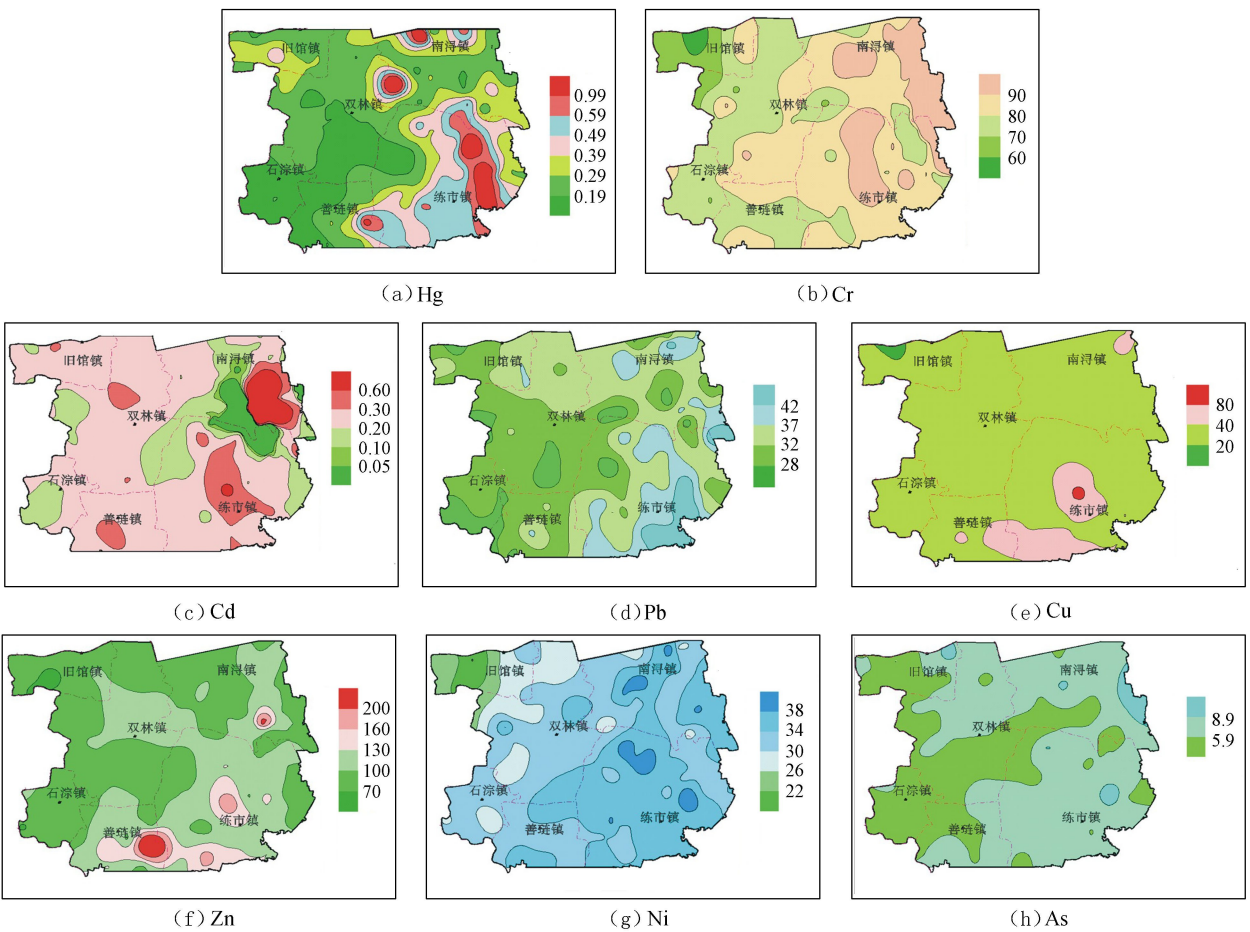


图2 土壤重金属质量比的空间分布特征(单位:mg/kg)

Fig.2 The spatial distribution characteristics of soil heavy metals(units:mg/kg)

环境质量标准》中二级标准作为污染评价阈值^[23],对研究区土壤中8种重金属现状进行评价,Cd、Hg、Ni、Zn、Cu、Cr、As、Pb的单因子污染指数均值分别为1.47、0.69、0.66、0.41、0.31、0.27、0.25、0.11,该地区土壤中Cd的污染情况突出,达到轻污染水平,超标率为14.17%;其他元素整体处于清洁水平,局部地区Cu、Zn、Hg存在污染;Cu、Zn污染超标率小于1%,Hg污染面积较大(如图2),总体超标率达到20%,大部分为轻污染,练市镇Hg存在中度污染。

该地区尼梅罗综合污染指数评价结果显示,研究区总体潜在生态危害属于轻微程度,56.67%的样品为清洁等级,30.83%的样品处于警戒线,受到轻度及以上污染的样品占12.50%,说明研究区受污染范围较大,局部地区污染比较严重。其中Cd的生态危害风险程度达中等级别,Hg存在轻微生态危害,其他重金属均未表现出生态危害。由于评价标准不同,导致评价结果存在差异,地质累积指数与土壤背景值联系紧密,能较好地反映土壤的污染情况,潜在生态危害指数参照GB 15618—1995《土壤环境质量标准》以及不同重金属的毒害权重^[30],更好地反映生态危害程度,因此可以看出,研究区受Cd、Hg污染情况明显,但Hg污染较轻微,未产生生态危害趋势,Cd生态危害趋势处于中等级别。

旧馆镇与双林镇交接处有呈带状的轻度污染区(图3),善璜镇与练市镇南部出现带状轻中度污染区,该地区木材加工业和桑蚕养殖比较发达,人为农业生产活动和工业发展导致该地区土壤重金属污染。练市镇中部地区重金属质量比均高于研究区其他地区,该地区总体污染情况处于尚清洁水平,说明练市镇土壤重金属综合污染程度较轻。研究区土壤清洁状况良,大部分农田土壤处于清洁和警戒线水平,整体潜在生态危害程度较轻,为保障粮食生产安全,应加强对该地区工业“三废”和农业生产活动规范管理。

为调查土壤Cd、Hg污染样点对稻米中对应元素质量比的影响,根据GB 15618—1995《土壤环境质量标准》,将土壤Cd、Hg超标的样品(未包含Cd污染区一件土壤样品Cd质量比异常样品)与对应稻米样品进行统计。

调查发现,Cd 超标土壤样品中 Cd 质量比均值为 0.438 mg/kg,稻米中 Cd 超标率为 16.67%;Hg 超标土壤样品中 Hg 质量比均值为 0.336 mg/kg,稻米中 Hg 质量比未出现超标现象。根据稻米中 Cd、Hg 质量比显示,Cd、Hg 质量比较高地区,稻米中对应元素质量比大部分未超标,说明受 Cd 和 Hg 污染的土壤均未表现出明显的生态危害效应。

3.5 土壤有机质与重金属的关系

土壤有机质质量比对重金属积累有重要的影响,通过对研究区土壤有机质与重金属的相关性进行分析,得到土壤有机质与重金属的非参数相关关系如下:Cr 为 0.105、Ni 为 0.124、Cu 为 0.305、Zn 为 0.323、Cd 为 0.569、Pb 为 0.376、As 为 0.2、Hg 为 0.332。由此可知土壤中 Cr、Ni、As 与有机质无显著相关性,且变异系数均较小,污染指数超标率均为 0,高值区分布于居民区(图 2);土壤有机质与 Cu、Zn、Cd、Pb、Hg 具有极显著相关性,说明影响土壤有机质和 Cr、Ni、As 等元素的因素存在差异,与影响 Cu、Zn、Cd、Pb、Hg 等元素的因素有共同作用。结合湖州市土壤背景值比较,说明该地区 Cr、Ni、As 主要受地质背景影响^[31-32],其次受城镇化发展影响。

诸多研究表明,土壤有机质质量比对重金属积累有重要影响,同时,土壤有机质对重金属累积的影响存在地区性差异^[33-35],根据对获得的数据进行相关性分析发现,该地区土壤有机质与 Cu、Zn、Cd、Pb、Hg 存在显著相关性,并且该地区土壤有机质的增加主要由于农业种植活动导致,因此,该地区农业种植活动对土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb、Hg 质量比存在一定影响,但农田周边环境对重金属累积也存在影响;Cd 污染区周边存在较多的中小型加工企业,可能是工业“三废”排放导致 Cd 污染的因素,Zn 污染区位于善琰镇与练市镇交界处,Pb 质量比较高的地区为主湖州市练市镇与其他地区交界处,各行政地交界处交通发达,Zn、Cu 来源于汽车轮胎磨损,Pb 来源于汽车尾气的排放^[36],该类现象集中出现在交通密集区和城镇化发达地区,其中,Pb 是土壤受机动车污染的标识元素^[17,31-32]。这一现象与刘亚纳等^[17]对不同功能区土壤重金属污染研究结果一致。

3.6 Cd、Hg 污染区土壤重金属主成分分析

在对湖州地区土壤重金属调查评价的基础上,分别选取南浔镇 Hg 污染区、Hg 非污染区,练市镇 Cd 污染区、Cd 非污染区选取 3 个采样点,采集不同深度土壤(0~20 cm、20~40 cm、40~80 cm),共计 36 件样品,对 Hg 污染区和 Cd 污染区的 Hg 和 Cd 元素的纵向分布和主成分进行分析,结果见表 3 和表 4。

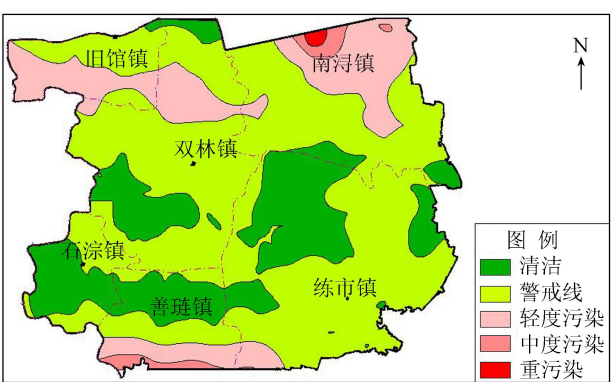


图 3 土壤重金属综合污染评价分布特征
Fig.3 The distribution characteristics of comprehensive pollution evaluations for soil heavy metals

表 3 不同深度土壤中 Hg、Cd 质量比
Table 3 The mass contents of Hg and Cd at different soil depths

元素	研究区	质量比/(mg·kg ⁻¹)		
		0~20 cm	20~40 cm	40~80 cm
Hg	非污染区	0.231±0.064	0.135±0.082	0.063±0.018
	污染区	0.719±0.295	0.938±0.430	0.073±0.037
Cd	非污染区	0.240±0.050	0.180±0.060	0.090±0.020
	污染区	1.060±0.270	0.250±0.050	0.090±0.020

表 4 土壤重金属主成分分析
Table 4 The results of principal component analysis(PCA) for soil heavy metals

元素	主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Hg	第一主成分	5.66	70.70	70.70	0.8	0.86	0.88	0.96	0.82	0.99	0.78	0.55
	第二主成分	1.34	16.80	87.50	0.56	0.26	-0.25	-0.16	-0.4	-0.05	-0.43	0.72
Cd	第一主成分	4.72	59.00	59.00	0.65	0.94	0.97	0.82	0.73	0.86	0.6	0.4
	第二主成分	1.68	21.00	80.00	0.71	0.1	0.05	-0.35	-0.3	-0.35	0.71	-0.57
	第三主成分	1.27	15.80	95.90	0.21	0.23	-0.17	-0.44	-0.6	0.37	0.03	0.68

通过多重比较的方式研究不同深度土壤中 Hg 质量比特征,非污染区土壤 Hg 质量比无显著性差异($P<0.05$),污染区和非污染区 40~80 cm 土壤 Hg 质量比无显著性差异($P<0.05$),说明研究区地质背景一致,湖州市土壤 Hg 背景值为 0.13 mg/kg,低于浙北地区土壤 Hg 的背景值^[37],污染区 0~20 cm、20~40 cm 深处土壤 Hg 质量比远大于非污染区,污染深度达到 40 cm,接近土心层,污染区土壤主要受外界污染因子影

响。Hg 污染区重金属全部信息可由 2 个主成分(特征值:5.66+1.34=7.00 个变量)反映 87.50%,第一主成分贡献率达 70.70%,特点表现在 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As 的质量比上有较高的正载荷量,这个组合受地质背景、农业种植活动和交通的共同影响,第二主成分贡献率为 16.80%,Hg 质量比的载荷量为 0.725,该地区 Hg 污染主要由渔业、蚕桑业生产过程中使用药剂导致,第二主成分主要受农业药剂(西力生、赛力散等)使用的影响。

Cd 污染区 0~20 cm 土壤 Cd 质量比超过国家土壤环境标准,通过多重比较的方式研究不同深度土壤中 Cd 质量比特征(表 3),非污染区不同深度土壤 Cd 质量比无显著性差异($P<0.05$),且污染区和非污染区 20~40 cm、40~80 cm 土壤 Cd 质量比均无显著性差异($P<0.05$),受地质背景的影响,污染区 0~20 cm 土壤 Cd 质量比与 20~40 cm、40~80 cm 呈显著性差异($P<0.05$),研究区土壤 Cd 背景值低于浙北地区土壤 Cd 背景值^[37],说明 Cd 污染主要集中在土壤表层。

Cd 污染区重金属全部信息可由 3 个主成分(特征值:4.72+1.68+1.27=7.67 个变量)反映 95.90%,第一主成分贡献率为 59.00%,在 Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 质量比上的载荷量较大,受地质背景、交通以及周边加工厂的影响;第二主成分贡献率为 21.00%,在 Cr 质量比上的载荷量较大,Cr 及其化合物主要来源于金属加工、电镀、制革和颜料等行业^[38],同时发现该地存在这类行业,因此,第二主成分主要受金属加工和制革行业的影响;第三主成分贡献率为 15.80%,且 Hg 质量比载荷量较大,主要受农业药剂使用的影响。

4 结 论

研究区农田土壤 Cd 均值高于土壤环境标准 II 类标准,其他重金属质量比均值低于土壤环境标准 II 类标准,Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg 平均质量比高于湖州市土壤背景值;土壤重金属空间变异特征表明该地区 Hg 污染由西向东逐渐增强,主要受农业活动影响,Cd 污染较严重的地区为南浔镇东南部和练市镇中部,主要受周边环境的影响。土壤 Hg、Cd 地质累积指数均值为 0.50、0.11,为轻-中度污染水平,土壤重金属单因子污染指数趋势由高到低依次为 Cd、Hg、Ni、Zn、Cu、Cr、As,土壤中 Cd 达到轻污染水平,该地区大部分土壤重金属未达到污染水平,仅有南浔镇中部、善链镇南部和旧馆镇与双林镇交接处一带出现轻度及以上污染,综合污染等级为轻污染;单一重金属潜在生态危害指数显示研究区 Cd 的生态风险程度为中等,其他重金属为轻微风险,综合潜在生态危害指数显示研究区生态风险为轻微等级,土壤 Cd、Hg 质量比超标地区未表现出明显的生态危害效应。

研究区土壤总体情况良好,总体污染程度不高,局部地区出现 Hg、Cd 超标,该地区在农业生产活动中应控制污染性较强的农药使用,同时加强对工业周边环境的管理,避免农田土壤受到重金属污染,威胁粮食安全。

参考文献:

[1] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社,1999:35-149.

[2] 刘春早,黄益宗,雷鸣,等. 湘江流域土壤重金属污染及生态环境风险评价[J]. 环境科学,2012,33(1): 260-265. (LIU Chunzao,HUANG Yizong, LEI Ming, et al. Soil contamination assessment of heavy metals of Xiangjiang River Basin[J]. Environmental Science,2012,33(1): 260-265. (in Chinese))

[3] TANG Xianjin, SHEN Chaofeng, SHI Dezhi, et al. Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: an emerging e-waste recycling city in Taizhou area, China[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,173(1/2/3): 653-660.

[4] HU Youning, WANG Dexiang, WEI Lijing, et al. Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan'an city of the loess plateau, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2014,110: 82-88.

[5] 王爽,李荣华,张增强,等. 陕西潼关农田土壤及重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学,2014,34(9): 2313-2320. (WANG Shuang, LI Ronghua, ZHANG Zengqiang, et al. Assessment of the heavy pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shangxi Province[J]. China Environmental Science,2014,34(9): 2313-2320. (in Chinese))

[6] 陈圆圆,孙小静,王军 等. 上海宝山区农业用地土壤重金属空间分异规律及分布特征研究[J]. 环境化学,2010,29(2): 215-219. (CHEN Yuanyuan, SUN Xiaojing, WANG Jun, et al. Spatial variability and distribution of heavy metals in soil of

- Baoshan District[J]. Environmental Chemistry, 2010, 29(2): 215-219. (in Chinese))
- [7] 李小平,徐长林,刘献宇,等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1241-1249. (LI Xiaoping, XU Changlin, LIU Xianyu, et al. Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji City, P. R. China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(4): 1241-1249. (in Chinese))
- [8] 高翔云,汤志云,李建和,等. 国内土壤环境污染现状与防治措施[J]. 江苏环境科技, 2006, 19(2): 52-55. (GAO Xiangyun, TANG Zhiyun, LI Jianhe, et al. Current situation of soil environmental pollution and countermeasures of prevention and control in China[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2006, 19(2): 52-55. (in Chinese))
- [9] 施加春,刘杏梅,于春兰,等. 浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 824-830. (SHI Jiachun, LIU Xinmei, YU Chunlan, et al. Spatial variability and risk evaluation of soil heavy metals in Taihu Lake Region of North Zhejiang Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 824-830. (in Chinese))
- [10] SUTER G W, EFROYMSON R A, SAMPLE B E, et al. Ecological risk assessment for contaminated sites[M]. Washington: Leais Publishers, 2000: 20-35.
- [11] 许朝阳,柏庭春,孟涛,等. 铁细菌 A 生物修复铅铜污染土壤[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 569-573. (XU Zhaoyang, BAI Tingchun, MENG Tao, et al. Bioremediation of soil contaminated by Pb^{2+} or Cu^{2+} using iron bacteria A [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(6): 569-573. (in Chinese))
- [12] 张光贵,黄博. 湖南洞庭湖水系重金属健康风险评价[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 14-17. (ZHANG Guanggui, HUANG Bo. Health risk assessment of heavy metals in Dongting Lake water system in Hunan Province, China[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 14-17. (in Chinese))
- [13] 林曼利,彭位华. 宿州市农村地下水重金属含量与健康风险评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 110-116. (LIN Manli, PENG Weihua. Concentrations and health risk assessment of heavy metals in groundwater in rural areas of Suzhou City[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 110-116. (in Chinese))
- [14] 郑军,张立,杨常青,等. 跨国界流域重金属污染溯源体系框架初步构建[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 57-61. (ZHENG Jun, ZHANG Li, YANG Changqing, et al. Initial framework construction of sources identification system of heavy metal pollution in trans-boundary river basin[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 57-61. (in Chinese))
- [15] 刘德鸿,王发园,周文利,等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 253-259. (LIU Dehong, WANG Fayuan, ZHOU Wenli, et al. Heavy metal pollution in street dusts from different functional zones Luoyang City and its potential ecological risk[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 253-259. (in Chinese))
- [16] 吴新民,李恋卿,潘根兴,等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1561-1567. (WU Xinmin, LI Lianqing, PAN Genxing, et al. Soil pollution of Cu, Zn, Pb, and Cd in different city zones of Nanjing[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1561-1567. (in Chinese))
- [17] 刘亚纳,朱书法,魏学锋,等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2322-2328. (LIU Yana, ZHU Shufa, WEI Xuefeng, et al. Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different function areas in Luoyang[J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2322-2328. (in Chinese))
- [18] 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: 4-12.
- [19] 中国地质调查局. 多目标区域地球化学调查规范(1: 250000): DD2005—2001[S]. 北京: 中国地质调查局, 2005.
- [20] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行): DD2005—2003[S]. 北京: 中国地质调查局, 2005.
- [21] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [22] HOU Wenyi, HUANG Fengru, CHEN Jingsheng, et al. Comparative study of assessment method for river particulate heavy metal pollution[J]. Scientia Geographica Sinica, 1997, 17(1): 81-86.
- [23] FORSTNER U. Lecture notes in earth science (contaminated sediments)[M]. Berlin: Springer Verlag, 1989.
- [24] CHAI Shiwei, WEN Yanmao, ZHANG Yalei, et al. Application of index of geoaccumulation to pollution evaluation of heavy metal in soil[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2006, 34(12): 1657-1661.
- [25] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 101-104.
- [26] 孙铁珩,周启星,李培军. 污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [27] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准: GB 1561—1995[S]. 北京: 国家环境保护总局, 1995.
- [28] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [29] 陈春霄,姜霞,立春会,等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11): 1842-1848. (CHEN Chunxiao, JIANG Xia, LI Chunhui, et al. Speciation distribution and potential ecological risk assessment of

heavy metals in sediments of Taihu Lake[J]. China Environmental Science,2011,31 (11): 1842-1848. (in Chinese))

[30] 陈静生,王忠,刘玉机. 水体金属污染潜在危害: 应用沉积学方法评价[J]. 环境科技,1989,9(1): 16-25. (CHEN Jingsheng, WANG Zhong, LIU Yuji. Metal Pollution Water Potential Hazards: Sedimentology method is applied to evaluation [J]. Environmental Science and Technology, 1989, 9(1): 16-25. (in Chinese))

[31] 李玉,俞志明,宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染源[J]. 环境科学,2006,27(1): 137-141. (LI Yu, YU Zhiming, SONG Xiuxian. Application of principal component analysis (PCA) for estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments[J]. Environmental Science,2006,27(1): 137-141. (in Chinese))

[32] 戴彬,吕建树,战金城,等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2015,36(2): 507-515. (DAI Bin, LYU Jianshu, ZHAN Jincheng, et al. Assessment of source, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shangdong Province[J]. Environmental Science,2015,36(2): 507-515. (in Chinese))

[33] 孙花,谭长银,黄道友,等. 土壤有机质对土壤重金属累积、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2011,34(4): 82-87. (SUN Hua, TAN Changyin, HUANG Daoyou, et al. Effects of soil organic matter on the accumulation, availability and chemical speciation of heavy metal[J]. Journal of Natural Science of Human Normal University,2011,34(4): 82-87. (in Chinese))

[34] 陈凤,濮励杰. 昆山市农业土壤基本性质与重金属含量及二者关系[J]. 土壤,2007,39(2): 291-296. (CHEN Feng, PU Lijie. Relationship between heavy metals and basic properties of agricultural soils in Kunshan county[J]. Soils,2007,39(2): 291-296. (in Chinese))

[35] 柴世伟,温琰茂,张云霓. 广州郊区农业土壤重金属含量与土壤性质的关系[J]. 农业生态环境,2004,20(2): 55-58. (CAI Shiwei, WEN Yanmao, ZHANG Yunxia, et al. Relationship between heavy metals and property of agricultural soil in Guangzhou suburb[J]. Rural Eco-Environment,2004,20(2): 55-58. (in Chinese))

[36] 张一修,王济,秦樊鑫,等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较. 环境科学学报,2012,32(1): 204-212. (ZHANG Yixiu, WANG Ji, QIN Fanxin, et al. Comparison of sources of metals in road-dust and soil in Guiyang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(1):204-212. (in Chinese))

[37] 董岩翔,郑文,周建华,等. 浙江省土壤地球化学背景值[M]. 北京:地质出版社,2007:129-152.

[38] 杨景辉. 土壤污染与防治[M]. 北京:科学出版社,1995:103-107.

+++++

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于1957年,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,绝大部分为国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版,国内外公开发行,每期定价15.00元,全年6期,共计90.00元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。

编辑部地址:210098 南京市西康路1号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部

电话/传真:025-83786343

E-mail:xb@hhu.edu.cn

http://kkb.hhu.edu.cn/web/indexxb.asp-d_id=53