

## 影响北京市 2 次生物质燃烧事件的表征

张 焯<sup>1</sup>, 刘咸德<sup>2</sup>, 董树屏<sup>1</sup>, 杨勇杰<sup>1</sup>, 董 亮<sup>1</sup>

(1. 国家环境分析测试中心, 国家环境保护二噁英污染控制重点实验室, 北京 100029;  
2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:**采用气相色谱-质谱(GC/MS)法测定 2005~2006 年北京市 31 个总悬浮颗粒物(TSP)样品中生物质燃烧分子示踪物——左旋葡聚糖。城区样品左旋葡聚糖的平均含量为  $334 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , 变化范围在  $34.6 \sim 1307 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  之间, 与文献报道的台湾云林城区 TSP 样品的左旋葡聚糖含量水平相差不多, 与 2003~2004 年北京市颗粒物测定结果大体持平, 略有降低。通过测定左旋葡聚糖捕捉到影响北京的 2 次生物质燃烧事件, 即 2005 年 10 月 6 日和 2006 年 6 月 21 日邻近省份焚烧玉米秸和麦秸事件。利用气象卫星监测农田焚烧信息, 反向风迹图分析这 2 次事件的源地和传输路径。

**关键词:**北京; 总悬浮颗粒物(TSP); 气相色谱-质谱(GC/MS); 左旋葡聚糖; 秸秆焚烧

**中图分类号:** O 657.63    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1004-2997(2010)03-0172-07

## Characterization of Two Biomass Burning Episodes Affecting Air Quality in Beijing

ZHANG Ting<sup>1</sup>, LIU Xian-de<sup>2</sup>, DONG Shu-ping<sup>1</sup>, YANG Yong-jie<sup>1</sup>, DONG Liang<sup>1</sup>

(1. *National Research Center for Environmental Analysis and Measurement, State Environmental Protection Key Laboratory of Dioxin Pollution Control, Beijing 100029, China;*  
2. *Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China*)

**Abstract:** Atmospheric concentrations of levoglucosan, a molecular marker for biomass burning, were determined by gas chromatography-mass spectrometry(GC/MS) for 31 Beijing total suspended particle(TSP) samples collected during 2005—2006. The average concentration of downtown samples is  $334 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  with a range of  $34.6 \sim 1307 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , which is comparable to the downtown TSP samples of Yunlin in Taiwan reported and slightly lower than the level in 2002—2003 study. Two biomass burning episodes were caught by the levoglucosan measurements. By resorting to the meteorological satellite fire spot information and wind backward trajectories computed by HYSPLIT software, the episodes on Oct. 6, 2005 and June 21, 2006 were attributed to the burnings of corn and wheat stalk in neighboring provinces, respectively. The biomass burning sources and air mass transporta-

收稿日期: 2009-12-29; 修回日期: 2010-03-30

基金项目: 科技部创新方法工作项目(2009IM030200), 国家重点基础研究专项(973 项目)(2009CB421602)资助

作者简介: 张 焯(1970~), 女(汉族), 江苏赣榆人, 高级工程师, 从事大气颗粒物有机组分监测技术及应用研究。

E-mail: tzhang@cneac.com

tion routes are discussed as well.

**Key words:** Beijing; total suspended particle(TSP); gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS); levoglucosan; farmland corn stake burning

生物质燃烧是温室气体和大气颗粒物的重要来源,对城市大气颗粒物污染有不可忽视的作用。与森林和草原大火等大规模生物质燃烧事件相比,秸秆焚烧、薪柴燃烧等人为生物质燃烧影响范围较小,主要影响城市空气质量、降低大气能见度。生物质燃烧过程还能产生多环芳烃<sup>[1]</sup>,卤代有机污染物等<sup>[2]</sup>有毒物质危害人体健康。挥发性有机物(VOCs)也是生物质燃烧的主要产物之一,研究证明它可以影响光化学链反应平衡,促进更多的臭氧以及二次有机污染物的形成<sup>[3-4]</sup>。目前生物质燃烧污染的重要性已引起管理部门的重视,农田秸秆焚烧和城市秋季落叶集中焚烧活动已被明令禁止,并已实现气象卫星监测秸秆焚烧火情日报在麦收和秋收季节的每日发布。

水溶性钾<sup>[5]</sup>,左旋葡聚糖<sup>[6]</sup>和当代碳(<sup>14</sup>C)<sup>[7]</sup>3类化学物种在颗粒物源解析研究中通常用于表征生物质燃烧。颗粒物中水溶性钾产生于生物质燃烧、海盐和土壤扬尘等过程,当代碳的来源包括生物质燃烧和天然生物排放,因此理论上讲,使用水溶性钾和当代碳估算生物质燃烧会使结果偏高,近年来的研究多使用左旋葡聚糖作为生物质燃烧的示踪物质<sup>[6,8]</sup>。左旋葡聚糖是纤维素在高于 300 °C 下裂解产生的,没有其他来源,其结构示于图 1。由于左旋葡聚糖的释放量相对较大,有足够的稳定性,是理想的生物质燃烧示踪化合物。左旋葡聚糖的异构体还来源于半纤维素高温裂解的甘露聚糖和半乳糖。目前多数研究认为,颗粒物中 80% 以上的左旋葡聚糖存在于细颗粒(PM<sub>2.5</sub>)中,对 PM<sub>2.5</sub> 中左

旋葡聚糖含量报道也相对较多<sup>[9-10]</sup>。最近有研究发现,在某些地区生物质燃烧事件发生时,较粗颗粒(大于 PM<sub>2.5</sub>)上的左旋葡聚糖会迅速富集,甚至达 35%<sup>[11]</sup>,因此,仅用 PM<sub>10</sub> 或 PM<sub>2.5</sub> 的左旋葡聚糖含量表征生物质燃烧对颗粒物的影响可能并不完全,对总悬浮颗粒物(TSP)中左旋葡聚糖的含量水平也有必要做进一步研究,而这方面的数据并不多见。

测定颗粒物中左旋葡聚糖常用的方法有气相色谱法(GC/FID),气相色谱-质谱法(GC/MS)和液相色谱法(HPLC)<sup>[12]</sup>。总的来说,GC/FID法和GC/MS法比较灵敏<sup>[13]</sup>,相比GC/FID法,GC/MS法在分析基质复杂样品时定性准确性更高。由于左旋葡聚糖分子结构中有多个羟基,使用GC/FID法和GC/MS法测定前必须进行衍生化前处理,即用三甲基硅烷化试剂处理以减少分子极性,降低汽化温度,这样的样品前处理步骤复杂,而且由于衍生试剂的特点不能用于湿样的分析。使用HPLC法(通常用紫外检测器)在样品前处理阶段则不需衍生,但比气相色谱类方法检测灵敏度要差一些,而且由于HPLC的分离能力有限,设法消除共流出化合物的影响是方法的关键<sup>[6]</sup>。本工作采用了GC/MS分析法。

本工作对 2005~2006 年间的北京市二环、北郊背景点和南部 3 个采样点采集的 TSP 样品中左旋葡聚糖进行测定,研究采样时段北京市生物质燃烧的水平 and 季节变化特征,并与 2002~2003 年的数据进行比较,分析样品捕捉到的 2 次生物质燃烧事件的来源和传输路径。

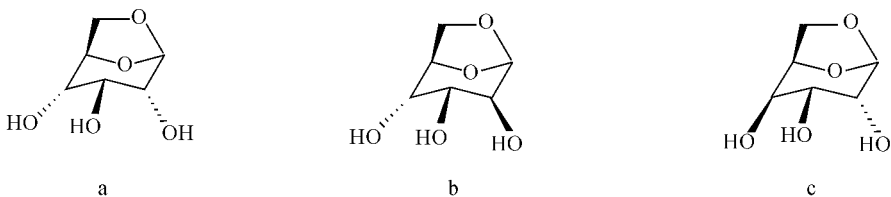


图 1 左旋葡聚糖(C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)及其异构体的结构

a. 左旋葡聚糖; b. 甘露聚糖; c. 半乳糖

Fig. 1 Structures of levoglucosan and its isomers

a. levoglucosan; b. mannosan; c. galactosan

## 1 实验部分

### 1.1 采样

3 个采样点分别为北京城区二环、北郊背景点昌平区(距城区约 40 km)、南郊房山区(距城区约 30 km),采样时段为 2005 年 9 月 18 日至 2006 年 9 月 13 日。使用石英纤维滤膜和大流量采样器采集 TSP 样品,每 6 天采集 1 个样品,采样时间为 24 h。在北郊、城区、南郊分别有效回收了 61、56、49 个样品,用称重法测定了 TSP 的质量浓度。

### 1.2 主要仪器、试剂与材料

GC-MSQP5000 气相色谱-质谱联用仪;日本岛津公司产品,配有电子轰击离子源(EI)及 GC solution 2.3 数据处理系统;MT-5CHN 元素分析仪;日本柳本公司产品,配有数据处理系统。

标准物质:左旋葡聚糖、甘露聚糖、半乳糖、1,6-脱水- $\beta$ -D-吡喃木聚糖苷(methyl- $\beta$ -D-xylopyranoside,内标化合物)均为色谱纯,美国 Sigma 公司产品。

衍生化试剂:*N*-甲基-*N*-三甲基硅三氟乙酰胺(MSTFA)含 1% 三甲基氯硅烷(TMS),美国 Pierce 公司产品。

### 1.3 左旋葡聚糖的测定

综合考虑季节特点和典型生物质燃烧时段,选取 19 个城区采样点的样品测定左旋葡聚糖含量,测定样品覆盖了采样的 12 个月,每个月选测 1~4 个样品。北郊和南郊的采样点则各选测 6 个同步采集样品。左旋葡聚糖的测定采用衍生化前处理,GC/MS 内标法测定<sup>[14]</sup>。简单来说,样品加入内标后以有机溶剂超声波萃取,萃取液完全吹干后进行三甲基硅烷化衍生,用 GC/MS 定量测定。

**1.3.1 色谱条件** J&W DB-5 石英毛细色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu$ m);升温程序:100  $^{\circ}$ C 保持 1 min,以 15  $^{\circ}$ C $\cdot$ min<sup>-1</sup> 升至 260  $^{\circ}$ C,再以 5  $^{\circ}$ C $\cdot$ min<sup>-1</sup> 升至 300  $^{\circ}$ C,保持 2 min;载气(He)流速 1.1 mL $\cdot$ min<sup>-1</sup>;进样量 1.0  $\mu$ L;不分流进样;进样口温度 200  $^{\circ}$ C。

**1.3.2 质谱条件** 电子轰击(EI)离子源;电子能量 70 eV;传输线温度 300  $^{\circ}$ C;离子源温度 200  $^{\circ}$ C;选择离子模式定量,定量离子  $m/z$  217,参考离子  $m/z$  204、333;激活电压 1.65 kV;质量扫描范围  $m/z$  35~500。

### 1.4 质控实验

使用空白石英滤膜进行全程序空白实验,未检出左旋葡聚糖,方法加标回收率为 90%。检出限为左旋葡聚糖绝对量 3.4 ng,按照采样和实验方法,24 h 共采集 1 630 m<sup>3</sup> 大气样品,实验中冲取一片半径为 1 cm 的石英滤膜用于左旋葡聚糖测定,左旋葡聚糖检出浓度为 0.13 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>。3 次空白滤膜加标平行测定的相对标准偏差为 4.9%。

### 1.5 碳质测定

样品的有机碳,元素碳使用 CHN 元素分析仪测定<sup>[15-16]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 左旋葡聚糖浓度水平

城区采样点 19 个 TSP 样品左旋葡聚糖含量平均值为 334 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>,含量范围为 34.6~1 307 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>,与同样是 TSP 样品的台湾云林城区采样点浓度范围(253~1 438 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>)相近,列于表 1。如果假设 80% 的左旋葡聚糖存在于细粒子(PM<sub>2.5</sub>)中<sup>[17]</sup>,则可以估算出城区样品 PM<sub>2.5</sub>的平均浓度约为 267 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>,将这一数据与 2002~2003 年城区采样点 PM<sub>2.5</sub>样品数据(307 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>)做比较,可以看出北京市颗粒物左旋葡聚糖的浓度水平整体上略有降低。这一浓度水平的高值端则明显高于广州城区 PM<sub>2.5</sub>样品的测定结果<sup>[10]</sup>。

左旋葡聚糖浓度以及左旋葡聚糖与有机碳浓度比的时间变化趋势示于图 2。因某些气象条件(如静稳天气)也会引起左旋葡聚糖绝对浓度的升高,使用左旋葡聚糖与有机碳浓度比(lev<sub>o</sub>/OC,数据列于表 1)可以更清晰地反映生物质燃烧对有机碳的贡献。图 2a 中城区采样点 2005 年 10 月 6 日和 2006 年 6 月 21 日在 2 条曲线中均为峰值,明显高于其他样品,表明这两天受到了生物质燃烧事件的影响,本研究中左旋葡聚糖含量的峰值为 1 286 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>和 1 307 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>。这一数值与台湾云林城区的生物质燃烧事件样品<sup>[11]</sup>(1 438 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>),以及 2002~2003 年北京城区采样点生物质燃烧事件样品<sup>[18]</sup>(PM<sub>10</sub>, 1 962 ng $\cdot$ m<sup>-3</sup>)水平基本相当。城区采样点左旋葡聚糖含量除上述 2 个峰值外,全年左旋葡聚糖含量的季节变化特征不明显,考虑到所有样品均有左旋葡聚糖被检出,表明北京大气中存在一个生物质燃烧背景值<sup>[18]</sup>。

表 1 2005~2006 年北京 TSP 样品中左旋葡聚糖浓度及与文献值的比较 (ng · m<sup>-3</sup>)

Table 1 Concentrations of levoglucosan in Beijing TSP samples collected during 2005—2006 (ng · m<sup>-3</sup>)

取样城市	北京(本研究)	北京 <sup>[17]</sup>	广州 <sup>[10]</sup>	台湾云林 <sup>[11]</sup>
sampling site	Ring 2, downtown	North Ring 4	downtown	downtown
sampling period	2005. 9. 18 ~2006. 9. 13	2002. 7. 11~2003. 9. 30	2004. 10. 6~10. 31	2006. 12. 18~10. 26
sample type	TSP	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP
average	334±379 (34.6~1 307, n=19)	307±345 (47.2~1 626, PM <sub>2.5</sub> , n=52) 397±432 (55.1~1 962, PM <sub>10</sub> , n=48)	352 (120~740, without biomass burning) 950 (biomass burn- ing period)	332 (253~390, without biomass burning) 741 (404~1 438, bio- mass burning period)
levo/OC	0.015 2±0.012 6 (0.003 78~ 0.049 4, n=19)	0.021 6±0.010 7 (0.007 12~0.053 8, PM <sub>2.5</sub> , n=52) 0.017 3±0.008 74 (0.006 49~0.049 0, PM <sub>10</sub> , n=48)		

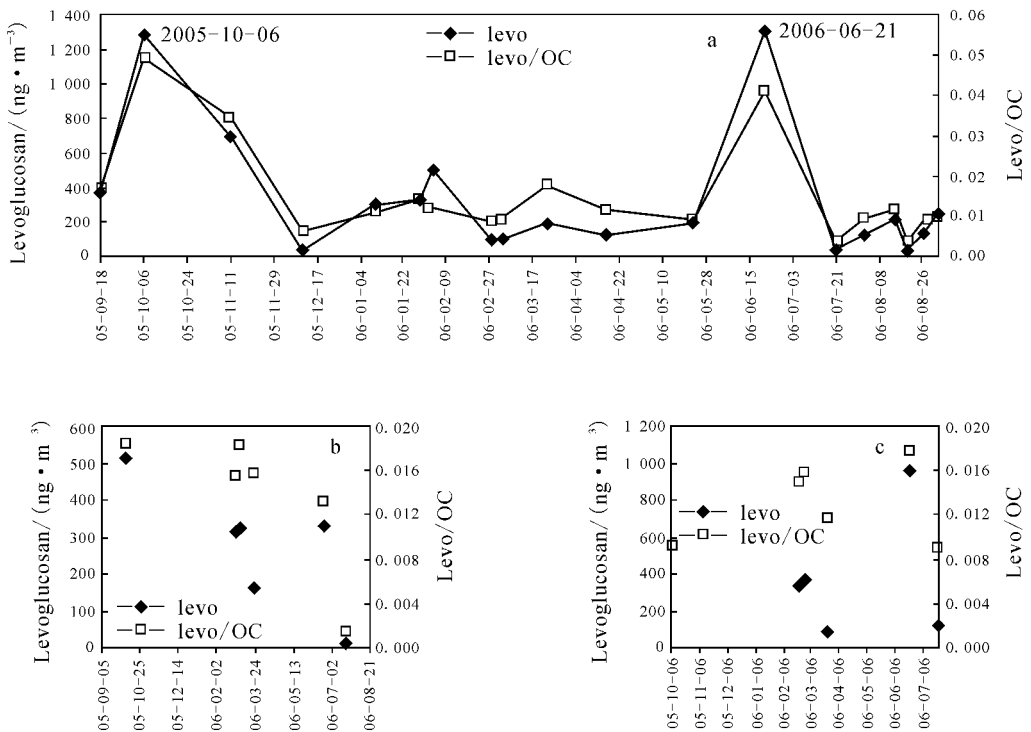


图 2 2005~2006 年北京 TSP 样品左旋葡聚糖浓度及左旋葡聚糖与 OC 浓度比的时间变化趋势  
a. 城区采样点; b. 北郊背景点; c. 南郊房山

Fig. 2 Time trends for levoglucosan atmospheric concentration and the ratio of levoglucosan to OC  
a. downtown sampling site; b. background site at north suburb; c. Fangshan site at south suburb

2.2 3 个采样点左旋葡聚糖浓度的差异

城区和房山 2 个点位的 6 个同步采集的样品中,2005 年 10 月 6 日和 2006 年 6 月 21 日样品的左旋葡聚糖浓度均是最高的。对北郊背景

点而言,2005 年 10 月 6 日样品左旋葡聚糖浓度也是 6 个样品中最高的,但 2006 年 6 月 21 日样品与另外 2 个点不同,没有明显高于其他采样日,示于图 2b、2c。因此城区和房山采样点左旋

葡聚糖浓度的相关性要好一些。

从浓度来看,城区采样点 2 个左旋葡聚糖峰值样品浓度均高于其他采样日 4 倍以上,房山 2006 年 6 月 21 日样品高于其他采样日的 1~2 倍,北郊背景点、房山 2005 年 10 月 6 日样品左旋葡聚糖浓度比其他采样日高 50% 左右。因此城区采样点左旋葡聚糖的浓度变化幅度最大,换句话说,生物质燃烧事件对城区空气的影响更为显著。这一现象可能与北京的地理位置有关。北京市南部是平原,来自南部携带污染物的气团可以顺利的通过北京市区,但最终受到北京北部和西北部的燕山和太行山脉的阻挡,造成污染物在市区滞留。另外,很多研究指出,北京的地理条件造成的“城市热岛环流”现象也加剧了城区污染物的聚集<sup>[19]</sup>。北郊背景点位于北京北部的山坳中,由于燕山的阻挡削弱了城区污染物对它的影响。

南郊房山采样点 2006 年 6 月 21 日样品左旋葡聚糖浓度也较高( $967 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ),但低于城区的同步样品( $1307 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ),后文(2.3.2 节)将对产生这一差异的原因做进一步分析。

### 2.3 2005 年 10 月 6 日和 2006 年 6 月 21 日生物质燃烧事件分析

北京市空气质量日报数据<sup>[20]</sup>也反映出,2005 年 10 月 6 日和 2006 年 6 月 21 日的空气污染指数(API)是采样日附近几天中最高的,空气质量状况分别为轻微污染和轻度污染,示于图 3。而生物质燃烧是否就是这两天的污染加重的原因,需要参考气象卫星和风向信息做进一步分析。通过查阅上述时段的卫星秸秆焚烧日报和专报,利用美国海洋和宇航局的 HYSPLIT 软

件<sup>[21]</sup>做出 2005 年 10 月 6 日和 2006 年 6 月 21 日采样时段的反向风迹图。

#### 2.3.1 2005 年 10 月 6 日样品分析

根据秸秆焚烧日报<sup>[22]</sup>,2005 年 10 月 5 日气象卫星在山东省潍坊、淄博和滨州地区以及北京市丰台地区发现数个火点。10 月 6 日可能因为卫星过境时地面被云层覆盖没有数据。而 10 月 7 日在北京平谷、顺义、密云,河北省邯郸、唐山、张家口地区,河南省安阳、鹤壁、新乡地区和山西省忻州地区发现大量火点。可以推测在 10 月 6~7 日,北京周边及其南部相邻的河北省、河南省部分地区都有秸秆焚烧现象,这一时段正是北方地区收获玉米的时期,玉米秸焚烧产生的烟雾在刮南风的情况下可以影响到北京的大气质量。

结合图 4a, 10 月 7 日 48 h 反向风迹图可以做进一步分析。此图的起始计算时间是格林威治标准时间 10 月 7 日的 0 点,即北京当地时间 7 点,反映了自起始时间逆推 48 h 期间采样点受到风影响的情况,与采样时段(10 月 6 日 8 时至 10 月 7 日 8 时)基本吻合。从图中可以看出,这一时段影响北京的风绝大部分来自北京南部和西南部,传输距离不太远(跨 1~2 个省),河北省南部、河南省地区的秸秆焚烧烟雾完全可以随风影响北京。因此可以认为,2005 年 10 月 6 日北京市大气污染事件主要或部分是由河北省南部、河南省部分地区的秸秆焚烧烟雾向北传输造成的。

#### 2.3.2 2006 年 6 月 21 日样品分析

结合图 4b 反向风迹图和 2006 年 6 月 19~25 日的气象卫星监测作物秸秆焚烧专报<sup>[23]</sup>,可以对 2006 年 6 月 21 日采样时段做出分析。

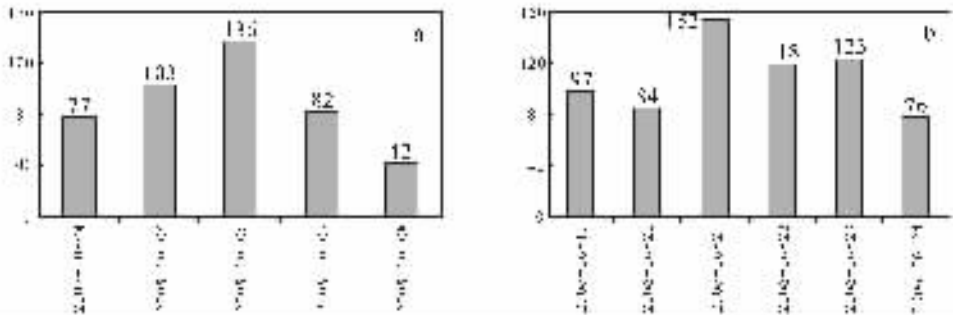


图 3 生物质燃烧时段空气污染指数(API)

a. 2005 年 10 月 6 日前后; b. 2006 年 6 月 21 日前后

Fig. 3 Air pollution indexes during biomass burning episodes

a. Oct. 6, 2005; b. June 21, 2006

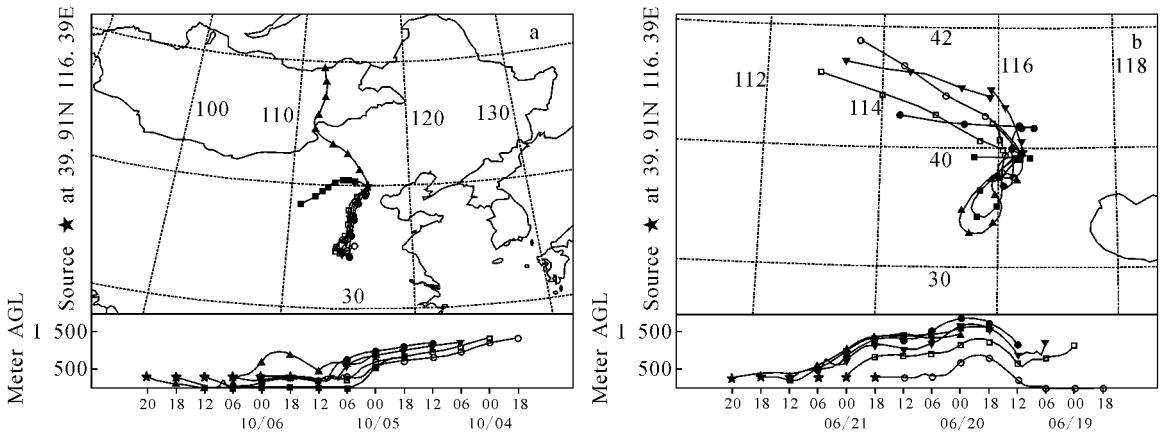


图 4 生物质燃烧时段 HYSPLIT 反向风迹图

a. 2005 年 10 月 6 日; b. 2006 年 6 月 21 日

Fig. 4 Backward wind trajectories during the biomass burning episodes computed by NOAA HYSPLIT

a. Oct. 6, 2005; b. June 21, 2006

根据秸焚烧日报<sup>[24]</sup>, 6 月 19 日气象卫星共监测到河北邯郸市, 河南安阳市、鹤壁市、周口市, 山西长治市辖区有多处火点, 6 月 20 日监测到江苏盐城市、连云港市辖区有火点, 6 月 21 日监测到重庆市辖区有几处火点。从图 3b 反向风迹图中可以看出, 2006 年 6 月 21 日样品的采样时段内北京主要受到局地风的影响, 范围不超过河北省境, 因此 19 日河北省南部的秸秆焚烧是引起 2006 年 6 月 21 日北京市空气污染的原因, 而其他地区的秸秆焚烧则不可能对北京有大的影响。

6 月中下旬通常是北方小麦产区收获小麦后整理农田播种玉米的时间, 由于农时忙, 许多地区会采取将麦秸直接焚烧的方式进行处理, 因此这一阶段秸秆焚烧现象比较集中。根据 2006 年 6 月 19 日~25 日的气象卫星监测作物秸秆焚烧专报<sup>[23]</sup>, 6 月 19 日~25 日监测到山东、江苏、山西、陕西、天津及重庆等省(市)的焚烧作物秸秆火点 164 个(不包括云覆盖下的火点信息), 其中河北省 62 个、河南省 10 个、山东省 156 个、江苏省 3 个、山西省 8 个、陕西省 2 个、天津市 8 个、重庆市 3 个。每年这个时段的秸秆焚烧烟雾都有可能传输到北京, 但具体影响北京的污染源地与当时的风向等气象条件有关。北京市 2006 年 6 月空气质量月报<sup>[25]</sup>提到: “21 日受河北地区焚烧麦秸烟雾的输送影响, 空气质量由预报的二级降为三级(2)轻度污染”, 也印证了这次空气污染事件是由河北省秸秆焚烧引起的。

房山采样点 2006 年 6 月 21 日样品左旋葡聚糖浓度为  $967 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , 低于城区的同步样品

$1307 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , 可以做如下分析: 2006 年 6 月 21 日生物质燃烧事件是由 6 月 19 日河北南部和河南省部分地区燃烧麦秸烟雾向北传输引起的。由于 6 月 21 日采样时这次事件已接近尾声, 位于烟雾从南至北的传输途径上的良乡当时可能只受到了烟雾末端的影响, 而北京城区由于污染物扩散的滞后仍然处在烟雾的影响中。

### 3 结论

利用 GC/MS 法测定了 2005~2006 年北京城区 TSP 样品中的左旋葡聚糖含量, 与 2002~2003 年北京的分级颗粒物样品做了比较, 发现与 2005~2006 年北京大气颗粒物中左旋葡聚糖浓度持平, 略有降低。

通过有机碳和示踪化合物左旋葡聚糖的测定, 捕捉到 2005 年 10 月 6 日和 2006 年 6 月 21 日生物质燃烧事件, 利用气象卫星监测秸秆焚烧信息, 反向风迹图分析这 2 次事件的源地和传输路径。分析结果得到空气质量日报数据的支持。

致谢: 感谢美国海洋与航天局, 其网站提供了反向风迹图的原始数据及 HYSPLIT 软件。

### 参考文献:

- [1] 于国光, 王铁冠, 朱先磊, 等. 北京市西北郊大气气溶胶中多环芳烃的源解析[J]. 环境化学, 2008, 27(2): 245-249.
- [2] ALEKSANDRYAN A V. Main potential sources of Dioxins/Furans generation at territory of Armenia[C]// Proceedings of 29th International Sym-

- posium of Halogenated Persistent Organic Pollutant, Beijing, 2009.
- [3] LAMANNA M S, GOLDSTEIN A H. In situ measurements of C2-C10 volatile organic compounds above a Sierra Nevada ponderosa pine plantation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (D17): 21 247-21 262.
- [4] ANDREA M O, CRUTZEN P J. Atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry [J]. *Science*, 1997, 276 (5 315): 1 052-1 058.
- [5] 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): 1 275-1 282.
- [6] PUXBAUM H, CASEIRO A, SANCHEZCHOA A, et al. Levoglucosan levels at background sites in Europe for assessing the impact of biomass combustion on the European aerosol background [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D23S05.
- [7] YANG F, HE K, YE B, et al. One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5: 1 449-1 457.
- [8] SIMONEIT B R T, SCHAUER J J, NOLTE C G, et al. Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33: 173-182.
- [9] 何凌燕, 胡敏, 黄晓锋, 等. 北京大气气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 中的有机示踪化合物 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(1): 23-29.
- [10] WANG Q Q, SHAO M, LIU Y, et al. Impact of biomass burning on urban air quality estimated by organic tracers; Guangzhou and Beijing as cases [J]. *Atmospheric Environment* 2007, 41 (37): 8 383-8 390.
- [11] LEE J J, ENKING G, CANDICE S C, et al. Particle size characteristics of levoglucosan in ambient aerosols from rice straw burning [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (35): 8 300-8 308.
- [12] SCHKOLHIK G, FALKOVICHA H, RUDICH Y, et al. New analytical method for the determination of levoglucosan, polyhydroxy compounds, and 2-methylerythritol and its application to smoke and rainwater samples [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(8): 2 744-2 752.
- [13] PASHYNSKA V, VERMEYLEN R, VAS G, et al. Development of a gas chromatographic/ion trap mass spectrometric method for the determination of levoglucosan and saccharidic compounds in atmospheric aerosols. Application to urban aerosols [J]. *Journal of Mass Spectrometry* 2002, 37(12): 1 249-1 257.
- [14] 张焱, 刘咸德, 董树屏, 等. 生物质燃烧颗粒物有机示踪化合物的测定和应用 [J]. *岩矿测试*, 2006, 25(2): 107-113.
- [15] 董树屏, 刘咸德, 张焱, 等. 大气颗粒物元素碳的直接测定 [J]. *中国环境监测*, 2004, 20(3): 20-22.
- [16] 迟旭光, 狄一安, 董树屏, 等. 大气颗粒物样品有机碳和元素碳的测定 [J]. *中国环境监测*, 1999, 15(4): 20-31.
- [17] HERCKES P, ENKING G, KREIDENWEIS S M, et al. Particle size distributions of organic aerosol constituents during the 2002 Yosemite aerosol characterization study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40 (15): 4 554-4 562.
- [18] ZHANG T, CLAEYS M, CACHIER H, et al. Identification and estimation of the biomass burning contribution to Beijing aerosol using levoglucosan as a molecular marker [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(29): 7 013-7 021.
- [19] 王喜全, 王自发, 龚晏邦, 等. 北京城区热岛环流对山地-平原风的调节作用 [J]. *气候与环境研究*, 2008, 31(5): 639-644.
- [20] 中华人民共和国环境保护部数据中心. 重点城市空气质量日报 [EB/OL]. [http://datacenter.mep.gov.cn/TestRunQian/air\\_dairy.jsp?lang=](http://datacenter.mep.gov.cn/TestRunQian/air_dairy.jsp?lang=)
- [21] 美国海洋与航天局. HYSPLIT 反向风迹图 [EB/OL]. <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>.
- [22] 国气象局国家卫星气象中心. 气象卫星监测作物秸秆焚烧日报 [EB/OL]. [2005-10-06] <http://www.12369.gov.cn/jgrsinfo/2005/20051006.asp>.
- [23] 中国气象局国家卫星气象中心. 气象卫星监测作物秸秆焚烧专报 [EB/OL]. [2006-06-26]. [http://www.12369.gov.cn/jgrsinfo/2006/200604\\_zb.asp](http://www.12369.gov.cn/jgrsinfo/2006/200604_zb.asp).
- [24] 国气象局国家卫星气象中心. 气象卫星监测作物秸秆焚烧日报 [EB/OL]. [2006-06-19] <http://www.12369.gov.cn/jgrsinfo/2006/20060619.asp>.
- [25] 北京市环境保护局. 北京市空气质量月报 [EB/OL]. [2006-06]. <http://www.bjebp.gov.cn/bjhb/publish/portal0/tab377/info2644.html>.