

塔里木盆地巴-麦地区古生界油气盖层动态演化评价

张仲培,王毅,李建交,刘士林,云金表,李京昌

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:为实现动态评价经历过多旋回构造变动的海相油气盖层,基于塔里木盆地古生界大量盖层样品的实验测试结果和盖层空间分布特征分析,以地质演化为主线,综合考虑其宏观变化、物性演化、应力应变特征,探讨和重建自形成至今其封盖性能的演化过程。结果显示,巴-麦地区多期差异隆-拗演变对盖层封盖性能演化具有明显控制作用。在海西晚期,大部分地区石炭系泥岩盖层具有封油能力。但因差异抬升,埋深浅于2100m的西北区域为差盖层区。之后,石炭系泥岩盖层封盖性能在西北部不断变差,东南部变好。中-下寒武统膏盐岩盖层在早奥陶世开始具备封油能力。玉北地区西南部,在海西早期因埋深浅于其封闭能力形成的初始埋深1230m而评价为差盖层区。结合其他油气成藏条件,提出了石炭系巴楚组泥岩是重要的区域性盖层,多套盖层对油气聚集起控制作用。麦盖提斜坡、巴楚南缘构造带及隆起大型断裂带间的区域是油气好保存区。

关键词:动态演化;力学性质;盖层;巴-麦地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Dynamic evolution assessment of the Paleozoic hydrocarbon cap rocks in Bachu-Magati area, Tarim Basin

Zhang Zhongpei, Wang Yi, Li Jianjiao, Liu Shilin, Yun Jinbiao, Li Jingchang

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: With the aim of assessing the dynamic evolution of marine hydrocarbon cap rocks experienced multi-cycle tectonic movements, the Paleozoic in the Tarim Basin was taken for case study. Based on the experimental test results of large amount of cap rock samples, this paper reconstructed the evolutionary process of its sealing capability by taking geological evolution as a clue and in combination with its macroscopic change, physical property evolution and stress variation. The results show that the polyphase burial changes due to uplift-depression conversion obviously controlled the sealing property of cap rock. Most of the Carboniferous mudstone caps had good sealing capacity in the late Hercynian in most areas except for the northwestern part where the burial depth of cap rocks was less than 2100m due to differential uplifting. Later, the sealing capacity of the Carboniferous mudstone deteriorated in the northwestern part, but enhanced in the eastern and southern parts. Salt-gypsum rocks in the Middle and Lower Cambrian established their sealing capacity in the Early Ordovician, but it became ineffective in the southwest of Yubei area where its burial depth was less than 1230m in the early Hercynian. The Carboniferous mudstone caps were regarded as the most important regional seal. Magiati slop, structural belt at the southern margin of Bachu uplift and stable area between large fault zones are the favorable areas for oil and gas preservation.

Key words: dynamic evolution, rock mechanics, cap rock, Bachu-Magaiti area, Tarim Basin

有效的区域盖层是大型油气田最终成藏保存的关键条件。塔里木盆地盖层研究最早开始于“八五”期间,研究认识到塔里木盆地寒武系膏盐岩、奥陶系泥岩、石炭系泥岩和膏盐岩是重要的区域盖层,控制了油气的分布^[1-5];利用地质、地震和测井等资料研究了盖层的特征与分布^[6-10],并对盖层的封盖能力进行了评

价^[6-9,11-14]。但是这些研究成果往往只关注了现今的盖层宏观分布特征及物性特征,以厚度、分布以及突破压力作为评价的主要参数^[9-10]。

近年来盖层评价研究中开始注意到盖层封盖能力在埋深过程中的变化,并就泥岩的封盖能力随深度的变化建立了初步的关系^[15-18]。而埋深变化带来

成岩作用变化的同时,很多学者也注意到了盖层岩石力学性质的变化对盖层封盖性能的影响^[19-20],并以应力应变模拟实验来研究盖层所处的应力状态对封盖性能的影响,提出了盖层脆延转换深度的概念并用于历史封盖性能的评价^[15-18,21-30]。不难看出,盖层封盖性能受多种因素影响,且在地质演化过程中动态变化。但是,如何把盖层的宏观特征、物性、力学性质、变化过程综合考虑,实现对盖层的动态评价研究较少,而针对塔里木海相叠合盆地油气盖层动态演化研究尚未开展。

本次研究基于盖层古埋深的动态演化评价思路,以单井盖层古埋深去量化影响封盖性能的各评价参数,并据此建立了分级标准;同时结合平面上古埋深恢复,实现动态分级评价,并在塔里木盆地巴楚-麦盖提地区进行研究和应用。最后结合油气成藏研究认识,动态评价了石炭系泥岩盖层和中-下寒武统盐膏岩盖层的演化过程,并指出该区有利油气保存的地区,为油气勘探部署提供了依据。

1 塔里木盆地海相油气盖层分布

1.1 主要油气藏盖层层系

截至2014年,塔里木盆地台盆区已发现塔河、轮南、轮古潜山、桑塔木、西达里亚、东河塘、哈得、塔中1、塔中4、和田河等大型油气田以及巴什托-亚松迪、玉北1、巴探5、顺9、中1、古隆1、顺南4等油气藏。目前发现的油气田主要分布在五个油气区:沙雅隆起油气区、卡塔克隆起油气区和巴楚-麦盖提油气区、顺托果勒(哈得)油区及塔东油气区。台盆区古生界多口油气井揭示,目前除在二叠系与中-下泥盆统尚未获得工业油气流外,在其他古生界层系均获得了工业油气流(图1)。

通过油气井的储、盖层统计,可以看出,台盆区油气直接盖层具有多岩性类型、多层系的特征。台盆区油气直接盖层有三大类:泥质岩类、碳酸盐岩类与盐膏岩类(图1)。

1.2 主要油气盖层平面分布特征

研究表明,盖层厚度与封闭的油气柱高度有直接关系^[16,31-39],厚度大小又决定着断裂破坏后盖层空间分布的连续性^[40-42]。如果泥岩盖层的厚度大,它不易被小断裂错段,仍会保持横向分布的连续性,对油气起到封盖作用。相反,如果盖层厚度小,易被断裂错开,失去横向分布的连续性,造成油气的大量散失。因此,

从这个意义上说,厚度大小是决定断裂破坏后盖层空间分布连续性的重要因素。

1.2.1 台盆区石炭系盖层空间展布

利用大量钻井资料,根据测井岩电特征盖层识别进行厚度统计、横向连井对比、井间地球物理预测与前人沉积相划分,同时考虑盖层沉积期的沉积相变化与后期构造剥蚀情况,多种手段相结合,编制了古生界各盖层的平面分布图(重点层系为石炭系)^①。

石炭系潮坪-潟湖-浅海环境的3套(含膏)泥岩盖层厚度稳定,分布广泛。在巴-麦地区呈中部厚度大,向西北剥蚀减薄、向南沉积减薄的变化趋势(图2)。

巴楚组下泥岩段厚度从塔北隆起南缘的零线向塔中、巴楚、麦盖提斜坡逐渐过渡到100多米。岩石类型主要为泥质岩,包括粉砂质泥岩、泥岩和炭质泥岩,主要是一套潮坪相沉积。在塔北隆起区,缺失下部泥岩沉积。在中央隆起区,该套泥岩厚度分布在20~80m之间,巴楚隆起东部和田1井和塔中之间厚度稍大,呈现东西向展布的厚度中心。巴楚组中泥岩段是生屑灰岩储层的直接盖层,其岩石类型有蒸发岩(包括石膏、岩盐)、泥质岩、泥质粉砂岩,其中泥质岩盖层分布最广,巴楚隆起和麦盖提斜坡北部等均有分布,巴-麦西部地区最大厚度在300m以上。盆地腹部的塔中东部最大厚度为120多米。卡拉沙依组上泥岩段厚度分布在0~160m,巴楚东部及塔中东部及阿克库勒凸起中、南部区域厚度较大,均在60m以上。围绕着这一厚度分布中心,泥岩厚度向外围逐渐减小并尖灭。在巴楚隆起西部,受后期构造抬升剥蚀的影响,上泥岩段明显较巴楚中东部地区薄,并在古董山构造带以西与同1井一带剥蚀殆尽。

1.2.2 其他层系盖层空间展布

志留系盖层岩类主要为泥岩,纵向上发育3套重要的盖层:一是塔塔埃尔塔格组下段红色泥岩,分布广、厚度大,具有很强的连续性和稳定性,可以作为塔中隆起和顺托果勒低隆等地区的区域盖层;二是柯坪塔格组上段二亚段,该亚段泥岩也能作为良好的盖层,但其分布范围和规模比塔塔埃尔塔格组下段红色泥岩小,是控制塔中地区及顺托果勒低隆现今志留系油气成藏的重要盖层;三是柯坪塔格组中段浅海陆棚沉积的暗色泥岩,主要分布在满加尔坳陷、阿瓦提坳陷、沙雅隆起南部和顺托果勒低隆等地区,是柯坪塔格组下段砂岩的区域盖层。

奥陶系顶部的桑塔木组泥岩在台盆区分布广泛,

① 王毅,张仲培,等.塔里木盆地巴麦地区古生界盖层动态演化与保存评价.中国石化石油勘探开发研究院,2013.

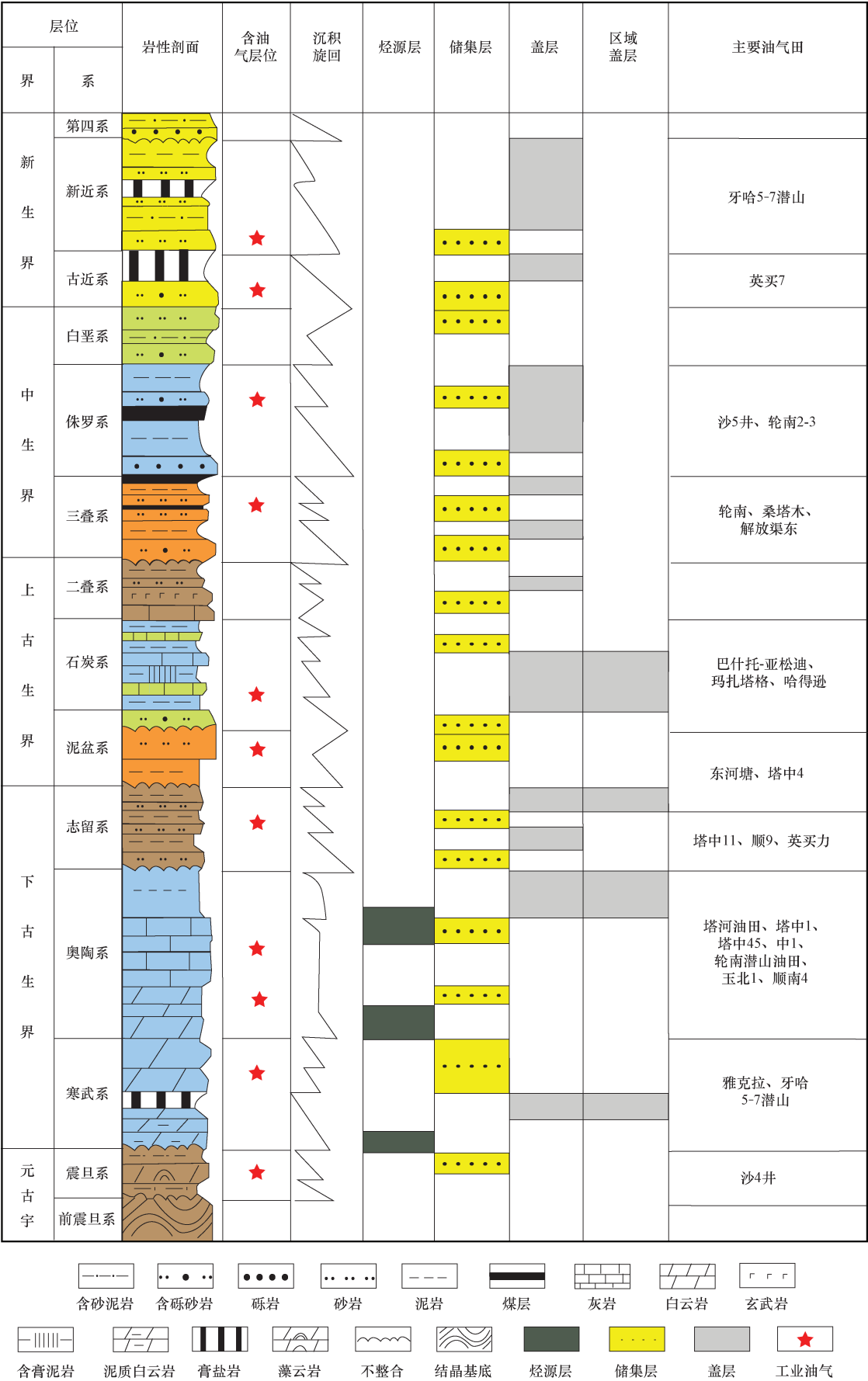


图 1 塔里木盆地海相油气储-盖组合示意图

Fig. 1 Schematic map showing marine reservoir-cap assemblages in the Tarim Basin

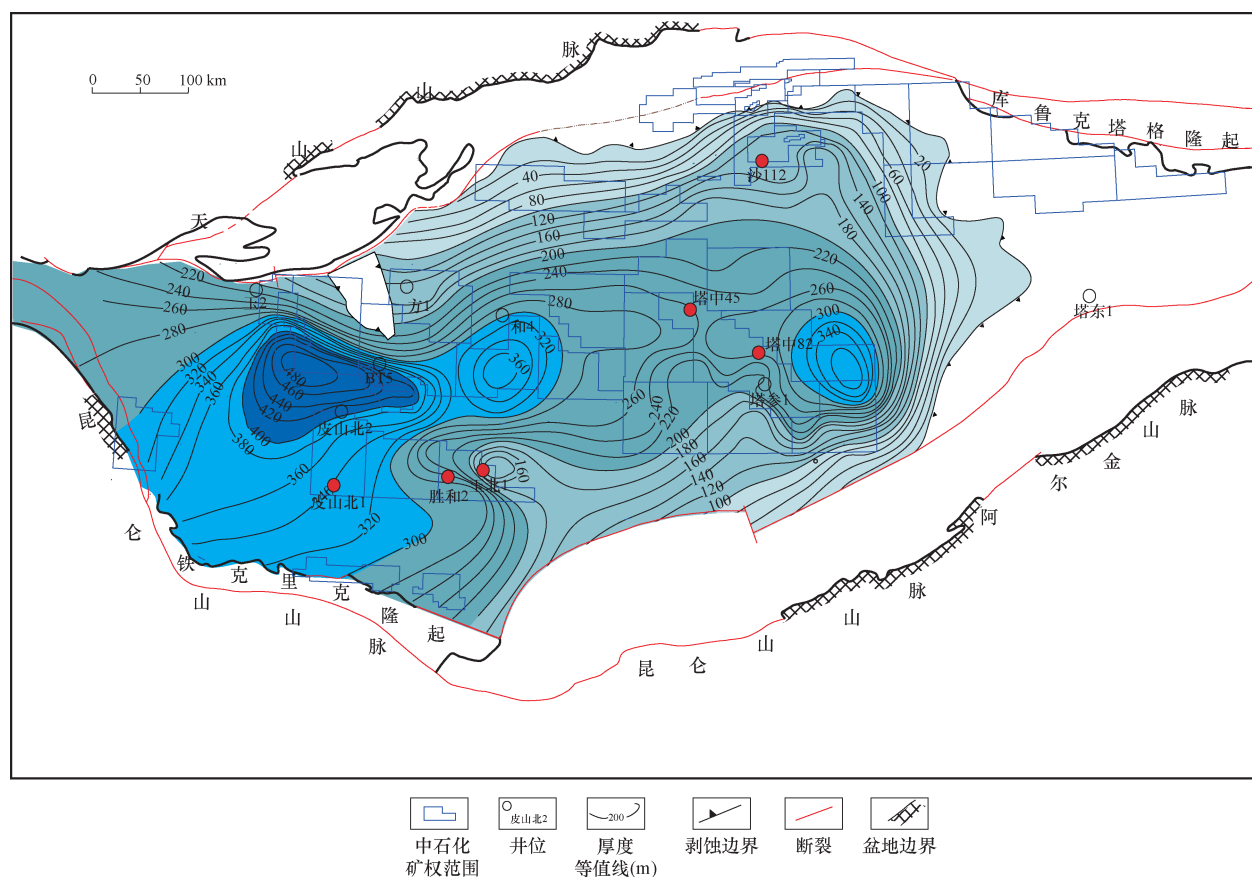


图2 塔里木盆地石炭系泥岩厚度等值线

Fig. 2 Isopach of the Carboniferous mudstone in the Tarim Basin

除隆起高部位被剥蚀以外,其残余厚度在数百米到1 000 m,在满加尔盆地,其厚度最厚可达8 000 m以上,是一套很好的区域性盖层。在塔北地区,厚度仅为50~200 m的上奥陶统泥岩作为直接盖层,封盖了下部的油气藏。另外,中奥陶统的泥灰岩段也是比较好的盖层,中16井泥灰岩突破压力均值为14.3 MPa,泥质条带微晶灰岩突破压力均值为5.41 MPa,灰云岩最低为2.15 MPa。一般可以作为中-上奥陶统灰岩段内幕型含油气储层的直接盖层。

中-下寒武统膏盐岩盖层分布广泛,但厚度变化较大,受相带控制明显。纵向上主要发育在阿瓦塔格组和吾松格尔组,横向对比性较好,厚度变化较大。代表着蒸发台地-局限台地沉积环境。从南北两条东西向剖面对比看,蒸发台地主要分布在西南部。巴楚隆起区厚度较大,向南、向西减薄。

比较而言,石炭系中泥岩与上泥岩段、志留系塔塔埃塔格组下部红泥岩段、上奥陶统桑塔木组泥岩以及中-下寒武统盐膏岩段厚度大多在100~300 m,都属于较大厚度连续均质盖层段,其中在塔中隆起低部位及满加尔凹陷周边的钻井揭示,桑塔木组泥岩为巨厚沉积,多口钻厚达2 000 m以上。石炭系下泥岩段泥岩较均质,但受海西早期古地貌控制,在

古隆起高部位厚度明显变小,局部地区甚至缺失。志留系柯坪塔格组中部泥岩段属于小厚度薄夹层盖层,沉积受早加里东期古隆起控制明显。上奥陶统良里塔格组灰岩盖层主要表现为小厚度薄夹层特征。

1.3 石炭系巴楚组泥岩是海相油气最重要的区域盖层

根据石炭系盖层厚度稳定、封盖性能好,且与海西晚期碳酸盐岩风化壳岩溶储层构成优质储盖组合等特征分析,认为石炭系是台盆区最重要的区域盖层,对台盆区下古生界的油气资源具有重要控制作用。塔里木地区在经历了海西早期的强烈构造运动之后,形成了塔里木石炭纪克拉通内部挤压性拗陷原型盆地,石炭系为一套浅海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积,沉积厚度约700~1 000 m,分布范围广。同时,石炭系泥岩多处于中成岩作用阶段^[31-32],通过现今盖层封盖能力参数实测、声波时差计算等都表明,盖层物性封盖性能较好,并且存在形成多种封闭机制的可能。例如,巴楚西部地区巴什托-亚松迪油气田钻井石炭系卡拉沙依组上泥岩段和巴楚组中、下泥岩段异常高压普遍发育,并且随深度增加有增大的趋势,在塔北隆起的轮南油田,石炭系泥岩最大异常压力也具有类似的特征,但压力系

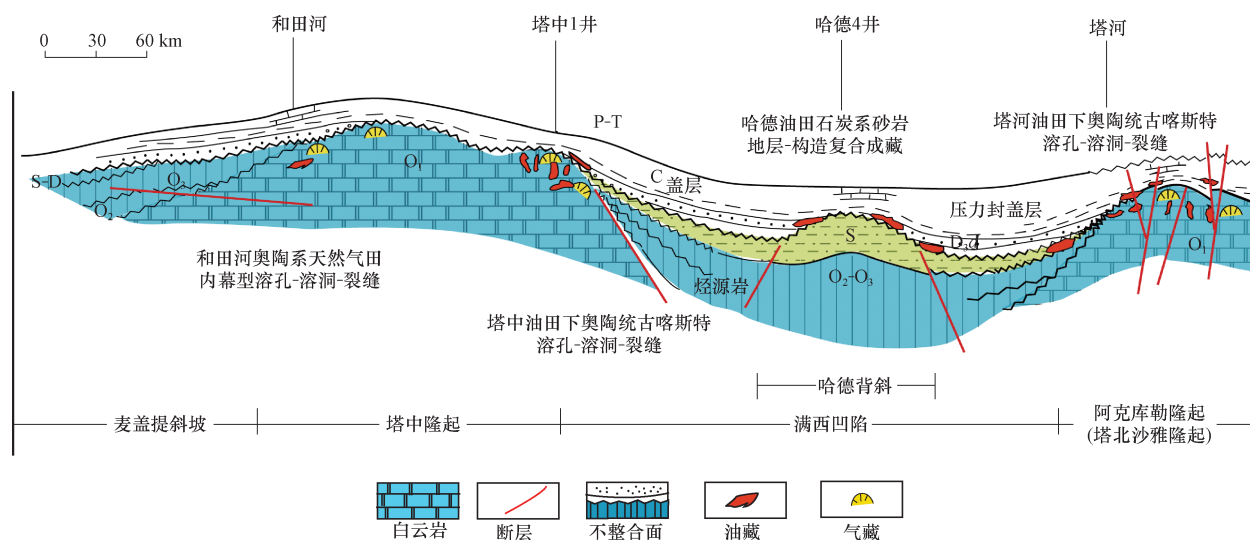


图3 塔里木盆地石炭系盖层与碳酸盐岩储层储-盖组合示意图

Fig. 3 Schematic map showing assemblages of the Carboniferous cap rock and the Lower Paleozoic reservoir in the Tarim Basin
T-P. 二叠系-三叠系; C. 石炭系; D-S. 志留系-泥盆系; D₃d. 泥盆系东河塘组; O₃. 上奥陶统; O₂-O₃. 中-上奥陶统; O₁. 下奥陶统

数较小,在 1.12~1.33 之间^[6]。

此外,石炭系盖层与风化壳岩溶型储层形成有利的储盖组合。与风化壳岩溶作用有关的碳酸盐岩储层在区域上主要展布于奥陶系碳酸盐岩裸露的古潜山分布范围内,前述的塔河地区岩溶储层解剖表明岩溶形成期主要在加里东晚期与海西早期,石炭系沉积是在其储层形成以后最大规模的海侵沉积,全面覆盖了碳酸盐岩储层,从而成为台盆区古生界非连续型油气储盖组中的优质盖层(图3)。

油气勘探结果表明,石炭系(含膏)泥岩封盖了台盆区大部分油气。塔里木盆地古生界碳酸盐岩层系特别是下古生界碳酸盐岩层系油气资源丰富,塔河油田奥陶系储层中,以石炭系为区域盖层的油气资源占总资源量的 93%。根据 2011 年全国油气矿产储量通报,对塔里木盆地油气藏的盖层进行的统计,结果表明,台盆区黑油、凝析油探明储量以石炭系为盖层的资源量占 80.1%,而天然气资源探明储量石炭系盖层占 31.6%。

2 基于盖层动态地质演化的评价技术与方法

2.1 盖层动态评价基本思路

在地质演化过程中,盖层要经历沉降埋藏和抬升两个最为基本的阶段。理论研究表明,沉降埋藏阶段,是泥岩盖层不断压实、微观封闭能力不断形成并增大的阶段,也是盖层温压不断升高、力学性质由脆性逐渐转换为韧性(不一定发生,视埋藏深度的大小)的阶段;抬升阶段为盖层围压不断减小、差应力

增大导致岩石可能产生裂缝化(不一定发生,视抬升幅度的大小)的阶段。抬升阶段盖层本身微观封闭能力并不会发生大的变化,但受裂缝化的影响,盖层封盖效能将会大大降低。在多期构造变动的地区,埋藏-抬升的地质过程会发生多次,盖层的这种封闭性能变化会更加复杂。但无论是哪个阶段,盖层的埋藏深度变化是导致盖层封盖性能变化的关键因素。盖层动态评价,就是重建盖层在地质演化历史过程中随着其埋深的变化,评价其封盖能力的变化过程。因此,本次研究正是基于盖层在埋藏阶段封闭能力的形成、力学性质的变化、抬升阶段裂缝化的出现均与盖层的埋深有密切关系的认识,确定了评价盖层的 3 个重要参数:盖层封盖能力形成的临界深度(D_{P0})、脆-延转换的临界深度(D_{B-P})、隆升阶段开始裂缝化深度(D_F),并用盖层埋深来量化盖层在埋藏-抬升旋回过程上述评价参数,以达到分级、定量评价的目的(图4)。

根据图4可以看出,如果盖层埋深处于封盖能力形成的临界深度(D_{P0})之上,不管是泥岩还是膏盐岩盖层,均未演化到封闭石油的阶段,不具备封盖能力。在评价时,可以视之为“有盖无效”,评价为Ⅲ类。而当盖层埋深超过临界深度(D_{P0})以后,随着盖层的成岩作用与压实的进行,盖层具备了一定的物性封盖能力,并且随着埋深的增加,封盖能力有增大的趋势,此时可以评价为Ⅱ类盖层,此时盖层称之为“有盖有效”,盖层的物性封闭能力是评价此时的重要参数。

多项研究表明,泥岩或者膏盐岩,在低温低围压下弹脆性较明显,而在高温高围压下多表现为塑性。随着盖层埋深的增加,盖层在应力作用下,逐渐由脆性变

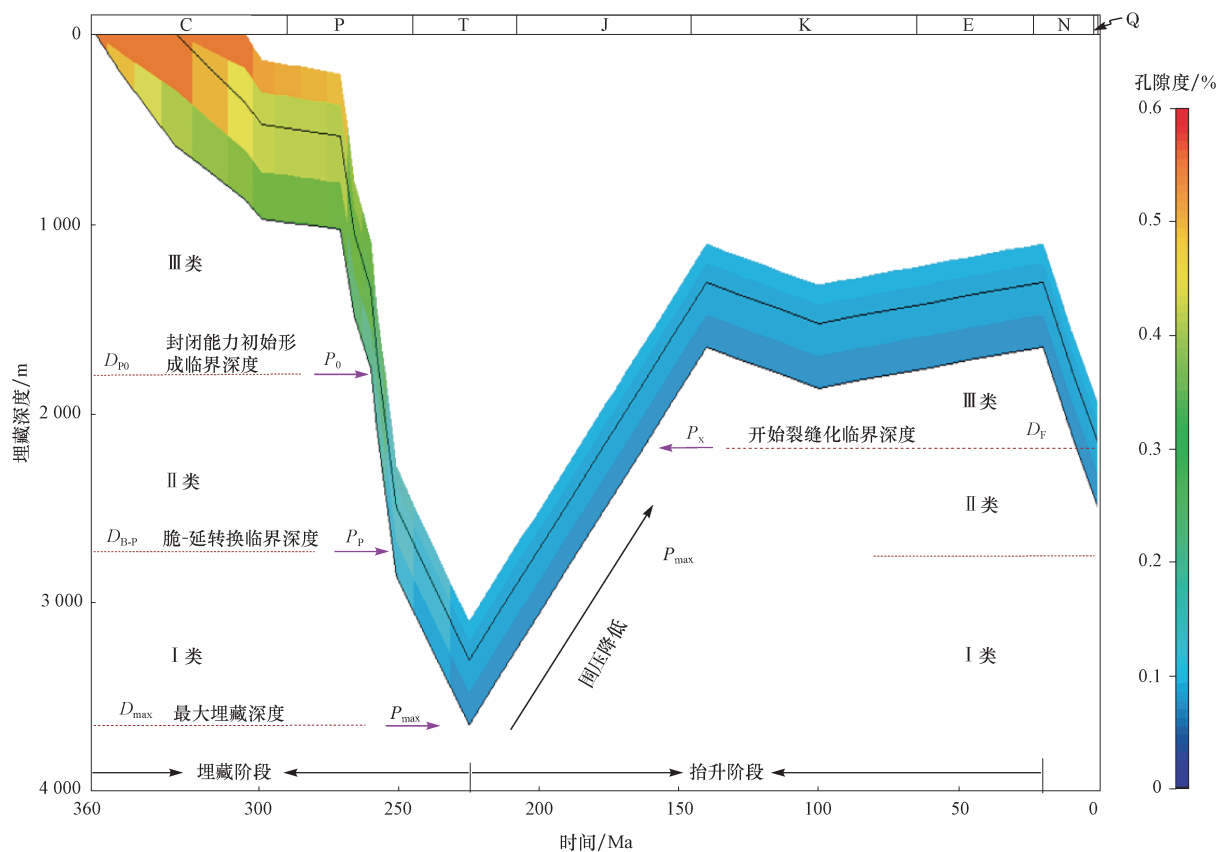


图4 盖层动态演化与评价参数及等级划分

Fig. 4 Parameters and grading for cap rock dynamic assessment

D_{p0} . 封闭能力初始形成临界深度; D_{B-P} . 脆-延转换临界深度; D_{max} . 最大埋藏深度; D_F . 盖层开始裂缝化临界深度;

P_0 . 能够封闭油的盖层突破压力; P_P . 盖层具有塑性时间的突破压力; P_{max} . 盖层具有最大埋深时的突破压力; P_X . 盖层裂缝化时的突破压力

形向韧性变形过渡。因此,围压状态的变化决定盖层脆韧性。盖层由脆向韧性转换,意味着抵御裂缝化能力的提高,是决定其有效性的的重要因素。当盖层埋深处于在脆-延转换的临界深度(D_{B-P})之下,相对与浅埋深盖层,除具备较强的物性封闭能力外,裂缝化程度更小,封盖能力最好,可以评价为I类。此时除了考虑盖层的物性封盖能力外,要更多参考其岩石力学性质的特征。

盖层到达最大埋深以后(D_{max})经历抬升,由于成岩作用的不可逆,此时物性封闭能力并不会随着埋深的降低变小。但当其被抬升至埋深小于脆延-转换临界深度(D_{B-P}),盖层脆、韧性又开始反向变化,封盖能力由I类,降低为II类。随着盖层继续抬升,因为应力状态的变化,差应力不断增加,盖层遭受裂缝化,有效性不断降低。当达到大量产生裂缝的深度(D_F)之上时,认为盖层也是无效的,评价为III类。

2.2 盖层动态评价关键参数求取

2.2.1 泥岩盖层封盖能力形成的临界深度(D_{p0})

对于泥岩盖层,可以利用研究区孔隙度-埋深关

系式、样品实测的孔隙度-突破压力的关系式来换算突破压力-埋深关系,通过求取能封油的临界突破压力所对应的深度来获得封闭能力形成的临界深度(D_{p0})。

沉积物的压实作用从开始埋藏一直持续到埋深9000多米,压实过程中沉积物的孔隙度随深度加大而减小。在正常压实的情况下(不考虑胶结作用等),碎屑岩的孔隙度随深度增加而逐渐减小,砂泥岩孔隙度衰减曲线近似遵循指数分布。在地层由多种岩性组成的复杂岩性条件下,地层孔隙度随深度变化关系式可改进为^[15]:

$$\phi = P_1 \phi_1 e^{c_1 Z} + P_2 \phi_2 e^{c_2 Z} + \cdots + P_n \phi_n e^{c_n Z} \quad (1)$$

根据实测的巴麦地区石炭系泥岩的孔隙度与突破压力的数据,利用44组数据拟合了其相互关系:

$$P = 80.234 \text{Power}(\phi, -1.452) \quad (2)$$

综合公式(1)和公式(2)可以建立突破压力与深度的关系:

$$P = 80.234 \text{Power}(P_1 \phi_1 e^{c_1 Z} + P_2 \phi_2 e^{c_2 Z} + \cdots + P_n \phi_n e^{c_n Z}, -1.452) \quad (3)$$

式中,Power是表达返回给定数字的乘幂,如:Power(a, b)表示 a 的 b 次方。 ϕ 为地层孔隙度,小数; P_1 ,

$P_2, \dots, P_n$ 为地层岩性百分含量, 小数; $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 为对应岩性沉积物初始孔隙度, 小数; $c_1, c_2, \dots, c_n$ 为对应岩性压实系数, m^{-1} ; Z 为深度, m ; P 为突破压力, MPa ;

根据周雁等制定的中石化盖层评价的参考标准, 并参考赵庆波以及袁玉松等人的研究成果^[15,43], 本次研究取突破压力 1.0 MPa 作为封闭石油的下限值, 根据上述关系, 求得石炭系巴楚组泥岩盖层封闭能力形成的临界深度 (D_{p0}) 为 2 100 m。

2.2.2 膏盐岩盖层封盖能力形成的临界深度 (D_{p0})

膏盐岩(包括石膏、半水石膏、硬石膏等)因其密闭性好、韧性好被认为是最好的油气盖层^[17]。膏岩盖层的封盖能力是什么时候形成的? 除了在焦方正的文献中提到“塔河油区南侧下石炭统的膏盐岩在海西晚期已结晶成岩, 封闭性好”外, 少有文献提及^[44], 暗示膏岩在结晶后具备封盖能力, 其封闭能力的形成可能并不像我们想象的“在沉积结晶析出后就具备了封盖能力”。

盖层如果无效, 层间流体就会发生流动。而盐结晶或者重结晶的速度要比石英和方解石等快的多, 所以在早期很容易被包裹体记录流体活动的信息, 此时流体活动代表盐不具备封盖能力(图 5); 而盐层中流体包裹体的最高温度, 代表了其具有封盖能力的最低条件, 是最后一次流体被捕获, 此后流体不能在盐层间发生流动(图 5), 具备了封盖能力。因此, 如果在盐膏岩盖层中发现低温包裹体群, 可以用其最高温度对应的埋深来近似其封盖能力形成的初始深度。

在 BT5 井盐层中发现多个包裹体, 对盐层中的包裹体测温表明, 最低温度为 29.6 °C, 最高温度为 57.1 °C, 包裹体发现在盐晶体中, 是盐晶体在愈合时捕获, 此时流体活动代表盐不具备封盖能力, 盐岩中流体的最高温度代表了其具有封盖能力的最低条件, 是最后一次流体捕获, 此后流体不能在盐层间发生流动。所以 57.1 °C 代表了盐能具备封盖能力的最小埋深的地温, 即能具备封盖能力的最低地质条件, 通过对 BT5 井埋藏史的恢复, 可见, 中寒武统盐层具备封盖能力的埋深是 1 230 m。

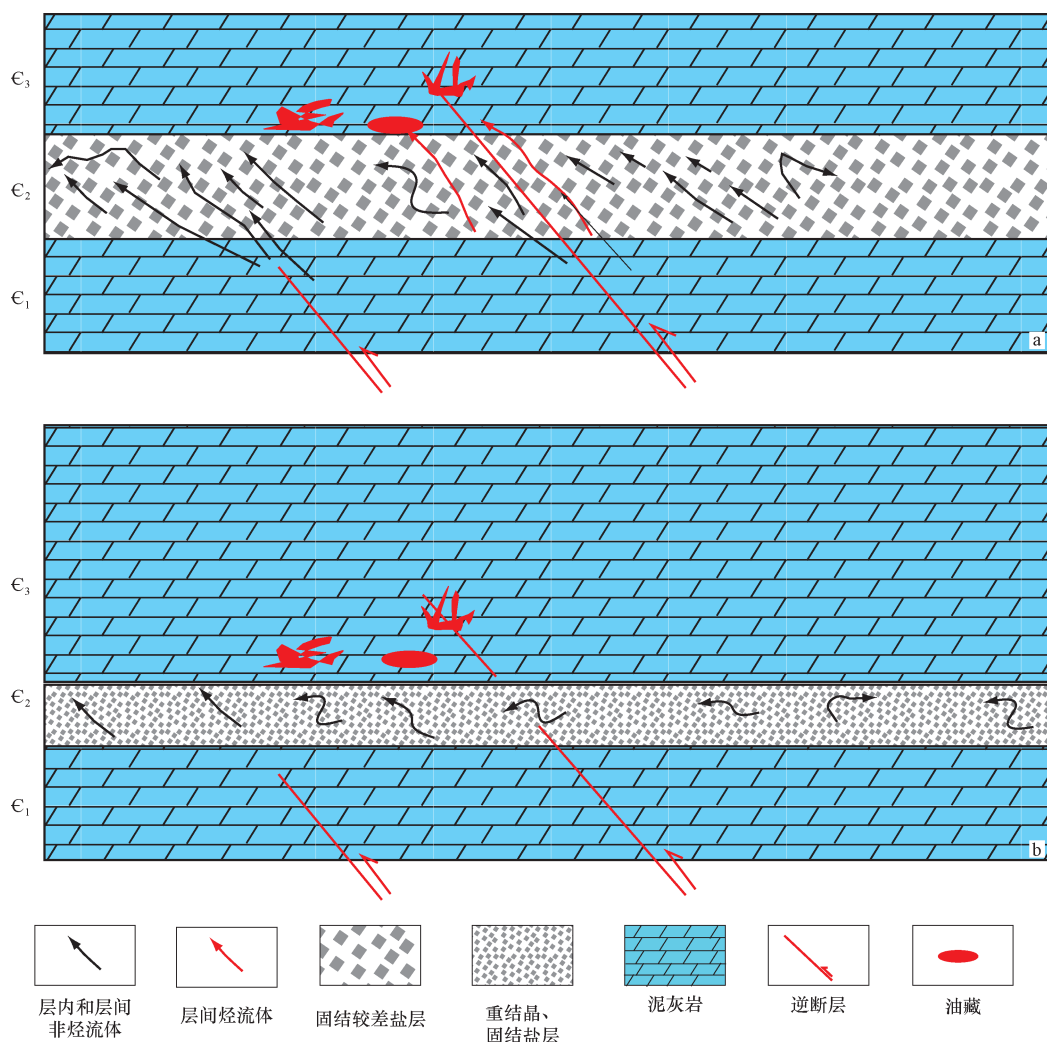


图 5 理想的盐压实过程与封闭能力形成模型(以中寒武统盐层为例)

Fig. 5 Ideal model of salt compaction and sealing capacity formation(taking the Middle Cambrian as an example)

2.2.3 盖层脆-延转换的临界深度(D_{B-P})

在实验室条件下对盖层样品进行三轴压缩试验,低温低围压下弹脆性较明显,高温高围压下,多表现为塑性。当对多个固定围压下的样品不断增加轴压时(模拟沉降埋藏阶段),在一定的临界条件下,它们都会发生由脆性向塑性的转换^[26,28-30]。理论上随着围压的增大,岩石有从脆性和塑性转变的趋势,当岩石变为塑性时,极限强度和残余强度趋于相同。应用这一原理,通过实验模拟分别建立围压与极限强度和残余强度的数学回归方程,通过这个方程求解出极限强度和残余强度相同时的围压,进而估算盖层由脆性向塑性转变的临界深度(D_{B-P})。

此次试验选用古近系野外露头的石膏样品。实验分析表明,膏岩在不同的温度条件下其变形特征差异较大。温度升高,膏岩发生脆延转换的围压会降低。不考虑温度时,膏盐岩在3 655 m时膏岩已经进入韧性变形域。但实际上在地下现今地层温度为100℃左右及其以上。所以我们选择在100℃的温度条件下,给盖层样品施以不同的围压,来探索膏盐岩发生脆延转换的温压条件。

结果表明,在实验室条件下,在100℃时围压 P 与硬石膏极限强度和残余强度之差 σ_t 的拟合关系为:

$$P = -0.1484\sigma_t + 6.0261, R^2 = 0.9729 \quad (4)$$

而在实际地层条件下,围压 P 可以通过下式计算得到:

$$P = 0.010133(\rho_D - \rho_w)H \quad (5)$$

式中: P 为围压,MPa; σ_t 为极限强度和残余强度之差值; ρ_D 为上覆岩层密度, kg/m^3 ; ρ_w 为地层水密度, kg/m^3 ; H 为盖层埋深,m。

在 P 值为0时,膏盐具有塑性,此时 σ_t (围压)为40.6 MPa。根据的围压与埋深之间的关系式(5),可以计算在埋深为2 550 m时,膏岩发生脆-延转换。即膏盐 D_{B-P} 为2 550 m。

2.2.4 盖层裂缝化深度(D_F)等效估算

岩石在抬升阶段会出现裂缝化已被理论研究和野外观察所证实。抬升阶段的裂缝化现象可以用在实验室三轴卸压试验来模拟再现,但是由于难以得到理想的未经历抬升与再压实的样品,实验室模拟非常困难。在野外,我们注意到在裂缝中多充填石英或方解石,这是裂缝开启流体曾经发生流动的标记,其中的流体包裹体记录了裂缝发育的地质条件。用包裹体的均一温度去反推和估算岩石发生裂缝时的埋深。把岩层在抬升前的最大埋深减去这一埋深,即可得到出现裂缝化

的最小抬升幅度。在研究中发现,由于泥岩较少捕获包裹体,并且发现脆性系数(脆性系数是描述岩石韧性特征的参数)具有白云岩>灰岩>泥岩>膏岩的特点,所以利用可以捕获大量包裹体的灰岩等效。

选择塔里木盆地西北部小海子水库附近的野外露头,以奥陶系蓬莱坝组灰岩裂缝与方解石晶体中的包裹体为研究对象,探讨了地层由于构造抬升引起压力卸载,裂缝张开的条件。分析取样点的地质演化历史之后,认为奥陶系沉积后,地层经历了复杂的地质过程,达到最大埋深,此时地层围压大,层间有少量裂缝,但裂缝闭合,很少有流体通过;在地层抬升以后,奥陶系上覆地层被剥蚀,压力卸载,裂缝张开,有流体通过,流体被裂缝愈合与孔洞充填时的方解石捕获形成流体包裹体。

此次分析,获得灰岩裂缝充填方解石脉的包裹体均一温度数据110个,其峰值温度在90~110℃之间,借鉴与剖面位置最近的同1井埋藏史来模拟下奥陶统蓬莱坝组埋藏与抬升过程,蓬莱坝组灰岩在由4 750 m(最大埋深)抬升至2 500~3 200 m左右时裂缝张开,抬升幅度在1 550~2 250 m,选择一个最小的发生裂缝化的条件,即灰岩在地层抬升幅度为1 550 m,开始发生破裂。

泥岩的超固结比(OCR)为最大垂直有效压力和现今垂直有效压力的比值, OCR 越大,高演化泥岩的脆性也越大。在不考虑构造应力作用下(如区域性水平挤压应力导致地层变形和褶皱、断裂等因素),只考虑抬升剥蚀、地层卸压这一因素时,当 $OCR \geq 2.5$ 时,泥岩发生破裂,从而失去封闭性^[16,45]。

此次试验的抬升过程计算了超固结比,在埋深为4 750 m抬升至2 500 m,抬升幅度为1 550 m时,其 $OCR = 1.9$ 。所以我们可以用 OCR 参数来评价盖层发生破裂的地质条件,泥岩 OCR 可以取值2.5,而灰岩 OCR 取值1.9,作为裂缝化产生的条件。

3 塔里木盆地古生界盖层评价及应用

3.1 盖层分级评价标准的建立

根据上述评价思路及三个关键参数的求取,对泥岩盖层和膏盐岩盖层进行评价和分级(表1,表2)。如果是对单井的某套盖层进行评价,只要根据井区的地质演化历史,建立单井的埋藏史,就可以分级评价其不同演化阶段的封闭性能。如果需要对某套盖层进行平面横向上分级评价,需要基于区域上古构造演化历史和地层剥蚀厚度恢复结果,恢复盖层在不同历史时期的埋深,进而根据上述3个临界深度参数,进行分级评价。这样做既可以动态评价不同时期的封盖性能,

表 1 塔里木盆地石炭系泥岩盖层封盖性分级评价标准

Table 1 Criterion for sealing capacity assessment of the Carboniferous mudstone cap in the Tarim Basin

因素	评价参数	泥岩盖层封闭性分级标准				
		好(Ⅰ)		中等(Ⅱ)		差(Ⅲ)
		I ₁	I ₂	Ⅱ ₁	Ⅱ ₂	Ⅲ
力学性质	脆、韧性	韧性		脆性		被裂缝化
	OCR	<2.5		<2.5		≥2.5
	埋深/m	≥4 780		2 100 ~ 4 780		≤2 100
微观物性	突破压力/MPa	≥5		1 ~ 5		≤1
宏观特征	平面分布	大面积连片		较大面积连片		小面积零星分布
	厚度	≥平均厚度	≤平均厚度	≥平均厚度	≤平均厚度	不考虑

表 2 塔里木盆地中-下寒武统膏盐岩盖层封盖性分级评价标准

Table 2 Criterion for sealing capacity assessment of the Middle-Lower Cambrian salt-gypsum cap in the Tarim Basin

因素	评价参数	泥岩盖层封闭性分级标准				
		好(Ⅰ)		中等(Ⅱ)		差(Ⅲ)
		I ₁	I ₂	Ⅱ ₁	Ⅱ ₂	Ⅲ
力学性质	脆、韧性	韧性		脆性		被裂缝化
	埋深/m	≥2 550		1 230 ~ 2 550		≤1 230
	平面分布	大面积连片		较大面积连片		小面积零星分布
宏观特征	厚度	≥平均厚度	≤平均厚度	≥平均厚度	≤平均厚度	不考虑

也可以考虑同一时期不同地区因差异沉降-隆升导致的变化,对同一套盖层在平面上进行等级划分。两种方法结合,达到由点及面的评价,从而满足区带评价的需要。

3.2 巴-麦地区盖层动态评价

在完成对巴-麦地区古构造恢复的基础上,按照上述泥岩盖层分级标准,以巴楚组泥岩顶面、中-下寒武统顶面系列古埋深等值线图为基础,编制了一系列盖层动态演化评价图。

3.2.1 石炭系巴楚组泥岩盖层封盖能力动态评价

从石炭系下泥岩段盖层评价图中可以看出(图 6),自海西晚期以来至喜马拉雅晚期,石炭系巴楚组泥岩盖层在巴楚隆起区西北部的差封盖区(Ⅲ类区)在不断扩大,而在麦盖提斜坡封盖性能在不断增强,由Ⅱ类区变为Ⅰ类区。海西晚期大幅抬升之前,在巴楚隆起区西北部,因埋深小于 2 100 m,尚未进入封油的临界深度,为无效盖层,评价为Ⅲ类区。在中、南部,盖层埋深较大,但未达到能封闭气的深度,也未达到泥岩发生脆延转换的深度,所以评价为Ⅱ类区。

达到最大埋深后在海西末期经历抬升,盖层的裂缝化是影响封盖能力的关键因素。用超固结比(OCR)也可对该阶段盖层裂缝化程度进行初步评价。计算得出不同构造分区 7 口代表井(玉 2、康探 1、巴开 8、巴探 5、和田 1、和 4、玉北 1)抬升幅度和 OCR 值,结果表明,位于和靠近西北部的井,OCR 值较大,玉 2 井为

2.46,接近裂缝化的临界值 2.5。而在南部的玉北 1 井区,只有 1.34,属于无裂缝化区域。这一计算结果与上述的评价结果具有较好的一致性。

喜马拉雅晚期石炭系下泥岩段埋深加大,部分盖层进入了脆延转换的深度。在南部的麦盖提斜坡上,埋深较大,超过 4 780 m,因此评价为Ⅰ类区(图 6)。但在北部地区,Ⅲ类区进一步扩大。有盖无效可能是制约该地区没有成藏的重要原因。

在巴-麦地区的中部,根据埋深的差异,划为Ⅱ₁和Ⅱ₂两类,其划分的界线是 4 200 m 的等深线。埋深超过 4 200 m 时,是气的有效盖层,所以埋深在 4 200 ~ 4 780 m 时盖层评价为Ⅱ₁类,其余评价为Ⅱ₂类。

3.2.2 寒武系膏盐岩盖层封盖能力动态评价

对于中寒武统盐膏岩盖层,前面求取的封闭能力形成初始深度 1 230 m 和脆延转换临界深度 2 550 m 是评价共封闭能力的关键依据。评价结果显示,自海西期到喜马拉雅晚期,研究区西南部的差封盖区在不断缩小,最后全部演变成Ⅰ类区。相反,巴楚隆起西北部,局部地区盖层却在不断变差,由海西期的Ⅰ类区演变为喜马拉雅晚期的Ⅲ类区。

从评价图可以看出,在海西早期的巴-麦地区西南部,由于膏盐埋深较浅,没有达到能具有封盖能力的 1 230 m 的深度范围,所以划为Ⅲ类区,认为当时该地区无有效盖层;在Ⅲ类区的北部,膏盐盖层埋深超过 1 230 m 但是埋深未达到膏盐发生韧性变形的深度范围,考虑盖层岩性的塑性,其划分为Ⅱ类,为有效盖层

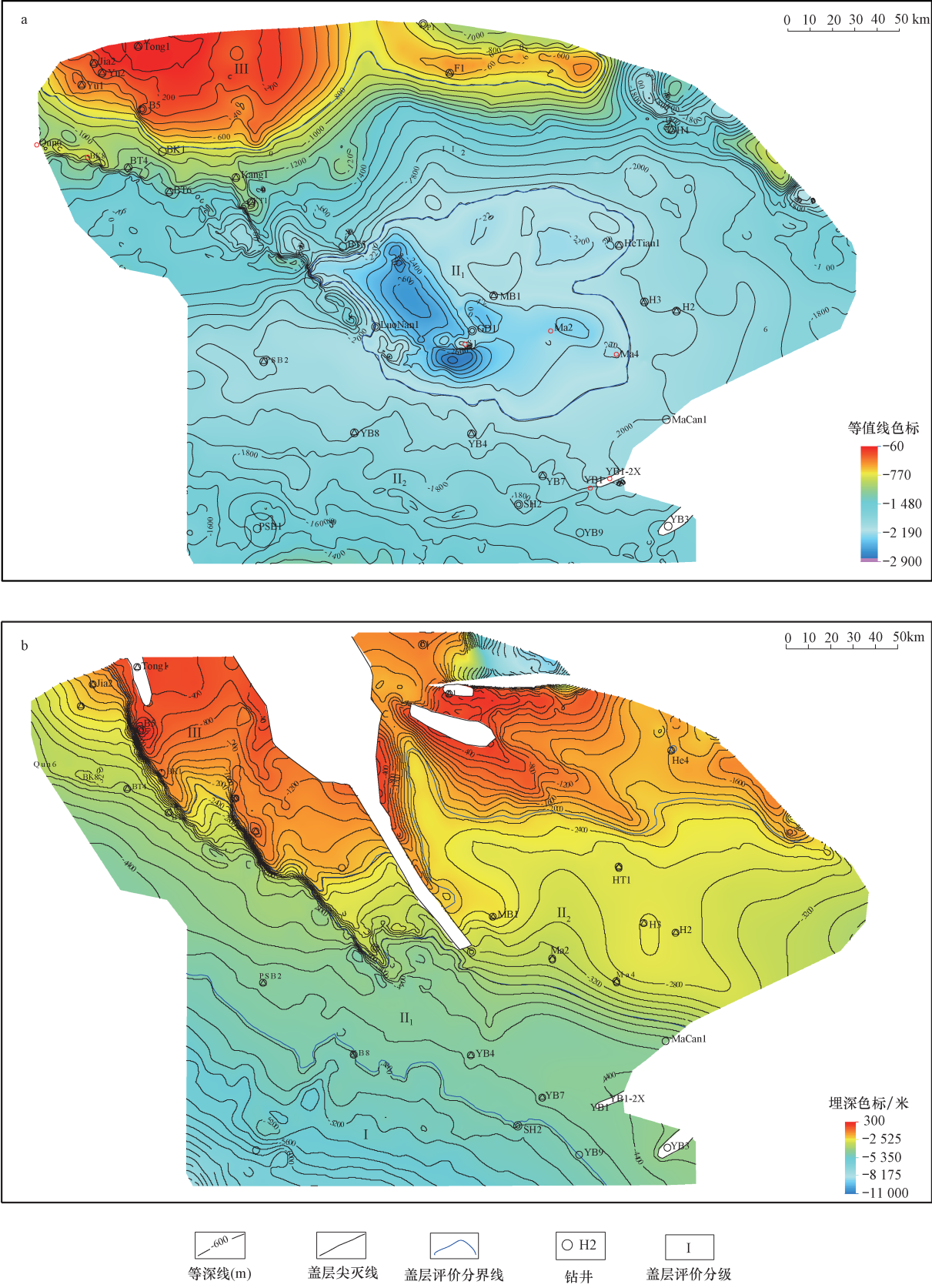


图 6 塔里木盆地巴-麦地区海西晚期和喜马拉雅期石炭系下泥岩段盖层评价

Fig. 6 Assessment of the Carboniferous mudstone cap in the Late Hercynian and late Himalayan in Bachu-Magaiti area, Tarim Basin

a. 海西晚期; b. 喜马拉雅期

区;在现今巴楚隆起区的大部分地区,膏盐埋深大,超过了膏盐发生韧性变形的深度 2 550 m,所以此时的盖层性质是最好的,在构造活动中表现为韧性,盖层塑性

好,所以认为盖层处在较好的演化阶段上,划为 I 类,并且可以依据其厚度变化,可以划为 I₁ 或者 I₂ 类区。I₁ 类区厚度大,盖层的封盖能力最好(图 7)。

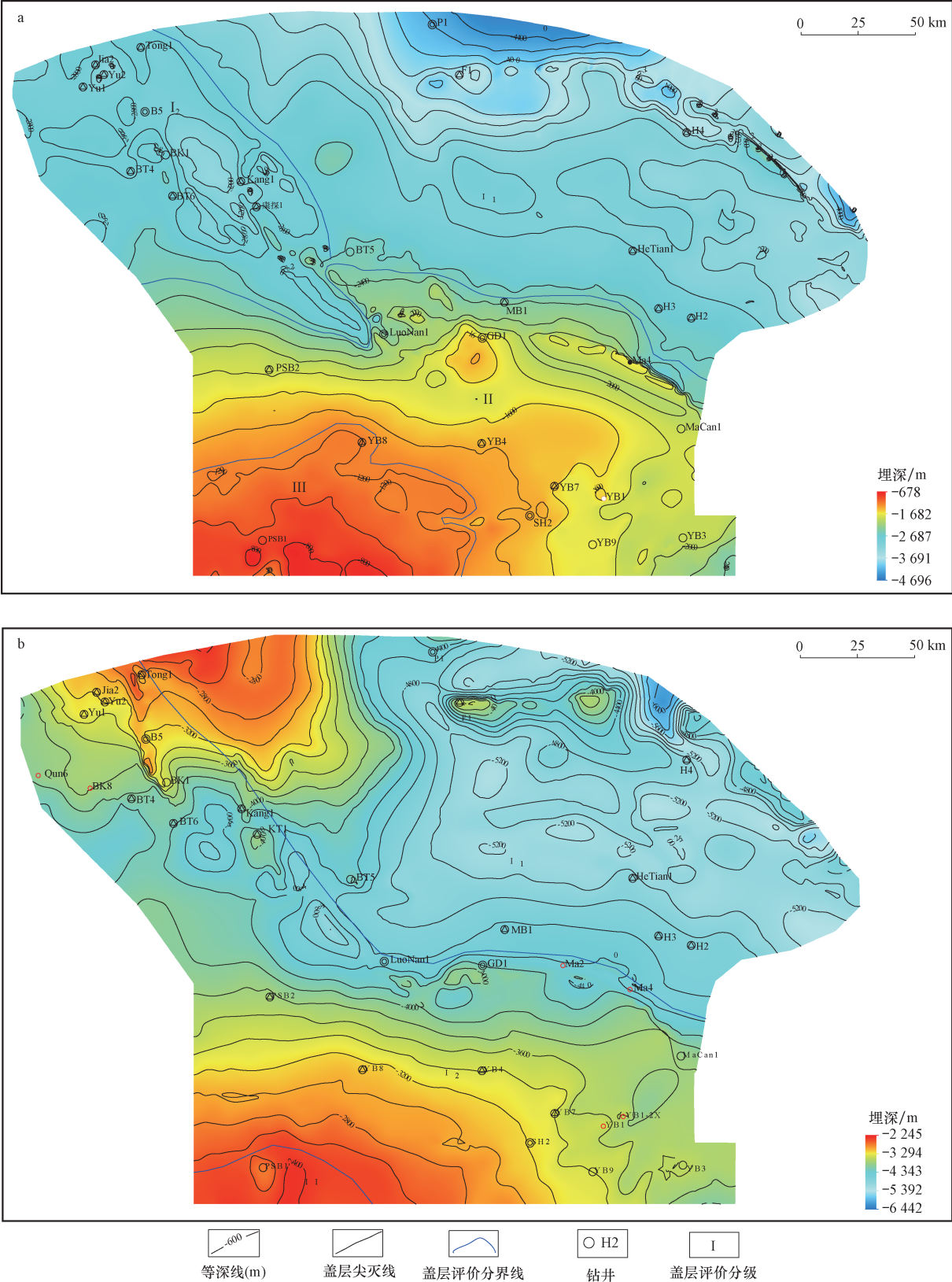


图 7 塔里木盆地巴-麦地区中-下寒武统膏盐岩盖层评价

Fig. 7 Assessment of the Middle-Lower Cambrian salt-gypsum cap in the Early and Late Hercynian in Bachu-Magaiti area, Tarim Basin
a. 海西早期; b. 海西晚期

海西晚期,玉北地区膏盐岩埋深早超过了盖层具有封盖能力的最小埋深,盖层是有效的。但是西南部小范围地区埋深并没有到膏盐岩发生脆延转换的埋

深——2 550 m,所以评价为Ⅱ类;巴楚隆起区在此时总体上都归为Ⅰ类(图 7)。

喜马拉雅晚期,受巴-麦地区南北向隆坳反转的

影响,大部分地区寒武系的埋深进一步增大,超过了盖层脆延转换的临界深度,所以寒武系膏盐盖层被认为是达到了能够封闭油甚至高压气藏的条件,评价为Ⅰ类区;只在西北部局部隆升较强的古董山构造带及以北地区较差,评价为Ⅱ-Ⅲ类区。

3.3 盖层动态评价结果应用

勘探实践表明,巴-麦地区油气发现与显示,具有东西分段的特征。东南部地区集中在下古生界,而西北部地区集中在上古生界,这是与石炭系的盖层封盖性能有关。在东南部地区,自海西晚期以来,石炭系盖层一直有效,评价为Ⅰ-Ⅱ类盖层,所以油气主要在下古生界聚集,而西北部地区伽1井附近,直接覆盖在生屑灰岩顶部的中泥岩厚度,仅剩有16 m,使得石炭系上、中两套泥岩盖层基本不具备封盖能力。玉2井虽然在石炭系见到了良好的油气显示,但没有获得油流,该井的失利与该处石炭系泥岩盖层较严重的剥蚀有很大的关系。所以西北部区域多评价为Ⅲ类盖层,下古生界储层与石炭系盖层的储盖组合较差,油气沿断裂带在上古生界多层分散聚集。

玉北地区寒武系膏盐岩盖层在海西早期封盖性能不好,油气可以穿越盖层,向上运移,而上部的奥陶系泥灰岩盖层埋深较浅,并被剥蚀,盖层无效,有油气运移过程,而不能成藏,玉北1井储层中的沥青就是这次油气聚集过程的证据;在海西晚期以后,石炭系盖层评价为Ⅰ-Ⅱ类盖层,所以,石炭系覆盖区是有利的勘探领域。

因此,海西晚期(目前认为的主力成藏期),巴-麦西北部地区石炭系盖层为差保存区,好保存区主要分布于和田古隆起区和巴楚隆起的中东部。喜马拉雅晚期(油气藏调整和定型期),因为巴楚隆起西、北发育多条断至浅表的断层,基本上为差保存区,好保存区主要分布在麦盖提斜坡和巴楚隆起南缘带以及巴楚隆起的东部大型构造带间的区域。

在评价好的保存区内,部署的巴探5井在奥陶系获得天然气发现,玛北1井中-下寒武统遇良好的油气显示,玉北地区多口井在奥陶系钻遇良好油气显示。这些勘探结果与上述评价的好封盖区是基本一致的,也证实这一评价结果的科学性与可靠性。

4 结论

1) 盖层封盖性能受多种因素影响,且在地质演化过程中动态变化。充分考虑盖层的地质演化过程,把盖层的宏观变化、物性演化、应力应变特征等因素综合考虑,是实现盖层动态评价的科学做法。

2) 盖层在埋藏阶段初始封闭能力的形成、力学性

质的变化、抬升阶段裂缝化的出现均与盖层的埋深有密切关系;且这些关系可以通过样品实验测试数据和盖层地质演化历史分析建立起来。盖层封盖能力形成的临界深度(D_{f0})、脆-延转换的临界深度(D_{B-P})、隆升阶段开始裂缝化深度(D_F)3个参数可以用来作为分级、定量评价的依据。结合单井埋藏史和平面上古埋深恢复,可以实现由井点到平面上的盖层动态分级评价。

3) 塔里木盆地巴-麦地区石炭系巴楚组泥岩盖层初始封闭石油对应的临界埋深平均为2 100 m。中-下寒武盐膏岩盖层具备初始封闭能力的临界埋深是1 230 m,脆-延转换临界深度为2 550 m。

4) 塔里木盆地古生界海相油气受多套盖层控制。石炭系巴楚组泥岩是海相油气最重要的区域盖层。巴-麦地区多套盖层封盖性能的动态演化受多期差异隆-拗演变控制明显。自海西晚期以来至喜马拉雅晚期,石炭系巴楚组泥岩盖层在巴楚隆起区西北部的差封盖区不断扩大,而在麦盖提斜坡封盖性能不断增强。对于中-下寒武盐膏岩盖层,自海西期到喜马拉雅晚期,西南部的差封盖区在不断缩小,而巴楚隆起西北部,局部地区盖层却在不断变差。

5) 麦盖提斜坡、巴楚南缘构造带及隆起大型断裂带间的区域是油气好保存区。

参 考 文 献

- [1] 周兴熙. 源-盖共控论述要[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 4-7.
Zhou Xingxi. Essentials about hydrocarbon distribution controlled source and seal[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6): 4-7.
- [2] 赵孟军, 张水昌. 塔里木盆地天然气成因类型及成藏条件[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(2): 27-31.
Zhao Mengjun, Zhang Yongchang. The genesis types and accumulation condition of natural gas in Tarim Basin[J]. China petroleum exploration, 2001, 6(2): 27-31.
- [3] 吕延防, 付广, 于丹. 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, 2005, 26(6): 742-745.
Lv Yanfang, Fu Guang, Yu Dan. 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, 2005, 26(6): 742-745.
- [4] 赵靖舟, 李启明, 王清华, 等. 塔里木盆地大中型油气田形成及分布规律[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2004, 34(2): 212-217.
Zhao Jingzhou, Li Qiming, Wang Qinghua, et al. On the formation and distribution of mid-large oil and gas fields in the Tarim Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2004, 34(2): 212-217.
- [5] 郑朝阳, 张文达. 盖层类型及其对油气运移聚集的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 96-101.
Zheng Chaoyang, Zhang Wenda. Cover types and their control over hydrocarbon migration and accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(2): 96-101.

- [6] 付广,陈章明,姜振学. 轮南地区石炭系泥岩盖层的压力封闭特征[J]. 新疆石油地质, 1995, 16(1): 19-23.
Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue. Pressure seal characteristics of carboiferous shale caprock in LunNan area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 16(1): 19-23.
- [7] 付广,陈章明. 塔中地区石炭系泥岩盖层封闭性能研究[J]. 新疆石油地质, 1996, 17(4): 380-384.
Fu Guang, Chen Zhangming. Study on sealing capacity of shale caprock of carboniferous in central Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1996, 17(4): 380-384.
- [8] 叶德胜,王贵全. 塔里木盆地北部储盖组合评价[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(1): 43-49.
Ye Desheng, Wang Quanguai. Evaluation of reservoir-cap assemblage in northern Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(1): 43-49.
- [9] 朱筱敏,顾家裕,贾进华. 塔里木盆地重点层系储盖层评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
Zhu Xiaomin, Gu Jiayu, Jia Jinghua. Reservoir and cap rock evaluation of the major strata in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [10] 焦翠华,谷云飞. 测井资料在盖层评价中的应用[J]. 测井技术, 2004, 28(1): 45-47.
Jiao Cuihua, Gu Yunfei. Application of log data in evaluating caprocks [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(1): 45-47.
- [11] 王显东,姜振学,庞雄奇,等. 塔里木盆地志留系盖层综合评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 49-53.
Wang Xiandong, Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, et al. Comprehensive evaluation of sealing ability of Silurian caprocks in Tarim Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19(4): 49-53.
- [12] 孙丽丹,常贵钊,阎树汶. 盖层突破压力的计算方法及应用[J]. 测井技术, 2004, 28(4): 296-298.
Sun Lidan, Chang Guizhao, Yan Shuwen. Calculation method of caprocks breakthrough pressure and its application [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(4): 296-298.
- [13] 陈章明. 油气藏保存与破坏研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
Chen Zhangming. Studies on preservation and destruction of trapped hydrocarbons [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [14] 付广,陈章明. 利用测井资料综合评价泥质岩盖层封闭性的方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(2): 271-276.
Fu Guang, Chen Zhangming. A method for comprehensively evaluating the sealing ability of overlying mudstone by log data and its application effect [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(2): 271-276.
- [15] 袁玉松. 泥质盖层封闭性动态演化研究方法[C]. 中国石化石油勘探开发研究院博士后学术论文集, 2009.
Yuan Yushong. The research method about sealing capacity dynamic evolution of mudstone cap [C]. Postdoctoral Academic, PEPRIS, SINOPEC, 2009.
- [16] 袁玉松,范明,刘伟新,等. 盖层封闭性研究中的几个问题[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 336-340.
Yuan Yusong, Fan Ming, Liu Weixin, et al. Several discussions of sealing capacity studies of caprock [J]. Petroleum Geology & experiment, 2011, 33(4): 336-340.
- [17] 俞凌杰,范明,刘伟新. 盖层封闭机理研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 91-95.
Yu Lingjie, Fan Ming, Liu Weixin. Seal mechanism of cap rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 91-95.
- [18] 刘伟新,承秋泉,范明. 盖层、压力封盖和异常压力系统研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 74-80.
Liu Weixin, Cheng Qiuquan, Fan Ming. Research on cap rock, pressure seal and abnormal pressure system [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 74-80.
- [19] 杨传忠,张先普. 油气盖层力学性质与封闭性关系[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(3): 7-13.
Yang Chuansong, Zhang Xianpu. Relationship between dynamics of caprocks and characteristics of seal [J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 1994, 16(3): 7-13.
- [20] 杨传忠,刘鑫. 碳酸盐岩油气盖层研究[J]. 天然气工业, 1991, 11(6): 17-23.
Yang Chuansong, Liu Xin. A study of carbonate caprocks of oil and gas [J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(6): 17-23.
- [21] 鲁雪松,蒋有录,宋岩. 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, 2007, 27(8): 48-51.
Lu Xuesong, Jiang Youlu, Song Yan. Influence mechanical properties and stress state of caprock on its sealing performance: taking KeLa-2 gas field as an example [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(8): 48-51.
- [22] 吕延防,张绍臣,王亚明,等. 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 27-30.
Lu Yangfang, Zhang Shaochen, Wang Yaming, et al. Research of quantitative relations between sealing ability and thickness caprock [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 27-30.
- [23] 黄风楼,贾裕鲲. 盖层封闭能力探究[J]. 中国西部科技, 2010, 9(19): 42.
Huang Fenglou, Jia Yukun. Research of the caprock sealing capacity [J]. Science and Technology in Western China, 2010, 9(19): 42.
- [24] 李双建,高波,沃玉进. 中国南海相油气藏破坏类型及其时空分布[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 43-49.
Li Shuangjian, Gao Bo, Wo Yujin. Distribution types and temporal-spatial distribution of marine hydrocarbon reservoirs in South China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 43-49.
- [25] 沃玉进,汪新伟,袁玉松等. 中国南海海相层系油气保存研究的新探索——“保存系统”的概念与研究方法[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 66-73.
Wo Yujin, Wang Xinwei, Yuan Yusong, et al. New explorations of petroleum preservation conditions in marine sequences, South China — concept and research methods of preservation system [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 66-73.
- [26] 周雁,金之钧,朱东亚. 油气盖层研究现状与认识进展[J]. 石油实验地质, 2012, 24(3): 234-246.
Zhou Yan, Jin Zhijun, Zhu Dongya. Current status and progress in research of hydrocarbon cap rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 24(3): 234-246.
- [27] 袁玉松,孙冬胜,周雁,等. 四川盆地川东南地区“源—盖”匹配关系研究[J]. 地质论评, 2010, 56(6): 831-838.
Yuan Yusong, Sun Dongsheng, Zhou Yan, et al. Relationship between hydrocarbon generation history of source rocks and sealing history of mudstone cap—rocks in the Southeast Sichuan Basin [J]. Geological Review, 2010, 56(6): 831-838.

- [28] 汪新伟,沃玉进,周雁. 构造作用对油气保存影响的研究进展——以上扬子地区为例[J]. 石油实验地质,2011,33(1):34-42.
Wang Xinwei, Wo Yujin, Zhou Yan, et al. Primary discussion on relationship between hydrocarbon preservation and tectonic movement: a case study in upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1):34-42.
- [29] 周雁,李双建,范明. 构造变形过程中盖层封闭性研究[J]. 地质科学,2011,46(1):226-232.
Zhou Yan, Li Shuangjian, Fan Ming. Study on sealing capacity of cap rock in the process of tectonic deformation[J]. Geological Science, 2011, 46(1):226-232.
- [30] 李双建,沃玉进,周雁. 影响高演化泥岩盖层封闭性的主控因素分析[J]. 地质学报,2011,85(10):1691-1697.
Li Shuangjian, Wo Yujin, Zhou Yan. Controlling factors affect sealing capability of well-developed muddy cap rock[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(10):1691-1697.
- [31] 付广,姜振学. 影响盖层形成和发育的地质因素分析[J]. 天然气地球科学,1994,5(5):6-12.
Fu Guang, Jiang Zhenxue. Analysis of geological factors on cap formation and development[J]. Natural Gas Geoscience, 1994, 5(5):6-12.
- [32] 皇甫红英,温爱琴,吴涛,等. 塔里木盆地巴楚隆起石炭—二叠系碳酸盐岩成岩作用[J]. 新疆地质,2001,19(4):260-262.
Huangfu Hongying, Wen Aiqin, Wu Tao, et al. Diagenesis of the carbonates of carboniferous and permian in Bachu, Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(4):260-262.
- [33] 蒋有录. 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,1998,18(2):20-23.
Jiang Youlu. A discussion on the relation between the caprock thickness of oil and gas reservoir and its hydrocarbon[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(2):20-23.
- [34] 曹成润,吕延防. 盖层有效封盖厚度定量分析[J]. 中国海上油气,1998,12(5):328-331.
Cao Chengrun, Lv Yanfang. Quantitative analysis of effective seal rock thickness[J]. China Offshore Oil and Gas, 1998, 12(5):328-331.
- [35] 付广,薛永超. 泥质岩盖层各种封闭能力的影响因素[J]. 复式油气田,1999,2:44-48.
Fu Guang, Xue Yongchao. Factors affecting sealing capability of muddy cap rock[J]. Multiple Oil-gas Field, 1999, 2:44-48.
- [36] 胡国艺,汪晓波,王义凤,等. 中国大中型气田盖层特征[J]. 天然气地球科学,2009,2:2.
Hu Guoyi, Wang Xiaobo, Wang Yifeng, et al. Cap rock characteristics of medium and large gas fields in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 2:2.
- [37] 黄志龙,赵宝顺,肖中尧. 盖层微渗漏散失机理与定量模型[J]. 天然气地球科学,2007,18(1):37-40.
Huang Zhilong, Zhao Baoshun, Xiao Zhongyao. Diffusion mechanism and quantitative model of microleaking in caprocks[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1):37-40.
- [38] 孙明亮,柳广弟,李剑. 气藏的盖层特征及划分标准[J]. 天然气工业,2008,28(8):36-38.
Sun Mingliang, Liu Guangdi, Li Jian. Features of cap rocks of gas and criteria of identification[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 28(8):36-38.
- [39] 张蕾. 盖层物性封闭力学机制新认识[J]. 天然气地球科学,2010(1):112-116.
Zhang Lei. Reevaluation of caprock physical sealing mechanism[J]. Natural Gas Geoscience, 2010(1):112-116.
- [40] 吕延防,万军,沙子萱. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学,2008,43(1):162-174.
Lv Yanfang, Wan Jun, Sha Zixuan. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting and its application[J]. Scientia Geologica Sinica, 2008, 43(1):162-174.
- [41] 吕延防,沙子萱,付晓飞. 断层垂向封闭性定量评价方法及其应用[J]. 石油学报,2007,28(5):34-38.
Lü Yanfang, Sha Zixuan, Fu Xiaofei. Quantitative evaluation method for fault vertical sealing ability and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5):34-38.
- [42] 付广,杨文敏,雷琳. 盖层内断裂垂向封闭性定量评价新方法[J]. 特种油气藏,2009,16(4):18-20.
Fu Guang, Yang Wenmin, Lei Lin. A new method for quantitative evaluation of vertical seal ability of faults in cap rock[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(4):18-20.
- [43] 赵庆波,杨金凤. 中国气藏盖层类型初探[J]. 石油勘探与开发,1994,21(3):15-23.
Zhao Qingbo, Yang Jinfeng. 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, 1994, 21(3):15-23.
- [44] 焦方正,翟晓先. 海相碳酸盐岩非常规大油气田——塔河油田勘探研究与实践[M]. 北京:石油工业出版社,2008.
Jiao Fangzheng, Zhai Xiaoxian. Marine carbonate unconventional oil and gas fields: Tahe oilfield exploration research and practice[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [45] Nygard R, Gutierrez M. Brittle-ductile transition, shear failure, leakage in shales, mudrocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(2):201-212.

(编辑 张玉银)

《石油与天然气地质》2015 年报道计划

2015 年计划出版《石油与天然气地质》期刊 6 期,围绕 3 个重点:“页岩油赋存机理与勘探”、“深层超深层碳酸盐岩储层形成与预测”和“油气盖层与保存条件评价”。

欢迎广大作者不吝赐稿。

《石油与天然气地质》编辑部