

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.257

基于 AHCP 算法的大规模露天矿生产计划问题求解

顾清华^a, 李俊飞^a, 卢才武^b

(西安建筑科技大学 a.管理学院; b.资源工程学院, 西安 710055)

摘要:随着露天矿生产计划问题规模的扩大,生产计划求解的难度急剧增加,传统求解方法难以在合理时间范围内获得高质量的解。针对以上问题,根据矿床开采过程中的特点,设计了一种具有惩罚的凝聚层次聚类算法(agglomerative hierarchical clustering algorithm with penalties, AHCP)与二进制入侵式杂草算法(binary intrusive weed algorithm, BIWO)相结合的方法来求解大规模露天矿生产计划问题。首先采用 AHCP 算法对块状矿床模型进行块体聚类处理,然后将聚合体作为对象建立 0-1 整数规划模型,并使用 BIWO 算法对其进行求解。实验结果表明, AHCP 算法可以显著地提高 BIWO 算法求解大规模露天矿生产计划问题的能力。在保证解的质量的前提下,可将问题的整体求解时间缩短近 90%。

关键词:露天矿; 生产计划; 0-1 整数规划; AHCP 算法; BIWO 算法

中图分类号: TD804

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)04-033-14

On the solution to large-scale open-pit mine production planning problem based on AHCP algorithm

GU Qinghua^a, LI Junfei^a, LU Caiwu^b

(a. School of Management; b. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: With the expansion of the scale of open pit mines, the problems of preparing production plans has increased dramatically, leaving it difficult for traditional methods to obtain high-quality solutions in a reasonable time. In response to the above questions, a method combining agglomerative hierarchical clustering algorithm with penalties (AHCP) and binary intrusive weed algorithm (BIWO) is designed in this paper, according to the characteristics of mining, to solve the large-scale open pit mine production planning problem. Firstly, the block deposit model is aggregated according to AHCP algorithm. Then, the state of these units in each period is taken as variables to establish a 0-1 integer programming (IP) model. Finally, the IP model is solved by the BIWO algorithm. Experimental results show that AHCP algorithm can significantly improve the ability of BIWO algorithm in solving large-scale open pit production

收稿日期: 2019-08-19 **网络出版日期:** 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774228, 51404182); 陕西省自然科学基金资助项目(2017JM5043); 陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0425)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51774228, 51404182), Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2017JM5043) and Special Research Project of Education Department of Shaanxi Provincial Government(17JK0425).

作者简介: 顾清华(1981—), 男, 西安建筑科技大学教授, 博士, 研究方向为资源系统优化与管理、矿业系统工程等, (E-mail) qinghuagu@126.com。

planning problems. The method in this paper can reduce the overall solution time by nearly 90% while ensuring the quality of the solution.

Keywords: open-pit mine; production plan; 0-1 integer programming; AHCP algorithm; BIWO algorithm

矿产资源的开发利用对我国经济的发展至关重要,矿产资源开采在为矿山企业创造利润的同时,也给企业的生产管理提出了极大的挑战。不合理的生产计划会造成矿产资源以及投入生产的人、物力资源的浪费,降低矿山企业的经济效益,在一些情况下还可能增加开采过程中的作业难度^[1]。

编制露天矿生产计划的方法很多,根据研究对象的不同,大致可以分为两类:第一类以各计划期末矿坑的边界为研究对象,该类方法综合考虑矿山地质以及矿产品价格等因素,得到一系列经济最优境界,将这一系列境界作为矿山各计划期的生产目标^[2-3];第二类方法以各计划期内需要开采的矿岩量为研究对象。相较于第一类方法,此类方法还考虑了矿岩石开采过程中技术因素,使问题模型更符合现实情况的需要^[4]。通常在第二类方法中,为确定矿床各部分的开采次序以及具体的开采时间,矿床被分割为规则的块体,并且各块体的处理方法已经确定。矿床开采的总年限被划分为多个独立的计划期^[5],然后根据上述假设构建 0-1 整数规划模型。对于一个包含 n 个块体、计划期为 p 个的矿床,就需要 $n \times p$ 个二进制变量来表示每个块体在所有计划期内的状态。尤其在涉及时空范围较广的露天矿生产计划问题中,其对应的 0-1 整数规划模型里包含的决策变量总数可达数百万甚至上千万,导致该问题求解难度较大,甚至无法求解^[6]。

目前针对大规模露天矿生产计划问题主要从两个方面解决:一方面是通过松弛掉整数规划模型一些约束或是将块体聚合等方法降低问题难度。Lambert 等^[7]采用拉格朗日松弛方法对整数规划模型进行简化的策略,利用拉格朗日乘子将模型中的资源限制类约束松弛掉;Ramazan 等^[8]提出了一种基础树算法,根据图论原则合并块状矿床模型中的块体;Askari-Nasab 等^[9]将聚类思想引入到块体聚合中,提出使用凝聚层次聚类算法对块体进行聚合处理。另一方面是通过使用计算能力强的群智能算法求解生产计划问题。Denby 等^[10]使用具有自主学习能力的遗传算法解决生产计划问题,该方法能够同时获得最终境界和块体的开采顺序,但不能确保获得最优解;Kumral 等^[11]采用模拟退火算法求解多目标生产计划问题,然而由于 SA 算法收敛速度较慢,该方法只适用于小规模作业问题的求解。Lamghari 等^[12]提出了两种不同更新策略的禁忌搜索算法用于解决生产计划问题,这两种 TS 算法均可在合理时间内获得可行解,但是该可行解与最优解的差距很大;胡乃联等^[13]为粒子群算法设计了一种新型搜索策略,该策略能够帮助粒子群算法克服了易陷入局部最优和收敛速度慢的缺陷;Shishvan 等^[14]研究分析了蚁群算法、最大最小蚂蚁系统算法和蚁群系统 3 种算法求解生产计划问题的效果,证明了蚁群算法可显著提高初始可行解的质量;Khan 等^[15]比较了差分进化算法和 CPLEX 方法求解大规模露天矿生产计划问题的速率,证明了 DE 算法能够有效地缩减生产计划的求解时间。综上所述,虽然群智能算法在解决复杂规划问题上具有显著优势,但是它的运算能力仍难以满足大规模露天矿生产计划问题的求解需求。

以往文献直接将块体在各计划期内的状态作为变量建立整数规划模型,造成群智能算法在求解大规模露天矿生产计划问题时,无法在合理时间内获得高质量解。针对这一问题,笔者将块体聚合方法与群智能算法结合,提出一种新的求解大规模露天矿生产计划问题的方法。在求解方法上有 2 点创新,主要体现在如下:

1) 采用 AHCP 算法对块体进行聚合处理。根据块体间相似度指数对块体进行预处理,从而降低求解问题的时间复杂度。2) 在块体聚合过程中,通过引入 3 个不同的惩罚策略以控制块体的聚合结果进而确保解的质量。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

在露天矿生产计划问题中,由于矿山企业的规模限制了各计划期内矿岩的开采量和各类矿石的处理量,因此各计划期内块体的开采数量限定在一定范围内,以确保矿山企业的正常运行。此外,块体的开采次序直

接影响矿坑边坡稳定与否,因此在块体的开采过程中还应当考虑块体间的空间位置关系。换句话说,露天矿生产计划问题的本质就是确定一个合理的块体开采次序,既能够满足技术条件限制,又可以使矿山企业获得最大经济利益。

1.2 符号说明

集合

N 为块体集合 $\{1, 2, \dots, n\}$; W_n 为块体的质量集合 $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$; T 为开采周期集合 $\{1, 2, \dots, t\}$; M 为块体的岩石类型集合 $\{1, 2, \dots, m\}$; K 为矿床中有价元素的集合 $\{1, 2, \dots, k\}$; L_n 为块体 n 的优先块体集合 $\{l_{n1}, l_{n2}, \dots, l_{nq}\}$ 。

参数

M_{\max}^t 和 M_{\min}^t 分别为每个计划期内矿岩开采量的上下限, P_{\max}^{tm} 和 P_{\min}^{tm} 为各类矿岩石处理量的上下限; G_{\max}^{ktm} 和 G_{\min}^{ktm} 分别为周期 t 内 m 型岩石有价金属 k 平均品位的上下限; g_n^k 为矿石中各有价元素的品位; C_n^{tm} 为块体 n 在周期 t 作为 m 型岩石开采的净收益折现值。

决策变量

$x_n^{tm} = \{0, 1\}$ 为块体 n 在计划期 t 内作为 m 型岩石的开采状态, $x_n^{tm} = 1$ 表示开采, $x_n^{tm} = 0$ 表示不开采。

1.3 模型

目标函数(1)表示矿山企业经济效益最大化,该目标同时考虑了矿产品的价值和资金的时间价值,有利于矿山企业管理人员评价各生产计划的优劣;约束条件(2)和(3)分别将各计划期的矿岩石开采量以及矿石处理量保持在限定范围内;约束条件(4)确保了各计划期内的矿石的平均品位能够满足配矿的要求;约束条件(5)表示块体间的优先级约束。优先级约束包括块体开采过程中可达性约束和可采性约束,可达性约束是指每一个块体的优先块体都应当先于或与该块体一同开采,可采性约束是指块体开采过程中不能破坏边坡的稳定。约束条件(6)限制了块体的开采次数,在数学模型中,该约束用来防止出现某一块体被多次开采的情况。

$$\max V(x) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M C_n^{tm} x_n^{tm}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_n x_n^{tm} \leq M_{\max}^t & \forall t, \\ \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_n x_n^{tm} \geq M_{\min}^t & \forall t. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \omega_n x_n^{tm} \leq P_{\max}^{tm} & \forall t, \forall m, \\ \sum_{n=1}^N \omega_n x_n^{tm} \geq P_{\min}^{tm} & \forall t, \forall m. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N (g_n^k - G_{\max}^{ktm}) \omega_n x_n^{tm} \leq 0 & \forall t, \forall m, \\ \sum_{n=1}^N (g_n^k - G_{\min}^{ktm}) \omega_n x_n^{tm} \geq 0 & \forall t, \forall m. \end{cases} \quad (4)$$

$$\left(\sum_{m=1}^M x_n^{tm} \right) - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T x_{l_{nq}}^{tm} \right) \leq 0 \quad \forall t, \forall n, \forall l_{nq} \in L_n, \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T x_n^{tm} \leq 1 \quad \forall n. \quad (6)$$

2 算法设计

2.1 基本的 AHCP 算法

凝聚层次聚类算法 (agglomerative hierarchical clustering algorithm, AHC) 是一种根据对象间相似度, 自底向上将对象逐层合并的聚类算法。Dósea 等^[16]和 Miyamoto 等^[17]基于 AHC 算法并结合惩罚策略, 提出一种用于处理大规模多维度复杂数据的 AHCP 算法。AHCP 算法主要包括对象间相似度计算, 聚类间相似度计算和相似度矩阵修正 3 个部分。

2.1.1 对象间相似度计算

对象间相似度的衡量是 AHCP 算法中的重要步骤。闵科夫斯基距离度量准则是目前最常用的衡量对象间相似度的方法^[18], 其计算式为

$$d(i, j) = \left(\sum_{p=1}^P |x_{ip} - x_{jp}|^m \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (7)$$

式中: $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$ 和 $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp}$ 分别是对象 i 和对象 j 用于计算距离的属性 P 的值; m 的值依据距离种类而定。

2.1.2 聚类间相似度计算

根据聚类属性的取值方法, 常用的相似度计算方法有最短距离法、最长距离法、平均值距离法和平均距离法 4 种, 具体的计算方法如图 1 所示。

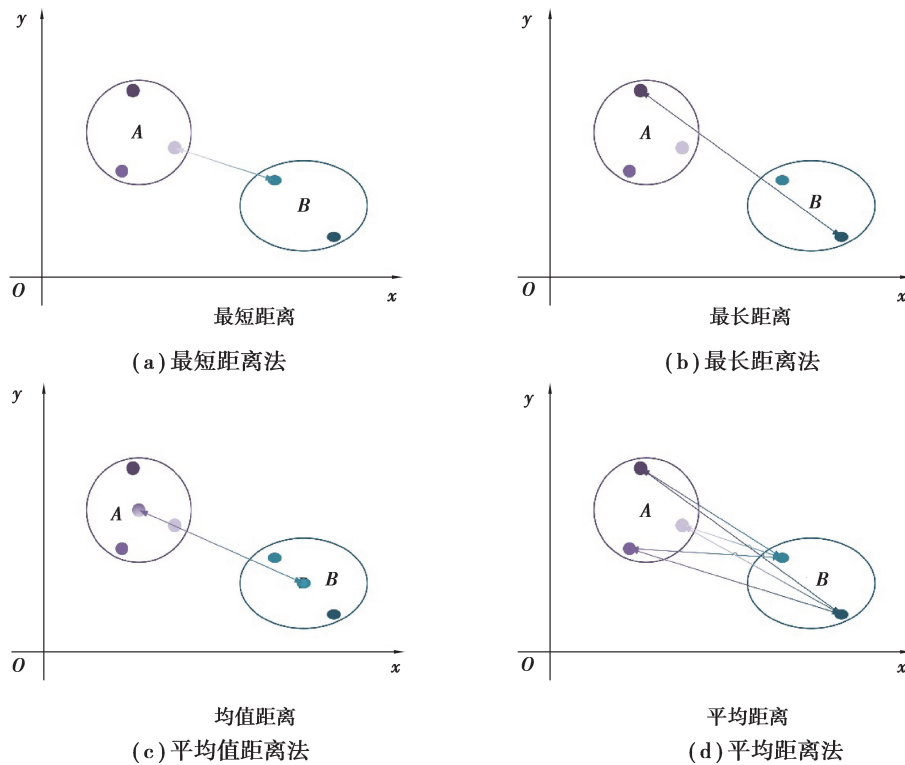


图 1 聚类间距离的计算方法

Fig. 1 Class distance calculation method

2.1.3 相似度矩阵修正

为了区分不同属性对聚合结果的影响程度, AHCP 算法在对象间的初步相似度矩阵形成后, 加入惩罚函数, 以提高聚合结果在实际操作中的实用性。惩罚函数的应用方式为

$$d' = \begin{cases} d & |x_{ig} - x_{jg}| \leq \epsilon, \\ d \times f(|x_{ig} - x_{jg}|) & |x_{ig} - x_{jg}| > \epsilon. \end{cases} \quad (8)$$

式中: d 为对象的初步相似度矩阵; d' 为经调整的相似性矩阵; $|x_{ig} - x_{jg}|$ 为在对象 i 和对象 j 的合并过程中起重要作用属性的差距; ϵ 为该属性的允许合并范围; $f(|x_{ig} - x_{jg}|)$ 为 $|x_{ig} - x_{jg}|$ 的函数, 用来修正相似度指数。

2.2 AHCP 算法中块体合并的规则设计

AHCP 算法在执行过程中, 每合并完一个聚类就需要重新计算一次相似度矩阵, 对于数据量庞大的块体模型而言, 计算量浩大。因此, 为提高 AHCP 算法的合并块体的速率, 结合块状矿床模型中块体的数量众多、相邻块体间的差异小等特点^[19], 这里对 AHCP 算法的合并规则做出调整, 具体的调整方法如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 在 AHCP 算法中设置了单次最小合并块体数量 N_{\min} , 以增加单次合并块体的数量, 减少相似度指数的计算次数, 提高算法的运算效率。

3 用 AHCP 算法求解生产计划问题

3.1 约束条件的处理

由于 0-1 整数规划模型同时考虑了开采能力、处理能力、平均品位等多项约束, 使得问题变得更为复杂。因此采用约束条件目标化方法, 将原始整数规划模型中的各约束转化为约束度违反函数, 降低模型的求解复杂度。依据上述思想, 对模型中约束条件的处理如下:

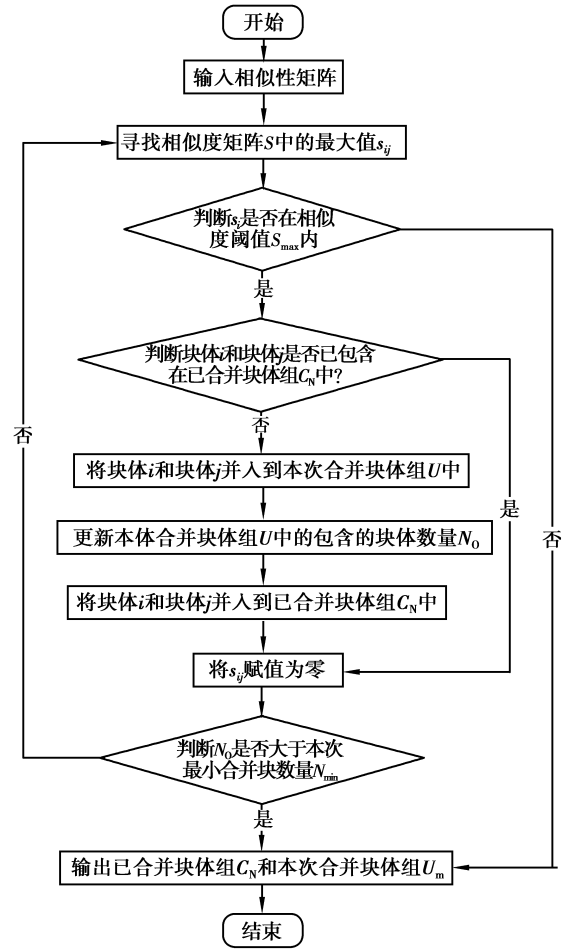


图 2 AHCP 算法合并规则

Fig. 2 Clustering rules of the AHCP algorithm

$$\left\{ \begin{aligned}
 \theta_1(x) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_n x_n^{tm} - M_{\max}^t \leq 0, \\
 \theta_2(x) &= - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_n x_n^{tm} + M_{\min}^t \leq 0, \\
 \theta_3(x) &= \sum_{n=1}^N \omega_n x_n^{tm} - P_{\max}^{tm} \leq 0, \\
 \theta_4(x) &= - \sum_{n=1}^N \omega_n x_n^{tm} + P_{\min}^{tm} \leq 0, \\
 \theta_5(x) &= \sum_{n=1}^N (g_n^k - G_{\max}^{ktm}) \omega_n x_n^{tm} \leq 0, \\
 \theta_6(x) &= - \sum_{n=1}^N (g_n^k - G_{\max}^{ktm}) \omega_n x_n^{tm} \leq 0, \\
 \theta_7(x) &= \left(\sum_{m=1}^M x_n^{tm} \right) - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^t x_{lnqr}^{rm} \right) \leq 0, \\
 \theta_8(x) &= \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T x_n^{tm} - 1 \leq 0.
 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

经过式(9)对规划模型的约束条件处理, 原始模型被转化为多目标优化问题形式:

$$\begin{cases} \max V(x) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M C_n^{tm} x_n^{tm}, \\ O(x) = \sum_{j=1}^J \max\{0, \theta_j\}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $O(x)$ 为约束度违反函数,当 $O(x)=0$ 时,表示当前解可以满足所有的约束条件;当 $O(x) \neq 0$ 时,表示当前解不满足模型中的各项约束条件。

一般而言,多目标规划问题的求解是比较困难的。为简化问题的求解难度,使用理想点法将多目标问题转化为单目标问题,该方法通过比较有效解与理想化目标的接近程度,进而选出最优解^[20-21]。根据理想点法,上述 IP 模型的目标函数转化为

$$\min f = \lambda_1 (V(x) - Q_1)^2 + \lambda_2 (O(x) - Q_2)^2, \quad (11)$$

式中: Q_1 为 $V(x)$ 的理想值,其取值为使用线性规划方法求解该问题的上界值; Q_2 为 $O(x)$ 的理想值,由约束违反度函数的特性可知,其取值为零; λ_i 为第 i 个目标函数的权重,大小根据参与决策的各个目标函数的重要性决定,且所有的 λ_i 值相加为 1。

3.2 决策变量的处理

约束违反度函数方法和理想点法将生产计划问题简化为无约束的优化问题,从约束条件的角度降低问题的求解难度。但就实际情况而言,变量的规模才是增加生产计划问题复杂度的关键。这里采用 AHCP 算法,通过合并块体减少变量的数目。

AHCP 算法对块体进行合并时,首先将每一个块体作为单独的一类,然后根据块体间的相似度指数,将其逐层合并形成聚合体。计算块体间的相似度指数的首要任务是确定相似度指数计算需要考虑的属性。理论上讲,属性的种类越多,聚合结果的可靠性越强。但是,随着属性种类的增加,AHCP 算法的时间和空间复杂度呈指数型增长。基于以上原因以及块体特性的考虑,选择位置、品位、质量等属性来计算块体间的相似度指数。

根据 AHCP 算法的聚类原则,将块体间相似度的计算过程分为 3 个步骤。首先根据块体的位置和品位计算块体的初步相似度矩阵。然后引入矿石的纵向距离、岩石类型和聚合体质量惩罚修正相似度指数,以提高聚类结果的实用性。最后应用图 2 所示的 AHCP 算法合并规则将块体逐层合并,减少块状矿床模型中块体的数量,进而减少整数规划模型中决策变量的数目。

1) 位置相似度计算。

$$D_{ij} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2], \quad (12)$$

$$\tilde{D}_{ij} = D_{ij} / D_{\max}. \quad (13)$$

式中: X_i, Y_i, Z_i 和 X_j, Y_j, Z_j 分别为块体 i 与块体 j 的中心点的 x 轴、 y 轴和 z 轴坐标, D_{ij} 为块体 i 与块体 j 的位置相似度指数。式(12)计算两块体之间的三维距离,式(13)是将位置相似度指数做归一化处理。其中 D_{\max} 表示式(12)中 D_{ij} 的最大值。

2) 品位相似度计算。

$$G_{ij} = \begin{cases} (G_i - G_j)^2 & G_i \neq G_j, \\ \delta & G_i = G_j. \end{cases} \quad (14)$$

$$G_{ij} = G_{ij} / G_{\max}. \quad (15)$$

式中: G_i 和 G_j 分别为块体 i 与块体 j 的品位值; G_{ij} 为块体 i 与块体 j 的品位相似度指数。式(14)计算 2 个块体间品位的差异,式(15)用于品位相似度的归一化处理。其中 G_{\max} 表示式(14)中品位相似度指数的最大值, δ 是一个不为 0 的极小值。

3) 初步相似度计算。

$$S_{ij} = 1 / (aD_{ij} \times bG_{ij}). \quad (16)$$

式(16)计算两块体间的初步相似度,其中 S_{ij} 为块体 i 与块体 j 的初步相似度值,引入参数 a, b 的目的是平衡块体位置与品位对相似度的影响程度,使同一个块体的位置相似度和品位相似度指数位于同一量级, $a,$

b 的取值方式如式(17)(18)所示:

$$a = \log(G_{ij}), \quad (17)$$

$$b = \log(D_{ij}). \quad (18)$$

4)纵向距离惩罚。为避免出现纵向上不连续块体合并的情况,采用纵向距离惩罚来调整块体间的相似度指数。

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & |z_i - z_j| \leq (h_i - h_j)/2, \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \quad (19)$$

式中: Z_i 和 Z_j 分别为块体 i 和块体 j 的中心点坐标的 z 轴值; h_i 和 h_j 分别为块体 i 和块体 j 的 z 轴尺寸; F_{ij} 为块体 i 和块体 j 纵向距离的惩罚值。

5)岩石类型惩罚。在实际生产过程中,不同类型的岩石的处理方式和场地都不同。因而为避免将不同岩石类型的块体合并到同一聚合体中,这里增加了岩石类型惩罚。

$$R_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{块体 } i \text{ 和 } j \text{ 的岩石类型相同,} \\ 0 & \text{块体 } i \text{ 和 } j \text{ 的岩石类型不同。} \end{cases} \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (20)$$

6)聚合体质量惩罚。为限制聚合体的体积,将体积限制转为对质量限制,引入聚合体质量惩罚,避免超大量聚合体的形成。

$$Q_{ij} = \begin{cases} 1 & w_i + w_j \leq M_{\max}, \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \quad (21)$$

式中: w_i 和 w_j 分别为块体 i 与块体 j 的质量; M_{\max} 为根据生产计划问题的求解精度确定的聚合体的最大质量; Q_{ij} 为块体 i 与块体 j 的聚合体质量的惩罚值。

7)初步相似度修正。根据纵向距离惩罚、岩石类型惩罚和聚合体质量惩罚修正块体间的初步相似度矩阵,以提高聚合结果的实用性。其中, S'_{ij} 为块体 i 与 j 的总体相似度值。

$$S'_{ij} = S_{ij} \times F_{ij} \times R_{ij} \times Q_{ij} \quad (i, j \in N, i \neq j). \quad (22)$$

3.3 0-1 整数规划模型的求解

3.3.1 基本 BIWO 算法

入侵式杂草算法(invasive weed optimization, IWO)是一种模仿杂草生长和繁殖行为的随机搜索型优化算法,该算法通过种群初始化、繁殖、扩散和竞争排斥4步获得最优解^[22]。在IWO算法寻优过程中,子代的数目由父代的适应度值决定,位置在父代周围的空间中呈正态分布。子代数目的计算公式和位置更新公式为

$$u = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}(V_{\max} - V_{\min}) + V_{\min}, \quad (23)$$

式中: u 为父代中某一株杂草的种子数量; f 为父代中某一株杂草当前的适应度值; f_{\max} 与 f_{\min} 分别为父代中的最优与最劣个体的适应度值; V_{\max} , V_{\min} 分别为每一株杂草可以产生种子数量的上下界。

$$\sigma_i = (i_{\max} - i)^\alpha (\sigma_{\text{ini}} - \sigma_{\text{fin}}) / i_{\max}^\alpha + \sigma_{\text{fin}}, \quad (24)$$

式中: i_{\max} 为最大迭代次数; i 代表当前迭代的次数; σ_{ini} 和 σ_{fin} 分别是标准差的初始值和最终值,用来控制子代个体的扩散范围; α 为非线性调和因子。

为将IWO算法用于解决露天矿0-1整数规划问题,BIWO算法使用二进制方法初始化种群,并以式(25)为映射函数调整IWO算法中的扩散步骤^[23]。

$$f(\sigma_i^k) = \text{sig}(\sigma_i^k - 6) + \text{sig}(-\sigma_i^k - 6). \quad (25)$$

$$\hat{\sigma}_i^k = \begin{cases} 1 & f(\sigma_i^k) \succ \rho, \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \quad (26)$$

$$x_i^{k+1} = \text{mod}(x_i^k + \hat{\sigma}_i^k, 2). \quad (27)$$

式(25)中 σ_i^k 为 i 次迭代中某个体 k 维的标准差;式(26)中 ρ 为0至1间的随机数;式(27)中 x_i^k 为 i 次迭代中某个体 k 维的值。

3.3.2 模型求解

根据文中构建的 0-1 整数规划模型,结合 3.1 和 3.2 的处理基础,设计 BIWO 算法的编码方式。以块体模型中各聚合体在每一个开采周期的状态 $\mathbf{X} = \{x_n^{tm}, n \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T}, m \in \mathbf{M}\}$ 为变量的生产计划编制问题: $\min\{f(x), x \in \mathbf{X}\}$, BIWO 算法用每株杂草代表一种聚合体开采方案。杂草的维数等于聚合体数量 \mathbf{N} 、开采周期 \mathbf{T} 和岩石类型 \mathbf{M} 的乘积,杂草的每一维位置信息表示每个聚合体在 t 周期内作为 m 型岩石的开采状态,将聚合体开采后的净现值作为 BIWO 算法的适应度函数。假设已知杂草初始种群的大小为 u_{ini} ,杂草的最大种群定为 u_{max} 采用 BIWO 算法求解露天矿生产计划问题,其求解过程描述如下。

1) 种群初始化。杂草的初始种群规模为 $u_{ini}=5$,每株杂草的编码为一个 N 行 TM 列的矩阵, N, T 和 M 分别为聚合体数量 \mathbf{N} ,开采周期 \mathbf{T} 和岩石类型 \mathbf{M} 的最大值,且该矩阵中仅包含 0,1 两种元素。具体形式为

$$X_i(0) = \begin{bmatrix} x_1^{11} & x_1^{12} & \cdots & x_1^{1M} & x_1^{21} & x_1^{22} & \cdots & x_1^{2M} & \cdots & x_1^{T1} & x_1^{T2} & \cdots & x_1^{TM} \\ x_2^{11} & x_2^{12} & \cdots & x_2^{1M} & x_2^{21} & x_2^{22} & \cdots & x_2^{2M} & \cdots & x_2^{T1} & x_2^{T2} & \cdots & x_2^{TM} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_N^{11} & x_N^{12} & \cdots & x_N^{1M} & x_N^{21} & x_N^{22} & \cdots & x_N^{2M} & \cdots & x_N^{T1} & x_N^{T2} & \cdots & x_N^{TM} \end{bmatrix}。$$

2) 确定 BIWO 算法的各项参数。根据问题规模的大小,确定 BIWO 算法中 $u_{max}, V_{min}, V_{max}, \sigma_{ini}, \sigma_{fin}, i_{max}$ 等参数的取值。

3) 根据式(23)计算父代中每一株杂草的种子数量。

4) 子代更新操作。根据式(28)确定父代生成子代时需要更新的行数 o ,然后用式(25)至(27)对矩阵中任意 o 行的元素进行变换。

$$o = \sigma_i \times N。 \quad (28)$$

5) 种群更新。计算所有父代和子代的适应度值,根据个体的适应度值和预设的最大种群规模,淘汰适应度值低的个体。

6) 停止条件判定。采用限定最大迭代次数作为终止条件,即 $i \leq i_{max}$ 。

4 实例验证

4.1 实验数据

为验证应用 AHCP 算法和群智能算法编制大规模露天矿生产计划的有效性,将该方法应用于 MineLink 库的案例 KD, P4HD 中^[24],其中 KD 为规模较小的单金属铜矿床模型, P4HD 是包含金、银、铜的多金属矿床模型,以上 2 个模型的详细信息如表 1 所示,图 3 所示为各个模型的立体图形。对于 P4HD 这样的多金属矿,使用当量品位方法,将其余组分折合主组分的品位进行块体间品位相似计算^[25],以简化相似度的计算过程。

表 1 KD, P4HD 案例中的经济和技术参数

Table 1 Economic and technical parameters of KD and P4HD model

案例	总质量/ t	块体数量/ 个	块体尺寸	最大开采量/ (t · a ⁻¹)	最小开采量/ (t · a ⁻¹)	最大处理量/ (t · a ⁻¹)
KD	222 720 060.0	14 153	20 m × 20 m × 15 m	—	—	10 000 000
P4HD	169 274 250.8	40 947	50 ft × 50 ft × 20 ft	525 000 000	—	125 000 000
案例	最小处理量/ (t · a ⁻¹)	计划周期/ a	折现系数/ %	Au 回收率/ %	Ag 回收率/ %	Cu 回收率/ %
KD	—	12	0.15	—	—	88.00
P4HD	—	10	0.10	67.30	56.30	89.30

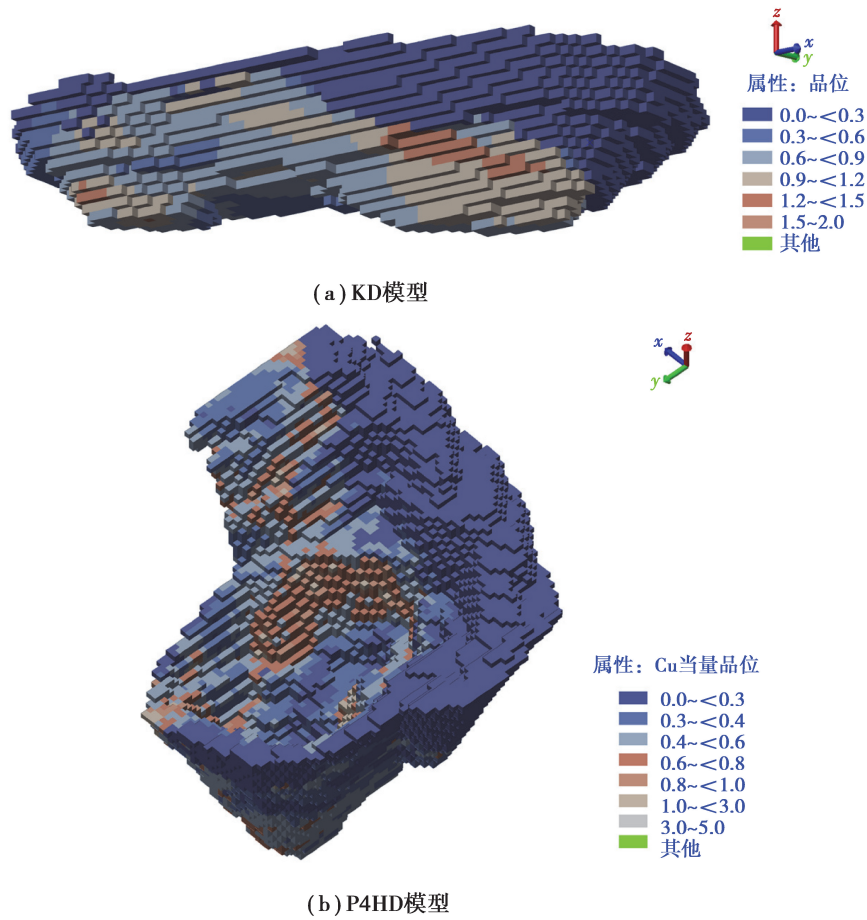


图 3 块体模型的立体图

Fig. 3 Stereoscopic view of the block model

在本实验中,首先使用 AHCP 算法对以上模型进行块体聚合处理,然后采用 BIWO 算法求解 0-1 整数规划模型,其中 BIWO 算法的各种运算参数如表 2 所示。AHCP 算法以及 BIWO 算法的程序编写和运行在英特尔© Core™i5 处理器、CPU 为 2.57 GHz、RAM 为 8 GB 的计算机中的 MATLAB R2018b 平台上进行。

表 2 BIWO 算法的各项参数设置

Table 2 Parameter setting of BIWO algorithm

符号	含义	取值
N	初始种群规模	5
N_{\max}	最大种群规模	20
S_{\max}	最小种子数	5
S_{\min}	最大种子数	15
δ_1	标准偏差初始值	0.500
δ_2	标准偏差终值	0.001
α	方差约化指数	3
i_{\max}	最大迭代次数	500

4.2 结果分析

4.2.1 块体聚合结果分析

以 KD 和 P4HD 模型为例,测试聚合体最大允许质量 M_{\max} 以及单次最小合并块体数量 N_{\min} 不同的状态下, AHCP 算法对块体的聚合结果,并将结果以图的方式保存以便进行分析。

图 4 以及图 5 分别为块状矿床模型中块体(聚合体)数量的变化图。

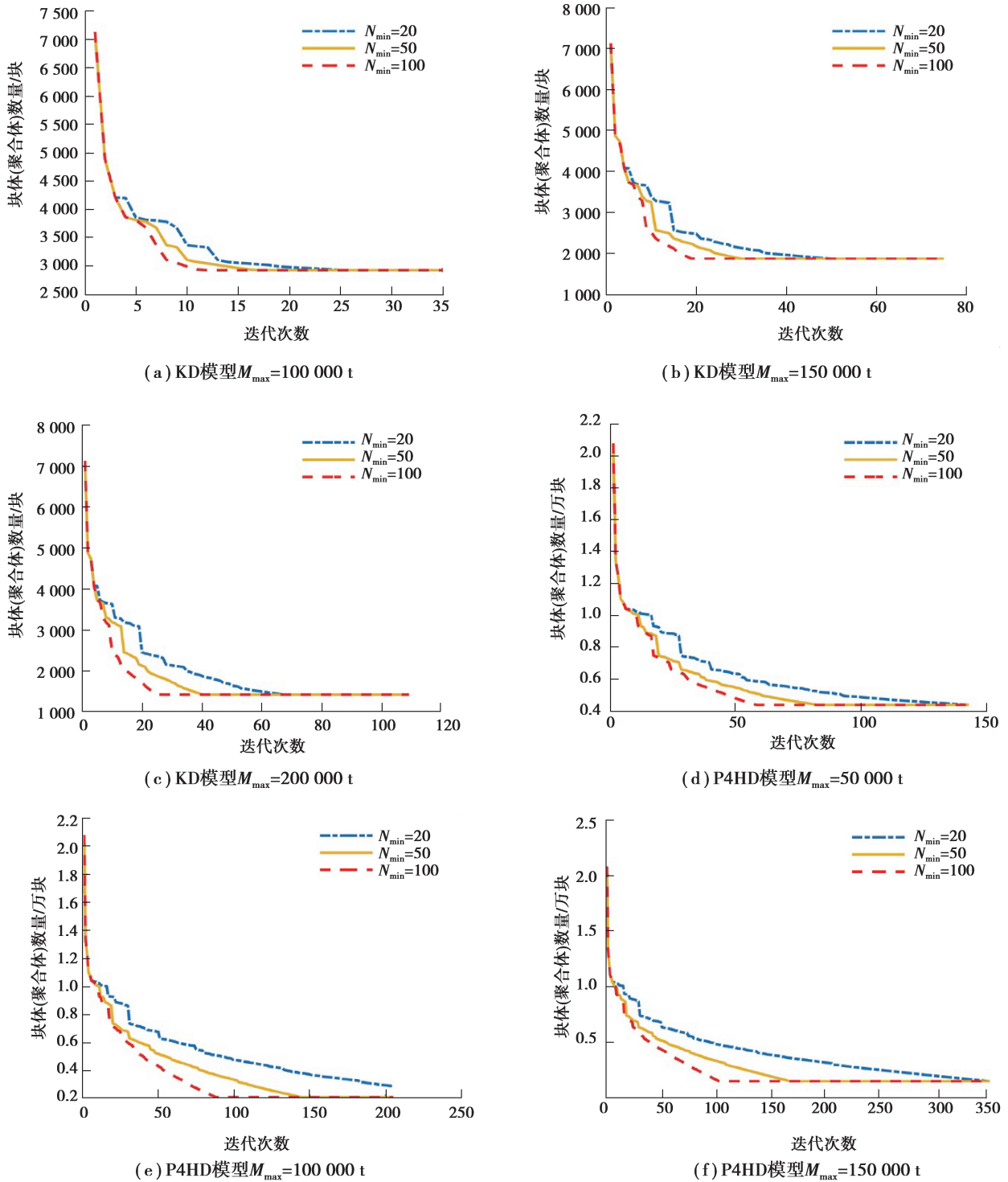


图 4 块体(聚合体)数量的变化状况

Fig. 4 Change in the number of blocks

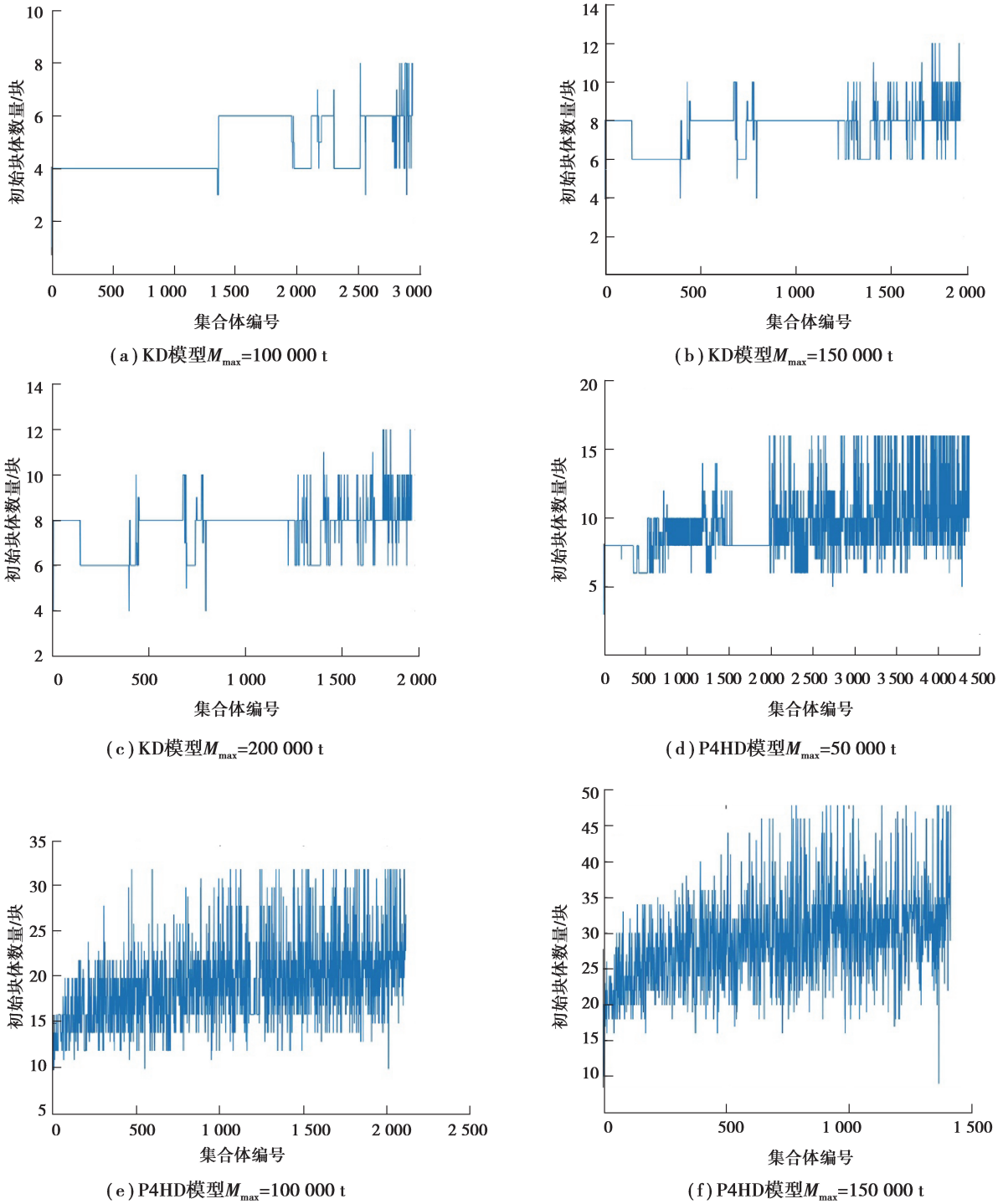


图 5 聚合物中初始块体的数量

Fig. 5 The number of initial blocks in the unit

通过分析可以得到以下 3 点结论:

1) 经 AHCP 算法处理,模型中块体数量大幅度减小。块体(聚合物)的数量首先呈快速的下降趋势,然后逐渐减缓,最终保持不变。出现这样的下降趋势是因为在算法执行前期,临近块体间的差异很小,因此算法迭代一次就可以将大批量的块体分组合并。随着算法的进行,符合合并条件的块体数量减少,块体数量减少的速度下降。

2) N_{\min} 能够显著减少 AHCP 算法获得最终聚类结果的迭代次数,提高算法聚合速率。在传统聚类算法

中,每计算一次相似度,只将相似度最高的一组对象进行合并。本文中设计的合并规则使单次合并的块体数目增多,减少了计算相似度矩阵的次数。合并规则中的参数 N_{\min} 的值则根据块体模型的规模以及块体间的相似度指数设置。因为若 N_{\min} 的取值过大,存在将差异较大的块体合并的情况,降低聚合结果的实用性;但如果 N_{\min} 的值设置的过小,又不能起到提高算法收敛速率的作用。

3)对比图 5 的(a)~(c)图可得出,随着 M_{\max} 值的增加,块体最终聚合结果中包括的聚合体(块体)数量减少,单个聚合体中包含的原始块体数量增多。理论上讲,当 M_{\max} 的取值越大,模型中各块体合并的概率越大,块体聚合的效果越显著。但当聚合体的质量过大会导致生产计划问题的求解质量下降。这是因为 AHCP 算法是根据块体间的相似性指数合并块体,当 M_{\max} 的值较小时,聚合结果中存在大量经处理的块体,但是聚合体的大小被限制在很小的范围里,求解精度受到的影响很小。随着 M_{\max} 的增加,聚合体的质量受到的约束越来越弱,因而聚合结果中可能存在超大尺寸的聚合体,降低整数规划模型的解的质量。由此可以得出,聚合体质量惩罚 M_{\max} 控制了单个聚合体含有的原始块体数量,减少了因存在超大质量的块体导致生产计划的解的质量下降的情况。

4.2.2 生产计划结果分析

经过 AHCP 算法的处理,KD 和 P4HD 模型中块体均被合并为体积较大、数量相对较少的聚合体。将聚合体在各计划期的状态作为研究对象,建立 0-1 整数规划模型,并使用 BIWO 进行求解。表 3 为不同聚合结果下,使用 BIWO 算法求解 2 个模型生产计划的最优解,该解和线性规划求解生产计划问题的解的上界^[26]之间差距以及生产计划问题的整体求解时间。对比分析表中数据可以得出:AHCP 算法的引入能够明显减少各模型生产计划的求解时间,并且保证解的质量仅发生较小的变化。此外还可得出,块体模型越复杂 AHCP 算法的效果越显著。例如,对于 P4HD 这种包含多种有价元素的大规模块体模型,应用 AHCP 算法处理块体模型时,使用当量品位计算块体间的相似度指数,进行块体聚合处理。在构建 0-1 整数规划模型时,以聚合体各金属元素自身的品位值作为参数进行求解计算。这样既提高了块体聚合的效率,又充分考虑了块体中多种不同金属元素的价值。

表 3 露天矿生产计划问题求解结果的比较

Table 3 Comparison of results of open-pit mine production planning problem

实验序号	模型	M_{\max}	块体(聚合体) 数量	V 值/ \$	Gap 值/ %	AHCP 运行 时间/s	BIWO 运行 时间/s	整体求解 时间/s
1		—	14 153	—	—	0	>86 400	>86 400
2	KD	50 000	6 897	40 932 254	0.43	382	120 421	120 803
3		100 000	2 940	40 886 889	1.54	634	2 556	3 190
4		150 000	1 861	40 859 555	2.21	2 880	1 274	4 154
6		—	40 947	—	—	0	>86 400	>86 400
7	P4HD	50 000	4 397	280 525 201	4.58	3 534	92 873	96 407
8		100 000	2 107	277 710 390	5.64	4 235	2 132	6 367
9		150 000	1 414	270 240 655	8.56	5 892	1 443	7 335

说明:Gap 值 = $(V_{L_{pub}} - V) / V \times 100\%$, $V_{L_{pub}}$ 为线性规划方法求解 KD 模型所获得解的上界, V 为使用本文方法得到的解。

5 总 结

研究了大规模块体条件下的露天矿生产计划问题,主要工作如下:

1)为大规模露天矿生产计划问题建立了 AHCP 算法和 BIWO 算法相结合的求解方法。其中 AHCP 算

法用来对块状矿床模型进行预处理,缩小块体的数量规模;BIWO 算法用于求解经简化的生产计划问题。

2) 针对块状矿床模型设计的惩罚策略以及 AHCP 算法合并规则既能够增强聚合结果在实际中的实用性,又能够提高块体的合并速率。

3) 数值分析部分,通过不同参数设置的运用结果,验证了 AHCP 算法能够显著提高群智能算法求解大规模露天矿生产计划的能力。实验结果表明,引入 AHCP 算法可将 BIWO 算法求解生产计划问题的时间减少近 90%,并且保证解的质量仅在小范围内变动。

通过减少块状块体模型中块体的数量,达到降低 0-1 整数规划模型复杂度,提高求解速率的目的。但块体聚合结果对生产计划解的质量的影响很大,因此如何设计聚合规则,既可以缩短问题的求解时间,又不降低解的质量是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Saavedra-Rosas J, Jévez E, Amaya J, et al. Optimizing open-pit block scheduling with exposed ore reserve[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2016, 116(7): 655-662.
- [2] 顾晓薇,胥孝川,王青,等. 金属露天矿生产计划优化算法的改进[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(10): 1492-1496.
GU Xiaowei, XU Xiaochuan, WANG Qing, et al. Improving optimization algorithm of production scheduling for open-pit metal mine[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2014, 35(10): 1492-1496. (in Chinese)
- [3] 王青,顾晓薇,胥孝川,等. 露天矿生产规划要素整体优化方法及其应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(12): 1796-1800.
WANG Qing, GU Xiaowei, XU Xiaochuan, et al. Holistic optimization of production planning elements and its application for open-pit mine[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2014, 35(12): 1796-1800. (in Chinese)
- [4] 黄俊歆,郭小先,王李管,等. 一种新的用于编制露天矿生产计划开采模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2819-2824.
HUANG Junxin, GUO Xiaoxian, WANG Liguan, et al. A novel mining model for open-pit mine production scheduling[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011, 42(9): 2819-2824. (in Chinese)
- [5] Rahmanpour M, Osanloo M. Determination of value at risk for long-term production planning in open pit mines in the presence of price uncertainty[J/OL]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2016, 116(3) [2019-08-03]. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532016000300007.
- [6] Hochbaum D S, Chen A. Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open-pit mining problem[J]. Operations Research, 2000, 48(6): 894-914.
- [7] Lambert W B, Newman A M. Tailored Lagrangian relaxation for the open pit block sequencing problem[J]. Annals of Operations Research, 2014, 222(1): 419-438.
- [8] Ramazan S. The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(2): 1153-1166.
- [9] Askari-Nasab H, Pourrahimian Y, Ben-Awuah E, et al. Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling[J]. Journal of Mining Science, 2011, 47(3): 338-359.
- [10] Denby B, Schofield D. Open-pit design and scheduling by use of genetic algorithms[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 1994, 103: A21-A6.
- [11] Kumral M, Dowd P A. A simulated annealing approach to mine production scheduling[J]. Journal of the Operational Research Society, 2005, 56(8): 922-930.
- [12] Lamghari A, Dimitrakopoulos R. A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 222(3): 642-652.
- [13] 胡乃联,李勇,李国清,等. 用粒子群算法优化编制露天矿生产作业计划[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(4): 537-543.

- HU Nailian, LI Yong, LI Guoqing, et al. Optimization of open-pit-mining operational planning by using a particle swarm algorithm[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(4): 537-543. (in Chinese)
- [14] Shishvan M S, Sattarvand J. Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 240(3): 825-836.
- [15] Khan A, Niemann-Delius C. A differential evolution based approach for the production scheduling of open pit mines with or without the condition of grade uncertainty[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 66: 428-437.
- [16] Dósea M, Silva L, Silva M A, et al. Adaptive mean-linkage with penalty: a new algorithm for cluster analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2008, 94(1): 1-8.
- [17] Miyamoto S, Terami A. Constrained agglomerative hierarchical clustering algorithms with penalties[C]// 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011), June 27-30, 2011. Taipei, Taiwan, China. New York, USA: IEEE, 2011.
- [18] Wang Y Y, Zeng X J, Dong Z Y, et al. Stator single-phase-to-ground fault protection for bus-connected powerformers based on hierarchical clustering algorithm[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, 28(4): 991-998.
- [19] Liu X, Huang G Y, Li C X, et al. Depressive effect of oxalic acid on titanite during ilmenite flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 79: 62-67.
- [20] 李瑞, 胡乃联, 李国清, 等. 基于多目标 0-1 规划的采掘作业计划优化[J]. *金属矿山*, 2017(2): 102-108.
LI Rui, HU Nailian, LI Guoqing, et al. Optimization of mining operation plan based on multi-objective 0-1 programming[J]. *Metal Mine*, 2017(2): 102-108. (in Chinese)
- [21] 叶海旺, 欧阳枫, 李宁, 等. 矿山短期生产计划优化的多目标遗传粒子群算法[J]. *金属矿山*, 2018(11): 25-30.
YE Haiwang, OUYANG Jian, LI Ning, et al. Multi-objective genetic particle swarm optimization algorithm for the short-term production planning in a mine[J]. *Metal Mine*, 2018(11): 25-30. (in Chinese)
- [22] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization[J]. *Ecological Informatics*, 2006, 1(4): 355-366.
- [23] Shanti S K. Application of improved invasive weed optimization technique for optimally setting directional overcurrent relays in power systems[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 79: 1-13.
- [24] Espinoza D, Goycoolea M, Moreno E, et al. MineLib: a library of open pit mining problems[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 206(1): 93-114.
- [25] Osanloo M, Ataei M. Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits[J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(8): 771-776.
- [26] Jélvez E, Morales N, Nancel-Penard P, et al. Aggregation heuristic for the open-pit block scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 249(3): 1169-1177.

(编辑 郑洁)