

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.007.

孙媛, 张鑫, 闫彩, 等. 基于 GAMLSS 模型的青海省非平稳 NSPEI 干旱时空特征分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 316-327, 336.

Sun Yuan, Zhang Xin, Yan Cai, et al. Spatiotemporal Characteristics of Drought Using NSPEI in Qinghai Province Based on the GAMLSS Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 316-327, 336.

基于 GAMLSS 模型的青海省非平稳 NSPEI 干旱时空特征分析

孙媛¹, 张鑫¹, 闫彩¹, 赵雪岩², 雒舒琪¹, 胡晓萌¹

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.黄河水利委员会 山东水文水资源局 艾山水文站, 山东 聊城 252200)

摘要: [目的] 识别气象变量在气候变化影响下出现的非平稳特征, 揭示青海省气象干旱特征的时空演变规律, 进而为青海省抗旱减灾提供一定的技术支持。 [方法] 基于 GAMLSS 模型构建以气候因子为解释变量的非平稳 NSPEI, 通过与传统 SPEI 对比遴选一种更适合青海省的气象干旱指数, 并利用游程理论与 Copula 方法分析了不同情景下干旱重现期的分布特征。 [结果] NSPEI 较 SPEI 能更准确地识别青海省不同干旱程度, 尤其对于较严重干旱事件。1961—2020 年青海省干旱频率呈下降趋势且主要发生中度干旱和轻度干旱, 干旱频率高发区为柴达木盆地西北部, 青南牧区西南部为干旱低频区; 干旱历时、干旱烈度分别以 0.018 9/a, 0.016 6/a 的速率减小, 两干旱特征时空变化较同步, 均由西北向东北部递减。在中旱情景下, Tor 平均为 2.79 a 一遇, Tand 平均为 7.52 a 一遇; 重旱 Tor 平均为 4.11 a 一遇, Tand 平均为 16.22 a 一遇, 青海省西南部是中、重旱高风险集中区, 而东部农业区为重、中旱低风险集中区。 [结论] 青海省降水、气温序列的平稳性不复存在, 考虑以气候因子为协变量 NSPEI 在揭示青海省时空变化趋势方面更有优势, 可以用来预测未来青海省气象干旱的变化情况。

关键词: GAMLSS 模型; 非平稳干旱; Copula 理论; 青海省; 干旱重现期

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0316-12

Spatiotemporal Characteristics of Drought Using NSPEI in Qinghai Province Based on the GAMLSS Model

Sun Yuan¹, Zhang Xin¹, Yan Cai¹, Zhao Xueyan², Luo Shuqi¹, Hu Xiaomeng¹

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Aishan Hydrologic Station, Shandong Hydrology and Water Resources Bureau, Yellow River Water Resources Commission, Liaocheng, Shandong 252200, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to identify the non-stationary characteristics of meteorological variables under the influence of climate change and reveal the spatiotemporal evolution law of meteorological drought characteristics in Qinghai Province, so as to provide some technical support for drought relief and disaster reduction in Qinghai Province. [Methods] Based on GAMLSS model, a non-stationary NSPEI with climatic factors as explanatory variables was constructed. A meteorological drought index more suitable for Qinghai Province was selected by comparing with the traditional SPEI, and the distribution characteristics of drought return periods under different scenarios were analyzed by using the run length theory and Copula method. [Results] Compared with SPEI, NSPEI could identify different drought degrees in Qinghai Province

收稿日期: 2022-08-02

修回日期: 2022-10-09

资助项目: 陕西省科技统筹创新计划项目“现代农业节水技术模式与高效用水物联网系统基金”(2016KTZDNY-01-01)

第一作者: 孙媛(1997—), 女, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 研究方向为气候变化下的干旱识别与时空演变规律。E-mail: sunyuan0310@nwa-fu.edu.cn

通信作者: 张鑫(1968—), 男, 河南淅川人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与水循环、干旱识别与时空演变规律研究。E-mail: zhxin@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

more accurately, especially for severe drought events. From 1961 to 2020, the drought frequency in Qinghai Province showed a decreasing trend and moderate and mild drought mainly occurred. The high drought frequency occurred in the northwest of Qaidam Basin and the low drought frequency area in the southwest of Qingnan pastoral area. Drought duration and drought intensity decreased at 0.018 9/a and 0.016 6/a, respectively. The spatiotemporal changes of the two drought characteristics were synchronous, and both decreased from northwest to northeast. In the moderate drought scenario, Tor and Tand averaged 2.79 and 7.52 years, respectively. The average Tor of severe drought was 4.11 years, and the average Tand was 16.22 years. The southwest of Qinghai Province was the high risk area of moderate and severe drought, while the eastern agricultural area was the heavy and low risk area of moderate and severe drought. [Conclusion] The stationarities of precipitation and temperature series in Qinghai Province no longer exist. Considering that NSPEI, which takes climate factor as covariable, has more advantages in revealing the spatiotemporal variation trend of Qinghai Province, it can be used to predict the future change of meteorological drought in Qinghai Province.

Keywords: GAMLSS model; non stationary drought; Copulas connect theory; Qinghai Province; drought return period

干旱是指在一定时期区域内由水分收支不平衡而引发的一种缺水现象,具有广泛且深远的时空影响效应^[1]。IPCC6 报告指出,我国气温将持续上升直到 2050 年且各地极端干旱事件将会变得更频繁、严重^[2]。干旱问题已经成为我国乃至全球普遍关注的问题。青海省位于我国青藏高原东北部,由于具有特殊的高寒干旱气候条件与复杂多样的地形、地貌特征^[3],导致其气象干旱灾害发生频率较高、持续时间较长,对全省农牧业经济发展、人类生产生活以及生态环境的影响较大。根据青海省 1984—2017 年气象灾害记录,34 a 里干旱灾害发生的频数为 166 次,造成年均经济损失 4 702 万元,年均农作物受灾面积 3.6 万 hm^2 ^[4]。因此,在气候变化背景下,为青海省寻求适合的气象干旱检测指标是干旱事件的识别与预测的首要任务,以期达到对防御干旱灾害、降低干旱风险影响具有重要的理论价值和实践意义。

一个合适的干旱检测指标可以有效减少干旱灾害对生态环境、农牧业发展以及国民经济的损失,在干旱监测和量化中越来越多的气象干旱指数被开发出来^[5]。比如,帕尔默干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)等^[6-8]。其中 SPEI 的提出弥补了 PDSI 与 SPI 这两种指数的不足,它不仅考虑了气温变异性的影响,而且还适用于多时间尺度特征的比较,适用性范围较广^[9]。温家兴等^[10]证明了多尺度 SPEI 对表征青海省干旱有较好的适用性,范磊等^[11]利用 SPEI 确定了青海省干旱与大气环流有一定的响应关系。值得注意的是,之前研究中 SPEI 指数是在水文气象序列满足平稳性假设前提下进行计算的,即降水、气温时间序列的期望、方差是固定的。但是在气候变化下,国内外众多学者证

明了长期水文序列的平稳性不复存在^[12]。目前,已有学者针对非平稳问题构建了一些非平稳气象干旱检测指标。Wang 等^[13]通过构建非平稳伽马模型,提出了基于时间变化的非平稳标准化降水指数(SPI_t)。Li 等^[14]基于 GAMLSS 模型纳入以气候指数作为降水时间序列的协变量建立 NSPI,研究显示该指数能更好地描述和评估滦河流域的干旱特征。然而,这些研究大多都是针对降水气象变量的非平稳性开展的,却忽略了在气候变化下气温的非平稳性。温庆志等^[15]提出 NSPEI 指数并发现中国气象站点中 88% 的站点对 NSPEI 的拟合效果较好。这表明 NSPEI 在我国的适应性较好,对于该指数的进一步研究也是很有必要的。同时,由于诸多学者考虑到 GAMLSS 模型能有效地识别统计参数线性以及非线性特征^[16],因此该模型被广泛应用到构建非平稳干旱指数中。Song 等^[17]利用 GAMLSS 模型考虑分布参数与气候指数的非线性变化构建了 NSPI,为长江中下游地区提供了一种可行的干旱评估方法。近年来,越来越多的研究表明,水文系统常受到 ENSO, AMO 等大尺度气象环流因子影响^[18],但极少有学者将气候因子视为协变量纳入降水-潜在蒸散序列之中构建非平稳气象干旱指数。

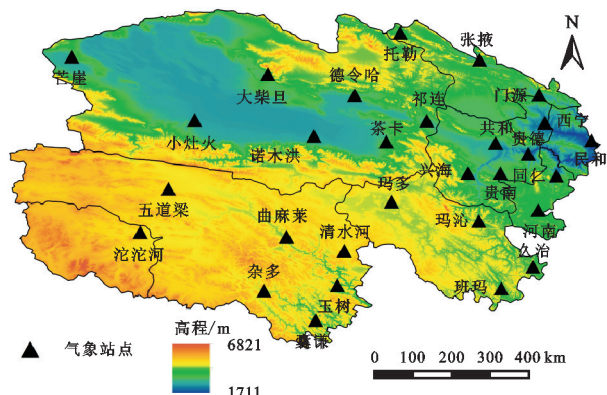
因此,鉴于青海省降水、气温等年际变化与大尺度气候指数间存在遥相关关系,本文拟在 GAMLSS 框架内同时考虑降水、气温的位置参数与气候指数的变化关系,构建非平稳状态下的 NSPEI,来弥补传统平稳气象干旱指数的不足。基于青海省历史灾情数据将 NSPEI 指数与 SPEI 指数进行对比分析,寻求更好的干旱监测指数来表示青海省干旱时空演变规律,并分析不同情景下干旱特征的联合重现期分布特

征, 以为青海省旱灾决策和应对未来气候变化提供理论支持和科学依据。

1 资料来源与研究方法

1.1 数据资料

本文使用的 1961—2020 年青海省及周边共 30 个气象站点的降水、气温、风速等逐日气象数据下载于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 各气象站点分布见图 1。文中对所使用的气象数据进行了质量检测, 并将观测数据中缺测部分使用线性内插法补齐时间序列。结合前人研究^[14], 文中选择 5 个大尺度气候指数: 太平洋年代际涛动(PDO)、北大西洋涛动(NAO)、大西洋数年代际震荡(AMO)、南方涛动指数(SOI)和北极涛动(AO)。1961—2020 年气候指数月数据来自于美国国家大气海洋局气候预测中心(NOAA) (<http://www.esrl.noaa.gov/teleconnections/>)。



注: 基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作, 底图未做修改, 下图同。

图 1 青海省气象站点分布及高程

Fig. 1 Distribution and elevation of meteorological stations in Qinghai Province

1.2 研究方法

1.2.1 平稳 SPEI Vicente-Serrano 等^[8]提出的 SPEI 是根据降水与潜在蒸散水分亏损情况来进行干旱模拟, 其中, ET_0 采用 Penman-Monteith 蒸发公式计算。

$$D_i = P_i - (ET_0)_i \quad (1)$$

式中: P_i 为月降水量(mm); $(ET_0)_i$ 为月潜在蒸散量(mm); D_i 为月降水量与月潜在蒸散量的差值;

然后根据 Log-logistic 概率密度函数求 D_i 的累计概率, 最后对累计概率进行正态标准化就得到 SPEI, 其中 SPEI 的计算公式如下:

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}, \quad w = \sqrt{-2 \ln P} \quad (2)$$

式中: P 为超过待定 D 值的累积概率, 当 $p > 0.5$ 时,

SPEI 值的符号被逆转; $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。

由于在全球范围内大尺度气候模式与区域内年际、年代际降水等水文变量存在遥相关关系, 因此, 本文选择 12 个月尺度 SPEI 进行分析气象干旱的年际变异规律。根据 SPEI 值将干旱事件分为轻旱 D_1 ($-1 < SPEI \leq -0.5$)、中旱 D_2 ($-1.5 < SPEI \leq -1$)、重旱 D_3 ($2 < SPEI \leq -1.5$) 和特旱 D_4 ($SPEI \leq -2$)。

1.2.2 非平稳 NSPEI 在 SPEI 计算基础上, 考虑到累积降水与潜在蒸散序列的差值时序 D 在拟合 Log-logistic 分布时位置参数(μ)不是恒定的。因此本文基于位置、尺度和形状的广义加性模型(GAMLSS), 选择时序 D 位置参数与解释变量最优拟合结果, 构建非平稳 Log-logistic 概率密度函数框架。GAMLSS 是 Rigby^[19]提出用来描述降水、气温等水文气象序列的位置、尺度和形状参数与解释变量的平稳性或非平稳性关系。时序 D 的位置参数与以气候指数为协变量的拟合多项式函数如下:

$$g_1(\mu_t) = g_1[\mu(t)] = \alpha_0 + \alpha_1 C_1(t) + \dots + \alpha_n C_n(t) \quad (3)$$

式中: α_n 为常数; $C_n(t)$ 为解释变量在 t 年内不同滞后期的观测值(12 个月尺度)。本文选用 AIC 和 SBC 准则来获得最优模型, 即 AIC 和 SBC 值越小, 模型的拟合效果越好。在对模型定性评价时, 采用 Q-Q 图和 worm 图; 定量评价时, 计算模型残差序列的均值、均方差、偏度系数、峰度系数以及 Filliben 相关系数^[20]。

最后, 计算拟合最优的非平稳 Log-logistic 模型累积概率, 并采用与传统 SPEI 相同的标准正态化处理, 即可得到与 SPEI 具有相同的干旱分类的 NSPEI 指标。

1.2.3 游程理论 计算得到非平稳气象干旱指数后, 运用游程理论对干旱事件进行识别与评价。本文以 NSPEI 的分级标准为参考选取 $X_1 = 0, X_0 = -0.3$ 和 $X_2 = -0.5$ 作为截断水平, 提取研究期内干旱历时(D)和干旱烈度指标(S)序列^[21]。干旱特征变量的识别对干旱风险评价及管理具有重要作用, 为了避免单变量特征值在分析干旱事件风险存在的局限性, 因此本文将考虑干旱历时与干旱烈度多变量的联合重现期属性^[22]。

1.2.4 重现期分析 Copula 函数常用来将多个边缘分布函数与联合分布函数“连接”在一起的理论方法^[23]。本文采用常用的伽马(Gam)、威布尔(Wbl)、指数(Exp)、正态(Nor)、对数正态(Logn)以及广义极值(Gev)6 种概率分布函数来拟合两干旱特征变量, 并以 K-S 和 AIC 最小准则对备选分布进行优

选。联合分布函数选择 Gumbel, Frank, Clayton, t-copula 以及 Gaussian 这 5 种常见的 copula 函数,以 AIC 和 RMSE 对模型进行拟合优度评价。本文通过构建干旱历时与干旱烈度二维变量重现期来揭示干旱事件的严重性,重现期可以分为“或”($D > d \cup S > s$)和“且”($D > d \cap S > s$)两种情况^[24]。若干旱历时(D)和干旱烈度(S)的边缘分布函数分别为 $F(d)$, $F(s)$,联合分布函数为 $F(d, s)$,则二维联合重现期 T_{or} 和同现重现期 T_{and} 分别表示为:

$$T_{or} = \frac{N}{n[1 - F(d, s)]}$$

(4)

$$T_{and} = \frac{N}{n[1 - F(d) - F(s) + F(d, s)]}$$

(5)

式中: N 为系列长度(月); n 为研究时段干旱发生次数。

2 结果与分析

2.1 基于 GAMLSS 模型构建 NSPEI

2.1.1 非平稳模型的构建 各种研究表明,气候指数对水文气象变量的影响往往伴随着不同时间尺度的滞后效应。本文先对青海省各站点 12 个月尺度时

序 D 与所选的 5 个气候因子分别进行时滞相关分析,时滞数为 0~12 个月,并采用 Pearson 相关系数和 Sen's 方法来挑选影响最大的气候指标序列。再通过逐步回归方法确定各站点非平稳模型显著(显著性超过 95%)相关的解释变量。由于本文站点较多,下面只列出了各功能分区具有代表性的 14 个站点中气候因子时滞数以及逐步回归确定的解释变量(表 1)。由表 1 可知,PDO,NAO,SOI,AMO,AO 这 5 个气候指数与青海省干旱分别存在 5 个月(23%的站点)、1 个月(30%的站点)、0 个月(27%的站点)、7 个月(40%的站点)、11 个月(40%的站点)的滞后。结果表明,青海省各站点因地理位置不同受到环流的影响有所不同,西北部柴达木盆地站点主要受 AMO,AO 的影响,环湖区的主要受 PDO,AMO,AO 的影响,东部主要受 SOI,AMO,AO 影响,青南牧区的主要受 NAO,AMO,AO 的影响,这与范磊等^[11]发现较为一致。由于降水与气温变化特征存在空间差异性,导致最终各站点选择最佳非平稳模型的解释变量也是不同的。

表 1 青海省部分站点气象指数时滞序列与相关解释变量

Table 1 Time delay series and related explanatory variables of meteorological indices at some stations in Qinghai Province

站点	时滞相关序列($l=0,1,2,\dots,12$)	相关解释变量
小灶火	PDO(12) NAO(5) SOI(1) AMO(0) AO(12)	PDO **, AO
诺木洪	PDO(12) NAO(9) SOI(7) AMO(2) AO(0)	AO ***
共和	PDO(12) NAO(1) SOI(2) AMO(12) AO(2)	PDO *, SOI *, AO
西宁	PDO(5) NAO(12) SOI(0) AMO(0) AO(12)	PDO **, SOI ***, AMO *
民和	PDO(5) NAO(2) SOI(12) AMO(0) AO(2)	SOI **, AMO *, AO *
兴海	PDO(6) NAO(2) SOI(2) AMO(12) AO(2)	AMO *, AO
贵南	PDO(12) NAO(1) SOI(6) AMO(12) AO(2)	PDO, AMO *, AO
同仁	PDO(0) NAO(2) SOI(0) AMO(0) AO(1)	NAO **, SOI
曲麻莱	PDO(5) NAO(5) SOI(2) AMO(12) AO(1)	NAO *, AO
玛沁	PDO(7) NAO(2) SOI(2) AMO(12) AO(1)	AO **
囊谦	PDO(5) NAO(12) SOI(11) AMO(2) AO(12)	SOI, AMO *, AO *
托勒	PDO(4) NAO(10) SOI(9) AMO(2) AO(1)	NAO *, SOI *, AMO **
祁连	PDO(12) NAO(0) SOI(12) AMO(2) AO(1)	PDO *, AMO, AO *
门源	PDO(4) NAO(1) SOI(11) AMO(7) AO(2)	PDO **, AO

注:*** 代表显著水平为 0.001,** 代表显著水平为 0.01,* 代表显著水平为 0.05,括号里表示为气候因子时滞数。

本文采用最大似然法来估计非平稳模型中最优协变量的参数,并同时构建一个统计参数为常数的平稳模型。根据 AIC 准则、SBC 准则对各站点的平稳模型和非平稳模型的性能进行比较(以 3 月、6 月、12 月为例)。如图 2 所示,青海省 30 个站点的箱线图中非平稳模型的 AIC 值、SBC 值中位数均明显低于平稳模型,根据 AIC,SBC 值最小原则得到,非平稳模型在拟合时序 D 与气候指数方面要比平稳模型性

能表现好。表 2 展示了代表站点对所构建非平稳模型中位置参数(μ)的估计结果。例如,民和站时序 D 与上一年 12 月的 $SOI(l=12)$,12 月的 $AMO(l=0)$ 与 10 月的 $AO(l=2)$ 存在显著相关关系,并将上述气候因子作为最优解释变量代入公式(3)中,得到位置参数与气候因子非平稳拟合结果为: $\mu(t)=6.33-0.6SOI(t)-0.05AMO(t)-0.18AO(t)$,其中气候因子观测值均为 12 个月尺度。

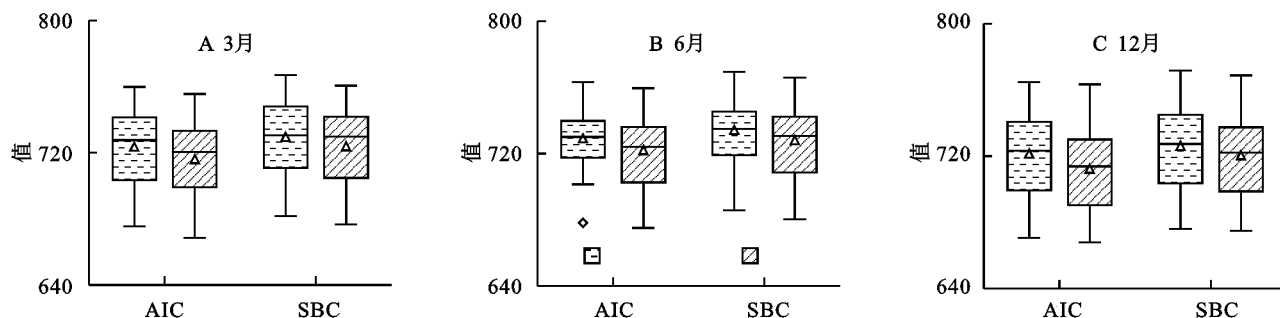


图2 青海省平稳模型和非平稳模型的 AIC,SBC 值的箱线图(3月、6月、9月)

Fig. 2 Box plot of AIC and SBC values of stationary model and non-stationary model in Qinghai Province (March, June and September)

2.1.2 非平稳模型的检验 为检验以气候因子为协变量的非平稳模型的合理性及拟合效果,计算模型残差序列,结果见表2。表2中所有站点的非平稳模型所得到残差序列的均值接近于0,方差接近于1,偏态系数接近于0,峰态系数接近于3,Filliben系数大于等于0.987,说明理论残差序列与实测残差序列有良好的相关关系。此外,通过构建分位数图(第5,25,50,75,95分位数)、正态QQ图和worm图,进一步评估最优非平稳模型的可靠性。由图3可知,以民和站为例,对比平稳模型和非平稳模型的分位数图,发现非平稳模型能够捕捉大部分实测时序D的变

化,尤其更准确捕捉到若干极值点,可以更好地来描述干旱与气候指数非平稳关系。从正态QQ图中可以直观看到,民和站大部分残差点都是均匀地分布在直线附近,这说明残差点近似服从标准正态分布;在worm图中,模型的实际点据与理论直线分布具有较好的一致性,所有残差点都在95%的置信区间内,这也充分证明了大尺度气候因子作为非平稳降水、气温模型的协变量是合理、可靠的。

因此,在气候变化的背景下引入非平稳性是必要的,通过构建NSPEI指数来揭示干旱演变特征,可作为干旱评估与分析的重要手段。

表2 部分站点非平稳模型的参数估计和残差统计结果

Table 2 Parameter estimation and residual statistical results of non-stationary models at some sites

站点	μ				均值	均方差	偏态系数	峰度系数	概率点据相关系数
	α_0	α_1	α_2	α_3					
玛沁	5.327	-0.489			-0.084	1.069	-0.689	3.552	0.982
小灶火	7.089	0.031	0.049		-0.024	0.978	-0.208	2.519	0.989
诺木洪	6.988	-0.008	-0.207		-0.041	1.004	-0.248	2.641	0.988
共和	6.325	-0.059	-0.051		-0.016	1.015	-0.235	2.766	0.998
西宁	4.703	-0.401	-0.502		-0.013	1.137	-0.292	2.513	0.987
兴海	6.126	-0.181	-0.239		-0.064	1.016	-0.533	3.090	0.986
同仁	6.088	-0.211	-0.088		-0.046	1.036	-0.485	3.003	0.988
曲麻莱	5.810	0.284	-0.288		-0.024	0.990	-0.231	2.434	0.995
门源	5.219	-0.177	-0.334		-0.080	1.032	-0.709	2.981	0.992
民和	6.372	0.096	0.238	-0.182	-0.032	1.001	-0.405	2.751	0.988
贵南	5.7445	-0.068	-0.379	-0.512	-0.037	1.049	-0.558	3.002	0.989
囊谦	5.812	-0.074	-0.386	-0.185	-0.076	1.009	-0.635	2.614	0.997
托勒	6.138	0.089	0.032	0.220	-0.051	1.002	-0.397	2.579	0.989
祁连	5.954	-0.055	-0.188	-0.116	-0.055	1.022	-0.641	3.116	0.989

2.2 NSPEI 干旱事件的验证

应用所提出的非平稳 Log-logistic 模型,计算1961—2020年青海省年尺度NSPEI与传统SPEI。由于SPEI的适用性已得到证明,因此通过对比两种指数以及根据气象灾害记录可对NSPEI的可靠性与适用性进行评价,从而确定适合青海省的干旱指数。

本文以民和站为例:

如图4A所示,NSPEI在1961—2020年中不仅与SPEI随时间的变化趋势较为一致,并且能够有效识别出1962年3—6月、1999年、2005年4—5月、2015年以及2017年等这些典型年的干旱事件变化情况,这验证了NSPEI在识别青海省干旱事件的可

靠性与适用性。但在图 4A 中两种指数在极端值处也存在一些显著差异。例如,在 1994 年 NSPEI 识别到的干旱严重程度要高于 SPEI,根据历史记录民和站在 1994 年发生了持续 9 个月的重旱,然而 SPEI

没有揭示出这一年严重的水分亏缺情况,这表明 NSPEI 可以比 SPEI 识别出更多的极端干旱事件。因此在大多数情况下两指数在评估干旱程度方面也具有一些差异。

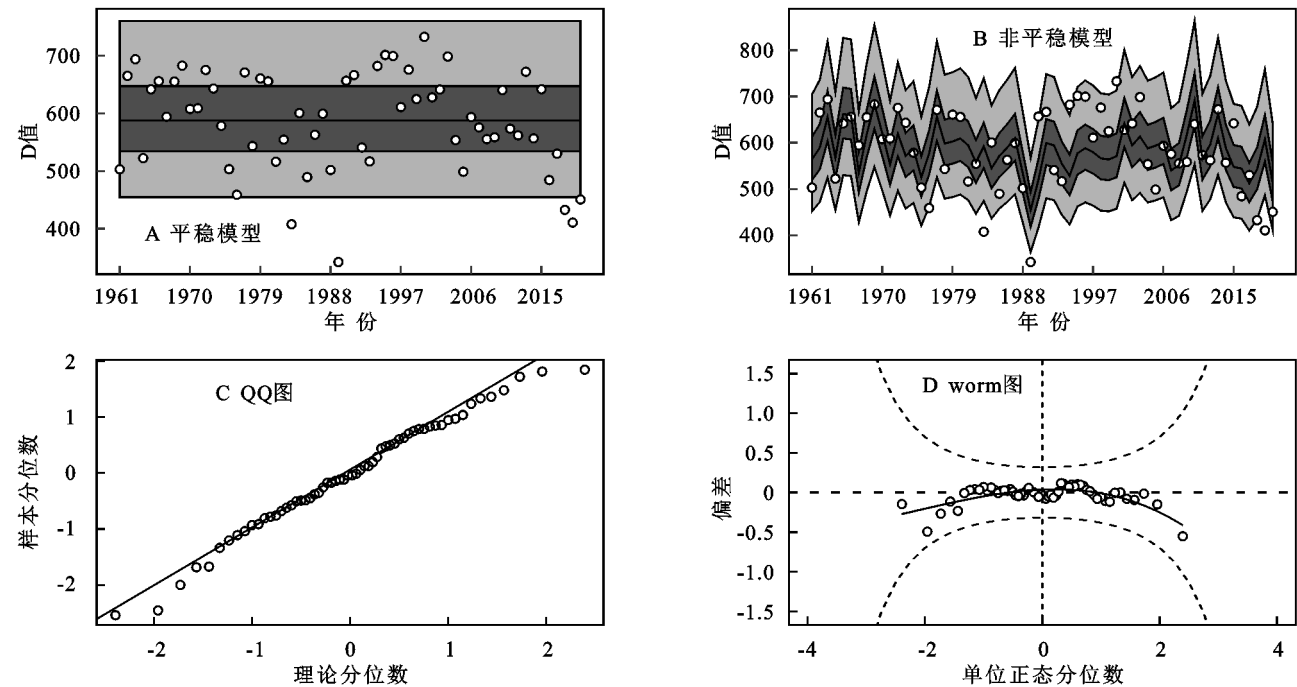


图 3 民和站平稳与非平稳模型模拟结果分位数图及 QQ 图与 Worm 图

Fig. 3 Quantile graph, QQ graph and Worm graph of stationary and non-stationary model simulation results of Minhe Station

图 4B—C 显示了 1961—2020 年 12 月共和站的 NSPEI 与 SPEI 干旱程度差异结果图,在图中 NSPEI 与 SPEI 提供的干旱程度几乎是一致的,但也存在一些显著区别。比如在 1994 年和 2017 年 SPEI 值均表现为无旱和中旱,而按 NSPEI 值则表示发生了轻旱和重旱。此外,在 1980 年中累积降水、潜在蒸散和两者差值 D 分别为 273.3,928.5,−655.2 mm,SPEI 将该年划分为轻旱,NSPEI 将这一时期划分为中旱;在 1990 年中累积降水、潜在蒸散和两者差值 D 分别为 254.9,911.5,−656.6 mm,SPEI 将该年同样划分为轻旱,然而 NSPEI 将其划分为重旱。出现这种情况是因为 NSPEI 指标是在降水-潜在蒸散基础上,考虑到前期或同期 SOI,AMO,AO 气候指数序列对降水—潜在蒸散序列动态影响,从而表现出了异于平稳性指标的气象干旱特征。由此可见 NSPEI 能够模拟出在变化环境下降水与气温的非平稳动态变化。

为进一步验证 NSPEI 在青海省的适用性,选择发生极端干旱事件的 1999 年为代表年,根据 SPEI 与 NSPEI 对青海省典型旱情空间分布进行评价(图 5)。如图 5 所示,SPEI 与 NSPEI 的评价结果均表明有 50% 以上的站点都发生了不同程度的干旱,且主要集中在分布青海省的东部农业区以及柴达木盆地西北部。而与 SPEI 评价结果相比,NSPEI 识别到遭遇干

旱的区域面积更大、严重程度更重,尤其玉树州沱沱河站发生重旱及特旱的情况。1999 年整个青海省旱情严重,绝大部分站点的降水量比历年同期偏少 7 成以上,特别是玉树州,从上年 10 月—本年 5 月连续干旱,7 月中旬—8 月上旬滴雨未落,农作物干枯而死。因此,对比发现 NSPEI 更能反映出 1999 年青海省各区域的严重历史旱情。

在时间和空间尺度上,两种干旱评价结果的差异性同时说明在气候变化的影响下青海省气象干旱的时空特征已发生了改变,NSPEI 以此特征适应了由气候变化引起的非一致性影响,使其能够应用于变化环境下的气象干旱监测与评价进而有助于气象干旱的预测预报。

2.3 基于 NSPEI 的非平稳干旱特征分析

2.3.1 干旱特征时空分析 为进一步了解非平稳条件下青海省干旱事件特征的变化情况,以 12 个月尺度 NSPEI 指标为依据,计算青海省 30 个站点 1961—2020 年气象干旱事件的特征指标值,包括干旱频率、干旱历时及干旱烈度。以 20 a 尺度将研究期划分为 3 个时段,分别为 1961—1980 年、1981—2000 年及 2001—2020 年。

由表 3 可知,从年代际变化来看,青海省 1961—2020 年干旱频率呈现逐渐减小的趋势,整体发生频

率为:中旱>轻旱>重旱>特旱。其中,1960—1980年是干旱发生频率最高的年代,频率达到了52.16%,期间主要发生中度干旱(22.99%)。从1980—2000年及2000—2020年来看,青海省干旱有所缓减主要是轻、中旱发生的频率显著降低,然而一些极端干旱事件仍在发生,因此对于极端干旱发生的风险不容忽视。从干旱频率的空间分布格局来看,如图6所示,青海省1961—2020年干旱频率范围为41%~63%。干旱频率高值区主要在柴达木盆地西北部,且该区域发生轻度干旱、重度干旱频次较高,这是由于柴达木

盆地属于常年干旱区,降水量较少^[25]。干旱频率低值区出现在降水量较多的青南牧区西南部以及环湖区西部,该区域多发生中度干旱。因降水存在不确定性和各站点降水的差异性,导致青海省不同程度的干旱频频发生。在图6中可以看到,轻旱、中旱发生频率的空间分布差别不大,但随着干旱程度的增加,各站点空间分布差异性显著。例如,对农牧业及社会经济影响较大的极端干旱主要发生在海北州的托勒站、西北部芒崖站以及青南区的沱沱河站等,而位于果洛州的久治站、班玛站几乎不发生重旱和特旱。

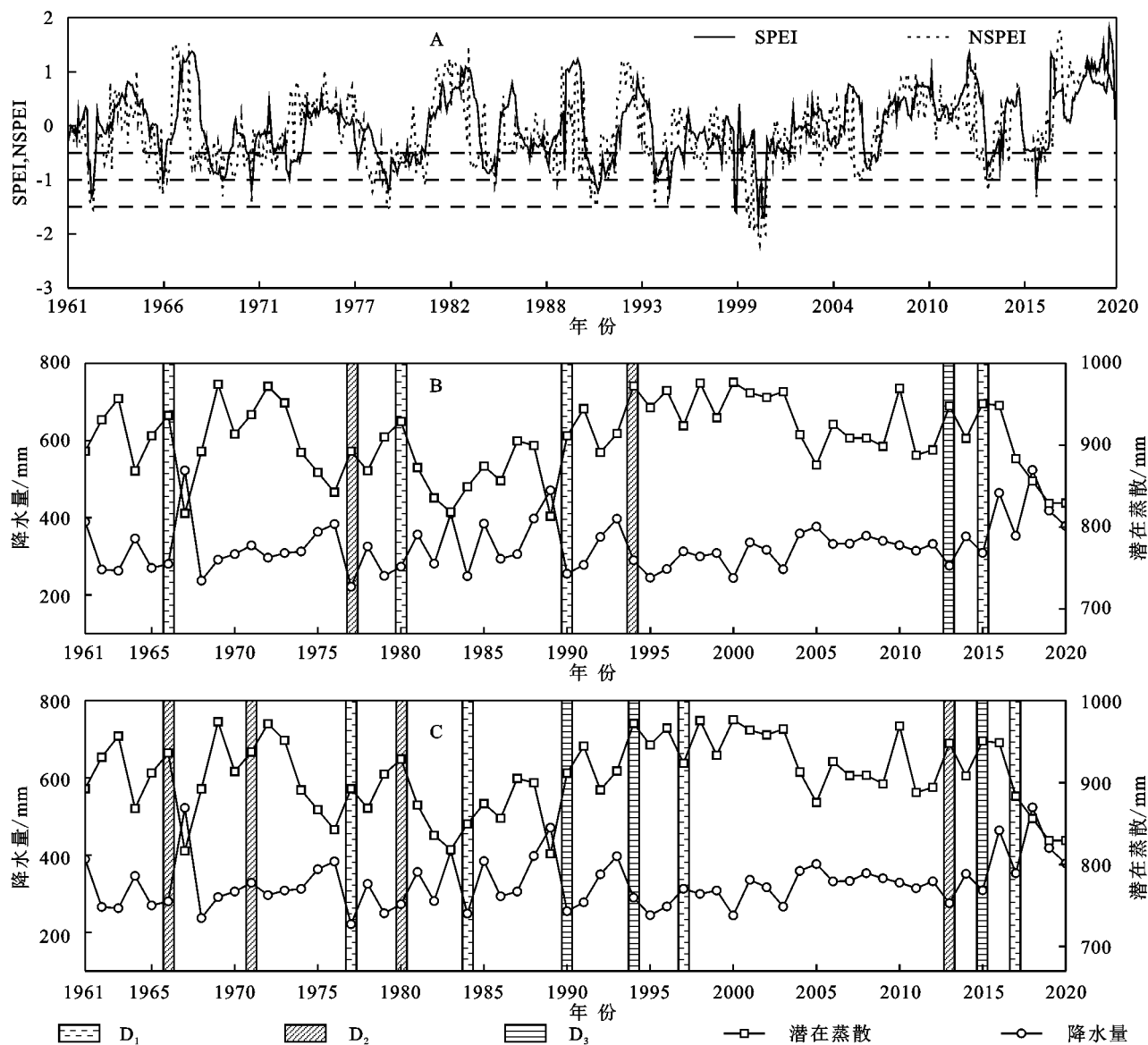


图4 民和站 SPEI 与 NSPEI 的趋势变化与干旱程度对比

Fig. 4 Comparison between the trend change of SPEI and NSPEI and the drought degree at Minhe Station

图7为1961—2020年青海省干旱历时、干旱烈度的时间变化。如图7所示,干旱历时与干旱烈度在1961—2020年整体年变化趋势较为一致,分别以0.018 9/a、0.016 6/a的速率减小。干旱历时与烈度存在明显的年际变化特征,均在1978年、1990年、2006年达到最大

值,在该时期青海省发生了长历时高烈度的干旱事件。从图7还可以看出,1961—1980年、1981—2000年干旱历时与烈度均呈增加趋势;而2000年之后呈显著的减小趋势,说明青海省近20a以来,发生干旱事件的持续时间、强烈程度呈现减小趋势。

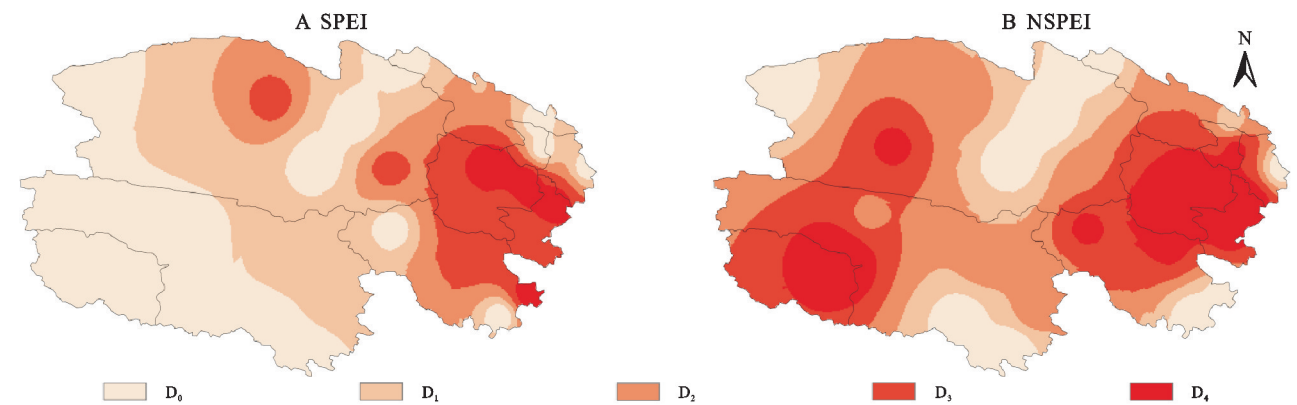


图 5 1999 年青海省 SPEI 与 NSPEI 不同干旱程度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of SPEI and NSPEI with different drought degrees in Qinghai Province in 1999

表 3 非平稳性不同程度发生干旱频率

Table 3 Drought frequency with different degrees of non-stationarity %

年代	干旱 频率	轻旱 频率	中旱 频率	重旱 频率	特旱 频率
1961—1980	52.61	19.32	22.99	9.21	1.08
1981—2000	49.85	20.84	21.24	7.03	0.74
2001—2020	46.33	19.07	18.76	7.78	0.72

图 8 展示了 1961—2020 年青海省干旱历时与烈度多年平均值的空间分布,并用 M-K 趋势法分析各站点的干旱特征变化趋势。在图 8A 中,干旱历时时长由西北部向东北部递减,其中柴达木盆地中小灶火站是平均干旱历时(7.15)较大值集中区,而环湖区中茶卡站是平均干旱历时(3.66)较小值集中区。并且统计了各站点干旱历时的趋势,发现青海省大部分站点(66%)干旱历时呈下降趋势。从图 8B 中看出,平均干旱烈度范围为 8.66~3.73,且空间展布与平均干旱历时的空间展布基本相似,整体(62%的站点)也呈

下降趋势。说明干旱历时与烈度这两特征变量在时间空间上具有正相关关系,即较为严重的干旱事件往往伴随着较长的干旱月份。

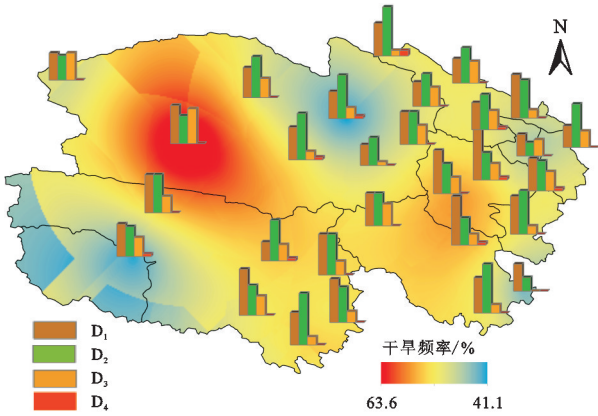


图 6 非平稳性不同程度(轻旱 D₁、中旱 D₂、重旱 D₃、特旱 D₄)干旱频率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought frequency in different degrees of non-stationary (light drought D₁, medium drought D₂, severe drought D₃, extreme drought D₄)

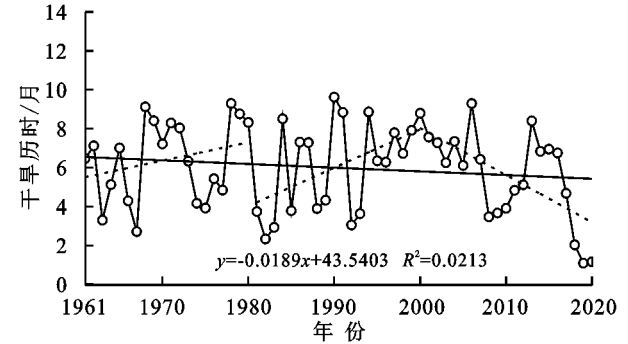


图 7 1961—2020 年青海省干旱历时、干旱烈度的时间变化

Fig. 7 Temporal changes of drought duration and drought intensity in Qinghai Province from 1961 to 2020

2.3.2 干旱特征重现期分析 利用重现期评价干旱风险是一种有效的方法。通过 K-S 检验及 AIC 准则对各站点干旱历时和烈度的边缘分布函数与联合分布函数进行拟合优度检验,结果表明干旱历时最优分布函数为 Wbl(58%站点),干旱烈度最优分布函数为

Gev(76%站点),而单参数 Frank copula 函数(86%站点)为最优联合分布函数。利用 Pearson, Kendall 和 Spearman^[24]对两干旱特征相关性进行度量,各站点相依性达到 0.75~0.98,因此采用 Frank copula 函数对 D, S 构建二维联合分布函数来评估干旱事件的风险。

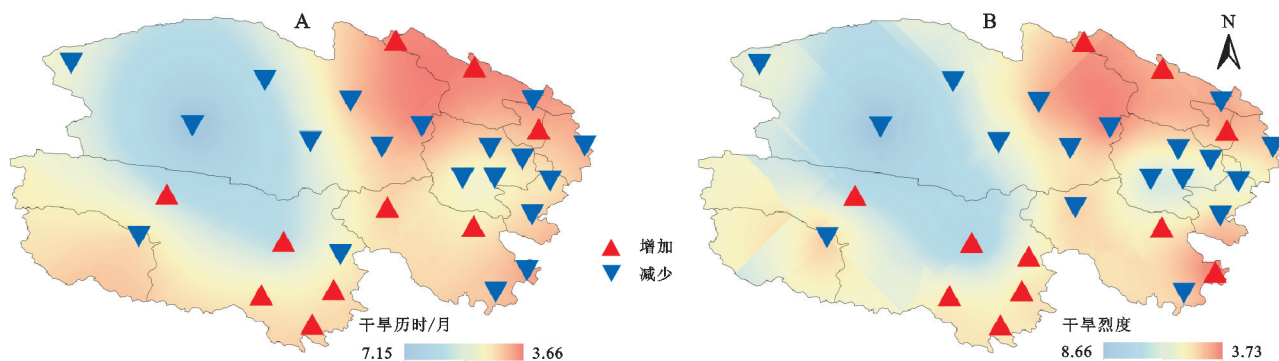


图8 非平稳模型平均干旱历时、干旱烈度的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of mean drought duration and drought intensity in non-stationary model

本文选择同仁站作为代表站,绘制了 D 、 S 联合重现期(T_{or})与同现重现期(T_{and})等值线图。由图9可知,SPEI与NSPEI估计的干旱同现重现期、联合重现期存在差异,并且两种指数估计重现期都是 T_{and} 大于 T_{or} 。从图中可以看到,在相同干旱烈度与干旱历时情况下,SPEI估计的干旱事件重现期要比NSPEI估计的干旱重现期小。例如,干旱历时为9且干旱烈度为10的干旱事件,SPEI估计的 T_{and} 为11.98 a, T_{or} 为5.37 a,而

NSPEI估计的 T_{and} 为16.14 a, T_{or} 为8.94 a。这说明了平稳模型容易高估干旱事件发生的风险,尤其对于长历时高烈度的干旱事件。此外,从图中还可以看到,非平稳NSPEI识别的干旱事件普遍要比传统SPEI识别的干旱事件多且较集中,这表明在大尺度气候模式下NSPEI可以捕捉更多气候变化背景下的干旱特征,能较好地反映不同干旱事件的风险,这可以为干旱风险管理提供更可靠的参考。

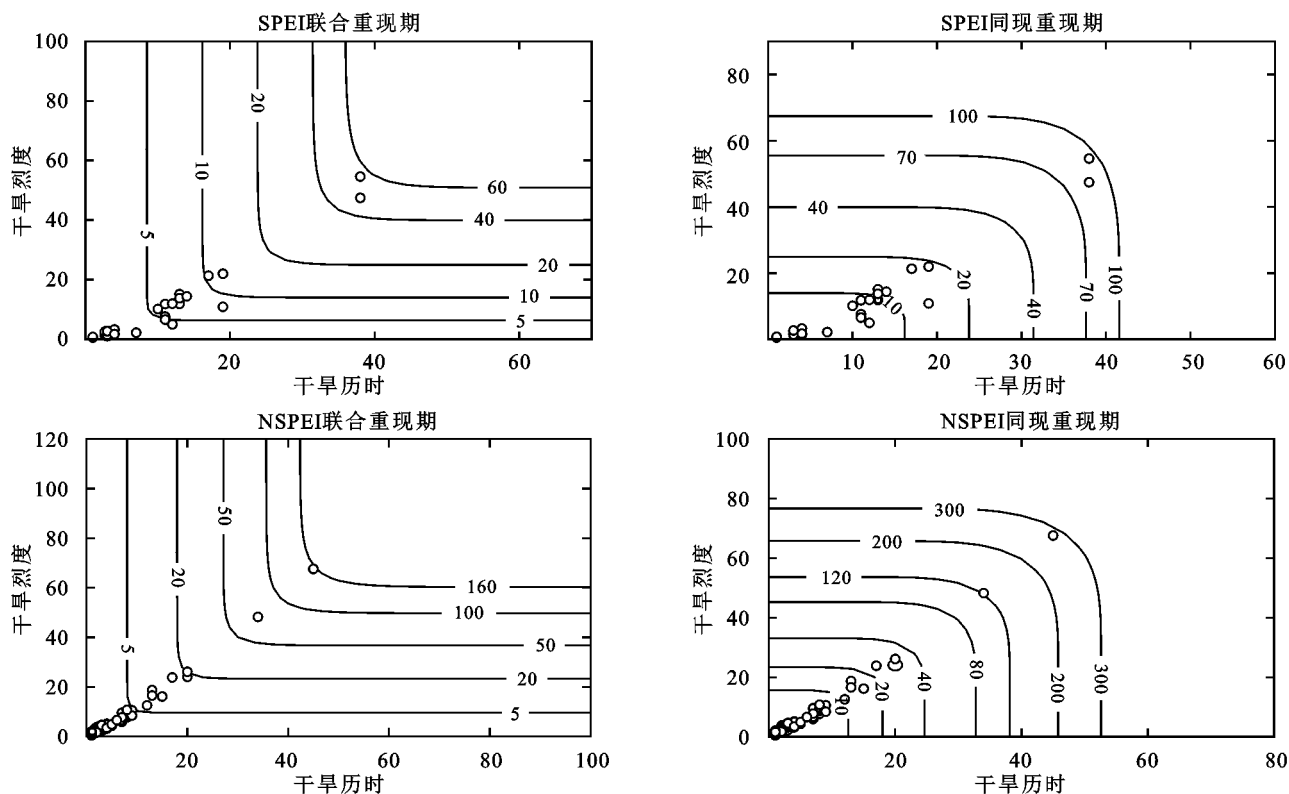


图9 同仁站联合重现期与同现重现期

Fig. 9 Joint recurrence period and co-occurrence recurrence period of Tongren Station

本文结合前人研究^[25-26]与NSPEI干旱等级划分,选择两个典型干旱情景:干旱历时大于6个月,干旱烈度大于8表示为联合中度干旱($S/D=1.25$);干旱历时大于8个月,干旱烈度大于14为联合重度干旱($S/D=1.75$)。绘制了两种情景下重现期空间分

布,来反映青海省整个区域的干旱风险情况(图10)。

由图10A可知,在中旱情景下, T_{or} 平均为2.79 a一遇, T_{and} 平均为7.52 a一遇,可见整个区域发生中旱风险较大。其中青海省西南部以及海北州的中旱重现期要低于环湖区东南部,因此西南部以及海北州

发生中旱风险要高于环湖区东南部。此外,从图中发现 T_{and} 比 T_{or} 的低值区范围大,说明发生 $D>6$ 且 $S>8$ 要比发生 $D>6$ 或 $S>8$ 干旱事件的高风险地区多。从图 10B 可知,重旱 T_{or} 平均为 4.11 a 一遇, T_{and} 平均为 16.22 a 一遇,整个区域发生重旱的风险相对中旱较小。在重旱情景下联合与同现重现期的空间分布与中旱情景下空间分布一致,说明青海省西南部的小灶火、沱沱河以及海北州的托勒等站点是中、重旱高风险集中区,需要加强对干旱预警与检测工作;而环湖区共和等站点

是中、重旱低风险集中区。苏夏羿^[27]利用传统气象干旱指标识别到 1956—2006 年东南部民和站发生轻度干旱 T_{or} 为 8.9 a 一遇, T_{and} 为 17.9 a 一遇;发生重度干旱 T_{or} 为 15.5 a 一遇, T_{and} 为 34.5 a 一遇。而本文使用 NSPEI 指数识别到 1961—2020 年民和站发生轻度干旱 T_{or} 为 3.4 a 一遇, T_{and} 为 6.1 a 一遇;发生重度干旱 T_{or} 为 5.9 a 一遇, T_{and} 为 12.6 a 一遇。可见,在全球气候变化和大气环流异常的不断影响下,青海省气象干旱联合重现期降低,即发生中、重度干旱风险增加。

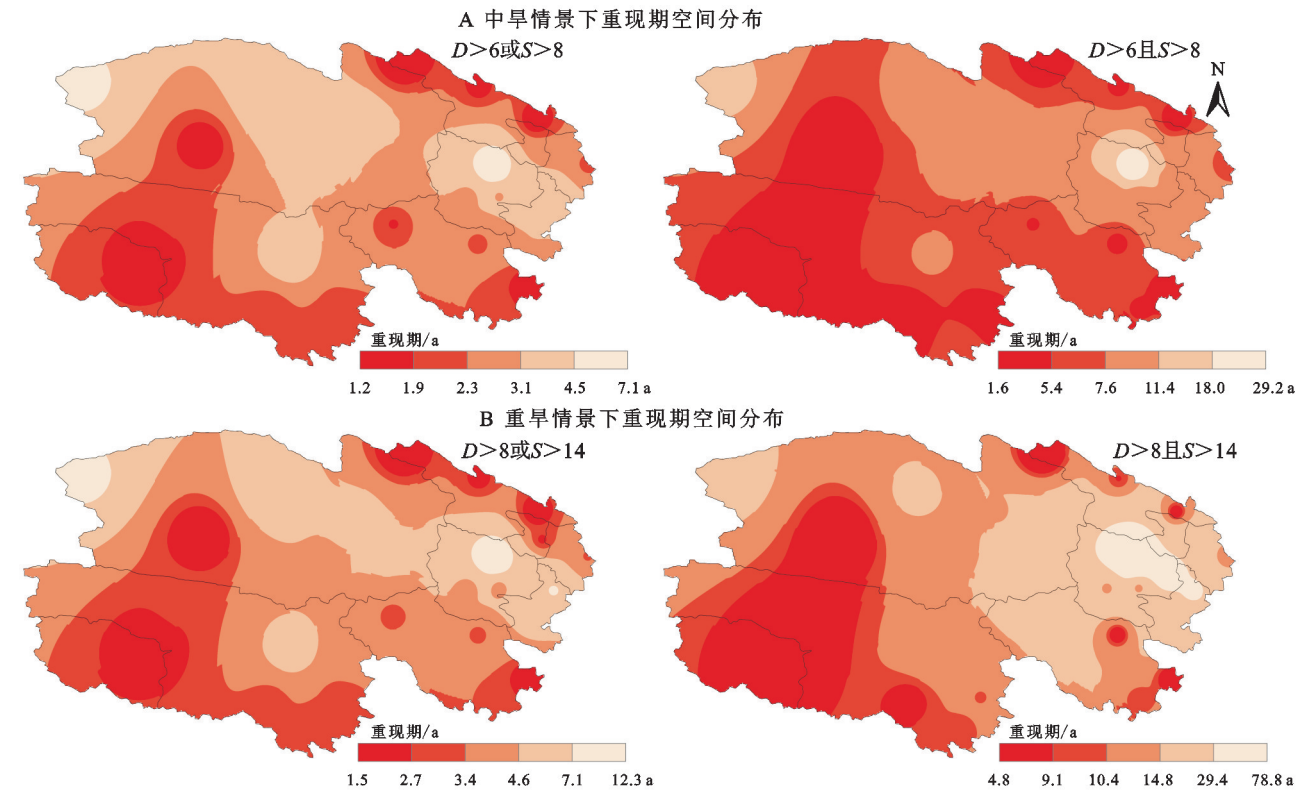


图 10 中旱和重旱情景下的联合、同现重现期空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of joint and co-occurrence recurrence periods under moderate and severe drought scenarios

3 讨论

考虑到干旱指数的非平稳性,诸多学者将降水的概率分布参数与时间或气候指数等协变量相结合来开发新的干旱指数,但同时考虑降水、气温序列与气候指数的非平稳变化却鲜有研究。因此,本文基于 GAMLSS 模型以气候指数作为协变量构建非平稳 NSPEI,通过与传统的 SPEI 及历史旱情对比,验证了 NSPEI 在青海省的适用性与可靠性。Song 等^[17]对比平稳与非平稳两种水文气象指数的年际变化,发现平稳指数在反映局部变化时普遍会低估极端值,文中也得到了这样的结果,说明了使用 NSPEI 能够更准确地计算出变化环境中的极端降水和气温。李红梅等^[28]分析青海省干旱时空分异特征,表明了柴达

木盆地为主要重旱发生区,剖析其主要原因是:柴达木盆地深居青南高原与祁连山脉之中,远离海洋,长期得不到充足的水汽,加之该区常年盛行偏西风的影响,导致柴达木盆地降水较少,重旱及特旱的风险较高^[29]。文中 NSPEI 表示的干旱类型在空间分布上不仅与李红梅得到一致的结论,而且还与历史干旱事件高度吻合。这也佐证了使用 NSPEI 来表征青海省非平稳干旱特征是一种有效手段。

非平稳性是时间变异性的一个特征,它直接体现在概率密度函数随时间的变化。在时间变化趋势上,汪青春等^[30]研究表明,青海省干旱范围和干旱历时等特征值呈逐年下降趋势,且两者有着显著的正相关关系,这与文中得到的干旱特征规律基本一致。本文在对干旱特征重现期分析研究表明 SPEI 容易高估

干旱事件的干旱强度和干旱历时,温庆志等^[15]解释出现这种偏差主要是由于 SPEI 本身对温度的变化较为敏感,从而导致忽视了水分亏损过程中降水序列的非平稳性。同样,从文中图 4B—C 中可以看出,在气象水文非平稳过程中,降水序列的非平稳变化会更能决定这一时期干旱特征。在典型干旱情景下,本文评估环湖区北部为干旱风险区这与苏夏羿等^[27]评估的干旱风险分布稍有不同,其主要原因是:受气候变暖的影响,大气环流模式异常导致青海省降水与气温在 2000 年前后变化较大,同时由于所选时间尺度与区域内站点不同,进而导致结论存在差异性。

近年来,结合大尺度气候指数遥相关来探索干旱背后的潜在物理机制,可以为监测和预警干旱提供了更多的信息。然而,关于非平稳多变量干旱指数的构建研究尚不多见。由于气象干旱在不同时间尺度上所表现的特征不同,因此,在未来的研究应考虑基于多时间尺度上建立多变量非平稳干旱指数,以有效监测变化环境下的干旱特征。本研究在构建 NSPEI 时,只考虑了位置参数随时间呈现线性变化,今后的研究中应考虑其他参数(如尺度参数、形状参数等)对水文序列存在的线性以及非线性影响。

4 结论

(1) 在 GAMLSS 模型框架内,构建以气候指数为协变量的非平稳 Log-logistic 模型对时序 D 拟合效果较好,可以更好地捕捉气候变化背景下的年降水与年气温的变化情况。

(2) 基于非平稳模型计算出的 NSPEI 与 SPEI 进行对比,在时间尺度上整体呈相同的变化趋势,但 NSPEI 能识别出更多的极端干旱事件。在空间尺度上,NSPEI 比 SPEI 评估的干旱程度更严重,对比青海省历史旱情,NSPEI 更符合历史干旱程度。因此 NSPEI 可以作为青海省评估干旱的有效工具。

(3) 青海省 1961—2020 年干旱频率主要呈下降趋势,发生干旱频率范围为 41%~63%,且干旱事件主以中旱和轻旱为主;干旱历时与干旱烈度分别以 0.018 9/a、0.016 6/a 的速率减小,两者存在显著正相关关系。在空间上三者具有相同的分布特征,柴达木盆地干旱频率、干旱历时与烈度高值区,青南牧区西南部为干旱频率低值区,环湖区为干旱历时与烈度低值区。整个区域超过 50% 的站点的干旱历时与烈度呈减缓趋势,但极端干旱事件频率没有减少。

(4) 青海省干旱历时与干旱烈度重现期最优联合分布为 Frank copula 函数,NSPEI 比 SPEI 评估的干旱特征重现期较大且集中。利用 NSPEI 评估青海

省发生中旱联合重现期平均为 2.79 a 一遇,同现联合重现期平均为 7.52 a 一遇;重旱联合重现期平均为 4.11 a 一遇,同现联合重现期平均为 16.22 a 一遇。其中青海省西南部小灶火、沱沱河等站是中、重旱高风险集中区,而东部农业区为干旱低风险集中区。

参考文献:

- [1] Schwalm C R, Williams C A, Schaefer K, et al. Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(8): 551-556.
- [2] 姜大膀,王晓欣.对 IPCC 第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J].*大气科学学报*, 2021, 44(5): 650-653.
Jiang D B, Wang X X. A brief interpretation of drought change from IPCC sixth assessment report[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(5): 650-653.
- [3] 张世虎,王一峰,侯勤正,等.青海省干旱指数时空变化特征与气候指数的关系[J].*草业科学*, 2015, 32(12): 1980-1987.
Zhang S H, Wang Y F, Hou Q Z, et al. Spatial and temporal characteristics of aridity index and association with AO and ENSO in Qinghai Province[J]. *Pratacul-tural Science*, 2015, 32(12): 1980-1987.
- [4] 贾红莉,杨英莲,金义安,等.1984—2017 年青海省气象灾害灾情演变[J].*青海科技*, 2019, 26(2): 64-72.
Jia H L, Yang Y L, Jin Y A, et al. Evolution of meteorological disasters in Qinghai Province from 1984 to 2017[J]. *Qinghai Science and Technology*, 2019, 26(2): 64-72.
- [5] 胡玉乾,胡磊,孙鹏,等.基于非平稳的淮河流域干旱时空演变特征研究[J].*北京师范大学学报:自然科学版*, 2022, 58(1): 116-124.
Hu Y Q, Hu L, Sun P, et al. Spatio-temporal evolution of drought events in Huaihe River Basin: A non-stationary standardized precipitation evapotranspiration index study [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2022, 58(1): 116-124.
- [6] 王劲松,李耀辉,王润元,等.我国气象干旱研究进展评述[J].*干旱气象*, 2012, 30(4): 497-508.
Wang J S, Li Y H, Wang R Y, et al. Preliminary analysis on the demand and review of progress in the field of meteorological drought research [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2012, 30(4): 497-508.
- [7] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//*Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 1993.
- [8] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.

- [9] 宋玉鑫,马军霞,左其亭,等.新疆多时间尺度干湿变化特征分析[J].水资源保护,2021,37(2):43-48.
Song Y X, Ma J X, Zuo Q T, et al. Analysis on characteristics of dry-wet variation on multi-time scale in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021,37(2):43-48.
- [10] 温家兴,张鑫,王云,等.多时间尺度干旱对青海省东部农业区小麦的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(4):92-97.
Wen J X, Zhang X, Wang Y, et al. Effects of drought in multi-time scale on wheat crop in eastern agricultural region of Qinghai Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016,35(4):92-97.
- [11] 范磊,吕爱锋,张文翔.青海省干旱时空特征及与大气环流响应关系[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):60-65.
Fan L, Lv A F, Zhang W X. Temporal-spatial variation characteristics of drought and its relationship with atmospheric circulation in Qinghai Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(12):60-65.
- [12] Craig R K. Stationarity is dead-long live transformation: Five principles for climate change adaptation law [J].Harvard Environmental Law Review. 2010,34(1):9-73
- [13] Wang Y, Li J, Feng P, et al. A time-dependent drought index for non-stationary precipitation series [J]. Water Resources Management, 2015,29:5631-5647.
- [14] Li J Z, Wang Y X, Li S F, et al. A nonstationary standardized precipitation index incorporating climate indices as covariates [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015,120:12082-12095.
- [15] 温庆志,孙鹏,张强,等.非平稳标准化降水蒸散指数构建及中国未来干旱时空格局[J].地理学报,2020,75(7):1465-1482.
Wen Q Z, Sun P, Zhang Q, et al. A multi-scalar drought index for global warming: The non-stationary standardized precipitation evaporation index (NSPEI) and spatio-temporal patterns of future drought in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(7):1465-1482.
- [16] 宋昕熠.非一致性统计模型在水文-气象频率研究中的应用[D].江苏徐州:中国矿业大学,2017.
Song X Y. Non-stationary Statistical Model and Its Applications in Hydro-meteorological Frequency Analysis[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2017.
- [17] Song Z, Xia J, She D, et al. The development of a nonstationary standardized precipitation index using climate covariates: A case study in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2020,588:125115.
- [18] 黄梦杰,贺新光,卢希安,等.长江流域的非平稳 SPI 干旱时空特征分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(7):1597-1611.
Huang M J, He X G, Lu X A, et al. Spatio-temporal characteristics of drought in the Yangtze River Basin using non-stationary standardized precipitation index [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(7):1597-1611.
- [19] Rigby R A, Stasinopoulos D M. Generalized additive models for location, scale and shape[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C(Applied Statistics), 2005,54(3):507-554.
- [20] 王怡璇.变化环境下滦河流域干旱演变驱动机制及定量评价研究[D].天津:天津大学,2017.
Wang Y X. Driving Mechanism and Quantitative Assessment of Drought in Luanhe River Basin Under Changing Environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [21] 侯陈瑶,朱秀芳,肖名忠,等.基于游程理论和 Copula 函数的辽宁省农业气象干旱特征研究[J].灾害学,2019,34(2):222-227.
Hou C Y, Zhu X F, Xiao M Z, et al. Research on agricultural meteorological drought in Liaoning Province based on run theory and copula function[J]. Journal of Catastrophology, 2019,34(2):222-227.
- [22] 廖显微,高峰,魏婷,等.基于 Copula 函数的松花江流域水文干旱频率分析[J].灌溉排水学报,2021,40(3):134-141.
Liao X W, Gao F, Wei T, et al. Using copula method to analyze drought frequency in Songhua River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021,40(3):134-141.
- [23] 张卓群,冯冬发,侯宇恒.基于 Copula 函数的黄河流域干旱特征研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):66-72.
Zhang Z Q, Feng D F, Hou Y H. Study on drought characteristics in Yellow River basin based on Copula function[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(1):66-72.
- [24] 韩会明.赣江流域干旱时空演变特征及重现期分析[D].南昌:南昌大学,2020.
Han H M. Spatial and Temporal Evolution Characteristics and Recurrence Period of Drought in Ganjiang River Basin [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [25] 马有绚,李万志,王丽霞,等.基于 SPI 的青海省春季干旱时空演变特征及环流诊断[J].干旱气象,2020,38(3):362-370.
Ma Y X, Li W Z, Wang L X, et al. Spatial and temporal evolution and atmospheric circulation diagnosis of spring drought based on SPI in Qinghai Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020,38(3):362-370.

- [18] 王雁南,杜峰,隋媛媛,等.黄土丘陵区撂荒群落演替序列种根系对氮素施肥方式和水平的形态响应[J].生态学报,2017,37(9):2913-2925.
Wang Y N, Du F, Sui Y Y, et al. Morphological response of successional sequence species root systems to nitrogen fertilization patterns and levels in abandoned communities of loess hills[J]. *Journal of Ecology*, 2017, 37(9):2913-2925.
- [19] Smith B. Declining global leaf nitrogen content: smart resource use by flexible plants[J]. *New Phytologist*, 2022, 235(5): 1683-1685.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [21] Deng G, Cahill L W, Tobin G R. The study of logarithmic image processing model and its application to image enhancement[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(4):506-512.
- [22] 王进,朱江,艾训儒,等.湖北星斗山地形变化对不同生活型植物叶功能性状的影响[J].植物生态学报,2019, 43(5):447-457.
Wang J, Zhu J, Ai X R, et al. Effects of topographic changes on leaf functional traits of different life types in the Xingduo Mountains, Hubei[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(5):447-457.
- [23] 霍佳璇,任梁,潘莹萍,等.柴达木盆地荒漠植物功能性状及其对环境因子的响应[J].生态学报,2022,42(11): 4494-4503.
Huo J X, Ren L, Pan Y P, et al. Functional traits of desert plants in the Qaidam Basin and their response to environmental factors[J]. *Journal of Ecology*, 2022, 42(11):4494-4503.
- [24] Pohl M, Stroude R, Buttler A, et al. Functional traits and root morphology of alpine plants[J]. *Annals of Botany*, 2011, 108(3):537-545.
- [25] 晓洁,张凯,肖迪,等.凉水天然红松阔叶混交林主要植物叶片性状相互关系研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(9):52-58.
Wang X J, Zhang K, Xiao D, et al. Interrelationship of major plant leaf traits in a natural red pine broadleaf mixed forest in Liangshui[J]. *Journal of Central South University of Forestry Science and Technology*, 2015, 35(9):52-58.
- [26] Curran T J, Brown R L, Edwards E, et al. Plant functional traits explain interspecific differences in immediate cyclone damage to trees of an endangered rainforest community in north Queensland[J]. *Austral Ecology*, 2008, 33(4):451-461.
- [27] Wittich B, Horna V, Homeier J, et al. Altitudinal change in the photosynthetic capacity of tropical trees: A case study from Ecuador and a pantropical literature analysis[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(6):958-973.
- [28] Zhang H, He Q, Pandey S P, et al. Can overgrazing responses be disentangled by above- and below-ground traits[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 573948.
- [29] Reich P B. The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(2):275-301.

(上接第327页)

- [26] 陈亚利,赵强,艾明乐,等.1959—2019年辽河流域气象干旱时空特征分析[J].水利水电技术(中英文),2023, 54(1):42-52.
Chen Y L, Zhao Q, Ai M L, et al. Spatio-temporal characteristics of meteorological drought in the Liaohe River Basin from 1959 to 2019[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(1):42-52.
- [27] 苏夏羿,张鑫,王云,等.基于SPI和Copula的湟水流域干旱趋势研究[J].中国农村水利水电,2016,410(12): 151-155.
Su X Y, Zhang X, Wang Y, et al. Research on the drought trend based on standardized precipitation index and copula function in Huangshui River Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016, 410(12):151-155.
- [28] 李红梅,周秉荣,申红艳,等.青海高原干旱时空分异特征及发生风险研究[J].山地学报,2019,37(2):230-239.
Li H M, Zhou B R, Shen H Y, et al. Research on temporal and spatial differentiation and occurrence risks of drought in Qinghai, China [J]. *Mountain Research*, 2019, 37(2):230-239.
- [29] 韩炳宏,周秉荣,吴让,等.基于格网的青海省干旱灾害综合风险评估[J].干旱区地理,2018,41(6):1194-1203.
Han B H, Zhou B R, Wu R, et al. Grid-based estimation of drought disaster in Qinghai Province[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(6):1194-1203.
- [30] 汪青春,李凤霞,刘宝康,等.近50年来青海干旱变化及其对气候变暖的响应[J].干旱区研究,2015,32(1): 65-72.
Wang Q C, Li F X, Liu B K, et al. Variation in drought and its response to climate warming in Qinghai Plateau in recent 50 years[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(1):65-72.