

文章编号:1001-4810(2005)01-0035-06

向源潜流侵蚀岩溶作用及其成因机理 ——以塔河油田早海西风化壳岩溶洞穴层为例^①

徐国强¹, 刘树根^{1,2}, 李国蓉^{1,2}, 武恒志³, 夏在连¹, 孙 玮¹

(1. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:向源潜流侵蚀作用指在海(水)进环境中,由于盆地边缘岩溶斜坡带内陆区的潜水面上升后,潜水面以下地下潜流在相当长时间内仍然在原有的洞穴内流动,由此产生的连续向上(向着地下水流源头)侵蚀作用,其结果是在原有的洞穴层之上形成多旋回的具有‘坍塌角砾—暗河沉积’双层结构的塌积层序及纵向上呈加积方式产出的叠积洞穴层,以及由叠积洞穴与原有洞穴连成一体复合洞穴层。本文以塔河油田早海西风化壳岩溶洞穴层为例,简要地介绍了古岩溶洞穴层的对比方法,展示了塔河地区早海西风化壳岩溶洞穴层对比成果,并通过典型井的洞穴层内部结构解剖分析,阐述了向源潜流侵蚀岩溶作用的成因机理,并探讨了一些相关的主要问题。

关键词:塔河油田;洞穴层;向源潜流侵蚀岩溶;塌积层序;成因机理
中图分类号:P512.1 **文献标识码:**A

0 引言

1993年,郭建华教授通过对塔里木盆地轮南地区 LX2 井下奥陶统早海西风化壳岩溶洞穴层的研究,发现深埋于 5000m 以下的洞穴层中存在“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”现象,并认为这种现象反映了洞穴的形成与洞穴的充填基本是同时进行^[1]。在塔河油田中,这种现象普遍存在,而且,这种互层产出的洞穴充填呈多个旋回出现,如 T403, LN12 井^[2]等。

对于这种现象,长期以来一直没有得到一个合理的成因解释。之所以这样,其原因是多方面的,其中可能与以往研究中存在的地下埋藏洞穴层的研究思路套用了侵蚀基准面下降岩溶模式、洞穴层与潜水面过分拘泥于“水平”概念、洞穴层横向对比中未将洞穴层进行古高程的准确归位或只是简单地用上覆地层厚度恢复古地貌等有很大关系。

笔者认为:(1)位于盆地边缘或岛屿的风化壳埋藏洞穴层,其形成环境总体处于海进环境,因此,伴随间歇性的海平面上升必将发生多期次的大型古岩溶

事件,从而形成与侵蚀基准面下降模式中相反的洞穴层序列及岩溶侵蚀方式,即下老上新的序列^[2]。(2)位于盆地内小岛及近岸的潜水面虽然与海平面近于一致^[3],但是,位于盆地边缘斜坡带的碳酸盐岩陆块内部情况则有很大的不同,潜水面总体上是一个具有递降水流势能的斜面,而且潜水面坡度主要受大气降水、陆块内部渗流和管流通道特征的控制^[3,4]。(3)洞穴层的横向对比应从等时概念出发,将同一个时期形成的洞穴层进行横向对比,避免根据相似性对比所带来的穿时穿层。从方法技术上讲,洞穴层的对比应该将其恢复到风化壳埋藏前的位置,因此,必须作古地貌恢复。选择一个离风化壳最近、稳定、易识别的标准层面作为等时面,利用该层面至风化壳顶面的钻井厚度或双程时间厚度,通过压实、古水深、差异沉降等校正后的厚度作为古风化壳顶面的深度去恢复古地貌,然后将洞穴层进行古高程归位。同一个时期发育的风化壳岩溶洞穴层,通过古高程归位后,小岛潜山型洞穴层一般处于同一个高程,而斜坡带的洞穴层则大致分布在同一个递降水流平衡面^[5]上。(4)在对比中切忌:①不作古地貌分析;②简单地用地层厚度代替古

① 基金项目:国家“十五”科技攻关项目部分成果(2001BA605A-03-01)

第一作者简介:徐国强(1963-),男,副教授,石油地质学。Email: xuugq0@163.com。

收稿日期:2004-09-22

风化壳深度;③将斜坡带的洞穴层理解为水平层而按水平对比。

上述4个方面也是本文洞穴层研究所采用的研究思路及技术方法。

1 塔河油田早海西风化壳岩溶洞穴层的多旋回塌积层序

1.1 早海西风化壳岩溶发育的地质条件

中塔北古隆起地貌形成演化及油气地质条件对比表明^[6],塔北地区在加里东中期处于台地—斜坡环境,从而使得奥陶系保存较为齐全;在加里东运动中晚期,中下奥陶统碳酸盐岩尚未暴露地表,风化壳岩溶不发育;加里东晚期,处于志留系—泥盆系沉积

中心^[7];在早海西期,塔北地区构造活动强烈,形成阿克库勒穹隆状鼻凸,整体抬升达2000余米,与此同时,下泥盆统、志留系、上奥陶统被剥蚀殆尽,中下奥陶统部分遭受剥蚀(图1)。阿克库勒鼻凸构造的形成不仅使得该地区碳酸盐岩可溶蚀地层大面积暴露地表,还使得该地区的古地貌继承古构造形态而发育为岩溶阶地。伴随古隆起的形成,构造裂缝在致密碳酸盐岩内部形成了厚达1000余米的渗流网络通道,从而为该地区发育大型洞穴系统提供了必要的内在条件;在晚泥盆世—早石炭世的17 Ma间,塔里木盆地持续下沉,由西向东发生持续海进^[8,9],这一期间的多个潮湿气候期与海平面间歇性上升中相对稳定的有效配合,为在该陆块内部发育多期的风化壳岩溶洞穴层提供了外在条件。

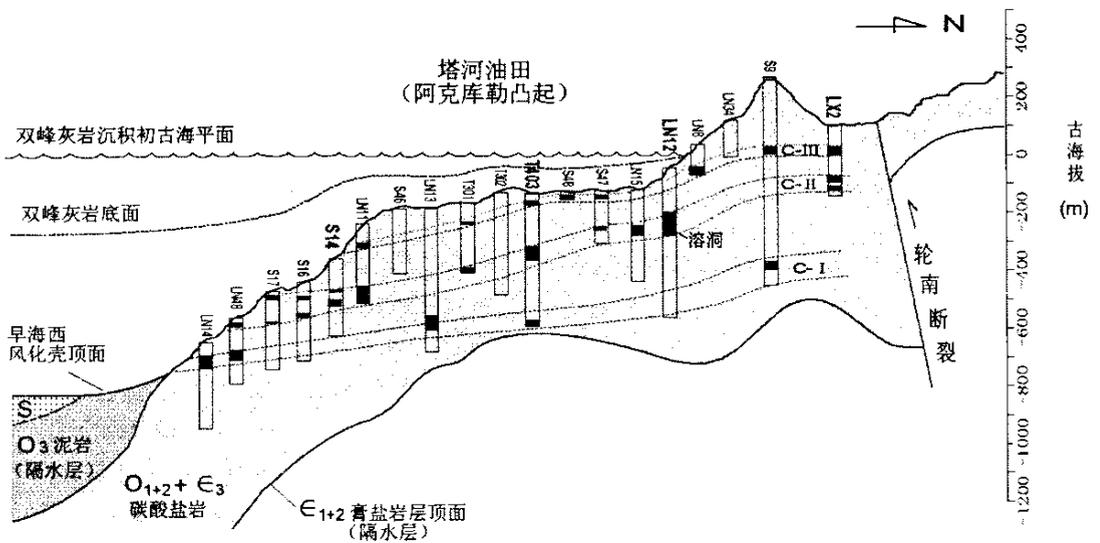


图1 塔河油田早海西风化壳古地貌及岩溶洞穴层对比图

Fig. 1 Map showing paleo-geomorphology and cave layers in the Early Hersinian weathered crust in Tahe oilfield

1.2 洞穴层宏观分布特征

近年来的勘探表明,百余口钻井的洞穴层钻遇率高达60%,纵向上发育3~4层洞穴层,单个洞穴高度一般为2~10 m,单个多层洞穴系统的南北向延伸直线距离达20 km以上,东西向多个洞穴系统的宽度达30 km,覆盖面积约600 km²。在地下古风化壳岩溶洞穴系统^[1,2,10,11]中,其规模之大,为世界所罕见。

根据录井、岩芯、测井资料解释的洞穴层通过古高程归位后,发现塔河油田洞穴层的发育分布具如下特征(图1):(1)洞穴层主要沿3个递降水流平衡面分布,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);(2)处于斜坡内陆

的洞穴层高度普遍较近岸斜坡带大,有的可高达百米;(3)中间一套洞穴层(C-II),在靠近盆地一侧为两层(II-1, II-2),而进入内陆则为一层。

1.3 洞穴层内部的多旋回塌积层序

图2所示,T403井的洞穴层II高65 m(井深5488~5553 m),根据岩芯及测井解释,上下各有一个高为10 m左右(井深5494.5~5505.5 m及5539.5~5548.5 m),全部为红色泥岩及岩溶角砾等暗河携带的沉积物充填,内部无坍塌巨砾,在电测曲线中表现为低电阻率、低密度,高自然伽玛,发育斜层理、水平层理等沉积构造,代表两个稳定潜水面岩溶洞穴层。中间一段高34 m(5505.5~5539.5 m井段),其中中

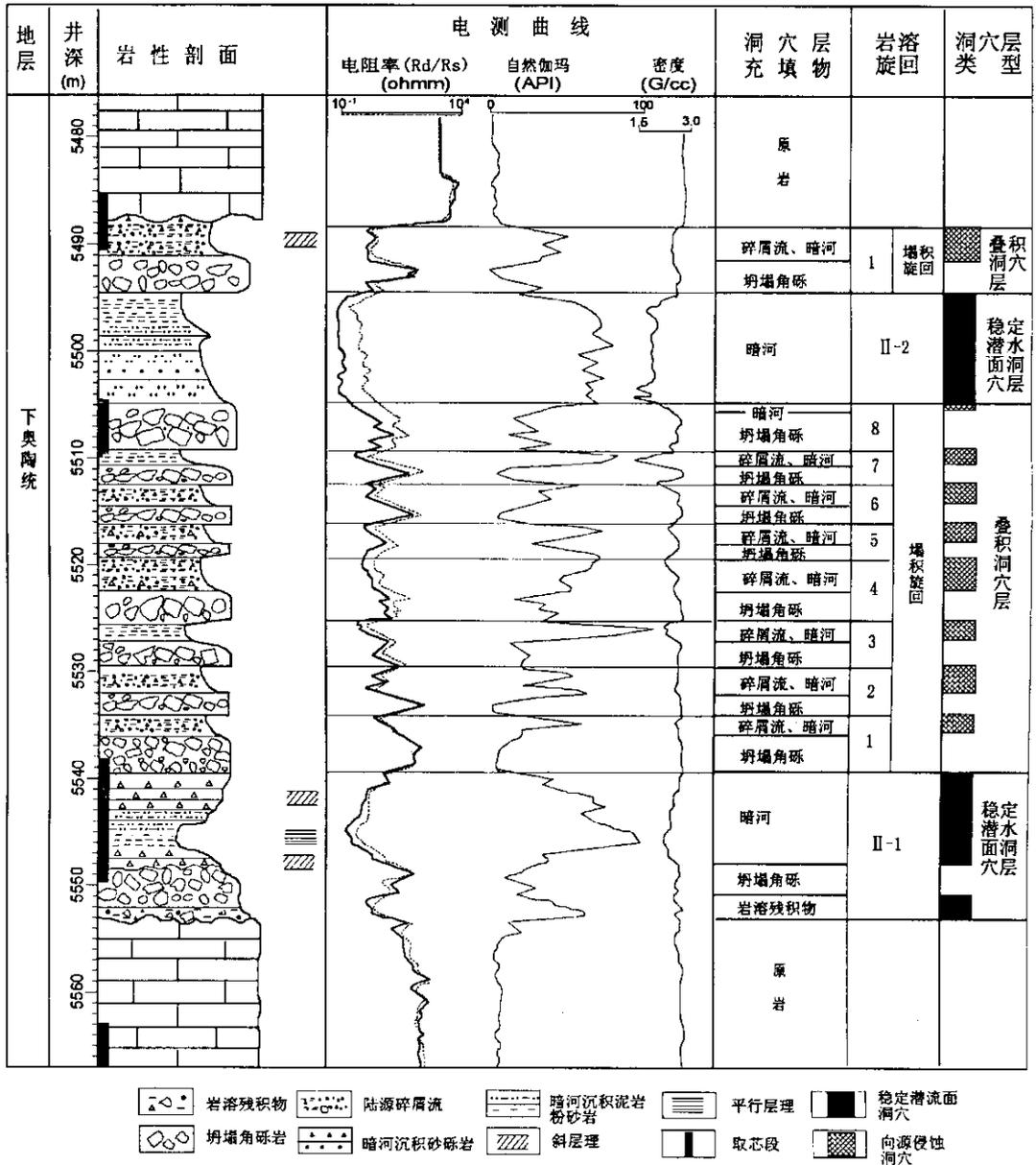


图2 塔河油田T403井洞穴层(II)的充填结构及多旋回塌积层序

Fig. 2 The inner cave depositional configuration and multi-cycled collapse sequences of cave layer C-II in well T403, Tahe oilfield

—高电阻率、高密度、低—中自然伽玛者(与灰岩层接近)为坍塌巨型角砾与碎屑流混积层;而低电阻率、低密度、高自然伽玛者为暗河所携带的岩溶角砾及泥砂沉积,两者互层状产出,韵律发育。我们把“坍塌角砾与碎屑流混积层—暗河沉积层”所构成的沉积地层称之为塌积层序,其沉积旋回称为塌积旋回。T403井上下两个主洞之间共有8个塌积层序,其中7个旋回比较完整。在顶部还有一个塌积旋回。在塌积层序中,被岩溶角砾和泥砂充填的部分应该是碳酸盐岩真正被溶蚀的部分,是真正意义上洞穴,它们在纵向上呈

加积方式叠置,故称之为叠积洞穴。

塔河油田的LN12, LN11, T664等井,其洞穴层结构与T403井类似,不再详述。

2 向源侵蚀岩溶及多旋回塌积层序的成因模式

对于一个成熟岩溶区及/或致密碳酸盐岩陆块,洞穴层总是追随潜水面发育^[3]。潜水面在小岛内部总体上表现为水平面,在斜坡带则为一个从源头到地下水泄水区高程逐渐降低的具有水动力势能的斜

面^[3,4,12,13]。潜水面随海平面变动^[3],在海平面快速上升或快速下降过程中,潜流面附近的溶蚀作用虽然每时每刻都在进行,但只有当海平面相对长期稳定时,斜坡带的潜水面才会长期稳定,才能形成大型洞穴层。

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^[14]。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,而上下多个洞穴层形成的先后次序关系即为洞穴层序次。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。前者是在构造幕次抬升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;后者是在基底幕次沉降,海平面发生间歇性相对上升过程中形成的洞穴层^[2,15],这类洞穴通常已深埋于地下,如塔北地区广泛发育的早海西风化壳岩溶洞穴层^[2]。

在间歇性的海平面相对上升过程中,若从一个相对长期稳定的海平面SL1快速上升到另一个相对长期稳定的海平面SL2(图3),则在小岛及斜坡带将形成两个分别与SL1及SL2对应的稳定潜水面SWT-1、SWT-2,以及洞穴层C-1、C-2。但应指出的是,对于斜坡带情况则远不是这样简单。在海平面从SL1

快速上升到SL2时,由于离海岸较远的斜坡带内陆洞穴层C-1仍然高出海平面SL1,从而使内陆区的潜流仍然会在早期的暗河上流动,因为地下水流总是首先选择较大的管道流动^[3,4],从而在斜坡带内陆将产生潜流面相对于潜水面的迟后上升现象。我们把界于两个稳定潜水面之间,同时又高出海平面SL2的区域称之为潜流面上升迟后带(简称迟后带,如图3所示)。在迟后带内,C-1溶洞被灌满大气水,其内潜流必将对洞顶不断地产生溶蚀作用和机械冲刷(这种冲顶溶蚀在正常情况下,一般只有洪水期才会发生^[3,14])。在潜流对洞顶的持续溶蚀作用下,被裂缝及层理面切割的岩块由于裂缝的首先溶蚀扩大,失去连接支撑而坍塌。由于迟后带位于潜水面以下,处于缓流带,水动力势能较低,坍塌的角砾、岩块会同陆源碎屑流在洞底混积(而潜流面洞穴内的坍塌角砾则通常被潜流带走),在下次洞顶坍塌之前,暗河所携带的泥沙将在坍塌巨砾层之上沉积。在SL2稳定期内,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SWT-2,或者SWT-2附近的新的洞穴管道(C-2)形成使得大部分地下水在潜水面洞穴管道内得以畅流,其下老的管道被泥砂充填为止。其结果是:在迟后带内,将发育多个旋回的塌积层序,它们代表一种持续向上、向着水流源头方向侵蚀的岩溶作用,因此,我们将其称之为向源侵蚀岩溶。

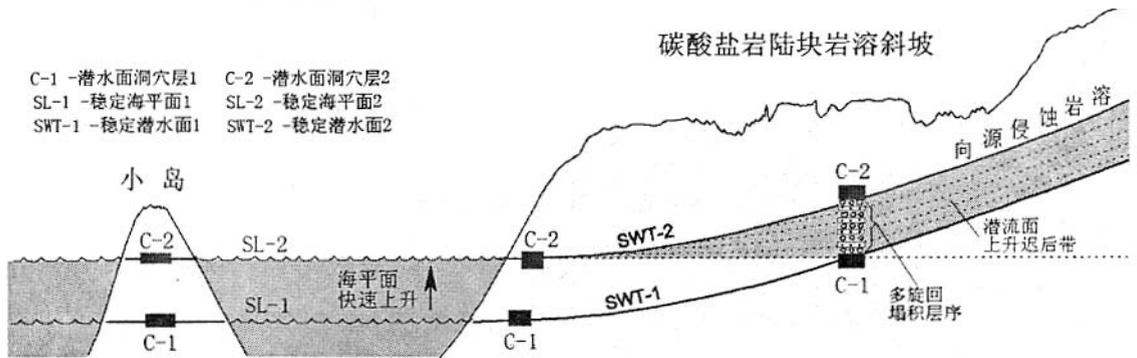


图3 向源潜流侵蚀岩溶作用成因模式示意图

Fig. 3 Sketch map showing the genetic mechanism of retrogressive erosion and karstification

3 讨论与结论

(1)塔河油田C-Ⅱ洞穴层在近岸带的两层结构,很容易让人们联想到斜坡近岸带发育的潜水面岩溶及混合水岩溶所形成的双层洞穴^[3,12]。混合水岩溶洞穴位于淡水透镜体底部,向陆地方向下倾,在近岸带局部发育,洞内一般为滨岸相充填沉积^[3];而塔河油田的洞穴层在近岸带分两层,沿递降水流平衡面分布,向陆地上倾(图1)。在S14井的C-Ⅱ-1内部,

充填物为暗河沉积,见钟乳石碎片,杂基中发现多达15种孢粉化石^[11]。另外,在内陆区C-Ⅱ尽管合二为一,但在巨厚洞穴层中,可以识别出与近岸带C-Ⅱ-2、C-Ⅱ-1对应的上下两个潜水面洞穴(图2)。因此,洞穴层的产状、延伸长度、充填物都表明C-Ⅱ-1不是混合水岩溶洞穴。实际上,洞穴层C-Ⅱ由上下两个稳定潜水面洞穴层构成,只不过两个洞穴层间距较小(一般为26~40m),在内陆区两个稳定潜水面洞穴层中间被一套叠积洞穴连成一体而已。因此,塔河

地区早海西风化壳岩溶洞穴层共有4层。

(2)在海平面快速上升过程中,潜水面随之而快速上升,一旦新的潜水面超出老的潜水面(洞穴层),就标志着在老的洞穴内潜流面迟后于潜水面上升,以及向源侵蚀岩溶的开始。潜流面上升迟后带也将随海平面的快速上升而不断地向上、向着地下水源头推移,图2所示的迟后带为潜水面上升到达SWT-2的迟后带。从理论上讲,在近岸带老的洞穴之上也存在向源侵蚀岩溶,但由于时间较短,坍塌角砾—暗河沉积旋回一般发育不完善,很少有多旋回发育。在海平面上升过程中,盆地边缘斜坡带向上侵蚀岩溶在任何位置都可以进行,其发育程度与向上侵蚀岩溶所持续的时间成正比,从近岸带到内陆区大气水入水口,塌积旋回的数量将增多,在地下伏流的入水孔一带最为集中发育,如图1中T403、LN12^[2]井一带,往岩溶高地,其发育程度又减弱,如LX2井^[1]。一旦潜流面抵达新的稳定潜水面,或者新的稳定潜流面洞穴渗流管道打通,向源侵蚀岩溶也将随之结束,此外,地下水流袭夺改道、气候变化导致潜水面下降或地下水流量减少也有可能终止向源侵蚀岩溶。

(3)在两个潜水面洞穴层间距较小情况下,岩溶内陆区持续向上的向源侵蚀岩溶甚至可以贯穿上下两个潜水面洞穴,并将潜水面洞穴与叠积洞穴连成一体形成一个巨厚的复合洞穴层,如,LN12井的C-Ⅱ洞穴层厚达132m^[2],T403井C-Ⅱ厚达65m(图2),就是由潜水面洞穴层与叠积洞穴层构成的复合洞穴层。在两个洞穴层间距较大时,复合洞穴通常由单个潜水面洞穴与其上叠积洞穴构成,这种复合洞穴在塔河油田4层稳定潜水面洞穴层之上普遍发育,可以通过塌积层序识别。

参考文献

[1] 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[J]. 沉积学报,1993,11(1):56-64.

- [2] 顾家裕,周兴熙,刘雯林等. 塔里木盆地轮南潜山古岩溶作用及油气分布[M]. 北京:石油工业出版社,2001. 67-187.
- [3] James N P, Choquette P W. Preface in: Paleokarst[M]. 1988, Springer-Verlog.
- [4] Ognjen Bonacci. Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia) [J]. 1995, Journal of Hydrology 165, 113-134.
- [5] Vail P. R., Sequence stratigraphy workbook, fundamentals of sequence stratigraphy [A]. In: AAPG Annual Convention Short Course[C]. Houston, Texas, 1988.
- [6] 徐国强,刘树根,李国蓉,等. 塔中塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比[J]. 石油与天然气地质,2005,26(1)(印刷中).
- [7] 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[J]. 石油大学学报(自然科学版),2002,26(3):5-11.
- [8] 顾家裕,塔里木盆地石炭系东向砂岩沉积环境分析及储层研究[J]. 地质学报,1996,70(2):153-161.
- [9] 郭建华,王明艳,蒋小琼,等. 塔里木盆地塔中和满西地区石炭系层序地层[J]. 中南大学学报(自然科学版),35(1):122-128.
- [10] 叶德胜,林忠民. 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[M]. 成都:四川大学出版社,2000.
- [11] 肖玉茹,王敦则,沈杉平. 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[J]. 现代地质,2003,17(1),92-98.
- [12] John E. Mylroie and James L. Carew, Karst development on carbonate islands[A], In: Unconformities and porosity in carbonate strata[C],1995,AAPG Memoir 63,55-76.
- [13] Arthur N. Palmer Geochemical models for the origin of macroscopic solution porosity in carbonate rocks[A]. In: Unconformities and porosity in carbonate strata[C]. 1995,AAPG Memoir 63,77-101.
- [14] 任美镔,刘振中主编 岩溶学概论[M]. 1983,商务印书馆.
- [15] S. W. Tinker, J. R. Ehrets and M. D. Brondos, Multiple karst events related to stratigraphic cyclicity: San Andres Formation, Yates field, West Texas[A]. In: Unconformities and porosity in carbonate strata[C]. 1995,AAPG Memoir 63,213-237.

THE MECHANISM OF RETROGRESSIVE EROSION AND KARSTIFICATION: A CASE STUDY OF CAVE FORMATION IN EARLY HERSINIAN WEATHERED CRUST IN TAHE OILFIELD

XU Guo-qiang^{1,2}, LIU Shu-gen^{1,2}, LI Guo-rong^{1,2}, WU Heng-zhi³, XIA Zai-lian¹, SUN Wei¹

(1. Resource institute, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu, Sichuan 610059, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, INOPEC, Beijing, 100083, China)

Abstract: Retrogressive erosion refers to the continued upward and head-ward erosion towards groundwater source produced by the flow of groundwater in cave under the water table after the water table in inner land on the verge of karst basin slope rises during transgression. The erosion results in multi-cycled collapse sequences and aggradational caves being developed over the original cave. The collapse sequence is composed of huge collapsed breccias and underground fluvial deposits. The aggradational cave is characterized by the filling of fluvial deposit and aggradational distribution. The complex huge cave is composed of the water table cave and the above aggradational cave. In this paper, the methods for the comparison of paleo-cave layers in the Early Hersinian weathered crust in Tahe oilfield is introduced, the result from the comparison of paleo-cave layers is showed, the mechanism of retrogressive erosion and karstification is illustrated through the analysis on configuration of the deposits filled in the huge cave and the dynamic model of underflow, and some key problems associated with retrogressive karstification are discussed.

Key words: Tahe oilfield; Cave layer; Retrogressive erosion and karstification; Collapse sequence; Genetic mechanism

(上接第 27 页)

DIURNAL DYNAMICS OF SOIL RESPIRATION AND CARBON STABLE ISOTOPE IN LUNAN STONE FOREST, YUNNAN PROVINCE

CAO Jian-hua¹, SONG Lin-hua², JIANG Guang-hui¹, XIE Yun-qiu¹, YOU Sheng-yi¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS; Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Natural Resources and Geography, CAS, Beijing, 100101, China)

Abstract: With the alkaline-sorption method, the diurnal changes of soil respiration were monitored in Lunan Stone Forest, Yunnan province. In the meanwhile, the carbon stable isotope (CSI) samples were collected and taken to laboratory, the CSI values were examined by the mass spectrometer (MAT-251). The fine days from 13 to 16, April and 21 to 24, August were selected as the monitoring period. The field works were carried out in grass and cypress community. The results show that the rate of soil respiration at daytime is lower than that at night, and it is higher in August than that April; the diurnal average value of carbon stable isotope is relative lighter in April in grass community but heavier in April in cypress community. The soil respiration keeps the negative correlation with its carbon stable isotope value, i. e. it is larger in April in grass community but larger in August in cypress community. This suggests the changes of soil respiration and carbon stable isotope are sensitive to surrounding environments. Moreover, the difference of carbon cycle and isotope exchange exists in cypress community and grass community.

Key words: Karst environment; Soil respiration; Carbon stable isotope; Lunan Stone Forest