

顾北煤矿岩溶地下水动态特征及影响因素分析

孙绍波^{1*}, 许光泉^{1#}, 窦春远², 李旭¹, 周涛¹, 魏建², 许童², 蔡有京²

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²淮河能源集团顾北煤矿, 安徽 淮南

收稿日期: 2021年11月9日; 录用日期: 2021年11月30日; 发布日期: 2021年12月7日

摘要

研究深埋开采条件下岩溶地下水动态变化特征, 对于分析含水层之间的水力联系及岩溶水害的防治具有重要意义。以淮南顾北煤矿为例, 通过现场放水试验、采样测试与统计分析等方法, 结合进一步水文地质探查和注浆治理工程, 分析了南一1煤采区底板C₃I组灰岩含水层的水位、水质和水温等动态变化特征及影响因素。结果表明: 区内C₃I组灰岩含水层浅部露头区岩溶裂隙相对发育, 其富水性和渗透性相对较好, 向深部富水性逐渐变弱、连通性逐渐变差特点。通过对岩溶含水层探查、注浆治理阻断了深部C₃III和奥灰含水层与浅部含水层(C₃I、C₃II组)之间垂向水力联系, 并得到了验证, 从而为该矿深部岩溶水害防治提供依据。

关键词

岩溶含水层, 放水试验, 探查与注浆, 地下水动态, 顾北煤矿

Dynamic Characteristics and Influencing Factors of Karst Groundwater in Gubei Mine

Shaobo Sun^{1*}, Guangquan Xu^{1#}, Chunyuan Dou², Xu Li¹, Tao Zhou¹, Jian Wei², Tong Xu², Youjing Cai²

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Gubei Coal Mine of Huaihe Energy Group, Huainan Anhui

Received: Nov. 9th, 2021; accepted: Nov. 30th, 2021; published: Dec. 7th, 2021

Abstract

The study of the dynamic characteristics of karst groundwater under the condition of deep mining

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 孙绍波, 许光泉, 窦春远, 李旭, 周涛, 魏建, 许童, 蔡有京. 顾北煤矿岩溶地下水动态特征及影响因素分析[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(12): 1573-1583. DOI: 10.12677/ag.2021.1112151

is very important for analyzing the hydraulic relationship between different aquifers and the prevention and control of water inrush from aquifers under coal seam. Taking Gubei Coal Mine in Huainan as research object, through the methods such as dewatering test of aquifers, sampling and testing and statistical analysis, combined with the local advanced hydrogeological exploration and grouting project, the dynamic variation of characteristics (water level, water quality and water temperature) of group C₃I aquifer under the coal floor in the first southern coal mining area and its factors are analyzed. The results show that karst fractures are relatively developed in the shallow outcrop of C₃I limestone aquifer which is some abundance and permeability, while with increase of depth, its abundance, permeability and connection gradually become weak and the connectivity gradually becomes worse. Through further exploration to karst aquifers and grouting treatment, the vertical hydraulic connections between the shallow aquifer (aquifer of C₃I and C₃II) and the deep one (aquifer of C₃III and Ordovician) have been blocked up and verified, which has provided a scientific basis for the prevention and control of karst water hazards in Gubei Coal Mine.

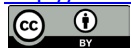
Keywords

Karst Aquifer, Dewatering Test, Hydrogeological Exploration and Grouting, Groundwater Dynamics, Gubei Coal Mine

Copyright © 2021 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

煤炭是我国能源的支柱,近年来随着开采深度增加,岩溶水害问题日益趋突出[1] [2]。岩溶水害是煤炭安全开采重大隐患之一,华北煤田岩溶突水事故时有发生,它是制约煤矿安全生产的重要因素。如淮北任楼煤矿与桃园煤矿及淮南的潘二煤矿,因岩溶水害造成淹井事故,带来严重经济损失[3]。自上个世纪七十年代以来,岩溶地下水研究从岩溶管道一裂隙一孔隙三重空隙介质地下水流模型[4],到研究了岩溶水系统地下水化学环境演化[5] [7],再到煤矿深部岩溶突水机理及水害防治研究[6],开展了一系列工作。

针对华北煤田岩溶水害问题,从先前的采前疏水降压[8] [9] [10],到目前的地面区域探查治理工程[11] [12],期间还采用放水试验[13] [14] [15] [16],均进一步查明开采范围内水文地质条件。通过地下水动态特征分析,获得不同含水层的水位、水质、水温等的变化,进而为分析各含水层之间的水力联系提供重要的依据。

顾北煤矿位于潘谢矿区构造转折段,水文地质条件较为复杂,煤层底板下部裂隙、溶隙和小溶洞发育不均,构造控水程度高。为此,前期围绕岩溶水害开展井下放水试验工作。依据放水试验数据,利用GMS模拟C₃I组灰岩水变化规律,揭示了岩溶地下水对流场变化规律[17]。此外,利用离子组合比和主成分法分析了该矿F₁₀₄断层两侧岩溶水化学形成机制以及岩溶水化学组分特征及其成因[18] [19]。

本文在以往工作基础上,以顾北煤矿南一1煤采区放水试验及地面区域探查治理为背景,通过现场观测、采样测试,分析了该过程的各含水层水位、水质、水温等地下水动态变化,尤其是TDS及pH随深度变化,并获得一些规律性的认识,探讨分析地下水动态的影响因素,从而为该矿深部岩溶水害防治提供依据。

2. 研究区概况

顾北矿位于井田中部,为断层发育区,主要为北西及北北西向的 F_{100} 、 F_{104} 等断层,其落差一般大于50 m;北东向主要断层有 F_{16} 、 F_{146} 等,落差较小。整个矿区被 F_{104} 断层分为南北两个部分, F_{109} 断层为南一采区南边界, F_{104} 断层组为南一采区北边界。基岩被厚446.8 m的新生界松散层所覆盖,中部、下部隔水层分布稳定,平均厚度67 m。根据综合水文地质勘探成果,将井田划分为三个构造控水单元,分别为: F_{86} 至 F_{104} 断层区段I区、 F_{86} 断层以北II区、 F_{104} 断层以南III区(如图1)。

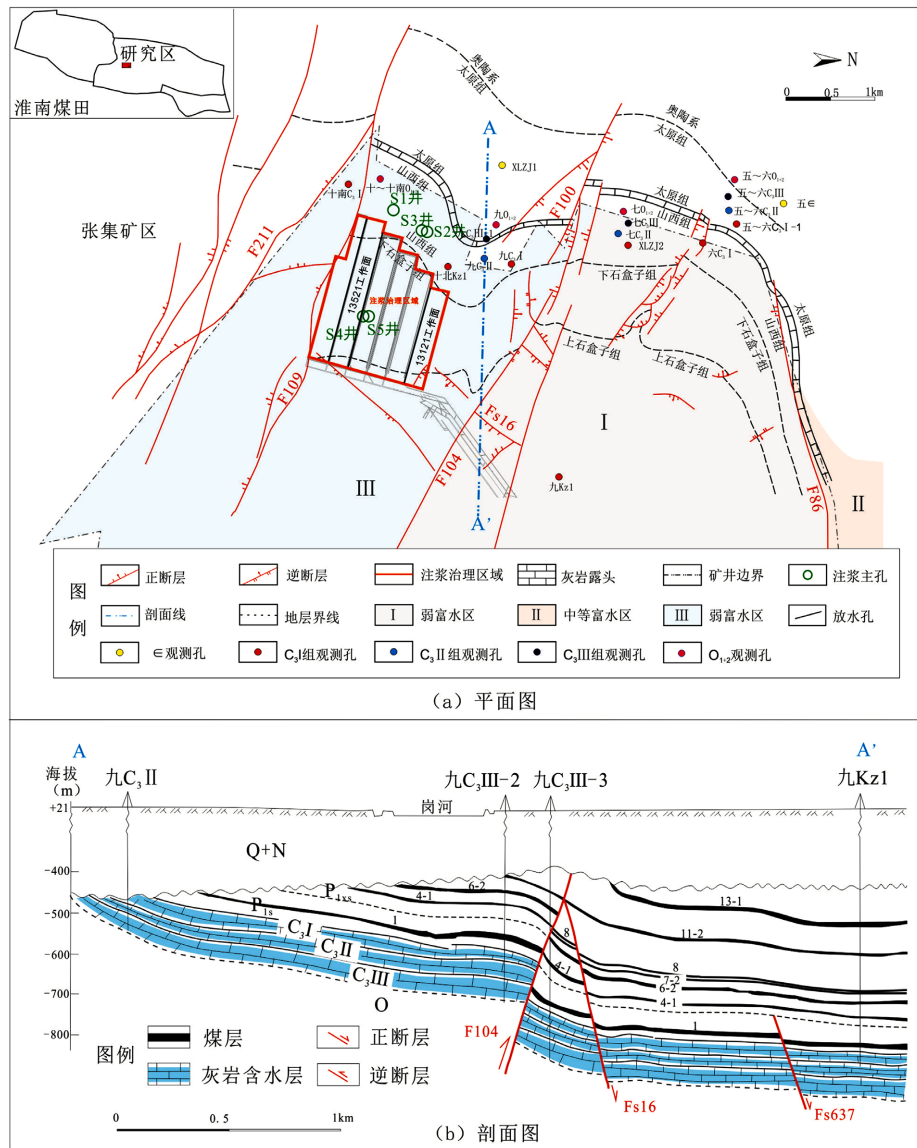


Figure 1. Hydrogeological map of bedrock in Gubei coal mine
图1. 顾北煤矿基岩水文地质图

顾北煤矿南一1煤采区自上而下含水层为:新生界松散层含水层、顶底板砂岩裂隙含水层、太原组岩溶裂隙含水层组、奥陶系岩溶含水层组。其中太原组灰岩分成三个含水组: C_3I 灰岩含水组(1~3下灰)、 C_3II 灰岩含水组(4~9灰)、 C_3III 灰岩含水组(10~12灰)。

3. 放水试验及探查与治理

3.1. 放水试验

试验分别于 2018 年 3 月 19 日至 2018 年 4 月 2 日、2018 年 12 月 5 日至 2018 年 12 月 23 日, 开展南一 1 煤采区 13121 工作面放水试验。试验历时 32 天, 共完成背景值观测 2 次、放水试验 3 次、恢复试验 3 次、连通试验 1 次。

2021 年 4 月 26 日至 2021 年 5 月 16 日, 开展南一 1 煤采区 13521 工作面放水试验, 试验历时 21 天, 完成背景值观测 1 次, 放水试验一次, 恢复试验一次。放水期间各放水孔数据如表 1, 水位长观孔如表 2。

Table 1. List of underground test holes for water discharge test

表 1. 两次放水试验井下试验孔一览表

放水阶段	钻孔	位置	层位	性质	备注
2018 年放水阶段	JD12-6#	底抽巷	$C_3^{3下}$	放水孔/测压孔	井下人工观测
	JD12-8#	底抽巷	C_3^5	放水孔/测压孔	井下人工观测
	T4	底抽巷	/	放水孔/测压孔	井下人工观测
	其余 192 个	底抽巷、放水巷	/	放水孔	井下人工观测
2021 年放水阶段	疏放水 1#	底抽巷	$C_3^{3下}$	放水孔	井下人工观测
	3-4#	1 煤底板矸石胶带机巷	$C_3^{3下}$	放水孔/测压孔	井下人工观测
	D4-1#	13421 定向长钻孔钻场	$C_3^{3下}$	放水孔/测压孔	井下人工观测

Table 2. Statistics of long observation holes for water level of limestone aquifer in water discharge test

表 2. 放水试验灰岩含水层水位长观孔统计表

序号	孔号	观测层位	数量	备注
1	五~六 C_3I	C_3I	6	自动监测
2	六 C_3I			
3	XLZJ ₂			
4	九 Kz1			
5	九 C_3I	C_3II	1	自动监测
6	十南 C_3I			
7	九 C_3II			
8	七 C_3III	C_3III	2	自动监测
9	九 C_3III			
10	七 O_{1+2}	O_{1+2}	2	自动监测
11	九 O_{1+2-1}			
12	XLZJ ₁	ε	2	自动监测
13	五 ε			

两次放水试验分别针对不同的工作面, 其中第一次放水试验放水孔多, 大都分布在底抽巷、放水

巷, 水位长观孔分布在新生界及 C_3I 、 C_3II 、 C_3III 组灰岩含水组, 观测采用自动监测系统。第二次放水试验放水孔少, 仅有三个放水孔, 水位长观孔分布在 C_3I 、 C_3II 、 C_3III 组灰岩含水组, 观测采用自动监测系统。通过放水试验进一步探查一水平南一 1 煤采区 C_3I 组灰岩与其它不同灰岩含水层(组)之间的水力联系特征, 并对区内主要断层的导、隔水性做定性分析, 评价其是否具备疏放条件, 且通过两次 C_3I 组灰岩含水层群孔放水试验成果进行对比分析, 对南一 1 煤采取地面区域探查及注浆治理效果进行评价。

3.2. 区域探查治理

依据南一 1 煤采区采掘规划及地面物探异常区治理需要, 结合地面施工条件, 南一 1 煤采区共计 5 个主孔, 编号为 S1-S5, S4 主孔又分为 S4-1 和 S4-2 两个主支孔。其中 S1、S2、S3 主孔位于采区西侧, S1 独立井场, S2、S3 主孔共处一个井场; S4、S5 主孔位于采区中部, 共处一个井场(如图 1)。项目于 2018 年 8 月 17 日开始施工, 截止 2021 年 3 月 21 日完成了 13121 工作面, 13321 工作面, 13521 工作面的注浆治理, 共完成 5 个主孔, 67 个分支孔, 钻孔数据如表 3。

Table 3. List of ground area exploration and treatment works in Nanyi mining area 1

表 3. 南一 1 煤采区地面区域探查治理工程一览表

孔号	分支孔数	直井段工作量	造斜段工作量	水平段工作量	总工作量
S1	35	300	353	16,137	16,790
S2	10	320	356	5927	6603
S3	14	/	/	8336	8336
S4-1	12	/	232	6562	6794
S4-2	10	490	251	6303	7044
S5	10	490	213	6724	7427

4. 地下水动态特征

4.1. 水位动态变化

依据地面自动监测系统统计水位标高数据, 分析自 2017 年以来水位变化情况, 及 2018 年以来地面区域探查治理对其的影响。地面区域探查注浆治理过程不仅改变了 1 煤底板含隔水层结构, 同时也对不同含水层地下水水流产生一定影响, 主要表现在对不同含水层的水位动态变化上, 具体如下:

1) C_3I 组灰岩含水层地下水动态

开采条件下受疏放水过程的影响 C_3I 组灰岩含水层水位呈下降趋势, 其中距离 13121 工作面较近的九 C_3I 孔水位下降较快。后期注浆过程中, 也发现九 C_3I 孔水位出现上升的反常现象, 注浆结束后, C_3I 组灰岩含水层水位下降减弱, 九 C_3I 孔水位上升也有所减弱(如图 2(a))。

2) C_3II 组灰岩含水层

开采条件下 C_3II 组灰岩含水层水位九 C_3II 孔水位下降较明显。注浆过程中九 C_3II 孔水位动态变化受注浆影响变化较大, 水位呈现先上升后下降以及持续下降的趋势, 尤其距离 13121 工作面较近九 C_3II 孔水位先上升后下降(如图 2(b))。

3) C_3III 组与 O_{1+2} 灰岩含水层

开采条件下 C_3III 组与 O_{1+2} 灰岩含水层水位下降较快, 斜率较大。注浆过程中 C_3III 组与 O_{1+2} 灰岩含

水层水位下降速度有所减弱，并且七 C₃III 孔水位有所上升。注浆结束后 C₃III 组与 O₁₊₂ 灰岩含水层水位下降速度比较注浆之前明显减弱(如图 2(c), 图 2(d))。

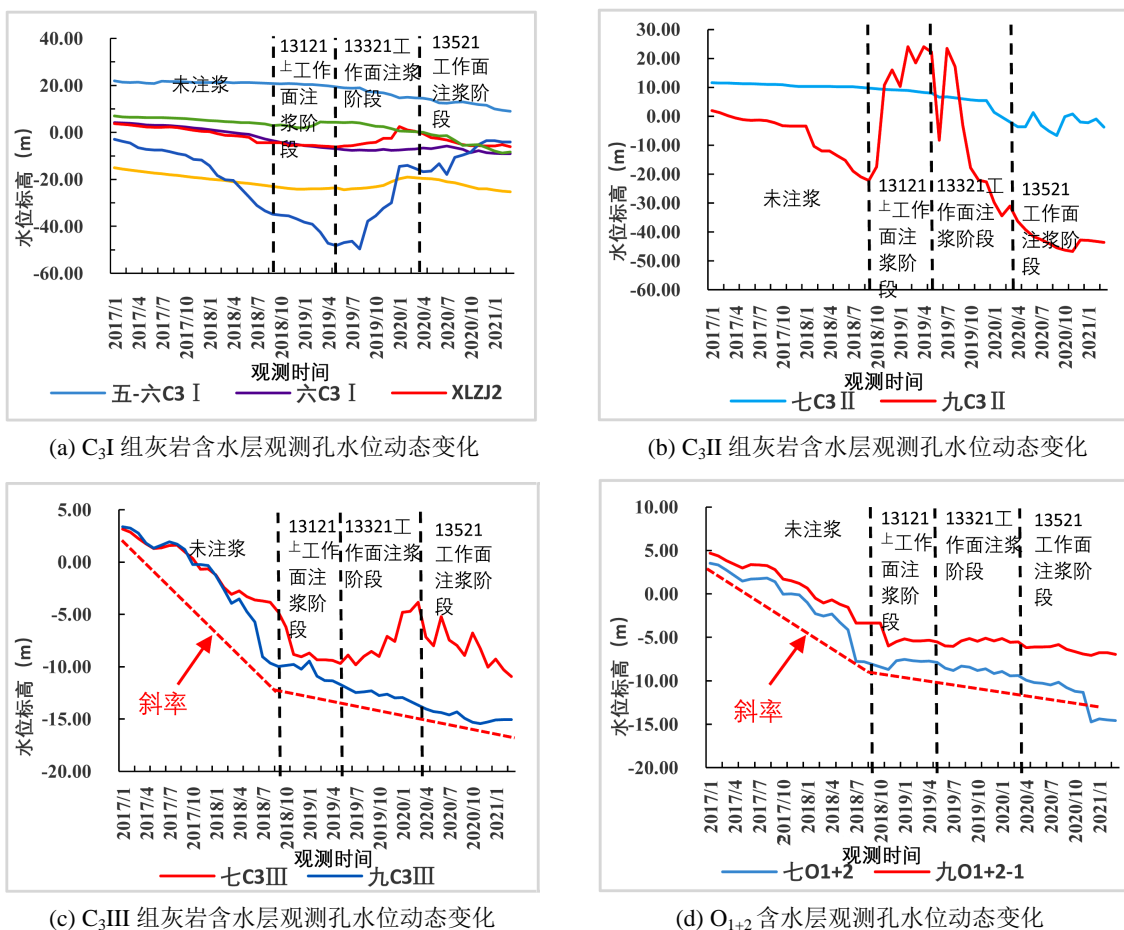


Figure 2. Dynamic change of water level of observation holes of different aquifers before and after grouting in each aquifer
图 2. 各含水层注浆前后观测孔水位动态变化

4.2. 水化学组分动态变化

4.2.1. TDS 含量及 pH 变化特征

由 TDS 含量及 pH 随深度变化图可知：2018 年放水试验第一阶段(如图 3(a))，TDS 含量在垂向上随着深度的增加缓慢递增，在深度-500~-650 m 之间，含量大多集中于 2000~3000 mg/L 之间，仅有个别孔出现异常。pH 值在垂向上也出现递增变化，数值分布在 7.5~8.5 之间，其水性为弱碱性。2018 年放水试验第二阶段(如图 3(b))，TDS 含量在垂向上随着深度的增加逐渐递减，在深度-550~-554 之间，含量集中于 1900~2100 mg/L 之间较多，仅有个别钻孔出现异常(JD12-10#、T5)，含量在 2100 mg/L 之上，孔壁水含量有所异常。pH 值在垂向上逐渐递增，大多分布在 7.0~8.0 之间，其水性为弱碱性，J5-3# 钻孔的 pH 值偏高。2021 年放水试验阶段(如图 3(c))，TDS 含量在垂向上随着深度的增加逐渐递减，在深度-580~-680 m 之间，含量在 2000~2600 mg/L 之间；pH 值在垂向上递增，分布在 7.6~8.0 之间，其水性为弱碱性。从 2018 年到 2021 年的放水试验水质的空间，时间尺度分析来看，随着取样深度的增加，pH 值均有所上升。

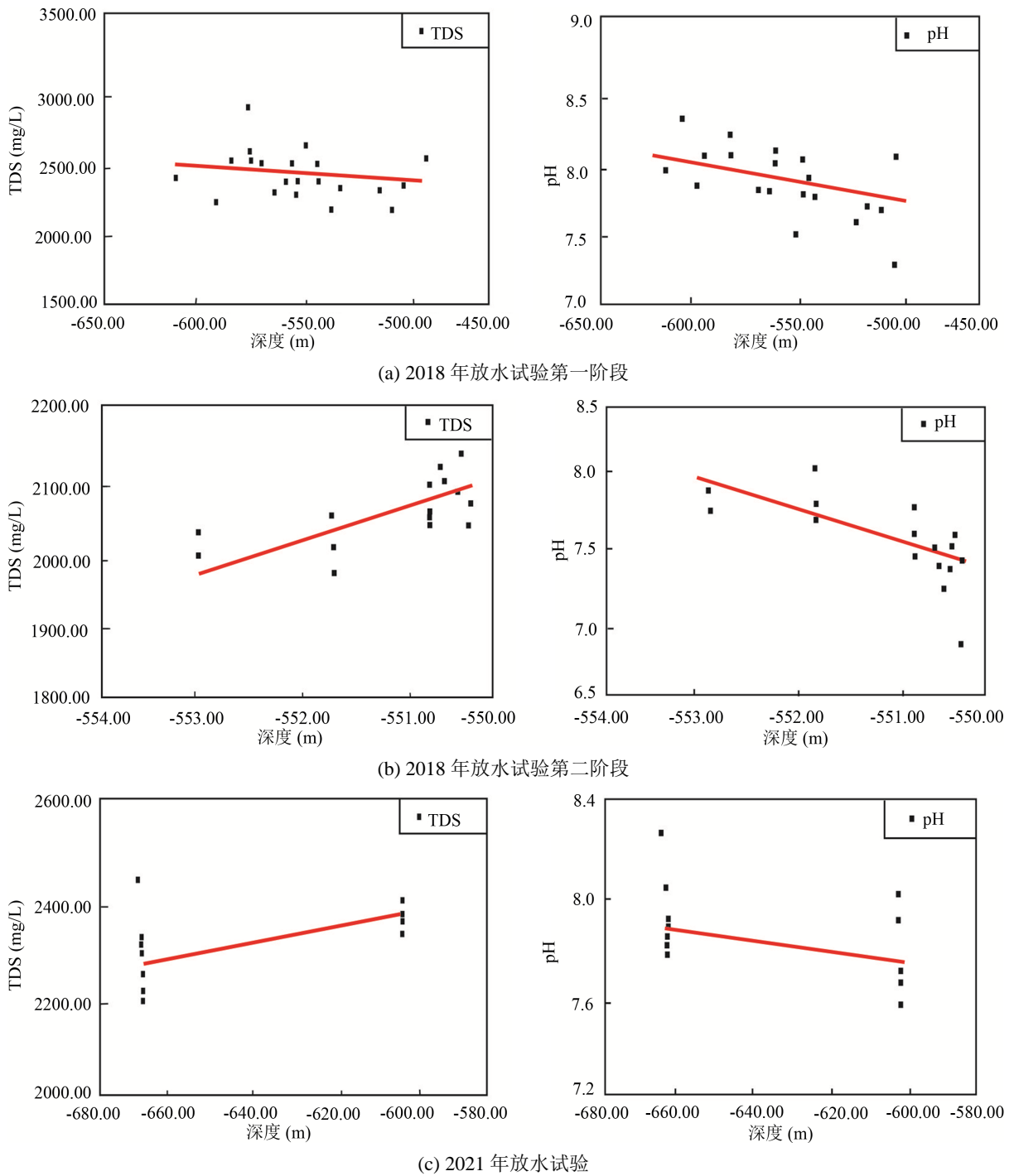


Figure 3. Relationship between TDS and pH with depth

图 3. TDS 与 pH 随深度变化关系图

4.2.2. 水化学类型变化特征

在井下灰岩钻孔放水试验前, 开采条件下太灰、奥灰、寒灰和混合灰岩水的水化学类型以 Cl-Na+K 型为主, 到两次放水试验结束: 井下灰岩钻孔水的水化学类型由放水试验前以 Cl-Na+K 型为主到放水试验后以 Cl-(Na+K)·Mg 型为主, 期间 Ca^{2+} , Mg^{2+} 离子含量增大, HCO_3^- , SO_4^{2-} 离子含量逐渐降低。

4.2.3. 水温动态变化

试验期间测试南一1煤采区13521工作面放水点不同深度出水点温度, 结果发现: 2018年第一阶段、第二阶段, 水温随着深度的增加呈现递增趋势, 且水温随深度增长趋势相近。对比于2018年, 2021年放水阶段水温随温度增加随深度的变化不明显, D4-1#钻孔水温值较高, 达到39℃, 各钻孔及水温如表4。

Table 4. Schedule of depth water temperature of each borehole

表4. 各钻孔深度 - 水温一览表

钻孔名称	深度(m)	层位	2018年3	2018年3	2018年12	2018年12	2021年5	2021年5
			月19日	月27日	月5日	月20日	月7日	月16日
			水温(°C)	水温(°C)	水温(°C)	水温(°C)	水温(°C)	水温(°C)
JD5-9#	-639.57	C ₃ ^{3下}	37.5					
JD6-3#	-606.82	C ₃ ^{3下}	36.5					
JD7-3#	-600.63	C ₃ ^{3下}	36.3					
JD7-9#	-634.2	C ₃ ^{3下}	36.9					
T1	-639.23	C ₃ ^{3下}			36	36.9		
T2	-639.23	C ₃ ^{3下}			36	36.2		
T3	-639.23	C ₃ ^{3下}			36	36.5		
T4	-639.23	C ₃ ^{3下}	/	35.7	36	36.5		
T5	-639.23	C ₃ ^{3下}			36	35.8		
JD12-4#	-580.56		35.7					
JD12-8#	-575.41	C ₃ ⁵	35.9	35.9				
JD12-10#	-607.1	C ₃ ^{3下}	35.9	36	36	36		
JD12-补10#	-607.1	C ₃ ⁸			36	36		
疏放水1#	-600.63	C ₃ ^{3下}					36.8	35.5
D4-1#	-665.00	C ₃ ¹					39.5	39.4
3-4#	-663.80	C ₃ ³					39.0	38.5

5. 地下水动态变化影响因素

5.1. 构造控水影响

顾北煤矿位于淮南煤田中部水文地质单元, 且属于顾北-张集-谢桥次一级水文地质单元。在这次一级单元中, 该矿位于F₂₁₁和F₈₆之间, 石炭系太原组含水层通过该断层与相邻矿井之间发生一定水力联系, 且其上部为煤系弱含水层, 而下部与奥陶系灰岩之间通过断层或陷落柱发生水力联系。因此, 研究区为一个相对独立裂隙含水系统, 但受F₁₀₄断层影响, 又分为南北两个独立亚构造单元, 形成两个相对独立含水系统。F₁₀₄断层对顾北矿灰岩露头区而言, 为深部导水断层(太原组C₃III组灰岩深部导水), 九C₃I孔在F₁₀₄断层北侧, 水位受断层影响较大, 自疏放水以来水位持续下降达25.53 m。因此, 断层对地下水水位变化控制显著。除断层外, 还发育有滑面、裂隙溶隙和褶曲等构造。褶曲起伏幅度较大, 致使煤层形成波状形态; 滑面和裂隙破坏了煤层及其顶底板的完整性, 导致岩层破碎, 为地下水流动提供了导水通道。

由于受 A 组煤层采动和井下放水试验的影响,太原组含水层形成局部地下水流系统,而相对较深的下部奥陶系含水层为中间含水层系统,它通过构造与上部太原组含水层发生水力联系。这种不同深度含水层系统决定了地下水径流深度、水动力条件和氧化与 - 还原环境、地下水温度变化以及单斜径流方向上水岩作用程度。

5.2. 井下疏放水影响

第一次放水试验:通过不同阶段的水量、水压以及水位观测,获得了丰富试验数据,得出了规律性认识。 C_3I 组灰岩含水层的水量、径流速度疏放随时间和深度增大逐渐减小,反映出以储存量消耗为主。试验期间,地面观测孔水位变化与疏放时间不同步,且不明显,表明井下 C_3I 组放水点与露头区其他同含水层之间水力联系存在滞后现象;同时也间接反映了在试验区内与其他含水层之间渗透性较差,水力联系不太密切。

第二次放水试验:再次证明 C_3I 组灰岩含水层浅部裂隙较为发育,富水性和渗透性相对较好,随着深度增加,水量逐渐减小,富水性弱,反映了岩溶裂隙发育程度由浅部至深部逐渐变差、下部与上部岩溶之间连通性差。

顾北矿南一采区水质自勘探阶段至 2021 年 5 月放水试验结束,自疏放水以来,地面观测孔水位一直呈下降趋势,截止到 2018 年 8 月注浆治理前,七 O_{1+2} , 九 O_{1+2-1} , 九 C_3III 钻孔水位分别下降了 13.08 m, 11.44 m, 13.81 m (如图 4)。

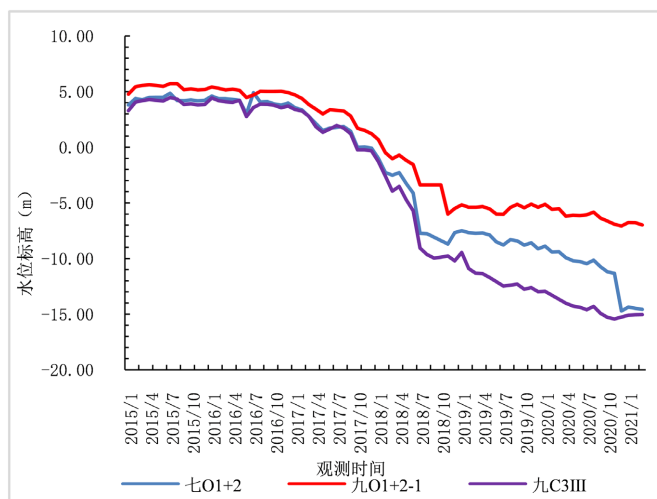


Figure 4. Dynamic change of water level before and after drainage
图 4. 疏放水前后水位动态变化

水化学类型由 $Cl-Na+K$ 转变为 $Cl \cdot HCO_3-(Na+K)$ 最后演变为 $Cl-(Na+K) \cdot Mg$ 型,水质类型不断变化。放水试验第一阶段底抽巷、放水巷以及放水试验第二阶段水质数据可以分三种,说明所取水样存在混合水的可能。随着时间的推移,含水层中离子含量也在不断变化, Cl^- 、 Mg^{2+} 含量显著增多, Cl^- 含量随着地下水流程的增大而不断增加, Mg^{2+} 含量主要来源与白云岩、泥灰岩的溶解,由于取样点白云岩较少,因此推断该区 Mg^{2+} 增多与邻近矿区注浆活动有关;井下疏放水造成灰岩地下水流速加快,溶滤作用增强;同时,由于灰岩水长期与空气接触,灰岩地下水中 CO_2 浓度上升,溶蚀能力增强,加快碳酸岩类的溶解。 CO_3^{2-} 与 SO_4^{2-} 含量不断减少,这与含水层发生的水化学反应有一定的联系,在封闭的还原环境中,脱硫细菌促使 SO_4^{2-} 还原为 H_2S ,使得 HCO_3^- 含量增多。各离子含量的变化与含水层围岩性质、地温变化、含水层的氧化 - 还原环境以及人为干扰有一定的关系。

5.3. 区域治理工程影响

地面区域探查治理是近几年一种新型防治水技术，它采用地面定向钻进技术，围绕“点，线，面”的治理类型进行合理布置分支孔，在治理区域合理布井，做到钻探全覆盖无盲区，并通过注浆的方式[20][21]，进行填充加固裂隙及导水构造，改造深部灰岩及其附近含水层，使其成为隔水层并阻断奥灰及以下含水层通道[22][23]。综合考虑突水系数要求、含水层水力联系、地层可注性、地层岩石特征等因素可知，南一1煤采区选 C_3^9 为地面区域治理目的层。

C_3I 组灰岩含水层： C_3I 组钻孔中九 C_3I 孔，在未注浆前，水位呈下降状态自2015年以来，到2018年3月水位共下降25.53 m，注浆过程中，由于浆液扩散阻断了与相邻区域含水层之间的水力联系，对含水层产生一定的压力，结果导致水位上升，注浆结束后水位仍保持上升状态(如图5)，说明深部奥灰水对其没有补给，水位趋于稳定状态。



Figure 5. Dynamic change of water level in No.9 observed hole of C_3I aquifer
图 5. 九 C_3I 孔水位动态变化

C_3II 组灰岩含水层：注浆对 C_3II 组灰岩含水层水位影响较大，早期九 C_3II 孔在13121工作面注浆过程中，受注浆充填挤压影响水位出现上升现象。注浆结束后，浆液阻隔了 C_3I ， C_3II 灰岩含水层与下部 C_3III 灰岩含水层和奥灰灰岩含水层水力联系。

C_3III 组及 O_{1+2} 灰岩含水层：区域治理注浆前(2018年8月)，因井下受疏放水和相邻张集煤矿出水的影响， C_3III 与 O_{1+2} 灰岩含水层联系密切，且其对 C_3I 组灰岩含水层具有一定的补给，水位下降幅度较大。随着分支钻孔的浆液由 C_3^9 注入后形成了有效隔水层，阻隔了下部(C_3III 与 O_{1+2})灰岩含水层对上部的补给，导致 C_3III 与 O_{1+2} 水位趋下降有所减弱。

6. 结论

通过上述分析，可以得出如下结论：

- 1) 通过井下多次放水试验发现： C_3I 组灰岩含水层浅部裂隙较为发育，富水性和渗透性相对较好，随着深度增加，水量减小，富水性弱，反映了岩溶裂隙发育程度由浅部至深部逐渐变差、下部与上部岩溶之间连通性差，
- 2) 经地面区域探查治理后，井下 C_3III 组和奥灰水位下降速度变慢，表明通过注浆区域治理阻断了 C_3I 、 C_3II 组灰岩与下部 C_3III 组和奥灰含水层之间的垂向水力联系。

3) 试验区水质组分变化表明: 由露头区沿单斜含水层的倾向方向, TDS 及 PH 逐渐增加。随着时间的推移 Cl^- 、 Mg^{2+} 含量逐渐增大, CO_3^{2-} 与 SO_4^{2-} 含量不断减少。

4) 井下疏放水、区域治理工程和地质构造是控制地下水流场及其动态变化的控制因素。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(42172279, 41572147); 安徽理工大学 2021 年研究生创新基金项目(2021CX2010)。

参考文献

- [1] 靳德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2006(6): 3-6.
- [2] Jiang, C.F., Gao, X.B., Hou, B.J., Zhang, S.T., Zhang, J.Y., Li, C.C. and Wang, W.Z. (2020) Occurrence and Environmental Impact of Coal Mine Goaf Water in Karst Areas in China. *Journal of Cleaner Production*, **275**, Article ID: 123813. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123813>
- [3] 高宇航, 许光泉, 党保全, 等. 隐伏岩溶地下水动态特征及水文地质模式分析[J]. 煤矿安全, 2021, 52(3): 204-210.
- [4] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学, 1995(4): 361-366.
- [5] 马振民, 刘立才, 陈鸿汉, 等. 山东泰安岩溶水系统地下水化学环境演化(1) [J]. 现代地质, 2002(4): 423-428.
- [6] 蒋飞军, 卿国屏, 蒋魁, 等. 桥头河煤矿区深部岩溶突水机理及水害防治分析[J]. 资源信息与工程, 2021, 36(3): 76-79, 86.
- [7] 李定龙. 应当建立煤矿区水资源保护区[J]. 中国煤炭, 1997(7): 20-21, 58.
- [8] 丛利, 江彬华, 李英明. 基于井下群孔放水试验的首采工作面涌水量预测[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 162-163.
- [9] 王占银, 胥海东, 王彦召, 等. 基于放水试验的含水层参数计算及含水层间关系分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 227-231.
- [10] 田广, 王晓波. 东滩煤矿奥灰放水试验数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 61-64.
- [11] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1112-1117.
- [12] 吴玉华, 赵开全, 孙本魁. 底板灰岩承压水上开采安全技术实践及认识[J]. 煤矿开采, 2009, 14(4): 40-42, 87.
- [13] 许光泉, 桂和荣, 张连福, 等. 矿井大型放水试验及其意义[J]. 地下水, 2002(4): 200-201, 237.
- [14] 叶志清. 放水试验阶段地下水动态变化及影响因素分析[J]. 地下水, 2014, 36(5): 259-261.
- [15] 赵宝峰, 吕玉广. 基于底板砂岩含水层放水试验的多含水层水力联系研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 34-39.
- [16] Liu, Z.B., Zhao, R.J., Dong, S.N., Wang, W.K., Sun, H.F. and Mao, D.Q. (2020) Scanning for Water Hazard Threats with Sequential Water Releasing Tests in Underground Coal Mines. *Journal of Hydrology*, **590**, Article ID: 125350. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125350>
- [17] 余世滔. 顾北矿岩溶水文地质特征及疏放性评价[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [18] 郑竹艳, 许光泉, 杨婷婷, 等. 淮南顾北矿 F₁₀₄断层两侧岩溶水化学形成机制及导隔水性评价(1) [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(1): 129-137.
- [19] 杨婷婷, 许光泉, 余世滔, 等. 煤层下部太原组岩溶水化学组分特征及其成因分析(1) [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 100-108.
- [20] 郑士田. 两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 142-146, 153.
- [21] 赵庆彪. 华北型煤田深部开采底板突水机理与区域治理关键技术[J]. 华北科技学院学报, 2015, 12(4): 1-7.
- [22] 赵鹏飞, 赵章. 地面水平分支孔注浆超前治理奥灰底板突水技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 122-125.
- [23] 李金龙, 张允强, 徐新启, 等. 高家堡煤矿煤层顶板注浆加固堵水技术探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1): 20-25.