

肖平, 马真臻, 张西浩, 等. 青岛市平原区地下水干旱特征及对气象干旱的动态响应[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 97-110. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.008

XIAO Ping, MA Zhenzhen, ZHANG Xihao, et al. Groundwater drought characteristics and its dynamic response to meteorological drought in Qingdao plain area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 97-110. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.008

青岛市平原区地下水干旱特征及对气象干旱的动态响应

肖平¹, 马真臻¹, 张西浩², 肖璇³, 苟淇书⁴, 郭梦瑶⁵, 林鹏飞¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 青岛市水务管理局, 山东 青岛 266071; 3. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司, 山东 青岛 266100; 4. 青岛市水文中心, 山东 青岛 266001; 5. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:【目的】为探究青岛市平原区地下水干旱时空特征及对气象干旱的动态响应,【方法】利用2000—2020年20眼监测井逐月地下水位数据及平度站逐月降水数据分别计算标准化地下水指数(SGI)和多尺度的标准化降水指数(SPI),对地下水干旱和气象干旱演变及趋势特征进行分析,并利用Kendall's秩相关系数定量识别地下水干旱对气象干旱的动态响应关系。【结果】结果显示:研究区地下水与降水都呈现先变湿后变干的趋势,地下水干旱出现时间滞后于气象干旱;地下水干旱对气象干旱的响应时间为30~56个月,整体响应程度较强;春季、夏季、秋季和冬季SGI与SPI- n ($n=1, 2, \dots, 48$)的最大相关系数分别为0.42、0.84、0.65和0.57,地下水干旱对气象干旱在夏、秋响应程度明显强于春、冬;西南部SGI与SPI- n 的相关系数明显小于其他区域。【结论】结果表明:受降水、包气带岩性及地下水开采等因素的影响,研究区地下水干旱及对气象干旱的响应存在时空异质性;从气象干旱到地下水干旱的传播是一个缓慢演化的隐性过程,掌握地下水干旱对气象干旱的时空响应关系,能为地下水干旱的预警和防控提供参考。

关键词: 地下水干旱; 气象干旱; 标准化地下水指数; 标准化降水指数; 动态响应; 水资源; 时空变化

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0097-14



Groundwater drought characteristics and its dynamic response to meteorological drought in Qingdao plain area

XIAO Ping¹, MA Zhenzhen¹, ZHANG Xihao², XIAO Xuan³, GOU Qishu⁴, GUO Mengyao⁵, LIN Pengfei¹

(1. State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Qingdao Water Administration Bureau, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Qingdao Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266100, Shandong, China;

收稿日期: 2024-09-27; 修回日期: 2024-11-27; 录用日期: 2024-11-30; 网络出版日期: 2025-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3204601); 国家自然科学基金项目(52079143, 51609261)

作者简介: 肖平(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事地下水水资源评价与管理研究。E-mail: 614730270@qq.com

通信作者: 马真臻(1984—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水资源配置、调度与管理研究。E-mail: mazz@iwahr.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

4. Qingdao Hydrological Center, Qingdao 266001, Shandong, China; 5. College of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To explore the spatiotemporal characteristics of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Qingdao plain areas, [Methods] the standardized groundwater index (*SGI*) and standardized precipitation index (*SPI*) at the multi-scale were calculated using monthly groundwater level data from 20 monitoring wells and monthly precipitation data from Pingdu Station from 2000 to 2020. The evolution and trend characteristics of groundwater drought and meteorological drought were analyzed, and Kendall' s rank correlation coefficient was used to quantitatively identify the dynamic response relationship between groundwater drought and meteorological drought. [Results] The result indicate that both groundwater and precipitation in the study area tend to become wet first and then dry, and the occurrence time of groundwater drought is later than that of meteorological drought. The response time of groundwater drought to meteorological drought is 30~56 months, and the overall response degree is strong. The maximum correlation coefficients between *SGI* and *SPI-n* ($n=1, 2, \dots, 48$) in spring, summer, autumn, and winter were 0.42, 0.84, 0.65, and 0.57, respectively. The response degree of groundwater drought to meteorological drought was significantly stronger in summer and autumn than in spring and winter. The correlation coefficient between *SGI* and *SPI-n* in the southwest is significantly lower than in other regions. [Conclusion] The result reveal that there is spatiotemporal heterogeneity in groundwater drought and its response to meteorological drought in the study area, influenced by factors such as precipitation, lithology of the aquifer, and groundwater exploitation. The propagation from meteorological drought to groundwater drought is a slowly evolving implicit process. Understanding the spatiotemporal response relationship between groundwater drought and meteorological drought can provide reference for the early warning and prevention of groundwater drought.

Keywords: groundwater drought; meteorological drought; standardized groundwater index; standardized precipitation index; dynamic response; water resources; spatiotemporal changes

0 引言

干旱是一种波及范围广、影响时间长和反复发生的自然灾害,会对社会经济系统和生态环境系统的协调发展造成直接或间接的负面影响^[1]。干旱通常由长期降水不充分引起,伴随着高于正常水平的气温和蒸散发量^[2],可直接导致径流减少、植物缺水、地表水供水不足,使得地下水补给来源减少;同时干旱条件下人们还会加大地下水开采,以弥补地表供水的不足。补给减少和排泄增加,最终引发地下水位降低或储量减少,形成地下水干旱^[3]。持续的地下干旱直接影响工农业生产和居民生活,导致地下水位下降、地面下沉、沿海地区海水入侵、土壤盐渍化等生态环境问题^[4]。干旱分为四种类型:气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱^[5]。近年来,地下水干旱作为水文干旱中一种特殊类型^[6],逐渐引起广大研究者的重视。气象干旱与地下水干旱之间存在传播效应^[7],在人类活动干扰强烈的地区,研究地下水干旱特征及其对气象干旱的动态响应关系,对于地下水干旱预警、预防及管理至关重要。

目前国内外对于气象干旱的研究较为成熟,标准

化降水指数(*SPI*)、标准化降水蒸散指数(*SPEI*)、帕默尔干旱指数(*PDSI*)和德马顿干旱指数(*IDM*)等^[8]指标广泛应用于气象干旱研究中。然而由于地下水监测网络不够完善、监测周期短、数据缺失等问题,地下水干旱研究起步较晚,仍处于探索阶段,研究指标主要有标准化地下水指数(*SGI*)和地下水干旱指数(*GDI*)。其中, BLOOMFIELD 等^[9]在 2013 年参考 *SPI* 首次提出了 *SGI*,探讨了英国地下水干旱的演变特征,并肯定了 *SGI* 研究地下水干旱的可行性;艾启阳等^[10]利用 *SGI* 评价了河西走廊黑河流域中游地区地下水干旱时空变化规律,认为地下水干旱不仅受到气象要素的驱动作用,还受到当地特定的补给排泄影响; NUNNO 等^[11]通过贝叶斯变点检测和时间序列分解算法分析苏格兰北方到英格兰南部地区 *SGI* 序列,得到了地下水干旱的详细突变情况。 THOMAS 等^[12]在 2017 年通过 GRACE 重力卫星数据反演地下水储量,建立了 *GDI*,分析了加州中央谷地下水干旱的时空变化规律; WANG 等^[13]验证了 *GDI* 评价地下水干旱的可靠性,并分析了中国地下水干旱时空变化特征。 ZHOU 等^[14]通过将 *GDI* 与径流理论相结合,实现了淮河流域内地下水干旱事件及其持续时间、强度等特征的定量识别。可见 *SGI* 与 *GDI* 都成功用于评估

区域地下水干旱情况。

也有学者就地下水干旱对气象干旱的响应关系进行了探讨^[15-20], 如 KUMAR 等^[15] 基于实测数据计算了德国南部和荷兰中部地区 *SGI* 和多尺度 *SPI*, 分析气象干旱与地下水干旱关系并对研究区地下水干旱进行预测, 发现预测可靠性易受气候、人类活动以及区域水文地质条件等因素的影响; 粟晓玲等^[17] 利用 *GRACE* 数据和全球陆地同化系统 (*GLDAS*) 数据计算中国西北地区地下水干旱指数 (*GRACE-GDI*), 分析了地下水干旱特征, 认为地下水干旱对气象干旱的响应关系存在明显的时空差异; ZHAO 等^[20] 利用标准化降水与蒸散发指数 (*SPEI*) 和 *GDI* 对华北平原气象干旱和地下水干旱以及两者之间的关系进行了评价, 发现地下水总体呈现变干趋势, 两者之间的响应关系季节差异明显。以上研究初步探讨了地下水干旱对气象干旱的响应关系, 但是对响应关系的时空异质性研究较少, 且已有研究多基于 *GRACE* 数据计算 *GDI* 来评估, 而 *GRACE* 数据尺度大 ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), 精度相对较低^[17], 不太适用于评估小尺度区域地下水干旱时空变化情况。

青岛市是山东半岛经济中心城市, 人均水资源量仅 186 m^3 , 是全国的 9.5%, 水资源禀赋条件较差。2012—2019 年, 青岛市持续干旱, 降水比多年平均少 124 mm, 全市主要河流断流时间近 4 年, 平原区地下水位持续下降, 局部形成降落漏斗, 地下水干旱问题尤为严重, 迫切需要评估平原区的地下水干旱情况。相比 *GDI* 仅适用于大尺度范围, *SGI* 不受区域尺度影响, 可以用于较小尺度地区。青岛市平原区监测井分布较多且均匀, 具备利用 *SGI* 评估地下水干旱时空变化情况的条件。基于此, 本文利用降水数据和地下水监测数据分别计算 *SGI* 和多尺度 *SPI*, 分析青岛市平原区地下水干旱和气象干旱演变趋势, 探讨地下水干旱对气象干旱的时空动态响应关系, 对区域地下水干旱预警和防护有重要参考意义。

1 研究区概况

青岛市平原区位于山东省青岛市西部(见图 1), 面积为 $1\,808.5 \text{ km}^2$, 是青岛市重要的农业灌区, 涉及平度市南部、莱西市西南部、即墨市西部和胶州市北部, 地理坐标范围为 $33^{\circ}48'N-36^{\circ}20'N$, $119^{\circ}33'E-120^{\circ}20'E$, 属华北温带季风大陆气候。多年平均降水量为 633.1 mm, 降水主要集中在 6—9 月, 约占全年的 70%^[21]。地势南高北低, 含水层富水性由南

向北逐渐减弱。主要河流位于山东半岛诸河水系, 有胶莱河、大沽河和泽河。地下水主要由降雨入渗补给、地表水补给、山前侧向径流补给和井灌回归补给, 主要通过人工开采、侧向流出和少量潜水蒸发等方式排泄。

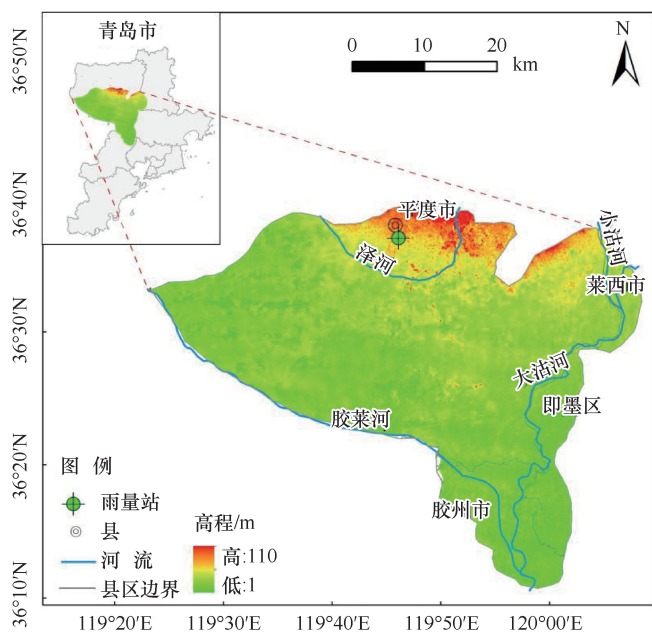


图 1 研究区概况

Fig. 1 General situation of the study area

青岛市平原区土壤岩性主要是粉质黏土、重壤土以及少数中壤土和轻壤土。按照空间均匀的原则, 并考虑不同土壤岩性分布情况, 选择井 43、井 91、井 146、井 150 和井 159 作为研究区典型监测井。其中, 井 150B 和井 159 土壤岩性为粉质黏土, 井 43、井 91 为重壤土, 井 146 为中壤土。轻壤土区域无监测井分布, 本次不考虑。研究区土壤质地及监测井分布情况如图 2 所示。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究采用了研究区土壤质地数据、地下水位观测数据和实测降水数据。土壤质地数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。地下水位数据由青岛市水务管理局提供, 为研究区水位观测系列较为完整的 20 眼地下水监测井 2000—2020 年逐月地下水位数据, 分布如图 2 所示。降水数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 采用研究区内平度气象站(站号: 54842)2000—2020 年日降水系列。为了与地下水数据保持一致, 降水数据取月累积值进行分析。

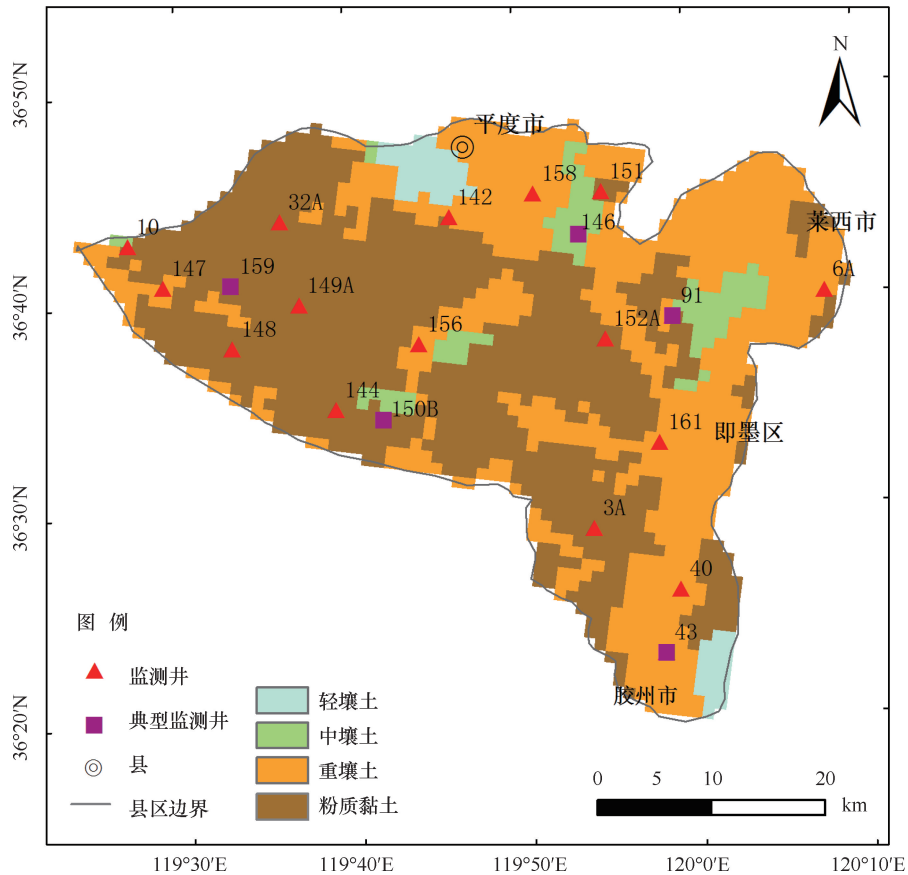


图2 土壤质地及监测井分布

Fig. 2 Soil texture and monitoring well distribution

2.2 研究方法

2.2.1 SPI与SGI

标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)是由MCKEE等^[22]在1993年最先提出的,是全球气象干旱监测和影响评估中使用最广泛的指数之一,具有计算简单和适用于多种时间尺度的特点^[23]。某个时间尺度的SPI是基于计算理想周期的长期降水量的 Γ 分布,再将其转化为标准正态分布。SPI的具体计算过程可参考文献^[24]。SPI的等级划分如表1所列。

表1 SPI与SGI干旱等级划分^[25]

Table 1 Classification of SPI and SGI drought grades

干旱等级	无旱	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极度干旱
SPI/SGI	>0	-1~0	-1.5~-1	-2~-1.5	≤-2

标准地下水指数(Standardized Groundwater Index, SGI)是参考SPI提出的一种用于评估地下水干旱状况的指标。目前SGI的计算方法包括参数化方法和非参数化方法,通常优先考虑参数化方法。参数化方法计算SGI的步骤与SPI类似,但由于地下水位是

一个连续的变化过程,在一定时间内累积水位无意义,水位序列不一定服从Gamma分布,因此计算SGI需要找到最适合地下水位序列的分布函数。常用拟合分布函数有Gamma分布、Weibull分布、Normal分布、Log-normal分布和Extreme-value分布等。参数化方法计算SGI的流程如图3所示,SGI的具体计算公式见文献^[10]。SGI的等级划分如表1所列。

2.2.2 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall(MK)检验法^[26-27]是分析水文及气象数据趋势及突变情况常用的一种非参数检验方法,其优势在于操作简单、不受时间序列异常值和是否具有某一特定分布的影响。 UF 和 UB 是MK检验法的两个统计量, $UF > 0$ 序列为上升趋势, $UF < 0$ 序列为下降趋势。对于给定显著性水平 α 下的临界值 u_α , $|UF| < u_\alpha$,说明序列变化趋势不显著, $|UF| \geq u_\alpha$,说明序列上升或下降趋势显著。 UF 和 UB 曲线在临界值之间的交点为突变点。MK检验法的具体分析步骤见文献^[28]。

2.2.3 Kendall's 秩相关

Kendall's 秩相关是衡量两个时间序列在统计上

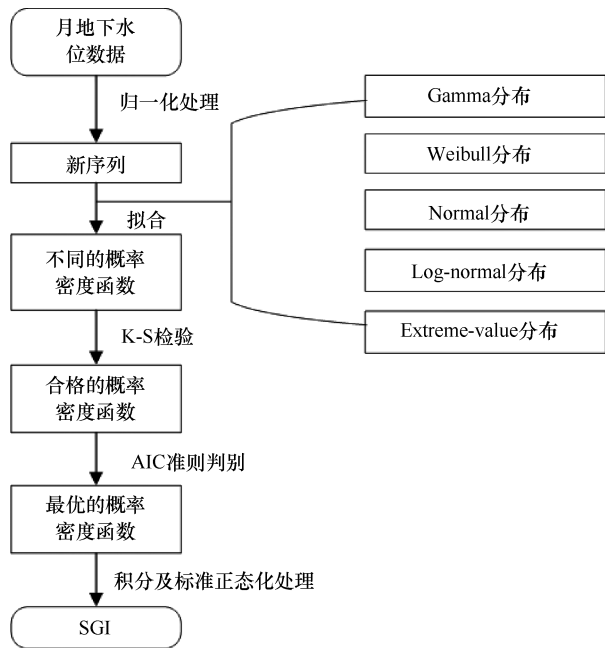


图3 参数化方法计算SGI的流程

Fig. 3 The flow chart of calculating SGI by parametric method

相关性强弱的常用方法, 不受时间序列异常值和是否遵从一定分布的影响, 因此被广泛用于水文及气象分析的研究中^[29]。对于时间序列变量 $P_n = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 和 $Q_n = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$, 相关性计算公式为

$$\tau_{au} = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(P_j - P_i, Q_j - Q_i) \quad (2)$$

式中, τ_{au} 为两个时间序列变量的相关系数; S 为统计变量。

τ_{au} 的取值范围为 $[-1, 1]$, 若 $\tau_{au} > 0$, 值越大, 两个时间序列变量的正相关性越大; 若 $\tau_{au} < 0$, 值越小, 两个时间序列变量的负相关性越大; 若 $\tau_{au} = 0$, 则两个时间序列变量是相互独立的。

3 结果与分析

3.1 气象干旱特征

3.1.1 气象干旱时间特征

采用 SPI 指标, 基于研究区 2000—2020 年逐月降雨量进行气象干旱分析。不同时间尺度的 SPI 反映不同类型的气象干旱: $SPI-1$ (代表一个月尺度的 SPI , 以此类推) 反映气象干湿的逐月变化情况; $SPI-3$ 反映季节性旱涝特征; $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 反映中期尺度降雨变化下的气象干旱特征; $SPI-24$ 和 $SPI-48$ 反映长期尺度的气象干旱状况。研究区 1、3、6、12、24、

48 个月共 6 个时间尺度的 SPI 变化过程如图 4 所示。

图 4 显示, 1 个月尺度下, 2000 年、2002 年、2005—2009 年、2012—2017 年和 2019—2020 年研究区干旱频率较高, 其中 2015 年几乎全年干旱, 在 3 月达到中度干旱; 3 个月尺度下, 2000 年、2002 年、2006 年、2008—2009 年和 2012—2017 年干旱频率较高, 其中 2009 年、2012 年几乎全年干旱, 2009 年 5 月、2012 年 5 月分别达到中度干旱与重度干旱; 中期尺度下, 2000 年、2002 年、2009 年和 2012—2019 年干旱频率较高, 持续时间长, 2015 年 9 月达到极度干旱; 长期尺度下, 2000—2001 年、2010 年和 2013—2020 年干旱频率较高, 持续时间长, 2017 年下半年主要呈现重度干旱与极度干旱。综上分析, 研究区不同时间尺度的 SPI 值差异明显, 但干旱频率高的年份大体一致; 1 个月和 3 个月尺度的 SPI 值波动剧烈, 干旱程度多在 3—5 月最为严重; 中期和长期尺度下的 SPI 值波动较为平稳, 干旱程度多在 9—12 月最为严重, 且干旱的连发性较强。

3.1.2 气象干旱趋势特征

$SPI-1$ 能反映气象干湿的逐月变化情况, 相比其他 SPI 序列, 分析 $SPI-1$ 序列的趋势及突变情况更具实际意义。对研究区 2000—2020 年 $SPI-1$ 序列进行 MK 检验分析, 在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 下, $u_{0.05} = 1.96$, 即 $|UF| \geq 1.96$ 时, $SPI-1$ 序列显著上升或下降, $|UF| < 1.96$ 时, $SPI-1$ 序列变化不显著, 结果如图 5 所示。

由图 5 可见, 2000 年 1 月至 2000 年 9 月 $UF < 0$, 且 UF 统计量值位于临界值之间, $SPI-1$ 序列呈现下降趋势, 但下降趋势不显著。2000 年 10 月至 2007 年 1 月 $UF > 0$, $SPI-1$ 序列呈现上升趋势, 在 2003 年 11—12 月 UF 统计量值大于临界值上限, 上升趋势达到显著水平。2007 年 2 月之后除少数月份 $UF < 0$, $SPI-1$ 序列为长期的下降趋势, 下降趋势不显著。从 SPI 的变化趋势可以看出, 研究区呈现先变湿后变干的趋势。

UF 和 UB 曲线分别于 2000 年 7 月和 2007 年 1 月相交且相交点位于临界值之内, 说明 $SPI-1$ 序列于此时发生突变。2000 年 7 月到 2007 年 1 月, $SPI-1$ 为正值的年份较之前明显增多, 干旱频率降低; 而在 2007 年 1 月之后, $SPI-1$ 为负值的年份增多, 干旱频率增大。

3.2 地下水干旱特征

3.2.1 地下水干旱时间特征

基于研究区 2000—2020 年逐月平均水位和 5 处

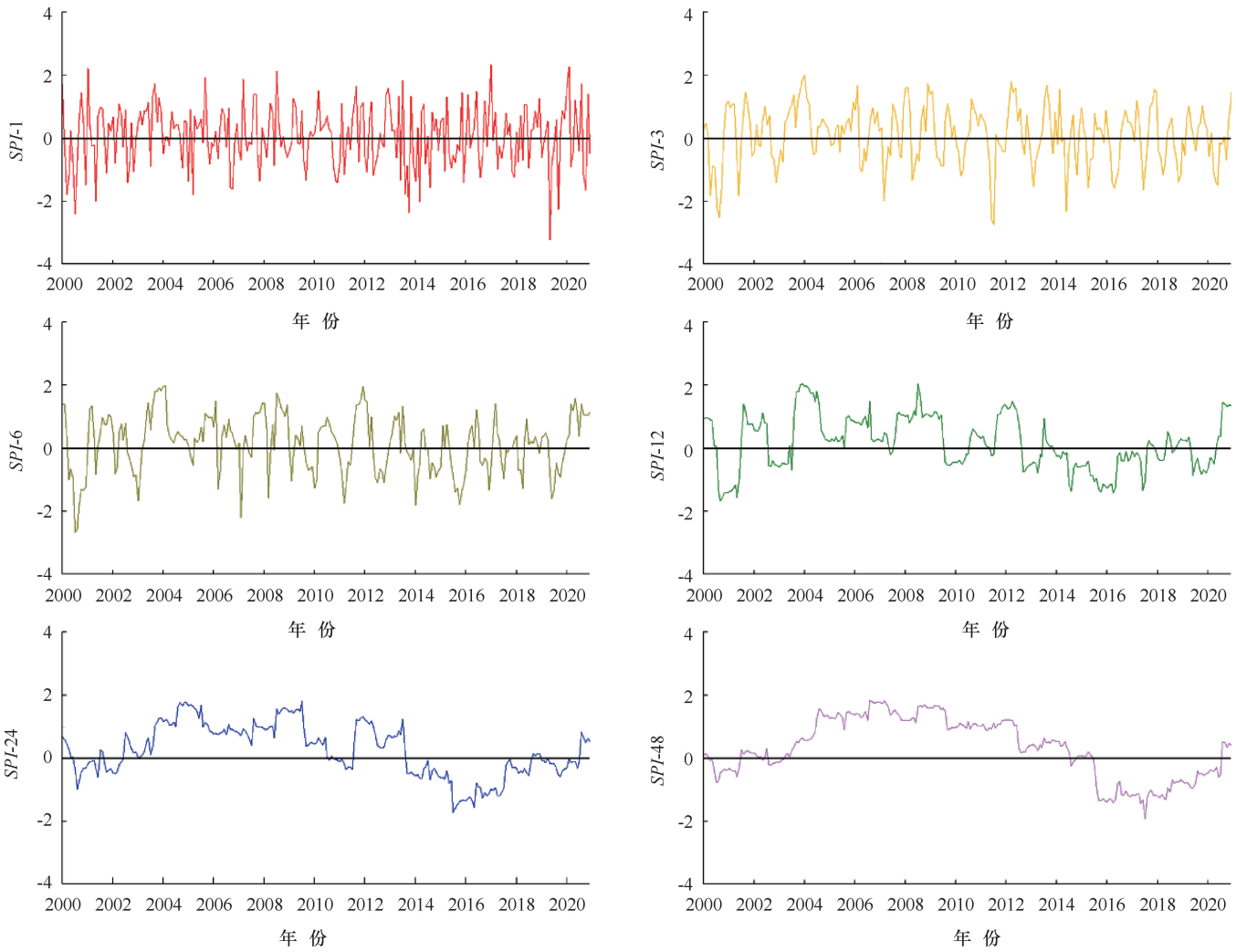


图4 研究区 SPI 变化过程

Fig. 4 The change process of SPI in the study area

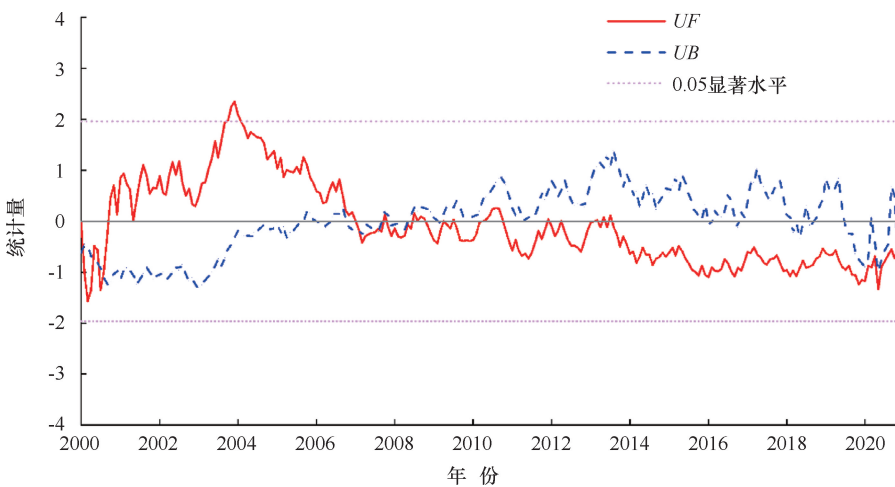


图5 研究区 SPI 序列 MK 检验分析

Fig. 5 MK test analysis of SPI sequence in the study area

典型监测井逐月观测水位, 分别计算研究区和典型监测井 SGI, 分析地下水干旱时间特征。采用研究区

20 眼监测井观测水位计算研究区平均水位。研究区及典型监测井 SGI 变化过程如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 井 150B、井 159 土壤岩性均为粉质黏土, 干旱频率和干旱程度较为一致, 在 2000—2005 年、2007—2008 年和 2016 年—2020 年干旱频率较高, 2000—2005 年、2007 年和 2018—2020 年全年处于干旱状态, 在 2020 年 3 月干旱最为严重, 为中度干旱。井 43 与井 91 土壤岩性均为重壤土, 干旱频率与干旱程度存在差异, 井 43 在 2001 年、2014—2020 年干旱频率较高, 2014—2020 年全年都处于干旱状态, 在 2020 年 5 月干旱最为严重, 为极

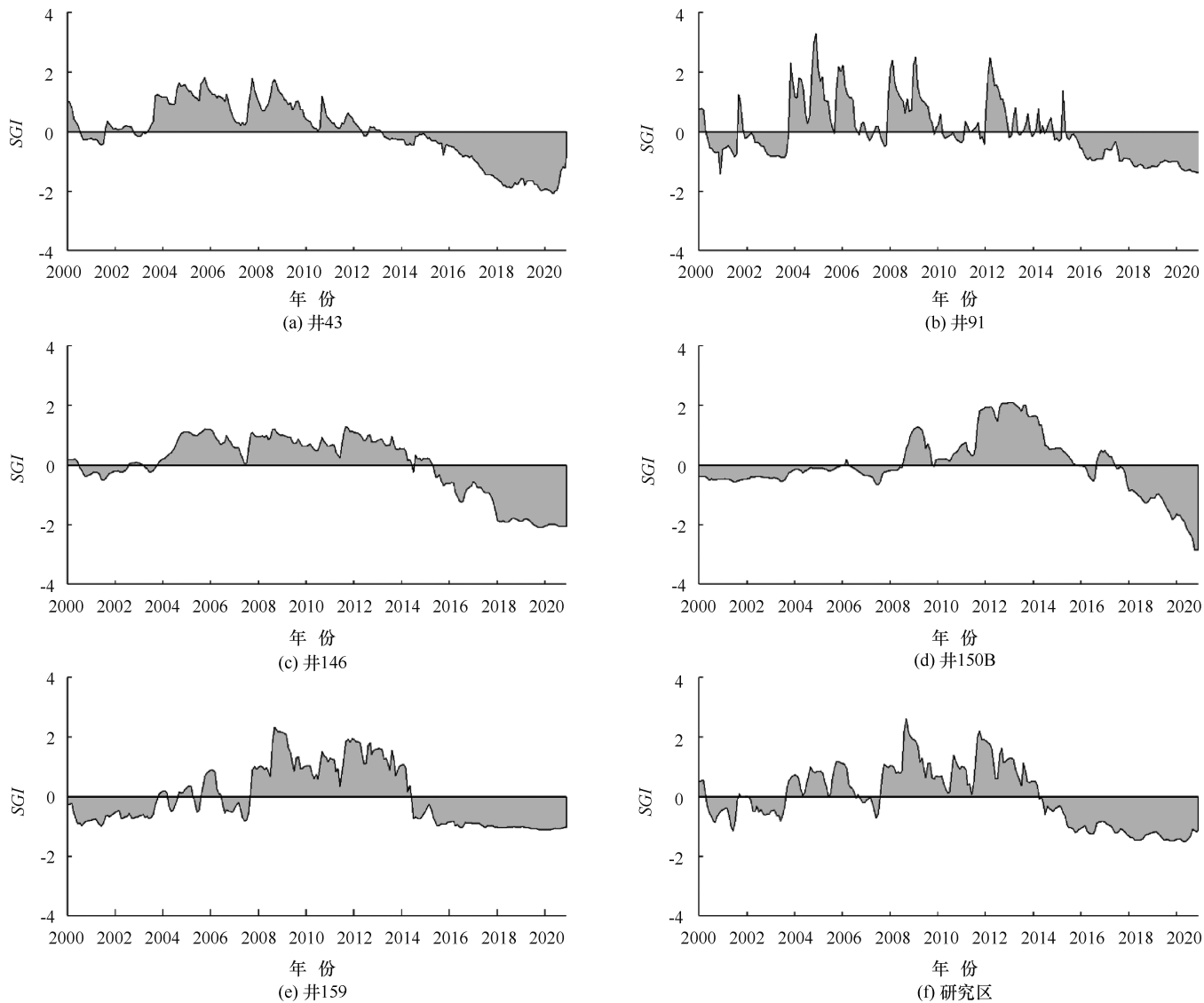


图6 研究区及典型监测井 SGI 变化过程

Fig. 6 The change process of SGI of the study area and the typical monitoring well

度干旱；井 91 在 2000—2004 年、2007 年、2014—2020 年全年基本处于干旱状态，在 2020 年 4 月干旱最为严重，为中度干旱。研究区与井 91 的干旱频率和干旱程度较为一致。井 146 土壤岩性为中壤土，在 2000 年、2015—2020 年全年基本处于干旱状态，在 2020 年 5 月干旱最为严重，为极度干旱。

与气象干旱时间特征对比可以发现，研究区 SGI 与中长期 SPI 的波动相似度较高，都较为平稳。地下水干旱最严重的月份与短期尺度 (SPI-1 和 SPI-3) 的气象干旱一致，均为 3—5 月。这是因为 3—5 月是作物生长关键期，需水量大，但是该时段降水较少，而水库主要向城镇供水，作物只能依赖地下水灌溉，导致地下水干旱；而该时段气象干旱最为严重则主要是受季节性降水减少的影响。

3.2.2 地下水干旱空间特征

计算研究区监测井 2000—2020 年年均 SGI 值，并使用 Arcgis 中的普通克里金法对年均 SGI 进行空间插值，绘制等值线图，分析地下水干旱空间特征。具体如图 7 所示。

图 7 显示，研究区 2000—2003 年地下水干旱程度变化不大，西部地区为轻度干旱状态，东部地区为无干旱状态；2004—2012 年全区基本为无旱状态；2013 年局部地区为无旱状态，其他地区为轻度干旱状态；2014—2016 年全区干旱持续发生，基本为轻度干旱状态；2017—2020 年全区干旱持续加重，在 2020 年，全区整体干旱情况最为严重，西南局部地区处于重度干旱和极度干旱状态。

总体而言，研究区西部地区年均 SGI 值比东部地

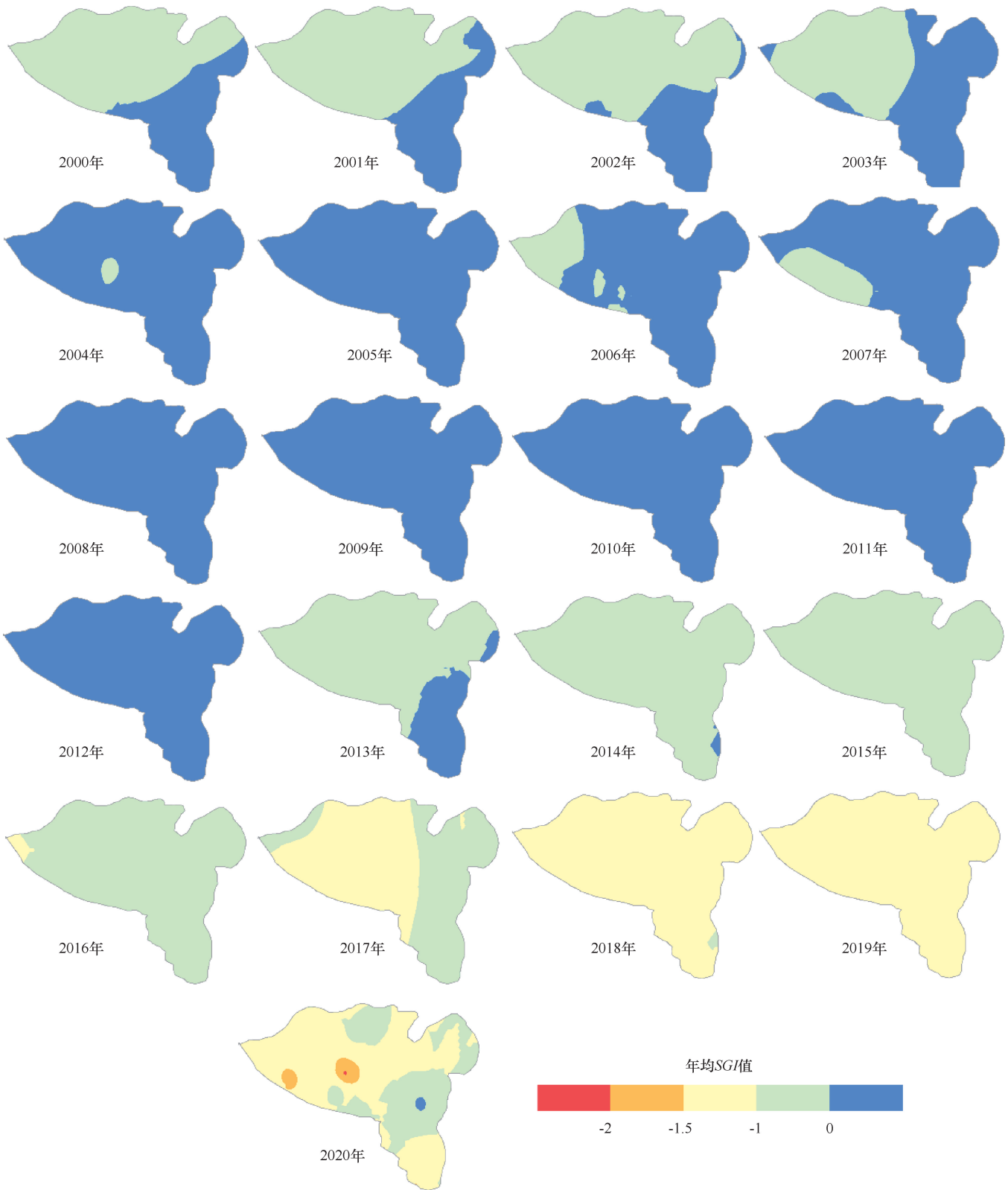


图7 研究区年均SGI等值线

Fig. 7 Annual average SGI contour maps for the study area

区偏小,地下水干旱程度呈现东部向西部逐渐加重的特征。这与水资源开发的区域特征有关,研究区西部河流较小,水量不充沛,农业灌溉对地下水的依赖程

度高,地下水开采量大,导致地下水位的下降;东部地区靠近大沽河(见图1),这是青岛最大的河流,且有多级闸坝调蓄,沿岸地区可就近引河道水灌溉,对

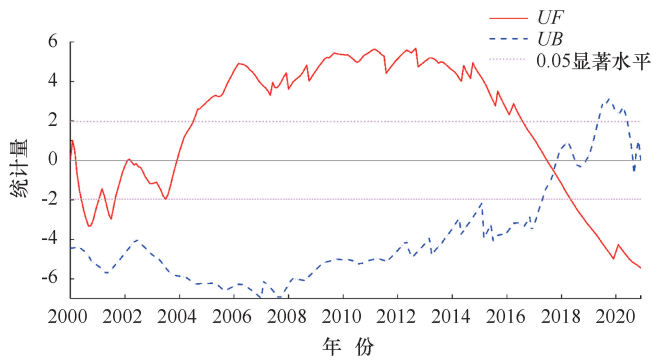


图8 研究区平均水位 SGI 序列 MK 检验分析

Fig. 8 MK test analysis of SGI sequence of mean water level in the study area

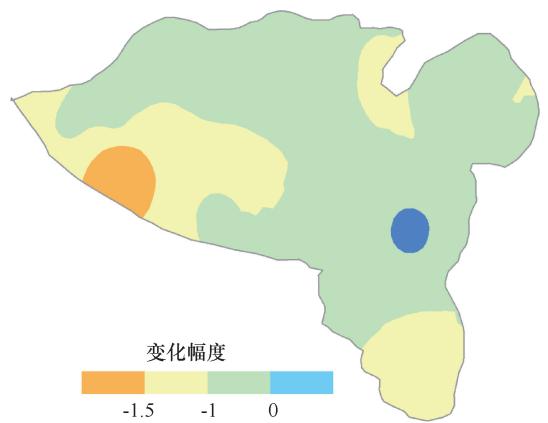


图9 研究区2020年与2000年年均SGI变化幅度空间分布图

Fig. 9 Annual average SGI contour maps for the study area

地下水的依赖程度相对较低,地下水开采量较小,地下水水位下降幅度小。

3.2.3 地下水干旱趋势特征

对研究区2000—2020年的SGI序列进行MK检验分析。在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 下, $u_{0.05}=1.96$,分析研究区SGI序列的趋势及突变情况,结果如图8所示。从图8可知,研究区2000年1月至2003年12月大部分月份 $UF<0$,SGI序列整体呈现下降趋势,在2000年6月—2001年1月、2001年5月—2001年8月达到显著水平。2004年1月—2017年6月, $UF>0$,SGI序列呈现上升趋势,2004年8月—2016年7月达到显著水平。2017年7月之后 $UF<0$,SGI序列呈下降趋势,于2018年6月之后达到显著水平。从SGI的变化趋势可以看出,研究区总体上呈现先变湿后变干的趋势,这与SPI的变化趋势较为相似,但是趋势发生时间上有所滞后。进一步对研究区平均水位SGI序列进行MK突变检验, UF 与 UB 两条曲线于2017年8月相交,且交点位于临界值之间,表明此时SGI序列发生突变。突变前,研究区SGI均值为0.36,未发生地下水干旱的月份占62.6%;突变之后,SGI持续小于-1,均值为-1.26,所有月份均发生地下水干旱,且程度严重。

利用研究区2020年与2000年年均SGI绘制SGI变化趋势的空间分布图(见图9)。图9显示,对比2000年,除西部局部区域,2020年SGI整体呈现减少趋势,西南部地区减少最为明显,部分地区减少了1.5以上。

3.3 地下水干旱对气象干旱的时空动态响应

3.3.1 地下水干旱对不同时间尺度气象干旱的响应

为了量化地下水干旱对不同时间尺度气象干旱的响应关系,采用Kendall's τ 秩相关法计算研究区和不

同监测井2000—2020年SGI与 $SPI-n$ ($n=1, 2, \dots, 60$)的相关系数,并绘制两个指标的相关系数热点图,如图10所示。

图10显示,随着SPI序列时间尺度的增加,两个指标的相关系数呈现增加的趋势,但两个指标的相关系数在增加到一定程度后开始减小。两个指标相关系数的最大值分布在30~56个月时间尺度上,大多数分布在48个月时间尺度以下。其中,井158最大的相关系数出现在30个月时间尺度上,井150B最大的相关系数出现在56个月时间尺度上。研究结果表明研究区地下水干旱对气象干旱的响应时间(即两个指标相关系数最大时的SPI时间尺度)分布在30~56个月,响应时间较长。研究区井144、井150B和井156两个指标的最大相关系数较小,分别为0.47、0.36和0.51;其他监测井两个指标的最大相关系数均超过0.6,最大相关系数为0.80,说明除少数区域外,地下水干旱对气象干旱的响应较强,气象干旱是研究区地下水干旱的主因。

3.3.2 地下水干旱对气象干旱的季节性响应

利用研究区2000—2020年不同季节SGI和1~48个月尺度的SPI之间的相关性,分析地下水干旱对气象干旱的季节性响应,3—5月、6—8月、9—11月、12月—次年2月分别为春季、夏季、秋季、冬季。计算逐年不同季节内平均SGI与 $SPI-n$ ($n=1, 2, \dots, 48$)的相关系数(见图11和表2)。

从图11可以看出,随着SPI时间尺度的增加,各个季节两个指标的相关性呈增加趋势,两个指标最大的相关系数出现在35~44个月尺度上。其中春季两个指标的相关性在44个月尺度达到最大值,夏季两个指标的相关系数在35个月尺度达到最大值,

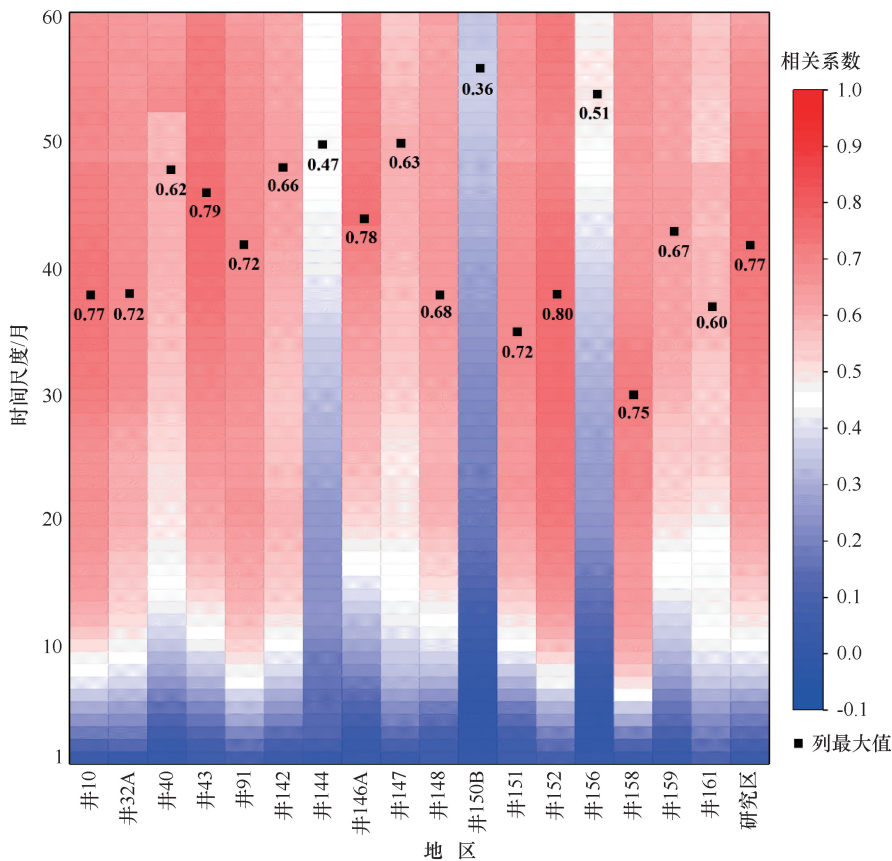


图 10 研究区及不同监测井 2000—2020 年 SGI 与不同尺度 SPI 的相关性

Fig. 10 Correlation between SGI and SPI at different scales in the study area and different monitoring Wells from 2000 to 2020

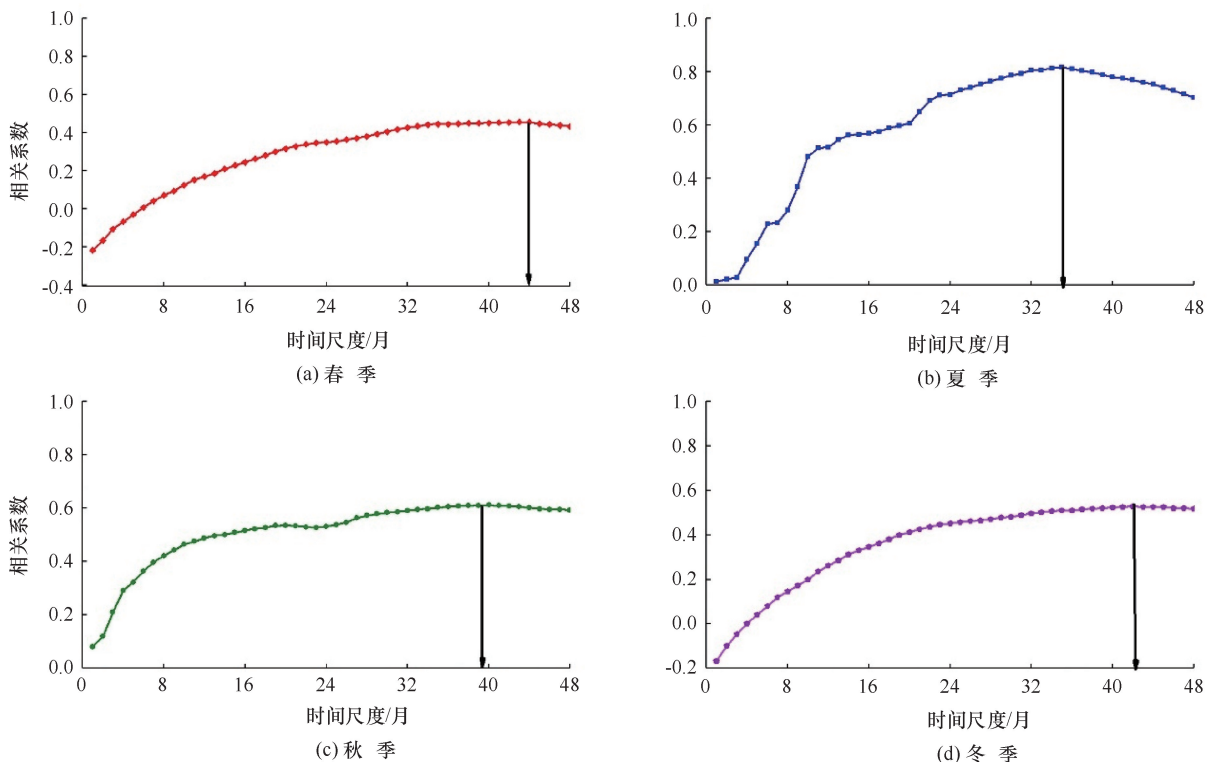


图 11 研究区不同季节 SGI 与不同尺度 SPI 的相关性

Fig. 11 Correlation between seasonal SGI and SPI at different scales in the study area

表2 研究区不同季节 SGI 对不同尺度 SPI 的响应

Table 2 Responses of seasonal SGI to SPI at different scales in the study area

季节	春季	夏季	秋季	冬季
响应时间/月	44	35	39	42
相关系数	0.42	0.84	0.65	0.57

而冬季和秋季两个指标的相关系数最大值发生尺度介于两者之间。春、冬季 SGI 与短期 SPI 相关系数为负值, 主要原因是春、冬季节地下水开采量大, 使地下水更干旱, 且 SGI 与短期尺度的 SPI 相关性低, 短期降水对地下水干旱影响较小。根据表 2, 夏季、秋季地下水干旱对气象干旱的响应程度明显强于冬季和春季。春季两个指标相关系数最大值在四个季节中最小, 为 0.42。由于春季是作物灌溉高峰期, 主要依赖地下水开采量灌溉, 地下水开采对地下水位影响较大; 夏季两个指标的相关系数最大为 0.84, 夏季降水量大, 能够较好满足作物生长所需, 从而使本季节利用地下水灌溉较少, 降水是直接影响地下水干旱的主要因素; 秋季和冬季两个指标的相关系数分别为 0.65 和 0.57, 介于春季和夏季之间。分析表明, 降水及地下水开采的季节性特征是影响季节性 SGI 对 SPI 响应强度的主要因素。

3.3.3 地下水干旱对气象干旱的空间响应

为了量化地下水干旱对气象干旱的空间响应关

系, 计算 2000—2020 年 20 眼监测井的 SGI 与代表性时间尺度(1 个月、3 个月、6 个月、12 个月、24 个月和 48 个月) SPI 之间的相关系数, 并进行空间插值, 绘制相关系数的空间分布图, 如图 12 所示。

图 12 表明, 随着时间尺度的增加, 空间上 SGI 与 SPI 的相关系数增大。空间上 SGI 与短期尺度的 SPI ($SPI-1$ 和 $SPI-3$) 的相关性较小, 介于 $-0.05 \sim 0.17$ 之间; 与中期尺度 ($SPI-6$ 和 $SPI-12$) 的相关系数中等, 介于 $0.12 \sim 0.58$ 之间; 而与长期尺度 ($SPI-24$ 和 $SPI-48$) 的相关系数最大, 介于 $0.23 \sim 0.80$ 之间。空间上 SGI 与不同尺度 SPI 相关性强度的分布规律有所差异, 但整体具有一致性。研究区西南部两个指标的相关性强度明显弱于其他区域, 这主要与两方面因素有关, 一方面该区域是研究区的主要农灌区, 且地表水资源相对匮乏, 农业灌溉以地下水为主, 地下水开采量大, 地下水干旱主要受人类活动影响; 另一方面, 该区域主要为粒径较小的粉质黏土和重壤土, 地下水含水层富水性较弱, 更易受到外界条件如地下水开采和土地利用等人类活动的影响。

4 讨论

研究区地下水干旱对气象干旱的最强响应时间尺度分布在 30~56 个月, 这在国内外以往的研究^[19,30]中也有发现。崔英杰等^[19]分析保定市 SGI 和 SPI, 发现河北省保定市地下水位对降水的响应时间主要为

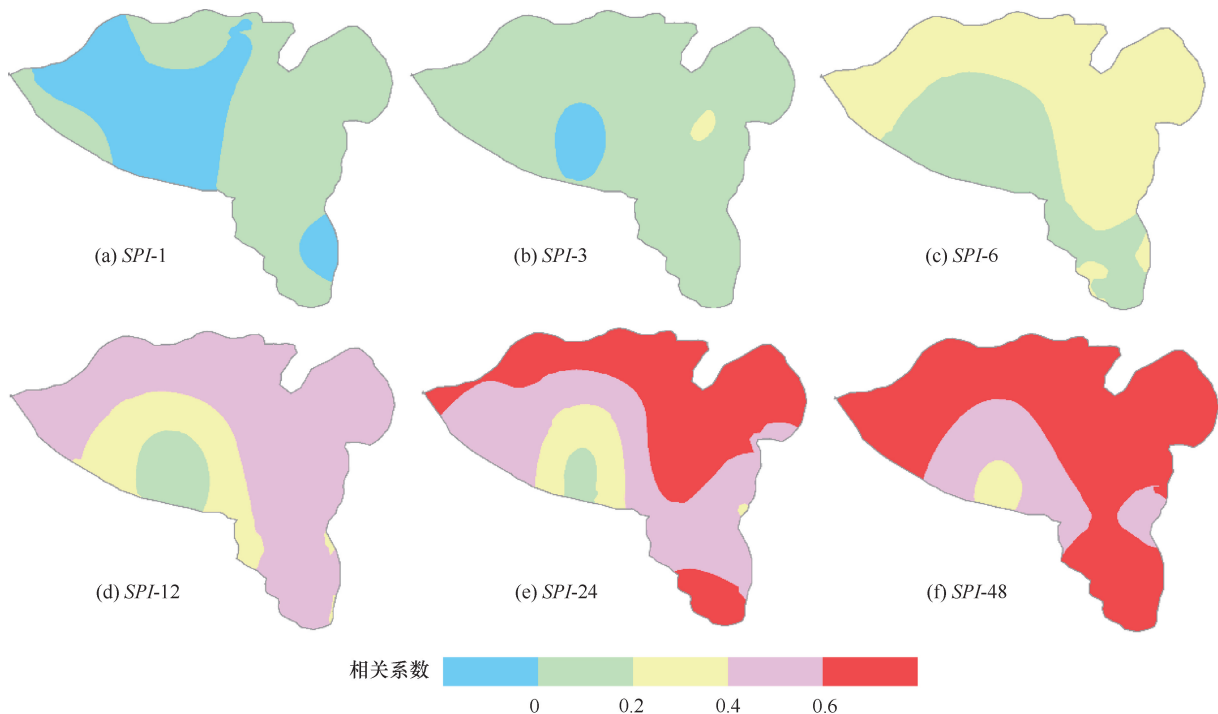


图 12 研究区 SGI 与不同尺度 SPI 的空间相关性

Fig. 12 Spatial correlation between SGI and SPI at different scales in the study area

36~48个月, 局部地区大于48个月; ROHINI等^[30]利用德国和荷兰地区超过2000眼地下水监测井数据分析了SGI对不同时间尺度SPI的相关性, 发现部分地区地下水干旱对气象干旱的响应时间为30~36个月。有学者进一步分析了地下水干旱对气象干旱响应时间的影响因素, LORENZO-LACR等^[31]将地中海地区SGI对SPI响应时间分为三种模式: 小于6个月、6~24个月、大于24个月, 认为不同的响应模式主要是由含水层岩性和高渗透性岩所占百分比的差异造成的。其中, 最后一种响应模式所在区域的岩性与本次研究区一致, 均主要为粉质黏土和重壤土。研究区地下水干旱对气象干旱的响应时间较长, 说明气象干旱对地下水干旱的传播是一个缓慢演化的隐性过程, 因此在实际应对地下水干旱的过程中, 可以根据地下水干旱对气象干旱的响应时间, 提前进行预警、预防工作。

研究区地下水干旱对气象干旱的季节性响应关系表明夏季、秋季地下水干旱对气象干旱的响应程度明显强于冬季、春季, 这与不同季节的补给和排泄条件有关。沈业杰等^[32]基于氢氧稳定性同位素技术分析不同季节降水对地下水的贡献率, 发现丰水期降雨对地下水的贡献率为83%, 而枯水期降雨对地下水的贡献率仅为17%; 赵振华等^[33]对济南市西郊降雨资料和地下水月水位资料进行季节特征统计和小波分析, 发现春季抽取地下水用于农业灌溉等活动会较大程度影响地下水动态。

研究区地下水干旱对气象干旱的响应关系与我国南部、西北部等区域存在差异。例如, LIU等^[34]利用SGI分析了江苏省地下水干旱变化特征, 发现地下水干旱对气象干旱的响应时间为1~12个月; 龚栋栋等^[16]揭示新疆平原区地下水干旱时空变化特征及其对气象干旱的响应关系, 认为新疆平原区平均响应时间为18个月, 其中天山北麓山前平原区的响应时间呈增大趋势。

综上所述, 由于地下水干旱对气象干旱响应关系的复杂性, 一方面, 未来需要更深入地验证人类活动(地下水开采、河道闸坝和土地利用等)对地下水干旱的影响, 并定量分析和评估这些影响因素对响应关系的贡献率; 另一方面, 未来还需要考虑变化环境下地下水干旱发生机制的变化情况, 以更好地进行地下水干旱的预警和防控。

5 结论

(1) 受降水和地下水开采影响, 研究区地下水干

旱与短期尺度(SPI-1和SPI-3)的气象干旱最为严重的月份都在3—5月; 随着SPI时间尺度的增加, 气象干旱变化趋势特征越明显, SGI与中长期尺度的SPI波动相似; 研究区地下水与降水都呈现先变湿后变干的趋势, 地下水干旱出现时间滞后于气象干旱; 研究区地下水干旱总的分布趋势是从东部向西部逐渐加重。

(2) 受包气带岩性影响, 研究区地下水干旱对气象干旱的响应时间较长, 为30~56个月; 除个别区域外, 地下水干旱对气象干旱的响应较强, 气象干旱是地下水干旱的主因。

(3) 降水和地下水开采是影响地下水干旱对气象干旱季节性响应特征的主要因素。研究区春季、夏季、秋季和冬季SGI与SPI- n ($n=1, 2, \dots, 48$)的最大相关系数分别为0.42、0.84、0.65和0.57, 地下水干旱对气象干旱在夏、秋、冬的响应程度明显强于春。

(4) 研究区地下水监测井SGI与短期尺度的SPI(SPI-1和SPI-3)的相关性较小, 介于-0.05~0.17之间; 与中期尺度(SPI-6和SPI-12)的相关系数中等, 介于0.12~0.58之间; 与长期尺度(SPI-24和SPI-48)的相关系数最大, 介于0.23~0.80之间。受包气带岩性、地层富水性和地下水开采等因素影响, 研究区西南部SGI与SPI的相关性明显弱于其他区域。

参考文献(References):

- [1] SCHWALM C, ANDEREGG W, Michalak A, et al. Global patterns of drought recovery[J]. *Nature*, 2017, 548: 202-205.
- [2] 崔素芳, 张保祥, 荣燕妮, 等. 基于云模型的山东省干旱时空分布特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 679-688.
CUI S F, ZHANG B X, RONG Y N, et al. Characteristics of temporal-spatial drought distribution in Shandong Province based on cloud model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 679-688.
- [3] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1): 202-216.
- [4] 汤秋鸿, 徐锡蒙, 周羽暄, 等. 全球变化背景下黄河流域水旱灾害演变及应对策略[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(2): 13-20.
TANG QiuHong, XU Ximeng, ZHOU Yuxuan, et al. Evolution of floods and droughts in the Yellow River Basin under global change and relevant coping strategies [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(2): 13-20.
- [5] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望 I: 干旱传播含义、特征、类型与研究方法[J]. *南水北调与水利科*

技(中英文), 2023, 21(4): 625-653.

ZHI X F, TIAN Y T, CHEN C C, et al. Drought propagation: Progress and prospect I: The meaning, characteristics, types, and research methods of drought propagation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 625-653.

[6] KARTAL V, NONES M. Assessment of meteorological, hydrological and groundwater drought in the Konya closed basin, Türkiye[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(9): 285.

[7] WOSSENYELEH B K, KASA A, VERBEIREN B, et al. Drought propagation in the hydrological cycle in a semiarid region: a case study in the Bilate catchment, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2022, 30: 751-766.

[8] 郭伟, 李莹, 杜莉丽. 基于SPI的山西省1972—2012年春夏干旱特征及对玉米产量的影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 230-236.

GUO Wei, LI Ying, DU Lili. Characteristic of spring and summer drought variations and its relation with maize yield in Shanxi Province in 1972—2012 based on SPI[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 230-236.

[9] 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.

[10] 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.

[11] DI N F, GRANATA F. Analysis of trends and abrupt changes in groundwater and meteorological droughts in the United Kingdom. [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637(3/4): 131430.

[12] 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.

[13] WANG F, LAI Hexin, LI Yanbin, et al. Identifying the status of groundwater drought from a GRACE mascon model perspective across China during 2003—2018 [J]. Agricultural Water Management, 2022, 260: 107251.

[14] ZHAO Y. Quantifying water storage changes and groundwater drought in the Huaihe river basin of china based on GRACE data [J]. Sustainability, 2024, 16(19): 8437.

[15] KUMAR R, MUSUUZA J L, VAN LOON A F, et al. Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016,

20(3): 1117-1131.

[16] 龚栋栋, 高凡, 吴彬, 等. 基于GRACE的新疆平原区地下水干旱时空变化及其对气象干旱的响应[J]. 干旱区地理, 2024, 47(9): 1496-1507.

GONG Dongdong, GAO Fan, WU Bin, et al. Spatial and temporal change of groundwater drought in the Xinjiang plain based on GRACE and its response to meteorological drought[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(9): 1496-1507.

[17] 粟晓玲, 褚江东, 张特, 等. 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[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42.

SU Xiaoling, CHU Jiandong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42.

[18] KUBIZ 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.

[19] 崔英杰, 魏永富, 徐晓民, 等. 基于标准地下水指数的地下水位动态及其对降水变化的响应[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6336-6342.

CUI Yingjie, WEI Yongfu, XU Xiaomin, et al. Groundwater level dynamics and its response to variations of precipitation based on standardized groundwater index [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6336-6342.

[20] ZHAO A, XIANG K, ZHANG A, et al. Spatial-temporal evolution of meteorological and groundwater droughts and their relationship in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127903.

[21] 杨艺, 周恒, 王松禄. 平度市水资源利用存在问题及对策[J]. 山东水利, 2020, (1): 23-24.

YANG Yi, ZHOU Heng, WANG Songlu. Problems and countermeasures of water resources utilization in Pingdu City [J]. Shandong water Conservancy, 2020, (1): 23-24.

[22] MCKEE T, DOESKEN N, KLEIST J. Drought monitoring with multipletime scales [C]//American Meteorological Society. Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology. Dallas: American Meteorological Society, 1995: 233-236.

[23] 甘贝贝, 刘梅冰. 1962—2021年闽江流域干湿演变特征及其对ENSO事件的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 545-556.

GAN B B, LIU M B. Dry-wet evolution characteristics and response to ENSO events in the Minjiang River basin from 1962 to 2021 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 545-556.

[24] 王洁, 李王成, 李晨, 等. 基于SPI指数的宁夏干旱特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 528-538.

Wang Jie, LI Wangchen, LI Chen, et al. Drought characteristics in

- Ningxia based on standardized precipitation index[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(3): 528-538.
- [25] MXOLISI B, MUKHAWANA D K, THOKOZANI K, et al. Hydrological drought assessment using the standardized groundwater index and the standardized precipitation index in the Berg River Catchment, South Africa [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 53, 101779.
- [26] 虞畅, 金君良, 王国庆, 等. 黄河源区典型流域水文要素演变及其对气候变化的响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(5): 845-855.
- YU C, JIN J L, WANG G Q, et al. Evolution of hydrological elements in typical watersheds of the Yellow River source area and their response to climate change[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(5): 845-855.
- [27] KENDALL M G. Rankcorrelation measures [M]. London: Charles Griffin, 1975, 23(1): 254-271.
- [28] 张海荣, 周建中, 曾小凡, 等. 金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析[J]. *水文*, 2015, 35(6): 90-96.
- ZHANG Hairong, ZHOU Jianzhong, ZENG, Xiaofan, et al. Inconsistency analysis of spatial and temporal evolution of precipitation and runoff in Jinshajiang River Basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(6): 90-96.
- [29] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 16(9): 1807-1829.
- [30] ROHINI K, MUSUUZA J L, VAN L A F, et al. Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 1117-1131.
- [31] LORENZO-LACR J, GARCIA C, MORAN-TEJEDA E. Groundwater level responses to precipitation variability in mediterranean insular aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 516-531.
- [32] 沈业杰, 高磊, 彭新华. 基于氘盈余分析季节性降水对浅层地下水的补给: 以鹰潭孙家农田小流域为例[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 394-399.
- SHEN Yejie, GAO Lei, PENG Xinhua. Evaluation of Shallow Groundwater recharge from seasonal precipitation using deuterium excess method: A case of Sunjia agricultural watershed, Yingtan[J]. *Soils*, 2015, 47(2): 394-399.
- [33] 赵振华, 罗振江, 黄林显, 等. 基于小波分析的济南西郊地下水位对降雨响应机制研究[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(5): 1-9.
- ZHAO Zhenhua, LUO Zhenjiang, HUANG Linxian, et al. Research on the Response Mechanism of Groundwater Level to Rainfall in Xijiao Region of Jinan Based on Wavelet Analysis [J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(5): 1-9.
- [34] LIU Bo, ZHOU Xiangqian, LI Wei, et al. Spatiotemporal characteristics of groundwater drought and its response to meteorological drought in Jiangsu Province, China[J]. *Water*, 2016, 8(11): 480.

(责任编辑 王海锋)