

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0529

乔胜英,刘江,胡方决,等.福建省德化县金矿区民间冶炼活动相关的土壤与大气汞污染特征[J].地质科技情报,2017,36(5): 216-221.

福建省德化县金矿区民间冶炼活动相关的 土壤与大气汞污染特征

乔胜英,刘江,胡方决,张昕,蔺强强,吕串,王瀚博

(中国地质大学(武汉)地球科学学院,武汉 430074)

摘要:民间小规模金矿混汞冶炼活动因缺乏环保措施常常造成周围环境严重的汞污染,目前已被认定为全球最大的人为汞污染排放源。福建省德化县山区土壤汞含量异常升高和该地区民间小规模金矿冶炼活动密切相关,对当地土壤总汞、大气总汞污染分布及土壤表面汞释放的调查研究表明:金矿区周边村子稻田土壤汞平均质量分数达 (5.180 ± 7.191) mg/kg,距金矿最近民间冶炼活动最集中的邱村稻田总汞质量分数平均值达到 (15.658 ± 12.726) mg/kg,随着距离金矿点越远民间冶炼活动减少,土壤总汞含量呈下降趋势。区域大气总汞平均质量浓度为 (36.4 ± 24.3) ng/m³,邱村大气总汞质量浓度平均值 (77.2 ± 42.4) ng/m³;工作区4个土-气界面汞通量均值分别为:华口 (109.6 ± 55.9) ng/(m²h),邱村 (97.1 ± 36.1) ng/(m²h),大安 (63.5 ± 12.6) ng/(m²h),中仙 (25.9 ± 23.5) ng/(m²h)。因地形复杂,微气象条件差异及土地利用差异等综合因素制约,土壤汞含量与大气总汞含量、释放通量间没有显著相关关系,华口测点土壤释汞通量最大。工作区民间金矿冶炼活动历史造成当地环境的汞污染及其环境影响将长期存在。

关键词:民间小规模金矿冶炼;汞污染;汞通量;稻田土壤;福建省

中图分类号:X14,X16

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2017)05-0216-06

汞因具有生物毒害作用,又可通过挥发作用进入大气远距离迁移沉降形成全球性循环而成为国际社会关注的优先污染物。因此不论人为源还是自然源排放的汞生物地球化学研究都是研究者和政府组织的关注热点^[1-2]。随着黄金价格上升、产量上涨,强烈的经济利益驱动下民间小规模金汞齐冶炼提取黄金的活动在许多发展中国家的金矿区都普遍存在。因手工小规模冶炼技术落后,汞使用量大而且没有环保措施导致汞直接进入周围环境,从而造成周边环境的严重汞污染,联合国环境署2013年认定小规模民间金矿冶炼为最大的全球人为大气汞排放源^[3]。

民间混汞黄金冶炼加热过程将促使金汞齐混合物中大量汞以单质汞形态进入大气,大气中的汞通过干湿沉降进入陆地表面和水体而使得环境中汞含量增加。土壤表层的汞在环境中转化会再次活化迁移,部分汞通过从土壤表面挥发进入大气环境,土-气界面汞通量可用通量箱原位分析^[4-5]。含有高浓度汞的冶炼废渣直接排放进入周围环境是民间金矿冶炼另一污染途径,废渣和废水通常一起排入周围环境,随水流搬运沉积在水体。进入水体的汞能够

发生甲基作用形成高毒性的甲基汞,甲基汞可以被生物吸收随食物链传递最终危害人体健康^[6-8]。

自20世纪80年代以来与金矿开采相关的陆地和水生态系统汞污染研究报道已有很多,报道最多的是南美洲(巴西、秘鲁、厄瓜多尔等)、亚洲(中国、菲律宾、印尼)、非洲等^[9-12]。国内金矿冶炼汞污染可分为大规模冶炼和民间小规模冶炼2类。大规模黄金冶炼技术成熟,汞元素循环利用效率高,估计每克金排放汞0.68g;而民间小规模黄金生产汞排放系数高达单位产量的15倍。民间小规模金矿开采活动主要集中在20世纪80年代到90年代,因技术落后及缺乏环保措施而造成了严重的污染,1995年全国金矿开采活动估计消耗汞400t,约有107t单质汞进入周围环境^[11]。金矿混汞开采技术于1996年被国家正式禁止,但在偏远地区仍有少量非法开采活动存在。虽然汞法冶炼污染活动停止了,但是金矿开采历史活动造成的环境汞污染问题却长期存在,国内松花江夹皮沟金矿、潼关金矿大规模金矿开采造成的周围环境汞污染特征已有报道^[11,13]。

在福建省地质调查院区域生态地球化学调查面

收稿日期:2017-05-14

编辑:刘江霞

基金项目:中国地质调查局与福建省人民政府生态地球化学调查研究专题(1212011087082)

作者简介:乔胜英(1970—),女,副教授,主要研究方向环境地球化学、应用地球化学教学与科研工作。E-mail:syqiao@cug.edu.cn

上工作中发现了闽中西部山区土壤汞异常高值现象,因工作区内有不少中小规模金矿点,结合实地调查了解到 20 世纪 80 年代末到 90 年代末该区民间小规模金矿开采冶炼活动繁盛。笔者拟通过对该区土壤、大气汞污染特征,土-气界面通量的调查分析,查明早期民间金矿冶炼活动产生的当地环境土壤、大气汞污染程度及土-气界面汞释放通量特征,为该区汞环境行为及生态效应等研究提供基础数据。

1 工作区特点与工作方法

工作区位于闽中屋脊戴云山区(图 1),具有地势高、地形复杂的特点。地貌以高坡度山地为主,山坡土壤由硅铝质红壤、黄红壤和黄壤呈垂向分带,水稻土呈星点状、浸染状沿沟谷分布,水稻土也是工作区村落周边最主要的农业用地。中亚热带季风气候,年平均气温 18℃,年降雨量 1 789 mm。海拔 800~1 650 m,由于地形复杂,不同海拔有着不同的微气象特点^[14]。

工作区内主要有邱村金矿、肖坂金矿和吉山金矿等中小规模金矿,20 世纪 80 年代末金矿被发现后周边村子的民间小规模冶炼活动也盛行一时,尤其是邱村金矿所在地邱村。民间混汞冶炼地点常常在村民家附近溪流边稻田旁,冶炼后的含汞废渣直接弃于近旁稻田中,随稻田引用溪水灌溉与放水而将废渣分散到村子周围稻田中。1996 年混汞法冶炼被国家禁止后,氰化法冶炼替代了混汞法冶炼,但民间混汞冶炼偶尔仍会发生。

2012 年 7—8 月期间在邱村、葛坑、大安、吉山、汤头、杨梅、华口、西华、濑头、中仙、苏峰 11 个村镇开展了调查工作,根据海拔及地理位置特点将这些村镇分为两条线,一条线是邱村、下美、葛坑、美洋、

吉山、汤头,海拔在 800~1 100 m 间变化;另一条线是杨梅、肖坂、华口、西华、蔡头,海拔相对较低,在 400~700 m 间,村点山谷相对更开阔,气温也高于邱村一线海拔较高的村子,工作期间了解到处于低海拔相对开阔村子的稻田常常两季耕作,一季水稻,另一季旱作种植烟叶。其他 2 个距金矿区较远的对照研究点中仙、苏峰平均海拔分别为 680,720 m,实地调查表明没有民间冶炼活动,同时地势上不受金矿污染区水系影响,其中苏峰为海拔较高狭窄山区,人口较少,中仙相对开阔,是人口集中的大镇。土-气界面汞通量测试工作选择邱村、大安、华口和中仙 4 处开展。

2 采样及测试方法

土壤样品采集以各村周边稻田土为主,同时在稻田附近山脚处采集自然山地土壤样品用于稻田土的对比。每个村采集 5~10 份土壤样品,每份样品取采样点周边表层至 20 cm 深土壤,为保证采样土壤的代表性,同时在采样点周围 5 m 采集 3~5 个子样混合为一份土壤样品,工作区内共采集水稻土样品 81 份,山地土样品 20 份。样品采集后密封保存于聚乙烯封口袋中以避免交叉污染。于室内通风避光处自然风干后,去除其中植物残体、碎石等杂物,四分法取样经玛瑙研磨过 0.071 mm(200 目)尼龙筛后测试,王水消解冷原子荧光分析完成土壤总汞测试,分析检出限 0.005 mg/kg,同时采用国家标准物质 GSS9~GSS16 进行质量控制,分析质量参数准确度在 1%~5%之间,精确度小于 10%。

大气汞含量通过美国 Brooks 公司进口金砂捕汞管捕获大气汞,在捕汞管前连接干燥剂与滤膜过滤去除水分及酸性气体干扰与粉尘,用大气采样器以 0.5 L/min 的流量定时采样 30 min;同时测试温度、湿度和光照强度等环境气象参数。当天采集的大气样品在室内采用 RG-BS 数字智能测汞仪测定经高温加热释放的捕汞管自动计算大气汞浓度^[15]。

土-气界面汞通量测试采用动态通量箱法^[16-17],由四氟乙烯薄膜材料制成一面开口的长方体(60 cm×20 cm×10 cm),测定时将通量箱开口朝下放置在待测地面上,四周用土壤密封以防止漏气。两端分别设置进气口、出气口(进气口距地表 2 cm 高有一排 5 个直径 1 cm 的圆孔,出气口有 2 个直径约 1 cm 的圆孔),进气口附近设置捕汞管以采集进气汞含量,出气口用聚四氟乙烯管与 2 个大气采样器连接,一根管连接捕汞管用于采集通量箱出气大气汞含量,每次采集大气 30 min,流量设置为 0.5 L/min;另一出气口用大气采样器进行抽气(流量设置为 1.5

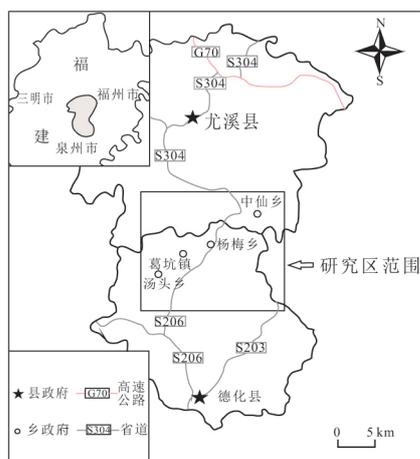


图 1 研究区地理位置示意图
Fig. 1 Location of the study area

L/min),使通量箱中空气的流速保持在120 L/h,保持通量箱内空气流动。每天每个监测点在7:00到19:00间分4个时段分别采集土-气界面汞交换通量。使用微型气象仪器测定太阳辐射强度、大气温度、大气相对湿度并记录。当日回室内完成大气汞含量测试。所有野外用材料均在室内用10%稀盐酸浸泡清洗,蒸馏水清洁,封口保存。野外使用过程中每日简单用稀盐酸清洁,再用纯净水清洗。

根据质量守恒定律,土-气界面汞释放通量的计算公式为:

$$F = (\rho_{out} - \rho_{in})Q/A$$

式中: F 为汞释放通量[ng/(m²h)]; ρ_{out} 为流出通量箱的气态汞质量浓度(ng/m³); ρ_{in} 为进入通量箱的气态汞质量浓度(ng/m³); Q 为通量箱内的空气流量(m³/h); A 为通量箱的底面积(m²)。

3 结果与讨论

3.1 土壤总汞特征

工作区土壤总汞质量分数具有质量分数高、变化范围大的特点(表1),土壤总汞平均质量分数为4.302 mg/kg,其中稻田土总汞平均质量分数为5.180 mg/kg,山地土总汞平均质量分数为0.745 mg/kg,而该地区的区域生态地球化学调查得到表层土壤总汞平均值为0.245 mg/kg,与福建省土壤背景值(0.081 mg/kg)^[18]相比富集系数达53倍。稻田土壤总汞质量分数相对国家土壤环境质量标准(GB15618-2008)二级标准水田(0.3 mg/kg)的超标率达81%。

表1 工作区土壤总汞统计

Table 1 Statistics of total Hg in soils of the study area

土壤类型	平均值	最小值	最大值	标准差	变异系数	样品数
	$w_B/(mg \cdot kg^{-1})$					
稻田土	5.180	0.083	46.840	7.191	1.388	81
山地土	0.745	0.049	4.320	1.094	1.468	20
总体	4.302	0.049	46.840	6.689	1.555	101

当年村民的作坊式冶炼活动都是在村子外溪流边稻田旁开展,由于技术落后汞用量大,没有任何处理措施,汞气直接排放,冶炼废渣也是直接弃于旁边稻田中,随着稻田引溪水灌溉含汞矿渣分散混入周边稻田。从稻田土壤与邻近山地土壤样品汞质量分数平均值对比(表1)可以看出稻田土壤汞质量分数显著增加,表现为严重污染,附近山地土壤的汞质量分数也明显高于福建省土壤背景值,表明在该区邻近环境都呈现出一定程度的汞污染现象。

工作区各村稻田土壤总汞平均值与金矿点空间距离密切相关(图2),邱村金矿所在地邱村的稻田

土壤总汞质量分数平均值达到15.658 mg/kg,自邱村向西一直到大安,离金矿越远的村点稻田土壤总汞平均值明显下降,大安稻田土壤总汞平均值降为2.760 mg/kg。因吉山村也有一小规模金矿点,稻田土壤总汞平均值升至9.619 mg/kg,成为第二个汞质量分数峰值,而到汤头村稻田总汞平均值降为1.643 mg/kg。同样另一条路线肖坂到苏峰各村稻田土壤总汞质量分数的变化特点是,自西向东距金矿最近的肖坂稻田土壤总汞平均值最高为5.728 mg/kg,自肖坂向东一直到苏峰显著降低,随着距金矿距离增加稻田土壤的总汞质量分数明显降低,到中仙土壤总汞质量分数平均值已降至0.391 mg/kg。对照点苏峰稻田土壤总汞质量分数平均值为0.150 mg/kg已小于区域土壤调查背景值。

工作区土壤总汞质量分数变化特征和密云金厂周围土壤总汞质量分数平均值(9.57 mg/kg)^[19]、潼关金厂附近土壤总汞质量分数范围相似(0.9~7.6 mg/kg)^[11]。夹皮沟金矿区土壤总汞(0.506~1.864 mg/kg)污染程度相对较低^[13],笔者认为夹皮沟金矿区汞污染主要通过大气扩散沉降影响土壤环境。国外亚马逊地区民间金矿冶炼活动主要通过废气和废渣随废水排放进入河流造成水域污染^[4,20], Santos-Francés等^[20]认为在金矿区附近使用混汞冶炼活动是导致矿区附近土壤汞含量增高的主要原因,金矿区土壤汞污染常呈现距金矿距离增加汞污染降低的特点。此次工作区汞污染源于20世纪90年代民间金矿小规模混汞冶炼活动,与其他研究报道不同之处在于工作区主要为中高山区,民间冶炼活动汞污染集中于稻田土壤中。各村稻田土壤总汞含量变化随着距金矿距离增加村民民间冶炼活动减少而表现出降低的趋势,稻田土壤总汞含量变化趋势与野外调查中当地居民反映的历史民间金矿混汞

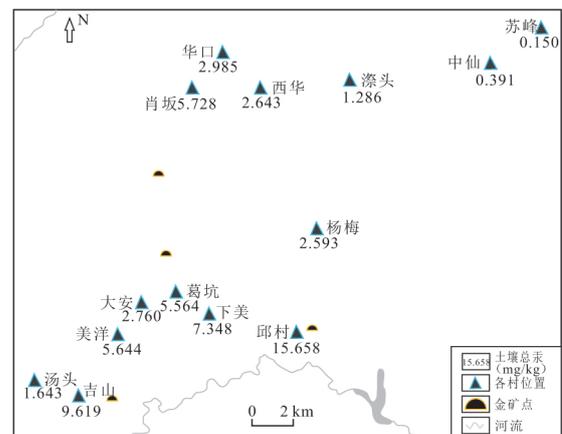


图2 工作区各村稻田土壤总汞平均值与金矿点分布示意图

Fig. 2 Distribution of average total Hg value in paddy soils and gold mine sites

冶炼活动强度相符。

3.2 大气汞含量特征

工作区各村的大气汞质量浓度统计结果见表 2。工作区总体的大气汞质量浓度平均值为 36.4 ng/m³,其中邱村大气汞质量浓度平均值为 77.2 ng/m³,背景对照点苏峰大气汞质量浓度平均值最低为 16.5 ng/m³,除背景点外工作区多数村子大气汞质量浓度平均值高于文献报道的邻近城市厦门大气汞平均质量浓度 11.037 ng/m³^[21],且远高于北半球大气汞质量浓度背景值 1.5~2.0 ng/m³^[22]。

表 2 研究区各村大气汞浓度分布统计

Table 2 Statistics of total Hg in atmosphere in the study area

地点	邱村	汤头	吉山	大安	葛坑	华口	西华	濠头	中仙	苏峰
样品数量	33	35	33	35	35	36	35	33	33	32
	$\rho_B/(ng \cdot m^{-3})$									
最大浓度	206.1	169.1	54.3	42.3	75.4	52.1	52.5	38.2	40.1	26.5
最小浓度	18.5	8.1	14.3	13.1	6.9	4.9	12.4	13.3	5.2	9.4
平均浓度	77.2	34.7	34.9	32.2	33.7	38.8	32.6	23.1	17.9	16.5
标准偏差	42.4	13.8	9.5	9.0	14.4	11.8	10.6	7.2	7.6	5.2
与苏峰比值	4.68	2.10	2.11	1.95	2.04	2.35	1.97	1.40	1.08	1

工作区地处闽中西部山区的邱村大气汞质量浓度显著高于其他研究点位,应该与以下 2 个原因有关:①邱村因距金矿最近,民间金矿冶炼活动很集中;②该村所在地海拔较高,四面环山,民间冶炼直接在山谷边溪流边开展,冶炼后的矿渣就近弃于附近的稻田中。邱村大气汞质量浓度与张刚等^[13]报道的松花江上游夹皮沟金矿区中污染对照点夹皮沟小镇平均质量浓度 77.2 ng/m³(质量浓度范围 29.99~138.17 ng/m³)相近,其他村镇大气汞质量浓度与夹皮沟金矿区边缘对照点老金厂大气汞平均质量浓度(22~39 ng/m³)相近。邱村大气汞质量浓度也和 Feng 等^[11]报道潼关金矿冶炼厂下风向 200~500 m 范围内大气汞质量浓度范围 9~250 ng/m³相当;其他村点大气汞质量浓度与距潼关金矿 1 000 m 大气汞质量浓度 7~66 ng/m³、平均 29 ng/m³相当。

张刚等^[13]报道的夹皮沟中国黄金第一矿瞬时大气汞质量浓度为 1 004.24 ng/m³。据报道,厄瓜多尔 Portovelo 的金矿镇金矿提炼厂附近的大气汞质量浓度高达 2 356.0 ng/m³,邻近城区的大气汞质量浓度为 214.0~574.0 ng/m³^[9],可以推测工作区当年小规模和民间混汞冶炼活动是目前环境汞污染来源。此次大气汞测量区域主要是山谷居民集中的村落,地形上除邱村测点四面环山外,其他都位于山沟呈狭长状沿溪流分布,当年冶炼活动也是在村外溪流边稻田旁开展,民间冶炼活动由于技术落后,没

有任何防护措施,废气废渣直接进入当地环境后稻田成为主要污染汇,早年受到冶炼活动汞污染的稻田成为目前散布于山谷的面状污染源。

因大气汞量与其来源与转化等环境气象条件间有着复杂机制作用,工作区的土壤总汞含量与大气总汞含量之间没有显著相关关系,只有邱村土壤总汞平均含量与大气总汞平均含量都显著高于其他研究点位,分析认为与其土壤汞污染严重又四面环山汞气挥发扩散条件相比其他村两山夹一沟的地形扩散条件差的制约有关。

3.3 土-气界面汞通量

土壤-大气界面汞通量测试工作主要在工作区 4 个村子分别开展了 2~3 d,土-气界面汞通量日变化趋势见图 3,汞通量结果统计见表 3。

表 3 土-气界面汞通量监测结果统计

Table 3 Summary of Hg fluxes between soil and atmosphere

采样点	样品数	监测日期	最大值	最小值	日平均值	标准偏差	点平均值
大安	8	7月19日	73.6	39.6	52.9	14.6	63.5
		7月20日	89.8	68.7	74.1	10.5	
		7月21日	74.6	55.8	63.8	7.5	
邱村	14	7月22日	101.8	72.5	91.5	13.2	97.1
		7月23日	274.0	72.6	130.4	87.6	
		7月28日	42.6	-49.6	6.3	39.4	
中仙	14	7月29日	31.2	6.6	18.6	11.4	25.9
		7月30日	74.2	34.8	49.0	18.5	
		7月31日	175.9	16.4	105.9	77.4	
华口	12	8月1日	219.3	106.8	186.6	53.5	109.6
		8月2日	73.4	-14.4	36.5	36.9	

“—”表示土-气界面为大气汞沉降

4 个通量测试点中土-气界面汞通量(平均值)的最大值出现在华口地区,平均值可达到 109.6 ng/(m²h),最小值出现在中仙地区,平均值为 25.9 ng/(m²h)。采样点每日汞通量具有近似的变化趋势,即正午(10:00-12:00)及午后(12:00-14:00)达到最大值,清晨及傍晚其值最小。此次通量测试主要时间段在白天,以汞气释放为主,与其他文献报道一致^[23-25]。实际监测 48 次测量结果显示有 46 次为土壤释放,仅 2 次为大气沉降,2 次大气沉降数据与当时的降雨作用有关。土壤汞的释放通量通常在午后达到最大值,以土壤汞的释放为主,傍晚监测显示大气汞的沉降,总体上土壤汞释放通量远大于大气汞的沉降通量。与国内夹皮沟金矿区报道的监测点土-气界面汞平均通量从金厂到边缘对照点的汞通量均值变化区间相似(老金厂 129.13 ng/(m²h),二道沟 98.64 ng/(m²h),二道岔 23.17 ng/(m²h))^[13],选作对照点的中仙土-气界面汞通量与位于西南的贵州红枫湖地区农田土壤报道的夏季土

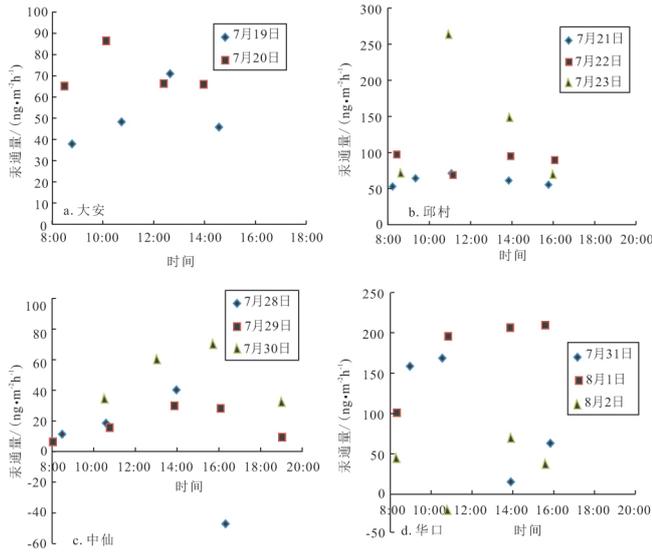


图3 土-气界面汞通量日变化示意
Fig.3 Hg fluxes between soils and atmosphere

壤汞通量平均值(27.4 ng/(m²h))接近^[17]。

几个监测点土壤总汞、大气汞与土-气界面汞通量均值统计(表4)的比较发现,华口测点土壤总汞质量分数在几个测试点并不是最高,但是土-气界面汞释放通量反而高出土壤汞污染最严重的邱村。结合野外调查中气象资料及环境特点分析认为,华口村所处海拔较低,山谷相对平缓开阔,测试期间平均气温要高于海拔较高的邱村,同时邱村四面环山的地形特点也可能影响到实际地表太阳辐射与日照时间;这些地形特点及环境因子可以在一定程度上解释华口村所处土壤总汞含量虽然比邱村低很多,但汞气释放强度超过邱村的现象。也有研究者认为在无人为汞污染干扰的环境条件下,土壤释汞通量与土壤总汞含量之间存在一定的对数相关关系^[26-27];但在污染地区土壤总汞含量不再是控制土-气界面通量的主要因素,气象因子等其他因素对土-气界面汞交换的影响则表现得更加重要^[17,23]。研究区复杂地形产生的微气象变化对环境汞迁移行为的影响还有待进一步深入研究。

表4 土-气界面汞通量均值与土壤总汞含量对比

Table 4 Hg fluxes and total Hg in soils in the fluxes monitor sites

地点	海拔/m	土壤总汞/ (mg·kg ⁻¹)	土壤释汞通量/ (ng·m ⁻² h ⁻¹)
邱村	863	4.32	97.1
大安	932	2.47	63.5
华口	415	0.67	109.6
中仙	684	0.24	25.9

4 结 语

闽中山区因早期民间小规模金矿混汞冶炼活动而造成当地环境汞严重污染,工作区稻田土壤总汞平均值质量分数为 5.180 mg/kg,距金矿最近的邱村稻田土壤总汞质量分数平均值高达 15.658 mg/kg,而对照点苏峰的土壤总汞质量分数平均值为 0.150 mg/kg。各村大气总汞质量浓度平均值为 36.4 ng/m³,邱村大气汞质量浓度平均值最高达 77.2 ng/m³,是对照点苏峰的 4.68 倍;土-气界面汞通量邱村平均值为 97.1 ng/(m²h),华口平均值为 109.6 ng/(m²h),中仙汞平均值为 25.9 ng/(m²h)。

研究区稻田土壤总汞含量随着距金矿距离增加而降低,与早期民间小规模金矿冶炼活动强度密切相关。从土壤、大气汞含量分布特征推断早期民间冶炼活动主要集中于村子周边稻田旁,在污染活动停止十多年后稻田土壤的汞污染成为周围环境汞污染源。由于地形复杂、微气象条件差异大,土壤汞含量与大气汞含量、土壤界面汞释放量之间没有显著相关关系,地形条件、气象因子(太阳辐射、温度等)等因素对土-气界面汞释放起着控制作用。

参考文献:

- [1] Pirrone N, Cinnirella S, Feng X, et al. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources[J]. Atmos. Chem. Phys., 2010, 10(13): 5951-5964.
- [2] United Nations Environment Programme(UNEP). Global mercury assessment[R]. UNEP: Geneva, Switzerland, 2002.
- [3] United Nations Environment Programme(UNEP). Global mercury assessment 2013: Sources, emissions, releases and environmental transport[R]. UNEP: Geneva, Switzerland, 2013.
- [4] Malm O. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon [J]. Environmental Research: Section A, 1998, 77(2): 73-78.
- [5] Tomiyasu T, Kono Y, Kodamatani H, et al. The distribution of mercury around the small-scale gold mining area along the Cikaniki river, Bogor, Indonesia [J]. Environmental Research, 2013, 125(3): 12-19.
- [6] Garcia-Sanchez A, Contreras F, Adams M, et al. Atmospheric mercury emissions from polluted gold mining areas (Venezuela)[J]. Environ. Geochem. Health, 2006, 28(6): 529-540.
- [7] Poissant L, Pilote M, Constant P, et al. Mercury gas exchanges over selected bare soil and flooded sites in the bay St. Francois wetlands (Quebec, Canada) [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(25): 4205-4214.
- [8] Gustin M S, Engle M, Ericksen J, et al. Mercury exchange between the atmosphere and low mercury containing substrates [J]. Appl. Geochem., 2006, 21(11): 1913-1923.
- [9] Gonzalez-Carrasco V, Velasquez-Lopez P, Olivero-Verbel J, et al. Air mercury contamination in the gold mining town of por-

- tovelo,ecuador[J]. Bull. Environ. Contam. Toxicol. ,2011,87(3):250-253.
- [10] Rajae M, Long R, Renne E P, et al. Mercury exposure assessment and spatial distribution in a ghanaiian small-scale gold mining community[J]. Int. J. Environ. Res. Public Health, 2015,12(9):10755-10782.
- [11] Feng X B, Dai Q, Qiu G, et al. Gold mining related mercury contamination in Tongguan, Shaanxi Province, PR China[J]. Applied Geochemistry, 2006,21(11):1955-1968.
- [12] Williams T M, Apostol A N, Miranda C R. Assessment by hair analysis of mercury exposure among mining impacted communities of Mindanao and Palawan, the Philippines[J]. Environ. Geochem. Health, 2000,22(1):19-31.
- [13] 张刚, 王宁, 王媛, 等. 松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征[J]. 环境科学, 2012,33(9):2953-2959.
- [14] 百度百科地理组. 德化县人民政府网. http://baike.baidu.com/link?url=2hglhlf2innM-HyaCBX7u4k1f4iSnYptkdZ_leLRvXqgm_kbXGzPxS7vDtjtp3Bhk9n3Je4MCPclmeQmMx-be0K.
- [15] 汤庆合, 王文华, 黄丽华. 镀金石英砂吸附-吸附大气中痕量汞的直接测定方法[J]. 分析测试学报, 2007,26(2):252-254.
- [16] Eckley C S, Brian B. Gaseous mercury emissions from urban surfaces: Controls and spatiotemporal trends[J]. Applied Geochemistry, 2008,23(3):369-383.
- [17] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 夏季红枫湖地区农田土壤大气界面汞交换通量的初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004,23(1):19-23.
- [18] 中国环境监测总站. 中国土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:87-460.
- [19] Chen Xiaomin, Ji Hongbing, Yang Wen, et al. Speciation and distribution of mercury in soils around gold mines located upstream of Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2016,63(4):1-9.
- [20] Santos-Francés F, García-Sánchez A, Alonso-Rojo P, et al. Distribution and mobility of mercury in soils of a gold mining region, Cuyuni river basin, Venezuela[J]. Journal of Environmental Management, 2011,92(4):1268-1276.
- [21] 李红英, 罗津晶, 李金兰. 厦门市秋冬季节大气汞污染调查[J]. 环境科学与管理, 2009,34(9):48-52,194.
- [22] Lamborg C H, Fitzgerald W F, Donnell J O, et al. A non-steady state compartmental model of global-scale mercury biogeochemistry with interhemispheric atmospheric gradients[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002,66(7):1105-1118.
- [23] 高锦玉, 王昊, 蔡武, 等. 土壤汞通量影响因素研究进展[J]. 地球与环境, 2016,44(2):261-269.
- [24] 付学吾, 冯新斌, 王少锋, 等. 贵阳市2种不同类型草地的汞释放通量[J]. 环境科学研究, 2007,20(6):33-37.
- [25] 马明, 王定勇, 申源源, 等. 中亚热带阔混交林土壤-大气界面汞通量研究[J]. 环境科学, 2014,35(1):85-92.
- [26] Zehner R, Gustin M S. Estimation of mercury vapor flux emissions from natural substrate in Nevada[J]. Environmental Science and Technology, 2002,36(19):4039-4045.
- [27] Nacht D M, Gustin M S, Engle M A, et al. Atmospheric mercury emissions and speciation at the sulphur bank mercury mine superfund site, Northern California[J]. Environmental Science and Technology, 2004,38(7):1977-1983.

Artisanal Gold Mining Related Mercury Pollution in Soils and Atmosphere in Mountains in Dehua County, Fujian Province

Qiao Shengying, Liu Jiang, Hu Fangyang, Zhang Xi, Ning Qiangqiang, Lü Chuan, Wang Hanbo
(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Artisanal and small-scale gold mining (ASGM) poses serious mercury contamination to surrounding ecosystems. At present ASGM is the largest source of global Hg emissions. Elevated mercury of soils found through eco-geochemistry survey in mountain areas in middle Fujian Province, has close relationship with former artisanal gold mining activities. Investigations on the distribution of mercury in soils, atmosphere and fluxes from soil to atmosphere yield the following results. The mean value of total Hg concentration in paddy soils around villages is $(5.180 \pm 7.191) \text{mg/kg}$, the highest mean value of total Hg concentration in paddy soils, $(15.658 \pm 12.726) \text{mg/kg}$ in Qiucun, and the mean value of total Hg in paddy soils decreases with the distances between villages with the gold mine sites increased. The average mercury concentration in the atmosphere is $(36.4 \pm 24.3) \text{ng/m}^3$, and the mean value of Qiucun's $(77.2 \pm 42.4) \text{ng/m}^3$; the mercury fluxes to the atmosphere from four sites are Qiucun $(97.1 \pm 36.1) \text{ng}/(\text{m}^2 \text{h})$, Da'an $(63.5 \pm 12.6) \text{ng}/(\text{m}^2 \text{h})$, Huakou $(109.6 \pm 55.9) \text{ng}/(\text{m}^2 \text{h})$, Zhongxian $(25.9 \pm 23.5) \text{ng}/(\text{m}^2 \text{h})$. There is no significant relationship between soil Hg with the total Hg in ambient air and mercury fluxes, due to solar radiation, temperature of the micro-climate feature and complex topography conditions. The mercury pollution from the historical ASGM to the local environment will long exist in the area.

Key words: artisanal and small-scale gold mining; mercury pollution; mercury flux; paddy soil; Fujian Province