

文章编号 :1000-0550(2001)04-0530-06

大港探区奥陶系岩溶储层发育分布控制因素^①

金振奎 邹元荣 蒋春雷 由伟丰

(CNPC 油气储层重点实验室 石油大学(北京) 北京昌平 102249)

摘要 大港探区奥陶系厚 600~800 m,主要由石灰岩和白云岩组成。本区奥陶系的储层主要为岩溶储层。控制岩溶发育的主要因素有:岩性及沉积环境、水动力条件、古地形因素、断裂与裂缝发育情况和风化淋滤时间等。白云岩和石膏发育的地层有利于岩溶储层发育,湖坪环境是有利的储集岩发育相带。岩溶储层主要发育在距不整合面 20~200 m 范围内。加里东期古地形为南西高、北东低,水流方向是自南西向北东的,岩溶斜坡和不长期积水的岩溶洼地是有利的岩溶储层发育部位,尤其是岩溶斜坡。裂缝和断层发育的部位是岩溶储层有利的发育部位,裂缝和断层的走向控制岩溶带的走向。风化剥蚀时间越长,越有利于岩溶储层发育。

关键词 大港探区 奥陶系 岩溶储层 分布规律 控制因素

第一作者简介 金振奎 男 1963 年出生 博士(后) 教授 沉积学

中图分类号 TE122.2+4 文献标识码 A

1 前言

大港探区位于北纬 37°30'~39°50',东经 116°10'~119°30',包括黄骅坳陷及沧县隆起东部,其延伸方向大体为北东—南西向,面积约 9 000 km²(图 1)。

1970 年以来,奥陶系一直是该油田勘探目的层之一,但一直未发现重要油气藏。直到 1997 年,大港油田在多年勘探的基础上,由于采用了新的技术方法,在奥陶系岩溶储层中终于发现了亿吨级千米桥潜山油气藏,在乌马营地区的岩溶储层中也获得了高产油流,从而取得了潜山勘探的历史性突破。这表明,大港探区的古潜山的油气前景是好的。但关于什么样的潜山岩溶储层发育,目前尚无定论。本文根据已有的钻探资料,对奥陶系碳酸盐岩储层分布规律和控制因素进行研究,以便为正确评价其它潜山提供科学依据。

2 地层

奥陶系在本区分布广泛,厚度一般为 600~800 m,主要由浅水台地沉积的石灰岩和白云岩组成,与下伏寒武系整合接触,与上覆地层(石炭系或中生界)不整合接触^[1~3]。

在前人研究的基础上^[4],本次研究采用的划分方案为奥陶系三分^[3],下奥陶统分为冶里组和亮甲山组,中奥陶统分为下马家沟组、上马家沟组和峰峰组,上奥陶统缺失(图 2)。其中下马家沟组、上马家沟组和峰峰组均进一步划分为下段和上段。奥陶系下统与中统

之间为平行不整合,其余各组之间均为整合接触。目前发现的油气均分布在峰峰组和上马家沟组上段中。

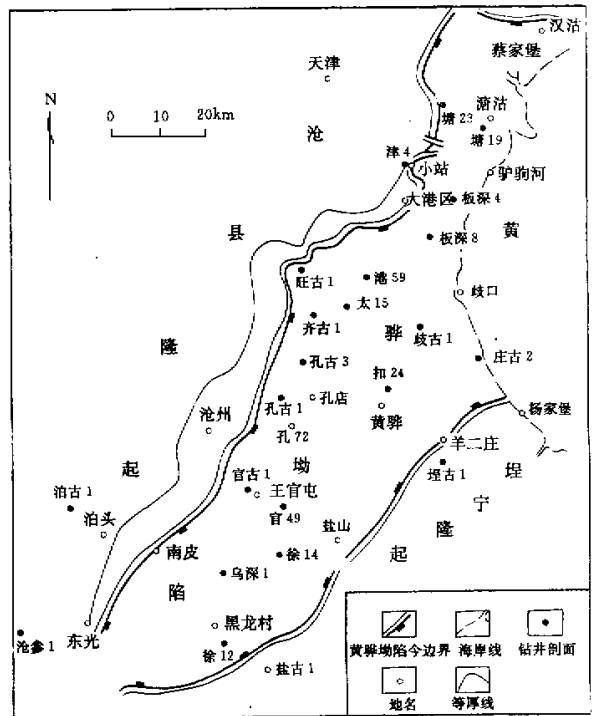


图 1 大港探区位置图

Fig. 1 Location of the Dagang oilfield

① 国家 973 课题中国典型叠合盆地优质烃源岩发育环境及控制因素(批准号:G1999043306)资助

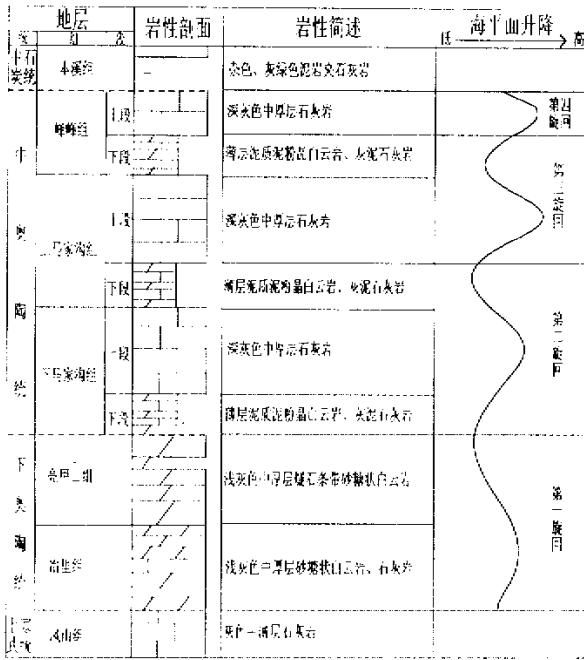


图 2 黄骀坳陷奥陶系划分
Fig.2 Division of the Ordovician in the Huanghua Depression

3 岩溶储层发育和分布的主控因素

本次研究表明, 本区碳酸盐岩岩溶储层受岩性及沉积环境、水动力条件、古地形、断裂与裂缝发育情况和风化淋滤时间等的控制。

3.1 岩性和沉积相对岩溶储层发育和分布的控制作用

不同的岩性, 其溶蚀性不同。实际资料表明, 白云岩的储集性通常比石灰岩的好(图 3), 储层发育段通常对应白云岩段, 放空和漏失也主要发生在白云岩段。这主要是两种原因: 第一, 白云岩的脆性通常比石灰岩

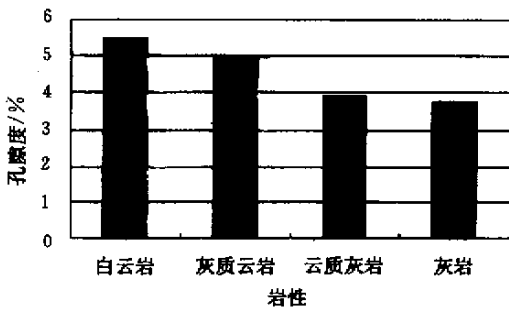


图 3 孔隙度与岩性关系图

Fig.3 Relationship between porosity and lithology

大, 因此更容易形成裂缝; 第二, 白云岩通常具有粉晶

至细晶结构, 晶间孔发育, 而石灰岩通常具有泥晶结构, 晶间孔不发育。无论裂缝还是晶间孔, 本身不仅是良好的储集空间, 而且有利于地下水流动, 因而有利于岩层溶蚀。对于处在岩溶带中的地层, 储层发育段通常是白云岩发育段, 这在千米桥地区十分明显。该区凡是白云岩发育的井, 储层也发育(如板深 7、板深 8 等井); 凡是石灰岩发育的井, 储层发育就差(如板深 12-18 井)。

纯白云岩比泥质白云岩有利于岩溶储层发育。泥质白云岩本身难以形成储层, 而其上与之紧邻的较纯的白云岩通常是良好的储层(如板深 8 井)。这是由于泥质白云岩泥质含量高, 塑性大, 不利于形成裂缝, 也不利于溶蚀, 但这种比较致密的岩层却是好的隔水层, 在其之上地下水可大量汇集, 导致其上覆岩层的强烈溶蚀, 形成好的储层。

石膏晶体、结核、条带或石膏层发育的层段有利于岩溶储层发育。石膏极容易在浅部或深部溶蚀, 形成溶蚀孔隙或垮塌孔隙。下马家沟组下段、上马家沟组下段、峰峰组下段是石膏发育的层段, 在许多地区形成了垮塌角砾岩。

因此, 白云岩和石膏发育的层段往往形成良好的储集层。

岩石类型往往是特定沉积环境的产物, 因此沉积环境对岩溶储层的分布也有重要控制作用。潮坪环境有利于白云岩和石膏发育, 是有利的相带。由滩相颗粒石灰岩白云化形成的白云岩比由局限海和开阔海灰泥石灰岩白云化形成的白云岩孔隙发育, 所以滩也是有利的岩溶储层发育相带。而局限海和开阔海是较差的储集相带。

3.2 水动力条件对岩溶储层发育的控制作用

岩溶剖面上, 通常自上而下分为垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带(图 4)。垂直渗流带在潜水面以上, 一般是在大气降水期间才充有水, 水是垂直向下渗流的^[5], 流量少, 并且是间歇性的。水平潜流带在潜水面之下, 长期充满水, 水流大致沿水平方向流动, 流

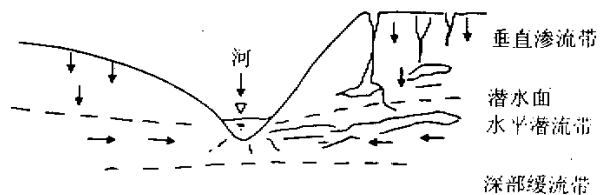


图 4 岩溶垂向水动力分带

Fig.4 Hydrodynamic zones of karst

量大, 流速较高。深部缓流带虽然也长期充满水, 但流动极其缓慢。

本区奥陶系碳酸盐岩岩溶储层在纵向上的分布与水动力分带密切相关,有利储层主要分布在距离风化壳20至200 m的潜流带范围内。

钻井资料表明,钻具放空和泥浆漏失主要发生在距离风化壳20至200 m范围内(图5),放空幅度一般为0.25~2.65 m,反映地下存在未充填死的溶洞,其直径约为0.25~2.65 m。泥浆漏失量为几十方到数百方,个别井达上千方。测井解释结果表明,孔隙度在距离风化壳20至200 m范围内也最高(图6)。

这表明,在距离风化壳20至200 m范围内岩溶储层最发育,此范围之上和之下的层段,岩溶储层一般不发育。

地表岩溶储层的这种分布特征主要是由岩溶地区的水动力分带决定的。地下水汇集且流动快的潜流带溶蚀最强烈,是岩溶储层最有利的发育带。本区溶洞主要分布在200 m之内,因此潜流带的底界在200 m

充填,不利于储层发育,故在岩溶剖面上一般有个相对致密的壳,此壳的厚度一般在20 m左右。同时,这也表明本区渗流带的深度为20 m左右。潜流带之下的缓流带以胶结为主,不利于储层发育。

可见,水动力分带对岩溶储层的纵向分布有十分重要的控制作用。认识到这一点对潜山钻探有重要意义,钻井时只需揭穿不整合面之下200 m以内地层即可,从而可以避免钻井过深,节约钻井成本。

3.3 古地形对岩溶储层发育和分布的控制

地形的高低直接影响地下水的流动方向和汇集地区。由于地下水总是从高处向低处流动,因此岩溶带的走向应平行于水流方向。例如,近些年在长江下游发生的岩溶塌陷呈带状分布,塌陷带走向近东西向,平行于区域水流方向。

根据奥陶系上覆地层石炭系本溪组的地层等厚图分析,发现本溪组的厚度总的趋势自南西向北东变厚。根据填平补齐原理作出本区的古岩溶地貌图(图7),从图中可以看出,加里东岩溶期的地形是南西高、北东低,水流方向是自南西向北东的。因此,该期岩溶带的走向应该是北东向的,如北大港构造带石炭系—二叠系覆盖的地区,发生放空的井自南西向北东依次为太12-太13-太5-港深5井,形成一个大体北东向的岩溶带(图7)。沿岩溶带走向打井,成功率就会高,而垂直岩溶带的走向打井,成功率低。

在古地貌图上,可将本区分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地(图7)。

根据岩溶形成的机理,岩溶发育的一个重要条件之一就是其水流因素,流量大、流速快,溶蚀就强烈。岩溶高地地形较平缓,坡度小,地下水流动较慢,而且由于地形高,不利于流水汇集,溶蚀作用较弱。因此岩溶高地不是岩溶储层发育的有利部位,放空、漏失并很少(图7)。

岩溶斜坡坡度大,地下水流速快,有利于溶蚀,岩溶储层发育,放空漏失并多(图7)。

岩溶洼地可分两类。一类是处于基准面之下的岩溶洼地,这类洼地长期积水,形成湖泊。洼地中地下水几乎是静止的,溶蚀作用弱,而胶结作用强烈,不利于岩溶储层发育。另一类是处于基准面之上的岩溶洼地,这种洼地虽能汇水,但不积水,其汇集的地下水又向更低的地区流动,水流量大,溶蚀作用较强,有利于岩溶储层发育。本区岩溶洼地的类型属于后者,因为其不整合面上有红色残积物,说明它长期处于暴露的氧化环境中。

左右。由于水流量小,渗流带本身溶蚀强度就不如潜流带,而且其孔隙容易被来自上覆风化残积层的泥质

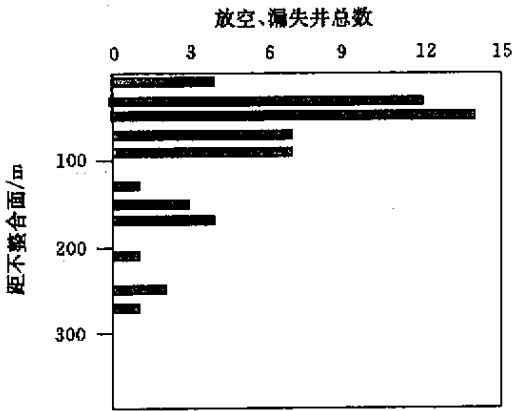


图5 放空漏失井数与距不整合面距离关系图

Fig.5 Relationship between number of wells with deeply buried caves and distance to the unconformity

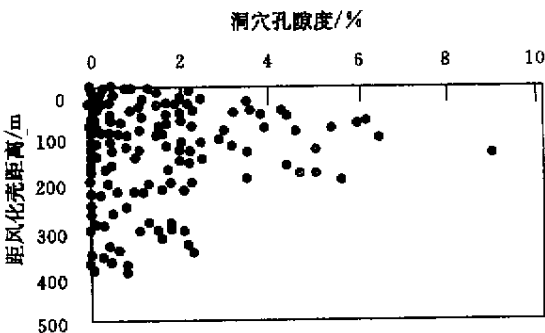


图6 洞穴孔隙度与距风化壳距离关系图

Fig.6 Relationship between cave porosity and distance to the weathering crust

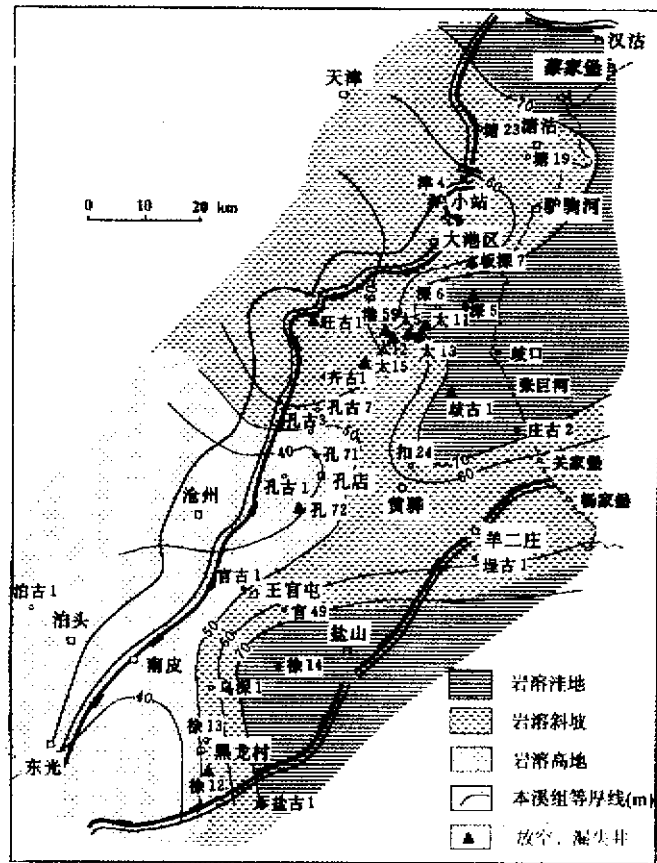


图 7 大港探区前石炭纪古地貌图

Fig. 7 Pre-Carboniferous surface features of Dagang region

总之,从放空、漏失井数看,岩溶斜坡最多,是最有利的岩溶储层发育带,岩溶洼地次之,岩溶高地最差。

3.4 裂缝、断层对岩溶储层发育和分布的控制

裂缝和断

层是地下水运动的良好通道,裂缝和断层的分布和发育程度直接控制了岩溶的分布和发育程度。裂缝和断层发育的地区,岩溶发育;裂缝和断层不发育的地区,岩溶一般也不发育。岩溶带的走向往往平行裂缝和断层的走向。渗流带的落水洞通常是在裂缝交叉处发育起来的,潜流带的水平溶洞或地下暗河也常常是沿着裂缝或断层发育、伸展。

例如,在千米桥地区,裂缝和断层的走向以东北—南西向为主,岩溶储层带的走向及等厚线的走向也主要是东北—南西向。又如,北京房山银狐洞就是一个典型的沿裂缝发育的大型溶洞,其中发育了多种岩溶地貌,其最典型的岩溶现象是发育一条 700 m 的地下暗河,在暗河顶部,裂缝清晰可见,具有沿裂缝溶蚀的迹象。

灰岩脆性小于白云岩,但有裂缝发育的地区灰岩的岩溶发育程度明显增强,形成有利的运移通道和储存空间。如板深 7 井-板深 8 井一带,裂缝发育,在距离风化壳 100 m 范围内,裂缝密度为 5.6~12 条/m,溶蚀孔洞层数多,达 5~6 层,为高产井,而板深 4 井中裂缝密度就小得多,全井仅为 10 条,溶洞层仅为 3 层,为低产井。

断层附近有利于岩溶发育,这主要是由于断层附近往往有裂缝相伴生,断层本身也是地下水渗透和运移的通道。北大港潜山带临近港西主断层的九口井(港 1、2、13、59、87、太 5、太 4、太 9、太 10)中大部分具钻时明显加快和放空现象,而且均见到较好显示。其中港 1、87、太 4 已获油气流。太 9 并于 3 182 m 通过一断层,断距达 328 m,在断点附近 3 176~3 183 m 井段,方解石脉的百分含量高达 34.2%~54.2%。沿港 8 断层附近分布的一系列高产井(板深 7、板深 8、板深 701、板深 703)与断层的发育也有密切的关系。

表 1 奥陶系岩溶发育情况与覆盖层关系统计表

Table 1 Relationship between Ordovician karst and overlying strata

上覆地层	第四系	上第三系		中生界	石炭—二叠系	
风化时间	4.38 亿年	4.15 亿年		2.5 亿年	1.2 亿年	
地区	唐山	埕子口	咸水沽	港西	港西	
代表井	水 03 井	新埕 1	津 2	港 2	港 13	港 23
缝洞发育程度	钻进发现 0.2~0.4 m 溶洞,取芯是蜂窝状溶孔灰岩	钻具放空 6.69 m,漏失泥浆 113 方	钻进发现 12 m 溶洞并见蜂窝状溶孔灰岩	放空 1 m		放空 0.6 m
测试井段	40 m 以下	891.81~898.5	1 440~1 466	2 362.4~2 363.6	1 910~2 604.84	2 174.25~2 291.18
测试结果	日产油(吨)					
	日产气/m ³					
	日产水/m ³	4 900	9 024	119	23.8	1.06

3.5 风化淋滤时间对岩溶储层发育的控制作用

本区的奥陶系在不同的地区,其上覆地层不同。根据上覆地层的年代,可分两个时期的岩溶,即古生代岩溶和中生代岩溶。

古生代岩溶是指奥陶系上覆地层为石炭—二叠系的岩溶区,其间缺失了晚奥陶世至早石炭的地层,经历风化淋滤的时间大约是 1.2 亿年。

中生代岩溶是指奥陶系上覆地层为侏罗—白垩系的岩溶区,其间缺失了晚奥陶世至三叠纪的地层,经历了两次以上岩溶,风化淋滤的时间大约是 2.5 亿年。

研究表明,本区奥陶系风化淋滤次数越多、时间越长,越有利于岩溶储层发育。

从表 1 中可以看出,被第三系、第四系直接覆盖的奥陶系石灰岩或白云岩,由于风化淋滤时间长(4 亿年以上)缝洞发育,钻遇溶洞可达 6.69~12 m,石灰岩产液量高(日产水 119~9 024 m³),水的总矿化度低(1 675~9 384 mg/L),表明地下水活跃。被上古生界复盖的奥陶系石灰岩或白云岩经受风化淋滤时间较短,岩溶和缝洞连通程度与前者相比较差。石灰岩产液量低(1~24 m³/日),水的总矿化度高达 3×10⁴mg/L,地下水活动性差。唐山地区水井资料证实,有无石炭—二叠系复盖,奥陶系石灰岩产液量大小悬殊很大,二者产液量相差 10~276 倍。大港千米桥潜山直接被中生界覆盖,属中生代岩溶。潜山之上多口井钻遇大型溶洞,成像测井和岩心观察也表明存在大大小小的溶洞,并且多口井(如板深 7、板深 8 等)获得了高产油气流。而千米桥以西的地区属于古生代岩溶,目前尚未发现高产油气流。又如,孔古 3 井中,奥陶系之上直接覆盖中生界,缺失石炭系和二叠系,风化淋滤时间要比其它有石炭系和二叠系覆盖的地区要长。从岩心看,该井的白云岩晶间溶蚀孔隙相当发育,此井也是孔南地区为数不多的获得工业油气流的井之一。

本区中、下奥陶统之间也存在一个平行不整合,但由于该不整合间断时间很短,岩溶不明显。

以上资料均说明奥陶系储集性能的好坏,与风化淋滤时间有密切关系,淋滤时间越长,缝洞连通性越好,储层质量越高、厚度越大。

4 结论

综合上述研究,得出以下几点结论:

(1) 控制岩溶发育的主要因素有:岩性及沉积环境、水动力条件、古地形因素、断裂与裂缝发育情况和风化淋滤时间等。

(2) 白云岩和石膏发育的地层有利于岩溶储层发育。潮坪环境特别是云坪和膏云坪环境是最有利的储集岩发育相带。

(3) 水动力带控制岩溶储层的纵向分布,有利的岩溶储层主要发育在距离不整合面 20~200 m 的范围内。地下水最活跃的水平潜流带溶蚀最强烈,是岩溶储层最有利的发育带。

(4) 古地形控制地下水流向和流速,也控制了岩溶储层的发育和展布,岩溶储层带的走向通常平行于水流方向。岩溶斜坡最有利于岩溶储层发育,岩溶洼地次之,岩溶高地最差。

(5) 裂缝和断层发育的部位是岩溶储层有利的发育部位,裂缝和断层的走向控制岩溶带的走向。

(6) 风化剥蚀时间越长,越有利于岩溶储层发育。

参 考 文 献

- 1 金振奎,冯增昭.华北地台东部下古生界白云岩岩石学及储集特征[J].沉积学报,1993,11(2):11~18
- 2 冯增昭,陈继新,吴胜和.华北地台早古生代岩相古地理[J].沉积学报,1991,7(4):15~55
- 3 邹元荣,金振奎,由伟丰,蒋春雷.黄骅拗陷奥陶纪岩相古地理[J].古地理学报,2001,7(4):35~44
- 4 冯增昭,陈继新,吴胜和.华北地台早古生代岩相古地理[M].北京:地质出版社,1990.269
- 5 吴胜和,金振奎,黄沧钊,陈崇和.储层地质建模[M].北京:石油工业出版社,1999.124

Distribution and Controlling Factors of Ordovician Karst Reservoirs in Dagang Region

JIN Zhen-kui ZOU Yuan-rong JIANG Chun-lei YOU Wei-feng

(CNPC Key Research Laboratory, University of Petroleum, Changping Beijing 102249)

Abstract

In the Dagang region, the Ordovician is 600~800 m thick and mainly consists of limestones and dolostones. Karst reservoirs are developed. The main controls on karst reservoirs are: lithology, depositional environments, hydrology, an-

cient landform , fractures and weathering time and so on. The lithology composed of dolostones and gypsum is favorable for the development of karst reservoirs. Tidal flat environments are favorable facies to develop karst reservoirs. Karst reservoirs are mainly developed 20 to 200 m beneath the unconformity. Before the Carboniferous , the land surface of the study area inclined from southwest to northeast , and the ground water flew from southwest to northeast. Karst reservoir belt formed in this time also trends southwest-northeast. The karst slope and karst depression with no standing water are favorable for the karst reservoir development , especially the karst slope. Karst reservoirs tend to develop in the place where fractures and faults are abundant , and the trend of fractures and faults controls the trend of karst reservoir belts. The longer the weathering time , the better the karst will be developed.

Key words Dagang region , Ordovician karst reservoir , distribution , controlling factors

(Continued from page 529)

corrosion capacity and solubility.

The research shows during the development of hot fluid karst , the artesian hot water from different depths causes the increase of karst water specific gravity with the pressure boost and the increase of salinity , and drives the water flow from high pressure zone to the lower , at the same time , the rising water temperature and the increase of dissolved gas get the water gravity decreased , boosting the hot water move in circulation in the sediments. So it is clear that the deeply buried hot water karst in this area is dominated by deep heat source and the hot water circulation.

Based on the content changes of trace elements of Fe^{2+} and Mn , it has been distinguished that the well zones of Er6 , Dingtan1 , Lihua1 , Lucan1 in the west part of the basin , Xongtan1 in the south , and Shan8 , Shan12 in the east are the main zones where hot water circulation is active , and are favorable for the development of hot water karst. It plays an important role in forming deep Ordovician reservoir in this area.

Key words Ordos basin , Ordovician , hot water karst , deep reservoir , development characteristics