王纪煊,胡忠贵,李世临,等. 川东地区中寒武统高台组蒸发岩特征和沉积模式.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):784-799. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220298.

Wang Jixuan, Hu Zhonggui, Li Shilin, et al. Evaporite Characteristics and Sedimentary Model of the Middle Cambrian Gaotai Formation in the Eastern Sichuan Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(3):784-799. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220298.

川东地区中寒武统高台组蒸发岩特征和沉积模式

王纪煊[1,2],胡忠贵[1,2],李世临[3],蔡全升[1,2],郭艳波[3],左云安[3],庞宇来[3]

1.长江大学地球科学学院,武汉 430100

2.长江大学沉积盆地研究中心,武汉 430100

3.中国石油西南油气田公司重庆气矿,重庆 400021

摘要:为明确川东地区中寒武统高台组蒸发岩特征与发育模式,综合野外观察、岩心描述、薄片鉴定、测井及地震资料,在对高台组蒸发岩的岩性及成因类型进行分析的基础上,讨论其沉积模式以及与油气的关系。研究结果表明:1)蒸发岩主要为含膏白云岩类、石膏岩和膏盐岩,存在清水和浑水两种蒸发岩岩性组合序列,蒸发岩厚度具有由西向东逐渐增厚的特点,沉积中心分别位于建深1井区—巫溪一线和太和1井区—石柱一线,蒸发岩盖层以"宽广圆环状"覆盖川东大部分地区;2)蒸发岩在干旱炎热的古环境、障壁滩形成的封闭环境、海水的周期性波动以及物源补给的共同作用下形成清水潟湖和浑水潟湖,即源控多潟湖成因环境;3)高台组蒸发岩厚度与龙王庙组储层的分布存在一定的负相关关系,即厚层蒸发岩控低含气储层,薄层蒸发岩控高含气储层;4)蒸发岩为盖层的储盖组合包括浑水潟湖成因的岩下储层和清水潟湖成因的岩间储层,薄层蒸发岩岩下储层含气规模较大,岩间储层的非均质性较强,厚度较薄,总体上呈中—低孔低渗的特征,研究区发育3个天然气有利勘探区带,分别位于北部、中部以及南部地区,是川东地区潜在的后备勘探领域。

关键词:蒸发岩;川东地区;高台组;清水潟湖;浑水潟湖;沉积模式

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220298 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Evaporite Characteristics and Sedimentary Model of the Middle Cambrian Gaotai Formation in the Eastern Sichuan Basin

Wang Jixuan[1,2], Hu Zhonggui[1,2], Li Shilin[3], Cai Quansheng[1,2], Guo Yanbo[3], Zuo Yun'an[3], Pang Yulai[3]

1. *School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan* 430100, *China*

2. *Sedimentary Basin Research Center, Yangtze University, Wuhan* 430100, *China*

3. *Chongqing Gas District, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chongqing* 400021, *China*

收稿日期:2022-10-29

作者简介:王纪煊(1996—),男,硕士研究生,主要从事碳酸盐岩沉积学及储层地质学方面的研究,E-mail:1079299440@qq.com

通信作者:胡忠贵(1979—),男,教授,主要从事层序地层学及储层沉积学方面的研究,E-mail:hzg1978@yangtzeu.edu.cn

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05007-002)

Supported by the National Science and Technology Major Project (2016ZX05007-002)

Abstract: In order to clarify the sedimentary characteristics and development model of evaporite in the Gaotai Formation in eastern Sichuan basin, the sedimentary model of evaporite and its relationship with oil and gas are discussed based on field observation, core description, thin section identification, well logging and seismic data. The results show that: 1) The evaporites are mainly gypsum dolomite, gypsum rock and gypsum-salt rock, and there are two kinds of evaporite lithologic assemblage sequence: Gypsum lagoon and mixed lagoon. The evaporite thickness gradually increases from the west to the east. The sedimentary centers are located in the Wuxi line of Jianshen 1 Well area and the Shizhu line of Taihe 1 Well area, respectively. 2) Evaporite was formed in gypsum lagoon and mixed lagoon under the combined action of arid and hot paleoenvironment, closed environment formed by barrier beach, periodic fluctuation of seawater and provenance recharge, that is, sourcing-controlled multi-lagoon genetic environment. 3) There is a negative correlation between the thickness of Gaotai Formation evaporite and the distribution of Longwangmiao Formation reservoir, that is, thick evaporite controlled the low gas reservoir, thin evaporite controlled the high gas reservoir. 4) The reservoir cap assemblages with evaporative rocks as cap formations include subrock reservoirs of mixed lagoon and interrock reservoirs of gypsum lagoon. The subrock reservoirs of thin evaporative rocks have large gas bearing scale, and the interrock reservoirs are of strong heterogeneity and thin thickness, showing the characteristics of medium-low porosity and low permeability in general. Three favorable exploration zones for natural gas are developed in the study area. They are located in northern, central and southern regions, respectively, and are potential reserve exploration areas in the eastern Sichuan basin.

Key words: evaporite; eastern Sichuan basin; Gaotai Formation; gypsum lagoon; mixed lagoon; sedimentary model

0　引言

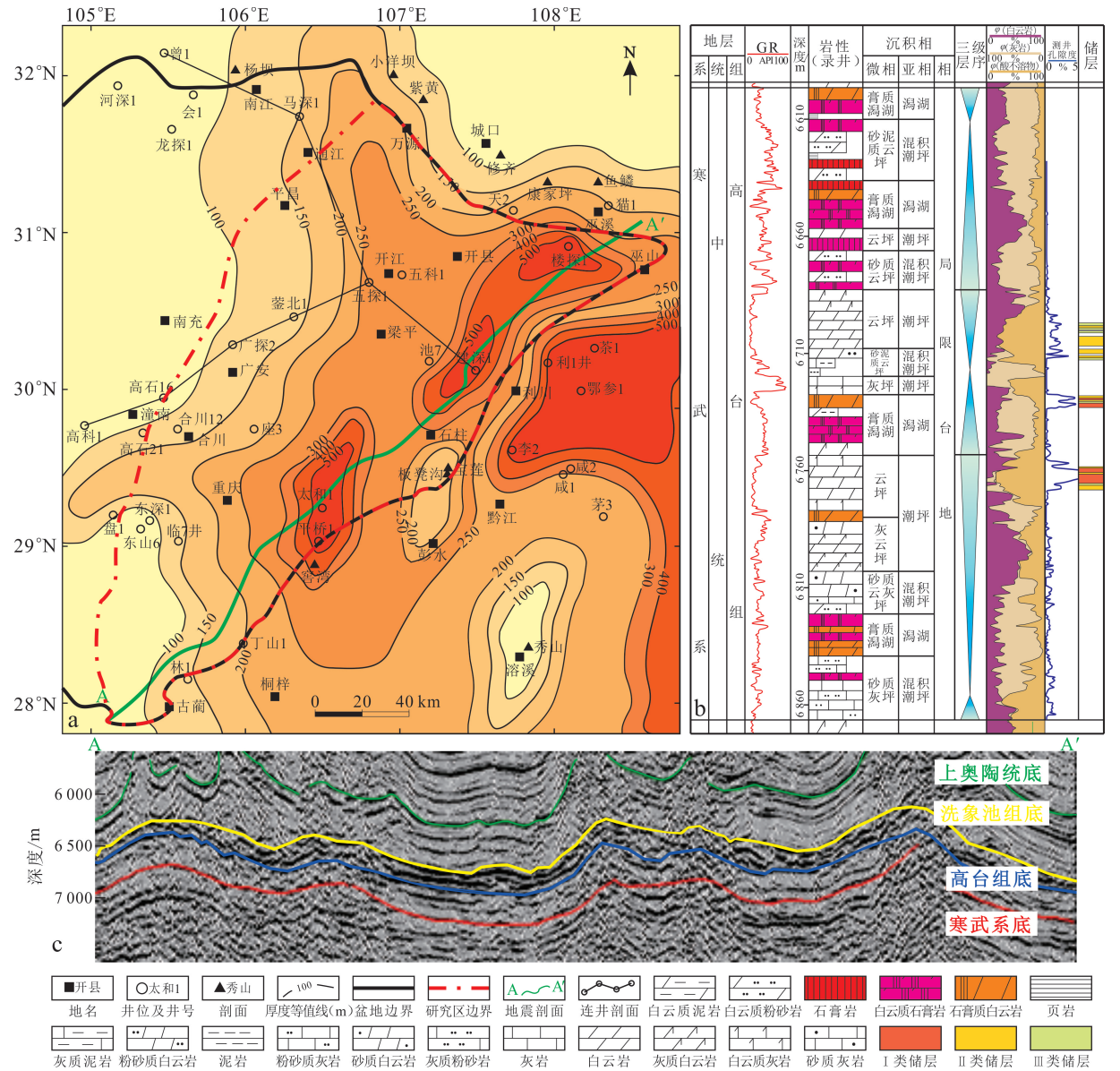
对于世界范围内的各种常规油气系统，泥页岩和蒸发岩是主要的油气盖层。蒸发岩对油气生产具有重要意义，占世界表面 8% 的含石膏蒸发岩是世界 55% 油气藏的直接盖层[1]，封闭了大量的油气资源[2-3]。据不完全统计，截至 2021 年底，四川盆地东部(川东)地区至少已有 15 口探井钻遇高台组。钻遇结果表明，川东地区高台组蒸发岩分布广泛且大量发育，其对油气保存起到了很好的封闭作用，但其岩下储层龙王庙组油气产量不高，其岩间储层的发育特征也尚未解决。因此，通过对川东地区蒸发岩开展岩性特征分析和沉积模式研究，分析有利储集体的空间展布，对于川东地区中寒武统高台组油气勘探具有重要的指导意义。

众多学者针对蒸发岩的形成模式开展了一系列研究。20 世纪 50 — 60 年代，以 Masson 和 Kinsman 为代表的学者提出了潮上萨布哈模式[4-5]，之后相继出现了高山深盆盐模式[6]，深水深盆模式[7]，深盆干燥模式[8]，和陆表-地台盐模式[9]；近年来，针对四川盆地寒武系蒸发岩，有学者[10-11]提出了台地边缘—半局限台地沉积模式、障壁条件下的蒸发盆地和潟湖沉积模式，认为在龙王庙组和高台组沉积时期，由于气候炎热，水体较浅，沉积大量膏盐岩，发育川西南和川东南两个沉积中心，同时进一步将膏盐岩细分为石膏岩类、含膏白云岩类、含膏泥(砂)岩类和石盐类 4 大类[12]。顾志翔等[13]研究发现四川盆地下寒武统膏盐岩形成于多个封闭—半封闭的滩间潟湖环境，同时受到沉积背景、古地貌和古气候等因素的影响，膏盐岩在其形成的过程中对下寒武统烃源岩的生烃具有明显的催化作用，有利于增大和改善白云岩储层的孔隙。

综上所述，前人研究对于四川盆地寒武系蒸发岩的总体认识较为相似，但对于川东地区高台组蒸发岩的研究有待细化和深化。本文以钻井、测井、露头剖面、地震和岩心资料为基础，对川东地区高台组蒸发岩的岩性进行分类，分别讨论不同岩性组合序列的沉积环境，分析现今高台组蒸发岩的残余厚度和盖层厚度，建立蒸发岩的成因模式，论述龙王庙组和高台组的储盖组合模式，预测龙王庙组和高台组的有利勘探区，旨在为该区油气勘探提供地质参考。

1 地质背景

川东地区位于四川盆地东部,范围包括华蓥山以东,齐岳山以西,大巴山以南,渝南以北,行政区划包括了四川省的达州、开江、大竹、邻水等县市和重庆市的大部分地区,面积约为 5.5×10^4 km^2。川东地区高台组地层厚度较大,大部分区域超过 250 m,且自西向东逐渐增厚,在太和 1 井和建深 1 井—楼探 1 井处沉积厚度相对最大,以其为中心向四周逐渐减薄(图 1)。在早寒武世形成的稳定扬子克拉通构造背景下,早寒武世早期海水由川东南方向侵入,除西侧康滇古陆外,四川盆地全部被淹没,海侵达到顶峰。早寒武世中期海水变浅,海水向东南方向撤退,西侧古陆逐渐扩大,在盆地中部为局限台地沉积,沉积物为白云岩夹少量泥页岩,盆地东部逐渐形成开阔台地相沉积环境。中寒武世早期又发生海侵,沉积环境虽仍为局限台地相,但陆源物质大量增加,沉积物除含砂质、泥质白云岩外,不同地区还出现了层数、厚度不等的紫红色白云质泥岩,即高台组[14]。



GR.自然伽马。

图 1 川东地区高台组地层厚度(a)、五探 1 井高台组地层综合柱状图(b)和高台组地震剖面(c)

Fig.1 Thickness of Gaotai Formation (a), stratigraphic column of Gaotai Formation of Wutan 1 Well (b) and seismic stratigraphic section of Gaotai Formation in eastern Sichuan basin (c)

2　高台组蒸发岩特征

2.1　岩石学特征

根据蒸发岩、碳酸盐岩和陆源碎屑岩的矿物组成[15]，以石膏、白云石与黏土矿物为三端元，以 90%、50% 和 25% 为体积分数界线，按三级分类命名原则，川东地区中寒武统高台组含膏蒸发岩可分为膏盐岩类、石膏岩类、含膏白云岩类、含膏灰岩类、含膏泥岩类和含膏砂岩类。这 6 大类又可分为 11 小类：膏盐岩、盐岩、纯石膏岩、白云质石膏岩、泥质石膏岩、石膏质白云岩、含石膏白云岩、含石膏灰岩、石膏质泥岩、含石膏细砂岩和含石膏粉砂岩（图 2、3）。

1）膏盐岩类：在研究区高台组广泛发育，沉积厚度大，主要由膏盐岩和盐岩组成。该岩类主要呈灰色—灰白色，晶粒结构，致密块状构造，常常与石膏岩类互层。通常发育为下石膏上膏盐的厚层沉积序列。楼探 1 井、建深 1 井等高台组均发育较厚的盐岩（钾盐）层（图 3a）。这类岩石主要形成于气候干燥，水体相对浅且局限的潟湖，当在海平面上升时，潟湖较开放，盐类物质可以通过海水得到补充，导致这种岩类比较发育。

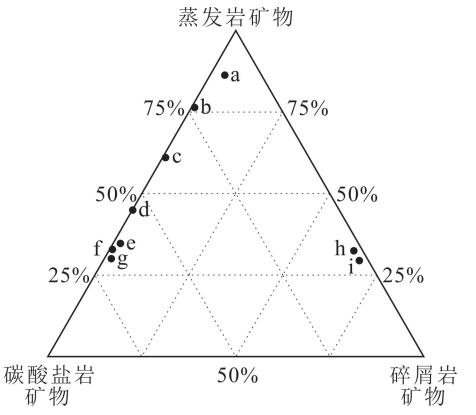
2）石膏岩类：研究区均有分布，但沉积厚度差异大，为白色—灰白色块状石膏岩（图 3b）、白云质石膏岩（图 3c）和泥质石膏岩，可见黄铁矿、玉髓及有机质。石膏具结晶结构，常发育透镜状、波状、韵律条带状等构造类型。如在楼探 1 井高台组发育有多达 20 层的石膏岩，累计厚度为 85 m；座 3 井 5 700～5 880 m发育灰白色石膏岩，单层厚度为 15 m；马深 1 井 7 140～7 300 m 发育白色石膏岩、灰白色泥质石膏岩，二者厚度均可达 8 m；丁山 1 井 2 650～2 850 m 发育白色石膏岩（累计厚度为 6 m）、灰白色泥质石膏岩（单层厚 10 m）。这种岩类主要形成于水体比较局限的潟湖环境，受海水影响相对较小。

3）含膏白云岩类：区内普遍发育，根据白云石与石膏的占比不同，将其划分为石膏质白云岩和含石膏白云岩。该岩类主要呈灰色—灰白色，晶粒结构，石膏质白云岩和含石膏白云岩常呈互层。楼探 1 井高台组发育 14 层石膏质白云岩（图 3d）和 65 层含石膏白云岩（图 3e、f），前者累计厚度为 54 m，后者累计厚度为 222 m，并且发育灰岩夹含膏泥晶白云岩；五探 1 井高台组发育 12 层含膏白云岩，累计厚度为 40 m；太和 1 井高台组在 4 750～5 400 m 范围发育 4 层石膏质白云岩，累计厚度为 54 m；林 1 井高台组在 1 830～1 970 m 发育 3 层石膏质白云岩，累计厚度为 29 m。含膏白云岩类多发育在潟湖环境，在潟湖远离湖盆中心的位置，由于白云岩与石膏岩和盐岩的沉积差异，以及石膏岩类物源补充的不足，白云石含量相对较多的含膏白云岩类容易沉积。

4）含膏灰岩类：研究区分布较少，厚度较薄（图 3g）。该岩类主要呈灰色—灰白色，晶粒结构，致密块状构造。如在丁山 1 井高台组在 2 600～2 800 m 发育 2 套含石膏灰岩，累计厚度为 4 m。在石柱—宝莲高台组剖面发育大量深灰色中层泥晶膏质灰岩、深灰色薄层夹中层泥晶含膏云质灰岩、深灰色中—厚层含膏泥晶灰岩夹泥质条带、深灰色中—厚层泥晶膏质灰岩。这类岩石主要形成于潟湖环境相对比较深层的部位。

5）含膏泥岩类：含膏泥岩类主要表现为石膏质泥岩，在野外剖面中较少发现。该岩类主要呈灰黑色—灰色，晶粒结构，致密块状构造。在五探 1 井发育有 1 套含石膏泥岩，累计厚度为 6 m。这种岩类多发育在受陆源物质供应的潟湖较深层环境中。

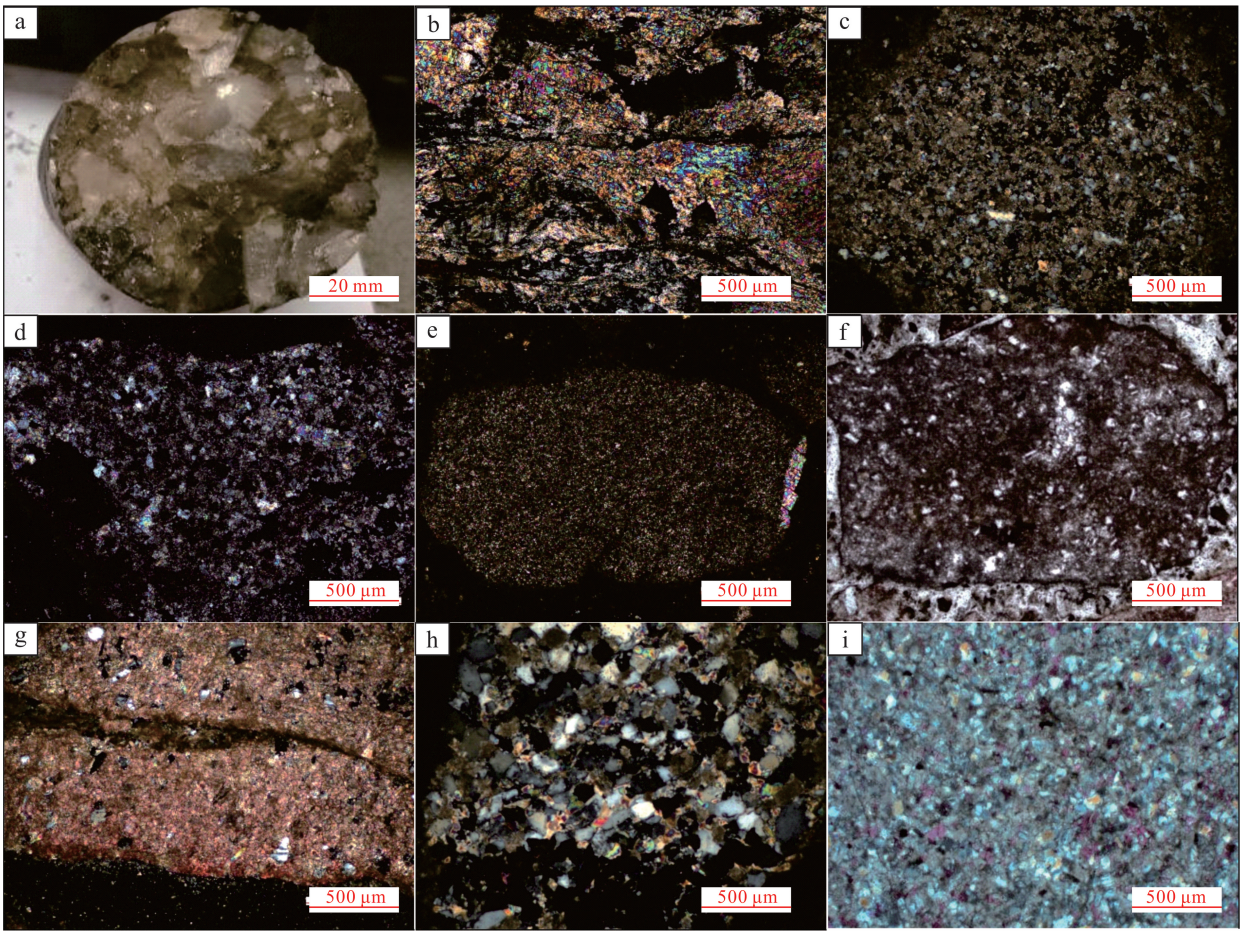
6）含膏砂岩类：研究区西南部发育大量厚层的含石膏细砂岩和含石膏粉砂岩（图 3h、i）。该岩类主要呈灰色—灰白色，晶粒结构，致密块状构造。在太和 1 井发育厚度较大的含膏砂岩，累计厚度为 233 m，这种岩类主要形成于受陆源物质供应较多的潟湖较浅部环境。



a. 盐岩；b. 石膏岩；c. 白云质石膏岩；d. 石膏质白云岩；e—g. 含石膏白云岩；h、i. 含石膏细砂岩。

图 2　川东地区高台组蒸发岩分类

Fig.2　Classification of evaporite of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin



a. 盐岩(钾盐),楼探1井,6 050 m,岩心;b. 石膏岩,楼探1井,5 595 m,正交偏光;c. 白云质石膏岩,楼探1井,5 931 m,正交偏光;d. 石膏质白云岩,楼探1井,5 325 m,正交偏光;e. 含石膏白云岩,楼探1井,5 665 m,正交偏光;f. 含石膏白云岩,五探1井,6 618 m,单偏光;g. 含石膏灰岩,楼探1井,6 491 m,正交偏光;h. 含石膏细砂岩,蓥北1井,2 724 m,正交偏光;i. 含石膏粉砂岩,座3井,5 798 m,正交偏光。

图3 川东地区高台组典型蒸发岩岩石学特征

Fig.3 Petrological characteristics of typical evaporites of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

2.2 岩性组合序列和沉积环境

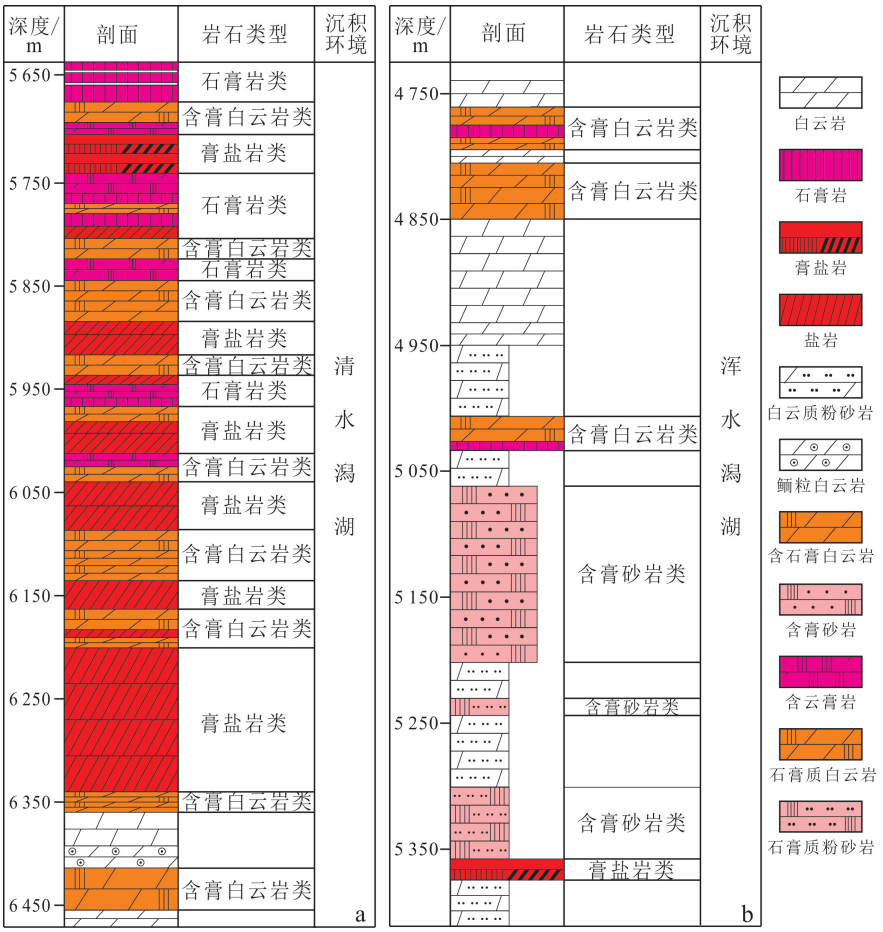
在对川东地区寒武系高台组17口井及露头分析的基础上,根据蒸发岩剖面的基本组成、构造特征和沉积环境[13-15],建立了川东地区高台组蒸发岩岩性组合序列,包括清水蒸发岩和浑水蒸发岩岩性组合序列。

2.2.1 清水蒸发岩岩性组合序列

清水蒸发岩岩性组合序列以楼探1井高台组为代表(图4a),主要发育膏盐岩类(图3a)、石膏岩类(图3b)、含膏白云岩类(图3e)、含膏灰岩类(图3g)、含膏泥岩类等5种类型,形成了巨厚的膏盐岩系地层,可达460 m。各种互层岩性具有不同的沉积厚度,且沉积厚度差异大。

清水蒸发岩岩性组合序列形成于清水潟湖环境。当海平面下降时,膏盐岩系有很好的沉积条件,以潟湖为中心向四周辐射沉积,石膏岩和盐岩的含量逐渐减少,白云岩的含量逐渐增加,在横向上自潟湖中心向周缘依次沉积膏盐岩类、石膏岩类和含膏白云岩类;纵向上也呈现膏盐岩类—石膏岩类—含膏白云岩类的旋回式沉积。当海平面上升时,潟湖通过海水得到补给,但由于海平面升高、盐度降低而不利于膏盐岩系的沉积,膏盐岩系沉积较少,甚至出现间断,正常潟湖逐渐演变为淡化潟湖;当海平面下降时,由于长时间干旱的古气候环境,潟湖水分大量蒸发,潟湖中钾盐浓度增高,清水潟湖逐渐演变为咸化潟湖,有利于膏盐岩系大量沉积。

沉积环境出现由较开放的潮坪向开放的潟湖、较封闭的潟湖和较封闭的潮坪方向逐渐变化。清水蒸发岩组合序列具有膏盐岩系巨厚且连续的特点。



a. 清水潟湖型(楼探 1 井)；b.浑水潟湖型(太和 1 井)。

图 4　川东地区高台组蒸发岩岩性组合序列

Fig.4　Lithologic assemblage sequence of evaporite of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

2.2.2　浑水蒸发岩岩性组合序列

浑水蒸发岩岩性组合序列以太和 1 井高台组为代表(图 4b)，主要发育含膏砂岩类、含膏白云岩类和膏盐岩类。各类蒸发岩内部不等厚度互层，夹杂一些陆源碎屑物质。浑水蒸发岩岩性组合序列主要形成于浑水潟湖环境。在炎热干旱的局限环境下，当海平面下降时，陆源碎屑会被搬运到附近的潟湖中，主要沉积含膏砂岩类，同时发育含膏白云岩类和少量膏盐岩类，此类潟湖为浑水潟湖；当海平面上升时，膏盐岩系的沉积较少，甚至出现间断。浑水潟湖型表现为从潟湖到混积潮坪再到潟湖的沉积序列。该类型在五探 1 井、马深 1 井和建深 1 井也有体现，主要特征是自下而上发育白云质砂岩与含膏砂岩类旋回，同时膏盐岩系薄且间断。

综上所述，清水潟湖型发育受海洋物源供应影响的不稳定海平面升降沉积环境中的膏盐岩系，浑水潟湖型发育受陆源物质供应的过渡带和间断海水影响的膏盐岩系。当两种潟湖类型同时发育时，清水潟湖型距海较近，距陆地较远；浑水潟湖型距海较远，距陆地较近。清水潟湖型的沉积水体相对较深，受海水物源的影响大；浑水潟湖型的沉积水体相对较浅，受陆地物源的影响大。同时，两者在物源补给、海平面升降发生变化时可以相互转换：当陆源供应不足，海平面上升时，浑水潟湖型会演变为清水潟湖型；当陆源供应丰富，海平面下降时，清水潟湖型会演变为浑水潟湖型。

2.3　分布特征

2.3.1　纵向分布特征

高台组岩性主要为碳酸盐岩和蒸发岩，普遍含有碎屑组分。以五探 1 井为例(图 1b)，高台组厚 273 m，其顶部以石膏质白云岩与洗象池组底部的白云岩分界，底部以粉砂质灰岩和下伏龙王庙组顶部的灰质白云岩分界；上部以发育多套含膏白云岩类(石膏质白云岩)和石膏岩类(白云质石膏岩夹多

层石膏岩)为主;中部主要发育含膏白云岩类(石膏质白云岩),其间夹少量石膏岩类(含云石膏岩)和含膏泥岩类;下部发育多套含膏白云岩类(石膏质白云岩)、石膏岩类(白云质石膏岩)。

总体上,五探1井高台组沉积时期处于一个潟湖和潮坪交替的沉积环境。海平面下降时,该区属于封闭潟湖环境,潟湖海水盐度较高,容易沉积多套蒸发岩,如高台组上部发育多套含膏白云岩类、石膏岩类;海平面上升时,该区属于潮坪环境,容易受到海水侵入的影响,水体盐度较低,容易发育多套较薄的含膏白云岩类、石膏岩类和含膏泥岩类沉积。

2.3.2 横向分布特征

在进行单井岩石成因类型分析的基础上,为进一步建立膏盐岩系岩石成因演化模式,选取了研究区内的高科1井、高石16井、广探2井、蓥北1井、五探1井、曾1井、马深1井、建深1井等关键井和剖面,对比建立了大范围的垂向和横向剖面。如图5所示,川东地区高台组沉积厚度差异大,横向上地层厚度自西南向东北具有"间断略变厚、沉积水体间断变深"的趋势。膏盐岩系主要分布在研究区东部和东南部,特别是太和1井、建深1井一带。由此判断在高台组沉积过程中,川东东部和南部存在两个沉积盆地,盆地内的潟湖形成了厚达数百米的膏盐岩系岩石。

高台组沉积时期古气候相对干燥,研究区以发育潮坪—潟湖沉积为主,自西南向东北依次为潮坪—混积潮坪—潟湖,反映了水体逐渐变深。在靠近物源方向受陆地物源影响较大,以浑水沉积为主,膏盐岩系不易发育或多发育含膏砂岩类、含膏泥岩类和含膏白云岩类,横向上沉积厚度较薄;越远离陆源物质,沉积水体相对越深,受海水影响越明显,膏盐岩系在潟湖中越广泛发育。同时,在海平面下降时期的暴露环境下,由于潟湖的水体状态较为封闭,易发育多套含膏白云岩类和石膏岩类;在海平面上升时期发育的潟湖受海水物源影响大,易发育多套薄层含膏白云岩类、石膏岩类和含膏泥岩类。

2.3.3 平面分布特征

基于前人研究成果[10],笔者编制了研究区及邻区高台组蒸发岩残余厚度等值线图(图6)。高台组膏盐岩系的分布主要集中于2个区域,即建深1井区—巫溪蒸发岩区和太和1井区—石柱蒸发岩区;前者聚膏中心位于建深1井和楼探1井附近,其中楼探1井膏盐岩系厚度可达569 m;后者聚膏中心在太和1井向北东方向,呈椭圆形展布,其中太和1井蒸发岩厚度超过300 m。总体上表现为:受陆源物质影响越大,蒸发岩的沉积厚度越薄;受海水物源影响越大,蒸发岩的厚度越厚。

2.3.4 盖层分布

通过对全球368个大型含油气系统盖层的综合分析,其盖层主要为泥页岩、致密石灰岩和蒸发岩3种[16]。根据蒸发岩厚度统计(图6)和前人资料[3,11,14-15],笔者对川东地区可作为高台组盖层的蒸发岩、泥页岩、泥灰岩的厚度进行了统计。盖层厚度0 m等值线围绕马深1井西侧—楼探1井东侧—林1井南侧—高石16井,以"宽广圆环状"覆盖川东大部分地区(图7)。盖层厚度300 m等值线环绕楼探1井东侧—建深1井东侧—太和1井南侧,以"东北—西南单方向圆环状"覆盖在川东地区东部。盖层厚度600 m等值线围绕楼探1井东侧—建深1井西侧,以"东北—西南单方向圆环状"嵌套在300 m等值线的内部覆盖在川东地区东部。

3 高台组岩相古地理及沉积模式

3.1 岩相古地理

结合前人对四川盆地及其周缘的研究成果[17-19],基于岩石类型、单井沉积相和测井标志,综合地震资料,总结了川东地区高台组岩相古地理平面展布(图8)。

川东地区高台组沉积时期总体发育碳酸盐岩局限台地相沉积,在兴凯运动和大规模海退的背景下,研究区西部受到古陆的影响,地层厚度较薄,发育混积潮坪相沉积,由西向东地层厚度逐渐增加,发育局限台地和开阔台地。局限台地相内部可以细分为潮坪亚相、潟湖亚相和鲕粒滩亚相。以白云岩为代表的潮坪亚相分布在研究区西部;潟湖亚相可以细分为清水潟湖微相和浑水潟湖微相,清水潟湖微相近海发育,其周围发育滩体,浑水潟湖靠近物源发育,滩体发育较少。

3.2 沉积模式

在海水深部和浅部表层两个部位都可以为蒸发岩的沉积提供盐类物质[20-21]。川东地区高台组蒸发岩主要来源于海水浅表蒸发和陆地河流盐类补给[15],且来源部位均为浅部表层。结合川东地区高台组膏盐岩系的发育位置及两种岩类组合、潟湖模式的类型,根据岩石类型、水动力条件及膏盐岩系单层厚度等沉积特征进行对比分析,并建立清水潟湖

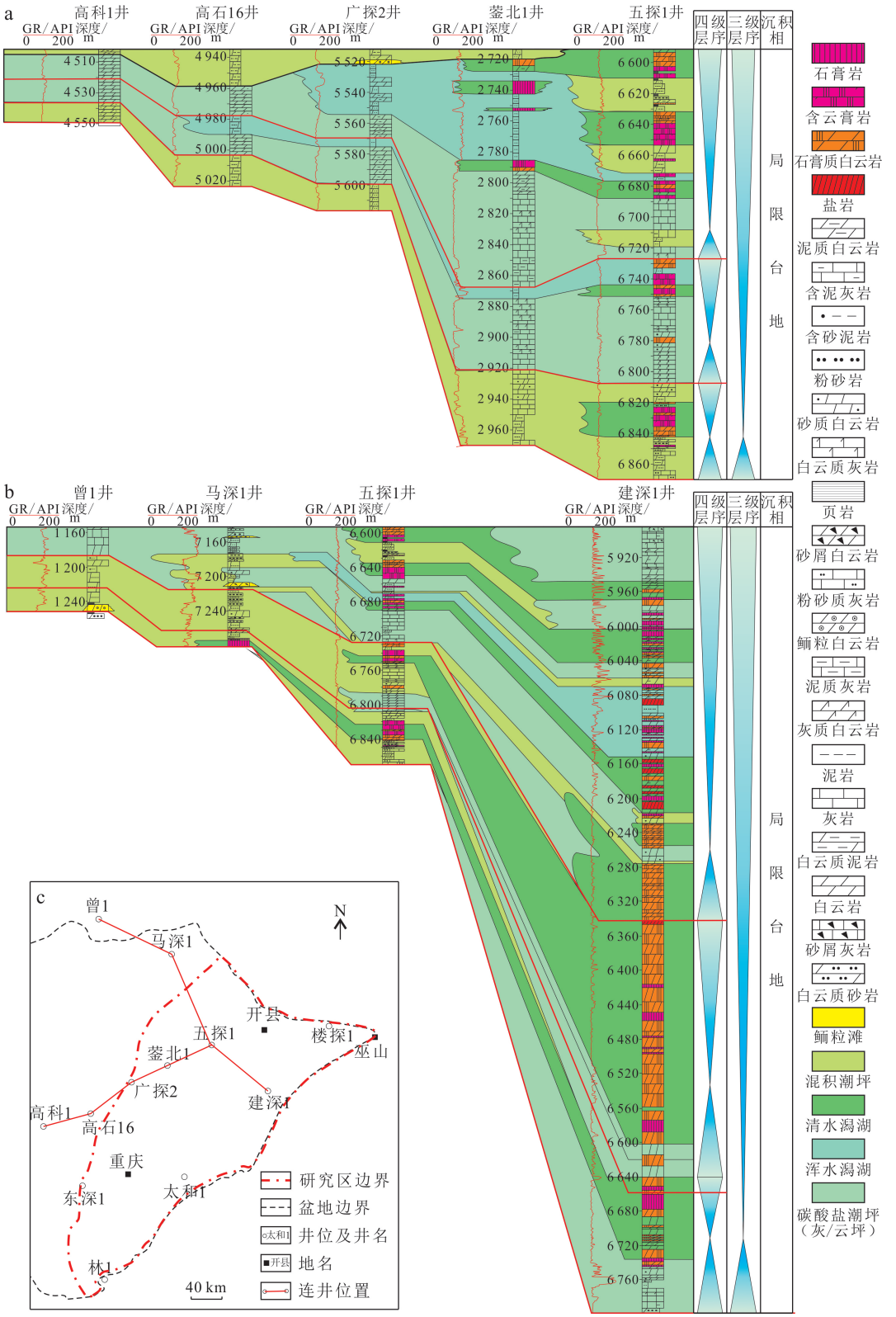


图 5　川东地区高台组连井沉积相(a、b)和研究区位置图(c)

Fig.5　Interwell sedimentary facies of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin (a、b) and location of in the study area (c)

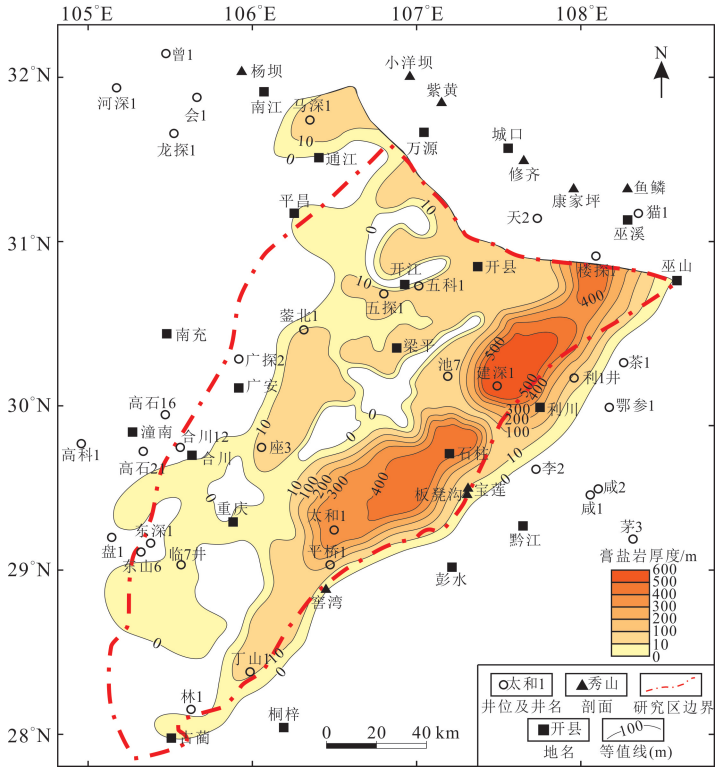


图 6 川东地区高台组蒸发岩残余厚度等值线

Fig.6 Contour of residual evaporite thickness of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

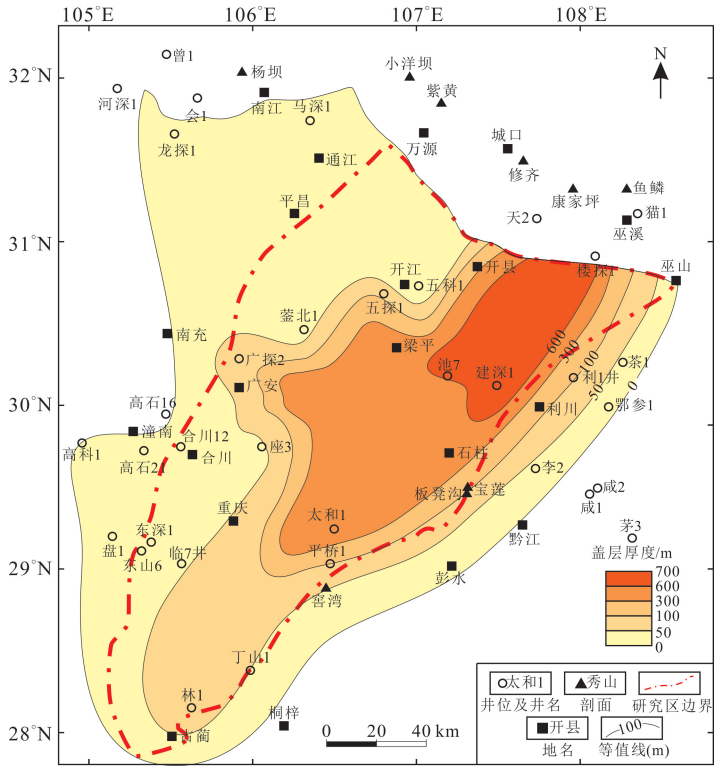


图 7 川东地区高台组盖层厚度等值线

Fig.7 Contour of cover thickness of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

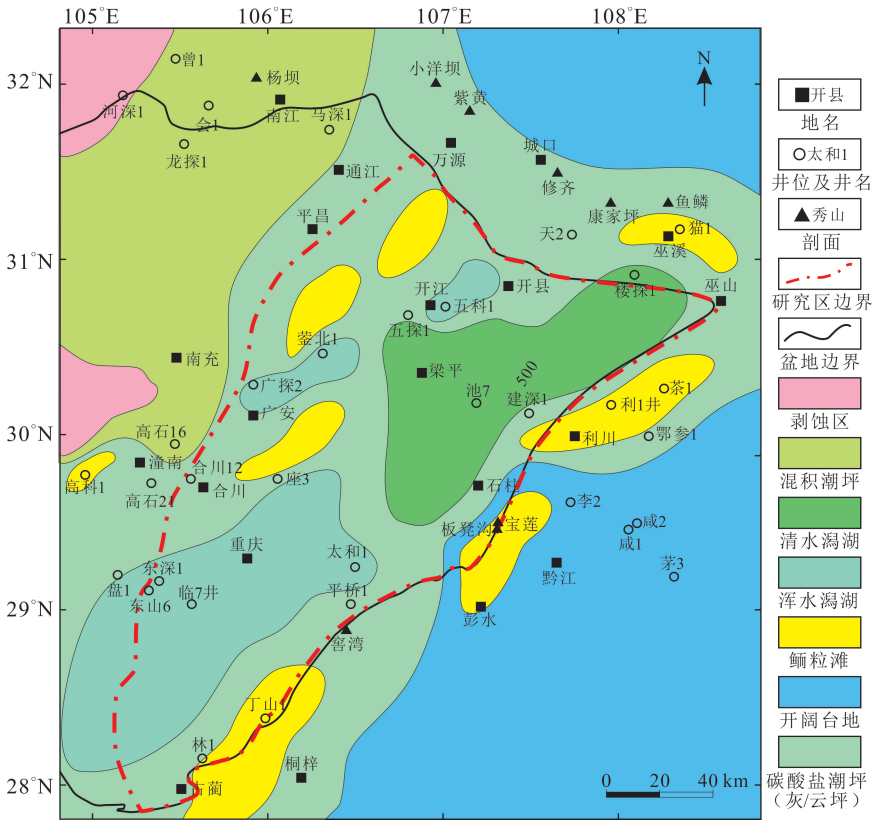


图 8　川东地区高台组岩相古地理

Fig.8　Lithofacies paleographic map of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

及浑水潟湖的源控多潟湖沉积模式(表 1，图 9)。该模式主要受干热的气候、连续的海退过程、陆源物质的供应和礁滩的障壁作用影响[13,15,22]。上述条件的变化会使两种潟湖类型发生转化。

1)清水潟湖。主要发育膏盐岩类、石膏岩类、含膏白云岩类、含膏灰岩类等，单套岩层厚度大于 45 m。由于古地形和零星展布的滩体使梁平—巫溪低部位发育了一个展布面积宽广、水深且水体接近局限的较封闭潟湖，膏盐浓度较高的水体与浓度较低的水体通过置换的方式逐渐回流到了潟湖的中心部位，进而使膏盐岩系得到沉积。海平面上升时提供的较高膏盐浓度海水为潟湖膏盐的积聚提供了持续且规律的物质条件。清水潟湖蒸发岩的厚度较厚。

表 1　蒸发岩沉积环境沉积特征表

Table 1　Deposition characteristics of evaporite sedimentary environment

沉积特征	清水潟湖模式	浑水潟湖模式
水动力条件	波浪、潮汐作用	海平面上升作用、牵引流
岩石类型	膏盐岩类、石膏岩类、含膏白云岩类、含膏灰岩类	含膏砂岩类、含膏泥岩类
自然伽马	值低，平直	值较高，锯齿状
膏盐岩系单层厚度	＞45 m	＜15 m
凹陷程度	较深	较浅
规模	较大	较小
封闭情况	半封闭—封闭	较封闭
发育位置	云坪外部	云坪内部
代表井点	建深 1 井、楼探 1 井	太和 1 井

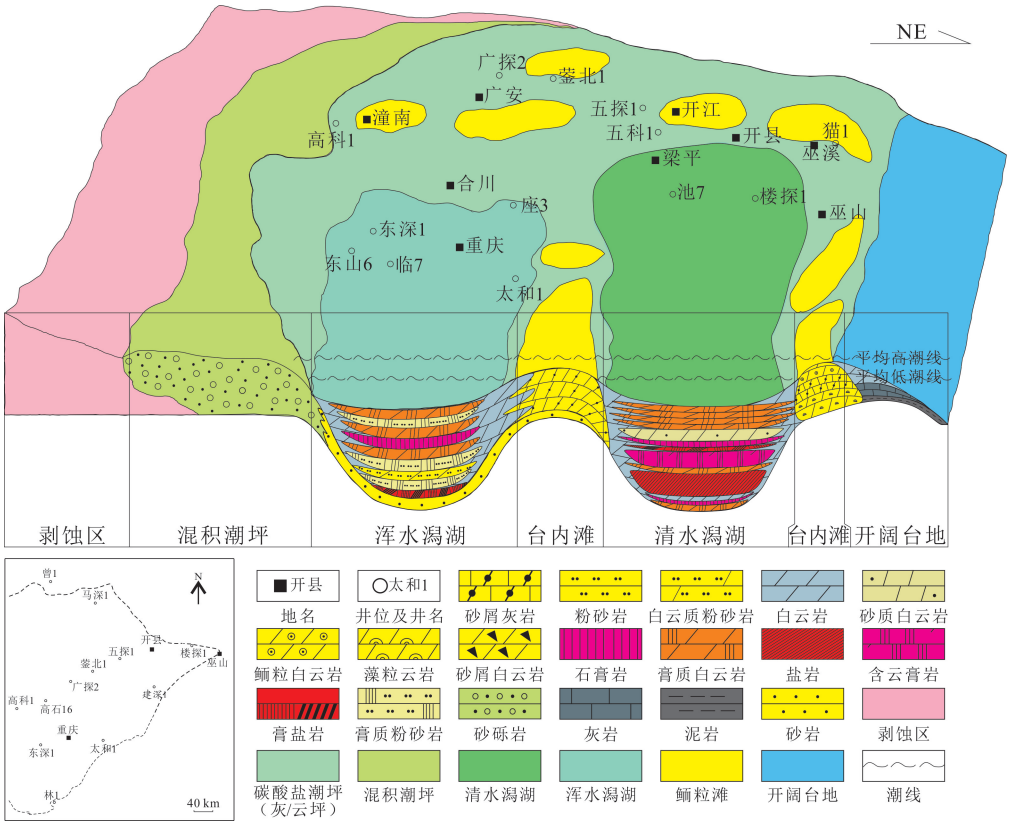


图 9 川东地区高台组源控多潟湖成因模式

Fig.9 Source-controlled multiple-lagoon genesis model of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

2)浑水潟湖。主要为含膏砂岩类和含膏泥岩类,具有厚度薄、连续性好等特点,蒸发岩单层厚度小于 15 m。受控于海平面上升和陆源含盐水体的补给,在干旱气候条件下,强烈的蒸发作用形成蒸发岩,仅发育于靠近陆地物源的混积潮坪上,长时间与外海隔绝。如浑水潟湖剖面的含膏砂岩类形成于该模式。

从图 9 中可以看出,清水潟湖与浑水潟湖距离较近,浅滩分布规模较小。浑水潟湖和清水潟湖都属于半封闭性质,海水影响的差异性较小,唯一不同的是浑水潟湖受到陆源碎屑的注入,海平面的周期波动导致浑水潟湖出现白云岩-含膏蒸发岩-陆源碎屑岩的沉积组合,清水潟湖出现白云岩-含膏蒸发岩的沉积组合。综上所述,在干旱炎热的古环境、浅滩形成的封闭环境、海水的周期性波动和物源补给的共同作用下形成了川东寒武系的源控多潟湖成因模式。

4 蒸发岩与油气勘探

4.1 高台组蒸发岩的储盖组合

高台组蒸发岩作为龙王庙组的直接盖层,对龙王庙组的油气储存具有重要作用。结合前人对于龙王庙组储层的研究成果[23-25],笔者对龙王庙组储层与高台组盖层的组合关系进行了研究(图 10)。安岳气田磨溪 8 井上覆高台组蒸发岩盖层较薄,龙王庙组储层日产气量为 89.81 万 m^3,自西向东高台组蒸发岩盖层厚度逐渐增加,五探 1 井、楼探 1 井测井解释结论均为气测异常,表现为水层或干层,说明高台组蒸发岩厚度与龙王庙组储层的含气规模存在一定的负相关关系,即高台组蒸发岩厚度越厚,其下伏龙王庙组储层含气规模越小;反之高台组蒸发岩厚度越薄,其下伏龙王庙组储层含气规模越大。

4.2 高台组蒸发岩岩间储层探讨

高台组蒸发岩岩间存在白云岩储层,高台组有利储层岩性以潮坪相粉晶白云岩为主,储集空间包括溶孔(图 11a — f)、微裂缝(图 11g、h)、溶洞(图 11i)等类型,其中以溶蚀孔洞为主,见开启状微裂缝。根据高台组五探 1 井取心段的物性资料(表 2):Ⅰ类储层孔隙度范围为 7.0%～10.4%,Ⅱ类储层孔隙度范围为 5.1%～6.0%,Ⅲ类储层孔隙度范围为2.8%～3.6%。高台组储集层储层的累计厚度

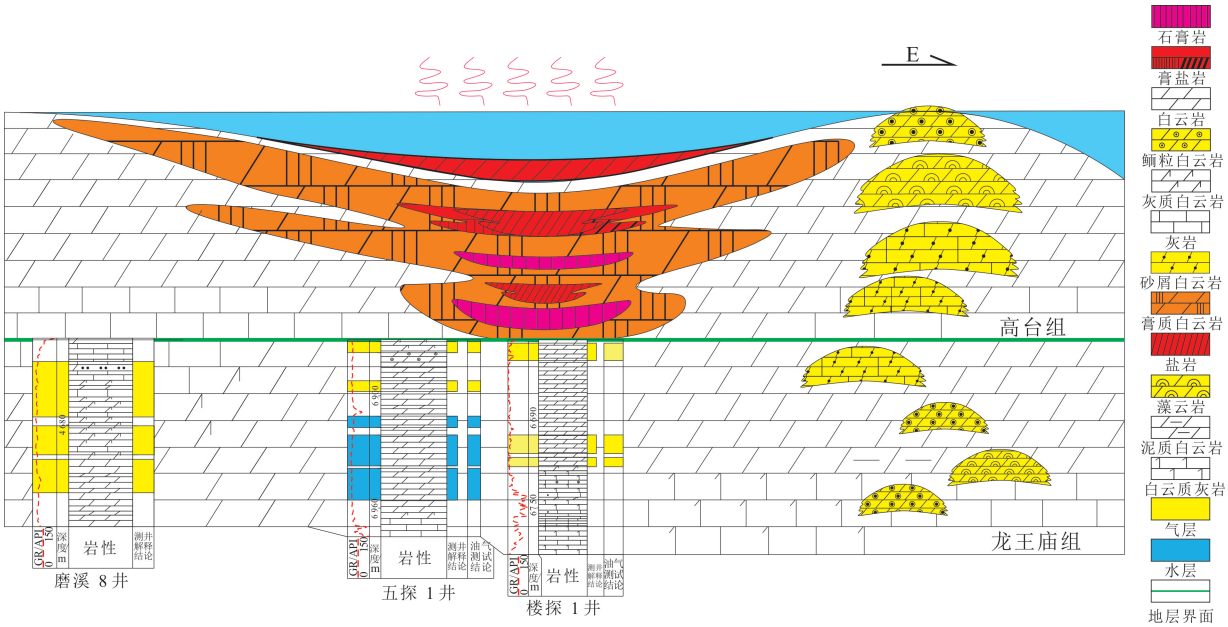
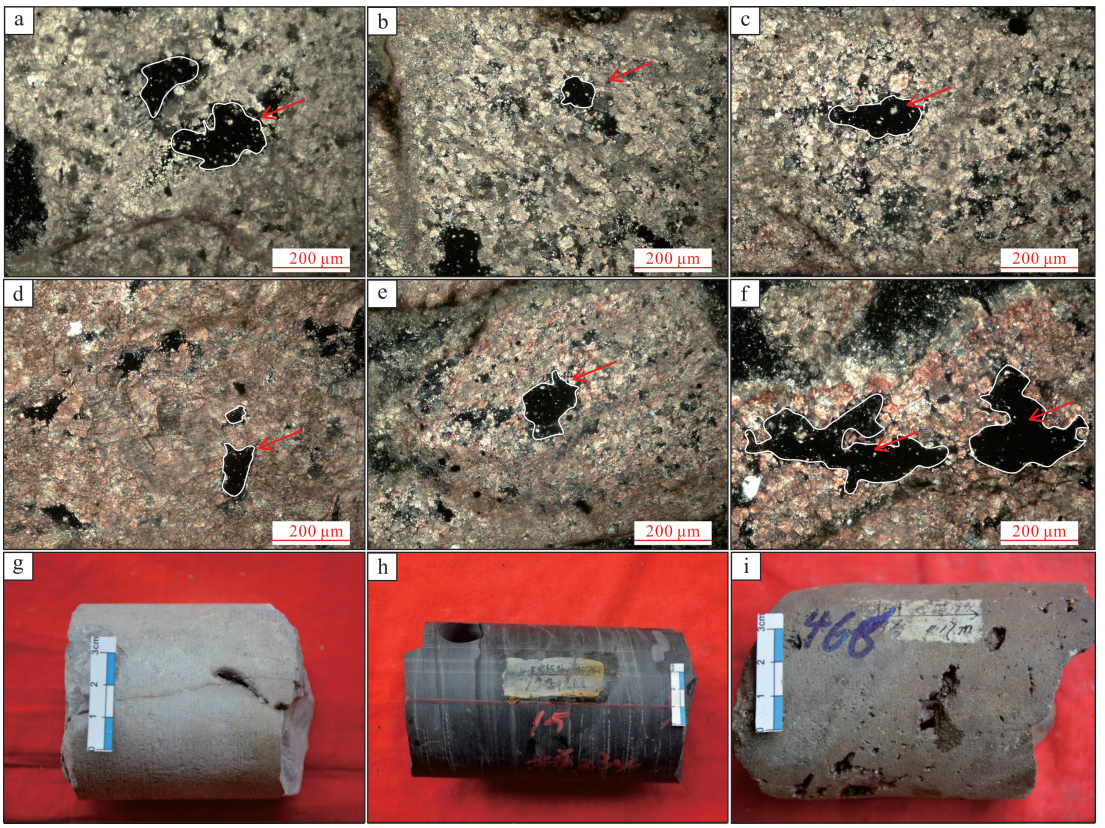


图 10　川东地区高台组和龙王庙组储盖组合

Fig.10　Storage cover combination of the Gaotai Formation and the Longwangmiao Formation, eastern Sichuan basin



a — f. 粉晶白云岩，溶蚀孔洞，五探 1 井，分别位于 6 995 m、6 700 m、6 729 m、6 732 m、6 759 m 和 6 762 m，正交偏光；g. 浅灰色膏云岩，见少量高角度裂缝，溶洞半充填石膏，五科 1 井，5 940 m；h. 深灰色粉晶云岩，发育少量开启状微裂缝，水平为主（少量高角度），发育水平状层理，广探 2 井，5 563 m；i. 浅灰色粉晶云岩，溶孔溶洞发育，溶洞部分充填，见大量黄铁矿晶体，部分溶洞中充填有石英晶体，五科 1 井，6 050 m。

图 11　川东地区高台组显微镜照片和岩心

Fig.11　Core and microscope photograph of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

表2 川东地区中寒武统高台组五探1井储集物性表

Table 2 Reservoir physical properties of Wutan 1 Well of the Middle Cambrian Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

深度/m	储厚/m	孔隙度/%	渗透率/($\mu m^2 \times 10^{-5}$)	Ⅰ类储层		Ⅱ类储层		Ⅲ类储层	
				厚度/m	孔隙度/%	厚度/m	孔隙度/%	厚度/m	孔隙度/%
6 695.1～6 712.0	16.9	4.3	6.9	0.1	7.0	7.5	5.1	4.6	2.8
6 727.5～6 732.6	5.1	6.3	130.0	2.1	8.0	2.0	6.0	1.0	3.3
6 758.4～6 768.8	10.4	8.3	2 931.7	6.1	10.4	3.5	5.8	0.8	3.6
平均值	10.8	6.3	1 022.8	2.7	6.1	4.3	5.6	2.1	3.2

分布在0.1～7.5 m之间。储集层的非均质性较强，厚度较薄，总体上呈中—低孔低渗的特征。

4.3 有利勘探区带预测

综合高台组蒸发岩的储盖组合和高台组蒸发岩岩间储层进行研究，结果表明：与高台组蒸发岩有关的储层包括蒸发岩岩下储层和蒸发岩岩间储层两大类。根据蒸发岩和盖层厚度、岩相古地理和潟湖成因模式研究发现：高台组盖层与下部龙王庙组白云岩储层形成了较好的储盖组合，以浑水潟湖环境下龙王庙组储层最为发育；岩间储层主要表现为高台组蒸发岩岩间储层，主要发育清水潟湖环境下高台组粉晶白云岩储层。

在研究高台组岩相古地理特征、蒸发岩岩下储层和蒸发岩岩间储层特征等基础上，综合天然气成藏地质条件，进一步明确了与高台组蒸发岩相关的3个有利勘探区带(图12)，分别为北部有利勘探区带、中部有利勘探区带和南部有利勘探区带。

北部有利勘探区带位于川东高陡构造带，区内背斜圈闭发育，储层类型主要为蒸发岩岩间粉晶白云岩储层，储层孔隙发育，物性较好，非均质性强，平均孔隙度为6.3%，最高可达15.0%。区内下伏龙马溪组烃源岩，生烃强度大，展示了该区良好的勘探前

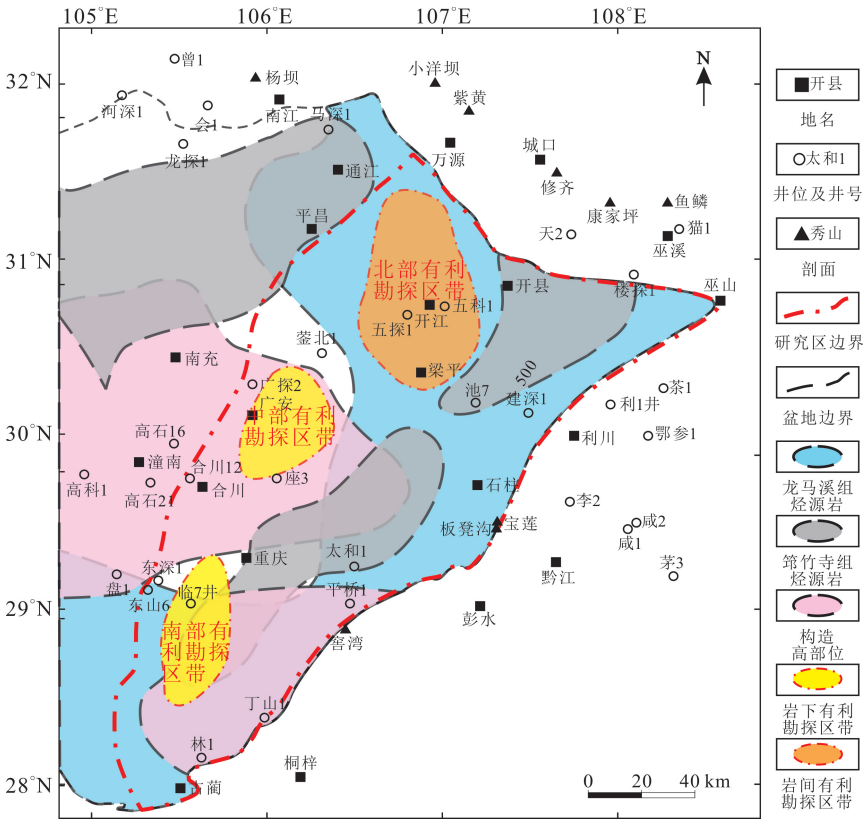


图12 川东地区高台组有利勘探区带预测

Fig.12 Prediction of favorable exploration targets of Gaotai Formation, eastern Sichuan basin

景。中部有利勘探区带位于继承性古隆起发育区，储层类型主要为高台组蒸发岩下龙王庙组储层，下伏筇竹寺组烃源岩厚度大，生烃强度高，气源条件充足。同时，该有利勘探区带长期处于古构造的相对高点，为有利的油气运移指向带[26]。龙王庙组安岳大气田的发现证实了高台组薄层蒸发岩下伏龙王庙组储层的成藏组合形式，显示了该区具有良好的天然气勘探潜力。南部有利勘探区带位于构造高部位，区内储层类型主要为高台组蒸发岩下龙王庙组储层，符合高台组薄层蒸发岩下伏龙王庙组储层的成藏组合形式，区内龙马溪组泥质烃源岩发育，生烃强度大，而该区高陡构造背景为油气从龙马溪组烃源岩向龙王庙组储层的运移提供了条件[27-28]。高台组薄层蒸发岩下伏龙王庙组储层的组合圈闭可作为区内下一步油气勘探的新的目标类型。

5　结论

1）川东中寒武统高台组蒸发岩可分为膏盐岩类、石膏岩类、含膏白云岩类、含膏灰岩类、含膏泥岩类和含膏砂岩类，共 6 类，分别形成于清水潟湖环境和浑水潟湖环境；高台组蒸发岩厚度在平面上从西向东逐渐增厚，盖层分布具有“宽广圆环状”的特点。

2）川东中寒武统高台组蒸发岩主要发育于局限台地的潟湖环境。中寒武世时期，古气候条件较为干热，海平面持续下降，陆源碎屑供应充足，颗粒滩的障壁滩作用形成了川东地区的多潟湖环境，建立了川东地区高台组蒸发岩清水潟湖和浑水潟湖的源控多潟湖成因模式。

3）寒武纪时期，川东地区高台组与龙王庙沉积环境具有良好的继承性，导致高台组蒸发岩厚度与下伏龙王庙组含气性存在负相关关系，高台组蒸发岩越厚，龙王庙组含气规模越小；在高台组内部蒸发岩间存在一定规模的白云岩储层，储集层的非均质性较强，厚度较薄，总体上呈中—低孔低渗的特征。

4）川东中寒武统高台组的储盖组合包括浑水潟湖成因的高台组盖层与龙王庙组储层的岩下储层和清水潟湖成因的高台组蒸发岩岩间储层；研究区发育 3 个天然气有利勘探区带，分别位于研究区北部、中部以及南部地区，是川东地区潜在的后备勘探领域。

参考文献（References）：

[1] 金之钧，龙胜祥，周雁，等. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. 石油与天然气地质，2006，27(5)：571－583.
Jin Zhijun，Long Shengxiang，Zhou Yan，et al. A Study on the Distribution of Saline-Deposit in Southern China [J]. Oil & Gas Geology，2006，27(5)：571－583.

[2] Michael R H，Martin P A，Jackson T I. Understanding Salt Tectonics [J]. Earth Science Reviews，2007，82(1)：1－28.

[3] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京：石油工业出版社，2008.
Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology[M]. Beijing：Petroleum Industry Press，2008.

[4] Masson P H. An Occurrence of Gypsum in Southwest Texas[J]. Journal of Sedimentary Research，1955，25(1)：72－77.

[5] Kinsman D J J. Modes of Formation，Sedimentary Associations，and Diagnostic Features of Shallow-Water and Supratidal Evaporites[J]. AAPG Bulletin，1969，53 (4)：830－840.

[6] 袁见齐，霍承禹，蔡克勤. 高山深盆的成盐环境：一种新的成盐模式的剖析[J]. 地质论评，1983，29(2)：159－165.
Yuan Jianqi，Huo Chengyu，Cai Keqin. The High Mountain Deep Basin Saline Environment：A New Genetic Model of Salt Deposits[J]. Geological Review，1983，29 (2)：159－165.

[7] Schmalz R F. Deep-Water Evaporite Deposition：A Genetic Model[J]. AAPG Bulletin，1969，53 (4)：798－823.

[8] Hsu K J. Origin of Saline Giants：A Critical Review After the Discovery of the Mediterranean Evaporate [J]. Earth Science Reviews，1972，8 (4)：371－396.

[9] Liu H，Tan X C，Li Y H，et al. Occurrence and Conceptual Sedimentary Model of Cambrian Gypsum-Bearing Evaporites in the Sichuan Basin，SW China [J]. Geoscience Frontiers，2018，9(4)：1179－1191.

[10] 杜金虎，邹才能，徐春春，等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发，2014，41(3)：268－277.
Du Jinhu，Zou Caineng，Xu Chunchun，et al. Theoretical and Technical Innovations in Strategic Discovery of Agiant Gas Field in Cambrian Longwangmiao Formation of Central Sichuan Paleo-Uplift，Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development，2014，41 (3)：268－277.

[11] 王纪煊. 川东及周缘地区寒武系白云岩-蒸发岩共生体系沉积-成岩系统研究[D]. 荆州：长江大学，2023.
Wang Jixuan. Study on the Sedimentation-Formation

System of Cambrian Dolomite-Evaporite Paragenesis System in the Eastern Sichuan Basin and Its Peripheral Area[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.

[12] 王纪煊,胡忠贵,远光辉,等. 川东寒武系高台组碳酸盐岩-蒸发岩共生体系地球化学特征及沉积模式[J/OL]. 古地理学报.[2024-03-25].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4678.P.20240117.0832.002.html.
Wang Jixuan, Hu Zhonggui, Yuan Guanghui, et al. Geochemical Characteristics and Depositional Model of Carbonatite-Evaporite Syngenetic System of the Cambrian Gaotai Formation in the Eastern Sichuan Basin[J/OL]. Journal of Palaeogeography.[2024-03-25].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4678.P.20240117.0832.002.html.

[13] 顾志翔,何幼斌,彭勇民,等. 四川盆地下寒武统膏盐岩"多潟湖"沉积模式[J].沉积学报,2019,37(4):834-846.
Gu Zhixiang, He Youbin, Peng Yongmin, et al. "Multiple-Lagoon" Sedimentary Model of the Lower Cambrian Gypsum-Salt Rocks in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedmentologica Sinica, 2019, 37(4):834-846.

[14] 王纪煊,胡忠贵,远光辉,等.碳酸盐岩-蒸发岩共生体系沉积特征及演化模式:以四川盆地东部高台组为例[J/OL].沉积学报,[2024-03-25].https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.024.
Wang Jixuan, Hu Zhonggui, Yuan Guanghui, et al. Sedimentary Characteristics and Evolutionary Patterns of Carbonatite-Evaporite Syngenetic System: A Case Study of the Gaotai Formation in Eastern Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, [2024-03-25]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.024.

[15] 林良彪,陈洪德,淡永,等.四川盆地中寒武统膏盐岩特征与成因分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(增刊2):95-103.
Lin Liangbiao, Chen Hongde, Dan Yong, et al. Characteristics and Genesis of Middle Cambrian Gypsum Rock in Sichuan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (Sup. 2): 95-103.

[16] John K W. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons[M]. Heidelberg:Springer, 2006.

[17] 胡忠贵,王纪煊,李世临,等.川东地区寒武系高台组白云岩-蒸发岩共生地层高频层序划分及地质意义[J].岩性油气藏,2023,35(2):113-124.
Hu Zhonggui, Wang Jixuan, Li Shilin, et al. High-Frequency Sequence Division and Geological Significance of Dolomite-Evaporite Paragenetic Strata of Cambrian Gaotai Formation in Eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(2): 113-124.

[18] 黄文明,刘树根,张长俊,等.四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理[J].石油与天然气地质,2009,30(5):566-575.
Huang Wenming, Liu Shugen, Zhang Changjun, et al. Reservoir Characteristics and Formation Mechanism of the High Quality Cambrian Reservoirs in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5):566-575.

[19] 胡忠贵,吴松,郭艳波,等.川东地区下寒武统龙王庙组储层特征及主控因素研究[J].长江大学学报(自然科学版),2020,17(5):1-9.
Hu Zhonggui, Wu Song, Guo Yanbo, et al. The Study on Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020, 17(5):1-9.

[20] Rangel H D, Guimarães P T M, Spadini A R. Barracuda and Roncador Giant Oil Fields, Deep-Water Campos Basin, Brazil[J]. AAPG Memoir, 2003, 78: 123-137.

[21] 邹灏. 四川盆地寒武系膏盐岩特征研究[D]. 成都:成都理工大学,2011.
Zou Hao. Characteristics of the Cambrian Gypsum-Salt Rocks in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.

[22] 单玄龙,邢健,苏思远,等.川南长宁地区下古生界五峰组—龙马溪组一段页岩岩相与含气性特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(5):1323-1337.
Shan Xuanlong, Xing Jian, Su Siyuan, et al. Shale Lithofacies and Gas-Bearing Characteristics of the Lower Paleozoic Wufeng Formation-Member 1 of Longmaxi Formation in Changning Area, Southern Sichuan[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023, 53(5):1323-1337.

[23] 杨威,谢武仁,魏国齐,等.四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层展布与勘探区带[J].石油学报,2012,33(增刊2):21-34.
Yang Wei, Xie Wuren, Wei Guoqi, et al. Sequence Lithofacies Paleogeography, Favorable Reservoir Distribution and Exploration Zones of the Cambrian

and Ordovician in Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (Sup.2):21 - 34.

[24] 杨雪飞，王兴志，杨跃明，等.川中地区下寒武统龙王庙组白云岩储层成岩作用[J].地质科技情报，2015，34(1):35 - 41.
Yang Xuefei, Wang Xingzhi, Yang Yueming, et al. Diagenesis of the Dolomite Reservoir in Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Central Sichuan Basin[J]. Geological Science Technology Information, 2015, 34 (1): 35 - 41.

[25] 王东，王海军，王莹，等.川西南井研地区龙王庙组储层特征及主控因素[J].断块油气田，2022，29(1):14 - 19.
Wang Dong, Wang Haijun, Wang Ying, et al. Reservoirs Characteristics and Main Controlling Factors of Longwangmiao Formation in Jingyan Area, Southwestern Sichuan Basin[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2022,29(1):14 - 19.

[26] 吴冬，邓虎成，熊亮，等.四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组—筇竹寺组层序充填和演化模式[J].石油与天然气地质，2023，44(3):764 - 777.
Wu Dong, Deng Hucheng, Xiong Liang, et al. Sequence Filling and Evolutionary Model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi Formations in Sichuan Basin and on Its Periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2023,44(3): 764 - 777.

[27] 边瑞康，孙川翔，聂海宽，等. 四川盆地东南部五峰组—龙马溪组深层页岩气藏类型、特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质，2023，44(6)：1515 - 1529.
Bian Ruikang, Sun Chuanxiang, Nie Haikuan, et al. Types, Characteristics, and Exploration Targets of Deep Shale Gas Reservoirs in the Wufeng - Longmaxi Formations, Southeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1515 - 1529.

[28] 王纪煊，胡忠贵，李世临，等.四川盆地东部地区中寒武统高台组沉积相及有利区预测[J/OL].沉积学报.[2024 - 03 - 25]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000 - 0550.2022.155.
Wang Jixuan, Hu Zhonggui, Li Shilin, et al. Characteristics and Evolution of Sedimentary Sequences of the Middle Cambrian Gaotai Formation in the Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica.[2024 - 03 - 25]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000 - 0550.2022.155.