

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦硒(VI)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险

陈轶楠¹, 马建华^{1,2*}, 段海静¹, 魏林恒¹

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 黄河文明传承与现代文明建设河南省协同创新中心, 开封 475004)

摘要: 采集河南省某市 29 所驾校的地表灰尘样品, 应用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 测定样品中 16 种优控 PAHs 含量, 用终生致癌风险增量模型 (ILCR) 评价灰尘 PAHs 不同暴露情景下 (情景 1、2、3 分别为驾校工作 5 a、10 a 和 20 a) 的健康风险, 用比值法、成分谱法和主成分因子载荷法揭示 PAHs 来源。结果表明, 驾校灰尘 \sum PAHs 含量在 198.21 ~ 3 400.89 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均 908.72 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。单体 PAHs 含量较高的是萘、菲、蒽、荧蒽, 含量最低的是二苯并[a,h]蒽, 低环 PAHs 占 \sum PAHs 的 55.79%, 高环占 44.21%。3 种情景下的平均健康风险为情景 3 (3.71×10^{-7}) > 情景 2 (1.85×10^{-7}) > 情景 1 (9.27×10^{-8}), 只有一个驾校 (J11) 在情景 3 存在潜在健康风险, 其他情景下均无风险。皮肤接触灰尘是最主要的 PAHs 暴露途径, 其占总风险的 64.21%; 其次是误食途径, 占总风险的 33.04%; 吸入途径可忽略不计。驾校灰尘 PAHs 主要来源为化石燃料不完全燃烧源和混合源, 农田区驾校灰尘 PAHs 的柴油/天然气动力车排放源、燃煤源和汽油车排放源贡献率分别为 56.44%、26.55% 和 17.01%, 工业区驾校混合源、汽油车和炼焦/燃煤排放源贡献率分别为 76.26%、22.85% 和 0.89%, 混合区驾校燃煤源、天然气/柴油动力车排放源和汽油车排放源的贡献率分别为 45.57%、45.41% 和 9.02%。灰尘 PAHs 含量及健康风险与其周边环境、前期土地利用状况密切相关。

关键词: 驾校; 地表灰尘; PAHs; 健康风险; 来源; 组成

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0711-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607119

Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China

CHEN Yi-nan¹, MA Jian-hua^{1,2*}, DUAN Hai-jing¹, WEI Lin-heng¹

(1. Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization of Henan Province, Kaifeng 475004, China)

Abstract: The contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dusts attracts great attentions due to their properties of threatening human health. Twenty-nine surface dust samples were collected from driving-schools in a city of Henan. Concentrations of 16 priority PAHs were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The health risks exposed to dust PAHs for three different scenarios (working for 5 a, 10 a and 20 a in driving-school) were estimated by the health risk assessment model (ILCRs). Source identification was analyzed by diagnostic ratio, composition analysis, and principal component analysis. The results showed that concentrations of the \sum PAHs in dusts ranged from 198.21 to 3 400.89 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with a mean of 908.72 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Among individual PAHs, the contents of naphthalene (Nap), phenanthrene (Phe), anthracene (Ant) and fluoranthene (Flu) were higher, and the content of dibenzo[a,h]anthracene (DBA) was the lowest. The dominant compounds were 2-3 ring PAHs, which accounted for 55.79%, while the 4-6 ring PAHs accounted for 44.21%. The health risks exposed to PAHs in dust in three different scenarios were 9.27×10^{-8} , 1.85×10^{-7} , and 3.71×10^{-7} respectively; only sample J11 was with potential health risk in scenario 3, and the other samples were all without risks. Average daily doses by dermal contact of dust particles for the PAHs was the main exposure way. PAHs in dusts of driving-school were mainly originated from the combustion of fossil fuels and mixture combustion. The major sources of dust PAHs in farmland area driving-schools were natural gas and diesel combustion (56.44%), coal combustion (26.55%), gasoline combustion and the leakage (17.01%); dust PAHs in industrial area driving-schools were from mixture combustion (76.26%), gasoline combustion and the leakage (22.85%), coking and coal combustion (0.89%); and dust PAHs in mixed area driving-schools were from coal combustion (45.57%), natural gas and diesel combustion (45.41%), gasoline combustion and the leakage (9.02%). The concentrations and health risks of heavy metals in dusts were closely related to the surroundings around driving-schools and the previous land use status.

Key words: driving-school; surface dust; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); health risk assessment; sources; compositions

多环芳烃 (PAHs) 是一类广泛存在于环境中, 具有强烈“三致”特点的持久性有机污染物^[1]。环境

收稿日期: 2016-07-19; 修订日期: 2016-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171409, 41430637); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (12JJD790023)

作者简介: 陈轶楠 (1988 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤污染与防治, E-mail: greta.nan666@163.com

* 通信作者, E-mail: mjh@henu.edu.cn

中的 PAHs 除少量来源于自然源排放外,大部分来源于人类活动过程中有机物的不完全燃烧或高温热解^[2]. 美国环保署 (US EPA) 将 16 种 PAHs [萘 (Nap)、蒎 (Acy)、蒎烯 (Ace)、芴 (Fl)、菲 (Phe)、蒽 (Ant)、荧蒽 (Flu)、芘 (Pyr)、苯并 [a] 蒽 (BaA)、䓛 (Chr)、苯并 [b] 荧蒽 (BbF)、苯并 [k] 荧蒽 (BkF)、苯并 [a] 芘 (BaP)、二苯并 [a, h] 蒽 (DBA)、苯并 [ghi] 芘 (BghiP)、茚并 [1,2,3-cd] 芘 (IcdP)] 列为优先控制污染物^[3]. 环境 PAHs 已成为环境科学研究的热点之一.

地表灰尘是环境 PAHs 重要的“源”和“汇”^[4]. 在各种外力 (如风力、车流、流水等) 作用下,地表灰尘中的 PAHs 会重新悬浮到空气中或进入水体,造成次生污染^[5]. 灰尘 PAHs 可通过手-口误食、呼吸吸入和皮肤接触等暴露途径进入人体,危害健康. 国内外学者针对城市地表灰尘、街道灰尘、室内灰尘中 PAHs 的含量^[6,7]、污染^[8,9]、来源^[10]、生态风险和健康风险^[11-13]等方面开展过大量研究,并取得重要进展,但迄今为止针对驾校地表灰尘 (驾校

灰尘) PAHs 的研究却鲜见报道.

由于驾校学员驾车速度慢、档位低、频繁启停车辆等,燃料不完全燃烧现象比较严重,所以驾校灰尘中的 PAHs 除受外源性输入影响外,主要与汽车尾气的排放密切相关. 驾校学员学习时间较短,暴露灰尘 PAHs 所致的健康风险不甚明显,但教练员工作时长,可能存在一定的健康危害. 本文以河南省某市 29 所驾校为研究对象,在灰尘 PAHs 含量测定的基础上,对驾校灰尘 PAHs 的含量、组成、来源进行分析,应用终生致癌风险增量模型对不同暴露情景下 (在驾校工作 5 a、10 a 和 20 a) 的健康风险进行评价,旨在维护教练员身体健康,为城市环境 PAHs 综合防治提供依据.

1 材料与方法

1.1 样点布置与样品采集

于 2015 年 2 月采集河南省某市 29 所驾校的灰尘样品,各驾校建校时间、面积、教练车数量、建校前土地利用状况及周围环境信息见表 1.

表 1 采样驾校基本情况¹⁾

Table 1 Basic questionnaire of driving-schools

驾校编号	建校时间/a	面积/hm ²	教练车数量/辆	建校前土地利用	周围环境状况
J1	2	1.36	10	农田	农田
J2	7	0.72	11	农田	N-建筑工地; S-居民区; W-公路,汽修厂; E-空地
J3	2	0.71	13	农田	N-某高校校园; S-空地; W-某高校校园; E-空地
J4	2	0.35	6	农田	N-居民区; S-公路; W-空地; E-居民区
J5	8	0.51	7	村庄	N-建筑工地; S-公路; W-空地; E-居民区
J6	8	0.64	10	村庄	N-居民区; S-旅游区; W-马路; E-空地
J7	2	0.05	7	村庄	高校
J8	8	1.95	18	农田	N-居民区; S-马路,税务局; W-停车场; E-居民区
J9	0.5	0.05	6	农田	N-停车场; S-空地; W-空地; E-汽车销售中心
J10	4	0.15	3	农田	N-停车场,空地; S-停车场; W-空地; E-加气站
J11	6	0.69	10	农田	N-汽车交易与修理市场; S-停车场; W、E-居民区;
J12	2.5	1.13	15	村庄	N-鱼塘; S-公路,居民区; W-石油物流; E-小学
J13	1.5	0.02	6	某公司	N-停车场; S-汽车钣金喷漆房; W-居民区; E-村庄
J14	7	0.97	15	村庄	N-公路; S-居民区; W-居民区; E-居民区
J15	3.5	1.54	18	农田	N-菜地; S-空分公司; W-农田; E-农田
J16	0.24	0.2	10	村庄	N-居民区; S-化肥厂; W-居民区; E-汽修厂
J17	0.2	0.27	2	农田	农田
J18	1.5	0.62	10	三轮车厂	N-化肥厂; S-纸箱厂; W-化肥厂; E-炼锌厂
J19	2.5	0.8	5	农田	N-空地; S-空地; W-废品收购站; E-空地
J20	2	0.57	8	汽车配件厂	N-锌业公司; S-垃圾中转站; W-炼煤厂; E-化肥厂
J21	5	1.4	25	农田	N-公路; S-驾校新区; W-居民区; E-驾校新区
J22	2.5	0.8	5	农田	N-空地; S-空地; W-废品收购站; E-空地
J23	2.5	0.84	13	农田	N-驾校,化工厂; S-空地; W-玻璃厂; E-农田
J24	2.5	1.45	7	农田	N-空地; S-空地; W-空地; E-化工厂
J25	2.5	0.54	6	农田	N-化工厂; S-停车场; W-玻璃厂; E-农田
J26	2.5	1.35	12	农田	N-花生厂; S-废弃磷肥厂; W-公墓; E-公路
J27	6	1.35	18	农田	N-施工地; S-制药厂; W-干渠; E-空地
J28	2.5	0.79	13	农田	N-空分厂,制药厂; S-养猪场; W-工地; E-空地
J29	3	1.34	13	农田	N-幼儿园; S-垃圾站; W-电厂; E: 复合肥厂

1) 表中 E、S、W、N 分别表示东、南、西、北方位

采集样品前 10 d 和采样期间均无降水. 每个驾校范围内, 在柏油或水泥等不透水地面上随机布设 30 ~ 50 个子样点. 在各个子样点上, 首先用塑料簸箕和毛刷清扫出灰尘 50 g 左右; 然后将各子样放在一起, 均匀混合, 仔细挑拣出植物残体、烟头和石砾等; 最后按“四分法”舍弃多余样品, 保留 500 g 样品, 装入聚乙烯塑料袋中.

1.2 样品处理与 PAHs 测定

1.2.1 样品处理

在实验室, 样品经冷冻干燥后, 用玛瑙研钵研磨, 全部通过 60 目尼龙筛, 存放于 4℃ 冰箱中待测.

1.2.2 PAHs 萃取与净化

称取灰尘样品 15.000 g, 与适量硅藻土混合均匀后填入 22 mL 萃取池. 以正己烷-丙酮混合液(色谱纯, 体积比为 1:1)作提取剂, 用快速溶剂萃取仪(ASE-350 型, 美国戴安)萃取 PAHs. 用全自动固相萃取仪(Preval SPE 304 型, 北京普立泰科)对萃取液中的 PAHs 进行净化. 先将萃取液经氮吹仪(温度 50℃)浓缩至 2 mL, 加入 5 mL 丙酮-正己烷混合液(色谱纯, 体积比为 1:9)与 5 mL 正己烷进行两次活化; 然后取 3 mL 活化后的萃取液装入 Florisil 固相萃取柱, 用 5 mL 丙酮-正己烷混合液淋洗; 最后用氮吹仪将收集液吹至近干, 用正己烷定容至 1 mL 待测.

1.2.3 PAHs 测定

灰尘 PAHs 含量由气质联用仪(GC-MS, 5975C/7890N 型, 美国安捷伦)测定. 色谱条件为: 弹性石英毛细管色谱柱 HP-5MS(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 载气为高纯 He, 柱前压 0.03 MPa, 流速为 1.2 mL·min⁻¹; 初始温度 60℃, 以 14℃·min⁻¹升温到 280℃, 保持 14 min 至样品完全流出. 质谱条件为: EI 电离源 70 eV, 质量范围 45 ~ 600 u, 倍增器电压 1 288 V, 选择 SIM 法定量; 离子源温度 230℃, 四级杆温度 150℃, 传输线温度 280℃, 离子监测模式为 SIM. 色谱峰根据 NIST08 数据库检索, 结合标样定性^[14].

误食灰尘 PAHs 的 ILCR:

$$ILCR_{\text{误食}} = \frac{TTEC \times CSF_{\text{误食}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{\text{误食}} \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6} \quad (2)$$

呼吸灰尘 PAHs 的 ILCR:

$$ILCR_{\text{呼吸}} = \frac{TTEC \times CSF_{\text{呼吸}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{\text{呼吸}} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} \quad (3)$$

皮肤接触灰尘 PAHs 的 ILCR:

$$ILCR_{\text{皮肤接触}} = \frac{TTEC \times CSF_{\text{皮肤接触}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6} \quad (4)$$

1.2.4 质量控制

实验过程中应用空白实验、平行实验和加标回收实验进行综合质量控制, 外标法定量. PAHs 标准品购置于美国 AccuStandard Inc., 各个 PAHs 单体的标准曲线回归方程的 R^2 都在 0.999 以上. 空白实验有少量低环 PAHs 检出, 平行实验的标准偏差小于 15%, 加标回收率在 63.5% ~ 89.0% 之间, 方法检出限在 0.01 ~ 0.20 ng·g⁻¹ 之间.

1.3 灰尘 PAHs 健康风险评价方法

1.3.1 PAHs 总毒性当量浓度计算

由于不同环数 PAHs 的毒性差异很大, 因此进行健康风险评价时不能直接用 PAHs 总量(\sum PAHs)计算. 本文采用毒性当量因子(toxicity equivalent factor, TEF)法, 先将各种 PAHs 单体的浓度统一折算成能够比较的毒性当量浓度(toxicity equivalence concentration, TEC), 然后将各个 PAHs 单体 TEC 加和得到某样品 PAHs 的总毒性当量浓度(total toxicity equivalence concentration, TTEC)^[15, 16], 即:

$$TTEC = \sum_{i=1}^{16} TEC_i = \sum_{i=1}^{16} PAH_i \times TEF_i \quad (1)$$

式中, PAH_i 和 TEF_i 分别为 i 种 PAH 单体的实测浓度($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和毒性当量因子(无量纲). 目前, 国内外均以 BaP 的 TEF($TEF_{\text{BaP}} = 1$)为参照得到其他 PAHs 的 TEF, 其中 Nap、Acy、Ace、Fl、Phe、Flu、Pyr 的 TEF 为 0.001, Ant、Chr、Bghip 的 TEF 为 0.01, BaA、BbF、BkF、IcdP 的 TEF 为 0.1, DBA 的 TEF 与 BaP 相同^[17].

1.3.2 PAHs 健康风险评价方法

用终生致癌风险增量模型(incremental lifetime cancer risk, ILCR)^[18]评估驾校教练通过误食、吸入和皮肤接触等途径暴露灰尘 PAHs 所致的健康风险. 各种暴露途径的 PAHs 致癌风险按下式计算^[17, 19, 20].

3 种暴露途径的总风险:

$$CR = \sum (ILCR_{\text{误食}} + ILCR_{\text{呼吸}} + ILCR_{\text{皮肤接触}}) \quad (5)$$

式中, TTEC 的单位是 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CSF 是灰尘 PAHs 不同暴露途径的致癌斜率因子, $CSF_{\text{摄食}}$ 、 $CSF_{\text{呼吸}}$ 和 $CSF_{\text{皮肤接触}}$ 分别为 7.3、3.85、25 ($\text{kg} \cdot \text{d}$) $\cdot \text{mg}^{-1}$ [5, 17]; $ILCR_{\text{误食}}$ 、 $ILCR_{\text{吸入}}$ 、 $ILCR_{\text{皮肤接触}}$ 分别是手-口误食、呼吸吸入和皮肤接触暴露灰尘 PAHs 所致的健康风险; CR 是上述 3 种暴露途径的总风险; 其他参数的含义及其取值见表 2. 根据 ILCRs 或 CR 大小可开展健康风险评价: ILCRs 或 $CR < 10^{-6}$ 表示不存在健康风险, $10^{-6} < ILCRs$ 或 $CR < 10^{-4}$ 表示存在潜在健康风险, $ILCRs$ 或 $CR > 10^{-4}$ 表示存在健康风险 [17].

表 2 终身致癌风险评价模型参数含义及取值 [21, 22]

Table 2 Definition and values of parameters used in the incremental lifetime cancer risk assessment

暴露参数	含义与单位	成人取值
BW	平均体重/kg	64.15
EF	暴露频率/ $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	285 (实地调研)
ED	暴露年限/a	5/10/20
$IR_{\text{呼吸}}$	灰尘吸入频率/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	20
$IR_{\text{误食灰尘}}$	灰尘摄取率/ $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	100
SA	接触灰尘的皮肤面积/ $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	5700
AF	灰尘对皮肤的粘附系数/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.07
ABS	皮肤吸附系数	0.13
AT	人均寿命/d	70×365
PEF	灰尘扩散因子/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.36×10^9

表 3 驾校灰尘 PAHs 组成与含量¹⁾/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Table 3 Composition and contents of PAHs in driving-school dusts/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

PAHs 单体	环数/个	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%
Nap	2	11.31	1188.10	160.03	266.97	166.82
Acy	3	1.93	68.42	15.31	16.59	108.37
Ace	3	2.01	66.22	14.03	16.09	114.69
Fl	3	7.89	289.68	48.52	57.46	118.43
Phe	3	30.03	774.71	168.76	151.41	89.72
Ant	3	7.42	406.36	100.32	86.13	85.86
Flu	4	21.95	250.43	96.63	58.66	60.70
Pyr	4	15.68	207.51	68.72	45.45	66.14
Chr	4	5.13	179.16	61.10	40.29	132.23
BaA	5	0.44	180.18	23.61	31.22	65.94
BkF	5	8.15	121.99	43.26	30.23	71.12
BbF	5	0.05	100.71	28.96	20.60	69.87
BaP	5	5.67	190.40	34.49	36.59	106.09
DBA	5	0.26	19.40	6.24	4.26	60.56
IcdP	6	3.35	43.33	15.25	9.39	68.30
BghiP	6	3.33	68.18	23.48	16.21	69.07
\sum PAHs		198.21	3400.89	908.72	709.30	78.05
LMWPAHs		93.98	2531.38	506.97	555.57	109.59
HMWPAHs		104.23	1016.26	401.75	228.08	56.77

1) LMWPAHs 指 2 环和 3 环的低环 PAHs 的质量之和, HMWPAHs 指 4~6 环的高环 PAHs 的质量之和

1.4 灰尘 PAHs 暴露情景设计

教练在驾校工作时间不同, 暴露灰尘 PAHs 的量必然不同, 健康风险也会存在差异. 本研究设计了在驾校工作 5 a (情景 1)、10 a (情景 2) 和 20 a (情景 3) 3 种情景, 分别计算其灰尘 PAHs 暴露量及健康风险.

2 结果与分析

2.1 驾校灰尘 PAHs 含量与组成

从该市 29 所驾校灰尘 16 种 PAHs 的含量 (表 3) 可见, \sum PAHs 含量范围为 198.21 ~ 3400.89 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 908.72 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 灰尘 \sum PAHs 含量最高的驾校是 J18 (3400.89 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其次是 J20 (2443.41 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 J16 (2379.10 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 含量最低的驾校是 J5 (198.21 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其次是 J1 (255.76 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 J7 (274.78 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 低环 PAHs 稍占优势, LMWPAHs 占 \sum PAHs 的 55.79%, HMWPAHs 占 \sum PAHs 的 44.21%. 不同单体 PAHs 的平均质量分数为: 3 环 (38.18%) > 4 环 (24.92%) > 2 环 (17.61%) > 5 环 (15.03%) > 6 环 (4.26%). 可见驾校灰尘中以 3 环和 4 环 PAHs 为主, 共占 \sum PAHs 的 63.10%. LMWPAHs 以 3 环中的 Phe 和 Ant 为主, 分别占 \sum PAHs 的 18.57% 和 11.04%; HMWPAHs 以 4 环中的 Flu 为主, 占 \sum PAHs 的 10.63%.

与国内外其他城市灰尘 PAHs 含量对比, 本研究的驾校灰尘 \sum PAHs 含量显著高于伊朗德黑兰 ($330 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 街道灰尘^[23], 与伊朗伊斯法罕 ($1074.58 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[24]、越南河内 ($1500 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[25] 街道灰尘的含量水平相近, 低于西安 ($10620 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[26]、重庆 ($4204 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[27]、新乡 ($3223 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[28]、福州 ($2884.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29] 和贵阳 ($1928.66 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[30] 等城市街道灰尘。

2.2 驾校灰尘 PAHs 健康风险评价

按照式 (1) ~ (5) 分别计算得到驾校灰尘

PAHs 在 3 种暴露情景下的 ILCRs 和 CR (表 4)。由表 4 可知, 3 种情景都是 $\text{ILCRs}_{\text{皮肤接触}} > \text{ILCRs}_{\text{摄入}} > \text{ILCRs}_{\text{呼吸}}$ 。情景 1、2、3 的平均 $\text{ILCRs}_{\text{皮肤接触}}$ 分别占其 CR 的 64.03%、63.97% 和 64.62%, 平均为 64.21%; $\text{ILCRs}_{\text{摄入}}$ 分别占其 CR 的 35.97%、36.03% 和 36.11%, 平均为 33.04%; 呼吸途径可以忽略不计。从全市平均来看, 3 种情景下的平均 CR 大小顺序为: 情景 3 (3.71×10^{-7}) > 情景 2 (4.47×10^{-7}) > 情景 1 (9.27×10^{-8}), 说明随着驾校教练员的教龄增长, 暴露灰尘 PAHs 所致的健康风险增大。

表 4 各驾校不同暴露情景下的 ILCRs 和 CR

Table 4 ILCRs and CR of PAHs in dusts for different exposure scenes in driving-schools

暴露情景	统计值	ILCRs _{摄入}	ILCRs _{皮肤接触}	ILCRs _{呼吸}	CR
情景 1 (5 a)	最小值	7.50E-09	1.33E-08	5.81E-13	2.08E-08
	最大值	1.34E-07	2.38E-07	1.04E-11	3.72E-07
	均值	3.34E-08	5.93E-08	2.59E-12	9.27E-08
情景 2 (10 a)	最小值	1.50E-08	2.66E-08	1.16E-12	1.25E-07
	最大值	2.68E-07	4.77E-07	2.08E-11	2.23E-06
	均值	6.68E-08	1.19E-07	5.18E-12	4.47E-07
情景 3 (20 a)	最小值	3.00E-08	5.33E-08	2.33E-12	8.32E-08
	最大值	5.37E-07	9.53E-07	4.16E-11	1.49E-06
	均值	1.34E-07	2.37E-07	1.04E-11	3.71E-07

从 29 所驾校灰尘的健康风险 (图 1) 可见, 在情景 1 和情景 2 下, 所有样点及其平均 CR 都小于 10^{-6} 数量级, 不存在健康风险; 情景 3 下, 样点 J11 的 CR 值为 1.49×10^{-6} , 存在潜在健康风险, 其他样

点均小于 10^{-6} , 不存在健康风险。

之所以驾校 J11 存在灰尘 PAHs 健康风险最强, 是由于该驾校位于本市的驾考中心和机动车检测中心大院内, 且周围有汽车交易市场、汽车修理

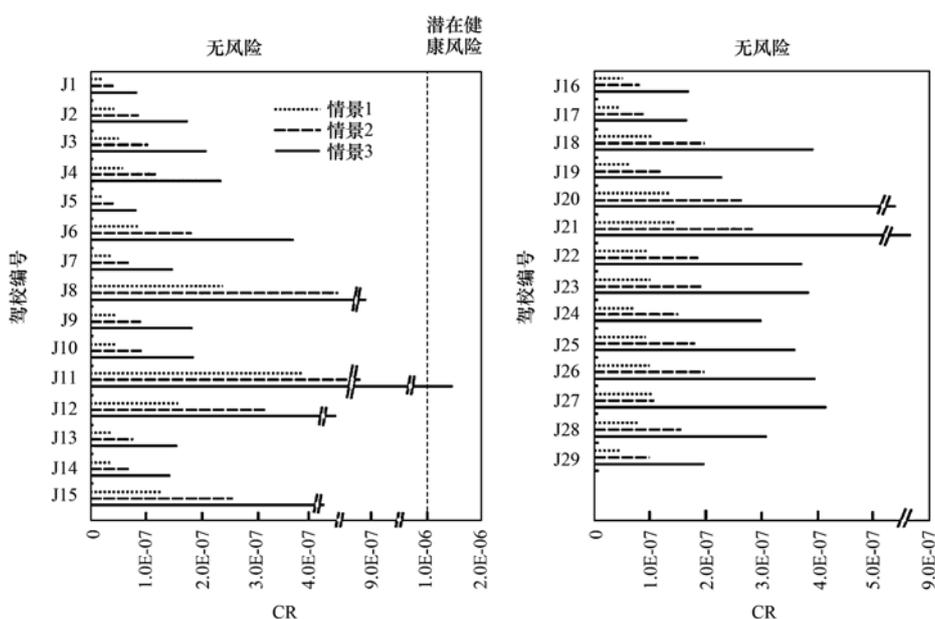


图 1 各驾校不同情景下的健康风险

Fig. 1 Average CR of PAHs in dusts from different driving-schools for different scenarios

市场,车流量很大的缘故. 驾校 J11 灰尘 \sum PAHs 含量 ($1\ 104.56\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 虽然不是驾校中的最高者,但也超过平均值 $200\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 更为重要的是, J11 灰尘中毒性最强的 BaP 含量很高,达 $190.40\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是各驾校平均值的 5.52 倍; 灰尘 BaP 含量占 \sum PAHs 的 17.24%,远高于各驾校的平均值 3.4%. 故此, J11 灰尘 PAHs 的 TTEC 最大 ($217.90\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 导致 3 种暴露情景下的 CR 都最大,其中情景 3 达到了潜在健康风险水平.

3 讨论

3.1 驾校灰尘 PAHs 源解析

3.1.1 PAHs 特征比值法

PAHs 不同单体间质量分数的比值可定性分析其来源^[9, 27-29]. 本研究选取 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 和 $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 进行驾校灰尘 PAHs 源解析: $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr}) < 0.2$ 指示石油源, $0.2 \sim 0.35$ 指示石油、化石燃料不完全燃烧混合源, > 0.35 指示化石燃料不完全燃烧源; $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP}) < 0.2$ 指示石油源, $0.2 \sim 0.5$ 指示化石燃料不完全燃烧源, > 0.5 指示煤炭和薪材不完全燃烧源^[5, 31]. 此外, $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 的均值为 0.43 ± 0.20 时表示柴油车的排放量较大^[32], 柴油车和汽油车排放的 BaP/IcdP 均值分别为 1.0 和 0.4^[33].

从该市 29 所驾校灰尘 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 和 $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 分布 (图 2) 可知, 6 个驾校灰尘 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 在 $0 \sim 0.2$ 之间, 为石油源; 19 个驾校在 $0.2 \sim 0.35$ 之间, 为石油、燃烧混合源; 4 个驾校 > 0.35 , 为化石燃料不完全燃烧源. 而且, 93.10% 的驾校灰尘 $\text{IcdP}/(\text{Icdp} + \text{BghiP})$ 在 $0.2 \sim$

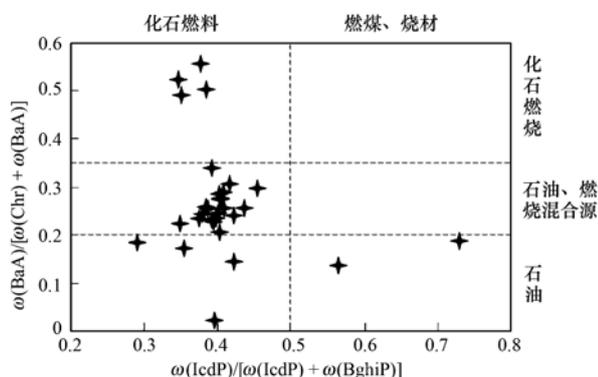


图 2 不同驾校灰尘中 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 和 $\text{IcdP}/(\text{Icdp} + \text{BghiP})$ 分子比率

Fig. 2 Bivariate plots of $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ versus $\text{IcdP}/(\text{Icdp} + \text{BghiP})$ in dusts of different driving-schools

0.5 之间,均值为 0.41,表明化石燃料不完全燃烧是 PAHs 的主要来源. 79.31% 的驾校灰尘 BaP/IcdP 在 1.02 ~ 2.79 之间,均值为 1.45,更接近柴油车 1.0. 由此可以得到如下结论: 该市驾校灰尘 PAHs 主要来源为化石燃料不完全燃烧源和混合源,其中柴油车尾气排放贡献较大.

3.1.2 成分谱法

根据表 1 所列 29 所驾校周围环境状况,大致可将驾校分为 3 类: 一是农田区驾校,周围主要是农田、公路等 PAHs 来源相对单一的驾校,包括驾校 J1 ~ J7、J17,共 8 所驾校; 二是工业区驾校,周围多是工业企业,包括驾校 J11、J16、J18 ~ J21、J23 ~ J29,共 13 所驾校; 三是混合区驾校,周围是住宅、空地,农田,文教、行政或公司用地,包括 J8 ~ J10、J12 ~ J15、J22,共 8 所驾校.

农田区驾校可以较好地响应驾校对灰尘 PAHs 的影响,其他驾校周围的人类活动较复杂,对驾校灰尘 PAHs 含量均有不同程度的干扰. 由农田区驾校灰尘 PAHs 成分谱 (图 3) 可知,驾校灰尘以柴油车排放标识物 Phe 和 Ant^[32] 占绝对优势,其平均含量分别占 \sum PAHs 的 15.14% 和 15.06%; Pyr 和 BkF 的相对含量也较高,占 9.02% 和 7.81%. 天然气动力机动车排放标识物为 Flu 和 Nap^[34],其平均含量分别占 \sum PAHs 的 11.55%、5.30%. 汽油车的排放标识物 BaP、IcdP 和 BghiP 等^[34] 所占的比例均未超过 5%. 组分特征进一步说明该市驾校柴油车 (大卡、皮卡等) 对灰尘 PAHs 排放与积累的贡献最为显著,其次为天然气动力机动车 (是目前教练车的主要动力车型) 的排放与积累.

与农田区驾校相比,工业区和混合区驾校灰尘 PAHs 的成分谱既有相似之处,又有所差异 (图 3). 三类驾校灰尘 PAHs 成分谱的趋势基本一致,说明尽管不同类型驾校灰尘 PAHs 的来源存在差异,但驾校汽车排放仍然占主导地位,PAHs 外源性输入或继承性影响处于次要地位.

三类驾校灰尘 PAHs 成分谱的不同之处表现为,农田区驾校灰尘 HMWPAHs 占 \sum PAHs 的比重较大,而其他两类驾校 LMWPAHs 占 \sum PAHs 的比重较大. 从图 3 可见,以 Ant 为界,右侧的高环 PAHs 单体占 \sum PAHs 的比重均表现为农田区驾校 > 混合区驾校 > 工业区驾校; 左侧低环 PAHs 单体占 \sum PAHs 的比重均表现为工业区驾校 > 混合区

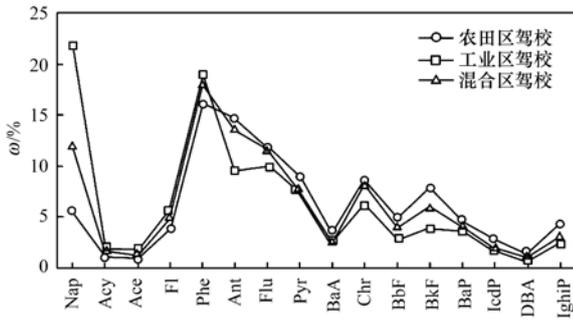


图3 不同类型驾校灰尘中16种PAHs的成分谱比较

Fig. 3 Component spectra of 16 PAHs in dusts of driving-schools in different regions

驾校 > 农田区驾校. 说明驾校灰尘 PAHs 外源性输入或继承性影响主要表现在低环 PAHs 单体上, 并且对工业区驾校的影响大于混合区驾校. 监测数据表明, 工业区驾校灰尘平均 Nap (2 环) 含量占比高达 22.74%, 尤其是驾校 J16、J18、J20 的 Nap 含量分别高达 1 188.097、932.65、459.97 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 这些驾校都位于老工业区, 周围分布有化肥厂、钢铁厂、汽车配件厂、磷肥厂、炼锌厂等, 常年受到燃煤锅炉、焦化等工业活动的影响, 导致工业区驾校灰尘 Nap 含量很高^[34~36]. 混合区驾校灰尘 PAHs 外源性输入或继承性影响更为复杂, 其低环单体的含量与比重低于工业区驾校, 而高于农业区驾校.

3.1.3 主成分分析/多元线性回归法

先采用主成分分析法 (PCA) 分别对上述三类驾校数据进行因子分析, 然后根据 PAHs 各组分载荷高低来研究它们的来源, 最后通过多元逐步线性回归分析 (MLR) 获得各主要来源的相对贡献率. 从 3 类驾校灰尘 PAHs 数据均可提取出 3 个因子. 工业区和农田区驾校的因子 1, 混合区驾校的因子 2 较相似, 中低环组分 Nap、Acy、Ace、Fl、Phe、Ant、Flu、Pyr 等有较高的载荷, 根据前文所述各类源的特征指示物, 判定农田区驾校因子 1 和混合区驾校因子 2 为天然气/柴油动力车排放源, 工业区驾校因子 1 为混合源; 农田区与工业区驾校因子 2, 混合区驾校因子 3 较相似, BaP、IcdP 和 BghiP 代表了汽油车的特征指示物, 故将其判定为汽油车排放源; 工业区和农田区驾校因子 3, 混合区因子 1 较相似, BaA、BkF、BbF 和 BaP 等代表了燃煤焦化等的特征指示物, 故将其判定为炼焦/燃煤排放源、燃煤源、燃煤源.

三类驾校灰尘 PAHs 主成分的回归方程分别为: $Z_{\text{农田}} = 0.355F_1 + 0.107F_2 + 0.167F_3$, $Z_{\text{工业}} =$

$0.347F_1 + 0.104F_2 + 0.004F_3$, $Z_{\text{混合}} = 0.283F_1 + 0.282F_2 + 0.056F_3$. 农田区驾校灰尘 PAHs 的柴油/天然气动力车排放源、燃煤源和汽油车排放源的贡献率分别为 56.44%、26.55% 和 17.01%. 工业区驾校的混合源比例较高, 达 76.26%, 这是由于该区工业活动复杂、柴油货车流量大、紧邻加油加气站等导致的; 汽油车和炼焦/燃煤排放源的比例分别为 22.85% 和 0.89%. 混合区驾校的燃煤源比例与柴油/天然气动力车排放源相当, 分别占 45.57% 和 45.41%, 汽油车排放源比例很低, 只占 9.02%, 这可能是混合区驾校多靠近交通要道与居民区, 居民冬季燃煤取暖有较大贡献所致.

3.2 不同驾校灰尘 PAHs 含量和健康风险差别原因

不同驾校灰尘 PAHs 含量与健康风险的差别可能与建校时间、周围环境状况、建校前的土地利用状况、教练车密度及车型等多种因素有关. 工业区、混合区和农田区驾校灰尘 \sum PAHs 含量均值表现出依次递减趋势, 分别为 1 306.06、787.77 和 383.98 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 情景 3 的 CR 均值分别为 4.81×10^{-7} 、 3.81×10^{-7} 、 1.83×10^{-7} , 说明驾校周边环境对其灰尘 PAHs 含量和健康风险具有很大影响.

驾校建校前的土地利用方式对当前驾校灰尘 PAHs 含量和健康风险也具有很大影响. 在 29 所驾校中, 除 J18 和 J20 的前期土地利用分别是三轮车厂和汽车配件厂, J13 是某倒闭的公司场地之外, 其他驾校的前期土地利用基本上都是农田或村庄 (表 1). 本研究表明, 驾校 J18 灰尘的 PAHs 含量是所有驾校中的最高者, 为 3 400.89 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其毒性当量浓度是 57.70 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 驾校 J20 灰尘的 \sum PAHs 含量和毒性当量浓度分别是 1 104.57 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 217.90 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 从图 1 可见, 驾校 J18 和 J20 在 3 种情景下的健康风险也是比较高的.

驾校的建校时间、教练车密度与其灰尘 PAHs 含量和健康风险的相关分析发现, 彼此之间并没有显著正相关 ($P < 0.05$). 其原因可能是由于影响驾校灰尘 PAHs 含量与健康风险的因素众多, 建校时间和车辆密度只是较为重要的驾校内部因素, 除此之外主要与驾校周围环境状况和前期土地利用状况密切相关. 如前所述, 如果驾校周围有工业企业, 那么企业排放的 PAHs 可通过空气迁移, 以干湿沉降形式降落在驾校区域, 增加其外源性 PAHs 的输入; 如果驾校建校前是工业废弃地, 那么前期工业场地会残留一定量的 PAHs. 这些外源性或继承性 PAHs

的影响往往会对驾校灰尘 PAHs 造成很大的影响。

4 结论

(1) 该市 29 所驾校灰尘 \sum PAHs 含量范围在 198.21 ~ 3 400.89 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 908.72 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。单体 PAHs 含量较高的是萘、菲、蒽、荧蒽, 含量最低的是二苯并[a,h]蒽。低环 PAHs 所占比例稍占优势, LMWPAHs 占 \sum PAHs 的 55.79%, HMWPAHs 占 \sum PAHs 的 44.21%。

(2) 随着驾校教练员的教龄增长, 暴露灰尘 PAHs 所致的健康风险增大。在情景 1(在驾校工作 5 a) 和情景 2(在驾校工作 10 a) 下, 29 所驾校暴露灰尘 PAHs 的平均 CR 都小于 10^{-6} , 不存在健康风险; 在情景 3(在驾校工作 20 a) 下, 除驾校 J11 存在潜在健康风险外, 其他样点均不存在健康风险。皮肤接触灰尘是最主要的 PAHs 暴露途径, 其占总风险的 64.21%; 其次是误食途径, 占总风险的 33.04%; 吸入途径可忽略不计。

(3) 该市驾校灰尘 PAHs 主要来源为化石燃料不完全燃烧源和混合源, 农田区驾校灰尘柴油/天然气动力车排放源, 燃煤源和汽油车排放源贡献率分别为 56.44%、26.55% 和 17.01%, 工业区驾校混合源、汽油车和炼焦/燃煤排放源比例分别为 76.26%、22.85% 和 0.89%, 混合区驾校燃煤源、柴油/天然气动力车排放源和汽油车排放源的比例分别为 45.57%、45.41% 和 9.02%。

(4) 驾校灰尘 PAHs 除来自驾校本身的 PAHs 排放外, 还与驾校周围环境状况和建校前期土地利用方式密切相关。驾校周围环境的外源性 PAHs 输入或者前期土地利用的 PAHs 残留, 往往会对驾校灰尘 PAHs 含量与组成造成很大的影响。农田区驾校灰尘 HMWPAHs 占 \sum PAHs 的比重较大, 而其他两类驾校 LMWPAHs 占 \sum PAHs 的比重较大。

(5) 驾校空气中的气态和吸附态 PAHs 经呼吸进入人体也是比较重要的暴露途径, 但因本文的研究对象是驾校灰尘, 并未测定涉及空气中的气态和吸附态 PAHs 含量, 因此健康风险评价结果会低于实际风险水平。今后应进一步开展驾校空气中的气态和吸附态 PAHs 含量测定, 连同其灰尘一起进行综合风险评价。

致谢: 河南大学 2011 级环境专业本科生郭溪香、马延豪、张洋同学参加了样品采集, 2012 级环

境专业本科生卢二超、张孝帅同学对灰尘 PAHs 的测定给予了帮助, 在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] Durant J L, Busby Jr W F, Lafleur A L, *et al.* Human cell mutagenicity of oxygenated, nitrated and unsubstituted polycyclic aromatic hydrocarbons associated with urban aerosols [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 1996, **371**(3-4): 123-157.
- [2] Shi J W, Peng Y, Li W F, *et al.* Characterization and source identification of PM₁₀-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Tianjin, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, **10**(5): 507-518.
- [3] WHO. Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons. Environmental health criteria [M]. Geneva: World Health Organization/International Program on Chemical Safety, 1998. 202.
- [4] Watanabe H, Nakajima F, Kasuga I, *et al.* Toxicity evaluation of road dust in the runoff process using a benthic ostracod *Heterocypris incongruens* [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(12): 2366-2372.
- [5] Wang W, Huang M J, Kang Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: status, sources and human health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(21): 4519-4527.
- [6] Qi H, Li W L, Zhu N Z, *et al.* Concentrations and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor dust in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **491-492**: 100-107.
- [7] Liang J, Fang H, Wu L, *et al.* Characterization, distribution, and source analysis of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of atmospheric bulk deposition in Shanghai, China [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2016, **227**(7): 1-14.
- [8] Choi S D, Ghim Y S, Li J Y, *et al.* Factors affecting the level and pattern of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at Gosan, Korea during a dust period [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **227-228**(5): 79-87.
- [9] 向丽, 李迎霞, 史江红, 等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 159-167.
Xiang L, Li Y X, Shi J H, *et al.* Investigation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in street dusts in urban Beijing [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 159-167.
- [10] Liu M, Cheng S B, Ou D N, *et al.* Characterization, identification of road dust PAHs in central Shanghai areas, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(38): 8785-8795.
- [11] Wang X T, Chen L, Wang X K, *et al.* Occurrence, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban (Pudong) and suburban soils from Shanghai in China [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1224-1232.
- [12] Jiang Y F, Hu X F, Yves U J, *et al.* Status, source and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust of an industrial city, NW China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **106**: 11-18.
- [13] 李英红, 饶志国, 谭吉华, 等. 兰州大气细颗粒物中多环芳

- 烃污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2428-2435.
- Li Y H, Rao Z G, Tan J H, *et al.* Pollutional characteristics and sources analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric fine particulate matter in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2428-2435.
- [14] 卢福峰, 邢核, 许秀艳, 等. ASE 萃取-SPE 净化-HPLC 法测定土壤中多环芳烃[J]. 环境监测管理与技术, 2007, **19**(3): 25-27, 31.
- Lu F F, Xing H, Xu X Y, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbon in soil samples by accelerated solvent extraction coupled with solid-phase extraction clean up[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2007, **19**(3): 25-27, 31.
- [15] Nisbet J C T, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, **16**(3): 290-300.
- [16] 张树才, 张巍, 王开颜, 等. 北京东南郊大气中多环芳烃的相分配及其致癌毒性表征[J]. 生态环境, 2006, **15**(6): 1165-1169.
- Zhang S C, Zhang W, Wang K Y, *et al.* Phase distribution and carcinogenic of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in the southeastern suburb of Beijing, China [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(6): 1165-1169.
- [17] Peng C, Chen W P, Liao X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: status, sources, distribution and potential risk [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(3): 802-808.
- [18] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [19] UK EA, DEFRA. Contaminants in soils: collation of toxicological data and intake values for humans. Benzo[a]pyrene [EB/OL] [R]. <https://www.gov.uk/government/organisations/environment-agency>, 2002.
- [20] 北京市环境保护局. 场地环境评价导则[R]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2009.
- [21] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民暴露参数探讨[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- Wang Z S, Duan X L, Liu P, *et al.* Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [22] 吴以中, 唐小亮, 葛滢, 等. RBCA 和 Csoil 模型在挥发性有机物污染场地健康风险评估中的应用比较[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(12): 2458-2466.
- Wu Y Z, Tang X L, Ge Y, *et al.* Comparison of RBCA and Csoil Model applications in health risk assessment of a volatile organic compounds contaminated site [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(12): 2458-2466.
- [23] Saeedi M, Li L Y, Salmanzadeh M. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: pollution and ecological risk assessment in street dust of Tehran [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **227-228**: 9-17.
- [24] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 712-723.
- [25] Tuyen L H, Tue N M, Suzuki G, *et al.* Aryl hydrocarbon receptor mediated activities in road dust from a metropolitan area, Hanoi—Vietnam: contribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and human risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **491-492**: 246-254.
- [26] Wei C, Bandowe B A M, Bandowe M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (alkyl-PAHs, oxygenated-PAHs, nitrated-PAHs and azaarenes) in urban road dusts from Xi'an, Central China[J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 512-520.
- [27] 李章平. 重庆市主城区街道灰尘的污染与风险特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- Li Z P. Characteristics and risk analysis of street dust pollution in country town of Chongqing [D]. Chongqing: Doctoral Dissertation of Southwestern University, 2012.
- [28] 冯精兰, 刘书卉, 申君慧. 新乡市道路灰尘中 PAHs 的污染特征和来源解析[J]. 环境化学, 2013, **32**(4): 630-639.
- Feng J L, Liu S H, Shen J H, *et al.* Pollution characteristics and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust from Xinxiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(4): 630-639.
- [29] 陈卫锋, 倪进治, 杨红玉, 等. 福州市区街道灰尘中多环芳烃的质量分数及其来源[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(2): 177-183.
- Chen W F, Ni J Z, Yang H Y, *et al.* Concentrations and sources of PAHs in the street dust of Fuzhou city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(2): 177-183.
- [30] 王娅, 贺华中, 林野, 等. 贵阳市道路地表灰尘中多环芳烃的分布特征及生态风险评估[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2010, **46**(4): 483-487.
- Wang Y, He H Z, Lin Y, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of PAHs in road dust of Guiyang urban area [J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Science)*, 2010, **46**(4): 483-487.
- [31] 王丽, 王利军, 史兴民, 等. 西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1279-1286.
- Wang L, Wang L J, Shi X M, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dust of Xi'an City, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1279-1286.
- [32] 李英红, 谭吉华, 段菁春, 等. 中国主要排放源颗粒相多环芳烃的成分谱特征[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(6): 58-69.
- Li Y H, Tan J H, Duan J C, *et al.* Characteristic of particle-PAHs source profile in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(6): 58-69.
- [33] Menichini E, Monfredini F, Merli F. The temporal variability of the profile of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air: a study in a medium traffic area in Rome, 1993-1998 [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(23): 3739-3750.
- [34] 蔚隽. 西安市机动车排放尾气中多环芳烃对大气环境的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- Yu J. Research on the influence of the PAHs in automobile tail

- gas to air environment in Xi'an city[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.
- [35] 葛佳, 刘振鸿, 杨青, 等. 加油站的油品渗漏污染调查及健康风险评估[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(2): 97-101.
Ge J, Liu Z H, Yang Q, *et al.* Investigation and assessment: oil leakage contamination at a gas station and the health hazards due to its contamination[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(2): 97-101.
- [36] 于国光, 王铁冠, 吴大鹏. 薪柴燃烧源和燃煤源中多环芳烃的成分谱研究[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 285-289.
- Yu G G, Wang T G, Wu D P. Study on fingerprints of PAHs from the combustion of bavin and coal [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 285-289.
- [37] 李静, 吕永龙, 焦文涛, 等. 天津滨海工业区土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 2111-2117.
Li J, Lü Y L, Jiao W T, *et al.* Concentration and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in the Industrial Area of Tianjin, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(10): 2111-2117.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发刊,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172