

西宁夏季对流层臭氧垂直分布变化 与气象要素的关系*

郑向东 周秀骥

秦 瑜

(中国气象科学研究院,北京,100081) (北京大学物理学院大气科学系,北京,100871)

汤 洁 刘奇俊 李维亮

(中国气象科学研究院,北京,100081)

摘 要

根据臭氧、气象探空观测数据,分析了 1996 年 7 月 5 日至 8 月 3 日西宁(36°44'N,101°45'E,海拔高度 2296 m)上空对流层臭氧垂直分布变化与气象要素之间的关系。对流层臭氧浓度的增加(减少)总伴随着干、冷(暖、湿)气流的输送变化,而这又与大气垂直方向的运动是紧密联系在一起。分析表明天气动力输送过程对对流层臭氧垂直分布变化有重要作用。

关键词:臭氧垂直分布,气象场,天气过程。

1 引 言

天气动力过程是影响自由大气中臭氧分布变化的因素之一。20 世纪 50 年代 Reed 和 Dobson 等^[1]就注意到冷锋过境后,欧洲一些站点臭氧总量有明显的增加现象。60 年代以后,随着探空技术的发展,对臭氧分布的时空变化有了进一步的认识。现在基本可以确认:高空天气过程所引起的平流层与对流层之间的物质相互交换是中纬度地区对流层臭氧垂直分布变化的重要机制之一^[2],而且类似的机制也存在副热带地区^[3]。尽管如此,全球臭氧垂直分布观测站点的稀少和分布极不均匀的现实在一定程度上仍制约着人们对臭氧垂直分布的全面了解。在亚洲地区,日本对臭氧垂直分布作了长期的观测研究工作^[4],印度也独自研制 Brewer-Mast 型臭氧探空仪并参加了国际间的比对^[5]。在中国,石广玉等^[6]率先开展过臭氧和气溶胶垂直分布的吊篮观测实验;孔琴心等^[7]研制的臭氧探空仪也开展过观测研究工作,但总体而言,中国的臭氧探空观测工

作还是偏少。

1994 年夏季青藏高原上空“臭氧谷”的发现极大地推动了中国臭氧研究的发展^[8]。1995~1996 年,在芬兰 Vaisala 公司的资助下,中国气象科学研究院在西宁分 4 个阶段进行了臭氧探空观测^[9],1998~1999 年,石广玉等^[10]又在拉萨进行了臭氧垂直分布的观测实验。本文利用 1996 年 7 月 5 日~8 月 3 日在西宁 30 d 内进行的 29 次臭氧探空观测与臭氧同步进行观测的气象探空资料,分析了西宁夏季对流层臭氧垂直分布的连续变化与气象要素的关系。

2 数据处理

对观测实验及数据获取的详细介绍见文献^[9]。原始观测数据平均时间分辨率约 10 s,相当于 50 m 空间分辨率。用拉格朗日内插方法,把每次探空观测(包括气象探空)各个要素垂直分布从 2300 m(接近西宁的海拔高度)起,按 100 m 空间分辨率给出。对于 7 月 20 日缺测数据,用 7 月 19 日和 7 月 21 日

* 初稿时间:2000 年 11 月 4 日;修改稿时间:2001 年 6 月 7 日。

资助课题:中国气象科学研究院跨世纪青年基金项目 and 博士启动基金。

的平均值代替。因为这3 d没有明显的天气过程,而且7月19日和7月21日观测到的各要素变化也不是很大。出于以下两个因素的考虑,选择18 km为处理数据的上限高度:(1)18 km实际包括了平流层下部和对流层上部的高度范围,这是平流层与对流层之间相互交换的重要场所;(2)对流层顶的高度在天气时间尺度内会因高空天气过程有比较大的变化,而不是固定不变的,但是18 km远离了这个变

化的高度。

3 臭氧、湿度、温度与风矢量的垂直分布

图1给出了从地面到18 km臭氧垂直分布随时间变化的剖面。从图可见,近地面层的臭氧浓度一般在40 ppb^①左右;8 km以下对流层臭氧浓度比较低,基本上没有超过100 ppb。16 km以下,对流层臭氧垂直分布随时间变化可粗略地分为以下4个阶段。

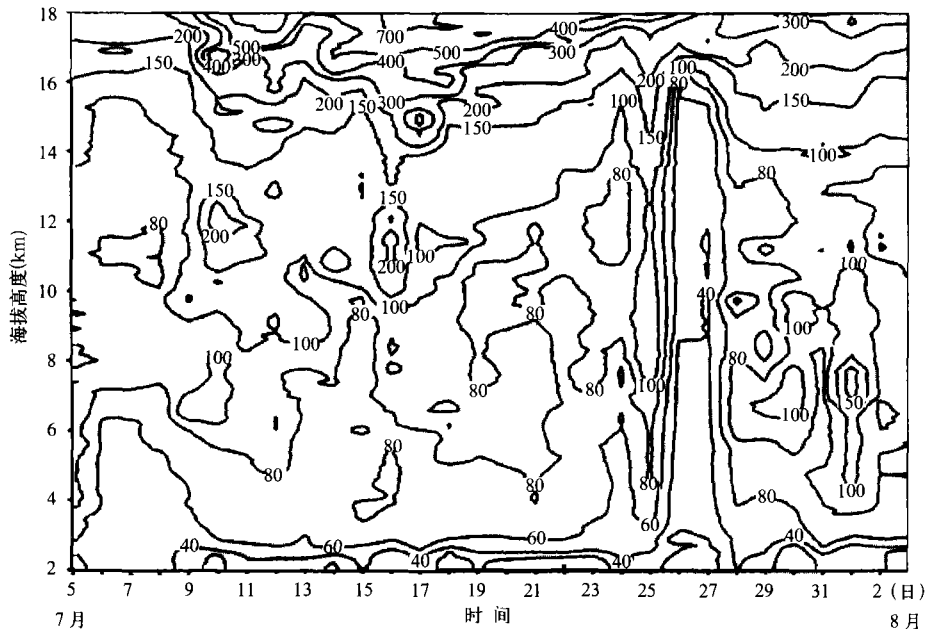


图1 1996年7月5日到8月3日西宁地区对流层臭氧浓度垂直分布变化

第1阶段:5~8日。8~15 km范围臭氧浓度为80~100 ppb,7 km以下臭氧浓度低于80 ppb。

第2阶段:9~25日。臭氧浓度有明显增加,而且持续比较时间长,大约一周后,臭氧浓度逐渐下降。具体的变化过程是:9~10日在6~8 km高度范围臭氧浓度出现了100 ppb,而9~16 km则是大于100 ppb的值;10~11日12 km,15~17日10~11 km的臭氧浓度则上升到200 ppb;17日以后,臭氧浓度逐渐降低,并且持续到7月24日;7月23~24日臭氧浓度已恢复到与第一阶段相当,14 km以下臭氧浓度低于100 ppb;25日臭氧浓度突然增高,8 km以上的臭氧浓度为100 ppb。

第3阶段:26~28日。26,27日从地面到16 km高度范围臭氧浓度已下降到60 ppb以下。28日各个高度上的臭氧浓度开始上升,但是在28,29日8~12 km的范围还是维持80 ppb以下的臭氧低

值。

第4阶段:7月29日~8月3日。4 km以上出现高于60 ppb的值,在7月29~30日7~8 km还出现了100 ppb的值,但是8月1日6~8 km出现150 ppb以上的高值的臭氧浓度则是这一阶段的主要特征。8月2日臭氧高值开始降低。

需要说明的是上述4个阶段的划分不是绝对的,不同高度范围内臭氧浓度随时间的变化存在一些差异。在第2阶段里,臭氧垂直分布存在次小幅度的扰动,如14~15日间就有一个明显的小低值过程,8 km以下臭氧浓度为80 ppb以下。在第4阶段里,29日8~12 km存在臭氧低值,严格地说应分布在第3阶段里。

图2给出了相对湿度(R)的垂直分布随时间变化的剖面图。图中 R 低于15%为空白区。从图2可见, R 垂直分布基本是随高度增加而递减

^① 1 ppb = 10^{-9} × mol/L

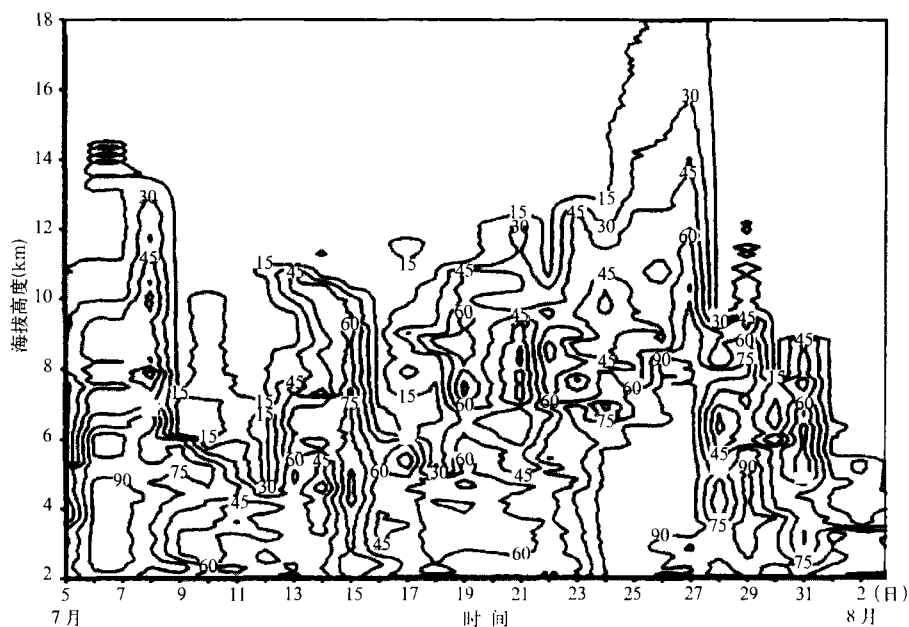
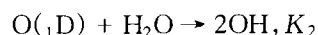
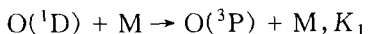


图2 1996年7月5日到8月3日西宁地区相对湿度垂直分布变化

的,符合水汽垂直分布的一般规律。和图1相比, R 与臭氧的垂直分布变化在时间上是基本同步的,并且存在这样的事实: R 高(低)值区总是对应着臭氧的低(高)值区。

从图1,2可以初步看出,对流层臭氧、水汽的垂直分布反映了夏季平流层/对流层之间相互交换的结果。低水汽、高臭氧是平流层气团的特征,这在第2,4阶段很明显;而在第1,3阶段中,则是低臭氧、高水汽的近地面边界层的特征,尤其是在第3阶段,高水汽、低臭氧的垂直分布在16 km处还是十分显著,这反映了强烈的对流层向上输送已发生在西宁上空。3 km以下,由于受平流层向下输送影响较小,又加上西宁地区夏季基本处在雨季的缘故,则是低臭氧、高水汽分布特点。

水汽和臭氧的反相分布特点,也反映了光化学过程对臭氧浓度的影响。最具有代表性的化学反应是:



从上述化学反应可得:

$$-\frac{1}{[O_3]} \cdot \frac{d[O_3]}{dt} = J(O^1D) \cdot \frac{[H_2O] \cdot K_2}{[H_2O] \cdot K_2 + [M] \cdot K_1}$$

从上式可以看出臭氧的损耗速率几乎与水汽的增加是成比例的关系。高水汽、低臭氧的这种对应关系在其它的观测中也被注意到^[11]。在图2中还可看到在7月6~7日,24~27日这两个时期6 km以下的近地面湿度已达到90%以上了,这很可能是低纬度海洋暖湿气团远距离输送的结果,因为很多观测都证实了在热带海洋气团里臭氧浓度相当低^[12,13];三维后向轨迹计算也表明,西宁上空7月26~27日气团源自于低纬海洋上空(有关轨迹计算结果的分析我们将另文给出)。但是,7月25日高臭氧、 R 则是一个比较特殊的现象,其机理还有待于进一步分析。

图3和图4分别给出了温度、风矢量垂直分布的连续变化。从图中可以看出,6~8日6~12 km,14~15日11 km以下、26~27日14 km以下有明显的温度峰。其中6~8日和26~27日峰值区分别对应臭氧变化第1,3阶段;14~15日峰值分布正对应着第二阶段中13~16日高湿度、低臭氧阶段。而7月9~12日、7月28日~8月2日在12 km以下温度出现了两个明显波谷,所对应是低湿度、高臭氧的垂直分布;7月16~17日8~12 km也存在较为明显的温度谷分布。14 km以上,温度垂直分布变化基本上与14 km以下温度垂直分布变化相反:冷空气对应低臭氧,而暖空气对应高臭氧。

由于高空气团的热力性质与地面气团相反:来

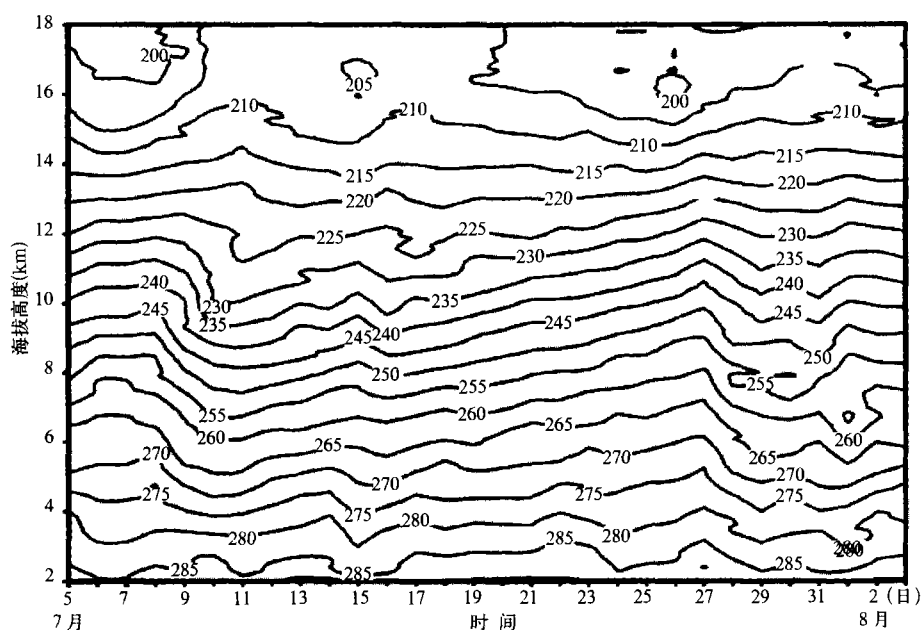


图3 1996年7月5日到8月3日西宁地区温度(单位:K)垂直分布变化

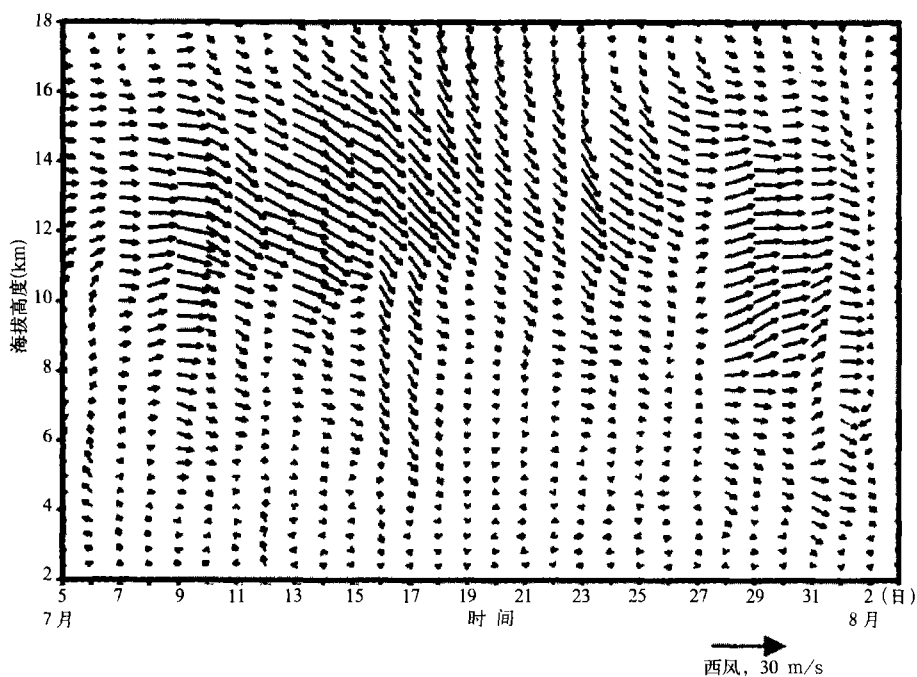


图4 1996年7月5日到8月3日西宁地区风矢量垂直分布变化

自低(高)纬度地区的气团具有低(高)温特征。从图3温度垂直分布变化可大致地判断西宁地区在观测期间内高空环流的走向:第1,3阶段气流来自于低纬地区,为Hadley环流中北上的上升的支流,而第2,4阶段来自于高纬地区,是Hadley环流中南下下沉部分的支流。

图4是西宁上空风矢量垂直分布随时间变化的剖面。尽管受地形的影响,使得近地面高度层的风

场变化比较复杂,但整个对流层风矢量垂直分布随时间的变化还具有明显阶段性的特征。

在第1阶段里,6日6~10 km出现南风,在10~12 km出现东南风;7日10 km以上则是以西风为主,但风速较小;8日西风速明显增大(12 km达到25 m/s);9日高空风速得到进一步地加强,12 km的风速接近40 m/s。同日,臭氧明显上升,这是臭氧垂直分布变化第2阶段的开始。在第2阶段里,

明显的西北急流基本上出现在 10 km 的高度, 17 日以后急流逐渐减弱, 23~25 日又得到一次明显的加强。可以看出, 臭氧垂直分布阶段性的转变与高空风场的变化是相联系的, 高臭氧浓度与西北急流是基本同时出现的。在第三阶段里, 26~27 日高空风速明显地下降; 并且在 26 日 4 km 附近出现东风, 这与 6 日 4~6 km 高度出现的东南风的情况很类似。27 日西南风开始出现在 9~12 km, 并在 28~31 日演变成西南急流。显然, 西南急流高度比第二阶段里出现的西北要低。与西南急流相对应的则是臭氧浓度低值分布的出现。在第四阶段, 8 月 1 日风向为较强的西北和西风, 同在这一天, 7 km 附近的臭氧浓度急剧上升到 150 ppb 以上, 8 月 2 日以后风速迅速降低, 臭氧浓度也随之下降。

从风场与臭氧的垂直分布可以发现, 8~12 km 出现的高空 NW 或 W 急流与对流层臭氧浓度的增加是有关的, 而在 8 km 以下出现的 S 扇区的风(6, 12 日)、或 E 扇区的风(26 日)则与对流层臭氧浓度的降低有密切的关系。高空 NW 或 W 急流往往是伴随着较强的平流层向下输送^[2,3], 从而使富臭氧气团从平流层向下对流层输送; 而在对流层低层, 来自西宁南部、或东部的暖湿气流的输送基本上是与对流天气系统是密切联系的, 对臭氧浓度的影响则是表现为把近地面边界层特征的高水汽、低臭氧向上输送。大气在垂直方向上的运动特征与臭氧浓度的分布变化将在下面进行分析。

4 臭氧的垂直分布与大气的垂直运动

直接的观测表明臭氧浓度与气象场的变化是密切相联系的。它们垂直分布特征都具有天气时间尺度的特征, 这正是天气动力输送过程对臭氧浓度垂直分布的贡献。夏季西北大部分地区天气过程主要是以地面冷锋活动为主^[14], 而从青藏高原主体北上的暖湿气团偶尔也可以影响到青海湖—西宁地区^[15]。文中以湿球位温的垂直分布变化来表征锋面活动的特征, 因为湿球位温在蒸发、凝结、以及干、湿绝热过程中均为守恒量, 可以根据气象探空的数据来计算^[16]。Browning 曾指出: 低纬度地区来自暖输送带(Warm Conveyor Belt: WCB)气团所形成的暖锋具有高湿球位温的特征, 锋内以上升气流为主; 而从高纬度地区冷输送带(Cold Conveyor Belt: CCB)南下的气团所形成的冷锋具有低湿球位温的特征, 锋内以下沉气流为主^[17]。因此, 只需要确定释放臭氧探空期间

西宁上空的湿球位温垂直分布的变化, 便可以推测大气在垂直方向上的上升(下沉)运动过程。

图 5(见封三)给出了从地面到 16 km 湿球位温的垂直变化。臭氧垂直分布 4 个明显的变化阶段所对应的刚好是暖、冷锋交替地出现在西宁地区上空的 4 个过程。臭氧垂直分布变化也是冷、暖锋活动的结果。来自高纬地区的干、冷气流, 湿球位温值低, 气团以下沉运动为主, 对流层臭氧浓度增加; 而来自低纬地区的暖、湿气流, 湿球位温值高, 以上升运动为主, 对流层臭氧浓度减少。选择 16 km 的高度为计算湿球位温的上限高度, 这是因为在 16 km 以上, 气象探空仪所测的 R 误差较大, 这会给计算湿球位温带来较大的误差。

在绝热、没有动力输送和光化学反应的条件下, 臭氧体积混合比浓度随高度的变化应是守恒的, 而在自由大气里, 臭氧的生命周期在天气时间尺度内还是比较稳定的^[13], 化学对臭氧浓度的影响很小。因此, 以位温为垂直坐标比以高度为垂直坐标更能有效地反映出臭氧分布变化受动力输送的影响^[18]。图 6(见封三)给出了在以位温为垂直方向的条件下, 臭氧混合比浓度、位势高度随时间的变化。和图 1 相比, 臭氧浓度随位温方向上的分布变化与随高度方向的变化上是一致的。因而, 对臭氧垂直分布的变化起绝对作用的动力输送过程, 基本上可以认为是等熵绝热过程。位势高度的变化, 则清楚地看出: 臭氧浓度的减少(或增加)是与对流层上升(或下沉)运动的联系是非常紧密的, 在 355 K 以下特别明显。在 355 K 以上则相反: 来自低纬对流层上部冷空气在高空下沉, 臭氧浓度降低, 而高纬暖空气则得到抬升, 臭氧浓度增加。

5 结 论

通过臭氧、气象探空观测数据, 分析了西宁地区夏季对流层臭氧、与气象要素的垂直分布变化特征。显然, 对流层臭氧垂直分布变化与天气动力输送过程间基本存在着对应性的关系: 对流层暖、湿(干、冷)大气所对应的是低(高)浓度臭氧。天气动力过程影响了大气热力、动力分布状态的同时, 也改变了臭氧垂直分布。暖锋过境时, 湿球位温升高, 伴随着上升运动, 观测到的臭氧浓度降低, 当冷锋过境时, 湿球位温降低, 伴随着下沉气流; 观测到的臭氧浓度升高。在天气尺度内动力输送过程对对流层臭氧垂直分布的变化基本上可以认为是等熵绝热的。

致谢:青海省西宁市二十里铺气象站探空组对 1996 年 现场观测工作提供了帮助。

参考文献

- 1 Reed. The role of vertical motions in ozone-weather relationships. *J Meteor*, 1950, 7: 263~267
- 2 Holton J R, Haynes P H, McIntire M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev Geophys* 1995, 33: 403~439
- 3 Gouget H, Cammas J P, et al. Ozone peaks associated a subtropical-tropopause fold and with the trade wind inversion: A case study from the airborne campaign TROPOZ II over the Caribbean in winter. *J Geophys Res* 1996, 101. 25979~25993
- 4 Austin J F, Midgley P R. The climatology of the jet stream and stratospheric intrusions of ozone over Japan. *Atmos Environ* 1994, 28: 39~52
- 5 Smit, Kley D. The Jülich ozone sonde intercomparison experiment (JOSIE), The IGAC(International Global Atmospheric Chemistry), *News Letter*, 1996, 5: 4~7
- 6 石广玉, 许黎, 吕位秀等. 0-33公里大气臭氧与气溶胶垂直分布的气球观测. *科学通报*, 1986, 31(15): 1165~1167
- 7 孔琴心, 王庚辰, 刘广仁等. 大气臭氧垂直分布的电化学测量. *大气科学*, 1992, 16(5): 636~640
- 8 周秀骥, 罗超, 李维亮等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原异常低值中心. *科学通报*, 1995, 4(15): 1396~1398
- 9 刘奇俊, 周秀骥, 郑向东等. 青海高原臭氧的垂直廓线特征. 见: 周秀骥主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(2). 北京: 气象出版社, 1996. 50~58
- 10 石广玉, 白宇波, 岩坂泰信等. 拉萨上空大气臭氧垂直分布的高空气球探测. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 522~524
- 11 Philippe Van Haver, Dirk De Muer. Climatology of tropopause folds at mid latitudes. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 1033~1036
- 12 Yukitomo Tsutsumi, Yukio Makino, Jensen J. Aircraft measurements of tropospheric ozone over the western Pacific Ocean. *Atmos Environ*, 1996, 30(10-11): 1763~1772
- 13 Kley D, Crutzen P J. et al. Observations of near-zero ozone concentrations over the connective Pacific: effects on air chemistry. *Sciences*, 1996, 274: 230~233
- 14 白肇焯, 徐国昌著. 中国西北天气. 北京: 气象出版社, 1988. 71~82
- 15 罗四维著. 青藏高原及其邻近地区几类天气系统的研究. 北京: 气象出版社, 1992. 205pp
- 16 Bolton D. The computation of equivalent potential temperature. *Mon Wea Rev*, 1980, 108: 1046~1053
- 17 Browning K A. Organization of clouds and precipitation in the extratropical cyclones. In: *Extratropical Cyclones. The Erik Palmén Memorial volume*, 1990, 129~153
- 18 Brinksma E J, Meijer Y J, et al. Analysis of record-low ozone values during the 1997 Winter over Lauder. New Zealand. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 2785~2788

VARIATIONS IN VERTICAL DISTRIBUTION OF TROPOSPHERIC OZONE AND RELATIONSHIP WITH METEOROLOGICAL ELEMENTS OVER XINING IN SUMMER SEASON

Zheng Xiangdong Zhou Xiuji

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Qin Yu

(Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Tangjie Liu Qijun Li Weiliang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The variations in vertical distribution of tropospheric ozone and their associations with meteorological elements have been analyzed based on the observations made by using ozonesondes and rawinsondes during the period of July 5—August 3, 1996 over Xining (36°44'N, 101°45'E, 2296 m above sea Level). Increase (decrease) of ozone concentration in troposphere is always accompanied by the dry, cold (warm, moist) air flow, and this is much related to the vertical movement of atmosphere. Our results illustrate that the synoptic process has significant impact on the variations of ozone vertical distribution in troposphere.

Key words: Ozone vertical distribution, Meteorological field, Synoptic process.

郑向东等：西宁市夏季对流层臭氧垂直分布变化 与气象要素的关系

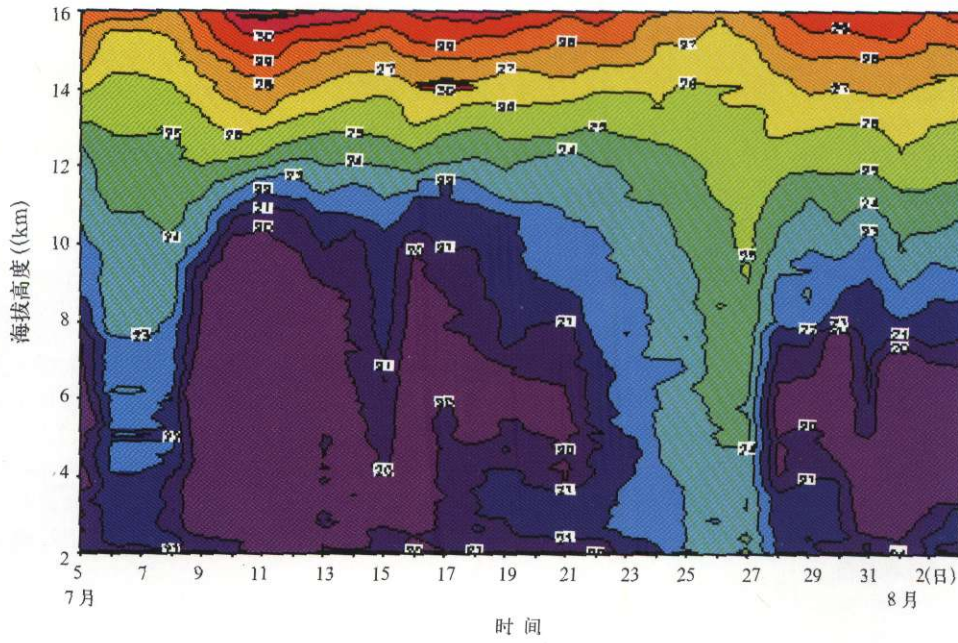


图5 1996年7月5日到8月3日西宁地区湿球位温(°C)垂直分布变化

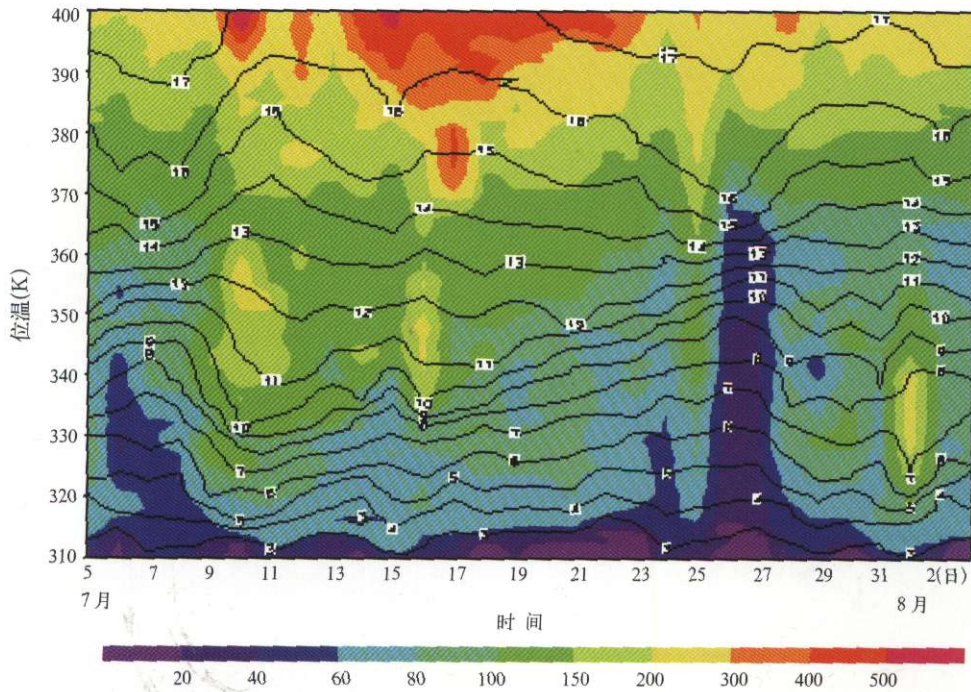


图6 1996年7月5日到8月3日西宁地区位势高度和臭氧浓度在熵坐标系里随时间的变化
(图中等值线为位势高度, 单位: km; 填色部分为臭氧混合比浓度)