

气候异常对城市多尺度地下水干旱的影响—以大同市为例

王亚博^{1,2}, 周帅^{1,2}, 宋向旭^{1,2}, 李紫妍^{1,2}, 肖智慧^{1,2}, 宿辉^{1,2}, 张燕茹³

(1.河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2.河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 3.河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要:【目的】揭示气候异常背景下大同市地下水干旱时空演变特征及其对大气环流因子的动态响应关系, 为区域地下水干旱识别、预警及抗旱减灾提供重要科学依据。【方法】利用大同市 2003—2023 年地下水埋深实测资料, 采用非参数标准化方法构建多尺度标准化地下水干旱指数 (SGI), 并结合 Mann-Kendall 趋势检验、游程理论、Pearson 相关分析、交叉小波变换方法, 阐明了超采区地下水干旱时空演变特征及其与 NAO、PDO 等大气环流因子的动态响应关系。【结果】①大同市地下水水位呈现显著的时空差异性, 且多数监测站点地下水水位呈下降趋势; ②时程上, 2003—2023 年间地下水干旱整体呈现“先湿后干”的变化规律, 且 2015 年之后该特征尤为明显; ③空间上, 不同等级地下水干旱的多属性特征具有明显差异, 东部区域干旱最为严峻, 轻、中旱发生频繁且分布较广, 重、特旱局部烈度较高、历时较长; ④NAO 和 PDO 与 SGI 的相关性相对突出, 分别以滞后 6~18 个月的弱负相关和 0~12 个月的正相关为主, 并在 8~16、16~32 和 32~64 个月周期范围内存在阶段性共同振荡。【结论】大同市地下水干旱具有明显的持续性和空间异质性, 且受大气环流异常影响显著。研究结果可为地下水超采区或漏斗区地下水干旱监测预警、分区识别和地下水资源合理调控提供参考。

关键词: 地下水干旱; 标准化地下水指数; 大气环流因子; 小波分析; 气候异常

中图分类号: TV21

文献标识码: A

地下水作为干旱、半干旱区重要的补给来源, 其在维持区域生产生活 and 生态环境稳定方面具有重要意义^[1]。与气象和地表水干旱相比, 地下水干旱具有形成缓慢、持续时间长和恢复滞后等特征^[2], 其变化过程更能反映地下水系统对外界环境变化的累积响应^[3]。近年来, 针对地下水干旱研究逐渐由单一指标评价向多变量特征分析和影响机制识别拓展^[4]。例如, 蔡霞等^[5]以山西北部为例, 揭示了 1972—2020 年极端降水指数的时空变化规律, 且受 NAO 影响显著, 其增大时区域少雨干旱概率较高。Gu Xincheng 等^[6]以信阳地区为例, 基于 1961—2015 年降水资料, 研究旱涝周期变化, 发现该区旱涝演变具有明显周期性变化。Barbosa H A 等^[7]以巴西东北部为例, 采用 SPEI 与表层土壤湿度 (SSM) 进行小波相干分析, 发现土壤湿度对干旱过程具有明显的时频响应特征。Dubois E 等^[8]以加拿大魁北克 3 和 12 个月) 标准化地下水干旱指数 (SGI), 并

克地区地下水位资料为基础, 结合全球气候指数和标准化地下水指数 (SGI), 分析地下水位波动对气象条件及气候指数的响应关系。

纵观过往研究发现, 上述研究多侧重于气象干旱、极端降水或土壤水分干旱过程, 研究对象主要集中在降水、蒸散发和土壤湿度等浅层水文气象要素, 对地下水干旱的关注相对不足。此外, 地下水系统受降水入渗、地形地貌、含水层结构及人类开采等多种因素共同影响^[9], 其对外界气候变化的响应往往具有明显的滞后性和累积性^[10], 仅依靠气象干旱指标难以全面反映地下水干旱的发生、发展和恢复过程。综上, 现有研究针对超采区地下水干旱多时间尺度演变特征, 及大气环流因子对其的滞后影响等方面较为匮乏。因此, 本文以地下水超采区大同市为例, 利用区域 2003—2023 年地下水埋深实测资料, 采用非参数标准化方法构建多尺度 (1、结合 Mann-Kendall 趋势检验、游程理论、Pearson

收稿日期/Received: 2026-6-16

修回日期/Revised: 2026-7-31

基金项目: 国家自然科学基金 (52509012); 河北省教育厅“青年拔尖”项目 (BJ2025132); 水灾害防御全国重点实验室重点项目 (2025490211); 河北省自然科学基金 (E2024402052)。

第一作者: 王亚博 (2002—), 男, 在读硕士研究生, 从事水资源系统工程方面的研究。E-mail: 2930182836@qq.com。

通信作者: 周帅 (1990—), 男, 副教授, 博导, 博士, 从事水资源系统方面的研究。E-mail: zhoushuai@hebeu.edu.cn。

相关分析、交叉小波变换方法,阐明了超采区地下水干旱时空演变特征及其与 NAO、PDO 等大气环流因子的动态响应关系。研究结果有助于深化对干旱、半干旱过渡区地下水干旱演变及其气候响应特征的认识,为大同市地下水干旱监测预警、地下水资源合理调控和区域抗旱减灾提供科学依据。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区概况

大同市位于山西省最北端,介于 112°34′~

114°33′E, 39°03′~40°44′N (图 1), 地处山西省、河北省和内蒙古自治区交界地带,全市总面积约 14176 km²。研究区属于温带大陆性季风气候区,降水年内分配不均、年际波动明显,夏季降水集中,冬春季干燥少雨,干旱灾害频发,素有“十年九旱”之称^[1]。受降水少、蒸发强及地下水超采等因素共同影响,区域地下水对气候异常的动态响应极为敏感。

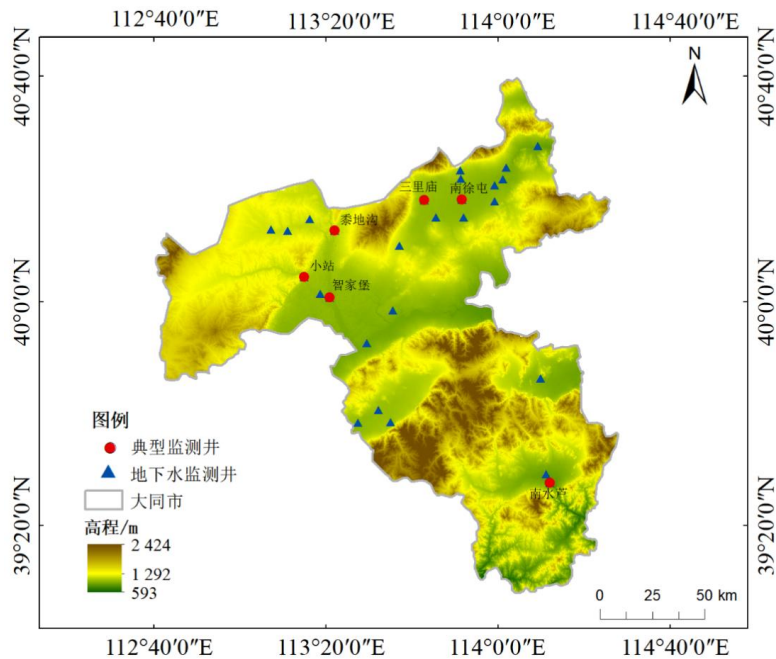


图 1 研究区位置及监测站点分布图

Fig.1 Location of the study area and distribution of monitoring stations

1.2 数据来源

基于大同市 2003—2023 年 27 个地下水监测井实测资料。此外,为确保数据质量,首先对原始监测数据进行清洗,剔除缺失或异常数据记录,保留连续性较好的监测序列用于后续 SGI 计算、地下水干旱演变分析及其与大气环流因子的响应关系研究。

表 1 为选取的大气环流因子。相关研究表明, AO、APVAI、NAO、NP、PDO、SN、SOI 和 WP 等大气环流因子与华北、山西北部地区降水、干旱等事件变化息息相关。因此,本文选取上述 8 种大气环流因子作为候选因子,其涵盖海温异常、中高纬环流、亚洲极涡、ENSO、西太平洋遥相关型及太阳活动等不同类型的大尺度气候信号,均来源于中国气象局国家气候中心。

表 1 大气环流因子

Tab.1 Candidate atmospheric circulation factors		
序号	大气环流因子	中文名称
1	AO	北极涛动指数
2	APVAI	亚洲区极涡面积指数

3	NAO	北大西洋涛动指数
4	NP	北太平洋遥相关指数
5	PDO	太平洋年代际振荡指数
6	SN	太阳黑子指数
7	SOI	南方涛动指数
8	WP	西太平洋遥相关型指数

2 研究方法

2.1 标准化地下水指数

非参数标准化地下水指数 (SGI) ^[12]方法不要求地下水序列服从特定概率分布,但要求监测资料具有较好的连续性。由于地下水埋深越大表示干旱程度越重,计算前对原始埋深序列 D_t 进行方向转换,令 $X_t = -D_t$,并分别采用 1、3 和 12 个月滑动平均构建相应尺度序列。

对于任一尺度和历月分组,设有效样本数为 n ,将序列按升序排列:

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_i \leq \dots \leq X_n \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

然后将排序后的序列在区间 $\frac{1}{2}n \sim 1 - \frac{1}{2}n$ 内等分。

并赋予经验概率：

$$p_i = \frac{1}{2n} + \frac{i-1}{n} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中： P_i 为第 i 个排序样本对应的经验累积概率； n 为样本长度。

进一步通过标准正态分布反函数将经验概率转换为 SGI 值：

$$SGI_i = \Phi^{-1}(p_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中 Φ^{-1} 为标准正态分布函数的反函数。

最后，将计算得到的 SGI- i 按照原始时间顺序重新排列，即可获得对应时间序列的非参数化 SGI 值。

表 2 为 SGI 干旱识别标准^[13]，用于划分地下水干旱等级：

表 2 SGI 的干旱识别

Tab.2 Drought identification based on SGI	
SGI 取值区间	干旱等级
$SGI \geq 0.0$	无旱
$-1.0 < SGI < 0.0$	轻度干旱
$-1.5 < SGI \leq -1.0$	中度干旱
$-2.0 < SGI \leq -1.5$	重度干旱
$SGI \leq -2.0$	极端干旱

2.2 Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 非参数趋势检验法用于判断时间序列是否存在显著上升或下降趋势，其广泛应用于气象、水文序列趋势性检验，限于篇幅，其基本计算原理详见参考文献^[14]。

2.3 游程理论

游程理论是识别时间序列干旱事件的常用方法，其广泛应用于识别气象、水文等干旱的多变量属性特征（历时、强度及烈度等），限于篇幅，其基本计算原理详见参考文献^[15]。

2.4 小波变换分析

2.4.1 连续小波变换

连续小波变换（Continuous Wavelet Transform, CWT）可用于分析非平稳时间序列在不同时间尺度上的周期变化特征，能够反映序列在时间域和频

率域上的局部变化规律，限于篇幅，其基本计算原理详见参考文献^[16-17]。

2.4.1 交叉小波变换

交叉小波变换（Cross Wavelet Transform, XWT）可用于分析两个非平稳时间序列在时频域中的共同能量分布及相位关系^[18]。本文采用交叉小波变换分析 SGI 与大气环流指数之间的时频响应关系，以识别地下水干旱变化与大气环流因子之间的共振周期及阶段性关联特征。

设 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 SGI 时间序列， $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为大气环流指数时间序列，二者的连续小波变换系数分别为 $W_n^X(s)$ 和 $W_n^Y(s)$ ，则交叉小波变换定义为：

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) \times W_n^{Y*}(s) \quad (4)$$

式中： $W_n^{XY}(s)$ 为交叉小波变换系数； $W_n^{Y*}(s)$ 为 $W_n^Y(s)$ 的复共轭。

3 结果与分析

3.1 地下水埋深时空动态演变特征

3.1.1 地下水埋深时程变化规律

为了揭示大同市地下水位的时空差异性，限于篇幅，本文选取 27 眼实测井中的 6 眼（智家堡、黍地沟、三里庙、南徐屯、小站和南水芦）进行时空演变规律分析。图 2 为大同市典型监测井地下水埋深年际变化及季节差异图。我们发现：（1）时程上，各典型监测站地下水埋深变化差异明显，其中智家堡、黍地沟和三里庙地下水埋深呈增加趋势，即地下水位逐年下降，而其余 3 眼监测井地下水埋深总体呈减小趋势，即地下水位有所回升；（2）南徐屯、小站、南水芦测站地下水埋深整体呈减小趋势，即地下水位有所回升，这主要归因于近年来政府部门严格按照“用足黄河水、用好地表水、保障生态水、涵养地下水、多用再生水和矿井水”的思路，强化地下水超采区综合治理，取得一定成效；（3）各测站地下水埋深存在季节差异性，且不同站点埋深差异显著，例如，春季下智家堡站埋深为 37.10 m，而南徐屯站仅为 3.24 m，意味着研究区地下水埋深空间差异明显。

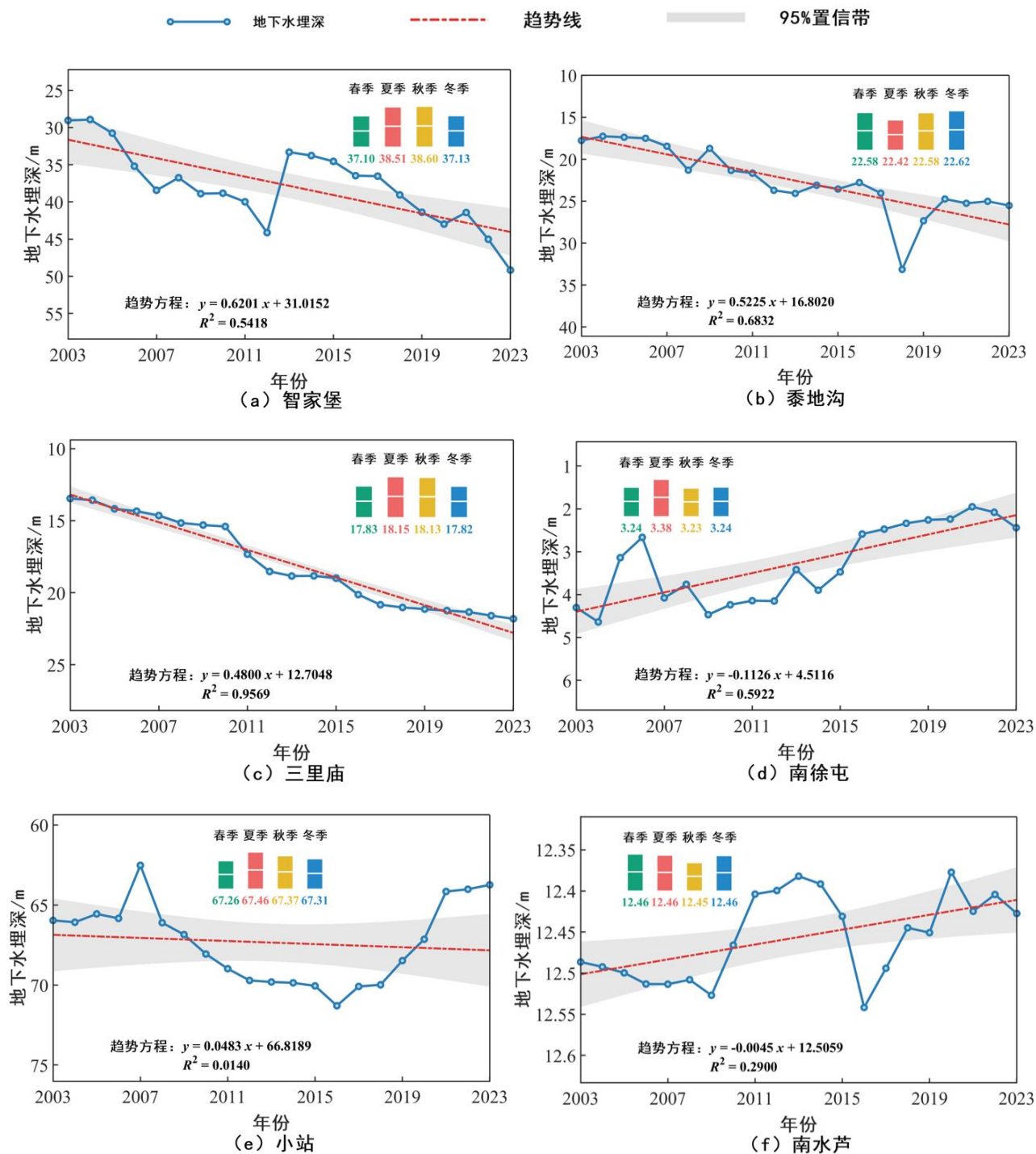


图2 大同市典型监测井地下水埋深年际变化及季节差异图

Fig.2 Interannual variation and seasonal differences in groundwater depth at typical monitoring wells in Datong City

3.1.2 地下水埋深空间分布格局

图3为大同市全域地下水埋深年和季节尺度空间分布规律。由图可知：（1）年和季节尺度下地下水埋深空间分布格局基本一致，整体呈现出局部深埋与浅埋区相间分布，说明地下水埋深具有较明显的空间差异性；（2）不同季节地下水埋深高

低值范围变化较小，意味着研究区地下水埋深的季节差异相对有限，整体空间格局较为稳定；（3）M-K趋势检验结果表明，在各季节及年尺度上，约75%的监测井地下水埋深呈显著增加趋势，表明研究区地下水位总体呈下降态势。

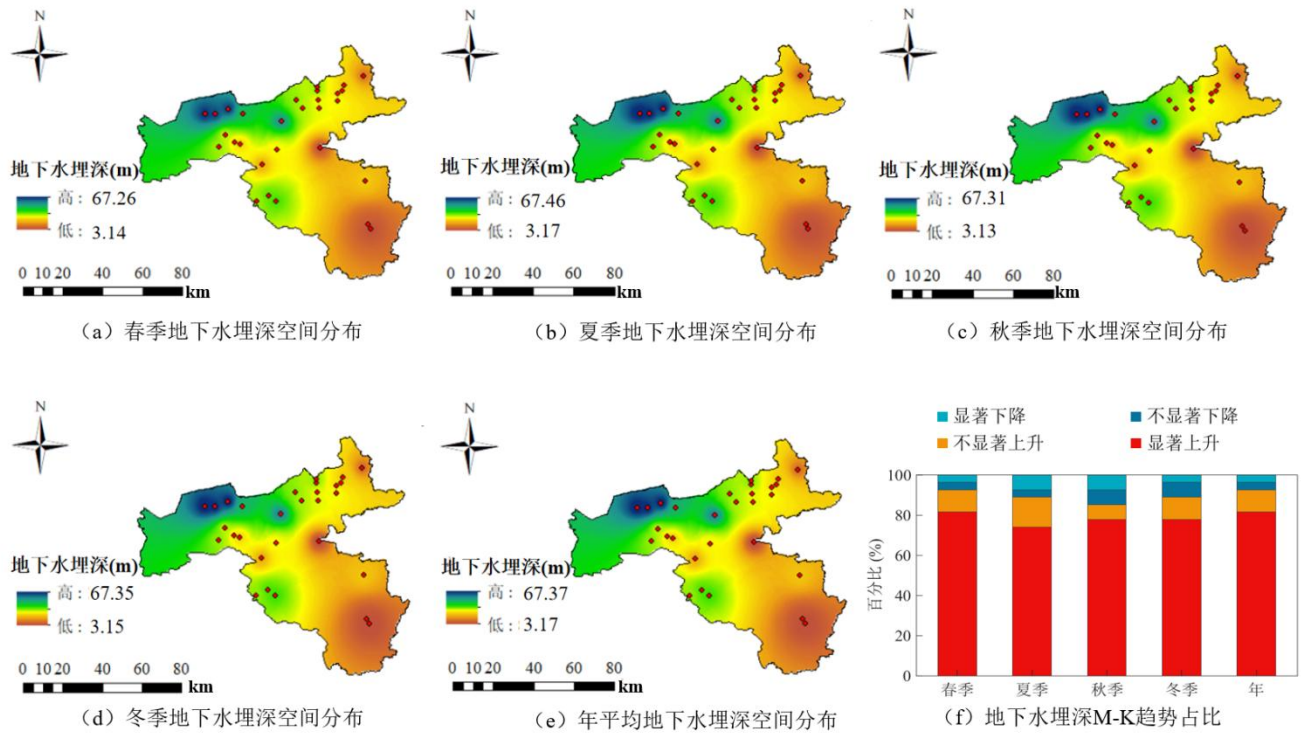


图3 大同市季节及年尺度地下水埋深空间分布及 M-K 趋势统计

Fig.3 Seasonal and annual spatial distributions and M-K trend statistics of groundwater table depth in Datong City

3.2 多时间尺度地下水干旱事件识别及量化

3.2.1 地下水干旱时程演变规律

图4为大同市多时间尺度 SGI 指标时程变化规律计算结果。

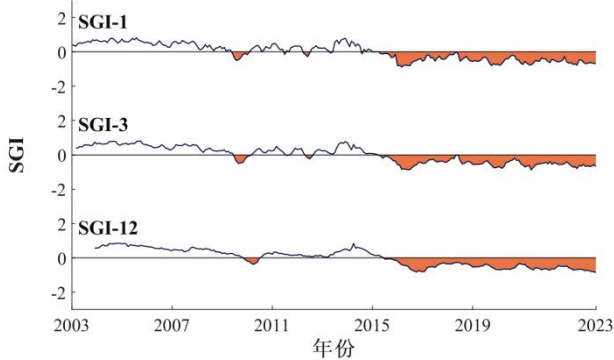


图4 大同市不同时间尺度 SGI 演变特征

Fig.4 Evolution characteristics of SGI at different time scales in Datong City

我们发现：（1）时程上，SGI-1、SGI-3 和 SGI-12 均表明，研究区地下水干旱总体呈现由前期偏湿向后期偏干转变的演变特征，且 2015 年以后干旱程度明显加剧；（2）2015 年之前，各尺

度下 SGI 值多大于 0，意味着区域地下水较为丰富，呈湿润状态且相对稳定；（3）2015 年之后，各尺度下 SGI 值多小于 0，则意味着区域地下水干旱严峻，且具有一定持续性；（4）各时间尺度下，SGI-1 月际变化较强，干湿转换频繁，SGI-3 波动有所减弱，SGI-12 连续性更明显，更能反映区域地下水干旱的长期演变特征。

3.2.2 地下水干旱空间分布格局

图5为基于游程理论方法识别的1个月尺度 SGI-1 干旱特征空间分布结果。由图5可知：（1）不同等级地下水干旱下多属性干旱特征具有显著的空间差异性，且东部区域地下水干旱极为严峻；（2）轻旱、中旱发生次数较多、分布范围较广，意味着区域以低等级、高密度地下水干旱为主；（3）从干旱烈度和历时来看，轻旱、中旱整体表现较弱，持续时间相对较短，重旱和特旱在部分地区烈度较高、历时较长，即高等级干旱对应的地下水亏缺程度更大，恢复过程相对缓慢；（4）总体来看，大同市地下水干旱表现为低等级干旱发生较频繁、影响范围较广，高等级干旱发生较少但局部影响较强的空间分布特征。

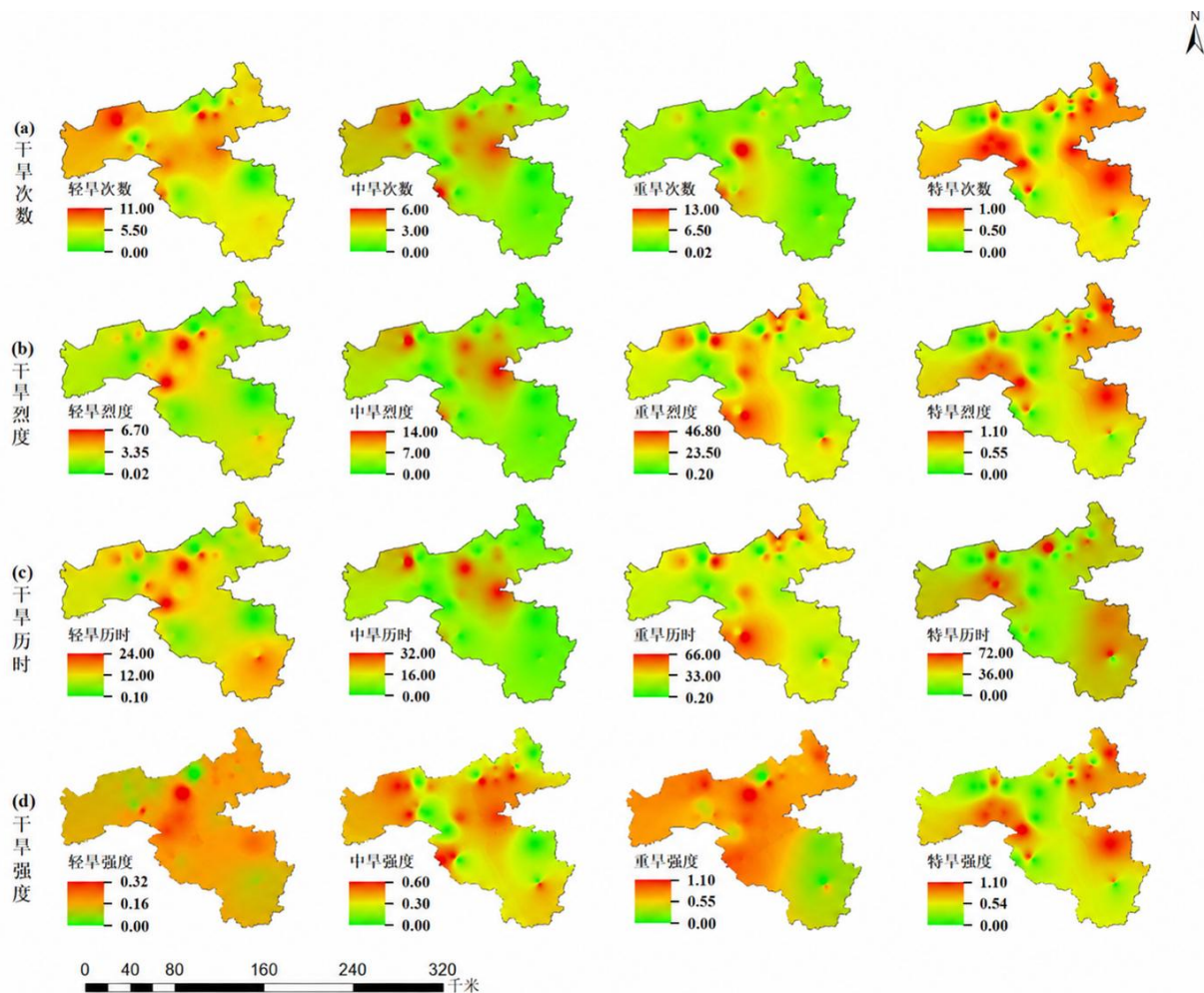


图 5 基于游程理论识别的 1 个月尺度 SGI-1 干旱特征空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of SGI-1 drought characteristics identified based on run theory

3.2.3 不同等级地下水干旱及其水位阈值分析

表 3 为典型监测井下不同地下水干旱等级对应的地下水埋深阈值。分析发现：（1）空间尺度下，不同监测站发生不同等级地下水干旱对应的阈值不同，其中小站干旱起始阈值为 67.59 m，南徐屯仅为 3.22 m；（2）随着干旱等级增大，各监测井埋深均增大，例如，智家堡监测井的干旱起始埋

深阈值为 37.70 m，极端干旱下其值增至 48.01 m，即地下水埋深增加与干旱化程度具有强一致性；（3）不同监测井各等级阈值间距存在差异，智家堡和黍地沟变化幅度较大，而南水芦各等级阈值集中在 12.46~12.56 m，反映了各井地下水埋深波动特征的不同；（4）地下水干旱判定应结合不同监测井或分区的埋深基准分别设置阈值，以提高干旱识别和预警的针对性。

表 3 典型监测井不同地下水干旱等级对应的地下水埋深阈值

Tab.3 Groundwater depth thresholds corresponding to different groundwater drought levels at typical monitoring wells

序号	监测井	干旱起始阈值/m	中度干旱阈值/m	重度干旱阈值/m	极端干旱阈值/m
		SGI=0	SGI=-1.0	SGI=-1.5	SGI=-2.0
1	智家堡	37.70	43.14	46.38	48.01
2	黍地沟	23.06	24.99	25.92	30.02
3	三里庙	18.76	21.15	21.54	21.59
4	南徐屯	3.22	4.20	4.49	4.70
5	小站	67.59	69.91	70.20	70.84
6	南水芦	12.46	12.51	12.53	12.56

3.3 多时间尺度地下水干旱事件识别及量化

3.3.1 地下水干旱时程演变规律

为筛选与地下水干旱关系较为突出的重要因子，采用 Pearson 相关系数分析 SGI-1、SGI-3 和

SGI-12 与各大气环流因子的相关关系，并设置 0、1、2、3、6、9、12、18 和 24 个月滞后期进行显著性检验^[20]。图 6 为不同时间尺度 SGI 与大气环流因子的滞时 Pearson 相关热图。由图 6 可知：（1）不同时间尺度 SGI 与各因子的相关性存在差异，其中 PDO 和 NAO 表现相对突出，其余因子相关系数整体较小；（2）PDO 与 SGI 整体呈正相关，在 0~12 个月滞后期范围内较为明显，且多个滞后月份通过显著性检验。其中 SGI-12 与 PDO 在 0~3 个月滞后时相关性较强，说明 PDO 对地下水干旱

具有较稳定的正向影响；（3）NAO 与 SGI 整体呈弱负相关，主要集中在 6~18 个月滞后期范围内，SGI-12 在 18 个月滞后时达到显著水平，表明 NAO 对地下水干旱具有一定滞后响应特征；（4）相比之下，NP、AO、SOI、WP、SN 和 APVAI 与 SGI 的相关性整体较弱，未表现出稳定显著关系。综合来看，PDO 和 NAO 在不同时间尺度及滞后月份下表现出相对明确的相关特征，因此可作为后续交叉小波变换和小波相干分析的重要因子。

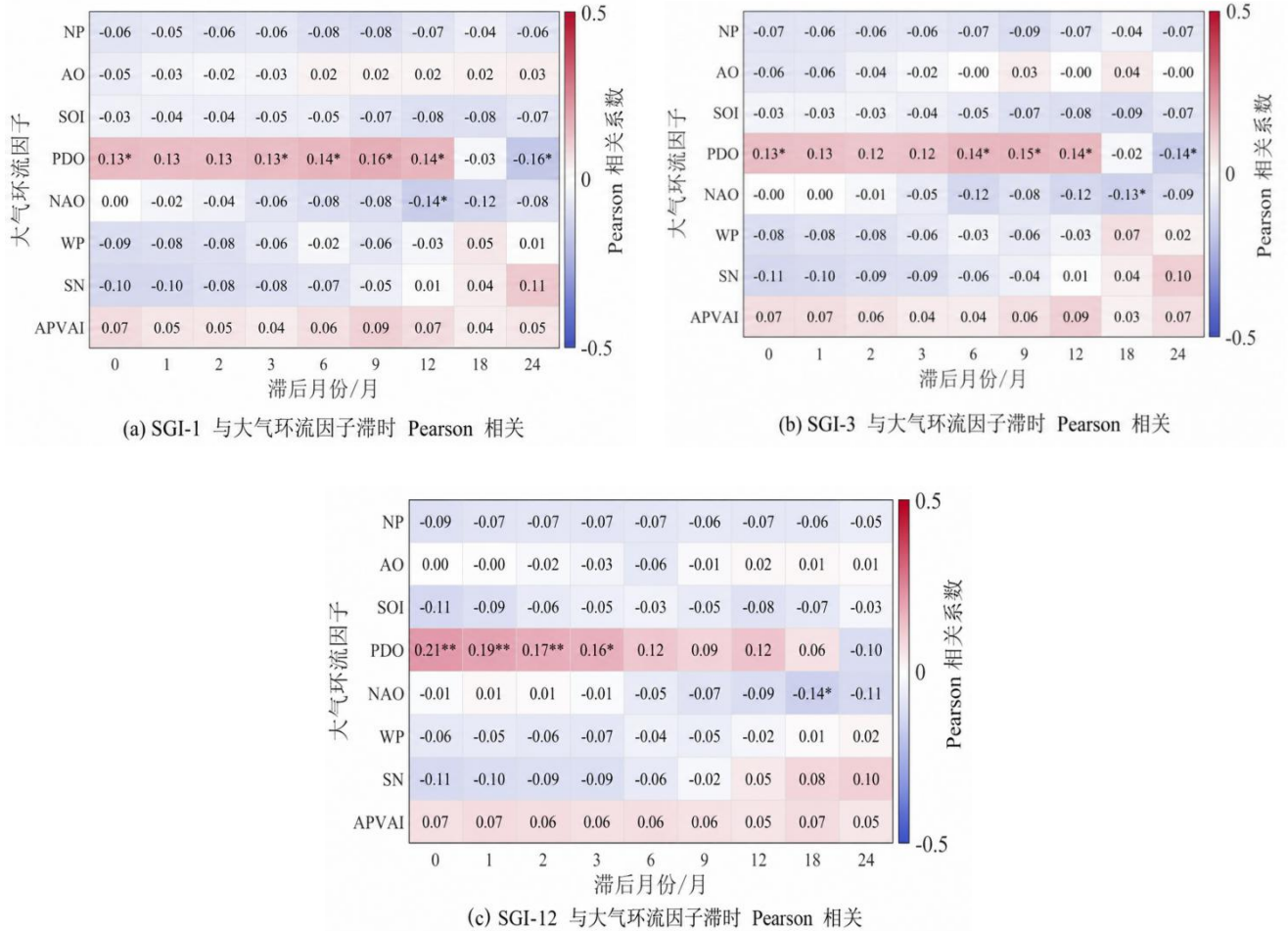


图 6 不同时间尺度 SGI 与大气环流因子的滞时 Pearson 相关热图

Fig.6 Lagged Pearson correlation heatmaps between SGI at different time scales and atmospheric circulation factors

3.3.2 交叉小波变换下的共同周期特征

图 7 为 SGI 与大气环流因子 NAO、PDO 的交叉小波功率谱图。由图 7 可知：（1）SGI 与 NAO、PDO 在不同时间尺度上均存在一定的共同振荡特征，说明大尺度气候因子与大同市地下水干旱变化之间具有一定的时频联系，且这种联系在研究期内呈阶段性分布，主要集中在 2009—2017 年前后；

（2）从周期尺度看，显著共振区主要集中在 8~16 个月、16~32 个月和 32~64 个月等中长周期范围，表明地下水干旱对气候因子的响应并非完全表现为短期波动，而具有一定的滞后性、累积性和持续性；（3）从不同 SGI 尺度看，SGI-1 受短期波

动影响较明显，与 NAO、PDO 的显著共振区相对零散，主要分布在 8~16 个月和 16~32 个月周期附近，而 SGI-3 和 SGI-12 与气候因子的共同功率区更加连续，尤其 SGI-12 在 32~64 个月周期附近表现出较强共同功率，更能反映地下水干旱与大尺度气候信号之间的长期协同变化；（4）从不同因子看，NAO 与 SGI 的联系相对更为突出，在 SGI-1、SGI-3 和 SGI-12 中均表现出一定的显著共振区域，说明 NAO 可能对地下水干旱的短期波动和中长期变化均具有影响；PDO 与 SGI 的共同功率区主要集中在 16~32 个月和 32~64 个月周期范围，表明 PDO 对地下水干旱的影响更偏向年际至多年

际尺度的调制作用。总体来看，NAO 和 PDO 可能通过影响区域降水、干湿转换及地下水补给过程，

对大同市地下水干旱演变产生一定影响。

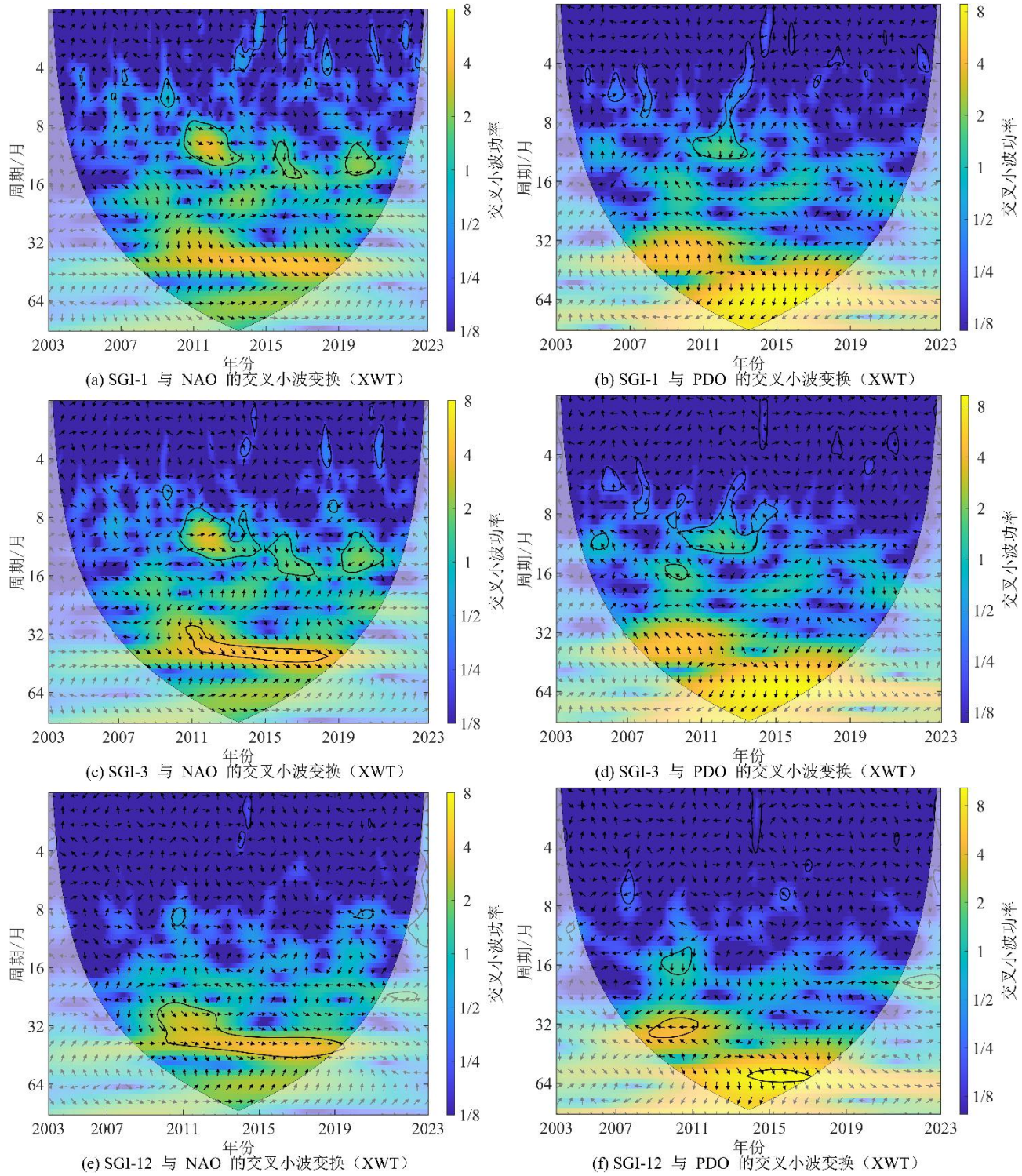


图 7 SGI 与大气环流因子的交叉小波功率谱图

Fig.7 Cross-wavelet power spectrum of SGI and atmospheric circulation factors

3.3.3 小波相干分析下的时频关联特征

图 8 为 SGI 与大气环流因子 NAO、PDO 的小波相干谱图。由图 8 可知：（1）SGI 与 NAO、PDO 在不同时间尺度上均存在一定相干关系，说明大尺度气候因子与大同市地下水干旱变化之间具有局部时频相关性，但这种关系并非在整个研究期内持续稳定存在，而是呈现出明显的阶段性分布；（2）

从周期尺度看，显著相干区主要集中在 8~16 个月、16~32 个月和 32~64 个月等中长周期范围，短周期相干区相对较少，表明地下水干旱对气候因子的响应具有一定滞后性和持续性，其变化过程更多体现为年际至多年际尺度上的协同响应；（3）从不同 SGI 尺度看，SGI-1 受短期波动影响较明显，与 NAO、PDO 的相干区相对零散，说明短尺度地

下水干旱对气候因子的响应稳定性较弱；SGI-3 和 SGI-12 的相干区更加连续，尤其 SGI-12 在中长期周期范围内表现出较明显的相干特征，更能反映地下水干旱与大尺度气候信号之间的长期联系；（4）从不同因子看，NAO 与 SGI 的相干关系相对更明显，在不同 SGI 尺度下均表现出一定显著相干区，说明 NAO 可能对地下水干旱的短期波动和中长期

变化均具有影响；PDO 的相干区主要集中在 16~32 个月和 32~64 个月周期附近，表明 PDO 对地下水干旱的影响更偏向年际至多年际尺度的调制作用。总体来看，NAO 和 PDO 与 SGI 之间存在一定的小波相干关系，二者可能通过影响区域降水、干湿转换及地下水补给过程，对大同市地下水干旱演变产生一定影响。

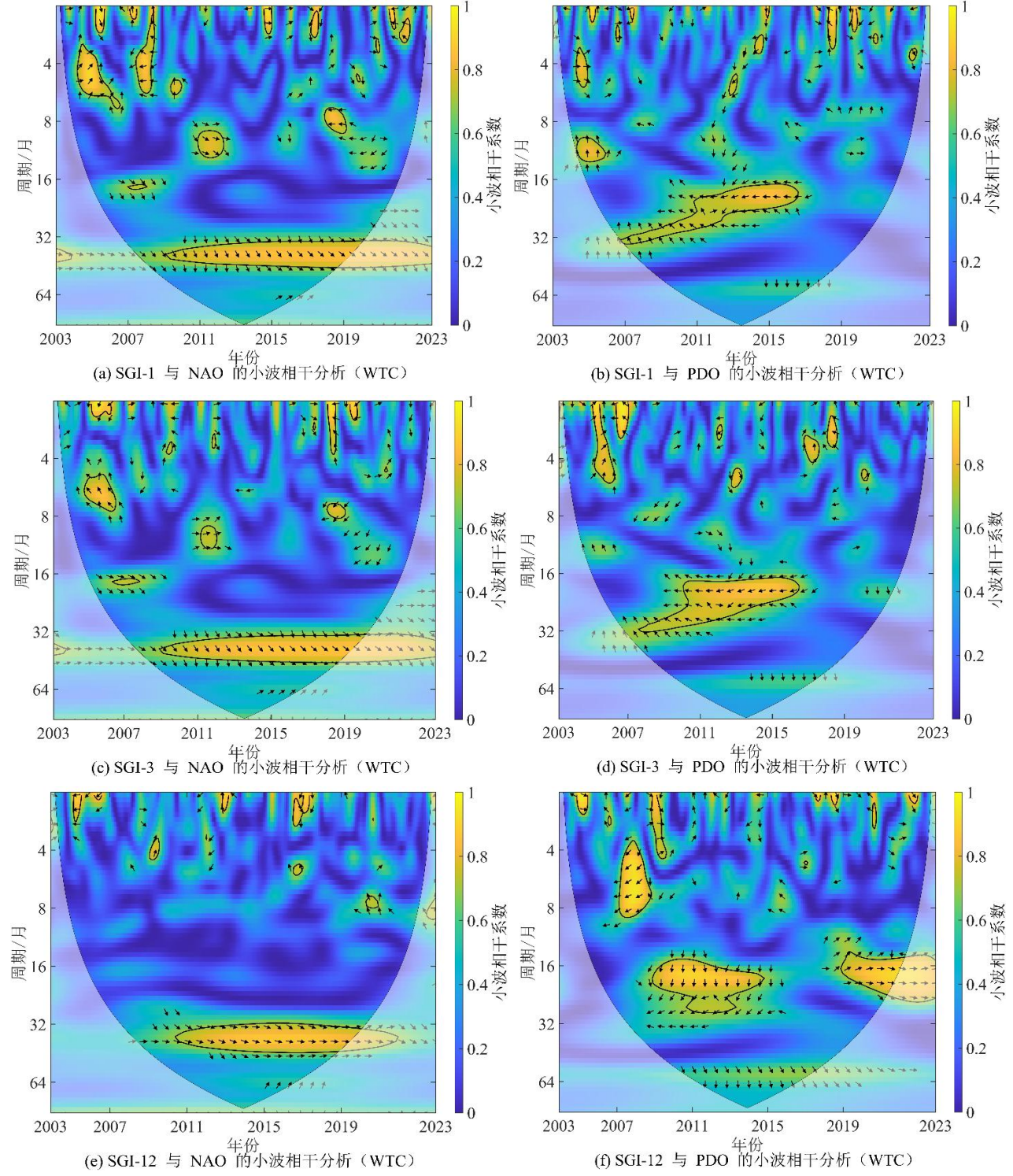


图 8 SGI 与大气环流因子的小波相干谱图

Fig.8 Wavelet coherence spectrum of SGI and atmospheric circulation factors

4 讨论

大同市地处地下水超采区，受长期地下水开采影响，地下水干旱对气候异常的敏感性尤为明显。

本文研究发现大同市地下水干旱具有明显的持续性和空间异质性,且受大气环流异常影响显著。我们也发现地下水干旱对大气环流异常表现出明显的滞后响应。PDO与SGI的较强正相关主要集中在滞后0~12个月,NAO与SGI的较强负相关主要分布在滞后6~18个月,且SGI-12与NAO在滞后18个月时达到显著水平。王铂淮等^[19]研究发现,大同市年降水量、年潜在蒸发量和年开采量均与地下水埋深变化密切相关,其中多数站点地下水开采量的灰色关联度在0.70以上,即人类开采活动分布广泛且对地下水变化影响深远。龚栋栋等^[20]指出,新疆平原区地下水干旱对气象干旱的平均响应时间为18个月;栗晓玲等^[21]发现,西北地区响应时间主要集中在1~6个月和19~24个月,与本文结果较为接近。肖平等^[13]得到青岛市平原区的响应时间为30~56个月,表明地下水响应具有较强的区域差异。Mukhawana M B等^[22]基于南非Berg河流域的SGI和SPI研究指出,地下水干旱是气候因素、地表水—地下水相互作用、含水层地质条件及地下水开采共同作用的结果,且地下水对短期气候干旱具有一定缓冲能力,该结论进一步证实了大气环流因子的影响。

本文小波分析表明,SGI与NAO、PDO的显著共同振荡主要分布在8~16个月、16~32个月和32~64个月周期范围,且SGI-12的显著联系较SGI-1和SGI-3更为连续,说明较长尺度SGI更能反映气候异常的累积影响。本文NAO与SGI总体呈负相关,与蔡霞等^[23]关于NAO增大时山西北部降水量和降水强度总体减小的结论一致,表明NAO可能通过削弱区域降水及地下水补给而加剧地下水干旱。Rust W等^[24]指出,NAO与地下水之间的多年尺度联系具有明显的非平稳性;其后续研究^[25]进一步发现,NAO的多年周期变化可用于预测地下水干旱,其中对响应较慢的含水层和持续时间较长的干旱预测效果更好。这也解释了本文小波相干显著区在不同时段呈间断分布的现象。

综上所述,大同市地下水干旱是大气环流异常、区域降水补给、含水层调蓄和人工开采共同作用的结果。NAO和PDO可作为地下水干旱监测的前期气候信号,但其与SGI之间的统计联系不能直接等同于因果关系。未来应进一步结合降水、蒸散发、地下水开采量及含水层参数,定量区分气候因素与人类活动的贡献,以提高地下水干旱预警和水资源调控的可靠性。

5 结论

本文以地下水超采区大同市为例,利用区域2003—2023年地下水埋深实测资料,采用非参数标准化干旱指数等方法阐明了超采区地下水干旱时空演变特征及其与NAO、PDO等大气环流因子

的动态响应关系。得到主要结论如下:

1)大同市地下水埋深具有明显的时空差异性,时程上,各典型监测站地下水埋深变化差异明显,其中智家堡、黍地沟和三里庙地下水埋深呈增加趋势,即地下水位逐年下降,而其余测站地下水位呈上升趋势;空间上,年和季节尺度下地下水埋深空间分布格局基本一致,且约75%的监测井地下水埋深呈显著增加趋势,表明研究区地下水位总体呈下降态势;

2)2003—2023年间,地下水干旱整体呈“先湿后干”的时程变化规律,且2015年之后尤为明显;空间上,不同等级地下水干旱下多属性干旱特征具有显著的空间差异性,且东部区域地下水干旱极为严峻。

3)随着干旱等级增大,各监测井埋深均增大,例如,智家堡监测井的干旱起始埋深阈值为37.70 m,极端干旱下其值增至48.01 m,即地下水埋深增加与干旱化程度具有强一致性;

4)NAO和PDO与SGI的相关性相对突出,其在多个时间尺度上存在阶段性共同振荡和显著响应关系。较SGI-1,长历时下SGI-3和SGI-12与大气环流因子的周期性更强。

参 考 文 献

- [1] 赵荣钦.黄河流域生态保护和高质量发展的关键:人地系统的优化[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(3):1-6.[Zhao Rongqin.The key to ecological protection and high quality development in the Yellow River Basin:optimization of human-land systems[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2020,41(3):1-6.]
- [2] 王文科,宫程程,张在勇,等.旱区水文与生态效应研究现状与展望[J].地球科学进展,2018,33(7):702-718.[Wang Wenke,Gong Chengcheng,Zhang Zaiyong,et al.Research progress and prospects of groundwater hydrology and ecological effects in arid regions[J].Advances in Earth Science,2018,33(7):702-718.]
- [3] 王楠,吴丽丽,温小虎,等.基于标准化地下水指数的酒泉绿洲地下水干旱特征[J].中国沙漠,2025,45(1):121-130.[Wang Nan,Wu Lili,Wen Xiaohu,et al.Groundwater drought characteristics of Jiuquan Oasis based on the standardized groundwater index[J].Journal of Desert Research,2025,45(1):121-130.]
- [4] Bloomfield J P, Marchant B P. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach[J].Hydrology and Earth System Sciences,2013,17(12):4769-4787.
- [5] 蔡霞,蔡琳,李亚军,等.山西北部极端气候事件与农业气象

- 灾害分析[J].江西农业学报,2023,35(2):121-127,134.[Cai Xia,Cai Lin,Li Yajun,et al.Analysis of extreme climate events and agrometeorological disasters in northern Shanxi[J].Acta Agriculturae Jiangxi,2023,35(2):121-127,134.]
- [6] Gu Xinchun, Zhang Pei, Zhang Wenjia, et al. A study of drought and flood cycles in Xinyang, China, using the wavelet transform and M-K test[J].Atmosphere,2023,14(8):1196.
- [7] Barbosa H A,Buriti C O,Kumar T V L.Deep learning for flash drought detection:a case study in Northeastern Brazil[J].Atmosphere,2024,15(7):761.
- [8] Dubois E,Larocque M.Contribution of standardized indexes to understand groundwater level fluctuations in response to meteorological conditions in cold and humid climates[J].Journal of Hydrology,2024,634:131105.
- [9] 杨美,胡梅,李云良,等.鄱阳湖流域地下水位时空变化特征及气候因子影响分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2026,47(3):35-45.[Yang Mei,Hu Mei,Li Yunliang,et al.Analysis of spatiotemporal variation characteristics of groundwater level and impact of climatic factors in Poyang Lake Basin[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2026,47(3):35-45.]
- [10] 刘小蝶,张红月,芮小平,等.引入注意力机制的多因素LSTM地下水位预测模型[J].水文,2025,45(2):73-79.[Liu Xiaodie,Zhang Hongyue,Rui Xiaoping,et al.Multi-factor LSTM groundwater level prediction model with attention mechanism[J].Hydrology,2025,45(2):73-79.]
- [11] 关不了,姜珊,赵勇,等.海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系[J].水资源保护,2023,39(4):59-68.[Guan Buliao,Jiang Shan,Zhao Yong,et al.Spatiotemporal evolution of drought and its relationship with climate factors in the Haihe River Basin[J].Water Resources Protection,2023,39(4):59-68.]
- [12] 艾启阳,栗晓玲,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.Analysis of spatiotemporal evolution of groundwater in the middle reaches of the Heihe River using the standardized groundwater index[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(10):69-74.]
- [13] 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.[Xiao Ping,Ma Zhenzhen,Zhang Xihao,et al.Groundwater drought characteristics and dynamic response to meteorological drought in the plain area of Qingdao[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2025,56(10):97-110.]
- [14] Yue Sheng, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J].Journal of Hydrology,2002,259(1-4):254-271.
- [15] Ling Zihan, Shu Longcang, Wang Dingkui, et al. Characteristics of groundwater drought and its propagation dynamics with meteorological drought in the Sanjiang Plain, China: irrigated versus nonirrigated areas[J].Journal of Hydrology: Regional Studies,2024,54:101911.
- [16] Sang Yanfang,Singh V P,Sun Fubao,et al.Wavelet-based hydrological time series forecasting[J].Journal of Hydrologic Engineering,2016,21(5):06016001.
- [17] 洪梅,刘科峰,张栋,等.基于交叉小波分析方法的西太平洋副热带高压年际变率与热带海温及大气环流异常的相关性研究[J].热带气象学报,2020,36(2):166-179.[Hong Mei,Liu Kefeng,Zhang Dong,et al.Relationship between interannual variability of the western Pacific subtropical high and tropical sea surface temperature and atmospheric circulation anomalies based on cross wavelet analysis [J].Journal of Tropical Meteorology,2020,36(2):166-179.]
- [18] 李函珂,董晓华,马耀明,等.长江中下游降水分区的季节特征及其对大气环流的响应[J].水文,2025,45(3):86-92.[Li Hanke,Dong Xiaohua,Ma Yaoming,et al.Seasonal characteristics of precipitation zoning in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its response to atmospheric circulation[J].Hydrology,2025,45(3):86-92.]
- [19] 王铂淮,周帅,李紫妍,等.地下水超采区地下水时空动态演变特征预测及其驱动力研究[J].水电能源科学,2026,44(5):43-47.[Wang Bohuai,Zhou Shuai,Li Ziyang,et al.Prediction of spatiotemporal dynamic evolution characteristics and driving forces of groundwater in overexploited areas[J].Water Resources and Power,2026,44(5):43-47.]
- [20] 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.Spatiotemporal change of groundwater drought in the plain area of Xinjiang based on GRACE and its response to meteorological drought[J].Arid Land Geography,2024,47(9):1496-1507.]
- [21] 栗晓玲,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 Jiangdong,Zhang Te,et al.Spatiotemporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in North

- west China[J].Water Resources Protection,2022,38(1):34-42.]
- [22] Mukhawana M B,Kanyerere T,Kahler D,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.
- [23] 蔡霞,梁桂花,张冬峰,等.山西北部极端降水时空演变规律及与大气环流因子的响应[J].干旱区地理,2024,47(3):391-402.[Cai Xia,Liang Guihua,Zhang Dongfeng,et al.Temporal and spatial evolution of extreme precipitation and its response to atmospheric circulation factors in northern Shanxi Province[J].Arid Land Geography,2024,47(3):391-402.]
- [24] Rust W,Bloomfield J P,Cuthbert M,et al.The importance of non-stationary multiannual periodicities in the North Atlantic Oscillation index for forecasting water resource drought[J].Hydrology and Earth System Sciences,2022,26:2449-2467.
- [25] Rust W,Bloomfield J P,Holman I.Long-range hydrological drought forecasting using multi-year cycles in the North Atlantic Oscillation[J].Journal of Hydrology,2024,641:131831.

Impacts of Climate Anomalies on Urban Groundwater Drought across Multiple Scales: a Case Study of Datong

WANG Yabo^{1,2}, ZHOU Shuai^{1,2}, SONG Xiangxu^{1,2}, LI Ziyang^{1,2}, XIAO Zhihui^{1,2}, SU Hui^{1,2}, ZHANG Yanru³

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Handan 056038, China; 3. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: **【Objective】** This study aimed to reveal the spatiotemporal evolution of groundwater drought in Datong City in the context of climate anomalies and its dynamic responses to atmospheric circulation factors, thereby providing a scientific basis for regional groundwater drought identification, early warning, and drought preparedness and mitigation. **【Methods】** Observed depth-to-groundwater data for Datong City from 2003 to 2023 were used to construct a multiscale standardized groundwater index (SGI) using a nonparametric standardization method. The Mann–Kendall trend test, runs theory, Pearson correlation analysis, and cross-wavelet transform were then applied to characterize the spatiotemporal evolution of groundwater drought in the groundwater overexploitation area and its dynamic responses to atmospheric circulation factors such as the North Atlantic Oscillation (NAO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO). **【Results】** (1) Groundwater levels in Datong City exhibited pronounced spatiotemporal variability, with declining trends observed at most monitoring sites.(2) Temporally, groundwater drought showed an overall transition from wet to dry conditions during 2003–2023, and this pattern became particularly pronounced after 2015.(3) Spatially, groundwater drought characteristics varied markedly among severity classes, with the eastern part of the study area experiencing the most severe drought. Mild and moderate droughts occurred frequently and were widely distributed, whereas severe and extreme droughts exhibited higher cumulative severity and longer durations in some areas.(4) NAO and PDO showed relatively pronounced correlations with SGI, characterized primarily by weak negative correlations at lags of 6–18 months and positive correlations at lags of 0–12 months, respectively. Their relationships with SGI also exhibited intermittent common oscillations in the 8–16, 16–32, and 32–64-month period bands. **【Conclusion】** Groundwater drought in Datong City exhibits pronounced persistence and spatial heterogeneity and is significantly affected by atmospheric circulation anomalies. These findings provide a reference for groundwater drought monitoring and early warning, drought zoning, and the rational regulation of groundwater resources in areas affected by groundwater overexploitation or cones of depression.

Keywords: groundwater drought; standardized groundwater index; atmospheric circulation factors; wavelet analysis; climate anomalies