

1971 – 2018 年汉江流域陕西段降水时空特征分析

赵爱莉¹, 张晓斌², 郝改瑞^{3,4}, 李抗彬⁴

(1. 山西汾河流域管理有限公司, 山西 太原 030002; 2. 运城学院, 山西 运城 044000; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 4. 西安兰特水电测控技术有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 基于 1971 – 2018 年汉江流域陕西段 27 个气象站点的逐日降水数据, 选择了年降水量、降水强度、最大日降水量、年降水日数、中雨日数和大雨日数 6 个降水指数分析其降水时空特征, 分析方法包括线性估计法、小波分析法、滑动均值法、IDW 空间插值法及 Mann – Kendall 检验法。结果表明: 在研究时段内, 汉江流域陕西段降水强度有缓慢增加趋势, 其余 5 个降水指数均呈缓慢减小趋势, 且 6 个降水指数的变化趋势均不显著; 研究区域仅年降水日数无突变点, 且在 1995 年后呈现显著减小趋势, 其余降水指数均有突变点; 年降水量有 7 a 的副周期和 27 a 左右的主周期, 主周期有 3 个循环交替, 且丰、枯交替突变点在 1983 和 2000 年。汛期降水量与年降水量周期基本一致, 而非汛期有 4 和 16 a 两个副周期和 1 个 28 a 的主周期; 年降水量空间分布呈现由北到南逐渐增大的趋势, 除了年降水日数的高值中心在宁强县外, 其余 5 个降水指数的高值中心均在镇巴县, 而低值中心除了降水强度在太白县外其余的均在商县。在研究时段内各年代际降水指数的比较中, 1971 – 2018 年的年降水量、降水强度和年降水日数均仅次于最大值, 预计未来极端降水事件可能更加频繁, 严重的情况下会影响水生态、水环境、水安全等的健康发展。

关键词: 降水指数; 时空特征; 小波分析; Mann – Kendall 检验; 汉江流域陕西段

中图分类号: TV125; P426.61⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)06-0080-08

Spatial and temporal characteristics of precipitation in Shaanxi section of Hanjiang River Basin during 1971 – 2018

ZHAO Aili¹, ZHANG Xiaobin², HAO Gairui^{3,4}, LI Kangbin⁴

(1. Limited Company of Shanxi Fenhe River Basin Administration, Taiyuan 030002, China; 2. Yuncheng University, Yuncheng 044000, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Xi'an Land Water and Electricity Measurement and Control Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data of 27 meteorological stations in Shaanxi section of Hanjiang River Basin from 1971 to 2018, six precipitation indexes including annual precipitation, precipitation intensity, maximum daily precipitation, annual precipitation days, moderate rainfall days and heavy rainfall days were selected to analyze the spatial and temporal characteristics of precipitation in this area using linear trend, wavelet analysis, moving average, IDW spatial interpolation and Mann – Kendall abrupt test methods. The results showed that the precipitation intensity in Shaanxi section of Hanjiang River Basin presented a slow increasing trend, whereas the other five precipitation indexes presented a slow decreasing trend, but all the changes were insignificant. There were abrupt points in all the indexes except annual precipitation days, showing a remarkable decreasing trend after 1995. Annual precipitation had a secondary cycle of 7 a and a main cycle of about 27 a consisted of three alternative dry – wet cycles, with the occurrence of abrupt points in 1983 and 2000. The precipitation cycle in the flood season was consistent with that in non-flood season, but the non-flood period had two secondary cycles of 4 a, 16 a and a main cycle of 28 a. The spatial distribution of precipitation showed a progressive increasing trend from north to south. Except for the high value center of annual precipitation days in Ningqiang County, that of

收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-07-01

基金项目: 山西省水利厅科技项目(TZ2019026); 运城学院博士科研项目(YQ-2020003); 国家自然科学基金项目(51879215)

作者简介: 赵爱莉(1977-), 女, 山西万荣人, 本科, 工程师, 主要从事流域治理及水文水资源方面研究。

通讯作者: 张晓斌(1977-), 男, 山西临猗人, 博士, 教授, 主要从事流域治理及水文水资源方面研究。

the other five precipitation indexes were all in Zhenba County, whereas the low value center of all the indexes were in Shang County apart from the precipitation intensity which was in Taibai County. The comparison analysis showed that the values of annual precipitation, precipitation intensity and annual precipitation days from 1971–2018 were only second to the maximum values. Extreme precipitation events are likely to happen more frequently in the future, resulting in water disasters which will affect the healthy development of water ecology, water environment and water security in severe cases.

Key words: precipitation index; spatial and temporal characteristics; wavelet analysis; Mann–Kendall test; Shaanxi section of Hanjinag River Basin

1 研究背景

在全球气候变暖的背景下,各种强降水甚至极端降水对水环境、水生态系统、社会经济和人类生活造成了一定的影响,对此需要进行深入的研究,提出应对措施^[1–4]。降水和气温是气候变化中比较重要的因素,气温呈上升趋势已成为共识,对此研究的相关论著也很多^[5–6]。降水因素的改变会增加严重干旱和极端降水事件发生的频率^[7–8]。受到季风及地形地貌等自然因素的影响,全国降水量具有较为明显的地域特征,即西部降水量呈增加趋势,而东部降水量在减小,同时长江中下游、华南南部以及黄河上游等地区的极端降水事件频率显著升高^[9]。姜江等^[10]通过对1962–2011年中国干湿区范围变化的研究分析得出,未来中国大部分地区降水将会增加,干旱区及湿润区范围会缩小,半干旱、半湿润地区会因为对气候的极度敏感而扩大。极端降水事件在各区域降水特征的研究中均备受关注,王涛等^[11]研究发现陕北黄土高原地区的极端降水在近10年增加较快,且7个极端降水指数均呈现自东南向西北的递减趋势;Meehl等^[12]利用模型进行模拟得到亚洲东部沿海降水强度在增加的结论;胡思等^[13]对长江流域极端降水事件进行区域频率和时空特征分析得出,在四川盆地和长江中下游地区发生极端事件的可能性较大,且从长江上游至下游的极端降水量逐渐增加;汪成博等^[14]发现汉江流域极端降水呈现“东部早,西部迟”的分布特征,夏季影响其非均匀变化,季风强弱程度不同导致极端降水量变化范围不同;春兰等^[15]得到内蒙古极端降水区域差异显著的结论,其中内蒙古西部及东北部呈上升变化,而中部和东部呈下降变化。

汉江位于中国中部,是长江的一级支流,属于中国南北分界线,其气候变化机制较为复杂。众多学者以汉江为研究对象,在水生态承载力、非点源污染、气候响应分析、植被响应、水环境模拟及水资源

评估等方面取得了很多极具参考价值的成果^[16–25]。分析已有汉江流域有关降水的研究成果发现,前期研究范围主要是丹江口以上流域,站点数量有限,且主要针对降水极值、径流的变化趋势和突变检验,而对于多种形式的降水特征未进行详细分析,再者,对汉江流域利用小波分析进行降水周期诊断的研究也较少^[26–27]。因此,本文基于汉江流域陕西段水源区27个气象站1971–2018年的逐日降水数据,利用泰森多边形法求出研究区域的逐日降水序列,分析所选取的6个降水指数在近48a的时空变化情况,并对降水量的周期性进行判断,为汉江流域水源区水环境污染治理、暴雨灾害防治、生态建设及水资源管理等提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

汉江发源于秦岭南麓的蟠冢山,其中陕西段主要包括在陕西境内的汉江干流及其支流丹江所覆盖区域,流域面积62 723 km²,包含了陕南地区商洛、汉中和安康3个市。流域内林草地和耕地分布最广,所占比例约为98.88%。该研究区域也是丹江口水库的水源区,由大巴和秦岭山地以及汉江盆地组成,地形起伏较大,河流分布较密,水力资源较丰富。研究区气候属于亚热带季风气候,雨量丰沛,降水主要集中于6–9月,多年平均降水量为700~1 800 mm,年均温度15.24℃,相对湿度达到67.4%,无霜期较长。汉江流域陕西段水系及气象站点分布图见图1。

2.2 数据来源

此次所收集的汉江流域陕西段27个气象站逐日降水量数据来自中国科学院资源环境科学数据中心,站点数据长度从气象站建站以来至2018年末,各气象站点位置见图1。对收集数据进行检查发现,有个别站点部分年份数据缺失,为了保证数据质量的完好性和一致性,将站点无缺测降水数据研究时段确定为1971–2018年,数据系列长度均为48a。降水数据包括水平降水和垂直降水,其中雨淞、

雨及雪等构成垂直降水,雾淞及霜雾露等组成水平降水。本次仅对气象站的垂直降水数据进行整理。

利用泰森多边形法处理研究区域 27 个气象站点的降水量数据,进而计算降水指数并进行分析。

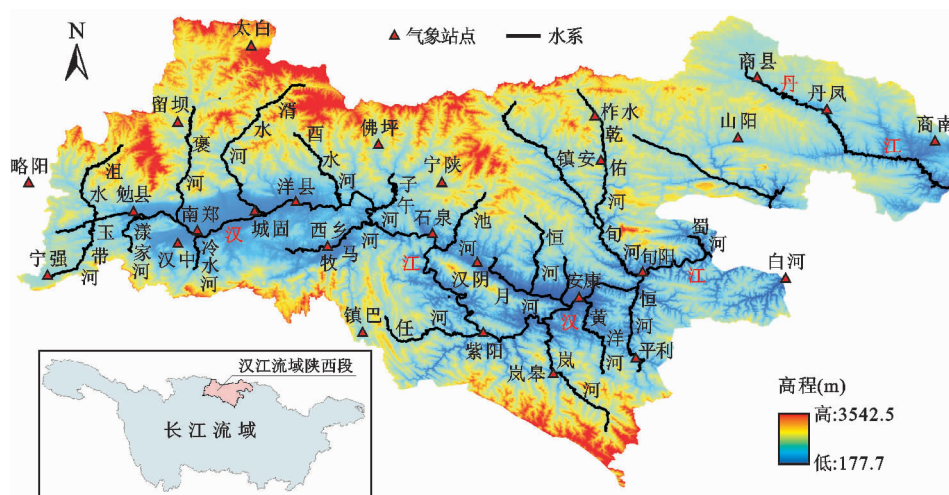


图1 汉江流域陕西段水系及气象站点分布图

2.3 研究方法

以世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)发布的降水指数为基础,通过借鉴他人研究中采用的多种降水指数^[28],最终确定选用年降水量(年降水总量 R ,单位:mm)、年降水日数(日降水量 $R_d > 0$ 的天数,单位:d)、降水强度(多日降水量 R_n 与降水日数的比值,单位:mm/d)、中雨日数($R_d > 10$ mm的天数,单位:d)、最大日降水量($R_{d\max}$,单位:mm)和大雨日数($R_d > 25$ mm的天数,单位:d)6个降水指数。

M-K法、线性估计法和滑动均值法被用来分析不同降水指数的趋势变化及突变性,小波分析法主要是对降水量及其汛期和非汛期降水的周期性进行判断,IDW(inverse distance weighted)插值法是对6个降水指数进行空间插值,从而分析其特征。各方法详细过程可参考相关文献^[29]、^[30],其中滑动平均值法利用的滑动长度为5 a,在0.05显著性水平下进行检验,系列数据在相同尺度上的变化特点可以通过小波变化系数图进行说明^[30]。

3 结果与分析

3.1 各降水指数变化趋势分析

基于1971–2018年汉江流域陕西段27个气象站逐日降水数据,利用泰森多边形法确定所研究流域的逐日降水量,统计出1971–2018年研究流域的年降水量、最大日降水量和降水日数、中雨及大雨日数,并求出降水强度。为了分析各降水指数的空间分布特征,也对各气象站点的6个降水指数进行了

统计。利用线性倾向估计法和滑动平均值法分析降水指数随时间变化趋势,结果见图2。

由图2可看出,汉江流域陕西段年降水量呈缓慢下降趋势,年降水量与时间之间的相关性较小,极值分别出现在1997年(最小值)和1983年(最大值),倾向率为 -3.63 mm/10a;降水强度与时间之间相关性较差,增大趋势不明显;最大日降水量的大、小极值分别出现在1979和1985年,倾向率为 -0.23 mm/10a;年降水日数的倾向率为 -1.0 d/10a,有缓慢下降的趋势,大、小极值分别在2003和1995年;中雨日数和大雨日数线性倾向率分别为 -0.022 和 -0.093 d/10a,呈缓慢下降趋势。分析各降水指数5 a滑动曲线可知,年降水量从1985–2000年左右有小幅减小的趋势,而后至2011年又缓慢增加,在2011年后有小幅增加又减小的变化;降水强度在研究时段前期变化趋势与降水量类似,从2013年后小幅减小,而降水日数从2013年后则缓慢增加。6个降水指数数据序列均未通过0.05显著性水平检验,说明其变化趋势并不明显。

对1971–2018年汉江流域陕西段降水指数按年代统计年均值,结果见表1。

由表1可看出,1981–1990年是汉江流域陕西段降水多发期,除了日最大降水量之外,其他5个降水指数均为各年代中的最大值。1991–2010年为汉江流域陕西段的降水缺乏期,6个降水指数均为各年代中的最小值。值得注意的是2011–2018年虽然只有8 a的数据,但是该期间的降水量、降水日数和降水强度均仅次于最大值,预计未来气候变化

会造成极端降水事件频繁发生,从而严重影响区域的水土环境。

3.2 各降水指数突变分析

以 1971 – 2018 年汉江流域陕西段 27 个气象站点的逐年统计数据为基础,对 6 个降水指数采用

Mann – Kendall 法进行变化趋势和突变检验,以判断各降水指数的突变时间和突变区域。Mann – Kendall 法检验图由 UF 、 UB 曲线和 0.05 显著性水平线组成, UB 曲线用来计算突变点, UF 曲线用来判断变化趋势,结果见图 3。

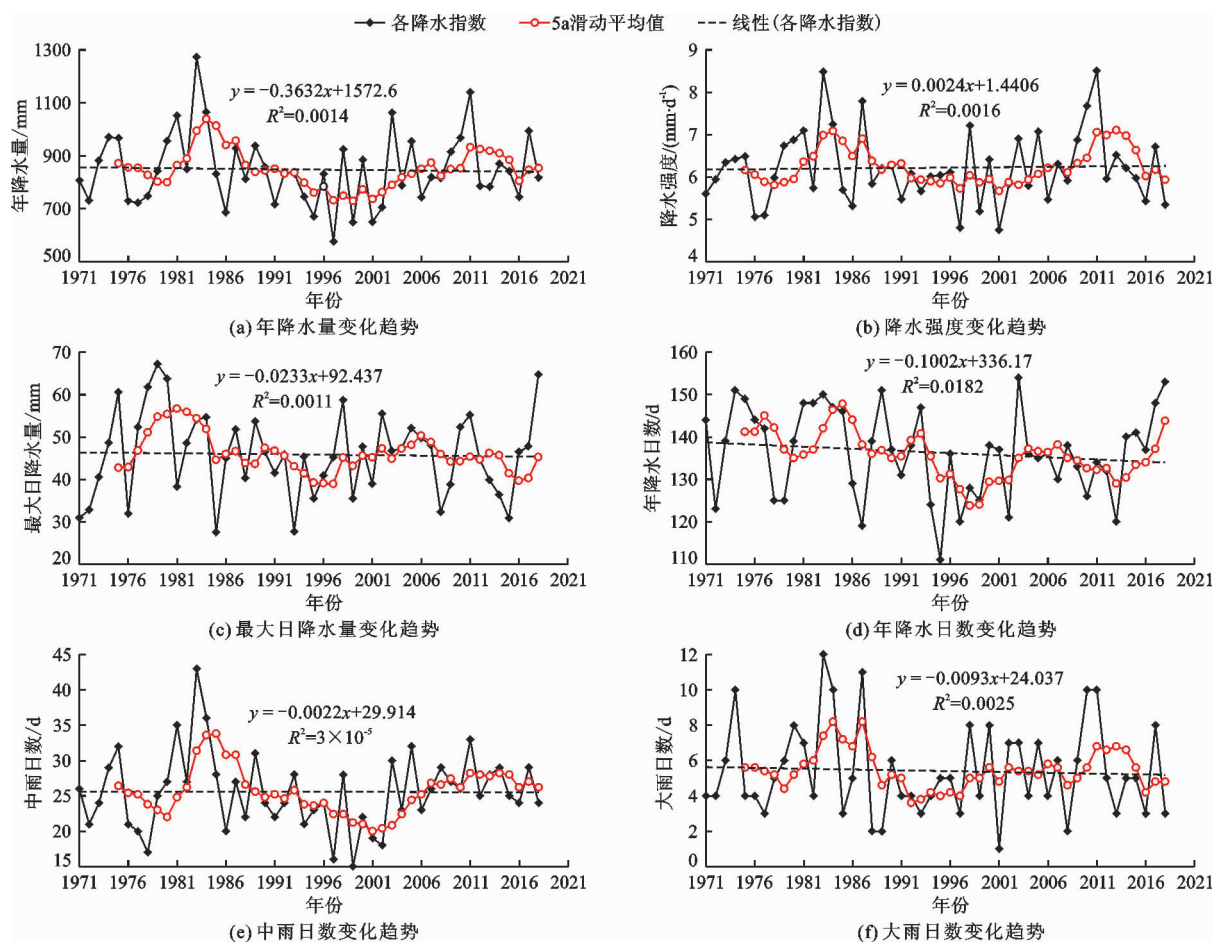


图 2 1971 – 2018 年汉江流域陕西段各降水指数变化趋势

表 1 1971 – 2018 年年代际年均降水指数统计结果

年份	降水量/ mm	降水日数/ d	降水强度/ (mm · d ⁻¹)	最大日降水量/ mm	中雨日数/ d	大雨日数/ d
1971 – 1980	835.68	138.10	6.06	49.04	24.20	5.40
1981 – 1990	928.82	141.40	6.57	46.02	29.30	6.20
1991 – 2000	766.88	129.80	5.90	42.37	22.30	4.80
2001 – 2010	842.17	134.60	6.26	46.18	25.30	5.40
2011 – 2018	872.04	138.13	6.33	45.74	27.13	5.25

由图 3 可以看出,1971 – 2018 年汉江流域陕西段年降水量在 1974 年前为增大趋势,而后至 1983 年经历了减小到增大的趋势,1983 – 2001 年呈减小趋势,2002 – 2018 年又缓慢增大,但是除了在 1971 和 2001 年左右出现 UF 统计量超过 0.05 显著性水

平线的情况外,其余时间变化趋势均不显著,年降水量突变发生在 1983 年左右(图 3(a))。降水强度与降水量的变化趋势类似,在 1983 年之后呈现先减小后缓慢增加的趋势,但是变化趋势不显著,降水强度突变点为 1973 年(图 3(b))。最大日降水量在

1980 年后呈现不显著减小趋势,突变出现在 1977 年左右(图 3(c))。年降水日数整体呈现减少趋势,显著减少趋势出现在 1995 年后,在研究时段内

无突变点(图 3(d))。中雨日数和大雨日数均呈现不显著减少趋势,且该两个降水指数均在 1983 年左右出现突变(图 3(e)、3(f))。

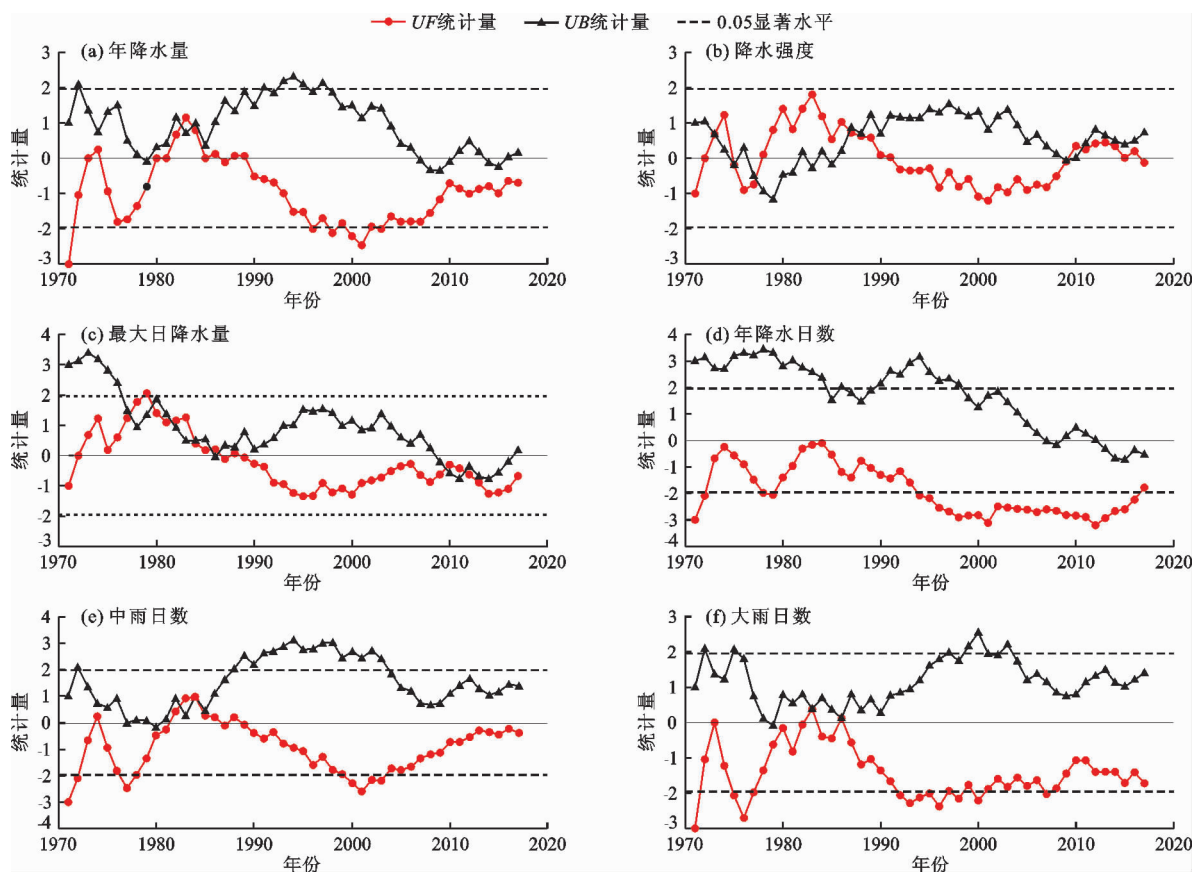


图 3 1971-2018 年汉江流域陕西段各降水指数 M-K 突变分析

3.3 降水量周期分析

1971-2018 年汉江流域陕西段的年降水量小波变化如图 4 所示。分析图 4 可知,年降水量有两个周期,分别为 7 和 27 a。其中在 10 a 以下尺度上,年降水量周期规律不明显;15~40 a 尺度上,主要存在 27 a 的主周期,研究时段内有明显的 3 个循环交替的周期规律,包括 1 个偏枯期和 2 个偏丰期,即 1983 年前为偏丰期,1983-2000 年左右为偏枯期,2000 年后为偏丰期,丰枯交替突变年份在 1983 和 2000 年。采用相同的方法对汉江流域陕西段的汛期(5-10 月)和非汛期(11-次年 4 月)的降水量进行周期分析,如图 5 所示。研究区域的汛期降水量周期与年降水量周期基本一致(图 5(a)),其副周期为 8 a,无明显规律,主周期分布在 15~40 a 尺度内,为 26 a 左右,且具有明显的 3 个循环周期规律,也包括 1 个偏枯期和 2 个偏丰期,突变节点也与年降水量对应的节点相同。汉江流域陕西段非汛期降水量具有 28 a 的主周期和 4、16 a 两个副周期

(图 5(b))。在 10 a 以下尺度非汛期降水量无明显规律;10~20 a 尺度周期呈现出 5 个循环交替的变化规律;20~40 a 尺度为主周期,具有明显的 3 个循环周期规律。

3.4 各降水指数空间分布特征

以 1971-2018 年汉江流域陕西段 27 个气象站的 6 个降水指数的多年均值为基础,进行 IDW 插值,获取的各降水指数等值线空间分布见图 6。

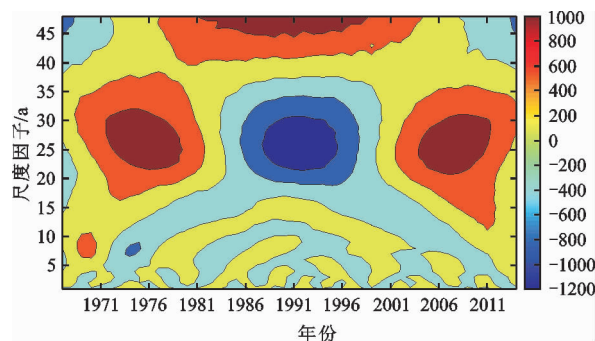


图 4 1971-2018 年汉江流域陕西段年降水量小波变化图

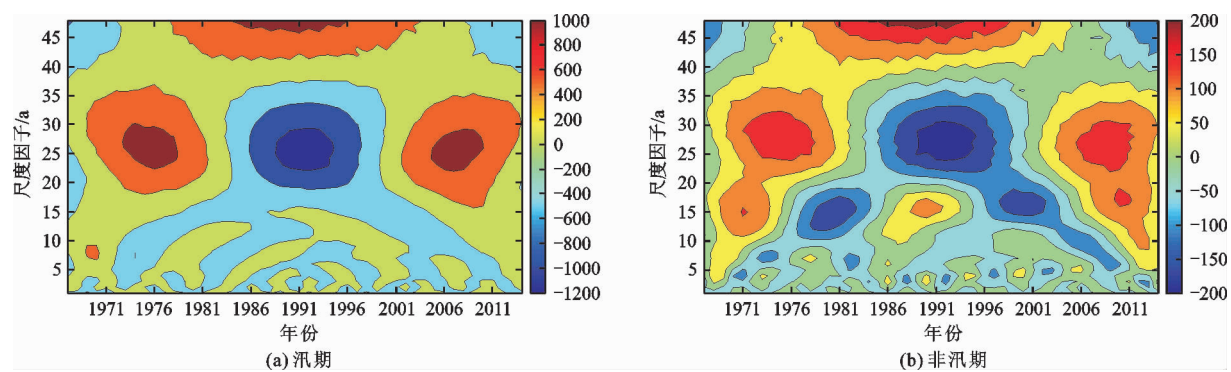


图 5 1971 - 2018 年汉江流域陕西段汛期和非汛期降水量小波变化图

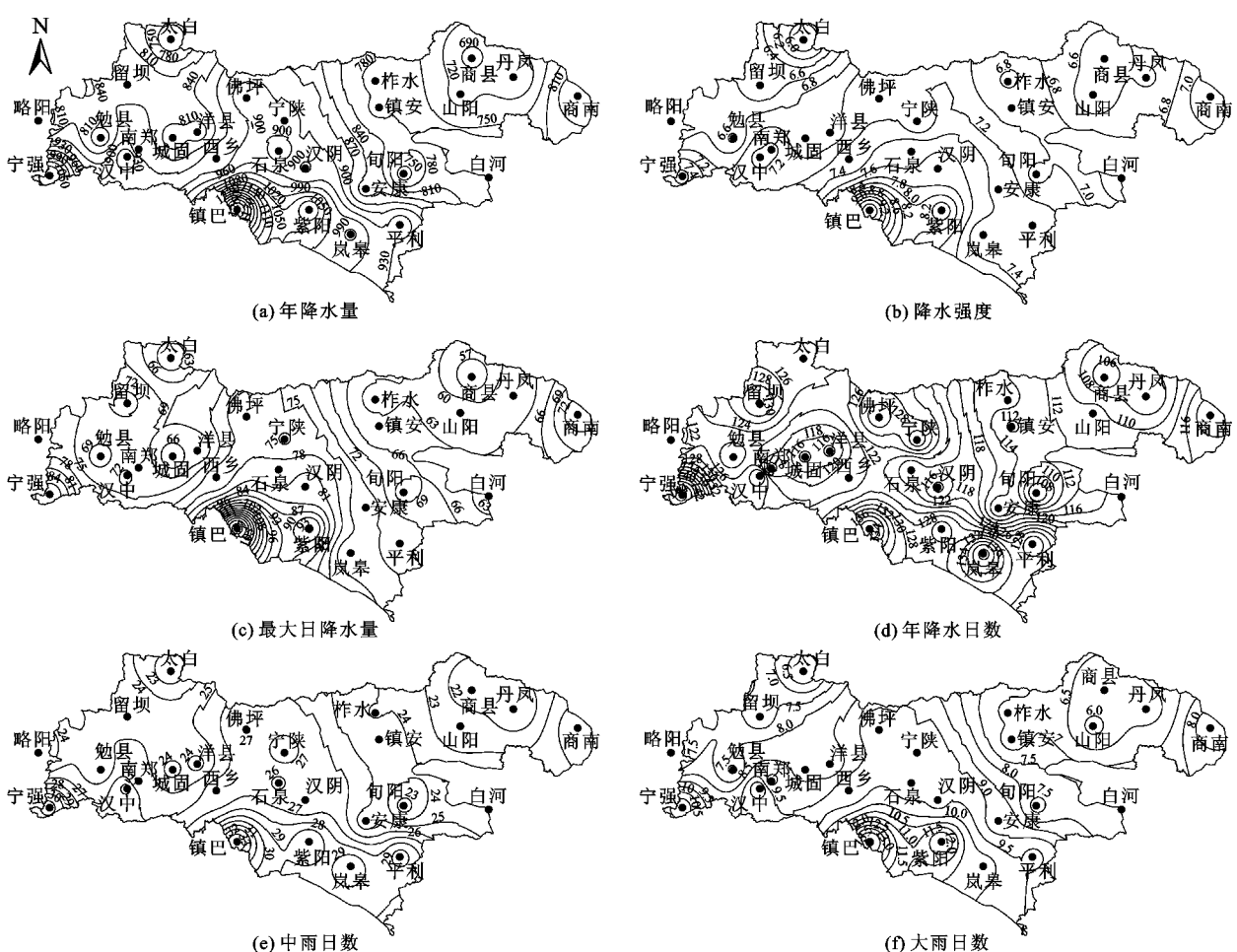


图 6 1971 - 2018 年汉江流域陕西段各降水指数多年均值等值线空间分布

由图 6 可见,研究时段内汉江流域陕西段年降水量在空间分布上以镇巴县为高值中心(多年均值大于 1 230 mm/a),以商县为低值中心(多年均值小于 690mm/a),呈现由北到南逐渐增大的趋势(图 6(a))。降水量的空间分布与气象站点分布和季风强弱关系比较紧密。汉江流域陕西段属于东南季风与西南季风的过渡带,降水多发生在夏季风期间,结合站点分布位置从而得到降水量空间分布状况。降水强度的空间分布以镇巴县为高值中心(多

年均值大于 9.2 mm/d),以太白县为低值中心(多年均值小于 6.0 mm/d),呈现由北向南递增的趋势(图 6(b)),作为降水强度最大的镇巴县,特别要重视土壤侵蚀、极端降水事件及其他水灾害问题。最大日降水量仍以镇巴县为高值中心(多年均值大于 117 mm),以商县为低值中心(多年均值小于 57 mm),呈现由北向南增加的趋势(图 6(c))。年降水日数以宁强县为高值中心(多年均值大于 142 d),以商县为低值中心(多年均值小于 106 d),形成自

东北向西南逐渐增加的趋势(图 6(d))。中雨日数和大雨日数的空间分布状况与年降水量类似,低值中心均在商县,高值中心均在镇巴县(图 6(e)、6(f))。

4 讨 论

通过汉江流域陕西段 27 个气象站点 1971—2018 年的逐日降水数据,研究了流域 6 个降水指数的变化趋势、突变年份、周期规律及空间分布,发现在研究时段内汉江流域陕西段除了降水强度缓慢增加,其余 5 个降水指数均缓慢减小。在全国总体而言,我国的年平均降水量变化较小,但降水频率降低,降水强度呈上升趋势,极端降水(暴雨和大雨)逐渐增加^[9]。本文研究结论与目前大多数研究结果基本一致,虽然总降水量变化不大,但是具有明显的区域特征。汉江流域陕西段属于东部季风区,与我国西部内陆地区降水变化趋势的差异性较大,西部地区年平均降水量显著增加,降水频率也明显上升,与平均降水量相比上升幅度较大的为暴雨和大雨^[9]。全球气候变暖会增加空气湿度,从而影响大气环流状况,引发极端降水事件的发生,从汉江流域陕西段的降水空间分布特征分析中发现,汉中市镇巴县的降水强度最高,易发生极端降水。例如 2020 年 6 月 17 日镇巴县发生了特大暴雨,最大 6 h 降雨量为 169.0 mm,日降雨量达到了 213.4 mm,与其相邻的紫阳县及洋县的降雨量也分别达到了 130.0 和 120.4 mm。强降雨会引发部分区域的地质灾害和水环境问题,从而影响整个研究区域的水生态、水环境及水安全的健康发展。通过研究分析汉江流域陕西段各降水指数的时空分布情况及周期变化规律,能够为水源区的水资源管理、水灾害及水污染防治等提供一定的参考。

5 结 论

基于汉江流域陕西段 27 个气象站点 1971—2018 年逐日降水数据,分析 6 个降水指数的特征,采用 Mann-Kendall 检验法、线性估计法、滑动均值法、IDW 空间插值法及小波分析法研究汉江流域陕西段降水的时空分布特性,得到以下结论:

(1)汉江流域陕西段降水指数变化趋势除降水强度呈缓慢增加之外,其他指数如年降水量、最大日降水量、年降水日数、中雨日数和大雨日数均呈不显著减小的趋势。汉江流域陕西段在 1981—1990 年为降水多发期,在 1991—2010 年为降水缺乏期。需

要关注的 2011—2018 年,在研究时段内各年代际降水指数均值的比较中,其年降水量、降水强度和年降水日数均仅次于最大值,未来极端降水事件可能会更加频繁,造成的水灾害不容忽视。

(2)研究区域仅年降水日数在研究时段内无突变点,且在 1995 年后减少趋势显著。年降水量在 1971 和 2001 年左右出现 UF 统计量超过 0.05 显著性水平线的情况,其余时间变化趋势均不显著。降水强度在 1983 年后呈现不显著的先减小后缓慢增加的趋势。年降水量、中雨日数和大雨日数的突变点均为 1983 年左右,而降水强度和最大日降水量的突变点分别为 1973 和 1977 年。

(3)对年降水量进行小波周期诊断发现有 7 a 的副周期和 27 a 左右的主周期,主周期内震荡规律明显,表现为 3 个循环交替,包括 1 个偏枯期和两个偏丰期,丰、枯交替突变点在 1983 和 2000 年。对汉江流域陕西段的汛期和非汛期降水量分析发现,汛期降水量周期与年降水量周期基本一致,有 8 a 的副周期和 26 a 左右的主周期。而非汛期则有 4、16 a 两个副周期和 1 个 28 a 的主周期,主周期内同样有 3 个循环交替。

(4)从 6 个降水指数的空间分布情况可以发现,除了年降水日数的高值中心在宁强县外,其余 5 个降水指数的高值中心均在镇巴县,而低值中心除了降水强度在太白县外其余的均在商县,各降水指数均呈现自北向南递增的趋势,并表现出一定的季风影响性。镇巴县为降水强度最大的区域,后续面临的土壤侵蚀问题、极端降水事件及其他水灾害问题均要引起重视。

参考文献:

- [1] 赵宗慈,罗 勇,黄建斌. 全球增暖 1.5℃ 的再思考——写在 SR15 发表之后[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(2): 212—216.
- [2] IPCC. Special report on global warming of 1.5℃ (SR15) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [3] PFAHL S, OGORMAN P A, FISCHER E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation [J]. Nature Climate Change, 2017, 7(6): 423—427.
- [4] KNAPP A K, AVOLIO M L, BEIER C, et al. Pushing precipitation to the extremes in distributed experiments: Recommendations for simulating wet and dry years [J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 1774—1782.
- [5] 李东欢,邹立维,周天军. 全球 1.5℃ 温升背景下中国极端事件变化的区域模式预估[J]. 地球科学进展, 2017,

- 32(4):446—457.
- [6] 许小明,徐玉霞,雷雯,等.近60年宝鸡市主城区极端天气变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):67—74.
- [7] LIU Run, LIU S C, RALPH J C, et al. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(8): 1027—1037.
- [8] 张奇谋,陈思,陈松生,等.不同RCP情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1470—1480.
- [9] 吴燕娟.气候变化背景下我国极端降水的时空分布特征和未来预估[D].上海:上海师范大学,2016.
- [10] 姜江,姜大膀,林一骅.中国干湿区变化与预估[J].大气科学,2017,41(1):43—56.
- [11] 王涛,杨强,于冬雪.陕北黄土高原地区极端降水事件时空分布特征[J].云南地理环境研究,2014,26(4):7—14.
- [12] MEEHL G A, ARBLASTER J M, TEBALDI C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18): 109—127.
- [13] 胡思,曾伟,王磊,等.长江流域极端降水的区域频率及时空特征[J].长江流域资源与环境,2019,28(8): 2008—2018.
- [14] 汪成博,李双双,延军平,等.1970—2015年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征[J].自然资源学报,2019,34(6):1209—1222.
- [15] 春兰,秦福莹,宝鲁,等.近55a内蒙古极端降水指数时空变化特征[J].干旱区研究,2019,36(4):963—972.
- [16] 白景峰.基于县域的生态脆弱区人均粮食时空格局变动及驱动力分析——以南水北调中线水源区为例[J].地理科学,2014,34(2):178—184.
- [17] SUN Xiaolei, HU Zhengyi, LI Meng, et al. Optimization of pollutant reduction system for controlling agricultural non-point-source pollution based on grey relational analysis combined with analytic hierarchy process [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243: 370—380.
- [18] 郝改瑞,李家科,李怀恩,等.流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J].水力发电学报,2018,37(12):54—64.
- [19] 唐肖阳,唐德善,鲁佳慧,等.汉江流域农业面源污染的源解析[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2242—2251.
- [20] 滕杰,郭明,周政辉.汉江上游径流非一致性演变特征及频率分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(6):106—112.
- [21] 孙佳乐,王颖,辛晋峰.汉江流域(陕西段)水生态承载力评估[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):80—86.
- [22] 王乐,杨文发,张录军,等.北极海冰对长江流域主汛期降雨的影响[J].水科学进展,2019,30(5):623—631.
- [23] 陈婷,夏军,邹磊.汉江上游流域水文循环过程对气候变化的响应[J].中国农村水利水电,2019(9):1—7.
- [24] 栾金凯,刘登峰,刘慧,等.汉江流域上游植被指数变化的影响因素分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):46—54.
- [25] 陈灏,董前进.基于AWRI指数的汉江上游流域水资源量评估[J].人民长江,2019,50(6):92—97+129.
- [26] 卢珊,王百朋,贺皓,等.汉江上游汛期面雨量气候特征[J].干旱气象,2014,32(2):201—206.
- [27] 李丹,郭生练,洪兴骏,等.汉江流域1960~2014年降雨极值时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2016,25(9):1448—1456.
- [28] 王涛,于冬雪,杨强.陕北黄土高原地区降水时空变化特征[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):24—28.
- [29] 王雨斐,方国华,闻昕,等.1956—2015年高邮市气温和降水量变化特征研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):111—116.
- [30] 杨柳.陕西省泾惠渠灌区发展中的生态环境问题分析及调控研究[D].西安:西安理工大学,2017.

(上接第79页)

- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.节水型社会评价指标体系和评价方法:GB/T 28284—2012 [S].北京:中国标准出版社,2012.
- [19] 梁富山.基于AHP和熵权法的税收收入质量评价——基于国税系统2011年数据的实证研究[J].税务与经济,2013(5):70—78.
- [20] 张强,王本德,曹明亮.基于因素分解模型的水资源利用变动分析[J].自然资源学报,2011,26(7):1209—1216.
- [21] 宋国君,高文程.中国城市节水潜力评估研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):1—7.