

李强, 周锁铨, 李永华, 等. 三峡库区洪涝特征及其与大尺度环流的联系[J]. 大气科学学报, 2010, 33(4): 477-488.

Li Qiang, Zhou Suo-quan, Li Yong-hua, et al. Features of floods in the Three Gorges Reservoir Region and its relationship with large scale circulation [J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(4): 477-488.

## 三峡库区洪涝特征及其与大尺度环流的联系

李强<sup>1,2</sup>, 周锁铨<sup>2</sup>, 李永华<sup>2,3</sup>, 王中<sup>1</sup>, 高阳华<sup>3</sup>

(1. 重庆市气象台, 重庆 401147;

2. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 3. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147)

**摘要:** 利用三峡库区降水观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了 1980—2007 年三峡库区洪涝年际变化特征, 研究了三峡库区洪涝典型年份大尺度环流合成特征, 进一步讨论了水汽输送特征。近年来, 三峡库区年均洪涝、区域洪涝强度变化趋势不明显, 而区域性洪涝较为频繁; 乌拉尔山高压脊加强, 经向环流增强, 引导冷空气南下, 与低纬北上暖湿气流交汇, 三峡库区在以上环流背景下, 易于产生洪涝灾害; 蒙古高原, 以及我国东北地区的环流背景合成有差异, 三峡库区建库前典型洪涝年份较建库后环流异常更有利于降水; 水汽输送异常在三峡地区均有汇合, 建库前指示特征比三峡建库后大; 典型洪涝年 2004、2007 年以及典型洪涝事件中, 各个关键区水汽输送强度较弱。

**关键词:** 三峡库区; 洪涝指数; 关键区; 水汽输送

中图分类号: P467 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097(2010)04-0477-12

## Features of Floods in the Three Gorges Reservoir Region and Its Relationship with Large Scale Circulation

LI Qiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Suo-quan<sup>2</sup>, LI Yong-hua<sup>2,3</sup>, WANG Zhong<sup>1</sup>, GAO Yang-hua<sup>3</sup>

(1. Chongqing Weather Office, Chongqing 401147, China;

2. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China;

3. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Based on the observed precipitation data in the Three Gorges Reservoir Region and the NCEP/NCAR reanalysis data, the interannual variation features of the floods in this area during 1980—2007 were investigated and the large scale circulation in typical flood years were studied. The water vapor transportation features were further discussed. In recent years, there was no notable variation tendency in the annual mean flood intensity or the regional flood intensity but regional floods often occurred. It was apt to flood when the high pressure ridge over Ural strengthened and the meridional circulation was enhanced, which caused the cold air moving southward and the warm air moving northward converged in the Three Gorges Reservoir area. The large scale circulation composites were different in the Mongolia plateau and Northeast China. The circumfluence anomalies before the construction of the Three Gorges Reservoir were prone to cause rainfall. The water vapor transportation anomalies converged in the Three Gorges Reservoir region, but the amount of water vapor after the construction of the Three Gorges Reservoir was less than that in historical flood years (1980 and 1984). The water vapor transportations in the key areas were weak during the typical flood years (2004 and 2007).

**Key words:** Three Gorges Reservoir Region; flood index; key area; water vapor transportation

收稿日期: 2009-05-20; 改回日期: 2009-11-20

基金项目: 重庆市自然科学基金计划重点项目(2008BA0022); 中国气象局成都高原气象研究所开放基金项目(LPM200814); 重庆市气象局 2010 年科技计划项目(zl-201003)

作者简介: 李强(1982—), 男, 四川绵阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为天气预报、数值模拟, nuistlq@163.com.

## 0 引言

大尺度区域性降水对大气环流时空特征具有相应的响应<sup>[1-2]</sup>,而水汽作为降水的充分条件之一,经、纬向水汽输送季节性的变化对降水区域强度和落区分布具有重要影响<sup>[3-4]</sup>。源于印度洋季风爆发,经孟加拉湾和中南半岛的水汽,和南海越赤道水汽汇合,以及西太平洋的水汽对我国以及东亚旱涝具有较大影响<sup>[5-6]</sup>。高原东部及其邻近地区水汽输送主要来源于孟加拉湾、南海、西太平洋地区,且季风携带的水汽在高原东侧的进退能影响旱涝<sup>[7-8]</sup>;四川盆地西涝东旱、西旱东涝气候特征,不仅与大尺度环流背景关系密切,也与特殊的局地气候条件相关<sup>[9]</sup>。青藏高原的热力和动力作用对大气环流和我国天气、气候有重要影响<sup>[10-11]</sup>;同时,高原东部盆地是高原水汽及西南水汽进入长江中下游一个通道<sup>[12]</sup>;高原地形对南来水汽具有向东“转运”的作用,并且“转运”强弱对长江中下游旱涝具有重要影响<sup>[13]</sup>。

三峡地区地处西南地区东部,北邻秦岭高地,南接云贵高原,西连四川盆地,特殊的地理位置使得西南地区东部气候受热带季风、副热带季风,以及青藏高原环流系统影响,在以上环流系统作用下,易产生洪涝灾害。随着三峡库区的建成,水体下垫面面积大幅度增加产生的气候效应,与大尺度气候系统叠加的复杂过程,会导致局地气象灾害发生频率、程度、分布特征的变化<sup>[14-15]</sup>。近年来,局地的暴雨洪涝频发、程度严重,对区域经济和人民生活产生严重的影响。如2004年9月三峡库区出现大范围的持续性暴雨天气<sup>[16-17]</sup>;2007年7月,位于三峡库区上游的重庆西部地区遭受暴雨袭击,这两次暴雨过程持续时间长、范围广、强度大,由此造成的洪涝灾害极为严重。

科学认识三峡库区区域性气候变化特征,对于三峡库区以后的生产实际建设的具有重要的指导意义,本文主要研究三峡库区洪涝近30 a来降水气候特征,以及典型降水异常年份的大尺度环流背景特征,进一步研究洪涝年水汽输送特征,这对提高科学认识局地水体下垫面对区域降水变化的响应,对于更加精准预测局地天气、气候具有重要的现实意义。

## 1 研究区域

三峡库区是指三峡大坝建成后受回水影响,水库淹没区、移民搬迁、安置所涉及的行政区域。根据

长江三峡水库淹没范围,以及所在行政区域,三峡库区西起重庆江津区,东至湖北宜昌市。范围包括重庆市的江津区、长寿、涪陵、武隆、丰都、忠县、石柱、万州、开县、云阳、奉节、巫溪、巫山和重庆市都市9区(渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区和巴南区)22个县(市、区)及湖北省的巴东、秭归、兴山和宜昌4个县(市)。库区范围大致为 $105^{\circ}44' \sim 111^{\circ}39'E$ , $28^{\circ}32' \sim 31^{\circ}44'N$ ,总面积 $5.67 \text{ 万 km}^2$ ,其中淹没陆地面积 $600 \text{ km}^2$ 。

## 2 资料和方法

由于三峡库区范围主要以重庆地区为主,而且库区范围湖北段为峡谷地形,以及气温、降水气候特征和重庆库区范围基本相同<sup>[18]</sup>,属于我国西南亚热带地区气候特征<sup>[19]</sup>。高阳华等<sup>[20]</sup>在已有研究基础上,系统全面提出了适合重庆地区洪涝指标体系,研究了重庆地区近40 a来洪涝时空特征,基于三峡库区的行政区域以及气候特征,本研究中应用此洪涝指标。利用三峡库区范围1980—2007年21个气象站(表1)降水资料,应用以上洪涝指标,对三峡库区范围内近30 a来的旱涝特征,进行分析研究,利用NCEP/NCAR的再分析资料,研究近30 a来的三峡库区范围内典型洪涝年的环流特征。

为了反映库区每年洪涝的总体强度,定义如下:

$$I_{NH} = 0.7M_1 + 0.8M_2 + 0.9M_3,$$

$$I_{QS} = \sum I_{NH}/M。$$

其中: $I_{NH}$ 为单站洪涝指数; $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 分别表示单站一般、重、严重洪涝的发生次数; $I_{QS}$ 为库区年均洪涝指数; $\sum I_{NH}$ 为一年中库区发生洪涝台站的单站年洪涝指数之和; $M$ 为台站总数。单站一般、重和严重洪涝对应的指数分别为0.7、0.8、0.9。库区年均洪涝等级指标为:一般洪涝年, $0.2 \leq I_{QS} < 0.4$ ;较多洪涝年, $0.4 \leq I_{QS} < 0.5$ ;多洪涝年, $I_{QS} \geq 0.5$ 。

区域性洪涝指一次成片出现的洪涝灾害情况,其计算公式为

$$I_{QY} = 0.7N_1 + 0.8N_2 + 0.9N_3。$$

其中: $I_{QY}$ 为区域洪涝指数; $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 分别为一次区域性洪涝过程中发生一般、重和严重洪涝的站数。上式为一次洪涝过程的洪涝指数,但许多年份会发生多次区域性洪涝,为了反映区域性洪涝的年度发生情况,定义年度区域性洪涝指数为

$$I_{QY,n} = \sum (0.9 + 1.1K)I_{QY}/(2K)。$$

表1 三峡库区21个气象站

Table 1 The twenty-one observation stations in the Three Gorges Reservoir Region

| 站名 | 经度       | 纬度      | 站名  | 经度       | 纬度      | 站名 | 经度       | 纬度      |
|----|----------|---------|-----|----------|---------|----|----------|---------|
| 开县 | 108°26'E | 31°12'N | 石柱  | 108°07'E | 30°00'N | 涪陵 | 107°25'E | 29°45'N |
| 云阳 | 108°54'E | 30°58'N | 北碚  | 106°27'E | 29°51'N | 丰都 | 107°41'E | 29°52'N |
| 巫溪 | 109°37'E | 31°24'N | 渝北  | 106°38'E | 29°43'N | 武隆 | 107°45'E | 29°19'N |
| 奉节 | 109°30'E | 31°03'N | 沙坪坝 | 106°28'E | 29°35'N | 宜昌 | 111°18'E | 30°42'N |
| 巫山 | 109°52'E | 31°04'N | 江津  | 106°17'E | 29°17'N | 巴东 | 110°24'E | 31°24'N |
| 万州 | 108°24'E | 30°46'N | 巴南  | 106°31'E | 29°23'N | 秭归 | 110°41'E | 31°00'N |
| 忠县 | 108°02'E | 30°18'N | 长寿  | 107°24'E | 29°50'N | 兴山 | 110°46'E | 31°14'N |

其中: $I_{QY,n}$ 为年度区域性洪涝指数; $K$ 为年内区域性洪涝发生次数。相应的区域性洪涝等级指标为:一般区域性洪涝年, $2.8 \leq I_{QY,n} < 4.5$ ;重区域性洪涝年, $4.5 \leq I_{QY,n} < 7.0$ ;严重区域性洪涝年, $I_{QY,n} \geq 7.0$ 。

### 3 三峡库区洪涝年际变化特征

图1是三峡库区1980—2007年年均洪涝指数年际变化,库区范围内年均洪涝指数年际变化有差异。1982年、1998年是洪涝指数较大年份,指数值相同,均为0.67,达到多洪涝年份洪涝等级。洪涝较多年份有1983、1989、1999年,洪涝指数分别为0.47、0.45、0.44。就近30a来洪涝指数变化来看,20世纪80年代前期除1981年外,洪涝指数较大,洪涝程度较重,多为洪涝发生年份;80年代中后期到90年代中期洪涝指数年际变化较大,其中1988—1993年大致是洪涝年和基本无洪涝年交替出现,但总体上,此时段洪涝指数较小,洪涝程度较弱;90年代后期,洪涝程度较重,多为洪涝发生年份;自21世纪初以来,洪涝指数年际变化较大,2001—2007年洪涝指数,程度相对较弱,多为一般

洪涝年份。

图2清楚地反映了不同等级洪涝发生频数年际变化,一般洪涝发生频数在研究时间段内每年是多于其他等级的洪涝频数,表明三峡库区范围内主要以一般洪涝为主,且一般洪涝发生的频数与洪涝指数的变化趋势具有较好的一致性,相关系数为0.903,通过信度为0.001相关性检验,重洪涝、严重洪涝的发生频数相对较小,1982年重洪涝、严重洪涝频数较大,分别发生了6次、4次,其次是1998年,重洪涝、严重洪涝发生5次、1次,其余的一些年份重洪涝、严重洪涝频数较小。2003年以来一般洪涝频数较大,重洪涝、严重洪涝频数变化不是很大。

图3是三峡库区区域洪涝指数年际变化,区域洪涝指数和年均洪涝指数趋势比较一致。但在一些特殊年份两者之间差异较大,1982、1998年为年均多洪涝年份,两者年均洪涝指数相同,而区域洪涝指数1982年比1998年偏大,达到区域性严重洪涝等级,该年3次洪涝过程中,有15个站发生区域性洪涝,1998年2次区域洪涝过程,只有10个站发生区域性洪涝。2001年以来,除2006年没有出现区域洪涝现象,其他年份每年都有区域洪涝发生,区域洪

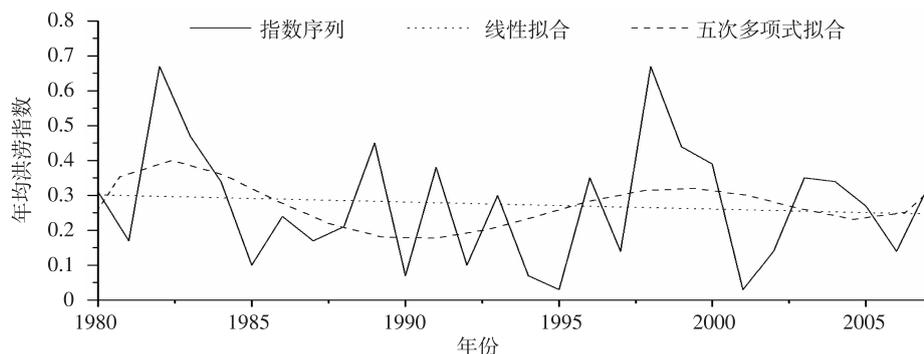


图1 1980—2007年三峡库区年均洪涝指数的年际变化

Fig. 1 Interannual variation of annual mean flood index in the Three Gorges Reservoir Region from 1980 to 2007

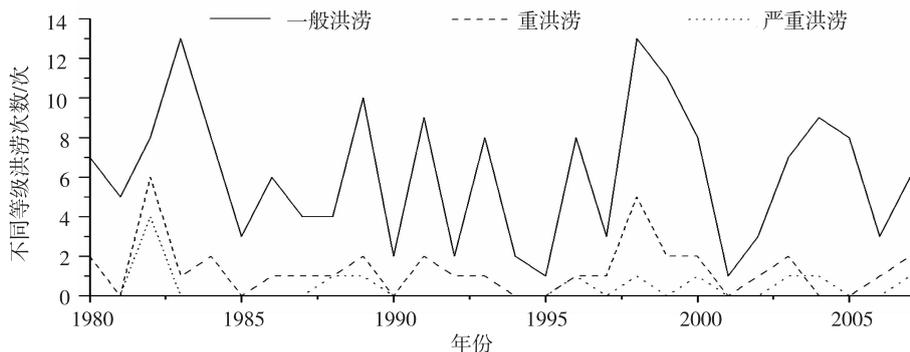


图 2 不同等级洪涝发生频数的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of the flood frequency in different ranks

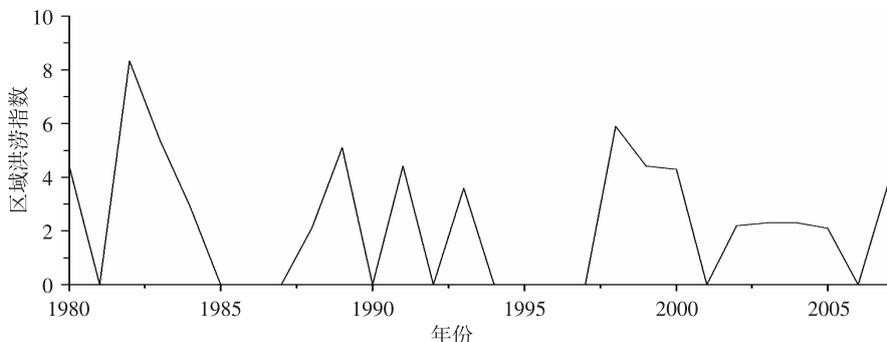


图 3 1980—2007 年三峡库区区域洪涝指数的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of regional flood index in the Three Gorges Reservoir Region from 1980 to 2007

涝较为频繁,强度相对与上世纪 90 年代末较弱,且区域洪涝指数较一致,强度相当。

整体来看,2001 年以来,库区年均洪涝指数变化不大,且相对 90 年代后期是减弱的。而自三峡开始蓄水以来,即 2003 年以来,年均洪涝指数变化不大,总体趋于平稳,且近几年来年均洪涝指数较小,洪涝等级大致都为一般洪涝,与此前历史上洪涝情况比较,除 1982、1998 年以外,共有 8 年次洪涝指数达到这段时间洪涝指数最大值;不同洪涝等级频数上,2004 年一般洪涝出现次数最多,总共出现 9 次,在此前共有 11 年次接近或超过该频数,重洪涝、严重洪涝频数也没有明显的变化;自 2003 年以来,除 2006 年没有出现区域洪涝现象,其他年份区域洪涝指数趋势变化不是很明显,趋于平稳,2007 年区域洪涝指数最大,而近 30 a 来有 8 年次出现过该等级以上的洪涝指数情况。以上分析表明:在库区建立以来,三峡库区范围内,年均洪涝强度指数没有明显的增强;在近 30 a 的历史内,出现过多次与近年来洪涝等级相当的洪涝;不同等级洪涝频数也没有出现明显的增加,历史上都出现过相当的洪涝频数;区域洪涝指数近年来变化也不明显。而相对于 20 世

纪 90 年代后期,年均洪涝和区域洪涝指数都呈减弱的趋势,表明洪涝强度相对减弱。

#### 4 典型洪涝年的环流背景特征

由于三峡库区所在西南地区东部气候特征,降水主要集中在 5—9 月。图 4 三峡库区 1980—2007 年 5—9 月降水标准化距平年际变化,可以看到,近 30 a 降水具有明显的年际变化特征,20 世纪 80 年代前期降水偏多,80 年代后期降水偏少,90 年代前中期降水整体偏少,90 年代后期到本世纪降水年际变化较大。从 1980—2007 年 5—9 月降水标准化距平,确定 1980、1982、1983、1984、1986、1998、2003、2004、2007 年 9 个洪涝年份(降水标准化距平百分率大于等于 60%),同样确定 1981、1985、1990、1992、1994、1995、1997、2001、2006 年 9 个干旱年份(降水标准化距平百分率小于等于 -60%)。洪涝年份,必定有与之相对应的大气环流特征。洪涝发生时间不同,强度不同与之相应的大气环流特征也不同,基于此,洪涝年环流特征研究中,选取 1980 年、1984 年、2004 年、2007 年,降水距平百分率分别为 94%、78%、75%、93%,年均洪涝指数分别为

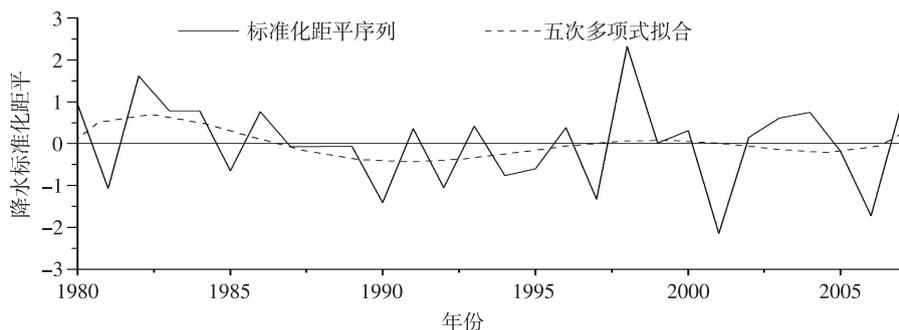


图4 三峡库区1980—2007年5—9月降水标准化距平的年际变化

Fig. 4 Interannual variation of the standard departure rainfall in the Three Gorges Reservoir Region from 1980 to 2007

0.31、0.34、0.34、0.32, 区域洪涝指数分别为4.4、2.9、2.3、3.8, 三者比较一致。以上选取的洪涝典型年份发生时间上主要在5—9月这个时间段内, 且具有三峡建库前后的代表性, 下面将对这些典型洪涝年的大气环流背景、水汽输送特征进行分析。

#### 4.1 典型洪涝年500 hPa 高度场合成分析

图5是三峡库区9个洪涝年与9个干旱年500 hPa 位势高度场差值, 可以看到, 高纬度位势高度偏高, 乌拉尔山地区、巴尔喀什湖地区上空位势高度偏高, 乌拉尔山地区通过了0.1信度 $T$ 检验, 乌拉尔山高压脊显著加强; 贝加尔湖以北西伯利亚地区有较弱位势高度偏低区域; 我国河套地区上空的位势高度偏低, 表明此处低槽加深; 印度半岛、孟加拉湾、中南半岛, 以及我国南海和东南沿海地区位势高度场偏高。乌拉尔山高压脊加强, 经向环流加强, 脊前西北气流引导冷空气南下侵入四川盆地, 有利于西风槽和西南涡发展, 且来自北方的冷空气受西北槽的影响, 继续向南推进到长江中上游地区; 而低纬度, 受孟加拉湾、南海、热带太平洋高度场偏高影响, 能够把这些地区暖湿气流向北输送到我国内陆地区。在以上气流共同作用下, 南下的冷空气和北上的暖湿气流能够在三峡库区汇合, 有利于三峡库区降水, 易于发生洪涝灾害。

图6是1980、1984年5—9月500 hPa 高度场合成及距平场合成(气候态为1978—2007年, 下同), 高纬度西伯利亚地区为高压系统, 东西伯利亚地区为低压系统, 大致为“一脊一槽”环流, 距平场上相应地表现为“+ -”距平波列; 中纬度乌拉尔山以东的咸海地区为高压系统, 而蒙古高原, 及我国北部大部分地区为低压系统, 日本海地区一直延伸到我国东海为高压系统, 距平场上为“+ - +”距平波列; 低纬度印度半岛为低压系统, 但距平场上变化不

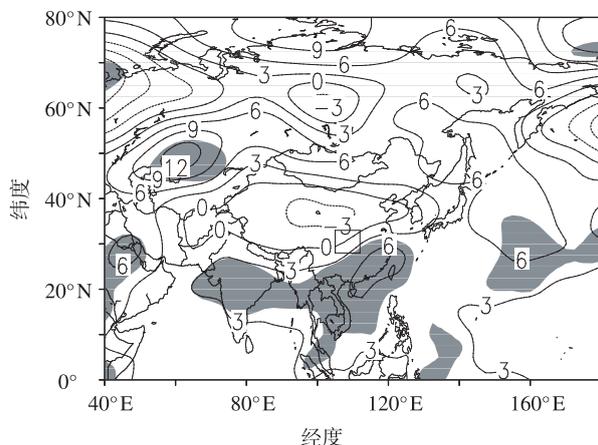


图5 三峡库区洪涝年与干旱年500 hPa 位势高度场差值(阴影区表示通过0.1信度的 $T$ 检验, 图中109°E、30°N附近矩形为三峡库区位置, 下同)

Fig. 5 Difference in geopotential height between flood and drought years in the Three Gorges Reservoir Region at 500 hPa (The shaded area denotes the significance of 90% confidence level in  $T$  test; the rectangle indicates the location of the Three Gorges Reservoir Region, the same as follows)

明显。

2004、2007年5—9月500 hPa 高度场合成及距平场合成(图7), 高纬度西伯利亚地区为低压槽, 距平场上, 相应地为负距平; 中纬度乌拉尔山地区为高压系统, 距平场上位势高度偏高, 为正距平, 而蒙古高原、我国东北部地区, 及朝鲜半岛和日本海为受高压系统影响, 距平场为正距平; 低纬度印度半岛还为低压系统, 西太平洋副热带高压移动明显, 距平场较常年变化不明显。

从以上分析可以得到, 历史上两个典型洪涝年份高度场的合成距平, 乌拉尔山地区由于高压脊加强表现为正距平, 三峡地区以北为低压槽为负距平,

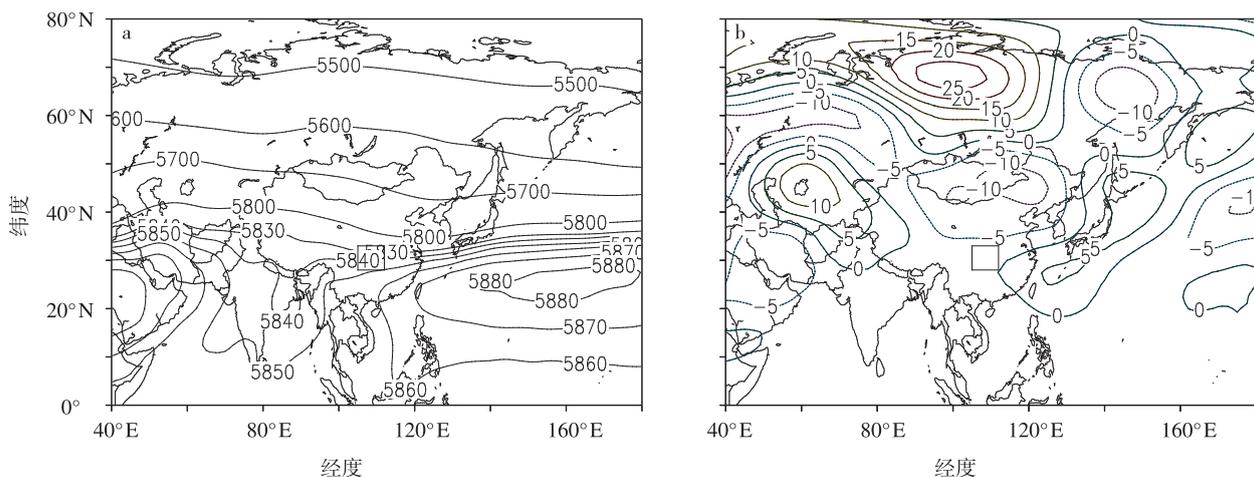


图 6 1980 和 1984 年 5—9 月 500 hPa 高度场合成(a)及距平场合成(b)(单位:gpm)

Fig. 6 The composites of (a) geopotential height and (b) height anomaly at 500 hPa from May to September in 1980 and 1984 (units: gpm)

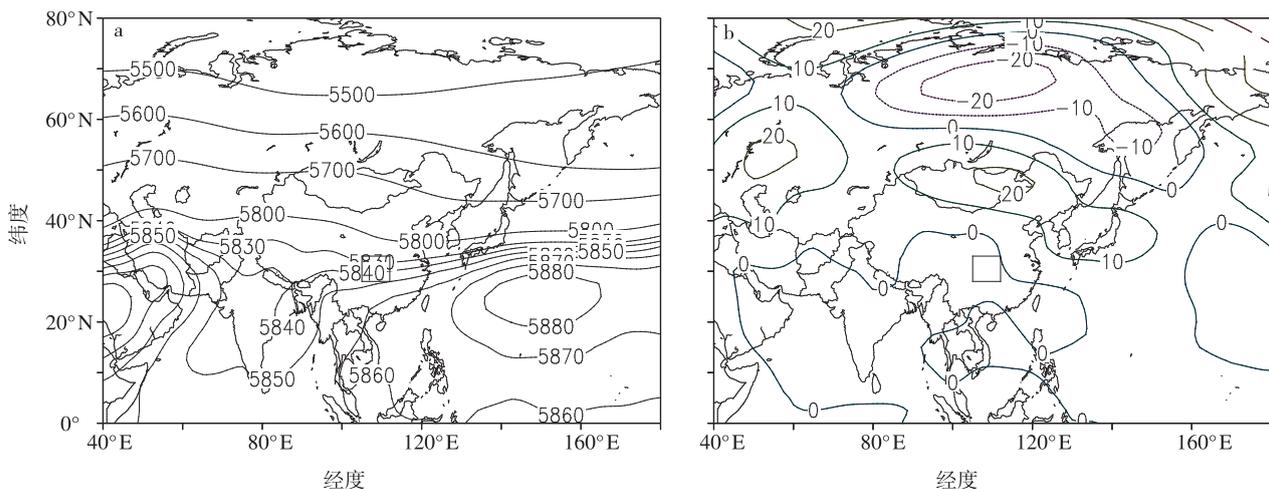


图 7 2004 和 2007 年 5—9 月 500 hPa 高度场合成(a)及距平场合成(b)(单位:gpm)

Fig. 7 The composites of (a) geopotential height and (b) height anomaly at 500 hPa from May to September in 2004 and 2007 (units: gpm)

与洪涝环流背景较一致,有利于三峡库区降水;三峡建库以后两个典型洪涝年份 2004、2007 年距平场合成乌拉尔山也为正距平,而蒙古高原,以及我国北部为正距平。乌拉尔山的高压脊加强有利于经向环流加强,有利于把高纬度的冷空气引导南下,西北地区的低压槽的槽后西北气流进一步引导冷空气入侵到三峡地区,蒙古及我国东北部地区的正距平阻塞了冷空气的继续向南推进,是不利于三峡地区的降水发生。下面将就典型洪涝年大气环流和水汽输送进行分析。

#### 4.2 典型洪涝年份及水汽输送合成分析

源于印度洋,经孟加拉湾和中南半岛,与来自南海的气流汇合,流向我国内陆大部分地区,这支气流

继续向北分为三支:一支流向西南地区东部,一支经华北流向我国东北地区,还有一支经华东流向黄海(图略)。典型洪涝年份 1980、1984 年 700 hPa 流场距平场合成(图 8a)上,我国东部沿海洋面上空为反气旋性环流异常,在该异常环流影响着我国南部大部分地区,三峡地区为偏南气流;蒙古直到我国东北为反气旋性环流异常,有利于把冷空气引导入侵我国西北地区;华北及河套地区呈弱的反气旋性环流异常,进一步把蒙古南下入侵的冷空气继续向南输送至三峡地区。三峡地区主要以偏南气流为主,有利于把南部的暖湿水汽输送到该地区,当有北方的冷空气入侵时,易于产生降水,易于发生洪涝灾害。

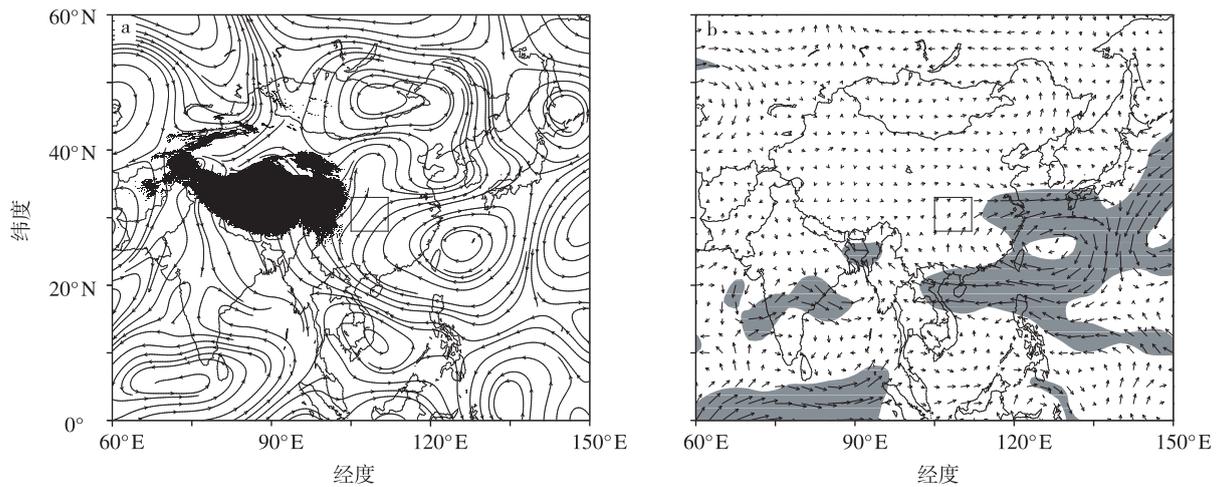


图8 1980和1984年5—9月700 hPa等压面上流场距平合成(a)及水汽通量矢量距平场合成(b;单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 8 The composites of (a) anomalous flow field and (b) water vapor flux vector anomaly at 700 hPa from May to September in 1980 and 1984 (units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

整层水汽输送上,源于印度洋经孟加拉湾和中南半岛的水汽,以及南半球越赤道输送水汽,与西太平洋的水汽输送汇合后向北输送至我国华南、西南、华东地区(图略),对我国的大部分地区降水具有重要影响。1980、1984年距平合成(图8b)上可以看到,由于受东南沿海洋面上反气旋性异常环流影响,我国南部主要受偏南风环流控制,强大的偏南风环流把西太平洋、南海及孟加拉湾的水汽输送到华南,以及我国西南地区内陆,三峡库区在以上水汽输送影响下,形成西南—东北走向的水汽输送。

从典型雨涝年2004、2007年700 hPa流场距平场合成上(图9a)可以看到:河套地区为气旋性异常

环流,此异常环流把蒙古地区反气旋性异常环流形成南下气流向南输送,即北方冷空气向南输送;孟加拉湾地区为气旋性距平环流,把来自印度洋的水汽由孟加拉湾的气流,经缅甸,沿高原地形边缘匍匐到西南地区,在高原地形作用下,该异常环流靠近高原边缘的气流表现转向特征,转向向东输送到三峡地区。以上南下气流和转向气流的异常,在三峡地区汇合,产生切变,当西南涡东移,以及局地的水汽供应时,该地区易于产生降水。

分析三峡建库后两个洪涝年整层水汽输送合成(图9b)可知,由于受到孟加拉湾异常环流的影响,来自孟加拉湾的少许水汽被输送到三峡地区,与南

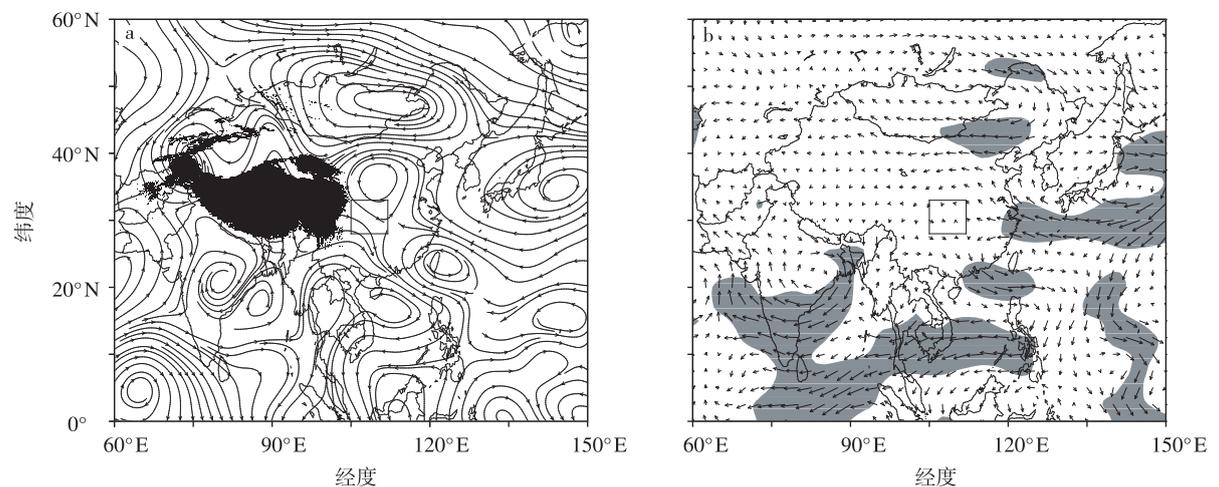


图9 2004和2007年5—9月700 hPa等压面上流场距平合成(a)及水汽通量矢量距平场合成(b;单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 9 The composites of (a) anomalous flow field and (b) water vapor flux vector anomaly at 700 hPa from May to September in 2004 and 2007 (units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

下冷空气汇合,有利于形成三峡地区降水。而从水汽输送指示特征上,建库前的水汽输送特征更加明显,更有利于三峡地区降水。

综上所述,三峡建库前后典型洪涝年环流合成,三峡地区建库前环流主要以偏南风为主,有利于三峡地区水汽输送,而建库后的三峡地区气流异常汇合,均有利于产生降水;相应地,水汽输送特征上,三峡建库前在强盛的偏南气流控制下,水汽输送明显较建库以后强,配合大气环流合成异常,建库前的冷空气入侵更加明显,更有利于降水,有利于该地洪涝发生。

## 5 关键区水汽源输送特征分析

来自孟加拉湾、南海、西太平洋和中纬度西风带水汽输送对我国降水影响较大,这些地区的水汽输送不仅对高原东部及邻近地区的气候降水有重要作用,而且也能成为异常强降水最主要的水汽输送源。周晓霞等<sup>[21]</sup>研究了不同水汽通道源与华北汛期水汽输送的时空特征及其与降水的关系。考虑三峡库区的水汽源,确定以下 3 个水汽输送关键区: $P_1$  关键区:西南经向水汽关键区( $100 \sim 108.5^\circ\text{E}$  平均); $P_2$  关键区:西太平洋经向水汽关键区( $108.5 \sim 120^\circ\text{E}$  平均); $P_3$  关键区:华南纬向水汽关键区( $25 \sim 35^\circ\text{N}$  平均), $P_1$ 、 $P_2$  关键区经向输送反映低纬南来水汽对三峡库区的水汽贡献,建立  $P_1$ 、 $P_2$  关键区与三峡库区降水之间的关系,相关系数分别为 0.415、0.569 分别通过了 0.02、0.001 信度检验,表明以上关键区能反映三峡库区水汽输送源,能代表三峡库区及西南地区东部水汽输送特征。 $P_1$  关键区表示了来自孟加拉湾和南海汇合西南水汽输送对三峡库区水汽贡献; $P_2$  关键区显示了来自副热带高压西太平洋、南海地区的东南水汽输送对三峡库区的水汽贡献; $P_3$  关键区反映了西太平洋水汽,及西南地区水汽输送特征相互作用特征。

图 10a 清楚的反映了  $P_1$  关键区水汽输送 1980—2007 年年际变化, $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  特征线反映了来自孟加拉湾和南海汇合水汽北扩特征,三峡库区洪涝年份特征线均北扩到  $30^\circ\text{N}$  附近,1980、1984 年特征线位于  $30^\circ\text{N}$  附近,水汽输送明显,2004、2007 年  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  特征线均在  $30^\circ\text{N}$  以南,水汽输送大值区(阴影区)1980、1984 年与特征线具有较好的匹配关系,位于  $30^\circ\text{N}$  附近,2004、2007 年均位于  $20^\circ\text{N}$  以南,并未到达三峡地区。洪涝年份  $P_2$  关键区  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  特征线大都北扩

到  $30^\circ\text{N}$  以北,1980、1984 年特征线配合水汽输送大值区(阴影区)位于  $30^\circ\text{N}$  附近,而 2004 年特征线和水汽输送大值区位于  $20^\circ\text{N}$  以南,2007 年特征线位于  $30^\circ\text{N}$  附近,但水汽输送大值区位于  $20^\circ\text{N}$  附近,没北扩到三峡地区。据研究<sup>[22]</sup>:20 世纪 80 年代以来,来自孟加拉湾、高原上空的偏西风水汽较少在盆地西部辐合,大量的水汽只能到达长江流域地区;同时,来自南海西太平洋地区的水汽输送向西的扩展也减弱,90 年代,大量水汽只能到达长江中下游地区以及西南地区东部。从  $P_3$  关键区(图 10c)上可以发现,20 世纪末到 2003 年,来自西太平洋的水汽输送出现明显断裂(图 10c 中  $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  特征线),表明西太平洋的水汽输送西进较弱,主要以西部输送水汽为主。2004、2007 年西太平洋水汽输送  $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  特征线位于  $110^\circ\text{E}$  附近,而 1980、1984 年大致位于  $106^\circ\text{E}$  附近,西进水汽输送较强。综上所述,典型洪涝年 2004、2007 年相对与历史上洪涝强度相当于 1980、1984 年水汽输送较弱。下面进一步讨论典型洪涝年 2004、2007 年水汽输送特征。

季风环流作为水汽输送载体,季风活动将影响大尺度水汽输送场的分布和水汽收支状况,其强弱和进退不仅制约着东亚夏季主要雨带的位置,而且影响了旱涝区域,东亚季风周期爆发、北扩、西进、南撤,水汽特征线具有相应的周期变化<sup>[23]</sup>。 $P_1$  关键区(图 11a)6 月初  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  特征线北扩到  $25^\circ\text{N}$ ,一直维持到 8 月第 1 候,此后特征线有所南撤,出现了间歇性断裂,8 月第 5 候特征线迅速北扩,此后缓慢南退。整个过程中,特征线有 2 次阶段性的迅速北跳过程,7 月第 4 候北跳到  $40^\circ\text{N}$  附近,以及 8 月第 1 候到第 5 候特征线一致在  $40^\circ\text{N}$  附近维持,相应的水汽输送大值区(阴影区)也显著地北跳。 $P_2$  关键区(图 11b),5 月第 5 候,随着季风活跃, $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  特征线迅速北进  $25^\circ\text{N}$ ;由于西太平洋副高的影响,7 月第 1 候特征线逐渐北扩,第 5 候到达  $40^\circ\text{N}$  以北,水汽输送大值区也到达  $40^\circ\text{N}$  附近,此后逐渐南撤。 $P_3$  关键区,由于印度季风爆发,5 月、6 月特征线西进、东扩有所表现,7 月强大的水汽西进、东扩输送导致特征线的贯通,水汽输送大值区明显汇合,这种过程大致持续到 9 月中旬。综上所述,不同关键区水汽输送有明显的特征, $P_1$  关键区作为来自孟加拉湾、南海水汽的“中转站”,只有当水汽输送异常强大时,水汽才能到达这一地区,然后向北输送; $P_2$  关键区水汽输送与西太平洋副高活动

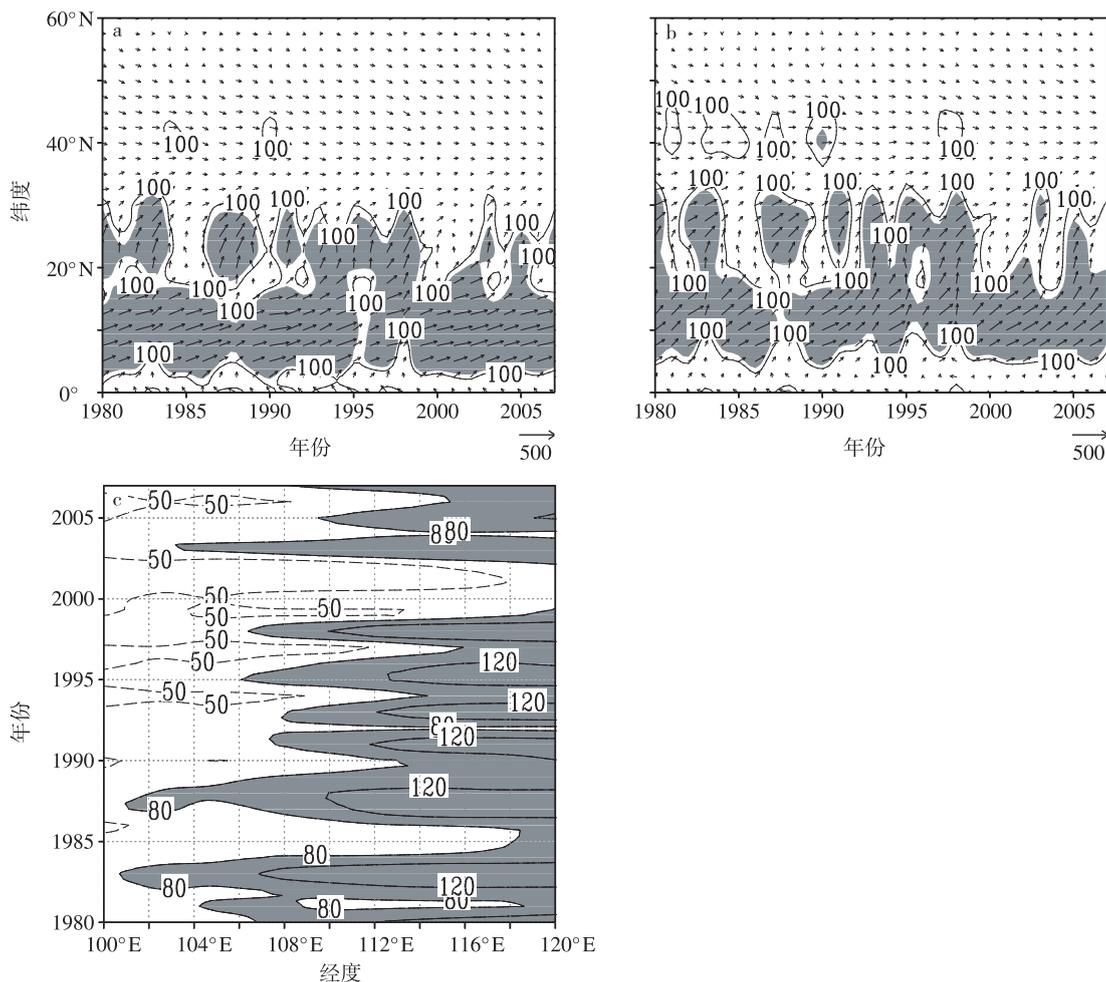


图 10 1980—2007 年 5—9 月各关键区上整层水汽输送通量时间剖面(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;图 a、b 中实线表示  $Q_\phi = 100$ ,阴影表示  $Q_\phi \geq 120$ ;图 c 中虚线表示  $Q_\phi = 50$ ,阴影表示  $Q_\phi \geq 80$ )  
a.  $100 \sim 108.5^\circ\text{E}$ ; b.  $108.5 \sim 120^\circ\text{E}$ ; c.  $25 \sim 35^\circ\text{N}$

Fig. 10 Time-section of vertically integrated water vapor transportation ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in the key areas of (a)  $100\text{--}108.5^\circ\text{E}$ , (b)  $108.5\text{--}120^\circ\text{E}$  and (c)  $25\text{--}35^\circ\text{N}$  from May to September in 1980—2007 (Solid lines indicates  $Q_\phi = 100$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 120$  in (a) and (b). Dashed line indicates  $Q_\phi = 50$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 80$  in (c))

紧密联系,且水汽输送较大; $P_3$ 关键区由于受到  $P_1$ 、 $P_2$ 关键区的影响,也具有相应特征。2004 年 9 月第 1 候三峡库区出现了洪涝天气过程, $P_1$ 、 $P_2$ 关键区水汽输送特征线北扩到  $32.5^\circ\text{N}$  附近,水汽输送方向上,北上水汽输送不明显,主要为南下水汽输送,水汽交汇出现  $25^\circ\text{N}$  附近,以上表明水汽输送对洪涝事件并没有明显表征,表明可能具有局地因素对此次洪涝事件产生影响。

2007 年 4—10 月不同水汽关键区水汽输送(图 12), $P_1$ 关键区  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 特征线 5 月第 4 候迅速北进以后,一直维持在  $30^\circ\text{N}$  附近,到 10 月下旬才有

较明显地南退。这期间,特征线有间歇性的 3 次较显著的北扩,而水汽输送大值区在 6 月第 6 候至 7 月第 5 候北进比较明显。 $P_2$ 关键区上,  $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 特征线 5 月第 6 候以后一直维持  $30^\circ\text{N}$  以北,北上水汽输送较为明显,尤其 6 月第 5 候至 7 月第 5 候水汽输送大值区,能够到达  $30^\circ\text{N}$  附近。 $P_3$ 关键区,5 月中旬,特征线缓慢东扩,到 6 月下旬与西太平洋的水汽输送贯通,该过程一直维持到 8 月末。从以上关键区水汽输送可以看到,在 2007 年 7 月中下旬三峡库区强降水过程中, $P_1$ 关键区、 $P_2$ 关键区水汽输送大值区特征较显著而特征线的北扩不明显。

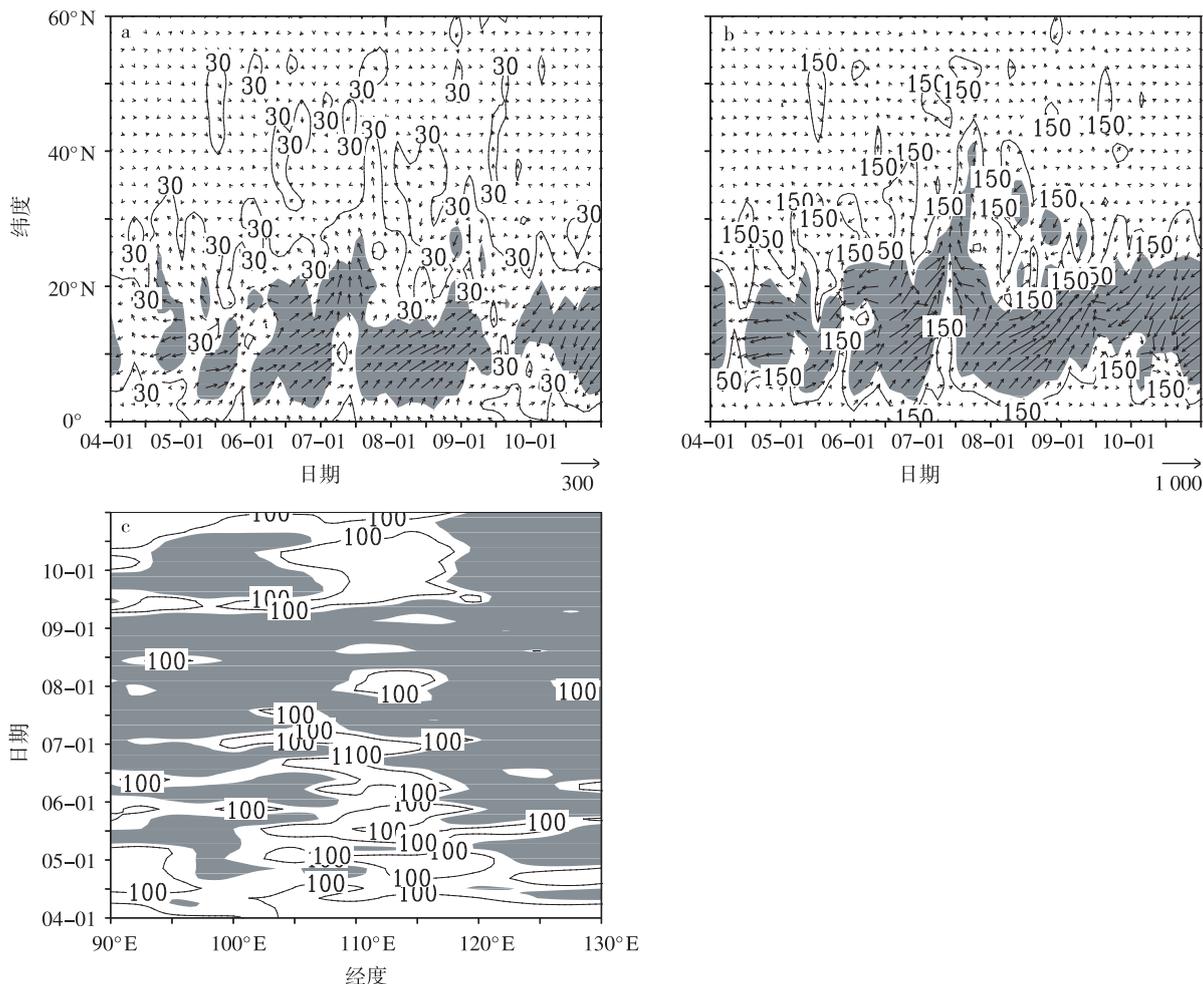


图 11 2004 年 4—10 月各关键区候平均的垂直积分的水汽输送时间剖面(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;图 a 中实线表示  $Q_\phi = 30$ , 阴影表示  $Q_\phi \geq 80$ ;图 b 中实线表示  $Q_\phi = 150$ , 阴影表示  $Q_\phi \geq 300$ ;图 c 中实线表示  $Q_\phi = 100$ , 阴影表示  $Q_\phi \geq 150$ ) a.  $100 \sim 108.5^\circ\text{E}$ ; b.  $108.5 \sim 120^\circ\text{E}$ ; c.  $25 \sim 35^\circ\text{N}$

Fig. 11 Time-section of vertically integrated water vapor transportation ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along (a)  $100 \sim 108.5^\circ\text{E}$ , (b)  $108.5 \sim 120^\circ\text{E}$  and (c)  $25 \sim 35^\circ\text{N}$  from April to October in 2004 (Solid lines indicate  $Q_\phi = 30$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 80$  in (a). Solid lines indicate  $Q_\phi = 150$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 300$  in (b). Solid lines indicate  $Q_\phi = 100$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 150$  in (c))

## 6 结论与讨论

本文分析三峡库区 1980—2007 年年均洪涝变化、区域洪涝变化特征,研究了典型洪涝年份主要降水期的环流背景特征,以及水汽输送差异,主要得出以下结论:

(1) 三峡库区近 30 a 来,20 世纪 80 年代前期,年均洪涝程度偏强;80 年代中后期到 90 年代中期,洪涝程度较弱;90 年代后期,洪涝程度较重;自 21 世纪初以来,洪涝年际差异较大,但相对于 20 世纪 90 年代末是减弱的。区域洪涝,近年来较为频繁,强度变化不明显。

(2) 乌拉尔山地区位势高度场,高压脊加强,经

向性环流加强,有利于高纬度冷空气南下,以及受西北气流引导,冷空气继续向南推进到三峡库区;而低纬度,孟加拉湾、热带太平洋高度场偏高,有利于暖湿水汽输送到我国内陆。在以上气流共同作用下,南下的冷空气和北上的暖湿气流能够在三峡库区交汇,有利于库区降水,易于发生洪涝灾害。

(3) 洪涝指数相当的典型洪涝年份 1980、1984 年,以及建库以后洪涝年份 2004、2007 年 500 hPa 高度场合成在蒙古高原及我国东北地区有一定差异,历史上环流合成更有利于三峡库区降水;环流特征上,建库前主要为偏南气流异常,建库后存在一支南下异常气流,由此水汽输送特征上,历史上水汽输送更加明显,更有利于库区降水。

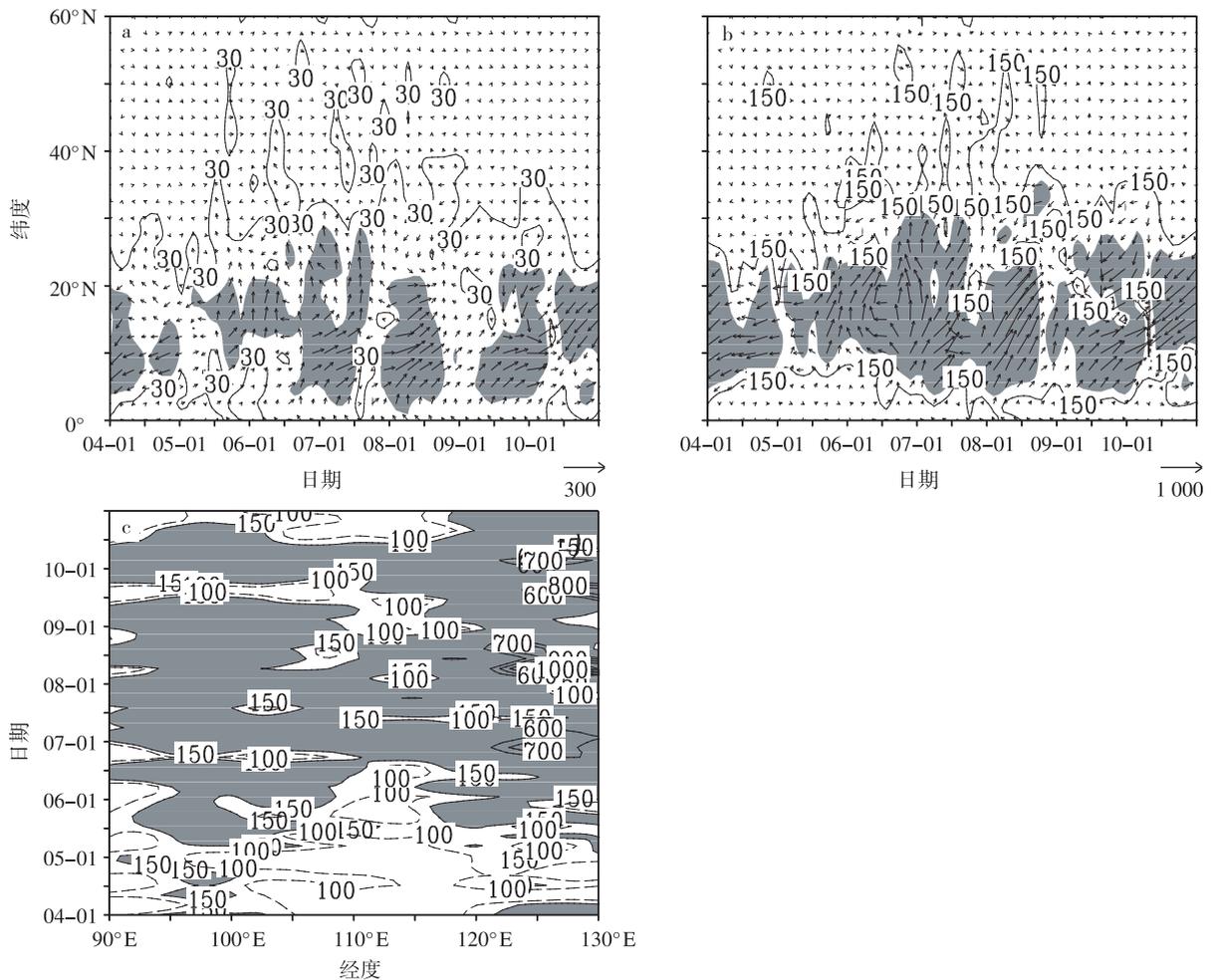


图 12 2007 年 4—10 月各关键区候平均的垂直积分的水汽输送时间剖面(单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 图 a 中实线表示  $Q_\phi = 30$ , 阴影表示  $Q_\phi \geq 80$ ; 图 b 中实线表示  $Q_\phi = 150$ , 阴影表示  $Q_\phi \geq 300$ ; 图 c 中实线表示  $Q_\phi = 100$ , 阴影表示  $Q_\phi \geq 150$ )  
a.  $100 \sim 108.5^\circ\text{E}$ ; b.  $108.5 \sim 120^\circ\text{E}$ ; c.  $25 \sim 35^\circ\text{N}$

Fig. 12 Time-section of vertically integrated water vapor transportation ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along (a)  $100\text{--}108.5^\circ\text{E}$ , (b)  $108.5\text{--}120^\circ\text{E}$  and (c)  $25\text{--}35^\circ\text{N}$  from April to October in 2007 (Solid lines indicate  $Q_\phi = 30$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 80$  in (a). Solid lines indicate  $Q_\phi = 150$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 300$  in (b). Solid lines indicate  $Q_\phi = 100$  and the shaded areas denote  $Q_\phi \geq 150$  in (c))

(4) 洪涝年份, 不同水汽关键区年际变化有显著差异。各水汽关键区特征线表现出与洪涝年际变化一致的特性; 典型洪涝年 2004、2007 年, 各水汽关键区特征线有显著候变化特征, 而在强降水候时期, 水汽指示特征并不明显。

三峡库区由于地处气候敏感区, 局地地形较复杂, 以及受外来系统等不确定因素影响, 使得该地区天气、气候较复杂, 不同洪涝过程中的局地下垫面区域效应需要进一步深入研究。本文就三峡库区近 30 a 来洪涝特征进行了研究, 得出了一些有意义的结果, 但就水汽输送的局地特征量等, 尚需高分辨率观测资料进行系统详尽的水汽收支计算。

## 参考文献:

- [1] Phillips I D, Mcgregor G R. Western European water vapor flux-Southwest England rainfall associations[J]. Journal of Hydrometeorology, 2001, 2(5): 505-524.
- [2] Jiang Zhihong, Chen G T-J, Wu M-C. Large-scale circulation patterns associated with heavy spring rain events over Taiwan in strong ENSO and non-ENSO years[J]. Mon Wea Rev, 2003, 131(8): 1769-1782.
- [3] Zhu Yong, Newell R E, Read W G. Factors controlling upper-troposphere water vapor[J]. J Climate, 2000, 13(4): 836-848.
- [4] Evans J P. Changes in water vapor transport and the production of precipitation in the Eastern Fertile Crescent as a result of global warming [J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(6): 1390-1401.
- [5] 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原一季风水汽输送“大三

- 角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 257-266.
- [6] 陈湘雅, 周锁铨, 周兵. 2007年南海夏季风的爆发过程[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(1): 71-79.
- [7] 周长艳, 李跃清, 李薇. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 880-888.
- [8] 蒋兴文, 李跃清. 长江流域地区水汽输送及其对旱涝影响研究综述[J]. 气象科学, 2009, 29(1): 138-142.
- [9] 朱艳峰, 宇如聪. 川西地区夏季降水的年际变化特征及与大尺度环流的联系[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1045-1056.
- [10] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 278-288.
- [11] 李跃清. 青藏高原上空环流变化与其东侧旱涝异常分析[J]. 大气科学, 2000, 24(4): 470-476.
- [12] 蒋兴文, 李跃清, 李春, 等. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 476-484.
- [13] 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 93-99.
- [14] 叶香, 陆维松, 张天宇, 等. 近46a重庆汛期极端降水量异常特征[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 646-654.
- [15] 张强, 王有民, 祝昌汉. 长江三峡局地气候监测系统与设计研究[J]. 气象, 2004, 30(9): 31-35.
- [16] 周国兵, 沈桐立, 韩余. 重庆“9·4”特大暴雨天气过程数值模拟分析[J]. 气象科学, 2006, 26(5): 572-577.
- [17] 杜楠, 钟玮, 陆汉城, 等. 一次四川暴雨过程的非线性对流一不对称不稳定分析[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(3): 308-316.
- [18] 孙士型, 奉承平, 居志刚. 三峡坝区气候特征分析[J]. 中国三峡建设, 2002(6): 22-23.
- [19] 杨荆安, 陈正洪. 三峡坝区区域性气候特征[J]. 气象科技, 2002, 30(5): 292-299.
- [20] 高国华, 冉荣生, 唐云辉, 等. 重庆市洪涝指标及其发生规律研究[J]. 西南农业大学学报, 2002, 24(6): 551-554.
- [21] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 影响华北汛期降水的水汽输送过程[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 345-357.
- [22] 周长艳, 李跃清, 彭俊. 高原东侧川渝盆地降水与水资源特征及变化[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1217-1226.
- [23] 蔡学湛, 温珍治, 扬义文. 东亚夏季风异常大气环流遥相关及其对我国降水的影响[J]. 气象科学, 2009, 29(1): 46-51.

(责任编辑: 倪东鸿)