

文章编号: 1000-0550 (2005) 02-0316-07

海平面周期性升降变化与岩溶洞穴层序次关系探讨

徐国强^{1,2} 刘树根^{1,2} 武恒志³ 李智武¹ 孙 玮¹

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

3 (中国石油化工集团公司石油勘探开发研究院西部分院 北京 100083)

摘要 层序地层学理论为全球或跨地区的等时地层对比提供了理论和技术方法,它对洞穴层的跨地区对比及序次分析同样适用。从洞穴层的发育期总是与水平面稳定期对应关系出发,通过水平面周期性升降变化与岩溶洞穴层序次关系研究,探索层序地层学与岩溶学交叉学科研究领域的一些基本问题。认为同一个水平面稳定期发育的所有水平洞穴可形成一个跨地区对比的洞穴层,岩溶旋回包括侵蚀基准面上升和下降两种旋回,在海平面的间歇性上升(或下降)过程中可以发育多个水平洞穴层及下老上新(或上老下新)的洞穴层序列。在总结前人研究成果及美国 YATE 油田、四川峨眉山剖面、塔河油田实例分析基础上,概括了 3 种受海平面间歇性上升(或下降)变化控制的洞穴层序次模式,包括层序地层内部同生期岩溶形成的下老上新的洞穴层序次,以及碳酸盐岩陆块近地表风华壳岩溶形成的上老下新和下老上新的洞穴层序列。利用塔河油田早海西期古岩溶地质条件、洞穴充填结构等直接和间接证据,求证该洞穴系统的洞穴层序次,指出该特大洞穴系统为晚泥盆—早石炭世海平面间歇性上升过程中形成的下老上新的洞穴层序列,并由此推测塔里木盆地早海西期大规模岩溶的时代。指出利用水平洞穴层同时期形成的沉积地层等地质体可以确定洞穴层的形成年代,预测洞穴的发育分布。

关键词 层序地层学 古岩溶 洞穴层序次 沉积层序 等时对比

第一作者简介 徐国强 男 1964 年出生 副教授 石油地质

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

1 引言

1988 年以来, P. R. Vail 等创立的层序地层学理论^[1]在地学研究及矿产勘探中得到快速的发展与应用。但是,在古岩溶学研究方面的应用却非常少。层序地层学与岩溶学交叉学科研究目前还是一个较新的研究领域。本文从海平面稳定期发育洞穴层出发,通过海平面间歇性上升(或下降)过程中沉积旋回与岩溶旋回、沉积旋回序列与岩溶旋回序列的关系分析,探讨海平面的周期性升降变化对洞穴层及其序次的控制作用,探索层序地层学与岩溶学交叉学科研究领域的一些基本问题。

2 洞穴层及岩溶序次

在缺少隔水层的碳酸盐岩陆块或岛屿内部,潜水面随水平面变动,水平面的快速上升(或下降)都会导致潜水面因为在某一点停留时间短而难以形成洞穴层,只有当水平面长期稳定时,潜水面才能长期稳定而发育洞穴层。本文中的洞穴层仅指大气水环境

中潜水面附近形成的水平洞穴。在同一个时期,同一个潜流面附近跨地区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,可以利用其等时性进行跨地区横向对比,它们可以组合成一个代表古潜水面的洞穴层面。同一时期形成的分布于同一个稳定潜水面附近的水平洞穴所构成的洞穴集合体称之为洞穴层。

3 水(海)平面的周期性升降变化与洞穴层序次的关系

由一次较大幅度的侵蚀基准面下降所发育的溶蚀作用,称之为一个岩溶旋回^[2,3,4]。笔者认为,岩溶旋回还应该包括由一次较大幅度的海平面相对上升所发育的岩溶作用。因此,多次的侵蚀基准面下降(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关系为洞穴层序次。从理论上讲,洞穴层序次有 2 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(图 1a);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(图 1b)。下老上新序次的洞穴层

既可以发育在盆地边缘或潜山的碳酸盐岩陆块内部(图 1b),也可以发生在层序地层内部短期暴露地表的碳酸盐岩岛屿内部^[5],图 1c所示。

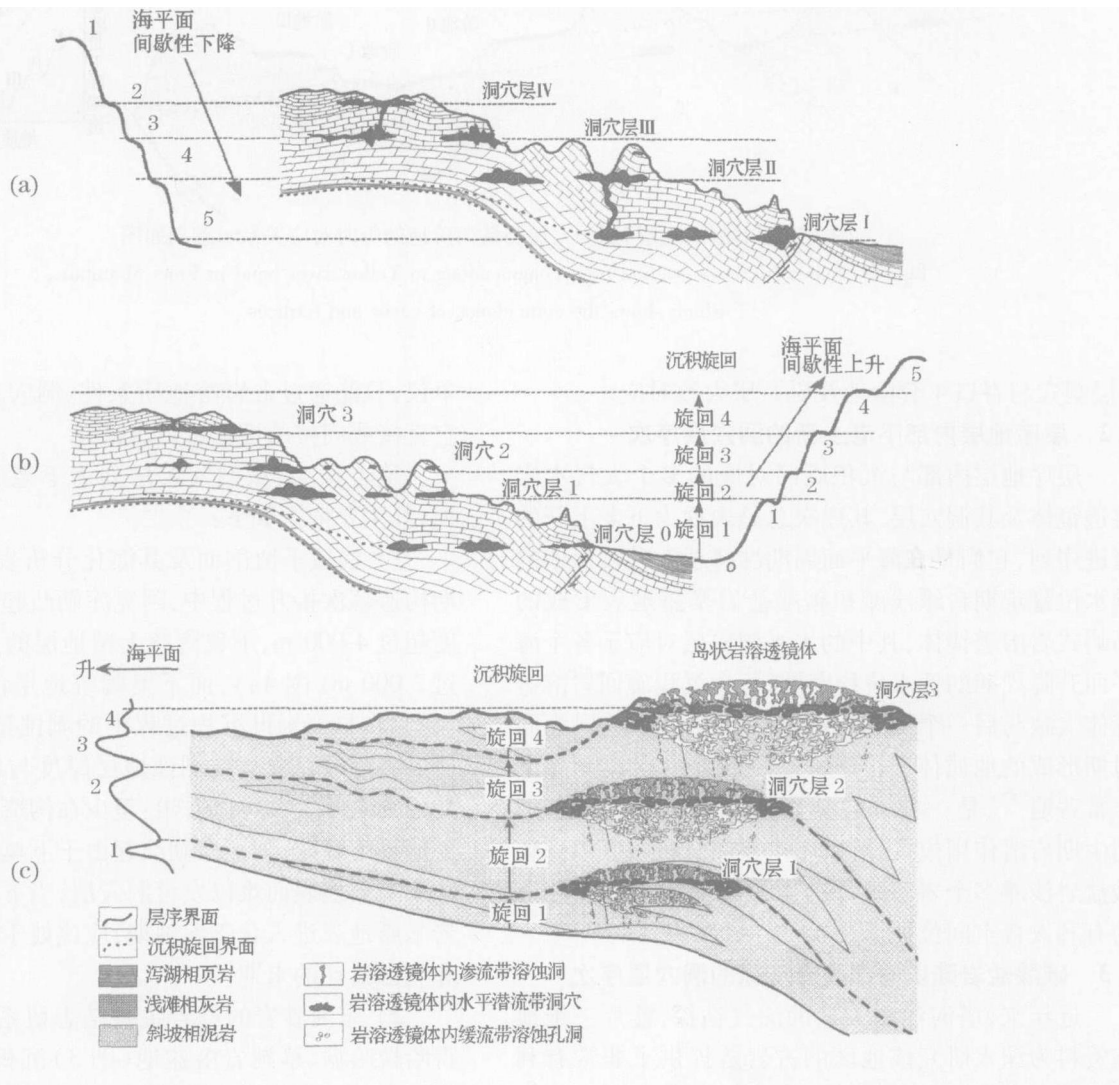


图 1 海(水)平面升降周期性变化与洞穴层形成序次关系模式图

(a)和 (b)碳酸盐岩陆块内部的洞穴层序次(徐国强等,2002);(c)层序地层内部与沉积旋回对应的多个岛状岩溶透镜体及洞穴层序次(据 S.W. Tinker等,1995,原图有修改)

Fig 1 Diagram showing the relationship of sea level changes and cave formation sequence

(a) and (b) cave formation sequence in the continent carbonate blocks (by Xu Guoqiang *et al.*, 2002);

(c) Multiple karst island lenses corresponding to sedimentary cycles within the sequence - stratigraphic framework (modified from S.W. Tinker *et al.*, 1995)

3.1 碳酸盐岩陆块内部上老下新的洞穴层序次

现今陆表碳酸盐岩地块内部的水平洞穴系统,绝大多数受第四纪新构造运动多幕次构造抬升控制,所形成的洞穴层为上老下新的序次。序列洞穴层一般都能与沟谷口同时期形成的阶地及阶地沉积物进行对比,洞穴层的规模大小与侵蚀基准面稳定的时间长

短、阶地的规模大小成正比。实例非常多,如:世界上最长的洞穴 Mammoth Cave^[6],在海拔 125 ~ 225 m 间发育 5 个洞穴层,单个洞穴层延伸长度超过 545 km;广西桂林的七星岩洞穴系统^[2];峨嵋山龙门碛—黄湾剖面,已显露地表的两个洞穴层与黄湾的、大型阶地对应(图 2);韩行瑞等认为泾河峡谷下古灰岩

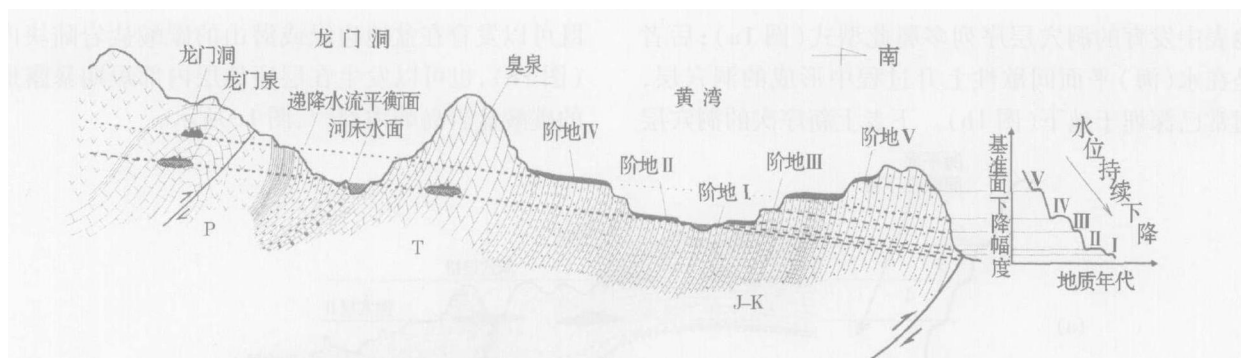


图 2 四川峨眉山龙门洞洞穴层与黄湾阶地的等时对应关系示意剖面图

Fig 2 Schematic cross-section from Longmendong to Yellow river bend in Emei Mountain, which shows the coincidence of caves and terraces

4层洞穴与谷口 4套阶地及砾石层大致对应^[7]。

3.2 层序地层内部下老上新的洞穴层序

层序地层内部与沉积旋回对应的多个大气水岩溶透镜体及其洞穴层,其序次总是表现为下老上新的海进序列,它们是在海平面周期性持续上升过程中的低水位稳定期台缘浅滩相碳酸盐岩暴露地表形成的岛屿式岩溶透镜体,其中的水平洞穴层对应于各个海平面升降周期的低水位稳定期,每个沉积旋回岩溶透镜体大致与后一个沉积旋回低水位期沉积地层为同时期形成的地质体(图 1c),这种岩溶模式在世界上非常普遍^[5],是一种碳酸盐岩浅滩短期暴露地表的同生期岩溶作用模式,可以用于预测分析层序内部碳酸盐岩浅滩多个岩溶事件的发生时间和高孔隙储层的良好发育空间位置。

3.3 碳酸盐岩陆块内部下老上新的洞穴层序

近年来,塔河油田大量的油气钻探,连片三维地震资料为深入研究该地区的古岩溶提供了非常有利的条件。多数学者^[8,9]认为阿克库勒凸起的下奥陶统洞穴层为早海西期近地表风化壳岩溶的产物,其内至少发育有三个大规模的岩溶旋回和 3 个水平洞穴层,图 3 所示。

不过,有关多期洞穴层的形成序次,目前还有两种不同的观点:其一为下老上新,多期洞穴层是在晚泥盆世—早石炭世持续海进过程中形成的;其二为上老下新,认为多期洞穴层是在早海西构造运动幕次抬升过程中形成,时间上早于东河砂岩沉积期。争议悬而未决,主要是因为两种序列的洞穴层内充填物都是下老上新,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、次生矿物裂变径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结束

争议,只能通过古岩溶地质条件、洞穴充填结构等其它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) 构造平衡剖面及其演化分析表明:在早海西期构造幕次抬升过程中,阿克库勒凸起得累计隆升幅度超过 4 000 m,下奥陶统上覆地层的累计厚度当超过 2 000 m(图 4a),而下奥陶统地层的剥蚀总厚度(包括在早石炭世沉积过程中的剥蚀量)不足 250 m(图 4b)。因此,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:至少在构造抬升和剥蚀夷平的早中晚期,阿克库勒凸起由于下奥陶统碳酸盐岩还未暴露地表而难以发育洞穴层,当下奥陶统碳酸盐岩暴露地表进入化学溶蚀期,应该处于构造幕次抬升和剥蚀活动的末期。

2) 东河砂岩的母岩主要是志留系砂岩^[10,11],在得哈拉哈塘、草湖岩溶盆地(图 3)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,这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(晚泥盆世后期)。

3) 塔河油田已有的 100 余口井,其中 70 余口钻遇洞穴层,取芯资料非常丰富,许多井的洞穴层的充填结构表现为‘中下部混合沉积带内的洞顶坍塌沉积与碎屑流沉积及地下河流沉积呈互层产出,这种

徐国强,刘树根,李国蓉,等.塔中地区早海西风化壳古岩溶地质条件研究. 2002

李国蓉,张涛,刘存革,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层古岩溶作用研究. 2003

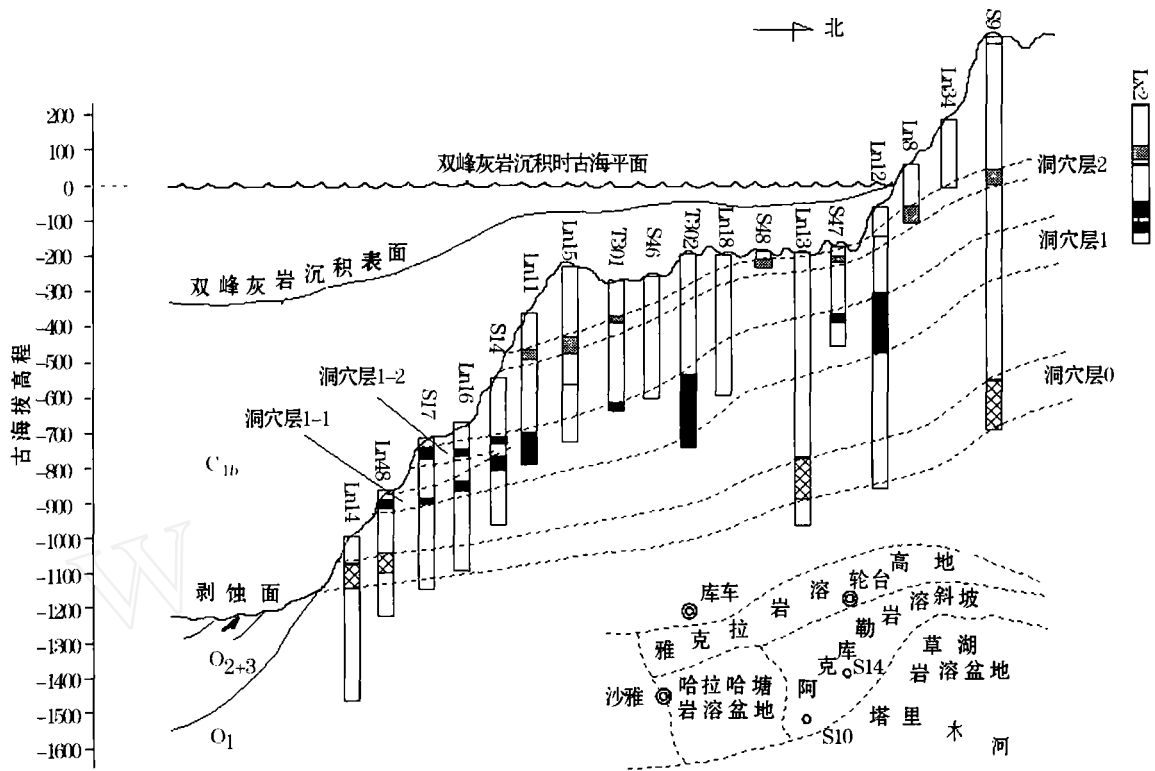


图 3 塔北轮南地区早海西风化壳岩溶斜坡带洞穴层对比剖面图
(洞穴层划分数据:轮南地区据叶德胜,2000,轮西 2 井据郭建华,1993)

Fig 3 Diagram showing correlation of cave formations in the residue of lower Ordovician, north Tarim basin

现象反映洞穴的形成与洞穴的充填基本同时进行^[12],这是洞穴层在潜水面幕次上升过程中发育形成的最有力的直接证据,与图 1b 模式相符。

4) 晚泥盆世—早石炭世,是塔里木盆地海平面发生间歇性持续上升^[11,13],阿克库勒凸起已具备发育多期次大型洞穴层的各种古岩溶地质条件,包括:

(1) 内在条件: 东河砂岩沉积后碳酸盐岩陆块大面积暴露; 鼻凸构造顶部构造裂缝^[9]大量发育; 具有入水孔的阶状斜坡式岩溶古地貌形成。表明此时此地已完全具备发育大型洞穴系统的 3 个内在基本条件^[3](图 3,图 4b);

(2) 外部条件: 从晚泥盆世 Famennian 期^[13]至早石炭世末阿克库勒凸起淹没,延续时间为 17 Ma, 已有足够的时间发育多个岩溶旋回、多个水平洞穴层; D₃—C₁时期虽然总体处于半干旱环境^[8],但巴楚组上、中、下泥岩段内的生物化石、有机质含量较之志留系、泥盆系明显增多,特别是在生屑灰岩内富含有机质,生物化石的数量和种类都非常丰富,表明当时的气候虽为半干旱气候,但期间曾有多气候潮湿期,具备发育大规模岩溶的古气候条件; 从晚泥盆

世至早石炭世,间歇性海平面上升为碳酸盐岩陆块内部的潜水面的间歇性上升及发育下老上新的洞穴层序列提供了外在条件,图 5 所示。

对应于海平面持续上升过程中每一个周期,潜流面呈“快速上升—稳定”方式变动,潜流带岩溶作用表现为: 在海平面快速上升时段,潜流面上升过程中途径的任何一个面由于潜流溶蚀作用时间短而不可能形成大型水平洞穴; 潜水面随海平面稳定而长期稳定,使得在潜水面附近,同一个位置将发生长期岩溶,其结果必然使先存孔洞缝产生一而再,再而三地溶蚀扩大和机械冲刷,最终形成大型洞穴,其间水位小幅震荡则有利于水平洞穴扩大。以此类推,海平面的间歇性上升将引发多个期次的岩溶旋回,多个洞穴层,洞穴层序则必定是下老上新(图 1b,图 5)。

根据东河塘组和巴楚组地层沉积过程中每个周期不同时段岩溶特征、海平面的升降幅度与洞穴层间距的对应关系,塔河地区的洞穴层的岩溶旋回序列与沉积层序的对应关系为: 洞穴层 0 为最底部的一套水平洞穴层,主要形成于东河砂岩沉积后期,发育时间较长,其边界受隆起带东、南、西周缘中上奥陶统泥

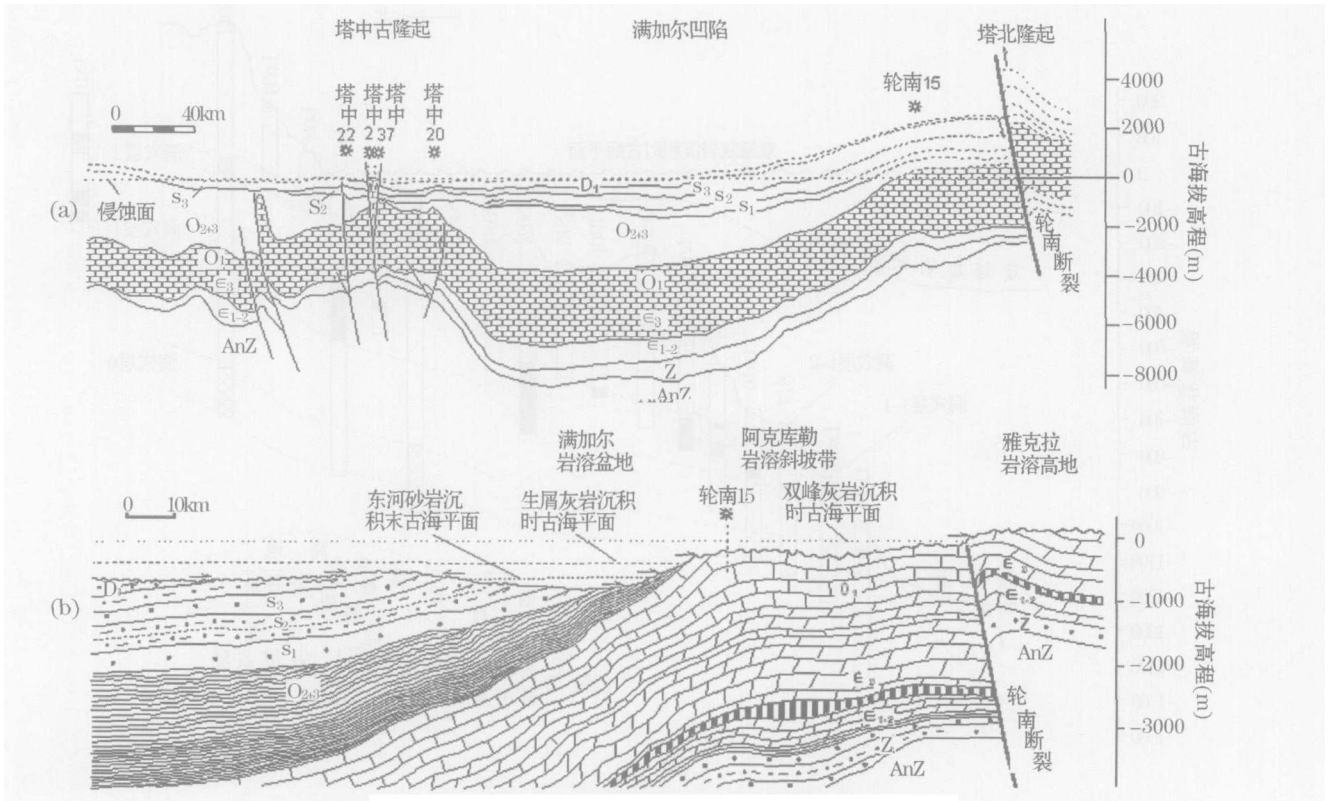


图 4 塔北—塔中地区早海西期平衡恢复剖面

(a) 泥盆纪末塔北地区强烈隆升及累计抬升幅度; (b) 泥盆纪末石炭纪初, 塔北地区构造平衡恢复剖面及沉积古地貌剖面, 据 Z-45 地震大剖面恢复的构造平衡剖面

Fig 4 Reconstructed cross section across Tazhong and Tabei uplift in Early episode of Hersonian orogeny

(a) showing the total uplifting of north of Tarim basin; The base data from seismic profile Z-45; (b) Showing the continuous sea level rising in the epoch of Late Devonian to Early Carboniferous and the paleo-sea level at each important depositional surface

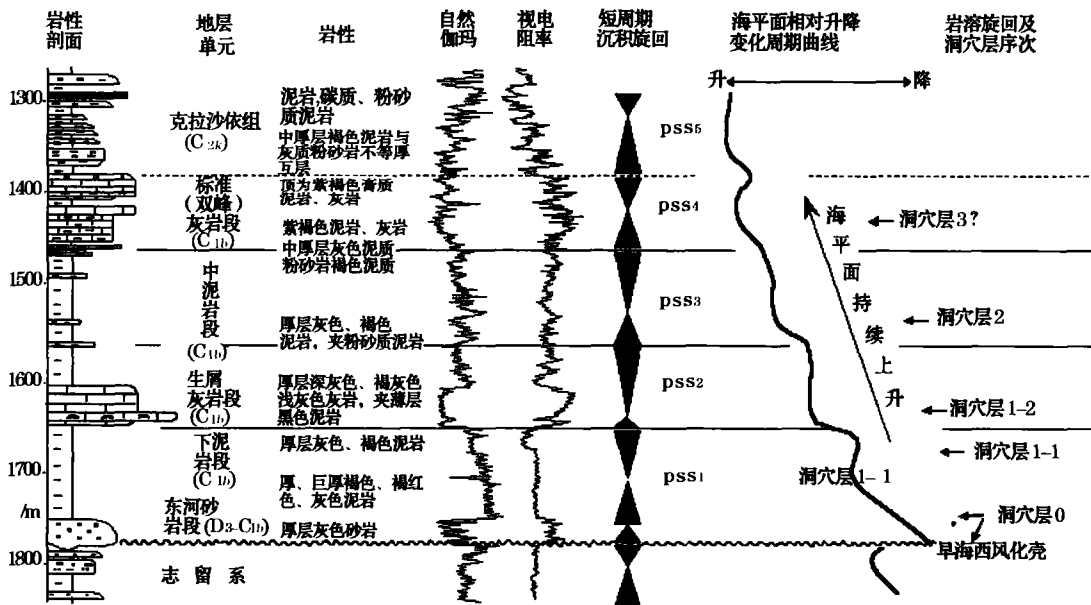


图 5 早石炭世沉积层序 (和 4 井) 与期同时期形成的洞穴层对比

Fig 5 Diagram showing the correlation of depositional sequence and their coincident caves in Late Devonian to Early Carboniferous, Well H4, Tarim basin

页岩隔水岩系的控制; 洞穴层 1 在近岸斜坡带分上下两层(即洞穴层 1-1, 洞穴层 1-2), 其中洞穴层 1-1 岩溶旋回与准层序组 1 (PSS1) 对应; 洞穴层 1-2 岩溶旋回与准层序组 2 (PSS2) 对应, 水平洞穴层主要形成于生物碎屑灰岩沉积时的海平面稳定期, 与当时生物大量发育的潮湿的古气候条件相符; 洞穴层 2 基准面上升岩溶旋回与准层序组 3 (PSS3) 对应; 洞穴层形成于一次较大规模海进之后的海平面稳定期(中泥岩段沉积中期); 与准层序组 4 (PSS4) 对应的洞穴层 3 岩溶旋回在塔河油田区不发育, 主要是因为此时阿克库勒凸起大部分已被海水淹没, 在其北古岩溶高地有可能发育与准层序组 4 对应的洞穴层 3 岩溶旋回。

4 结论

(1) 层序地层学理论为全球或跨地区的等时地层对比提供了理论和技术方法, 它对由构造—海平面变化引发的古岩溶事件分析和对比同样适用。

(2) 洞穴层序次有 3 种基本型式: 发生在层序地层内部同生期岩溶洞穴层形成于低水位海平面稳定期, 其序次为下老上新; 和 发育在盆地边缘碳酸盐岩陆块或潜山的风化壳岩溶洞穴层, 受水(海)平面的间歇性上升(或下降)变化控制, 可以发育下老上新(或上老下新)的洞穴层序次。

(3) 洞穴层是水(海)平面稳定期在同一个潜流面上长期溶蚀作用的产物, 同一期发育的所有水平洞穴可形成一个跨地区对比的洞穴层, 可以与其同时期形成的阶地、沉积地层进行等时对比, 洞穴层具有年代地层意义。

(4) 根据同一水平面稳定期发育的洞穴层、阶地、沉积地层三者的等时关系, 只要知其中一个地质体的地质年代, 就可推断其它二个地质体的地质年代。

(5) 利用岛状岩溶透镜体大气水岩溶模式及海平面变化周期中的低位海平面, 可以预测层序内部碳酸盐岩浅滩的系列古岩溶事件的发生时间, 预测溶蚀孔隙储层有利发育带的空间位置; 通过恢复对应于海(水)平面稳定期的古潜水面, 可以预测碳酸盐岩陆块风化壳内部潜在的洞穴层及有利的岩溶洞穴型储层发育带。

致谢 在本文完成过程中, 曾多次与李国蓉、郑荣才教授交流意见, 受益良多。在研究过程中得到了中国石油化工股份公司西北石油地质局康玉柱总地

质师, 中国石油化工股份公司石油勘探开发研究院张宏年教授, 中国地质大学樊太亮教授, 河南石油勘探局地质研究院杨道庆教授、田纳新、李永林高工; 胜利油田新疆勘探公司时华星教授、向奎、徐希坤高级工程师等同志的帮助与指导, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- Vail P R. Sequence stratigraphy workbook, fundamentals of sequence stratigraphy. In: AAPG Annual Convention Short Course. Houston, Texas, 1988
- 任美镔, 刘振中主编. 岩溶学概论. 商务印书馆, 1983 [Ren Meie, Liu Zhenzhong. Fundamentals of karst. Business Organization Press, 1983]
- James N P, Choquette P W. Paleokarst. Springer-Verlag, 1988
- 郑荣才, 彭军, 高红灿. 渝东黄龙组碳酸盐岩的古岩溶特征及岩溶旋回. 地质地球化学, 2003, 31(1): 28 ~ 35 [Cheng Rongcai, Peng Jun, Gao Hongcan. Paleokarst-related characteristics and cycles of carbonate reservoirs in Huanglong formation Upper Carboniferous, eastern Chongqing. Geology Geochemistry, 2003, 31(1): 28 ~ 35]
- Tinker SW, Ehrets J R, and B rondos M D. Multiple karst events related to stratigraphic cyclicity: San Andres Formation, Yates field, West Texas. In: Unconformities and porosity in carbonate strata, 1995, AAPG Memoir 63, 213 ~ 237
- Arthur N. Palmer Geochemical models for the origin of macroscopic solution porosity in carbonate rocks. In: Unconformities and porosity in carbonate strata, 1995, AAPG Memoir 63, 77 ~ 101
- 韩行瑞. 鄂尔多斯盆地南、西缘的古岩溶及地文期划分. 中国岩溶, 2001, 20(2): 125 ~ 129 [Chen Qianglu, Wang Shuyi, Qian Yixiong. Paleo-karst and distribution of oil and gas of Lower Ordovician in Akekule area, Tarim basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 633 ~ 638]
- 叶德胜, 王根长, 林忠民, 等. 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, 2000. 49 ~ 72 [Ye Desheng, Wang Changgen, Lin Zhongmin, et al. Reservoir characteristics and hydrocarbon perspective of Cambrian to Ordovician in north part of Tarim basin. Chengdu: Sichuan University Press, 2000. 49 ~ 72]
- 闰相宾, 韩振华, 李永宏. 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, 2002, 48(6): 629 ~ 626 [Yan Xiangbin, Han Zhenghua, Li Yonghong. Reservoir characteristics and formation mechanisms of the Ordovician carbonate pools in the Tahei Oil field. Geological Review, 2002, 48(6): 629 ~ 626]
- 朱筱敏, 王贵文, 谢庆宾. 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), 2002, 26(3): 5 ~ 11 [Zhu Xiaomin, Wang Guiwen, Xie Qingbing. Characteristics and distribution of depositional systems of Silurian in Tarim basin. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(3): 5 ~ 11]
- 顾家裕. 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, 1996, 70(2): 153 ~ 161 [Gu Jiayu. Sedimentary environ-

- ment and reservoir characters of the Carboniferous Donghe sandstone in the Tarim basin. *Acta Geologica Sinica* 1996, 70(2): 153 ~ 161]
- 12 郭建华. 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*, 1993, 11(1): 56 ~ 64 [Guo Jianhua Burial hill paleokarst and its controlled reservoir heterogeneity in Ordovician, Lunnan region of Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 1993, 11(1): 56 ~ 64]
- 13 朱怀诚, 罗辉, 王起飞. 论塔里木盆地“东河砂岩”的地质时代. *地层学杂志*, 2002, 26(3): 197 ~ 201 [Zhu Huaicheng, Luo Hui, Wang Qifei The age of the Donghe sandstone in the Tarim basin. *Journal of Stratigraphy*, 2002, 26(3): 197 ~ 201]

The Relationship between Sea Level Change and Cave Formation Sequence

XU Guo-qiang^{1,2} LU Shu-gen^{1,2} WU Heng-zhi³ LI Zhi-wu¹ SUN Wei¹

1(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059) 2(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059) 3(Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083)

Abstract Sequence stratigraphy provided a theory and significant tool for the global or regional stratigraphic isochronous correlation, it was also suitable for karst events analysis and regional correlation of caves related to sea level changes. The main topic for this paper is to discover the fundamentals in the intersecting domain between paleokarst and sequence stratigraphy through the study of the relationship between the sea level change and the cave formation sequence followed by the principle of the water table changed with sea level and the cave formation was only developed in the period of standing sea level. By the study of Yate (in U. S. A.) and Tahe (in Tarim basin) oil field, outcrop of Emei Mountain, as well as the integrated analysis of previous study, 3 general models about the relationship between the sea level change and the cave formation sequence are provided including that one is for the multiple karst island lenses corresponding to sedimentary cycles within the sequence-stratigraphic framework in which developed a normal succession of cave formation (the upper the younger, the lower the older); and the other two are for paleokarst in the continent carbonate blocks, in which it could develop the normal or reversed cave formation sequence followed by sea level intermissive rising or dropping. With the direct or indirect evidences, such as the started outcropping time of carbonate blocks, paleokarst environments and other geological conditions, the characteristics of karst and the deposits in the horizontal caves, indicating that the great cave system in the residue of Ordovician of Tahe oil field were developed in a sea level intermissive rising half cycle of 2-order sequence. The isochronous relationship of depositional sequence and cave can be applied in dating the paleokarst events, predicating the possible depth of caves; it has significant value in minerals exploration and engineering geology.

Key words sequence stratigraphy, cave formation sequence, depositional sequence, isochronous correlation