

黄河三门峡水库—小浪底水库间夏季降水量 年际变化及水汽形势分析

张胜军¹ 陈怀亮² 翁永辉¹

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081; 2 河南省气象科学研究所,郑州 450003)

摘要 利用 1960~1999 年全国 600 个站月平均降水资料,对黄河三门峡水库—小浪底水库间的夏季降水总量年际变化进行了统计分析,并应用功率谱诊断方法提取了夏季各月降水的振荡周期。在此基础上,选取了黄河三门峡水库—小浪底水库间降水量多与少的年份,利用 NCEP 再分析资料研究了其上空的水汽变化以及水汽输送量变化。结果表明,黄河三门峡水库—小浪底水库间降水量多的年份,其上空为较为明显的水汽辐合;降水量比较少的年份,其上空为明显的水汽辐散。选取多雨年(1982 年)及少雨年(1997 年),结合 NCEP 再分析资料以及 T_{BB} 资料,进一步验证了上述结论。

关键词 降水量 水汽输送 云顶亮温 黄河

引言

中国重要灾害频度分析^[1]表明:黄河流域旱涝灾害发生频繁,已成为中国之心腹大患之一。长期以来,气象学家对其旱涝成因及规律进行了充分深入的研究。叶笃正等做了长江黄河流域旱涝规律和成因研究^[2],胡鞍钢等研究了长江、黄河流域近 40 年大旱大涝时空特点及 20 世纪 90 年代趋势预测^[3],卢敬华等研究了长江黄河流域上、中、下游汛期旱涝的气候特征^[4],杨志刚等对近年来黄河下游断流的干旱背景进行了分析^[5]。随着 2001 年黄河小浪底水库的建成,配合其上游三门峡水库,黄河下游防洪标准由 60 年一遇提高到千年一遇,因此小浪底水库成为防御黄河下游特大洪水的一张“王牌”。做好三门峡水库—小浪底水库间(以下简称为黄河三—小间)的降水监测与预报,将有利于小浪底水库的储、排水调度,以及防洪、防凌、减淤、兼顾供水、灌溉、发电等各方面的综合利用。

1 资料及诊断方法

本文所使用的云顶亮温为气象卫星辐射亮度温度,是气象卫星红外探测通道获取的云顶和无云或

少云区地球表面的向外辐射值,通过应用普朗克函数处理,转换成云顶或地球表面的黑体辐射亮度温度(Black-Body Temperature,表示为 T_{BB})。在无云或少云区, T_{BB} 是地表黑体辐射温度;在云区, T_{BB} 是云顶黑体辐射温度, T_{BB} 越低,表明云顶越高,对流越旺盛,因此它较好地显示了云的存在以及云处于发展演变中的一些显著特征。国内专家在对大量强对流降水云团的云图特征进行分析发现^[6~8],降水与云顶温度等云相关特征量有着显著的相关性,而且在夏季和热带地区“热带辐合带”通常与 -10 对应,可以根据 T_{BB} 的演变推断天气系统的强度、活动以及可能引起的相应天气现象和降水变化,因此本文把它作为检验对流分布以及降水的一个指标。另外该资料在中长期天气的诊断分析研究中也得到了较为广泛的应用^[9,10],如果将该资料合理应用到模式当中可以有效地提高模式的模拟能力^[11~13]。本文使用的 T_{BB} 包括 1980~1997 年数据,时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。在分析中还使用了美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气科学研究中心(NCAR)合作收集整理的 NCEP/NCAR Reanalysis Data(NCEP 再分析资料),其水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,垂直方向为 17 层,以及 1960~1999

国家科技部社会公益研究专项(2002DIB10100)资助

作者简介:张胜军,男,1971 年生,博士,副研究员,主要从事中尺度动力学研究,Email: zhangsj@cams.cma.gov.cn

收稿日期:2005 年 7 月 10 日;定稿日期:2005 年 9 月 20 日

年全国 600 个站月平均降水量。分析中同时引入了提取时间振荡周期的功率谱、相关系数以及 9 点平滑滤波分析。功率谱,是根据谱密度与自相关函数互为傅里叶变换的重要性质,通过自相关函数做连续功率谱估计。如对一时间序列 x ,最大滞后时间长度为 m 的自相关系数:

$$r(j) = \frac{1}{m-j} \sum_{t=1}^{n-j} \frac{x_t - \bar{x}}{s} \frac{x_{t+j} - \bar{x}}{s} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中 $\bar{x}$ 为序列的均值, s 为序列的标准差。

由下式得到不同波数 k 的粗谱估计值:

$$S(k) = \frac{1}{m} r(0) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} r(j) \cos \frac{k\pi j}{m} + r(m) \cos k\pi \quad (k = 0, 1, \dots, m) \quad (2)$$

在实际计算中考虑端点特性,一般用下列形式:

$$\begin{aligned} S(0) &= \frac{1}{2m} r(0) - r(m) + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m-1} r(j) \\ S(k) &= \frac{1}{m} r(0) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} r(j) \cos \frac{k\pi j}{m} + r(m) \cos k\pi \\ S(m) &= \frac{1}{2m} r(0) + (-1)^m r(m) + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m-1} (-1)^j r(j) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $r(j)$ 表示第 j 个时间间隔上的相关函数,最大滞后时间长度 m 是给定的,在已知序列样本量为 n 的情况下,功率谱估计随 m 的不同而变化。

上述方法得到的谱估计与真实谱存在一定误差,因而对粗谱估计需要作平滑处理,以便得到连续性的谱值。常用 Hanning 平滑系数来进行平滑。

$$\begin{aligned} S(0) &= 0.5 S(0) + 0.5 S(1) \\ S(k) &= 0.25 S(k-1) + 0.5 S(k) + 0.25 S(k+1) \\ S(m) &= 0.5 S(m-1) + 0.5 S(m) \end{aligned} \quad (4)$$

对谱估计作显著性检验,为了确定谱值在哪个波段最突出,并了解该谱值的统计意义,需求一个标准过程谱以便比较。标准有 2 种情况:

(1) 红噪音标准谱:

$$S_{0k} = S \frac{1 - r(1)^2}{1 + r(1)^2 + 2r(1)\cos \frac{\pi k}{m}} \quad (5)$$

其中 S 为 $m+1$ 个谱估计值的均值,即

$$S = \frac{1}{2m} [S(0) + S(m)] + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m-1} S(k) \quad (6)$$

(2) 白噪音标准谱: $S_{0k} = S$

如果序列的滞后自相关系数 $r(1)$ 为较大值,表示序列具有持续性,用红噪音标准谱检验。若 $r(1)$ 接近 0 或为负值时,则序列无持续性,用白噪音标准谱检验^[14]。

2 黄河三—小间夏季降水的年际变化

黄河流域的洪水主要由暴雨形成,发生时间为 6~10 月,其中中下游的大洪水和特大洪水发生时间一般集中在 7~8 月,利用该区域 5 个站 1960~1999 年 6~8 月平均降水资料对黄河三—小间夏季降水总量进行了统计分析。

图 1 给出了 1960~1999 年黄河三—小间夏季降水的年际变化,可以看到,最大降水发生在 1982 年,5 站平均降水量达到 516.3 mm,最小降水发生在 1997 年,5 站平均仅为 161.5 mm。为了进一步了解月平均降水的年变化,对黄河三—小间夏季各月降水时间序列进行功率谱分析,提取其年变化的振荡周期。分析结果表明,黄河三—小间 6 月降水存在着一个 3~4 年的显著振荡周期(图略);而 7 月降水变化无显著振荡周期(图略);8 月降水则存在着 6 年和 3 年两个显著振荡周期(图 2)。通过功率谱提取振荡周期的方法可以对黄河三—小间夏降水总量变化做一简单估计,对水库的蓄、排水提供一定的参考。

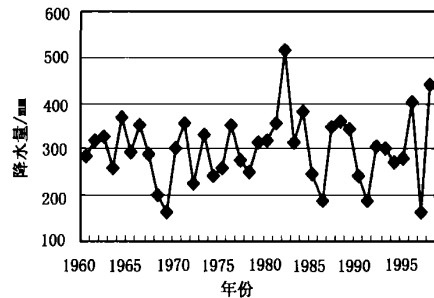


图 1 1960~1999 年黄河三—小间夏季降水年际变化

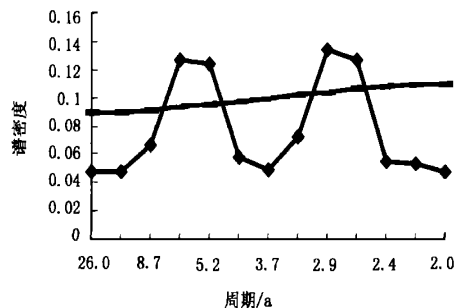


图 2 黄河三—小间 8 月月平均降水功率谱
(粗实线为信度超过 95% 的红噪音检验谱)

3 黄河三—小间夏季多、少雨年水汽形势

3.1 黄河三—小间夏季多、少雨年整体水汽形势

降水量的多少与局地水汽量以及周围水汽向该地的运输密切相关,因此了解某一地区的水汽变化可以为该地区的降水变化提供较为准确的预测。一般来讲,大气中整层水汽含量可根据各层比湿 q (p) 进行计算,即:

$$Q = - \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_z} q(p) dp$$

式中 p_0 和 p_z 为大气底层和顶层气压。若考虑纬向风速 u 和经向风速 v ,则大气中整层纬向水汽输送量为:

$$Q_\lambda = - \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_z} q(p) u dp$$

大气中整层经向水汽输送量为:

$$Q_\phi = - \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_z} q(p) v dp$$

大气中整层水汽输送量的计算公式为:

$$Q_T = - \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_z} q(p) |V| dp$$

选取黄河三—小间降水量多的年份(1982、1984、1996、1998年)及降水量相对少的年份(1969、1986、1991、1997年),计算了整层水汽输送量,计算中根据资料中水汽垂直分布特点, p_0 取1000 hPa, p_z 取300 hPa。

图3给出了黄河三—小间降水量多年(a)与少年(b)的整层水汽输送量。如果单纯从水汽输送量来看,黄河三—小间上空的水汽输送量在降水量多与少的年份并没有明显的变化,水汽输送流场(qV)上二者流型也比较一致(图略)。但如果进一步对水汽输送流场做9点平滑滤波处理,从滤波场上可以清楚的看到,降水量多的年份(图4a),黄河三—小间上空水汽基本是上是辐合的,其上空产生明显的水汽堆积,有利于降水的发生。降水量相对少的年份(图4b),黄河三—小间上空为明显的水汽辐散,导致该地区降水量明显减少。

3.2 黄河三—小间夏季多、少雨年个例水汽形势分析

为了更好地分析黄河三—小间旱涝年形势,选取了黄河三—小间夏季多雨年(1982年)和少雨年(1997年),同时考虑到黄河三—小间洪水与特大洪水集中在每年的7~8月,本文的背景分析也重点放在7月和8月。

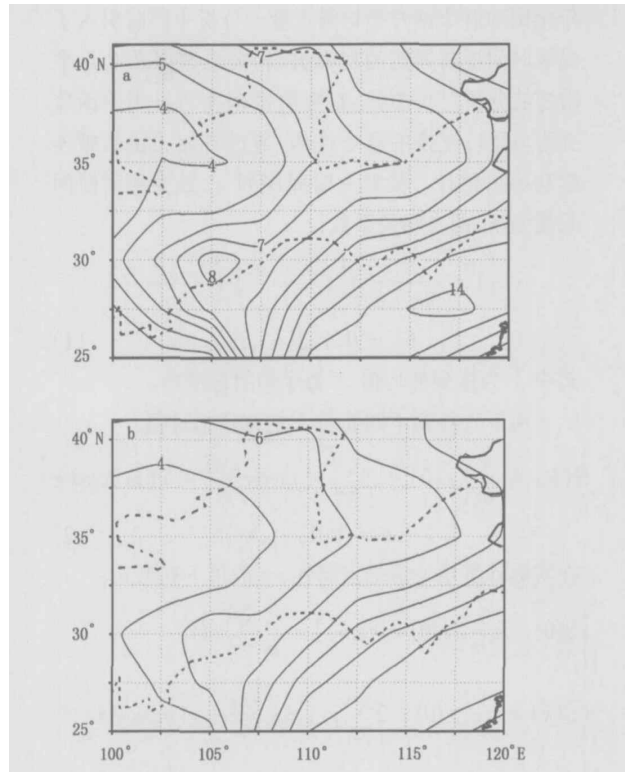


图3 黄河三—小间降水量多年(a)与少年(b)整层水汽输送量($g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)

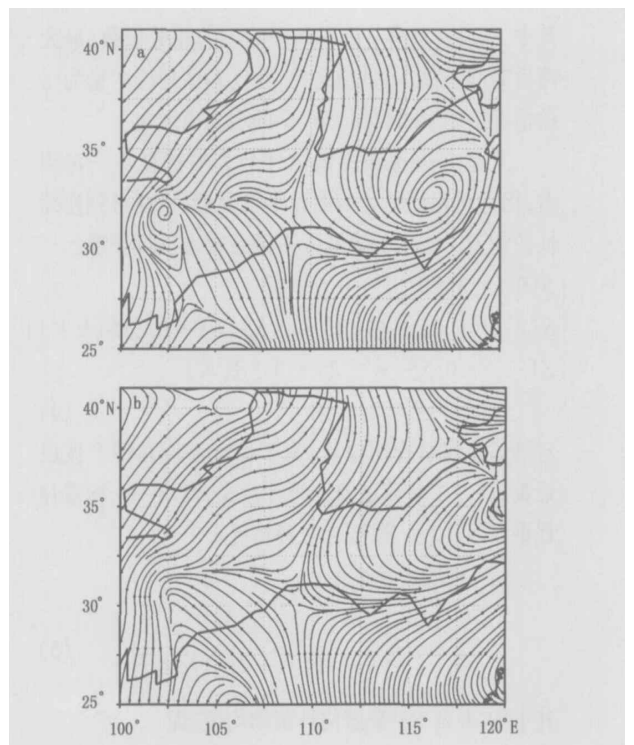


图4 黄河三—小间夏季多雨年(a)、少雨年(b)整层水汽输送流场滤波场

夏季降水最多的 1982 年,由整层水汽输送流场滤波场可以清楚看到,黄河三—小间上空为明显的水汽辐合(图略),在 500 hPa 高度场上,水汽输送辐合体现的更为明显(图 5a)。而由同时段 T_{BB} 分布也可看到,黄河三—小间为 T_{BB} 相对低值区(图 5b),其距平场上为明显的负距平区,意味着该区域的对流活动相对比较活跃(图 5c)。

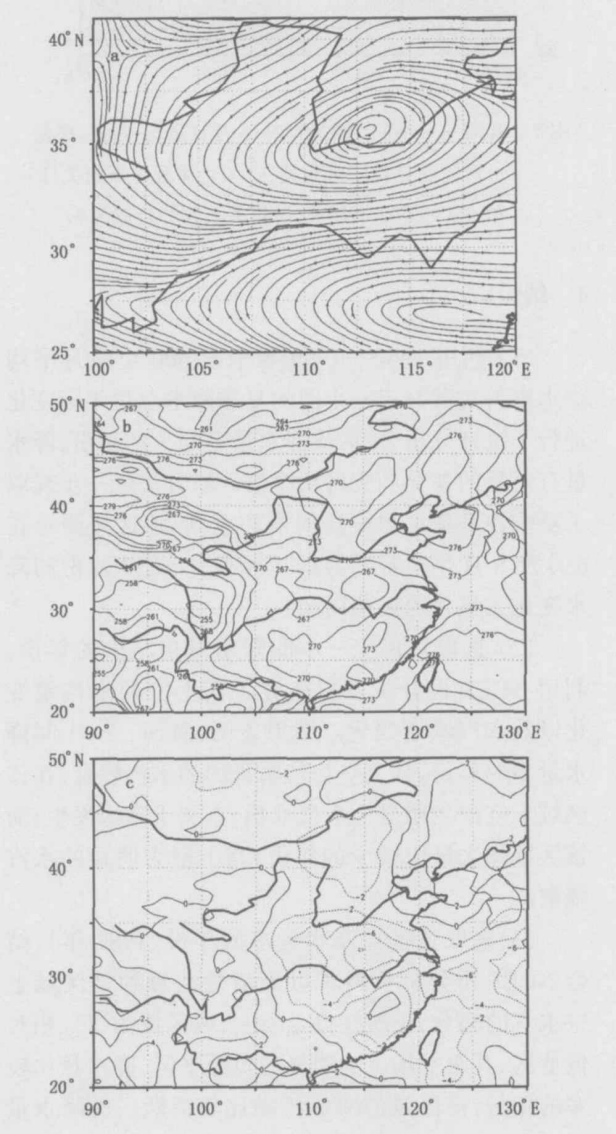


图 5 1982 年 7~8 月黄河三—小间 500 hPa 水汽输送流场滤波场(a)、 T_{BB} 平均场(b)和 T_{BB} 平均场距平场(c)

夏季降水相对较少的 1997 年,由整层水汽输送流场滤波场可以清楚看到,黄河三—小间上空为明显的水汽辐散(图略),在 500 hPa 高度场上,水汽输送辐散也体现的尤为明显(图 6a)。而由同时段 T_{BB}

分布也可看到,黄河三—小间为 T_{BB} 相对高值区(图 6b),而同时段,黄河三—小间上空 T_{BB} 距平场为明显正距平区(图 6c),该高值区几乎覆盖了黄河、长江之间的所有地区,表明该区域没有明显的对流活动。

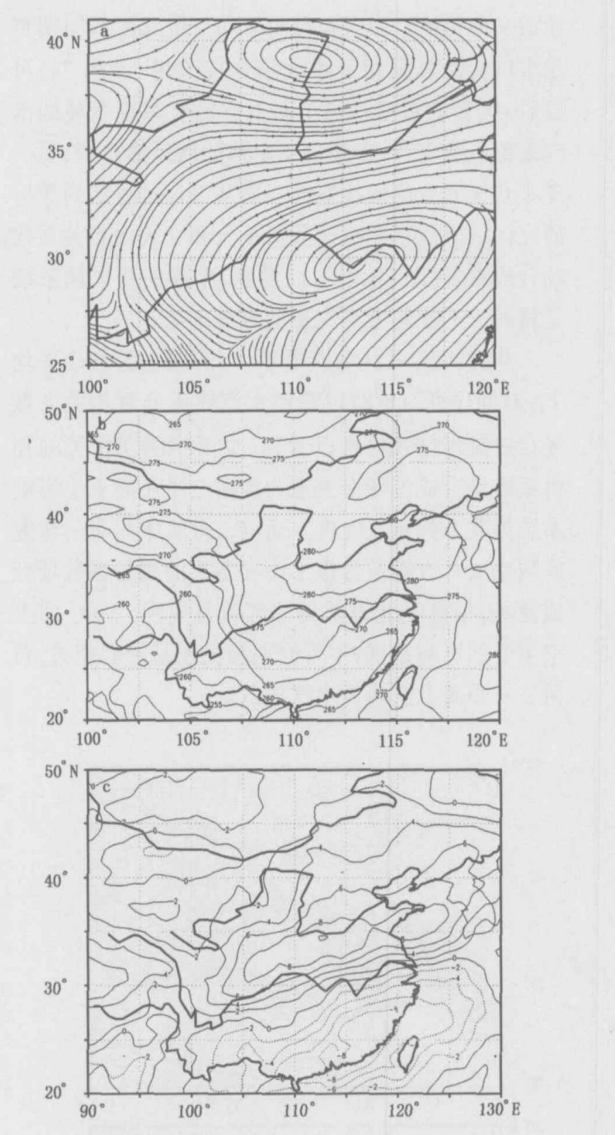


图 6 1997 年 7~8 月黄河三—小间 500 hPa 水汽输送流场滤波场(a)、 T_{BB} 平均场(b)和 T_{BB} 平均场距平场(c)

3.3 黄河三—小间水汽输送关键区

进一步研究黄河三—小间周围天气系统对该地区的影响,同时考虑到 T_{BB} 资料描述了对流系统的活动特征,且该地区的主要降水时段集中在 7~8 月间,本文针对 1982 年 7、8 月降水比较多的时段,计算了黄河三—小间上空 T_{BB} 时间序列与研究区域

(90°~120°E, 20°~50°N) 整层水汽输送分量 (Q_{λ} 和 Q_{ϕ}) 的同时及滞后相关, 其中滞后相关重点计算了该区域上空 T_{BB} 时间变化滞后研究区域内整层水汽输送分量的相关特征, 滞后时间分别为 1 天和 2 天, 可反映不同来向天气系统水汽输送对该地区上空对流活动的影响。由 T_{BB} 时间序列与研究区域同期整层水汽输送分量相关系数场合成流场^[5] (图 7a) 可以看到, 影响黄河—三小间上空对流系统发展的水汽来源有两支, 一支来自于东移的西风槽系统, 另一支来自于北方的湿冷空气。而从 T_{BB} 时间序列滞后研究区域整层水汽输送分量 1 天和 2 天的相关系数场合成流场 (图 7b, c) 可以看到, 东移的西风槽系统是黄河三—小间上空主要的水汽来源。

从黄河三—小间少雨年 (1997 年) 夏季日平均 T_{BB} 时间序列与该时段整层水汽输送分量相关系数场合成流场 (图略) 可以看到, 少雨年同期相关的相关系数场合成流场上表现为黄河三—小间上空影响系统为北方的东北气流。而 T_{BB} 时间序列滞后研究区域整层水汽输送分量 1 天和 2 天的相关系数场合成流场, 依然是北方的偏北气流是黄河三—小间上空主要的影响系统, 不管同期相关还是滞后相关, 黄河三—小间上空均为水汽辐散。

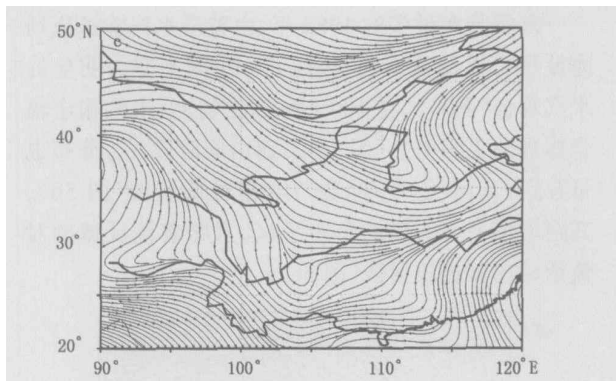
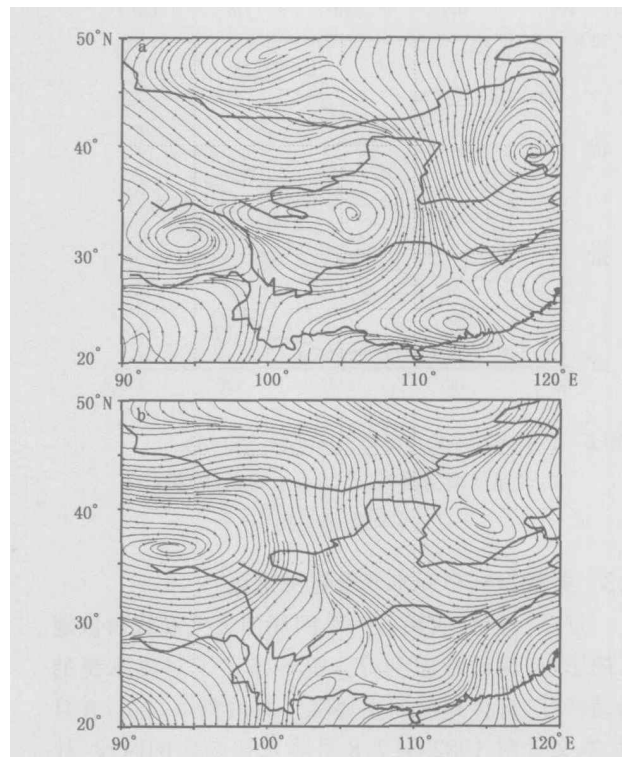


图 7 黄河三—小间 1982 年 7~8 月日平均 T_{BB} 与整层水汽输送分量同时相关 (a)、 T_{BB} 滞后 1 天相关 (b) 和 T_{BB} 滞后 2 天相关 (c) 相关系数场合成流场

4 结论

(1) 利用 1960~1999 年全国 600 个站月平均降水资料对黄河三—小间的夏季降水总量年际变化进行了统计分析, 该区域降水量多与少的年份, 降水量有明显的差异。应用功率谱诊断方法进一步提取了夏季各月降水的振荡周期注意到, 该区域降水在 6 月及 8 月存在着明显的年际变化, 而 7 月份的降水变化无显著的振荡周期。

(2) 选取黄河三—小间降水量多与少的年份, 利用 NCEP 再分析资料研究了其上空的水汽量变化以及水汽输送变化。结果表明, 黄河三—小间降水量多的年份, 其上空为较明显的水汽辐合, 在该区域上空产生明显的水汽堆积, 有利于降水发生; 而该区域降水量比较少的年份, 其上空为明显的水汽辐散。

(3) 选取该区域降水量多的年份 (1982 年), 结合 NCEP 再分析资料可以更清楚地看到该区域上空水汽的辐合, 反映在 T_{BB} 场上, 该区域为 T_{BB} 相对低值区, 其距平场上为明显的负距平区, 降水量比较多的年份, 该区域的对流活动比较活跃。而降水量相对少的年份 (1997 年), 该区域上空有明显的水汽辐散, T_{BB} 也为相对高值区和明显的正距平区。

(4) 通过计算黄河三—小间上空 T_{BB} 时间变化与研究区域整层水汽输送分量的同时及滞后相关, 研究了对黄河三—小间产生影响的天气系统。结果表明, 该区域降水多的年份, 其影响系统主要为东移的西风槽系统和北方冷空气, 在该区域产生明显的水汽辐合; 而该区域降水少的年份, 影响系统主要为

北方偏北气流,在该区域产生明显的水汽辐散。

参考文献

- 1 胡鞍钢,陆中臣,沙万英,等.中国自然灾害的基本特征及其对社会经济发展的影响.见:胡鞍钢,陆中臣,等编.中国自然灾害与经济发展.武汉:湖北科学技术出版社,1997.14-37
- 2 叶笃正,黄荣辉.黄河长江流域旱涝规律和成因研究.济南:山东科学技术出版社,1996.242
- 3 胡鞍钢,陆中臣,沙万英,等.长江、黄河流域近40年大旱大涝时空特征.见:胡鞍钢,陆中臣,等编.中国自然灾害与经济发展.武汉:湖北科学技术出版社,1997.121-156
- 4 卢敬华,李国平,薛升.长江黄河流域上中下游汛期重旱涝的气候特征.热带气象学报,2002,18(3):262-268
- 5 杨志刚,杨洪昌,谷湘潜,等.近年来黄河下游断流的干旱背景分析.气象学报,2000,55(6):751-758
- 6 江吉喜,范梅珠.GMS TBB揭示的1998年长江大水的异常天气成因.南京气象学院学报,1999,23(3):331-337
- 7 国家气象中心,国家卫星中心.98中国大洪水与天气预报.北京:气象出版社,1999
- 8 陆尔,丁一汇,Murakami M,等.1991年江淮特大暴雨的降水性质与对流活动.气象学报,1997,55(3):318-333
- 9 何金海,朱乾根,Murakami M,等.T_{BB}资料揭示的亚澳季风区季节转换对亚洲夏季风建立的特征.热带气象学报,1996,12(1):34-42
- 10 陈旭红,智协飞,田华.T_{BB}资料揭示的热带大气低频振荡周期的年变化特征.应用气象学报,1996,12(4):324-332
- 11 周霞琼,朱永麟.非对称的非绝热加热对热带气旋移动影响的数值研究.应用气象学报,1999,10(3):283-291
- 12 孟智勇,徐祥德,陈联寿.卫星亮温资料四维同化方案及其对“7.20”武汉特大暴雨的模拟试验.大气科学,2002,26(5):663-676
- 13 Noel E D, Puri K. Tropical prediction using dynamical nudging, satellite-defined convection heating source, and a cyclone bogus. Mon Wea Rev, 1992,120:2501-2522
- 14 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术.北京:气象出版社,1999.77-82
- 15 徐祥德,陈联寿,王秀荣,等.长江流域梅雨带水汽输送源-汇结构.科学通报,2003,48(21):2288-2294

Interannual Change of Summer Rainfall over Middle and Lower Reaches of Yellow River and Water Distribution Pattern Analysis

Zhang Shengjun¹ Chen Huailiang² Weng Yonghui¹

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

2 Henan Institute of Meteorology, Zhengzhou 450003)

Abstract: By means of summer monthly average precipitation data of 600 stations from 1960 to 1999, the interannual change of total rainfall over the Sanmenxia and Xiaolangdi Reservoir area in the Middle and Lower Reaches of Yellow River is analyzed. The oscillation periods of month precipitation in summer are detected with the help of spectral analysis. Hereby, the years with more-than-normal and less-than-normal rainfall over the area are selected, and the quantity of water vapor and water vapor transport the area are calculated by using the NCEP/NCAR reanalysis data set. The results indicate that there existed obvious water convergence over the area in the years with more-than-normal rainfall; and on the contrary, there existed obvious water divergence in the years less-than-normal rainfall. Through two cases studies (1982 and 1997), the conclusion is verified by means of the NCEP/NCAR reanalysis data set and TBB data.

Key words: rainfall, water transport, blackbody temperature, Yellow River