

长江上游流域生长季气象干旱分异特征

杨少康^{1,2,3}, 刘冀^{1,2,3}, 魏榕^{1,2,3}, 董晓华^{1,2,3}, 刘艳丽^{4,5}, 丛方杰⁶

(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; 4.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
南京 210098; 5.水利部 应对气候变化研究中心,南京 210029; 6.烟台大学 网络与教育技术中心,山东 烟台 264005)

摘 要:为揭示长江上游流域气象干旱发生与演变规律,基于气象站 1961—2019 年逐月气象数据,运用旋转正交分解(EOF)、集合经验模态分解(EEMD)及游程理论等方法研究了其生长季气象干旱变化特征。结果表明:长江上游可分为 8 个气象干旱亚区,其中 V 区呈干旱趋势,Ⅰ区、Ⅲ区及Ⅶ区表现为变湿态势,其他各区表现为干湿交替态势;干旱周期以年际为主,Ⅰ和Ⅲ区表现出较为明显的年代际周期特征,趋势贡献较高的为 V 区及Ⅶ区,其余各区趋势的贡献均小于年代际贡献;Ⅱ区干旱时间最长,达到 1.57 月,Ⅶ区最小为 1.41 月,仅有Ⅶ区干旱时间呈显著下降趋势,各区干旱强度比较接近,差异不大,且未来变化趋势不明显,Ⅶ区干旱面积为各区最大,达到 30.36%,Ⅵ区干旱面积最小为 19.18%,整体而言,干旱发生最为集中的为Ⅶ区,其 AD 达到 0.091,最为分散的是Ⅱ区,其 AD 达到 0.194。综上,长江上游流域各分区生长季气象干旱特征各有不同,西北部地区干旱较东南部地区严重。

关键词:标准降水蒸散发指数(SPEI); 旋转正交分解(EOF); 集合经验模态分解(EEMD); 长江上游流域; 游程理论; 干旱离散度

中图分类号:P332

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0184-08

Differentiation Characteristics of Meteorological Drought in the Growing Season in the Upper Reaches of the Yangtze River Basin

YANG Shaokang^{1,2,3}, LIU Ji^{1,2,3}, WEI Rong^{1,2,3}, DONG Xiaohua^{1,2,3}, LIU Yanli^{4,5}, CONG Fangjie⁶

(1.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 3.Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China; 4.State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 5.Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 6.Network and Educational Technology Center, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract: In order to reveal the occurrence and evolution of meteorological drought in the upper reaches of the Yangtze River, based on the monthly meteorological data of the weather station from 1961 to 2019, the methods of rotating orthogonal decomposition (EOF), ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and run theory were used to study the characteristics of meteorological drought changes in the growth season. The results show that the upper reaches of the Yangtze River can be divided into 8 meteorological arid sub-regions, of which zone V shows a drought trend, zone I, zone III, and zone VII show a humidification trend, and other regions become wet and dry alternately; the drought cycle is interannual. Mainly, region I and region III show obvious characteristics of interdecadal cycles, and region V and region VIII have higher trend contributions, and the contributions of the other regions are less than the interdecadal contributions; the period of drought in region II is the longest, reaching 1.57 months. Area VII has a minimum of 1.41 months, and only area VII shows a significant decrease in drought time. The drought intensity of each area is

收稿日期:2021-03-10

修回日期:2021-04-05

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508104);国家自然科学基金(51679145,91747103,51609124)

第一作者:杨少康(1998—),男,湖北汉川人,硕士研究生,研究方向为水文学与水资源。E-mail:1002878336@qq.com

通信作者:刘冀(1980—),男,河北保定人,博士,副教授,主要从事流域水文模拟与防洪调度研究。E-mail:liuji@ctgu.edu.cn

relatively close, and the future change trend is not obvious. Area VII has the largest arid area of each area, reaching 30.36%, and area of drought of area VI is the smallest, accounting for 19.18%. On the whole, the most concentrated area of drought is area VII, with an AD of 0.091, and the most dispersed area is area II, with an AD of 0.194. To sum up, the characteristics of meteorological drought in the growth season of each subregion in the upper reaches of the Yangtze River are different. The drought in the northwest is more severe than that in the southeast.

Keywords: standardized precipitation evapotranspiration index; rotated empirical orthogonal function; ensemble empirical mode decomposition; Upper Yangtze River Basin; theory of run; arid dispersion

干旱是一种缓慢的自然灾害,作为一种经常出现的极端气候事件,其影响范围可以跨越多个国家和地区^[1]。及时开展区域干旱监测及特征研究有利于清晰认识干旱演变规律并科学有效开展抗旱减灾措施。因此,随着对干旱深入研究,国内外学者陆续提出不同的干旱指数来对干旱进行量化分析,以便于能够更好认识干旱变化规律,其中包括气象干旱指数、农业干旱指数、水文干旱指数及社会经济干旱指数^[4]。

IPCC 气候评估报告指出全球气温将不断持续升高,且这种变化在北半球更为明显^[5]。在全球变暖的背景下,长江上游流域正表现出暖干化趋势,尤其是2005年之后干旱频次、程度、历时增加显著^[6]。因此,许多学者对长江上游流域干旱变化的时空特征进行了研究,沈沛英等^[7]基于 PAI 指出,长江上游地区发生大范围的严重干旱都是在特定的气候背景及大气环流异常情况下发生;洪兴骏等^[8]认为对长江上游干旱指标评估干旱等级时,应该考虑不确定性的影响,以此更为准确有效地为抗旱提供决策;刘志雄等^[9]通过对长江上游流域进行旱涝分级,指出对于范围比较大的区域可以通过划分为更小的区域开展研究。不过,多数研究是以长江上游流域干旱的整体变化趋势作为研究对象,且多是基于月、季、年尺度上,不能很好地反映植物生长季所需的气象要素的特征,且长江上游流域地理跨度大,地形复杂,气候条件和敏感性在不同的区域差异很大^[10],将长江上游流域作为单一的研究区域,无法揭示其流域内部的干旱变化。因此为更好了解长江上游流域干旱演变特征,有必要对长江上游流域进行区域空间细分。

基于上述原因,本文选取 Vicente-Serrano 等^[11]构建的气象干旱指数 SPEI, SPEI 不仅结合气温和降水,更综合比较潜在蒸散量对干旱的影响,是目前国内研究干旱应用最为广泛的指数之一^[12-14]。对长江上游流域植物生长季 SPEI 利用 REOF 进行计算,完成长江上游流域空间上的细分,进而选取 Yevjevich 于 1967 年提出的游程理论对长江上游流域各分区干

旱特征进行分析^[15],以期对长江上游流域农业生产、生态调度以及水资源安全提供决策支持。

1 数据及研究方法

1.1 研究区域和数据来源

长江发源于青藏高原各拉丹东,至湖北宜昌以上为上游流域,总体跨越 6 个省市,干流全长 4 511 km,流域面积 100 万 km²,介于 24°46′—35°91′N, 90°47′—113°31′E。长江上游流域自然地理条件分异明显,地跨我国第一、二级阶梯,流域地形复杂,不仅受西南季风和东南季风的影响,又受“中华水塔”青藏高原的影响,流域地理位置及气象站分布如图 1 所示。本文采用中国气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>)提供的长江上游流域气象站 1961—2019 年气象数据。综合考虑站点缺测、数据起止时间及空间代表性等情况,最终选取流域内及周边共 67 个气象站点,对于少数站点缺测数据采用临近站进行插补。

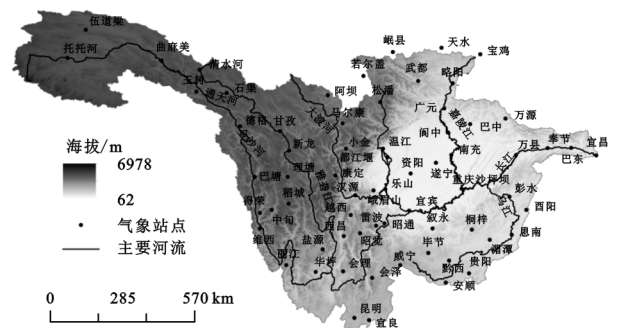


图 1 长江上游流域气象站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水蒸散指数 标准化降水蒸散指数 (SPEI) 是在标准化降水指数 (SPI) 的基础上发展而来,综合考虑了温度、降水及蒸散作用的影响,是较为理想的气象干旱指标。同 SPI 一样, SPEI 可以计算多尺度,可分为月尺度 (SPEI-1)、季节尺度 (SPEI-3)、半年尺度 (SPEI-6) 及年尺度 (SPEI-12)^[16]。由于 SPEI-3 更适用于流域的连续性干旱事件识别,因此

本文主要根据长江上游流域植物生长季(4—10 月)各站点数据计算得到站点 SPEI-3,运用反距离平方方法进行空间插值,从而得到长江上游流域各像元 SPEI-3 值,并对各像元进行干旱识别。SPEI 的具体计算方法如下:首先计算逐月降水与潜在蒸散量的水汽平衡 D_i 。

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$
式中: i 为月份; P 为月降水量(mm);PET 为月潜在蒸散量(mm)。其中 PET 采用联合国粮食及农业组织修订的 Penman-Monteith 模型。

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中: R_n 为净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; G 为土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; T 为日均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2 m 高风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为干湿表系数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。

然后采用三参数 log-logistic 概率分布函数计算概率密度函数 $f(x)$ 。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta - 1} \left[1 + \frac{x - \gamma}{\alpha} \right]^{-2} \quad (3)$$

式中: α, β, γ 分别为尺度参数、形状参数和位置参数,这些参数主要通过线性矩法估计得到。因此,可以进一步得到三参数 log-logistic 概率分布函数 $F(x)$ 。

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (4)$$

参数 α, β, γ 分别采用线性矩法获得。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \\ \beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \\ \gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: Γ 为阶乘函数; $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 为原始数据 D_i 的概率加权矩。

对概率分布函数 $F(x)$ 进行标准化处理,即可得到 SPEI。

令 $P = 1 - F(x)$,当 $P \leq 0.5$ 时,参数 $W = \sqrt{-2\ln P}$,SPEI 计算公式如下:

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (6)$$

当 $P > 0.5$ 时,参数 $W = \sqrt{-2\ln(1 - P)}$,SPEI

计算公式如下。

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} - W \quad (7)$$

式中: $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。在本文中,选用 SPEI 作为定义干旱的指标。根据国家气象等级标准^[17],将干旱分为 5 个等级,具体分类情况见表 1。

表 1 SPEI 值干旱等级分类标准

| SPEI | 干旱等级 |
|-----------------------|------|
| $SPEI < -2$ | 极端干旱 |
| $-2 \leq SPEI < -1.5$ | 严重干旱 |
| $-1.5 \leq SPEI < -1$ | 中等干旱 |
| $-1 \leq SPEI < -0.5$ | 轻微干旱 |
| $-0.5 \leq SPEI < 0$ | 正常 |

1.2.2 旋转正交分解 经验正交分解 EOF 的功能是把随时间变化的向量场分解为不随时间变化的空间函数部分及依赖时间变化的时间函数部分,对包含空间点的场随时间变化进行分解,将变量场时间和空间变化特征进行分离,展开得到前几个特征向量,用尽可能少的模态表达主要的时空变化特征。针对 EOF 存在过于强调整体结构而忽视了重要的局部特性的问题,可使用旋转正交分解 REOF,即对 EOF 载荷矩阵进行极大方差旋转,将特征向量高载荷集中于某一较小区域上,突出气候要素在空间分布的局域特征。REOF 具体计算步骤可参考文献^[18]。

1.2.3 集合经验模态分解 经验模态分解 EMD 是一种自适应的时频局部化分析方法,该法可从离散无序的原信号序列中分解出有限本征函数 IMF_s 分量,进而体现出原信号序列不同时间尺度的局部特征,常适用于非线性、非平稳的时间序列。集合经验模态分解 EEMD 在 EMD 的基础上通过添加人为白噪声和求取集合平均方法,有效解决了采用 EMD 分解时间序列时可能出现的模态混叠现象。具体计算步骤详见文献^[19]。

1.2.4 Mann-Kendall 检验及 Sen 趋势度 Mann-Kendall 趋势检验常用于气象领域的时间序列趋势分析,主要是根据检验统计量 Z 判断序列的趋势显著性^[20],通常结合 Sen 趋势度使用,Sen 趋势度检验是由 Sen^[21]提出的研究长时序变量的方法,趋势度 β 计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, N - 1; j > i) \quad (8)$$

式中: x_j, x_i 分别为不同时刻下的变量值; median 为中位数函数。当 $\beta > 0$ 时表示变量的时间序列呈上升趋势, 反之当 $\beta < 0$ 表示变量的时间序列呈下降趋势。

1.2.5 干旱特征指标 目前一般基于游程理论来进行干旱特征的识别, 即先选定干旱指标阈值, 若某个像元的干旱指标超过阈值就被认定属于干旱^[22], 本文将干旱阈值指标选为-1, 即判定 SPEI 小于-1 的像元点为干旱像元。干旱指标识别过程如图 2 所示, 当某个像元关于 SPEI 的时间序列在一个时间或多个时间内连续大于-1 时, 出现正游程, 反之则出现负游程。在干旱特征指标的研究中, 负游程的长度被称为干旱历时 d , 干旱强度 s 为干旱历时与干旱阈值水平包围的面积, 干旱面积则是像元 SPEI 值低于阈值的干旱像元面积总数。

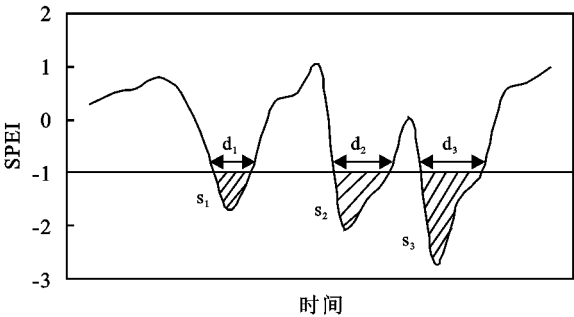


图2 干旱特征识别过程

1.2.6 干旱离散度 干旱离散度(AD)是一种反映干旱区域干旱强度聚集度的指标, 其值越小, 说明区域干旱发生越集中, 反之则越发散。计算 AD, 首先需要计算各区域的干旱集中点。本文根据不同分区每年 4—10 月份的像元数据, 得到 7 个逐月干旱集中点, 再利用这 7 个干旱集中点计算出当年干旱集中点, 依次方法可以得出不同分区 1961—2019 年 59 a 的逐年干旱集中点, 利用不同分区 59 个干旱集中点, 算出各分区 59 a 平均干旱集中点, 最后算出各分区 59 个逐年干旱集中点与该分区 59 a 平均干旱集中点的相对比值, 得到该分区 AD, 具体计算方法见公式(9)—(12)。

首先计算不同分区每年 4—10 月份逐月干旱集中点:

$$x_{nm} = \frac{\sum_{i=1}^k s_i x_i}{\sum_{i=1}^k s_i}, \quad y_{nm} = \frac{\sum_{i=1}^k s_i y_i}{\sum_{i=1}^k s_i} \tag{9}$$

式中: s_i 为第 i 个干旱像元的强度值; x_i, y_i 为第 i 个干旱像元的经度、纬度坐标; x_{nm}, y_{nm} 为第 n 年中第 m 个月干旱逐月集中点的经度、纬度坐标。

根据每年 4—10 月算出来的 7 个逐月干旱集中点, 得到当年干旱集中点:

$$x_n = \frac{\sum_{m=1}^7 s_m x_m}{\sum_{m=1}^7 s_m}, \quad y_n = \frac{\sum_{m=1}^7 s_m y_m}{\sum_{m=1}^7 s_m} \tag{10}$$

式中: s_m 为第 m 个月逐月干旱集中点强度值; x_m, y_m 为第 m 个月干旱集中点的经度、纬度坐标; x_n, y_n 为第 n 年逐年干旱集中点的经度、纬度坐标。

再根据逐年干旱集中点, 算出平均干旱集中点:

$$x_a = \frac{\sum_{n=1}^{59} s_n x_n}{\sum_{n=1}^{59} s_n}, \quad y_a = \frac{\sum_{n=1}^{59} s_n y_n}{\sum_{n=1}^{59} s_n} \tag{11}$$

式中: s_n 为第 n 年逐年干旱集中点强度值; x_n, y_n 为第 n 年干旱集中点的经度、纬度坐标; x_a, y_a 为第 a 分区平均干旱集中点的经度、纬度坐标。

最后计算各分区干旱离散度:

$$AD = \sum_{n=1}^{59} \sqrt{\left(\frac{x_n - x_a}{x}\right)^2 + \left(\frac{y_n - y_a}{y}\right)^2} \tag{12}$$

式中: x, y 为该分区经度、纬度的长度差; AD 为各分区离散度。

2 结果与分析

2.1 干旱指数空间分布特征

为探究长江上游流域不同分区的干旱演变特征, 本文开展了基于 EOF、REOF 的长江上游流域生长季 SPEI-3 特征分区的对比研究。由表 2 可知, 由于长江上游流域较大, 地形复杂, 导致 EOF 分解的各个模态的方差贡献率不高, 且呈现逐渐减小趋势, 前 8 个模态的累积方差贡献率达到 67.71%, 表明分解出来的模态函数可解释长江上游流域大部分地区干旱变化。将前 8 个模态进行极大方差旋转, 旋转后得到的各个特征向量方差贡献率均匀分布。模态中的载荷值反映了空间相关程度, 是气候分区的主要依据, 可将载荷值高的地区视为同一区域。图 3 给出了长江上游流域各空间模态分布图。

表2 长江上游流域生长季 SPEI 前 8 个模态 EOF/REOF 方差贡献率 %

| 模态 | EOF | | REOF | |
|----|-------|---------|-------|---------|
| | 方差贡献率 | 累积方差贡献率 | 方差贡献率 | 累积方差贡献率 |
| 1 | 17.50 | 17.50 | 10.82 | 10.82 |
| 2 | 14.72 | 32.21 | 8.95 | 19.77 |
| 3 | 9.81 | 42.02 | 8.94 | 28.71 |
| 4 | 9.06 | 51.09 | 8.93 | 37.64 |
| 5 | 6.14 | 57.22 | 8.82 | 46.46 |
| 6 | 4.11 | 61.33 | 8.12 | 54.59 |
| 7 | 3.49 | 64.82 | 6.53 | 61.12 |
| 8 | 2.89 | 67.71 | 6.52 | 67.44 |

将前 8 个模态以空间载荷值绝对值大于 0.15 进

行划分,可将长江上游流域划分为 8 个子区域,高载荷区域将长江上游流域绝大多数地区涵盖,存在个别

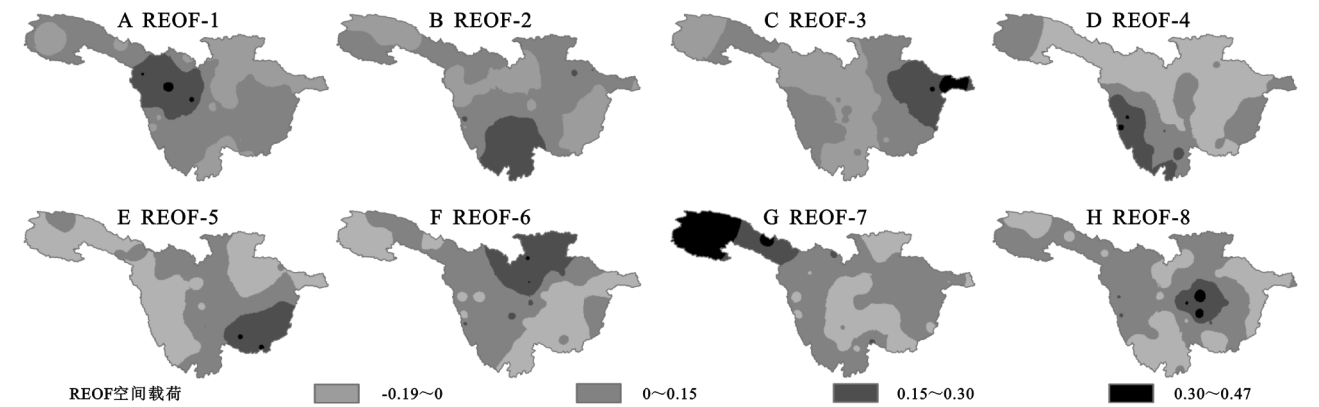


图 3 长江上游流域基于 REOF 的 8 个空间模态分布

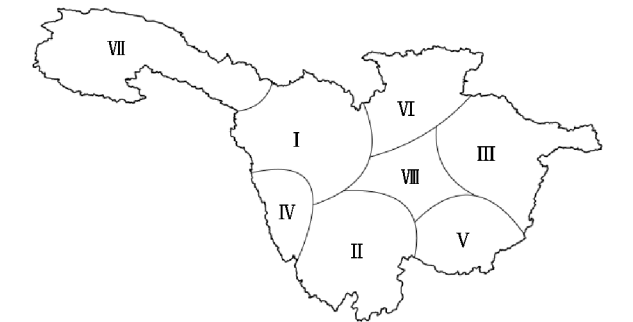


图 4 基于 REOF 的长江上游流域 SPEI-3 指数分区

2.2 各分区干旱变化的趋势特征

为分析长江上游流域各分区 SPEI-3 的周期特征,利用 EEMD 方法对 8 个分区的 SPEI-3 时间序列进行分解.由图 5 可知,4 个分量 IMF_s 及 1 个趋势项 RES, IMF_s 分量依次代表 SPEI-3 序列分解之后从高频到低频的变化,纵轴没有实际意义,趋势项 RES 则用来解释 SPEI-3 的总体变化趋势.从 RES 变化可以看出, SPEI-3 呈明显下降的分区为 V 区,表示该区逐渐趋于干旱. II 区、IV 区及 VIII 区的趋势呈现 U 型,其拐点分别在 1992 年、1997 年及 1982 年,这三区干旱呈现“干旱—湿润”态势,区别在于 II 区及 VIII 区变化较为剧烈, IV 区变化则较为平缓. I 区、III 区及 VII 区呈现上升趋势,表明这 3 区趋于湿润,且 VII 区的湿润趋势比其他两区较为明显. VI 区趋势呈现波浪线型,“湿润—干旱”态势交替出现,整体趋势变化不显著.

各分区 IMF_s 分量的周期及贡献率见表 3. 各区 IMF_1 分量的周期普遍为 3 a 左右,且各分区 1~10 a 周期占主导地位. 比较长江上游流域不同分区周期贡献率,年代际及趋势项的贡献率远远低于年际贡献率,但各分区之间又互相有所差异. 长江上游整体流域的干旱周期以年际变化为主, I 和 III 区的年代际贡献率相比其他区域较高,趋势变化贡献较高的区域则主要是 V 区及 VIII 区,其他分区的年代际贡献率高于趋势变化.

相邻分区在低值区域少量重叠现象,但整体未影响分区结果. 具体分区结果如图 4 所示.

为确定各分区 SPEI-3 的主要周期,对各分区的 IMF_s 分量进行显著性检验,具体结果如图 6 所示. 长江上游流域 8 个分区的 IMF_1 分量除 III 区及 IV 区落在 80% 的置信区间以上,其余各分区 IMF_1 分量均接近 80% 的显著性检验线,但未通过检验. 在关于 IMF_2 分量的显著性检验中,仅有 II 区、V 区及 VII 区通过显著性检验,且 VII 区 IMF_2 分量落在 95% 置信区间以上. IMF_3 分量的显著性检验中,除 VII 区外,其余各区均未通过显著性检验. I 区、II 区、V 区及 VII 区的 IMF_4 分量均落在 80% 的置信区间以上,均通过显著性检验,其中 I 区及 V 区通过了 95% 的显著性水平检验. 由此可知,以 IMF_1 分量周期为主要周期的为 III 区、IV 区、VI 区及 VIII 区, II 区及 VII 区主要以 IMF_2 分量周期为主要周期, I 区及 V 区则以 IMF_4 分量周期为主要周期. 整体而言,长江上游流域以 IMF_1 及 IMF_2 分量的年际周期为主要周期.

2.3 各分区干旱特征

通过游程理论提取出长江上游流域各分区的干旱强度、干旱历时及干旱面积,并计算出其均值 \bar{X} 、离差系数 C_v 、偏差系数 C_s 、标准差 σ 、Mann-Kendall 趋势检验 Z 值及 β 值. 具体计算结果见表 4.

由表 4 可知,长江上游流域各区生长季的平均干旱历时均在 1.4 月以上,其中 VIII 区干旱历时最长为 1.59 月,最短的为 VII 区的 1.41 月; C_v 值及 σ 值用来描述系列的离散程度,各区干旱历时的 C_v 值均大于 0.3, σ 值均大于 0.5,其中 VII 区干旱历时的离散程度最大, C_v 值达到 0.71, σ 值达到 1, III 区的 C_v 值和 σ 值最小,说明该区干旱历时离散程度较低; C_s 值主要用来分析系列不对称的程度,除 I 区、IV 区及 VI 区外,其余 5 区均表现为正偏;在变化趋势分析中,仅有 VII 区干旱历时的 Z 值为 -2.05, β 值为 -0.01,说明该

区通过 95%置信水平检验,干旱历时呈显著下降趋势,其余各区均未通过检验。通过分析长江上游流域各区植物生长季的干旱强度可知,各区的平均干旱强度差别不大,且各区 β 值均为 0,说明长江上游流域整体干旱强度变化不大。对干旱面积进行分析,Ⅶ区的干旱面积最大,达到 30.36%,干旱面积最小的为Ⅷ

区,仅占 19.18%,各区的 C_s 值均表现为正偏,Ⅰ区和Ⅶ区的干旱面积均通过 95%的置信水平检验,呈显著下降趋势。整体而言,Ⅶ区的干旱历时和干旱强度最小,但其干旱面积最大。Ⅷ区的干旱面积最小,干旱历时和干旱强度最大,且历时和强度的离散程度较低,说明该区干旱发生范围较小,但其强度大。

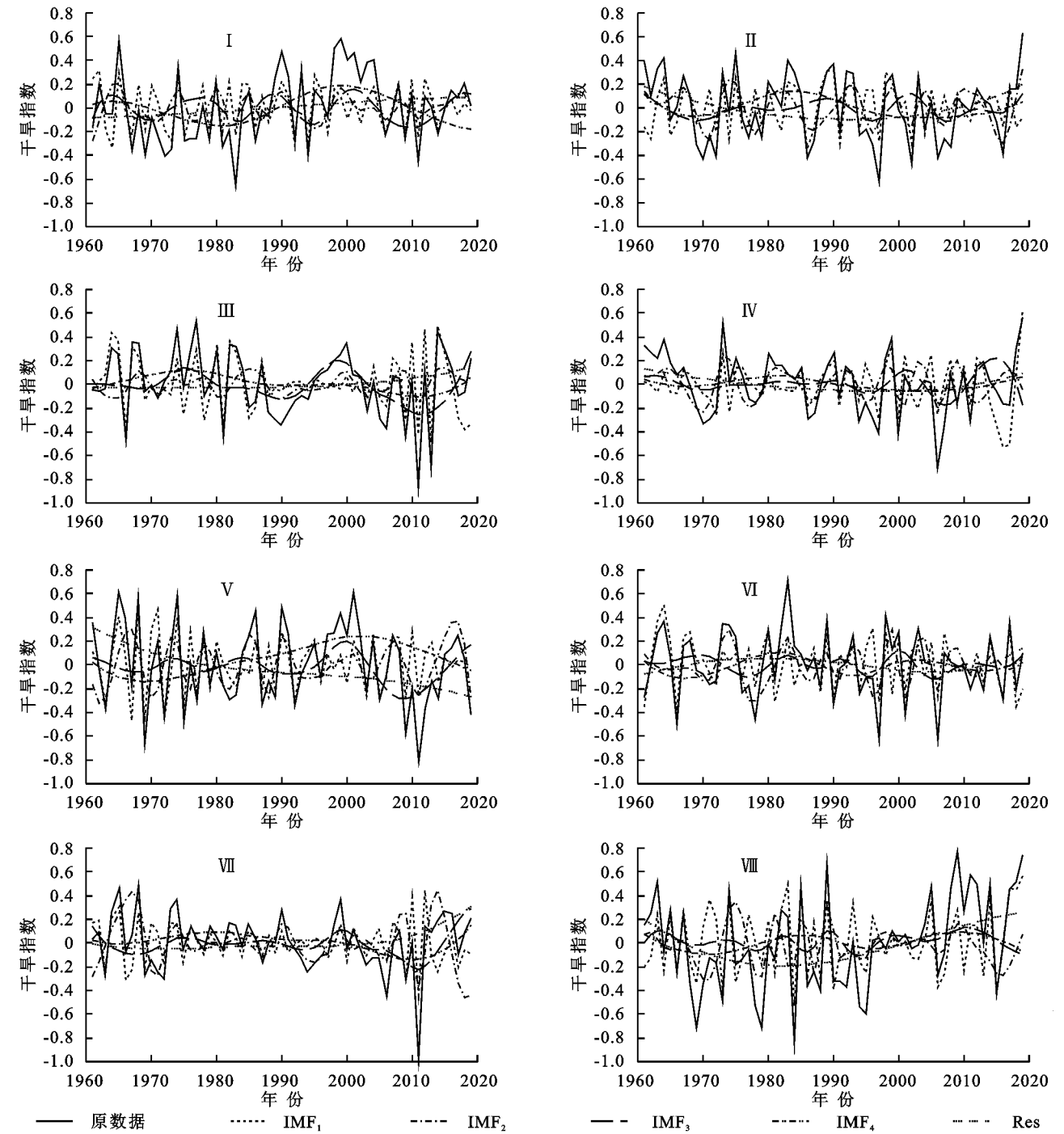


图 5 基于 EEMD 得到的长江上游各分区 SPEI-3 指数年际、年代际和趋势序列

为了进一步得到各区发生干旱的聚集程度,长江上游流域各区植物生长季的 AD 值,计算结果见表 5。

由表 5 可知,各区的 AD 值均不高,均在 0.2 之下,说明长江上游流域整体干旱发生的范围较为集

中,干旱分区发生,且在不同分区内,干旱聚集度较高。相比其他各区,Ⅱ区的干旱发生较为发散,其 AD 值为 0.194,Ⅶ区的干旱发生最为集中,其 AD 值达到 0.091。

表 3 长江上游流域各分区分解分量周期及贡献率

| 分区 | 要素 | IMF ₁ | IMF ₂ | IMF ₃ | IMF ₄ | Res | 年际 | 年代际 |
|------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|
| I | 周期/a | 2.88 | 7.87 | 13.11 | 39.33 | 4.45 | 66.23 | 29.32 |
| | 贡献率/% | 51.78 | 14.45 | 12.03 | 17.29 | | | |
| II | 周期/a | 3.11 | 8.43 | 14.75 | 29.50 | 9.98 | 76.91 | 13.11 |
| | 贡献率/% | 47.57 | 29.34 | 5.57 | 7.54 | | | |
| III | 周期/a | 3.69 | 8.43 | 19.67 | 23.60 | 2.54 | 75.47 | 21.99 |
| | 贡献率/% | 67.93 | 7.54 | 17.15 | 4.84 | | | |
| IV | 周期/a | 3.69 | 7.87 | 16.86 | 29.50 | 4.40 | 82.85 | 12.75 |
| | 贡献率/% | 59.89 | 22.96 | 10.38 | 2.37 | | | |
| V | 周期/a | 2.89 | 7.38 | 14.75 | 39.33 | 14.08 | 64.72 | 21.20 |
| | 贡献率/% | 41.06 | 23.66 | 9.66 | 11.54 | | | |
| VI | 周期/a | 2.81 | 6.56 | 11.80 | 19.67 | 3.13 | 87.22 | 9.65 |
| | 贡献率/% | 59.94 | 27.28 | 4.73 | 4.92 | | | |
| VII | 周期/a | 3.03 | 6.56 | 14.75 | 29.50 | 7.91 | 76.22 | 15.87 |
| | 贡献率/% | 33.74 | 42.48 | 10.35 | 5.52 | | | |
| VIII | 周期/a | 3.03 | 56.56 | 11.80 | 23.60 | 16.31 | 78.49 | 5.20 |
| | 贡献率/% | 59.95 | 18.54 | 2.78 | 2.42 | | | |

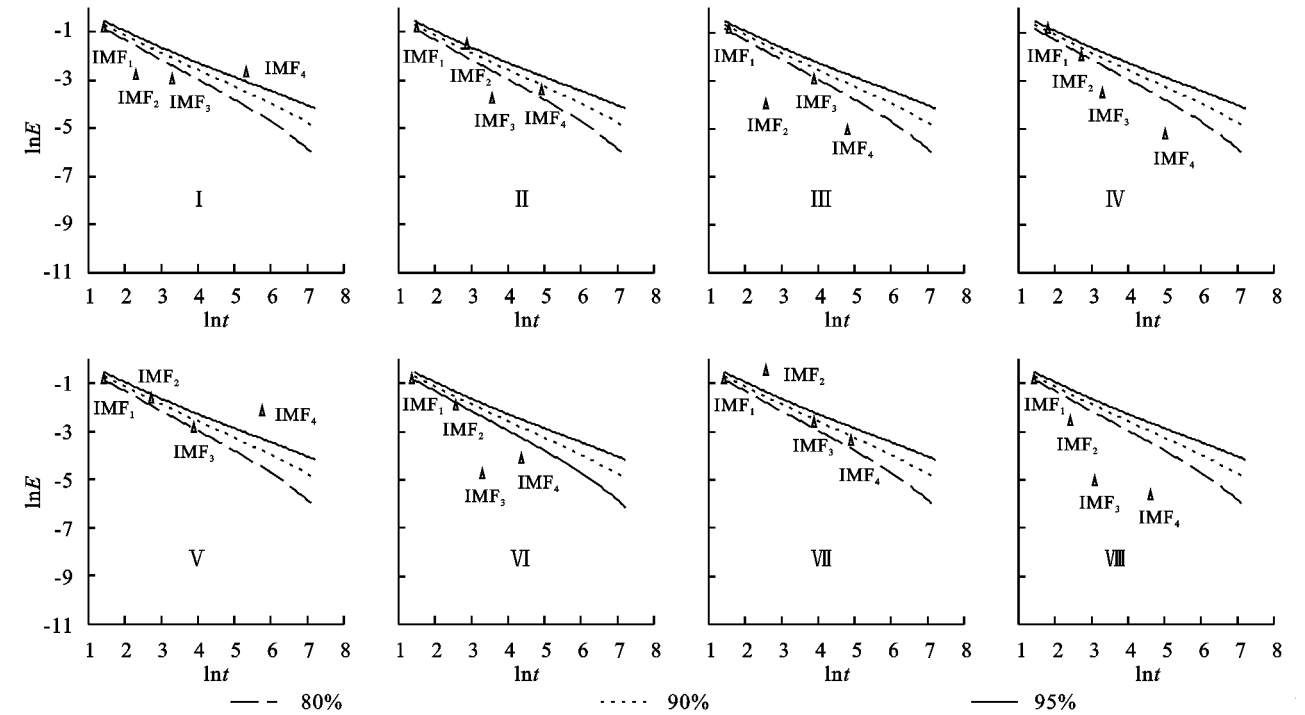


图 6 长江上游流域各分区 SPEI-3 指数 IMFs 分量显著性检验

表 4 长江上游流域各分区干旱特征统计

| 分区 | 干旱历时 | | | | | | 分区 | 干旱强度 | | | | | | 分区 | 干旱面积 | | | | | |
|------|-------------------------|-------|-------|----------|-------|---------|------|----------------|-------|-------|----------|-------|---------|------|-------------------|-------|-------|----------|-------|---------|
| | $\overline{X}/\text{月}$ | C_v | C_s | σ | Z | β | | \overline{X} | C_v | C_s | σ | Z | β | | $\overline{X}/\%$ | C_v | C_s | σ | Z | β |
| I | 1.54 | 0.36 | -0.21 | 0.56 | -0.44 | 0.00 | I | 0.10 | 0.67 | 0.28 | 0.07 | -2.00 | 0.00 | I | 22.74 | 1.34 | 1.41 | 30.42 | -2.07 | -0.12 |
| II | 1.57 | 0.43 | 1.17 | 0.67 | 0.28 | 0.00 | II | 0.11 | 0.73 | 1.50 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | II | 26.84 | 1.21 | 1.08 | 32.56 | -0.83 | -0.07 |
| III | 1.55 | 0.35 | 0.73 | 0.54 | 0.15 | 0.00 | III | 0.11 | 0.67 | 0.80 | 0.08 | 0.56 | 0.00 | III | 26.29 | 1.01 | 1.08 | 26.64 | 0.43 | 0.05 |
| IV | 1.42 | 0.59 | -0.02 | 0.83 | 1.20 | 0.01 | IV | 0.09 | 0.84 | 0.76 | 0.08 | 0.54 | 0.00 | IV | 28.58 | 1.24 | 1.01 | 35.44 | -0.57 | -0.03 |
| V | 1.44 | 0.62 | 2.20 | 0.90 | 0.26 | 0.00 | V | 0.09 | 0.99 | 1.77 | 0.09 | 0.04 | 0.00 | V | 29.34 | 1.12 | 0.87 | 32.87 | 0.14 | 0.00 |
| VI | 1.42 | 0.54 | -0.11 | 0.76 | -0.03 | 0.00 | VI | 0.10 | 0.78 | 0.48 | 0.08 | 1.29 | 0.00 | VI | 23.05 | 1.17 | 1.14 | 26.92 | 1.05 | 0.07 |
| VII | 1.41 | 0.71 | 0.09 | 1.00 | -2.05 | -0.01 | VII | 0.08 | 1.03 | 1.02 | 0.08 | -2.11 | 0.00 | VII | 30.36 | 1.13 | 0.91 | 34.33 | -2.00 | -0.15 |
| VIII | 1.59 | 0.40 | 1.53 | 0.64 | -0.41 | 0.00 | VIII | 0.11 | 0.65 | 0.76 | 0.07 | 0.54 | 0.00 | VIII | 19.18 | 1.33 | 1.62 | 25.54 | -0.49 | -0.02 |

表 5 长江上游流域各分区干旱离散度

| 分区 | AD | 分区 | AD |
|-----|-------|------|-------|
| I | 0.170 | V | 0.173 |
| II | 0.194 | VI | 0.173 |
| III | 0.163 | VII | 0.091 |
| IV | 0.131 | VIII | 0.150 |

3 结 论

(1) 根据长江上游各站点 SPEI-3 变化,可将长江上游流域划分为 8 个亚区,其中 V 区逐渐趋于干旱。II 区、IV 区及 VIII 区的趋势呈现 U 型,呈现“干旱—湿润”态势。I 区、III 区及 VII 区呈现上升趋势。VI 区趋势呈现波浪线型,“湿润—干旱”态势交替出现,整体趋势变化不显著。

(2) 长江上游整个流域的干旱周期以年际变化为主,年代际周期较为明显的是 I 和 III 区。趋势变化贡献率较高的区域则主要是 V 区及 VIII 区,其他分区的年代际贡献率高于趋势变化贡献率。

(3) 长江上游流域不同位置的干旱历时、干旱强度及干旱面积均有不同,表现为 VIII 区的干旱历时和干旱强度最小,但其干旱面积最大。VIII 区的干旱面积最小,干旱历时和干旱强度最大。II 区的干旱发生较为发散,VII 区的干旱发生最为集中。

参考文献:

[1] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions[J]. Drought A Global Assessment, 2000, 1: 3-18.

[2] 秦大河,陈振林,罗勇,等.气候变化科学的最新认知[J].气候变化研究进展,2007,3(2):63-73.

[3] 段安民,吴国雄,张琼,等.青藏高原气候变暖是温室气体排放加剧结果的新证据[J].科学通报,2006(8):989-992.

[4] 赵丽,冯宝平,张书花.国内外干旱及干旱指标研究进展[J].江苏农业科学,2012,40(8):345-348.

[5] 沈永平,王国亚.IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.

[6] 王雨茜,杨肖丽,任立良,等.长江上游气温、降水和干旱的变化趋势研究[J].人民长江,2017,48(20):39-44.

[7] 沈浒英,陈瑜彬.2009—2010 年长江上游地区旱情成因分析[J].人民长江,2011,42(9):12-14.

[8] 洪兴骏,郭生练.长江上游水文干旱评估及其不确定性分析[J].中国防汛抗旱,2018,28(10):14-20.

[9] 刘志雄,肖莺.长江上游旱涝指标及其变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):310-314.

[10] 吴志勇,徐征光,肖恒,等.基于模拟土壤含水量的长江上游干旱事件时空特征分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):176-184.

[11] Vicente-Serrano S M, Beauveria S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of climate, 2010,23(7):1696-1718.

[12] 刘珂,姜大膀.基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J].大气科学,2015,39(1):23-36.

[13] 柴荣繁,陈海山,孙善磊.基于 SPEI 的中国干湿变化趋势归因分析[J].气象科学,2018,38(4):423-431.

[14] 魏巍,王百田,张克斌.基于 SPEI 的中亚地区 1901—2015 年干旱时空趋势分析[J].北京林业大学学报,2020,42(4):113-121.

[15] 徐敏,孔维财,徐经纬,等.基于游程理论和 CWDI_a 的农业干旱时空特征分析[J].江苏农业学报,2021,37(2):362-372.

[16] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 1948,38(1):55-94.

[17] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.气象干旱等级 GB/T20481—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

[18] 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.

[19] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1(1):1-41.

[20] Agbo E P, Ekpo C M. Trend analysis of the variations of ambient temperature using Mann-Kendall test and Sen's estimate in Calabar, Southern Nigeria[C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021.

[21] 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.

[22] 冯瑞瑞,荣艳淑,吴福婷.基于 Copula 函数的宜昌水文干旱特征分析[J].水文,2020,40(2):23-30,71.