

基于地质标签-参数图谱体系的钻速优化与预测

李谦¹, 李俊萍^{2,*}, 刘绪勇³, 邓赫宏³

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059;

2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734;

3. 广东英格尔地质装备科技股份有限公司, 广东珠海 519085)

摘要: 针对钻井过程中钻速预测与优化面临的参数耦合复杂、地层描述粗糙、模型可解释性差等挑战, 旨在实现地质驱动的钻进参数智能优化。本文提出一种融合地质特征量化与多参数可视化分析的“地质标签-参数图谱”体系。基于南海某区块实际数据, 引入因子分析将该区域的深度、压力、地震波速、岩性等多源地质参数降维为三个公共因子, 据此构建 12 类具有明确物理意义的地质标签。基于地质标签与目标钻速区间的钻进参数图谱, 直观展示不同地质条件下十余项工程参数的合理取值范围与最佳值。基于图谱, 可在实钻中通过比对参数曲线与图谱偏离, 制定定量的参数优化策略; 在设计阶段通过计算参数与多套图谱的匹配概率, 实现钻速区间定量预测。

关键词: 地质标签; 钻进参数; 钻速优化调整; 钻速预测

中图分类号: P634

收稿日期: 2026-1-8

Rate of Penetration Optimization and Prediction

Based on a Geological Label-Parameter Spectrum Framework

Li Qian¹, Li Junping^{2,*}, Liu Xuyong³, Deng Hehong³

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, China;

3. Guangdong Yingle Geological Equipment Technology Co., Ltd., Zhuhai 519085, China)

Abstract: In response to the challenges of complex parameter coupling, rough formation description, and poor model interpretability in predicting and optimizing the rate of penetration (ROP) during drilling, this study aims to achieve geology-driven intelligent optimization of drilling parameters. A "Geological Label- Parameter Atlas" system integrating geological feature quantification and multi-parameter visualization analysis is proposed. Based on actual data from a block in the South China Sea, factor analysis is introduced to reduce multiple geological parameters, such as depth, pressure, seismic wave velocity, and lithology, into three common factors. Accordingly, 12 types of geological labels with clear physical meanings are constructed. The drilling parameter atlas, developed based on these geological labels and target ROP intervals, visually displays the reasonable value ranges and optimal values for over ten engineering parameters under different geological conditions. Based on this atlas, quantitative parameter optimization strategies can be formulated during actual drilling by comparing the deviation between current parameter curves and the atlas, while in the design stage, quantitative prediction of ROP intervals can be achieved by calculating the matching probability between design parameters and multiple sets of

基金项目: 广东省珠海市产学研合作项目《一种数字化工程勘察钻探装备的研发及其产业化》(编号: 2320004002792); 中海石油(中国)有限公司项目“南海西部油田上产 2000 万方钻完井关键技术研究”子课题“乐东 10 区超高温高压井综合提速技术研究”(编号: CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ05ZJ)。

作者简介:

第一作者: 李谦(1987-), 男, 副教授, 地质资源与地质工程专业, 博士, 从事钻井智能化分析与应用研究工作, E-mail: liqian2014@cdut.edu.cn, ORCID: 0000-0003-1535-7734。

通讯作者: 李俊萍(1986-), 女, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探工程金刚石钻头设计与研发工作, E-mail: lijunping_xp@163.com, ORCID: 0009-0003-7869-5084。

引言

钻井效率是制约深部、复杂油气资源经济开发的关键。精准的钻速预测与优化，直接关乎作业成本、风险控制与智能化决策水平。然而，该问题涉及地质与工程多源参数、复杂过程的强耦合，极具挑战。钻速的优化、控制与预测极具挑战性，主要表现在多源参数（涵盖钻井、测井、录井等）、复杂过程（破岩、岩屑运移、钻具磨损等）以及多因素间的耦合与相互影响（刘书杰等，2021；宋先知等，2022）。

当前研究主要分为理论推演与人工智能两类。理论模型（如 Bourgoyne and Young 方程（Young, 1969; Bourgoyne, 1974））基于破岩机理，但常将地层简化为均质体，且对工程参数的耦合分析多依赖经验。后续研究在此基础上进行了诸多修正（Wiktorski et al., 2017; Etesami et al., 2021; Ren et al., 2023），例如纳入井眼轨迹、地层压力、钻头结构、钻井液性能及岩屑运移等因素的影响。同时，数值仿真技术（如有限元分析）的运用，使得研究者能够模拟井底破岩过程，分析钻头力学行为、温度场和流场分布（闫炎等，2023；李根生等，2024；吴泽兵等，2024；曹继飞等，2024），从而深化对机械钻速变化规律的认识。人工智能方法（如神经网络）虽能提升预测精度，但其“黑箱”特性导致决策过程不可解释，难以厘清参数影响机制，在遭遇较为复杂的情况时易出现明显的误差。

现有方法存在两大根本局限：一是地层表征过于简化，未能融合微观物性、压力及岩性组合的协同效应；二是工程参数分析孤立，缺乏基于地质力学响应的系统性关联模型。当前的地质力学相关模型多仅集中于单纯从地质的角度对地层进行分析（鞠玮等，2025；刘泽栋等，2026），鲜有将地质特征与钻井作业耦合的相关分析，这导致参数配置与地层特性失配，易引发机械钻速剧降、井下故障等问题。实现从经验驱动到地质-工程一体化智能决策的转变，是核心突破方向。

针对上述局限，本文提出并构建了一套融合精细化地层判定与多参数协同的钻速优化方法。提出多源地质信息融合的定量表征方法，实现对地层特性的标准化、量化描述，为模型提供了精准地质输入；构建地质-工程协同的参数优化图谱，建立以地质标签和目标钻速为核心的分析框架，将十余项工程参数置于统一平台进行可视化与统计分析，明确了不同地质条件下优化、控制钻速最优参数调整策略，为智能化钻井工况的分析与开发提供了一定的参考。

1 数据采集区域分析

1.1 数据采集区域钻井工况

分析数据源于南海某区域十余口钻井现场，采集了包括施工工艺、钻井液性质、地质、钻具结构在内的 20 种相关参数，列举如表 1 所示，本次分析采集数据集规模为 21917 条。

表 1 采集参数类型列表
Table 1 List of parameter types

参数类型	参数名称/缩写
施工工艺	钻速/ROP；钻压/WOB；转速/RPM；扭矩/T；泵压/SPP；泵量/Q
钻井液性质	密度/MW；屈服值/YP；漏斗粘度/MV；塑性粘度/PV；滤失量/FL；PH；固相含量/SO
地质情况	深度/D；地震速度/EV；孔隙压力/PP；破裂压力/FP；上覆压力/OP；岩性/TYP
钻头参数	喷嘴等效直径/NS

在该区域的作业过程中发现当钻进深度达到 2500~3500m 左右时会出现明显的钻速突降，如图 1a、b 所示。结合对该区域采集数据统计，将钻速曲线与关键工程参数曲线进行对比，发现该区域中钻速的突降与大多数常规理论中影响较大的钻进参数类型相关性并不大。与之对应，发现在多个钻速突降点上均伴随着钻

井液密度的大幅度提升，据此以钻深和钻井液密度结合的钻井液柱压力为核心指标，绘制钻速与井深的对应曲线统计如图 1c 所示。图中蓝点为该区域所有统计井眼的钻速值，红点为该区域所有统计井眼的深度值。由图可见该区域钻速在钻井液柱压力达到 45MPa 后呈现出明显的突降，其峰值从最高 70~75m/h 突降至大多不超过 30m/h，钻速突降发生时的井深则集中于 3040~3385m 之间。

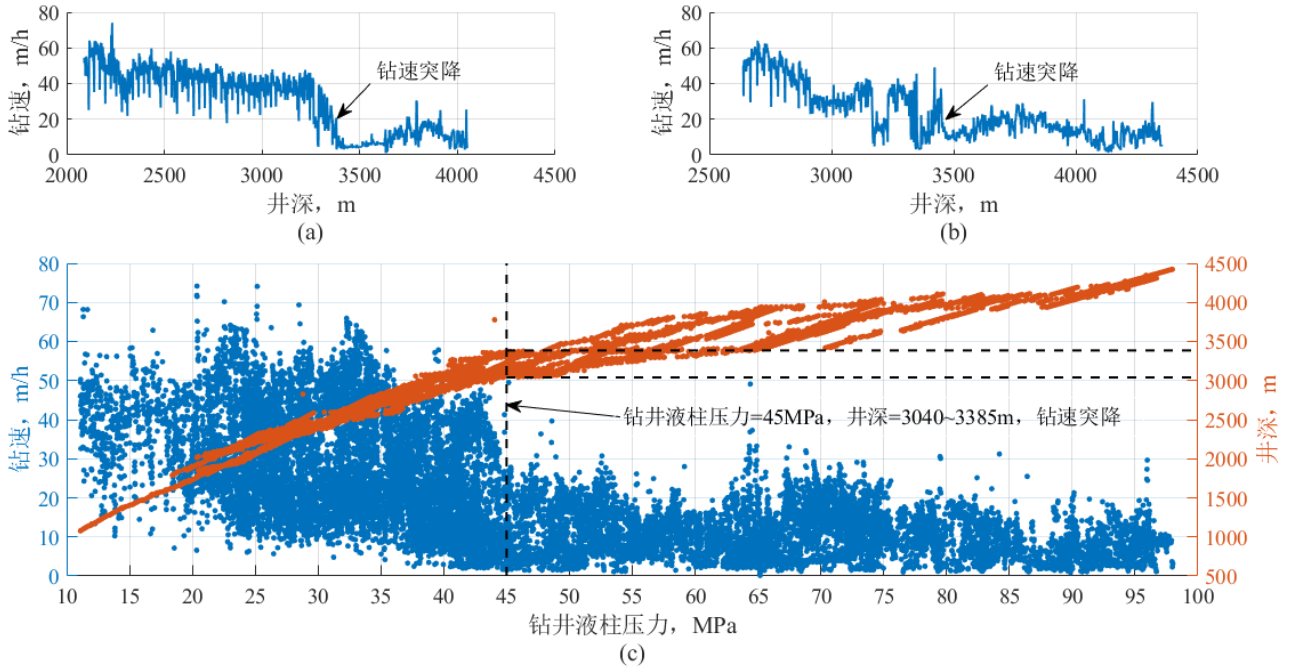


图 1 受钻井液柱影响下的钻速突降工况

(a/b: 分析区域内钻速突降实例; c: 钻速、钻井液柱压力与井深对比)

Fig. 1 ROP sudden drop condition affected by drilling fluid column

(a/b: Instances of ROP sudden drop in the analyzed area; c: Comparison between ROP, drilling fluid column pressure and well depth)

1.2 数据采集区域地层概况

对该区域内 1000~4500m 范围内的五种地层参数（包括地震波速、孔隙压力、破裂压力、上覆地层压力和岩性）进行采集和统计如图 2 所示。就地震波速而言，如图 2a 所示，该区域地层的地震波速过半集中于 3107~3412 m/s 之间，中位数为 3205 m/s。对三种关键压力的统计以当量钻井液密度进行核算，如图 2b 所示，孔隙压力集中于 1.33~1.86 g/cm³ 之间，破裂压力集中于 2.01~2.25 g/cm³，对应钻井液密度合适的密度窗口中位数为 1.62~2.14 g/cm³ 之间。同时统计范围内地层上覆压力则集中于 2.27~2.39 g/cm³ 之间。

结合该区域明显受钻井液柱压力影响而导致钻速突降的工况，合理分析其主要发生原因在于过大的钻井液柱压力导致了井底岩石在钻井过程中由脆性破坏转变为塑性破坏。故井底钻遇岩层类型也是钻速突降的主要原因之一。故对同深度范围地层的岩性进行统计如图 2c 所示，该区域主要岩性由泥岩、粉砂质泥岩、泥质分砂岩与中砂岩构成，四种岩性合计占比超过 94.5%。同时可以看出，占比最重的四种岩性中前三种都含有泥质，纯泥岩占比更是达到 65%，故可认为该地层属于巨厚泥岩层。

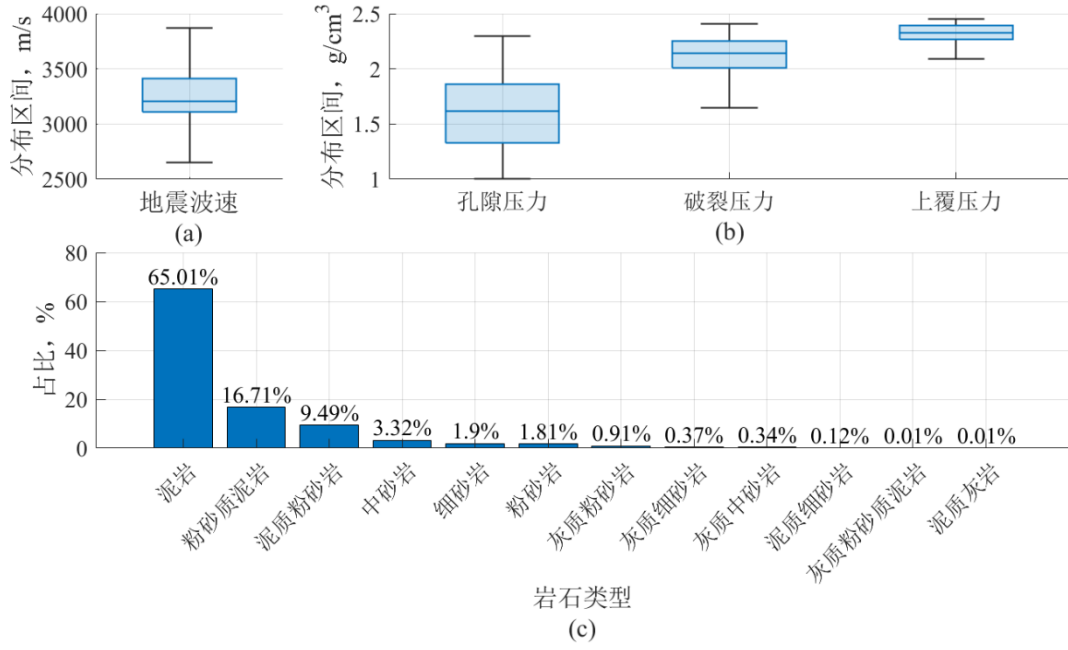


图2 区域地层统计

(a: 分析区域地震波速统计; b: 分析区域地层压力统计; c: 分析区域地层类型统计)

Fig. 2 Stratigraphic statistics in the area

(a: Statistical data of seismic wave velocity within the area; b: Statistical data of formation pressure within the area; c: Statistical data of formation types within the area.)

2 基于因子分析的地质标签

2.1 地质参数的定义

针对钻遇地层, 如表 1 所示, 涉及钻遇地层的参数包括深度 (D)、地震波速 (EV)、孔隙压力 (PP)、破裂压力 (FP)、上覆压力 (OP)、岩性 (TYP) 共六种, 其中任取一种都无法完整描述该地层所有性质。据此需要使用与地质相关的所有参数通过计算组合以获得更精确的地层特征分类, 类似于为不同类型的地层打上标签。如图 3 所示, 令 L 为所有地层类型集合, 假设该区域可划分为 n 种不同的地层类型, 则可建立 n 种不同的地质标签 L_i ($i \in [1, n]$) 分别可由对应的计算方法 f_i 由指定的地层参数通过组合计算获得, 有

$$L_i = f_i(D, EV, PP, FP, OP, TYP) \quad (1)$$

式中: L_i —地质标签; f_i —计算方法; D —深度, m; EV —地震波速, m/s; PP —孔隙压力, g/cm³; FP —破裂压力, g/cm³; OP —上覆压力, g/cm³; TYP —岩性。

其中每种标签各自对应的地层类型合集即为当前分析区域的所有地层合集, 有

$$L = \{L_1, L_2, \dots\} \quad (2)$$

式中: L —所有地层类型集合; L_n —第 n 个地层类型。

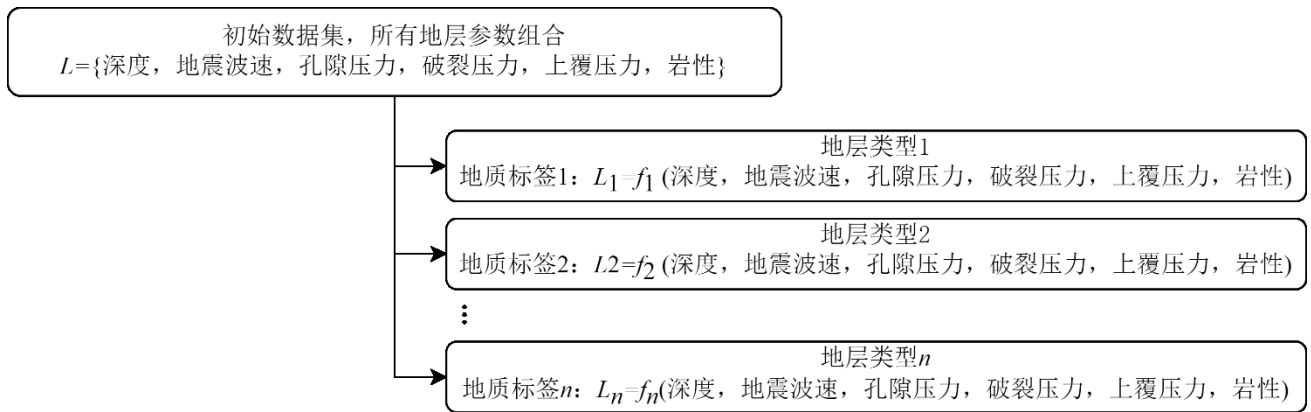


图3 地质标签定义

Fig. 3 Definition of geological labels

2.2 地层参数的预处理

建立地质标签的前提在于对计算地层参数进行分析，包括分析各参数间的相关性，分析判别各参数之间的共同内在特征。据此首先对分析区域的地层参数进行了以 Pearson 理论为基础的相关性分析。其计算结果相关系数是用于衡量两个定量变量之间线性关系强度与方向的统计指标，其数值范围为 $[-1, 1]$ 。当系数大于0时，表示两变量存在正相关；小于0时表示负相关；而等于0则表示没有线性相关关系。系数的绝对值越接近1，表明线性关系越强（ ± 1 代表完全线性相关）；绝对值越接近0，则线性关系越弱。

对本区域的六种地层参数的相关性分析结果如图4所示，可见井深、孔隙压力、破裂压力和上覆压力之间存在极强的线性相关性，其计算结果最小都超过0.94，该现象主要原因在于三种压力的计算过程中均引入了井深作为计算参数。此外，对于地震波速而言，与除岩性外的其他参数均呈现出中等相关性，其相关系数取值为 $[0.51 \sim 0.64]$ 。对于岩性，则与其他所有参数呈现出偏低相关性，相关系数计算最大值为0.42，在一定程度上证明了岩石类型出现的随机性。

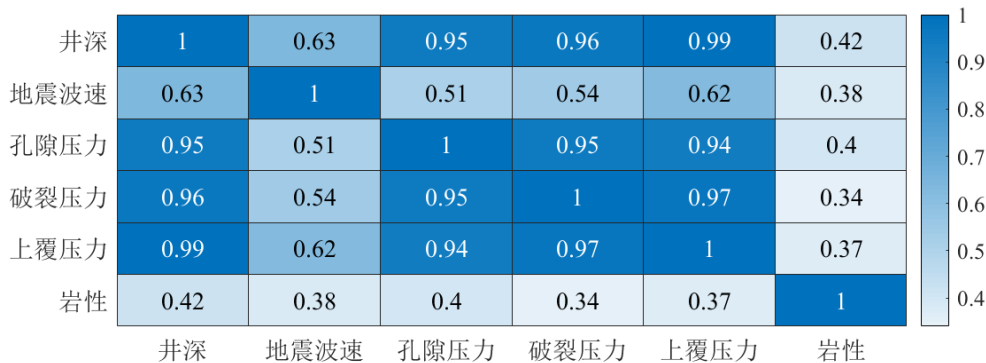


图4 地质参数原始相关性分析

Fig. 4 Original correlation analysis of geological parameters

在进行因子分析前，为消除不同地质参数量纲与数量级差异对分析结果的影响，首先对深度、地震波速、孔隙压力、破裂压力、上覆压力及经数值化编码的岩性等六项原始参数进行了 Z-score 标准化处理，使所有参数均值为0，标准差为1。标准化确保了各参数在因子分析中具有平等的权重。

结合式2的定义，拟建地质标签是由各地层参数通过计算获得，据此在计算过程中须消除各参数间的相关性。本文通过因子分析法消除不同地质参数间的相关性。因子分析的核心目的在于通过降维来探索和简化参数结构，其方法是识别出少数几个能够解释多个可观测变量间相关关系的潜在公共因子。通过这一过程，揭示数据背后的内在理论结构，将复杂的观测数据归结为更本质的、不可直接测量的公共因子。最终

揭示各原始参数与公共因子关联强度的因子载荷，以及可用于后续分析的、每个观测对象在因子上的量化因子得分。

采用主成分分析法作为因子提取方法，该方法以保留原始数据最大方差为目标，能够有效实现数据降维。为获得更具物理可解释性的因子结构，对提取出的初始因子载荷矩阵采用了最大方差法进行正交旋转。正交旋转 (Varimax) 通过最大化各因子载荷平方的方差，使每个原始变量尽可能只在一个因子上有高载荷，而在其他因子上载荷接近零，从而使因子结构更加清晰，便于对公共因子的物理意义进行识别和命名。

进行因子分析之前，对本区域地层参数集合进行 KMO 检验和 Bartlett 球形检验是判定其是否适合因子分析的前提。由于因子分析、KMO 检验和 Bartlett 球形检验均为常规算法，本文不再描述计算过程，仅针对结果进行分析。KMO 检验用于衡量样本数据的适宜性，判断观测变量间的偏相关性是否足够小，以判断是否适合进行因子分析，通常认为 $KMO \geq 0.7$ 适合进行因子分析，而本文采集地层参数间的 KMO 检验值为 0.767，证明适合进行因子分析。针对 Bartlett 球形检验，则是为了证明多参数间是否有必要进行因子分析，其判断标准以显著性 p 值进行表征，通常认为其显著性 $p < 0.05$ 时计算参数间存在显著相关值得因子分析。对于数据采集区域获得的地层参数，其 Bartlett 球形检验计算获得的显著性 $p=0.000$ 。综上，结合 KMO 和 Bartlett 球形检验校核结果，本区域地层参数数据集适合进行因子分析。

因子分析结果如表 2 所示。当使用有限个公共因子 (低维) 代替原有的高维参数组合时，不可避免的产生信息量丢失的问题。在因子分析中，对信息量的留存以贡献率进行表征。如表 2 所示，提取出的公共因子贡献率随序号大小逐渐递减，1 号公共因子包含了 60.705% 的原始数据信息量，对应的 2 号和 3 号因子分别贡献了 19.465% 和 18.157% 的信息量。从累积贡献率上看，前三个公共因子累积包含了原有数据 98.327% 的信息量，在不引入后续公共因子的情况下，丢失的原有信息量不足 2%，信息量丢失误差尚可接受。

表 2 因子分析结果
Table 2 Results of factor analysis

结果分类	分析参数	井深压力因子 F_1	地震波速因子 F_2	岩性因子 F_3
贡献率	特征值	3.642	1.168	1.089
	独立贡献率 (%)	60.705	19.465	18.157
	累积贡献率 (%)	60.705	80.170	98.327
因子载荷矩阵	深度 D	0.918	0.319	0.198
	地震波速 EV	0.326	0.929	0.178
	孔隙压力 PP	0.944	0.176	0.197
	破裂压力 FP	0.954	0.219	0.131
	上覆压力 OP	0.926	0.317	0.151
	岩性 TYP	0.189	0.156	0.969
因子得分矩阵	深度 D	0.274	-0.088	-0.044
	地震波速 EV	-0.305	1.209	-0.136
	孔隙压力 PP	0.300	-0.100	-0.052
	破裂压力 FP	0.339	-0.110	-0.039
	上覆压力 OP	0.292	-0.091	-0.037
	岩性 TYP	-0.152	-0.154	1.087

基于计算得到的因子载荷矩阵，每个公共因子对应列中超过 0.8 的参数可被确定为该公共因子的主要影响原始参数，据此可确定该公共因子的物理含义如下：

公共因子 1：主要影响参数包括深度 D 、孔隙压力 PP 、破裂压力 FP 和上覆压力 OP 。由此可见，对该区域的地层而言，地层深度和对应的地层压力是影响地层分类和定义的主要因子，据此将该公共因子命名为井深压力因子 F_1 ；

公共因子 2: 主要影响参数为地震波速 EV , 说明该区域的地层岩性结构的影响仅次于深度和地层压力, 故将该公共因子命名为地震波速因子 F_2 ;

公共因子 3: 主要影响参数为岩性 TYP , 说明在偏单一的岩性组成中 (超过 65% 的泥岩成分), 岩性并非地层参数分类的首选核心, 但仍然包含了 18.157% 的分类贡献, 故将该公共因子命名为岩性因子 F_3 。

在确定各公共因子物理意义的同时, 可通过因子得分矩阵得到通过原始参数计算三个公共因子的公式如式 3 所示, 同时可计算三个公共因子之间的相关性如图 5 所示, 所有公共因子间的相关性全部归零。可见在通过因子分析降维后, 新生成的公共因子在保留了大于 98% 原始信息量的同时消除了参数间的相关性。

$$\begin{cases} F_1 = 0.274D - 0.305EV + 0.3PP + 0.339FP + 0.292OP - 0.152TYP \\ F_2 = -0.088D + 1.209EV - 0.1PP - 0.11FP - 0.091OP - 0.154TYP \\ F_3 = -0.044D - 0.136EV - 0.052PP - 0.039FP - 0.037OP + 1.087TYP \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_1 —井深压力因子; F_2 —地震波速因子; F_3 —岩性因子; D —深度, m; EV —地震波速, m/s; PP —孔隙压力, g/cm³; FP —破裂压力, g/cm³; OP —上覆压力, g/cm³; TYP —岩性。

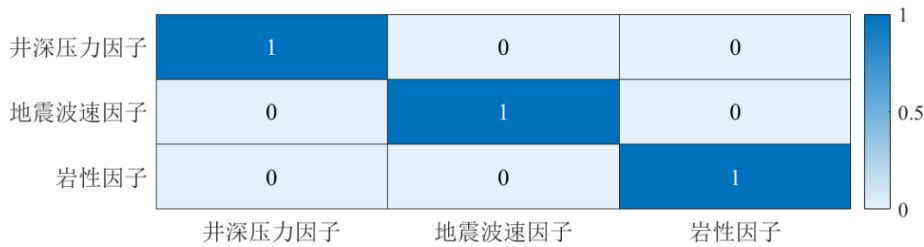


图 5 主要因子相关性

Fig. 5 Correlation of main factors

本研究采用的因子分析对结果解释具有明确影响: 1) 数据标准化保证了各参数在分析中的公平性, 避免了因量纲不同导致分析结果被大数值参数主导; 2) 主成分分析法确保了提取出的少数因子能够最大程度地保留原始地质参数的信息, 符合本研究降维与特征提取的核心目的; 3) 正交旋转显著改善了因子结构的可解释性, 使旋转后的因子载荷矩阵 (表 2) 清晰地显示出每个原始参数主要归属于某一个特定因子 (如压力参数群集中于因子 1, 地震波速集中于因子 2, 岩性集中于因子 3), 这为后续将公共因子明确命名为“井深压力因子”、“地震波速因子”和“岩性因子”提供了直观的统计依据, 增强了地质标签构建过程的客观性与物理意义。

2.3 地质标签的建立

基于式 3, 将本区域地层参数通过计算转换为公共因子集合, 将公共因子数据点绘制如图 6 左所示。可见在三个公共因子组成的坐标系中, 分析区域的所有公共因子点呈现出稳定间隔的规律性层状分布。该规律性出现的主要原因在于原始数据中对于文字性的十二种岩性表述以数字 1~12 代替, 而计算获得的第三个公共因子也主要由岩性所主导。据此, 由实际采集的六种地层参数组合而成的三种公共因子而产生的 12 组互相平行的层状分布, 可看作为本区域地层建立了 12 组既有区别又有联系的地质标签。不同地质标签的主要联系在于各标签均由三种固定的公共因子所标记和确定, 其主要区别在于三个公共因子对每种标签的计算方式不同。

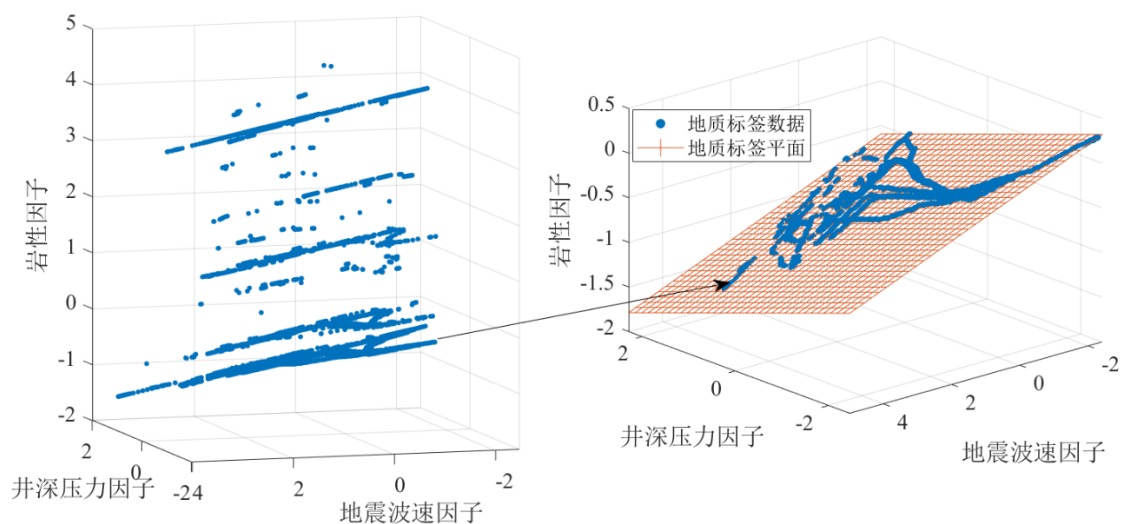


图 6 地质标签分类图例

Fig. 6 Legend of geological labels classification

如图 6 右所示，可基于三公共因子坐标系，建立每种标签的平面方程确定其计算方式。对于呈现出规律分布的 12 个互相平行的倾斜平面，各标签的平面方程如式 4 所示，三种公共因子的系数保持不变，用不同的常数 D_i 以区分不同的地质标签。通过拟合，可获得不同的地质标签值如表 3 所示。

$$-0.1963P_1 - 0.1621P_2 - P_3 + D = 0 \quad (4)$$

式中： P_1 —井深压力因子系数； P_2 —地震波速因子系数； P_3 —岩性因子系数； D —深度，m。

表 3 地质标签不同平面常数计算表

Table 3 Constants calculation table for different planes of geological labels

标签序号	常数 D_i	标签序号	常数 D_i	标签序号	常数 D_i
1	-0.5420	5	1.3482	9	3.2319
2	-0.0682	6	1.8177	10	3.7021
3	0.4043	7	2.2898	11	4.1764
4	0.8763	8	2.7638	12	4.6548

进一步的，通过计算筛选，可获得本计算区域的中各地质标签的数据条数分布如图 7 所示，可见 1 号标签、2 号标签和 5 号标签三种所属地层类型为本计算区域前三位，其数据量分别为 14244 条、3662 条和 2080 条。

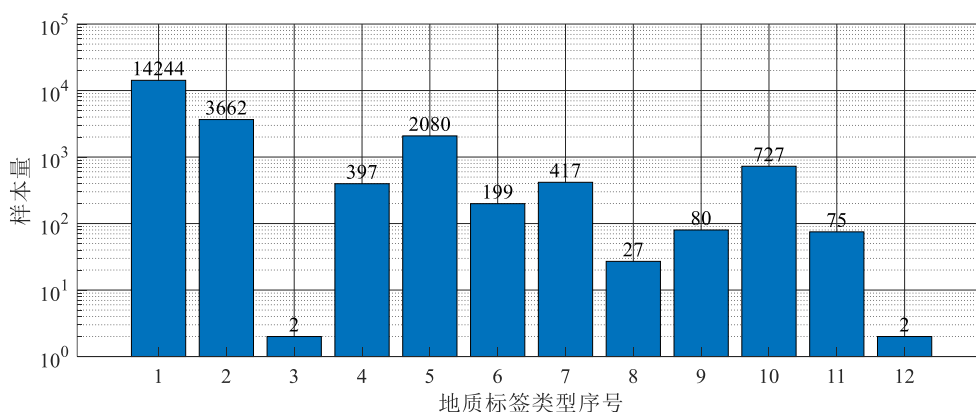


图 7 本区域中不同地质标签数据量分布

Fig. 7 Data distribution of different geological labels in the area

3 基于地质标签的钻进参数图谱

3.1 钻进参数图谱的筛选

基于图 3 所示的地质标签定义，可从初始数据集中筛选出指定地质标签与钻速范围的钻进参数，并建立对应的钻进参数图谱。其建立流程如图 8a 所示，主要包含如下步骤：

- 第一步，拆分初始数据集：将指定区域合并了所有井眼所有深度的初始数据集按参数类型拆分为地质类参数、钻速和工艺类参数三个子集，同时为了规避不同工艺参数间不同的数量级与单位的影响，拆分后的工艺类参数子集还需进行标准化处理，将其各参数值归一化为无单位统一范围[0,1]；
- 第二步，建立地质标签：按照前文所述地质标签的建立流程，对地质类参数子集进行因子分析，将其计算转变为公共因子子集，同时对公共因子子集分类建立不同的地质标签，为公共因子子集各数据打上不同的地质标签；
- 第三步：建立筛选钻进参数：基于初始数据集拆分的子集具有不同的参数数量，但具有相同的排序和样本量。故可通过指定地质标签获得同类地层的子集 S_F 及其在初始数据集中的序号集 N_{SF} ，通过指定钻速范围获得相同钻速的子集 S_{ROP} 及其在初始数据集中序号集 N_{SROP} ，则通过两个序号集的交集 $N_p = N_{SF} \cap N_{SROP}$ 可从初始数据集中筛选出指定钻速范围与地质标签的工艺参数；
- 第四步，绘制钻进参数图谱：根据筛选出指定地质标签与钻速范围工艺参数，绘制如图 8b 所示的箱型图谱（图 8b 所示为 1 号地质标签在 10~20m/h 钻速范围内的钻进参数图谱），各参数 25%分位数与 75%分位数之间的取值即可视为当前条件下合理钻进参数选择范围，而最佳取值则直接指定为各参数箱型图的中位数值。

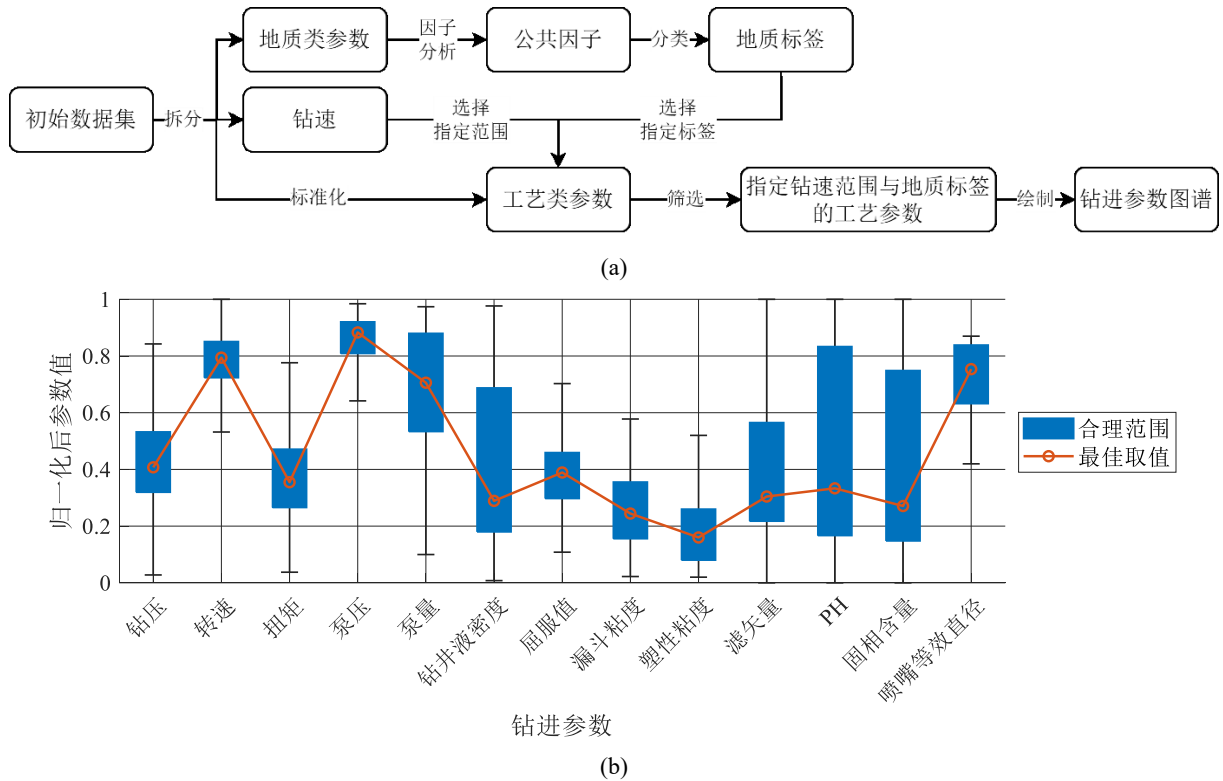


图 8 钻进参数图谱建立流程 (a) 与实例 (b)

Fig. 8 Establishment process of the drilling parameter atlas (a) and the example (b)

3.2 钻进参数图谱的解读

参考图 8 所示参数图谱绘制流程,以本区域数量最多的三种标签(1 号、2 号和 5 号)为例,统计分析在相同钻速条件下的钻进参数图谱。为方便对比,本文分别列举了高低两种钻速条件下的对比如图 9 所示。

在低钻速($\text{ROP} \leq 10 \text{ m/h}$)条件下,如图 9a 所示,从合理范围取值的角度看,钻压、扭矩和滤失量三种参数图谱明显呈现出 1 号地质标签范围整体更高,而 2 号和 5 号地质标签则相对接近;泵压、钻井液密度、PH 值、固相含量四个参数中 5 号地质标签合理范围明显较 1 号和 2 号标签更低;转速、流量、钻井液屈服值和漏斗粘度三种地质标签取值合理范围重合程度较高,其中的差异更多是由数据量所导致。同时,在 1 号地质标签数据量远大于 2 号和 5 号标签的前提下,塑性粘度中 2 号标签取值更高和喷嘴等效直径中 1 号标签取值更小更集中也反映了典型的人工调控的特征。从最佳取值的角度看,2 号地质标签和 5 号地质标签的最佳取值在大多数参数中均比较接近,而近半数参数的 1 号地质标签(包括钻压、扭矩、泵压、钻井液密度、屈服值、滤失量、固相含量)最佳取值要高于 2 号和 5 号标签;对应的塑性粘度和泵量 1 号标签的最佳取值则更低。

在高钻速($\text{ROP} \geq 30 \text{ m/h}$)条件下,如图 9b 所示,与低钻速条件对比,合理范围上部分参数呈现出明显的改变为:泵压取值范围在高钻速条件下明显增大;钻井液密度 1 号地质标签明显增大但 2 号标签则明显降低;5 号地质标签的屈服值和塑性粘度均明显下降;滤失量的取值范围三种标签都有一定的扩大;同时 1 号标签的 PH 值,2 号标签的 PH 和固相含量也在显著降低。而对最佳取值而言,最明显的改变则在于 1 号地质标签的泵量在明显提升,而钻井液密度在显著下降,该规律也与图 1 所示的统计规律吻合。

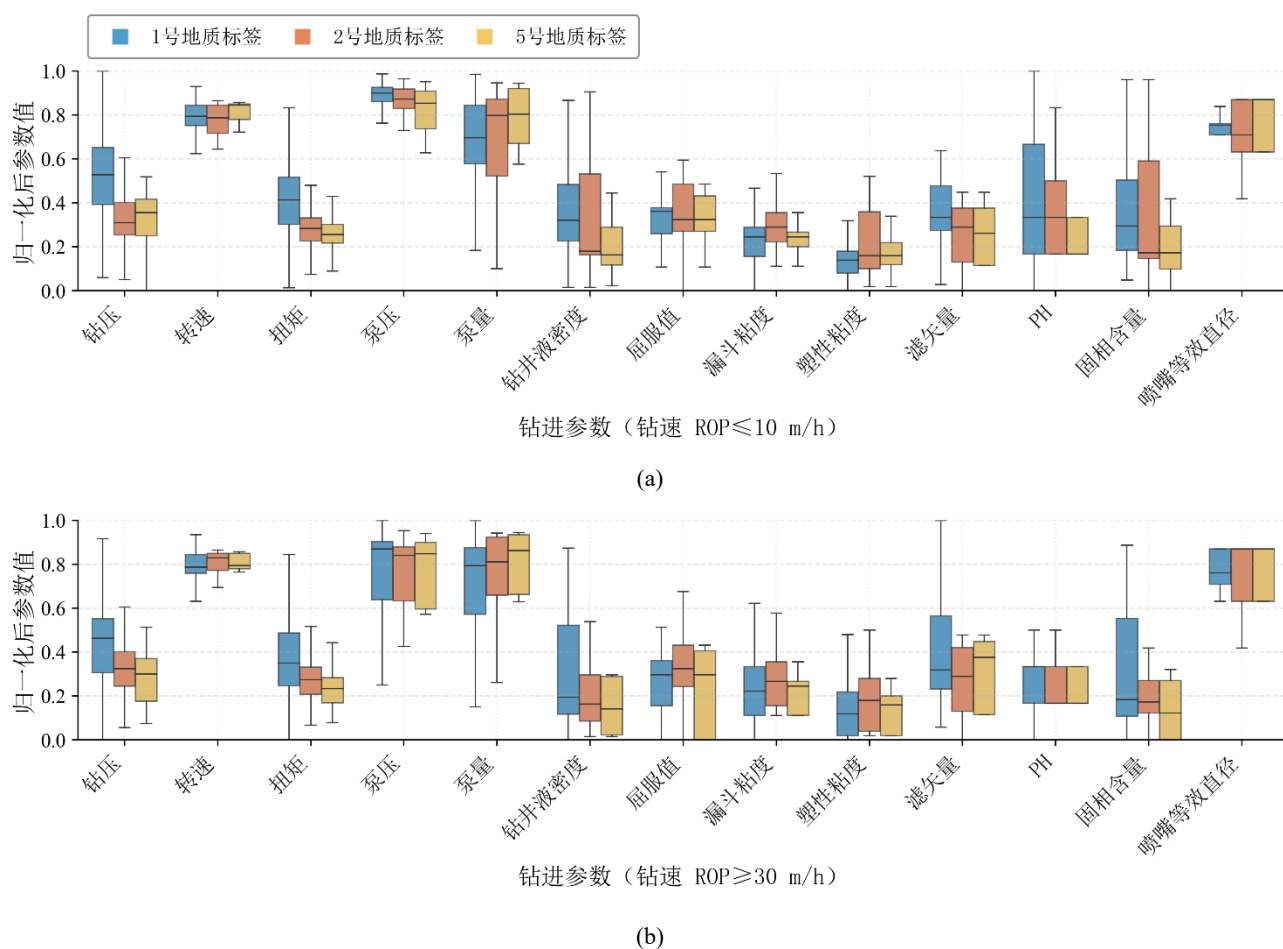


图 9 相同钻速条件下不同地质标签钻进参数图谱

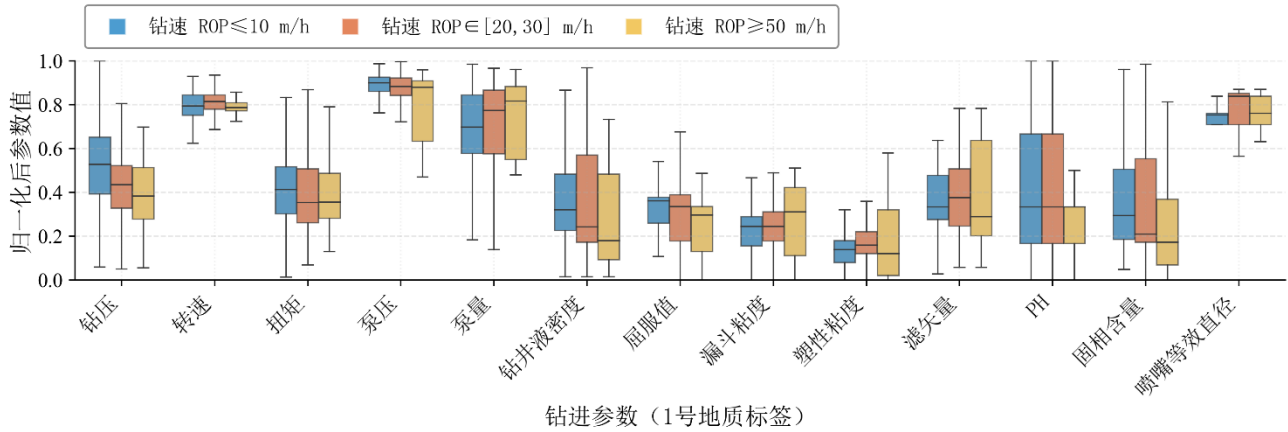
(a: 钻速 $\text{ROP} \leq 10 \text{ m/h}$ 时参数图谱; b: 钻速 $\text{ROP} \geq 30 \text{ m/h}$ 时参数图谱)

Fig. 9 The drilling parameters atlas under the same ROP conditions and different geological labels

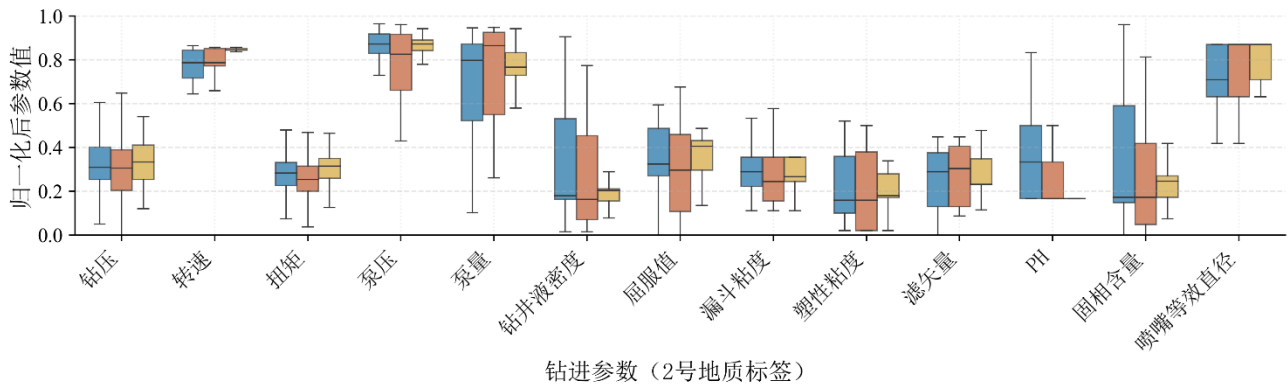
(a: Parameter atlas when the ROP ≤ 10 m/h; b: Parameter atlas when the ROP ≥ 30 m/h)

除对比不同地质标签的钻进特征外，钻进参数图谱还能在相同地质标签条件下给出不同钻速的典型变化特征，如图 10 所示分别针对 1 号、2 号和 5 号地质标签，给出了在低钻速（ROP ≤ 10 m/h）、中钻速（ROP $\in [20, 30]$ m/h）和高钻速（ROP > 30 m/h）条件下的钻进参数变化趋势。

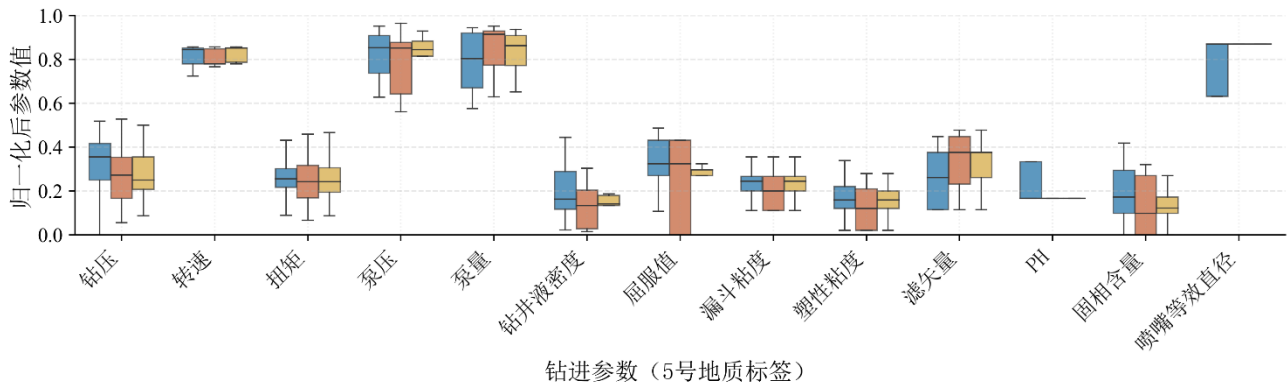
就 1 号地质标签而言，如图 10a 所示，在合理取值范围上，降低钻压、PH 和固相含量能够有效提高钻速。从最佳参数取值上看，在类似的取值范围内更小的钻压、扭矩、钻井液密度、钻井液屈服值、塑性粘度、滤失量、固相含量和喷嘴等效直径能有效提高钻速。对应增大泵量和漏斗粘度也是 1 号标签可采用的提高钻速的措施。类似的，如图 10b、c 所示，控制和降低泵量、钻井液密度和固相含量，也是针对 2 号和 5 号地质标签提高钻速的有效措施和手段。



(a)



(b)



(c)

图 10 相同地质标签条件下不同钻速钻进参数图谱对比

(a/b/c: 1/2/5 号地质标签不同钻速范围内的钻进参数图谱)

Fig. 10 Comparison of drilling parameters atlas with the same geological labels and different ROP

(a/b/c: Drilling parameter atlas with different ROP of geological labels NO.1/2/5)

4 基于地质标签的钻进参数优化

4.1 基于图谱的钻进参数调整策略

如图 9、图 10 所示, 不同地质标签、不同钻速会引起整个钻进参数体系呈现出不同的取值分布。据此钻进参数图谱可视为在指定地质标签条件下, 为获取指定钻速的钻进参数调整指南。如图 11 所示, 以 1 号地质标签, 钻进速度选定为 $[30,40]$ m/h 区间绘制钻进参数图谱, 同时可获取该条件下的最优推荐取值线。

为便于观察调整方案, 选取 1 号地质标签中钻速 33.9m/h (位于取值区间内)、17.2m/h 和 5.9m/h (小于取值区间) 的参数为例, 将钻进参数取值连线也绘制于参数图谱中。由图可见, 对于位于钻速区间的取值点, 33.9m/h 钻速所代表的钻进参数曲线仅扭矩和塑性粘度两个参数位于合理范围以外, 其余参数基本都位于最佳取值线附近。若以匹配参数数量来计算曲线吻合度, 13 个钻进参数有 11 个取值符合, 其吻合度可计算为 84.6%。需要补充说明的是, 本文所建立的参数图谱和最佳取值是基于统计规律, 故存在钻速取值范围内部分钻进参数值出现偏差的可能, 但出现偏差的参数个数和偏差值大小均不会过大。

对比而言, 当钻速值明显小于指定区间时, 其钻进参数连线则会出现明显的偏离。如图 11 所示, 钻速 17.2m/h 的参数曲线对比, 仅扭矩、泵量和钻井液密度与最佳取值匹配, 钻压和固相含量略偏离最佳值但仍然位于合理范围内, 转速、滤失量、PH 值和喷嘴等效直径已偏离至合理范围边缘, 屈服值、漏斗粘度和塑性粘度取值都明显偏离合理范围。对于钻速更低的 5.9m/h 参数曲线, 只有钻压和扭矩匹配最佳取值, 在合理范围内的钻进参数也只有转速和 PH 值, 其他所有参数均已偏离出合理范围。若以合理范围内的参数数量计算匹配吻合度, 17.2m/h 和 5.9m/h 钻进参数曲线的匹配吻合度分别为 69.2% (9/13) 和 30.8% (4/13), 匹配度明显低于符合范围内的 33.9m/h 钻进参数曲线。若以匹配最佳值的参数个数计算匹配度, 则 17.2m/h 和 5.9m/h 钻进参数曲线的匹配度将进一步降至 23.1% (3/13) 和 15.4% (2/13)。

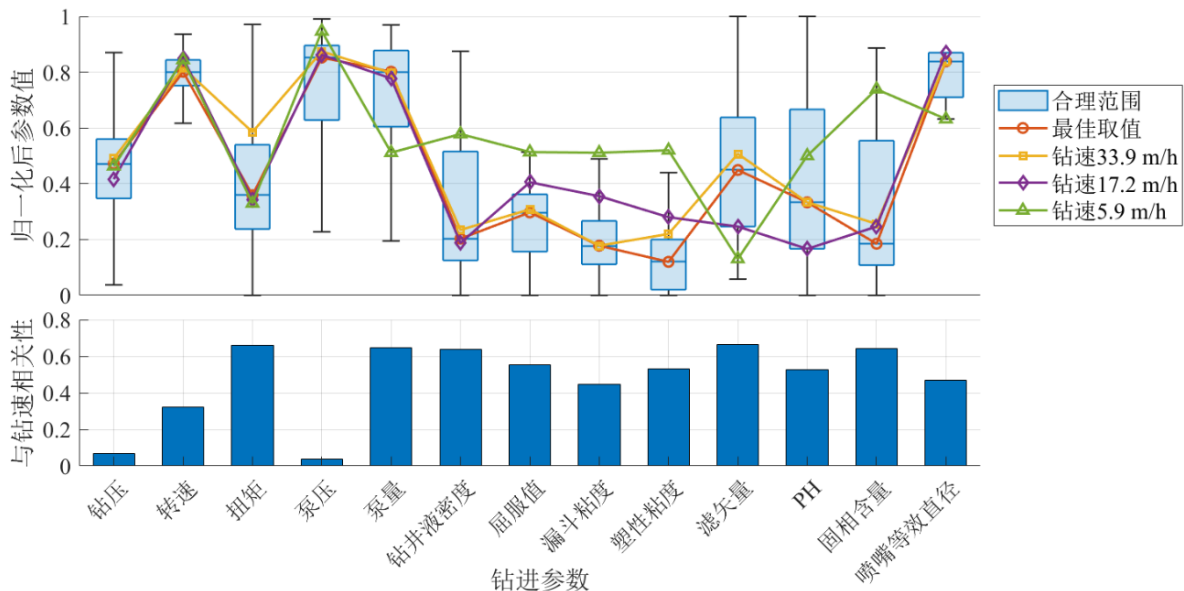


图 11 基于图谱的钻进参数优化调整示例

Fig. 11 Example of drilling parameter optimization based on the atlas

分析不同钻速参数曲线偏离的规律, 低于目标区域的钻进参数曲线呈现出类似的偏离趋势。纵观

17.2m/h 和 5.9m/h 两条钻进参数曲线, 统计所有偏离合理范围内的钻进参数取值, 可见在屈服值、漏斗粘度、塑性粘度、滤失量和固相含量几个参数上均呈现出明显偏离最佳值的趋势, 且钻速偏离目标范围越大, 钻进参数值偏离最佳值越远。进一步的, 当钻速距离目标区间更远后, 原本合理范围内的钻进参数也出现了明显的偏离, 如 5.9m/h 钻速曲线中的泵压、泵量和钻井液密度参数。

据此, 在同样的地质标签集合中, 在已知指定钻速区间的钻进参数图谱的条件下, 可根据当前钻速所绘制的钻进参数曲线的偏离程度进行调整。如图 11 所示, 对于钻速 17.2m/h 的工况, 提高钻速的策略可制定为降低屈服值、漏斗粘度和塑性粘度, 同时提升滤失量和 PH 值; 而对于钻速 5.9 m/h 的工况, 在钻速 17.2m/h 的提速策略上, 可进一步补充降低泵压、降低钻井液密度、降低固相含量和提高泵量予以实现。

同时, 在策略的制订过程中, 可根据控制参数与钻速的相关性, 优先选择与钻速相关性高的参数予以调整。结合当前地质标签中各钻进参数与钻速相关性的计算, 图 11 所示的钻速 17.2m/h 与 5.9m/h 的工况中偏离参数集中于钻井液相关性能参数, 对应的各相关性结果均接近或达到中高等级, 除漏斗粘度外均超过 0.53。综上, 从与钻速相关性的角度上对钻进参数的分析结论也与前述钻进参数图谱的分析吻合。

4.2 结合相关性的参数图谱钻速预测算法

前文基于指定地质标签与指定钻速区间绘制的钻进参数图谱, 可在已知当前钻速条件下对钻速优化的方案给出定性的控制策略。在定量分析方面, 当已知钻进参数值需要评估潜在的钻速区间时 (如工程设计阶段仅给出推荐参数取值范围, 无法给出钻速), 可通过对比设计钻进参数与已知参数图谱的合理范围, 评估各参数与既有参数图谱的匹配概率, 并结合不同参数与钻速的相关性进行加权, 即可获得设计钻进参数组合的匹配既有参数图谱钻速区间的概率。当存在多个钻速区间的参数图谱时, 可分别计算各区间的匹配概率, 其中最大的计算概率即为当前设计钻进参数组合的钻速区间预估概率。具体计算流程如下:

假设已知固定地质标签、固定钻速区间的参数图谱中含 m 个钻进参数, 则在设计过程中则需首先确定这 m 个同类钻进参数的取值, 并依次计算各参数与既有参数图谱的匹配概率 $p_i (i \in [1, m])$, 同时计算各参数的权重 w_i , 则当前参数组合落于当前钻速区间的总概率 P 可计算为

$$P = \sum_{i=1}^m p_i w_i \quad (5)$$

式中: P —当前参数组合落于当前钻速区间的总概率; p_i —第 i 个参数与既有参数图谱的匹配概率; w_i —第 i 个参数的权重; m —钻进参数数量, 个。

对于指定参数的匹配概率 p_i , 以该参数与既有参数图谱的分布范围进行计算, 如图 12 左所示, 以指定参数值落入参数图谱中箱型图的对应区间来赋值对应的概率值 p_i , 赋值核心理念在于对比落入区间大小, 区间越小, 说明数据在该区间越密集, 输入值落在此处越典型, 故得分越高。具体赋值规则为:

- 当指定参数值 y 位于既定图谱范围以外时 ($y > y_{75} + IQR$ 或 $y < y_{25} - IQR$, $IQR = y_{75} - y_{25}$) $p_i = 0$;
- 当指定参数值 y 位于既定图谱范围以内, 合理范围以外时 ($y \in [y_{25} - IQR, y_{25}]$ 或 $y \in [y_{75}, y_{75} + IQR]$), 对比上下区间的范围大小予以赋值, 落入较大的范围时赋值 $p_i = 0.25$, 落入较小的范围时赋值 $p_i = 0.5$;
- 当指定参数值 y 位于合理范围以内时, ($y \in [y_{25}, y_{75}]$), 同样对比上下区间的范围大小予以赋值, 落入较大的范围时赋值 $p_i = 0.75$, 落入较小的范围时赋值 $p_i = 1$ 。

对于指定参数的权重 w_i , 以该参数在当前地质标签分类中与钻速的相关性加权计算获得。令该参数与钻速的相关性为 c_i , 则可计算该权重 w_i 为

$$w_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^m c_i} \quad (6)$$

式中: w_i —第 i 个参数的权重; c_i —第 i 个参数与钻速的相关性; m —钻进参数数量, 个。

结合式 5 至式 6 的计算, 以 1 号地质标签为例, 选择四组钻速范围 (0,10], (10,20], (20,30], (30,40], 分别筛选建立对应的钻进参数图谱。基于相同地质标签选择钻速分别为 6.3、15.4、25.6 和 36.4 m/h 的四组不同工况, 将其各自钻进参数导出对应四组已知图谱计算各自对应概率。计算结果如图 12 右所示, 可见不同

钻进参数所导致的工况在预判钻速区间概率时均得到了正确的判定，均以超过 0.7 的概率落在了正确的钻速区间。

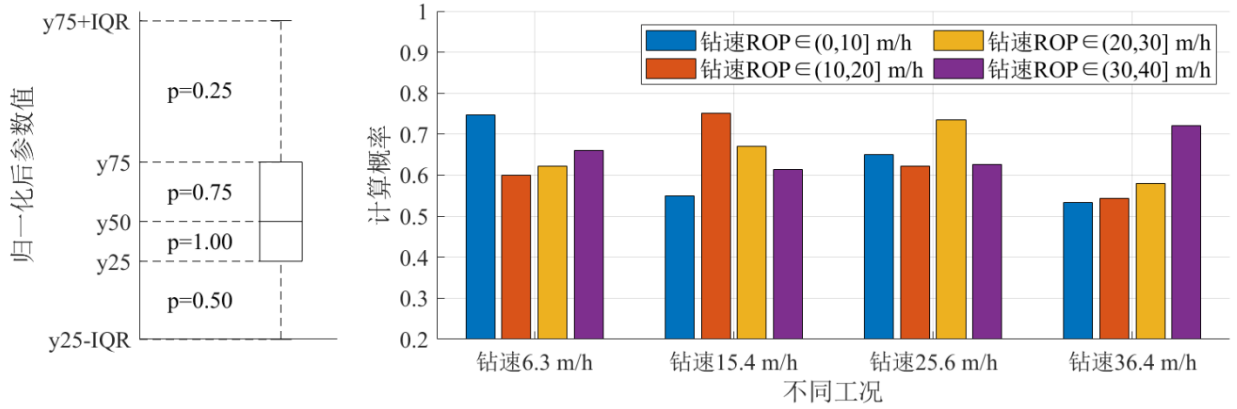


图 12 不同工况下钻速预测概率计算

(左：单参数概率赋值示意；右：1 号地质标签不同工况下钻速概率区间预测)

Fig. 12 Prediction probability calculation of the ROP with different conditions

(Left: Schematic diagram of probability assignment for a single parameter; Right: Probability intervals prediction of the ROP with different conditions for geological label No. 1)

基于概率和统计的钻速参数图谱与钻速预测方式具有较高的灵活性与自适应性。当指定区域的作业连续进行，相关数据集不断获得补充的条件下，指定地质标签的数据集同时会不断扩充，进而引起指定钻速范围筛选出的钻进参数图谱自适应发生改变。同时，基于图谱范围赋值的参数概率将随图谱进一步发生变化。同时，随着数据集的不断扩充，相同参数与钻速的相关性也将发生变化。据此，随着钻进作业的实时进行，“分析数据集→参数图谱→赋值概率→计算权重”全链条均将实现实时扩充与修订，进而保持了较高的灵活性。

4.3 结合地质标签的参数图谱分析流程

综上所述，本文提出的结合地质标签的钻进参数图谱建立与应用流程如图 13 所示，从建立和应用两个方向阐述其完整的分析流程如下：

就建立过程而言，首先需要采集指定区域内尽可能多的地质参数数据及其匹配对应的钻进参数数据；其次通过包括但不限于因子分析等手段消除地质参数数据间的相关性后，以互不相关的地质参数（或因子）建立地质标签；第三，结合建立的地质标签，将匹配的历史钻井数据按标签分类（如图 13 所示 $G1 \setminus G2 \setminus \dots$ ），同时在每一类中再按照钻速区间分类（如图 13 所示 $R1 \setminus R2 \setminus \dots$ ）；第四，将指定地质标签与钻速区间的数据独立集合选出，针对其不同的钻进参数即可完成独立的钻进参数图谱（如图 13 所示 $G_n R_m$ ，代表第 n 类地质标签中的第 m 类钻速范围的钻进参数图谱）；最后，将所有地质标签子集及其对应的所有钻速区间筛选出的钻进参数图谱汇总，即可获得整个区域的钻进参数图谱集合 A 为

$$A = \begin{bmatrix} G1R1 & G2R1 & \dots & 1 \\ G1R2 & G2R2 & \dots & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G1Rm & G2Rm & \dots & n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： A —钻进参数图谱集合； G_n —第 n 类地质标签； R_m —第 m 类钻速范围的钻进参数图谱。

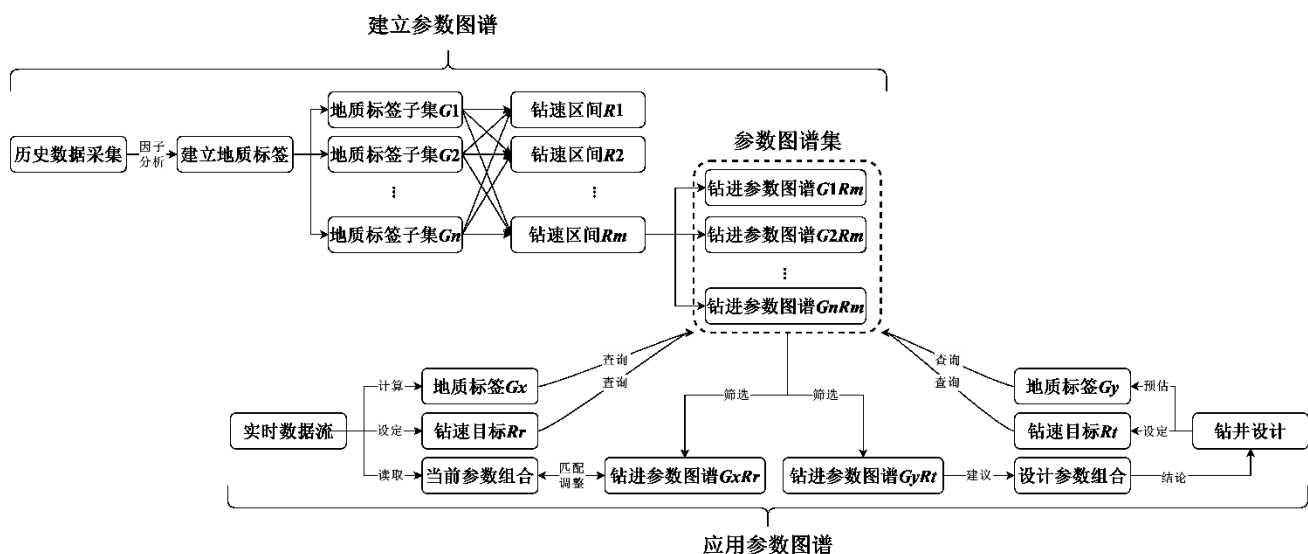


图 13 结合地质标签的参数图谱建立-使用流程

Fig. 13 Establishment and application workflow of geological label-parameter spectrum framework

针对参数图谱的应用，结合需求可划分为针对实时数据流的调整与针对待作业井的设计两个方向。如图 13 所示，针对实时数据流的调整，在接入实时数据流后，根据实际采集数据，首先判定计算当前井眼的地质标签 G_x ，设定当前井眼的钻速目标 R_r ，同时读取当前钻进参数组合曲线如图 11 所示；其次，根据当前地质标签与钻速目标在钻进参数图谱中筛选出最适合的图谱 $G_x R_r$ ；第三，将当前钻进参数曲线与筛选出的参数图谱进行比对即可获得针对当前井眼的钻速调整策略。针对钻井设计而言，与实时数据流调整类似，通过预估当前设计井眼的地质标签 G_y 与目标钻速 R_t ，同样需要从既有钻进参数图谱中筛选出最适合的图谱 $G_y R_t$ ，结合该图谱即可给出最适合的钻进参数组合。

若在特定条件下需要控制钻进参数（如环境或地层因素），则可根据设定的钻机参数从同类地质标签 G_y 的多幅图谱中计算钻进参数对应的钻速概率（式 5），进而实现对设计钻进参数组合的初步钻速预估。需要注意的是，在钻速预估的过程中，本文选择的 10m/h 的钻速预估刻度是由数据量所控制的，为保证参数图谱预测的准确性，同一类图谱需要保持相当的样本数量，故钻速刻度区间也会随样本数量的变化而发生变化。理论上，当样本数量足够多时，对钻速的预测刻度也可进一步缩小。就样本数量与预测精度和钻速区间的大小之间的关系而言，本团队将在后续的相关研究中进一步进行补充。

5 结论

结合源于南海某区域的十余口钻井数据，本文提出并建立了一套通过建立地质标签，实现对地层特征的量化分类；并据此构建了可用于参数优化与钻速预测的图谱模型。主要结论如下：

（1）基于因子分析的地质标签可有效表征地层特征。通过因子分析将六种互相高相关的地质参数降维为三个互不相关的公共因子（井深压力因子、地震波速因子、岩性因子），并据此将本区域所有地层划分为有明确物理意义的 12 大类，实现了地层类型的精细化区分；

（2）基于地质标签可筛选建立指定钻速范围的钻进参数图谱，明确了各参数的合理取值区间与最佳值。通过对比不同地质标签的参数图谱，可明确不同目标地层的适应参数取值范围；通过对比相同地质标签不同钻速的参数图谱，可更有针对性的指定提高钻速的参数组合；

（3）地质标签-参数图谱体系具备参数优化与钻速预测的双重功能。在已知地质标签和当前参数的情况下，可通过对比图谱偏离程度制定具体的参数调整策略；在工程设计阶段，则可基于参数与图谱的匹配概率，预测钻速区间，实测验证表明预测正确概率超过 0.7。同时，随着钻井数据的持续积累，地质标签的分

类、参数图谱的分布以及相关性权重均可动态更新，使方法具备良好的现场适用性与持续优化能力。

致谢

本论文受到的资助项目包括：广东省珠海市产学研合作项目《一种数字化工程勘察钻探装备的研发及其产业化》（编号：2320004002792）；中海石油（中国）有限公司项目“南海西部油田上产2000万方钻完井关键技术研究”子课题“乐东10区超高温高压井综合提速技术研究”（编号：CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ05ZJ）。感谢成都理工大学朱海燕教授，中海油湛江分公司张超高级工程师提供基础数据。

参考文献

- 刘书杰, 吴怡, 谢仁军, 等, 2021. 深水深层井钻井关键技术发展与展望. 石油钻采工艺, 43(2):139-145. doi: /10.13639/j.odpt.2021.02.002.
- Liu, S.J., W, Y., XIE, R.J., et al., 2021. Development and Prospect of the Key Technologies for the Drilling of Deep Wells in Deep Water. *Oil Drilling & Production Technology*, 43(2):139-145. doi: /10.13639/j.odpt. 2021.02.002 (in Chinese with English abstract).
- 宋先知, 裴志君, 王潘涛, 等, 2022. 基于支持向量机回归的机械钻速智能预测. 新疆石油天然气, 18(1):14-20.
- Song, X.Z., PEI, Z.J., WANG, P., et al., 2022. Intelligent Prediction for Rate of Penetration Based on Support VectorMachine Regression. *Xinjiang Oil & Gas*, 18(1):14-20 (in Chinese with English abstract).
- Young, J.F.S., 1969. Computerized drilling control. *Journal of Petroleum Technology*, 21(4):483-496. doi: / 10.2118/2241-PA.
- Bourgoyne, J.A.T., Young, J.F.S., 1974. A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 14(04):371-384. doi: /10.2118/4238-PA.
- Wiktorski, E., Kuznetsov, A., Sui, D., 2017. ROP Optimization and Modeling in Directional Drilling Process. *SPE*, 2017.
- Etesami, D. G., Shirangi, M., Zhang, W.J., 2021. A Semiempirical Model for Rate of Penetration with Application to An Offshore Gas Field. *SPE Drilling & Completion*, 36(01):29-46. doi: /10.2118/202481-PA.
- Ren, C., Huang, W., Gao, D., 2023. Predicting Rate of Penetration of Horizontal Drilling by Combining Physical Model with Machine Learning Method in the China Jimusar oil field. *SPE Journal*, 28(06):2713-2736. doi: /10. 2118/212294-PA.
- 闫炎, 韩礼红, 刘永红, 等, 2023. 全尺寸PDC钻头旋转冲击破岩过程数值模拟. 石油机械, 51(6):36-42. doi: /10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2023.06.005.
- Yan, Y., Han, L.H., Liu, Y.H., et al., 2023. Numerical Simulation of Rotary Impact Rock-Breaking Process of a Full-Size Drill Bit. *China Petroleum Machinery*, 51(6):36-42. doi: /10.16082/j.cnki.issn.1001-4578. 2023.06.005. (in Chinese with English abstract).
- 李根生, 穆总结, 田守增, 等, 2024. 冲击破岩钻井提速技术研究现状与发展建议. 新疆石油天然气, 2024, 20(1):1-12. doi: /10.12388/j.issn.1673-2677.2024.01.001.
- Li, G.S., Mu, Z.J., Tian S.C., et al., 2024. Research Status and Development Proposal of ROP Improvement Technology with Percussion Rock-Breaking Method. *Xinjiang Oil & Gas*, 20(1):1-12. doi: /10.12388/j.issn.1673-2677.2024.01.001(in Chinese with English abstract).
- 吴泽兵, 袁若飞, 张文溪, 等, 2024. PDC混合布齿钻头破碎非均质花岗岩数值模拟. 天然气工业, 44(5):105-117. doi: /10.3787/j.issn.1000-0976.2024.05.009.
- WU, Z.B., Yuan, R.F., Zhang, W.X., et al., 2024. Numerical Simulation of Breaking Heterogeneous Granite with PDC Mixed-tooth Bits. *Natural Gas Industry*, 44(5): 105-117. doi: /10.3787/j.issn.1000-0976.2024.05.009. (in Chinese with English abstract).
- 曹继飞, 邹德永, 李成, 等, 2024. 基于仿真的复合冲击破岩流固热耦合场分析. 石油机械, 52(8):61-69. doi: /10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.08.008.
- Cao, J.f., Zou, D.Y., Li, C., et al., 2024. Analysis on Fluid-Solid-Thermal Coupling Field in Rock Breaking under

Composite Impact Loads Based on Simulation Model. *China Petroleum Machinery*, 52 (8):61-69. doi: /10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.08.008. (in Chinese with English abstract).

鞠玮, 肖宇航, 田永净, 等, 2025. 深部煤层气储层地质力学研究与进展. 地球科学, doi: /10.3799/dqkx.2025.294.

Ju, W., Xiao, Y.H., Tian, Y.J., et al., 2025. Study and progress of reservoir geomechanics within deep coalbed methane. *Earth Science*. doi: /10.3799/dqkx.2025.294. (in Chinese with English abstract).

刘泽栋, 吴孔友, 汪必峰, 等. 2026. 富满油田F₁₇走滑断裂带碳酸盐岩储层天然裂缝地质力学特征及开发意义. 地球科学. doi: /10.3799/dqkx.2026. 016.

Liu, Z.D., Wu, L.Y., Tian, Y.J., et al., 2026. Geomechanical Characteristics And Development Significance Of Natural Fractures In Carbonate Reservoirs Of The F₁₇ Strike-Slip Fault Zone, Fuman Oilfield. *Earth Science*. doi: /10.3799/dqkx.2026. 016. (in Chinese with English abstract).

作者贡献度说明:

李谦: 改善地质标签及钻进参数图谱的分析框架, 完成了核心代码编写、实验数据预处理、模型训练与结果分析, 并撰写了论文初稿。

李俊萍: 研究并建立了地质标签及钻进参数图谱的分析框架与流程, 参与研究方案的论证与优化, 对论文的核心学术观点、模型验证方法及结论部分进行了关键性修改与审定, 负责研究项目的整体协调。

刘绪勇: 参与了研究初期数据特征的讨论与分析方法的设计, 对钻井图谱指导钻速优化的策略提出了建设性意见, 协助完成了部分文献调研与数据分析工作。

邓赫宏: 负责实验数据的收集、整理与初步清洗, 参与了论文的数据可视化工作, 协助完成了论文中部分图表的绘制与格式调整。