

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.06.002

长江源区和黄河源区降水量变化分析

王冰冰^{1,2}, 荣艳淑¹, 白路遥^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663; 3. 中国石油管道科技研究中心, 河北 廊坊 065000)

摘要:利用长江源区和黄河源区22个气象站1961—2010年的逐日降水量资料,基于正态分布和Gamma分布,从概率角度讨论了两个源区的年、季节和日降水量的变化特征。结果表明:黄河源区年平均降水量和标准差均大于长江源区,近年来长江源区降水量明显增多,两者之间差异减小。两个源区年内降水量分布很不均匀,长江源区降水量大多集中于夏季,年际间丰枯差异显著;黄河源区降水量集中于夏季,年际变率随时间变化减小,降水稳定性增加;两个源区的日降水量以小雨为主,极端日降水量可达暴雨程度,近年来,随着形状参数和尺度参数的增大,日降水量概率分布有偏度和陡峭度减小的趋势,导致日降水量有所增大,进而影响到极端日降水量,使其有增大趋势。

关键词:降水量;概率分布;长江源区;黄河源区

中图分类号:P333

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2013)06-0006-07

Analysis of precipitation variation in source regions of Yangtze River and Yellow River

WANG Bingbing^{1,2}, RONG Yanshu¹, BAI Luyao^{1,3}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China;

3. PetroChina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, China)

Abstract: Daily precipitation data from 22 meteorological stations in the source regions of the Yangtze River and the Yellow River from 1961 to 2010 were used to investigate the characteristics of annual, seasonal, and daily variations of precipitation over these regions from the perspective of probability, based on normal and gamma distributions. The results show that both the annual average precipitation and the standard deviation in the source region of the Yellow River were greater than those in the source region of the Yangtze River. Precipitation in the source region of the Yangtze River has increased significantly in recent years, resulting in the reduction of the difference between the two source regions. Intra-annual precipitation distribution was very uneven in the two source regions. Precipitation in the source region of the Yangtze River was mostly concentrated in the summer, and there was an obvious wet and dry difference in inter-annual precipitation. Precipitation in the source region of the Yellow River was concentrated in the summer, and the inter-annual variability decreased while the precipitation stability increased over time. Daily precipitation in the two source regions was mainly drizzle. However, the extreme daily precipitation could reach the level of storm rain. In recent years, with the increase of the shape and scale parameters, there has been a decreasing trend in the skewness and steepness of the probability distribution of daily precipitation, resulting in an increase in daily precipitation and an increasing trend of extreme daily precipitation.

Key words: precipitation; probability distribution; source region of Yangtze River; source region of Yellow River

近年来,气候变暖使长江和黄河源区的气温显著增加,两个源区平均上升了 0.75°C ,以 $0.018^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 的平均速率升高,升温速率高于全国平均值^[1-2],最新资料分析表明,长江源区和黄河源区每 10 年平均升温速度分别达到了 0.36°C 和 0.37°C ^[3]。气温的升高使得降水量和蒸发量均有明显变化,进而影响水循环变化^[4]。气候变暖严重影响了高海拔地区的自然及生态环境,尤其是长江、黄河两个源区等生态环境极其脆弱的地区。目前,观测资料表明,长江、黄河两个源区出现了大范围的冰川退缩、多年冻土消融加剧以及大范围高寒草甸与草原植被退化的现象,严重影响了该地区的生态平衡^[5]。作为长江、黄河发源地的青藏高原是我国气候变化的启动区^[6],生态环境十分脆弱,气候变化具有超前性,并且变化幅度远高于其周边地区,被认为是全球气候变化的敏感区^[7]。因此,长江和黄河源区气候变化的研究具有很大价值。

目前关于长江源区和黄河源区气候变化的研究主要集中于分析实测资料或模拟资料,研究气候要素的变化趋势、周期、突变、空间特征及影响因素等,研究得出了气候变暖使青藏高原的降水量增多^[8],但长江源区夏季降水量减少,黄河源区春、冬季节的降水量增加的结论^[9]。由于研究使用的时间序列长短不同、同一研究区域选择的气象站点数量和位置也不同,得到的结果可能存在差异。例如,Rong 等^[10]的研究发现,长江源区降水增加明显,黄河源区存在降水减少现象。而在郝振纯等^[11]的研究中显示,长江源区和黄河源区年降水量都在增加。无论如何,气候要素都遵从一定的概率分布规律,平均值是大概率事件,而极端值是小概率事件。如果从概率角度研究气候要素的变化,就可避免上述现象的出现。因此,从概率分布的角度研究气候变化问题是有意义的,然而此类研究成果尚不多见。

为了确定长江源区和黄河源区在气候变暖背景下降水量的变化情况,笔者从两个源区年、季节、日降水量的特征分析入手,从概率分布角度分析长江、黄河两个源区降水量的时空变化特征,为江河源区气候变化的深入研究提供参考。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

本文所采用的数据资料是国家气象信息中心整理的长江、黄河源区 22 个测站(图 1)1961—2010 年的逐日降水资料,并在此基础上进行逐季和逐年的统计。

将 50 年的降水资料划分为 3 个气候基准期,分

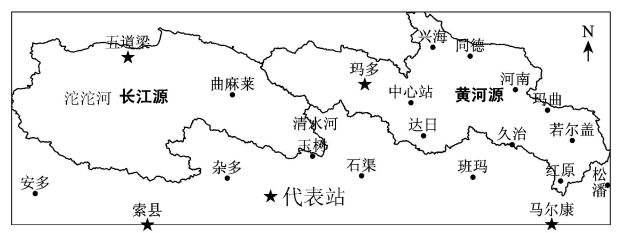


图 1 长江源区、黄河源区气象站点分布(五角星为代表站) 别为 1961—1990 年,1971—2000 年和 1981—2010 年,年降水量和月降水量均是从这 3 个气候基准期出发进行计算和比较的。在日降水量分析中,将 50 年的降水资料划分为 5 个年代,分别对每个年代的降水量的频率变化进行分析。

1.2 分析方法

逐日降水量序列近似服从 Γ 分布函数,并具有较高的稳定性^[12]。将利用 Γ 分布对逐日降水量(日均降水量不小于 0.1 mm)进行拟合,然后利用 K-S 检验方法对拟合效果进行检验。 Γ 分布密度函数如下:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \quad (x > 0) \quad (1)$$

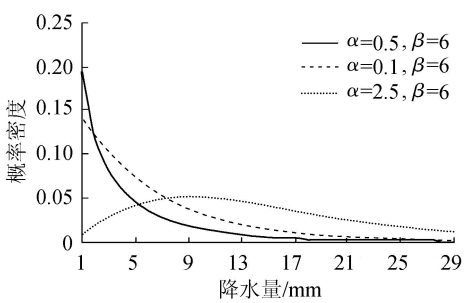
$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty e^{-t} t^{\alpha-1} dt \quad (2)$$

式中: α 为形状参数, $\alpha > 0$; β 为尺度参数, $\beta > 0$; t 为时间; x 为日降水量。

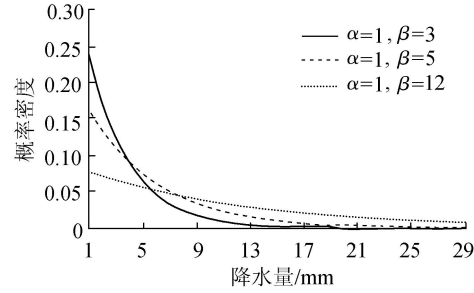
形状参数 α 衡量 Γ 分布的倾斜程度, α 越小, Γ 分布越倾斜, α 越大, Γ 分布曲线越对称,越接近正态分布,特别当 $\alpha < 1$ 时,曲线近似为“L”形,概率密度在零附近最大。尺度参数 β 衡量陡峭程度, β 越小,曲线越陡峭, β 越大,曲线越平坦。

图 2 是形状参数和尺度参数分别变化时,对应的 Γ 分布曲线的变化。可以看到,当尺度参数固定为 6,形状参数从 0.5 变化到 2.5 时(图 2(a)),曲线形状发生改变,偏度减小,曲线逐渐变得对称起来,对于日降水量而言,当形状参数较小时,平均日降水量较小,分布曲线呈“L”形,当形状参数逐渐增大时,意味着众数增大,即平均日降水量增加。当形状参数固定为 1 时,随着尺度参数的增大(图 2(b)),分布曲线的陡峭程度减小,逐渐变得平坦,对于日降水量而言,就意味着降水量等级的离散度增大,对应的极值概率增大,即极端降水气候事件趋于增多。

K-S 检验 (Kolmogorove-Smirnov test) 基于累积分布函数,用以检验两个经验分布是否不同或一个经验分布与另一个理想分布是否不同^[13]。假设检验问题为:样本总体分布服从某特定分布(H_0),样本总体分布不服从某特定分布(H_1)。设 D 为 $F_0(x)$ 与 $F_n(x)$ 差距的最大值,定义如下:



(a) 形状参数变化对 Γ 分布曲线的影响



(b) 尺度参数变化对 Γ 分布曲线的影响

图2 形状参数和尺度参数对日降水量概率分布的影响

$$D = \max |F_n(x) - F_0(x)| \quad (3)$$

式中: $F_n(x)$ 为经验分布函数; $F_0(x)$ 为假设的总体分布函数。

当 $D > D_\alpha$ 时,接受 H_1 ;当 $D \leq D_\alpha$ 时,接受 H_0 。

2 结果分析

2.1 年降水量特征分析

图3为长江、黄河两个源区年降水量的时间变化,其中3条水平线为气候基准期的平均值。可以看出,黄河源区的平均降水量明显高于长江源区,它们的多年平均降水量相差约150 mm。3个气候基准期中,1961—1990年的平均降水量在两个源区都是最小的,1981—2010年期间降水量最大,说明最近30年降水量比过去明显增大。两个源区逐年降水量一直围绕着平均值呈波动变化,二者呈现明显的正相关性,表明两个源区降水量变化具有一致性特征。分析近10年的降水量可以发现,长江、黄河源区分别有8年和7年的降水量高于平均值,说明近年来两个源区降水有增多趋势。

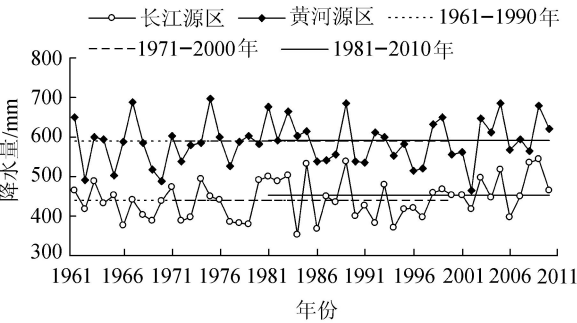


图3 长江源区和黄河源区降水量时间序列变化

表1是两个源区降水量均值和标准差的统计结果。由表1可以看出,黄河源区各基准期的均值和标准差均大于长江源区,说明黄河源区不仅降水量大于长江源区,而且年际变化也比较大,不稳定程度也大于长江源区。1981—2010年期间,两个源区的平均降水量均有所上升,特别是长江源区降水量增多程度较大,黄河源区降水量增多程度略小。比较两个源区年降水量均值和标准差的差异可以看出,黄河源区的均值和标准差都比长江源区超过15%以上,随着年代变化,两个源区均值的差异有微弱的减小趋势,标准差的大小有明显递减的特征。两个源区降水量均值差异减小与长江源区降水量增多有很大关系。

表1 长江源区和黄河源区年降水量均值和标准差 mm

区域	1961—1990年		1971—2000年		1981—2010年	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
黄河源区	584.9	60.7	586.6	52.8	591.6	53.0
长江源区	439.2	43.7	438.2	43.9	452.9	46.2
比值(黄河源区/长江源区)	1.33	1.39	1.34	1.20	1.31	1.15

2.2 季节降水量特征分析

利用正态分布分别对3个基准气候期的季节降水量进行了拟合,K-S检验表明(表2),经验分布与理论分布差异的最大值均达到了0.05的显著性水平,表明正态分布能够较好地描述季节降水量的概率分布特征。图4是正态分布中位置参数和尺度参数的季节变化,这种变化相当于均值和标准差的年内变化。

表2 长江源区和黄河源区季节降水量 K-S 检验统计

时段	K-S 检验值							
	长江源区				黄河源区			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
1961—1990年	0.067	0.094	0.085	0.067	0.077	0.094	0.094	0.106
1971—2000年	0.160	0.090	0.104	0.109	0.083	0.080	0.135	0.182
1981—2010年	0.077	0.106	0.074	0.100	0.101	0.087	0.063	0.127

注: $D_{n,\alpha} = 0.248 (n=30, \alpha=0.05)$ 。

从图4中可以看出,长江、黄河两个源区各季节平均降水量(用位置参数表示)的年内分布很不均匀,降水主要集中在夏季,夏季多雨、冬季少雨的特征十分明显。比较3个基准气候期均值,可以发现两个源区都存在春季和冬季变化较小,夏季和秋季变化较大的明显特点。长江源区1981—2010年夏季降水量最大,其次是1961—1990年,1971—2000年夏季降水量最小。黄河源区1971—2000年夏季降水量最小,其他两个基准气候期降水量接近。

与位置参数相比,两个源区在3个基准气候期各季节尺度参数变化较大(图4(b),(d)),可以看出,尺度参数最大值均发生在夏季,是降水量最不稳定的季节,而冬季的尺度参数最小,因此冬季降水量

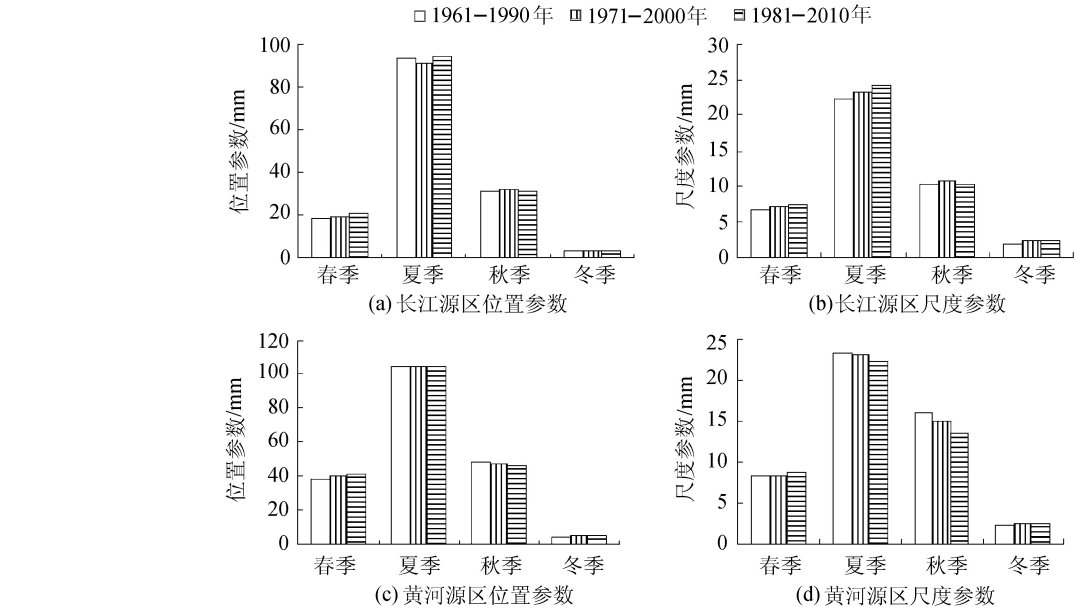


图 4 降水量位置参数和尺度参数的季节变化

最稳定。比较长江源区夏季降水量的尺度参数在不同气候期的变化还可以发现,长江源区夏季降水量的尺度参数呈现增加的趋势,表明近年来长江源区夏季降水呈现剧烈变化的趋势,即夏季降水丰枯差异更明显。

与长江源区略有不同,黄河源区尺度参数夏季和秋季呈现出减小趋势,这意味着黄河源区夏季和秋季降水量的年际差异逐渐减小,即丰枯转变的程度有减弱的趋势。这种现象可以解释表 1 中反映的现象,由于黄河源区夏季降水量略有减小,而长江源区夏季降水量有明显增多,使得两个源区夏季降水量均值差异有减小的趋势,反映在年降水量中也有同样结果。另外,黄河源区降水量年际波动减小,而长江源区随着降水量增多,产生了较大的年际波动,使得两个源区标准差差异减小。根据文献[14]的研究,最近 10 年黄河源区降水有明显减少趋势,长江源区有明显增加趋势,两个源区降水量的差距缩小。本文分析结果与这个结论是一致的。

由于均值和标准差变化会使得极值的频率和强度发生非线性变化,并且标准差的变化对极值频率的影响更大^[15-16],由此推断,长江源区夏季极端降水频率会增高,而黄河源区极端降水频率可能略有减弱。

2.3 日降水量特征分析

2.3.1 日降水量时间变化

在日降水量的分析中,由于数据量较大,无法显示每个测站图形,仅在两个源区分别挑选了两个代表站进行对比分析,它们分别是长江源区的五道梁站、索县站和黄河源区的玛多站、马尔康站。五道梁和玛多站分别是两个源区年降水量最小的站点,索县和马尔康站分别是两个源区年降水量最大的站点。表 3 是它们的极端最大日降水量与平均日降水量的比较,其中带下划线者是极端最大值。

由表 3 可以看出,在 1960 年代,长江源区索县站的最小日降水量超过黄河源区的马尔康站;在 1970 年代,长江源区和黄河源区的最大年降水量都出现了极端最大值,其中长江源区的五道梁站为 37.1 mm,黄河源区的玛多站为 54.2 mm,其他两个站的最大日降水量相同;长江源区的索县站在 2000 年代出现了极端最大日降水量,黄河源区的马尔康站在 1980 年代出现了极端最大日降水量。

虽然长江源区的年降水量总体小于黄河源区,但是在个别年代,无论是索县还是五道梁站,都曾出现大于黄河源区对应站点的极端日降水量,因此,长江源区的极端降水量并不比黄河源区小,这需要人们对该地区的极端降水给予重视。

表 3 长、黄两个源区水文代表站降水量的年代变化

水文站	1960 s 降水量		1970 s 降水量		1980 s 降水量		1990 s 降水量		2000 s 降水量	
	mm		mm		mm		mm		mm	
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
长江源区五道梁	27.6	1.4	<u>37.1</u>	2.4	27.4	2.5	28.4	2.6	33.9	3.0
长江源区索县	47.1	4.0	43.8	3.8	36.4	4.1	34.1	3.9	<u>54.1</u>	4.2
黄河源区玛多	30.8	2.3	<u>54.2</u>	2.6	24.9	2.3	31.9	2.3	32.1	2.6
黄河源区马尔康	44.8	4.7	43.8	4.6	<u>53.5</u>	5.1	53.0	5.1	45.6	5.0

注:表中下划线数值代表极值。

另外,两个源区极端最大日降水量与平均日降水量差异明显,二者相差达 10 倍以上,特别是长江源区的五道梁和玛多站,极端日降水量是平均日降水量的 20 倍之多,这表明,降水量越少的站,极端日降水量变化越大,可能造成的危害也越大。

图 5 是两个源区 4 个代表站日降水量的累积频率曲线,可以看到,累积频率曲线均呈“L”形,说明日降水量大多集中在小雨量级上。对于长江源区而言,五道梁和索县站日降水量频率大多集中在 1.1 mm

和 1.8 mm 以内,出现频率达到 50% 左右,降水量变化最大频率大多集中在 2~7 mm 范围内,大于 7 mm 和 9.3 mm 的日降水量仅占 10% 左右(图 5(a))。对于黄河源区,玛多和马尔康站中有 50% 的降水频率在 1.3 mm 和 2.5 mm 以下,较大频率集中在 2~10 mm 范围内,仅有 10% 左右的雨日出现了大于 7 mm 和 13.1 mm 日降水量(图 5(b))。因此,对两个源区而言,长江源区和黄河源区各站日降水量以小雨为主,偶尔达到中雨量级,暴雨出现的频率十分小,如果日降水量达到小雨量级的上限就可认为出现了小概率事件,即极端降水事件。

2.3.2 日降水量空间变化

图 6 是两个源区在 5 个年代中 Γ 分布的形状参数的空间分布图。可以看出,随着年代的变化,长江源区各个站点的形状参数都有所增大,由 0.64~0.70 增加到 0.68~0.73 的范围;黄河源区形状参数变化较复杂,每个年代都出现多个中心,形状参数也有随年代逐渐增大的现象,由 0.59~0.70 增加到 0.65~0.73。另外,两个源区的形状参数均小于 1,说明日降水量概率分布的偏态性较强,小雨量级的降水发生的概率较大,极端降水的概率相对较小,与图 5 反映的现象一致。但是,在 2000 年代,两个源区的形状参数都增加到了最大值,这是日降水量概率分布形状偏度减小的标志,也预示着极端日降水量有增大的趋势。

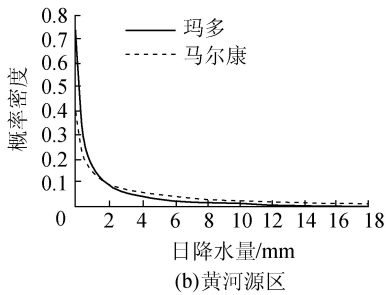
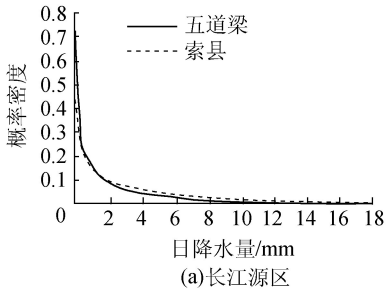


图 5 代表站日降水量概率密度

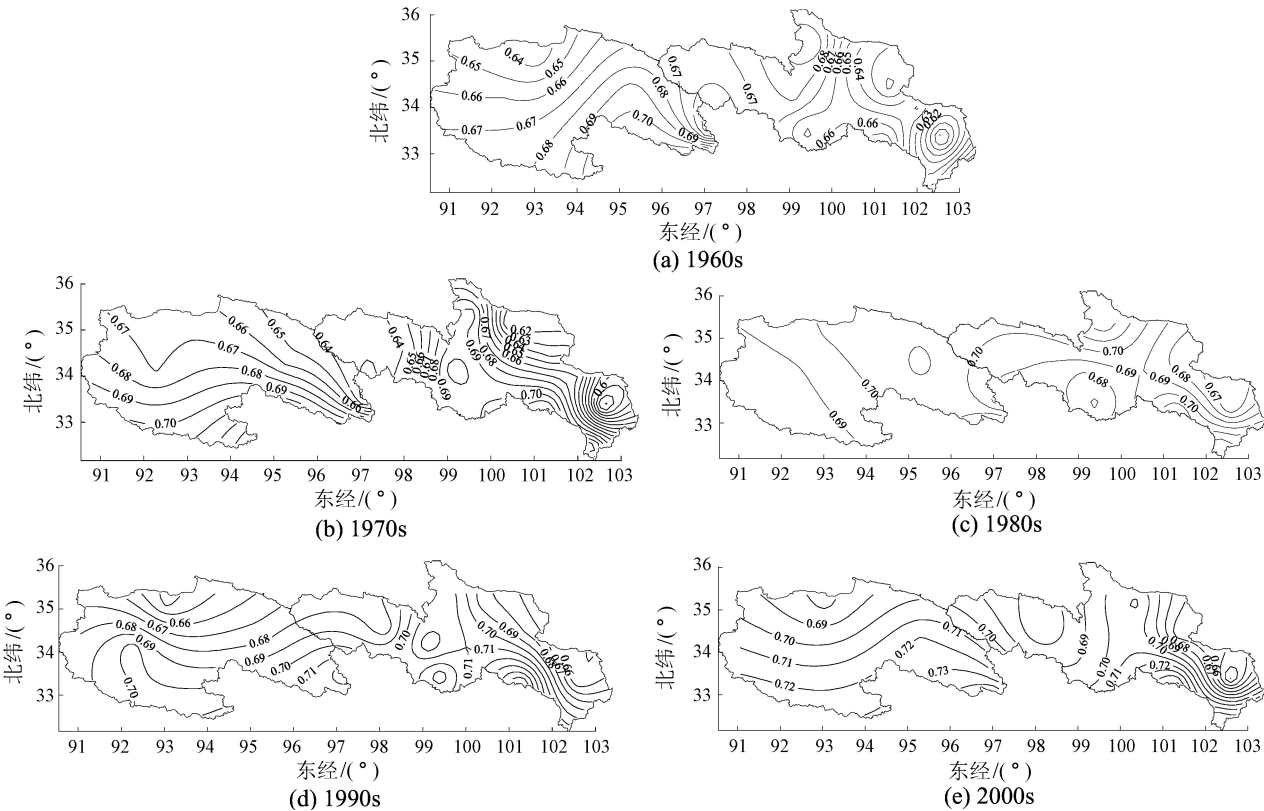


图 6 长江、黄河两个源区各年代形状参数空间分布

图 7 是长江、黄河两个源区 5 个年代的尺度参数空间分布图,尺度参数控制分布的值域,起放大或缩小分布面积的作用,对概率分布的影响大于形状参数,同时尺度参数偏大的地区,其极端降水发生的可能性较大。长江源区尺度参数由北向南逐渐增加,随着年代的变化,长江源区的尺度参数也略有增大,数值由 1960 年代的 3.8~5.0 变化到 2000 年代的 4.4~5.0,即长江源区的北部尺度参数增大明显,南部变化较小。尺度参数变大,是日降水量概率分布曲线陡峭程度减小、平均日降水量增大的标志,随着尺度参数的增大,极端降水量的概率也会有所增大。黄河源区的尺度参数比形状参数的空间分布稳定,其空间分布形状基本不变,都是由东部数值较小区向西部数值较大区过渡。1960 年代到 1990 年代数值变化不明显,但是,在 2000 年代,黄河源区的尺度参数略有增大,由过去的 3.7~6.4 增加到 4.2~6.6。因此,黄河源区的日降水量有增大的趋势,由此导致极端日降水量的频率也会相应增大。

3 结 论

a. 长江源区和黄河源区降水量具有显著的年际波动,丰枯转换时间接近,但是数值相差明显,在 1961—1990 年气候基准期中,黄河源区年平均降水量和标准差分别是长江源区的 1.3 和 1.4 倍。在 1971—2000 年和 1980—2010 年的气候基准期中,长江源区降水量增多明显,黄河源区略有增多,导致

2 个源区降水量均值和标准差的差异都在减小,目前 2 个源区标准差仅相差 15%,表明了长江源区不仅降水量增多,而且降水量的年际波动幅度上升,丰枯转换程度加大。

b. 长江源区和黄河源区年内降水量的分布很不均匀,夏季多雨、冬季少雨的特征显著。长江源区降水主要集中在夏季,但是降水波动性较大,丰枯转换频繁;黄河源区降水也集中于夏季,但降水量波动程度小于长江源区。这也是黄河源区降水量多于长江源区的根本原因。

c. 黄河源区平均日降水量也大于长江源区,但是,个别站点、个别年份长江源区的极端最大日降水量大于黄河源区,这是长江源区降水极端性较强的标志。两个源区的日降水量以小雨为主,偶尔达到中雨量级,暴雨出现的概率非常小,但是,极端最大日降水量与平均日降水量的差异显著,特别是长江源区极端日降水量是平均日降水量的 20 倍之多,这表明,降水量越少的站,极端日降水量变化越大。

d. 从形状参数和尺度参数所反映的日降水量空间变化中,两个源区日降水量概率分布的偏态性较强,小雨量级降水发生的概率最高。两个源区的形状参数都有随年代增加而增大的现象,预示着日降水量有增大的趋势,导致极端日降水量概率增大。从尺度参数看,长江源区北部地区尺度参数有随着年代增加而增大的现象,南部变化较小,表明长江源区北部日降水量有整体增大趋势,进而导致极端降

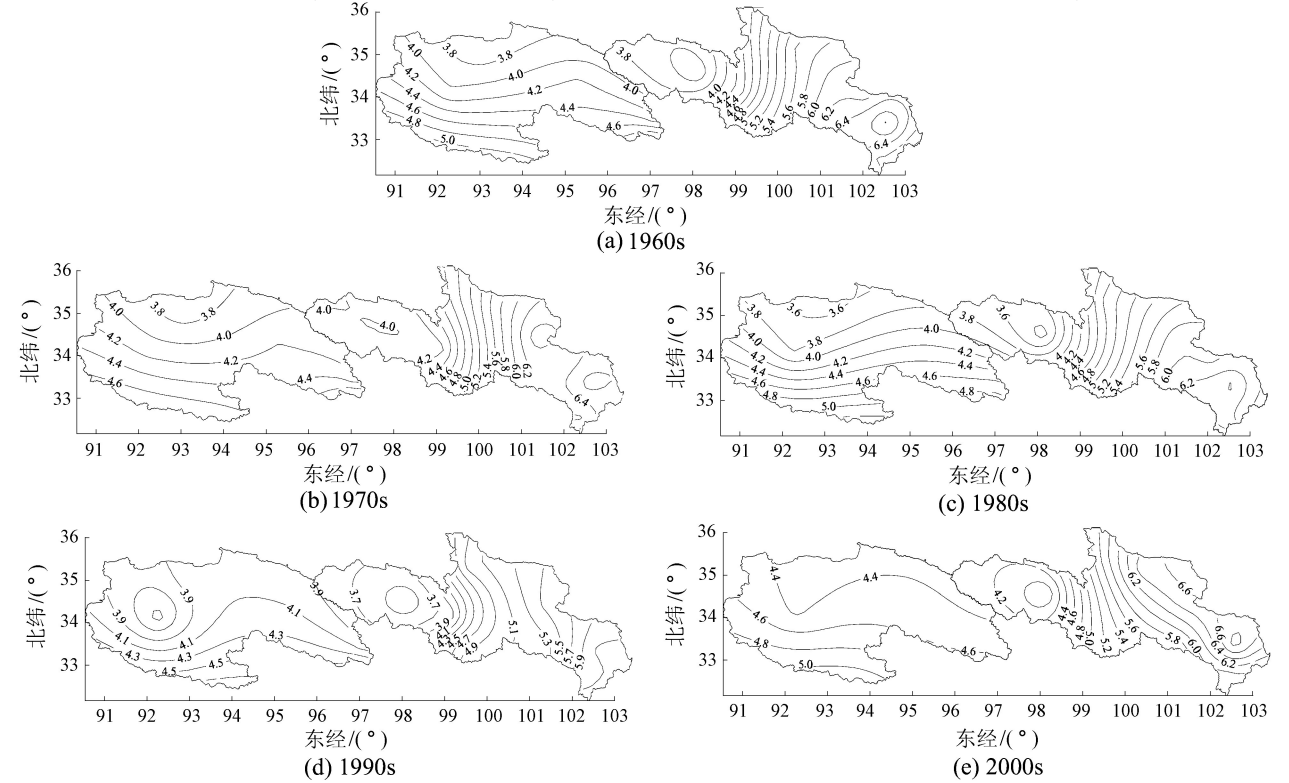


图 7 长江、黄河两个源区各年代尺度参数空间分布

水概率也会增大;黄河源区的尺度参数呈现东低西高的特征,最近 10~20 年,尺度参数略有增大,平均日降水量也开始增大,导致极端日降水量的概率也会相应增加。

综上所述,长江源区和黄河源区降水存在明显的气候变化,特别是长江源区日降水量明显增大,导致年降水总量增多,伴随着极端降水概率增大,这对源区的生态环境改善有很大益处,但是极端降水概率增大,会加大洪涝灾害的风险,特别在夏季这种情况更应引起相当重视。

参考文献:

[1] 谢昌卫,丁永建,刘时银.近 50 年来长江—黄河源区气候及水文环境变化趋势分析[J].生态环境,2004,13(4):520-523. (XIE Changwei, DING Yongjian, LIU Shiyin. Changes of weather and hydrological environment for the last 50 years in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers [J]. Ecology and Environment, 2004, 13(4):520-523. (in Chinese))

[2] 李林,李凤霞,郭安红,等.近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J].自然资源学报,2006,21(1):79-85. (LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over "Sanjiangyuan" Region in recent 43 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1):79-85. (in Chinese))

[3] 白路遥,荣艳淑.气候变化对长江、黄河源区水资源的影响[J].水资源保护,2012,28(1):46-70. (BAI Luyao, RONG Yanshu. Impacts of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1):46-70. (in Chinese))

[4] 荣艳淑,张行南,姜海燕,等.长江上游区域蒸发皿蒸发量变化及其对水分循环的影响[J].地球物理学报,2012,55(4):20-29. (RONG Yanshu, ZHANG Xingnan, JIANG Haiyan, et al. Pan evaporation change and its impact on water cycle over the upper reach of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4):20-29. (in Chinese))

[5] 王根绪,李琪,程国栋,等.40 年来江河源区的气候变化特征及其生态环效应[J].冰川冻土,2001,23(4):346-352. (WANG Genxu, LI Qi, CHENG Guodong, et al. Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(4):346-352. (in Chinese))

[6] 冯松,汤懋苍,王冬梅.青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J].科学通报,1998,43(6):34-39. (FENG Song, TANG Maocang, WANG Dongmei. The new proof of Qinghai-Xizang Plateau as the startup area of climatic change in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43

(6):34-39. (in Chinese))

[7] 刘晓东,侯萍.青藏高原及其邻近地区近 30 年气候变暖与海拔高度的关系[J].高原气象,1998,17(3):245-249. (LIU Xiaodong, HOU Ping. Relationship between the climatic warming over the Tibetan Plateau and its surrounding areas in recent 30 years and the elevation [J]. Plateau Meteorology, 1998, 17(3):245-249. (in Chinese))

[8] 李林,陈晓光,王振宇,等.青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J].气候变化研究进展,2010,6(3):181-186. (LI Lin, CHEN Xiaoguang, WANG Zhenyu, et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau [J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(3):181-186. (in Chinese))

[9] 汪青春,周陆生,张海玲,等.长江黄河源地区气候变化诊断分析[J].青海环境,1998,8(2):73-77. (WANG Qingchun, ZHOU Lusheng, ZHANG Hailing, et al. Climate change analysis of source regions of Yangtze River and Yellow River [J]. Environment of Qinghai, 1998, 8(2):73-77. (in Chinese))

[10] RONG Yanshu, WEI Lusi, BAI Luyao. Extreme rainfall events in the sources of the Yangtze and the Yellow Rivers [C]//Proceedings of 34th IAHR World Congress. Brisbane, Australia; 2011:839-846.

[11] 郝振纯,江微娟,鞠琴,等.青藏高原河源区气候变化特征分析[J].冰川冻土,2010,32(6):1130-1136. (HAO Zhenchun, JIANG Weijuan, JU Qin, et al. The features of climate changes in the five river source regions of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6):1130-1136. (in Chinese))

[12] LIANG Li, ZHAO Linna, GONG Yuanfa, et al. Probability distribution of summer daily precipitation in the Huaihe Basin of China based on Gamma distribution [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(1):72-84.

[13] 王星.非参数统计[M].北京:清华大学出版社,2009:1-304.

[14] 王可丽,程国栋,丁永建,等.黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J].冰川冻土,2006,28(1):8-14. (WANG Keli, CHENG Guodong, DING Yongjian, et al. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1):8-14. (in Chinese))

[15] MEARNS L O, KATZ R W. Extreme high-temperature events in their probabilities changes in mean temperature [J]. Journal of climate and Applied Meteorology, 1984, 23(12):1601-1613.

[16] KATZ R W, BROWNS B G. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages [J]. Climatic Change, 1992, 21(3):289-302.

(收稿日期:2013-05-17 编辑:高渭文)