

帅晶, 黄春明, 张绍东等. 2014. 2003—2011 年平流层顶抬升事件的 SABER/TIMED 观测. 地球物理学报, 57(8): 2465-2472, doi:10.6038/cjg20140808.

Shuai J, Huang C M, Zhang S D, et al. 2014. Elevated stratopause events during 2003—2011 revealed by SABER/TIMED temperature observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(8): 2465-2472, doi:10.6038/cjg20140808.

## 2003—2011 年平流层顶抬升事件的 SABER/TIMED 观测

帅晶<sup>1,2,3,4</sup>, 黄春明<sup>1,2,3,4</sup>, 张绍东<sup>1,2,3,4\*</sup>, 易帆<sup>1,2,3,4</sup>,  
黄开明<sup>1,2,3,4</sup>, 甘泉<sup>1,2,3,4</sup>, 龚韵<sup>1,2,3,4</sup>

1 武汉大学电子信息学院, 武汉 430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079

3 武汉大气遥感国家野外科学观测研究站, 武汉 430079

4 武汉大学遥感测绘国家重点实验室, 武汉 430079

**摘要** 利用 2003—2011 年的 SABER/TIMED 温度数据观测发现, 在 2006 年、2009 年和 2010 年北半球高纬(70°N)的冬季(1—3 月)发生了“平流层顶抬升”. 在这 3 次事件中, 1 月末—2 月初的~50 km 和~80 km 高度处分别出现了温度的极大值~260 K 和~230 K, 即平流层顶的高度突然由原来的 50 km 左右上升至 80 km 左右, 这就是平流层顶抬升事件; 随着时间的推移, 抬升的平流层顶的高度逐渐下降直至恢复到原有位置, 与此同时其温度由~230 K 上升至~260 K. 值得注意的是, 虽然在极区的每年冬天都发生平流层突然增温事件, 但是只在伴随着极涡分裂的平流层突然增温事件后出现平流层顶抬升. 此外, 在发生平流层顶抬升事件的冬季里, 高纬的重力波活动在 1 月末—2 月初的~80 km 高度处突然增强, 对应着平流层顶的抬升时间和高度; 在 2 月份之后, 重力波活动在 75 km 以下逐渐增强、在 75 km 以上逐渐减弱, 同时抬升的平流层顶也不断下降. 通过重力波活动与平流层顶抬升事件的相关性分析, 表明重力波活动可能对平流层顶的抬升有重要影响.

**关键词** 抬升的平流层顶; 平流层突然增温; 重力波; SABER

doi:10.6038/cjg20140808

中图分类号 P401

收稿日期 2013-10-02, 2014-07-17 收修定稿

### Elevated stratopause events during 2003—2011 revealed by SABER/TIMED temperature observations

SHUAI Jing<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Chun-Ming<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Shao-Dong<sup>1,2,3,4\*</sup>, YI Fan<sup>1,2,3,4</sup>,  
HUANG Kai-Ming<sup>1,2,3,4</sup>, GAN Quan<sup>1,2,3,4</sup>, GONG Yun<sup>1,2,3,4</sup>

1 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

3 State Observatory for Atmospheric Remote Sensing, Wuhan 430079, China

4 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract** The elevated stratopause (ES) events in the winter (January—March) of 2006, 2009

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(2012CB825605), 国家自然科学基金(41221003, 41374155, 41174126), 南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2014-02-03), 空间天气国家重点实验室开放基金共同资助.

**作者简介** 帅晶, 女, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事大气重力波及平流层顶的研究. E-mail: 568835678@qq.com

\* **通讯作者** 张绍东, E-mail: zsd@whu.edu.cn

and 2010 at 70°N are studied based on the SABER/TIMED temperature measurements in the period from 2003 to 2011. In each of these three winters, there suddenly appeared the maximum atmospheric temperature around 80 km between 25 and 85 km in late January—early February, which meant that the stratopause jumped from the normal location ( $\sim 50$  km) with temperature  $\sim 260$  K up to the higher location ( $\sim 80$  km) with temperature  $\sim 230$  K, and this phenomenon was identified as the ES event. As time went on, the ES height decreased gradually and returned to its normal level. Meanwhile the ES temperature increased from  $\sim 230$  K to  $\sim 260$  K. It is noteworthy that the applied data set indicates that although stratospheric warming occurred in every boreal winter, only after the major sudden stratospheric warming (SSWs) accompanying with the polar vortex splitting, the ES events could occur. Furthermore, in the ES events winter, gravity wave (GW) activity enhancement could be observed at  $\sim 80$  km between late January and early February, corresponding to the ES occurrence height and time. After February GW activity became weaker above 75 km and stronger below 75 km when the ES decreased with time. The correlation analyses between GW activity and the ES event indicate the possible contribution of GW activity to the formation of the ES event.

**Keywords** Elevated stratopause; Sudden stratospheric warming; Gravity wave; SABER

## 1 引言

“平流层顶抬升”(ES)是一种异常的大气现象,一般发生在北半球高纬的冬季(Waugh and Randel, 1999; Manney et al., 2008; Manney et al., 2009; France et al., 2012a).在中、低纬,由于大气中的臭氧直接吸收太阳短波辐射,在 50 km 左右出现温度极大值,此处对应着平流层顶.而在极区,由于太阳辐射远远少于中、低纬的,而且还受到各种动力驱动的影响,比如极区的气旋、反气旋和各种大气波动(Hitchman et al., 1989; Kanzawa, 1989; Harvey and Hitchman, 1996; Thayer et al., 2010),使得不能仅仅通过大气温度判定平流层顶.特别是在极区的冬季常有平流层突然增温(SSW)事件发生,10 hPa( $\sim 30$  km)高度处的大气温度会突然增加几十开尔文,由此可能在更高的高度上(比如 80 km 左右)出现平流层顶,即 ES(Waugh and Randel, 1999; Manney et al., 2008; Manney et al., 2009; De la Torre et al., 2012; France and Harvey, 2013).

在过去的 10 年里,对于北半球 ES 事件的观测研究大部分基于卫星数据. Manney 等(2008, 2009)利用 MLS(Microwave Limb Sounder)数据发现,在 2006 年的北半球极区发生了强 SSW 不久后就出现了 ES 事件,他们认为这次 ES 事件与极涡有关. France 等(2012a)利用同样卫星的数据研究 2006 年和 2009 年发生的 ES 事件,发现这两次事件都被

限制在涡旋中心并且与斜压不稳定性所引起的非地转活动有关,从而进一步证明了 ES 事件与极涡有关.通过 SMR(Sub-Millimeter Radiometer)数据, Orsolini 等(2010)分别在 2004 年、2006 年和 2009 年极区冬季的  $\sim 80$  km 高度处观测到 ES,直到 1.5~2 个月 after 恢复到正常位置,而且他们同样认为 ES 的产生与极涡有关.除了分析 ES 与极涡的关系外,也有不少关于 ES 期间重力波活动变化的研究.由于极区冬季的平流层顶易受各种驱动影响(Hitchman et al., 1989; Harvey and Hitchman, 1996),重力波活动的任何变化都会对大气的温度结构产生重要影响(Zhang et al., 2001),这意味着极区冬季的平流层顶对重力波驱动十分敏感,比如在 2006 年和 2009 年重力波活动异常引起极区冬季平流层顶的抬升(Siskind et al., 2007; Thuraiajah et al., 2010a; Wright et al., 2010; Yamashita et al., 2013).本文利用 2003—2011 年的 SABER/TIMED 温度数据,分别在 2006 年、2009 年和 2010 年的高纬冬季观测到 ES,其中 2010 年的 ES 事件是第一次被观测研究,并且这 3 次事件都发生在伴随着极涡分裂的强 SSW 之后.本文同时给出了长达 9 年的高纬冬季的重力波活动的气候学观测结果,比较分析重力波活动在 ES 事件发生前后的变化.

本文第 2 节简单介绍 SABER 的 1.07 版本的温度数据以及从中提取重力波的方法.利用 2003—2011 年北半球高纬(70°N)冬季(1—3 月)的 25~85 km 高度范围内的 SABER/TIMED 温度数据,第

3 节详细研究 2006 年、2009 年和 2010 年发生的 ES 事件. 相应的重力波活动的变化将在第 4 节分析研究, 其中还包括重力波活动与 ES 事件的相关性分析. 最后是结论.

## 2 数据和方法

SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 仪器搭载在 TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) 卫星上, 于 2002 年 1 月底开始工作, 利用波长从  $1.27 \mu\text{m}$  到  $17 \mu\text{m}$  的 10 个通道临边探测  $20 \sim 120 \text{ km}$  高度范围内的大气温度. 当 SABER 向北观测时纬度覆盖范围是  $50^\circ\text{S} \sim 82^\circ\text{N}$ , 60 天后交换观测方向, 即 SABER 向南观测, 此时纬度覆盖范围是  $82^\circ\text{S} \sim 50^\circ\text{N}$ , 所以观测数据在纬度  $50^\circ\text{N/S}$  以上的时间覆盖上不连续.

本文利用 SABER 的 level2A 索引中的 1.07 版本温度数据分析研究, 这主要是因为其系统误差比之前版本的要小些. 由于 1.07 版本的数据考虑了非局地热平衡, Garcia 等 (2008) 认为其系统误差在  $95 \text{ km}$  以下不超过  $\pm 1.5 \text{ K}$ .

因为 ES 事件发生在北半球高纬冬季的中间层顶以下 (Waugh and Randel, 1999; Manney et al., 2008; Manney et al., 2009; Orsolini et al., 2010; France et al., 2012b; Yamashita et al., 2013), 所以我们主要分析 2003—2011 年 1—3 月从平流层到中间层 ( $25 \sim 85 \text{ km}$ ) 的 SABER 温度数据, 其垂直分辨率是  $2 \text{ km}$  (Mertens et al., 2004), 并将数据在  $70^\circ\text{N}$  上划分  $4^\circ$  的纬度带. 同时考虑到 ES 事件的持续时间 (Orsolini et al., 2010), 将纬向日平均值作为  $70^\circ\text{N}$  的大气温度.

## 3 2003—2011 年的平流层顶抬升事件

2003—2011 年  $70^\circ\text{N}$  的大气纬向日平均温度随时间 (1—3 月)、高度 ( $25 \sim 85 \text{ km}$ ) 的变化如图 1 所示. 冬季平流层顶 (定义为  $25 \sim 85 \text{ km}$  高度范围内温度极大值所对应的高度) 一般出现在  $50 \text{ km}$  左右 ( $40 \sim 60 \text{ km}$ ), 这与之前的观测结果相一致 (France et al., 2012a; France and Harvey, 2013). 然而, 在 2006 年、2009 年和 2010 年的 1 月末—2 月初, 大气温度结构出现异常, 即在更高的高度上 ( $75 \text{ km}$  以上) 出现一个温度极大值. De la Torre 等 (2012) 将

平流层顶突然上升  $15 \text{ km}$  以上的现象定义为一次 ES 事件. 我们采用同样的标准, 将 2006 年、2009 年和 2010 年冬季的平流层温度结构异常的现象认为是 ES 事件, 其中 2006 年和 2009 年的 ES 事件已被多次观测报道 (Manney et al., 2008; Manney et al., 2009; Orsolini et al., 2010; Thurairajah et al., 2010a; France et al., 2012a; Yamazaki et al., 2012), 而 2010 年的 ES 事件是第一次被观测到.

在 2010 年观测到一次明显的 ES 事件. 在 2 月份之前, 平流层顶的高度和温度分别是  $\sim 50 \text{ km}$  和  $\sim 260 \text{ K}$ . 在 2 月 9 日的  $79 \text{ km}$  高度处突然出现一个温度极大值  $221 \text{ K}$ , 即为 ES; 此时, 在  $25 \sim 85 \text{ km}$  高度范围内出现了两个温度极大值, 分别是  $50 \text{ km}$  附近的温度极大值  $\sim 260 \text{ K}$  和  $80 \text{ km}$  附近的温度极大值  $\sim 220 \text{ K}$ . 随着时间的推移, 较低的平流层顶的高度以  $\sim 1 \text{ km/day}$  的平均速度逐渐下降, 直至 2 月 15 日完全消失. 与此同时, ES 的高度也随时间逐渐下降, 但是其温度逐渐升高; 到 3 月 11 日的时候, 平流层顶的高度恢复到  $52 \text{ km}$ 、温度上升至  $263.0 \text{ K}$ ; 通过计算得知, 在此期间, ES 高度的平均下降速度是  $0.7 \text{ km/day}$ , ES 温度的平均上升速度是  $0.6 \text{ K/day}$ .

除了 2010 年, 图 1 中的结果还显示在 2006 年和 2009 年的冬季北半球极区也发生了 ES 事件, 这与以前的观测结果一致 (Siskind et al., 2007; Manney et al., 2008; Manney et al., 2009; Thurairajah et al., 2010a; Wright et al., 2010; France et al., 2012a; Yamashita et al., 2013). 在这两次事件中, 在 1 月末—2 月初的  $\sim 50 \text{ km}$  和  $\sim 80 \text{ km}$  高度处分别出现了温度极大值  $\sim 260 \text{ K}$  和  $\sim 230 \text{ K}$ , 即平流层顶突然由原来的  $50 \text{ km}$  左右上升至  $80 \text{ km}$  左右, 其中较小的温度极大值所对应的较高高度就是 ES; 在 ES 事件发生后的一个月左右 (大约在 3 月份), ES 的高度和温度都恢复至 ES 事件发生前的水平. 因此在 ES 事件的恢复期, ES 高度的平均下降速度在 2006 年和 2009 年分别是  $0.6 \text{ km/day}$  和  $0.5 \text{ km/day}$ , ES 温度的平均上升速度在 2006 年和 2009 年分别是  $0.8 \text{ K/day}$  和  $0.5 \text{ K/day}$ . 除了 ES 的高度和温度的恢复速度在 3 次 ES 事件中不同外, 平流层顶的高度和温度变化范围 (正常的平流层顶与抬升后的平流层顶的高度/温度差) 也不同, 其中 2010 年的高度变化最小、而温度变化最大.

此外, 2006 年、2009 年和 2010 年的 ES 事件均发生在伴随着极涡分裂的强 SSW 之后, 其发生和结束时间分别在图 1 中用带有字母 “S<sub>s</sub>” 和 “S<sub>e</sub>” 的虚线标记出来 (Yamazaki et al., 2012; Goncharenko et

al., 2013). 然而在其他年份, 如发生了伴随着极涡位移的强 SSW 的 2008 年以及没有发生强 SSW 的正常年份 2003 年, 都没有出现 ES 事件. 因此, 换句话说, 在伴随着极涡分裂的强 SSW 事件发生后都出现了 ES.

虽然 Orsolini 等(2010)利用 Orid 探测卫星在 70°N 的 2004 年 12 月发生的伴随着极涡分裂的强 SSW 之后观测到 ES 事件, 而 SABER 在此期间没有观测数据, 故图 1 中没有标注出这次强 SSW 的开始和结束时间. 但是除此之外, 2003—2011 年的其他 ES 和强 SSW 事件都发生在 1—3 月(Manne et al., 2008; Manne et al., 2009; Orsolini et al., 2010; Thurairajah et al., 2010a; Thurairajah et al., 2010b; France et al., 2012a; France et al., 2012b; Yamazaki et al., 2012), 且此期间 SABER 有连续的观测数据. 因此, 由于 SABER/TIMED 观测的不连续性造成高纬冬季的 1 月之前和 3 月之后的数据缺失不会影响 ES 事件的结论.

#### 4 平流层顶抬升事件期间的重力波活动

在 2006 年、2009 年和 2010 年冬季的北半球高纬地区, ES 事件发生在伴随着极涡分裂的强 SSW 之后(Yamazaki et al., 2012; Goncharenko et al., 2013). 当极区发生强 SSW 时, 平流层( $\sim 10$  hPa)的温度在几天内突然增加几十开尔文, 同时绕极环流明显减弱甚至崩溃而出现东风气流. 然后向东传播的重力波可以上传至中间层, 在 80 km 左右破碎并释放能量, 从而可能改变该区域的大气温度结构(Waugh and Randel, 1999; Manne et al., 2008; Manne et al., 2009; Orsolini et al., 2010; Siskind et al., 2010; Thurairajah et al., 2010a; Thurairajah et al., 2010c; Chandran et al., 2011; Ren et al., 2011; De la Torre et al., 2012; France and Harvey, 2013). 因此在 ES 期间的各种大气波动中, 我们主要研究重力波活动的变化.

利用卫星观测得到的温度剖面中包含背景温度和各种大气扰动(比如行星波、潮汐和重力波等), 所以从中正确提取重力波成分(纬向波数大于 6)是十分必要的(Preusse et al., 2002). 我们利用 Shuai 等(2014)提出的方法从 SABER 温度数据中提取重力波: 首先, 从每个温度剖面中减去纬向日平均值, 其中包括背景温度和迁移潮; 然后, 再从中一一减去拟合得到的所有可能的行星尺度(纬向波数小于 6)

波动; 最后得到的残余量即认为是重力波成分, 并将其平方量作为重力波活动强度. 由此我们得到 70°N 的重力波活动随时间(1—3 月)、高度(25~85 km)的变化, 如图 2 所示.

在 2010 年的 ES 事件发生前, 中间层的重力波活动强度是平流层的 2 倍左右, 比如在 1 月 28 日, 重力波活动在 50 km 是  $15.6 \text{ K}^2$ 、在 80 km 是  $32.1 \text{ K}^2$ , 但是在正常年份里(没有强 SSW 和 ES 事件)中间层的重力波活动强度几乎是平流层的 10 倍左右(Ern et al., 2011). 在 ES 事件发生前后(1 月 31 日—2 月 15 日), 75 km 以上的重力波活动明显增强, 最大值  $25.6 \text{ K}^2$  出现在 2 月 8 日的 81 km 处, 正好对应着 ES 的出现时间和高度; 而 75 km 以下的重力波活动强度突然减小. 随后, 重力波活动在 75 km 以上逐渐减弱、在 75 km 以下逐渐增强, 比如从 2 月 8 日到 3 月 10 日, 重力波活动强度在 81 km 高度处由  $25.6 \text{ K}^2$  减弱至  $18.0 \text{ K}^2$ 、在 50 km 高度处由  $4.5 \text{ K}^2$  增强至  $10.9 \text{ K}^2$ ; 在此期间, ES 随时间逐渐下降. 因此, 平流层顶随时间的变化与重力波活动的变化相关联; 特别是在 2 月初的 80 km 左右, 重力波活动的增强正好对应着 ES 事件的发生.

在 2006 年和 2009 年的 ES 事件中(Yamazaki et al., 2012; Goncharenko et al., 2013), 重力波活动随时间的变化与 2010 年的比较一致. 比如, 重力波活动在 ES 事件发生前夕, 其强度在中间层比在平流层大一倍左右; 到 1 月末—2 月初, 重力波活动在 80 km 附近突然增强, 此处对应着 ES 的出现, 而 75 km 以下的重力波活动急剧减弱; 在 2 月份之后, 75 km 以上的重力波活动逐渐减弱而 75 km 以下的重力波活动逐渐增强, 同时 ES 随时间下降直至回到原来的位置.

通过对比图 2 中不同年份的重力波活动随时间的变化规律可以很明显地看到, 重力波活动在在没有发生 ES 事件的年份里和在发生了 ES 事件的年份里是完全不一样的. 在 2003 年、2005 年、2007 年和 2011 年(正常年份), 重力波活动只随高度变化而几乎不随时间变化; 其中 2011 年的重力波活动比其他年份的相同高度、相同时间的重力波活动强些, 这可能是因为太阳活动强度与重力波活动呈现反相关(Goncharenko et al., 2013). 在 2008 年的 1 月末虽然发生了伴随着极涡位移的强 SSW 事件(Wang and Alexander, 2009), 但是不同高度的重力波活动在 1—2 月几乎没有变化、到 2 月份之后整体减弱.

为了研究 ES 事件和重力波活动的关联, 我们

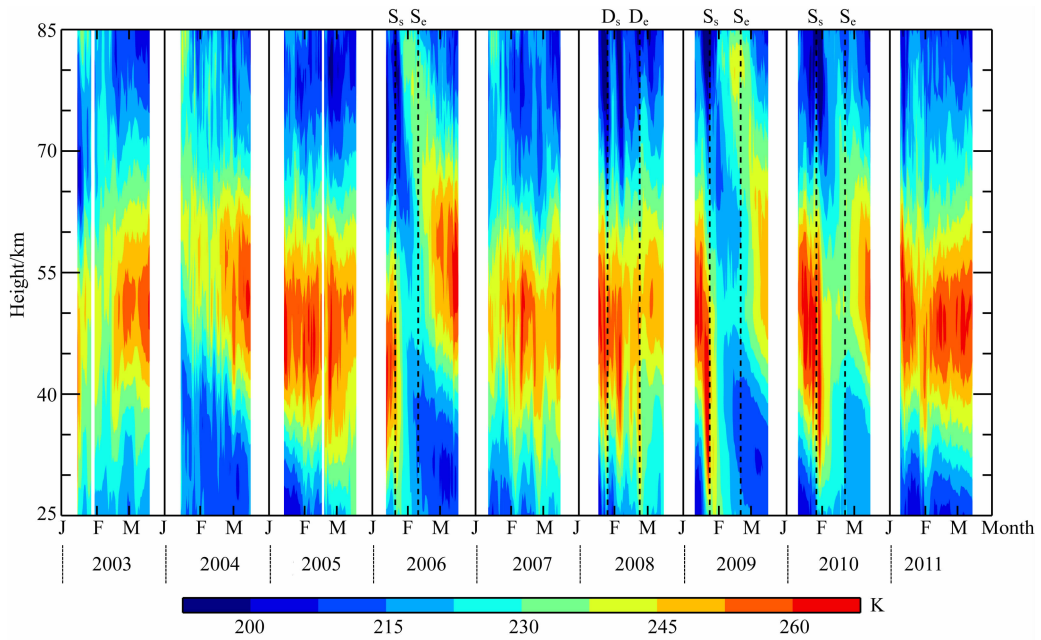


图 1 2003—2011 年的大气纬向日平均温度在  $70^{\circ}\text{N}$  随时间(1—3 月)、高度(25~85 km)的变化用“ $S_s$ ”和“ $S_e$ ”标记的虚线分别表示伴随着极涡分裂的强 SSW 的开始和结束时间,用“ $D_s$ ”和“ $D_e$ ”标记的虚线分别表示伴随着极涡位移的强 SSW 的开始和结束时间. 图中空白部分表示无数据.

Fig. 1 Daily zonal average atmospheric temperature at height 25~85 km at  $70^{\circ}\text{N}$  in winter months (January—March) between 2003 and 2011

Dashed lines marked with “ $S_s$ ” and “ $S_e$ ” denote, respectively, the start and end times of major SSW accompanying with the vortex splitting in corresponding year. Dashed lines marked with “ $D_s$ ” and “ $D_e$ ” denote, respectively, the start and end times of major SSW accompanying with the vortex displacement in corresponding year. Blank means no data.

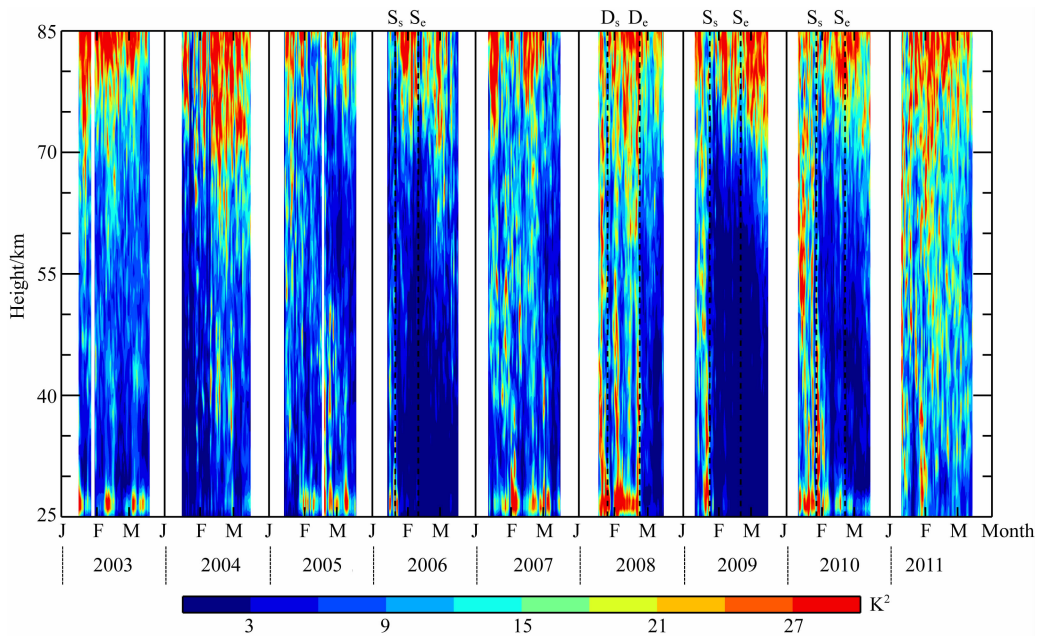


图 2 2003—2011 年的纬向日平均重力波活动在  $70^{\circ}\text{N}$  随时间(1—3 月)、高度(25~85 km)的变化用“ $S_s$ ”和“ $S_e$ ”标记的虚线分别表示伴随着极涡分裂的强 SSW 的开始和结束时间,用“ $D_s$ ”和“ $D_e$ ”标记的虚线分别表示伴随着极涡位移的强 SSW 的开始和结束时间. 图中空白部分表示无数据.

Fig. 2 Daily zonal average gravity wave activity at height 25~85 km at  $70^{\circ}\text{N}$  in winter months (January—March) between 2003 and 2011

Dashed lines marked with “ $S_s$ ” and “ $S_e$ ” denote, respectively, the start and end times of major SSW accompanying with the vortex splitting in corresponding year. Dashed lines marked with “ $D_s$ ” and “ $D_e$ ” denote, respectively, the start and end times of major SSW accompanying with the vortex displacement in corresponding year. Blank denotes no data.

计算  $70^{\circ}\text{N}$  的大气温度和重力波活动的相关系数. 考虑到 ES 出现在伴随着极涡分裂的强 SSW 之后且其高度、温度均随时间变化, 所以我们将每个高度上从 SSW 发生到 ES 发生的时间段内的大气温度与重力波活动进行相关性分析, 得到  $25\sim 85\text{ km}$  高度范围内相关系数, 如图 3a 所示. 从图中很明显地看到, 2006 年、2009 年和 2010 年的相关系数随高度的变化比较一致. 在  $30\sim 60\text{ km}$  高度范围内, 相关系数大于 0.5, 其中 2006 年的最大相关系数 0.9 出现在  $45\text{ km}$ 、2009 年的最大相关系数 0.7 出现在  $51\text{ km}$ 、2010 年的最大相关系数 0.9 出现在  $47\text{ km}$ , 这说明重力波可能对 ES 的形成有重要影响. 在  $70\text{ km}$  左右, 相关系数达到极小值. 在更高的高度上 ( $75\text{ km}$  以上), 相关系数随高度逐渐增大且均为正值, 说明在 ES 出现的高度范围内大气温度与重力波活动呈正相关. 总体而言, 重力波活动与 ES 事件呈正相关.

根据重力波活动随时间的变化情况以及是否发生特殊事件(如强 SSW)的年份类型, 将 2003—2012 年(除 2006 年、2009 年、2010 年和 2012 年)的相关系数再分为两组讨论, 其结果分别如图 3b 和 3c 所示. 在 2008 年的冬季发生了伴随着极涡位移的强 SSW 事件但没有发生 ES 事件, 计算得到的相关系数在大部分高度上小于 0.5(图 3b), 其中与发生 ES 年份里的相关系数最大的不同是  $30\sim 60\text{ km}$  高度

范围内的相关系数几乎为 0. 在其他的正常年份(没有发生 SSW 和 ES 事件)2003 年、2005 年、2007 年和 2011 年里, 相关系数在  $40\sim 70\text{ km}$  高度范围内几乎为 0(图 3c).

在图 3 中, 没有 2004 年的大气温度与重力波活动的相关系数, 这主要是因为 2004 年的强 SSW 发生在 12 月份(Pancheva et al., 2008; France et al., 2012a), 而此时 SABER 没有观测数据, 故没有计算大气温度与重力波活动的相关系数. 然而, 在长达 9 年的统计分析中, 仅 1 年(2004 年)的数据缺少不会影响重力波活动与 ES 事件相关性的结论.

## 5 结论

本文利用 1.07 版本的 SABER/TIMED 温度数据统计研究 2003—2011 年北半球高纬 ( $70^{\circ}\text{N}$ ) 冬季(1—3 月)的  $25\sim 85\text{ km}$  高度范围内发生的 ES 事件. 根据将平流层顶上升高度大于  $15\text{ km}$  的现象定义为 ES 事件的标准, 我们分别在 2006 年、2009 年和 2010 年冬季观测到 ES.

这 3 次 ES 事件都发生在 1 月末—2 月初, 平流层顶的高度由  $\sim 50\text{ km}$  突然上升到  $\sim 80\text{ km}$ , 而对应的平流层顶温度由  $260\text{ K}$  左右下降至  $230\text{ K}$  左右, 其中较小的温度极大值对应的较高高度即为 ES. 随

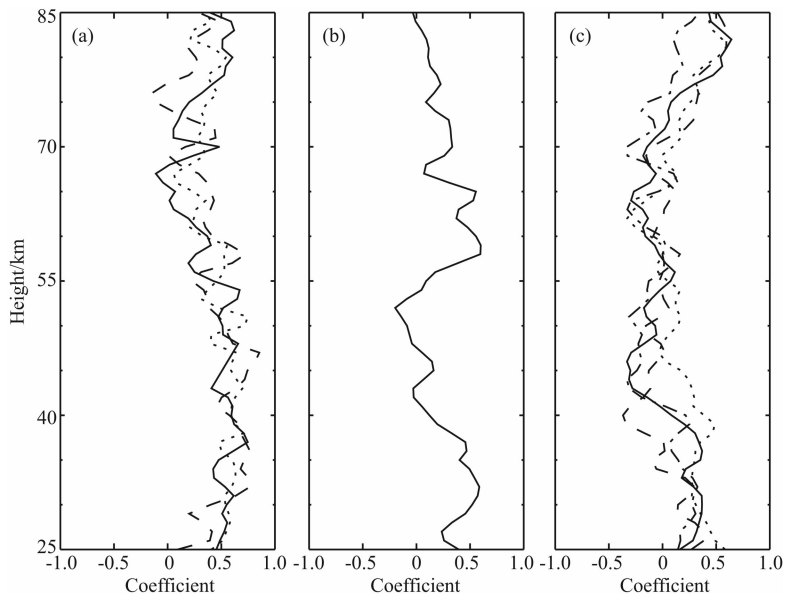


图 3 大气温度和重力波活动的相关系数分别在(a) 2006 年(实线)、2009 年(点线)、2010 年(虚线), (b) 2008 年(实线), (c) 2003 年(实线)、2005 年(点线)、2007 年(虚线)和 2011 年(虚/点线)的冬季(1—3 月)随高度( $25\sim 85\text{ km}$ )的变化  
Fig. 3 Correlation coefficients between the atmospheric temperature and GW activity versus height ( $25\sim 85\text{ km}$ ) in the winter (January—March) of (a) 2006 (solid curve), 2009 (dotted curve) and 2010 (dashed curve), in (b) 2008 (solid curve), in (c) 2003 (solid curve), 2005 (dotted curve), 2007 (dashed curve) and 2011 (dashed dot curve)

着时间的推移,ES 的高度逐渐下降而温度逐渐上升.直到 ES 发生的一个月后(3 月份左右),平流层顶的高度和温度都恢复到 ES 事件发生前的水平.然而,在这 3 次 ES 事件中也存在一些差异,比如,通过计算 ES 的恢复速度,得到 ES 高度的平均下降速度在 2006 年、2009 年和 2010 年分别是 0.6 km/day、0.5 km/day 和 0.7 km/day,ES 温度的平均上升速度在 2006 年、2009 年和 2010 年分别是 0.8 K/day、0.5 K/day 和 0.6 K/day;平流层顶的温度和高度变化(即正常的平流层顶和抬升后的平流层顶之间的差值)在 2010 年分别最小和最大.

值得注意的是,所观测到的 ES 事件均发生在伴随着极涡分裂的强 SSW 事件之后,反之亦然,即在伴随着极涡分裂的强 SSW 事件之后都发生了 ES;而在发生了伴随着极涡位移的强 SSW 的 2008 年里,没有观测到 ES 事件.此外,在 2006 年、2009 年和 2010 年的 1 月末—2 月初,重力波活动在~80 km 高度处增强,正好对应着 ES 的出现时间和高度;而 75 km 以下的重力波活动强度突然减小.这可能是因为西风突然减弱甚至发生反转,使得向东传播的重力波能上传至中间层并饱和破碎(Manne et al., 2008; Manney et al., 2009; Orsolini et al., 2010; Chandran et al., 2011; Ren et al., 2011; De la Torre et al., 2012; France and Harvey, 2013).在 ES 事件的恢复期,重力波活动在 75 km 以上逐渐减弱、在 75 km 以下逐渐增强,此时 ES 随时间下降直至恢复到原来位置.因此,平流层顶随时间的变化与重力波活动有关.

为了研究重力波活动与 ES 事件的关联,我们计算了 2006 年、2009 年和 2010 年的重力波活动与大气温度在 25~85 km 高度范围内的相关系数.在 40~60 km 高度范围内,相关系数大于 0.5,这说明重力波活动可能对 ES 的产生有重要影响.然而,在其他没有发生 ES 事件的年份里,重力波活动与大气温度的相关系数都较小.

## References

- Chandran A, Collins R L, Garcia R R, et al. 2011. A case study of an elevated stratopause generated in the Whole Atmosphere Community Climate Model. *Geophys. Res. Lett.*, 38(8): L08804.
- De la Torre L, Garcia R R, Barriopedro D, et al. 2012. Climatology and characteristics of stratospheric sudden warmings in the Whole Atmosphere Community Climate Model. *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JD016840.
- Ern M, Preusse P, Gille J C, et al. 2011. Implications for atmospheric dynamics derived from global observations of gravity wave momentum flux in stratosphere and mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 116(D19): D19107, doi:10.1029/2011JD015821.
- France J A, Harvey V L, Randall C E, et al. 2012a. A climatology of stratopause temperature and height in the polar vortex and anticyclones. *J. Geophys. Res.*, 117(D6): D06116, doi:10.1029/2011JD016893.
- France J A, Harvey V L, Alexander M J, et al. 2012b. High Resolution Dynamics Limb Sounder observations of the gravity wave-driven elevated stratopause in 2006. *J. Geophys. Res.*, 117(D20): D20108, doi:10.1029/2012JD017958.
- France J A, Harvey V L. 2013. A climatology of the stratopause in WACCM and the zonally asymmetric elevated stratopause. *J. Geophys. Res.*, 118(5): 2241-2254, doi:10.1002/jgrd.50218.
- Garcia C M, Lopez P M, Marshall B T, et al. 2008. Errors in Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) kinetic temperature caused by non-local-thermodynamic-equilibrium model parameters. *J. Geophys. Res.*, 113(D24): D24106, doi:10.1029/2008JD010105.
- Goncharenko L P, Hsu V W, Brum C G M, et al. 2013. Wave signatures in the midlatitude ionosphere during a sudden stratospheric warming of January 2010. *J. Geophys. Res.*, 118(1): 472-487, doi:10.1029/2012JA018251.
- Harvey V L, Hitchman M H. 1996. A climatology of the Aleutian High. *J. Atmos. Sci.*, 53(14): 2088-2102, doi:10.1175/1520-0469.
- Hitchman M H, Gille J C, Rodgers C D, et al. 1989. The separated polar winter stratopause: A gravity wave driven climatological feature. *J. Atmos. Sci.*, 46: 410-422.
- Kanzawa H. 1989. Warm stratopause in the Antarctic winter. *J. Atmos. Sci.*, 46: 435-438, doi:10.1175/1520-0469.
- Manney G L, Kruger K, Pawson S, et al. 2008. The evolution of the stratopause during the 2006 major warming: Satellite data and assimilated meteorological analyses. *J. Geophys. Res.*, 113(D11): D11115, doi:10.1029/2007JD009097.
- Manney G L, Schwartz M J, Krüger K, et al. 2009. Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric major warming. *Geophys. Res. Lett.*, 36(12): L12815, doi:10.1029/2009GL038586.
- Mertens C J, Schmidlin F J, Goldberg R A, et al. 2004. SABER observations of mesospheric temperatures and comparisons with falling sphere measurements taken during the 2002 summer MaCWAVE campaign. *Geophys. Res. Lett.*, 31(3): L03105.
- Orsolini Y J, Urban J, Murtagh D P, et al. 2010. Descent from the polar mesosphere and anomalously high stratopause observed in 8 years of water vapor and temperature satellite observations by the Odin Sub-Millimeter. *J. Geophys. Res.*, 115(D12): D12305, doi:10.1029/2009JD013501.
- Pancheva D, Mukhtarov P, Mitchell N J, et al. 2008. Planetary

- waves in coupling the stratosphere and mesosphere during the major stratospheric warming in 2003/2004. *J. Geophys. Res.*, 113(D12): D12105, doi:10.1029/2007JD009011.
- Preusse P, Dornbrack A, Eckermann S D, et al. 2002. Space-based measurements of stratospheric mountain waves by CRISTA 1. Sensitivity, analysis method, and a case study. *J. Geophys. Res.*, 107(D23): 8178, doi:10.1029/2001JD000699.
- Ren S, Polavarapu S, Beagley S R, et al. 2011. The impact of gravity wave drag on mesospheric analyses of the 2006 stratospheric major warming. *J. Geophys. Res.*, 116(D19): D19116, doi:10.1029/2011JD015943.
- Shuai J, Zhang S D, Huang C M, et al. 2014. Climatology of global gravity wave activity and dissipation revealed by SABER/TIMED temperature observations. *Sci. China (Series E)*, 57(5): 998-1009.
- Siskind D E, Eckermann S D, Coy L, et al. 2007. On recent interannual variability of the Arctic winter mesosphere: Implications for tracer descent. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L09806, doi:10.1029/2007GL029293.
- Siskind D E, Eckermann S D, McCormack J P, et al. 2010. Case studies of the mesospheric response to recent minor, major, and extended stratospheric warmings. *J. Geophys. Res.*, 115(D3): D00N03, doi:10.1029/2010JD014114.
- Thayer J P, Greer K, Harvey V L. 2010. Front-like behavior in the Arctic wintertime upper stratosphere and lower mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 115: D00N04, doi:10.1029/2010JD014278.
- Thurairajah B, Collins R L, Harvey V L, et al. 2010a. Gravity wave activity in the Arctic stratosphere and mesosphere during the 2007—2008 and 2008—2009 stratospheric sudden warming events. *J. Geophys. Res.*, 115: D00N06, doi:10.1029/2010JD014125.
- Thurairajah B, Collins R L, Harvey V L, et al. 2010b. Rayleigh lidar observations of reduced gravity wave activity during the formation of an elevated stratopause in 2004 at Chatanika, Alaska (65°N, 147°W). *J. Geophys. Res.*, 115(D13): D13109, doi:10.1029/2009JD013036.
- Thurairajah B, Collins R L, Harvey V L, et al. 2010c. Rayleigh lidar observations of reduced gravity wave activity during the formation of an elevated stratopause in 2004 at Chatanika, Alaska (65°N, 147°W). *J. Geophys. Res.*, 115(D13): D13109, doi:10.1029/2009JD013036.
- Wang L, Alexander M J. 2009. Gravity wave activity during stratospheric sudden warmings in the 2007—2008 Northern Hemisphere winter. *J. Geophys. Res.*, 114(D18): D18108, doi:10.1029/2009JD011867.
- Waugh D W, Randel W J. 1999. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, 56(11): 1594-1613.
- Wright C J, Osprey S M, Barnett J J, et al. 2010. High Resolution Dynamics Limb Sounder measurements of gravity wave activity in the 2006 Arctic stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 115(D2): D02105, doi:10.1029/2009JD011858.
- Yamashita C, England S L, Immel T J, et al. 2013. Gravity wave variations during elevated stratopause events using SABER observations. *J. Geophys. Res.*, 118(11): 5287-5303, doi:10.1002/jgrd.50474.
- Yamazaki Y, Richmond A D, Liu H X, et al. 2012. Sq current system during stratospheric sudden warming events in 2006 and 2009. *J. Geophys. Res.*, 117(A12): A12313, doi:10.1029/2012JA018116.
- Zhang S D, Yi F, Wang J F, et al. 2001. A numerical study on saturation mechanism of gravity wave in mesosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 44(4): 454-460.

## 附中文参考文献

- 张绍东, 易帆, 王敬芳等. 2001. 中层大气中重力波饱和机制的数值分析. *地球物理学报*, 44(4): 454-460.

(本文编辑 何燕)