

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019059

引用格式: 华晓莉, 李慧勇, 孙希家, 陶莉, 胡贺伟. 2020. 渤中凹陷碳酸盐岩潜山岩溶分带特征与优质储层分布规律研究[J]. 高校地质学报, 26 (3): 333-338

## 渤中凹陷碳酸盐岩潜山岩溶分带特征与优质储层分布规律研究

华晓莉, 李慧勇, 孙希家, 陶莉, 胡贺伟

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

**摘要:** 渤海湾盆地渤中凹陷西南环古生界深埋碳酸盐岩潜山天然气获得重大突破, 钻井揭示古生界气层垂向上显示分段性特征, 该区储层主要受岩溶作用的控制, 认识研究区岩溶垂向分带特征是预测优质储层和油气分布的关键。文章利用岩心、薄片、电性特征、能谱测井U值、C、O、Sr同位素等资料, 结合水动力作用的大小、方向, 综合分析认为, 岩溶储层垂向具有分带性特征, 自上而下分为表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带, 且其岩电特征与溶蚀作用强差异性控制了储层发育段。研究表明优质储层主要分布于表层风化带、水平潜流带, 且分别在不整合面以下20 m范围内和距不整合面50~200 m, 此外在溶蚀作用弱的深部缓流带, 白云岩发育区则是潜在优质储层发育带。明确岩溶垂向分带特征及储层发育规律, 对下一步碳酸盐岩区油气勘探具有一定的指导意义。

**关键词:** 渤中凹陷; 古生界; 碳酸盐岩; 岩溶分带; 优质储层

**中图分类号:** P618.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7493 (2020) 03-333-06

## Distribution Pattern of High-quality Reservoirs and Karst Zoning Feature of Carbonate Rocks in Buried Hills: A Case Study from the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China

HUA Xiaoli, LI Huiyong, SUN Xijia, TAO Li, HU Hewei

Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300452, China

**Abstract:** A great breakthrough of gas exploration has been gained in deep Paleozoic carbonate reservoirs of Buried Hill in the southwestern Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. Drilling wells reveal that the vertical zonation of the Paleozoic gas layers was mainly controlled by karstification in this region. Recognizing the characteristics of vertical karst zoning in the study area is the key to predict the distribution of high-quality reservoirs. According to cores, thin sections, logging characteristics, spectrum logging U values, C-O-Sr isotope compositions, combined with the hydrodynamic magnitude and direction, karst reservoirs can be vertically divided into four zones from top to bottom: surface weathering zone, vertical percolating zone, horizontal underflow zone, and deep slow flowing zone. The differences of lithologic-logging properties and denudation intensity were closely related to the development of high-quality reservoirs. It is showed that the high-quality reservoirs are mainly distributed in the surface weathering zone (20 m under unconformity) and horizontal underflow zone (50 to 200 m beneath unconformity). In addition, the potentially high-quality reservoirs are developed in dolomite-existing area of deep slow flowing zone with weak denudation. Therefore, clarifying the characteristics of karst vertical zoning and the patterns of reservoir development have important guidance for exploration of oil and gas in the future.

**Key words:** Bozhong Sag; Paleozoic; carbonate; karst zoning; high-quality reservoirs

**First author:** HUA Xiaoli, Master Degree; E-mail: deam2006@126.com.

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2019-12-30

基金项目: “十三五”全国油气资源评价项目中海油矿权区油气资源评价(2017YQZYPJ0109)资助

作者简介: 华晓莉, 女, 1988年生, 硕士, 研究方向为碳酸盐岩沉积学与储集层地质学; E-mail: deam2006@126.com

碳酸盐岩油气储量在世界油气总储量中占有非常重要的地位,目前全球有近50%的石油和25%的天然气储量分布于碳酸盐岩储集体中(马新华等,2019;王建波等,2008;Zenger et al.,1980)。储集层发育程度已逐渐成为制约油气勘探的关键,尤其是海相碳酸盐岩区油气勘探(咎念民等,2018;汪泽成等,2013;Lamberta et al.,2006;付孝悦等,2002),与沉积间断或者不整合面相关的古岩溶地层更是油气的重要储集层(李启桂等,2013;段杰,2009;郭彤楼等,2003)。通过对塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地等地区大量调研,总结了岩相、断裂、岩溶、白云石化等对储集层的控制作用(吉云刚,2012;闫海军等,2016;于洲等,2017;刘丽红等,2017;华晓莉等,2018;何治亮等,2019);同时将岩溶相在垂向上划为表层岩溶带、垂直渗流带、季节变动带、水平潜流带和深部缓流带5种,且纵向上不同相带岩溶储层特征对优质岩溶储集层的发育具有一定的控制作用(蒋春雷和金振奎,2009;冯仁蔚等,2014)。

渤中凹陷西南环在渤中21/22构造区潜山天然气勘探获得重大突破,下古生界潜山碳酸盐岩岩溶储集层是主要勘探层系。该构造区面积约200 km<sup>2</sup>,仅2口井钻遇古生界碳酸盐岩,钻井揭示古生界气层垂向上显示分段性特征,这与岩溶储层垂向分带性密切相关。目前针对下古生界储集层的研究主要集中于后期岩溶作用对储集层的改造方面,

而对影响岩溶储集层发育的岩溶分带性特征研究较为薄弱。本文旨在通过岩心薄片、测井并结合地球化学资料,精细研究渤中21/22构造区古生界碳酸盐岩岩溶分带特征,寻找有利于形成岩溶储集层的岩溶相带,对碳酸盐岩区储层研究及下一步勘探部署目标优选具有一定的指导意义。

## 1 区域地质概况

渤中凹陷西南环碳酸盐岩出露区域集中在渤中21/22构造区,位于渤海湾盆地中部海域,潜山整体具有凹中隆的背斜构造背景(图1)。渤中21/22构造区经历了渤海湾整体沉降,加里东、印支、海西、燕山、喜马拉雅运动的多期改造,使得潜山地层遭受长期暴露剥蚀,碳酸盐岩储集层接受多期改造,形成了风化壳型岩溶储集层。渤中凹陷西南环潜山上覆地层为新近系明化镇组和馆陶组、古近系东营组和沙河街组一段。古生界潜山碳酸盐岩地层是本文研究的目的层段,目前钻井揭示古生界地层厚度约300 m,主要为灰岩、泥质灰岩和云质灰岩的岩性组合特征(图2)。

## 2 岩溶储层旋回特征

根据水动力作用的大小、方向,大气水在地表一部分形成地表径流,岩石遭受强烈的风化淋滤,形成表层风化带;另一部分大气水受重力驱动发生垂直渗流,形成垂直渗流带,多发育近垂直裂缝;当水进入潜水面之后,发生横向近水平流动,水流稳定,溶蚀作用强,形成水平潜流

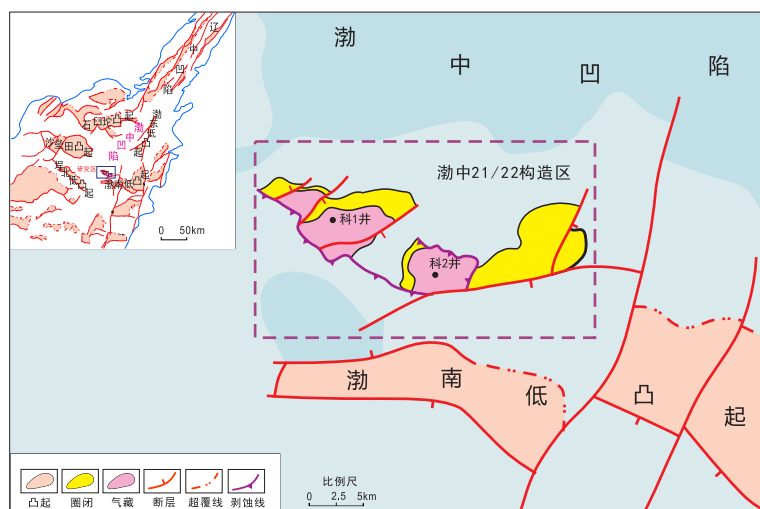


图1 渤海湾盆地渤中凹陷21/22构造区域位置

Fig. 1 Structural location of the 21/22 structural area in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

地层			岩性剖面	岩性描述
系	统	组		
新近系	中新统	明化镇组	上部砂泥岩互层	
			下部厚层泥岩夹砂岩	
		馆陶组	顶部砂岩与泥岩不等厚互层	
			中下部厚层砂砾岩夹薄层泥岩	
古近系	渐新统	东营组	泥岩与砂岩不等厚互层	
			厚层泥岩夹砂岩	
			以厚层泥岩为主，发育一套火成岩	
	始新统	沙河街组		
奥陶系	中下奥陶统	马家沟组	以灰岩、泥质灰岩、灰质云岩为主	

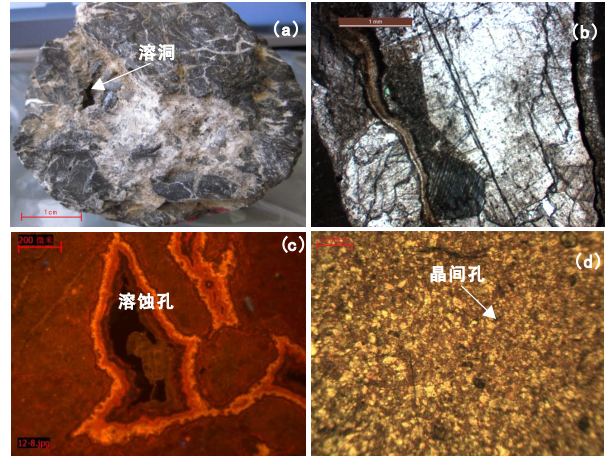
图2 渤中凹陷21/22构造区地层综合柱状图

Fig. 2 Generalized stratigraphy of the 21/22 structural area in the Bozhong Sag

带，发育溶蚀孔洞；最后水流至泄水面，几乎处于滞留状态，溶蚀作用很弱，形成深部缓流带，孔缝不太发育。结合钻井岩心、薄片、电性、地球化学这几方面的标志性特征，研究区垂向上自上而下划分为四个带：表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带、深部缓流带。

### 2.1 岩石学特征

根据研究区目前已钻井的岩心薄片观察结果，不同带的岩性和储集空间都存在一定的差异性。Ke1井在潜山顶面4888.79 m岩心观察岩性为泥晶灰岩，可见泥质，溶蚀孔洞、网状裂缝发育，为表层风化带的典型特征，储集空间为孔洞—裂缝型（图3a）；Ke2井在4362.5 m薄片观察岩性为比较致密的灰岩，不利于发生溶蚀，仅发育近垂直裂缝，被完全充填，为垂直渗流带（图3b）；



(a) Ke1, 4888.79 m, 云质灰岩，溶蚀孔洞发育；(b) Ke2, 4361.5 m, 隐晶灰岩，垂直微裂缝发育；(c) Ke2, 4450.6 m, 阴极发光，含白云质隐晶灰岩，见溶蚀孔；(d) Ke1, 5127 m, 粉—泥晶白云质灰岩，晶间孔发育

图3 渤中凹陷21/22构造区不同岩溶相带岩石学特征  
Fig. 3 Petrological characteristics of different karst facies in the 21/22 structural area of the Bozhong Sag

水平潜流带在本区特征明显，Ke2井4450.6 m阴极发光显示粒间孔、溶蚀孔洞发育，由于水流稳定，大量的溶蚀孔隙保存较好，岩性主要为粒屑灰岩，为易溶性的岩石，具备发生强溶蚀作用的物质基础（图3c）；深部缓流带裂缝较少，在Ke1井下部5127 m薄片观察到裂缝基本不发育，但由于白云岩发育，形成白云石化晶间孔隙（图3d）。

### 2.2 电性特征

测井曲线自然伽马值反映泥质含量，电阻率曲线在碳酸盐岩中可反映岩石致密程度，U相对值是风化壳溶蚀作用的表征（张海涛和时卓，2008）。

表层风化带，由于表层风化形成土壤层，泥质含量高，形成泥质灰岩，自然伽马值较高，呈微锯齿状，电阻率曲线值偏低，说明岩石不太致密（图4），U相对值明显偏大，为典型的风化壳表层特征。垂直渗流带，曲线特征与表层风化带相反，自然伽马值低，曲线平直，电阻率值异常高，密度变大，说明岩性非常致密，U相对值变小，反映溶蚀程度较低。水平潜流带，曲线特征最为明显，自然伽马值偏高，呈锯齿状，电阻率整体较小，U值变大，反映该带溶蚀作用很强，易形成较厚的岩溶储层。深部缓流带，典型特征是U值呈降低的趋势，说明溶蚀作用逐渐减弱。

### 2.3 地球化学特征

碳酸盐岩岩溶作用过程中，由于大气淡水的

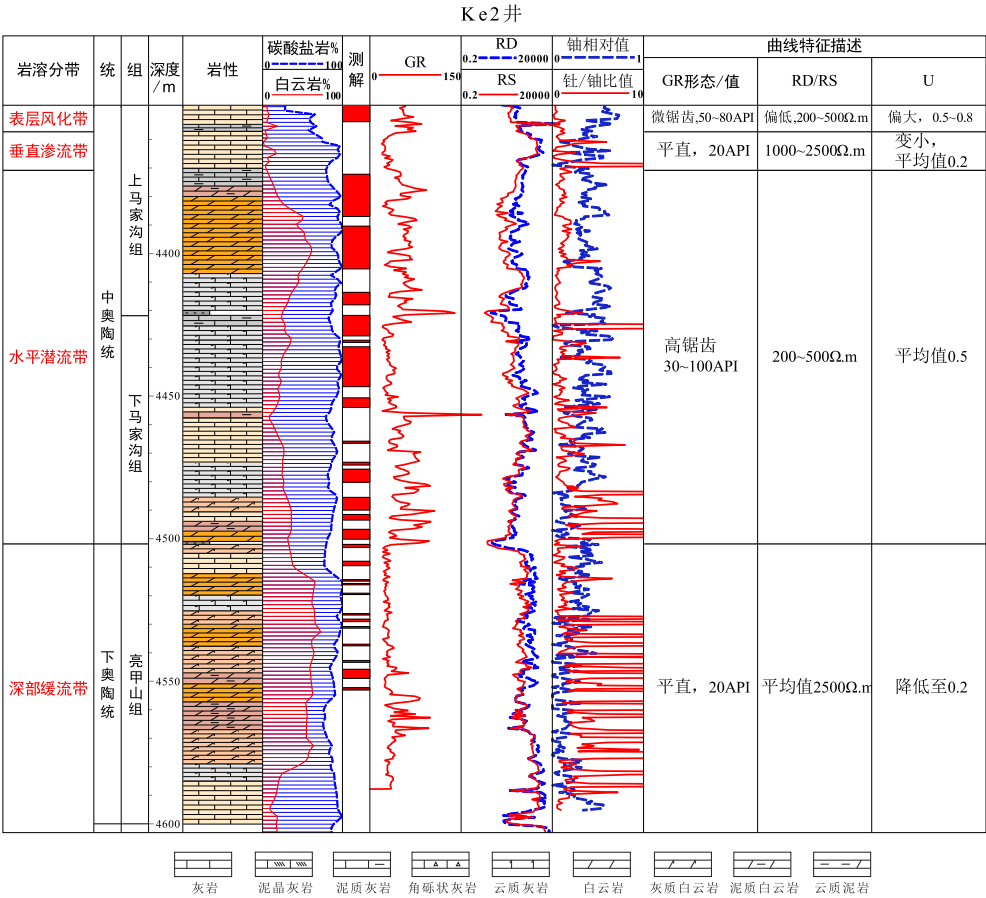


图4 渤中凹陷21/22构造区不同岩溶相带测井曲线特征

Fig. 4 Logging curve characteristics of different karst facies in the 21/22 structural area of the Bozhong Sag

混入，会对一些化学元素造成一定的影响。针对研究区目前资料，本次主要通过C、O、Sr同位素来进一步证实岩溶带的划分及溶蚀强度（刘存革，2005）。一般而言，海相中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 含量比淡水要高，且有淡水混入时，大量富含 $^{87}\text{Sr}$ 的陆壳锶随地表径流进入沉积盆地，导致 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高（张涛等，2005）。

Ke1井C、O、Sr同位素值变化趋势明显分为四段（表1,图5），其中表层风化带和水平潜流带C和O同位素组成都偏小， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值明显偏大，为淡水混入特征，均代表溶蚀强度高的证据，反之垂直渗流带和深部缓流带C、O同位素值偏大，Sr同位素比值降到最低，为海水特征，说明溶蚀强度较弱。

### 3 不同岩溶相带储层分布规律

由于岩溶作用强度的差异，各带储层发育特征也存在不同。根据前面分析各带的岩石学特

表1 渤中凹陷21/22构造区C、O、Sr同位素组成

Table 1 Carbon, oxygen, strontium isotopic compositions of samples from the 21/22 structural area of the Bozhong Sag

井号	深度/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Ke1	4867.5	-1.188	-7.704	0.711495
Ke1	4872.5	-0.178	-10.127	0.711582
Ke1	4888.79	-0.651	-9.3	0.709079
Ke1	4890.7	-0.496	-8.6	0.709131
Ke1	4891.1	-0.584	-8	0.709321
Ke1	4907.5	-0.635	-7	0.709204
Ke1	4926.5	-0.85	-6	0.709311
Ke1	4952.5	-0.8	-10.319	0.710827
Ke1	4982.5	-0.966	-8.104	0.711300
Ke1	4992.5	-0.903	-11.041	0.711700
Ke1	5012.5	-1.389	-10.968	0.711800
Ke1	5032.5	-	-9.943	0.711045
Ke1	5052.5	-1.067	-11.084	0.710394
Ke1	5075.5	-	-	0.709265
Ke1	5077.5	-0.823	-9.862	0.709476
Ke1	5102.5	-0.803	-6.765	0.709706
Ke1	5122.5	-0.477	-4.779	0.709416



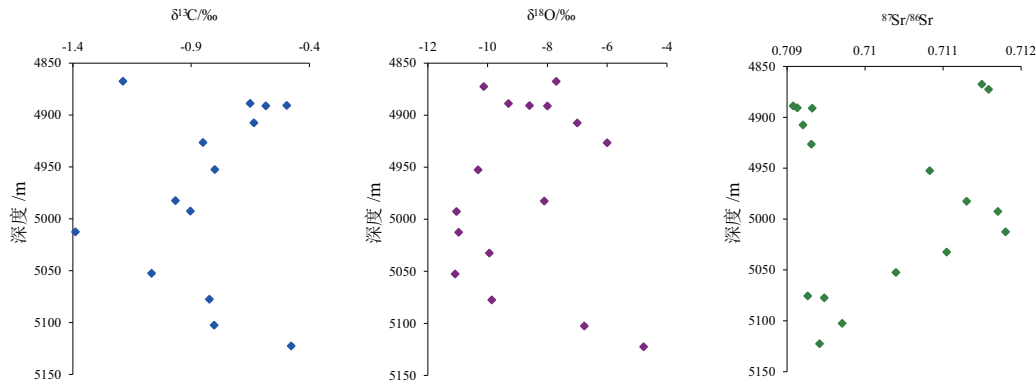


图5 渤中凹陷21/22构造区不同岩溶相带地球化学特征

Fig. 5 Geochemical characteristics of different karst facies in the 21/22 structural area of the Bozhong area

征、储集空间、物性特征，表层风化带岩性主要为泥晶灰岩，发育溶蚀孔洞、网状裂缝，储集空间为孔洞—裂缝型，由于表层风化，裂缝完全被方解石充填，但仍保存有未被充填的溶蚀孔洞，说明该带物性好；垂直渗流带岩性为比较致密的灰岩，不利于发生溶蚀，仅发育近垂直裂缝，而且被完全充填，物性较差；水平潜流带岩性主要为典型高能滩相的粒屑灰岩，上部白云岩发育，这两种岩性均为易溶性的岩石，具备发生强溶蚀作用的物质基础，储集空间类型与表层风化壳类似，为孔洞—裂缝型，同时存在被充填现象，但

由于水流稳定，大量的溶蚀孔隙保存较好，物性相对最好；深部缓流带虽然溶蚀作用弱，裂缝较少，但由于白云岩发育，形成白云石化晶间孔隙，物性相对垂直渗流带较好。整体上，表层风化带和水平潜流带物性要好，深部缓流带白云岩的发育改善了储层物性，相对较好（图6；图7）。

通过对各岩溶带的易溶岩性、充填程度、溶蚀强度、孔隙类型、物性条件等综合分析，将溶蚀作用强、呈半充填程度、还存在一定有效孔隙、裂缝密度和孔隙度相对大、物性好的储层归为 I 类优质储层；溶蚀作用较弱、充填程度严

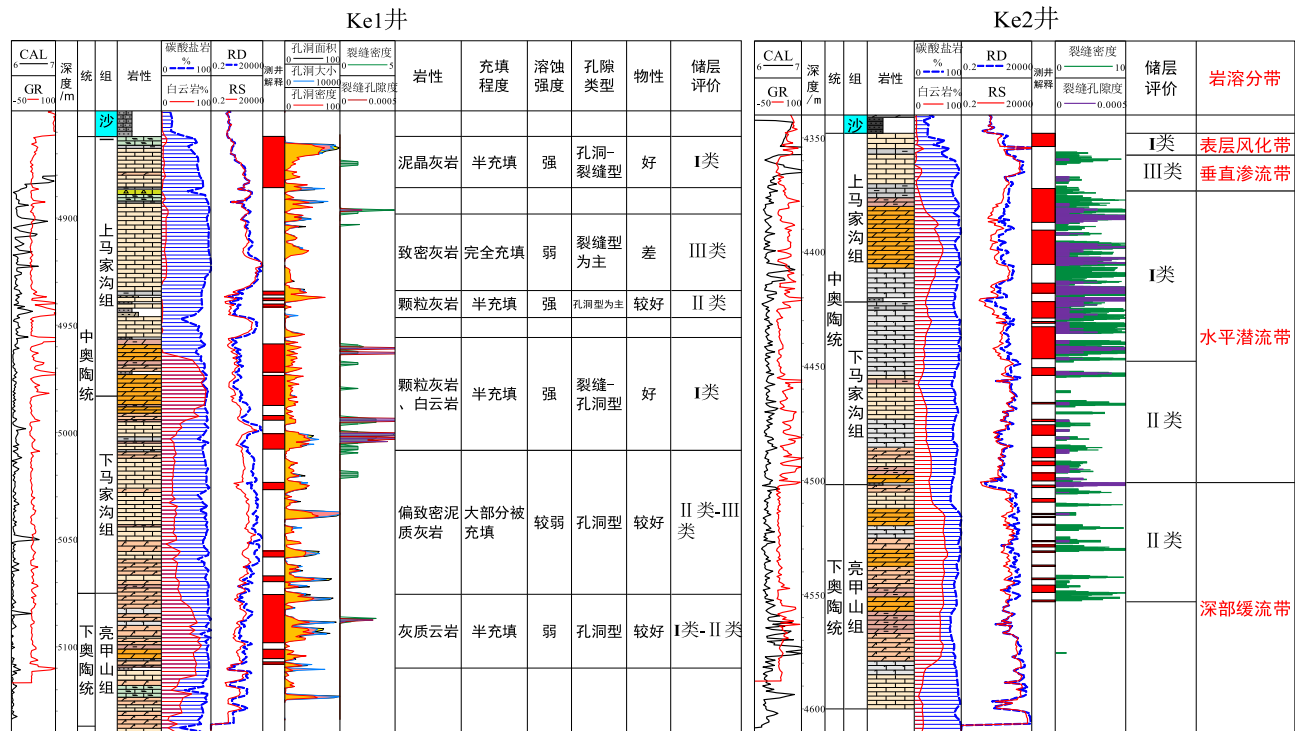


图6 渤中凹陷21/22构造区不同岩溶相带储层分布

Fig. 6 Reservoir distribution of different karst facies in the 21/22 structural area of the Bozhong area

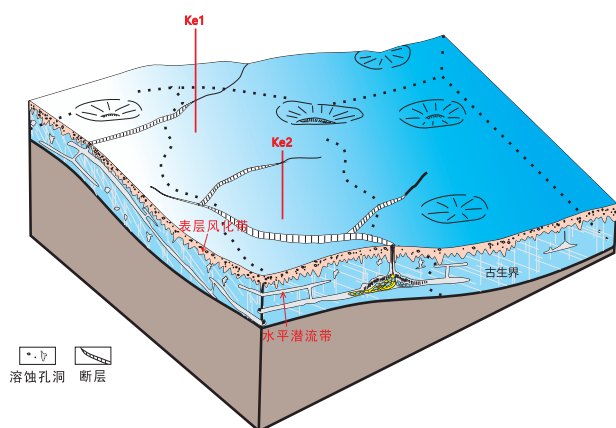


图7 渤中凹陷21/22构造区不同岩溶相带储层模式图

Fig. 7 Reservoir formation model of different karst facies in the 21/22 structural area of the Bozhong Sag

重、物性较好的储层归为Ⅱ类储层；溶蚀作用弱，岩性致密、完全充填、物性较差的储层划为Ⅲ类储层。纵向上，Ⅰ类优质储层主要分布在表层风化带，即不整合面以下20 m范围内，还有水平潜流带，距不整合面50~200 m（图6）。另外，表层风化带和水平潜流带储层发育不受岩性影响，除了普遍认为在白云岩中储层较发育外，灰岩中也发育优质储层。但是在溶蚀作用弱的深部缓流带，白云岩发育区则是潜在优质储层发育带。

## 4 结论

（1）研究区岩溶储层垂向具有分带性特征，自上而下分为表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带，且其岩电特征与溶蚀作用差异性控制了储层发育段。

（2）优质储层主要分布在表层风化带和水平潜流带，即不整合面以下20 m范围内和距不整合面50~200 m。此外在溶蚀作用弱的深部缓流带，白云岩发育区则是潜在优质储层发育带。

## 参考文献(References):

段杰. 2009. 鄂尔多斯盆地南缘下古生界碳酸盐岩储层特征研究[D]. 四川成都: 成都理工大学: 1-114.  
冯仁蔚, 欧阳诚, 庞艳君, 等. 2014. 层间风化壳岩溶发育演化模式——

以塔中川庆EPC区块奥陶系鹰一段—鹰二段为例[J]. 石油勘探与开发, 41(1): 45-54.

付孝悦, 王津义, 张汉荣. 2002. 南方海相天然气保存机理及保存条件初探[J]. 海相油气地质, 7(2): 43-47.

郭彤楼, 楼章华, 马永生. 2003. 南方海相油气保存条件评价和勘探决策中应注意的几个问题[J]. 石油实验地质, 25(1): 3-9.

何治亮, 云露, 尤东华, 等. 2019. 塔里木盆地阿—满过渡带超深层碳酸盐岩储层成因与分布预测[J]. 地学前缘, 25(1): 13-21.

华晓莉, 李慧勇, 孙希家, 等. 2018. 渤海沙西北构造带下古生界碳酸盐岩潜山白云岩形成机制研究[J]. 高校地质学报, 24(6): 833-840.

吉云刚, 韩剑发, 张正红, 等. 2012. 塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系鹰山组深部优质岩溶储层的形成与分布[J]. 地质学报, 86(7): 1165-1175.

蒋春雷, 金振奎. 2009. 塔中地区寒武—奥陶系地层岩溶相研究[J]. 石油天然气学报, 31(5): 161-165.

李启桂, 李克胜, 周卓铸, 等. 2013. 四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测[J]. 石油与天然气地质, 34(4): 516-521.

刘存革, 李国蓉, 传玲, 等. 2008. 塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石碳、氧、锶同位素地球化学特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 33(3): 377-386.

刘丽红, 杜小弟, 徐守礼, 等. 2017. 四川盆地中南部寒武系白云岩特征及形成机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 775-784.

马新华, 杨雨, 文龙, 等. 2019. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 46(1): 1-13.

汪泽成, 赵文智, 胡素云, 等. 2013. 我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J]. 石油与天然气地质, 34(2): 153-160.

王建波, 沈安江, 蔡习尧, 等. 2008. 全球奥陶系碳酸盐岩油气藏综述[J]. 地层学杂志, 32(4): 363-373.

闫海军, 王泽东, 杨学锋, 等. 2016. 复杂底水型气藏储层发育控制因素及气水分布模式——以四川盆地龙岗礁滩型碳酸盐岩气藏为例[J]. 石油钻采工艺, 38(1): 64-72.

于洲, 丁振纯, 吴东旭, 等. 2017. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五亚段白云岩地球化学特征及成因模式[J]. 海相油气地质, 22(4): 85-93.

曾念民, 王艳忠, 操应长, 等. 2018. 东营凹陷下古生界碳酸盐岩古潜山储层储集空间特征及发育模式[J]. 石油与天然气地质, 39(2): 355-365.

张海涛, 时卓. 2008. 古风化壳的裂缝性碳酸盐岩储层测井分类评价方法研究[J]. 测井技术, 32(6): 566-570.

张涛, 云露, 邬兴威, 等. 2005. 锶同位素在塔河古岩溶期次划分中的应用[J]. 石油实验地质, 27(3): 299-303.

Lamberta L, Durlleta C, Jean-Paul Loreaua J P, et al. 2006. Burial dissolution of micrite in Middle East carbonate reservoirs (Jurassic-Cretaceous): keys for recognition and timing [J]. Marine and Petroleum Geology, 23(1): 79-92.

Zenger D H, Dunham J B and Ethington R I. 1980. Concepts and models of dolomitization [C]. SEPM Special Publication, 28: 1-320.