

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC、EC 污染特征 ..... 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 ..... 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM<sub>2.5</sub> 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 ..... 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中的元素特征 ..... 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 ..... 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骜鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM<sub>2.5</sub> 痕量重金属的生态和健康风险分析 ..... 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 ..... 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 ..... 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 ..... 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 ..... 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 ..... 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 ..... 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 ..... 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 ..... 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 ..... 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 ..... 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 ..... 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氨释放特性 ..... 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 ..... 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 ..... 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 ..... 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 ..... 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 ..... 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 ..... 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 ..... 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 ..... 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 ..... 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 ..... 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 ..... 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 ..... 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 ..... 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 ..... 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 ..... 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 ..... 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 ..... 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 ..... 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 ..... 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 ..... 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 ..... 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 ..... 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 ..... 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 ..... 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 ..... 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 ..... 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 ..... 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 ..... 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 ..... 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 ..... 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 ..... 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 ..... 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 ..... 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 ..... 解雪峰, 濮励珊, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 ..... 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 ..... 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 ..... 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 ..... 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

# 青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价

周雯雯<sup>1,2</sup>, 李军<sup>2</sup>, 胡健<sup>3\*</sup>, 朱兆洲<sup>2</sup>

(1. 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387; 2. 天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; 3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

**摘要:** 2013 年 7~8 月采集了青藏高原中东部地区 55 个表层土壤样品, 对土壤中多环芳烃 (PAHs) 的分布特征、来源等进行了研究, 并对表层土壤中的 PAHs 进行了生态风险评价. 土壤样品进行超声萃取, HLB 固相萃取小柱净化后, 采用 GC-MS 对土壤中美国 EPA 优先控制的 16 种 PAHs 进行了检测分析. 研究区域土壤中 16 种 PAHs 的总量为 40.47~1276.40  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 267.97  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 以 2~3 环的 PAHs 为主, 占 PAHs 的质量分数为 47.15%~88.51%, 平均值为 70.90%, 其中菲所占质量分数最高. 用比值法和主成分分析法进行来源解析, 结果显示青藏高原中东部土壤中 PAHs 主要来源于石油燃烧和生物质的燃烧. 土壤中苯并(a)芘的毒性当量浓度  $\text{TEQ}_{\text{BAP}}$  范围为 3.73~79.32  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 12.84  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 有 4% 的采样点超过荷兰土壤标准目标值 (33.00  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 青藏高原中东部少部分表层土壤存在潜在的生态风险.

**关键词:** 青藏高原; 土壤; 多环芳烃; 来源; 生态风险评价

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1413-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201707207

## Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau

ZHOU Wen-wen<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, HU Jian<sup>3\*</sup>, ZHU Zhao-zhou<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Fifty-five soil samples were collected across the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau during July to August in 2013. These were analyzed for the sixteen polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) called out by the USA EPA. The concentration characteristics, sources, and potential ecological risk assessment of the sixteen PAHs in the soils were investigated. The soils were extracted by ultrasonic extraction, purified by an HLB solid-phase extraction column, and quantified by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The total PAH concentrations ranged from 40.47 to 1276.40  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with a mean of 267.97  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Low-ring PAHs (two and three rings PAHs) were dominant in all samples, and the proportion of phenanthrene was the highest. The sources of PAHs were assessed by diagnostic ratios and a principal component analysis (PCA), which indicated that the main sources of the PAHs originated from petroleum and biomass combustion. The toxic equivalent concentration (TEQ) concentration of benzo(a)pyrene (TEQ<sub>BAP</sub>) in soils ranged from 3.73 to 79.32  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with an average concentration of 12.84  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The TEQ<sub>BAP</sub> in 4% of the soil samplings exceeded the Dutch target reference value (33.00  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), suggesting that a small portion of the soils in the Qinghai-Tibetan Plateau have potential ecological risk.

**Key words:** Qinghai-Tibetan Plateau; soil; polycyclic aromatic hydrocarbons; source; ecological risk assessment

多环芳烃 (PAHs) 是由 2 个或 2 个以上苯环连接在一起的一类具有较强致癌、致畸性和致突变的有机化合物<sup>[1]</sup>. 环境中的 PAHs 来源分为自然源和人为源, 但主要来源于人为活动, 如煤、木材、化石原料的不完全燃烧、汽车尾气排放、工业生产、石油泄漏等<sup>[2~4]</sup>. PAHs 广泛存在于土壤、水体、沉积物、气溶胶、污泥和植物等中<sup>[5]</sup>.

国内外学者对大气、河湖水体、沉积物、土壤中的 PAHs<sup>[6~10]</sup> 进行了广泛的研究. 土壤是环境中

PAHs 的重要储存库, 环境中 90% 以上的 PAHs 都存在于土壤中<sup>[11]</sup>. 由于 PAHs 具有低水溶性、高脂

收稿日期: 2017-07-24; 修订日期: 2017-09-12

基金项目: 国家重大科学研究计划项目 (2013CB956401); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07503003001); 国际 (地区) 合作与交流项目 (4161101324); 国家自然科学基金项目 (41172315); 天津市水资源与水环境重点实验室开放基金项目

作者简介: 周雯雯 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地表环境中有机污染物迁移转化, E-mail: Z147258ww@126.com

\* 通信作者, E-mail: hujian@vip.skleg.cn

溶性和难降解特性使得其极易吸附于颗粒物上,并在土壤中进行累积,之后可通过吸入土壤扬尘、皮肤接触或者通过植物等进入食物链的方式对人体健康构成威胁<sup>[12,13]</sup>,因此土壤中 PAHs 污染及其潜在危害不容忽视.我国对土壤中 PAHs 的研究主要集中于东部相对发达地区<sup>[14~16]</sup>,对西部环境恶劣地区尤其是青藏地区的研究较少.近几年主要对高山湖泊和草场等地区土壤中 PAHs 进行了研究<sup>[17~20]</sup>,青藏高原主要位于我国西南,平均海拔4 000 m以上,有“世界屋脊”之称.青藏高原人烟稀少,目前几乎无工业生产.而近几年随着青藏社会经济和旅游业的发展,越来越多的人和车辆进入青藏高原,青藏高原的环境受到越来越多的人类活动的影响.为了评估越来越强的人类活动对青藏高原的环境产生的影响,本研究通过对地处青藏高原中东部的青藏公路沿线表层土壤 PAHs 含量、分布特征的研究,进一步探讨其来源、评价其潜在危害,以期为人类活动程度对青藏高原的环境质量的影响的研究提供参考,并为全面保护和合理开发青藏高原提供数据支撑.

## 1 材料与实验方法

### 1.1 样品采集

2013年7~8月,在青藏公路沿线地带采样,采样点距离青藏公路约500 m,平均100 km左右设置一个采样点,途经都兰、格尔木、那曲、拉萨、林芝等地,共计55个采样点(图1),主要采集0~20 cm的表层土壤.采集的土壤样品装入自封袋中,尽快运回实验室,待样品自然风干后,剔除草根、砾石等杂物,用玛瑙研钵研磨土样,后过100目筛,密封装袋备用.本研究检测了美国国家环境保护署(USEPA)列出的16种优控PAHs:萘(Nap)、苊(Acy)、二氢苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fluo)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DBA)和苯并[g,h,i]芘(BghiP).

### 1.2 分析方法

实验中色谱纯的正己烷、二氯甲烷以及无水硫酸钠购买于上海安谱实验科技股份有限公司,沃特世 Oasis HLB 固相萃取小柱购买于美国 Waters 公司,16种PAHs标准溶液、回收率指示物 Nap-d8、Ace-d10、Phe-d10、Chr-d12 和 Pyr-d12,均购于美国

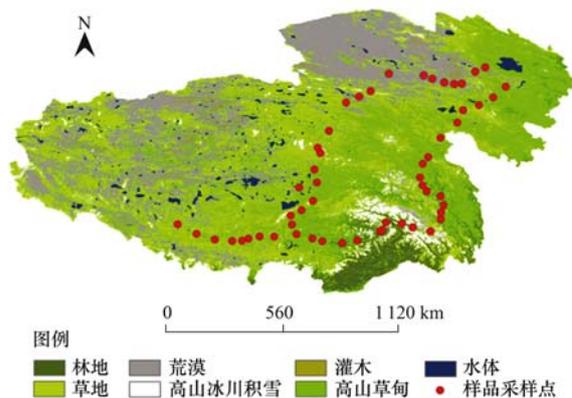


图1 青藏高原中东部表层土壤采样分布点

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites in the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau

New Haven 标准品公司.

准确称量 5.00 g 表层土壤、3.00 g 无水  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (已于马弗炉中 450℃ 灼烧 4 h) 于玻璃离心管中,添加 200.00  $\mu\text{L}$  回收率指示物 (Nap-d8、Ace-d10、Phe-d10、Chr-d12 和 Pyr-d12),加入 25.00 mL 二氯甲烷,超声提取 30.00 min,倒出超声后的液体,重复操作 3 次,合并 3 次超声后的液体旋转蒸发至 1.00 mL,再添加 10.00 mL 正己烷旋蒸,转换溶剂为正己烷至 1.50 mL,然后过 HLB 固相萃取小柱)进行净化,小柱用 3.00 mL 二氯甲烷洗脱,重复操作 3 次,收集 3 次洗脱液,旋转蒸发至 1.00 mL,再转换溶剂为正己烷旋、定容至 1.00 mL 待测. PAHs 采用气相色谱-质谱仪 (Agilent GC QTOF) 测定,离子源为 EI 源,电子能力 70 eV,离子源温度为 230℃;质量分析器为单四级杆;扫描范围 ( $m/z$ ) 35~500 u,定量分析为选择离子扫描 (SIM),电子倍增电压,色谱柱为 (HP-5MS, 15 m  $\times$  250  $\mu\text{m}$   $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ). 以高纯氦气为载体,流速为 1 mL  $\cdot$  min<sup>-1</sup>. 升温程序为:起始温度 70℃,保持 2 min,然后以 18  $^\circ\text{C} \cdot$  min<sup>-1</sup> 的速率上升至 140℃,再以 12  $^\circ\text{C} \cdot$  min<sup>-1</sup> 的速率上升至 240℃,保持 1 min,最后以 5  $^\circ\text{C} \cdot$  min<sup>-1</sup> 的速率上升到 280℃ 保持 10 min,不分流进样.

### 1.3 质量保证与质量控制

为保证实验方法的可靠性和实验数据的准确性,实验通过方法空白、空白加标、基质加标和样品平行等来进行质量控制和保证.样品空白加标回收率为 78.84%  $\pm$  15.84% ~ 110.81%  $\pm$  8.19%.样品基质加标回收率为 63.00% ~ 119.00%,空白样品中未检出目标污染物,16种PAHs的方法检出限为 0.012 ~ 45  $\mu\text{g} \cdot$  kg<sup>-1</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中 PAHs 含量及组成特征

采集的 55 个土壤样品中 16 种多环芳烃的检出率达到 98.00%，土壤中  $\sum_{16} \text{PAHs}$  为 40.47 ~ 1276.40  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为 267.97  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (表 1)。根据苯环数不同，可以将 PAHs 划分为低环(2~3 环)、中环(4 环)和高环(5~6 环)PAHs<sup>[21]</sup>。如图 2 所示青藏高原中

东部土壤中 2 环 3 环 PAHs 所占质量分数为 47.15% ~ 88.51%，平均值为 70.90%；4 环 PAHs 所占质量分数为 9.06% ~ 34.15%，平均值为 18.62%；5~6 环 PAHs 所占质量分数为 2.02% ~ 26.09%，平均值为 10.47%。个别采样点(1、2、9、34、42、50)中高环 PAHs 所占比例与低环 PAHs 的比例差别较小，但是整体上仍然是以低环 PAHs 占据绝对优势，青藏高原中东部土壤中 PAHs 以低环 PAHs 为主。

表 1 青藏高原中东部土壤 PAHs 含量及毒性当量

Table 1 Concentration and TEQ<sub>PAH</sub> of PAHs in soil samples collected in the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau

化合物	缩写	环数	含量	平均值	荷兰土壤质量	毒性当量因子	毒性当量范围	毒性当量平均值	超标率
			/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$					
萘	Nap	2	1.82 ~ 25.69	7.53	15.00	0.001	0.00 ~ 0.03	0.01	5.50
苊	Acy	2	1.10 ~ 21.79	2.75	—	0.001	0.00 ~ 0.02	0.00	—
二氢苊	Ace	2	1.14 ~ 39.45	5.21	—	0.001	0.00 ~ 0.04	0.01	—
芴	Flu	2	2.60 ~ 137.57	23.45	—	0.001	0.00 ~ 0.14	0.02	—
菲	Phe	3	12.90 ~ 440.51	114.19	50.00	0.001	0.01 ~ 0.44	0.11	87.27
蒽	Ant	3	1.94 ~ 15.43	4.36	50.00	0.01	0.00 ~ 0.15	0.04	—
荧蒽	Fluo	3	3.78 ~ 139.04	34.20	15.00	0.001	0.00 ~ 0.14	0.03	83.63
芘	Pyr	4	3.20 ~ 94.88	19.17	—	0.001	0.00 ~ 0.09	0.02	—
苯并(a)蒽	BaA	4	1.81 ~ 24.23	4.88	20.00	0.1	0.18 ~ 2.42	0.49	2.00
䓑	Chr	4	2.94 ~ 61.32	9.24	20.00	0.01	0.03 ~ 0.61	0.09	5.50
苯并(b)荧蒽	BbF	4	2.63 ~ 81.04	10.98	—	0.1	0.26 ~ 8.10	1.10	—
苯并(k)荧蒽	BkF	4	1.68 ~ 22.46	4.99	25.00	0.1	0.17 ~ 2.25	0.50	—
苯并(a)芘	BaP	5	1.45 ~ 33.40	5.16	25.00	1	1.45 ~ 33.40	5.16	2.00
茚(1,2,3-cd)并芘	InP	5	0.65 ~ 55.52	8.71	25.00	0.1	0.06 ~ 5.55	0.87	4.00
二苯并(ah)蒽	DBA	5	0.00 ~ 25.82	4.29	—	1	0.00 ~ 25.82	4.29	—
苯并(g,h,i)芘	BghiP	6	0.84 ~ 58.24	8.89	20.00	0.01	0.01 ~ 0.58	0.09	4.00
总和	$\sum_{16} \text{PAHs}$		40.47 ~ 1276.40	267.97	—	—	2.21 ~ 79.79	12.83	—

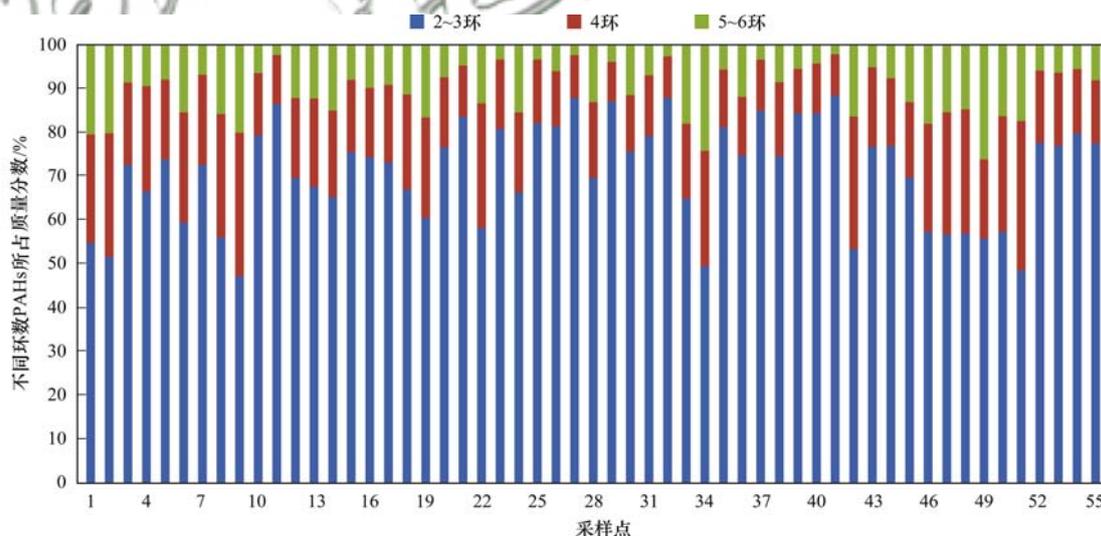


图 2 青藏高原中东部表层土壤中不同环数 PAHs 所占质量分数

Fig. 2 Constitution of PAHs with a varied number of aromatic and aliphatic rings in soil samples collected from the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau

### 2.2 土壤中 PAHs 污染状况

Maliszewska-Kordybnch 等<sup>[22]</sup>在 1996 年将土壤中

PAHs 的污染程度划分为 4 个等级，当土壤中 PAHs 含量低于 200  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时，土壤无污染；含量在 200

~600  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,土壤为轻度污染;含量范围在600~1 000  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤为中度污染;而当含量超过1 000  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,则土壤被认为受到了重度污染.如图3所示,本文所采样品的污染范围大部分位于无污染和轻度污染之间,采样点5、9、32的PAHs的含量超过600  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,达到了中度污染水平.采样点5位于两条国道相交不远处,受交通的影响更大,故污染水平较高.采样点9距离城市那曲不远,那曲是藏北地区政治、经济、文化、交通、信息和通讯的中心,人类活动较多,达到了中度污染.而采样点32位于国道318林芝市附近,离城镇地区较近且旅游业相对发达,交通量和人流量相对

较大,所以造成了一定程度的污染.

与其他地区土壤中PAHs含量(表2)比较发现:相较于西北门户西安市(平均值2 727.00  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),首都北京(平均值3 917.00  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),国际大都市上海(平均值2 068.00  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),发达城市深圳(平均值290.00  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),国外部分国家土壤中的PAHs相比较,研究区土壤PAHs含量总体处于较低水平,这也进一步反映城市地区由于工业活动和人为活动较多,造成了比较严重的环境污染.与其他青藏地区的<sup>[23-26]</sup>研究结果相比,本研究青藏高原中东部表层土壤PAHs含量较高.

表2 青藏高原中东部与其他地区土壤中PAHs含量的比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Comparison of PAHs concentrations in soils in the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau and other regions/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

采样点	土壤类型	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
青藏高原东部	城区和戈壁	0.83 ~ 14.41	—	[23]
藏东南		75.00 ~ 327.00	—	[24]
青藏高原中部	城区和郊区	0.43 ~ 26.7	—	[25]
青藏高原		10.50 ~ 102.10	—	[26]
青藏高原中东部	青藏公路沿线	40.47 ~ 1 276.40	267.97	本研究
中国西安	城区	125.00 ~ 9 057.00	2727	[27]
中国北京	城区	219.00 ~ 27 825.00	3917	[28]
中国上海	城区	24.92 ~ 1 014.61	2068	[29]
中国深圳	城区	2.00 ~ 6 745.00	290	[30]
中国贵阳	城区和郊区	247.00 ~ 1 560.00	—	[31]
美国佛罗里达	城区	83.00 ~ 2 371.00	543	[32]
葡萄牙里斯本	城区	6.30 ~ 22 670.00	1 544	[33]
印度新德里	农田	107.70 ~ 1 657.00	—	[34]
美国迈阿密	城区	1 508.00 ~ 2 364.00	1 869	[35]

### 2.3 PAHs来源解析

通过环数的分布特征可以作初步的来源分析,2~3环PAHs主要来源于原油和石油产品泄漏、化石燃料不完全燃烧和生物质低温燃烧,4~6环PAHs来源于化石和木材高温燃烧<sup>[36]</sup>.由图2所示,研究区土壤中低环数PAHs的占比最高,主要为石油源及化石燃料和生物质低温燃烧,尤其是Phe和Flu含量较高.通过PAHs环数分析是比较浅显的来源分析方法,为了进一步判断PAHs来源,本文采用PAHs特征组分比值法和主成分分析法进行PAHs来源分析.

#### 2.3.1 比值法

同分异构体比值法是近些年研究中比较常用的PAHs来源的判别方法<sup>[37,38]</sup>,本研究用BaA/(BaA+Chr)的比值做来源分析.当BaA/(BaA+Chr) < 0.2时为石化来源,0.2 < BaA/(BaA+Chr) < 0.35为石化和燃烧混合来源,当BaA/(BaA+Chr) > 0.35时,来源为燃烧源.若InP/(InP+BghiP) <

0.2时,PAHs来源为石油源,当0.2 < InP/(InP+BghiP) < 0.5,来源为石油燃烧源,而当InP/(InP+BghiP) > 0.5时,则其来源为煤和生物燃烧.对青藏高原中东部表层土壤中PAHs的来源用比值法进行分析(图4),结果显示所有采样点BaA/(BaA+Chr)和InP/(InP+BghiP)都大于0.2,并且其中的采样点位集中于燃烧源周围,说明其来源是燃烧源,青藏高原中东部土壤中PAHs主要来源于煤和生物燃烧源以及石油燃烧源.

#### 2.3.2 主成分分析

主成分分析也常被用来做来源解析<sup>[39]</sup>,用以进一步判断来源.运用SPSS软件,对55个样品PAHs进行主成分因子分析,KMO检验结果为0.815,说明适合进行主成分分析.如表3,提取累积方差贡献率89.92%.因子1中高环分子(BaA、Chr、BbF、BaP、InP和BghiP)载荷较高,高环分子的来源主要为石油燃烧源.因子2中Flu和Phe载荷高,这两种化合物主要是由炼焦活动产生<sup>[40]</sup>.在

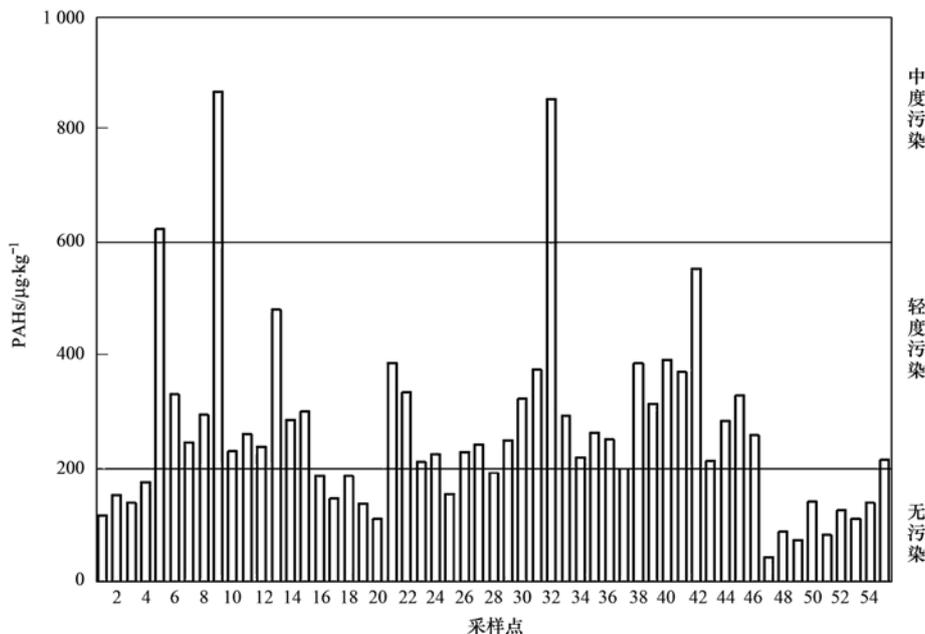


图 3 青藏高原中东部土壤 PAHs 污染水平

Fig. 3 Degree of contamination of PAHs in soil samples collected in the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau

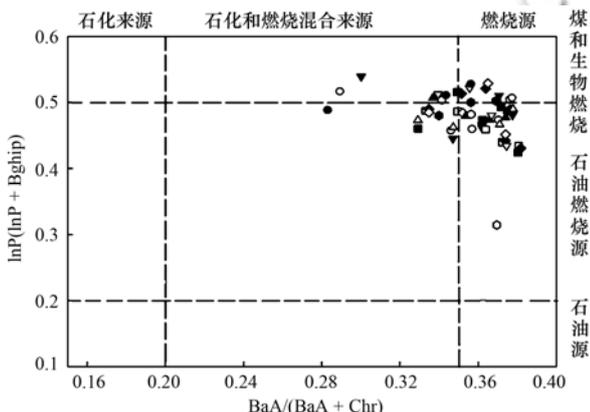


图 4 青藏高原中东部土壤中 PAHs 同分异构体特征比值

Fig. 4 Specific isomeric ratios of PAH species in soil samples from the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau

因子 3 中 Acy 载荷最高，其主要是薪柴燃烧的特征产物<sup>[41]</sup>。根据以上 3 个主成分结果，将主成分因子作为自变量 ( $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ )，以 16 种多环芳烃总量为因变量进行多元线性回归，通过回归系数得到来源的相对贡献率<sup>[22]</sup>，得出青藏高原中东部土壤 PAHs 来源于煤、石油等化石燃料高温燃烧占 27.29%，石油源和生物质燃烧产生 PAHs 占 58.82%，而由煤燃烧产生的 PAHs 只占 13.89% (表 3)。

比值法和主成分分析法对采样点的 PAHs 进行来源分析结果显示：青藏高原中东部 PAHs 来源主要是石油燃烧源和生物燃烧源。本研究采样点位于青藏高原中东部地区，经济不发达，生活水平不高，大部分地区还是以使用薪柴、牛粪等生物质能

为主，与当地能源利用情况基本符合；而又主要沿着青藏公路采样，交通的贡献相对较大，所以存在石油燃烧源成分。

表 3 青藏高原中东部土壤 PAHs 主成分分析旋转成分矩阵

Table 3 PCA results of the soil samples from the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau

成分	因子 1	因子 2	因子 3
Nap	0.63	0.55	0.10
Acy	0.08	0.12	0.96
Ace	-0.05	0.97	0.01
Fluo	-0.02	0.98	0.16
Phe	0.09	0.93	0.28
Ant	0.10	0.68	0.69
Fla	0.66	0.55	0.44
Pyr	0.76	0.44	0.40
BaA	0.91	0.13	0.30
Chr	0.94	0.11	0.27
BbF	0.96	0.07	0.24
BkF	0.80	0.25	0.03
BaP	0.94	0.09	0.18
InP	0.95	0.11	0.21
DahA	0.74	-0.09	0.29
BghiP	0.95	0.07	0.22
方差/%	60.89	22.18	6.89
累计方差/%	60.89	83.07	89.92
贡献率/%	27.29	58.82	13.89

2.4 PAHs 生态风险评价

参照荷兰土壤质量标准<sup>[22]</sup> (表 1)，本研究区域的土壤中 Phe 的超标率达到 87.27%，Fluo 超标率达 83.63%，Nap、Chr 的超标率为

5.50%，InP、BghiP 的超标率达到 4.00%，尤其是毒性较大的 BaP 也有超标，反映了青藏高原中东部土壤受到一定程度的 PAHs 污染，应予以重视。

为了进一步确定 PAHs 的生态风险，采用苯并(a)芘的毒性当量浓度  $TEQ_{BaP}$  对 PAHs 进行生态风险评价<sup>[42]</sup>。其计算公式为：

$$TEQ_{BaP} = \sum \text{组分 } i \text{ 的浓度} \times \text{组分 } i \text{ 的毒性当量因子}$$

表 1 列出了 16 种 PAHs 的毒性当量因子。将 55 个采样点的浓度及毒性因子代入上式，计算出青藏高原中东部各采样点的总体风险水平(图 5)，土壤中 16 种 PAHs 的总  $TEQ_{BaP}$  的范围在 3.73 ~ 79.32  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为 12.84  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中大约 4.00% 的土样中的值超过荷兰土壤标准目标参考值(33.0  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )，最高值为 79.32  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。通过图 5 所示，整体上研究区土壤的毒性较低。

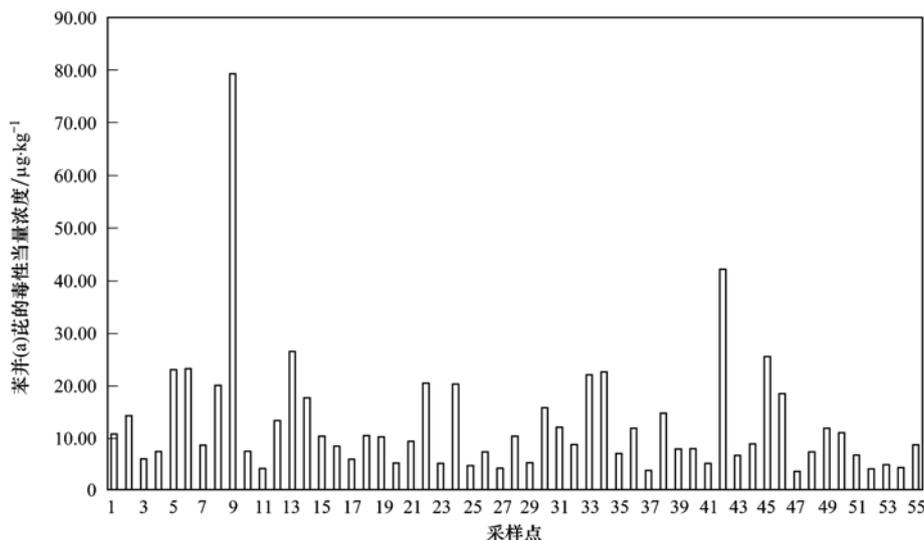


图 5 青藏高原中东部各采样点苯并(a)芘毒性当量浓度

Fig. 5 Toxic equivalent concentrations of BaP in the soil samples of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau

### 3 结论

(1) 青藏高原中东部土壤中 16 种 PAHs 含量为 40.47 ~ 1276.40  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为 267.97  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究区土壤 PAHs 主要以 2 ~ 3 环为主，其中 Phe 的含量较高，所占质量分数较大。

(2) 源解析结果表明青藏高原中东部土壤 PAHs 其污染来源主要是燃烧源，主要是石油燃烧源和生物燃烧源。

(3) 研究区域有 4.0% 的土壤 PAHs 超过荷兰土壤标准和苯并(a)芘的毒性当量浓度，大部分土壤处于无污染和轻度污染，少部分表层土壤存在潜在的生态风险。

#### 参考文献：

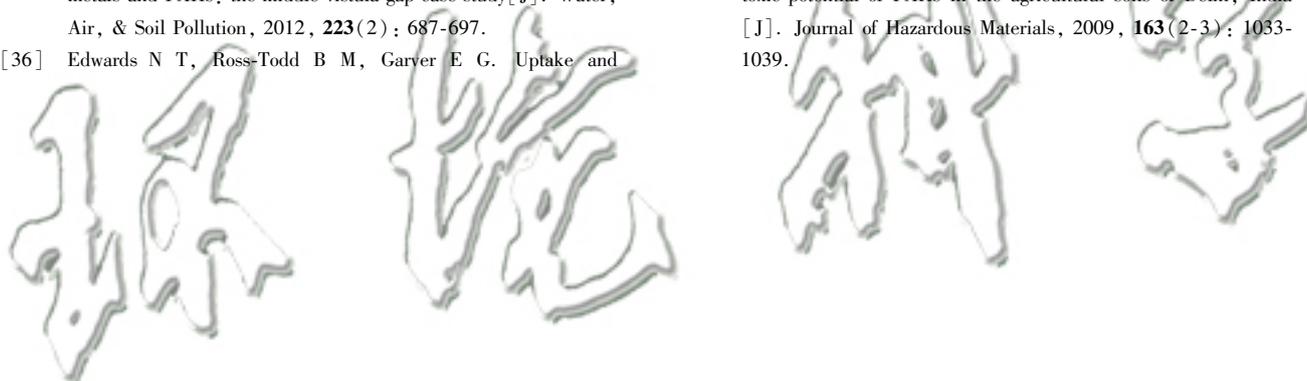
- [1] Zhang D, Wang J J, Zeng H. Soil polycyclic aromatic hydrocarbons across urban density zones in Shenzhen, China: occurrences, source apportionments, and spatial risk assessment [J]. *Pedosphere*, 2016, **26**(5): 676-686.
- [2] 师阳, 孙玉川, 梁作兵, 等. 重庆金佛山土壤中 PAHs 含量的海拔梯度分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1417-1424.
- Shi Y, Sun Y C, Liang Z B, *et al.* Altitudinal gradient

distribution and source analysis of PAHs content of topsoil in Jinpo mountain, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1417-1424.

- [3] Lin H, Wang X P, Gong P, *et al.* The influence of climate change on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon and mercury in a shrinking remote lake of the southern Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 1814-1823.
- [4] Nam J J, Song B H, Eom K M. *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(10): 1281-1289.
- [5] Hu G J, Chen S L, Shi W, *et al.* Identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils in Taizhou, East China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**(3): 429-439.
- [6] 谢婷, 张淑娟, 杨瑞强. 青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2680-2690.
- Xie T, Zhang S J, Yang R Q. Contamination levels and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in soils and grasses from lake catchments in the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2680-2690.
- [7] 陈敏, 陈莉, 黄平. 乌鲁木齐土壤中多环芳烃的污染特征及生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(2): 84-94.
- Chen M, Chen L, Huang P. Concentration and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils of Urumqi

- area, China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(2): 84-94.
- [ 8 ] 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强. 藏东南色季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2745-2755.
- Luo D X, Zhang S J, Yang R Q. Distribution and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in soils from Shergyla mountain, southeast Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2745-2755.
- [ 9 ] 周变红, 张承中, 王格慧. 西安城区大气中多环芳烃的季节变化特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(9): 2324-2331.
- Zhou B H, Zhang C Z, Wang G H. Seasonal variation and health risk of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the urban area of Xi'an [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(9): 2324-2331.
- [ 10 ] 李静雅, 吴迪, 许芸松, 等. 长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 253-261.
- Li J Y, Wu D, Xu Y S, *et al.* Recent distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Yangtze river delta [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 253-261.
- [ 11 ] Wild S R, Jones K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: a preliminary source inventory and budget[J]. *Environmental Pollution*, 1995, **88**(1): 91-108.
- [ 12 ] Wilcke W. Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil[J]. *Geoderma*, 2007, **141**(3-4): 157-166.
- [ 13 ] Khan S, Cao Q. Human health risk due to consumption of vegetables contaminated with carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, **12**(2): 178-184.
- [ 14 ] 章迪, 曹善平, 孙建林, 等. 深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 711-718.
- Zhang D, Cao S P, Sun J L, *et al.* Occurrence and spatial differentiation of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Shenzhen, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 711-718.
- [ 15 ] Yin C Q, Jiang X, Yang X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils in the vicinity of Nanjing, China [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(3): 389-394.
- [ 16 ] 林纪旺, 倪进治, 杨红玉, 等. 泉州市表层土中多环芳烃的含量、来源及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2074-2080.
- Lin J W, Ni J Z, Yang H Y, *et al.* Concentrations, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the topsoils of Quanzhou City, China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 2074-2080.
- [ 17 ] Wu C X, Xiong X, Huang X L, *et al.* Occurrence and distribution of organochlorine pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Qinghai Lake, northeast Qinghai-Tibet plateau, China [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(3): 675-683.
- [ 18 ] Luo W, Gao J J, Bi X, *et al.* Identification of sources of polycyclic aromatic hydrocarbons based on concentrations in soils from two sides of the Himalayas between China and Nepal [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 424-432.
- [ 19 ] Wang C F, Wang X P, Gong P, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil across the Tibetan Plateau: Spatial distribution, source and air-soil exchange [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 138-144.
- [ 20 ] 李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 青藏高原冰川冰雪中多环芳烃的分布特征及其来源研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, **40**(10): 1399-1409.
- Li Q L, Wang N L, Wu X B, *et al.* Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons of different glaciers over the Tibetan Plateau [J]. *Science China: Earth Science*, 2010, **40**(10): 1189-1198.
- [ 21 ] Zhu Y D, Yang Y Y, Liu M X, *et al.* Concentration, distribution, source, and risk assessment of PAHs and heavy metals in surface water from the Three Gorges reservoir, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2015, **21**(6): 1593-1607.
- [ 22 ] Maliszewska-Kordybach B, Smreczak B, Klimkowicz-Pawlas A, *et al.* Monitoring of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in arable soils in Poland [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(8): 1284-1291.
- [ 23 ] 孙娜, 陆晨刚, 高翔, 等. 青藏高原东部土壤中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 664-668.
- Sun N, Lu C G, Gao X, *et al.* Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of east Qingzang Plateau [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(3): 664-668.
- [ 24 ] Yang R Q, Zhang S J, Li A, *et al.* Altitudinal and spatial signature of persistent organic pollutants in soil, lichen, conifer needles, and bark of the southeast Tibetan Plateau: implications for sources and environmental cycling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(22): 12736-12743.
- [ 25 ] Yuan G L, Wu L J, Sun Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of the central Tibetan Plateau, China: distribution, sources, transport and contribution in global cycling [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **203**: 137-144.
- [ 26 ] Wang S, Ni H G, Sun J L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from the Tibetan Plateau, China: distribution and influence of environmental factors [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(3): 661-667.
- [ 27 ] Li Y T, Li F B, Chen J J, *et al.* The concentrations, distribution and sources of PAHs in agricultural soils and vegetables from Shunde, Guangdong, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **139**(1-3): 61-76.
- [ 28 ] Tay C K, Biney C A. Levels and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in selected irrigated urban agricultural soils in Accra, Ghana [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(6): 1773-1782.
- [ 29 ] 刘飞, 刘应汉, 王建武, 等. 太原市土壤多环芳烃污染特征研究[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 155-160.
- Liu F, Liu Y H, Wang J W, *et al.* Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the topsoil of Taiyuan city, north China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, **68**(6): 1773-1782.
- [ 30 ] Satya, Upreti D K, Patel D K. *Rinodina sophodes* (Ach.) Massal.: a bioaccumulator of polycyclic aromatic hydrocarbons

- (PAHs) in Kanpur City, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(1): 229-238.
- [31] 胡健, 张国平, 刘頔, 等. 贵阳市表层土壤中多环芳烃的分布特征及来源解析[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(9): 1982-1987.
- Hu J, Zhang G P, Liu D, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of PAHs in topsoil of Guiyang city, southwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(9): 1982-1987.
- [32] Chahal M K, Toor G S, Brown P. Trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in an urbanized area of Florida[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2010, **19**(4): 419-435.
- [33] Cachada A, Pato P, Rocha-Santos T, *et al.* Levels, sources and potential human health risks of organic pollutants in urban soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **430**: 184-192.
- [34] 邹正禹, 唐海龙, 刘阳生. 北京市郊农业土壤中多环芳烃的污染分布和来源[J]. *环境化学*, 2013, **32**(5): 874-880.
- Zou Z Y, Tang H L, Liu Y S. Source and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Beijing suburbs [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(5): 874-880.
- [35] Maliszewska-Kordybach B, Klimkowicz-Pawlas A, Smreczak B, *et al.* Effect of flooding on contamination of agricultural soils with metals and PAHs: the middle vistula gap case study[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, **223**(2): 687-697.
- [36] Edwards N T, Ross-Todd B M, Garver E G. Uptake and metabolism of  $^{14}\text{C}$  anthracene by soybean (*Glycine max*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1982, **22**(3): 349-357.
- [37] Manoli K, Kouras A, Samara C. Profile analysis of ambient and source emitted particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from three sites in northern Greece[J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(9): 867-878.
- [38] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K. [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(3): 825-832.
- [39] Brown A S, Brown R J C. Correlations in polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) concentrations in UK ambient air and implications for source apportionment [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(8): 2072-2082.
- [40] Shen G F, Tao S, Chen Y C, *et al.* Emission characteristics for polycyclic aromatic hydrocarbons from solid fuels burned in domestic stoves in rural China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 14485-14494.
- [41] Khalili N R, Scheff P A, Holsen T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(4): 533-542.
- [42] Agarwal T, Khillare P S, Shridhar V, *et al.* Pattern, sources and toxic potential of PAHs in the agricultural soils of Delhi, India [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(2-3): 1033-1039.



## CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China .....	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing .....	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM <sub>2.5</sub> During Summer-Winter in Changzhou City .....	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Road Dust Fall During Spring in Tianjin .....	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer .....	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province .....	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment .....	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province .....	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool .....	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF .....	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project .....	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River .....	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet .....	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin .....	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China .....	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin .....	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China .....	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring .....	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins .....	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification .....	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu .....	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir .....	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde .....	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics .....	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation .....	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process .....	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of $\alpha$ -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate .....	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal .....	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites .....	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution .....	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO <sub>2</sub> and the Regeneration of TiO <sub>2</sub> .....	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process .....	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China .....	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen .....	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier .....	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification .....	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor .....	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process .....	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor .....	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO <sub>x</sub> <sup>-</sup> -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process .....	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community .....	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System .....	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor .....	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System .....	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge .....	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation .....	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea .....	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities .....	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years .....	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County .....	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China .....	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau .....	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model .....	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions .....	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities .....	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)