

doi: 10.12029/gc20220202

季天愚, 杨威, 武雪琼, 蒲仁海, 李德江, 刘满仓, 缪卫东, 苏楠, 叶颖. 2022. 塔里木盆地台盆区寒武系盖层评价及对油气盖层有利区的优选 [J]. 中国地质, 49(2): 369–382.

Ji Tianyu, Yang Wei, Wu Xueqiong, Pu Renhai, Li Dejiang, Liu Mancang, Miao Weidong, Su Nan, Ye Ying. 2022. Evaluation of Cambrian caprock in the platform–basin area of Tarim Basin and optimization of favorable area for oil and gas caprock[J]. Geology in China, 49(2): 369–382(in Chinese with English abstract).

塔里木盆地台盆区寒武系盖层评价及对油气盖层有利区的优选

季天愚^{1,2}, 杨威¹, 武雪琼¹, 蒲仁海², 李德江¹, 刘满仓¹, 缪卫东¹, 苏楠¹, 叶颖³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 地质学系, 陕西 西安 710069; 3. 中国石油华北油田第四采油厂, 河北 廊坊 065000)

摘要:【研究目的】塔里木盆地台盆区中寒武统发育大面积的膏盐岩、膏质泥岩和膏质云岩地层, 探讨该套地层的油气封盖能力和展布可为塔里木盆地寒武系盐下领域的勘探提供依据。【研究方法】对 4 口井的 44 个岩心样品进行镜下薄片、物性参数和突破压力测试。通过建立各参数之间的关系, 定量地对研究区中寒武统不同岩性岩石的封盖能力进行评价; 结合二维地震和 14 口钻井资料对研究区中寒武统膏盐岩、膏质泥岩和膏质云岩地层的厚度进行研究; 最终综合研究区中寒武统微观和宏观的评价结果, 并以实际钻井的勘探情况作为约束, 建立针对该研究区盖层封盖能力的综合评价方式。【研究结果】研究结果认为膏盐岩相比膏质泥岩与膏质云岩具有更好的封盖能力, 但断裂和石膏的埋藏地质条件会影响盖层的封盖能力。其中阿瓦提凹陷、塔中隆起北部、满西低凸起南部以及巴楚隆起中北部膏盐岩盖层厚度较大, 以巴楚隆起北部为中心, 膏盐岩厚度向四周呈不规则状递减, 环绕状分布。【结论】认为阿瓦提凹陷、满西低凸起西部和南部、塔中隆起北部和西部, 以及塔北隆起中部为盖层发育的有利区。

关键词:石油天然气; 中寒武统; 膏盐岩; 盖层; 封闭性; 油气勘查工程; 塔里木盆地

创 新 点:对塔里木盆地台盆区中寒武世地层的封盖能力进行了微观和宏观的系统研究, 并建立了针对该研究区盖层封盖能力的综合评价方法, 优选出了盖层发育的有利区。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2022)02–0369–14

Evaluation of Cambrian caprock in the platform–basin area of Tarim Basin and optimization of favorable area for oil and gas caprock

Ji Tianyu^{1,2}, Yang Wei¹, Wu Xueqiong¹, Pu Renhai², Li Dejiang¹, Liu Mancang¹, Miao Weidong¹, Su Nan¹, Ye Ying³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of

收稿日期: 2020–04–04; 改回日期: 2020–05–31

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05007–002)资助。

作者简介: 季天愚, 男, 1990 年生, 博士, 工程师, 主要从事天然气地质研究工作; E-mail: jitianyu123@hotmail.com。

通讯作者: 杨威, 男, 1971 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事天然气地质研究工作; E-mail: yangw69@petrochina.com.cn。

Continental Dynamics; Dept. of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. 4th Production Plant Huabei Oilfield, Petrochina, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

[Objective] Gypsum-salt rocks, gypsum-bearing mudstone, and gypsum-bearing dolomite were extensively deposited in the platform-basin area of Tarim Basin during the Middle Cambrian. The study on the oil and gas sealing capacity and distribution of this set of strata can provide a basis for the exploration of the Cambrian subsalt field in the Tarim Basin. **[Methods]** 44 core samples from 4 wells were studied under microscopic thin sections and tested for physical parameters and breakthrough pressure. Based on the relationship among physical parameters, the sealing ability of the Middle Cambrian rocks in the study area was quantitatively evaluated. Meanwhile, we studied the thicknesses of the Middle Cambrian gypsum-salt rocks, gypsum-bearing mudstone, and gypsum-bearing dolomite using two-dimensional seismic data and drilling data from 14 wells. The microscopic and macroscopic appraisals of Middle Cambrian successions are constrained by drilling data obtained during exploration. Finally, we proposed a comprehensive method to evaluate the sealing ability of the caprock. **[Results]** The results suggest that gypsum-salt rocks have better sealing ability than gypsum-bearing mudstone and gypsum-bearing dolomite, but the faults and burial condition will affect the sealing ability of the caprock. It shows that the thicknesses of the gypsum caprocks are great in the Awati Depression, the north of the Tazhong Uplift, the south of the Manxi Low Uplift, and the middle and north of the Bachu Uplift. The thinness of gypsum is greatest in the Bachu Uplift and decreases unevenly towards the surrounding areas. **[Conclusions]** The research results show that the Awati Depression, the West and south of Manxi Low Uplift, the north and west of Tazhong Uplift, and the middle of Tabei Uplift are favorable areas for the development of the caprock.

Key words: oil and gas; Middle Cambrian; gypsum salt rock; caprock; sealing ability; oil and gas exploration engineering; Tarim Basin

Highlights: The sealing ability of the Middle Cambrian strata in the platform-basin area of the Tarim Basin is systematically studied in the microscopic and macroscopic aspects. A comprehensive method for evaluating the sealing ability of the caprock in the study area is established and the favorable area for the development of the caprock is identified.

About the first author: Ji Tianyu, male, born in 1990, doctor, engaged in natural gas geology; E-mail: jitianyu123@hotmail.com.

About the corresponding author: YANG Wei, male, born in 1971, doctor, engaged in natural gas geology; E-mail: yangw69@petrochina.com.cn.

Fund support: Supported by the National Science and Technology Major Project from the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (No. 2016ZX05007-002).

1 引 言

在油气勘探中,盖层对于油气成藏至关重要。膏盐岩和泥岩作为区域盖层得到了广泛的关注和研究(赵庆波等,1994;吕延防等,2000;吕修祥等,2014;付晓飞等,2018),同时,近几年大量的研究表明致密碳酸盐岩也可作为盖层封堵碳酸盐岩储层中的油气(杨传忠等,1991;吕延防等,2005;鲁雪松等,2007;付广等,2014)。物性封闭、超压封闭以及烃浓度封闭是盖层的三种重要的封闭机理,尤以物性封闭最为基础和关键(Watts, 1987;蒋有录,1998;周雁等,2012)。针对盖层的封闭性评价,前人主要通过宏观和微观两个方面进行研究(Downey, 1984):宏观评价包括盖层岩性、分布范围、厚度、盖

地比等(吕延防等,2000;王庭斌,2005;张林晔等,2010);微观封闭能力可通过孔隙度、渗透率、突破压力等参数进行评价(黄志龙等,1994;付广等,1995;邓祖佑等,2000;刘东鹰,2010;付晓飞等,2018)。

塔里木盆地寒武系以中寒武统膏盐岩为界,可将寒武系的白云岩地层分为盐上白云岩和盐下白云岩(杨海军,2015)。中深1井和轮探1井在寒武系盐下白云岩地层中获得工业油气流是塔里木盆地寒武系盐下白云岩勘探的重大突破(杨海军等,2020),而中寒武统这一膏盐岩重要的发育层位,因其可作为良好的盖层而被学者重视(王招明等,2014;沈安江等,2016;张纪智等,2017;易士威等,2019)。自1994年至今,钻至塔里木盆地寒武系盐

下的钻井已超20余口,除中深1井和轮探1井外,其余钻井皆因不同原因而失利,保存条件不佳是导致盐下油气勘探失利的重要原因之一,如舒探1井、方1井等。虽然前人针对塔里木盆地寒武系盖层已做了较多工作:如研究中寒武统的岩相古地理特征(高志前等,2011;田雷等,2018;朱永进等,2019),分析中寒武统膏盐岩的分布范围(金之钧等,2010),以及通过岩心和露头样品对中寒武统膏盐岩的封盖性进行定量分析等(吕修祥等,2000,2014;余海波等,2015;林潼等,2019;Liao et al.,2019)。前人已对塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组储层以及玉尔吐斯组烃源岩进行了大量研究(白忠凯等,2018;Bai et al.,2019),但较少对盆地内部中寒武统盖层进行系统研究。

为了系统研究塔里木盆地台盆区中寒武统膏盐岩盖层,本文主要通过盖层的宏观特征和微观封闭能力两方面进行研究:(1)对44个岩心样品进行镜下薄片、物性参数及突破压力测试,定量地对中

寒武统膏盐岩的封盖能力进行评价;(2)利用地震和钻井资料对中寒武世地层的厚度和平面展布进行研究;(3)结合中寒武世地层的宏观特征和微观封闭能力,建立盖层封闭能力的综合评价表,以对台盆区中寒武世地层进行盖层的综合评价,并探讨其油气地质意义,以期为塔里木盆地寒武系盐下领域的勘探提供参考和依据。

2 地质背景

塔里木盆地是中国最大的内陆沉积盆地,面积达 $5.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图1a),同时也是中国最大的含油气盆地。塔里木盆地是一个由古生界克拉通盆地和中—新生界前陆盆地组成的大型叠合复合盆地(贾承造,1999),其在太古界、元古界结晶基底之上沉积了巨厚的古生界、中生界及新生界沉积地层(Hu et al.,2000;Long et al.,2011;周肖贝等,2012)。根据现今构造面貌和地层埋深可将塔里木盆地划分为7个一级构造单元,分别为塔北隆起、中央隆起、

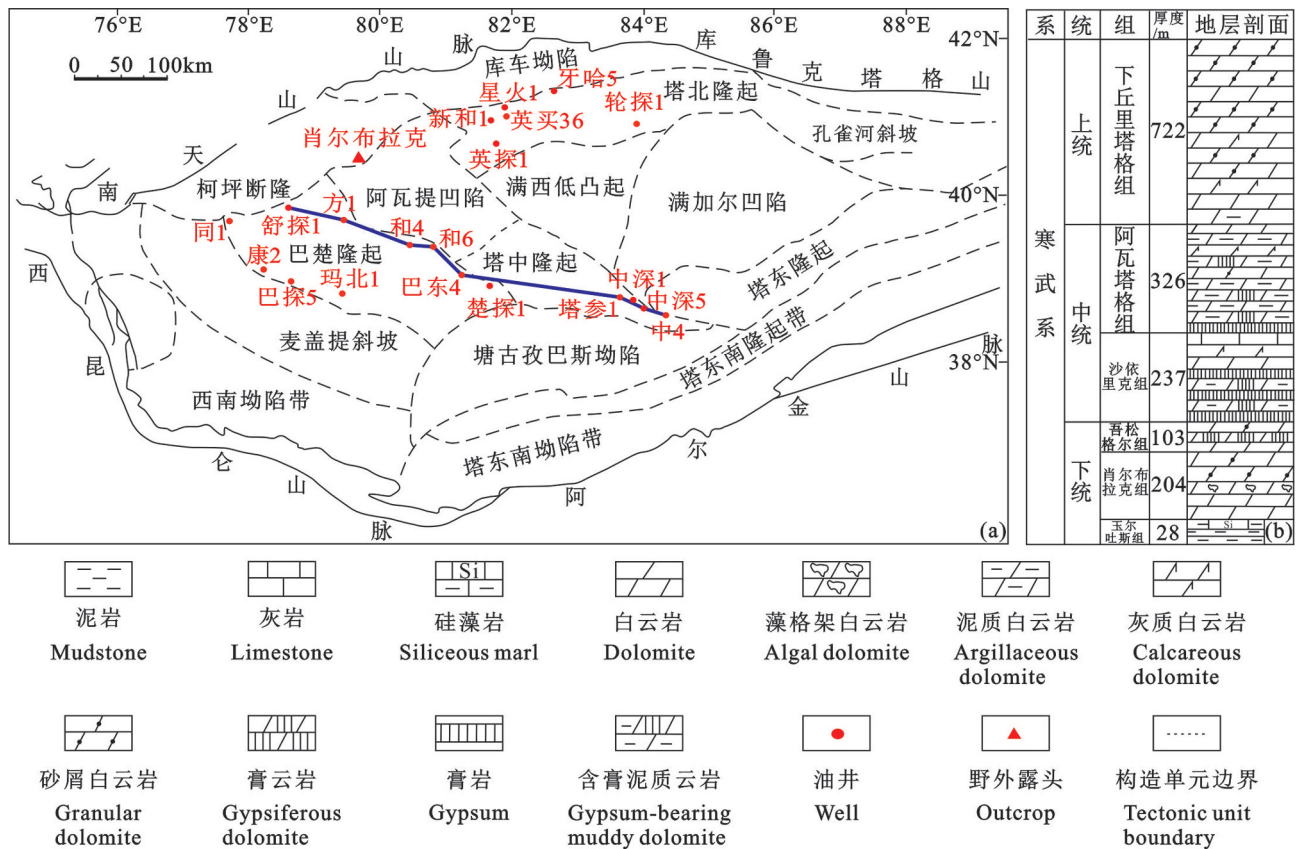


图1 研究区位置及塔里木盆地构造单元图(a)、寒武系地层柱状图(b)

Fig. 1 Location of study area and structural unit map of Tarim Basin(a) and stratigraphic histogram of the Cambrian(b)

东南隆起、库车拗陷、北部拗陷、西南拗陷和东南拗陷(杨海军等,2020)(图1a)。

塔里木盆地寒武系表现出东盆西台的特点,以塔里木盆地东部台缘带为界可将塔里木盆地划分为塔东碳酸盐岩盆地相区和塔西碳酸盐岩台地相区(杜金虎等,2016),其中塔西台地区为本文的研究重点。根据露头、钻井和古生物资料,可将塔西台地相区寒武系分为3统6组(蔡习尧等,2009;熊剑飞等,2011;Zhang et al., 2020),由下至上分别为下统的玉尔吐斯组、肖尔布拉克组和吾松格尔组,中统的沙依里克组和阿瓦塔格组以及上统的下丘里塔格群(图1b)。其中玉尔吐斯组以黑色泥页岩为主,为良好的烃源岩(杜金虎等,2016);肖尔布拉克组在塔中、巴麦地区作为储层自下而上发育薄层泥晶白云岩、晶粒白云岩和藻白云岩,而轮探1井和新和1井在塔北地区肖尔布拉克组揭示的都是灰岩,为非储层;吾松格尔组以泥质白云岩为主,并局部发育薄—中层膏盐岩;中寒武统发育最厚可达400 m的蒸发岩,并以膏盐岩夹膏云岩或含泥云岩为主;上寒武统以砂屑云岩和灰质云岩为主。

塔里木盆地中寒武世虽继承了早寒武世南北分异的沉积格局,但由于当时炎热干旱的气候,水平面

的下降以及古隆起幅度的降低,其与早寒武世的沉积格局已有明显差异(陈永权等,2015)。塔里木盆地台缘带西部台地相区中寒武统的岩相以膏盐岩、泥云岩、膏云岩以及膏质泥岩等为主,表现为一大型蒸发台地相沉积特征,同时又可将其细分为膏盐湖、膏云坪、泥云坪等亚相。塔里木盆地中寒武统沉积模式由西向东表现为蒸发台地、台地边缘、斜坡相及盆地相,其中蒸发台地主要发育于台缘带以西的台地相区(朱永进等,2020)。在蒸发台地内部,膏盐湖大面积分布,且以膏盐湖为中心,膏云坪与泥云坪沿膏盐湖外围依次成环带状分布(图2)。

3 盖层封闭能力微观评价

对塔里木盆地台盆区寒武系盖层的微观封闭能力进行评价,突破压力测试是最直接且成熟的盖层封闭能力评价方法,突破压力越大,盖层的封闭能力越强,因此多将突破压力参数作为评价盖层封闭性的主要参数。其测试方法包括压汞法、分步法、驱替法以及连续法(黄志龙等,1994;Nygard et al., 2006)等。本文选取研究区4口钻遇中寒武统钻井的44个岩心样品,利用驱替法对岩样进行突破压力测试。为了消除岩样中黏土矿物吸水后膨胀导

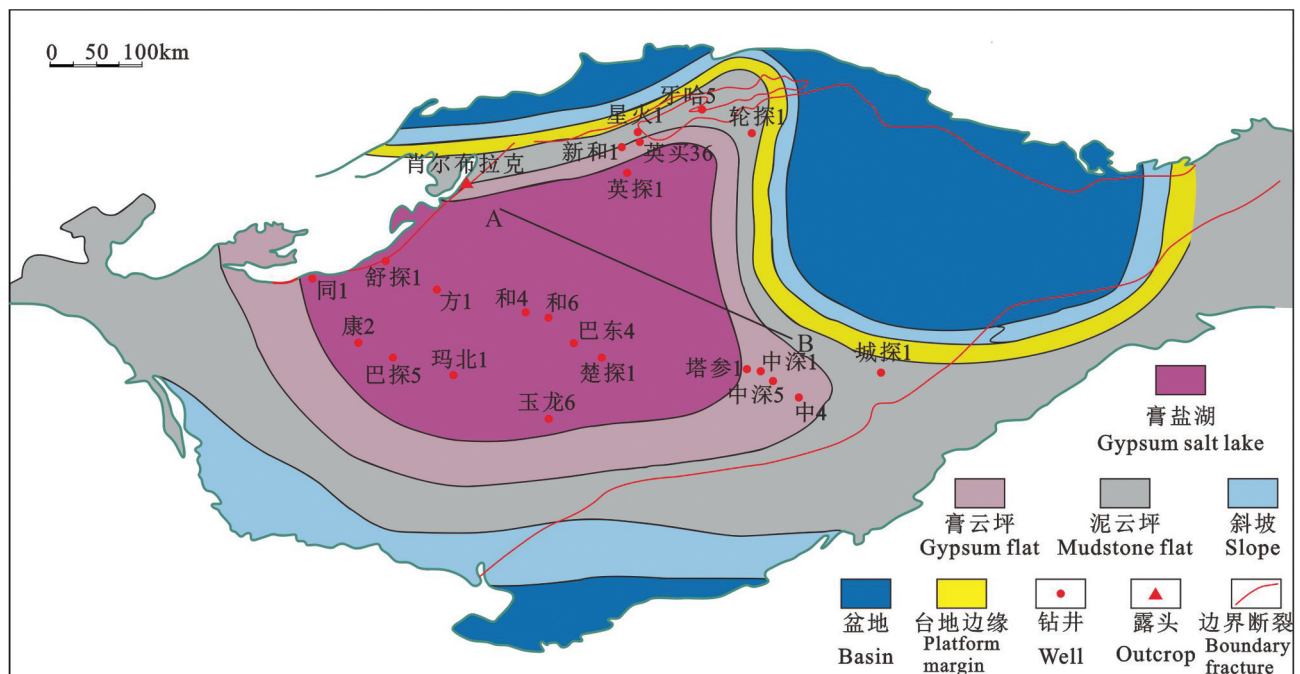


图2 塔里木盆地中寒武统岩相古地理图(修改自朱永进等,2020)

Fig.2 Lithofacies paleogeographic map of the Middle Cambrian in Tarim Basin (modified from Zhu Yongjin et al., 2020)

致的测试结果不准确,以及消除水对膏岩性质的影响,本次突破压力测试的岩样饱和液以煤油替换传统的盐水,结果如表1所示。

实验数据结果显示:4口井中寒武统的岩性为泥岩、膏盐岩和白云岩。其中舒探1井中寒武统阿瓦塔格组的取样深度范围为1673.10~1675.40 m,

镜下薄片鉴定的岩性为膏质粉晶云岩,其饱和煤油突破压力最小0.7 MPa,最大4 MPa;在沙依里克组取样深度范围为1674.90~1675.40 m,岩性为浅灰色石膏岩,其饱和煤油突破压力最小为2.1 MPa,最大为14 MPa,且48 h未突破。中深5井阿瓦塔格组的取样深度范围为6189.0~6223.4 m,镜下薄片鉴

表1 台盆区寒武系盖层渗透率及突破压力统计

Table 1 Permeability and breakthrough pressure statistics of Cambrian caprock in the Tarim Basin

井名	取心深度/m	层位	岩性	渗透率/mD	饱和煤油突破压力/MPa
舒探1	1673.10	C _{2a}	膏质粉晶云岩	0.01700	3.1
舒探1	1673.30	C _{2a}	膏质粉晶云岩	0.01400	1.5
舒探1	1674.10	C _{2a}	含膏泥质粉晶云岩	0.16300	0.7
舒探1	1674.30	C _{2a}	膏质泥晶白云岩	0.00630	4.0
舒探1	1674.30	C _{2a}	膏质粉晶白云岩	0.02400	1.1
舒探1	1674.90	C _{2s}	破碎角砾状膏质泥晶云岩	0.00880	4.0
舒探1	1675.10	C _{2s}	破碎角砾状膏质泥晶云岩	0.00380	4.0
舒探1	1675.10	C _{2s}	破碎角砾状粉泥晶云质膏盐	0.01700	2.1
舒探1	1675.40	C _{2s}	破碎角砾状粉泥晶膏质云岩	0.00290	5.5
中深5	6189.00	C _{2a}	角砾状云质膏岩	0.02297	1.5
中深5	6191.95	C _{2a}	角砾状膏质粉晶云岩	0.10100	1.1
中深5	6192.60	C _{2a}	含硬石膏粉晶云岩	0.10600	1.5
中深5	6193.50	C _{2a}	含硬石膏粉晶云岩	0.00947	12.2
中深5	6193.95	C _{2a}	含云细晶硬石膏岩	0.00571	8.5
中深5	6196.90	C _{2a}	粉晶硬石膏岩	0.01700	1.9
中深5	6222.60	C _{2a}	粉晶石膏岩	0.38600	0.5
中深5	6223.40	C _{2a}	细晶硬石膏岩	0.00007	14.0
中深5	6545.40	C _{2s}	含石膏粉晶云岩	0.00713	9.5
中深5	6545.40	C _{2s}	泥晶云岩	0.00041	10.5
中深5	6546.00	C _{2s}	含膏泥晶云岩	0.05900	1.3
中深5	6547.80	C _{2s}	泥晶云岩	0.00037	14.0
中深5	6548.00	C _{2s}	含膏泥晶云岩	0.00357	5.37
中深5	6548.60	C _{2s}	云质粉晶硬石膏岩	0.00018	10.5
中深5	6552.10	C _{2s}	云质粉晶硬石膏岩	2.76000	0.5
中深5	6553.10	C _{2s}	含石膏粉晶云岩	0.017	2.52
中深5	6553.50	C _{2s}	含石膏粉晶云岩	2.21000	0.7
牙哈10	6173.90	C _{2a}	泥晶云岩	0.00170	8.5
牙哈10	6174.30	C _{2a}	泥晶云岩	0.09900	3.1
牙哈10	6174.40	C _{2a}	泥晶云岩	0.32200	0.7
牙哈10	6175.20	C _{2a}	泥晶云岩	0.64100	0.7
牙哈10	6175.50	C _{2a}	泥晶云岩	0.00035	12.5
牙哈10	6175.90	C _{2a}	泥晶云岩	0.00035	11.5
牙哈10	6176.20	C _{2a}	泥晶云岩	0.00100	4.5
牙哈10	6176.40	C _{2a}	细晶灰岩	0.00110	14.0
牙哈10	6176.80	C _{2a}	泥晶云岩	0.00860	5.5
牙哈10	6212.10	C _{2a}	泥晶云岩	0.00910	11.5
牙哈10	6395.80	C _{2a}	粉晶云岩	0.50900	0.3
牙哈10	6446.10	C _{2a}	粉晶云岩	0.00280	5.0
牙哈10	6446.50	C _{2a}	粉晶云岩	0.00041	12.5
牙哈10	6448.10	C _{2a}	泥晶云岩	0.08700	4.6
牙哈10	6448.60	C _{2a}	粉晶云岩	0.00460	7.5
英买36	5597.70	C _{2a}	粉晶云岩	0.02200	0.7
英买36	5597.80	C _{2a}	粉晶云岩	0.02000	1.1
英买36	5598.00	C _{2a}	粉晶云岩	0.00013	12.5

定以膏岩为主,夹杂膏粉晶云岩,其饱和煤油突破压力最小为0.5 MPa,最大为14 MPa且48 h未突破,但大多数岩样的突破压力未超过4 MPa;在沙依里克组的取样深度为6545.4~6553.5 m,岩性以白云岩为主,夹有云质粉晶膏岩,其突破压力最小为0.5 MPa,最大为14 MPa且48 h未突破;相对于中深5井在阿瓦塔格组以突破压力低于4 MPa为主,其岩样在沙依里克组的突破压力大多高于9 MPa。牙哈10井的取样全部位于阿瓦塔格组,其取样深度范围为6173.9~6448.6 m,深度范围较大,岩性全部为白云岩,岩样突破压力从0.1 MPa到14 MPa且48 h未突破,突破压力跨度较大且无规律。英买36井取样较少,仅在阿瓦塔格组5597.7~5598.0 m取样3个,突破压力最小为0.7 MPa,最大为12.5 MPa,岩性为粉晶云岩。通过对上述数据进行整理分析,岩石渗透率与突破压力之间具有较为明显的负幂指数关系(图3),即岩石的渗透率越大,其突破压力越小,反之则越大。

在表1中,4口井大多数岩样的突破压力大于5 MPa,根据石油天然气盖层评价方法(SY/T 6942-2013)中突破压力的分级评价标准,当突破压力大于5 MPa,具有较好的封闭性。因此普遍认为当突破压力大于5 MPa时,样品可视为盖层。但仍有较多样品的突破压力低于5 MPa,有些仅为0.1 MPa,这样的样品不具有良好的封闭能力。

为弄清样品突破压力相差较大的原因,本文选取舒探1井、中深5井和牙哈10井不同突破压力对

应的岩心薄片进行研究,发现除渗透率因素,裂缝的发育对于岩石突破压力具有较大的影响,如图4所示。图4a位于舒探1井1675.4 m深的沙依里克组,岩性为破碎角砾状粉泥晶膏质云岩,突破压力为5.5 MPa,渗透率0.0029 mD。图4b位于舒探1井1674.30 m深的阿瓦塔格组,岩性为含云膏岩,渗透率为0.0077 mD,突破压力为3.5 MPa。图4c位于舒探1井1674.90 m深的阿瓦塔格组,岩性为破碎角砾状膏质泥晶云岩,渗透率为0.0088 mD,突破压力为4.0 MPa。舒探1井岩样的物性较差,且易产生破裂,因此突破压力值较低。图4d、e、f为中深5井中突破压力递增的3张镜下岩心薄片,岩性为膏质云岩、含膏泥晶云岩及含硬石膏粉晶云岩。由图可知,图4d显示一条未充填的构造缝,裂缝的宽度约为0.05 mm,其所对应的突破压力为2.52 MPa;图4e可见一条宽约0.01 mm且被硬石膏充填的构造缝,以及一条未充填的构造缝,其突破压力为5.37 MPa;图4f可见被硬石膏充填的构造缝,其突破压力为12.22 MPa。由此可见,当岩石中存在未被充填的构造缝时,会造成该岩石具有较高的渗透率以及较低的突破压力,反之则具有较低的渗透率和较高的突破压力。牙哈10井中的泥晶云岩同样具有相同的特征。从图4g中可见该岩样发育多条构造裂缝,其突破压力仅为0.7 MPa,图4h中裂缝被方解石和白云石所充填,其突破压力为4.5 MPa,而图4i中未见裂缝,其突破压力为11.5 MPa。因此,裂缝会降低岩石的突破压力并影响其封盖性。

通过对以上中寒武统岩石样品进行封盖性微观分析,发现相比于碳酸盐岩样品,膏岩的突破压力变化较大,且较多具有较大的孔隙度和渗透率。这与膏岩可作为优质盖层的认识不符,针对这一问题,林潼等(2021)通过对塔里木盆地台盆区中寒武统石膏样品进行三轴应力实验,认为石膏在650~700 m以浅时容易产生裂缝和断裂而导致封盖能力散失;700 m后,石膏由脆性转化为塑性,此时的封闭能力最强;随后当地层温度大于52℃时,石膏开始脱水向硬石膏转化,形成大量孔隙,此时封闭能力下降;当硬石膏埋深达3300 m以深,此深度对应脆-塑转化的边界压力,硬石膏重新具有塑性,同时压实作用也会减少石膏内部的孔隙,使其重新具备封闭能力。这为定量评价塔里木盆地台盆区中寒武统膏岩的封闭性提供了

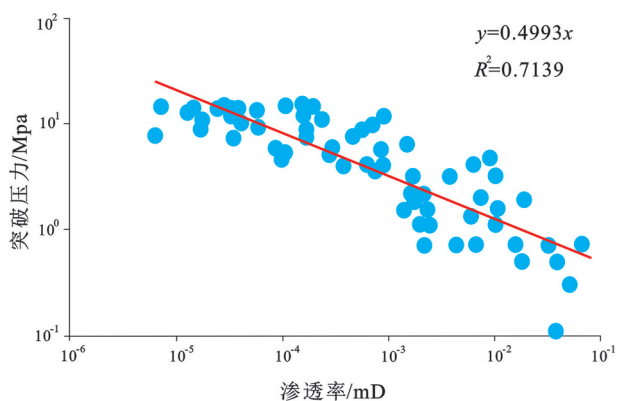


图3 塔里木盆地台盆区中寒武统盖层岩石突破压力与渗透率关系图

Fig.3 Relationship between breakthrough pressure and permeability of the Middle Cambrian caprock in Tarim Basin

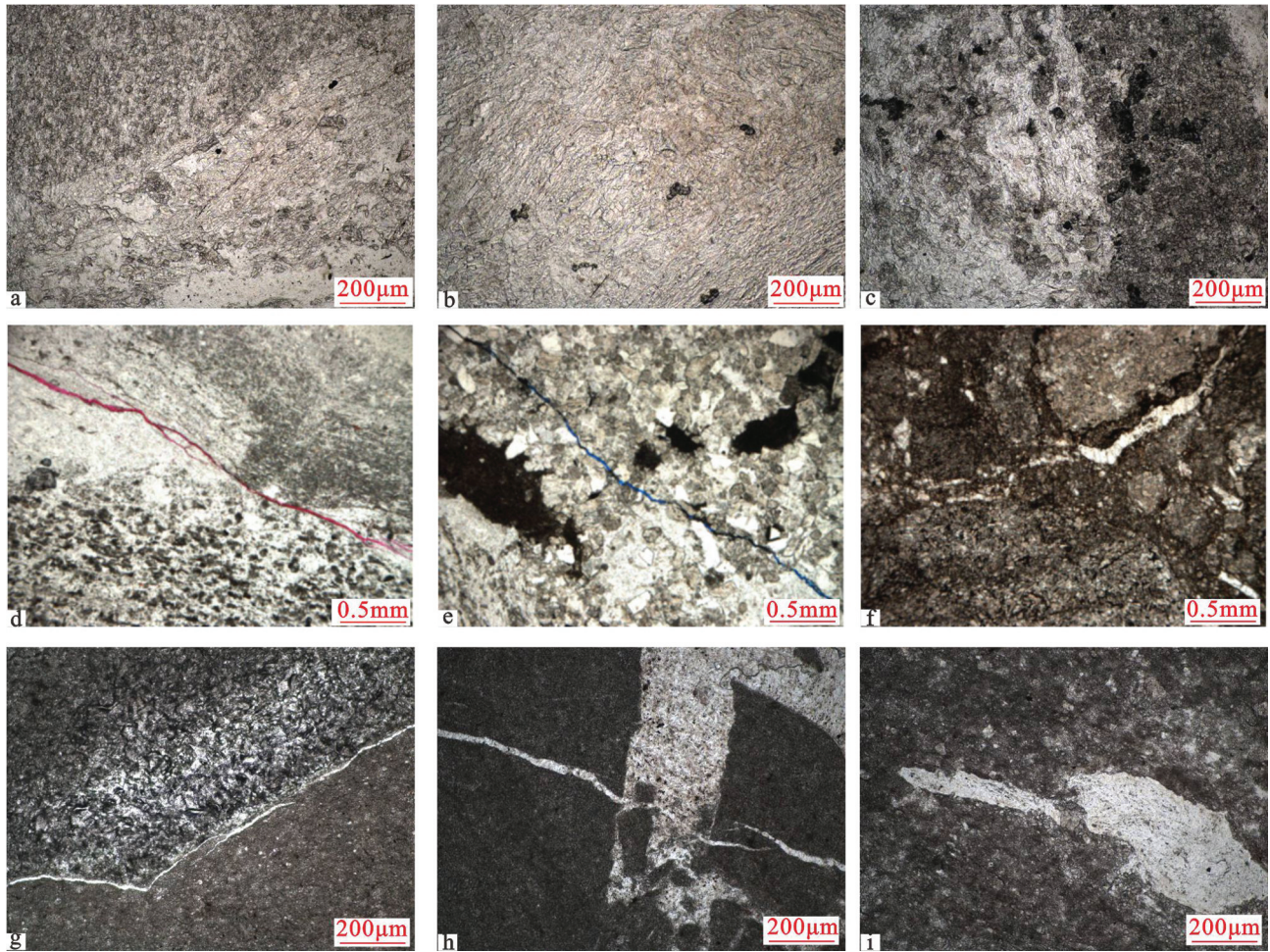


图4 研究区中寒武统样品典型显微特征(单偏光)

a—舒探1井,1675.40 m,沙依里克组,破碎角砾状粉泥晶膏质云岩;b—舒探1井,1674.30 m,阿瓦塔格组,含云膏盐;c—舒探1井,1674.90 m,阿瓦塔格组,破碎角砾状膏质泥晶云岩;d—中深5井,6553.10 m,沙依里克组,膏质云岩;e—中深5井,6548 m,沙依里克组,含膏泥晶云岩;f—中深5井,6193.50 m,阿瓦塔格组,含硬石膏粉晶云岩;g—牙哈10井,阿瓦塔格组,6175.20 m,泥晶云岩;h—牙哈10井,阿瓦塔格组,6176.20 m,泥晶云岩;i—牙哈10井,阿瓦塔格组,6212.1 m,泥晶云岩

Fig. 4 Typical microscopic characteristics of the Middle Cambrian samples in the study area (monopolar light)

a—Well Shutan 1, 1675.40 m, Shayilike Formation, micrite gypsum dolomite; b—Well Shutan 1, 1674.3m, Awatage Formation, dolomitic gypsum; c—Well Shutan 1, 1674.90m, Awatage Formation, gypsum micrite dolomite; d—Well Zhongshen 5, 6553.10m, Shayilike Formation, gypsum dolomite; e—Well Zhongshen 5, 6548m, Shayilike Formation, gypsum bearing micrite dolomite; f—Well Zhongshen 5, 6193.50m, Awatage Formation, anhydrite bearing dolomite; g—Well Yaha 10, Awatage Formation, 6175.20 m, micrite dolomite; h—Well Yaha 10, Awatage Formation, 6176.20m, micrite dolomite; i—Well Yaha 10, Awatage Formation, 6212.10m, micrite dolomite

依据(林潼等,2021)。

4 盖层宏观发育特征

4.1 盖层厚度

盖层的厚度及平面展布特征对盖层的封闭能力具有重要影响,盖层厚度越大,平面展布面积越大且越稳定,盖层的封闭性能越好,反之则盖层的封闭能力越差(付晓飞等,2015)。以巴探5井为例,其中寒武统岩性可分为4大类:膏岩、盐岩、膏质云岩以及膏

质泥岩,其中膏岩又可分为白云质膏岩、泥质膏岩等(图5)。每一种岩性的测井响应特征明显,盐岩具有高声波、低密度和高电阻率的特征,纯净的膏岩自然伽马值低且密度高。这四种岩性中,盐岩的封盖能力最强,因为其具有极低的孔隙度和渗透率,同时具有很强的塑性;巴探5井中寒武统的埋深超过3300 m,其膏岩处于塑性状态且内部孔隙较少,同样具有较好的封盖性。又由于这4种岩性为互层的状态,因此该地层具有非常好的油气封盖性。

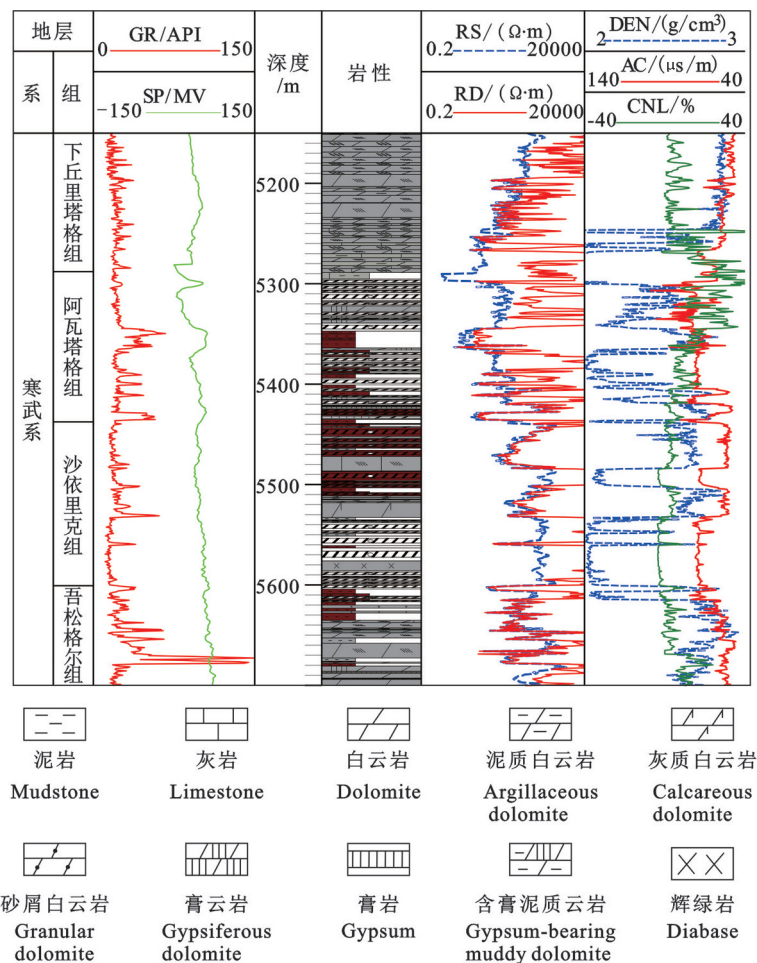


图5 巴探5井中寒武统单井剖面

Fig.5 Single well profile of the Middle Cambrian in well Batan 5

由膏盐岩沉积所形成的膏盐湖位于盆地的中西部,最大深度位于阿瓦提凹陷中部,厚度可达300多米。通过对钻揭寒武系各井盖层厚度以及盖地比的统计分析可知(表2),可作为盖层的岩层厚度最厚可达376.5 m,盖层单层厚度最大可达47.2 m,同时盖层占地层厚度的比值为21.2%~86.2%。

4.2 盖层平面展布

膏盐岩在 seismic 剖面上表现为强振幅、中—高连续性以及平行—亚平行的地震相特征,通过拉平中寒武统底界后的地震剖面进行分析,可将膏盐湖等蒸发台地相沉积进行有效识别(图6)。塔里木盆地台缘带西部台地相区中寒武统盖层展布受沉积期蒸发台地相控制,因此对蒸发台地地震相的追踪有助于研究盖层的平面展布。

依据膏盐岩反射具有高连续、强振幅的特征来判断其边界,再利用研究区内的钻井资料作为约束

(图7),并结合中寒武统岩相古地理特征,得到研究区膏盐岩的厚度分布(图8)。可见研究区内膏盐岩分布范围较广,主要集中在阿瓦提凹陷、塔中隆起北部、满西低凸起南部以及巴楚隆起中北部。最大厚度的膏盐岩位于巴楚隆起中北部,可达300余米。以厚度最大的位置为中心,膏盐岩厚度向四周呈不规则状递减,呈环绕状分布。同时由图8可知中寒武统膏盐岩具有良好的连续性和稳定性。膏盐岩具有较高的突破压力和低渗透率,且与膏质云岩和膏质泥岩互层分布,使这种大面积分布的膏盐岩盖层能为盐下油气的聚集提供了良好的封盖条件,是优质的区域性盖层。

5 盖层封闭能力综合评价

虽然膏盐岩具有良好的油气封闭性,但并不是膏盐岩存在的地区就是油气封闭的有利区。如上

表2 塔里木盆地台盆区中寒武统盖层厚度统计

Table 2 Thickness statistics of the Middle Cambrian caprock in Tarim Basin

井名	层位	总厚度/m	膏盐岩累计厚度/m	膏质泥岩累计厚度/m	膏质云岩累计厚度/m	盖地比/%	盖层单层厚度/m
和4	中寒武统	558.1	266	37	28	59.3	2.5~32.5
塔参1	中寒武统	329.5	33	-	59	27.9	1~12
方1	中寒武统	548	325.5	10	41	68.7	2.5~15
巴东4	阿瓦塔格	365.6	193	90	32	86.2	2~19
康2	中寒武统	386.75	165	42	31	61.5	1~16.5
同1	中寒武统	426	164.5	71.5	48	66.7	3.5~19
和6	中寒武统	549.5	126	26	21	31.5	3~15
巴探5	中寒武统	316	182	20	18	69.6	1~13
玛北1	中寒武统	425.6	214.5	14.5	-	53.8	3~18.5
中深1	中寒武统	532	10	-	103	21.2	1~10
中深5	中寒武统	761.5	-	45	59	13.7	1~9
舒探1	中寒武统	342	105	62	45	62.0	1~13
中4	中寒武统	495.6	166	-	176.5	69.1	1~25
轮探1	中寒武统	345.5	-	-	153.62	44.5	14.2~47.2

所述,其封闭性受其发育规模、厚度、连续性、构造作用以及成岩演化阶段等因素的影响(李永豪等, 2016)。为更好地评价塔里木盆地台盆区中寒武统盖层的封盖性,建立了一套盖层封盖性综合定量评价方式(表3)。

通过公式 $E = \sum a_i \times b_i$ 可计算出各井中寒武统盖层的综合评价值,其中E为盖层综合评价权值, a_i 为第 i 项的评价参数, b_i 为第 i 项评价参数的权重。当盖层综合评价权值为 3~4、2~3、1~2、0~1 时,分别对应盖层品质为好、较好、一般、差。表4为14

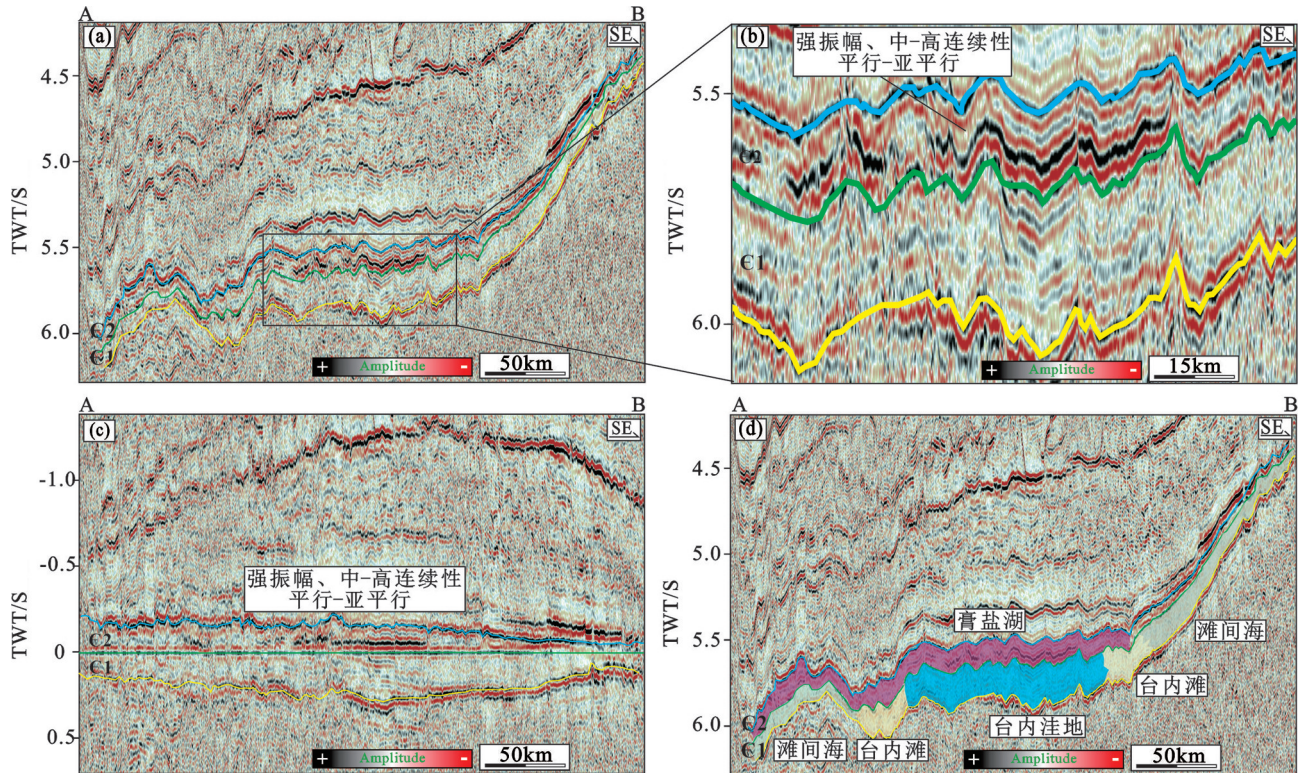


图6 研究区地震剖面:(a)原始地震剖面;(b)局部放大的地震剖面;(c)将C₂底拉平后的地震剖面;(d)解释后的地震剖面(位置见图2)

Fig.6 Seismic section in the study area:(a) original seismic section, (b) locally amplified seismic section, (c) seismic section after leveling at the end of C₂, (d) interpreted seismic section (see Fig. 2 for location)

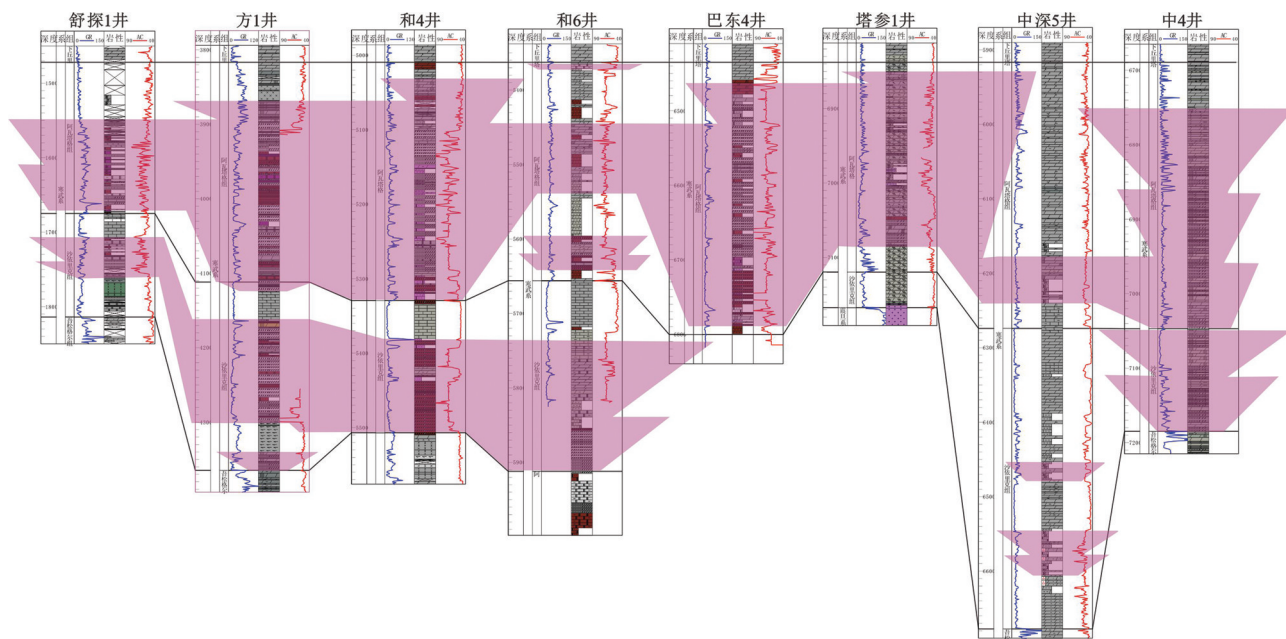


图7 舒探1-方1-和4-和6-巴东4-塔参1-中深5-中4井中寒武统连井对比剖面(位置见图1)

Fig.7 Correlation profiles of connected wells in Middle Cambrian of Shutan 1-Fang1-He 4-He 6-Badong 4-Tacan 1-Zhongshen 5-Zhong4 (location in Fig. 1)

口井的盖层综合评价。但在具体评价时,当断裂破坏程度为断穿地层时,即使其余各项指标良好,其盖层综合评价也应该差。

由表4可知,舒探1井和方1井虽然多数指标较好,但由于有断穿盖层断裂的存在,导致两口井的

盖层不具备封盖能力。同时,舒探1井中寒武统以膏岩为主,在较浅的埋深下石膏向硬石膏转化而导致内部孔隙度变大,封盖能力变差(林潼,2021)。塔参1井综合评价为一般,轮探1井、中4井、同1井、和4井以及巴东4井的盖层综合评价为好,其余

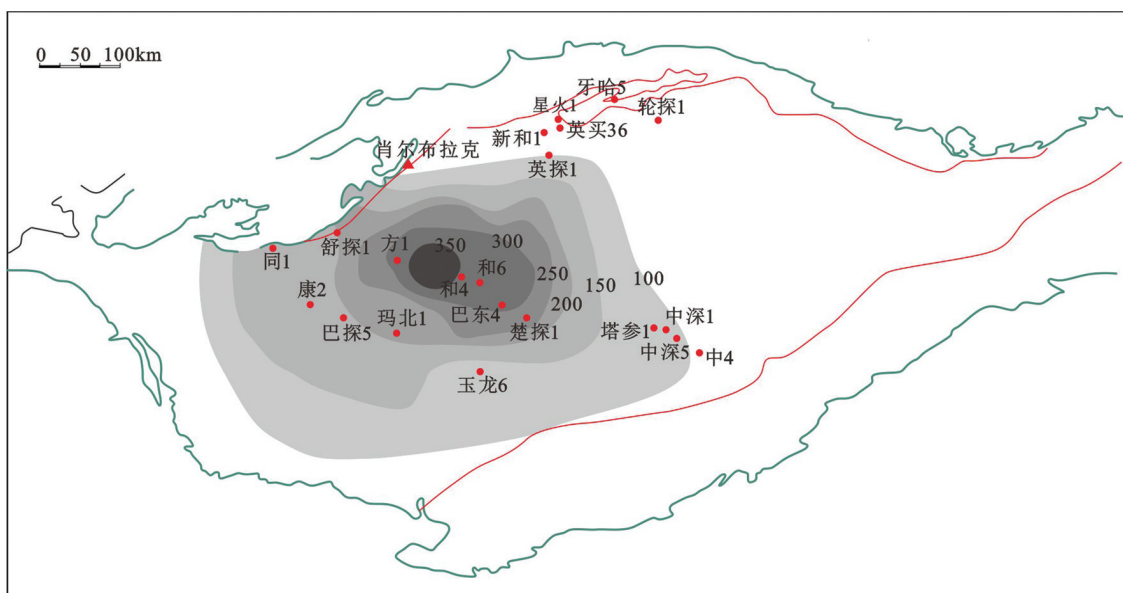


图8 塔里木盆地中寒武统膏盐岩厚度图

Fig.8 Isopach map of the Middle Cambrian gypsum salt rock in Tarim Basin

表3 塔里木盆地台盆区中寒武统盖层封盖性综合定量评价

Table 3 Thickness statistics of the Middle Cambrian caprock in Tarim Basin

评价参数	权重	3~4	2~3	1~2	0~1
盖层岩性	0.2	膏盐岩	膏质泥岩	膏质云岩	白云岩
盖层累计厚度/m	0.15	>300	150~300	50~150	<50
盖层单层厚度	0.15	>20	10~20	5~10	<5
盖地比/%	0.15	>75	50~75	25~50	<25
断裂破坏程度	0.15	无破坏	轻微破坏	中等破坏	断穿地层
连续性	0.1	完全连续	连续	基本连续	不连续
成岩演化(埋深/m)	0.1	塑性(>3300)	脆性-塑性(2000~3300)	塑性-脆性(650~2000)	脆性(<650)

井的盖层综合评价为较好。

6 盖层发育有利区

通过以上对研究区中寒武统盖层的微观、宏观以及综合评价,并以实际钻井的勘探情况作为约束,对研究区内主要构造单元盖层的封盖性进行分析,并指出盖层封盖的有利区。由于满西低凸起中西部及阿瓦提凹陷暂无太多钻井揭示中寒武统膏盐岩,但通过膏盐岩厚度图可知该区域膏盐岩厚度大、埋深大、分布广且连续,同时该区域的构造运动以整体升降为主,断层不发育,因此判断该地区为盖层发育的有利区。巴楚隆起膏盐岩发育,尤以北部地区的厚度最大。但位于巴楚隆起北部的舒探1井和方1井由于多期断层发育,且断穿盖层,因此该区域保存条件较差。塔中隆起中寒武统膏盐岩多发育于北部和南部地区,同时中深1井的油气突破证实该区域盖层具有良好的封闭性。塔北隆起中寒武统膏盐岩不发育,轮探1井揭示其主要以膏质

云岩和灰岩为主,膏质云岩在一定深度的条件下同样具有较好的封盖性,且其单层最厚可达47.2 m,因此该区域为盖层发育的有利区。

7 结论

(1)塔里木盆地台盆区中寒武世地层岩性以膏盐岩、膏质泥岩和膏质云岩为主,其中膏盐岩具有很强的的油气封盖性。但岩石内的构造裂缝和石膏的埋藏地质条件对其封盖性具有较大影响。

(2)阿瓦提凹陷、塔中隆起北部、满西低凸起南部以及巴楚隆起中北部膏盐岩盖层厚度较大,以巴楚隆起北部为中心,膏盐岩厚度向四周呈不规则状递减,环绕状分布。且膏盐岩的分布具有良好的连续性和稳定性。膏盐岩、膏质云岩和膏质泥岩的互层式分布,使这种大面积分布的膏盐岩盖层能为盐下油气的聚集提供良好的封盖条件。

(3)通过对研究区盖层封闭能力的综合评价,认为阿瓦提凹陷、满西低凸起西部和南部、塔中隆

表4 盖层封闭能力综合评价结果

Table 4 Thickness statistics of the Middle Cambrian caprock in Tarim Basin

井名	盖层岩性 权值	盖层累计 厚度权值	盖层单层 厚度权值	盖地比 权值	断裂破坏 程度权值	连续性 权值	成岩演 化权值	综合 权值	盖层 品质
和4	3.5	3.5	3.5	2.6	3	2.5	4	3.24	好
塔参1	1	1	2	1	3	1	4	1.75	一般
方1	3.2	3.5	2.8	2	0.1	2	4	2.5	差
巴东4	3.5	3.5	3	4	3	3	4	3.43	好
康2	3.5	2.5	2.5	2.5	3	3	4	2.98	较好
同1	3.8	2.3	2.9	3	3	3	4	3.14	好
和6	2	2	2	1	3	1	4	2.1	较好
巴探5	3.6	2.5	2.2	2.5	3	3.2	4	2.97	较好
玛北1	3.5	2.5	2.8	2.2	3	3	4	2.98	较好
中深1	2.5	2	2	1	3	2	4	2.3	较好
中深5	3	1.8	1.8	1	3	2	4	2.34	较好
舒探1	3	2.8	2.2	2.3	0.5	1	0.5	1.92	差
中4	3.5	3.8	3.8	2.8	3	3	4	3.41	好
轮探1	3	2.5	4	2	4	3	4	3.18	好

起北部和西部,以及塔北隆起中部为盖层发育的有利区。

References

- Bai Zhongkai, Lü Xiuxiang, Song Zongxu, Qiu Haijun, Zhou Xingui, Gao Yongjin, Qi Yingmin, Zhu Lichun, Fu Xiaotao, Zhou Yuanyuan. 2019. Characteristics of boundary fault systems and its hydrocarbon controlling on hydrocarbon accumulation in Awati Sag, Tarim Basin, China[J]. *China Geology*, 2(1): 94–107.
- Bai Zhongkai, Xie Li, Han Miao, Lü Xiuxiang, Sun Zhichao, Li Qingyao, Yang Youxing, Zhang Jinhui. 2018. Paleoproductivity conditions of lower member of Cambrian Xiaerbulak Formation in Kalpin thrust belt, Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 45(2): 227–236(in Chinese with English abstract).
- Cai Xiyao, Mao Shuhua, Qian Yixiong, Chen Yue, You Donghua. 2009. Stratigraphic classification and correlation of Cambrian in Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(1): 38–42(in Chinese with English abstract).
- Chen Yongquan, Yan Wei, Han Changwei, Yang Pengfei, Li Zheng. 2015. Redefinition on structural paleogeography and lithofacies paleogeography framework from Cambrian to Early Ordovician in Tarim Basin: A new approach based on seismic stratigraphy evidence[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(10): 1831–1843(in Chinese with English abstract).
- Deng Zuyou, Wang Shaochang, Jiang Zhenglong, Chen Zhaonian. 2000. Breaking pressure of gas caprocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 21(2): 136–138(in Chinese with English abstract).
- Downey M W. 1984. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations[J]. *AAPG Bulletin*, 68: 1752–1763.
- Du Jinhui, Pan Wenqing. 2016. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 327–339(in Chinese with English abstract).
- Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue. 1995. Research method on capillary sealing ability of caprocks[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 9(2): 83–88(in Chinese with English abstract).
- Fu Guang, Wang Biao, Shi Jijian. 2014. Comprehensive quantitative evaluation method of sealing oil–gas ability of caprock and its application[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 48(1): 174–179(in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofei, Jia Ru, Wang Haixue, Wu Tong, Meng Lingdong, Sun Yonghe. 2015. Quantitative evaluation of fault–caprock sealing capacity: A case from Dabei–Kelasu structural belt in Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(3): 300–309(in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofei, Wu Tong, Lyu Yanfang, Liu Shaobo, Tian Hua, Lu Mingxu. Research status and development trend of the reservoir caprock sealing properties[J]. *Oil & Gas Geology*, 39(3): 454–471 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Yin Hui, Zhang Xiaolong, Wang Enhui. 2011. Extensional tectonic characteristics and its sedimentary response of Early–Middle Cambrian in Tarim Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 33(3): 83–88 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Jahn Bor–ming, Zhang Guoxin, Chen Yibing, Zhang Qianfeng. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks[J]. *Tectonophysics*, 328(1/2): 15–51.
- Huang Zhilong, Hao Shisheng. 1994. A method of estimating breakthrough pressure and displacement pressure of caprock[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 15(1): 163–166(in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao. 1999. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(3): 177–183(in Chinese with English abstract).
- Jiang Youlu. 1998. A discussion on the relation between the cap rock thickness of oil & gas reservoir and its hydrocarbon column height[J]. *Natural Gas Industry*, 18(2): 20–23(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, Sun Dongsheng, Long Shengxiang. 2010. Distribution of gypsum–salt cap rock and near–term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. *Oil & Gas Geology*, 31(6): 715–724(in Chinese with English abstract).
- Li Yonghao, Cao Jian, Hu Wenxuan, Lu Xiancai, Fan Ming, Zhang Dianwei, Hong Dongdong. 2016. Research advances on hydrocarbon sealing properties of gypsolyte/saline rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(5): 634–643(in Chinese with English abstract).
- Liao Xiao, Wang Zhenliang, Fan Changyu, Yu Changqing, Yu Zhuayu. 2019. Quantitative characterization of sealing integrity by caprock of Paleocene Artashi Formation gypsolyte rock in Kashi Sag of Tarim Basin, NW China[J]. *Journal of Central South University*, 26(3): 695–710.
- Lin Tong, Wang Tongshan, Pan Wenqing, Yuan Wenfang, Li Qiuwen, Ma Wei. 2019a. The evolution of the sealing effectiveness of the gypsum during the burial process[J]. *Oil & Gas Geology*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4820.TE.20191213.1118.002.html>.
- Lin Tong, Wang Xiaoming, Zhang Lu, Zeng Xu, Zhang Shuai, Cheng Yuzong. 2019b. Experimental analysis of the effect of caprock thickness on sealed natural gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 30(3): 322–330(in Chinese with English abstract).
- Liu Dongying. 2010. Characteristics of break through pressure of Mesozoic–Paleozoic cover in Jiangsu Lower Yangtze area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 32(4): 362–365(in Chinese with English abstract).
- Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, Kröner Alfred, Zhao Guochun, Wilde Simon, Hu Aiqin. 2011. Reworking of the Tarim Craton by under plating of mantle plume–derived magmas: Evidence from

- Neoproterozoic granitoids in the Kuluketage area, NW China[J]. Precambrian Research, 187(1/2):1-14.
- Lu Xuesong, Jiang Youlu, Song Yan. 2007. Influence of mechanical properties and stress state of caprock on its sealing performance: taking Kela-2 gas field as an example[J]. Natural Gas Industry, 27(8):48-51(in Chinese with English abstract).
- Lü Xiuxiang, Jin Zhijun, Zhou Xinyuan, Pi Xuejun. 2000. Oil and gas accumulation related to evaporaterocks in Kuqa Depression of Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 27(4):20-21(in Chinese with English abstract).
- Lü Xiuxiang, Qu Yiqian, Yu Hongfeng, Lan Xiaodong. 2014. Sealing capacity of carbonate cap rocks: A case study of Ordovician in northern slope of central Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 36(5):532-538(in Chinese with English abstract).
- Lü Yanfang, Fu Guang, Yu Dan. 2005. Comprehensive evaluation of sealing ability of cap rock in China's large and medium gas fields and their contribution to gas accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 26(6):742-745(in Chinese with English abstract).
- Lü Yanfang, Zhang Shaochen, Wang Yaming. 2000. Research of quantitative relations between sealing ability and thickness of cap rock[J]. Acta Petrolei Sinica, 21(2):27-30(in Chinese with English abstract).
- Nygaard R, Gutierrez M, Bratli R K. 2006. Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 23:201-212.
- Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, Ni Xinfeng, Huang Lili. 2016. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoir in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(3):340-349(in Chinese with English abstract).
- Tian Lei, Cui Haifeng, Liu Jun, Zhang Nianchun, Shi Xiaoqian. 2018. Early-Middle Cambrian paleogeography and depositional evolution of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 39(5):171-181(in Chinese with English abstract).
- Wang Tingbin. 2005. Distribution of large middle sized gas fields in China: Geological characteristics and key controlling factors[J]. Petroleum Exploration and Development, 32(4):1-8(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, Qi Yingmin, Zhang Ke. 2014. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 well in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 19(2):5-17(in Chinese with English abstract).
- Watts N L. 1987. Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single and two-phase hydrocarbon columns[J]. Marine and Petroleum Geology, 4(4):274-307.
- Xiong Jianfei, Yu Tengxiao, Cao Zicheng, Zhao Ming, Fan Huaiyang, Wu Tao. 2011. New advances in Cambrian Biostratigraphy of the covered area of the Tarim Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 35(4):419-430(in Chinese with English abstract).
- Yang Chuanzhong, Liu Xin. 1991. A study of carbonate of oil and gas[J]. Natural Gas Industry, 11(6):17-23(in Chinese with English abstract).
- Yang Haijun, Chen Yongquan, Tian Jun, Du Jinhu, Zhu Yongfeng, Li Honghui, Pan Wenqing, Yang Pengfei, Li Yong, An Haiting. 2020. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in wellLuntan-1 of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 25(2):62-72(in Chinese with English abstract).
- Yang Haijun. 2015. Exploration knowledge and direction of Lower Proterozoic inner dolostones, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 26(7):1213-1223(in Chinese with English abstract).
- Yi Shiwei, Li Mingpeng, Guo Xujie, Yang Fan, Miao Weidong, Lin Shiguo, Gao Yang. 2019. Breakthrough direction of Cambrian pre-salt exploration fields in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(11):1281-1295(in Chinese with English abstract).
- Yu Haibo, Qi Jiafu, Shi Jun, Wu Chao, Zhang Wei, Fan Sheng, Sun Tong, Yang Xiangyang. 2015. Basement fault activities have influenced on caprock tectonic deformation in Kuqa Depression[J]. Chinese Journal of Geology, 50(1):50-62(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jizhi, Wang Zhaoming, Yang Haijun, Xu Zhiming, Xiao Zhongyao, Li Zhongxuan. 2017. Origin and differential accumulation of hydrocarbons in Cambrian sub-salt dolomite reservoir in Zhongshen Area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(1):40-47(in Chinese with English abstract).
- Zhang Linye, Bao Shuyou, Liu Qing, Zhang Shouchun, Zhu Rifang, Zhang Lei. 2010. Effects of hydrocarbon physical properties on caprock's capillary sealing ability[J]. Scientia Science(Terrae), 40(1):28-33(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanqiu, Guo Zenghui, Chen Daizhao. 2020. Porosity distribution in cyclic dolomites of the Lower Qiulitag Group (Upper Cambrian) in northwestern Tarim Basin, China[J]. China Geology, 3(3):425-444.
- Zhao Qingbo, Yang Jinfeng. 1994. A preliminary discussion on the types of cap rocks in Chinese gas reservoir and their control on the gas accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 21(3):15-26(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaobei, Li Jianghai, Fu Chenjian, Li Wenshan, Wang Honghao. 2012. A discussions on the Cryogenian-Cambrian tectonic-sedimentary event and tectonic setting of northern Tarim Basin[J]. Geology in China, 39(4):900-911(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yan, Jin Zhijun, Zhu Dongya, Yuan Yusong, Li Shuangjian. 2012. Current status and progress in research of hydrocarbon cap rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 34(3):234-251(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongjin, Shen Anjiang, Liu Lingli, Chen Yongquan, Yu Guang. 2020. Tectonic-sedimentary filling history through the Later Sinian to the Mid-Cambrian in Tarim Basin and its explorational potential[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 38(2):398-410(in Chinese with English abstract).

Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白忠凯, 谢李, 韩森, 吕修祥, 孙智超, 李清瑶, 杨有星, 张金虎. 2018. 塔里木盆地柯坪地区寒武系肖尔布拉克组下段古生产力研究[J]. 中国地质, 45(2): 227-236.
- 蔡习尧, 毛树华, 钱一雄, 陈跃, 尤东华. 2009. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系划分与对比[J]. 新疆石油地质, 30(1): 38-42.
- 陈永权, 严威, 韩长伟, 杨鹏飞, 李峥. 2015. 塔里木盆地寒武纪—早奥陶世构造古地理与岩相古地理格局再厘定——基于地震证据的新认识[J]. 天然气地球科学, 26(10):1831-1843.
- 邓祖佑, 王少昌, 姜正龙, 陈昭年. 2000. 天然气封盖层的突破压力[J]. 石油与天然气地质, 21(2): 136-138.
- 杜金虎, 潘文庆. 2016. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 327-339.
- 付广, 陈章明, 姜振学. 1995. 盖层物性封闭能力的研究方法[J]. 中国海上油气:地质, 9(2): 83-88.
- 付广, 王彪, 史集建. 2014. 盖层封盖油气能力综合定量评价方法及应用[J]. 浙江大学学报:工学版, 48(1): 174-179.
- 付晓飞, 贾茹, 王海学, 吴桐, 孟令东, 孙永河. 2015. 断层-盖层封闭性定量评价—以塔里木盆地库车坳陷大北-克拉苏构造带为例[J]. 石油勘探与开发, 42(3): 300-309.
- 付晓飞, 吴桐, 吕延防, 柳少波, 田华, 卢明旭. 2018. 油气藏盖层封闭性研究现状及未来发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 39(3): 454-471.
- 高志前, 樊太亮, 尹微, 张晓龙, 王恩辉. 2011. 塔里木盆地早中寒武世张裂构造及沉积响应[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 33(3):83-88.
- 黄志龙, 郝石生. 1994. 盖层突破压力及排替压力的求取方法[J]. 新疆石油地质, 15(1): 163-166.
- 贾承造. 1999. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 20(3): 177-183.
- 蒋有录. 1998. 油气藏盖层厚度与所封盖烃柱高度关系问题探讨[J]. 天然气工业, 18(2):20-23.
- 金之钧, 周雁, 云金表, 孙冬胜, 龙胜祥. 2010. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 31(6): 715-724.
- 李永豪, 曹剑, 胡文瑄, 陆现彩, 范明, 张殿伟, 洪东东. 2016. 膏盐岩油气封盖性研究进展[J]. 石油与天然气地质, 37(5): 634-643.
- 林潼, 王铜山, 潘文庆, 袁文芳, 李秋芬, 马卫. 2021. 埋藏过程中膏岩封闭有效性演化特征—以塔里木盆地寒武系深层膏岩盖层为例[J]. 石油与天然气地质, 42(6): 1354-1364.
- 林潼, 王孝明, 张璐, 曾旭, 张帅, 程煜宗. 2019. 盖层厚度对天然气封闭能力的实验分析[J]. 天然气地球科学, 30(3): 322-330.
- 刘东鹰. 2010. 江苏下扬子区中—古生界盖层突破压力特征[J]. 石油实验地质, 32(4): 362-365.
- 鲁雪松, 蒋有录, 宋岩. 2007. 盖层力学性质及其应力状态对盖层封闭性能的影响——以克拉2气田为例[J]. 天然气工业, 27(8): 48-51.
- 吕修祥, 金之钧, 周新源, 皮学军. 2000. 塔里木盆地库车坳陷与膏盐岩相关的油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 27(4): 20-21.
- 吕修祥, 屈怡倩, 于红枫, 兰晓东. 2014. 碳酸盐岩盖层封闭性讨论——以塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系为例[J]. 石油实验地质, 36(5): 532-538.
- 吕延防, 付广, 于丹. 2005. 中国大中型气田盖层封盖能力综合评价及其对成藏的贡献[J]. 石油与天然气地质, 26(6): 742-745.
- 吕延防, 张绍臣, 王亚明. 2000. 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系[J]. 石油学报, 21(2): 27-30.
- 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 倪新锋, 黄理力. 2016. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 340-349.
- 田雷, 崔海峰, 刘军, 张年春, 石小茜. 2018. 塔里木盆地早、中寒武世古地理与沉积演化[J]. 石油与天然气地质, 39(5): 171-181.
- 王庭斌. 2005. 中国大中型气田分布的地质特征及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 32(4):1-8.
- 王招明, 谢会文, 陈永权, 齐英敏, 张科. 2014. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 19(2):5-17.
- 熊剑飞, 余腾孝, 曹自成, 赵明, 樊怀阳, 武涛. 2011. 塔里木盆地覆盖区寒武系生物地层研究新进展[J]. 地层学杂志, 35(4): 419-430.
- 杨传忠, 刘鑫. 1991. 碳酸盐岩油气盖层研究[J]. 天然气工业, 11(6): 17-23.
- 杨海军, 陈永权, 田军, 杜金虎, 朱永峰, 李洪辉, 潘文庆, 杨鹏飞, 李勇, 安海亭. 2020. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探, 25(2): 62-72.
- 杨海军. 2015. 塔里木盆地古生界内幕白云岩勘探认识与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 26(7): 1213-1223.
- 易士威, 李明鹏, 郭绪杰, 杨帆, 缪卫东, 林世国, 高阳. 2019. 塔里木盆地寒武系盐下勘探领域的重大突破方向[J]. 石油学报, 40(11): 1281-1295.
- 余海波, 漆家福, 师骏, 吴超, 张玮, 范绳, 孙统, 杨向阳. 2015. 库车坳陷盐下构造对盐上盖层变形的影响因素分析[J]. 地质科学, 50(1):50-62.
- 张纪智, 王招明, 杨海军, 徐志明, 肖中尧, 李中璇. 2017. 塔里木盆地中深地区寒武系盐下白云岩油气来源及差异聚集[J]. 石油勘探与开发, 44(1):40-47.
- 张林晔, 包友书, 刘庆, 张守春, 朱日房, 张蕾. 2010. 盖层物性封闭能力与油气流体物理性质关系探讨[J]. 中国科学(D)辑: 地球科学, 40(1): 28-33.
- 赵庆波, 杨金凤. 1994. 中国气藏盖层类型初探[J]. 石油勘探与开发, 21(3): 15-26.
- 周肖贝, 李江海, 傅臣建, 李文山, 王洪浩. 2012. 塔里木盆地北缘南华纪—寒武纪构造背景及构造—沉积事件探讨[J]. 中国地质, 39(4): 900-911.
- 周雁, 金之钧, 朱东亚, 袁玉松, 李双建. 2012. 油气盖层研究现状与认识进展[J]. 石油实验地质, 34(3): 234-251.
- 朱永进, 沈安江, 刘玲利, 陈永权, 俞广. 2020. 塔里木盆地晚震旦世—中寒武世构造沉积充填过程及油气勘探地位[J]. 沉积学报, 38(2): 398-410.