

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0106

邱亚婷, 陈娟, 束龙仓, 等. 三江平原典型区地下水位对降水及河水位变化的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1076-1083, 1127. QIU Y T, CHEN J, SHU L C, et al. Response of groundwater level to precipitation and river stage in the typical district of Sanjiang Plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1076-1083, 1127. (in Chinese)

# 三江平原典型区地下水位对降水及河水位变化的响应

邱亚婷<sup>1,2</sup>, 陈娟<sup>1,2</sup>, 束龙仓<sup>1,2</sup>, 袁亚杰<sup>3</sup>, 张凤海<sup>3</sup>, 鲁程鹏<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;  
3. 黑龙江省水文水资源中心, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 选取三江平原典型区松花江、乌苏里江河流附近建设街、海青地下水水位站及相邻的富锦、海青水文站为研究对象, 采用 2007—2016 年逐月降水、地下水位和河水位数据, 利用互相关分析和交叉小波变换方法开展地下水位对降水的响应研究, 并对地下水位和河水位进行偏相关分析, 阐释地下水位对降水响应的时滞差异。结果表明: 地下水位和河水位存在显著相关关系, 且松花江、乌苏里江段两者的偏相关系数分别为 0.880、0.511, 说明河水位明显影响河流附近地下水位对降水的响应; 研究区内松花江、乌苏里江段河流附近地下水位对降水的滞后水平存在时空差异, 滞后时间分别为 21.65 d、2.17 d; 此外, 2007—2016 年地下水和河水的补排关系总体表现为地下水补给河水, 且松花江段河水位和附近地下水位的关系更紧密, 即松花江段河水和地下水的交互作用更强, 故松花江段相邻地下水位对降水的滞后时间更长。研究结果为掌握该地区地下水水位时空变化规律和水资源的合理开发利用及管理提供了科学依据。

**关键词:** 地下水位; 降水; 河水位; 相关性分析; 滞后时间

中图分类号: TV211.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



降水是平原地区浅层地下水的主要补给来源, 采用互相关分析<sup>[1-3]</sup>、交叉小波变换<sup>[4-6]</sup>等方法来定量研究降水补给的滞后延迟效应对掌握地下水水位动态变化规律具有重要作用。地表水和地下水作为自然界中相互关联的水文连续体, 两者之间复杂多变的交互作用影响着流域内的水文循环和水均衡计算<sup>[7-8]</sup>, 其补排关系显著影响地表水体附近地下水位对降水的响应, 然而国内外相关学者<sup>[9-11]</sup>主要在水量和水质方面进行了大量的科学研究, 却很少深入研究地下水位对降水及河水位共同作用的响应。

三江平原是我国重要的粮食生产基地和湿地集中分布区, 农田的灌溉和生态系统的涵养都离不开

地下水<sup>[12]</sup>。20 世纪 90 年代以来, 地下水开采量随着水田面积的增加而急剧增加, 使得局部已出现地下水水位降落漏斗区, 因此掌握三江平原地下水水位动态变化规律及其影响因素对地下水资源的可持续利用至关重要。国内已有许多学者对三江平原地下水动态变化规律<sup>[13-15]</sup>、人类活动<sup>[16-17]</sup>、土地利用类型<sup>[18]</sup>、地层结构<sup>[19]</sup>、洪水<sup>[20]</sup>等影响因素进行研究, 但降水作为三江平原典型区地下水的重要补给来源之一, 相关学者对区域内地下水位对降水的时空响应方面研究较少, 且未讨论区域内地表水如何影响着地表水体附近地下水位对降水的响应。因此, 基于皮尔逊相关分析、偏相关分析、互相关分析和交叉小波变换方法, 研究三江平原典型区河水位、

收稿日期: 2022-06-18 修回日期: 2022-09-30 网络出版时间: 2022-11-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221117.2001.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200502); 河海大学中央高校基本科研业务费项目(B200201030); 国家自然科学基金青年基金项目(51909062); 国家自然科学基金项目(41971027; 41572210)

作者简介: 邱亚婷(1998—), 女, 河南驻马店人, 主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail: [qiuyating9197@163.com](mailto:qiuyating9197@163.com)

通信作者: 束龙仓(1964—), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail: [lcsu@hhu.edu.cn](mailto:lcsu@hhu.edu.cn)

降水与地下水位时间序列之间的相关性,探讨河水位如何影响附近地下水位对降水的响应,掌握三江平原典型区地下水水位时空变化规律,为研究区内水资源的合理开发利用和管理提供支持。

## 1 研究区概况

三江平原典型区位于黑龙江省三江平原的东北部,为三江平原地下水水位降幅较大区域,该区分别以松花江、黑龙江、乌苏里江、挠力河及富锦市行政区范围为边界,包括富锦市、同江市、抚远市和饶河县挠力河以北部分,地处东经  $131^{\circ}26' \sim 134^{\circ}47'$ ,北纬  $44^{\circ}48' \sim 48^{\circ}23'$ ,总面积约  $2.21$  万  $\text{km}^2$ 。区内属于寒温带湿润一半湿润大陆性季风气候,冬长夏短,受海洋暖湿气流影响,春季风大雨少,夏季暴雨频繁,多年平均降水量为  $383.5 \sim 886.1$  mm,年内降水分布不均,主要集中在 6—9 月,多年平均气温为  $2.8$   $^{\circ}\text{C}$ 。

研究区内水系发育,河流交错,均属于黑龙江水系,其主要支流为松花江、乌苏里江,区域内部主要河流为鸭绿河、浓江河和别拉洪河。

研究区内含水层主要为第四纪地层,其沉积范围广、厚度大,发育很不均衡,空间分布主要呈现出中间厚四周薄的特点。地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水,绝大部分赋存于松散孔隙介质中,含水层介质主要为导水性强、富水性较好的砂、砂砾石层,加少量黏性土薄透镜体,中间没有隔水层,在河漫滩区域近地表零星分布着砂土。此外,研究区近地表大面积覆盖着 0~18 m 的黏土层,主要土壤类型为粉质黏土和黏性土,分别分布于平原区和山前台地。

据研究区内水文地质剖面图可知,松花江、乌苏里江代表性河段河床均切割至含水层,且切割深度分别约为 17、8 m,黑龙江段、挠力河代表性河段河床切割深度分别约为 3、8 m,均未切割至含水层。鸭绿河、浓江河和别拉洪河作为研究区内部的主要河流,发源于沼泽湿地,为沼泽性河流,河床底部均未完全切割近地表的黏土层。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

研究的主要数据包括降水数据、代表性河段的河水位数据以及相邻地下水位观测数据。由于黑龙江河段相邻地下水位受到灌区影响,挠力河段年内多数时间内为地表水补给地下水,使得地下水位

在接受降水补给之前就处于抬升状态,因此为了减少人工开采和地表水补给对地下水位变化的影响,选取松花江及乌苏里江河段附近的建设街、海青地下水位站及相邻的富锦、海青水文站为研究对象进行研究。此外,研究数据均采用逐月数据,其中:降水时间序列数据为 2007 年 1 月—2016 年 12 月,来源于黑龙江流域水文年鉴;河水位监测数据和地下水位监测数据为 2007 年 1 月—2016 年 12 月,均来源于黑龙江省水文水资源中心。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 偏相关分析

偏相关分析指当两个变量均与第三个变量相关时,剔除第三个变量的影响,分析另外两个变量之间相关程度的过程<sup>[21]</sup>。在控制降水变量下对河水位和地下水位进行相关性分析,其计算公式为

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r_{ac}^2)(1-r_{bc}^2)}} \quad (1)$$

式中: $r_{ab,c}$  为控制变量  $c$  后变量  $a$  与变量  $b$  之间的偏相关系数; $r_{ab}$ 、 $r_{ac}$ 、 $r_{bc}$  分别表示变量  $a$  和变量  $b$ 、变量  $a$  与变量  $c$ 、变量  $b$  与变量  $c$  的相关系数。

### 2.2.2 互相关分析

互相关函数表示两个时间序列在任意两个不同时刻取值之间的相关程度。该方法适用于分析降水和地下水位之间的时空响应关系,其中最大互相关系数值反映了区内地下水位对降水响应的敏感程度,其对应的滞后时间为地下水位对降水的滞后时间。对于降水时间序列  $x_n$  和地下水位序列  $y_n$ ,互相关函数  $R_{xy}(k)$ <sup>[22]</sup> 可以表示为

$$R_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma(x)\sigma(y)} \quad (2)$$

其中,

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (3)$$

式中: $R_{xy}(k)$  为互相关系数; $C_{xy}(k)$  为两个时间序列的互协方差; $\sigma(x)$ 、 $\sigma(y)$  分别为  $x_n$ 、 $y_n$  的标准差; $n$  为时间序列长度; $k$  为滞后时间; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  分别为  $x_n$ 、 $y_n$  的均值。

### 2.2.3 交叉小波变换

交叉小波变换是一种信号时频分析工具,用于研究两个时间序列之间在时频域上的相关性,揭示两个时间序列在时频域上的共同动态特征和相位关系<sup>[23]</sup>。该方法适宜于分析长时间序列降水和地下

水位数据在时频域上的相关性。对于两个时间序列  $x_n$  和  $y_n$ , 交叉小波变换将两者定义为  $W_{xy} = W^x W^{y*}$ , 其中, \* 表示复共轭, 对应交叉小波谱为  $|W_{xy}|$ 。两个时间序列的背景功率谱分别为  $P^x$  和  $P^y$ , 则具有背景功率谱的两个时间序列的交叉小波定义为

$$D\left(\frac{|W_n^x(s)W_n^{y*}(s)|}{\sigma_x\sigma_y} < p\right) = \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{P_k^x P_k^y} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_x, \sigma_y$  分别为  $x_n$  和  $y_n$  的标准差;  $Z_v(p)$  为概率  $p$  的置信度水平。

交叉小波的平均相位角定义为

$$a_m = \arg(X, Y) = \arg\left[\sum_{i=1}^n \cos a_i, \sum_{i=1}^n \sin a_i\right] \quad (5)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 地下水位和降水、河水位的相关性分析

准确评价降水、地下水和河水三者之间的相关性, 可以加强对区域内水文循环和水资源管理的认识<sup>[24]</sup>。以往论文在研究地下水和地表水的关系时未考虑降水的影响, 导致河水位和地下水位之间的相关关系偏大, 因此, 研究在对 2007—2016 年逐月降水和地下水位、河水位数据进行皮尔逊相关分析的基础上, 对地下水位和河水位进行偏相关分析相关结果见表 1、表 2。

表 1 降水与地下水位、河水位的皮尔逊相关系数

Tab. 1 Pearson correlation coefficients of precipitation, groundwater level and river stage

站点	皮尔逊相关系数
地下水位站	
建设街	0.367**
海青	0.379**
水文站	
松花江富锦站	0.403**
乌苏里江海青站	0.441**

注: \*\*为在 0.01 显著性水平上相关(双尾检验)。

表 2 河水位与地下水位偏相关系数

Tab. 2 Partial correlation coefficients of river stage and groundwater level

站点	偏相关系数
建设街	0.880**
海青	0.511**

注: \*\*为在 0.01 显著性水平上相关(双尾检验)。

由表 1 可知, 建设街站地下水位、河水位和降水的皮尔逊相关系数分别为 0.367、0.403, 海青站地下水位、河水位和降水的皮尔逊相关系数分别为

0.379、0.441, 表明松花江、乌苏里江段的河水位及相邻地下水位和降水之间均呈现出 0.01 水平的显著性, 即两者与降水之间存在显著的相关性。由表 2 可知, 松花江段河水位与建设街站地下水位的偏相关系数为 0.880, 乌苏里江段河水位与海青站地下水位的偏相关系数为 0.511, 表明两个地下水位的地下水位和河水位均有着显著的正相关关系。此外, 建设街地下水位的偏相关系数大于海青地下水位的偏相关系数, 说明松花江段河水位和相邻地下水位之间的关系更紧密。

#### 3.2 地下水位对降水过程的响应

2007—2016 年建设街、海青地下水水位站逐月地下水位与降水量关系图见图 1。由图 1 可以看出, 2007—2016 年降水量和地下水位的变化趋势基本一致, 但地下水位的抬升并不随着降水量的增加而同步上升, 地下水位的峰值、谷值的出现时间总是滞后于降水量的最大和最小月份, 即降水对地下水的补给具有滞后性, 且当逐月降水量增加或减少时, 地下水位也随之发生高低变化, 表明地下水位的抬升与降水量具有密切关系。因此, 利用互相关分析方法和交叉小波变换方法对地下水位和降水的响应关系进行研究。

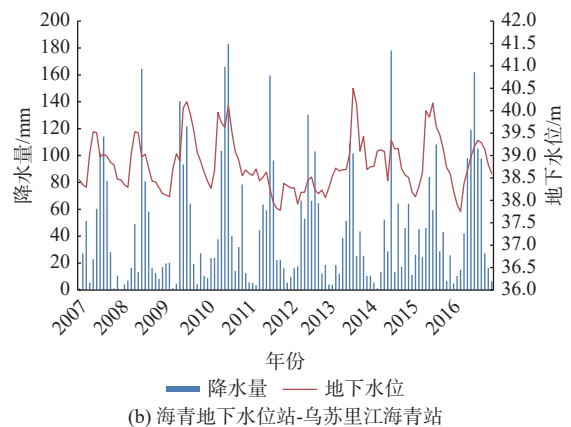
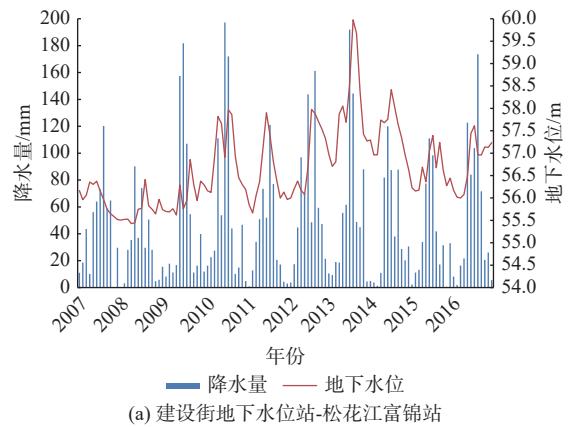


图 1 2007—2016 年逐月地下水位与降水量关系

Fig. 1 Monthly groundwater level and precipitation from 2007 to 2016

### 3.2.1 互相关分析

为揭示研究区内地下水位对降水量响应的时滞特征,利用 SPSS 软件对逐月降水量和地下水位数据进行互相关分析,分析结果见图 2。

由图 2(a)可以看出,建设街站地下水位和降水量之间通过 95% 置信度检验的互相关系数范围为 0.211~0.465,相应的滞后时间范围为 0~3 个月,且降

水和地下水位时间序列的最大互相关系数为 0.465,对应的时滞值为 1 个月,因此建设街站地下水位对降水的滞后时间为 1 个月。同理,由图 2(b)可以看出,海青站地下水位与降水量的互相关系数范围为 0.241~0.392,相应的滞后时间范围为 0~2 个月,最大互相关系数对应的滞后时间为 1 个月,即海青站地下水位对降水的滞后时间为 1 个月。

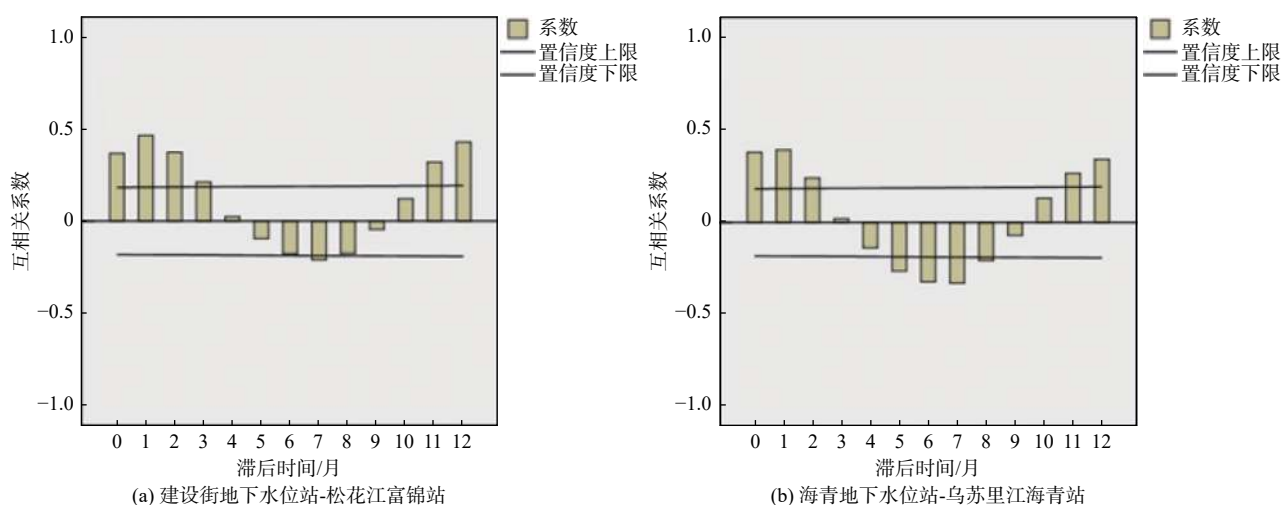


图 2 降水与地下水位互相关分析

Fig. 2 Correlation analysis of precipitation and groundwater level

此外,考虑到降水、河水位、地下水位之间关系受到季节影响,对 2007—2016 年汛期(6—9 月)和非汛期(10 月—次年 5 月)逐月降水和地下水位数据进行互相关分析,相关滞后时间结果见表 3、表 4。由表 3 可知,2007—2016 年汛期建设街站地下水位对降水的滞后时间为 0~2 个月,海青站地下水位对降水的滞后时间为 0~2 个月;由表 4 可知,非汛期建设街站地下水位对降水的滞后时间为 0~3 个月,海青站地下水位对降水的滞后时间为 0~5 个月。

表 3 2007—2016 年汛期地下水位对降水的滞后时间

Tab. 3 Lag time of groundwater level to precipitation in flood season from 2007 to 2016 单位:月

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
建设街	2	1	2	1	2	0	1	1	0	2
海青	2	1	2	0	2	1	1	0	0	1

表 4 2007—2016 年非汛期地下水位对降水的滞后时间

Tab. 4 Lag time of groundwater level to precipitation in non-flood season from 2007 to 2016 单位:月

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
建设街	3	2	0	1	0	0	0	1	0
海青	0	2	0	1	3	5	0	5	0

采取中位数来表示 2007—2016 年汛期及非汛期地下水位对降水的响应时间:汛期建设街站地下水位对降水的滞后时间为 1 个月,非汛期建设街站地下水位对降水的滞后时间为 0 个月;汛期海青站地下水位对降水的滞后时间为 1 个月,非汛期海青站地下水位对降水的滞后时间为 1 个月。其中,汛期及非汛期海青站地下水位对降水的滞后时间相同,而汛期建设街站地下水位对降水的滞后时间大于非汛期的滞后时间,推测由于汛期开始时,地下水位较低,其对降水的响应时间较长,而非汛期开始地下水位经过汛期的补给,地下水位已较高,再次补给时,响应时间更快。

结合 2007—2016 年汛期和非汛期结果与 2007—2016 年逐月时间序列结果可知,建设街站、海青站地下水位对降水的滞后时间约为 1 个月。

### 3.2.2 交叉小波分析

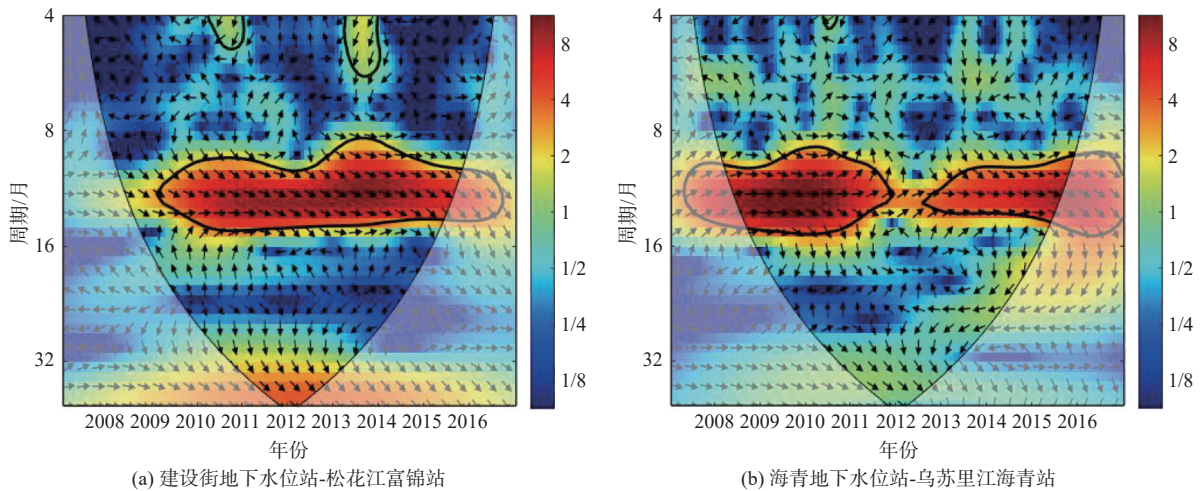
由于研究采用月尺度数据,互相关分析结果最小以月尺度为单位,不能以天为尺度精细刻画地下水对降水的时滞特征,故该结果为地下水位对降水的响应时间划定了大致的滞后时间范围,接下来将结合交叉小波变换方法进一步对地下水位和降水

响应关系进行研究。

利用 MATLAB 软件分别对建设街、海青地下水水位站的逐月地下水位数据和降水数据进行交叉小波变换,结果见图 3:红色和蓝色分别表示能量密度的峰值和谷值,揭示主导波动组分时频变换的局部性和动态性特征<sup>[25]</sup>;粗黑色实线闭合的区域表示通过置信水平为 95% 的红噪声检验,细黑色实线包络表示小波影响锥(COI)。

由图 3(a)可知,建设街站地下水位和降水的高能区主要集中在 11~13 个月,且在 2009—2016 年通过 95% 置信水平的红噪声检验,表明两者显著相关,主共振周期约为 1 a。由图 3(b)可知,海青监测站地下水位和降水在 2007—2011 年和 2013~2016 年通过了 95% 置信水平的红噪声检验,即大部分时间

段通过了显著性检验,且在此期间内同样存在约 1 年的主共振周期。由图 3(a)和图 3(b)可知,箭头方向基本指向右下方,表明地下水位和降水相位相同,两者呈正相关,且地下水位的抬升滞后于降水。此外,利用 COI 之外通过显著性检验的平均相位角来量化相位关系进而分析两个时间序列之间的时滞特征。由图 3(a)和图 3(b)可以得到 COI 外显著时间段的降水和地下水位时间序列的交叉相位<sup>[23]</sup>,见表 5,其中,“±”前的弧度为交叉小波变换的平均相位角,“±”后的弧度为相位角计算中的卷积误差。通过平均相位角的换算可以得到地下水位相对于降水的滞后时间,其中,建设街地下水位站对降水的滞后时间为 21.65 d,海青地下水位站对降水的滞后时间为 2.17 d。



注:图中箭头方向反映了地下水位与降水的相对相位关系:→表示两者相位相同,←表示两者相位相反,↓表示降水领先地下水位 1/4 个周期,↑表示降水领先地下水位 3/4 个周期。

图 3 降水与地下水位交叉小波变换

Fig. 3 Cross wavelet transform of precipitation and groundwater level

表 5 降水和地下水位交叉小波变换的交叉相位及时间间隔

Tab. 5 Cross-wavelet phases and time intervals of cross-wavelet transforms of precipitation and groundwater level

地下水位站	交叉相位/rad	时间间隔/d
建设街	0.3725±0.0956	21.65±5.56
海青	0.0373±0.2274	2.17±13.22

利用交叉小波变换定量分析地下水位和降水量之间的时滞特征,并通过对比两条河流附近的地下水位对降水的滞后时间,表明两者滞后水平存在时空差异,和降水条件及地下水与河水之间的补排关系有关。结合 3.1 中相关性分析结果可知,地下水位和河水、降水均呈现不同程度的相关性,地下水

位和降水量的相关系数低于地下水位和河水位的相关系数,说明河水位对地下水水位变化影响更大,即两条河流附近地下水位对降水响应的时滞差异受地下水和河水的相互作用影响更大。

### 3.3 河流附近地下水位对降水的响应

研究选取的地下水位监测站位于河道附近,由研究区的水文地质剖面图可知,松花江段、乌苏里江段河床的切割深度分别约为 17 m、8 m,均切割至含水层,结合河水位和地下水位的相关系数可知,地下水和河水之间存在良好的水力联系。此外,建设街地下水位站和海青地下水位站的地下水位埋深较大,大于蒸发的极限埋深,故可以忽略蒸发影响。河流与附近地下水之间的水量交换频繁,使得河流和地下水的相互作用对地下水水位动态的变

化有着重要影响。因此,基于地下水位和河水位的动态关系及两者之间的相关性对河水位如何影响附近地下水位对降水的响应进行探讨。

2007—2016年逐月河水位和地下水水位变化过程线见图4。由图4可知,河流和地下水水位均呈现峰、谷交替形态,且两者水位年际动态变化趋势相似。图4(a)表明,松花江富锦段河水和地下水之间为互补关系,其中河流对地下水位的补给主要发生在春季融雪时期及汛期。图4(b)表明,乌苏里江段河流和地下水水位之间虽为互补关系,但整体上大部分时间内均为地下水补给河水。基于水位动态变化的线性拟合结果可知,多年来松花江段和乌苏里江段的河水位低于附近地下水位,为地下水的主要排泄项,即河水和地下水的补排关系总体表现为地下水补给河水。

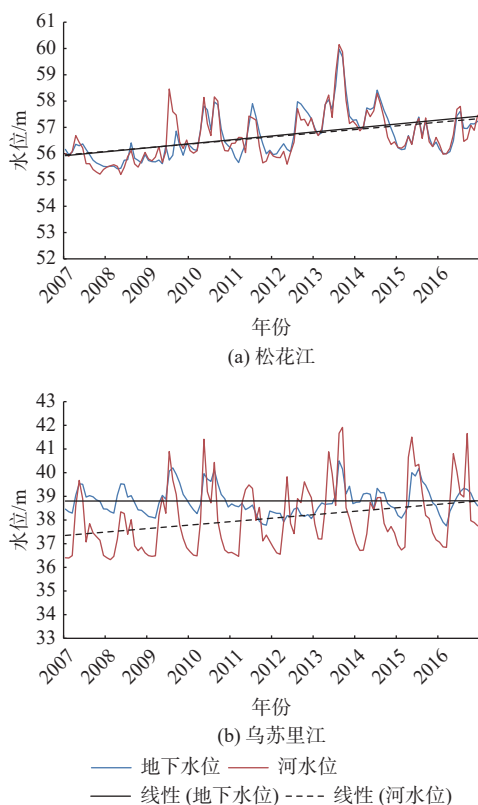


图4 2007—2016年地下水位与河水位变化过程线

Fig. 4 The dynamic variations of groundwater level and river stage from 2007 to 2016

建设街地下水位站的偏相关系数大于海青地下水位站的偏相关系数的结果表明,建设街站地下水位和松花江段河水位的关系更紧密,两者之间的交互作用更强,研究区相关论文<sup>[26]</sup>也佐证了这一结论,即多年来松花江段附近地下水对河水的补给量大于乌苏里江段附近地下水位对河水的补给量。由

此可以得出,河流附近地下水对河水的补给影响地下水水位的抬升,且河流-地下水的相互作用越强,地下水位对降水的滞后时间越长。

## 4 结论

为明确三江平原典型区降水及河水位对地下水水位动态变化规律的影响,基于2007—2016年降水、河水位及相邻地下水位数据,采用皮尔逊相关分析、偏相关分析、互相关分析和交叉小波变换方法,定量研究了地下水位对降水的滞后延迟效应,探讨了河水位如何影响附近地下水位对降水的响应,主要得出以下结论:

研究区内松花江、乌苏里江段河流附近地下水位对降水的滞后时间分别为21.65 d、2.17 d,表明两者地下水位对降水的滞后水平存在时空差异,和降水条件及河流-地下水相互作用有关。

相关分析结果表明,松花江、乌苏里江段河流附近地下水位和降水的相关系数分别为0.367、0.379,松花江、乌苏里江段河水位及相邻地下水位的相关系数分别为0.880、0.511,说明地下水位和降水量的相关性低于地下水位和河水位的相关性,且松花江段河水位和相邻地下水位之间的关系更紧密,河水位明显影响相邻地下水位对降水的响应。

基于多年河水位和地下水位动态变化趋势可知,2007—2016年地下水和河水的补排关系总体表现为地下水补给河水。结合偏相关分析结果可知,松花江段河水和附近地下水的交互作用比乌苏里江段河水和附近地下水的交互作用更强,即松花江段河水位对地下水位和降水的响应关系影响更大,因此松花江段相邻地下水位对降水的滞后时间更长。

## 参考文献(References):

- [1] DELBART C, VALDES D, BARBECOT F, et al. Spatial organization of the impulse response in a karst aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 18-26. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.029.
- [2] KIM I, PARK D, KYUNG D, et al. Comparative influences of precipitation and river stage on groundwater levels in near-river areas[J]. *Sustainability*, 2015, 8(1): 1. DOI: 10.3390/su8010001.
- [3] FIORILLO F, DOGLIONI A. The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(8): 1881-1895. DOI: 10.1007/

- s10040-010-0666-1.
- [4] YANG T, WANG G. Periodic variations of rainfall, groundwater level and dissolved radon from the perspective of wavelet analysis: a case study in Tengchong, southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(15): 1-13. DOI: [10.1007/S12665-021-09785-2](https://doi.org/10.1007/S12665-021-09785-2).
- [5] NIU S, SHU L, LI H, et al. Identification of preferential runoff belts in Jinan spring basin based on hydrological time-series correlation[J]. *Water*, 2021, 13(22): 3255. DOI: [10.3390/W13223255](https://doi.org/10.3390/W13223255).
- [6] 祁晓凡, 杨丽芝, 韩晔, 等. 济南泉域地下水位动态及其对降水响应的交叉小波分析[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(9): 969-978. (QI X F, YANG L Z, HAN Y, et al. Cross wavelet analysis of groundwater level regimes and precipitation-groundwater level regime in Jinan spring region[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(9): 969-978. (in Chinese)) DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2012.09.0969](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2012.09.0969).
- [7] WINTER T C. Recent advances in understanding the interaction of groundwater and surface water[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(S2): 985-994. DOI: [10.1029/95RG00115](https://doi.org/10.1029/95RG00115).
- [8] SOPHOCLEOUS M. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 52-67. DOI: [10.1007/s10040-002-0204-x](https://doi.org/10.1007/s10040-002-0204-x).
- [9] MODIE L T, KENABATHO P K, STEPHENS M, et al. Investigating groundwater and surface water interactions using stable isotopes and hydrochemistry in the Notwane River catchment, South East Botswana[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 40: 101014. DOI: [10.1016/J.EJRH.2022.101014](https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2022.101014).
- [10] XU S, FREY S K, ERLER A R, et al. Investigating groundwater-lake interactions in the Laurentian Great Lakes with a fully-integrated surface water-groundwater model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125911. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2020.125911](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125911).
- [11] JAVADZADEH H, ATAIE-ASHTIANI B, HOSSEINI S M, et al. Interaction of lake-groundwater levels using cross-correlation analysis: A case study of Lake Urmia basin, Iran[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 729: 138822. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.138822](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138822).
- [12] 李福林, 陈华伟, 王开然, 等. 地下水支撑生态系统研究综述[J]. *水科学进展*, 2018, 29(5): 750-758. (LI F L, CHEN H W, WANG K R, et al. Comprehensive review of groundwater-dependent ecosystems[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 750-758. (in Chinese)) DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2018.05.015](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2018.05.015).
- [13] 刘伟坡, 沙娜, 程旭学. 三江平原建三江地下水动态变化特征[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(5): 96-101. (LIU W P, SHA N, CHENG X X. Groundwater dynamics in catchment of Jiansanjiang in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(5): 96-101. (in Chinese)) DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.20190258](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.20190258).
- [14] 董维红, 孟莹, 王雨山, 等. 三江平原富锦地区浅层地下水水化学特征及其形成作用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(2): 542-553. (DONG W H, MENG Y, WANG Y S, et al. Hydrochemical characteristics and formation of the shallow groundwater in Fujin, Sanjiang Plain[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(2): 542-553. (in Chinese)) DOI: [10.13278/j.cnki.jjuese.201702203](https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201702203).
- [15] 危润初, 肖长来, 方樟. 黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(1): 202-210. (WEI R C, XIAO C L, FANG Z. Trends mutation nodes of groundwater dynamic in Jiansanjiang area of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2016, 46(1): 202-210. (in Chinese)) DOI: [10.13278/j.cnki.jjuese.201601204](https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201601204).
- [16] 刘正茂, 夏广亮, 吕宪国, 等. 近50年来三江平原水循环过程对人类活动和气候变化的响应[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(1): 68-74. (LIU Z M, XIA G L, LYU X G, et al. Response of water cycle processes in Sanjiang Plain to human activities and climate change in recent 50 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(1): 68-74. (in Chinese)) DOI: [10.3724/SP.J.1201.2011.01068](https://doi.org/10.3724/SP.J.1201.2011.01068).
- [17] 王韶华, 田园. 三江平原地下水埋深变化及成因的初步分析[J]. *灌溉排水学报*, 2003(2): 61-64. (WANG S H, TIAN Y. Preliminary Research on groundwater table change and causes in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003(2): 61-64. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1672-3317](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3317).

- 2003.02.016.
- [18] 束龙仓,王哲,袁亚杰,等.近40年三江平原典型区土地利用变化及其对地下水的影响[J].*水利学报*, 2021, 52(8): 896-906. (SHU L C, WANG Z, YUAN Y J, et al. Land use change and its impact on groundwater in the typical district of Sanjiang Plain during the past 40 years[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(8): 896-906. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210284.
- [19] 刘伟朋,崔虎群,刘伟坡,等.三江平原地下水流场演化趋势及影响因素[J].*水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 10-17. (LIU W P, CUI H Q, LIU W P, et al. An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 10-17. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008044.
- [20] WANG X, ZHANG G, XU Y J. Impacts of the 2013 extreme flood in northeast China on regional groundwater depth and quality[J]. *Water*, 2015, 7(8): 4575-4592. DOI: 10.3390/w7084575.
- [21] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002. (XU J H. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))
- [22] BOX G E P, JENKINS G M, REINSEL G C, et al. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1994.
- [23] 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(5/6): 561-566. DOI: 10.5194/npg-11-561-2004.
- [24] DONG L, GUO Y, TANG W, et al. Statistical evaluation of the influences of precipitation and river level fluctuations on groundwater in Yoshino River basin, Japan[J]. *Water*, 2022, 14(4): 625. DOI: 10.3390/W14040625.
- [25] 王亚敏,张勃,郭玲霞,等.地磁Ap指数与太阳黑子数的交叉小波分析及R/S分析[J].*地理科学*, 2011, 31(6): 747-752. (WANG Y M, ZHANG B, GUO L X, et al. Cross wavelet analysis and R/S analysis of relationship between geomagnetic Ap index and sunspot number[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(6): 747-752. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2011.06.007.
- [26] 束龙仓,殷晓然,袁亚杰,等.三江平原典型区河水与地下水水量交换的时空变化规律分析[J].*水利学报*, 2021, 52(10): 1151-1162. (SHU L C, YIN X R, YUAN Y J, et al. Land use change and its impact on groundwater in the typical district of Sanjiang Plain during the past 40 years[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(10): 1151-1162. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210509.

## Response of groundwater level to precipitation and river stage in the typical district of Sanjiang Plain

QIU Yating<sup>1,2</sup>, CHEN Juan<sup>1,2</sup>, SHU Longcang<sup>1,2</sup>, YUAN Yajie<sup>3</sup>, ZHANG Fenghai<sup>3</sup>, LU Chengpeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Heilongjiang Monitoring Center of Hydrology and Water Resources, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To clarify the influence of precipitation and river stage on the variation of groundwater level, the correlation among precipitation, groundwater level, and river stage in the typical area of Sanjiang Plain was quantitatively analyzed, and how the river stage affects the response of nearby groundwater level to precipitation was discussed. The Jianshe street and Haiqing groundwater level observation stations near Songhuajiang River and Wusulijiang River and adjacent Fujin and Haiqing hydrological stations in the typical area of Sanjiang Plain were selected as the research objects. The monthly precipitation, groundwater level, and river stage from 2007 to 2016 were used to study the response of groundwater level to precipitation by the cross-correlation analysis method and cross wavelet transform method, and the partial correlation analysis of groundwater level and river stage was carried out to explain the time lag difference of groundwater level response to precipitation.

(下转第 1126 页)