

基于 ERA-5 数据集的陕西省气象-水文 干旱传播与响应研究

申曼华, 黄领梅, 余小波, 申 奥, 史荣情, 李 佳

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要:基于 ERA-5 陆地再分析月尺度降水和径流数据, 计算陕西省 1952—2022 年标准化降水指数 (SPI) 和标准化径流指数 (SRI), 结合 M-K 检验、游程理论和皮尔逊相关系数, 揭示气象-水文干旱的传播与响应特征。结果表明: (1) 陕西省气象干旱发生的次数高于水文干旱, 两者的发生频次在空间上有显著差异, 陕北多发气象干旱, 关中东部和陕南南部多发水文干旱。 (2) 陕西省 SPI_3 和 SRI_3 整体呈逐年下降趋势, SPI_3 和 SRI_3 的持续性在时空分布中有显著差异, SPI_3 的 Hurst 指数变化幅度较小, 持续性弱; SRI_3 变化幅度大, 且陕北持续性最强, 关中次之, 陕南最弱。 (3) 陕北的气象-水文干旱传播率最低, 关中地区次之, 陕南最高; 在发生气象轻旱和特旱时, 最大可能会紧接着发生同等级的水文干旱。 (4) 空间上, 陕西省气象-水文干旱响应时间以秦岭为分界线, 秦岭以南响应迅速, 以北响应迟钝; 时间上, 夏季最敏感, 响应最快, 春季响应最慢; 陕北北部高海拔地区的气象-水文相关性最弱, 全年小于 0.5。

关键词: 气象干旱; 水文干旱; 传播; 响应时间; 陕西省

中图分类号: S165 **文献标志码:** A

Meteorological-hydrological drought propagation and response in Shaanxi Province based on ERA-5 dataset

SHEN Manhua, HUANG Lingmei, YU Xiaobo, SHEN Ao, SHI Rongqing, LI Jia

(State Key Laboratory of Ecological Hydrology in Northwest Arid Regions, Xi'an University of
Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: Using ERA-5 land reanalysis monthly-scale precipitation and runoff data, we calculated the standardized precipitation index (SPI) and standardized runoff index (SRI) for Shaanxi Province from 1952 to 2022. To analyze the propagation and response characteristics of meteorological and hydrological droughts, we employed the Mann-Kendall (M-K) test, run theory, and Pearson's correlation coefficient. The results showed that: (1) Meteorological droughts occurred more frequently than hydrological droughts in Shaanxi Province, and there was a significant spatial difference in the frequency of the two, with more meteorological droughts occurring in northern Shaanxi, and more hydrological droughts occurring in central and eastern Guanzhong, and southern Shaanxi. (2) SPI_3 and SRI_3 in Shaanxi Province as a whole exhibited a decreasing trend over the years, with significant spatial and temporal differences in their persistence. The Hurst index of SPI_3 showed minimal changes and weak persistence, while SRI_3 demonstrated larger changes. Persistence was strongest in northern Shaanxi, moderate in Guanzhong, and weakest in southern Shaanxi. (3) The meteorological-hydrological drought propagation rate of northern Shaanxi was the lowest, Guanzhong was the second highest, and southern Shaanxi was the highest. In the occurrence of meteorological light drought and extreme drought, the maximum possibility of hydrological drought of the same level occurred immediately. (4) Spatially, the meteorological-hydrological drought response time in Shaanxi Province was divided by the Qinling Mountains, with a faster response in the south and a slower response in the north. Temporally, summer exhibited the highest sensitivity and the quickest response, while spring showed the slowest response. The meteorological-hydrological correlation was weakest in the high-elevation areas of northern

Shaanxi Province, remaining below 0.5 throughout the year.

Keywords: meteorological drought; hydrological drought; propagation; response time; Shaanxi Province

干旱是指长时间降水缺乏而导致的水资源供需不平衡、水分短缺等现象,主要分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱 4 种类型^[1]。IPCC 最新报告表明,未来气候将继续变暖,干旱的发生频率、影响面积和持续时间会进一步加剧^[2],更加确定人类活动会影响全球和区域尺度上的干旱变化^[3]。全球干旱造成的经济损失占自然灾害损失的 35% 以上^[4]。由 2022 年《中国水旱灾害防御公报》可知,全国 24 省发生干旱灾害,经济作物损失 149.44 亿元;其中陕西省农作物因旱受灾面积 28.096 万 km²,占比 4.5%,绝收面积 4.406 万 km²,占比 7.2%。干旱不仅对农业生产带来严重影响,还会造成生态环境恶化,引发其他自然灾害。因而,研究干旱变化特征对预防旱灾、减轻旱灾损失具有重要意义。

水分缺失信号在不同类型干旱之间的传递被定义为干旱的传递或传播,如由气象干旱演变为农业干旱和水文干旱的过程^[5-6]。许怡然等^[7]以标准化降水量(*SPI*)和径流干旱指数(*SDI*)两个干旱指标表征气象、水文干旱,采用游程理论、滑动 *t*-检验等方法研究了潮白河流域气象-水文干旱特征,并探求水文干旱和气象干旱的响应关系;Wang 等^[8]利用 ERA-5 陆地再分析资料,以中国汉江流域为研究对象,分析了跨流域调水前后干旱的传播特征,证实了气象干旱向水文干旱的非线性传播。陕西省陕北、关中地区属于干旱、半干旱区,降水南多北少,年降水量变化率大,是中国北方典型缺水和干旱频发地区^[9]。李斌等^[10]基于陕西省 34 个气象站点 1971—2013 年逐日降水资料,采用 *SPI* 分析陕西省干旱时空变化特征发现,研究区内干旱范围整体上有扩大趋势。刘永佳等^[11]以无定江、窟野江和沁河流域为研究区域,采用 *SPI* 和标准化径流指数(*SRI*)研究不同季节气象干旱向水文干旱的传播与响应机制发现,气象和水文干旱趋于加重,且水文干旱对气象干旱的响应具有滞后性。目前有关气象-水文干旱传播与响应的研究在国内外广泛开展,但针对陕西省有关干旱的研究主要集中在气象干旱,只有少数流域将两者结合起来,探究气象-水文干旱时空演变特征。

基于此,本文利用 ERA-5 陆地再分析月尺度降水和径流数据,借助气象干旱指数 *SPI* 和水文干旱指数 *SRI*,计算陕西省 1952—2022 年气象与水文干旱发生频次和变化趋势,探究气象-水文干旱传

播概率和响应时间,揭示陕西省气象-水文干旱时空演变特征,以期为区域水资源可持续利用提供理论支撑。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

陕西省(31°42′~39°35′N,105°29′~111°15′E)地处中国东南湿润地区到西北干旱地区的过渡带,按自然条件和社会经济特征可分为陕北黄土高原、关中渭河盆地、陕南秦巴山区三大地理单元(图 1b)。陕北包括榆林市和延安市;关中包括西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市和渭南市;陕南包括汉中市、安康市、商洛市(图 1a)。2022 年,陕西省生产总值 11 486.51 亿元,按可比价格计算,比上年增长 4.4%;粮食种植面积 25.738 万 hm²,粮食产量 140.41 万 t,拥有丰富的自然资源和多样的地理特征,在中国经济发展和生态环境保护中占据重要地位。

1.2 研究数据

降水和径流数据来自欧洲中期天气预报中心(<https://cds.climate.copernicus.eu>)提供的 ERA-5 陆地再分析月尺度数据集,径流为总径流,包含地面径流和地下径流。时间跨度为 1952—2022 年,空间分辨率为 0.1°×0.1°,覆盖整个流域约 5 312 个网格。该数据集是以前 ERA-5 数据集的增强版,可确保在各种土地应用中更准确^[12]。

2 研究方法

2.1 干旱指标

采用标准化降水指数(*SPI*)表示气象干旱,标准化径流指数(*SRI*)表示水文干旱,*SPI* 和 *SRI* 分别采用气象、水文参数,较客观地描述干旱的强度、持续时间和发生频率等信息,在干旱传播研究中得到了广泛的应用^[7]。拟合和归一化月降水序列和径流序列,计算 *SPI* 和 *SRI*,具体的计算方法见参考文献^[5]。按照游程理论提取干旱事件,方法详见文献^[13]。干旱等级划分见表 1。

表 1 干旱等级划分

Table 1 Drought classification

等级 Classification	类型 Type	<i>SPI/SRI</i>
1	轻旱 Light drought	-1.0< <i>SPI/SRI</i> ≤-0.5
2	中旱 Moderate drought	-1.5< <i>SPI/SRI</i> ≤-1.0
3	重旱 Severe drought	-2.0< <i>SPI/SRI</i> ≤-1.5
4	特旱 Extreme drought	<i>SPI/SRI</i> ≤-2.0

2.2 干旱指标的变化趋势

本文将 Mann-Kendall 检验与 Sen's 斜率两者结合用于分析干旱指标变化趋势的斜率及显著性,其中显著是指通过 $P < 0.05$ 的显著性检验。Hurst 指数是一种基于重标极差的分析方法,可以定量描述时间序列信息的长期依赖性,被广泛运用在水文、气象等多个领域,利用 Hurst 指数分析 SPI 和 SRI 时间序列持续性的方法见参考文献^[14]。

2.3 气象-水文干旱传播率

气象-水文干旱传播率是指发生气象干旱时水文干旱发生的概率。其值越大,表示发生气象干旱时水文干旱发生的可能性越大。

$$F = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中, F 为气象-水文干旱传播率(%); n 为研究期间发生气象干旱的次数; N 为研究期间发生水文干旱的次数。

2.4 响应时间和相关性

水文干旱对气象干旱的响应存在滞后现象^[15]。干旱指数符合正态分布,计算 1~12 个月时间尺度下的 SPI_{1-12} 与一个月尺度下的 SRI_1 的皮尔逊相关系数(PCC),以最大相关系数对应的时间尺度来确定滞后的时长,具体时间尺度为 0~11。例如与 2 月份 SRI 相关性最高的 SPI 若为 2 月份的一个月尺度的 SPI,则两者的滞后时间为 0^[16]。对于同一季节的 3 个月,采取平均传播时间的方法得到该季节的干旱传播时间^[11]。

3 结果与分析

3.1 气象干旱和水文干旱的次数与等级

图 2 是陕西省气象干旱和水文干旱发生次数空间分布,图 3 是陕西省各等级气象干旱和水文干旱发生次数空间分布。按照游程理论提干旱事件,统计 1952—2022 年各等级气象干旱和水文干旱的发生次数。

3.1.1 气象干旱的次数与等级 陕西省气象干旱的发生频次表现出明显的空间差异。陕北是气象干旱发生频次最高的地区,且大部分地区每年旱灾频次超过 120 次,关中次之,陕南干旱频次最低,普遍在 110 次左右;按行政区划分,延安市、渭南市、榆林市和西安市的干旱频次较高,平均每年发生 1.7 次(图 2a)。轻旱发生频次在陕北和关中东北部最高,平均为 120 次;关中西部和陕南西北部频次较低,少于 110 次。中早在关中发生频次最高,其次是陕南中部的汉中市。重旱主要集中在陕北北部和

西部、关中北部,超过 25 次。特旱主要集中在陕北中部,发生频次为 20 次左右(图 3a~d)。

3.1.2 水文干旱的次数与等级 陕西省水文干旱的发生频次具有明显的离散性和区域性。陕南南部和关中中东部是水文干旱高发区,局部地区发生频次超过 90 次;关中北部、陕北中部和西部是水文干旱低发区,多数小于 40 次(图 2b)。轻旱发生频次在陕南南部、关中南部和中东部最高,平均每年发生一次。中旱发生频次在关中中东部的渭南地区最高,超过 25 次,其次是陕南,且分布相对均匀,陕北地区最低。重旱和特旱的频次空间分布相似,最高均发生在关中中东部的渭南地区(图 3e~h)。薛瑞华^[17]研究也发现渭南市干旱较为严重,从轻旱开始干旱程度加重,特旱因子贡献度最大,渭南市处于干旱高风险区,与本研究图 2、3 所示相符。

3.1.3 次数与等级的结果分析 陕西省气象干旱发生的次数高于水文干旱,且两者的发生频次在空间上有显著差异,存在这一差异的原因在于陕北地处黄土覆盖区,地势西高东低,降水稀少,蒸发强烈,季节变化大,该地区的气候条件使其易受气象干旱影响。关中以渭河为干流,地势较低,中部地区较为平坦,是工农业生产和经济发展的重要地区;然而经济快速发展和工农业生产用水大量增加,导致地表和地下水资源的过度开发,该地区水文干旱的发生频次增加。陕南以秦岭和大巴山系为主,水热条件相对较好,植被种类丰富,水资源相对较为充足,是南水北调中线工程的重要水源地;受人类活动和地形的影响,陕南南部高海拔地区的径流量减少,局部地区水文干旱加剧。

3.2 气象干旱和水文干旱的变化趋势及其持续性

基于月降水和月径流数据分别计算季尺度 SPI_3 和 SRI_3 ,其中春季、夏季、秋季和冬季分别对应 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12 月到次年 2 月。图 4、5 分别是陕西省 1952—2022 年季尺度 SPI_3 和 SRI_3 变化趋势及持续性的分布图,图 4 中 SPI_3 和 SRI_3 值升高表示 SPI_3 和 SRI_3 整体逐年增大,干旱减缓,值降低表示 SPI_3 和 SRI_3 整体逐年减小,干旱加重。

3.2.1 气象干旱的变化趋势及其持续性 陕西省不同季节的气象干旱变化趋势不同。春季, SPI_3 值显著降低,气象干旱呈显著加重趋势;夏季,陕北北部干旱为不显著缓解,陕南南部和西部不显著加重,其他地区为显著加重;秋季,全省 SPI_3 值降低,干旱加重,其中陕北北部和中部、陕南东部显著加重;冬季,关中西部的宝鸡和陕南西部的安康市旱情有所缓解, SPI_3 值呈不显著升高趋势(图 4a~d)。陕

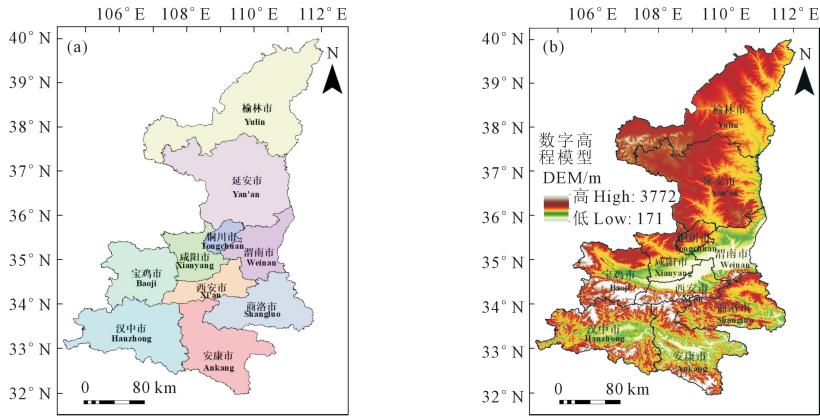


图 1 陕西省行政分区和数字高程分布

Fig.1 Administrative divisions and digital elevation distribution of Shaanxi Province

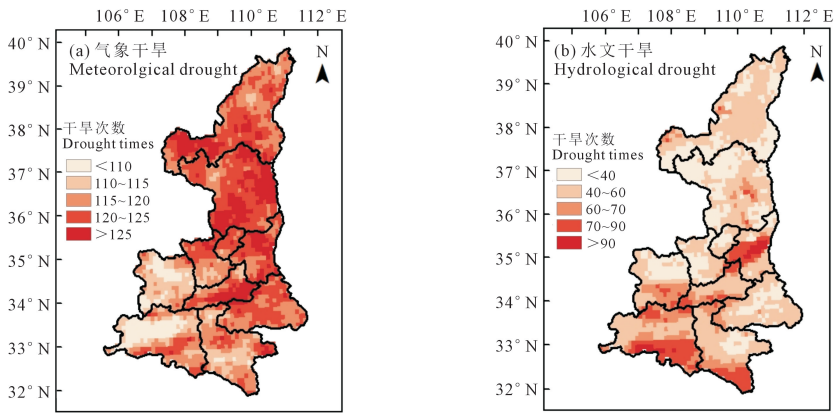


图 2 陕西省气象干旱发生次数和水文干旱发生次数空间分布

Fig.2 Spatial distribution of meteorological drought and hydrological drought in Shaanxi Province

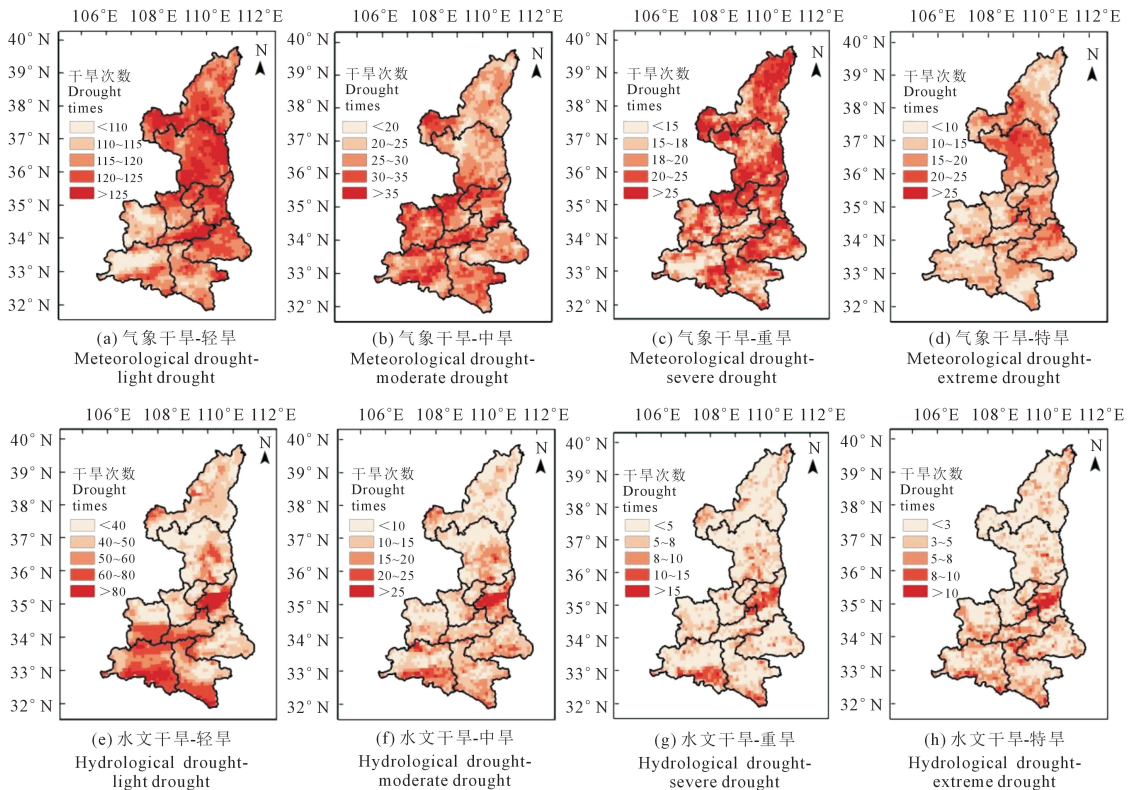


图 3 陕西省各等级气象和水文干旱发生次数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the number of occurrences of meteorological drought and hydrological drought by class

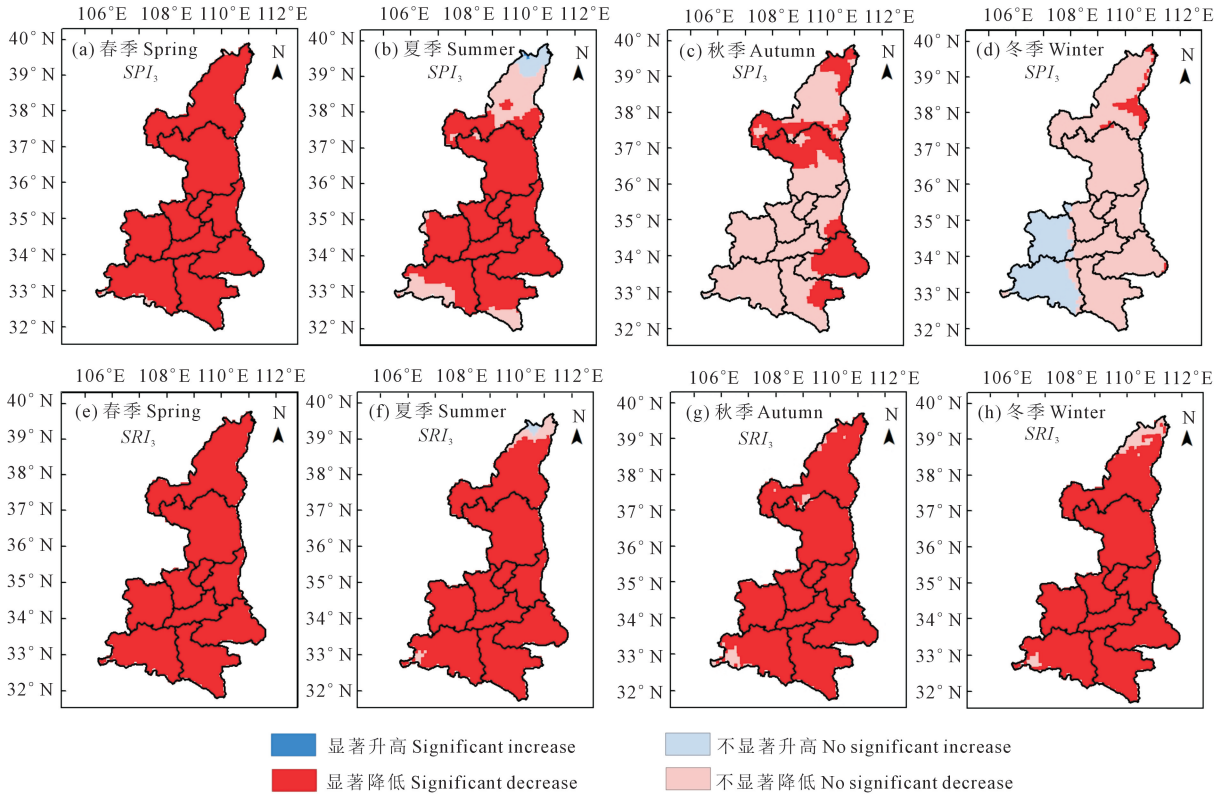


图 4 陕西省 SPI_3 和 SRI_3 变化趋势的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of SPI_3 and SRI_3 trends in Shaanxi Province

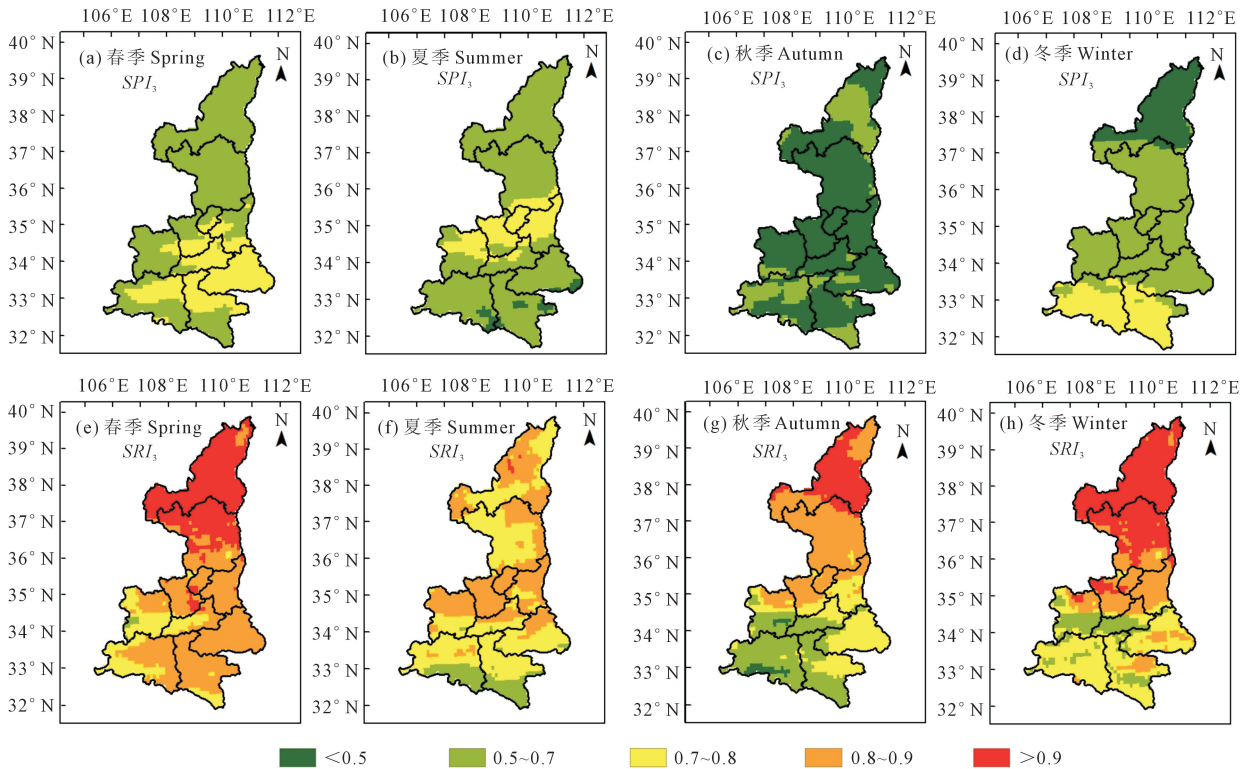


图 5 陕西省 SPI_3 和 SRI_3 的 Hurst 指数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of Hurst index of SPI_3 and SRI_3 in Shaanxi Province

西省不同季节的气象干旱持续性指标也有差异。春季,全省 Hurst 指数介于 0.5~0.8 之间,陕南东部和北部、关中南部和中部的 Hurst 指数相对较高,介于 0.7~0.8 之间;夏季,关中北部大部地区的 Hurst 指数较高,介于 0.7~0.8 之间,其余地区小于 0.7;秋季, SPI_3 序列整体具有反持续性,这与陕西省秋季多雨有关;冬季,除陕南汉中市和安康市的 Hurst 指数大于 0.7,其余均低于 0.7(图 5a~d)。

3.2.2 水文干旱的变化趋势及其持续性 陕西省不同季节的水文干旱变化趋势如下:春季,全省 SRI_3 显著下降,干旱显著加重;夏季,陕北北部极少数地区的旱情有所缓和,呈现出湿润的状态,其余地区都是加重;秋季 SRI_3 变化趋势分布与春季相似,全省干旱显著加重;冬季 SRI_3 变化趋势分布与夏季较为相似,除陕北北部和陕南西部的小部分地区外,其余地区 SRI_3 为不显著下降,陕西省冬季旱情整体呈加剧趋势(图 4e~h)。陕西省不同季节的水文干旱持续性指标如下:春季,陕北的 Hurst 指数最高,多数达到 0.9 以上,持续性强;夏季,除陕南南部外,其他地区的 Hurst 指数都介于 0.7~0.9 之间,具有较强的持续性;秋季,陕北榆林市的 Hurst 指数最高,陕南汉中市的最低;冬季,陕北 Hurst 指数的空间分布与春季相似,整体超过 0.9,持续性强,陕南的 Hurst 指数普遍在 0.7 左右,具有较弱的持续性(图 5e~h)。

3.2.3 气象干旱与水文干旱趋势与持续性的结果分析 由上述结果可知,陕西省 SPI_3 和 SRI_3 整体呈现逐年下降趋势,干旱加重。 SPI_3 和 SRI_3 的持续性在时空分布中有显著差异, SPI_3 的 Hurst 指数变化幅度较小,持续性弱; SRI_3 变化幅度大,且陕北持续性最强,关中次之,陕南最弱。全省径流量呈逐年减小的趋势,这与前人研究相符,如吴喜军等^[18]利用温家川站 1961—2010 年的流量资料分析陕北窟野河年径流变化发现,窟野河近 50 年来流量明显减少;梁浩^[19]基于混合模型对渭河流域水文干旱进行预测发现,流域内 6 个水文站点的年标准化径流指数均存在显著的下降趋势,且均通过了 95% 的显著性检验;邓乐乐等^[20]研究发现,安康和白河站径流情势指标在变异后明显减小,汛期平均径流下降率分别为 23.39% 和 23.18%。

3.3 气象-水文干旱传播

气象干旱通常是其他类型干旱的源头,且在传播中具有明显的阶段性、群发性和滞后性等特征^[21]。研究认为,气象干旱发生时间内发生了水文干旱,即气象干旱和水文干旱有交集,且水文干旱

发生时间晚于气象干旱,则发生了干旱传播。统计各地区气象干旱和水文干旱发生的时间和次数,计算气象-水文干旱传播率,绘制陕西省气象-水文干旱传播率空间分布图(图 6,见 265 页)。陕北干旱传播率最低,大多小于 30%,其次是关中,陕南最高。其中,陕南南部和北部、关中东部的传播率普遍大于 40%,局部地区大于 50%,表明该区域的气象干旱较其他区域敏感。

将气象干旱和水文干旱各分为 4 个等级,计算不同等级气象干旱向水文干旱传播的概率,共 16 种组合方式,其空间分布见图 7。由图 7 可以看出,在发生气象轻旱的条件下,发生水文轻旱的可能性最大,中旱的可能性最小;在发生气象中旱的情况下,发生水文轻旱的可能性最大,其中关中东部和陕南南部的传播率超过 20%;在发生气象重旱的条件下,发生水文特旱概率最大,特别是在陕北北部、汉中中东部和陕南中部的部分地区,传播率大于 10%;在发生气象特旱的条件下,发生水文特旱的可能性最大,传播率普遍超过 10%,陕南超过 20%。由此可知,陕南对气象干旱较其他区域敏感。

综上,气象干旱到水文干旱传播率的空间分布与水文干旱次数的空间分布相似,陕南南部、关中东东部对气象干旱较为敏感,传播率最大。当发生气象轻旱和特旱时,最大可能会紧接着发生同等级的水文干旱;当发生气象中旱时,发生水文轻旱和特旱的频率相差不大,但空间分布差异显著;当发生气象重旱时,发生水文特旱的频率最高。因此可以通过监测气象干旱,做到对水文干旱的预警和实时跟踪通报。

3.4 气象-水文干旱响应

图 8 为陕西省 SPI_{1-12} 与 SRI_1 响应时间以及最大相关系数的空间分布。就响应时间而言,陕北大部分地区水文干旱对气象干旱的响应时间大于 8 个月;关中东东部小于 1 个月,关中西南部为 3~6 个月,关中北部为 7~12 个月;陕南东部为 7 个月左右,陕南西部为 4 个月,陕南南部响应较迅速,在 3 个月以内(图 8a)。关中的渭南地区对气象干旱的迅敏响应与当地气候和地貌密切相关,郭新^[22]认为该地区降水量低,气温相对较高,蒸发作用较强,导致该地区干旱等级高,土壤水分亏缺严重,水文干旱对气象干旱响应迅速。就相关系数而言,陕南最高,普遍为 0.8 左右;关中次之,其中中西部的相关性较强,超过 0.85,中东部的相关性较弱,为 0.6 左右;陕北相关性最弱,特别是陕北北部的高海拔地区,相关系数低于 0.5(图 8b)。

图 9 为陕西省季尺度气象-水文干旱响应时间

及其相关系数的空间分布图。对于响应时间而言,春季,秦岭以北较长,普遍介于 9~11 个月,秦岭以南响应时间较短,为 2~5 个月;夏季,水文干旱对气象干旱最敏感,响应最迅速,其中陕北大部分地区小于 1 个月,局部地区接近 0,即无滞时;秋季,干旱响应时间有着明显的地理分界线,关中南、陕南南部和西部响应时间最短,关中南和陕北的响应时间较长,最大为 11 个月;冬季,干旱响应时间的空间分布与春季相似(图 9A)。对于相关系数而言

(图 9B),春季,陕北北部最小,在 0.5 以内,关中南、陕南西部和南部的相关性最强,超过 0.85;夏季相关性在一年中最好,其空间分布依秦岭为分界线,秦岭以南的相关系数整体超过 0.85,为强相关;秋季,关中南、陕南东南部相关性较夏季增强,关中和陕南南部的相关性有所减弱;冬季,陕北相关系数的分布与春季和秋季相似,关中南的相关性较弱,为关中地区的低值中心,且陕西省冬季的相关性整体低于春季。

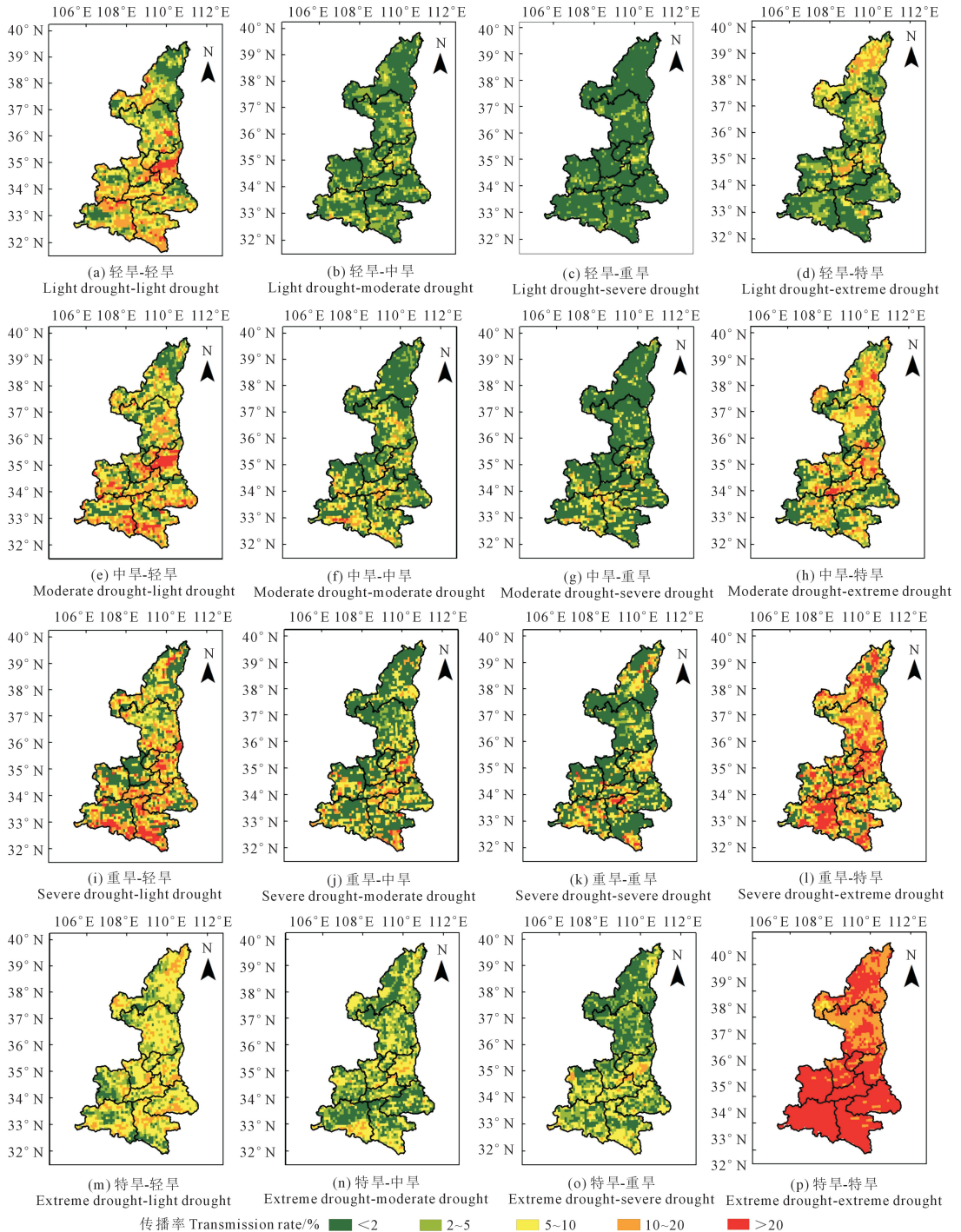


图 7 陕西省不同等级气象-水文干旱传播率空间分布

Fig.7 Spatial distribution of meteorological-hydrological drought propagation rate of different classes in Shaanxi Province

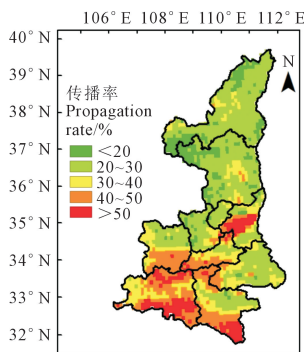


图 6 陕西省气象-水文干旱传播率的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of meteorological-hydrological drought propagation rate in Shaanxi Province

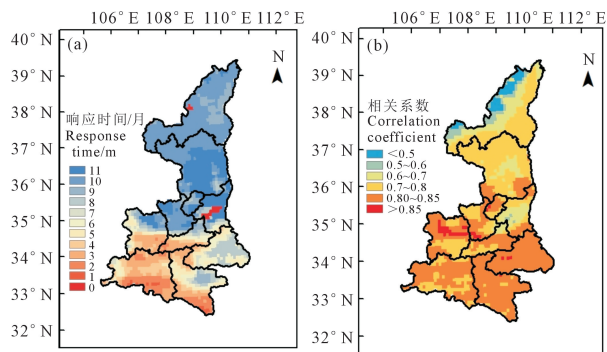


图 8 气象-水文干旱响应时间及其相关系数的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of meteorological-hydrological drought response time and its correlation coefficient

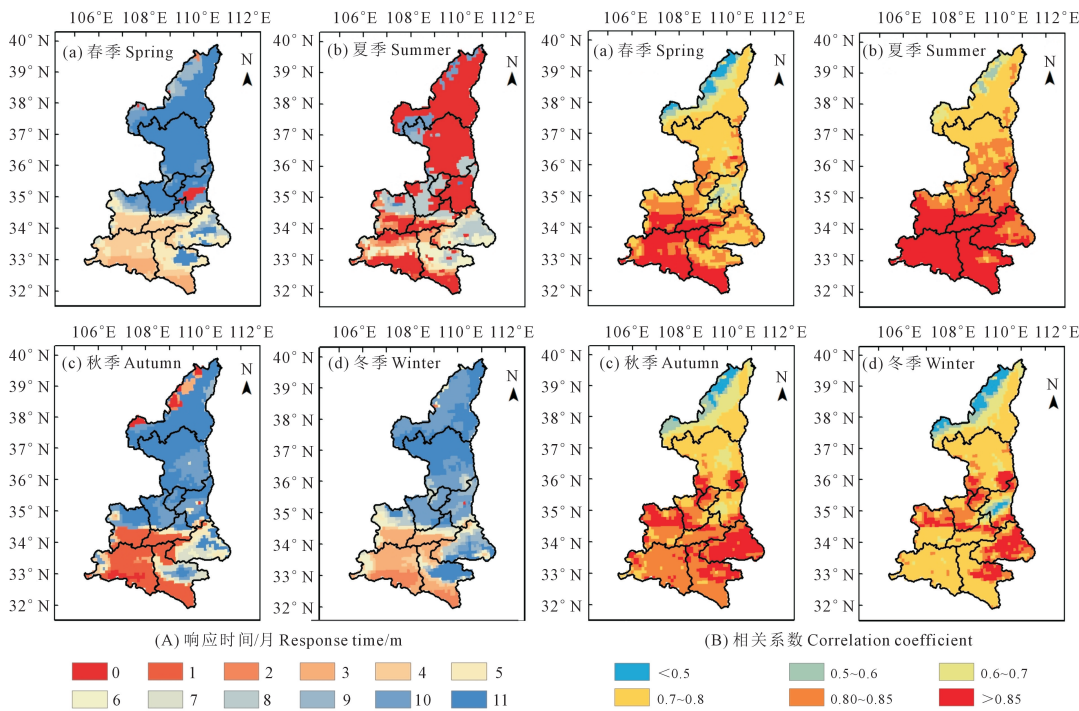


图 9 陕西省季尺度气象-水文干旱响应时间及其相关系数的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of seasonal-scale meteorological-hydrological drought response times and their correlation coefficients in Shaanxi Province

综上,陕西省气象-水文干旱响应时间具有明显的空间和时间特征。空间上以秦岭为分界线,秦岭南北差异显著,秦岭以南响应迅速,以北响应迟钝。时间上,夏季水文干旱对气象干旱最敏感,响应最快,春季最慢。陕西省气象-水文相关系数的空间分布有着典型的地域特征,关中和陕南相关性较强,陕北较弱,且陕北北部高海拔地区最弱,其相关系数在一年中都小于 0.5。受气候、下垫面条件和人类活动的影响,气象-水文干旱响应时间和相关系数之间有着显著差异,在春季的关中渭南地区,相关性差,响应时间反而短;在秋季的陕北北部高海拔地区,相关性较好,响应时间反而长。

4 结 论

基于陕西省 1952—2022 年月尺度气象和水文干旱指数,分析其变化趋势及持续性,统计不同等级干旱的发生频次和时间,探究气象-水文干旱的传播与响应特征,主要结论如下:

(1)陕西省气象干旱发生的次数高于水文干旱,两者的发生频次在空间上有显著的差异。陕北多发生气象干旱,关中东东部、陕南南部多发生水文干旱,其差异与气候变化、下垫面条件以及人类活动等因素密切相关。

(2)陕西省 SPI_3 和 SRI_3 整体呈现逐年下降趋势,干旱加重,且 SRI_3 的下降趋势较 SPI_3 显著。 SRI_3 的 Hurst 指数空间变化较 SPI_3 显著,具有明显的空间差异

性,且陕北 SRI_3 的持续性最强,关中次之,陕南最弱。

(3) 陕北气象-水文传播率最低,关中地区次之,陕南最高。其中,陕南南部、关中中东部的传播率大于 50%。在 16 种不同等级的气象-水文干旱组合中,当发生气象轻旱和特旱时,最大可能会紧接着发生同等级的水文干旱。

(4) 陕西省气象-水文干旱响应时间具有明显的空间和时间特征。空间上以秦岭为分界线,以南响应迅速,以北响应迟钝。时间上,夏季最敏感,响应最快,春季响应最慢。一年中,气象-水文相关系数的最小值均在陕北北部高海拔地区。

参考文献:

- [1] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 449-456.
- PEI Y S, JIANG G Q, ZHAI J Q. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 449-456.
- [2] DAI A G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.
- [3] 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.
- [4] 罗荃, 余博. 全球多地遭遇严重干旱气候[J]. 生态经济, 2022, 38(8): 5-8.
- LUO Q, YU B. Many parts of the world have experienced a severe dry climate[J]. Ecological Economy, 2022, 38(8): 5-8.
- [5] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 80-86.
- SHI P, ZHAN H J, QU S M, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 80-86.
- [6] 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 K, SU X L. Spatio-temporal response of agricultural drought to meteorological drought based on three-dimensional perspective[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 103-113.
- [7] 许怡然, 鲁帆, 谢子波, 等. 潮白河流域气象水文干旱特征及其响应关系[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 220-228.
- XU Y R, LU F, XIE Z B, et al. Characteristics and responses of hydrological and meteorological drought in Chaobai River Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2): 220-228.
- [8] WANG H L, WANG Z Z, BAI Y, et al. Propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought considering nonlinear correlations—a case study of the Hanjiang River Basin, China[J]. Ecological Informatics, 2024, 80: 102512.
- [9] 徐晗. 基于熵权法的陕西省农业干旱脆弱性评价及影响因子识别[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 198-205.
- XU H. Assessment of agricultural drought vulnerability and identification of influencing factors based on the entropy weight method[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 198-205.
- [10] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 基于标准化降水指数的陕西省干旱时空变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 113-119.
- LI B, XIE J C, HU Y H, et al. Analysis on spatiotemporal variability characteristics of drought in Shaanxi Province using standardized precipitation index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(17): 113-119.
- [11] 刘永佳, 黄生志, 方伟, 等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 93-102.
- LIU Y J, HUANG S Z, FANG W, et al. Propagation and dynamic change of meteorological drought to hydrological drought in different seasons[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 93-102.
- [12] PELOSI A, TERRIBILE F, DURSO G, et al. Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration[J]. Water, 2020, 12(6): 1669.
- [13] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1231-1241.
- ZHOU S, WANG Y M, CHANG J X, et al. Study on spatial pattern of spatio-temporal evolution of drought in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1231-1241.
- [14] 刘婷婷, 朱秀芳, 孙劭, 等. 阈值选择对高温时空变化特征的影响[J]. 地理科学, 2023, 43(4): 726-736.
- LIU T T, ZHU X F, SUN S, et al. Impact of threshold selection on the spatiotemporal change characteristics of high temperature[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(4): 726-736.
- [15] 石朋, 唐汉, 瞿思敏, 等. 西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 49-56.
- SHI P, TANG H, QU S M, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 49-56.
- [16] 王萍根, 肖丽英, 宋世强, 等. 鄱阳湖流域气象水文干旱时空变化及传播特征[J]. 南昌工程学院学报, 2023, 42(4): 28-34, 46.
- WANG P G, XIAO L Y, SONG S Q, et al. Spatial-temporal variation characteristics of meteorological and hydrological droughts in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2023, 42(4): 28-34, 46.
- [17] 薛瑞华. 基于特征分析的关中地区干旱风险预测评估研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- XUE R H. Study on drought risk prediction and assessment in Guanzhong area based on characteristic analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [18] 吴喜军, 李怀恩, 孙志勇, 等. 陕北富野河年径流变化特征分析与诊断[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 558-562.
- WU X J, LI H E, SUN Z Y, et al. Analysis and diagnosis of changes in annual runoff in Kuye River valley in North Shaanxi[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(4): 558-562.
- [19] 梁浩. 基于混合模型的渭河流域水文干旱预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- LIANG H. Study on hydrological drought prediction of Weihe river basin based on mixed model[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [20] 邓乐乐, 郭生练, 田晶, 等. 汉江上游径流情势变化及归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2023, 21(4): 761-769.
- DENG L L, GUO S L, TIAN J, et al. Runoff regime change and attribution analysis in the upper reaches of Hanjiang River[J]. South-to-North Water Transfer and Water Conservancy Science and Technology, 2023, 21(4): 761-769.
- [21] 闵睿. 平原湖区也须重视干旱——以鄱阳湖区为例[J]. 中国减灾, 2003, (3): 39-41.
- MIN Q. The plain and lake areas should also pay attention to drought prevention—take Poyang Lake area as an example[J]. Disaster Reduction in China, 2003, (3): 39-41.
- [22] 郭新. 关中麦区干旱时空变化特征及其对冬小麦产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- GUO X. Spatio-temporal variation characteristics of drought and its effect on winter wheat yield in Guanzhong wheat area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.