

# 海河流域严重干旱 500hPa 信号场异常信号分析

严小林<sup>1,2</sup>, 杨 扬<sup>3</sup>, 黄嘉佑<sup>4</sup>, 鲍振鑫<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029;  
3. 水利部水利信息中心, 北京 100053; 4. 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

**摘要:**基于严重少雨甸的定义,分析海河流域1961~2009年严重少雨甸的分布特征,进而对汛期40个典型严重少雨甸的500hPa信号场进行经验正交分解(EOF分析)。结果表明:EOF第一模态的方差贡献率达到35.3%,远高于其他模态;第一模态呈现出2个负异常区和1个正异常区,在对应的环流背景下,海河流域受暖性高压控制,高纬冷空气及低纬暖湿气流难以到达流域上空交绥,持续高温少雨造成流域严重干旱。

**关键词:**干旱;严重少雨甸;500hPa信号场;EOF分析;海河流域

**中图分类号:**P448

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2013)01-0027-05

## 1 前言

由于发生频率高、持续时间长、受灾人口和影响范围广等原因,干旱被《中国科学技术蓝皮书》第5号列为我国气候灾害之首。海河流域是我国七大流域之一,地处华北地区,是我国的政治、经济、文化和交通中心。流域内干旱灾害严重、水资源严重短缺,极大地制约了当地社会经济的发展。自20世纪80年代以来,这种现象越发严重,引起了社会各界的广泛关注。

干旱的发生主要源于较长时间内降水量的严重偏少<sup>[1]</sup>,而这种降水的持续减少是由全球大气环流被持久且大规模地打乱而引起的<sup>[2]</sup>。可见,大气环流异常是干旱产生的直接原因<sup>[3]</sup>。

目前,海河流域干旱研究已积累了大量成果。卫捷、张庆云等<sup>[4,5]</sup>分析得出华北夏季干旱时的主要大气环流异常特征,包括500hPa高度距平场40~50°N欧亚大陆位势高度偏高叠加EU遥相关型,大陆暖高压控制等。盛飞等<sup>[6]</sup>分析了2004年6~8月海河流域降水明显偏少的气候背景,包括西风带平直,7、8月份东亚夏季风偏弱以及西太平洋副热带高压(以下简称西副高)较常年偏东等。海河水利委员会<sup>[7]</sup>总结海河流域干旱少雨的主要环流特征有:亚洲纬向环流指数小;流域大部被西风带环流控制;西副高西伸脊点偏西,水汽输

送路径偏西;印度低压偏弱;西副高偏东或偏南,远离海河流域;西风环流较平直等。

目前,已有的干旱研究成果多建立在位势高度场或风场距平场分析的基础上,距平场能表明较气候平均状态的变化量但无法体现这种变化的显著性,而信号场能够弥补这种不足。信号场分析着重强调天气要素场对常年状态的变化性,由黄嘉佑等首次提出并用于暴雨的500hPa位势高度场大气环流异常信号研究<sup>[8-10]</sup>。信号场方法多用于暴雨事件研究,在干旱研究中尚不多见。本文在定义严重少雨甸事件基础上,计算分析了海河流域1961~2009年干旱发生特性,经验正交分解了汛期(6~9月)40个典型严重少雨甸的500hPa信号场,并分析得到了流域严重干旱时大气环流的主要异常信号。

## 2 研究区域与研究方法

### 2.1 研究区域

海河流域属于半湿润半干旱大陆性季风气候区,雨热同期,多年平均降水量538mm。受夏季风影响,流域汛期集中了年降水量的75%~85%,降水集中期(6月下旬~8月下旬)降水占全年降水的60%。降水年内分配集中、年际变化大,造成海河流域水旱灾害频繁。近几十年来,降水呈减少趋势(见图1),流域持续干旱,给流域内生活生产以及生态环境带来了很大的影响。

收稿日期:2011-12-30

基金项目:国家973重点基础研究发展计划项目(2010CB951103);国家十二五科技支撑计划项目(2012BAC21B01,2012BAC19B03);水利部公益性行业专项经费资助项目(200801001,201101015)

作者简介:严小林(1987-),女,湖南娄底人,博士,主要从事水文气象方面研究。E-mail:yanxl5566@126.com

选用国家气象局 1961~2009 年地面观测日值数据集和美国 NCEP/NCAR 逐日再分析数据集 ( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ), 综合考虑干旱的持续性和大气环流的变化特性, 时间尺度取为旬, 选取  $0^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$ 、 $20^{\circ} \sim 85^{\circ} \text{N}$  区域内共 3139 个空间格点变量的 500hPa 位势高度场进行

分析研究。根据流域内 34 个气象站的逐日降水量计算得到海河流域面平均旬降水量, 并由再分析数据得旬平均 500hPa 位势高度场; 标准化雨量序列和 500hPa 位势高度场得到海河流域旬雨量标准化序列和标准化位势高度场序列。

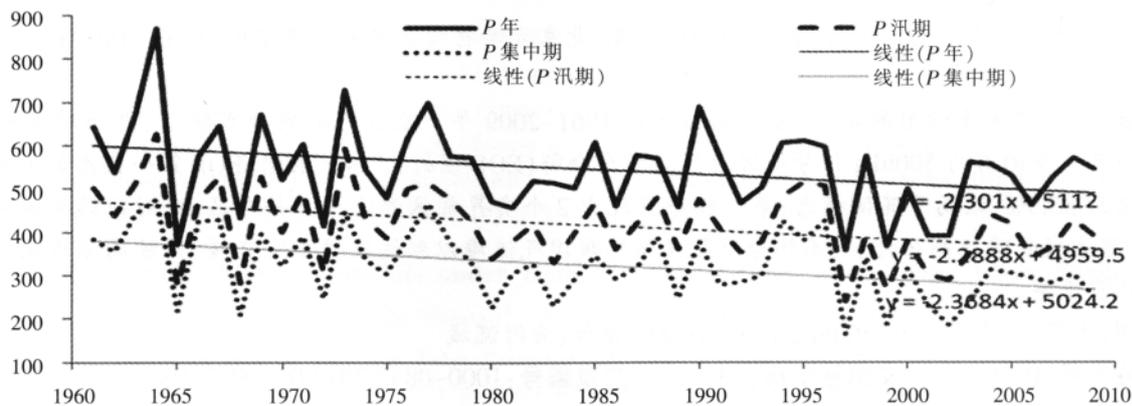


图1 海河流域 1961~2009 年逐年年降水量、汛期降水及降水集中期降水量

( $P$ 年: 年降水量;  $P$ 汛期: 汛期降水量;  $P$ 集中期: 6月下旬至8月下旬降水量; 单位: mm)

Fig.1 The annual precipitation, flood seasonal precipitation and precipitation in concentrated period in the Haihe River basin from 1961 to 2009

## 2.2 研究方法

(1) 严重少雨旬的确定将海河流域旬雨量标准化序列的 5%分位值作为阈值定义严重少雨旬。百分位值的计算方法常使用序列排序法, 如将某个气象要素样本按大小升序排列, 则小于或等于序号  $j$  对应气象要素值的概率为<sup>[11]</sup>:

$$P = (j - 0.31) / (n + 0.38) \quad (1)$$

式中:  $n$  为样本大小。计算得海河流域标准化旬雨量 5%百分位值为  $-1.033$ , 即旬雨量标准化值小于或等于  $-1.033$  的旬为严重少雨旬。

(2) 信号场。信号场即标准化的位势高度场<sup>[8]</sup>, 上文中标准化 500hPa 位势高度场即 500hPa 信号场, 若假设旬高度场满足正态分布, 则信号场服从标准正态分布。根据假设检验理论, 在 5%显著水平下, 信号场中绝对值大于 1.96 的格点通过显著性检验, 认为该旬位势高度场与平均状态存在显著差异, 本文取信号场中绝对值大于 2.0 的格点视为存在显著异常。

(3) EOF 分析 1901 年由 Pearson 提出<sup>[12]</sup>, Lorenz<sup>[13]</sup> 在 20 世纪 50 年代首次将其引入气象和气候研究, 目前该方法在地球科学特别是大气科学中被广泛运用。EOF 分析使用特征技术, 正交分解气象要素场得到不随时间变化的空间函数部分(特征向量或模态)和只依赖时间变化的时间函数部分(主分量), 分解后模态的解释方差(见式 2)愈大, 对总方差的贡献愈大, 提取原

变量场变化的信息越多。分解出的空间模态是否具有物理意义或是无意义的噪音, 需要通过统计检验判别。North<sup>[14]</sup> 提出通过特征值误差范围进行显著性检验(见式 3)。当两相邻特征值  $\lambda_k - \lambda_{k-1} \geq e_k$  时, 认为其对应的模态是有价值的信号, 反之两者认为无明显差别。

$$R_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (2)$$

式中:  $p$  为空间格点(变量)的个数;  $\lambda_k$  为降序排列的第  $k$  个特征值;  $R_k$  为  $\lambda_k$  对应的第  $k$  模态的解释方差。

$$e_k = \lambda_k \sqrt{\frac{2}{n}} \quad (3)$$

式中:  $e_k$  为  $\lambda_k$  的误差范围;  $n$  为样本量。

## 3 结果分析

### 3.1 严重少雨旬分析

海河流域 1961~2009 年共 95 个严重少雨旬(见图 2), 其中 78% 的严重少雨旬集中在汛期, 尤以 7 月上旬最为频繁。汛期严重少雨旬的年代分布特征(见表 1)表明: 自 20 世纪 80 年代以来, 海河流域汛期严重少雨旬的发生保持在一个较高的水平, 且 2000 年以后明显增加, 几乎比前几个 10 年增加了 1 倍。汛期严重少雨是海河流域干旱的主要原因。因此需着重研究汛期严重少雨旬 500hPa 信号场的异常信号。

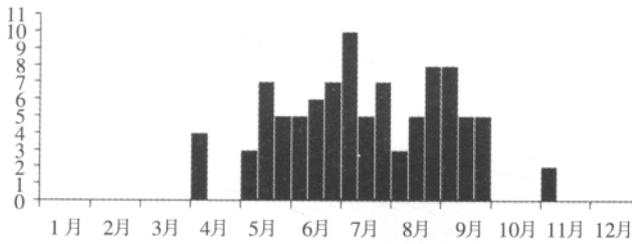


图2 海河流域 1961~2009 年严重少雨旬的年内月际变化分布  
Fig.2 The monthly variability of the 10-day precipitation drought events in the Huaihe River basin from 1961 to 2009

表1 汛期严重少雨旬的年代分布特征  
Table1 Decade distribution of the 10-day precipitation drought events during flood season

时间	60 年代 1961~1969	70 年代 1971~1979	80 年代 1981~1989	90 年代 1991~1999	00 年代 2000~2009
严重少雨旬个数	12	9	14	12	27

### 3.2 500hPa 信号场 EOF 分析

干旱主要由持续少雨造成, 排除前后旬降水较充沛(旬雨量标准化值>0.5)的旬, 得到海河流域 1961~2009 年汛期 40 个典型的严重少雨旬, 对该 40 旬的 500hPa 旬平均位势高度场取平均即得到相应的合成场(见图 3)。从图中可见: 西副高脊线位于 30°N 以南, 西伸脊点在 135°E 以东, 东亚夏季风很难到达海河流域; 从中纬度西风带槽脊来看, 流域位于脊前槽后, 盛行下沉气流, 天气晴好。为进一步分析 500hPa 位势高度场的异常配置及其显著性, 对 40 个典型严重少雨旬的 500hPa 信号场进行了 EOF 分析。

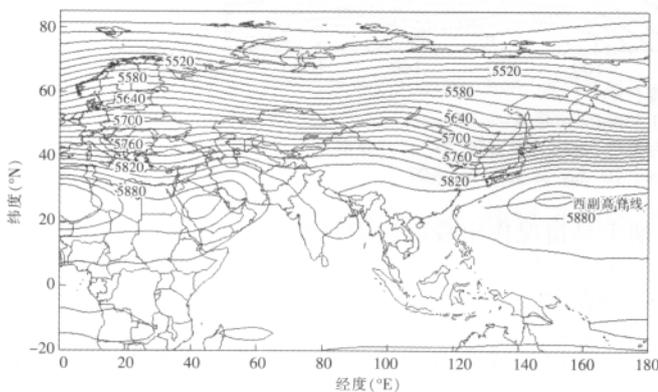


图3 海河流域 40 个典型严重少雨旬 500hPa 位势高度场的合成场  
(图中数值为合成场的位势高度值, 单位: gpm)  
Fig.3 Synthetic 500hPa geopotential height field of 40 10-day precipitation drought events in the Huaihe River basin

EOF 分析结果表明前 2 个模态的累积方差占总方差的 44%, 其中第一模态方差贡献率为 35.3%, 第二模态为 8.7%; 对前 6 个模态进行统计检验表明(见

图 4): 第一模态和第二模态有显著差别, 但第二模态和第三模态差别不显著, 因此, 前 2 个模态具有一定的物理意义。由于第一模态的解释方差远高于第二模态, 可反映原信号场的主要模态特征, 认为其体现的信号场空间分布特征是海河流域严重干旱发生时 500hPa 大气环流异常特征的重要表现。

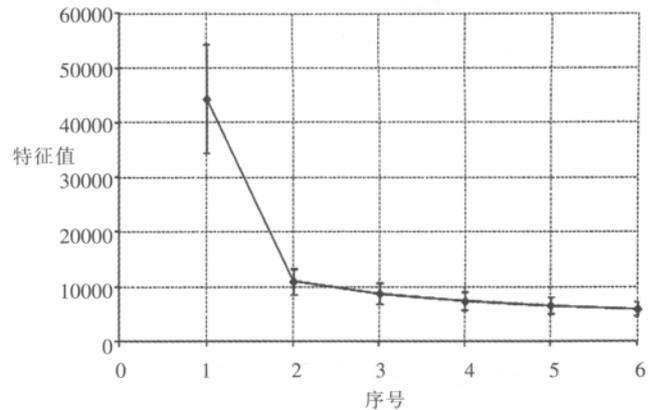


图4 前 6 个模态的特征根及其误差范围  
Fig.4 Eigenvalues of the first 6 modes and their error ranges

海河流域汛期出现严重少雨旬时, 500hPa 信号场 EOF 第一模态(见图 5)呈现出以下分布特征: ①在亚欧中高纬度存在两个显著的负值区。一个几乎覆盖了整个东半球高纬地区, 负值主体位于 40~120°E、55°N 以北地区, 负值中心在巴伦支海新地岛附近; 另一负值区位于 150°E 以东、30~50°N 的太平洋上。②处于中纬度地区的我国大陆中西部为宽广的正值区, 位于伊朗至青藏高原地区的暖性高压主体一直延伸到华北和东北地区。③太平洋上空的负值区从中心向西延伸, 形成自日本以东洋面沿 35~40°N 直达我国东部淮河流域及其以南地区、覆盖我国东部沿海地区和朝鲜半岛以及日本在内的东西向槽区。综上, 当海河流域汛期严重少雨时在我国大陆和东部海面间形成了“西高东低”的态势。而“西高东低”正是华北地区夏季干旱少雨的主要环流形势<sup>[15-16]</sup>。

基于以上分布特点, 高空天气形势呈现出以下特点: ①高纬负值区的存在使得中高纬度阻塞形势难以建立, 不能形成稳定的冷空气南下通道。同时, 中纬地区强大的大陆暖高压阻挡了主体位于新地岛的冷空气, 西路的冷空气被阻挡在新疆北部, 难以进入我国大陆的广大地区。②在“西高东低”的环流形势下, 海河流域受暖性高压控制, 东部沿海地区为偏东北气流, 冷空气沿海河东侧南下到达淮河流域及其以南地区。③西副高主体显著偏南, 暖湿气流北上条件不足。以上分析

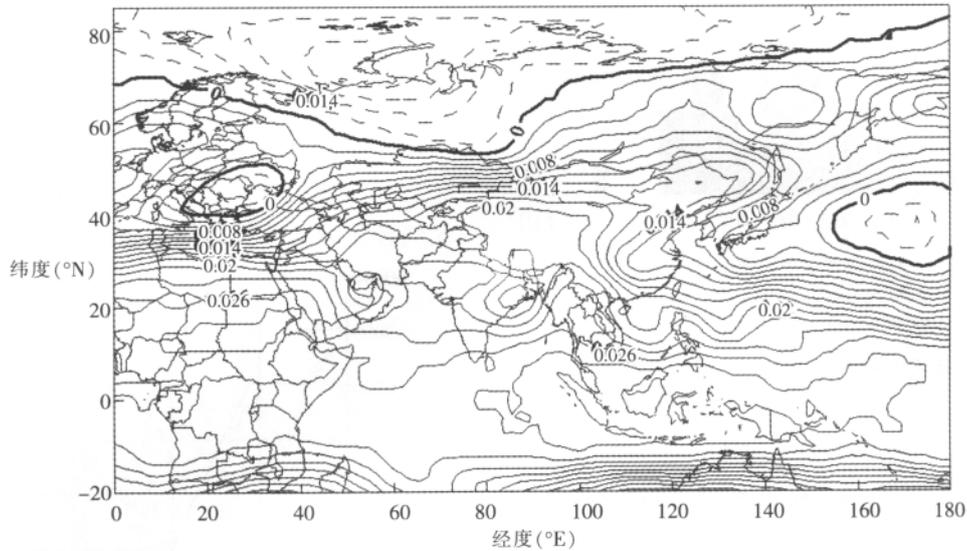


图5 海河流域40个典型严重少雨旬500hPa信号场EOF第一模态

(图中数值为EOF第一模态的值,实线为正值,虚线为负值)

Fig.5 The first mode of 40 10-day precipitation drought events 500hPa signal fields

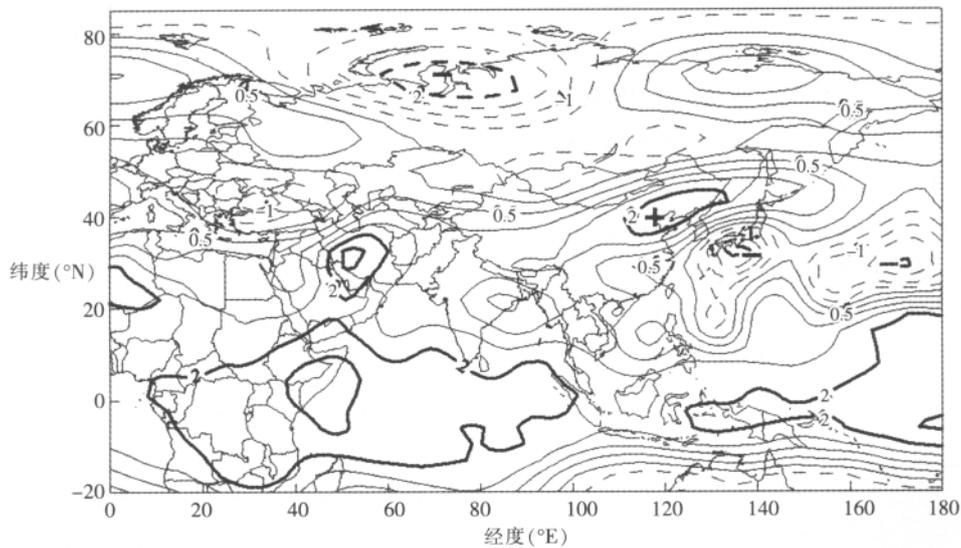


图6 1997年7月下旬500hPa信号场

(图中数值为标准化500hPa位势高度值,实线为正值,虚线为负值;粗线为异常区,“+”、“-”分别为正负异常中心)

Fig.6 500hPa signal field of the last 10-day of July in 1997

表明冷暖空气不能在流域上空交绥,致使暖高压控制下的海河流域持续高温少雨,严重少雨旬事件发生。

1997~2002年,海河流域遭受严重持续干旱。其中,1997年汛期降水较常年减少42%,是近50年少见的干旱年,图6为1997年7月下旬对应的500hPa信号场。对比图5和图6可发现:信号场空间分布形态、3个正负异常中心的位置和强度基本一致;图6中日本以东洋面30~35°N的负异常更为显著。可见,500hPa信号场第一模态可以较好地反映海河流域汛期严重干旱旬发生的大气环流异常形势,通过对比500hPa信号场正负异常显著区的位置和强度,可对海河流域汛

期干旱情况作出较准确的判断。

#### 4 结论

海河流域降水高度集中于汛期,汛期严重少雨是造成流域干旱的主要原因。用EOF分析方法分析海河流域1961~2009年汛期40个典型严重少雨旬的500hPa信号场,得出以下结论:(1)EOF分析第一模态的方差贡献率为35.3%,远大于其他模态,可以反映海河流域汛期严重干旱500hPa信号场主要的异常环流形态;(2)EOF第一模态呈现出3个正负显著异常区域,分别为高纬地区的负异常区、中纬地区几乎覆盖我

国大陆中西部的正异常区以及中西太平洋副热带地区的负异常区。500hPa 信号场的上述异常配置是海河流域汛期严重干旱发生的主要大气环流异常信号。

参考文献:

- [1] Wilhite, D.A., M H Glantz. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions [J]. *Water International*, 1985, 10(3): 111-120.
- [2] 惠希特 D A. 干旱与水危机: 科学、技术和管理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008. (Donald A. Wilhite. *Drought and Water Crises: Science, Technology and Management Issues* [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 邵晓梅, 刘劲松, 许月卿. 河北省旱涝指标的确定及其时空分布特征研究[J]. *自然灾害学报*, 2001, 10(4): 133-136. (SHAO Xiaomei, LIU Jingsong, XU Yueqing. Determination of drought-flood index and its temporal and spatial distribution in Hebei Province [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2001, 10(4): 133-136. (in Chinese))
- [4] 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 近 20 年华北地区干旱期大气环流异常特征[J]. *应用气象学报*, 2003, 14 (2): 140-151. (WEI Jie, ZHANG Qingyun, TAO Shiyan. Characteristics of atmospheric circulation anomalies during persistent droughts in North China for last two decades [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(2): 140-151. (in Chinese))
- [5] 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征 [J]. *气候与环境研究*, 2003, 8 (3): 307-318. (ZHANG Qingyun, WEI Jie, TAO Shiyan. The decadal and interannual variations of drought in the Northern China and association with the circulations [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(3): 307-318. (in Chinese))
- [6] 盛飞, 杨弘. 2004 年汛期海河流域降水特征及成因分析[A]. 中国气象学会. 中国气象学会 2004 年年会会议论文集 [C]. 2004. (SHENG Fei, YANG Hong. Precipitation characteristics and driving forces analysis of Haihe river basin in the flood season of 2004 [A]. Chinese Meteorological Society. Proceedings of the 2004 Annual Chinese Meteorological Society Conference [C]. 2004. (in Chinese))
- [7] 水利部海河水利委员会. 海河流域水旱灾害[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2009. (Haihe Water Conservation Commission of MWR. *Flood and Drought Disasters in Haihe River Basin* [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [8] 黄嘉佑, 杨扬, 周国良. 我国暴雨 500hPa 高度信号场分析[J]. *大气科学*, 2002, 26(2): 221-229. (HUANG Jiayou, YANG Yang, ZHOU Guoliang. A study of the 500 hPa-signal field about heavy rainfall in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(2): 221-229. (in Chinese))
- [9] 黄嘉佑, 杨扬, 周国良. 500hPa 高度场的信号场突变与我国暴雨的发生规律性研究[J]. *大气科学*, 2002, 26(5): 625-632. (HUANG Jiayou, YANG Yang, ZHOU Guoliang. Jump phenomena in the 500hPa signal field and the occurrence of China's heavy rainfalls [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26 (5): 625-632. (in Chinese))
- [10] 杨扬, 周国良, 戚建国, 等. 长江中游地区暴雨过程的气候背景分析 [J]. *水科学进展*, 2005, 16 (4): 546-551. (YANG Yang, ZHOU Guoliang, QI Jianguo, et al. Background of climatic anomalies about heavy rain in middle reaches of the Yangtze River in China [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 546-551. (in Chinese))
- [11] Beard LR. Statistical analysis in hydrology [J]. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 1943, 108:1110-1160.
- [12] Pearson, K. On lines and planes of closest fit to system of points in space [J]. *Philos. Mag.*, 1901: Ser. 6, 2, 559-572.
- [13] Lorenz, E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction [J]. *Sci. Rept.*, No.1, Statistical.
- [14] North G R, Bell T, Cahalan R, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110: 699-706.
- [15] 宫德吉. 春夏季华北地区旱雨转折的环流特征 [J]. *内蒙古气象*. 1993, (1): 9-16. (GONG Jide. Circulation characteristics of drought turning to rain during spring and summer in North China [J]. *Meteorology Journal of Innermongolia*. 1993, (1): 9-16. (in Chinese))
- [16] 孙燕, 朱伟军, 王谦谦, 等. 华北夏季降水异常的变化及其与大气环流的联系[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(1): 67-73. (SUN Yan, ZHU Weijun, WANG Qianqian, et al. Spatial/temporal variations of summer precipitation anomalies in North China and their relations to atmospheric circulation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2010, 33(1): 67-73. (in Chinese))

## Anomalies of 500hPa Signal Field during Meteorological Droughts in Haihe River Basin

YAN Xiaolin<sup>1,2</sup>, YANG Yang<sup>3</sup>, HUANG Jiayou<sup>4</sup>, BAO Zhenxin<sup>1,2</sup>

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*; 2. *Research Center for Climate Change, MWR, Nanjing 210029, China*; 3. *Water Resources Information Center, MWR, Beijing 100053, China*; 4. *Department of Atmosphere Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** Based on the definition and analysis of 10-day precipitation drought events, the anomalies of the 500hPa signal field during meteorological droughts in the Haihe River Basin were investigated with 40 10-day precipitation drought events from 1961 to 2009, using empirical orthogonal function analysis. The results showed that the relative variance contribution of the first mode is 35.3%, much higher than those of other modes; and there are three abnormal areas in the 500hPa signal field: two negative ones and a wide stretches of positive one. The abnormal spatial pattern of soohPa signal field meant that the Haihe River Basin is under the control of warm high, and the cold air and warm air can not meet over it, which would cause severe drought in the Haihe River Basin eventually.

**Key words:** drought; 10-day precipitation drought event; 500hPa signal field; EOF analysis; Haihe River Basin