

杨鹏,张寿川,郭本力,等.山东日照地区不同类型含水层地下水位多年动态变化特征及其影响因素.吉林大学学报(地球科学版), 2024,54(3):967-979. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220322.

Yang Peng, Zhang Shouchuan, Guo Benli, et al. Characteristic of Groundwater Level Dynamic Variation and the Potential Influence Factors in Different Aquifer Categories in Rizhao Area, Shandong Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024,54(3):967-979. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220322.

山东日照地区不同类型含水层地下水位 多年动态变化特征及其影响因素

杨 鹏^{1,2,3,4}, 张寿川⁵, 郭本力^{1,2,3,4}, 杨崇敬^{1,2,3,4}, 冯启原^{1,2,3,4},
吕有成^{1,2,3,4}, 解露茜^{1,2,3,4}

- 1.山东省第八地质矿产勘查院, 山东 日照 276826
- 2.山东地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 山东 日照 276826
- 3.日照地质地理信息大数据研究院, 山东 日照 276826
- 4.日照市土地质量评价与污染修复重点实验室, 山东 日照 276826
- 5.中国地质科学院, 北京 100037

摘要:自然条件下沿海地区地下水与海水呈现动态平衡,但地下水超采会破坏二者间平衡关系,进而引发一系列地质环境问题。地下水动态变化受多种因素影响呈现非平稳信号变化特征,传统时间序列分析方法无法从多角度准确描述时间序列动态变化特征,基于时间域和频率域分解的小波分析方法为探究地下水动态变化特征及影响因素提供了便利条件。利用山东日照地区不同类型含水层3口监测井1996—2015年间地下水位和降雨量监测数据,应用连续小波变换法和小波相干分析法开展研究,结果表明:不同类型含水层地下水位动态变化周期特征存在差异,获水监测井(第四系松散岩类孔隙水含水层)地下水位呈现年际、4~5 a和11 a周期变化,莒县地震办监测井(基岩裂隙含水层)和东莞中学监测井(碳酸盐岩类裂隙岩溶水含水层)地下水位均呈现11 a周期和14 a强趋势项变化,总体而言,该地区降雨量呈现年际周期、4~5 a周期、11 a周期变化以及14 a强趋势项变化;降雨量周期变化是导致不同类型含水层地下水位呈现年际周期变化和多年周期变化的主要因素;不同含水层地下水位对降雨量响应时间存在差异是造成其呈现不同周期变化特征的主要原因。

关键词:地下水动态;连续小波变换;小波相干;时滞性;日照地区

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220322

中图分类号:P641.8

文献标志码:A

Characteristic of Groundwater Level Dynamic Variation and the Potential Influence Factors in Different Aquifer Categories in Rizhao Area, Shandong Province

Yang Peng^{1,2,3,4}, Zhang Shouchuan⁵, Guo Benli^{1,2,3,4}, Yang Chongjing^{1,2,3,4},

收稿日期:2022-11-28

作者简介:杨鹏(1986—),男,高级工程师,主要从事水文地质、环境地质方面的研究,E-mail: 9804179@qq.com

通信作者:郭本力(1983—),男,高级工程师,主要从事水文地质、环境地质方面的研究,E-mail: 286486736@qq.com

基金项目:日照市城市地质调查项目(SDGP371100202102000475);中国地质调查局项目(DD20221677-2);中央财政基本科研业务费资助项目(JKY202004)

Supported by the Project of Rizhao Geological Survey (SDGP371100202102000475), the Project of China Geological Survey (DD20221677-2) and the Fundamental Research Funds of CGS Research (JKY202004)

Feng Qiyuan^{1,2,3,4}, Lü Youcheng^{1,2,3,4}, Xie Luxi^{1,2,3,4}

- 1. *The Eighth Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Rizhao 276826, Shandong, China*
- 2. *Key Laboratory of Nonferrous Metal Ore Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276826, Shandong, China*
- 3. *Rizhao Big Data Research Institute of Geology and Geographic Information, Rizhao 276826, Shandong, China*
- 4. *Rizhao Key Laboratory of Land Quality Evaluation and Pollution Remediation, Rizhao 276826, Shandong, China*
- 5. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

Abstract: Under the natural conditions, there is the dynamic balance between the groundwater and sea in the coastal region. However, the overexploitation of groundwater causes the imbalance between them, which also induces the various of environmental problems. The analysis methods of traditional time series cannot accurately reveal the dynamic variation characteristic in both time and frequency domains, while wavelet analysis methods provide convenient way to explore the dynamic variation characteristics and external influence factors of groundwater. The continuous wavelet transform and wavelet coherence analysis are used to analyze the time series data of groundwater level in three monitoring wells and precipitation in Rizhao area during the interval of 1996 – 2015. The results show that: The periodic characteristics of groundwater level variation in different aquifer categories are different. The groundwater level in Dishui monitoring well (pore water of shallow loose rocks) shows periodic variation characteristics which are one year, 4 – 5 a and 11 a. The groundwater level in Earthquake Bureau of Juxian well (bedrock fissure water) and Dongguan High School well (carbonate fissure karst water) show the periodic variation of 11 a and the strong tendency of 14 a. The precipitation in Rizhao area shows several different periodic variations, including one year, 4 – 5 a, 11 a and the strong tendency of 14 a. The periodic variation of precipitation in Rizhao area is the important influence factor on the variation of groundwater level which show the periodic variation of one year and several years. The lag time between the groundwater change and the variation of precipitation in different aquifer type is different, which is the main reason for the diversity characteristic of groundwater level periodic variation in different aquifer type.

Key words: groundwater regime; continuous wavelet transform; wavelet coherence; lag time; Rizhao area

0 引言

地下水是水资源的重要组成部分,其不仅是重要的地质信息载体^[1-5],也在饮水保障、农田灌溉、工业生产和生态环境保护等方面发挥着重要作用^[6-8]。但由于人类活动加剧和极端气象事件频发,地下水资源管理面临巨大挑战。近年来,国家地下水监测工程的实施,不仅有助于深入了解地下水动态变化规律,也为地下水资源开发、利用提供了科学依据和有力保障^[9-11]。

沿海地区地下水在自然条件下与海水达到动态平衡,但过量开采地下水则会造成地下水位下降,极易引发海水入侵、水质恶化、生态环境退化等问

题^[12-13]。山东省日照市位于黄海之滨,该地区地下水监测工作已开展 20 余年,前人^[14-15]在不同类型含水层中均布设了监测井,已积累海量监测数据;但对于该地区地下水位动态变化规律的研究十分匮乏,仅有的研究只局限在基于时间域角度的地下水位变化趋势分析方面,导致对该地区地下水动态变化规律的认识十分有限,缺乏对地下水监测数据所蕴含地质信息的深入挖掘;同时,该地区工农业生产对地下水的不合理开采,破坏了地下水和海水间的动态平衡,引发了海水入侵、地下咸水面积增加等一系列生态环境问题,严重威胁该地区地下水安全。因此,开展日照地区不同类型含水层地下水动态变化特征及影响因素研究迫在眉睫。

前人对时间序列的研究主要基于滑动平均法、滤波分析法和傅里叶变换法等方法^[16-18],但这些方法具有一定的局限性,不仅无法准确获取非平稳信号在局部时间域内的频域特征,也无法对时间序列中的突变点进行严谨的数学判断。地下水受构造因素、气象因素以及人类生产生活的影响^[19-23],呈现非平稳信号特征,因此无法利用上述分析方法开展研究。近些年,从傅里叶变换法演变而来的小波分析法有效弥补了上述几种分析方法的不足,为识别地下水动态变化特征开辟了新途径。该方法为结合样条分析、调和分析、傅里叶分析、数值分析和泛函分析的有效时频分析工具^[24-25],主要优势为:其可以从时间域和频率域两个角度分析数据动态变化特征,并通过在时间域和频率域内搜索不同时间序列共同特征进而分析二者间的相关性和滞后性。已有基于小波分析法对地下水动态的研究大多集中于识别单一含水层地下水动态变化特征,而对同一地区不同类型含水层地下水动态变化特征的对比分析关注较少,地下水位变化影响因素及机制尚未得到

深入揭示。

受分析方法的制约,已有研究对日照地区地下水动态变化的分析仅停留在时间域角度层面,尚未开展基于时间域和频率域的多角度地下水动态变化特征及影响因素的研究。为此,本文选取山东省日照地区不同类型含水层监测井——获水监测井(第四系松散岩类孔隙水)、莒县地震办监测井(基岩裂隙水)和东莞中学监测井(碳酸盐岩类裂隙岩溶水)为研究对象,利用多年地下水位和降雨量监测数据,基于连续小波变换法分析时间序列数据周期特征,采用小波相干分析法研究不同时间序列数据间的相关性和时滞性;以期准确识别自然条件下日照地区不同类型含水层地下水位动态变化特征及影响因素,为合理开发利用地下水资源,保护生态环境提供科学依据。

1 区域概况

日照市位于山东省东南部黄海之滨,陆域面积 5 317 km²(图 1),海域面积 5 630 km²,大陆海岸线

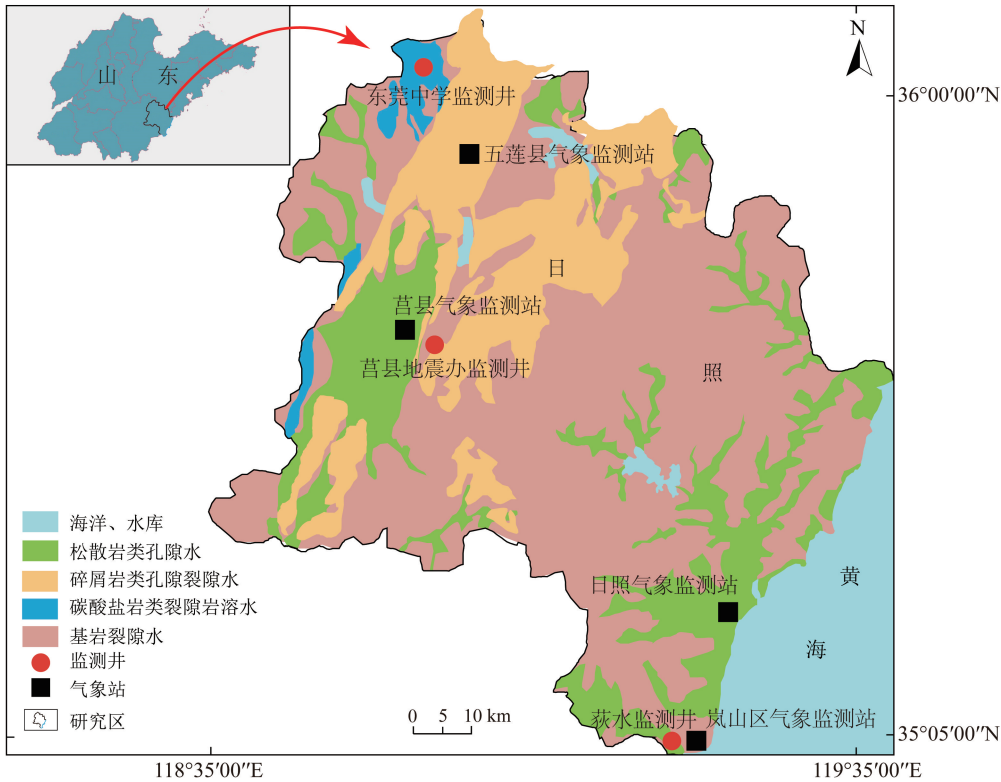


图 1 日照市监测井分布图

Fig.1 Hydrogeological map and the distribution map of monitoring well in Rizhao City

总长 226 km,地形地貌以山地、丘陵为主,二者约占总面积的 69%,属于典型鲁东山地丘陵地区,域内最高点为五莲县马耳山,海拔 706 m。

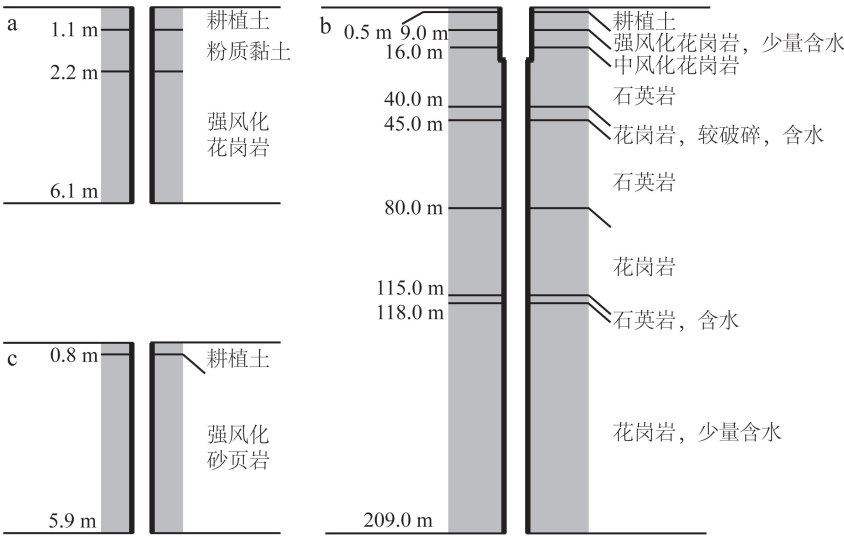
1.1 水文地质概况

日照地处一级构造单元鲁东断块内的二级构造单元胶南隆起,沂沭断裂带末端和五莲一成断裂带交会处,区域内构造复杂。结合地下水赋存、埋藏条件以及含水层性质,区域内地下水可划分为 4 种不同类型^[14-15]:第四系松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水(图 1)。其中:第四系松散岩类孔隙水主要分布于河流两侧冲积、冲洪积砂砾层中,水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$,该类型地下水分布范围较广,供水能力较强;碎屑岩类孔隙裂隙水分布于莒县东部、五莲县西部和北部区域,含水层为白垩系砾岩、粉砂岩和碎屑岩,水化学类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Na}$;基岩裂隙水分布于莒县东部、五莲县东部和南部,以及东港区南部区域,含水层岩性主要为燕山晚期花岗岩,水化学类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$,受控于构造条件等因素影响,基岩裂隙水分布范围最广,但水量较小,供水能力不足;碳酸盐岩类裂隙岩溶水主要分布于莒县北部区域,分布较少。

区域内地下水主要补给来源为大气降水^[15],由于地势呈现北高南低、西高东低的特点,因此地下水总体呈现自西北向东南流动的趋势。该区域第四系

沉积物组成物质较细,主要包括亚黏土、含砾亚黏土和粉砂土等,加之地形起伏较小、水力坡度小等特点,故大气降水补给过程及地下水径流速度较为缓慢。第四系沉积物之下为古风化裂隙水,由于与上层第四系松散岩类孔隙水联系较差,因此该层地下水具有微承压性。在基岩露头区,大气降水沿风化裂隙、断层和其他导水裂隙入渗、补给,形成风化裂隙和构造裂隙水。

获水监测井,位于日照市岚山区获水村,井深 6.1 m,含水层类型为第四系松散岩类孔隙水,钻孔柱状图如图 2a 所示:0~1.1 m 为耕植土;1.1~2.2 m 为粉质黏土,粉土与黏土体积比约为 3:7;2.2~6.1 m 为强风化花岗岩。莒县地震办监测井,位于日照市莒县城阳街道,井深 209.0 m,含水层类型为基岩裂隙水,钻孔柱状图如图 2b 所示:0~0.5 m 为耕植土;0.5~9.0 m 为强风化花岗岩,含水量较少;9.0~16.0 m 为中风化花岗岩;16.0~40.0 m 为石英岩;40.0~45.0 m 为花岗岩,较为破碎,含水量较大;45.0~80.0 m 为石英岩;80.0~115.0 m 为花岗岩;115.0~118.0 m 为石英岩,含水量较大;118.0~209.0 m 为花岗岩,含水量较少。东莞中学监测井,位于日照市莒县东莞镇,井深 5.9 m,含水层为碳酸盐岩类裂隙岩溶水,钻孔柱状图如图 2c 所示,0~0.8 m 为耕植土,0.8~5.9 m 为强风化砂页岩。



a. 获水监测井; b. 莒县地震办监测井; c. 东莞中学监测井。

图 2 监测井钻孔柱状图

Fig.2 Borehole diagram of three monitoring wells

1.2 区域地下水动态

日照地区地下水动态监测工作始于 1993 年,积累了丰富的监测数据。监测站点的布设考虑不同地貌单元和地下水补径排条件,主要分布于河流两岸、供水水源地、海水入侵和地下水污染严重地段^[15]。

地下水动态变化主要受气象因素和人类生产生活用水影响^[26-28]。降雨入渗是日照地区地下水资源的主要补给来源^[15, 22]。该地区属暖温带湿润季风大陆性气候,雨量充沛,多年平均降雨量为 817.6 mm,降雨多集中在每年 6—8 月,该时间段内降雨量约占全年降雨量的 72.7%(图 3)。计算 3 口监测井水位以及降雨量多年月均值发现,每年 6—9 月井水位呈现明显上升趋势,每年 10 月—次年 3 月井水位呈现下降趋势。

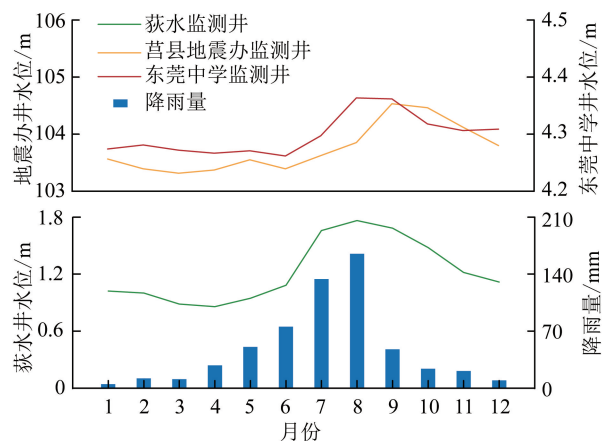


图 3 3 口监测井 1996—2015 年水位和降雨量多年月均值
Fig.3 Monthly average of water level and precipitation of three monitoring wells during 1996 - 2015

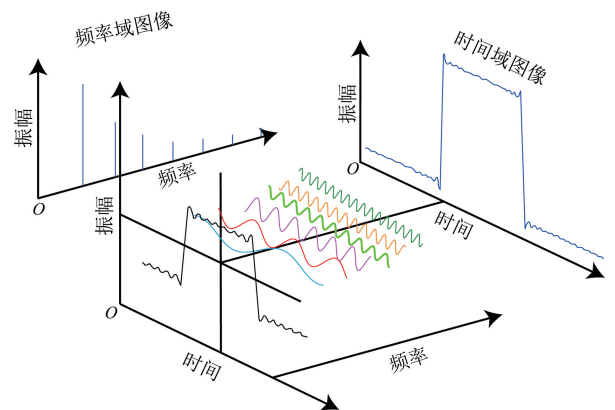
2 研究方法

时间序列根据特征不同可分为两种类型,分别为具有平稳信号特征的时间序列和具有非平稳信号特征的时间序列。其中:平稳信号是指参数分布规律不随时间变化的信号;非平稳信号是指需要分析时间域和频率域特性的时变信号或频变信号,其参数特征(如均值、方差等)随时间变化。

平稳信号特征时间序列常采用傅里叶变换方法进行分析;但该方法无法全面刻画突变信号和非平稳信号的局部特征,并不适用于分析具有非平稳信号特征的时间序列。由于非平稳信号的频率特性会随时间变化,为了捕获这一时变特性,需要对信号进

行时频分析,常用的时频分析方法包括小波变换、希尔伯特变换、短时傅里叶变换等。地下水动态由于受到多种外部因素叠加影响而呈现非平稳动态变化的特征,在分析时需要应用时频分析工具对其同时进行时间域和频率域信息提取。

本研究中主要采用小波变换开展研究工作,该方法发展至今已 40 余年,在自然科学领域得到广泛应用^[29-31]。该方法可以同时时间序列数据在时间域和频率域内进行分解并分析其固有特征(图 4),主要包括连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)和离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)两种方法。在本次研究中应用连续小波变换方法开展时间序列特征分析^[32-33]。



图中彩色曲线为动态监测示例数据。

图 4 小波分析分解时间序列示意图
Fig.4 Time series decomposed by wavelet analysis method

2.1 连续小波变换

连续小波变换通过利用已知频率和振幅的小波基函数,将时间序列数据投影到相应的时间域和频率域空间内,分析其动态变化特征。对时间序列进行连续小波变换时,选择恰当的小波基函数尤为重要,常用小波基函数主要包括 Morlet 函数、Haar 函数、Mexican Hat 函数、Gaus 函数等。在本次研究中,采用 Morlet 函数作为小波基函数,该函数是高斯包络下的单频率复正弦函数,具有非正交分解特性,可用于连续小波变换。

对于连续函数 $f(x)$,其连续小波变换可表示为

$$W_f(a,b) = (1/\sqrt{a}) \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi((t-b)/a)dt \quad (1)$$

式中: W 为小波变换系数; a 为伸缩尺度; b 为平移因子; a, b 均为实数且 $a > 0$; $\varphi(x)$ 通过 $\varphi(x) = (\frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-1/4})(1-x^2)e^{-x^2/2}$ 计算; t 为时间间隔。

对于长度为 N 的时间序列而言,其连续小波变换可表示为

$$W(a,b) = (1/\sqrt{a}) \sum_{n=1}^N x(n) \varphi((n-b)/a) \tag{2}$$

式中: $\varphi((n-b)/a)$ 为子小波; $x(n)$ 为变换系数。

小波方差可以确定时间序列中的主周期,其计算方式为将 b 域内所有小波系数的平方积分,可表示为

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_p(a,b)|^2 db \tag{3}$$

式中: $Var(a)$ 为小波方差; $W_p(a,b)$ 为信号函数。

2.2 小波相干

小波相干方法通过搜索两个时间序列在时间域和频率域内的共同特征,从而有效识别两个时间序列的相关性。对于两个具有周期特征的时间序列,常采用小波相干研究二者相关性。与传统相关系数定义相似,两个时间序列 x, y 小波相干函数的平方可定义^[34] 为

$$R^2(x,y) = \frac{|S(s^{-1}W(x,y))|^2}{S(s^{-1}W(x)) \cdot S(s^{-1}W(y))} \tag{4}$$

式中: $R^2(x,y)$ 为小波相干函数的平方; S 表示平滑操作; s 为小波尺度。当只有一个时间序列时, W 表示连续小波变换,当有两个不同时间序列时, W 表示两个时间序列的小波相干变换。“相干”是指小波相干的平方,其取值为 0~1 之间。

2.3 水位数据收集及处理

本次研究涉及数据主要包括日照地区不同类型含水层地下水监测数据和降雨数据。为准确掌握该地区地下水时空动态变化特征,在该地区不同类型含水层均布设监测井,监测时间间隔为 5 d。由于部分监测井监测数据出现缺失,故选取数据连续性较强的监测井为研究对象。图 5 为获水、莒县地震办和东莞中学 3 口监测井 1996—2015 年水位动态变化图。如图 5 所示,获水监测井在 1996—2009 年间水位呈现动态变化趋势,水位变幅小于 1 m,2009—2015 年间水位呈现下降趋势,水位变幅为 3 m;莒县地震办监测井在 1996—2010 年间水位呈现平稳波动变化趋势,在 2010—2015 年间水位呈现下降趋

势;东莞中学监测井在 1996—2015 年间水位未呈现明显上升或下降趋势,水位变幅小于 2.5 m。降雨数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

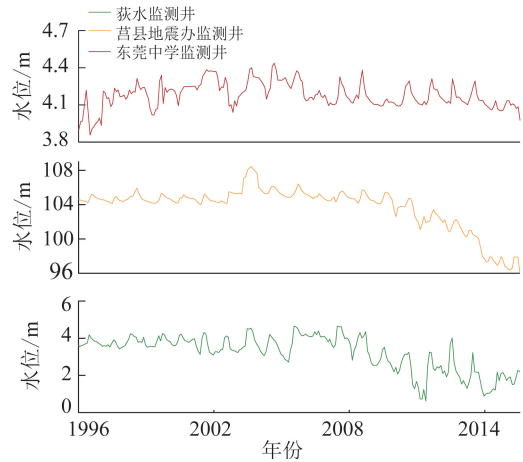


图 5 3 口监测井 1996—2015 年水位动态变化图
Fig. 5 Variation of water level of three monitoring wells during 1996 - 2015

利用连续小波变换和小波相干分析法进行多时间尺度分析的步骤为:1)数据预处理。小波分析需要等时间间隔的数据,需将水位监测数据取月均值、降雨数据取月累积降雨量。2)连续小波变换。将预处理数据代入式(2)中,并选取 Morlet 小波基函数进行计算,得到小波系数。小波系数为复数,通过计算可以得到小波系数实部,绘制小波系数实部等值线图。将预处理数据代入式(3)可以得到小波方差。通过上述计算可以得到水位和降雨量周期变化特征。3)小波相干分析。将预处理的水位和降雨量数据代入式(4)可以得到两个时间序列在不同时间尺度下的相关性,分析导致水位呈现周期变化的外部影响因素。

3 结果

对地下水动态监测数据进行连续小波变换可以得到小波系数方差图(图 6)、小波系数等值线图(图 7)和不同周期小波系数动态变化图(图 8)。小波系数方差图通过突出不同周期振幅强弱的差异性帮助分析时间序列周期变化特征,小波系数等值线图能够反映时间序列中所包含的各周期与振幅大小,不同周期小波系数动态变化图可以反映同一周期内振幅随时间变化规律。

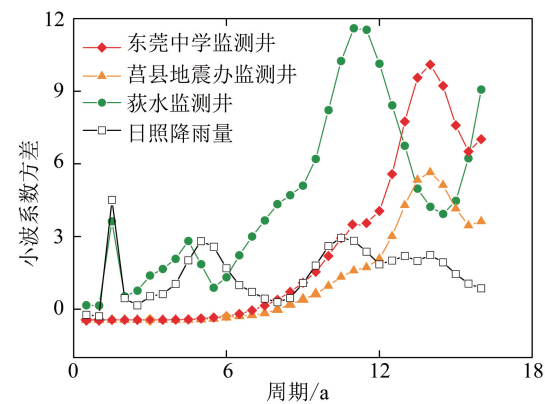


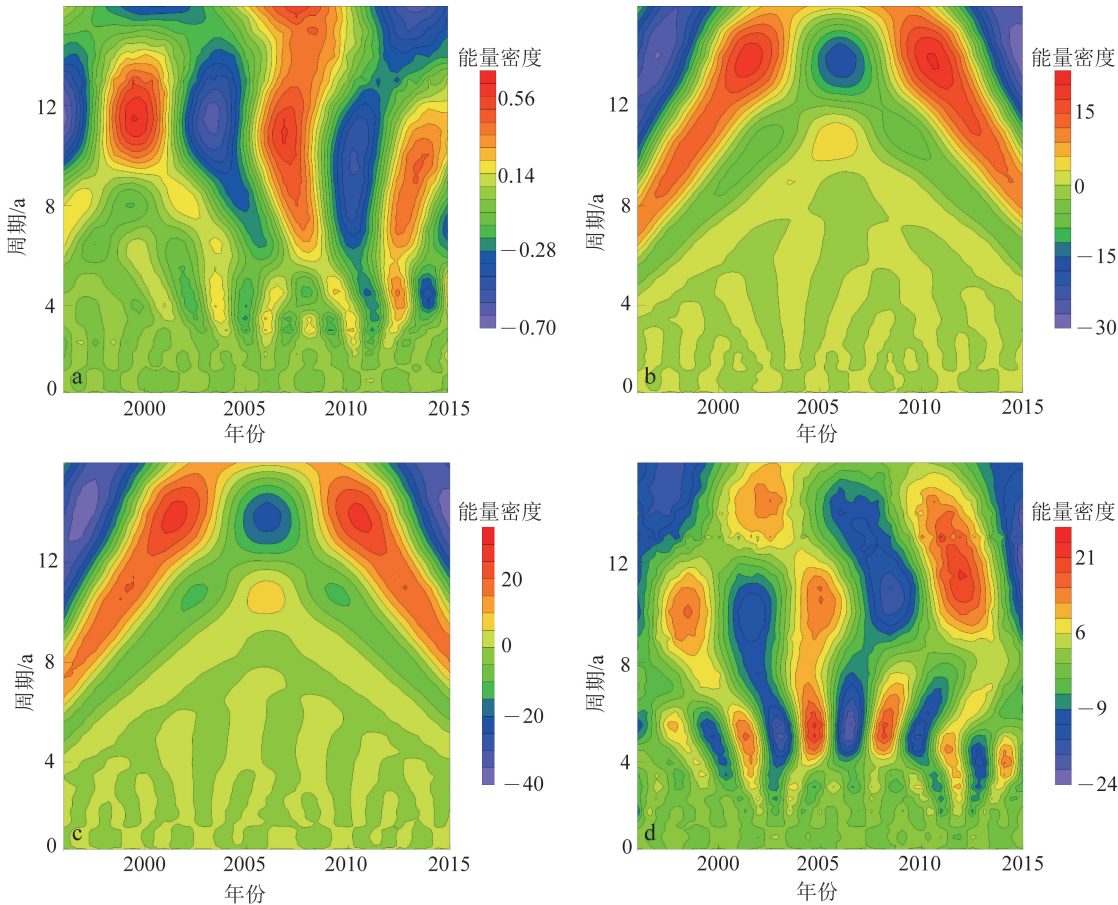
图 6 3 口监测井水位和降雨量小波系数方差图

Fig. 6 Wavelet coefficient variance of water level and precipitation of three monitoring wells

获水监测井水位 2005—2008 年期间达到最大值,2010—2012 年期间达到最小值(图 5)。由图 6

可知该井水位存在年际周期变化,从图 7a 可知井水位在 1996—2015 年间存在 11 a 周期变化,在 2010—2015 年间存在 4~5 a 周期变化。由图 8a 结合图 5 可知:获水监测井 11 a 周期变化小波系数振幅最大且随时间变化较为稳定,4~5 a 周期小波系数振幅呈现由弱变强的变化趋势,年际周期小波系数振幅最小;在 2005—2008 年期间,在 4~5 a 周期和 11 a 周期小波系数峰值共同影响下,该井水位达到最高值;在 2010—2012 年期间,由于 4~5 a 周期和 11 a 周期小波系数处于谷值,该井水位降至最低值。

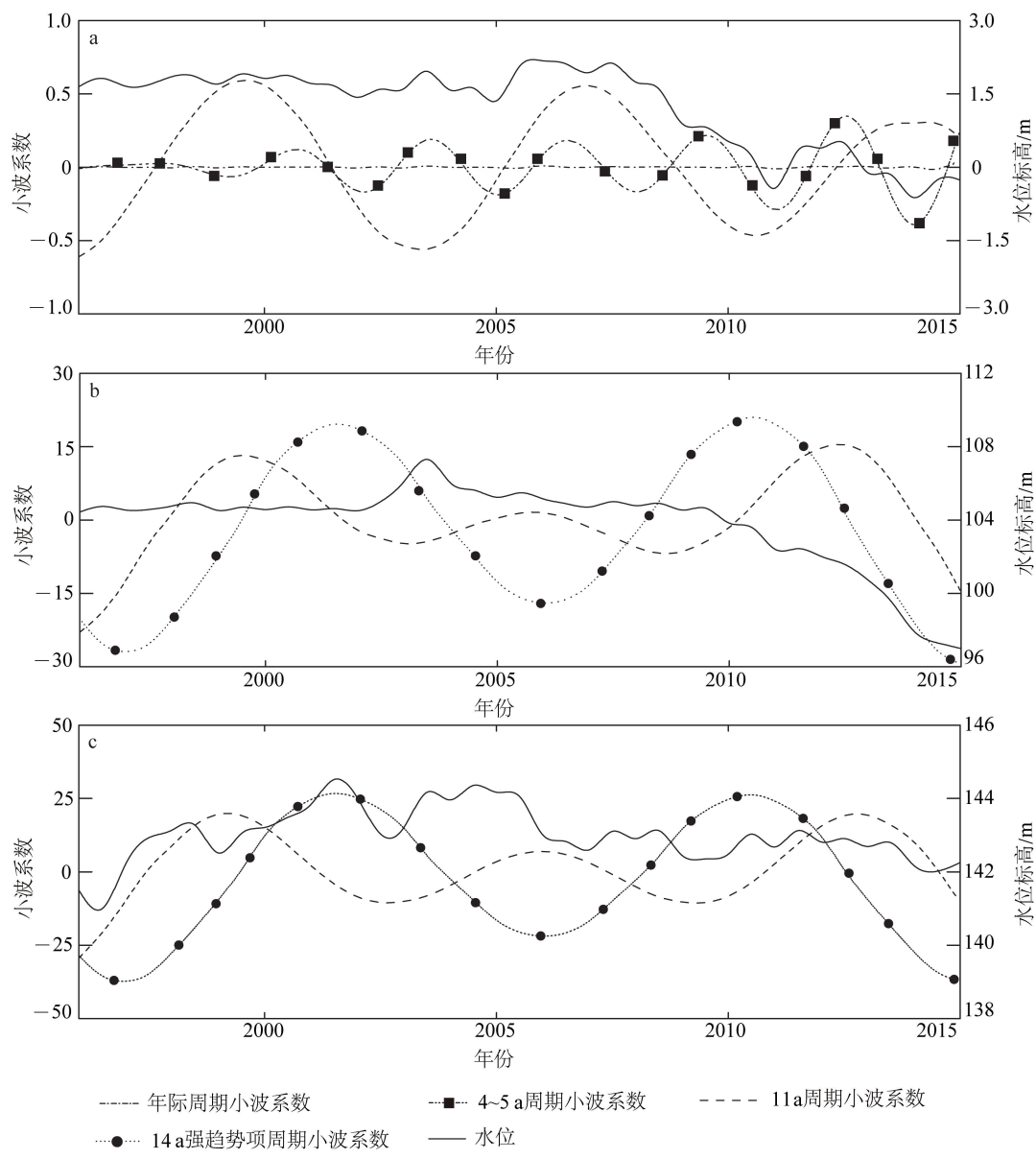
莒县地震办监测井水位在 2003—2004 年期间达到最大值,在 2010 年之后呈现逐渐下降趋势(图 5)。图 6 表明该井水位存在 14 a 强趋势变化和 11 a 周期变化。由图 7b 可知该井水位在 1996—2015 年间存在 14 a 强趋势变化,在 2000—2015 年间存在



a. 获水监测井;b. 莒县地震办监测井;c. 东莞中学监测井;d. 日照降雨量。图中红色与蓝色分别表示能量密度的峰值和谷值,颜色深浅表示能量密度的相对变化。

图 7 3 口监测井水位及降雨量小波系数等值线图

Fig.7 Wavelet coefficient contour of water level of three monitoring wells and precipitation



a. 获水监测井;b. 莒县地震办监测井;c. 东莞中学监测井。

图 8 3 口监测井不同周期小波系数与水位关系

Fig.8 Relationship between wavelet coefficients and water level of three monitoring wells in different periods

11 a 周期变化。由图 8b 结合图 5 可以看出:莒县地震办监测井 14 a 强趋势项振幅最大且随时间变化较为稳定,11 a 周期小波系数振幅较小且随时间呈现强—弱—强的不稳定变化趋势;在 2003—2004 年期间,受到 14 a 强趋势项小波系数峰值影响,该井水位达到最高值,在 2010 年以后,由于 14 a 强趋势项和 11 a 周期小波系数均处于向谷值变化趋势,该井水位在 2010 年之后持续下降。

东莞中学监测井水位在 1996—1997 年期间达

到最低值,在 2001—2005 年期间达到最高值(图 5)。由图 6 结合图 7 可知,该井水位在 2000—2013 年间存在 14 a 强趋势变化,在 1996—2015 年间存在 11 a 较弱周期变化。由图 8c 结合图 5 可以看出:东莞中学监测井 14 a 强趋势项小波系数振幅最大且随时间变化较为稳定,11 a 周期小波系数振幅较小且随时间变化呈现强—弱—强变化趋势;在 1996—1997 年期间,受到 14 a 强趋势项和 11 a 周期小波系数谷值影响,该井水位降至最低值;在

2001—2005 年期间,受 14 a 强趋势项小波系数峰值影响,井水位达最高值,在这期间虽然受 11 a 周期小波系数谷值影响,但因其振幅较小,其对水位变化影响较小,因此井水位逐渐上升至历史最高值。

对日照地区降雨量而言,结合小波方差图(图 6)和小波系数等值线图(图 7)可知,在 1996—2015 年间日照地区降雨量呈现年际周期、4~5 a 周期和 11 a 周期变化,以及 14 a 强趋势项变化特征。

4 讨论

4.1 地下水位年际周期变化影响因素

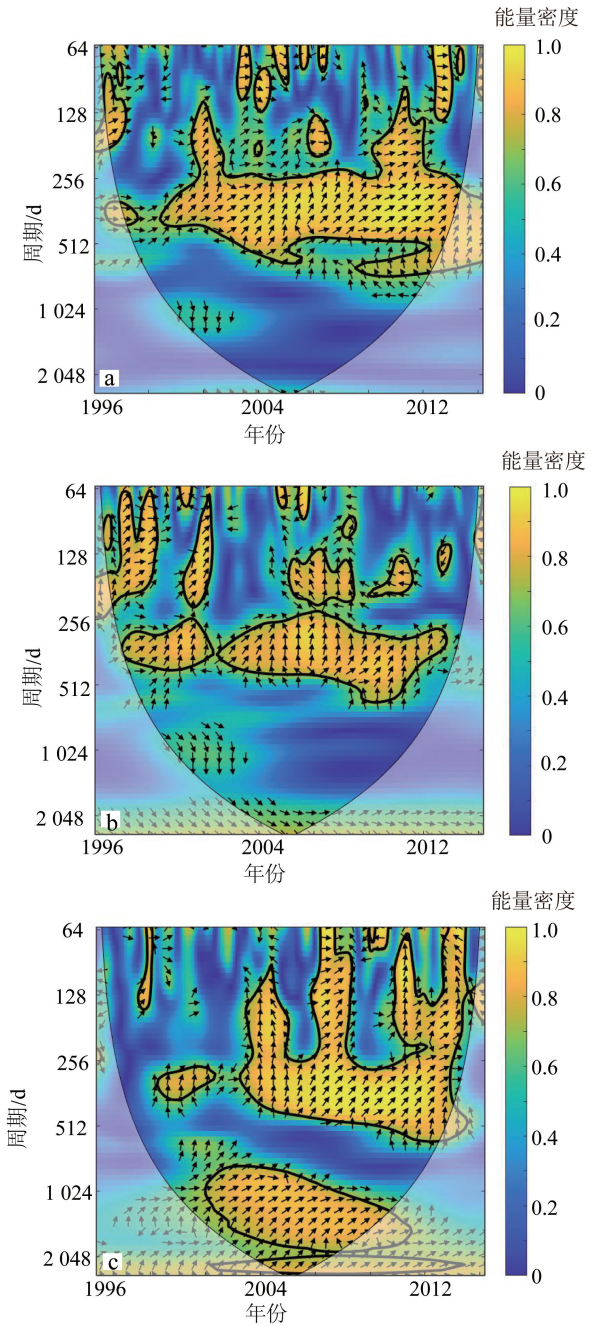
通过计算不同监测井水位多年月均值可以发现,3 口监测井水位均呈现夏季水位上升、冬季水位下降的年际动态变化趋势。为进一步分析不同类型含水层地下水动态与降雨之间的关系,分别计算获水监测井、莒县地震办监测井和东莞中学监测井水位与降雨量之间的小波相干函数。

图 9 为 3 口监测井水位和降雨量小波相干性分析结果,可以得出:对获水监测井而言,1998—2015 年间,在 1 a 时间尺度上,该井水位与降雨量呈现高度相关性(图 9a);对莒县地震办监测井而言,1997—2014 年间在 1 a 时间尺度上,该井水位与降雨量呈现高度相关性(图 9b);对东莞中学监测井而言,1998—2015 年间在 1 a 时间尺度上以及 2003—2012 年间在 4~5 a 时间尺度上,该井水位与降雨量呈现高度相关性(图 9c)。因此,3 口监测井水位年际动态变化特征均由降雨所致。

进一步分析小波相干结果图(图 9),可以得出不同含水层中地下水位动态变化与降雨量时滞性关系。图 9 中半数以上箭头指向右侧,表明 3 口地下水监测井水位变化滞后于降雨量变化。再根据相位角确定滞后时间可知,获水监测井、莒县地震办监测井、东莞中学监测井水位与降雨量之间平均相位角分别为 45°、60°和 30°;表明不同监测井水位变化对降雨响应时间存在差异,获水监测井(第四系松散岩类孔隙水)水位变化滞后于降雨约 1.5 月,莒县地震办监测井(基岩裂隙水)水位变化滞后于降雨约 2.0 月,东莞中学监测井(碳酸盐岩类裂隙岩溶水)水位变化滞后于降雨约 1.0 月。

4.2 地下水位多年周期变化动态变化影响因素

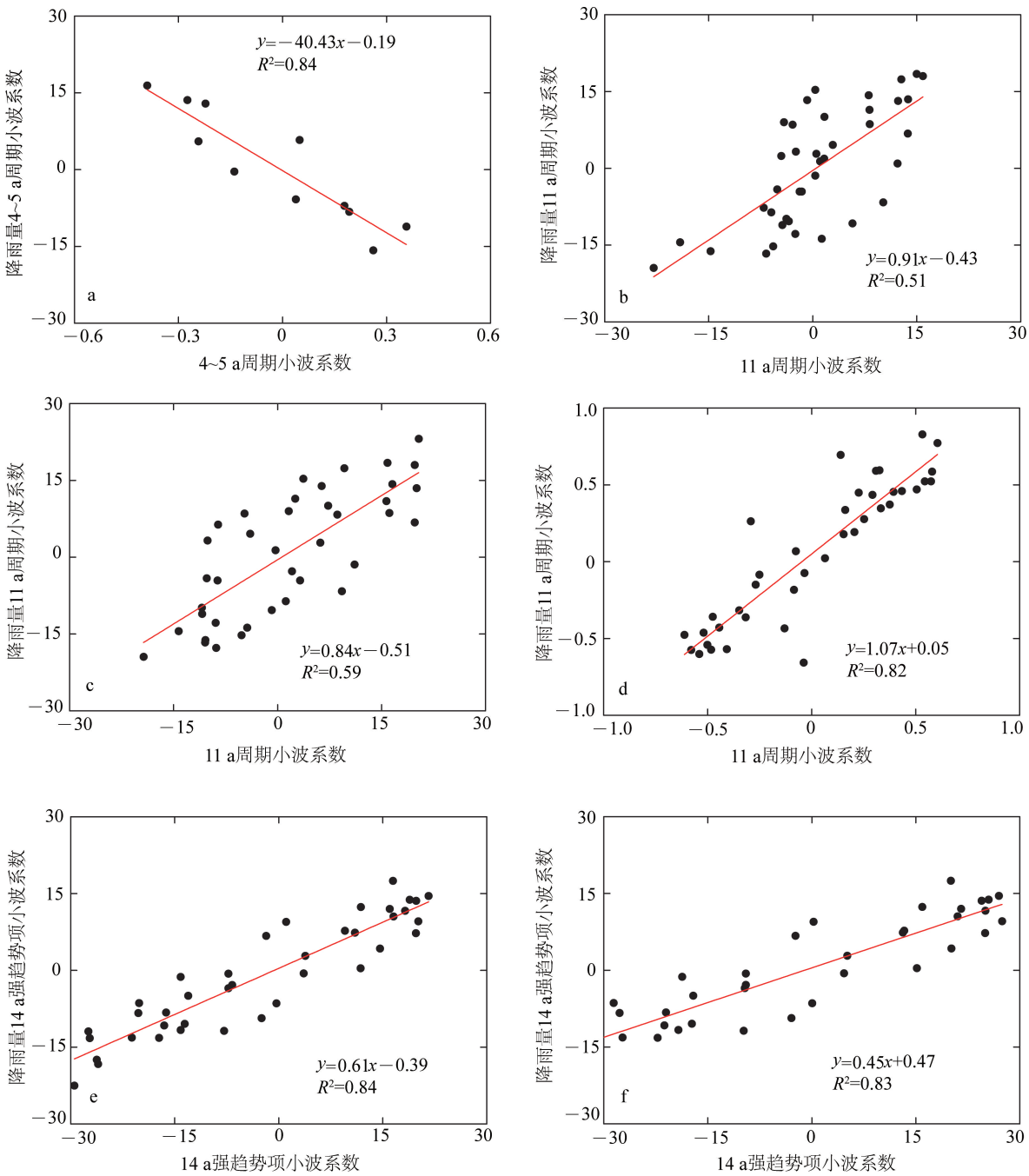
小波系数等值线图和小波方差结果表明,3 口地下水监测井水位除呈现年际周期变化(获水监测井)和年际动态变化(莒县地震办监测井和东莞中学



a. 获水监测井; b. 莒县地震办监测井; c. 东莞中学监测井。箭头指向右侧,表示相位相同;箭头指向左侧,表示相位相反;垂直向上箭头表示相位滞后 90°;垂直向下箭头表示相位超前 90°。

图 9 3 口监测井水位和降雨量小波相干性分析
Fig.9 Wavelet coherence analysis between water level of three monitoring wells and precipitation

监测井)特征外,还呈现多年周期动态变化特征。通过计算得到 3 口地下水监测井水位与降雨量不同周期小波系数相关系数(图 10),用以分析井水位多年动态变化影响因素。



a. 获水监测井水位, 4~5 a; b. 莒县地震办监测井水位, 11 a; c. 东莞中学监测井水位, 11 a; d. 获水监测井水位, 11 a; e. 莒县地震办监测井水位, 14 a; f. 东莞中学监测井水位, 14 a. R^2 为相关系数。

图 10 3 口监测井水位与降雨量不同周期小波系数相关性分析

Fig.10 Correlation analysis of wavelet coefficients between water level of three monitoring wells and precipitation

获水监测井水位(图 10a,d)1996—2015 年间呈现 11 a 周期变化,在 2010—2015 年间呈现 4~5 a 周期变化特征。计算水位与降雨量小波系数相关性可知,对于 2010—2015 年间的 4~5 a 周期变化而言,两者相关系数为 0.84,具有较强相关性,对于 1996—2015 年间的 11 a 周期变化而言,二者相关

系数为 0.82,也具有较强相关性;说明该井水位 4~5 a 周期和 11 a 周期变化主要受降雨量 4~5 a 周期和 11 a 周期变化影响。

莒县地震办监测井水位(图 10b,e)在 1996—2015 年间呈现 11 a 周期变化和 14 a 强趋势项变化。分别计算井水位 11 a 周期变化、14 a 强趋势项

小波系数与对应的降雨量小波系数的相关性可知,对11 a周期变化而言,两者相关系数为0.51,有一定相关性,对于14 a强趋势项而言,两者相关系数为0.84,具有较强相关性;说明该井水位11 a周期变化和14 a强趋势项均为降雨影响所致。

东莞中学监测井水位(图10c,f)在1996—2015年间呈现11 a周期变化和14 a强趋势项变化。分别计算井水位11 a周期变化、14 a强趋势项小波系数与对应的降雨量小波系数的相关性可知,对于11 a周期变化而言,两者相关系数为0.59,有一定相关性,对于14 a强趋势项而言,二者相关系数为0.83,具有较强相关性;说明该井水位11 a周期变化和14 a强趋势项均为降雨影响所致。

4.3 不同类型含水层水位多年动态变化特征

前人^[35-36]研究表明,日照地区降雨周期特征主要受太平洋年代际涛动和南方涛动影响呈现年际周期变化和4~5 a周期变化,同时还受太阳黑子极值出现周期变化影响呈现11 a周期变化^[37]。

获水监测井连通第四系松散岩类孔隙含水层,为非承压含水层,含水层埋藏深度较浅,顶板埋深为3.3 m,其上覆弱透水层为粉质黏土,厚度仅为1.1 m,降雨补给地下水速度较快,井水位受降雨的年际周期、4~5 a周期和11 a周期变化较为明显;因此,第四系松散岩类孔隙含水层水位在不同时间段内呈现年际周期、4~5 a周期和11 a周期变化。

莒县地震办监测井连通基岩裂隙含水层,为承压含水层,该井连通的两个含水层埋深分别为40.0~45.0 m和115.0~118.0 m,其中40.0~45.0 m含水层岩性为花岗岩,115.0~118.0 m含水层岩性为石英岩,裂隙发育,上覆弱透水层厚度较大,降雨补给地下水速度较慢,含水层渗透系数较小;因此,基岩裂隙含水层水位未呈现年际周期变化,仅呈现11 a周期变化和14 a强趋势项变化。

东莞中学监测井连通含水层为碳酸盐岩类裂隙岩溶含水层,含水层岩性为砂页岩,岩石风化严重,含水层埋深较浅,但由于裂隙岩溶含水层较为复杂且裂隙发育,导致含水层与深部含水层相连通,大气降水补给深层含水层速度较慢;因此深部含水层地下水位呈现11 a周期变化和14 a强趋势项变化,从而导致接受深部含水层越流补给的东莞中学监测井水位也呈现11 a周期变化和14 a强趋势变化。

5 结论

1)日照地区不同类型含水层地下水位动态变

化特征存在差异,获水监测井(第四系松散岩类孔隙水)水位在不同时间段内呈现年际周期、4~5 a周期和11 a周期变化特征,莒县地震办监测井(基岩裂隙水)和东莞中学监测井(碳酸盐岩类裂隙岩溶水)水位均呈现11 a周期变化和14 a强趋势项变化特征。总体而言,该地区降雨量呈现年际周期、4~5 a周期、11 a周期变化以及14 a强趋势项变化特征。

2)小波相干分析结果表明,水位变化滞后于降雨量变化,降雨量周期变化是造成地下水位年际动态变化和多年周期变化的主要影响因素。

3)时滞性分析结果表明,获水监测井(第四系松散岩类孔隙水)、莒县地震办监测井(基岩裂隙水)和东莞中学监测井(碳酸盐岩类裂隙岩溶水)水位变化滞后于降雨的时间分别为约1.5月、约2.0月和约1.0月。不同含水层地下水对降雨量响应时间存在差异是造成其呈现不同周期变化特征的主要原因。

参考文献(References):

- [1] Zhang S C, Shi Z M, Wang G C, et al. Quantitative Assessment of the Mechanisms of Earthquake Induced Groundwater Level Change in the MP Well, Three Gorges Area[J]. Pure and Applied Geophysics, 2018, 175(1): 2475-2484.
- [2] Wang C Y, Manga M, Shirzaei M, et al. Induced Seismicity in Oklahoma Affects Shallow Groundwater[J]. Seismological Research Letters, 2017, 88(1): 956-962.
- [3] 常廷改,胡晓.水库诱发地震研究进展[J].水利学报, 2018, 49(1): 1109-1122.
Chang Tinggai, Hu Xiao. Research Progress on Reservoir Induced Earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 1109-1122.
- [4] 车用太,鱼金子,刘成龙,等.水库诱发地震地下水监测网建设的若干问题探讨[J].地震学报, 2010, 10(1): 203-213.
Che Yongtai, Yu Jinzi, Liu Chenglong, et al. A Discussion on Some Problems in Groundwater Network Construction for Monitoring Reservoir-Induced Earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 10(1): 203-213.
- [5] Qu S, Shi Z M, Wang G C, et al. Using Water-Level Fluctuations in Response to Earth-Tide and Barometric-Pressure Changes to Measure the in-Situ Hydrogeological Properties of an Overburden Aquifer in a Coalfield[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 50(1): 1-15.
- [6] 赵全升,孔智涵,胡舒娅,等.柴达木盆地马海盐湖地

下卤水地球物理探测及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1560 - 1572.

Zhao Quansheng, Kong Zhihan, Hu Shuya, et al. Geophysical Exploration and Application of Underground Brine of Mahai Salt Lake in Qaidam Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1560 - 1572.

[7] 何冠儒, 史浙明. 地下水对气压和固体潮响应研究进展[J]. 地震研究, 2021, 44(1): 541 - 549.

He Guanru, Shi Zheming. Advance in the Groundwater Level Response to Barometric Pressure and Earth Tide[J]. Journal of Seismological Research, 2021, 44(1): 541 - 549.

[8] 兰双双, 迟宝明, 姜纪沂. 地下水位对近震和远震异常响应的比较: 以汶川地震和苏门答腊地震为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 26(1): 523 - 532, 565.

Lan Shuangshuang, Chi Baoming, Jiang Jiyi. Comparison of Groundwater Level Response to Near Earthquake and Distant Earthquake: Taking Wenchuan Earthquake and Sumatra Earthquake for Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 26(1): 523 - 532, 565.

[9] 董殿伟, 林沛, 晏婴. 北京平原地下水水位监测网优化[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 10 - 18.

Dong Dianwei, Lin Pei, Yan Ying. Optimum Design of Groundwater Level Monitoring Network of Beijing Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(1): 10 - 18.

[10] 侯金武. 精心实施国家地下水监测工程[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 1 - 3.

Hou Jinwu. The Implementation of National Groundwater Monitoring Project[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 1 - 3.

[11] 李文鹏. “水文地质与水资源调查计划”进展[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 1 - 6.

Li Wenpeng. Achievements of Investigation Program on Hydrogeology and Water Resources of CGS[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 1 - 6.

[12] 李振函, 张春荣, 朱伟. 日照市沿海地区海水入侵现状与分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(1): 4 - 19.

Li Zhenhan, Zhang Chunrong, Zhu Wei. The Present and Analysis of the Sea Water Intrusion in Coastland of Rizhao[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(1): 4 - 19.

[13] 高铭骏, 汪旭, 孟玲珑, 等. 沿海发展区海水入侵与土壤盐渍化空间关联解析[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 14 - 26.

Gao Mingjun, Wang Xu, Meng Linglong, et al. Spatial Correlation Analysis of Seawater Intrusion and Soil Salinization in Coastal Developed Area [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(1): 14 - 26.

[14] 谈恒文, 张子军, 安丰芹. 日照市东港区地下水环境质量现状评价[J]. 地球学报, 2005, 26(1): 5 - 18.

Tan Hengwen, Zhang Zijun, An Fengqin. Underground Water Environmental Quality Evaluation of Donggang District, Rizhao City, Shandong Province [J]. Acta Geochemistry Sinica, 2005, 26(1): 5 - 18.

[15] 杨鹏, 袁杰, 秦鹏. 日照市地下水动态特征及演化规律[J]. 地质学报, 2019, 15(1): 100 - 110.

Yang Peng, Yuan Jie, Qin Peng. Dynamic Characteristic and Evolution Law of Groundwater in Rizhao City, Shandong [J]. Acta Geological Sinica, 2019, 15(1): 100 - 110.

[16] Obergfell C, Bakker M, Zaadnoorduk W J, et al. Deriving Hydrogeological Parameters Through Time Series Analysis of Groundwater Head Fluctuations Around Well Fields [J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(1): 987 - 999.

[17] Moritz B S, Bartz-Beielstein T. Time Series Missing Value Imputation[J]. R Journal, 2015, 9(1): 8 - 22.

[18] 杨忠平, 卢文喜, 李平. 时间序列模型在吉林西部地下水动态变化预测中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 1475 - 1479.

Yang Zhongping, Lu Wenxi, Li Ping. Application of Time Series Model to Predict Groundwater Regime [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(1): 1475 - 1479.

[19] 于宁莉, 易东云, 涂先勤. 时间序列中自相关与偏相关函数分析[J]. 数学理论与应用, 2007, 27(1): 54 - 57.

Yu Ningli, Yi Dongyun, Tu Xianqin. Analyze Auto-Correlations and Partial-Correlations Function in Time Series [J]. Mathematical Theory and Applications, 2007, 27(1): 54 - 57.

[20] Manga M. On the Timescales Characterizing Groundwater Discharge at Springs [J]. Journal of Hydrology, 1999, 219(1): 56 - 69.

[21] Wu Z, Huang N E, Long S R, et al. On the Trend, Detrending, and Variability of Nonlinear and Nonstationary Time Series [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(1): 14889 - 14894.

[22] Siino M W, Scudero S J, Cannelli V, et al. Multiple Seasonality in Soil Radon Time Series[J]. Scientific

- Reports, 2019, 9: 8610.
- [23] 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.
- [24] Oygur T, Unal G. Vector Wavelet Coherence for Multiple Time Series [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9(1): 403-409.
- [25] Lee E, Kim S. Wavelet Analysis of Soil Moisture Measurements for Hillslope Hydrological Processes [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575(1): 82-93.
- [26] 孔庆敏, 王广才, 史浙明. 云南地区震前地下流体异常特征统计分析[J]. 地震学报, 2018, 40(1): 632-645, 689.
- Kong Qingmin, Wang Guangcai, Shi Zheming. Statistical Analysis of Pre-Seismic Anomalous Characteristics of Subsurface Fluids in Yunnan Region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(1): 632-645, 689.
- [27] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. 地下空间, 1999, 20(1): 303-310, 316.
- Wu Yanqing. Groundwater and Geological Hazards [J]. Underground Space, 1999, 20(1): 303-310, 316.
- [28] 平建华, 李升, 钦丽娟. 地下水动态预测模型的回顾与展望[J]. 水资源保护, 2006, 22(1): 11-15.
- Ping Jianhua, Li Sheng, Qin Lijuan. Review and Prospect of Dynamic Prediction Model for Groundwater [J]. Water Resource Protection, 2006, 22(1): 11-15.
- [29] 梁四海, 徐德伟, 万力. 黄河源区基流量的变化规律及影响因素[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 10-19.
- Liang Sihai, Xu Dewei, Wan Li. Periodic Regularity of the Base Flow in the Headwater Region of the Yellow River and Affecting Factors [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 10-19.
- [30] 祁晓凡, 李文鹏, 李海涛. 济南岩溶泉域地下水位、降水、气温与大尺度气象模式的遥相关[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 18-28.
- Qi Xiaofan, Li Wenpeng, Li Haitao. Teleconnections Between Groundwater Levels, Precipitation, Air Temperature of the Jinan Karst Springs Watershed and Large Scale Climatic Patterns [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 18-28.
- [31] 凤蔚, 祁晓凡, 李海涛. 雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 8-19.
- Feng Wei, Qi Xiaofan, Li Haitao. Wavelet Analysis Between Groundwater Level Regimes and Precipitation, North Pacific Index in the Xiongan New Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(1): 8-19.
- [32] Yan R, Woith H, Wang R J, et al. Decadal Radon Cycles in a Hot Spring [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 18-29.
- [33] Zhang S C, Shi Z M, Wang G C, et al. Groundwater Radon Precursor Anomalies Identification by Decision Tree Method [J]. Applied Geochemistry, 2020, 16(1): 104696.
- [34] Torrence C. A Practical Guide to Wavelet Analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [35] 徐泽华, 韩美, 路广, 等. 山东省降雨侵蚀力与气候指数关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 880-889.
- Xu Zehua, Han Mei, Lu Guang, et al. Relationship Between Rainfall Erosivity in Shandong Province and Climate Indices [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(10): 880-889.
- [36] 王善华, 黄镇. 赤道东太平洋海温、南方涛动和我国东部降水的谱分析[J]. 气象科学, 1987, 5(2): 66-73.
- Wang Shanhua, Huang Zhen. The Spectral Analysis of the Sea Surface Temperature in the Eastern Equatorial Pacific the Southern Oscillation and the Rainfall in the Eastern China [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1987, 5(2): 66-73.
- [37] 朱继前, 韩美, 徐泽华, 等. 淮河流域不同量级降雨时空分布特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 87-95.
- Zhu Jiqian, Han Mei, Xu Zehua, et al. Temporal-Spatial Distribution Characteristics and Factors of Different Magnitude Rainfall in Huaihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 87-95.