

鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型 岩溶储层发育规律

丁晓琪^{1,2}, 张峭楠², 潘怀孝³, 李良³, 贾会冲³

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 西南石油大学 油气藏地质开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;
3. 中国石化 华北油气分公司, 河南 郑州 450006)

摘要:随着水平井压裂技术在大牛地气田奥陶系风化壳气藏开发中的成功运用,低孔、低渗、强非均质性的岩溶储层显示出良好的天然气开发潜力,储层发育规律是风化壳成藏的关键。通过岩心观察,结合大量的测井资料,利用岩石相进行岩溶旋回和储层发育规律的研究,结果表明:①奥陶系马家沟组发育3期岩溶,上部两期岩溶规模较大,下部第三期岩溶规模较小,风化壳储层的发育主要与上部两期岩溶有关;②膏质云岩、泥云岩的长期溶蚀,导致水平洞穴层顶板发生破裂,部分上覆地层垮塌,最终形成一套厚层的岩溶角砾岩;③储层主要发育在岩溶强度相对较弱的区域,平面上主要发育在岩溶斜坡的残丘,纵向上则发育在上部两期岩溶保存相对完整的垂直渗流带,发育的岩石相为裂纹-镶嵌角砾岩相。利用岩溶旋回和岩相对有利储层发育区进行了预测,指明了下一步天然气勘探开发的方向。

关键词:岩溶;储层;岩相;奥陶系;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Development patterns of collapse-type karst reservoirs in the Ordovician of Daniudi gasfield, Ordos Basin

Ding Xiaoqi^{1,2}, Zhang Shaonan², Pan Huaixiao³, Li Liang³, Jia Huichong³

(1. Energy College, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of
Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
3. SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: Due to wide application of horizontal well fracturing technology in the Ordovician weathering crust reservoirs of Daniudi gasfield, Ordos Basin, karst reservoirs exhibit its great potential of gas production, regardless of its low porosity, permeability and strong heterogeneity. However, development pattern of reservoir is the key of gas accumulation in karst reservoirs. Karst cycles and reservoirs distribution are studied by using lithofacies based on core observation and well-logging interpretation. The following results were obtained. (1) Three Karst cycles can be identified in the Ordovician Majia-gou Formation. The upper two karst cycles formed in the earlier time and are larger in scale than the lower one; therefore the development of karst reservoirs are mainly related to the upper two karst cycles. (2) The long-term dissolution of gypsiferous dolostone and muddy dolostone layers produces fractures in cave-roof zone and finally led to the collapse of overlying strata, forming a thick layer of breccias. (3) Reservoirs are mainly developed in areas with relatively weak karst intensity. Laterally, they mainly occur in monadnock of palaeogeomorphology slope, while vertically, they are distributed in the intact vadose zones of upper two karst cycles. The lithofacies are dominated by crackle-mosaic breccias lithofacies. The research on karst cycles and lithofacies will play significant roles in the reservoir predication for the following gas exploration.

Key words: karst, reservoir, lithofacies, Ordovician, Daniudi gasfield, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地奥陶系以碳酸盐岩为主,在盆地中部已发现靖边整装岩溶风化壳大气田,地质储量近 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前,在靖边气田的南部及东部均有

勘探突破,陆续发现了一系列气田,显示出风化壳储层巨大的勘探潜力^[2-4]。大牛地气田位于盆地北部(图1),在岩溶高地和斜坡的过渡部位,成藏条件和靖边气

收稿日期:2015-10-21;修订日期:2015-12-21。

第一作者简介:丁晓琪(1981—),男,博士、副教授,石油地质学。E-mail: xiaoqidong@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05045);成都理工大学中青年骨干教师培养计划项目;成都理工大学校级科研团队资助项目(KYTD201401)。

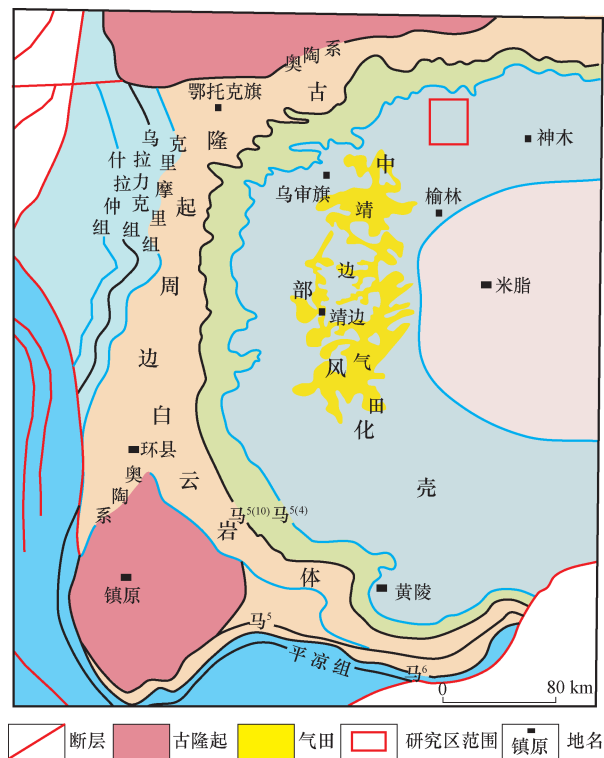


图1 早石炭世古地质图及研究区位置

Fig. 1 Paleogeologic map of the Early Carboniferous and location of the study area

田相似。但由于强烈的岩溶作用导致储层质量差,一直没有大的勘探突破。随着水平井压裂技术的实施,风化壳气藏开发的瓶颈被克服,目前水平井均可达到工业气流,显示出良好的天然气开发前景。然而,研究区大量的取心资料表明,奥陶系风化壳的发育深度和发育程度与靖边气田存在较大差别。靖边气田的岩溶储层主要发育在马家沟组 5 段 3 亚段(马五³ 亚段)以上层位,膏模孔和白云岩的晶间溶孔为主要的储集空间^[5-6]。地层垮塌不严重,储层横向上分布稳定。大牛地气田奥陶系岩溶储层发育层位可达马五⁶⁻¹⁰ 亚段,马五⁵ 亚段之上基本为岩溶角砾,以紊乱角砾岩和洞穴充填砂砾岩为主,其次为裂纹-镶嵌角砾岩。从目前的勘探情况来看,天然气主要富集于裂纹-镶嵌角砾岩中。寻找岩溶发育程度不强、地层保持相对完整的区域是储层预测的关键,但由于多期次的岩溶使这些相对完整的地层空间分布不稳定,给下一步的开发带来挑战。本文通过大量取心资料和测井数据,在岩石相识别的基础上,从岩溶旋回入手,研究储层所处岩溶旋回的位置,进而分析储层的发育规律,为下一步天然气的开发提供地质依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地奥陶系除在中央古隆起和伊盟古陆缺失外,大部分区域均有分布。中央古隆起以东,主要

受华北海的影响,而古隆起以西,则主要受祁连海的影响^[1,7]。奥陶系马家沟组沉积期,盆地经历了3次大的海退-海侵,构成了马家沟组6个大的地层岩性段。区域上马一段、马三段和马五段以白云岩、石膏、盐岩为主,沉积环境为云坪、膏云坪和膏盐湖。马二段、马四段和马六段以灰岩为主,沉积环境为台地相。马一段、马二段及马三段同中央古陆以西的三道坎组对比,马四段及马五段同桌子山组对比,马六段同克里摩里组对比。马五段又根据岩性划分为10个层若干个小层,具体划分方案见表1。

依据大量的取心资料与区域资料,对岩溶地层的原岩进行恢复。研究区马五⁶⁻¹⁰层为微晶云岩与泥云岩的不等厚互层,局部含石膏。马五⁵层为微晶灰岩夹厚度不等的粉晶云岩,底部发育数厘米厚度稳定的叠层石云灰岩和砂屑云灰岩。马五⁴层为含膏白云岩、微-粉晶白云岩和泥云岩的不等厚互层,中部及下部膏质泥云岩发育。马五³层为膏质泥云岩夹含膏粉晶云岩。马五²和马五¹层为含膏白云岩、微-粉晶白云岩的互层,但马五¹层的含膏程度要高于马五²层。

中奥陶世末,盆地中东部抬升遭受剥蚀,缺失上奥陶统,而中央古隆起以西及盆地南缘仍接收一套深水相沉积^[8-9](图1;表1)。奥陶纪末,由于秦岭海槽的闭合,华北地块整体抬升遭受剥蚀,海水从盆地本部向南西方向退出。换言之,盆地中东部在加里东期,至少经历了两期构造隆升。

表 1 鄂尔多斯盆地奥陶系划分

Table 1 Stratigraphic subdivision of the Ordovician in the Ordos Basin

地层		盆地西部		盆地中东部		
系	统	组	组	段	层	小层
奥陶系	上统	缺失	缺失		马五 ¹	马五 ^{1(1)}}
		蛇山组				马五 ^{1(2)}}
		公乌素组				马五 ^{1(3)}}
		拉什仲组				马五 ^{1(4)}}
		乌拉力克组				
	中统	克里摩里组	马家沟组	马六段	马五 ²	马五 ^{2(1)}}
		桌子山组		马五 ³	马五 ^{2(2)}}	
				马五 ⁴	马五 ^{4(1)}}	
				马五 ⁴	马五 ^{4(2)}}	
				马五 ^{4(3)}}		
		三道坎组		马四段	马五 ⁵	
				马三段	马五 ⁶⁻¹⁰	
				马二段		
				马一段		
		下统		缺失	亮甲山组	
	冶里组					

2 岩石相

大牛地奥陶纪岩溶地层最显著的特点是角砾化,根据角砾间的接触关系和角砾的支撑类型,参考 Loucks 的岩溶角砾分类^[10],可以将岩溶角砾岩划分为五种岩石相(表2)。

2.1 裂纹连续角砾岩相

角砾成分单一,没有发生明显位移,大小不一且棱角明显。角砾间被方解石充填(图2a),局部出现半充填。方解石充填物中见黑色包裹体,经拉曼检测为沥青包裹体(图3)。该岩相发育在马五⁵中,通过地层对比可知其横向变化稳定,说明该岩相具有横向连续的特点。马五⁵层中的该岩相无法从测井曲线上进行识别,主要原因是裂缝充填严重,充填物和角砾成分基本相同,均为方解石。

2.2 裂纹-镶嵌角砾岩相

角砾仍没有发生明显位移,成分单一。角砾由于溶蚀而棱角不明显,角砾间往往被白云石充填,其次为泥质、云泥充填(图2b)。该岩石相主要出现在马五¹层、马五²层和马五⁴层中,厚度差别大,横向连续性差,可在数百米内消失。测井曲线响应为低自然伽马,中等电阻率,孔隙度测井表现出孔隙型储层的特点。

2.3 紊乱角砾岩相

角砾成分复杂,分选较差但有一定的磨圆。根据颗粒的支撑类型可分为颗粒支撑紊乱角砾岩相和杂基支撑紊乱角砾岩相。

表2 大牛地气田奥陶系风化壳岩石相类型

Table 2 Lithofacies types of the Ordovician weathering crust in Daniudi gasfield

岩相类型	角砾组成	角砾间充填物	所在岩溶旋回	分布层位
裂纹连续角砾岩相	微晶灰岩	方解石	垂直渗流带	马五 ⁵
裂纹-镶嵌角砾岩相	(含膏)白云岩	白云石 云泥岩 泥云岩	垂直渗流带	马五 ¹⁻² 马五 ⁴⁽¹⁾
颗粒支撑紊乱角砾岩相	白云岩 次生灰岩	泥云岩 云泥岩	垂直渗流带 水平潜流带	马五 ¹⁻⁴ 马五 ⁶⁻¹⁰
杂基支撑紊乱角砾岩相	白云岩 硅质白云岩 石英、变质岩	云泥岩 泥岩	水平潜流带	马五 ¹⁻⁴ 马五 ⁶⁻¹⁰
砂砾岩相	白云岩 硅质白云岩 石英、变质岩	泥岩	水平潜流带	马五 ³⁻⁴

2.3.1 颗粒支撑紊乱角砾岩相

角砾与角砾直接接触,角砾间被云质泥岩充填(图2c)。该岩相主要发育在马五³层、马五⁴层中部及下部,其次是马五¹层,马五²层和马五⁶⁻¹⁰层顶部,测井响应为中等自然伽马和电阻率。

2.3.2 杂基支撑紊乱角砾岩相

该岩相与颗粒支撑紊乱角砾岩相最大的区别是杂基含量高,杂基主要为泥岩和云泥岩。角砾漂浮在杂基中,角砾分选差、磨圆差。角砾成分以白云岩为主,偶见硅质叠层石白云岩、石英碎屑、变质岩,表明砾石为地表水携带而来(图2d)。该岩相主要发育在马五³层和马五⁴层中部及下部,测井响应特征为中-高自然伽马和低电阻率,测井曲线齿化明显。

2.4 砂砾岩相

该岩相类似于碎屑岩中的砂砾岩,碎屑颗粒主要为白云岩和石英(图2e),含量低于20%,粒度一般小于1cm。杂基为黑色泥质,见炭屑,牵引流特征明显,常发育在水平洞穴及落水洞中^[11]。主要发育在马五⁴层中部及下部,测井响应特征为高自然伽马、高声波时差、低密度和电阻率。

3 岩溶特征

通过测井曲线和岩心资料,可以将风化壳剖面结构划分为两个组成部分(图3):紊乱角砾岩相和砂砾岩相;裂纹角砾岩相和裂纹-镶嵌角砾岩相。

紊乱角砾岩相和砂砾岩相往往是水平潜流带的产物,潜流带最下部往往是紊乱角砾岩相,代表上覆地层垮塌,被地下水短距离搬运改造,分布普遍但厚度变化大。潜流带上部为砂砾岩相,厚度变化较大(0~2m)。潜流带中含少量的石英颗粒、炭屑、硅质叠层石白云岩、云母石英片岩及石英岩,它们均不是来自于奥陶系本身,而是地下水长距离搬运,进而下渗、潜流的结果,岩心可以明显看到砾石的定向排列及流水形成的各种沉积构造(图2f)。

顶部为裂纹连续角砾岩相或裂纹-镶嵌角砾岩相,不管是哪种岩相,角砾成分单一,无分选,角砾间可以被泥质、淡水白云石和方解石充填,岩心中往往可以看到泥岩组分由上向下的灌入(图2g)。

从奥陶系岩溶剖面可以看出(图4),马家沟组顶部至少存在3期岩溶,对应3期水平岩溶带。第一期水平岩溶带主要发育在马五³层,第二期水平岩溶带主要发育在马五⁴⁽²⁺³⁾层,第三期水平岩溶带主要发育在马五⁶⁻¹⁰层顶部。

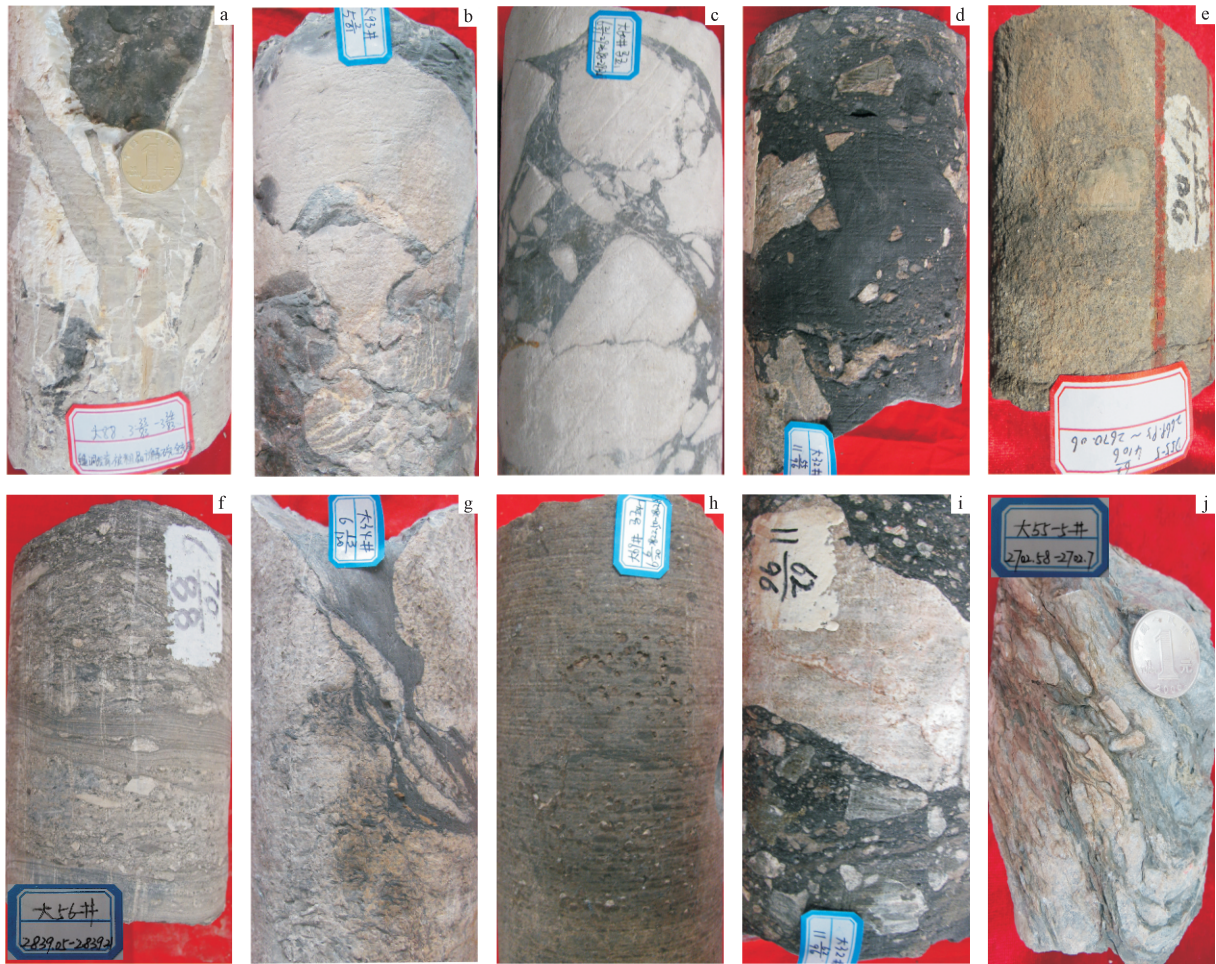
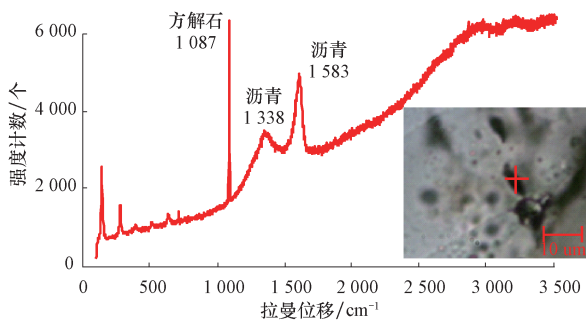


图2 大牛地气田奥陶系风化壳典型岩石相照片

Fig. 2 Lithofacies photos of the Ordovician weathering crust in Daniudi gasfield

a. 裂纹连续角砾岩相,角砾无分选、无磨圆,方解石充填,D88井,2 818.87~2 819.06 m,马五⁵;b. 裂纹-镶嵌角砾岩相,角砾呈镶嵌状,磨圆一般,泥云岩充填角砾间,D93井,2 905.5~2 905.65 m,马五²;c. 颗粒支撑紊乱角砾岩相,角砾分选差,磨圆一般,颗粒相互支撑,D60井,2 926.98~2 927.2 m,马五¹;d. 杂基支撑紊乱角砾岩相,角砾漂浮在黑色泥质中,D32井,2 949.15~2 949.29 m,马五⁴⁽³⁾;e. 砂砾岩相,颗粒分选差,磨圆一般,D55-5井,2 669.95~2 670.06 m,马五⁴⁽³⁾;f. 牵引流构造,具正粒序特征,D56井,2 839.05~2 839.31 m,马五⁶⁻¹⁰;g. 黑色泥质沿裂隙垂直灌入,D34井,2 761.30~2 761.46 m,马五²⁽¹⁾;h. 膏模孔发育,被方解石半充填,D69井,2 922.50~2 922.70 m,马五⁴⁽¹⁾;i. 砂砾岩相,大块崩塌角砾,D32井,2 836.20~2 836.39 m,马五¹⁽³⁾;j. 颗粒支撑紊乱角砾岩相,角砾间充填灰绿色泥质,D55-5井,2 702.58~2 702.7 m,马五⁶⁻¹⁰

图3 大牛地气田马五⁵层裂缝充填物中包裹体拉曼特征Fig. 3 Raman characteristics of inclusions in fracture fillings of M5⁵ in Daniudi gasfield

第一期岩溶的垂直渗流带为马五¹层和马五²层,角砾化明显,以白云石充填为主,其次是泥岩或云质泥

岩,可以明显看到灰黑色泥质沿垂直裂隙向下充填(图2f),该垂直渗流带在岩溶高地和岩溶斜坡沟槽发育处被剥蚀而不存在。水平潜流带发育在马五³层中,普遍为一套紊乱角砾岩相,除极个别井由于垮塌而厚度变薄外,大部分井厚度相对较稳定。

第二期岩溶的垂直渗流带为马五⁴⁽²⁾以上地层,部分马五⁴⁽¹⁾垂直岩溶带由于强烈岩溶作用发生垮塌而不复存在,其它则部分被保留了下来。从保留下来的马五⁴⁽¹⁾垂直岩溶带可以看出,岩相以裂纹-镶嵌角砾岩相为主,角砾间均为淡水白云石充填,说明地下水下渗过程中,泥质优先沉淀在浅层,随着下渗距离的增加,水体中泥质组分逐渐减少,马五⁴⁽¹⁾小层的含膏白云岩经过岩溶后,石膏被溶解形成膏模孔,部分被方解石半充填(图2h)。第二期岩溶的水平潜流带主要发

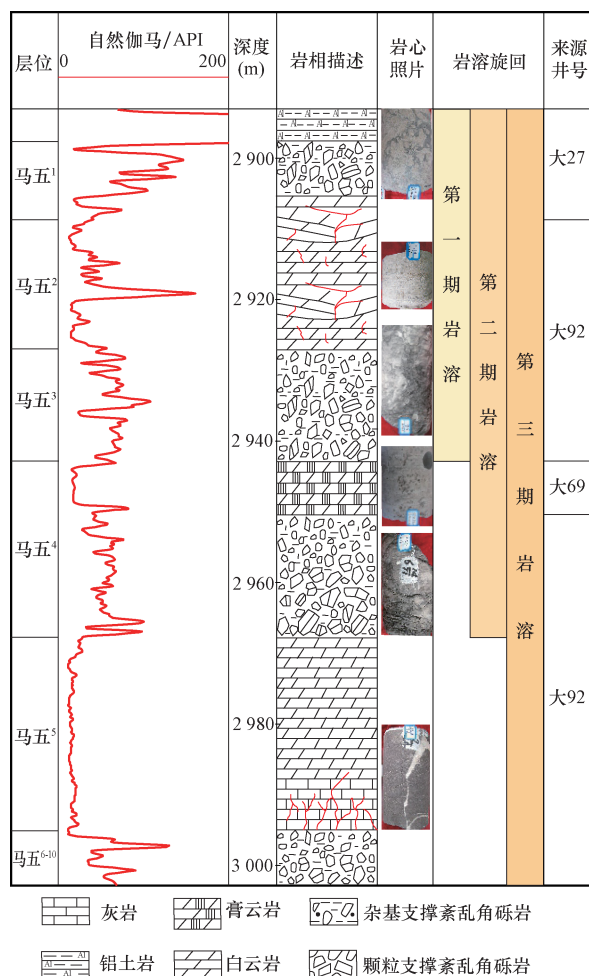


图4 大牛地气田马家沟组岩溶旋回剖面

Fig.4 Karst cycle section of the Majiagou Formation in Daniudi gasfield

育在马五⁴⁽²⁺³⁾层。岩相以紊乱角砾岩相为主,在部分井还可见洞穴砂砾岩相(图2d),裂纹-镶嵌角砾岩相偶见,其形成可能为垂直渗流带的垮塌形成的巨大角砾(图2i)。

第三期岩溶的垂直渗流带发育在马五⁶⁻¹⁰层以上,马五⁵层垂直渗流带在大部分区域为原状地层,破裂不明显,但在沟槽及岩溶高地,马五⁵层上部为原状地层,而下部为裂纹连续角砾岩相,角砾间被方解石充填-半充填,不见泥质充填和云质充填。马五⁶⁻¹⁰水平潜流带受取心资料的限制,仅在马五⁶⁻¹⁰顶部出现,厚度至少超过10m,岩相为颗粒支撑和杂基支撑的紊乱角砾岩相,角砾间充填灰绿色泥岩(图2j)。

4 岩溶旋回与构造期次

大规模的构造隆升(或沉降)将导致多期岩溶旋回,从理论上讲岩溶旋回的形成序次有两种基本型式:一种是上老下新,另一种为下老上新。上老下新代表构造隆升,潜水面间歇性下降,现今地表中发育的洞穴

多属这种情况^[12]。后者则是在潜水面间歇性上升过程中形成。大牛地气田奥陶系的岩溶序次具有上老下新的特征,理由如下。

1) 区域地质表明,中奥陶世末中央古隆起及其以东开始抬升,遭受剥蚀,缺失上奥陶统。晚奥陶世末,秦岭海槽闭合,整个华北地块抬升遭受剥蚀,缺失志留-泥盆系。以上表明中-晚奥陶世华北地块至少经历了两期区域构造抬升。

2) 从三期岩溶垂直渗流带角砾间的充填物质可以看出,第一期最为复杂,角砾间被泥质、云质泥岩、泥质云岩、炭质和方解石充填。第二期主要是白云石充填,其次是泥质云岩充填。而第三期则是方解石充填。3期岩溶的水平潜流带也有各自的特征,第一期和第二期的水平潜流带较为相似,砾石主要来自本层岩石及上覆地层的垮塌,少量为地表水带来的盆外砾石,如石英砾、变质岩砾石、硅质叠层石白云岩等,砾石间的泥以黑色为主。第三期水平潜流带的砾石则全部来自马五⁶⁻¹⁰层自身,尚未看到上覆马五⁵层中垮塌的灰岩砾石。由此可以看出,最上面的第一期和第二期岩溶带经历了较长时间的、更为复杂的岩溶,而最下面的第三期岩溶则相对简单,岩溶作用亦不强,反映出3期岩溶具有上老下新的特征。

3) 第一期和第二期水平潜流带中含少量石英碎屑及叠层石白云岩,而第三期水平潜流带中不见叠层石白云岩,石英碎屑也很少。第一期和第二期岩溶发生时,蓟县系和中-晚元古代的基底提供部分物质来源,到第三期岩溶时,可以认为蓟县系已被剥蚀殆尽,不再提供物源。上古生界本溪组和太原组含有大量的石英碎屑及变质岩屑,不见叠层石白云岩,也可以佐证蓟县系叠层石白云岩物源在加里东早期就被剥蚀殆尽。亦说明3期岩溶具有上老下新的特征。

通过以上分析可以看出,大牛地气田奥陶系的3期岩溶是在晚奥陶世阶段性的构造抬升过程中形成的,岩溶旋回具有上老下新的特征,但这3期岩溶与区域性的两次构造抬升如何匹配,尚很难给出回答。

5 岩溶储层发育规律

碳酸盐岩岩溶储层主要发育在水平潜流带中,特别是灰岩地层^[13-14]中,由于潜流带长期处于饱水状态,水体以扩散流的方式穿过潜流带。溶缝、节理、裂缝等都可作为水体流动的通道,由于体系开放,溶解产物可以被及时带出,所以在灰岩地层中,易看到大的洞穴^[15-16]。然而,对于白云岩-膏盐地层而言,石膏、盐岩具有易溶的特点,且白云岩由于晶格生长不完善导致的晶体内劈理裂隙的出现,成为扩散溶蚀的主要通

道。结果是溶解过程中白云石晶体间的联结力减弱,结构变得越来越疏松,从而产生整体岩溶。初期以渗透-溶蚀为主,后期以分解-垮塌为主,所以白云岩-膏盐地层的岩溶过程就是一个边溶蚀边垮塌的过程。整个奥陶系岩溶地层偶见岩溶洞穴及其充填,大量存在的是岩溶角砾岩。奥陶系3期水平潜流带都处于白云岩-膏盐中,潜流带均为紊乱角砾岩和少量洞穴砂砾岩,角砾间基本是致密无孔的白云质泥岩或泥质白云岩,储层物性差,孔隙度普遍小于4%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图5)。

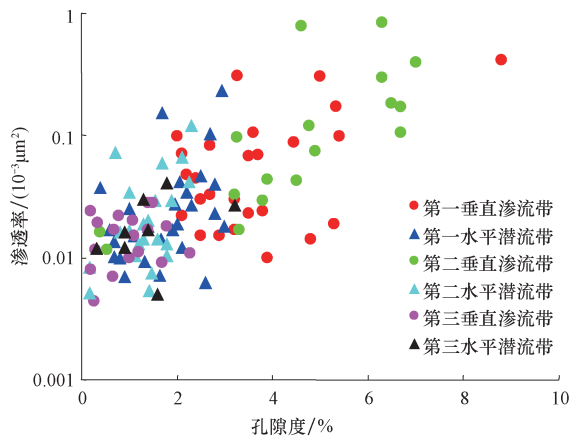


图5 大牛地气田马家沟组不同岩溶旋回孔-渗交汇图

Fig. 5 Crossplot of porosity and permeability of different karst cycles of the Majiagou Formation in Daniudi gasfield

对于垂直渗透带,孔隙中同时充满着空气和水,水体以两种明显不同的方式经过渗透带,一种是扩散方式,另一种是通过裂缝、节理、落水洞快速流动到潜水面。所以垂直渗透带的岩溶具有不均匀性,特别是白云岩地层。研究区奥陶系垂直渗透带的表现形式是,岩溶强的区域垂直渗透带被溶解、垮塌而不复存在,上下两层水平潜流带叠合在一起。岩溶弱的区域则相对保存完整,地层发生破裂、溶蚀,形成裂纹角砾岩及镶嵌角砾岩,储层储集物性相对较好,孔隙度普遍大于3%,渗透率大于 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图5),为研究区风化壳的主力产层。然而,有些区域由于局部溶蚀强而发生整体垮塌,垮塌规模可达数十米,对于这种类型的储层,其储集物性仍较好。

3期垂直渗透带对应于3期岩溶的顶板,最上面的第一期岩溶顶板分布层位为马五¹⁽³⁾—马五²⁽²⁾(研究区马五¹⁽³⁾以上地层基本被剥蚀殆尽),原岩主要为含膏白云岩和微晶白云岩,由于岩石的易溶及经历的岩溶时间较长,顶板遭受强烈的风化、淋滤、剥蚀,现今保留下来的地层以残丘的形式存在(图6)。中间的第二期岩溶顶板分布层位为马五⁴⁽¹⁾,厚度较小,原岩仍为含膏白云岩,顶板在强烈的溶蚀作用下,发生岩溶垮塌,甚至破裂形成紊乱角砾岩,没有发生垮塌的顶板则孔隙发育,储集物性好。最下面的第三期岩溶顶板分布层位为马五⁵,原岩为微晶灰岩夹厚度不等的白云

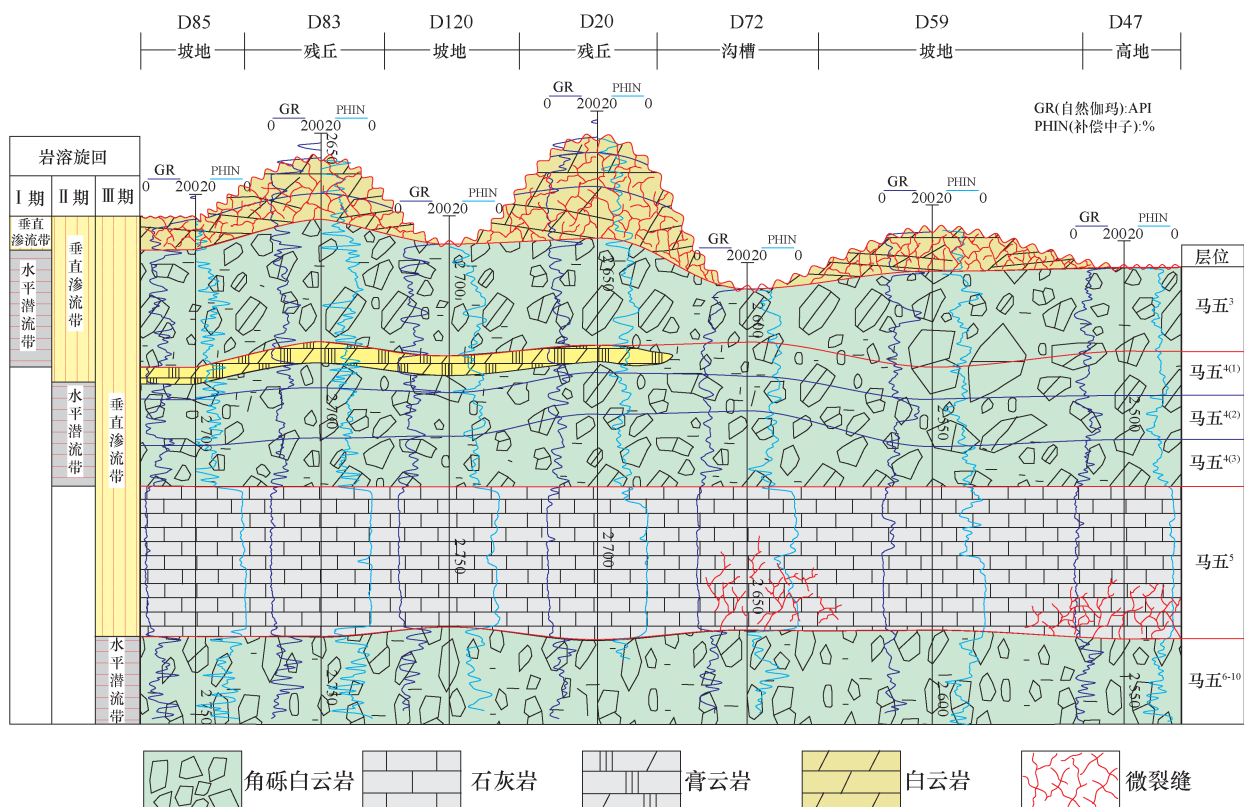


图6 大牛地气田马家沟组岩溶旋回对比(剖面位置见图7)

Fig. 6 Correlation of karst cycles of the Majiagou Formation in Daniudi gasfield(see Fig. 7 for the profile location)

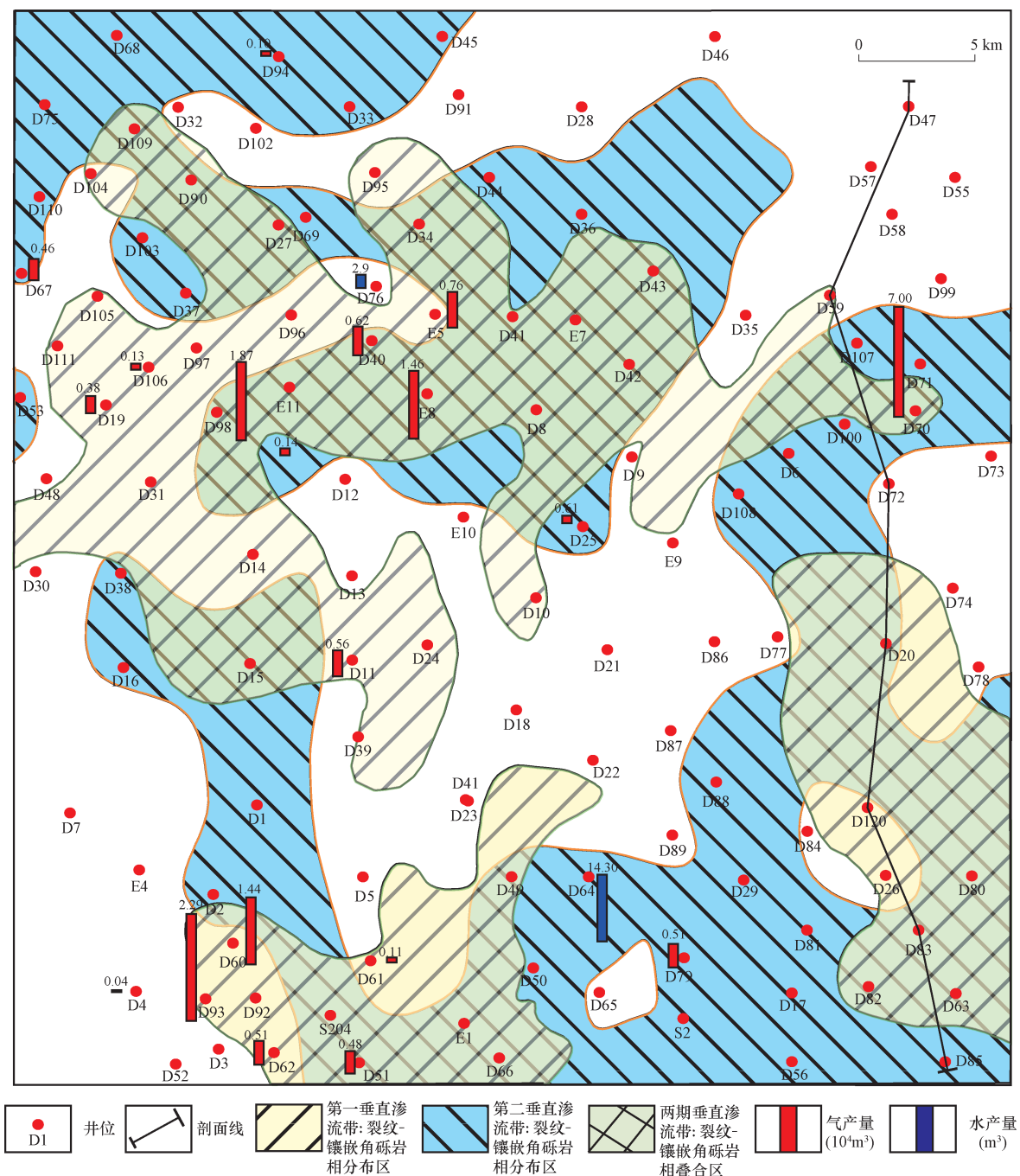


图7 大牛气田地奥陶系风化壳垂直直流带裂纹-镶嵌角砾岩相分布

Fig. 7 Distribution of crackle-mosaic breccias in the first and second vertical vadose zones of the Ordovician weathering crust in Daniudi gasfield

岩,厚度 30m 左右。从大量的取心资料来看,该套微晶灰岩不见任何溶蚀孔洞,说明地表水下渗至马五⁵层时,由于溶蚀作用使水体中 Ca^{2+} 增加,富 Ca^{2+} 的孔隙水对灰岩而言是饱和的。从测井曲线形态来看,少量井钻遇溶蚀洞穴,亦不排除是大的溶缝。考虑到第三期岩溶是最弱的,说明大气水并不是以扩散的方式均匀穿过马五⁵层微晶灰岩的,而是通过裂缝、溶缝等通道进入水平潜流带,所以马五⁵层微晶灰岩的溶蚀并不明显。在岩溶高地及斜坡沟槽发育处(图 6),马五⁵中部及下部见裂纹连续角砾岩相,角砾间被巨晶

方解石充填-半充填(图 2a),无任何泥质。考虑到发育区域、所在层段及无任何泥岩充填,认为是上古生界、甚至中生界沉积后,由于岩溶高地及斜坡沟槽区域马五⁵层之上的奥陶系较薄,而马五⁵层之下的水平潜流带沉积具有可压缩性,巨厚的上覆地层导致马五⁵层中部及下部地层变形破裂,来自下部富含 CaCO_3 的孔隙水沿着裂缝向上运移,随着压力的降低,方解石充填裂缝。方解石中包裹有沥青也证明其形成时间较晚(图 3),所以第三期水平潜流带的顶板与岩溶关系不大。

综上所述,奥陶系岩溶储层主要发育在第一期和第二期岩溶的垂直渗流带中,并且要求垂直渗流带没有发生明显的垮塌,储层发育的岩相为裂纹-镶嵌角砾岩相。根据大量的钻井资料,编制了奥陶系第一期和第二期岩溶垂直渗流带的裂纹-镶嵌角砾岩相分布图(图7),指明了下一步天然气的勘探方向。

6 结论

1) 奥陶系岩溶地层发育5种岩溶相,储层主要发育在裂纹-镶嵌角砾岩相中,该岩相主要赋存于第一期和第二期岩溶的垂直渗流带中,即洞穴层顶板中。

2) 马家沟组发育3期岩溶,具有上老下新的特征。上面两期岩溶规模较大,而第三期岩溶规模相对较小,最终结果是风化壳储层的发育主要与上部两期岩溶有关。

3) 研究区奥陶系储层欠发育的主要因素是岩溶作用过强,特别是上部两期岩溶洞穴发生垮塌,角砾间被泥质、云质泥岩充填而使储集性能变差,所以垂直渗流带中岩溶较弱的区域是储层发育区。

参 考 文 献

- [1] 冉新权,付金华,魏新善,等.鄂尔多斯盆地奥陶系顶面形成演化与储集层发育[J].石油勘探与开发,2012,39(2):154-162.
Ran Xinquan, Fu Jinhua, Wei Xinshan, et al. Evolution of the Ordovician top boundary and its relationship to reservoirs' development, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):154-162.
- [2] 罗香建,田景春,张锦泉,等.鄂尔多斯盆地高桥地区奥陶系马家沟组马五1+2亚段储层特征[J].岩性油气藏,2012,24(4):24-29.
Luo Xiangjian, Tian Jingchun, Zhang Jinquan, et al. Reservoir characteristics of M51+2 sub-member of Ordovician Majiagou Formation in Gaoqiao Area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4):24-29.
- [3] 马春生,许化政,郑浚茂,等.鄂尔多斯盆地富县地区奥陶系岩溶风化壳储集层类型与形成条件[J].海相油气地质,2011,16(2):42-47.
Ma Chunsheng, Xu Huazheng, Zheng Junmao, et al. Types and formation conditions of Ordovician Karst weathering-crust reservoirs in Fuxian slope area, Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(2):42-47.
- [4] Li J, Zhang W Z, Luo X, et al. Paleokarst reservoirs and gas accumulation in the Jingbian field, Ordos Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(1):401-415.
- [5] 何自新,郑聪斌,王彩丽,等.中国海相油气田勘探实例之二——鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J].海相油气地质,2005,10(2):37-44.
He Zixin, Zheng Congbin, Wang Caili, et al. Case of discovery and exploration of marine fields in China (part2)—Jingbian gas field, Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(2):37-44.
- [6] 侯方浩,方少仙,何江,等.鄂尔多斯盆地靖边气田区中奥陶统马家沟组五¹—五⁴亚段古岩溶型储层分布特征及综合评价[J].海相油气地质,2011,16(1):1-13.
Hou Fanghao, Fang Shaoxian, He Jiang, et al. Distribution characters and comprehensive evaluation of Middle Ordovician Majiagou M5¹⁻⁴ submembers reservoirs in Jingbian Gasfield, Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum, 2011, 16(1):1-13.
- [7] 付金华,郑聪斌.鄂尔多斯盆地奥陶纪北海和祁连海演变及岩相古地理特征[J].古地理学报,2001,3(4):25-35.
Fu Jinhua, Zheng Congbin. Evolution between north China sea and Qilian sea of the Ordovician and the characteristics of lithofacies palaeogeography in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(4):25-35.
- [8] 高振中,罗顺社,何幼斌,等.鄂尔多斯地区西缘中奥陶世等深流沉积[J].沉积学报,1995,13(4):16-26.
Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, He Youbin, et al. The Middle Ordovician contourite on the west margin of Ordos [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(4):16-26.
- [9] 席胜利,李振宏,王欣,等.鄂尔多斯盆地奥陶系储层展布及勘探潜力[J].石油与天然气地质,2006,27(3):405-413.
Xi Shengli, Li Zhenhong, Wang Xin, et al. Distribution and exploration potential of Ordovician reservoir in Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3):405-413.
- [10] Loucks R. G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11):1795-1834.
- [11] Wang B Q, S Al-Aasm I. Karst-controlled diagenesis and reservoir development: Example from the Ordovician main reservoir carbonate rocks on the eastern margin of the Ordos basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(9):1639-1658.
- [12] 徐国强,李国蓉,刘树根,等.塔里木盆地早海西期多期次风化壳岩溶洞穴层[J].地质学报,2005,79(4):557-568.
Xu Guoqiang, Li Guorong, Liu Shugen, et al. Cave layers formed multiple times of weathering crusts in Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(4):557-568.
- [13] 朱东亚,胡文瑄,张学丰,等.塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J].石油学报,2007,28(5):57-62.
Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, et al. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5):57-62.
- [14] 曹建文,金意志,夏日元,等.塔河油田4区奥陶系风化壳古岩溶作用标志及控制因素分析[J].中国岩溶,2012,31(2):220-226.
Cao Jianwen, Jin Yizhi, Xia Riyuan, et al. Marks and controlling factors of the paleo-karstification in the Ordovician weathered crust at the 4th block of Tahe oilfield [J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(2):220-226.
- [15] 郑聪斌,张军,李振宏.鄂尔多斯盆地西缘古岩溶洞穴特征[J].天然气工业,2005,25(4):27-31.
Zheng Congbin, Zhang Jun, Li Zhenhong. Paleokarst cave features of the western fringe of Ordos Basin [J]. Natural gas industry, 2005, 25(4):27-31.
- [16] 李阳,范智慧.塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J].石油学报,2011,32(1):101-106.
Li Yang, Fan Zhihui. Formation model of fracture-cave systems in Ordovician carbonates in Tahe Oilfield and their distributions [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1):101-106.

(编辑 董立)