

# 基于灰狼算法的区域铀矿山运输系统规划研究

杨润生<sup>1</sup>, 霍晨琛<sup>1</sup>, 任赛<sup>1</sup>, 任晓飞<sup>2</sup>, 马靖宇<sup>2</sup>, 侯杰<sup>2</sup>

(1. 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149;

2. 北京科技大学, 北京 100083)

**摘要:** 针对区域铀矿山矿床开采分散、开拓方式多样、运输系统网络复杂等特征, 构建了基于复杂网络规划的区域矿山运输系统优化模型, 在区域矿山开采条件下, 综合规划开拓运输系统, 提升区域矿山运输系统的高效性、经济性与科学有效性。通过分析区域矿山空间地理位置关系以及集约化开发理念, 建立了系统网络图, 运用网络流理论和灰狼算法, 得到区域矿山运输系统全局最优方案。在相山铀矿田区域矿山进行了模型有效性验证, 解算出矿山最优的区域运输路径与最低成本方案。结果表明, 模型满足区域矿山运输系统的规模化、集约化要求, 具有有效的运输系统规划效果。研究结果为相山铀矿田运输系统经济、高效运转提供了技术支撑, 也可为其他铀矿大基地运输系统智能化规划提供借鉴。

**关键词:** 铀矿床; 相山; 开拓运输系统; 网络流; 灰狼算法; 集约化

**中图分类号:** TL212; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)03-0097-11

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2025.05.10

相山矿田是中国品位较高、矿量丰富的热液脉型铀矿田<sup>[1]</sup>, 位于江西省中部, 在该区域相继发现了邹家山、居隆庵、沙洲等近 30 个铀矿床<sup>[2]</sup>。矿田大致分布在东北部和西南部 2 个相对集中的区域, 各区域内部又分布着较为密集的矿床集群, 大部分矿床为中小型矿床, 呈多、小、散矿群产出。相山铀矿田铀资源丰富, 保有资源可靠, 矿床分散但又相对集中, 包括多个大中型矿床, 具备规模化、集约化开发基本条件。

开拓运输系统是矿山重要的生产体系, 它把矿山生产各个环节有机联系起来, 是保证矿山生产活动得以正常进行和发展的基础环节, 安全高效的矿山开拓运输系统对矿山产能规模、安全生产、经济效益具有重要意义, 运输设备的升级对主运输巷道也提出了更高要求<sup>[3]</sup>。传统的矿山建设模式一般以单个矿床为建设单元, 开拓运输系统通常为单一矿山服务的运输体系, 采用各自独立、分散、小规模的传统开采方式, 形成了以矿床、矿体为单元的开拓布局, 不适应矿田规模化、集约化要求<sup>[4]</sup>。目前, 相山铀矿田提出“集聚资源、集约开发”的思路, 由多矿山整合而成的区域矿山对开

拓运输系统提出了更高要求, 针对单一矿床传统的开拓运输存在建设速度慢、运行效率低、运输成本高等问题, 有必要从区域矿山开发全局角度开展开拓运输系统整体规划研究, 构建一个运输功少、运行效率大、经济合理、技术先进, 以及满足区域资源开发、矿石运输等系统要求的综合性开拓运输系统, 从而实现矿田规模化、集约化开发。

目前, 较成熟的开拓运输系统规划和优化方法有经济比较法、综合比较法等工程类比方法<sup>[5-6]</sup>, 该方法对进行比较的方案数量有较大制约, 比选过程中存在较多定性判断; 而且大多开拓运输系统规划是针对单体矿山的井巷工程和地面运输道路进行优化。随着优化理论、决策分析以及智能算法等在矿山中的应用, 国内外学者对矿山运输系统优化模型与方法进行了深入研究, 图论是研究运输问题的经典理论与方法, 孙效玉等从图论角度分析矿山道路网, 进行了矿山运输系统优化模型及解算方式的探讨<sup>[7]</sup>; 林启太等将模糊综合评判模型应用于矿山开拓运输系统实例中<sup>[8]</sup>; 周科平等提出改进蚁群算法在地下矿运输路径优化的应用<sup>[9]</sup>。近年来, 灰狼算法 (Grey

**收稿日期:** 2025-05-27; **修回日期:** 2025-06-11

**基金项目:** 中核铀业揭榜挂帅项目(A50-20)。

**第一作者简介:** 杨润生(1981—), 男, 河北石家庄人, 学士, 高级工程师, 主要从事铀资源开发研究和管理工作。



深 195 m,宽仅几米(图 3)。书堂矿床矿体矿化严格受裂隙构造带控制,矿化带总长 1 100 余米,宽

200~300 m,平面上整体走向北东,呈“左行侧列”,矿化幅度超 340 m,剖面上呈斜列分布。

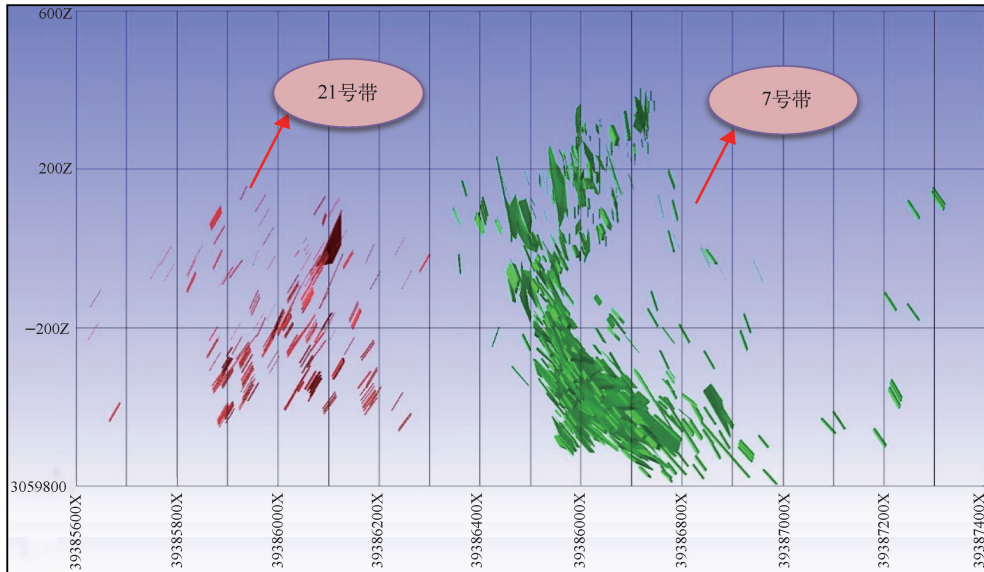


图 2 居隆庵矿床矿体垂向展布图

Fig. 2 Vertical distribution map of the ore body in Julongan deposit

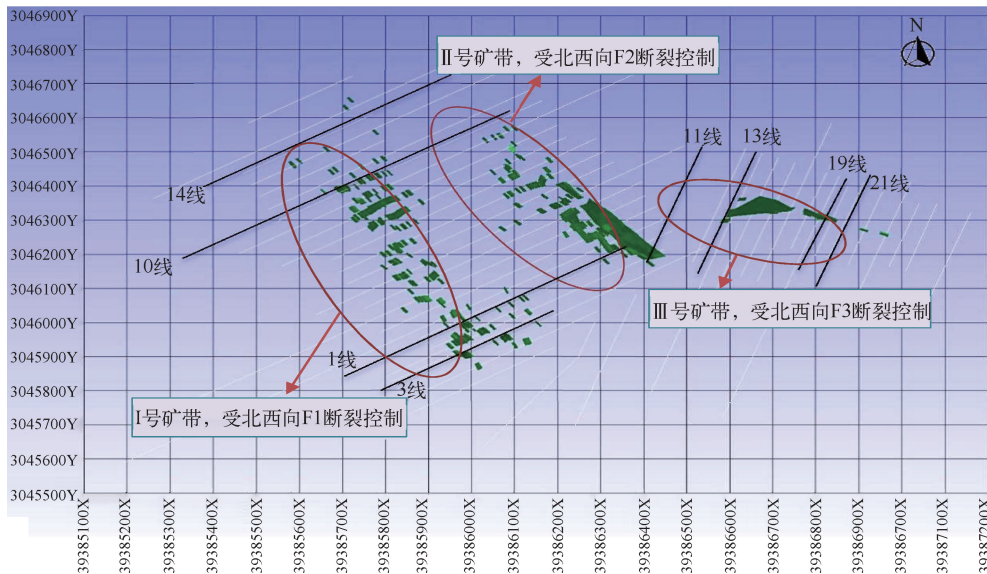


图 3 石洞矿床矿体平面分布图

Fig. 3 Plan distribution map of ore body in Shidong deposit

由居隆庵、李家岭、石洞和书堂铀矿床构成的区域铀资源赋存标、资源规模高差异较大,为此根据各矿床矿体赋存条件、地表地形条件、开拓方式等因素,应用网络流理论建立网络结构优化模型,基于灰狼算法对复杂网络流问题进行智能求解优化,确定区域铀矿山开拓运输系统。

## 2 基于网络流理论的开拓运输系统规划模型构建

### 2.1 网络流理论基本原理

网络流的基础理论是图论,从直观上来说是由若干节点和节点之间的部分构成的点线图。用节

点表示现实世界中离散系统中的个体,用边表示个体之间具有待分析的某种关系属性,从而形成一个复杂网络。再采用分析网络结构的理论方法,来达到分析离散复杂系统结构和规律的目的。

图(graph)是一个二元组  $G = [V(G), E(G)]$ 。其中  $V(G)$  是非空集,称为点集,对于  $V$  中的每个元素,我们称其为顶点或节点,简称点;  $E(G)$  为  $V(G)$  各结点之间边的集合,称为边集。常用  $G=(V,E)$  表示图。当  $V$  和  $E$  都是有限集合时,称  $G$  为有限图。当  $V$  和  $E$  都是无限集合时,称  $G$  为无限图。

网络(network)是指一个特殊的有向图  $G=(V,E)$ ,其与一般有向图的不同之处在于有容量和源汇点。 $E$  中每条边  $(u,v)$  都有一个被称为容量的权值,记作  $c(u,v)$ 。当  $(u,v) \notin E$  时,可以假定  $c(u,v)=0$ 。 $V$  中有 2 个特殊的点,源点  $s$  和汇点  $t(s \neq t)$ 。对于网络  $G=(V,E)$ ,流是一个从边集  $E$  到整数集或实数集的函数,其满足容量限制、流量守恒原则<sup>[17]</sup>。

2.2 区域矿山开拓运输系统网络图构建

在该矿区开拓运输系统网络图中,其核心对象是矿石的流动,源点  $s$  为矿床各中段矿石,途径各种运输巷道,包括中段巷道、运输平台、平硐等,最后运至汇点  $t$  竖井或平硐口,最终运至地表水冶厂,每条边的权值  $c(u,v)$  则由运输费用决定,从而可以把各分区的开拓运输系统工程映射为一个完整的开拓运输系统网络图。构建区域系统网

络图的详细步骤如下:1)确定网络节点。按照 40 m 中段高度对矿床进行划分,将每一个划分后的中段设定为一个节点;把每个出矿口包括竖井或平硐口,均设定为一个独立的节点。2)确定网络边。针对每一条实际存在的矿石运输巷道,在网络图中构建与之对应的边;无论是中段巷道、运输平台还是平硐等不同类型的运输通道,都在网络图中有其对应的边;这样确保了实际的开拓运输工程与网络图中的边建立一一对应关系,使得网络图能够准确反映实际运输系统的连接情况。3)构建网络流模型。将整个开拓运输系统视为一个网络流,其中矿石作为流量在网络中流动;从矿床各中段节点出发,沿着运输巷道对应的边,向出矿口节点流动,模拟了实际矿石从地下开采点到最终输出点的运输过程。

基于构建区域矿山运输系统网络图的步骤,同时考虑运输巷道的建设成本、矿石的运输成本、运输距离等因素,可搭建相山铀矿田基地典型运输网络图(图 4),给每条边赋予响应的费用表示,为后续矿床运输路径优化目标对应数学模型的建立提供计算依据。其中:  $A_n$  代表各矿床中段标高;  $G_n(Q_n, \Delta h_n, r_p)$  表示中段汇聚成本,其中  $Q_n$  为某矿床第  $n$  中段的矿石量,  $\Delta h_n$  为某中段到汇聚中段的高度,  $r_p$  为盲竖井或溜井的单位建设及运输成本总和;  $T_i$  表示当前矿床汇聚点到运输平台起点成本或运输平台终点到下一矿床汇聚点的成本;  $TP_p^q$  为运输平台转运成本。

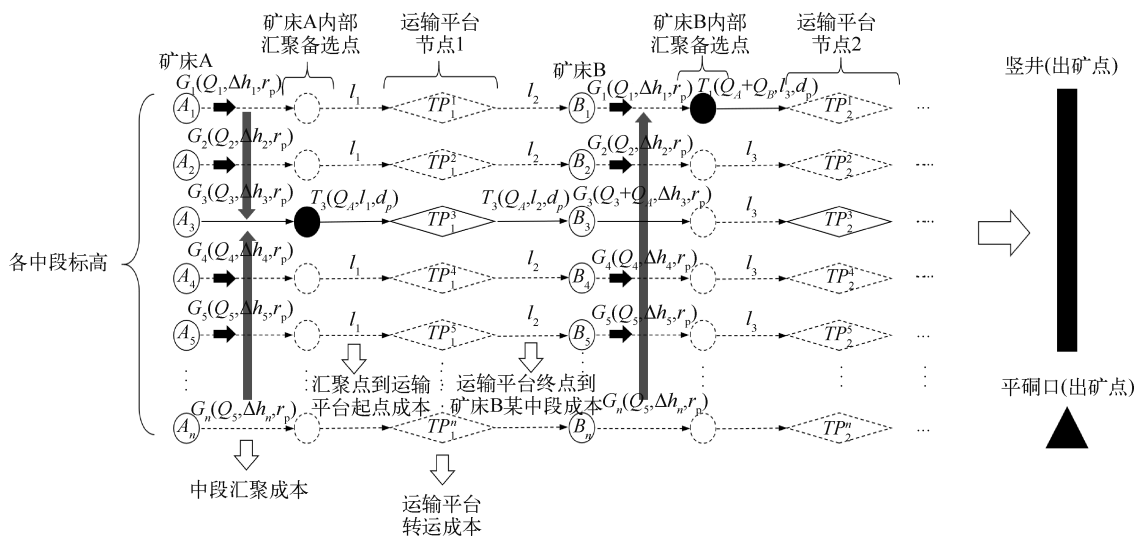


图 4 相山铀矿田典型运输网络图

Fig. 4 Typical transportation network diagram of Xiangshan uranium mine

### 3 基于灰狼算法的开拓运输系统规划

#### 3.1 灰狼算法基本原理

2014年澳大利亚学者 Mirjalili 提出了灰狼优化算法<sup>[18]</sup>,每一只灰狼个体可以对应可能路径中的一条,通过多维度的模拟机制将复杂的地下矿山矿石运输路径规划问题转化为算法可处理的优化模型,使得每一只灰狼个体都能在庞大的搜索空间中依据算法规则逐步探索,从而找到最优路径。灰狼算法运行机理包括以下五部分。

##### 3.1.1 社会等级

在GWO算法应用于各运输中段至水冶厂最佳路径规划时,首先在路径搜索空间中随机生成代表不同路径组合的灰狼族群。为构建灰狼的社会等级制度模型,将种群中适应度值最优解、次优解和第三优解分别看作 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼,而剩余的解被视为 $\omega$ 狼;然后由 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼来负责引导, $\omega$ 狼则跟随 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼,通过在运输网络中搜寻可能的路径节点、包围路径上的关键中转点以及向最终的最佳路径发起“攻击”(确定最优路径)来完成整个运输路径的优化,最终获取从各运输中段到水冶厂的最优路径。

##### 3.1.2 包围猎物

当使用灰狼算法搜索运输路径上的关键节点时,灰狼种群会逐渐地接近包围猎物(最佳路径),该行为的数学模型如下:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)|, \quad (1)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D, \quad (2)$$

式(1)表示灰狼个体与猎物之间的距离;式(2)为灰狼的位置更新公式。式中: $D$ —表示灰狼个体与猎物(即最优解)之间的距离向量; $t$ —目前的迭代的次数; $X_p$ —表示猎物的位置向量; $X(t)$ —表示当前灰狼的位置向量; $X(t+1)$ —表示下一次迭代灰狼的位置向量; $A$ 和 $C$ —协同系数向量,具体计算公式如下:

$$A = 2a \cdot r_1 - a, \quad (3)$$

$$C = 2 \cdot r_2, \quad (4)$$

式中: $a$ 是收敛因子,随着迭代次数从2线性减少到0, $r_1$ 和 $r_2$ 的模取 $[0,1]$ 之间的随机数。

##### 3.1.3 狩猎

当灰狼识别出最佳路径的位置后, $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼在 $\alpha$ 狼的带领下确定最佳路径上的关键节点范围。在优化运输路径问题的决策空间中,对最佳运输路

径组合并不了解;因此为了模拟灰狼的狩猎行为,我们假设 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼更了解猎物的潜在位置,即保留取得的3个最优运输路径组合方案,然后根这三者的位置信息来确定最佳路径的核心走向,同时强迫其他灰狼个体依据最优灰狼个体的位置来调整路径组合向最优靠近,逐渐逼近最佳路径。

灰狼个体跟踪猎物位置的数学模型如下:

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X| \\ D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X|, \\ D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X| \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot X_\alpha \\ X_2 = X_\beta - A_2 \cdot X_\beta, \\ X_3 = X_\delta - A_3 \cdot X_\delta \end{cases}, \quad (6)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \quad (7)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 是灰狼算法中模拟灰狼社会等级的三类个体,分别表示最优、次优、第三优; $D_\alpha$ 、 $D_\beta$ 和 $D_\delta$ 分别表示 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼路径与其他路径组合间的差异向量; $X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 和 $X_\delta$ 分别代表 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼的当前路径; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 是随机向量, $X$ 是当前路径组合向量。

##### 3.1.4 攻击猎物

当运输路径优化过程中,灰狼通过攻击来完成狩猎过程。为了获取最优路径结果, $a$ 的值被逐渐减小,因此 $A$ 的波动范围也随之减小。换句话说,在迭代过程中,当 $a$ 的值从2线性下降到0时,其对应的 $A$ 的值也在区间 $[-a, a]$ 内变化,当 $A$ 的值位于区间内时,灰狼的下一位置可以位于当前路径和最佳路径的任意位置;当 $A < 1$ 时狼群向猎物发起攻击,即陷入局部最优运输路径组合方案。

##### 3.1.5 搜索猎物

在运输路径优化应用里,灰狼根据 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\delta$ 的位置来搜索最优运输路径组合。灰狼在寻找猎物时彼此分开,分别寻找各矿床的最优运输路径;然后聚集在一起整合优质路径信息,从而确定最佳运输路径。基于数学建模的散度,可以用大于1或小于-1的随机值来迫使灰狼与跳出局部最优,探索新路径,这强调了搜索并允许GWO算法全局搜索最优运输路径解。

### 3.2 优化模型构建

对相山铀矿田由中段矿石开始到达竖井或平硐口的所有可能存在的运输路径进行梳理(图

5), 结合居隆庵、李家岭、石洞和书堂矿床资源赋存特征以及无轨运输要求等, 居隆庵 7# 深部采用斜坡道开拓, 溜井下放至最低标高进行统一出矿; 李家岭南浅部采用平硐开拓, 因其平硐不用于

矿石运输, 需要将浅部矿石下放至合适中段, 从竖井出矿; 石洞、书堂矿床因距离出矿口远, 各中段直接联通出矿口成本过高, 考虑先在矿床内部汇集至某一中段, 再进行统一运输。

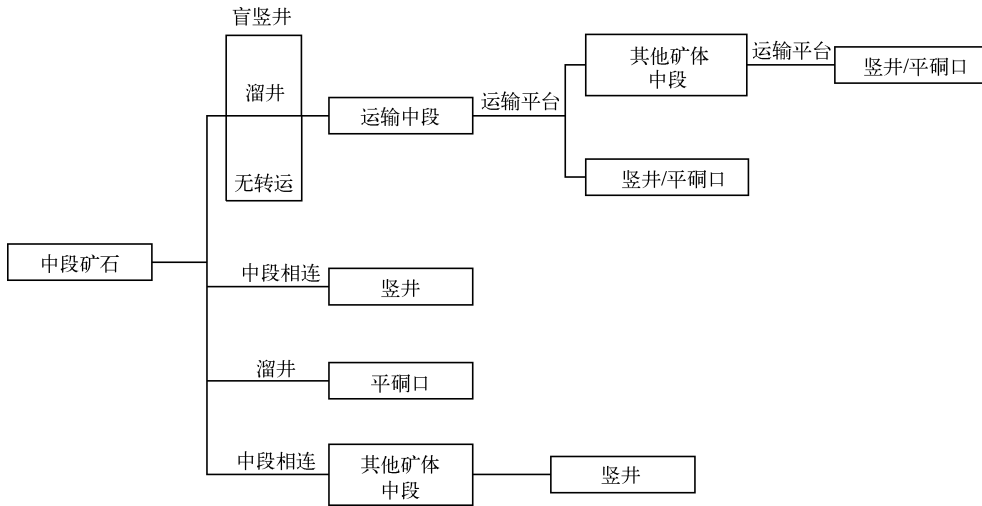


图 5 相山铀矿田运输路径

Fig. 5 Transportation route of Xiangshan uranium ore field

基于 2.2 中已建立的矿区开拓运输系统网络流, 结合各个矿床从中段运输至地表的所有运输方式确定最优运输路径, 使其总运输费用最小。由此构建的开拓运输系统优化数学模型如下:

$$\min Z = \sum_{i \in n} d_{ij} c_{ij} q_{ij} + \sum_{i \in n} e_{ij} w_{ij}, \quad (8)$$

式中:  $d_{ij}$ ——表示矿石从  $i$  地点运至  $j$  地点的运输距离,  $m$ ;  $c_{ij}$ ——表示矿石从  $i$  地点运至  $j$  地点的单位运输费用, 元/( $t \cdot m$ );  $q_{ij}$ ——表示  $i$  地点需转运至  $j$  地点的矿石量,  $t$ ;  $e_{ij}$ ——表示矿石从  $i$  地点运至  $j$  地点的单位建设费用, 元/ $m$ ;  $w_{ij}$ ——表示矿石从  $i$  地点运至  $j$  地点的总建设距离,  $m$ 。

### 3.3 模型应用及结果分析

利用灰狼算法规划优化居隆庵、李家岭、石洞、书堂区域矿山开拓运输方案, 步骤见图 6。步骤 1: 程序开始运行前, 设置灰狼种群数目  $n$ 、 $a$ 、 $A$ 、 $C$ 、最大迭代次数(表 1); 步骤 2: 种群初始化, 利用高斯映射随机初始化种群, 得到的解作为初始种群, 计算灰狼适应度, 保留适应度最好的前三匹狼  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  及对应适应度; 步骤 3: 对灰狼位置进行更新, 同时对系数  $a$ 、 $A$ 、 $C$  进行更新, 计算更新后灰狼的适应度, 并与上一代对比, 更新最好的前三匹狼  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  及其对应适应度; 步骤 4: 算法满足最

大迭代次数的终止条件, 输出最优的运输路径及对应的最小费用, 若未符合终止条件, 返回步骤 3。

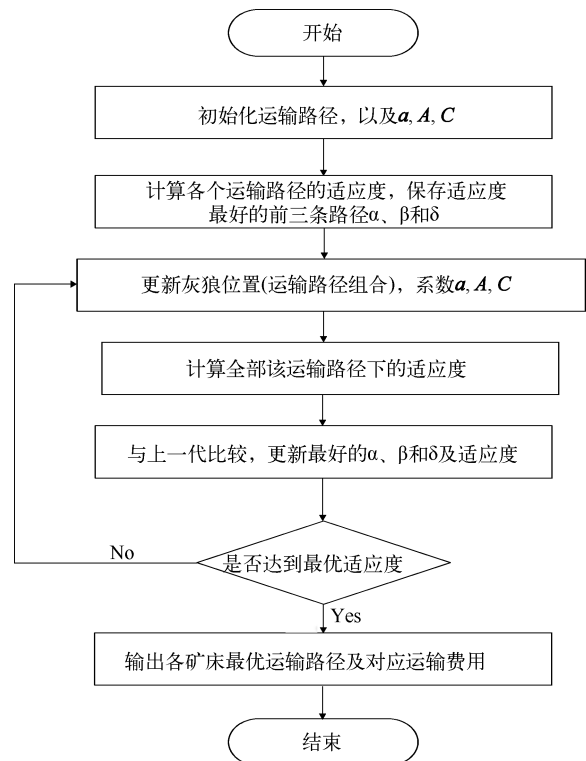


图 6 灰狼算法优化流程图

Fig. 6 Grey Wolf Algorithm optimization flowchart

规划区域内矿床由居隆庵 7#、居隆庵 21#、李家岭南、李家岭北、书堂、石洞组成。使用灰狼算法对区域所有矿床的矿石运输路径进行优化,在优化结果中可以得到运输平台的建设位置以及满足区域矿石总运输费用最小的矿床运输路径。灰狼算法在优化过程中的适应度(最小费用)迭代收敛曲线见图 7。

表 1 初始参数表

Table 1 Initial parameter table

参数	具体取值
种群规模( $n$ )	过小易陷入局部最优,过大增加计算耗时,取 500
系数参数( $a$ 、 $A$ 、 $C$ )	$a$ :初始值为 2,随迭代线性递减至 0 $A$ :由 $a$ 动态计算 $C$ :在 $[0,2]$ 间动态变化,增强个体搜索灵活性
最大迭代次数(MaxIter)	避免过早收敛或计算耗时过长,取 200

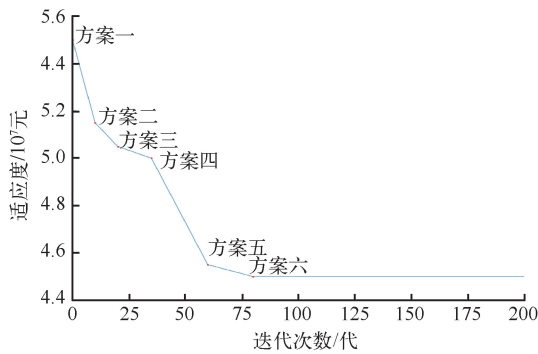


图 7 灰狼算法收敛曲线

Fig. 7 Grey wolf algorithm convergence curve

为了突显算法逼近最优解的收敛过程,特列出优化过程中适应度(费用)变化较大的 6 个运输

方案以及对应的运输路线(表2)。方案六为最优开拓运输系统,综合费用最小,为了直观展现区域矿山地下开拓运输过程,运输路线示意图见图 8,三维数字化模型见图 9。

区域内各矿床具体开拓运输方式:1)居隆庵 7# 矿床由居隆庵竖井开拓,其内部中段分为浅部和深部,浅部各中段均采用有轨运输,矿石开采后直接由矿车通过中段巷道运至竖井进行提升;深部中段标高范围为-560 m 至-280 m,深部中段全部采用无轨运输,所有中段矿石统一依靠溜井下放至最低标高-560 m 中段,使用矿用卡车运至竖井集中提升。2)居隆庵 21# 矿床由居隆庵竖井开拓,各中段巷道皆与居隆庵竖井相连,中段标高范围为 440 m 至-120 m,各中段矿石可直接由竖井提升。3)李家岭南部矿床中段标高 240 m 至 560 m 采用平硐开拓,此部分中段巷道通过建立溜井将各中段矿石集中下放至 200 m 标高,随 200 m 中段统一经居隆庵 7# 中段巷道运输至居隆庵竖井场地;-240 m 至 200 m 中段经居隆庵相同标高中段巷道,运向居隆庵竖井,竖井提升后运至水冶厂。4)李家岭北部矿床中段标高 240 m 至 320 m 采用平硐开拓,此部分中段矿石集中汇聚至 240 m 中段后,通过 240 m 平硐集中运输至水冶厂;-560 m 至 200 m 中段采用竖井开拓,依靠李家岭北部开拓竖井提升至 200 m 中段,通过运输平台连接 200 m 平硐口集中运输至水冶厂。5)书堂 200 m 至 440 m 中段由平硐开拓,修建溜井使所有中段矿石集中下放至 200 m 中段,通过运输平台连接 200 m 平硐口运输至水冶厂。6)石洞 0 m 至 200 m 中段采用独立竖井开拓,使用竖井将所有中段矿石集中汇聚至 120 m 中段,通过运输平台连接李家岭南 120 m 中段,通过其中段运输巷道运至竖井提升,最后通过地表运输到达水冶厂。

表 2 收敛过程中代表方案对比

Table 2 Comparison of representative schemes during the convergence process

方案	运输路线	运输总费用/万元
	①石洞(120 m 中段)→李家岭北(120 m 中段)→李家岭北(-320 m 中段)→居隆庵 21#→居隆庵竖井→水冶厂;	
方案一	②书堂(200 m 中段)→李家岭北(200 m 中段)→李家岭北(40 m 中段)→居隆庵竖井→水冶厂;	5 508.20
	③李家岭北(-240 m 中段)→居隆庵 7#(-240 m 中段)→居隆庵竖井→水冶厂;	
	④李家岭南、居隆庵 7# 浅部以及居隆庵 21# 均通过各中段巷道运输至竖井提升,最终至水冶厂	

表2(续)

方案	运输路线	运输总费用/万元
方案二	①石洞(0 m中段)→李家岭北(0 m中段)→李家岭北(160 m中段)→居隆庵7#(160 m中段)→居隆庵竖井→水冶厂; ②书堂(200 m中段)→李家岭北(200 m中段)→李家岭北(160 m中段)→居隆庵竖井→水冶厂; ③李家岭北(200 m中段)→200 m主平硐→水冶厂; ④李家岭南、居隆庵7#浅部以及居隆庵21#均通过各中段巷道运输至竖井提升,最终至水冶厂	5 150.88
方案三	①石洞(120 m中段)→李家岭北(120 m中段)→居隆庵7#(120 m中段)→居隆庵竖井→水冶厂; ②书堂(200 m中段)→李家岭北(200 m中段)→李家岭北(-400 m中段)→居隆庵7#(-400 m中段)→居隆庵竖井→水冶厂; ③李家岭北(200 m中段)→200 m主平硐→水冶厂; ④李家岭南、居隆庵7#浅部以及居隆庵21#均通过各中段巷道运输至竖井提升,最终至水冶厂	5 053.26
方案四	①石洞(80 m中段)→居隆庵7#(80 m中段)→居隆庵竖井→水冶厂; ②书堂(200 m中段)→李家岭北(200 m中段)→李家岭北(-400 m中段)→居隆庵7#矿床(-400 m中段)→居隆庵竖井→水冶厂; ③李家岭北(200 m中段)→200 m主平硐→水冶厂; ④李家岭南、居隆庵7#浅部以及居隆庵21#均通过各中段巷道运输至竖井提升,最终至水冶厂	5 000.25
方案五	①石洞(120 m中段)→居隆庵7#(120 m中段)→居隆庵主竖井→水冶厂; ②书堂运输平台(200 m中段)→居隆庵竖井→水冶厂; ③李家岭北(200 m中段)→200 m主平硐→水冶厂; ④李家岭南、居隆庵7#浅部以及居隆庵21#均通过各中段巷道运输至竖井提升,最终至水冶厂	4 557.68
方案六	①石洞(120 m中段)→李家岭南(120 m中段)→居隆庵主竖井→水冶厂; ②书堂(200 m中段)→200 m主平硐→水冶厂; ③李家岭北(200 m中段)→200 m主平硐→水冶厂; ④李家岭南、居隆庵7#浅部以及居隆庵21#均通过各中段巷道运输至竖井提升,最终至水冶厂	4 509.12

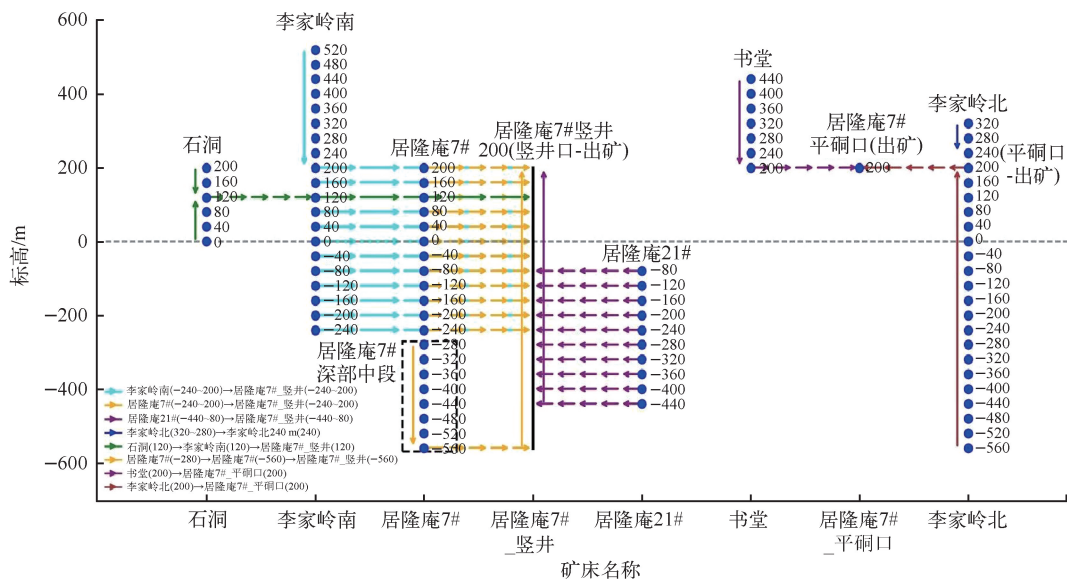


图8 区域最佳开拓运输路径方案

Fig. 8 The best transportation route development plan for the region

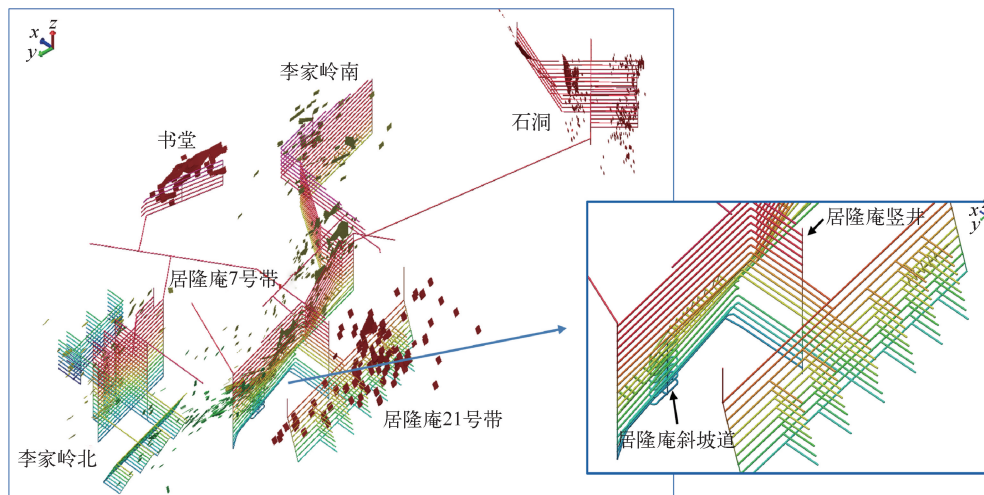


图9 区域开拓运输系统三维示意图

Fig. 9 Three dimensional schematic diagram of regional development transportation system

#### 4 结论

1)在相山铀矿田集聚资源集约开发理念基础上,运用网络流理论分析了区域铀矿山开拓运输系统结构,建立了基于网络流的区域矿山开拓运输系统概念模型,为开拓运输系统优化奠定了基础。

2)区域矿山运输系统规划模型采用全局优化思想,同时综合考虑了区域内所有矿山的运输路径,针对区域矿山复杂开拓运输系统问题,基于灰狼算法构建区域矿山开拓运输系统优化模型,得出最优运输路径,进一步降低成本费用,为矿田经济高效开发提供了技术支持。

3)针对区域矿山运输系统网络复杂特点,采用灰狼算法能够有效求解问题,灰狼算法在矿山复杂开拓运输系统优化中具有较好的适用性,可为铀矿大基地复杂开拓运输系统规划提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 姚亦军,许芸芸,马英英,等.江西省相山铀矿田居隆庵地区富矿体形成条件及找矿方向[J].铀矿地质,2022,38(4):748-755.  
YAO Yijun, XU Yunyun, MA Yingying, et al. Formation conditions and prospecting direction of rich ore body in Julong'an uranium area, Xiangshan ore field, Jiangxi Province [J]. Uranium Geology, 2022, 38(4):748-755 (in Chinese).
- [2] 张万良,郭福生,李嘉,等.相山铀矿田矿体分布规律研究新进展[J].华东理工大学学报(自然科学

版),2022,45(4):311-318.

ZHANG Wanliang, GUO Fusheng, LI Jia, et al. New progress in the study of ore body distribution in Xiangshan uranium ore field [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2022, 45(4):311-318 (in Chinese).

- [3] 侯志永,刘海洋,马运超,等.智能矿山建设在硬岩铀矿山的实践应用[J].铀矿冶,2025,1-8 [2025-06-03]. <https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2024.12.09>.
- HOU Zhiyong, LIU Haiyang, MA Yunchao, et al. Practical application of intelligent mine construction in hard rock uranium mines [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 1-8 [2025-06-03]. <https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2024.12.09> (in Chinese).
- [4] 高文翔.多矿整合产能配置与区域开拓运输系统重构优化研究[D].长沙:中南大学,2008.
- [5] 袁艳斌,梁宵,张晓盼,等.矿山运输系统可靠性的熵权法模糊综合评判[J].金属矿山,2011(2):28-31.  
YUAN Yanbin, LIANG Xiao, ZHANG Xiaopan, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the reliability of mining transport system with entropy-weight method [J]. Metal Mine, 2011 (2): 28-31 (in Chinese).
- [6] 陈志兴.某地采多金属矿开拓运输系统设计[J].现代矿业,2017,33(4):89-91.  
CHEN Zhixing. Design of transportation system for the development of polymetallic mines in a certain area [J]. Modern Mining, 2017, 33(4):89-91 (in Chinese).

- [7] 孙效玉,张维国,贾荣军. 矿山运输系统优化模型及解算方式探讨[J]. 金属矿山, 2012(5):133-136.  
SUN Xiaoyu, ZHANG Weiguo, JIA Rongjun, et al. Discussion on the model optimization and solution for mining pit transportation system [J]. Metal Mine, 2012(5):133-136(in Chinese).
- [8] 林启太. 基于模糊积分评判的开拓运输系统选择[J]. 中国矿业, 2000, 9(1):32-35.  
LIN Qitai. Apply fuzzy integral to choose the haulage system for mine development [J]. China Mining Magazine, 2000, 9(1):32-35(in Chinese).
- [9] 周科平,翟建波. 改进蚁群算法在地下矿山运输路径优化的应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(1):256-261.  
ZHOU Keping, ZHAI Jianbo. Application of improved ant colony algorithm in route optimization of underground mine's transportation [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(1):256-261(in Chinese).
- [10] 梅伟,赵云涛,毛雪松,等. 基于离散灰狼算法的喷涂机器人路径规划方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(11):3379-3384.  
MEI Wei, ZHAO Yuntao, MAO Xuesong, et al. Path planning method for spraying robot based on discrete grey wolf optimizer algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(11):3379-3384 (in Chinese).
- [11] 蒋正锋,李春青,杨秀增,等. 灰狼优化算法研究综述[J/OL]. 计算机工程与应用, 1-42[2025-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20250514.1037.002.html>.  
JIANG Zhengfeng, LI Chunqing, YANG Xiuzeng, et al. Survey of Gray Wolf Optimization Algorithm [J/OL]. Computer Engineering and Applications, 1-42[2025-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20250514.1037.002.html>(in Chinese).
- [12] 张朋超,刘翔,刘家槟,等. 基于改进灰狼算法的无人矿车路径规划[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(5):194-200.  
ZHANG Pengchao, LIU Xiang, LIU Jiabin, et al. Path planning of unmanned mine truck based on improved Grey Wolf Algorithm [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5):194-200 (in Chinese).
- [13] 刘云平,朱慧如,方卫华. 改进灰狼算法的无人机路径规划[J]. 电光与控制, 2023, 30(7):1-7.  
LIU Yunping, ZHU Huiru, FANG Weihua. Path planning of uav based on improved Grey Wolf Optimizer Algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(7):1-7(in Chinese).
- [14] 张威,张鑫中,王丛佼,等. 改进灰狼算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(6):129-135.  
ZHANG Wei, ZHANG Xinzong, WANG Congjiao, et al. Path planning of substation inspection robots based on an improved Grey Wolf Optimizer [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2023, 37(6):129-135 (in Chinese).
- [15] 顾清华,吕艳红,卢才武,等. 多金属露天矿多目标生产计划优化问题建模及求解算法[J]. 金属矿山, 2020(4):147-153.  
GU Qinghua, LYU Yanhong, LU Caiwu, et al. Modeling and algorithm of multi-objective production scheduling optimization for multi-metal open-pit mine [J]. Metal Mine, 2020(4):147-153 (in Chinese).
- [16] 张芝超. 改进灰狼算法在矿井风网风量优化调节中的应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
- [17] 李宝,李国清,胡乃联,等. 区域矿山集约化运输系统优化模型[J]. 金属矿山, 2017(5):119-126.  
LI Bao, LI Guoqing, HU Nailian, et al. Optimization model of regional mine intensive transportation system [J]. Metal Mine, 2017(5):119-126 (in Chinese).
- [18] 张晓凤,王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(3):30-38.  
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Comprehensive review of Grey Wolf Optimization Algorithm [J]. Computer Science, 2019, 46(3):30-38 (in Chinese).

## Planning of Regional Uranium Mine Transportation System Based on Grey Wolf Optimizer

YANG Runsheng<sup>1</sup>, HUO Chenchen<sup>1</sup>, REN Sai<sup>1</sup>, REN Xiaofei<sup>2</sup>, MA Jingyu<sup>2</sup>, HOU Jie<sup>2</sup>

(1. China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, Beijing 101149, China;

2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A regional mining transportation system optimization model based on complex network planning was constructed to address the characteristics of dispersed mining of uranium deposits, diverse development methods, and complex transportation system networks in the region. Under the conditions of regional mining, a comprehensive planning and development transportation system was developed to enhance the efficiency, economy, and scientific effectiveness of the regional mining transportation system. By analyzing the spatial and geographical relationships of regional mines and the concept of intensive development, a system network diagram was established. Using network flow theory and Grey Wolf Algorithm, the global optimal solution for the regional mining transportation system was obtained. The effectiveness of the model was validated in the Xiangshan uranium mining area, and the optimal regional transportation route and lowest cost plan for the mine were calculated. The results indicate that the model meets the requirements of large-scale and intensive regional mining transportation systems, and has effective planning effects on transportation systems. It provides technical support for the economic and efficient operation of the transportation system in the Xiangshan uranium mining field, and can also provide reference for the intelligent transportation system planning of other uranium mining bases.

**Key words:** uranium deposits; Xiangshan; developing transportation systems; network flow; Grey Wolf Optimizer; intensive