

基于GMS地下水数值模拟方法在 煤层底板灰岩突水评价中的应用

许光泉, 李康佳, 梁森, 陈龙

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年11月24日; 录用日期: 2025年12月24日; 发布日期: 2026年1月7日

摘要

以淮南煤田某矿的1煤层底板岩溶地下水为对象, 通过水文地质试验了解水质、水位等变化, 确定了断层导隔水性质和水文地质单元。采用GMS软件构建了水文地质模型和数值模拟模型, 并开展了煤层底板突水性的安全性评价, 结果表明: F₉₂和F₁₀₄断层带将矿井分为三个相对独立的水文地质单元, 中央采区C₃I组灰岩地下水, 其补给来源于浅部露头区, 从浅部向深部地下水富水性逐渐减弱; 含水层具有非均质性和各向异性, 可划分为6个水文地质块段。结合《煤矿安全防治水细则》的底板突水系数安全阈值要求, 当采区煤层底板灰岩含水层的疏放控制在82 m³/h时, 55天后其突水系数降至0.06 MPa/m以下, 能够满足煤层安全开采的相关要求。

关键词

岩溶水害, 水文地质试验, 数值模拟, 安全性评价

Application of GMS-Based Groundwater Numerical Simulation Method in Water Inrush Evaluation of Coal Seam Floor from Limestone Aquifer

Guangquan Xu, Kangjia Li, Miao Liang, Long Chen

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: November 24, 2025; accepted: December 24, 2025; published: January 7, 2026

Abstract

Taking the karst groundwater from karst aquifer under No.1 coal seam of some coal mine in the

文章引用: 许光泉, 李康佳, 梁森, 陈龙. 基于 GMS 地下水数值模拟方法在煤层底板灰岩突水评价中的应用[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 66-77. DOI: 10.12677/me.2026.141008

Huainan Coalfield as the research object, hydrogeological tests are conducted to understand variations in water quality and water level, and determine the water-conducting and water-resisting properties of the faults and the hydrogeological units. The hydrogeological model and a numerical simulation model have been built. GMS software, and a safety assessment of the water inrush risk from the karst aquifer under the coal seam floor was done. The results show that: Fault zones F₉₂ and F₁₀₄ have divided the mine into three relatively independent hydrogeological units. Specifically, the groundwater in the C₃I limestone group within the central mining area receives recharge from the shallow outcrop area, and the groundwater richness gradually decreases from the shallow aquifer to the deep. The aquifer is characterized by heterogeneity and anisotropy, and can be divided into 6 hydrogeological blocks. Combined with the safety threshold requirements for water inrush coefficients in coal seam floor from *Detailed Rules for Coal Mine Safety and Water Inrush Prevention and Control* when the drainage from the limestone aquifer under the coal seam floor is 82 m³/h, the water inrush coefficient will be less than 0.06 MPa/m after 55 days, which meets the requirements for safe mining.

Keywords

Karst Water Hazard, Hydrogeological Test, Numerical Simulation, Safety Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前华北型煤田浅部资源开采殆尽并逐步转向深部开采，在此过程中深部岩溶水害对煤炭安全开采有着严重威胁[1]-[3]。华北板块如任楼煤矿、桃园煤矿、潘二矿等先后在1996年、1997年、2013年和2017年发生突水淹井事故，造成了数以亿计的经济损失[4] [5]。通过井下疏放水试验工程，进一步查明采区岩溶水文地质条件、模拟分析充水含水层的水文地质参数，结合煤矿防治水相关细则，进行安全性评价，并因地制宜地采取水害防治措施，是防止这类水害发生的重要前提[6]-[8]。

我国华北煤田深部煤层开采过程中，主要的充水水源来自石炭系、奥陶系和寒武系岩溶含水层，其导水通道为裂隙带、断层带和岩溶陷落柱等，煤层采掘过程中，使之与其发生水力联系而导致突水事故[9]。为研究采掘过程的突水机制，学者们先后提出了“流固耦合理论”[10]、“板壳理论”[11]、“原位张裂”与“零位破坏”[12]、“下三带”理论[13]、“优势面”突水理论[14]、“强通道渗流”突水理论等。

目前，针对突水，主要采取注浆治理和疏放两种措施，为进一步模拟岩溶含水层的疏放过程，一般采用经验公式法[15]、解析法[16]等。但经验公式法依赖浅部或特定矿区的案例统计，而深部环境下突水机理与浅部存在本质差异，直接套用经验公式易导致评价结果失真。解析法以均质岩体假设为基础，虽计算简便，但无法刻画深部岩溶“裂隙-溶洞”网络的非均质性。

针对上述方法存在问题，本文以淮南煤田某矿采区煤层下部石炭系岩溶含水层为研究对象，采用现场试验与数值模拟相结合的方法，通过井下疏放水试验获取真实的含水层动态数据并分析采区边界断层导隔水性质，校准数值模型参数与边界条件，利用数值模拟识别了含水层参数。该方法既弥补了现场试验的尺度局限，又解决了数值模拟参数失真问题，结合相关矿山开采细则，评价其安全开采性，为实现安全开采提供重要依据。

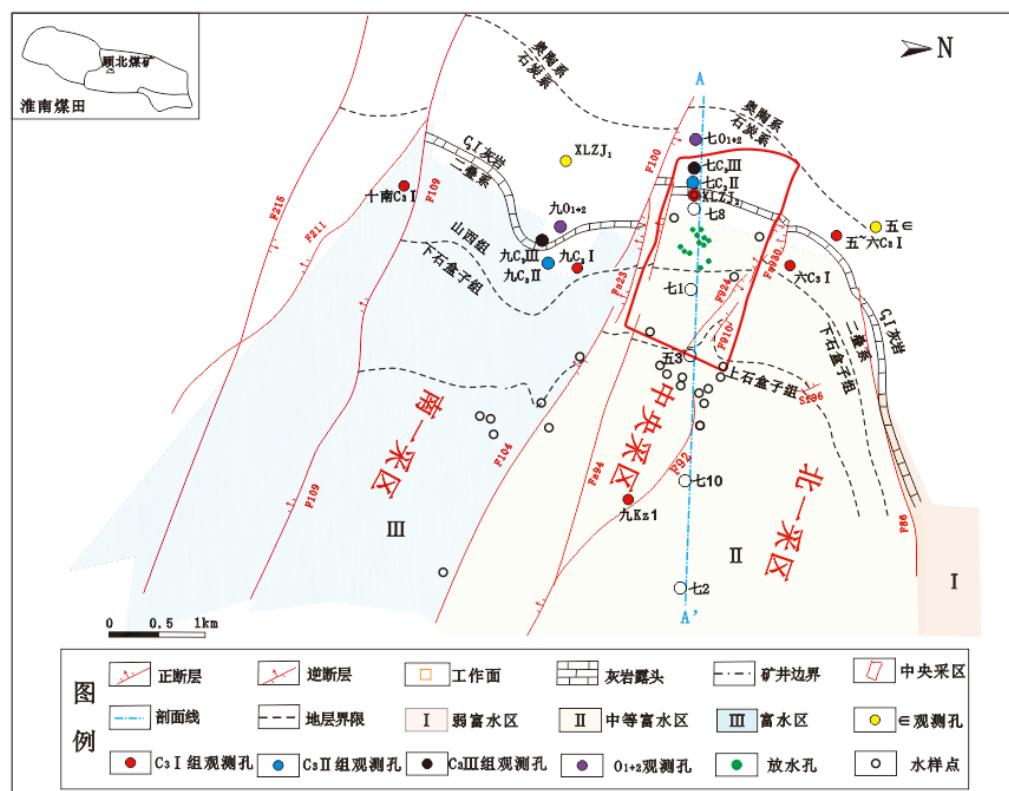
2. 水文地质概况

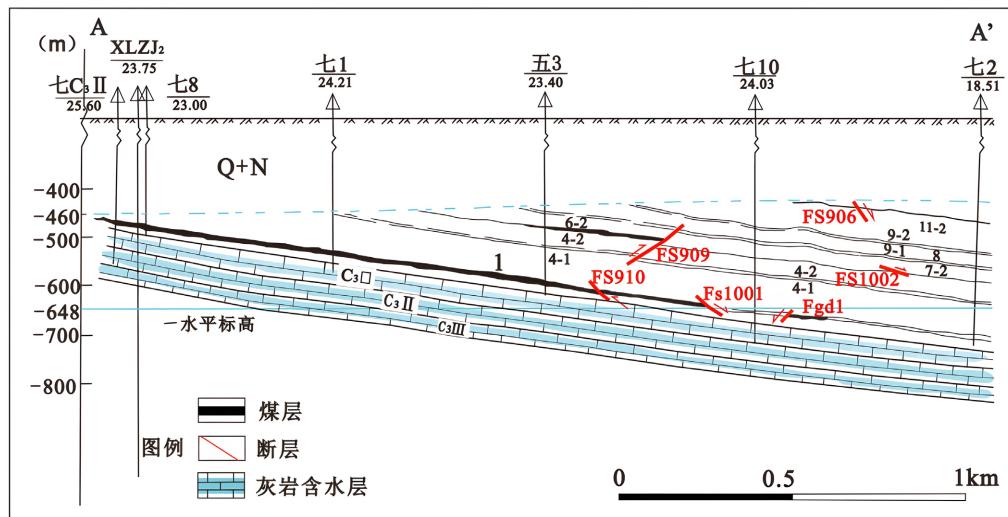
淮南煤田位于华北板块东南缘, 为近东西向南北对冲、中间褶皱的复向斜水文地质构造, 研究区含水层自上而下依次为: 新生界松散层含水层、二叠系砂岩裂隙含水层、太原组岩溶裂隙含水层、奥陶系岩溶裂隙含水层和寒武系岩溶裂隙含水层等。新生界松散层厚度为390.35~509.10 m, 其底部为一含粘土红层, 能够有效隔绝松散层与下部基岩的水力联系。二叠系煤系砂岩裂隙含水层, 富水性弱, 以储存量为主; 石炭系太原组厚99.99~129.11 m, 由薄层灰岩、泥岩、砂岩和煤线等组成, 太原组自上而下分为三个含水层组, 如表1: (1) $C_3^1 \sim C_3^3$ 为 C_3 I 含水组; (2) $C_3^4 \sim C_3^9$ 为 C_3 II 含水组; (3) $C_3^{10} \sim C_3^{12}$ 为 C_3 III 含水组; 奥陶系含水层厚度为48.70~92.50 m, 单位涌水量为0.0007~0.7631 L/(s.m), 富水性为弱~中等; 寒武系含水层主要为灰岩和白云岩, 富水性弱~中等。

Table 1. Hydrogeological parameters of the Taiyuan Formation limestone aquifer in the study area
表1. 研究区太原组灰岩含水层水文地质参数

| | C_3 I组 | C_3 II组 | C_3 III组 |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| q (L/(s.m)) | 0.000213~0.2612 | 0.00064~0.00189 | 0.000376~0.00677 |
| k (m/d) | 0.00056~2.2371 | 0.0019~0.0078 | 0.00201~0.0379 |

整个矿井为一单斜地层, 经断层分割形成南、中、北三个采区(或亚水文地质单元), 具体分布见图1。直接充水水源为露头区岩溶水, 间接充水水源为奥陶系和寒武系灰岩水, 沿着裂隙带或断层带, 向开采范围进行充水补给, 因此, 对A组煤层开采构成不同程度的威胁。





(b) 采区水文地质剖面图

Figure 1. Bedrock hydrogeological map of the study area

图 1. 研究区基岩水文地质图

3. 水文地质试验与水文地质概念模型

为进一步查明采区 1 煤层下部灰岩含水层水力特征, 及与相邻含水层之间是否存在水力联系, 开展了井下水文地质试验, 通过观测三个采区各含水层观测孔水位动态变化特征, 分析相邻采区边界断层(带)导隔水性, 为刻画水文地质概念模型提供依据。

3.1. 放水试验工程

3.1.1. 放水孔和水位观测孔选择

试验水位观测孔选择不仅考虑试验区范围的断层带与露头风化带之间存在水力联系, 且在试验过程中具有较好瞬时响应。观测孔选择优先考虑断层带周边或露头风化带区域。地面观测方面, 需利用不同含水层对应的观测孔; 井下水位测压孔则需布置在两类位置, 一是风化带露头区, 二是与断层带存在水力联系区域。此外, 放水孔应优先选择涌水量较大, 且水位(压)响应较好的孔位, 如图 1(a)所示。

3.1.2. 试验过程

试验过程分为背景值观测、放水、水位恢复、再放水阶段, 其平均水量为 $13.64 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $48 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $33.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $104.23 \text{ m}^3/\text{h}$ 不同阶段各含水层的观测孔水位随着井下疏放量的变化如图 2~4 所示。

3.2. 试验分析

通过不同采区水位、水压及水质变化, 明确边界断层的导水和隔水性质, 进而为中央采区水文地质条件分析工作提供基础依据。

3.2.1. F_{104} 断层组

F_{104} 逆断层组为南区和中央区分界断层, 倾向 SW, 倾角 $65^\circ\sim75^\circ$, 落差 $0\sim130 \text{ m}$ 。试验期间断层组两盘观测孔水位变化, 如图 2、图 3 所示。结果发现该断层组南侧水位变化小, 九 C_3I 孔水位降深为 5.04 m 、九 C_3II 孔水位降深为 8.25 m 、九 C_3III 孔水位降深为 3.33 m 、九 O_{1+2} 孔水位降深为 7.17 m ; 与南侧断层组相比北部部分观测孔水位变化较大, $XLZJ_2$ 孔水位降深为 374.19 m 、七 C_3II 孔水位降深为 186.78 m 、

七 C₃III 孔水位降深为 123.83 m, 因此两侧灰岩观测孔水位具有差异性, 初步判断该断层组具有一定的隔水性。

通过对采集的断层南、北两侧岩溶水样的水质分析, 进一步明确了此断层组导隔水性, 结果显示: 南侧水化学类型为 Cl·HCO₃-Na, 其次为 Cl-Na, 推测因断层南侧为相对封闭的含水层(如岩溶裂隙较窄、连通性弱), 地下水径流速度慢、循环周期长, 易富集 HCO⁻, 同时可能伴随少量 Cl⁻导致; 北侧水化学类型为 Cl(SO₄)-Na, 其次为 HCO₃·Cl-Na, 推测因断层北侧为径流较为通畅的含水层(如岩溶管道发育), 地下水与含 SO₄²⁻ 的地层接触更充分, 且快速径流易携带更多 Cl⁻导致, 具体见图 5。

F104 断层组勘探结果为富水性弱, 在整个放水试验间, 北部观测孔水位响应比南部观测孔响应要好, 认为此断层组为弱含水、具有阻水性质的断层。

3.2.2. F₉₂ 断层组

F₉₂ 断层组是北区与中央采区的分界断层, 该断层组走向长度 2.4 km, 倾向 SW, 倾角 55°~70°, 落差 0~30 m, 属于多分支断层。断层组两侧灰岩观测孔的水位变化情况可见图 2 与图 4, 其中断层组南部观测孔水位变化幅度较大, XLZJ2 孔水位降深为 374.19 m、七 C₃II 孔水位降深为 186.78 m、七 C₃III 孔水位降深为 123.83 m; 而北部水位变化均较小, 水位降深分别为 2.548 m(五~六 C₃I)、5.65 m(五 E)。

通过对采集的断层南、北两侧岩溶水样的水质分析, 进一步明确了此断层组导隔水性, 水化学测试结果显示, 两侧水样类型存在差异: 南部以 Cl-Na 型为主, HCO₃·Cl-Na 型与 Cl(SO₄)-Na 型次之; 北部则以 Cl·HCO₃-Na 型为主要类型, HCO₃·Cl-Na 型次之, 推测因断层北部未开采, 地下水循环慢, 长期与碳酸盐岩作用, 持续溶出 HCO₃⁻, 同时缓慢溶滤地层中的 Cl⁻导致, 具体见图 5。

依据上升水位响应性和水化学类型的差异性, 反映出该断层组也具有一定阻水断层。

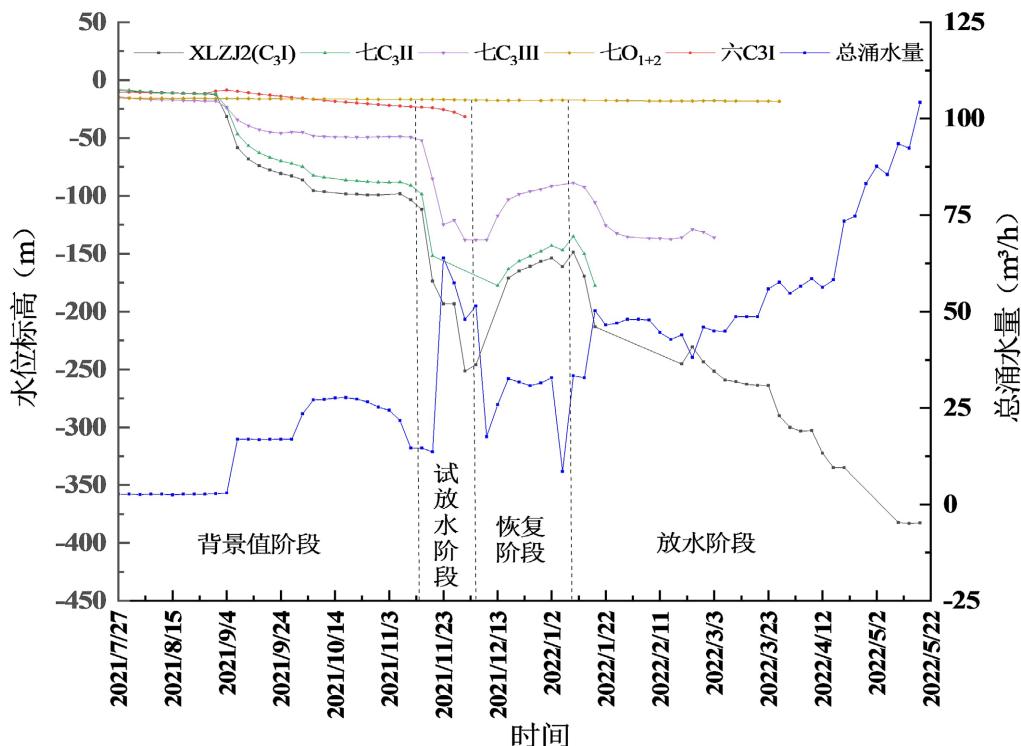


Figure 2. Time-bound water level changes in various limestone observation wells in the central mining area during the test
图 2. 试验期间中央采区各灰岩观测孔水位历时变化曲线

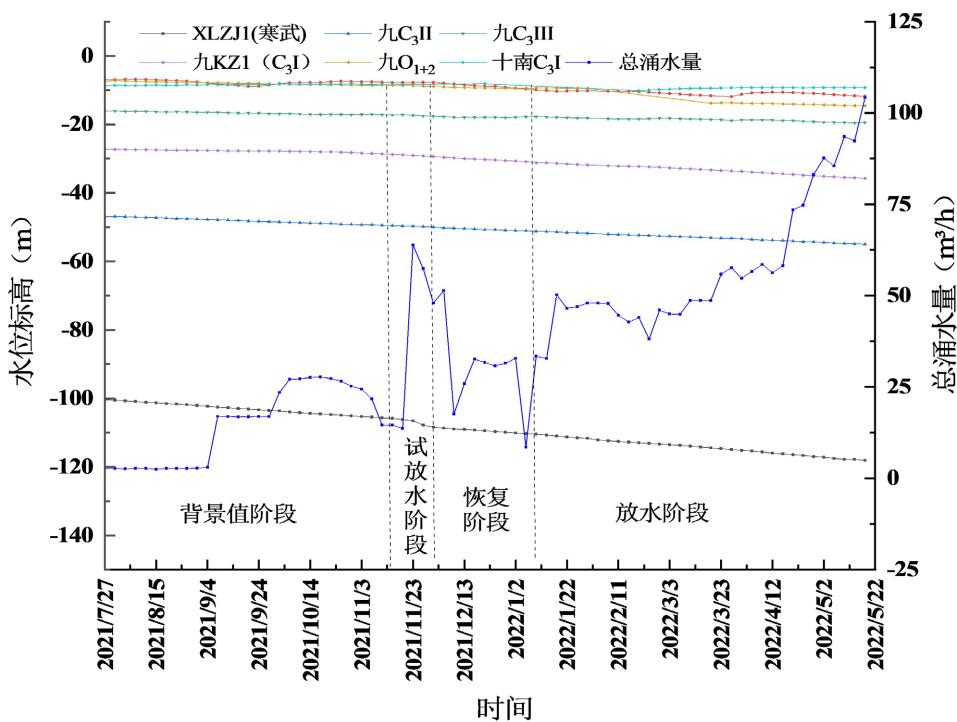


Figure 3. Time-varying curves of water levels in various limestone observation wells in the South No. 1 mining area during the test

图3. 试验期间南一采区各灰岩观测孔水位历时变化曲线

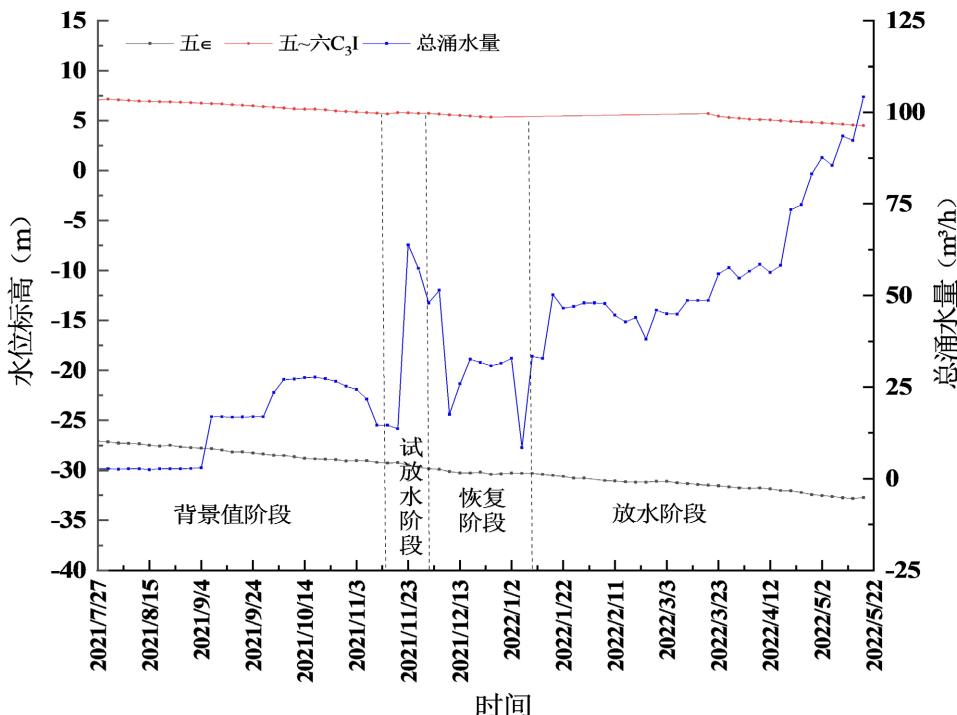


Figure 4. Time-bound water level changes in various limestone observation wells in the North No. 1 mining area during the test

图4. 试验期间北一采区各灰岩观测孔水位历时变化曲线

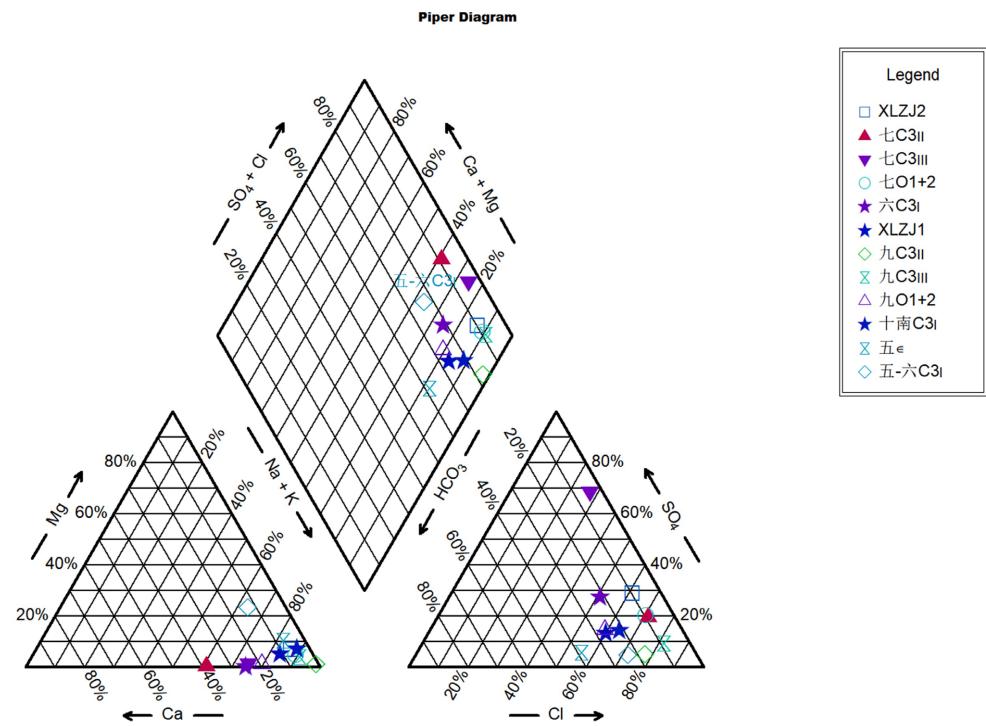


Figure 5. Piper's three-line diagram of water quality in each limestone observation well in each mining area during the test
图5. 试验期间各采区各灰岩观测孔水质 piper 三线图

3.3. 水文地质概念模型

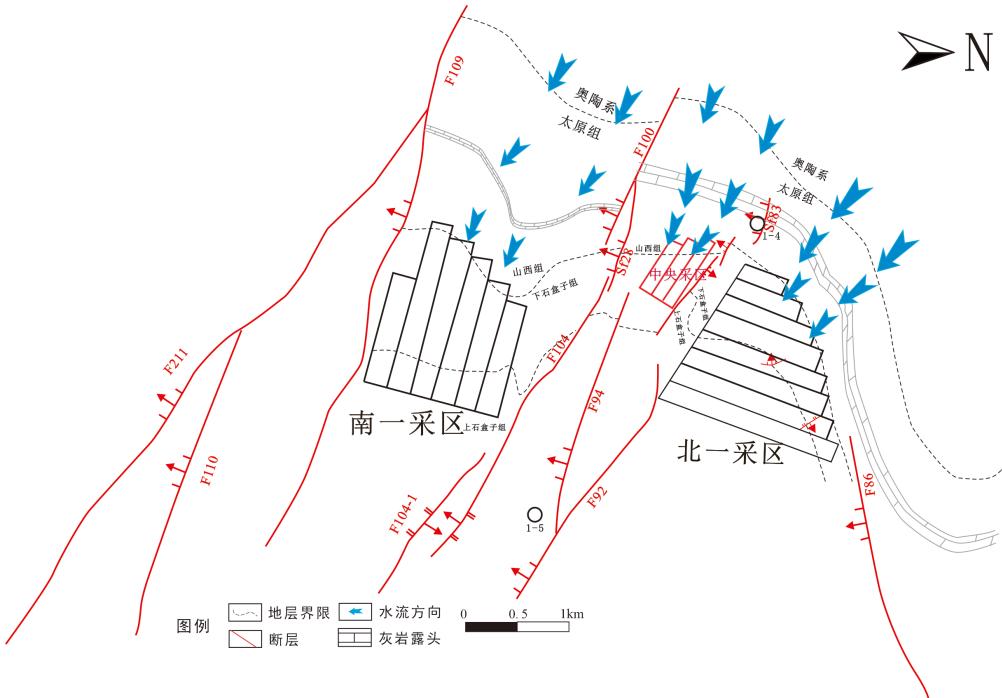


Figure 6. Groundwater flow patterns in the three hydrogeological units of the well field
图6. 井田三个水文地质单元水地下水流动模式

井田的西部位于陈桥背斜碳酸盐岩的露头区，通过以往南区和本次中央区放水试验工程所获得试验结果，发现采区岩溶水的补给来自于碳酸盐岩露头区风化带含水层的补给，沿着断层带和含水层倾斜方向发生径流；同时在井田范围内 F_{104} 、 F_{94} 断层具有较好的隔水性，因此中央 1 煤采区为一个相对独立水文地质单元，与南一、北一采区水力联系较弱。

综上，整个矿井岩溶含水层为三个相对独立水文地质单元。 C_3I 与 C_3II 、 C_3III 组灰岩含水层在浅部露头区存在一定水力联系，但太灰与奥灰、寒灰水力联系较弱，整个岩溶地下水流动模式如图 6 所示。

4. 地下水数值模拟过程

4.1. 数学模型构建

如图 6，中央采区位于井田中部，面积为 2 Km^2 ，煤层开采过程中直接充水水源来自 C_3I 组含水层，厚度为 $31.14\sim41.09 \text{ m}$ ； F_{104} 、 F_{94} 断层组为隔水断层；西边为露头区，存在侧向补给，为流量边界，东边为地下水深部滞留区。

在回采期间， C_3I 组灰岩地下水的流动过程，可归纳为受到露头区补给、具有非均质各向异性特征的三维非稳定流地下水问题，数学模型为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial_x} \left(k_{xx} \frac{\partial H}{\partial_x} \right) + \frac{\partial}{\partial_y} \left(k_{yy} \frac{\partial H}{\partial_y} \right) + \frac{\partial}{\partial_z} \left(k_{zz} \frac{\partial H}{\partial_z} \right) - w = S_s \frac{\partial H}{\partial_t}, & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z), & (x, y, z) \in \Omega \\ K \frac{\partial H}{\partial_n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t), & (x, y, z, t) \in \Gamma_2 \end{aligned}$$

式中： k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} —— x 、 y 、 z 方向的渗透系数， m/d ；

H 、 H_0 ——分别灰岩含水层的水位和初始水水位， m ；

w ——灰岩的疏放水量， d^{-1} ；

S_s ——弹性释水率， m^{-1} ；

T ——时间， d ；

Ω ——计算区域；

$q(x, y, z, t)$ ——单位时间单位面积流量， m/d ；

Γ_2 ——二类边界。

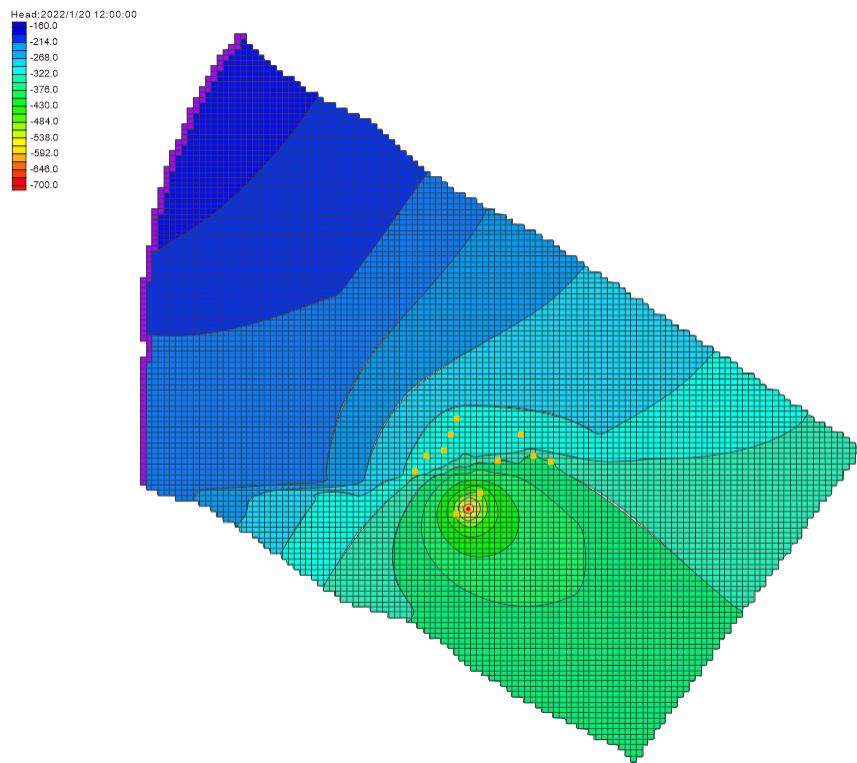
4.2. 模拟模型

依据区内含水层厚度及地下水补径排特征，采用 GMS 软件中的差分方法(图 7)，以 2022 年 1 月 20 日 12:00 为初始时刻， C_3I 组地下水位为西北高东南低，试验疏放后形成以疏放点为中心地下水位降落漏斗。

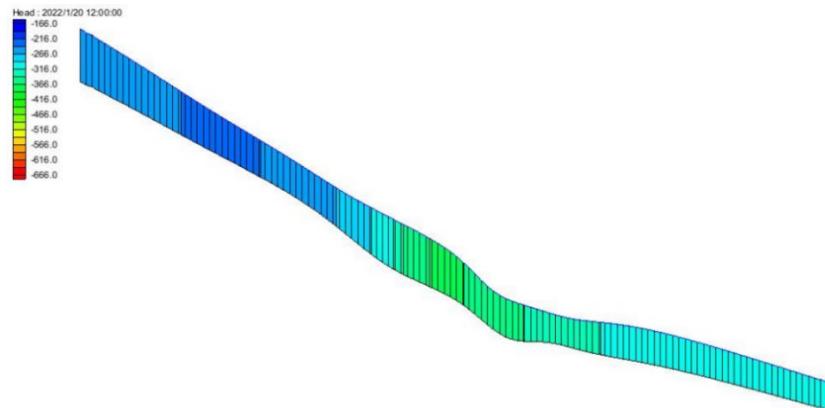
4.3. 模型识别与验证

利用 2022 年 2 月 20 日~2022 年 3 月 20 日、2022 年 3 月 21 日~2022 年 5 月 18 日分别作为识别期和验证期。经过多次含水层区块参数调整后，使计算值与观测值之间的误差小于 10%。

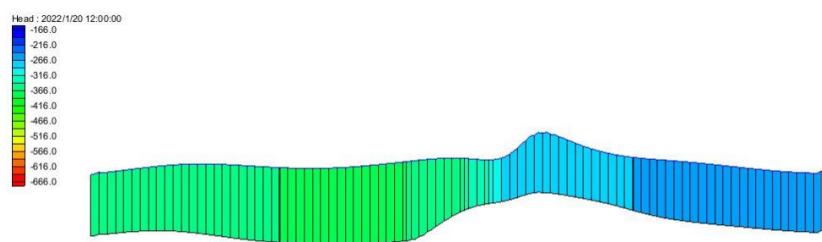
模拟结果显示，灰岩露头区含水层渗透性较好，而随着与露头区距离增加，含水层渗透性呈现逐渐减弱的趋势；模拟过程中地下水流动方向受井下开采疏放影响，流动趋势与采区地层倾向相同，客观反映了地下水流动场变化规律，如表 2、图 8 所示。



(a) 网格单元划分平面图



(b) 模拟区剖分第 90 行



(c) 模拟区剖分第 90 列

Figure 7. Plan view of the grid division of the central mining area
图 7. 中央采区单元网格划分平剖面图

Table 2. Hydrogeological parameters of different zones of the C₃I aquifer in the mine
表 2. 矿井 C₃I 组含水层不同分区水文地质参数

| 渗透系数分区编号 | 水平渗透系数/(m/d) | 垂直渗透系数/(m/d) | 弹性释水率/m ⁻¹ |
|----------|--------------|--------------|-----------------------|
| 1 | 1.81 | 0.18 | 0.000015 |
| 2 | 1.52 | 0.15 | 0.000014 |
| 3 | 0.35 | 0.05 | 0.000010 |
| 4 | 0.01 | 0.0058 | 0.000018 |
| 5 | 0.05 | 0.0053 | 0.00001 |
| 6 | 0.02 | 0.005 | 0.000025 |

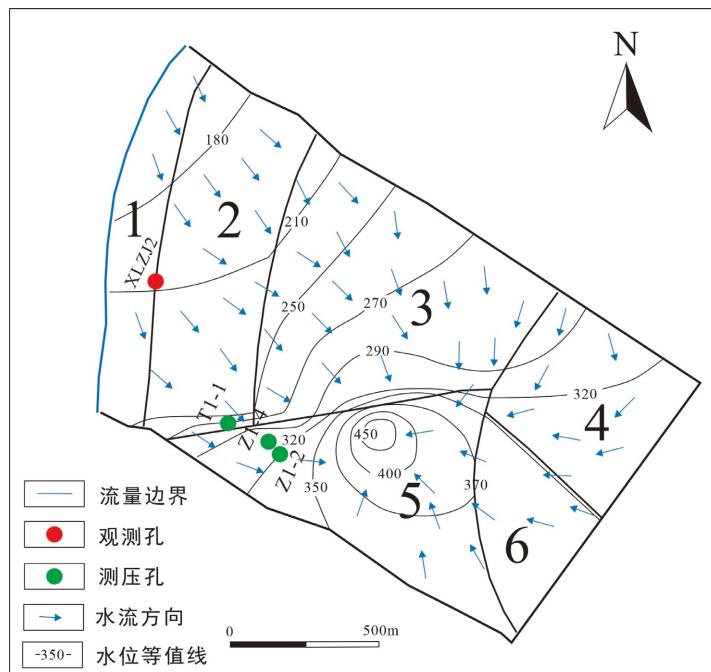


Figure 8. Hydrogeological zoning and initial groundwater flow field
图 8. 水文地质分区及初始地下水水流场

5. 底板突水安全性评价

为确保中央采区煤层安全开采, 对 C₃I 组含水层的水压值进行疏降, 以满足《煤矿防治水细则》[17] 中承压含水层下安全开采要求。由于煤层底板受构造破坏影响, 因此, 突水系数应满足突水系数 $T \leq 0.06$ MPa/m。

煤层底板承受 C₃I 组含水层 $P_{\text{最大水压}} = 0.93$ MPa, 隔水层 $M_{\text{最小厚度}} = 12.31$ m。计算的突水系数 $T = 0.0755$ MPa/m, 该数值超过 0.06 MPa/m 的安全阈值。因此需通过疏水降压手段降低含水层水压, 确保满足煤层安全开采条件。

为解决采区生产接替, 需要在短时间内解决这一问题, 通过两种疏放水方案并结合模型进行安全性评价。

方案一: 按放水前疏放量 $33.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 执行。此时采区内灰岩含水层 $T_{\text{最大}} = 0.25$ MPa/m; 疏放至 293 天时, 突水系数小于 0.06 MPa/m, 且含水层最低点水位达到安全要求。

方案二：在方案一基础上增设放水孔(见图8)，单孔水量 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ ，总疏放量 $48 \text{ m}^3/\text{h}$ 。以 2022 年 5 月 18 日为起始时间，运行模型计算得：55 天后突水系数小于 0.06 MPa/m ，满足安全开采条件，同时最低点水位降至安全开采要求(图 9)。

因此，在适合位置，设置疏放孔，增加疏放量，是快速解决工作面接替问题的主要措施。

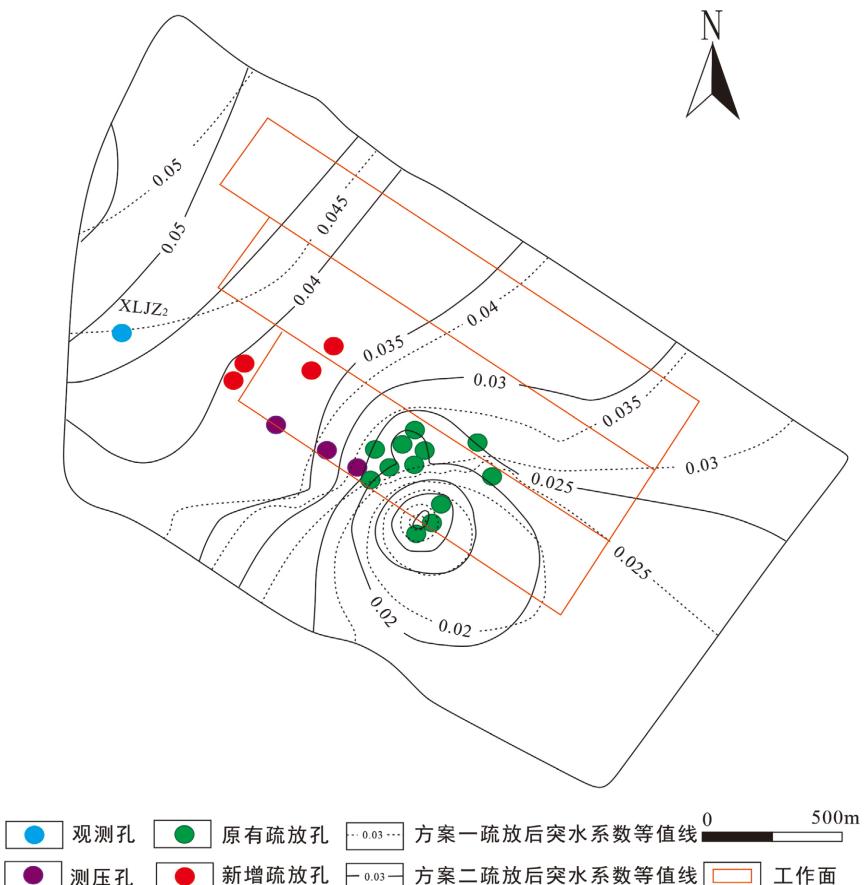


Figure 9. Contour maps of the inrush coefficient corresponding to the two drainage schemes (unit: MPa/m)
图 9. 两种疏放方案对应突水系数等值线图(单位: Mpa/m)

6. 结论与建议

通过放水试验结合数值模拟，获得了对井田灰岩水文地质条件系统认识，划分了水文地质单元，识别了 C_3I 组含水层参数，并进行疏放性模拟，主要结论为：

- (1) 井田岩溶含水层通过 F_{104} 和 F_{92} 断层组形成三个相对独立水文地质单元，中央采区为 6 个不同参数的区块。
- (2) 采区 C_3I 组含水层水源补给来自浅部露头区，与深部其他含水层水力联系差。
- (3) 选择合适位置，增加疏水孔数量和开采量，是快速降低含水层水位得到安全开采阈值的最直接有效方法。

基金项目

安徽省研究生教育质量工程项目：地质工程专业学位地下水数值模拟计算教学案例库(2022zyxwjxalk086)和安徽省省级质量工程项目(2023xnjys012)联合资助。

参考文献

- [1] 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国不同类别煤层底板水害致灾机理与防控远景导向[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1073-1099.
- [2] 谢治刚, 韩锋, 陈善成, 等. 淮南煤田下组煤底板岩溶含水层系统重构及岩溶水害分源防治技术[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250918.1439.011>, 2025-11-19.
- [3] 邢生. 承压含水层上方煤层底板采动裂隙演化及渗流运动数值模拟[J]. 煤炭科技, 2025, 46(5): 97-101, 107.
- [4] 尹尚先, 虎维岳, 刘其声, 等. 承压含水层上采煤突水危险性评估研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 311-315.
- [5] 甘林堂. 淮南矿区 A 组煤底板灰岩水防治及潘二矿突水事故原因分析[J]. 煤矿安全, 2018, 49(7): 171-174, 180.
- [6] 刘江斌, 张仲杰, 李洋, 等. 孔隙-裂隙型耦合底板突水数值模拟模型研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(11): 114-119.
- [7] 杨勇, 李双利, 张涛, 等. 奥陶系岩溶水对司马煤矿下组煤开采影响分析[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(6): 72-78.
- [8] 任波. 煤层底板突水防治技术[J]. 矿业装备, 2025(3): 38-40.
- [9] 关继超, 韩璐, 李国勇, 等. 煤层底板奥灰突水危险性等级评价方法与工程实践研究[J]. 山西煤炭, 2025, 45(4): 32-39+46.
- [10] 贺国庆, 陈俊智, 任春芳, 等. 基于流固耦合理论的含水巷道稳定性影响因素研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(4): 102-110.
- [11] Qin, H., Zhang, J., Cheng, Z., Ouyang, Z., Chen, L., Yi, H., et al. (2022) Research on Overburden Failure Characteristics Based on the Theory of Plates and Shells. *Sustainability*, **14**, Article 11441. <https://doi.org/10.3390/su141811441>
- [12] 边凯, 李思宇, 刘博, 等. 承压水上含断层煤层开采底板突水规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(6): 169-177.
- [13] 刘玉卫, 商铁林, 王浩, 等. 郑州矿区告成矿煤层底板“下三带”范围研究与应用[J]. 榆林学院学报, 2021, 31(2): 5-8.
- [14] 孟浩鹏, 侯恩科, 尹尚先, 等. 带压开采“厚板分段导升”突水机理研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S1): 250-262.
- [15] 秦壮杰. 比拟法预测矿坑涌水量与结果评价浅析[J]. 中国金属通报, 2023(11): 222-224.
- [16] 刘琼. 比拟法和解析法在矿坑涌水量预测中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(5): 45-47.
- [17] 刘守强, 武强, 曾一凡. 《煤矿防治水细则》修订要点解析[J]. 煤炭工程, 2019, 51(3): 1-4.