

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.005

西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应

栗晓玲^{1,2}, 褚江东², 张特², 姜田亮², 王冠智²

(1. 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;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为分析西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应,利用 GRACE 和 GLDAS 数据定量评估地下水储量变化,构建地下水干旱指数 GRACE-GDI 分析地下水干旱的时空演变特征,并利用 Pearson 相关系数分析了地下水干旱对气象干旱的动态响应关系。结果表明:西北地区地下水储量总体上以 0.25 cm/a 的速率枯竭;河西走廊、六盘山区、青海南部地下水干旱发生频率较高,陕南地区、柴达木盆地地下水干旱发生频率较低,西北地区多年平均地下水干旱面积比例为 29.0%;地下水干旱与气象干旱的响应关系存在明显的空间异质性,其中呈显著正相关关系的区域占 59.3%,且由于气候变暖和植被改善,在准噶尔盆地、吐鲁番盆地、青海湖流域、阿尔泰山等地区响应程度增加;干旱响应时间主要为 1~6 月和 19~24 月。

关键词:地下水干旱;气象干旱;动态响应;GRACE 数据;演变趋势

中图分类号:TV213.4;P223

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2022)01-0034-09

Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China // SU Xiaoling^{1,2}, CHU Jiangdong², ZHANG Te², JIANG Tianliang², WANG Guanzhi² (1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To analyze the spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China(NWC), the groundwater storage change was quantitatively evaluated by GRACE and GLDAS data and the groundwater drought index GRACE-GDI was constructed to analyze the spatio-temporal evolution characteristics of groundwater drought. The Pearson correlation coefficient was used to analyze the dynamic response relationship of groundwater drought with meteorological drought. The results show that the groundwater storage in NWC generally decreased at the rate of 0.25 cm/a. The frequency of groundwater drought in the Hexi Corridor, Liupan Mountains and southern Qinghai was relatively high, while in southern Shaanxi and the Qaidam Basin was relatively low. The average annual groundwater drought area in NWC was 29.0%. There existed obvious spatial heterogeneity in the response relationship between groundwater drought and meteorological drought with 59.3% of the area having a significant positive correlation. The response degree increased in the Junggar Basin, Turpan Basin, Qinghai Lake Basin and Altai Mountain due to the climate warming and improved vegetation. The drought response time in NWC mainly ranged from 1 to 6 and 19 to 24 months.

Key words: groundwater drought; meteorological drought; dynamic response; GRACE data; evolution trend

地下水是人类赖以生存的宝贵水源,尤其是在降水稀少的干旱地区^[1]。当地下水系统受到干旱的影响后,地下水补给减少,导致地下水位降低和排

泄减少,引起地下水干旱^[2]。持续的地下水干旱影响居民生活及工农业生产,并导致地面沉降、土壤盐碱化、海水入侵等次生灾害的发生。西北地区深处

基金项目:国家自然科学基金(52079111,51879222)

作者简介:栗晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文模拟研究。E-mail: xiaoling@nwfau.edu.cn

亚欧大陆腹地,主要为干旱半干旱地区,研究地下水干旱的时空演变特征及其对气象干旱的响应机理对旱区水资源可持续开发、遏制沙漠化等具有重要意义。

干旱通常分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种类型,近年来生态干旱和地下水干旱也引起了研究者的重视。不同类型干旱间具有密切的联系,气象干旱通常是其他干旱的驱动因素^[3]。由降水不足引起的气象干旱作用于下垫面,对土壤、植被、径流和地下水产生不同程度的影响^[4],继而触发农业干旱^[5]、生态干旱^[6-7]、水文干旱^[8]和地下水干旱^[9-12]。在人类活动干扰强烈的地区,揭示不同类型干旱间的响应关系愈显重要。由于对地下水干旱发生机理认识不足,加之地下水位观测站点密度稀疏、数据缺测严重,地下水干旱还处于探索阶段。Bloomfield等^[13]依据地下水位构建了标准化地下水指数(standard groundwater index, SGI), Thomas等^[14]基于GRACE(gravity recovery and climate experiment)数据反演地下水储量,构建了地下水干旱指数(GRACE groundwater drought index, GGDI)监测地下水干旱演变规律。也有学者探究了地下水干旱对气象干旱的响应关系^[9-12],如Kubicz等^[10]基于实测数据构建了多尺度标准化降水指数(standard precipitation index, SPI)和SGI,认为气象干旱与地下水干旱间非线性响应关系,地下水干旱除受气象干旱影响外,还受地形、含水层的水力性质、人类活动等多种因素的影响; Han等^[11]基于GRACE数据,分析了干旱从气象到地下水的传播规律,指出珠江流域的干旱传播时间约为240 d; Hellwig等^[12]基于MODFLOW模型模拟的地下水位动态变化研究了德国地下水对降水的响应关系。以上研究初步探讨了地下水干旱对气象干旱的响应关系,但大多未考虑响应关系的空间异质性。Hellwig等^[12]基于分布均匀、稠密的地下水位站点得出了地下水干旱对气象干旱在空间上的响应关系,但西北地域辽阔,常年干燥少雨,生态环境脆弱,地下水观测站点密度稀疏限制了该地区地下水干旱的研究。气候变化加速了全球水循环过程,导致大气环流、降水、蒸发发生变化,进而导致极端干旱事件频发^[15-17];人类活动改变了流域的产汇流条件,两者共同影响水文循环过程。因此,有必要进一步探讨西北地区地下水干旱对气象干旱的动态响应关系,为科学认识变化环境下的干旱传播机理提供理论依据。

本文基于GRACE数据与GLDAS(global land data assimilation system)数据定量评估西北地区地

下水储量变化,以实测地下水位数据进行验证,构建地下水干旱指数GRACE-GDI(GRACE groundwater drought index),探究地下水干旱的时空演变特征及对气象干旱的动态响应关系,以期对地下水资源可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

西北地区(31°42'N ~ 49°6'N, 73°3'E ~ 111°14'E)位于亚欧大陆中部,包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区(图1),总面积约304.3万km²,约占中国陆地面积的1/3。该区深居内陆,加之高原山脉对湿润气流的阻挡,除东南部分地区为温带季风气候外,其余均为温带大陆性气候,降水稀少且时空分布不均,总体呈现东多西少的格局。

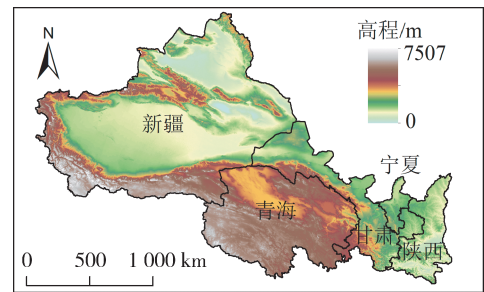


图1 行政区划与地理高程

Fig. 1 Administrative division and geographic elevation

2 数据来源

2.1 GRACE数据

采用美国得克萨斯大学(University of Texas at Austin)空间研究中心(Center for Space Research, CSR)与美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提供的CSR-Mascons与JPL-Mascons解算数据。两套数据均已替换C20项、地心改正项,扣除冰川均衡调整的影响,并以2004年1月至2009年12月的均值为基准做距平处理,具有高分辨率、高信噪比、泄露误差小等特点,在水储量研究方面得到了广泛的应用^[11,14,18-22]。研究时段为2002年4月至2021年3月,其中GRACE卫星与其后续卫星GRACE-Follow On之间的缺测月份(2017年7月至2018年5月)数据来源于Zhong等^[19],其余因技术原因导致的数据缺失采用线性插值方法补充。两套数据的分辨率分别为0.25°×0.25°和0.5°×0.5°。Sakumura等^[20]认为GRACE集成数据在降噪方面较为有效,因此,本文将JPL-Mascons基于最邻近配法重采样至0.25°×0.25°,取JPL-Mascons和CSR-Mascons

数据均值为陆地水储量变化数据。

2.2 GLDAS 数据

采用 GLDAS 模型中 Noah 陆地表面模型提供的 2002 年 4 月至 2021 年 3 月逐月浅层地表水储量数据(0 ~ 10 cm、10 ~ 40 cm、40 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm 的土壤水储量、雪水当量、冠层水储量),空间分辨率为 0.25° × 0.25°。为与 GRACE 数据保持一致,以 2004 年 1 月至 2009 年 12 月的平均浅层地表水储量为基准,逐月浅层地表水储量减去基准得到逐月浅层地表水储量变化。

2.3 其他数据

降水量数据采用基于中国气象站点实测资料插值而成的 CN05.1 数据集,是当前中国区域格点化近地面气象场最精确的数据集,分辨率为 0.25° × 0.25°^[23]。潜在蒸散发数据来自东英吉利大学气候研究中心(Climatic Research Unit, University of East Anglia)提供的多源气候数据集第 4 版,空间分辨率为 0.5° × 0.5°^[24],该数据由 Penman-Monteith 公式计算,已被广泛应用于全球和区域的水文气象研究,适用于对中国西北地区的干旱监测^[25]。为保持空间精度一致,采用最邻近分配法重采样到 0.25° × 0.25°。降水和潜在蒸散发数据的研究时段均选取 2002 年 4 月至 2018 年 12 月。实测地下水位数据来自《黑河流域地下水动态观测年鉴》《石羊河流域地下水动态观测年鉴》与《宝鸡峡灌区年报》,并将漏测、缺测以及换井等误差较明显、序列缺失较多的站点剔除,黑河中游、石羊河流域、关中地区经筛选后符合要求的地下水位观测井分别为 16 个、24 个和 24 个。

3 研究方法

3.1 地下水储量变化的计算与验证

陆地水储量包括地表水、地下水、土壤水、冰雪、生物水、冠层水等。其中生物水和地表水难以测量,且在干旱半干旱地区相对其他成分,变化量可忽略不计^[21],因此由下式计算地下水储量变化:

$$\Delta W_{地} = \Delta W_{陆} - \Delta W_{土壤} - \Delta W_{雪} - \Delta W_{冠层} \quad (1)$$

式中: $\Delta W_{地}$ 为地下水储量变化,cm; $\Delta W_{陆}$ 为陆地水储量变化,cm; $\Delta W_{土壤}$ 为土壤水储量变化,cm; $\Delta W_{雪}$ 为雪水当量变化,cm; $\Delta W_{冠层}$ 为冠层水储量变化,cm。

选用黑河中游、石羊河流域、关中地区 3 个典型区一致性、连续性较好的实测地下水位数据,对基于 GRACE 和 GLDAS 数据二者结合反演得出的地下水储量变化进行验证。为与 GRACE 数据一致,对实测地下水位数据扣除了 2004 年 1 月至 2009 年 12 月均值后进行比较。

3.2 GRACE-GDI 的计算

Zhao 等^[22]提出了一种基于 GRACE 数据反演的陆地水储量变化干旱指数 GRACE-DSI (GRACE drought severity index),为资料缺乏地区提供了评估区域干旱的新途径。应用该方法计算 GRACE-GDI 的公式如下:

$$I_{ij} = \frac{\Delta W_{地ij} - \overline{\Delta W_{地j}}}{\sigma_j} \quad (2)$$

式中: I_{ij} 为 i 年 j 月的 GRACE-GDI 值; $\Delta W_{地ij}$ 为 i 年 j 月的地下水储量变化,cm; $\overline{\Delta W_{地j}}$ 、 σ_j 分别为 j 月地下水储量变化的均值与标准差。参照文献[18],考虑到地下水的持续开采,地下水枯竭区研究期末的干旱程度比研究期初更加严重,在计算 GRACE-GDI 时去除 $\Delta W_{地}$ 的趋势项。地下水干旱相对气象干旱变幅较缓,在此认为 GRACE-GDI 小于 -0.5 时即发生地下水干旱。

3.3 标准化降水蒸散发指数的计算

标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)由 Vicente-Serrano 等^[26]提出,不仅充分考虑了降水和潜在蒸散发的作用,而且综合考虑了干旱的多时间尺度特性^[27],相比 SPI 能够更好地评价气象干旱。一般情况下 SPEI 选用 Logistic 分布,考虑到西北地区地域辽阔,降水稀少且蒸发量大,地域差异性大,因此待选分布函数包括 Gamma 分布函数、对数正态分布函数、威布尔分布函数、Logistic 分布函数、Beta 分布函数与正态分布函数,采用 K-S 检验与 AIC 准则对各个格点的分布函数进行优选,优选方法详见艾启阳等^[28]的研究。

3.4 滑动相关分析

地下水干旱对气象干旱的响应具有滞后性,目前关于不同类型干旱的相关性研究^[7,29-31]仅计算了两种干旱指数的年最大相关系数以及响应时间,不能呈现相关系数、响应时间随时间的动态演变关系。因此,本文引入滑动相关思路,分析研究 GRACE-GDI 与 SPEI 之间的动态响应关系。选取时段为 2003 年 1 月至 2018 年 12 月,滑动窗口长度为 10 a,滑动时间间隔取 1 a,分别计算各格点一年 12 个月的 GRACE-GDI 序列与 1 ~ 24 月时间尺度 SPEI 的皮尔逊相关系数。为消除其他因素对相关性结果的干扰,取相关系数中的最大值为年最大相关系数 R_{max} 。其中数据时间序列长度为 10 a 时,年最大相关系数 0.63 和 0.76 分别对应 5% 与 1% 的显著性水平。

4 结果与分析

4.1 地下水储量变化的验证

观测井实测地下水位与基于 GRACE 数据反演

地下水储量变化的相关性检验以及典型井时间序列变化对比分别如图 2 和图 3 ~ 5 所示。

由于 GRACE 数据的原始分辨率仅为 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ ，且地下水位变化应乘以土壤给水度才能计算得出等效水高，因此仅对两者之间的相关性进行分析。由图 2 可以看出，大部分观测井通过了 $\alpha = 1\%$ 时的相关系数显著性检验，说明在这 3 个地区反演结果精度较高；石羊河流域、关中地区实测地下水位与反演的地下水储量变化的相关性较好，在黑河流域的相关性相对稍差。图 3 ~ 5 为部分地下水位站点时间

序列，可看出 GRACE 数据反演的地下水储量变化与实测地下水位趋势基本一致，但在部分年份精度较差。参考其他学者^[21,32]的相关研究，GRACE 数据在小空间尺度精度较差，但在流域大尺度上精度较高。本文着重研究西北地区大尺度的地下水干旱情况，故 GRACE 数据的精度在西北地区满足要求。

4.2 地下水储量变化趋势分析

图 6 为 2002 年 4 月至 2021 年 3 月基于 Sen's 斜率^[33]的西北地区地下水储量变化速率空间分布，可知新疆天山山脉、准噶尔盆地、陕西关中地区、陕

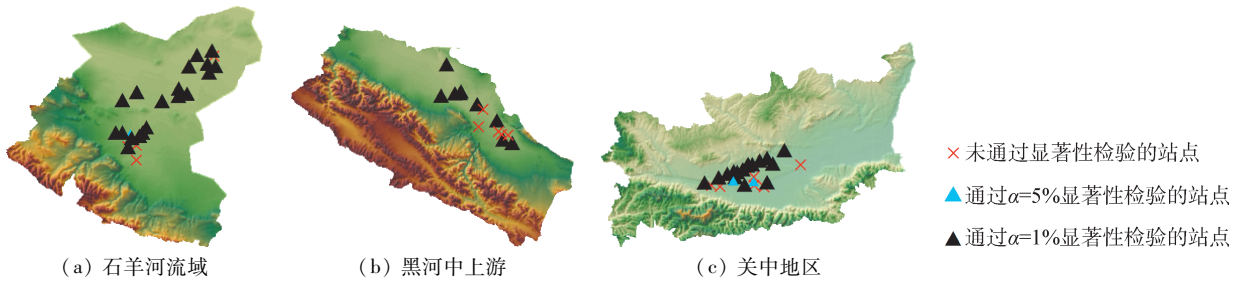


图 2 地下水储量变化与实测地下水位变化的相关关系显著性检验空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of significance test of correlation between groundwater storage change and in-situ groundwater level change

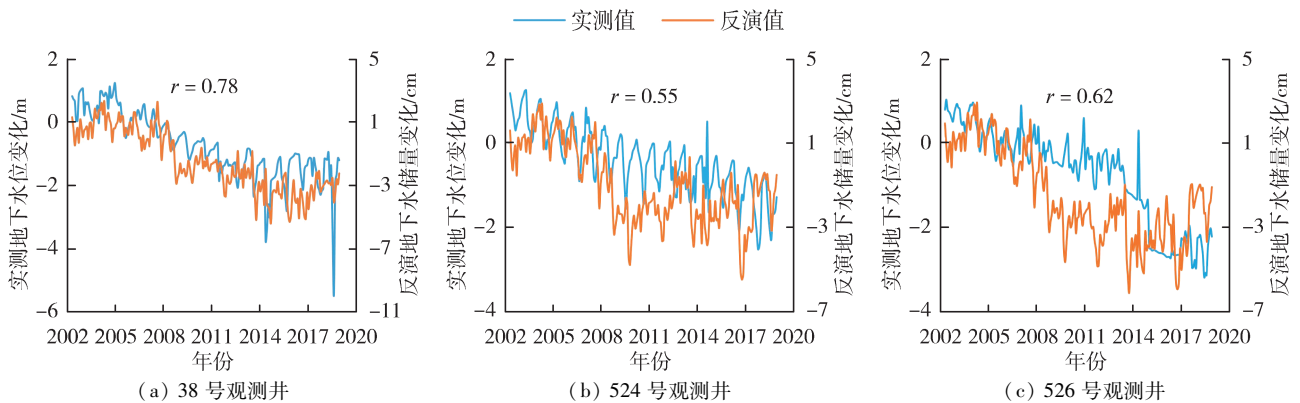


图 3 石羊河流域地下水储量变化与典型观测井实测地下水位变化对比

Fig. 3 Comparison of groundwater storage change and in-situ groundwater level change in typical observation wells over Shiyang River Basin

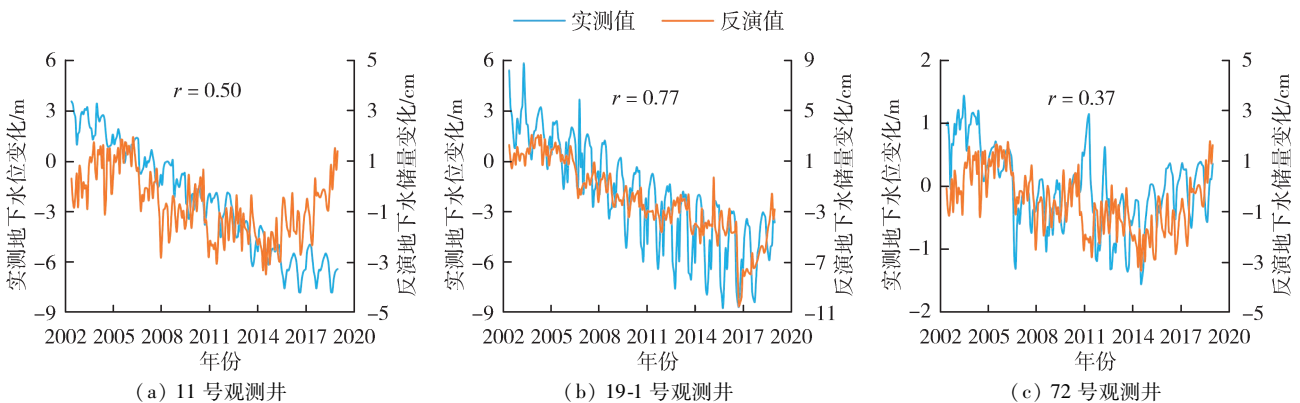


图 4 黑河中上游地下水储量变化与典型观测井实测地下水位变化对比

Fig. 4 Comparison of groundwater storage change and in-situ groundwater level change in typical observation wells over upper and middle reaches of Heihe River

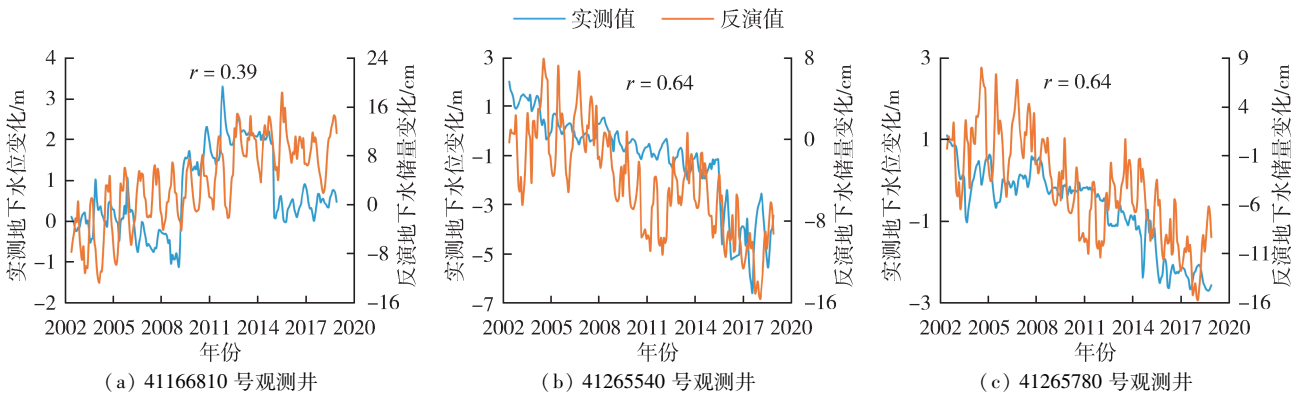


图5 关中地区地下水储量变化与典型观测井实测地下水水位变化对比

Fig. 5 Comparison of groundwater storage change and in-situ groundwater level change in typical observation wells over Guanzhong Area

北地区的地下水枯竭较为严重,而柴达木盆地、昆仑山北麓、陕南地区、甘肃南部地下水储量变化有增加的趋势。

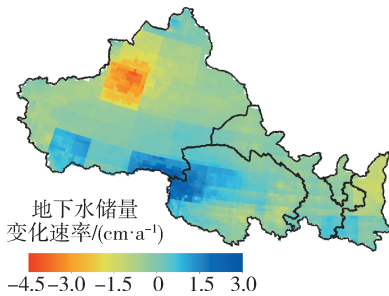


图6 基于 GRACE 数据的地下水储量变化速率
Fig. 6 Change rate of groundwater storage based on GRACE data

新疆和陕西关中地下水枯竭地区为人口稠密区,城市化快速发展导致地下水过度抽取是地下水枯竭的主要原因;陕北地区由于治理水土流失和大规模植树造林,导致蒸发蒸腾增加、地下水补给变少,引起地下水枯竭^[34];气候变暖使高海拔地区的冰雪加速融化,冰雪融水由于重力作用不断流向低海拔地区的柴达木盆地与昆仑山北麓^[32],地下水储量不断增加;陕西南部、甘肃南部地处秦岭南麓,属亚热带季风气候,降水充沛,且自 21 世纪以来降水量呈增加趋势^[35],从而导致地下水储量增加。

基于 Sen's 斜率对西北各省区地下水储量变化速率进行定量计算,得出陕西、甘肃、宁夏、新疆的枯竭速率分别为 0.50 cm/a、0.21 cm/a、0.40 cm/a 和 0.44 cm/a,青海的地下水为上升的趋势,速率为 0.25 cm/a。根据青海省水资源公报,2020 年地下水资源量为 437.3 亿 m³,较 2002 年增加了 202.8 亿 m³,而地下水开采量基本维持在 5 亿 m³左右,说明地下水储量是增加的,与本文结论一致。西北地区地下水储量总体上为下降趋势,约以 0.25 cm/a 的速率减少,折合等效水量约减少

76.1 亿 m³/a。许多学者认为西北地区呈现“暖湿化”的趋势^[36],但由于地下水超采,部分区域地下水资源在不断减少。

4.3 西北地区地下水干旱时空演变趋势

a. 地下水干旱频率的空间变化特征。图 7 为 2002 年 4 月至 2021 年 3 月西北地区地下水干旱发生频率的空间分布。由图 7 可知,河西走廊、六盘山区、青海南部地下水干旱发生频率较高,而陕南地区、柴达木盆地、青海湖流域、新疆等地下水干旱发生频率较低。河西走廊为西北地区农业发达、人口密集的区域,由于人口快速增长、绿洲扩张和城市化,日益增加的用水需求导致地下水超采^[21],进而导致地下水干旱频发;陕南地区、柴达木盆地等地下水位有回升的趋势,地下水干旱发生频率较低。

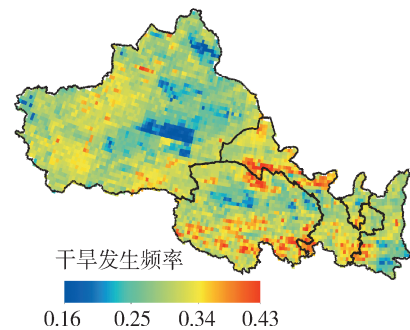


图7 地下水干旱发生频率空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of groundwater drought frequency

b. 地下水干旱面积的时间演变特征。图 8 为西北地区及各省区 GRACE-GDI 与地下水干旱面积比例的 7 月滑动平均值变化过程,图中阴影区表示发生地下水干旱事件。由图 8 可知,西北地区在 2002 年 4 月至 2003 年 5 月、2008 年 7 月至 2010 年 6 月、2014 年 11 月至 2015 年 6 月、2016 年 1 月至 2017 年 5 月、2020 年 7 月至 2021 年 3 月发生了较为严重的地下水干旱,其中 GRACE-GDI 最小值出现

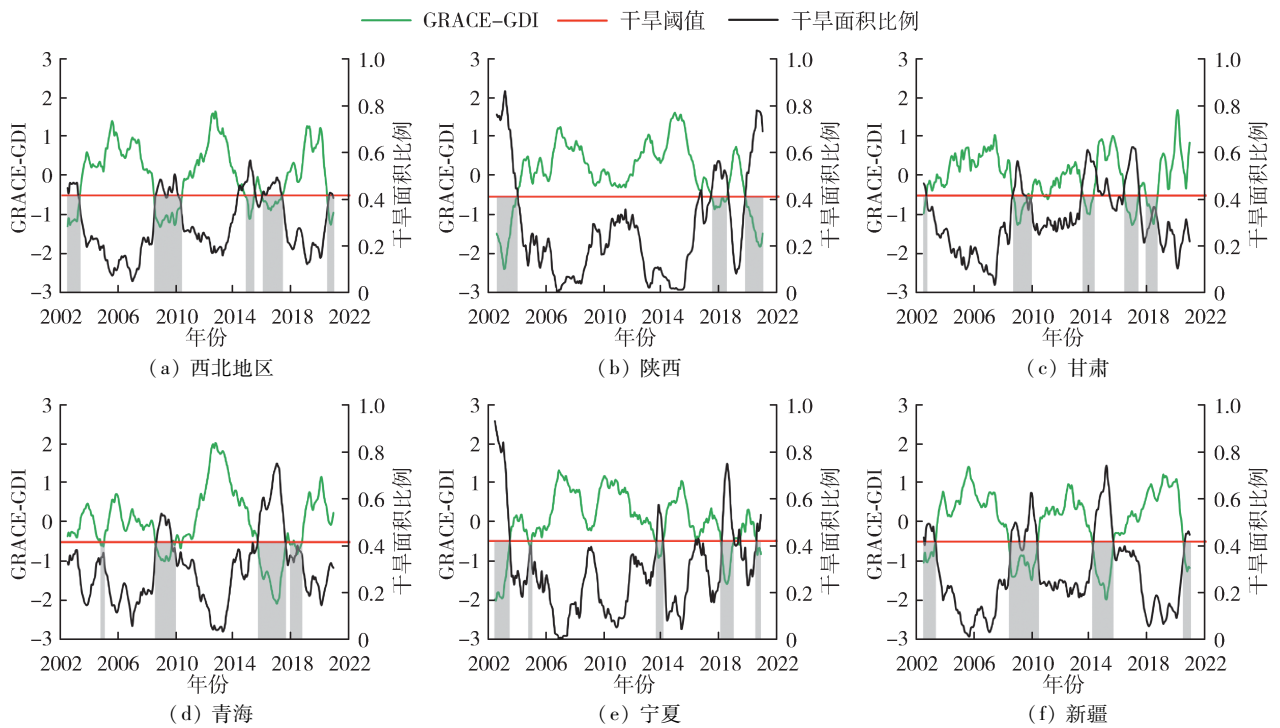


图8 西北地区及各省区 GRACE-GDI 和干旱面积比例

Fig. 8 GRACE-GDI and proportion of drought area in Northwest China and provinces

在 2008 年 12 月,为 -1.32 ,对应干旱面积比例为 48.3% ,在 2015 年 3 月干旱发生面积比例最高,达到 56.6% ,而西北地区多年平均地下水干旱面积比例仅为 29.0% 。宁夏、甘肃地下水干旱呈现频次高、烈度小的特征,而陕西、青海、新疆呈现频次低、烈度大、干旱面积广的特征。由于降水稀少,各省区在 2007 年之后 GRACE-GDI 均有不同程度的下降,其中甘肃、青海、新疆发生了历时 $2 \sim 3$ a 的地下水干旱。

4.4 地下水干旱对气象干旱的响应关系

GRACE-GDI 与 SPEI 的年最大相关系数可表示

气象干旱对地下水干旱的影响程度,而年最大相关系数所对应的 SPEI 时间尺度能够反映地下水干旱对气象干旱的敏感性,其中时间尺度越短,表明地下水对气象干旱的响应越敏感。图 9 和图 10 分别为 2003—2018 年 GRACE-GDI 与 SPEI 的年最大相关系数与响应时间的空间分布。

由图 9 (a) 可知,西北地区分别有 28.4% 和 59.3% 的面积达到 0.01 显著性水平 ($R > 0.62$) 和 0.05 显著性水平 ($R > 0.50$)。天山山脉、柴达木盆地、青海湖流域、宁夏部分地区气象干旱对地下水干旱的影响程度较大,而塔里木盆地、准噶尔盆地、吐

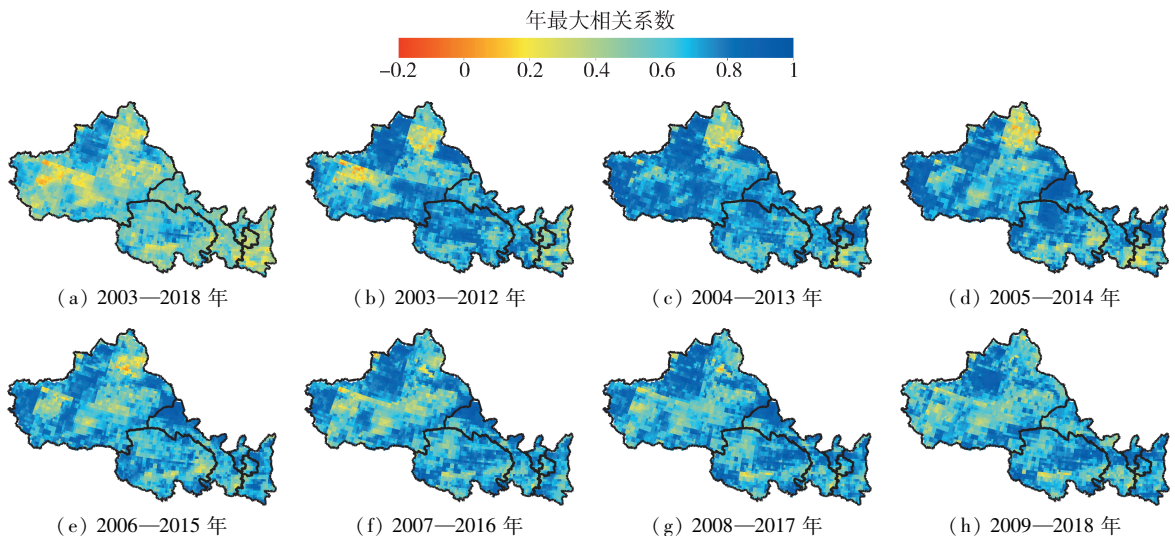


图9 GRACE-GDI 与 SPEI 的年最大相关系数空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of annual maximum correlation coefficient between GRACE-GDI and SPEI

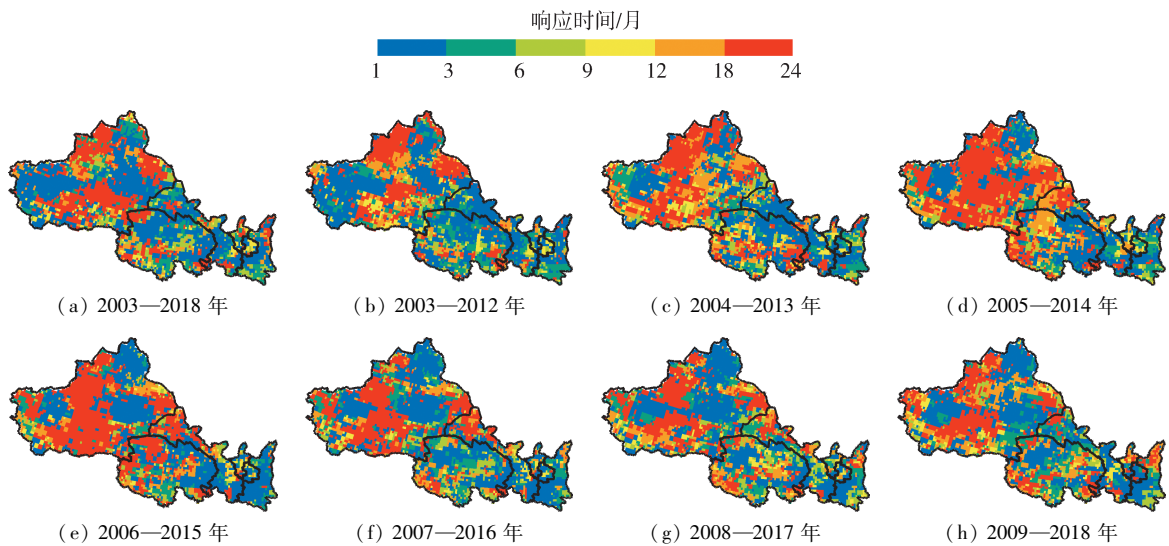


图 10 GRACE-GDI 与 SPEI 的响应时间空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of response time between GRACE-GDI and SPEI

鲁番盆地、陕南地区、青海南部等地区地下水与气象干旱的相关性较差。塔里木盆地被塔克拉玛干沙漠覆盖,除塔里木河冲积平原外,大部分地区地下水埋深较深,包气带较厚,气象干旱难以影响地下水干旱的发生;青海南部地处青藏高原巴颜喀拉山脉,地下水变化主要受冰雪融水影响,气象干旱不是引起地下水干旱的主要因素;陕南地区地处秦岭南部,降水丰沛,地形崎岖多丘陵,地形因素导致土壤蓄水能力差,地下水排泄补给受气象、径流、地形多种因素控制,故气象干旱与地下水干旱相关性较差。

从图 9(b)~(h) 可看出,准噶尔盆地、吐鲁番盆地、青海湖流域、阿尔泰山等地地下水干旱受气象干旱的影响程度有增加的趋势,这与气候变暖和植被改善等因素有关。准噶尔盆地、吐鲁番盆地、青海湖流域、阿尔泰山 NDVI 总体呈上升趋势,植被改善明显^[37],且气温上升显著。植被改善使土壤保水能力增强,且气温升高导致更强的植被蒸发蒸腾作用,降雨补给地下水减少,从而导致气象干旱对地下水干旱的影响程度变大;塔里木盆地部分地区则有相关性变差的趋势。

进一步对相关性通过 0.05 显著性水平检验的面积进行分析。由图 10(a) 可知,西北地区地下水干旱对气象干旱的响应时间为 1~6 月、7~12 月、13~18 月、19~24 月的面积比例分别为 47.0%、13.8%、8.4% 和 30.8%,表明地下水干旱对气象干旱的响应时间主要为 1~6 月和 19~24 月。陕南地区、阿尔泰山的响应时间主要为 3~9 月,而天山山脉、哈密地区、塔里木盆地部分地区响应时间长达 12~24 月。陕南地区地处秦岭南麓,降水充沛,地下水干旱因降水、径流补给而被缓解,因此湿润地区地下水易受气象干旱的长期累积影响;阿尔泰山受

西风带气流影响,降水稳定且植被茂密,植被截留和土壤固水使下渗进程变缓;天山山脉、哈密地区、塔里木盆地部分地区降水稀少,降水对地下水的补给很少,气象干旱不是地下水干旱的主要影响因素。

2003—2018 年,西北地区地下水干旱对 SPEI 的响应时间为 1~6 月、7~12 月、13~24 月的占比从 52.3%、12.1% 和 35.5% 变为 43.6%、15.1% 和 41.3% (图 10(b)~(h))。陕北地区、宁夏等地响应时间从 1~6 月变为 12~24 月,河西走廊响应时间也有增加的趋势。该响应时间基于统计意义,一般响应时间超过 12 月说明地下水干旱受其他因素(人类活动、植被变化等)影响较大。西北地区以气象条件为主导因素的地下水干旱面积比例在变小,表明气象干旱的影响程度在逐渐变小。

5 结 论

a. 基于 GRACE 和 GLDAS 数据计算的地下水储量变化在西北地区具有可靠性;西北地区除青海地下水储量以 0.25 cm/a 的速率上升外,陕西、甘肃、宁夏、新疆地下水储量分别以 0.50 cm/a、0.21 cm/a、0.40 cm/a 和 0.44 cm/a 速率下降;西北地区地下水储量总体上为下降趋势,约以 0.25 cm/a 的速率减少,折合等效水量约为 76.1 亿 m³/a。

b. 构建的地下水干旱指数 GRACE-GDI 识别出西北地区在 2002 年 4 月至 2003 年 5 月、2008 年 7 月至 2010 年 6 月、2014 年 11 月至 2015 年 6 月、2016 年 1 月至 2017 年 5 月、2020 年 7 月至 2021 年 3 月发生了地下水干旱。河西走廊、六盘山区、青海南部地下水干旱发生频率较高,而陕南地区、柴达木盆地、青海湖流域、新疆等地下水干旱发生频率较低;西北地区多年平均地下水干旱面积比例

为 29.0%。

c. 气象干旱对地下水干旱的响应关系存在明显的空间异质性,其中影响程度较大的地区主要分布在天山山脉、柴达木盆地、青海湖流域、宁夏等地;由于气候变暖和植被改善等因素,准噶尔盆地、吐鲁番盆地、青海湖流域、阿尔泰山等地地下水干旱受气象干旱的影响程度有增加的趋势;西北大部分地区地下水干旱对气象干旱的响应时间为 1~6 月和 19~24 月。

参考文献:

[1] 乔晓英,王文科,姜桂华,等. 西北干旱内陆盆地地下水生态功能的探讨[J]. 水资源保护,2005,21(5):6-10. (QIAO Xiaoying, WANG Wenke, JIANG Guihua, et al. Study on ecological function of groundwater in northwest arid inland basin [J]. Water Resources Protection, 2005, 21(5):6-10. (in Chinese))

[2] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2):202-216.

[3] 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 Yuansheng, JIANG Guiqin, ZHAI Jiaqi. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3):449-456. (in Chinese))

[4] 吴志勇,程丹丹,何海,等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(1):36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):36-45. (in Chinese))

[5] ZHOU Keke, LI Jianzhu, ZHANG Ting, et al. The use of combined soil moisture data to characterize agricultural drought conditions and the relationship among different drought types in China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 243:106479.

[6] 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 Xiaoling, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4):15-21. (in Chinese))

[7] 姜田亮,粟晓玲,郭盛明,等. 西北地区植被耗水量的时空变化规律及其对气象干旱的响应[J]. 水利学报,2021,52(2):229-240. (JIANG Tianliang, SU Xiaoling, GUO Shengming, et al. Spatiotemporal variation of vegetation water consumption and its response to meteorological drought in Northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2):229-240. (in Chinese))

[8] GUO Yi, HUANG Qiang, HUANG Shengzhi, et al.

Elucidating the effects of mega reservoir on watershed drought tolerance based on a drought propagation analytical method [J]. Journal of Hydrology, 2020, 598(3):125738.

[9] LORENZO-LACRUZ J, GARCIA C, MORAN-TEJEDA E. Groundwater level responses to precipitation variability in Mediterranean insular aquifers [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552:516-531.

[10] KUBICZ J, BAK B. The reaction of groundwater to several months' meteorological drought in Poland [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(1):187-195.

[11] HAN Zhiming, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Propagation dynamics from meteorological to groundwater drought and their possible influence factors [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578:124102.

[12] HELLMIG J, DE GRAAF I E M, WEILER M, et al. Large-scale assessment of delayed groundwater responses to drought [J]. Water Resources Research, 2020, 56(2):2019WR025441.

[13] BLOOMFIELD J P, MARCHANT B P. Analysis of groundwater drought building on the standardized precipitation index approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(12):4769-4787.

[14] THOMAS B F, FAMIGLIETTI J S, LANDERER F W, et al. GRACE groundwater drought index: evaluation of California Central Valley groundwater drought [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 198:384-392.

[15] 马明卫,韩宇平,严登华,等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护,2020,36(5):11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5):11-21. (in Chinese))

[16] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3):8-13. (in Chinese))

[17] 袁飞,章益棋,刘懿,等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估[J]. 水资源保护,2021,37(1):46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):46-52. (in Chinese))

[18] LIU Xianfeng, FENG Xiaoming, CIAIS P, et al. GRACE satellite-based drought index indicating increased impact of drought over major basins in China during 2002-2017 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 291:108057.

- [19] ZHONG Yulong, FENG Wei, HUMPHREY V, et al. Human-induced and climate-driven contributions to water storage variations in the Haihe River Basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2019(11):3050.
- [20] SAKUMURA C, BETTADPUR S, BRUINSMA S. Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(5):1389-1397.
- [21] WANG Sijia, LIU Hu, YU Yang, et al. Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of Northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705:135829.
- [22] ZHAO Meng, GERUO A, VELICOGNA I, et al. A global gridded dataset of GRACE drought severity index for 2002-2014; comparison with PDSI and SPEI and a case study of the Australia Millennium drought [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(8):2117-2129.
- [23] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4):1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4):1102-1111. (in Chinese))
- [24] HARRIS I, OSBORN T J, JONES P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1):109.
- [25] 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 Liliang, 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))
- [26] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7):1696-1718.
- [27] 粟晓玲, 张更喜, 冯凯. 干旱指数研究进展与展望 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(5):9-18. (SU Xiaoling, ZHANG Gengxi, FENG Kai. Progress and perspective of drought index [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2019, 17(5):9-18. (in Chinese))
- [28] 艾启阳, 粟晓玲, 张更喜, 等. 标准化地下水指数法分析黑河中游地下水时空演变规律 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10):69-74. (AI Qiyang, SU Xiaoling, ZHANG Gengxi, et al. Constructing standardized groundwater index to analyze temporal-spatial evolution of groundwater in middle reaches of Heihe River [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10):69-74. (in Chinese))
- [29] VICENTE-SERRANO S M, GOUVEIA C, CAMARERO J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1):52-57.
- [30] 孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析 [J]. *生态学报*, 2016, 36(24):7908-7918. (KONG Dongdong, ZHANG Qiang, GU Xihui, et al. Vegetation responses to drought at different time scales in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24):7908-7918. (in Chinese))
- [31] 张更喜, 粟晓玲, 郝丽娜, 等. 基于 NDVI 和 scPDSI 研究 1982—2015 年中国植被对干旱的响应 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20):145-151. (ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, HAO Lina, et al. Response of vegetation to drought based on NDVI and scPDSI datasets from 1982 to 2015 across China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(20):145-151. (in Chinese))
- [32] 王洋. 基于 GRACE 的柴达木盆地水储量变化研究 [D]. 西宁:青海大学, 2018.
- [33] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324):1379-1389.
- [34] HAN Zhiming, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Effects of vegetation restoration on groundwater drought in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591:125566.
- [35] 赵爱莉, 张晓斌, 郝改瑞, 等. 1971—2018 年汉江流域陕西段降水时空特征分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(6):80-87. (ZHAO Aili, ZHANG Xiaobin, HAO Gairui, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation in Shaanxi section of Hanjiang River Basin during 1971-2018 [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2020, 31(6):80-87. (in Chinese))
- [36] YANG Peng, XIA Jun, ZHANG Yongyong, et al. Temporal and spatial variations of precipitation in Northwest China during 1960-2013 [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 183:283-295.
- [37] 王计平, 郭仲军, 黄继红, 等. 北疆不同生态功能区近 30 年来植被盖度时空变化 [J]. *林业资源管理*, 2015(6):64-70. (WANG Jiping, GUO Zhongjun, HUANG Jihong, et al. Characteristics of spatio-temporal variation of NDVI in different ecological function zones in North Xinjiang in recent 30 years [J]. *Forest Resources Management*, 2015(6):64-70. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-15 编辑:熊水斌)