白方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.6
第41卷 第6期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第6期
2020年6月15日

目 次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源 …… 林秋菊，徐娇，李梅，王玮，史国良，冯银厂（2505）
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析 …… 杨笑影，曹芳，林煜棋，章炎麟（2519）
西安市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的季节变化特征 …… 黄含含，王羽琴，李升苹，陈庆彩（2528）
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响 …… 刘会斌，迪丽努尔·塔力甫，王新明，张潇潇，王威，阿布力克木·阿不力孜，买里克扎提·买合木提，刘伟（2536）
长春秋季生物质燃烧对 $PM_{2.5}$ 中WSOC吸光性的影响 …… 孟德友，曹芳，翟晓瑶，张世春，章炎麟（2547）
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源 …… 王倩（2555）
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 曹梦瑶，林煜棋，章炎麟（2565）
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析 …… 任义君，马双良，王思维，于世杰，李一丹，张瑞芹，尹沙沙（2577）
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献 …… 韩婷婷，李颖若，邱雨露，何迪，王堃，马志强（2586）
北京市餐饮业大气污染物排放特征 …… 孙成一，白画画，陈雪，翟翼飞，高启天，何万清，聂磊，石爱军，李国傲（2596）
北京市农业机械排放因子与排放清单 …… 王凯，樊守彬，亓浩雲（2602）
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化 …… 李贝贝，黄玉虎，毕晓辉，刘李阳，秦建平（2609）
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析 …… 张颖蕾，崔希民（2617）
环渤海地区2,4,4′-三氯联苯的多介质归趋模拟 …… 张毅，马艳飞，宋帅，吕永龙，张盛，吴强（2625）
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析 …… 周石磊，孙悦，苑世超，彭瑞哲，刘世崇，岳胥丞，张航，王周强，李再兴，罗晓（2635）
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析 …… 李悦昭，陈海洋，孙文超（2646）
伊通河（城区段）沉积物重金属形态分布特征及风险评价 …… 姜时欣，翟付杰，张超，王蒙蒙，单保庆（2653）
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析 …… 赵然，韩志伟，申春华，张水，涂汉，郭永丽（2664）
沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响 …… 陈洁，许海，詹旭，许笛，朱广伟，朱梦圆，季鹏飞，康丽娟（2671）
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因子 …… 李胜男，陈豪宇，彭华，李尝君，朱坚，简燕，纪雄辉（2679）
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用 …… 王振方，韩子玉，王梦雪，马逸驰，王婷，王丽卿，张玮（2688）
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较 …… 桑雨璇，杨珈乐，熊怡，尹文博，汪华，王和云（2698）
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用 …… 张帅，李大鹏，丁玉琴，徐楚天，许鑫澎，孙培荣，赵哲豪，黄勇（2706）
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析：以晋江流域为例 …… 王亚楠，税伟，祁新华，范水生（2714）
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径 …… 张杰，梅宁，刘孟浩，叶雪松，李冬（2727）
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5 …… 李立，吴丽颖，董正玉，王霁，张倩，洪俊明（2736）
Fe-cyclam/H_2O_2 体系催化降解罗丹明B机制 …… 余雨清，陈翔宇，蔡权华，黄歆珏，陈曼（2746）
微生物光电化学池去除硝酸盐氮：以PANI/TiO_2-NTs为光阳极 …… 卢忆，周海珊，彭瑞建，叶杰旭，陈建孟，宋爽，张士汉（2754）
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性 …… 陈凡雨，徐仲，尤宏，柳锋，李之鹏，陈其伟，韩红卫（2762）
HRT对改良式 A^2/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响 …… 赵凯亮，刘安迪，南彦斌，梁利民，王云霞，陈永志（2771）
重金属Ni（Ⅱ）对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化 …… 孙琪，赵白航，范飒，周邦磊，李玉琪（2779）
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响 …… 王萌萌，曹刚，张迪，冯乃宪，潘涌璋（2787）
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替 …… 薛嘉俊，张绍青，张立秋，李淑更，姚海楠，耿忠轩，李鸿，刘晓玲（2796）
游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响 …… 沈琛，张树军，彭永臻（2805）
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰 …… 苏宇傲，刘宏波，毛秋燕，张慧旻，张衍，刘和（2812）
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价 …… 陈文轩，李茜，王珍，孙兆军（2822）
土壤环境质量预警体系构建与应用 …… 李笑诺，丁寿康，陈卫平，王夏晖，吕斯丹，刘睿（2834）
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系 …… 毛霞丽，邱志腾，张爽，沈倩，章明奎（2842）
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征 …… 宁玉菲，魏亮，魏晓梦，祝贞科，袁红朝，葛体达，吴金水（2852）
生物质炭对磷镉富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响 …… 黄洋，郭晓，胡学玉（2861）
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉砷铅污染特征及健康风险评价 …… 肖冰，薛培英，韦亮，刘成程，高培培，樊利敏，杜佳燕，刘文菊（2869）
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素 …… 胡青青，沈强，陈飞，尹炳，邹宏光，庄红娟，张世文（2878）
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果 …… 陈兆进，李英军，邵洋，林立安，徐鸽，陈彦，田伟，姚伦广，韩辉（2889）
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征 …… 李丽娟，李昌晓，陈春桦，杨治华，陈雪梅（2898）
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布 …… 张宇，左剑恶，王丝可，Alisa Salimova，李爱军，李玲玲（2908）
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响 …… 王愉琬，马安周，种国双，谢飞，周汉昌，刘国华，庄国强（2918）
水肥气耦合对温室番茄地土壤 N_2O 排放及番茄产量的影响 …… 商子惠，蔡焕杰，陈慧，孙亚楠，李亮，朱艳，王晓云（2924）
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用 …… 尚誉，杨丰隆，宁夏，董轶茹，桑楠（2936）
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价 …… 汪慧娟，旷泽行，周贤，覃晓青，黄洪辉（2942）
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因子分析 …… 贺玉晓，李珂，任玉芬，王思琪，方文颖（2951）
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估 …… 蔡朝卉，楚沉静，郑浩，罗先香，李锋民（2963）
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局（1985～2016年） …… 蒋自然，金环环，王成金，叶士琳，黄艳豪（2972）
《环境科学》征订启事（2595） 《环境科学》征稿简则（2687） 信息（2697，2713，2811）

环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第6期 2020年6月
Vol.41, No.6 Jun., 2020

长春秋季生物质燃烧对 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 吸光性的影响

孟德友[1,2], 曹芳[1,2*], 翟晓瑶[1,2], 张世春[3], 章炎麟[1,2]
(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 为探究长春秋季生物质燃烧对 $PM_{2.5}$ 中水溶性有机碳(water-soluble organic carbon, WSOC)吸光性的影响, 于 2017 年 10 ~11 月进行 $PM_{2.5}$ 样品采集, 对 $PM_{2.5}$ 中碳质组分、糖类化合物和 WSOC 的光吸收特征参数进行分析. 研究表明: 长春秋季 $PM_{2.5}$ 中 WSOC、有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)的平均浓度分别为(10.12 ± 3.47)、(17.07 ± 5.64)和(1.34 ± 0.75) $\mu g \cdot m^{-3}$, 二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)对 OC 的平均贡献率为 38.93%. 长春秋季总糖浓度为(1 049.39 ± 958.85) $ng \cdot m^{-3}$, 其中作为生物质燃烧示踪剂的脱水糖含量(左旋葡聚糖、半乳聚糖和甘露聚糖)在总糖中占比为 91.69%, 糖类相关性分析结果显示生物质燃烧源为长春秋季大气中糖类物质的主要贡献源. 糖类物质的相关性分析及 3 种脱水糖的特征比值研究显示, 作为长春秋季大气主要污染源的生物质燃烧的类型是硬木和作物残渣的燃烧. 长春秋季 WSOC 的光吸收波长指数(AAE)为 5.75 ± 1.06, 单位质量吸收效率(MAE)为(1.23 ± 0.28) $m^2 \cdot g^{-1}$, 表明生物质燃烧对 WSOC 吸光性具有重要影响. 利用生物质燃烧特征源参数量化计算生物质燃烧对 WSOC 浓度的贡献达 58.82%, 对总 WSOC 光吸收的贡献达 40.92%.

关键词: 水溶性有机碳(WSOC); 糖; 左旋葡聚糖; 生物质燃烧; 吸光性
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)06-2547-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201911026

Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun

MENG De-you[1,2], CAO Fang[1,2*], ZHAI Xiao-yao[1,2], ZHANG Shi-chun[3], ZHANG Yan-lin[1,2]
(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing 210044, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: To investigate the effect of biomass burning in Changchun in autumn on the absorbance of water-soluble organic carbon (WSOC) on $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}$ samples were collected from October to November 2017. The light absorption characteristics of WSOC, carbonaceous components, and carbohydrate content in $PM_{2.5}$ were analyzed. The study showed that the average concentrations of WSOC, organic carbon (OC), and elemental carbon (EC) in $PM_{2.5}$ in Changchun were (10.12 ± 3.47), (17.07 ± 5.64), and (1.34 ± 0.75) $\mu g \cdot m^{-3}$, respectively; the average contribution rate of secondary organic carbon (SOC) to OC was 38.93%. The total sugar concentration in Changchun is (1 049.39 ± 958.85) $ng \cdot m^{-3}$, of which the content of anhydroglucose (L-glucan, galactan, and mannan), as a biomass burning tracer in total sugar, was 91.69%. The results of sugar correlation analysis showed that biomass combustion was the main source of contribution to carbohydrates in the autumn of Changchun. The light absorption wavelength index of WSOC in autumn was 5.75 ± 1.06, and the unit mass absorption efficiency was (1.23 ± 0.28) $m^2 \cdot g^{-1}$, indicating that biomass combustion has an important influence on WSOC absorbance. The biomass combustion characteristic source parameter was used to quantify the contribution of biomass burning to WSOC concentration, which was found to be 58.82%, while the contribution to total WSOC light absorption was 40.92%.

Key words: water-soluble organic carbon (WSOC); sugar; levoglucosan; biomass burning; absorbance

大气有机气溶胶对于大气能见度、气候变化和人体健康有着复杂且重要的影响, 因此其受到广泛的关注和研究. 水溶性有机碳(water-soluble organic carbon, WSOC)是气溶胶有机碳(organic carbon, OC)的重要组成部分, 占 OC 的 20% ~ 70%[1]. WSOC 可以改变气溶胶的吸湿性并影响云凝结核的形成, 从而影响气候变化[2]. WSOC 的来源相当广泛, 生物质燃烧、化石燃料燃烧、机动车尾气排放以及大气颗粒物表面的多相化学反应等都是 WSOC 的来源[3]. 近年来研究表明, 生物质燃烧是 WSOC 的一个重要贡献源[4,5], 生物质燃烧产生的大量棕色碳(BrC)在短波区对于气溶胶的总光吸收有相当大的贡献, BrC 在辐射强迫和全球气候变化中具有重要作用[6], 对于 WSOC 吸光性的研究可以很好地

收稿日期: 2019-11-04; **修订日期**: 2019-12-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212302); 国家自然科学基金项目(41977185, 41977305); 江苏省自然科学杰出青年基金项目(BK20180040); 江苏省双创团队基金项目
作者简介: 孟德友(1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气化学与环境化学, E-mail: 20181208024@nuist.edu.cn
* 通信作者, E-mail: caofangle@163.com

表征 BrC 的吸光特性[7].

糖类化合物是大气中分布非常广泛的有机物质,是大气颗粒物来源非常有说服力的指示物,也是生物质燃烧和土壤再悬浮的重要示踪物[8]. 左旋葡聚糖(levoglucoan)由于其特异性、光化学稳定性、释放量大等特点,被公认、且被广泛用作生物质燃烧示踪物[9,10]. Fabbri 等[11]利用燃烧实验证实左旋葡聚糖、甘露聚糖、半乳聚糖之间的比值可以用来区分野外和室内生物质燃烧. Simoneit 等[8]的研究表明,这 3 种脱水糖的排放因子随温度的变化情况类似,它们的比值不随燃烧温度不同而显著改变,这表明 3 种脱水糖之间的比值可以用来指示生物质燃料类型.

有研究表明我国 OC 质量浓度表现出明显的季节性变化,秋季受生物质燃烧的影响显著[12,13]. Lu 等[14]通过调查 1996 ~2010 年中国的一次源碳质气溶胶排放,发现用于供暖及烹饪的燃煤和生物质燃烧是中国人为排放 OC(69%)和元素碳(elemental carbon, EC)(51%)的主要贡献源. Cheng 等[15]首次阐述了北京冬季和夏季水溶性有机碳(WSOC)的光学特性,并研究了几种不同生物质燃烧产生的 EC 的质量吸收效率(MAE)特征. Du 等[16]利用正定矩阵因子法(PMF)用生物质燃烧因子计算了 WSOC 的 MAE,结果显示在 365 nm 处生物质燃烧产生的 WSOC ($WSOC_{BB}$)贡献了总 WSOC 光吸收量的 58%. 李栋梁等[17]对东北地区生物质燃烧的相关研究表明,秋季农作物收成后东北地区会有大量秸秆燃烧. 东北三江平原地区在受生物质燃烧影响时期,生物质燃烧对 $PM_{2.5}$中 WSOC 的贡献率超过 70%[18]. 吴瑕等[19]对长春秋季大气有机气溶胶组成及来源的研究表明,生物质燃烧是长春秋季有机气溶胶的主要贡献源.

生物质燃烧对大气污染的影响十分显著,了解生物质燃烧对 WSOC 的浓度和吸光性的贡献能力以及燃烧源的类型特征对于环境监管和改善空气质量非常重要. 本研究对长春秋季 $PM_{2.5}$的碳质组分污染特征以及 WSOC 的光学特征进行分析,并利用对生物质燃料类型的探讨,对长春 $WSOC_{BB}$在总 WSOC 的质量浓度及光吸收的贡献进行了量化,更加深入地认识了长春大气颗粒物的光学性质和生物质燃烧的污染特征,以期为大气化学特征研究以及长春大气环境污染治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采样点位于吉林省长春市中国科学院东北地理与农业生态研究所内,周围无明显污染物排放源及障碍物,能比较好地反映采样点区域大气污染的状况. 采样时间为 2017 年 10 月 10 日至 2017 年 11 月 9 日,每个样品连续采集 23.5 h,共采集 30 个 $PM_{2.5}$样品. 采样仪器是流量为 1.05 $m^3 \cdot min^{-1}$的 KC-1000 大气颗粒物采样器. 采样前将石英滤膜(PALL)用锡纸包好放在马弗炉中 450℃高温灼烧 6 h,以去除石英滤膜中残留的有机物. 灼烧后冷却,并在干燥皿中室温平衡 48 h 后用微电子天平(BSA124S,德国 Sartorius)称重. 采样后样品放置于 -18℃的冰箱中保存.

1.2 分析方法

使用微电子天平称量采样前后滤膜的质量,通过前后质量差和采样体积计算出大气中 $PM_{2.5}$的质量浓度. 使用总有机碳分析仪(TOC,德国 Elementar)测定 WSOC 的质量浓度,其预处理方法为:用 18 mm 打孔器取一片样品放于 15 mL 玻璃瓶中,加入 10 mL 超纯水冰浴超声振荡 30 min,超声萃取后用针式滤器(0.22 μm)过滤到进样瓶中待测. 使用离子色谱(ICS-5000 +,美国 Thermo)测定糖类物质的质量浓度,分离系统采用的色谱柱为 Dionex CarboPac™ MA1 分析柱(4 × 250 mm)和 Dionex CarboPac™ MA1 保护柱(4 × 250 mm). 其预处理方法为:用 20 mm 打孔器取四片样品放于 30 mL 塑料瓶中加入 10 mL 超纯水超声振荡 30 min(放冰袋),萃取后用针式滤器(0.22 μm)过滤到进样管中待测. OC 和 EC 的测定使用美国 Sunset Lab 公司 Model-4 型全半自动连续式分析仪. 得到滤膜样品中 WSOC 吸收光谱的方法是将 WSOC 萃取液通过长光程吸收池(LWCC-2000,美国 World Precision Instrument)并利用光纤光谱仪(USB4000-UV-VIS-ES,美国 Ocean Optics)测定样品的紫外吸收系数,其中光源采用双重氘和卤钨光源(DT-MINI-2-GS,美国 Ocean Optics).

1.3 AAE 及 MAE 值计算

利用采集到的 WSOC 吸收光谱,可以得到提取液对不同波长光导致的衰减(ATN),以 700 nm 处的 ATN 作为吸收基线扣除,通过公式(1)计算实际大气中的光吸收强度(Bap, Mm^{-1})[12]:

$$\mathrm{Bap} = (\mathrm{ATN}_{\lambda} - \mathrm{ATN}_{700}) \cdot \frac{V_1}{V_a \cdot L} \cdot \ln(10) \qquad (1)$$

式中, ATN_{λ} 由光谱仪直接测量; V_1 为提取液的体积(mL); V_a 为 $PM_{2.5}$样品的采样体积(L); L 为吸收光路长度(m).

Angstrom 指数(AAE)表征 BrC 的吸光能力和吸光特性随波长变化的程度,如式(2).

$$\mathrm{Bap}_{\lambda} = K \cdot \lambda^{-\mathrm{AAE}} \qquad (2)$$

式中, Bap_{λ} 为 WSOC 在波长 λ 处的光吸收强度; K

为常数，AAE 通过公式(2)拟合指数曲线得到.

WSOC 的单位质量吸收效率(MAE, $m^2 \cdot g^{-1}$)，计算公式如下：

$$MAE = \frac{Bap_\lambda}{c_{WSOC}} \quad (3)$$

式中，c_{WSOC} 为 WSOC 的浓度($\mu g \cdot m^{-3}$).

本研究中，为排除其它物质的干扰，选择 λ = 365 nm 处的光学参数作为 WSOC 的 Bap、AAE 及 MAE 值表征.

1.4 生物质燃烧贡献的计算

生物质燃烧产生的 WSOC($WSOC_{BB}$)对总 WSOC 的贡献采用 Yan 等[20]的计算公式：

$$\frac{WSOC_{BB}}{WSOC} = \frac{(\text{levoglucoan/WSOC})_{\text{ambient}}}{(\text{levoglucoan/WSOC})_{\text{source}}} \quad (4)$$

同时，使用下式[20]计算 $WSOC_{BB}$ 在波长 365 nm 处对总 WSOC 光吸收的贡献：

$$f = \frac{MAE_{365} \cdot WSOC_{BB}}{Bap_{365}} \times 100\% \quad (5)$$

式中，f 是 $WSOC_{BB}$ 对总 WSOC 光吸收的贡献率；$WSOC_{BB}$ 为公式(4)与 WSOC 浓度乘积；MAE_{365} 为选择源样品的特征值；Bap_{365} 是样品中 WSOC 在波长 365 nm 处的吸光系数.

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 中碳质组分污染特征

采样期间，长春 $PM_{2.5}$ 秋季平均浓度为(72.36 ± 34.62) $\mu g \cdot m^{-3}$，低于我国环境空气质量(GB 3095-2012)日平均二级标准浓度限值 75 $\mu g \cdot m^{-3}$，与李栋梁等[17]在 2014 年对于东北三省主要城市的研究中 $PM_{2.5}$ 水平较为接近. 以国家环境空气质量二级标准限值来划分清洁天与污染天，在采样期间污染天数 14 d，超标率46.67%，污染天 $PM_{2.5}$ 平均浓度超过99 $\mu g \cdot m^{-3}$，超过清洁天的 2 倍. 本研究测得长春地区秋季 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 平均浓度为(10.12 ± 3.47) $\mu g \cdot m^{-3}$，OC 平均浓度为(17.07 ± 5.64) $\mu g \cdot m^{-3}$，EC 平均浓度为(1.34 ± 0.75) $\mu g \cdot m^{-3}$. 如图 1 所示，在采样期间，长春地区的 OC、EC 与 WSOC 的浓度变化在 11 月 2 日前均有较大幅度变化且变化情况同步，在 11 月 2 日后变化均趋于稳定. OC、EC 与 WSOC 浓度变化趋势一致说明三者具有较为一致的排放源. 利用 OC/EC 的最小比值法可以计算 $PM_{2.5}$ 中的二次有机碳(SOC)含量[21,22]：

$$SOC = OC - EC \times (OC/EC)_{min} \quad (6)$$

式中，$(OC/EC)_{min}$ 为采样期间所得样品 OC/EC 的最小值. 由公式(6)计算出采样期间 SOC 平均浓度为(6.38 ± 4.77) $\mu g \cdot m^{-3}$，SOC 对 OC 的平均贡献率为 38.93%. 通过对比本研究与其它研究结果可得(表 1)，长春秋季的 SOC 浓度远高于上海，与南京和贵阳相近，但 SOC 对 OC 的贡献率远低于南京、贵阳及济南，与上海相当，说明长春大气污染情况严重，一次污染可能是主要污染源.

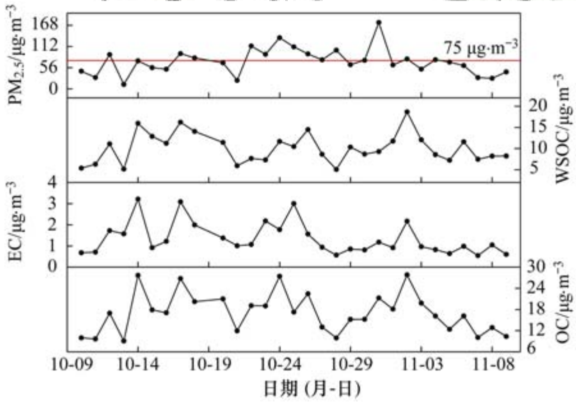

图 1 $PM_{2.5}$、WSOC、EC 与 OC 随时间变化情况

Fig. 1 Changes in $PM_{2.5}$, WSOC, EC, and OC over time during the study period

表 1 我国部分城市大气 $PM_{2.5}$ 中碳质组分浓度特征

Table 1 Concentration characteristics of carbonaceous components in atmospheric in some cities of China

研究地点	时间	OC /$\mu g \cdot m^{-3}$	EC /$\mu g \cdot m^{-3}$	SOC /$\mu g \cdot m^{-3}$	SOC/OC /%	文献
长春	2017 年秋	17.07 ± 5.64	1.34 ± 0.75	6.38 ± 4.77	38.93	本研究
上海	2015 年秋	3.95	1.87	1.51	36.13	[23]
南京	2015 年秋	11.30	1.10	5.30	51.90	[24]
济南	2015 年冬	18.1 ± 9.5	7.6 ± 3.6	8.2	45	[21]
贵阳	2013 年秋	14.70	2.31	6.89	46.40	[25]
北京	2010 年秋	20.20	10.20	—	—	[26]

2.2 WSOC 中的糖类

在 $PM_{2.5}$ 样品中检测到 12 种糖类物质，分别为左旋葡聚糖、半乳聚糖、甘露聚糖、甘露醇、阿拉伯糖醇、苏糖醇、甘露糖、葡萄糖、山梨糖醇、海藻糖、半乳糖和木糖醇，糖类物质的月平均质量浓度如图 2 所示. 总糖平均浓度为(1 049.39 ± 958.85) $ng \cdot m^{-3}$，浓度范围为 66.68 ~ 3 805.17 $ng \cdot m^{-3}$，总糖质量占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 1.45%. 本研究检测到的糖类化合物分为 3 类(脱水糖、糖醇和糖)，其中脱水糖的含量最为丰富，占到总糖比例的 91.69%. 左旋葡聚

糖是含量最丰富的一种脱水糖，它占到脱水糖总量的 90.23%. 糖醇占到总糖含量的 6.62%，其中甘露醇含量最高. 糖占到总糖含量的 1.69%，其中甘露糖含量最高.

脱水糖包括左旋葡聚糖及其两种同分异构体（半乳聚糖和甘露聚糖），由纤维素和半纤维素热解产生，被广泛应用作为生物质燃烧的示踪剂[27]. 脱水糖在总糖比例中超过 90%，本研究中总糖、脱水糖和左旋葡聚糖的浓度水平均明显高于北京、上海和柳州等城市的秋季水平（图 3），甚至高于典型北方城市西安的冬季水平（图 3）[27~30]，长春秋季大气气溶胶受生物质燃烧的影响可能非常严重. 根据图 4 中糖类物质的日变化情况可以发现，甘露醇、甘露聚糖、半乳聚糖和左旋葡聚糖的变化趋势非常相似，这代表着它们具有相似的来源. 为了更好地研究长春大气颗粒物中糖类化合物的组成特征及来源，本研究对大气样品中 12 种糖类物质进行相关性分析（表 2）.

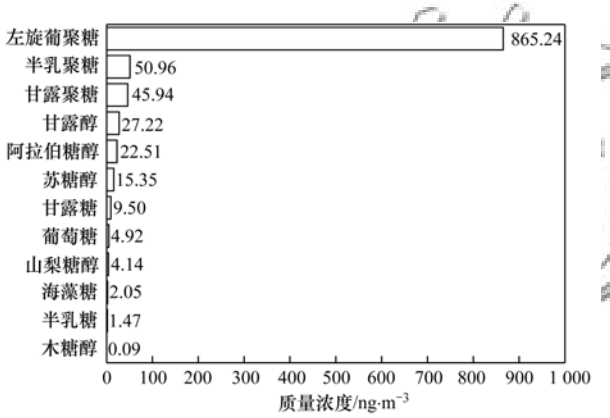

图 2　12 种糖类化合物月平均质量浓度

Fig. 2　Monthly average mass concentrations of twelve carbohydrate compounds

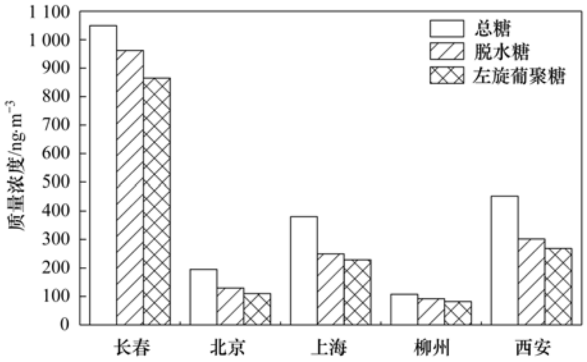

图 3　不同地区糖类化合物浓度比较[27~30]

Fig. 3　Comparison of carbohydrate concentration in different regions

脱水糖之间在 0.01 水平上显著相关，左旋葡聚糖与甘露聚糖和半乳聚糖的相关系数（R^2）为 0.82 和 0.87，甘露聚糖与半乳聚糖的相关系数为 0.96，说明 3 种脱水糖来源相同，为生物质燃烧. 苏糖醇、山梨糖醇、甘露醇和甘露糖均与 3 种脱水糖在 0.01 水平上显著相关，相关系数分布在 0.61 ~ 0.98 之间，表明除生物质燃烧外，苏糖醇、山梨糖醇、甘露醇和甘露糖亦有其他来源，如植物和动物的新陈代谢排放以及土壤再悬浮[31]. 木糖醇、阿拉伯糖醇和半乳糖在 0.01 水平上显著相关，在日变化趋势中（图 4），3 种糖类物质在 10 月 24 日后浓度水平较稳定，几乎无波动，不受生物质燃烧的影响，因此木糖醇、阿拉伯糖醇及半乳糖来源相似，土壤再悬浮是它们最大的影响源. 海藻糖与葡萄糖的平均质量浓度低于 5 ng·m^{-3}，与其它糖类几乎无相关性，原因可能是受长春当地植作物种类及其生长特性的影响. 海藻糖广泛存在于细菌、真菌和海藻中，在高温、高寒以及干旱等恶劣环境中的植物表层也大量存在[11]，葡萄糖是维管植物中最常见的单糖[32]. 长春秋季维管植物较少也并无气候恶劣地域，因此长春秋季海

表 2　糖类物质相关性分析1)

Table 2　Correlation analysis of carbohydrates

	左旋葡聚糖	半乳聚糖	甘露聚糖	甘露醇	阿拉伯糖醇	苏糖醇	甘露糖	葡萄糖	山梨糖醇	海藻糖	半乳糖	木糖醇
左旋葡聚糖	1	0.87**	0.82**	0.86**	0.37*	0.71**	0.80**	−0.15	0.63**	0.11	0.38*	0.39*
半乳聚糖		1	0.96**	0.98**	0.30	0.80**	0.93**	−0.26	0.61**	0.02	0.36	0.37*
甘露聚糖			1	0.94**	0.33	0.80**	0.91**	−0.13	0.65**	0.03	0.37*	0.32
甘露醇				1	0.27	0.76**	0.94**	−0.25	0.59**	0.00	0.32	0.38*
阿拉伯糖醇					1	0.66**	0.29	−0.04	0.47*	0.17	0.62**	0.55**
苏糖醇						1	0.78**	−0.08	0.77**	0.08	0.51**	0.35
甘露糖							1	−0.17	0.69**	−0.03	0.28	0.27
葡萄糖								1	−0.05	−0.28	0.07	-0.10
山梨糖醇									1	0.27	0.20	0.09
海藻糖										1	0.00	0.16
半乳糖											1	0.59**
木糖醇												1

1）* * 表示在 0.01 水平上显著相关，* 表示在 0.05 水平上显著相关

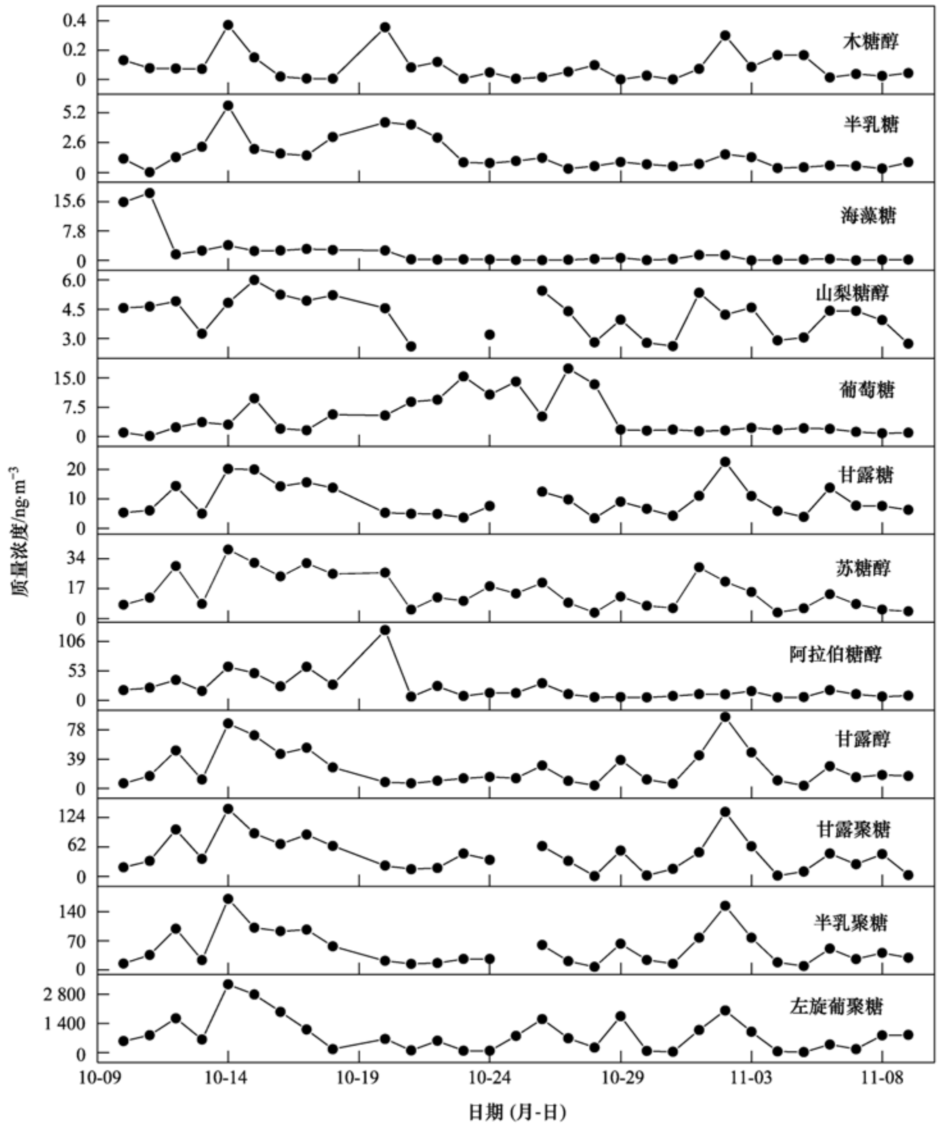

图 4　12 种糖类物质浓度日变化情况

Fig. 4　Diurnal changes of twelve carbohydrates

藻糖与葡萄糖的质量浓度较低，与其它糖类相关性也较差符合事实. 综上，作为生物质燃烧示踪剂的脱水糖在总糖中的比例达 91.69%，并且苏糖醇、山梨糖醇、甘露醇和甘露糖等糖醇也受生物质燃烧的影响. 除部分含量极低的糖醇来源土壤悬浮外，生物质燃烧源是长春秋季大气中糖类物质的主要贡献源，大气气溶胶受生物质燃烧影响严重.

2.3　生物质燃烧类型

不同类型的生物质燃烧排放的左旋葡聚糖、甘露聚糖与半乳聚糖的比例存在差异，因此左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖之间的比值可以有效地识别生物质燃料类型[11,32]. 本研究参考王鑫彤等[33]对不同生物质燃烧产生的脱水糖类化合物比例的研究结果，将长春秋季 $PM_{2.5}$ 中脱水糖之间浓度比值与之对比. 如表 3 所示，长春秋季左旋葡聚糖/甘露聚糖(L/M)、左旋葡聚糖/半乳聚糖(L/G)和左旋葡聚糖/(甘露聚糖 + 半乳聚糖)[L/(M + G)]比率分别为 35.99、16.75 和 9.22，3 个特征值均与硬木和作物残渣燃烧排放的脱水糖特征比值相近. 长春有林地 26.5 万 hm^2，森林组成以东亚阔叶林为主，硬木储量庞大，农村地区用林木烹饪及取暖现象普遍. Cao 等[34]的研究表明水稻和小麦等 C3 作物的燃烧为东北三江平原地区生物质燃烧的主要贡献源，而长春的主要农作物与三江平原相似. 因此，结合长春的林业及农业的生产情况，长春大气中生物质燃烧源的主要类型是硬木和作物残渣的燃烧.

2.4　WSOC 吸光性参数

Bap_{365}是 WSOC 在 365 nm 处的光吸收强度，长春秋季 $PM_{2.5}$ 样品中 WSOC 的 Bap_{365} 平均值为 $(13.33 \pm 5.87)\ Mm^{-1}$，根据 Bap_{365}与 OC、WSOC 和左旋葡聚糖相关性分析(图 5)，发现在研究期间长春大气 OC、WSOC 与 Bap_{365} 的相关性指数分别为

表 3 不同生物质燃烧排放的糖类化合物比例[33]

Table 3 Proportion of carbohydrates emitted from burning of different biomass

比例	比例范围/%	生物质类型	本研究比例/%
L/M	2.4 ~ 5.8	软木	35.99
	10.7 ~ 83.4	硬木	
	12.7 ~ 60.7	作物残渣	
	2.0 ~ 33.3	草	
L/G	3.4 ~ 40.5	软木	16.75
	3.6 ~ 84	硬木	
	12.7 ~ 884.5	作物残渣	
	3.4 ~ 15.2	草	
L/(M + G)	1.5 ~ 5.1	软木	9.22
	7.9 ~ 20.3	硬木	
	6.4 ~ 52.4	作物残渣	
	1.7 ~ 8.9	草	

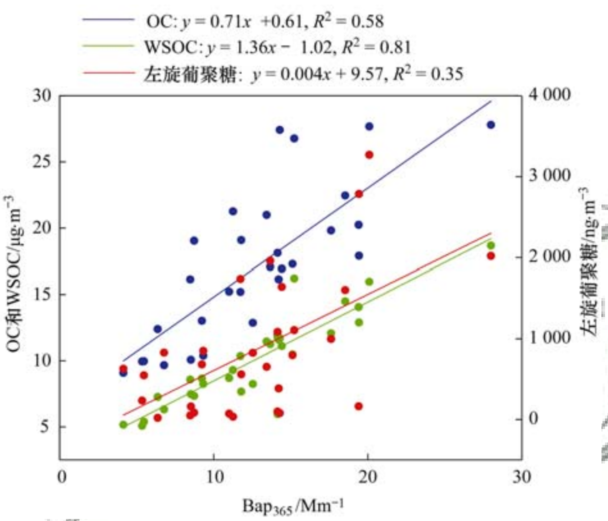

图 5 Bap_{365} 与 OC、WSOC 和左旋葡聚糖的相关性

Fig. 5 Correlation between Bap_{365}, OC, WSOC, and levoglucosan

0.58 和 0.81,表明 OC 和 WSOC 中含有大量水溶性棕色碳. 与翟晓瑶等[18]对东北三江平原生物质与非生物质燃烧时期 WSOC 吸光特性的研究对比,长春秋季左旋葡聚糖与 Bap_{365} 的相关性指数低于三江平原生物质燃烧时期数值(0.91),高于非生物质燃烧时期数值(0.09),说明长春秋季大气 WSOC 的光吸收强度受生物质燃烧影响的同时还可能受其它来源的影响. AAE 表示吸光特性随波长变化的程度,二次转化形成的有机气溶胶(SOA)的光吸收对波长的依赖性较强,新、老 SOA 的水萃取液 AAE 值分别在 7.00 和 4.70 左右[35];受煤燃烧和生物质燃烧影响时的 AAE 值约为 3.50[36]. 本研究中,长春地区 WSOC 的 AAE 值在 2.86 ~ 7.33 之间分布,平均值为 5.75 ± 1.06,长春地区秋季 WSOC 的 AAE 显著受生物质燃烧和 SOA 的影响.

MAE 值表征单位质量 WSOC 的吸光能力,排放源不同的 WSOC 其 MAE 值不同. 有报道指出,生物质燃烧源 MAE 值为 1.19 $m^2 \cdot g^{-1}$,柴汽油机动车排放源为 1.33 $m^2 \cdot g^{-1}$,混合性一次源为 2.89 $m^2 \cdot g^{-1}$[16]. 本研究计算所得长春秋季 MAE 平均值为(1.23 ± 0.28) $m^2 \cdot g^{-1}$,长春地区秋季 WSOC 的 MAE 值受生物质燃烧源影响较大, $WSOC_{BB}$ 对 WSOC 的吸光性有重要影响.

2.5 生物质燃烧对 WSOC 光吸收效率的贡献

本研究中对长春秋季的糖类物质及吸光参数的讨论表明,生物质燃烧源对 WSOC 的贡献和吸光性具有重要影响. 为定量描述生物质燃烧对 WSOC 的浓度和光吸收的影响,本研究引用公式(4)和(5)计算 $WSOC_{BB}$ 对总 WSOC 浓度和光吸收的贡献. 由前文研究可知,L/M、L/G 和 L/(G + M)的数值均与稻草燃烧及硬木燃烧的特征数值接近,长春秋季生物质燃烧源的主要类型是水稻残渣和硬木. 因此采用稻草燃烧和木材燃烧的 $(levoglucoan/WSOC)_{source}$ 及 MAE_{365} 的平均值作为本研究的 $(levoglucoan/WSOC)_{source}$ 和 MAE_{365} 的特征值. 根据 Du 等[16]以及 Ding 等[37]使用稻草及木材的燃烧实验结果显示,使用稻草和小麦秸秆燃烧的 $(levoglucoan/WSOC)_{source}$ 比率为 0.17, MAE_{365} 为 0.80 $m^2 \cdot g^{-1}$;使用木材燃烧的 $(levoglucoan/WSOC)_{source}$ 比率为 0.1, MAE_{365} 为 0.97 $m^2 \cdot g^{-1}$. 计算结果显示,生物质燃烧对 WSOC 的平均贡献率为 58.82%, $WSOC_{BB}$ 在波长 365 nm 处对总 WSOC 光吸收平均贡献率为 40.92%. 长春秋季大气中大部分的 WSOC 来源于一次生物质燃烧源,并且该区域中生物质燃烧产生了丰富的水溶性棕色碳,生物质燃烧是长春秋季 WSOC 吸光性的主要影响源.

3 结论

(1)本研究测得长春秋季 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度为(72.36 ± 34.62) $\mu g \cdot m^{-3}$, WSOC 平均质量浓度为(10.12 ± 3.47) $\mu g \cdot m^{-3}$, OC 平均质量浓度为(17.07 ± 5.64) $\mu g \cdot m^{-3}$, EC 平均质量浓度为(1.34 ± 0.75) $\mu g \cdot m^{-3}$, SOC 的平均质量浓度为(6.38 ± 4.77) $\mu g \cdot m^{-3}$, SOC 对 OC 的贡献率为 38.93%.

(2)长春秋季 $PM_{2.5}$ 中共检测 12 种糖类物质,总糖浓度为(1049.39 ± 958.85) $ng \cdot m^{-3}$,脱水糖(左旋葡聚糖、半乳聚糖、甘露聚糖)在总糖中占比为 91.69%, 3 种脱水糖之间显著相关;并且苏糖醇和甘露糖等 4 种糖/糖醇与脱水糖的相关性均超过 0.61($P < 0.01$). 研究表明生物质燃烧是长春秋季大气中糖类物质的主要贡献源,长春生物质燃烧情况严重;通过生物质燃烧类型分析并结合长春当地

的农林生产情况,发现长春大气中生物质燃烧的主要类型是硬木和作物残渣的燃烧.

(3) 长春秋季 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 的 Bap_{365} 值为 (13.33 ± 5.87) Mm^{-1}, AAE 值为 5.75 ± 1.06, MAE 值为 (1.23 ± 0.28) $m^2 \cdot g^{-1}$, $WSOC_{BB}$ 对 WSOC 吸光性有重要影响;利用生物质燃烧特征源参数量化计算生物质燃烧对长春秋季 WSOC 的贡献为 58.82%, $WSOC_{BB}$ 对总 WSOC 光吸收的贡献为 40.92%,研究区域内生物质燃烧产生了丰富的水溶性棕色碳,生物质燃烧是长春秋季 WSOC 吸光性的主要影响源.

参考文献:

[1] Park S S, Cho S Y. Tracking sources and behaviors of water-soluble organic carbon in fine particulate matter measured at an urban site in Korea[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(1): 60-72.

[2] Padró L T, Tkacik D, Lathem T, *et al*. Investigation of cloud condensation nuclei properties and droplet growth kinetics of the water-soluble aerosol fraction in Mexico City[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, **115**(D9): D09204.

[3] Weber R J, Sullivan A P, Peltier R E, *et al*. A study of secondary organic aerosol formation in the anthropogenic-influenced southeastern United States[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**(D13): D13302.

[4] Gao S, Hegg D A, Hobbs P V, *et al*. Water-soluble organic components in aerosols associated with savanna fires in southern Africa: identification, evolution, and distribution[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D13): 8491.

[5] Jacobson M Z. Effects of biomass burning on climate, accounting for heat and moisture fluxes, black and brown carbon, and cloud absorption effects[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, **119**(14): 8980-9002.

[6] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, *et al*. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment[J]. Journal of Geophysical Research, 2013, **118**(11): 5380-5552.

[7] 闫才青, 郑玫, 张远航. 大气棕色碳的研究进展与方向[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4404-4414.
Yan C Q, Zheng M, Zhang Y H. Research progress and direction of atmospheric brown carbon[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4404-4414.

[8] Simoneit B R T, Elias V O, Kobayashi M, *et al*. Sugars—Dominant water-soluble organic compounds in soils and characterization as tracers in atmospheric particulate matter[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(22): 5939-5949.

[9] Schkolnik G, Rudich Y. Detection and quantification of levoglucosan in atmospheric aerosols: a review[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, **385**(1): 26-33.

[10] Engling G, Lee J J, Tsai Y W, *et al*. Size-resolved anhydrosugar composition in smoke aerosol from controlled field burning of rice straw[J]. Aerosol Science and Technology, 2009, **43**(7): 662-672.

[11] Fabbri D, Torri C, Simoneit B R T, *et al*. Levoglucosan and other cellulose and lignin markers in emissions from burning of Miocene lignites[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(14): 2286-2295.

[12] Arola A, Schuster G, Myhre G, *et al*. Inferring absorbing organic carbon content from AERONET data[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(1): 215-225.

[13] Feng Y, Ramanathan V, Kotamarthi V R. Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation?[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(17): 8607-8621.

[14] Lu Z, Zhang Q, Streets D G. Sulfur dioxide and primary carbonaceous aerosol emissions in China and India, 1996-2010[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(18): 9839-9864.

[15] Cheng Y, He K B, Zheng M, *et al*. Mass absorption efficiency of elemental carbon and water-soluble organic carbon in Beijing, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(22): 11497-11510.

[16] Du Z Y, He K B, Cheng Y, *et al*. A yearlong study of water-soluble organic carbon in Beijing Ⅱ: light absorption properties[J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 235-241.

[17] 李栋梁, 贺文君. 2014 年东北三省主要城市大气 $PM_{2.5}$ 污染时空格局演变及重心偏移[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2016, **32**(3): 108-111.
Li D L, He W J. The research on changes of time and space pattern and its pollution center movement of $PM_{2.5}$ in main cities of north-east provinces in 2014[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2016, **32**(3): 108-111.

[18] 翟晓瑶, 曹芳, 张世春, 等. 东北三江平原地区生物质燃烧对 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 吸光能力的影响[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(3): 523-530.
Zhai X Y, Cao F, Zhang S C, *et al*. Contribution of biomass burning on light absorption property of water soluble organic carbon in $PM_{2.5}$ in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(3): 523-530.

[19] 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 等. 长春秋季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3438-3446.
Wu X, Cao F, Zhai X Y, *et al*. Molecular composition and source apportionment of fine organic aerosols in autumn in Changchun[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3438-3446.

[20] Yan C Q, Mei Z, Sullivan A P, *et al*. Chemical characteristics and light-absorbing property of water-soluble organic carbon in Beijing: Biomass burning contributions[J]. Atmospheric Environment, 2015, **121**: 4-12.

[21] 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 等. 济南市夏、冬季 $PM_{2.5}$ 中化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4014-4025.
Liu X D, Meng J J, Hou Z F, *et al*. Analysis of seasonal variations in chemical characteristics and sources of $PM_{2.5}$ during summer and winter in Ji'nan City[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4014-4025.

[22] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al*. Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.

[23] 孙运筑, 修光利, 段玉森, 等. 上海市淀山湖区域灰霾天大气颗粒物中碳组分的污染特征[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, **45**(3): 440-448.
Sun Y Z, Xiu G L, Duan Y S, *et al*. Characteristics of carbonaceous compositions in atmospheric particulate matters during haze days in Dianshan Lake area, Shanghai[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2019, **45**(3): 440-448.

[24] 徐足飞, 曹芳, 高嵩, 等. 南京北郊秋季 $PM_{2.5}$ 碳质组分污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3033-3041.

Xu Z F, Cao F, Gao C, *et al*. Characteristics and source analysis of carbonaceous components of $PM_{2.5}$ during autumn in the northern suburb of Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3033-3041.

[25] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市秋、冬季 $PM_{2.5}$中碳组分污染特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2015, **43**(3): 285-289.
Wang Z, Guo J, Chen Z. Characteristics and source analysis of carbonaceous aerosol in $PM_{2.5}$ of Guiyang City, P. R. China during autumn-winter period[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(3): 285-289.

[26] Du Z Y, He K B, Cheng Y, *et al*. A yearlong study of water-soluble organic carbon in Beijing I: sources and its primary vs. secondary nature[J]. Atmospheric Environment, 2014, **92**: 514-521.

[27] Wang X, Shen Z X, Liu F B, *et al*. Saccharides in summer and winter $PM_{2.5}$ over Xi'an, northwestern China: sources, and yearly variations of biomass burning contribution to $PM_{2.5}$[J]. Atmospheric Research, 2018, **214**: 410-417.

[28] Kang M J, Ren L J, Ren H, *et al*. Primary biogenic and anthropogenic sources of organic aerosols in Beijing, China: insights from saccharides and *n*-alkanes[J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 1579-1587.

[29] Li X, Chen M X, Le H P, *et al*. Atmospheric outflow of $PM_{2.5}$ saccharides from megacity Shanghai to East China Sea: impact of biological and biomass burning sources[J]. Atmospheric Environment, 2016, **143**: 1-14.

[30] 黄绪, 郭云霞, 刘剑斌, 等. 柳州大气 $PM_{2.5}$中糖类物质的分布特征与指示意义[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 838-843.
Huang X, Guo Y X, Liu J B, *et al*. The distribution characteristics and implications of carbohydrates in the $PM_{2.5}$ of Liuzhou[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 838-843.

[31] 马社霞, 王真真, 毕新慧, 等. 广州大气气溶胶中糖类化合物的组成及主要来源[J]. 科学通报, 2009, **54**(17): 2562-2567.
Ma S X, Wang Z Z, Bi X H, *et al*. Composition and source of saccharides in aerosols in Guangzhou, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(23): 4500-4506.

[32] Cowie G L, Hedges J I. Carbohydrate sources in a coastal marine environment[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, **48**(10): 2075-2087.

[33] 王鑫彤, 鞠法帅, 韩德文, 等. 大气颗粒物中生物质燃烧示踪化合物的研究进展[J]. 环境化学, 2015, **34**(10): 1885-1894.
Wang X T, Ju F S, Han D W, *et al*. Research progress on the organic tracers of biomass burning in atmospheric aerosols[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(10): 1885-1894.

[34] Cao F, Zhang S C, Kawamura K, *et al*. Inorganic markers, carbonaceous components and stable carbon isotope from biomass burning aerosols in Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **572**: 1244-1251.

[35] Bones D L, Henricksen D K, Mang S A, *et al*. Appearance of strong absorbers and fluorophores in limonene-O_3 secondary organic aerosol due to NH_4^+-mediated chemical aging over long time scales[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, **115**(D5): D05203, doi: 10.1029/2009JD012864.

[36] Hecobian A, Zhang X, Zheng M, *et al*. Water-soluble organic aerosol material and the light-absorption characteristics of aqueous extracts measured over the Southeastern United States[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(13): 5965-5977.

[37] Ding X, Zheng M, Yu L P, *et al*. Spatial and seasonal trends in biogenic secondary organic aerosol tracers and water-soluble organic carbon in the southeastern United States[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(12): 5171-5176.

HUANJING K0EXUE Vol. 41 No. 6
Environmental Science (monthly) Jun. 15, 2020

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) ········ LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, *et al.* (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China ···················· YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, *et al.* (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ in Xi'an ···················· HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, *et al.* (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area ···················· LIU Hui-bin, Dilinuer·Talifu, WANG Xin-ming, *et al.* (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun ···················· MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, *et al.* (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019 ···················· WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn ···················· CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou ········ REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, *et al.* (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China ···················· HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, *et al.* (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing ···················· SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, *et al.* (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation ···················· WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing ···················· LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, *et al.* (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061 ···················· ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4′-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model ···················· ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, *et al.* (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir ···················· ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, *et al.* (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System ···················· LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area ···················· JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chao, *et al.* (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin ···················· ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, *et al.* (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu ··········· CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting ···················· LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, *et al.* (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae *Dictyosphaerium* sp. ···················· WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, *et al.* (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels ···················· SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, *et al.* (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment ···················· ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, *et al.* (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed ···················· WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, *et al.* (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese ···················· ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, *et al.* (2727)
Degradation of RBK5 by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate ···················· LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, *et al.* (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H_2O_2 System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B ···················· YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, *et al.* (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell: PANI/TiO_2-NTs as a Photoanode ···················· LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, *et al.* (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR ···················· CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, *et al.* (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A^2/O-BAF ···················· ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, *et al.* (2771)
Effect of Ni(Ⅱ) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics ···················· SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, *et al.* (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity ··········· WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, *et al.* (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter ········ XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, *et al.* (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria ···················· SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge ······ SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, *et al.* (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China ···················· CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, *et al.* (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality ···················· LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, *et al.* (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials ···················· MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, *et al.* (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management ···················· NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, *et al.* (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops ·············· HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale ·············· XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, *et al.* (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors ···················· HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, *et al.* (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (*Brassica chinensis* L.) ···················· CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, *et al.* (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir ···················· LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, *et al.* (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaebacteria in Dianchi Lake ···················· ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, *et al.* (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield ···················· WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, *et al.* (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N_2O Emission and Yield in Greenhouse Tomato ···················· SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, *et al.* (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (*Hordeum vulgare*) ···················· SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, *et al.* (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province ···················· WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, *et al.* (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring ·············· HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, *et al.* (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of *Typha angustifolia* Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk ···················· CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, *et al.* (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016) ················· JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, *et al.* (2972)