

基于多源耦合的矿井异常水温成因研究

——以塔什店一号矿井为例

孟宪伟*, 杨晓锋, 冯子仪, 欧阳玉山

河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年4月24日; 录用日期: 2026年6月22日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

矿井异常水温是地下热场、含水层结构及采动扰动共同作用的外在表现。针对塔什店一号矿井局部出水温度偏高、层间水力联系判识不足的问题, 以新疆库尔勒塔什店矿区一号矿井为研究对象, 综合钻孔地温梯度、抽水试验、井下实测水温及水化学资料, 分析异常水温空间分布与形成机制。结果表明: 研究区地温梯度为 $1.40^{\circ}\text{C}\sim 3.79^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 平均 $2.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 其中9-3、11-2和13-4孔达到或超过 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 异常阈值, 但异常并非区域性整体升温, 而表现为局部发育、分层分带特征。H2含水层循环较快, H3-1具过渡导通特征, H3-2低渗、弱循环, 是深部热量积聚的主要层位。采动裂隙及揭露通道使H3-2热水释放, 并与上覆冷水混合, 形成阶段性偏高温水。研究可为类似矿区异常温水识别和防治水提供依据。

关键词

矿井异常水温, 层间水力联系, 多源耦合, 抽水试验

Research on the Causes of Abnormal Mine Water Temperature Based on Multi-Source Coupling

—A Case Study of Tashidian No. 1 Mine

Xianwei Meng*, Xiaofeng Yang, Ziyi Feng, Yushan Ouyang

School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: April 24, 2026; accepted: June 22, 2026; published: June 30, 2026

*通讯作者。

Abstract

Abnormal mine water temperatures represent the external manifestation of the combined effects of underground thermal fields, aquifer structures, and mining-induced disturbances. Addressing the issues of elevated local water temperatures and insufficient identification of inter-layer hydraulic connections at the Tashidian No. 1 Mine, this study focuses on the Xinjiang Korla Tashidian Mining Area No. 1 Mine. By integrating borehole geothermal gradients, pumping tests, *in-situ* water temperature measurements, and hydrochemical data, the spatial distribution and formation mechanisms of abnormal water temperatures were analyzed. The results indicate that the geothermal gradient in the study area ranges from 1.40°C to 3.79°C/100m, with an average of 2.53°C/100m. Boreholes 9-3, 11-2, and 13-4 reached or exceeded the 3°C/100m anomaly threshold; however, the anomaly does not represent a regional overall warming but rather exhibits localized development with stratified and zoned characteristics. The H2 aquifer exhibits rapid circulation, while H3-1 demonstrates transitional conductivity features, and H3-2, being low-permeability with weak circulation, serves as the primary layer for deep heat accumulation. Mining-induced fractures and exposed channels facilitate the release of hot water from H3-2, which mixes with overlying cold water to form periodically elevated-temperature water. This study provides a basis for identifying abnormal warm water and implementing water control measures in similar mining areas.

Keywords

Abnormal Mine Water Temperature, Hydraulic Connection between Strata, Multi-Source Coupling, Pumping Test

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

矿井异常水温现象不仅关系到井下热环境和生产安全,也反映了地下水系统的补给条件、循环特征及含水层间潜在水力联系[1]-[3]。对于多含水层叠置发育的煤矿区而言,局部出水温度偏高通常不是单一热源作用的结果,而与地温场背景、含水层赋存条件、局部导水结构及不同层位地下水混合作用密切相关[4]-[6]。因此,查明异常温水的形成机制,对矿井水源判别、导通通道识别和防治水工作具有重要意义。

已有研究表明,地下水温度可作为反映地下水循环深度和运移过程的重要信息[7],水化学特征能够揭示不同含水层之间的成因差异与混合关系[8],抽水试验参数则可从水动力角度反映含水层导水能力及补给条件[9]-[11]。现有矿井水研究多集中于充水水源判别和水化学分析,对异常温水问题的系统研究相对较少,尤其对采动扰动背景下局部导通、层间弱连通及地下水混合升温等过程认识仍显不足[12][13]。

塔什店一号矿井井下局部出水点存在水温偏高现象,且在空间上表现出较明显的差异性,说明其形成机制并非单纯由区域地温背景控制,而更可能与含水层结构特征及局部水力联系变化密切相关。基于此,本文以塔什店一号矿井为研究对象,综合利用原始地勘资料、钻孔地温梯度、抽水试验参数、井下出水温度实测及水化学资料,对异常温水的成因机制及层间水力联系特征进行系统分析,以期为类似矿区异常温水识别及防治水工作提供参考。

2. 研究区概况与矿井水温数据异常情况

2.1. 研究区概况

塔什店矿区一号矿井位于新疆库尔勒市塔什店镇(图 1)。根据已有勘探和补勘成果,井田主要含水层自上而下可划分为 H2、H3-1 和 H3-2。H2 为第三系砂岩孔隙-裂隙含水层, H3-1 为 10 煤底板以上侏罗系塔什店组砂岩裂隙含水层, H3-2 为 10 煤底板以下哈满沟组砂岩裂隙含水层。

对采空区及周边矿井影响的排查表明,塔什店一号矿井属于新建矿井,不存在老窑积水、老空区残余热异常等历史遗留因素。井下现阶段仅形成 118-2W01 工作面采空区,且该采空区已于 2025 年 9 月完成密闭处理;各采掘工作面周边总体以实体煤分布为主,不具备形成大范围热储或持续导热的空间条件。同时,邻近矿井采空区与本矿井现采掘区域相距均超过 1.6 km,其热传递及水力扰动难以对研究区产生直接影响。由此判断,研究区异常温度现象不宜归因于邻矿采空区传热、老窑余热或老空区影响,其成因更应从本矿井地层热背景及含水层内部水热循环过程加以分析。

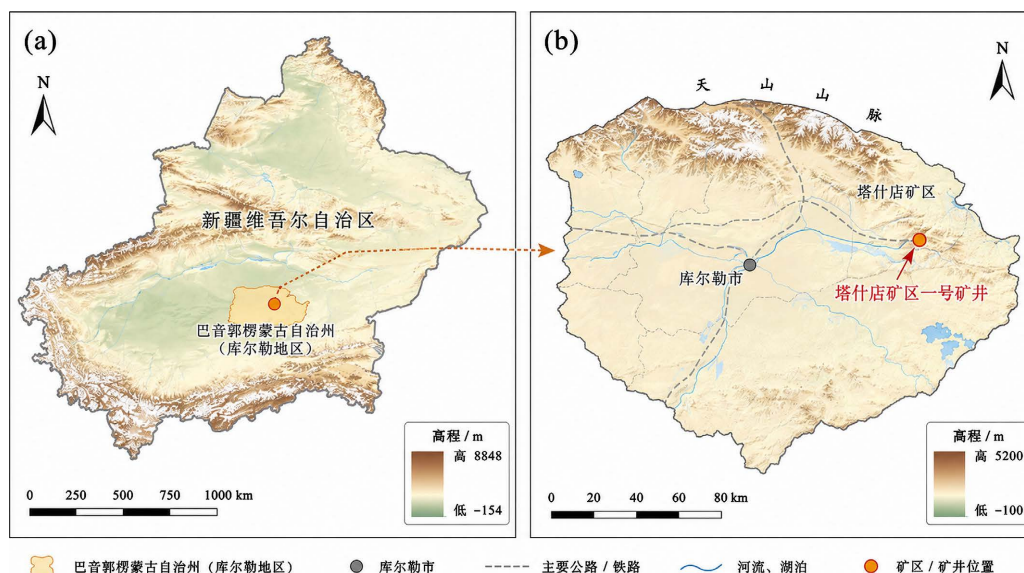


Figure 1. Geographical location map of Tashidian mining area
图 1. 塔什店矿区地理位置图

2.2. 矿井水温数据异常情况

基于原始地勘钻孔测温资料与异常温度专项资料,对塔什店矿区一号矿井已识别的异常温度相关钻孔进行统一校核。地温梯度钻孔统计结果见表 1,地温梯度钻孔情况见图 2。

Table 1. Statistical results of geothermal gradient drilling boreholes

表 1. 地温梯度钻孔统计结果

孔号	5-2	6-3	7-3	9-3	10-4	11-2	12-1	13-4	14-1	井检 1	井检 2	极值/平均值
地温梯度 (°C/百米)	2.60	2.39	1.88	3.00	2.84	3.79	1.40	3.04	2.26	2.65	1.97	1.40~3.79/2.53

据表 1、图 2 比对确认,异常温度分析涉及钻孔主要包括 5-2、6-3、7-3、9-3、10-4、11-2、12-1、13-4、14-1、井检 1 和井检 2。

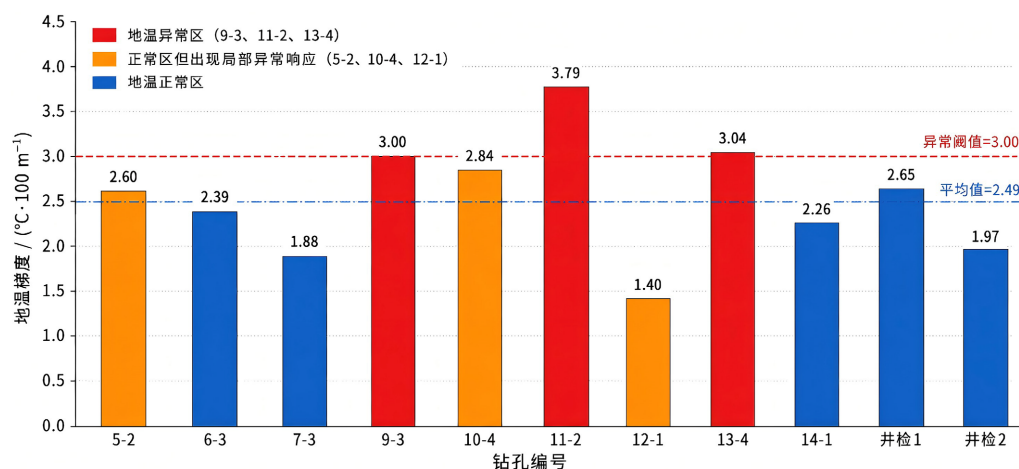


Figure 2. Statistical chart of geothermal gradient drilling boreholes

图 2. 地温梯度钻孔统计图

3. 矿井水温异常分析

地温梯度通常指恒温带以下地层温度随深度增加的增长率，国内矿井热害相关规范将正常地温梯度范围概括为 $1.6^{\circ}\text{C}\sim 3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，低于或高于该正常范围均可视为地温异常区；一般大陆地壳浅部地温梯度多在 $25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，即约 $2.5^{\circ}\text{C}\sim 3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ， $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 常被作为正常热背景上限或异常分区界线使用；本区 11 个测温钻孔平均值为 $2.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ， $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 高于全区平均值约 18.6%，且位于样本高值端，能够较好地区分背景型钻孔与局部高温响应钻孔。基于上述依据，9-3、11-2 和 13-4 钻孔地温梯度分别为 3.00°C 、 3.79°C 和 $3.04^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，达到或超过异常阈值，可归为地温异常区；5-2、10-4、12-1 等钻孔地温梯度虽低于 $3.00^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，但在局部层段、特定水平或井下揭露区段仍出现温度偏高现象，说明“异常温度点”与“区域高地温场”并不完全等同。进一步考察孔内局部高温段，可以发现 5-2、9-3、10-4、11-2、12-1 和 13-4 均存在一级或二级高温区间，说明研究区热异常并非简单表现为“整孔升温”，而是呈现出“背景正常—局部高温段突出”的分层特征。依据统计结果，研究区用于地温分析的钻孔共 11 个，地温梯度变化范围为 $1.40^{\circ}\text{C}\sim 3.79^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，平均值为 $2.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。以 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 作为异常分界，9-3、11-2 和 13-4 钻孔地温梯度分别为 3.00°C 、 3.79°C 和 $3.04^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，达到或超过异常阈值，可归为地温异常区；5-2、10-4、12-1 等钻孔地温梯度虽低于 $3.00^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，但在局部层段、特定水平或井下揭露区段仍出现温度偏高现象，说明“异常温度点”与“区域高地温场”并不完全等同。进一步考察孔内局部高温段，可以发现 5-2、9-3、10-4、11-2、12-1 和 13-4 均存在一级或二级高温区间，说明研究区热异常并非简单表现为“整孔升温”，而是呈现出“背景正常—局部高温段突出”的分层特征。

Table 2. Statistics on abnormal high-temperature sections in drilling holes

表 2. 异常钻孔高温区段统计

孔号	5-2	9-3	10-4	11-2	12-1	13-4
一级高温区垂深范围(m)	740~880	540~740	720~940	600~700	665~955	680~820
一级高温区标高范围(m)	464~324	630~430	420~200	548~448	491~201	457~317
二级高温区垂深范围(m)	>900	-	>960	>710	-	>840
二级高温区标高范围(m)	<304	-	<180	<438	-	<297
一级高温区温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	33.7~37.4	30.6~36.6	34.9~41.1	37.0~40.8	24.0~28.0	35.1~39.3

从高温区段分布看, 11-2 和 9-3 的一级高温段主要位于+500 m 水平以上; 5-2、10-4、12-1 和 13-4 的高温段则更多出现在+500 m 水平以下, 表明热异常在垂向上具有明显分带性。结合三维地震资料与地质解释结果, 异常点附近未发现控制性断层, 也未见岩浆岩侵入现象, 因此构造传热与岩浆热源可以基本排除。研究区热异常更可能属于沉积地层背景下的局部蓄热与层位差异所致, 异常钻孔高温区段统计见表 2。

从区域热场特征看, 矿区整体仍以正常地温背景为主, 高温异常表现为局部增强、分段出现和与导通条件耦合的非均质特征。地温梯度提供的是深部热源背景约束, 而井下偏高温水是否形成, 则更多取决于含水层之间的导水能力差异、采动裂隙或断裂带导通程度、局部抽排条件及冷热水体混合比例。因此, 在成因分析中必须把钻孔地温梯度、抽水试验参数、水化学差异及井下实测温度放在同一分析框架内综合讨论。

4. 水化学、水动力与水温异常联合分析

4.1. 含水层水文参数特征

抽水试验成果为判识温度异常的水动力学基础提供了关键约束。总体上, H2 含水层单位涌水量较大、渗透系数偏高, 说明其补给来源相对开放、水力更新速度较快, 热量不易长期滞留; H3-1 含水层水文参数处于中间水平, 既具一定渗透性, 也具局部滞热条件, 更容易表现为过渡型或混合型温度响应; H3-2 含水层单位涌水量与渗透系数普遍偏低, 反映深部水体循环缓慢、对流换热受限, 是形成相对高温水的重要储热层位。就热-渗耦合关系而言, 抽水试验并不直接给出“高温”结论, 但能够揭示热量是否具备长期保存与被后期开采扰动重新释放的水动力学前提。

抽水试验与揭露段资料经统一换算后, 得到厚度、涌水量、单位涌水量、渗透系数以及导水能力等参数。与仅比较单一渗透系数不同, 本文将厚度因素纳入, 采用 $T^* = K \cdot b$ 作为层位导水能力代理指标。该处理有助于避免薄层高 K 和厚层低 K 之间的直接误判, 也更接近矿井工程上对“可持续补给能力”的关注, 抽水试验与揭露段水动力-热化学参数见表 3。

Table 3. Pumping test and hydrodynamic-hydrothermal chemical parameter table for the exposed section

表 3. 抽水试验与揭露段水动力-热化学参数表

孔号	含水层	厚度/m	涌水量/ (L·s ⁻¹)	单位涌水量 /[L·(s·m) ⁻¹]	渗透系数/ (m·d ⁻¹)	导水能力 T*	平均水温/°C	矿化度/ (mg·L ⁻¹)
CG1	H2	76.85	43.200	0.0655	0.00760	0.5841	27.0	2530
CG2	H2	87.32	5.846	0.0148	0.00170	0.1484	25.3	2514
CG3	H2	88.08	34.870	0.0605	0.00620	0.5461	28.7	2550
CG2	H3-1	13.59	0.980	0.0041	0.00040	0.0054	24.3	2552
CG3	H3-1	10.09	25.648	0.1958	0.01050	0.1059	24.2	2555
揭露段	H3-2	138.14	0.400	0.0029	0.00055	0.0760	31.3	3126

进一步将抽水试验参数与水温资料叠合分析可以看出, 温度偏高区并不对应最大富水区, 而更常出现在“中低渗-弱循环-局部导通”的组合条件下。若含水层渗透性过强, 深部热量会随地下水循环被持续带走, 难以形成稳定热异常; 若含水层过于封闭, 则高温水虽可滞留, 但不易进入井下空间。塔什店矿区异常温水的形成恰恰介于两者之间: 深部 H3-2 提供热量累积背景, 采掘或构造裂隙提供有限导通通道, 上覆 H3-1 和局部 H2 冷水则在揭露后参与混合, 最终在井下表现为“温度偏高但并非极高、且具

有间断性与衰减性”的异常水温响应。

结合既有补勘成果，CG1~CG3 抽水试验孔主要约束 H2 与 H3-1 的水动力特征，H3-2 则主要依靠井下揭露段排水与水样资料进行表征。从试验结果的相对关系看，CG1、CG2 和 CG3 在 H2 层的试验段均表现为中等出水能力，说明该层具有一定补给与排泄条件，热量不易长期封存；而 H3-1 层在不同试验孔中的表现差异较大，反映其受裂隙展布控制明显，属于“局部导通、整体偏弱”的过渡性层位。对比之下，H3-2 虽然缺少完整常规抽水试验孔组，但其揭露段出水温度高、矿化度高、单位涌水量低，说明深部层位处于相对封闭的慢循环状态。因此，抽水试验所揭示的含水层开放程度差异，为温度异常解释提供了基础水动力背景：H2 更接近快速循环冷水系统，H3-1 是层间联系与混合作用的关键通道，H3-2 则是异常温水的主要储热空间(具体参见表 4)。

Table 4. Comparison of hydrochemical parameters across different aquifers and before/after cooling (mg/L)

表 4. 不同含水层及降温前后水化学参数对比(mg/L)

样品/层位	Na+K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	矿化度	pH	平均水温(°C)	水化学类型
H3-1	770.54	140.49	21.27	762.47	758.16	134.55	15.05	2602.86	7.58	25	Cl-SO ₄ -Na+K
H3-2	759.29	262.25	25.82	871.32	931.40	94.88	1.86	2946.82	7.38	36	Cl-SO ₄ -Na+K
H3-2 降温后	847.85	184.55	37.31	843.23	947.27	164.17	0.00	3024.38	7.30	25	Cl-SO ₄ -Na+K

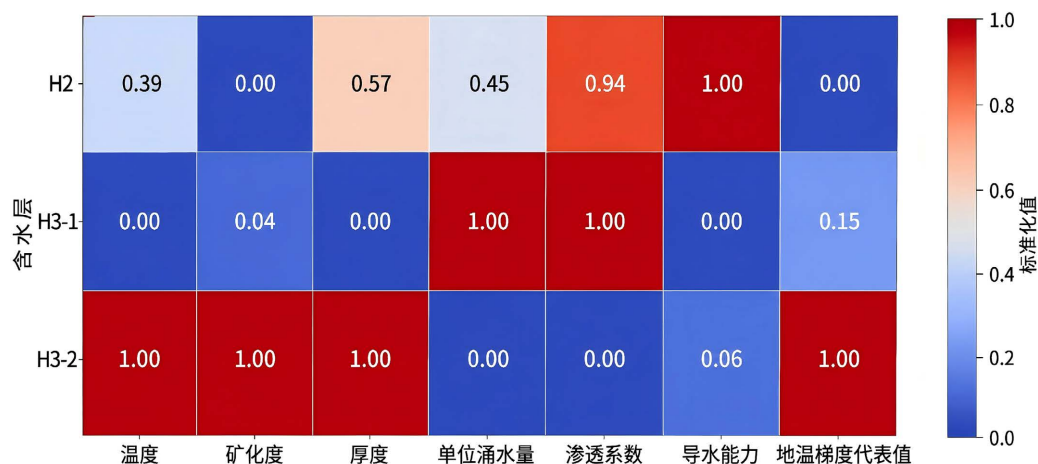


Figure 3. Standardized thermal map of multi-source indicators for aquifers

图 3. 含水层多源指标标准化热力图

图 3 中标准化处理采用极差标准化方法，目的是消除温度、矿化度、厚度、单位涌水量、渗透系数、导水能力和地温梯度等指标量纲差异，使不同指标能够在同一热力图中进行横向比较。对第 j 个指标，设第 i 个层位或含水层的原始代表值为 x_{ij} ，则标准化值 x'_{ij} 按式(1)计算：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min,j}}{x_{\max,j} - x_{\min,j}} \quad (1)$$

式中， x_{\min} 和 x_{\max} 分别为第 j 个指标在 H2、H3-1 和 H3-2 三个层位中的最小值和最大值。当同一指标在某一层位存在多个试验点时，先计算该层位的算术平均值作为代表值，再参与标准化。代表值计算遵循以下原则：H2 取 CG1、CG2 和 CG3 的算术平均值；H3-1 取 CG2 和 CG3 的算术平均值；H3-2 因常规抽

水试验资料不完整, 采用井下揭露段排水与水样资料作为代表值。地温梯度指标根据各层位对应埋深范围内的测温结果及邻近钻孔地温梯度资料进行归并统计。以温度为例, H2 平均水温为 $(27.0 + 25.3 + 28.7)/3 = 27.0^{\circ}\text{C}$, H3-1 为 24.25°C , H3-2 揭露段为 31.3°C ; 经极差标准化后, 对应值分别为 0.39、0.00 和 1.00。矿化度、厚度、单位涌水量、渗透系数和导水能力等指标均按同一流程处理。

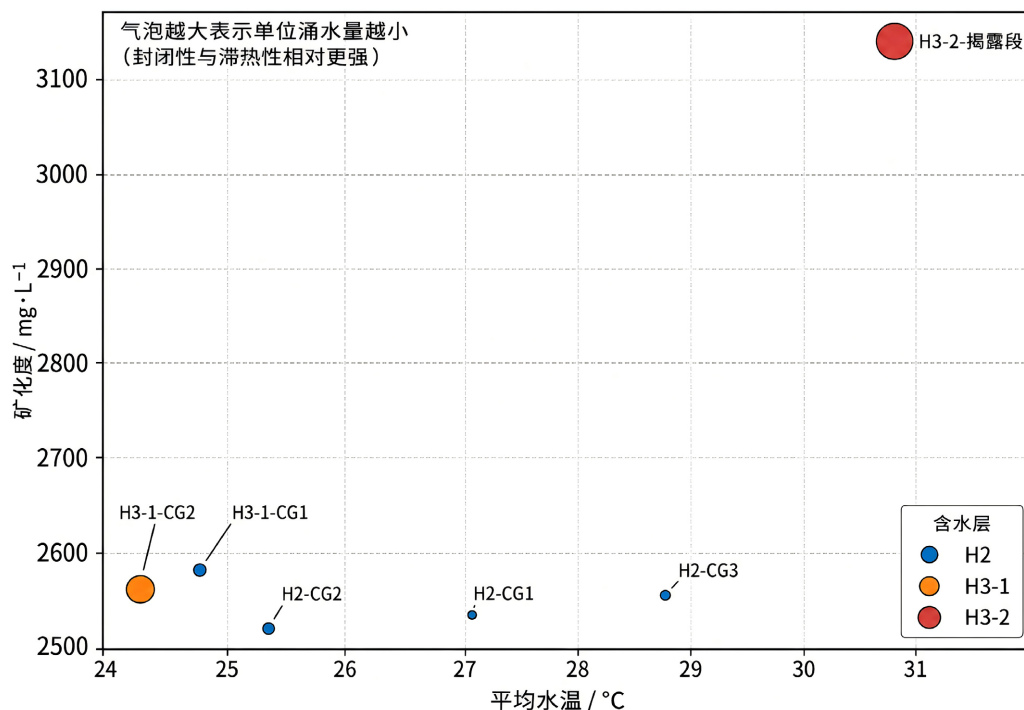


Figure 4. Coupling diagram of water temperature, salinity, and unit water inflow rate
图 4. 水温 - 矿化度 - 单位涌水量耦合图

根据图 4 显示不同含水层水体并不具有简单的一致性来源, 其水文地球化学特征和循环条件存在明显差异。H2 含水层总体表现为补给条件较好、地下水更新较快的浅部循环特征; H3-1 含水层则处于由浅部向深部过渡的水动力环境, 水化学性质表现出一定的过渡性; 相比之下, H3-2 含水层更接近深部弱循环体系, 在相对封闭条件下更易发生矿化度升高与热量积聚。层间这种差异性表明, 井下异常温水的判断不能仅依据单一测点温度高低作出判断, 而应结合水化学离子组合特征、矿化度变化及其与温度的协同响应, 综合识别是否存在深部热水参与或层间水体混合作用。

井下主要出水点及采掘工作面温度实测结果进一步支持了这一认识。部分揭露段在初始阶段出现温度偏高现象, 但随着持续排水过程推进、低温补给水进入以及局部对流换热增强, 水温又逐渐回落, 说明异常温度并非静态常量, 而具有明显的动态演化特征。若该异常主要受原位高地温单独控制, 则井下出水温度应保持相对稳定的高值状态; 而实际监测中, 温度变化往往伴随出水量变化、揭露先后顺序及导水通道发育程度而发生波动, 表明其本质上更接近于深部热水局部释放后与周边水体发生混合, 并在持续补给和换热作用下逐步衰减的过程性响应。

综合钻孔地温梯度、抽水试验、水化学对比和井下实测资料, 可以将研究区井下偏高温水成因概括为三层逻辑: 其一, 深部地温梯度及 H3-2 弱循环环境提供了热量积累背景; 其二, 采动裂隙、局部断裂或揭露扰动使原本相对分隔的含水层之间出现水力联系, 构成热水上移或冷水下渗的通道条件; 其三, 深部热水在进入井下前后, 与上覆冷水发生不同比例混合并持续进行对流换热, 导致井下实测水温高于

常规涌水但明显低于深部封闭热储水温。因此，井下温度偏高本质上是地温背景、含水层结构与开采扰动共同作用的耦合结果。

H3-1 与 H3-2 均以 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na+K}$ 型为主，说明二者具有一定的区域成因一致性，但在温度和矿化度水平上仍存在明显差异。H3-2 平均水温约 36°C ，平均矿化度约 2946.82 mg/L ，均高于 H3-1；当 H3-2 出水温度由约 36°C 降低至 25°C 后，其主要离子组成与水化学类型并未发生根本改变，仅表现为局部参数的小幅波动。这一现象说明，水温衰减主要对应揭露后持续排水条件下的热量散失及上覆冷水混合，而不是全新水源对原热水的完全替代。换言之，H3-2 的高温属性具有“端元性”，而降温后水样则体现出端元热水经 H3-1 补给混合后的过渡特征。

4.2. 主要出水点与采掘工作面温度实测

井下实测结果可从工程角度检验上述含水层判识。主要出水点中，118-2W01 采空区涌水水温为 26°C ~ 28°C ，平均约 27°C ；119W01 工作面涌水为 27°C ~ 30°C ，平均约 29°C ；111001 回风顺槽涌水为 30°C ~ 32°C ，平均约 32°C 。可见，靠近 H3-2 揭露部位的出水点温度明显偏高，而与 H3-1 联系更强的出水点水温相对偏低。另一方面，多个采掘工作面环境温度均未达到 26°C 热害控制阈值，说明“水温偏高”与“作业环境热害”并不完全等同，前者更多反映含水层热—水动力属性，后者还受到通风、湿度和设备散热等工程因素影响。

Table 5. Analysis of the temperature of mine outflow water

表 5. 矿井涌水温度分析

工作面/地点	实测温度($^\circ\text{C}$)	传感器温度($^\circ\text{C}$)	温度偏高原因分析
901 回采工作面	23	25.8	大功率电器设备散热
901 工作面上隅角	24	—	大功率电器设备散热
901 工作面回风	20.9	20.5	—
8203 回顺迎头	23	23.9	地质因素(靠近含水层)
8203 运顺迎头	20.9	20.2	—
1001 回顺迎头	21	23.9	地质因素(靠近含水层)

结合表 5，基于地勘资料、异常温度专项资料及钻孔测温结果综合校核，塔什店矿区一号矿井异常温度相关钻孔主要包括 5-2、6-3、7-3、9-3、10-4、11-2、12-1、13-4、14-1、井检 1 和井检 2。其中，9-3、11-2 和 13-4 孔地温梯度分别为 3.00°C 、 3.79°C 和 $3.04^\circ\text{C}/100\text{m}$ ，达到或超过异常阈值，属于地温异常区；其余钻孔整体处于正常地温背景，但在局部层段仍存在温度偏高响应。由此表明，研究区异常温度并非整体性区域地温异常，而是具有局部发育、分层分带和空间非均质特征，异常温度点与区域高地温场之间并不存在简单对应关系，应结合钻孔位置、水平标高、含水层层位及采掘揭露条件进行综合判识。

抽水试验、水化学对比和井下温度动态监测进一步表明，异常水温的形成并不取决于含水层富水性绝对大小，而主要受“储热条件—导通条件—混合条件”共同控制。H2 含水层补给开放、导水能力较强，热量不易长期保存；H3-1 具有一定渗透性和混合过渡特征，是层间水体交换的重要通道；H3-2 则表现为低渗、弱循环和相对封闭，是深部热量积聚的主要背景层位。采掘扰动及局部裂隙导通后，深部 H3-2 相对高温水沿导通带释放，并与 H3-1 及局部 H2 冷水混合，形成井下偏高温水的阶段性、间断性和衰减性响应。

塔什店一号矿井井下异常温水的形成，并不是某一单一含水层自身温度异常升高所致，而是矿井开拓扰动改变了原有分层含水系统的水力联系格局，使深部热水上移、浅部冷水下渗，并在揭露段发生持

续混合与换热的结果。原始状态下，H2、H3-1、H3-2 三个含水层在埋深、补给条件、径流强度和热量保存能力方面存在明显差异：H2 受大气降水补给控制，循环更新强，水温较低；H3-1 处于中间过渡层位，具一定侧向径流条件；H3-2 埋深较大、相对封闭、循环缓慢，在地温梯度控制下形成了较稳定的热量积聚环境。也就是说，深部 H3-2 本身具备“储热体”属性，而浅部和中深部含水层则更多体现为“补给 - 径流体”属性。这种天然分异是异常温水形成的基础前提。

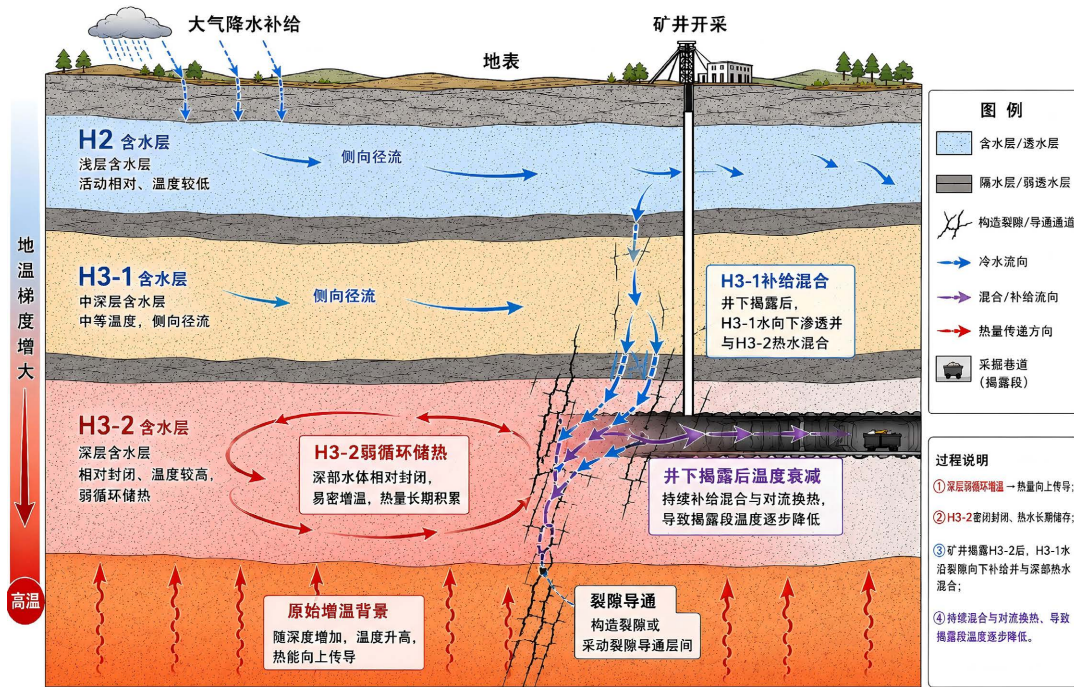


Figure 5. Conceptual model of mine water temperature anomaly and interlayer hydraulic connectivity
图 5. 矿井异常水温与层间水力联系图

异常水温本质上是采掘揭露与裂隙导通共同作用的结果，见图 5。随着矿井开拓和采掘活动推进，局部隔水层完整性受到破坏，原有相对稳定的分层水文地质结构被扰动，H3-2 含水层中温度较高的地下水得以沿裂隙及揭露通道向井下迁移；与此同时，H3-1 乃至局部 H2 含水层中的低温水也可沿导通部位进入揭露段，并与深部相对高温水发生混合。因此，井下实测到的异常水温并不是某一含水层原始温度的直接反映，而是在深部热水释放、上覆冷水补给以及井下空间换热共同作用下形成的综合温度响应。

随着排水过程持续推进，浅部低温补给水所占比例逐步增加，系统温度控制机制也由初期的深部高温水主导，逐渐转变为冷热水混合控制；同时叠加巷道环境中的对流散热作用，最终表现为出水温度持续回落并趋于稳定。由此可见，矿井异常温水的形成机理可概括为：在深部储热背景存在的前提下，采掘扰动导致裂隙导通和层间水力关系重组，进而通过地下水持续混合与热量交换，形成阶段性的井下高温出水现象。

4.3. 垂向越流热通量估算

本文将等效导水能力 $T^* = K \cdot b$ 与储水系数 S 共同用于约束层间水力响应能力，并在此基础上采用等效垂向达西通量 q_z 表征采动裂隙或揭露通道形成后的越流强度。 T^* 主要反映含水层或揭露段的等效导水能力， q_z 则用于描述不同导通情景下的垂向越流量级，二者分别从水动力响应和越流强度两个角度对热 - 水耦合过程进行约束。含水层水力扩散能力可表示为：

$$D = \frac{T^*}{S} \quad (2)$$

表 3 中 H2 平均等效导水能力约为 0.426 m²/d, H3-1 约为 0.0556 m²/d, H3-2 揭露段约为 0.0760 m²/d。考虑原始资料中储水系数尚未形成完整孔组, 本文采用承压砂岩裂隙含水层常用数量级 $S = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ 进行敏感性分析。若取有效响应距离 $L = 100$ m, 则压力响应特征时间可近似表示为:

$$\tau = \frac{SL^2}{T^*} \quad (3)$$

计算结果表明, H2 的响应时间约为 2.3~23.5 d, H3-1 约为 18.0~180 d, H3-2 约为 13.2~132 d。说明 H2 具有较快补给与排泄响应, 而 H3-1 和 H3-2 的水动力响应相对滞后, 更容易表现为阶段性混合和持续降温过程。

垂向越流导致的对流热通量可按下式估算:

$$q_h = \rho_w c_w \frac{q_z}{86400} \Delta T \quad (4)$$

式中, q_h 为对流热通量, 单位为 W/m²; ρ_w 为水的密度, 取 1000 kg/m³; c_w 为水的比热容, 取 4180 J/(kg·K); q_z 为等效垂向达西通量, 单位为 m/d, 计算时换算为 m/s; ΔT 为深部热水与上覆冷水之间的温差。根据表 4, H3-2 降温前后水温由约 36°C 降至 25°C, 本文取 $\Delta T = 11$ °C 作为端元温差, 用于表征深部热水释放并与上覆冷水混合过程中的近似热差。结合弱越流、扰动裂隙越流和局部通道化越流三类情景, 计算结果见表 6。

Table 6. Simplified estimation of vertical transflow heat flux
表 6. 垂向越流热通量简化估算

越流情景	等效 $q_z/(m \cdot d^{-1})$	$\Delta T/^\circ C$	$q_h/(mW \cdot m^{-2})$	水文地质含义
弱越流	1.0×10^{-5}	11	5.3	隔水层完整性较好, 仅有微弱层间交换
中等越流	1.0×10^{-4}	11	53.2	采动裂隙或揭露段形成有限导通, 热通量接近正常传导热流量级
局部通道化越流	3.0×10^{-4}	11	159.6	裂隙连通性增强, 短期内可显著抬升井下出水温度

表 6 中的计算结果表明, 当 $q_z = 1.0 \times 10^{-5}$ m/d 时, 对流热通量约为 5.3 mW/m², 仅对背景传导热流产生小幅修正; 当 $q_z = 1.0 \times 10^{-4}$ m/d 时, 对流热通量约为 53.2 mW/m², 已接近正常传导热流量级; 当局部裂隙连通性增强、越流强度增至 3.0×10^{-4} m/d 时, 对流热通量可达 159.6 mW/m², 明显高于背景传导热流。若取砂泥岩综合导热系数 $\lambda = 2.2$ W/(m·K) = 2.2, 本区平均地温梯度 2.53°C/100m 对应的传导热流约为 55.7 mW/m², 3°C/100m 异常阈值对应约 66.0 mW/m², 11-2 孔 3.79°C/100m 对应约 83.4 mW/m²。由此可见, 弱越流情景下对流热输入有限; 当采动裂隙形成中等越流时, 对流热通量已接近正常传导热流量级; 若局部通道化越流形成, 对流热输入可在短期内超过传导热流量级, 从而解释井下揭露初期水温偏高、持续排水后逐步回落的现象。

5. 结果与讨论

(1) 塔什店一号矿井异常水温并非整体性区域地温异常, 而是具有明显的局部发育和分区分布特征。钻孔地温梯度显示, 异常主要集中于 9-3、11-2、13-4 等少数钻孔, 并与首采区、五采区、六采区局部层位相对应; 同时, 部分地温梯度未达到异常阈值的钻孔, 在特定埋深和揭露区段仍出现温度偏高现象。

说明矿区温度异常受地层结构、含水层赋存条件及采动扰动共同控制，具有较强的空间非均质性，不能简单归因于区域高地温背景。

(2) 抽水试验、水化学和井下实测温度共同表明，异常温水形成的关键不在于单一含水层富水性强弱，而在于“深部储热-局部导通-冷热混合”的耦合过程。H2 含水层补给开放、循环较快，热量不易长期保存；H3-1 具有过渡性和局部导通特征，是层间水体混合的重要通道；H3-2 埋深较大、循环较弱、矿化度和温度相对较高，是异常温水的主要热源端元。采掘揭露后，深部热水沿裂隙或导通带上移，并与 H3-1 及局部 H2 冷水混合，使井下出水表现为初期温度偏高、持续排水后逐渐回落的动态响应。

(3) 综合认为，塔什店一号矿井异常温水是在正常地温场背景下，由采动扰动诱发局部导水结构发育、层间弱水力联系增强及不同层位地下水混合共同形成的复合水热响应。本文提出的概念模型具备进一步开展热-流耦合数值模拟的基础，后续可围绕 H2~H3-1~H3-2 三层含水结构，结合渗透系数、导水能力、端元水温、矿化度和井下温度衰减曲线，对垂向越流热通量、冷水混合比例及水温衰减过程进行定量验证。该认识可为异常温水预报、疏放水强度控制及矿井热害风险分区提供依据。

参考文献

- [1] 李善民, 全洪波, 唐名富, 等. 水质、水温在判别矿井涌水水源中的应用[J]. 人民黄河, 2024, 46(S2): 83-84.
- [2] 张立钊, 司明, 刘华建, 等. 基于水化学和物理方法的水温异常成因分析[J]. 地质与勘探, 2025, 61(6): 1296-1304.
- [3] 龚冀东. 梧桐庄矿底板高水位、高水温异常区探查治理技术[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(3): 57-62.
- [4] 字承柱, 张翔, 张源, 等. 洱源滇 20 井水温异常特征分析与机理研究[J]. 华南地震, 2025, 45(1): 59-67.
- [5] 晏先震. 高水温-地温异常形成机理及水害防治技术研究[J]. 能源与节能, 2025(1): 212-218+248.
- [6] Croghan, D., Van Loon, A.F., Bradley, C., Sadler, J., Ouellet, V. and Hannah, D.M. (2024) Identifying the Impacts of Urbanization and Extreme Flows on River Water Temperatures in Headwater Catchments. *Hydrological Sciences Journal*, **70**, 347-357. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2425827>
- [7] 王辰辰. 南水北调中线滏阳河段生态补给地下水数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2025.
- [8] Du, G.L., Su, S.Q., Chang, X.C., et al. (2023) Hydrogeochemical Characteristics and Genesis of Hongshuilantang Hot Spring and Its Water Temperature Anomalies during the Rushan Earthquake Swarm in Eastern China. *Frontiers in Earth Science*, **278**, Article 106378.
- [9] Khan, S.A., Kjeldsen, K.K., Kjær, K.H., Bevan, S., Luckman, A., Aschwanden, A., et al. (2014) Glacier Dynamics at Helheim and Kangerdlugssuaq Glaciers, Southeast Greenland, since the Little Ice Age. *The Cryosphere*, **8**, 1497-1507. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1497-2014>
- [10] 张海涛, 许光泉, 陈晓晴, 等. 我国闭坑煤矿矿井水水质演化研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(9): 3944-3959.
- [11] Hu, Y., Chen, L., Shi, Y., Hou, X., Zhang, M., Ou, Q., et al. (2025) Layered Damage Evolution Mechanism of an Underground Waterproof Grouting Curtain Wall under Hydrodynamic-Hydrochemical Coupling. *Construction and Building Materials*, **458**, Article 139725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139725>
- [12] Zhan, H., Liu, S., Wu, Q., Liu, W., Shi, L. and Liu, D. (2024) Effects of Deep Coal Mining on Groundwater Hydrodynamic and Hydrochemical Processes in a Multi-Aquifer System: Insights from a Long-Term Study of Mining Areas in Ecologically Fragile Western China. *Journal of Contaminant Hydrology*, **265**, Article 104386. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104386>
- [13] Debiecheet, T.H., Bouzenoune, A., Zahi, F., et al. (2020) Hydrodynamic Functioning of Rhythmic Springs: A Case of M'Chaki Spring (Jijel-NE Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, Article No. 1094. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06082-3>