

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.008.

李雪, 于坤霞, 李鹏, 等. 黄河流域不同水资源区降雨集中度时空演变与驱动力[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 266-273.

LI Xue, YU Kunxia, LI Peng, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Force of Rainfall Concentration in the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 266-273.

黄河流域不同水资源区降雨集中度时空演变与驱动力

李雪¹, 于坤霞¹, 李鹏¹, 李占斌¹, 杨志², 张国军², 张晓明³, 马文涛²

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2.宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川 750000; 3.中国水利水电科学研究院水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100000)

摘要: [目的]探究黄河流域降雨集中度的时空演变特征及其驱动力, 揭示区域降雨的年内分配特征, 为流域预防极端降雨及遏制水土流失和水资源规划制定提供一定的科学依据。[方法]基于1961—2018年逐月栅格降雨数据, 采用Theil-Sen Median分析和Mann-Kendall检验探究黄河流域降雨集中度变化趋势特征, Morlet小波分析法分析了黄河流域降雨集中度的演变特征, 对降雨集中度出现显著性变化的区域, 使用交叉小波变换讨论选取的3个大气异常环流因子和太阳黑子对降雨集中度的影响。[结果](1)黄河流域中下游地区年平均降雨量远大于上游, 流域中下游的三门峡至花园口及花园口以下等区域年均降雨量最大可达867 mm, 而黄河上游的兰州至河口镇北部年均降雨量只有115 mm。(2)黄河流域降雨集中度分布较不均匀, 流域龙门至三门峡等地降雨年内变化有明显的季节性, 兰州至河口镇的东北部年内变化具有异常集中性。(3)黄河流域降雨集中度变化趋势变化显著的区域主要集中在龙羊峡以上、龙羊峡至兰州及兰州至河口镇区域。(4)太阳黑子和大气环流异常因子对降雨集中度变化均有影响, 其中太阳黑子通过影响大气环流异常因子间接影响降雨集中度, 而大气环流异常因子直接影响降雨集中度。[结论]黄河流域不同水资源区降雨集中度差异较大, 在制定水土流失防治措施及水资源规划政策时, 需根据不同水资源区实际降雨情况因地制宜。

关键词: 降雨集中度; 黄河流域; 时空演变; 驱动力; 交叉小波

中图分类号: TV125

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0266-08

Spatiotemporal Evolution and Driving Force of Rainfall Concentration in the Yellow River Basin

LI Xue¹, YU Kunxia¹, LI Peng¹, LI Zhanbin¹, YANG Zhi²,
ZHANG Guojun², ZHANG Xiaoming³, MA Wentao²

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750000, China; 3.Ecological Engineering Research Center for Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100000, China)

Abstract: [Objective] Investigating the spatial and temporal evolution of rainfall concentration in the Yellow River Basin and its driving forces can reveal the intra-annual distribution of rainfall in the region and provide a scientific basis for the prevention of extreme rainfall and the control of soil erosion and water resources planning in the basin. [Methods] Theil-Sen Median analysis and Mann-Kendall test were used to investigate the trend characteristics of rainfall concentration in the Yellow River basin based on the month-by-month raster rainfall data from 1961—2018. The influence of the three selected atmospheric anomalous circulation

收稿日期: 2022-07-27

修回日期: 2022-09-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(52079104, 51979290); 宁夏区水利科技项目(SBZZ-J-2021-12, SBZZ-J-2021-13); 榆林市2018年度科技计划项目(CXY2018-2-19); 陕西省重点研发计划(2023-ZDLSF-60)

第一作者: 李雪(1998—), 男, 河北张家口人, 在读硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1239921724@qq.com

通信作者: 于坤霞(1989—), 女, 河南长垣市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事流域水热耦合平衡研究。E-mail: yukunxia@126.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

factors and sunspots on rainfall concentration were discussed. [Results] (1) The average annual rainfall in the middle and lower reaches of the Yellow River basin was much greater than that in the upper reaches, with the maximum average annual rainfall in the middle and lower reaches of the basin from Sanmenxia to Huankou and below Huankou reaching 867 mm, while the average annual rainfall in the upper reaches of the Yellow River from Lanzhou to the northern part of Hekou town was only 115 mm. (2) The rainfall concentration in the Yellow River Basin varied greatly from watershed to watershed, with significant seasonal variations in the watershed from Longmen to Sanmenxia, and abnormal concentrations in the northeastern part of the watershed from Lanzhou to Hekou town. (3) Areas with significant trends in rainfall concentration in the Yellow River basin mainly concentrated above Longyangxia, from Longyangxia to Lanzhou and from Lanzhou to Hekou town. (4) Both sunspots and atmospheric circulation anomalies had influence on rainfall concentration, with atmospheric circulation anomalies directly influencing rainfall concentration and sunspots indirectly influencing rainfall concentration through atmospheric circulation anomalies. This study investigated the rainfall concentration in the Yellow River Basin, which could provide a scientific basis for the prevention of extreme rainfall and the control of soil erosion and water resources planning in the Yellow River Basin. [Conclusion] The concentration of rainfall in different water resource zones in the Yellow River Basin varied greatly. When formulating erosion control measures and water resource planning policies, it is necessary to tailor them to the actual rainfall conditions in different water resource zones.

Keywords: rainfall concentration; Yellow River Basin; spatiotemporal evolution; driving force; cross wavelets

IPCC 第六次报告指出,目前的升温速度至少是过去 2000 年以来前所未有的,受全球气候变暖影响,我国降雨年内分配特征发生了显著变化^[1-2],极端降雨事件频发,给社会经济发展和人类生产生活造成了严重危害^[3-5]。目前,国内外学者大量研究降雨量的变化^[6-7],这些研究揭示了区域降雨的时空演变规律。但降雨的变化不仅包括降雨量的分布变化^[8-9],降雨年内分配不均很有可能导致旱涝灾害的发生,威胁人民生命财产安全^[10-11]。因此,揭示区域降雨的年内分布特征具有重大意义。

目前国内外研究降雨集中度使用比较广泛的是由学者 Oliver^[12]提出的一种利用月降雨量推求降雨集中度指数的方法,此方法计算简单,物理意义直观,能够很好地表征降雨在年内的分配情况。Martin Vid^[13]定义了表征日降雨分布不均匀性的降雨集中度指数,该方法虽然可以更精确反映区域降雨分布特征,但对数据要求较高,不适宜大面积推广使用。de Luis 等^[14]研究发现降雨的分配特征与对土壤的侵蚀能力有紧密联系。Chatterjee 等^[15]用降雨集中度指数对印度西孟加拉地区降雨的时空分布特征进行了分析探究。我国的段亚雯等^[16]利用降雨集中度公式对中国区域的降雨集中指数进行了计算分析,研究发现我国降雨集中度指数整体呈现由东南向西北逐渐递增的分布趋势。黄生志等^[8]在探究汉江流域降雨

结构特征时,区分了月降雨集中度和日降雨集中度指数,对比了两种尺度降雨集中度的适用情况。目前对降雨集中度的研究多集中在湿润多雨地区,而缺少对水资源紧缺,降雨分布不均匀的干旱地区的研究。事实上,我国大部分干旱半干旱地区每年的降雨主要集中在少数几天,而这几天的降雨可能会决定该年是多雨年还是干旱年。因此,探究干旱半干旱区域降雨的年内分布情况对预防极端降雨,高质量利用水资源及遏制水土流失十分有必要^[17-18]。

本文以整个黄河流域为研究对象,选取 1961—2018 年逐月降雨资料,通过计算降雨集中度指数深入探究黄河流域降雨集中度时空演变特征,采用交叉小波来讨论大气环流因子及太阳黑子对降雨集中度的影响,将有助于进一步认识黄河流域各二级水资源区内降雨分配问题。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

黄河干流总长 5 464 km,流域总面积约为 79.5 万 km²,位于干旱和半干旱的过渡带^[19],多年平均降水量在 200~600 mm^[20],天然径流量 580 亿 m³,水资源严重短缺,生态环境也相对脆弱^[21]。本文将其分为 8 个水资源区,分别为龙羊峡以上、龙羊峡至兰州、兰州至河口镇、内流区、河口至龙门、龙门至三门

峡、三门峡至花园口、花园口以下^[22],如图1所示。



图1 黄河流域二级水资源区分

1.2 数据来源

本研究所有数据的时间序列均为1961—2018年,其中降雨数据来自World-Clim的降雨栅格数据(<https://www.worldclim.org/data/index.html>),精度为1 km;本文空间分布计算结果分辨率均为1 km;大气环流异常是大气在不同季节进程、地域空间运行的环流形势与常年气候平均态的偏离超过阈值,本文大气异常环流因子数据来源于Climate Indices(<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>),太阳黑子是磁场聚集的地方,是太阳表面可以看到的最突出的现象,本文太阳黑子数据来源于SILSO-Introduction(<https://wwwbis.sidc.be/silso/home>)。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨集中度 月降雨集中度用来表示季节降雨的不均匀性。该指数由Oliver提出,经过De Luis等改进,计算公式如下^[12]:

$$CIM = 100 \sum_{i=1}^{12} P_i^2 / (\sum_{i=1}^{12} P_i)^2 \quad (1)$$

式中: CIM为降雨集中度指数; P_i 为第*i*个月的降雨量(mm)。

其中降雨集中度指数(CIM) ≤ 10 时,表明该年月降雨年内分配较为均匀,当 $10 < CIM \leq 20$ 时,表明该年月降雨有明显的季节性变化,当 $CIM > 20$ 时,说明该年月降雨量在年内分布具有异常集中性,降雨的月变化幅度比较大。

1.3.2 趋势检验 Theil-Sen Median分析和Mann-Kendall检验法相结合可作为判断时间序列趋势的有效方法^[23-24],这两种计算方法稳健,不受异常值的干扰,可减少异常值影响^[25-28],其具体计算公式见参考文献^[29]。

本研究将这两种方法结合,这可以有效地反映1961—2018年黄河流域降雨集中度变化趋势的空间分布特征。本研究将变化趋势划分为不显著减少、显著减少、不显著增加和显著增加4种变化类型。具体原理及划分依据见参考文献^[30]。

1.3.3 Morlet小波分析 Morlet小波分析法^[31-32]是一种时域—频域分析方法,本研究使用该方法探究黄

河流域降雨集中度的周期变化。具体计算方法见参考文献^[33]。

1.3.4 交叉小波分析 本研究使用交叉小波分析^[34]来分析年太阳黑子总数及大气环流异常因子对黄河流域有显著变化趋势的两个二级水资源区降雨集中度的驱动力。交叉小波分析是小波分析的拓展,用于分析两个序列在时域和频域间的相关关系,这两个时间序列间交叉小波普公式为:

$$W_{xy}(X) = C_x(\alpha, \beta) C_y^*(\alpha, \beta) \quad (2)$$

式中: $W_{xy}(\alpha, \beta)$ 为交叉小波谱; α 为尺度函数; β 为时间变换函数; $C_x(\alpha, \beta)$ 为 $x(t)$ 小波变化系数; $C_y^*(\alpha, \beta)$ 为序列 $y(t)$ 小波变化系数的复共轭。具体公式方法见参考文献^[35]。

2 结果与分析

2.1 黄河流域降雨时空分布特征

黄河流域1961—2018年平均降雨量如图2所示,流域平均降雨量在1964年达到最大值695 mm,平均降雨量最小为340 mm,出现在1970年。在1990年后流域年平均降雨量在400~600 mm间上下波动。由降雨空间分布图3可知黄河流域南部降雨量远大于北部区域,其中龙门至三门峡、三门峡至花园口及花园口以下区域年降雨量较大,这3个二级水资源区年平均降雨量均超过600 mm,兰州至河口镇年降雨量最小,在1961—2018年兰州至河口镇平均降雨量在200 mm左右,降雨量最小值115 mm。这也表明黄河流域呈现出中下游暴雨多,降雨强度大,而上游的雨强小的降雨特点。

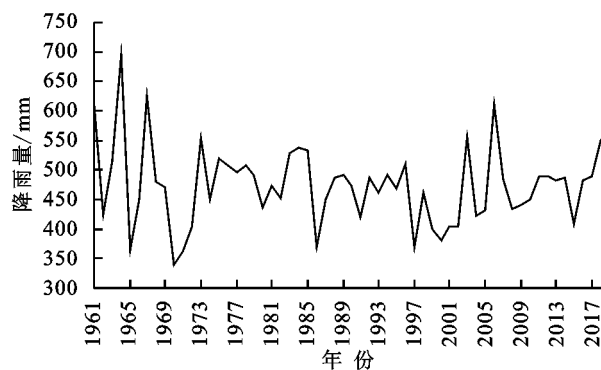


图2 黄河流域1961—2018年平均降雨

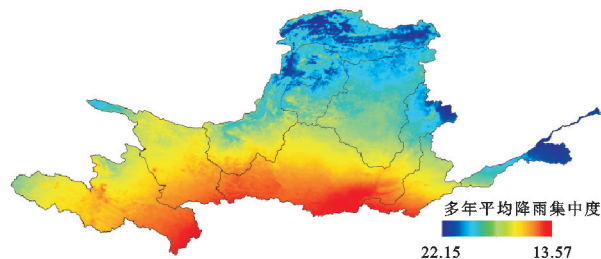


图3 黄河流域1961—2018年降雨空间分布

2.2 黄河流域降雨集中度的空间分布特征

黄河流域 1961—2018 年降雨集中度的空间演变特征如图 4 所示,流域在 1961—2018 年平均降雨集中度空间变化范围为 13.57~22.15,其中,龙羊峡以上南部、龙门至三门峡和三门峡至花园口南部的降雨集中度值为 13 左右,在 10~20,说明该地降雨在年内具有明显的季节性。黄河流域东北部降雨集中度的值较大,其中,兰州至河口镇、河口镇至龙门东北部,花园口以下及内流区降雨集中度值在 22 左右,大于 20,这表明这部分地区降雨量年内变化具有异常集中性。

整个黄河流域 1961—2018 年降雨集中度的变差系数如图 5 所示,黄河流域降雨集中度变差系数(C_v)的变化范围为 0.059~0.217,其中,龙羊峡以上和龙羊峡至兰州两地 C_v 值在 0.059 左右,表明两地在 1961—2018 年降雨集中度变化幅度较小。流域剩余 6 个区域 C_v 值均在 0.2 左右,表明这 6 个二级流域在这 58 a 间降雨集中度变化幅度相对龙羊峡以上和龙羊峡至兰州两地较大,但从整体来看黄河流域降雨集中度在 1961—2018 年变化幅度不大,属于弱变异。黄河流域地处干旱与半干旱交界带,根据上述研究发现流域的年内降雨分配较不均匀,为了进一步指导实际生产,本研究在分析流域年降雨集中度的基础上又对流域汛期(6—10 月)降雨集中度进行了进一步分析。流域汛期降雨集中度与全年在空间分布上具有一致性,均呈现流域东北部较大,西南部较小,尤其是花园口以下及兰州至河口镇等地区汛期降雨集中度高达 31,降雨汛期分配如此不均匀,极有可能发生洪涝灾害(图 6)。

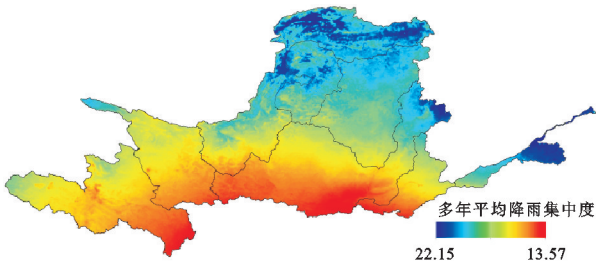


图 4 黄河流域 1961—2018 年降雨集中度

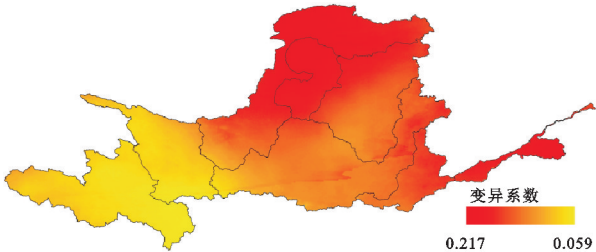


图 5 黄河流域降雨集中度变异系数

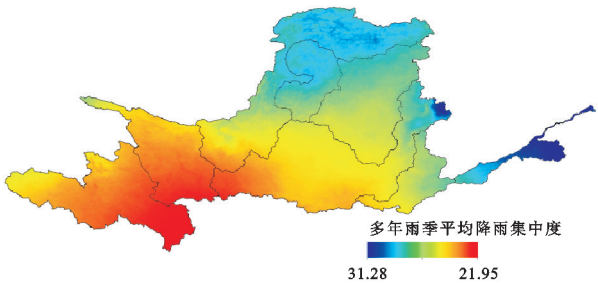


图 6 黄河流域 1961—2018 年雨季降雨集中度

2.3 黄河流域降雨集中度变化趋势分析

黄河流域 1961—2018 年降雨集中度趋势分析如图 7 所示,由图知整个流域部分二级水资源区的降雨集中度在 1961—2018 年出现显著性变化,其中,龙羊峡以上西南部、龙羊峡至兰州中部及兰州的降雨集中度在 1961—2018 年出现显著减少趋势的区域,其面积分别占该二级水资源区总面积的 36.9%,32.2%,龙羊峡至兰州西北部有占该二级水资源区面积 7.4% 的区域降雨集中度呈现显著增加趋势。

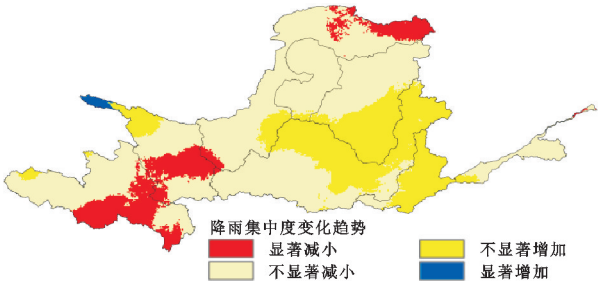


图 7 黄河流域降雨集中度趋势检验

2.4 降雨集中度周期分析

由上述对整个黄河流域趋势分析可知,只有流域部分二级水资源区域出现显著变化,其中,龙羊峡以上西南部降雨集中度呈现出显著增加趋势。龙羊峡至兰州中部降雨集中度呈现出显著减少趋势,而西北部降雨集中度呈现出显著增加趋势,兰州至河口镇北部降雨集中度出现了显著增加趋势,因此,本研究选取这 3 个二级水资源区作为重点研究对象进行深入探究。采用 Morlet 小波分析先对黄河流域整体降雨集中度进行周期性分析,然后再对降雨集中度有显著性变化的龙羊峡以上、龙羊峡至兰州及兰州至河口镇 3 个出现显著性变化的二级水资源区进行周期性分析。

由图 8 可知黄河流域整体降雨集中度与龙羊峡以上、龙羊峡至兰州及兰州至河口镇这 3 个二级水资源区的降雨浓度的主周期均在 55 a 左右,流域整体降雨集中度与出现显著性变化的二级水资源区降雨集中度在周期性变化上无明显差异,以上分析说明,整个流域的平均降雨集中度与这 3 个二级水资源区的平均降雨集中度在 1961—2018 年变化周期具有一致性。

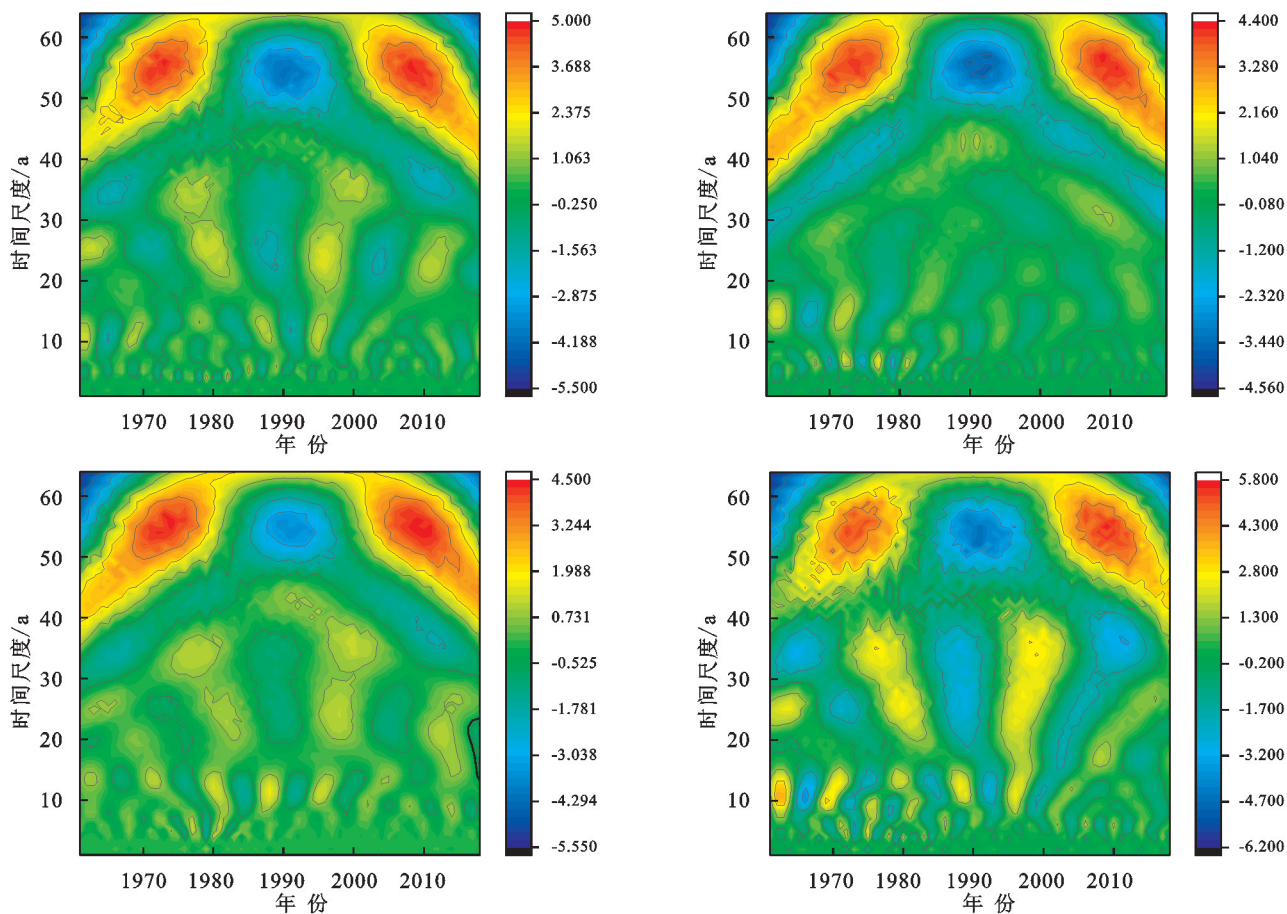


图8 降雨集中度变化周期

3 讨论

3.1 降雨集中度驱动力探究

本文将对降雨集中度出现显著性变化的原因进行讨论,已有研究表明,大气环流异常因子变化对我国降雨的年内分配特征有着不可忽视的影响^[36],而太阳黑子对降雨的影响十分复杂,现有的研究发现太阳黑子不光可以直接影响降雨且可以通过影响区域辐射改变其水热平衡,从而间接影响降雨分布^[37],但对太阳黑子影响地球气候变化的具体机理目前尚未有明确定论,先前的研究大多是探究这两者对降雨量的影响,而忽视了对降雨分配的影响,降雨集中度是反映降雨年内分配的指标,而大气异常环流因子及太阳黑子都对降雨的年内分配有着不可忽视的影响,因此,本研究选取太阳黑子总数及对我国影响较大的几个大气环流异常因子(太平洋十年涛动(PDO)、北极涛动(AO)和厄尔尼诺—南极涛动(ENSO),)运用交叉小波分析讨论这4个影响因子对龙羊峡以上、龙羊峡至兰州及兰州至河口镇3个二级水资源区降雨集中度变化的影响情况,解释其降雨集中度出现显著性变化的原因。结果如图所示:

由图9可知这3个二级水资源区降雨集中度与太

阳黑子在1980—2010年有6~14 a周期的负相关关系;与ENSO在1978—1982年有4~6 a的负相关关系;与PDO在1990—1998年有8~10 a周期的负相关关系;与AO在1982—1992年有6~9 a周期的负相关关系。

由图9可知太阳黑子变化对黄河流域水资源区降雨集中度有较大的直接影响且以负相关关系为主,而选取的大气异常环流因子对该区域降雨集中度驱动力较弱,此外,可以看出选取的大气环流异常因子与降雨集中度大部分呈现负相关关系。太阳黑子对区域降雨集中度的影响较大,太阳黑子具有强磁场可直接对地球气候造成影响,目前的研究可知太阳黑子与降雨具有相同的周期性变化,以11 a左右为变化周期。由本文讨论结果结合先前研究可知,太阳黑子不仅直接影响降雨的分配情况而且会对其产生间接影响,因此,本文将讨论太阳黑子与选取的大气环流异常因子的联系,更深刻地认识太阳黑子对降雨集中度变化产生的影响,结果如图10所示。

太阳黑子与ENSO在1968—2000年有9~14 a周期的正相关关系,在1974—1990年有5~6 a周期的负相关关系;与PDO在1978—2000年有8~14 a周期的负相关关系;与AO在1980—2010年有7~15 a周期的正相关关系。由以上分析可知太阳黑子

对大气环流异常因子的影响强烈,有比较显著的正相关关系,因此,太阳黑子对降雨集中度的间接影响很有可能是通过影响大气环流异常因子来影响区域降

雨集中度。由相关研究知太阳黑子有较强磁场,而其活跃时将对地球磁场产生影响,改变大气电离度,从而影响大气环流,以此间接影响降雨。

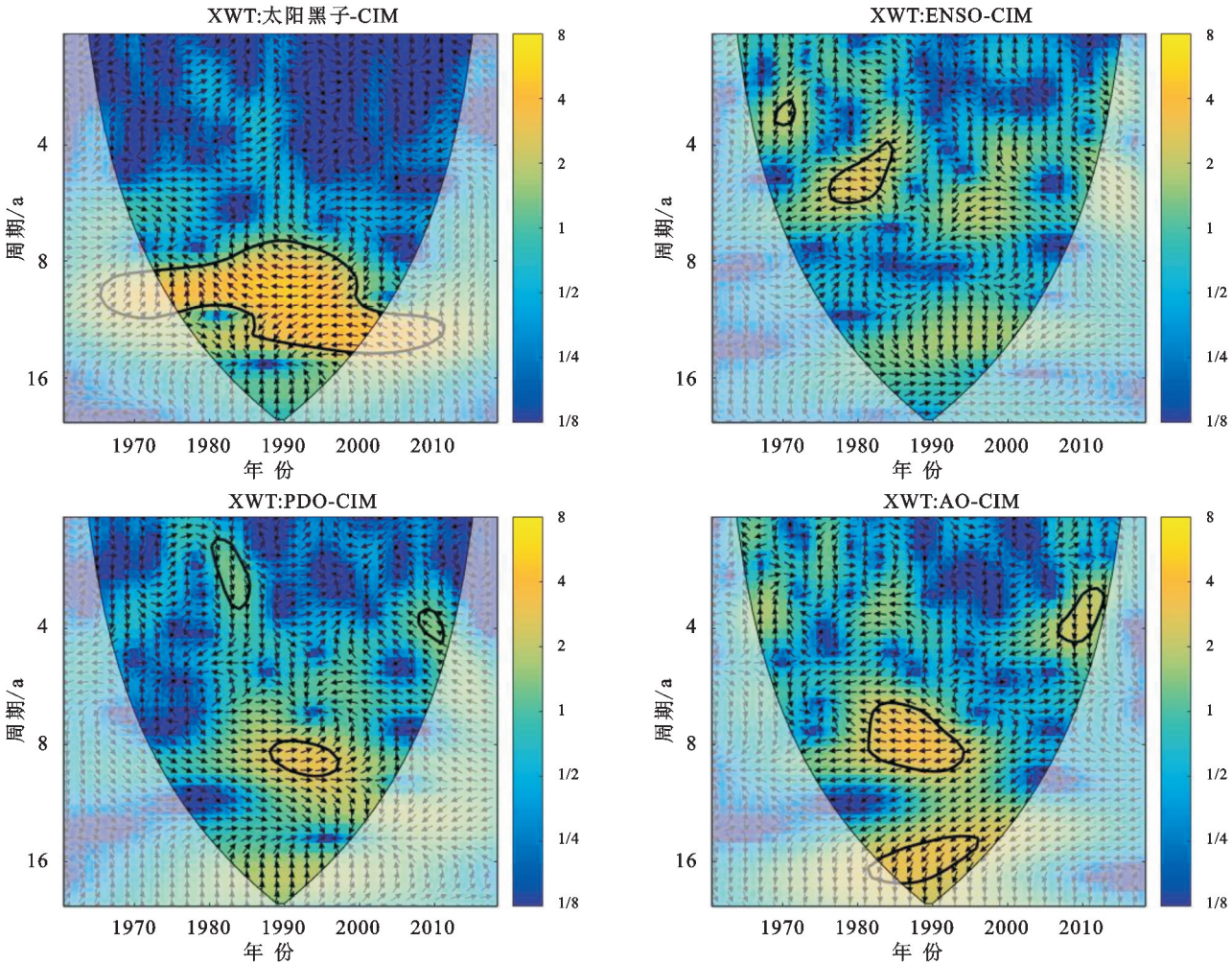


图 9 3 个二级水资源区 CIM 与太阳黑子,PDO,AO 和 ENSO 的交叉小波变换

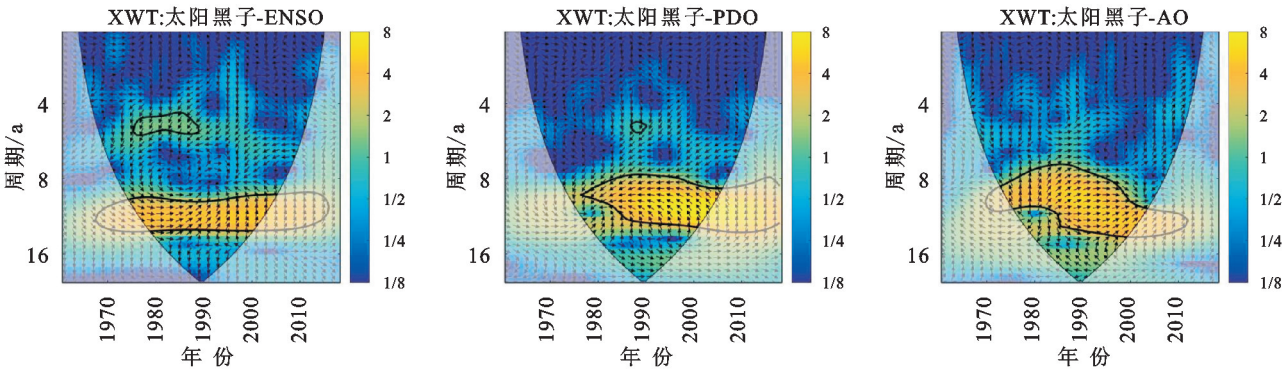


图 10 太阳黑子与 ENSO,PDO,AO 的交叉小波变换

由上述讨论交叉小波变换图,本研究认为太阳黑子及大气环流异常因子在一定程度上改变了降雨集中度序列的一致性,从而使区域降雨集中度出现显著变化趋势。

3.2 降雨集中度变化对不同水资源区生态环境产生的影响

黄河流域最大的矛盾是水资源短缺,流域大部分

地区气候干旱少雨,水资源利用率远超生态警戒线。黄河流域降雨的年内分配变化对整个流域的生态质量及未来高质量发展有着不可忽视的作用,因此本文将进一步讨论流域降雨集中度变化对不同二级水资源区生态质量产生的影响。

龙羊峡以上及龙羊峡至兰州区域降雨集中度较小,表明其降雨年内分配季节性明显,无异常集中性,

两个二级水资源区在行政区划上隶属于青海和甘肃省,根据这两地所公布的生态环境公报可知,这两个地生态环境状况总体保持稳定,尤其青海全省生态等级达到以“良”为主。

黄河上游兰州至河口镇北部地区降雨集中度较大,年内降雨分配极不均匀,大部分隶属于内蒙古自治区,该地区生态环境质量较差,水土流失严重,因此该地区应加以重视,制订相关政策,种植牧草等适宜该地区的植被,在保水减沙的基础上进一步发展经济。

花园口以下属黄河下游,区域降雨集中度值较大且年均降雨量大,这说明该地区降雨年内分配极不均匀,降雨日少但雨量较大,这很有可能造成洪涝灾害,地区政府部门在应提高汛期洪水预警能力,建设堤防工程,完善灾情应对措施,此外,花园口以下为黄河入海口,地区可以此为基础建设湿地生态保护区,促进黄河下游河道生态功能提升和入海口生态环境改善,实现生态保护与经济社会协调发展。

而流域中南部区域由降雨集中度值可知,这些区域降雨具有较明显的季节性,这些地区的生态质量等级为“一般”,要进一步改善生态环境需要根据其降雨季节性明显的特点种植季节性林草,发展特色经济。以上表明分析降雨集中度在一定程度上可影响并指导地区生态环境发展。此外,区域可根据降雨年内分配特征高效利用水资源,科学划分灌区,对于降雨年内分配较为均匀的地区应减少灌溉用水量及次数,避免出现水资源浪费的情况。而对于降雨量较少且年内分配极不均匀的地区如黄土高原、内蒙古等地区应合理种植植被,防风固沙,进一步遏制水土流失,使城市免遭风沙侵袭。

4 结论

(1) 流域平均降雨量在1964年达到最大值695 mm,1990年后流域年平均降雨量在400~600 mm间上下波动,流域中下游年平均降雨量远大于上游,降雨地区间差异较大。

(2) 黄河流域在1961—2018年的降雨年内分配较不均匀,降雨年内分配与汛期具有一致性,流域西南部降雨集中度较小,降雨量在年内季节性变化明显,位于上中游的兰州至河口镇北部、内流区及下游花园口以下的降雨集中度值较大,降雨量年内分配极不均匀,有异常集中性,易发生洪涝灾害。

(3) 黄河流域大部分区域降雨集中度变化趋势

不显著,但龙羊峡以上、龙羊峡至兰州及兰州至河口镇3个二级水资源区的降雨集中度出现显著变化,这3个二级水资源区的降雨集中度的周期变化与流域整体降雨集中度周期变化具有一致性。

(4) 太阳黑子和大气环流异常因子对降雨集中度变化具有较大影响,其中太阳黑子不仅直接影响降雨集中度且通过影响大气环流异常因子间接影响地区降雨集中度。

参考文献:

- [1] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等.北京地区降水极值时空演变特征[J].水科学进展,2017,28(2):161-173.
- [2] 闫宝伟,刘昱,江慧宁,等.考虑降雨空间异质性的动态临界雨量预警指标推求[J].水利学报,2020,51(3):342-348.
- [3] 韩谓,潘保柱,陈越,等.黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布[J].环境科学,2021,42(12):5786-5795.
- [4] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.
- [5] 冶运涛,梁犁丽,龚家国,等.长江上游流域降水结构时空演变特性[J].水科学进展,2014,25(2):164-171.
- [6] 莫崇勋,莫桂燕,阮俞理,等.澄碧河水库流域降雨变化分析[J].节水灌溉,2017,267(11):56-61.
- [7] Van Wijngaarden W A, Syed A. Changes in annual precipitation over the Earth's land mass excluding Antarctica from the 18th century to 2013[J]. Journal of Hydrology, 2015,531:1020-1027.
- [8] 黄生志,杜梦,李沛,等.变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究[J].水科学进展,2019,30(4):496-506.
- [9] 刘业森,刘媛媛,李敏,等.降雨数据空间分辨率在城市流域洪峰变化分析中的影响[J].地球信息科学学报,2022,24(7):1326-1336.
- [10] 樊晶晶.变化环境下水文要素变异研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [11] 郑彦辰,李建柱,荣佑同,等.降雨时空分布量化及其在洪水过程分类中的应用[J].水利学报,2022,53(5):560-573.
- [12] Oliver J E. Monthly precipitation distribution: a comparative index[J]. the Professional Geographer, 1980, 32(3):300-309.
- [13] Martin-Vide J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2004,24(8):959-971.
- [14] De Luís M, García-Cano M F, Cortina J, et al. Climatic trends, disturbances and short-term vegetation dynamics in

- a Mediterranean shrubland [J]. *Forest ecology and management*, 2001, 147(1): 25-37.
- [15] Chatterjee S, Khan A, Akbari H, et al. Monotonic trends in spatio-temporal distribution and concentration of monsoon precipitation(1901—2002), West Bengal, India[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 54-75.
- [16] 段亚雯, 朱克云, 马柱国, 等. 中国区域 1961—2010 年降水集中指数(PCI)的变化及月分配特征[J]. *大气科学*, 2014, 38(6): 1124-1136.
- [17] Shiau J T. Effects of gamma-distribution variations on SPI-based stationary and nonstationary drought analyses[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34: 2081-2095.
- [18] 王卫平, 刘永强, 赵求东, 等. 新疆地区极端降水时空变化特征及对气温变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(4): 133-142.
- [19] 郑金丽, 严子奇, 李东, 等. 黄河流域降雨—径流关系时空演变研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 77-85, 92.
- [20] 杨大文, 李翀, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. *地理学报*, 2004, 59(1): 143-154.
- [21] 贺振, 贺俊平. 基于 SPOT-VGT 的黄河流域植被覆盖时空演变[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(10): 1655-1659.
- [22] 张金萍, 张航. 黄河流域降水时空演变规律研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022, 473(3): 60-68.
- [23] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170-1186.
- [24] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, et al. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981—1989 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12: 1133-1135.
- [25] Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis[J]. *Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics: Econometric Theory and Methodology*, 1992: 345-381.
- [26] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [27] Stuart M. Understanding robust and exploratory data analysis[J]. *the Statistician*, 1984, 33: 320-321.
- [28] Tošić I. Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 77: 47-56.
- [29] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1585-1591.
- [30] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [31] 贾路, 于坤霞, 邓铭江, 等. 西北地区降雨集中度时空演变及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 80-89.
- [32] Xu G C, Zhang J X, Li P, et al. Vegetation restoration projects and their influence on runoff and sediment in China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 233-241.
- [33] 张会兰, 李丹勋, 姜晓明, 等. 基于阶段特性的岷江镇江关以上流域水沙趋势多尺度分析[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(3): 127-133.
- [34] 罗光坤. Morlet 小波变换理论与应用研究及软件实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [35] 邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(2): 22-26, 42.
- [36] 张洪波, 俞奇骏, 陈克宇, 等. 基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J]. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(4): 59-66.
- [37] 陈亮, 段建平, 马柱国. 大气环流形势客观分型及其与中国降水的联系[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(4): 396-403.