

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.001

长江流域年降水量的空间特征和演变规律分析

曾小凡^{1 2}, 翟建青^{1 2}, 姜 彤^{1 3}, 苏布达³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国气象局气候变化中心, 北京 100081)

摘要:为获取长江流域年降水量的时空变化特征,对长江流域年降水量进行了空间分区和时间演变分析.根据长江流域 146 个气象站点 1960~2005 年的逐年降水量资料,采用经验正交函数和旋转经验正交函数对长江流域年降水量的空间变化特征进行分析,并计算了 1960~2005 年年降水量的线性演变规律.利用奇异谱分析方法检测区域降水量发生突变的情况.结果表明,长江流域年降水量主要有 3 种空间分布型、8 个降水变化敏感区域.8 个敏感区域中,汉江流域、岷江-嘉陵江源区、乌江流域南部年降水量呈减少趋势,其中岷江-嘉陵江源区减少最为显著,年降水量每 10 年减少 27.1 mm;洞庭湖-鄱阳湖地区、鄱阳湖流域南部、太湖流域、金沙江流域中部、云南地区年降水量呈增加趋势,其中金沙江流域中部年降水量显著增加,年降水量每 10 年增加 17.7 mm.存在降水突变的地区有 5 个,下游的太湖流域发生最早,时间为 1977 年,上游云南地区最晚,为 1998 年.长江流域年降水量有比较明显的空间区域特征,各个区域年降水量的时间演变规律也不一致.

关键词:年降水量;空间特征;演变规律;长江流域

中图分类号:P333.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2008)06-0727-06

长江流域尤其长三角地区是我国经济发达地区,20 世纪 90 年代气候发生显著变化,导致某些区域降水量显著增加,加剧了洪水灾害,造成巨大的损失^[1].

长江流域多年平均年降水量为 1 126.7 mm,属于我国降水丰沛的地区.受局地环流和地形的影响,年降水量的空间分布非常不均匀,自东南向西北呈减少趋势.中下游地区除汉江水系和干流区下游外,年降水量均多于 1 100 mm.在洞庭湖和鄱阳湖水系年降水量达 1 350 mm 以上,尤其鄱阳湖水系,大部分地区年降水量多于 1 600 mm.上游地区,四川盆地是降水高值区,长江源头是低值区,其他大部分地区年降水量在 600~1 100 mm.

随着全球气候变暖,长江流域的降水响应形式发生了一定的变化.姜彤等^[2-4]研究表明,长江流域中下游地区降水呈现上升趋势的区域面积增大,主要集中在洞庭湖流域和鄱阳湖流域,这一趋势在夏季 7 月份尤为明显.为进一步得到长江流域年降水量的空间特征和流域内部降水变化敏感区域,本文根据 1960~2005 年的实测降水数据分析近几十年来长江流域年降水量的区域特征和不同降水变化敏感区域的演变趋势.

1 数据与分析方法

本文选用数据为长江流域 146 个气象站点 1960 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日逐日降水量资料,由中国气象局国家气象信息中心气候资料室提供.年降水量资料为年内逐日降水量之和,区域年降水量为区域内各站点年降水量的算术平均值.

采用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)和旋转经验正交函数(rotated empirical orthogonal function, REOF)方法,分析长江流域年降水量的主要空间分布型和降水变化敏感区域. EOF 没有固定的函数形式,对一个空间场,能用尽量少的正交向量场表示,有利于大量信息的浓缩和集中,反映气象要素场的主要空间分布特征. REOF 在 EOF 的基础上经过极大方差旋转,使高荷载集中在少数变量上,使空间结构更加清

晰,突出气候的区域性特征^[5-8]。

通过计算年降水量的气候趋势系数和气候倾向率来研究长江流域年降水量增减的定量程度^[9],并进一步用非参数 Mann-Kendal(以下简称 MK)分析方法^[10]检测长江流域年降水量的变化趋势。

利用奇异谱分析(singular spectrum analysis,SSA)方法进行年降水量的突变检测,基于 CUSUM 统计量初步判定突变点产生的可能区间,并根据均方差最小原则判定显著性突变点,用自助法进行显著性水平检验。20 世纪 80 年代发展起来的 SSA 方法,以重构相空间为基本手段,通过 EOF 提取序列主要成分,实现振荡与趋势的分离,为分析貌似随机的复杂非线性时间序列提供了有效途径^[11-12]。SSA 较一般的功率谱而言,序列波形无需正弦假定,而且对信号有强化放大作用,特别适合探索非线性系统中的弱信号,因而在识别气候、水文等地学变量的周期振荡和历史趋势方面获得广泛应用^[13-14]。SSA 方法研究数据序列的突变已在国内进行了成功的运用,具有较好的可信度^[15-16]。

2 长江流域年降水量的空间特征

对长江流域 146 个站点 1960~2005 年的年降水量进行 EOF 和 REOF 分析,表 1 给出了旋转前后前 10 个主分量的方差及累计方差贡献百分比。由表 1 可知,前 3 个主分量的方差贡献较其他主分量的方差贡献要大,它们的累积方差贡献为 38.6%,因此认为这 3 个主分量所对应的降水空间分布型基本上代表了长江流域年降水量最主要的空间分布型。

前 3 个旋转前主分量所代表的空间分布型见图 1。从旋转前第 1 主分量空间分布型(图 1(a))可知,长江流域以岷江流域为界呈现经向分布的空间分布型,其中正值高值区位于洞庭湖和鄱阳湖地区,这与我国东部是典型的东亚季风区、夏季风爆发的早晚及强弱直接影响我国东部年降水量的多少相一致^[17]。第 2 主分量所对应的空间分布型为纬向分布状态(图 1(b)),大致以长江为界,长江流域北部为正值区,汉江流域呈现一个高值中心,南部为负值区,高值中心位于下游地区鄱阳湖流域南部。这是由于长江流域夏季降水量受到西太平洋副热带高压的位置和强弱影响,当副高强偏南时,雨带偏南,长江流域南部降水相对偏多,当副高位置偏弱偏北时,雨带偏北,长江流域北部降水量相对偏

表 1 旋转前后前 10 个主分量的方差贡献

Table 1 Variance contribution of the first 10 principal omponents of empirical orthogonal function and rotated empirical orthogonal function %				
主分量	旋转前		旋转后	
	方差贡献	累计方差贡献	方差贡献	累计方差贡献
1	18.6	18.6	13.2	13.2
2	12.1	30.6	10.6	23.8
3	8.0	38.6	9.0	32.8
4	6.7	45.3	5.8	38.5
5	5.6	51.0	5.6	44.1
6	4.3	55.2	5.5	49.6
7	3.5	58.7	5.4	55.0
8	3.4	62.1	5.4	60.4
9	2.8	64.9	4.0	64.4
10	2.6	67.5	3.1	67.5

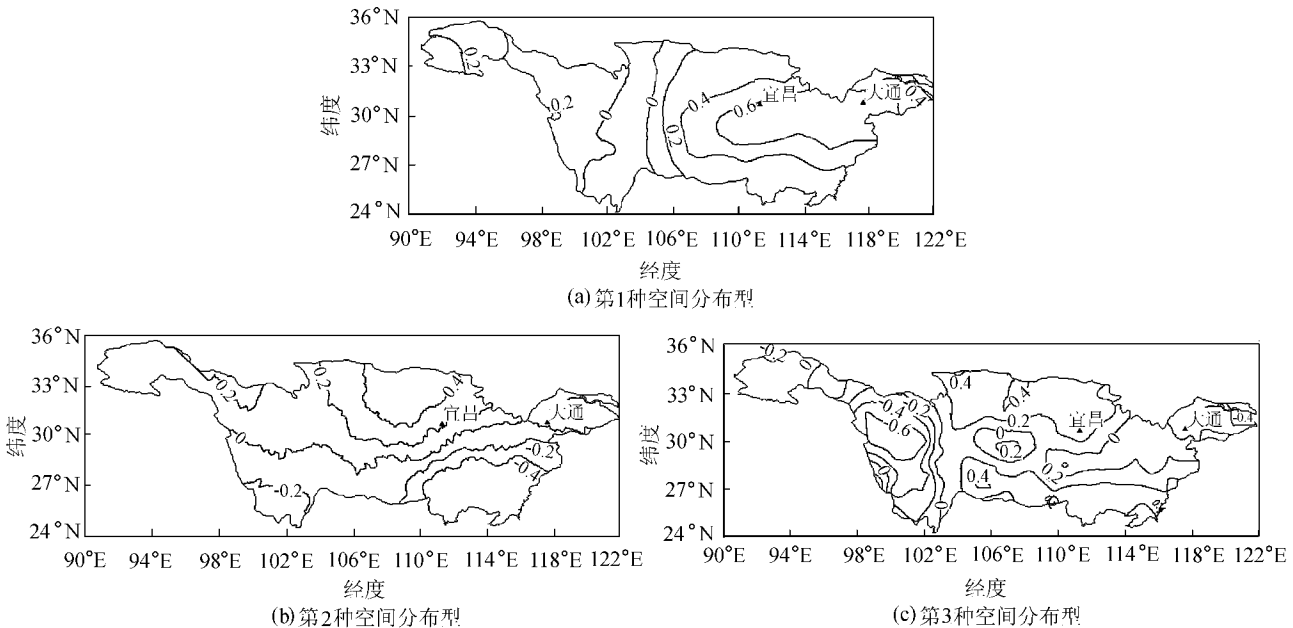


图 1 长江流域年降水量的 3 种空间分布型

Fig.1 3 spatial distribution patterns of annual precipitation in the Yangtze River basin

多^[18],长江流域夏季降水量占年降水量的比例最大,因此西太平洋副热带高压的位置也直接影响到年降水量的分布和大小.长江流域年降水量的第 3 空间型为源区与其他地区反相变化的空间分布型(图 1(c)).源区为负值,高值中心位于金沙江流域中部,即青藏高原的东边缘,中下游地区的太湖流域也为负值区,其他地区为正值区,但没有明显的高值中心.

为进一步突出长江流域年降水量的区域性气候特征,在 EOF 分析的基础上进行 REOF 分析,通过旋转使高荷载中心仅仅集中在某一小区域,反映不同地理区域的降水变化特征.由于长江流域年降水量各地差异大,本研究选择累计方差贡献为 67.5% 的前 10 个主分量进行方差极大正交旋转,旋转后的各个主分量的方差贡献比旋转前分散,且某些主分量的方差贡献也发生了一些改变(表 1).由于第 9 和第 10 主分量旋转前后的方差贡献相对其他主分量的方差贡献都比较小,因此由前 8 个旋转主分量得到长江流域年降水量的 8 个主要降水变化敏感区域.选择特征向量的分量绝对值不小于 0.4 的地区为降水变化敏感区.8 个变化敏感区域中,前 4 个位于长江流域中下游,后 4 个位于长江流域上游.

图 2(a)为长江流域年降水量第 1 旋转荷载向量场,其高荷载区位于洞庭湖和鄱阳湖地区,是年降水量变化最敏感的区域之一,称之为洞庭湖-鄱阳湖地区型.第 2 敏感区域位于汉江流域(图 2(b)),中心荷载值为

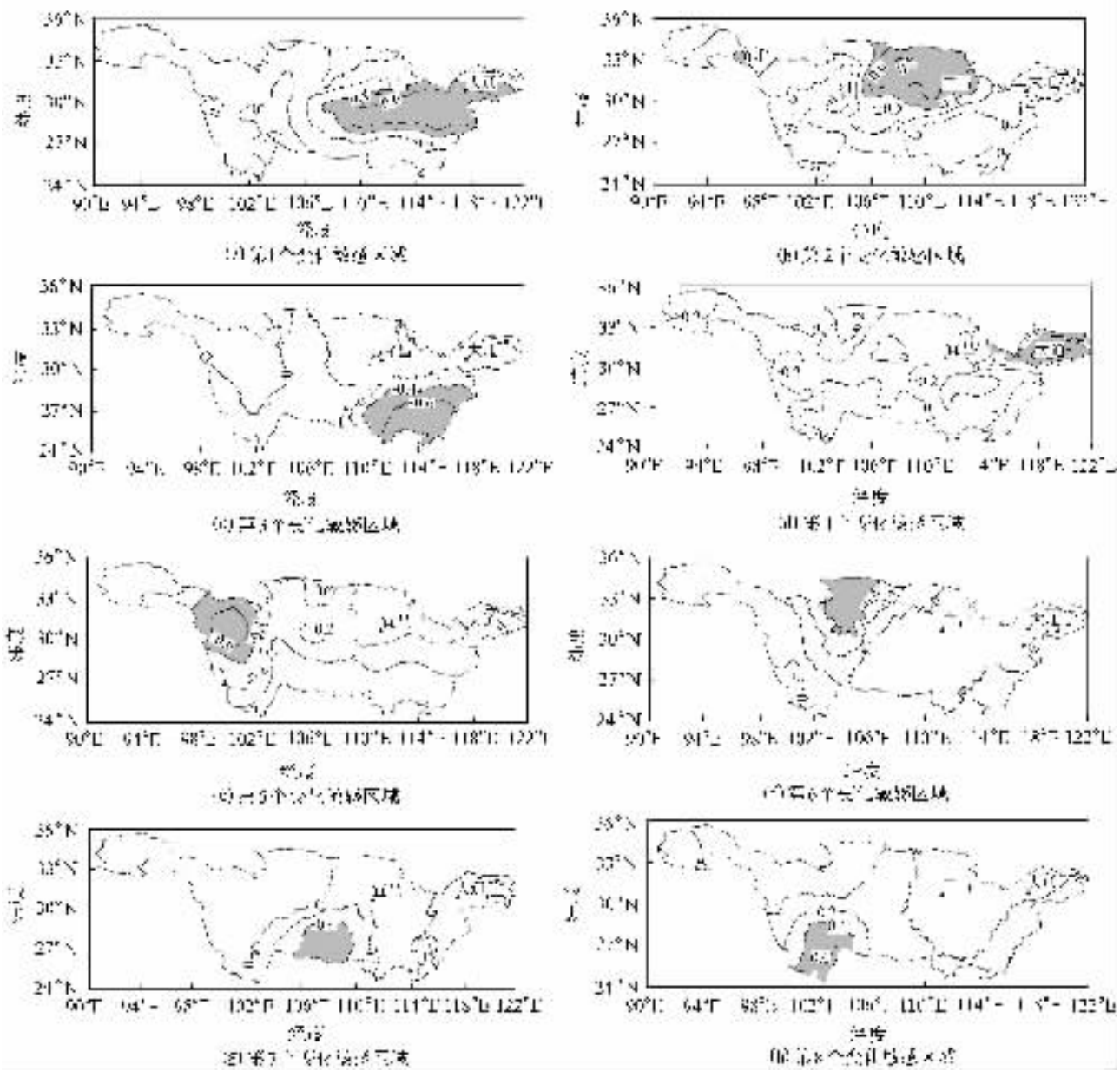


图 2 长江流域年降水量的 8 个变化敏感区域

Fig.2 8 sensitive areas of annual precipitation in the Yangtze River basin

0.85 称之为汉江流域型.长江流域中下游有一降水变化敏感区域位于鄱阳湖流域南部(图 2c)),其中心荷载值为 -0.86 称之为鄱阳湖流域南部型.图 2d 给出了长江流域年降水量第 4 旋转荷载向量场,旋转高值区位于长江流域下游太湖地区,其中心荷载值为 -0.79,称之为太湖流域型.金沙江流域中部是上游地区的一个气候变化敏感区(图 2e)),中心荷载值为 -0.84,称其为金沙江流域中部型.第 6 降水变化敏感区域位于岷江和嘉陵江源区,为一负值高值区(图 2f)),称之为岷江-嘉陵江源区型.图 2g 为第 7 旋转荷载向量场,高荷载中心位于乌江流域南部,为一负值区,称为乌江流域南部型.长江流域上游的云南地区是又一降水敏感区域(图 2h)),是一正值高值中心,称为云南地区型.

3 长江流域年降水量的演变趋势

3.1 各个区域年降水量的变化趋势分析

为分析长江流域 8 个典型降水变化敏感区的年降水量演变趋势,计算了各个区域年降水量的趋势系数和倾向率.1960 ~ 2005 年年降水量 MK 统计值(表 2).图 3 给出了 8 个区域 1960 ~ 2005 年年降水量距平变化曲线及线性趋势.

从图 3 可以看出 8 个年降水量变化敏感区域中,汉江流域、岷江-嘉陵江源区、乌江流域南部年降水量呈减少趋势,其中岷江-嘉陵江源区减少最为显著,年降水量每 10 年减少 27.1 mm,其他 2 个地区仅微弱减少.洞庭湖-鄱阳湖地区、鄱阳湖流域南部、太湖流域、金沙江流域中部、云南地区年降水量呈增加趋势,其中金沙江流域中部年降水量显著增加,年降水量每 10 年增加 17.7 mm.总的来说,降水增加区域要多于降水减少区域,金沙江流域中部降水增加幅度和岷江-嘉陵江源区减少幅度最为明显,其他地区增加或减少幅度并不显著,每 10 年变化幅度均小于 0.20 mm.

3.2 各个区域年降水量的年代际变化

为更清楚地了解长江流域 1960 ~ 2005 年年降水量变化,本文计算了 8 个降水变化敏感区域年降水量的年代际距平(表 3).除太湖流域、乌江流域南部,其他 6 个区域自 1991 年以来的年降水量变化是 4 个年代际中变化最大的时期,其中鄱阳湖流域南部距平值增加最大,为 103.2 mm,汉江流域和岷江-嘉陵江源区是自 1991 年以来降水减少的 2 个地区,距平值分别为 -44.7 mm 和 -76.1 mm.乌江流域南部自 1991 年以来降水变化最小,距平值为 5.8 mm.

3.3 各个区域年降水量的突变检测

对长江流域 8 个降水变化敏感区域 1960 ~ 2005 年的年降水量进行突变分析,发现有 5 个区域存在突变现象(表 4).除岷江-嘉陵江源区年降水量在 1984 年发生由多到少的突变外,其他 4 个区域都发生由少到多的突变.5 个地区发生突变的年份并不同,太湖流域发生突变的年份最早,发生在 1977 年,其次是洞庭湖-鄱阳湖地区,最晚是云南地区,发生在 1998 年.

表 3 长江流域 8 个降水变化敏感区域
年降水量的年代际距平

Table 3 Decadal anomalies of annual precipitation in the 8 sensitive areas from 1960 to 2005 mm				
区 域	1961 ~ 1970 年	1971 ~ 1980 年	1981 ~ 1990 年	1991 年 以来
洞庭湖-鄱阳湖地区	-16.2	1.1	15.2	63.7
汉江流域	1.1	-25.8	24.7	-44.7
鄱阳湖流域南部	13.8	-9.3	-4.5	103.2
太湖流域	-56.5	-11.9	68.5	35.9
金沙江流域中部	-11.4	-3.7	15.1	45.9
岷江-嘉陵江源区	8.3	-9.7	1.4	-76.1
乌江流域南部	48.6	31.8	-80.4	5.8
云南地区	5.4	-11.1	5.8	30.9

表 2 长江流域 8 个降水变化敏感区域
1960 ~ 2005 年年降水量的趋势系数和倾向率

Table 2 Climate trend coefficients and climate trend rate of annual precipitation in the 8 sensitive areas from 1960 to 2005			
区 域	趋势 系数	倾向率/ mm	MK 统 计值
洞庭湖-鄱阳湖地区	0.18	25.40	1.24
汉江流域	-0.06	-6.15	-0.29
鄱阳湖流域南部	0.16	27.70	1.07
太湖流域	0.13	18.80	0.75
金沙江流域中部	0.33*	17.70	2.32**
岷江-嘉陵江源区	-0.31*	-27.10	-2.00*
乌江流域南部	-0.12	-10.40	-0.63
云南地区	0.16	12.40	0.9

注: * 表示通过置信度为 95% 的检验; ** 表示通过置信度为 99% 的检验.正值表示年降水量为增加趋势,负值表示年降水量为减少趋势,趋势系数为年降水量的线性增(减)趋势,倾向率为年降水量每 10 年的变化值.

表 4 长江流域 8 个降水变化敏感区域
年降水量突变检测

Table 4 Abrupt change detection of annual precipitation in the 8 sensitive areas in the Yangtze River basin			
区 域	突变年份	趋势	置信度/%
洞庭湖-鄱阳湖地区	1983	增加	99
汉江流域			
鄱阳湖流域南部			
太湖流域	1977	增加	99
金沙江流域中部	1985	增加	98
岷江-嘉陵江源区	1984	减小	99
乌江流域南部			
云南地区	1998	增加	99

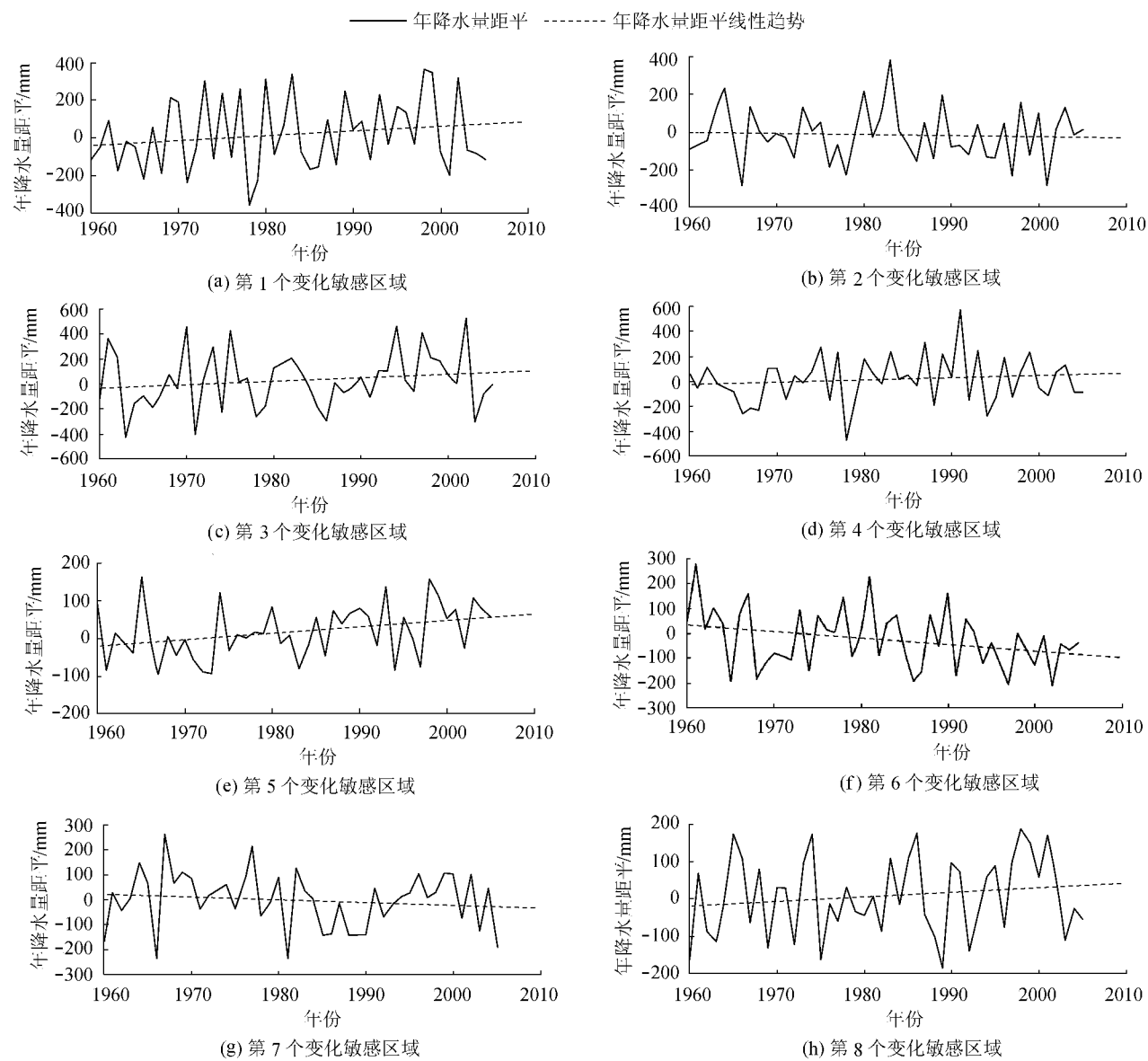


图 3 长江流域 8 个降水变化敏感区域 1960 ~ 2005 年年降水量距平及线性趋势

Fig.3 Anomalies and linear trends of annual precipitation in the Yangtze River basin

4 结 论

- a. 长江流域年降水量主要有 3 种空间分布型:以岷江流域为界呈现东西向均为正值的空间分布型;长江流域南部与长江流域北部反相变化的空间分布型;长江流域源区与其他地区反相变化的空间分布型。
- b. 长江流域有 8 个典型的降水变化敏感区域:洞庭湖-鄱阳湖地区、汉江流域、鄱阳湖流域南部、太湖流域、金沙江流域中部、岷江-嘉陵江源区、乌江流域南部、云南地区。
- c. 汉江流域、岷江-嘉陵江源区、乌江流域南部年降水量呈减少趋势,其中岷江-嘉陵江源区减少最为显著,MK 统计量通过 95% 的置信度检验。其他 5 个地区降水都呈增加趋势,但只有金沙江流域中部年降水量显著增加,年降水量每 10 年增加 17.7 mm,MK 统计量通过 99% 的置信度检验。自 1991 年以来,除太湖流域、乌江流域南部,其他 6 个区域年降水量在这个时期的变化幅度要大于 1961 ~ 1990 年的 3 个年代际变化幅度。
- d. 长江流域有 5 个地区年降水量发生突变,其中岷江-嘉陵江源区在 1984 年发生由多到少的突变,另外 4 个地区发生由少到多的突变,分别是:太湖流域最早,发生在 1977 年,洞庭湖-鄱阳湖地区为 1983 年,金沙江流域中部为 1985 年,云南地区最晚,发生在 1998 年。

参考文献:

- [1] 姜彤, 施雅风. 全球变暖、长江水灾与可能损失[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 277-284.
- [2] JIANG Tong, ZHANG Qiang. Potential control of climatic changes on flood events in the Yangtze Delta during 1100-2000[J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(1): 70-80.
- [3] 苏布达, 姜彤, 施雅风, 等. 1990s 长江流域降水趋势分析[J]. 湖泊科学, 2003, 15(增刊): 38-48.
- [4] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 65-68.
- [5] 邓爱军, 陶诗言, 陈列庭. 我国汛期降水的 EOF 分析[J]. 大气科学, 1989, 13(3): 189-196.
- [6] 黄嘉佑. 旋转主分量分析在天气气候分析中的应用[J]. 气象, 1988, 14(9): 47-51.
- [7] 朱亚芬. 530 年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 100-107.
- [8] 张永领, 高全洲, 丁裕国, 等. 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, 2006, 22(2): 161-168.
- [9] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.
- [10] GERSTENGARBE F W, WERNER P C. Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime[J]. Climate Research, 1999, 11: 97-107.
- [11] GOLYANDINA N, NEKRUTKIN V, ZHIGLHAVSKY A. Analysis of time series structure: SSA and related techniques[M]. New York: Chapman & Hall/CRC, 2001: 1-305.
- [12] VAUTARD R, GHIL M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series[J]. Physical D, 1989, 35: 395-424.
- [13] MANN M E, LEES J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series[J]. Climatic Change, 1996, 33: 409-445.
- [14] 段克勤, 姚檀栋, 蒲健辰. 喜马拉雅山中部过去约 300 年季风降水变化[J]. 第四纪研究, 2002, 22(3): 236-242.
- [15] 王国杰, 姜彤, 陈桂亚. 长江干流径流的时序结构与长期记忆[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 47-56.
- [16] 郭华, 姜彤, 王国杰, 等. 1961~2003 年间鄱阳湖流域气候变化趋势及突变分析[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 443-451.
- [17] 熊安元. 90 年代长江中游异常多雨的气候变化背景分析[J]. 应用气象学报, 2001, 12(1): 113-117.
- [18] 李维京. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J]. 气象, 1999, 25(4): 20-25.

Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin

ZENG Xiao-fan^{1, 2}, ZHAI Jian-qing^{1, 2}, JIANG Tong^{1, 3}, SU Bu-da³

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China ;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China ;

3. Center on Climate Change, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: To get its spatial and temporal characteristics, the spatial zoning and evolutionary trends of the annual precipitation in the Yangtze River basin were analyzed. Based on the precipitation data of 146 meteorological stations in the Yangtze River basin from 1960 to 2005, the spatial characteristics were calculated by use of the empirical orthogonal function and the rotated empirical orthogonal function, the linear evolutionary trends of the annual precipitation from 1960 to 2005 were analyzed, and the abrupt changes were detected by means of the singular spectrum analysis. The results show that, the annual precipitation in the Yangtze River basin has 3 main spatial distribution patterns and 8 sensitive areas. Among the 8 sensitive areas, the annual precipitation in 3 areas (Hanjiang River basin, Minjiang River-Jialing River source area, south of Wujiang River basin) have decreased, especially that in the Minjiang River-Jialing River source area has a decrease of 27.1 mm per 10 years; the annual precipitation in 5 areas (Dongting Lake-Poyang Lake area, south of Poyang Lake basin, Taihu Lake basin, center of Jinsha River basin, Yunnan area) have increased, especially that in the center of Jinsha River basin has an increase of 17.7 mm per 10 years. There are 5 areas with abrupt changes. Among them, the Taihu Lake basin in the lower reaches of Yangtze River had the earliest abrupt changes in 1977, while the Yunnan area in the upper reaches of Yangtze River had the latest ones in 1998. The annual precipitation in the Yangtze River basin has obvious spatial regional characteristics, and its temporal evolutionary trends in various areas are different.

Key words: annual precipitation; spatial characteristic; evolutionary trend; Yangtze River basin