周顺武,杨双艳,张人禾,等.青藏高原两类对流层顶高度的季节变化特征[J].大气科学学报,2010,33(3):307-314.

Zhou Shun-wu, Yang Shuang-yan, Zhang Ren-he, et al Seasonal variation of two types of tropopause height over the Tibetan Plateau [J]. Trans A tmos Sci, 2010, 33 (3): 307-314.

青藏高原两类对流层顶高度的季节变化特征

周顺武¹,杨双艳¹,张人禾²,马振锋³

(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,江苏南京 210044;
2.中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室,北京 100081;
3.四川省气候中心,四川 成都 610071)

摘要:根据青藏高原地区 14个探空站近 30 a(1979—2008年)的对流层顶逐日观测资料,分析了该 地区上空热带对流层顶 (第二对流层顶)和极地对流层顶 (第一对流层顶)出现的频率及高度的季 节变化特征。结果表明: (1)高原全年均可观测到第二对流层顶,其中在暖季 (6—10月)第二对流 层顶占绝对主导地位,而在其余月份则以复合对流层顶为主; (2)两类对流层顶高度在季节变化上 存在着明显的差异,第一对流层顶高度在春秋 (夏冬)季偏高 (低),第二对流层顶高度在春夏 (秋 冬)季偏高 (低),即第一 (二)对流层顶高度的年变化曲线呈双 (单)峰型; (3)两类对流层顶高度均 存在明显的年际变化,第一 (二)对流层顶高度除秋季存在准 3.6 a(6 a)的周期变化外,其余季节 均具有 4.5 ~ 6 a(2 ~ 4 a)的振荡周期; (4)近 30 a来高原第一 (二)对流层顶主要表现出下降 (上 升)的趋势,尤其是第二对流层顶高度在冬、春季存在着明显的上升趋势。 关键词:青藏高原;第一对流层顶;第二对流层顶;高度;季节变化

中图分类号: P465 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097 (2010) 03-0307-08

Seasonal Variation of Two Types of Tropopause Height over the Tibetan Plateau

ZHOU Shun-wu¹, YANG Shuang-yan¹, ZHANG Ren-he², MA Zhen-feng³

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NU IST, Nanjing 210044, China;
State Key Laboratory for Severe Weather, CAMS, Beijing 100081, China;
Climate Center of Sichuan Province, Chengdu 610071, China)

Abstract: Based on the tropopause daily observation data of 14 sounding stations from 1979 to 2008 over the Tibetan Plateau, the frequence and the seasonal variation of the tropical tropopause (the second tropopause) and the polar tropopause (the first tropopause) were analyzed The results indicate that the second tropopause is dominant from June to October over the Tibetan Plateau and the frequency of the two types of tropopause is roughly equal in other months There are significant seasonal differences in the two kinds of tropopauses: the first tropopause presents a double-peak structure which is higher in spring and autumn and lower in winter and summer, the second tropopause presents a single-peak structure which is lower in autumn and winter and higher in spring and summer There are obvious annual variations in the tropopause height in each season, the first one has a periodic quasi-oscillation of 4.5 to 6 years in each season except autumn which has a 3.6-year one. In recent 30 years, the first height

收稿日期: 2009-09-15;改回日期: 2010-02-25

基金项目 :中国气象局成都高原气象研究所开放实验室基金项目 (LEM2008007) ;国家自然科学基金资助项目 (40675058) 作者简介 :周顺武 (1968—) ,男 ,四川大竹人 ,博士 ,教授 ,研究方向为区域气候变化 , zhou@ nuist edu cn has a mainly downtrend while the second one presents an opposite trend, which is even more obvious in spring and winter

Key words: the Tibetan Plateau; the first tropopause; the second tropopause; height; seasonal variation

0 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^[1-6]。 对流层顶高度由热带上空的大约 16 km向两极递减 到 9 km左右,按其高度可将其分为极地 (第一)对 流层顶和热带 (第二)对流层顶,如果某一地区上空 同时存在两类对流层顶,则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]。许多研究^[7-8]指出对 流层顶断裂带是平流层和对流层进行物质和能量交 换的主要区域,在副热带地区经常出现对流层顶断 裂现象,因而这里最有利于对流层和平流层的空气 进行交换^[9]。

由于全球变暖,地球的热带区域在扩大,对流层 顶最高的部分在向南向北伸展,这些变化正在引发 一种会影响全球天气形势和长期气候的连锁反 应^[10]。近年来对流层顶高度的抬升已引起了越来 越多的关注^[11-15]。Steinbrecht等^[12]分析了德国的 Hohenpeissenberg站探空资料,发现自 20世纪 60年 代末以来该站对流层顶高度大约上升了 150 ±70 m。Santer等^[13]基于探空资料和 NCEP/NCAR 再分 析资料,证实了自 1979年以来全球对流层顶高度升 高了近 200 m。Sausen和 Santer^[14]也指出,自 1979 年以来全球平均的对流层顶高度呈上升趋势。

近十几年来,我国气象工作者基于探空资料分 析了中国不同区域的对流层顶高度变化特征。吴香 玲^[16]利用北京站 1977—1990年的探空资料,对该 地区全年占主导地位的第一对流层顶高度进行了分 析,指出北京地区第一对流层顶高度的年变化曲线 呈双峰型。张广兴等^[17]通过对新疆地区 12个探空 站的对流层顶资料分析后,发现 1960—1999年全区 第一对流层顶高度整体上存在上升趋势。李辑 等^[18]分析了 1964—2005年辽宁省南部(大连)和北 部(沈阳)第一对流层顶高度的变化特征。陈芳 等^[19]利用青海 7个探空站近 32 a(1970—2001年) 的高空观测资料,分析表明该地区两类对流层顶的 高度存在明显的季节性变化,同时指出近 30 a来第 二对流层顶的年平均高度呈上升趋势。 青藏高原 (以下简称高原)面积约占我国陆地 面积的 1/4,平均海拔在 4 000 m以上,伸入到对流 层中部。高原作为地球表面上一块突出的巨大陆 地,由春到夏高原上空加热导致了对流明显增强以 及地形动力抬升作用,全球对流层顶的最大高度出 现在高原以南的附近地区^[20]。同时高原地处副热 带地区,也是经常出现对流层顶断裂带的地区,作为 一个极为特殊的区域,研究高原对流层顶的演变特 征,对于全面和准确了解对流层顶区域变化以及理 解上下层大气耦合机制具有重要的意义。王鑫和吕 达仁^[21]利用 GPS无线电掩星数据,分析了青藏高原 (75~105 E,25~40 N)上空对流层顶高度及温度 的季节变化特征。

本文基于高原地区 14个探空站逐日观测的对 流层顶资料,详细讨论了两类对流层顶出现的频率 及其高度的季节变化、年际变化和长期趋势变化。

1 资料说明与处理方法

采用中国气象局信息中心提供的高原地区(包括西藏、青海以及周边部分省)14个探空站(站点位置见图 1)近 30 a(1979—2008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。本文以 150 hPa为两类对流层顶的临界值^[22],即当对流层顶气压 >() 150 hPa时,视其为第一(第二)对流层顶。首先由每日两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后得到每日一次的气压值;再由压高公式^[23]将对流层顶气压值 转换为以"km"为单位的高度值;最后由逐日高度值 得到各月对流层顶的高度。文中以"T1"("TH1") 表示第一对流层顶(高度),以"T2"("TH2")表示 第二对流层顶(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。 按文献 [22]的取值,文中 H = 7.5 km, p_0 = 1 013.25 hPa。

2 对流层顶高度的气候变化特征

2.1 两类对流层顶出现的相对频率 比较不同季节两类对流层顶出现的频率,按月



- 图 1 高原 14个探空站的地理位置分布 (图中阴影部分表示海拔超过 3 000 m 的地形, 表示探空站的位置)
- Fig 1 The location of the 14 sounding stations over Tibetan plateau (Shaded area denotes the Tibetan Plateau, and indicates the location of the stations)

统计各站 30 a两类对流层顶各自出现的次数 (若为 复合对流层顶则两类对流层顶各计 1次),然后将 每月各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 出现的相对频率。图 2显示了两类对流层顶出现频 率的季节分布。由图 2可见,在 5—11月期间 T2出 现的频率明显多于 T1出现的频率,其中 6—9月 T2 出现的频率超过了 85%,特别是在 8月几乎很少观 测到 T1,T2出现的频率几乎为 100%;12月到翌年 4月两类对流层顶出现的频率基本相当。由此可 见,高原上空第二对流层顶在暖季 (6—10月)占绝 对优势地位,而在其余季节两类对流层顶的出现频 率基本相当。

2 2 两类对流层顶的平均高度

将高原 14个探空站两类对流层顶高度分别进 行算术平均后,以分析整个高原地区对流层顶高度 的季节变化,图 3给出了高原上空多年平均后的两 类对流层顶高度的季节变化。由图 3可见,高原 TH1全年处在 9.9~12.1 km 之间,在春季和秋季 平均高度较高,其中 3—6月和 9—12月平均高度均 在 11.0 km 以上,尤其是 4—5月最高 (超过了 11.5 km);而在夏、冬季高度偏低,尤其是 7—8月其平均



Fig 2 The seasonal variation of the occurrence frequency of the two kinds of tropopauses (The black columns indicate the first tropopause, and gray ones indicate the second one)



图 3 两类对流层顶多年平均高度的季节变化(TH1表示第一对流层顶高度,TH2表示第二对流层顶高度) Fig 3 The seasonal variation of multi-annual average height of two kinds of tropopauses(TH1 indicates the first tropopause, and TH2 indicates the second one)

高度降至最低 (<10 km),年变化幅度超过 2.5 km。因此, TH1的年变化曲线呈现出明显的双峰型特征。

TH2的年平均高度约为 17.45 km,其年进程与 TH1明显不同,其中在 2—7月平均高度较高,最大 高度出现在 4—6月(超过了 17.7 km);而在 9月到 翌年 1月高度较低,尤其是在 10—11月平均高度降 至最低(约为 17.0 km)。简言之,TH2在晚春和初 夏为峰值,晚秋为谷值,但年变化幅度仅为 0.75 km,其年变化曲线表现出明显的单峰单谷型。

2 3 不同季节两类对流层顶高度的变化幅度

比较不同季节两类对流层顶高度的变化幅度, 由 TH1和 TH2各月的标准差分布 (图 4)可见, TH1 的最大变率出现在暖季 (6—10月),尤其是在 8月 其标准差超过了 2.0 km,而其他月份其值均为 0.4 km 左右,这表明 TH1在暖季表现出极大的不稳定 性。由图 2可知,高原暖季 T2出现的频率占绝对主 导地位,只是偶尔观测到 T1,正是由于 T1出现的偶 然性使得其变率异常偏大。 TH2各月的标准差基 本在 0.2 km上下波动,明显低于 TH1各月的标准 差,尤其是在暖季 TH2的变化幅度最小,这也从另 外一个角度表明 TH2在暖季表现出相当高的稳定 性。由此可见,在所有月份中, TH1以各月均值为 中心的变化幅度要明显大于 TH2的变化幅度。

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特征

图 5给出了近 30 a期间 TH1在春、夏、秋和冬

图 4 不同季节两类对流层顶高度标准差分布

Fig 4 The seasonal distribution of the standard deviation of the two kinds of tropopause height



图 5 各个季节 TH1的年际变化曲线

Fig 5 Interannual variation of TH1 in each season

4个季节的年际变化曲线。由图 5可以看出,就平均值 而言, TH1在春 (夏)季明显偏高 (低);就年际变化幅度 而言,夏季最大,秋季次之,春、冬季较低,这与图 3得到 的结果一致。利用功率谱进一步分析各季节 TH1的变 化周期,发现除秋季存在准 3.6 a的周期外,其余季节 均存在准 4.5~6 a的周期 (表 1)。

在各季节 TH2的年际变化曲线图上 (图略),就 平均值而言,在春夏 (秋冬)季相对较高 (低);各季 节的年际变化幅度均小于 TH1。各个季节的 TH2 同样也表现出明显年际振荡,除秋季具有准 6 a的 周期外,其余季节存在准 2 ~4 a的振荡周期 (表 1),功率谱分析同时还发现,各季节 TH2普遍还存 在着 10~11 a的低频变化。

表 1 功率谱分析给出的 TH1和 TH2周期

Table 1 Periods of TH1 and TH2 according to power spec-

trum analysis				č
类型	春季	夏季	秋季	冬季
TH1	5~6	6.0	3.6	6.0
TH2	3.6	2.3	6.0	2.0

3.2 对流层顶高度的线性趋势分析

以下采用线性趋势方法分析近 30 a 各季两类 对流层顶高度的线性变化趋势,由前面分析可知,第 一对流层顶在 5—10月表现出极大的不稳定性,且 极少出现,分析这些月份的变化趋势意义不大^[19], 因此以下仅讨论 TH1在 1—4月和 11—12月的变 化趋势。

图 6给出了近 30 a逐月高原两类对流层顶高度的线性变化趋势。由图 6可知, TH1除在 1月和

11月表现为微弱的上升趋势外,2—4月和 12月均 表现出不同程度的下降趋势。对 TH2而言,除 10 月份出现了微弱的下降趋势外,其他各月均表现出 上升的趋势,其中在冬春季的上升趋势明显比夏秋 季大,尤其 TH2在 2月、5月及 12月的上升趋势均 超过了 150 m/(10 a)。

4 结论与讨论

本文根据高原地区 14个探空站近 30 a的对流 层顶气压资料,讨论了两类对流层顶在不同季节出 现的频率及高度的变化特征,其主要结论如下:

(1)高原地区两类对流层顶出现的频率存在明显的季节差异:在暖季(6—10月)出现第二对流层顶的频率极高,而在其余季节两类对流层顶的出现频率大致相当。

(2)高原两类对流层顶高度在季节变化上存在 着明显的差异:第一对流层顶多年平均高度约为 11.11 km,其中在春秋季 (夏冬季)相对偏高 (低), 年变化曲线呈单峰型;而第二对流层顶的多年平均 高度约为 17.45 km,其高度在春夏 (秋冬)季偏高 (低),年变化曲线呈双峰型。

(3)高原两类对流层顶高度均存在明显的年际 变化,第一(二)对流层顶高度除秋季存在准 3.6 a (6 a)的周期外,其余季节普遍具有 4.5~6 a(2~4 a)的振荡周期。

(4)近 30 a来高原第一对流层顶高度在 2—4 月和 12月表现出不同程度的下降趋势,而第二对流 层顶高度除 10月为下降趋势外,其他各月均为上升 趋势,尤其是在冬、春季上升趋势最为显著。



Fig 6 The monthly linear trend of two kinds of trop op ause height in recent 30 years

在分析对流层顶高度变化时,一些研究只是简 单比较了年平均高度的变化^[16,24],本文的分析结果 表明,高原地区两类对流层顶无论是出现频率还是 平均高度均存在明显的季节差异,因此只有分季节 来研究两类对流层顶变化特征,才有可能更有意义, 也才有可能揭示其变化原因。

影响对流层顶的变化因子主要有太阳辐射、环 流因子、下垫面性质(包括海陆分布)、大地形以及 臭氧含量改变等^[1,6,9,13-14,25-26],在诸多影响因子中, 高原作为"被抬高了的大尺度山地,其地表面吸收 太阳辐射加热大气,这种热力作用直接对大气对流 层加热^[27-28]。因此,高原对流层顶高度无疑与该地 区下垫面热状况的季节变化有关。在地面加热的各 分量(感热通量、潜热通量和地面净长波辐射通量) 中,哪一种加热对对流层顶高度的影响最显著呢? 高原 TH1全年处在 300~200 hPa之间,其高度 变化与对流层上部温度的变化存在密切关系。地面 净长波辐射为地面向上长波辐射与大气逆辐射之 差,由于受到地面向上长波辐射和大气逆辐射的综 合影响,它直接影响到对流层大气温度的变化。

魏丽和李栋梁^[29]通过对 NCEP/DOE再分析地 面通量资料与 1982年 8月—1983年 7月高原热源 观测资料进行比较后,认为在高原地区 NCEP/DOE 提供的地面各辐射通量能够反映出其年变化的特 征。以下利用该套再分析资料提供的地面净长波辐 射通量 (NLW RF)和感热通量 (SHTF),通过对它们 在高原地区面积平均后,得到多年平均值的季节演 变特征,初步讨论高原热力状况对两类对流层顶高 度的影响。图 7为多年平均 NLW R与 TH1的季节 变化。由图 7可见,高原地区 NLW RF在 4—5月最





0

312

大,7—8月最小,10—11月为次大,1—2月为次小, 其季节变化与 TH1的季节变化一致,也表现出双峰 型结构:即在秋、春季大,冬、夏季小。这是因为由春 至夏地面迅速加热,使地面向上长波辐射迅速增大, 且其增大幅度大于大气逆辐射;而秋季因晴好天气 出现频数较多,大气逆辐射的减少快于地面向上长 波辐射,从而使秋、春季地面净长波辐射始终维持较 高的水平;冬季的低值是与冬季地表温度迅速降低, 地面向上长波辐射较小有关;夏季的低值则是因为 随着雨季的到来天空总云量增多造成大气逆辐射迅 速增大^[30]。这表明 NLW RF越强(弱),对流层上部 气温越低(高),从而导致 TH1越高(低)。

TH2在春、夏两季较高,在秋、冬两季较低,对 流层顶的高度取决于对流层大气的平均温度^[1,30]。 图 8为高原区多年平均的 SHTF与 TH2的季节变 化。由图 8可见,在 11月至翌年 2月高原感热为负 值,热量由大气输送给下垫面;而 3—10月的感热为 正值,即地面加热大气,尤其是在 5—6月达到最大, SHFT的这一单峰型变化与 TH2的变化一致。感热 在春末夏初达到最大的可能原因是^[30].冬季高原积 雪多,反照率大,太阳高度角也小,故地面吸收日辐 射最小:夏季太阳高度角虽高,但处于雨季,云量多, 地面也不能大量吸收日辐射:而春末夏初高原积雪 已溶化,反照率小,太阳角度已转高,又未入雨季,云 量少,故地面能吸收大量日辐射,同时春季地面风速 也较大,故此期间 SHFT最高。这说明高原对大气 的加热作用主要表现在春季和夏季,当 SHFT 增强 (减弱),对流层的平均温度变暖(冷),对流层的厚 度增大 (减小)时, TH2也就升高 (降低)。

致谢:感谢中国国家气象信息中心气象资料室 (Climatic Data Center, National Meteorological Information Center, CMA)提供了对流层顶探空资料。同时 感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵修改建议!

参考文献:

- [1] Maxobep 3 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, Hayes P H, M cintyre M E, et al Stratosphere-troposphere exchange [J]. Rev Geophys, 1995, 33 (4): 403-439.
- [4] 丛春华,李维亮,周秀骥.青藏高原及其邻近地区上空平流 层—对流层之间大气的质量交换[J].科学通报,2001,46 (22):1914-1918.
- [5] 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.
- [6] 李国辉,吕达仁, Tie X X. 对流层顶变化对上对流层/下对流层 臭氧分布的影响 [J]. 空间科学学报, 2003, 23 (4): 269-277.
- [7] Reed R J. A study of a characteristic type of upper level frontogenesis [J]. J M eteor, 1955, 12: 226-237.
- [8] Danielsen E F. Stratosphere-troposphere exchange at polar latitudes based on radioactivity, ozone, and polar vorticity [J]. J A tm os S ci, 1968, 25: 502-518.
- [9] 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.
- [10] 曾晓梅. 对流层顶气候变化证据探测 [J]. 气象科技, 2008, 36 (4): 473.
- [11] Selkirk H B. The tropopause cold trap in the Australian monsoon during STEP/AM EX 1987 [J]. J Geophys Res, 1993, 98: 8591-8610.
- [12] Steinbrecht W, Claude H, Köhler U, et al Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes [J]. J Geophys Res, 1998, 103: 19183-19192





- [13] Santer B D, Wehner M F, Wigley T M L, et al Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes [J]. Science, 2003, 301 (7): 479-483.
- [14] Sausen R, Santer B D. Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate [J]. M eteorol Z, 2003, 12: 131-136
- [15] Randel W J, Gaffen D J. Interannual variability of the tropical trop opause derived from radiosonde data and NCEP reanalyses [J]. J Geophys Res, 2000, 105: 15509-15523.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李鹏. 青藏高原大气臭氧与对流层顶的关系 [D]. 北京:中国 科学院大气物理研究所, 2007.
- [21] 王鑫, 吕达仁. 利用 GPS 掩星数据分析青藏高原对流层顶结 构变化 [J]. 自然科学进展, 2007, 17 (7): 913-919.

- [22] 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.
- [23] Wallace J M, Hobbs P V. 大气科学 (中文版) [M]. 何金梅, 王振会, 银海, 等译. 北京:科学出版社, 2008: 72
- [24] 吴涧,杨茜,符淙斌,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.
- [25] 王旻燕,吕达仁. 东亚强对流云的季节变化及其与对流层顶 关系初探 [J]. 大气科学, 2007, 31 (5): 937-949.
- [26] 朱保林. 北半球夏季对流层顶变动的现象及机制研究 [D]. 南京:南京信息工程大学大气科学学院, 2005.
- [27] 叶笃正,高由禧.青藏高原气象学 [M].北京:科学出版 社,1979.
- [28] 邹捍, 郜永祺, 周立波. 大尺度山地上空的臭氧低值及地面加热[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(3): 209-217.
- [29] 魏丽,李栋梁. 青藏高原地区 NCEP 新再分析地面通量资料 的检验 [J]. 高原气象, 2003, 22 (5): 478-487.
- [30] 季国良,江灏,吕兰芝. 青藏高原的长波辐射特征 [J]. 高原气象, 1995, 14(4): 451-457.

(责任编辑:张福颖)