

# 夏秋季北京及河北三城市的大气污染联合观测研究

吴莹<sup>1,2</sup>, 吉东生<sup>2</sup>, 宋涛<sup>2</sup>, 朱彬<sup>1</sup>, 王跃思<sup>2\*</sup>

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为评估北京西南方向城市群对北京大气污染的影响, 于 2009 年夏秋季节(2009 年 7 月 16 日~10 月 15 日), 利用自动在线大气环境观测仪器, 对北京及太行山东侧河北省的 3 个城市涿州、保定和石家庄进行了大气污染物 PM<sub>10</sub>、NO<sub>x</sub> 和 O<sub>3</sub> 的联合观测研究. 结果表明, 夏秋季节 4 个城市的首要污染物均为可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>), 平均质量浓度分别为(99 ± 88)、(121 ± 74)、(141 ± 92)和(180 ± 107) μg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 平均质量浓度分别为(66 ± 48)、(23 ± 14)、(47 ± 35)和(52 ± 32) μg/m<sup>3</sup>; 大气光化学污染物 O<sub>3</sub> 浓度小时最高平均值分别达到(107 ± 60)、(128 ± 55)、(164 ± 61)和(120 ± 54) μg/m<sup>3</sup>. 受局地源影响, 石家庄颗粒物造成的大气污染最为严重, 依次为保定、涿州、北京; 受大城市北京和石家庄的双重影响, 保定地区大气二次污染物臭氧浓度最高, 其次是涿州、石家庄, 北京最低. 对 2009 年 7 月出现的 2 次典型区域大气污染过程分析表明, 太行山东侧河北城市群污染物排放及大气光化学污染对北京及华北区域空气质量有显著影响.

关键词: 北京; 涿州; 保定; 石家庄; 大气污染; PM<sub>10</sub>; NO<sub>x</sub>; O<sub>3</sub>

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2741-09

## Characteristics of Atmospheric Pollutants in Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang During the Period of Summer and Autumn

WU Ying<sup>1,2</sup>, JI Dong-sheng<sup>2</sup>, SONG Tao<sup>2</sup>, ZHU Bin<sup>1</sup>, WANG Yue-si<sup>2</sup>

(1. Institute of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to evaluate the potential impact of the atmospheric pollution in Beijing by those cities which located southwest of it, the observations of PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> were conducted during the period of summer-autumn (Jul. 16-Oct. 15, 2009) in Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang online, with the automated instruments which conform to international standards. The results showed that the principal pollutant was PM<sub>10</sub>, and the average concentration was (99 ± 88), (121 ± 74), (141 ± 92) and (180 ± 107) μg/m<sup>3</sup>, respectively. The concentration of NO<sub>x</sub> was (66 ± 48), (23 ± 14), (47 ± 35) and (52 ± 32) μg/m<sup>3</sup>, respectively. Ozone, the photochemical pollutant, the daily maximum concentration hourly was (107 ± 60), (128 ± 55), (164 ± 61) and (120 ± 54) μg/m<sup>3</sup>, respectively. Owing to the emission of local sources, the atmospheric PM<sub>10</sub> pollution of Shijiazhuang was the most serious in 4 cities, in order was Baoding, Zhuozhou and Beijing. However, the average concentration of O<sub>3</sub> in Baoding was the highest for the dual influence of Beijing and Shijiazhuang. Two episodes of heavy regional atmospheric pollution in July 2009 were analyzed with the surface meteorological data and backward trajectory model. The results suggested that the air quality in Beijing and the surrounding areas was significant influenced by the three cities of Hebei province in summer-autumn.

**Key words:** Beijing; Zhuozhou; Baoding; Shijiazhuang; atmospheric pollution; PM<sub>10</sub>; NO<sub>x</sub>; O<sub>3</sub>

近地层臭氧、氮氧化物、二氧化硫、可吸入颗粒物、一氧化碳和铅被美国 EPA 称为 6 种大气中的首要污染物. 而我国近年来可吸入颗粒物一直居各大中小城市污染物之首, 近地层二次污染物臭氧也呈现快速上升趋势. 日趋严重的大气污染不但使大气环境质量持续下降, 严重危害人体健康, 而且也影响着区域和全球气候变化的速度, 更成为工业化城市发展的掣肘<sup>[1-4]</sup>. 城市化发展速度过快和城市群的出现, 使我国大气污染呈现复合型 and 区域性的双重特点<sup>[5-9]</sup>.

我国华北地区位于黄河下游, 西起太行山脉和豫西山地, 东到黄海、渤海和山东丘陵, 北起燕山山脉, 西南到桐柏山和大别山, 东南至苏、皖北部, 与长江中下游平原相连. 受其独特的地形和大陆东岸中纬度气候的影响, 一旦遭遇不利于污染物扩散的

收稿日期: 2010-11-08; 修订日期: 2011-02-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q02-03); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A301); 国家自然科学基金项目(40675073)

作者简介: 吴莹(1987~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境, E-mail: designwuying@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

气象条件并且持续时间较长时,该地区大气污染物就会逐步累积,空气质量随之变差,甚至会达到重度污染.因此,除污染源外,气象条件是造成该地区空气质量好坏的另一重要因素.

本研究的主要目的是阐述夏秋季节北京及河北涿州、保定和石家庄城市群区域大气污染物的浓度水平和变化规律,评估这一区域夏秋季节大气污染现状及对北京乃至整个华北区域空气质量的影响,并通过典型污染事件气象要素和气团运移轨迹的分析,定性评估局地排放、光化学反应和外来输送各自的影响,以期为区域大气污染协同防控提供部分科学参考.

## 1 研究区域与方法

### 1.1 站点位置和观测时间

北京市区观测点选定在中国科学院大气物理研究所铁塔分部院内的一座二层办公楼顶(39.96°N, 116.36°E),距地面 10 m.涿州观测站选定在涿州城区(39.46°N, 115.99°E)某军校院内,距离北京 71 km;保定观测站位于河北农业大学(38.87°N, 115.52°E),距离北京 137 km;石家庄观测站位于中国科学院石家庄农业现代化研究所(38.02°N, 114.53°E),距离北京 283 km.所有观测点周边都没有显著的遮挡物和局地排放源,能代表各城市典型的大气环境平均状况.本观测研究时段为 2009 年夏秋季节的 7 月 16 日~10 月 15 日.

### 1.2 观测方法和 QA/QC

监测仪器为美国热电环境设备公司出产的大气污染物环境监测分析仪,包括可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )监测仪,型号:RP1400a,最低检测限:0.06  $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ,质量分辨率:0.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,精度:±1.5  $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ;氮氧化物( $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ )分析仪,型号:TE42i,最低检测限:0.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,零漂 < 0.5  $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,跨漂:±1%/d;臭氧( $\text{O}_3$ )分析仪,型号:TE49i,最低检测限:2.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,零漂 < 2  $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,跨漂:<1%/(7 d).所有观测仪器均安装在临时移动实验室内,温度控制在(25±5)°C,条件设置和维护均按照美国环境保护署相关业务标准<sup>[10]</sup>进行.仪器标定系统由零空气发生器(TEI, 111)、146 型多点校准仪(TEI, 146i)和臭氧标准发生器(TEI, 49iPS)组成,标准气体由国家标准物质中心提供.所有观测仪器每 2 周轮换标定一次,如发生故障,随时更换标定好的备用仪器.仪器状态使用自行开发专用系统通过国际互联网实时监控,数据每

5 min 采集一次随时发送控制中心服务器并在本机存贮备份,同步气象数据由北京大气综合观测试验站提供,并采用数据统计软件,对数据进行小时平均和日平均处理,经质量控制后建立数据库.

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物总体变化

图 1 为污染物逐日浓度变化图.可以看出,除北京外,其他 3 个站点  $PM_{10}$  都呈现先降低后升高的总体趋势.7~9 月北京、涿州、保定和石家庄观测站  $PM_{10}$  的日均浓度分别为(99±88)、(121±74)、(141±92)和(180±107)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .观测期(92 d)4 个城市首要污染物均为  $PM_{10}$ ,可吸入颗粒物浓度超过国家空气质量二级标准( $PM_{10}$  日均值标准为 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_2$  日均值标准为 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{O}_3$  小时值标准为 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[11]</sup>的天数分别为 10 d(超标率为 11%)、24 d(26%)、23 d(25%)、60 d(65%).整个区域颗粒物污染十分严重.7 月 16 日~8 月 15 日期间,由于仲夏强烈的光化学作用、高温和较少的降水,4 城市大气  $PM_{10}$  日均浓度分别为(127±121)、(111±63)、(129±80)和(189±108)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;8 月 16 日~9 月 15 日,初秋有利的天气扩散条件和频繁的降水清除,使各地区  $PM_{10}$  浓度分别降至(104±65)、(100±57)、(96±61)和(159±100)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;9 月 16 日~10 月 15 日,随着深秋的来临,温度下降,大气层结趋向稳定,空气不易对流,污染物较难扩散<sup>[12, 13]</sup>,山前积累效应使涿州、保定和石家庄  $PM_{10}$  浓度升至(153±87)、(199±118)和(191±111)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,而北京  $PM_{10}$  浓度持续下降至(66±40)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .表 1 为同时段不同城市污染物浓度统计表.对比分析表明,石家庄  $PM_{10}$  浓度最高,依次为保定、涿州、北京.这是因为  $PM_{10}$  受局地排放源影响较为显著<sup>[12]</sup>,截至 2009 年 9 月,石家庄机动车保有量已超过 135 万辆,市内有多家纺织、粉末冶金、制药以及印染厂,工地林立,且防尘措施不完善,多污染源致使其观测期内的  $PM_{10}$  浓度最高,污染最为严重;而北京在观测期内执行了严格的污染物限排措施,因此  $PM_{10}$  浓度最低.

夏秋季节在研究区域排放源相对稳定的情况下,由于辐射强度和温度的下降,加之扩散条件趋于不利,各城市大气  $\text{NO}_x$  浓度均表现为随着季节的推移而逐渐升高.观测期间,北京、涿州、保定和石家庄各站点日均浓度分别为(66±48)、(23±14)、

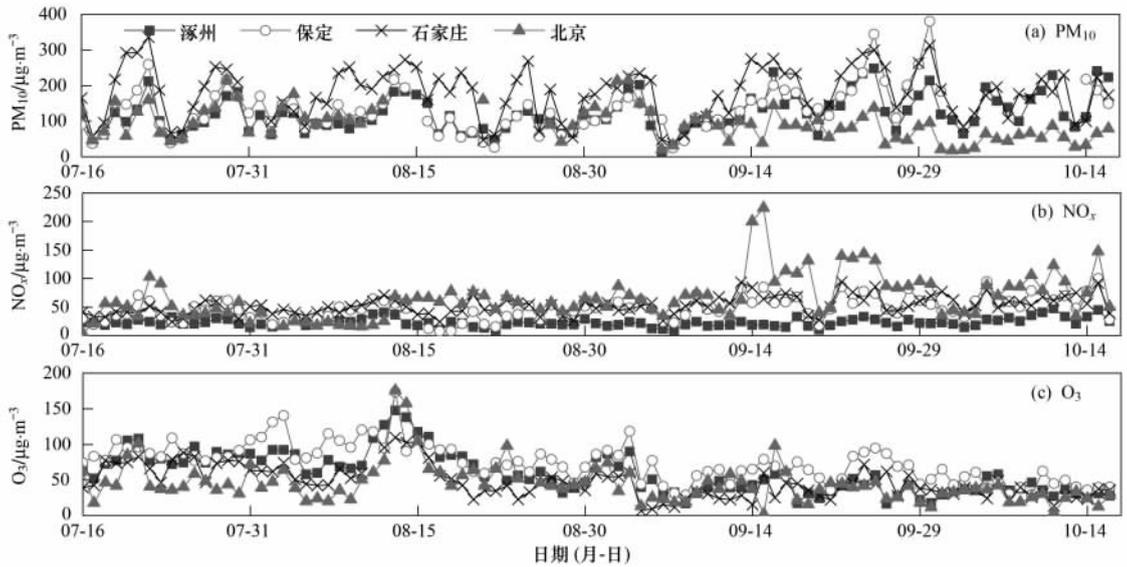


图1 太行山东侧河北涿州、保定、石家庄和北京大气污染物浓度逐日变化(2009-07-16~2009-10-15)

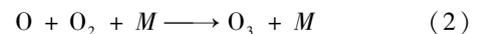
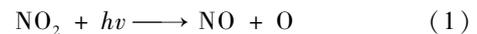
Fig. 1 Variations of pollutants concentration with time at the Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang station

( $47 \pm 35$ ) 和 ( $52 \pm 32$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . 7月中旬到8月中旬各观测点  $\text{NO}_x$  浓度日均值分别为 ( $39 \pm 31$ )、( $24 \pm 14$ )、( $41 \pm 27$ ) 和 ( $45 \pm 27$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 8月中旬到9月中旬日均值分别为 ( $70 \pm 42$ )、( $19 \pm 10$ )、( $42 \pm 30$ ) 和 ( $51 \pm 29$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 9月各城市  $\text{NO}_x$  浓度明显升高至 ( $88 \pm 55$ )、( $26 \pm 16$ )、( $59 \pm 43$ ) 和 ( $61 \pm 37$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . 相关研究结果表明<sup>[14,15]</sup>, 夏季大气强对流和湿沉降, 有利于  $\text{NO}_x$  的扩散和清除; 而随着辐射和气温的下降, 大气扩散条件随之下降, 区域各城市大气  $\text{NO}_x$  由于汇减少表现出浓度上升. 观测期内, 北京大气  $\text{NO}_x$  浓度最高, 主要归因于化石燃料燃烧, 其中40%来自机动车排放<sup>[15]</sup>. 截至2009年9月, 北京市机动车保有量为387万辆, 石家庄为135万辆, 保定为124万辆, 涿州为规模最小的城市, 机动车数量也最少. 机动车保有量由高到低的顺序北京、石家庄、保定、涿州, 亦是大气中  $\text{NO}_x$  浓度由高到低的顺序.

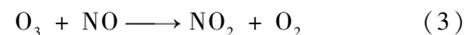
臭氧是大气中最典型的光化学污染物, 受紫外辐射强度和气温变化的影响, 其浓度呈现明显的日变化和季节变化. 2009年夏秋季节, 北京、涿州、保定和石家庄  $\text{O}_3$  日均浓度依次为 ( $45 \pm 47$ )、( $60 \pm 49$ )、( $74 \pm 58$ ) 和 ( $47 \pm 48$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 日小时最大浓度值达到 ( $107 \pm 60$ )、( $128 \pm 55$ )、( $164 \pm 61$ ) 和 ( $120 \pm 55$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . 仲夏时节的7月中旬到8月中旬, 大气  $\text{O}_3$  浓度最高, 日小时最高浓度达到 ( $125 \pm 77$ )、( $168 \pm 58$ )、( $201 \pm 64$ ) 和 ( $160 \pm 54$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 4个城

市超过国家空气质量二级标准的天数分别为3d(超标率为10%)、7d(23%)、12d(39%)、6d(19%); 8月中旬到9月中旬, 大气  $\text{O}_3$  浓度略有降低, 日小时最大浓度值分别为 ( $109 \pm 51$ )、( $115 \pm 40$ )、( $146 \pm 44$ ) 和 ( $94 \pm 46$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 9月中旬至10月中旬, 大气表观氧化能力进一步降低<sup>[15]</sup>, 各城市  $\text{O}_3$  日小时最高浓度值分别为 ( $87 \pm 40$ )、( $98 \pm 37$ )、( $146 \pm 57$ ) 和 ( $106 \pm 40$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 超标率远低于夏季.

结合表1发现, 观测期内保定  $\text{O}_3$  浓度最高, 涿州次之, 石家庄和北京最低. 臭氧的生成效率、近地层  $\text{NO}$  汇和相应的气象要素, 是造成这一格局的主要原因. 大气中的  $\text{NO}_2$ , 在波长  $< 424 \text{ nm}$  的日光照射下, 光解生成  $\text{O}_3$ :



式中,  $\text{M}$  是空气中的  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  或其他分子介质, 可以吸收过剩的能量而使生成的  $\text{O}_3$  分子稳定. 事实上, 式(2)是  $\text{O}_3$  在大气中唯一的化学反应源; 而  $\text{O}_3$  一旦生成, 则会与  $\text{NO}$  再反应生成  $\text{NO}_2$ :



这3个反应式为稳态循环. 在大气中无其他反应干预下,  $\text{O}_3$  浓度取决于  $\text{NO}_2/\text{NO}$ . 目前, 在一定程度上, 可以认为  $\text{NO}_2/\text{NO}$  的大小基本上反映了光化学反应“效率”的高低, 反映了大气氧化能力的强弱, 同时也是光化学二次污染物  $\text{O}_3$  形成的指标之一<sup>[15]</sup>. 观测期内北京、涿州、保定、石家庄各站

表 1 同时段北京、涿州、保定、石家庄污染物浓度日均值统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Table 1 Pollutant concentration time descriptive statistics during different time at Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang station / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 

污染物	地点	日期(月-日)			
		07-16 ~ 08-15	08-16 ~ 09-15	09-16 ~ 10-15	07-16 ~ 10-15
PM <sub>10</sub>	北京	127 ± 121	104 ± 65	66 ± 40	99 ± 88
	涿州	111 ± 63	100 ± 57	153 ± 87	121 ± 74
	保定	129 ± 80	96 ± 61	199 ± 118	141 ± 92
	石家庄	189 ± 108	159 ± 100	191 ± 111	180 ± 107
NO <sub>x</sub>	北京	39 ± 31	70 ± 42	88 ± 55	66 ± 48
	涿州	24 ± 14	19 ± 10	26 ± 16	23 ± 14
	保定	41 ± 27	42 ± 30	59 ± 43	47 ± 35
	石家庄	45 ± 27	51 ± 29	61 ± 37	52 ± 32
NO	北京	4 ± 7	12 ± 21	22 ± 27	13 ± 21
	涿州	3 ± 5	5 ± 6	8 ± 11	5 ± 8
	保定	4 ± 11	7 ± 17	17 ± 27	9 ± 20
	石家庄	6 ± 9	12 ± 16	16 ± 21	11 ± 17
NO <sub>2</sub>	北京	35 ± 27	58 ± 26	66 ± 37	53 ± 33
	涿州	21 ± 12	14 ± 7	18 ± 9	18 ± 10
	保定	37 ± 20	35 ± 20	42 ± 25	38 ± 23
	石家庄	39 ± 10	39 ± 8	45 ± 9	41 ± 9
O <sub>3</sub>	北京	56 ± 56	45 ± 44	33 ± 34	45 ± 47
	涿州	87 ± 56	56 ± 39	36 ± 36	60 ± 49
	保定	99 ± 68	69 ± 48	55 ± 50	74 ± 58
	石家庄	69 ± 59	37 ± 37	36 ± 37	47 ± 48
O <sub>3</sub> -Max	北京	125 ± 77	109 ± 51	87 ± 40	107 ± 60
	涿州	168 ± 58	115 ± 40	98 ± 37	128 ± 55
	保定	201 ± 64	146 ± 44	146 ± 57	164 ± 61
	石家庄	160 ± 54	94 ± 46	106 ± 40	120 ± 55

NO<sub>2</sub>/NO 值分别为 4.0、3.6、4.2、3.7,北京和石家庄产生 O<sub>3</sub> 的效率较高,但是由于近地层排放较多的 NO,通过式(3) O<sub>3</sub> 被 NO 滴定,尤其是夜间,两大城市近地层 O<sub>3</sub> 几乎为“0”,使得 O<sub>3</sub> 日平均浓度最低;涿州具有较少的机动车保有量,较低的 NO 浓度,当对流输送的 O<sub>3</sub> 到达地面时被 NO 消耗的也较少,近地层大气 O<sub>3</sub> 平均浓度居中;而保定 O<sub>3</sub> 产生率高,但排放的 NO 相对北京和石家庄少,源强汇低造成保定近地层大气 O<sub>3</sub> 浓度最高.此外,从以往研究得知<sup>[16,17]</sup>,北京及周边外来污染物存在常驻性输送通道,按照风场流场特征分为东风型、西南风型和东南风型输送通道.这些天然输送通道的存在,经常促成北京及周边区域性光化学污染.唐贵谦<sup>[18]</sup>利用 IPR 分析方法得出,当华北地区盛行偏东气流时,下风向区域的保定、涿州极易受到来自北京、天津 O<sub>3</sub> 水平输送的影响;而当华北地区盛行西南气流时,南部站点石家庄表现出明显的 O<sub>3</sub> 水平输出特征,下风向区域的保定呈现明显的 O<sub>3</sub> 水平输入特征.保定在不同风向条件下,分别受北京、石家庄等城市的影响,O<sub>3</sub> 浓度居高不下;涿州只在盛行偏东气流时受北京影响,因而其 O<sub>3</sub> 浓度次于保定.

通过以上分析可以看出,北京和其西南方向的河北重要城市涿州、保定和石家庄的大气污染变化之间有着千丝万缕的联系,对北京大气污染的调控,必须考虑与周边城市之间的相互影响,厘清大气污染物的相互输送潜势,才可能为首都北京大气污染的防控提出可行的建议.

## 2.2 污染物浓度统计日变化

各城市的 3 种典型污染物的统计日变化形式基本相同,不同的仅是它们的污染物浓度水平.可吸入颗粒物 PM<sub>10</sub> 和 NO<sub>x</sub> 具有双峰型日变化特征,峰值出现的时间分别在 07:00 ~ 08:00 和 20:00 ~ 21:00 (图 2).早晨的峰值与城市交通“早高峰”对应,而傍晚的峰值对应于晚交通高峰污染物的高排放和逐渐稳定的大气边界层对污染物的持续积累.

大气 O<sub>3</sub> 呈明显单峰型日变化,峰值往往出现在午后 15:00,低值则出现在早上 07:00 左右.晚间 22:00 至次日凌晨 07:00 O<sub>3</sub> 浓度变化幅度极小,且一直保持低值,这一变化规律与夜间混合层高度及地面 NO 排放源强度直接相关.白天光化学作用产生的臭氧,除部分干沉降消失外,大部分都被机动车排放的 NO 所滴定.因此,混合层高度即是地面 NO 所能达到的高度,由于大城市夜间大量机动车排放,

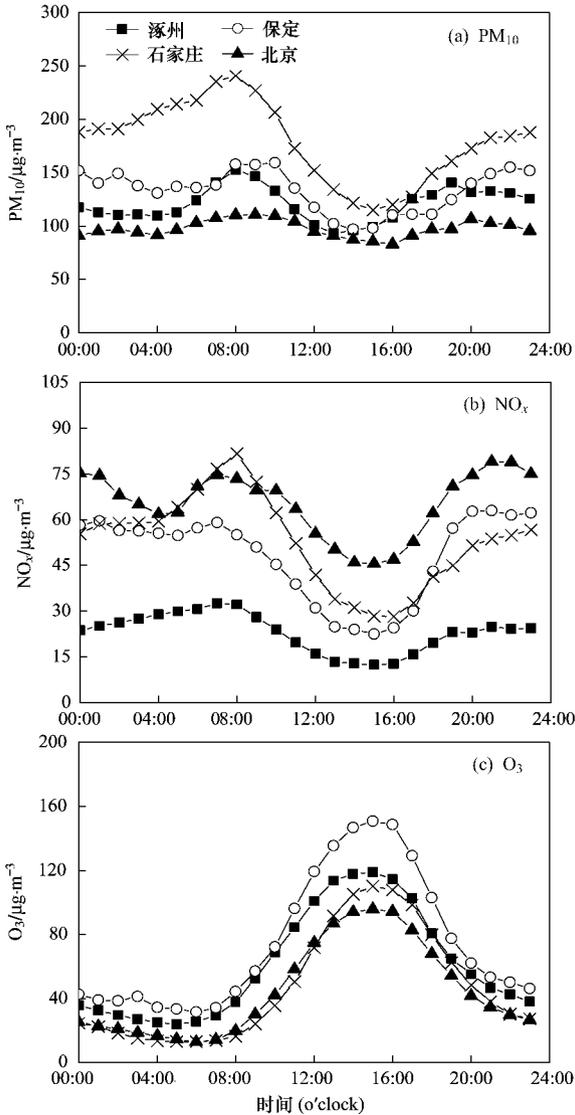


图2 区域大气污染物浓度统计日变化  
(2009-07-16~2009-10-15)

Fig. 2 Diurnal cycles of atmospheric pollutants

导致过量的 NO 使近地面 O<sub>3</sub> 趋近于“0”。

### 3 气象要素对污染物浓度的影响

已有的模拟研究显示<sup>[19-22]</sup>,环境空气中污染物浓度不仅与污染源的排放有关,更与气象条件的变化密不可分。在不利气象条件下,空气中污染物浓度可能在极短时间内就出现峰值,造成城市空气质量迅速恶化。因此,对地面天气形势及高低空气象要素特征进行综合分析,有利于了解大气污染形成的外部条件,为空气污染预报奠定基础。

#### 3.1 典型污染过程

2009年7月17~31日在4个城市连续观测到

2次污染过程,导致北京、涿州、保定和石家庄颗粒物浓度分别超过国家二级标准4d(超标率26%)、3d(20%)、7d(46%)、10d(67%),平均质量浓度依次为107、106、130和190 µg/m<sup>3</sup>,污染严重。鉴于PM<sub>10</sub>在大气中存在时间较长,输送距离远,图3以PM<sub>10</sub>为代表给出了这2次污染时段污染物从生成到清除的过程。华北4个城市在这一时段污染物浓度具有显著同步变化特征,属于同一天气形势控制下的区域污染。

#### 3.2 污染过程背景气象场特征

2009年7月17日开始,500 hPa高度巴尔喀什湖北部及东亚东北部各受一冷涡控制,从贝加尔湖北部到河套地区则为一弱高压脊控制,中国北部地区形成“两槽一脊”型天气形势,同时巴尔喀什湖北部形成槽线,并逐步东移;中国南部,西太平洋副热带高压控制华东南南大部分地区,并不断西进。地面和850 hPa高度华北地区均处于低压控制。大气低层辐合,污染物在垂直方向上充分混合扩散,浓度较低。18日20:00,500 hPa副热带高压脊线延伸至青藏高原东南部,且稳定维持到20日;850 hPa以下高度华北地区为弱高压控制。高空气流平直,底层为下沉气流,不利于气团扩散,近地层污染物浓度较高。20日,随着北部冷涡势力的加强,500 hPa副热带高压逐渐东退,华北地区转为槽后偏北气流控制(图4),且风速加大;20日20:00,850 hPa高度东北部哈尔滨-沈阳-天津-延安一线有切变线(图5);地面20日08:00吉林西北部有一低压中心,华北同样处于低压控制(图6)。此时大气低层辐合上升,气流垂直交换较强,污染物浓度有所降低。

21日副热带高压脊线西伸至青藏高原南部,华北地区500 hPa处于弱脊控制;850 hPa恢复弱高压控制;地面21日08:00,低压中心移至朝鲜半岛以东洋面,同时在山西中部形成一高压中心,且维持至23日凌晨。期间,华北地区一直处于弱高压控制,较小的风速以及稳定的近地层结构,使得污染物不断积累,于22日出现峰值。22日夜間,500 hPa高度贝加尔湖附近弱高压脊势力逐渐减弱,从黑龙江西部到贝加尔湖南部受东北冷涡后部横槽控制,华北地区处于槽前并出现大面积降水。直至25日夜間,华北地区处于槽后偏北气流控制,北方来的清洁空气、降水的湿清除和气流较强的垂直交换作用使得污染物浓度持续下降。

26日20:00,500 hPa高度华北地区重新处于副热带高压弱脊控制(图7);850 hPa北京、石家庄和

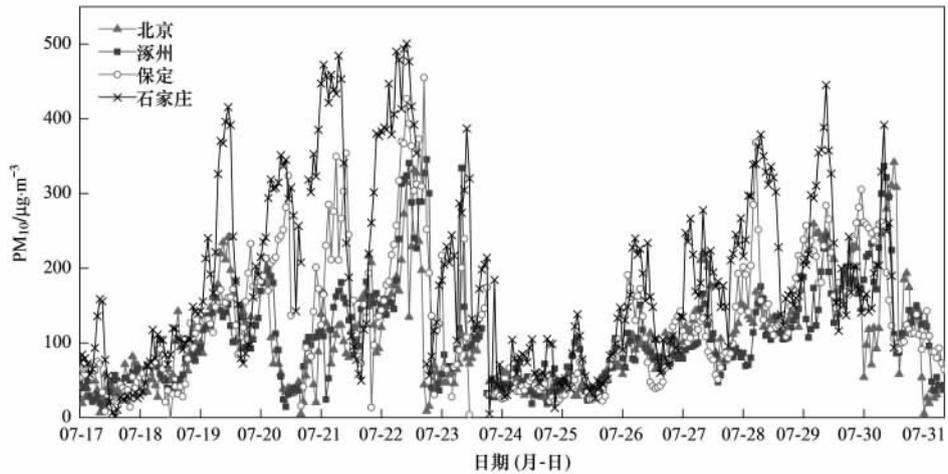


图3 连续污染过程中北京、涿州、保定和石家庄  $PM_{10}$  小时均值(2009-07-17 ~ 31)

Fig.3 Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang station comparison chart of  $PM_{10}$  mass concentration between 17-31 in July

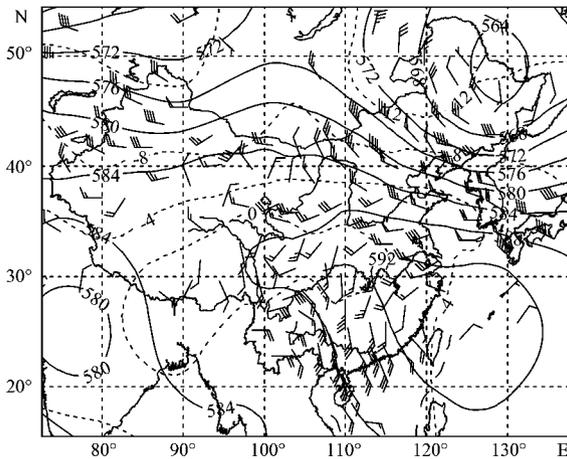


图4 2009年7月20日20:00 500 hPa 位势高度、温度场

Fig.4 Geopotential height field at 500 hPa at 20:00 July 20 in 2009

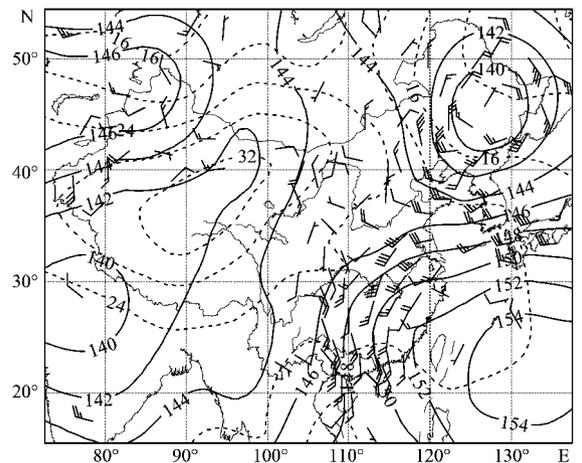


图5 2009年7月20日20:00 850 hPa 位势高度、温度场

Fig.5 Geopotential height field at 850 hPa at 20:00 July 20 in 2009

呼和浩特之间有一个弱高压,跟朝鲜半岛之间的高压形成切变(图8);地面低压中心移至朝鲜半岛以南洋面,华北地区开始受均压场控制(图9),导致近地层污染物不断积累并在30日达到峰值,之后又一次降水过程对其进行湿清除。

$O_x$  ( $O_x = O_3 + NO_2$ ) 是大气中最重要的光化学氧化剂,其值的高低能够准确表现出大气氧化性的强弱<sup>[23]</sup>. 观测期(92 d)北京、涿州、保定和石家庄大气  $O_x$  的平均质量浓度分别为  $(97 \pm 52)$ 、 $(79 \pm 48)$ 、 $(105 \pm 56)$  和  $(88 \pm 42)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . 污染较严重的21日各站  $O_x$  浓度为  $(123 \pm 66)$ 、 $(133 \pm 52)$ 、 $(153 \pm 68)$  和  $(118 \pm 58)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 22日为  $(129 \pm 77)$ 、 $(99 \pm 43)$ 、 $(145 \pm 77)$  和  $(110 \pm 63)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 远高于平均

水平. 这两日大气氧化性强,二次粒子的转化率明显升高<sup>[24]</sup>;而  $NO_x$  等一次污染物的持续积累,进一步加剧了大气均相或非均相化学反应,使得硝酸盐、硫酸盐等二次污染物的浓度迅速增加. 此外,张凯等<sup>[25]</sup>发现  $PM_{2.5}$  及水溶性化学成分浓度与大气相对湿度成正相关,与风速成负相关. 21~22日华北地区处于弱高压控制,风速较小,近地层结构稳定,持续高温( $30^\circ\text{C}$ 左右),能见度低(8 km以下),相对湿度较大,不利的气象条件导致细粒子浓度迅速升高,22日北京和保定  $PM_{2.5}/PM_{10}$  值分别为 0.68 和 0.72, 远超过观测期内平均水平,整个华北区域表现为严重的氧化型细粒子污染状态。

### 3.3 后向轨迹分析

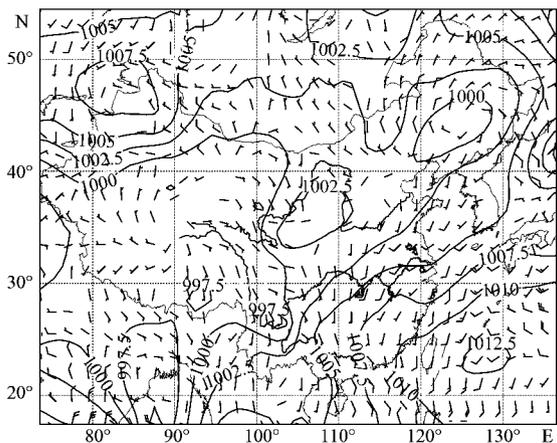


图6 2009年7月20日地面位势高度、温度场  
Fig.6 Geopotential height field of sea level at 20:00 July 20 in 2009

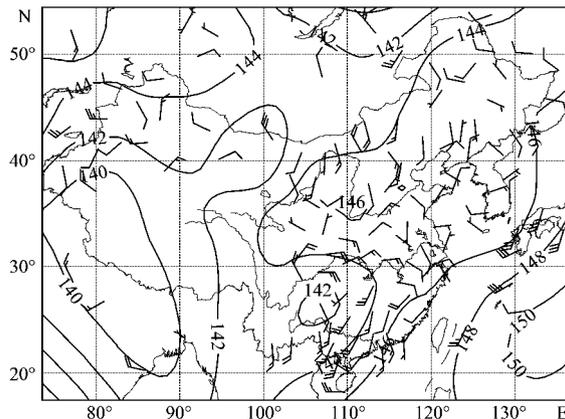


图8 2009年7月26日20:00 850 hPa 位势高度、温度场  
Fig.8 Geopotential height field at 850 hPa at 20:00 July 26 in 2009

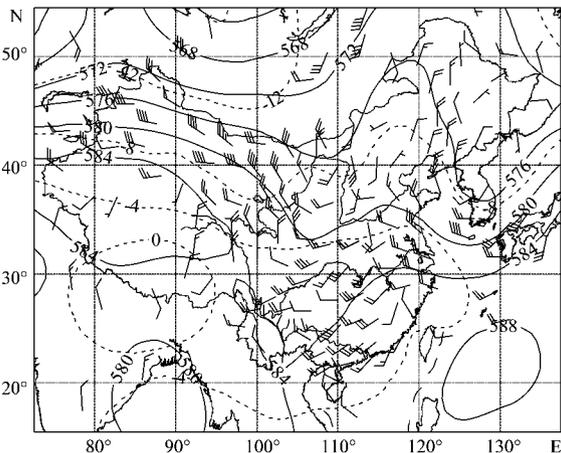


图7 2009年7月26日20:00 500 hPa 位势高度、温度场  
Fig.7 Geopotential height field at 500 hPa at 20:00 July 26 in 2009

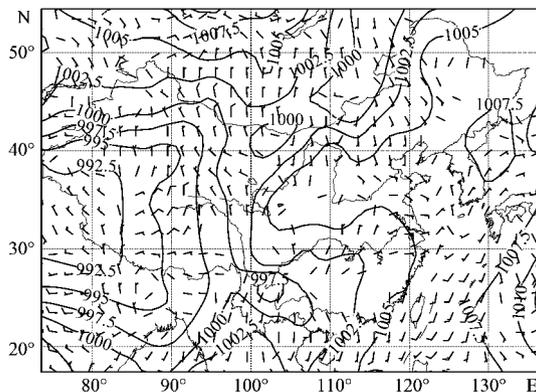


图9 2009年7月26日地面位势高度、温度场  
Fig.9 Geopotential height field of sea level at 20:00 July 26 in 2009

以北京(39.96°N,116.36°E)为参考点,利用美国海洋与大气管理局(NOAA)空气资源实验室(ARL)提供的混合型单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLIT)模式,选取500、1000和1500 m这3个高度层,分别计算北京时间2009年7月17~31日08:00之后的后向轨迹,以追踪抵达北京的气团过去24 h所经过的地方。

对北京地面气象资料统计发现,7月17~31日北京主要以偏南风为主,易受到天津、保定和石家庄等地污染气团的影响,加之该地区北面连绵不断的群山阻隔,污染物不易扩散,造成污染物浓度的增长。结合图10(来自www.ready.noaa.gov/ready.html网站)发现,7月17~19日北京持续受到来自

西南方向石家庄和保定等地区污染较严重的气团影响,PM<sub>10</sub>浓度由46 μg/m<sup>3</sup>迅速增加为156 μg/m<sup>3</sup>;20日风向转变,北京主要受偏北气流影响,由于北方空气较为清洁,区域PM<sub>10</sub>浓度都有一定程度的降低,北京降至59 μg/m<sup>3</sup>;21~22日风向转为东南偏南风,气团途径污染同样严重的天津和廊坊等地,使得各站污染程度再次升高,累积到顶峰,北京、涿州、保定和石家庄大气颗粒物浓度均超过国家二级标准,分别为163、212、259和335 μg/m<sup>3</sup>;23~25日地面风向由偏南风逐渐转为有利于污染物扩散的北风和东北风,高空气团来源于较为洁净的海洋,随之出现的降水对污染物进行了有效的清除;26日开始北京持续受到南面污染气团的影响,污染物开始累积,在30日达到峰值168 μg/m<sup>3</sup>,之后被降水清除,31日污染物浓度明显到达低谷,污染过程结束。

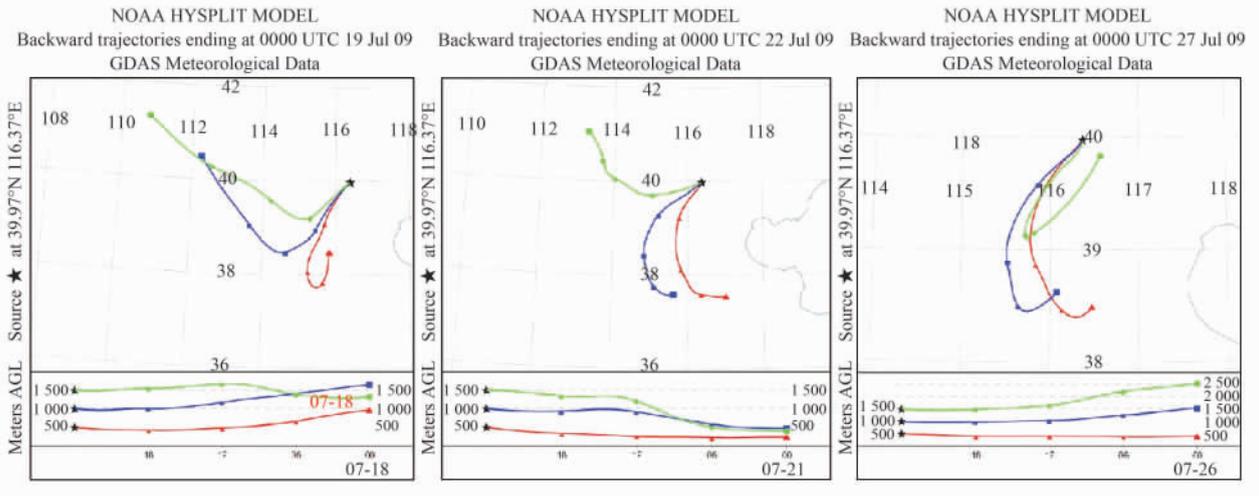


图 10 北京 19、22、27 日北京时间 08:00 24h 后向轨迹

Fig. 10 24 h Backward trace at 08:00 (Beijing time) 19, 22, 27 in July at Beijing station

#### 4 结论

(1) 受局地源的显著影响和区域污染复合,太行山东侧河北省会石家庄大气污染最为严重,依次为保定和涿州;受大城市北京和石家庄的双重影响,保定地区夏秋季节大气二次污染物臭氧浓度最高。

(2) 2009 年 7 月 17 ~ 31 日华北区域发生 2 次连续的污染过程,偏南弱风、高温和高湿加之西侧高山的阻挡,是造成该区域污染物持续积累和长时间超标的重要原因;受西南气流影响,该地区污染物对北京空气质量有明显影响,整个区域呈现严重的颗粒物污染特征。

致谢:感谢南京信息工程大学苏继峰同学和中国科学院大气物理研究所北京、石家庄、保定和涿州大气综合试验站工作人员在观测期间给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Anderson H R, Katsouyanni K, Spix C. Air pollution and daily admissions for chronic obstructive pulmonary disease in six European cities: results from the APHEA project - Reply [J]. *European Respiratory Journal*, 1998, **11**(4): 993.
- [2] Schwartz J. Particular air pollution and chronic respiratory diseases [J]. *Environmental Research*, 1993, **62**(1): 7-13.
- [3] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(3): 480-492.
- [4] 赵越, 潘钧, 张红远, 等. 北京地区大气中可吸入颗粒物的污染现状分析 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 67-69.
- [5] Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, *et al.* Regional integrated experiments on air quality over pearl river delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6157-6173.
- [6] 贺克斌, 贾英韬, 马永亮, 等. 北京大气颗粒物污染的区域性本质 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 482-487.
- [7] Westerdaal D, Wang X, Pan X C, *et al.* Characterization of on-road vehicle emission factors and microenvironmental air quality in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 697-705.
- [8] 张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 中国华北区域城市间污染物输送研究 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 14-20.
- [9] Hu H, Yang Q, Lu X, *et al.* Air pollution and control in different areas of China [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(6): 452-518.
- [10] 美国环境保护署关于气体校准标准气实验和认证可追溯性方案[S]. 1997 年 9 月.
- [11] 世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则[S]. 2005 年全球更新版.
- [12] 王珩, 于金莲. 大气中 PM<sub>10</sub> 浓度的影响因素及其污染变化特征分析 [J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2004, **33**(3): 98-102.
- [13] 任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM<sub>10</sub> 浓度分布和演变过程的影响 [J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 741-751.
- [14] 张敏, 朱彬, 王东东, 等. 南京北郊冬季大气 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 的变化特征 [J]. *大气科学学报*, 2009, **32**(5): 695-702.
- [15] 白建辉, 徐永福, 陈辉, 等. 鼎湖山森林地区臭氧及其前体物的变化特征和分析 [J]. *气候与环境研究*, 2003, **8**(3): 370-380.
- [16] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道 [J]. *环境科学研究*, 2004, **1**(17): 26-29, 40.
- [17] 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇 [J]. *环境科学研究*, 2004, **1**(17): 21-25, 33.
- [18] 唐贵谦. 北京及周边地区奥运时段臭氧时空分布特征数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2010.
- [19] 赵德山, 王明星. 煤烟型城市污染大气气溶胶[M]. 北京: 中

- 国环境科学出版社, 1991.
- [20] 马锋敏, 高庆先, 周锁铨, 等. 北京及周边地区一次典型大气污染过程的模拟分析 [J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 30-36.
- [21] 范清, 程水源, 苏福庆, 等. 北京夏季典型环境污染过程个例分析 [J]. 环境科学研究, 2007, **20**(5): 12-19.
- [22] 杨素英, 陈东升, 赵秀勇. 周边污染对北京大气  $PM_{10}$  的影响研究 [J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(3): 13-17.
- [23] 马志强, 王跃思, 孙扬, 等. 北京市与香河县大气臭氧及氮氧化合物的变化特征 [J]. 环境化学, 2007, **26**(6): 832-837.
- [24] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子( $PM_{2.5}$ )的影响 [J]. 环境科学, 2002, **23**(4): 33-36.
- [25] 张凯, 王跃思, 温天雪, 等. 北京夏末秋初大气细粒子中水溶性盐连续在线观测研究 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(3): 459-465.
- [26] 郑永光, 陈炯, 王洪庆, 等. 一个气象数据分析绘图软件的设计与开发 [J]. 应用气象学报, 2005, **15**(4): 506-509.