第17卷第3期	气 候 与 环 境 研 究	Vol. 17	No. 3
2012 年 5 月	Climatic and Environmental Research	May	2012

侯雪伟,朱彬,王东东. 2012. 东亚季风转换对西北太平洋近地面 O<sub>3</sub>春季高值的影响 [J]. 气候与环境研究,17 (3): 303-314, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10121. Hou Xuewei, Zhu Bin, Wang Dongdong. 2012. The impact of East Asia Monsoon's conversion on the surface ozone spring maximum in the northwestern Pacific region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 303-314.

# 东亚季风转换对西北太平洋近地面 O<sub>3</sub>春季高值的影响

## 侯雪伟 朱彬 王东东

南京信息工程大学中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室,南京 210044

**摘 要** 以东亚酸沉降监测网近地面 O<sub>3</sub>资料,结合 NCEP/NCAR 的全球再分析风场、NOAA 总云量及全球 降水气候项目降水资料,分析 2000~2007 年东亚西太平洋地区近地层 O<sub>3</sub>的区域和季节变化,重点分析不同站 点 O<sub>3</sub>月均浓度最大值时间差异的原因。结果表明,东亚以及大部分北半球中纬度清洁背景地区,近地层 O<sub>3</sub>春 季最高、夏季最低是广泛存在的现象。东亚夏季风的推进过程造成不同地区春季 O<sub>3</sub>月均最大值出现的时间略 有不同,Ogasawara 和 Hedo 站 O<sub>3</sub>浓度在 3 月达最大值,而 Rishiri、Happo、Oki 和 Cheju 站在 4、5 月达最大值。2007 年副热带高压西进较晚且推进过程受阻导致 Happo 站 2007 年春季 O<sub>3</sub>浓度高于气候平均值,Cheju 地区 2007 年5 月 O<sub>3</sub>浓度达最大;2004 年东亚夏季风爆发较早导致 Hedo 站 2004 年春季 O<sub>3</sub>浓度明显低于平均值。 **关键词** 东亚季风 O<sub>3</sub> 季节变化 **文章编号** 1006 - 9585 (2012) 03 - 0303 - 12 **中图分类号** P402 **文献标识码** A doi:10.3878/j.issn.1006 - 9585.2011.10121

## The Impact of East Asia Monsoon's Conversion on the Surface Ozone Spring Maximum in the Northwestern Pacific Region

#### HOU Xuewei, ZHU Bin, and WANG Dongdong

Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract** The regional and seasonal variations of surface  $O_3$  over East Asia from 2002 to 2007 and the reason that the maximum of the  $O_3$  monthly mean values occurred at different time at different sites are analysed by using the data of Acid Deposition Monitoring Network in East Asia, NCEP/NCAR, NOAA, and Global Precipitation Climatology Project. The results showed that the highest value occurred in spring and the lowest occurred in summer over East Asia and most midlatitude clean background areas in the Northern Hemisphere. Because of the East Asian monsoon advancement process the time when the monthly mean value in spring reaches the maximum are slightly different at different sites. AT Ogasawara and Hedo, they reached the highest values in March, while at Rishiri, Happo, Oki, and Cheju, they reached the highest values in April or May. This is mainly because of the push of East Asia summer monsoon. The  $O_3$  concentration is higher than the climate mean in the spring of 2007. This is

**收稿日期** 2010-09-16 收到, 2012-04-06 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 40875078, 国家重点基础研究发展计划 2009CB426313、2010CB428505

作者简介 侯雪伟,女,1986年出生,硕士研究生,主要从事大气化学数值模拟。E-mail: xiaohou@mail.com

通讯作者 朱彬,男,1969年出生,博士,教授,主要从事大气化学和大气环境研究。E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

mainly because of the delay of subtropical high establishing and the block of the pushing. In 2007, the  $O_3$  concentration reached the maximum in May at Cheju. The  $O_3$  concentration in the spring 2004 at Hedo was significantly lower than average because of the earlier establishing of East Asia summer monsoon.

Key words East Asia monsoon,  $O_3$ , seasonal variation

## 1 引言

随着全球经济的发展以及城市规模的不断扩 大,大气环境问题日益突出。对流层 O<sub>3</sub>是一种重 要的温室气体,它吸收红外辐射,影响辐射平衡, 是气候变化需要考虑的因子(秦瑜和赵春生, 2003)。O<sub>3</sub>是一种化学活性气体,在大气光化学反 应中扮演重要角色。东亚地区高浓度的 O<sub>3</sub>显著影 响周围地区的大气环境,并且通过区域和洲际间 的传输影响北半球(Akimoto et al., 1996)。

许多学者对 O<sub>3</sub>的季节变化进行了大量研究, 对于Oa的季节变化特征有了比较明确的结论。东 亚以及大部分北半球中纬度清洁背景地区的观测 表明,近地面 O₃浓度季节变化特征明显: O₃春季 达到最大值, 夏季达最低值 (Pochanart et al., 2002, 2003; Tanimato et al., 2005)。O3春季最高 是由于局地光化学产生 (Penkett and Brice, 1986)、洲际间长距离输送 (Pochanart et al., 2002) 和平流层注入 (Levy et al., 1985; Carmichael et al., 1998; Langford, 1999) 造成的。 但杨健和吕达仁(2004)认为平流层注入对春季 地表 O<sub>3</sub>高值的贡献远小于光化学和洲际输送的贡 献, Kim and Lee (2010) 也认为平流层注入作用 并不是东亚太平洋地区春季 O3 出现高值的主要原 因;夏季最低是由于东亚夏季风输送来低浓度污 染物气团导致的 (Pochanart et al., 2002; Zhu et al., 2004),这种变化对于东亚以及大部分北半 球中纬度清洁背景或沿海地区观测结果是一致的。 我国中东部的临安站(杨关盈等,2008)表现为 春季最高,秋季有次峰值。然而,我国大气本底 站瓦里关(青藏高原东北)(Zhu et al., 2004)的 观测却表现为近地层 O3 夏季最高。

季风是指近地面层冬、夏季盛行风向接近相 反且气候特征明显不同的现象(朱乾根等, 2007)。东亚处于季风区,其范围大致包括我国中 东部、朝鲜半岛、日本等地区。夏季亚洲大陆为 热低压控制,同时太平洋高压西伸北进,以致形成由海洋吹向大陆的偏南风系,即亚洲东部的夏季风。Tanimoto et al. (2005)指出,不同纬度地区 O<sub>3</sub> 春季峰值出现时间差异;Yamaji et al. (2006)指出春季 O<sub>3</sub>峰值出现的时间不同主要由于光化学作用和洲际间的传输;He et al. (2008)指出东亚季风对 O<sub>3</sub>的季节变化具有显著影响。由此可知,东亚季风季节和年际变化与大气化学过程结合对近地层 O<sub>3</sub>分布和输送的季节和年际差异有重要作用。

大量研究已经对东亚地区近地面 O3浓度的季 节变化及出现峰值的可能原因有了综合描述, Tanimoto et al. (2005) 指出 O<sub>3</sub>春季峰值与季风转 换有关,但对于近地面 O<sub>3</sub>的季节和年际变化与东 亚季风的关系,没有明确指出;He et al. (2008) 仅分析 2004~2006 年 3 年,且对于各地区 O<sub>3</sub>峰值 出现时间差异的原因没有探讨。本文将分析 2000 ~2007 年 8 年 O<sub>3</sub>的季节变化,并结合东亚季风的 建立与推进分析 O<sub>3</sub>峰值出现时间差异的原因。由 于对季风转换的认识和理解不同,许多学者从不 同角度使用不同的气象要素定义了各种季风转换 的指标,一般根据季风转换期间的环流场、降水 场、温度场、对流等要素场的突变特征来定义。 一些研究认为盛行风向的变化是季风的本质,侧 重以风向的变化为标准等要素场的突变特征来定 义(王启和丁一汇, 1997; 阎俊岳, 1997; 吴尚 森和梁建茵, 1998); 另一些研究认为强降水是夏 季风建立和开始的重要标志,侧重以降水强度作 为标准(Tao and Chen, 1987; Lau and Yang, 1997; Wang and Lin, 2002)。对于西太平上季风 的转换,本文利用副热带高压的推进、盛行风的 转变和降水量来共同描述。

### 2 数据资料与方法

#### 2.1 数据来源及介绍

研究中采用东亚酸沉降监测网(Acid Deposi-

tion Monitoring Network in East Asia, EANET) 2000~2007 年 O<sub>8</sub> 的月平均浓度值资料(其中 Cheju 站和 Mondy 站为 2002~2007 年)、NCEP/ NCAR 再分析数据集月平均资料中 2000~2007 年 2.5°(纬度)×2.5°(经度)网格点 1000 hPa 风 场和气压资料、NOAA 中心提供的分辨率为 1.75°(纬度)×1.75°(经度)的总云量资料。还 有 2000~2007 年全球降水气候项目(Global Precipiation Climatology Project, GPCP)全球降水 日平均资料,分辨率为 1°(纬度)×1°(经度)。 GPCP 综合了全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Center, GPCC)地面雨量计的 降水观测结果和卫星遥感对降水的反演结果,能 较好地反映出降水的时空分布和变化。

#### 2.2 站点介绍

本研究所选站点均来自EANET。尽量选取 背景站点,避免受局地排放源的影响。Happo站 设在日本中部山区,它能够反映日本中部地区污 染物的变化情况。Rishiri站为沿海测站。4个西 太平洋岛屿测站分别位于韩国的Cheju和日本的 Oki、Hedo及Ogasawara。Cheju和Oki站距陆地 较近,Hedo和Ogasawara站为日本南部太平洋面 上独立的岛屿,距排放源高值地区较远,仅仅受 当地生活排放源的微小影响。俄罗斯的Mondy站 位于亚洲东北偏远内陆区,处于非季风区,其背 景清洁,常被用作北半球陆地背景站(各站点情 况见表1)。

#### 表1 各测站经纬度及海拔高度

 
 Table 1
 Longitude, latitude, and height above sea level of the monitoring sites

测站	经纬度	海拔高度/m
Hedo	(26°52′ N, 128°15′ E)	60
Ogasawara	(27°05′ N, 142°13′ E)	47
Cheju	(33°18′ N, 126°10′ E)	72
Oki	(36°17′ N, 133°11′ E)	90
Happo	(36°42′ N, 137°48′ E)	1850
Rishiri	(45°07′ N, 141°12′ E)	40
Mondy	(51°40′ N, 101°00′ E)	2000

参考 He et al. (2008) 对各类测站的划分,将 本文中测站分为 4 类:清洁季风洋面站 (CMO)、 污染季风洋面站 (PMO)、污染季风内陆站 (PMI)和非季风内陆站(NMI)。Hedo和 Ogasawara可看做是CMO,这主要是因为这两个站点远离大陆地区,受大陆地区污染物排放的直 接影响很小,受季风的影响强烈;Cheju、Oki和 Rishiri站位于强季风区域,但距陆地较近,受大 陆人为排放源的潜在影响,因此将其划分为 PMO;尽管Happo站位于日本的中部地区,但受 季风的影响显著,因此Happo站被定义为PMI; Mondy站位于高纬度地区,受季风的影响很小,人 为污染源较小,可作为NMI。各类站点观测到的近 地面 Q<sub>3</sub>的季节变化存在差异,由此,对来自这些站 点 2000~2007年月平均数据进行系统的分析。

#### 2.3 数据处理及分析方法

为分析 O<sub>3</sub> 8 年平均季节变化特征,对 2000~2007 年各月 O<sub>3</sub>浓度做平均,得到 O<sub>3</sub> 的气候月平均变化。利用 NOAA 的总云量资料来间接表示地表接受的太阳辐射强度,分析光化学 O<sub>3</sub> 产生的强弱。由 NCEP/NCAR 再分析资料 1000 hPa 处的风矢量场、气压场及 GPCP 的降水资料,可以确定季风的建立及推进过程,进而得出季风对不同地区 O<sub>3</sub>浓度变化的影响。引入距平量,以风矢量为例,对 8 年各月风速做平均,每月得到一个平均值,再用 8 年中第 *j* 年第 *i* 月风速减去对应月的平均值即得距平风速,其公式计算为

$$egin{aligned} \delta^u_{i,j} &= u_{i,j} - \overline{u}_i\,,\ \delta^v_{i,j} &= v_{i,j} - \overline{v}_i\,, \end{aligned}$$

其中, $\delta_{i,j}^{v}$ 、 $\delta_{i,j}^{v}$ 分别为第*j*年第*i*月*u*、*v*方向的风 速距平(单位: m·s<sup>-1</sup>), $u_{i,j}$ 、 $v_{i,j}$ 分别为第*j*年 第*i*月*u*、*v*方向风速。

$$\overline{u}_{i} = \sum_{j=1}^{8} u_{i,j}, (i = 1, 2, \dots, 12)$$
$$\overline{v}_{i} = \sum_{j=1}^{8} v_{i,j}, (i = 1, 2, \dots, 12)$$

分别为8年第*i*月*u、v*方向的平均风速,亦称气候平均风速,该值反映的是第*j*年第*i*月相对于8年平均的距平,表征该月盛行风的强弱程度。

## 3 结果分析与讨论

#### 3.1 O<sub>3</sub>的季节变化特征

由图1所示,低纬 Ogasawara、Hedo 站和中 纬 Cheju、Oki、Happo 站及高纬 Rishiri 站均显示



图 1 2000~2007 年各测站 O3体积分数 (a、b、c、d) 月均值及 (e、f、g、h) 气候月均值

Fig. 1 The (a, b, c, d) monthly and (e, f, g, h) climatological volumetric mixing ratio of O<sub>3</sub> at monitoring sites from 2000 to 2007

2000~2007年近地面 O3浓度季节变化明显且规律 性较强:冬季(12月至次年2月)地面O<sub>3</sub>浓度月 均值较小,春季(3~5月)达到最高,夏季(6 ~8月)为最低值;中高纬 Cheju、Oki、Happo 及 Rishiri 站秋季出现次峰,其中 Cheju 站次峰较 明显,8年中各月的平均变化也是如此。不同地 区 O<sub>3</sub>呈现一致的季节变化规律,主要是由于季风 输送、区域和局地光化学反应,平流层注入可能 有一定贡献。整体来讲,中高纬测站(Cheju、 Oki、Happo、Rishiri)的 O<sub>3</sub>浓度比低纬站 (Ogasawara、Hedo) 高,夏季低纬站 O3 值尤其 低,较中高纬站低约 20×10<sup>-9</sup>,主要因为低纬站 (Ogasawara、Hedo) 位于日本远海地区, 周围污 染物浓度较低,受人为因素的影响很小。中高纬 测站中, Happo 站为日本的内陆站, 受区域污染 物排放的影响较大,使得 Happo 站 O<sub>3</sub>浓度明显高 于 3 个海洋站 (Cheju、Oki、Rishiri)。Oki、 Rishiri站位于日本沿海地区,一面是开阔的海面, 一面是日本内陆区,其上风向为陆地时受人为污 染源的影响;上风向为清洁海面时,受人为污染 影响小。

位于西伯利亚中部的 Mondy 站处于非季风 区,与季风区测站不同的是,Mondy 站  $O_a$ 的季节 变化幅度较小,夏季低值与秋季、冬季值相差不 大。由于 Mondy 位于高纬度地区,温度较低,太 阳辐射较弱, $O_a$ 生命期较长,可经长距离输送将 欧洲、北美地区的  $O_a$ 输送到 Mondy 站。这种输 送作用对  $O_a$ 的贡献在春季最强(Wild et al., 2004),使 Mondy 站  $O_a$ 浓度春季最高;尽管夏季 条件(温度较高、太阳辐射较强)适宜光化学反 应,但  $O_a$ 的汇增强,如地表沉降、大量活跃的植 物,从而导致  $O_a$ 夏季最低(Pochanart et al., 2003)。 由图 1 可见, Ogasawara 和 Hedo 站 O<sub>3</sub>浓度 均在 3 月达最大值, 而 Cheju、Oki 、Happo 和 Rishiri 站基本在 4、5 月达最大, 与 Tanimoto et al. (2005)的结论一致。结合各测站地理位置, 发现西太平洋沿岸地区 O<sub>3</sub>浓度最大值存在明显的 纬度梯度:低纬 (20°N~30°N)地区 O<sub>3</sub>最大值出 现在 3 月,中高纬 (30°N~50°N)地区 O<sub>3</sub>最大值 出现在 4、5 月。

3 期

No. 3

### 3.2 东亚季风转换对 O<sub>3</sub>最大值出现时间差异的 影响

根据测站分类,在每类测站中选取一个,如 CMO 类测站选取日本的 Ogasawara 站,PMI 类 测站选取日本的 Happo 站,PMO 类测站选取韩国 的 Cheju 站,同时为了对比季风区和非季风区 O<sub>3</sub> 的变化,选取属于 NMI 类的 Mondy 测站。O<sub>3</sub>为 二次污染物,分析其浓度随时间的变化时,本节 综合考虑季风的输送及光化学反应条件对 O<sub>3</sub>的作 用,并用总云量来间接衡量太阳辐射强度。有研 究者认为平流层注入对东亚春季近地面 O<sub>3</sub>有不可 忽视的影响,本节还简要讨论了其可能贡献。

就气候平均而言,3月(如图 2a1、a2),大 陆增暖较快,蒙古冷高压减弱并西移,阿留申低 压东移,但这两个系统仍然影响东亚地区,东亚 大部分地区仍然盛行冬季风。但在(30°N, 150° E) 附近盛行风向发生转变,由东北风转变为东南 风。从降水图中也可看出在(30°N, 150°E)附近 降水较强,这可以说明副热带高压开始西进增强, 西太平洋上季风开始转换。此时 Ogasawara 站主 要风向为西北风,风速较大,有利于污染物的长 距离输送,其上风向地区为受人为污染的东亚大 陆和日本,将大陆性的污染物输送到 Ogasawara 地区。此时 Ogasawara 站总云量较大,约75%, 地表太阳辐射弱,无局地源,不利于局地 O<sub>3</sub>的光 化学产生(肖辉等, 1999)。其上风向地区总云量 较少, 地表太阳辐射较 Ogasawara 站略强, 且各 类一次污染物浓度高,有利于 O<sub>3</sub>的光化学产生。 可以推论,季风将上风向产生的高浓度 O<sub>3</sub>输送到 Ogasawara 地区。Cheju 地区在3月受强大的西北 风的影响,其上风向为渤海海面,此时 Cheju 地 区总云量(约55%)较少,但3月Cheju地区太 阳高度角较小,总的太阳辐射较4、5月弱,导致 O3的光化学产生比4、5月弱。Happo地区的上风 向为较清洁的日本海海面,污染物浓度较低,在 强西北风的作用下,清洁的海洋气团取代 Happo 地区的局地气团,从而使 Happo 地区 O<sub>3</sub>浓度 较低。

4月(如图2b1和b2所示),蒙古高压进一步 减弱西移,阿留申低压进一步东移。在中国东北 地区开始出现一个低压,华南地区开始出现偏南 风,西太平洋沿岸 30°N 以北地区风向转变为西南 风。24°N~30°N间出现强降水带,副热带季风已 经北移西进。此时 Ogasawara 地区位于副热带高 压的脊线附近,风向转变为南风,其上风向为广 阔清洁的太平洋海面,各类污染物浓度较低。与3 月相比,其背景浓度清洁,从而使 Ogasawara 地 区 O<sub>3</sub>浓度在 4 月低于 3 月;此时 Cheju 地区位于 西太平洋高压脊的北侧,有弱的气旋,风速较小, 有利于污染物的积聚,同样太阳辐射的增强及积 聚的前体物使该地区 O<sub>3</sub>浓度高于 3 月。Happo 地 区在4月风向转变为西南风,上风向地区为日本 本土南部的工业区,污染物浓度较高,并且与3 月相比,总云量无明显增多,而4月太阳辐射强 于3月,有利于O<sub>3</sub>的光化学产生,使Happo地区 O₃浓度增大。

5月(如图 2c1、c2),蒙古冷高压消退,阿 留申低压退出东亚地区,中国东北地区维持着一 个低压。副热带高压进一步向西推进,其脊线为 图 2c1 中粗实线,降水带向西推进,范围和强度 均加大。由风向图可以看出,西北太平洋沿岸地 区风向基本都已转变为夏季风,盛行风向为偏南 风。此时 Ogasawara 地区为偏南风, 使 5 月 O<sub>3</sub>浓 度低于3月;虽然 Cheju 地区 O<sub>3</sub>浓度从气候平均 值来看是5月最高,但6年中5月最高的年份只 有2007年,从气候平均风场可以看出,4、5月风 场有利于污染物的积累,而3月风速较大,有利 于污染物扩散稀释,且太阳辐射较弱,不利于 O<sub>3</sub> 的产生,所以 Cheju 地区 4、5 月 O<sub>3</sub>浓度比 3 月 高。Happo 地区风向转变为南风, 上风向为清洁 海面,污染物浓度低,从而使 Happo 地区 5 月 O<sub>3</sub> 浓度低于4月。

东亚西太平洋沿岸地区 O<sub>3</sub>峰值出现时间受季 风转换的影响显著。Mondy 站虽然位于内陆地 区,但该地区及背景地区人为活动少,污染物排 放很少,属于非季风区清洁背景内陆站。由图 2



图 2 东亚地区 (a1、a2) 3 月、(b1、b2) 4 月、(c1、c2) 5 月 1000 hPa 气候平均风 (左列矢量)、位势高度 (左列等值线,单位: gpm)、地表平均降水量 (右列阴影)、总云量 (右列等值线) (c1 中粗实线为脊线)

Fig. 2 The climatological wind (vectors in left panel), geopotential height (contours in left panel, units: gpm), surface precipitation (shadings in right panel) and total cloud cover (contours in right panel) in (a1, a2) Mar, (b1, b2) Apr, and (c1, c2) May over East Asia (thick solid line in (c1) denotes the ridge line)

可以看出,3、4、5月 Mondy 地区风向风速基本 无变化,而该地的 O<sub>3</sub>浓度在5月达最大,这说明 Mondy 地区春季 O<sub>3</sub>峰值受季风转变的影响较小。

Carmichael et al. (1998)和 Langford (1999) 分别指出,平流层一对流层交换作用(Stratosphere - Troposphere Exchange, STE)与位势涡 度和高空急流有关,位势涡度和高空急流的位置 及强度对近地面 O<sub>3</sub>的季节变化有影响。因此,我 们计算了位势涡度及 200 hPa(对流层顶附近)处 的风速和急流。2000~2007年位势涡度均显示南 低北高,且多年 3~5月纬向分布差异不大,显示 不出位势涡度与近地面 O<sub>3</sub>季节变化的关系(图 略);由 200 hPa 处风场和急流图可以看出,多年 3~4月急流核在西北太平洋地区纬向分布变化不 大,其中变化最大的是 2004年,但4月急流核位 置只比 3月向北移动约4°,5月急流核位置与4月 基本相同,说明 STE 过程可能对西太平洋春季近 地面 O<sub>3</sub>季节变化有一定影响,但估计贡献有限, 其影响程度有待进一步研究。

#### 3.3 东亚季风年际变化对 O<sub>3</sub>的影响

季风区内的各测站(Hedo、Ogasawara、 Cheju、Oki、Happo和Rishiri)O<sub>3</sub>浓度距平随时 间有较大波动(如图3),Happo站O<sub>3</sub>浓度在 2007年春季偏离平均值较大,达10×10<sup>-9</sup>;Hedo站2004年春季O<sub>3</sub>浓度偏离气候平均值约-15 ×10<sup>-9</sup>;Cheju站2003年春季O<sub>3</sub>偏离气候平均值 约-15×10<sup>-9</sup>,2007年5月O<sub>3</sub>浓度高于气候平均 值约12×10<sup>-9</sup>。处于非季风区的Mondy站,O<sub>3</sub> 浓度距平随时间变化波动较小,特别是春季,偏 差基本维持在0附近。对比季风区和非季风区O<sub>3</sub>的距平变化,可以得出季风对O<sub>3</sub>的季节变化的影 响作用明显。

Happo站 2007 年春季 O<sub>3</sub>浓度相对于气候平 均值偏大。由图 4 可以看出,2007 年 3 月 Happo 站盛行西北风,此时距平风风向为东北风,说明 2007 年 3 月 Happo 站盛行风较弱。与气候平均气



图 3 2000~2007 年各测站 O3浓度距平的季节变化

Fig. 3 The seasonal variations of the  $O_3$  concentration departure at the monitoring sites from 2000 to 2007



图 4 东亚地区 2007 年 (a1、a2) 3 月、(b1、b2) 4 月、(c1、c2) 5 月 1000 hPa 平均风(左列矢量)、位势高度(左列等值线,单位: gpm)和 1000 hPa 距平风(右列矢量)、地表平均降水量(右列阴影)(c1 中粗实线为脊线)

Fig. 4 The monthly wind at the height of 1000 hPa (vectors in left panel), geopotential height (contours in left panel, units: gpm), departure of wind vectors at the height of 1000 hPa (vectors in right panel) and surface precipitation (shadings in right panel) in (a1, a2) Mar, (b1, b2) Apr, and (c1, c2) May 2007 over East Asia (thick solid line in (c1) denotes the ridge line) 压场相比,此时阿留申低压较强,即2007年3月 阿留申低压消退较慢。气候平均图(图 2a1)中3 月在太平洋海面已经有风向的明显转变,而 2007 年3月(图4a1)没有出现风向的转变,2007年3 月(图 4a2)的降水也较弱,由此说明,2007 年 3 月副高没有向西推进,西太平洋上季风没有转换。 4月,东北地区低压开始形成,但强度不大。 Happo 地区盛行西风, 距平风风向仍为东北风, 说明 2007 年 4 月的盛行风也很弱。在 (30°N, 150°E)附近盛行风向开始发生转变,在(30°N, 150°E)附近开始出现强降水,说明 2007 年 4 月 副热带高压开始西进,西太平洋上季风开始转换。 5月,东北低压较强,影响范围较广,在低压前 部,压制副热带高压的推进,使 Happo 地区盛行 风向为西南风。在(30°N, 150°E)附近的降水进 一步增强,且延伸至(20°N,135°E)附近,表明 副热带高压向西推进;由于东北低压的抑制,副 高北移受阻,其脊线位于 24°N~27°N 间(图 4c1 中的粗实线),比8年平均图中副热带高压脊线偏 南。由此可以得出,2007年副热带高压西进较 晚,且在向北推进时受阻,从而导致 Happo 地区 在3、4、5月均盛行偏西风。由图5中可以看出, 2007 年 3、4、5 月距平总云量为负值,即 2007 年 春季总云量均低于气候平均值, 使 2007 年春季地 表接受到的太阳辐射比气候平均强。上风向的污 染物输送到 Happo 地区,在强太阳辐射的作用 下,产生高浓度 O₃,使 Happo 地区 2007 年春季 O₃浓度高于气候平均值。

Cheiu 站观测到 O<sub>3</sub> 干 2007 年 5 月达到峰值, 与历年4月达峰值不同,而且峰值比历年高。由 2007年3月的风矢量图(图4)可以看出, Cheju 地区位于蒙古冷高压的东南侧,盛行西北风。此 时距平风矢量为东南风,说明此时盛行风较弱, 但其上风向为渤海海面,污染物浓度相对于陆地 人为污染区较小。4月, Cheju 地区仍然盛行西北 风,且位于气旋的边缘区域,有利于污染物向气 旋中心辐合。5月,Cheju地区位于副热带高压的 西北侧,盛行西南风,距平风矢量为西南风。这 说明,此时 Cheju 地区盛行的西南风相对于气候 平均风来说较强,其上风向为中国发展比较迅速 的长江三角洲地区,长江三角洲存在大的污染源, 各类污染物浓度比较高,并且图 5 中 2007 年春季 Cheju 及其上风向地区距平总云量为负值,约为 -15%,即2007年春季总云量低于气候平均,这 说明 2007 年春季地表接受到的太阳辐射强。强的 输送作用和光化学反应最终使 Cheju 在 2007 年 5 月产生较大的 O<sub>3</sub>峰值。

2004 年春季 Hedo 地区 O<sub>3</sub>浓度明显低于气候 平均值。分析 2004 年春季副热带高压的推进过程 (如图 6),发现 2004 年 3 月副高在(30°N,140°E) 附近西进,4 月副高向西有大幅度推进,5 月副高 又退至西太平洋地区,说明 2004 年副高西进较早 且强度大,在4 月有向西的强推进。由于副高西 进较早,Hedo 地区在3 月盛行偏东风。由距平风 可以看出此时的盛行风较强,在4、5 月盛行风进 一步加强,风向顺时针旋转至南风,从而导致



图 5 东亚地区 2007 年 (a) 3 月和 (b) 4 月距平总云量

Fig. 5 The departure of total could cover in (a) Mar and (b) Apr 2007 over East Asia



图 6 东亚地区 2004 年 (a) 3 月、(b) 4 月、(c) 5 月 1000 hPa 平均风 (矢量)、位势高度 (等值线,单位:gpm)和 (d) 3 月 1000 hPa 距平风 (矢量)、地表平均降水量 (阴影)

Fig. 6 The monthly wind vectors at the height of 1000 hPa (vectors, geopotential height (contours, units: gpm) in (a) Mar, (b) Apr, and (c) May of 2004, and (d) departure of wind vectors at the height of 1000 hPa (vectors) and surface precipitation (shadings) in Mar 2004 over East Asia

2004 年春季 Hedo 地区 O<sub>3</sub>浓度明显低于气候平均 值。春季 STE 过程对近地面 O<sub>3</sub>有一定影响,而副 热带急流位置和强度可以定性表征其影响强度 (Langford, 1999)。为此,分析了 200 hPa (对流 层顶附近)风场和风速 (如图 7),发现 2004 年急 流核位置比 2003 年 (正常年)偏北约 2°,这说明 2004 年 3 月,较低纬的 Hedo 站近地面 O<sub>3</sub>可能受 STE 的影响较 2003 年弱,即 STE 过程可能也是 影响西北太平洋近地面 O<sub>3</sub>的因子之一,但估计不 是主要因子,还需大气化学模式进一步的评估。

### 4 结论

(1) 低纬 (Ogasawara、Hedo)、中纬 (Hap-

po、Cheju、Oki)及高纬(Rishiri)站均显示O<sub>3</sub>浓度春季最高、夏季最低的季节变化特征,中高 纬站秋季出现一次峰,其中Cheju站次峰明显。 中高纬测站O<sub>3</sub>浓度比低纬站高,夏季低纬站O<sub>3</sub>值 尤其低;中高纬站中内陆站(Happo)O<sub>3</sub>浓度值 最高。

(2)副热带高压的推进过程造成不同地区春季 O<sub>3</sub>浓度最大值的出现月份略有不同,Ogasawara 和 Hedo 站 O<sub>3</sub>浓度在 3 月达最大值,而 Rishiri、 Happo、Oki 和 Cheju 站在 4 月达最大值;相比不 受季风转换影响的亚洲内陆 Mondy 站 O<sub>3</sub>浓度在 5 月达最大值。

(3) Happo 地区 2007 年春季 O<sub>3</sub>浓度高于气候平均值,主要是由于 2007 年副热带高压西进较

3期

No. 3



图 7 东亚地区 (a) 2003 年 3 月和 2004 年 (b) 3 月、(c) 4 月、(d) 5 月 200 hPa 平均风 (矢量) 和急流 (阴影, >30 m • s<sup>-1</sup>) Fig. 7 The monthly wind vectors at the height of 200 hPa (vectors) and jet (shadings, >30 m • s<sup>-1</sup>) in (a) Mar 2003 and (b) Mar, (c) Apr, and (d) May of 2004 over East Asia

晚且推进过程受东北低压抑制所造成; Cheju 地区 O<sub>3</sub>浓度在 2007 年 5 月达峰值且峰值较大, 主要是 强的季风输送作用及光化学反应造成; Hedo 地区 2004 年春季 O<sub>3</sub>浓度明显低于平均值, 是由于 2004 年副热带高压推进较早且 4 月有大幅度推进 所造成。

(4) 春季平流层一对流层交换(STE) 对西 北太平洋近地面 O<sub>3</sub>有一定影响,但估计不是主要 因子,尚需进一步确认。

**致谢** 感谢东亚酸沉降网(EANET)提供的 O<sub>8</sub> 观测数 据; NECP/NCAR 提供的风场及气压场资料;全球降水气 候项目(GPCP)提供的降水资料; NOAA 提供的总云量 资料。感谢黄乾的热心帮助!感谢审稿人及编辑提供的宝 贵意见!

#### 参考文献 (References)

- Akimoto H, Mukai H, Nishikawa M, et al. 1996. Long-range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region [J]. J. Geophys. Res., 101 (D1): 1999-2010.
- Carmichael G R, Uno I, Phadnis M J, et al. 1998. Tropospheric ozone production and transport in the springtime in East Asia [J]. J. Geophys. Res., 103: 10649-10671.
- He Y J, Uno I, Wang Z F, et al. 2008. Significant impact of the East Asia monsoon on ozone seasonal behavior in the boundary layer of Eastern China and the west Pacific region [J]. Atmos. Chem. Phys., 8: 7543-7555.
- Kim J H, Lee H. 2010. What causes the springtime tropospheric ozone maximum over Northeast Asia? [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (3): 543-551.

Langford A O. 1999. Stratosphere - troposphere exchange at the

subtropical jet: Contribution to the tropospheric ozone budget at midlatitudes [J]. Geophys. Res. Lett., 26 (16): 2449-2452.

- Lau K M, Yang S. 1997. Climatology and interannual variability of the southeast Asian summer monsoon [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 14 (2): 141-162.
- Levy H II, Mahlman J D, Moxim W J, et al. 1985. Tropospheric ozone: The role of transport [J]. J. Geophys. Res., 90: 3735 – 3772.
- Penkett S A, Brice K A. 1986. The spring maximum in photo-oxidants in the Northern Hemisphere troposphere [J]. Nature, 319: 655-658.
- Pochanart P, Akimoto H, Kinjo K, et al. 2002. Surface ozone at four remote island sites and the preliminary assessment of the exceedances of its critical level in Japan [J]. Atmos. Environ., 36: 4235-4250.
- Pochanart P, Akiomoto H, Kajii Y, et al. 2003. Regional background ozone and carbon monoxide variations in remote Siberia/ East Asia [J]. J. Geophys. Res. , 108 (4028): 1–17.
- 秦瑜,赵春生. 2003. 大气化学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 74 - 77. Qin Yu, Zhao Chunsheng. 2003. The Basis of Atmospheric Chemistry [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 74-77.
- Tanimato H, Sawa Y, Matsueda H, et al. 2005. Significant latitudinal gradient in the surface ozone spring maximum over East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L21805, doi: 10.1029/ 2005GL023514.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A Review of Recent Research on East Summer Monsoon in China [M] // Chang C P, Krishramurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60 – 92.
- Wang B, Lin H. 2002. Rainy season of the Asian Pacific summer monsoon [J]. J. Climate, 15: 386 – 398.
- 王启,丁一汇. 1997. 南海夏季风演变的气候学特征 [J]. 气象学 报,55:466-438. Wang Qi, Ding Yihui. 1997. Climatological aspects of evolution of summer monsoon over the northern South China Sea [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (4): 466-438.
- Wild O, Pochanart P, Akimoto H. 2004. Trans Eurasian transport of ozone and its precursors [J]. J. Geophys. Res., 109:

D11302, doi: 10.1029/2003JD004501.

- 吴尚森,梁建茵. 1998. 南海西沙地区季风季节变化的气候特征 [J]. 大气科学, 22 (5): 771 - 778. Wu Shangsen, Liang Jianyin. 1998. Seasonal evolution of climatic characteristics of summer monsoon over Xisha area [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22 (5): 771 - 778.
- 肖辉,朱彬,黄美元,等. 1999. 云对云中大气臭氧影响因子的分析 [J]. 气候与环境研究,4 (3): 259 266. Xiao Hui, Zhu Bin, Huang Meiyuan, et al. 1999. Numerical study of the impact of clouds on atmospheric ozone [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (3): 259 266.
- Yamaji K, Ohara T, Uno I, et al. 2006. Analysis of the seasonal variation of ozone in the boundary layer in East Asia using the Community Multi-scale Air Quality model: What controls surface ozone levels over Japan? [J]. Atmos. Environ., 40 (10): 1856 – 1868.
- 阎俊岳. 1997. 南海西南季风爆发的气候特征 [J]. 气象学报, 55: 174-186. Yan Junyue. 1997. Climatological characteristics on the onset of the South China Sea southwest monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (2): 174-186.
- 杨关盈,樊曙先,汤洁,等. 2008 临安近地面臭氧变化特征分析 [J]. 环境科学研究, 20 (3): 21-35. Yang Guangying, Fan Shuxian, Tang Jie, et al. 2008. Characteristic of surface ozone concentrations at Lin'an [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 21 (3): 31-35
- 杨健, 吕达仁. 2004. 东亚地区平流层、对流层交换对臭氧分布影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 28 (4): 579 589. Yang Jian, Lü Daren. Simulation of stratosphere – troposphere exchange effecting on the distribution of ozone over eastern Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (4): 579 – 588, 644.
- Zhu B, Akimoto H, Wang Z F, et al. 2004. Why does surface ozone peak in summertime at Waliguan? [J]. Geophys. Res. Lett., 31: L17104, doi:10.1029/2004GL020609.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2007. 天气学原理和方法 [M]. 气 象出版社,565-586. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Weather Principles and Methods (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press,565-586.