# 四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层控气非均质性三维表征

彭先[1]，欧成华[2a,2b*]，肖富润[2a]，王蓓[1]，郭培培[2a]，和宇博[2a]，彭仕轩[3]，刘俊延[2a]

1. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司勘探开发研究院，成都 610041；
2. 西南石油大学 a. 石油与天然气工程学院；b. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室，成都 610500；
3. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司，成都 610500

第一作者，E-mail：pengxian@petrochina.com.cn

* 通信作者，E-mail：chomm@163.com

2023-10-09 收稿；2024-03-22 修回；2024-03-28 接受

基金项目：四川科教联合基金重点项目(2024NSFSC1960)；油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD14049-004)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)02-0193-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230558

**摘　要：**膏岩层控气是重要的天然气富集成藏模式，现有膏岩层控气研究集中于实验测试与定性描述，缺乏对膏盐层分布的三维表征。为此，研发了膏盐层与气水层井震结合相控三维建模新技术，具体包括膏盐层测井解释及相控三维建模、膏盐层地震遗传反演三维建模、膏盐层井震结合三维建模、沉积微相控制的气水层三维建模及膏盐层与气水层三维融合建模 5 个关键技术环节，应用于分析四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层的控气性，建立了膏盐层与气水层井震结合相控三维模型，定量刻画了研究区内膏盐层的控气非均质性，实现了对膏盐层控气的三维可视化定量表征。结果表明：铁山坡飞仙关组膏盐层平面上除Ⅰ区和Ⅱ区中部局部范围外，其余大部分区域呈连续片状分布，纵向上具有多层、薄层、厚度强非均质分布等特征；呈现出封盖控气性、降储控气性和使气藏复杂化 3 类控气特征模式，显示了研究区膏盐层控气的强非均质性。研究成果为研究区天然气非均衡规模高效开发提供了可靠的模型基础与地质认识。

**关键词：**膏盐层控气非均质性；井震结合；相控建模；铁山坡飞仙关组；三维表征；四川盆地

膏盐层分布与天然气成烃、成储及成藏关系密切[1-3]。一方面，膏盐岩性软、致密，是构成油气运移通道与含油气圈闭顶、底板的主要岩石类型，膏盐层可为油气运移和聚集创造条件[4-6]；正是因为广泛分布的巨厚膏盐层的良好封盖，才产出了中东波斯湾盆地加瓦尔油田和北方气田[7-8]，中国鄂尔多斯盆地靖边气田[9-10]、四川盆地安岳气田[11-13]等世界级的大气田。另一方面，膏盐层中的石膏与盐岩在成烃、成储及成藏的高温、高压环境中易溶解、易流动，易于下渗或上溢至储层中，导致邻近储层的储渗性能大幅度降低，使得原有天然气聚集受到破坏[14]。由此可见，膏盐层的表征与刻画不仅有益于天然气成藏及勘探，对于天然气成储及开发同样意义重大[15-19]，而膏盐层的表征与刻画离不开地质建模技术的加成。地质建模技术自 20 世纪 70 年代提出以来，一直都是各类矿藏勘探开发的支撑技术之一，从一维单井分析、二维平面实现，发展到今天的三维立体模拟，相控三维建模已经成为地质建模的主体技术[20]。然而，相控三维建模技术主要应用于表征油气储层[21-22]，鲜少有针对膏盐层三维建模的研究成果报道。为此，研发出膏盐层与气水层井震结合相控三维建模技术，成功应用于铁山坡飞仙关组膏盐层控气非均质性的三维表征，所获成果对于类似地区的膏盐层控气性表征及评价不无裨益。

**著录信息：**彭先，欧成华，肖富润，等. 四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层控气非均质性三维表征 [J]. 地质科技通报，2025，44(2)：193-203.
PENG Xian, OU Chenghua, XIAO Furun, et al. Three-dimensional characterization of natural gas heterogeneity controlled by gypsum-salt layer in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 193-203.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

## 1　四川盆地铁山坡飞仙关组天然气藏膏盐层分布的典型特点

铁山坡地区(图 1a)下三叠统飞仙关组发育碳酸盐岩台缘及台内滩，是四川盆地近年来天然气勘探开发的重点领域[23-25]，目前满覆盖工区采集了三维地震资料(面积 25 m×25 m)，完钻了 4 口天然气开发井，录取了丰富的测录井资料，开采形势喜人。铁山坡飞仙关组天然气储层以台缘或台内滩环境的鲕状灰岩、白云岩和含灰白云岩为主；天然气储层上覆蒸发泻湖与下伏局限泻湖环境均发育多套膏盐层；部分台缘滩或台内滩环境的天然气储层中，还分布着因膏盐下渗形成的数量不等的膏盐薄层[26-29](图 1)。由此可见，非均质性是铁山坡飞仙关组天然气田膏盐层区别于国内外其他大型油气田膏盐层的显著特征。膏盐层分布的非均质性自然会造成膏盐层控气的非均质性，仅仅依靠实验测试与定性描述等手段[30-33]，难以阐明铁山坡飞仙关组膏盐层的空间分布及其控气性特征。

## 2　四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层与气水层井震结合相控三维建模

围绕铁山坡地区飞仙关组膏盐层的发育特点，结合测井高垂向分辨率和地震高横向分辨率的双高优势，利用三维空间中膏盐层与气水层分布的依存关系，在传统沉积微相控制的气水层三维建模技术基础上，通过增加膏盐层测井解释及相控三维建模、膏盐层地震遗传反演三维建模、膏盐层井震结合三维建模、膏盐层与气水层融合三维建模等 4 个关键技术环节，研发出了膏盐层与气水层井震结合相控三维建模新技术(图 2)。该技术涵盖 6 个具体的实施步骤：①开展测井解释处理，依据解释成果提取每口井的膏盐层厚度，建立单井膏盐层厚度数据集，利用序贯高斯模拟算法[34-36]，依靠沉积微相约束，进行膏盐层测井解释及相控三维建模，建立膏盐层测井相控三维模型；②利用深度域叠后地震数据，开展地震属性提取及优化，运用神经网络遗传算法[37-39]，进行膏盐层深度域地震遗传反演，在沉积微相的控制下，建立膏盐层地震三维模型；③依据气水层解释成果，开展沉积微相控制下的气水层三维建模，建立气水层三维模型；④以膏盐层测井相控三维模型为主变量，膏盐层地震三维模型为协同变量，利用协同克里金算法[34]进行膏盐层井震结合三维建模，建立膏盐层三维模型；⑤结合膏盐层三维模型与气水层三维模型，完成膏盐层与气水层融合三维模型的建立；⑥依靠对膏盐层与气水层融合三维模型的系统剖析，揭示膏盐层非均质分布特征，刻画膏盐层控气非均质

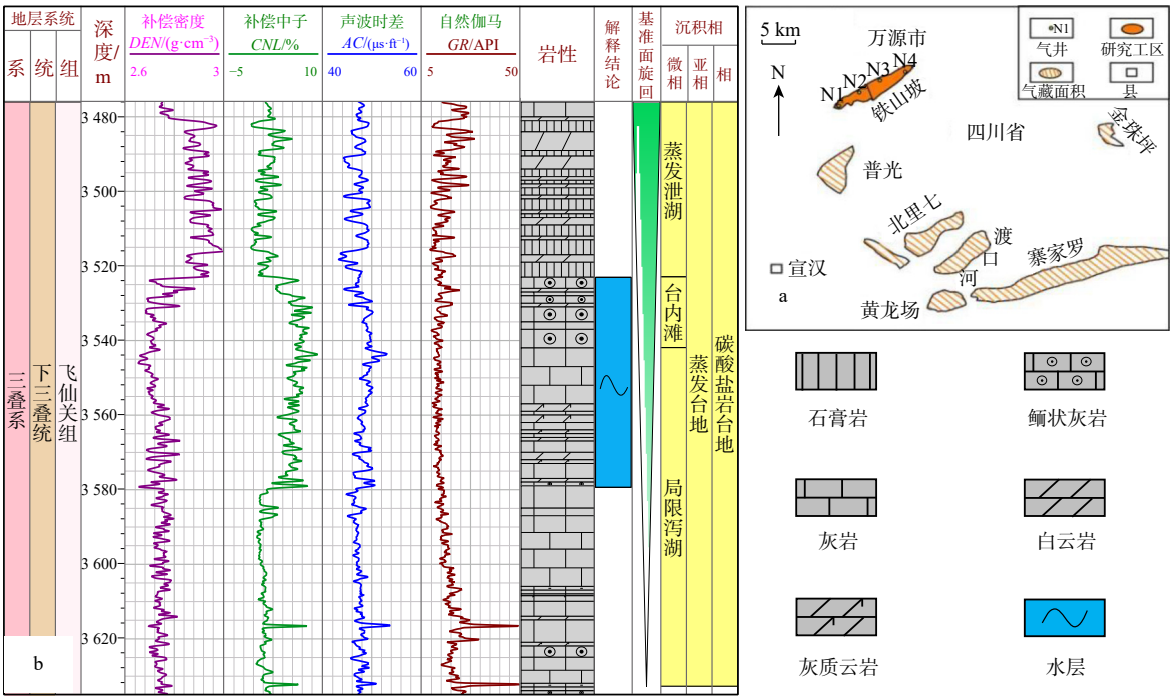



图 1　四川盆地铁山坡飞仙关组天然气藏区域位置 (a) 及 N3 单井综合柱状图 (b)

Fig. 1　Locations of natural gas reservoirs in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin (a) and single-well N3 composite column chart (b)

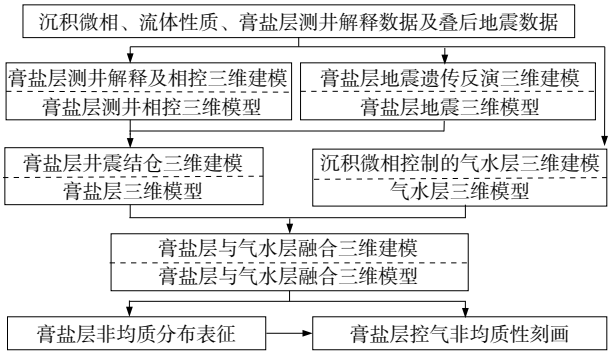



图 2　膏盐层与气水层井震结合相控三维建模技术流程

Fig. 2　Integration of well-seismic facies controls in the 3D modeling process of gypsum-salt layers and gas-water interfaces

性。下面详细阐述上述新技术应用于铁山坡飞仙关组膏盐层与气水层井震结合相控三维建模的具体过程。

## 2.1　膏盐层测井解释及相控三维建模

结合现场录井与测井分析表明：铁山坡飞仙关组膏盐岩体积密度约 2.92 g/cm$^3$；膏盐岩声波时差约为 47 μs/ft，明显大于致密白云岩和致密灰岩[40-41]；膏盐层的补偿中子响应值约 1%，明显小于白云岩、灰岩、泥岩等(图 1b)。因此，通过密度、中子、声波时差等测井响应特征，在消除人为因素或者环境因素干扰后，极易实现对膏岩层的测井单井解释。经岩屑录井验证后，解释获得了铁山坡飞仙关组 4 口天然气开发井(N1 ~ N4 井)的膏盐层分布数据，统计如表 1 所示。

采用文献 [21-22] 提出的两级次相建模方法，开展铁山坡地区飞仙关组沉积微相三维建模。首先，依据铁山坡飞仙关组沉积微相研究成果，以沉积微相平面分布图为基础，采用确定性算法，建立三维确定性沉积微相模型；然后，依据研究得到的单井沉积相综合柱状图(图 1b)，完成单井沉积微相数据的整理和提取，利用序贯指示模拟算法[21-22]，建立三维随机沉积相模型；最后，将三维确定性沉积微相模型作为三维随机沉积微相模型的约束条件，建立得到三维沉积微相模型(图 3a)。

将 4 口天然气开发井的膏盐层测井解释逐点数据进行粗化，作为建模主输入；采用序贯高斯模拟算法[21-22]，依靠建成的三维沉积微相模型的约束，建立

**表 1　四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层、气/水层测录井解释成果统计**

Table 1　Statistical analysis of gypsum-salt layer and gas-water layer well logging in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

| 井名 | 层类型 | 层数/层 | 累计厚度/m | 最大单层厚度/m | 最小单层厚度/m | 日产气量/$10^4$m$^3$ | 日产水量/m$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N1 | 膏盐层 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 39.2 | 0.0 |
| | 气/水层 | 5/0 | 137.6/0.0 | 103.0/0.0 | 3.3/0.0 | | |
| N2 | 膏盐层 | 5 | 16.5 | 4.0 | 1.0 | 30.3 | 0.0 |
| | 气/水层 | 5/0 | 58.5/0.0 | 43.1/0.0 | 1.5/0.0 | | |
| N3 | 膏盐层 | 10 | 24.5 | 4.0 | 1.0 | 0.0 | 13.7 |
| | 气/水层 | 0/1 | 0.0/56.6 | 0.0/56.6 | 0.0/56.6 | | |
| N4 | 膏盐层 | 8 | 47.5 | 14.0 | 1.0 | 0.0 | 2.4 |
| | 气/水层 | 0/1 | 0/20.0 | 0.0/20.0 | 0.0/20.0 | | |

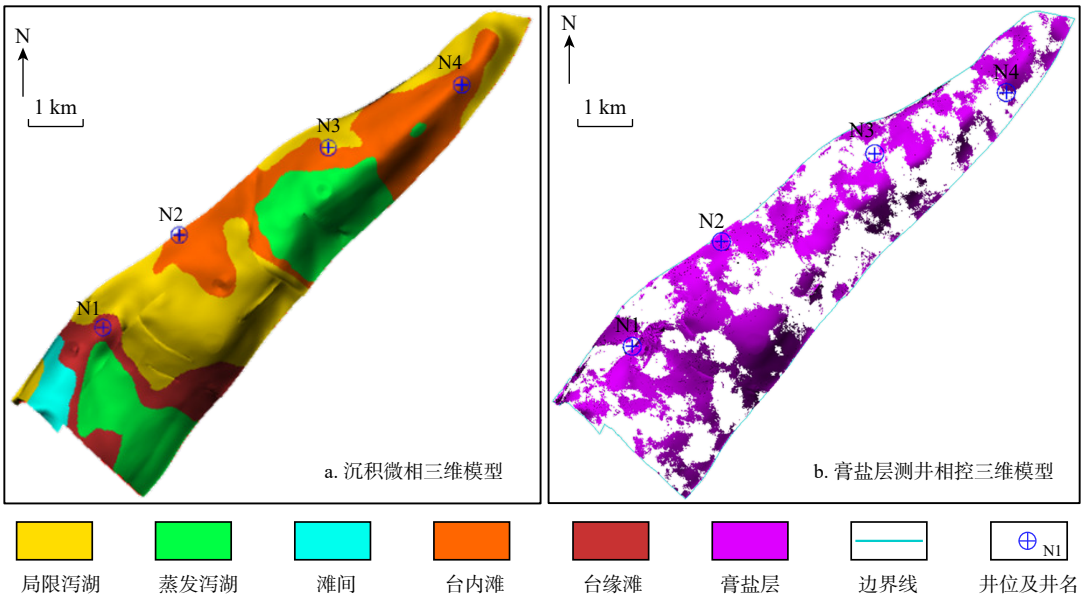



图 3　四川盆地铁山坡飞仙关组沉积微相与膏岩层测井解释及相控三维建模成果

Fig. 3　Results of 3D modeling for sedimentary microfacies and interpretation of gypsum-salt layer logging controlled by sedimentary microfacies in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

起铁山坡飞仙关组膏盐层测井相控三维模型(图 3b)。由建模结果可知: 因井距较大, 依靠测井解释成果结合相控建模, 预测得到的膏盐层井间分布的可靠性较差。

### 2.2　膏盐层地震遗传反演三维建模

利用收集到的深度域叠后地震数据, 依据单井膏盐层测井解释数据, 采用神经网络遗传算法[37], 开展铁山坡地区飞仙关组膏盐层地震遗传反演(图 4a); 以获得的地震遗传反演成果为输入数据, 利用确定性建模方法建成研究区膏盐层地震三维模型(图 2, 4b)。该模型实现了对研究区膏盐层与非膏盐层空间分布的三维表征, 但难以正确表征膏盐薄层的纵向非均质性分布特征。

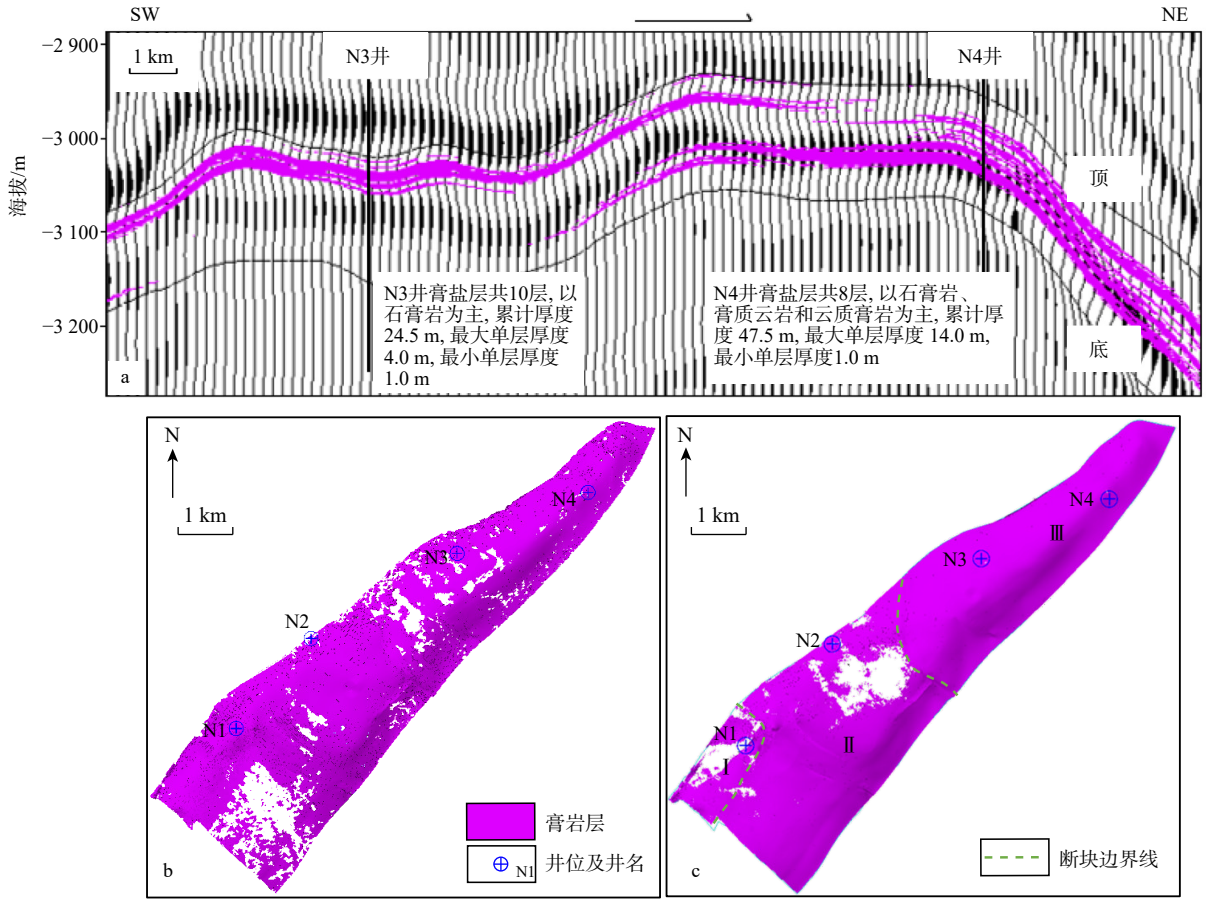
### 2.3　膏盐层井震结合三维建模

为了弥补膏盐层测井解释及相控三维建模井间分布预测可靠性较差, 以及膏盐层地震遗传反演三维建模难以识别薄层的缺点, 充分利用测井纵向分辨率高、地震横向连续性好的优势, 开展膏盐层井震结合三维建模。以建立的膏盐层测井相控三维模型为主变量, 膏盐层地震遗传反演相控三维模型为协同变量, 利用协同克里金算法, 依靠对两者间结合比例的优化, 完成铁山坡地区飞仙关组膏盐层井震结合三维建模(图 2), 获得膏盐层三维模型(图 4c), 确保了对研究区厚、薄不等的各类膏盐层在三维空间中分布特征的精细、准确表征与刻画, 并完成了铁山坡飞仙关组井震结合三维模型中膏盐层分布特征参数统计(表 2)。

### 2.4　膏盐层与气水层融合三维建模

根据收集到的铁山坡地区飞仙关组 4 口天然气开发井的气水层测井解释成果(表 2), 统计并提取每口井在各个深度位置处的气、水层分布数据, 采用 2.1、2.2 和 2.3 节中类似膏盐层的建模技术流程, 实施沉积微相控制的气水层分布三维建模, 获得气水层三维模型(图 5a), 准确刻画了气层在三维空间中的非均质特征(表 2)。

在膏盐层三维模型(图 4c)基础上, 融入气水层




a. 地震反演石膏成果图; b. 膏盐层地震三维模型; c. 膏盐层三维模型; Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ为膏盐层的 3 个断块区

图 4　四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层井震结合三维建模成果

Fig. 4　Results of well-seismic integrated 3D modeling of the gypsum-salt layer in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

**表 2　四川盆地铁山坡飞仙关组井震结合三维模型中膏盐层分布特征参数统计**

Table 2　Summary of 3D modeling results of the gypsum-salt layer in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

| 断块区 | 断块区面积/$km^2$ | 膏盐/气层覆盖面积/$km^2$ | 膏盐/气层覆盖比例/% | 膏盐/气层平均厚度/m | 膏盐/气层最大厚度/m | 膏盐/气层最小厚度/m | 膏盐/气层厚度标准差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | 3.69 | 0.72/3.51 | 19.5/95.1 | 0.64/10.21 | 21.67/40.10 | 0/0.14 | 2.12/8.12 |
| Ⅱ | 20.48 | 15.97/8.84 | 78.0/43.2 | 7.07/44.10 | 65.39/185.38 | 0/0 | 7.57/28.42 |
| Ⅲ | 16.55 | 16.55/3.85 | 100/23.3 | 22.34/102.76 | 70.15/380.77 | 0/0 | 10.73/66.83 |

三维模型(图 5a)，建成膏盐层与气水层融合三维模型(图 5b)，形成后续膏盐层非均质分布表征及控气非均质性刻画的模型基础。

## 3　四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层及其控气非均质性的表征与刻画

剖析膏盐层与气水层融合三维模型，既可表征铁山坡飞仙关组膏盐层三维空间分布的非均质性，又能从中提取控气特征模式；进一步依据控气特征模式呈现出来的非均质性，刻画在膏盐层非均质分布的作用下，气水层在三维空间分布的差异性特征。上述成果为实现铁山坡飞仙关组天然气的非均衡高效开发提供了可靠的模型基础与地质认识。

### 3.1　膏盐层与气水层的非均质分布表征

表 1 和表 2 分别利用收集到的测录井解释成果及本研究建立的膏盐层三维模型，系统统计了铁山坡飞仙关组膏盐层气层发育的基本情况。

测录井解释成果(表 1)表明：(1)区内 N2、N3 和 N4 3 口井在飞仙关组钻遇了膏盐层，N1 井未钻遇膏盐层；(2)钻遇的膏盐层数量多，介于 8～10 层；(3)钻遇的膏盐层累计厚度变化大，介于 0～48.0 m；(3)钻遇的单个膏盐层厚薄差异大，介于 1.0～14.0 m。

膏盐层三维模型(图 4c，表 2)显示：(1)铁山坡飞仙关组膏盐层在Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ 3 个断块区内的分布差异较大，其中膏盐层面积覆盖比例分别为 19.5%，78.0% 和 100%，气层面积覆盖比例分别为 95.1%，43.2% 和 23.3%；(2)Ⅰ断块区膏盐层零星分布在边缘地带，中间大部分区域不发育膏盐层，膏盐层最大厚度为 21.67 m，最小厚度为 0，平均厚度为 0.64 m，厚度标准差为 2.12；(3)Ⅱ断块区膏盐层覆盖了大部分区域，仅东北部中间局部区域不发育膏盐层，膏盐层最大厚度为 65.39 m，最小厚度为 0，平均厚度为 7.07 m，厚度标准差为 7.57；(4)Ⅲ断块区被膏盐层满覆盖，膏盐层最大厚度为 70.15 m，最小厚度为 0，平均厚度为 22.34 m，厚度标准差为 10.73。

通过气水层三维模型进行数据统计(图 5a、表 2)，结果表明：(1)铁山坡飞仙关组气层在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 个断块区内的分布差异同样较大，气层面积覆盖比例分别为 95.1%，43.2% 和 23.3%；(2)Ⅰ断块区气层最大厚度为 40.10 m，最小厚度为 0.14，平均厚度为 10.21 m，厚度标准差为 8.12；(3)Ⅱ断块区气层最大厚度为 185.38 m，最小厚度为 0，平均厚度为 44.10 m，厚度标准差为 28.42；(4)Ⅲ断块区气层最大厚度为 380.77 m，最小厚度为 0，平均厚度为 102.76 m，厚度

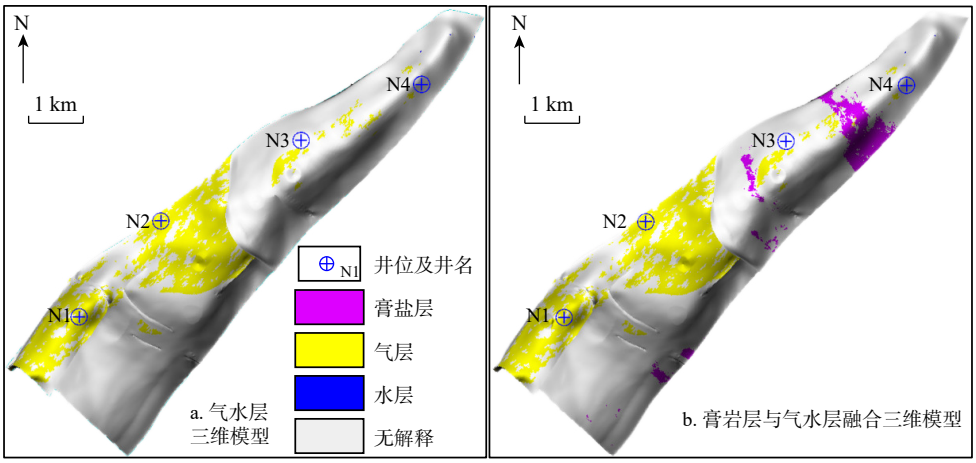



图 5　四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层与气水层融合三维建模成果

Fig. 5　Results of 3D fusion modeling of gypsum-salt layer and gas-water layer distribution in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

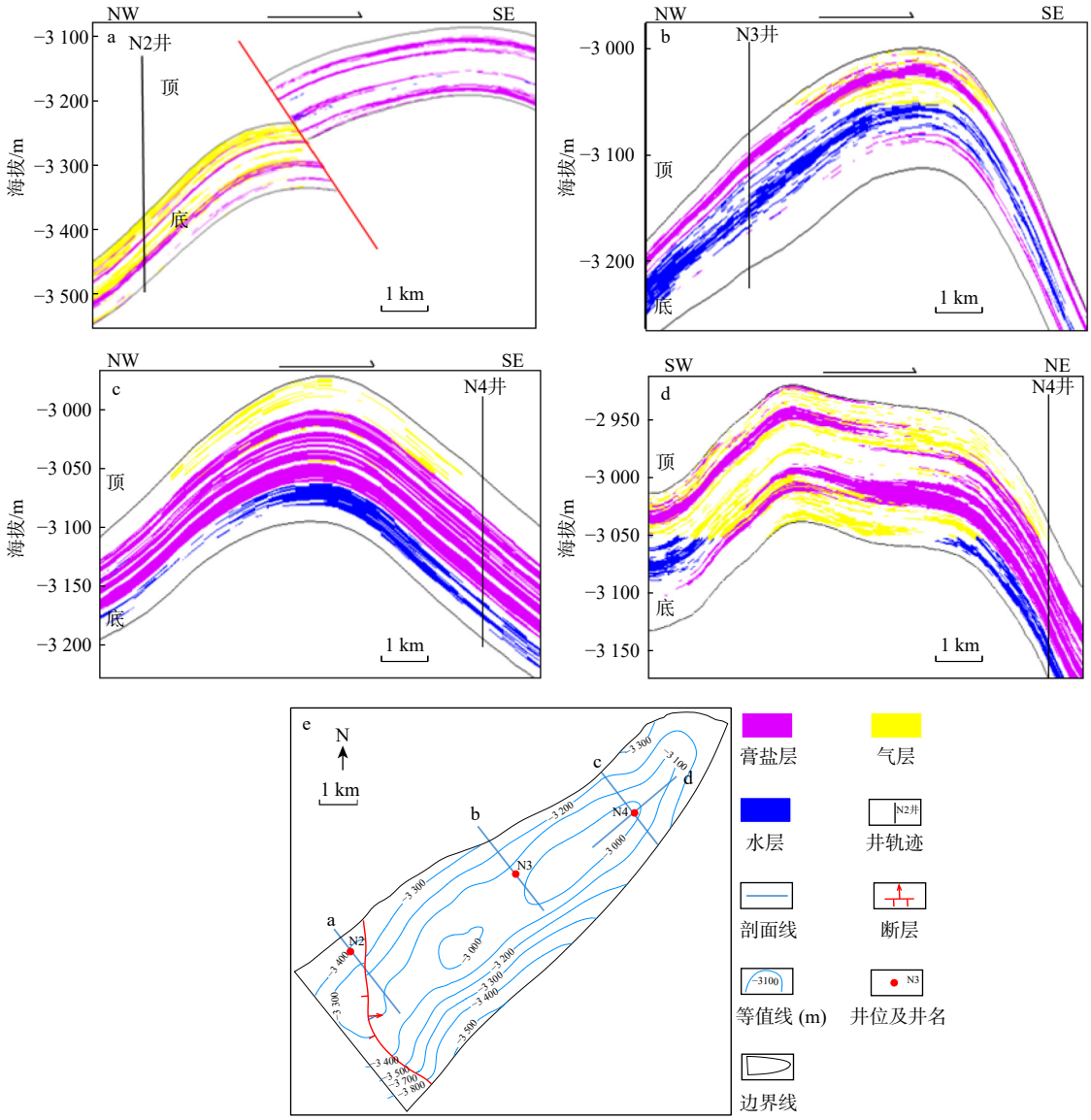
标准差为 66.83。

利用膏盐层与气水层融合三维模型，分别按 NE-SW 与 NW-SE 2 个方向，分别制作了 4 条剖面，详细展示了铁山坡飞仙关组膏岩层和气层的空间分布特征(图 6)，不难看出，研究区内的膏盐层和气层分布无论在纵向上还是在横向上，都呈现出强烈的非均质性；三维模型能清晰地可视化表达强非均质膏岩层和气层空间分布的详细细节，这个优势是现有实验测试与定性描述无法比拟的。

### 3.2　膏盐层控气非均质性刻画

由于膏盐层在控制天然气生成、运移和聚集的过程中扮演着重要的角色，膏盐层发育的强非均质性，预示着膏盐层控气性也将呈现出强非均质性。依靠对膏盐层与气水层三维模型分别在 NE-SW 与 NW-SE 2 个方向共计 4 条剖面的剖分分析，发现铁山坡飞仙关组膏盐层控气性呈现出封盖控气性、降储控气性及气藏复杂化 3 类特征模式。

（1）封盖控气性　表现为膏盐层不仅能作为顶部盖层有效封盖下伏天然气，还能作为底部密封层限制天然气向下逸散，形成膏盐层间的天然气聚集，如图 6a 断层左部区域、图 6b 背斜顶部地层的中上部区域、图 6d 背斜顶部地层的中下部区域。由于




a. 铁山坡飞仙关组沿 a 线三维模型剖面图；b. 铁山坡飞仙关组沿 b 线三维模型剖面图；c. 铁山坡飞仙关组沿 c 线三维模型剖面图；d. 铁山坡飞仙关组沿 d 线三维模型剖面图；e. 铁山坡飞仙关组顶面构造等值线图

图 6　四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层与气水层三维模型剖分成果图

Fig. 6　Section view of the 3D model of gypsum-salt layer and the gas-water layer distribution in the Feixianguan Fromation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

膏岩层在气藏顶部或底部的连续分布，有效封堵了天然气的逸散路径，能够形成天然气的高压富集；如N2井，因受气藏中部和底部钻遇膏盐层的封盖，获得日产气量30.3×10$^4$ m$^3$（表1）。同时也需要指出，封盖控气性模式也会出现在顶底部，由于膏盐层封堵了顶底部外来天然气运移进来的路径，从而出现无气干层或水层的情况，如图6a断层右部2组膏盐层之间区域为无气干层、图6d右下底部区域为水层。因此，封盖控气性特征模式将同时出现富气高产或无气无产2种可能，诠释了膏盐层控气的强非均质性和复杂性。

（2）降储控气性　表现为在高温高压的地层环境下，膏盐层中的石膏与盐岩的溶解下渗及压实充填，将造成下伏储层储渗性能的大幅度降低，甚至丧失储渗性能而成为非储层，使得原有天然气聚集受到破坏，呈现出降储控气性特征，如图6a断层右边上下2组膏盐层之间的区域、图6c地层中下部膏盐层之间的区域、图6d背斜右翼地层中下部膏盐层之间区域。降储控气性特征模式由于缺乏良好的储层，一般呈现出少气、无气或气层减少等特征。如表1中的N3和N4井，由于井剖面中发育较多膏岩层，影响了储层发育，失去了产气能力；N2井剖面零星发育膏盐层，储层发育仅受局部影响，储层较发育，累计厚度58.5 m，日产气量达到30.3×10$^4$ m$^3$；N1井剖面不发育膏盐层，储层发育未受膏盐层影响，储层发育，累计厚度高达137.6 m，日产气量高达39.2×10$^4$ m$^3$。来源于N2井的岩心照片则是降储控气特征模式的直接证据；图7a，b展示了石膏充填导致石灰岩孔缝失去储渗性能，图7c，d显示了石膏充填导致白云岩孔缝失去储渗性能。

（3）气藏复杂化　表现为因膏盐层分布的强非均质性，局部空间分布的膏盐层将阻隔天然气聚集，使其分散分布，造成原有气藏的复杂化，如图6d背斜顶部和左翼地层中上部区域。气藏复杂化特征模式制约了气藏的整体连片性与连通性，通常会出现局部高产，但整体产出形势需要厘清膏盐层非均质性特征影响后方能判定（表1）。

综上所述，正是因为膏盐层空间分布的强非均质性，造成了铁山坡飞仙关组气水层分布的多样性与复杂性。通过膏盐层与气水层井震结合相控三维建模技术的应用，不仅有利于精细表征膏盐层的非均质分布，同时还能准确刻画膏盐层气层的非均质性，从而为膏盐层复杂分布区天然气的非均衡高效开发提供可靠的模型基础与地质认识。

## 4　结论与认识

（1）膏盐层与气水层井震结合相控三维建模技




a. 石灰岩夹块状石膏，4 174.18 ~ 4 174.24 m；b. 层状石膏与石灰岩互层，4 173.43 ~ 4 173.53 m；c. 层状石膏与白云岩互层，4 166.23 ~ 4 166.29 m；d. 白云岩夹块状石膏，4 163.34 ~ 4 163.43 m

图7　四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐岩影响储层发育的岩心照片（以N2井为例）

Fig. 7　Core image of the gypsum-salt mixture in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

术是专门针对膏盐层控气非均质性精细解析研发的，该技术涵盖膏盐层测井解释及相控三维建模、膏盐层地震遗传反演三维建模、膏盐层井震结合三维建模、沉积微相控制的气水层三维建模及膏盐层与气水层三维融合建模 5 个关键技术环节，有利于依靠对膏盐层与气水层空间分布强非均质性的融合表征，提取膏盐层控气性特征模式，精准刻画膏盐层控气性的非均质性特征。

(2)利用建立的膏盐层三维模型和气水层三维模型分析发现：四川盆地川东北铁山坡飞仙关组Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ 3 个断块区内的膏盐层和气层面积分布差异较大，其中膏盐层面积覆盖比例分别为 19.5%，78.0% 和 100%，气层面积覆盖比例分别为 95.1%，43.2% 和 23.3%；各个断块区内的厚度差异也较大，其中膏盐层厚度标准差分别为 2.12，7.57 和 10.73，气层厚度标准差分别为 8.12，28.42 和 66.83。

(3)依靠建立的膏盐层与气水层井震结合相控三维模型，识别出四川盆地川东北铁山坡飞仙关组具有封盖控气性、降储控气性和使气藏复杂化 3 类控气特征模式，明确了 3 类控气特征模式分别在气藏空间发生的实际区域、位置，以及对储层发育和产气能力的影响，为认识气藏、开发好气藏指明了具体方向。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

## 参考文献：

[1] LI M P, CHEN Z H, YI S W, et al. Origin and accumulation mechanisms of deep Paleozoic oil and gas: A case study of the central Tarim Basin, Western China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109634.

[2] 胡素云，石书缘，王铜山，等. 膏盐环境对碳酸盐岩层系成烃、成储和成藏的影响 [J]. 中国石油勘探，2016，21(2)：20-27.
HU S Y, SHI S Y, WANG T S, et al. Effect of gypsum-salt environment on hydrocarbon generation, reservoir-forming and hydrocarbon accumulation in carbonate strata[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(2): 20-27. (in Chinese with English abstract)

[3] ZHU Z, YIN H W, JIA D, et al. Impact of gypsolith on the preservation and exploration prospect of shale gas in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(8): 1472-1480.

[4] YANG L L, LI X W, ZHUO Q G, et al. Effects of gypsum-salt rock on mineral transformations in a saline lacustrine basin: Significance to reservoir development[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 211: 110240.

[5] 王东旭，曾溅辉，宫秀梅. 膏盐岩层对油气成藏的影响 [J]. 天然气地球科学，2005，16(3)：329-333.
WANG D X, ZENG J H, GONG X M. Impact of gypsolith on the formation of oil & gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 329-333. (in Chinese with English abstract)

[6] YANG H, BAO H P, MA Z R. Reservoir-forming by lateral supply of hydrocarbon: A new understanding of the formation of Ordovician gas reservoirs under gypsolyte in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry B, 2014, 1(1): 24-31.

[7] 王坤，王明磊，梁坤，等. 四川盆地坡西地区长兴组–飞仙关组礁滩体发育特征与储集性 [J]. 中外能源，2022，27(12)：40-49.
WANG K, WANG M L, LIANG K, et al. Development characteristics and reservoir properties of reef and oolitic shoal of Changxing and Feixianguan Formation, Poxi area, Sichuan Basin[J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(12): 40-49. (in Chinese with English abstract)

[8] HE Z L, JIN Z J, LI S J, et al. Prototypes, modifications, and hydrocarbon enrichment variations in basins influenced by Tethyan evolution: A comparative analysis of the Persian Gulf Basin and the Sichuan Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(12): 2871-2897.

[9] ZHANG X, ZHU H H, LEI B J, et al. Sedimentary and diagenetic facies of tidal flat in epeiric sea and its related descriptive method: A case of Ma51-4 submember in Jingbian gas field of Ordos Basin, China[J]. Petroleum, 2021, 7(2): 123-134.

[10] 于洲，范立勇，任军峰，等. 鄂尔多斯盆地寒武系–奥陶系天然气成藏模式及有利勘探区 [J]. 天然气工业，2024，44(8)：44-57.
YU Z, FAN L Y, REN J F, et al. Natural gas accumulation models and favorable exploration areas of the Cambrian-Ordovician in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(8): 44-57. (in Chinese with English abstract)

[11] 冯许魁，陈友智，臧殿光，等. 四川盆地东缘寒武系盐下油气勘探领域探讨 [J]. 地质论评，2024，70(3)：1061-1070.
FENG X K, CHEN Y Z, ZANG D G, et al. Study on the structural inheritance of Dengying Formation in Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2024, 70(3): 1061-1070. (in Chinese with English abstract)

[12] 杜金虎，徐春春，汪泽成，等. 四川盆地二叠–三叠系礁滩天然气勘探 [M]. 北京：石油工业出版社，2010.
DU J H, XU C C, WANG Z C, et al. Natural gas exploration of Permian-Triassic reef & oolite in Sichuan Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese)

[13] 杨威，刘满仓，魏国齐，等. 四川盆地中三叠统雷口坡组岩相古地理与规模储集体特征 [J]. 天然气地球科学，2021，32(6)：781-793.
YANG W, LIU M C, WEI G Q, et al. Sedimentary characteristics and sequence lithofacies paleogeography of the semi-closed carbonate platform of the Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(6): 781-793. (in Chinese with English abstract)

[14] 李剑，杨春龙，谢武仁，等. 四川盆地安岳气田震旦系台缘带和台内地区天然气成藏差异性及勘探领域 [J]. 石油与天然气地质，2023，44(1)：34-45.
LI J, YANG C L, XIE W R, et al. Differences of natural gas accumulation and play fairways in the marginal zone and interior of Sinian Platform in Anyue gas field, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas

Geology, 2023, 44(1): 34-45. (in Chinese with English abstract)

[15] LIU S G, ZHANG Z J, HUANG W M, et al. Formation and destruction processes of Upper Sinian oil-gas pools in the Dingshan-Lintanchang structural belt, southeast Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Science, 2010, 7(3): 289-301.

[16] 孟庆强, 李京洲, 刘文汇, 等. 膏盐岩含量对成熟阶段页岩生烃影响的模拟实验 [J]. 特种油气藏, 2022, 29(5): 113-118.
MENG Q Q, LI J Z, LIU W H, et al. Simulation study on the effect of gypsum-salt content on hydrocarbon generation in mature stage shale[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 113-118. (in Chinese with English abstract)

[17] 李广才, 王兴宇, 李培, 等. 地震正演模拟技术在膏盐岩识别中的应用 [J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(2): 67-72.
LI G C, WANG X Y, LI P, et al. Applications of seismic forward modeling technology for identifying of gypsum-salt rocks[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(2): 67-72. (in Chinese with English abstract)

[18] 赵恒, 刘文汇, 李艳杰, 等. 海相膏盐岩层系烃源岩形成演化特征初探 [J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 1-7.
ZHAO H, LIU W H, LI Y J, et al. A preliminary study on hydrocarbon generation and evaluation of marine gypsum/salt-bearing source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(3): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[19] 朱童, 王兴志, 沈忠民, 等. 川中雷口坡组膏盐岩成因及对储层的影响 [J]. 中国地质, 2014, 41(1): 122-134.
ZHU T, WANG X Z, SHEN Z M, et al. The origin of gypsum-salt rock of Leikoupo Formation and its influence on the gas reservoir in central Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 122-134. (in Chinese with English abstract)

[20] 欧成华, 冯国庆, 李波. 油气藏开发地质建模: 富媒体 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
OU C H, FENG G Q, LI B. Geological modeling of oil and gas reservoir development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018. (in Chinese)

[21] 欧成华, 李朝纯. 用于带水碳酸盐岩气藏气水分布表征的六阶段建模方法: CN104183018B[P]. 2017-06-23.
OU C H, LI C C. A six-stage modeling method for gas-water distribution characterization of carbonate gas reservoirs with water: CN104183018B[P]. 2017-06-23. (in Chinese)

[22] 欧成华, 李朝纯. 用于多层砂岩气藏气层品质分类表征的六阶段建模方法: CN104156617B[P]. 2017-06-23.
OU C H, LI C C. A six-stage modeling method for gas quality classification and characterization of multi-layer sandstone gas reservoirs: CN104156617B [P]. 2017-06-23. (in Chinese)

[23] 江青春, 李建忠, 汪泽成, 等. 四川盆地东部地区寒武系膏盐岩厚度定量预测及其油气地质意义 [J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 34-46.
JIANG Q C, LI J Z, WANG Z C, et al. Quantitative thickness prediction of Cambrian gypsum-salt rocks in eastern Sichuan Basin and its petroleum significance[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 34-46. (in Chinese with English abstract)

[24] 花卫华, 宿紫莹, 朱玉华, 等. 大范围地质体分块建模方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 257-265.
HUA W H, SU Z Y, ZHU Y H, et al. Large-range geological block modeling method[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 257-265. (in Chinese with English abstract)

[25] 梁欣阳, 付德奎, 张宁, 等. 川东北普光地区下三叠统飞仙关组岩溶段的地质意义 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 386-394.
LIANG X Y, FU D K, ZHANG N, et al. Geological significance of karst section of Lower Triassic Feixianguan Formation in Puguang area, Northeast Sichuan[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 386-394. (in Chinese with English abstract)

[26] 李阳, 代宗仰, 张洁伟, 等. 基于无监督学习的多参数储层评价: 以蒲包山地区下三叠统飞仙关组礁滩储层为例 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 285-292.
LI Y, DAI Z Y, ZHANG J W, et al. Multiparameter reservoir evaluation method based on unsupervised learning: A case study of the reef beach reservoir of the Lower Triassic Feixianguan Formation in the Pubaoshan area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 285-292. (in Chinese with English abstract)

[27] HE Y L, FU X Y, LIU B, et al. Control of oolitic beaches sedimentation and diagenesis on the reservoirs in Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 466-475.

[28] 李阳, 王兴志, 蒲柏宇, 等. 四川盆地开江–梁平海槽东侧三叠系飞仙关组鲕滩沉积特征 [J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 116-130.
LI Y, WANG X Z, PU B Y, et al. Sedimentary characteristics of oolitic beach of Triassic Feixianguan Formation in eastern Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 116-130. (in Chinese with English abstract)

[29] 唐德海, 段金宝. 四川盆地嘉陵江组嘉四段–嘉五段膏盐岩分布及油气意义 [J]. 特种油气藏, 2017, 24(2): 80-85.
TANG D H, DUAN J B. Distribution and reservoir significance of gypsum salt rocks in Jia-4-Jia-5 interval of Jialingjiang Formation in the Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(2): 80-85. (in Chinese with English abstract)

[30] ZHANG X L, GAO Z Q, MASELLI V, et al. Tectono-sedimentary characteristics and controlling factors of the Lower-Middle Cambrian gypsum-salt rocks in the Tarim Basin, Northwest China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 151: 106189.

[31] ZHENG Z Y, ZUO Y H, WEN H G, et al. Natural gas characteristics and gas-source comparisons of the Lower Triassic Feixianguan Formation, Eastern Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Science, 2023, 20(3): 1458-1470.

[32] 吴小力, 刘翰林, 李荣西, 等. 中国陆相蒸发岩盆地中烃源岩的发育规律及其生排烃特征研究进展 [J]. 地质科技情报, 2017, 36(4): 183-192.
WU X L, LIU H L, LI R X, et al. Progress in researches of developmental rule and the hydrocarbon generation and expulsion characteristics of hydrocarbon source rocks in terrestrial evaporite basins of China[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(4): 183-192. (in Chinese with English abstract)

[33] 王小军, 王婷婷, 曹剑. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩基本特征及其高效生烃 [J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 9-15.
WANG X J, WANG T T, CAO J. Basic characteristics and highly

efficient hydrocarbon generation of alkaline-lacustrine source rocks in Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 9-15. (in Chinese with English abstract)

[34] OU C H, WANG X L, LI C C, et al. Three-dimensional modelling of a multi-layer sandstone reservoir: The Sebei gas field, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(1): 209-221.

[35] OU C H, LI C C, MA Z G. 3D modeling of gas/water distribution in water-bearing carbonate gas reservoirs: The Longwangmiao gas field, China[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2016, 13(5): 745-757.

[36] ZHOU F D, YAO G Q, TYSON S. Impact of geological modeling processes on spatial coalbed methane resource estimation[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 146: 14-27.

[37] DING S F, SU C Y, YU J Z. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm[J]. Artificial Intelligence Review, 2011, 36(2): 153-162.

[38] 常德宽, 雍学善, 王一惠, 等. 基于深度卷积神经网络的地震数据断层识别方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(1): 1-8.
CHANG D K, YONG X S, WANG Y H, et al. Seismic fault interpretation based on deep convolutional neural networks[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[39] 王一鸣, 宋先海, 张学强. 应用人工神经网络算法的地震面波非线性反演 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(5): 979-991.
WANG Y M, SONG X H, ZHANG X Q. Research on nonlinear inversion of seismic surface waves based on artificial neural network algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(5): 979-991. (in Chinese with English abstract)

[40] 冯琼, 魏水建. 中上扬子区膏岩盖层的测井识别 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 100-104.
FENG Q, WEI S J. Well logging identification of gypsum cap rocks in Middle-Upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 100-104. (in Chinese with English abstract)

[41] 徐振平, 陈书平, 罗彩明, 等. 塔里木盆地中寒武统膏盐岩分布及封闭性评价 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(5): 54-67.
XU Z P, CHEN S P, LUO C M, et al. Distribution and sealing capacity evaluation of gypsum-salt rocks in the Middle Cambrian in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(5): 54-67.(in Chinese with English abstract)

Summary for “四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层控气非均质性三维表征”

# Three-dimensional characterization of natural gas heterogeneity controlled by gypsum-salt layer in the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area, Sichuan Basin

PENG Xian[1], OU Chenghua[2a, 2b*], XIAO Furun[2a], WANG Bei[1], GUO Peipei[2a], HE Yubo[2a], PENG Shixuan[3], LIU Junyan[2a]

1. Research Institute of Exploration and Development PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu 610041, China;
2a. Petroleum Engineering School; 2b. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
3. Development Division of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610500, China

First author, E-mail: pengxian@petrochina.com.cn

* Corresponding author, E-mail: chomm@163.com

**Abstract**: [**Objective**] Natural gas heterogeneity controlled by gypsum-salt layers is a significant model for enrichment and accumulation. While previous studies have primarily focused on experimental testing and qualitative descriptions, they have lacked three-dimensional characterization of the gypsum-salt layers distribution. This study proposes a novel three-dimensional modeling technique that integrates well-seismic data with sedimentary microfacies control in both the gypsum-salt layer and the gas-water layer. [**Methods**] The proposed technique encompasses five key technical aspects: (1) logging interpretation and 3D modeling of the gypsum-salt layer controlled by sedimentary microfacies, (2) seismic genetic inversion-based 3D modeling of the gypsum-salt layer guided by sedimentary microfacies, (3) well-seismically integrated 3D modeling of the gypsum-salt layer, (4) 3D modeling of gas-water distribution influenced by sedimentary microfacies, and (5) fusion-based 3D modeling of both the gypsum-salt and gas-water layers. [**Results**] This method was applied to assess the influence of the gypsum-salt layer within the Feixianguan Formation in the Tieshanpo gas field of the Sichuan Basin on gas accumulation characteristics. Accurate 3D geological models were constructed that integrate well-seismic data with sedimentary microfacies control for both the gypsum-salt and gas-water layers. The results indicated that, except for some localized areas, a continuous distribution was observed across most regions of the Feixianguan Formation in the Tieshanpo area. Additionally, the formation exhibited multilayered characteristics with significant longitudinal thickness heterogeneity. Three distinct models were developed to illustrate the effects of gas capping, reduced gas storage capacity, and complex reservoir conditions resulting from the heterogeneous influence of the gypsum-salt layer. [**Conclusion**] These findings provide essential geological insights that can inform the development of effective strategies targeting natural gas reserves at non-equilibrium scales.

**Key words:** natural gas heterogeneity controlled by gypsum-salt layer; well-seismic combination; microfacies-controlled geologic modeling; Feixianguan Formation in the Tieshanpo area; three-dimensional characterization; Sichuan Basin

Received: 2023-10-09; Revised: 2024-03-22; Accepted: 2024-03-28

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230558