

青藏高原与同纬度其他地区热带对流层顶气压变化特征的比较

周顺武^{①*}, 郑丹^①, 秦亚兰^①, 郭栋^①, 王传辉^②, 胡开喜^③

① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210044;

② 安徽省气象局, 安徽 合肥 230031;

③ 中国气象局 国家气象信息中心, 北京 100081

* 联系人, E-mail: zhou@nuist.edu.cn

2017-01-12 收稿, 2017-03-13 接受

国家重点研发计划课题(2016YFA0602003); 国家自然科学基金资助项目(91637105; 41675039; 91537213)

摘要 基于1979—2014年ERA-Interim逐日再分析温度资料, 依据温度递减率插值法计算出青藏高原及同纬度其他地区热带对流层顶气压数据, 比较了高原和同纬度其他地区热带对流层顶气压季节变化和长期变化趋势, 讨论了热带对流层顶气压与高空温度的关系。结果表明: 1) 在季节变化上, 除12月和1月外, 青藏高原热带对流层顶气压全年低于同纬度其他地区; 青藏高原热带对流层顶气压、对流层中上层以及平流层下部平均温度均表现出比同纬度其他地区更明显的单峰型特征。2) 热带对流层顶气压与高空温度变化关系密切, 对流层中上层(平流层下部)平均温度升高(降低), 有利于热带对流层顶气压降低; 相对于同纬度其他地区, 青藏高原对流层顶气压与对流层中上层平均温度的关系更密切。3) 1979—2014年青藏高原和同纬度其他地区各季节的热带对流层顶气压均呈现出不同程度的下降趋势, 冬春季下降趋势更加显著; 青藏高原各季节对流层中上层增温和平流层下部降温的幅度均超过同纬度其他地区, 导致其热带对流层顶气压的下降趋势比同纬度其他地区更加明显。

关键词

青藏高原;
热带对流层顶;
气压;
季节变化;
趋势

对流层顶是对流层与平流层之间明显的过渡层, 对全球对流层-平流层物质能量交换过程(STE, Stratosphere-Troposphere Exchange)具有重要影响(Holton et al., 1995; 李国辉等, 2003; 卞建春等, 2013)。近几十年来, 温室效应引起的大气增温已使全球气候发生了显著变化(丁一汇, 2002)。相对地表温度变化, 有关高空大气温度变化的结论存在较大的不确定性(翟盘茂和郭艳君, 2006; IPCC, 2007), 而目前较为一致的定性结论为: 近几十年来全球对流层温度趋于升高, 平流层下部温度趋于下降(Seidel et al., 2004; Thorne, 2005; 郭艳君, 2008)。

对流层顶作为对流层与平流层的过渡层, 对流层顶高度(气压)变化已成为衡量气候变化的一个重要指标(王卫国等, 2008; Son et al., 2009; 江宇等, 2013; 夏昕等, 2016)。Santer(2003)利用探空资料和NCEP/NCAR再分析资料, 证实了1979—1999年全球对流层顶高度升高了几百米。Son et al.(2009)基于模式结果及多种再分析对流层顶资料, 研究认为对流层顶气压在未来将继续降低, 但趋势较2009年之前有所减弱。付志嘉等(2011)分析了1980—2007年中国120个探空资料, 发现1980—2007年中国对流层顶高度总体上升约45 m。

引用格式: 周顺武, 郑丹, 秦亚兰, 等, 2019. 青藏高原与同纬度其他地区热带对流层顶气压变化特征的比较[J]. 大气科学学报, 42(5): 660-671.

Zhou S W, Zheng D, Qin Y L, et al., 2019. Comparison on variation features of the tropical tropopause pressure over the Tibetan Plateau and the other regions in the same latitudes[J]. Trans Atmos Sci, 42(5): 660-671. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170112001. (in Chinese).

对流层顶按其高度分为热带对流层顶和极地对流层顶,通常以 150 hPa 为临界值,当对流层顶气压大于等于(小于)150 hPa 时,称为极地(热带)对流层顶(王树廷和王伯民,1984)。中纬度地区是热带对流层顶和极地对流层顶共同存在的地区(邹进上等,1989;周顺武等,2010;Chen et al.,2011),对流层顶分布较热带地区更为复杂。基于探空观测资料的研究指出,在中纬度地区全年各月都可以观测到热带对流层顶(吴香玲,1995;陈芳等,2007;Randel et al.,2007;李伟等,2009;杨双艳等,2010;Yang et al.,2016)。青藏高原(以下简称高原)作为中纬度地区高耸的地标,深入对流层中部,其独特的动力和热力效应不仅影响着东亚地区天气和气候(郭品文等,2017;王静等,2018;张超等,2018),也影响着对流层顶高度变化,使得高原与同纬度其他地区对流层顶存在明显的差异(周顺武等,2010;夏昕等,2016;Yang et al.,2016)。

那么高原与同纬度其他地区热带对流层顶气压变化特征究竟存在哪些异同?目前对此还少有研究。鉴于高原探空站点稀疏,且主要位于高原中东部(周顺武等,2010),拟采用 1979—2014 年高分辨率的 ERA-Interim 逐日再分析温度资料,依据温度递减率插值法(Santer et al.,2003;Sausen and Santer,2003;Son et al.,2009),计算出北半球中纬度地区(包括高原)的热带对流层顶气压;再根据同期高原及同纬度平原地区探空观测的热带对流层顶气压资料,验证本文计算的热带对流层顶气压的可靠性;在此基础上,比较高原与同纬度其他地区的热带对流层顶气压季节变化特征和长期变化趋势;最后分析热带对流层顶气压与对流层中上层及平流层下部温度的关系。

1 资料和方法

ERA-Interim 再分析资料是 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)创建的全球再分析高分辨率产品,在垂直方向上有 37 层(1 000~1 hPa),时间始于 1979 年(Dee et al.,2011)。选用 1979—2014 年 ERA-Interim 再分析资料的逐日温度资料(水平分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$;垂直方向为 15 层,即 500~30 hPa)。

热力学对流层顶的定义为:500 hPa 以上,任意 2 km 的气层内出现了平均温度递减率减小到 2 K/km 或者更小,则该气层的起始高度称为对流层顶。Reichler et al.(2003)完善了温度递减率插值

法,将温度递减率 Γ 表示为 p^* 的函数,公式如下:

$$\Gamma(p) = \frac{\partial T p^{\kappa}}{\partial p^{\kappa} T} \left(\frac{\kappa g}{R} \right). \quad (1)$$

其中: T 代表温度; p 代表气压; g 代表重力加速度; $\kappa = R/c_p$, R 为干空气气体常数, c_p 为恒压空气的比热容。结合热力学定义中对流层顶的判定方法,且计算出对流层顶气压值,根据气压小于 150 hPa 区分出热带对流层顶(以下称为再分析对流层顶气压)。

还根据同期(1979—2014 年)ERA-Interim 再分析月平均温度和位势高度资料,分别利用两等压面之间的厚度差计算得到对流层中上层(500~200 hPa)和平流层下部(100~50 hPa)的平均温度(吕美仲等,2004)。其中,由对流层中上层厚度差通过以下公式计算出的平均温度表示对流层中上层平均温度(简称对流层温度 T_t ;申乐琳等,2009);由平流层下部厚度差通过以下公式计算出的平均温度表示平流层下部平均温度(简称平流层温度 T_s ;郑彬和施春华,2006)。公式如下:

$$T_t = \frac{\Phi_{500} - \Phi_{200}}{R(\ln 500 - \ln 200)}. \quad (2)$$

$$T_s = \frac{\Phi_{100} - \Phi_{50}}{R(\ln 100 - \ln 50)}. \quad (3)$$

式中: Φ 表示某等压面上的位势高度; R 为干空气气体常数。

参考常用的划分高原和非高原区的方法(Zou,1996;张人禾和周顺武,2008;苏昱丞等,2016;Guo et al.,2017;郭栋等,2017;徐雯雯等,2019),将高原区定义为 $75^{\circ} \sim 102.5^{\circ} \text{E}$ 、 $27.5^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$,非高原区定义为除去青藏高原以外的同纬度其他地区。为了分季节讨论高原和非高原区热带对流层顶气压变化的异同,分别将 12 月至翌年 2 月定义为冬季(DJF),3—5 月定义为春季(MAM),6—8 月定义为夏季(JJA),9—11 月定义为秋季(SON);同时将 4—9 月、10 月至翌年 3 月分别定义为暖季和冷季。

为了检验再分析对流层顶气压在中纬度地区(包括高原)的适用性,采用中国气象局国家气象信息中心提供的同期(1979—2014 年)高原地区(包括西藏、青海及周边山区)9 个探空站以及同纬度平原地区 16 个探空站逐日观测的热带对流层顶气压资料,将高原和平原地区(站点位置见图 1)的热带对流层顶气压分别作算术平均(周顺武等,2010),得到两个地区的热带对流层顶气压(简称为探空对流层顶气压)。

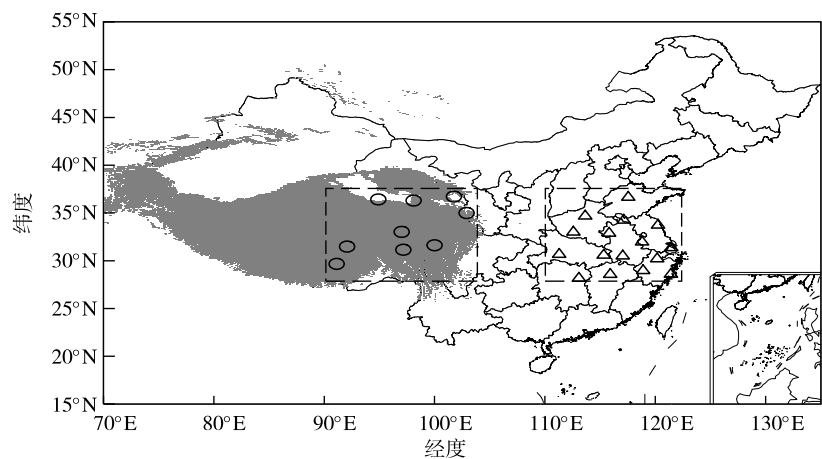


图 1 高原和平原地区探空站点的地理位置分布(○代表高原站点,△代表平原站点;图中 2 个矩形框分别表示高原和平原地区;阴影区表示海拔高度超过 3 km)

Fig.1 Geographical position of the radiosonde stations(○ and △ indicate the stations over the Tibetan Plateau and the plain area, respectively. The two rectangular frames denote the area of the Plateau stations and the plain stations. The shadings denote the topography surpassing 3 km)

2 高原再分析热带对流层顶气压的适用性分析

2.1 误差分析

再分析对流层顶气压格点资料虽可弥补观测资料的稀缺,但其可信性必须进行验证。按高原 9 个探空站和平原 16 个探空站所在的经纬度区域,通过区域面积平均分别得到高原和平原地区的再分析对流层顶气压。将探空对流层顶气压作为客观值,考察再分析对流层顶气压在高原和平原地区的适用性。

表 1 给出了高原和平原地区多年(1979—2014 年)平均的逐月再分析与探空对流层顶气压的误差统计结果。可以看到,尽管再分析对流层顶气压值普遍偏高于探空对流层顶气压值(BIAS 均为正值),但高原地区各月的平均误差(BIAS)和均方根误差(RMSE)分别仅在 2.61~8.36 hPa 和 3.15~9.13 hPa;而平原地区各月再分析与探空对流层顶气压之间的误差普遍更小一些。与 Reichler et al. (2003)给出的热带外地区再分析与探空对流层顶气压的 RMSE(1 月为 27 hPa,7 月为 20 hPa)相比,本文计算得到的高原和平原地区的 RMSE 明显有所减小。进一步比较两个地区各月的平均相对误差(MRE):高原(平原)地区在 2.82%~7.99%(3.05%~7.94%),均小于 8.0%。由此可见,高原和平原地区再分析对流层顶气压均接近探空观测结果。值得注意的是,两种资料各类误差值均在冷

(暖)季较大(小)。这可能是因为中纬度地区冷季气旋活动频繁,对流层顶容易发生断裂,导致对流层顶的稳定性较差;而中纬度地区暖季天气系统较为稳定,主要以单一的对流层顶为主,使得对流层顶的稳定性较高(邹进上等,1989)。

表 1 高原和平原地区多年(1979—2014 年)平均的逐月再分析与探空对流层顶气压的误差

Table 1 Monthly deviation of multi-year mean tropical tropopause pressure between reanalysis data and radiosonde data over the Tibetan Plateau and plain regions during 1979—2014

月份	高原地区			平原地区		
	BIAS/ hPa	RMSE/ hPa	MRE/ %	BIAS/ hPa	RMSE/ hPa	MRE/ %
1	8.03	8.88	7.92	8.26	8.56	7.94
2	5.97	7.07	6.22	7.02	7.51	6.91
3	6.34	7.30	6.48	6.34	6.68	6.30
4	4.22	5.19	4.58	3.94	4.53	3.96
5	2.61	3.15	2.82	2.93	3.27	3.05
6	3.61	3.74	3.77	3.35	3.50	3.31
7	3.95	4.08	4.06	3.37	3.51	3.27
8	4.76	4.85	4.79	3.39	3.73	3.47
9	5.95	6.06	5.85	5.12	5.25	4.92
10	6.34	6.49	6.00	6.26	6.40	5.95
11	8.22	8.57	7.73	8.18	8.38	7.67
12	8.36	9.13	7.99	8.33	8.67	7.91
年平均	5.70	6.21	5.69	5.56	5.83	5.39

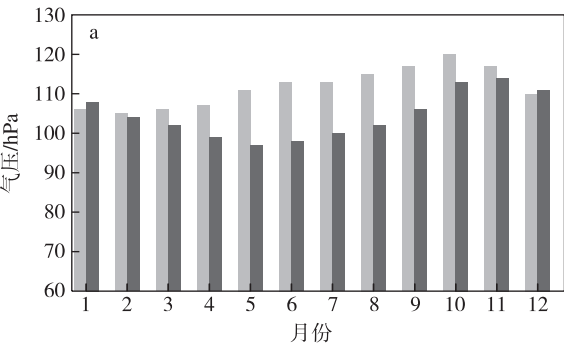
2.2 相关性分析

分析再分析和探空对流层顶气压的相关性,表2给出了高原和平原地区再分析与探空对流层顶气压之间的逐月相关系数。两个地区再分析与探空对流层顶气压的年际变化非常一致,高原各月再分析与探空对流层顶气压之间的相关系数普遍超过0.68(通过0.001信度的显著性水平检验),其中夏季两者关系更为显著(相关系数 ≥ 0.90);相对高原地区,平原地区两者的年际变化更加一致(其相关系数普遍达到0.87以上),这可能与地形分布及海拔高度有关(赵天保和符淙斌,2006;支星和徐海明,2013)。

表2 1979—2014年高原和平原地区再分析与探空对流层顶气压的逐月相关系数

Table 2 Monthly correlation coefficients of the tropical tropopause pressure between the reanalysis data and radio-sonde data over the Tibetan Plateau and plain regions during 1979—2014

月份	高原	平原
1	0.68	0.87
2	0.79	0.84
3	0.84	0.90
4	0.79	0.83
5	0.87	0.93
6	0.91	0.94
7	0.90	0.93
8	0.90	0.94
9	0.82	0.84
10	0.90	0.90
11	0.78	0.84
12	0.69	0.81
年平均	0.82	0.88



3 高原与非高原区热带对流层顶气压的差异

上述两种资料的对流层顶气压多年平均误差及相关性表明,再分析与探空对流层顶气压十分接近。下面将根据再分析对流层顶气压资料,利用区域面积平均法,给出高原与非高原区对流层顶气压,对比分析两个地区对流层顶气压变化特征的异同。

3.1 季节变化的差异

Yang et al.(2016)基于中国探空站的对流层顶资料发现,高原对流层顶高度除10月略低于同纬度平原外,其他月份均高于平原。那么,高原与非高原区对流层顶气压季节变化的差异如何?图2为高原和非高原区各月对流层顶气压及其偏差的分布。由图2a可见,高原对流层顶气压全年在97~111 hPa之间,春夏季气压低,秋冬季气压高,其年变化呈现出明显的单峰型特征,这与利用探空观测资料所得结论一致(陈芳,2007;周顺武等,2010);而非高原区对流层顶气压全年在105~115 hPa之间,冬春季气压略低于夏秋季,其单峰型变化特征不如高原明显。比较两地各月对流层顶气压的偏差(图2b)发现,除12月和1月外,高原对流层顶气压均低于非高原区,4—9月尤其偏低。

3.2 年际变化和长期趋势变化的差异

为了分析高原和非高原区各季节对流层顶气压的年际变化和长期变化趋势,图3分季节给出了两个地区对流层顶气压的年际变化曲线。由图3可见,就平均而言,除冬季外高原各季节对流层顶气压均低于非高原区,夏季尤其偏低;就年际变化而言,高原和非高原区对流层顶气压在各个季节的年际变

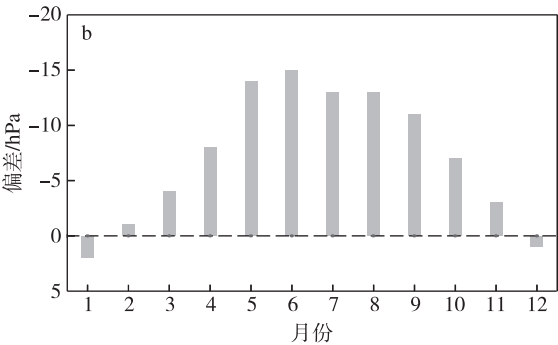


图2 高原和非高原区多年平均热带对流层顶气压(a;黑色表示高原,灰色表示非高原区)以及高原和非高原区热带对流层顶气压偏差(b;单位:hPa)的逐月变化

Fig.2 Monthly variations of (a) multi-year mean tropical tropopause pressure over the Tibetan Plateau and non-plateau regions, where the dark bar indicates the Tibetan Plateau, and the gray bar indicates non-plateau regions and (b) their differences (unit:hPa)

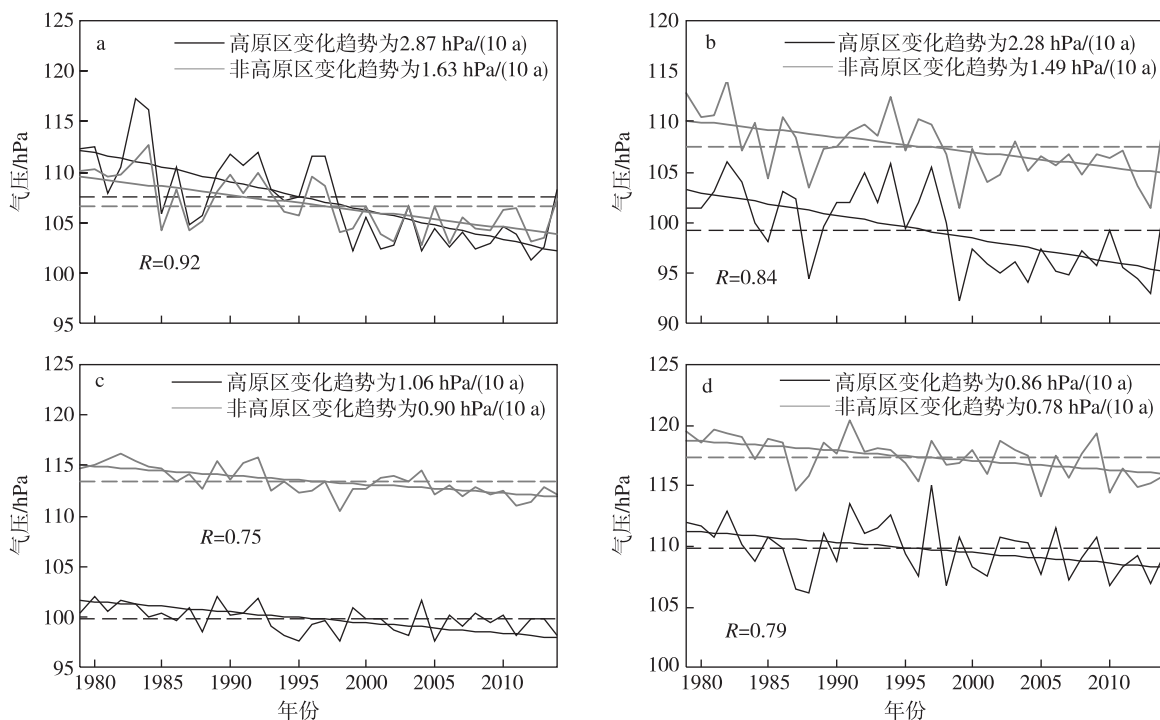


图3 1979—2014年高原和非高原区冬(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)四季热带对流层顶气压的年际变化(黑、灰色实线分别表示高原、非高原区热带对流层顶气压,单位:hPa;黑、灰虚线分别表示高原、非高原区热带对流层顶气压的多年平均值,单位:hPa;黑、灰直线分别表示高原、非高原区热带对流层顶气压的线性变化趋势,单位:hPa/(10 a); R 表示高原与非高原区对流层顶气压的相关系数)

Fig.3 Interannual variations of the tropical tropopause pressure over the Tibetan Plateau and non-plateau regions in (a) winter, (b) spring, (c) summer, and (d) autumn during 1979—2014. The black (gray) line indicates the tropical tropopause pressure over the Tibetan Plateau (non-plateau regions) (unit:hPa); the black (gray) dashed line indicates multi-year mean value of the tropical tropopause over the Tibetan Plateau (non-plateau regions) (unit:hPa); the black and gray straight lines indicate the linear trends of the tropical tropopause over the Tibetan Plateau and non-plateau regions, respectively (unit:hPa/(10 a)); and R denotes the correlation coefficients of the tropical tropopause pressure between the Tibetan Plateau and non-plateau regions

化均较为一致(其相关系数均通过0.001信度的显著性水平检验);在长期变化趋势上,高原和非高原区对流层顶气压在各个季节均呈现出不同程度的下降趋势(通过0.05信度的显著性水平检验),冬春季两地对流层顶气压下降趋势更加显著(通过0.01信度的显著性水平检验)。此外,高原各个季节对流层顶气压的下降趋势均超过了非高原区。

4 高原与非高原区热带对流层顶气压变化差异的可能原因

对流层顶高度同时受到对流层中上层和平流层下部温度的影响(Santer et al., 2003; 吴润等, 2007; 杨双艳等, 2010; 郑彬和施春华, 2015)。下面分析高原和非高原区对流层温度(T_l)和平流层温度(T_s)的变化特征及其对对流层顶气压的影响。

4.1 季节变化差异的机制

影响对流层顶的主要因子除了太阳辐射、大气环流外,还有海陆分布以及大地形等(邹进上等, 1989)。为此,图4给出沿高原所在纬度(27.5°~40°N平均)的对流层顶气压、 T_l 和 T_s 的月份-经度分布。由图4a可见,暖季在高原(80°~100°E)以及北美落基山脉(110°W)两大山地附近分别存在一个对流层顶气压的最低值(≤ 100 hPa)和次低值(≤ 125 hPa),而在太平洋中部(180°)以及大西洋中部(60°W)各维持一个对流层顶气压高值(≥ 130 hPa),并且在夏季,两大山地(大洋)对流层顶气压达到全年最低(高)值。

图4b为高原与同纬度其他地区 T_l 的分布。由图可知,暖季(两大山地上空维持着较低对流层顶气压的期间),高原和落基山脉 T_l 分别为最高值和次高值。这可能与下垫面的不同及热力作用的季节

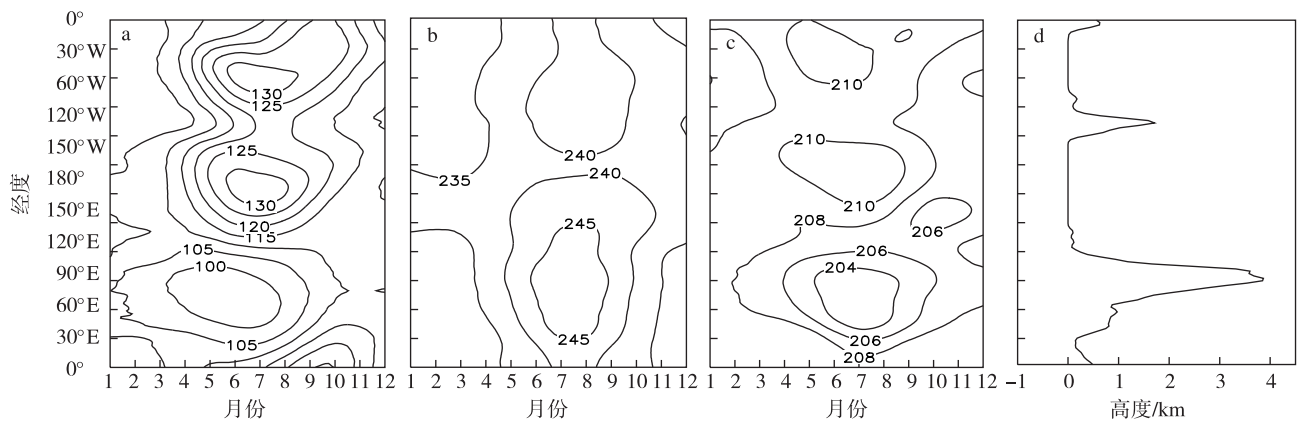


图4 多年(1979—2014年)平均的热带对流层顶气压(a;单位:hPa)、对流层中上层(500~200 hPa)平均温度(b;单位:K)、平流层下部(100~50 hPa)平均温度(c;单位:K)沿高原所在纬度(27.5°~40°N)平均的时间-经度剖面以及沿27.5°~40°N平均的海拔高度分布(d;单位:km)

Fig.4 Longitude-time cross-sections of (a) the tropical tropopause pressure(unit:hPa); (b) the mean temperature in the upper troposphere(unit:K); and (c) the mean temperature in the lower stratosphere(unit:K) during 1979—2014 averaged; and (d) altitude(unit:km) along the Tibetan Plateau latitude (27.5°—40°N averaged)

差异有关(朱保林等,2010)。暖季陆地比海洋气温高,加热对流层大气,因而高原和落基山脉上空的 T_t 普遍升高,对流发展旺盛,使得对流层顶抬升,对流层顶气压降低。而高原升温更为明显,尤其是在夏季,高原的 T_t (≥ 245 K)明显比其他地区偏高,使得高原对流层顶气压成为其所在纬度的最低值。由此可见,高原与同纬度其他地区对流层顶气压季节分布的差异与高原大地形作用、海陆分布及高原不同季节的热力异常等有关。而由图4c中高原与同纬度其他地区 T_s 的分布可知,同样在暖季(两大山地上空维持着较低的对流层顶气压的期间),高原上空 T_s 为最低值(图4c),特别是在夏季,高原 T_s 为同纬度的最低值(≤ 204 K)。综上所述,高原与同纬度其他地区对流层顶气压的季节变化差异与各自

高空温度季节变化的差异紧密相关。

进一步比较高原和非高原区 T_t 和 T_s 的季节变化与两地对流层顶气压之间的联系,图5为高原和非高原区 T_t 和 T_s 的逐月分布。由图5a可知,高原 T_t 在夏季最高(≥ 246 K)、冬季最低(≤ 232 K),呈现出明显的单峰型季节变化特征;非高原区 T_t 的季节变化特征与高原相似,然而其暖季低于高原、冷季高于高原,故其季节变化幅度小于高原。由图5b可知,高原 T_s 表现为夏低冬高的单峰型季节变化特征,非高原区各月 T_s 均高于同期非高原区,且其季节变化幅度小于高原。由此可见,与非高原区相比,高原 T_t 和 T_s 的季节变化与其对流层顶气压一样,均呈现出更加明显的单峰型变化特征。

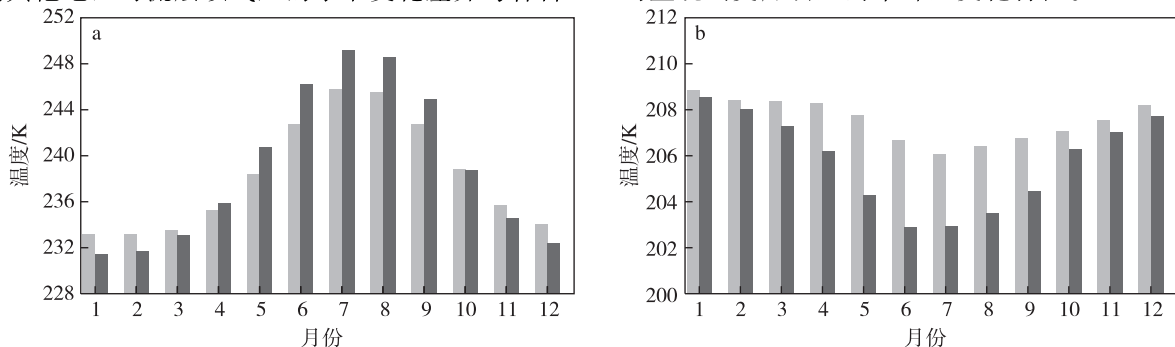


图5 高原和非高原区多年平均对流层上层平均温度(a)及平流层下部平均温度(b)的逐月变化(黑色表示高原,灰色表示非高原区;单位:K)

Fig.5 Monthly variations of multi-year averaged mean temperature in (a) the upper troposphere and (b) the lower stratosphere over the Tibetan Plateau and non-plateau regions; the dark bar indicates the Tibetan Plateau, and the gray bar indicates non-plateau regions (unit:K)

4.2 年际变化及趋势差异的机制

为了分析 T_i 和 T_s 的年际变化及其长期趋势变化与对流层顶气压变化的关系,表3给出了1979—2014年高原和非高原区四个季节的对流层顶气压(p)与 T_i 、 T_s 的线性变化趋势及其相关系数的统计结果。图6给出了高原和非高原区各个季节 T_i 的年际变化曲线。由图6并结合表3可见,就平均而言,冬季高原 T_i 低于非高原区,而其他季节高原 T_i 均高于非高原区,特别是夏季高原的 T_i 明显偏高,与两地的对流层顶气压平均值之差相反(图3);在年际变化上,两地 T_i 具有较为一致的变化关系(各季节的相关系数均通过0.001信度的显著性水平检验)。就长期变化趋势而言,高原和非高原的 T_i 在各个季节均呈现不同程度的升高趋势(通过0.05信度的显著性水平检验),且高原各个季节的 T_i 升高趋势普遍超过非高原区。在冬、夏季,高原的 T_i 升高趋势最明显(通过0.01信度的显著性水平检验),分别达到0.35 K/(10 a)和0.30 K/(10 a);非高原区 T_i 升温趋势在冬季达到最大(0.18 K/(10 a)),但其升温幅度仅约为高原冬季 T_i 的一半。

下面分析高原和非高原区四个季节 T_s 的年际变化特征(图7)。由图7和表3可以看出,高原各季 T_s 平均值均低于非高原区,夏季尤其偏低,与之对应的是高原对流层顶气压均普遍低于非高原区(图3);在年际变化上,各个季节高原和非高原区的 T_s 变化具有非常高的一致性(各季节相关系数 ≥ 0.86);就长期变化趋势而言,高原和非高原区 T_s 各个季节均呈现不同程度的下降趋势(均通过0.05信

度的显著性检验),且1979—2014年高原各季 T_s 的下降幅度均超过同期同季的非高原区。

上述分析表明,1979—2014年高原和非高原区均呈现出 T_i 升高和 T_s 下降的趋势。而全球增暖的重要特征是对流层增温而平流层降温(任荣彩等,2014),那么对流层顶气压与全球变暖又存在怎样的联系呢?由表3中对流层顶气压和 T_i 相关系数(R_{pt})可知,高原对流层顶气压与高原 T_i 呈现出显著的负相关(均通过0.01信度的显著性检验),而非高原区对流层顶气压与 T_i 也表现为一定的负相关(除冬季通过0.05信度的显著性检验以外,其他季节均通过0.01信度的显著性检验);表3中对流层顶气压和 T_s 的相关系数(R_{ps})则表现为高原和非高原区对流层顶气压与其各自同季的 T_s 均呈现出显著的正相关关系(均通过0.01信度的显著性检验)。

综上所述,高原和非高原区对流层顶气压变化无论在年际变化还是在长期趋势变化上都与 T_i 和 T_s 的变化存在密切联系:当各季对流层(平流层)各层温度普遍升高(降低)时,有利于对流层顶气压降低(即对流层顶高度抬升);相比非高原区,高原对流层顶气压与 T_i 的关系更密切(相关系数普遍较非高原区偏大)。正是由于近几十年来高原和非高原区 T_i 升高及 T_s 下降的共同影响,两地对流层顶气压出现不同程度的下降;并且高原 T_i 升高和 T_s 下降幅度均较非高原区更加明显,从而使得高原对流层顶气压降低普遍超过了非高原区。

表3 1979—2014年高原和非高原区四季热带对流层顶气压(p)与对流层中上层平均温度(T_i)、平流层下部的平均温度(T_s)的线性趋势及相关系数

Table 3 The linear trends of monthly tropical pressure (p), mean temperature in the upper troposphere (T_i) and mean temperature in the lower stratosphere (T_s), as well as the correlation coefficients between T_i (T_s) and p over the Tibetan Plateau and non-plateau regions during 1979—2014

季节	高原					非高原区				
	p 趋势/ hPa · (10 a) ⁻¹	T_i 趋势/ K · (10 a) ⁻¹	R_{pt}	T_s 趋势/ K · (10 a) ⁻¹	R_{ps}	p 趋势/ hPa · (10 a) ⁻¹	T_i 趋势/ K · (10 a) ⁻¹	R_{pt}	T_s 趋势/ K · (10 a) ⁻¹	R_{ps}
冬季	-2.87 ²⁾	0.35 ²⁾	-0.63 ³⁾	-0.63 ²⁾	0.81 ³⁾	-1.63 ²⁾	0.18 ²⁾	-0.40 ³⁾	-0.43 ²⁾	0.84 ³⁾
春季	-2.28 ²⁾	0.24 ¹⁾	-0.69 ³⁾	-0.58 ²⁾	0.78 ³⁾	-1.49 ²⁾	0.17 ²⁾	-0.50 ³⁾	-0.33 ¹⁾	0.68 ³⁾
夏季	-1.06 ¹⁾	0.30 ²⁾	-0.45 ³⁾	-0.41 ²⁾	0.82 ³⁾	-0.90 ¹⁾	0.14 ¹⁾	-0.52 ³⁾	-0.32 ²⁾	0.71 ³⁾
秋季	-0.86 ¹⁾	0.20 ¹⁾	-0.71 ³⁾	-0.30 ¹⁾	0.79 ³⁾	-0.78 ¹⁾	0.16 ¹⁾	-0.48 ³⁾	-0.25 ¹⁾	0.61 ³⁾
年平均	-1.77 ²⁾	0.28 ²⁾	-0.62 ³⁾	-0.48 ²⁾	0.80 ³⁾	-1.20 ²⁾	0.16 ²⁾	-0.47 ³⁾	-0.33 ²⁾	0.71 ³⁾

注:1)表示通过0.05信度的显著性水平检验;2)表示通过0.01信度的显著性检验; R_{pt} 和 R_{ps} 分别表示热带对流层顶气压(p)与对流层中上层平均温度(T_i)及平流层下部的平均温度(T_s)的相关系数;3)表示相关系数通过0.01信度的显著性检验。

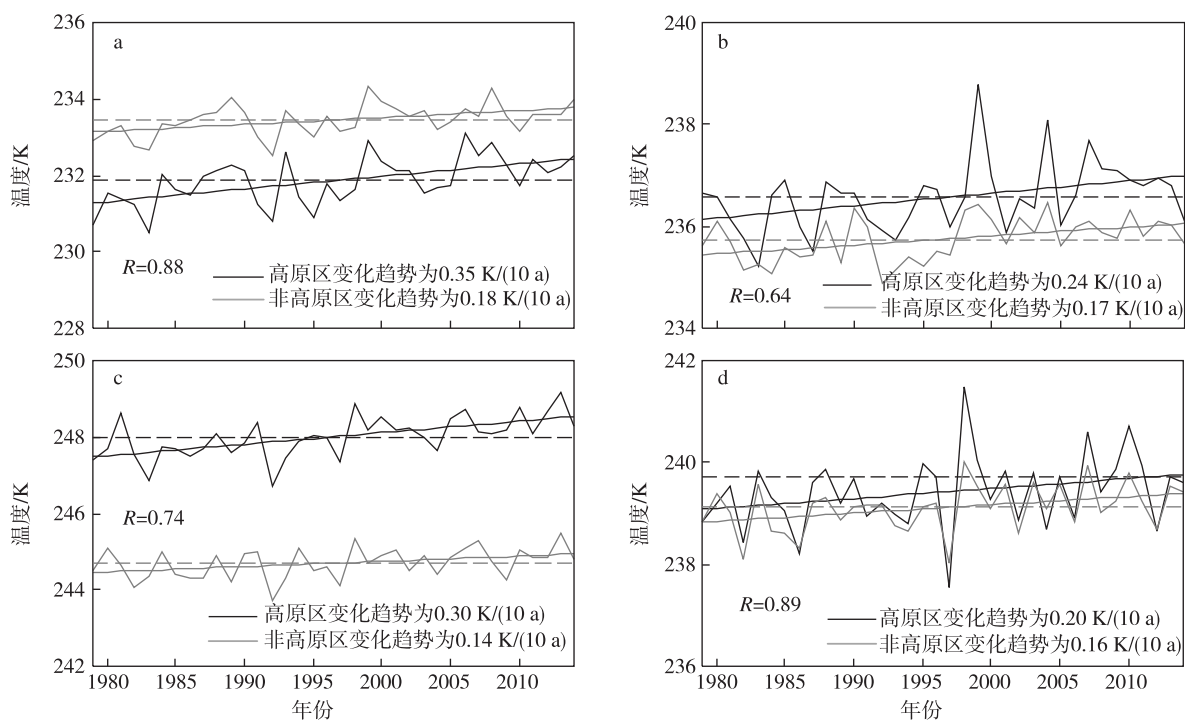


图6 1979—2014年高原和非高原区冬(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)四季对流层平均温度的年际变化(黑、灰色实线分别表示高原、非高原区对流层平均温度,单位:K;黑、灰虚线分别表示高原、非高原区对流层平均温度的多年平均值,单位:K;黑、灰直线分别表示高原、非高原区对流层平均温度的线性变化趋势,单位:K/(10 a); R 表示高原与非高原区对流层平均温度的相关系数)

Fig.6 Interannual variations of the mean temperature in the upper troposphere over the Tibetan Plateau and non-plateau regions in (a) winter, (b) spring, (c) summer, and (d) autumn during 1979—2014; the black (gray) line indicates the mean temperature in the upper troposphere over the Tibetan Plateau (non-plateau regions) (unit: K); the black (gray) dashed line indicates multi-year mean value of the mean temperature in the upper troposphere over the Tibetan Plateau (non-plateau regions) (unit: K); the black and gray straight lines indicate the linear trends of the mean temperature in the upper troposphere over the Tibetan Plateau and non-plateau regions, respectively (unit: K/(10 a)); and R denotes correlation coefficients of the mean temperature in the upper troposphere between the Tibetan Plateau and non-plateau regions

5 结论与讨论

采用 ERA-Interim 逐日再分析温度资料,应用温度递减率插值法,计算得到北半球对流层顶气压数据,首先与高原和同纬度平原的探空对流层顶资料对比,在一致的基础上,使用再分析数据对比分析了高原与同纬度其他地区热带对流层顶气压及高空温度的差异,并分析了高原以及同纬度其他地区高空温度对热带对流层顶气压的影响,得到以下结论:

1) 高原和平原的再分析热带对流层顶气压与探空对流层顶气压非常接近,尤其在暖季,两地再分析热带对流层顶气压与观测结果更加吻合;与高原相比,平原再分析热带对流层顶的误差更小。

2) 高原热带对流层顶气压在春夏季低、秋冬季高,表现出明显的单峰型变化特征;同纬度其他地区冬春季气压略低于夏秋季。与同纬度其他地区相比,

高原热带对流层顶气压在12月和1月偏高,其他月份均偏低,暖季尤其偏低。在季节变化上,高原热带对流层顶气压、对流层中上层平均温度以及平流层下部平均温度单峰型的变化特征均比同纬度其他地区明显。高原与同纬度其他地区对流层顶气压季节分布的差异与高原大地形作用、海陆分布及高原不同季节的热力异常等有关。

3) 高原和同纬度其他地区热带对流层顶气压与各自高空温度的变化关系密切。热带对流层气压与平流层下部(对流层中上层)平均温度各季节存在显著的正(负)关系。当对流层中上层(平流层下部)平均温度升高(降低)时,有利于热带对流层顶气压减小。相比同纬度其他地区,高原对流层顶气压与对流层中上层平均温度的关系更紧密。

4) 全球变暖背景下,高原各季对流层中上层(平流层下部)的升温(降温)普遍均超过同纬度其他地

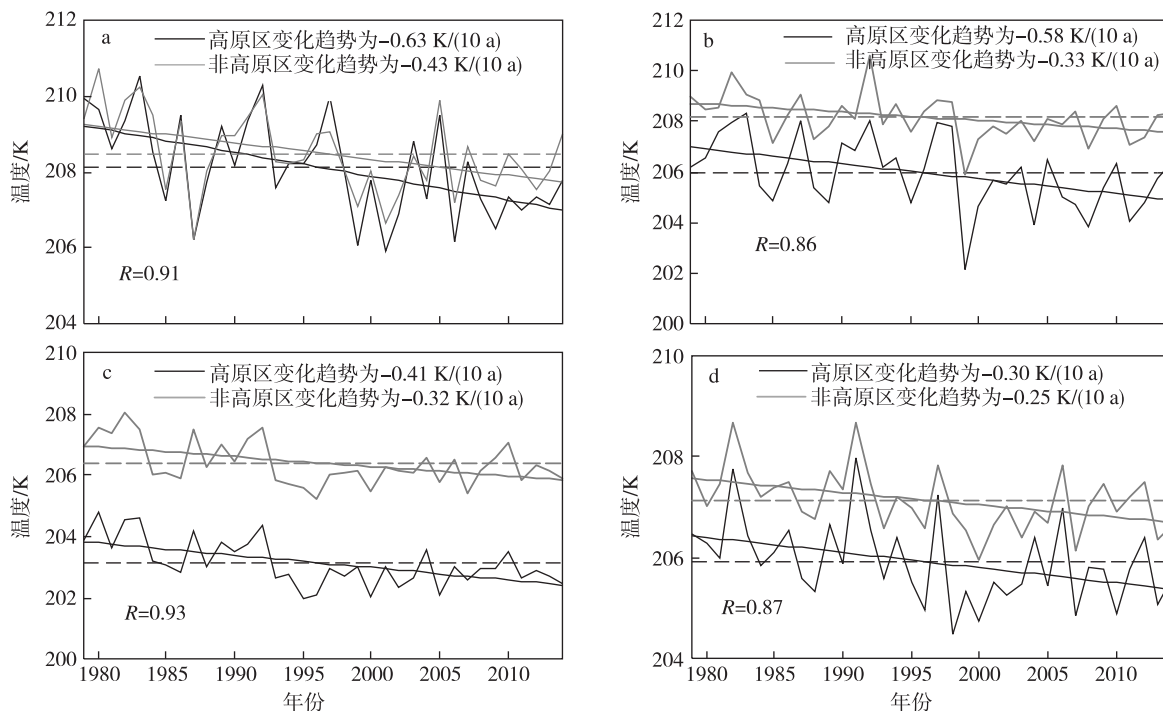


图 7 1979—2014 年高原和非高原区冬(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)四季平流层平均温度的年际变化(黑、灰色实线分别表示高原、非高原区对流层平均温度,单位:K;黑、灰色虚线分别表示高原、非高原区平流层平均温度的平均值,单位:K;黑、灰直线分别表示高原、非高原区平流层平均温度的线性变化趋势,单位:K/(10 a);R 表示高原与非高原区平流层平均温度的相关系数)

Fig.7 Interannual variations of the mean temperature in the lower stratosphere over the Tibetan Plateau and non-plateau regions in (a) winter, (b) spring, (c) summer, and (d) autumn during 1979—2014; the black (gray) line indicates the mean temperature in the lower stratosphere over the Tibetan Plateau (non-plateau regions) (unit: K); the black (gray) dashed line indicates multi-year mean value of the mean temperature in the lower stratosphere over the Tibetan Plateau (non-plateau regions) (unit: K); the black and gray straight lines indicate the linear trends of the mean temperature in the lower stratosphere over the Tibetan Plateau and non-plateau regions, respectively (unit: K/(10 a)); and R denotes correlation coefficients of the mean temperature in the lower stratosphere between the Tibetan Plateau and non-plateau regions

区。正是由于受到对流层中上层增温及平流层下部降温的共同影响,1979—2014 年各个季节高原和同纬度其他地区的热带对流层顶气压均呈现出不同程度的下降趋势,尤其是在冬春季两地热带对流层顶气压下降趋势均更加显著。高原各季节对流层中上层增温和平流层下部降温的幅度均超过同纬度其他地区,从而导致高原热带对流层顶气压下降趋势较同季节的同纬度其他地区更加明显。

分析表明,热带对流层顶气压与对流层中上层和平流层下部平均温度的变化关系密切;但这是否与本文计算再分析热带对流层顶数据所用的温度资料与对流层中上层和平流层下部平均温度资料属于同一套资料有关呢?为此,依据 1979—2014 年高原 9 个

探空站观测的月平均温度和热带对流层气压资料,分析高原各月探空热带对流层顶气压与高空各层温度之间的相关系数(图 8a)。高原各月热带对流层顶气压与高空各层温度大致在 150 hPa 以上(下)两者之间为显著的正(负)相关,即说明高原各月对流层顶气压与平流层下部(对流层中上层)温度普遍为显著的正(负)相关,观测资料的分析结果与再分析资料得出的结果(图 8b)基本一致。

本文初步分析了热带对流层顶与高空温度的相关关系,与同纬度其他地区相比,为何高原热带对流层顶气压与对流层中上层平均温度的关系更紧密?高原对流层增温普遍超过同纬度其他地区,这与人类活动又有何联系?这些问题都值得进一步探究。

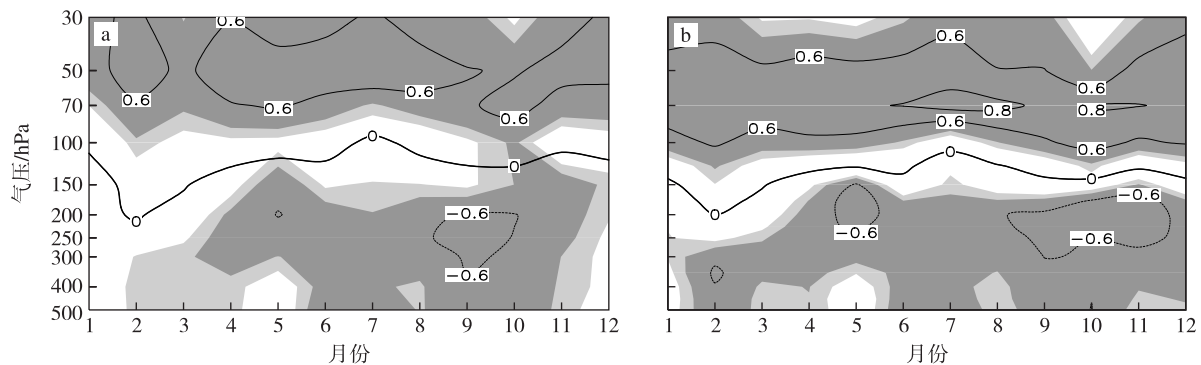


图 8 高原探空(a)、再分析(b)热带对流层顶气压与高空各层温度的逐月相关系数(浅、深阴影区分别表示通过 0.05 和 0.01 信度的显著性检验)

Fig.8 Monthly correlation coefficients between the tropical tropopause pressure and the temperature over the Tibetan Plateau derived from (a) radiosonde data and (b) reanalysis data (Light and heavy shaded regions with correlation exceeding 0.05 and 0.01 significance levels are shown, respectively)

致谢:感谢美国犹他大学大气科学学院的 Reichler 教授提供了热力学递减率插值算法程序,感谢中国气象局国家气象信息中心提供了对流层顶逐日探空数据。

参考文献 (References)

- 卞建春,范秋君,严仁娣,2013.夏季青藏高原对流层-平流层交换过程及其气候效应的若干问题[J].气象科技进展,3(2):22-28. Bian J C, Fan Q J, Yan R C, 2013. Summertime stratosphere-troposphere exchange over the Tibetan Plateau and its climatic impact[J]. Adv Meteorol Sci Technol, 3(2):22-28. (in Chinese).
- 陈芳,马英芳,朱西德,2007.青海省对流层顶若干统计特征[J].气象科技,35(1):57-60. Chen F, Ma Y F, Zhu X D, 2007. Statistical features of tropopause over Qinghai Province[J]. Meteorol Sci Technol, 35(1):57-60. (in Chinese).
- Chen X L, Ma Y M, Kelder H, et al., 2011. On the behavior of the tropopause folding events over the Tibetan Plateau[J]. Atmos Chem Phys, 11(10): 5113-5122.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quart J Roy Meteorol Soc, 137(656):553-597.
- 丁一汇,2002.全球气候变化[J].世界环境,(6):9-12. Ding Y H, 2002. Global climate change[J]. World Environ, (6):9-12. (in Chinese).
- 付志嘉,董保举,张成稳,2011.我国气候变暖特征及其与对流层顶的关系[J].干旱气象,29(2):182-188. Fu Z J, Dong B J, Zhang C W, 2011. Correlation analysis between greenhouse effects and tropopause over China[J]. Arid Meteorol, 29(2):182-188. (in Chinese).
- Guo D, Su Y C, Zhou X J, et al., 2017. Evaluation of the trend uncertainty in summer ozone valley over the Tibetan Plateau in three reanalysis datasets[J]. J Meteorol Res, 31(2):431-437.
- 郭栋,徐建军,苏昱丞,等,2017.青藏高原和北美夏季臭氧谷垂直结构和形成机制的比较[J].大气科学学报,40(3):412-417. Guo D, Xu J J, Su Y C, et al., 2017. Comparison of vertical structure and formation mechanism of summer ozone valley over the Tibetan plateau and North America[J]. Trans Atmos Sci, 40(3):412-417. (in Chinese).
- 郭品文,沈沅,董丽娜,等,2017.亚洲季风区海陆热力变化的观测分析及模拟评估[J].大气科学学报,40(2):215-223. Guo P W, Shen C, Dong L N, et al., 2017. The observation analysis and simulation evaluations of land-sea thermal contrast over Asian monsoon region[J]. Trans Atmos Sci, 40(2):215-223. (in Chinese).
- 郭艳君,2008.高空大气温度变化趋势不确定性的研究进展[J].地球科学进展,23(1):24-30. Guo Y J, 2008. Advances in uncertainties in upper air temperature trends[J]. Adv Earth Sci, 23(1):24-30. (in Chinese).
- Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al., 1995. Stratosphere-troposphere exchange[J]. Rev Geophys, 33(4):403.
- IPCC, 2007. The Physical Basis, in Climate Change 2007 [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- 江宇,盛峥,石汉青,2013.基于 COSMIC 掩星资料的全球第二对流层顶详细特征[J].物理学报,62(3):545-555. Jiang Y, Sheng Z, Shi H Q, 2013. Global characteristics of the double tropopause derived from the COSMIC radio occultation data[J]. Acta Phys Sin, 62(3):545-555. (in Chinese).
- 李国辉,吕达仁, X X Tie, 2003. 对流层顶变化对上对流层/下平流层臭氧分布的影响[J].空间科学学报, 23(4):269-277. Li G H, Lyu D R, X X Tie, 2003. The impact of tropopause variation on ozone distribution in upper troposphere/lower stratosphere[J]. Chin J Space Sci, 23(4):269-277. (in Chinese).
- 李伟,樊超,易帆,2009.武汉与海口地区对流层顶的变化特征[J].空间科学学报, 29(4):409-416. Li W, Fan C, Yi F, 2009. Characteristics of tropopause over Wuhan and Haikou[J]. Chin J Space Sci, 29(4):409-416. (in Chinese).

- 吕美仲,侯志明,周毅,2004.动力气象学[M].北京:气象出版社. Lyu M Z,Hou Z M,Zhou Y,2004.Dynamic Meteorology [M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- Randel W J,Park M,Wu F,et al.,2007.A large annual cycle in ozone above the tropical tropopause linked to the brewer—Dobson circulation[J].J Atmos Sci,64(12):4479-4488.
- Reichler T,Dameris M,Sausen R,2003.Determining the tropopause height from gridded data [J].Geophys Res Lett,30(20):2042,doi:10.1029/2003GL018240.
- 任荣彩,吴国雄,Cai Ming,等,2014.平流层-对流层相互作用研究进展:等熵位涡理论的应用及青藏高原影响[J].气象学报,72(5):853-868.
- Ren R C,Wu G X,Cai M,et al.,2014.Progress in research of stratosphere-troposphere interactions;application of isentropic potential vorticity dynamics and the effects of the Tibetan Plateau[J].Acta Meteorol Sin,72(5):853-868.(in Chinese).
- Santer B D,2003.Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes[J].Science,301(5632):479-483.
- Sausen R,Santer B D,2003.Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate[J].Metz,12(3):131-136.
- Seidel D J,Angell J K,Christy J,et al.,2004.Uncertainty in signals of large-scale climate variations in radiosonde and satellite upper-air temperature datasets[J].J Climate,17(11):2225-2240.
- 申乐琳,何金海,陈隆勋,等,2009.青藏高原热力状况对东亚夏季副热带西风急流的影响[J].气象与减灾研究,32(1):25-31. Shen L L,He J H,Chen L X,et al.,2009.Thermal effect of Tibetan Plateau on East Asia subtropical westerly jet in summer[J].Meteorol Disaster Reduct Res,32(1):25-31.(in Chinese).
- Son S W,Polvani L M,Waugh D W,et al.,2009.The impact of stratospheric ozone recovery on tropopause height trends[J].J Climate,22(2):429-445.
- 苏昱丞,郭栋,郭胜利,等,2016.未来百年夏季青藏高原臭氧变化趋势及可能机制[J].大气科学学报,39(3):309-317. Su Y C,Guo D,Guo S L,et al.,2016.Ozone trends over the Tibetan Plateau in the next 100 years and their possible mechanism[J].Trans Atmos Sci,39(3):309-317.(in Chinese).
- Thorne P W,2005.Revisiting radiosonde upper air temperatures from 1958 to 2002[J].J Geophys Res,110(D18):D18105.
- 王静,何金海,祁莉,等,2018.青藏高原土壤湿度的变化特征及其对中国东部降水影响的研究进展[J].大气科学学报,41(1):1-11. Wang J,He J H,Qi L,et al.,2018.The variation characteristics of soil moisture in Tibet Plateau and its influences on the precipitation in Eastern China;recent progress[J].Trans Atmos Sci,41(1):1-11.(in Chinese).
- 王树廷,王伯民.1984.气象资料的整理和统计方法[M].北京:气象出版社. Wang S T,Wang B M.1984.Reorganization and statistical method for meteorological data [M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- 王卫国,孙绩华,吴润,等,2008.青藏高原及东亚邻近区域对流层顶气压场的时空演变结构分析[J].热带气象学报,24(3):294-302. Wang W G,Sun J H,Wu J,et al.,2008.Structure analysis of the spatial-temporal feature of tropopause pressure field over the Tibetan Plateau and adjacent areas of East Asia[J].J Trop Meteorol,24(3):294-302.(in Chinese).
- 吴润,杨茜,符淙斌,等,2007.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,23(6):595-600. Wu J,Yang Q,Fu C B,et al.,2007.Climatological characteristics of East Asia tropopause height under global warming background[J].J Trop Meteorol,23(6):595-600.(in Chinese).
- 吴香玲,1995.北京地区极地对流层顶与地面要素之间的关系[J].气象,21(11):42-46. Wu X L,1995.The relationship between arctic tropopause height and surface air temperature in Beijing area[J].Meteorol Mon,21(11):42-46.(in Chinese).
- 夏昕,任荣彩,吴国雄,等,2016.青藏高原周边对流层顶的时空分布、热力成因及动力效应分析[J].气象学报,74(4):525-541. Xia X,Ren R C,Wu G X,et al.,2016.An analysis on the spatio-temporal variations and dynamic effects of the tropopause and the related stratosphere-troposphere coupling surrounding the Tibetan Plateau area[J].Acta Meteorol Sin,74(4):525-541.(in Chinese).
- 徐雯雯,郭栋,孙晓娟,等,2019.青藏高原臭氧谷极端事件的定义及其特征[J].大气科学学报,42(1):129-137. Xu W W,Guo D,Sun X J,et al.,2019.Definition and characteristics of extreme events of ozone valley over the Tibetan Plateau[J].Trans Atmos Sci,42(1):129-137.(in Chinese).
- Yang S Y,Hu J G,Qin Y L,2016.Annual variations of the tropopause height over the Tibetan Plateau compared with those over other regions[J].Dyn Atmospheres Ocean,76:83-92.
- 杨双艳,周顺武,陈鹤,2010.甘肃省对流层顶高度的季节变化特征分析[J].气象,36(4):57-62. Yang S Y,Zhou S W,Chen H,2010.Analysis on seasonal variation of tropopause height over Gansu Province[J].Meteorol Mon,36(4):57-62.(in Chinese).
- 翟盘茂,郭艳君,2006.高空大气温度变化研究[J].气候变化研究进展,2(5):228-231,257,232. Zhai P M,Guo Y J,2006.A study of upper air temperature change[J].Adv Clim Chang Res,2(5):228-231,257,232.(in Chinese).
- 张超,田荣湘,茆慧玲,等,2018.青藏高原4月感热通量异常对长江以南夏季降水的影响[J].大气科学学报,41(6):775-785. Zhang C,Tian R X,Mao H L,et al.,2018.Impact of the sensible heat flux anomaly over the Tibetan Plateau in April on summer precipitation in the South of the Yangtze river region[J].Trans Atmos Sci,41(6):775-785.(in Chinese).
- 张人禾,周顺武,2008.青藏高原气温变化趋势与同纬度带其他地区的差异以及臭氧的可能作用[J].气象学报,66(6):916-925. Zhang R H,Zhou S W,2008.The air temperature change over the Tibetan Plateau during 1979—2002 and its possible linkage with ozone depletion[J].Acta Meteorol Sin,66(6):916-925.(in Chinese).
- 赵天保,符淙斌,2006.中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析[J].气候与环境研究,11(1):14-32. Zhao T B,Fu C B,2006.Preliminary comparison and analysis between ERA-40,NCEP-2 reanalysis and observations over China[J].Clim Environ Res,11(1):14-32.(in Chinese).
- 郑彬,施春华,2006.全球平流层下部降温及其对纬向风的影响[J].气象科技,34(5):538-541. Zheng B,Shi C H,2006.Temperature cooling in lower stratosphere and its effects on zonal wind[J].Meteorol Sci Technol,34(5):538-541.(in Chinese).

- 郑彬,施春华,2015. 1979—2011年热带对流层顶高度线性趋势变化的因子贡献及其年际变率成因探讨[J]. 热带气象学报, 31(3): 300-309.
- Zheng B, Shi C H, 2015. Factors contributing to linear trends of the tropical tropopause height and causes of their interannual variability from 1979 to 2011[J]. J Trop Meteorol, 31(3): 300-309. (in Chinese).
- 支星,徐海明,2013. 三种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的季节平均特征对比分析[J]. 高原气象, 32(1): 97-109. Zhi X, Xu H M, 2013. Comparative analysis on monthly mean characteristic of free atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in China[J]. Plateau Meteorol, 32(1): 97-109. (in Chinese).
- 周顺武,杨双艳,张人禾,等,2010. 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, 33(3): 307-314. Zhou S W, Yang S Y, Zhang R H, et al., 2010. Seasonal variation of two types of tropopause height over the Tibetan Plateau [J]. Trans Atmos Sci, 33(3): 307-314. (in Chinese).
- 朱保林,管兆勇,程智,2010. 北半球夏季对流层顶气压与气温的年(代)际变率与趋势分析[J]. 热带气象学报, 26(3): 364-370. Zhu B L, Guan Z Y, Cheng Z, 2010. Interannual/interdecadal variabilities and trend in the tropopause pressure and temperature Fields during boreal summer[J]. J Trop Meteorol, 26(3): 364-370. (in Chinese).
- Zou H, 1996. Seasonal variation and trends of toms ozone over Tibet[J]. Geophys Res Lett, 23(9): 1029-1032.
- 邹进上,张降秋,王炳忠,1989. 我国对流层顶时空分布特征及其影响因子[J]. 气象科学, 9(4): 417-426. Zou J S, Zhang J Q, Wang B Z, 1989. The characteristics of temporal and spatial variation of tropopause over China and its controlling factors [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 9(4): 417-426. (in Chinese).

Comparison on variation features of the tropical tropopause pressure over the Tibetan Plateau and the other regions in the same latitudes

ZHOU Shunwu¹, ZHENG Dan¹, QIN Yalan¹, GUO Dong¹, WANG Chuanhui², HU Kaixi³

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

²Anhui Provincial Meteorological Bureau, Hefei 230031, China;

³National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China

In this study, based on the daily temperature dataset from ERA-Interim analysis during 1979—2014, and according to the temperature lapse rate interpolation method, the tropopause pressure over the Tibetan Plateau and other regions in the same latitudes are calculated. First, the seasonal variation and long-term trends of the tropical tropopause pressure over the Tibetan Plateau, in comparison to those over other regions in the same latitudes, are discussed. Next, the relationships between the tropical tropopause pressure and upper air temperature are preliminarily addressed. The results of the study are as follows: 1) In terms of seasonal change, with the exceptions of December and January, the tropical tropopause pressure over the Tibetan Plateau is lower than that over other regions in the same latitudes in each month. In addition, compared with other regions in the same latitudes, the single structure of the tropical tropopause pressure, mean temperature in the upper troposphere, and mean temperature in the lower stratosphere over the Tibetan Plateau are shown to be more distinct. 2) The tropical tropopause pressure the Tibetan Plateau and other regions in the same latitudes display a close relation with the upper air temperature, i.e. when the mean temperature in the upper troposphere (in the lower stratosphere) increases (decreases), the tropical tropopause pressure decreases. Furthermore, the tropical tropopause pressure the Tibetan Plateau is more closely linked with the mean temperature in the upper troposphere than that over other regions in the same latitudes. 3) From 1979 to 2014, both the tropical tropopause pressure of the Tibetan Plateau and non-plateau regions decreased with time during each month, especially in spring and winter. Meanwhile, compared with the other regions in the same latitudes, the upward (downward) trends of the mean temperature in the upper (lower) troposphere of the Tibetan Plateau were faster all year round, which led to a more rapid tropical tropopause pressure decline on the Tibetan Plateau.

Tibetan Plateau; the tropical tropopause; pressure; seasonal variation; trends

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20170112001

(责任编辑:袁东敏)