

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源

周雪明¹, 亓雪娇^{1,2}, 项萍¹, 谭吉华^{1,5*}, 段菁春³, 何晓朗⁴, 贺克斌⁵, 马永亮⁵

(1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 4. 广西大学环境学院, 南宁 530004; 5. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 为分析北京市 APEC 期间强化减排措施对大气细颗粒物中类腐殖酸(humic-like substances, HULIS)浓度及污染特征的影响. 对 APEC 前后样品进行了碳质组分(OC/EC)、水溶性有机碳(water-soluble organic carbon, WSOC)、HULIS 和水溶性离子分析, 研究发现 APEC 采样期间大气颗粒物中 HULIS 的浓度范围为 $1 \sim 15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. HULIS 浓度在会议减排前、中和后期分别为 7.99 、 5.83 和 $7.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 会议减排对降低 HULIS 浓度起到了一定作用. 在会议期间 HULIS 的浓度下降程度明显快于 EC 与 WSOC. 会议之后 HULIS 的浓度上升程度明显慢于 OC、EC、WSOC 和 $\text{PM}_{2.5}$; HULIS 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的值在采样期间变化不大, 在采样期间、会议减排前、中和后期分别为 13.60% 、 13.59% 、 14.02% 和 12.22% . HULIS-C/OC 的值和 HULIS-C/WSOC 的值依次为 28.95% 、 35.51% 、 28.37% 、 19.93% 和 52.75% 、 59.58% 、 51.54% 、 45.39% . HULIS 与湿度呈显著正相关, 与风速呈显著负相关; 生物质燃烧和二次转化可能是北京大气颗粒物中 HULIS 重要来源.

关键词: 北京; APEC; $\text{PM}_{2.5}$; 类腐殖酸; 来源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1602-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.002

Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC

ZHOU Xue-ming¹, QI Xue-jiao^{1,2}, XIANG Ping¹, TAN Ji-hua^{1,5*}, DUAN Jing-chun³, HE Xiao-lang⁴, HE Ke-bin⁵, MA Yong-liang⁵

(1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Environment College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 5. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the emission reduction measure during the Beijing APEC on the concentrations and pollution characteristics of humic-like substances (HULIS) in atmospheric fine particles, $\text{PM}_{2.5}$ samples were collected and analyzed for OCEC, WSOC, HULIS and water-soluble ions. The concentration of HULIS in $\text{PM}_{2.5}$ ranged $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ – $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. HULIS concentrations were $7.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $5.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $7.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ before, during and after APEC, which indicated emission reduction measure had important effect on the reduction of HULIS. The decrease of HULIS during the APEC was significantly faster than those of EC and WSOC, while the increase of HULIS turned out to be much slower than OC, EC, WSOC and $\text{PM}_{2.5}$ after the meeting. The proportions of HULIS to $\text{PM}_{2.5}$ were 13.60% , 13.59% , 14.02% and 12.22% at four different stages, i. e., whole sampling period, before, during and after the APEC, while HULIS-C/OC and HULIS-C/WSOC were 28.95% , 35.51% , 28.37% , 19.93% ; and 52.75% , 59.58% , 51.54% , 45.39% , respectively. HULIS was significantly positively correlated with humidity, while significantly negatively correlated with wind speed. Biomass burning and secondary transformation of VOCs might be two important sources of HULIS in Beijing.

Key words: Beijing; APEC; $\text{PM}_{2.5}$; humic-like substances(HULIS); source

类腐殖酸(HULIS)是一类从大气颗粒物、云、雾以及雨水中提取出的有机分子,因与陆地、水体中的腐殖酸和富里酸有相似的结构而得名^[1]. HULIS 相对于陆地、水体中的腐殖酸平均分子量较小,芳环结构较少,脂肪链结构较丰富^[2,3],含有多环芳香烃、酚类和酸性官能团. 大气颗粒物中的

HULIS 是水溶性有机物 WSOC 和二次有机气溶胶

收稿日期: 2015-10-25; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41105111, 41475116, 41275134); 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室基金项目(SCAPC201401)

作者简介: 周雪明(1992~),男,硕士,主要研究方向为大气环境科学, E-mail: zhouxueming14@mails.ucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: tanjh@ucas.ac.cn

SOA 的重要组成部分,对空气质量有一定影响. 因其具有较强的水溶性和表面活性,在云凝结核(能够被激活形成云滴的气溶胶粒子称为云凝结核)、冰核的形成和气溶胶的吸湿性增长,以及大气化学(有机污染物的液相氧化和气溶胶表面的臭氧损耗)等过程中发挥着重要作用,从而对大气辐射平衡和全球气候变化产生直接或间接的影响^[4]. 近几年又发现类腐殖酸对人体健康存在一定的负面影响^[5].

对 HULIS 的污染特征和来源研究具有很重要的意义. 北京 APEC 会议在会议期间实施了严格的污染控制措施,减排的污染源主要包含工业源、交通源和生物质燃烧源等,不同过程(污染控制前中后)HULIS 来源的显著变化,使得采样过程中 HULIS 的污染特征和来源的信息更加丰富,为 HULIS 的污染特征、转化和来源的研究提供了较好的机会. 为保障 2014 年亚太经济合作组织会议(APEC)期间的空气质量,会议前北京市政府和周边地区政府进行了一系列的污染防治措施. 北京在会议期间(11 月 3~12 日)采取了非常严格的强化减排控制措施:11 月 3~12 日实行机动车单双号限行、11 月 7~12 日在京政府机关和企事业单位放假调休 6 d、全市所有施工工地停工,企业停产并且在北京周边五省区市实施多种污染物协同减排等措施. 本研究通过对会议前中后期北京大气颗粒物中 HULIS 的分析,了解各种减排措施的对 HULIS 综合效应,以期为以后 HULIS 研究提供一些依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采样地点位于北京市石景山区中国科学院大学科研楼顶(39.92°N, 116.26°E),采样高度距地面约 8 m,对北京市大气污染状况有较好的代表性^[6]. 具体采样点位图如图 1 所示. 采样期分为 2014 年 10 月 29 日至 11 月 2 日、11 月 3 日至 11 月 12 日、11 月 13 日至 11 月 15 日这 3 个阶段共 18 d; 其中 2014 年 10 月 29 日至 11 月 2 日代表 APEC 会议前期,北京周边五省区市未采取强制减排措施; 2014 年 11 月 3 日至 11 月 12 日代表 APEC 会议期间,北京周边五省区市开始采取强制减排措施; 2014 年 11 月 13 日至 11 月 15 日代表会议后期,北京周边五省区市强制减排措施结束. 样品采集使用 Thermo TE-6070 大流量($1.13 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)PM_{2.5}采样器,共采集 18 个样品. 采样使用石英滤膜,采样前

置于马弗炉内在 480℃ 高温下灼烧 4 h.



图 1 采样点位示意

Fig. 1 Sampling map

1.2 样品分析

有机碳(OC)和元素碳(EC)使用美国 DRI 的 Model 2001A 型热/光碳分析仪;水溶性有机碳(WSOC)样品用 KQ-500DB 型数控超声波清洗器促进样品溶解,用 0.45 μm Teflon 滤头过滤得水溶液后立即上机分析. 样品分析使用总有机碳分析仪 TOC,型号为德国耶拿 Multi N/C 3100;水溶性离子(Water-Soluble Ions, WSI)样品预处理方法同 WSOC 样品预处理. 样品分析使用 ICS-2100 离子色谱仪进行分析. HULIS 样品预处理参考 Varga 等^[7]的方法. 样品前期提取同 WSOC 样品预处理,所得滤液用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸调节至 pH = 2,将酸化后的提取液导入装有 Waters Oasis HLB 小柱(3 cc, 60 mg)的固相萃取装置,大分子的 HULIS 会截留在小柱上,而小分子的 WSOC,无机盐等会随着溶液流出小柱. 向 HLB 小柱中加入含 2% 氨(优级纯)的甲醇溶液(色谱纯)对吸附在小柱上的 HULIS 进行洗脱,洗脱液经氮气吹干后加 Milli-Q 超纯水重新溶解后,以萨旺尼河黄腐酸(SRFA, Suwannee river fulvic acid)和北欧黄腐酸(NAFA, Nordic aqueous fulvic acid)为标准参考物质,高效液相配置蒸发光散射检测器即 HPLC 串联 ESLD(型号为 Agilent1260)检测器进行定量分析.

1.3 气象数据来源

观测期间气象数据采用“wunderground”网站公布的北京市(40.1°N, 116.6°E)气象观测数据.

2 结果与讨论

2.1 HULIS 污染水平

如表 1 所示 APEC 采样期间的 PM_{2.5}、OC、EC、

WSOC 和 HULIS 的平均浓度分别为 49.72、11.88、2.25、6.21 和 6.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其中 APEC 采样期间大气颗粒物中 HULIS 的浓度范围为 1 ~ 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。本研究的采样时间包括了 APEC 会议前、中、后这 3 个时期。其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为 58.42、43.23 和 56.84 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；OC 浓度分别为 10.48、10.71 和 18.10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；EC 浓度分别为 2.33、2.02 和 2.86 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；WSOC 浓度分别为 6.28、5.73 和 7.73 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；HULIS 浓度分别为 7.99、5.83 和 7.06 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ （图 2）。由数据可以看出会议期间相对于会议前 HULIS、EC、WSOC

和 $\text{PM}_{2.5}$ 分别下降了 27.05%、13.10%、8.81% 和 26.01%，OC 变化很小。其中 HULIS 的浓度下降程度明显快于 EC 与 WSOC，较快于 $\text{PM}_{2.5}$ 。会议后期间相对于会议中期间 HULIS、OC、EC、WSOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 分别升高了 21.10%、68.99%、41.42%、34.91% 和 31.50%。在此期间 HULIS 的浓度上升程度明显慢于 OC、EC、WSOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。与国内外地区相比（表 2），北京采样期间的 HULIS 浓度低于广州冬季，和广州夏季相近，高于香港，远高于美国纽约、匈牙利布达佩斯、法国巴黎、法国马赛和新西兰奥克兰。

表 1 北京 APEC 期间主要污染物浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Concentration of main air pollutants during the Beijing APEC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$												
时间	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	Na^+	Cl^-	K^+	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	OC	EC	WSOC	HULIS
减排前	16.33	6.15	7.36	0.45	2.23	0.96	137.5	58.42	10.48	2.33	6.28	7.99
减排中	9.26	3.55	4.12	0.26	1.81	0.64	76.50	43.23	10.71	2.02	5.73	5.83
减排后	7.00	3.27	4.24	0.38	4.03	0.81	93.89	56.84	18.10	2.86	7.73	7.06
采样期间	10.85	4.23	5.04	0.33	2.30	0.76	96.35	49.72	11.88	2.25	6.21	6.63

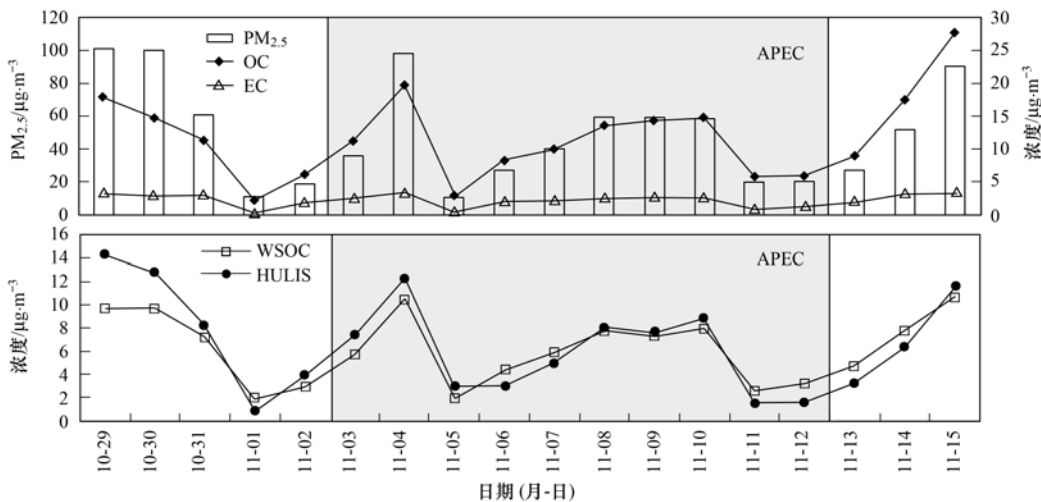


图 2 北京 APEC 期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC、WSOC、HULIS 日均浓度变化

Fig. 2 Variation of daily averaged concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, OC, EC, WSOC and HULIS during the Beijing APEC

表 2 国内外不同城市 HULIS 浓度比较

Table 2 Comparison of HULIS in different cities worldwide					
地点	地点类型	观测时间	样品类型	HULIS/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	检测手段
北京(本研究)	内陆城市	2014 年 10 月 29 日至 11 月 1 日	$\text{PM}_{2.5}$	6.63	蒸发光散射检测器
香港荃湾 ^[8]	沿海城市	2007 年 7 月至 2008 年 8 月	$\text{PM}_{2.5}$	4.9	蒸发光散射检测器
广州南沙 ^[8]	沿海城市	2007 年 7 月至 2008 年 8 月	$\text{PM}_{2.5}$	7.1	蒸发光散射检测器
广州五山 ^[9]	沿海城市	2006 年 7 月	TSP	5.8	重量分析
广州五山 ^[9]	沿海城市	2007 年 1 月	TSP	13.4	重量分析
美国纽约 ^[10]	内陆乡村	2009 年 9 月至 10 月	$\text{PM}_{2.5}$	0.9	紫外可见光谱
匈牙利布达佩斯 ^[11]	内陆城市	2008 年 6 月 3 日至 10 日	$\text{PM}_{2.5}$	2.2	总有机碳分析仪
法国巴黎 ^[12]	内陆城市	2007 年 11 月至 2008 年 2 月	PM_{10}	2.28	总有机碳分析仪
法国马赛 ^[13]	内陆城市	2008 年 6 月 30 日至 7 月 14 日	$\text{PM}_{2.5}$	1.17	总有机碳分析仪
新西兰奥克兰 ^[14]	港口城市	2001 年 1 月至 2 月	PM_{10}	0.634	总有机碳分析仪

2.2 HULIS 污染特征

OC 和 WSOC 是 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分. 对 OC 在 $PM_{2.5}$ 中所占的比例和 WSOC 在 OC 中所占的比例进行分析. 如图 3 所示: 采样期间 OC 占 $PM_{2.5}$ 的 25.79%, 会议减排前、中和后所占比例分别为 20.69%、26.36% 和 32.35%. 对于 WSOC 在 OC 所占的比例, 采样期间、会议减排前、中和后分别为 54.93%、62.83%、54.00% 和 44.89%. OC 在 $PM_{2.5}$ 的比例依次增加, 而 WSOC 在 OC 所占的比例依次降低, 不同期间比例差异明显, 说明来源的变化以及气象条件的改变对 OC 和 WSOC 影响较大.

对 HULIS 在 $PM_{2.5}$ 、WSOC 和 OC 中所占的比例进行分析. 结果表明: HULIS 占 $PM_{2.5}$ 在采样期间、会议减排前、中和后分别为 13.60%、13.59%、14.02% 和 12.22%. HULIS 占 $PM_{2.5}$ 的值在采样期间变化不大, 可见一次源的减少对 HULIS 在 $PM_{2.5}$ 中的含量影响不是很大. 再看 $HULIS-C^{[15]}/OC$ 的值和 $HULIS-C/WSOC$ 的值依次为 28.95%、

35.51%、28.37%、19.93% 和 52.75%、59.58%、51.54%、45.39%. 在会议减排中 $HULIS-C/OC$ 的值和 $HULIS-C/WSOC$ 的值相对于减排前下降了近 10%, 且会议减排后 $HULIS-C/OC$ 的值和 $HULIS-C/WSOC$ 的值相对于减排中又下降了近 10%. 可知一次源的减少会使 $HULIS-C/OC$ 和 $HULIS-C/WSOC$ 的值下降, 而在一次降低一定时间后, 一次源的增加不会立即使 $HULIS-C/OC$ 的值和 $HULIS-C/WSOC$ 的值上升反而会继续下降. $HULIS-C/WSOC$ 的值和 $HULIS-C/OC$ 的值随着大气颗粒物中 HULIS 含量的增加都表现出明显的逐渐增大的趋势, $HULIS-C/WSOC$ 增加幅度比 $HULIS-C/OC$ 的增加幅度要大. 由此可见: 随着大气颗粒物中 HULIS 含量的增加, HULIS 在 WSOC 和 OC 中所占的比例越来越高. 另外, $HULIS-C/EC$ 的值随着大气颗粒物中 HULIS 含量的增加也表现出增加的趋势, 并且增加幅度比 $HULIS-C/WSOC$ 和 $HULIS-C/OC$ 的增加幅度要大.

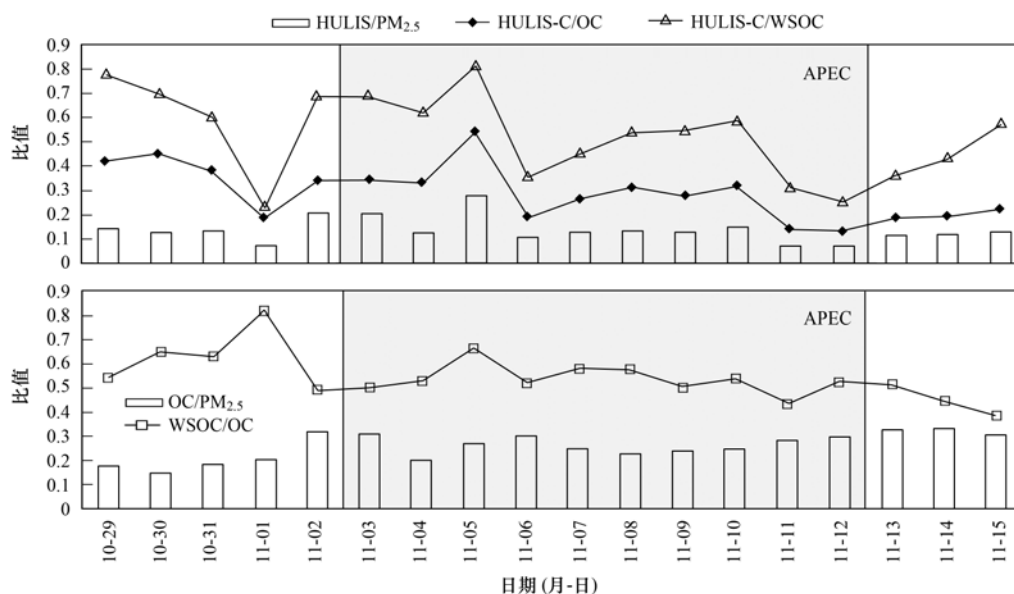


图3 北京 APEC 期间 $HULIS/PM_{2.5}$ 、 $HULIS-C/OC$ 和 $HULIS-C/WSOC$ 等的变化

Fig. 3 Variation of $HULIS/PM_{2.5}$, $HULIS-C/OC$ and $HULIS-C/WSOC$ etc during the Beijing APEC

2.3 HULIS 与气象参数的关系

图 4 为采样期间气象因子的湿度和风速的值分别与 HULIS 浓度进行的相关性分析, 分析发现: HULIS 与湿度呈显著正相关, 相关系数为 0.707 ($P < 0.01$), 可见湿度的增加可以使得 HULIS 的值上升; 而 HULIS 与风速呈显著负相关, 相关系数为 -0.689 ($P < 0.01$), 故风速的增加可以使得污染物质的扩散加快, 使得 HULIS 的值下降. 此次采样过程中, 会议减排前的湿度和风速分别为 58.2% 和

$10.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, HULIS 的浓度是 $7.99 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 会议减排中的湿度和风速分别为 46.7% 和 $9.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, HULIS 的浓度是 $5.83 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 会议减排前的湿度和风速分别为 37.7% 和 $8.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, HULIS 的浓度是 $7.06 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 相对于会议减排前, 会议减排中的气象因子对 HULIS 浓度的降低起到了一定的作用.

2.4 HULIS 来源分析

大气中 HULIS 来源有: 地壳土壤源^[16]、海洋飞沫^[17~19]、生物质燃烧^[20~23]、汽车尾气^[24]以及大气

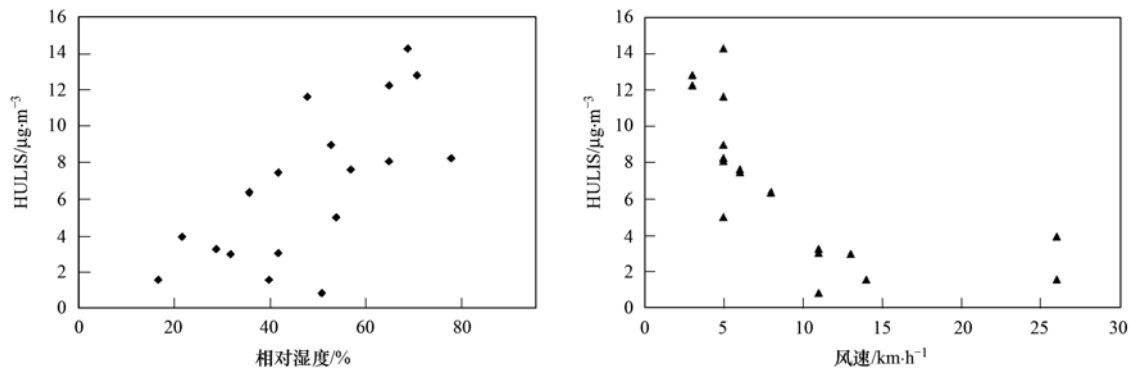


图 4 风速和湿度对 HULIS 浓度的影响

Fig. 4 Influences of wind speed and humidity on HULIS

中的二次反应过程^[25~27]. 但汽车尾气排放作为 HULIS 另一个可能的来源,目前尚有争议^[28]. 然而,近几年的研究发现,源于地壳土壤的 HULIS 量基本可以忽略不计. 沿海地区和北极地区大气颗粒物中的 HULIS 大量来自于海洋飞沫,而内陆地区来自海洋的 HULIS 量非常少. 通过表 1 可以知道 APEC 采样期间,Na⁺ 和 Cl⁻ 的浓度分别为 0.33 μg·m⁻³ 和 2.30 μg·m⁻³,可见海洋飞沫不是采样期间 HULIS 重要来源.

用 HULIS 的浓度和采样期间 K⁺ 的浓度做相关性分析,分析发现: HULIS 与 K⁺ 呈显著正相关,相关系数为 0.929 ($P < 0.01$). 大气颗粒物中水溶性 K⁺ 可以作为生物质燃烧的指示物^[29~31],HULIS 的浓度水平和 K⁺ 的相关性很好,因此生物质燃烧可能是 APEC 期间北京大气颗粒物中 HULIS 的重要来源之一. 图 5 是采样期间 24 h 后向轨迹. 模式选

用采样点 500 作为气团轨迹计算的起始高度. 从中可知一般情况下采样期间气团传输距离比较近,受局地影响比较明显,污染浓度较高,传输距离比较远,受区域影响比较明显,污染浓度较低. 并且从南北方传输的情况也不一样,南方传输过来形成的污染浓度明显高于气团从北方的传输. 如 10 月 29 日、10 月 30 日和 11 月 4 日的气团从南方传递过来并且传输距离短,这 3 d 的 HULIS 浓度为采样期间最高的 3 d, HULIS 浓度分别为 14.28、12.78 和 12.26 μg·m⁻³; 11 月 3 日气团从北方传递过来并且传输距离长, HULIS 浓度为 7.45 μg·m⁻³; 11 月 8 日气团从北方传递过来但传输距离短, HULIS 浓度为 8.02 μg·m⁻³. 周边的生物质燃烧污染源随着气流传输到北京后,加之北京处于静稳天气污染物扩散受到限制,成为造成北京 HULIS 和水溶性 K⁺ 浓度升高的一个重要原因. 综上可知,生物质燃烧可

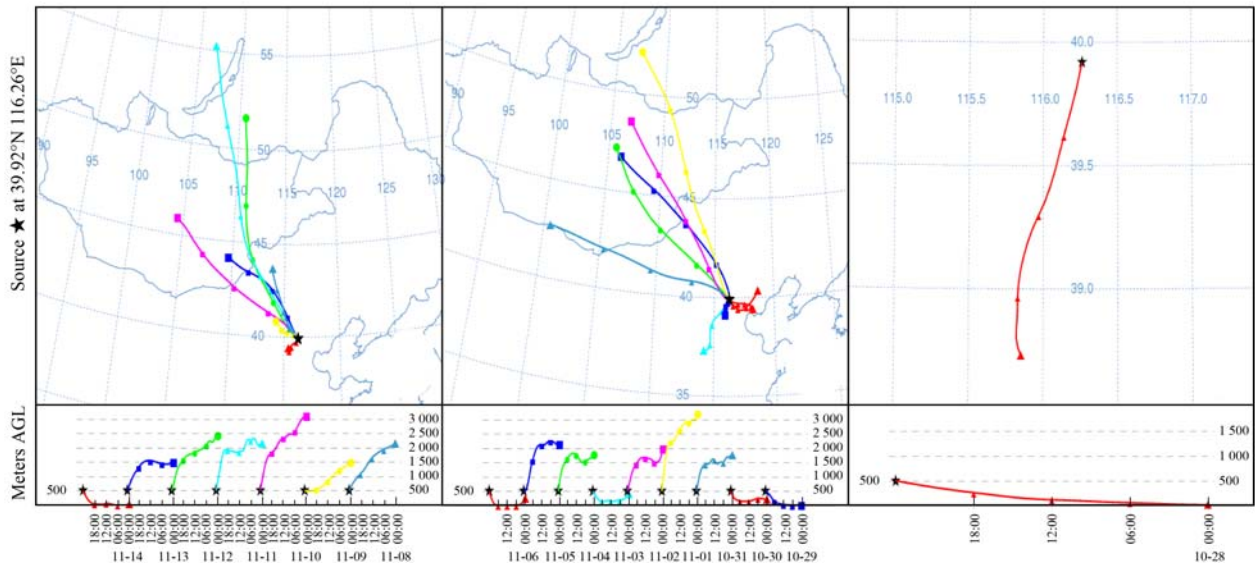


图 5 后向轨迹图

Fig. 5 Backward trajectories

能是北京大气颗粒物中 HULIS 的一个重要来源。

用 HULIS-C/OC 和 WSOC/OC 做相关性分析,排除特殊点的影响如图 6 所示,HULIS-C/OC 与 WSOC/OC 呈显著正相关,相关系数为 0.717

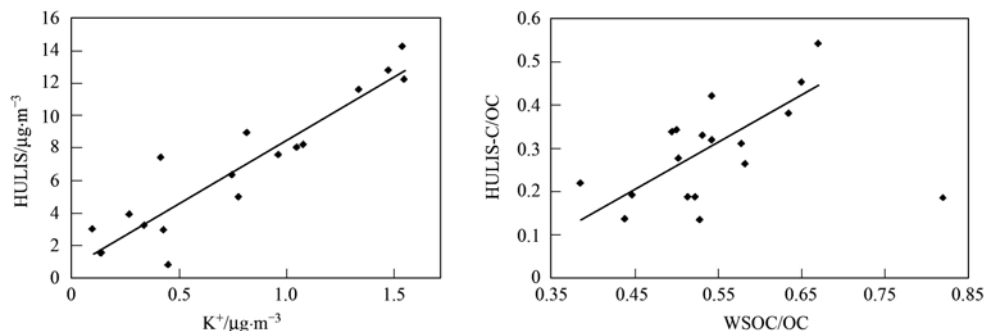


图 6 北京 APEC 期间 HULIS 和 K^+ 、HULIS-C/OC 和 WSOC/OC 的相关性

Fig. 6 Correlation between HULIS and K^+ , HULIS-C/OC and WSOC/OC during the Beijing APEC

3 结论

(1)APEC 采样期间大气颗粒物中 HULIS 的浓度范围为 $1 \sim 15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。会议前、中、后这 3 个时期,HULIS 浓度分别为 7.99 、 5.83 和 $7.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。会议减排对降低 HULIS 浓度起到了一定作用。在会议期间 HULIS 的浓度下降程度明显快于 EC 与 WSOC。会议之后 HULIS 的浓度上升程度明显慢于 OC、EC、WSOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。

(2)HULIS 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的值在采样期间变化不大,在采样期间、会议减排前、中和后期分别为 13.60% 、 13.59% 、 14.02% 和 12.22% 。HULIS-C/OC 的值和 HULIS-C/WSOC 的值依次为 28.95% 、 35.51% 、 28.37% 、 19.93% 和 52.75% 、 59.58% 、 51.54% 、 45.39% 。随着大气颗粒物中 HULIS 含量的增加,HULIS 在 WSOC 和 OC 中所占的比例越来越高。

(3)HULIS 与湿度呈显著正相关,湿度的增加可以使得 HULIS 的浓度上升;HULIS 与风速呈显著负相关,风速的增加可以使得污染物质的扩散加快,使得 HULIS 的浓度下降。

(4)生物质燃烧是北京大气颗粒物中 HULIS 的一个可能重要来源,二次转化可能是 HULIS 的另一个重要来源。

参考文献:

- [1] Graber E R, Rudich Y. Atmospheric HULIS: how humic-like are they? A comprehensive and critical review[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2005, **5**(5): 9801-9860.
- [2] Havers N, Burba P, Lambert J, *et al.* Spectroscopic characterization of humic-like substances in airborne particulate

($P < 0.01$). WSOC/OC 可以表示二次转化的程度,样品中的 HULIS-C/OC 和 WSOC/OC 具有显著的相关性,可知二次转化也可能是 HULIS 一个重要来源。

matter[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1998, **29**(1): 45-54.

- [3] Salma I, Mészáros T, Maenhaut W. Mass size distribution of carbon in atmospheric humic-like substances and water soluble organic carbon for an urban environment[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, **56**: 53-60.
- [4] 项萍, 谭吉华, 马永亮, 等. 大气颗粒物中类腐殖酸的研究进展[J]. 环境化学, 2015, **34**(3): 401-409.
- [5] Lin P, Yu J Z. Generation of reactive oxygen species mediated by humic-like substances in atmospheric aerosols [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(24): 10362-10368.
- [6] 韦莲芳, 段菁春, 谭吉华, 等. 北京春季大气中氨的气粒相转化及颗粒态铵采样偏差研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, **45**(2): 216-226.
- [7] Varga B, Kiss G, Ganszky I, *et al.* Isolation of water-soluble organic matter from atmospheric aerosol[J]. Talanta, 2001, **55**(3): 561-572.
- [8] Lin P, Engling G, Yu J Z. Humic-like substances in fresh emissions of rice straw burning and in ambient aerosols in the Pearl River Delta Region, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(14): 6487-6500.
- [9] Song J Z, He L L, Peng P A, *et al.* Chemical and isotopic composition of humic-like substances (HULIS) in ambient aerosols in Guangzhou, South China[J]. Aerosol Science and Technology, 2012, **46**(5): 533-546.
- [10] Pavlovic J, Hopke P K. Chemical nature and molecular weight distribution of the water-soluble fine and ultrafine PM fractions collected in a rural environment[J]. Atmospheric Environment, 2012, **59**: 264-271.
- [11] Salma I, Mészáros T, Maenhaut W, *et al.* Chirality and the origin of atmospheric humic-like substances [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(3): 1315-1327.
- [12] Baduel C, Voisin D, Jaffrezou J L. Seasonal variations of

- concentrations and optical properties of water soluble HULIS collected in urban environments[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4085-4095.
- [13] El Haddad I, Marchand N, Temime-Roussel B, *et al.* Insights into the secondary fraction of the organic aerosol in a Mediterranean urban area; Marseille[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(5): 2059-2079.
- [14] Krivácsy Z, Kiss G, Ceburnis D, *et al.* Study of water-soluble atmospheric humic matter in urban and marine environments[J]. *Atmospheric Research*, 2008, **87**(1): 1-12.
- [15] Kiss G, Varga B, Galambos I, *et al.* Characterization of water-soluble organic matter isolated from atmospheric fine aerosol[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D21): ICC 1-1-ICC 1-8.
- [16] Simoneit B R T. Eolian particulates from oceanic and rural areas-their lipids fulvic and humic acids and residual carbon [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1980, **12**: 343-352.
- [17] Calace N, Petronio B M, Cini R, *et al.* Humic marine matter and insoluble materials in Antarctic snow [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2001, **79**(4): 331-348.
- [18] Cavalli F, Facchini M C, Decesari S, *et al.* Advances in characterization of size-resolved organic matter in marine aerosol over the North Atlantic [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2004, **109**(D24): D24215.
- [19] Cini R, Degliinnocenti N, Loglio G, *et al.* Air-sea exchange: sea salt and organic micro components in Antarctic snow [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1996, **63**(1): 15-27.
- [20] Facchini M C, Fuzzi S, Zappoli S, *et al.* Partitioning of the organic aerosol component between fog droplets and interstitial air [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1999, **104**(D21): 26821-26832.
- [21] Graham B, Mayol-Bracero O L, Guyon P, *et al.* Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia 1. characterization by NMR and GC-MS[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, **107**(D20): LBA 14-1-LBA 14-16.
- [22] Mayol-Bracero O L, Guyon P, Graham B, *et al.* Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia 2. apportionment of the chemical composition and importance of the polyacidic fraction [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, **107**(D20): LBA 59-1-LBA 59-15.
- [23] Zappoli S, Andracchio A, Fuzzi S, *et al.* Inorganic, organic and macromolecular components of fine aerosol in different areas of Europe in relation to their water solubility [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2733-2743.
- [24] Zheng G J, He K B, Duan F K, *et al.* Measurement of humic-like substances in aerosols; a review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **181**: 301-314.
- [25] Gelencsér A, Hoffer A, Krivácsy Z, *et al.* On the possible origin of humic matter in fine continental aerosol [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, **107**(D12): ACH 2-1-ACH 2-6.
- [26] Hung H M, Katrib Y, Martin S T. Products and mechanisms of the reaction of oleic acid with ozone and nitrate radical [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2005, **109**(20): 4517-4530.
- [27] Jang M, Carroll B, Chandramouli B, *et al.* Particle growth by acid-catalyzed heterogeneous reactions of organic carbonyls on preexisting aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(17): 3828-3837.
- [28] Haddad I E, Marchand N, Dron J, *et al.* Comprehensive primary particulate organic characterization of vehicular exhaust emissions in France [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(39): 6190-6198.
- [29] 段凤魁, 鲁毅强, 狄一安, 等. 秸秆焚烧对北京市空气质量的影响 [J]. *中国环境监测*, 2001, **17**(3): 8-11.
- [30] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1275-1282.
- [31] Cheng Y, Engling G, He K B, *et al.* Biomass burning contribution to Beijing aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(15): 7765-7781.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人