

杨双艳,周顺武,陈鹤. 甘肃省对流层顶高度的季节变化特征分析[J]. 气象,2010,36(4):57-62.

甘肃省对流层顶高度的季节变化特征分析^{* 1}

杨双艳¹ 周顺武^{1,2} 陈鹤¹

1 南京信息工程大学,气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

提 要: 根据甘肃省8个探空站25年(1980—2004年)的对流层顶观测资料,分析了第一对流层顶和第二对流层顶高度的季节变化特征,结果表明:(1)全省各站全年各月均可观测到复合对流层顶,两类对流层顶存在着明显的季节差异,冬(夏)季以第一(二)对流层顶为主。(2)第一对流层顶的平均高度在春、秋(冬、夏)季相对较高(低),年变化曲线呈双峰型;第二对流层顶的平均高度在春、夏(秋、冬)季相对较高(低),年变化表现出单峰型。(3)两类对流层顶高度均存在明显的年际变化,除秋季外,各个季节第一(二)对流层顶普遍存在5~6 a(准3 a)的周期振荡。(4)近25年来甘肃省两类对流层顶主要以上升趋势为主,特别是在夏季两类对流层顶高度均存在明显的上升趋势。

关键词: 第一对流层顶高度,第二对流层顶高度,季节变化

Analysis on Seasonal Variation of Tropopause Height over Gansu Province

YANG Shuangyan¹ ZHOU Shunwu^{1,2} CHEN He¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract: Based on the tropopause observation data of eight sounding stations from 1980 to 2004 over Gansu Province, the seasonal variations of the first and the second tropopause heights were analyzed. The results indicated that there are significant seasonal differences in the two kinds of tropopause over Gansu Province. The second (first) tropopause is the main type in summer (winter). The annual average height of the first tropopause is higher in spring and autumn than in winter and summer, the average height of the second tropopause is lower in autumn and winter than in spring and winter. There is an obvious annual variation in the tropopause height in this location, the first tropopause height in each season has a periodic oscillation of 5 to 6 years, the second tropopause height has a quasi-oscillation of 3 years. The two kinds of tropopause heights in each season have a mainly rising trend in Gansu Province in the recent 25 years, especially in summer.

Key words: the first tropopause height, the second tropopause height, seasonal variation

引 言

对流层顶是对流层和平流层之间的一个过渡层,作为一个深厚的阻滞层,对流层顶阻碍着积雨云

顶的垂直发展、气溶胶和水汽等的垂直交换^[1-4]。对流层顶附近常伴随着高空急流^[5],暴雨等强对流天气与对流层顶有着紧密的联系^[6-7]。因此,研究对流层顶有着十分重要的意义。

根据温度的垂直剖面分布可将对流层顶分为极

* 国家自然科学基金项目(40675058),中国气象局成都高原气象研究所开放实验室基金(LPM2008007)

2009年4月29日收稿; 2009年10月28日收修定稿

第一作者:杨双艳,主要从事区域气候变化研究. Email:152850201@163.com

地对流层顶(又称为第一对流层顶)和热带对流层顶(又称为第二对流层顶),如果某一地区上空同时存在两类对流层顶,便称之为复合对流层顶。复合对流层顶在空间上的延伸区称之为对流层顶复合带或对流层顶断裂带^[1-2]。极地对流层顶和热带对流层顶在高度、温度上有明显的差异,极地(热带)对流层顶的高度较低(高),但温度较高(低)。许多研究^[8-9]表明物质从平流层向对流层的输送发生在对流层顶的断裂区中。因此在分析副热带地区对流层顶性质时,有必要对其进行分类研究。

根据中国境内探空站观测的对流层顶资料,近年来我国气象工作者对部分地区对流层顶要素的变化进行了分析。吴香玲^[10]利用北京地区 1977—1990 年的探空资料,对全年占主导地位的极地对流层顶进行分析,指出北京地区极地对流层顶高度的年变化曲线呈双峰型。张广兴等^[11]通过对新疆地区 12 个探空站的逐日观测对流层顶资料分析后,发现 1960—1999 年期间该地区第一对流层顶高度整体上存在上升趋势。李辑等^[12]比较了近 42 年来辽宁地区第一对流层顶高度变化特征,结果表明,在该时段内该地区第一对流层顶年、季高度变化表现为除冬季以外其他时段均呈下降趋势。陈芳等^[13]依据青海省 7 个探空站 1970—2001 年高空观测资料,揭示了青海上空对流层顶的分布特征,指出两类对流层顶高度存在着明显的季节性变化,第一对流层顶高度在春(夏)季最高(低),而第二对流层顶高度在夏(秋)季最高(低),同时还发现,近 32 年来青海地区上空第二对流层顶年平均高度呈上升趋势。

甘肃省地处黄土、青藏和蒙古三大高原交汇地带,作为一个气候敏感区域,有关该区域的气候变化已有很多研究,但多是基于地面观测要素的分析,而对其高层大气特性层的气候变化一直鲜有研究。甘肃省地处中高纬度地区,处在对流层顶复合带中^[14],因此有必要分季节对该地区两类对流层顶的变化特征进行分析。本文利用甘肃省 8 个探空站逐日观测的对流层顶气压资料,详细讨论两类对流层顶高度的季节、年际和长期趋势等变化特征。

1 对流层顶高度的计算方法

对流层顶有热力学定义及动力学定义。依据其最常用的热力学定义^[15],可以对各种来源的高空各层温度资料,计算出对流层顶高度^[16]或者直接利用

再分析提供的对流层顶气压资料^[17],由经验压高公式^[18]得到对流层顶高度。

本文选用中国气象局气象信息中心整编的甘肃省境内 8 个探空站 25 年(1980—2004 年)观测的每日两个时次的对流层顶气压资料,该资料的特点是:如果某一时次两类对流层顶都出现,则将该时次两类对流层顶气压值都记录下来。将两类对流层顶的临界值定为 150 hPa^[19],即当对流层顶气压 $>$ (\leq) 150 hPa 时,视其为第一(第二)对流层顶。首先将观测到的每日两时次的对流层顶气压值区分出第一对流层顶和第二对流层顶;然后分别进行算术平均得到每日气压值;再根据压高公式^[18]将对流层顶气压值转换为以“km”为单位的高度值;最后由各月的对流层顶日平均高度值得到月平均高度。文中以“TH₁(TH₂)”表示第一(二)对流层顶高度。

压高公式为: $Z = -H \times \ln(p/p_0)$, 其中 Z 为高度, p 为该高度的气压, H 为标高, p_0 为海平面气压。文中取 $H = 7.5$ km, $p_0 = 1013.25$ hPa。

2 对流层顶高度的季节变化特征

2.1 各季节两类对流层顶出现频率的比较

分别按月统计 25 年中 8 个探空站两类对流层顶各自出现的次数,然后将各月两类对流层顶各自出现的次数除以该月两类对流层顶出现次数的总和,就得到各月两类对流层顶出现相对频率,图 1 给出了各月 TH₁ 和 TH₂ 的频率分布。由图可见,在 6—9 月期间甘肃省上空出现 TH₂(深色柱)的频率明显多于 TH₁(浅色柱),其中在 7—8 月出现 TH₂

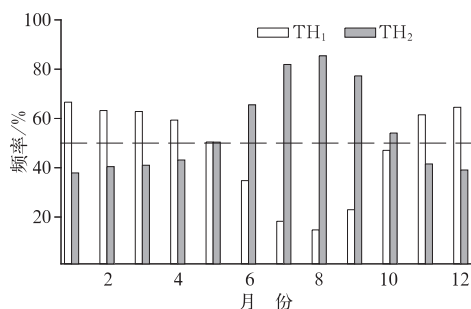


图 1 两类对流层顶出现频率的季节变化(浅色柱表示第一对流层顶;深色表示第二对流层顶)
Fig. 1 The seasonal variation of the frequency for the two kinds of tropopause heights (The left columns indicate the first tropopause, right ones indicate the second)

的频率超过了 80%;5 月和 10 月两类对流层顶出现的频率基本相当;而在 11 月至次年 4 月 TH₁ 出现的次数则明显多于 TH₂。这表明两类对流层顶分布存在着明显的季节差异,除 5 月和 10 月过渡季节外,夏季(6—9 月)主要以第二对流层顶为主,而冬季(11 月至次年 4 月)则以第一对流层顶为主。

2.2 各季节两类对流层顶的平均高度

分析甘肃省 8 个探空站多年平均的两类对流层顶年平均高度(图略),发现各站之间多年平均的 TH₁ 和 TH₂ 的最大值与最小值之差分别在 0.1 km 和 0.4 km 左右,表明各站之间的两类对流层顶年平均高度差异均不明显。因此,以下将 8 个站的对流层顶高度进行算术平均后,以讨论全省对流层顶高度的变化。图 2 为两类对流层顶的平均高度的季节变化。由图可见,TH₁ 在春季和秋季较高,其中 4—6 月和 10 月份的平均高度超过了 10.5 km,尤其是 4—5 月均超过 11 km,而在冬、夏季平均高度偏低,其中 1—2 月和 8 月低于 10 km,可见 TH₁ 的年变化曲线呈双峰型结构;TH₂ 年变化与 TH₁ 明显不同,表现出单峰型变化:2—7 月的平均高度超过 16 km,而其他月份低于 16 km。

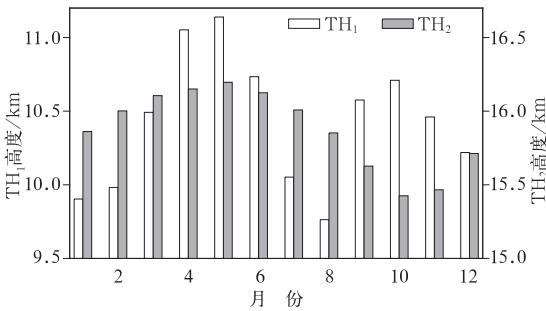


图 2 两类对流层顶多年平均高度的季节变化
Fig. 2 The seasonal variation of multi-year average height for two kinds of tropopause heights (left coordinate: TH₁, right coordinate: TH₂)

2.3 两类对流层顶高度标准差的季节分布

比较两类对流层顶高度在不同季节的变化幅度,图 3 给出了各月两类对流层顶高度的标准差分布。由图可见,TH₁ 的最大变率出现在 6—9 月,其中 8 月份的标准差超过了 0.6 km,而 10—5 月的标准差均不到 0.4 km。由图 1 可知,在夏季第二对流层顶出现的频率占绝对的主导地位,很少观测到第一对流层顶,正是由于第一对流层顶出现的频率相

当少,使得其变率异常偏大,即 TH₁ 在夏季表现出较大的不稳定性;TH₂ 月际变率不如 TH₁ 明显,除 12 月份略大于 TH₁ 外,其他各月 TH₂ 的标准差均小于 TH₁,各月的标准差基本上在 0.2 km 上下波动。这表明在绝大多数月份,TH₁ 以各月均值为为中心的变化幅度要明显大于 TH₂ 的变化幅度。

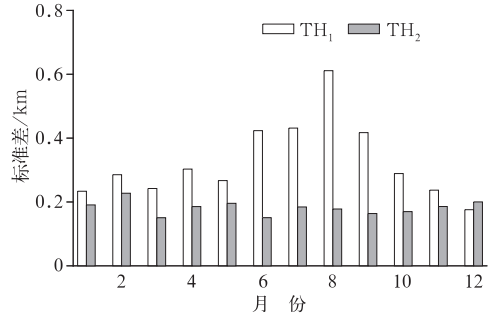


图 3 两类对流层顶高度标准差的季节分布
Fig. 3 The seasonal distribution of the standard deviation for the two kinds of tropopause heights

3 对流层顶高度的年际变化和长期趋势变化

3.1 对流层顶高度的年际变化

甘肃省两类对流层顶高度存在着明显的季节差异,在春、夏、秋和冬季 TH₁ 和 TH₂ 的年际变化曲线(图略)可见,就平均值而言,TH₁ 在春季普遍偏高,在冬季相对较低;就年际变化幅度而言,夏季最大,春、秋季次之,冬季最低。利用功率谱分析各季节 TH₁ 的周期(图 4)可知,除秋季存在准 3.5 a 的周期振荡外,其余季节均具有 5~6 a 的周期振荡,各季节周期均通过 0.05 的显著性检验。

分析 1980—2004 年期间 TH₂ 的年际变化(图略),就平均值而言,在春季相对较高,在秋季相对较低;比较各季节的年际变化幅度,冬季最大,春、夏季次之,秋季最低。各个季节的 TH₂ 同样也表现出明显的年际变化。图 5 为利用功率谱给出各季节 TH₂ 的周期,由图可见,除秋季存在准 5 a 的周期变化外,其他季节均具有准 3 a 的周期振荡,各季节显著的周期均通过了 0.05 的显著性检验。需要指出的是,结合 morlet 小波分析结果(图略),同时还发现 TH₂ 在春季和冬季还存在着较长时间(如 11 a 左右)的长周期变化,但由于资料年限限制,其可信度还有待于今后选取更长时段的数据加以验证。

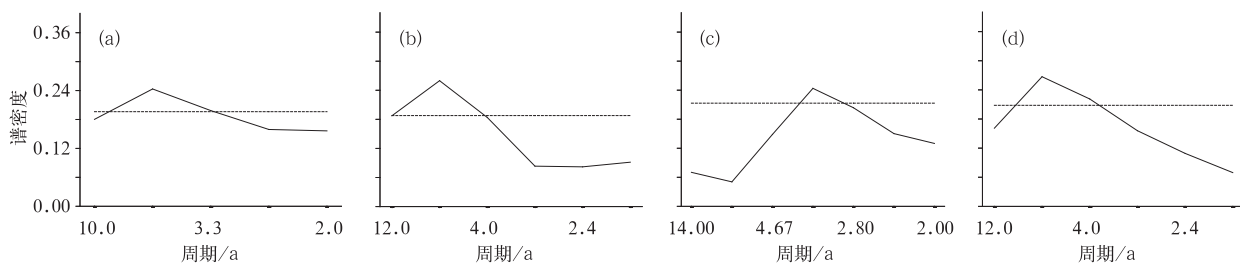


图 4 各季节第一对流层顶高度功率谱

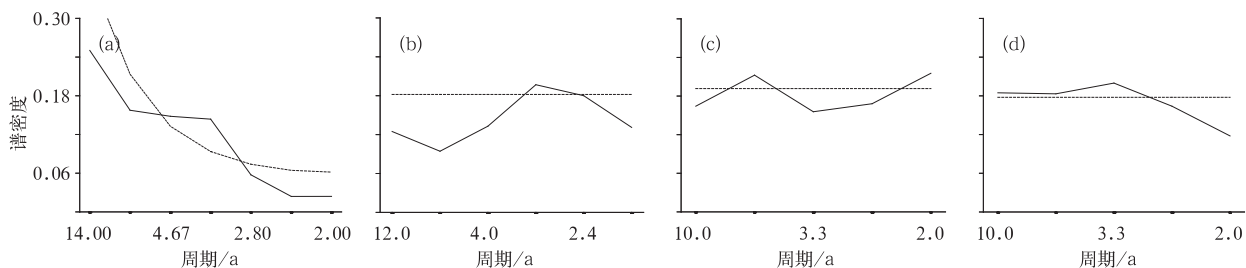
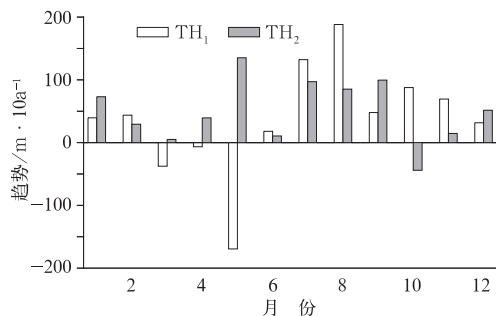
(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季。实线:功率谱,虚线为 $\alpha=0.05$ 的白噪音标准谱Fig. 4 The power spectrum of TH₁ in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d)
(solid lines; power spectrum; dashed lines; significance at the 0.05 level)

图 5 各季节第二对流层顶高度功率谱

(说明同图 4, 但图 5a 中虚线为 $\alpha=0.05$ 的红噪音标准谱)Fig. 5 The power spectrum of TH₂ in spring(a), summer(b), autumn(c) and winter(d)
(legends same as Fig. 4 and the dashed line denotes the standard spectrum of red noise at $\alpha=0.05$)

3.2 对流层顶高度的线性趋势

温室效应导致全球变暖是公认的事实, 由于温室气体增多导致的对流层变暖和由于臭氧减少导致的平流层变冷可能使对流层抬升^[20-21]。以下采用线性趋势方法分析全省各月两类对流层顶高度变化趋势。图 6 给出了 1980—2004 年期间全省各月 TH₁、TH₂ 的线性变化趋势。从图中可以看出, 除在 3—5 月表现出一定的下降趋势外, 其他各月均为上升趋势, 尤其是 7—8 月的上升趋势最为

图 6 两类对流层顶高度线性趋势的季节变化
Fig. 6 Seasonal variation of linear trend for two kinds of tropopause heights

明显, 升幅分别达到 132 m/10 a 和 188 m/10 a。对 TH₂ 而言, 除 10 月表现出微弱的下降趋势外, 其他各月均表现出上升趋势, 其中 5 月、7—9 月和 12 月的线性上升趋势均超过了 80 m/10 a。简言之, 近 25 年来全省两类对流层顶高度主要表现出上升趋势, 特别是夏季两类对流层顶高度均存在明显的上升趋势。

4 臭氧总量和垂直运动对对流层顶高度的影响

事实上, 影响对流层顶高度的主要有热力因素(臭氧)和动力因素(抬升运动)两方面。为了弄清楚臭氧总量和垂直运动对对流层顶高度的影响, 以下参考邹捍^[20]的方法通过面积平均给出甘肃省上空臭氧总量时间序列, 由于对流层顶以上垂直速度计算的准确性较差^[21], 本文采用位温来分析高空垂直运动^[22], 当空气块做干绝热运动时, 位温守恒。对流层顶和平流层中下层的水汽含量低, 大气运动可视为干绝热运动, 位温恒定不变。当空气上升时, 将下层较低的位温带到上层, 使上层的位温下降, 局地

的等位温面抬升。所以,由该地区位温的变化,可以反映垂直运动情况^[21]。鉴于 TH_1 (TH_2) 平均高度约在 200(100) hPa,利用 NCEP 再分析资料分别计算得到 200 hPa 和 100 hPa 位温序列。

图 7 分别给出了两类对流层顶高度与臭氧总量以及不同高度位温的逐月相关系数分布。由图 7a 可见,各月 200 hPa 的位温与 TH_1 具有非常显著的

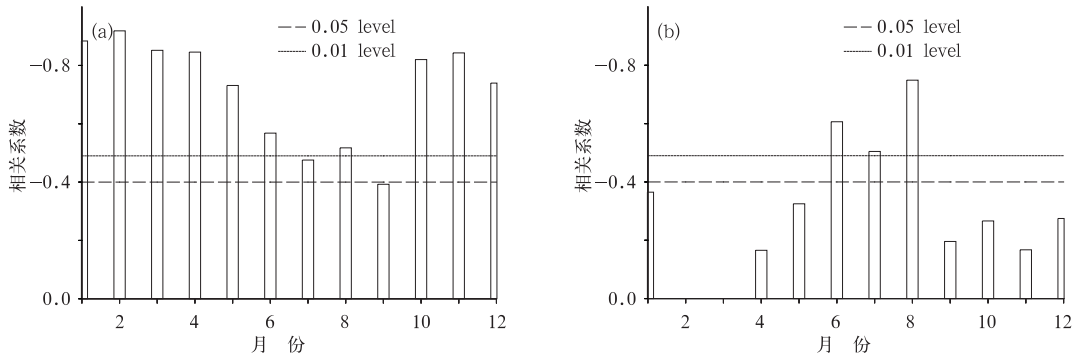


图 7 甘肃省上空 200 hPa 的位温与 TH_1 (a) 以及臭氧总量与 TH_2 (b) 的逐月相关系数
(图中虚直线和实直线分别表示相关信度通过 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 显著性水平)

Fig. 7 The monthly correlation coefficient of 200 hPa potential temperature and the first tropopause height (a) and that of the total ozone and the second tropopause height (b)
(solid lines and dashed lines respectively indicate significance at the 0.05 and 0.01 level)

图 7b 为甘肃省上空臭氧总量与 TH_2 的逐月相关系数分布。图中各月臭氧总量普遍与 TH_2 存在反相关关系,特别是在夏季其两者之间具有明显的负相关。这反映出当臭氧总量减少,使得平流层对太阳紫外辐射吸收减少,而进入对流层底层的辐射增加,从而导致平流层低层降温,对流层增温,而这又使得对流层顶高度得以抬升^[23]。

在影响对流层顶高度变化因子的诸多研究中,许多研究表明对流层顶高度变化与对流层增温和平流层降温有关,而这又与温室效应和平流层臭氧减少有关^[24-26]。Santer 等^[24]将对流层顶高度变化归因于人为强迫和自然强迫共同作用的结果,而人为强迫又是主要的因素。由于人类活动的影响,平流层臭氧的损耗导致太阳到达地面的紫外辐射增加^[27],造成平流层的降温和对流层的升温,从而使对流层高度上升;在大气层上部不断增加的温室气体导致了平流层的降温^[28],总之,诸多因子的变化都可能影响对流层顶高度,其中的物理过程又可能是相互影响^[25, 29],有待今后进一步深入研究。

5 小结与讨论

根据甘肃省 8 个探空站 25 年的对流层顶气压

反相关关系,尤其是冬春季其显著性均通过了 0.01 信度水平。说明当高空 200 hPa 附近的位温下降(即有上升运动)时, TH_1 抬高,逐月计算 100 hPa 的位温与 TH_2 的相关关系也存在类似的反向关系,其明显的负相关出现在夏季(图略),这表明了上升作用有利于第一对流层顶高度的抬升。

资料,分季节讨论了两大类对流层顶高度的变化特征,主要结论有:

(1) 甘肃省各站全年各月均可观测到复合对流层顶,两类对流层顶表现出明显的季节差异,5 月和 10 月两类对流层顶出现的频率基本相当,夏季(6—9 月)出现第二对流层顶的频率较大,冬季(11—4 月)出现第一对流层顶的频率较大。

(2) 甘肃全省第一对流层顶的平均高度在春、秋季相对较高,而在冬、夏季相对较低,年变化曲线呈现出双峰型;第二对流层顶的平均高度在秋、冬季相对较低,而在春、夏季相对较高,年变化曲线表现出单峰型。

(3) 甘肃省第一对流层顶高度的最大变率出现在 6—9 月,特别 8 月的变率最大。第二对流层顶高度除 12 月外,其余各月变率均不如第一对流层顶,即第一对流层顶高度在绝大多数月份中以其各月均值为中心的变化幅度比第二对流层顶的变化幅度大。

(4) 甘肃省两类对流层顶高度均存在明显的年际变化,除了秋季外,全省第一对流层顶高度普遍存在 5~6 a 周期振荡,而第二对流层顶高度存在准 3 a 周期振荡。

(5) 近 25 年来甘肃全省第一对流层顶的高度

除了春季外,均表现出上升趋势,而第二对流层顶高度除了 10 月份外,其余各月均为上升趋势,尤其是在夏季两类对流层顶高度均存在明显的上升趋势。

随着大气环流的季节转换,对流层顶纬度位置也随着季节有明显的南北进退^[14]。尽管甘肃省 8 个探空站所处纬度位置南北差距仅有 8 个纬度,各站之间的第一、第二对流层顶平均高度差异也不明显,但在 25 年的统计时段内,在某些年份位置偏南的测站(武都、合作和平凉)在 7—9 月甚至没有观测到第一对流层顶。因此将 8 个测站对流层顶高度通过算术平均后,分析全省两类对流层高度的变化,仍显得过于简单。

此外,在分析对流层顶高度变化时,不少研究只是简单比较了年平均高度的变化^[10, 13, 17],而本文的分析结果表明,甘肃省两类对流层顶均存在明显的季节差异,因此在研究两类对流层顶高度变化时需要区分不同季节进行分析,这样才有可能更真实反映其变化。

致谢:衷心感谢国家气象信息中心气象资料室提供了对流层顶逐日气压资料!

参考文献

- [1] Maxobep z. M. 对流层顶气候学[M]. 张贵银, 廖寿发, 译. 北京: 气象出版社, 1988. 19-29. 136-141.
- [2] 邹进上, 江静, 王梅华. 高空气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 306-313.
- [3] Holton J R, P H Hayes, M E McIntyre, et al. Stratosphere-troposphere exchange [J]. Rev Geophys, 1995, 33: 403-439.
- [4] 杨健, 吕达仁. 平流层—对流层交换研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 380-385.
- [5] 民航北京管理局气象台. 高空飞行与气象[J]. 气象, 1974, 试刊: 24-25.
- [6] 黄亿, 寿绍文, 傅灵艳. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(1): 65-73.
- [7] 方翔, 邱红, 曹志强, 等. 应用 AMSU-B 微波资料识别强对流云区的研究[J]. 气象, 2008, 34(3): 22-29.
- [8] Ramanathan K R, Kolkarni R N. Mean meridional distribution of ozone in different season calculated from Umkehr observation and probable vertical transport mechanism [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1960, 86(368): 144-155.
- [9] Danielsen E F. Stratosphere-troposphere exchange at polar latitudes based on radioactivity, ozone, and polar vorticity [J]. J Atmos Sci, 1968, 25: 502-518.
- [10] 吴香玲. 北京地区极地对流层顶与地面要素之间的关系[J]. 气象, 1995, 21(11): 42-45.
- [11] 张广兴, 李娟, 崔彩霞, 等. 新疆 1960—1999 年第一对流层顶高度变化及其突变分析[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 106-110.
- [12] 李辑, 蔡福, 明惠青, 等. 辽宁地区第一对流层顶高度变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(2): 9-15.
- [13] 陈芳, 马英芳, 朱西德. 青海省对流层顶若干统计特征[J]. 气象科技, 2007, 35(1): 57-60.
- [14] 邹进上, 张降秋, 王炳忠. 我国对流层顶的时空分布特征及其影响因子[J]. 气象科学, 1989, 9(4): 417-426.
- [15] WMO. Meteorology—A three-dimensional science: Second session of the commission for aerology [J]. WMO Bull, 1957, 4: 134-138.
- [16] Reichler T, Dameris M, Sausen R. Determining the tropopause height from gridded data [J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(20): 2042, doi: 10.1029/2003GL01824.
- [17] 吴润, 杨茜, 符凉斌, 等. 全球变暖背景下东亚对流层顶高度演变特征的研究[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 595-600.
- [18] 约翰·M 华莱士, 彼得·V 霍布斯. 大气科学(中文版)[M]. 何金海, 王振会, 银海, 等译. 北京: 科学出版社, 2008. 8
- [19] 王树廷, 王伯民. 气象资料的整理和统计方法[M]. 北京: 气象出版社, 1984.
- [20] Zou H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet[J]. Geophys Res Lett, 23, 1996: 1029-1032.
- [21] 周任君, 陈月娟. 青藏高原和伊朗高原上空臭氧变化特征及其与南亚高压的关系[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(6): 899-908.
- [22] Zou Han, Gao Yongqi. Vertical ozone profile over Tibet using SAGE I and II data [J]. Adv Atmos Sci, 1997, 14(4): 505-512.
- [23] Santer B D, M F Wehner, T M L Wigley, et al. Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes [J]. Science, 2003, 301(7): 479-483.
- [24] Santer B D, M L T Wigley, A J Simmons, et al. Identification of anthropogenic climate change using a second-generation reanalysis [J]. J Geophys Res, 2004, 109: D21104.
- [25] Steinbrecht W, Claude H, K? hler U, et al. Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes [J]. J Geophys Res, 1998, 103(D15): 19183-19192.
- [26] 吴兑. 到达地面的太阳紫外辐射强度的观测[J]. 气象, 2001, 27(3): 26-29.
- [27] 卞林根, 陈百炼, 辛羽飞. 极地气象与全球变化[J]. 气象, 2007, 33(3): 4-9.
- [28] Shunwu Zhou, Renhe Zhang. Decadal variations of temperature and geopotential height over the Tibetan Plateau and their relations with Tibet ozone depletion [J], Geophys Res Lett, 2005, 32: 18705, doi: 10.1029/2005GL023496.
- [29] 王卫国, 秦芳. 臭氧层季节变化与对流层顶的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1994, 16(增刊): 29-34.