

基于图论的矿井突水水流漫延模型与最佳逃生路径的研究

范 鹏

四川职业技术学院通识教育学院, 四川 遂宁

收稿日期: 2026年1月9日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月11日

摘 要

矿井突水严重威胁矿山开采与井下人员安全, 精准预测突水范围、优化逃生路径对矿山安全生产至关重要。本文针对不同突水场景与应急需求, 以图论框架和路径优化算法为核心, 采用分叉速度衰减规则和曼宁公式简化水流传播, 得到双突水点突水时的全矿井巷道水流漫延模型和工人逃生最优路径方案。研究结果可为矿井水灾演进研究与应急逃生规划提供解决方案。

关键词

水流漫延模型, 图论, 曼宁公式, 应急逃生

Research on the Water Inrush Flow Spreading Model and Optimal Escape Path in Mines Based on Graph Theory

Peng Fan

School of General Education, Sichuan Vocational and Technical College, Suining Sichuan

Received: January 9, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 11, 2026

Abstract

Mine water inrush poses a serious threat to mining operations and the safety of personnel underground. Accurate prediction of the water inrush range and optimization of escape routes are crucial for safe production in mines. This paper focuses on different water inrush scenarios and emergency response needs, using graph theory frameworks and path optimization algorithms as the core. By adopting bifurcation velocity attenuation rules and Manning's formula to simplify water flow

文章引用: 范鹏. 基于图论的矿井突水水流漫延模型与最佳逃生路径的研究[J]. 理论数学, 2026, 16(2): 218-226.

DOI: 10.12677/pm.2026.162051

propagation, it derives a model of water flow spread in the entire mine tunnel during water inrush at multiple inrush points, as well as an optimal escape route plan for workers. The research results can provide solutions for the study of mine flood evolution and emergency escape planning.

Keywords

Water Flow Spreading Model, Graph Theory, Manning's Formula, Emergency Escape

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

矿井突水是煤矿安全生产领域的危害之首，受矿井水文地质条件繁杂等因素影响，突水事故难以避免[1]。突水发生时，突如其来的大量水流瞬间涌入巷道，能在短时间内蔓延至复杂的井下三维巷道网络，若不能及时掌握突水的流向、速度、流动时间，不仅增大对矿工的救援难度，难以保障矿工的安全，同时也会影响矿山的安全开采生产，影响其工作效率，严重时甚至会引起巷道坍塌等毁灭性的灾害。

矿井的巷道系统一般有着复杂的网络拓扑结构，主要包括主巷道、辅助巷道、通风巷道等多个层次和分支的空间布局。在矿井巷道发生突水事故时，水流的传播路径、速度以及分布情况，会受到巷道的几何形状、坡度、分支结构等多种因素的综合作用。精准掌握巷道内水流的扩散规律与演进时序，对矿井救援方案的动态优化与救援资源的精准部署具有决定性影响，是突破矿井安全防护与高效应急救援瓶颈的关键技术难题。

多年来，矿业领域工作者始终致力于矿井突水问题的研究与防治[2]-[5]，但是传统应对矿井突水的方式依赖经验判断与简单几何分析，缺乏精确数学模型支撑，难以在复杂情况下为应急决策提供可靠依据[6]。如今，随着计算机、通信、物联网等现代技术的飞速发展，数字矿井理论与技术逐渐成熟，矿井信息化建设水平也得到了不断提高。数字矿井是矿井安全信息化发展的必然需求，它通过整合多种应用技术，能够实现矿井的数字化与智能化管理[7]-[9]。数字矿井作为一种典型的矿井地理信息系统，能够为矿井生产、建设与安全管理提供科学的决策依据，对提升安全防护水平、保障矿工生命财产安全具有重要的现实意义。

2. 问题提出

矿井巷道系统根据矿藏分布和矿脉走向布局，通常形成复杂的立体交叉三维网络结构。巷道断面存在多种类型(如矩形、拱形、梯形等)，考虑矩形断面，断面底边与水平面平行，一段巷道用其两端断面底边中点的连线来表示，如图1所示。

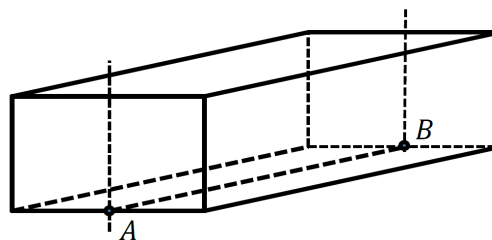


Figure 1. A three-dimensional schematic diagram of a section of tunnel
图 1. 一段巷道的三维示意图

矿井的巷道的分布情况有两种情形：在同一水平面上与不在同一水平面。当矿井水灾发生时，综合突水情况，考虑水流过程，可以将水流面分为同一水平和存在高低位置差的两种情况，以下便作分类讨论。

问题一：若矿井有两个突水点发生突水，分析水流过程，建立突水水流在两种情形的巷道下的流动蔓延模型。

问题二：当矿井出现第二个突水点后，安全生产部门即刻监控到突水情况，并尽快调整逃生方案。请协助安全生产部门调整最佳逃生路径。在问题一的基础上，假设在第二突水点突水发生 1 分钟后，给出安全生产部门发布调整后的逃生方案。

为了方便解决此问题，本文作出以下假设：

(1) 假设巷道的断面是宽 4 m，高 3 m 的矩形断面，突水水流以 0.1 m 的初始水位向前蔓延。当水流蔓延到巷道的分叉节点处时，水流向水平巷道和下行巷道平均分流，且初始水位不变。以开始突水时间为 0 min，各突水点的突水量均为 30 m³/min。

(2) 假设巷道的壁面为完全封闭，突水不会渗入巷道壁面；巷道网络为静态结构，在逃生过程中不发生变化；忽略巷道内其它物品对水的阻力；所在巷道在逃生期间均保持通行状态。

(3) 假设突水点不会变化，突水流量均匀，速度恒定，突水范围不会扩大。

(4) 假设水流在分叉点出严格的平均分流，流向水平巷道和下行巷道的流量完全相等，且分流后初始水位保持不变。

(5) 假设矿工能够第一时间看到方案并且严格地按照方案中的路径和速度行进，且在逃生途中矿工不会因为恐慌等因素造成摔跤、迷路等行为偏差。矿工的行进速度仅取决于水流速度、流向，不考虑矿工本身身体素质情况以及疲劳程度。

3. 矿井巷道的流动蔓延模型

矿井的巷道的分布情况有两种情形：在同一水平面上与存在高低位置差。当矿井水灾发生时，综合突水情况，考虑水流过程，可以将水流面分为水平和倾斜两种情况，以下便作分类讨论。

针对矿井中两个突水点同时发生涌水灾害的情形，构建用于模拟双出水点水流扩散的耦合建模体系。其中，基础模型采用了分叉减速规则，并通过“分源独立模拟 - 时序叠加整合”的策略，分别处理两个突水点不同时序发生的情形；其次，进阶模型进一步引入曼宁公式和巷道坡度参数，建立了坡度自适应的动态流速机制，提升了水流传播的物理真实性。两个模型均采用模块化架构设计，先独立计算每个突水点所引起的水流到达时间，再通过取最小值的方式实现耦合，从而全面计算出整个巷道网络中水灾的最早波及时序。该模型体系不仅能生成双突水点共同影响下的综合等时线图，还能确定各水源的影响范围，为多重突水情景下的灾情动态推演与应急资源精准调度提供科学依据。

将矿井巷道系统抽象为三维空间中的网络图 $G=(V,E)$ ，如图 2 所示。其中对于任意突水点 $P_1=\{X_p, Y_p, Z_p\}$ ，确定其所在巷道 e_j 以及在该巷道上的位置。

1) 巷道距离和水流时间的计算：

设巷道 e_j 连接端点 $O_a=(x_a, y_a, z_a)$ 和 $O_b=(x_b, y_b, z_b)$ ，定义向量 $\{v\}=O_b-O_a$ 。突水点 P_1 到该巷道的投影参数为：

$$t = \frac{(P_1 - O_a) \times \bar{v}}{\|\bar{v}\|^2},$$

实际位置参数经过边界约束：

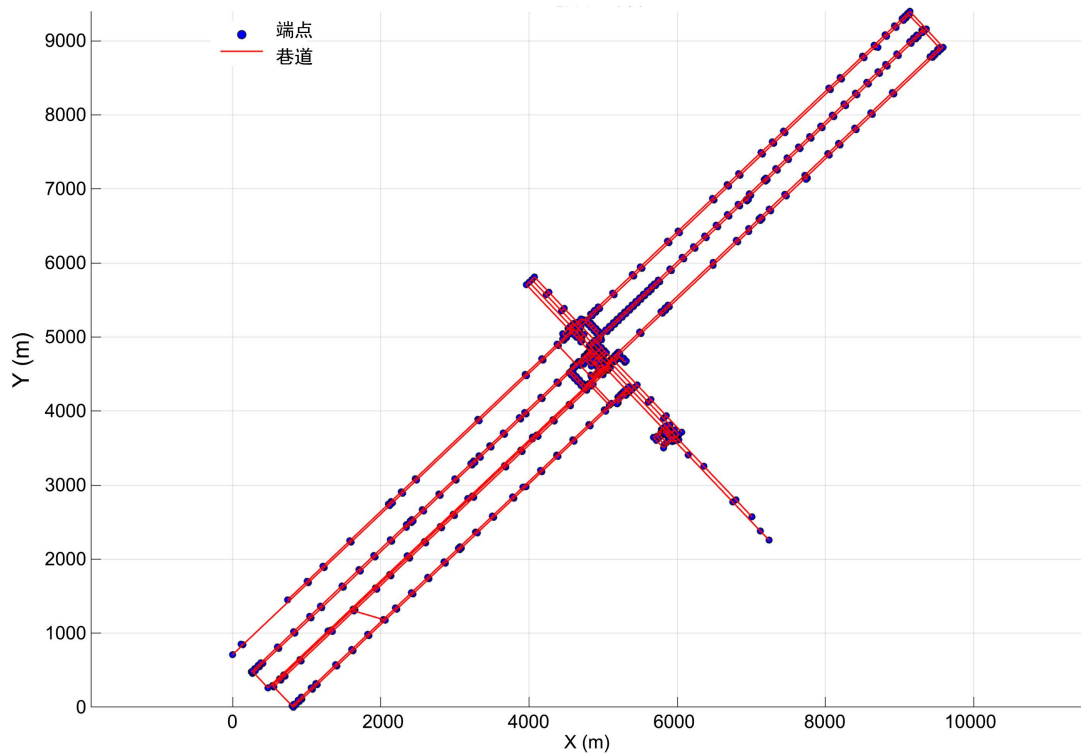


Figure 2. Network distribution diagram of mine tunnel system

图 2. 矿井巷道系统的网络分布图

$$t_c = \max(0, \min(1, t)),$$

投影点坐标为:

$$P_2 = O_a + t_c \times \vec{v},$$

选择使 $|P_1 - P_2|$ 最小的巷道作为突水点所在巷道:

$$|P_1 - P_2| = \sqrt{(x_q - x_2)^2 + (y_q - y_2)^2 + (z_q - z_2)^2},$$

水流从突水点到巷道两端的时间分别为:

$$t_a = \frac{t_c \times L_j}{v_0}, t_b = \frac{(1 - t_c) \times L_j}{v_0},$$

其中初始水流速度 $v_0 = 0.625$ m/s。

2) 水流在巷道网络中传播的动力学规则:

(1) 单巷道水流运动

在单一巷道, 水流以恒定速度 v 传播, 从一端 A 到另一端 B 所需时间为:

$$\Delta t = \frac{L}{v_0}$$

(2) 节选处分流速度衰减

当水流到达节点时, 根据流出巷道数量 m 不同, 水流速度会按以下规则衰减:

$$v_k = v_{k-1} \times k(m)$$

其中, v_{k-1} 表示上一个节点的水流速度, $k(m)$ 表示衰减系数且 $k(m) = \frac{1}{m}$ 。这一规则体现了水流在分叉处的能量损失和流量分配效应。

(3) 坡度自适应的动态流速机制

在原有模型基础上, 进一步引入曼宁公式, 结合巷道坡度参数构建了依赖坡度变化的动态流速物理模型, 从而更真实地反映实际地形对水流运动的影响。

因矿井中各巷道并非处于同一水平面, 部分巷道存在一定坡度, 水流速度的计算方法如下: 从突水点起, 水流以初始速度 0.625 m/s 向巷道两端流动。对于坡度小于或等于 1.5% 的巷道, 水流速度保持恒定, 即采用初始速度值; 对于坡度大于 1.5% 的巷道, 则引入曼宁公式[10]计算水流首次到达巷道端点的时间:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} s^{1/2}$$

其中, v 为水流速度, n 为曼宁粗糙系数, R 为水力半径, s 为巷道坡度。用这个巷道两端点的水流速度的平均速度以此代表该条巷道的特征流速。本模型同时兼顾分叉衰减策略, 从而更精确地反映水流在倾斜巷道中的传播行为。

对于巷道不在同一水平面时。当水流在巷道中蔓延时, 同样简化处理, 水流流动时, 只有水流速度变化, 水位不变。

3) 时间传播算法

采用改进的 Dijkstra 算法[11]计算水流到达各节点的最早时间。

(1) 初始化: 对于每个突水点, 设其所在巷道为 e_j , 连接节点 O_a 和 O_b , 初始化:

$$T(O_a) = t_a, \quad T(O_b) = t_b,$$

对于 B_1 突水点, 考虑延迟时间 $\Delta t = 240$ s, $T_{B_1}(O_a) = t_a + \Delta t$, $T_{B_1}(O_b) = t_b + \Delta t$, 其他节点初始时间设为无穷大。

(2) 时间传播过程

对于每个节点的水流速度 v_i , 其下一蔓延水流节点 v_j 的到达时间更新为:

$$T(v_j) = \min \left\{ T(v_j), T(v_i) + \frac{L_{ij}}{v_k} \right\}$$

其中 L_{ij} 连接 v_i 和 v_j 的巷道长度, v_k 为根据节点 v_i 的出度确定的流速。

(3) 双突水点时间合并

对于每个节点 v_i , 综合考虑两个突水点的到达时间:

$$T(v_j) = \min \left\{ T(v_j), T(v_i) + \frac{L_{ij}}{v_k} \right\}$$

(4) 等时线生成模型

利用散点数据插值方法生成等时线图, 设节点坐标为 (x_i, y_i) , 对应到达时间为 T_i , 使用自然领域插值生成连续时间场:

$$T_{(x,y)} = \sum_{i=1}^n \delta_i(x,y) T_i$$

其中 $\delta_i(x,y)$ 为插值权重函数。

4. 问题的求解

利用 MATLAB 软件仿真验证结果。其数据来源于 2025 高教社杯全国大学生数学建模竞赛 D 题[12]。

4.1. 问题一模型的求解

4.1.1. 问题一中同一水平矿井巷道网络的求解

考虑矿井巷道网络中两个突水点(A_1 和 B_1)同时作用的情况, 其中 B_1 点比 A_1 点延迟 4 分钟开始突水。需要建立同一水平矿井巷道网络的数学模型, 描述水流在复杂巷道网络中的传播过程, 并计算水流到达各巷道端点的时间。

基于以上分析和软件仿真, 可得到巷道中水流按时间顺序到达的端点分别为:

P0358→P0351→P0357→P0349→P0352→……→P0557→P0560→P0083→P0405→P0082, 其对应的时间分别为: 5.28 s→5.28 s→7.47 s→7.73 s→7.74 s→……→556.15 s→557.31 s→564.11 s→564.22 s→577.59 s, 即巷道充满水的时刻: 24404.29 min。得到两个突水点 A_1 , B_1 首次到达各巷道时间的等值线图如图 3 所示。

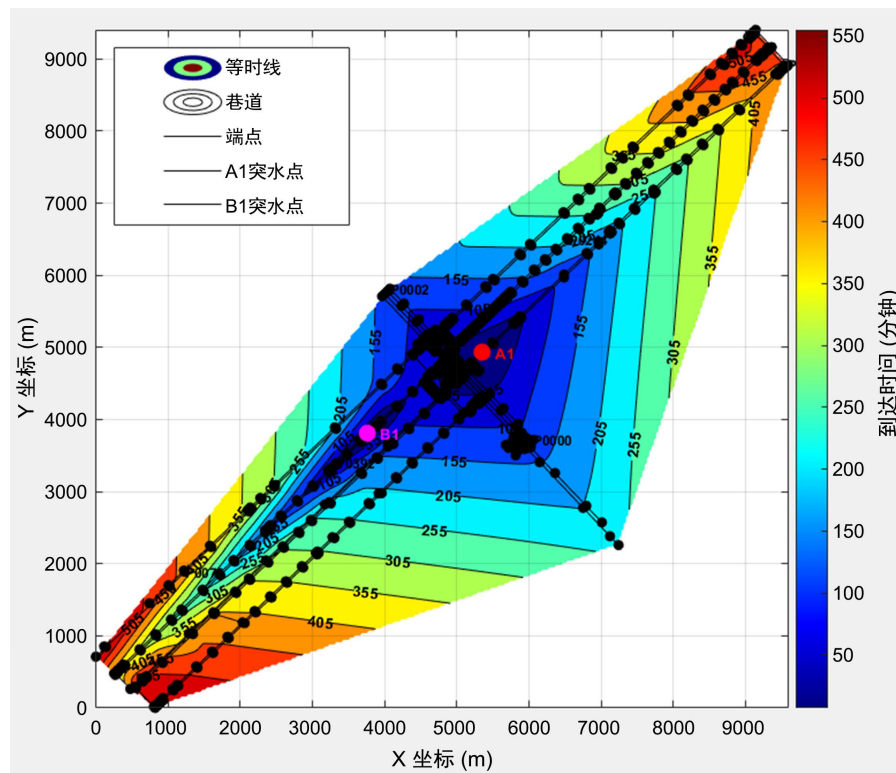


Figure 3. Contour map of first arrival times at two water inrush points A_1 and B_1 in each tunnel

图 3. 两个突水点 A_1 , B_1 首次到达各巷道时间的等值线图

4.1.2. 问题一中存在高低位置差的矿井巷道网络的求解

考虑矿井巷道网络中两个突水点(A_2 和 B_2)同时作用的情况, 其中 B_2 点比 A_2 点延迟 5 分钟开始突水。需要建立存在高低位置差矿井巷道网络的数学模型, 描述水流在复杂巷道网络中的传播过程, 并计算水流到达各巷道端点的时间。

通过软件仿真得出端点到达时刻。其中最早和最晚到达的 5 个巷道端点的坐标与时间

P0358→P0357→P0351→P0349→P0352→……→P0282→P0283→P0083→P0405→P0082 和 1.72 s→2.45

$s \rightarrow 8.84\text{ s} \rightarrow 9.66\text{ s} \rightarrow 9.66\text{ s} \rightarrow \cdots \rightarrow 170.56\text{ s} \rightarrow 170.57\text{ s} \rightarrow 179.02\text{ s} \rightarrow 179.73\text{ s} \rightarrow 184.18\text{ s}$, 巷道充满水的时刻: 24305.78 min。得到两个突水点 A_2 , B_2 首次漫水至整个矿井巷道网络的示意图如图 4 所示。

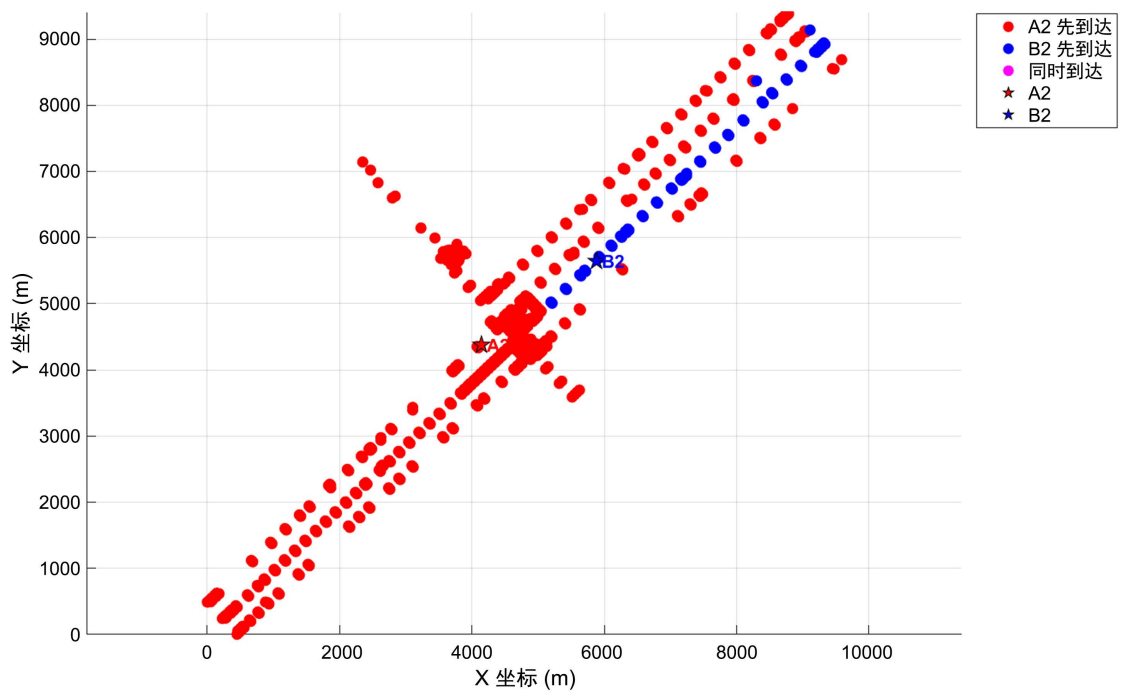


Figure 4. Schematic diagram of initial flooding from two water inrush points A_2 and B_2 to the entire mine tunnel network
图 4. 两个突水点 A_2 , B_2 首次漫水至整个矿井巷道网络的示意图

4.2. 问题二模型的建立和求解

假设在第二突水点突水 1 分钟后, 开始逃生时间: 6 分钟(第一个突水点与第二个突水点的突水间隔时间为 5 分钟), 可通行最大水位 0.3 米, 分别给出各矿工调整后的最佳逃生路径。

4.2.1. 问题二中同一水平矿井巷道网络的求解

通过软件仿真, 得到同一水平矿井巷道网络三个工人在不同起点的逃生方案, 结果如表 1 所示。

Table 1. Escape plan for the same level mine tunnel network in question two

表 1. 问题二中同一水平矿井巷道网络的逃生方案

工人编号	最佳逃生路径	最佳逃生时间
工人 1	无法逃生	Inf
工人 2	起点(5194.00, 4785.31, 10.00)→H0389→H0385→H0387→……→H0662	16.93 min
工人 3	起点(6190.81, 3434.29, 10.00)→H0733→H0019→H0017→……→H0662	22.34 min

其逃生模拟路线如图 5 所示。

4.2.2. 问题二中存在高低位置差的矿井巷道网络的求解

利用曼宁公式优化版逃生方案(巷道实际坡度), 通过软件仿真, 得到存在高低位置差的矿井巷道网络三个工人在不同起点的逃生方案, 如表 2 所示。

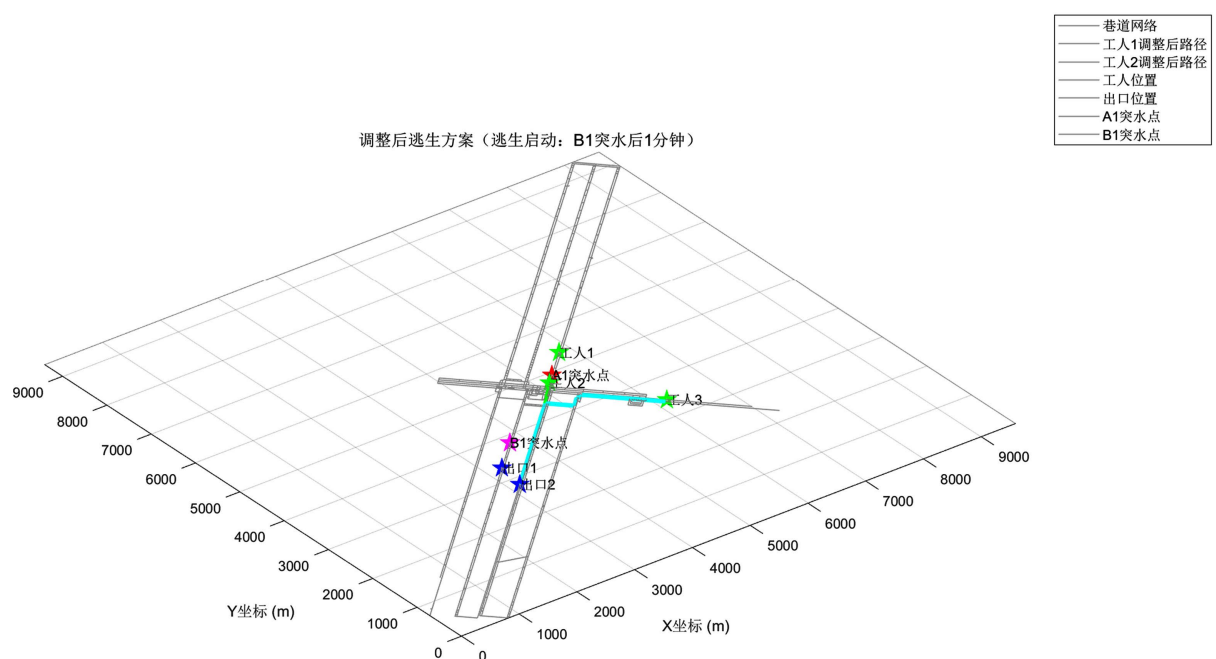


Figure 5. Escape plan for three workers after water inrush at points A_2 and B_2

图 5. 突水点 A_2 ， B_2 发生突水后，三个工人的逃生方案

Table 2. The escape plan for the mine tunnel network with height differences in question two

表 2. 问题二中存在高低位置差矿井巷道网络的逃生方案

工人编号	最佳逃生路径	最佳逃生时间
工人 1	起点(4395.15, 4614.53, 6.59)→·····→出口 2 (6416.05, 6579.88, 8.69)	18.19 min
工人 2	起点(3398.34, 5965.56, 1.31)→·····→出口 1 (6336.99, 6073.22, 36.15)	28.49 min
工人 3	起点(3879.44, 4125.47, 6.22)→·····→出口 2 (6416.05, 6579.88, 8.69)	21.95 min

5. 结论

针对矿井中出现两个突水点同时发生涌水灾害的情形，本文构建了用于模拟双突水点水流扩散的耦合建模体系。其中，基础模型采用了分叉减速规则，并通过“分源独立模拟－时序叠加整合”的策略，分别处理两个突水点不同时序发生突水的情形；进阶模型引入曼宁公式和巷道坡度参数，建立了坡度自适应的动态流速机制，提升了水流传播的物理真实性。模型不仅考虑了巷道淹没时间约束，还融入了水流动力学参数，实现了从物理机制到逃生决策的模拟，为存在高低落差的矿井提供了一种可靠的应急逃生方案。

参考文献

[1] 桑兴旭, 罗五洲, 钟平, 等. 基于组合权重-TOPSIS 法的矿井突水风险评价[J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 397-402.

[2] 田志伟, 任素雅, 林云, 等. 大采深高承压水条件下煤层底板突水问题及解决对策[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(2): 43-47.

[3] 王威. 成片小窑采空区奥灰突水特大水害快速治理关键技术研究[J]. 能源与环保, 2025, 47(6): 111-119.

[4] 曹伟伟. 矿井水害防治工作中定向钻探技术的应用研究[J]. 矿业装备, 2024(10): 46-48.

[5] 李鑫, 孙亚军, 徐智敏, 等. 矿山采动突水危险源划分与致灾危险性评价研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(9): 108-115.

-
- [6] 冯子阳. 矿井突水模拟及逃生路径分析系统研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [7] 苏明强. 信息化技术在煤矿矿井安全生产管理中的应用[J]. 移动信息, 2024, 46(4): 219-222.
- [8] 葛红丽. 机电一体化条件下的矿井设备管理策略[J]. 工程管理与技术探讨, 2024, 6(3): 107-109.
- [9] 范强. 煤矿井下定向钻探数字化监测技术及其煤岩识别应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2024.
- [10] 燕翔, 牛存稳, 贾仰文, 等. 基于曼宁公式的汾河生态系统服务价值研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 927-936.
- [11] 张佳良, 凌敏. 基于可靠性的铁路应急运输路径多目标优化[J]. 综合运输, 2024, 46(1): 109-113.
- [12] 全国大学生数学建模竞赛. 2025 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛赛题[EB/OL]. https://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/03c91a444e62eee81a3740fa97a461a6.html, 2025-09-04.