

多方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2019  
Vol.40 No.4  
第40卷 第4期

目 次

- 南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 ..... 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)  
西安市  $PM_{2.5}$  中碳质气溶胶污染特征 ..... 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)  
太原市冬季  $PM_{2.5}$  化学组分特征与来源解析 ..... 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)  
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 ..... 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)  
珠海市郊区大气  $PM_{2.5}$  中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)  
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 ..... 金同俊, 祁建华, 郑梓延, 林学辉(1562)  
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 ..... 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)  
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 ..... 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)  
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 ..... 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)  
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 ..... 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)  
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 ..... 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)  
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 ..... 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翩, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)  
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和  $O_3$  分析 ..... 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长秦(1634)  
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 ..... 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)  
南昌市扬尘  $PM_{2.5}$  中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 ..... 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)  
道路扬尘排放因子建立方法与应用 ..... 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)  
现实工况下挖掘机尾气排放特征分析 ..... 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)  
雾-霾对人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 ..... 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)  
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 ..... 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)  
支持向量机回归在臭氧预报中的应用 ..... 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)  
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析 ..... 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)  
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 ..... 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴伟, 彭学义, 刘九缠(1715)  
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 ..... 刘成, 孙翠竹, 张哿, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)  
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 ..... 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)  
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例 ..... 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)  
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) ..... 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)  
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 ..... 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)  
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 ..... 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)  
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征 ..... 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)  
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 ..... 何露露, 杨平, 谭立山, 全川, 黄佳芳(1788)  
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险 ..... 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)  
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 ..... 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)  
超声活化过硫酸盐降解水中典型嗅味 ..... 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)  
金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(VI) ..... 闫增元, 习海玲, 袁立永(1819)  
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 ..... 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)  
氢氧化镧改性介孔稻壳生物炭除磷性能 ..... 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)  
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 ..... 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)  
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生 ..... 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)  
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 ..... 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)  
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 ..... 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)  
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试 ..... 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)  
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉颖(1878)  
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能 ..... 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)  
异养硝化细菌 *Pseudomonas putida* YH 的脱氮特性及降解动力学 ..... 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郑丹(1892)  
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响 ..... 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)  
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落 ..... 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)  
内源碳 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 ..... 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)  
中国市政污泥中磷的含量与形态分布 ..... 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 吴宇翔(1922)  
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 ..... 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)  
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮( $N_2O$ )浓度特征及影响因素 ..... 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)  
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤  $CH_4$  吸收规律 ..... 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)  
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 ..... 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)  
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 ..... 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)  
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 ..... 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)  
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 ..... 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)  
生物发酵制药 VOCs 与嗅味治理技术研究与发展 ..... 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明晗, 杨敏(1990)  
《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

# 南昌市扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价

于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任\*

(华侨大学化工学院, 厦门 361021)

**摘要:** 为了解南昌市道路扬尘和土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃(PAHs)的来源和健康风险, 利用颗粒物再悬浮系统采集 PM<sub>2.5</sub> 样品, 测定了 PM<sub>2.5</sub> 中 16 种优先控制的多环芳烃的含量。结果表明, 南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量范围为 48.85 ~ 166.16  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $(114.22 \pm 39.95) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量范围为 31.05 ~ 62.92  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $(40.79 \pm 9.39) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。道路尘和土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中的 PAHs 都是以 4 ~ 5 环组分为主。主成分分析/多元线性回归分析结果表明, 南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的来源包括机动车的排放和燃煤源与石油泄漏, 贡献率分别为 51.7% 和 48.3%, 总估计值与实际值的线性拟合有很好的一致性。对于儿童和成年男性, 不同暴露途径的 PAHs 致癌风险值从大到小依次是皮肤接触 > 摄食 > 呼吸吸入, 而成年女性则表现为摄食 > 皮肤接触 > 呼吸吸入。各暴露途径中, PAHs 对成人的致癌风险均高于儿童。所有人群中, PAHs 的总致癌风险值均低于美国 EPA 推荐的致癌风险阈值  $10^{-6}$ , 没有致癌风险。

**关键词:** 南昌市; 扬尘 PM<sub>2.5</sub>; 多环芳烃; 来源解析; 健康风险评价

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1656-08 DOI: 10.13227/j.hjxk.201809106

## Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM<sub>2.5</sub> Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City\*

YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, WANG Shan-shan, ZHAO Li-si, HU Gong-ren\*

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to understand the sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the PM<sub>2.5</sub> fraction of road dust and soil dust in Nanchang city, PM<sub>2.5</sub> samples were collected by a resuspension sampler and the concentrations of sixteen polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were detected. The results showed that the  $\sum$  PAHs of the road dust ranged from 48.85 to 166.16  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with a mean of  $(114.22 \pm 39.95) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The  $\sum$  PAHs of the soil dust ranged from 31.05 to 62.92  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  with a mean of  $(40.79 \pm 9.39) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The PAHs in the PM<sub>2.5</sub> fraction of fugitive dust were mainly composed of 4-5 rings. The results of the principal component analysis and multiple linear regression analysis indicated that the PAHs in PM<sub>2.5</sub> samples of road dust mainly originated from motor vehicle emissions, coal sources, and oil leakage, with contribution rates of 51.7% and 48.3%, respectively. For children and adult males, the carcinogenic risk values of PAHs in different exposure pathways followed the order dermal contact > ingestion > inhalation, while those for adult females followed the order ingestion > dermal contact > inhalation. For all exposure pathways, the carcinogenic risks of the PAHs to adults were higher than those to children. For all populations, the total carcinogenic risk values of the PAHs were lower than the US EPA recommended carcinogenic risk threshold of  $10^{-6}$ , indicating no carcinogenic risk.

**Key words:** Nanchang City; PM<sub>2.5</sub> fraction of fugitive dust; polycyclic aromatic hydrocarbons; sources analysis; health risk assessment

多环芳烃(PAHs)是具有毒性和持久性的有机污染物<sup>[1]</sup>, 广泛分布在大气、水、土壤等不同环境介质中<sup>[2]</sup>。化石燃料燃烧、工业生产、煤炭燃烧等人类活动是环境中 PAHs 的主要来源<sup>[3,4]</sup>。开放扬尘是城市大气颗粒物的重要来源, 而 PAHs 在城市扬尘中普遍存在并随之迁移。其中细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 更容易富集 PAHs, 不仅污染环境, 对人体健康也会产生致癌风险<sup>[5~7]</sup>。

南昌市是中国重要的综合交通枢纽和现代制造业基地, 因城市建设产生的扬尘是大气 PM<sub>2.5</sub> 的重要贡献源<sup>[8]</sup>。目前, 关于城市扬尘细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的研究鲜见报道, 多数是关于整体扬尘中

PAHs 的组成特征、来源解析和风险评价等<sup>[9~13]</sup>。因此, 本研究以南昌市道路扬尘和土壤风沙尘两种源尘的 PM<sub>2.5</sub> 为研究对象, 分析其中 PAHs 的含量分布特征, 并利用主成分分析/多元线性回归法解析其来源和计算贡献率, 采用 EPA 推荐的健康风险评价模型评价其致癌风险, 以期为南昌市大气污染防治和环境管理提供参考依据。

收稿日期: 2018-09-12; 修订日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(21477042, 21377042); 福建省自然科学基金项目(2016J01065)

作者简介: 于瑞莲(1970 ~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: ruiliyan@hqu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: gahu@hqu.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

道路扬尘的采集分别选取南昌市具有代表性的城市主干道(八一大道、丰和大道、昌南大道)、次干道(三店西路、会展路、京东大道)、支路(彭桥路、苏圃路、芙蓉路),每条道路选3个采样点,各采样点之间距离:主干道不小于1 000 m、次干道不小于500 m、支路不小于100 m。用毛刷收集机动车道边沿的道路积尘。每个样点采集5个子样品混合,每个样点采集不少于500 g,共计27个样品。

在南昌市的东、南、西、北各方向和西南、东北两个主导风向6个点位选择裸露农田、绿地或果园地采集土壤风沙尘,在每个样点采用梅花布点法采集裸露地面的表层土混合样,使用刷子刷去表面1~2 cm的土壤及杂物,用木铲取一定量样品,每个点位采3个样品,共计18个样品。道路扬尘和土壤风沙尘的具体点位见图1。道路扬尘和土壤风沙尘均带回实验室后自然晾干,过150目筛后的量不少于500 g,然后用石英滤膜在NK-ZXF颗粒物再悬浮采样器采集相应的PM<sub>2.5</sub>样品,密封于自封袋中,于4℃条件下保存待分析。

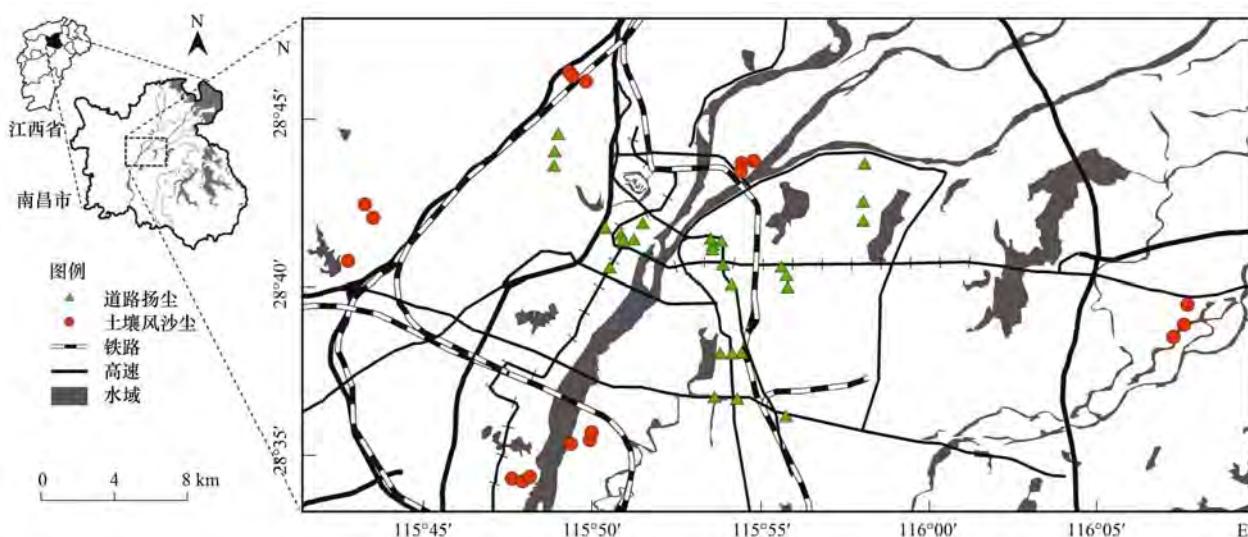


图1 南昌市两种源尘采样示意  
Fig. 1 Sampling sites of the two types of fugitive dusts in Nanchang City

### 1.2 样品分析与质量控制

将载有扬尘PM<sub>2.5</sub>的石英滤膜剪成细长条置于具塞离心管中,再在离心管中加入10 mL重蒸后的二氯甲烷,用超声清洗器超声提取10 min;取出离心管,在3 000 r·min<sup>-1</sup>下离心10 min;将上清液移入50 mL圆底烧瓶中,再向离心管中加入10 mL二氯甲烷,超声提取10 min,离心10 min,将上清液合并入50 mL圆底烧瓶中;用旋转蒸发器浓缩(40℃,低于常压0.02~0.03 MPa)至近干,将浓缩液移入K-D浓缩管中,再用氮吹仪吹至0.2 mL;将浓缩液滴加在硅胶柱中,依次加入40 mL正己烷,100 mL二氯甲烷和正己烷(3:7)混合液洗脱,分别得到正构烷烃和多环芳烃洗脱液,洗脱液用旋转蒸发器浓缩(45℃,低于常压0.07~0.08 MPa)至近干,移入K-D浓缩管中,氮气吹至近干,加二氯甲烷定容至1 mL。采用GC-MS分析优先控制的16种多环芳烃:萘(Nap)、苊烯(Acy)、芴(Flu)、苊(Ace)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、䓛(Chr)、苯并[a]蒽(BaA)、苯并[b]荧蒽(BbF)、

苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[ah]蒽(DahA)、苯并芘(BghiP)和茚并芘(InP)。

样品分析过程设置10%样品空白和20%的平行样品,平行样结果控制在±30%内;并采用16种多环芳烃混合标样(Accustandard, 美国)作为标准样品,控制加标回收率在68%~110%之间。定量分析采用外标法,十氟联苯作为反应前处理提取效果的替代物加入样品中,控制回收率在50%~120%之间,具体的提取、浓缩、净化、测定方法及质控措施见文献[4]。

### 1.3 主成分分析/多元线性回归(PCA-MLR)模型

采用主成分分析法(PCA)对数据进行因子分析,根据因子中载荷系数高低来判断它们的来源,最后通过多元线性回归法(MLR)确定各因子(来源)的贡献率<sup>[14]</sup>。以因子得分作为自变量,标准化的PAHs总量作为因变量,进行多元线性回归分析,得到标准回归方程为:

$$Z = \sum_{i=1}^n (A_i \times F_i)$$

式中,  $Z$  为标准化的 PAHs 总量;  $n$  为提取的因子个数;  $A_i$  为第  $i$  个因子的标准化方程系数;  $F_i$  为第  $i$  个因子得分。

各因子(来源)的贡献率计算公式为:

$$\text{各因子(来源) 贡献率} = \left( A_i / \sum_{i=1}^n A_i \right) \times 100\%$$

式中,  $n$  为提取的因子个数;  $A_i$  为第  $i$  个因子的标准化方程系数。

#### 1.4 致癌健康风险评价模型

##### 1.4.1 毒性当量含量计算

由于不同环数的 PAHs 的毒性不同, 国内外均以 BaP 的毒性当量因子(TEF)为参照, 得到其他单体 PAHs 的 TEF, 各单体 PAHs 的 TEF<sup>[15]</sup>见表 1。计算总毒性当量含量(TEQ<sub>BaP</sub>)公式如下:

$$\text{TEQ}_{\text{BaP}} = \sum_{i=1}^{16} (\omega_i \times \text{TEF}_i)$$

式中, TEQ<sub>BaP</sub> 为总毒性当量含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\omega_i$  为

$$\begin{aligned} \text{ILCR}_{\text{ing}} &= \frac{\text{TEQ}_{\text{BaP}} \times \text{CSF}_{\text{ing}} \times \sqrt[3]{\text{BW}/70} \times \text{IR}_{\text{ing}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 10^6} \\ \text{ILCR}_{\text{inh}} &= \frac{\text{TEQ}_{\text{BaP}} \times \text{CSF}_{\text{inh}} \times \sqrt[3]{\text{BW}/70} \times \text{IR}_{\text{inh}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{PEF}} \\ \text{ILCR}_{\text{derm}} &= \frac{\text{TEQ}_{\text{BaP}} \times \text{CSF}_{\text{derm}} \times \sqrt[3]{\text{BW}/70} \times \text{SA} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 10^6} \end{aligned}$$

$$\text{TILCR} = \text{ILCR}_{\text{ing}} + \text{ILCR}_{\text{inh}} + \text{ILCR}_{\text{derm}}$$

式中, ILCR<sub>ing</sub>、ILCR<sub>inh</sub> 和 ILCR<sub>derm</sub> 分别为摄食、呼吸吸入和皮肤接触途径的致癌健康风险值; TILCR 为 3 种途径的致癌健康风险之和, 即总致癌风险值; IR<sub>ing</sub> 为摄食速率( $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ); IR<sub>inh</sub> 为呼吸速率( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ), EF 为暴露频率( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ), ED 为暴露持续时间(a), BW 为体重(kg), AT 为平均暴露时间(a), PEF 为颗粒物排放因子( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ); SL 为皮肤黏着度 [ $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ], SA 为暴露皮肤面积( $\text{cm}^2$ ), ABS 为皮肤吸收因子; CSF<sub>ing</sub>、CSF<sub>inh</sub> 和 CSF<sub>derm</sub> 是

第  $i$  个单体 PAHs 的含量, TEF<sub>i</sub> 为第  $i$  个单体 PAHs 的毒性当量因子。

表 1 PAHs 的毒性当量因子

| PAHs | 毒性当量因子<br>(TEF) | PAHs  | 毒性当量因子<br>(TEF) |
|------|-----------------|-------|-----------------|
| Nap  | 0.001           | Chr   | 0.01            |
| Acy  | 0.001           | BghiP | 0.01            |
| Ace  | 0.001           | BaA   | 0.1             |
| Flu  | 0.001           | BbF   | 0.1             |
| Phe  | 0.001           | BkF   | 0.1             |
| Fla  | 0.001           | InP   | 0.1             |
| Pyr  | 0.001           | DahA  | 1               |
| Ant  | 0.01            | BaP   | 1               |

##### 1.4.2 致癌健康风险值计算

PAHs 对人体健康产生致癌风险包括 3 个途径: 经口摄入、呼吸吸入及皮肤接触<sup>[16]</sup>。根据美国 EPA 推荐的致癌健康风险评价模型计算 PAHs 对人体健康产生的影响, 具体公式<sup>[17]</sup>如下:

3 种暴露途径的致癌斜率系数, 分别为 7.3、3.85 和 25.0 ( $\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ <sup>[17~19]</sup>。当 ILCR 或 TILCR <  $10^{-6}$  时, 表示没有致癌风险; 当 ILCR 或 TILCR 介于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  时, 表示存在一定致癌风险; 当 ILCR 或 TILCR >  $10^{-4}$  时, 表示存在较高的致癌风险。

为了使 PAHs 的致癌健康风险评价结果更符合中国人群的特性, 本文中的暴露参数部分选用了《中国人群暴露参数手册》等文献<sup>[20~22]</sup>的相关参数。各参数取值见表 2。

表 2 致癌风险评价暴露参数

Table 2 Exposure parameters for the carcinogenic health risk assessment

| 暴露参数   | 儿童(0~18岁)              | 成人男性(18岁以上)            | 成人女性(18岁以上)            |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| IR <sub>ing</sub> /mg·d <sup>-1</sup>              | 90                     | 50                     | 50                     |
| IR <sub>inh</sub> /m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> | 10.8                   | 17.7                   | 14.5                   |
| EF/d·a <sup>-1</sup>                               | 365                    | 365                    | 365                    |
| ED/a   | 6                      | 24                     | 24                     |
| BW/kg  | 32.2                   | 66.1                   | 57.8                   |
| AT/d   | 74.8 × 365             | 72.4 × 365             | 77.4 × 365             |
| PEF/m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>               | 1.36 × 10 <sup>9</sup> | 1.36 × 10 <sup>9</sup> | 1.36 × 10 <sup>9</sup> |
| SL/mg·(cm <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup>           | 0.2                    | 0.07                   | 0.07                   |
| SA/cm <sup>2</sup>                                 | 1091                   | 1700                   | 1500                   |
| ABS  | 0.13                   | 0.13                   | 0.13                   |

## 2 结果与讨论

### 2.1 南昌市道路扬尘和土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的含量

表 3 为南昌市道路扬尘和土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的含量, 所有样品中 Acy、Flu、Ace、Ant 和 InP 均低于检测限, 土壤风沙尘中 BaA、DahA 和 BghiP 也未检出。道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量范围为 48.85 ~ 166.16  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $(114.22 \pm 39.95) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 检出的 PAHs 中 BkF 的含量最高, 平均值为  $(20.03 \pm 8.35) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其次是 BbF ( $18.71 \pm 5.63$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Phe ( $18.00 \pm 6.04$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 Nap ( $11.86 \pm 5.13$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占总量的比例分别为 17.5%、16.4%、15.8% 和 10.4%。土

壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量范围为 31.05 ~ 62.92  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $(40.79 \pm 9.39) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 含量较高的为 BbF ( $6.91 \pm 1.79$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、BkF ( $6.64 \pm 1.79$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Phe ( $6.58 \pm 1.73$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Nap ( $6.21 \pm 1.67$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 BaP ( $5.75 \pm 2.34$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占比分别为 16.9%、16.3%、16.1%、15.2% 和 14.1%。高环多环芳烃 (HMWPAHs) 是扬尘的主要组成部分, 分别为  $(84.36 \pm 31.23) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $(28.00 \pm 6.20) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占  $\sum$  PAHs 含量的比例为 73.9% 和 68.6%, 说明 PAHs 主要来源于化石燃料的不完全燃烧<sup>[23]</sup>。对比两种源尘的 PAHs 含量, 土壤风沙尘均低于道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中的 PAHs 含量, 这与道路受交通活动影响更大有关。

表 3 南昌市两种源尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Contents of PAHs in PM<sub>2.5</sub> of the two types of the fugitive dust in Nanchang City/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

| PAHs             | 环数 | 道路扬尘           |                    | 土壤风沙尘            |                  |
|------------------|----|----------------|--------------------|------------------|------------------|
|                  |    | 含量范围           | 平均值 $\pm$ 标准偏差     | 含量范围             | 平均值 $\pm$ 标准偏差   |
| Nap              | 2  | 1.27 ~ 20.30   | $11.86 \pm 5.13$   | 4.91 ~ 9.52      | $6.21 \pm 1.67$  |
| Phe              | 3  | 8.38 ~ 29.00   | $18.00 \pm 6.04$   | 5.07 ~ 9.95      | $6.58 \pm 1.73$  |
| Fla              | 4  | 3.74 ~ 14.90   | $9.16 \pm 3.27$    | 2.32 ~ 5.04      | $3.18 \pm 0.92$  |
| Pyr              | 4  | 3.54 ~ 14.10   | $8.74 \pm 3.19$    | 2.05 ~ 4.74      | $2.90 \pm 0.88$  |
| Chr              | 4  | 3.38 ~ 13.70   | $8.55 \pm 3.16$    | 1.88 ~ 4.31      | $2.61 \pm 0.83$  |
| BaA              | 4  | ND ~ 9.74      | $5.29 \pm 3.22$    | ND <sup>1)</sup> | ND               |
| BbF              | 5  | 9.04 ~ 29.33   | $18.71 \pm 5.63$   | 5.35 ~ 11.37     | $6.91 \pm 1.79$  |
| BkF              | 5  | 8.60 ~ 35.51   | $20.03 \pm 8.35$   | 5.02 ~ 10.52     | $6.64 \pm 1.79$  |
| BaP              | 5  | 2.30 ~ 16.70   | $9.54 \pm 4.72$    | 1.30 ~ 10.51     | $5.75 \pm 2.34$  |
| DahA             | 5  | ND ~ 3.87      | $1.11 \pm 1.61$    | ND               | ND               |
| BghiP            | 6  | ND ~ 5.79      | $3.25 \pm 1.64$    | ND               | ND               |
| $\sum$ PAHs      |    | 48.85 ~ 166.16 | $114.22 \pm 39.95$ | 31.05 ~ 62.92    | $40.79 \pm 9.39$ |
| LMWPAHs(2 ~ 3 环) |    | 15.95 ~ 49.30  | $29.86 \pm 9.70$   | 10.04 ~ 19.43    | $12.79 \pm 3.39$ |
| HMWPAHs(4 ~ 6 环) |    | 32.90 ~ 125.16 | $84.36 \pm 31.23$  | 20.91 ~ 43.54    | $28.00 \pm 6.20$ |

1) ND: 未检出

### 2.2 南昌市两种源尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的环数组成

南昌市道路扬尘和土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 环数组成见图 2。从中可知, 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 从 2 环到 6 环的占比分别为 10.39%、15.76%、27.78%、43.23% 和 2.84%, 土壤风沙尘中 PAHs 从 2 环到 6 环的占比分别为 15.21%、16.14%、21.33%、47.32% 和 0.00%。两种源尘的 PAHs 都是以 4 ~ 5 环组分为主, 主要是由于机动车排放、工业活动和燃煤等影响, 另一方面, 高分子量的 PAHs 能长期滞留, 低分子量的容易挥发降解<sup>[24]</sup>。所有道路中三店西路、彭桥路和昌南大道扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中的  $\sum$  PAHs 含量较高, 分别为 162.47、156.19 和 151.88  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与 3 条道路属于交通要道有密切联系; 而丰和大道、苏圃路和会展路的扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量较低, 分别为 56.18、

67.55 和 75.06  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 初步分析是由于红谷滩新区正处于发展阶段, 没有明显的工业污染及巨大的交通流量。道路扬尘的 PAHs 环数组成(八一大道除外)符合 5 环 > 4 环 > 3 环 > 2 环 > 6 环的规律。八一大道、昌南大道、三店西路和彭桥路的 5 ~ 6 环 PAHs 明显高于其他道路, 说明与机动车尾气排放有较大关系<sup>[25]</sup>。

### 2.3 南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的来源解析

表 4 为南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中各 PAHs 的主成分分析结果。共识别出 2 个主要因子, 共解释了变量方差贡献的 85.90%, 能够反映大部分的数据信息。因子 1 中载荷系数较高的为 DahA、Fla、Pyr、Chr、Phe、BaA、BghiP、BkF 和 BaP, 方差贡献率为 52.19%, DahA 和 BghiP 是汽油机动车排放的标识物<sup>[26]</sup>, BaA、BkF 和 Chr 指示的是柴油车排

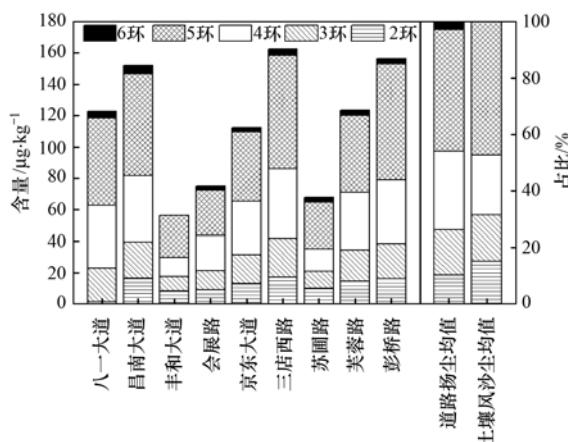
图 2 南昌市两种源尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的环数组成

Fig. 2 Contents of different ring types for the PAHs in PM<sub>2.5</sub> of the two types of fugitive dust in Nanchang City

放<sup>[27,28]</sup>，Fla、Phe 和 Pyr 源于燃煤<sup>[29]</sup>，因此因子 1 代表的是机动车的排放和燃煤源。因子 2 的方差贡献率为 33.71%，其中 Nap 的载荷系数较高(0.923)，Nap 与未燃烧的石油泄漏有关<sup>[30]</sup>，因此因子 2 代表的是石油泄漏。

从主成分分析结果得出，南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的来源包括机动车的排放和燃煤源与石油泄漏。通过线性回归得出标准方程为：

$$Z = 0.728F_1 + 0.681F_2 \quad (R^2 = 0.994)$$

机动车的排放和燃煤源与石油泄漏的贡献率分别为 51.7% 和 48.3%。

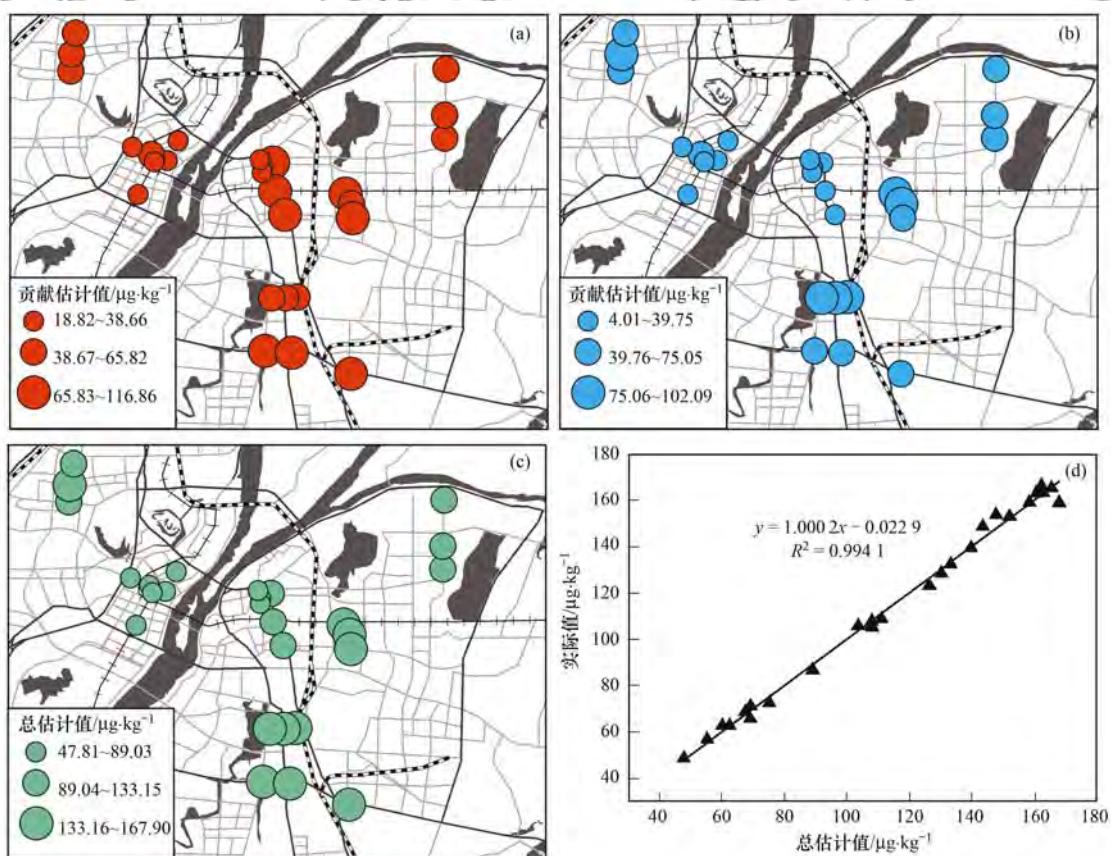
表 4 南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的主成分分析结果<sup>1)</sup>

Table 4 Principal component analysis results of the PAHs in PM<sub>2.5</sub> of road dust in Nanchang City

| PAHs      | 因子 1         | 因子 2         |
|-----------|--------------|--------------|
| DahA      | <b>0.862</b> | -0.201       |
| Fla       | <b>0.800</b> | 0.566        |
| Pyr       | <b>0.786</b> | 0.596        |
| Chr       | <b>0.779</b> | 0.608        |
| Phe       | <b>0.774</b> | 0.605        |
| BaA       | <b>0.772</b> | 0.559        |
| BghiP     | <b>0.755</b> | 0.183        |
| BkF       | <b>0.754</b> | 0.577        |
| BaP       | <b>0.741</b> | 0.502        |
| Nap       | -0.036       | <b>0.923</b> |
| BbF       | 0.497        | <b>0.688</b> |
| 累积方差贡献率/% | 52.19        | 85.90        |
| 来源        | 机动车的排放和燃煤源   | 石油泄漏         |
| 贡献率/%     | 51.7         | 48.3         |

1) 黑体字表示因子中载荷系数较高的值

南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的主成分因子贡献估算空间分布见图 3，因子 1(机动车的排放和燃煤源)的估算贡献值[图 3(a)]在昌南大道、八一



(a) 因子 1 贡献估计值；(b) 因子 2 贡献估计值；(c) 总估计值；(d) 总估计值与实际值的线性拟合

图 3 南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的估算贡献值

Fig. 3 Estimated contribution of PAHs in PM<sub>2.5</sub> of road dust in Nanchang City

大道和彭桥路是较高的, 其中八一大道和昌南大道分别是南昌市南北向、东西向的重要通道, 彭桥路位于北京东路(地铁1号线)南侧, 交通发达, 车流量很大, 机动车尾气排放明显增加; 而在丰和大道和会展路处于较低水平, 两条道路位于正在发展阶段的红谷滩新区, 没有工业影响以及交通流量也不大。因子2[石油泄漏, 图3(b)]在三店西路的贡献值最高, 红谷滩新区的丰和大道、会展路和老城区的苏圃路、八一大道处于较低水平, 主要由于三店西路靠近工业区以及分布较多的加油站, 可能产生石油泄漏及化石燃料的不完全燃烧。从图3(c)可以看出, PAHs 总估计值在彭桥路、昌南大道、三店西路较高, 与实测含量的结果一致。总估计值与实际值的线性拟合[图3(d)] $R^2$  值为0.9941, 拟合方程为 $y = 1.002x - 0.0229$ , 说明二者具有很好的一致性。

#### 2.4 南昌市两种源尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的致癌风险评价

南昌市道路扬尘和土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的3种暴露途径健康风险结果见表5。所有人群中, ILCRs 均低于 $10^{-6}$ , 无致癌风险。在道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中, 儿童、成年男性和成年女性的 TILCR 的均值分

别为 $4.00 \times 10^{-8}$ 、 $5.63 \times 10^{-8}$  和  $5.41 \times 10^{-8}$ 。土壤风沙尘相对更低, TILCR 的均值分别为 $1.88 \times 10^{-8}$ 、 $2.64 \times 10^{-8}$  和  $2.54 \times 10^{-8}$ 。对于儿童和成年男性, 3种暴露途径的致癌风险值从大到小依次是 $\text{ILCR}_{\text{derm}} > \text{ILCR}_{\text{ing}} > \text{ILCR}_{\text{inh}}$ , 而成年女性则表现为 $\text{ILCR}_{\text{ing}} > \text{ILCR}_{\text{derm}} > \text{ILCR}_{\text{inh}}$ 。不同的暴露途径中, 成人的致癌健康风险均高于儿童, 说明随着年龄的增加, 致癌风险在逐渐增加。对比男性与女性的区别,  $\text{ILCR}_{\text{ing}}$  在女性上更高, 道路扬尘和土壤风沙尘的均值分别为 $2.80 \times 10^{-8}$  和  $1.31 \times 10^{-8}$ , 而 $\text{ILCR}_{\text{inh}}$  和  $\text{ILCR}_{\text{derm}}$  则表现为男性更高, 其均值分别为 $3.75 \times 10^{-12}$ 、 $2.90 \times 10^{-8}$  和  $1.76 \times 10^{-12}$ 、 $1.36 \times 10^{-8}$ , 这主要是由于女性的呼吸速率、体重、接触皮肤面积更低以及寿命更长造成的<sup>[19]</sup>。不同暴露途径中, 南昌市道路扬尘的致癌风险均比土壤风沙尘高, 也是由于道路更容易受人类活动的影响。

虽然本研究中两种源尘 PM<sub>2.5</sub> 中的 PAHs 致癌风险未超过可接受的风险水平 $10^{-6}$ , 但由于 PM<sub>2.5</sub> 中含有其他有害组分如重金属等也会对人体健康产生危害, 需结合多种组分的健康风险分析, 方可对扬尘中有害组分的健康危害有较准确的认识。

表5 南昌市道路扬尘和土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的致癌风险值

Table 5 Carcinogenic risk evaluation results of the PAHs in PM<sub>2.5</sub> of the two types of fugitive dust in Nanchang City

| 项目                          | 道路扬尘 |                        |                        | 土壤风沙尘                  |                        |                        |
|-----------------------------|------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                             | 均值   | 最小值                    | 最大值                    | 均值                     | 最小值                    | 最大值                    |
| $\text{ILCR}_{\text{ing}}$  | 儿童   | $1.92 \times 10^{-8}$  | $6.19 \times 10^{-9}$  | $3.17 \times 10^{-8}$  | $9.03 \times 10^{-9}$  | $4.00 \times 10^{-9}$  |
|                             | 成人男性 | $2.73 \times 10^{-8}$  | $8.80 \times 10^{-9}$  | $4.51 \times 10^{-8}$  | $1.28 \times 10^{-8}$  | $5.68 \times 10^{-9}$  |
|                             | 成人女性 | $2.80 \times 10^{-8}$  | $9.00 \times 10^{-9}$  | $4.62 \times 10^{-8}$  | $1.31 \times 10^{-8}$  | $5.81 \times 10^{-9}$  |
| $\text{ILCR}_{\text{inh}}$  | 儿童   | $8.95 \times 10^{-13}$ | $2.88 \times 10^{-13}$ | $1.48 \times 10^{-12}$ | $4.20 \times 10^{-13}$ | $1.86 \times 10^{-13}$ |
|                             | 成人男性 | $3.75 \times 10^{-12}$ | $1.21 \times 10^{-12}$ | $6.19 \times 10^{-12}$ | $1.76 \times 10^{-12}$ | $7.80 \times 10^{-13}$ |
|                             | 成人女性 | $3.14 \times 10^{-12}$ | $1.01 \times 10^{-12}$ | $5.19 \times 10^{-12}$ | $1.48 \times 10^{-12}$ | $6.54 \times 10^{-13}$ |
| $\text{ILCR}_{\text{derm}}$ | 儿童   | $2.08 \times 10^{-8}$  | $6.68 \times 10^{-9}$  | $3.43 \times 10^{-8}$  | $9.75 \times 10^{-9}$  | $4.32 \times 10^{-9}$  |
|                             | 成人男性 | $2.90 \times 10^{-8}$  | $9.32 \times 10^{-9}$  | $4.78 \times 10^{-8}$  | $1.36 \times 10^{-8}$  | $6.02 \times 10^{-9}$  |
|                             | 成人女性 | $2.61 \times 10^{-8}$  | $8.42 \times 10^{-9}$  | $4.32 \times 10^{-8}$  | $1.23 \times 10^{-8}$  | $5.44 \times 10^{-9}$  |
| TILCR                       | 儿童   | $4.00 \times 10^{-8}$  | $1.29 \times 10^{-8}$  | $6.60 \times 10^{-8}$  | $1.88 \times 10^{-8}$  | $8.31 \times 10^{-9}$  |
|                             | 成人男性 | $5.63 \times 10^{-8}$  | $1.81 \times 10^{-8}$  | $9.29 \times 10^{-8}$  | $2.64 \times 10^{-8}$  | $1.17 \times 10^{-8}$  |
|                             | 成人女性 | $5.41 \times 10^{-8}$  | $1.74 \times 10^{-8}$  | $8.93 \times 10^{-8}$  | $2.54 \times 10^{-8}$  | $1.12 \times 10^{-8}$  |

### 3 结论

(1) 南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量范围为 $48.85 \sim 166.16 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为 $(114.22 \pm 39.95) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 检出的 PAHs 中 BkF 的含量最高, 平均值为 $(20.03 \pm 8.35) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 土壤风沙尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量范围为 $31.05 \sim 62.92 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为 $(40.79 \pm 9.39) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2) 南昌市三店西路、彭桥路和昌南大道扬尘

PM<sub>2.5</sub> 中的  $\sum$  PAHs 含量较高, 丰和大道、苏圃路和会展路的扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中  $\sum$  PAHs 含量较低。道路扬尘的 PAHs 环数组成(八一大道除外)符合 5 环>4 环>3 环>2 环>6 环的规律。

(3) 主成分分析/多元线性回归分析结果得出, 南昌市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的来源包括机动车的排放和燃煤源与石油泄漏, 贡献率分别为 51.7% 和 48.3%, 总估计值与实际值的线性拟合有很好的一致性。

(4) 道路扬尘  $PM_{2.5}$  中 PAHs 对各类人群的致癌风险值均高于土壤风沙尘。对于儿童和成年男性, 3 种暴露途径的 PAHs 致癌风险值从大到小依次是  $ILCR_{derm} > ILCR_{ing} > ILCR_{inh}$ , 而成年女性则表现为  $ILCR_{ing} > ILCR_{derm} > ILCR_{inh}$ 。各暴露途径中, 成人的致癌健康风险均高于儿童。所有人群中,  $ILCRs$  均低于  $10^{-6}$ , 没有致癌风险。

#### 参考文献:

- [1] Majumdar D, Rajaram B, Meshram S, et al. Worldwide distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2017, **14**(2): 397-420.
- [2] Wang X F, Cheng H X, Xu X B, et al. A wintertime study of polycyclic aromatic hydrocarbons in  $PM_{2.5}$  and  $PM_{2.5-10}$  in Beijing: assessment of energy structure conversion[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **157**(1): 47-56.
- [3] 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 等. 大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5272-5281.
- [4] 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 等. 大庆市秋季  $PM_{2.5}$  中多环芳烃的污染特征、风险评价及来源分析[J]. 环境化学, 2016, **35**(3): 500-507.
- [5] Zhao Y, Lin X H, Hu G R, et al. Pollution characteristics, risk assessment and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in  $PM_{2.5}$  collected in autumn in Nanchang City[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(3): 500-507.
- [6] Srogi K. Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2007, **5**(4): 169-195.
- [7] Pickering R W. A toxicological review of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Journal of Toxicology: Cutaneous and Ocular Toxicology, 1999, **18**(2): 101-135.
- [8] 曹治国, 王萌萌, 王小颖, 等. 办公室地面灰尘中 PAHs 污染的时间变化规律及人体健康风险[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(3): 209-219.
- [9] Cao Z G, Wang M M, Wang X Y, et al. Time variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in floor dust from office and corresponding human health risks [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(3): 209-219.
- [10] 魏秀芝, 左嘉, 魏宝梅. 南昌市扬尘污染现状及防治情况报告[J]. 黑龙江科技信息, 2016, (10): 13.
- [11] 陈铁楠, 马建华, 段海静, 等. 河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 711-720.
- [12] Chen Y N, Ma J H, Duan H J, et al. Compositions, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dusts from driving-schools in a City of Henan Province, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 711-720.
- [13] Kong S F, Ding X, Bai Z P, et al. A seasonal study of polycyclic aromatic hydrocarbons in  $PM_{2.5}$  and  $PM_{2.5-10}$  in five typical cities of Liaoning Province, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **183**(1-3): 70-80.
- [14] 赵洪涛, 尹澄清, 陈梅雪. 长江三角洲河网地区典型城镇街尘中多环芳烃的污染特征[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(1): 123-130.
- [15] Zhao H T, Yin C Q, Chen M X. The pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from a typical town in the Yangtze River Delta[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, **4**(1): 123-130.
- [16] Yu B B, Xie X J, Ma L Q, et al. Source, distribution, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust from Tianjin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(4): 2817-2825.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Nisbet I C T, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992, **16**(3): 290-300.
- [21] USEPA. Exposure factors handbook [R]. EPA/600/P-95/002Fa. Washington, DC: USEPA, 2011.
- [22] USEPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2002.
- [23] 王震. 辽宁地区土壤中多环芳烃的污染特征、来源及致病风险[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [24] Wang Z. Regional study on soil polycyclic aromatic hydrocarbons in Liaoning: patterns, sources and cancer risks [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [25] Knafla A, Phillipps K A, Brecher R W, et al. Development of a dermal cancer slope factor for benzo[a]pyrene [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2006, **45**(2): 159-168.
- [26] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [27] Environmental Protection Department. Exposure factors handbook of Chinese population (adults) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [28] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷 0~5岁)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [29] Environmental Protection Department. Exposure factors handbook of Chinese population (0-5 years Children) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.
- [30] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷 6~17岁)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [31] Environmental Protection Department. Exposure factors handbook of Chinese population: children (6-17 years) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.
- [32] 孙焰, 祁士华, 李绘, 等. 福建闽江沿岸土壤中多环芳烃含量、来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(6): 1821-1829.
- [33] Sun Y, Qi S H, Li H, et al. Concentrations, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils collected along the banks of Minjiang River, Fujian, China[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(6): 1821-1829.
- [34] 冯精兰, 刘书卉, 申君慧, 等. 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.
- [35] 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.
- [25] Guo H, Lee S C, Ho K F, et al. Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(38): 5307-5317.
- [26] Khairy M A, Lohmann R. Source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Alexandria, Egypt [J]. Chemosphere, 2013, **91**(7): 895-903.
- [27] Hamid N, Syed J H, Junaid M, et al. Elucidating the urban levels, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Pakistan: implications for changing energy demand [J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 165-175.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 范金鹏, 王晓利, 周家斌, 等. 济南市表层土壤中PAHs的分布、来源及风险分析 [J]. 环境化学, 2015, **34**(1): 166-171.
- Yuan J P, Wang X L, Zhou J B, et al. Distribution, source and risk analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in top-soil from Jinan City [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(1): 166-171.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2018年11月1日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2017年度中国科技论文统计结果。统计结果显示《环境科学》2017年度总被引频次11 228,影响因子1.958,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列。

### CONTENTS

|  |  |
|--|--|
| Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area .....   | YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, et al. (1521)                 |
| Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Xi'an .....  | MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, et al. (1529)           |
| Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During Winter in Taiyuan .....  | LIU Su, MA Tong, YANG Yan, et al. (1537)                     |
| Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou .....   | YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, et al. (1545)   |
| Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in a Suburb of Zhuhai City .....   | YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, et al. (1553)          |
| Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean .....   | JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, et al. (1562)          |
| CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM <sub>2.5</sub> in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism .....   | GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, et al. (1575)                    |
| Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei .....  | SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, et al. (1585)          |
| Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017 .....  | ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, et al. (1594)        |
| Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region .....  | QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, et al. (1604)          |
| Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province .....  | ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, et al. (1613)            |
| Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions .....  | GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, et al. (1627)          |
| Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station .....   | ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, et al. (1634)                 |
| Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing .....   | HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, et al. (1645)                    |
| Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM <sub>2.5</sub> Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City .....  | YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, et al. (1656)        |
| Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization .....   | FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, et al. (1664)              |
| Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators .....  | MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, et al. (1670)            |
| Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days .....   | YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, et al. (1680)               |
| Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days .....   | ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)                    |
| Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting .....  | SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, et al. (1697)        |
| Analysis of PHEV CO <sub>2</sub> Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities .....   | HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, et al. (1705)               |
| Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing .....                      | DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, et al. (1715)  |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay .....   | LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, et al. (1726)              |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay .....   | PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, et al. (1734)      |
| Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring .....  | MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, et al. (1742)                    |
| Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis .....                          | LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, et al. (1751)                |
| Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin .....   | XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, et al. (1760)      |
| Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model .....   | ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, et al. (1770)      |
| Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs .....  | CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, et al. (1779)             |
| Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn .....  | HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, et al. (1788)              |
| Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers .....   | WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, et al. (1797)       |
| Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis .....   | LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, et al. (1803)       |
| Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water .....  | SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, et al. (1811)                 |
| Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution .....   | YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)              |
| Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake .....   | GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, et al. (1826)    |
| Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide .....   | XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, et al. (1834)              |
| Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals .....   | CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, et al. (1842)           |
| Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles .....   | LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, et al. (1849)       |
| Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater .....   | HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)                  |
| Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor .....   | MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, et al. (1865)                |
| Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test .....  | LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, et al. (1871)            |
| Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System .....   | LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, et al. (1878)             |
| Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System .....   | ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, et al. (1885)          |
| Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics .....  | WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, et al. (1892)         |
| Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process .....  | WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, et al. (1900)       |
| Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions .....  | WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, et al. (1906)         |
| Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature .....  | YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, et al. (1914)         |
| Contents and Forms of Phosphorous in the Municipal Sewage Sludge of China .....  | WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, et al. (1922)              |
| Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou .....   | WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, et al. (1931)        |
| Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River ..... | TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, et al. (1939)              |
| CH <sub>4</sub> Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia .....   | YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, et al. (1950)          |
| Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application .....  | WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, et al. (1957)     |
| Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China .....   | XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, et al. (1965)           |
| Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region .....  | QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, et al. (1973)               |
| Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land .....   | KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, et al. (1981)   |
| VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry .....   | WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, et al. (1990) |