

海外油气效益产量决策模型研究及应用

李 婷[✉]

中国石油化工股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083
[✉]通信作者, E-mail: litong.syky@sinopec.com

摘 要 效益最大化是国际石油公司生产经营的永恒主题, 油气产量是效益实现的载体, 提高效益产量则是海外资产保值增值的必然途径. 针对目前国内公司对于海外项目开展提质增效的一系列做法, 亟待建立一套能够兼容油价震荡、适应海外项目, 并满足不同需求的综合效益产量决策方法, 助力海外项目提质增效. 针对海外项目不同于国内项目的特点, 分析了矿税制、产量分成、服务合同等不同油气项目合同模式下的效益实现特点及策略; 并基于国内外调研分析, 建立了一套不同效益条件(成本、产量等指标浮动)下的海外项目效益产量评价逻辑框架, 以整体边际效益、现金流、利润优化目标为决策点, 指导效益配产, 实现资产增值保值; 在兼顾收益性与风险性的基础上, 创建全效益多维度效益产量决策模型并设计求解算法, 在满足石油公司的投资、成本等多种约束条件下, 考虑产量、利润、风险等多个决策目标, 给出海外油气田项目开发的全维度最优决策区间, 即帕累托解集. 将创建的模型应用于海外油田具体案例, 给出一定决策目标下的帕累托效益最优决策区间, 并对解集中的每个解进行深度分析比选, 提出按不同决策偏好选取不同的对应解, 从而满足效益经营决策的客观性及科学性. 最后考虑不确定性因素的影响, 分情景对方案产量、油价、成本及投资等的不确定性进行分析, 取得较好的应用效果, 为制定海外油田效益产量优化方案、资产保值增值提供可靠的决策支持.

关键词 全效益多维度; 效益产量决策模型; 资产保值增值; 帕累托解集; 最优决策区间

分类号 F270.3

Development and application of an optimization model for overseas oil and gas production benefits

LI Ting[✉]

Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083, China
[✉]Corresponding author, E-mail: litong.syky@sinopec.com

ABSTRACT Benefit maximization is the enduring objective of production and management for international oil companies. This objective can only be realized through oil and gas production; thus, enhancing production efficiency inevitably leads to maintaining and increasing the value of overseas assets. Given the current practices adopted by domestic companies to improve the quality and efficiency of overseas projects, it is imperative to establish a set of comprehensive benefit and output optimization methods that can withstand oil price shocks, adapt to overseas projects, and cater to various other requirements, thereby serving to improve the quality and efficiency of overseas projects. Taking into account the differences between overseas and domestic projects, this paper analyzes the characteristics and strategies for realizing benefits under different financial and tax regimes, such as mine tax contracts, output-sharing contracts, and service contracts. A framework for evaluating the benefits and outputs of overseas projects under different conditions (such as cost, output, and other floating indicators) is established based on research and analysis conducted at home and overseas. Overall marginal benefit, cash flow, and profit optimization objectives are used to guide benefit allocation to achieve asset appreciation and preservation.

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技部项目 (P19020-3)

A multidimensional and multi-objective decision-making model and an algorithm for benefit maximization are developed by considering both profitability and risk. A Pareto solution set is provided for a comprehensive optimal decision-making interval of overseas oil and gas field project development by considering the constraints of investment, cost, and block in conjunction with multiple decision-making objectives such as production, profit, and risk. This model was applied to specific cases of overseas oil fields under certain decision objectives, and the Pareto optimal decisions were generated. An in-depth analysis and comparison of each solution in the solution set was conducted. Appropriate selection of different solutions is advocated for different decision preferences to ensure the objectivity and scientific nature of profit management decisions. Finally, considering the influence of uncertainty factors, the scenario-based uncertainty analysis of the project output, oil price, cost, and investment has proved effective and generally provides reliable support for decision making in the context of overseas oilfield efficiency and plans for production optimization and high-quality development. The benefit production model and solving algorithm for overseas oilfield projects developed in this paper can provide a theoretical basis and support for decision making by oil field companies to optimize the production benefits of overseas oil fields and improve profitability.

KEY WORDS full benefit multidimensional; benefit yield model; asset appreciation and preservation; Pareto solution set; optimal decision interval

海外油气田项目相较于国内项目,存在合同模式复杂、地域分布广、难度大及风险大的特点,在开发过程中存在大量的不确定性。受行业竞争地位、地缘政治、勘探开发技术的制约,与国际石油公司相比我国海外油田项目成本较高,优化经营状况的需求迫切。产量作为效益的载体,提高效益产量比例是提升石油企业效益的有效途径^[1]。国内建立的海外油气生产规律及产量预测模型有很多种,但是模型中对海外油田主要特征的风险性和开发经济时效性考虑较少^[2]。为有效应对海外油气田运营风险,有必要从收益与风险的角度出发,创建一套能够覆盖不同油价情景需求及多种决策目标需求的效益产量决策模型及方法,从而满足海外油气项目资产保值增值决策需求。

多目标规划是油田开发规划领域经常用到的一种数学规划方法,用来分析在多个约束条件下,优化多个目标的问题。Harrison 和 Tweedie^[3]针对油田生产政策的经济指标,建立了多目标规划,考虑了包括政府、企业在内的不同决策制定者的不同经济目标。张强等^[4]建立了多目标优化模型,优化年产出投入比和累计产出投入,约束条件包括增注量、增产量、含水率和单项措施界限。还有很多学者结合具体需求,考虑利润、现金流、成本等多目标进行方案的优选。宋杰鲲等^[5]以最大化油田措施增产量为目标,以成本和措施工作量为约束条件,建立了随机机会约束规划方法及模型。李伟^[6]将 Agent 协同理论融合到多目标决策方法中,提出了基于 Agent 的多目标决策模型和框架,应用于解决油田开发过程中的压裂措施方案选井选层、油田开发指标预测公式优选等典型多目标决策问题,并开发决策支持系统。张圆圆和叶鹏^[7]根

据油田开发的各種成本投资形式,结合求解非线性规划的信赖域方法,以最低开采成本规划模型为例,提出了一种油田开发规划模型的求解算法。迟国泰等^[8]以油田累计净现值最大化为目标函数,以油田开发资金限制为约束条件,建立了基于储量价值评估的油田开发规划模型。

油气田开发是系统工程,具有复杂性和不确定性,进行开发规划时应充分考虑这些特点。李斌等^[9]建立了由风险评估原则、流程、16 项评估指标、多方法组合评估、风险预警和重要提示等构成的全面、系统的油田开发风险评估方法。盖英杰等^[10]考虑措施实施导致的增油量和增水量的不确定性,建立了措施随机规划数学模型。Aseeri 等^[11]将不确定性引入石油价格、生产力指标、财务风险管理和预算约束,并利用抽样平均近似方法建立了考虑不确定因素的随机模型。檀雅静等^[12]基于不确定理论,考虑措施增油效果和新增投资两类不确定参数,以经营效益最大化和新增投资最小化为目标,构建了基于美国证券交易委员会(SEC)准则的油田开发规划不确定优化模型,并利用差分进化算法求解,给出措施工作量的帕累托解集。王志新^[13]通过分析油田开发的特性以及随机不确定因素的影响,以“措施工作量”为系统的决策变量,建立了最大化产量目标概率、最小化成本费用期望、最大化新增可采储量等多目标随机优化模型。胡娟和刘志斌^[14]提出了非线性模糊综合评判的油田开发规划评判方法,以避免线性加权评判方法对油田开发方案造成的不准确性。冯利娟^[15]综合考虑了多种资源约束水平的不确定性和油田开采系统的各种复杂因素,利用多约束水平线性规划框架研究了油田开发的产量构成优化问题,

并建立了油田产量构成优化的优化模型. 杨永青和李树荣^[16]在已有的确定性的油田开发规划模型的基础上, 建立了油田开发规划的机会约束妥协规划模型. 该模型以利润作为目标函数, 投产措施的井次数作为决策变量, 将增油量、增水量、耗电量、措施工作量及投资上限等作为约束参数, 并假定这些参数都是随机的且服从正态分布. 康小军等^[17]建立了随机油价下的油田开发规划优化模型, 解决了油田开发规划中随机油价下的油田(采油厂)产量、工作量及成本的最优分配问题.

海外油田相较于国内油田, 受到地质条件、地缘政治、勘探开发技术等诸多因素的影响, 更具复杂性和不确定性^[18]. 目前针对海外项目特点, 考虑不确定性因素影响的海外油田效益开发优化方法的研究不多, 常规的多目标规划模型不能满足海外效益产量决策要求. 分析其原因主要包括三个方面: 首先, 企业进行海外资源优化配置时, 经常要考虑多个目标, 如效益最大化、成本最小化以及投资最优化等, 同时也要结合油公司实际情况, 考虑多个约束条件; 其次, 油价震荡使得油公司在不同油价情景追求的效益目标不同, 需要叠加考虑全效益层次设定经营决策目标, 体现边际效益需求、现金流需求及利润需求等层级; 第三, 风险及不确定因素等方面需要考虑油价波动、储量规模、政局风险等, 综合考虑对效益产量决策的影响. 因此基于以上三方面, 创建全效益多维度的效益产量决策模型以及对产量进行风险分析, 对于决策者制定效益产量方案及经营策略依据是十分必要的.

本文根据海外油气项目的特点, 创建了一套能够兼容油价震荡、适应海外项目特点, 并满足不同需求的综合效益产量评价方法, 并兼顾效益产量方案的收益性与风险性, 进行海外油田方案实证应用, 并对影响效益的关键因素进行灵敏度分析及产量风险不确定性分析, 为制定海外油田效益产量优化方案提供决策依据.

1 海外油田项目效益实现特点

海外油田项目分布广、财税模式和作业类型差异大, 首先需要创建不同财税模式的海外项目投入产出库. 与国内油田效益评价相比, 海外油田开发方案的特点在于海外油田效益评价需要深入了解并密切结合所在资源国的特定石油合同, 不同合同类型对应不同经济评价策略及经营目标. 一般来说, 国际石油合同按财税体系可以分为两

大类三种类型(矿税制合同、产品分成合同、服务合同), 他们的效益分类模式不同. 海外项目的效益实现要重视不同财税合同, 也就是篱笆圈的识别. 权益产量不是油公司实际获得的产量, 而是净产量. 对于产量及效益的分析, 均以净产量为准, 净产量指合同者在作业产量中扣除矿费及政府分成比例之后的剩余产量中拥有的净份额, 服务合同项目的净产量是指按照服务费折算后的相应产量. 几种财税合同的效益经营目标有差异, 分别如下^[19]:

1.1 矿税制合同项目

矿税制合同项目经营目标为最大化税后油气净利润, 享受超额收益. 矿税制合同模式的核心内容为税后净利润分配收入, 因此储量风险、产量高低、油气波动和财税条款的苛刻程度对于合同者效益影响较大. 在海外油田的实际运作中, 合同期一般为 20 ~ 30 a, 矿税制合同是保证合同者在较长合同期内通过生产、销售原油, 在缴纳各项税金、扣减投资与成本后, 有一定的税后利润, 并进行分红. 矿税制合同模式追求的目标为税后油气净利润, 该合同模式风险和效益并存, 投资者必须承担产量低、油价波动等因素导致的项目亏损所带来的风险, 但同时可以享受优良油气藏资源、良好合同条款、合理的开发策略带来的超额利润. 矿税制的经营目标是最大化这一超额利润.

1.2 产品分成合同项目

产品分成合同项目经营目标为尽快回收成本, 最大化利润油收益. 产品分成合同模式的核心内容为产品分成模式. 合同者通过在合同期内回收成本油和获得利润油来获得收益. 回收上限、利润油分成比、超额成本油的处理方式等均直接影响产品分成合同的实际收益. 回收上限、利润油分成比、超额成本油的处理方式等均直接影响产品分成合同的实际收益, 因此, 分成模式是产品分成的核心条款. 产品分成合同者必须承担产量低于预计产量、投资与操作费无法回收的风险, 同样也可以享受优良油气藏资源带来的超额利润. 由于该合同类型的超额收益来自利润油分成, 最大化合同者利润油收益是这一合同类型的经营目标.

1.3 服务合同项目

服务合同项目经营目标为最大化报酬费收入. 服务合同用报酬费代替了利润油, 报酬费的计算有特定的合同规定, 纯服务合同是指合同者代表资源国政府有偿进行勘探或者开发作业, 承包者不承担勘探与经营风险. 这类合同使用并不广泛, 主要是资源国资金较为富裕时, 为了寻求更先进

的勘探开发技术而制定,在沙特阿拉伯、菲律宾和科威特都有纯服务合同的例子.纯服务合同类似于石油行业中上游公司与斯伦贝谢、哈里伯顿等油服公司签订的合同,合同者因提供服务而获得报酬.若勘探成功,合同者可通过出售石油天然气来收回成本,并按产量的一定比例收取费用.合同者不能获得产量分成,也不存在利润油气.资源国政府保留对所生产的石油和天然气的所有权,合同者不拥有石油和天然气的所有权.服务合同追求合理的投入产出及最优化的报酬费收入.大部分服务合同的报酬费与产量正相关,合同者只有合理地设计开发方案,不断提高作业水平,才能有效益地获取更多效益产量,获得更多报酬收入.

2 全效益多维度决策的效益产量决策模型构建

2.1 海外项目效益产量逻辑架构

国内外对于效益产量的分析方法主要有以下几类:第一类,以边际理论及盈亏平衡理论做指引来界定油气资源的效益实现特点,进而研究油气效益产量.一般通过建立原油生产费用和原油产量之间的数学关系,利用边际分析方法,来求取原油效益产量的规模.油田边际成本其实是一个随产量变动而变化的有关原油产量的综合函数,需要在具体应用中采取大量数据模拟原油成本函数关系.盈亏平衡分析即量本利分析法,着重研究产量、价格、成本和利润之间的数量关系.第二类,以最大效益目标及定效益目标等方式来界定石油效益产量.最大效益目标下的产量界定标准为油田开发整体利润最大化时的产量规模.以利润最大化界定石油效益产量的应用场景不同,可分为整个已开发期累积利润最大化界定石油效益产量和一定开发时期(如年度)利润最大化界定石油效益产量;制定一定时期内的企业效益目标,以能实现该目标效益的产量为合理效益产量.

基于调研分析,结合海外项目实际特点,定位海外效益产量实现的逻辑思路,以全效益、多维度条件来设定目标函数及约束条件.全效益指在设置目标函数时兼顾不同油价波动区间能够获得的相应层级效益,具体包括油价覆盖完全成本形成利润、油价覆盖付现成本形成经营现金流、油价覆盖生产运行费用形成边际贡献;多维度是指在设置约束条件时除了考虑投资规模约束、成本规模约束,还要考虑不同效益层级约束、技术产量规模以及海外项目风险等因素,实现契合油公司经

营策略的同步优化,这样以便于决策者做出基于综合角度考虑的效益经营科学决策.

在石油公司的实际效益经营情景中,基于近年来国际油价的走势以及石油公司设定的主要财务能力参考指标,分析所得的利润指标及现金流指标是衡量石油公司收益能力的两个重要指标;通过现金流指标可以判断油公司的实际经营能力、偿债能力及投资决策;通过利润指标可以衡量石油公司收入的增长质量,其关乎油公司的盈利能力和发展能力.因此,构建好利润最优及现金流最优两个效益产量实现模型,将其作为构建海外效益产量逻辑框架体系的重要基础,进而形成全效益、多维度的海外油气效益产量整体模型架构.

2.1.1 利润最优效益产量评价模型

利用边际效益原理与方法,对海外目标年度各存量投资单元开发指标和成本指标进行预测,考虑海外项目涉及服务合同模式、产量分成合同模式及矿税模式等,利用现金流法分别建立不同的效益评价模型,并预测折旧、变动成本、固定成本及税收指标,对各项预测指标进行整体利润指标的评价,综合分析其各项指标的合理性,再用以下利润最优效益产量模型求取最优利润下的效益产量规模 $\max(\text{Profit})$,最终求取累计利润对应的产量应小于等于利润最优产量规模,见公式(1)~(2)所示.

$$\max(\text{Profit}) = P(Q_1 + Q_n) - C_v(Q_1 + Q_n) - C_f - T - I \frac{Q_x}{\Delta N} \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} Q \leq Q_{\max(\text{Profit})} \quad (2)$$

其中,Profit为利润; P 为油气价格; $Q_1, \dots, Q_n$ 为第1至第 n 个单元产量; C_v 为单位产量变动成本; C_f 为固定成本; T 为税金; $I \frac{Q_x}{\Delta N}$ 为年折旧额, I 为投资, Q_x 为产量, ΔN 为年限; $Q_{\max(\text{Profit})}$ 为利润最优产量.

2.1.2 现金流最优效益产量评价模型

现金流最优模型也需要对每个开发单元的开发指标和成本指标进行预测,根据不同财税模型建立相应的效益评价模型,并预测变动成本与固定成本及税收指标,对各项预测指标进行整体经营现金流的评价,综合分析其各项指标的合理性,再用现金流最优效益产量模型求取效益产量规模 $\max(\text{CF})$,最终求取累计经营现金流对应的产量小于等于现金流最优产量规模,见公式(3)~(4)所示.

$$\max(\text{CF}) = P(Q_1 + Q_n) - C_v(Q_1 + Q_n) - C_f - T \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} Q \leq Q_{\max(\text{CF})} \quad (4)$$

其中, CF 为现金流;其他符号含义与利润最优模型相同。

2.2 根据效益产量主控因素形成要素集

根据效益产量产生影响的完全成本、份额油、政府所得等主控因素,重点推演不同油价情景的公司发展目标与策略,考虑风险因素,研究优选全成本、全效益层级的 7 个目标函数及 7 个约束条件,形成效益产量模型要素集。对模型中使用到的要素做如下定义,如表 1 所示。

基于海外油田开发实践中对效益实现及风险控制过程中追求的目标和约束条件,给出海外油气田效益产量决策优化模型中的决策变量、目标函数和约束条件。

2.2.1 决策变量

决策变量 x_{ij} 表示是否开采第 i 个区块的第 j 个项目, $x_{ij} = 1$ 表示开采该项目, $x_{ij} = 0$ 表示不开采该项目。由于石油公司的海外油田类型包括必选开采油田与可选开采油田,开采项目均取值为 1。

2.2.2 目标函数

海外油田效益产量优化决策的主要原则是以盈利为核心,以风险控制为关键。一方面,石油公

司面临着“以有限的资源尽可能地增产增收”的盈利诉求;另一方面,由于海外油田项目多位于政治局势动荡的区域,海外油田开发具有高风险性。同时,为了满足不同油价下全效益层级的决策需求,创建了不同的目标函数,包括产量最大化(目标产量偏差最小化)、利润最大化、现金流最大化、单位操作成本最小化、单位付现成本最小化和风险最小化。决策者可根据实际情况,选择合适的目标函数组建模型,如表 2 所示。

2.2.3 约束条件

由于各油田资源禀赋、开采技术、财税模式等条件不同,在成本及效益指标上存在较大差异,且公司一般都有投资规模、成本规模约束指标。因此,模型中的约束条件必须包括双重约束,即对单油田的单指标效益界限值约束以及总量约束,如单位产量经营现金流约束、总投资约束、成本上限约束、投资回报率约束等,如表 3 所示。

2.2.4 建立模型

构建模型的灵活性是首要考虑的目标,上述模型创建过程中,列举了 7 个目标函数与 7 个约束条件,在实际应用中可以根据项目需求对目标与

表 1 效益产量模型要素集

Table 1 Element set of the benefit yield model

Element	Interpretation
x_{ij}	Whether to exploit the j th field project in the i th block
q_{ij}	Maximum production from the j th field project in the i th block
Q_{target}	Total target production
p_{ij}	Net profit of the j th oilfield project in the i th block
c_{ij}	Net cash flow from the j th oilfield project in the i th block
r_{ij}	Combined risk for the j th field project in the i th block, which is a weighted average of field reserve risk, political risk, and oil price risk, weighted and scored by experts in field development planning
i_{ij}	Investment in the j th oil field project in the i th block
o_{ij}	Operating cost of the j th oilfield project in the i th block
m_{ij}	Management costs for the j th oilfield project in the i th block
s_{ij}	Cost of sales for the j th oilfield project in the i th block
e_{ij}	Financial costs for the j th oilfield project in the i th block
NPV(a)	a discounted to the net present value in the year of decision
C_1	Lower limit of operating cash flow per unit of production for inventory production
C_2	Lower bound on operating costs per unit of production
C_3	Lower bound on payout costs
C_4	Lower bound on return on investment in new production
C_5	Lower bound on total profit
C_6	Lower limit of total production
C_7	Total investment cap

表 2 效益产量建模用目标函数

Table 2 Objective function used in benefit yield modeling

Objective function	Function formula	Sequence number
Yield maximization	$\text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_{ij}$	(1)
Minimize yield differential	$\text{Min} (Q_{\text{target}} - \text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_{ij})$	(1*)
Profit maximization	$\text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} p_{ij}$	(2)
Maximize cash flow	$\text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} c_{ij}$	(3)
Minimize operating cost per unit	$\text{Min} \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} o_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_{ij}}$	(4)
Minimize unit cash cost	$\text{Min} \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} (o_{ij} + m_{ij} + s_{ij} + e_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_{ij}}$	(5)
Minimize risk	$\text{MinMax} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} r_{ij}$	(6)

表 3 效益产量建模用约束条件

Table 3 Constraint conditions for benefit yield modeling

Constraint	Function formula	Sequence number
Lower limit of operating cash flow per unit of production	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} (c_i + i_i) \geq C_1$	(7)
Upper limit of operating cost per unit of production	$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} o_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_{ij}} \leq C_2$	(8)
Upper limit of payout cost	$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} (o_{ij} + m_{ij} + s_{ij} + e_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_{ij}} \leq C_3$	(9)
Lower limit of return on investment for new production volume	$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=2021}^T x_{ij} NPV(c_{ij}^t)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=2021}^T x_{ij} NPV(i_{ij}^t)} \geq C_4$	(10)
Lower limit of total profit	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} p_{ij} \geq C_5$	(11)
Lower limit of total production	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_{ij} \geq C_6$	(12)
Total investment upper limit	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} i_{ij} \leq C_7$	(13)
Required constraint-block constraint	$\text{foreach } i, \sum_{j=1}^n x_{ij} \geq n$	(14)

约束条件进行灵活组合. 其中, 目标函数中(1)和 (1*)均为关于产量的目标, 不需同时选择; 设置目

标和约束条件在同一维度的指标中可以同时选择,例如:在给定的总产量下限约束条件的同时追求产量最大化能够更严格地约束帕累托解集中的产量指标.7个目标函数可以分别与7个约束条件组

合构建单目标或多目标模型,根据海外项目经营实际情况,建立效益产量决策优选常用模型库127个,表4列举了常用的多维度组合模型及对应模型表达式组合.

表4 效益产量决策优化常用模型及表达式组合

Table 4 Common models and expression combinations for benefit yield decision optimization

Decision optimization model	
Type	Expression Combination
Model I: Maximize the production and minimize the risk given the ROI constraints, cash flow, and the range of profits achieved	Objective function: (1), (5) Constraint: (7), (10), (11), (14)
Model II: Maximize the profit and cash flow and minimize the unit operating costs given the ROI constraints, payout costs, and range of production	Objective function: (2), (3), (4) Constraint: (9), (10), (12), (14)
Model III: Given the yield target Q_{target} and investment constraints, profit, and unit operating cost requirements, minimize yield deviation and risk	Objective function: (1*)(5) Constraint: (8), (11), (13), (14)

Notes: ROI means return on investment.

2.3 设计基于遗传算法的多目标规划算法

对于多目标规划求解,往往采用先将多目标转化为单目标形式,再对单目标规划进行求解的方法.多目标向单目标转化的方式有很多种,包括权重法、主目标法、理想点法等.但这个多个目标函数值的量级和量纲存在很大差异,无论采用哪种转换方法,都带有很强的主观性,并且转换后的单目标规划一般情况下只能得到一个最优解,且目标函数意义不具体,对决策的参考价值有局限性.

本文设计的全效益多维度效益产量决策模型可同时考虑产量最大化(目标产量偏差最小化)、利润最大化、现金流最大化、单位操作成本最小化、单位付现成本和风险最小化等多个目标,而实际上要满足多个目标同时实现并非现实,不能求解出一个方案使得所有目标函数同时达到最优;而且实际中也不能只追求一个目标的最优化(最大或最小),而不顾其他目标的可实现性.为了真正实现效益产量决策优化方案的客观性,避免权重法及唯一解的非客观性和局限性,本文设计用遗传算法找到全局最优解的思路来针对模型求解.

寻求满意解(又称非支配解或帕累托解),即在不牺牲其他目标函数的前提下,不可能再改进任何一个目标函数值的可行解.这样就可给出一组满意解,提供多组方案,对应不同的利润、产量及现金流等,决策时可根据各目标的需求选择合适的方案.而非支配排序遗传算法(NSGA)是一种基于遗传算法的经典优化算法,在遗传算法的基础上先对根据个体之间的支配与非支配关系分

级,再进行选择算子等步骤,增加了优秀个体的遗传概率,是针对多目标优化决策问题的求解方法. Deb 和 Pratap^[20]为降低 NSGA 算法的计算复杂度,在 NSGA-II(带精英策略的非支配排序的遗传算法)中引入了快速非支配算法、拥挤度比较算子和精英策略.而 NSGA-III 进一步改进,对基于个体关联参考点进行选择,寻找被最少样本点关联的参考点,并保留接近参考点的个体,通过参考点的多样性控制个体的多样性,该算法改善了 NSGA 算法的性能,有效降低了算法的计算复杂度,实现了帕累托前沿中的最优解的均匀扩展,从而保证了种群的多样性.该算法适合求解包括多个目标函数的模型,在各领域的实际应用中取得了很好的效果.本文采用该算法对效益产量决策模型进行求解,设计算法的流程图如图1所示.

3 效益产量模型应用及案例分析

3.1 效益产量优化模型应用案例

某石油公司现有各种类型的海外油气田项目,包括在产的老区项目和勘探井、评价井、新井等增量投入项目,考虑各项目的投入产出指标、风险因素等,以契合石油公司对海外油田的总体战略及经营目标,应用效益产量决策模型对这些项目进行优选.总体思路为应用效益产量决策模型给出优选方案集,并对方案进行灵敏度以及产量不确定性分析,从而为石油公司决策者提供参考依据.通过数据收集可获得所有油田项目的信息,包括投入(操作成本、管理成本、财务费用、管输

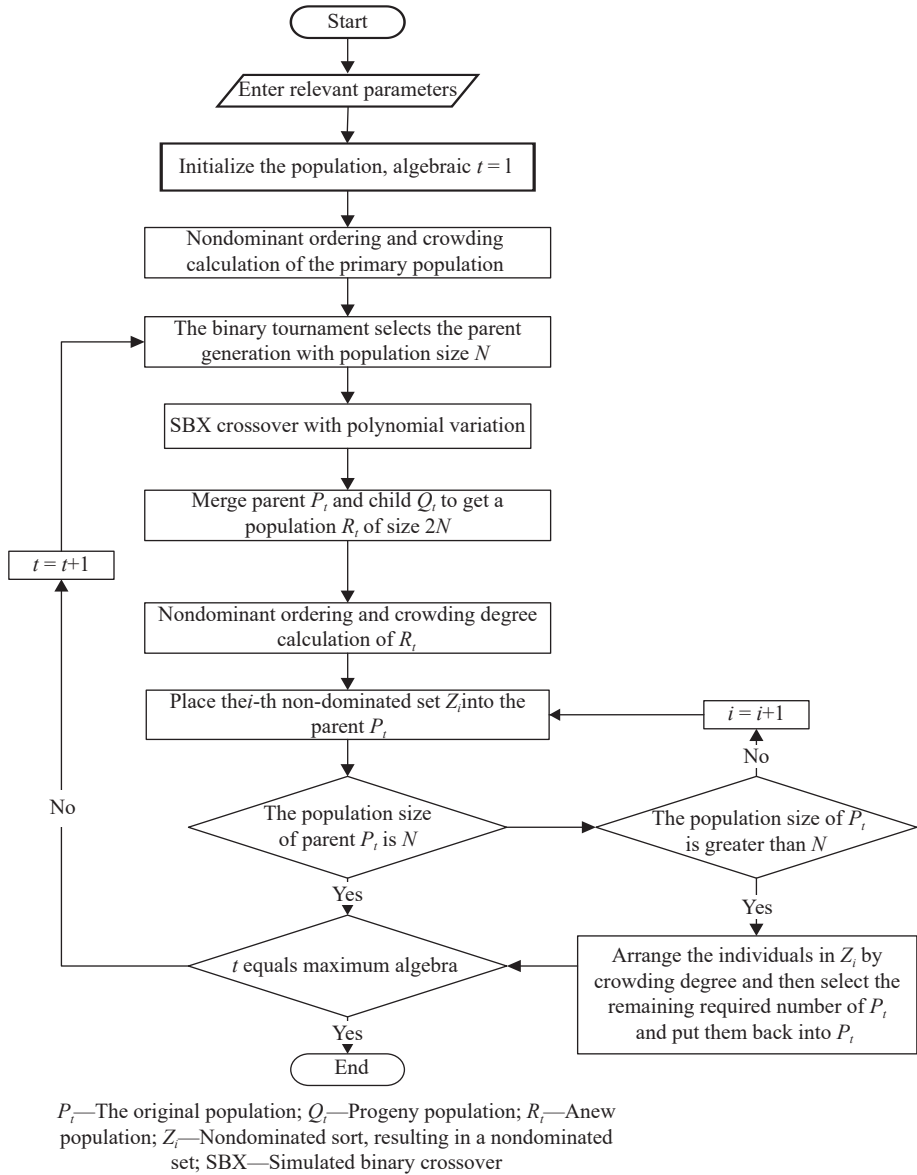


图 1 遗传算法流程图

Fig.1 Flowchart of the genetic algorithm

成本、投资)、产出(权益油气产量、净现金流、净利润)、风险(储量风险、政局风险、油价风险及各自的权重)。在选取目标函数及约束条件时,要契合油公司的发展重点,海外项目一般都以效益导向为中心,则提升效益产量占比及存量创效能力、降本增效就是油公司首要的经营目标。在应用模型之前,需要充分锚定这些条件作为效益经营决策的前提条件,基于本文所创建的效益产量决策模型是覆盖全效益的,考虑近两年在油价回暖后效益会提升,故设置目标函数时应考虑利润及经营现金流两个效益层级,继而选择产量、利润、经营现金流、风险为目标函数,并设置石油公司投资规模及石油公司成本规模两项重要指标为双重约束条件。具体应用模型实现步骤如下:首先应用决

策模型确定约束指标极值,再根据石油公司发展情景,设定多目标为现金流最大及操作成本最低两种情况,考虑投资成本约束规模,进行模型优化决策。因该效益产量决策优化模型可以兼顾灵活性及全面性,根据设计的优化算法,利用 python 编程进行求解,设置种群规模为 100,迭代次数为 1000,表 5 为求得的效益产量帕累托解集,根据设定的目标函数及约束条件,得到 10 个效益产量解形成优选决策区间解集,优选决策区间的推荐效益产量解集的含义为,在油田生产效益配产中均为能满足目标函数及约束条件的满意解,即按这些解集去应用到实际配产上均有效益。每个解集对应主要指标如表 5 所示。

由结果可知,10 组解集在产量、利润、经营现

金流和风险四个目标中不可同时最优,在追求产量增加的过程中伴随着付现成本、利润与风险的快速上升,经营现金流和单位操作成本的下降.追求产量目标增加的同时,一般会拉动利润规模的增加并降低单位产量的操作成本,但过度追求产量目标同时也可能成为双刃剑,低效无效的产量会致使油气开采成本大幅上涨、而产量增加带来的正向效益拉动不足以弥补成本上升带来的负向效果,有可能导致经营现金流缩减,由此使开采此油气区块的风险系数增加.

如解 5 为产量最大的解,而其现金流最低,风险较高,虽然其单位付现成本及单位操作成本居中,但是对于油田经营决策来讲,一般不会推荐只追求产量而忽视效益及风险目标的解来作为效益最优配产解;在油价中低位,油公司经营目标为以现金流最优为主时,则应选择解 4,其现金流最优,风险也相对较小,产量则在 10 组解中排名第 9,考虑稳妥发展偏好,则可以选择解 4;若考虑控本及

降本管控需求,可以选择单位操作成本及单位付现成本均最低的解 1,其单位操作成本为 $436.8 \text{ ¥} \cdot \text{t}^{-1}$ 、单位付现成本为 $504.0 \text{ ¥} \cdot \text{t}^{-1}$,但其产量大,对应的风险也较高.

因此在给出全维度最优决策区间后,决策者可根据决策偏好,在效益产量帕累托方案集产生的决策区间中选择各目标值满意的适合方案.在 10 组解中,每一组效益产量优选解较未优化前的产量方案,均有一定的效益增加,在实际应用中,因考虑降本增效目标,选择单位成本最低的解 1,优化后单位经营现金流较未优化前提高 2.56%,单位边际贡献提升 8%,说明该组解对于效益的拉动较为明显,如图 2 所示.将该优化思路应用于方案具有较好的生产应用效果.

同时,应用效益产量最优决策区间解集进行选择时,考虑利用产量与成本的协同关系提质增效.高油价下油气项目的运行压力一般较小,一旦油价下行至一定水平,油气资产的效益压力可以

表 5 效益产量最优决策区间

Table 5 Decision intervals for benefit yield optimization

Preferred solution set	Equity oil and gas production/t	Profit/¥	Operating cash flow/¥	Risk	Unit operating costs/ ($\text{¥} \cdot \text{t}^{-1}$)	Unit cash paid cost/ ($\text{¥} \cdot \text{t}^{-1}$)	Total number of oil fields
1	37310841	4009049828	7094331796	20.4	436.8	504.0	36
2	37258035	3968636467	7806138825	16.8	441.0	508.2	21
3	37341255	3963712429	7399291824	18.8	441.0	508.2	29
4	36716835	3290670240	9689161738	14.1	449.4	516.6	9
5	37502802	3513549687	7006716908	21.3	441.0	508.2	39
6	36723054	3804018854	9127457671	16.4	441.0	508.2	19
7	36605850	3693330144	9536101806	13.8	449.4	516.6	9
8	36881063	3877670734	8692999494	17.2	441.0	508.2	23
9	36829709	3782262111	9512866333	15.2	445.2	512.4	14
10	37012710	3961423106	7745694098	17.1	441.0	508.2	22

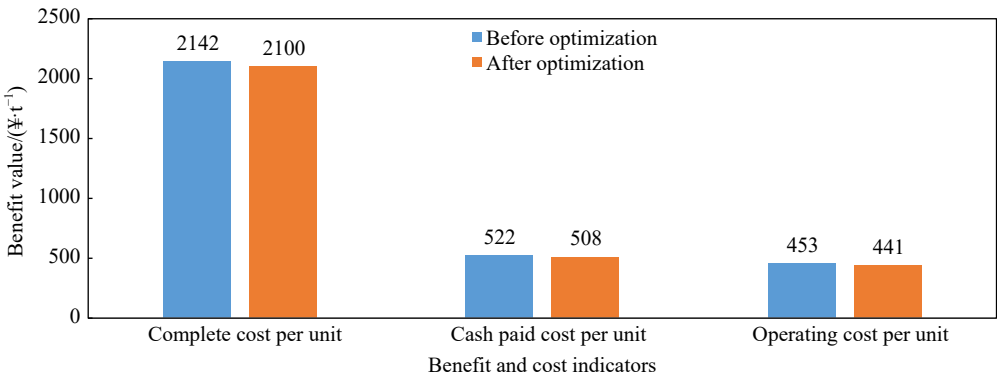


图 2 效益产量优选解对于效益提升的贡献

Fig.2 Contribution of optimal solution for benefit production to benefit enhancement

通过内部挖潜控制成本来缓解, 相关指标设计可以参考国内其他石油公司的业绩考核思路. 如果考虑到成本控制存在极限点, 应重视产量提升, 通过产量提升增加成本分担对象, 在增收的同时降低单位成本, 尤其考虑到海外项目存在的合同期限, 尽可能早日增产就更为必要.

3.2 效益产量决策优化方案的不确定性分析

由于海外油田产量受到地缘政治、地质条件、勘探开发技术等诸多不确定因素的影响, 各海外项目的产量完成情况会具有较大不确定性, 会与预测产量存在偏差, 因此所选最优决策区间所对应的优化方案的总产量也具有一定的不确定性, 使得完成效益产量决策优化目标具有一定的风险性, 因此有必要对方案产量的风险进行量化分析. 收集同类型海外油田的历史数据, 统计分析其产量分布规律, 拟合出产量的概率分布. 对于无历史数据的油田, 可以根据专家经验或类比方法给出分布, 然后采用随机模拟的方法量化总产量的不确定性, 给出各方案产量的概率分布, 以及完成给定产量目标的风险, 为决策者控制方案的风险提供支持. 在效益产量决策优化模型的帕累托多个解集中选择一个方案, 利用水晶球(Crystal Ball)进行随机模拟, 模拟 1000 次所得结果如图 3 所示.

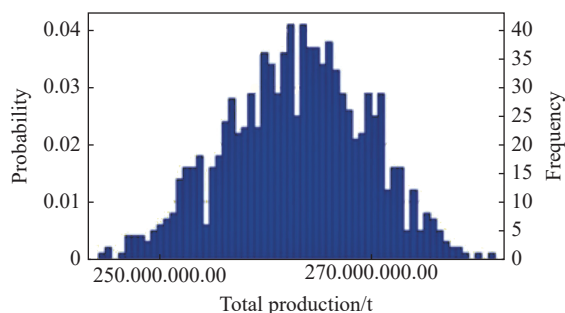


图 3 总产量概率分布及统计量

Fig.3 Probability distribution and statistics for the total output

根据产量的风险分析可以得到该方案总产量的分布情况及完成指定产量目标的概率, 可按照此方法对其他方案进行分析, 并进行比较, 为方案选择提供参考. 另外也可对油价、利润、现金流、成本等指标进行不确定性分析, 使决策者对方案可能面临的实际投产结果有全面的预判, 对效益产量总体方案的执行起到保障作用.

4 结论与建议

考虑海外油田开发的实际情况以及经济性、风险性, 本文创建了全效益多维度多目标决策模

型并设计求解算法, 在满足投资规模、成本规模、效益指标等多个约束条件下, 考虑产量、利润、现金流、边际效益、风险等多个维度及全效益层级决策目标, 给出海外油气田项目开发的全维度最优决策区间. 将创建模型应用于某石油公司海外油田的具体案例中, 并给出效益产量方案, 考虑不确定性因素的影响, 采用随机模拟方法分情景对方案产量、油价、成本及投资等进行不确定性分析, 为石油公司海外资产效益经营决策提供技术支撑, 并为决策者提供稳妥客观的效益产量最优决策区间. 本文所创建的针对海外油田项目的效益产量决策模型及求解算法, 可为油田公司对于海外油田的效益产量决策优化、经营策略的制定、资产保值增值、降本增效提供强有力的理论依据及决策支持.

参 考 文 献

- [1] Du J J, Zhang G H, Liu H B. Summary of oil economic output research. *J Univ Petroleum*, 2000(3): 12
(杜吉家, 张光华, 刘洪波. 石油经济产量研究综述. 石油大学学报(社会科学版), 2000(3): 12)
- [2] Huang A Q. *Study on the Evaluation of Development Benefit and Investment Portfolio Optimization on Offshore Oilfield* [Dissertation]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018
(黄安琪. 海外油田开发效益评价及投资组合优化[学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018)
- [3] Harrison G H, Tweedie J A. A multi-objective economic analysis of oilfield production policy // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, 1981
- [4] Zhang Q, Li P C, Liu L J. Multi-objective optimization of oilfield development plan based on quantum-shuffled frog-leaping algorithm. *Inf Contr*, 2014, 43(1): 116
(张强, 李盼池, 刘丽杰. 基于量子混合蛙跳算法的油田开发规划多目标优化. 信息与控制, 2014, 43(1): 116)
- [5] Song J K, Zhang Z X, Zhang Y. A stochastic chance-constrained programming model for measures program. *Microcomput Inf*, 2007, 190(3): 192
(宋杰鲲, 张在旭, 张宇. 油田措施配置的随机机会约束规划模型. 微计算机信息, 2007, 190(3): 192)
- [6] Li W. *Model of Multi-Objective Decision-Making Based on Agent and Application in Oilfield Development* [Dissertation]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011
(李伟. 基于Agent的多目标决策模型及在油田开发中的应用[学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2011)
- [7] Zhang Y Y, Ye P. A new solution method to oilfield development and programming model. *Inn Mong Petrochem Ind*, 2010, 36(3): 111

- (张圆圆, 叶鹏. 基于信赖域算法的油田开发规划模型研究. 内蒙古石油化工, 2010, 36(3): 111)
- [8] Chi G T, Wang H Z, Cheng Y Q. Oilfield development planning model and application based on reserve value assessment. *Res Financ Econ News*, 2010, 320(7): 34
(迟国泰, 王化增, 程砚秋. 基于储量价值评估的油田开发规划模型及应用. 财经问题研究, 2010, 320(7): 34)
- [9] Li B, Bi Y B, Gao G L. Risk assessment and analysis of oilfield development planning. *Spec Oil Gas Reserv*, 2016, 23(2): 63
(李斌, 毕永斌, 高广亮, 等. 油田开发规划风险评估与分析. 特种油气藏, 2016, 23(2): 63)
- [10] Gai Y J, Chen Y M, Fan H J. A multiple objective optimization under parameter uncertainty for measure program of oil field. *Syst Eng Theory Pract*, 2002, 22(2): 131
(盖英杰, 陈月明, 范海军. 油田措施配置多目标随机规划. 系统工程理论与实践, 2002, 22(2): 131)
- [11] Aseeri A, Gorman P, Bagajewicz M J. Financial risk management in offshore oil infrastructure planning and scheduling. *Ind Eng Chem Res*, 2004, 43(12): 3063
- [12] Tan Y J, Ji X Y, Wang T Z. Uncertain programming model and algorithm for oilfield development planning under SEC criterion. *Oper Res Manag Sci*, 2020, 29(7): 25
(檀雅静, 计小宇, 王天智, 等. 基于SEC准则的油田开发规划不确定优化模型及算法. 运筹与管理, 2020, 29(7): 25)
- [13] Wang Z X. Multi-objective uncertainty optimization model of oilfield development planning and its application. *Petrol Geol Oilfield Dev Daqing*, 2020, 39(5): 86
(王志新. 油田开发规划多目标不确定性优化模型及其应用. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 86)
- [14] Hu J, Liu Z B. Nonlinear fuzzy and comprehensive evaluation model of oilfield development program. *J Oil Gas Technol*, 2011, 33(10): 132
(胡娟, 刘志斌. 油田开发规划的非线性模糊综合评价模型. 石油天然气学报, 2011, 33(10): 132)
- [15] Feng L J, Guo D L, Zhong Y H, et al. Production composition optimization model based on multiple criteria and multi-constraint levels linear programming. *Oil Plan Eng*, 2009, 20(6): 14
(冯利娟, 郭大立, 钟仪华, 等. 多准则多约束水平的油田开发规划产量构成优化模型. 石油规划设计, 2009, 20(6): 14)
- [16] Yang Y Q, Li S Y. Opportunity constraint and compromise planning model for oilfield development planning. *Stat Decis*, 2008, 259(7): 55
(杨永青, 李树荣. 油田开发规划的机会约束妥协规划模型. 统计与决策, 2008, 259(7): 55)
- [17] Kang X J, Li Z M, Liu Z B. Optimal model of oilfield development programming under stochastic oil price. *Petrol Explor Dev*, 2007, 201(6): 765
(康小军, 李兆敏, 刘志斌. 随机油价下的油田开发规划优化模型. 石油勘探与开发, 2007, 201(6): 765)
- [18] Yang L, Liu J, Yang X P. Risk identification and coping strategies of overseas oilfield development project investment decision. *Int Petrol Econ*, 2022, 30(3): 97
(杨莉, 刘钧, 杨希濮. 海外油田开发项目投资决策风险识别及应对策略. 国际石油经济, 2022, 30(3): 97)
- [19] Fan Z X, Wang R F, Xu A, et al. *HAIWAI YOUTIAN KAIFA FANGAN SHEJI CELUE YU FANGFA*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021
(范子菲, 王瑞峰, 许安, 等. 海外油田开发方案设计策略与方法. 北京: 石油工业出版社, 2021)
- [20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput*, 2022, 6(2): 182