

罗东地区沙四上亚段砂砾岩体有利储层预测

温睿¹, 聂聪¹, 李磊¹, 王彪¹, 李智超², 吴若滨²

¹中国石化股份胜利油田分公司河口采油厂, 山东 东营

²中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京

收稿日期: 2025年10月10日; 录用日期: 2025年11月4日; 发布日期: 2025年11月13日

摘要

本文根据钻井、测井、录井、地震等资料, 对罗东地区沙四上亚段砂砾岩体储层展布规律开展研究, 明确了砂砾岩扇体发育范围, 应用地质统计学反演技术划分了砂砾岩扇体期次, 基于相控机器学习地震属性融合储层预测方法对有利储层进行了预测, 明确了有利储层的分布范围, 为罗东地区砂砾岩扇体的进一步勘探提供了理论指导。

关键词

砂砾岩体, 地质统计学反演, 地震属性融合储层预测

Prediction of Favorable Reservoirs in the Glutenite Bodies of the Upper Es4 Submember in Luodong Area

Rui Wen¹, Cong Nie¹, Lei Li¹, Biao Wang¹, Zhichao Li², Ruobin Wu²

¹Hekou Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying Shandong

²National Key Laboratory of Oil and Gas engineering, China University of Petroleum, Beijing

Received: October 10, 2025; accepted: November 4, 2025; published: November 13, 2025

Abstract

Based on data from drilling, logging, mud logging, and seismic surveys, this study investigates the distribution patterns of glutenite reservoirs in the upper Es4 submember of the Luodong area. The

文章引用: 温睿, 聂聪, 李磊, 王彪, 李智超, 吴若滨. 罗东地区沙四上亚段砂砾岩体有利储层预测[J]. 自然科学, 2025, 13(6): 1256-1263. DOI: 10.12677/ojns.2025.136131

developmental extent of glutenite bodies has been delineated, and the stages of these fans have been classified using geostatistical inversion technology. By employing a facies-controlled machine learning seismic attribute fusion method for reservoir prediction, favorable reservoirs have been identified, and their distribution range has been clarified. This research provides theoretical guidance for further exploration of glutenite bodies in the Luodong area.

Keywords

Glutenite Body, Geostatistical Inversion Technology, Seismic Attribute Fusion Method for Reservoir Prediction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

罗东地区位于山东省东营市河口区汀罗乡境内，构造上位于沾化凹陷渤南洼陷缓坡带，西部为罗家鼻状构造，北部为渤南洼陷，东部为孤岛凸起，构造上洼陷形态呈北北东向，由陡坡带、洼陷带和缓坡带三部分组成，东南方向构造较缓，西北方向构造较陡，盆地形态具有“北断南超、东西双断”的特点。研究区北部渤南洼陷是主要的生油洼陷，油源充足，成藏条件十分有利。研究区内发育以沙三段、沙四段为主的规模巨大的砂砾岩体，其中蕴藏有丰富的稠油资源。目前沙四上亚段砂砾岩扇体已上报预测储量 2907 万吨，具有较大的勘探潜力，但是受多物源体系影响，沉积类型多样，岩相复杂，加之成藏规律不清，勘探程度及储量动用程度相对较低。

2. 沉积特征

通过对研究区内 19 口取心井的岩心详细观察和显微薄片分析，结合 162 口井的测井和录井数据，综合考虑生物、岩性和结构等多种沉积标志，同时借鉴前人研究，确定了该研究区的沉积相类型及其识别特征。罗家东部地区主要发育扇三角洲和湖泊两个沉积体系，进一步细分为扇三角洲前缘、扇三角洲平原、前三角洲、滨浅湖和深湖 - 半深湖五个亚相类型，扇三角洲平原储层相对致密，扇三角洲前缘粒度更细，储层物性及含油性也更好[1]。研究区北部以深湖 - 半深湖亚相的厚层泥膏岩为主，南部以滨浅湖和扇三角洲前缘沉积为主，南部的陈家庄凸起和东部的孤岛凸起为罗家地区主要提供了物质来源。

罗东地区沙四上亚段发育多种岩相，根据实际钻井资料勾绘了岩相展布图(图 1)，可以看出砂砾岩扇体位于南部和东南部，扇体前端发育混积岩相带，再往北发育灰岩与膏岩相带。南部砂砾岩扇体沉积类型为扇三角洲沉积，主体发育扇三角洲平原亚相，该亚相主要为来自南侧陈家庄凸起的砾石，主要位于罗 9 井、罗 10 井等区域，岩性主要为中 - 细砾岩，砾石成分复杂，沉积速率快，厚度大，中间夹杂一些相对较细的粗 - 中砂岩，见水平层理。基于岩心观察和沉积构造特征可以将扇三角洲平原亚相进一步分为：分流河道微相、漫流微相两个主要的微相类型，分流河道微相的沉积特征与河流体系的河床沉积基本相同[2]。但是在扇三角洲中，由于其搬运距离近，坡度较陡，河床沉积物主要是滞留砾石，砂质相对较少，其中砾石分选变化较大，并且夹杂一些堤岸垮塌变形构造，纵向上往往呈现间断性的韵律，以正韵律为主[3]。漫流沉积微相位于分流河道的侧方，由于洪水作用溢出河道形成具有块状层理、中小型交错层理、小范围的平行层理等沉积构造，岩石类型主要是砂岩或含砾砂岩沉积。平面呈小规模朵状，剖面呈砂岩透镜体状。扇体边部发育扇三角洲前缘亚相，扇三角洲前缘亚相主要位于湖盆边缘，粒度相对

较粗，同时显现出重力流和牵引流的构造特征，在研究区的东部和南部，紧邻陈家庄凸起的缓坡带尤为明显。基于岩性和构造特征进一步细分为水下分流河道微相和河口砂坝微相。水下分流河道主要由砾岩、含砾砂岩和砂岩组成，分选性较差。河口砂坝以细砂岩为主，分选性和含油性均较好。

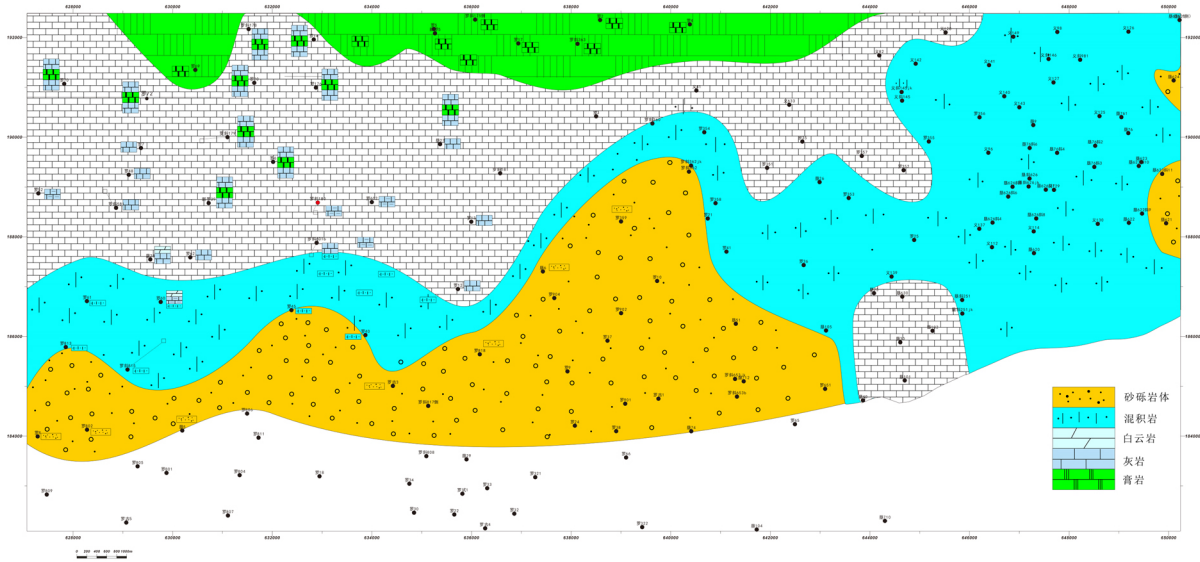


Figure 1. Lithofacies distribution map of the upper Es4 submember in the Luodong area
图 1. 罗东地区沙四上岩相展布图

3. 地震响应分析与砂砾岩扇体边界刻画

岩相组合	岩相接触图示	响应规律	实际数据	响应特征
灰岩薄层		稍强波峰响应		稍强波峰
灰岩-砂岩互层		顶界面出现一个强波峰，底界面表现为较弱的波谷		强波峰较弱波谷结合
灰岩-泥岩薄层		顶界面出现一个强波峰，底界面表现为紧随的波谷		强波峰较强波谷结合
砂岩-泥岩互层		顶界面出现强波峰，后续较弱波峰波谷交替		强波峰与波峰波谷交替
砾岩-砂岩接触		出现强波峰		强波峰
砾岩-泥岩互层		顶界面出现强波峰，后续较弱波峰波谷交替		强波峰与波峰波谷交替
灰岩-砂岩-砾岩-泥岩互层		顶界面出现较强波峰，后续波峰波谷交替出现，振幅响应较弱		较强波峰与弱波峰组合

Figure 2. Lithology-seismic response chart for the upper Es4 submember, Luodong area
图 2. 罗东地区沙四上亚段不同岩性地震响应图版

砂砾岩体不同的岩相组合，在地震上表现为不同的响应特征[4]，通过对罗东地区沙四上地震反射特征分析，构建了针对不同岩相组合和不同接触关系的地震响应规律模板(图 2)。根据模板可以看到，不同的岩相组合(如灰岩薄层、灰岩-砂岩互层、灰岩-泥岩薄层、砂岩-泥岩互层、砾岩-砂岩接触、砾岩-泥岩互层，以及复杂的灰岩-砂岩-砾岩-泥岩互层)在地震剖面中表现出不同的地震反射特征和响应

规律。例如：灰岩薄层的地震响应通常表现为稍强波峰响应。灰岩与砂岩互层的地震响应规律是顶界面出现一个强波峰，底界面表现为较弱的波谷。灰岩与泥岩互层则显示顶界面强波峰、底界面弱波谷的组合，表现在地震数据中为明显的波峰与波谷结合特征。砂岩与泥岩互层的地震反射特征为顶界面出现强波峰，随后是较弱的波谷。砾岩与砂岩接触的地震响应则以强波峰为主。砾岩与泥岩互层则在地震数据中表现为顶界面强波峰，随后较弱波谷的特征。复杂的灰岩-砂岩-砾岩-泥岩互层地震响应表现为顶界面对应的强波峰与底界面的弱波谷，随后较强波峰的连续响应(图2)。

通过在多条地震剖面中对这些地震响应规律的分析与特征对比，我们成功地识别出西区 and 东区扇体的边界，得到了罗东沙四上亚段砂砾岩扇体分布预测图(图3)。这一识别结果为后续优质储层的精细刻画奠定了基础，有助于更好地预测有利储层分布，为进一步的勘探和开发工作提供了可靠依据。

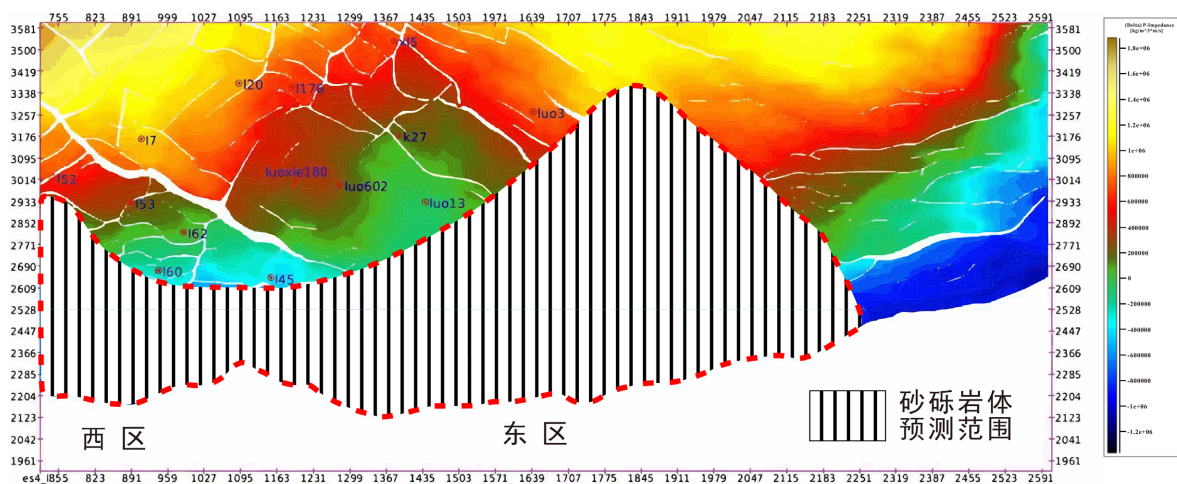


Figure 3. Prediction map for glutenite bodies distribution in the upper Es4 submember, Luodong area

图3. 罗东地区沙四上亚段砂砾岩体分布范围预测图

4. 地质统计学反演与扇体期次划分

地质统计学反演将井中测井数据与地震数据结合，生成空间上的岩性或速度模型。在砂砾岩扇体的期次划分中，反演模型可以用来确定砂砾岩分布区域和沉积厚度，从而识别不同期次的沉积事件。这种方法不仅可以识别不同的期次，还能给出期次的空间分布范围。

地质统计学反演方法的基本做法为：以已知条件井数据为基础，生成井间处的模型参数数据(波阻抗)，将波阻抗转化为反射系数并与地震子波褶积，褶积的结果即对应该点的合成地震记录，将该记录与实际地震道进行对比匹配，记录对比匹配最好的模型参数数据作为随机反演结果。这种随机反演方法极大地提高了反演的纵向分辨率，并且捕获了超出地震带宽的频率信息[5][6]。

其算法主要包括以下两个部分：① 序贯随机模拟过程；② 随机模拟结果优化过程。主要的实现思路如下：首先，通过随机模拟过程建立反演的随机路径。在确定随机路径之后，利用声波测井资料和密度测井数据合成该井点处的波阻抗曲线并计算其垂向变差函数，根据地震资料信息计算横向变差函数。然后，利用克里格插值获得待反演点的波阻抗信息，并提取该点的子波，即可合成模拟地震记录。最后，将正演的地震记录与当前位置已知的地震道作残差，多次重复上述模拟，选择符合精度要求的或者残差最小的结果。上述结果一旦被保留下来，该道波阻抗信息就会被认为是先验测井信息，而且可以作为模拟下一位置的波阻抗道。重复上述过程，直到覆盖整个工区，就完成了一次全局实现[7][8]。

我们对工区内多条连井剖面进行了地质统计学反演，以此为基础对扇体期次进行划分。首先从平面

上将工区划分为东、西两区，两区的扇体从纵向上均可划分为 3 个期次。如图 4 所示，西区扇体一期砂体为一套砂岩和粉砂岩层组，其下部以薄层泥岩为底，表明该阶段的沉积以细粒物质为主；二期砂体则由砂岩和砾岩组成，其下部以厚层泥岩为底，反映了沉积环境的变化，表明二期具有较高的能量条件，能够搬运较粗的砾岩物质。

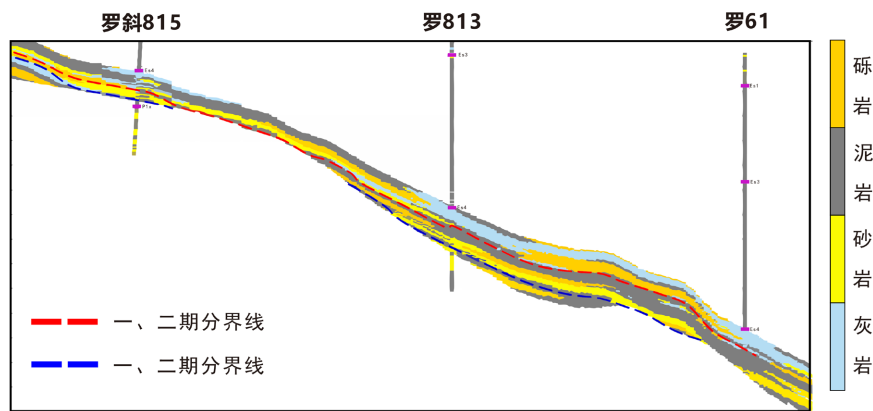


Figure 4. Geostatistical inversion section with stage division of glutenite bodies, western area
图 4. 西区扇体地质统计学反演剖面与期次划分图

东区扇体一期为一套中砾岩条带，底部以泥岩为基础，上覆砂岩，显示出典型的扇体沉积特征，泥岩底座和砾岩条带的组合反映了沉积环境的演化；二期则为一套以泥岩为底的中砾岩条带，进一步加强了砾岩的分布；三期为一套砾岩夹层，靠近扇体边缘的砾岩条带明显变薄，显示出近扇端地区沉积物供应减少、粒度逐渐变细的特征(图 5)。

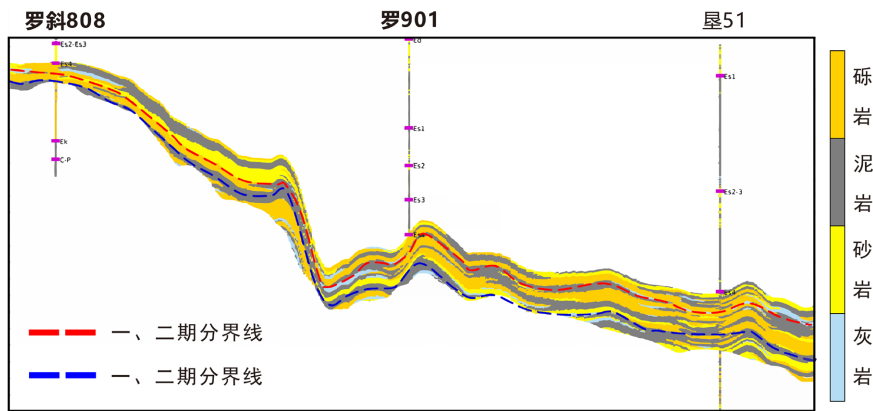


Figure 5. Geostatistical inversion section with stage division of glutenite bodies, eastern area
图 5. 东区扇体地质统计学反演剖面与期次划分图

根据地质统计学反演结果，我们绘制了研究区扇体期次的平面展布图(图 6)，可以看到，扇体一期西侧扇体展布范围较小，北部发育至 L61 井；东侧扇体展布范围较大，北部发育至 L354 北部，东部发育至 L651 西部；东侧与西侧砂体连通。砂砾岩扇体二期西侧扇体展布范围较小，北部发育至 L813、Lx815 北部；东侧扇体展布较大，北部发育至 L12、Lx362 附近，东部发育至 Lx653 井附近；东侧与西侧砂体不连通。砂砾岩扇体三期分布范围最小，仅在东部局部发育，北部发育至 L359 井附近，东部发育至 K51 井附近，南部发育至 L9 井附近。

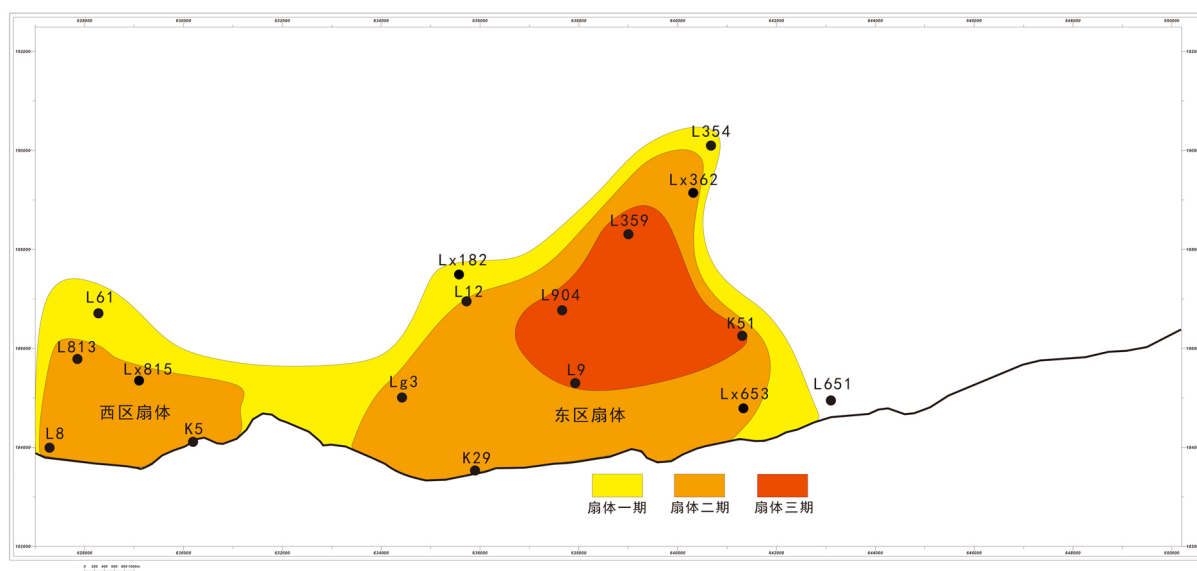


Figure 6. Planar division and distribution map of glutenite bodies stages

图 6. 砂砾岩扇体期次平面划分展布图

5. 地震属性融合方法预测砂砾岩体有利储层

本文应用基于相控机器学习的多属性融合储层预测技术对研究区砂砾岩体有利储层进行预测，该方法整合了相控原理与机器学习算法。先依据地质相控规律构建模型框架，这里主要是依据砂砾岩体中砾岩、砂岩、泥岩等不同岩相的地震反射及地震属性特征，筛选出对储层敏感的地震属性。运用基于神经网络的机器学习方法，对这些属性进行训练学习，挖掘其与储层参数的关系，进而融合多种属性，预测储层的厚度、物性等关键参数，有效降低预测的多解性，提高储层预测的精度与可靠性。

首先，利用地震资料计算并生成 20 余种不同类型三维地震属性体，为后续沿层地震属性切片优选提供数据基础；纵向上沿层位提取地震属性切片，并提取沙四上亚段层间属性，优选出砂砾岩体识别敏感属性。

在罗家东部沙四上亚段砂砾岩储层的地震属性分析中，不同属性类型在储层预测中发挥了重要作用，特别是在砂体厚度、横向分布和油水界面等方面的指示。通过分析振幅、频率、衰减、阻抗和波形特征等多种属性，为复杂沉积环境和地质构造下的储层识别提供了详细的地震响应依据[9]。根据分析得到本研究区域对以下属性较为敏感，能较好地刻画储层分布情况。① 均方根振幅属性：在罗家东部沙四上亚段的砂岩储层中，均方根振幅属性对于砂体厚度有良好的指示作用。它能够有效地表征砂体的厚度变化及其横向分布，对砂体边界的识别具有较高的灵敏度。② 反射强度属性：反射强度在复杂沉积环境下表现出对反射界面的出色表征，尤其在横向上能够指示岩性和油气层的变化。对于罗家东部的沙四上亚段砂岩储层，反射强度能够捕捉到储层岩性和含油性层的横向变化，是识别沉积界面的重要指标。③ 相对阻抗属性：相对阻抗能够增强波阻抗差异，使岩性变化更加明显[10]。在罗家东部的砂岩储层中，相对阻抗能够有效地显示出有利储层的分布情况，特别是对于不同岩性边界的识别具有重要作用。④ T 衰减属性：T 衰减在砂岩储层中能够有效放大油水之间的差异，降低围岩对砂体厚度变化的干扰。在高精度分析的情况下，它能帮助隔离油水界面，从而在含油区和含水区的划分中提供可靠的参考[11]。⑤ 瞬时频率属性：瞬时频率属性对储层中的油水变化非常敏感。在罗家东部的砂岩储层中，瞬时频率能够反映油水横向变化，指示油水界面边缘，使油水分布得到更清晰的定义[12]。⑥ 边缘增强属性：边缘增强能够

在复杂地质构造中放大油水差异，并降低围岩和砂体厚度变化的干扰。尤其是在高分辨率需求下，该属性对砂体边缘的识别效果显著，可以帮助更准确地描绘油水边界。⑦ 梯度幅度属性：梯度幅度属性用于放大砂体顶底间的高程差异，从而对储层厚度提供有效的控制和约束。此属性尤其适用于放大纵向高程差异，对砂体厚度的精准识别具有关键意义。⑧ 相位余弦属性：在复杂地质构造中，相位余弦属性能够显著降低围岩和砂体厚度变化的影响，有助于更好地识别砂体的几何形态细节，确保在高精度条件下的储层形态判别[13]。

通过属性筛选，发现砂砾岩体对均方根振幅、相对阻抗、瞬时频率以及边缘增强 4 种地震属性较为敏感，将上述 4 种砂砾岩体敏感地震属性进行融合，得到了沙四上亚段砂砾岩体有利储层预测结果(图 7)，图中颜色越接近红色，代表有利储层发育概率越大，这些区域的砂砾岩厚度较大，储层条件较好；颜色越接近蓝色，则表示砂砾岩储层发育的概率较低。分析结果表明，有利储层主要集中在东区扇体中部及南部 L359-L901 一带，这些区域具有相对优质的储层条件，有利于进一步勘探和开发。

将预测结果与实钻井进行对比验证，红色区域内预测储层有利的探井共计 12 口，其中 9 口井沙四上砂砾岩体钻遇油层超过 20 m，同时试采获得工业油流，预测准确率达 75%，说明此预测方法对于砂砾岩体勘探开发实践具有一定指导意义。

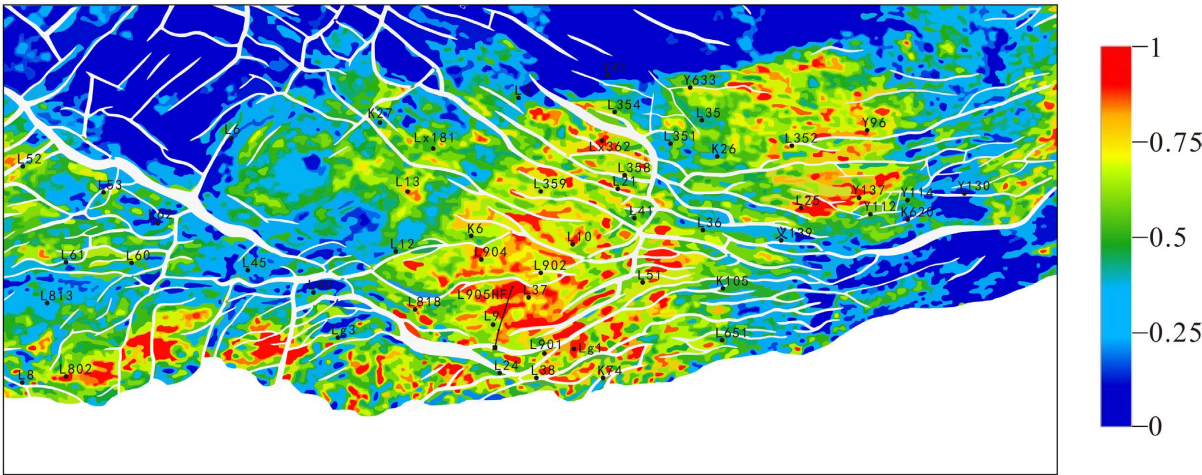


Figure 7. Prediction map of favorable sandy conglomerate reservoirs in the upper Es4 submember, Luodong area
图 7. 罗东地区沙四上亚段砂砾岩体有利储层预测图

6. 讨论与结论

本文基于不同岩性的地震响应特征，依托地质统计学反演，对罗家东部沙四上亚段砂砾岩扇体发育边界进行了刻画。根据地质统计学反演结果，通过井震结合，将砂砾岩扇体划分为 3 个期次，并且明确了不同期次扇体在平面上的展布范围。应用地震属性融合方法，对研究区砂砾岩扇体有利储层发育区进行了预测，预测结果表明，有利储层主要集中在东区扇体中部及南部 L359-L901 一带，这些区域具有相对优质的储层条件，有利于进一步勘探和开发。

本文将地质统计学反演及多地震属性融合技术作为储层预测的主要手段，预测结果具有不确定性，这种不确定性一方面来源于地震反演及地震属性本身所具有的多解性，另一方面，在实现多属性融合的过程中，不同属性的权重选择以及融合算法的不同都可能对最终预测结果带来不同的影响[14]，同时砂砾岩扇体储层本身所具有的非均质性也对预测造成了困难。本文预测结果与实际钻井吻合率达 75%，说明利用本文方法指导生产实践，能够保证较高的勘探成功率，对下一步勘探开发工作具有一定的借鉴意义。

进一步分析表明, L37 以南、L904 以东、L10 以西目前勘探程度较低, 预测储层有利, 是下一步勘探的有利区域。

参考文献

- [1] 曹辉兰, 华仁民, 纪友亮, 等. 扇三角洲砂砾岩储层沉积特征与储层物性的关系——以罗家油田沙四段砂砾岩体为例[J]. 高校地质学报, 2001, 7(2): 222-229.
- [2] 吕世从, 王少鹏, 张汶, 等. 石臼坨凸起南部陡坡带扇三角洲沉积特征研究[J]. 天然气与石油, 2024, 42(1): 54-62.
- [3] 莫博文, 陈仕甄, 秦玲, 等. 断陷湖盆扇三角洲沉积特征及砂体构型模式——以泌阳凹陷核一段I-II油组为例[J]. 断块油气田, 2025, 32(3): 381-388.
- [4] 孙超, 岳建华, 蔡来星, 等. 砂砾岩体跨频段地震岩石物理响应特征——以东营凹陷陡坡带为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1543-1558.
- [5] 高扬. 基于地质统计学的地震反演方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- [6] 贺斌, 晏昊. 基于地质统计学反演的薄煤层识别研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(z1): 336-342.
- [7] 刘灵, 徐乐意, 陈人杰, 等. 叠后地质统计学反演在 H 地区储层预测中的应用[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(3): 36-41.
- [8] 朱正平, 周自强, 潘仁芳, 等. 相控地质统计学去硅质反演方法在四川盆地高石梯-磨溪区块灯四段的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(2): 124-134.
- [9] 卢伟, 李国福. 相控多属性融合技术在贝西次凹储层预测中的应用[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 185-190.
- [10] 韩双. 地震多属性分析在徐西地区营城组砂体识别中的应用[J]. 世界地质, 2021, 40(3): 721-727.
- [11] 李莉, 王雅春, 彭朋, 等. 地震波衰减属性在储层含油气预测中的应用[J]. 能源与环保, 2022, 44(4): 121-125.
- [12] 田广, 赵岩. 几种常见的瞬时频率计算方法研究[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(4): 1553-1564.
- [13] 许玲, 姜宏章. 复杂断块油藏精细构造解释技术[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(9): 52-54.
- [14] 赵忠宇, 周小军. 基于多属性融合的断层破碎带地震表征方法[J]. 石化技术, 2024, 31(12): 229-231.