

文章编号:1000-0550(2017)03-0460-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.03.004

# 川西北地区上三叠统卡尼阶古喀斯特的发现及研究意义

杜怡星, 时志强

成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

**摘要** 在川西北地区绵竹汉旺、安县雒水剖面上三叠统卡尼阶海绵礁(丘)灰岩顶部发现古喀斯特;野外露头可见明显的花斑状构造以及蜂窝状溶孔,显微镜下可见泥晶化颗粒,喀斯特角砾以及喀斯特溶孔充填物,其中包括泥—亮晶方解石,生物碎屑以及陆源石英颗粒;根据露头岩性和显微薄片特征判断其属于早成岩期喀斯特;喀斯特成单层发育,之上覆盖化石丰富的黄色或黑色页岩,其中的菊石化石鉴定表明其为上卡尼阶底部沉积。该喀斯特是重要的等时界面,且可作为该地区上下卡尼阶的界线。喀斯特之上的岩性在汉旺和雒水有差异:在绵竹汉旺青岩沟剖面,喀斯特灰岩之上覆盖有黑色粉砂质页岩与生屑灰岩(如层状海绵灰岩、海百合灰岩),在汉旺观音崖剖面,喀斯特面之上发育海绵丘灰岩及页岩,在安县雒水剖面,古喀斯特发育在滚落的海绵巨砾之上。综合研究表明,喀斯特的形成与早期龙门山的隆升以及卡尼期湿润气候事件在发生时间上非常相近,推测其成因与龙门山的隆升以及卡尼期湿润气候事件有关。

**关键词** 喀斯特;卡尼期湿润气候事件;龙门山;上三叠统

**第一作者简介** 杜怡星,男,1991年出生,硕士研究生,沉积学,E-mail: 280418258@qq.com

**通讯作者** 时志强,男,教授,E-mail: szqcudt@163.com

**中图分类号** P588.24<sup>+</sup>5 **文献标识码** A

## 0 引言

晚三叠世是构造活动频繁、古生态环境复杂多变、古气候变化显著的一段地质历史时期<sup>[1-2]</sup>。这一时期的温室效应十分显著,在特提斯地区,其气候主要表现为半干旱温暖的气候特征,大气中CO<sub>2</sub>浓度值超过了4 000 mL/m<sup>3</sup>,但在中—晚卡尼期期间存在两个短暂的高温期,与高温天气相伴随的是这一时期全年平均降水量的明显增多<sup>[3-5]</sup>。同时,晚三叠世构造活动频繁,位于特提斯北缘的基莫里微型陆块与欧亚板块在这一时期发生碰撞<sup>[6]</sup>,随着基莫里板块持续向北漂移,最终导致了古特提斯洋的关闭以及新特提斯洋的打开<sup>[7]</sup>。由于构造运动活跃,在特提斯地区贯穿整个卡尼期的连续地层并不多见<sup>[8]</sup>。

川西北地区在晚三叠世时期位于特提斯洋东缘。上三叠统卡尼阶沉积岩广泛出露于龙门山前地带,前人将这套沉积与诺利阶下部沉积一起归为马鞍塘组<sup>[1,9-10]</sup>。马鞍塘组下部主要为一套碳酸盐岩,该套碳酸盐岩沉积自下而上分别为一套鲕粒灰岩和海绵礁(丘)灰岩,层内可见生物碎屑颗粒和生物化石。碳酸盐岩之上则发育卡尼阶黑色页岩沉积。以前的研究认为从卡尼阶内的鲕粒灰岩到海绵礁(丘)灰岩

再到黑色页岩,反映出水体连续逐渐加深的过程<sup>[11]</sup>,新的野外考察却在川西北地区汉旺青岩沟、观音崖以及安县雒水等三个剖面的卡尼阶海绵礁(丘)灰岩顶部均发现有古喀斯特的存在,这表明该地区在卡尼期时曾出现过水深变浅的情况。该喀斯特发育于川西北地区上三叠统卡尼阶中,属于早成岩期喀斯特,其正好位于上下卡尼阶的界线附近,同时又是卡尼阶岩性变化的重要标志,其地层学意义显著。喀斯特的形成一方面是构造作用所致,另一方面与湿热的气候条件之间关系密切<sup>[12]</sup>,且该喀斯特的形成与龙门山的初次隆升以及卡尼期湿润气候事件的发生在时间上都颇为近似,其成因很有可能与二者密切相关。

## 1 区域地质背景

### 1.1 构造背景

晚三叠世的印支运动导致了中国大陆主体的合并,同时也改变了扬子板块的构造格局与沉积面貌<sup>[13]</sup>。受印支运动影响,晚三叠世华北板块与扬子板块发生碰撞,导致处于古特提斯洋东线分支的秦岭洋盆关闭<sup>[14]</sup>。四川盆地处于扬子板块西北侧,在古生代至中生代早期,扬子板块西部为稳定的被动大陆边缘盆地,地层沉积主要为巨厚的海相碳酸盐岩<sup>[15]</sup>。

由于受到印支构造作用的影响,龙门山在晚三叠世开始由北端至南端逐渐隆升出水面,四川盆地内的海水也在此时自东而西逐渐退去,盆内沉积物逐渐转变为以陆相沉积为主<sup>[13,15-16]</sup>。在中上扬子地区,上三叠统卡尼阶呈带状局限分布于龙门山前缘地区,其主要集中在四川省绵竹市九龙场至安县沸水场之间的川西北地区,在江油佛爷洞等地也有零星分布。地层出露层位主要为上三叠统马鞍塘组,几个重要剖面均位于龙门山山前断褶带边缘的4个背斜、向斜两翼<sup>[10]</sup>。

## 1.2 地层背景

上三叠统马鞍塘组局限分布于龙门山前缘什邡金河到江油马鞍塘一带,该地区在晚三叠世时位于古特提斯海东缘<sup>[17]</sup>。马鞍塘组按岩性大致可分为3段:下段岩性主要为鲕粒灰岩、海绵礁(丘)灰岩;中段以黑色泥页岩为主,部分地区存在碳酸盐岩的二次发育,故同时可见灰岩与页岩以及粉砂岩沉积;上段则为粉、细砂岩夹灰岩、泥岩沉积。有关马鞍塘组的具体时代划分此前一直存在争议,马鞍塘组建组剖面位于宝成铁路江油马鞍塘车站处,前人一直将马鞍塘组划归为卡尼阶,但在对其上部地层中菊石和瓣鳃类化石进行年限鉴定后发现马鞍塘组上部地层时代属于早诺利期,成都地质学院三叠系研究小组<sup>[9-10,13]</sup>曾将其作为一个独立地层单独划分出来并命名为石元组。本文综合前人研究结果,认为马鞍塘组的下段和中段属于卡尼阶,而其上段则属于诺利阶。时志强等<sup>[18]</sup>在睢水、青岩沟剖面发现了代表上卡尼阶底部的标志性菊石化石,由此基本可以确定出川西北地区上下卡尼阶的界线,但是卡尼阶与诺利阶之间的界线却由于缺少相关证据而无法确定。

## 2 剖面简述

研究涉及汉旺观音崖、汉旺青岩沟以及安县睢水等3个剖面,其均位于川西北地区龙门山前缘地带,剖面位置如图所示(图1)。

### 2.1 安县睢水剖面

睢水剖面位于龙门山中段,距离睢水镇北约500 m,马鞍塘组地层沿河出露,发育良好。地层厚约183.4 m(图2)。剖面描述如下:

上覆地层:

26层:上三叠统小塘子组( $T_3x$ )灰色薄至中层状粉砂质泥岩与薄至中层状细砂岩、粉砂岩互层。厚度:8.30 m。

——整合——

马鞍塘组( $T_3m$ ):

21~25层:岩性以灰色、浅灰色钙质粉砂岩及粉砂质泥岩为主,夹薄层状钙质粉砂岩、钙质细砂岩;含植物碎片。下部产瓣鳃类、腹足类化石。厚度:21.50 m。

16~20层:该段沉积主要为泥页岩和泥灰岩,内夹薄层泥质粉砂岩。产瓣鳃类、腹足类、腕足类及菊石类化石,含植物碎片及植物茎干化石。喀斯特之上的16层岩性为含生物碎屑黑色页岩,出产菊石(e.g., *Discotropitid* n.gen.n.sp.1, *Juwavitid*? n.gen.)和浮游类双壳(*Halobia comatoides* Yin)。厚度:21.20 m。

喀斯特面:喀斯特发育于第15层海绵礁(丘)灰岩的顶部,成层发育。在野外露头可见岩石表面的花斑状构造,并发育有针状或蜂窝状溶孔。属于早成岩期喀斯特。

1~15层:下卡尼阶灰岩段,该套地层下部为鲕粒灰岩段,内夹部分生屑灰岩,底部可见核形石。层内见丰富的珊瑚化石;鲕粒灰岩之上沉积物主要为生屑灰岩、凝块石灰岩,喀斯特之下的15层发育一套海绵礁(丘)灰岩。层内生物种类丰富,可见棘皮类、苔藓虫类、瓣鳃类、腹足类、腕足类化石以及

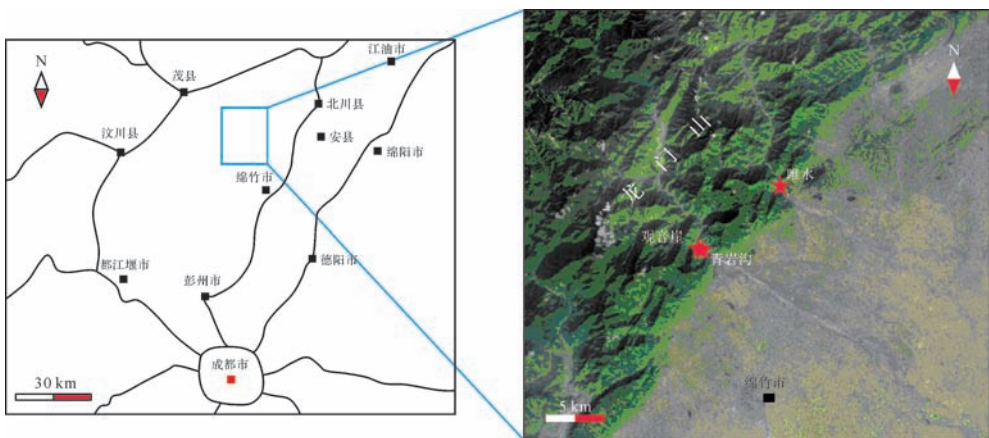


图1 汉旺青岩沟、观音崖以及安县睢水剖面位置图

Fig.1 Geographical map showing location of Qingyangou section, Guanyinya section in Hanwang and Jushui section in Anxian, northwestern Sichuan province

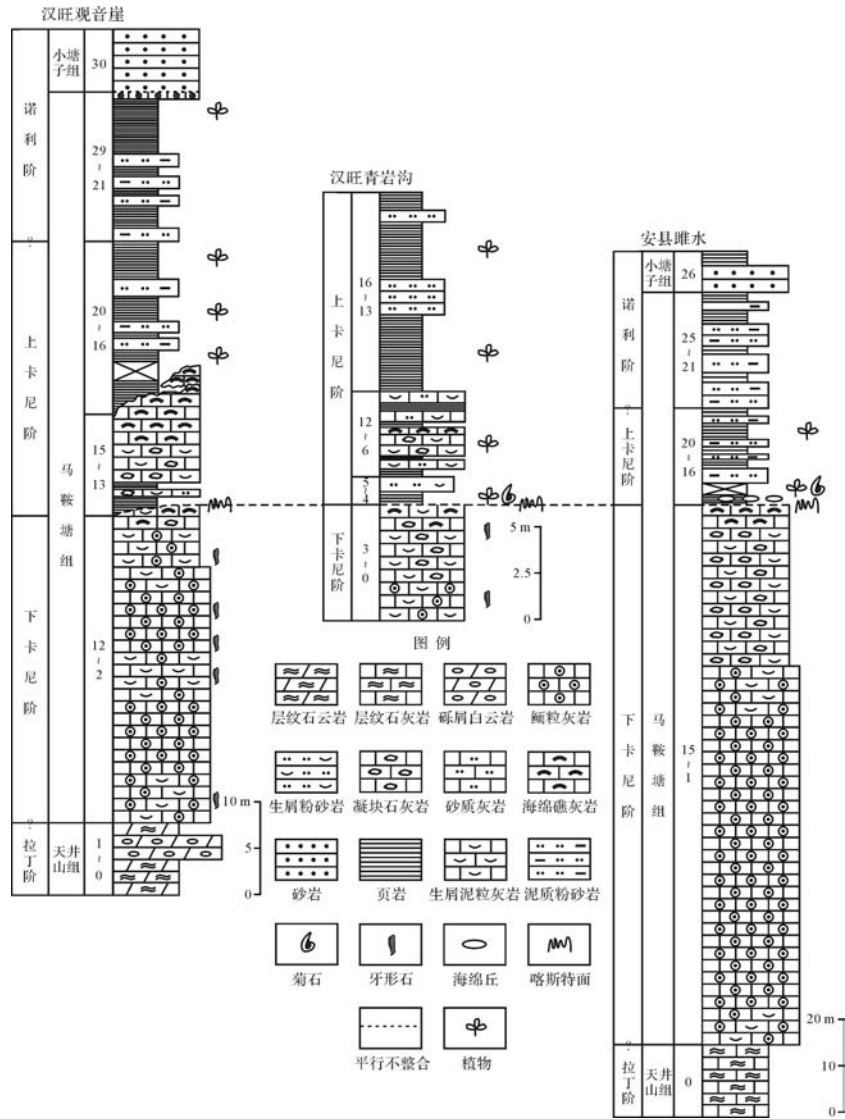


图2 汉旺观音崖、汉旺青岩沟、安县雒水剖面岩性柱状图

Fig.2 Lithological column of the Qingyangou section, Guanyinya section and Jushui section

大量的海绵骨针。厚度:117.30 m。

———整合———

下伏地层:

0层:中三叠统天井山组( $T_2t$ )白灰至白色厚层块状层纹石灰岩。厚度大于15.00 m。

## 2.2 汉旺观音崖剖面

观音崖剖面位于四川盆地西北部的绵竹汉旺镇。剖面地层从中三叠统天井山组顶部开始,一直到上三叠统小塘子组底部结束,地层的真厚度约为98 m。根据野外岩性特征划分为30层(图2)。观音崖剖面自上而下,岩性分层描述如下:

上三叠统小塘子组( $T_3x$ ):

30层:为小塘子组灰色薄到中层状钙质粉砂岩。厚度:7.30 m。

-----平行不整合-----

上三叠统马鞍塘组( $T_3m$ ):

21~29层:该段主要为页岩夹多套泥质粉砂岩沉积,层间可见植物叶片化石。该套沉积顶部为第29层灰色含砾屑鲕粒灰岩,砾屑大小不一、磨圆度较差,顶界面凹凸不平,为平行不整合面界线,其上为上三叠统小塘子组沉积。厚度:15.31 m。

16~20层:该段沉积岩性以页岩和粉砂质页岩为主,其间夹多套灰色薄层状钙质泥质粉砂岩和砂岩,岩层间可见丰富的黄铁矿颗粒,亦可见植物化石碎片。厚度:18.34 m。

13~15层:为灰岩与页岩互层沉积,下部为凝块石灰岩和生屑灰岩,之上发育深灰色中层状海绵礁(丘)灰岩,为海绵礁短暂二次生长。喀斯特之上的13层主要为薄层钙质黑色页岩,岩层中有黄铁矿颗粒分布,岩石整体有机质含量较

高,局部可见薄层生物碎屑灰岩。厚度:14.30 m。

喀斯特面:喀斯特发育于第12层第一期海绵礁(丘)灰岩的顶部,在野外露头可见岩石表面的花斑状构造,并发育有针状或蜂窝状溶孔。属于典型的早成岩期喀斯特。

2~12层:该段为碳酸盐岩沉积,其下部为灰白色含生屑鲕粒灰岩以及鲕粒灰岩,与下部的天井山组顶部呈整合接触。鲕粒灰岩段中夹有薄层的生屑灰岩。至该段上部12层岩性变为海绵礁灰岩,岩石呈深灰色,内含部分其他生物碎屑,岩石中还可见凝块石和团块。在生屑灰岩和鲕粒灰岩中出产牙形石 *Quadralella polygnathiformis*,这些牙形石可以确切地表明该段沉积属于卡尼阶。厚度:35.15 m。

———整合———

中三叠统天井山组( $T_2t$ ):

0~1层:灰白色中厚层状含藻纹层灰质白云岩以及白云岩,纹层构造发育。厚度:7.40 m。

### 2.3 汉旺青岩沟剖面

汉旺青岩沟剖面位于绵竹市汉旺镇西北约一公里的青岩沟内。出露地层总厚度约为25 m,自下而上可分为16层,但是马鞍塘组的顶底界面均不可见。岩层中可见大量生物化石,且种类丰富,例如双壳类、腹足类、头足类以及植物叶片等(图2)。剖面特征描述如下:

上三叠统马鞍塘组( $T_3m$ ):

13~16层:该段沉积以泥页岩以及粉砂质页岩为主,含有大量植物叶片化石以及少量生物碎屑。其间夹灰色中层状泥质粉砂岩,黄铁矿含量丰富。厚度:12.88 m。

6~12层:该段沉积主要以碳酸盐岩为主,中间夹多层薄层状黑色钙质页岩,岩石中可见植物叶片化石。主要岩性为生屑灰岩,可见大量生物碎屑。第9~10层为海绵礁(丘)灰岩,推测为海绵礁(丘)的第二次发育。厚度:4.50 m。

4~5层:喀斯特之上的第4层为黑色薄层状钙质页岩,可见大量的植物化石碎屑,黄铁矿颗粒较多且顺层分布。第5层为灰色薄到中层状含生屑粉砂岩,生屑主要为双壳类、棘皮类、有孔虫以及海绵碎屑等。厚度:0.90 m。

喀斯特面:喀斯特发育于第3层第一期海绵礁(丘)灰岩的顶部,该处的喀斯特以野外露头表面的花斑状构造为特征,原生的喀斯特溶孔较少见,已被后期物质所充填。

0~3层:0层主要为灰色中厚层状含生屑鲕粒灰岩,正常鲕粒占主要地位,放射鲕和复鲕数量较少,含少量生物化石。向上逐渐变为凝块石灰岩和生物碎屑灰岩,至第3层则出现海绵礁(丘)灰岩,岩石中可见海绵骨针以及其他生物碎屑。出产牙形石 *Quadralella polygnathiformis*,表明该段沉积属于卡尼阶。厚度:6.30 m。

## 3 古喀斯特特征

古喀斯特的形成一般与重大的区域性构造运动

以及相对海平面下降导致的暴露有关。喀斯特作用模式可分为两种:一种是“一般模式”,也称作经典模式,其对应的是晚成岩期喀斯特,亦称硬岩喀斯特<sup>[19]</sup>;另一种是“加勒比模式”,其对应的是早成岩期喀斯特,亦称软岩喀斯特<sup>[19-21]</sup>。早成岩期喀斯特多成层发育,岩石表面常可见花斑状构造以及蜂窝状或海绵状溶孔,镜下常见泥晶化颗粒、生物碎屑、碳酸盐以及陆源颗粒等充填物<sup>[21]</sup>。

### 3.1 宏观特征

川西北地区,安县睢水、汉旺观音崖和汉旺青岩沟等地上三叠统卡尼阶中的古喀斯特显示出早成岩期喀斯特的明显特征:成层发育、花斑构造以及海绵状或蜂窝状溶孔。

睢水剖面的古喀斯特位于剖面第15层的海绵礁(丘)灰岩顶部(图3A<sub>1</sub>),岩层内可见大量古生物化石以及海绵硬块。在海绵礁(丘)体表面,可见大量呈黄褐色,被泥晶颗粒、砂泥混合物以及生物碎屑颗粒充填形成的花斑构造(图3A<sub>2</sub>),同时岩石表面仍可见一些未被充填的蜂窝状或海绵状溶孔(图3A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>)。观音崖剖面古喀斯特位于剖面第12层第一期海绵礁(丘)灰岩的顶部,其野外露头特征与青岩沟以及睢水剖面的喀斯特类似(图3B<sub>1</sub>)。岩石表面可见喀斯特溶孔被砂泥混合物以及生物碎屑颗粒充填所形成的花斑构造(图3B<sub>2</sub>),部分岩石表面仍可见残余溶孔(图3B<sub>3</sub>)。青岩沟的古喀斯特发育在剖面第3层顶部的第一期海绵礁(丘)灰岩中,在灰色的基岩表面可见明显的花斑状构造(图3C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>),这是由于大气水体在岩石内部冲刷淋滤形成的管道被后期物质充填形成的结果,充填物呈黄褐色,多为泥晶颗粒,砂泥混合物以及生物碎屑颗粒等(图3C<sub>3</sub>)。

### 3.2 显微特征

汉旺观音崖剖面喀斯特发育于第一期海绵礁(丘)顶部,镜下可见大量的生物碎屑以及海绵骨针,同时可见碳酸盐砂泥混合物以及零星的陆源石英颗粒充填于喀斯特溶孔中。基质内可见泥晶化颗粒(4A),部分生物化石在淡水淋滤作用下也产生泥晶化现象,如图4B所示为泥晶化有孔虫。部分生物颗粒因受淡水淋滤溶解而仅剩外形,其产生的孔洞被后期的方解石充填。部分基质或充填物中可见磨圆较差,呈次棱角状的喀斯特角砾(4C)。

青岩沟剖面喀斯特发育于第一期海绵礁(丘)灰岩中,其薄片中所见现象与观音崖剖面类似。镜下可见海绵骨针化石,一些生物化石被淋滤溶解只剩下泥

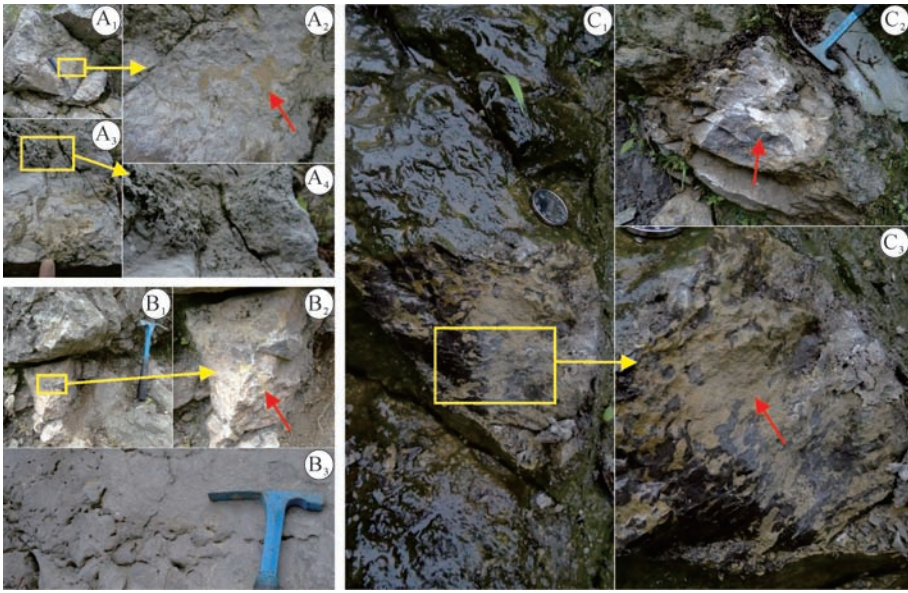


图3 川西北地区安县雒水、汉旺观音崖和青岩沟剖面古喀斯特宏观特征

A.雒水剖面古喀斯特野外照片:A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>在海绵礁(丘)体表面,可见大量呈黄褐色,被泥晶颗粒、砂泥混合物以及生物碎屑颗粒充填形成的花斑构造(红色箭头所指),A<sub>3</sub>,A<sub>4</sub>为残留的蜂窝状或海绵状溶孔;B.观音崖剖面古喀斯特野外照片:B<sub>1</sub>,B<sub>2</sub>可见岩石表面黄褐色的充填物(红色箭头所指),B<sub>3</sub>为岩石表面残留的喀斯特溶孔;C.青岩沟剖面古喀斯特野外照片:C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>可见岩石表面黄褐色的充填物,C<sub>3</sub>为C<sub>1</sub>照片的局部放大,具明显的花斑状构造,见大量黄褐色喀斯特充填物(红色箭头所指)。

Fig.3 Characteristics of the karst in Qingyangou section, Guanyinya section and Jushui section, northwestern Sichuan

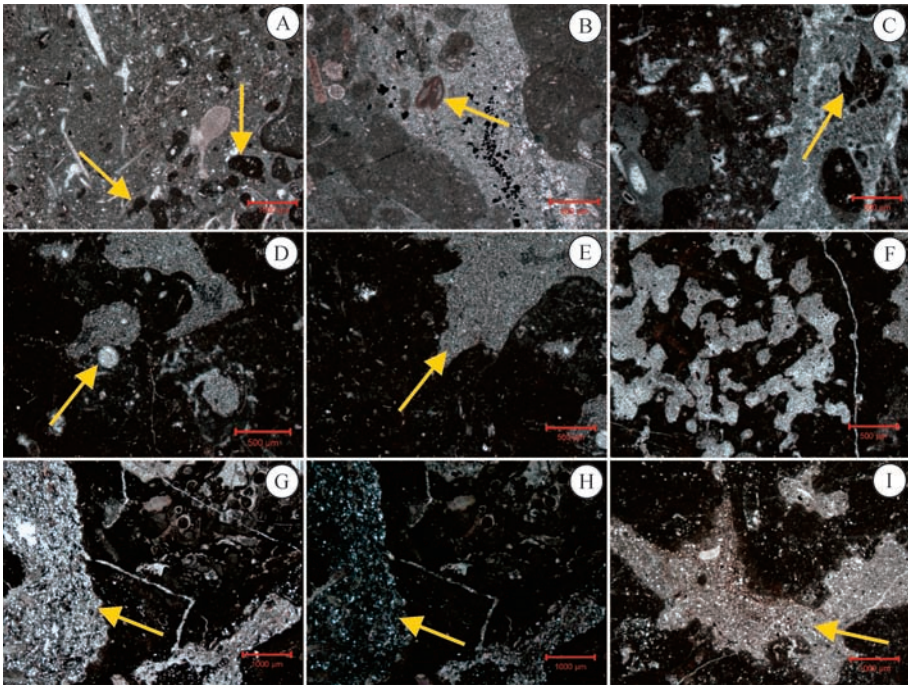


图4 川西北地区安县雒水、汉旺观音崖和青岩沟剖面古喀斯特显微特征

A~C.观音崖剖面喀斯特显微照片:A图片可见大量海绵骨针,箭头所示为泥晶化颗粒(2×10,单偏光);B.泥晶化的有孔虫(4×10,单偏光);C.箭头所示为磨圆较差,呈次棱角状的喀斯特角砾(4×10,单偏光);D~F.青岩沟剖面喀斯特显微照片:D.箭头所指为被亮晶方解石交代的生物碎屑(4×10,单偏光);E.箭头所示为喀斯特溶孔被泥微晶方解石充填(4×10,单偏光);F.喀斯特内部漫流式溶孔被微亮晶方解石充填(4×10,单偏光);G~I.雒水剖面喀斯特显微照片:G图中箭头所指为充填于喀斯特溶孔中的陆源石英颗粒(2×10,单偏光);H.图G的正交偏光,图中明显可见充填的石英颗粒(2×10,正交偏光);I.箭头所示为充填于喀斯特溶孔中的碳酸盐颗粒以及石英颗粒(2×10,单偏光)。

Fig.4 Microscopic characteristics of the karst in Qingyangou section, Guanyinya section and Jushui section, northwestern Sichuan

晶化的形态,溶解产生的孔洞被后期亮晶或微亮晶的方解石充填(图4D)。这些被充填的孔洞与泥晶的基质一起形成了与岩石表面类似的花斑状构造(图4F)。在部分基质或充填物中同样存在着磨圆较差,呈次棱角状的喀斯特角砾。

睢水剖面的喀斯特面同样发育于海绵礁(丘)灰岩之中,但与观音崖和青岩沟不同的是睢水海绵礁(丘)灰岩的溶蚀孔洞中不仅充填有碳酸盐砂质和泥质颗粒,部分孔洞内部还充填有陆源石英砂颗粒(图4G,H)。在显微镜下可见大量造礁的海绵以及其他的生物化石,部分生物颗粒溶解后被亮晶方解石充填,喀斯特溶蚀孔中充填陆源石英砂颗粒,同时在灰岩的基质中也沉积有部分的陆源石英颗粒(图4I),这可能表明在海绵礁(丘)灰岩沉积的过程中就已经开始有部分的陆源碎屑物质向盆地内输入。

### 3.3 喀斯特成因分析

在以往的喀斯特研究对象中,大多数均属于晚成岩期喀斯特。由于晚成岩期喀斯特主要基于过去对大陆型喀斯特的研究,故其又被称为大陆型喀斯特<sup>[20]</sup>;有统计数据表明,晚成岩期岩石发育的喀斯特占喀斯特总数的98%,而早成岩期喀斯特仅占2%<sup>[22]</sup>。早成岩期喀斯特的研究实例报道早期主要来自岛屿及海岸环境,岩石类型主要为早成岩期的碳酸盐岩<sup>[21,23-24]</sup>,后来随着研究的不断深入,人们发现区域性海平面下降导致的台地大面积暴露也可产生早成岩期喀斯特<sup>[25-26]</sup>。

早成岩期喀斯特一般具有以下几个重要的鉴别特征:花斑状构造、蜂窝状或海绵状溶孔、泥晶化颗粒、生物碎屑、碳酸盐以及陆源充填物<sup>[21]</sup>。此次研究发现的古喀斯特就属于典型的早成岩期喀斯特。就成因机制来看,早成岩期喀斯特与晚成岩期喀斯特在主导因素上存在重要差别<sup>[21,27]</sup>,晚成岩期喀斯特由于其岩石本身坚硬且致密,一般情况下,水体的流动通道主要依赖于岩石的裂缝、节理以及层理面<sup>[21]</sup>。而对于早成岩期的岩石来说,由于其未经历深埋藏及强压实作用,所以往往保留有较好的孔渗性,使得水体可以在颗粒之间呈漫流式流动<sup>[21]</sup>,随着时间的累计便逐渐形成管道。此次研究发现的喀斯特既是如此(图5)。但也有研究表明:若在晚成岩期孔渗层得以保存,在大气淡水的作用下也可能出现类似于早成岩期喀斯特的岩溶特征,如四川盆地龙王庙组,但此类型的喀斯特岩石中常含有易溶的膏盐以及石盐<sup>[28]</sup>。而这种现象在此次的喀斯特研究中并未

发现。

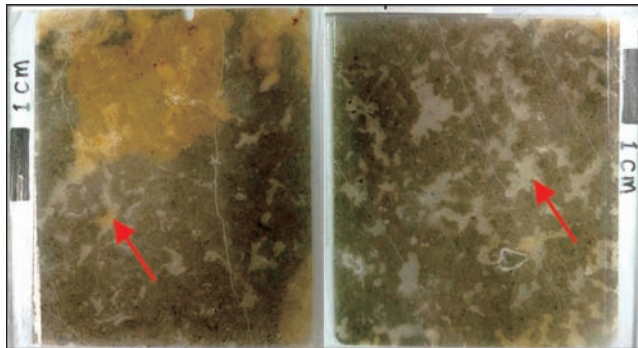


图5 喀斯特岩石内部的漫流式溶孔(箭头所示)

Fig.5 Diffuse dissolution pore in karst(Indicated by the arrows)

川西北地区卡尼阶中的喀斯特发育于海绵礁(丘)灰岩内,岩石内部含大量团块以及生物颗粒,可见其岩石在早成岩时期孔渗性较好,水体得以在碳酸盐颗粒间呈漫流式流动。之后,岩石在大气淡水与海水形成的混合水带中被缓慢溶蚀,使得岩石内部形成交织分布的网状管道(图5),而在岩石表面则出现蜂窝状或海绵状溶孔。当这些蜂窝状或海绵状溶孔被后期的亮晶方解石、泥晶颗粒、砂泥混合物以及生物碎屑等充填后,岩石表面就表现出明显的花斑状构造。

## 4 研究意义

### 4.1 地层划分意义

晚三叠世是四川盆地重要的海陆转换时期,盆地内海水在这一时期逐渐退去<sup>[29-30]</sup>,沉积岩性由海相碳酸盐岩逐渐向海相碎屑岩和陆相碎屑岩转变,因此四川盆地的三叠系沉积表现出明显的二分性。而马鞍塘组就处于四川盆地由海相向陆相转变的关键层位,是盆地内最后的海相碳酸盐岩发育的地层<sup>[10,15]</sup>。

马鞍塘组大致可分为上中下三段。前人依据古生物化石的分布特征认为马鞍塘组下段与中段属于卡尼阶,而其上段则属于下诺利阶<sup>[9,13]</sup>。赵玉峰<sup>[31]</sup>曾将川西地区中晚三叠世划分为5个双壳类生物组合带,其中双壳 *Halobia pluriradiata*-*Halobia convexa* 组合带分布于马鞍塘组下部(岩性为含生物碎屑泥岩、灰岩),含有丰富的有孔虫、菊石、鸚鵡螺及双壳类化石,该组合带所代表的地质年代为早卡尼期。而在马鞍塘组上部和须家河组下部一段二段(小塘子组)地层之中则分布有双壳 *Burmesia lirata*-*Myophoria* (*Costatria*) *napengensis* 组合带,该组合带产于粉砂质

泥岩和泥质粉砂岩中,含丰富的双壳类化石,其次为少量菊石化石。该组合带所代表的地质年代为晚卡尼期至早诺利期。纵观前人的研究,虽然部分学者运用生物地层学等方法标定了马鞍塘组的沉积时代,但却没能对其进行更进一步的划分。

Shi *et al.*<sup>[18]</sup>在观音崖剖面和睢水剖面的马鞍塘组下段生屑灰岩中均发现有牙形石 *Quadralella polygnathiformis*,这些牙形石可以确切地表明马鞍塘组下段沉积属于卡尼阶。但是仅仅通过牙形石的鉴定并不能对马鞍塘组下段的沉积时代进行更加精确的划分,同时也无法更进一步地确定上下卡尼阶的界线,即 julian 亚阶和 tualian 亚阶的界线,因为牙形石 *Quadralella polygnathiformis* 生存的时代范围包括了整个卡尼期。但是在睢水和青岩沟剖面马鞍塘组下段顶部的喀斯特面之上 2~3 m 的含生物碎屑黑色页岩中,同时发现了大量其他具有重要地层学意义的生物化石。比如菊石 (*Discotropitid* n. gen., n. sp. 1, *Juvavitid?* n. gen.) 和浮游类双壳 (*Halobia comatoides* Yin)。粗棱的 *Discotropitids* 菊石属代表的时代范围是晚卡尼早期至晚卡尼中期,即 Tualian 1 至 Tualian 2 时期<sup>[32-33]</sup>,其中缺少螺旋壳饰的菊石 *Discotropites* 来自经典的波斯尼亚 Glamoc 菊石带<sup>[32,34]</sup>,其可作为上卡尼阶底部(Tualian 1)的代表<sup>[18]</sup>。

由于菊石(*Discotropites* n.gen., n.sp.1)的出现,我们可以确定出该喀斯特的形成时间在早卡尼晚期(Julian 2)至晚卡尼早期(Tualian 1)。其正好位于上下卡尼阶的界线附近,在某种程度上来说,该喀斯特面可作为川西北地区上下卡尼阶界线的划分标志。该界面对于今后川西北地区,乃至整个四川盆地上三叠统的研究来说,尤其是在进行更为精确的地层划分时,具有重要的参考价值。

#### 4.2 古构造意义

喀斯特的形成通常与地层的暴露有关,对于海洋环境来说,在构造活动频繁的时期,当构造运动导致相对海平面下降时,岩层就会抬升至浅水地区,甚至暴露出水面,使得层内岩石遭受大气淡水或混合水的淋滤作用,从而产生岩溶喀斯特。生物化石的鉴定结果表明,川西北地区上三叠统海绵礁(丘)中古喀斯特的发育时代为早卡尼晚期(Julian 2)至晚卡尼早期(Tualian 1)。然而参考卡尼期的全球海平面变化曲线来看,这一时期的全球海平面处于上升趋势<sup>[11]</sup>,这说明这次暴露并非是由于全球性的海平面下降而产生,而是由区域性的构造抬升引起的地区相对海平面

下降所导致,就地理位置上来看,其很有可能与晚三叠世早期龙门山的构造隆升事件有关。

有学者认为,在马鞍塘沉积期(主要为卡尼期),川西北地区地层发育仍然以海相为主,此时西部的龙门山造山带并未有发生明显的隆升作用。而从小塘子沉积期开始,龙门山造山带北段开始构造隆升,并成为此后川西北地区的主要物源区<sup>[16]</sup>。而陈杨等<sup>[35]</sup>在对早诺利期小塘子组的碎屑锆石进行研究后,认为龙门山的隆升在早卡尼期就已经开始;但是晚三叠世早期川西地区的沉积物源主要还是来自北东方向和北部的秦岭造山带,这说明龙门山在晚三叠世早期隆升的规模还比较有限。此次川西北地区卡尼阶中的古喀斯特在其形成时间与陈杨等<sup>[35]</sup>得出的早期龙门山隆升的时间结果非常近似,这表明龙门山在这一时期很可能确实发生过构造隆升。但是从沉积特征上来看,龙门山隆升带来的陆源物质供给增加却并不太明显,镜下仅见部分喀斯特溶孔以及灰岩基质中充填有少量的陆源石英颗粒,大部分的喀斯特充填物主要为泥微晶以及亮晶方解石,这也在一定程度上印证了龙门山在这一时期的隆升规模还比较有限这一观点。

#### 4.3 卡尼期湿润气候事件的影响

卡尼期湿润气候事件是继二叠纪末生物大灭绝后最显著的一次全球范围内小地质时间尺度的气候变化及生物危机事件<sup>[36-37]</sup>,许多物种在卡尼事件之后开始复苏<sup>[38-39]</sup>。有人认为三叠纪时期的气候状况是相对稳定的<sup>[40-41]</sup>。然而,有同样的证据表明在晚三叠世卡尼期发生了一起剧烈的气候变化事件,气候在此时由干燥变得湿润<sup>[42-43]</sup>。人们最开始是从北阿尔卑斯碳酸盐台地生长的中断而注意到这起气候变化事件的<sup>[44]</sup>。在北英格兰地区,砂岩的广泛分布以及岩石中高岭石含量的增多被解释为是气候向湿热转变的标志<sup>[42-43]</sup>。这起事件同时也被称为卡尼期洪水事件(CPE)<sup>[43]</sup>。根据生物地层学的推断,其发生时间应该为卡尼中晚期<sup>[45-46]</sup>。卡尼期湿润气候事件在沉积特征上表现为由生物灰岩到黑色页岩的岩性突变,并伴有大量陆源硅质碎屑的输入<sup>[1,10,17,47-48]</sup>,其被 Preto *et al.*<sup>[2,48]</sup>认为是三叠纪晚期最为显著的全球性气候变化事件。

长久以来,碳酸盐台地的消亡以及黑色页岩的突然出现被认为是全球卡尼期湿润气候事件开始的重要标志<sup>[48]</sup>。但与其他特提斯地区不同的是,在川西北地区卡尼阶灰岩与黑色页岩之间发育着一层古喀

斯特面。虽然在对欧洲地区上三叠统的研究中有过关于喀斯特以及落水洞的报道<sup>[48-49]</sup>,但在有关卡尼期湿润气候事件的研究文献中,尤其是在涉及卡尼期灰岩到黑色页岩的关键岩性变化的材料中则未见关于喀斯特的论述。这表明,卡尼期湿润气候事件虽然具有全球性的影响,但由于受到不同地方区域地质作用的影响,其在表现形式上也可能存在着地域性差异。而川西北地区卡尼期湿润气候事件的产生与该地区卡尼阶内部古喀斯特,二者在发生时间与表现特征上均存在着惊人的同步性与一致性。其依据有,代表卡尼期湿润气候事件开端的黑色页岩直接覆盖于喀斯特面之上,二者形成的时间非常相近;再者,卡尼期湿润气候事件以幕次降雨量的增多为特征;而喀斯特的形成与湿润气候条件之间则存在明显的关联,喀斯特主要发育于气候湿热的地区(如热带和亚热带),气候干旱的地区很难发育喀斯特,在高寒带则基本不发育喀斯特<sup>[12]</sup>。由于这些气候湿热的地区降雨量较大,所以岩层更易被冲刷淋滤形成喀斯特溶孔。同时降雨量的增加会导致大量陆源碎屑物质输入海洋,部分陆源物质则会充填进入喀斯特溶孔。卡尼阶海绵礁(丘)灰岩顶部喀斯特的出现在某种程度上反映出在早卡尼晚期(Julian 2)川西北地区的气候状况已经由干旱开始向湿润转变。该喀斯特的形成与卡尼期湿润气候事件之间关系密切,可作为川西北地区卡尼期湿润气候事件开始的一个重要标志,其古气候意义十分显著。

## 5 结论

通过野外露头剖面观察,镜下薄片鉴定,并综合前人的研究成果,此次研究得出以下几点认识:

(1) 首次在川西北地区上三叠统卡尼阶海绵礁(丘)灰岩的顶部发现了古喀斯特,露头可见明显的花斑状构造以及蜂窝状溶孔;镜下可见交织分布的网状管道以及充填于管道及孔洞中的碳酸盐颗粒和陆源碎屑物质。根据其野外露头特征以及镜下显微特征判断该喀斯特属于早成岩期喀斯特。

(2) 该喀斯特的形成时间为早卡尼晚期(Julian 2)至晚卡尼早期(Tuvalian 1)。

(3) 早成岩期喀斯特的出现暗示了相对湿润的气候条件,其可作为川西北地区卡尼期湿润气候事件开始的重要标志。同时喀斯特的形成表明川西北地区在卡尼期发生过构造抬升,并且很有可能是早期龙门山构造隆升的结果。

## 参考文献(References)

- [1] 时志强,欧莉华,罗凤姿,等. 晚三叠世卡尼期黑色页岩事件在龙门山地区的沉积学和古生物学响应[J]. 古地理学报, 2009, 11(4): 375-383. [Shi Zhiqiang, Ou Lihua, Luo Fengzi, et al. Black shale event during the Late Triassic Carnian age: implications from sedimentary and palaeontological records in Longmen Mountains region[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(4): 375-383.]
- [2] Preto N, Kustatscher E, Wignall P B. Triassic climates-State of the art and perspectives [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 290(1/2/3/4): 1-10.
- [3] Royer D L, Berner R A, Montañez L P, et al. CO<sub>2</sub> as the primary driver of Phanerozoic climate[J]. GSA Today, 2004, 14(3): 4-10.
- [4] Royer D L. CO<sub>2</sub>-forced climate thresholds during the Phanerozoic [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(23): 5665-5675.
- [5] Retallack G J. Greenhouse crises of the past 300 million years[J]. Geological Society of America Bulletin, 2009, 121(9/10): 1441-1455.
- [6] Stampfli G, Kozur H W. Europe from the Variscan to the Alpine cycles[M]//Gee D G, Stephenson R A. European Lithosphere Dynamics. London: Geological Society, 2006, 32: 57-82.
- [7] Golonka J. Late Triassic and early Jurassic palaeogeography of the world [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 244(1/2/3/4): 297-307.
- [8] Nakada R, Ogawa K, Suzuki N, et al. Late Triassic compositional changes of aeolian dusts in the pelagic Panthalassa: response to the continental climatic change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 393: 61-75.
- [9] 邓康龄,何鲤,秦大有,等. 四川盆地西部晚三叠世早期地层及其沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(3): 204-210. [Deng Kangling, He Li, Qin Dayou, et al. The earlier late Triassic sequence and its sedimentary environment in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1982, 3(3): 204-210.]
- [10] 时志强,张华,曾德勇,等. 龙门山前缘上三叠统卡尼阶特征及其古环境、古气候意义[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2010, 37(4): 424-431. [Shi Zhiqiang, Zhang Hua, Zeng Deyong, et al. Characters of Carnian in the frontal area of Mt. Longmenshan: implications for palaeoenvironment and paleoclimate [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2010, 37(4): 424-431.]
- [11] 李勇,苏德辰,董顺利,等. 晚三叠世龙门山前陆盆地早期(卡尼期)碳酸盐缓坡和海绵礁的淹没过程与动力机制[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3460-3470. [Li Yong, Su Dechen, Dong Shunli, et al. Dynamics of drowning of the carbonate ramp and sponge build-up in the early stage (Carnian) of Longmen Shan foreland basin, Late Triassic, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3460-3470.]
- [12] 车用太,鱼金子. 中国的喀斯特[M]. 北京:科学出版社, 1985: 69-71. [Che Yongtai, Yu Jinzi. Chinese Karst[M]. Beijing: Science Press, 1985: 69-71.]



- [13] 张彪,王中蛟,时志强,等. 川西北绵竹汉旺马鞍塘组与小塘子组间不整合面的发现及意义[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2013,41(1):80-88. [Zhang Biao, Wang Zhongjiao, Shi Zhiqiang, et al. Discovery and geological significance of unconformity surface between Upper Triassic Ma'antang Formation and Xiaotangzi Formation in Hanwang of Mianzhu in Northwest Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 41(1): 80-88.]
- [14] 李江海,王洪浩,李维波,等. 显生宙全球古板块再造及构造演化[J]. 石油学报,2014,35(2):207-218. [Li Jianghai, Wang Honghao, Li Weibo, et al. Discussion on global tectonics evolution from plate reconstruction in Phanerozoic[J]. Acta Petroli Sinica, 2014, 35(2): 207-218.]
- [15] 刘树根,杨荣军,吴熙纯,等. 四川盆地西部晚三叠世海相碳酸盐岩—碎屑岩的转换过程[J]. 石油与天然气地质,2009,30(5):556-565. [Liu Shugen, Yang Rongjun, Wu Xichun, et al. The Late Triassic transition from marine carbonate rock to clastics in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 556-565.]
- [16] 陈洪德,徐胜林,林良彪,等. 龙门山造山带晚三叠世构造隆升的分段性及层序充填响应[J]. 沉积学报,2011,29(4):622-630. [Chen Hongde, Xu Shenglin, Lin Liangbiao, et al. Segmental uplift of Longmenshan Orogen and sequence filling characteristic of western Sichuan Foreland-like Basin, Later Triassic[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 622-630.]
- [17] 时志强,钱利军,曾德勇,等. 晚三叠世卡尼期碳酸盐生产危机在东特提斯地区的地质记录[J]. 地质论评,2010,56(3):321-328. [Shi Zhiqiang, Qian Lijun, Zeng Deyong, et al. Geological records of Late Triassic Carnian carbonate productivity crisis in eastern Tethys region(SW China)[J]. Geological Review, 2010, 56(3): 321-328.]
- [18] Zhiqiang Shi, Nereo Preto, Haishui Jiang, et al. Demise of Late Triassic sponge mounds along the northwestern margin of the Yangtze Block, South China: Related to the Carnian Pluvial Phase? [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 474:247-263.
- [19] Esteban M. Palaeokarst: practical applications[M]//Wright V P, Esteban M, Smart P L. Palaeokarsts and Palaeokarstic Reservoirs. Univ. Reading, 1991: 89-119.
- [20] Grimes K G. Syngenetic karst in Australia: a review[J]. Helveticite, 2006, 39(2): 27-38.
- [21] 谭秀成,肖笛,陈景山,等. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义[J]. 古地理学报,2015,17(4):442-456. [Tan Xiucheng, Xiao Di, Chen Jingshan, et al. New advance and enlightenment of eogenetic karstification[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 442-456.]
- [22] Loucks R G. Origins of reservoir heterogeneity in paleokarst reservoirs; key to understanding production[R]. Bureau of Economic Geology Centennial Lecture Program, 2009: 12-15.
- [23] Mylroie J E, Carew J L. Land use and carbonate island karst [C]//Beck B F, Stephenson J B. The Engineering Geology and Hydrogeology of Karst Terranes. Brookfield, Illinois: A. A. Balkema, Brookfield, 1997: 3-12.
- [24] Mylroie J E, Carew J L. Speleogenesis in coastal and oceanic settings[C]//Klimchouk A B, Ford D C, Palmer A N, et al. Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville, Alabama: National Speleological Society, 2000: 226-233.
- [25] Xiao Di, Tan Xiucheng, Xi Aihua, et al. An inland facies-controlled eogenetic karst of the carbonate reservoir in the Middle Permian Maokou Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 72: 218-233.
- [26] 肖笛,谭秀成,郝爱华,等. 四川盆地南部中二叠统茅口组碳酸盐岩岩溶特征:古大陆环境下层控型早成岩期岩溶实例[J]. 古地理学报,2015,17(4):457-476. [Xiao Di, Tan Xiucheng, Xi Aihua, et al. Palaeokarst characteristics of carbonate rocks of the Middle Permian Maokou Formation in southern Sichuan Basin; example of strata-bound eogenetic karst in palaeo-continental settings [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 457-476.]
- [27] Vacher H L, Mylroie J E. Eogenetic karst from the perspective of an equivalent porous medium [J]. Carbonates and Evaporites, 2002, 17(2): 182-196.
- [28] 金民东,曾伟,谭秀成,等. 四川磨溪—高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素[J]. 石油勘探与开发,2014,41(6):650-660. [Jin Mindong, Zeng Wei, Tan Xiucheng, et al. Characteristics and controlling factors of beach-controlled karst reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 650-660.]
- [29] 罗志立. 扬子古板块的形成及其对中国南方地壳发展的影响[J]. 地质科学,1979(2):127-138. [Luo Zhili. On the occurrence of Yangze old plate and its influence on the evolution of lithosphere in the southern part of China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1979(2): 127-138.]
- [30] 边兆祥,朱夔玉,金以钟,等. 四川龙门山印支期构造发展特征[J]. 四川地质学报,1980,00(1):1-10. [Bian Zhaoxiang, Zhu Kuiyu, Jin Yizhong, et al. The development characteristics of Longmen Mountains in Sichuan during Indosinian[J]. Acta Geologica Sichuan, 1980, 00(1): 1-10.]
- [31] 赵玉峰. 川西地区中晚三叠世多重地层划分对比及沉积体系分析[D]. 成都:成都理工大学,2009:30-31. [Zhao Yufeng. Multiple stratigraphic division and correlation and depositional system analysis of the middle Late Triassic in west of Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009: 30-31.]
- [32] Krystyn L. Stratigraphy of the Hallstatt region [J]. Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 1980, 35: 69-98.
- [33] Tozer E T. Canadian Triassic ammonoid faunas[J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 1994, 467: 1-663.
- [34] Diener C. Ladinic, carnic, and Noric faunas of Spiti [M]//Memoirs Geological Survey of India, Palaeontologia Indica (Ser. 15), Calcutta, 1908: 1-157.
- [35] 陈杨,刘树根,李智武,等. 川西前陆盆地晚三叠世早期物源与龙门山的有限隆升:碎屑锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 大地构造

- 与成矿学, 2011, 35(2): 315-323. [Chen Yang, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb geochronology approaches to the sediment provenance of western Sichuan foreland basin and limited uplift the Longmen mountains during the early stage of Late Triassic[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(2): 315-323.]
- [36] Raup D M, Sepkoski J, Jr. Mass extinction in the marine fossil record[J]. *Science*, 1982, 215(4539): 1501-1503.
- [37] Kump L R. The geochemistry of mass extinction[M]//Mackenzie F T. *Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks. Treatise on Geochemistry*, Vol. 7. Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2003: 351-367.
- [38] Hallam A, Wignall P B. *Mass Extinctions and Their Aftermath* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [39] Chen Zhongqiang, Benton M J. The timing and pattern of biotic recovery following the end-Permian mass extinction[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(6): 375-383.
- [40] Kutzbach J E, Gallimore R G. Pangaeian climates; megamonsoons of the megacontinent[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(D3): 3341-3357.
- [41] Parrish J T. Climate of the supercontinent Pangea[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 215-233.
- [42] Simms M J, Ruffell A H. Synchronicity of climatic change and extinctions in the Late Triassic[J]. *Geology*, 1989, 17(3): 265-268.
- [43] Simms M J, Ruffell A H. Climatic and biotic change in the late Triassic[J]. *Journal of the Geological Society*, 1990, 147(2): 321-327.
- [44] Schlager W, Schelnerberger W. Das Prinzip stratigraphischer Wenden in der Schichtenfolge der Noedlichen Kalkalpen[J]. *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft Wien*, 1974, 66-67: 165-193.
- [45] Hornung T, Brandner R. Biochronostratigraphy of the Reingraben Turnover (Hallstatt Facies Belt): local black shale events controlled by the regional tectonics, climatic change and plate tectonics[J]. *Facies*, 2005, 51(1/2/3/4): 460-479.
- [46] Rigo M, Preto N, Roghi G, et al. A rise in the carbonate compensation depth of western Tethys in the Carnian (Late Triassic): deep-water evidence for the Carnian Pluvial Event[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 246(2/3/4): 188-205.
- [47] 时志强, 钱利军, 熊兆军, 等. 中国西南部地区卡尼期危机及其成因探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(3): 227-232. [Shi Zhiqiang, Qian Lijun, Xiong Zhaojun, et al. Carnian crisis occurring in SW China and its ideational origin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(3): 227-232.]
- [48] 金鑫, 时志强, 王艳艳, 等. 晚三叠世中卡尼期极端气候事件: 研究进展及存在问题 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 105-115. [Jin Xin, Shi Zhiqiang, Wang Yanyan, et al. Mid-Carnian (Late Triassic) extreme climate event: advances and unsolved problems [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 105-115.]
- [49] Carmignani L, Conti P, Massa G, et al. Note Illustrative Della Carta Geologica d'Italia; Alla Scala 1:50.000" Foglio 249-Massa Carrara" [M]. Italia: Servizio Geologicod' Italia, 2007: 200.

## Discovery of the Upper Triassic Karst in Northwest Sichuan Basin, China: Implications for Carnian Tectonic and Paleoclimatic Evolution

DU YiXing, SHI ZhiQiang

Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** A karst surface is first found at the top of the Upper Triassic Carnian sponge limestone at Hanwang sections in Mianzhu and Jushui section in Anxian, northwestern Sichuan Province, China. Piebald structures and honeycomb dissolved pores are obvious in the karst outcrops, and karst breccia, filling material (e.g., micritic-sparry calcite and terrigenous quartz grains) in the dissolved pores and micritization granules are discovered with microscope. According to the microscopic characteristics and the lithology, the eogenetic karst is determined to be a single layer, overlaid yellow and black shale containing abundant marine fossils. The identification of ammonoids in the shales shows that the karst is an important isochronous surface regarded as the boundary of the upper and lower Carnian. The strata above the karst are different between the Hanwang sections and Jushui section, i.e., the overlying rocks above the karst in the Qingyangou section, Hanwang are black silty shale and bioclastic limestone (e.g. lamellated sponge limestone and crinoidal limestone) while in Guanyinya section, Hanwang, the overlying rocks above the karst are shale and moundy sponge limestone. However, karst caves are developed at the top of sponge boulders in the Jushui section. Comprehensive research implies that the formation time of this karst is close to the occurrence of the Longmen Mountain uplift and the Carnian Pluvial Event, it is thus inferred that the karst was caused by the joint effect of uplift of Longmen Mountain and Carnian paleoclimatic event.

**Key words:** Karst; Carnian Pluvial Event; Longmen Mountain; Upper Triassic