

# 我国气候变暖特征及其与对流层顶的关系

付志嘉<sup>1,2</sup>, 董保举<sup>1,2</sup>, 张成稳<sup>3</sup>

(1. 云南大学大气科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 大理国家气候观测台, 云南 大理 671003;  
3. 云南省大理州气象局, 云南 大理 671000)

**摘要:**对我国 1980~2007 年 120 个观测站的探空资料进行处理后, 分别计算出对流层顶高度、对流层温度和平流层低层温度。在对温室效应引起我国气温变化进行研究的同时, 重点分析对流层温度和平流层低层温度与对流层顶高度变化之间的关系。结果表明: 全球性温室气体的排放导致我国对流层温度 1980~2007 年增加了近 3.9 °C, 其中夏季增温较冬季明显, 而平流层低层温度则呈降低趋势, 降幅约 7.0 °C; 28 a 来我国对流层顶高度总体上升约 45 m, 高度变化范围在 8~16 km 左右; 从平均对流层顶高度的年变化看来, 对流层顶高度与平流层低层温度呈负相关, 与对流层温度呈正相关, 且存在季节差异。对流层的增暖和平流层的冷却作用共同导致了我国对流层顶高度的变化。

**关键词:** 温室效应; 对流层顶高度; 对流层温度; 平流层低层温度

**中图分类号:** P468.0

**文献标识码:** A

## 引言

近年来人们对温室效应的关注与日剧增, 而温室效应引起的天气和气候问题也成为了人们关心的重点问题, 并在这方面已有了较多的研究<sup>[1-5]</sup>。王明星等<sup>[6]</sup>在人类活动对气候影响的研究中分析了温室气体和气溶胶对气候的影响, 石广玉等<sup>[7]</sup>认为由于人类活动, 到 21 世纪末, 东亚气温将可能增加 2.5~6.8 °C。温室效应导致全球变暖是公认的事实, Santer 等<sup>[8]</sup>研究了人为排放的臭氧和温室气体导致的气候变化, 认为近年来对流层顶高度的增长约 80% 是由这一因素引起, 还发现由于温室气体导致的对流层变暖和臭氧导致的平流层变冷是对流层高度增高的主要原因, 1979 年以来对流层顶高度增加了几百 m。对流层顶作为对流层和平流层之间的一个过渡层, 对于发生在大气圈层的各种天气现象和气候演变都具有很重要的作用<sup>[9]</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, 对流层顶高度的变化又能影响对流层—平流层之间的质量交换, 由此可能影响大气痕量气体的分布, 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>[10-12]</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的变化。吴润等<sup>[13-14]</sup>研究了对流层顶的温度场和气压场, 王卫国<sup>[15]</sup>曾研究过对流层顶高度和臭氧层的关系, 吴润<sup>[16]</sup>在全球变暖的背景下对东亚地区对流层顶高度的演变规律进行了研究, 结果表明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。

温室效应引起的大气增温已使全球气候发生了显著变化<sup>[4,17]</sup>, 而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<sup>[11-12,18]</sup>, 中国处于东亚地区的中心地带, 其穿越对流层顶的物质交换过程对北半球甚至对全球都是非常重要的。本文在其他学者的研究基础上, 采用探空资料来分析温室效应与我国对流层顶高度演变之间的关系, 对进一步认识人类活动对气候系统的影响有实际意义。

## 1 资料和方法

用我国 120 个观测站 1980~2007 年 28 a 的探空资料, 通过探空报文的自动解释软件将探空报文解译出来, 使用 FORTRAN 编程软件编程计算了各个测站不同层次的月平均和年平均高度和温度, 利

收稿日期: 2010-11-16; 改回日期: 2011-02-20

基金项目: 云南省气象局预报员技术开发专项(YB201007)资助

作者简介: 付志嘉(1986-), 男, 主要从事雷达探测与应用研究。

用对流层顶的热力学定义方法:500 hPa 等压面之上温度递减率小到  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  或以下的最低高度,而且在此高度及其上  $2\text{ km}$  气层内的温度平均递减率不超过  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,将达到此条件的最低高度视为对流层顶高度。用此方法计算了各个测站上空不同时间的对流层顶高度,将对流层顶以下的各层温度进行质量加权平均处理,并将其看成对流层温度,对流层顶之上的各层温度也进行质量加权平均处理,并将其视为平流层低层温度。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气层温度的贡献。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。利用统计分析方法<sup>[19]</sup>分析了我国 120 个测站对流层和平流层温度及对流层顶高度的演变规律及它们之间的相互关系。

## 2 结果分析

### 2.1 温室效应引起的气温变化

图 1 为 1980 ~ 2007 年我国冬季和夏季对流层平均气温的时间序列。自 1980 年代以来,冬夏季气温均呈波动上升趋势,其中冬季在 1982 ~ 1985 年间有微弱下降后,开始持续波动上升,1998 ~ 1999 年的明显上升也与 1999 年的暖冬相对应,1999 年冬季为 1980 年以来的最暖冬季<sup>[20]</sup>,之后气温有所回落,2002 年温度上升后又呈现了平稳的变化趋势。从一元回归直线上看,1980 ~ 2007 年间,我国冬季对流层温度呈逐年升高趋势,年平均变率为  $0.105\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,28 a 温度上升约  $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;1980 ~ 1999 年间夏季的温度与冬季变化基本一致,1999 ~ 2004 年间温度有一定回落,2004 年后又呈逐年升高趋势,夏季对流层温度年变率比冬季稍高,为  $0.201\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,28 a 来夏季对流层温度升高了约  $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。程启英<sup>[4]</sup>等利用大洋环流模式耦合的海气模式分析了温室效应对东亚气候的影响,认为东亚冬季是全年增温较为明显的季节,此处与程启英等的结论有一定差异,可能与分辨率有关。

图 2 给出了 1980 ~ 2007 年我国对流层和平流层低层年平均温度的变化。由图可见,对流层温度在 1982 ~ 1987 年有微弱下降(变化未超过  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )外,均呈波动上升趋势,对流层温度基本受温室气体影响,28 a 来对流层温度升高了约  $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与其他学者利用模式模拟的我国温度变化值接近<sup>[7]</sup>;1987 ~

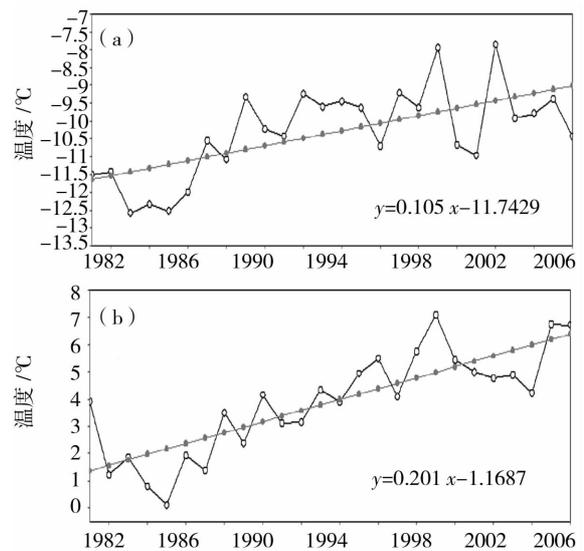


图 1 中国 1980 ~ 2007 年冬季(a)和夏季(b)对流层温度变化趋势(直线为线性拟合趋势)

Fig. 1 Variations of temperature in troposphere in winter(a) and summer(b) during 1980 - 2007 in China

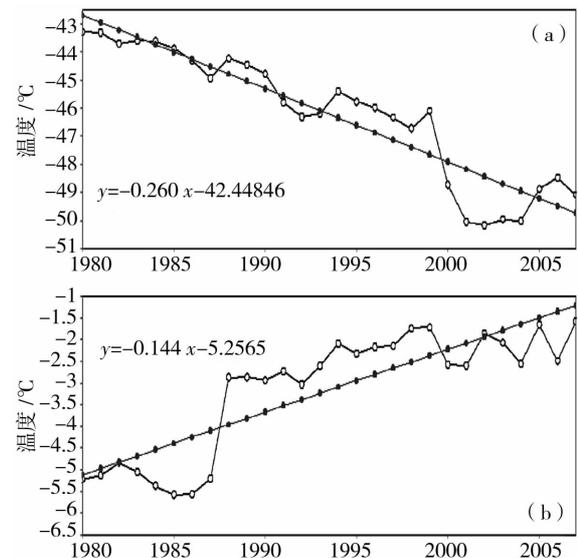


图 2 中国 1980 ~ 2007 年年平均平流层低层温度(a)和对流层温度(b)变化趋势

Fig. 2 Variations of annual mean temperature in lower stratosphere(a) and troposphere(b) during 1980 - 2007 in China

1988 年升温较为明显,1988 年为强拉尼娜年,该年我国出现了酷热干旱等灾害性天气,可能与此次升温有关。平流层低层自 1980 年以来,温度就呈逐年降低趋势,其年变率为  $-0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ , 比对流层温度

稍高,28 a 来我国平流层低层降温约 7.0 ℃;平流层温度主要与臭氧含量有关<sup>[11,21]</sup>,据研究表明,自从 1980 年以来,平流层臭氧总量已明显降低<sup>[22]</sup>,这将导致平流层温度的降低,而据 WMO 称南极上空平流层中的臭氧耗减气体数量在 2000 年达到最多,此后以每年 1% 的速度减少,图中的 1999~2000 年我国上空平流层低层的明显降温可能受此影响。

### 2.2 对流层顶高度变化的基本特征

图 3 为 1980~2007 年我国平均对流层顶高度的演变图。图中显示,平均对流层顶高度呈阶段性波动上升,1980~1999 年为上升的第 1 阶段,该阶段波动较大,到 1998 年上升达最大高度 12 km 左右,1989 年则有最低高度 11 km 左右;1999~2000 年有所下降,2000 年后为第 2 上升阶段,上升幅度较第 1 阶段明显,但振幅偏小,总体高度较第一阶段偏低。1980~2007 年我国对流层顶高度的年平均变率为 1.637 m/a,一元回归处理后其升高趋势明显,28 a 平均升高了约 45 m。由于 1999 年以前的探空资料在处理方法上不同于 2000 年以后的资料,这可能是造成图中对流层顶高度阶段性变化的一个原因,其他原因尚待进一步研究。

图 4 是中国 1980~2007 年年平均对流层顶高度场,在计算有对流层顶的地区,对流层顶高度基本呈纬向带状分布,30°~35°N 之间(除四川东南部

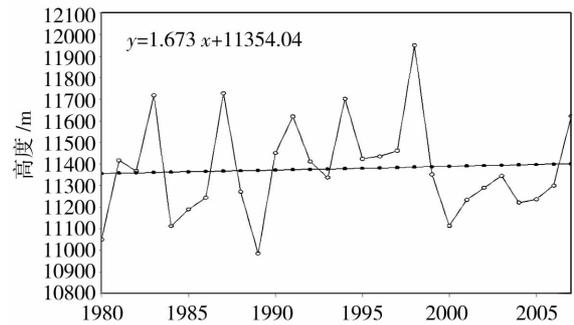


图 3 中国 1980~2007 年的平均对流层顶高度演变图(直线为线性拟合趋势)

Fig. 3 Variations of average tropopause height during 1980-2007 in China

有最低高度外)为对流层顶高度大值区,向南北依次有递减趋势,平均对流层顶高度范围在 8~16 km。等值线密集区在 30°N 附近的四川中部及云南东部,说明此区域对流层顶的倾角增大,为对流层顶断裂区,极地对流层顶与热带对流层顶的过渡即发生在这一区域。虽然有部分地区的对流层顶高度没有计算出来,但根据大气的连续性质可推断,最大对流层顶高度在青藏高原东南侧,而最小对流层顶高度在四川盆地内,受地形影响显著。为更清楚对流层顶高度的分布特征,对其进行纬向平均(图 5),在副热带地区,35°N 附近有最大对流层顶高度,超

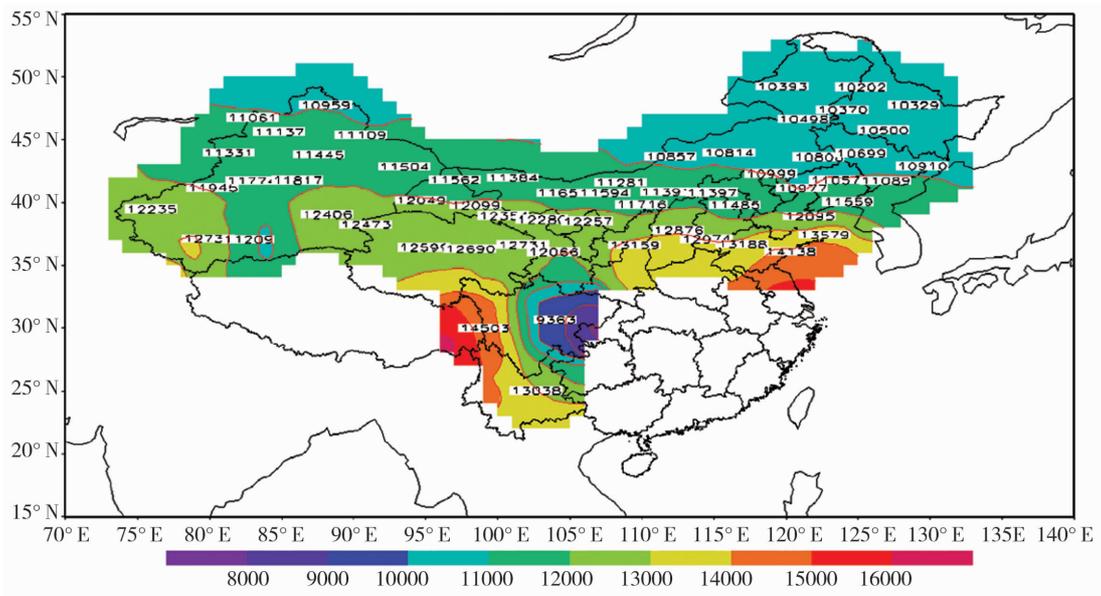


图 4 中国 1980~2007 年年平均对流层顶高度场分布(单位:m)(无值区为对流层顶缺测)

Fig. 4 Distribution of average height field of tropopause during 1980-2007 in China

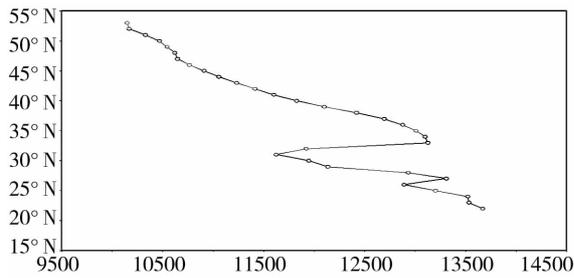


图5 中国1980~2007年平均对流层顶高度纬向分布图(横坐标为高度,单位:m)  
Fig.5 The latitudinal distribution of tropopause height during 1980-2007 in China

过13 km,然后向南北递减,向北的递减趋势较为明显且幅度大,在55°N附近低至10.2 km;向南的下降趋势至30°N时出现了逆转,由原来的下降趋势转为了上升趋势,到20°N时有最大高度13.7 km。由此可见,在30°N附近为对流层顶高度的一个转折过渡区,其南北方向有不同的对流层顶变化趋势,向北为极地对流层顶,向南为热带对流层顶,且热带对流层顶的平均高度高于极地对流层顶的平均高度,我国处于热带对流层顶和极地对流层顶过渡带内。我国华南及南部地区对流层顶缺测,这些地区的测量数据无法计算出对流层顶,也就是说这些地区利用探空资料发现不了对流层顶,原因可能与探

空气球的施放高度和稳定性有关,由于大气环境和太阳辐射等原因导致气球飞跃对流层顶的时间拉长而不能通过对流层顶,或使气球达到膨胀极限的时间缩短而早炸等,都会导致缺少高层大气资料而无法算出对流层顶<sup>[23]</sup>。

### 2.3 对流层顶高度与大气温度的相关分析

#### 2.3.1 对流层顶高度和温度

图6为对流层顶高度和对流层质量加权温度的相关图,其中等值线表示通过正相关显著性检验的区域(显著性水平为5%,临界相关系数 $R_c = 0.3727$ )。由于对流层顶在西藏及中原和南部地区缺测,故这些区域无相关系数。在有对流层顶高度区域,对流层顶高度与对流层温度呈正负相关性,以正相关为多。其中负相关区大部分集中于35°N附近的黄河流域及新疆中西部地区,其余地区几乎为正相关,其正相关显著性区域位于黑龙江南部及内蒙古东北部、新疆西藏北部和甘肃东南部,最大正相关出现在内蒙古东北部及甘肃东南部,相关系数接近1。

#### 2.3.2 对流层顶高度和平流层低层温度

图7是对流层顶高度和平流层低层温度的相关系数场,图中等值线为通过负相关显著性检验的区域(显著性水平为5%,临界相关系数 $R_c = -0.3727$ )。我国除南部未发现对流层顶的区域外,大部分地区对流层顶高度与平流层低层温度呈负相关

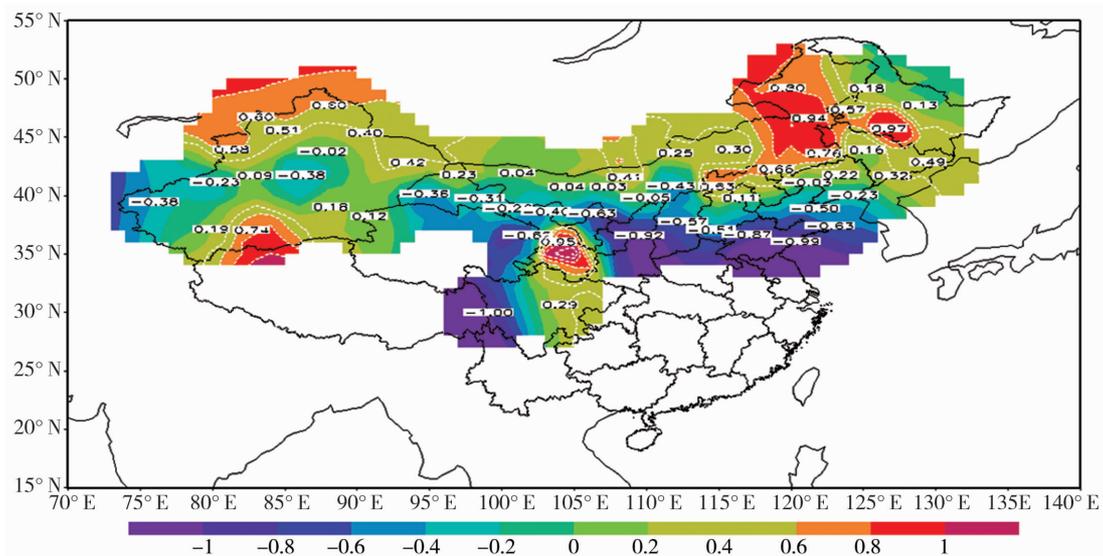


图6 中国1980~2007年对流层顶高度与对流层温度的相关分布场  
(阴影区为相关系数,等值线为通过检验的区域)

Fig.6 The correlation coefficient distribution between tropopause height and tropospheric temperature during 1980-2007 in China

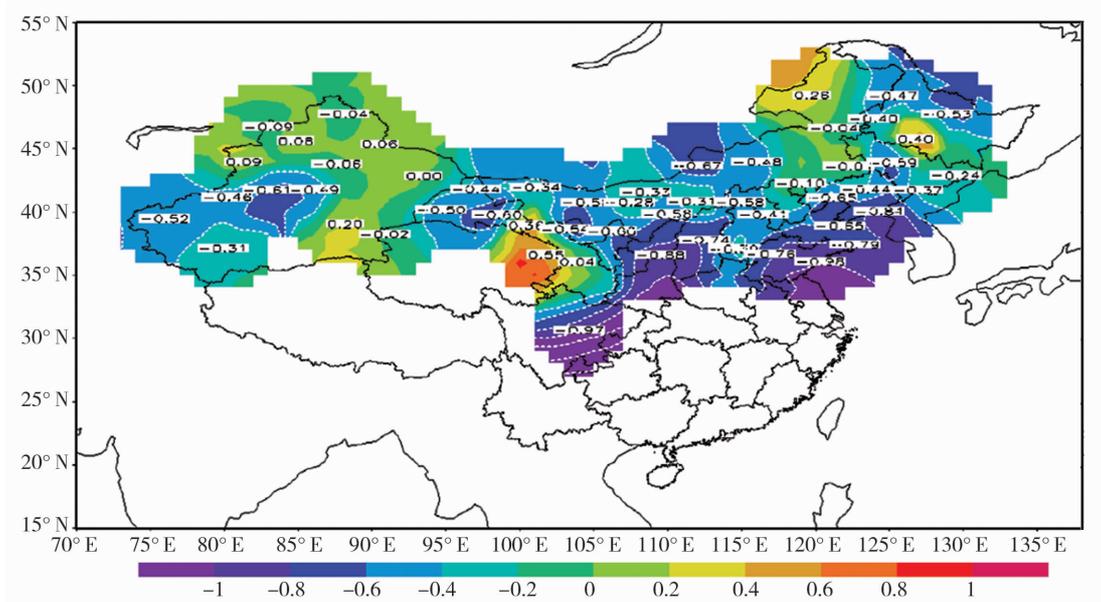


图7 中国1980~2007年对流层顶高度与平流层低层温度的相关分布场(阴影区为相关系数,等值线为通过检验的区域)

Fig.7 The correlation coefficient between tropopause height and lower stratospheric temperature during 1980 - 2007 in China

关系,只有新疆东北部、青海东部及内蒙古东北部呈正相关,并且除青海东部正相关稍大外,其他正相关性都较弱。在负相关区域,大部分地区也都通过了负相关的显著性检验,其中又以四川中部、陕西中南部及江苏沿海一带的相关性最大,相关系数接近-1。

从对流层顶高度与对流层温度和平流层低层温度的相关系数上来看,我国在计算出具有对流层顶的区域内,对流层顶高度与对流层温度有正负相关关系,正相关区位于我国北部,负相关区位于我国中部少数区域,且有纬向分布趋势;我国对流层顶高度与低平流层温度基本呈负相关关系,负相关的大值区与对流层顶高度和对流层温度的负相关区域有对应关系。我国大部分地区对流层顶高度的变化与低平流层温度的负相关关系更为密切,而与对流层温度的正相关关系区域较少,这一方面受限于资料,在我国南部没有发现对流层顶,使相关性分析区域减少所致;另一方面受地理因素影响,我国多高山和盆地,地形分布错综复杂,且大部分区域处于热带对流层顶和极地对流层顶过渡带,过渡带内为混合对流层顶,其与对流层温度和平流层低层温度之间的关系较单类对流层顶出现时复杂,其确切的相关性尚

待进一步研究。

图8绘出了对流层顶高度与对流层温度和平流层低层温度的年平均变化趋势。可以清楚看到,在对流层顶高度升高的第1阶段即2000年以前,对流层顶高度的升高与对流层温度的升高和平流层低层温度的降低一致,但是1987年对流层显著升温时对流层顶高度在第2年后才有较明显的升高;在第2阶段,对流层顶高度的变化与对流层温度的变化趋势较为一致,平流层低层温度则在第2阶段有小幅升高,之后又呈波动变化。在进入对流层顶高度变化的第2阶段时,平流层低层温度有显著下降,但对流层顶高度在第2年后才有了相应的升高,可见平均态下对流层顶高度的变化对温度变化的响应有一定滞后性。从多年平均变化趋势上看,对流层顶高度与对流层温度有正相关关系,与平流层低层温度有负相关关系。

此外,计算了我国1980~2007年对流层顶高度与对流层温度的冬夏季节相关系数,分别为冬季0.298,夏季为0.557。冬夏季节都为正相关且都通过了显著性检验,夏季较冬季显著,这体现了对流层顶高度与对流层温度相关的季节差异。

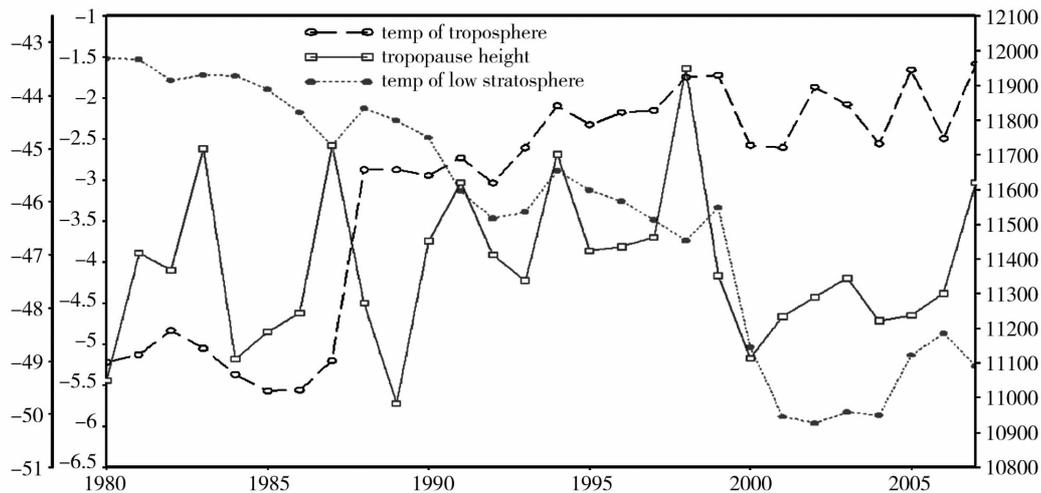


图8 中国1980~2007年对流层顶高度与对流层温度和平流层低层温度的变化趋势图(左边第一纵坐标为平流层低层温度,第二纵坐标为对流层温度,单位:°C;右边纵坐标为对流层顶高度,单位:m)

Fig. 8 Variations of tropopause height and temperature in troposphere and lower stratospheric during 1980 - 2007 in China

### 3 结论与讨论

(1)1980~2007年我国对流层温度有明显的波动上升趋势,28 a上升了约3.9 °C,增温存在季节差异,夏季增温较冬季明显;平流层低层温度呈逐年降低趋势,1980~2007年降温近7.0 °C,其中2000年左右降温尤为明显,可能与该年南极臭氧空洞的恶化有关。

(2)1980~2007年我国对流层顶高度呈分段波动上升趋势,在1980~1999年的第1上升阶段,分别有28 a来的最小高度和最大高度,为1989年的11 km和1998年的12 km;第2上升阶段总体高度较第一阶段小,但上升幅度较第1阶段大。对流层顶高度呈分段上升可能受探空资料记录及资料处理存在分段性的影响。

(3)我国处于热带和副热带交接处,热带对流层顶和极地对流层顶同时存在,2类对流层顶在我国30°N附近形成过渡带,而30°N以北地区上的对流层顶高度以35°N为中心,向南北递减。

(4)从计算出有对流层顶高度的区域,其与对流层温度有正负相关性,正负相关区接近1:1,但大部分正相关区相关较为显著;与平流层低层温度几乎都为负相关区,且大部分区域相关显著,其最显著的区域和对流层温度与对流层顶高度的负相关区相对应。从平均态年变化趋势上看,对流层顶高度与平流层低层温度有负相关关系,与对流层温度有正

相关关系,且相关存在季节差异,但高度对温度的响应有一定滞后性。

本文仅是对探空资料进行分析,讨论了观测资料反映出来的温室效应与我国对流层顶高度的关系,其结果仅为观测事实的分析讨论,未进行数值模拟和动力热力学分析,暂不能全面反映温室效应影响我国对流层顶高度的物理过程,这需要在以后的工作中进一步深入研究。

致谢:对云南大学吴润教授的指导以及提供资料的云南省气象局表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 丁永健. 1980年以来冰冻圈对气候变暖响应的若干证据[J]. 冰川冻土,1996,18(2):131-138.
- [3] 赵宗慈. 模拟温室效应对我国气候变化的影响[J]. 气象, 1989,15(3):10-14.
- [4] 陈起英,俞永强,郭裕福,等. 温室效应引起的东亚区域气候变化[J]. 气候与环境研究,1996,1(2):113-122.
- [5] 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(4):590-596.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] SANTER B D, WEHNER M F. Contributions of Anthropogenic and Natural Forcing to Recent Tropopause Height Changes[J]. Science, Journal of Arid Meteorology, 2011,29(2):182-188

- 2003(301):479-483.
- [9] 张贵银, 廖寿发, 译. 对流层顶气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1988.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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):1031-1044.
- [13] 吴润, 杨茜, 王卫国, 等. 全球对流层顶气压场的季节变化特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2006, 28(4):323-332.
- [14] 杨茜, 吴润, 王卫国, 等. 全球对流层顶气压场的季节变化特征分析[J]. 气象科学, 2008, 28(3):328-333.
- [15] 王卫国, 秦芳. 臭氧层季节变化与对流层顶的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1994, 16(1):29-34.
- [16] 吴润, 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.
- [17] 丁一汇. 全球气候变化[J]. World Environment, 2006, 2:9-12.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 孙冷. 1999 年我国天气气候特点[J]. 气象, 2000, 4(26):20-24.
- [21] 朱乾根, 郭品文. 北半球春季大气臭氧变化特征及其对大气温度和环流场的影响[J]. 应用气象学报, 2000, 11(4):448-454.
- [22] 林伟立, 胡建信, 唐孝炎. 臭氧层耗损对对流层大气质量的影响和在我国的响应[J]. 环境科学研究, 2002, 15(3):61-64.
- [23] 吴兴洋, 杨金芝, 张辉. 探空高度的稳定性分析[J]. 贵州气象, 2003, 27:35-36.

## Correlation Analysis Between Greenhouse Effects and Tropopause over China

FU Zhijia<sup>1,2</sup>, DONG Baoju<sup>1,2</sup>, ZHANG Chengwen<sup>3</sup>

(1. Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Dali National Climatic Observatory, Dali 671003, China; 3. Dali Meteorological Bureau of Yunnan Province, Dali 671000, China)

**Abstract:** Based on sounding data of 120 meteorological observation stations in China from 1980 to 2007, the height of tropopause, tropospheric temperature and temperature at low stratosphere were calculated. Temperature changes caused by greenhouse effects in China were analyzed, and mainly the correlations between the tropospheric temperature, the temperature of lower stratosphere and the tropopause height variation were analyzed. The main results revealed that the tropospheric temperature had an increase of nearly 3.9 °C from 1980 to 2007 in China caused by global warming, the warming was more obvious in winter than that in summer. The lower stratospheric temperature decreased by 7.0 °C from 1980 to 2007. The tropopause height increased by 45 meters in 28 years, the tropopause height change was in the range of 8-16 km. From annual change of the tropopause height, it was negatively related to lower stratospheric temperature and positively associated with the troposphere temperature, and there was seasonal difference. The joint effects of warming in the troposphere and cooling in the stratosphere resulted in tropopause height variation in China.

**Key words:** greenhouse effect; tropopause height; tropospheric temperature; lower stratospheric temperature