

基于 SPEI 指数的新疆干旱时空变化特征分析



汤国虎*

温泉县气象局, 新疆温泉 833500

摘要: 新疆是中国面积最大, 最为干旱的地区, 受自然地理位置等因素影响, 干旱已经成为新疆典型的自然灾害之一, 具有发生频率高、影响范围广、危害程度大的特点, 给农林业、生态和经济发展都造成了很大的损失。所以分析该地区干旱的时空变化对合理应对干旱事件, 降低干旱造成的损失具有重要意义。本文通过获取到的 53 个气象站点的标准化降水蒸散发指数 (SPEI), 结合线性回归、Mann-Kendall 突变检验、Morlet 小波分析对 SPEI 指数进行季节和年尺度时空变化分析以及周期提取。结果表明: 1961-2020 年新疆地区年尺度呈干旱化趋势; 空间上, 轻旱在新疆大部分地区都存在, 中旱主要发生在北疆地区, 重旱存在个别站点, 极旱发生在南疆地区; 新疆地区春季干旱变化得主周期为 28、12、6a, 夏季主周期为 6、8、15a, 秋季得主周期为 16、10、6、4a, 冬季得主周期为 13a, 年尺度干旱周期为 13、6a。新疆整体上呈现干旱化趋势; 空间分布上南疆比北疆干旱程度更严重; 轻旱和中旱的频率较高; 干旱周期变化上主要以 13a 为主。

关键词: SPEI; 干湿变化; 干旱频率; 新疆

DOI: [10.57237/j.res.2024.03.002](https://doi.org/10.57237/j.res.2024.03.002)

Analysis of Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drought in Xinjiang Based on SPEI Index

Tang Guohu*

Wenquan County Meteorological Bureau, Hot Spring 833500, China

Abstract: Xinjiang is the largest and most arid area in China. Affected by natural geographical location and other factors, drought has become one of the typical natural disasters in Xinjiang. It has the characteristics of high frequency, wide range of influence and great harm, which has caused great losses to agriculture, forestry, ecology and economic development. Therefore, it is of great significance to analyze the spatial and temporal changes of drought in the region to reasonably respond to drought events and reduce the losses caused by drought. In this paper, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) of 53 meteorological stations was obtained. Combined with linear regression, Mann-Kendall mutation test and Morlet wavelet analysis, the SPEI index was used to analyze the seasonal and annual spatial and temporal changes and cycle extraction. The results showed that the annual scale in Xinjiang showed a trend of drought from 1961 to 2020. In space, light drought exists in most parts of Xinjiang, moderate drought

*通信作者: 汤国虎, 1831734611@qq.com

mainly occurs in northern Xinjiang, severe drought exists in individual stations, and extreme drought occurs in southern Xinjiang. The main period of spring drought change in Xinjiang is 28, 12, 6a, the main period of summer is 6, 8, 15a, the main period of autumn is 16, 10, 6, 4a, the main period of winter is 13a, and the annual scale drought period is 13, 6a. Xinjiang as a whole shows a trend of drought; in terms of spatial distribution, the drought degree in southern Xinjiang is more serious than that in northern Xinjiang; the frequency of light drought and moderate drought is higher; the change of drought cycle is mainly 13a.

Keywords: SPEI; Dry and Wet Changes; Frequency of Drought; Xinjiang

1 引言

干旱是普遍发生在全世界的一种气象灾害,是指由于水分收支或供求关系不平衡,从而形成的水分短缺现象[1]。中国季风气候明显,逐年间季风的不稳定性和境内由于地形、山脉等因素造成的水热分布不均匀,导致中国干旱频繁发生[2]。IPCC在《第三次评估报告》中指出,20世纪末期以来,全球气温普遍升高,且北半球变化更为明显,气温升高导致了地表蒸散量加强,并且降水呈现出很强的地域性,从而使干旱趋势进一步加强[3]。中国西北地区地处欧亚内陆,同时受西风带、高原季风气候和东亚季风气候的共同影响,属北半球中纬度干旱半干旱区,对全球气候变化的响应十分敏感[4]。西北地区干旱、半干旱区面积占全国总面积的30%,生态环境脆弱、气候环境变化剧烈[5],若西北地区干旱灾害进一步增强,将会影响该区作物的分布、产量以及生长发育,影响该区农业生产,同时会进一步导致该区植被退化、加剧土地荒漠化进程、生态环境进一步恶化,进而影响西北地区的社会经济发展。基于全球变暖的背景条件下,深入研究西北地区干旱的演变特征,为及时制定改善生态环境状况的决策、调整区域农业种植制度和促进西北经济可持续发展都有着十分重要的意义[6]。

由于干旱复杂性和对社会影响的广泛性,干旱指标都是建立在特定的地域和时间范围内,有其相应的时空尺度[7]。新疆是典型的干旱地区,在气候变暖和人类活动的影响下,新疆干旱灾害损失呈扩大的趋势。不少学者依据统计资料[8]、CI指数[9]、S指数[10]、PDSI指数[11]及SPI[12]等干旱指数,对全疆或局部区域的干旱特征进行了研究。但这些干旱指数大都是利用降水量来表征干旱变化,没有考虑由温度上升而引起的干旱加剧现象,得出的结论也不尽相同。综合考虑多种干旱评价指数的优缺点,本文选择计算较为简单,时间尺度灵活的SPEI指数,利用新疆地区

1961~2020年气象资料对SPEI指数进行计算,并对SPEI指数计算过程中由气象站空间分布不均导致的精度下降问题进行改进。基于线性回归分析、Mann-Kendall突变检验、Morlet小波分析、等分析方法,对长时间序列SPEI指数变化趋势、突变点、周期变化进行分析,并对新疆地区干旱频率空间分布特征进行了作图与分析。本文旨在通过对长时间序列SPEI指数的分析对新疆地区干旱的时空变化特征以及发展趋势进行研究,为新疆地区旱灾的预警、防治与应急提供理论支持。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

新疆位于中国西北部,占地面积为 $1.65\times 10^6\text{km}^2$,占中国总面积的15.58%,是中国最大的省份,新疆地质构造较为复杂,区域内主要以山地和盆地为主,山地主要有昆仑山系、天山山脉和阿尔泰山等,北疆和南疆以天山山脉为分界线,地势特征主要以“三山夹两盆”为主,北疆地区地势高差较大,海拔位于-155-8611m,地势整体上呈现出东高西低的特征。

新疆远离海洋,其降水主要源西风环流带来的大西洋的水汽[13],具有显著的温带大陆性干旱气候特征,全年干旱,年降水量小,光热充沛,蒸散发量大,气温差异大。此外,新疆的气候也具有明显的局域性。由于气候条件和地形条件的双优越,使得山区的自然条件好于平原,致使整个新疆地区,北部好于南部、西部好于东部。此外山地的年均气温低于平原,平原内周围的年均气温又低于平原中心,由于北疆地区高海拔山区相对较多,所以年均气温低于南疆。另外南疆在高压系统的控制下,全境基本都处于干旱区,全

年的降雨量很少，年均降水量甚至不到 100mm，某些局部区域还有全年无雨的情况；北疆受到北冰洋气团和西风气流的交替作用，降水量相对偏多，但年平均降水量也只有 116.2mm，降雨时间分布相对均匀。

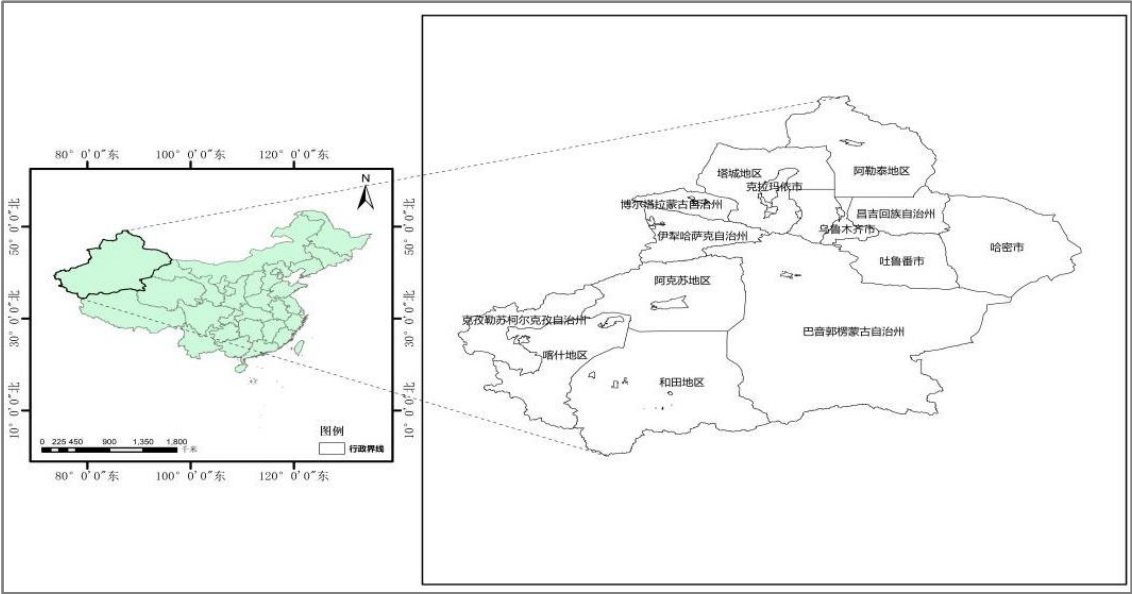


图 1 研究区位置

2.2 数据来源

根据本文研究的需求，收集了新疆 53 个气象站点 1961-2020 年的地面逐月气象数据，数据来源于中国气象科学数据共享服务网数据 (<http://data.cma.cn/>)。为了保证所用气象站点数据在研究期间的一致性，对缺

失时间短的数据采用线性插值方法进行插值，对缺失时间长的数据采用多年月平均值进行替换，从而减少空间插值过程和结果的误差。季节时间尺度以 3-5 月为春季，6-8 月为夏季，9-11 为秋季，12 月-次年 2 月为冬季，年时间尺度上按照 3 月至次年 2 月为一年。

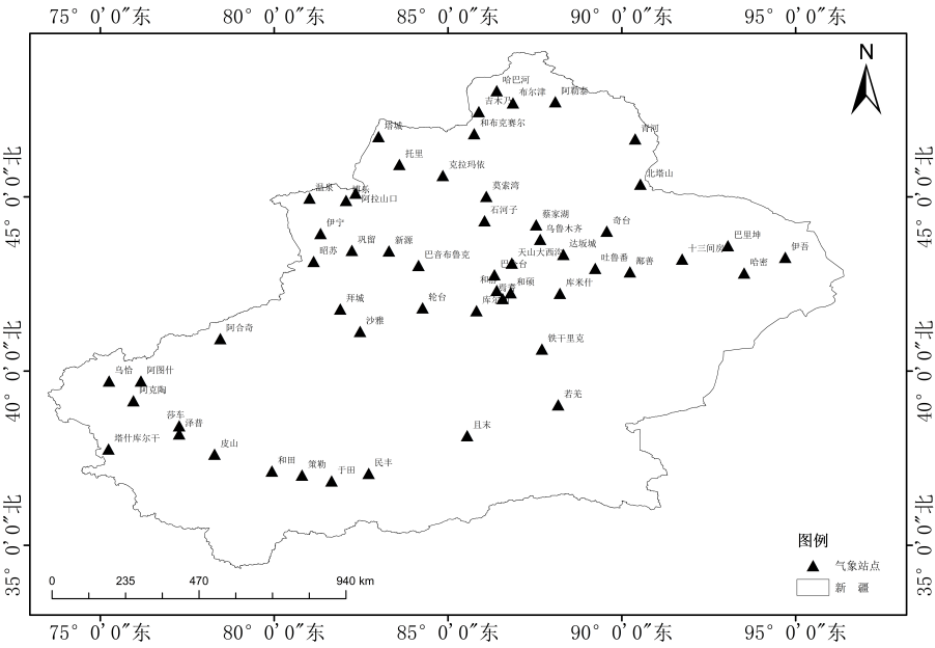


图 2 气象站点分布图

3 研究方法

3.1 标准化降水蒸散指数 (SPEI)

SEPI 值是反映某一时段的干旱状况偏离多年正常值的程度, SPEI 值小于 0, 则表示干旱, SPEI 值越小, 表明干旱程度越强。计算 SPEI 指数最关键的一步是计算蒸散量 PET, 计算 PET 方法有很多种, Thornthwaite 法[14]计算 PET 仅需要平均气温和站点纬度数据即可; Hargreaves 法[15]计算 PET 需要最高气温、最低气温、平均气温以及大气顶层太阳辐射数据; Penman-Monteith 公式法[16]是联合国农粮组织 (FAO) 所推荐的一种计算 PET 的方法, 计算的 PET 也更加精确。Penman-Monteith 公式法虽然精确, 但是所需要的气象指标也是最多的。因此, 本文综合考虑数据质量及计算方法的优缺点, 采用 Thornthwaite 法计算潜在蒸散量, 对降水蒸散差值序列用三参数 Log-Logistic 概率分布进行拟合。最后, 进行标准正态转换, 得到最终标准化 SPEI 值。本文在 R 语言环境中利用 SPEI 软件包[17]。

计算得到 53 个气象站点季节尺度和年尺度的 SPEI 值。

该指数的具体计算步骤如下:

使用 Thornthwaite 方法计算每月的 PET (mm)。

计算气候水平衡量 Di:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

建立 Di 累积序列, 引入 3 个参数 log-logistic 分布。累积概率函数为:

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

式中: 3 个参数 α , β , γ 计算公式为如下:

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{F(1+1/\beta)F(1-1/\beta)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \quad (4)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha F(1+1/\beta)F(1-1/\beta) \quad (5)$$

计算得到 SPEI 序列:

$$P = 1 - F(x) \quad (6)$$

当 $P \leq 0.5$ 时:

$$\omega = \sqrt{-2\ln(P)} \quad (7)$$

$$SPEI = \omega - \frac{C_0 + C_1\omega + C_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \quad (8)$$

上式中:

$C_0=2.51$; $C_1=0.80$; $C_2=0.01$

$d_1=1.43$; $d_2=0.18$; $d_3=0.001$

当 $P > 0.5$ 时, $P=1-P$,

$$SPEI = -(\omega - \frac{C_0 + C_1\omega + C_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3}) \quad (9)$$

根据国家气象干旱等级的划分标准[18] (表 1), 将 SPEI 值划分为以下五个等级。

表 1 SPEI 干旱等级划分标准

干旱等级	SPEI
无旱	(-0.5, +∞)
轻度干旱	(-1, -0.5]
中度干旱	(-1.5, -1]
重度干旱	(-2, -1.5]
极端干旱	(-∞, -2]

3.2 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 法是一种非参数的突变检验方法。该方法不受样本分布的限制, 少数异常值不受影响, 并且计算简便, 因此在气候研究上被广泛运用。本文采用 Mann-Kendall 法对加权后的年和季节尺度的 SPEI 值进行突变检验, 以此来检验研究区不同时间尺度下 SPEI 的变化趋势和确定突变开始的时间点。首先, 对于时间序列变量 $\{x_t\}$ ($t=1, 2, \dots, n$), 定义一个统计量 S , 其表示为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (10)$$

X_i , X_j 分别为 i , j 年相对应样本值:

$$\text{sgn}(X_i - X_j) = \begin{cases} 1 & X_i - X_j > 0 \\ 0 & X_i - X_j = 0 \\ -1 & X_i - X_j < 0 \end{cases} \quad (11)$$

得到正态分布变量 Z 计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

方差: $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。Z 值若为正表示上升趋势, 若为负表示下降趋势。

当 Mann-Kendall 检验法用于检测序列突变时, 需要重新构造统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (13)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & X_i > X_j \\ 0, & X_i \leq X_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (14)$$

定义统计量 UF_k , 其表示为:

$$UF_k = \frac{d_k - E[d_k]}{\sqrt{\text{var}[d_k]}}, k=1, 2, \dots, n \quad (15)$$

其中: $E[d_k] = k(k-1)/4$; $\text{var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72$

将时间序列反序排列, 重复上述计算过程, 得到 UB_k :

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

当 UF_k 超过置信线, 即表明时间序列变化趋势明显, 若 UF_k 和 UB_k 曲线出现交点, 并且焦点位于置信线之间, 则此点对应的时刻可能就是突变开始的时间。

3.3 干旱频率

干旱频率可以在一定程度上衡量这一地区发生干旱的几率, 干旱频率越大, 则代表该地区越容易发生干旱, 计算公式如下:

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (17)$$

式中: n 为 SPEI 值小于 0 的个数, N 为 SPEI 序列长度。

3.4 SPEI 时间序列干旱周期特征分析

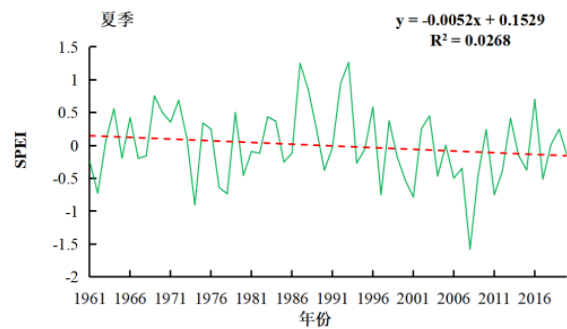
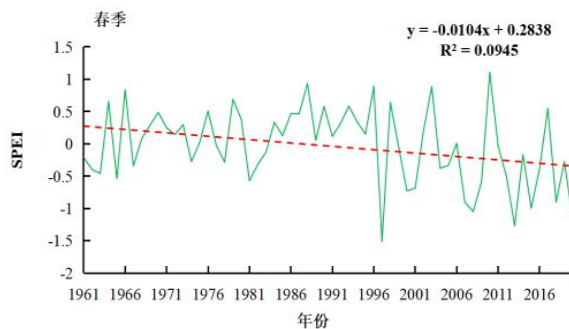
利用 MATLAB 软件对 SPEI 数据做 Morlet 小波分析, 对 1961~2020 年期间新疆地区季节和年尺度的加权 SPEI 指数序列进行转变, 得到季节和年尺度的小波实部等值线图和小波方差结果, 用于分析新疆地区季节和年尺度的干旱周期。

4 结果分析

4.1 SPEI 时间变化特征分析

4.1.1 SPEI 变化趋势

通过计算新疆地区季节和年时间尺度的 SPEI 指数, 利用线性回归绘制 SPEI 变化趋势图。如图 3、图 4 所示, 通过 SPEI 指数变化趋势图可以看出新疆地区年尺度干旱指数呈干旱化趋势, 下降速率约为 0.0046/a。季节尺度上春季、夏季、秋季都呈现干旱化趋势, 下降速率为 0.01/a、0.0052/a、0.0082/a, 秋季下降速率最为明显, 只有冬季呈现湿润化趋势, 上升速率为 0.0053/a。



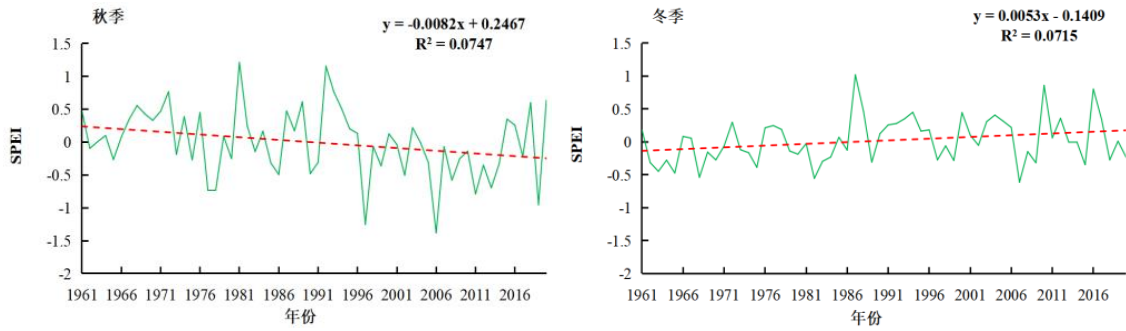


图3 季节尺度 SPEI 指数变化

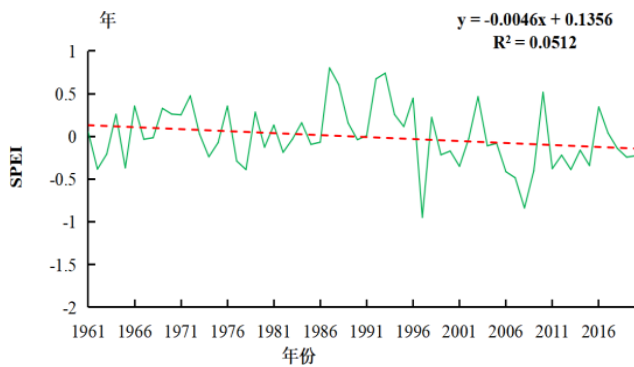


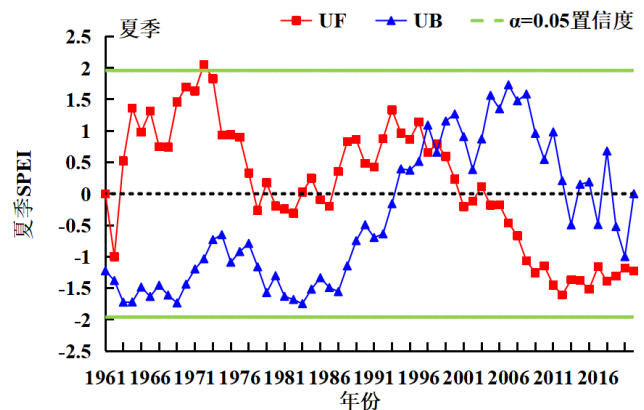
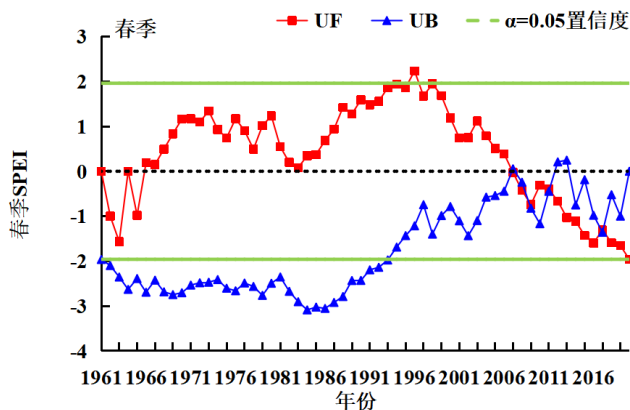
图4 年尺度 SPEI 指数变化

4.1.2 Mann-Kendall 突变检验

本研究采用 M-K 检验对新疆地区 1961~2020 年 SPEI 指数在不同时间尺度下的突变点进行检测。如图 5、图 6 所示,春季 SPEI 指数的 UF 曲线在 1966~2006 年均为正值,在这 40 年间只有 1996 年通过了 0.05 置信线,说明在 1966 年~1996 年间新疆地区春季向湿润趋势发展,在 2007~2015 年均为负值,说明这些时段的 SPEI 值处于下降趋势,但未通过 0.05 置信线;夏季 UF 曲线在 1963~1977 年为正值,在 1972 年通过了 0.05 的置信检验,说明在 1963~1972 年间新疆地区夏季向湿润化趋势发展,1973 年往后 UF 曲线随仍有起伏,但均未通过 0.05 置信线;

秋季 UF 曲线在 1961~1995 年干湿交替变化情况较多,从 1996 年开始向干旱化趋势发展,并在 2008 年通过 0.05 的置信检验;冬季 SPEI 指数 UF 曲线在 1971 年以前都处于干旱状况,从 1972~2015 年 UF 曲线呈上升趋势,并且在 1991 年一直到 2015 年均通过 0.05 的置信检验,说明新疆地区冬季湿润化趋势十分显著。在年时间尺度上,年 SPEI 指数序列的 UF 曲线在 1964~1978 年都处于湿润趋势,并且在 1972 年通过了 0.05 的置信检验。本文计算得到的新疆地区不同尺度 SPEI 指数 M-K 检验结果,秋季 SPEI 指数下降显著,冬季 SPEI 指数上升比较显著,其它时间尺度的趋势变化均不够明显,虽然春季和夏季 UF 曲线均有超过预设显著性水平的年份,但均没有连续多年超过现象,这种情况下,置信区间内 UF 曲线和 UB 曲线的交点不能视为突变点,而秋季和冬季 UF 曲线在和 UB 曲线出现交点之后又经过了突变检验,所以秋季 UF 和 UB 的交点可以视为突变点。

综上所述,在四季中只有冬季呈现湿润化趋势,从气温和降水情况来看,冬季气温达到最低,蒸散量同样达到最低,植物大多处于休眠状态消耗量极小,水分的补充远远大于消耗,所以冬季为全年湿润度最高的季节。新疆地区容易发生轻旱和中旱。



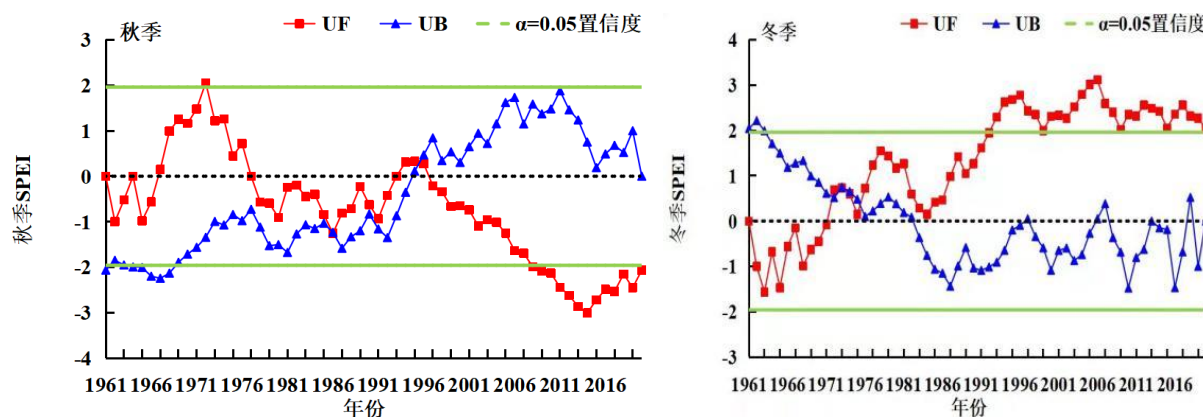


图5 季节尺度 SPEI 指数 M-K 检验结果图

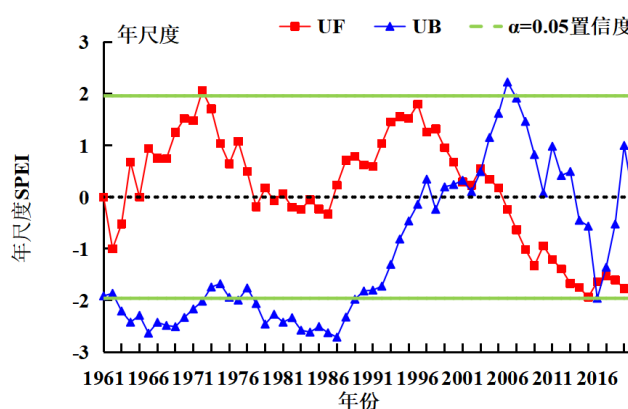
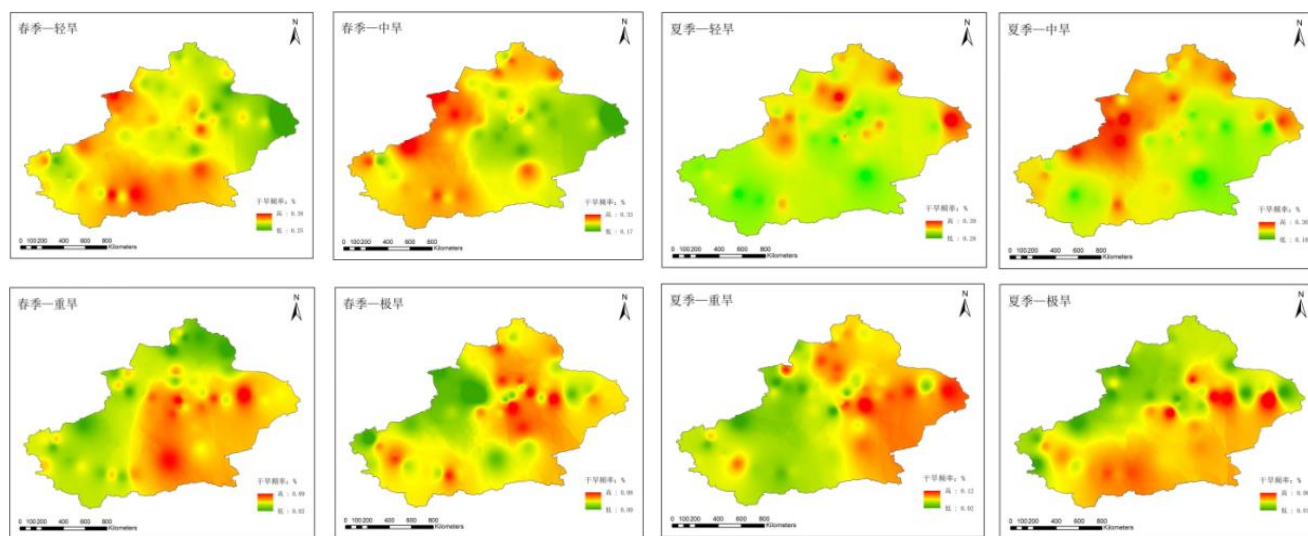


图6 年尺度 SPEI 指数 M-K 检验结果图

4.2 SPEI 空间变化特征分析

为了了解新疆各个地区的干旱频率分布状况，统计了每个气象站点发生不同等级干旱的频率，然后利用 ArcGIS10.7 进行插值，最终得到季节和年时间尺度下不同等级的干旱发生频率空间分布图。



(a) 春季

(b) 夏季

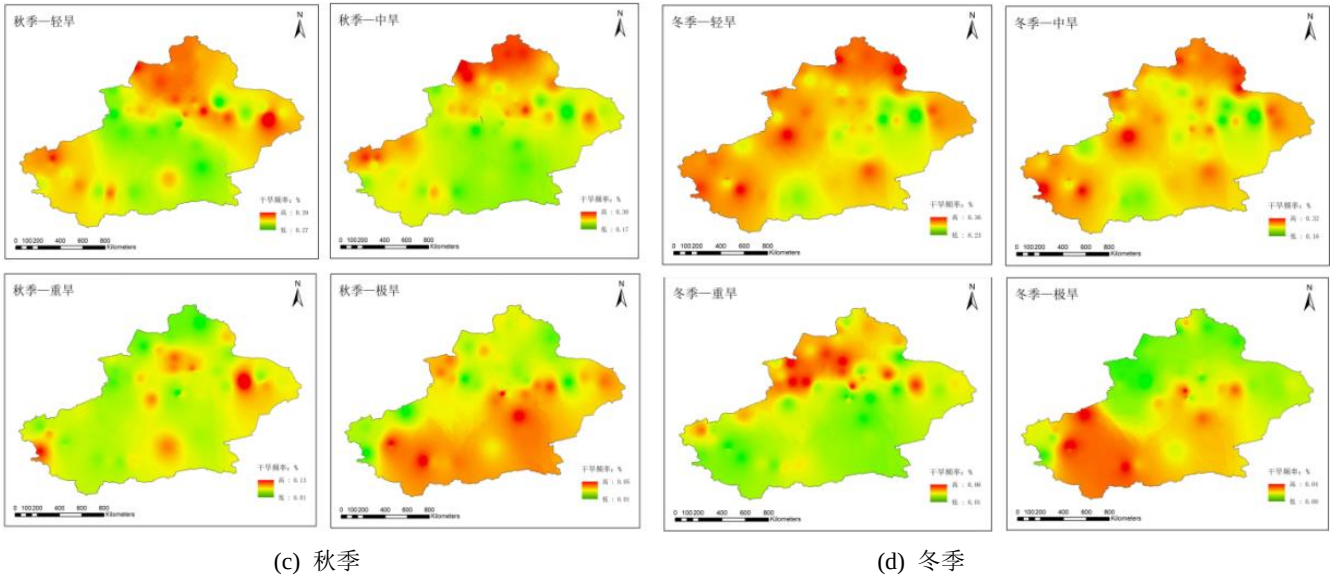


图7 季节尺度不同等级干旱发生频率空间分布图

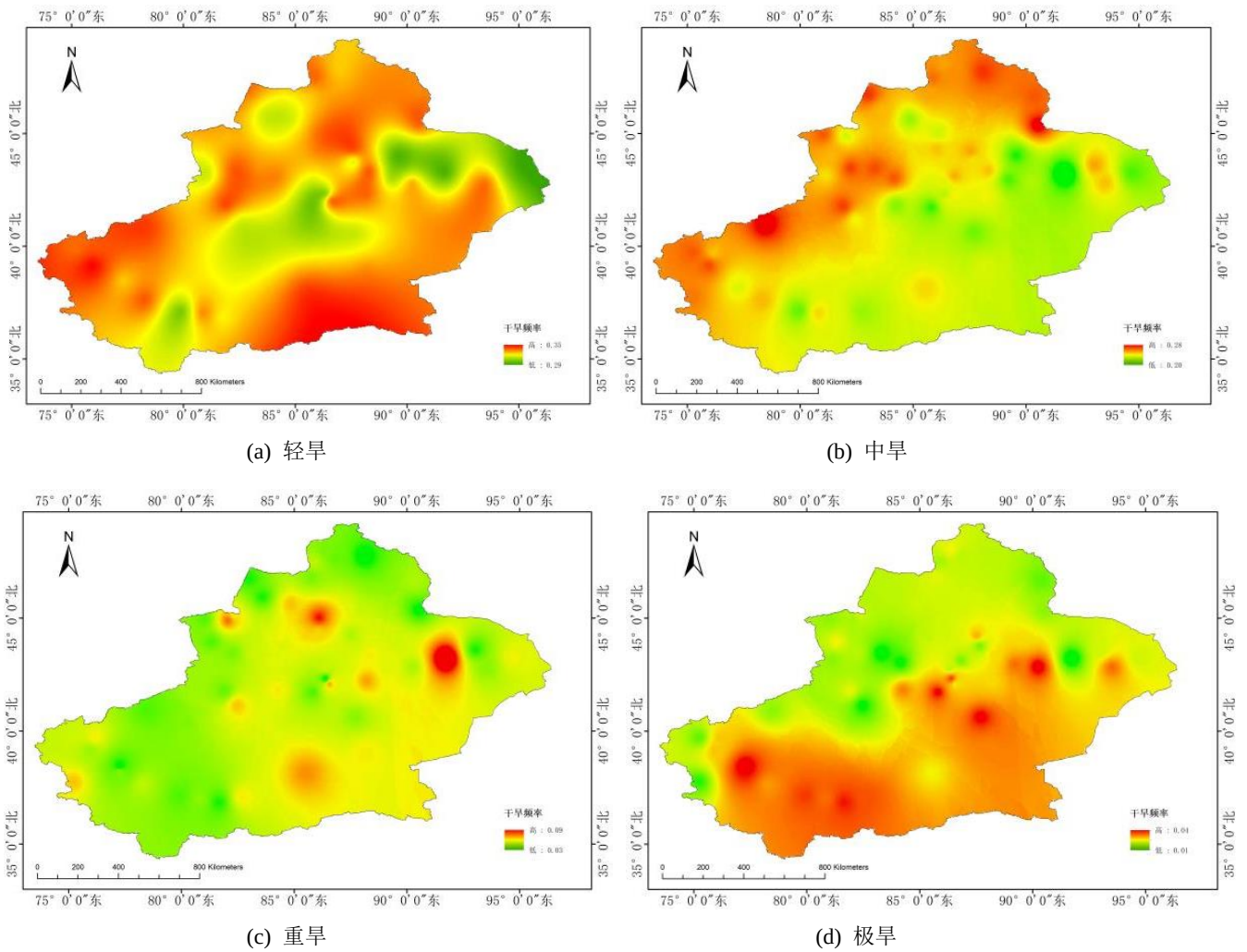


图8 年尺度不同等级干旱发生频率空间分布图

从季节尺度干旱发生频率空间分布图可以看出,新疆地区春季轻旱、中旱、重旱、极旱的平均频率分别为 32%、25%、5.5%、3%,春季的轻旱和中旱主要分布在塔里木盆地,重旱和极旱主要分布在整个新疆地区的东边;夏季轻旱、中旱、重旱、极旱的平均频率分别为 33.5%、24%、7%、3.5%,夏季轻旱地区较少,中旱主要分布在伊犁地区和阿勒泰地区,重旱主要分布在哈密和吐鲁番地区,极旱主要分布在整个南疆地区;秋季轻旱、中旱、重旱、极旱的平均频率分别为 33%、23.5%、7%、3%,秋季轻旱和中旱大多分布在北疆地区,重旱只在个别站点存在,极旱主要分布在南疆地区;冬季轻旱、中旱、重旱、极旱的平均频率分别为 29.5%、24%、3%、2%。冬季轻旱和中旱在全疆基本都存在,重旱主要分布在塔城地区,极旱主要分布在塔里木盆地及和田地区。综上所述,四个季节中只有冬季的不同等级干旱发生频率最低。

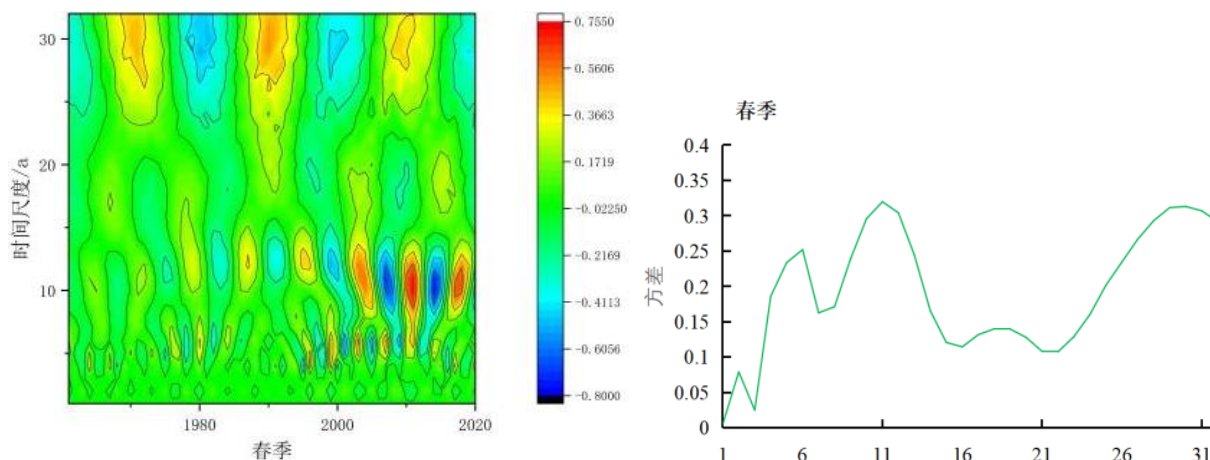
从新疆地区年尺度干旱等级空间分布情况可以看出,1961~2020 年新疆地区年时间尺度轻旱、中旱、重旱和极端干旱平均频率分别为 32%、24%、6%、2.5%。其中,轻旱发生频率在 29%~35%之间,除了伊吾、奇台、十三间房、库尔勒、和田站点附近外,全疆大部分地区都存在轻旱现象;中旱发生频率在 20%~28%之间,主要发生在全疆西边和北边地区,代表站点有阿合奇、拜城、北塔山以及阿勒泰;重旱发生频率在 3%~9%之间,主要发生在莫索湾、十三间房、且末以及阿拉山口等站点;极端干旱发生频率在 1%~4%之间,主要发生在全疆以南地区,代表站点有莎车、于田、铁干里克、鄯善等。干旱频率高的地区普遍日照时间比较长,昼夜的温差比较大,降水量一般不高,植被覆盖率低,水资源比较匮乏,受区域性影响比较大。其中,南疆地区最为严重,该地区温度高,蒸散发量大,植被较少,降水

量少,导致该地区极旱程度一直在处在较高频率,需要重点关注,合理的植树造林和修渠引水可以增加该地区植被覆盖程度,可以防止干旱程度升高。

综上所述,新疆地区正往干旱化发展,从干旱频率的空间分布情况可以看出,不同季节受降水量和气温的影响程度也有所不同,新疆地区的干旱受所在地区的区域性影响也比较大。可见,新疆地区干旱的空间变化特征是由多个季节发生干旱的综合结果。

4.3 SPEI 时间序列的周期特征分析

由图 9、图 10 可知,新疆地区春季 SPEI 指数存在 4~8、10~13、21~32a 的周期信号,其中主周期为 28、12、6a,在 28a 时间尺度上,目前正处在偏干期,在 12a 时间尺度上,目前也处在偏干的时期,可见春季 2015 年往后长周期都是持续偏干的趋势;夏季 SPEI 指数存在 3~7、7~9、11~20a 的周期信号,其中主周期为 6、8、15a,在 6a 时间尺度上,目前正处在偏干期,而在 15a 时间尺度上,目前正处在偏湿的末期,可见夏季短期有由湿转干的趋势,而 2015 年往后得长周期则是持续偏湿的趋势;秋季 SPEI 指数存在 3~5、5~7、7~13、13~21a 的周期信号,其中主周期为 16、10、6、4a,在 16a 时间尺度上,目前正处在偏湿期,在 10a 的时间尺度上,正处在由湿转干的时期,未来短周期内有偏干的趋势,而长周期内则是偏湿的趋势;冬季 SPEI 指数存在 12~16a 的周期信号,主周期为 13a;在 13a 时间尺度上,目前正处在偏干期的初期;年尺度 SPEI 指数存在 3~7、10~20a 的周期信号,其中主周期为 13、6a,目前 13a 时间尺度正处在偏干期,而 6a 时间尺度正处在偏湿期,可见年尺度上未来短周期内有由干转湿的趋势,而长周期则是持续偏干的趋势。



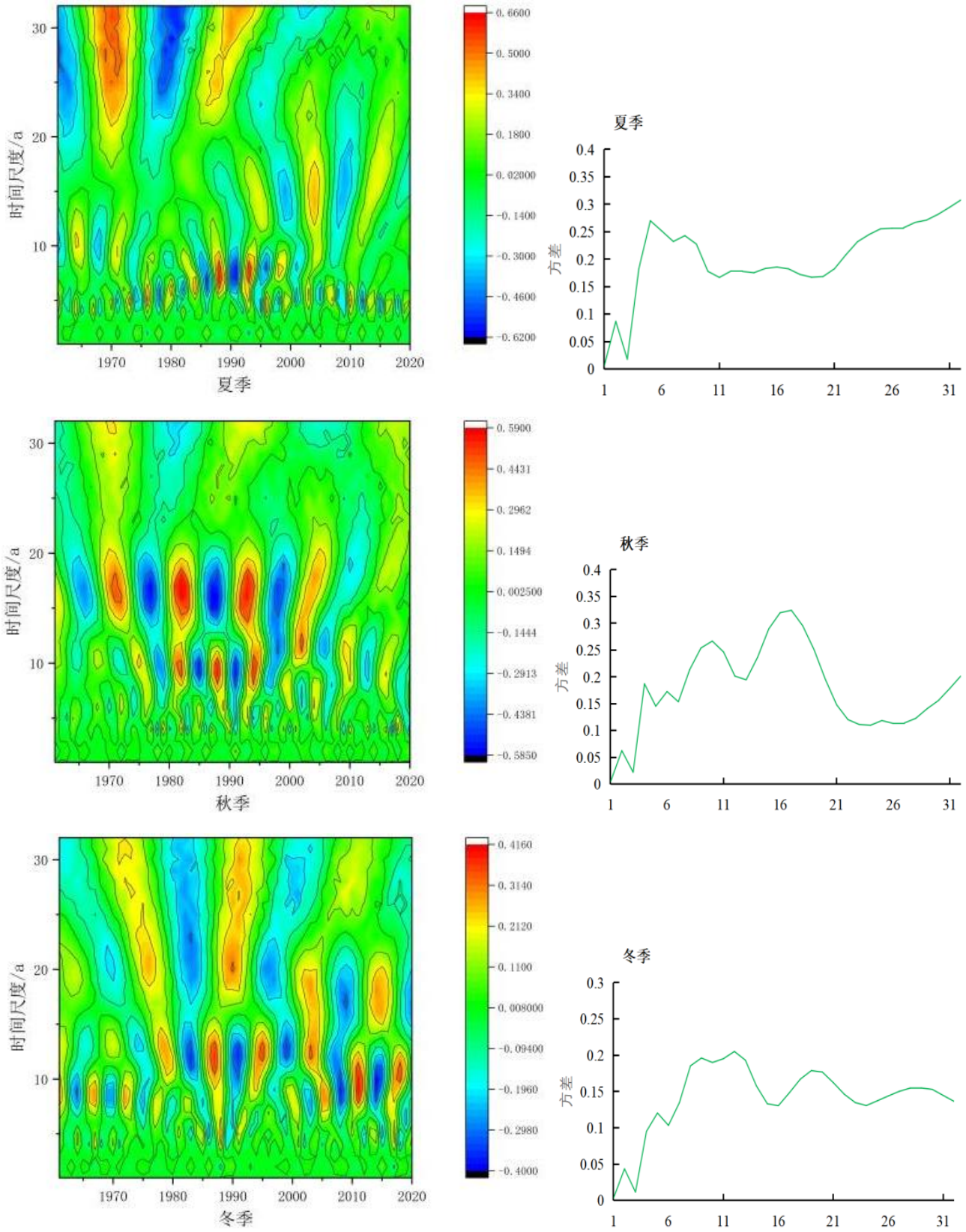


图9 季节尺度小波实部等值线和小波方差图

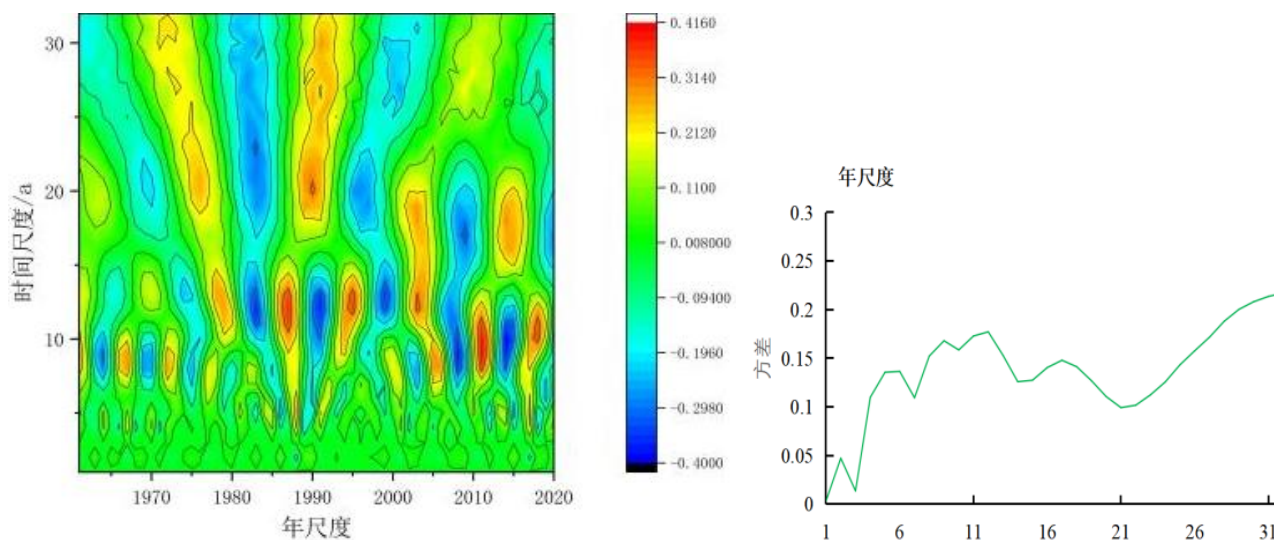


图 10 年尺度小波实部等值线和小波方差图

5 结论与展望

5.1 结论

本文基于新疆地区 53 个气象站点 1961~2020 年 SPEI 数据通过统计分析得到季节和年时间尺度的 SPEI 平均值,然后利用线性回归做出 SPEI 指数变化趋势图,经过 Mann-Kendall 检验,干旱频率分布分析了新疆地区近 59 年的干旱时空变化及特征,得出以下结论:

- (1) 整体上,季节尺度 SPEI 波动变化大,能够反映短期干旱特征,年尺度干旱变化较稳定,周期性明显,对长期干旱的持续时段有显著标识作用。季节和年时间尺度的 SPEI 值都反应了新疆地区近年来旱情有所加重。
- (2) 从 SPEI 值时间变化上看,近 59 年来新疆地区气候经历由湿润变为干旱的过程,季节尺度呈现春夏秋趋势变化相似,冬季则相反得特征;由 Mann-Kendall 检验的结果来看,秋季和冬季的变化趋势通过了显著性检验,其他时间尺度上虽有波动,但均未通过显著性检验。序列越是平稳,在 M-K 图像上越容易出现更多的交点,但这些交点并不能都盲目地视为序列的突变点。
- (3) 在空间变化上,干湿空间分布的地域分异规律性显著,其主要原因是受地理环境的影响,植被覆盖度低,降水量少的沙漠地区,是发生干旱的敏感地区;从干旱发生频率上来看,轻、

中、重和特旱在四季和年尺度中分布特征一致,均表现为轻旱>中旱>重旱>极旱。

5.2 展望

- (1) 今后的研究将从多时间尺度联合的角度,借助遥感和 GIS 手段进行动态监测和风险评价,进行区域综合干旱监测,将会很大程度地提高干旱监测的准确性和有效性。
- (2) 干旱发生和发展机理具有复杂性,其还受到风速、地形、植被高程、及环流等综合因素的影响,研究更多因素对干旱的形成及发展会有更准确的了解。

参考文献

- [1] 高宇,冯婧,张诚,等. 干旱评价指标体系研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(23): 11659-11663.
- [2] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展、[J]. 干旱气象, 2017, (06): 709-723.
- [3] Alien Perry. Book R review: Climate change 2001: synthesis report. Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Climate change 2001: thescientific basis; Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability; Climate change 2001: mitigation [J]. The Holocene, 2003, 13(05): 794.
- [4] 刘维成,张强,傅朝. 近 55 年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析 [J]. 高原气象, 2017, 36(06): 1533-1545.

- [5] 郭瑞霞, 管晓丹, 张艳婷. 中国荒漠化主要研究进展 [J]. 干旱气象, 2015, 33(03): 505-513.
- [6] 张勃, 张调风. 1961-2010 年黄土高原地区参考作物蒸散量对气候变化的响应及未来趋势预估 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(03): 733-740.
- [7] 卫炎豪, 古丽娜孜. 基于 SPEI 的北疆 1961—2020 年气象干旱变化特征 [J]. 湖北农业科学, 2024, (05): 37-44.
- [8] 姜逢清, 胡汝骥. 近 50 年来新疆气候变化与洪旱灾害扩大化 [J]. 中国沙漠, 2004, 24(01): 35-40.
- [9] 江远安, 赵逸舟, 陈颖, 等. 干旱指数 CI 的确定及其在新疆的应用 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(02): 18-20.
- [10] 潘淑坤, 张明军, 汪宝龙, 等. 近 51 年新疆 S 干旱指数变化特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(03): 32-39.
- [11] 刘卫国, 王曼, 丁俊祥, 等. 帕默尔干旱指数在天山北坡典型绿洲干旱特征分析中的适用性 [J]. 中国沙漠, 2013, 33(01): 249-257.
- [12] MCKEE T B, DOESKEN N J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales [M]. Pre-prints Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim, CA, 1993.
- [13] 李江风. 新疆气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [14] Vicente-Serrano M, S, S Beguería, et al. comment on characteristics and trends in various forms of the palmer drought severity index (PDSI) during 1900-2008 [J]. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. 2011, 116(D19): 112-119.
- [15] Samani Z. Discussion of “History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation” by George H. Hargreaves and Richard G. Allen [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(05): 447-448.
- [16] 张璐, 朱仲元, 王慧敏, 等. 基于 SPEI 的锡林河流域气象干旱风险分析 [J]. 水土保持研究, 2020, (2): 7.
- [17] Dimitris T, Vangelis H, Tsakiris G, Drin C: A software for drought analysis based on drought indices [J]. Earth Science Informatics, 2015, 8(03): 697-709.
- [18] 孙荣强. 干旱定义及其指标评述 [J]. 灾害学, 1994, 9(01): 17-21.