

## 2006年湖北宜昌地区对流层特征分析

熊洁<sup>1</sup>, 叶芳<sup>2</sup>, 许海富<sup>3</sup>, 刘端阳<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044; 2. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101; 3. 湖北省宜昌市气象局观象台, 湖北 宜昌 443114)

**摘要:** 利用2006年湖北省宜昌市高空观象台基于GFE(L)1型二次测风雷达观测的高空探测资料, 分析了该地区对流层顶高度、对流层内温度、风等要素的季节特征。分析结果表明: 这些要素显现出明显的季节差异, 对流层顶高度在冬季最高, 春、夏、秋依次减小; 对流层顶温度夏季最低, 冬季最高, 春秋介于两者之间; 对流层内的温度变化主要受太阳短波辐射的影响, 不仅有明显的季节变化, 且日变化显著; 对流层的底层风速基本在10 m/s以内, 风速随高度递增, 春秋冬季在12 km左右达到一个极值; 近地面风向变化大, 以上的对流层内夏季变化大, 春秋冬盛行西风。

**关键词:** 对流层; 对流层顶高度; 温度廓线; 风速廓线

**中图分类号:** P465

**文献标识码:** A

### 引言

地球大气成分和结构是很复杂的。按大气中性成分的热力结构分层, 即根据大气垂直减温率的正负变化, 把大气分成对流层、平流层、中间层和热层。低层大气即对流层, 以太阳辐射加热地面后引起的对流、湍流交换作用以及地面的红外辐射为主, 地面是主要热源<sup>[1]</sup>。天气和气候取决于来自太阳的辐射能量及其分布<sup>[2]</sup>。

对流层顶作为对流层与平流层之间的过渡层, 对于气候和大气循环具有重要的意义。这个过渡层对于对流层与平流层之间的水汽、臭氧、气溶胶的输送与交换产生了重要的影响。以往的研究工作表明, 水汽向平流层的输送与对流层顶的特性, 尤其是温度特性密切相关<sup>[3]</sup>, 同时揭示了气溶胶穿过对流层顶向平流层输运的过程<sup>[4-6]</sup>。

对流层顶的标志是温度递减率从湍流混合的对流层到稳定层结的平流层突变, 其厚度约几百 m 至 2 000 m, 分为第一对流层顶(极地类)和第二对流层顶(热带或副热带类)<sup>[7]</sup>。中高纬度以前者为主, 其高度偏低, 是一个深厚的对流阻滞层, 它阻碍着气溶胶和水汽的垂直交换; 阻碍着积雨云顶的垂直发展,

决定着云的上限、降水以及和云有关的天气现象的高度。该处大气温、压、湿结构以及环流的变化直接影响着近地层的天气和气候。由于受人类活动和自然条件变化的影响, 全球对流层顶在不断变化, 对流层和平流层之间的耦合过程也会有相应的改变。对流层顶的研究已引起各国学者广泛关注。目前对于对流层顶的形成与特性研究并没有最终的定论, 一般地认为, 赤道附近及热带地区对流层顶高约 15 ~ 20 km, 极地和 中纬度带高约 8 ~ 14 km<sup>[1]</sup>。

对流层顶真正成为人们广泛关注的科学问题是近几十年的事情, 是因为对流层顶(层)大气过程在大气化学和气候变化中所起的重要作用<sup>[8]</sup>。对流层顶区域中的大气结构和多尺度物理化学过程与很多问题都有关联, 如平流层与对流层相互作用、平流层与对流层物质交换、平流层臭氧损耗、平流层变冷、全球气候变化等, 因此成为当前大气科学研究的一个热点。

本文以宜昌地区为研究区域, 利用宜昌 2006 年全年的高空探测资料, 分别作月平均、季节平均和各要素随时间高度的变化, 来分析宜昌地区的对流层顶高度、温度季节变化及对流层内温度、风场的垂直结构特征。通过对宜昌地区对流层顶及温度、风场

收稿日期: 2010-10-20; 改回日期: 2011-01-08

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906012)资助

作者简介: 熊洁(1987-), 女, 硕士研究生. E-mail: xiongjie8707@sina.com

的研究,更好地掌握其特点,进而为三峡、葛洲坝工程的良好运行提供高质量的气象服务,提高长江汛期天气预报的准确度。

## 1 观测及资料概况

宜昌位于中国湖北省西部(图1),长江三峡西陵峡东口、长江上中游分界处,是以宜昌市长江葛洲坝水利枢纽为主的水电工业城和华中电网的最大能源地,也是举世瞩目的长江三峡工程所在地,湖北省省域副中心城市,素有“三峡门户”和“川鄂咽喉”之称。宜昌往西为鄂西、川东等山地地形,往东为江汉平原,地理位置特殊,气候复杂多变,是青藏高原低值系统东移的下游关键区域。



图1 宜昌的地理位置

Fig. 1 The geographical position of Yichang

湖北省宜昌市高空观测站位于  $111^{\circ}18'E$ 、 $30^{\circ}42'N$ ,海拔 133 m,高空综合探测仪器为 GFE(L)1 型二次测风雷达。这种测风雷达是我国自行研制的新型自动化程度较高的高空气象探测雷达,它与 GTS1 型数字探空仪相配合可获取地面至 30 km 高空范围内各层次的风向、风速、温度、气压、湿度等气象要素,为气象台(站)提供准确的气象资料<sup>[9]</sup>。该观测站每天进行 2 次探空观测(08 时和 20 时),观测时间间隔为 12 h。本文的数据由该观测站提供,经气象局工作人员的处理成为等 10 m 间隔高度上的气象要素值(距地面),包含 2006 年 12 个月的每天 08 时与 20 时的高空探测的气温、风向、风速值。

宜昌地处温带,属亚热带季风性湿润气候,且地处青藏高原,气候复杂<sup>[10]</sup>。为了更清楚地认识宜昌地区对流层顶高度、对流层内温度和风场的特征,本文从春、夏、秋、冬 4 个季节进行分析。在气象上,通常以农历 3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12 月至 2 月为冬季,并且常常把 1、4、7、10

月作为冬、春、夏、秋季的代表月份。宜昌地区四季分明,春秋较长,可采用气象上通用的 4 季划分。本文用的是 2006 年的资料,把该年 1 月、2 月与 12 月结合起来作为冬季来讨论。

## 2 观测结果与分析

### 2.1 对流层顶高度特征

#### 2.1.1 对流层顶高度季节变化

对流层顶是发现平流层之后自然形成的一个概念,定义为对流层的上边界层或对流层与平流层之间的转换层<sup>[11]</sup>。早期的大气结构模型认为对流层和平流层被一个垂直梯度不连续界面分开,该不连续界面首先与温度递减率的不连续联系起来。基于早期的研究,1957 年世界气象组织给出了热力学对流层顶定义:

(1)第一对流层顶定义为温度递减率减至  $2^{\circ}C/km$  或以下的最低高度,且在此高度至其上 2 km 内任何一个高度范围内的平均温度递减率不超  $2^{\circ}C/km$ ;

(2)如果第一对流层顶之上存在某一个高度,在此高度至其上 1 km 内任何一个高度范围内的温度递减率超过  $3^{\circ}C/km$ ,则根据(1)中的标准定义第二个对流层顶,该对流层顶可以在该 1 km 层之内或之上。该定义几乎适用于全球任何地方,但是在急流和高空峰面附近由于多个稳定层的存在而导致确定对流层顶时的模棱两可<sup>[12]</sup>。

根据温度廓线确定对流层顶的方法有大气温度递减率判据法(LRT)和最小温度法(CPT)<sup>[13]</sup>。国内外的许多文献利用最小温度法来描述对流层顶,如李伟等<sup>[14]</sup>在研究武汉与海口的对流层顶时就采用最小温度法。本文也采用最小温度法(CPT)来确定对流层顶高度和温度。最小温度法即选取温度数据的最小值作为对流层顶温度,对应的高度作为对流层顶高度。

图2为宜昌地区 2006 年全年对流层顶温度和高度时间变化,及对应的 10 点平滑曲线。宜昌地区对流层顶高度绝大部分分布在 16.5~18.5 km 之间,极大值为 20.73 km,极小值为 13.04 km,对应的温度和时间见表 1。对流层顶高度呈现明显的季节变化,其各季节的最大值和最小值见表 2。整体而言,其极大值出现在冬季 1、2、12 月,极小值出现在秋季 9~11 月。高度变化在春季和冬季有很大的波动性,波动范围最大可达到 7 km。值得注意的

是,从极大值到极小值的变化比从极小值到极大值的变化要舒缓一些,极小值到极大值在 4 个月内完

成。与李伟<sup>[11]</sup>等对宜昌地区对流层顶高度的分析一致。

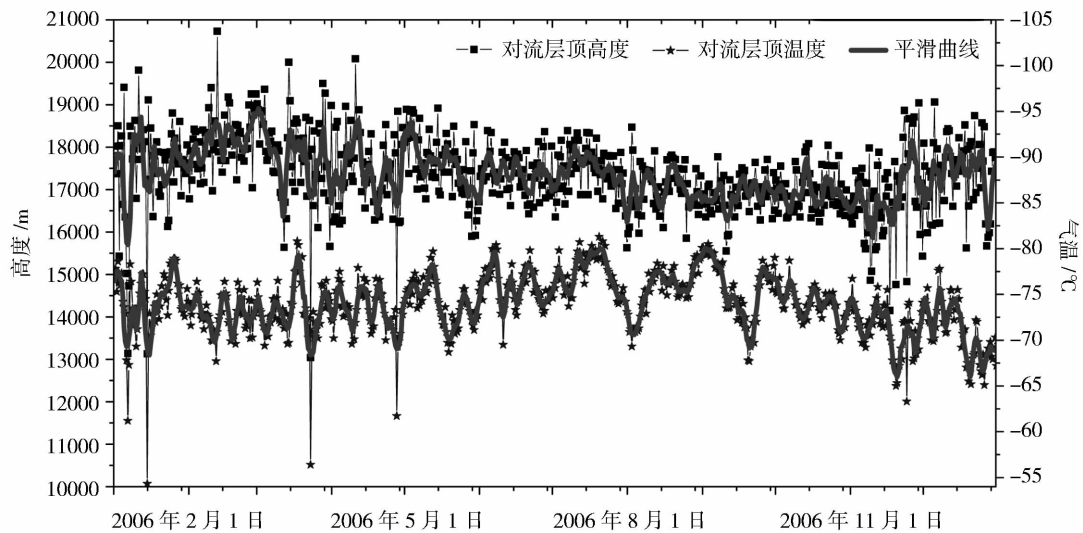


图 2 2006 年宜昌地区对流层顶温度和高度的变化

Fig. 2 Variation of tropopause's temperature and height in 2006 over Yichang

表 1 宜昌地区对流层顶高度和温度的极值

Tab. 1 Extreme values of tropopause's height and temperature in Yichang

	$H/m$	$T/^\circ\text{C}$	日期
$H_{1\max}$	20 730	-70.9	2 月 12 日
$H_{1\min}$	13 040	-56.4	3 月 23 日
$T_{1\max}$	13 130	-54.3	1 月 14 日
$T_{1\min}$	17 500	-81.3	7 月 20 日

表 2 宜昌地区对流层顶高度的季节极值(单位:m)

Tab. 2 Seasonal extreme values of tropopause's height in Yichang (Unit:m)

	春	夏	秋	冬
$H_{2\max}$	20 080	18 470	19 040	20 730
$H_{2\min}$	13 040	15 630	14 150	13 130
$H_{2\max} - H_{2\min}$	7 040	2 840	4 890	7 600

### 2.1.2 对流层顶高度与温度的相互关系

宜昌地区对流层顶温度绝大部分分布在  $-80 \sim$

$-65^\circ\text{C}$  之间,其极大值为  $-54.3^\circ\text{C}$ ,极小值为  $-81.3^\circ\text{C}$ ,对应的高度和时间如表 1。有明显的季节变化,其极大值在 1、12 月,极小值出现在 8、9 月。对流层顶温度在夏季和秋季表现出一定的上升或下降的变化趋势,而在春季和冬季每天高度的波动比较大。

表 2 中的温度极大值与高度极大值时间对应,温度极小值在夏季,而高度极小值在秋季。一般情况下对流层顶是表征充分对流混合的对流层的上界,对流层顶高度的升高代表着这种混合达到了更高的高度,而这种混合多由对流运动来完成,于是意味着对流积云达到更高的高度,相应出现了更低的云顶温度。四季对流层顶平均高度和温度统计见表 3。对流层顶的平均温度在夏季小、冬季大、春秋介于两者之间,与地球表面的四季温度变化相一致;而平均高度呈现冬、春、夏、秋的高低排列,这里从热力状况和日照情况都不能解释,Reid 和 Gage<sup>[15]</sup>认为对流层顶高度并非完全有对流层的扩张与收缩来决定,其变化同时也要受到来自平流层的影响。CPT 定义下的对流层顶侧重于受平流层辐射加热作用影响显著,层顶高度随季节变化较为平缓,冬季无降低趋势,甚至略有升高<sup>[16]</sup>。根据对流层顶各季节的平均高度变化,在讨论对流层内温度和风场变化时可

选定为 18 km。

表 3 宜昌地区各季节对流层顶高度和温度的平均值  
Tab.3 Mean value of tropopause's height and temperature in four seasons in Yichang

	春	夏	秋	冬
$\bar{H}/m$	17 647.29	17 285.75	16 877.22	17 737.77
$\bar{T}/^{\circ}C$	-73.6602	-76.2811	-73.6094	-72.7434

### 2.2 温度的日变化特征

对流层顶主要特点是:大气温度随高度降低,大气的垂直混合作用强,气象要素的水平分布不均匀。由于地面是对流层大气的主要热源,所以总趋势是气温随高度降低,平均温度递减率约为 6.5 K/km<sup>[1]</sup>。

图 3 是 2006 年各季节典型月份温度时间—高度剖面图。总的来看,气温垂直分布的日变化非常显著,特别在大气边界层及其上自由大气 3 000 ~ 4 000 m 的范围内。这是因为大气边界层是对流层中最靠近下垫表面的气层,通过湍流交换,白昼地面获得的太阳辐射能以感热和潜热的形式向上输送,加热上面的空气;夜间地面的辐射冷却同样也逐渐影响到它上面的大气,这种热量输送过程造成大气边界层内温度的日变化显著。使得对流边界层在白天出现和发展,而稳定边界层在夜间出现和发展<sup>[17]</sup>。温度廓线出现了夜间辐射型、早上过渡型、白天日射型及傍晚过渡型<sup>[18]</sup>。夜晚由于地面长波辐射降温使近地气层形成逆温层,逆温层厚度从几 m 到几百 m,凌晨日出后逐渐消散<sup>[19]</sup>。

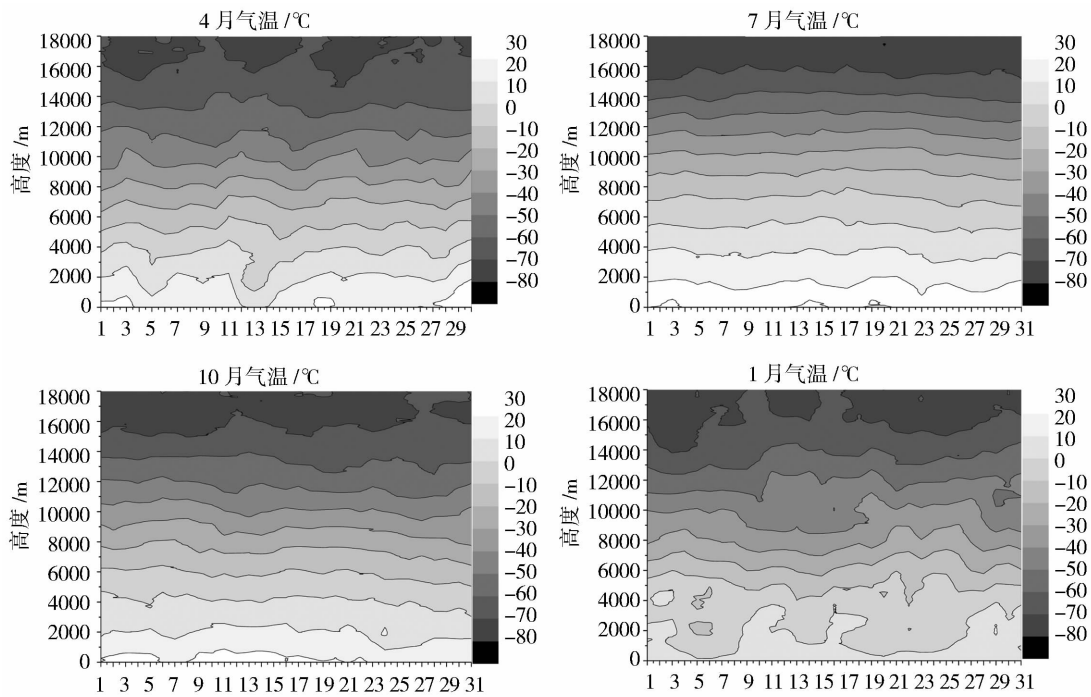


图 3 宜昌地区 2006 年各季节典型月份气温的时间—高度剖面图

Fig.3 Time - height section of air temperature in April, July, October and January of 2006 in Yichang

4 月即春季的气温时间—高度剖面图看出,春季气温变化剧烈,同一高度上的气温有出现突然下降和逐渐上升的现象,2006 年 4 月 13 日气温在 1 000 m 左右高度内骤然下降了 10 °C,此后几天温度慢慢回升,类似今年南京的春天。因为春季太阳高度角还比较小,对地球的短波辐射不强,使得宜昌和南京(纬度相差不大)气温不高,加上春天时而有冷空气南下使得气温会骤变,边界层内气温降低幅度很大,但边界层以上受到的影响较小;7 月夏季,整

个对流层气温升高,在同一高度上每日相同时刻气温相差不大,日变化较春季平缓;10 月秋季,气温逐渐下降,但整体上要高于春季,时而有气温的突升,且多有逆温层,这很大可能是因为晴朗的秋天昼夜温差比较大造成的,也给雾的形成提供了条件;1 月冬季,气温的日变化更为显著,地表受太阳辐射弱,易受天气系统的影响。

对比冬、夏月份的气温时间—高度剖面图,对流层内同一高度夏季温度要大于冬季,这与夏季太阳

高度角大,受热辐射强,地面温度升高有关。

### 2.3 风场的演变特征

#### 2.3.1 风速的时空变化

图4为2006年各季节典型月份风速的时间—高度剖面图。整体上看,风速在对流层内12 km的高度会有一个极大值,7月极大值表现的不明显,且风速在整个对流层变化较其他月份小。大气边界层风速廓线结构比较复杂,风速都在10 m/s的范围

内,风速总体上随高度增加而增大,有时在大气边界层会出现风速极大值。越接近地面风速越小,这是越接近地面摩擦力越大和湍流涡旋作用的结果。由于下垫面表面的摩擦作用,风速在接近地面处为零值,随高度增加逐渐变化到边界层顶的地转风速值。边界层内风速的日变化是显著的,而在自由大气层风速日变化相对不是很明显,风速高值区对应会有一个形成和消失的过程。

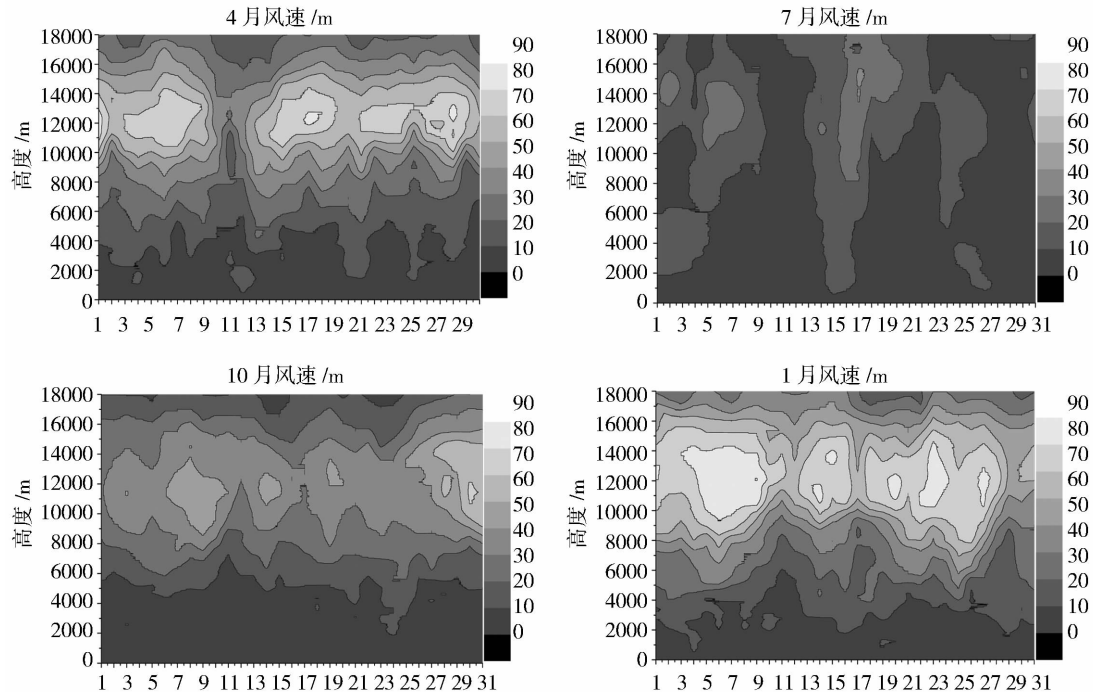


图4 宜昌地区2006年各季节典型月份风速的时间—高度剖面图

Fig. 4 Time-height section of wind speed in April, July, October and January of 2006 in Yichang

为了更明显地看出风速在垂直高度上的变化情况,引入风速差<sup>[20]</sup>,即上下层风速的差值。在此为10 m等间隔高度上的风速差值。综合7月的风速剖面图,整个对流层风速值都很小,且边界层的各层风速差趋于零,图5a夏季的平均风速差廓线几乎保持为零;而在1月冬季,风速低值区被压到边界层内,风速梯度相差很大(图5b)。且在冬季,风速先随高度增加而增加,在大约10 km的高度达到极大值,随后风速差开始减小,在此过程中,风速变化会比较大,直至对流层顶高度一直在减小。春秋季节是过渡时期,图5c,图5d平均风速差有像冬季一样的变化趋势,但比较平缓,风速变化是个渐变过程,没有像冬季一样多的突变。这种风速垂直分布季节上的差异,是由大气层结稳定与否造成的。夏季,大

气层结不稳定,湍流混合作用强,上下层风速的差别趋于减小,甚至为零;冬季则反之。

#### 2.3.2 风向的时空变化

图6为宜昌地区2006年各季节典型月份风向的时间—高度剖面图。风向在边界层内随高度变化比较大,各个风向都有出现。这主要因边界层是对流层中最靠近下垫表面的气层,下垫面的性质直接影响着风向的变化。边界层往上的对流层,风向在同一时刻垂直变化不大或基本保持不变,春、秋、冬季表现得非常明显,整层吹西风。夏季风向随时间的变化很大,7月风向随时间—高度剖面图上,西北风、东北风、西风、南风都有出现。这是由宜昌地区属亚热带季风性湿润气候特点决定的,并在一定程度上受到西部高原季风的影响<sup>[21]</sup>。

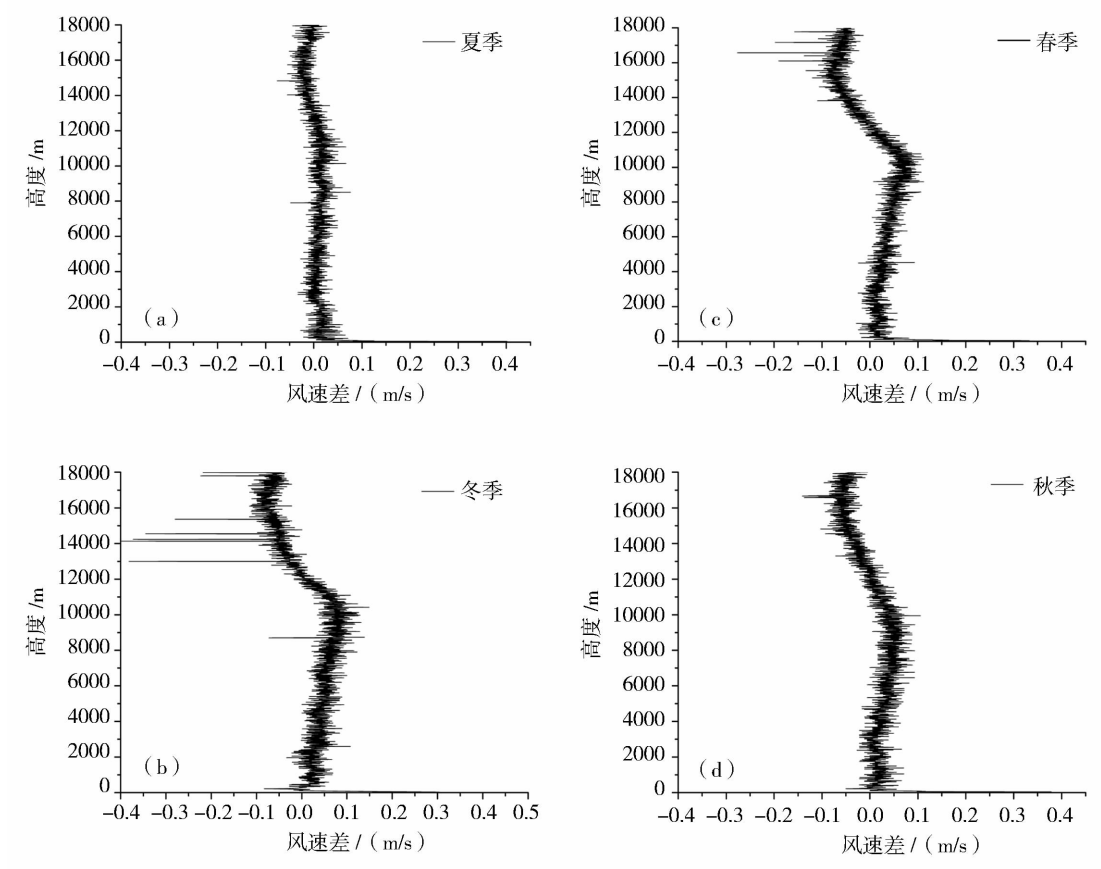


图 5 宜昌地区夏(a)、冬(b)、春(c)、秋(d)季的平均风速差随高度的变化  
 Fig.5 Variation of average wind speed difference with height in summer(a), winter(b), spring(c) and autumn(d) in Yichang

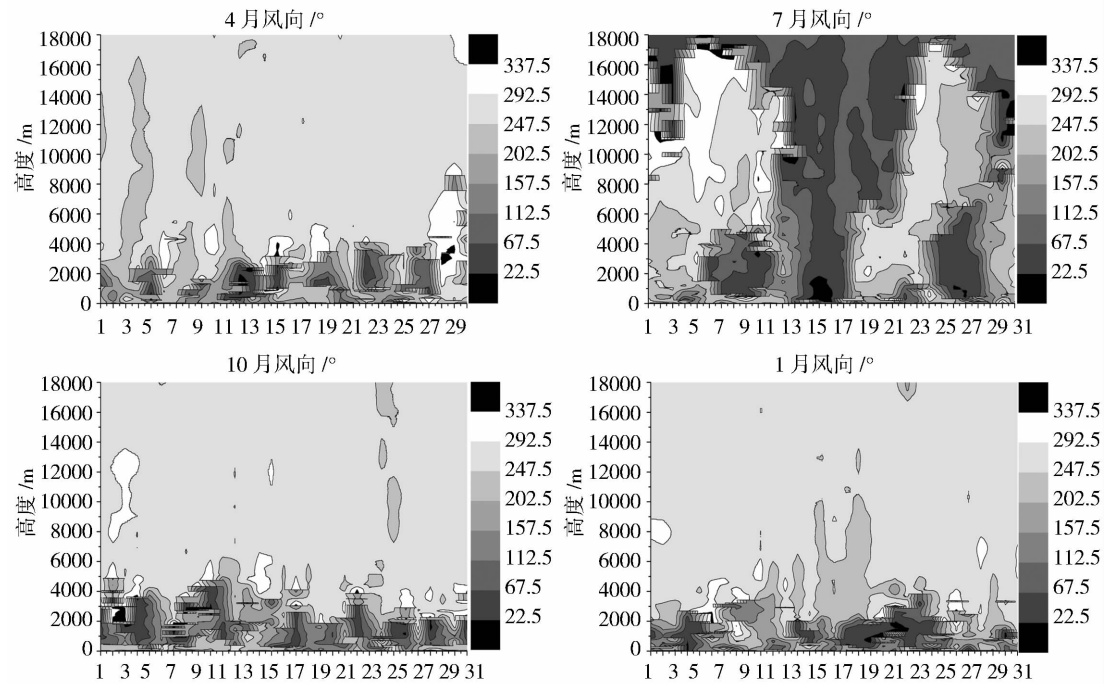


图 6 宜昌地区 2006 年各季节典型月份风向的时间—高度剖面图  
 Fig.6 Time - height section of wind direction in April, July, October and January of 2006 in Yichang

### 3 结论

(1) 宜昌地区对流层顶温度和对流层顶高度有明显的季节变化, 对流层顶高度在 17 ~ 18 km, 冬季对流层顶高度最高, 春、夏、秋依次减小; 对流层顶温度夏季最低, 冬季最高, 春秋介于两者之间。

(2) 对流层内温度有明显的日变化。

(3) 对流层内风速呈现明显的季节变化, 夏季垂直高度变化不大, 春、秋、冬季风速随高度的增加而增大, 在 12 km 高度风速达到极大值。冬季风速的突变也表现明显。

(4) 近地面风向变化大, 以上的对流层内夏季变化大, 春秋冬盛行西风。

#### 参考文献:

- [1] 盛裴轩, 毛节秦, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 49 - 50.
- [2] 周跃武, 白虎志译. 全球能量收支预算[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 230 - 237.
- [3] Highwood E J, Hoskins B J. The tropical tropopause Quart[J]. Rpyal Meteorol Soc, 1998(124): 1579 - 1604.
- [4] Alekseev G V, Narurny A P, Timerev A A. Interannual variability of thropopause characteristics in the Arctic[J]. Rep Acad Sci Russia, 1994(339): 243 - 245.
- [5] Teimerev A A, Nagurny A P, Egorov S A, et al. Climate characteristics of the height and temperature of the tropopause over the Arctic Basin[J]. Russ Meteorol Hydrol, 1994(6): 39 - 47.
- [6] Holton J R. Stratosphere - Troposphere exchange[J]. Rev Geophys, 1995(33): 403 - 439.
- [7] 张广兴, 何清, 李娟, 等. 近 40 年来新疆极地类对流层顶温度变化的若干事实和突变分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(6): 729 - 733.
- [8] Gettem A A. Tropopause initiative[J]. SPARC New sletter, 2007(29): 14 - 20.
- [9] 张立功, 王汝忠, 黄小明, 等. L 波段测风雷达 - 电子探空仪系统简介[J]. 干旱气象, 2002, 20(4): 30 - 32.
- [10] 齐冬梅, 李跃清, 李英, 等. 夏季青藏高原东部大气热源变化及其对相邻区域气候的影响[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 113 - 120.
- [11] Stohl A, Wemli H, James P, et al. A new perspective of stratosphere troposphere exchange[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003(84): 1565 - 1573.
- [12] Hoerling M P, Schaack T K, Lenzen A J. Global objective tropopause region[J]. Monthly Weather Review, 1991(119): 1819 - 1831.
- [13] World Meteorological Organization(WMO). Definition of the tropopause[J]. WMO Bull, 1957(6): 136 - 140.
- [14] 李伟, 樊超, 易帆. 武汉与海口地区对流层顶的变化特征[J]. 空间科学学报, 2009, 29(4): 409 - 416.
- [15] Reid G C, Gage K S. The tropical tropopause over the western Pacific Wave driving, convection and the annual cycle[J]. Geophys Res, 1996(21): 233 - 241.
- [16] 王鑫, 吕达仁. 利用 GPS 掩星数据分析青藏高原对流层顶结构变化[J]. 自然科学进展, 2007, 17(7): 913.
- [17] 徐桂荣, 崔春光. 青藏高原东部及下游关键区大气边界层高度的观测分析[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(2): 112 - 118.
- [18] 李祥余, 何清, 艾力·买买提明, 等. 塔中春季阴天近地层风速、温度和湿度廓线特征分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(2): 22 - 28.
- [19] 大气物理学编写组. 地球物理学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1990.
- [20] 卞林根, 程彦杰, 王欣, 等. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究[J]. 应用气象学报, 2002(S1): 13 - 25.
- [21] 齐冬梅, 李跃清. 高原季风研究主要进展及其科学意义[J]. 干旱气象, 2007, 25(4): 74 - 79.

## Characteristics of Troposphere over Yichang of Hubei Province in 2006

XIONG Jie<sup>1</sup>, YE Fang<sup>2</sup>, XU Haifu<sup>3</sup>, LIU Duanyang<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information & Technology, Nanjing 210044, China; 2. PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 3. Yichang Meteorological Bureau of Hubei Province, Yichang 443114, China)

**Abstract:** Based on the GFE(L) wind radar data of the upper - air observatory in Yichang of Hubei Province, the seasonal characteristics of the height of tropopause, temperature and wind in troposphere were analyzed. The results indicated that there was evident seasonal change for these elements, the height of the tropopause was maximum in winter and decreased in spring, summer and fall one by one. The temperature of the tropopause was maximum in winter and minimum in summer; the temperature of the troposphere was mainly effected by solar short - wave radiation, and it had not only seasonal change but also evident daily change. The wind velocity was not over 10 m/s in lower troposphere and increased with height, and it came to a maximum at the height of 12 km in spring, autumn and winter. The wind direction near the surface layer varies obviously, and in summer it was changeful in troposphere, it was west wind in spring, autumn and winter.

**Key words:** troposphere; the height of tropopause; temperature profile; wind speed profile