

芜湖市驾校微环境地表灰尘中汞的分布特征及影响因素

王月¹, 方凤满^{1,2}, 吴明宏¹, 林跃胜^{1,2}, 匡盈¹, 武慧君¹, 汪剑飞¹

(1.安徽师范大学地理与旅游学院,安徽 芜湖 241003;2.江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室,安徽 芜湖 241003)

摘要: 为了解驾校不同微环境地表灰尘中 Hg 的污染情况,使用测汞仪(Hydra II C)测定了芜湖市 26 个驾校全粒径和细粒径灰尘样品中 Hg 的含量,并进行了统计分析。结果表明:芜湖市驾校地表全粒径和细粒径灰尘中 Hg 的平均含量分别为 49.36、59.97 ng/g,均低于芜湖市土壤背景值,且全粒径与细粒径灰尘中 Hg 含量存在极显著性差异($P<0.01$)。对于全粒径灰尘,驾校不同微环境地表灰尘 Hg 含量呈现出:倒车入库>S 弯>侧方位停车>直角转弯>坡道定点,细粒径灰尘则表现出:倒车入库>S 弯>侧方位停车>坡道定点>直角转弯,两者呈现出相似的规律,其中倒车入库、S 弯和侧方位停车 3 个项目细粒径灰尘 Hg 含量显著高于直角转弯和坡道定点项目($P<0.05$),倒车入库项目全粒径灰尘 Hg 含量显著高于坡道定点项目($P<0.05$)。通过对驾校地表灰尘 Hg 的影响因素分析,室内驾校全粒径和细粒径灰尘中 Hg 的平均含量均高于室外驾校,燃气驾校不同微环境地表灰尘 Hg 的平均含量均高于燃油驾校,且燃油和燃气驾校全粒径地表灰尘 Hg 含量呈现显著性差异($P<0.05$);相关性分析发现,对于全粒径与细粒径灰尘,S 弯、倒车入库和侧方位停车项目灰尘 Hg 含量均与教练车密度呈极显著相关,芜湖市驾校地表灰尘 Hg 的含量受汽车尾气排放的影响。驾校汽车尾气排放及燃油泄露等导致的 Hg 污染不容小觑,且存在累积性,教练常年在驾校工作,其健康受到一定威胁,驾校 Hg 污染需加以重视。

关键词: 汞;地表灰尘;影响因素;驾校微环境;空间分布

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0342-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.048

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Mercury in Surface Dust of Driving School Micro-environment in Wuhu City

WANG Yue¹, FANG Fengman^{1,2}, WU Minghong¹,

LIN Yuesheng^{1,2}, KUANG Ying¹, WU Huijun¹, WANG Jianfei¹

(1.School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003; 2.Key Laboratory of Earth Surface Processes and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin, Anhui Province, Wuhu, Anhui 241003)

Abstract: In order to explore the pollution of Mercury (Hg) in surface dust of different micro-environment in driving schools in Wuhu City, the concentrations of Hg in 26 driving schools with full and fine particle sizes were measured by Hydra II C, and the statistical analysis was carried out. The results showed that the average concentrations of Hg in the full and fine particle sizes dust on the surface of driving school were 49.36 ng/g and 59.97 ng/g, respectively, which were lower than the background value of soil in Wuhu City, and there were statistically significant differences in Hg concentrations between the full particle size and the fine particle size. For the full particle size dust, the average concentrations of Hg in different training programs of driving school were in decreasing order of reverse stall parking>S bending>side parking>right angle turning>parking on ramps, and the fine particle size dust showed as follows: reverse stall parking>S bending>side parking>parking on ramps>right angle turning. Both of them showed a similar regularity. The Hg content of fine particle size dust in the three items of reverse stall parking, S bending and side parking were significantly higher than that in the right angle turning and the parking on ramps, the Hg content of full particle size dust in the reverse stall parking was significantly higher than that in the parking on ramps. Through the analysis of the factors affecting the dust Hg of driving school surface, it was found that the average concentration of Hg in indoor driving school was higher than that of outdoor driving school,

收稿日期: 2019-04-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41371480);安徽省教育厅高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0327)

第一作者: 王月(1994—),女,硕士研究生,主要从事区域环境综合评价与环境生态研究。E-mail:wy1837532@163.com

通信作者: 方凤满(1974—),女,博士,教授,主要从事环境地理与环境生态研究。E-mail:ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

the concentration of Hg in gas driving school was significantly higher than that in fuel driving school, and there were significant difference in Hg concentrations of surface dust between fuel and gas driving schools. It was found that the concentrations of Hg in S bending, reverse stall parking and side parking were significantly correlated with coach vehicle density, and the Hg concentration of surface dust in Wuhu driving school was affected by vehicle exhaust emissions. Hg pollution caused by vehicle exhaust emissions, fuel leakage and tire wear could not be underestimated, and there was an accumulation phenomenon. The coaches' health was threatened, as they were working in driving school all the year round. The Hg pollution in driving school should be taken seriously.

Keywords: mercury; surface dust; influencing factor; micro-environment of driving school; spatial distribution

城市地表灰尘是城市生态系统的重要组成部分,在城市地球化学循环中起重要作用^[1],它所携带的有毒有害物质对城市人群以及城市环境产生影响。而人类活动产生的 Hg 可以通过吸收和大气沉降直接或间接地积聚在地表灰尘上,然后通过污染食物、大气和水间接地影响城市环境质量和危害人群健康^[2-3]。

目前国内外学者^[4-5]对城市地表灰尘中的 Hg 进行了大量研究,多将城市地表灰尘中 Hg 的来源归结于煤炭的燃烧,且多以城市中的公园、校园、道路、车站等为研究对象,对于驾校地表灰尘中的 Hg 研究较少。驾校车辆由于在各项目行驶的车速不一样,燃油燃气排放效率以及排放量不同,导致驾校地表灰尘 Hg 排放存在差异。有研究^[6]报道,前苏联石油、天然气矿区的一般 Hg 含量要比大气圈中 Hg 高出 2 个数量级,美国的威姆里克石油矿床 Hg 含量达到 $3\times 10^{-3}\text{ g/m}^3$,我国油田的生气母质中 Hg 的平均含量为 $36\sim 668\text{ }\mu\text{g/kg}$ 。国外学者采用了 BrCl 萃取法和冷蒸气原子吸收光谱法(CV-AAS)分析了汽油、柴油和液化石油气中 Hg 含量分别为 (571.1 ± 4.5) , (185.7 ± 2.6) , $(1\ 230.3\pm 23.5)\text{ ng/L}$ ^[7],其中液化石油气含 Hg 量最高。Matthew 等^[8]研究发现,汽油中存在单质 Hg、二价活性气态 Hg 和颗粒态 Hg;另有研究^[6,9]发现,公路剖面土壤、植物和大气 Hg 含量具有相关性,交警头发中 Hg 含量明显高于普通人群,公路系统的 Hg 污染来源于汽车尾气的排放。由此可见,汽车尾气造成的 Hg 污染不容小觑。

中国已经成为汽车大国,汽车保有量呈现不断增长的态势,“全民学车”促使了大量驾校的开设。截止 2018 年 1 月 10 日,芜湖市机动车保有量 625 956 辆,同比增涨 10.18%,2017 年每天有近百人取得驾照。学员在驾校学习科目二 5 个不同训练项目时(分别为直角转弯、S 弯、倒车入库、坡道定点、侧方位停车),由于车辆行驶速度缓慢,档位低,车辆启停次数多^[10],会造成地表灰尘 Hg 的累积,而每个项目练习时间不同,就会导致地表灰尘中 Hg 有不同程度的富集,这关乎了驾校教练、学员以及驾校周边居民的健康,因此开展驾校不同微环境地表灰尘 Hg 的污染状况研究具有重要意义。本文在前人研究的基础上选

取安徽省芜湖市市区不同类型的 26 所驾校,并分析 5 个不同项目之间 Hg 含量的差异,探讨驾校不同微环境地表灰尘 Hg 的污染状况,为芜湖市环境质量的改进提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

芜湖市位于安徽省东南部,处长江下游,属亚热带湿润季风气候,雨量充沛,年均温 $15\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$,区内水系主要为长江和青弋江,芜湖市辖鸠江区、镜湖区、弋江区、三山区 4 个区。为保证试验研究目的,采样点布设尽量均匀,并剔除周边有明显污染源的驾校,选择主城区 26 个代表性驾校(图 1),其中 J3/J4、J9/J10、J11/J12、J19/J20 和 J21/J22 均为位于同一个地方的 2 所驾校,一所作为考场,另一所作为训练场地。这些驾校中,总校有 10 所(总校较分校规模大),均为室外驾校;分校有 16 所,其中室内驾校有 4 所,其余均为室外驾校。

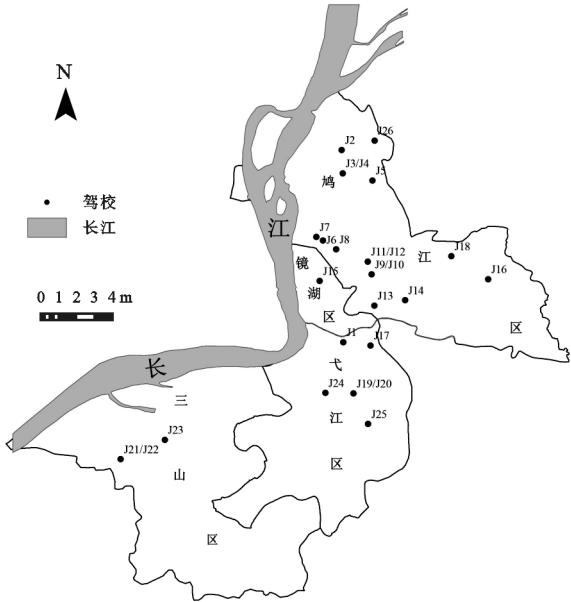


图 1 芜湖市驾校采样点分布

1.2 样品采集与分析

2018 年 4 月,在一次性降水 5 天后,选择晴朗、干燥、无风的天气进行驾校室内外灰尘样品的采集。在驾校的 5 处不同训练场所地面上,即倒车入库(D)、侧方位停车(C)、S 弯(S)、直角转弯(Z)、坡道定

点(P),使用塑料簸箕和毛刷分别采集灰尘,共 120 个样品,同时使用手持 GPS 进行定位,并记录各驾校教练车数量与驾校训练场地面积。样品采集采取多点均匀混合成 1 个样,约 40~50 g,装入聚乙烯密封塑料袋中密封保存,在样品袋上标明采样时间与地点,带回实验室。

灰尘样品放在室内自然风干后,去除样品中的植物残枝、石灰粒和小石子等杂质,然后全部过 20 目尼龙筛,将样品分为 2 部分,一部分用玛瑙研钵磨细全部过完 100 目尼龙筛得到全粒径灰尘,另一部分过 200 目尼龙筛得到细粒径灰尘。采用美国利曼公司出产的 Hydra II C 测汞仪进行测定,根据样品类型需将方法中各参数进行设定:干燥温度 300 ℃,干燥时间 10 s(如含水较高则延长干燥时间),热解温度 850 ℃,热解时间 180 s,催化剂温度 600 ℃,等待时间 60 s,汞齐温度 600 ℃,汞齐加热时间 30 s。为了减小误差,保证试验的准确性和科学性,需要在每次试验之前对盛放样品的样品舟进行净化,即将马弗炉温度升至 800 ℃,将样品舟放入干净的镍坩埚内,然后将镍坩埚放入马弗炉加热 15 min 以上。在试验过程中,采用平行样、空白样和国家土壤标准物质进行质量控制,标准物质回收率为 102%~111%,结果均符合质控要求。

2 结果与分析

2.1 驾校地表灰尘 Hg 的含量特征

驾校地表全粒径和细粒径灰尘中 Hg 的含量见表 1。全粒径灰尘中 Hg 的平均含量为 49.36 ng/g,细粒径灰尘中 Hg 的平均含量为 59.97 ng/g,均低于芜湖市土壤背景值^[11],同时与本市街道地表灰尘相

比(表 1),芜湖市区驾校全粒径和细粒径灰尘中 Hg 的平均含量低于芜湖市区同季节(4 月)地表灰尘中 Hg 含量,主要是因为驾校四周均有围墙阻隔,驾校内多为不透水地面,四周均无明显污染源,受土壤和外界环境影响小,灰尘中 Hg 来源较单一,而街道灰尘污染来源复杂多样,污染程度较高^[12]。本研究中,全粒径灰尘 Hg 含量高于背景值的样点占总样点的 58%,细粒径灰尘则占 76%。全粒径和细粒径灰尘中 Hg 含量的变化范围较大,各驾校存在不同程度的污染,其中最大值均出现在顺安驾校,是由于顺安驾校面积小,但是教练车数量很多,学员练车密度大,损耗的燃料多,导致其污染较严重。本研究全粒径和细粒径灰尘中 Hg 的平均含量与河南省驾校 Hg 含量较为接近^[10],但是均低于襄阳市^[13],这与湖北省土壤 Hg 本底值较高可能有关,同时也说明驾校地表灰尘 Hg 污染问题应当引起重视。

对于全粒径和细粒径灰尘,驾校 5 个项目细粒径灰尘中 Hg 的平均含量均高于全粒径灰尘 Hg 的平均含量,经过非参数检验,全粒径灰尘和细粒径灰尘中 Hg 含量呈现出极显著性差异($P=0<0.01$)。细粒径灰尘比表面积较大,更容易吸附 Hg,而粗粒径灰尘对 Hg 的吸附作用较弱,因此细粒径灰尘中 Hg 含量通常高于全粒径灰尘中 Hg 含量,这与前人^[12,14-16]的研究结果一致。灰尘粒径在很大程度上决定了灰尘能否通过各种暴露途径对人体产生危害^[17],而细粒径灰尘更容易在外力作用下随着水流和大气漂移,通过呼吸系统、皮肤接触等途径对人体造成危害^[18]。因此长期工作在驾校中的教练应注意灰尘的影响,做好防护措施。

表 1 驾校地表灰尘中 Hg 含量特征 单位:ng/g

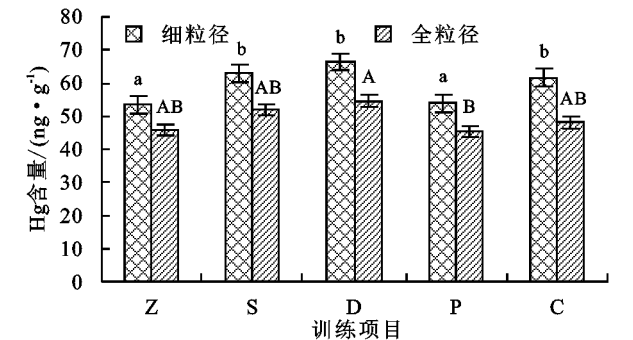
地表灰尘	含量范围	平均值	标准差	变异 系数/%	文献值			背景值
					芜湖地表 灰尘 ^[12]	河南驾校 灰尘 ^[10]	襄阳市驾 校灰尘 ^[13]	
全粒径	12.73~196.93	49.36	25.42	51.50	230	54.93	96	67
细粒径	19.92~179.71	59.97	25.31	42.20				

2.2 驾校不同微环境地表灰尘 Hg 的差异性分析

对于全粒径灰尘,驾校不同微环境地表灰尘 Hg 含量呈现出:倒车入库>S 弯>侧方位停车>直角转弯>坡道定点,细粒径灰尘则表现出:倒车入库>S 弯>侧方位停车>坡道定点>直角转弯(图 2)。全粒径和细粒径灰尘 Hg 含量表现出相似的规律,均为倒车入库项目地表灰尘 Hg 含量最高,平均含量分别为 54.59,66.36 ng/g。王萧等^[13]报道,倒车入库旁的采样点灰尘样品中的 Hg 含量也都很高,其平均含量高达 108 ng/g。S 弯和侧方位停车项目灰尘 Hg 含量次之,而含量较低的则为坡道定点和直角转弯,这

2 个项目灰尘 Hg 含量差异很小。通过非参数检验,倒车入库、S 弯和侧方位停车 3 个项目细粒径灰尘 Hg 含量显著高于直角转弯、坡道定点两项目,坡道定点项目全粒径灰尘 Hg 含量显著低于倒车入库项目($P<0.05$)。在训练的 5 个项目中,倒车入库和侧方位停车项目较难,不易学,学员在倒车入库和侧方位停车上花费的时间较多,在采样过程中,观察发现这 2 个训练项目上一直有教练车在反复行驶,单位时间内车流量大,因此这 2 个训练项目地表灰尘 Hg 含量较高。在采集的 26 所驾校中,由于 S 弯道占的场地较大,几乎所有驾校均只有 1 个 S 弯道,因此弯道

上通过的车流量相对较大。在这 3 个项目上,倒车入库和侧方位停车过程中需要急打方向盘,多次启停车辆,轮胎严重磨损,S 弯训练过程中则需要不停调整方向,导致车辆停留时间长,尾气排放量大。以往的研究^[19-20]认为,石油、天然气中含 Hg 非常普遍,油气的燃烧是人类造成 Hg 释放的来源之一;Hg 来源于汽车轮胎的磨损以及燃油的泄露等交通排放^[21-22];灰尘中 Hg 与交通、道路状况、轮胎和刹车磨损、润滑剂、油漆以及汽车燃料有关^[23-26],并且汽车尾气排放造成的 Hg 污染非常严重,甚至公路司乘人员头发中 Hg 的含量明显高于普通人群^[9]。

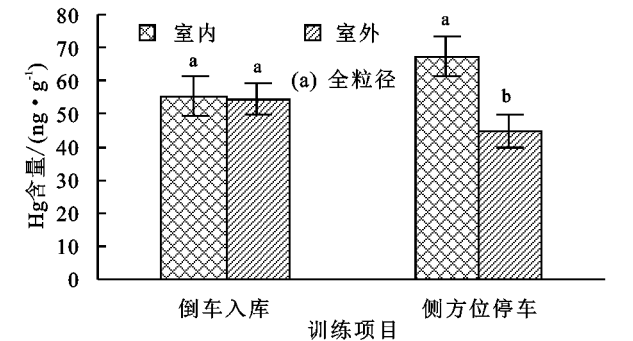


注:图中不同小写字母表示细粒径灰尘不同训练项目之间的差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示全粒径灰尘不同训练项目之间的差异显著($P<0.05$)。

图 2 驾校不同训练项目灰尘中 Hg 含量分布

2.3 驾校地表灰尘中 Hg 的影响因素分析

2.3.1 室内与室外的影响 本研究驾校所有室内训



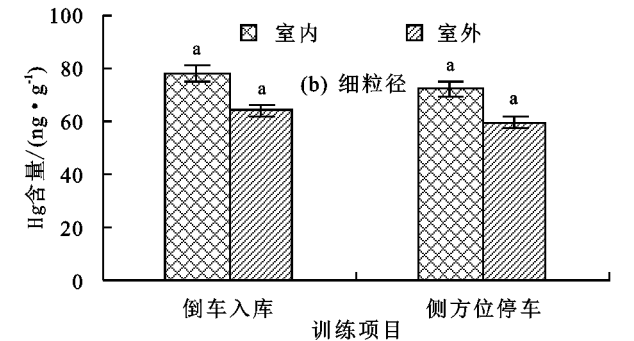
注:不同字母表示各项目在室内与室外的差异显著($P<0.05$)。

图 3 不同条件下驾校不同微环境地表灰尘 Hg 含量特征

2.3.2 教练车密度的影响 通过相关性分析探讨教练车密度(车辆数量/驾校面积)对驾校不同训练项目地表灰尘中 Hg 的影响,由于室内驾校只有 2 个项目,且室内驾校与室外驾校灰尘 Hg 含量差异较大,因此只对室外驾校各训练项目地表灰尘 Hg 含量与教练车密度进行相关性分析(表 2)。从表 2 可以看出,对于全粒径与细粒径灰尘,S 弯、倒车入库和侧方位停车项目灰尘 Hg 含量都与教练车密度呈极显著相关,直角转弯处细粒径灰尘 Hg 含量与教练车密度呈显著相关。由于倒车入库、侧方位停车两项目较难不易学,学车花费时间长,教练车使用频率高,而 S 弯项目由于驾

练场地只有倒车入库和侧方位停车 2 个训练项目,故室外驾校也只选择这 2 个训练项目与室内驾校进行对比研究。室内驾校和室外驾校全粒径灰尘中 Hg 的平均含量分别为 61.25,57.49 ng/g;室内驾校和室外驾校细粒径灰尘中 Hg 的平均含量分别为 75.15,59.22 ng/g。无论是全粒径还是细粒径灰尘,室内驾校地表灰尘 Hg 含量均高于室外驾校(图 3),且室内侧方位停车项目全粒径灰尘 Hg 含量显著高于室外该项目($P=0.01<0.05$)。干沉降是城市灰尘中重金属的重要来源^[27],室内驾校处于半封闭环境下,通风设施条件不好,颗粒物特别容易沉降到地表造成累积,而且受到风力扬起、雨雪的冲刷以及植物吸收降解等外部条件的影响较小^[28],室外驾校容易遭受雨雪的影响,受到干沉降的影响比室内低,因此室内灰尘中的 Hg 相比于室外更容易富集^[16,29-31]。

从图 3 可以看出,对于全粒径灰尘,室内驾校灰尘 Hg 含量表现为侧方位停车>倒车入库,室外驾校则表现为倒车入库>侧方位停车;对于细粒径灰尘,室内与室外驾校灰尘 Hg 含量均表现为倒车入库>侧方位停车,但是两项目之间均没有差异性($P>0.05$)。这与芜湖市驾校不同微环境地表灰尘 Hg 含量分布特征相一致,且这 2 个项目在室内或室外驾校灰尘 Hg 的含量均较高,说明室内驾校或是室外驾校只会影响驾校地表灰尘整体 Hg 含量水平,对于各项目的影响较小。



校数量少,导致驾校的教练车多集中于这 3 个项目,即教练车密度大,尾气排放量大,因此这 3 处的灰尘 Hg 含量较高,这与 2.2 处的差异性分析结果相一致。

为了排除燃料类型对分析结果的影响,表 3 列出了 2 种燃料类型下教练车密度最大和最小驾校各训练项目灰尘中的 Hg 含量。从表 3 可以看出,在燃气的 2 所驾校中,直角转弯和坡道定点项目的全粒径灰尘中 Hg 含量较为接近,坡道定点项目的细粒径灰尘中 Hg 含量也较为接近。除此之外,无论是燃油还是燃气,各项目的粗细粒径灰尘中 Hg 含量都呈现出:教练车密度大的驾校 Hg 含量高出教练车密度小的

驾校 2~6 倍。可见,芜湖市驾校地表灰尘 Hg 的含量受驾校教练车密度的影响,特别是倒车入库、侧方位停车和 S 弯受到的影响较大。

表 2 教练车密度与室外驾校各训练项目地表灰尘 Hg 含量相关性分析

地表灰尘	Z	S	D	P	C
全粒径	0.268	0.691 **	0.744 **	0.417	0.694 **
细粒径	0.453 *	0.685 **	0.619 **	0.344	0.738 **

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

2.3.3 不同燃料类型的影响 为了研究不同燃料类型对驾校地表灰尘中 Hg 的影响,排除其他因素的干扰,因此去除 4 所室内驾校,且对燃油驾校与燃气驾校教练车密度进行差异性检验,发现并无显著性差异($P>0.05$)。在教练车燃油的驾校中,全粒径与细粒径灰尘中 Hg 的平均含量分别为 42.47,55.85 ng/g;燃气的驾校中,全粒径灰尘和细粒径灰尘中

Hg 的平均含量分别为 52.69,60.76 ng/g。经过非参数检验,对于全粒径灰尘,燃油和燃气驾校灰尘中 Hg 含量呈现出显著差异($P=0.018<0.05$),细粒径灰尘 2 种燃料类型下的 Hg 含量则无统计学差异。燃气驾校地表灰尘 Hg 平均含量高于燃油驾校,是因为天然气主要成分是甲烷,另外有少量的乙烷、丙烷和丁烷,而汽油具有较高的辛烷值,辛烷值越高,抗爆性越好,同时汽油组成成分中带支链的烷烃以及烯烃、芳烃通常具有优良的抗爆性,因此相比于天然气,在汽油中减少了人为加入金属抗爆剂的动力^[32]。另一方面,天然气中一般都会含有少量 H_2S 、 SO_2 、Hg 等有害物质,而 S 元素与 Hg 的关系非常密切^[33],天然气在使用之前,一般都会进行脱硫处理,Liu 等^[34]研究发现,在脱硫过程中,脱硫浆液中的 SO_3^{2-} 、 NO_2^- 会将浆液吸收的 Hg^{2+} 还原成 Hg^0 ,因此,会造成 Hg 的再次释放。

表 3 不同教练车密度驾校各训练项目地表灰尘 Hg 含量

驾校	全粒径					细粒径				
	Z	S	D	P	C	Z	S	D	P	C
J22	59.99	56.36	68.36	53.86	59.61	69.55	60.39	82.96	76.70	94.65
J12	25.98	12.73	35.50	18.24	30.87	30.25	19.96	40.75	27.44	37.39
J5	56.63	196.93	115.52	35.98	66.18	61.09	179.71	101.77	54.69	66.04
J20	54.75	29.42	37.63	42.30	14.89	36.24	35.06	44.76	43.86	26.37

注:J22 和 J12 分别为燃油驾校中教练车密度最大和最小的驾校;J5 和 J20 分别为燃气驾校中教练车密度最大和最小的驾校。

从图 4 可以看出,无论是全粒径灰尘还是细粒径灰尘,燃气驾校不同微环境地表灰尘 Hg 的平均含量均高于燃油驾校,经过非参数检验,发现不同微环境的地表灰尘 Hg 含量在燃油与燃气驾校之间并无显著性差异。对于全粒径灰尘,燃油驾校中的倒车入库项目 Hg 含量最高,直角转弯项目 Hg 含量最低,两微环境之间的 Hg 含量呈现出显著性差异($P<0.05$);对于细粒径灰尘,燃油驾校中的倒车入库项目 Hg 含量最高,坡道定点项目 Hg 含量最低,两微环境之间的 Hg 含量呈现出显著性差异($P<0.05$),这与上文中

的 2.2 结果一致,但是燃气驾校却没有表现出此种规律。结合图 2 与图 4 可以发现,无论是全粒径还是细粒径灰尘,燃气驾校中不同微环境 Hg 含量均高于芜湖市驾校不同微环境的 Hg 含量,即教练车燃气会提高 Hg 的排放,导致驾校不同微环境地表灰尘中 Hg 含量的上升。天然气作为一种环保能源,能够减少温室气体的排放,改善环境污染问题,但是天然气作为汽车燃料使用造成的 Hg 排放需要引起注意,因此应该努力探索一种先进的技术去除天然气中的 Hg,使天然气成为真正的绿色环保能源。

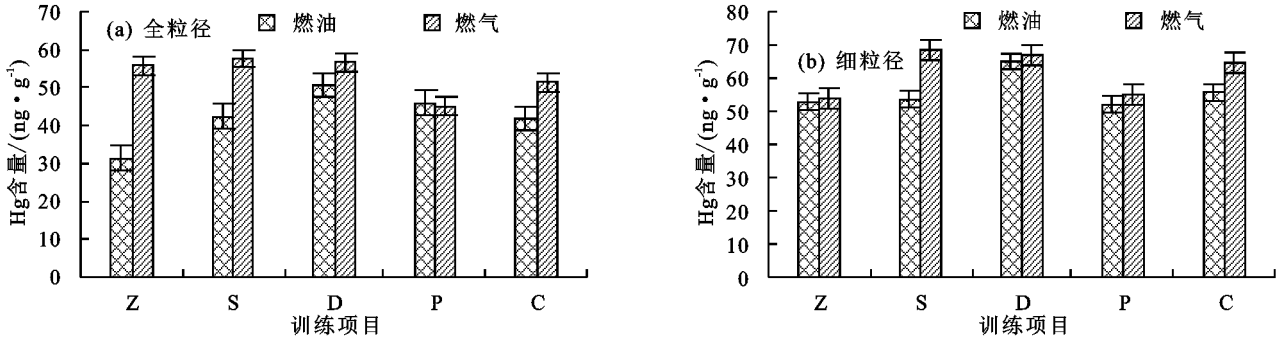


图 4 不同燃料下驾校不同微环境地表灰尘 Hg 含量特征

3 结论

(1)芜湖市区驾校地表细粒径灰尘中 Hg 的平均含量(59.97 ng/g)高于全粒径灰尘中 Hg 的平均含量

(49.36 ng/g),且呈现显著性差异。2 种粒径灰尘中 Hg 的含量变化范围较大,各驾校存在不同程度的污染,其中最大值均出现在顺安驾校,对于长期在驾校

工作的教练员,应注意做好防护措施。

(2)对驾校内不同微环境地表灰尘 Hg 进行分析,全粒径和细粒径灰尘 Hg 含量在不同微环境表现出相似的规律,倒车入库、S 弯和侧方位停车项目细粒径灰尘 Hg 含量显著高于另外 2 项,倒车入库项目全粒径灰尘 Hg 含量显著高于坡道定点($P<0.05$)。

(3)室内驾校处于半封闭环境下,受到风力等外部影响小,干沉降影响大,导致室内驾校地表灰尘 Hg 的平均含量高于室外驾校;驾校教练车密度与倒车入库、S 弯和侧方位停车项目地表灰尘 Hg 含量呈极显著相关,驾校地表灰尘 Hg 含量受汽车尾气排放的影响;燃油和燃气驾校全粒径灰尘中 Hg 含量呈现出显著差异($P<0.05$),不同微环境的地表灰尘 Hg 含量均为燃气驾校高于燃油驾校,天然气作为汽车燃料造成的 Hg 排放问题,应当引起重视与研究。

参考文献:

[1] 邹常亮,赵全升,谢文霞,等.下垫面高度梯度对城市灰尘分布特性及其重金属污染的影响[J].环境科学学报,2017,37(2):729-736.

[2] Nakayama S, Harada K, Inoue K, et al. Distribution of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonate (PFOS) in Japan and their toxicities[J].Environmental Sciences,2005,12(6):293-313.

[3] 方凤满,杨丁,汪琳琳,等.芜湖燃煤电厂周边土壤中砷汞的分布特征研究[J].水土保持学报,2010,24(1):109-113.

[4] 姚有如,方凤满,武家园,等.淮南城区小学校园及其临近街道地表灰尘中汞的分布特征及污染评价[J].环境科学学报,2017,37(3):844-852.

[5] Nazarpour A, Ghanavati N, Watts M J. Spatial distribution and human health risk assessment of mercury in street dust resulting from various land-use in Ahvaz, Iran[J].Environmental Geochemistry and Health,2018,40(2):693-704.

[6] 钱建平,张力,张爽,等.汽车尾气汞污染现状、来源及其环境效应[C]//欧阳自远.中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集.广州,2011:437-438.

[7] Won J H, Park J Y, Lee T G. Mercury emissions from automobiles using gasoline, diesel, and LPG[J].Atmospheric Environment,2007,41(35):7547-7552.

[8] Matthew S L, Charles W L, Robert K S, et al. Ft. McHenry tunnel study: Source profiles and mercury emissions from diesel and gasoline powered vehicles[J].Atmospheric Environment,2007,41(38):8711-8724.

[9] 钱建平,张力,李成超,等.桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究[J].环境科学,2013,34(6):2344-2349.

[10] 陈轶楠,马建华.河南省某市驾校地表灰尘重金属污染及健康风险评价[J].环境科学学报,2016,36(8):3017-3026.

[11] 安徽省环境监测中心.安徽省土壤环境背景值调查研究报告[R].合肥:安徽省环境监测中心站,1992.

[12] 方凤满,张志明,陈文娟,等.芜湖市春季地表灰尘中汞和砷的空间及粒径分布规律[J].环境科学学报,2009,29(9):1871-1877.

[13] 王萧,常华进,代梦云,等.襄阳市驾校灰尘重金属含量及其指示意义[J].环境化学,2017,36(7):1568-1578.

[14] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment[J].Atmospheric Environment,2005,39(25):4501-4512.

[15] 常静,刘敏,李先华,等.上海城市地表灰尘重金属污染粒级效应与生物有效性[J].环境科学,2008,29(12):3489-3495.

[16] 曹治国,余刚,吕香英,等.北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估[J].环境科学,2016,37(4):1272-1278.

[17] Mercier F, Glorennec P, Thomas O, et al. Organic contamination of settled house dust: A review for exposure assessment purposes[J].Environmental Science and Technology,2011,45(16):6716-6727.

[18] 代勇,李章平,李燕燕,等.重庆市主城区街道灰尘重金属的污染特征分析[J].环境化学,2015,34(1):188-189.

[19] Darrell L G. The behavior of mercury in water, alcohols, monoethylene glycol and triethylene glycol II. Elemental mercury solubility in alcohols, ethers and acetone; gas plant mercury distribution; and speciation in monoethylene glycol solution[J].Fluid Phase Equilibria,2018,477:58-61.

[20] 刘全有.塔里木盆地天然气中汞含量与分布特征[J].中国科学(地球科学),2013,43(5):789-797.

[21] 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[J].环境科学学报,2012,32(1):204-212.

[22] 章明奎.浙江省城市汽车站地表灰尘中重金属含量及其来源研究[J].环境科学学报,2010,30(11):2294-2304.

[23] Li N, Han W Z, Tang J. Pollution characteristics and human health risks of elements in road dust in Changchun, China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2018,15(9):1843-1856.

[24] Gunawardana C, Egodawatta P, Goonetilleke A. Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces[J].Environmental Pollution,2014,184:44-53.

[25] Trujillo-González J M, Torres-Mora M A, Keesstra S, et al. Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses[J].Science of the Total Environment,2016,553:636-642.

ronomy Journal,2016,108(4):1636-1648.

[17] 张英利,许安民,杨玉秀,等.自动分析仪测定土壤全磷的方法探讨[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):168-171.

[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.

[19] 宁志英,李玉霖,杨红玲,等.沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响[J].生态学报,2019,39(10):1-10.

[20] Mulder C, Elser J J. Soil acidity, ecological stoichiometry and allometric scaling in grassland food webs[J]. Global Change Biology,2010,15(11):2730-2738.

[21] 李文军,杨奇勇,赵迪,等.洞庭湖水稻土有机氮组分及其与可矿化氮的关系特征[J].中国土壤与肥料,2018,277(5):18-26.

[22] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Linking macro-aggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J].Soil and Tillage Research,2018,178:99-107.

[23] Ai Z M, Xue S, Wang G L, et al. Responses of non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of, bothriochloa ischaemum, to nitrogen addition on the Loess Plateau, China[J].Journal of Plant Growth Regulation,2017,36(3):714-722.

[24] Cao L, Song J M, Li X G, et al. Geochemical characteristics of soil C, N, P, and their stoichiometrical significance in the coastal wetlands of Laizhou Bay, Bohai Sea[J].Clean-Soil, Air, Water,2015,43(2):260-270.

[25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J].Biogeochemistry,2010,98(1/3):139-151.

[26] Lv Y N, Wang C Y, Jia Y Y, et al. Effects of sulfuric, nitric, and mixed acid rain on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities in subtropical forests of China[J].Applied Soil Ecology,2014,79(5):1-9.

[27] 汪旭明,曾冬萍,闵庆文,等.福州茉莉花种植园土壤化学计量比及其对碳释放潜力的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(1):118-126.

[28] 陈彬彬,王宏,郑秋萍,等.福建省区域酸雨特征及成因分析[J].气象与环境学报,2016,32(4):70-76.

[29] 张新明,张俊平,刘素萍,等.模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响[J].水土保持学报,2006,20(6):18-21.

[30] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J].土壤学报,2018,55(5):119-130.

[31] Zhang P, Wei T, Li Y L, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C : N ratio in a semiarid region of China[J].Soil and Tillage Research,2015,153:28-35.

[26] Kamani H, Ashrafi S D, Isazadeh S, et al. Heavy metal contamination in street dusts with various land uses in Zahedan, Iran[J].Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2015,94(3):382-386.

[27] Tsai Y I, Kuo S C, Young L H, et al. Atmospheric dry plus wet deposition and wet-only deposition of dicarboxylic acids and inorganic compounds in a coastal suburban environment[J].Atmospheric Environment,2014,89:696-706.

[28] 杨孝智,陈扬,徐殿斗,等.北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J].中国环境科学,2011,31(6):944-950.

[29] 张舒婷,李晓燕.城市室内灰尘重金属的水平及来源[J].环境化学,2014,33(7):1201-1207.

[30] 邓高松,陈思民,李晓燕,等.城市室内外灰尘重金属形态差异分析:以贵阳市为例[J].地球与环境,2015,43(4):451-456.

[31] 李晓燕,汪浪,张舒婷.城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例[J].环境科学,2016,37(8):2889-2896.

[32] 杨昆昊,夏赞宇,何芃,等.机动车燃油质量及尾气排放与北京市大气污染的相关性[J].中国科学院大学学报,2017,34(3):304-317.

[33] 刘汝海,王起超,郝庆菊,等.三江平原湿地土壤汞的分布特征及影响因素分析[J].水土保持学报,2003,17(1):122-130.

[34] Liu Y, Wang Q F, Mei R J, et al. Mercury-re-emission in flue gas multipollutants simultaneous absorption system[J].Environmental Science and Technology,2014,48(23):14025-14030.

(上接第 347 页)