

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0627

项彩娟,陈植华,王涛,等.基于小波分析的滇东北毛坪铅锌矿充水水源识别[J].地质科技情报,2019,38(6):231-240.

基于小波分析的滇东北毛坪铅锌矿充水水源识别

项彩娟¹,陈植华¹,王涛¹,黄荷¹,孙帮涛²,王勇²

(1.中国地质大学(武汉)环境学院,武汉 430074;2.彝良驰宏矿业有限公司,云南 昭通 657600)

摘要:依据矿区长期地下水动态资料,运用小波分析技术进行地下水位时间序列多时间尺度分析,提取序列中包含的主周期信息,进而辨识矿区的主要充水水源。研究结果显示:地下水位动态时间序列中所包含的周期或者准周期非常宽泛,展现出了多谱的复杂结果,主要周期从小到大分别对应地球固体潮效应、潮汐作用以及降雨为驱动力的地下水循环过程。小尺度的周期变化反映了地下水系统的开放程度;大尺度的周期变化是地下水系统对高能量、长时间尺度降雨输入的响应。研究结果证实了矿区河东石炭系与泥盆系岩溶裂隙水为矿区的直接充水水源,北部二叠系岩溶裂隙水与河西泥盆系岩溶裂隙水为矿区的间接充水水源。

关键词:矿区充水水源;地下水位动态;小波分析;多时间尺度分析

中图分类号:P641.5

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2019)06-0231-10

Recognition of Water Source of Maoping Lead-Zinc Mine in Northeast Yunnan Based on Wavelet Analysis

Xiang Caijuan¹, Chen Zhihua¹, Wang Tao¹, Huang He¹, Sun Bangtao², Wang Yong²

(1.School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;

2.Yiliang Chihong Mining Co.Ltd., Zhaotong Yunnan 657600, China)

Abstract: Based on the long-term groundwater dynamic data, this paper conducts the multiple time scale analysis of groundwater level time series by using wavelet technology. The main period information contained in the sequence is extracted, and then the main water-filling source of the mining area are identified. The results show that the period or quasi-period of groundwater level dynamic time series is very wide, showing the complex results of multi-spectrum. The main periods correspond to the earth's solid tide effect, the tidal effect and the groundwater cycle driven by rainfall from small to large. Small-scale periodic variation reflects the openness of groundwater system; and the large-scale periodic variation is the response of groundwater system to high energy and long-time rainfall input. The research results confirm that the karst fissure water of Carboniferous and Devonian in Hedong mining area is the direct source of water, while the karst fissure water of Permian and Devonian in Hexi mining area is the indirect source of water.

Key words: water filling source; groundwater level dynamics; wavelet analysis; multiple timescale analysis

分析和解决矿坑涌突水问题最关键的是判别充水条件,矿区的充水水源和充水通道是矿区地下水防治的基础,研究矿区的地下水动态特征,提取并分析地下水位序列中的有效信息,是认识矿区充水条

件、识别矿区主要充水水源的重要手段^[1-2]。

地下水位的动态变化特征可以通过趋势、周期性波动和平稳随机变量来表述^[3-4],其中周期成分是矿区地下水系统状态的表征指标。时间序列的多时

收稿日期:2019-01-16

编辑:刘江霞

基金项目:校企合作项目“毛坪铅锌矿水文地质条件深入研究及地下水防治工程优化”(2016046177)

作者简介:项彩娟(1995—),女,现攻读水利工程专业硕士学位,主要从事矿区防治水的研究工作。E-mail:1663218193@qq.com

通信作者:王涛(1978—),男,讲师,主要从事矿区水文地质的工作。E-mail:twang21@cug.edu.cn

间尺度分析可以提取不同时间尺度的周期成分,非常适合地下水位时间序列这一类非平稳时间序列的分析和计算。对地下水动态进行多时间尺度分析的传统方法有滑动平均、滤波、Fourier分析等,但它们也具有缺陷^[5-6]:①在时间尺度上不具有局部化性质;②对突变点的诊断缺乏数学上的严谨性。小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部化功能,可以对时间序列进行局部化分析,剖析其内部精细结构,被誉为“数学显微镜”^[7]。目前,小波分析法在研究水文水资源时间序列变化特性上得到了广泛应用,但在地下水系统分析中的应用仍处于起步探索阶段^[8-17]。因此,笔者尝试选用小波分析方法进行矿区地下水水位时间序列的多时间尺度分析。

毛坪铅锌矿属西南地区川滇黔铅锌矿集区的典型矿床代表,属于水文地质条件复杂的岩溶型充水矿床。随着矿山开采中段延深,矿坑涌水量明显增大,井下作业面临高压地下水带来的安全隐患,地下水已成为制约该矿床深部安全开采的主要因素。矿区具有水文地质结构复杂、充水水源多样,人为活动干扰较大的特点。矿区自2012年至今,已逐步监测并逐步建立完善的地下水监测网,积累了丰富的地下水动态资料。

笔者依据矿区长期累积的地下水动态资料,将小波分析技术应用于地下水动态序列分析,通过提取地下水动态数据包含的多时间尺度特征比较分析,进而揭示矿区的主要充水水源,为矿区地下水防

治提供科学依据。同时,为地下水位动态这种地学非线性过程(NPG)的认识及其应用提供新的技术手段。

1 研究区概况

毛坪铅锌矿位于云南省昭通市彝良县,属中高山峡谷地貌,地形陡峻,侵蚀切割剧烈,地形南高北低,西高东低,海拔标高890~2 060 m。区内地表水系相对发育,主要水系洛泽河自南向北径流,构成了区内最低侵蚀基准面。研究区属于亚热带高原季风气候,历年平均降雨量747.94 mm,降水集中于每年的5~9月份,占全年降水量的80%以上。

研究区内主要含水层为下二叠统栖霞组、茅口组,石炭系威宁统上含矿组与石炭系丰宁统灰页岩组、上泥盆统宰格组3套岩溶含水层(表1),主要含水层与下二叠统梁山组、下石炭统万寿山组构成的相对隔水层相间分布。矿区位于滇东北铅锌成矿带东部,发育多组NE向、NW向、NS向断裂褶皱。区内主干构造为石门坎背斜,也是主要的控矿构造。石门坎背斜呈向北东突出的弧形展布,北西翼地层产状直立或倒转,经倾伏端转入东南翼后地层产状平缓。矿体集中分布于石门坎倒转背斜倾伏端及其北西翼,经由背斜倾伏端两翼发育的切层断裂及其他断层错断了区内的相对隔水层,可能构成了相邻含水层产生水力联系的潜在通道。

表1 区域岩溶水系统划分结果

Table 1 Division of regional karst water system

岩溶水系统	岩溶水系统	含水岩组	主要岩性	主要排泄点
下二叠统 岩溶含水系统	龙潭泉岩溶水系统	P_1q+m	灰岩	龙潭泉
	塘坊泉岩溶水系统			塘坊泉
	龙洞水岩溶水系统			龙洞水
石炭系 岩溶含水系统	水炉电站岩溶水系统	C_2w^{1+3}	灰岩与白云	水炉电站泉(已断流)
	林家坪岩溶水系统	C_1f^{2+3}	岩互层	/
泥盆系岩溶含水系统	陈家湾岩溶水系统	D_3zg	白云岩	陈家湾、黄木块、纪念碑等

注: P_1q+m .下二叠统栖霞组+茅口组; C_2w^{1+3} .上石炭统威宁统; C_1f^{2+3} .下石炭统丰宁统; D_3zg .上泥盆统宰格组

天然条件下,各岩溶含水层接受大气降水补给,受地形控制而主要以泉点排泄。当前采矿工程主要集中在河东石炭系丰宁统一威宁统、上泥盆统地层中,矿区大流量的疏排水使得河东石炭系与泥盆系含水层的水位大幅度下降,改变了地下水排泄方式及流场,矿区可能出现新的充水水源。河东二叠系岩溶水系统受下伏梁山组隔水层的阻隔,分布在石炭系、泥盆系矿带含水层之上,主要排泄点为塘坊泉、龙洞水,断层及抽排水破坏了梁山组地层的隔水性使得河东二叠系岩溶裂隙水成为矿区潜在的充水水源。河西二叠系岩溶水系统流量与历史同期相比

未见明显变化,表明其未受矿区开采影响。河东石炭系与泥盆系岩溶裂隙水为矿区的直接充水水源,石门坎背斜核部发育多组NE向、NS向断层构成河东石炭系含水层补给泥盆系含水层的潜在充水通道。河东泥盆系岩溶含水系统存在多个富水区,地下水汇集至中部疏排水中心(图1)处排泄。河西石炭系岩溶水系统水炉电站泉受河西矿区开采影响现已干涸,现其主要排泄方式为河西矿区排水,河西石炭系裂隙水对河东矿区充水的贡献不明。河西泥盆系含水层的主要泉点的天然排泄量几乎消耗其大气降水补给量,但河西泥盆系深层地下水径流对矿区

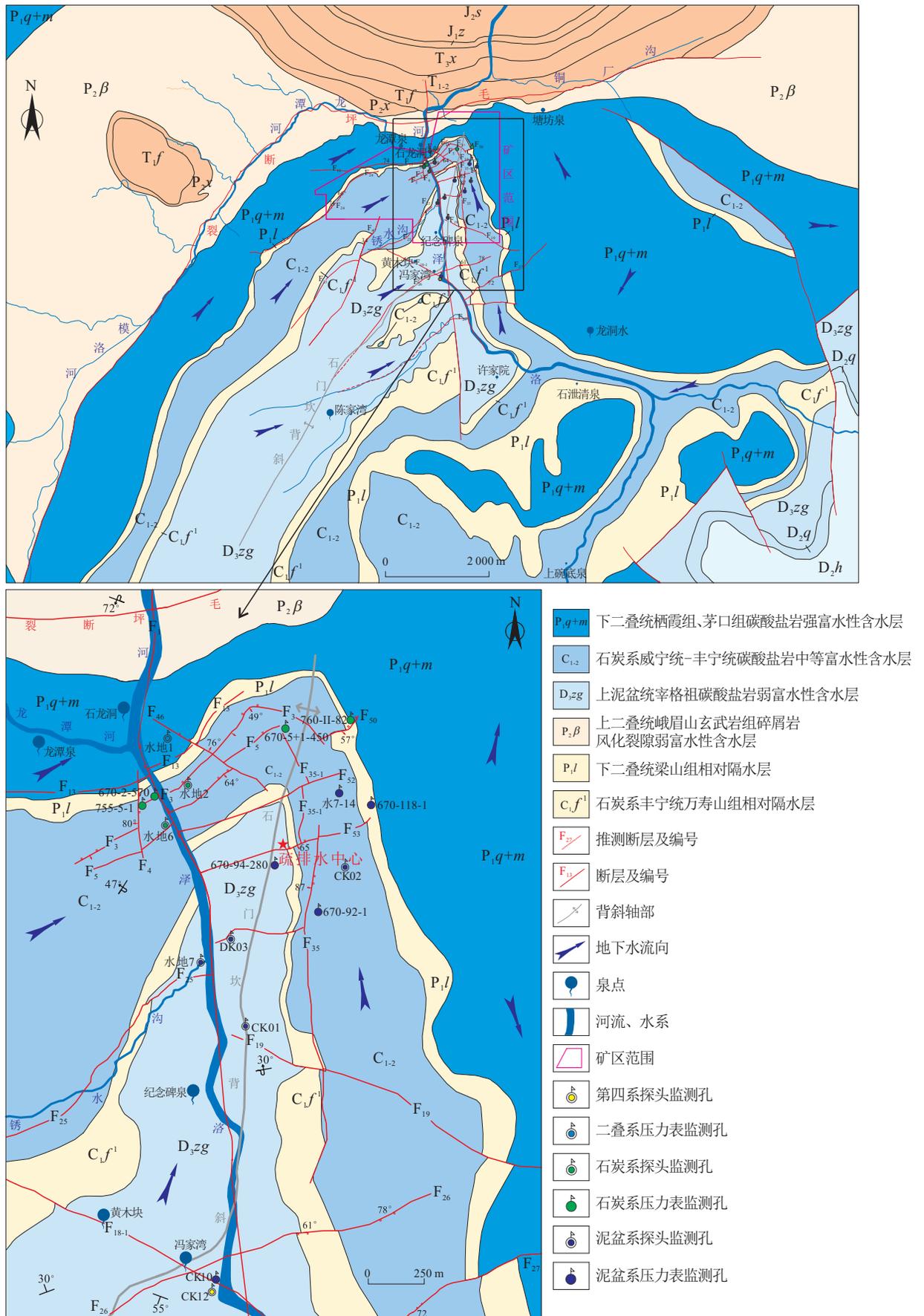


图 1 研究区地质图及监测孔布置图

Fig.1 Geological map and layout of monitoring holes in the study area

构成潜在充水威胁。

当前对矿区水文地质条件的认识显示,河东石炭系、泥盆系岩溶裂隙水为矿区直接充水水源,河东二叠系岩溶裂隙水与河东石炭系、泥盆系岩溶裂隙水为矿区潜在的间接充水水源。为了进一步验证上述认识是否正确,笔者使用小波分析技术获取矿区3个不同岩溶裂隙含水层地下水位时间序列的多时间尺度特征,拟解决以下具体问题:①分析矿区河东各岩溶裂隙含水层间的水力联系程度;②分析矿区河东、河西采区间的水力联系程度;③识别矿区疏干条件下主要的充水水源。

2 研究方法

小波分析主要是通过平移基小波函数获取信号的时间信息,通过缩放基小波函数的宽度(或者叫做尺度)获取信号的频率信息^[18]。选择适合的基小波函数是运用小波分析解决实际问题的前提,也是确保分析结果符合客观实际的关键^[19]。目前常用的基小波函数有 Mexican hat 小波、Haar 小波、Morlet 小波和 Meyer 小波。笔者选择 Morlet 小波作为基小波函数的原因如下:①Morlet 小波可以进行连续小波变换获取地下水位变化过程中连续变换的“多时间尺度”特征;②Morlet 是复小波,可以同时获取时间序列相位与振幅这两方面的信息,且实部与虚部的位相差可以消除虚假振荡,使分析结果更准确^[20-21]。

2.1 小波函数

基小波函数 $\psi(t)$ 指的是具有震荡特性,能够迅速衰减到零的一类函数^[22]。小波函数的定义为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

$\psi(t)$ 通过伸缩和平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (2)$$

$$b \in R, a \in R, a \neq 0$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为分析小波; a 为尺度(伸缩)因子; b 为时间(平移)因子; R 为实数集。其中, a 的变化代表时间尺度的变化; b 的变化代表不同时刻。

Moelet 小波的定义为:

$$\psi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

式中: c 为常数 6.2; i 为虚数。

Morlet 小波伸缩尺度 a 与周期 T 如下关系:

$$T = \left[\frac{4\pi}{c + \sqrt{2 + c^2}} \right] \times a \quad (4)$$

2.2 小波变化系数

时间序列 $f(t) \in L^2(R)$, 其连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

式中: $\bar{\psi}(t)$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭函数; $W_f(a, b)$ 为小波变换系数。

时间序列 $f(k\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots, N$; Δt 为取样时间间隔), 其离散小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (6)$$

式(6)为式(5)的离散形式,通过小波变换可以获得时间序列的 $f(t)$ 的时域和频域信息^[23]。当伸缩尺度 a 减小时,基小波函数的波形在时域上收缩,可以分析序列的细节获得高频信息;当伸缩尺度 a 增大时,基小波函数的波形在时域上展宽,可以分析序列的概况获得低频信息。因此可以通过调整伸缩尺度 a 的大小来实现对序列的时频局部不同分辨率的分析。针对笔者研究的地下水位时间序列,小波系数可反映地下水位在不同尺度下的变化特征。例如在 10 a 的时间尺度下,正的小波系数对应丰水期,地下水位增大;负的小波系数对应枯水期,地下水位降低;小波系数为 0 对应丰水期到枯水期的振荡,地下水位的变化趋势改变。因此小波系数随时间变化的过程可识别地下水系统多时间尺度演变特性和突变特征。

2.3 小波方差

小波方差为对应的伸缩尺度 a 上小波系数平方的积分,计算公式为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (7)$$

式中: $\text{Var}(a)$ 为小波方差。

通过绘制小波方差图直观展示小波方差随尺度 a 变化的过程,小波方差图中的波峰对应时间序列的周期成分,波峰最高表明周期成分对应的波动能量最大,为序列的主周期^[24-25]。

3 数据来源及处理

矿区已建立了地下水动态自动监测网(图1),其中安装自动存储的数字压力表9处、安装加拿大 Solinst Levellogger 地下水水位计的监测点8处,矿区监测孔集中在河东采区地下水疏干中心附近。

笔者选取 2017 年 1 月 1 日—12 月 30 日期间的矿区水位监测孔监测数据为研究对象。其中 2017 年 1 月 1 日—3 月 23 日监测频率为每小时 1 次;2017 年 3 月 24 日—9 月 6 日监测频率为每 10 min 1 次;2017 年 9 月 7 日—12 月 31 日监测频率为每 2 h 1 次。由于小波分析要求输入的信号必须是等时间间隔,对监测数据进行日平均处理,最终得到了 2017 年 1 月 1 日—12 月 30 日期间,监测频率为

每天1次的地下水位时间序列。

矿区排水量是矿区的技术人员根据不同开采水平的泵房资料整理而成,监测频率为每天1次,选取2017年1月1日—12月30日的矿区总排水量数据为本次研究的对象。

矿区累积有的数十年的降雨资料,1971—2016年是矿区自制雨量计测量结果,监测频率为每月1次。自2016年12月份至今使用RainWise Rainlog自计式雨量计进行降雨资料收集,监测频率为每天1次。选取其中连续完整的研究时段,使用2001—2010年的降雨数据进行研究区降雨序列的多时间尺度分析。

利用小波分析方法进行多时间尺度分析的步骤为:将标准化后的时间序列与Moret小波函数代入式(6),计算得到小波系数。由于Morlet小波为复数小波,可以计算出小波系数的实部、模、模平方的值。将计算得到小波系数代入式(7),计算得到小波方差。利用Matlab R2014b软件实现上述操作,并利用软件绘制时间序列的小波系数实部等值线图、小波系数模等值线图、小波系数模平方等值线图和 小波方差图,其中小波方差图可以直观体现时间序列的主周期成分,是多时间尺度分析的关键。

4 结果讨论与分析

4.1 矿区地下水位动态变化特征

图2显示矿区不同地下水动态类型的监测孔的水位动态曲线,图上标注的“水地7(D)”为监测孔孔号(监测层位的地层代号)。矿区地下水水位动态可以划分为以下4种类型^[26]:①径流型动态(图2-a):河西石炭系与泥盆系监测孔的地下水位对降雨响应较慢,地下水位动态曲线的形态为缓升缓降,表明监测孔所处的含水层不直接接受降雨的补给,主要由地下水径流补给,划分为径流型动态;②人工型动态(图2-b):河东泥盆系670-92-1,670-94-280孔靠近矿区疏干中心,地下水位动态的变化与降雨没有相关性,深部监测孔670-94-280水位持续下降,浅层监测孔670-92-1水位保持稳定,表明这2个监测孔所处的位置主要受矿区向深部掘进的排水影响,划分为人工型动态;③气候型动态(图2-c):第四系、二叠系、河东石炭系与泥盆系水670-118-1孔的地下水位对降雨响应迅速,地下水位动态曲线的形态为陡升陡降,表明监测孔所处的含水层存在降雨灌入式补给的通道,处于相对开放的地下水系统中,划分为

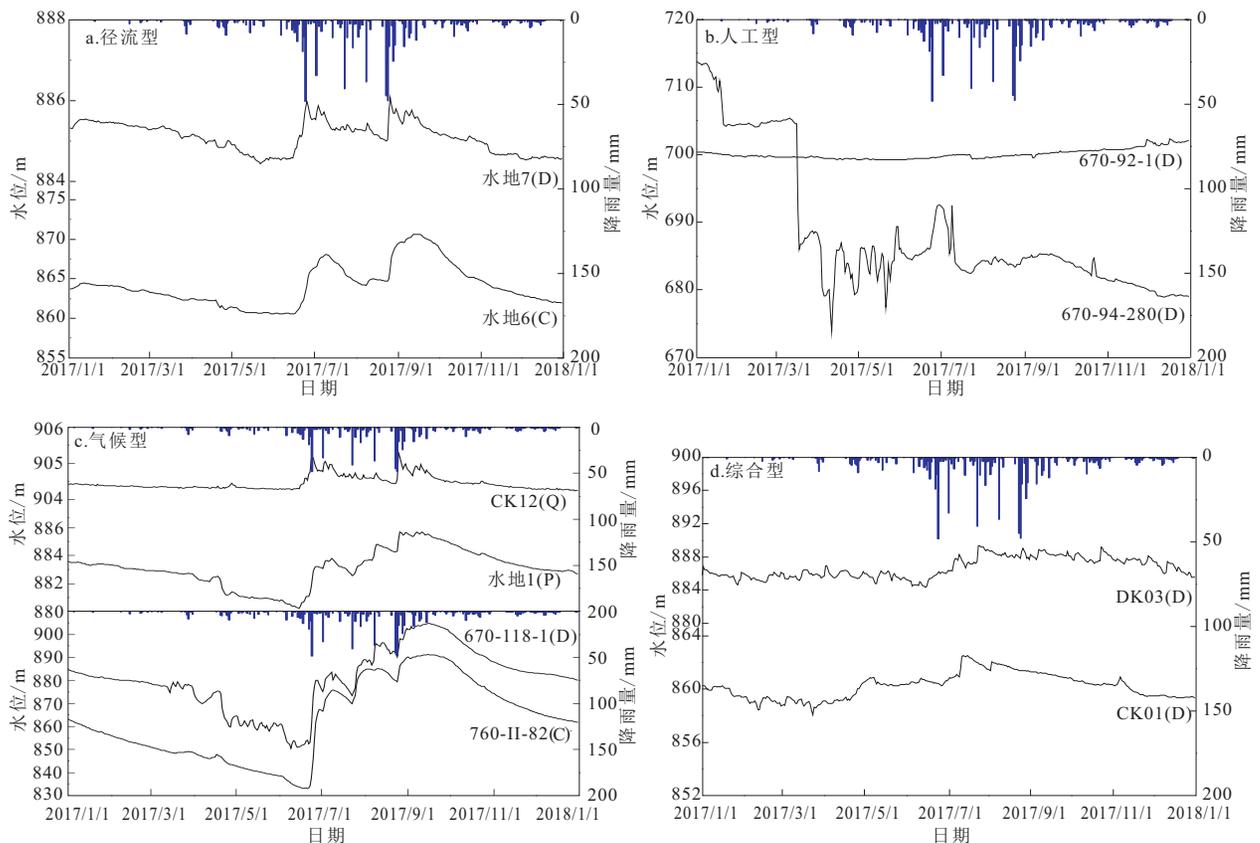


图2 各类型动态监测孔地下水位曲线图

Fig.2 Groundwater level curve of monitoring hole of runoff type (a), artificial type (b), climatic type (c), comprehensive type (d)

气候型动态;④综合型动态(图 2-d):河东泥盆系 CK01、DK03 孔地下水动态曲线与降雨相关性较低,同时并未呈现受排水影响持续下降的特征,表明监测孔所处的位置主要受天然与人为影响因素共同作用,形成了复杂的综合特征,划分为综合型动态。

分类结果表明影响矿区地下水动态主导因素为降雨,其次为矿区疏干排水,根据动态特征可以得到:①河西石炭系监测孔动态类型为径流型,河东石炭系监测孔动态类型为气候型,指示河西与河东石炭系含水层间水力联系不紧密;②河东石炭系监测孔与河东泥盆系东北部监测孔水位动态类型均为气候型,指示两者之间可能存在水力联系;③分布于河西、河东的泥盆系浅层监测孔水地 7 与 DK03 距离仅 100 m,但动态类型不同,指示河西与河东石炭系含水层间水力联系不紧密;④监测孔动态类型可划分泥盆系富水区,其中泥盆系东北部富水区的监测孔 670-118-1、水 7-14、CK02 为气候型;中部富水区监测孔 670-92-1、670-94-280 为人工型;南部富水区监测孔 CK01、DK03 为综合型。

依据地下水动态的定性分析结果难以对矿区充水条件形成清晰的认识,且地下水水位序列受外界因

素的影响产生的“噪音”成分,会影响地下水位动态曲线的形态,造成动态类型的误判,使得对矿区水文地质条件的认识产生偏差。因此使用小波方法进行多时间尺度分析,选取主周期为表征指标,不仅可以清晰指示影响地下水动态的主要因素,还能更科学、有效地将矿区不同含水层监测孔的地下水动态归类,将传统定性分析方法与小波分析手段充分结合,实现识别矿区主要充水水源的目的。

4.2 矿区降雨与排水量序列的多时间尺度分析

利用小波分析技术对矿区降雨与排水量序列进行多时间尺度分析,提取其主周期成分,验证其与地下水时间序列的相关关系,图 3 为处理前的原始序列。降雨量时间序列(图 4-a)研究时段内只有 1 个主要周期,约 300 d;矿区排水量时间序列(图 4-b)研究时段内有 3 个主要周期,分别是 21, 73, 305 d。其中矿区排水量最大的周期与降雨量周期相近,说明矿区排水量会受到降雨的影响。

4.3 矿区地下水水位序列的多时间尺度分析

参考 B.C.卡瓦列夫斯基对地下水动态的形成机理的分类^[27],将矿区的地下水动态划分为宏观动态与微观动态。

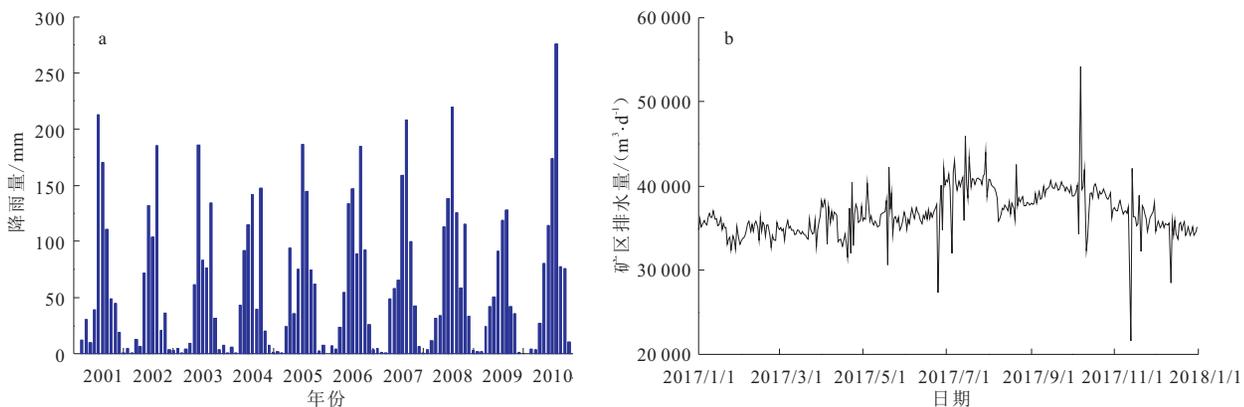


图 3 月均降雨量(a)和日均排水量(b)时间序列

Fig.3 Monthly mean time series (a) and daily average time series (b) of drainage

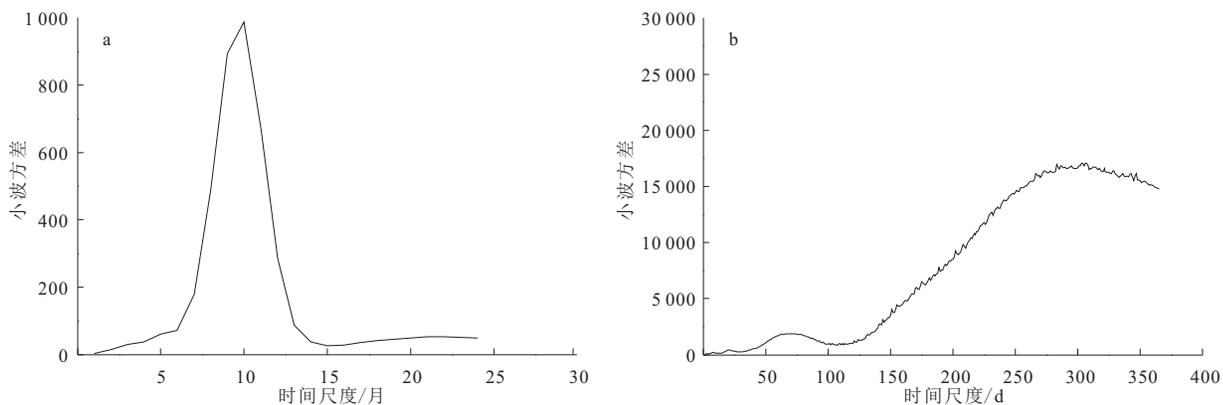


图 4 降雨量(a)和排水量(b)时间序列小波方差图

Fig.4 Wavelet variance map of rainfall time series (a) and drainage time series (b)

降雨补给、人为注水和开采造成了含水层中的水量增减,使得地下水位产生宏观的动态变化,在地下水动态曲线中表现为趋势性的水位升降;地震波、固体潮和大气压作用^[28]令含水层的孔隙水压发生变化,使得地下水位动态曲线产生小幅度的震荡。降雨存在年际的周期循环,固体潮效应、潮汐作用为小尺度的周期变化,常见的周期为半日、日、半月、月等。2种动态变化的叠加令矿区地下水位包含了不同时间尺度嵌套的周期变化。

以二叠系监测孔水地1为例展示小波分析进行水位序列多时间尺度分析的步骤,水地1原始地下水位处理后的日均时间序列与标准化时间序列见图5。

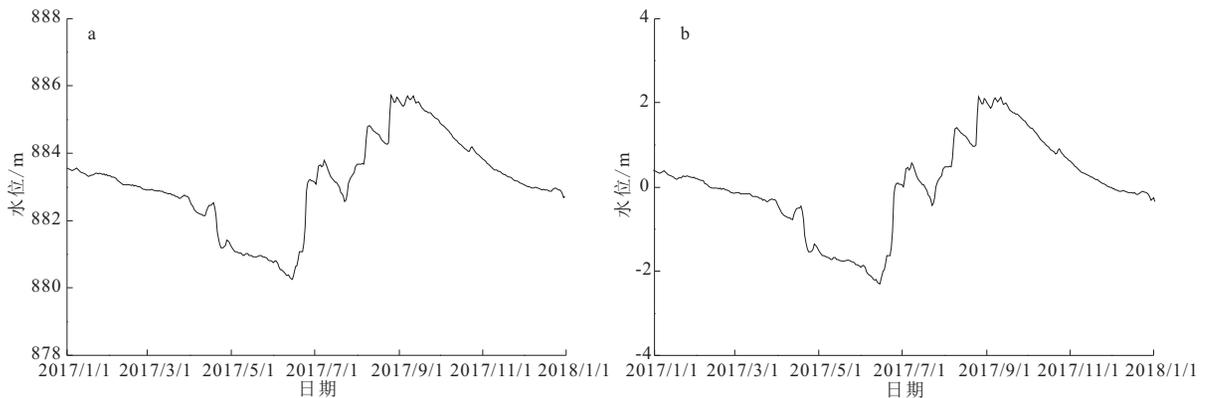


图5 水地1孔地下水位日均时间序列(a)和标准化时间序列(b)

Fig.5 Daily average time series (a) and standardized time series (b) of groundwater level in SD1

为了进一步反映各个时间尺度上周期变化的振荡强度,绘制出 Morlet 小波系数模等值线图(图 6-b)和模平方等值线图(图 6-c)来加以说明。Morlet 小波系数的模值是不同时间尺度变化周期所对应的能量密度在时间域中分布的反映,系数模值越大,表明其所对应时间段或尺度的周期性就越强。小波系数的模方相当于小波能量谱,它可以分析出不同周期的振荡能量。图 6-b, c 显示,200~250 d 时间尺度的振荡能量最强,周期最为显著,周期分布也比较明显,几乎占据整个研究时域(2017 年 1 月—12 月);30~60 d 时间尺度的周期变化次之,其他时间尺度的周期变化较小。

小波方差图能反映地下水位时间序列的波动能量随时间尺度 a 的分布情况,可用来确定地下水位时间序列中存在的主周期。水地1孔地下水位时间序列小波方差图(图7)只存在一个较为明显的峰值,对应着 200~250 d,该尺度的周期震荡最强,为水地1孔地下水位时间序列的第一主周期,该周期对应着地下水位的丰枯水期交替,控制这地下水位时间序列在整个时间域内的变化特征。

对矿区内其他监测点地下水位时间序列进行小

波系数实部等值线图能够反映地下水位动态中不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,进而判断在不同时间尺度上地下水位的未来变化趋势。图 6-a 显示了水地1孔地下水位动态包含的多时间尺度特征,指示其存在 5~20, 30~60, 200~250 d 这 3 类尺度的周期变化。其中,在 200~250 d 时间尺度上出现丰枯水期交替的 1 次震荡,该尺度的周期变化在整个分析时段表现稳定;在 30~60 d 时间尺度上出现受潮汐作用影响的 3 次震荡;5~20 d 与 30~60 d 这两个小时间尺度上的周期变化体现的是地下水位动态的局部化特征。

波变换,提取其主周期成分,矿区监测孔地下水位序列主周期见表 2。矿区监测孔的主周期成分有 4 个,分别是 13~19, 25~33, 55~105, 141~301 d,其中 141~301 d 的周期振荡能量最强,周期最为显著。降雨时间序列的主要周期约 300 d,说明矿区监测孔尺度最大的周期成分指示的是降雨为驱动力的地下水循环过程。矿区排水量的主要周期为 21, 73, 305 d,与监测孔地下水位时间序列的主周期特征相近,说明矿区排水会影响地下水位。矿区排水量最大的周期与降雨量周期相近,说明矿区排水与矿区地下水位间具有“联动”效应,即两者均受到降雨的影响。研究表明矿区排水量一方面受到降雨和人为调控的控制,另一方面也会影响矿区监测孔的水位。多时间尺度分析的结果证实了上述的分析结论,即矿区地下水动态主导因素为降雨,其次为矿区开采的影响。

结合前文对矿区地下水动态形成机理的讨论,分析矿区地下水位时间序列的不同周期成分的含义。水位时间序列大尺度的周期成分(与降雨序列的主周期相近)指示降雨为直接驱动力的地下水循环过程,对应水量型变化动态;小尺度的周期成分

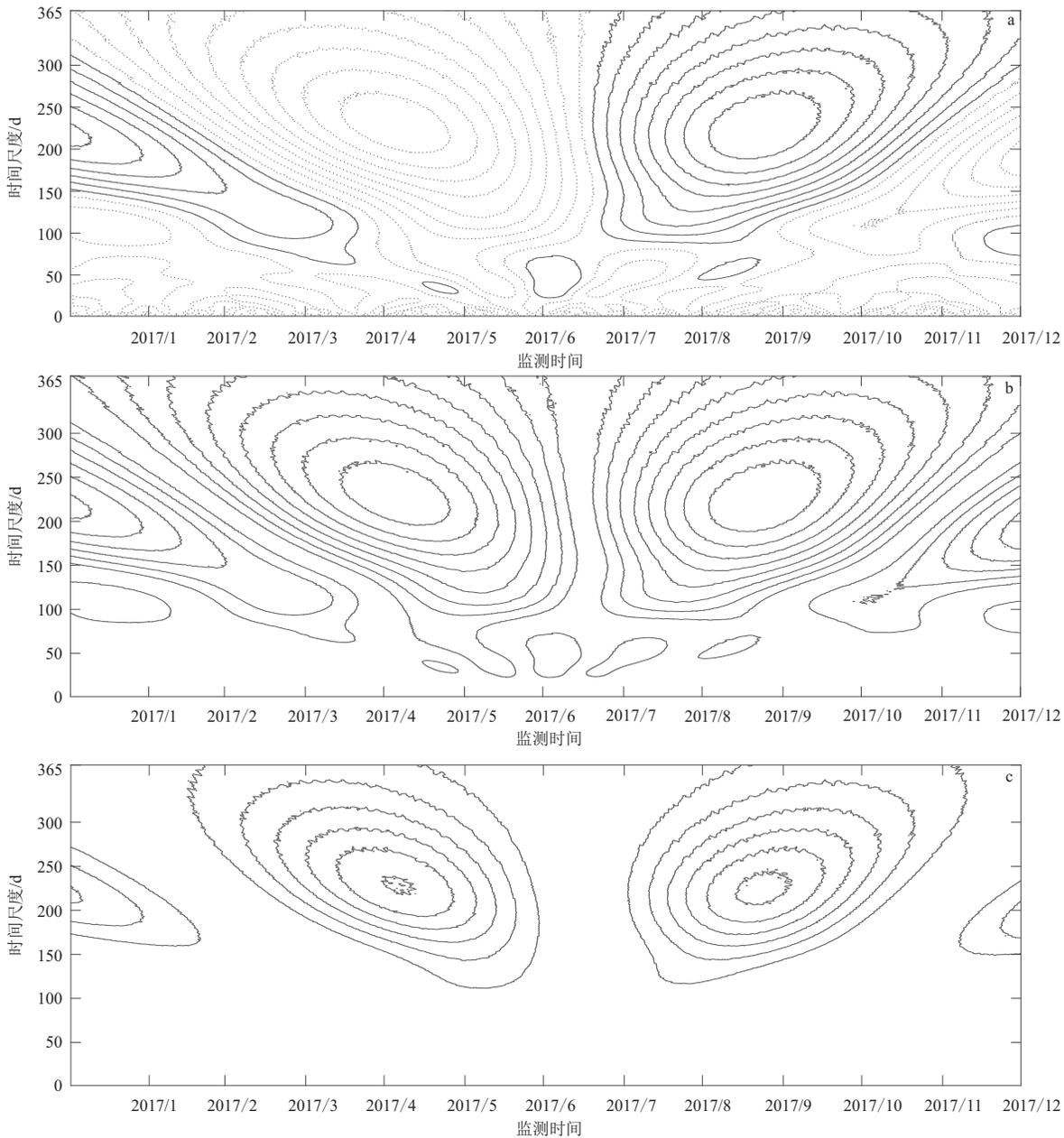


图6 水地1孔地下水位时间序列小波系数实部等值线图(a)、模等值线图(b)和模平方等值线图(c)

Fig.6 Realpart isogram (a), modulus isogram (b) and modulus square isogram (c) of wavelet coefficients of roundwater level time series in SD1

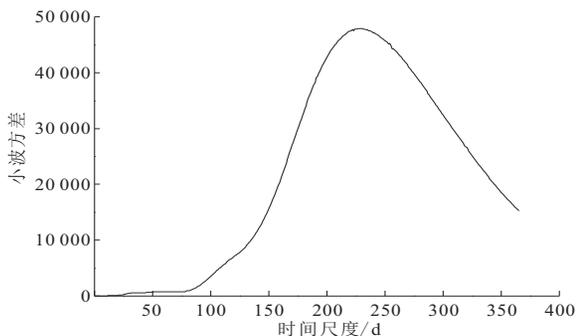


图7 水地1孔地下水位时间序列小波方差图

Fig.7 Wavelet variance of groundwater level time series in SD1

(小于 100 d)指示地球固体潮效应、潮汐作用,对应压力型变化动态。其中小尺度的周期变化可以反映地下水系统的开放程度,较开放的地下水系统会保留小尺度的周期变化,反之则不然;大尺度的周期变化为地下水系统对高能量、长时间尺度的降雨输入的响应。根据矿区不同监测孔的主周期特征(表2),可以将监测孔划分为3种类型:

I类含有大尺度周期与2~3个小尺度周期。二叠系监测孔、河东石炭系监测孔、河东泥盆系670-118-1、水7-14、670-94-280孔均属此类。该类主周期特征指示监测孔所处地下水系统相对开放,含水层介质岩溶裂隙、管道发育,地下水系统对地下

水位动态的“过滤”作用小,主要接受浅层水或者降雨的快速补给。

表2 矿区监测孔地下水水位时间序列主周期信息

Table 2 Main periods of groundwater level time series at mine monitoring holes

孔号	监测层位	主要周期/d			主周期特征分类
CK12	第四系(河西)	13	—	57 242	I类
水地1	二叠系(河东)	13	33	— 228	I类
水地2	石炭系(河东)	18	29	74 230	I类
670-5+1-450	石炭系(河东)	13	31	— 178	I类
760-II-82	石炭系(河东)	13	28	— 261	I类
670-118-1	泥盆系(河东)	13	31	— 235	I类
水7-14	泥盆系(河东)	13	28	— 264	I类
670-94-280	泥盆系(河东)	19	—	70 196	I类
水地6	石炭系(河西)	—	—	63 229	II类
755-5+1-1	石炭系(河西)	—	—	71 219	II类
670-2-570	石炭系(河西)	—	—	— 234	II类
670-92-1	泥盆系(河东)	—	—	76 141	II类
DK03	泥盆系(河东)	—	—	105 301	II类
水地7	泥盆系(河西)	—	—	66 203	II类
CK10	泥盆系(河西)	—	—	75 224	II类
CK01	泥盆系(河东)	—	29	55 —	III类
CK02	泥盆系(河东)	—	25	— —	III类

II类含有大尺度周期与至多1个小尺度周期。其中河西石炭系监测孔、河西泥盆系监测孔、河东泥盆系监测孔DK03,670-92-1孔均属此类。该类主周期特征指示监测孔所处地下水系统相对封闭,含水层介质岩溶裂隙、管道不发育,地下水系统会“过滤”掉较小的周期波动,只显示出大尺度上的周期变化,主要接受地下水深部径流的补给。

III类缺失大尺度周期成分,具有1~2个小尺度周期,其中河东泥盆系的CK01,CK02均属此类,该类主周期特征指示监测孔所处的富水区主要参与深部地下水循环,因此循环时间远超过研究时段(1a)。

4.4 矿区充水水源识别

利用小波分析获取矿区3套岩溶裂隙含水层的地下水水位时间序列的多时间尺度特征如下,结合矿区实际补径排条件分析矿区充水水源。

(1) 二叠系岩溶裂隙含水层

二叠系监测孔水地1孔主周期特征分类与河东石炭系监测孔相同,更接近670-5+1-450与760-II-82孔,说明河东二叠系岩溶裂隙含水层与石炭系岩溶裂隙含水层存在水力联系,二叠系梁山组地层的隔水性不完整,河东二叠系岩溶裂隙水对河东矿区充水有一定贡献。

(2) 河西石炭系岩溶裂隙含水层

河东石炭系监测孔主周期特征均属于I类,说明含水层主要接受浅层快速补给;河西石炭系监测孔主周期特征均属于II类,且位于巷道深部的670-2-570孔仅含有大尺度的周期,这说明了监测孔监测层位越深,含水层中发育的岩溶裂隙、管道越少,地下水系统对地下水水位动态的“过滤”效应越明显。石炭系河东、河西地下水系统相对独立的状态决定了两者监测孔周期特征的差异,这也反映石炭系含水层河东与河西间水力联系微弱,表明河西石炭系岩溶含水系统的降雨补给量主要通过河西矿坑疏水排泄,河西石炭系岩溶裂隙水对河东矿区充水无贡献。

(3) 河西泥盆系岩溶裂隙含水层

河东泥盆系存在3类不同主周期特征的监测孔,依此重新划分河东泥盆系富水区的范围。泥盆系东北部富水区的监测孔为670-118-1、水7-14;中部富水区监测孔为670-92-1,670-94-280,DK03;南部富水区监测孔为CK01,CK02。

东北部富水区监测孔的主周期特征均属于I类,与河东石炭系监测孔主周期类型相同,说明石炭系岩溶裂隙水会顺着石门坎背斜核部发育的断层快速补给至泥盆系东北部一带;靠近矿区疏干中心的深部监测孔670-94-280主周期特征为I类,浅部监测孔670-92-1主周期特征为II类,说明泥盆系东北部与中部富水区之间的水力联系通道发育在含水层深部;矿区有且仅有CK01与CK02孔的主周期特征为III类,说明其多处南部富水区与泥盆系东北部、中部的富水区无水力联系,主要参与河东泥盆系深层水循环过程。以上认识说明河东泥盆系岩溶裂隙水虽然是矿区的直接充水水源,但是含水层内存在多个富水区,东北部与中部富水区对矿区充水有贡献,而南部富水区主要参与深层水循环过程,对矿区充水无贡献。

河西泥盆系监测孔主周期特征均为II类,与河东泥盆系监测孔DK03与670-92-1孔的主周期特征相同,说明河西泥盆系岩溶裂隙水会顺层补给至河东采区,判断河西泥盆系岩溶裂隙水对矿区充水有一定贡献。

5 结论

利用小波分析技术进行多时间尺度分析得到监测孔主周期特征分类与监测孔地下水动态类型特征的划分具有相似性,但主周期特征分类更加科学合理,这是因为小波分析技术的自适应特性可以排除“噪音”成分的干扰,提取水位序列中的有效信息,从细节和整体上全方位展示地下水水位时间序列的复

杂性。

(1) 矿区地下水位有 4 个主周期成分, 从小到大分别对应地球固体潮效应、潮汐作用以及降雨为驱动力的地下水循环过程。矿区地下水位最大主周期与降雨量主周期相近, 主周期特征与矿区排水量相似, 说明矿区地下水动态主导因素为降雨, 其次为矿区开采的影响。

(2) 河东二叠系地下水的主周期特征与石炭系地下水主周期特征均为 I 类, 说明 2 个含水层间存在一定的水力联系, 二叠系岩溶裂隙水对矿区充水存在一定贡献。

(3) 石炭系河西河东岩溶裂隙含水层地下水主周期特征分别为 I 类、II 类, 说明两者已发展成 2 个相对独立的地下水系统, 水力联系微弱。河东石炭系岩溶裂隙含水层的非均质性较弱, 地下水系统的开放程度好, 主要接受浅层快速补给; 河西石炭系岩溶裂隙含水层岩溶裂隙、管道不发育, 地下水系统处于相对封闭的状态, 地下水系统会“过滤”掉较小的周期波动, 地下水位只显示出大尺度上的周期变化。

(4) 河西泥盆系岩溶裂隙含水层与河东泥盆系岩溶裂隙含水层中部富水区的地下水位主周期特征均为 II 类, 说明河西泥盆系岩溶裂隙水会顺层补给至河东采区, 对矿区充水有一定贡献。

(5) 结合小波分析技术, 通过监测孔的主周期特征重新划分泥盆系岩溶裂隙含水层的 3 个富水区。河东北东部富水区接受来自河东石炭系含水层的浅层快速补给; 中部富水区与北东部富水区存在深层水力联系通道; 南部的富水区主要由河东泥盆系深层水补给, 在含水层中相对独立, 对矿区充水无贡献。石炭系浅层快速补给与河西泥盆系地下水径流的缓慢补给最终在矿区疏干中心处汇合, 通过矿坑疏干排泄。

参考文献:

- [1] 房佩贤. 专门水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [2] 武亚遵, 潘春芳, 林云, 等. 典型华北型煤矿区主要充水含水层水文地球化学特征及控制因素[J]. 地质科技情报, 2018, 37(5): 197-205.
- [3] Percival D, Walden A. 时间序列分析的小波方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] Zhou Y X. Sampling frequency for monitoring the actual state of groundwater systems[J]. Journal of Hydrology, 1996, 180(1/4): 301-318.
- [5] 万能, 李书涛, 曾明中. 滤波技术在武当—桐柏—大别成矿带地球化学异常提取中的应用[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 15-26.
- [6] 池顺都. 苏联处理化探数据方法介绍—改进的逐步扩展滑动平均法[J]. 地质科技情报, 1989, 8(1): 93-100.
- [7] Chui C K, Heil C. An introduction to wavelets[M]. San Diego: CA Academic Press, 1992.
- [8] Foufoula G E, Kumar P. Wavelets in geophysics[M]. San Diego: CA Academic Press, 1994.
- [9] Kumar P, Foufoula G E. Wavelet analysis for geophysical applications[J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(4): 385-412.
- [10] Labat D, Mangin A, Ababou R. Rainfall-runoff relations for karstic springs: Multifractal analyses[J]. Journal of Hydrology, 2002, 256(3): 176-195.
- [11] Labat D. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts[J]. Journal of Hydrology, 2005, 314(1): 275-288.
- [12] Labat D, Ronchail J, Guyot J L. Recent advances in wavelet analyses: Part 2. Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability[J]. Journal of Hydrology, 2005, 314(1): 289-311.
- [13] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [14] 衡彤, 王文圣, 丁晶. 降水量时间序列变化的小波特征[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 466-470.
- [15] 李贤彬, 丁晶, 李后强. 水文时间序列的子波分析法[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 144-149.
- [16] 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.
- [17] 祁晓凡, 蒋忠诚, 罗为群. 典型表层岩溶水系统降水量与泉流量的交叉小波分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 561-567.
- [18] Liang H. Wavelet analysis[M]. New York: Springer, 2014.
- [19] 孙劲松, 陈国雄, 刘天佑. 基于改进 Morlet 小波的 MP 算法在地震频谱分析中的应用[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 119-122.
- [20] Wang Z, Liu Z, Deng Z, et al. Phase extraction of non-stationary interference signal in frequency scanning interferometry using complex shifted Morlet wavelets[J]. Optics Communications, 2018, 420: 26-33.
- [21] Resnikoff H L, Jr R O W. Wavelet analysis[M]. New York: Springer, 1998.
- [22] 桑燕芳, 王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 295-300.
- [23] Gryllias K C, Antoniadis I A. Estimation of the instantaneous rotation speed using complex shifted Morlet wavelets[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 78-95.
- [24] Jeon J J, Eom I K. Wavelet-based color modification detection based on variance ratio[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 47: 47-58.
- [25] Cai R. Wavelet packet variance methods for multi-period analysis of signal[C]// International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems. IEEE, 2013: 202-206.
- [26] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [27] 蔡祖煌. 地震流体地质学概论[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
- [28] 陆明勇, 牛安福, 鲁德顺, 等. 地壳形变与地下水动态异常特征研究进展[J]. 地震工程学报, 2005, 27(1): 89-95.