

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

塔里木盆地早海西期多期次风化壳岩溶洞穴层

徐国强¹⁾, 李国蓉^{1,2)}, 刘树根^{1,2)}, 武恒志³⁾, 田纳新⁴⁾, 李智武¹⁾

1) 成都理工大学能源学院, 610059; 2) 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都, 610059

3) 中国石化石油勘探开发研究院, 北京, 100083; 4) 中国地质大学, 北京, 100083

内容提要: 洞穴层是识别多期次岩溶旋回的标志, 是岩溶旋回连接沉积旋回及周期性海平面变化的纽带。本文通过古地貌恢复, 将从钻井剖面中识别的洞穴层归位到早石炭世古地貌剖面中, 根据洞穴层总是沿稳定古潜水面发育的特点划分对比洞穴层。通过洞穴层的形成条件、充填结构分析, 推断洞穴层发育序次、洞穴层与其同时期形成的沉积地层的时空对应关系, 并据此对洞穴层进行盆地范围内跨地区对比、总结斜坡及岛屿两种不同的洞穴层发育模式。研究表明, 在早海西期, 塔北、塔中、和田古隆起中、下奥陶统碳酸盐岩陆块内部发育了3个期次的风化壳岩溶洞穴层, 其序次为下老上新, 它们是在早石炭世间歇性海平面上升过程中形成的, 其同时期形成的沉积地层分别为下石炭统东河砂岩段、生屑灰岩段、下泥岩段中上部。洞穴层内部多旋回“坍塌角砾-地下河沉积”组合是斜坡内陆区潜流面的迟后上升效应, 洞穴层与洞穴等时层的时空对应关系对于大型古岩溶事件的断年及洞穴层的分布预测具有重要意义。

关键词: 塔里木盆地; 早海西期; 风化壳; 古岩溶; 洞穴层

自从塔北地区发现早海西期风化壳岩溶洞穴型储层以来(康玉柱, 1989), 塔里木盆地的洞穴层研究取得了许多重要进展(郭建华, 1991, 1993, 1996; 叶德胜等, 2000; 顾家裕等, 2001; Gu et al., 2002; 林忠明等, 2002; 何发歧, 2002; 肖玉茹等, 2003; 闫相宾等, 2002, 2004; 王嗣敏等, 2004)。20世纪90年代初期, 郭建华建立了洞穴层的识别标志及成因模式, 得出轮南地区发育两个在早石炭世海平面阶段性上升过程中形成的溶洞系统, 认为洞穴内的“坍塌角砾-地下河沉积”呈互层产出反映洞穴的形成与洞穴的充填基本同时进行, 洞穴的垂向生长主要是洪峰期冲顶岩溶的结果; 90年代后期, 叶德胜、顾家裕等引用大量钻孔、地震资料, 通过拉平双峰灰岩底面或风化壳顶面的方式对塔北地区的洞穴层进行横向对比, 证实了多期次洞穴层的存在; 近年来, 徐国强、李国蓉等通过对塔北、塔中、和田古隆起(图1)的洞穴层研究^{①②③④⑤}, 得出塔河油田发育3个期次的洞穴层, 认为它们是早海西期低温、近地表风化壳岩溶的产物, 塔中、和田地区的洞穴层可以与塔北地区的洞穴层进行对比。但是, 在前期研究中, 一些早期的论断需要进一步补充证据, 洞穴层横向对比的方法、理

论依据还需进一步完善, 洞穴沉积层结构及其成因方面的认识还需深化。

笔者以近年来完成的多项研究成果^{①②③④⑤}为基础, 通过建立碳酸盐岩陆块内部洞穴层和盆地内与其同时期形成的沉积层序内部等时层的关系, 以等时层作为约束条件, 对塔北、塔中、和田地区的洞穴层进行盆地范围内的跨地区的对比研究, 为间歇性海平面上升过程中形成的多期次风化壳岩溶洞穴层研究提供对比的理论依据及方法。

1 地质背景

塔里木盆地中、下奥陶统为一套台地相碳酸盐岩, 分上、中、下3段, 上部为纯灰岩段, 中部为灰云岩过渡段, 下部为纯云岩段(图2)。中、下奥陶统碳酸盐岩的基质孔隙度低, 内部无隔水层, 厚度超过1200m, 为一套非常好的块状可溶蚀地层。特别是顶部纯灰岩段, 其致密及块状属性为洞穴层沿稳定潜水面发育提供了基础条件。上奥陶统以黑色泥岩为主, 可作为隔水层。

泥盆纪末, 早海西运动使盆地形成一个向西敞开的马蹄形古陆(张光亚等, 1998; 张光亚, 2000), 和

注: 本文为国家“十五”科技攻关项目(编号 2001BA605A-03-01)资助的成果。

收稿日期: 2004-09-28; 改回日期: 2005-01-20; 责任编辑: 周健。

作者简介: 徐国强, 男, 1964年生。1985年毕业于成都地质学院, 1988年获硕士学位。副教授, 长期从事断层构造、碳酸盐岩层序地层、风化壳古岩溶研究工作。电话: 13708063215; Email: xuugq0@163.com。

田、塔北古隆起出露连片的碳酸盐岩陆块,塔中古隆起则出露多个小块状的碳酸盐岩陆块(图1)。早石炭世,由西向东发生大规模海进,下石炭统地层在早海西期不整合面之上逐层超覆沉积(顾家裕, 1996; 郭建华等, 2004)。与此同时,在致密碳酸盐岩陆块内部形成多个与间歇性海平面上升过程中海平面相对稳定期对应的稳定潜水面(图2)及沿稳定潜水面发育分布的洞穴层。早石炭世末,随着盆地范围扩大,碳酸盐岩陆块及其内部的古岩溶洞穴被埋藏。石炭纪以后,古岩溶洞穴随盆地持续下沉而深埋地下,一直保存至今。

2 洞穴层划分与对比

2.1 洞穴层识别

钻井剖面中的洞穴层主要根据以下标志识别:

(1)录井标志:包括放空、大量井漏、井涌、井喷、钻时下降、大量的方解石岩屑。其中放空为钻遇洞穴的直接标志(表1)。如塔中地区 TG1井在3706.29~3708m 放空1.71m(图5)。塔河油田在102口井中,未充填或部分充填的洞穴层钻遇井22口,其中9口井有

不同程度的放空,如 S48井放空7m(表1)。

(2)岩芯标志:包括陆源碎屑沉积物及其斜层理、水平层理等地下河沉积构造、岩溶角砾岩、氧化条件下结晶的巨晶方解石、钟乳石碎块、海岸砂体的伸入充填沉积等(表1,图3~5)。TZ3井3711~3724m 取芯显示,洞穴顶底为黄色巨晶方解石充填,中间为灰绿色泥岩充填,见纹层理,具典型的地下河沉积特征(图5)。

(3)测井标志:洞穴层的电测曲线特征表现为两高两低,即低电阻、低密度、高声波时差和高自然伽玛(图3~5)。

2.2 洞穴层分区对比

在成熟岩溶区致密碳酸盐岩地层中,风化壳岩溶洞穴总是沿着潜水面发育(Choquette, 1988)。分布于同一个稳定潜水面附近的洞穴所构成的洞穴集合体称之为洞穴层。同一个稳定潜水面附近发育的多个大型洞穴系统为同时期形成的地质体,尽管不连通,但它们可以按照等时原则进行横向对比。所以,只要把从井剖面中识别的洞穴层归位到它们形成时期的空间位置,就可以按照分布于同一个古潜

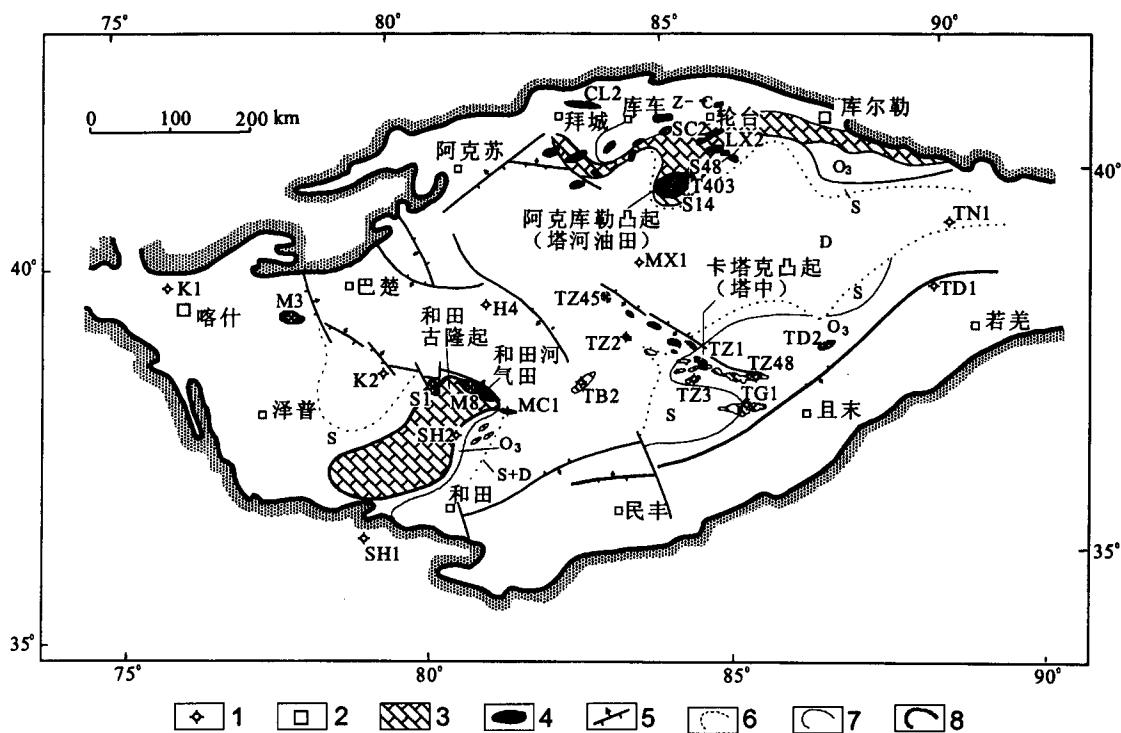


图1 塔里木盆地油气分布及早海西期古地质图

Fig. 1 Paleogeologic map in the Early Hercynian and oil & gas distribution in the Tarim basin

1—钻井;2—城镇;3—中、下奥陶统(O_{1+2})碳酸盐岩暴露区;4—油气田;5—断层;6—泥盆系(D)尖灭线;

7—志留系(S)尖灭线;8—上奥陶统(O_3)尖灭线;Z—震旦系—寒武系

1—Well; 2—town; 3—outcrop area of Lower to Middle Ordovician carbonates (O_{1+2}); 4—oil and gas field; 5—fault; 6—thin-out line of Devonian (D); 7—thin-out line of Silurian (S); 8—thin-out line of Upper Ordovician (O_3); Z—Cambrian to Sinian

水面上的洞穴层为同一个期次洞穴层的原则进行横对比。因此,在古洞穴层对比前,必须作古地貌恢复及洞穴层归位。

古地貌恢复一般采用印模法。使用印模法恢复古地貌(徐希坤等,2003;田纳新等,2004),首先要选

择一个离风化壳最近、层位稳定、分布广、钻井和地震剖面上都易于识别的标志层面,如生屑灰岩、标准灰岩(或双峰灰岩)(图2);然后提取标志层面与风化壳顶面的钻井地层厚度或地震时间厚度;再通过去压实恢复将提取的地层厚度转化为标志层沉积时期

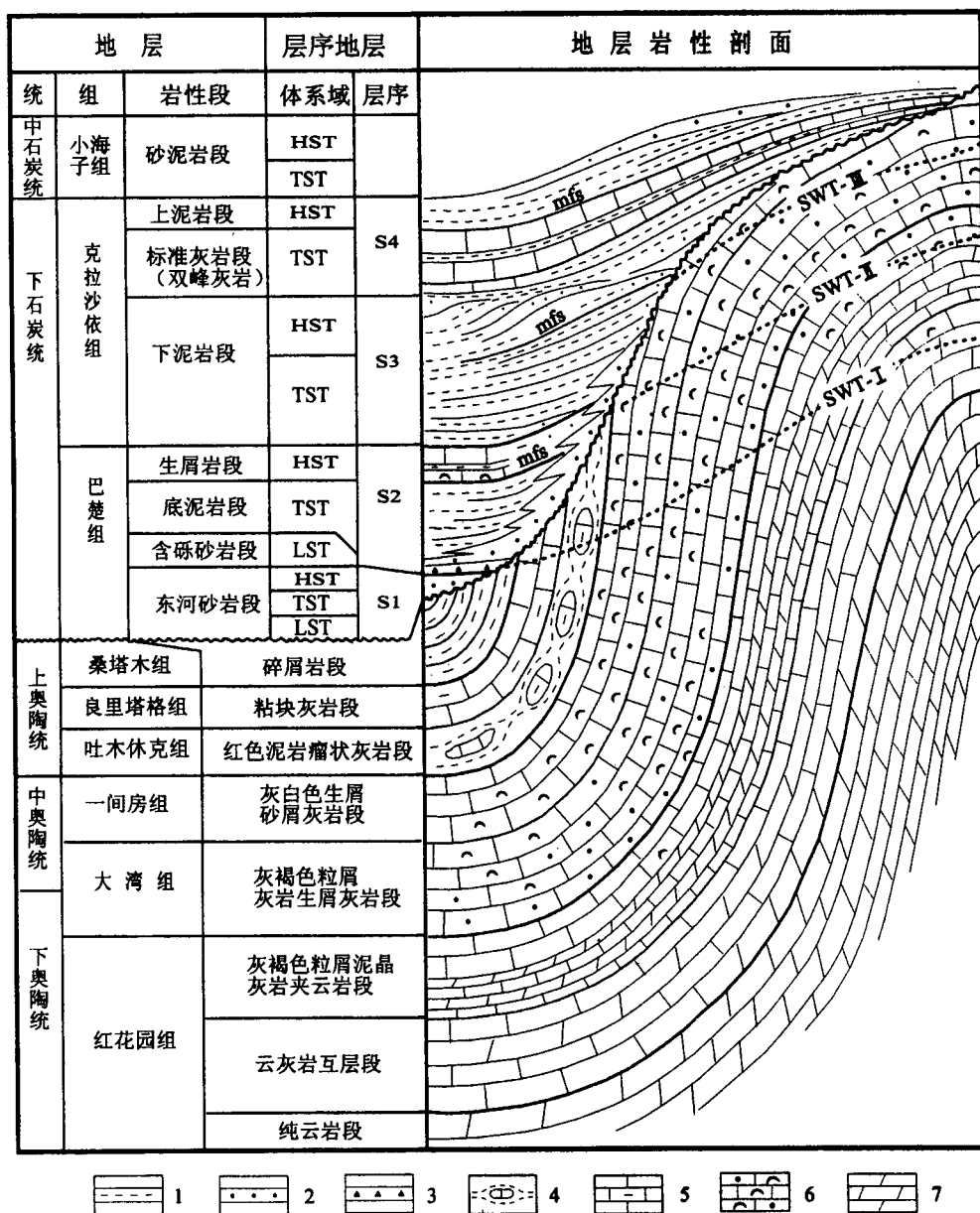


图 2 塔里木盆地早海西期风化壳岩溶相关地层剖面

(石炭系岩性地层及层序地层划分据郭建华等,2004;奥陶系岩性地层单元划分据顾家裕等,2001)

Fig. 2 Stratigraphy associated with the paleokarst in Early Hercynian weathering crust in the Tarim basin (the division of lithostratigraphic unit and sequence stratigraphic unit of Carboniferous after Guo Jianghua et al., 2004; the division of lithostratigraphic unit of Ordovician after Gu Jiayu et al., 2001)

1—泥岩;2—砂岩;3—角砾岩;4—瘤状灰岩;5—灰岩、泥灰岩;6—砂屑生屑灰岩;7—白云岩;S1~S4—下石炭统沉积层序;HST—高水位体系域;TST—海进体系域;LST—低水位体系域;mfs—最大洪泛面;SWT—稳定潜水面

1—Mudstone; 2—sandstone; 3—breccia; 4—nodular limestone; 5—limestone, marl; 6—biospararenite; 7—dolomite; S1~S4—depositional sequences in Lower Carboniferous; HST—highstand systems tracts; TST—transgressive systems tracts; LST—lowstand systems tracts; mfs—maximum flood surface; SWT—standing water table

的风化壳古埋藏深度;通过标志层面的古水深恢复得到的古海平面至风化壳顶面深度;最后通过构造差异沉降校正、断层错动归位和古海拔转换得到某个时期的风化壳古地貌。洞穴层归位就是把钻井剖面中识别的洞穴层放到它形成时期的空间位置。由于碳酸盐岩的压实作用非常小,可以直接利用风化壳顶面至洞穴的钻井深度将洞穴归位到古地貌剖面上(图6)。

2.2.1 塔北地区洞穴层划分对比

在塔北地区,从钻井剖面中识别的洞穴经过古地貌恢复及洞穴层归位后,具有明显的呈层状分布特征,在近南北向连井纵剖面上,洞穴层大致分布在由北向南古高程逐渐降低的上、中、下3个不同层面上(图6c);而在东西向连井横剖面上,也分上、中、下3层,拟合的洞穴层面大致与风化壳顶面平行,为一

个中间高,向东西两侧岩溶泄水盆地逐渐降低的一个拱型曲面(图6d)。

根据上述洞穴层分层展布特征可以拟合出3个古稳定潜水面,依据沿同一个古稳定潜水面分布的洞穴层为同一个期次发育的洞穴层推断,塔北地区发育3个期次的风化壳岩溶洞穴层及与之对应的3个岩溶旋回。在钻井剖面上,大部分洞穴钻遇并发育1~2个洞穴层(图6,表1),也有少量钻井钻遇3个洞穴层,如T403井、T615井、T75井等(图6d)。

据此,塔北地区洞穴层可分为上、中、下3层,由下向上排序,依次编为洞穴层C-I、C-II、C-III,其中洞穴层C-II,在斜坡近岸带为两层(C-II-1, C-II-2),内陆区合为一层(图6c)。

2.2.2 塔中地区洞穴层划分对比

早海西期,塔中地区出露的碳酸盐岩陆块主要

分布于背斜顶部,呈天窗方式产出,单个岩溶体系范围小,洞穴层总体欠发育。在钻遇下奥陶统风化壳的20口井中,仅TZ48井、TZ3井、TG1井发育标准的洞穴层(表1,图5),TZ1井、TZ2井、TB2井钻遇的早海西期风化壳白云岩,溶蚀孔洞发育,但由于反映稳定潜水面岩溶的洞穴层标志不明显,洞穴层不易识别。洞穴层的钻遇率约为22%。

TZ48井、TZ3井、TG1井处于3个不同潜山,它们都发育一套具有双层结构的洞穴层,从早海西期风化壳顶面至洞穴层的深度差别很大(图5),但通过古地貌恢复后,它们基本处于同一个古高程(图6B),其电测曲线特征也十分相似(图5),表明它们为同一个期次发育的洞穴层。TZ48井3411~3420.6m发育的另一个洞穴层还不能与该地区其他井对比。

上述对比结果表明,TZ48井、TZ3井、TG1井潜山在洞穴层发育时其古地理环境为孤立小岛,内部的潜水面近于水平,不同潜山内部同一个时期的洞穴层基本处于同一个水平面上。

2.2.3 和田地区洞穴层划分对比

和田地区的探井主要分布于和田古隆起北倾伏端的和田河气田(图1),气田中的10口探井及古隆起中部右翼的SH2井及山前构造带SH1井,共12口探井,其中M4井、MC1井、M8井具有洞穴层的特

表1 塔里木盆地中、下奥陶统部分具放空及半充填特征的洞穴层一览表
Table 1 A list of identified caves with the characteristics of drill fall and half filled in the Lower to Middle Ordovician in the Tarim basin

地区	井号	洞穴层井段(m)	识别标志	充填物类型及充填状态
塔	S23	5422.5~5430	测井	部分充填
	S47	5367~5371	岩芯、录井、测井	洞穴角砾岩部分充填
	S47	5455~5458	岩芯、录井、测井	部分充填,具放空
	S48	5363~5370	录井	放空
	S60	5492~5542.5	岩芯、录井	部分充填,钻时几近放空
	S61	5492~5542.5	岩芯、录井、测井	暗河沉积,部分充填,具放空
	S65	5485~5488	测井	部分充填
	S65	5720~5727	岩芯、测井	暗河沉积,部分充填
	S70	5488~5502	岩芯、测井	伸入洞穴的海岸沉积,部分充填
	S85	5960~5983	岩芯、测井	巨晶方解石充填,未填满
	T203	5615~5652	录井、测井	部分充填,具放空
	T301	5545~5558	录井、测井	放空
	Tk306	5441~5452	录井、测井	部分充填,断续放空
	Tk307	5576~5597	测井	部分充填
	Tk309	5439~5441	录井	放空
	T402	5370~5433	录井、测井	松散充填
	T402	5558~5592	录井、测井	松散充填
	Tk405	5428~5434	测井	部分充填
	Tk424	5536~5538	录井	放空
	Tk427	5578~	录井	严重井漏
	Tk444	5610~5626	测井	部分充填
	Tk612	5483~5487	测井	部分充填
	Tk615	5621~5628	测井	部分充填
	Tk618	5509~5514	测井	部分充填
	Tk618	5560~5564	测井	松散充填
	T701	5689~5692	测井	部分充填
塔中	TG1	3693.5~3704.5	录井、测井	部分充填,具放空
	TG1	3721~3743	录井、测井	严重井漏
	TZ48	3482~3493	录井、测井	巨晶方解石部分充填
	TZ48	3510~3512	录井、测井	严重井漏
和田	M4	2179~2190	测井	严重井漏
	M8	1890~1908	录井、测井	岩溶角砾松散充填,井漏

征标志(表1);S1井由于风化壳岩溶地层为孔隙性白云岩,溶蚀孔洞非常发育,但洞穴层不易识别。钻遇洞穴的概率约为25%。

通过M4井、MC1井、M8井3个不同潜山的古地貌恢复及井孔洞穴层归位,这3口井内的洞穴层基本处于同一个斜面上,根据分布在同一个古稳定潜水面的洞穴层为同一个期次发育的洞穴层推断,它们是同一期次形成的风化壳岩溶洞穴层。洞穴层所处的斜面受古隆起北倾伏端隔水层控制,是最低的一个古潜水面上的岩溶洞穴层(图6a)。

3 多期次洞穴层的形成序次

多次较大幅度的侵蚀基准面下降(或上升)将发

育多个岩溶旋回及多个洞穴层,上下多个洞穴层形成的先后次序为洞穴层序次。从理论上讲,洞穴层序次有两种基本型式,一种是上老下新,另一种为下老上新,前者是在构造抬升,侵蚀基准面随水平面间歇性下降过程中形成的洞穴层,现今地表中发育的洞穴层序列多属此型式;后者是在水(海)平面间歇性上升过程中形成的洞穴层,通常已深埋于地下。有关塔河油田多期次洞穴层的形成序次,目前还有两种不同的观点:其一是下老上新,认为多期洞穴层是在早石炭世阶段性海平面上升或构造沉降过程中形成的(郭建华,1993;叶德胜等,2000;顾家裕等,2001),是大家比较认同的观点。也有个别学者(尚无文献)认为多期次洞穴层是在早海西期多个幕次的构造抬

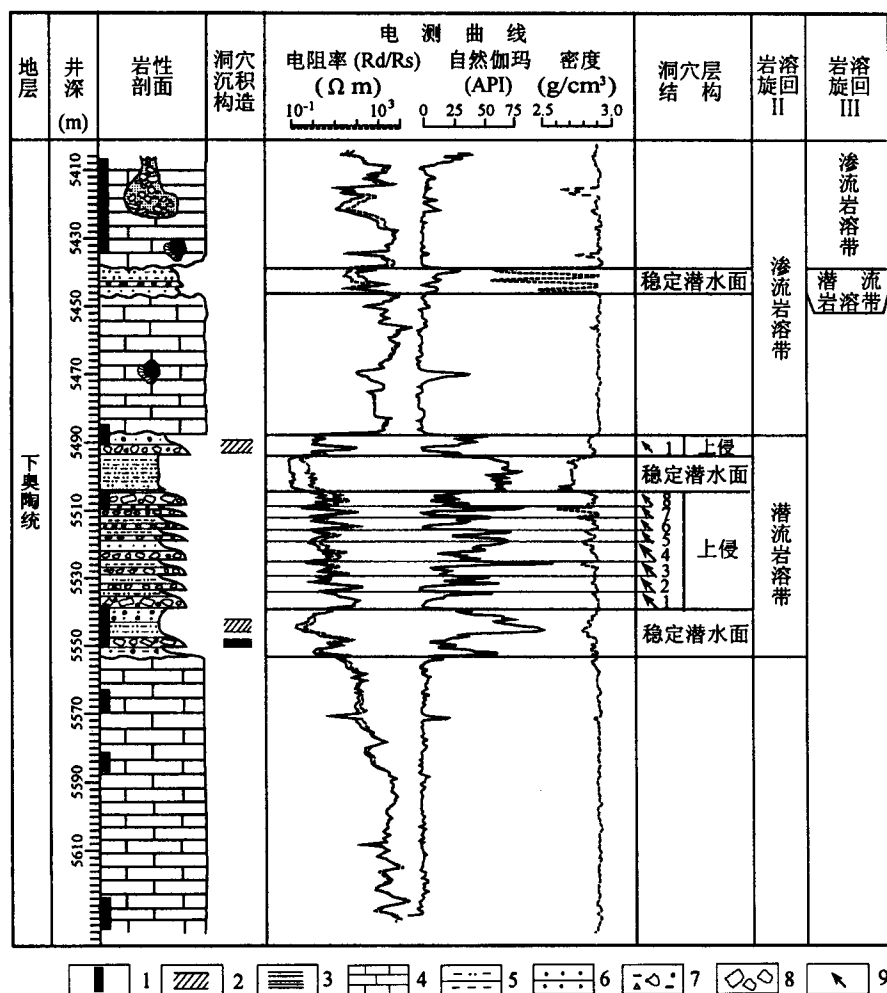


图3 塔河油田T403井岩溶旋回划分及洞穴沉积层结构

Fig. 3 The inner cave sedimentary configuration and division of paleokarst cycles of well T403, Tahe oilfield

1—取心段; 2—斜层理; 3—平行层理; 4—灰岩; 5—泥岩、粉砂质泥岩; 6—砂岩; 7—岩溶角砾与陆源碎屑;

8—坍塌角砾; 9—上侵岩溶形成的塌积旋回

1—Coring interval; 2—oblique bedding; 3—parallel bedding; 4—limestone; 5—mudstone, siltstone; 6—sandstone; 7—karst breccias mixed with fluvial deposits; 8—collapsed breccias; 9—collapsing and sedimentary cycle caused by upward karstification

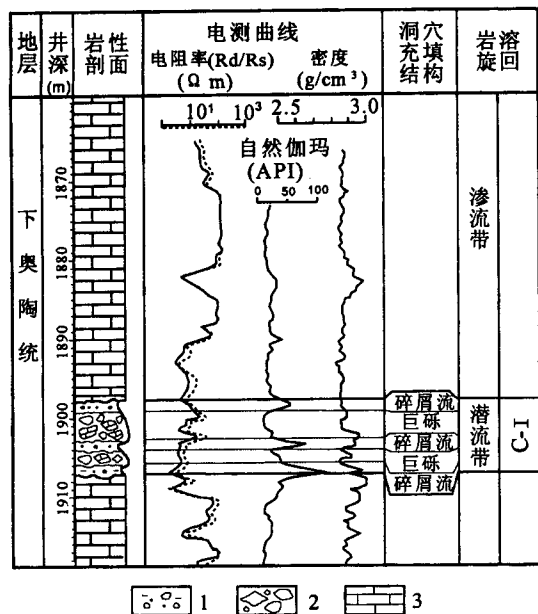


图4 和田气田 M8井洞穴层划分及洞穴充填结构
Fig. 4 Inner cave sedimentary configuration and division of cave horizon of the well M8 in Hotan river gas field

1—岩溶角砾与陆源碎屑; 2—坍塌角砾; 3—灰岩
1—Karst breccias mixed with fluvial deposits; 2—collapsed breccias; 3—limestone

升过程中形成, 时间上早于东河砂岩沉积期, 还有学者认为加里东中期风化壳岩溶对洞穴层形成有重要影响, 这主要是因为两种序列的洞穴层的时间差相对于其古老的地质年代又显的非常短, 用同位素、洞穴沉积物化石、次生矿物裂变经迹等方法测定的年代其误差均超出两种不同序列的时间差。所以, 目前还不能通过测年的方法来验证, 只能通过古岩溶地质条件、洞穴充填结构等其他直接或间接的证据进行求证。

笔者认为, 该洞穴层序列为下老上新的海进序列, 其主要依据如下:

(1) 构造演化分析表明(徐国强等, 2005), 在加里东中期(早奥陶世末), 塔北地区整体抬升暴露地表, 古地形高差小, 时间短, 所以地层剥蚀少, 发育了大量溶蚀孔洞, 但远未达到发育成熟岩溶期, 不具备发育大型洞穴层条件; 加里东中晚期(奥陶纪末), 塔北地区抬升隆起, 但由于残留上奥陶统, 风化壳岩溶不发育; 志留纪—泥盆纪, 塔北处于沉积中心(朱筱敏等, 2002); 早海西期, 塔北地区强烈隆升, 阿克库勒鼻凸构造形成, 并发育大量小断层和构造裂缝(顾家裕等, 2001; 林忠民, 2002), 其隆升幅度超过

4000m, 中、下奥陶统上覆地层的累计厚度超过2000m, 但中、下奥陶统上部灰岩的剥蚀厚度(包括早石炭世的剥蚀厚度)却不足250m, 从被剥蚀地层厚度与构造抬升剥蚀的延续时间关系可以看出: 当下奥陶统碳酸盐岩暴露地表进入化学溶蚀期, 应该处于早海西期多幕次构造抬升和剥蚀活动的末期, 因此, 在阶段性抬升过程中由于可溶蚀地层尚未出露地表而难以发育上老下新多期次的洞穴层, 洞穴层发育期应该是在早海西期幕次构造抬升活动基本结束之后形成的。

(2) 东河砂岩的母岩主要是志留系砂岩(顾家裕, 1996; 朱筱敏等, 2002), 在凸起周边的得哈拉哈塘、草湖岩溶盆地沉积东河砂岩时, 阿克库勒凸起作为物源区应该残存志留系, 表明在东河砂岩沉积初期, 轮南断裂以南地区下奥陶统岩溶地层至少尚未全部暴露地表, 轮南地区的大规模岩溶起始时间最早应该在东河砂岩开始沉积以后。

(3) 轮南地区许多洞穴层钻遇井(如 LX2井、LN12井、T403井等), 洞穴内的塌积角砾与地下河沉积呈互层产出, 反映潜流的上侵岩溶与洞底沉积同时进行(郭建华, 1993), 是在潜水面边上升、边溶蚀、边充填过程中形成的。多旋回“塌积角砾—地下河沉积”(图3)则代表一种持续向上的侵蚀岩溶作用。S14井 C-Ⅱ-1 洞穴(图6)内岩溶角砾杂基中的孢粉化石的时代为早石炭世杜内期(肖玉茹等, 2003), 根据上述洞穴形成与洞底沉积同时进行的结论可以推断, 上侵岩溶洞穴是在早石炭世形成的。从潜水面洞穴到上侵岩溶洞穴的连续发育(图3), 表明与之对应的海平面变化经历了一个从相对稳定海平面时段(高水位期)过渡到海平面快速上升时段(海进期), 从而揭示了在洞穴层形成过程中海平面的阶段性上升变化, 表明洞穴层是在早石炭世阶段性海平面上升过程中形成的。

(4) 晚泥盆世—早石炭世, 伴随海平面的间歇性持续上升, 阿克库勒凸起已完全具备发育多期次大型洞穴层的地质条件。内在条件: ①东河砂岩开始沉积后碳酸盐岩陆块大面积暴露; ②鼻凸构造背景使得块状碳酸盐岩内部小断层、裂缝大量发育(顾家裕等, 2001); ③鼻凸构造背景使得该地区形成阶状斜坡式岩溶古地貌(图7)。外部条件: ①从东河砂岩沉积开始(朱怀诚等, 1996, 2002)至早石炭世末阿克库勒凸起被淹没, 延续时间为17Ma, 而一个岩溶洞穴的形成时间只需1~1000 a (任美镔等, 1983), 表明在早石炭世有足够的时间发育多个期次的岩溶洞

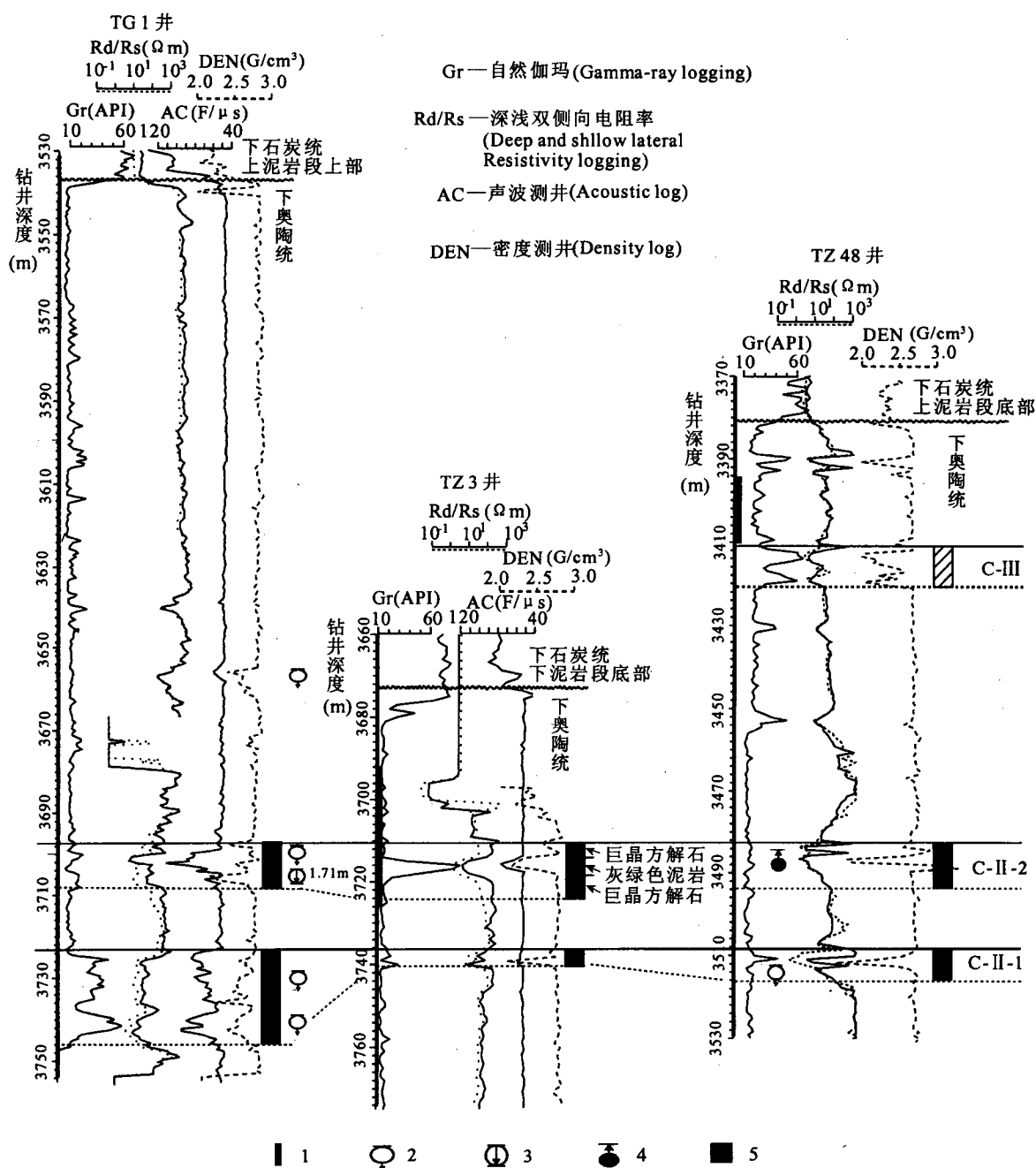


图5 塔中地区不同潜山洞穴层对比

Fig. 5 The correlation of caves among different hurried hills in the Tazhong area

1—取心段;2—井漏;3—放空;4—井涌;5—洞穴;C-II-1、C-II-2、C-III—洞穴层编号;下石炭统岩性段划分与图2对应

1—Coring interval; 2—mud-loss; 3—drill fall; 4—blowout; 5—cave; C-II-1, C-II-2 and C-III—cave horizons;

the lithostratigraphic units in Lower Carboniferous correspond to Fig. 2

穴层;②晚泥盆世至早石炭世,盆地总体处于半干旱环境(叶德胜等,2000),但期间曾有多期温暖潮湿气候期。因为下石炭统上、下、底泥岩段(图2)内的生物化石、有机质含量较之志留系、泥盆系明显增多。尤其是生屑灰岩,其有机质含量、生物化石的数量和种类都明显增多(朱怀诚等,2002),锶同位素分析揭示

其沉积期的平均古海水温度为25℃(朱如凯等,2002),在生屑灰岩沉积期,塔北地区河流搬运大量陆源碎屑进入海盆沉积(图2),表明当时塔北地区气候温暖潮湿(郭建华等,2004),降雨量大,河流水动力强;③从晚泥盆世至早石炭世,海平面的阶段性上升为碳酸盐岩陆块内部发育多个下老上新稳定潜

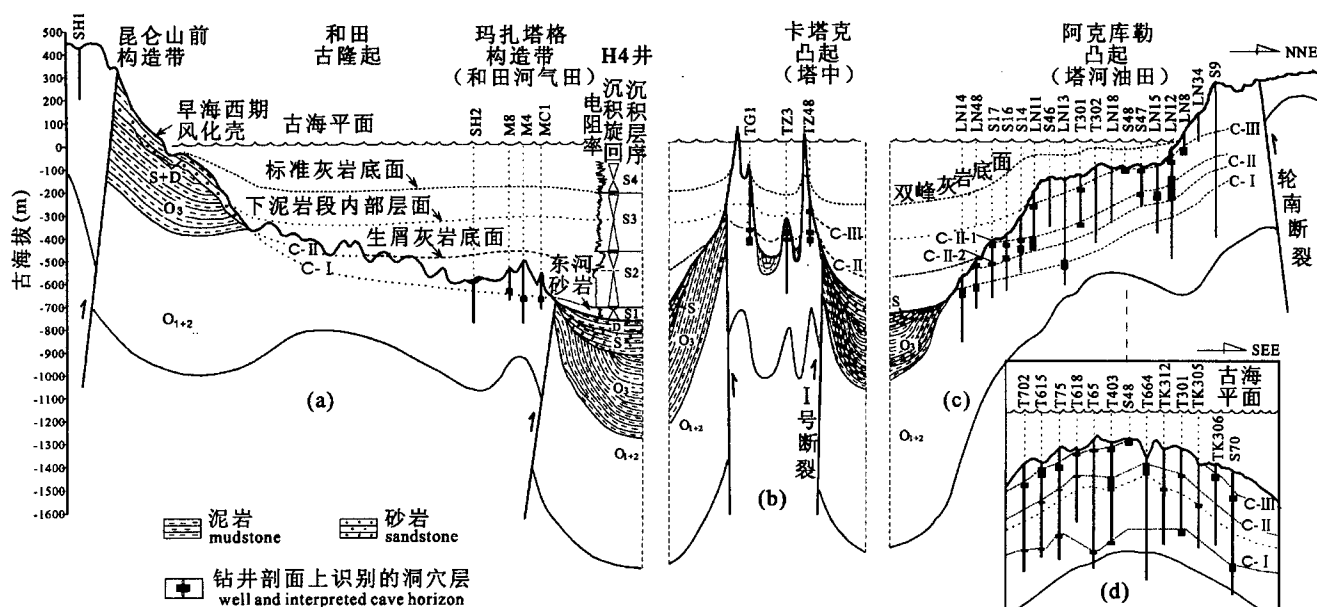


图6 塔里木盆地和田、塔中、塔北古隆起早海西期多期次风化壳岩溶洞穴层对比剖面图

Fig. 6 Reconstructed cross section across the Hotan, Tazhong and Tabei uplift in the Tarim basin, showing the correlation of multiple cave horizons developed in the Early Hercynian. It was reconstructed by the interval thickness between the bottom surface of double peak limestones (or standard limestones in Tabei region) and Early Hercynian unconformity interface, hence, it shows the paleogeologic features at the end of the Early Carboniferous

(a)—和田地区;(b)——塔中地区;(c),(d)——分别为塔北地区过 S48 井近南北、东西向连井剖面;图中海平面根据标准灰岩(塔北称双峰灰岩)底面恢复,反映早石炭世末标准灰岩沉积初期的地层构造形态及洞穴层分布;塔北地区洞穴层划分数据部分来自叶德胜等,2000;资料截止2003年底;C-I、C-II、C-III 为下老上新的3个洞穴层编号

(a)——SW—NE cross section in Hotan region across wells; (b)——south-north section in the Tazhong region across wells; (c), (d)——individually the SW—NE and NW—SE cross section through central well S48 in the Tabei region; part of the data about the cave division in the Tabei region after Ye Desheng et al., 2000; data to the end of 2003; C-I、C-II、C-III represents the three cave horizons

水面及洞穴层序列提供了外在条件。

综上,塔河油田的3个期次的洞穴层是在早石炭世阶段性的海平面上升过程中形成的,洞穴层的序次为下老上新。

4 洞穴层跨地区对比

4.1 洞穴层与洞穴等时层的时空对应关系

与潜水面洞穴层同时期形成的沉积地层称之为洞穴等时层(简称等时层)。洞穴层与等时层的时空对应关系是盆地内洞穴层跨地区对比的主要依据。

(1)时间对应关系:在阶段性海平面上升过程中形成的沉积层序,其海进体系域(TST)为海平面快速上升时间段形成的一连串沉积体系组合(Vail, 1988),在该时段中,盆地边缘及盆内小岛碳酸盐岩内部的潜水面将随海平面快速上升而上升,它所经过的任何一个面由于停留时间短暂而难以发育潜水面洞穴层;而高水位体系域(HST)为间歇性海平面

上升过程中相对稳定时间段的一连串沉积体系组合,在该时间段中,潜水面将随海平面长期相对稳定而稳定,从而使得潜水面长期处于同一个位置,通过潜流的长期溶蚀、机械冲刷和搬运,形成潜水面洞穴层。因此,从时间上看,潜水面洞穴层发育期与沉积层序的高水位体系域沉积期对应。

(2)空间对应关系:稳定海平面与稳定潜水面具有空间对应关系(图7)。最大海泛面为海进体系域与高水位体系域的分界面,是海平面间歇性上升过程中进入相对稳定时段的起始点,代表最大海泛面沉积层的海岸上超点与洞穴层(稳定潜水面)在海岸附近出口点应该大致处于同一个位置或相同古高程(图2)。所以,从空间上看,潜水面洞穴层与最大海泛面的标志层面具有空间对应关系。另外,同一个海平面快速上升时期形成的潜水面洞穴层间距与最大海泛面间距也存在匹配关系。

(3)洞穴层所对应的等时沉积地层:根据上述稳

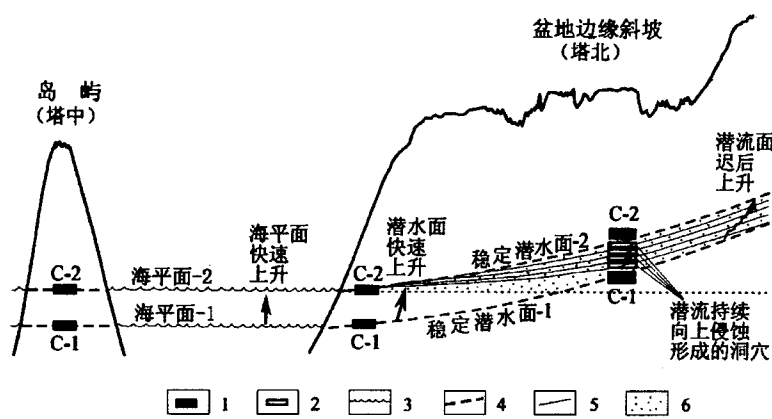


图7 塌积层序成因模式示意图

Fig. 7 Schematic cross section showing the dynamic mechanism of multicyclic collapse sequences and aggradational caves

1—稳定潜水面洞穴; 2—潜流向上侵蚀岩溶形成的洞穴; 3—古海平面; 4—古稳定潜水面; 5—迟后于潜水面上升的潜流面; 6—潜流面上升迟后带
1—Cave developed along the standing water table; 2—cave developed in the process of successive upward erosion of underflow; 3—paleo-sea level; 4—standing water table; 5—underflow surface delayed to the abrupt rising of water table; 6—lag zone of underflow

定潜水面洞穴层与洞穴等时层的时空对应关系,可以大致推断,洞穴层C-I、C-II、C-III发育期分别与下石炭统的沉积层序S1沉积期及S2、S3的高水位体系域沉积期对应。因此,洞穴层C-I、C-II、C-III的等时沉积地层分别为东河砂岩段、生屑灰岩段、下泥岩段的高水位体系域(图2)。

在3个洞穴层中,底部这套洞穴层比较特殊。因为盆地边缘碳酸盐岩陆块或岛屿内部的潜水面通常受周围隔水层控制,它与海平面的升降变化相关性较差。在东河砂岩沉积过程中,只要海平面未上升至泥岩隔层所控制的最低出水口,潜水面会一直稳定在同一个最低位置。因此,洞穴层C-I的形成有可能与整个东河砂岩段地层的沉积过程相伴,这么漫长的时间与洞穴层C-I为初始洞穴层形成时间相对较长是互相吻合的。

4.2 洞穴层C-II内部双层洞穴的成因

从洞穴层C-II的横向对比可以看出(图6),它在塔中孤立小岛、塔北斜坡近岸带为两层,而在塔北斜坡带内陆地区,如LN11井、T403井、LN12井等,则变为一巨厚洞穴层(图3,图6d),并在其内部发育多旋回的“坍塌角砾-地下河沉积”组合(图3),我们把这种组合称之为塌积层序,与之对应的岩溶及沉积旋回称之为塌积旋回。由于洞穴底部的连续沉积往往代表基底下沉或水位上升(任美镔等,1983; Choquette, 1988),因此,多旋回塌积层序应该是在

基底下沉或海平面上升过程中,由于侵蚀基准面上升导致洞顶持续向上生长及同时发生的洞底持续沉积的结果。据此,我们根据海平面上升过程中,潜水面和潜流面在小岛、斜坡带近岸带、斜坡内陆区的不同变化方式建立塌积层序的成因模式(图7),它可以很好地解释洞穴层C-II内部双层洞穴的成因。

如图7所示,在其他岩溶条件都具备时,当海平面的变化从稳定海平面-1快速上升到稳定的海平面-2,其结果是,在海平面-1稳定期,将发育与稳定海平面-1对应的稳定潜水面-1及洞穴层C-1。当海平面快速上升时,潜水面将随海平面快速上升而上升。在上升过程中,小岛内部、斜坡近岸带的主要潜水流面与潜水面保持一致,而在斜坡内陆地区,由于老的洞穴层-1高出新的海平面,使得内陆区老的洞穴底部到海岸附近地下河出口还存在水流高差势能,加上潜流总是优先选择大的管道流动(Choquette, 1988; Ognjen Bonacci, 1995; David et al., 1995),所以,潜流将继续在斜坡带内陆地区老的洞穴中流动,迟后于潜水面上升。我们把界于两个稳定潜水面之间,同时又高出海平面-1的区域称之为潜流面上升迟后带(简称迟后带)。在迟后带内,潜流将不断地冲顶溶蚀、机械冲刷,从而导致洞顶的坍塌,而坍塌的角砾会连同陆源碎屑流在洞底混积,并在坍塌角砾层之上接受暗河沉积,这个过程将周而复始地循环进行,直到迟后带内的潜流面抵达稳定潜水面-2或稳定潜水面-2上新的洞穴层初步形成为止。从而在洞穴内沉积多旋回的塌积层序。

在两个稳定潜水面洞穴层间距较小情况下,在老洞穴之上持续向上发育可以贯穿潜水面洞穴。如T403井(图3),在5188~5253m洞穴层中,上下各有一个高为10m左右,完全为地下河沉积物充填的潜水面洞穴层,中间一段高32m,被8个塌积层序充填,为发育在底部潜水面洞穴之上的上侵岩溶洞穴。所以,洞穴层C-II实际上为两层间距较小的潜水面洞穴,只是斜坡内陆区两个潜水面洞穴层被上侵岩溶洞穴连成一体而已。

值得特别指出的是,洞穴层C-II的等时层生屑灰岩,它所反映的海平面变化与上述成因模式中的海平面变化基本相符。据盆地中心H4井揭示(图6),生屑灰岩分上、中、下3个小段,上下两个灰岩小段间

为一厚约2 m的薄层泥岩。生屑灰岩的上下两个小段灰岩指示两个高水位时期的海平面稳定期(郭建华等,2004),与C-Ⅱ-1及C-Ⅱ-2发育期的所必须的两个稳定潜水面相对应,而从下面一个小段的浅滩相介壳灰岩突变为中间一个深水相薄层黑色泥岩小段则代表一次海平面突然快速上升。

4.3 盆地内跨地区的洞穴层对比

根据早海西期风化壳岩溶洞穴层的下老上新序次关系以及洞穴等时层在盆地范围内空间上的连续性,可以推断塔中、和田地区洞穴层与塔北地区洞穴层C-Ⅰ、C-Ⅱ、C-Ⅲ的对应关系,并对洞穴层进行盆地范围内跨地区对比(图6)。

(1)和田古隆起北倾伏端玛扎塔格构造带,由于M4井、M8井、MC1井的早海西期风化壳之上直接覆盖地层为下石炭统底泥岩段底部或东河砂岩段顶部地层,表明在生屑灰岩段、下泥岩段沉积时,M4井、M8井、MC1井潜山早已埋于地下,和田古隆起北倾伏端只能发育与东河砂岩沉积期对应的洞穴层C-Ⅰ。在和田古隆起向南逐渐抬起的古斜坡上(徐希坤等,2003),下石炭统由北向南逐层超覆,表明古隆起中南部,在生屑灰岩、下泥岩段沉积期还暴露地表,风化壳内部可以发育洞穴层C-Ⅱ、洞穴层C-Ⅲ,但由于现今埋深都在7000m以上,很难通过钻井验证。

(2)如上所述,TZ48井、TA3井、TZ3井潜山内部具有双层结构的洞穴层为同一个期次形成的洞穴层,由于TZ3井的风化壳上覆地层为下泥岩段底部,洞穴层在风化壳内的钻井深度(图5)与上覆下泥岩段底部至生屑灰岩的厚度所恢复的古深度大致相同,从地震剖面上可以看到生屑灰岩超覆在TZ3井低幅潜山腰部^①,表明该洞穴层的地下河出水口与生屑灰岩的上超点古高程大致相同(图6a),另外,该洞穴层的双层结构与塔北地区斜坡近岸带的C-Ⅱ特征相似,由此推断塔中地区具有双层结构的洞穴层与塔北地区的洞穴层C-Ⅱ对应,它们都是在生屑灰岩沉积期形成的。根据下老上新的洞穴层序次及洞穴层间距匹配关系推断,TZ48井3411~3420m井段洞穴层与塔北洞穴层C-Ⅲ对应。塔中地区洞穴层C-Ⅰ数量偏少,可能与该地区钻井少尚未发现、塔中地区中西部多口探井中白云岩地层中的潜水面洞穴层不易确定有关;而洞穴层C-Ⅲ相对不发育,可能主要与海平面上升后潜山岛屿的范围缩小,大气水补给非常有限有关。

5 结论

(1)塔里木盆地在早海西期岩溶期,盆地边缘碳酸盐岩陆块、潜山内部发育了上、中、下3套大型洞穴层,洞穴层的序次为下老上新。

(2)底部洞穴层C-Ⅰ主要形成于早石炭世东河砂岩沉积期,形成时间长,空间位置主要受隔水层控制。

(3)中间一套洞穴层C-Ⅱ形成于早石炭世生屑灰岩段沉积期,在塔中潜山岛屿及塔北的斜坡近岸斜坡带分上下两层潜水面洞穴层,其间约30m的间距代表生屑灰岩沉积过程中的一次海平面小幅度快速上升;在塔北斜坡带内陆地区,上下两层潜水面洞穴层间可以被上侵岩溶洞穴连成一体,构成一个巨厚的复合洞穴层。

(4)上部一套洞穴层C-Ⅲ形成于早石炭世下泥岩段上部高水位沉积期(图2)。在塔北地区广泛发育,塔中地区大部分潜山已淹没,个别仍然暴露的潜山因为岛屿面积小,缺少足够的大气水供应而不发育或规模很小。和田古隆起的中、南带古岩溶地质条件与塔北地区相似,具有发育洞穴层C-Ⅰ、C-Ⅱ、C-Ⅲ的条件。

(5)巨厚洞穴内的多旋回“坍塌角砾-暗河沉积”组合是海平面快速上升后斜坡内陆区潜流面相对于潜水面迟后上升,在老的洞穴带基础上潜流持续向上侵蚀岩溶的结果。

(6)在早海西期风化壳岩溶期,盆地内部的潜山岛屿、盆地边缘斜坡带的碳酸盐岩陆块内部发育的洞穴层及岩溶旋回、盆地内部的沉积层序都受海平面升降周期变化控制。洞穴层与其同时期(海平面稳定期)形成的沉积地层具有时间、空间上的对应关系。利用这种关系,可以对洞穴层进行跨地区的对比、确定大规模岩溶的地质年代、预测洞穴层的发育分布。

致谢:在长达5年的研究过程中,得到了中石化所属的胜利有限公司、西北分公司、河南分公司、勘探开发研究院,中国地质大学相关领导和协作者的大力帮助,在此一并表示感谢。

注 释

① 刘树根,徐国强,李国蓉,等. 2001. 和田古隆起形成演化及油气有利勘探区块选择. 中石化胜利有限公司科研报告.

② 李国蓉,刘存草,徐国强,等. 2002. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用研究. 中石化石油勘探开发研究院成果报告.

③ 徐国强,李国蓉,赵锡奎,等. 2002. 卡塔克隆起古岩溶地质条件研

究.中石化河南石油勘探开发研究院成果报告.

- ④ 李国蓉,徐国强,刘家铎.2003.卡塔克隆起外围区油气地质条件评价与勘探靶区研究.“十五”国家科技攻关成果报告.
- ⑤ 徐国强,刘树根,李国蓉,等.2004.和田古隆起有利储集相带及圈闭综合评价.中石化胜利有限公司科研报告.

参 考 文 献

- 顾家裕.1996.塔里木盆地石炭系东河砂岩沉积环境分析及储层研究.地质学报,70(2):153~161.
- 顾家裕,周兴熙,等.2001.塔里木盆地轮南潜山岩溶及油气分布规律.北京:石油工业出版社.
- 顾家裕,张兴阳,方辉.2002.塔里木盆地地下古生界深埋风化壳岩溶油储特征及成因分析.地质学报(英文版),76(4):494~502.
- 郭建华.1991.塔北轮南南奥陶统裂缝-溶洞系统.江汉石油学院学报,13(4):1~10.
- 郭建华.1993.塔里木盆地轮南地区奥陶系潜山古岩溶及其所控制的储层非均质性.沉积学报,11(1):56~64.
- 郭建华.1996.塔北、塔中地区下古生界深埋藏古岩溶.中国岩溶,15(3):207~216.
- 郭建华,王明艳,蒋小琼,等.2004.塔里木盆地塔中和满西地区石炭系层序地层.中南大学学报(自然科学版),35(1):122~128.
- 何发歧.2002.碳酸盐岩地层中不整合-岩溶风化壳油气田.地质论评,48(4):391~397.
- 康玉柱.1989.塔里木盆地油气勘查获巨大成果.石油天然气地质,10(3):276~282.
- 林忠民.2002.塔里木盆地塔河油田奥陶系大型油气藏形成条件.地质论评,48(4):371~376.
- 任美镔,刘振中.1983.岩溶学概论.北京:商务印书馆.
- 田纳新,徐国强,胡志方.2004.塔中地区早海西期风化壳古地貌特征.河南石油,18(1):1~4.
- 王嗣敏,金之钧,解启来.2004.塔里木盆地塔中45井区碳酸盐岩储层的深部流体改造作用.地质论评,50(5):543~547.
- 肖玉茹,王敦则,沈杉平.2003.新疆塔里木盆地塔河油田奥陶系古洞穴型碳酸盐岩储层特征及其受控因素.现代地质,17(1):92~98.
- 徐国强,刘树根,李国蓉,武恒志,闫相宾.2005.塔中塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比.石油与天然气地质,26(1):印刷中.
- 徐希坤,刘树根,黎剑,徐国强.2003.和田古隆起早海西古地貌恢复.特种油气藏,10(3):32~35.
- 闫相宾,韩振华,李永宏.2002.塔河油田奥陶系油藏的储层特征和成因机理探讨.地质论评,48(6):629~626.
- 闫相宾,张涛.2004.塔河油田碳酸盐岩大型隐蔽油藏成藏机理探讨.地质论评,50(4):370~376.
- 叶德胜,王根长,林忠民,等.2000.塔里木盆地北部寒武系-奥陶系碳酸盐岩储层特征及油气远景.成都:四川大学出版社,49~72.
- 张光亚.2000.塔里木古生代克拉通盆地形成演化与油气关系.北京:地质出版社.
- 张光亚,宋建国.1998.塔里木克拉通盆地改造对油气聚集和保存的控制.地质论评,44(5):511~521.
- 朱怀诚,赵治信,刘静江.1999.塔里木盆地泥盆系-石炭系界线研究.地质论评,45(2):125~128.
- 朱怀诚,罗辉,王起飞.2002.论塔里木盆地“东河砂岩”的地质时代.地层学杂志,26(3):197~201.
- 朱如凯,罗平,罗中.2002.塔里木盆地石炭系碳酸盐岩同位素地球化学特征.新疆石油地质,23(5):382~384.
- 朱筱敏,王贵文,谢庆宾.2002.塔里木盆地志留系沉积体系及分布特征.石油大学学报(自然科学版),26(3):5~11.

References

- Choquette P W. 1988. Introduction. In: Paleokarst. New York: Springer-Verlog, 1~22.
- David A Budd, Arthur H Saller, Paul M Harris. 1995. Unconformities and porosity in carbonate strata. AAPG Memoir 63: 1~313.
- Gu Jiayu. 1996. Sedimentary environment and reservoir characters of the Carboniferous Donghe sandstones in the Tarim basin. Acta Geologica Sinica, 70(2):153~161.
- Gu Jiayu, Zhou Xinx, et al. 2001. Tarim basin Lunna buried hill and occurrence of oil and gas. Beijing: Petroleum Industry Press, 67~187 (in Chinese).
- Gu Jiayu, Zhang Xinyang, Fang Hui. 2002. Characteristics and generation of the deep buried oil reservoirs in the Lower Paleozoic weathering crusts in Tarim basin. Acta Geologica Sinica (English version), 76(4):494~502.
- Guo Jianhua. 1991. The crack-cave system of Lower Ordovician in Lunnan region, Tarim basin. Journal of Jianhan Petroleum Institute, 13(4): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jianhua. 1993. Burial hill paleokarst and its controlled reservoir heterogeneity in Ordovician, Lunnan region of Tarim basin. Acta Sedimentologica Sinica, 11(1):56~64 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jianhua. 1996. On the paleokarst of Lower Paleozoic Group, Tabei and Tazhong regions of Tarim basin. Carsologica Sinica, 15(3): 207~216 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jianhua, Wang Mingyan, Jiang Xiaoqiong, et al. 2004. Sequence stratigraphy of the Carboniferous in Tazhong and Manxi areas of Tarim Basin. J. Cent. South Univ. (Natural Science), 35(1):122~128 (in Chinese with English abstract).
- He Faqi. 2002. Karst weathering crust oil-gas field on carbonate unconformity: An example from the Tahe oilfield in the Ordovician reservoir in the Tarim Basin. Geological Review, 48(4): 391~397 (in Chinese with English abstract).
- Kang Yuzhu. 1989. Great success in oil and gas investigation in Tarim basin. Oil and Gas Geology, 10(1): 276~282 (in Chinese).
- Lin Zhongmin. 2002. Formation condition of large-scale oil-gas pool in Ordovician carbonate rock in the Tahe oil field, Tarim basin. Geological Review, 48(4): 371~376 (in Chinese with English abstract).
- Ognjen Bonacci. 1995. Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia). Journal of Hydrology, 165: 113~134.
- Ren Meier, Liou Zhenzhong. 1983. Fundamentals of karst. Beijing: Business Organization Press.
- Tian Naxin, Xu Guoqiang, Hu Fangzhi, et al. 2004. Paleogeomorphology features of Early Hersinian weathering crust in Tazhong area. Henan Petroleum, 18(1): 1~4 (in Chinese with English abstract).
- Vail P R. 1988. Sequence stratigraphy workbook, fundamentals of sequence stratigraphy. In: AAPG Annual Convention Short Course. Houston, Texas.
- Wang Simin, Jin Zhijun, Xie Qilai. 2004. Transforming effect of deep fluids on carbonate reservoirs in the well TZ45 region. Geological Review, 50(5): 543~574.
- Xiao Yuru, Wang Dunze, Shen Shanping. 2003. The characteristics

- of paleocave carbonate reservoir and its control factors in Ordovician of the Tahe oilfield in the Tarim basin, Xinjiang. *Geoscience*, 17: 92~98 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guoqiang, Liou Shugen, Li Guorong, et al. 2005. The correlation of tectonic evolution and petroleum geological factors between Tazhong and Tabei paleo-uplift, Tarim basin. *Oil and Gas Geology*, 26(1): in press (in Chinese with English abstract).
- Xu Xikun, Liu Shugen, Li Jian, Xu Guoqiang, Yang Junchao. 2003. The Reconstruction of paleogeomorphology of Early Hercynian weathering crust on Hetian paleo-uplift. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 10(3): 32~35 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xiangbin, Han Zhenghua, Li Yonghong. 2002. Reservoir characteristics and formation mechanisms of the Ordovician carbonate pools in the Tahei oil field. *Geological Review*, 48(6): 629~626 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xiangbin, Zhang Tao. 2004. The discussion of generating model for Tahe giant carbonate subtle oil pool. *Geological Review*, 50(4): 370~376 (in Chinese with English abstract).
- Ye Desheng, Wang Changgen, Lin Zhongmin, et al. 2000. Reservoir characteristics and hydrocarbon perspective of Cambrian to Ordovician in north part of Tarim basin. Chengdu: Sichuan University Press, 49~72 (in Chinese).
- Zhang Guanya. 2000. The relationship between basin evolution and hydrocarbon of Tarim Craton Paleozoic basin. Beijing: Geological Publishing house (in Chinese).
- Zhang Guangya, Song Jianguo. 1998. Control of basin reworking on hydrocarbon accumulation and preservation in the Tarim cratonic basin, Northwest China. *Geological Review*, 44(5): 511~521.
- Zhu Huaicheng, Zhao Zhixin, Liu Jingjiang. 1999. Notes on the Devonian--Carboniferous boundary in the Tarim basin. *Geological Review*, 45(2): 125~128.
- Zhu Huaicheng, Luo Hui, Wang Qifei. 2002. The age of the Donghe sandstone in the Tarim basin. *Journal of Stratigraphy*, 26(3): 197~201 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rukai, Luo Ping, Luo Zhong. 2002. The isotope geochemical characteristics of Carboniferous carbonate in Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23(5): 382~384 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaomin. 2002. Characteristics and distribution of depositional systems of Silurian in Tarim basin. *Journal of the University of Petroleum (Natural Science)*, 26(3): 5~11 (in Chinese with English abstract).

Multiple Karst Cave Horizons in the Early Hercynian Weathering Crust in the Tarim Basin

XU Guoqiang¹⁾, LI Guorong^{1,2)}, LIU Shugen^{1,2)}, WU Hengzhi³⁾, TIAN Naxin⁴⁾, LI Zhiwu¹⁾

1) *Institute of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059*

2) *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu, 610059*

3) *Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC, Beijing, 100083*

4) *China University of Geosciences, Beijing, 100083*

Abstract

Cave horizons are an indicator of recognizing multiple karst cycles, and a linkage between karst cycles and sedimentary sequences and cycles of sea level change. Based on the principle that caves develop along the water table in a condensed carbonate land, cave horizons are correlated and caves identified from wells are reconstructed in paleogeomorphic sections. The order of cave horizons is deduced with evidence from the study of geological conditions of paleokarst and inner cave sediments configuration. A correlation of cave horizons across different carbonate lands in this basin is made in accordance with the relationship between synchronous beds and cave horizons in time and space. A systematic model is introduced for interpreting the differences of caves developed on island, near shore and inland of slopes. The results of this study indicate that three cave horizons were developed in the Lower to Middle Ordovician in the Tabei, Tazhong and Hotan uplifts during the Early Hercynian. Younger upward, they are developed during the intermissive rising of sea level in the Early Carboniferous. Their synchronous beds correspond to the Donghe sandstones, bioclastic limestones and lower mudstones (the highstand systems tracts of three sedimentary sequences in the Early Carboniferous). The multicyclic "collapsed breccias interbedded with underflow sediments" were caused by the rising of underflow surface posterior to the rising of water table in the inland of basin marginal slope, which is caused by abrupt rising of sea level. The relationship between the synchronous beds and the cave horizons in time and space is significant in dating paleokarst events and predicating cave horizons.

Key words: Tarim Basin; Early Hercynian; weathering crust; paleokarst; cave horizon