

文章编号:1004-4574(2013)04-0092-09

黄河流域汛期降水非均匀性变化规律研究

马雪宁,张明军,马 潜,刘文莉

(西北师范大学 地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:降水的时间分配对水资源利用有很大影响,降水的分配不均匀更是季风气候区旱涝灾害的主要原因。利用黄河流域72个台站1960-2010年汛期(6-9月)的逐日降水资料,通过EOF, Morlet小波分析等方法分析了该地区近51年来汛期降水集中程度的变化规律,并定量研究了降水集中度与旱涝指数之间的关系。研究表明:黄河流域汛期降水分配具有明显的不均匀性,东北部地区的降水不均匀性和集中度以及降水集中度对旱涝的影响更加明显,应高度警惕极端强降水造成洪涝灾害,而西部地区的降水相对较少,因而进一步加重了西部的干旱;降水集中期表现出从东北向西南地区推进的规律,7月中旬是降水集中的主要时段,并存在年际及年代际变化。

关键词:集中度;集中期;旱涝;黄河流域

中图分类号:P462

文献标志码:A

Nonuniform change of precipitation in Yellow River Basin during flood period

MA Xuening, ZHANG Mingjun, MA Qian, LIU Wenli

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The temporal distribution of precipitation has many effects on water resource uses. The non-uniform distribution of precipitation is the main cause of flood and drought disaster in the monsoon climate zone. Based on the daily precipitation data in flood period (June to September) of 72 stations in the Yellow River Basin from 1960 to 2011, the change rules of precipitation concentration degree in the flood period during these past 51 years in this area and the quantitative relationship between precipitation concentration degree and flood and drought index were analyzed by methods of EOF, Morlet wavelet analysis, etc. The results indicate that, the distribution of precipitation is obviously non-uniform. The non-uniform characteristics and concentration degree of precipitation in the northeast of the area and the effects of precipitation concentration degree are especially obvious on flood and drought disaster, and so flood and drought disasters caused by extreme strong precipitations should be watched out with extra vigilance; while the precipitation in the west of the area is relatively less, which aggravates the drought of the west. The precipitation concentration period shows an advancing trend from northeast to southwest. Mid-July is the main period of precipitation concentration and have inter-annual and inter-decadal change characteristics.

Key words: precipitation-concentration degree (PCD); precipitation-concentration period (PCP); flood and drought; the Yellow River Basin

收稿日期:2012-10-22; 修回日期:2012-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41161012);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019)甘肃省高等学校基本科研业务费项目

作者简介:马雪宁(1987-),女,硕士研究生,主要从事全球变化与可持续发展方面的研究. E-mail:mxn1987_good@163.com

通讯作者:张明军,教授,博士生导师. E-mail:mjzhang2004@163.com

黄河流域是中国重要的“能源流域”、农业基地,它在社会发展中的特殊地位^[1],决定了对黄河流域汛期降水集中程度研究的重要性。然而,黄河流域幅员辽阔,山脉众多,东西高差悬殊,加之受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂,流域内不同地区降水差异较大^[2];同时,受季风气流强弱的影响造成黄河流域总降水量和反映不同时段内降水量分配的降雨结构均发生了变化。降水量年内分配特征通常采用各月、季占年降水量的百分比和距平百分率等,一般为年内季节或某个特定时段降水量占年降水量的比例,它难以全面反映降水量年内分配的非均匀性^[3]。

近年来许多气象工作者根据 ZHANG 等^[4]提出的利用降水集中度和集中期度量降水量非均匀分配的方法,对我国长江流域^[5-6]、西北地区^[7]、华北地区^[8]及东北地区^[9-10]降水的非均匀性进行了研究,并得到一些有意义的结论。而关于黄河流域降水时空变化研究更多侧重于趋势分析^[11]、等值线法^[12-13]、局部光滑薄面样条法^[14]等分析手段,而对降水集中度、集中期指标缺乏研究。因此,本文利用降水集中度和集中期指标定量描述黄河流域的降水不均匀时空分布特征,分析其降水的年内分布规律,并进一步探讨了汛期降水集中度与旱涝指数 SPI 之间的关系,以期揭示该地区年内降水的非均匀性特征,为研究旱涝灾害规律和水资源科学利用提供基础,并为今后的气候诊断和预测提供依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

本文所研究的区域位于 95°53'E - 119°05'E, 32°10'N - 41°50'N, 涉及青海、甘肃、四川、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等9省(区)。该区多年平均降水量在 200 ~ 600 mm 之间,天然径流量为 580 亿 m³,水资源短缺十分严重,生态环境也相对脆弱^[15]。本文所用资料是国家信息中心提供的 1960 - 2010 年黄河流域 72 站点的汛期(6 - 9 月)逐日降水资料。图 1 是所选站点和河流分布示意图。

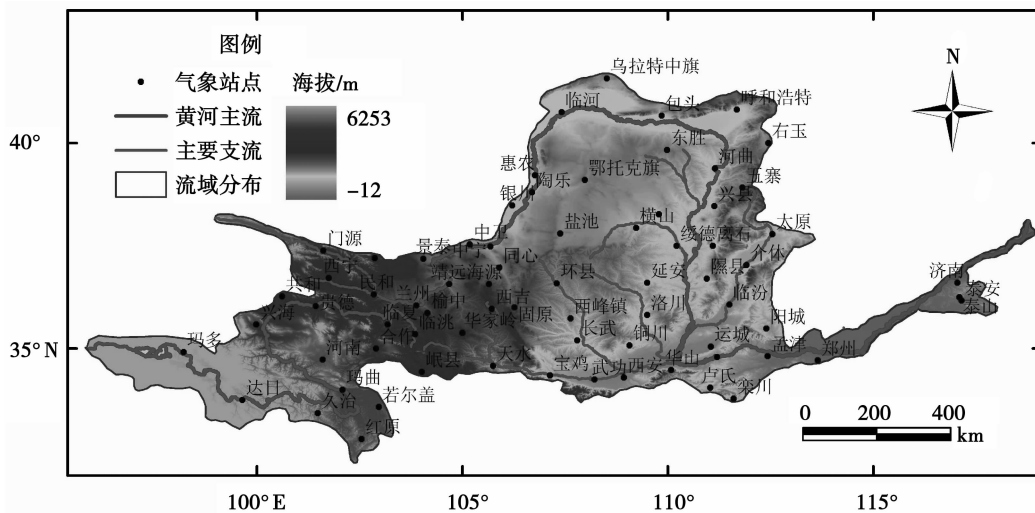


图 1 黄河流域示意图

Fig. 1 Sketch of the Yellow River Basin

1.2 集中度(PCD)和集中期(PCP)的定义

根据 Zhang Lujun 等^[4,16]提出的利用向量分析原理表征单站降水量时间分配特征的新参数:降水集中度(PCD)和集中期(PCP),定量地描述了降水的集中程度和集中时段,对黄河流域降水的时空分析特征有很好的演示作用,具体的计算公式如下:

$$PCD = \frac{R}{R_i} = \frac{\sqrt{(R_{xi})^2 + (R_{yi})^2}}{\sum_{j=1}^N r_{ij}} \tag{1}$$

式中:

$$R_{xi} = \sum_{j=1}^N r_{xi} = \sum_{j=1}^N r_{ij} \sin \theta_j, \quad R_{yi} = \sum_{j=1}^N r_{yi} = \sum_{j=1}^N r_{ij} \cos \theta_j, \tag{2}$$

$$R = \sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N r_{ij} \sin \theta_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N r_{ij} \cos \theta_j\right)^2}, \quad R_i = \sum_{j=1}^N r_{ij}. \quad (3)$$

式中: θ_j 表示第 j 个日对应的方位角,做法为整个研究时段内的方位角 360° 做每日平均分配,计算公式如下:

$$\theta_j = j \times \frac{2\pi}{122}. \quad (4)$$

式中 PCD 为研究时段(6 - 9 月)内的降水集中度, R_{xi}, R_{yi} 分别为某测站第 i 年 6 - 9 月逐日降水量在笛卡尔坐标系中 x, y 轴上的投影之和; R_i 为某测站第 i 年研究时段内的总降水量(mm); r_{ij} 为研究时段内某日降水量(mm); i 为年份($i = 1960, 1961, \dots, 2010$); j 为研究时段内的日序($j = 1, 2, \dots, N$).

某测站第 i 年的降水集中期 PCP 则反映了降水集中的一个时刻,计算方法如(5) 式所示:

$$PCP = \arctan \left(\frac{R_{xi}}{R_{yi}} \right). \quad (5)$$

本文以日为 6 - 9 月内研究时段,由式(1) 和式(5) 可知,PCD 能够反映降水总量在某年汛期各日的集中程度;而 PCP 反映汛期最大降水量出现的日.具体的计算方法及原理详见文献[4].

1.3 其他方法

本文还用到经验正交函数分解(EOF)^[17-19] 和小波分析等常用的分析方法.对于气候旱涝分析,则采用标准化降水 SPI 指数^[20-21].

2 结果分析

2.1 汛期平均降水量季节内变化

图 2 给出了黄河流域 72 个气象站平均的 6 - 9 月逐日合计(即每个站点 51 a 同日降水量之和)降水量年内变化特征.黄河流域汛期逐日降水量平均为 136.6 mm,日际变化较大,均方差为 34.9 mm,最大值出现在 7 月 27 日,降水量为 219.5 mm,最小降水量为 6 月 4 日的 61.3 mm.汛期降水量可以用二次多项式进行拟合,且拟合能达到相当高的优度,相关系数高达 79.1% ($P < 0.0001$).研究表明,对称点在 8 月 1 日,但实际降水的最大值出现在 7 月 27 日,以下分别进行分析(图略).从检验的结果看,不管是 7 月 27 日为界还是以 8 月 1 日为界,前后 2 段的平均值具有显著性的差异.

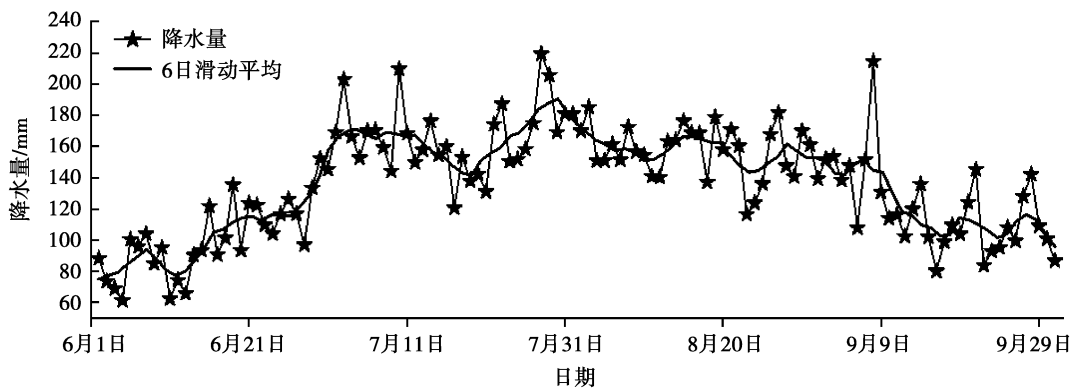


图 2 汛期(6 - 9 月)72 个站点平均降水量动态变化

Fig. 2 Dynamic change of mean precipitation of 72 stations in flood period (form June to September)

2.2 降水集中度和集中期的年际变化

图 3 给出了 1960 - 2010 年黄河流域、上游、中游和下游(上、中和下游直方图略)地区汛期(6 - 9 月)降水 PCD 和 PCP 的年际变化情况.由图 3(a) 可见,黄河流域汛期降水 PCD 变化具有阶段性特征并且年际变化明显,平均降水 PCD 呈逐年减少趋势,其历年平均值为 0.27,从 1995 年的 0.38 变化到 2003 年的 0.19,说明黄河流域汛期降水集中程度有所减弱,2003 年汛期降水量较平均,不会造成明显的洪涝灾害;以 1977 年为界,前后两个时段 PCD 变化表现出“W”型变化趋势.降水 PCD 空间差异较大,其中下游地区降水 PCD 较大,多年平均为 0.36,中上游地区降水 PCD 相对小些,与年际变化曲线十分相似,并且两个区域多年的平均

值非常相近,分别为 0.28 和 0.25。

图 3(b)中,黄河流域汛期平均降水 PCP 历年从 1997 年的 20.04 日(6 月 20 日)变化到 1999 年的 56.78 日(7 月 26 日),历年平均值为 41.17 日(7 月 11 日),年际变化较大,均方差达到 53.22 日。并且汛期降水 PCP 表现出区域的不同步性,黄河上游地区降水 PCP 出现的相对较晚,多年平均值为 31.38 日(7 月 1 日),而中下游区域降水 PCP 出现的相对早,其中下游最早开始于 7 月 6 日,PCP 总体表现出由黄河下游向中、上游推进的规律。1960 - 2010 年黄河流域汛期降水 PCP 具有显著地年际和年代际变化规律。黄河流域汛期降水 PCP 总体经过 20 世纪 60 年代初的一段平稳变化后,出现突降突升的变化趋势,尤以 20 世纪 80 年代中期到 90 年代中后期降水 PCP 震荡变幅最为明显。降水 PCP 减少,则一年中最大日降水量出现的时段较早,而较大的震荡变幅,说明该地区的天气受到不确定因素的影响较多。

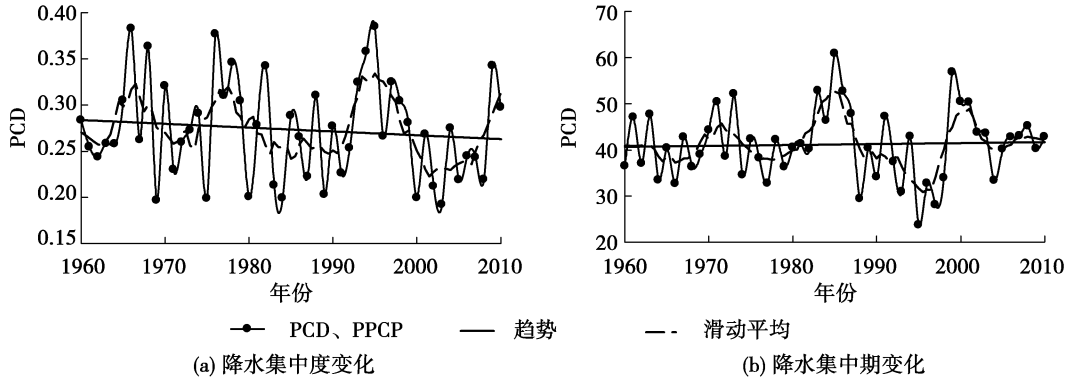


图 3 1960 - 2010 年黄河流域汛期降水 PCD 和 PCP 图

Fig. 3 Diagrams of PCD and PCP in flood period of the Yellow River Basin from 1960 to 2010

2.3 降水集中度和集中期的时空分布

2.3.1 汛期降水 PCD 和 PCP 的时空平均状况

黄河流域位于对流层上部南亚高压单体的东北侧和对流层中部西太平洋副热带高压的西北边缘,降水集中在夏季^[22]。统计表明,黄河流域 6 - 8 月降水量占全年降水量的 40% ~ 70% 左右,最大降水量出现在 7 月份,占全年降水量的 21.2%。由于汛期降水量在空间和非均匀性分布,局部降水易形成旱涝灾害,严重制约着当地经济的健康持续发展,因此汛期降水分配对旱涝格局起到至关重要的作用。本文采用降水 PCD 和 PCP 对 1960 - 2010 年黄河流域汛期降水量的非均匀性进行分析,结果见图 4。

由 1960 - 2010 年黄河流域汛期平均降水 PCD 空间分布(图 4(a))可见,汛期降水 PCD 由西南向东北依次增加,即 PCD 等值线基本呈东北—西南走向。黄河流域汛期降水 PCD 分布具有明显的高低值中心,在内蒙古的西部地区出现 PCD 的高值中心 - 临河,最高值为 0.43,而在四川地区出现 PCD 的低值中心——若尔盖,最低值为 0.15,说明黄河流域汛期降水 PCD 的空间差异较大,造成这一现象的原因可能是由于内蒙古西北部降水受赤道西太平洋地区正的海温异常影响,具有明显的季节性,因此降水更加集中,而四川地区降水受大气环流和季风环流影响情况比较复杂。

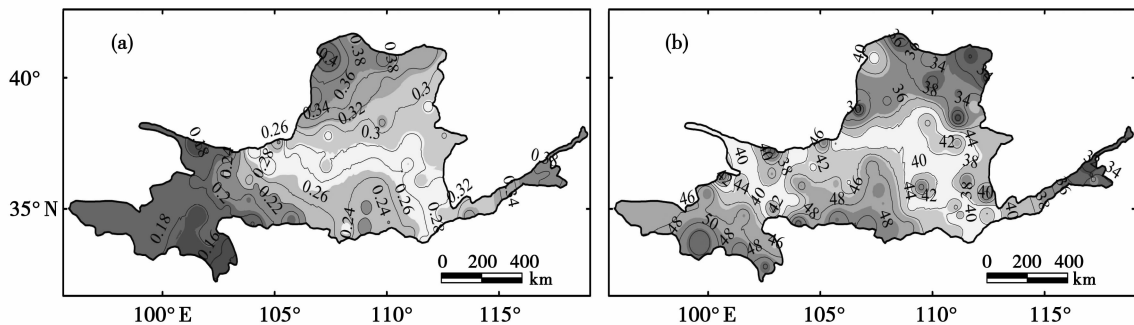


图 4 黄河流域多年汛期平均降水 PCD(a) 和 PCP(b) 空间分布(图 4(b) 中单位为日)

Fig. 4 Spatial distribution of PCD(a) and PCP(b) of mean precipitation in flood period of many years in Yellow River Basin (the unit is day in Fig. 4(b))

从汛期降水 PCP 空间分布(图 4(b))可见看出,黄河流域汛期降水 PCP 空间分布特征明显,主要表现出由东北向西南地区推进的变化规律,汛期降水 PCP 在黄河流域下游的山东境内最先开始,在 6 月下旬的第 30 日就开始了,接着在流域北部于第 31 日(即 7 月 1 日)开始,西南部开始相对较晚,于第 38 日左右开始,推进到最西部的黄河上游流域处到了第 40 日(7 月 10 日)以后,其中最晚为达日从第 50 日以后开始。平均而言西部相对较晚,大都位于第 40~50 日左右。可见黄河流域汛期平均降水量 PCP 空间分布的区域差异显著。

2.3.2 汛期降水事件 PCD 和 PCP 的异常时空分布

为了弄清楚黄河流域 1960-2010 年汛期降水 PCD 和 PCP 的主要异常空间分布特征,分别对其做经验正交函数分解(EOF),得到主要空间分布。通过对黄河流域汛期降水 PCD 的 EOF 分解的第 1、2 模态方差贡献率为 26.44%,11.39%,其余模态没能通过 North^[19] 显著检验。同样对汛期降水 PCP 的 EOF 分解的第 1 模态解释方差为 11.72%,第 2、3 模态没能通过 North 显著性检验。图 3 给出了 1960-2010 年黄河流域汛期降水 PCD 的 EOF 分析第 1(图 5(a))、2(图 5(b))模态,PCP 的 EOF 分析第 1(图 5(c))模态分布。

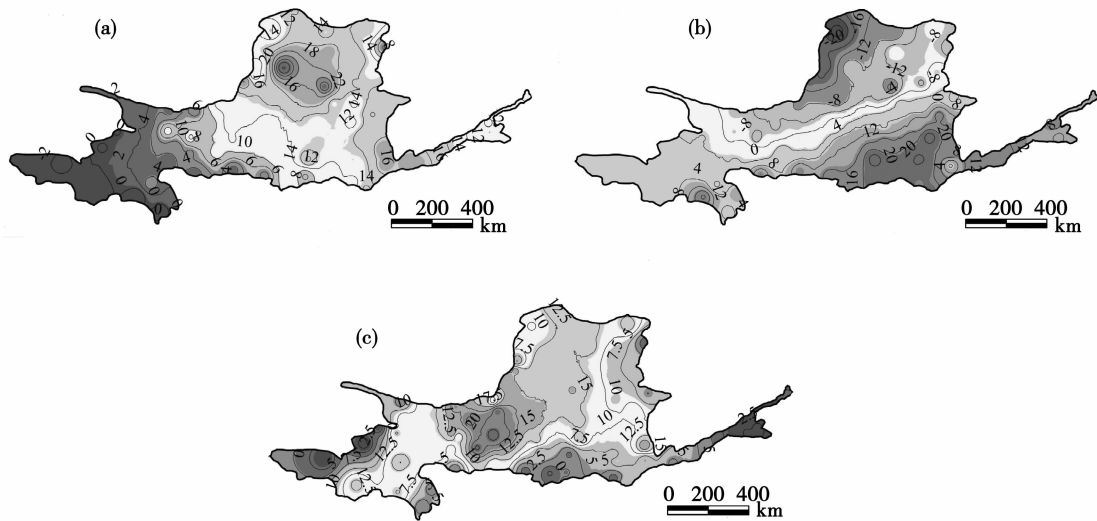


图 5 黄河流域汛期降水 PCD 的 EOF 分解第 1(a)和第 2(b)模态空间分布, PCP 第 1(c)模态空间分布(图中数值均×100)

Fig. 5 Spatial pattern of the first (a) and the second (b) EOF mode of PCD and the first (c) mode of PCP in flood period of Yellow River Basin (the values in the figures need to be multiplied 100)

从图 5(a)中可见,PCD 第 1 模态代表的空间分布类型显示,黄河流域汛期降水分全流域普遍集中或普遍相对均匀,意味着全流域地形差异虽大,但受大尺度天气、气候系统的影响一致,大值带位于内蒙古的东胜地区附近。从该模态时间系数变化曲线(图略)可以看出,该模态基本以年代际振荡为主,其中在 20 世纪 60 年代后期到 70 年代中期及 2000 年后主要以负异常为主,表明流域降水的集中程度有所减弱,而 20 世纪 80 年代该模态正负异常交替出现。从长期变化趋势上也可以看出近 51 a 黄河流域降水 PCD 表现为明显的下降趋势;PCD 第 2 模态所代表的空间分布类型呈东南—西北走向,表明汛期降水东南部集中度高时西北部降水较为均匀,西北部集中度高时东南部降水较为均匀。该型可能反映了季风环流对黄河流域降水 PCD 的影响。从时间系数变化曲线(图略)可以看出,该模态在 20 世纪 70 年代中期以前主要表现为负异常,而 70 年代中期以后正负异常交替出现。

从黄河流域 1960-2010 年汛期降水 PCP 第 1 模态空间分布图(图 5(c))来看:全流域降水 PCP 在空间分布上同样具有良好的地带性规律,该流域降水 PCP 高值区位于甘肃和宁夏的交界处附近。从该模态时间系数演变(图略)可以看出,汛期降水 PCP 在不同年际及年代际变化差异较大,1977 年以前和 1988-1998 年之间年际变化显著。从年代际变化特征可以看出 20 世纪 60 年代及 90 年代主要以负异常为主,而 80 年代主要以正异常为主。从其长期演变趋势上看,近 51 a 来呈现出弱的增加趋势,表明中下游降水集中期偏早上游偏晚分布特征有所增加。

2.4 周期分析

为了进一步搞清楚近 51 a 来黄河流域汛期降水集中度和集中期的周期振荡特征,本文对该流域汛期降水集中度和集中期的平均时间序列进行了小波分析,具体计算参考文献[23]。如图 6 所示,图中清晰地显示了降水集中度和集中期的周期变化、强弱,小波系数的变化趋势与信号的起伏是基本一致的,等值线中心为高低值中心(正小波系数为高值,负小波系数为低值),中心值得大小可以反映出波动的振荡强度^[16]。对于一个特定时间尺度的振荡,其波峰和波谷与相应尺度小波的正值和负值相对应。

从 PCD 序列的复值 Morlet 小波变换图 6(a) 和小波方差图图 6(b) 对应分析发现,在小波方差存在一个突出的点,对应的频率为 0.25,其倒数为 4,这个点的 Fisher 统计量为 $g_1 = 0.2554$ 。取显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、周期序号 $r = 1$,查调个分析可知 $g_a(s, r) = g_{0.05}(25, 1) = 0.22805$, $g_{0.05}(25.5, 1) < g_{0.05}(25, 1)$,因此必有 $g_1 > g_{0.05}(25.5, 1)$,4 a 作为第 1 周期检验可以通过;其次黄河流域汛期降水 PCD 序列在年尺度上还存在着贯穿于整个时间序列 25 a 左右的长第 2 周期变化,而且沿着时间序列振荡越来越强,但 $g_2 = 0.0400 < g_{0.05}(25.5, 2) = 0.15139$,说明 25 a 作为第 2 周期未通过 $\alpha = 0.05$ 的显著检验;另外是 15 a 的第 3 主周期,但其振荡与 25 a 的相比表现的弱些。虽然 15 a 周期在大部分时间信号较强,但值得注意的是自 20 世纪 90 年代中后期开始,这一信号开始弱化,同样 15 a 作为第 3 周期检验未能通过。

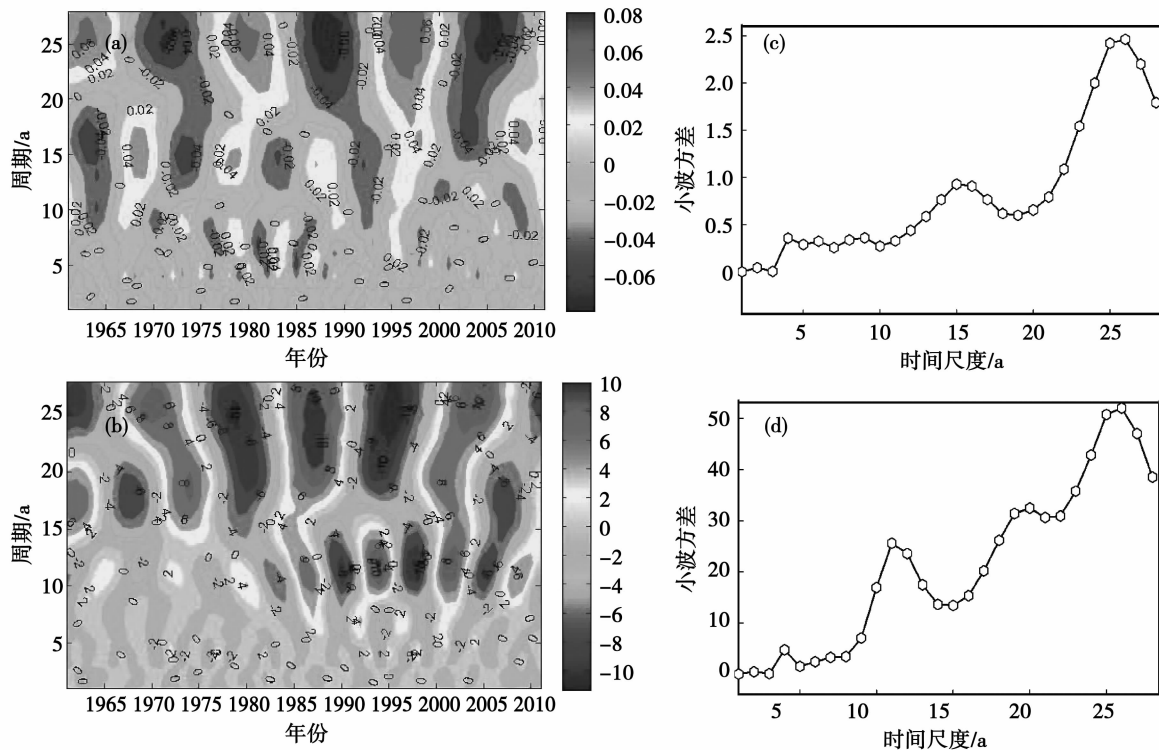


图 6 汛期降水集中度 Morlet 小波系数(a,b)和小波方差(c,d)

Fig. 6 Morlet wavelet coefficients (6(a),6(b)) and wavelet variance (6(c),6(d)) of PCD in flood period

由图 6(c) 中对应可以看出,汛期降水 PCP 序列存在明显 4a 第 1 主周期,该点的 Fisher 统计量为 $g_1 = 0.2554$ 。取显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、周期序号 $r = 1$,查调和分析可知 $g_a(s, r) = g_{0.05}(25, 1) = 0.22805$, $g_{0.05}(25.5, 1) < g_{0.05}(25, 1)$,因此必有 $g_1 > g_{0.05}(25.5, 1)$,4a 作为第 1 周期检验可以通过;另外汛期降水 PCP 序列存在 25 a 左右的第 2 周期振荡,并且贯穿整个时间序列,但此点的 Fisher 统计量为 $g_2 = 0.0400$, $g_2 < g_{0.05}(25.5, 2) = 0.15139$,因此 25 a 作为第 2 周期检验未能通过 0.05 的显著水平检验;同时汛期降水 PCP 还存在 11 a 的第 3 周期,此周期尤其自 20 世纪 80 年代以来周期振荡表现的更强烈,并且该点 Fisher 统计量为 $g_3 = 0.09116$, $g_3 > g_{0.05}(25.5, 3) = 0.08612$,因此 11 a 作为第 3 周期检验通过了 0.05 的显著水平检验。

通过以上分析,黄河流域汛期降水 PCD 和 PCP 存在较长周期的变化,其长周期中又包含较短的周期,具有较好的自相似性,并存在一定的规律性。虽然降水 PCD 和 PCP 振荡周期不完全一致,但均存在 5 a 以上的周期振荡,由此可以认为黄河流域汛期降水事件 PCD 和 PCP 在近 51 a 来主要表现为显著地年代际周期振荡。

3 降水集中度与气候旱涝的关系

黄河流域的河川径流主要由大气降水补给,降水自东南向西北逐渐减少,加之受大气环流及季风的影响,流域降水时间和空间分布不均匀。其不均匀分布对该流域水资源量的影响十分巨大。首先是对流域径流量的影响,径流量地区分布不均匀,径流深由流域南部向北部递减,对于相同的年降水量,年径流量差别可达到 $127 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。同时对于黄河流域降水不均匀性对水资源的影响分析发现空间降水不均匀对产流的影响更为重要。张士锋等^[24]对降水不均匀性对黄河流域天然径流量的影响做了详细的分析,这里就不在赘述。

其次,汛期是黄河流域降水最集中的季节,也是雨涝发生频率最高、范围最广的季节。因此本文利用该流域内 72 个气象站降水等气象资料,分别计算各地逐年的降水集中度和旱涝 SPI 指数(计算方法详见文献[25-26])。从 SPI 和 PCD 年际变化曲线图(图略),我们发现黄河流域逐年汛期的旱涝 SPI 指数与降水集中度年际变化趋势有较好的一致性,相关系数为 0.67,并通过了 0.01 的置信度检验。由此看出:黄河流域汛期降水越集中的年份,偏涝的程度越强;而降水 PCD 低的年份,表明汛期降水偏少,容易出现干旱。从空间分布可以看出(图 7):黄河流域大部分(主要是东北部)地区旱涝 SPI 与降水集中度 PCD 具有很好的一致性,并且这种一致性要好于西南部,出现这种现象是因为西南部地区,降水量比较小、水资源比较短缺,降水量对旱涝的影响远远大于降水集中度的影响;而东北部地区降水相对集中、丰沛,降水集中度对旱涝的影响更加的明显。

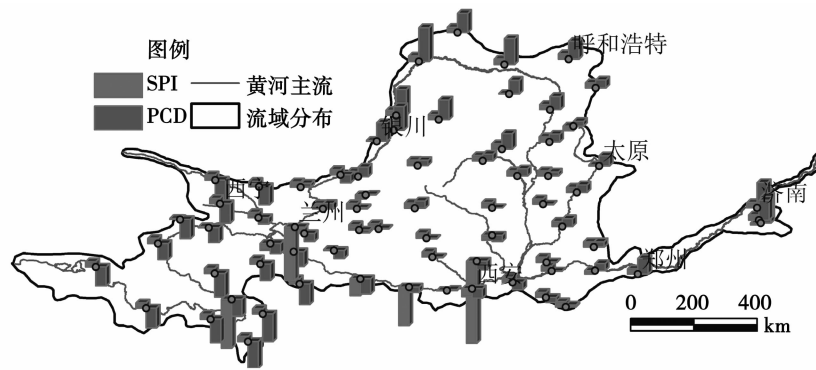


图 7 黄河流域汛期降水 PCD 和 SPI 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of PCD and SPI of flood period precipitation in the Yellow River Basin

4 结论与讨论

(1) 黄河流域汛期降水分配不均,年际及年代际变率大,表现为有些年份汛期降水相对集中,而有些年份时间分配均匀。但总体上汛期降水 PCD 值较小,即降水分配趋于均匀化。整个流域降水 PCP 主要出现在第 40-50 日(即 7 月 10 日-7 月 20 日),但其年际及年代际变率大。

(2) 汛期降水 PCD 的 EOF 分析显示,第 1 特征向量表现为全流域一致性;第 1 特征向量的时间系数在 20 世纪 60 年代后期到 70 年代中期及 2000 年后主要以负异常为主,80 年代该模态正负异常交替出现。第 2 特征向量表现为东南-西北走向;时间系数表现为在 20 世纪 70 年代中期以前主要表现为负异常,而 70 年代中期以后正负异常交替出现。

(3) 黄河流域汛期降水 PCP 在空间分布上同样具有良好的地带性规律,高值区位于甘肃和宁夏的交界处附近。该模态时间系数演变年代际变化在 20 世纪 60 年代及 90 年代主要以负异常为主,而 80 年代主要以正异常为主。从其长期演变趋势上看,近 51 a 来呈现出弱的增加趋势,表明中下游偏早上游偏晚分布特征有所增加。

(4) 中下游流域汛期降水集中程度高,出现时间偏早;而上游流域汛期降水分配相对均匀,出现时间偏晚。空间分布上,内蒙古以及汾河、洛河一带降水集中度和旱涝 SPI 指数具有明显的一致性,说明该地区降水相对集中、丰沛,降水集中度对旱涝的影响更加明显,应高度警惕极端强降水造成洪涝灾害。因此,从某种

程度上来讲,引起黄河流域旱涝灾害发生的直接原因是包含降水量、降水集中度和集中期的综合作用,以及三者之间相互关系的具体时空分配,至于定性、定量的研究旱涝灾害与三者之间的关系获得更为准确的结果,还需要进一步深入的研究。

本文对黄河流域近 51 a 来汛期降水 PCD 和 PCP 时空变化特征及周期进行了的分析,而对降水集中度与气候旱涝关系分析相对薄弱。降水量、降水集中度以及降水集中期三者之间相互关系的时空分配,直接影响黄河流域旱涝变化,如何定性、定量的分区研究黄河流域旱涝与降水量等三者之间的关系,并较准确的进行气候诊断和预测,这些问题都应给以足够的重视,也是我们下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 张善强. 黄河流域夏季旱涝变化及气候物理因素的影响[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(3): 40-44.
ZHANG Shanqiang. Characteristics of changes of summer drought and flood and impact of climatic physical factors on these changes in the Yellow River Valley[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(3): 40-44. (in Chinese)
- [2] 邵晓梅, 严昌荣, 魏红兵. 基于 Kriging 插值的黄河流域降水时空分布格局[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2): 65-69.
SHAO Xiaomei, YAN Changrong, WEI Hongbing. Spatial and temporal structure of precipitation in the Yellow River Basin based on Kriging method[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27(2): 65-69. (in Chinese)
- [3] 王纪军, 裴铁璠, 顾万龙, 等. 降水年内分配不均匀性指标[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1364-1368.
WANG Jijun, PEI Tiefan, GU Wanlong, et al. Non-uniformity index of annual precipitation distribution[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1364-1368. (in Chinese)
- [4] ZHANG Lujun, QIAN Yongfu. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their inter-annual variations[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 146-163.
- [5] 杜银, 张耀存, 谢志清, 等. 长江中下游梅汛期强降水过程非均匀特征[J]. 气象科学, 2007, 27(2): 133-139.
DU Yin, ZHANG Yaojun, XIE Zhiqing, et al. Study on heterogeneity characteristics of durative heavy precipitation during the meiyu period in low-middle reach of Yangtze River[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007, 27(2): 133-139. (in Chinese)
- [6] 张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中度和旱涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622-630.
ZHANG Lujun, QIAN Yongfu. A study on the feature of precipitation concentration and its relation to flood-producing in the Yangtze River Valley of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 622-630. (in Chinese)
- [7] 杨金虎, 王鹏祥, 白虎志, 等. 中国西北降水年内非均匀性特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(5): 276-281.
YANG Jinhu, WANG Pengxiang, BAI Huzhi et al. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation over northwest China[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(5): 276-281. (in Chinese)
- [8] 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 843-852.
ZHANG Tianyu, CHENG Bingyan, WANG Jifang, et al. Temporal and spatial change characteristics of precipitation-concentration degree (PCD) and precipitation-concentration period (PCP) over north China in rainy season[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 843-852. (in Chinese)
- [9] 张文, 张天宇, 刘剑. 东北降水过程年集中度和集中期的时空变化特征[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(3): 403-410.
ZHANG Wen, ZHANG Tianyu, LIU Jian. Temporal and spatial features of precipitation-concentration degree and precipitation-concentration period of annual rainfall over Northeast China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(3): 403-410. (in Chinese)
- [10] 张运福, 胡春丽, 赵春雨, 等. 东北地区降水年内分配的不均匀性[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 89-94.
ZHANG Yunfu, HU Chunli, ZHAO Chunyu, et al. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation in Northeast China[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(2): 89-94. (in Chinese)
- [11] 徐总学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34.
XU Zongxue, ZHANG Nan. Long-term trend of precipitation in the Yellow River Basin during the past 50 years[J]. Geographical Research, 2006, 25(1): 27-34. (in Chinese)
- [12] 庞爱萍, 李春晖, 杨志峰, 等. 近 50 年黄河流域降水变化的时空特征[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2008, 44(4): 420-424.
PANG Aiping, LI Chunhui, YANG Zhifeng, et al. Spatial and temporal changes in precipitation in the Yellow River Basin in the last 50 years[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2008, 44(4): 420-424. (in Chinese)
- [13] 王浩, 严登华, 秦大庸, 等. 近 50 年来黄河流域 400mm 等雨量线空间变化研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 649-655.
WANG Hao, YAN Denghua, QIN Dayong, et al. A study of the spatial shift of 400mm-rainfall contours in the Yellow River Basin during recent 50 years[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(6): 649-655. (in Chinese)
- [14] 祝青林, 张留柱, 于贵瑞, 等. 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 477-482.
ZHU Qinglin, ZHANG Liuzhu, YU Guirui, et al. The spatial and temporal variability characteristics of precipitation in the Yellow River Basin of recent 30 years[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(4): 477-482. (in Chinese)
- [15] 李春辉, 杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 753-759.

- LI Chunhui, YANG Zhifeng. Spation – temporal changes of NDVI and their relations with precipitation and runoff in the Yellow River Basin[J]. *Geographical Research*, 2004, 23 (6): 753 – 759. (in Chinese)
- [16] 杜银, 张耀存, 谢志清, 等. 长江中下游梅汛期强降水过程非均匀特征[J]. *气象科学*, 2007, 27 (2): 133 – 139.
DU Yin, ZHANG Yaocun, XIE Zhiqing, et al. Study on heterogeneity characteristics of durative heavy precipitation during the meiyu period in low – middle reach of Yangtze River[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(2): 133 – 139. (in Chinese)
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI Fengying. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [18] 张雪芹, 彭莉莉, 郑度, 等. 1971 – 2004 年青藏高原总云量时空变化及其影响因子[J]. *地理学报*, 2007, 62 (9): 959 – 969.
ZHANG Xueqin, PENG Lili, ZHENG Du, et al. Variation of total cloud amount and its possible causes over the Qinghai – Xizang plateau during 1971 – 2004[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 959 – 969. (in Chinese)
- [19] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110 (7): 699 – 706.
- [20] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. *植物生态学报*, 2004, 28 (4): 523 – 529.
YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Comparison between standardized precipitation index and Z – index China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 523 – 529. (in Chinese)
- [21] 车少静, 李春强, 申双和. 基于 SPI 的近 41 年(1965 – 2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. *中国农业气象*, 2010, 31 (1): 137 – 143.
CHE Shaojing, LI Chunqiang, SHEN Shuanghe. Analysis of drought – flood spatial – temporal characteristics based on standard precipitation index (SPI) in Heibei province during 1965 – 2005[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(1): 137 – 143. (in Chinese)
- [22] 朱福康, 陆龙骅. 南亚高亚[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 20 – 80.
ZHU Fukang, LU Longhua. *South Asia High*[M]. Beijing: Science Press, 1980: 20 – 80. (in Chinese)
- [23] 姜世中. 黄河源区达日至玛曲段近 50 年径流量变化趋势分析[J]. *地理研究*, 2008, 27 (1): 221 – 228.
JIANG Shizhong. Analysis on variety trend of runoff between Dari and Maqu in the headwater region of Yellow River in the past 50 years[J]. *Geographical Research*, 2008, 27 (1): 221 – 228. (in Chinese)
- [24] 张士锋, 贾绍凤. 降水不均匀性对黄河流域天然径流量的影响[J]. *地理科学进展*, 2001, 20(4): 355 – 363.
ZHAGN Shifeng, JIA Shaofeng. A Research of the impacts of uneven precipitation on the natural runoff in the Yellow River[J]. *Progress in Geography*, 2001, 20(4): 355 – 363. (in Chinese)
- [25] 翟禄新, 冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J]. *自然资源学报*, 2011, 26 (5): 847 – 857.
ZHAI Luxin, FENG Qi. Dryness/wetness climate variation based on standardized precipitation index in northwest China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 847 – 857. (in Chinese)
- [26] Patel N R, Chopra P, Dadhwal V K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index[J]. *Meteorological Applications*, 2007, 14: 329 – 336.