

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附铅的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品晶 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析

马妍¹, 程芦¹, 阮子渊¹, 史鹏飞¹, 路超君², 运晓彤¹, 李珞嫣¹, 徐雁秋¹, 史怡^{3*}

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

摘要: 随着中国经济社会的快速发展, 表层土壤多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 污染问题受到了全社会的高度关注. 本研究通过搜集 2000 ~ 2020 年间有关我国表层土壤 PAHs 污染的相关研究, 并对筛选得到的 166 篇文献采样数据综合运用统计学、空间插值分析和污染物特征比值源解析方法, 定量分析了我国表层土壤 PAHs 污染水平、时间变化特征、空间分布特征以及来源特征. 结果表明, 我国表层土壤普遍存在人为因素的 PAHs 污染, 其含量中位值为 $675.70 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总体情况良好但部分采样点位污染情况较为严重, 单体含量中荧蒽 (Fla) 和芘 (Pyr) 含量较高, 而萘 (Acy) 和二氢萘 (Ace) 含量较低; 调查时段中, 表层土壤 PAHs 含量数据大体稳定在 $313.10 \sim 1070.45 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的中度污染水平范围内, 其年度变化受石油生产与消费的影响相对较小, 且不存在明显波动; 统计学以及空间插值结果表明, 我国表层土壤 PAHs 污染存在明显区域特征, 地区含量从西北、华北、华东、东北、西南和中南依次递减, 多数省份的 PAHs 污染水平处于“中度污染”或“轻度污染”; 源解析结果表明, 我国大部分地区表层土壤 PAHs 污染来源于石油、生物质和煤等化石燃料的高温燃烧, 但黑龙江以及新疆、西藏等西北地区主要表现为石油源污染. 本研究对我国土壤环境管理和 PAHs 污染治理工作开展有一定参考价值.

关键词: 表层土壤; 多环芳烃 (PAHs); 污染水平; 时空分布; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1065-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010190

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors

MA Yan¹, CHENG Lu¹, RUAN Zi-yuan¹, SHI Peng-fei¹, LU Chao-jun², YUN Xiao-tong¹, LI Luo-yan¹, XU Yan-qiu¹, SHI Yi^{3*}

(1. School of Chemistry & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

Abstract: With the rapid development of China's economy and society, the polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollution of surface soil has attracted increasing attention. Based on a systematic review, this study identified 166 relevant papers (published from 2000 to 2020) dealing with the contamination of 16 PAHs in the surface soil of China and summarized the pollution level, temporal, and spatial distribution influencing factors of PAHs with statistics, spatial interpolation analysis, and source analysis methods. The results showed that the surface soil of China has been polluted by human-caused PAHs, with a median concentration of $675.70 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Although the overall condition is good, some sampling points have been seriously polluted. Among the monomers of PAHs, the concentrations of fluoranthene (Fla) and pyrene (Pyr) are high, while acenaphthylene (Acy) and acenaphthene (Ace) are relatively low. During the survey period, the concentration data of surface soil PAHs are generally within the moderate pollution levels of $313.10\text{--}1070.45 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, while the annual changes of PAHs do not show obvious fluctuations and are less affected by oil production and consumption. Statistics and spatial interpolation results show that PAH pollution in the surface soil of China has regional characteristics, where the concentration decreases in order from northwest, north, east, northeast, southwest, and south-central China. The pollution level in most provinces is “contaminated” or “weakly contaminated.” From the source analysis results, PAH pollution in surface soils in most areas of China comes from the high-temperature combustion of fossil fuels such as petroleum, biomass, and coal. Heilongjiang and some northwestern regions (e.g., Xinjiang and Tibet) were mainly represented by oil source pollution. Such results could provide a reference for soil environmental management and PAH pollution control in China.

Key words: surface soil; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); pollution level; temporal and spatial distribution; source analysis

随着中国经济社会的快速发展, 工业化和城市化进程的进一步加快, 土壤污染问题受到了全社会

的高度关注^[1]. 土壤作为环境中最重要“汇”之一, 承载了来自车辆排放、生物质燃烧、煤炭燃烧、石

收稿日期: 2020-10-26; 修订日期: 2020-12-03

基金项目: 中国矿业大学(北京)越崎青年学者资助计划项目(2019QN09); 国家重点研发计划项目(2018YFC1800800); 中央高校基本科研业务费专项(2020SKHH01); 国家大学生创新性实验计划项目(C201903762)

作者简介: 马妍(1983 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤修复和土壤环境化学, E-mail: mayan2202@163.com

* 通信作者, E-mail: feather_29@163.com

油残渣和大气交换等不同来源的多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) [2], 其 PAHs 污染情况以及来源分析受到了国内外相关学者的广泛研究. 刘瑞民等 [3] 基于地统计学的因子克立格方法展开研究, 结果表明天津地区土壤中 PAHs 污染在小空间尺度上主要是各种燃烧源和汽车尾气, 在大空间尺度上主要是区域性的大气沉降所造成的. 而在全中国尺度上, 曹云者等 [4] 从点、面源和地区角度对我国主要地区表层土壤多环芳烃总量进行了讨论, 指出我国表层土壤 PAHs 含量处于较低水平, 其组成以高环 PAHs 为主, 但不占绝对优势; 邓绍坡等 [5] 利用特征比值法分析我国表层土壤中 PAHs 来源, 结果表明煤燃烧是我国 PAHs 的主要来源, 尤其是我国北方地区; 尚庆彬等 [6] 运用 ArcGIS 空间插值技术、地理探测器模型和统计学方法分析了我国表层土壤 PAHs 含量、空间分布、主要来源及成因, 结果表明我国各地表土 PAHs 平均含量的空间分布具有明显的区域特征. 我国土壤中 PAHs 含量以及来源解析的空间大尺度研究多为定性或半定量研究, 且鲜见对我国土壤中 PAHs 含量年度变化的研究报道.

在上述研究基础上, 本研究通过对 2000 ~ 2020 年间发表的 166 篇中国不同地区表层 (0 ~ 20 cm) 土壤 PAHs 的采样数据进行统计分析, 分析我国表层土壤 PAHs 污染水平和 $\sum_{16}$ PAHs 年度变化特征及影响因素, 使用空间插值方法分析 $\sum_{16}$ PAHs 空间分布特征, 并从污染物特征比值角度对插值结果进行来源解析, 获取表层土壤 PAHs 含量时空分布特征信息, 以期为我国土壤环境管理和 PAHs 污染治理工作提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据收集与统计

于 2020 年 4 月, 在中国知网 (CNKI)、斯普林格期刊数据库 (Springer)、爱思唯尔期刊数据库 (Elsevier) 和 Web of Science 等全文数据库中, 使用“中国”、“多环芳烃”和“PAHs”作为检索关键词, 检索 2000 ~ 2020 年间发表的有关我国不同地区表层土壤中 PAHs 的相关研究. 舍去检索结果中未给出采样时间、空间点位和 PAHs 单体及总量含量采样数据信息的文献, 最终筛选出 166 篇有效文献用于后续分析过程. 所涉及的 PAHs 单体为美国环保局 (USEPA) 列出的优先控制污染物名单中的 16 种多环芳烃: 萘 (Nap)、蒽 (Acy)、二氢蒽 (Ace)、芴 (Flu)、菲 (Phe)、蒽 (Ant)、荧蒽 (Fla)、芘 (Pyr)、苯

并 [a] 蒽 (BaA)、蒽 (Chry)、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 (DahA) 和苯并 [ghi] 芘 (二萘嵌苯, BghiP).

本研究使用的国内生产总值、民用汽车拥有量、能源生产总量、原煤生产总量、原油生产总量、能源消费总量、煤炭消费总量和石油消费总量数据均来自国家统计局年度数据 (<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>), 选取的时间段为 2000 ~ 2018 年. 使用的全国政区图编辑自自然资源部标准地图网站 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>), 原审图号为 GS(2019)1697 号, 底图无修改.

1.2 数据处理

对 16 种多环芳烃及 $\sum_{16}$ PAHs 的含量数据进行对数正态分布的 Shapiro-Wilk 检验, 结果显示其显著度均小于 0.05, 不服从正态分布, 因此本研究采用多环芳烃含量的中位值来表征其平均水平 [7]. 对文献地块的位置信息, 若仅给出经纬度范围或者所有经纬度坐标, 则选取所描述范围的中心点经纬度作为代表.

数据统计分析及作图分别采用 IBM SPSS Statistics 26 和 Origin 2021b 完成, 地统计学分析及作图则采用 ArcGIS 10.6 完成.

1.3 普通克里金空间插值

克里金插值法 (Kriging) 又称为空间局部估计, 是建立在变异函数理论及结构分析基础上, 在有限区域内对区域化变量进行线性无偏最优估计的一种方法 [8]. 总的公式为:

$$Z_v^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

式中, x_i 为研究区内任一点的位置; λ_i 为权重系数, 表示各个已知样品值对克里金估计量 $Z_v^*(x)$ 的贡献.

本研究使用普通克里金插值法进行空间插值. 普通克里金法属于线性平稳地统计学范畴, 是对区域化变量的线性估计, 认为区域化变量的期望值是未知的, 通过确定待插点周围采样点的权重来求取待插点的近似值 [9]. 在插值过程中, 选择插值的变量类型为半变异函数, 插值模型为指数函数.

1.4 PAHs 源解析方法

环境中 PAHs 主要来源于自然源和人为源. 特征比值法是利用各种污染源的机制和特性不同, 生成的污染物组成和含量存在不同程度的差别来识别污染物的来源 [10]. 通常可以根据环数的分布特征作初步的来源分析 [11], 2、3 环多环芳烃 (low molecular weight PAHs, LMW PAHs) 相对分子质量

低,主要来自石油类产品的泄漏,当其含量占比超过 50%时代表了石油源; 3 ~ 4 环多环芳烃 (middle molecular weight PAHs,MMW PAHs) 和 5 ~ 6 环多环芳烃 (high molecular weight PAHs, HMW PAHs) 相对分子质量高,主要来源于化石燃料燃烧、燃煤和生物质燃烧,当 3 环以上多环芳烃含量占比超过 50%时代表了燃烧源. 也可采用 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgP})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 等异构体比值进行源解析^[12],若 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgP})$ 值小于 0. 2 意味着石油输入,大于 0. 5 则来自于煤和生物燃烧,介于 0. 2 与 0. 5 之间为石油燃烧源^[13]; 若 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 值小于 0. 2 意味

着石化来源,大于 0. 35 意味着燃烧源,而介于 0. 2 与 0. 35 之间为石化和燃烧混合来源^[14].

2 结果与讨论

2.1 我国表层土壤 PAHs 污染水平

调查的 166 篇文献分布于 27 个省级行政区,研究区域集中于我国东部地区,特别是珠三角、长三角、京津冀以及东三省这些经济或者工业发达地区. 如表 1 所示,共涉及 234 个污染地块, 9 284 个采样点位,基本能代表我国多数地区表层土壤 PAHs 污染情况.

表 1 我国表层土壤 PAHs 污染调查文献信息分布¹⁾

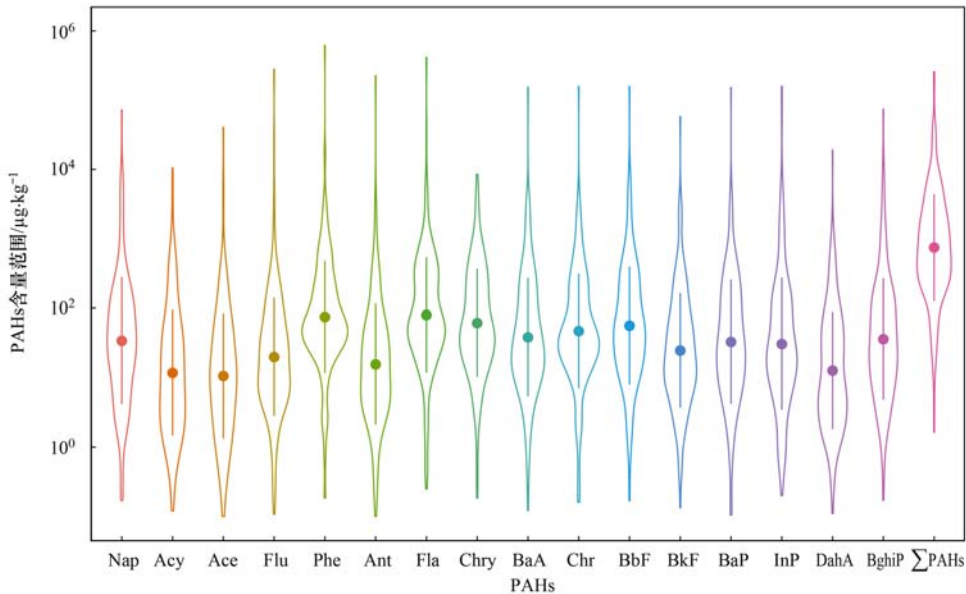
Table 1 Distribution of PAHs in China's surface soils based on literature		文献总数	地块总数	样点总数
地区	省级行政区划及文献计数			
华北	北京市(11)、天津市(8)、河北省(4)、山西省(6)和内蒙古自治区(0)	29	31	2 103
东北	辽宁省(12)、吉林省(2)和黑龙江省(8)	22	35	1 420
华东	上海市(10)、江苏省(16)、浙江省(9)、安徽省(2)、福建省(10)、江西省(1)和山东省(10)	58	88	2 977
中南	河南省(4)、湖北省(4)、湖南省(1)、广东省(21)、广西壮族自治区(1)和海南省(0)	31	43	2 045
西南	重庆市(3)、四川省(0)、贵州省(7)、云南省(1)和西藏自治区(2)	13	13	492
西北	陕西省(4)、甘肃省(4)、青海省(0)、宁夏回族自治区(1)和新疆维吾尔自治区(4)	13	24	247
合计		166	234	9 284

1) 括号内数据为对应省级行政区划的相关文献计数; 不包括中国香港、澳门和台湾地区

从 16 种多环芳烃及 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的含量分布来看,我国表土 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 含量从未检出到 6 100 000 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 30 530. 51 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 399 049. 83 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数 (CV) 为 13. 07,属于强变异关系,数据离散度高,上下四分位值分别为 252. 52 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2 500. 00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,中位值为 675. 70 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过了土壤中典型的内源性 PAHs

范围 (1 ~ 10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[15],说明我国表层土壤均受到了人为因素的影响,且部分点位受 PAHs 影响较为严重. 如图 1 所示,不同 PAHs 单体的 25% ~ 75% 区间分布在 1. 15 ~ 288. 30 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,其中 Phe 和 Fla 含量的中位值最高,分别为 62. 1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 60. 6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而 Acy 和 Ace 含量的中位值最低,分别为 6. 57 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 6. 98 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

而从中位值及其占比的角度上看,Phe、Fla、Pyr



小提琴图外侧框线宽度表示数据的频率分布,长度表示数据范围; 中间黑点表示该列数据中数,实线表示该列数据标准差范围

图 1 我国表层土壤 PAHs 单体及 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的含量特征

Fig. 1 Content of 16 single PAHs and $\sum_{16} \text{PAHs}$ in surface soils of China

和 BbF 的占比较高,均超过总体的 10%,而 Acy、Ace 和 DahA 的含量占比较低,这与曹云者等^[4]和尚庆彬等^[6]的报道结果相一致.如表 2 所示,就不同环数 PAHs 含量占比而言,4 环 PAHs 占比最高(38.13%),其次为 3 环 PAHs,占比为 23.02%,2 环和 6 环的 PAHs 占比最低,分别为 6.08% 和 10.51%.而就不同相对分子质量 PAHs 含量占比而言,MMW PAHs 和 HMW PAHs 占比相对较高,分别为 38.13%、32.78%,这可能与其饱和蒸气压较低、水溶性小和辛醇水分配系数 K_{ow} 相对较高、易于吸附在土壤颗粒物上的特性相关,极易在土壤环境中富集^[16],而 LMW PAHs 仅占 29.10%,含量相对较小,这可能与其相对分子质量较低、易挥发,且极易被微生物降解有关^[17].

表 2 不同单体、环数、相对分子质量 PAHs 的中位数及占比信息
Table 2 Median and percentage of PAHs by rings and relative molecular mass

划分依据	PAHs	环数	中位数 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 占比/%
单体	Nap	2 环	27.74	6.08
	Acy	3 环	6.57	1.44
	Ace	3 环	6.98	1.53
	Flu	3 环	16.20	3.55
	Phe	3 环	62.1	13.60
	Ant	3 环	13.25	2.90
	Fla	4 环	60.60	13.27
	Pyr	4 环	49.63	10.87
	BaA	4 环	26.47	5.80
	Chry	4 环	37.37	8.18
	BbF	5 环	46.00	10.08
	BkF	5 环	18.50	4.05
	BaP	5 环	29.50	6.46
	InP	6 环	21.20	4.64
	DahA	5 环	7.66	1.68
	BghiP	6 环	26.80	5.87
环数	2 环 PAHs	2 环	27.74	6.08
	3 环 PAHs	3 环	105.10	23.02
	4 环 PAHs	4 环	174.07	38.13
	5 环 PAHs	5 环	101.66	22.27
	6 环 PAHs	6 环	48.00	10.51
相对分子质量	LMW PAHs	2、3 环	132.84	29.10
	MMW PAHs	4 环	174.07	38.13
	HMW PAHs	5、6 环	149.66	32.78

目前,我国仅在《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中规定了苯并[a]芘(BaP)的农用地土壤污染风险筛选值为 $0.55\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,尚未具体制定表土中多环芳烃的污染风险筛选值和管制值标准,在调查的污染地块中仅有 16 个地块(占比 6.83%)的 BaP 单体含量超过了该筛选值标准.参照 Maliszewska-Kordybach 提出的评价标准^[18]:当土壤中 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 的含量小于

$200\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为未污染, $200\sim 600\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为轻度污染, $600\sim 1\,000\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为中度污染, 大于 $1\,000\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为重度污染.我国表层土壤中 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 的含量为中度污染水平,其含量仅低于德国森林,但均高于其它国家及地区的调查研究结果(表 3).

表 3 不同国家地区表土中 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 污染水平对比
Table 3 Comparison of $\sum_{16}\text{PAHs}$ pollution levels in surface soils in different countries and regions

地区	年份	$\sum_{16}\text{PAHs}$ 含量 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	污染水平	文献
中国	2020	675.70	中度污染	本研究
中国香港	2007	140	未污染	[19]
瑞士	2008	163	未污染	[20]
韩国	2003	236	轻度污染	[21]
日本	2007	496	轻度污染	[22]
英国农村	2006	590	轻度污染	[23]
德国森林	2015	1\,448	重度污染	[24]

2.2 我国表层土壤 PAHs 时间变化特征

目前我国相关学者对 PAHs 的时间变化特征研究多侧重于年度内含量随季节变化特征.本研究对近 20 年的时间跨度的我国不同地区、不同类型的表层土壤 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 进行统计分析,其结果如图 2 所示,我国表层土壤中 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 含量的 25%~75% 区间于 2000~2018 年间落在 $313.1\sim 1\,070.45\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,随年份变化均值数据大体稳定,属于中度污染水平范围内.

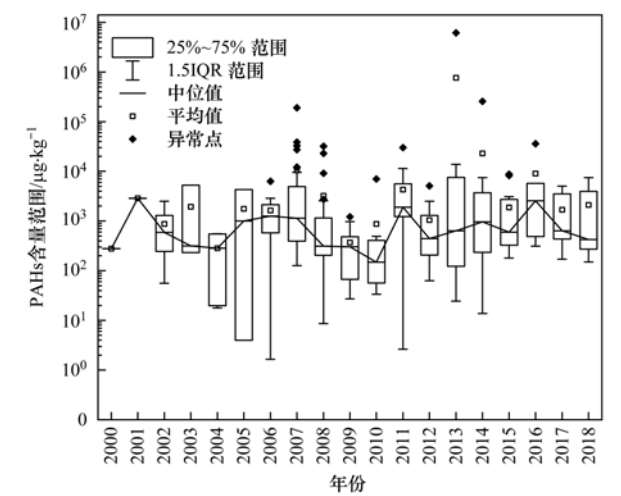


图 2 我国表土 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 含量年度变化趋势
Fig. 2 Annual Trend of $\sum_{16}\text{PAHs}$ concentration in surface soils of China

由于来自不同点位以及不同年度样本之间 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 含量差异过大,将本研究得到的 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 含量年度变化趋势与迄今为止报道的其

它水平进行比较. Jones 等^[25]的研究显示,由于工业化产生的化石燃料燃烧影响,英国耕层土壤 PAHs 含量从 1880 ~ 1980 年急剧增长了大约 4 倍(1 130 ~ 1 770 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); Honda 等^[22]的研究显示,日本水稻土中 PAHs 主要来源于化石燃料燃烧,之后由于燃烧工艺的优化,其平均含量从 1959 ~ 1969 年的 731 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 快速下降,并在 1980 ~ 2002 年间稳定在 236 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的轻度污染水平,且工业化初期土壤 PAHs 含量急剧升高,随着工业化进程以及相关环保技术的发展,PAHs 含量开始下降并趋于稳定. 本研究调查时段正处于我国从工业化中期向工业化后期发展的重要阶段^[26,27],调查时段中我国表土中 $\sum_{16}$ PAHs 含量及污染水平基本稳定,与日本等地区工业化中后期相关研究结果相一

致,但污染水平相对世界上其它国家及地区仍较高.

以年度为控制变量,分析我国表土 $\sum_{16}$ PAHs 含量与我国年度统计中能源、工业部分指标的偏相关性,结果如表 4 所示. 在选取的统计指标中,表土 $\sum_{16}$ PAHs 含量与原煤生产总量、能源生产总量和民用汽车拥有量的相关性最好,其绝对值均大于 0.15; 而与原油生产总量及石油消费总量的偏相关性绝对值小于 0.1,说明我国石油生产量和消费量变化对我国表土 $\sum_{16}$ PAHs 含量年度变化影响较小; 其它统计指标的偏相关性均在 0.1 水平,即对表土 $\sum_{16}$ PAHs 含量年度变化存在不同程度的影响,但其相关性均不显著($P > 0.05$).

表 4 表土 $\sum_{16}$ PAHs 含量与部分年度统计指标的偏相关性结果¹⁾

Table 4 Results of partial correlation between the concentration of $\sum_{16}$ PAHs and annual statistical indicators									
	$\sum_{16}$ PAHs	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
$\sum_{16}$ PAHs	1.000								
X_1	0.126	1.000							
X_2	0.153	0.952	1.000						
X_3	-0.155	-0.669	-0.839	1.000					
X_4	-0.157	-0.728	-0.882	0.995	1.000				
X_5	-0.090	-0.608	-0.728	0.866	0.843	1.000			
X_6	-0.142	-0.773	-0.898	0.959	0.970	0.796	1.000		
X_7	-0.111	-0.840	-0.948	0.944	0.966	0.787	0.989	1.000	
X_8	-0.076	0.281	0.316	-0.077	-0.115	-0.011	-0.085	-0.195	1.000

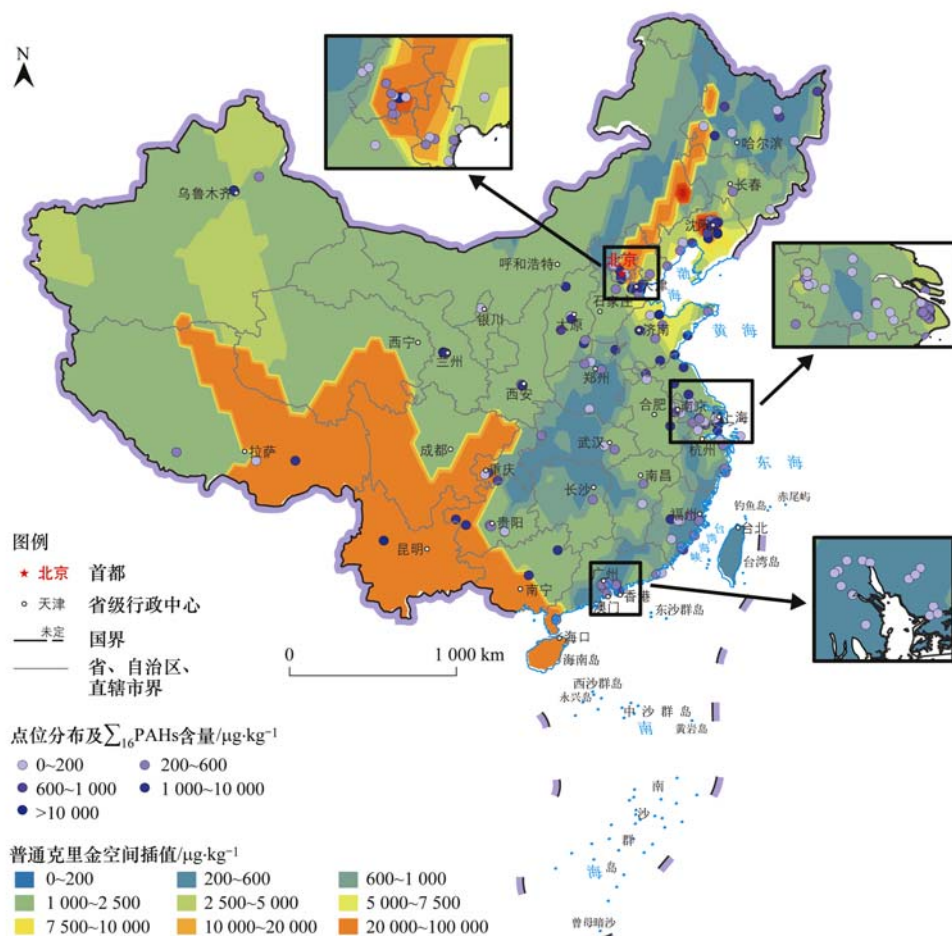
1) X_1 表示国内生产总值(亿元); X_2 表示民用汽车拥有量(万辆); X_3 表示能源生产总量(万吨标准煤); X_4 表示原煤生产总量(万吨标准煤); X_5 表示原油生产总量(万吨标准煤); X_6 表示能源消费总量(万吨标准煤); X_7 表示煤炭消费总量(万吨标准煤); X_8 表示石油消费总量(万吨标准煤)

2.3 我国表层土壤 PAHs 空间分布特征

我国表层土壤中 PAHs 含量在不同地区之间存在较大差异,不同地区 $\sum_{16}$ PAHs 中位值从大到小依次为:西北地区(1 815.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、华北地区(983.44 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、华东地区(912.98 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、东北地区(590.50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、西南地区(537.60 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和中南地区(399.18 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 与张俊叶等^[28]的研究结果相似,均表现为西北和华北地区表层土壤中 PAHs 含量中位值最高,而西南和中南地区中位值最低. 其中,西北地区统计结果偏高的原因可能为:①收集到的相关文献中,西北地区点位的地块类型以工业、道路为主,受工业企业生产加工以及道路车流的影响,其调查点位含量偏高;②由于“全球蒸馏效应”的影响,有机污染物通过蒸发、大气运输向极地地区迁移并沉积^[29],而西北地区处于高原等特殊环境及气候下,其多环芳烃的组成差异和含量可能受到一定影响,导致相关统计值偏高;③相

关研究指出土壤 $\sum_{16}$ PAHs 含量与石油储量之间存在正相关关系^[28],而西北地区,特别是新疆等地具有较高石油储量,导致当地本底值偏高,进而影响到相关点位统计结果.

使用 ArcGIS 10.6 地统计模块中的普通 Kriging 插值方法,对收集到 234 个地块的经纬度信息及 $\sum_{16}$ PAHs 含量进行插值分析,其结果如图 3 所示. 其中,我国西南地区普遍出现较高插值结果,与该地区中位值统计结果相悖,这可能与该区域收集点位过少,且已有收集点位多为异常点的原因相关. 除此以外,京津冀地区以及辽宁省也同样出现较高的插值结果,作为我国的老工业基地,两地历史上均存在大量排放,且相关研究多围绕这些地区的工业场地或工业遗留场地进行调查,此外,由于京津冀地区和辽宁省纬度较高且气温较低,日照辐射^[30]、微生物作用^[31]等自然因素导致的 PAHs 降解量较少,导致相关最终含量插值结果也相对较高. 而我国中南地区以及华东地



改自审图号为GS(2019)1697号的标准地图,底图无修改

图3 基于普通克里金法的我国 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 空间插值结果

Fig. 3 The $\sum_{16}\text{PAHs}$ spatial interpolation result based on ordinary Kriging

区的相关统计以及插值结果相对较低。

对普通 Kriging 插值结果进行栅格化处理,并按省份对应提取对应统计结果. 结果显示,16 个省(51.6%)污染情况为“轻微污染”,5 个省(16.1%)污染情况为“中等污染”,其余 10 个省份(32.3%)的污染情况为“严重污染”,不存在有省份污染情况为“未污染”,这说明 PAHs 污染在我国表土中是普遍存在的,但总体情况良好. 且本次插值在西南地区受异常值影响较大,西南地区部分省份实际应处于“中等污染”或者“轻微污染”水平,但西南地区生态地质环境较为脆弱^[32],更应重视对西南地区工矿企业其生产、运输、存储过程中产生的 PAHs 污染对表层土壤的影响。

2.4 我国表层土壤 PAHs 来源解析

从 PAHs 相对丰度来看,我国表土 PAHs 污染源可分为 5 个聚类,如图 4 所示,其中表现为燃烧源的聚类 1 和聚类 5 的 LMW PAHs 占比相对偏低(分别为 10%~30% 和 0~10%),所涉及的调查文献多体现为煤及生物质的燃烧影响,与于国光等^[33]对薪

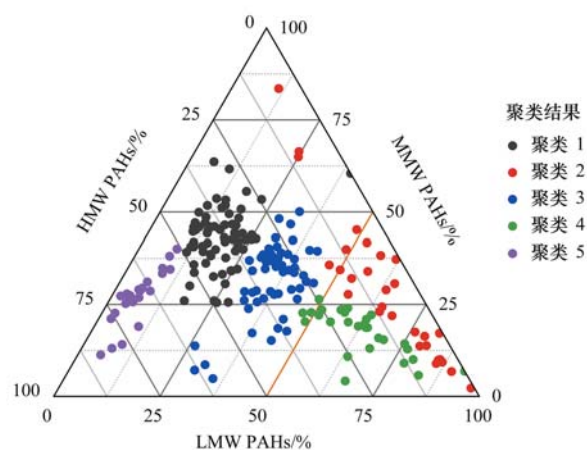


图4 我国表土 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 组分的含量分布

Fig. 4 Distribution of $\sum_{16}\text{PAHs}$ in surface soils of China

柴燃烧源和燃煤源的 PAHs 成分谱中 3、4 环多环芳烃含量较高的研究结论相吻合,而同样表现为燃烧源的聚类 3 的 LMW PAHs 占比则相对较高,所涉及的调查文献多体现为石油燃烧、道路机动车排放的影响,也与刘定超等^[34]对石油燃烧过程中释放的

PAHs 均以低环芳烃为主的结论相吻合; 而聚类 2 和聚类 4 则表现为石油源, 其范围 HMW PAHs 占比分别为 0 ~ 10% 及 10% ~ 30%。调查文献所涉及的地块中, 判定为燃烧源的地块占比 75%, 而判定为石油源的地块占比 25%, 且主要分布在黑龙江以及新疆、西藏等西北地区。初步可认为我国主要 PAHs 来源于燃烧源, 即主要由于石油和煤等化石燃料的高温燃烧造成我国 PAHs 污染。

而 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgHiP})$ 与 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 的 K-Means 聚类结果 (如图 5) 同样印证了燃烧源是我国表土 PAHs 污染来源的结论, 除聚类 3 的主体及聚类中心落在 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgHiP}) < 0.2$ 范围内, 主要表现为石油燃烧外, 其他聚类解析结果均表现为燃烧源, 这其中聚类 2 主要表现为混合源, 以油类燃烧为主, 而聚类 1 和聚类 4 则表现为以生物质、煤炭为代表的化石燃料燃烧。

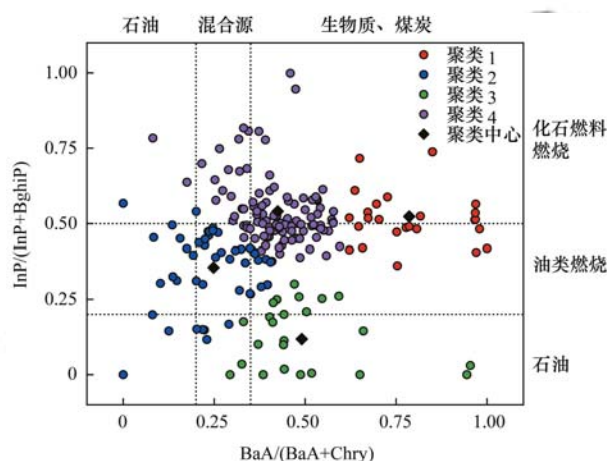


图 5 我国表土中 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgHiP})$ 比值分布

Fig. 5 Plot of PAHs between $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ and $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgHiP})$ in surface soils of China

综合来看, 我国 PAHs 来源分布较为分散, 但以生物质、煤炭和油类燃烧源为主要来源, 除此以外, 在我国主要产油区如黑龙江省、新疆维吾尔自治区, 统计数据显示其表土中 PAHs 污染主要来自于石油源污染。

3 结论

(1) PAHs 污染在我国表层土壤普遍存在, 其含量中位值为 $675.70 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 污染水平与其它国家及地区相比较。PAHs 单体含量中 Fla 和 Pyr 含量较高, 而 Acy 和 Ace 含量较低。

(2) 我国表层土壤 PAHs 污染存在明显区域特征, 地区含量从西北、华北、华东、东北、西南、中南依次递减。除北京和辽宁省外, 多数省份的 PAHs 污染水平处于“中度污染”或“轻度污染”。

(3) 2000 ~ 2018 年间, 我国表土中 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 含量及污染水平基本稳定在 $313.10 \sim 1070.45 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 其变动受我国石油生产和消费影响较小。

(4) 不同源解析的结果均表明我国表土 PAHs 主要来源于石油、生物质和煤等化石燃料的高温燃烧, 但黑龙江省以及新疆、西藏等西北地区则以石油源污染为主。

参考文献:

- [1] 马妍, 阮子渊, 刘士清, 等. 污染地块土壤环境风险管控体系亟待建立健全[J]. 世界环境, 2018, (3): 26-29.
Ma Y, Ruan Z Y, Liu S Q, et al. It is urgent to establish and perfect the soil environmental risk management and control system for contaminated plots[J]. World Environment, 2018, (3): 26-29.
- [2] Wang J Z, Zhu C Z, Chen T H. PAHs in the Chinese environment: levels, inventory mass, source and toxic potency assessment[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2013, 15(6): 1104-1112.
- [3] 刘瑞民, 王学军, 郑一, 等. 天津地区表层土壤多环芳烃的多元统计分析[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(3): 41-42, 59.
Liu R M, Wang X J, Zheng Y, et al. Multivariate statistics analysis of PAHs in topsoil of Tianjin area[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 28(3): 41-42, 59.
- [4] 曹云者, 柳晓娟, 谢云峰, 等. 我国主要地区表层土壤中多环芳烃组成及含量特征分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 197-203.
Cao Y Z, Liu X J, Xie Y F, et al. Patterns of PAHs concentrations and components in surface soils of main areas in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1): 197-203.
- [5] 邓绍坡, 吴运金, 龙涛, 等. 我国表层土壤多环芳烃(PAHs)污染状况及来源浅析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(6): 866-875.
Deng S P, Wu Y J, Long T, et al. PAHs contamination in the surface soil of China and its sources[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(6): 866-875.
- [6] 尚庆彬, 段永红, 徐立帅, 等. 我国表层土壤多环芳烃含量的空间分布及成因[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 917-924.
Shang Q B, Duan Y H, Xu L S, et al. Spatial distribution and genesis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(7): 917-924.
- [7] Madadzadeh F, Ezati Asar M, Hosseini M. Common statistical mistakes in descriptive statistics reports of normal and non-normal variables in biomedical sciences research[J]. Iranian Journal of Public Health, 2015, 44(11): 1557-1558.
- [8] 郑新奇, 吕利娜. 地统计学(现代空间统计学)[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [9] 丁倩, 成功. 基于 Kriging 插值的矿区周边土壤重金属空间分布规律研究[J]. 科技视界, 2016, (13): 263-265.
Ding Q, Cheng G. Study on spatial distribution of soil heavy metals surrounding the mining area based on Kriging[J]. Science & Technology Vision, 2016, (13): 263-265.
- [10] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染源解析研究综述[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 232-242.
Li J, Wu J, Jiang J Y, et al. Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years[J]. Chinese Journal of Soil

- Science, 2018, **49**(1): 232-242.
- [11] Ma X X, Ran Y, Gong J, *et al.* Concentrations and inventories of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in watershed soils in the Pearl River Delta, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **145**(1-3): 453-464.
- [12] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin; a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. Organic Geochemistry, 2002, **33**(4): 489-515.
- [13] De Souza J R B, Do Rosário Zucchi M, Costa A B, *et al.* Geochemical markers of sedimentary organic matter in Todos os Santos Bay, Bahia-Brazil. Indicators of sources and preservation [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **119**(2): 239-246.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中多环芳烃的含量分布特征及其污染来源[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2350-2354.
- Yang G Y, Zhang T B, Gao S T, *et al.* Source and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in the Pearl River Delta [J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2350-2354.
- [16] 朱媛媛, 田靖, 魏恩琪, 等. 天津市土壤多环芳烃污染特征、源解析和生态风险评价[J]. 环境化学, 2014, **33**(2): 248-255.
- Zhu Y Y, Tian J, Wei E Q, *et al.* Characteristics, sources apportionment and ecological risks assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Tianjin, China [J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(2): 248-255.
- [17] 周子康, 崔洁, 许平, 等. 细菌降解低分子量多环芳烃的研究进展[J]. 生物工程学报, 2019, **35**(11): 2069-2080.
- Zhou Z K, Cui J, Xu P, *et al.* Progress in biodegradation of low molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2019, **35**(11): 2069-2080.
- [18] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination [J]. Applied Geochemistry, 1996, **11**(1-2): 121-127.
- [19] Chung M K, Hu R, Cheung K C, *et al.* Pollutants in Hong Kong soils: polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Chemosphere, 2007, **67**(3): 464-473.
- [20] Desaulles A, Ammann S, Blum F, *et al.* PAH and PCB in soils of Switzerland—status and critical review [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2008, **10**(11): 1265-1277.
- [21] Nam J J, Song B H, Eom K C, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea [J]. Chemosphere, 2003, **50**(10): 1281-1289.
- [22] Honda K, Mizukami M, Ueda Y, *et al.* Residue level of polycyclic aromatic hydrocarbons in Japanese paddy soils from 1959 to 2002 [J]. Chemosphere, 2007, **68**(9): 1763-1771.
- [23] Heywood E, Wright J, Wienburg C L, *et al.* Factors influencing the national distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in British soils [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(24): 7629-7635.
- [24] Aichner B, Bussian B M, Lehnk-Habrink P, *et al.* Regionalized concentrations and fingerprints of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in German forest soils [J]. Environmental Pollution, 2015, **203**: 31-39.
- [25] Jones K C, Stratford J A, Waterhouse K S, *et al.* Increases in the polynuclear aromatic hydrocarbon content of an agricultural soil over the last century [J]. Environmental Science & Technology, 1989, **23**(1): 95-101.
- [26] 叶林, 余江. 中国工业化的进展、新情况和成功实现 [J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2014, **67**(2): 117-125.
- Ye L, Yu J. Current situation and countermeasures of industrialization in China [J]. Wuhan University Journal (Philosophy & Social Sciences), 2014, **67**(2): 117-125.
- [27] 黄群慧. “十四五”时期深化中国工业化进程的重大挑战与战略选择 [J]. 中共中央党校(国家行政学院)学报, 2020, **24**(2): 5-16.
- Huang Q H. Major challenges and strategic choices in deepening China's industrialization process during the “Fourteenth Five-Year” period [J]. Journal of the Party School of the Central Committee of the C. P. C. (Chinese Academy of Governance), 2020, **24**(2): 5-16.
- [28] 张俊叶, 俞菲, 俞元春. 中国主要地区表层土壤多环芳烃含量及来源解析 [J]. 生态环境学报, 2017, **26**(6): 1059-1067.
- Zhang J Y, Yu F, Yu Y C. Content and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in major areas of China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(6): 1059-1067.
- [29] 王小萍, 姚檀栋, 丛志远, 等. 珠穆朗玛峰地区土壤和植被中多环芳烃的含量及海拔梯度分布 [J]. 科学通报, 2006, **51**(21): 2517-2525.
- Wang X P, Yao T D, Cong Z Y, *et al.* Concentration level and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and grass around Mt. Qomolangma, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, **52**(10): 1405-1413.
- [30] 张利红, 李雪梅, 陈忠林, 等. 紫外辐射强度对土壤中 PAHs 催化降解的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(5): 1711-1715.
- Zhang L H, Li X M, Chen Z L, *et al.* Effect of UV radiant intensity on photocatalytic degradation of PAHs on soil surface [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(5): 1711-1715.
- [31] 郭楚玲, 郑天凌, 洪华生. 多环芳烃的微生物降解与生物修复 [J]. 海洋环境科学, 2000, **19**(3): 24-29.
- Guo C L, Zheng T L, Hong H S. Biodegradation and bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Marine Environmental Science, 2000, **19**(3): 24-29.
- [32] 王慧芳, 饶恩明, 肖懿, 等. 基于多风险源胁迫的西南地区生态风险评价 [J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8992-9000.
- Wang H F, Rao E M, Xiao Y, *et al.* Ecological risk assessment in Southwest China based on multiple risk sources [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(24): 8992-9000.
- [33] 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.
- [34] 刘定超, 金伟, 惠希东, 等. 石油焦燃烧过程中影响多环芳烃生成的因素分析 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2018, **44**(5): 631-637.
- Liu D C, Jin W, Hui X D, *et al.* Influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons formation during petroleum coke combustion [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, **44**(5): 631-637.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)