



祁东煤矿构造控水特征和地下水运移规律

张培森 李复兴 付翔 田志兆 牛辉 许大强

引用本文:

张培森, 李复兴, 付翔, 等. 祁东煤矿构造控水特征和地下水运移规律[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 292–305.

ZHANG Peisen, LI Fuxing, FU Xiang. Characteristics of structural water control and groundwater migration in Qidong Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 292–305.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0996>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新疆伊犁矿区侏罗系含水介质特征与地下水赋存运移规律

Characteristics of water-bearing media in Jurassic strata and groundwater occurrence and migration law in Yili Mining Area, Xinjiang
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 140–151 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0335>

煤矿地下水库研究进展与展望

Research progress and prospect of underground mines in coal mines

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 216–225 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d4cd6c75-a76e-4733-a37a-43e84bc31dbd>

基于保障生态地下水位的露天煤矿主动保水技术研究

Research on active water conservation technology in open-pit coal mine based on ecological protection groundwater level

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 49–57 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.006>

任楼煤矿地下水化学组成及其控制因素分析

Analysis of chemical composition and control factors of groundwater in Renlou Coal Mine

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6c22ecb4-d7eb-43e1-819b-3d71abf26bfc>

煤矿覆岩裂隙地下水渗流特征的试验研究

Experimental study on characteristics of groundwater fracture in coalmine overlying rock

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 168–176 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1405>

榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理

Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 383–394 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1050>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张培森, 李复兴, 付翔, 等. 祁东煤矿构造控水特征和地下水运移规律[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 292–305.

ZHANG Peisen, LI Fuxing, FU Xiang, *et al.* Characteristics of structural water control and groundwater migration in Qidong Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 292–305.

祁东煤矿构造控水特征和地下水运移规律

张培森^{1,2}, 李复兴^{1,2}, 付翔³, 田志兆⁴, 牛辉^{1,2}, 许大强^{1,2}

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿业工程国家级实验教学示范中心, 山东 青岛 266590; 3. 安徽恒源煤电股份有限公司祁东煤矿, 安徽 宿州 234114; 4. 山东科技大学 数学与系统科学学院, 山东 青岛 266590)

摘要:以祁东煤矿为例, 通过研究矿井地下水运移规律及其所在区域的构造控水特征, 以期为煤矿水害的超前精准治理和区域防治提供借鉴参考。利用构造控水理论结合祁东煤矿及其所在矿区、煤田的地质构造背景, 对构造控水的逐级控制作用和构造控水作用方式进行研究, 结果如下: 祁东煤矿基岩地层形态整体受宿南向斜控制, 局部受魏庙断层等构造控制, 新生界地层形态亦受到构造的间接控制; 在宿南向斜控制下, 矿井内或矿井外南部风化后的二叠系煤系砂岩裂隙含水层、太灰、奥灰与四含角度不整合接触; 在魏庙断层控制下, 在矿井南部采区部分二叠系煤系砂岩裂隙含水层含水层再次露头, 与四含角度不整合接触, 不整合接触使得含水层间可产生水力联系。总结分析结果, 认为: ①地质构造通过对地层形态的控制, 对地下含水层水起到控制作用; ②地质构造通过控制含水层间的接触, 对含水层间的水力联系起到控制作用。为进一步验证含水层间的水力联系, 利用水位变化的对比分析和皮尔逊(Person)相关系数, 对放水试验期间南部采区四含、太灰和正常水位观测期间四含、太灰、奥灰的钻孔水位观测结果进行分析, 得出: ①南部采区放水试验期间, 四含(SQ10-14)与太灰(ST4)水位变化基本同步, 相关性极强; ②正常水位观测期间, 四含(SQ10)、太灰(ST4)、奥灰(SO2)两两之间水位变化具有极强的相关性, 同一含水层内不同观测孔间水位变化的相关性差异较大。证实: 受构造控制, 在矿井局部, 四含与基岩含水层角度不整合接触区域, 存在水力联系。利用地下水数值模拟软件 Groundwater Model System(GMS)结合参数反演 Parameter Estimation(PEST), 对四含水位分布和径流规律进行研究, 得出: 四含水位在-7~57 m, 南部水位比北部水位高, 在魏庙断层处, 水力梯度较大; 四含水径流集中在矿井西南部和中部, 西南部整体向北径流, 中部以东西向径流为主, 四含径流有绕过魏庙断层。

关键词:祁东煤矿; 地下水运动; 构造控水; 水力联系; 皮尔逊相关系数; 水害治理; 区域防治

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)02-0292-14

Characteristics of structural water control and groundwater migration in Qidong Coal Mine

ZHANG Peisen^{1,2}, LI Fuxing^{1,2}, FU Xiang³, TIAN Zhizhao⁴, NIU Hui^{1,2}, XU Daqiang^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Qidong Coal Mine, Anhui Hengyuan Coal & Electric Company Limited, Suzhou 234114, China; 4. College of Mathematics and Systems Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Taking Qidong Coal Mine as an example, this paper studies the law of groundwater migration and the characteristics of structural water control in the region, in order to provide reference for advanced precise control and regional prevention of coal mine water disasters. Based on the theory of structural water control and combined with the geological and structural background of Qidong Coal Mine

收稿日期: 2022-06-28

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0996

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604702); 国家自然科学基金资助项目(51379119); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME086)

作者简介: 张培森(1977—), 男, 山东曹县人, 教授, 博士。E-mail: peisen_sky@163.com

通讯作者: 李复兴(1998—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生。E-mail: lfxsdust@qq.com

and its mining area and coalfield, the step-by-step control effect of structural water control and the mode of structural water control are studied. The results are as follows: The bedrock formation morphology of Qidong Coal Mine is controlled by Sunan syncline as a whole, partly by Weimiao fault and other structures, and the Cenozoic formation morphology is also indirectly controlled by structures. Under the control of Sunan syncline, Permian coal-bearing sandstone fractured aquifer, Taihui, Ordovician limestone and aquifer IV angle unconformity contact after weathering inside or outside the mine; under the control of Weimiao fault, the aquifer of partial Permian coal-bearing sandstone fractured aquifer in the southern mining area of the mine outcrops again, and contacts with the aquifer IV angle unconformity, which makes the hydraulic connection between the aquifers. Based on the analysis results, it is considered that ① the geological structure controls the underground aquifer water by controlling the formation morphology; ② Geological structure controls the hydraulic connection between aquifers by controlling the contact between aquifers. In order to further verify the hydraulic connection between aquifers, using the comparative analysis of water level changes and Pearson correlation coefficient, the borehole water level observation results of aquifer IV, Taihui and aquifer IV, Taihui and Ordovician limestone in the southern mining area during the water discharge test and normal water level observation period were analyzed. The results show that: ① During the water discharge test in the southern mining area, the water level changes of aquifer IV (SQ10-14) and Taihui (ST4) are basically synchronous and highly correlated; ② During the normal water level observation, there is a strong correlation between the water level changes of aquifer IV (SQ10), Taihui (ST4) and Ordovician limestone (SO2), and the correlation between different observation holes in the same aquifer is quite different. It is confirmed that, controlled by the structure, there is hydraulic connection in the angular unconformity contact area between the fourth aquifer and the bedrock aquifer in the local area of the mine. The groundwater model system (GMS) and parameter estimation (PEST) are used to study the distribution and runoff law of four water levels. The results show that the four water levels are about 7—57m, the water level in the south is higher than that in the north, and the hydraulic gradient is larger at the Weimiao fault. The four water-bearing runoff is concentrated in the southwest and central part of the mine. The southwest runoff is northward as a whole, and the central part is mainly east-west runoff. The four water-bearing runoff bypasses the Weimiao fault.

Key words: Qidong Coal Mine; groundwater movement; structural water control; hydraulic connection; pearson correlation coefficient; water disaster control; regional prevention and control

0 引 言

我国的煤炭消费总量决定了煤炭在我国能源结构中的主体地位^[1],保障煤炭安全生产是我国端牢能源饭碗的关键。我国煤矿安全生产受水害等煤矿重大灾害^[2]威胁严重,水文地质条件的复杂性是其难以防治的重要原因^[3]。祁东煤矿所在煤田属华北隐伏型煤田,地下水系统复杂^[4-5],且受顶板含水层水害威胁严重^[5-6],曾发生多起突水水压架事故^[7-8]。研究矿井水文地质条件,明确地下水的运动规律可为煤矿水害的超前精准治理^[2]奠定基础。

对于地下水运移规律,蔡祖煌^[9]总结提出构造水文地质学,开始研究地质构造、构造活动性与地下水、气的相互关系,构造控水作用是其中一个方面,地质构造对地下水系统边界、补给带、径流带、排泄带、富水性等具有控制作用。刘东升^[10]提出狭义上的构造控水是研究构造的不同力学性质和不同部位的阻、导水能力;广义上的构造控水指构造对地下水运动的控制作用和规律(部分地表水也受到构造的控制)。佟凤健等^[11]阐述构造控水理论为:查明区域地质构造,分析构造成因,划分储水单元和弄清水文地质条件及边界补给条件,并指出在矿井防治水工作中合理运用构造控水理论可以取得安全经济的效果。

随着数值模拟技术的发展,以 GMS 为代表的地

下水数值模拟软件广泛应用于矿井地下水运移规律研究,前景良好。胡艳卉等^[12]利用 GMS 模拟研究不同放水方案下五沟煤矿 102 煤底板石炭系太灰岩溶裂隙水水位变化情况。宋业杰等^[13]利用 GMS 实现了对矿井涌水量的预测。苗世超等^[14]利用 GMS 对巍山煤矿煤系上伏含水层的流场进行了定量分析和预测。王婷婷^[15]利用 GMS 预测了煤炭开采对区域内地下水的影响。

与模拟研究相比,抽放水试验和水位观测,虽范围有限,成本昂贵,但可直接揭示地下水运移规律。彭涛等^[16]通过钻孔抽水试验,确定了曹家滩井田直罗组、延安组和风化基岩含水层间的水力联系关系。李超峰^[17]对高家堡井田洛河组含水层进行垂向分段,通过分析抽水试验数据,得到了洛河组含水层分段内顺层、垂向水力联系特征。王海军^[18]通过水文动态观测等,分析地下水补径排规律,提出矿井防治水建议。侯恩科等^[19]采用钻探、地下水位观测等方法,将含水层随回采表现出的动态变化过程分为了“快速下降”“回升恢复”和“稳定波动”3 个阶段。胡雪峰^[20]等运用 Aquifer test 软件等分析矿区抽水试验数据,得出了基岩与第四系含水层间的水力联系关系。

以上专家学者通过构造控水理论、数值模拟、水位观测及抽(放)水试验等对矿井地下水运移规律开

展了大量研究,做出了重要贡献,笔者借鉴并综合其研究方法,对祁东煤矿及其所在的宿南矿区和淮北煤田进行了大量文献和资料调研,概述其地质构造运动和构造特征,研究分析构造对矿井内地下水的控制作用;将皮尔逊(Person)相关系数用于分析放水试验和长观孔水位变化,研究含水层间的水力联系;借助 GMS 构建四含地下水径流数值模型,运用参数反演(PEST)等手段保证模拟准确度,研究四含水位分布和径流规律,为矿井水害防治提供参考借鉴。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

祁东煤矿属于淮北煤田宿南矿区,淮北煤田在大地构造上属于华北板块,位于华北板块东南缘^[21-22]。煤田内以宿北断裂为界,分为了南、北2个构造区,在南部构造区中,以南坪断裂和丰涡断裂为界,划分成3个矿区,南坪断裂以东为宿南矿区^[21,23],祁东煤矿在宿南矿区南部^[22],如图1所示。

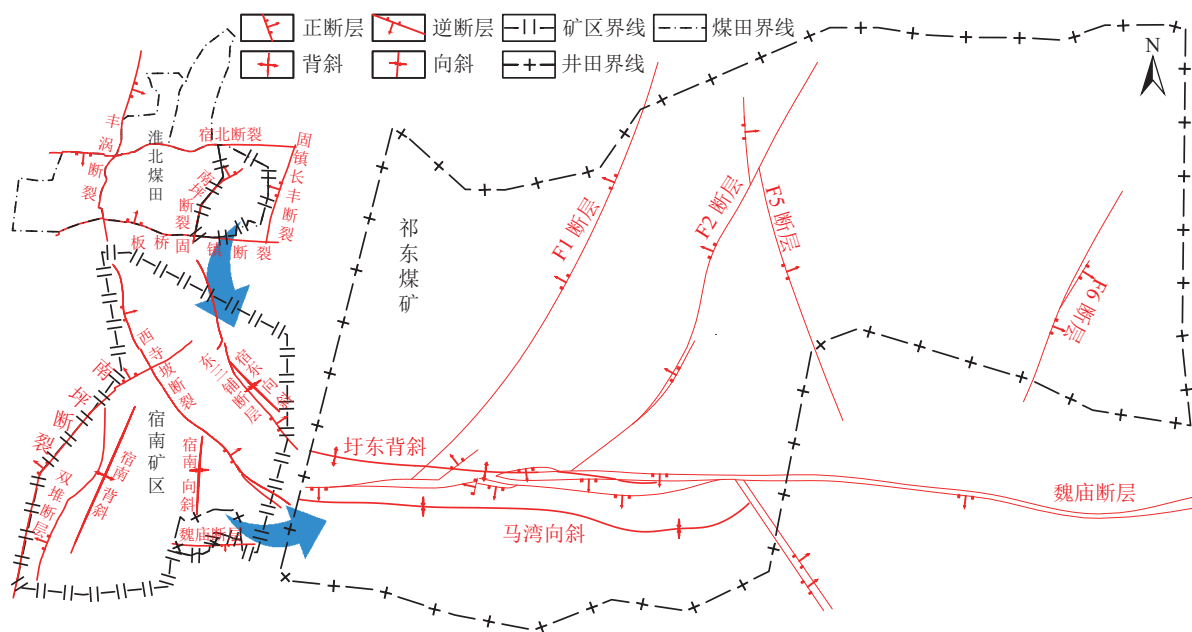


图1 祁东煤矿及其所在矿区、煤田构造示意

Fig.1 Structure of Qidong Coal Mine, its mining area and coalfield

二叠纪为淮北煤田的主要聚煤期,二叠纪末期聚煤期结束,淮北煤田地层产状基本呈西高东低的单斜形态。淮北煤田石炭-二叠系地层主要经历了三期构造运动,分别是:印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动^[21-22,24-26]。在印支运动时期,区域性主压应力为NS向,使煤田内挤压形成了EW向构造^[21,24-27]。燕山运动时期主压应力方向为NWW~SEE方向,NNE向构造叠加在近EW构造之上,形成复合构造^[21,25-27]。喜马拉雅运动时期总体上处于SN向伸展裂解的应力状态,区域拉张作用明显,大多数早期挤压应力作用下形成的EW向和NNE向断层,被改造转换为正断层^[22,24-28]。

1.2 矿井地层及构造特征

祁东煤矿地面钻孔揭露地层自上而下依次为:第四系、新近系、古近系、二叠系、石炭系、奥陶系,含煤地层为石炭-二叠系^[4,6]。主采煤层3₂煤、6₁煤、7₁煤、8₂煤、9煤,赋存于二叠系上统上石盒子组和

下统下石盒子组内^[6,24]。矿井地下含水层根据赋存介质特征可分为:新生界松散层孔隙含水层(一含、二含、三含、四含)、二叠系煤系砂岩裂隙含水层(煤系)、煤系下伏灰岩岩溶裂隙含水层(太灰、奥灰)^[4],其中由于三隔厚度大、隔水性良好,四含与上覆一含、二含、三含之间无直接水力联系^[4-6],如图2所示^[6]。

矿井地质构造复杂情况中等,地层整体东西向展布^[4],呈向北倾斜的单斜构造,倾角平缓,一般为10°~20°^[5-6];有较大的次级褶曲,马湾向斜、圩庄背斜,褶曲轴走向近EW^[26],与地层走向基本一致;存在岩浆岩侵入;断层较发育,走向以NE、NNE向为主,其中EW向魏庙断层将矿井分为了南北部分^[22,26],如图1所示。

2 构造控水特征

祁东煤矿地下水系统由多类含水层构成,受构造控制等因素影响,含水层间存在水力联系^[4-5]。

地层单位				柱状	含、隔水层或煤层	岩层厚度/m		岩性描述
界	系	统	组			最小值~最大值	均值	
新生界	第四系	全新统	Q ₄		一含	6.4~25.5	13.9	以粉砂为主，受大气降水补给
		更新统	Q ₁₋₃		一隔	4.75~22.85	13.2	以黏土、砂质黏土为主
					二含	3.7~34	17.5	以粉砂、黏土质砂为主
	新近系	上新统	N ₂		二隔	4.6~31.15	15.5	以黏土、砂质黏土为主，局部隔水性弱，二含、三含存在水力联系
					三含	21.4~4.8	50.1	以砂岩为主，富水性中等~强
		中新统	N ₁		三隔	49.3~164.75	99.9	以黏土、砂质黏土为主，厚度大，隔绝了四含与上方一、二、三含的水力联系
古生界	古近系	渐新统	E ₃		四含	0~59.1	28.5	谷口冲洪积扇内以砾石、砂砾、黏土砾石、砂、黏土质砂为主，夹多层薄层黏土或砂质黏土；残坡积-漫滩沉积以砂、黏土质砂、黏土砾石、砂砾为主
	二叠系	上统	上石盒子			>600		揭露厚度>600 m，岩性主要由粉砂岩、泥岩和煤层组成
					3 ₂ 煤	0~4.11	1.73	3煤(组)上、下砂岩(K3)裂隙含水层(段)
		下统	下石盒子		6 ₁ 煤	0~3.21	1	揭露厚度 205~245 m，平均235 m；岩性主要由泥岩、粉砂岩、砂岩和煤层组成
					7 ₁ 煤	0~4.31	1.71	4~6煤组隔水层段：主要由泥岩，粉砂岩组成，夹2~4层砂岩；裂隙不发育，岩性致密、隔水性良好
					8 ₂ 煤	0~3.83	1.65	7~9煤组含水层段：以中细砂岩为主，两极厚度11~65 m，平均厚度22 m。
						0~5.78	2.65	7、8、9主采煤层的直接顶板多为砂岩，裂隙比较发育
			山西组		9煤	302		铝质泥岩隔水层
					10煤			10煤组含水层段：10煤上为细中砂岩，性疏松，下为砂泥岩互层和细砂岩
					11煤			11煤下~1灰隔水层段：岩性主要以泥岩和粉砂岩为主，夹1~2层砂岩，岩性致密
	石炭系	上统	太原组					太原组石灰含水层段
	奥陶系	中统	本溪组					
		中下统	阁庄马家沟组					以铝质泥岩、粉砂岩为主，隔水性好 奥陶系石灰含水层段

图2 矿井水文地质柱状图

Fig.2 Hydrogeological histogram of mine

构造运动控制地层的升降,决定地层的沉积,同时产生断裂、褶皱等构造,继续控制着地层的赋存形态,对含水层中的地下水起到控制作用。

构造对地下水具有逐级控制关系。淮北煤田内以断裂构造为界划分水文地质单元,宿南矿区被宿北断裂、南坪断裂、板桥-固镇断裂、固镇-长丰断裂^[21-22]包围,属于南东单元。在宿南矿区,祁东煤矿位于宿南向斜的东南翼,构造位置处于宿南向斜南部仰起端^[21,24,26-28],地层的整体形态受到宿南向斜控制。在祁东煤矿内,魏庙断层分割矿井为南北两部分^[22,26],对矿井地层形态起到了控制作用,其余断层和褶皱亦对矿井局部地层形态起到控制作用。

宿南向斜走向近SN^[24],结合煤田地质演化史,推断宿南向斜形成于燕山构造运动期,在NEE的主压应力下挤压形成^[21-22]。宿南向斜控制二叠系、中上石炭统、下中奥陶统等地层,在向斜轴部为二叠系地层^[4,21],地层受风化作用出露后被松散层所覆盖,与上覆四含角度不整合接触^[4,5,22]。矿井主要含水层二叠系煤系砂岩裂隙含水层中的3煤上下砂岩裂隙含水层、7-9煤(组)上下砂岩裂隙含水层,在宿南向斜构造控制下走向近东西,倾向北,由北向南依次在

矿井范围内与四含角度不整合接触。太灰同样受到宿南向斜的控制,在矿井范围内与四含存在角度不整合接触,奥灰在矿井外南边与四含存在角度不整合接触。因此在构造控制下,四含与二叠系煤系砂岩裂隙含水层、太灰、奥灰均可产生水力联系^[21-22]。

魏庙断层走向EW,倾向南,形成于印支运动时期^[28-29],为正断层^[22,26]。南部采区位于魏庙断层上盘(下降盘)^[22,26],受魏庙断层控制,3煤上下砂岩裂隙含水层等在南部采区再次露头,与四含角度不整合接触。受马湾向斜^[24,26]控制,在向斜轴部3煤上下砂岩裂隙含水层埋深增加,轴两翼埋深较浅,风化剥蚀后,露头形态呈现环形,如图3所示。

基本无断裂构造发育至四含,但四含的赋存形态亦受到构造的间接控制。四含的沉积受古地理条件影响^[4]。四含所在的新生界地层,是在二叠系地层被风化后的基底上沉积形成的,构造通过对二叠系地层形态的控制,间接控制新生界地层的沉积形态,控制四含的赋存情况。在魏庙断层处,四含埋深发生变化,在断层以南四含埋藏增加^[22]。

煤层的产状亦受到宿南向斜等构造的控制,由南向北埋深逐渐增加。浅部煤层开采产生的导水裂

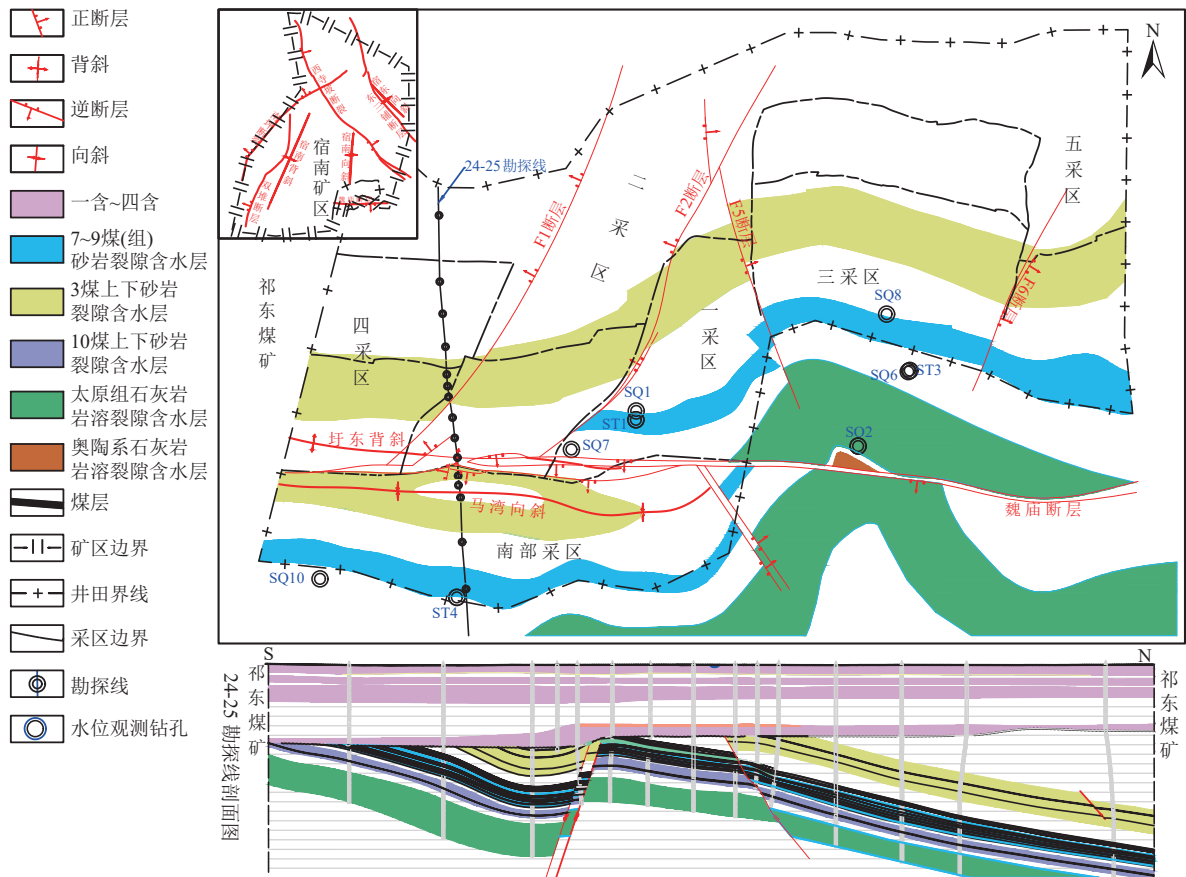


图3 构造与基岩含水层露头分布示意

Fig.3 Schematic of structure and outcrop distribution of bedrock aquifer

隙带将增加砂岩裂隙含水层的垂向导水能力,四含与二叠系煤系砂岩裂隙含水层的水力联系会因此增强^[4]。

3 含水层水位变化与水力联系

3.1 皮尔逊(Person)相关系数与水力联系

借鉴《水利水电钻孔抽水试验规程》中单孔抽(放)承压含水层情况下,计算渗透系数的裘布依公式(式1)^[30-31],可推得抽(放)水孔与观测孔间的水位降深的数学关系(式2)^[17,32]:

$$K = \frac{0.366Q}{MS} \lg \frac{R}{r} \quad (1)$$

$$S_R = S_r - \frac{0.366Q}{KM} \lg \frac{R}{r} \quad (2)$$

式中: K 为渗透系数, m/d; M 为含水层厚度, m; Q 为抽(放)水孔流量, m^3/d ; r 为抽(放)水孔孔径, m; R 为水位降落漏斗半径或抽(放)水至观测孔的距离, m; S_R 为观测孔水位降深, m; S_r 为抽(放)水孔水位降深, m; S 为抽(放)水孔水位降深或抽(放)水孔水位与观测孔水位降深之差, m。

当指定具体的抽(放)水孔与观测孔时(K 、 M 、 R 、 r 、 Q 固定不变), 观测孔水位降深与抽(放)水孔水位降深呈线性关系。当有多个观测孔时, 同一水位降落漏斗内, 各观测水位降深均与抽(放)水孔水位降深呈线性关系, 因此各观测孔间水位亦呈现线性关系。皮尔逊(Person)相关系数可以度量 2 个变量 X 与 Y 之间的线性相关性(式3)^[33-36]。单孔抽(放)水

试验中, 同一水位降落漏斗内, 忽略含水层厚度和渗透系数的差异, 各观测孔间水位值为线性函数关系, 皮尔逊(Person)相关系数将为 1。考虑到水文地质参数的空间差异性, 皮尔逊相关系数将接近于 1, 表明两孔之间水位变化存在联动, 存在水力联系。若在水位降落漏斗影响范围之外, 即使存在水力联系, 皮尔逊相关系数也不一定接近于 1。因此, 皮尔逊相关系数可作为判断水力联系的充分不必要条件。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中: P 为皮尔逊(Person)相关系数; X_i 、 Y_i 为变量 X 、 Y 中的第 i 个值; \bar{X} 、 \bar{Y} 为变量 X 和 Y 的平均值。

3.2 放水试验和正常水位观测期间水位变化规律分析

3.2.1 放水试验期间的水位变化规律分析

在矿井南部采区运输上山, 施工钻孔 QF2, 利用钻孔水头压力对四含水进行自流放水(流量恒定为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$), 同时由地面钻孔 SQ10、SQ11、SQ12、SQ13、SQ14 对四含水位进行监测, 钻孔 ST4 对太灰水位进行监测^[30], 钻孔布置如图 4 所示。

放水试验分为 3 个阶段: 2014-03-15—05-20 为预放水试验阶段, 2014-05-20—07-03 为水位恢复阶段, 2014-07-03—22 为正式放水试验阶段^[30]。放水试验期间的钻孔处的水位变化见表 1、图 5。

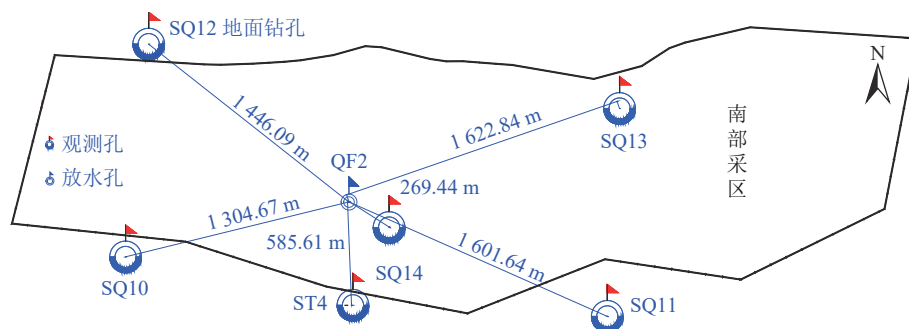


图 4 放水试验钻孔布置示意

Fig.4 The schematic of borehole layout in water discharge test

表 1 放水试验期间观测孔水位变化情况

Table 1 Water level changes of observation holes during discharge test

钻孔	预放水试验阶段			水位恢复阶段		正式放水试验阶段	
	2014-03-15水位/m	2014-05-20水位/m	水位变化/m	2014-07-03水位/m	水位变化/m	2014-07-22水位/m	水位变化/m
SQ10	-11.14	-14.63	-3.49	-12.12	2.51	-13.85	-1.73
SQ11	-24.33	-26.56	-2.23	-24.89	1.67	-26.06	-1.17
SQ12	-17.5	-19.67	-2.17	-18.09	1.58	-19.25	-1.16
SQ13		-30.17		-27.01	3.16	-28.97	-1.96
SQ14		-31.68		-25.44	6.24	-29.95	-4.51
ST4	-10.47	-12.63	-2.16	-11.16	1.47	-12.26	-1.1

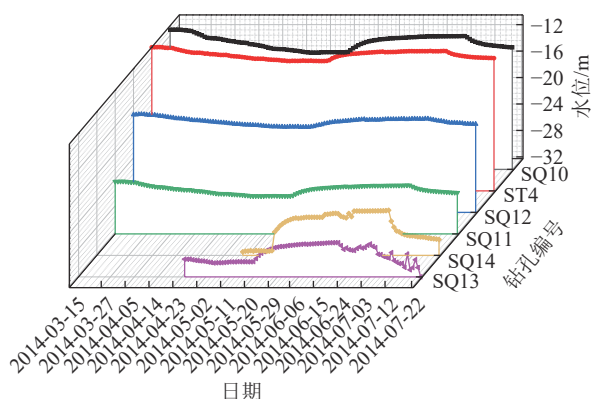


图5 放水试验期间观测孔水位变化
Fig.5 Water level change of observation hole during discharge test

在放水试验过程中,疏放四含水,而四含和太灰(ST4)水位均出现下降,且太灰(ST4)水位变化与四含基本同步变化,呈现出了一定的水力联系^[30]。比较SQ10、SQ14、ST4钻孔水位变化,在正式放水试验阶段,SQ14距离放水孔最近,降幅最大,下降速度最快;ST4相对于SQ10距离放水孔更近,但水位下降幅度小于SQ10,可见四含与太灰之间水力联系弱于四含内部之间的水力联系。

利用 Origin 2018 计算放水试验期间每两个钻孔间水位值的皮尔逊(Person)相关系数,结果见表2。

表2 放水试验期间观测孔水位变化的相关性
Table 2 Correlation of water level changes of observation holes during discharge test

孔号	孔水位变化相关性					
	SQ10	ST4	SQ12	SQ11	SQ14	SQ13
SQ10	1.00	1.00	0.98	1.00	0.92	0.84
ST4	1.00	1.00	0.97	1.00	0.96	0.87
SQ12	0.98	0.97	1.00	0.98	0.87	0.79
SQ11	1.00	1.00	0.98	1.00	0.93	0.84
SQ14	0.92	0.96	0.87	0.93	1.00	0.86
SQ13	0.84	0.87	0.79	0.84	0.86	1.00

在放水试验期间,各观测孔间的水位值均表现出极强的相关性(大于0.8)^[33],其中SQ10与SQ11的相关性最为显著,与ST4相关性最为显著的是SQ11,其在纵坐标上与ST4最为接近。观测孔间水位变化相关性的不同,体现了空间上水文地质参数的差异等。

3.2.2 正常水位观测期间的水位变化规律分析

在2018—2021年,祁东煤矿用于观测含水层水位的长观孔有:奥灰水位观测孔SO2;太灰水位观测

孔ST1、ST3、ST4;四含水位观测孔SQ1、SQ6、SQ7、SQ8、SQ10、SQ15(2020-11-20,部分长观孔在接近原位置处进行了更换,ST5取代ST1,ST6取代ST3,SQ15取代SQ1,此处仍沿用更换前的钻孔名称进行表示)。各观测孔的位置如图3所示。2018-01-05—2021-11-30,各观测孔所观测到的水位情况如图6所示。

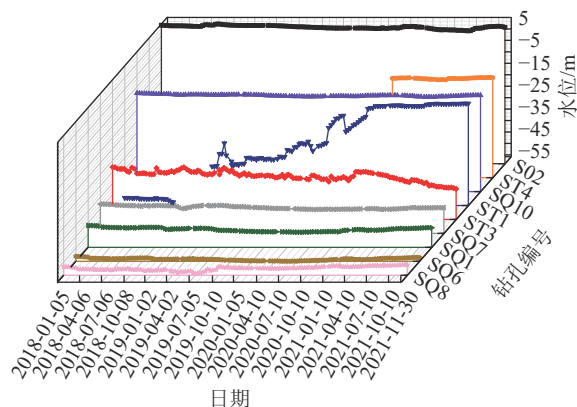


图6 正常水位观测期间观测孔水位变化
Fig.6 Water level change of observation hole during normal water level observation

奥灰水水位最高,水位变化较为平稳;太灰水水位波动性变化强烈且存在空间差异,在矿井南部的ST4孔处水位高于其他两处且水位变化平稳,ST1孔处水位整体呈上升变化,进入2021年后水位上升变缓,ST3孔处水位整体呈下降变化;四含各孔处的水位相差较大,存在空间差异,结合钻孔位置(图3)可知,从南向北,四含水位逐渐降低^[4]。

利用 Origin 2018 计算正常水位观测期间每两个钻孔间水位值的皮尔逊(Person)相关系数,结果见表3。基于观测孔间水位的相关性,分析同一含水层间和不同含水层间水位变化规律和成因:

1)SQ10、ST4、SO2孔分别观测四含、太灰、奥灰水位,其水位观测值两两之间均具有极强的相关性(大于0.8)^[33]。结合长观孔位置与太灰、奥灰露头的分布,ST4孔接近太灰露头,SO2孔接近奥灰露头,认为四含与太灰、奥灰在其露头区及附近存在一定的水力联系^[4,6]。

2)ST1孔与SQ1孔位置相近,但水位变化呈现负相关,可见四含与太灰之间因角度不整合接触等产生的水力联系未影响到全矿井范围或影响较弱。

3)同一含水层内,各长观孔水位的相关性亦有不同。太灰水观测孔,ST1、ST3、ST4之间未表现出极强的相关性,甚至弱于与部分四含孔和奥灰孔的

表 3 正常水位观测期间各钻孔水位间的相关性
Table 3 Correlation between long-term observation borehole water level of each aquifer

孔号	孔水位变化相关性								
	SO2	ST4	SQ10	ST1	ST3	SQ7	SQ1	SQ6	SQ8
SO2	1	0.81	0.84	-0.68	0.59	0.73	0.56	0.43	-0.54
ST4	0.81	1	0.90	0.39	-0.19	0.54	0.36	0.46	0.39
SQ10	0.84	0.90	1	-0.68	0.62	0.81	0.77	0.64	-0.36
ST1	-0.68	0.39	-0.68	1	-0.69	-0.82	-0.46	-0.25	0.62
ST3	0.59	-0.19	0.62	-0.69	1	0.56	0.29	0.13	-0.61
SQ7	0.73	0.54	0.81	-0.82	0.56	1	0.82	0.70	-0.46
SQ1	0.56	0.36	0.77	-0.46	0.29	0.82	1	0.96	-0.04
SQ6	0.43	0.46	0.64	-0.25	0.13	0.70	0.96	1	0.13
SQ8	-0.54	0.39	-0.36	0.62	-0.61	-0.46	-0.04	0.13	1

相关性,推测认为与岩溶裂隙发育较差和断层阻水作用有关,致使太灰内岩溶裂隙水连通性较差。四含水观测钻孔中, SQ1 与 SQ6 的相关性系数为 0.96, SQ6 与 SQ8 的相关性系数为 0.13。分析认为, SQ6 与 SQ8 之间可能存在阻水构造,阻断了水力联系;或是受采动影响, SQ6 在矿井外部, SQ8 在矿井三采区,该处 7-9 煤埋深较浅,四含受采动影响,致使水位小范围下降或回升较慢。

3.2.3 对比分析 ST4 与 SQ10 的水位变化

ST4 孔与 SQ10 孔在放水试验期间和正常水位观测期间的水位变化和相关性系数,如图 7 和图 8 所示。

图 7 和图 8 中的 ST4 孔与 SQ10 孔水位均存在同步变化,皮尔逊相关性系数均接近于 1,表明:

- 1)ST4 孔与 SQ10 孔处的含水层间的水力联系并非放水试验所致,在正常情况下依旧存在;
- 2)在放水试验期间,由于水力梯度增大,ST4 与 SQ10 间的水力联系会表现的更强,水位的同步变化会更加显著;
- 3)放水试验期间,太灰水位(ST4 孔处)下降和回升幅度弱于四含(SQ10 孔处),且太灰水位(ST4 孔处)高于四含水位(SQ10 孔处),进一步表明了太灰与四含的层间水力联系弱于四含层内的水力联系。

4 GMS 对四含水径流的模拟

我国大部分煤矿区水文地质勘查程度较低,长期观测钻孔(长观孔)数量不足,用于观测间接充水含水层水位的长观孔更少^[37]。仅依靠长观孔观测水位难以准确描述矿井的水位分布和分析地下水流场规律。运用 GMS,通过代入长观孔水位数据,设置水文地质参数和源汇项^[38],可以实现对地下水运动方

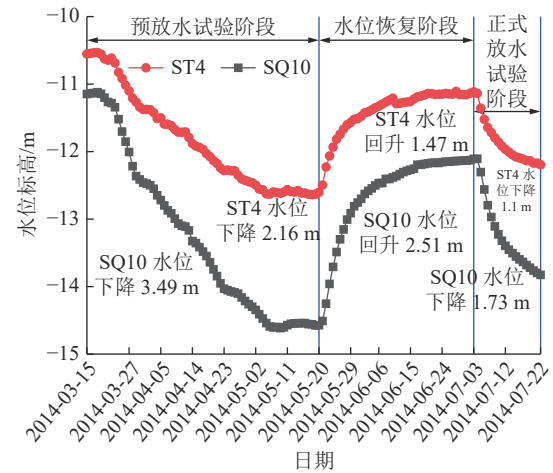


图 7 放水试验期间 ST4 孔与 SQ10 孔水位变化
Fig.7 Water level changes of ST4 and SQ10 boreholes during discharge test

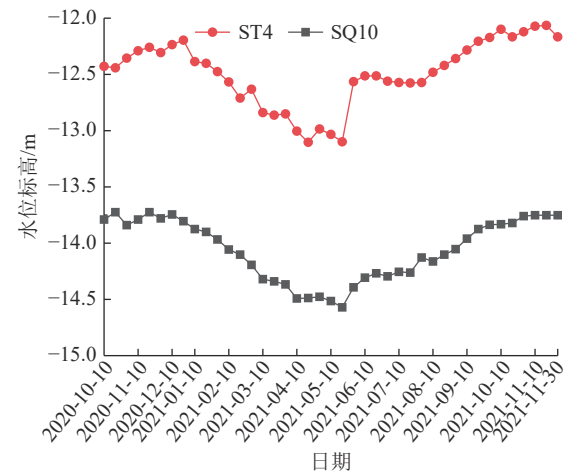


图 8 正常水位观测期间 ST4 孔与 SQ10 孔水位变化
Fig.8 Water level changes of ST4 and SQ10 boreholes during normal water level observation

程的近似求解,从而得到更为准确的地下水水位和流场分布。

在祁东煤矿,四含水害对矿井开采威胁程度最高^[5-6],自投产以来曾发生过 18 次突水压架事故^[7-8],且与多个含水层在局部存在水力联系。因此,对四含水水位分布和流场规律进行模拟研究。

四含埋藏浅,揭露钻孔多,利用 91 处地面钻孔数据和 5 处四含长观孔水位数据,来建立 3D Grid 模

型,在其中新建 MODFLOW Simulation 用以计算求解。水文地质参数和源汇项等资料的不足是影响模型准确度的一大难题^[39],GMS 中嵌装了 PEST 模块(参数反演),支持构建“反模型”用以实现对水文地质参数的求解^[38,40],对于源汇项,可以通过分析四含水水文地质特征、矿井的开采情况进行设置,其相关参数数值的大小亦可以通过 PEST 进行求得,模拟的主要流程,如图 9 所示。

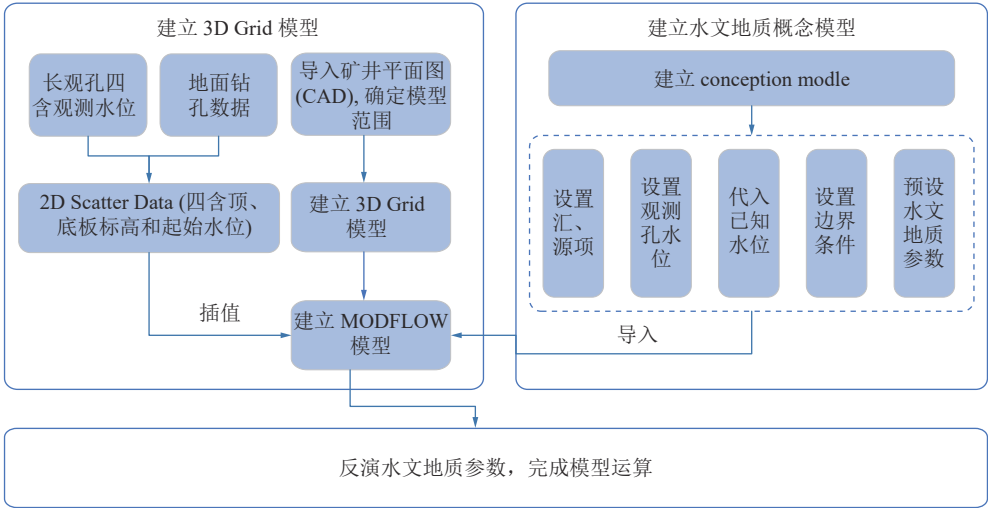


图 9 建立地下水数值模型的主要步骤流程

Fig.9 Flow of main steps for establishing groundwater numerical model

4.1 初始水位和模拟期

由图 7 可知,2018 年初至 2021 年底四含水位变化平缓。综合考虑模型求解效率和参数反演精度,取 2020-01-05—2021-11-30 为模拟期,根据长观孔数据的记录间隔,分为了 68 个应力期^[39],其中第一个应力期设置为稳态^[41]。因此,2020-01-05 的水位为模型的初始水水位,四含初始水位分布如图 10 所示。

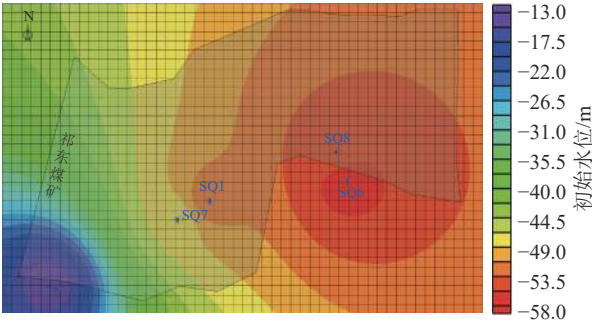


图 10 四含初始水位分布

Fig.10 Aquifer IV Initial water level distribution

4.2 建立网格模型

将祁东煤矿平面图(CAD)导入 GMS,确定 X: 39 504 500 ~ 39 514 500, Y: 3 695 500 ~ 3 702 000 为研

究范围,建立 50×33×1 的三维网格模型。在三维网格模型中新建 MODFLOW 数值运算模型。统计祁东煤矿及周边 91 处地面钻孔数据,建立包含四含顶、底界面标高信息的 2D Scatter Point^[42]并插值到 MODFLOW 模型中,如图 11 所示,模型已具备了四含的几何形态。

4.3 水文地质模型

基于概念模型建模使得 GMS 具备了强大的前处理功能^[12,38]。可在 GMS 中建立水文地质概念模型(Conception model)^[38],创建点、节点、弧线、区域,来表示井、边界、补给区、河流等,或用于对水文地质参数的分区^[39]。对于图 11 中建立的 MODFLOW 模型,在求解前还需要代入源汇项、水文地质参数、边界条件和观测水位与已知水位,这些可通过水文地质概念模型建立,然后导入到 MODFLOW 模型中,分述如下:

1)边界条件:四含上方为隔水岩层,下方局部透水^[4],在此均认为是完全不透水的边界,四含的平面范围为人工划分的包含祁东煤矿的矩形边界,边界的流量未知,水头不固定,边界类型由系统默认指定(默认为 NO Flow Arc)^[14,41,43]。

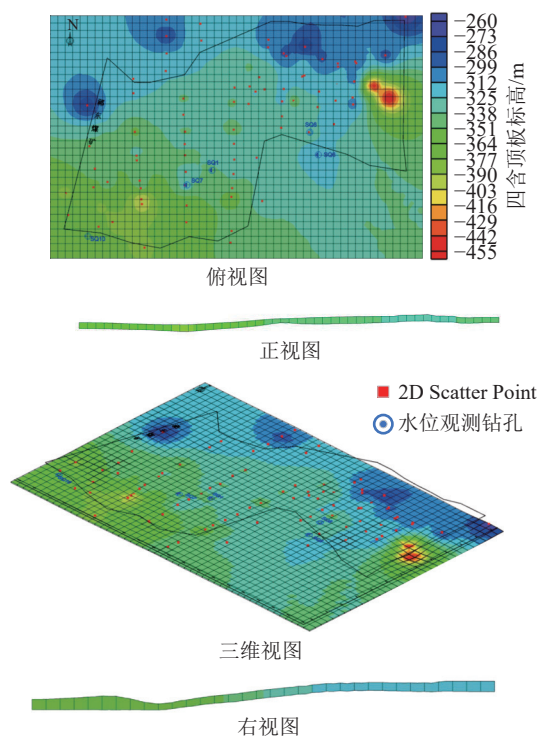


图 11 四含的三维地质模型

Fig.11 3D geological model of aquifer IV

2) 观测井和已知水位: 在长观孔所在处创建点, 设置为 Trans.Head, 代入水位数据, 作为参数反演所需的观测水位。新建层, 在长观孔所在处重新创建点, 设置为 Specific Head(CHD), 代入长观孔水位数据, 作为已知水位。

3) 水文地质参数: 模拟所需的水文地质参数有渗透系数和储水率。水文地质钻孔得到的渗透系数等参数有限, 难以准确表示矿井各处的情况。因此, 采用参数反演来获得水文地质参数, 其中渗透系数用水平渗透系数(Horizontal K)和横观各向异性系数(Horizontal anisotropic)来表示。

4) 源汇项: 四含无垂向补给, 存在一定的垂向排泄^[4-6], 设置抽水井来表示四含的排泄^[43], 将抽水速率(Flow rate)加入到参数反演中。由图 10 可知, 四含在矿井西南部水位高, 东北部水位低, 存在水力梯度, 四含水存在层内径流。因此, 在模型西南部定义了补给区, 作为径流上游, 将补给速率(Recharge rate)加入到参数反演中。其他的补给和排泄将从已知水位(Specific Head(CHD))处流入和流出模型。为便于后续研究祁东煤矿四含的补径排情况, 将祁东煤矿所在区域分配 ID 为 1, 其余区域 ID 为 2, 记作 ZONE 1 和 ZONE 2。模型的源汇项设置如图 12 所示。

4.4 数学模型

地下水数值模拟是利用 GMS 实现有限差分法

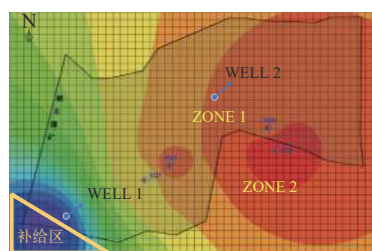


图 12 模型源汇项设置示意

Fig.12 Model source and sink item setting

对地下水运动方程的近似求解^[40]。四含为松散岩类孔隙含水层^[4], 描述四含水的流动可应用三维非均质各向异性非稳定流^[12,14-15,41]数学模型(式(4)~式(5)), 结合对水文地质参数的分析, 忽略 Z 方向的渗透系数, 边界条件为第二类边界, 流量为 0, 源汇项为补给区的补给、抽水井的排泄及已知水位钻孔处的流入和流出。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W = S_s \quad (4)$$

$$q_n = 0 \quad (x, y, z) \in S_2 \quad (5)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 分别为 x 、 y 方向上的渗透系数, m/d ; h 为水柱高度, m ; W 为源、汇项; S_s 为岩层的储水率, $1/m$; S_2 为第二类边界; q_n 为边界的法向流量, m^3/s 。

4.5 参数反演运算

为提高模拟结果准确度, 通过构建“反模型”, 进行参数反演来对模型运算求解。模型运算求解的大致流程如图 13 所示。

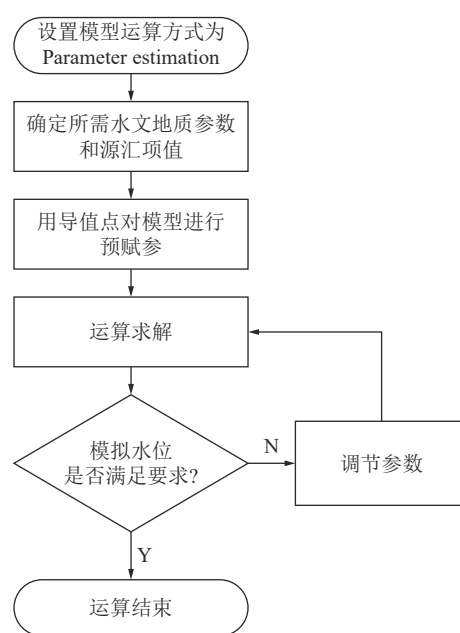


图 13 参数反演运算流程

Fig.13 Flow of parameter inversion

其中需要求解的水文地质参数和源汇项值有：水平渗透系数、横观各向异性系数、储水率、抽水井的抽水速率(Flow rate)和补给区的补给速率(Recharge rate)。考虑到模型的平面各向异性和不均匀性,通过 10×10 个导值点(Pilot points)对模型中的水

文地质参数进行插值赋参。

4.6 模拟结果分析

在长观孔处模拟水位与观测水位呈现同步变化,整个模拟期内最大水位差不超过 1 m,模拟结果准确可靠,如图 14 所示。

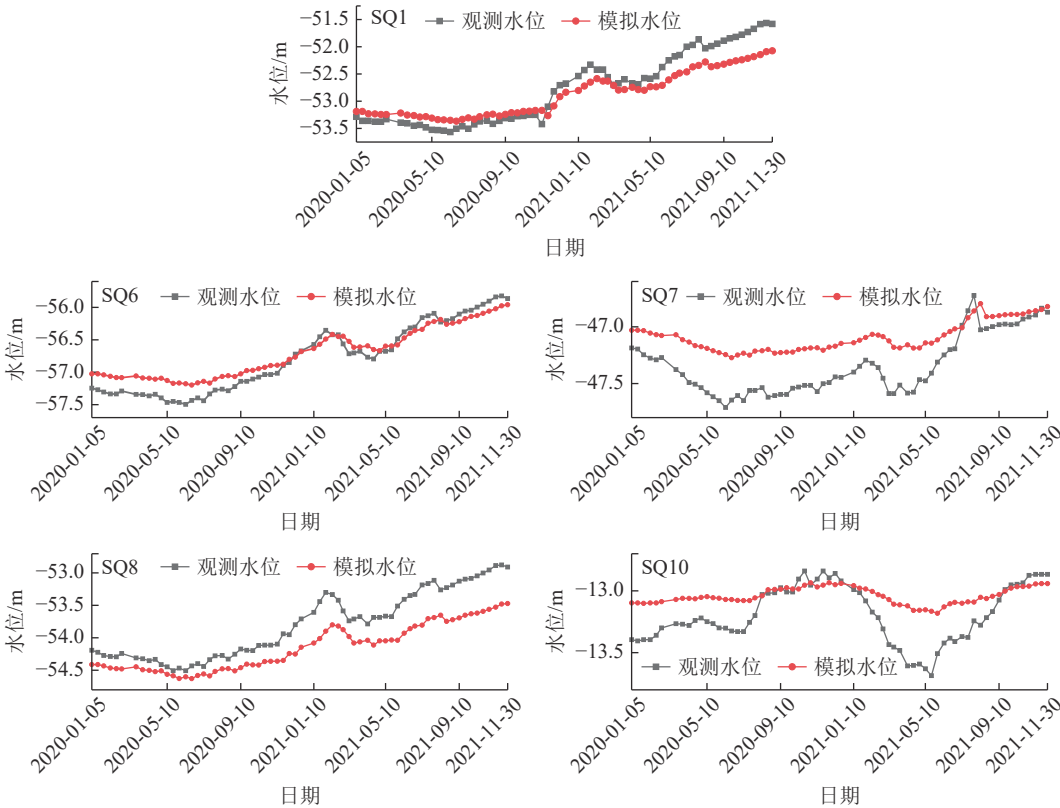


图 14 四含观测水位与模拟水位
Fig.14 aquifer IV Observational and simulated water levels

由于四含水的运动为非稳定流,模型设置为瞬态,故以模拟期最后一天为例,对地下水水位和运动情况进行分析。2021 年 11 月 30 日,祁东煤矿四含水位在-7~-57 m,符合矿区整体的水位分布趋势^[4],水位从南向北逐渐降低,南北向的变化比东西向变化明显。矿井南部 SQ7 孔处,水位变化较大,邻近魏庙断层,如图 15 所示。

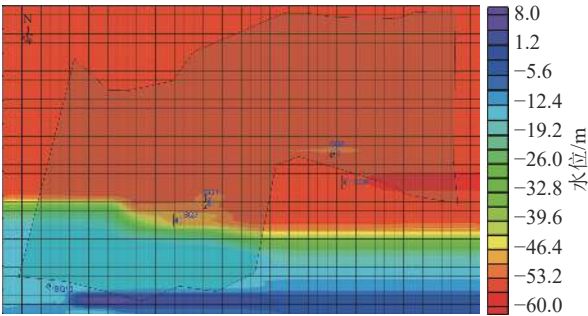


图 15 四含模拟水位分布

Fig.15 Water level distribution map of aquifer IV simulation

四含内地下水的径流情况如图 16 所示:

- 1)地下水运动速度在矿井的中部和西南部较快,其余区域较为缓慢;
- 2)径流趋势为:西南部补给区的四含水沿着模型西部边界向北运动,大致绕过魏庙断层所在位置

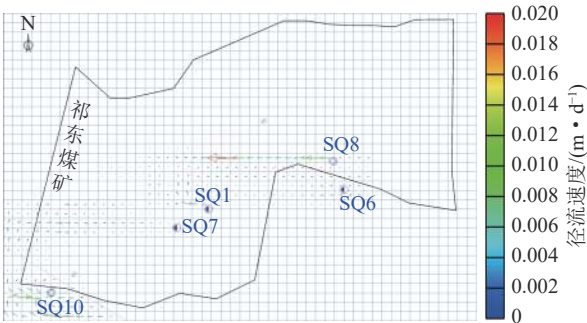


图 16 四含内地下水径流速度向量

Fig.16 Velocity vector diagram of groundwater runoff in aquifer IV

后转向东,朝 SQ7、SQ1 孔位置运动;矿井中部 SQ7、SQ1 孔处,接收西部四含水径流补给,同时向北、向东径流;在 SQ8 孔处四含水向西径流。

四含的补径排情况见表 4,总补给高于总排泄 $3.549\text{ m}^3/\text{d}$,与四含水位逐渐上升的变化趋势一致,推测认为与矿井开采深度增加,采动对四含的影响减小,矿井防治水工作取得积极成效等有关。所设抽水井的排泄速率为 $0.353\text{ m}^3/\text{d}$,表明采动对四含的影响较小,四含向矿坑的排泄微弱。

表 4 祁东煤矿四含的补、径、排情况

Table 4 Supplement, diameter and drainage of aquifer IV in Qidong Coal Mine

补给项	数值/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	排泄项	数值/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)
已知水位孔	35.756 528 88	已知水位孔	2.191 012 621
抽水井	0	抽水井	0.353 078
补给区	24.970 328 33	补给区	0
岩层储水	95.917 816 16	岩层放水	128.375 061
径流补给	16.771 612 54	径流排泄	38.947 971 01
总补给	173.416 285 9	总排泄	169.867 122 7

5 结 论

1)地质构造通过控制地层形态,对地下水的赋存和水力联系起到控制作用。区域性构造对地层的控制占主要地位,祁东煤矿地层整体受宿南向斜控制,魏庙断层对地层的控制作用次之。在宿南向斜控制下矿井二叠系、奥陶系地层向北倾斜,基岩被风化剥蚀后,基岩含水层露头与四含角度不整合接触,使得四含与煤系砂岩裂隙含水层、太灰、奥灰可产生水力联系。在魏庙断层控制下,矿井南部采区地层下降,使得在 3 煤上下砂岩裂隙含水层在南部采区再次露头,并与四含角度不整合接触。

2)分析井下放水试验,疏放四含水时,太灰水出现同步下降,且与四含水位变化具有极强的相关性,表明四含与太灰间存在一定的水力联系。分析近四年的含水层水位变化,研究各钻孔水位变化的相关性,得知太灰、奥灰因与四含角度不整合接触,在局部存在一定的水力联系,或是受断层阻水作用、开采扰动等因素影响,同一含水层内不同孔间观测水位相关性不同,含水层内部水力联系存在差异。

3)我国煤矿的含水层水位长期观测钻孔普遍较少,难以准确描述含水层水位分布情况,利用 GMS 构建地下水运动数值模型,通过 PEST 反演水文地质参数,解决了水位观测数据及水文地质参数资料不

足的问题,得到更准确的四含水位分布和径流趋势。

4)通过模拟得知,祁东煤矿四含水位呈现南高北低的分布,水位在 $-7\sim-57\text{ m}$;四含内地下水径流主要发生在矿井西南部和中部,西南部向北径流,中部以东西向径流为主。四含内基本无构造发育,但受到魏庙断层等构造的间接控制。在矿井南部魏庙断层处,水位变化较大,且四含径流有绕过魏庙断层。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[N]. 中国信息报, 2022-03-01(001).
- [2] 国务院安全生产委员会. 国务院安全生产委员会关于印发《“十四五”国家安全生产规划》的通知[EB/OL]. 中华人民共和国应急部. (2021-04-12) [2022-07-19]. https://www.mem.gov.cn/gk/zfxgkpt/fdzdgknr/202204/t20220412_411518.shtml.
- [3] 张培森,李复兴,朱慧聪,等. 2008—2020年煤矿事故统计分析及防范对策[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(1): 128–134.
ZHANG Peisen, LI Fuxing, ZHU Huicong, *et al.* Statistical analysis and prevention countermeasures of coal mine accidents from 2008 to 2020[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(1): 128–134.
- [4] 曾文. 宿南矿区地下水系统演化规律模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
ZENG Wen. Simulation study on the evolution of groundwater system in Sunan mining area [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [5] 冯晓青. 华北隐伏型煤田松散承压含水层下开采顶板突水预测与防治技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
FENG Xiaoqing. Water inrush prediction and prevention technology of roof mining under loose confined aquifer in North China concealed coalfield [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [6] 张开弦. 祁东煤矿四含富水性分区及其下开采覆岩变形破坏规律研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
ZHANG Kaixian. Study on the deformation and failure law of mining rock under the four water-rich zones of Qidong Coal Mine [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [7] 徐刚,黄志增,范志忠,等. 工作面顶板灾害类型、监测与防治技术体系[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 1–11.
XU Gang, HUANG Zhizeng, FAN Zhizhong, *et al.* Types, monitoring and prevention technology system of roof disasters in mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 1–11.
- [8] 李全生,李晓斌,许家林,等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 28–47.
LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, *et al.* Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 28–47.
- [9] 蔡祖煌. 构造水文地质学[J]. 地球科学进展, 1991(3): 96–97.
CAI Zuhuang. Tectonic hydrology geology[J]. Geoscience progress

- gress, 1991(3): 96–97.
- [10] 刘东升. 构造控水的理论探讨[J]. 山东煤炭科技, 1998(4): 43–45.
LIU Dongsheng. Theoretical discussion on structural water control[J]. Shandong Coal Science and Technology, 1998(4): 43–45.
- [11] 佟凤健, 孟新华, 刘生中. 构造控水理论在煤矿生产中的指导作用[J]. 煤矿安全, 1999(5): 11–12.
TONG Fengjian, MENG Xinhua, LIU Shengzhong. Structural water control theory in coal mine production guidance[J]. Coal mine safety, 1999(5): 11–12.
- [12] 胡艳卉, 张文泉, 任仰辉, 等. 安徽五沟煤矿1016面底板突水GMS模拟模型研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(4): 35–39.
HU Yanhui, ZHANG Wenquan, REN Yanghui, *et al.* Study on GMS simulation model of floor waterinrush in No. 1016 Coalface of Anhui Wugou Mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 28(4): 35–39.
- [13] 宋业杰. GMS在矿井涌水量预测中的应用[J]. 煤矿开采, 2011, 16(1): 104–107.
SONG Yejie. Applying of GMS in forecasting mine groundwater inflow[J]. Coalmining Technology, 2011, 16(1): 104–107.
- [14] 苗世超, 刘伟. 基于GMS的巍山煤矿煤系上伏含水层地下水数值模拟[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7): 133–136.
MIAO Shichao, LIU Wei. Groundwater numerical simulation on overlying aquifer in coal measure in weishan mine based on GMS model[J]. Coal Technology, 2015, 34(7): 133–136.
- [15] 王婷婷. 基于GMS的某矿区地下水数值模拟研究[D]. 太原: 中国辐射防护研究院, 2018.
WANG Tingting. Numerical simulation of groundwater in a mining area based on GMS [D]. Taiyuan: China Institute of Radiation Protection, 2018.
- [16] 彭涛, 龙良良, 刘凯祥, 等. 基于煤层顶板抽水试验的含水层水力联系研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(3): 66–69, 73.
PENG Tao, LONG Liangliang, LIU Kaixiang, *et al.* Study on aquifer hydraulic connection based on pumping test of coal seam roof[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(3): 66–69, 73.
- [17] 李超峰. 采煤工作面顶板巨厚层状含水层涌水量预测研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
- [18] 王海军. 柳江盆地岩浆活动对主力煤田水文地质特征的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1670–1684.
WANG Haijun. Influence of magmatic activities in Liujiang Basin on hydrogeological characteristics of main coalfields[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1670–1684.
- [19] 侯恩科, 谢晓深, 王双明, 等. 中深埋厚煤层开采地下水动态变化规律及形成机制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1404–1416.
HOU Enke, XIE Xiaoshen, WANG Shuangming, *et al.* Dynamic law and mechanism of groundwater induced by me-dium-deep buried and thick coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1404–1416.
- [20] 胡雪峰, 左文喆, 康振兴, 等. 基于多孔抽水试验的水文地质条件分析: 以马城铁矿为例[J]. 地下水, 2022, 44(1): 87–90, 99.
- [21] 方婷. 安徽淮北煤田构造特征和形成机制[D]. 南京: 南京大学, 2017.
FANG Ting. The structural characteristics and formation mechanism of Huaibei coalfield in Anhui[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [22] 彭涛. 淮北煤田断裂构造系统及其形成演化机理[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
PENG Tao. Huaibei coalfield fault structure system and its formation and evolution mechanism [D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2015.
- [23] 陈陆望, 王迎新, 欧庆华, 等. 考虑覆岩结构影响的近松散层开采导水裂隙带发育高度预测模型研究: 以淮北煤田为例[J]. 工程地质学报, 29(4): 1048–1056.
CHEN Luwang, WANG Yingxin, OU Qinghua, *et al.* Prediction model for development height of water-conducting fractured zone during mining near loose stratum considering influence of overburden structure: a case study of Huaibei coalfield[J]. Journal of Engineering Geology, 29(4): 1048–1056.
- [24] 李恒乐, 秦勇, 张玉贵, 等. 淮北矿区祁东井田构造对瓦斯赋存的控制作用[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 42–46, 50.
LI Hengle, QIN Yong, ZHANG Yugui, *et al.* Structure control on gas deposition in qidong minefield of Huaibei Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 42–46, 50.
- [25] 马杰, 桂和荣, 孙林华, 等. 淮北煤田地应力场分布特征及其构造演化研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(10): 97–99, 103.
MA Jie, GUI Herong, SUN Linhua. Distribution characteristics of in-situ stress field and tectonic evolution in Huaibei Coalfield[J]. Coal Engineering, 2015, 47(10): 97–99, 103.
- [26] 李佩. 淮北祁东煤矿构造煤中微量元素迁移聚集的构造控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
LI Pei. Tectonic control on the migration and aggregation of trace elements in tectonically deformed coal in Qidong Coalmine, Huaibei Coalfield[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [27] 覃木广, 张子敏, 张玉贵, 等. 祁东煤矿构造演化对瓦斯分布的控制[C]//瓦斯地质与瓦斯防治进展, 北京: 煤炭工业出版社, 2007. 94–99.
TAN Muguang, ZHANG Zhimin, ZHANG Yugui, *et al.* Control of gas distribution by tectonic evolution in Qidong Coal Mine[C]//Gas geology and gas prevention progress, Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007. 94–99.
- [28] 姜波, 秦勇, 琚宜文, 等. 煤层气成藏的构造应力场研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005(5): 564–569.
JIANG Bo, QIN Yong, JU Yiwen, *et al.* Research on tectonic stress field of generate and reservoir of coalbed methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005(5): 564–569.
- [29] 赫少攀, 张玉贵, 李恒乐, 等. 祁东井田构造变形系数与瓦斯地质单元划分[J]. 煤矿安全, 2013, 44(11): 172–174.
HE Shaopan, ZHANG Yugui, LI Hengle, *et al.* Structural deformation coefficient and gas geological unit division in qidong coalfield[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(11): 172–174.
- [30] 赵迎春, 洪荒. 祁东煤矿南部采区放水试验[J]. 能源技术与

- 管理, 2015, 40(4): 139-142.
- ZHAO Yingchun, HONG Huang. Drainage test in southern mining area of Qidong Coal Mine[J]. *Energy Technology and Management*, 2015, 40(4): 139-142.
- [31] SL 320-2005, 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S].
- [32] 李超峰. 水力联系系数法定量评价含水层之间水力联系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1801-1810.
- LI Chaofeng. Hydraulic connection coefficient and quantitative evaluation of hydraulic connection between aquifers[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1801-1810.
- [33] 肖勇, 赵云, 涂治东, 等. 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 37-43.
- XIAO Yong, ZHAO Yun, TU Zhidong, *et al.* Topology checking method for low voltage distribution network based on improved Pearson correlation coefficient[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(11): 37-43.
- [34] 曹伟伟. 采灌作用下地层变形与含水层水位变化的相关性分析及沉降预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- CAO Weiwei. Correlation analysis of stratum deformation and water level variation of aquifers and land subsidence prediction concerning groundwater exploitation and recharge[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [35] 张家权. 辽河汛期水质水量相关性分析[J]. 陕西水利, 2021(10): 107-109.
- ZHANG Jiaquan. Correlation analysis of water quality and quantity of Liaohe River in flood season[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2021(10): 107-109.
- [36] 余亚飞, 温忠辉, 商金华, 等. 基于泉群流量与降水量相关性的明水泉域岩溶水强径流带识别[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 56-60.
- YU Yafei, WEN Zhonghui, SHANG Jinhua, *et al.* Identification of karst water strong runoff zone in Mingshui spring area based on correlation between spring discharge and precipitation[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 56-60.
- [37] 武强, 许珂, 张维. 再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1341-1347.
- WU Qiang, XU Ke, ZHANG Wei. Further research on “three maps-two predictions” method for prediction on coal seam roof water bursting risk[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1341-1347.
- [38] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质, 2003(5): 53-55.
- ZHU Xiaobin. Groundwater simulation system (GMS) software[J]. *Hydrogeological engineering geology*, 2003(5): 53-55.
- [39] 杜守营, 鹿帅, 杜尚海. 基于GMS的地下水流数值模拟及参数敏感性分析[J]. 中国农村水利水电, 2013(8): 77-80.
- DU Shouying, LU Shuai, DU Shanghai. Numerical simulation of groundwater and sensitivity analysis of parameters based on GMS[J]. *Rural Water Conservancy and Hydropower in China*, 2013(8): 77-80.
- [40] 郭晓东, 田辉, 张梅桂, 等. 我国地下水数值模拟软件应用进展[J]. 地下水, 2010, 32(4): 5-7.
- GUO Xiaodong, TIAN Hui, ZHANG Meigui, *et al.* Application progress of groundwater numerical simulation software in China[J]. *Groundwater*, 2010, 32(4): 5-7.
- [41] 全晓霞, 宁立波, 董少刚. 运用GMS模型对某垃圾场地下水污染的研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(7): 197-201.
- TONG Xiaoxia, NING Libo, DONG Shaogang. GMS model for assessment and prediction of groundwater pollution of a garbage dumping site in Luoyang[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(7): 197-201.
- [42] 陈正华, 周斌, 邓智. 基于GMS的武山矿区水文地质结构可视化模型[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(4): 125-128.
- CHEN Zhenghua, ZHOU Bin, DENG Zhi. Hydrogeological structure visualization model of Wushan Mine based on GMS[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2012, 19(4): 125-128.
- [43] 赵研, 郭嘉琳, 施洋, 等. 基于GMS的抚顺西露天矿地下水涌水量模拟[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 75-79, 129.
- ZHAO Yan, GUO Jialin, SHI Yang, *et al.* A groundwater inflow prediction method for Fushun West Open-pit Mine based on GMS[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 75-79, 129.