

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.009

基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析

冯凯¹, 李彦彬¹, 王飞¹, 粟晓玲^{2,3}, 吴海江^{2,3}

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以标准化降水蒸散指数(SPEI)为基础,基于改进的干旱三维识别方法,提取多个反映干旱空间动态演变过程的特征变量,对西北地区识别的气象干旱事件进行分类并分析其时空演变模式,揭示季节干旱发展规律。结果表明:改进的干旱三维识别方法能够准确提取出时空连续的干旱事件,提高了干旱时空动态演变监测的可视化程度;1960—2018年西北地区气象干旱事件以同向迁移规律为主,青海省北部和甘肃省中部为两个主干旱中心区域,且呈现出历时逐渐变短、大面积干旱事件占比逐渐降低的趋势;西北地区季节连旱事件多集中在青海省,春夏秋连旱事件由东南向西北方向迁移,夏秋冬连旱事件由西南向东北方向迁移,且两种季节连旱事件在发展后期的迁移速率相对较快。

关键词:干旱;三维识别;动态演变;时空分析;西北地区

中图分类号:TV213;P429 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0063-10

Analysis of drought events in Northwest China based on an improved three-dimensional identification method// FENG Kai¹, LI Yanbin¹, WANG Fei¹, SU Xiaoling^{2,3}, WU Haijiang^{2,3} (1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: On the basis of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), the traditional 3D drought identification method is improved to extract more characteristic variables that can reflect the spatial dynamic evolution process of drought. Then the spatio-temporal patterns of classified droughts are analyzed. The results show that the improved 3D drought identification method can accurately extract spatio-temporal continuous drought events, and improve the visualization of spatio-temporal dynamic evolution of drought. From 1960 to 2018, the meteorological drought events in Northwest China were mainly in the same direction of migration. The northern part of Qinghai Province and the central part of Gansu Province were the two main drought centers, and showed a trend of gradually shortening the duration and decreasing the proportion of large-scale drought events. The seasonal continuous drought events in Northwest China are mostly concentrated in Qinghai Province. The continuous drought events in spring, summer and autumn migrate from southeast to northwest, and the continuous drought events in summer, autumn and winter migrate from southwest to northeast. The migration rate of the two seasonal continuous drought events is relatively fast in the late development period.

Key words: drought; three-dimensional identification; dynamic evolution; spatio-temporal analyses; Northwest China

近年来,全球气候变化导致洪水、干旱等气象水文极端事件频繁发生,给防洪抗旱工作带来更加严

峻的挑战^[1-2]。干旱是指在长期降水量偏少的情况下,水分收支不平衡导致的极端自然灾害,对水资

基金项目:国家自然科学基金(51879222, 52179015, 52079111);河南省科技攻关项目(222102320043);河南省重大科技专项(201300311400);内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站开放研究基金(YSS202112);流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-202212)

作者简介:冯凯(1991—),男,讲师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: fengk0121@163.com

通信作者:粟晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: xiaolingsu@nwfau.edu.cn

源、生态环境和社会经济会造成严重影响^[3-5]。干旱是一种随时间变化的区域性现象,在时空尺度上具有显著的连续性和动态性特征^[6-7],全面掌握干旱的时空结构及其时空动态演变规律对提高干旱监测能力以及抗旱减灾工作具有重要意义。为了更加清晰地认识和描述干旱,近年来国内外学者致力于研究干旱的空间维度。Yevjevich^[8]是最早考虑干旱空间范围变量的研究者之一,他认为干旱在演变过程中具有面积扩张的特征。基于降水的时间序列,Yevjevich等^[9]利用 Thiessen 多边形法计算了美国两个地区的干旱面积,且建议使用网格信息来处理 and 表示数据,但最终没有实现。Bhalme等^[10]将站点数据插值成网格数据,并据此计算出干旱面积,依据干旱面积的最大平均值确定了干旱最严重的年份。上述研究是将研究区的所有干旱面积视为其空间范围,而 Andreadis等^[11]提出一种简单的聚类方法,基于网格数据识别干旱事件,认为每一场干旱事件在特定的时间和空间尺度上是连续的。之后,Lloyd-Hughes^[12]将聚类算法扩展到三维空间(经度、纬度和时间),实现了单场干旱事件结构的完整时空表征,并在欧洲对构建的方法进行了测试。Corzo-Perez等^[13]提出用聚类的质心来定义大尺度干旱的地理位置,为干旱的空间分析提供了重要参考。Xu等^[14]基于历时、面积、强度、严重程度和质心5个特征变量,采用三维聚类方法分析了干旱的时空变化特征。Herrera-Estrada等^[15]应用聚类方法和拉格朗日方法识别了1979—2009年世界各地的1420个干旱集群,通过计算干旱质心在连续时间上的位移来分析干旱的迁移特征。Diaz等^[16]提出一种建立干旱空间轨迹和路径的方法,加强了对干旱的动态监测。冯凯等^[17]从三维视角全面描述了干旱事件的时空动态演变过程及区域干旱发展规律。上述研究通过提取干旱中心、历时、烈度、面积等特征变量来分析干旱迁移路径与距离,有助于掌握干旱事件的空间运动轨迹^[18],但随着新数据的开发和新理论的提出,关于这方面的研究还需不断改进。

综上所述,当前干旱识别方法提取的空间特征变量有限,表征干旱事件时空动态演进过程的可视化能力不足。因此,本文对传统的干旱事件三维识别方法进行改进,以提取更多能够反映整场干旱事件空间动态过程的特征变量(干旱迁移方向、迁移旋转特征)。干旱迁移方向和迁移旋转特征能够展现干旱事件在空间范围经历的变化,以及干旱事件本身在圆周方向上的动态迁移特征,对揭示干旱事件在时间和空间维度上的连续动态演变规律具有重要意义。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

选取包括陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省以及内蒙古自治区西部在内的西北地区为研究区。研究区位于东经 $89^{\circ}25' \sim 111^{\circ}27'$ 、北纬 $31^{\circ}33' \sim 42^{\circ}48'$,总面积约为 186.81 万 km^2 ,约占国土面积的 19.46% ,地势西高东低,高程相差悬殊,范围为 $184 \sim 6672$ m。研究区气候干燥,大部分地区年均降水量低于 500 mm,年均潜在蒸散发大于 1000 mm,面临严峻的干旱风险。年降水量由东向西递减,潜在蒸散发呈由北向南、由东向西递减趋势。

1.2 数据处理

卫星遥感数据具有时间序列长、覆盖范围广、适用性强等优点,近年来广泛应用于地球科学领域研究^[19]。本文采用 CRU TS v. 4.03 数据集的月降水量 P 和潜在蒸散发 ET_p 数据(<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>)计算标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),时间序列为1960—2018年,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,研究区共包含2903个栅格。

为了验证 CRU 数据集在研究区应用的可靠性,从中国气象数据共享网(<http://www.nmic.cn/data/cdcindex/cid/>)获取研究区内70个气象站点1960—2018年气象要素实测数据,并根据站点地理坐标提取对应位置栅格的 CRU 数据时间序列,分别采用决定系数(R^2)和偏差百分比来评估遥感数据集的观测质量^[20], R^2 越趋近于1,偏差百分比越趋近于0,表示两序列一致性越好。

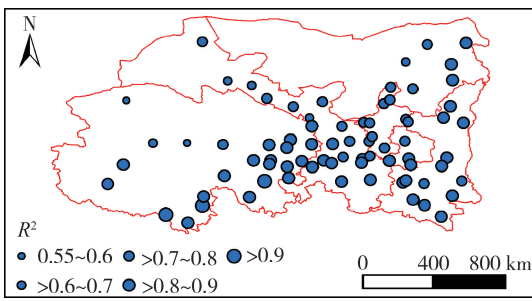
研究区气象站点实测降水数据与 CRU 数据相关关系如图1所示。由图1可知,大部分站点的实测降水数据与 CRU 数据之间的 R^2 为 $0.7 \sim 0.9$ (显著性水平 $p=0.01$),偏差百分比随着高程的增加表现出显著增大趋势($p=0.01$),其中偏差百分比绝对值介于 $30\% \sim 40\%$ 的站点数为7个,介于 $20\% \sim 30\%$ 的站点数为18个,其余站点均小于 20% ,表明实测降水数据与 CRU 降水数据之间具有较好的一致性,能够保证计算结果的可靠性。

2 研究方法

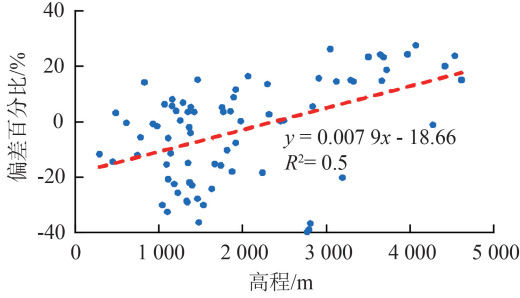
2.1 SPEI

选用 SPEI 定量评价研究区气象干旱状况,其原理是利用降水量与蒸散量之间的差异程度来代表区域干旱状况,主要计算步骤^[21]如下:

步骤1 建立逐月降水量与潜在蒸发量差值序列 D_i :



(a) 决定系数



(b) 偏差百分比

图1 研究区站点实测降水数据与 CRU 数据相关关系

Fig.1 Correlation between measured precipitation data and CRU data in study area

$$D_i = P_i - ET_{P_i} \quad (1)$$

式中: D_i 为*i*月降水量与潜在蒸散量的差值,mm; P_i 为*i*月降水量,mm; ET_{P_i} 为*i*月潜在蒸散量,mm。

步骤2 利用3参数 Log-logistic 概率分布函数拟合 D_i 序列并计算概率分布函数 $F(x)$:

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

式中: α 为尺度参数; β 为形状参数; γ 为位置参数。

步骤3 将 $F(x)$ 转化为标准正态分布,求得 SPEI 值。

2.2 改进的干旱事件三维识别方法

传统的干旱事件三维识别方法基于干旱指数栅格数据,通过干旱斑块空间识别和干旱斑块时程连接两步可提取多场时空连通的干旱指标连续体,并计算相应的干旱历时、面积、烈度、中心、迁移距离5个特征变量,具体计算方法可见参考文献[17]。本文对传统的三维识别方法进行改进,提取干旱迁移方向和迁移旋转特征2个能够反映整场干旱事件空间动态过程的特征变量,具体计算方法如下:

a. 干旱迁移方向。根据一场干旱事件开始和结束时刻的干旱中心相对于原点的位置来确定干旱开始和结束方位,由开始和结束方位来判断干旱事件的迁移方向。本文考虑东(E)、南(S)、西(W)、北(N)、中(C)5个方位,如图2所示,图中原点位置为研究区的质心, r_{min} 为研究区质心至边界的最小半径, r 为研究区质心至干旱中心的半径, θ 为干旱中

心与横轴正方向的夹角。干旱中心方位的判别准则如下:① $r > r_{min}$ 且 $0 < \theta < 45^\circ$ 或 $315^\circ \leq \theta < 360^\circ$,干旱中心方位为E;② $r > r_{min}$ 且 $225^\circ \leq \theta < 315^\circ$,干旱中心方位为S;③ $r > r_{min}$ 且 $135^\circ \leq \theta < 225^\circ$,干旱中心方位为W;④ $r > r_{min}$ 且 $45^\circ \leq \theta < 135^\circ$,干旱中心方位为N;⑤ $r < r_{min}$,干旱中心方位为C。如果某场干旱事件开始中心方位为E,结束方位为S,则本场干旱事件的迁移方向为由东向南,即E→S。

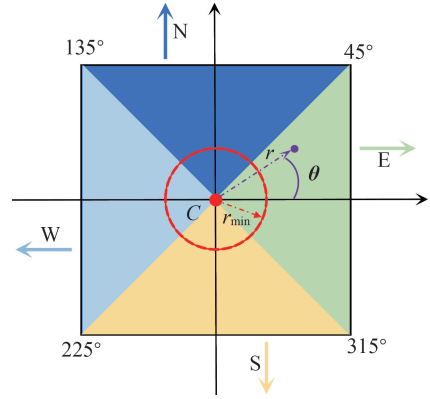


图2 干旱中心方位确定示意图

Fig.2 Schematic diagram of determination of drought center direction

b. 干旱迁移旋转特征。旋转是在跟踪空间目标时经常使用的变量,能够表征物体在空间范围经历的变化,本文用来描述干旱事件本身在圆周方向上的动态迁移特征^[22]。干旱迁移旋转基于以干旱中心坐标 x 和 y 为顶点坐标计算多边形的面积来实现,当干旱事件持续2月(即只有两个干旱中心)或干旱事件以水平或垂直方向迁移时,干旱迁移旋转特征不存在。具体计算方法^[23]为

$$\rho = (x_1 - x_n)(y_1 + y_n) + \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) \quad (3)$$

式中: n 为一场干旱事件逐月干旱中心个数; x 、 y 为干旱中心坐标; ρ 为旋转方向。当 $\rho > 0$ 时,干旱迁移整体上表现为顺时针旋转特征;当 $\rho < 0$ 时,干旱迁移整体上表现为逆时针旋转特征;当 $\rho = 0$ 时,干旱迁移整体上不发生旋转。

3 结果与分析

3.1 西北地区气象干旱事件识别结果

1960—2018年西北地区共识别出344场气象干旱事件,占研究时段总月数的48.6%。以最严重的第9场(1962年2—10月)气象干旱事件为例,图3和图4为该场干旱事件从开始到结束的时空动态演变全过程以及干旱中心迁移路径,图4中箭头曲线长度表示干旱的迁移速度,紫色圆圈表示逐月

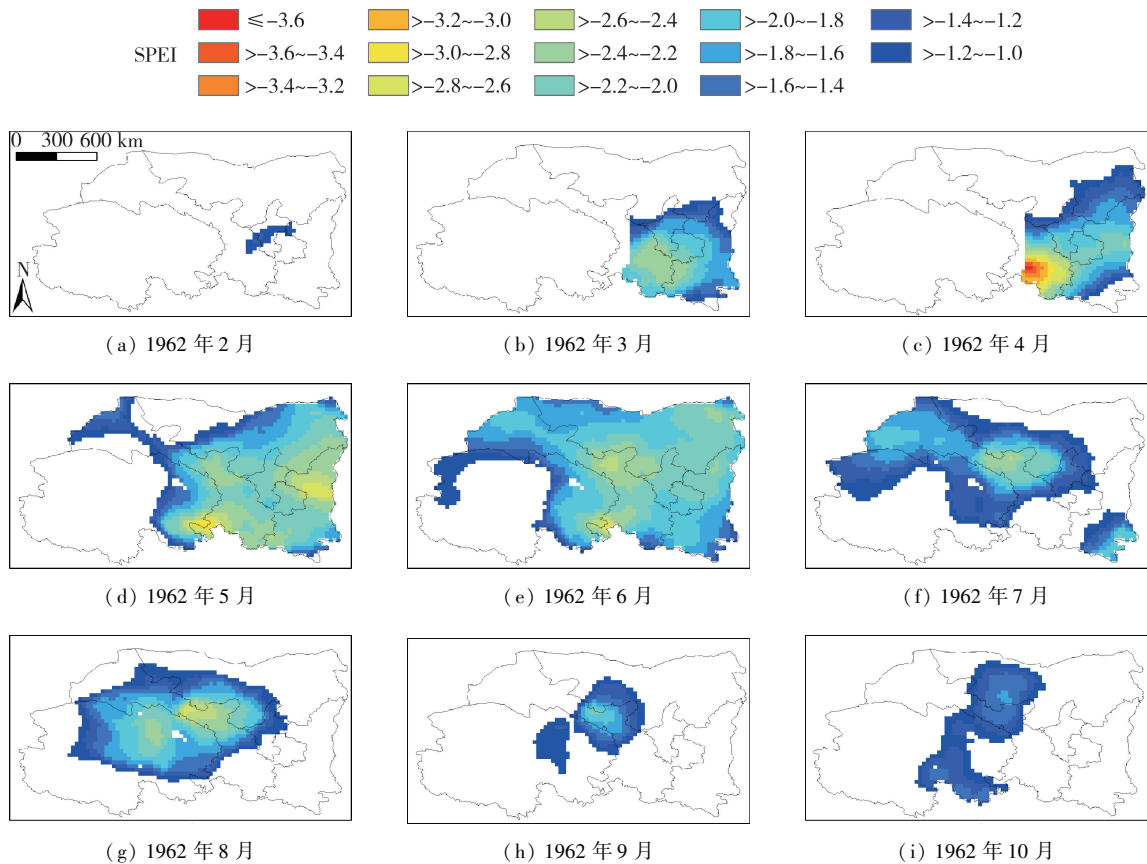


图3 第9场气象干旱事件时空动态演变过程

Fig. 3 Spatiotemporal dynamic evolution of No. 9 meteorological drought

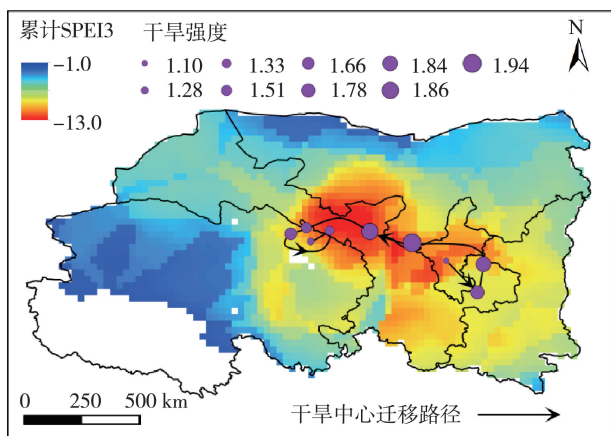


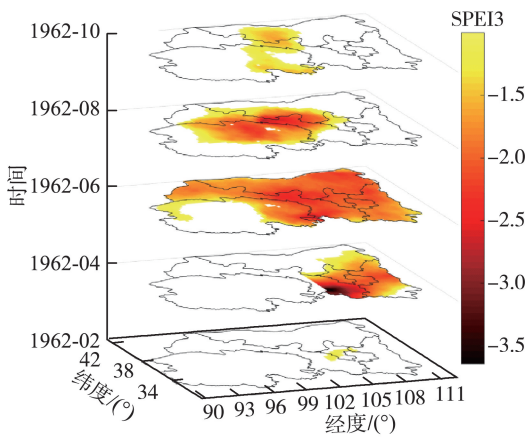
图4 第9场气象干旱中心迁移路径

Fig. 4 Migration path of drought center of No. 9 meteorological drought

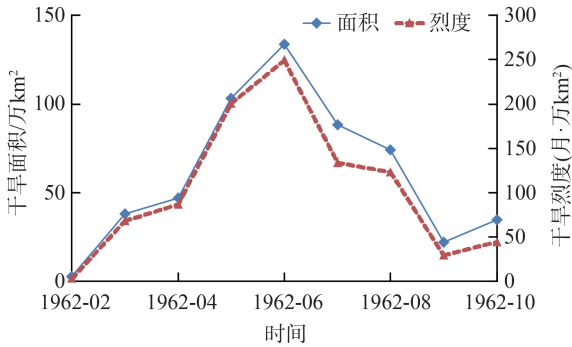
干旱中心。由图3可见,本场气象干旱于1962年2月起源于宁夏,干旱中心位于固原市北部,干旱面积约为3万 km^2 ,占研究区面积的1.65%,平均烈度为3月·万 km^2 ;随后干旱迅速向东南方向蔓延,面积扩大至38万 km^2 ,干旱中心向东南方向迁移175.05 km至甘肃西峰区西南部;4月干旱继续向北发展,干旱严重程度有所增加,烈度为86月·万 km^2 ,干旱中心位于甘肃西峰区北部;5月旱情持续增强,面积继续向西、向北扩大,干旱中心以264.5 km/月的速度向西

北方向迁移至内蒙古阿拉善盟东南部;6月旱情最为严重,面积约为134万 km^2 ,覆盖研究区77%以上区域,干旱烈度高达249月·万 km^2 ,干旱中心位于武威市中部;7—8月干旱严重程度出现衰减,面积占比42%~51%;9月干旱面积继续缩小至22万 km^2 ,干旱中心向东迁移132.86 km至甘肃张掖市东南部;10月干旱面积有所增加,但旱情较弱,干旱中心位于青海海北藏族自治州中部,并最终在此消亡。综上所述,本场干旱事件从1962年2—10月共历时9个月,旱情经历了发生、强化、峰值、衰减和消亡5个过程;干旱中心由东南向西北方向迁移,迁移过程整体上表现为逆时针旋转特征,迁移路径大致为固原市→西峰区→阿拉善盟→武威市→海北藏族自治州西北部→张掖市东南部→海北藏族自治州中部。

图5为第9场干旱事件时空变化三维透视图及特征变量的时间趋势。由图5可见,干旱面积和烈度的逐月变化趋势基本一致,1962年2—6月呈现上升趋势,并于6月达到最大值,分别为134万 km^2 和249月·万 km^2 ,7—10月呈现波动下降趋势。据《中国水旱灾害》^[24]记载,1962年青海、甘肃、宁夏、陕西发生了严重的干旱事件,其中陕西发生严重的春旱,青海省发生严重的春夏连旱,甘肃省中部和南部发生春旱并接初夏旱,旱情较重;《中国气象灾害大典—青海卷》^[25]



(a) 三维透视图



(b) 特征变量随时间变化趋势

图5 第9场气象干旱时空演化

Fig. 5 Spatio-temporal evolution of No. 9 meteorological drought

同样记载了1962年甘肃、青海等地区发生较为严重的干旱事件。翟禄新等^[26]的研究结果表明,1962年6月甘肃张掖、武威地区发生的干旱事件强度较大;任余龙等^[27]关于1961—2009年西北地区干旱

时空变化特征的研究表明,1962年4—5月青海中东部及甘肃祁连山区发生重旱,6月甘肃张掖附近发生特旱,7—9月青海北部及甘肃中部和南部发生重旱。上述旱灾记载和研究结论均与本文识别的干旱范围基本一致,表明基于改进的三维识别方法提取的干旱事件和时空特征变量是合理可靠的。

3.2 1960—2018年西北地区气象干旱事件的时空演变特征

1960—2018年识别出来的344场气象干旱事件中包含107场历时大于2月的干旱事件。根据干旱开始和结束时间所在的年份,可以分为年内干旱(即开始和结束时间在同一年份)和年际干旱(即开始和结束时间在不同年份)。此外,相关研究表明西北地区气象干旱在1980年发生了突变^[28],故本文分1960—1980年和1981—2018年两个时段进行讨论。

3.2.1 年内气象干旱事件

1960—2018年西北地区年内气象干旱事件统计如表1所示。1960—1980年和1981—2018年年内气象干旱事件数分别为29和47场,1960—1980年干旱事件的历时和烈度稍大于1981—2018年,表明1960—1980年的年内气象干旱事件旱情相对严重,1981—2018年旱情有所减弱,两个时段内年内气象干旱的迁移旋转特征均以逆时针旋转为主,同向迁移的干旱事件占比较高,1960—1980年为75.9%,1981—2018年高达80.9%,且以E→E的迁移方向为主,其次为S→S,这说明干旱中心随着干旱影响面积的扩大而迁移,然后在保持干旱中心位于特定地点时干旱面积缩小。

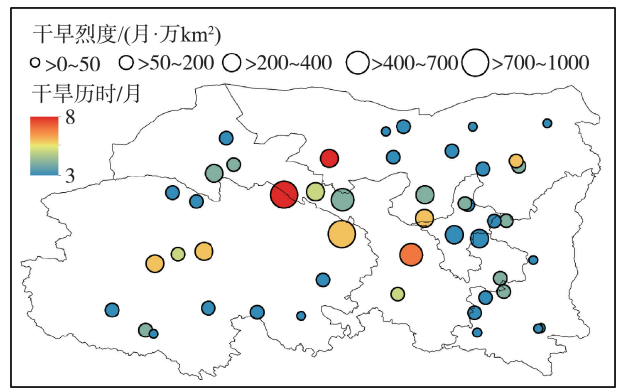
表1 1960—2018年西北地区年内气象干旱事件统计

Table 1 Statistics of within-year meteorological drought events from 1960 to 2018

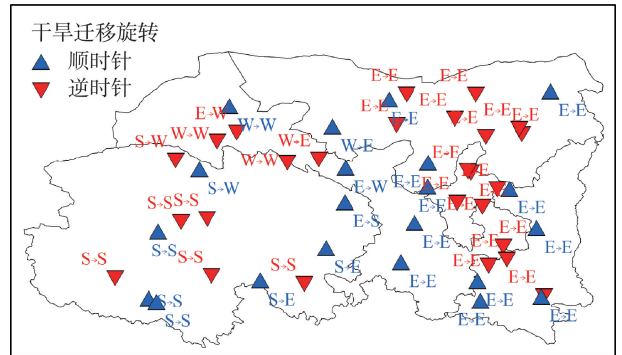
时段	干旱事件数	不同迁移方向干旱事件		顺时针旋转事件数	逆时针旋转事件数	干旱特征变量			
		迁移方向	事件数			历时/月	烈度/(月·万 km ²)	面积/km ²	迁移距离/km
1960—1980年	29	E→E*	13	11	18	9.00	938	154	1763.71
		S→S*	7						
		W→W*	2						
		W→S	2						
		S→E	2						
		E→S	1						
		S→W	1						
		E→C	1						
1981—2018年	47	E→E*	27	21	26	8.00	853	161	2115.55
		S→S*	8						
		W→W*	3						
		S→E	2						
		S→W	2						
		W→E	2						
		E→W	2						
		E→S	1						

注: *表示开始和结束位置相似的事件;干旱特征变量4个数据从上到下依次为最大值、最小值、平均值和标准差。下同。

图6和图7分别为西北地区1960—1980年和1981—2018年年内干旱历时-烈度和迁移方向-旋转特征的空间分布。由图6(a)可知,1960—1980年年内气象干旱事件在空间上大致呈西南-东北对角分布,长历时、强烈度的大规模气象干旱事件主要集中在青海省中北部以及蒙甘宁交汇处,表明这些地区为该时段西北地区两个重要的干旱中心,小规模气象干旱事件多集中在青海西南部以及内蒙古西部。由图6(b)可知,1960—1980年年内干旱事件迁移方向、旋转特征也具有明显的空间分布规律,分布于青海中南部的干旱事件迁移旋转特征主要表现为顺时针,内蒙古、青海北部以及甘肃、宁夏交汇处的干旱事件迁移过程呈逆时针旋转特征。研究区东部的干旱事件迁移方向全部表现为E→E,而西南部的干旱事件迁移方向比较多样化,以S→S和W→W的同向迁移为主。1981—2018年年内气象干旱特征空间分布规律与前一时期相比有明显差异。由图7(a)可知,1981—2018年年内干旱事件均匀分布在研究区,甘肃中部为该时期的主干旱中心区域,青海中部以及宁夏地区是两个次干旱中心区,而内蒙古中部、陕西西南部以及青海南部区域多集中一些小



(a) 历时-烈度



(b) 迁移方向-旋转特征

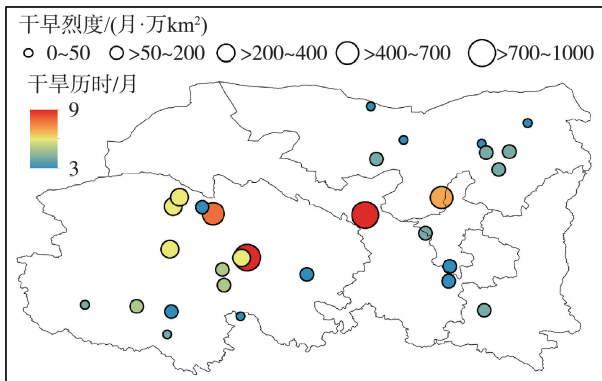
图7 1981—2018年西北地区年内气象干旱特征变量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of characteristic variables of within-year meteorological droughts in Northwest China from 1981 to 2018

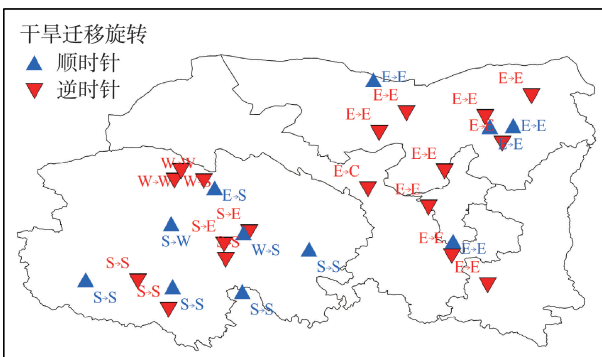
规模干旱事件。由图7(b)可知,整体迁移过程表现为顺时针旋转的年内干旱事件主要集中在研究区中部,表现为逆时针旋转的干旱事件主要分布在研究区东、西两侧。1981—2018年年内气象干旱迁移方向的空间分布规律类似于1960—1980年,但迁移方向的类别有所增加,研究区东部的气象干旱事件迁移方向全部表现为E→E,西部的气象干旱事件迁移方向仍以S→S和W→W的同向迁移为主。

3.2.2 年际气象干旱事件

表2为1960—2018年西北地区年际气象干旱特征变量统计结果,1960—1980年和1981—2018年分别发生了15场和16场年际干旱事件,两个时段的干旱历时、烈度、面积、迁移距离平均值相差较小,表明两个时段内发生的年际气象干旱严重程度较为接近。两时段内迁移过程表现为顺时针旋转特征的年际干旱场次分别10场和11场,均超过60%。1960—1980年年际干旱事件迁移方向为S→S的发生频次最高,其次为E→E;1981—2018年年际干旱事件发生频次最高的迁移方向为E→E,其次为W→W,表明1960—2018年研究区年际气象干旱事件主要表现为同向迁移规律。



(a) 历时-烈度



(b) 迁移方向-旋转特征

图6 1960—1980年西北地区年内气象干旱特征变量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of characteristic variables of within-year meteorological droughts in Northwest China from 1960 to 1980

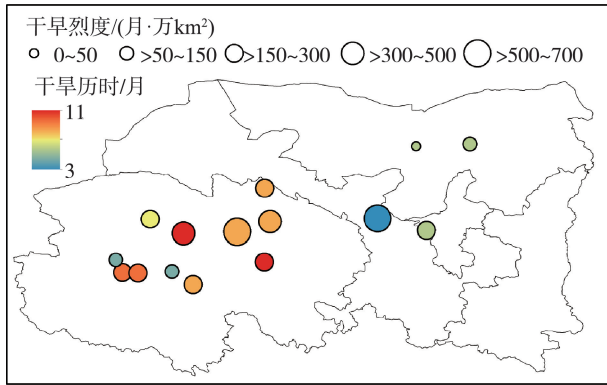
表 2 1960—2018 年西北地区年际气象干旱事件统计

Table 2 Statistics of over-year meteorological drought events from 1960 to 2018

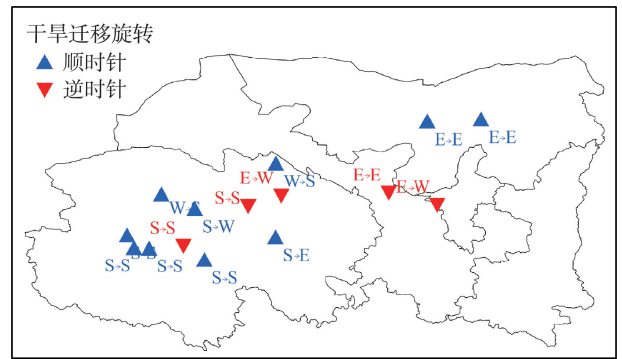
时段	干旱事件数	不同迁移方向干旱事件		顺时针旋转事件数	逆时针旋转事件数	干旱特征变量				
		迁移方向	事件数			历时/月	烈度/(月·万 km ²)	面积/km ²	迁移距离/km	
1960—1980 年	15	E→E*	3	10	5	11.00	681	151	2572.17	
		S→S*	6			3.00	53	31	376.21	
		E→W	2			6.00	277	83	1006.29	
		W→S	2			2.25	187	37	545.98	
		S→E	1							
		S→W	1							
1981—2018 年	16	E→E*	6	11	5	11.00	731	162	1901.33	
		S→S*	2			3.00	27	12	203.59	
		W→W*	4			5.94	347	89	1050.18	
		S→E	1			2.14	204	40	475.99	
		S→W	1							
		E→S	1							
E→C	1									

图 8 和图 9 分别为 1960—1980 年和 1981—2018 年年际气象干旱特征变量空间分布。1960—1980 年共发生了 15 场年际干旱事件,其中有 11 场(约 73.3%)年际干旱事件发生在青海省,2 场发生在甘肃,2 场发生在内蒙古,其中长历时、强烈度的气象干旱事件主要集中在青海中北部。1960—1980

年有 10 场年际干旱事件的迁移过程表现出顺时针旋转特征,其中 8 场集中在青海,2 场分布于内蒙古;5 场的迁移过程表现出逆时针旋转特征,其中 3 场分布在青海,2 场分布在甘肃中部。此外,1960—1980 年青海省年际干旱事件以 S→S 的迁移方向为主,青海以外的干旱事件以 E→E 的迁移方向为主。



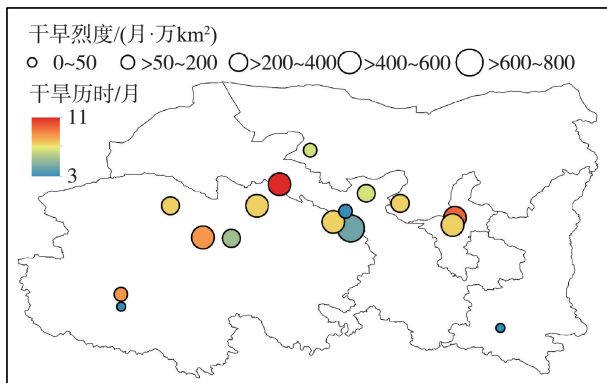
(a) 历时-烈度



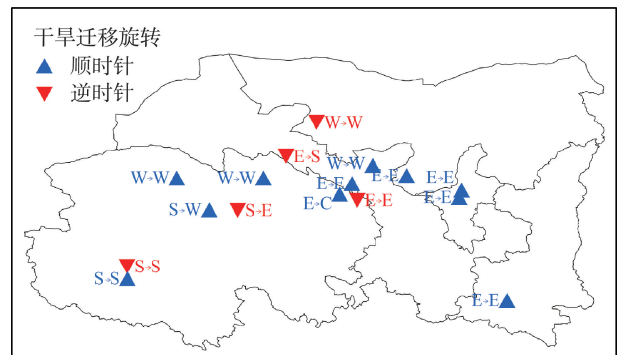
(b) 迁移方向-旋转特征

图 8 1960—1980 年西北地区年际气象干旱特征变量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of characteristic variables of over-year meteorological droughts in Northwest China from 1960 to 1980



(a) 历时-烈度



(b) 迁移方向-旋转特征

图 9 1981—2018 年西北地区年际气象干旱特征变量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of characteristic variables of over-year meteorological droughts in Northwest China from 1981 to 2018

1981—2018 年年际干旱事件主要以水平方向集中在研究区中部,其中青海东北部和宁夏为两个主要的干旱中心区域,规模较大的干旱事件多集中于此。1981—2018 年共发生了 16 场年际干旱事件,其中有 11 场的干旱迁移旋转特征表现为顺时针,青海 5 场,甘肃和宁夏各 2 场,陕西和内蒙古各 1 场;5 场表现为逆时针旋转特征的干旱事件分散于内蒙古、甘肃以及青海。集中于研究区东部的年际干旱事件迁移方向全部表现为同向迁移,包括 E→E 和 W→W,而西部的干旱迁移方向种类较多,以 S→S 和 W→W 的同向迁移为主。

3.3 西北地区季节气象干旱发展规律

较为严重的干旱事件一般历时较长,且容易发生季节连旱。据统计,研究区春夏秋 3 季连旱和夏秋冬 3 季连旱事件频发且发展规律较为明显。选取 1968 年、1978 年和 1990 年春夏秋 3 季连旱事件以及 1961 年、1965 年、1973 年和 1994 年的夏秋冬 3 季连旱事件,绘制各场连旱事件干旱中心逐月迁移轨迹,如图 10 所示,图中不同颜色的圆点代表不同年份的干旱中心。由图 10 可知,研究区的春夏秋连

旱和夏秋冬连旱事件大都集中在青海境内,春夏秋连旱事件一般起源于青海东部,然后逐渐向青海西部迁移并消失,干旱迁移路径大致呈东南-西北向的喇叭口状;而夏秋冬连旱事件一般起源于青海南部,然后逐渐向东北方向迁移并消亡,干旱迁移路径大致呈西南-东北方向的喇叭口状。两种季节连旱事件在发展后期的迁移速率均相对较快。研究区季节连旱事件呈现这种迁移规律主要是由气候条件的地域差异造成的,青海地势总体呈现西高东低、南北高中部低特征,全省降水量的总体分布趋势为由东南向西北逐渐减少,且降水量从春季到冬季也呈现由东南向西北地区逐渐减少趋势^[29-30],而平均气温总体分布为北高南低且表现出由南向北增加的趋势^[31]。

4 结 论

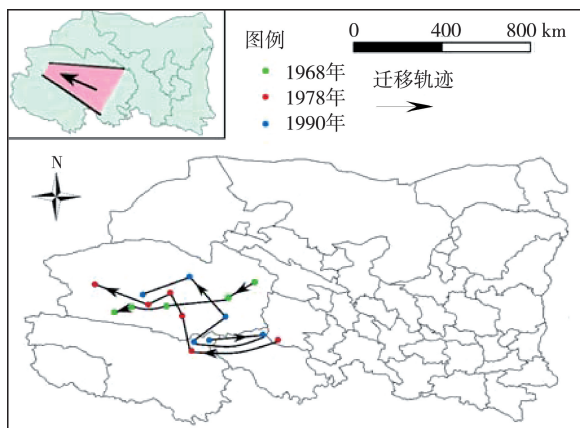
a. 基于改进的干旱三维识别方法,1960—2018 年西北地区共提取出 344 场时空连续的气象干旱事件,其中最严重的干旱事件历时 9 月,干旱面积约占研究区的 82.4%,迁移距离为 1 205.85 km,迁移方向为 E→C,迁移过程表现为逆时针旋转特征,旱情经历了发生、强化、峰值、衰减和消亡 5 个过程,发展过程与实际旱情记载基本保持一致。

b. 根据历时长短将识别结果分为年内干旱和年际干旱进行分类讨论,1960—2018 年西北地区气象干旱呈现出历时逐渐变短,大面积干旱占比逐渐降低的趋势,气象干旱事件以同向迁移规律为主,旱情严重的干旱事件集中在青海省北部和甘肃省中部。

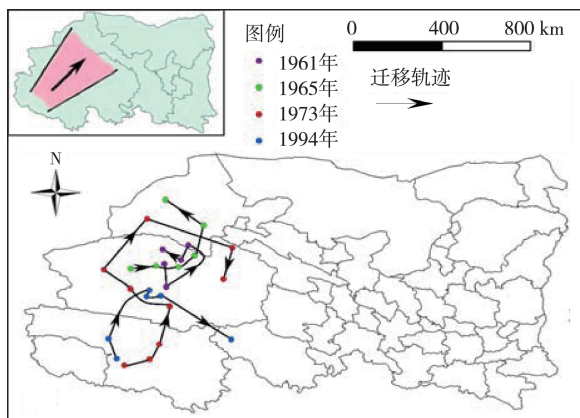
c. 西北地区季节气象干旱事件大都集中在青海,春夏秋连旱事件由东南向西北方向迁移,夏秋冬连旱事件由西南向东北方向迁移,且两种季节连旱事件在发展后期的迁移速率相对较快。这种现象与青海春季到冬季降水量由东南向西北地区逐渐减少,平均气温总体分布为北高南低且表现出由南向北增加的趋势有关。

参考文献:

- [1] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(1):39-45. (in Chinese))
- [2] 邹磊,夏军,张印,等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护,2021,37(1): 53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in



(a) 春夏秋连旱



(b) 夏秋冬连旱

图 10 西北地区季节连旱事件发展规律

Fig. 10 Development law of seasonal continuous drought events in Northwest china

- the Haihe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1):53-60. (in Chinese))
- [3] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6):515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(6):515-520. (in Chinese))
- [4] 卫林勇,江善虎,任立良,等. CRU 产品在中国大陆的干旱事件时间性效用评估[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2):112-120. (WEI Linyong, JIANG Shanhu, REN Lilaing, et al. Utility assessment of CRU products for temporality of drought events in mainland China [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2):112-120. (in Chinese))
- [5] 粟晓玲,姜田亮,牛纪苹. 生态干旱的概念及研究进展[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4):15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4):15-21. (in Chinese))
- [6] 方国华,涂玉虹,闻昕,等. 1961—2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(5):598-611. (FANG Guohua, TU Yuhong, WEN Xin, et al. Study on the development process and evolution characteristics of meteorological drought in the Huaihe River Basin from 1961 to 2015 [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(5):598-611. (in Chinese))
- [7] ZHU Y, LIU Y, WANGW, et al. Three-dimensional characterization of meteorological and hydrological droughts and their probabilistic links [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578:124016.
- [8] YEJVJEVICH V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts[M]. Fort Collins: Hydrology Paper, Colorado State University, 1967.
- [9] YEJVJEVICH V, KARPLUS A K. Area-time structure of the monthly precipitation process [M]. Fort Collins: Hydrology Paper, Colorado State University, 1973.
- [10] BHALME H N, MOOLEY D A. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation [J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(8):1197-1211.
- [11] ANDREADIS K M, CLARK E A, WOOD A W, et al. Twentieth-century drought in the conterminous United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*. 2005, 6(6), 985-1001.
- [12] LLOYD-HUGHES B A. Spatio-temporal structure-based approach to drought characterization [J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(3):406-418.
- [13] CORZO PEREZ G A, VAN HUIJJEVOORT M H J, VAN LANEN H A J, et al. On the spatio-temporal analysis of hydrological droughts from global hydrological models [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(9):2963-2978.
- [14] XU K, YANG D, YANGH, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: a climatic perspective [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526:253-264.
- [15] HERRERA-ESTRADA J E, SATOH Y, SHEFFIELDJ. Spatio-temporal dynamics of global drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44:2254-2263.
- [16] DIAZ V, CORZO PEREZ G, LANEN H V, et al. An approach to characterise spatio-temporal drought dynamics [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 137:103512.
- [17] 冯凯,粟晓玲. 基于三维视角的农业干旱对气象干旱的时空响应关系[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8):103-113. (FENG Kai, SU Xiaoling. Spatiotemporal response characteristics of agricultural drought to meteorological drought from a three-dimensional perspective [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8):103-113. (in Chinese))
- [18] ZHOU H, LIU Y, LIU Y. An approach to tracking meteorological drought migration [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(4):3266-3284.
- [19] GOUVEIA C M, TRIGO R M, BEGUERIA S, et al. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: an assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 151:15-27.
- [20] ZHANG G X, SU X L, AYANTOBO O O, et al. Remote-sensing precipitation and temperature evaluation using soil and water assessment tool with multiobjective calibration in the Shiyang River Basin, Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590:125416.
- [21] 曹永强,李可欣,任博,等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(5):28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(5):28-36. (in Chinese))
- [22] RAHMAN S M, YANG R, DI L. Clustering Indian Ocean tropical cyclone tracks by the standard deviational ellipse [J]. *Climate*, 2018, 6(2):39.
- [23] DIAZ V, CORZO PEREZ G A, VAN LANEN H A J, et al. Characterisation of the dynamics of past droughts [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718:134588.
- [24] 张海仑. 中国水旱灾害 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1997.
- [25] 温克刚,王梓. 中国气象灾害大典:青海卷 [M]. 北京:气象出版社, 2007.

- [26] 翟禄新,冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847-857. (ZHAI Luxin, FENG Qi. Dryness/wetness climate variation based on standardized precipitation index in Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 847-857. (in Chinese))
- [27] 任余龙,石彦军,王劲松,等. 1961—2009 年西北地区基于 SPI 指数的干旱时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 938-948. (REN Yulong, SHI Yanjun, WANG Jinsong, et al. Spatial and temporal variation characteristics of drought in Northwest China during 1961-2009 with Standardized Precipitation index[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 938-948. (in Chinese))
- [28] 任培贵,张勃,张调风,等. 基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 182-187. (REN Peigui, ZHANG Bo, ZHANG Tiaofeng, et al. Trend analysis of meteorological drought change in Northwest China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 182-187. (in Chinese))
- [29] 汪青春,秦宁生,张占峰,等. 青海高原近 40a 降水变化特征及其对生态环境的影响[J]. 中国沙漠, 2007(1): 153-158. (WANG Qingchun, QIN Ningsheng, ZHANG Zhanfeng, et al. Precipitation changes and its impact on eco-environment of Qinghai Plateau for the last 40 years[J]. Journal of Desert Research, 2007(1): 153-158. (in Chinese))
- [30] 徐慧,管蓓,薛艳,等. 青海省近 50 年降水集中性的时空变化特征研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 6-9. (XU Hui, GUAN Bei, XUE Yan, et al. Spatio-temporal variation of precipitation concentration in Qinghai in recent 50 years[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(3): 6-9. (in Chinese))
- [31] 郭素荣. 1960—2010 年青海省气候变化的时空特征分析[D]. 兰州:西北师范大学, 2012.
(收稿日期:2021-10-26 编辑:王芳)

(上接第 62 页)

- [18] GEVAERT A I,VELDKAMP T I E,WARD P J. The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(9): 4649-4665.
- [19] 徐丽萍,李鹏辉,李忠勤,等. 新疆山地冰川变化及影响研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 946-959. (XU Liping, LI Penghui, LI Zhongqin, et al. Advances in research on changes and effects of glaciers in Xinjiang mountains[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 946-959. (in Chinese))
- [20] DING YiBo, XU JiAtun, WANG Xiaowen, et al. Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 283: 111980.
- [21] 傅丽昕,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河源流区近 50 a 径流量与气候变化关系研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 204-209. (FU Lixin, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Relation between climate change and runoff volume in the headwaters of the Tarim River during the last 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(1): 204-209. (in Chinese))
- [22] XU Yang, ZHANG Xuan, WANG Xiao, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124147.
- [23] 陈忠升. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- [24] 周海鹰,沈明希,陈杰,等. 塔里木河流域 60 a 来天然径流变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 221-229. (ZHOU Haiying, SHEN Mingxi, CHEN Jie, et al. Trends of natural runoffs in the Tarim River Basin during the last 60 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 221-229. (in Chinese))
- [25] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 1-6. (in Chinese))
- [26] 刘晶,鲍振鑫,刘翠善,等. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(4): 31-41. (LIU Jing, BAO Zhenxin, LIU Cuishan, et al. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(4): 31-41. (in Chinese))
- [27] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 189-196. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3): 189-196. (in Chinese))
(收稿日期:2021-10-21 编辑:熊水斌)