

雅砻江流域 REOF 分区的降水特征及其未来趋势分析

龚成麒^{1,2,3}, 董晓华^{1,2,3}, 董立俊^{1,2,3}, 吴寒雨^{1,2,3}, 欧阳习军^{1,2,3}

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡库区生态环境教育部工程研究中心,
湖北 宜昌 443002; 3.水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072)

摘 要:研究区域降水对保障生态环境、发展有效灌溉面积、农业生产以及优化水库调度具有重要意义。以雅砻江流域为研究对象,利用该流域 13 个气象站 1961—2018 年的降水资料,使用旋转经验正交函数分解(ReOF)划分为 6 个地理区并结合 Daniel 趋势分析、Mann-Kendall 突变检验、滑动 T 检验和 R/S 重标极差法分析了雅砻江流域 6 个区 1961—2018 年的降水变化特征和未来降水趋势。结果表明:(1) 每个区的降水量年代际变化特征明显,年际变化特征不明显,与流域整体降水特征一致;Ⅰ区的降水量整体在持续减少,Ⅱ—Ⅵ区的降水量整体呈上升趋势,流域整体降水呈上升趋势。(2) Ⅰ—Ⅵ区的降水量突变年份依次为 1981 年、2002 年;1981 年;2005 年、2014 年;1978 年、1997 年、2001 年、2011 年;1980 年、2000 年;1980 年、1998 年、2001 年。(3) 6 个分区在未来一段时间内,Ⅳ区的降水量与过去趋势相比将会下降;Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅴ区及Ⅵ区的降水量与过去趋势相同并呈强持续性,其中Ⅲ区的降水量上升趋势时间长、持续性最强,与过去趋势变化最相符;6 个区的降水量受过去趋势影响的未来趋势时间长度依次为 12 a,10 a,8 a,10 a,6 a,13 a。以上研究表明,雅砻江流域中下游的降水量上升幅度最大,而下游西南部(Ⅰ区)的降水量在显著持续减少,该现象会对水力发电、生态治理和农业生产带来一定的负面影响;6 个区降水量的显著年代际变化增加了局部旱涝发生的不确定性,降水量过去总体趋势对未来趋势的影响时间较长,这对于合理治理植被生态、做好水土保持工作、优化水库调度、发展有效灌溉面积和农业生产具有科学指导意义。

关键词:雅砻江流域; 旋转经验正交函数; Daniel 趋势分析; 突变检验; 未来趋势分析

中图分类号:P467; P333.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0078-10

Analysis of Precipitation Characteristics and Future Trends in the REOF Subarea of the Yalong River Basin

GONG Chengqi^{1,2,3}, DONG Xiaohua^{1,2,3}, DONG Lijun^{1,2,3}, WU Hanyu^{1,2,3}, OUYANG Xijun^{1,2,3}

(1.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
2.Engineering Research Center for the Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang,
Hubei 443002, China; 3.Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The study of regional precipitation is of great significance for ensuring the ecological environment, developing effective irrigation area, agricultural production and optimizing reservoir operation. Taking the Yalong River Basin as the research object, we used the precipitation data of 13 weather stations in the basin from 1961 to 2018, used the rotating empirical orthogonal function decomposition (ReOF) to divide into 6 geographic regions, and combined with Daniel trend analysis and Mann-Kendall mutation Test, sliding T test and R/S re-standard range method to analyze the precipitation change characteristics and future precipitation trends of 6 districts in the Yalong River Basin from 1961 to 2018. The results show that: (1) the inter-decadal variation of precipitation in each area was obvious, and the inter-annual variation was not obvious, which was consistent with the overall precipitation characteristics of the basin; the overall precipitation in area I continued to decrease, and the overall precipitation in areas II—VI was on the rise, and the overall precipitation in the basin was on the rise; (2) the abrupt years of precipitation in I—VI areas were 1981, 2002; 1981; 2005, 2014; 1978, 1997, 2001, 2011; 1980, 2000; 1980, 1998, 2001; (3) in the six sub-regions, the precipitation in area IV will decrease compared with the past trend in the future; the precipitation in area I, II, III, V and VI will be the

收稿日期:2021-05-07

修回日期:2021-06-22

资助项目:欧洲空间局、中国国家遥感中心项目(58516);中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02-09)

第一作者:龚成麒(1996—),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:qchengong@qq.com

通信作者:董晓华(1972—),男,湖北秭归人,博士后,教授,主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail:xhdong@ctgu.edu.cn

same and strong sustainability; the precipitation in District III has the longest rising trend and the strongest sustainability, which is most consistent with the past trend; the during of the future trend of precipitation in the 6 districts affected by the past trend is 12 years, 10 years, 8 years, 10 years, 6 years, 13 years, respectively. The precipitation in the middle and lower reaches of the Yalong River has the largest increase, while the precipitation in the southwestern part of the lower reaches (Zone I) continues to decrease significantly, which has a negative impact on hydropower, ecological management and agricultural production. Significant interdecadal changes in precipitation in 6 districts increase the uncertainty of local droughts and floods. The past general trend of precipitation will have a longer impact on the future trend, which is of scientific guiding significance for the reasonable protection of vegetation ecology, soil and water conservation, optimization of reservoir scheduling and development of the effective irrigation area and agricultural production.

Keywords: Yalong River Basin; rotating empirical orthogonal function; Daniel trend analysis; mutation test; future trend analysis

降水在空间分布上的不均匀与时间变化上的不稳定是引起洪、涝、旱灾的直接原因^[1]。在全球气候变暖的背景^[2]下,气候的变化会影响水循环过程,导致降水、径流等水文要素的变异,进而影响旱涝极端水文事件的发生,给流域水电建设及运行、生态环境和农业生产带来巨大的威胁。

目前,学界在开展气候区划研究中多使用 EOF 和 REOF。相对前者而言,后者因能按方差贡献率分解出高度相关的各主成分空间模态而得到广泛的应用,不少学者对气候要素 REOF 分区和雅砻江已有不少的研究^[3-9]。宋雯雯等^[10]利用 1981—2017 年雅砻江流域的逐日降水资料分析了流域面雨量、雨季的时空分布特征,结果显示雅砻江流域面雨量随月份起伏明显,年内变化呈单峰型。陈媛等^[11]选取雅砻江流域 1960—2014 年降水、气温及径流资料探讨降水和气温对径流变化的影响,结果表明雅砻江流域降水分布地区差异较大,年内分配严重不均匀,年际变化小。曹琛等^[12]利用 ASD 模型,将 4 种大气环流模式(GCM)输出的低、中、高浓度排放情景下的气候因子统计降尺度到雅砻江流域的 15 个气象站点,模拟基准期的逐日降水并与实测值进行比较,总结出各模式在雅砻江流域的适用性结果并指出雅砻江流域未来降水将呈现增加的趋势。袁定波等^[13]在泰森多边形的基础上考虑地理空间要素对降雨空间分布的影响,采用面向对象的遥感信息聚类方法提取出雅砻江流域 2 项形状因子和 5 项地形因子,通过分析降雨—径流相关性指出地形因子雨量法在月尺度上的降雨估算精度高于年尺度,在月、年际降雨变化趋势分析方面,年尺度上的降雨与径流一阶差分后平均相关系数为 0.903,高于月尺度 0.629。以上这些研究大多是从雅砻江流域整体气候和面雨量入手,缺乏对降水场的区域分布特征研究,未能直观地体现出该流域的区域变化和区域时空分布特征。EOF 和 REOF 能较好地反映出区域变化和区域时空分布特征,Ercha 等^[14]通过引入模型

化的 EOF 序列,建立了全球 TEC 模型,并验证了模型的精度和质量,结果表明 EOF 模型能较好地反映出区域的大部分变化和时空分布特征。Ansari 等^[15]通过经验正交函数探究了 GNSS 观测到的时空 TEC 变化,结果分析表明 EOF 模型在分解模态快速收敛、时态和空间分量判别方面具有优越的效果和可行性。Jamjareegulgarn 等^[16]使用旋转经验正交函数来分析尼泊尔 TEC 的年变化和月变化过程中,发现使用经验正交函数得出结果的均方根误差普遍较低。鉴于该模型的可靠性,为了能更加清晰直观地体现雅砻江流域上中下游的区域降水特征,本文基于旋转经验正交函数法(EOF)将雅砻江流域进行地理分区,并使用数理统计的方法重点分析每个分区 1961—2018 年的降水特征及未来趋势,以期为该流域应对气候变化、合理保障植被生态、水库调度、发展灌溉和农业生产提供科学依据。

1 流域概况

雅砻江是金沙江左岸最大的支流,地处青藏高原东部,发源于青海省巴颜喀拉山南坡,于攀枝花市雅江桥下注入金沙江。雅砻江流域形状似柳叶状,流域面积 13.6 万 km²。流域山谷地势东南低、西北高,海拔在 980 m 以上,受地形地貌影响,流域气候复杂多变,其西北部多属干冷的大陆性气候,四季不分明,中南部多属降水充裕的亚热带气候,因此流域多羽状水系分布,短小支流众多,流域每逢汛期便暴雨频发,导致山洪灾害严重,经常给人民生命财产和工农业生产造成巨大威胁^[17]。流域内有人口 200 多万,在可生产利用的土地面积中,耕地面积约占 1/5,牧地约占 1/3,宜农荒地约占 1/20,宜牧草场约占 3/7。流域北部地区人少地广,多为四川的畜牧业基地,流域南部地区人口众多,工农业也较为发达,水能资源丰富,现投产运行的水电站有两河口、锦屏一级、锦屏二级、二滩等多座大中型梯级水电站,流域从上至下规划的水电站有仰日、达尼坎多、温波

寺、仁青岭、通哈、英达、新龙、牙根、楞古、孟底沟和龚坝沟等大中型水电站,总装机容量高达 28 446.2 MW,蓄水库容庞大,经济效益显著。鉴于地形和经济等因素,流域内气象站点较少,本文选取流域内及周边 13 个气象站点进行分析研究。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本研究使用的气象数据均来自中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),其降水数据是从中国地面 699 个国家基本气象站中提取出来的,分别是清水河、石渠、甘孜、色达、道孚、新龙、康定、木里、九龙、越西、昭觉、盐源和西昌 13 个国家气象站点 1961—2018 年的日降水观测数据,缺测数据使用线性内插法插补,将插补好的 13 个站点 58 a 的日降水数据换算成年平均降水数据以进行下面的分析。13 个气象站点(介于 $96^{\circ}52'—102^{\circ}48'E$, $26^{\circ}32'—34^{\circ}58'N$)在雅砻江流域的分布情况见图 1。

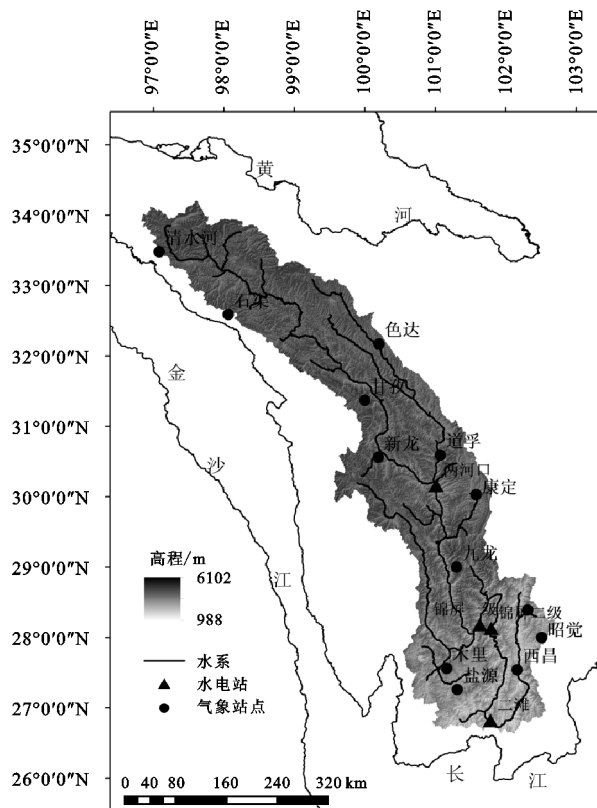


图 1 雅砻江流域概况

2.2 研究方法

2.2.1 旋转经验正交函数分解 经验正交函数(EOF)最早由统计学家 Pearson 在 1902 年提出,经 Lorenz 引入气象问题分析中。其分解原理是在有限地理空间中,利用不规则分布的观测站点数据,将气象要素场自然正交展开,按方差贡献率大小分解为少数互相独立的典型模态。该方法较倾向于气象要素

场的整体结构,分解出的模态集中体现了原变量场信息,是气候学领域进行空间分区的重要技术^[4]。

旋转经验正交函数(EOF)^[18-19]是在 EOF 的分解基础上,取累计贡献方差符合要求的前几个主成分作为载荷特征向量,对其进行方差最大正交旋转,旋转后的主成分贡献率相比 EOF 更加平均,简化了特征向量的结构,因此旋转分解出的空间模态更加清晰,更能明显反映出气候特征,它部分克服了传统 EOF 分析中每个载荷向量都较均匀地描述变量场变率结构的缺陷^[20-22]。

2.2.2 Daniel 趋势分析 Daniel 趋势检验法是结合 Spearman 秩相关系数进行统计分析的一种方法。Spearman 秩相关检验不需要考虑时间序列的真实数据,只需将时间序列的真实数据转化为依次的排名,一般数据量要求 4 个以上。

将时间序列按时间周期进行排序得到 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_{N-1}, Y_N$, 将时间序列的实测数据按大小进行排序得到相应值 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N-1}, X_N$, 统计检验所用的秩相关系数为:

$$r_s = \frac{1 - (6 \sum_{i=1}^N d_i^2)}{(N^3 - N)} \quad (1)$$

式中: $d_i = X_i - Y_i$; N 为周期年份数。

将秩相关系数 r_s 的绝对值与 Spearman 秩相关系数统计表中的临界值进行比较,当 $-w_p \geq r_s$ 或 $w_p \leq r_s$ 时说明降水量变化趋势具有显著意义;当 $-w_p < r_s < w_p$ 时,说明降水量变化趋势没有显著意义,降水量变化稳定。当 $r_s > 0$ 时说明具有上升趋势,反之具有下降趋势^[23]。

2.2.3 突变检验 气候从一种稳定的状态或趋势跳跃到另一种状态或趋势的现象便是普适的气候突变定义^[24]。Mann-Kendall 突变检验不需要样本遵从一定的分布,也不受部分异常值的干扰,其基本原理见文献^[25]。T 检验由于检验目的和方向的不同,通常分为双尾检验和单尾检验。双尾检验(双侧检验)是要检验样本平均数和总体平均数,或样本成数是否有显著差异,其检验方向为样本间是否存在差异,不计较差异的方向是正差还是负差。而单尾检验(单侧检验)目的是检验样本所取自的总体参数值是否大于或小于某个特定值,其检验方向是寻求样本与特定值存在正差还是负差。一般来说,气象要素的 T 检验大多是双尾检验,且所用到的样本数一般为所用数据样本中所包含的单位数,就本研究而言,其样本数为本次所用年平均降水数据的时间序列长度。滑动 T 检验是连续的气象要素序列按步长 v 逐段划分为序

列 1 和序列 2,在两序列中取容量分别为 n_1, n_2 的样本,构造统计量

$$T=\frac{\overline{x_1}-\overline{x_2}}{\sqrt{S_w(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2})}} \tag{2}$$

式中: $\overline{x_1}, \overline{x_2}$ 分别为样本 n_1, n_2 的均值,其中

$$S_w=\sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2+(n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}} \tag{3}$$

统计量 T 服从自由度为 (n_1+n_2-2) 的 t 分布,若给定显著性水平 α ,当 $|T|>t_{\alpha/2}$ 时,两样本 n_1, n_2 有显著性差异,即序列发生突变^[26-28]。

2.2.4 重标极差法 R/S 重标极差法(以下简称 R/S)在气象变量时间序列上有着广泛的应用,其具体计算步骤详见文献^[29]。在 R/S 分析过程中,Hurst 指数是定量分析时间序列的特征指数,它能够区分随机与非随机序列。Hurst 指数的 H 值有 3 种形式:(1)当 $0<H\leq 0.5$ 时,说明时间序列未来趋势与过去趋势具有反持续性, H 值越小,反持续性越强烈。(2)当 $H=0$ 时,说明时间序列未来趋势与过去趋势相比稳定不变。(3)当 $0.5<H<1$ 时,说明时间序列未来趋势与过去趋势相比具有正持续性, H 值越大,正持续性越强烈。目前已有研究进一步细分 Hurst 指数的 H 值: $0<H\leq 0.35$ 为强反持续性, $0.35\leq H\leq 0.5$ 为弱反持续性, $0.5<H\leq 0.65$ 为弱持续性, $0.65<H\leq 1$ 为强持续性^[30]。

虽然 R/S 中的 Hurst 指数能预测时间序列中的未来趋势,但是它并不能预测到具体的未来时间长度,但是可以使用统计量 V 用来判断时间序列的周期性循环,并推测出过去趋势影响将来趋势的时间长度。统计量 V 的计算公式为:

$$V_n=\frac{(R/S)_n}{\sqrt{n}} \tag{4}$$

在 $V_n-\ln(n)$ 坐标系上,若 $H=0.5$,图形应为一 条近似的水平直线;若 $H<0.5$,图形应为向下倾斜的曲线;若 $H>0.5$,图形应为向上倾斜的曲线。曲线出现明显转折时,过去趋势对未来趋势的影响消失,此时对应的时间长度就是系统的平均循环长度^[31],即过去趋势影响将来趋势的时间长度。

3 结果与分析

3.1 雅砻江流域的降水场分区

将雅砻江流域 1961—2018 年共 58 a 的逐日降水数据转换成逐年降水数据,并对各个站点的年降水数据进行矩平化处理。将矩平化后的年降水数据进行经验正交函数分解(EOF),可以得到 13 个主成分

及 13 个特征值。从第 7 个主成分起,特征值未能通过 North 显著性检验^[32],因为

$$|\lambda_{j+1}-\lambda_j|\geq \lambda_j\times (2/n)^{0.5} \quad (n=13) \tag{5}$$

当 $j=7$ 时, $|4060.111-4902.684|=842.573<4902.684\times (2/13)^{0.5}=1922.991$ 。

根据 North 显著性检验的结果,本文取前 6 个主成分的方差贡献率,见表 1。由表 1 可知,第一主成分的方差贡献率最大,达到了 43.6%,第二主成分的方差迅速降低,后面几个主成分方差贡献也愈来愈小,在 EOF 分解的基础上,进一步将主成分做最大正交方差旋转进行 REOF 展开,可以得出非常细微的降水载荷向量地理分区。由表 1 可以看出,REOF 展开的前 6 个主成分的累计方差达到了 83.3%,可以较好地用来划分 6 个空间模态,因此由前 6 个旋转空间模态对雅砻江流域降水场划分为 6 个分区。由于各主成分最大正交旋转后着重突出空间的相关性分布特征,高载荷只集中在某一较小的区域,而其他大部分区域的载荷尽可能地接近 0,所以由表 1 可知最大正交旋转后的载荷方差贡献率要比旋转前的分布均匀。

表 1 前 6 个 EOF 和 REOF 分解对总方差的贡献和累计贡献值

序号	EOF		REOF	
	方差	累计方差	方差	累计方差
	贡献/%	贡献/%	贡献/%	贡献/%
1	43.6	43.6	20.0	20.0
2	15.5	59.1	14.6	34.6
3	10.2	69.3	14.5	49.1
4	8.0	77.4	14.2	63.3
5	5.6	83.0	11.2	74.5
6	4.0	86.9	8.8	83.3

本文使用 ArcGIS 绘制出各模态 REOF 载荷向量分布图和分区示意图,见图 2—3。由图 3 可知,雅砻江降水的地理空间分布并非只局限于上、中、下游三部分,6 个区分别位于下游西南部(Ⅰ区),占总面积的 16.7%;中上游东北部(Ⅱ区),占总面积的 26.4%;中下游东部(Ⅲ区)占总面积的 23.6%;下游东南下部(Ⅳ区),占总面积的 7.7%;上游西北部(Ⅴ区),占总面积的 21.0%;下游东南上部(Ⅵ区),占总面积的 4.6%。其气象站点在 6 个区的具体分布见表 2,将高值区站点作为每个区的代表站。

表 2 雅砻江流域 13 个气象站点分区

站号	56034	56038	56146	56152	56167	56251	56374
站名	清水河	石渠	甘孜	色达	道孚	新龙	康定
区号	V	V	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
站号	56459	56462	56475	56479	56565	56571	
站名	木里	九龙	越西	昭觉	盐源	西昌	
区号	I	Ⅲ	Ⅵ	Ⅳ	I	Ⅳ	

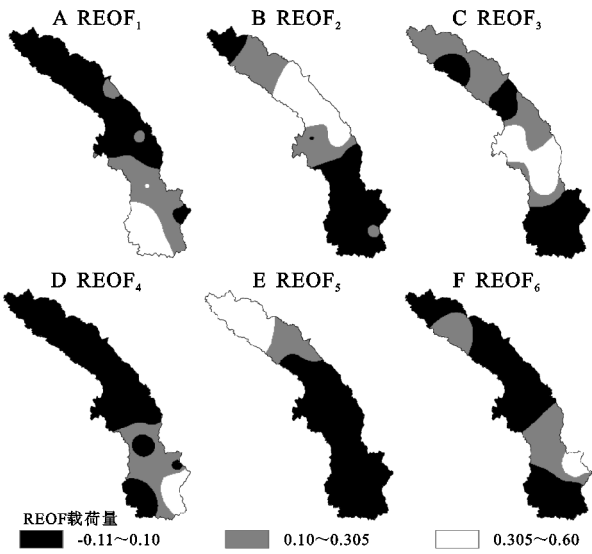


图 2 雅砻江流域 REOF 共 6 个载荷向量分布

3.2 变化趋势及突变检验

3.2.1 Daniel 趋势分析 本文先以 1961—2018 年 58 a 长时间序列为周期,再以各阶段短时间序列为周期,然后在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下计算各个周期阶段的秩相关系数,由 Spearman 秩相关系数表查询 $\alpha=0.05$ 显著性水平下的相关系数值 W_p ,见表 3。由表 3 可知:以长时间序列为周期时,雅砻江流域 6 个代表站在 58 a 长时间序列上的降水量是一致变化的,呈上升趋势,说明雅砻江流域每个分区的降水量年际变化是大体一致的。下游的盐源站(Ⅰ区)的降水量总趋势却是呈下降趋势,说明该区过去 58 a 内的降水量在减少。

以短时间序列为周期时,6 个区的各阶段时间序列

表 3 1961—2018 年雅砻江流域代表站年平均降水量 Daniel 趋势分析结果

年份	W_p	盐源(Ⅰ区)		甘孜(Ⅱ区)		康定(Ⅲ区)	
		降水 r_s 统计量	趋势	降水 r_s 统计量	趋势	降水 r_s 统计量	趋势
1961—2018	0.214	-0.116	下降	0.257 *	上升	0.489 *	上升
1961—1969	0.600	0.700 *	上升	0.300	上升	0.900 *	上升
1970—1979	0.564	-0.103	下降	0.297	上升	-0.418	下降
1980—1989	0.564	-0.115	下降	-0.127	下降	-0.115	下降
1990—1999	0.564	0.018	上升	0.333	上升	0.164	上升
2000—2018	0.391	-0.662 *	下降	-0.473 *	下降	-0.380	下降

年份	W_p	昭觉(Ⅳ区)		清水河(Ⅴ区)		越西(Ⅵ区)	
		降水 r_s 统计量	趋势	降水 r_s 统计量	趋势	降水 r_s 统计量	趋势
1961—2018	0.214	0.113	上升	0.167	上升	0.061	上升
1961—1969	0.600	0.600 *	上升	-0.900 *	下降	0.200	上升
1970—1979	0.564	-0.164	下降	0.527	上升	0.018	上升
1980—1989	0.564	0.139	上升	0.382	上升	-0.103	下降
1990—1999	0.564	-0.370	下降	-0.455	下降	-0.709 *	下降
2000—2018	0.391	-0.196	下降	0.714 *	上升	-0.437 *	下降

注: * 表示显著性水平 $\alpha=0.05$ 下差异显著; ** 表示显著性水平 $\alpha=0.01$ 下差异显著; *** 表示显著性水平 $\alpha=0.001$ 下差异显著。

3.2.2 Mann-Kendall 突变分析 给定显著性水平 $\alpha=0.05$,使用 Mann-Kendall 法分别检验代表 6 个分

有着不同的差异性。1960s 仅Ⅴ区的降水量呈下降趋势,其它区全为上升趋势,且多区出现了显著性差异,1970s 有 6 个区降水量的增减非一致性最为明显,1980s 有 6 个区的升降趋势的差异性有所降低,1990s 只有Ⅳ区和Ⅵ区的降水量减少;进入 21 世纪以后,Ⅴ区除外的其他 5 个区的降雨均出现了下降趋势,这与 20 世纪降水量普遍上升的现象刚好相反,出现这种变化的原因可能是因为进入 21 世纪以后,我国经济飞速发展的同时也造成了生态环境的破坏,从而影响了气候的变化,导致了降水量的减少。与长周期降水序列相比,6 个区的短周期降水序列的不同表明每个区都有着明显的年代际变化,而年际变化不明显。

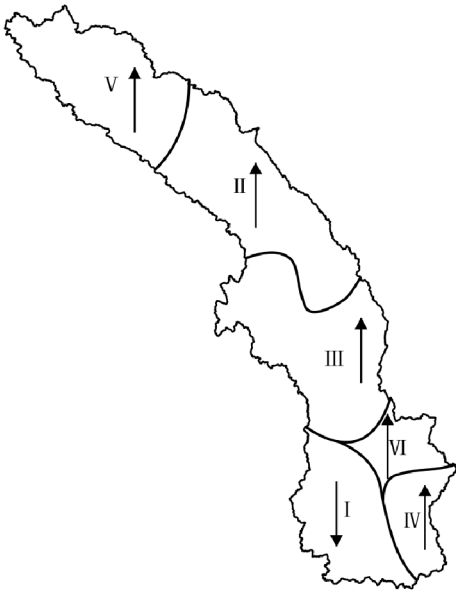


图 3 分区示意图

区的盐源、甘孜、康定、昭觉、清水河、越西 6 个气象站点的年平均降水量的变化趋势和突变时间(图 4)。

结果表明:Ⅰ区 1970s 降水量呈下降趋势,但下降趋势不显著。1980s 至 21 世纪初,降水呈上升趋势,但上升趋势不显著,降水量在 2002 年发生突变,说明 2002 年以后Ⅰ区的降水量开始显著性减少,与表 3 中的结果一致。Ⅱ区自 1965 年以后,降水量一直处于上升趋势,并与 1979 年达到置信度临界水平,但是该区出现了多个突变点,并不能确定降水量的突变时间,需结合滑动 T 检验进一步确定突变点的位置。Ⅲ区 1970s 降水量呈下降趋势,1980s 以后降水量呈上升趋势,并于 1984 年发生显著性突变,说明 1984

年以后,Ⅲ区的降水量呈显著上升趋势。Ⅳ区自 1960s—1990s 的降水量呈稳定上升趋势,但上升趋势不显著,1961—2018 年,降水量有多处突变位置,同样需辅以滑动 T 检验进一步进行突变点的判定。Ⅴ区在 1960s—1980s 年代,降水量呈下降趋势,而在 1964 年达到了置信度水平以上,即降水量下降趋势显著,与表 3 的结果一致,58 a 中出现的多个突变点需进一步确定。Ⅵ区自 1970s—2010s 以来,降水量一直呈上升趋势,且在 2006 年、2017 年均发生突变,待使用滑动 T 检验进一步对该区降水趋势进行探究。

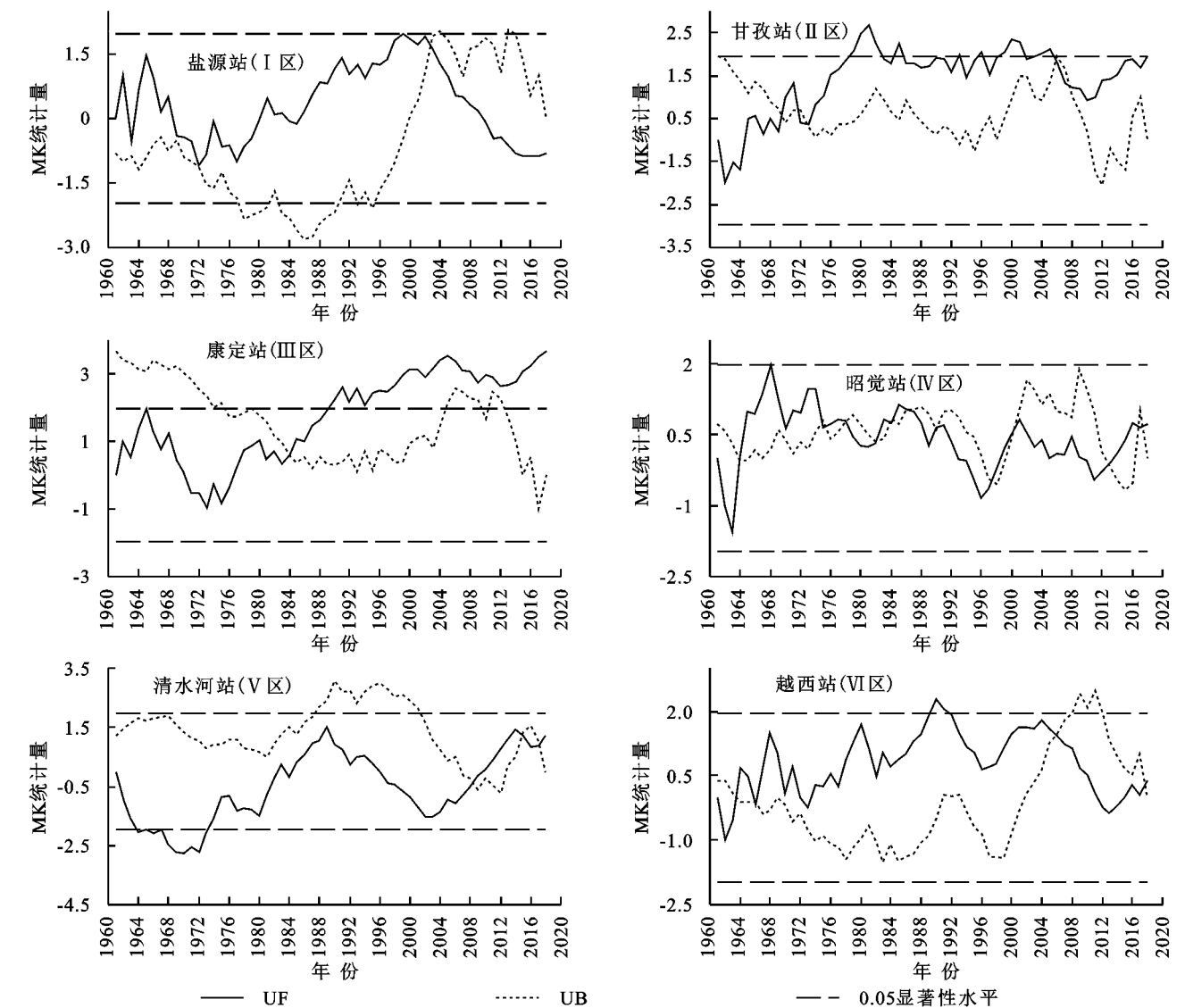


图 4 雅砻江流域 6 个区 58 年平均降水量的 Mann-Kendall 趋势检验与突变分析

3.2.3 滑动 T 检验分析 在 Mann-Kendall 突变分析中,甘孜站(Ⅱ区)、昭觉站(Ⅳ区)、清水河站(Ⅴ)及越西站(Ⅵ)出现了多处突变点,为进一步确定突变点的位置,现使用滑动 T 检验进行分析,以求进一步探究 6 个分区的降水特征。在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 进行滑动 T 检验时,分别取滑动步长 $v_1=2, v_2=3, v_3=4, \dots, v_{14}=15$ 对 6 个区的年平均降水量进行检

验(图 5)。结果表明:当滑动步长 $v=2$ 时,甘孜站(Ⅱ区)、清水河站(Ⅴ区)及越西站(Ⅵ区)的年平均降水量均通过显著性检验(图 5B, 5E, 5F),其降水突变年份依次为 1981 年;1980 年、2000 年;1980 年、1998 年、2001 年。当滑动步长 $v=3$ 时,盐源站(Ⅰ区)、康定站(Ⅲ区)及昭觉站(Ⅳ区)的年平均降雨量均通过显著性检验(图 5A, 5C, 5D),其降水突变年份依次分

别为 1981 年、2002 年;2005 年、2014 年;1978 年、1997 年、2001 年、2011 年。结合 Mann-Kendall 检验可以看出 6 个分区的降水量存在着明显的年代际变化,区与区之间也有着明显的降水特征差异,每个区在长时间序列中的年际变化不明显,在短时间序列中也不明显。

3.3 基于 R/S 的未来趋势预测分析

3.3.1 未来趋势分析 使用 R/S 分析雅砻江流域 6 个分区 58 a 年平均降水量的未来变化趋势,见表 4。结果表明:雅砻江流域 6 个分区中Ⅳ区的 Hurst 指数小于 0.5,其余 5 个区的 Hurst 指数均大于 0.5,其值

均在 0.6 以上,说明 6 个区的降水量未来变化趋势仅有Ⅳ区与过去趋势相反,其余 5 个区均与过去趋势相同,且呈现强持续性,即在未来一段时间内,Ⅳ区的降水量增加的趋势与过去趋势相比将会削弱,但呈弱持续性;Ⅰ区的降水量趋势与过去相同,将会持续保持下降的趋势;Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅴ区及Ⅵ区的降水量呈强持续显著上升的趋势,与雅砻江流域总体降水量的趋势一致^[12],说明Ⅰ区降水量的减少并不会影响雅砻江流域降水量增加的整体趋势。Ⅲ区的 Hurst 指数最大,说明该区的降水量上升趋势时间长、持续性最强,与过去趋势变化最为相似。

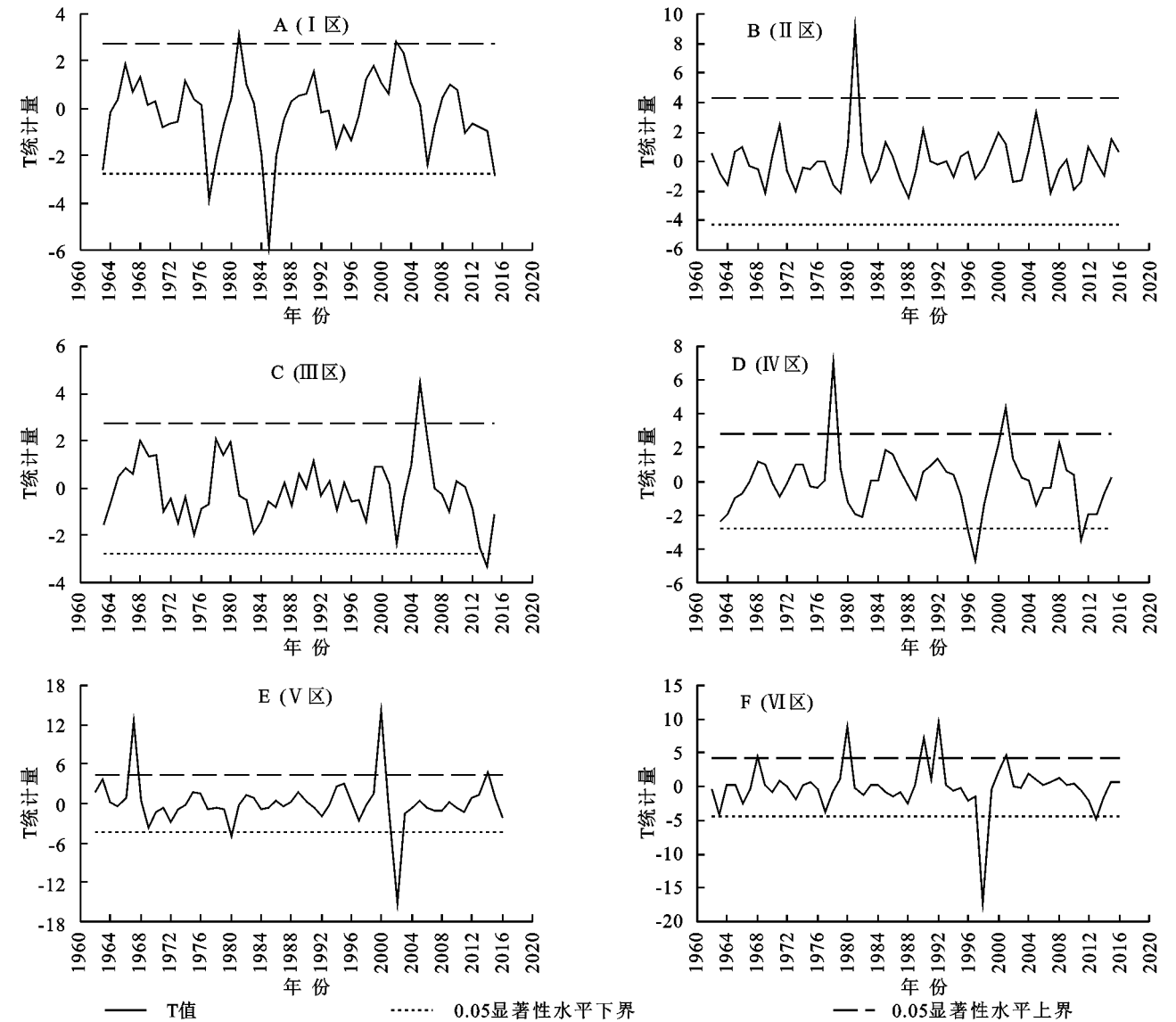


图 5 雅砻江流域 6 分区 58 年平均降雨量的滑动 T 检验结果

站点(区)	盐源(Ⅰ)	甘孜(Ⅱ)	康定(Ⅲ)	昭觉(Ⅳ)	清水河(Ⅴ)	越西(Ⅵ)
降水量 H 值	0.736	0.690	0.862	0.421	0.708	0.649
未来趋势	强持续	强持续	强持续	弱反持续	强持续	弱持续

注:表中未来趋势的(反)持续程度已在文中 2.2.4 节中明确给出界定范围。

3.3.2 非周期性循环长度 图 6 的结果显示:雅砻江流域 6 个分区中的Ⅳ区年平均降水 V 统计量呈下降趋势($H<0.5$),Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅴ区、Ⅵ区的降水 V 统计量呈上升趋势($H>0.5$),说明未来只有Ⅳ区的降水量趋势与过去相反,降水量将会减少,但持续性较弱;剩余 5 个区的降水量与过去增减趋势持续

保持一致且持续性较强。受过去趋势影响的未来趋势时间长度 I 区为 12 a, II 区为 10 a, III 区为 8 a, IV 区为 10 a, V 区为 6 a, VI 区为 13 a, 降水量总体上过去对未来趋势的影响时间较长。

4 讨论

在全球气候变暖,降水普遍增多的背景下,雅砻江流域下游西南部 I 区的降水量却是持续减少的,并且在未来 10 a 内 I 区降水量趋势是显著持续减少的,这会对植被生态治理、水力发电、农田灌溉等产生一定的影响。截止目前,该流域已投产运行的水电站有两河口、杨房沟、锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩和桐子林。规划的水电站有仰日、达尼坎多、温波寺、仁青岭、通哈、英达、新龙、牙根、愣古、孟底沟和龚坝沟等,总装机容量高达 28 446.2 MW, I 区下游的二滩水电站蓄水总库容有 58

亿 m^3 , 装机容量 330 万 kW, 保证出力 100 万 kW, 年发电量 170 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 因此 I 区降水的减少对水力发电、水电站运行和水库调度有一定的负面影响。2020 年该流域的有效灌溉面积已发展至 27.4 万 hm^2 , 其中农田耕地占 65.9%, 林果地占 8.5%, 草场、鱼场占 25.6%, 雅砻江流域的耕地面积主要集中在下游区域, 且 I 区林地覆盖度高, 耕地面积占比高达 57%, I 区降水量的减少也意味着该区有必要加强水土保持工作、优化水库调度和发展灌溉以供农业生活生产的需要。经对比雅砻江流域 1980—2018 年的土地利用(图 7)发现, 1980—2018 年期间的植被覆盖度, 耕地的分布及占比均没有明显的差异, 说明该区域的土地利用并没有发生较大的变化, 因此下垫面不是导致该区降水量减少的因素, 这就极有可能是受该区域的海拔高度、水汽通量以及人类活动等引起的降水量的减少^[33]。

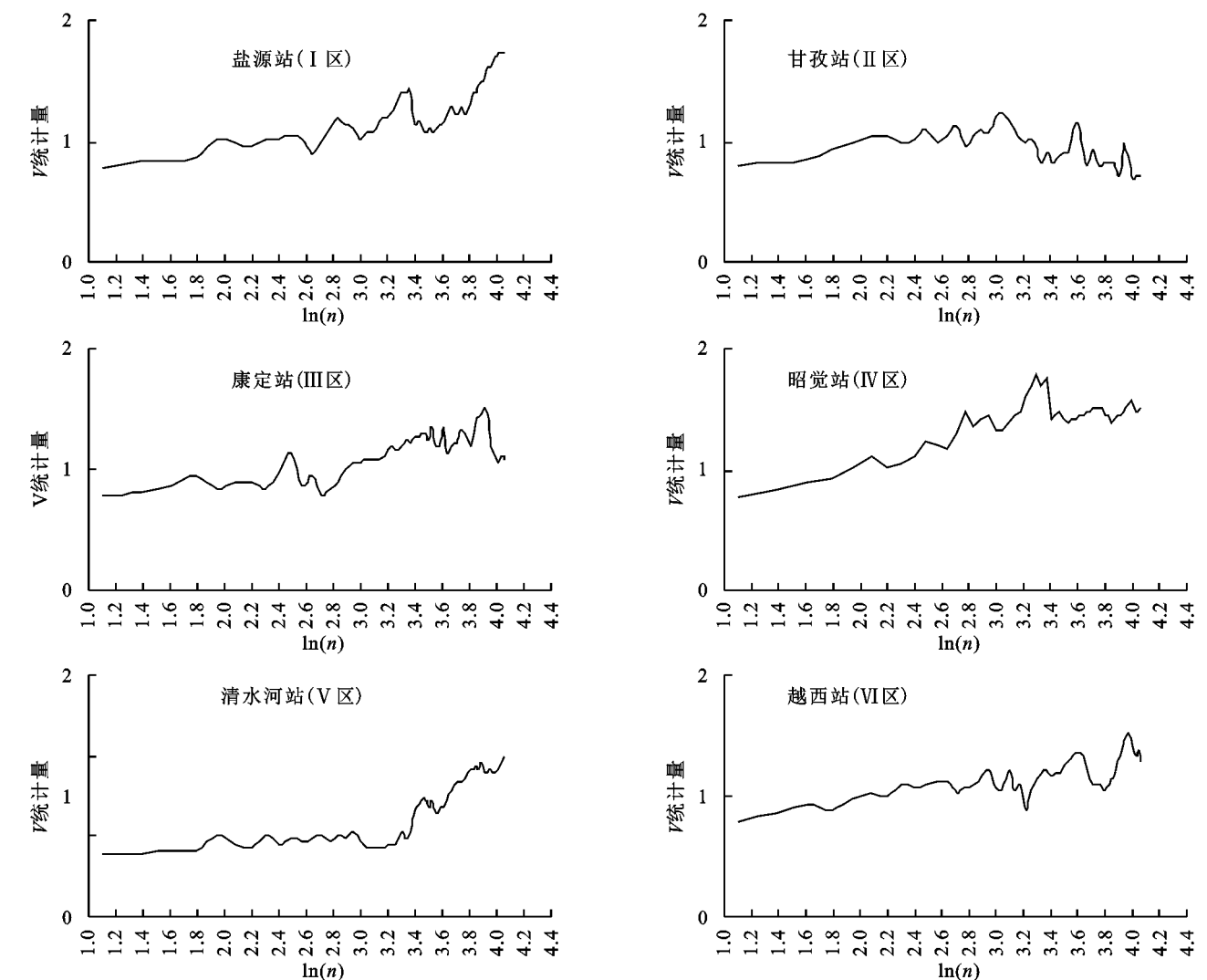


图 6 雅砻江 6 分区 58 年平均降水量的 V-ln(n) 曲线

5 结论

本文使用旋转经验正交函数分解(REOF)对雅砻江

流域降水场分成 6 个区,对每个分区 1961—2018 年的降水特征及未来趋势进行分析发现:6 个区之间的降水特征有明显的差异性,过去及未来增减趋势也非一致,且

各区的年代际变化大,年际变化小。结论如下:

(1) 使用旋转正交经验函数将雅砻江流域划分为 6 个地理区,6 个分区的降水量年代际变化明显,年际变化不明显,雅砻江流域整体降水的年代际变化明显,年际变化不明显。各分区长时间序列周期的年平均降水量整体呈上升趋势,整体降水量的年际变化小;各分区短时间序列周期之间有着较为明显的差异,并非同步雅砻江流域整体的上升趋势,有着明显的年代际变化,年际变化不明显。进入 21 世纪以后,6 个区的年平均降水量整体呈下降的趋势。

(2) Mann-Kendall 突变检验的结果 I 区的年平均降水量在 2002 年发生突变,2002 年以后 I 区的降水量开始显著下降。II 区自 1965 年以后,降水量一直处于上升趋势,并与 1979 年达到置信度临界水平。III 区的降水量于 1984 年发生显著性突变,此后 III 区的降水量呈显著上升趋势。IV 区整体降水量呈稳定上升趋势,但上升趋势不显著。V 区的年平均降水量在 1964 年达到了置信度水平以上,降水量下降趋势显著。VI 区的降水量在 2006 年发生突变,2006 年以后该区降水量逐渐减少。

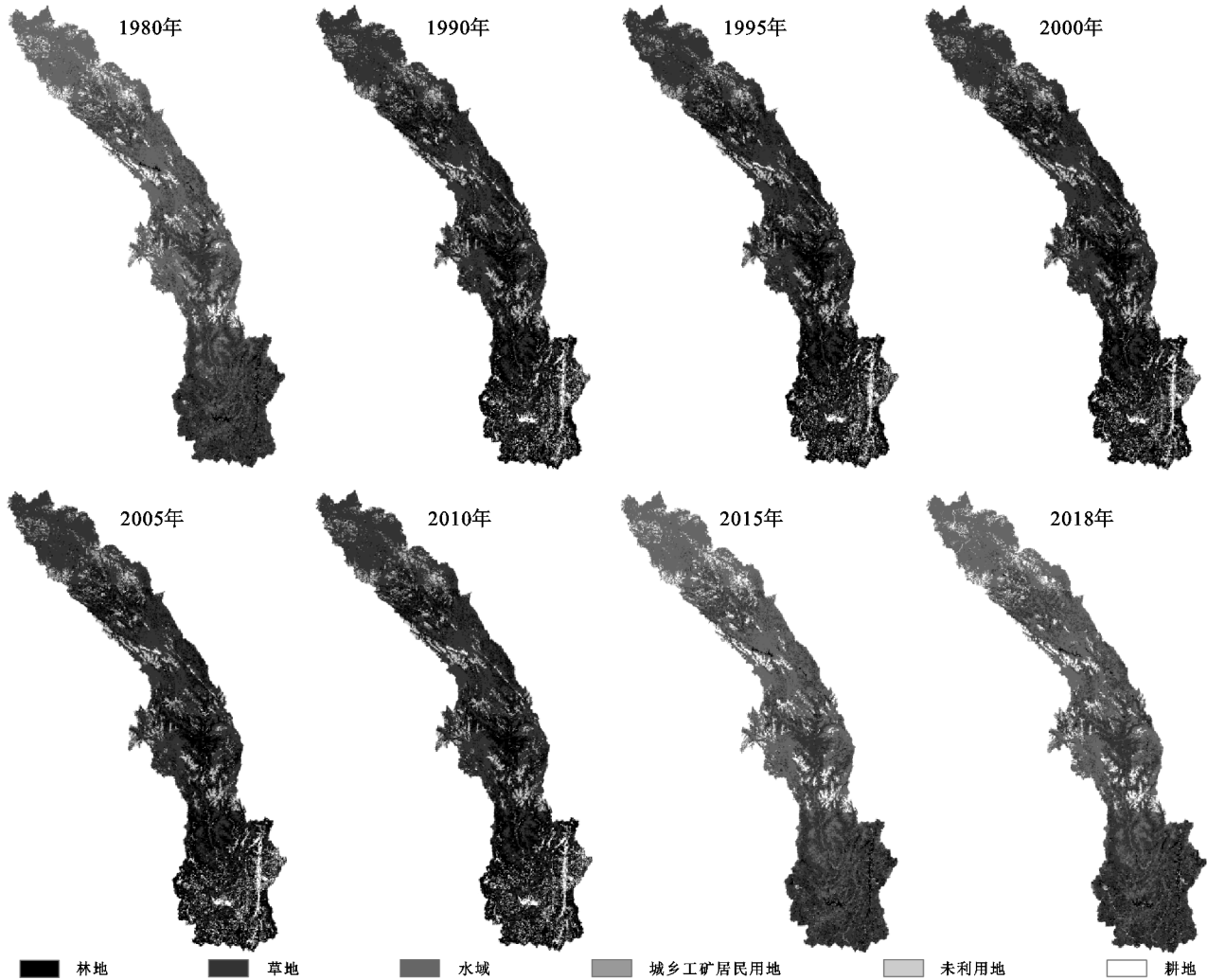


图 7 雅砻江流域 1980—2018 年土地利用对比

(3) 滑动 T 检验的结果表明当步长为 2 时,II 区、V 区、VI 区的年平均降水量均通过显著性检验,其降水突变年份依次为 1981 年;1980 年、2000 年;1980 年、1998 年、2001 年。当步长 $v=3$ 时,I 区、III 区、IV 区的年平均降雨量均通过显著性检验,其降水突变年份依次分别为 1981 年、2002 年;2005 年、2014 年;1978 年、1997 年、2001 年、2011 年。

(4) 雅砻江流域未来降水量整体仍旧呈持续上升趋势。6 个地理分区中 IV 区降水量 $H<0.5$,其余 5

个区降水量 $H>0.5$,即在未来一段时间内,IV 区的降水量与过去趋势相比将会下降,但呈弱持续性;I 区、II 区、III 区、V 区及 VI 区的降水量呈强持续显著上升的趋势,其中 III 区的降水量上升趋势时间长、持续性强,与过去趋势变化最相符。6 个区受过去趋势影响的未来趋势时间长度依次为 12 a,10 a,8 a,10 a,6 a,13 a,降水量总体上过去对未来趋势的影响时间较长,且大都为上升趋势,确保了水电工程建设和运行持续带来的经济效益。

(5) 雅砻江流域下游西南部区域降水量的减少会对下游水电站的水力发电、水库调度、农业生产及生态治理产生一定的负面影响,因此有必要在Ⅰ区域做好水土保持工作、优化水库调度方案、发展灌溉以满足水电站运行和农业生产生活的需要。

参考文献:

- [1] 邵丽欧主编.生命之源地球水资源[M].长春:吉林美术出版社,2014.
- [2] 张永香.巴黎能力建设委员会助力全球气候治理[J].气候变化研究进展,2021(1):1-4.
- [3] 黄琦,王瑞敏,向俊燕,等.3种降水产品在雅砻江流域的时空适用性研究[J].水文,2020,40(4):14-21.
- [4] 刘晓琼,孙曦亮,刘彦随,等.基于 REOF-EEMD 的西南地区气候变化区域分异特征[J].地理研究,2020,39(5):1215-1232.
- [5] 马宝珊,魏开金,徐进,等.雅砻江下游及其主要支流安宁河着生藻类多样性与空间分布[J].中国水产科学,2021(1):1-11.
- [6] 毛明策,蔡新玲,高茂盛.基于植被分区的秦岭年降水分区验证及其年际变化[J].地理研究,2020,39(12):2833-2841.
- [7] 吴珊珊,黄彩婷.基于 REOF 方法的江西省6月降水趋势分区预测[J].气象与减灾研究,2015,38(1):8-15.
- [8] 杨明祥,蒋云钟,王忠静,等.雅砻江流域 WRF 模式构建及应用[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2016,49(4):349-354.
- [9] 姚昆,张存杰,何磊,等.雅砻江中上游流域生态环境脆弱性动态评价及预测[J].国土资源遥感,2020,32(4):199-208.
- [10] 宋雯雯,郭洁,袁媛,等.1981—2017年雅砻江流域面雨量变化特征分析[J].高原山地气象研究,2020,40(1):56-60.
- [11] 陈媛,王文圣,陶春华,等.雅砻江流域气候变化对径流的影响分析[J].人民长江,2012,43(S2):24-29.
- [12] 曹琛,岳青华,郭靖,等.4种 GCM 在雅砻江流域的比较及未来降水模拟研究[J].中国农村水利水电,2020(12):21-26.
- [13] 袁定波,艾萍,洪敏,等.基于地理空间要素的雅砻江流域面雨量估算[J].水科学进展,2018,29(6):779-787.
- [14] Ercha A, Zhang D, Ridley A J, et al. A global model: Empirical orthogonal function analysis of total electron content 1999—2009 data[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2012,117(A3):212-218.
- [15] Ansari K, Park K D, Panda S K. Empirical Orthogonal Function analysis and modeling of ionospheric TEC over South Korean region [J]. Acta Astronautica, 2019,161:313-324.
- [16] Jamjareegulgarn P, Ansari K, Ameer A. Empirical orthogonal function modelling of total electron content over Nepal and comparison with global ionospheric models[J]. Acta Astronautica, 2020,177:497-507.
- [17] 袁雅鸣,陈新国.雅砻江流域降雨天气特征及致洪暴雨预报[J].人民长江,2013,44(3):1-5,19.
- [18] Lian T, Chen D. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical Pacific SST variability [J]. Journal of Climate, 2012,25(15):5361-5373.
- [19] Richman M B. Rotation of principal components[J]. Journal of Climatology, 1986,6(3):293-335.
- [20] Horel J D. A rotated principal component analysis of the interannual variability of the Northern Hemisphere 500 mb height field [J]. Monthly Weather Review, 1981,109(10):2080-2092.
- [21] Hoskins B J, R Pearce. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere[M]. Academic Press, 1983.
- [22] 张尧庭,方开泰.多元统计分析引论[M].北京:科学出版社,1982.06.
- [23] 刘娟,陈涛涛,迟道才.基于 Daniel 及 Mann-kendall 检验的辽西北地区降雨量趋势分析[J].沈阳农业大学学报,2014,45(5):599-603.
- [24] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992(4):482-493.
- [25] 王利盈.华南地区近48年气候变化特征及未来趋势分析[D].兰州:兰州大学,2014.
- [26] Li Z, Li X, Xu Z. Impacts of water conservancy and soil conservation measures on annual runoff in the Chaohe River Basin during 1961—2005[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010,20(6):947-960.
- [27] 张金萍,王宇昊.郑州市降雨—径流关系不确定性分析[J/OL].水资源保护,1-8[2021-08-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20201109.1610.002.html>.
- [28] 张献志,汪向兰,王春青,等.黄河源区气象水文序列突变点诊断[J].人民黄河,2020,42(11):22-26.
- [29] 吴拥政.重标极差法及其应用[J].统计与决策,2004(8):23-24.
- [30] 徐浩杰,杨太保.柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应[J].自然资源学报,2014,29(3):398-409.
- [31] 赵嘉阳,郭福涛,王文辉,等.龙岩市1960—2013年气候变化特征及未来趋势分析[J].福建农林大学学报:自然科学版,2017,46(1):95-102.
- [32] 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.
- [33] 路中,雷国平,郭一洋,等.不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J].生态学报,2021,41(5):1894-1906.