

团体标准

《金属露天矿绿色低碳优化设计规范》
编制说明

2024 年 3 月

标准编制小组

《金属露天矿绿色低碳优化设计规范》 编制说明

一、标准制定的必要性

新时代全球矿业发展将全面进入“绿色、低碳、智能、安全、高效”的全新历史阶段。露天开采是我国矿产资源开采的重要方式，为解决我国露天开采面临的生态环境损害严重、绿色低碳设计理论及方法缺失等迫切问题，规范露天矿绿色低碳设计方法，大力发展露天矿绿色低碳优化技术，革新露天开采传统设计及生产模式。

资源开采对环境产生强烈的生态冲击，尤以露天开采最为严重。虽然人类活动对生态系统服务功能的影响机制、在不同干扰方式与干扰程度下生态系统的结构与生态过程的变化、生态系统服务功能对干扰的响应特征、生态调节功能与空间单元的自然环境条件和生态系统结构过程之间的关系等尚不明了，但基于相关领域已有的研究成果和积累的数据，合理地估算矿山生产的生态成本并形成规范是可能的。

鉴于此，该标准从“为环境设计”理念出发，以“源头减量”为目标，兼顾资源综合利用效率和经济效益，先后形成了露天矿生态冲击和生态成本量化规范、碳排放核算规范、露天矿开采方案的低碳生态化优化规范，为我国露天矿绿色、低碳、高效开采和评价提供依据。

二、标准编制原则及依据

1、按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》要求进行编写。

2、参照相关法律、法规 and 规定，在编制过程中着重考虑了科学性、适用性和可操作性。

三、项目背景及工作情况

（一）任务来源

根据《中国国际科技促进会标准化工作委员会团体标准管理办法》的有关规定，经中国国际科技促进会标准化工作委员会及相关专家技术审核，批准《金属

露天矿绿色低碳优化设计规范》团体标准制定计划，计划编号为：CI2023483。

本标准由东北大学提出，中国国际科技促进会归口。

根据计划要求，本标准完成时限为 6 个月。

（二）标准起草单位

本标准的主要起草单位是东北大学，负责标准文档起草及相关文件的编制等。顾晓薇，胥孝川，王青，参与起草，负责标准中重要技术点的研究和建议，并参与标准内容的讨论。

（三）标准研制过程及相关工作计划

1) 前期准备提工作

项目立项前，标准编制小组查阅、研读相关国内外文献，广泛收露天矿生态破坏模式和类型、生态冲击和生态成本量化模型、碳排放和碳成本计算方法等相关材料。同时，多次开展绿色低碳优化方案设计，并与该行业相关人员进行调研、交流，广泛征求标准制定方面的意见和建议。

2) 标准起草过程

2023 年 11 月 20 日由中国国际科技促进会标准化工作委员会向国家标准委全国标准服务平台提交立项，立项编号为：CI2023483，并向全社会公示了十五日。

2023 年 12 月 15 日由东北大学以视频形式组织了第一次起草会议，分析了金属露天矿多要素整体优化技术的市场需求、现有技术水平、环保要求等，以确保标准的实用性和前瞻性；讨论并确定标准的主要内容和章节安排，如程序调试、算法建立、鲁棒性检测等；根据标准的框架，将不同章节或部分的起草工作分配给具有相关专业知识的组员，为每个分工明确编制详细的任务书，包括起草内容、完成时间节点、所需资料和参考标准等。

2023 年 12 月 25 日组织了第二次起草会议，确定下了标准内容的草案；

2024 年 1 月 10 日将标准草案提交中国国际科技促进标准化工作委员会，通过审核，于 3 月报送了全国标准平台，并向全社会公开征求意见 30 日。

3) 征求意见情况

标准编制小组先后通过现场会议、电话、微信等多种形式征集行业专家相关意见和建议。针对征集的意见，标准编制小组召开了研讨会，将收集到的意见进

行汇总处理分析，在充分吸纳合理意见的基础上，先后修改和完成标准内容，于2024年3月根据在各单位反馈意见基础上，形成了标准征求意见稿并由中国国际科技促进会提交全国标准信息平台公示。

（四）主要试验（或验证）情况分析

以某露天矿为例，基于矿山已有的地质数据和矿山目前开采现状，应用前面介绍的理论、算法和模型，在不同成本和价格上升率条件下分别对矿山进行以下条件的境界和开采计划优化：不考虑生态成本的境界单独优化和生态成本内生化的境界单独优化；在已知境界中进行考虑和不考虑生态成本的开采计划优化；考虑和不考虑生态成本的境界-开采计划整体优化。对上述优化结果进行比较分析，得出境界-开采计划整体优化的优越性以及生态成本对露天矿最终境界以及开采计划的影响。

1 矿床数值模型

该矿山是一个在采矿山，相关模型的建立是基于矿山生产现状和勘探数据。地表地形模型、矿体线框模型和品位模型是矿山优化的基础模型。

1.1 地表地形模型

地表地形模型是把矿区范围的平面离散为规则网格，网格尺寸为25m×25m，每个网格中心对应一个地表标高，标高值的计算用采场台阶线和矿区等高线对每一个网格（地表模块）进行线性插值，如图1和图2所示，分别为矿区地表地形等高线图和矿区地表标高模型的三维实体图。

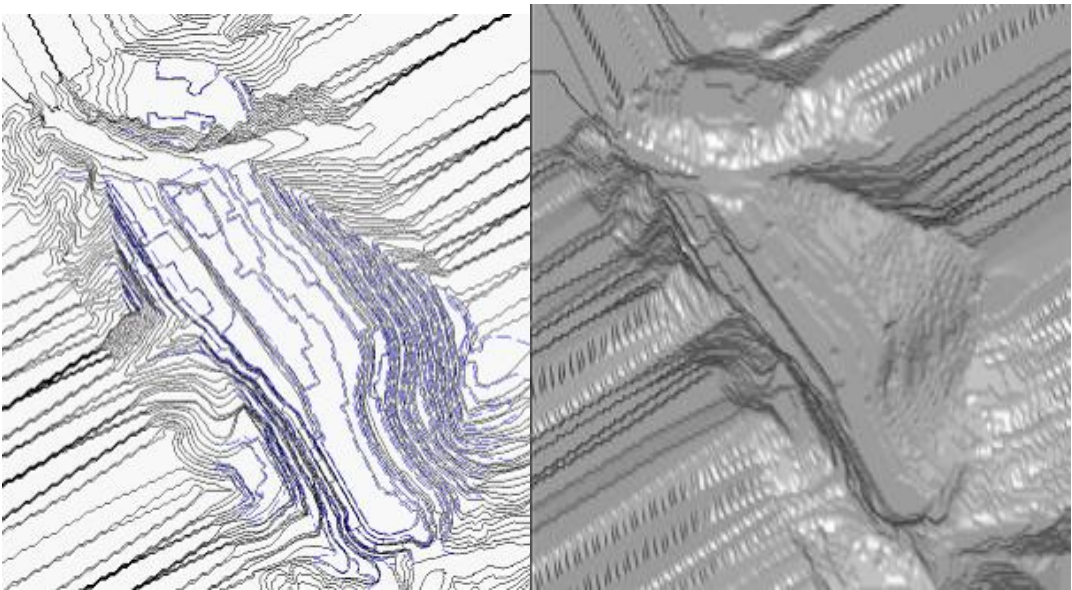


图1 矿区地表地形等高线

图2 矿区地表三维实体图

1.2 矿体及品位模型

该矿床为大型铁矿床，全长约 3400 米，工业矿段总长约 2900 米。由 3 条矿体组成，分别命名为 Fe1、Fe2 和 Fe3，其中 Fe3 为主要矿体，储量占全区的 82.6%，矿体走向北西，倾向南西，倾角为 40°~55°，矿体品位变化不大，平均品位 31%。采场目前已采到 262m 水平，现有探明矿石储量 6.8 亿吨。矿体在 274m，193m，-122m 水平的分层平面图如图 3 所示，图中阴影部分为矿体，其他界线为不同岩性的岩石。

矿床的品位模型含有 2044224 个模块，模块在水平面上的尺寸为 25m×25m，其高度等于台阶高度，238m 水平以上的台阶高度为 12m，以下为 15m。一般情况下，模块的品位应该依据钻孔取样进行估值，本例中品位模型的模块品位不是由估值求得，而是把分层平面图上的矿体离散为模块，模块品位取分层平面图上矿体的品位。品位模型如图 4 所示，每一小方格为一模块，阴影部分为矿石模块，其他模块为废石模块。剖面线 I-I 处的品位模型剖面如图 5 所示。

2 境界优化

2.1 境界优化参数设置

对于最终帮坡角，MetalMiner 软件提供了灵活的帮坡角表述方式：可以把矿区分为几个分区，每一分区在不同方向上具有不同的帮坡角；可以不分区，但在不同方向上具有不同的帮坡角；也可以不分区并在所有方向上用相同的帮坡角。本次设计采用第二种方式，不同方位对应的帮坡角如表 1 所示。

表 1 不同方位帮坡角							单位：度
方位角	21	41.5	119	200.5	225.5	291	353.5
最终帮坡角	34.8	34.5	51	42	48.1	47.5	34.8

表中方位角以东为 0°，逆时针方向旋转，即正北方位角为 90°。

根据矿床地质报告，表 2 给出了不同岩性的矿、岩容重，其中，“其他”是指在分层平面图上没有圈定矿、岩界线处的缺省岩石。

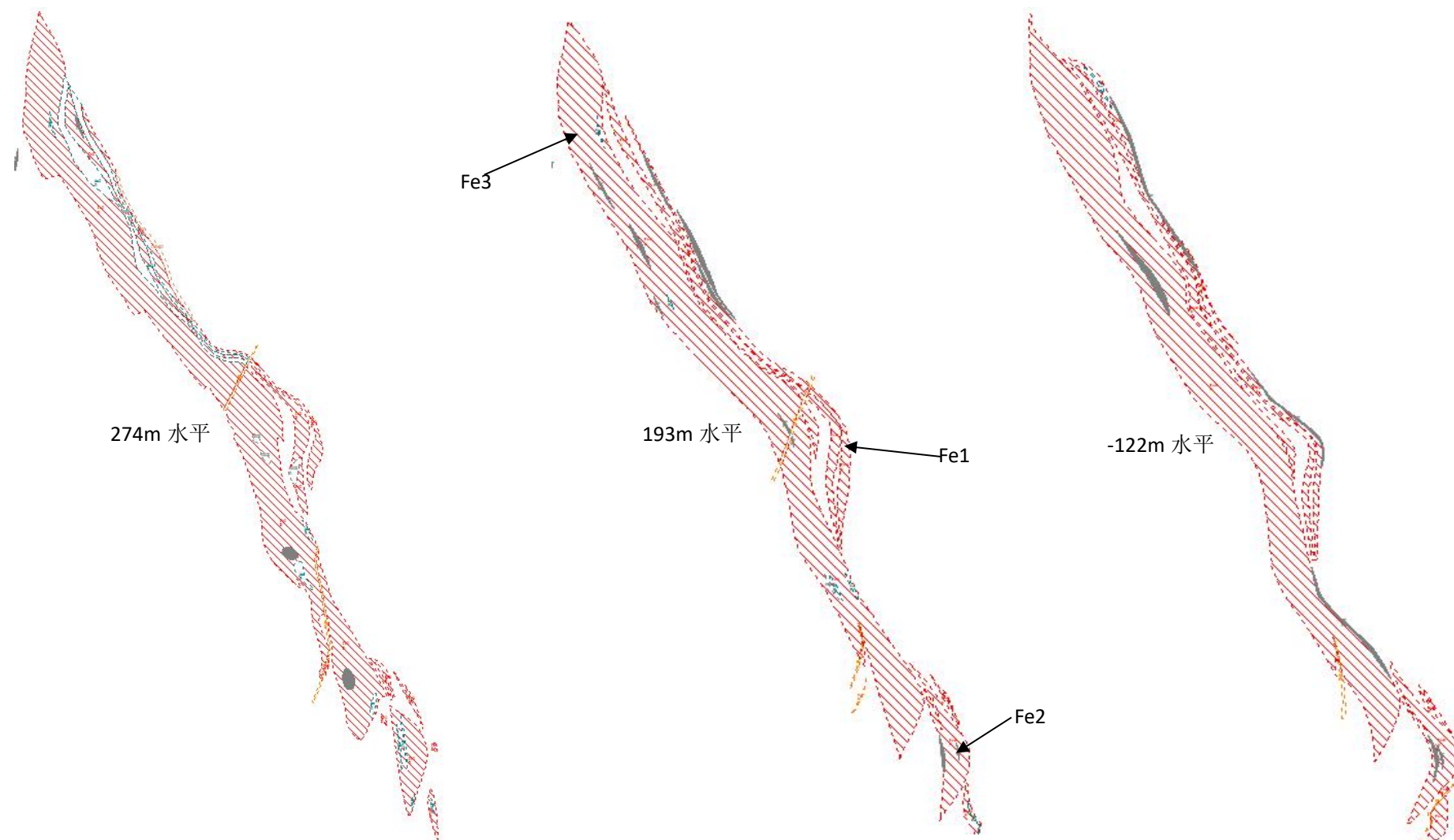


图 3 水平矿体线框模型

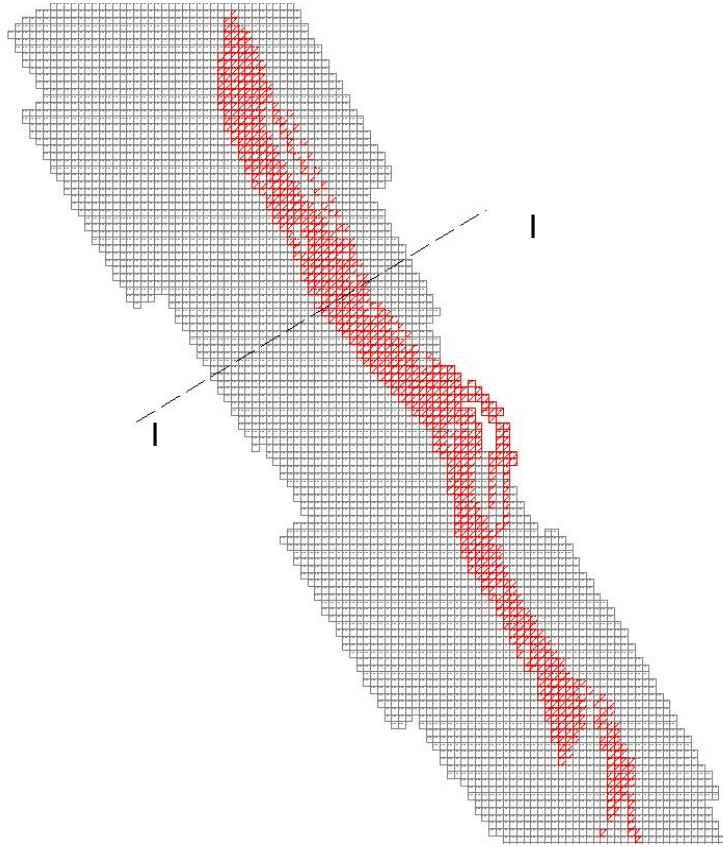


图 4 193m 水平的品位模型

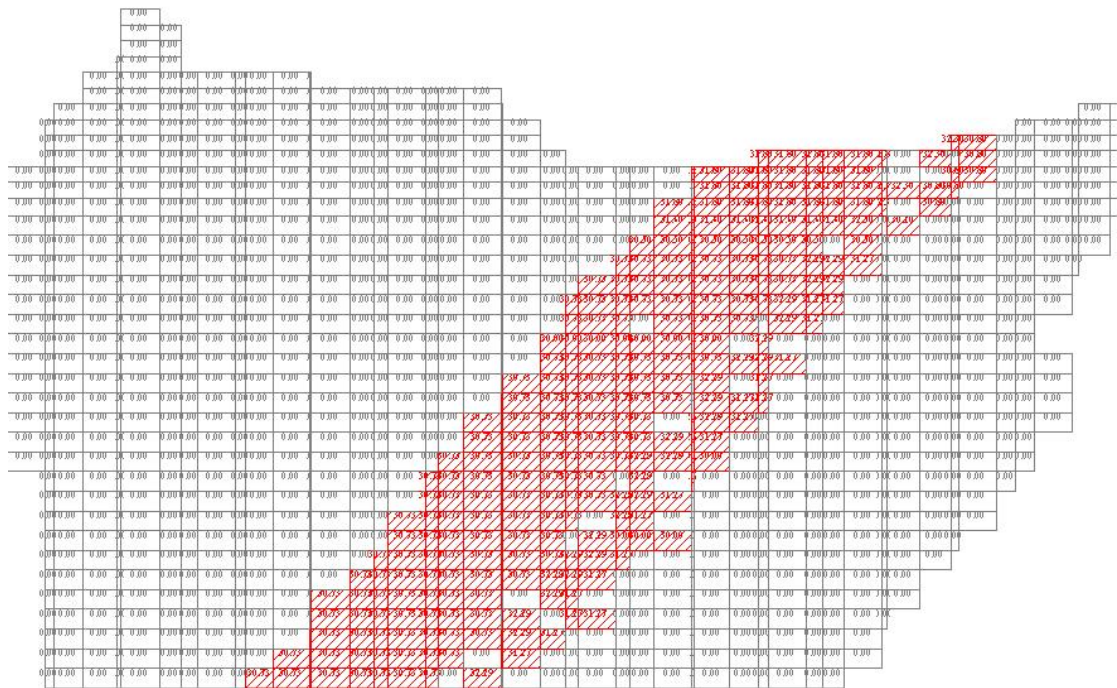


图 5 品位模型 I-I' 剖面

表 2 不同岩性的矿岩容重											单位: t·m ⁻³	
名称	Fe1	Fe2	Fe3	pp	AmL	Am	Am1	Am2	TmQ	Qp	zd	其他
矿/岩	矿	矿	矿	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩
容重	3.39	3.43	3.33	3.33	2.69	2.87	2.87	2.85	2.63	2.69	2.6	2.63

境界优化技术经济参数设置如表 3 所示, 其中采矿成本、剥岩成本和选矿成本在后面的生态成本内生境界优化中将会随着境界的变化而变化, 其余参数不变。

表 3 技术经济参数				
项目	采矿成本(元·t ⁻¹)	剥岩成本(元·t ⁻¹)	选矿成本(元·t ⁻¹)	精矿售价(元·t ⁻¹)
取值	24	15	135	700
项目	矿石回采率(%)	选矿回收率 (%)	边界品位(%)	精矿品位(%)
取值	95	82	25	66
项目	废石混入率(%)	废石品位(%)		
取值	3.5	10		

2.2 不考虑生态成本的境界优化

根据上述参数设置, 优化级别选择三级, 境界优化结果如表 4 所示。该境界是基于当前技术经济参数, 以经济效益最大化为目标优化得到的, 即不考虑生态成本, 为了与后面的各优化境界区别, 把该境界称为经济最优境界。

表 4 经济最优境界优化结果						
项目	原地矿石量 (10 ⁴ t)	原地岩石量 (10 ⁴ t)	采出矿量 (10 ⁴ t)	剥离岩量 (10 ⁴ t)	矿石平均 品位 (%)	境界总盈利 (10 ⁴ 元)
取值	55546.40	192494.91	54682.98	193358.33	30.2198	2776859.28

由于经济最优境界是在不考虑生态成本情况下优化得到的, 即开采成本是最小的, 所以该境界必定是所有后面考虑生态成本境界优化中最大的 (无论是开采境界范围还是采剥量)。图 6 和图 7 是经济最优境界的三围实体图和等高线图。图中, 最低开采水平为-122m。

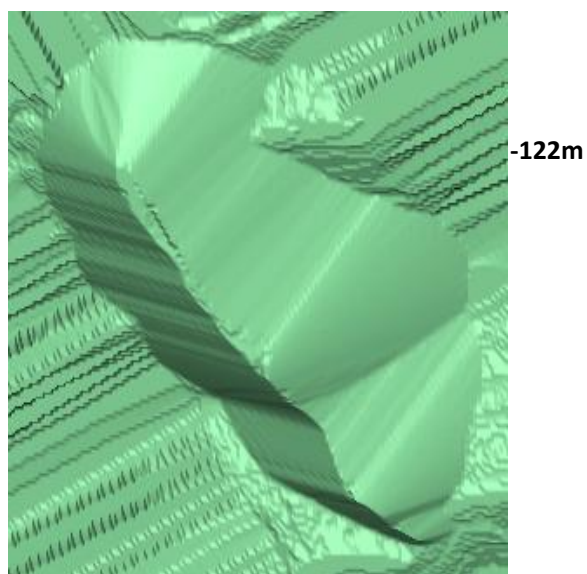


图 6 经济最优境界三维实体模型

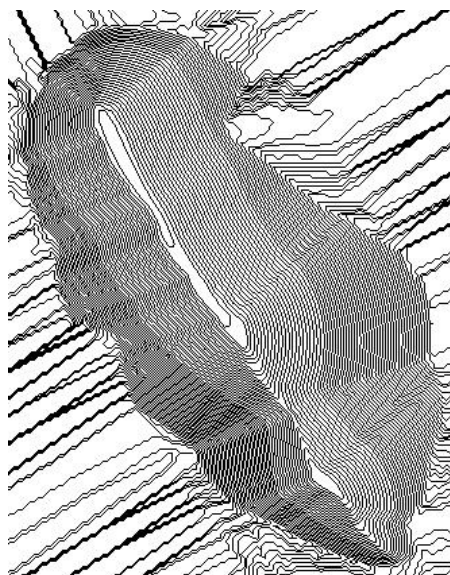


图 7 经济最优境界等高线

2.3 生态成本内生化的境界优化

首先需要得到一个单位采矿、剥岩和选矿生态成本为 0 的初始境界，即前面优化得到的经济最优境界，基于该境界优化结果（表 4），就可计算其可能产生的生态足迹和生态成本，并将生态成本分配到单位采矿、剥岩和选矿成本上。其中，采出矿石全部送到选矿厂，所以入选矿量为 54682.98 万吨。

2.3.1 生态足迹计算

（1）直接足迹计算

矿山直接足迹分为 4 大部分，其中露天采场的足迹（开采范围）可以根据优化结果，使用软件在图中直接圈定，不需要通过采场足迹计算公式计算，经济最优境界的开采范围圈定结果为 515.41 hm²。对于一个给定的矿山，其矿山的矿山专用道路，选矿厂、办公区和专用设施及场地等的占地面积基本上是一定的，无论开采境界如何变化，这些“其他直接足迹”变化不大，并且相对于采场、排岩场和尾矿库占地面积来说很小，所产生的生态成本对各境界的影响较小且基本一致，因而在计算中不考虑“其他直接足迹”。

估算排土场足迹、尾矿量以及尾矿库的足迹。其中，岩石膨胀系数为 1.25，排岩场形态系数为 1.5，岩石平均比重为 $2.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ，排岩场高度为 200 m；回采率为 95%，尾矿品位为 8.1%，选矿回收率为 82%，尾矿库形态系数为 1.5，尾矿比重为 $1.75 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ，尾矿库深度为 100 m。根据以上参数设置，得出经济最优境界剥离的岩石所需排土场的足迹为 671.38hm²；选矿产生的尾矿量为 $36722.42 \times 10^4 \text{ t}$ ，尾矿库足迹为 314.76 hm²。因此，直接占地面积(直接足迹)为 1501.56 hm²。

(2) 间接足迹（能耗足迹）计算

根据南芬露天矿实际生产情况，目前南芬露天矿每万吨采剥量的汽油消耗为 0.041t，柴油消耗为 5.664t，单位采剥量耗电量为 1.2 kwh/t，选矿厂单位选矿量耗电量为 28.5 kwh/t。矿山计划今后年生产能力达到 $1500 \times 10^4 \text{ t}$ 以上，根据表 4 经济最优境界优化结果，粗略估计该境界开采寿命为 36.5 年，年均采剥量为 $6795.65 \times 10^4 \text{ t}$ 。所以经济最优境界的汽油年消耗量为 278.62 t，柴油年消耗量为 $3.85 \times 10^4 \text{ t}$ ，露天采场年耗电量为 81.55GWh，选矿厂耗电量为 426.98GWh。

估算经济最优境界的一次能源足迹、电能耗足迹以及总能耗足迹。其中，消费的一次化石能源种类数为 2（柴油和汽油），两种一次化石能源的年消耗量如上面所述，汽油和柴油的热值分别为 10300 kcal/kg 和 10200 kcal/kg，汽油和柴油的碳排放系数分别为 $0.829 \text{ t} \cdot \text{kcal}^{-1}$ 和 $0.852 \text{ t} \cdot \text{kcal}^{-1}$ ，碳到二氧化碳的转换系数为 3.6667，当地林地的 CO₂ 年吸收能力为 $10.627 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，露天矿年均用电量如上所述(包括露天采场和选矿厂)，每度电标准煤消耗量为 $0.404 \text{ kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$ ，火力发电占总发电的比例为 0.8，标准煤碳排放系数为 $1.065 \text{ t} \cdot \text{kcal}^{-1}$ ，单位重量标准煤的热值为 $7000 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据以上数据得出经

济最优境界的一次能源足迹中汽油的能耗足迹为 82.09 hm²，柴油的能耗足迹为 11541.41 hm²；电能耗的足迹中露天开采电能耗足迹为 6779.48hm²，选矿厂电能耗足迹为 35496.7hm²；总能耗足迹（每年）为 53899.67hm²。

2.3.2 矿山生态成本计算

（1）直接经济损失

直接经济损失是由于直接足迹占用所造成的。考虑到该露天矿占用土地类型以林地为主，所以征地单元都以林地处理，即征地单元数为 1。根据矿山调研知，矿区的征地价格约为 240×10⁴ 元·hm⁻²，境界的直接足迹如前所述为 1501.56 hm²。可以得出对应于经济最优境界的直接经济损失(征地成本)为 36.04×10⁸ 元。

（2）复垦成本

复垦对象主要针对采场、排土场和尾矿库，即矿山占用的直接足迹。根据前面所述，矿山主要占用的是林地，所以这里研究的复垦也主要考虑进行林地复垦。根据已有矿山林地复垦经验知，复垦成本约为 40×10⁴ 元·hm⁻²，可以得出，经济最优境界的复垦成本为 6.01×10⁸ 元。

（3）外生生态价值损失

林地外生生态价值的损失是由于矿山直接足迹的占用所造成的林地生态功能的损失，不同的林种其自身的生态功能存在一定的差异。所研究的矿山所处地区的林种为温带常绿针叶林和落叶阔叶林，所以其净初级生产力取两种林地的平均值，为 6.56 t·hm⁻²·a⁻¹；CO₂ 固定系数为 1.62，二氧化碳处理成本为 441 元·t⁻¹，林地损毁面积为 1501.56 hm²(直接足迹)；释氧系数为 1.2，氧气成本取氧气的工业成本 701.4 元·t⁻¹；区域年平均降雨量 800 mm，产生径流降雨量占降雨总量的比例为 0.4（北方约 0.4，南方约 0.6），与裸地(或皆伐迹地)比较林地减少径流的系数为 0.26，水源蓄水成本取 1.25 元·m⁻³；土壤保持能力为 60.2915 t·hm⁻²·a⁻¹，林地保持的土壤转换为农田的单位面积收益估计为 22655.56 元·hm⁻²，农田的土壤厚度取 0.6 m，土壤容重取 1.3 t·m⁻³；SO₂ 吸收能力为 0.1521t·hm⁻²·a⁻¹，SO₂ 处理成本为 1116.1767 元·t⁻¹；NO_x 吸收能力为 0.38 t·hm⁻²·a⁻¹，NO_x 的处理成本根据汽车尾气脱氮处理成本为 1.6×10⁴ 元；林地的滞尘能力为 21.655 t·hm⁻²·a⁻¹，除尘成本为 316.25 元·t⁻¹；P 到 P205

的转换系数为 2.2903,林地净初级生产量中的氮、磷、钾元素含量分别为 0.0033、0.00036、0.00231,氮肥、磷肥(P2O5)、钾肥的价格分别为 2200 元·t⁻¹、650 元·t⁻¹、2259 元·t⁻¹;林地的杀菌素分泌能力为 10.95 t·hm⁻²·a⁻¹,杀菌素市场价格为 150 元·t⁻¹;根据植物的生长周期假设露天开采结束后 5 年时间恢复生态能力,经济最优境界总共开采 36.5 年,即生态功能损失一直要延续到第 41 年才能恢复。

基于以上参数设置可以得出对应于经济最优境界的年均固碳价值为 703.72×104 元,释氧价值为 829.07×104 元,涵养水价值为 156.16×104 元,土壤保持价值为 26.30×104 元,S02 净化价值为 25.49×104 元,NOX 净化价值为 912.95×104 元,滞尘价值为 1028.33×104 元,养分循环价值为 12.82×104 元,林地灭菌价值为 246.63×104 元;年均总的外生生态价值损失为 3941.46×104 元;境界从时间 0 点开始一直到矿区生态功能回复这段时间(41 年),外生生态价值损失的总额为 16.36×108 元。

(4) 能耗生态成本计算

根据能耗足迹计算使用到的相关参数,计算得到,经济最优境界露天采场总的电能耗产生的二氧化碳量为 262.97×104t,汽油能耗产生二氧化碳量为 3.18×104t,柴油能耗产生的二氧化碳量为 447.68×104t,选矿厂电能耗产生的二氧化碳量为 1376.87×104t。当前二氧化碳捕捉成本每吨大概在 35~75 美元之间,这里取碳捕捉成本为 441 元·t⁻¹,得到露天采场总的能耗生态成本为 31.48×108 元,选矿厂总的能耗生态成本为 60.72×108 元。

2.3.3 生态成本分配

得到经济最优境界总的生态成本后(直接经济损失、复垦成本、外生生态价值损失和能耗生态成本),将上述计算得到的直接经济损失、复垦成本、外生生态价值损失以及能耗生态成本分配到单位采矿、剥岩以及选矿成本上,得到单位采矿生态成本为 1.953 元·t⁻¹,单位剥岩生态成本为 3.463 元·t⁻¹,单位选矿生态成本为 13.343 元·t⁻¹。

2.3.4 生态成本内生化的境界迭代优化

将上述经济最优境界的单位采、剥、选生态成本分别加到基准开采成本(采矿成本 24 元·t⁻¹,剥岩成本 15 元·t⁻¹,选矿成本 135 元·t⁻¹)上,其他技术经

济参数不变，进行新一轮境界优化，根据优化得到的新境界的输出数据再次计算新境界的生态成本并按生态成本分配原理分配到单位采、剥、选上，这样反复迭代优化，直到算法收敛。迭代优化结果如表 5 所示，表中给出了不同境界的单位采矿、剥岩、选矿生态成本和基准成本，以及在该成本下得到新境界的矿岩量和利润值。

表 5 境界迭代优化结果

境界	采矿成本 (元·t ⁻¹)		剥岩成本 (元·t ⁻¹)		选矿成本 (元·t ⁻¹)		采出矿 石量 (10 ⁴ t)	剥离岩 石量 (10 ⁴ t)	利润值 (10 ⁸ 元)	直接占 地面积 (hm ²)
	基准	生态	基准	生态	基准	生态				
经济 最优 境界	24	0	15	0	135	0	54682.9 8	193358.3 3	277.69	1501.5 6
境界 1	24	1.95 3	15	3.46 3	135	13.34 3	41948.7 6	109559.4 9	169.92	1046.4 8
境界 2	24	2.14 8	15	3.62 6	135	13.21 6	42037.7 6	110485.7 6	166.90	1048.9 5
境界 3	24	2.13 9	15	3.61 5	135	13.21 6	42406.8 2	112293.1 6	166.91	1064.8 5
境界 4	24	2.14 4	15	3.62 4	135	13.22 0	42338.6 2	111965.4 9	166.81	1060.6 3
境界 5	24	2.14 0	15	3.61 8	135	13.21 9	42191.0 6	111138.6 0	167.15	1055.9 7
境界 6	24	2.14 3	15	3.62 1	135	13.21 7	42191.0 6	111138.6 0	167.12	1055.9 7

从表中可以看出，从经济最优境界到境界 1 的矿石量和岩石量减幅很大，之后矿岩量变化幅度逐渐减小，当进行完第 7 次境界（即得到境界 6）优化后，境界 6 内的矿岩量与境界 5 的矿岩量完全相同，即生态成本内生化的境界优化收敛于境界 5，所以境界 5 可看做是迭代优化的收敛境界，将境界 5 作为考虑生态成本的最优境界（为了方便说明，该境界在后面统称生态最优境界）。相对于经济最优境界，生态最优境界采出矿石量减少 22.84%，排弃废石量减少 42.52%，二者总和减少 38.18%，采区总占地面积（采场、排土场、尾矿库）减小 29.68%。生态最优境界的生态成本分摊到采矿、剥岩和选矿的单位成本分别为 2.14 元·t⁻¹、3.618 元·t⁻¹ 和 13.219 元·t⁻¹，占基准采矿、剥岩和选矿单位成本的 8.93%、24.14%和 9.79%。生态最优境界的总盈利比经济最优境界（不考虑生态成本）的总盈利下降了 39.82%。可见，如果政策要求矿山经营者以某种方式支付本研究

估算的全部生态成本，境界的大小和矿山项目的盈利能力都将显著下降。这有助于保护临界资源，即支付生态成本后不再带来盈利的那部分资源。

实际上，先不考虑生态成本优化得到经济最优境界，并根据其优化结果计算出总的生态成本，属于“末端治理”，按照这种矿山设计思想，矿山最终盈利为 127.08×108 元（经济最优境界总的生态成本为 150.61×108 元）；而在境界优化过程中考虑生态成本属于“源头减量”，最终盈利为 167.15×108 元，比“末端治理”高出 31.53%。即“源头减量”（生态成本内生化境界优化）要优于“末端治理”。图 8 和图 9 为生态最优境界的三维实体图和等高线图。图中，境界最低开采水平为 -107m。

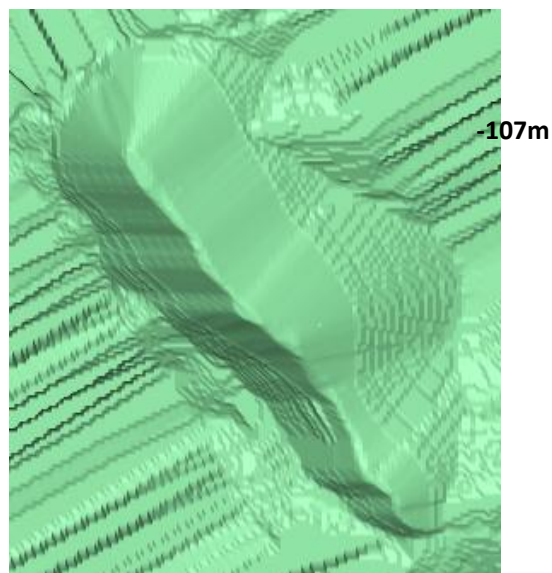


图 8 生态最优境界三维实体图

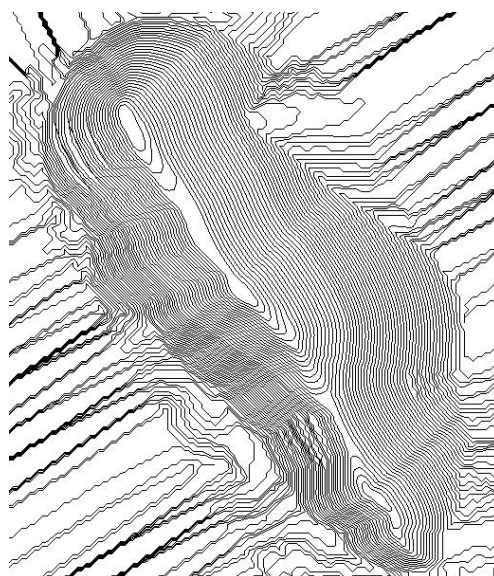


图 9 生态最优境界等高线图

图 10 为经济最优境界（虚线）与生态最优境界（实线）在不同水平的最终开采范围，阴影部分为矿体。从图 10 可以看出，生态最优境界上盘境界线相对于经济最优境界缩进了 180m 左右，下盘缩进 20m 左右。从 178m 开始生态最优境界有挂帮矿，经济最优境界则在 73m 水平开始形成挂帮矿。

3 已知境界中开采计划优化

完成境界设计后，露天矿设计的下一步就是在已知境界中进行开采计划优化。对已知境界做开采计划优化，就是在已圈定好的境界中确定每一年的最佳采剥量（生产能力）以及采剥位置（开采顺序），使净现值最大。这里分别以不考虑生态成本时得到的最优境界（经济最优境界）以及考虑生态成本（生态成本内生性）时得到的最优境界（生态最优境界）为已知境界，进行开采计划优化。

3.1 经济最优境界开采计划优化

根据前面阐述的开采计划优化模型与算法，首先需要在已知经济最优境界中产生一系列地质最优开采体，然后对开采体序列进行动态排序，使用动态规划法从所有满足要求的路径中找出 NPV 最大的开采路径，该路径上每一年的采剥量即为最佳采剥量，对应的开采体即为年最佳采剥位置，所对应的开采时间即为矿山开采寿命。

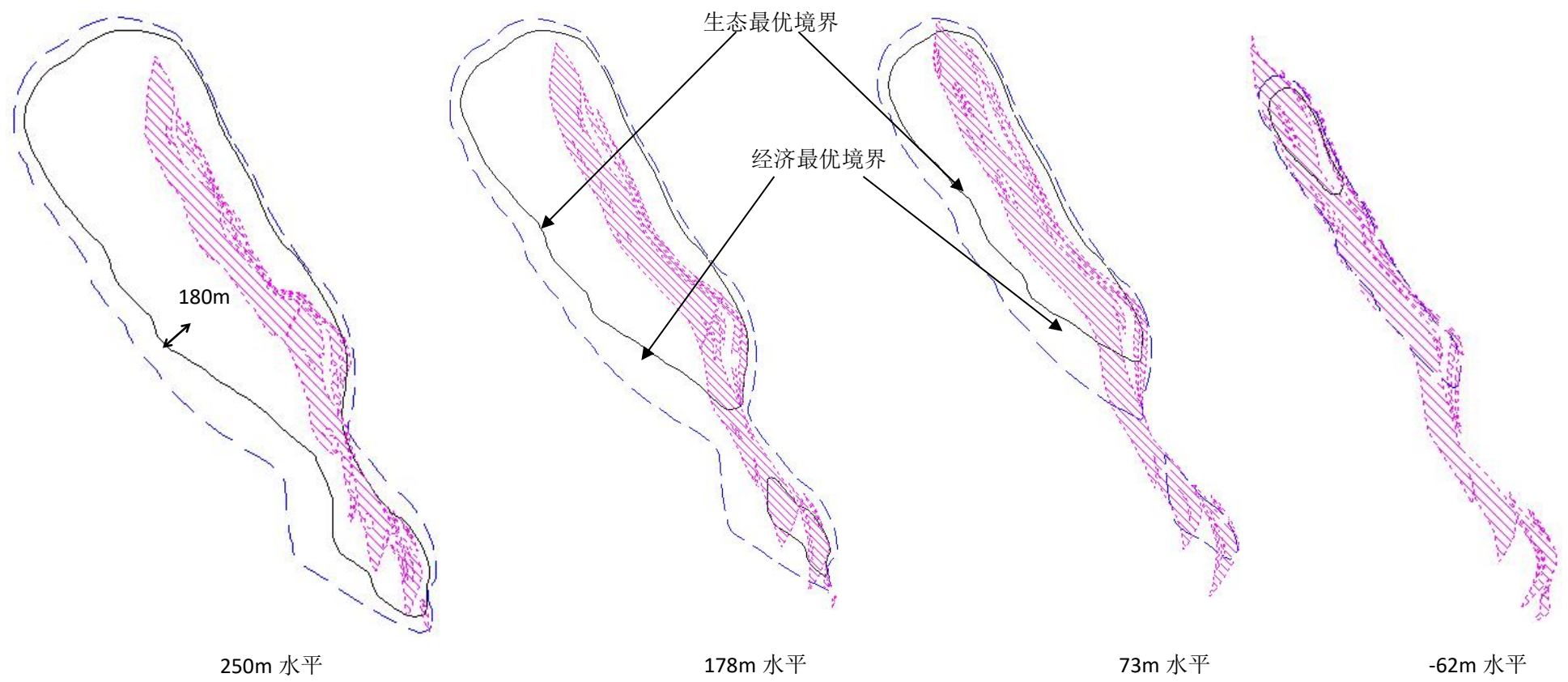


图 10 生态最优境界和经济最优境界在不同水平的对比

产生地质最优开采体序列的控制参数如表 6 所示。

表 6 产生地质开采体序列的控制参数

工作帮坡角(°)	年采矿量上限(10 ⁴ t)	年采矿量下限(10 ⁴ t)	年采矿量分辨率 (10 ⁴ t)
25	1800	1400	120

基于以上参数设置，经济最优境界中共产生开采体序列 461 个，最小开采体（开采体 1）矿石量为 $109.7 \times 10^4 \text{t}$ ，相邻开采体之间矿石增量基本保持在 $120 \times 10^4 \text{t}$ ，第 461 个开采体即为最大开采体（经济最优境界）。各开采体对应的矿岩量如图 11 示。

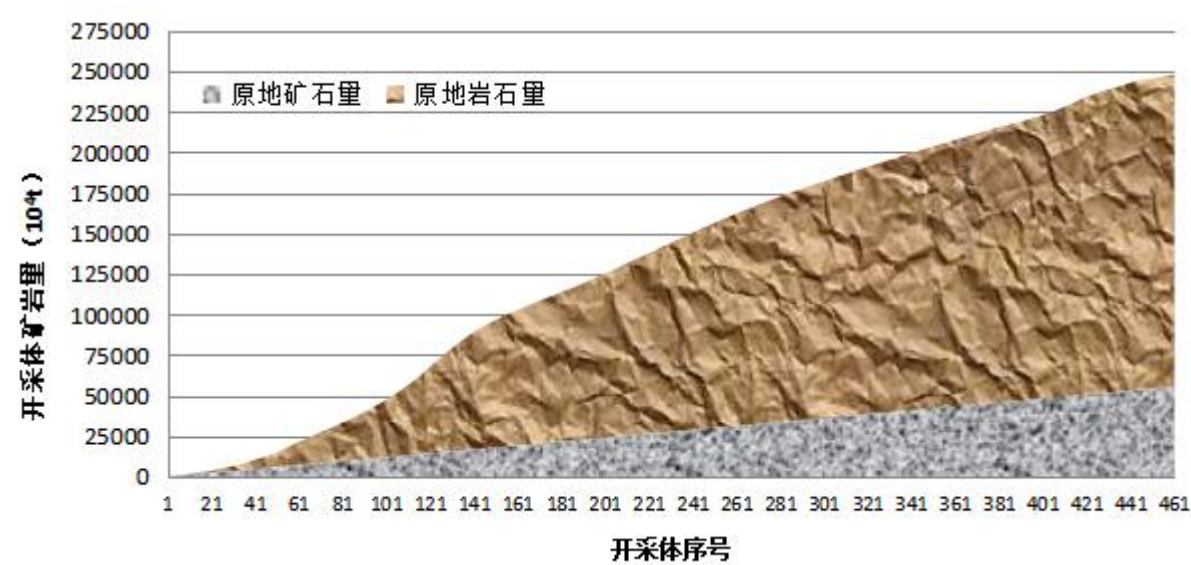


图 11 经济最优境界中开采体序列对应的矿岩量

开采计划优化过程中相关技术经济参数设置如表 7 所示。表中成本、价格上升率取 0 表示矿山从开采初期一直到开采结束，成本、价格不随时间的变化而变化，用 (0%, 0%) 表示，即每年的经济参数均取时间零点的值。假设矿山年矿石生产能力为 $1500 \times 10^4 \text{t}$ ，生产能力波动范围控制在 $1400 \times 10^4 \text{t}$ — $1600 \times 10^4 \text{t}$ ，年采剥总量上限为 $20000 \times 10^4 \text{t}$ ，闭坑期设置为 1 年。

表 7 开采计划优化参数

项目	采矿成本(元·t ⁻¹)	剥岩成本(元·t ⁻¹)	选矿成本(元·t ⁻¹)	精矿售价(元·t ⁻¹)
取值	24	15	135	700
项目	矿石回采率(%)	选矿回收率 (%)	边界品位(%)	精矿品位(%)
取值	95	82	25	66
项目	废石混入率(%)	废石品位(%)	成本上升率(%)	价格上升率(%)
取值	3.5	10	0	0

基于以上参数设置以及条件假设，对经济最优境界进行以下开采计划优化。

优化结果如表 8 所示。

表 8 经济最优境界开采计划优化结果

年	原地矿 量(10 ⁴ t)	原地品 位(%)	原地岩 量(10 ⁴ t)	入选矿 量(10 ⁴ t)	入选品 位(%)	排岩石量 (10 ⁴ t)	精矿产 量(10 ⁴ t)	年利润值 (10 ⁴ 元)	年净现值 (10 ⁴ 元)	开采体 序号
1	1558.21	31.65	425.20	1533.98	30.55	449.42	588.76	161488.58	134526.63	13
2	1554.40	31.30	1600.20	1530.24	30.21	1624.36	580.97	139005.30	105046.86	26
3	1567.01	31.23	2895.30	1542.64	30.14	2919.66	584.25	119897.56	81354.14	39
4	1565.31	31.18	4431.50	1540.97	30.09	4455.83	582.79	96100.75	56661.09	52
5	1566.90	30.93	6698.80	1542.54	29.85	6723.16	578.66	58951.69	24757.63	65
6	1565.71	31.19	6085.70	1541.36	30.10	6110.04	583.11	71452.81	31905.75	78
7	1567.91	31.01	7006.80	1543.53	29.93	7031.17	580.56	55501.56	19267.50	91
8	1568.12	30.87	8601.60	1543.72	29.79	8625.98	578.04	29788.75	2066.00	104
9	1565.65	30.71	11337.8 0	1541.36	29.64	11362.13	574.23	-13547.13	-23189.38	117
10	1567.80	30.9	13538.3 0	1543.43	29.82	13562.67	578.48	-43909.13	-38293.06	130
11	1567.61	30.87	11066.9 0	1543.23	29.79	11091.27	577.80	-7286.00	-17154.69	143
12	1566.60	30.82	7457.10	1542.25	29.75	7481.45	576.65	46213.63	9409.91	156
13	1566.76	30.83	5874.80	1542.45	29.76	5899.15	576.91	70098.00	19393.97	169
14	1566.55	30.90	5564.00	1542.25	29.82	5588.35	578.01	75566.50	20373.41	182
15	1564.66	30.92	5815.10	1540.38	29.84	5839.42	577.77	71928.81	17634.09	195
16	1567.20	30.92	6306.40	1542.84	29.85	6330.76	578.73	64840.81	13895.47	208
17	1566.21	31.01	6554.20	1541.86	29.92	6578.55	579.71	61965.75	11997.34	221
18	1569.40	30.94	6637.09	1545.01	29.86	6661.48	579.86	60325.75	10691.13	234
19	1567.82	30.86	6524.60	1543.43	29.78	6548.98	577.72	60762.13	10149.88	247
20	1569.21	30.92	5998.10	1544.81	29.84	6022.49	579.42	69630.25	11916.47	260
21	1566.20	30.91	5366.70	1541.86	29.83	5391.05	578.16	78691.75	13493.41	273
22	1566.25	30.99	4921.01	1541.96	29.91	4945.34	579.68	86422.13	14460.91	286
23	1568.51	30.90	4579.30	1544.12	29.82	4603.67	578.79	90582.63	14463.13	299
24	1568.06	30.94	4283.41	1543.72	29.86	4307.78	579.38	95496.63	14547.81	312
25	1567.92	30.91	4068.30	1543.53	29.83	4092.67	578.77	98327.75	14159.75	325
26	1566.51	30.85	4059.80	1542.15	29.78	4084.16	577.18	97562.63	13105.81	338
27	1566.41	30.92	3811.41	1542.05	29.85	3835.75	578.45	102194.88	13036.06	351
28	1566.60	30.81	3587.89	1542.25	29.73	3612.23	576.39	104069.50	12500.13	364
29	1567.07	30.77	3492.61	1542.64	29.69	3516.97	575.77	105007.75	11827.69	377
30	1567.35	30.87	3060.30	1543.04	29.80	3084.67	577.88	112904.00	12150.31	390
31	1565.05	30.81	3740.09	1540.67	29.73	3764.41	575.74	101582.50	9881.06	403
32	1567.45	30.70	5830.70	1543.14	29.63	5855.08	574.70	69107.25	5253.38	416
33	1568.05	30.75	5074.59	1543.63	29.68	5098.97	575.81	81146.50	6285.25	429
34	1565.41	30.94	3759.91	1541.07	29.86	3784.23	578.40	103087.25	8214.13	442
35	1568.21	31.19	1752.08	1543.83	30.10	1776.38	583.96	136661.00	11016.00	455

36	722.31	31.26	687.41	711.07	30.17	698.64	269.56	65155.25	4946.44	461
合计	55546.40	30.95	192494.91	54682.98	30.22	193358.33	20531.10	2776775.75	681751.38	461

从表 8 可以看出，矿山开采寿命为 36 年，每年采出矿石量（即表 8 中的入选矿石量）基本上保持在 $1540 \times 10^4 \text{t}$ （优化参数设置中，生产能力范围是 $1400 \times 10^4 \text{t}$ - $1600 \times 10^4 \text{t}$ ），除最后 1 年为闭坑期，采出矿石量不足 $1000 \times 10^4 \text{t}$ ；岩石剥离高峰发生在 9-11 年，年剥离量均达到了 $1 \times 10^8 \text{t}$ 以上，其中第 10 年的剥离量达到 $1.3 \times 10^8 \text{t}$ 以上；表中最后一列开采体序号表示对应年份采场推进的位置。净现值为 68.18×10^8 亿。

3.2 生态最优境界开采计划优化

在生态最优境界中优化开采计划的方法同在经济最优境界中一样，首先根据表 6 中的参数设置，在生态最优境界中共产生开采体 356 个，其中最小开采体原地矿石量为 $80.5 \times 10^4 \text{t}$ ，相邻开采体之间矿石增量基本保持在 $120 \times 10^4 \text{t}$ ，第 356 个开采体即为最大开采体（生态最优境界），原地矿石量为 $42857.2 \times 10^4 \text{t}$ ，原地岩石量为 $110472.4 \times 10^4 \text{t}$ 。各开采体对应的矿岩量如图 12 所示。

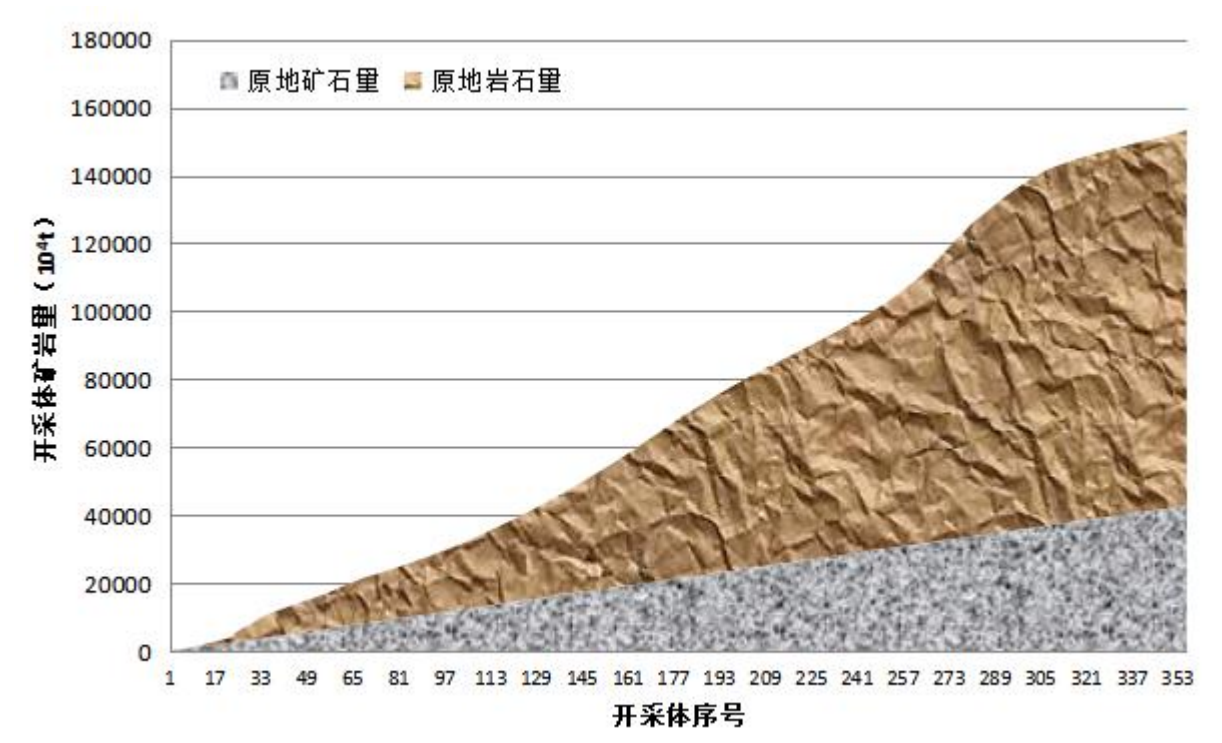


图 12 生态最优境界中开采体序列对应的各采场矿岩量

在生态最优境界进行生态成本内生化的开采计划优化，不同时间点以及不同

工艺环节上的生态成本动态分布如下：

征地时间、征地面积和征地资金确定。根据征地成本的时间分布及作用对象分析，矿山的征地包括采场、排土场和尾矿库征地，征地面积和征地时间受矿区地理地质条件、开采境界范围、境界矿岩量以及开采计划等影响。采场的征地面积，即经济最优境界的境界大小，可以通过软件直接在图上量取，假设采场不分期征地，那么采场在时间 0 点一次性完成全部征地。假设矿山只有一个排土场，根据境界内岩石量可以计算排土场总面积，如果排土场不分期征地，则在时间 0 点一次性完成排土场的全部征地。假设矿山只有一个尾矿库，根据尾矿库建库特点，尾矿库需要一次性完成征地，征地时间发生在时间 0 点，尾矿库面积根据境界内矿石量进行计算。根据上述对采场、排土场和尾矿库在不同时间征地面积的计算，结合矿山当地的单位面积征地成本（ 240×10^4 元 $\cdot$ hm^{-2} ），就可以计算出矿山直接经济损失。

外生生态价值损失时空动态分配。根据外生生态价值损失的时间分布及作用对象分析，采场的外生生态价值损失与采场每年推进位置（开采体的地表面积）有关，考虑到矿山目前采场的开采范围已经扩展到 300 hm^2 以上，即境界内植被破坏面积已达 300 hm^2 ，所以在计算采场外生生态价值损失时，当开采体地表面积小于 300 hm^2 时，按照每年土地损毁面积为 300 hm^2 计算，当某年对应开采体的地表面积大于 300 hm^2 时，按开采体地表面积计算。如果排土场近似为梯台体，排土场帮坡角为 20° ，形态系数为 1.5，并假设排土场初期建设用地可以容纳境界内岩石总量的十分之一，则可根据梯台体（排土场）几何关系计算出排土场初期的土地平整面积以及初期堆置高度，那么在累计排土总量未达到排土场初期容量之前，排土场每年的外部生态价值损失根据排土场初期土地损毁面积进行计算。由于尾矿库是一次建成，所以尾矿库的外生生态价值损失从时间 0 点开始每年都按照尾矿库总占地面积进行计算。根据外生生态价值损失计算参数设置，每公顷土地外生生态价值为 2.63×10^4 元，结合采场、排土场和尾矿库每年总的土地损毁面积，就可得到每一年的外生生态价值损失。假设矿山是在开采结束后才进行复垦，且需要 5 年的时间才能完全恢复矿区损毁土地的生态功能，那么矿山

的外生生态价值损失一直持续到矿山开采结束后 5 年，这 5 年时间的生态价值损失均按照采场、排土场和尾矿库总面积计算。

能耗生态成本确定。根据矿山目前生产过程中的能源消耗情况看，每万吨采剥量的汽油消耗为 0.041t，柴油消耗为 5.664 t，露天矿单位采剥量耗电量为 1.2 kwh · t⁻¹，选矿厂单位选矿量耗电量为 28.5 kwh · t⁻¹。对于处理能源消耗排放的二氧化碳最有效的办法就是进行碳捕捉和碳储存，分别得出采出 1t 矿石的能源生态成本和剥离 1t 岩石的能耗生态成本均为 1.269 元，选矿能耗生态成本为 11.104 元 · t⁻¹。

复垦成本确定。假设矿山在开采结束后进行复垦，复垦时间为 3 年，复垦年金为 40×10⁴ 元 · hm⁻²，每年的复垦面积相等，即需要复垦土地总面积（采场、排土场和尾矿库）除以复垦时间（3 年）。

开采计划优化过程中，成本均发生在年初，即在经济计算的时候，无论是表 7 中的各项开采成本，还是上面提到的矿山开采造成的各项生态成本，均认为是在每一年的年初产生，而精矿销售产生的利润发生在每年的年末。其他参数设置参考表 7，生态成本内生化的开采计划优化结果如表 9 所示。

表 9 生态最优境界开采计划优化结果

年	原地矿 量(10 ⁴ t)	原地品 位(%)	原地岩 量(10 ⁴ t)	入选矿 量(10 ⁴ t)	入选品 位(%)	排岩石量 (10 ⁴ t)	精矿产 量(10 ⁴ t)	年利润值 (10 ⁴ 元)	年净现值 (10 ⁴ 元)	开采体 序号
1	1526.10	31.64	409.40	1502.38	30.54	433.12	576.47	136687.84	110288.76	13
2	1536.20	31.37	2964.90	1512.32	30.28	2988.78	575.41	92660.91	61972.48	26
3	1567.80	30.79	3955.20	1543.43	29.72	3979.57	576.50	71975.39	39806.99	39
4	1566.70	30.89	2349.60	1542.35	29.81	2373.95	577.89	99254.48	59418.72	52
5	1567.70	30.90	2881.40	1543.33	29.82	2905.77	578.41	90770.30	49040.70	65
6	1568.50	30.94	2042.30	1544.12	29.86	2066.68	579.43	104960.17	55916.48	78
7	1567.00	31.17	2198.70	1542.64	30.09	2223.06	583.29	105337.61	52391.92	91
8	1567.30	31.14	2804.20	1542.94	30.06	2828.56	582.85	95085.17	42592.25	104
9	1568.00	31.12	3428.40	1543.63	30.04	3452.77	582.67	84636.17	33729.23	117
10	1567.60	30.99	3984.20	1543.23	29.90	4008.57	580.02	73716.23	25648.97	130
11	1567.20	30.81	4582.40	1542.84	29.73	4606.76	576.59	61556.61	17869.50	143
12	1567.60	30.86	5022.30	1543.23	29.79	5046.67	577.77	55077.92	13596.88	156
13	1569.10	30.87	5769.50	1544.71	29.79	5793.89	578.41	43045.55	7351.75	169
14	1569.30	30.80	5822.90	1544.91	29.72	5847.29	577.19	41234.17	6142.32	182
15	1564.50	30.90	4992.20	1540.18	29.82	5016.52	577.28	55570.55	11298.86	195

表 9 生态最优境界开采计划优化结果

年	原地矿 量(10 ⁴ t)	原地品 位(%)	原地岩 量(10 ⁴ t)	入选矿 量(10 ⁴ t)	入选品 位(%)	排岩石量 (10 ⁴ t)	精矿产 量(10 ⁴ t)	年利润值 (10 ⁴ 元)	年净现值 (10 ⁴ 元)	开采体 序号
16	1568.00	30.87	4600.90	1543.63	29.79	4625.27	577.98	61796.67	12804.64	208
17	1566.70	30.88	3978.10	1542.35	29.81	4002.45	577.79	71983.92	15420.60	221
18	1568.00	31.01	4134.10	1543.63	29.93	4158.48	580.67	71197.67	14121.14	234
19	1567.50	30.98	4709.80	1543.13	29.90	4734.16	579.82	61263.17	10269.57	247
20	1569.20	30.98	6236.40	1544.81	29.89	6260.79	580.42	36483.17	2738.38	260
21	1568.40	30.81	8991.30	1544.02	29.73	9015.68	576.98	-10680.45	-9588.12	273
22	1567.80	30.85	8854.09	1543.43	29.78	8878.47	577.64	-7940.33	-8306.44	286
23	1567.40	30.91	6755.00	1543.04	29.83	6779.36	578.55	26882.67	87.66	299
24	1566.10	30.81	4085.00	1541.75	29.73	4109.34	576.18	68871.05	8962.10	312
25	1568.30	30.77	1906.20	1543.93	29.70	1930.59	576.28	104006.17	15301.67	325
26	1568.50	31.01	1223.70	1544.12	29.93	1248.08	580.86	118277.30	16891.48	338
27	1568.10	31.18	1099.40	1543.73	30.09	1123.77	583.78	122407.80	16474.62	351
28	602.60	31.40	690.80	593.23	30.30	700.16	225.89	41668.80	5041.01	356
开采结束后，3 年复垦以及 5 年生态恢复期，利润损失和净现值损失										
29								-16773.48	-2522.77	
30								-16773.48	-2357.73	
31								-16773.48	-2203.48	
32								-2763.47	-339.28	
33								-2763.47	-317.08	
征地成本								-252180.16	-252180.16	
合 计	42857.2	30.98	110472.4	42191.02	30.24	111138.57	15853.02	1687656.88	435664.75	

从表 9 可以看出，在生态最优境界中进行生态成本内生化的开采计划优化，矿石年采出量基本在 $1540 \times 10^4 \text{t}$ 左右，岩石剥离高峰发生在第 21 年和第 22 年，开采寿命为 28 年；生态复垦时间发生在开采结束后（第 29—31 年），年均复垦成本为 1.4×10^8 元；开采结束后一直到生态功能恢复前（第 33 年），年均外生生态价值损失为 2763.47×10^4 元；征地时间发生在矿山开采初期，征地成本为 25.22×10^8 元；矿山累计净现值为 43.57×10^8 元。

图 13 分别给出了在第 10 年（图 a）、第 20 年（图 b）和第 28 年（图 c），在经济最优境界中进行开采计划优化（不考虑生态成本）的年末采场推进位置以及在生态最优境界中进行生态成本内生化的开采计划优化的年末采场推进位置。从图中可以看出，生态成本的考虑，使不同年份采场的最终推进位置相差较大。以第 10 年采场推进位置为例，生态最优境界内的采场推进速度在矿体上盘远滞后于经济最优境界中的推进速度，即前期岩石剥离量相对于经济最优境界要小很多，这从表 8 和表 9 也可以看出：在生态最优境界中进行生态成本内生化的开采计划优化，前 10 年的岩石剥离总量为 $2.73 \times 10^8 \text{t}$ ，而在经济最优境界中前 10 年的岩石剥离总量为 $6.29 \times 10^8 \text{t}$ ；二者年采出矿石量基本上都在 $1540 \times 10^4 \text{t}$ 左右（除最后一年闭坑期）。生态最优境界中的开采寿命（28 年）也要小于在经济最优境界中的开采寿命（36 年）。

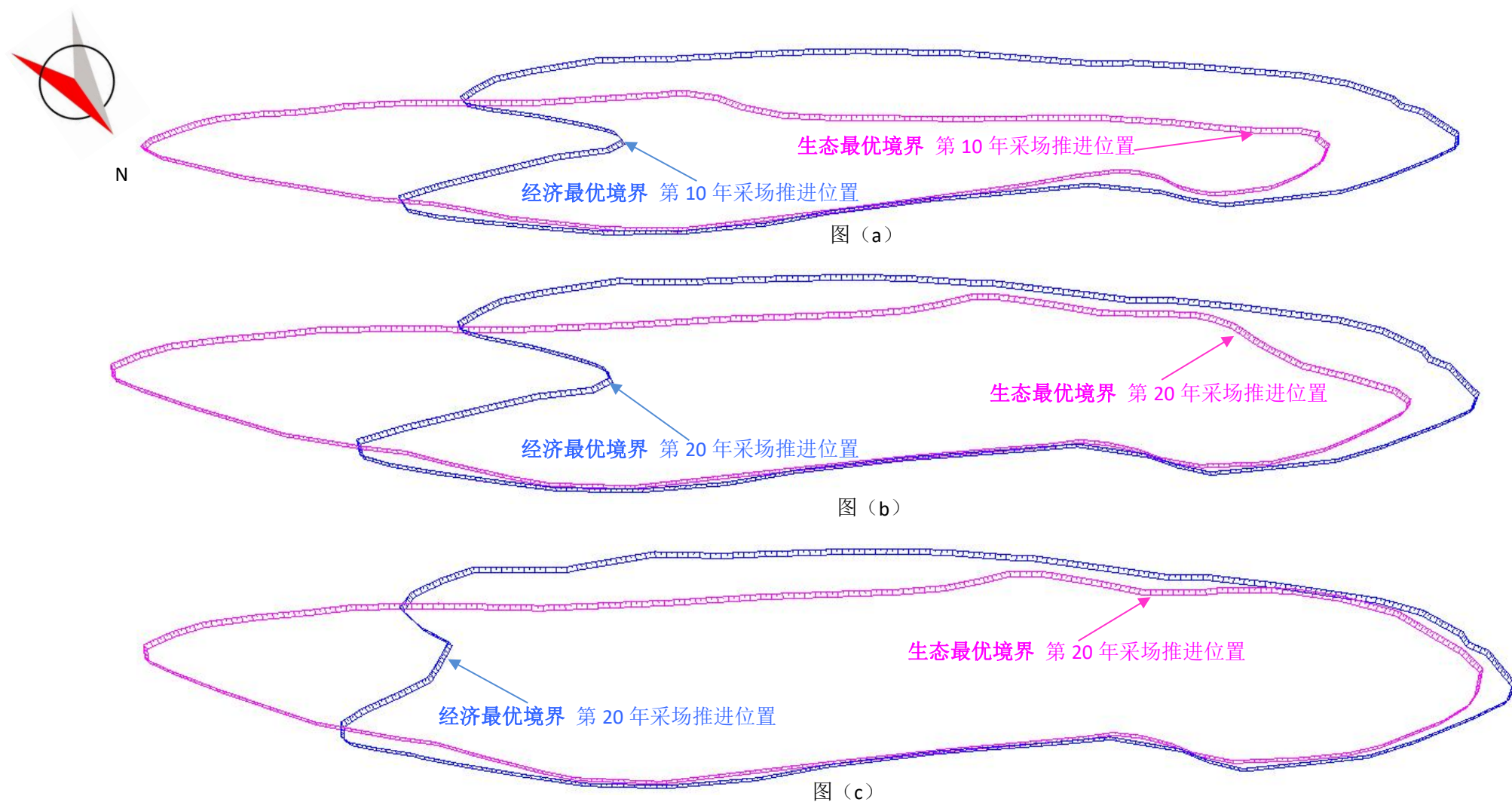


图 13 生态最优境界和经济最优境界中不同年份采场推进位置

从图 13 可以看出，从第 10 年到第 28 年，不考虑生态成本的开采计划是由西北向东南推进，而考虑生态成本的开采计划是由东南向西北推进；推进过程中受生态成本影响，在生态最优境界内上盘的推进速度要远滞后于在经济最优境界中的推进速度。综合上述分析得出，生态成本的考虑，使露天矿最终境界和开采计划都发生了很大变化。总的来说就是，当在最终境界优化过程中考虑生态成本，会缩小最终境界开采范围，减少矿岩采剥量（其中岩石量大幅降低），抬升境界最低水平；当在开采计划中考虑生态成本，趋于放缓采场推进速度，降低前期岩石剥离量。

从上述境界和开采计划优化可以看出，无论是考虑生态成本还是不考虑生态成本，境界优化和开采计划优化都是独立进行的，即首先以利润值最大为准则得到一个最优境界，然后再在对应境界中以 NPV 最大为准则进行开采计划优化。那么按照这种方法（境界、开采计划单独优化）得到的最终境界和开采计划是否就是矿山最佳设计方案呢，下面将基于前面构建的境界-开采计划整体优化理论、算法和模型，对境界-开采计划方案进行境界-开采计划整体优化，并与境界、开采计划独立优化结果进行对比分析。

四、标准制定的基本原则

标准编制过程中，遵循了以下基本原则：

- 1、标准需要具有行业特点，指标及其对应的分析方法要积极参照采用国家标准和行业标准。
- 2、标准能够体现出产品的具有关键共性的技术要素。
- 3、标准能够为产品的开发、改进指出明确的方向。
- 4、标准需要具有科学性、先进性和可操作性。
- 5、要能够结合行业实际情况和产品特点。
- 6、与相关标准法规协调一致。
- 7、促进行业健康发展与技术进步。

五、标准主要内容

本标准规定了生态冲击量化、生态成本量化、最终境界绿色低碳优化、生产计划绿色低碳优化的技术要求。

六、与有关法律法规和强制性标准的关系

遵守和符合相关法律法规和强制性标准要求。规范性引用文件包括：

GB/T 51360-2019 金属露天矿工程施工及验收标准

GB 51016-2014 非煤露天矿边坡工程技术规范

MT/T 881-2000 露天矿矿用自卸汽车适应性试验方法

DZ/T 0320-2018 有色金属行业绿色矿山建设规范

DZ/T 0312-2018 非金属矿行业绿色矿山建设规范

七、重大意见分歧的处理依据和结果

本标准起草过程中没有重大分歧意见。

八、后续贯彻措施

建议由煤炭、非金属矿行业和绿色矿山建设技术相关行业标准化管理机构组织贯彻本标准的相关活动，利用各种活动（如工作组活动、行业协会的管理和活动、专家培训、标准化技术刊物、网上信息、产品认证等）尽可能向绿色矿山建设相关单位和机构宣贯该标准。

建议本标准发布之日起半年内实施。

标准编制小组

2024年3月