

文章编号: 1004-4965(2007)06-0595-06

## 全球变暖背景下东亚对流层顶高度演变特征的研究

吴润<sup>1,2</sup>, 杨茜<sup>1</sup>, 符淙斌<sup>2</sup>, 王卫国<sup>1</sup>, 吴佳<sup>1</sup>, 许彦艳<sup>1</sup>

(1. 云南大学资源环境与地球科学学院大气科学系, 云南 昆明 650091;  
2. 中国科学院大气物理研究所/东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029)

**摘 要:** 研究了 1948~2004 年东亚增暖背景下对流层顶高度的演变特征, 重点分析对流层温度、平流层中下部温度与对流层顶高度变化之间的关系。结果表明: 东亚地区对流层顶高度在 1970 年代后呈现波动上升趋势, 其上升趋势不如南半球显著; 东亚对流层温度与对流层顶高度呈显著正相关, 特别是对流层中上部温度与对流层顶高度的正相关最显著, 这说明对流层中上部的增温对对流层顶高度的抬升贡献较大; 东亚平流层中下部温度与对流层顶高度基本呈显著负相关, 70 hPa 层上的负相关最显著; 近 20 年来东亚对流层温度上升了约 0.2<sup>°C</sup>, 平流层中下部温度下降了约 1.2<sup>°C</sup>, 对流层顶高度上升了约 86 m, 对流层的增暖和平流层的冷却作用共同导致了东亚对流层顶高度的变化。

**关键词:** 对流层顶高度; 温室效应; 东亚; 平流层中下部

中图分类号: P461.8

文献标识码: A

## 1 引 言

温室气体增加导致的全球变暖是人们关注的一个重要问题, 这一方面已经有较多的研究<sup>[1-5]</sup>。Santer 研究了海洋变率及其对可检测的温室增暖信号的影响<sup>[6]</sup>, 之后又探讨地表及下对流层温度的不同变化趋势<sup>[7]</sup>。温室效应导致全球变暖是公认的事实, 并且人们主要关注地表附近和低层大气的情况。近年来 Santer 等通过分析观测资料发现: 1979 年以来全球平均对流层温度大约每十年上升 0.07<sup>°C</sup>, 而 1979 年以来对流层顶高度则增加了几百米<sup>[7]</sup>。对流层顶高度变化是全球变暖背景下气候变化的又一体现, 对流层顶高度变化能影响对流层-平流层质量交换, 由此可能影响大气痕量气体分布, 进而引起辐射强迫甚至对一些地区的气候演变产生扰动<sup>[8-12]</sup>, 而温室气体、臭氧、气溶胶等能影响对流层温度的辐射强迫因子都可能导致对流层顶高度变化。Steinbrecht 曾研究过对流层顶高度和臭氧层的关系<sup>[14]</sup>, Santer 等也曾利用

模式评估硫酸盐气溶胶、太阳辐射变化、火山气溶胶、温室气体和臭氧对全球对流层顶高度的可能影响, 通过对 1979~1999 年间的数值模拟表明: 近年来对流层顶高度增长的约 80% 是由于人为排放温室气体增加和平流层臭氧减少所导致, 由于温室气体增多导致的对流层变暖和臭氧减少导致的平流层变冷是对流层增长的主要原因<sup>[15-17]</sup>, 但这两个原因的相对重要性还需要进一步研究。

近年来在全球变暖背景下东亚气候发生了一些显著的变化<sup>[18-22]</sup>, 有学者利用数值模拟研究表明: 1960~2000 年由于温室效应导致东亚地区地表气温升高 1~1.5 K, 由于气溶胶造成的同期温度下降达 -0.2~-1 K<sup>[23]</sup>。同时研究得到东亚地区是全球对流层-平流层物质、能量交换的活跃地区之一, 东亚地区的对流层顶高度变化以及对流层-平流层物质交换过程对北半球甚至对全球都是非常重要的<sup>[11-13]</sup>。因此在全球变暖背景下研究东亚地区对流层顶高度演变特征, 对进一步认识人类活动对气候系统的影响有实际意义。

收稿日期: 2006-08-13; 修订日期: 2006-11-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB400506); 国家自然科学基金项目(40675007); 云南省自然科学基金资助项目(2005D0006M); 云南大学学术创新团队建设项目-高性能计算方向共同资助

作者简介: 吴润, 男, 云南昆明人, 教授, 主要从事气溶胶与气候变化的研究。E-mail: wujian@ynu.edu.cn

## 2 资料与方法

利用 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的NCEP 1948~2004年共57年大气温度场月平均再分析资料和对流层顶月平均气压资料,将对流层顶气压插值求出对流层顶高度; 对流层1 000~300 hPa和平流层下部100~70 hPa温度进行质量权重平均处理,考虑到全球对流层顶气压均在100~300 hPa左右,所以近似将1 000~300 hPa质量加权平均温度看成对流层温度,而将100~70 hPa质量加权平均温度看成平流层下部温度。对各层温度进行质量加权平均主要是考虑大气各层密度不均,进行各层质量加权平均可以更合理考虑各层温度的贡献。此外,对对流层和平流层温度场及对流层顶高度场资料进行年平均及季节平均处理。选取了全球、南半球、北半球、东亚(选取范围为 $60^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$ ,  $5^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ )四个区域对流层、平流层中下部温度,利用统计分析方法<sup>[24]</sup>,分析其与对流层顶高度场的关系。

## 3 结果分析

### 3.1 对流层顶高度及对流层温度变化的基本特征

#### 3.1.1 对流层顶高度变化的基本特征

1948~2004年,全球、北半球、南半球、东亚地区对流层顶高度随时间的变化如图1所示。四个区域57年平均对流层顶高度变化均在1960年代之前出现明显的下降趋势,1960年代后全球、南半球又出现明显的上升趋势;北半球也出现了波动上升趋势

势,但北半球1960年代前的下降趋势与1960年代后的上升趋势都较全球、南半球平缓;在1980年以前,东亚对流层顶高度下降趋势较为明显,尤其在1970年之前对流层顶高度降低趋势非常显著,在1970年附近有所升高,到1970年代中期又开始下降,1980年代中期以后呈现缓慢波动上升趋势。有研究指出:NCEP对流层温度及对流层顶高度在1970年代以前的资料存在修订误差,因此前20年的可靠性相对较差<sup>[25]</sup>。

由图1可见东亚对流层顶高度比用于比较的其它区域高,东亚地区对流层顶高度最低平均值出现在1990年代初,约为14 000 m。从1980~2000年间,东亚地区对流层顶高度大约上升86 m,而全球平均对流层顶高度上升了约129 m,表明近20年来东亚对流层顶高度升高幅度比全球平均对流层顶高度升高幅度要小,同时北半球1980年以后的对流层顶上升趋势也明显小于全球平均和南半球。由于北半球人类活动比较集中,大气气溶胶含量较高,而一些研究表明气溶胶在一些地区起到显著的致冷效应,甚至其程度与温室效应相当<sup>[1]</sup>。因此对北半球对流层高度上升幅度较小的可能原因推断为气溶胶的影响,但尚待进一步的研究工作证实。

为更清楚地看出东亚对流层顶高度变化特征与其它区域的差异,将东亚与其它区域进行进一步比较。图2为四个区域对流层顶高度年际变化的5年滑动平均结果。由图可见,四个区域的时间变化趋势有很大程度的类似,这表明不同区域对流层顶高度的长期变化有共同影响的因子。图中也显示了南半球(虚点线)与东亚(实线)比较显著的差异,尤其在

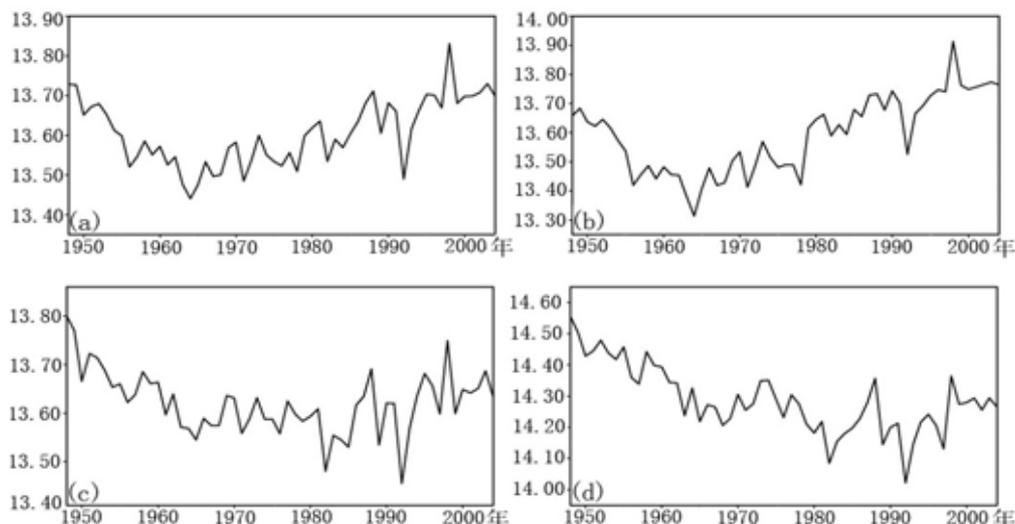


图1 1948~2004年共57年全球(a)、南半球(b)、北半球(c)、东亚(d)对流层顶高度变化  
横坐标单位为年,纵坐标单位为km。

高度基本为升高趋势，而东亚则在 1970 年代初期到 1980 年代基本为降低趋势。1980 年代中期后，四个区域的变化趋势有一致性特征，但仍然存在程度上的差异。对流层顶高度的年际变化在较多年份为正值，

但在 1990 年代初期年为绝对值很大的负值，推测这可能与 1991 年皮拉图博火山爆发导致全球性的气溶胶增多有关系。

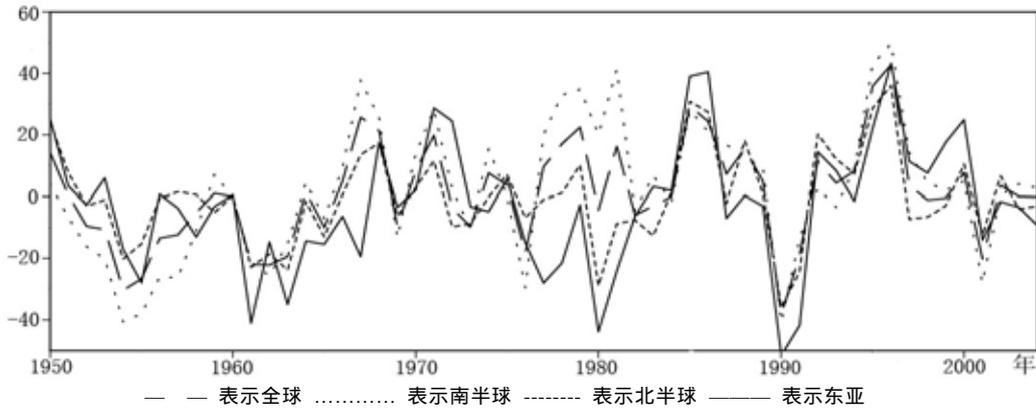


图 2 不同区域对流层顶高度年际变化的 5 年滑动平均 横坐标单位为：年，纵坐标单位为：m。

### 3.1.2 对流层顶高度及对流层温度变率的空间分布特征

图3为东亚对流层顶高度及对流层温度年平均变率的空间分布，年平均变率定义为

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (1)$$

其中  $y_i$  表示各年的值， $t_i$  为  $y_i$  对应的年份， $\bar{y}$  表示 1948 ~ 2004 多年平均值， $\bar{t}$  为相应时段的平均年序， $n$  表示样本长度。

由图3可见东亚年平均对流层温度变率在中国、日本及蒙古境内基本上都为负值，表明这些地区对流层温度降低，与全球性的对流层升温存在显著差异。对流层顶高度降低最显著的区域位于长江以北地区，与对流层温度负变率大值区基本对应。而对流层顶高度增加较大的区域位于俄罗斯及东亚南部地区，与温度正变率大值区基本一致。计算得到东亚温度平均变率为 -0.01 ~ 0.02 /年，对流层顶高度变率则为 -22 ~ 2 m/年。

图4为全球对流层顶高度及对流层温度年变率空间的分布。对流层顶高度和对流层温度变率大小值区及正负值中心对应也较好，对流层顶高度及对流层温度的最大正变率区都位于南半球 30 ~ 60 °S 中高纬对流层顶断裂带附近，低纬地区及北半球大范围地区均为小值区。南北半球对流层温度及对流层顶高度变化具有很大的不对称性。对流层温度以南半球中高纬增温最大。图3和图4均显示在全球变暖

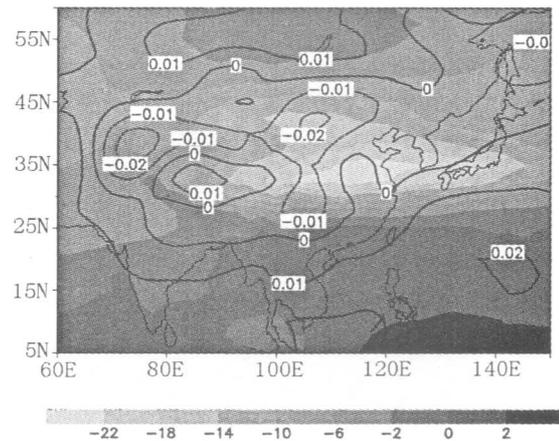


图 3 1948 ~ 2004 年东亚对流层顶高度及对流层温度年平均变率的分布 阴影为对流层顶高度变率，等值线为对流层温度变率。

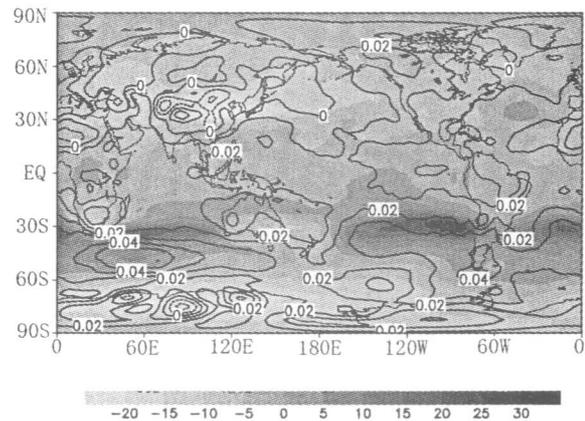


图 4 1948 ~ 2004 年全球对流层顶高度及对流层温度年平均变率的分布 说明同图 3。

的背景下，东亚大部分地区对流层温度反而有所下降，随之对流层顶高度也有所降低；图4还显示，东亚是全球对流层顶高度负变率最为明显的区域之一，对应对流层温度也是全球负变率明显的区域。这也在一定程度上说明东亚对流层温度1970年代后的上升趋势及对流层顶高度上升趋势均小于全球平均状况。

### 3.2 对流层顶高度与对流层温度的相关分析

温室效应对低层大气及地表具有加热的作用，这种加热作用可导致对流层顶高度的变化。图5为1948~2004年东亚对流层温度(1000~300 hPa质量权重平均温度)和对流层顶高度场的相关分布场，其中阴影表示通过显著水平5%显著性检验的区域。东亚大部分区域对流层温度与对流层顶高度变化都为显著的正相关关系，相关最好的地区位于蒙古、中国东北、塔克拉玛干沙漠临近地区、日本等地，而在太平洋及印度西部则相关较弱，未能通过检验。图6为全球的情况，可见北半球大部分区域都通过显著性检验，在北美东部、南半球中纬地区及日本地区相关系数达到0.8以上，具有显著正相关关系，而在南半球高纬地区相关较弱。

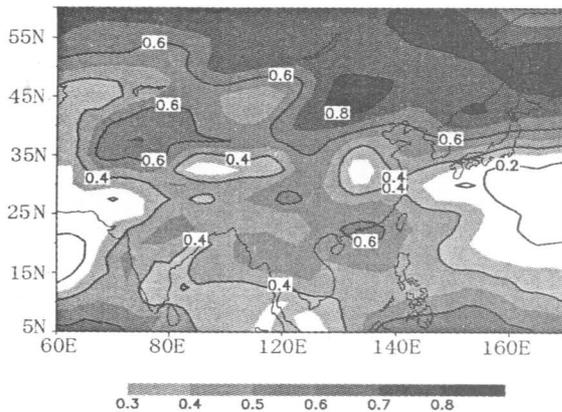


图5 1948~2004年东亚对流层温度与对流层顶高度的相关分布 等值线为相关系数，阴影区为通过检验的区域。

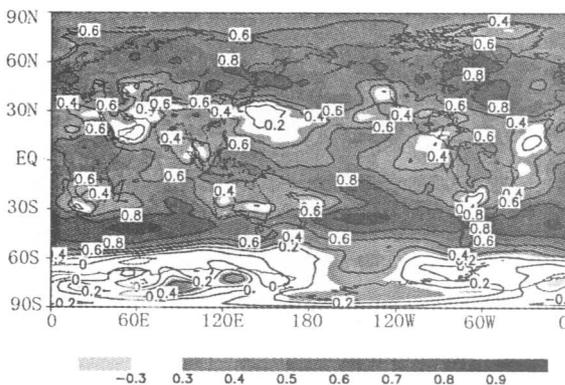


图6 1948~2004年全球对流层温度与对流层顶高度的相关分布 说明同图5。

对全球、南半球、北半球、东亚四个区域对流层顶高度与对流层温度变化计算相关系数，得到四个区域相关系数分别为全球：0.549、北半球：0.551、南半球：0.547、东亚：0.492，注意到东亚相关系数最小，这说明全球、北半球、南半球温室效应引起对流层温度变化与对流层顶高度变化正相关关系比东亚地区显著。

为进一步了解对流层不同高度的温度变化对对流层顶高度的影响差异，计算了东亚对流层下部和上部一些高度层次的年平均温度与对流层顶高度的相关系数。结果发现对流层下部温度与对流层顶高度的相关较弱，只有夏季时能通过显著性检验，而与对流层中上部的相关性却非常显著，特别是对流层300 hPa及250 hPa层次的相关系数最高可达0.733，说明在统计意义上对流层中上部温度升高对对流层顶的抬升作用比下部更显著。

### 3.3 对流层顶高度与平流层低层温度的相关分析

图7为东亚平流层中下部温度(100~70 hPa质量权重平均温度)与对流层顶高度场的相关分布场。显然与对流层温度的正相关不同，平流层中下部温度与东亚对流层顶高度基本呈负相关，除西北地区及阿拉伯海部分地区外都能通过显著性检验，尤其中国长江流域一带及太平洋海域的负相关最大，达到-0.7~-0.8。图8为全球平流层中下部温度与对流层顶高度场的相关图。平流层中下部温度变化与对流层顶高度变化在全球都为负相关关系，同样在南半球中高纬具有较大的负相关关系，而在赤道附近，欧洲大陆上空具有不显著的负相关关系。

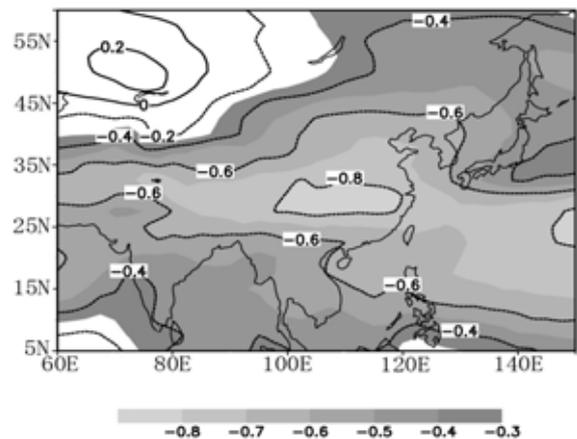


图7 1948~2004年东亚和全球平流层平均温度与对流层顶高度的相关分布 说明同图5。

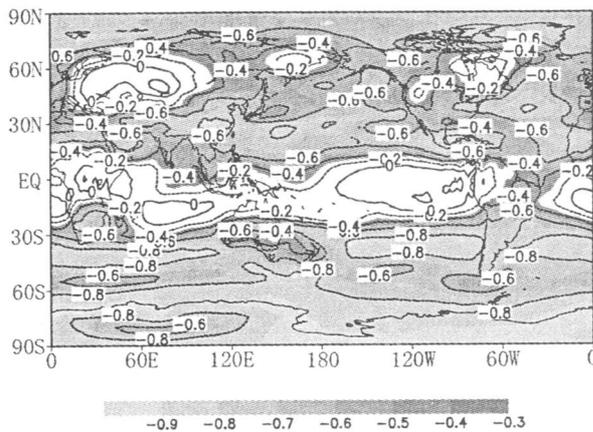


图 8 1948~2004 年东亚和全球平流层平均温度与对流层顶高度的相关分布 说明同图 5。

对全球、南半球、北半球、东亚四个区域平流层中下部平均温度与对流层顶高度的序列求相关系数,得到全球为-0.475,北半球为-0.464,南半球为-0.486,东亚为-0.499,以东亚的负相关最为显著。平流层低层的平均温度变化与对流层顶的高度变化具有一定的反相关关系,四个区域平流层中下部温度 1980 年代后都出现了明显的下降趋势,东亚近 20 年来总共下降了约 1.2,较全球平均的 1.1 略大。

此外,还计算了各季平流层一些层次上的温度与对流层顶高度变化的相关系数,结果表明 100 hPa 及 70 hPa 的负相关最显著,各季及年平均相关系数都通过显著性检验,而且负相关都超过-0.4。这表明平流层中下部温度变化对对流层顶高度的影响较为重要。从季节来看,平流层夏秋季的温度变化,对对流层顶高度的影响最为显著。

平流层的温度变化主要由臭氧分布变化引起,近些年来臭氧总量呈现下降趋势,因此导致平流层温度有不同程度下降。由于平流层存在逆温层结,因此对于对流层而言,平流层起到了抑制对流活动的作用,平流层的温度越高,对流层顶附近的逆温强度就越大,因而抑制作用也越显著。而臭氧的减少导致的平流层降温,使对流层顶附近的逆温程度减弱,有利于对流层高度的抬升,这说明平流层温度与对流层高度呈反相关关系是有物理依据的。

## 参 考 文 献:

- [1] IPCC, Climate Change: The scientific basis, contribution of working group to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] STOTT P A, TETT S F B, JONES G S, et al. Attribution of twentieth century temperature change to natural and anthropogenic causes[J]. Climate Dynamics, 2001, 17: 1-21.

## 4 结论与讨论

本文利用 NCEP 再分析资料,研究了 1948~2004 年全球变暖背景下东亚地区对流层顶高度变化特征,重点分析对流层温度、平流层中下部温度与对流层顶高度变化的关系,得到以下结论。

(1) 全球、南半球、北半球、东亚四个区域的对流层顶高度变率的年际变化趋势大致相同,1980 年代之后变率表现为增大,东亚对流层温度及高度变率最大的区域都出现在俄罗斯、印度半岛及阿拉伯海、印度尼西亚、菲律宾、乌兹别克斯坦及中国西北一带;就季节来看,东亚夏季对流层温度变化对对流层顶高度的影响较为重要,而夏秋季平流层温度变化对对流层顶高度的影响较为显著。

(2) 东亚对流层平均温度与对流层顶高度呈正相关关系,在蒙古、中国东北、日本境内能通过显著性检验;平流层中下层平均温度与对流层顶高度变化基本呈负相关关系,中国北部到日本一带及印度半岛以东地区的负相关最显著。

(3) 近 20 年来东亚对流层温度上升了约 0.2,平流层中下部温度下降了约 1.2,而对流层顶高度上升了约 86 m。在全球变暖背景下对流层温度升高和平流层中下部温度降低可能是影响东亚对流层顶高度变化的重要原因,但东亚对流层顶高度的上升幅度明显小于全球平均水平,存在与温室效应相反作用的其它影响因子。

本文仅对观测资料进行分析,研究了全球变暖背景下对流层温度及平流层中下部温度与对流层高度之间的变化关系,还缺乏数值模拟和动力学分析,暂不能全面认识温室效应影响对流层顶高度的物理过程,这需要在以后的工作中进行更深入的探讨。

- [3] 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 全球增暖的另一可能原因初探[J]. 大气科学, 2003, 27: 789-797.
- [4] 王宁练, 姚檀栋. 20世纪全球变暖的冰冻圈证据[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 98-105.
- [5] GAO Xuejie, ZHAO Zongci, DINGYihui. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model[J]. *Advance in Atmospheric Science*, 2001, 18: 1 224-1 230.
- [6] SANTER B D, MIKOLAJEWICZU, BRUGEMANNW, et al. Ocean variability and its influence on the detectability of greenhouse warming signal [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 10 693-10 725.
- [7] SANTER B D, WIGLEY T M L, GAFFEN D J, et al. Interpreting differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere[J]. *Science*, 2000a, 287: 1 227-1 232.
- [8] HOLTON J R, HAYNES P H, MCLNTYRE M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange[J]. *Rev of Geophy*, 1995, 33: 403-439.
- [9] OLSEN M A, SCHOEBERL M R, DOUGLASS A R. Stratosphere-troposphere exchange of mass and ozone[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109, D24114, doi:10.1029/2004JD005186.
- [10] MULLENDORE G L, DURRAN D R, HOLTON J R. Cross-tropopause tracer transport in midlatitude convection[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110, D06113, doi:10.1029/2004JD005059.
- [11] 杨健, 吕达仁. 2000年北半球平流层、对流层质量交换的季节变化[J]. 大气科学, 2004, 28: 294-300.
- [12] 杨健, 吕达仁. 东亚地区平流层、对流层交换对臭氧分布影响的模拟研究[J]. 大气科学, 2004, 28: 579-588.
- [13] 杨健, 吕达仁. 东亚地区一次切断低压引起的平流层、对流层交换数值模拟研究[J]. 大气科学, 2003, 27: 1 031-1 044.
- [14] 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: 19 183-19 192.
- [15] 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*, 2003a, 301: 479-483.
- [16] SANTER B D, SAUSEN R, WIGLEY T M L, et al. Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalyses, and observations: Decadal changes[J]. *J Geophys Res*, 2003b, 108, 4002, doi:10.1029/2002JD002258.
- [17] SANTER B D, WEHNER M F, WIGLEY T M L, et al. Response to Comment on "Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes"[J]. *Science*, 2004b, 303: 1 771c.
- [18] 高学杰, 林一骅, 赵宗慈. 区域气候模式模拟人为硫酸盐气溶胶在气候变化中的作用[J]. 热带气象学报, 2003, 19(2): 169-176.
- [19] 吴润, 刘红年, 王卫国, 等. 硫酸盐直接辐射强迫的在线与固定转化率模拟方法的对比研究[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 614-620.
- [20] 王明星, 杨昕. 人类活动对气候影响的研究.I:温室气体和气溶胶[J]. 气候与环境研究, 2002, 7: 247-254.
- [21] 石广玉, 王喜红, 张立盛, 等. 人类活动对气候影响的研究.II:对东亚和中国气候变化的影响[J]. 气候与环境研究, 2002, 7: 255-266.
- [22] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47: 590-596.
- [23] HANSEN J, SATO M, NAZARENKO L, et al. Climate forcings in Goddard Institute for Space Studies SI2000 simulations[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107, 4347, doi:10.1029/2001JD001143.
- [24] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法(第三版)[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [25] SANTER B D, TOM M L Wigley, ADRIAN J. Simmons et al. Identification of anthropogenic climate change using a second-generation reanalysis[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109, D21104, doi:10.1029/2004JD005075.

## CLIMATOLOGICAL CHARACTERISTICS OF EAST ASIA TROPOPAUSE HEIGHT UNDER GLOBAL WARMING BACKGROUND

WU Jian<sup>1,2</sup>, YANG Qian<sup>1</sup>, FU Cong-bin<sup>2</sup>, WANG Wei-guo<sup>1</sup>, WU Jia<sup>1</sup>, XU Yan-yan<sup>1</sup>

(1. Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** : The influence of greenhouse effect on the height of the tropopause were explored for the years between 1948 and 2004, and mainly the correlations between the tropospheric temperature, the temperature of lower part of stratosphere and the change of the tropopause height were analyzed. The main results reveal that the tropopause height had an increasing trend after the 1970s' in East Asia, and the trend in Southern Hemisphere was more obvious. In East Asia, the correlation was remarkably positive between the tropospheric temperature and the tropopause height, and especially between the temperature of higher troposphere and the tropopause height. It is shown that warming in higher troposphere contributes more to the lifting of the tropopause height. The temperature of lower stratosphere and the tropopause height are in remarkable anticorrelation, especially on 70 hPa. According to the results of the calculations, the tropopause height was increased by 86 meters in the recent 20 years, while the temperature of the troposphere was also increased by 0.2 , and the temperature of lower stratosphere was decreased 1.2 . The joint effects of warming in the troposphere and cooling in the stratosphere result in the change of tropopause height in East Asia.

**Key words** : tropopause height; greenhouse effects; East Asia; lower part of stratosphere