

节能灯产地竹林土壤重金属污染的时空分布特征

张素^{1,2}, 梁鹏^{1,2}, 吴胜春^{1,2}, 张进^{1,2}, 曹志洪²

(1. 浙江农林大学 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 于2012年3月、6月、10月, 2013年1月在典型节能灯生产集聚区浙江省临安市高虹镇沿仇溪与猷溪选取17个采样点采集竹林土壤样品, 分析其理化性质并测量重金属质量分数, 运用统计学原理对土壤重金属进行描述性分析与聚类分析, 并研究其时空分布特征。结果表明: 研究区域竹林土壤平均pH值为pH 5.55, 呈弱酸性, 有机质质量分数为53.00 g·kg⁻¹, 土壤质地肥沃; 剔除异常值后, 除镍外, 其他重金属均属非正态分布, 空间变异程度为汞>砷>锌>镉>铜>镍>铬>铅>镉, 说明竹林土壤重金属已经受到人为影响; 汞的最高值为0.61 mg·kg⁻¹, 超出食用农作物产地环境质量标准(HJ/T 332-2006)和土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995); 其他重金属质量分数在土壤背景值附近, 表明研究区域部分竹林土壤已经受到汞的污染。相关性与聚类分析结果显示: 汞与其他重金属来源不同, 锌与铅、镍、铜、铬有极显著相关性关系($P<0.01$)。图2表3参29

关键词: 森林土壤学; 节能灯生产; 重金属; 汞; 聚类分析; 时空分布

中图分类号: S714; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)03-0484-07

Temporal and spatial distribution of heavy metal contamination in Gaohong, Lin'an, Zhejiang Province

ZHANG Su^{1,2}, LIANG Peng^{1,2}, WU Shengchun^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}, CAO Zhihong²

(1. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Gaohong, a small town situated at the west of Hangzhou, is one of the largest production bases of compact fluorescent lamps (CFLs) in China. To determine the influence of local CFL production on temporal and spatial distribution characteristics of heavy metals in ambient bamboo forest soils during the four seasons, a systematic survey was conducted in March, July, and October of 2012 and January of 2013 with a total of 272 soil samples collected at 17 sampling sites in CFL production areas. Each sampling site was 8 m×8 m, on which four topsoil samples (0-10 cm) per time were collected by a soil auger in the diagonal position. Each sample's representativeness was ensured by collecting four field replicates in a one-meter diameter area and then mixed together as one sample. The chemical properties and heavy metals contents of the samples were determined, and the spatial and temporal distribution characteristics of heavy metals in soils was elucidated using descriptive and cluster analysis. Results showed that the average pH value of the bamboo forest soils was 5.55, and the mean organic matter content was 53.00 g·kg⁻¹. The highest value for Hg was 0.61 mg·kg⁻¹, two times higher than the Environmental Threshold for Agricultural Soil (HJ/T 332-2006) and the Grade II Standard of

收稿日期: 2016-05-16; 修回日期: 2016-07-22

基金项目: 浙江省科技厅重点创新团队项目(2013TD12); 浙江省科技厅公益技术研究所发项目(2015C33050); 浙江省“三农六方”科技协作项目(CTZB-F150922AWZ-SNY1)

作者简介: 张素, 从事重金属环境地球化学研究。E-mail: 18868801653@163.com。通信作者: 张进, 副教授, 博士, 从事生物质废弃物的资源化利用及环境行为和环境效应等方面研究。E-mail: jzhang@zafu.edu.cn

Soil Environment Quality in China (GB 15618-1995). Spatial variability of the heavy metals was in an order of $Hg > As > Zn > Se > Cu > Ni > Cr > Pb > Cd$. After eliminating outliers, the heavy metals, except Ni, were non-normally distributed. The cluster analyses showed that there was a significant mutually associated compound contamination property between Zn and Pb, Ni, Cu, and Cr ($P < 0.01$), while Hg and the other heavy metals (Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, As, Se, and Cd) might have originated from different sources. Thus, even though these acidic bamboo forest soils with abundant organic matter had been polluted by mercury, an essential raw material for the CFL industry, and even though heavy metal contamination had possibly been induced by anthropogenic activities, it was possible that Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, As, Se, and Cd in the bamboo soils did not originate from the CFL industry. [Ch, 2 fig. 3 tab. 29 ref.]

Key words: forest soils; CFL production; heavy metals; mercury; cluster analysis; spatial-temporal distribution

土壤重金属污染是指人类活动导致土壤中重金属积累带来的生态环境质量恶化的现象^[1]。土壤重金属污染危害周期长, 范围广, 持续时间长, 污染隐蔽, 且具有生物不可降解性和相对稳定性等特点, 会导致大气和水环境质量的进一步恶化, 影响农作物产量和质量; 同时重金属会通过食物链不断地在生物体内富集, 最终在人体内蓄积而危害人体健康^[1]。节能灯生产是汞进入环境中的典型通道。有数据表明, 2008年全国生产48亿支荧光灯共使用汞78.2 t^[2-3], 1支节能灯损坏后渗入地下的汞, 会污染大约180 t水^[2]。浙江省临安市高虹镇是节能灯生产聚集区, 生产产量占到全国的1/3, 是临安经济支柱产业之一^[2]。研究显示, 该地大米样品中总汞和甲基汞的含量都显著高于商品大米样品^[4], 提示节能灯生产已经对周围汞环境造成影响; 而竹笋是临安经济的另一支柱产业, 其产值约占全市农、林、牧、渔业产值的5.0%, 2012年仅雷竹 *Phyllostachys violascens* 的栽植面积就达到216 km²^[5-6], 因此, 竹林土壤的安全至关重要。有关不同行业对周围土壤重金属污染的研究报道已较多^[7-10], 但关于节能灯生产对竹林土壤重金属的影响并不常见。本研究以浙江省临安市高虹镇为研究区域, 分析了竹林土壤重金属的时空分布特征, 并用统计学方法对数据进行分析, 以探明节能灯生产对竹林土壤中重金属含量及分布的影响。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

浙江省临安市高虹镇地处浙江省西北部, 平均海拔为65 m; 属于中亚热带季风气候区南缘, 温暖湿润, 四季分明; 土壤以偏酸性的红壤为主(pH 4.9)。据常年气象资料统计, 年平均气温为16.1℃, 月平均降水量为133.6 mm, 年日照时数为1 703.6 h。该地区水资源丰富, 中苕溪的2条支流仇溪和猷溪穿越境内。镇内建有一处日处理量2 000 t的污水处理厂^[2,11]。

1.2 样品采集

根据节能灯厂区的分布情况, 沿仇溪和猷溪布设17个采样点, 于2012年3月, 6月, 10月及2013年1月, 在采样点附近竹林采集土壤样品。按对角线原则选择8 m²范围内0~10 cm的表层土壤, 4个·样点⁻¹, 采集到的样品按四分法取约1.0 kg装入聚乙烯密封袋保存^[2]并带回实验室。除去石块碎屑和植物残根, 经冷冻干燥机(Labconoco, 120457321D, 美国)干燥后, 用研钵(玛瑙)研磨过100目筛, 装于聚乙烯密封袋待测。每次采样用全球定位系统(GPS)定位, 以保证4个季节采样位点一致。

1.3 实验方法

土壤样品 $[m(\text{土}):V(\text{水})=1.0:2.5]$ pH值用酸度计测定; 有机质质量分数用重铬酸钾-浓硫酸

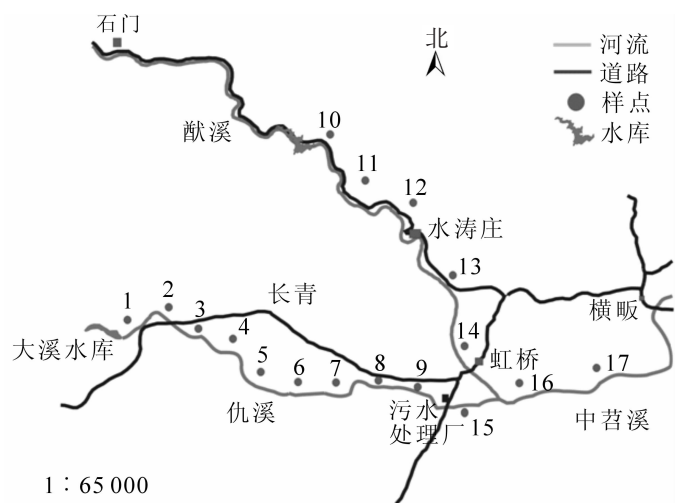


图1 高虹竹林土壤采样点分布图

Figure 1 Location of sampling sites in bamboo forest soil in Gaohong

外加热法测定。

重金属质量分数测定：准确称取 0.1 g 土壤样品，加入 3.0 mL 浓盐酸和 1.0 mL 浓硝酸，于石墨消解炉消解；待样品呈现灰白色时取下冷却，定容到 45.0 mL 并摇匀，离心，取上清液；采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Teledyne Leeman Labs, Prodigy 7, 美国)测定重金属质量分数。

总汞的测定：为除去可能附着的汞，将实验过程中用到的玻璃等仪器放入体积分数为 10% 的稀硝酸中浸泡一夜，冲洗干净放入马弗炉，500 °C 灼烧 0.5 h 后，自然冷却过夜，用锡箔纸包好备用。配制汞标，氯化溴(BrCl, 将样品中的汞氧化为 Hg²⁺)，盐酸羟胺(NH₂OH·HCl, 除去多余的 Cl⁻)，氯化亚锡(SnCl₂, 还原 Hg²⁺为 Hg⁰)等溶液。准确称取 0.1 g 样品于 25.0 mL 比色管中，加入 5.0 mL 的超纯水，5.0 mL 王水，消解炉消解 0.5 h；加入 0.5 mL 氯化溴继续消煮，隔 0.5 h 手动摇 1 次，6 h 后定容到 25.0 mL；放置 24 h 后^[2]用手动汞形态测试系统(Brooks Rand Labs, MERX-T, 美国)测定总汞质量分数。

1.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 20.0(IBM Analytics, 美国)统计软件分析试验数据；采用 Sigmaplot 10.0(Systat Software, Inc., 美国)作图。

2 结果与分析

2.1 竹林土壤 pH 值和有机质质量分数

本次研究共采集到竹林土壤样本 113 个，分析数据可知 pH 值为 pH 5.55±0.09，呈弱酸性；变异系数为 17.6%，表明研究区域竹林土壤具有较强的空间变异性。有机质质量分数为(53.00±21.80) g·kg⁻¹，表明该地质地肥沃，处于高肥力水平；变异系数为 41.2%，表明空间变异性较强^[12]，与 pH 值所得结果一致。

正态分布检验采用描述性统计频率分布正态性检验法，偏度系数小于 1 则为正态分布；结合实验数据发现，pH 值偏度 1.16，有机质偏度 1.38，均不符合正态分布。有数据显示^[13-15]，竹农为了提高竹笋产量，大量施用化肥和有机肥，单施化肥全年用量为 3.0 ~ 4.5 t·hm⁻²，化肥和有机肥配施的全年用量分别为 1.0 ~ 2.0 t·hm⁻² 和 80 ~ 100 t·hm⁻²。因此，可以推测研究区土壤有机质质量分数高很可能是竹农大量施肥造成的。

2.2 竹林土壤重金属质量分数统计分析

研究区竹林土壤重金属质量分数统计结果如表 1 所示。通过计算，对 9 种重金属进行了异常值处理，分别剔除了 3 个铬、2 个铜、1 个铅、1 个硒和 1 个汞的异常值。整体来看，研究区域竹林土壤重金属质量分数除镍外，其他均不符合正态分布。重金属质量分数表现为概率分布的正偏^[16-17]，表明研究区域的竹林土壤环境已经受到人为活动的影响。综合高虹镇节能灯生产、农业活动现状，可以推测节能灯生产排放的污水、废气，竹林施肥行为与土壤中重金属富集呈正相关关系。9 种重金属的变异程度为

表 1 高虹镇竹林土壤重金属质量分数统计

Table 1 Descriptive statistics summary of heavy metals concentration in bamboo forest soil in Gaohong

元素	分布类型	偏度	测量值范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数/%	背景值/ (mg·kg ⁻¹)	国家标准 I / (mg·kg ⁻¹)	国家标准 II / (mg·kg ⁻¹)
砷	非正态	1.603	0.90~12.80	3.59 ± 1.92	53.50	15.00	40.0	40.0
镉	非正态	1.850	0.02~0.42	0.11 ± 0.87	12.60	0.20	0.3	0.3
铬	非正态	1.735	3.24~27.61	11.79 ± 4.64	34.20	90.00	150.0	150.0
铜	非正态	1.134	2.39~34.40	12.22 ± 4.80	39.00	35.00	50.0	50.0
镍	正态	0.619	1.33~12.09	5.86 ± 2.03	34.60	40.00	40.0	40.0
铅	非正态	3.192	9.83~54.47	18.49 ± 5.41	29.40	35.00	80.0	250.0
硒	非正态	1.048	0.04~0.78	0.33 ± 0.14	39.70	-	-	-
锌	非正态	4.980	26.67~233.07	50.18 ± 24.37	48.60	100.00	200.0	200.0
汞	非正态	2.197	0.03~0.61	0.14 ± 0.12	81.98	0.15	0.3	0.3

说明：国家标准 I 为食用农作物产地环境质量标准(HJ/T 332-2006)(pH<6.5)，国家标准 II 为土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995)；-表示没有数值。各重金属质量分数值为每种重金属所有采样点的平均值±标准差。

汞>砷>锌>硒>铜>镍>铬>铅>镉; 其中汞的变异系数最大, 为 81.98%, 偏度为 2.20。这种空间变异性较大的现象表明研究区域的汞受外界条件干扰明显^[18]。研究区域内的汞质量分数最大值为 0.61 mg·kg⁻¹, 高于土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995) 和食用农作物产地环境质量标准(HJ/T 332-2006)(pH<6.5), 说明当地节能灯产业已经引起了竹林土壤汞的污染。

2.3 竹林土壤重金属时空分布特征

竹林土壤重金属的空间分布特征见表 2。除汞外, 其他重金属质量分数均低于土壤环境质量二级标准值, 说明这几种重金属未对研究区域内的竹林土壤造成污染。汞在 7 号, 10 号, 16 号采样点的质量分数分别为 0.37, 0.61, 0.47 mg·kg⁻¹, 超过了土壤环境质量二级标准; 尤其 10 号采样点的汞质量分数超过土壤环境质量二级标准的 2 倍。比对采样位置可知, 7 号采样点靠近节能灯厂聚集区, 10 号采样点位于污水处理厂附近, 16 号采样点位于仇溪和猷溪的汇合处。本结果与 LIANG 等^[19]发现的该地区污水处理厂周围水生生态系统中水体、沉积物以及生物体内汞含量均高于其他采样点的结果一致, 推测原因是高虹镇污水厂排放到附近水体中汞含量超标, 引水灌溉造成竹林土壤汞污染。雷竹是临安地区主要的竹类品种, 竹林土壤汞污染会导致潜在的健康风险, 需引起足够的重视。

表 2 高虹镇不同采样点重金属质量分数

Table 2 Concentration of heavy metals in different sampling sets in Gaohong

采样点	重金属质量分数/(mg·kg ⁻¹)								
	砷	镉	铬	铜	镍	铅	硒	锌	汞
1	4.18 ± 1.82	0.08 ± 0.09	10.03 ± 2.00	8.72 ± 2.34	5.80 ± 2.04	17.28 ± 6.08	0.26 ± 0.12	51.80 ± 20.13	0.07 ± 0.02
2	2.69 ± 0.99	0.10 ± 0.04	10.60 ± 1.45	16.58 ± 18.84	6.03 ± 1.48	18.61 ± 3.09	0.28 ± 0.10	45.69 ± 9.78	0.09 ± 0.03
3	2.48 ± 1.77	0.08 ± 0.04	10.10 ± 1.62	14.88 ± 4.76	5.61 ± 0.75	17.58 ± 2.92	0.27 ± 0.05	48.28 ± 3.45	0.07 ± 0.19
4	2.65 ± 0.73	0.05 ± 0.04	5.19 ± 1.36	7.99 ± 3.21	2.33 ± 0.80	18.58 ± 2.53	0.36 ± 0.09	31.06 ± 3.06	0.06 ± 0.17
5	2.64 ± 1.71	0.53 ± 0.99	9.07 ± 1.09	11.62 ± 4.56	4.14 ± 1.35	15.55 ± 2.11	0.27 ± 0.09	47.33 ± 9.59	0.15 ± 0.11
6	4.32 ± 1.07	0.15 ± 0.06	16.20 ± 1.77	17.02 ± 5.57	7.22 ± 0.55	24.35 ± 2.23	0.50 ± 0.08	70.90 ± 10.26	0.13 ± 0.03
7	3.87 ± 1.23	0.15 ± 0.03	18.07 ± 2.45	19.39 ± 3.16	8.47 ± 1.08	20.59 ± 2.38	0.40 ± 0.07	74.80 ± 5.35	0.37 ± 0.12
8	2.74 ± 1.50	0.11 ± 0.03	13.23 ± 5.41	10.06 ± 1.59	4.87 ± 0.97	16.75 ± 2.37	0.29 ± 0.14	45.08 ± 10.79	0.24 ± 0.11
9	2.77 ± 1.18	0.08 ± 0.04	11.54 ± 1.48	9.87 ± 4.40	6.36 ± 2.31	19.12 ± 6.37	0.33 ± 0.14	46.22 ± 13.40	0.14 ± 0.50
10	3.48 ± 3.47	0.07 ± 0.09	9.05 ± 6.03	12.87 ± 7.35	3.96 ± 2.11	16.83 ± 9.94	0.27 ± 0.39	41.64 ± 41.30	0.61 ± 0.50
11	2.74 ± 2.33	0.08 ± 0.15	11.72 ± 5.91	11.02 ± 14.15	5.15 ± 2.00	17.21 ± 3.01	0.34 ± 0.23	46.62 ± 60.92	0.22 ± 0.32
12	4.33 ± 1.74	0.13 ± 0.05	10.93 ± 0.12	11.78 ± 3.05	5.87 ± 0.61	20.37 ± 4.92	0.41 ± 0.14	52.73 ± 12.77	0.14 ± 0.10
13	4.21 ± 0.96	0.08 ± 0.07	10.81 ± 2.78	7.83 ± 3.71	6.25 ± 1.76	15.62 ± 1.75	0.34 ± 0.09	46.86 ± 9.31	0.13 ± 0.06
14	4.93 ± 2.49	0.09 ± 0.07	15.55 ± 5.03	12.46 ± 2.94	7.72 ± 1.05	15.96 ± 2.02	0.34 ± 0.06	45.75 ± 8.96	0.11 ± 0.08
15	3.94 ± 2.08	0.10 ± 0.08	11.68 ± 4.83	17.25 ± 4.02	6.35 ± 1.94	23.90 ± 8.68	0.37 ± 0.23	55.70 ± 13.21	0.12 ± 0.11
16	6.58 ± 0.81	0.11 ± 0.05	9.21 ± 2.35	9.37 ± 3.69	4.80 ± 1.42	14.80 ± 2.17	0.39 ± 0.09	45.33 ± 15.38	0.47 ± 0.15
17	4.36 ± 1.26	0.07 ± 0.06	8.89 ± 1.31	9.85 ± 1.83	4.43 ± 1.10	16.50 ± 1.88	0.41 ± 0.12	40.86 ± 10.96	0.11 ± 0.50

对不同季节测定的重金属质量分数的统计学分析表明: 9 种重金属质量分数在四季中不存在显著性差异。因此, 可以推断, 季节变化对研究区域内土壤中重金属质量分数没有显著影响。

2.4 竹林土壤重金属相关性与聚类分析

对研究区域土壤重金属进行相关性分析与聚类分析, 结果如表 3 所示: 在所有样品中, 铜与铬、铅; 镍与铬; 锌与铬、铜、镍、铅之间表现为极显著正相关关系($P<0.01$)。镍与铜; 硒与铅、砷; 汞与砷达到显著相关性($P<0.05$)。表明土壤中这些重金属的污染源相同^[20-21]或者存在伴生关系^[20,22]。其他重金属之间相关性不显著, 表明这些重金属来源可能差异较大。

聚类分析的结果(图 2)显示: 镉、硒、砷、镍、铬、铜和铅之间的聚类距离非常接近, 污染同源的可能性较大。镍、铬、铜、铅、锌的聚类距离也较为接近, 但与镉、硒、硒、镍、铬、铜和铅有一定的聚类距离, 其来源有一定的差异, 锌与另外 4 种重金属之间呈现相互伴随的复合污染现象。而汞与另外 8 种重金属的聚类距离相距甚远, 表现出其污染来源的独特性。由此可知: 除汞外, 其他重金属来源几乎相同, 可能是因为用于竹林灌溉的水源相同, 抑或是竹林施肥措施相同所致。而汞的来源独特, 极有

表3 高虹镇竹林土壤中9种重金属相关性分析

Table 3 Correlation analysis of the nine heavy metals in the bamboo forest soil in Gaohong

	砷	镉	铬	铜	镍	铅	硒	锌	汞
砷	1								
镉	-0.162	1							
铬	0.181	0.012	1						
铜	-0.090	0.113	0.612**	1					
镍	0.274	-0.081	0.890**	0.590*	1				
铅	-0.082	-0.109	0.410	0.662**	0.412	1			
硒	0.506*	-0.138	0.373	0.235	0.310	0.551*	1		
锌	0.206	0.173	0.812**	0.719**	0.784**	0.637**	0.480	1	
汞	0.491*	0.110	0.312	0.077	0.193	-0.144	0.310	0.324	1

说明：*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

可能与高虹节能灯生产引起的汞沉降有关，这与前面竹林土壤重金属统计分析及时空分布特征分析结果一致。

3 结论与讨论

土壤有机质是陆地生物圈的重要碳库^[23-24]，土壤酸碱性可以改变有机碳的溶解性^[25]，也可以通过改变土壤微生物活性和酶活性进而改变微生物种群的组成和数量，是影响土壤有机质的周转过程的主要因素之一^[26-27]。土壤有机质含量与土壤肥力水平密切相关，是衡量土壤肥力的重要指标^[18]。研究结果表明：高虹镇竹林土壤酸碱度平均值为pH 5.55，呈弱酸性；有机质质量分数平均值为53.00 g·kg⁻¹，处于高肥力水平；但无论pH值还是有有机质都处于中等强度以上的空间变异性。土壤重金属质量分数呈现明显的非正态分布，且空间变异性较大，9种重金属的变异程度为汞>砷>锌>硒>铜>镍>铬>铅>镉；其中，汞的空间变异系数高达81.98%，受人为影响较为严重；最高值为0.61 mg·kg⁻¹，超出食用农作物

产地环境质量标准(HJ/T 332-2006)(pH<6.5)和土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995)。镉、硒、砷、镍、铬、铜、铅、锌的质量分数多数与自然背景值持平，有个别样点略为偏高，但仍低于国家土壤环境质量标准。土壤中汞质量分数呈现明显的空间分布特征，在节能灯厂聚集区和污水处理厂附近明显高于仇溪与猷溪的下游，但四季变化不明显。通过聚类分析可知汞与其他重金属来源不同，有明显的独特性，节能灯厂是主要的汞污染源。同时锌与多数重金属有极显著的相关性，可能是受矿物伴生关系的影响。

此次研究数据可以确认高虹镇周边的竹林土壤已经受到不同程度的汞污染，而且进入土壤中的汞可以在硫酸还原菌或化学作用下，转化为毒性更强、能通过食物链产生生物放大效应的甲基汞，进而可以导致汞的生物积累效应的发生^[28]。因此，土壤中汞元素的富集不仅直接破坏土壤和水体的功能，还会影响植物、动物，最终威胁人体健康。汞对环境与生态系统的持续性、严重性危害已引起全球性的关注^[30]。中国汞污染研究处于刚刚起步阶段，严重滞后于社会发展需要，今后除应加强基础研究工作，还要对重要汞污染地区的污染状况、机制、环境效应开展研究，以全面掌握汞污染的来源、污染源分布以及环境治理现状^[29]。

4 参考文献

[1] 刘春阳, 张宇峰, 滕洁. 土壤中重金属污染的研究进展[J]. 污染防治技术, 2006, 19(4): 42-45, 64.

LIU Chunyang, ZHANG Yufeng, TENG Jie. Advances on pollution soils by heavy metals [J]. *Pollut Control Technol*,

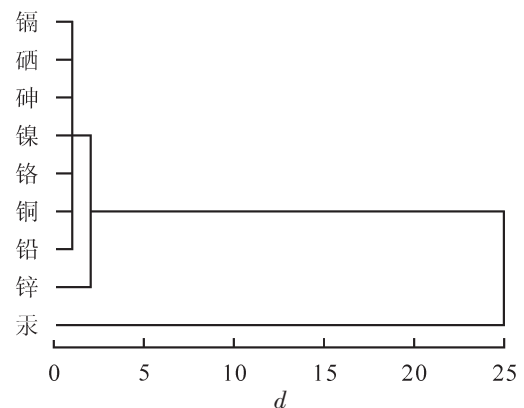


图2 高虹镇竹林土壤中9种金属聚类分析图
Figure 2 The clustering analysis of the nine heavy metals in the bamboo forest soil in Gaohong

- 2006, **19**(4): 42 – 45, 64.
- [2] 尤琼智. 节能灯生产区汞污染特征研究及人体健康暴露评估[D]. 浙江: 浙江农林大学, 2014.
YOU Qiongzhi. *Study on Characteristics of Mercury Pollution and Human Health Exposure Assessment in Fluorescent Lamps Production Area* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2014.
- [3] HU Yuanan, CHENG Hefa. Mercury risk from fluorescent lamps in China: current status and future perspective [J]. *Environ Int*, 2012, **44**(1): 141 – 150.
- [4] LIANG Peng, FENG Xinbin, ZHANG Chan, *et al.* Human exposure to mercury in a compact fluorescent lamp manufacturing area: by food (rice and fish) consumption and occupational exposure [J]. *Environ Pollut*, 2015, **198**: 126 – 132.
- [5] 方晓波, 史坚, 廖欣峰, 等. 临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(6): 1883 – 1891.
FANG Xiaobo, SHI Jian, LIAO Xinfeng, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for *Phyllostachys praecox* stands of Lin'an [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(6): 1883 – 1891.
- [6] 祝小祥, 谢国雄, 徐进, 等. 临安市雷竹林土壤肥力分析与培肥措施[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(28): 72 – 76.
ZHU Xiaoxiang, XIE Guoxiong, XU Jin, *et al.* The fertilization measures and analysis of soil fertility in the bamboo shoot groves (cv. *Ventricousinternode*) in Lin'an City [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, **29**(28): 72 – 76.
- [7] 王大勇, 吴效中, 张滋芳, 等. 汾河临汾段主要污染源周边土壤重金属来源及抗性植物调查[J]. 山西农业科学, 2015, **43**(10): 1290 – 1296.
WANG Dayong, WU Xiaozhong, ZHANG Zifang, *et al.* Origins of soil heavy metals and resistant plants around primary pollutant sources in the Linfen Area of the Fenhe River [J]. *J Shanxi Agric Sci*, 2015, **43**(10): 1290 – 1296.
- [8] 黄凤球, 纪雄辉, 鲁艳红, 等. 不同工业废弃物对稻田土壤中镉铅生物有效性及其形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1316 – 1321.
HUANG Fengqiu, JI Xionghui, LU Yanhong, *et al.* Effects of different industrial wastes on bio-availability of cadmium, lead and their formation in paddy soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2007, **26**(4): 1316 – 1321.
- [9] GONDAL M A, DASTAGEER M A, AL-ADEL F F, *et al.* Detection of highly toxic elements (lead and chromium) in commercially available eyeliner(kohl) using laser induced break down spectroscopy [J]. *Optics Laser Technol*, 2015, **75**: 99 – 104.
- [10] LU Huixia, WANG Yuzhen, WANG Jianyou. Recovery of Ni²⁺ and pure water from electroplating rinse wastewater by an integrated two-stage electrodeionization process [J]. *J Clean Prod*, 2015, **92**: 257 – 266.
- [11] 赵海侠. 浙西典型节能灯加工聚集区汞含量特征研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2013.
ZHAO Haixia. *Study on Mercury Content Characteristics in the Typical Energy-saving Lamps Industry Cluster District of Western Zhejiang Province* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2013.
- [12] 冯玲, 张威, 修光利, 等. 三江源区玉树县和玛多县土壤汞含量分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 262 – 267.
FENG Ling, ZHANG Wei, XIU Guangli, *et al.* Distribution of mercury in soil of Yushu and Maduo in the Three Rivers Source Region [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2014, **30**(2): 262 – 267.
- [13] CHENG Jinping, WANG Wenhua, JIA Jinping, *et al.* Expression of c-fos in rat brain as a prelude maker of central nervous system injury in response to methylmercury-stimulation [J]. *Biomed Environ Sci*, 2006, **19**(1): 67 – 72
- [14] 姜培坤, 徐秋芳, 周国模. 雷竹林土壤质量及其演变趋势[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [15] 陈闻, 吴家森, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤肥力及肥料利用率的影响[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 1021 – 1028.
CHEN Wen, WU Jiasen, JIANG Peikun, *et al.* Effects of different fertilization on soil fertility quality, fertilizer use efficiency, and bamboo shoot yields of *Phyllostachys praecox* stand [J]. *Acta Pedol Sin*, 2011, **48**(5): 1021 – 1028.
- [16] 夏学齐, 陈俊, 廖启林, 等. 南京地区表土镉汞铅含量的空间统计分析[J]. 地球化学, 2006, **35**(1): 95 – 102.
XIA Xueqi, CHEN Jun, LIAO Qilin, *et al.* Spatial statistics for cadmium, mercury and lead contents in topsoil of Nanjing [J]. *Geochimica*, 2006, **35**(1): 95 – 102.

- [17] LIN Yupin, CHANG T K. Geostatistical simulation and estimation of the spatial variability of soil zinc [J]. *J Environ Sci Health A*, 2000, **35**(3): 327 – 347.
- [18] ACIEGO PIETRI J C, BROOKES P C. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**(7): 1856 – 1861.
- [19] LIANG Peng, FENG Xinbin, YOU Qiongzhi, *et al.* Mercury speciation, distribution, and bioaccumulation in a river catchment impacted by compact fluorescent lamp manufactures [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, **23**(11): 10903 – 10910.
- [20] 丁明, 倪张林, 莫润宏, 等. 浙西南竹笋主产区土壤重金属环境质量分析与评价[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(33): 236 – 242.
DING Ming, NI Zhanglin, MO Runhong, *et al.* Analysis and evaluation of heavy metal environmental quality in bamboo shoot producing areas in south-west Zhejiang Province [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, **31**(33): 236 – 242.
- [21] 程芳, 程金平, 桑恒春, 等. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1062 – 1066.
CHENG Fang, CHENG Jinping, SANG Hengchun, *et al.* Assessment and correlation analysis of heavy metals pollution in soil of Dajinshan Island [J]. *Envir Sci*, 2013, **34**(3): 1062 – 1066.
- [22] 王济, 张凌云. 贵阳市表层土壤重金属污染元素之间的相关分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2006, **24**(3): 33 – 36.
WANG Ji, ZHANG Lingyun. The relativity between elements of heavy metal contamination in surficial soil of Guiyang, Guizhou [J]. *J Guizhou Norm Univ Nat Sci*, 2011, **24**(3): 33 – 36.
- [23] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, **46**(5): 851 – 860.
DAI Wanhong, HUANG Yao, WU li, *et al.* Relationships between soil organic matter content (SOM) and pH in topsoil of zonal soils in China [J]. *Acta Pedol Sin*, 2009, **46**(5): 851 – 860.
- [24] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, **298**(5870): 156 – 159.
- [25] VANCE, GEORGE F, DAVID, *et al.* Forest soil response to acid and salt additions of sulfate (III) solubilization and composition of dissolved organic carbon [J]. *Soil Sci*, 1991, **151**(4): 297 – 305.
- [26] MOTAVALLI P P, PALM C A, PARTON W J, *et al.* Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils: evidence from laboratory and simulation studies [J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, **27**(12): 1589 – 1599.
- [27] CURTIN D, CAMPBELL C A, JALIL A. Effects of acidity on mineralization: pH dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30**(1): 57 – 64.
- [28] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, **21**(2/3): 436 – 457.
FENG Xinbin, QIU Guangle, FU Xuewu, *et al.* Mercury pollution in the environment [J]. *Prog Chem*, 2009, **21**(2/3): 436 – 457.
- [29] 马跃峰, 武晓燕, 薛向明. 汞污染土壤修复技术的发展现状与筛选流程研究[J]. 环境科学与管理, 2015, **40**(12): 107 – 111.
MA Yuefeng, WU Xiaoyan, XUE Xiangming. Present situation and screening strategies of remediation technology for mercury-contaminated soil [J]. *Environ Sci Manage*, 2015, **40**(12): 107 – 111.