

龙凤山和瓦里关臭氧总量异常变化 与天气过程关系研究

涂小林¹ 郑向东² 赵春生^{1,†}

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

†通信作者, E-mail: zcs@pku.edu.cn

摘要 通过对黑龙江龙凤山和青海瓦里关 Brewer 地基臭氧总量的长期观测资料以及与观测时段对应的全球 NCEP R1 系列位势高度再分析资料的统计分析发现, 龙凤山和瓦里关臭氧总量观测值有时存在剧烈的逐日变化, 对这种异常变化进行定量分析, 并对其与对流层天气过程的关系进行研究, 发现两者之间存在良好的对应关系。臭氧总量的异常变化大多数出现在 11 月至次年 5 月的冬、春季节, 并且臭氧总量的异常升高(第一类异值点)总是伴随着平流层低层(250~70 hPa)的槽线和地面(1000 hPa)的低压中心后方的天气形势, 而臭氧总量的异常降低(第二类异值点)则时常伴随平流层低层的脊线和地面的高压中心后方的天气形势, 这表明臭氧总量的异常变化可以作为地面天气系统转变的一个信号。

关键词 臭氧总量; 异值点; 天气过程; 对应关系

中图分类号 P402

Variations in Total Ozone Observed at Longfengshan and Waliguan and Its Relationship with Synoptic Process

TU Xiaolin¹, ZHENG Xiangdong², ZHAO Chunsheng^{1,†}

1. Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081; † Corresponding author, E-mail: zcs@pku.edu.cn

Abstract Longtime in-situ measurements of total ozone from the ground-based Brewer observatories at Longfengshan in Heilongjiang Province and Waliguan in Qinghai Province were analyzed together with the according geopotential height data from NCEP R1 reanalysis series. Abnormal day-to-day fluctuations in the total ozone amount were found at times, which were analyzed in respect to synoptic processes. Results show that the impact of synoptic conditions is highly related to the variation of the total ozone amount. The anomaly in total ozone amount mostly appears in winter and spring (from November to May in the following year). The abnormal high total ozone amounts (the first kind of abnormal data points) always occur when the station is at the rear of the near surface (1000 hPa) cyclone with a simultaneous air pressure trough approaching in lower stratosphere (250 to 70 hPa). The abnormal low total ozone amounts (the second kind of abnormal points) always occur when the station is behind a near surface anticyclone with a simultaneous air pressure ridges approaching in lower stratosphere. The anomaly in total ozone amount can be considered as a signal for the upcoming transition between near surface cyclone and anticyclone.

Key words total ozone; abnormal points; synoptic process; corresponding relationship

臭氧是大气中一种重要的微量成分, 主要分布在 10~50 km 高度的平流层, 可以保护地球生物免遭紫外线 B (ultraviolet radiation B, UVB)和紫外线 C (ultraviolet radiation C, UVC)辐射的影响。自从 1985 年 Farman 等^[1]在哈雷湾站观测到“南极臭氧空洞”以来, 全球臭氧总量的观测研究越来越受到重视^[2]。近年来, 大气中臭氧含量的变化及其可能导致的气候和环境变化引起广泛关注^[3], 大气中的臭氧含量变化的研究已成为备受关注的国际性课题。

早在 20 世纪 20 年代利用 Dobson 仪器进行的臭氧总量观测中, 人们就发现臭氧总量的观测值存在明显的逐日波动, 并且与高空天气系统的变化联系紧密^[4]。从全球臭氧总量观测结果^[5]可以看出, 这种逐日变化在冬季和春季达到最大值; 而在同一季节, 高纬度地区的逐日变化高于低纬度地区。臭氧总量的逐日变化不仅与其振幅相关, 同时也与大气中各种气象要素的变化有密切联系。

Dobson 等^[6]研究发现, 臭氧总量的日均值与当月臭氧总量月均值的最大正偏差总是出现在地面低压后方, 而最大负偏差总是出现在地面高压后方。Tonsberg 等^[7]通过进一步研究认为, 地面冷锋是臭氧正负偏差的分界线。Reed^[8]总结了平流层水平输送和大气垂直运动的共同作用对臭氧总量短期变化的影响。Schubert 等^[9]认为对流层顶的变化也会对臭氧总量的短期变化产生影响, 他们通过实际观测资料分析对流层顶高度变化与臭氧总量的关系, 发现对流层顶高度的抬升会导致大气臭氧总量的降低, 其相关系数在 0.12~0.87 之间变化。20 世纪 90 年代初, Vaughan 等^[10]首次从理论上推导臭氧总量与对流层顶位势涡度之间的正相关关系, 认为对流层顶以上至少一半的臭氧含量变化来源于对流层顶位势涡度的变化, 并且利用全球 TOMS (total ozone mapping spectrophotometer)资料证实了这一点。

我国臭氧总量的地基观测最早可追溯到 20 世纪 30 年代。1938 年严济慈在当时的国立北平物理研究院, 购置我国第一台 Dobson 臭氧光谱仪, 开展臭氧总量观测。但是, 直到 1979 年以后, 才在中

国科学院大气物理研究所河北香河站利用 Dobson 臭氧光谱仪开展臭氧总量定期观测业务。1990 年前后, 先后在青海瓦里关和黑龙江龙凤山站等地建立自动化程度比较高的 Brewer 光谱仪, 开展臭氧总量观测。国内对臭氧总量变化与天气过程的关系研究比较少, 但是从卫星反演数据上已经发现臭氧总量的变化与大尺度极地气团及热带气团的移动有密切联系^[11]。在探空观测臭氧垂直分布的变化方面, 也注意到上对流层至下平流层高度范围内的臭氧与气象要素的变化有密切的联系^[12]。

本文基于龙凤山和瓦里关大气本底监测站 Brewer 臭氧总量长期观测数据, 并结合相应时间段的 NCEP (national centers for environmental prediction) 再分析资料, 统计分析臭氧总量短期内异常变化的特征及其与对流层天气过程之间的关系, 为认识臭氧总量与天气系统的关系提供依据, 为天气预报提供一种新思路。

1 仪器和数据

龙凤山和瓦里关臭氧总量资料来自 Brewer 臭氧分光光谱仪的长期连续观测反演, 观测资料长度和仪器信息见表 1。Brewer 臭氧分光光谱仪是世界气象组织(WMO)推荐使用的测量大气臭氧总量和臭氧垂直廓线分布的仪器, 通过测量太阳直射光、天顶光和月光, 得到逐日大气臭氧总量, 工作原理见文献[13]。在长期观测中, 通过定期与传递标准仪器 Brewer#017 进行校准以及对仪器进行波长校准、标准灯测试等性能检测, 保证观测数据质量。2000—2006 年 9 月, 由于衍射光栅出现擦痕, 导致仪器 Brewer#076 灵敏度在在大气质量数大于 2.5 时明显下降, 因此, 本文在统计分析该时段的臭氧总量时剔除了这一类数据^[14]。

本文使用美国国家环境预报中心(NCEP)的全球大气再分析资料, 分析臭氧异常变化时段对应的高空天气形势。NCEP R1 (national centers for environmental prediction reanalysis 1)系列再分析资料格距为 2.5°×2.5°, 在水平方向上覆盖 0°—357.5°E,

表 1 两个站点的基本信息
Table 1 Basic information on the two sites

| 站点 | 站点号 | 位置 | 海拔/m | 仪器 | 数据长度 |
|-----|--------|------------------|------|------------|------------------------|
| 龙凤山 | STN326 | 44.73°N, 127.6°E | 331 | Brewer#076 | 1993 年 7 月—2010 年 12 月 |
| 瓦里关 | STN295 | 36.29°N, 100.9°E | 3816 | Brewer#054 | 1991 年 8 月—2010 年 12 月 |

90°N—90°S 地区共 144×73 个格点, 在垂直方向上分为 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa 共 17 层。NCEP 再分析资料提供气温、位势高度、相对湿度、风速、风向等大气环境参数, 一般认为 NCEP 资料对于中国区域的研究是比较可靠的^[15-16]。

2 臭氧总量统计特征及异值点定义

龙凤山和瓦里关臭氧总量数据最小观测时间间隔为 10 分钟, 每一天的不同时刻有多个臭氧总量观测数据。在处理数据的过程中, 我们将臭氧总量数据按日期整理为日平均数据。由于恶劣天气条件以及观测仪器临时调出等原因, 两站观测数据有一定的缺测。将多年日平均数据逐月平均, 得到臭氧总量季节变化。为了得到臭氧总量年际变化, 首先将臭氧总量逐年逐月平均得到各年的月平均数据, 然后通过插值补齐臭氧总量缺测的月平均数据, 最后逐年将插值后各年的月平均数据再平均得到臭氧总量的年际变化。

图 1 为龙凤山和瓦里关臭氧总量的季节变化和年际变化特征, 可以明显地看出, 龙凤山和瓦里关臭氧总量呈现相似的冬春高而夏秋低的季节变化特征, 两地臭氧总量均是 12 月至次年 4 月含量较高, 5 月臭氧总量开始降低, 8, 9 月到达最低值, 之后又逐渐上升, 总体呈现类似正弦函数的季节变化, 出现一峰一谷。两个站点这种相似的季节变化规律, 反映全球尺度 Brewer-Dobson 环流的变化对平流层臭氧分布的影响。

龙凤山臭氧总量年平均值约为 360 DU (Dobson Unit), 3 月达到最高值, 约为 430 DU, 8 月达到最低值, 约为 310 DU, 平均年变化约为 120 DU。瓦里关臭氧总量年平均值约为 290 DU, 最高值出现在 3 月, 约为 320 DU, 最低值出现在 9 月, 约为 270 DU, 平均年变化约为 50 DU。从年际变化来看, 龙凤山臭氧总量 1993—2001 年变化不大, 而从 2003 年开始, 臭氧总量有明显的回升趋势, 平均变化速率约为每年 2%, 到 2010 年, 臭氧总量年平均值达到最大, 约为 383 DU, 基本上与 20 世纪 80 年代初期持平^[14]。瓦里关臭氧总量变化不大, 拟合结果表明, 2001—2010 年, 臭氧总量有小幅回升, 平均增幅约为每年 0.4%。北半球臭氧总量从 20 世纪末开始逐渐回升的信号^[17]在龙凤山和瓦里关均得到不同程度的体现。

在龙凤山和瓦里关 Brewer 臭氧总量观测中, 逐日变化较为明显。定义当日臭氧总量的平均值与前一日之差的绝对值大于某一临界值 R 的日期为臭氧总量异值点。为使异值点的臭氧变化能够代表臭氧总量短期的异常大幅度变化, 我们取 R 值超过臭氧总量年平均值 10%, 龙凤山和瓦里关臭氧总量的年平均值分别为 360 DU 左右和 290 DU 左右, 因此龙凤山取 R 值为 40 DU, 瓦里关取 R 值为 30 DU。由于大气中臭氧主要存在于平流层, 对流层臭氧含量仅占臭氧总量的 10% 左右, 臭氧总量的逐日变化主要产生于 5~20 km 高空^[5], 而我们选取的 R 值高于整个对流层的臭氧含量, 因此可以认为异值点臭氧变化主要来自平流层低层。根据臭氧总量的增加或减少, 我们将所有的异值点分为两类: 臭氧总量增加的异值点为第一类异值点, 臭氧总量减少的异值点为第二类异值点。

3 臭氧总量异值点统计特征分析及其解释

根据龙凤山和瓦里关异值点的定义, 我们利用龙凤山和瓦里关臭氧总量的日平均数据, 逐月统计臭氧总量日平均值与前一日之差的绝对值分别超过 40 和 30 DU 的两类异值点数量及所占比例。图 2 显示龙凤山和瓦里关臭氧总量异值点的季节分布特征, 上图表示各月份异值点的绝对数量, 下图表示各月份异值点所占的百分比。值得注意的是, 由于两个站点的臭氧总量观测数据都有一定程度的缺测, 因而各月份的总天数有所差别。从图 2 可以明显地看出, 龙凤山和瓦里关臭氧总量异值点分布呈现相似的特征, 总体上两个站点的异值点在冬半年分布较多, 而在夏半年分布较少, 出现异值点最多的月份均为冬春交接的 2—3 月。在龙凤山站, 两类异值点均主要分布在 11 月至次年 5 月, 6—10 月异值点分布很少; 在瓦里关站, 两类异值点均主要分布在 12 月至次年 4 月, 5—11 月异值点分布很少, 甚至几乎没有。

影响臭氧柱总量的因子很多^[9], 主要包括以下方面: 1) 影响 20 km 高空以上的臭氧含量的因子, 主要是冬春季来自产生臭氧的热带源区的输送和冬季极涡的移动, 这种影响主要表现为季节尺度上的变化; 2) 影响对流层顶至平流层低层臭氧含量的因子, 主要是大气扰动, 这种影响主要表现为在天气

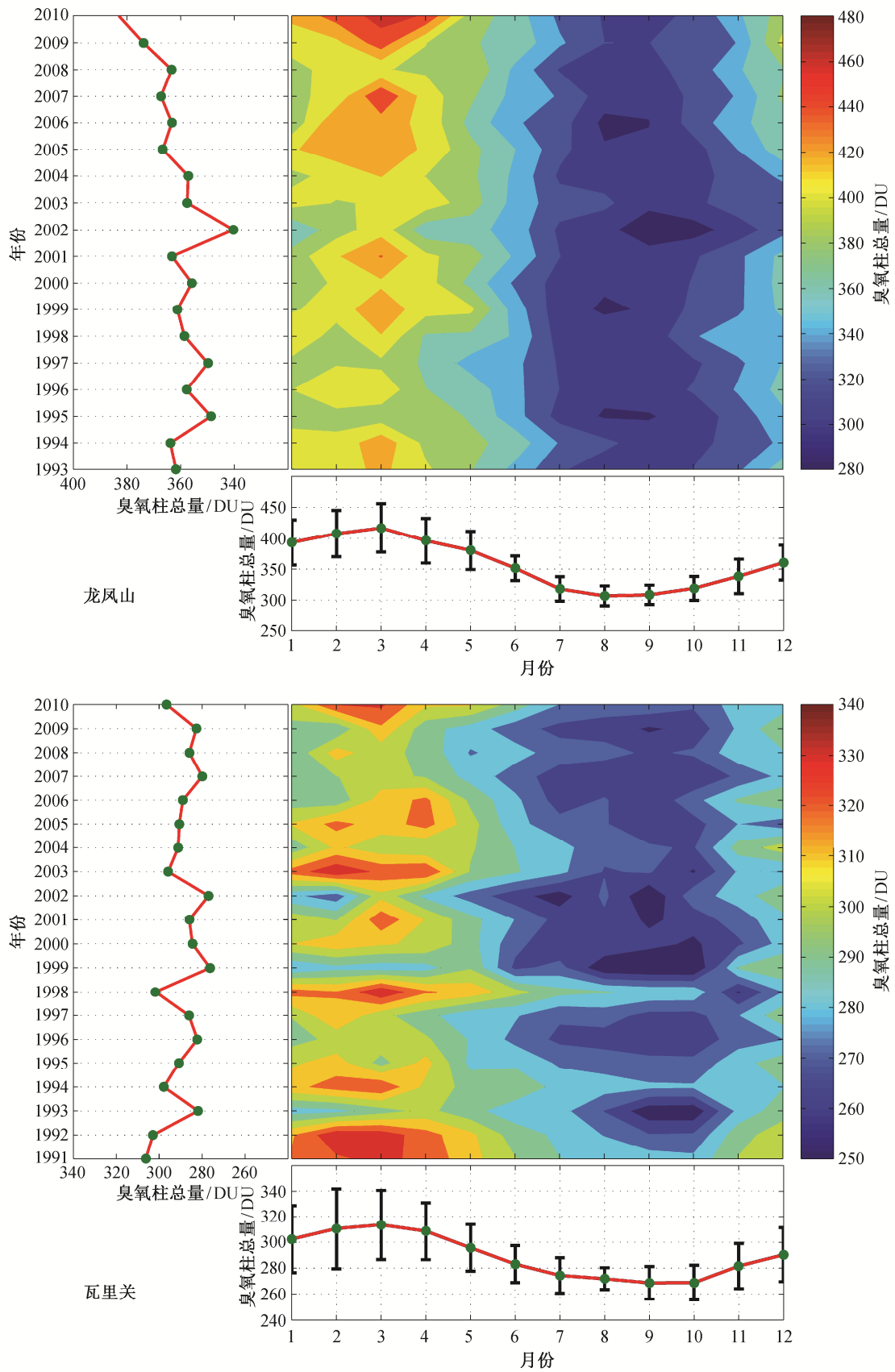


图 1 龙凤山和瓦里关臭氧总量季节变化和年际变化

Fig. 1 Seasonal and interannual variations in total ozone at Longfengshan and Waliguan

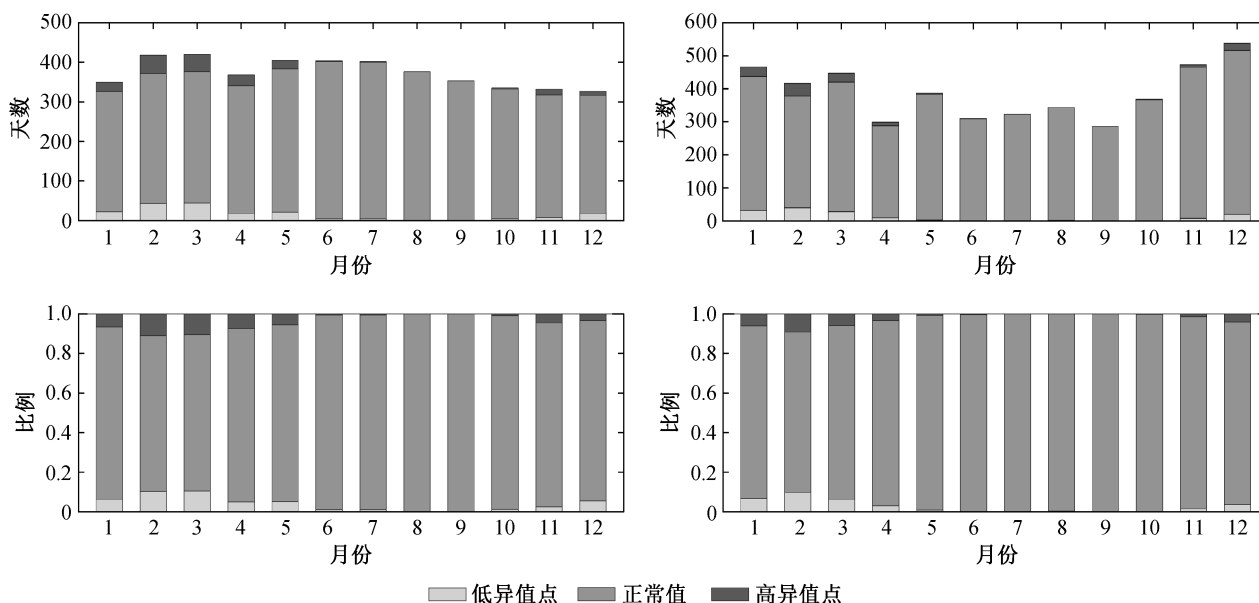


图2 龙凤山(左)和瓦里关(右)臭氧总量异值点季节分布

Fig. 2 Seasonal distribution of the abnormal data points at Longfengshan (left) and Waliguan (right)

尺度上的变化; 3) 对流层臭氧含量比较少, 其主要与对流层光化学反应有关, 在污染比较严重的地区对流层臭氧的变化也会叠加在臭氧总量的观测上。我们选取的异值点主要代表对流层顶至平流层低层的臭氧含量短期变化, 主要与对流层顶至平流层底层的大气扰动有关。

大气中的臭氧主要分布在平流层, 其分布主要受平流层环流控制。但是, 发生在对流层的波动(比如过山气流或者大尺度对流波动)可以扰动平流层环流。线性波理论表明, 向上传播的波动受东风抑制而受西风加强。在夏季, 平流层平均风偏东风, 而在冬季平流层平均风偏西风。在冬春季节, 对流层的波动更容易向上传播到平流层, 受到平流层西风影响而加强, 其结果是波动的振幅变大而最终破碎于平流层^[18-19]。这种波的破碎过程会导致平流层环流产生扰动, 使得大气中平流层低层的臭氧分布发生变化, 局地臭氧垂直柱总量发生剧烈波动, 因此臭氧总量异值点主要分布在冬春季节, 并且与和平流层扰动以及对流层波动密切相关。

4 臭氧总量异值点与天气过程关系

利用 NCEP 位势高度再分析资料, 我们绘制了龙凤山和瓦里关出现臭氧总量异常变化日期各个高度的位势高度图, 并依此统计龙凤山和瓦里关两个

站点发生臭氧总量异常变化时的地面(1000 hPa)、对流层顶(250 hPa)和平流层低层顶部(70 hPa)天气形势, 结果见表 2。

龙凤山第一类异值点共 190 个。在 70 hPa 高度上, 主要处在高空槽前或者槽中, 在 250 hPa 高度上也主要表现为槽前或槽中, 在地面主要表现为低压中心后方。龙凤山第二类异值点共 204 个。在 70 hPa 高度上, 大多数无明显槽脊, 在 250 hPa 高度上主要表现为脊前或者脊中, 在地面主要表现为高压中心后方。

瓦里关第一类异值点共 143 个。在 70 hPa 高度上, 主要表现为槽前或者槽中, 在 250 hPa 高度上主要表现为槽前或者槽中, 在地面主要表现为低压中心后方。瓦里关第二类异值点在 70 hPa 高度上主要表现为槽前或者槽中, 在 250 hPa 高度上主要表现为槽前或槽中, 在地面主要表现为低压中心后方。

可以看出, 对于臭氧总量异常升高的第一类异值点, 龙凤山和瓦里关都表现为高空处在槽前或者槽中, 地面处在低压中心后方这样的高低空配置关系。对于臭氧总量异常降低的第二类异值点, 龙凤山和瓦里关表现出不同的天气形势特征, 龙凤山主要表现为高空处在脊前或者脊中, 地面处在高压中心后方, 瓦里关主要表现为高空处在槽前或者槽中,

表 2 龙凤山和瓦里关两种异值点类型在 70, 250 和 1000 hPa 等压面上不同天气形势下的出现频率
 Table 2 Occurrence frequency of the 2 types of abnormal data points at Longfengshan and Waliguan under different synoptic conditions on the 70, 250 and 1000 hPa pressure levels %

| 高度/hPa | 天气形势 | 龙凤山 | | 瓦里关 | |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 第一类异值点 | 第二类异值点 | 第一类异值点 | 第二类异值点 |
| 70 | 槽前或槽中 | 68 | 37 | 52 | 50 |
| | 脊前或脊中 | 12 | 20 | 15 | 12 |
| | 无明显槽脊 | 20 | 43 | 33 | 38 |
| 250 | 槽前或槽中 | 79 | 34 | 55 | 45 |
| | 脊前或脊中 | 9 | 64 | 13 | 28 |
| | 无明显槽脊 | 12 | 2 | 32 | 27 |
| 1000 | 低压中心后 | 67 | 35 | 84 | 68 |
| | 高压中心后 | 3 | 50 | 2 | 28 |
| | 其他 | 30 | 15 | 14 | 4 |

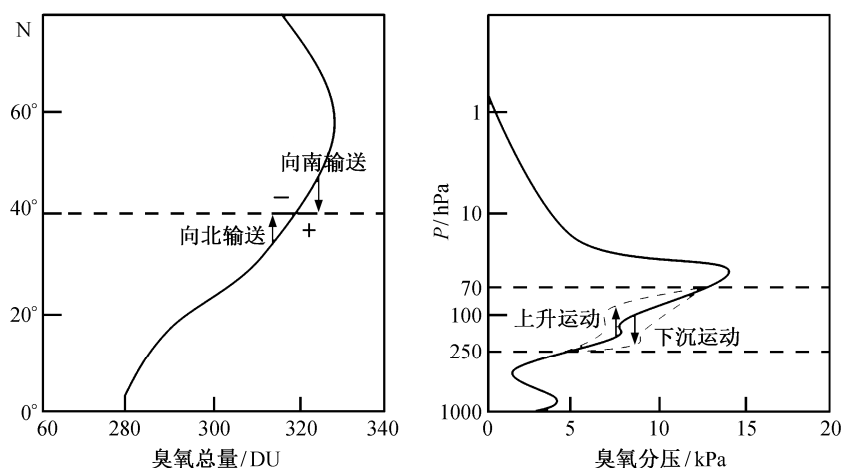


图 3 大气水平运动(左)与垂直运动(右)对臭氧总量的影响示意图

Fig. 3 Effect of horizontal advection (left) and vertical motion (right) on total ozone column concentrations

地面处在低压中心后方。

由于产生臭氧总量异常变化的高度主要在 5~20 km, 而在这一高度上的大气扰动主要表现为大气的水平和垂直运动, 这些扰动都会导致臭氧柱总量改变。图 3 显示北半球中纬度地区平流层低层大气的水平输送和垂直运动对臭氧总量的影响。水平输送对臭氧总量的影响主要基于环流理论。在全球尺度上, 臭氧总量随纬度增加而升高, 因此站点上空的南向输送导致臭氧总量的增加, 北向输送导致臭氧总量的减少。垂直运动对臭氧总量的影响基于大气的可压缩性。气团下沉伴随着密度的增加, 由于在平流层低层臭氧含量随着高度而增加, 气团下

沉导致高臭氧浓度气团取代原来位置的低臭氧浓度气团, 使得臭氧柱总量明显增加。相反, 气团上升则导致局地臭氧含量的减少。在平流层低层, 气压槽通常表现为暖区, 盛行下沉运动, 而气压脊通常表现为冷区, 盛行上升运动, 槽区和脊区代表下沉和上升位移最大的区域, 因此, 垂直运动导致槽区产生臭氧总量的最大正变化, 而脊区产生臭氧总量的最大负变化。同时, 由于空气运动轨迹近似与等高线重合, 因此当空气通过平流层气压槽时, 经历了最大的南向位移, 通过平流层脊时, 经历了最大的北向位移, 因此, 水平输送导致槽区臭氧总量产生最大正变化, 而脊区产生最大负变化。在平流层

低层,水平输送和垂直运动的总效果,使得在槽区产生臭氧总量的最大正变化,脊区产生臭氧总量的最大负变化。

第一类异值点代表超高臭氧正变化,对应平流层槽区;第二类异值点代表超高臭氧负变化,对应平流层脊区。根据天气系统的高低空配置关系^[20],高空系统总是位于地表系统的后方,从而高空槽对应着地面低压中心后方,高空脊对应着地面高压中心后方。因此,第一类异值点应该对应着高空槽和地面低压中心后方的高低空天气形势,第二类异值点应该对应着高空脊和地面高压中心后方的高低空天气形势。在龙凤山,第一类异值点和第二类异值点大多数都符合相应的高低空天气形势配置,表明平流层低层大气的水平输送和垂直运动是造成龙凤山臭氧总量异常变化的主要原因。而在瓦里关,第一类异值点大多数(超过50%)符合高空槽和地面低压中心后方的高低空配置关系,第二类异值点则只有很少(不到30%)符合高空脊和地面高压中心的高低空配置关系,更多的第二类异值点与第一类异值点一样,符合高空槽与地面高压中心后方的高低空配置关系。

此外,根据臭氧总量的异常变化与地面天气系统的对应关系,可以利用臭氧总量的异常变化来预测局地天气的变化。在龙凤山,冬春季臭氧总量的异常升高对应着地面低压中心后方,很大程度上预示着低压系统已经过境,天气将变得晴好;而臭氧总量的异常降低则对应着地面高压中心后方,很大程度上预示着高压系统已经过境,低压系统即将来临。在瓦里关,臭氧总量的异常升高或是降低似乎都预示着低压向高压之间的转换,因此可以将臭氧总量的异常变化作为地面高、低压系统之间相互转换的一个信号。

5 典型个例分析

图4展示1999年2月19日(龙凤山臭氧总量变化第一类异值点)从地面到高空各个等压面上的天气形势。这一天龙凤山站臭氧总量日平均值为492 DU,相较于前一日(2月18日)的臭氧总量平均值443 DU增加了49 DU,变化幅度超过10%。从各个等压面上的天气形势来看,在地面(1000 hPa),龙凤山以东处在一个深厚低压控制下,龙凤山以西受高压控制,龙凤山处在这两个高、低压之间的过渡地带。在700 hPa等压面上,龙凤山站上空的引导气流为由

北向南的气流,龙凤山以西高压地区的引导气流为西北-东南方向,表明高压系统会向东南方向发展,龙凤山站也会受到高压边缘的影响。在对流层顶(250 hPa)的等压面上,龙凤山处在一个发展深厚的槽中,高空气团经历了最大的向南位移,同时下沉运动也最为旺盛,导致臭氧总量的异常升高。在平流层低层顶部(70 hPa)的等压面上,龙凤山也处在一个深厚的高空槽中,同样向南的输送旺盛,并且盛行下沉运动,使得臭氧总量升高。

总之,从高、低空天气形势来看,1999年2月18—19日,龙凤山站上空对流层顶至平流层低层大幅度向南的输送和剧烈的下沉运动导致臭氧总量大幅度升高,而与此相对应,龙凤山地面处在高、低压过渡的地区,高压即将向东南方移动,使得高压边缘对龙凤山站产生影响,龙凤山站从低压逐步向高压转变。

图5展示1998年2月17日(龙凤山臭氧总量第二类异值点)从地面到高空各等压面上的天气形势。这一天龙凤山臭氧总量平均值为357 DU,相较于前一日(2月16日)的臭氧总量平均值427 DU降低了70 DU,臭氧总量剧烈减少,其变化幅度超过10%。从各高度的天气形势图看,在地面(1000 hPa),龙凤山处于高压中心偏北的位置,在高压的控制之下,而在龙凤山的西南方向是两个相邻的低压系统。在700 hPa等压面上,龙凤山处在一个深厚的高压脊中,其上空的引导气流为由西向东的气流,龙凤山以西的引导气流为西南-东北向,表明位于龙凤山站西南方向的低压系统将会沿着引导气流移动而影响龙凤山站。在对流层顶(250 hPa)的等压面上,龙凤山站处在槽后脊前的位置,由北向南的输送较弱,气团的上升运动占据主导地位,使得垂直方向的上升运动导致的臭氧总量减少远远超过水平方向上微弱的由北向南输送导致的臭氧总量增加,使得臭氧总量产生明显的降低;而在平流层低层顶部(70 hPa)等压面上,龙凤山也处在一个发展不太深厚的气压脊前,水平方向由北向南的输送和垂直方向的上升运动都较弱,对臭氧总量的影响相较于平流层低层底部要弱一些。

总之,从高空天气形势来看,龙凤山处在高空槽后脊前的位置,对流层顶至平流层低层垂直方向的上升运动是造成1998年2月16—17日臭氧总量大幅度降低的主要原因,水平方向的南北输送对臭氧总量的影响相较于垂直运动的影响要小很多。与

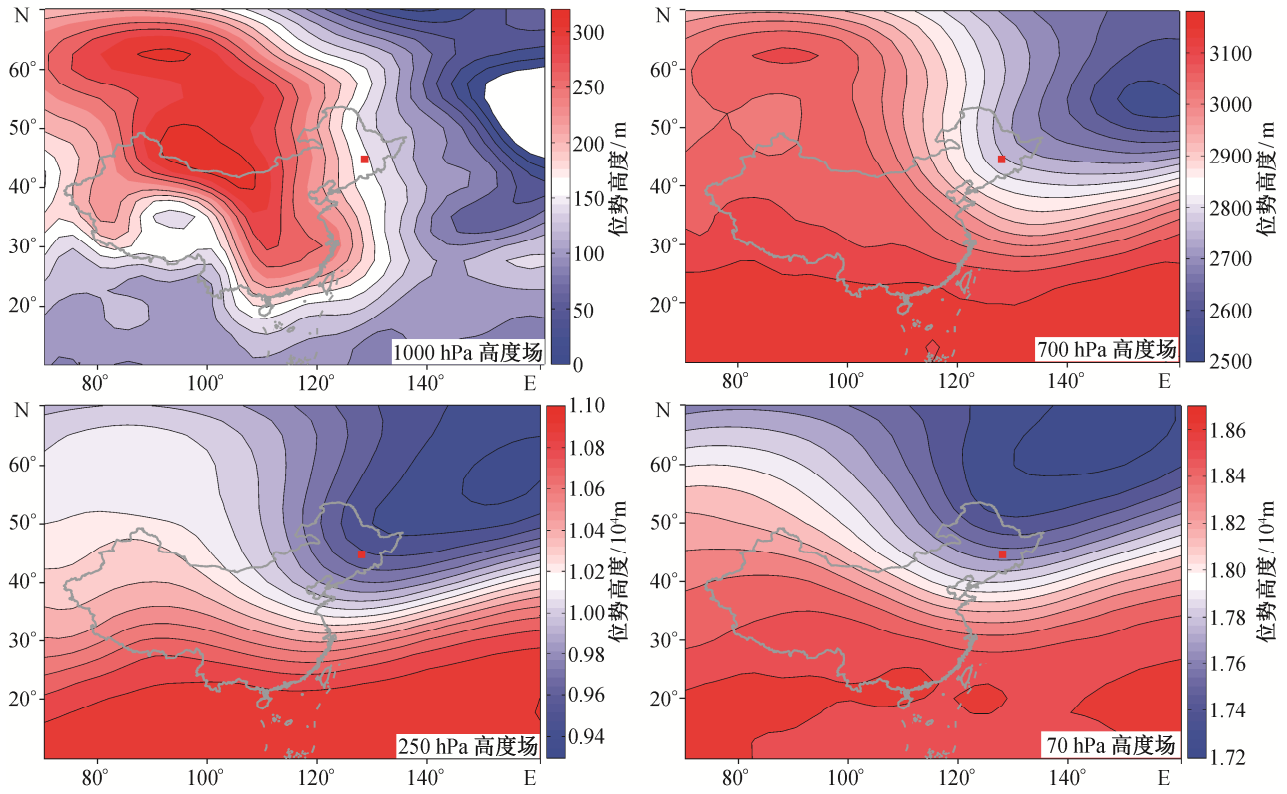


图 4 龙凤山 1999 年 2 月 19 日 1000, 700, 250 和 70 hPa 等压面上的天气形势

Fig. 4 Circulation features along the isobaric surface of 1000, 700, 250 and 70 hPa over Longfengshan on February 19th, 1999

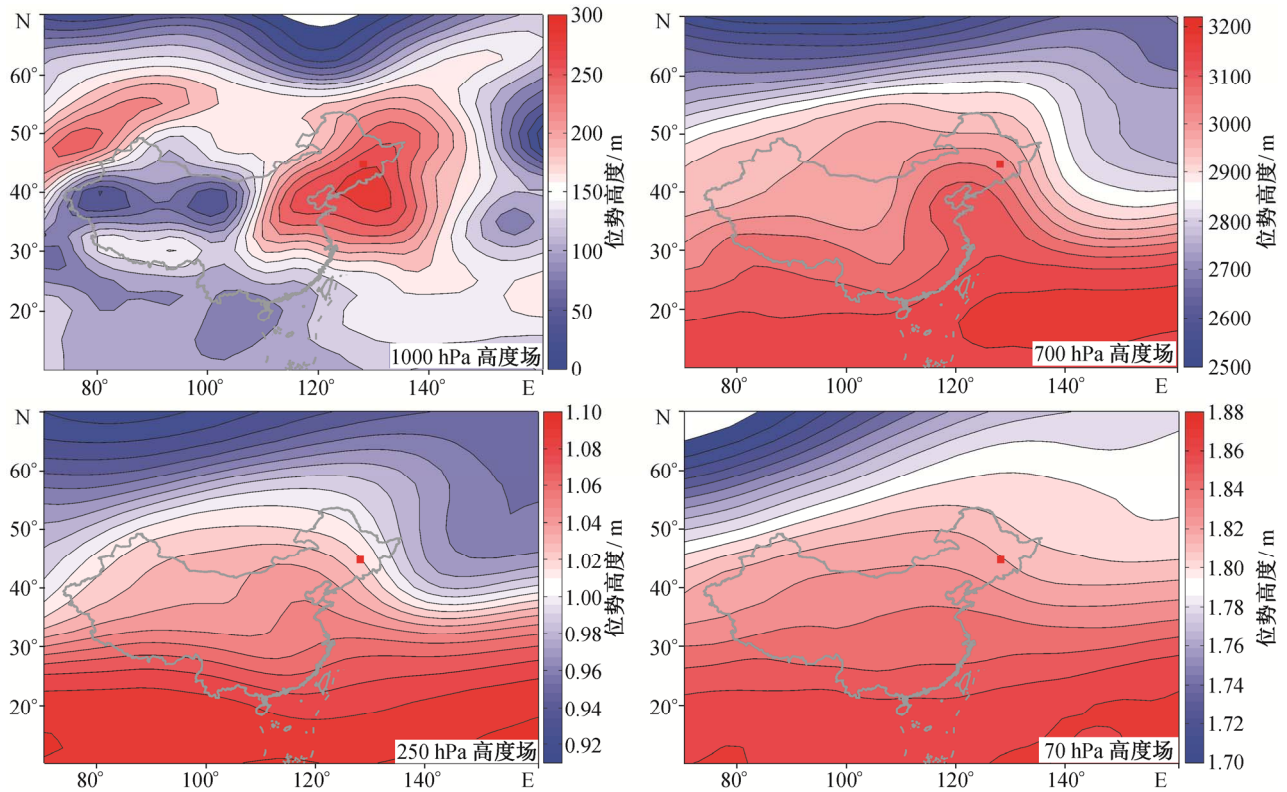


图 5 龙凤山 1998 年 2 月 17 日 1000, 700, 250 和 70 hPa 等压面上的天气形势

Fig. 5 Circulation features along the isobaric surface of 1000, 700, 250 and 70 hPa over Longfengshan on February 17th, 1998

此对应的是地面处在高压控制之下,在未来几天之内,西南方向的低压系统会逐渐沿着高空引导气流由西南向东北方向移动,使得龙凤山地区逐渐由高压系统向低压系统转变。

6 结论

对龙凤山和瓦里关长期 Brewer 臭氧总量分析表明,龙凤山和瓦里关臭氧总量存在明显的季节变化特征,冬春季高,夏秋季低,全年臭氧总量呈现类似正弦函数的变化。龙凤山臭氧总量最高值出现在 3 月,最低值出现在 8 月,年平均值约为 360 DU,振幅约为 120 DU。瓦里关臭氧总量最高值出现在 3 月,最低值出现在 9 月,年平均值比龙凤山低,约为 290 DU,振幅约为 50 DU。从年际变化来看,龙凤山臭氧总量从 2003 年开始有明显的回升趋势,年平均增长速率约为 2%;瓦里关 2001—2010 年,臭氧总量有小幅回升,年平均增幅约为 0.4%。20 世纪末北半球臭氧总量的回升信号在龙凤山和瓦里关均得到不同程度的体现。

龙凤山和瓦里关的 Brewer 臭氧总量数据存在明显的逐日波动。全球 TOMS 臭氧资料表明,北半球中纬度地区(40°N 左右)臭氧总量逐日变化的平均值约为 20 DU,并且随着纬度升高而增大^[21]。我们定义与前一日臭氧总量平均值之差的绝对值超过某一临界值 R 的日期为臭氧总量变化的异值点,在龙凤山 R 取值为 40 DU,而在瓦里关 R 取值为 30 DU。统计分析表明,龙凤山和瓦里关臭氧总量异值点主要分布在冬春季,夏秋季很少,甚至几乎没有。造成这一分布特征的原因是,冬春季向上传播的对流层波动更容易在平流层得到加强并最终消散于平流层,这种波动的消散过程会影响平流层环流,使得臭氧总量在短时间内发生剧烈波动。

通过对比分析 NCEP 资料,表明龙凤山和瓦里关臭氧短期内异常变化与平流层的水平输送和垂直输送紧密相关。高空槽中盛行下沉气流,并且经历了气团最大的南向位移,使得臭氧总量出现最大正变化。根据高、低空系统配置关系,高空槽位于地面低压后方,因此代表臭氧总量升高的第一类异值点往往对应着高空槽和地面低压中心后方的高低空天气形势。高空脊中盛行上升气流,并且经历了气团最大的北向位移,使得臭氧总量出现最大负变化。由于高空脊位于地面高压后方,因此龙凤山代表臭氧总量异常降低的第二类异值点大多数对应着

高空槽和地面高压后方的天气形势。值得注意的是,在瓦里关,代表臭氧总量异常降低的第二类异值点大多数对应着高空槽和地面低压中心后方的天气形势,这表明除平流层低层的水平输送和垂直运动外,可能存在着其他更重要的机制,使得瓦里关臭氧总量发生异常降低的情况。

根据臭氧总量的异常变化与地面天气系统的对应关系,我们可以利用臭氧总量的异常变化来预测局地天气状况,臭氧总量变化的异值点可以作为地面高、低压系统转换的一个信号。在龙凤山,第一类异值点的出现往往预示着低压逐渐过去,高压即将来临;第二类异值点的出现则往往预示着高压逐渐过去,低压即将来临。在瓦里关,两类异值点的出现似乎都预示着地面低压逐渐过去,高压即将来临的情况。

参考文献

- [1] Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 1985, 315: 207–210
- [2] WMO (World Meteorological Organization). Scientific assessment of ozone depletion: 1998. Geneva: WMO Ozone Rep. 44, 1999
- [3] Fioletov V E, Bodeker G E, Miller A J, et al. Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964–2000. *J Geophys Res*, 2002, 107(D22): 46–47
- [4] Dobson G M B. Ozone in the upper atmosphere and its relation to meteorology. *Nature*, 1931: 668–672
- [5] Craig R A. The observations and photochemistry of atmospheric ozone and their meteorological significance. American Meteorological Society: Meteorological Monographs, Vo. I, 1950
- [6] Dobson G M B, Harrison D N. Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1926, 110(756): 660–693
- [7] Tonsberg E, Langlo-Olsen K. Investigations on atmospheric ozone at Nordlysobservatoriet Tromsø. *Geofys Publik*, 1943, 13: 1–29
- [8] Reed R J. The role of vertical motions in ozone-weather relationships. *Journal of Meteorology*, 1950,

- 7(4): 263-267
- [9] Schubert S D, Munteanu M J. An analysis of tropopause pressure and total ozone correlations. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(3): 569-582
- [10] Vaughan G, Price J D. On the relation between total ozone and meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1991, 117: 1281-1298
- [11] Bolin Z, Wanbiao L, Yuanjing Z. Study on atmospheric ozone in east Asia with satellite observation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1994, 11(1): 27-35
- [12] 郑向东, 周秀骥, 秦瑜, 等. 西宁夏季对流层臭氧垂直分布变化与气象要素的关系. *气象学报*, 2002, 60(1): 47-52
- [13] Kerr J B, McElroy C T, Wardle D I, et al. The automated Brewer spectrophotometer // Zerefos C S, Ghazi A. *Atmospheric ozone*. Berlin: Springer Netherlands, 1985: 396-401
- [14] 郑向东, 韦小丽. 中国 4 个地点地基与卫星臭氧总量长期观测比较. *应用气象学报*, 2010, 20(1): 1-10
- [15] 苏志侠, 吕世华, 罗思维. 美国 NCEP/NCAR 全球再分析资料及其初步分析. *高原气象*, 1999, 18(2): 209-218
- [16] 赵天保, 艾丽坤, 冯锦明. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较. *气候与环境研究*, 2004, 9(2): 278-294
- [17] Reinsel G C, Miller A J, Weatherhead E C, et al. Trend analysis of total ozone data for turnaround and dynamical contributions. *J Geophys Res*, 2005, 110: doi: 10.1029/2004JD004662
- [18] Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. *Middle atmosphere dynamics*. Orlando, FL: Academic Press, 1987
- [19] Charney J G, Drazin P G. Propagation of planetary — scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(1): 83-109
- [20] 钱维宏. *天气学*. 北京: 北京大学出版社, 2004: 33-34
- [21] Allen D R, Reck R A. Daily variations in TOMS total ozone data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1997, 102(D12): 13603-13608