

束龙仓,张彤豪,澈丽木格,等.降水和地下水开采对通辽市科尔沁区潜水位的影响.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):954-966. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230231.

Shu Longcang, Zhang Tonghao, Che Limuge, et al. Effects of Precipitation and Groundwater Exploitation on the Phreatic Water Table in Khorqin District, Tongliao City. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 954-966. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230231.

降水和地下水开采对通辽市科尔沁区潜水位的影响

束龙仓^{1,2}, 张彤豪^{1,2}, 澈丽木格³, 刘圣昱^{1,2}, 刘波^{1,2}

1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098

3. 通辽市水利事业发展中心, 内蒙古 通辽 028000

摘要:变化环境下(气候变化和人类活动)潜水位动态演化过程识别是当前我国乃至全球水资源领域面临的主要科学问题。为了分析多影响因素下的潜水位时空动态变化,以降水和地下水开采为例,基于通辽市科尔沁区2016年1月—2019年12月实测地下水位动态数据,采用Mann-Kendall(MK)趋势检验和栅格代数法分析了区域潜位水的时空变化规律,并利用交叉小波分析、斯皮尔曼相关系数和多元线性回归法进一步量化分析了不同区域降水和地下水开采对潜水位的影响。结果表明:研究时段内科尔沁区潜水位总体呈下降趋势,年均降幅为0.36 m,中部和西部地区潜水位下降较为严重;根据潜水位差值空间分布特征,将研究区划分为潜水位基本平衡区、下降区和严重下降区,其分别占研究区总面积的9.88%、49.65%和40.47%;基本平衡区的潜水位受降水因素影响显著,受地下水开采变化影响极小,下降区和严重下降区潜水位受地下水开采的影响相较于降水影响更大。

关键词:通辽市科尔沁区;潜水位动态;降水;地下水开采;交叉小波

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230231

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

Effects of Precipitation and Groundwater Exploitation on the Phreatic Water Table in Khorqin District, Tongliao City

Shu Longcang^{1,2}, Zhang Tonghao^{1,2}, Che Limuge³, Liu Shengyu^{1,2}, Liu Bo^{1,2}

1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China

3. Tongliao Water Conservancy Development Center, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China

Abstract: Identification of regime evolution process of phreatic water table under changing environment (climate change and human activities) is the main scientific problem in the field of water

收稿日期: 2023-09-16

作者简介: 束龙仓(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事地下水资源评价与管理方面的研究, E-mail: lcs@hhu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200502); 国家自然科学基金项目(41971027)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFC3200502) and the National Natural Science Foundation of China (41971027)

resources in China and even globally. In order to analyze the spatial and temporal dynamic changes of phreatic water table under multiple influencing factors, considering precipitation and groundwater exploitation, the spatial and temporal variation of regional phreatic water table from January 2016 to December 2019 in Khorqin district, Tongliao City was analyzed using Mann-Kendall (MK) trend test and grid algebra method. In addition, cross-wavelet analysis, Spearman correlation coefficient and multiple linear regression method were used to further quantify the influence of precipitation and groundwater exploitation on the phreatic water table in different regions. The results show that, during the study period, the phreatic water table in Khorqin district shows a general decline trend, with an average annual decrease of 0.36 m, and the decrease of phreatic water table in central and western areas is more severe. According to the spatial distribution characteristics of the phreatic water table difference, the study area is divided into phreatic water table dynamic balance area, decline area and serious decline area, which account for 9.88%, 49.65% and 40.47%, of the total area of the study area, respectively. The phreatic water table in the dynamic balance region is mainly influenced by precipitation, only slightly affected by groundwater exploitation. In the phreatic water table decline region and serious decline region, the phreatic water table is more affected by exploitation than by precipitation.

Key words: Khorqin district, Tongliao City; phreatic water table dynamics; precipitation; groundwater exploitation; cross wavelet analysis

0 引言

地下水是水循环的重要组成部分^[1-2]。19世纪以来,大量温室气体排放使全球平均气温升高,降水、蒸发等气候要素发生明显变化^[3],同时,日益增强的人类活动也极大地影响着地下水循环的各个环节^[4],使地下水文过程发生显著改变^[5-6],水安全风险程度日益增高^[7],水资源问题成为人类经济社会可持续发展的重要制约因素^[8]。许多学者对地下水位的动态变化进行了研究,例如:Barnes等^[9]研究认为,城市发展模式对地下水文过程有显著影响;刘中培等^[10]认为影响石家庄平原区地下水位变化的主要因素是开采和降水;王电龙等^[11]通过小波分析研究了石家庄区域地下水水位动态与外界因素互动特征,指出降水和开采量对当地地下水水位动态的显著影响。由此可见,变化环境下地下水循环演化问题已成为当前水文过程演变规律研究的热点问题和前沿领域,但已开展的研究多以单因素定性分析为主,尚缺少复合因素贡献度的精确描述。

潜水位是地下水动态要素之一,是地下水均衡状态的外在表现,也是判断和衡量地下水开发利用是否合理的重要指标^[11-13]。长期以来,我国尤其是北方地区地下水的大规模开发利用,造成地下水严重超采,相继引发了地下水资源枯竭、地下水污染加

剧等一系列问题,给经济社会和生态环境的可持续发展带来了严重危害^[14]。开展潜水位动态的研究,可为地下水资源的合理开发利用与科学管理提供依据^[15]。本文以降水和地下水开采两个因素为例,采用小波变换、斯皮尔曼相关系数和多元线性回归法等方法对变化环境下通辽市科尔沁区潜水位演变过程进行归因分析,以期进一步明确降水和地下水开采对研究区潜位位的时空动态的相对影响程度。

1 研究区概况

内蒙古通辽市科尔沁区,地理位置介于 $121^{\circ}40'E-123^{\circ}00'E, 43^{\circ}22'N-43^{\circ}57'N$ 之间,位于西辽河流域平原区,南同科尔沁左翼后旗接壤,西与开鲁县为邻,北及东和科尔沁左翼中旗毗连,面积为 $3\,491.08\text{ km}^2$,如图1所示。科尔沁区位于松辽盆地西南,区内地形自西向东逐渐倾斜,地面坡度普遍小于 6° ,中部地区自东向西为狭长低洼的草甸平原,约占研究区总面积的 $3/5$ 。广阔的沙地和纵横交错的洼地是研究区典型的地貌特征。

科尔沁区地表水全部为过境水,来水受上游地区控制,过境水量日趋减少,科尔沁区境内有西辽河、清河和洪河三条较大河流,但河道连年干涸,地表水的可利用量几乎为0,因此地下水是区内主要供水水源。改革开放以来,随着该地区经济社会发

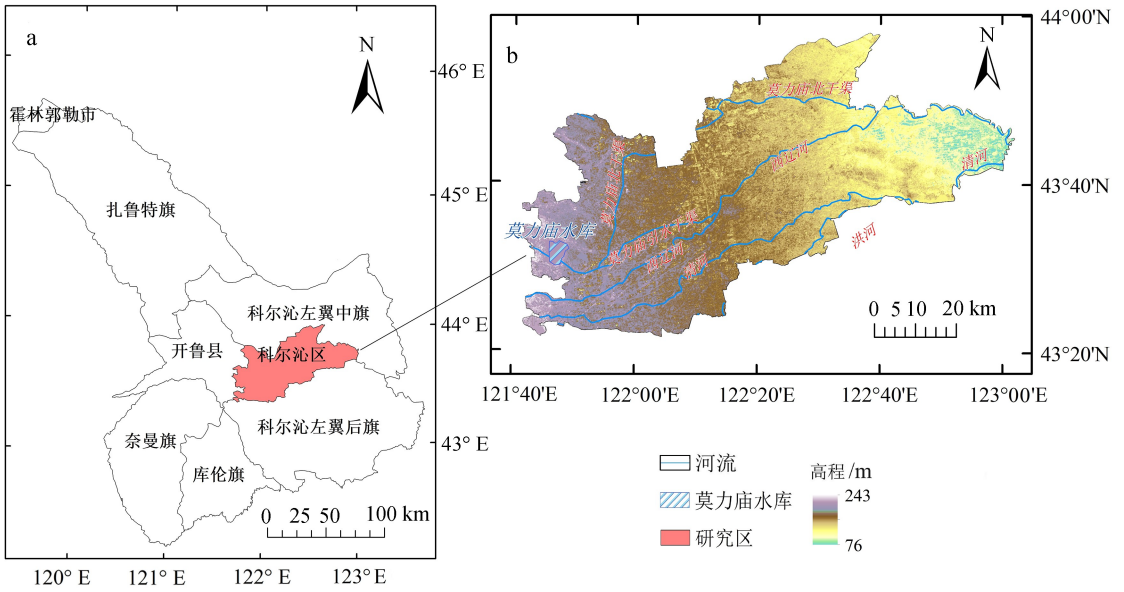


图 1 研究区地理位置图(a)和地形图(b)

Fig.1 Geographic location map (a) and topographic map (b) of the study area

展,地下水开采强度不断加大,水资源供需矛盾日益突出,地下水严重超采^[16]。区内潜水位不断下降,形成一定深度和面积的地下水降落漏斗,并导致了一系列环境地质问题,严重制约了当地社会经济和生态环境的可持续发展。研究区地下水开发利用引发的问题一直备受关注,降水变化和人类活动对潜水位的影响程度有待进一步研究揭示。

2 研究方法

2.1 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验(简称 MK 趋势检验)是一种基于秩的显著性检验,通过检验目标时间序列的统计量 S 是否落在预先设定显著性水平的原假设置信区间内来判断趋势的显著性^[17]。MK 趋势检验是一种非参数统计检验方法,不需要假定样本服从某种分布,且不受少数异常值的干扰,适用于高斯和非高斯数据。MK 检验统计量 S 计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (x_i - x_j); \quad (1)$$

$$sgn(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & x_i - x_j > 0; \\ 0, & x_i - x_j = 0; \\ -1, & x_i - x_j < 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: S 为检验统计量; x_i 和 x_j 分别为潜水位在时

间序列 i 和 j 时的值,且 $j > i$; n 为序列长度; $sgn()$ 为符号函数。当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,其均值为 0,方差和检验值计算公式为:

$$V(S) = \frac{n(n+1)(2n+5)}{18}; \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, & S > 0; \\ 0, & S = 0; \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V(S)$ 为方差; Z 为 MK 检验值,在给定的 α 显著水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,可认为该序列在 α 显著水平上存在显著的上升或下降趋势,反之则认为趋势不显著。

2.2 交叉小波变换

交叉小波变换(cross wavelet transform, XWT)是一种信号分析技术,是一种获取时间序列数据表示多分辨率的分析方法,其可以对两个时间序列在不同时频域中的相互关系进行分析研究,也可以检验两个时间序列之间的时频空间关系^[18-20]。本研究采用交叉小波变换分析潜水位变化与降水和地下水开采之间的关系,两个时间序列 X_n 和 Y_n 的交叉小波变换可以分别定义为 $W_n^X(S)$ 、 $W_n^Y(S)$ 。其交叉小波谱 $W_n^{XY}(S) = W_n^X(S) W_n^{Y*}(S)$,其中

$W_n^{Y*}(S)$ 代表 $W_n^Y(S)$ 的复共轭。它们的交叉小波功率谱密度被定义为 $|W_n^{XY}(S)|$, 其值越大, 二者相关程度越高。复数辐角 $\arg(W_n^{XY}(S))$ 可以看作时频空间中 X_n 和 Y_n 之间的局部相对相位。检验交叉小波功率谱的方法为: 假定时间序列 X_n 和 Y_n 的期望谱分别为红色噪音谱 p_k^X 和 p_k^Y , 两个时间序列的交叉小波功率谱可以表示为

$$P\left(\frac{|W_n^X(S)W_n^{Y*}(S)|}{\sigma_X\sigma_Y} < p\right) = \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{p_k^X p_k^Y} \quad (5)$$

式中: P 为概率分布函数; σ_X, σ_Y 分别为时间序列 X_n, Y_n 的标准差; v 为自由度; $Z_v(p)$ 为概率 p 的置信度水平。

2.3 斯皮尔曼相关分析

斯皮尔曼相关系数 r , 是两个排序变量或一个排序变量与另一个测量变量之间任意单调关联的强度和方向的非参数或无分布秩统计度量^[21-22]。原则上, 斯皮尔曼方法只是在进行相关系数计算之前将样本转换成秩, 它不需要对频率分布和两个变量之间的线性关系做任何假设, 也不需要区间尺度上测量。除了非参数特权之外, 斯皮尔曼相关分析的主要优点是使用起来更方便, 因为它不需要规定数据是升序还是降序。 X, Y 为两组独立同分布的数据集合, 其元素个数均为 N 。对 X, Y 同时进行降序或者升序排序, X_i 和 Y_i 分别表示在 X 和 Y 中元素位次的排序, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为集合 X, Y 的平均位次。集合 X, Y 中的对应元素的差值组成排行差分集合 D , 其中 $D_i = X_i - Y_i, 1 \leq i \leq N$, X, Y 之间的斯皮尔曼相关系数 r 可以由 \bar{x}, \bar{y} 或者 D 计算得到。由 \bar{x}, \bar{y} 计算得到 r 的公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})(Y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

在实际应用中, 变量间的连结是无关紧要的, 由排行差分集合 D 计算得到 r 的公式为

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N D_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (7)$$

2.4 多元线性回归分析法

多元线性回归分析法是一种统计学方法^[23], 可

用来定量判断影响潜水位变化因素的相对大小, 从而确定潜水位动态变化的主要影响因素。多元线性回归方程可表示为

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i \quad (8)$$

式中: b_0 为常数项; b_1, b_2, \dots, b_i 分别为自变量 x_1, x_2, \dots, x_i 的系数。

对多元线性回归方程, 需要测定方程的拟合程度, 检验回归方程和回归系数的显著性。多元线性回归方程的拟合程度采用判定系数 R^2 确定, R^2 越接近 1, 方程的拟合度越高。

3 数据来源与预处理

3.1 数据来源

3.1.1 潜水位动态数据

本文选用科尔沁区内 79 口潜水位监测井(图 2a)的观测数据, 对于个别数据缺失者采用三次样条插值法进行插值处理。由于地下水开采量长时间系列数据资料的不易获取, 本文只选取数据时间序列为 2016-01-01—2019-12-31 共计 1 461 d 的逐日潜水位动态数据。数据来源为水利部松辽水利委员会提供的监测井水位数据。

3.1.2 降水量数据

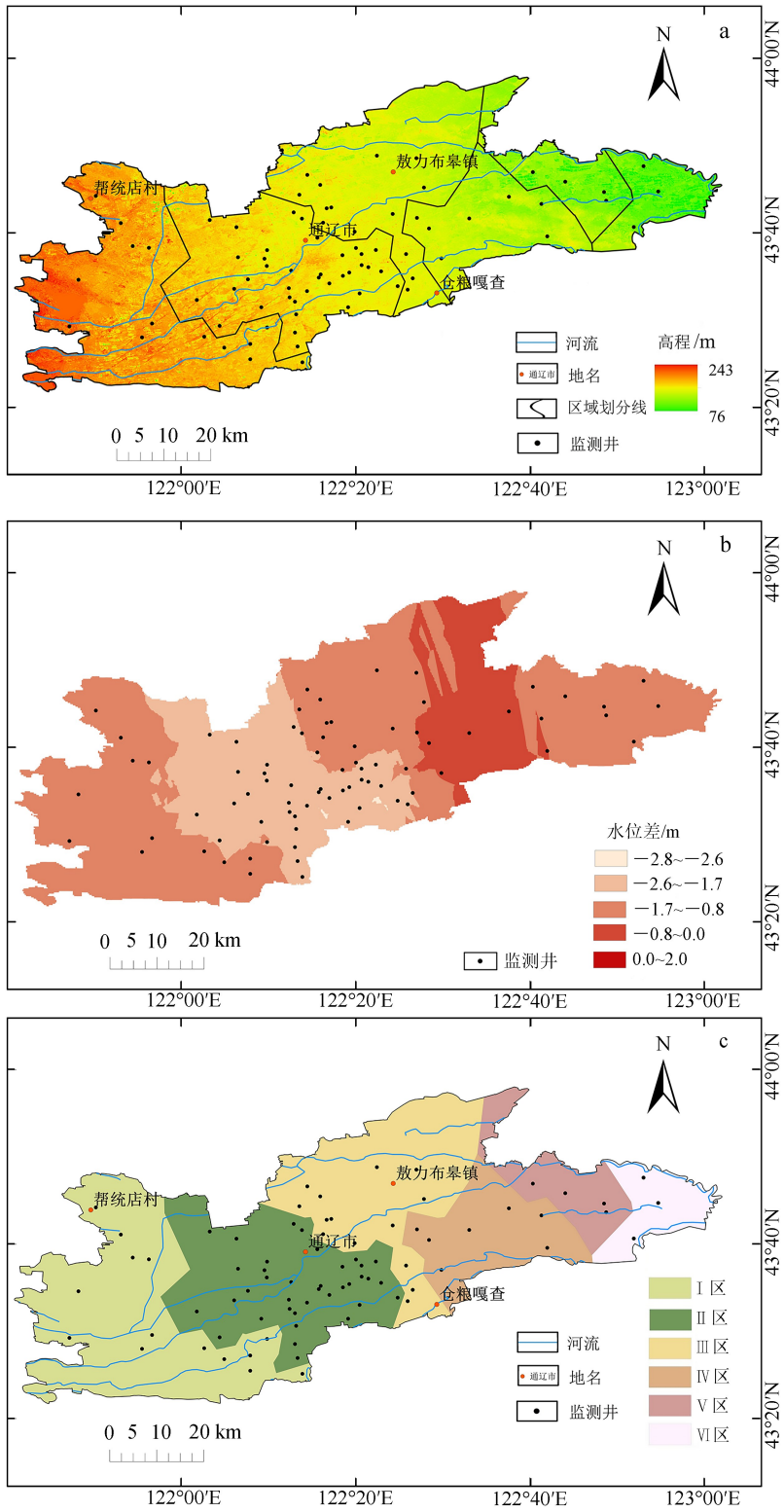
本文选用位于科尔沁区中部的通辽站(测站编号: 20153900)逐日降水量数据, 数据来源为中华人民共和国水文年鉴^[24]。通辽站 2016—2019 年年降水量分别为 498.1、632.4、565.1、360.9 mm, 4 a 平均降水量为 514.1 mm。

3.1.3 地下水开采量数据

本文地下水开采量数据来自水利部松辽水利委员会提供的 2016 年 1 月—2019 年 12 月的科尔沁区逐月开采量数据。

3.2 水位数据预处理

本文首先计算研究区内 2016 年 1 月—2019 年 12 月潜水位差值, 将差值结果通过克里金插值法计算, 得到其差值空间分布(图 2b); 再结合泰森多边形方法, 基于空间特征差异, 进行全域潜水位变化分区; 然后将研究区从西至东依次划分为 I—VI 区, 其中, II 和 V 区为水位严重下降区, I 和 III 区为水位下降区, IV 和 VI 区为水位基本平衡区, 如图 2c 所示; 最后根据区域划分结果计算各区的潜水位变化, 以便后续计算与分析。



a. 监测井位置;b. 2016年1月—2019年12月潜水位差值空间分布;c. 监测井泰森多边形与分区。

图 2 科尔沁区潜水位变幅区域划分图

Fig.2 Regional variation division of phreatic water table in Khorqin district

4 数据与分析

4.1 2016年1月—2019年12月科尔沁区潜水位变化

4.1.1 潜水位时间变化规律

利用MK趋势检验对科尔沁区2016—2019年逐月水位数据进行趋势分析,结果见表1。由表1分析可知:I、II、III、V区2019年12月与2016年1月的水位差为负值,且存在显著的下陷趋势,其中II和V区水位差更大,且Z检验值表明其趋势更显著,所以II和V区界定为潜水位严重下降区,I和III区的水位下降幅度及趋势显著性均较II和V区弱,因此界定为水位下降区;而IV区和VI区的水位差为正值,且Z检验值未达到显著性水平,说明潜水位存在不显著的上升趋势,故界定为潜水位基本平衡区。因地下水超采,研究区潜水位在2016—2019年间整体上处于波动下降状态。

表1 研究区各区域MK趋势检验Z值及水位差

Table 1 MK trend test Z value and water level difference in each regions of the study area

| 分区 | 水位差/m | Z | 潜水位变化区 |
|-----|-------|----------|--------|
| I | -1.35 | -5.95*** | 下降区 |
| II | -1.71 | -6.14*** | 严重下降区 |
| III | -1.36 | -4.12*** | 下降区 |
| IV | 0.27 | 1.68 | 基本平衡区 |
| V | -1.92 | -7.01*** | 严重下降区 |
| VI | 0.20 | 0.60 | 基本平衡区 |

注:水位差为2019年12月水位与2016年1月水位之差;上标***表示通过极好检验。

研究区潜水位具有显著的年内变化规律,具体为:每年的1—3月,由于农业需水量较少,潜水位较高;3月以后,随着灌溉需水量的不断增加,地下水开采量逐渐增加,潜水位开始下降,到每年6月左右达到潜水位值的低点;此后由于降水量增加,潜水接受降水补给增多,水位逐渐开始回升。整体上潜水位呈波动起伏的趋势,每年6月水位波动性最强,初步分析因为雨季降水量和地下水开采量对潜水位的影响。

4.1.2 潜水位空间变化规律

2016年1月—2019年12月潜水位差值结果(图2b)表明,研究区2016—2019年期间,潜水位下

降区域的面积为3 146 km²,占整个研究区面积的90.12%,而潜水位基本平衡区仅占研究区总面积的9.88%;大部分地区潜水位呈现下降趋势,仅东部小部分区域水位处于平衡状态。研究区2019年底较2016年初的潜水位平均下降1.46 m,潜水位年均降幅为0.36 m,中西部地区水位下降较为严重。潜水位严重下降区、下降区、基本平衡区分别占研究区面积的40.47%、49.65%和9.88%,整体上西部的潜水位降幅大于东部。

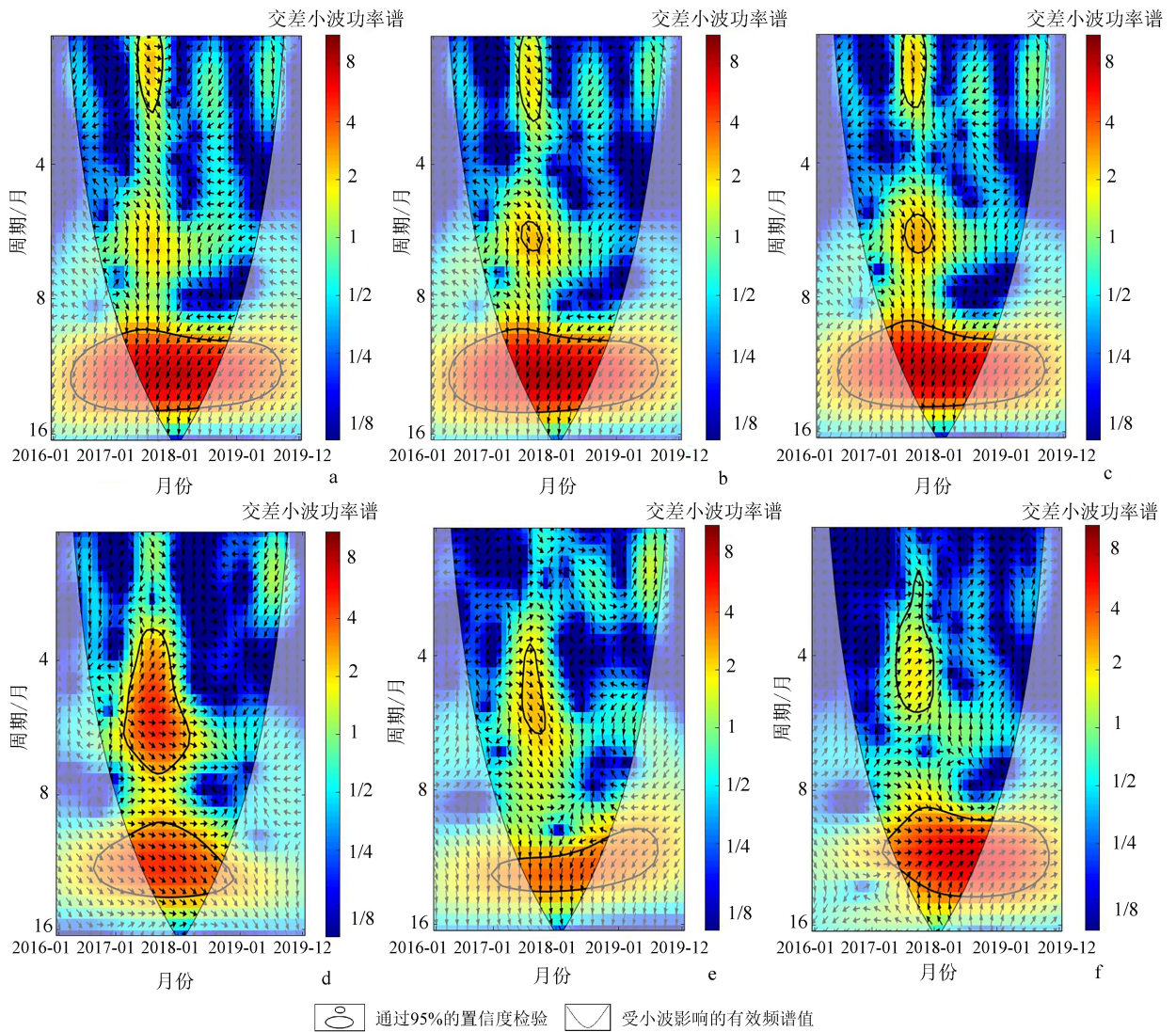
4.2 降水变化对潜水位的影响

4.2.1 降水变化与潜位位的时频响应特征

为了分析不同区域潜水位受降水影响的时频特征及相关特征,采用I—VI区2016年1月—2019年12月的逐月平均潜水位数据与通辽站所测得的逐月降水量数据进行交叉小波分析,交叉小波功率谱如图3所示。交叉小波功率谱图中,实线区域通过红噪声标准光谱检验,置信水平为95%,细弧中的区域表示受小波影响的有效频谱值。交叉小波谱图的箭头方向反映了两者的相位关系,可以用来判断两个时间序列各尺度成分间的时滞相关性,并可以通过计算得到提前或滞后的时间;箭头向右表示同相位,说明两者呈现正相关关系,向左则表示反相位,呈负相关关系。

由I区潜水位变化与降水的交叉小波谱(图3a)可知:在8.40~14.28月周期内,I区降水和潜水位序列在2016年5月—2019年8月期间通过95%置信度检验,表现出显著的共振关系;在整个研究期内,降水对月尺度上的潜水位变化有很强的影响;通过置信度检验的区域箭头基本指向下方,表示潜水位滞后于降水,根据平均相位角计算,获得潜水位变化相对于降水的滞后时间约为18.73 d。此结果说明I区所在的潜水位上升阶段受降水影响显著。

同理,由II区和III区交叉小波谱图(图3b、c)可见:在8.40~14.52月周期内,降水和潜水位序列在2016年4月—2019年8月期间通过95%置信度检验,表现出显著的共振关系;通过置信度检验的区域箭头基本指向下方,表示II区和III区的潜水位变化滞后于降水,用平均相位角除以频率,得到潜水位变化相对于降水的滞后时间分别约为12.80和3.29 d。值得注意的是,III区的潜水位相较于I和II区滞后时间偏短,分析其原因是III区相对于I、II区,其包气带厚度更薄,大气降水入渗补给条件更好,降水能



a. I 区; b. II 区; c. III 区; d. IV 区; e. V 区; f. VI 区。箭头向右表示同相位, 两者呈正相关关系, 向左表示反相位, 呈负相关关系; 箭头向下表示因变量滞后于自变量 1/2 个周期, 向上则表示因变量提前于自变量 1/2 个周期。

图 3 2016—2019 年研究区降水和不同区域潜水位变化的交叉小波功率谱

Fig.3 Crossed wavelet power spectrum of precipitation and variation of phreatic water table of different regions in the study area, 2016 - 2019

快速补给潜水; 因此潜水位响应迅速, 表现为滞后时间偏短。该分析也在后文相关性分析中得以验证, 表现为 III 区降水与潜水位变化存在更好的相关性。

此外, IV、V、VI 3 个区域的谱图(图 3d、e、f)表明: 降水对潜水位的影响从每年 5 月左右开始, 到 9 月左右结束, 这与科尔沁区每年的汛期为 5—8 月且降水与潜水位的影响区间有着较好的对应关系^[16]相一致; 而在非汛期降水与潜水位不存在明显的共振关系, 推测非汛期降水量太小, 同时非汛期地下水开采影响大。其中: IV 区(图 3d)在 8.76~13.44 月的周期内, 降水和潜水位序列仅在 2016 年

8 月—2018 年 11 月期间表现出通过 95% 置信度检验的显著共振关系; 通过置信度检验的区域箭头基本指向右, 表示潜水位与降水同相位, 二者为正相关关系。V 和 VI 区(图 3e、f)在 10.80~14.40 月的尺度上虽然在某些时间段通过了 95% 的置信度检验, 但降水与潜水位交叉小波功率谱能量较低, 相较于其他区域关联性更小; 说明 V 和 VI 区在研究期间潜水位变化受降水影响程度很小。此外, 虽两区域潜水位未与降水表现出强烈的关联性, 但 VI 区比 V 区的交叉小波功率谱能量高。分析原因可知, 全区含水层自西向东, 故相对于 V 区, VI 区包气带厚度更

薄,降水入渗条件更好。

4.2.2 降水变化与潜水位的相关特征

对 I—VI 区的潜水位变化与通辽站降水量数据进行斯皮尔曼相关性分析,结果见表 2。由表 2 可知: I、II、III、IV 区潜水位变化与降水的斯皮尔曼相关系数均为正值且均通过 0.01 级别的双尾检验,表明这 4 个区域的潜水位变化与降水存在正相关,且相关性显著; VI 区的相关系数为正值,但仅通过 0.05 级别的双尾检验,此区域潜水位变化与降水也存在一定的相关性,但较前 4 个区域相关性较小;而 V 区的相关系数未通过 0.05 级别的双尾检验,此区域潜水位变化与降水相关性不显著。该结果进一步说明,潜水位基本平衡区和下降区的潜水位受降水影响较大,而潜水位下降较严重区域降水对潜水位的影响程度较小。

表 2 研究区不同分区潜水位变化与降水相关性分析结果

Table 2 Correlation coefficient between phreatic water table change and precipitation of different zones in the study area

| 分区 | 水位差/m | 相关系数 |
|-----|-------|---------|
| I | -1.35 | 0.333** |
| II | -1.71 | 0.356** |
| III | -1.36 | 0.421** |
| IV | 0.27 | 0.274** |
| V | -1.92 | 0.041 |
| VI | 0.2 | 0.141* |

注:上标 ** 代表通过 0.01 级别的双尾检验;上标 * 代表通过 0.05 级别的双尾检验。

由于降水及下渗条件存在空间差异,降水对潜水位变化的影响程度也有所不同,不同位置监测点测量的潜水位变化和降水之间的相关系数情况见图 4。由图 4 可知:中西部降水与潜水位变化的相关系数大部分在 0.29~0.42 之间,表明中西部的降水与潜水位变化具有较明显的正相关性;而东部的相关系数大部分在 0.03~0.23 之间,表明潜水位变化与降水的相关关系较小。

4.3 地下水开采变化对潜水位的影响

4.3.1 地下水开采变化与潜位位的时频响应特征

为了分析不同区域潜水位受地下水开采影响的时频特征及相关特征,采用 I—VI 区 2016 年 1 月—2019 年 12 月的研究区逐月平均潜水位数据与逐月地下水开采量数据进行交叉小波分析,所得交叉小波功率谱如图 5 所示。

由 I、II、III、V 区地下水开采量与潜水位变化的交叉小波功率谱(图 5a、b、c、e)可知:这 4 个谱图极其相似,表明在 8.76~16.08 月周期内,地下水开采量和潜水位变化序列在整个 2016—2019 年期间通过 95% 置信度检验,表现出显著的共振关系;通过置信度检验的区域箭头基本指向左,即开采量与潜水位变化呈反相位,二者为负相关关系,说明在整个研究期间,这 4 个区域的潜水位下降受开采因素影响显著。值得注意的是, I、II、III、V 4 个区域的谱图(图 5a、b、c、e)表明,4—8 月间地下水开采量与潜位位的交叉小波功率谱能量高,且表现出较强的关联性;分析可知 4—8 月是农业灌溉用水的高峰期,农业灌溉用水量很高。另外对比可知, V 区在整个研究期间,交叉小波功率谱图能量最高(图 5e),

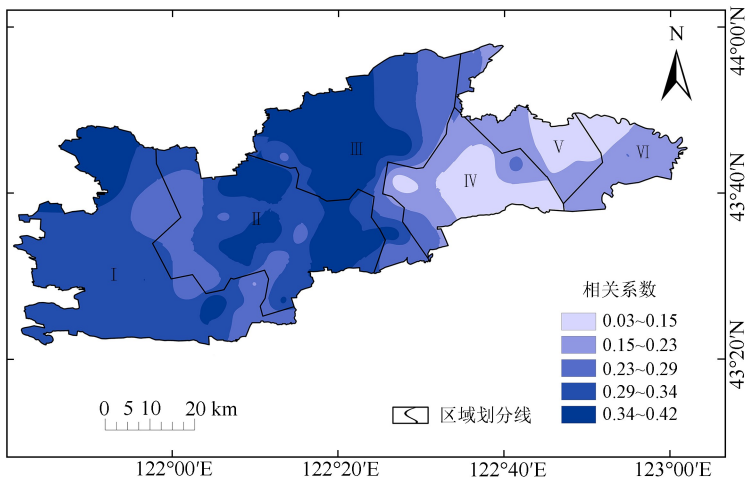
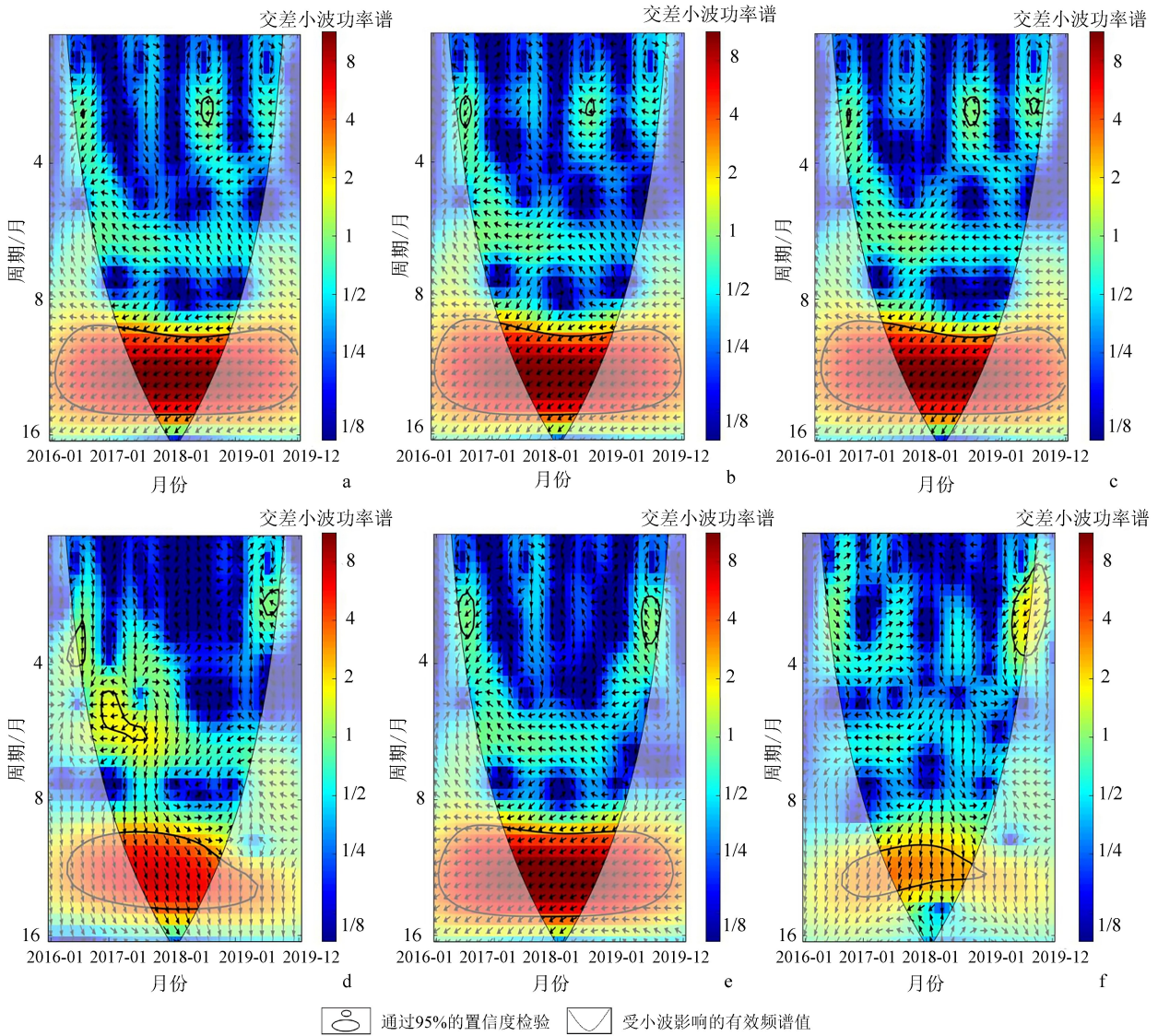


图 4 2016—2019 年研究区分区潜水位变化与降水相关性分析结果

Fig.4 Correlation coefficient between phreatic water table change and precipitation in the study area, 2016 - 2019



a. I区;b. II区;c. III区;d. IV区;e. V区;f. VI区。箭头向右表示同相位,两者呈正相关关系,向左表示反相位,呈负相关关系;箭头向下表示因变量滞后于自变量1/2个周期,向上则表示因变量提前于自变量1/2个周期。

图 5 2016—2019 年研究区地下水开采和不同区域潜水位变化的交叉小波功率谱

Fig.5 Crossed wavelet power spectrum of groundwater extraction and variation of phreatic water table in different areas of the study area, 2016 - 2019

表明该区域地下水开采量与潜水位变化联系最为显著,这与V区是水位下降最严重的区域相互印证。由图 5d、f 可见,IV和VI两区域在 8.88~15.00 月周期尺度上只分别在 2016 年 4 月—2019 年 1 月和 2016 年 9 月—2019 年 11 月通过 95%的置信度检验,与其他区域相比地下水开采量与潜水位交叉小波功率谱能量较低,未表现出较强的关联性,仅通过置信度检验的区域箭头指向下方,表明潜水位滞后于开采。分析原因可知,降水量在这个时间段内对潜水位的影响较大,从而使潜水位受地下水开采量影响程度

减小。

4.3.2 地下水开采量变化与潜水位的相关特征

研究区潜水位变化与开采相关性分析结果(表 3)显示,I、II、III、V区的潜水位变化与地下水开采量存在显著的负相关性,均通过 0.01 级别的双尾检验,而IV和VI区的潜水位变化与开采量呈现正相关性。这进一步表明,在研究区内潜水位下降区和严重下降区(I、II、III、V区)的水位变化受地下水开采的影响显著,开采是导致其水位下降的重要原因;而水位平衡区(IV和VI区)的潜水位变化受开

表 3 研究区不同分区潜水位变化与地下水开采相关性分析结果

Table 3 Correlation coefficient between phreatic water table change and groundwater exploitation of different zones in the study area

| 分区 | 水位差/m | 相关系数 |
|-----|-------|----------|
| I | -1.35 | -0.481** |
| II | -1.71 | -0.493** |
| III | -1.36 | -0.409** |
| IV | 0.27 | 0.092 |
| V | -1.92 | -0.567** |
| VI | 0.20 | -0.238 |

注:上标 ** 代表通过 0.01 级别的双尾检验。

采影响较小。

所处的位置不同,地下水开采对潜水位变化的影响程度也有所不同,不同位置监测点测量的潜水位变化和地下水开采之间的相关系数情况见图 6。由图 6 可知:东部的地下水开采与潜水位变化的相关系数较小,表明此区域潜水位变化受地下水开采的影响较小;而中西部地下水开采与潜水位变化的相关系数大部分处于 -0.52~ -0.39 之间,表明中西部的地下水开采与潜水位变化具有较明显的负相关性,潜水位下降受地下水开采影响显著。

4.4 降水和地下水开采对区域潜水位影响程度

潜水位变化受到多种因素影响,而降水和地下水开采是影响研究区潜水位变化的两个主要因素。由

前文得知,水位基本平衡区(IV和VI区)的潜水位存在不太显著的上升趋势,且潜水位变化与地下水开采和降水的交叉小波结果表明,IV和VI区潜水位变化受地下水开采影响较小,受降水影响较大,所以不在本节对两区域潜水位影响因素进行量化分析。为了进一步量化研究区内地下水开采与降水对于不同区域潜水位变化的影响程度,以I、II、III、V4个区域的潜水位变化作为因变量,研究区2016年1月—2019年12月月降水量、地下水开采量作为自变量,设置置信度为95%,建立多元线性回归方程。

方程中标准化系数的绝对值可以体现影响因素对潜水位影响的显著性,对此多元线性回归模型的系数进行标准化处理,结果见表4。由表4可见,4个区域的多元线性回归的判定系数 R^2 平均值为0.83,说明多元线性回归方程的拟合度较高。

表4进一步表明,研究区潜水位下降的4个区域,地下水开采与潜水位变化间的标准化系数绝对值均大于降水与潜水位变化间的标准化系数绝对值;说明潜水位下降的4个区域内,地下水开采对潜水位变化的影响程度均大于降水对潜水位变化的影响程度。其中:II和V区属于潜水位严重下降区,其地下水开采与潜水位变化间标准化系数绝对值明显大于降水与潜水位变化间的标准化系数绝对值,这也表明研究区潜水位严重下降区受地下水开采影响更显著;而I和III区地下水开采和潜水位之间的标准化系数绝对值略大于降水的,表明两区域所在的潜水位下降区受地下水开采的影响略大于降水的影响。

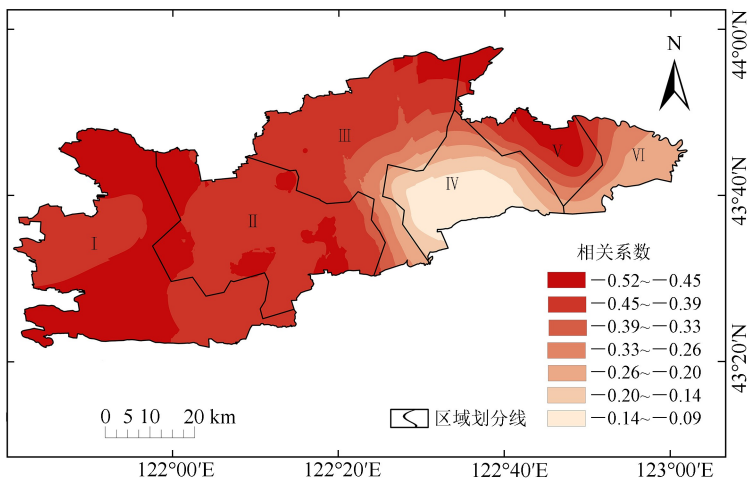


图 6 2016—2019 年研究区潜水位变化与地下水开采的相关性分析结果

Fig.6 Correlation coefficient between phreatic water table change and groundwater exploitation in the study area,2016 - 2019

表 4 研究区多元线性回归模型标准化系数

Table 4 Standardization coefficient of multiple linear regression model in the study area

| 分区 | 判定系数 | 标准化系数 | |
|-----|------|-----------------|--------------|
| | | 地下水开采与 潜水位变化 | 降水与潜 水位变化 |
| I | 0.81 | -0.61 | 0.52 |
| II | 0.86 | -0.65 | 0.44 |
| III | 0.84 | -0.59 | 0.53 |
| V | 0.81 | -0.69 | 0.33 |

注:回归系数的显著性均小于 0.05,4 个区域开采与降水对潜水位影响均显著。

5 结论

1)研究区的潜水位在时间尺度上具有显著的年内变化规律:每年 1—3 月,潜水位处于高值;3 月以后,地下水开采量随着灌溉需水量的上升不断增加,导致潜水位下降,6 月左右潜水位最低;此后由于降水量的增加,水位开始回升。整体上潜水位呈波动起伏的趋势,其中 6 月水位波动性最强。

2)2016 年 1 月—2019 年 12 月科尔沁区潜水位下降区域面积为 3 146 km²,占研究区面积的 90.12%。空间上,2019 年末与 2016 年初潜水位平均变化为 1.46 m,年均降幅 0.36 m,且中西部地区潜水位下降较为严重。潜水位严重下降区、下降区、基本平衡区分别占研究区面积的 40.47%、49.65%和 9.88%,整体上潜水位西高东低,且西部的潜水位降幅大于东部。

3)时频特征及相关特征分析结果表明,基本平衡区潜水位受降水因素影响显著,该区的地下水开采量较小,所以地下水开采对潜水位影响较小。区域潜水位与降水在月周期上存在显著共振关系,而潜水位与地下水开采之间不存在稳定的周期性相关,相关性较差。

4)研究区的潜水位严重下降区和下降区,潜水位受地下水开采的影响相较于降水影响更大。根据多元线性回归结果可知,潜水位下降区域中,严重下降区的潜水位变化与地下水开采之间的相关性明显大于潜水位变化与降水之间的相关性;而下降区的潜水位变化受地下水开采的影响略大于降水。

参考文献 (References):

[1] 岳卫峰,孟恺恺,侯凯旋,等.地下水埋深时空变异特征

及其影响因素[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):81-89.

Yue Weifeng, Meng Kaikai, Hou Kaixuan, et al. Spatial and Temporal Variation of Groundwater Depth in Hetao Irrigation Area and Its Influencing Factors [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2019, 17 (5): 81 - 89.

[2] 束龙仓,温中琦,张岩,等.苏北沿海地区潜水水化学特征及形成机理[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1223-1233.

Shu Longcang, Wen Zhongqi, Zhang Yan, et al. Chemical Characteristics and Formation Mechanism of Phreatic Water in Coastal Area of Northern Jiangsu [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4):1223-1233.

[3] 束龙仓,栾佳文,宫荣,等.傍河地下水位监测断面的优化设计[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):555-565.

Shu Longcang, Luan Jiawen, Gong Rong, et al. Optimal Design of Monitoring Section for Groundwater Level Beside the River [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2):555-565.

[4] 杜新强,何立滢,任思睿,等.中国北方地区水资源演变和供水构成变化特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):566-577.

Du Xinqiang, He Liying, Ren Sirui, et al. Water Resources Evolution and Water Supply Composition Changes in Northern China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2):566-577.

[5] 束龙仓,黄蕾,陈华伟,等.基于 AHP-EWM 的莱州市海岸带海水入侵灾害风险评价与区划[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1864-1879.

Shu Longcang, Huang Lei, Chen Huawei, et al. Risk Assessment and Zoning of Seawater Intrusion Hazard in Coastal Region of Laizhou City Based on AHP-EWM Method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6):1864-1879.

[6] 闫佰忠,盖俊百,王昕洲,等.石家庄滹沱河山前冲洪积扇地下水位动态演变特征及影响机制[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1880-1891.

Yan Baizhong, Gai Junbai, Wang Xinzhou, et al. Characteristics of Groundwater Level Dynamic Evolution and Influence Factors in Mountain-Front Alluvial Plain of Hutuo River in Shijiazhuang [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6):1880-1891.

- [7] 靳博文,王文科,段磊,等.保定平原区地下水生态水位阈值的探讨[J].水文地质工程地质,2022,49(5):166-175.
Jin Bowen, Wang Wenke, Duan Lei, et al. Discussion on Ecological Water Level Threshold of Groundwater in Baoding Plain Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 166-175.
- [8] Abhishek A, Pathak B, Dodamani M, et al. Trend Analysis of Groundwater Levels and Assessment of Regional Groundwater Drought: Ghataprabha River Basin, India[J]. Natural Resources Research, 2019, 28(3):413-424.
- [9] Barnes M L, Welty C, Miller A J, et al. Impacts of Development Pattern on Urban Groundwater Flow Regime[J]. Water Resources Research, 2018, 54(8):5198-5212.
- [10] 刘中培,王富强,于福荣.石家庄平原区浅层地下水位变化研究[J].南水北调与水利科技,2012,10(5):124-127.
Liu Zhongpei, Wang Fuqiang, Yu Furong. Study on Variation of Shallow Groundwater Level in Shijiazhuang Plain Area [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 2012, 10(5): 124-127.
- [11] 王电龙,张光辉,冯慧敏,等.降水和开采变化对石家庄地下水水流场影响程度[J].水科学进展,2014,25(3):420-426.
Wang Dianlong, Zhang Guanghui, Feng Huimin, et al. Impact of Precipitation and Mining on Groundwater Flow Field in Shijiazhuang [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3):420-426.
- [12] 许月卿.基于GIS的河北平原地下水位时空变化动态分析[J].北京大学学报(自然科学版),2005,41(2):265-272.
Xu Yueqing. Spatial and Temporal Variation of Groundwater Level in Hebei Plain Based on GIS [J]. Journal of Peking University (Natural Science), 2005, 41(2):265-272.
- [13] 陶虹,陶福平,刘文波.关中城市群50年地下水动态变化及影响因素分析研究[J].水文地质工程地质,2013,14(6):37-42.
Tao Hong, Tao Fuping, Liu Wenbo. Study on the Dynamic Changes of Groundwater in the Guanzhong Urban Agglomeration for 50 Years and Its Influencing Factors[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 14(6):37-42.
- [14] 王京晶,徐宗学,李鹏,等.济南市区地下水埋深动态变化及其成因[J].南水北调与水利科技,2021,19(5):883-893.
Wang Jingjing, Xu Zongxue, Li Peng, et al. Dynamic Changes and Causes of Groundwater Burial Depth in Jinan Urban Area[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2021, 19(5): 883-893.
- [15] 王庆明,姜珊,李森,等.大清河流域山区径流量衰减影响因素[J].南水北调与水利科技,2021,19(4):669-679.
Wang Qingming, Jiang Shan, Li Sen, et al. Influencing Factors of Runoff Attenuation in Mountainous Areas of Daqing River Basin[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2021, 19(4):669-679.
- [16] 王伟,刘小燕,宋庆玉,等.内蒙古通辽市科尔沁区节水潜力研究[J].内蒙古水利,2011(1):74-76.
Wang Wei, Liu Xiaoyan, Song Qingyu, et al. Study on Water Saving Potential in Keerqin District, Tongliao City, Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2011(1): 74-76.
- [17] 束龙仓,徐丽丽,袁亚杰,等.三江平原典型区地下水流场变化及主要影响因素分析[J].水利学报,2022,53(6):644-654.
Shu Longcang, Xu Lili, Yuan Yajie, et al. Analysis of Groundwater Flow Field Variation and Main Influencing Factors in Typical Areas of Sanjiang Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 644-654.
- [18] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11: 561-566.
- [19] Torrence C, Compo G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79:61-78.
- [20] 尚海昆,苑津莎,王瑜,等.基于交叉小波变换和相关系数矩阵的局部放电特征提取[J].电工技术学报,2014,29(4):274-281.
Shang Haikun, Yuan Jinsha, Wang Yu, et al. Local Discharge Characteristic Extraction Based on Cross Wavelet Transform and Correlation Coefficient Matrix [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4):274-281.
- [21] 张洪波,俞奇骏,陈克宇,等.基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(4):59-66.

- Zhang Hongbo, Yu Qijun, Chen Keyu, et al. Study on Response Relationship Between Runoff Periodicity and ENSO Events Based on Wavelet Transform[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(4):59 - 66.
- [22] 贾科,杨哲,魏超,等. 基于斯皮尔曼等级相关系数的新能源送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15):103 - 111.
- Jia Ke, Yang Zhe, Wei Chao, et al. Longitudinal Protection of New Energy Transmission Lines Based on Spearman Rank Correlation Coefficient [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15):103 - 111.
- [23] 王惠文,孟洁. 多元线性回归的预测建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4):500 - 504.
- Wang Huiwen, Meng Jie. Predictive Modeling Method of Multiple Linear Regression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4):500 - 504.
- [24] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016/2017/2018/2019.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016/2017/2018/2019.

中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊 收录证书

吉林大学学报. 地球科学版

依据文献计量学的理论和方法, 通过定量与定性相结合的综合评审, 贵刊被收录为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊, 特颁发此证书。

证书编号: CSCD2023-621
有效期: 2023年-2024年
发证日期: 2023年6月
查询网址: www.sciencechina.cn

