

史文丽, 闵锦忠, 费建芳, 等. 2013. 全球变暖背景下对流性降水变化特征及影响因子分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 32-42, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11036. Shi Wenli, Min Jinzhong, Fei Jianfang, et al. 2013. Analysis of characteristics of convective precipitation under global warming and its impact factors[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 32-42.

全球变暖背景下对流性降水变化特征及影响因子分析

史文丽¹ 闵锦忠² 费建芳¹ 黄小刚¹

¹ 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

² 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘 要 根据 NCEP/NCAR 逐日、逐月温度资料和相对湿度资料, 及长江中下游 60 个气象站逐日降水资料, 采用趋势分析、突变检验等方法, 研究了近 60 年来全球和北半球地表温度变化趋势, 分析了温度增加前后, 夏季 (6~8 月) 对流性降水的变化特征及其部分影响因子。结果表明: 近 60 年来, 北半球年平均及夏季平均地面温度为增暖趋势, 1998 年为增暖突变年份; 变暖后, 长江中下游地区夏季对流性降水事件的发生频率呈增多趋势且强度增强; 全球增暖后, 对流层中、高层水汽含量呈下降趋势, 对流层低层水汽含量呈上升趋势; 热含量除个别月份外, 在 700、850、1000 hPa 均有明显增长; 大气中不稳定性也显著增强。这些与对流性降水事件发生频率的增加和强度的增强有很好的对应关系, 说明全球变暖导致的大气中水汽含量变化、湿空气热含量增加和不稳定性增强对流性降水事件可能有重要影响。

关键词 气候变暖 对流性降水 水汽含量 湿空气热焓 大气稳定度

文章编号 1006-9585 (2013) 01-0032-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11036

Analysis of Characteristics of Convective Precipitation under Global Warming and Its Impact Factors

SHI Wenli¹, MIN Jinzhong², FEI Jianfang¹, and HUANG Xiaogang¹

¹ Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology Institute of Meteorology, Nanjing 211101

² Nanjing University of Information Science & Technology College of Atmospheric Science, Nanjing 210044

Abstract The authors analyzed the tendency of the annual and summer average surface temperatures in the Northern Hemisphere for a period covering nearly 60 years and the variation of the convective precipitation occurred in summer (June–August). The possible causes of the variation were also researched in this article by investigating the impact factors of the convective precipitation. The analysis was based on the monthly data, daily and monthly relative humidity, temperature data of NCEP/NCAR, and the daily precipitation records of 60 selected stations in the mid-lower reaches of the Yangtze River using trend analysis and mutation testing method. The results show that for nearly 60 years the annual and summer average surface temperatures in the Northern Hemisphere have been rising with an abrupt temperatures leap in nearly 1998 so that this year can be regarded as an temperature discontinuity. With the increasing effect of global warming, both the frequency and intensity of the convective precipitation events that occurred in summer were enhanced in the reaches of the Yangtze River. In years when the temperature was higher than average, the water vapor content in

收稿日期 2011-03-10 收到, 2012-02-21 收到修定稿

项目资助 国家自然科学基金项目 40875068, 解放军理工大学气象学院基础理论研究资助项目

作者简介 史文丽, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事灾害性天气形成机理和预报研究; E-mail: xiaolizi.shi@163.com

the upper and middle troposphere showed a continuously decreasing trend and in the lower troposphere showed an increasing trend in July and August. Apart from a few individual years, the heat content at the 700 hPa, 850 hPa, and 1000 hPa levels had an obvious positive trend. The atmospheric instability also showed a clear tendency of strengthening. These factors have a strong correlation with the increasing frequency and intensity of the convective precipitation. It was concluded that changes in water vapor content and enhancement of heat content and atmospheric instability caused by global warming may have an important influence on the increase of convective precipitation events.

Keywords Climate warming, Convective precipitation, Water vapor content, Wet air heat content, Atmospheric stability

1 引言

全球气候变化已经成为全世界共同瞩目的焦点,也是各国学者研究与讨论的热门课题。近 100 a 全球气候变暖已是公认的事实。王绍武(1994)根据 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)公布的温度序列指出,可以粗略地表明,近百年全球气温平均上升 0.5 °C 左右。不过,这种变暖并不是均匀的,期间有 3 次突变式的增温,发生在 1895 年、1925 年及 1980 年前后。王绍武和叶锦琳(1995)指出 20 世纪 80 年代之后出现了较明显的全球增暖趋势。

第 4 次 IPCC 评估报告得出结论:所有大陆和多数海洋的观测证据显示,许多自然系统正在受到区域气候变化,特别是受到温度升高的影响(沈永平, 2007)。众多学者的研究(Cohen, 1990; Chan and Liu, 2004; 陈洪斌和范学花, 2007, 2008; 徐雨晴等, 2009; Gualdi et al., 2008)表明,全球气候变暖使得厄尔尼诺事件的发生更加频繁,海表温度升高,冰川消融,海平面上升,对流层高度升高,季风发生变化,由此引发一系列极端天气现象,如持续性严重干旱、强降水、极端高温等频繁发生并加剧。

目前,许多科学家都是从全球变暖对极端天气发生频率及强度的时空分布变化的影响,或是单个极端天气事件形成过程的角度进行研究,而将极端天气的形成放到全球变暖大背景下来进行研究的还比较少。同时,长江中下游地区作为我国重要的气候响应区(IPCC, 2001),对流性降水频发,因此研究该地区增暖背景下对流性降水的变化具有重大意义。已有的研究表明在气候变暖背景下,该地区对流性降水的发生频率及强度也有较显著的变化(Li et al., 2002; 张永领等, 2006)。但是,对于这种变化的形成机理尚无深入研究和明确定论。本文以长江中下游地区为研究区域,利用了

WMO CCL/CL IVAR(Commission for Climatology/Climate Variability and Predictability Project)发布的极端降水指数(王冀等, 2008)来表征对流性降水的频率及强度,选取水汽含量、湿空气热焓、不稳定性 3 个对流性降水影响因子,分析该区域在增暖前后夏季(6~8 月)对流性降水事件的变化情况及 3 个影响因子的变化特征,初步讨论造成该区域增暖期夏季对流性降水增加的主要因素,力求从一个新的角度探究全球增暖背景下对流性降水的发生发展机理。

2 资料与方法

本文所用资料包括 2.5°(纬度)×2.5°(经度)的 NCEP/NCAR1948~2009 年共 62 年的逐月温度再分析资料; 2.5°(纬度)×2.5°(经度)的 NCEP/NCAR1964~1973 年、1999~2008 年的相对湿度和温度的逐日资料及逐月资料; 中国 753 站 1950~2008 年逐日降水资料。

本文根据中国气象局规定的全国七大江河流域的边界,根据所研究时段及资料连续性检查,选取长江中下游流域内的 60 个气象观测站,图 1 是所选站点分布示意图。

2.1 Mann-Kendall 法

为了确定全球温度变化的正常期和异常增暖期,必须确定全球变暖的突变时间点,因此选用 Mann-Kendall 突变检验方法(符淙斌和王强, 1992):

Mann-Kendall 法(以下简称 M-K 法)是在气候序列平稳的前提下,定义了统计量 d_i :

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N), \quad (1)$$

m_i 表示第 i 个样本 s_i 大于 s_j ($1 \leq j \leq i$) 的累计值。

在原序列随机独立的假设下,对 d_k 标准化后为 $U(d_k)$, 给定显著性水平 α_0 , 当 $\alpha_1 < \alpha_0$ 时,则拒绝原假设,它表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势。所有 $U(d_k)$ ($1 \leq k \leq N$) 将组成一条曲线 UF。把

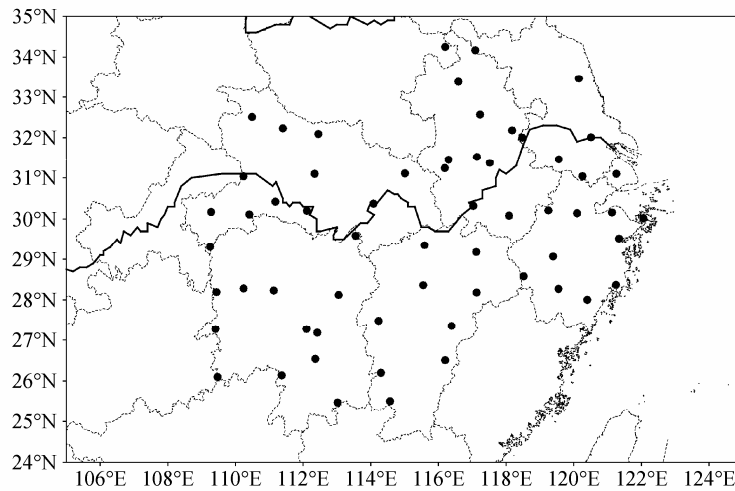


图1 长江中下游站点分布图

Fig. 1 Stations distribution in the mid-lower reaches of the Yangtze River

此方法引用到反序列中，得到另一条曲线 UB，如果曲线 UF 和 UB 的交叉点位于信度线之间，这个点便是突变的开始。本文给定显著性水平 $\alpha=0.05$ ，那么临界值 $U_{0.05}=\pm 1.96$ 。将 UF 和 UB 两个统计量序列曲线和 ± 1.96 两条直线均绘在同一张图上。

2.2 气候倾向率

本文引入气候倾向率（蔡福等，2006）来研究 1964~1973 年、1999~2008 年各站暴雨天数的变化趋势。用 x_i 表示各站的暴雨天数，用 t_i 表示 x_i 所对应的时间，建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归：

$$\hat{x}_i = a + b \cdot t_i \quad (i = 1, 2, \dots, 20), \quad (2)$$

其中， $\hat{x}_i$ 为气象要素的拟合值； $b \cdot 10$ 称为气候倾向率，表示 10 年气候要素的变化速率。上式可以看作一种特殊的、最简单的线性回归形式。它的含义是用一条合理的直线表示 x 与对应的时间 t 之间的关系，是一种时间序列分析的方法。

2.3 极端降水指数的选取

从 WMO2CCL/CL IVAR 发布的 50 种气候指数中选取了 3 种极端降水指数。这些指数的定义都是计算通过阈值的降水量或天数，从而消除了地域因素，使计算出的降水指数可以进行空间比较，具有较弱的极端性、噪声低、显著性强的特点，这些指数已成为欧盟 STARDEX 计划推荐用于描述与极端降水事件有关的核心指标（王冀等，2008），具体定义见表 1。

值得说明的是，本文中所选取的研究时段为夏季，所以大雨天数、暴雨天数和降水强度 3 个指数的计算时段均为夏季，即每年的 6 月、7 月、8 月。

降水强度（准确说为夏季降水强度）的计算方法是用 6~8 月总降水量/降水天数。

表1 3种基于逐日降水量的极端降水指数定义

Table 1 Three kinds of index definition for extreme precipitation

指数名称	指数符号	指数定义	单位
大雨天数	d_{R20}	日降水量超过 20 mm 的天数	d
暴雨天数	d_{R50}	日降水量超过 50 mm 的天数	d
降水强度	S	总降水量/降水天数	mm d ⁻¹

3 近60年北半球温度变化特征

对北半球 1000 hPa 全年及夏季异常增暖现象进行了 M-K 检验。图 2 是 1948~2009 年北半球 1000 hPa 年平均和夏季平均气温的 M-K 突变检验曲线。图 2a、2b 两图中 UF 线的趋势基本一致，表明 1948~2009 年北半球年平均温度和夏季平均温度的年际变化趋势是一致的。由 UF 曲线可见，1960 年代中期至 1970 年代末，UF 曲线低于 -1.96 的信度线，且呈下降趋势，表明这一时期温度有较明显的降低趋势；1990 年代末期开始，UF 曲线高于 $+1.96$ 的信度线，且呈上升趋势，表明温度显著增长。从图 2a 中两条曲线交叉点的位置，可以确定北半球年平均温度在 1990 年代末期的增暖为一种突变，它的起始时段约位于 1998 年附近。同样地，图 2b 两条曲线在 1998 年附近也有一个交点，说明北半球夏季平均温度的突变年份与全年平均温度是基本一

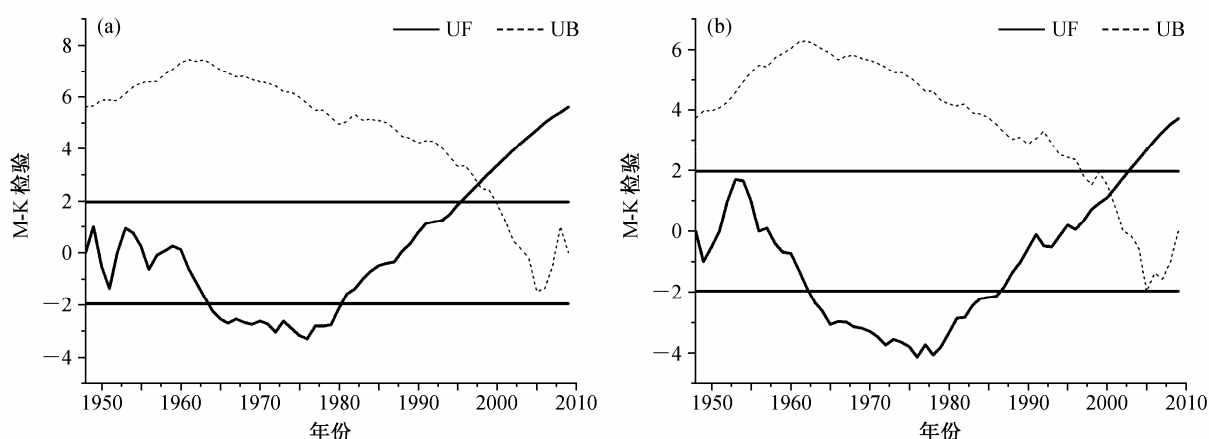


图2 1948~2009年北半球 (a) 年平均和 (b) 夏季平均地面 (1000 hPa) 气温的M-K检验

Fig. 2 The Mann-Kendall (M-K) trend of (a) the annual average and (b) summer average surface (1000 hPa) temperature

致的。

宋燕和季劲钧 (2005) 建立了近百年地面温度时间序列, 他们认为近百年温度变化应划分为3个时段: 1900~1935年为冷期, 1936~1975年为正常期, 1976年至今为暖期。根据3.1节和3.2节中的分析, 并参考前人的研究, 取1964~1973年作为气温正常期, 取1999~2008年为异常增暖期, 用于下面的对比研究。

4 长江中下游对流性降水在增暖前后的时空变化特征

对流性降水是长江中下游地区常见的极端天气现象, 为了分析全球变暖背景下对流性降水的变化情况, 本文选取长江中下游地区作为研究区域。选用大雨天数、暴雨天数和降水强度3个极端降水指数来表征对流性降水的变化特征。研究时段为全球气温正常期1964~1973年和异常增暖期1999~2008年。

4.1 长江中下游地区对流性降水的长期变化特征

一些学者曾对长江中下游对流性降水的变化进行了分析 (刘小宁, 1999; 陈辉等, 2001; Li et al., 2002; 汪方等, 2002; 张永领等, 2003, 2006; 苏布达等, 2006), 发现长江流域极端强降水量、降水强度与天数在长江流域中下游地区呈现显著增加的趋势, 长江流域极端强降水量变化的空间分布存在明显的差异。由图3所给出的1964~1973年、1999~2008年长江中下游地区夏季 (6~8月) 3个极端降水指数的时间变化情况, 我们发现增暖后大雨天数、暴雨天数和夏季降水强度

均呈上升趋势。3个指数在气温正常期内都表现为在1966年附近存在一个极小值。1999年开始, 进入温度异常增暖期后3个指数均出现了跃升, 分别在1999年和2002年存在极大值。这与王冀等 (2008) 得到的1990年代后期较1990年代前期极端降水指数明显增大的结论是一致的。同时, 他们通过相关性分析证实所选用极端降水指数的增加 (减少) 对降水量的增加 (减少) 有很好的指示作用, 总降水量的变化主要取决于大雨以上的极端降水量的变化。根据以上分析可知, 在全球增暖的大背景下, 长江中下游地区的夏季对流性降水在增加, 强度也明显增强。这说明长江中下游地区的对流性天气对气候增暖有着较为敏感响应。

4.2 对流性降水变化趋势的空间分布

前面讨论了长江中下游地区对流性降水在增暖前后的时间变化特征, 而长江中下游地区对流性降水在不同区域的变化特征也值得我们关注。下面主要分析暴雨天数在增暖前后变化趋势的空间变化特征。

利用线性倾向率的计算方法, 计算了长江中下游地区55站 (剔除资料不全的5个站点) 暴雨天数在增暖前后20 a的线性变化趋势, 如图4所示。从图中可以看出, 气候增暖后长江中下游地区55站中有46个站的夏季暴雨天数均呈正趋势, 但是各地区增长的正趋势是不均匀的。在安徽南部、湖北中部、江西北部正趋势最强, 高值中心位于安徽南部。对变化趋势进行 F 检验, 结果显示安徽西南部上升趋势最为显著, 通过了99%的信度检验; 其次是湖北中部、湖南南部、江西北部及浙江沿海地区的正趋势较为显著, 通过了97.5%的信度检验。

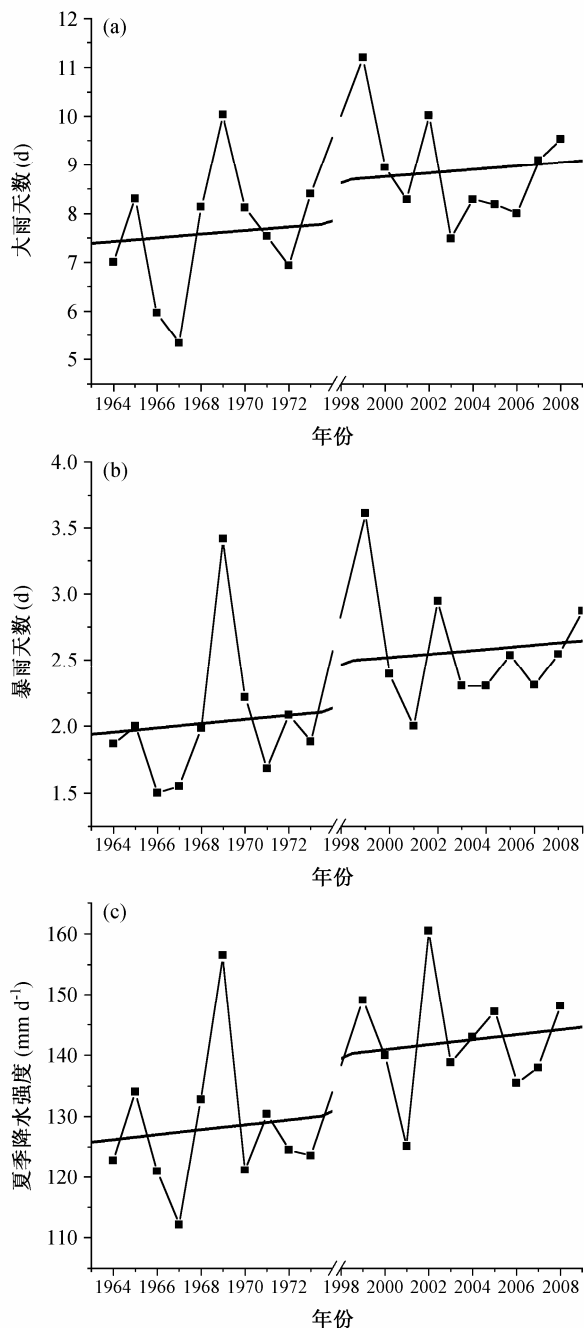


图3 长江中下游地区夏季(6~8月)极端降水指数的时间序列变化曲线和线性趋势(斜线代表线性回归趋势线): (a) 大雨天数; (b) 暴雨天数; (c) 夏季降水强度

Fig. 3 The curve for temporal series of extreme precipitation indices in the mid-lower reaches of the Yangtze River from June to August (the gradient-straight line refers to linear trend of the series): (a) d_{R20} ; (b) d_{R50} ; (c) S

5 对流性降水影响因子的长期变化特征

以上分析证实了,在全球变暖背景下,长江中

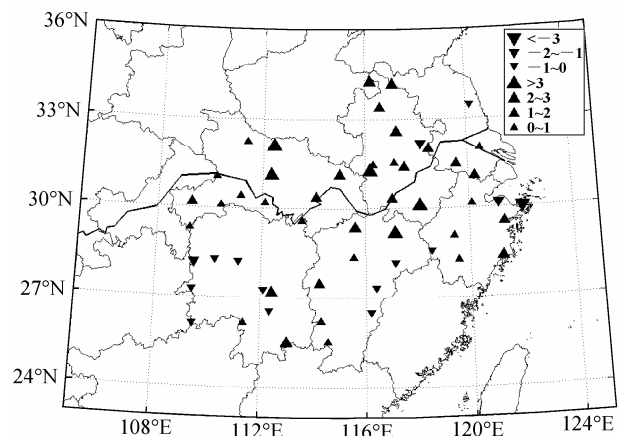


图4 暴雨天数在增暖前后变化趋势空间分布图

Fig. 4 Spatial variation of tendency of d_{R50}

下游地区的对流性降水的发生频率呈现出了明显的增加趋势,强度亦显著增强。受全球变暖影响的对流影响因子有很多,其中大气水汽含量、湿空气热焓、大气稳定性和垂直风切变是其中的几个关键因子,它们的高低、强弱基本决定了对流性天气的强弱、范围和移动路径。本文着重分析长江中下游地区水汽含量、湿空气热焓和大气稳定性3个对流影响因子在正常期和增暖期的变化特征。由于所用资料为格点资料,大致将长江中下游地区的经纬度取为(25°N~35°N, 107.5°E~122.5°E)。

5.1 水汽含量的变化特征

大气中的水汽含量与对流性降水的关系十分密切。水汽含量的增加不仅为对流性降水提供充足的水汽来源,而且可以通过释放凝结潜热增加大气能量,促进对流发展。水汽含量随高度差异较大,在不同层次上的变化应该有不同的特征,对对流性降水的影响也不尽相同。因此,我们将长江中下游上空的大气垂直分为对流层底层(1000~700 hPa)、对流层中层(700~400 hPa)和对流层高层(400~300 hPa)3层,分别研究各层的水汽含量在增暖前后的变化特征。各层间气柱水汽含量的估算方法(李玉林等, 2003)为:

$$W_a = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_z} q(p) dp, \quad (3)$$

其中, W_a 为气柱水汽量,单位为 $g \text{ cm}^{-2}$, g 为重力加速度, p_0 与 p_z 是地面及高度 z 处的气压值, $q(p)$ 为比湿,可由相对湿度计算得到。

图5给出了长江中下游地区6~8月对流层底层水汽含量在增暖前后各月的变化曲线和线性回归

趋势,从图中可以看出1999~2008年与1964~1973年相比,6、7、8月对流层低层水汽含量均呈上升趋势。图6、7分别表示了对流层中层、高层水汽含量的时间序列曲线和线性回归趋势,从图中可知对流层中层水汽含量的变化在增暖后除8月趋势略有上升外,6、7月的水汽含量略呈下降趋势,对流层

高层各月水汽含量均呈明显的下降趋势。水汽含量的这种变化特征说明,气候增暖与对流层低层水汽含量有正相关关系,而与对流层中、高层有负相关关系。这可能是因为温度升高使地表水蒸发加强,水蒸汽进入大气使低层水汽含量增加,而这种作用在中高层并不明显。

根据以上讨论,全球变暖后长江中下游地区对

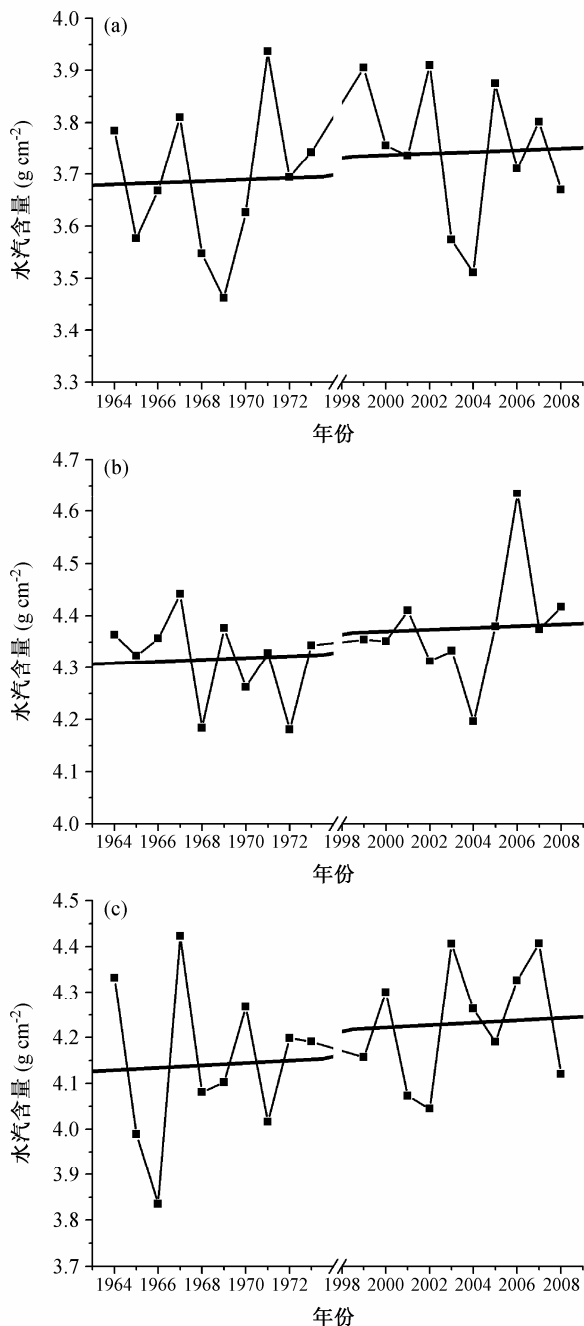


图5 长江中下游地区对流层低层(1000~700 hPa)水汽含量时间序列曲线(斜线代表线性回归趋势): (a) 6月; (b) 7月; (c) 8月

Fig. 5 The curve for temporal series of water vapor content in the lower troposphere (1000~700 hPa) in the mid-lower reaches of the Yangtze River (the gradient-straight line refers to linear trend of the series): (a) June; (b) July; (c) August

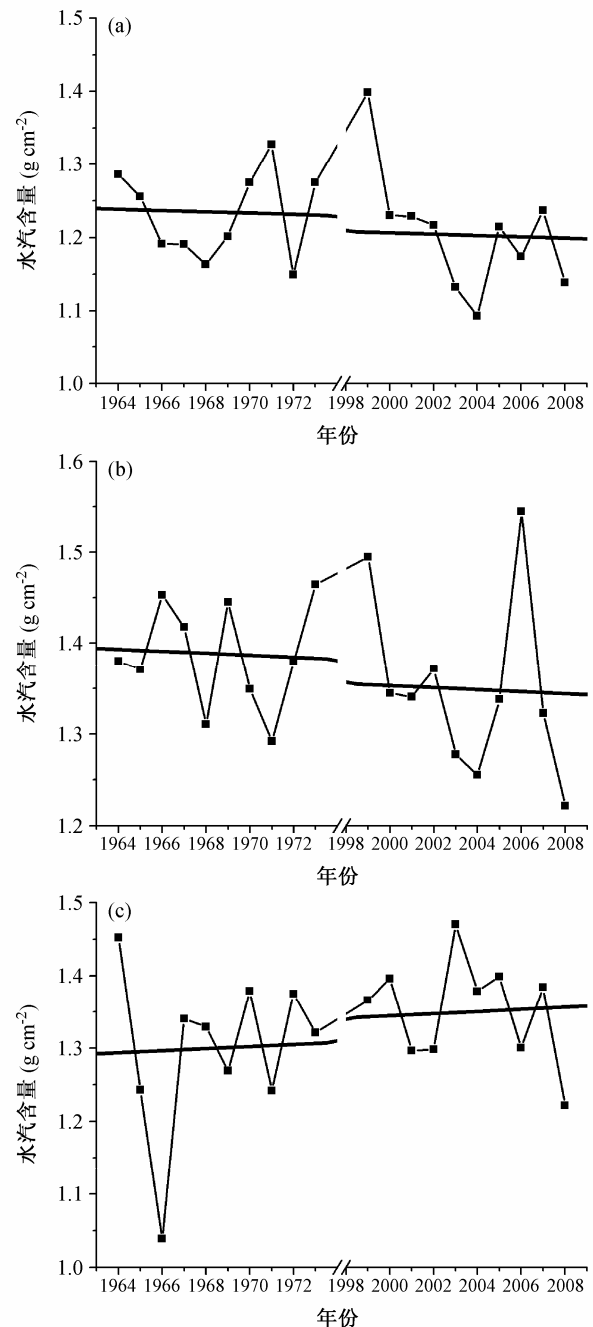


图6 同图5, 但为对流层中层(700~400 hPa)水汽含量时间序列曲线

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for water vapor content in the middle troposphere (700~400 hPa)

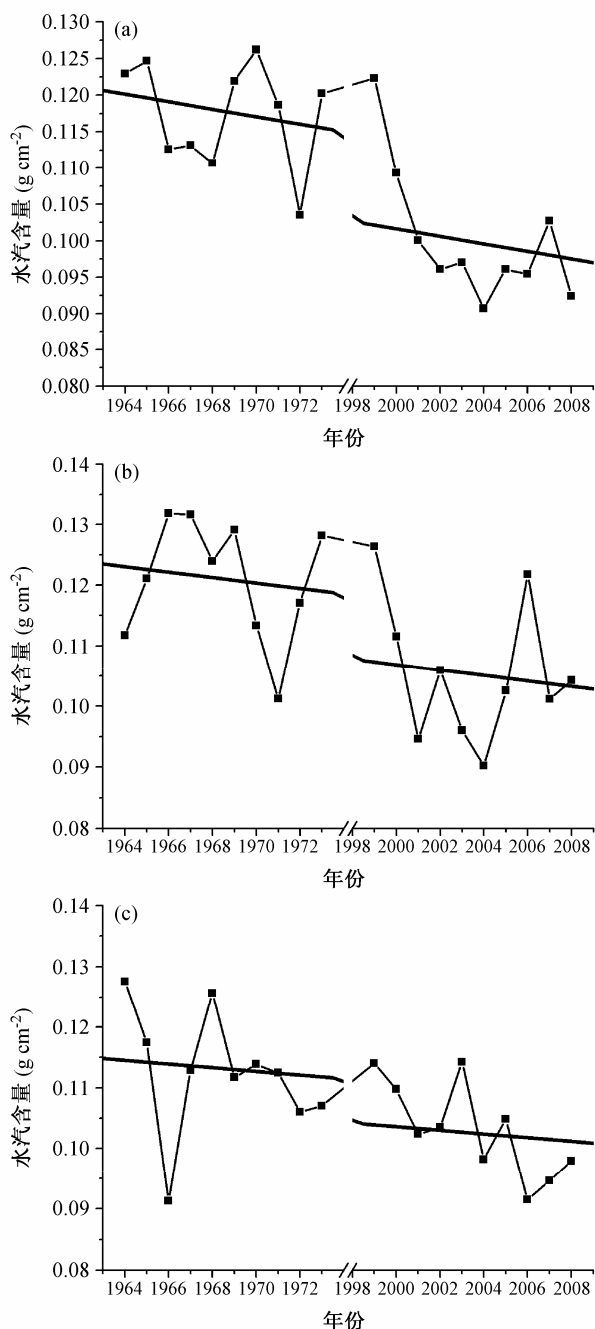


图7 同图5, 但为对流层高层(400~300 hPa)水汽含量时间序列曲线
Fig. 7 Same as Fig. 5, but for water vapor content in the higher troposphere (400-300 hPa)

流层低层水汽含量呈现正趋势, 中、高层呈现负趋势, 这对对流性降水的增加是有利的。一方面, “上干下湿”的层结状态更加明显, 有利于不稳定发展(朱乾根等, 1992), 促使对流天气发生; 另一方面, 低层水汽的增加为对流性降水提供更加充足的水汽来源, 有利于降水强度的加大。

5.2 大气稳定度的变化特征

大气稳定度是影响对流性天气发生发展的又

一重要因子。对流性天气一般发生在不稳定大气中(寿绍文, 2003)。大气稳定度指数是最直观地表示气层稳定程度的特征量, 这里选用稳定度指数分析增暖前后大气稳定度的差异。

实际天气分析中, 常采用700 hPa和850 hPa上的假相当位温之差作为判断大气稳定度的指数(周军, 1986)。大气稳定度的计算公式为:

$$I = \Delta\theta_{se} = \theta_{se700} - \theta_{se850}, \quad (4)$$

其中, I 表示大气稳定度, θ_{se} 表示各层的假相当位温 (θ_{se700} 和 θ_{se850} 分别表示 700 hPa 和 850 hPa 假相当位温)。 I 值越大说明气层越稳定, 当 $I < 0$ 时, 表示气层不稳定, 且 I 为负值时绝对值越大, 越不稳定。

利用 1964~1973 年、1999~2008 年 NCEP/NCAR 相对湿度、温度逐日资料, 计算得到前后 20 a 长江中下游地区各月不稳定格点平均百分比的时间序列如图 8 所示。从图中可以清晰地看出, 全球变暖后, 长江中下游地区 6、7 月各月不稳定格点所占的百分比为正趋势, 尤其以 6 月份的正趋势最为明显; 8 月份不稳定格点的百分比略有降低。前面讨论的 8 月中层的水汽含量有增加趋势, 因此 8 月份“上干下湿”的结构不如 6、7 月显著, 这可能与大气稳定度的变化存在联系。不稳定格点百分比的增加可以说明增暖期长江中下游地区气层的不稳定性较之正常期是逐渐增加的, 气层不稳定性的增加使得对流更加容易发生, 引发气层中不稳定能量释放, 形成对流性天气。

5.3 湿空气热焓的变化特征

湿空气热含量(简称热焓)就是其中干绝空气的热含量与水蒸气热含量之和, 它是表征湿空气能量的物理量。湿空气热焓越大, 空气中蕴含的能量就越多, 对流性天气发展的就越强烈。

为了计算上的便利, 以 1 kg 干绝热空气为基准。热焓是一个相对值, 计算热焓时必须有一个计算的起点, 一般以 0 °C 为起点, 称为基温。取 0 °C 时的空气热焓和液体热焓都为零, 所以空气的热焓只计算其显热部分, 而水蒸气热焓则包括水在 0 °C 时的汽化潜热和水蒸气在 0 °C 以上的显热。

根据以上原则, 湿空气的热焓为:

$$h = (1.01 + 1.88\gamma)t + 2500\gamma, \quad (5)$$

其中, 热焓 h 的单位为 K J kg^{-1} , t 为湿空气的温度(单位: °C), γ 为湿空气的含量, 即水汽的混合比(单位: kg kg^{-1})。

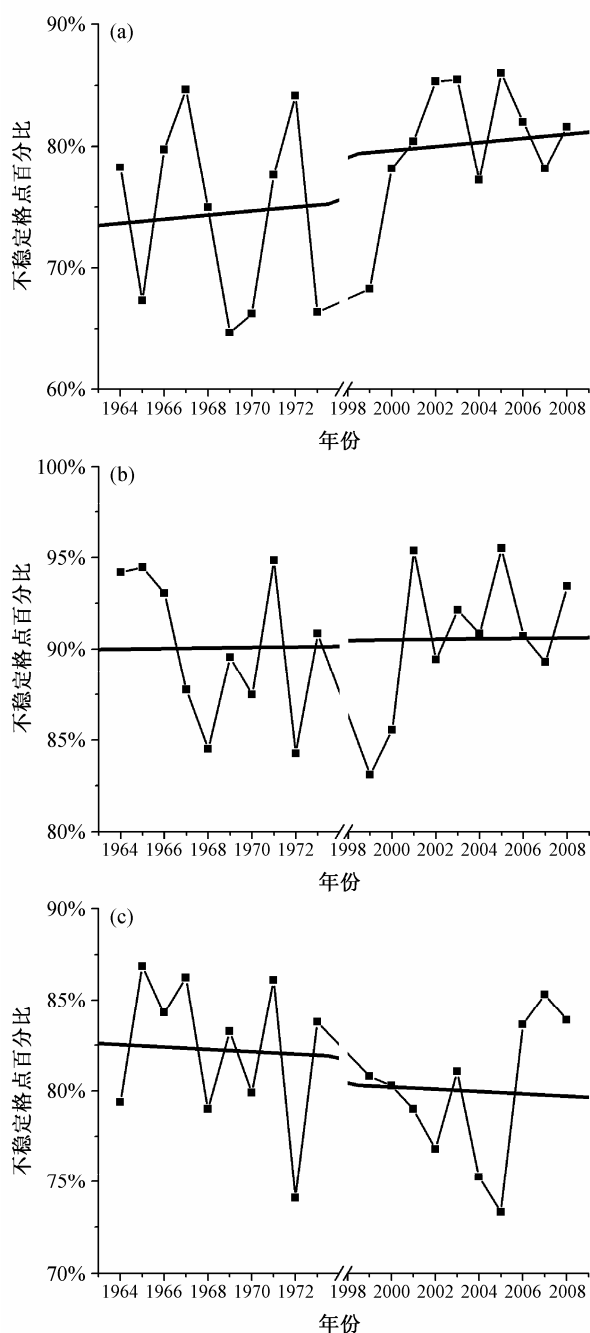


图8 长江中下游地区气候增暖前后不稳定格点百分比的时间序列（斜线代表线性回归趋势线）：(a) 6月；(b) 7月；(c) 8月

Fig. 8 The curve for temporal series of rate of the atmospheric instable grid point in the mid-lower reaches of the Yangtze River (the gradient-straight line refers to linear trend of the series): (a) June; (b) July; (c) August

运用以上公式，计算得到长江中下游地区各个格点上700、850、1000 hPa每日的热含量。为了判断增暖前后大气中热含量的变化情况，计算了1948~2009年6~8月各月各层的热含量的气候平均值（使用了逐月格点资料），并以此平均值为界，统计了增暖前后10 a每月高于此平均值的格点百分

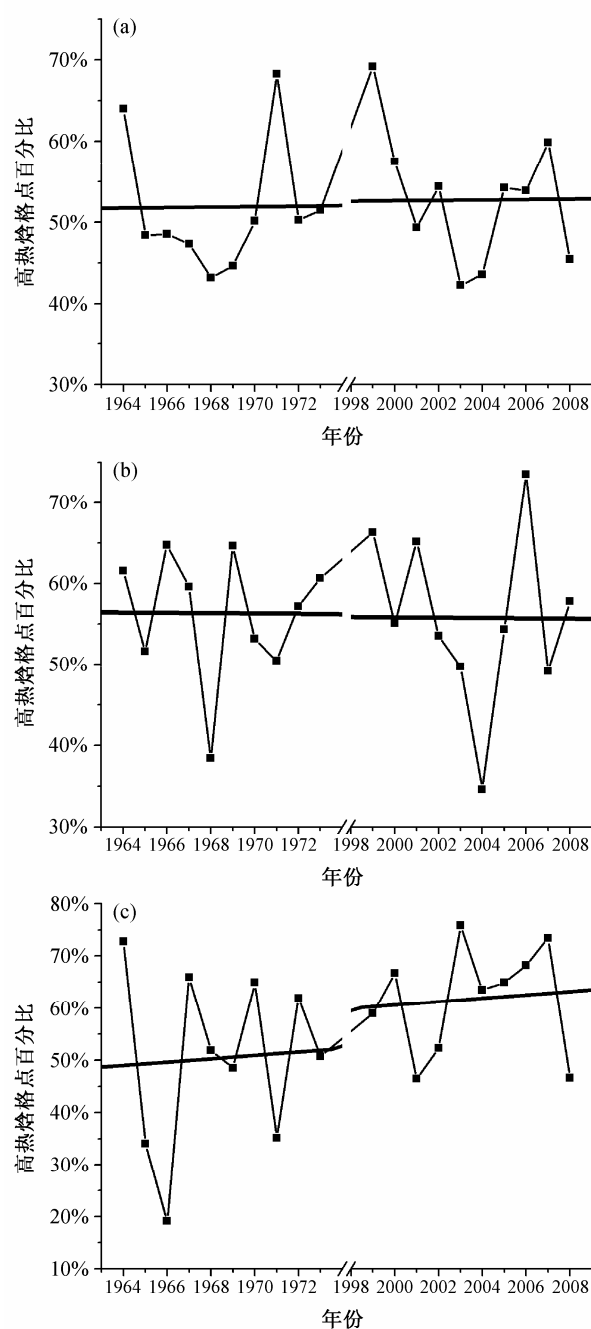


图9 700 hPa上增暖前后高热焓格点百分比时间序列（斜线为线性回归趋势线）：(a) 6月；(b) 7月；(c) 8月

Fig. 9 The curve for temporal series of rate of the high heat content grid point at 700 hPa (the gradient-straight line refers to linear trend of the series): (a) June; (b) July; (c) August

比及天数，文中称为“高热焓格点”。

图9、图10、图11分别给出了长江中下游地区700、850、1000 hPa正常期和增暖期高热焓格点百分比的时间序列曲线图及线性趋势线。

图9反映出根据选定的阈值，700 hPa上高热含量格点的百分率。除7月变化趋势不明显外，在其

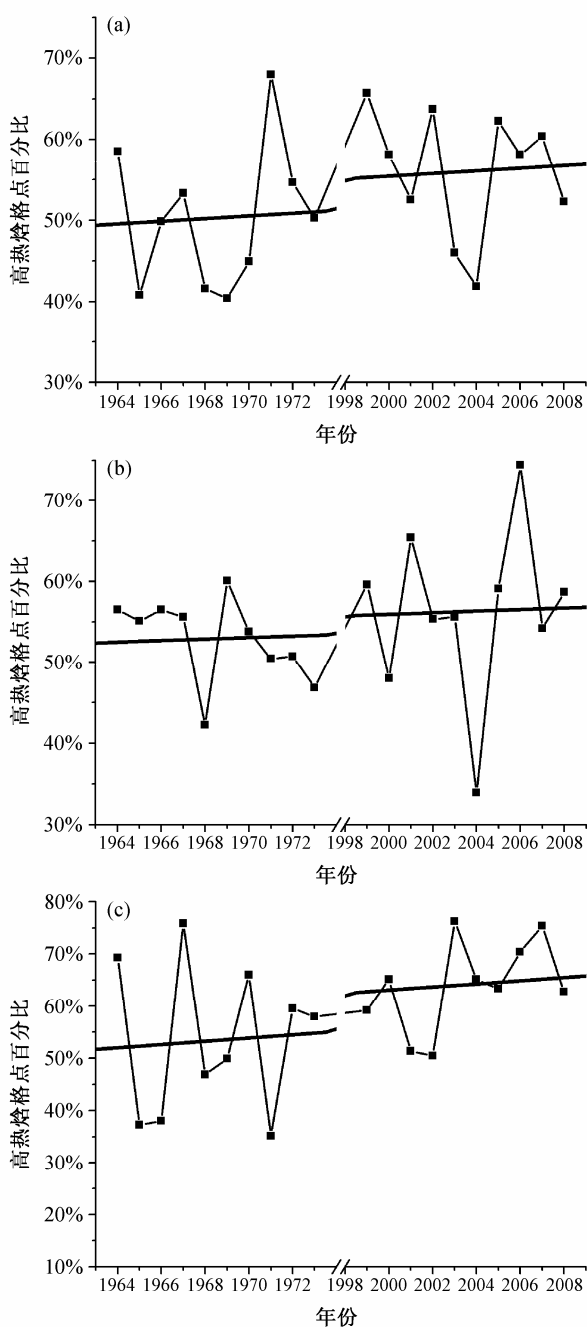


图10 同图9, 但为850 hPa

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for 850 hPa

他月份均略呈增长趋势, 其中以8月份的正趋势最为显著。从图10可以看到, 850 hPa高度上, 6~8月份的高热含量格点百分率均为正趋势, 8月份正趋势最为明显。图11中反映了1000 hPa上6~8月份都呈现明显的增长趋势, 以6、7月增长幅度最明显。综合3张图来看, 每月在各层上的趋势具有一定的一致性: 6、8月份大气热含量在各层均呈增长趋势, 尤以1000 hPa最为显著; 7月份热含量在850 hPa和1000 hPa上为明显正趋势, 但700 hPa上略有减少,

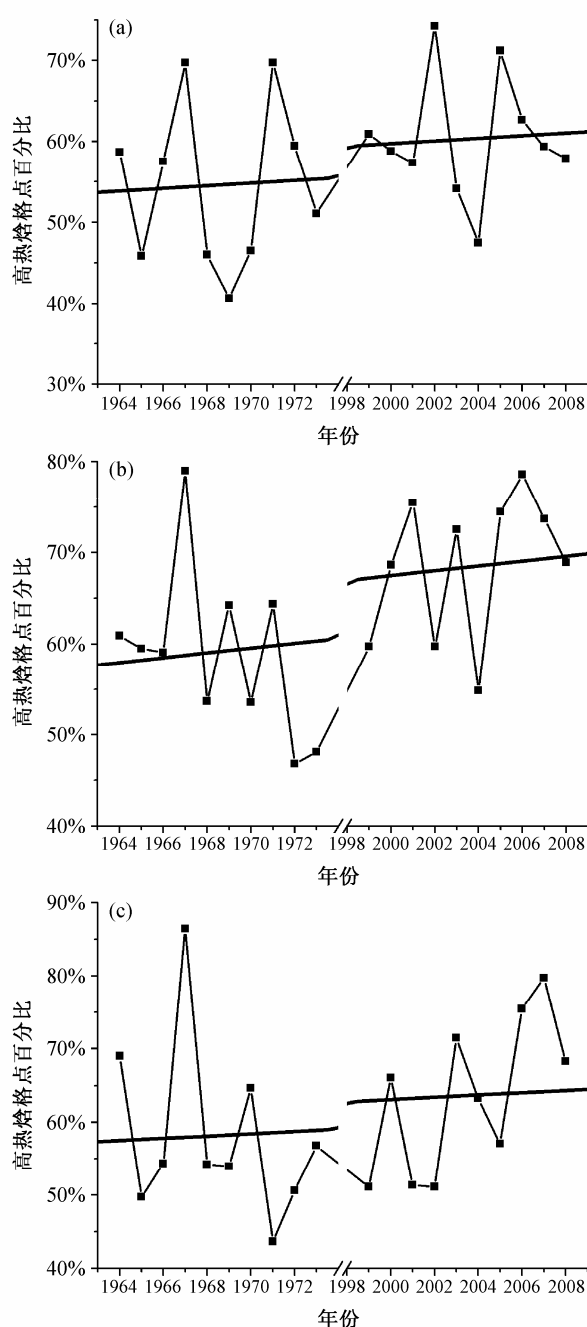


图11 同图9, 但为1000 hPa

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for 1000 hPa

所以7月份热含量总体是增加的; 同时, 每月在各层上热含量低值和高值出现的年份都十分相似, 这表明热含量在对流层低层各等压面上具有较为一致的变化特征。

6 结论

(1) 证实了近60多年来北半球增暖的总趋势。北半球气温从1960年代末开始缓慢上升, 但增温幅

度并不大; 1990年代起升温率显著增大。M-K突变检验显示北半球气候异常增暖的突变起始时段约位于1998年附近。北半球夏季气温的长期变化趋势及增暖突变年份与年平均气温一致。

(2) 对长江中下游地区夏季极端降水指数在增暖前后的年际变化特征进行了分析, 结果显示在全球增暖的大背景下, 长江中下游地区的夏季对流性降水频率和强度明显增大。增长的显著性空间分布是不均匀的。

(3) 全球变暖后, 长江中下游地区对流层低层水汽含量呈现正趋势, 中、高层呈现负趋势。这种变化对对流性降水的增加是有利的, 一方面, “上干下湿”的层结状态更加明显, 有利于不稳定发展, 促使对流天气发生; 另一方面, 低层水汽的增加为对流性降水提供更加充足的水汽来源, 有利于降水强度的加大。

(4) 增暖期 6、7 月长江中下游地区气层的不稳定性较之正常期是逐渐增加的, 气层不稳定性的增加使得对流更加容易发生, 引发气层中不稳定能量释放, 形成对流性天气。

(5) 长江中下游地区6、8月份大气热含量在各层均呈增长趋势; 7月份热含量总体是增加的。热含量在对流层低层各等压面上具有较为一致的变化特征。大气中热含量的增加有利于对流性天气强度的增强。

以上结论可以初步说明全球变暖可以通过改变这些影响因子的大小、强弱来使全球对流性降水的发生频率和强度发生变化的。这为进一步系统地研究温度升高后, 对流要素变化对对流性天气变化的影响机理和概念模型的建立奠定了基础。

本文仅分析了3个对流影响因子在增暖前后的变化特征, 并没有对它们在影响对流性天气过程中作用的大小进行讨论, 也没能给出具体的影响机制和概念模型。同时, 全球变暖背景下的对流影响因子远不止文中提到的这3个, 还包括环流形势、垂直风切变等, 这些因子的变化特征及对对流性天气的影响有待于分析。这些都是下一步需要深入进行的工作。

参考文献 (References)

- 蔡福, 李辑, 明惠青, 等. 2006. 沈阳地区对流层顶气候特征分析 [J]. 气象与环境学报, 22 (1): 11-16. Cai Fu, Li Yi, Ming Huiqing et al. 2006. Climatic characteristics of tropopause over Shenyang [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 22 (1): 11-16.
- Chan J C L, Liu K S. 2004. Global warming and western North Pacific typhoon activity from an observational perspective [J]. J. Climate, 17: 4590-4602.
- 陈辉, 施能, 王永波. 2001. 长江中下游气候的长期变化及基本态特征 [J]. 气象科学, 21 (1): 45-53. Chen Hui, Shi Neng, Wang Yongbo. 2001. Climate secular change and base state over the mid-lower reaches of Yangtze River [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 21 (1): 45-53.
- 陈洪斌, 范学花. 2007. 2006年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 100-112. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2007. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 100-112.
- 陈洪斌, 范学花. 2008. 2007 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 102-112. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2008. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 102-112.
- Cohen S J. 1990. Bringing the global warming issue closer to home: The challenge of regional impact studies [J]. American Meteorological Society, 71 (4): 520-526.
- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学, 16 (4): 482-493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 16 (4): 482-493.
- Gualdi S, Scoccimarro E, Navarra A. 2008. Changes in tropical cyclone activity due to global warming: Results from a high-resolution coupled general circulation model [J]. J. Climate, 21: 5204-5228.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1-785.
- Li X D, Zhu Y F, Qian W H. 2002. Spatiotemporal variations of summer rainfall over eastern China during 1880-1999 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (6): 1055-1068.
- 李玉林, 杨梅, 冯宏芳, 等. 2003. 江西省空中水汽量与降水效率特征分析 [J]. 江西气象科技, 26 (1): 25-29. Li Yulin, Yang Mei, Feng Hongfang, et al. 2003. Analysis of the amount of water vapor and efficiency of precipitation in Jiangxi Province [J]. Jiangxi Meteorology Science and Technology (in Chinese), 26 (1): 25-29.
- 刘小宁. 1999. 我国暴雨极端事件的气候变化特征 [J]. 灾害学, 14 (1): 55-59. Liu Xiaoning. 1999. Climatic characteristics of extremerain-storm events in China [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 14 (1): 55-59.
- 沈永平. 2007. IPCC WGI 第四次评估报告关于全球气候变化的科学要点 [J]. 冰川冻土, 29 (1): 156. Shen Yongping. 2007. Key results from summary for policymakers of IPCC WGI AR4 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 29 (1): 156.
- 寿绍文. 2003. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 141-145. Shou Shaowen. 2003. Mesoscale Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorology Press, 141-145.
- 宋燕, 季劲钧. 2005. 气候变暖的显著性检验以及温度场和降水场的时空分布特征 [J]. 气候和环境研究, 10 (2): 158-165. Song Yan, Ji

- Jinjun. 2005. The remarkable test of abrupt climatic warming and spatiotemporal distribution features of temperature and precipitation fields [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 158-165.
- 苏布达, 姜彤, 任国玉, 等. 2006. 长江流域1960~2004年极端强降水时空变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2 (1): 10-14. Su Buda, Jiang Tong, Ren Guoyu, et al. 2006. Observed trends of precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960 to 2004 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2 (1): 10-14.
- 汪方, 丁裕国, 范金松. 2002. 江苏夏季逐日降水极值统计特征诊断研究 [J]. 气象科学, 22 (4): 436-443. Wang Fang, Ding Yuguo, Fan Jinsong. 2002. The diagnosis research for extremumstatistical character of summer's daily precipitation in Jiangsu province [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 22 (4): 436-443.
- 王冀, 江志红, 严明良, 等. 2008. 1960~2005年长江中下游极端降水指数变化特征分析 [J]. 气象科学, 28 (4): 384-388. Wang Ji, Jiang Zhihong, Yan Mingliang, et al. 2008. Trends of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River valley of China during 1960-2005 [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (4): 384-388.
- 王绍武. 1994. 近百年气候变化与变率的诊断研究 [J]. 气象学报, 52 (3): 261-273. Wang Shaowu. 1994. Diagnostic studies on the climate change and variability for the period of 1880-1990 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (3): 261-273.
- 王绍武, 叶锦琳. 1995. 近百年全球气候变暖的分析 [J]. 大气科学, 19 (5): 545-553. Wang Shaowu, Ye Jinlin. 1995. An analysis of global warming during the last one hundred years [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 19 (5): 545-553.
- 徐雨晴, 苗秋菊, 沈永平. 2009. 2008年: 气候持续变暖, 极端事件频发 [J]. 气候变化研究进展, 5 (1): 56-60. Xu Yuqing, Miao Qiuju, Shen Yongping. 2009. The year 2008: Global warming continued, extreme events occurred frequently[J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (1): 56-60.
- 张永领, 程炳岩, 丁裕国. 2003. 黄淮地区降水极值统计特征的研究 [J]. 南京气象学院学报, 26 (1): 71-75. Zhang Yongling, Cheng Bingyan Ding Yuguo. 2003. Statistical features of rainfall extremes in Huang-Huai area [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (1): 71-75.
- 张永领, 高全洲, 丁裕国, 等. 2006. 长江流域夏季降水的时空特征及演变趋势分析 [J]. 热带气象学报, 22 (2): 162-168. Zhang Yongling, Gao Quanzhou, Ding Yuguo, et al. 2006. Analysis of time-spatial characteristics and evolutionary trends of summer precipitation in the Yangtze River catchment [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (2): 162-168.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 1992. 天气学原理和方法 [M]. 北京:气象出版社, 448pp. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen. 1992. The Weather Principles and Methods (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 448pp.
- 周军. 1986. 天气学诊断分析 [M]. 南京: 南京信息工程大学大气科学系, 111pp. Zhou Jun. 1986. Diagnosis of Weather (in Chinese) [M]. Nanjing: College of Atmospheric Science in Nanjing University of Information Science and Technology, 111pp.