

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析

胡冬梅, 彭林*, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九

(太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 为明确城市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及污染来源, 采集采暖和非采暖季环境空气 PM_{10} 样品和典型排放源(高等植物、燃煤和机动车)样品, 利用 GC-MS 测定正构烷烃, 选取诊断参数并结合污染源排放特征讨论 PM_{10} 中正构烷烃分布和来源, 采用主成分分析法定量解析源贡献率。结果表明, 环境空气 PM_{10} 中正构烷烃含量呈较强时空变化, 采暖和非采暖季浓度分别为 $213.74 \sim 573.32 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $22.69 \sim 150.82 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 前者总浓度最高是后者的 18 倍; 采暖季郊区点位(JY、JCP、XD 和 SL)浓度均高于市区, 以 JY 最高($577.32 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), 非采暖季工业区(JS)总烷烃量($150.82 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)明显高于其它点位, 是 SL 总量的 7 倍。采暖季化石燃料来源烷烃($C_n \leq C_{24}$)与总烷烃量相关性优于植物来源烷烃($C_n \geq C_{25}$), 非采暖季相反, 表明前者化石燃料输入较后者高。CPI 和 %WNA 指示非采暖季植物贡献率较采暖季高, 且植物蜡烷烃随环境压力的增大总产率增加; C_{max} 和 OEP 表明非采暖季 PM_{10} 中有有机质成熟度低于采暖季; 两季样品 TIC 图均存在 UCM 鼓包, 机动车尾气是该城市的重要污染源。PCA 解析结果表明太原市环境空气 PM_{10} 中正构烷烃首要排放源为机动车尾气 and 高等植物, 约占 51.28%; 其次为煤烟尘, 贡献率为 43.14%。煤烟尘污染控制协同机动车尾气净化措施的完善将成为降低城市空气颗粒物中正构烷烃浓度的有效途径。

关键词: 正构烷烃; PM_{10} ; 分布特征; 主成分分析; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3733-08

Distribution and Source Apportionment of *n*-Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China

HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, MU Ling, HAN Feng, LIU Xiao-feng, JI Hao-dong, ZHANG Peng-jiu
(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The *n*-alkanes in PM_{10} and typical emission sources samples collected during heating and non-heating periods in Taiyuan were determined with GC-MS. Meanwhile, the distribution characteristics and source identification of *n*-alkanes were investigated with diagnostic parameters and principal component analysis (PCA). Concentrations of *n*-alkanes ranged from 213.74 to $573.32 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ and 22.69 to $150.82 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ in the heating and non-heating seasons, respectively. The *n*-alkanes concentrations in suburban districts including JY, JCP, XD and SL were higher than those in urban sites in the heating quarter, and the relative concentration in JS was 7 times higher than that in SL in the other period. The correlation of the total *n*-alkanes in PM_{10} with that derived from fossil fuel was higher than the correlation with those from plant in the heating quarter, while the opposite result was detected in the other period, manifesting higher contribution of fossil fuel in the heating days. CPI and %WNA values showed that the contribution from plant wax in the non-heating period was higher than that in the heating period, and the alkanes production rate was elevated along with the increase in environmental pressures. Information on higher organic matter maturity was obtained during the heating period by C_{max} and OEP and the existence of UCM bulge confirmed that vehicles were the significant contributor to *n*-alkanes concentration during the whole year. PCA analysis indicated the major component was the mixture of vehicle emission and higher plant, accounting for 51.28% of the total variances, followed by coal dust, accounting for 43.14%. Cooperating control of emissions from coal combustions and vehicles would be the effective way to lower the concentrations of the corresponding *n*-alkanes.

Key words: *n*-alkanes; PM_{10} ; distribution characteristics; principal component analysis; source apportionment

城市环境空气颗粒物中正构烷烃是一类重要的痕量有机污染物, 主要来源于化石燃料(煤、石油)燃烧等人为源^[1~4]和高等植物排放等天然源^[5]。研究表明约 87%~88% 的正构烷烃随颗粒物进入呼吸道, 约 31%~49% 穿透并滞留在肺泡, 对人体危害极大^[6]; 烷烃能激发多环芳烃致癌性能, 皮肤癌诱发速率提高 4 倍^[7,8]。因此, 正构烷烃作为一种重要的分子标志物, 能较好地利用分子化学参数解析其在空气颗粒物^[9~11]中的主要来源。准确解析环境空气

中正构烷烃的污染来源并降低其环境浓度十分必要。

目前, 国内研究已从广州、香港、北京、上海等大城市延伸至保定等中小城市^[10,12~15], 而针对煤焦资源丰富的城市相关报道较少。太原市作为以煤炭

收稿日期: 2013-01-23; 修订日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173002)

作者简介: 胡冬梅(1986~), 女, 硕士, 主要研究方向为气溶胶有机化学, E-mail: huhu3057@163.com

* 通讯联系人, E-mail: penglin6611@163.com

为主要能源的全国重工业基地,已有研究表明 20 世纪 80 年代该市空气颗粒物中烷烃主要来源于矿物燃料的燃烧^[16],90 年代主要来自化石燃料的燃烧和少量的植物排放^[17].自 2005 年后,该地区机动车保有量大幅增加,集中供热普及率显著上升,公交车、出租车及家用燃料已逐渐被天然气、煤层气等清洁能源替代.燃料结构的调整和使用量的改变对太原市环境空气颗粒物中正构烷烃污染水平及来源的影响尚不明确.

本研究在分析太原市环境空气颗粒物正构烷烃时空分布基础上,利用 C_{max} 、CPI、% WAP、OEP 和 UCM 等诊断参数并结合污染源排放特征判定其主要来源,通过主成分分析法(PCA)定量解析源贡献率,以期为准确评估和有效控制环境空气中正构烷烃的污染提供科学依据,对城市环境空气质量改善具有一定的指导意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据研究区域的城市布局和气候条件信息,选取 7 个有代表性点位(图 1)同步采集 PM_{10} 样品,点位分别为上兰(SL,城市上风向居民区)、金胜(JS,工业区)、晋源(JY,居民文教区)、桃园与坞城(TY与 WC,商住混合区)、尖草坪与小店(JCP 与 XD,工业居民混合区).采样前将玻璃纤维膜经马弗炉

500℃灼烧 5 h,以去除膜上有机污染物.选用青岛崂山 KC-6120 型大气综合采样仪采集 PM_{10} 样品,流量 $100 L \cdot min^{-1}$.采样时间为 2010 年 12 月 28 ~ 2011 年 3 月 13 日和 2011 年 8 月 9 ~ 24 日,分别代表采暖和非采暖季,采样高度为 6 ~ 8 m,每天采样 20 h,共采集 106 个样品.为定性解析大气颗粒物中正构烷烃来源的来源,同时采集该城市常见高等植物叶片(杨树、槐树和冬青)、民用与工业燃煤烟尘(煤球灰、原煤灰、电厂灰和焦化灰)和机动车尾气尘(汽油车、柴油车和天然气车尾气)这 3 种源样品.

1.2 样品前处理

用二次精馏的三氯甲烷(分析纯)在 65℃时索氏抽提 48 h,抽提物过硅胶-氧化铝柱,依次用正己烷、二氯甲烷和甲醇(均为分析纯)做洗脱液,分别获得饱和烃、芳烃和非烃馏分.将饱和烃组分旋转蒸发,用氮吹仪浓缩至 1 mL,保存至棕色样品瓶,待分析.样品定量分析前加内标 $C_{24}D_{50}$.

1.3 分析测试方法

选用美国安捷伦公司 6890N-GC/5973N-MSD 进行饱和烃的定性和定量分析,色谱柱为 J&W. HP-5(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)弹性石英毛细管柱.进样口温度 280℃,进样方式为无分流,进样量 1 μL ,载气为高纯氦气(99.999%),流速 1.2 $mL \cdot min^{-1}$.色谱升温程序:起始温度 80℃,以 $4^\circ C \cdot min^{-1}$ 升温至 290℃,恒温 30 min.质谱离子源为 EI 源,温度 230℃,电离能 70 eV.参照标准样品在色谱图上保留时间和质谱图进行样品定性,以内标标准曲线法完成样品定量分析.

1.4 质量控制和质量保证

选用混合标准样品(正癸烷至正四十烷),单体烷烃标准曲线线性良好, R^2 均大于 0.95;烷烃回收率为 72% ~ 118%.实验室空白和野外空白实验均未检测到目标化合物.

2 结果与讨论

2.1 PM_{10} 中正构烷烃时空变化

不同功能区大气颗粒物中正构烷烃的浓度呈现较强时空变化,如图 2.采暖季各点位正构烷烃的总浓度明显高于非采暖季,最高达 18 倍,表明采暖季与非采暖季烷烃输入源有明显差别,这种差异主要源于冬季供暖燃煤量增大所导致的烷烃排放浓度升高.此外,大气环境要素对季间浓度的差异也起重要作用.采暖季平均气温较低($-2^\circ C$ 以下),半挥发

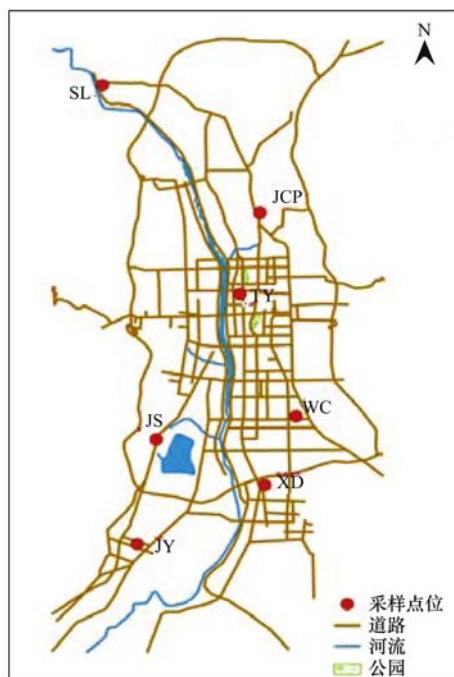


图 1 环境空气 PM_{10} 采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites for PM_{10}

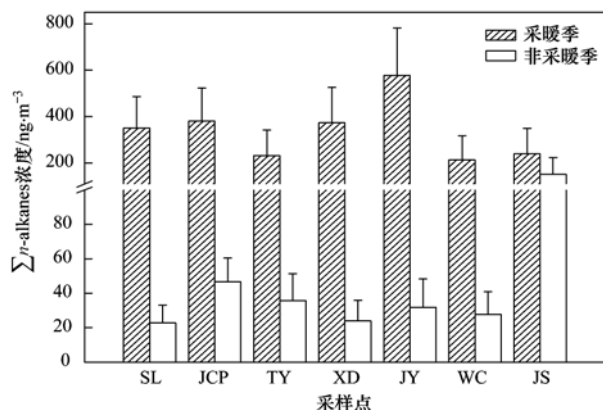
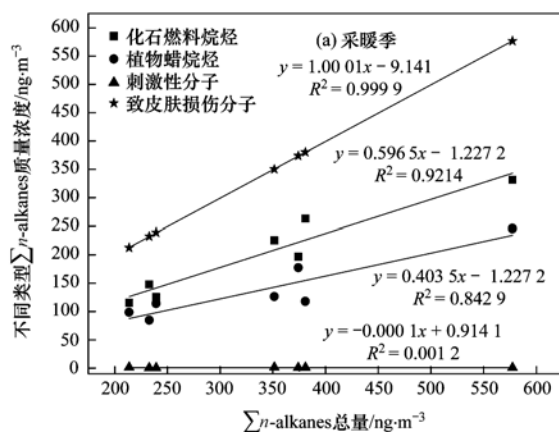
图2 采暖与非采暖季环境空气 PM₁₀ 中正构烷烃总浓度

Fig. 2 Concentrations of *n*-alkanes in PM₁₀ during the heating and non-heating quarters in Taiyuan

烷烃更易吸附在颗粒物上,且大气层结较为稳定,干燥少雨,不利于污染物的扩散和去除;非采暖季较高的温度、较好的空气对流及较多的降水均利于半挥发烷烃的气-固分配和颗粒物去除。

非采暖季 PM₁₀ 中各点位正构烷烃浓度介于 22.69 ~ 150.82 ng·m⁻³ 之间,平均值 48.43 ng·m⁻³, 低于广州 (70.9 ng·m⁻³)^[13] 和北京 (578 ng·m⁻³)^[18],与阿尔及利亚北部地区水平相近 (25 ~ 137 ng·m⁻³)^[11],处于较低污染水平;工业区 (JS) 总烷烃量 (*n*-C₁₆ ~ *n*-C₃₄, 150.82 ng·m⁻³) 明显高于其它点位,是上风向居民区 SL 的 7 倍,可能与工业固定燃煤锅炉和机动车尾气的排放有关。

采暖季正构烷烃浓度为 213.74 ~ 573.32 ng·m⁻³, 平均 338.56 ng·m⁻³, 高于香港 (199.3 ng·m⁻³)^[12], 低于宝鸡 (1733 ng·m⁻³)^[19]、北京 (1742 ng·m⁻³)^[18],处于中等污染水平;郊区点位 (JY、JCP、XD 和 SL) 浓度均高于市区,以 JY 最高 (577.32 ng·m⁻³),可能与冬季家用燃煤取暖有关。



采暖和非采暖季环境空气 PM₁₀ 中各点位总烷烃浓度与化石燃料来源烷烃 ($C_n \leq C_{24}$) 和高等植物来源烷烃 ($C_n \geq C_{25}$) 的相关性均较好 (见图 3)。采暖季总烷烃与植物来源和化石燃料来源烷烃相关系数分别为 0.84 和 0.92 [图 3(a)], 表明化石燃料输入量较植物高;非采暖季总正构烷烃量与两类不同来源烷烃的相关系数分别为 0.99 和 0.91 [图 3(b)], 优于采暖季与植物来源烷烃的相关性,植物贡献率显著增加。致皮肤损伤烷烃 ($C_n \geq C_{17}$)^[20] 与总烷烃相关性明显好于刺激性烷烃 (n -C₈ ~ n -C₁₆), 与低分子量刺激性烷烃主要存在于气相有关。

2.2 PM₁₀ 中正构烷烃定性来源解析

2.2.1 碳数分布和主峰碳 (C_{max})

采暖季 PM₁₀ 中正构烷烃碳数分布为 n -C₁₅ ~ n -C₃₅, 呈中间高、两头低的单峰型,以 n -C₂₂ 或 n -C₂₃ 为主峰碳 [图 4(a)], 且高碳数区有轻微奇碳优势;各点位分布特征相似。在非采暖季,烷烃分布为 n -C₁₅ ~ n -C₃₄, 呈单峰后峰型分布 [图 4(b)], 高碳数烷烃 (n -C₂₂ ~ n -C₃₁) 丰度明显高于低碳数烷烃 (n -C₁₅ ~ n -C₂₂), 且 n -C₂₅ ~ n -C₃₂ 间呈明显奇碳优势;工业居民混合区 (JCP 和 XD)、商住混合区 (WC 和 TY) 和居民文教区 (JY) 主峰碳为 n -C₂₉ 或 n -C₂₇, 与高等植物蜡烷烃分布特征相似,工业区 (JS) 以 n -C₂₅ 为主峰碳,可能是高等植物等现代生物和化石燃料的双重源。碳数分布和 C_{max} 反映信息表明采暖季环境空气中有机物演化程度高于非采暖季,主要源于现代高等植物与化石燃料的成熟度差异。

2.2.2 碳优势指数 (CPI) 和奇偶优势度 (OEP)

为区分生物源和化石燃料源的相对贡献,本研究计算了 CPI₁、CPI₂ 和 CPI₃^[21,22] (表 1)。采暖季各点位正构烷烃 CPI₁ 值在 1.1 左右波动,非采暖季

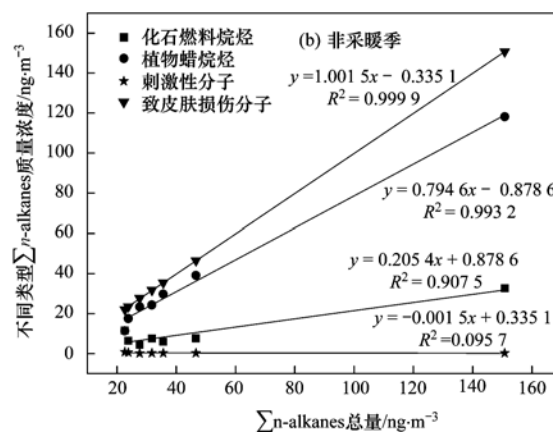
图3 PM₁₀ 中正构烷烃总量与不同类型烷烃相关关系

Fig. 3 Correlation of total *n*-alkanes with different types of *n*-alkanes in PM₁₀

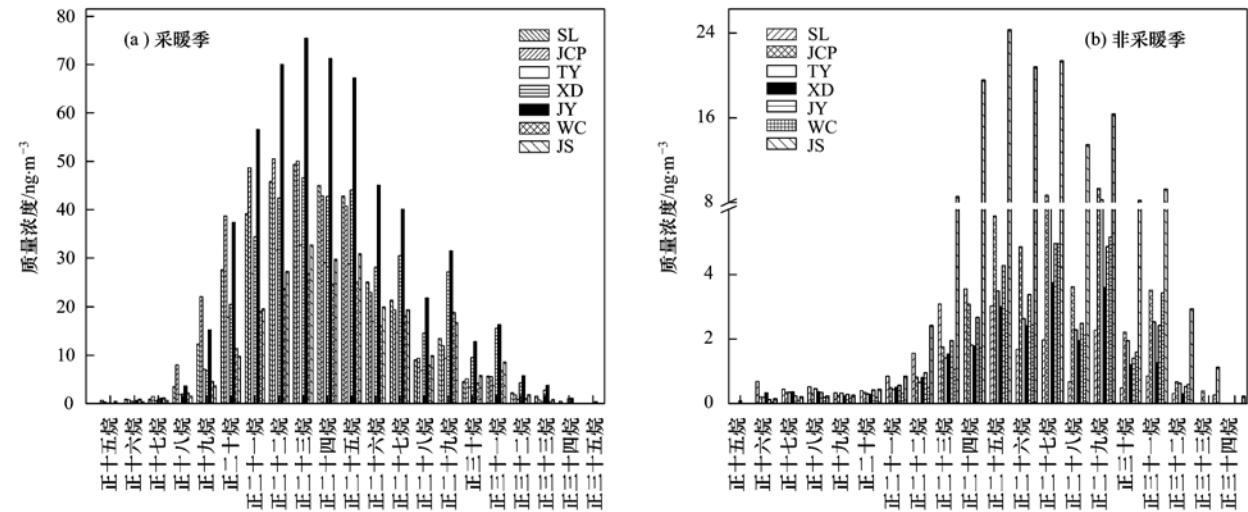


图4 不同功能区PM₁₀中单体正构烷烃浓度分布

Fig. 4 Concentrations of individual *n*-alkanes in PM₁₀ from different sampling sites

CPI₁ 值介于 1.20 ~ 2.27 之间,表明后者高等植物源输入大于前者,与上文结果一致. 其中非采暖季商住混合区(TY) CPI₁ 最高(2.27),源于道路周围绿化乔木较繁茂;工业区(JS)最低(1.20),受人为源

影响较大,与 C_{max} 表征信息一致. 采暖和非采暖季 CPI₂ 平均值分别为 0.83 和 1.58, CPI₃ 分别为 2.04 和 2.29,验证了化石燃料源和植物源对两季贡献比例.

表1 空气颗粒物中正构烷烃相关诊断参数

Table 1 Molecular diagnostic parameters of *n*-alkanes in atmospheric particulates

诊断参数	采暖季							非采暖季						
	SL	JCP	TY	XD	JY	WC	JS	SL	JCP	TY	XD	JY	WC	JS
CPI ₁ ¹⁾	1.14	1.12	1.14	1.26	1.14	1.32	1.25	1.30	1.90	2.27	1.51	1.58	1.95	1.20
CPI ₂	0.83	0.87	0.83	0.82	0.81	0.83	0.82	1.15	1.81	1.76	1.57	1.62	1.71	1.50
CPI ₃	2.03	1.97	2.01	2.08	1.81	2.35	2.01	2.58	2.41	2.97	1.97	2.11	2.43	1.57
OEP ²⁾	1.17	0.91	1.2	1.21	1.11	1.2	1.19	0.72	2.67	2.28	2.11	2.34	2.98	1.23
% WAX ³⁾	8.85	7.8	9.3	13.53	8.71	15.36	12.72	19.86	31.92	40.58	22.78	24.55	32.98	13.77
Fossil fuel/wax ⁴⁾	10.30	11.82	9.75	6.39	10.48	5.51	6.86	4.04	2.13	1.46	3.39	3.07	2.03	6.26

1) 总正构烷烃: $CPI_1 = \sum (C_{15} - C_{33}) / \sum (C_{16} - C_{34})$; 人为源正构烷烃: $CPI_2 = \sum (C_{15} - C_{23}) / \sum (C_{16} - C_{24})$; 生物源正构烷烃: $CPI_3 = \sum (C_{25} - C_{33}) / \sum (C_{26} - C_{34})$; 2) OEP = $[(C_{n-2} + 6C_n + C_{n+2}) / (4C_{n-1} + 4C_{n+1})]^{(-1)(n-1)}$; 3) % WAX = $\sum [C_n - 0.5(C_{n-1} + C_{n+1})] / \sum \text{alkanes} \times 100\%$, 当 C_n 为负时取其为 0; 4) 化石燃料烷烃与植物蜡烷烃比值

采暖与非采暖季烷烃 OEP 指数分别为 0.91 ~ 1.21 和 0.72 ~ 2.98 (表 1), 平均值分别为 1.14 和 2.05, 表明非采暖季空气中有机物基本处于未成熟阶段, 采暖季有机物演化已进入成熟阶段. 为更直观表现环境空气中烷烃的来源, 本研究分析了空气受体和排放源 OEP 曲线随碳链长度变化的趋势^[23,24]. 采暖季环境空气各点位 OEP 曲线相似, 表明其来源基本一致; 与排放源 OEP 曲线比较显示 [图 5(a) ~ 5(c)], 空气 PM₁₀ 中烷烃 OEP 曲线与原煤灰、电厂灰及汽油车、天然气车尾气的 OEP 曲线趋势相似, 表明采暖季煤烟尘和机动车尾气是 PM₁₀ 烷烃的重要源. 非采暖季, 除 JS 外, 其余点位 OEP

曲线基本一致; 对照典型污染源中烷烃 OEP 曲线 [图 5(d) ~ 5(f)], 结果显示空气 PM₁₀ 中低碳数烷烃 ($C_n \leq C_{24}$) OEP 与机动车尾气趋势较一致, 高碳数烷烃 ($C_n \geq C_{25}$) OEP 与高等植物有较好相关性, 表明非采暖季机动车尾气与植物的贡献率较大.

2.2.3 植物蜡贡献率 (% WAX)

为明确高等植物源对环境空气单体烷烃 ($n-C_{20} \sim n-C_{34}$) 的贡献, 本研究选用 $WAX(C_n) = C_n - 0.5(C_{n-1} + C_{n+1})$ 计算相应的植物蜡烷烃浓度^[23,25]. 采暖季植物源单体烷烃浓度在 1.54 ~ 15.21 ng·m⁻³ 之间 (图 6), 最大值是 $n-C_{25}$ 或 $n-C_{29}$; $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 来自植物蜡贡献率最高, 约 37.56% ~ 67.76%, 与

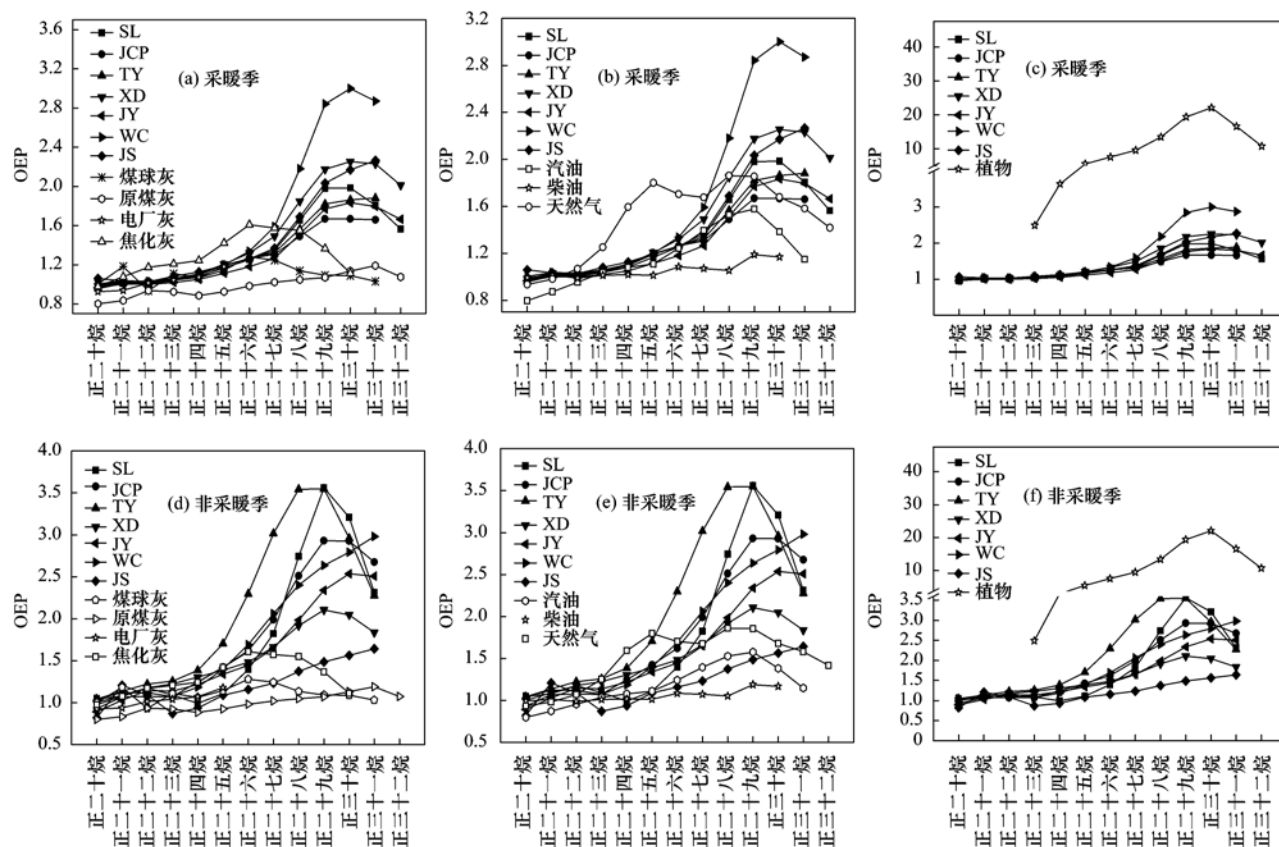


图5 环境空气颗粒物和污染源中正构烷烃单体 OEP 趋势图

Fig. 5 OEP plots of individual *n*-alkanes for atmospheric particulates and sources

Ladji 等^[26]的研究结果一致,其余单体烷烃植物蜡贡献率为 2.18% ~ 33.86%。非采暖季植物蜡单体烷烃浓度为 $0.13 \sim 6.43 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ [图 6], 最大值均在 $n\text{-C}_{29}$ 、 $n\text{-C}_{27}$ 、 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 来自植物蜡的贡献率为 39.79% ~ 74.58%, 其余单体比例范围为 6.86% ~ 36.42%。表明两季 PM_{10} 中中链奇碳数烷烃主要来自木本高等植物。

采暖季各点位植物蜡烷烃总浓度为 $25.06 \sim 45.76 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 不同点位间差异较小; 非采暖季总浓度为 $3.87 \sim 17.64 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 且各点位差异较大 (JS 为 SL 的 5 倍), 该差异与各点位污染水平 (JS > JCP > TY > JY > WC > XD > SL) 完全一致。植物蜡烷烃总产率的时空差异表明植物蜡质组成成分因环境压力的变化进行相应调控, 对植物起保护作用^[27,28]。环境压力增大使植物体中羟化酶活性增强, 新陈代谢过程加速, 在内质网中优先发生酰基链延伸反应, 使更多偶碳数脂肪酸成长链的奇碳烷烃, 以提高植物对环境压力的响应。

采暖季 % WNA 在 5.57% ~ 14.26% 范围, 平均值为 10.90%, 高等植物对环境空气中正构烷烃的贡献率相对较低; 非采暖季 % WNA 值介于 11.69%

~ 40.18% 之间, 平均值为 26.63%, 是采暖季 % WNA 平均值的 2 倍, 表明高等植物在非采暖季的输入大于采暖季 (表 1)。Fossil fuel/wax 可进一步证明两源的相对贡献, 采暖季高于非采暖季, 最高达 8 倍, 与青岛^[29]、香港^[30]一致。

2.2.4 UCM 和姥鲛烷、植烷 (P_r 、 P_h)

UCM 是机动车尾气的特征参数, 主要由支链和环烷烃组成^[31,32]。在采暖和非采暖季, 所有样品 TIC 图均存在 UCM 鼓包, 峰值分别在 $n\text{-C}_{20}$ 和 $n\text{-C}_{30}$ 附近, 机动车尾气是该城市的重要污染源。 P_r 和 P_h 是石油残余物和地质尘埃污染的标志物^[31]。两季空气 PM_{10} 样品中均检测出 P_r 和 P_h , 相对丰度较低, 表明气溶胶普遍受到化石燃料及其燃烧产物和地质尘埃的污染。

2.3 正构烷烃定量来源解析

为明确太原市 PM_{10} 中正构烷烃典型排放源 (煤烟尘、机动车尾气 and 高等植物) 的贡献率, 选用 SPSS 软件对 PM_{10} 中单体烷烃浓度进行最大方差旋转因子分析, 根据所得因子载荷及各因子分布特征对主成分识别与命名^[33]。依据特征根大于 1 时方可被提取原则, 解析得到 2 个主要成分, 其累计方差

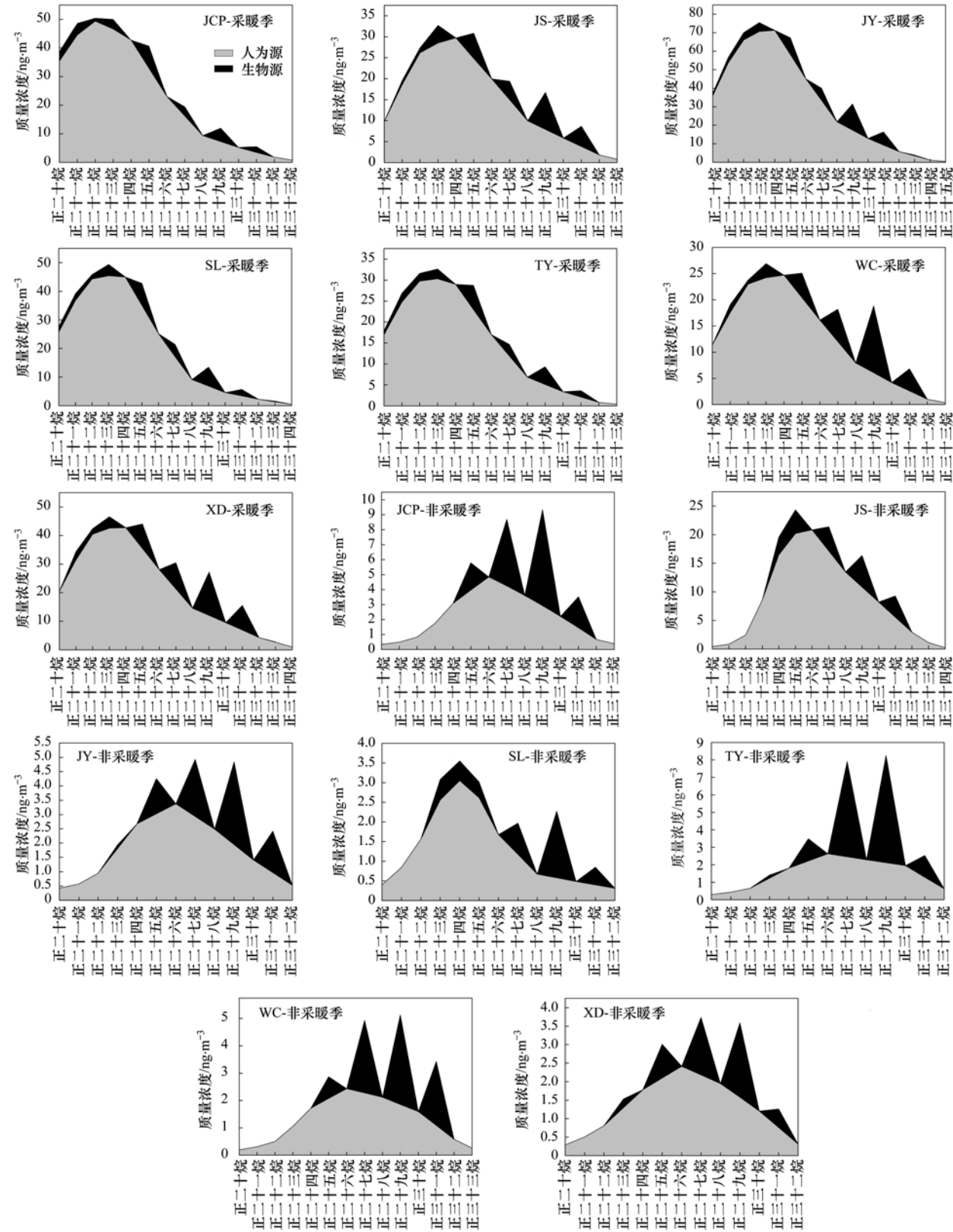


图 6 PM_{10} 中化石燃料源和生物源正构烷烃分布

Fig. 6 Distribution diagrams for anthropogenic and biogenic n -alkanes in PM_{10}

贡献率为 94.42%, 基本解释了全部变量的主要信息. 正构烷烃各因子载荷矩阵及主成分贡献率见图

7. 主成分 1 中因子载荷较大 (>0.7) 的化合物包括机动车尾气特征排放的烷烃 n - C_{22} 、 n - C_{23} 、 n - C_{24} 、

$n\text{-C}_{25}$ 、 $n\text{-C}_{26}$ ^[32,34]和高等植物烷烃 $n\text{-C}_{27}$ 、 $n\text{-C}_{29}$ 、 $n\text{-C}_{31}$ 以及石蜡或地蜡中长链偶数烷烃 $n\text{-C}_{28}$ 、 $n\text{-C}_{30}$ 、 $n\text{-C}_{32}$ ^[35],该混合源贡献率为 51.28%;主成分 2 中因子载荷较大的化合物是燃煤排放的低分子量烷烃 $n\text{-C}_{16} \sim n\text{-C}_{21}$,贡献率为 43.14%。

比较分析 20 世纪 80、90 年代和本研究中太原市 PM_{10} 中正构烷烃的来源可知,机动车保有量的大幅增加(1985 年不足 1 万辆,至 1999 年 19.71 万辆,再至 2012 年 82.41 万辆)使得机动车尾气对 PM_{10} 中正构烷烃的贡献突显,清洁能源的推广和燃料结构的调整减少了矿物燃料燃烧对其排放的贡献。煤烟尘污染控制协同机动车尾气净化措施的完善将成为降低城市 PM_{10} 中正构烷烃浓度的有效途径。

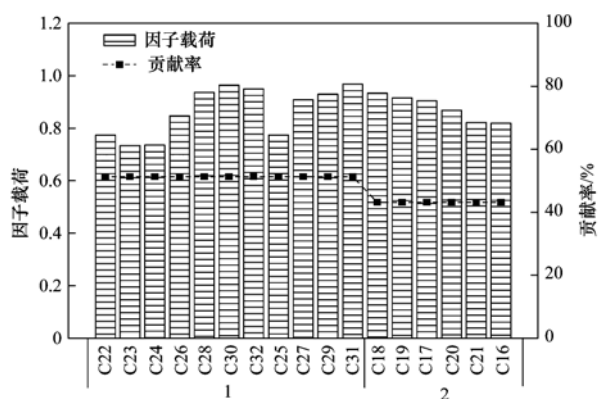


图 7 正构烷烃旋转因子载荷及主因子贡献率分布

Fig. 7 Principal component analysis of n -alkanes and source contribution

3 结论

(1) 环境空气 PM_{10} 中正构烷烃含量呈较强时空变化。采暖和非采暖季各点位正构烷烃浓度分别为 $213.74 \sim 573.32 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $22.69 \sim 150.82 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,平均值分别为 338.56 和 $48.43 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,前者烷烃总浓度明显高于后者,最高达 18 倍;采暖季郊区 JY、JCP、XD 和 SL 浓度均高于市区点位,以 JY 最高($577.32 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$);非采暖季工业区(JS)总烷烃量($150.82 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)最高,是上风向居民区 SL 的 7 倍。采暖季化石燃料来源烷烃($C_n \leq C_{24}$)与总烷烃量的相关性优于植物来源烷烃($C_n \geq C_{25}$),非采暖季相反,表明前者化石燃料输入较后者高。

(2) 采暖季各点位正构烷烃以 $n\text{-C}_{22}$ 或 $n\text{-C}_{23}$ 为主峰碳,呈中间高、两头低的单峰分布,CPI 值在 1.1 左右波动,% WNA 为 5.57% ~ 14.26%;非采暖季高碳数烷烃($n\text{-C}_{22} \sim n\text{-C}_{31}$)丰度明显高于低碳

数($n\text{-C}_{15} \sim n\text{-C}_{22}$),且高碳数区间呈奇碳优势,CPI 值最高达 2.27,% WNA 介于 11.69% ~ 40.18% 之间,平均值(26.63)是采暖季的 2 倍。CPI 和 % WNA 指示非采暖季植物贡献率较采暖季高; $C_{\max}$ 和 OEP 表明非采暖季 PM_{10} 中有机质成熟度低于采暖季;两季样品 TIC 图均存在 UCM 鼓包,机动车尾气是该城市的重要污染源。

(3) 采暖季各点位植物蜡烷烃总浓度为 $25.06 \sim 45.76 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,差异较小;非采暖季总浓度为 $3.87 \sim 17.64 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,各点位差异较大(JS 为 SL 的 5 倍),植物蜡烷烃总产率的时空差异表明植物蜡质组成成分因环境压力的变化进行相应调控,随环境压力的增大总产率增加。

(4) 环境空气和典型排放源单体烷烃 OEP 曲线趋势图表明采暖季煤烟尘和机动车尾气是主要排放源,而非采暖季机动车尾气是低碳数烷烃($C_n \leq C_{24}$)的主要来源,高等植物是高碳数($C_n \geq C_{25}$)的主要来源。

(5) PCA 解析结果表明,太原环境空气 PM_{10} 中正构烷烃首要排放源为机动车尾气 and 高等植物,分担率为 51.28%;其次为煤烟尘,贡献率为 43.14%。煤烟尘污染控制协同机动车尾气净化措施的完善将成为降低城市环境空气 PM_{10} 中正构烷烃浓度的有效途径。

致谢:感谢中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心孟任祥研究员、房嫒老师,在样品分析过程中给予的大力帮助。

参考文献:

- [1] 成玉,盛国英,闵育顺,等. 珠江三角洲气溶胶中正构烷烃分布规律、来源及其时空变化[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1): 96-100.
- [2] 王娟,钟宁宁,栾媛,等. 鄂尔多斯市秋季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 颗粒物中正构烷烃的组成分布与来源特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1915-1923.
- [3] Simoneit B R T. Organic matter in eolian dusts over the Atlantic Ocean[J]. Marine Chemistry, 1977, 5(4-6): 443-464.
- [4] Duan F K, He K B, Liu X D. Characteristics and source identification of fine particulate n -alkanes in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(7): 998-1005.
- [5] Cecinato A, Marino F, Di Filippo P, et al. Distribution of n -alkanes, polynuclear aromatic hydrocarbons and nitrated polynuclear aromatic hydrocarbons between the fine and coarse fractions of inhalable atmospheric particulates[J]. Journal of Chromatography A, 1999, 846(1-2): 255-264.
- [6] 周春玉,叶汝求,汤国才,等. 广州气溶胶中有机物的分布及其与人体健康关系的研究[J]. 环境科学研究, 1991, 4(2): 41-51.

- [7] Baxter C S, Miller M L. Mechanism of mouse skin tumor promotion by *n*-dodecane[J]. Carcinogenesis, 1987, **8**(12): 1787-1790.
- [8] Horton A W, Denman D T, Trosset R P. Carcinogenesis of the skin. II. The accelerating properties of aliphatic and related hydrocarbons[J]. Cancer Research, 1957, **17**(8): 758-766.
- [9] Tsapakis M, Lagoudaki E, Stephanou E G, *et al.* The composition and sources of PM_{2.5} organic aerosol in two urban areas of Chile[J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(23): 3851-3863.
- [10] Feng J L, Hu M, Chan C K, *et al.* A comparative study of the organic matter in PM_{2.5} from three Chinese megacities in three different climatic zones[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(21): 3983-3994.
- [11] Ladji R, Yassaa N, Balducci C, *et al.* Distribution of the solvent-extractable organic compounds in fine (PM₁) and coarse (PM₁₋₁₀) particles in urban, industrial and forest atmospheres of Northern Algeria [J]. Science of the Total Environment, 2009, **408**(2): 415-424.
- [12] Zheng M, Wan T S M, Fang M, *et al.* Characterization of the non-volatile organic compounds in the aerosols of Hong Kong—identification, abundance and origin [J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(2): 227-237.
- [13] Bi X H, Sheng G Y, Peng P A, *et al.* Extractable organic matter in PM₁₀ from LiWan district of Guangzhou City, PR China[J]. Science of the Total Environment, 2002, **300**(1-3): 213-228.
- [14] 姚利, 李杏茹, 郭雪清, 等. 2007 年春节期间北京大气细粒子中正构烷烃的污染特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 589-593.
- [15] 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 等. 保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 441-447.
- [16] 章安安, 柳永行. 太原地区大气飘尘中部分有机污染物的分析[J]. 环境化学, 1985, **4**(5): 21-27.
- [17] 彭林, 陈名梁, 段毅. 太原市大气颗粒物中正构烷烃的分布特征及环境意义[J]. 沉积学报, 1999, **17**(S1): 836-839.
- [18] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 北京大气颗粒物中正构烷烃污染特征的 GC-MS 法研究[J]. 分析测试学报, 2008, **27**(S1): 103-105.
- [19] Xie M J, Wang G H, Hu S Y, *et al.* Aliphatic alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM₁₀ aerosols from Baoji, China: Implications for coal burning [J]. Atmospheric Research, 2009, **93**(4): 840-848.
- [20] 堀口博, 刘文宗, 张凤臣, 等. 公害与毒物、危险物(有机篇)[M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1978. 2-8.
- [21] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust; roads as sources and sinks[J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(9): 1892-1904.
- [22] Bray E E, Evans E D. Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1961, **22**(1): 2-15.
- [23] Kavouras I G, Stratigakis N, Stephanou E G. *Iso*- and *anteiso*-alkanes: specific tracers of environmental tobacco smoke in indoor and outdoor particle-size distributed urban aerosols [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(10): 1369-1377.
- [24] Scalani E S, Smith J E. An improved measure of the odd-even predominance in the normal alkanes of sediment extracts and petroleum [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1970, **34**(5): 611-620.
- [25] Simoneit B R T. Organic matter of the troposphere—V: Application of molecular marker analysis to biogenic emissions into the troposphere for source reconciliations [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1989, **8**(3): 251-275.
- [26] Ladji R, Yassaa N, Balducci C, *et al.* Annual variation of particulate organic compounds in PM₁₀ in the urban atmosphere of Algiers [J]. Atmospheric Research, 2009, **92**(2): 258-269.
- [27] Furlan C M, Santos D Y A C, Salatino A, *et al.* *N*-alkane distribution of leaves of *Psidium guajava* exposed to industrial air pollutants [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, **58**(1-3): 100-105.
- [28] Grodzińska-Jurczak M. Conifer epicuticular wax as a biomarker of air pollution: an overview [J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 1998, **67**(3-4): 291-300.
- [29] Guo Z G, Sheng L F, Feng J L, *et al.* Seasonal variation of solvent extractable organic compounds in the aerosols in Qingdao, China [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(13): 1825-1834.
- [30] Zheng M, Fang M, Wang F, *et al.* Characterization of the solvent extractable organic compounds in PM_{2.5} aerosols in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(17): 2691-2702.
- [31] Simoneit B R T. Organic matter of the troposphere—III. Characterization and sources of petroleum and pyrogenic residues in aerosols over the western united states [J]. Atmospheric Environment (1967), 1984, **18**(1): 51-67.
- [32] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(4): 636-651.
- [33] Hopke P K, Gladney E S, Gordon G E, *et al.* The use of multivariate analysis to identify sources of selected elements in the Boston urban aerosol [J]. Atmospheric Environment, 1976, **10**(11): 1015-1025.
- [34] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [35] 马大谋. 石油化学基础知识[M]. 北京: 燃料化学工业出版社, 1974. 53-70.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行