

一个诊断极区平流层温度变化的近似方程的检验及应用

刘仁强^{①*}, 付焱焱^①, 吴国华^①, 王咏青^①, Wright J S^②

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, 江苏 南京 210044;

② 清华大学 地球系统科学系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: rq_liu@nuist.edu.cn

2017-11-27 收稿, 2018-04-10 接受

国家自然科学基金资助项目(41575040; 91537213; 41875070)

摘要 根据一个诊断极区平流层温度变化的近似方程及其滑动累加计算方案, 采用1980—2000年的MERRA-2再分析日资料计算了北半球极区低平流层100 hPa逐月的温度增量项、动力加热项和非绝热加热项, 以及各项的线性趋势。结果表明, 各月温度增量项与累积的动力和非绝热加热之和在气候平均的年循环意义上接近平衡, 而且它们的趋势也近似平衡。进一步通过多元回归, 得到了动力和非绝热加热作用对当前月温度趋势的分别贡献, 动力作用是北极低平流层冬季温度趋势的主导因素并且在冬季内不一致, 而非绝热作用在其他季节是主导因素。

关键词

平流层温度
变化;
热通量近似;
动力加热;
非绝热加热

纬向平均的平流层温度分布取决于净辐射加热和由涡动产生的动力加热之间的平衡(Andrews et al., 1987; Ivy et al., 2016), 这可以通过分析变换的欧拉平均(Transformed Eulerian-Mean, TEM)方程组(Andrews and McIntyre, 1976, 1978)得出。在准地转近似下, Edmon et al. (1980)和Andrews et al. (1987)导出了形式上更为简单的TEM方程, 其中热力学能量方程中的动力加热项仅与平均经向环流(或剩余环流)的垂直分量有关, 这为研究纬向平均的热带外平流层温度变化提供了简便的理论框架。

进一步的研究表明, 在北半球中高纬地区低平流层, 可以仅用涡动热通量项近似地表达动力加热的强度(Newman et al., 2001; Hu and Tung, 2002; Eyring et al., 2010; Bohlinger et al., 2014)。Newman et al. (2001)首先发现北极低平流层3月温度与中高纬地区1—2月涡动热通量呈正相关, 并推导了用累积的涡动热通量表征动力加热的极区面积加权的温度控制方程。Hu and Tung (2002)通过引入剩余环流流函数推导了类似的极区温度变化控制方程, 简明地表示了动力和非绝热加热作用对温度变化的分别影响。当今全球变化研究要求对极区平流层温

度变化进行定量的分析, Bohlinger et al. (2014)根据Newman et al. (2001)的热通量近似理论, 使用再分析及探空资料, 通过多元回归得到了北极低平流层温度变化的动力和辐射加热趋势。Ivy et al. (2016)则把辐射活跃气体月平均资料输入辐射传输模式中直接计算得到辐射加热趋势, 认为剩余部分即是动力趋势。

本文将根据一个Hu and Tung形式(Hu and Tung, 2002)的极区平流层温度变化近似方程, 提出一个利用日资料计算月到月的温度变化的计算方案。然后采用MERRA-2再分析资料(Bosilovich et al., 2015)1980—2000年时段研究北极低平流层100 hPa上的温度变化及其动力和非绝热加热贡献, 由此检验动力加热采用热通量近似的温度变化方程的有效性。最后使用多元回归方法将影响当前月温度变化的动力和非绝热作用分离, 研究它们对北极低平流层当前月温度趋势的分别贡献。

1 资料和方法

研究采用NASA(美国国家航空航天局)MERRA-2再分析水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的温度、

引用格式: 刘仁强, 付焱焱, 吴国华, 等, 2019. 一个诊断极区平流层温度变化的近似方程的检验及应用[J]. 大气科学学报, 42(6): 874-879.

Liu R Q, Fu Y Y, Wu G H, et al., 2019. Verification and application of an approximate thermodynamic equation for diagnosing the polar stratospheric temperature changes[J]. Trans Atmos Sci, 42(6): 874-879. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171127001. (in Chinese).

经向风和非绝热加热日资料。对比 MERRA (Modern-Era Retrospective-analysis for Research and Applications), MERRA-2 制作所使用的预报模式有实质性升级, 同化方案和输入资料也有变化 (Fujiwara et al., 2017)。选取 1980—2000 年进行分析是因为这是二氧化碳增加和平流层臭氧减少近于单调变化的时段, 选取 100 hPa 高度进行验证是因为这一高度上的涡动热通量可以很好地表征从对流层进入平流层的行星波活动强度 (Newman et al., 2001; Hu et al., 2015)。为了得到热通量近似的动力加热项, 首先对逐日的经向风场和温度场进行纬向平均, 得到纬向偏差, 然后利用纬向偏差计算涡动热通量。

Hu and Tung (2002) 通过引入剩余环流质量流函数代入 TEM 方程得到了与 Newman et al. (2001) 等价的位温形式的热力学能量近似方程, 它的温度形式的积分方程式可以写为:

$$\langle \bar{T} \rangle_{t_2} - \langle \bar{T} \rangle_{t_1} = \int_{t_1}^{t_2} F_{\phi,z} dt + \int_{t_1}^{t_2} \langle \bar{Q} \rangle dt. \quad (1)$$

$$F_{\phi,z} = \frac{v'T'\cos\phi}{a(1-\sin\phi)} \Big|_{\phi,z}. \quad (2)$$

$$t_2 - t_1 = \tau. \quad (3)$$

其中: a 、 ϕ 、 z 分别表示地球半径、纬度和垂直对数压力高度; v 、 T 、 Q 分别表示经向风速、温度和非绝热加热; 上标 “ $\bar{\cdot}$ ”、“ \prime ” 表示纬向平均和纬向偏差; “ $\langle \cdot \rangle$ ” 表示从纬度 ϕ 到极点的面积加权的平均, 文中 ϕ 取为 60°N ; $F_{\phi,z}$ 表示在纬度 ϕ 和高度 z 处的涡动热通量项; τ 是积分时间尺度, 它表示动力和非绝热加热作用对温度变化影响累积的时间长度, 一般取

为辐射弛豫时间尺度, 在低平流层可以取为 30 d (Newman et al., 2001)。

为了定量分析各月温度变化受动力和非绝热加热影响的大小, 对方程 (1) 逐日同步向前滑动 t_1 和 t_2 , 一共滑动 30 d, 然后累加并平均, 得到一个月到月的温度变化近似方程式如下:

$$\frac{1}{30} \sum_{t_2=t_1+\tau} \langle \bar{T} \rangle_{t_2} - \frac{1}{30} \sum_{t_1=1}^{30} \langle \bar{T} \rangle_{t_1} = \frac{1}{30} \sum_{t_1,t_2} \int_{t_1}^{t_2} F_{\phi,z} dt + \frac{1}{30} \sum_{t_1,t_2} \int_{t_1}^{t_2} \langle \bar{Q} \rangle dt. \quad (4)$$

虽然根据 (2) 式涡动热通量项只与单个纬度 (及高度) 有关, 以下在实际利用 (4) 式进行计算时, 为减小不确定性, 动力作用项取 $45^\circ \sim 75^\circ\text{N}$ 范围内面积加权的平均值 (Newman et al., 2001), 实际计算结果差别不大。另外, 不考虑受 El Chichón 和 Mount Pinatubo 火山爆发影响的 1982—1984 年和 1991—1993 年 (Santer et al., 2000; 赵立龙和徐建军, 2015; 陈中笑和魏文豪, 2018)。

2 结果与分析

图 1a 给出了 1980—2000 年北极 100 hPa 上各月的温度增量、累积的动力加热以及非绝热加热的气候平均值和各项偏差。可以看出, 累积的动力加热和非绝热冷却存在明显的年循环, 两者在冬季最强, 夏季最弱。这是由于冬季是北半球行星波活动最强的季节 (陆晏等, 2017; 施春华等, 2018), 因波耗散和破碎驱动的平流层平均经向环流在冬季达到最强, 它在北极的下沉支导致了强的动力加热, 而夏季的情形与此相反。值得注意的是, 动力加热和非

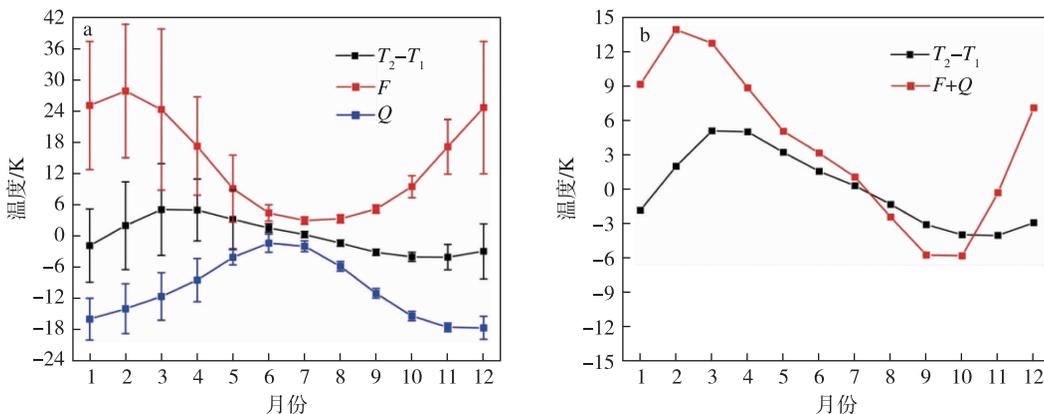


图 1 1980—2000 年北极 ($60^\circ \sim 90^\circ\text{N}$) 100 hPa 上各月温度增量 (黑色)、累积的动力加热 (红色) 及非绝热加热 (蓝色) 平均值, 误差条代表各项 2σ 偏差 (a) 以及累积的动力和非绝热加热之和 (红色) 及各月温度增量 (黑色) (b)

Fig. 1 (a) Arctic ($60^\circ \sim 90^\circ\text{N}$) monthly temperature increment (black), cumulative dynamical heating (red) and diabatic heating (blue) at 100 hPa averaged during 1980—2000 (the error bars show the 2σ uncertainty; unit: K); (b) sum of the cumulative dynamical and diabatic heating (red) and monthly temperature increment (black)

绝热加热的偏差在冬春季节也达到最大。

图 1b 给出了累积的动力和非绝热加热之和以及温度增量的年振荡,计算得到两者的相关系数为 0.67,通过了置信度为 95% 的显著性检验,这说明北极平流层月到月的温度变化可以用式(4)得到较好的解释。但两者之间也存在差异,在冬春季节尤为明显,如果不考虑资料同化引起的增量误差(Fueglistaler et al., 2009),动力加热在冬春季偏强,这有可能是在推导温度变化方程时采取了一系列近似,例如准地转近似、动力加热的热通量近似的原因。

图 2a—c 给出了式(4)中与图 1a 中对应的各项的线性趋势及不确定性,可以看出,除了 1 月和 6 月,动力作用是极区低平流层温度增量趋势的主导因素,但是行星波活动较大的年际变率可能使得冬春季节动力加热趋势的不确定性也较大(Chen et al., 2003; 陈文和黄荣辉, 2005; Haynes, 2005; Bohlinger et al., 2014)。图 2d 给出了累积的动力和非绝热加热趋势之和以及温度增量的趋势,可以看

到,除冬春季节的 12 月、2 月和 4 月外,累积的动力和非绝热加热趋势之和可以很好地表征温度增量趋势,两者的相关系数为 0.96,通过了置信度为 99% 的显著性检验,说明式(4)应用于变化趋势时也近似成立。

仅从式(4)本身并不能对当前月的温度趋势进行解释,但计算表明,当前各月的温度趋势与累积的动力加热趋势之间的相关系数达到 0.8,通过了置信度为 99% 的显著性检验。因此根据式(4),采用如下的回归方程式(5)通过回归计算对当前月的温度趋势的非绝热加热和动力加热贡献进行分离:

$$\frac{1}{30} \sum_{t_2=t_1+\tau} \langle \bar{T} \rangle_{t_2} \approx a + b \cdot y + r \cdot \frac{1}{30} \sum_{t_1, t_2} \int_{t_1}^{t_2} F_{\varphi, z} dt. \quad (5)$$

其中: a 为回归常数; b 、 r 为回归系数; y 表示以年为单位的时间变量; b 代表某月温度非绝热加热逐年贡献的线性趋势,而动力加热趋势可由进一步对回

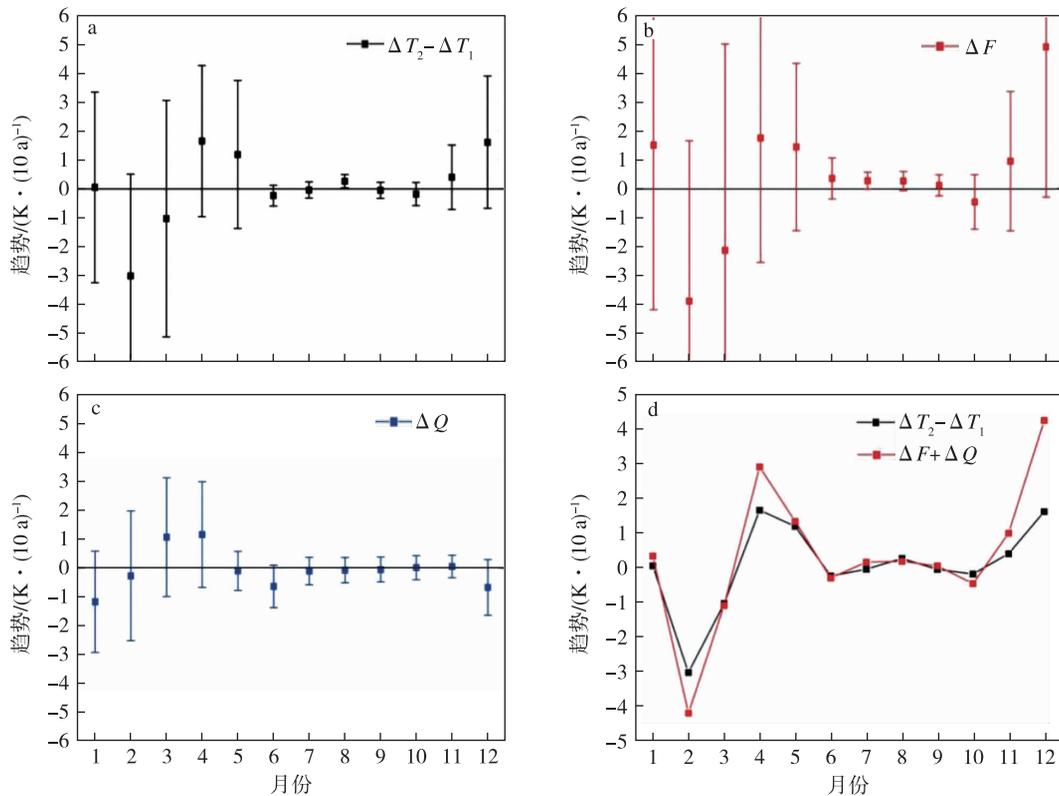


图 2 1980—2000 年北极 100hPa 各月温度增量趋势(a; 黑色)、累积的动力加热趋势(b; 红色)及非绝热加热趋势(c; 蓝色)(误差条表示各项在 2σ 水平上趋势的不确定性)以及累积的动力和非绝热加热趋势之和(红色)及温度增量趋势(黑色)(d)

Fig.2 Trends of the Arctic (60° — 90° N) monthly temperature increment (a; black), cumulative dynamical heating (b; red) and diabatic heating (c; blue), respectively, at 100 hPa during 1980—2000 (the error bars show the 2σ uncertainty; unit: $K/(10 a)$); (d) trends of the sum of the cumulative dynamical and diabatic heating (red) and monthly temperature increment (black)

归的动力加热项进行线性拟合得到。实际计算和筛选表明,式(5)是一个相对较优的二元回归模型。

图 3a 给出了 1980—2000 年北极 100 hPa 上当前各月温度的趋势及其不确定性。北极春季出现强冷却,夏秋呈弱降温趋势,而冬季与其他季节的区别明显,其中 12 月、1 月增温,2 月冷却。进一步从图 3b、3c 可见,温度的动力加热趋势以及非绝热加热趋势在冬季各月也不相同。其中,动力趋势在 12—2 月分别为 $2.2 \pm 2.4 \text{ K}/(10 \text{ a})$ 、 $0.57 \pm 2.2 \text{ K}/(10 \text{ a})$ 、 $-1.6 \pm 2.2 \text{ K}/(10 \text{ a})$,这说明行星波活动强度的变化在冬季内并不一致(Hu et al., 2005; 刘仁强等, 2018), 12—1 月行星波活动增强,导致北极低平流层温度的正趋势, 1—2 月行星波活动发生变化, 2 月行星波活动强度减弱,导致北极低平流层温度的负趋势,这些结果与 Ivy et al. (2016) 采用不同方法计算的 50 hPa 上的结果基本一致。温度的非绝热趋势在 12—2 月分别为 $-0.65 \pm 1.2 \text{ K}/(10 \text{ a})$ 、 $0.43 \pm 2.8 \text{ K}/(10 \text{ a})$ 、 $-0.46 \pm 2.8 \text{ K}/(10 \text{ a})$,总体上动力作用的贡献约占冬季温度变化趋势的 70%。

在春季,伴随臭氧的强烈损耗,非绝热因素导致明显的冷却趋势,在 3—5 月分别为 $-2.2 \pm 2.6 \text{ K}/(10 \text{ a})$ 、 $-1.81 \pm 2.2 \text{ K}/(10 \text{ a})$ 、 $-0.27 \pm 0.7 \text{ K}/(10 \text{ a})$ 。而此时的动力趋势已明显减弱。在夏、秋季非绝热作用呈弱冷却趋势而动力趋势几乎为零。综上所述,温度的动力加热趋势主导了北极低平流层冬季温度变化,而非绝热加热趋势主导了春、夏、秋季温度的变化。

3 结论和讨论

首先给出了一个诊断极区平流层温度变化的 Hu and Tung 形式的近似方程及其滑动累加计算方案,然后根据此方案并采用 1980—2000 年的 MERRA-2 再分析风场、温度场和非绝热加热日资料,计算检验动力加热采用热通量项近似的月到月的温度变化方程在北半球极区低平流层的有效性。

在 100 hPa 上,气候平均的累积动力加热和非绝热冷却存在明显的年循环,两者在冬季最强,夏季最弱,这与北半球行星波活动强度的季节变化相一致。累积的动力和非绝热加热之和与各月温度增量呈显著相关,说明月到月的温度变化方程近似成立。另外,动力作用是极区低平流层温度增量趋势的主导因素,累积的动力和非绝热加热趋势之和可以很好地表征温度增量趋势,说明月到月的温度变化方程应用于变化趋势时也近似成立。

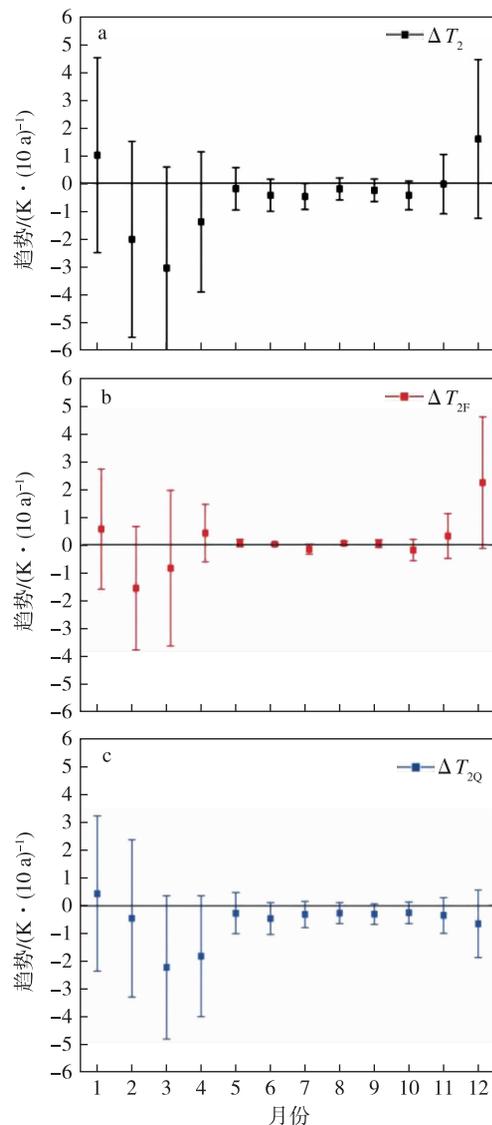


图 3 1980—2000 年北极 100 hPa 当前各月温度趋势 (a; 黑色)、温度趋势的动力加热部分 (b; 红色) 及温度趋势的非绝热加热部分 (c; 蓝色) (误差条表示在 2σ 水平上趋势的不确定性)

Fig. 3 (a) Trend of the Arctic (60° — 90° N) current month temperature (black), (b) dynamical component of the trend (red) and (c) the diabatic component of the trend (blue), respectively, at 100 hPa during 1980—2000 (the error bars show the 2σ uncertainty)

进一步通过多元回归,得到了北极 100 hPa 上动力和非绝热加热作用对当前月温度趋势的分别贡献。当前月温度的趋势、温度的动力以及非绝热加热趋势在冬季各月均不相同,说明行星波活动强度的变化在冬季内并不一致,这与其他文献中采用不同方法计算的 50 hPa 结果基本一致,总体上动力作用的贡献约占冬季温度变化趋势的 70%。在春季,

伴随臭氧的强烈损耗,非绝热因素导致明显的冷却趋势,动力趋势明显减弱。在夏、秋季非绝热作用呈弱冷却趋势而动力趋势几乎为零。因此,温度的动力趋势主导了北极低平流层冬季温度变化,而非绝热趋势主导了春、夏、秋季温度的变化。

值得注意的是,动力加热和非绝热加热的偏差在冬春季节也达到最大。如果不考虑资料同化引起的增量误差,动力加热在冬春季偏强,这有可能是在推导温度变化方程时采取了一系列近似,例如准地转近似、动力加热的热通量近似的原因。行星波活

动较大的年际变率可能使得冬春季节动力加热趋势的不确定性也较大。未来需要对动力加热采用热通量近似的热力学能量方程在平流层气候变化研究中适用的高度、纬度和积分时间尺度范围给出合理的界限,这需要结合多套再分析资料进行计算和对比分析。

致谢:感谢审稿人提出了修改意见;美国国家航空航天局(NASA)提供了 MERRA-2 再分析资料。

参考文献(References)

- Andrews D G, McIntyre M E, 1976. Planetary waves in horizontal and vertical shear; the generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration[J]. *J Atmos Sci*, 33(11): 2031-2048.
- Andrews D G, McIntyre M E, 1978. Generalized Eliassen-Palm and Charney-Drazin theorems for waves on axisymmetric mean flows in compressible atmospheres[J]. *J Atmos Sci*, 35(2): 175-185.
- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B, 1987. *Middle atmosphere dynamics*[M]. San Diego: Academic Press; 489.
- Bohlinger P, Sinnhuber B M, Ruhnke R, et al., 2014. Radiative and dynamical contributions to past and future Arctic stratospheric temperature trends [J]. *Atmos Chem Phys*, 14(3): 1679-1688.
- Bosilovich M, Akella S, Coy L, et al., 2015. MERRA-2: initial evaluation of the climate[R]//NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation.
- 陈文, 黄荣辉, 2005. 北半球冬季准定常行星波的三维传播及其年际变化[J]. *大气科学*, 29(1): 137-146. Chen W, Huang R H, 2005. The three-dimensional propagation of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere winter and its interannual variations[J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(1): 137-146. (in Chinese).
- Chen W, Takahashi M, Graf H F, 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST[J]. *J Geophys Res*, 108(D24): 4797.
- 陈中笑, 魏文豪, 2018. ENSO 与火山活动的共同作用对大气 CO₂ 浓度年际变化的影响[J]. *大气科学学报*, 41(5): 620-626. Chen Z X, Wei W H, 2018. The combined impacts of ENSO and volcanic eruptions on the interannual fluctuations of atmospheric CO₂[J]. *Trans Atmos Sci*, 41(5): 620-626. (in Chinese).
- Edmon H J Jr, Hoskins B J, McIntyre M E, 1980. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere[J]. *J Atmos Sci*, 37(12): 2600-2616.
- Eyring V, Shepherd T G, Waugh D W, et al., 2010. SPARC report on the evaluation of chemistry-climate models[R]//SPARC Report No.5, WCRP-132. WMO.
- Fueglistaler S, Legras B, Beljaars A, et al., 2009. The diabatic heat budget of the upper troposphere and lower/mid stratosphere in ECMWF reanalyses [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135(638): 21-37.
- Fujiwara M, Wright J S, Manney G L, et al., 2017. Introduction to the SPARC reanalysis intercomparison project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems[J]. *Atmos Chem Phys*, 17: 1417-1452.
- Haynes P, 2005. Stratospheric dynamics[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 37(1): 263-293.
- Hu D Z, Tian W S, Xie F, et al., 2015. Impacts of stratospheric ozone depletion and recovery on wave propagation in the boreal winter stratosphere[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(16): 8299-8317.
- Hu Y Y, Tung K K, 2002. Interannual and decadal variations of planetary wave activity, stratospheric cooling, and Northern Hemisphere annular mode [J]. *J Climate*, 15(13): 1659-1673.
- Hu Y Y, Tung K K, Liu J P, 2005. A closer comparison of early and late-winter atmospheric trends in the Northern Hemisphere[J]. *J Climate*, 18(16): 3204-3216.
- Ivy D J, Solomon S, Rieder H E, 2016. Radiative and dynamical influences on polar stratospheric temperature trends[J]. *J Climate*, 29(13): 4927-4938.
- 刘仁强, 黎颖, 付焱焱, 等, 2018. 北半球极区平流层冬季 12 月与 1—2 月气候变化形势的对比[J]. *大气科学学报*, 41(3): 416-422. Liu R Q, Li Y, Fu Y Y, et al., 2018. Comparison between the situations of climate change in the Arctic stratosphere during December and January-February[J]. *Trans Atmos Sci*, 41(3): 416-422. (in Chinese).
- 陆晏, 郭栋, 陶丽, 等, 2017. 太阳准周期变化对北半球夏季平流层加热率的影响[J]. *大气科学学报*, 40(6): 729-736. Lu Y, Guo D, Tao L, et al., 2017. Influence of solar quasi-periodic variation on stratospheric heating rate in the Northern Hemisphere in summer[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(6): 729-736. (in Chinese).

- Newman P A, Nash E R, Rosenfield J E, 2001. What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring? [J]. *J Geophys Res*, 106 (D17): 19999-20010.
- Santer B D, Wigley T M L, Boyle J S, et al., 2000. Statistical significance of trends and trend differences in layer-average atmospheric temperature time series [J]. *J Geophys Res*, 105 (D6): 7337-7356.
- 施春华, 蔡娟, 郭栋, 等, 2018. 北半球冬季平流层温度和 Brewer-Dobson 环流对 11 a 太阳循环的响应 [J]. *大气科学学报*, 41(2): 275-281. Shi C H, Cai J, Guo D, et al., 2018. Responses of stratospheric temperature and Brewer-Dobson circulation to 11-year solar cycle in boreal winter [J]. *Trans Atmos Sci*, 41(2): 275-281. (in Chinese).
- 赵立龙, 徐建军, 2015. 7 个 CMIP5 模式的平流层、对流层温度趋势与 SSU/MSU 观测资料的对比 [J]. *大气科学学报*, 38(1): 101-110. Zhao L L, Xu J J, 2015. Comparison of stratospheric and tropospheric temperature trend between seven CMIP5 models and SSU/MSU observations [J]. *Trans Atmos Sci*, 38(1): 101-110. (in Chinese).

Verification and application of an approximate thermodynamic equation for diagnosing the polar stratospheric temperature changes

LIU Renqiang¹, FU Yanyan¹, WU Guohua¹, WANG Yongqing¹, WRIGHT J S²

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

²Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Temperature changes in the Arctic lower stratosphere on both the short- and long-term timescales are critical for changing the magnitude of ozone losses in the Arctic vortex. In the present paper, first we give an approximate thermodynamic equation, which is in the form of that described by Hu and Tung (2002), for diagnosing the polar stratospheric temperature changes, along with its time-sliding calculation scheme. Next, according to this scheme and using the MERRA-2 reanalysis daily data for the period of 1980—2000, we calculate the terms of monthly temperature increment, dynamical heating and diabatic heating, as well as their respective linear trends, at 100 hPa in the Arctic lower stratosphere. The results show that the monthly temperature increment term and sum of the cumulative dynamical and diabatic heating, as well as their trends, are approximately balanced during the annual cycle of climatological average. Then, based on a multivariate linear regression, we further obtain the respective contributions of the dynamical and diabatic heating to the current month temperature trends. It is shown that the dynamical contribution to the temperature trend is dominant and varied with the different months in the Arctic lower stratosphere wintertime, while the diabatic contribution is dominant in other seasons. This is particularly pertinent to the attribution of decadal scale Arctic stratospheric temperature changes, due to the internal dynamics variability and anthropogenic climate forcings. In future work, it would be desirable to determine the reasonable range of the eddy heat flux approximation with regard to the reference latitude, pressure height and integration timescale, as well as to disclose more application aspects of the simplified thermodynamic energy equation. An assessment for the relative impact of each deviation factor is also required to obtain an accurate explanation for sources of some large departures and limits of the approximate temperature change equation. Of course, verifications and comparisons using greater numbers of and more varied data sets are required.

stratospheric temperature change; heat flux approximation; dynamical heating; diabatic heating

doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.20171127001

(责任编辑:袁东敏)