

# 川东南—黔西北桐湾Ⅲ幕岩溶古地貌恢复

冯伟明<sup>1,2)</sup>, 谢渊<sup>1,2)</sup>, 李嵘<sup>1,2)</sup>, 罗建宁<sup>1)</sup>, 林家善<sup>1,2)</sup>, 刘建清<sup>1,2)</sup>, 赵瞻<sup>1,2)</sup>

1) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;

2) 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都, 610081

**内容提要:**通过对川东南—黔西北灯影组露头、钻井岩芯的详细观察分析,认为灯影组中上部发育一系列的古岩溶标志,包括岩溶角砾岩、充填的溶洞溶缝、含铁质古风化壳等。在结合前人对上扬子桐湾运动研究的基础上,认为川东南—黔西北大部分地区由Ⅲ幕和Ⅱ幕叠加形成了寒武系与震旦系之间的平行不整合面。采用“印模法”恢复桐湾Ⅲ幕岩溶古地貌,“印模”为下寒武统“牛蹄塘组+明心寺组+金顶山组”;“印模”如果包括麦地坪组,“印模”底界将具明显穿时性。根据“印模”地层分布及古地貌指示,研究区岩溶古地貌主体呈南北向展布,具有东高西低的特征,东部发育岩溶高地,西侧为岩溶洼地,中部则发育岩溶斜坡。岩溶高地和岩溶斜坡可以进一步划分为残丘、平台以及上斜坡、下斜坡等次级岩溶古地貌单元。

**关键词:**古岩溶标志;桐湾运动;岩溶古地貌;灯影组;麦地坪组;川东南—黔西北

四川盆地震旦系灯影组天然气层的勘探和开发主要集中在川中地区,钻遇震旦系的钻井多达上百口,在川中发现了威远、磨溪—高石梯等含气构造。威远气田发现之后的几十年,人们对灯影组储层进行了大量研究,认为灯影组为区域性岩溶储层,非均质性很强,储层的分布主要受古岩溶的控制(王兴志等,1996;向芳等,2001;陈时学等,2004;朱东亚等,2013;杨威等,2014;罗冰等,2015)。有人认为“绵阳—长宁”拉张槽控制四川盆地灯影组的岩溶古地貌(刘树根等,2013;刘树根等,2016);还有人认为拉张作用形成的侵蚀谷控制了岩溶古地貌(汪泽成等,2014;谷志东等,2014);还有人认为桐湾期整体隆升背景下的局部差异升降,造成了岩溶古地貌差异(武赛军等,2016)。近年还有人通过“印模法”恢复四川盆地灯影期末的古岩溶地貌(刘宏等,2015;杨雨等,2014),但其“印模地层”底界局部明显穿时,因此,恢复的桐湾期末的古岩溶地貌可能存在一定问题。

川东南—黔西北区内勘探和研究程度均较低,前人对该区灯影组的古岩溶垂向结构及古岩溶地貌恢复的研究薄弱(曹建文等,2012;刘宏等,2015;杨雨等,2014)。笔者等在前人研究的基础上,利用的

野外露头、钻井岩芯等资料,结合区域地质条件,对区内灯影组古岩溶识别、古地貌特征进行了详细的研究分析,利用“印模法”恢复该区桐湾期末古地貌,但“印模”的选择与前人有所不同,其恢复的古地貌也更具合理性,这些成果对拓展川东南—黔西北灯影组的油气勘探也具积极意义。

## 1 地质背景

研究区处于上扬子地台的东南部(张鹏等,2015;冯动军等,2016),构造上位于川南低陡断褶带南部和黔北娄山构造带北部(图1),震旦系灯影组主要为局限台地相沉积,可进一步划分为潮坪、泻湖及浅滩等几个亚相沉积(李宇翔,2009;李英强,2013)。灯影组自下而上可分为四段:灯一段主要为厚层块状泥—粉晶白云岩,藻类少量,常称之为“贫藻段”;灯二段藻类发育,岩性主要为厚层状藻纹层白云岩、藻叠层白云岩、藻砂屑白云岩,常称之为“富藻段”,常见角砾岩以及雪花状、葡萄花边状等构造(李英强,2013;周慧等,2015)(图2);灯三段和灯四段总体颜色较浅,岩性主要为厚层块状粉晶白云岩、细晶白云岩及中—厚层状藻纹层,局部夹硅质白云岩,与灯二段、灯四段相比较,灯三段藻类较

注:本文为中国地质调查局项目(编号:1212010782003、12120115004101)和所控青年基金项目(编号:所控基[2014]-02)资助成果。

收稿日期:2016-12-26;改回日期:2017-06-10;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.05.010

作者简介:冯伟明,男,1986年生,硕士,工程师。主要从事沉积学、石油地质学相关的地质调查与综合研究。Email: fengweiming009@163.com。

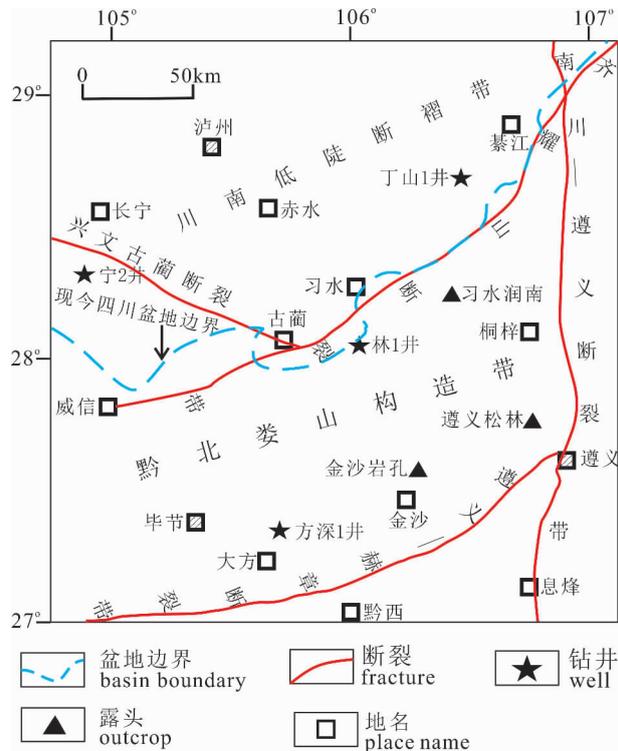


图1 川东南—黔西北构造简图

Fig. 1 Tectonic map of the Southeastern Sichuan and Northwestern Guizhou

少。需特别指出,由于研究区在灯三段沉积期位于浅水台地相区,而非深水台盆相区,因此该区灯三段未见深色泥页岩段,灯三段和灯四段难以通过岩性区分。

扬子地台甚至全球范围内,在晚震旦世末期都沉积了面积广的厚度大的浅海碳酸盐岩,局部形成了盐类沉积(Li Da et al., 2009; 王立成等, 2013),从前人关于晚震旦世—早寒武世古气候和古海洋环境研究来看(张同钢等, 2004; Hoffman et al., 2009; Li Da et al., 2009; 陈雅丽等, 2015),扬子地区灯影期位于典型的副热带高压带内,具有相时稳定的温暖湿润古气候条件,海水温度较高,氧化—还原条件较稳定,海洋水体条件有利于藻类等生物大量繁殖。但在灯影组顶界,地层岩性突变,震旦纪—寒武纪之交的全球事件与古海洋环境和古气候条件的剧烈变化有关(许清华等, 1986; Hoffman et al., 2009; Li Da et al., 2009; 陈雅丽等, 2015),而在相对较小范围的扬子地台内,震旦纪—寒武纪之交的沉积—成岩环境巨变与桐湾构造运动密切相关。

震旦系灯影组沉积之后,经历了复杂的构造演化,前后经历了多期幕式构造运动,而晚震旦世末—

早寒武世初发生的桐湾运动对灯影组影响最广泛。桐湾运动原是指形成湘西黔阳县下寒武统五里牌组和南华系南沱组冰碛层间的不整合的构造运动(劳秋元, 1980),之后其含义发生了诸多变化。但目前石油地质学界大多数学者(汪泽成等, 2014; 谷志东等, 2014; 邢凤存等, 2015; 武赛军等, 2016)倾向于将“桐湾运动”界定为扬子地区震旦纪与寒武纪之间的构造运动,表现为两者之间的不整合面,代表震旦纪末的大规模抬升运动,界面上普遍发育含铁质粘土层古风化壳,并造成灯影组上部地层被剥蚀。

有人将桐湾运动划分为3幕地壳升降运动(汪泽成等, 2014; 谷志东等, 2014; 邢凤存等, 2015),每幕运动均导致地层抬升、剥蚀,形成不整合面。桐湾运动I幕发生在灯二段与灯三段之间;桐湾运动II幕发生在灯影组四段与寒武系组芬兰统麦地坪组之间;桐湾运动III幕的产生时间最晚,发生在寒武系组芬兰统麦地坪组与下寒武统牛蹄塘组之间(图2)。在中上扬子地台大部分区域桐湾运动III幕和II幕两个构造面普遍合并为一个强构造面,表现为叠加形成的寒武系/震旦系之间的平行不整合面,缺失麦地坪组地层。桐湾运动的每幕都能造成灯影组沉积物抬升至地表接受大气淡水的淋滤,但发生岩溶作用的规模不同(汪泽成等, 2014; 谷志东等, 2014; 邢凤存等, 2015; 武赛军等, 2016),从不整合面的分布规模和剥蚀地层的厚度来看,普遍认为桐湾运动I幕强度最弱。

## 2 桐湾期古岩溶特征

目前古岩溶的定义很多,本文将古岩溶限定为:沉积物成岩之后暴露于地表,在表生风化期接受地表水以及地下水作用而发生的溶蚀充填,不包括(准)同生期、埋藏期的溶蚀及充填作用(黄思静, 2010; 谭秀成等, 2015)。在前人关于灯影组古岩溶研究成果的基础上,根据研究区内野外露头观察,古岩溶标志主要发育在灯影组的中上部,宏观的古岩溶标志有:岩溶角砾岩、溶蚀缝洞的充填、渗流豆等成岩构造。

岩溶角砾岩被认为是古岩溶作用最直接和最重要的岩石学识别标志(Sofiya et al., 2003; 黄思静, 2010; 刘怀仁等, 1991; 施泽进等, 2011; Nieto et al., 2014),岩溶角砾岩是在水岩作用及重力分异作用下产生(邹胜章等, 2016),灯影组上部较发育。溶洞主要被分选磨圆较差的白云石角砾和灰黑色含炭质泥岩全充填,角砾主要来自灯影组围,角砾间为垮

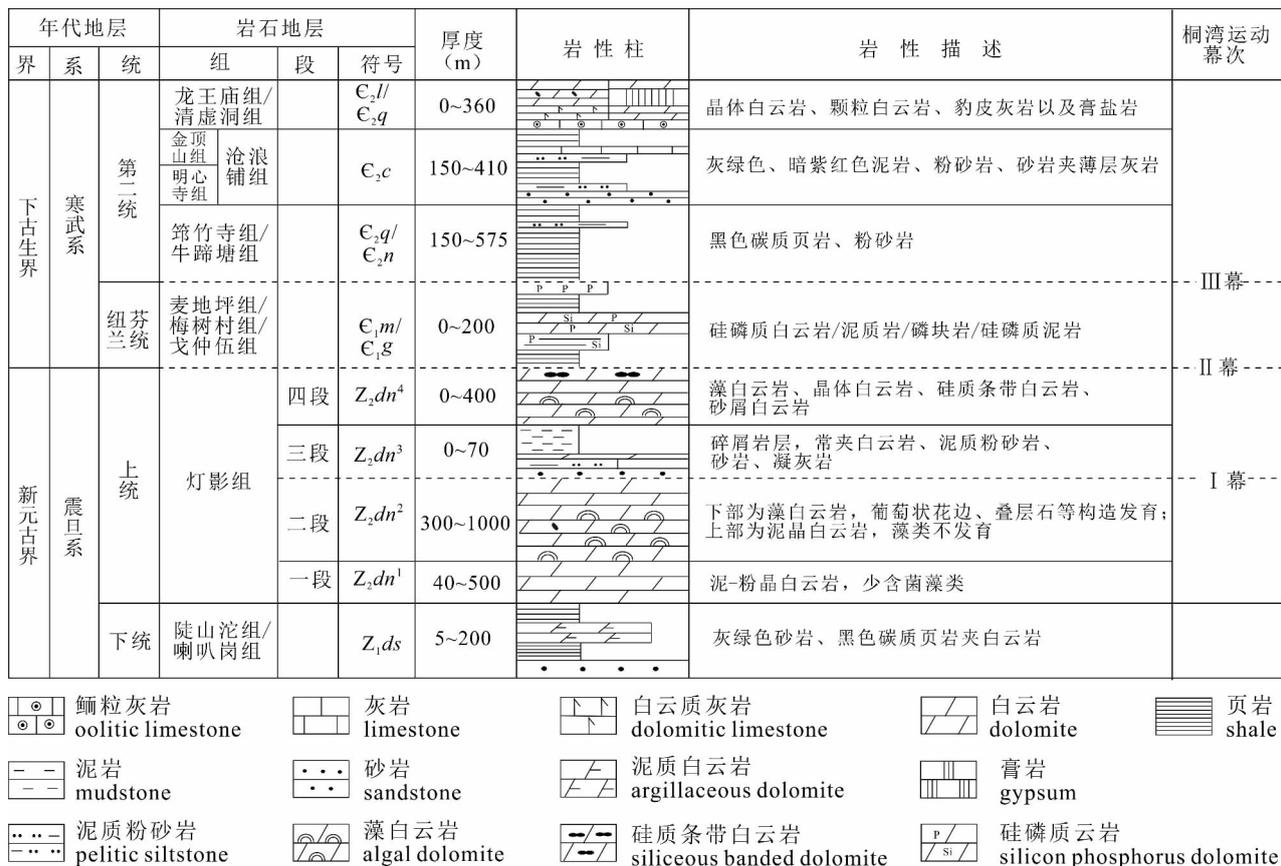


图2 上扬子地区震旦系—寒武系第二统地层及桐湾运动幕次划分方案(据周慧等,2015 修改)

Fig. 2 Stratigraphic division of the Sinian (Ediacaran)—the Second Series of Cambrian and subdivision of the Tongwan movement (modified from Zhou Hui et al., 2015&)

塌的上覆牛蹄塘组含炭质泥页岩(图3a)。

渗流豆的出现也能反映其处于陆上暴露的环境。灯影组中上部的渗流豆因有核心,外形较圆而呈浑圆状。渗流豆具有多层的圈层包壳,包壳厚度不均,重力作用特征明显,但包壳的下侧总是较厚(图3b)。

灯影组中、上部常见在微张裂缝基础之上发育的扩溶缝,以及大型顺层溶洞以及联通性较好的溶蚀孔洞,大多为古岩溶活跃带水平潜流带的产物。灯影组中、上部扩溶缝以化学沉积物充填为主,缝宽及延伸距离均较小,灯影组上部的扩溶缝主要为高角度缝,溶蚀缝洞均可见机械充填沉积和化学充填沉积物,充填物成分较为复杂,缝洞内被鞍状白云石、石英及黏土、黄铁矿半充填—全充填(图3c)。

灯影组顶部常发育古岩溶风化壳,主要为碳酸盐岩长时间暴露地表风化淋滤形成(罗贝维等, 2015)。从岩性接触关系上看,寒武系/震旦系不整合表现为由灯影组灰白色白云岩向牛蹄塘组的黑色

炭质泥页岩过渡,之间夹杂少量薄层含铁质古风化壳(图3d)。

桐湾运动 I 幕发生在灯二段与灯三段之间,地壳抬升导致区内碳酸盐岩发生古岩溶作用,区内未见该幕构造运动形成的古风化壳,但岩溶角砾岩、溶蚀缝洞的充填等古岩溶标志常见,但川中威远和川北南江等地广泛发育一个与之对应的平行不整合面(汪泽成等, 2014; 谷志东等, 2014; 邢凤存等, 2015)。区内“灯一段+灯二段”的残余厚度在区内基本稳定,普遍为 300 m 左右,表明桐湾运动 I 幕并未明显造成区内灯二段地层的剥蚀。也反映了桐湾运动 I 幕造成的古地貌高程差和坡降都相对很小,以至于该幕运动在研究区内不发育古风化壳,而灯二段与灯三段之间为整合接触关系。

研究区内桐湾运动 II 幕和 III 幕叠加形成了寒武系与震旦系之间的平行不整合面,在垂向上这两幕运动形成了大量的溶蚀缝洞、岩溶角砾岩等古岩溶标志,即在灯影组顶部不整合面之上发育 10~90

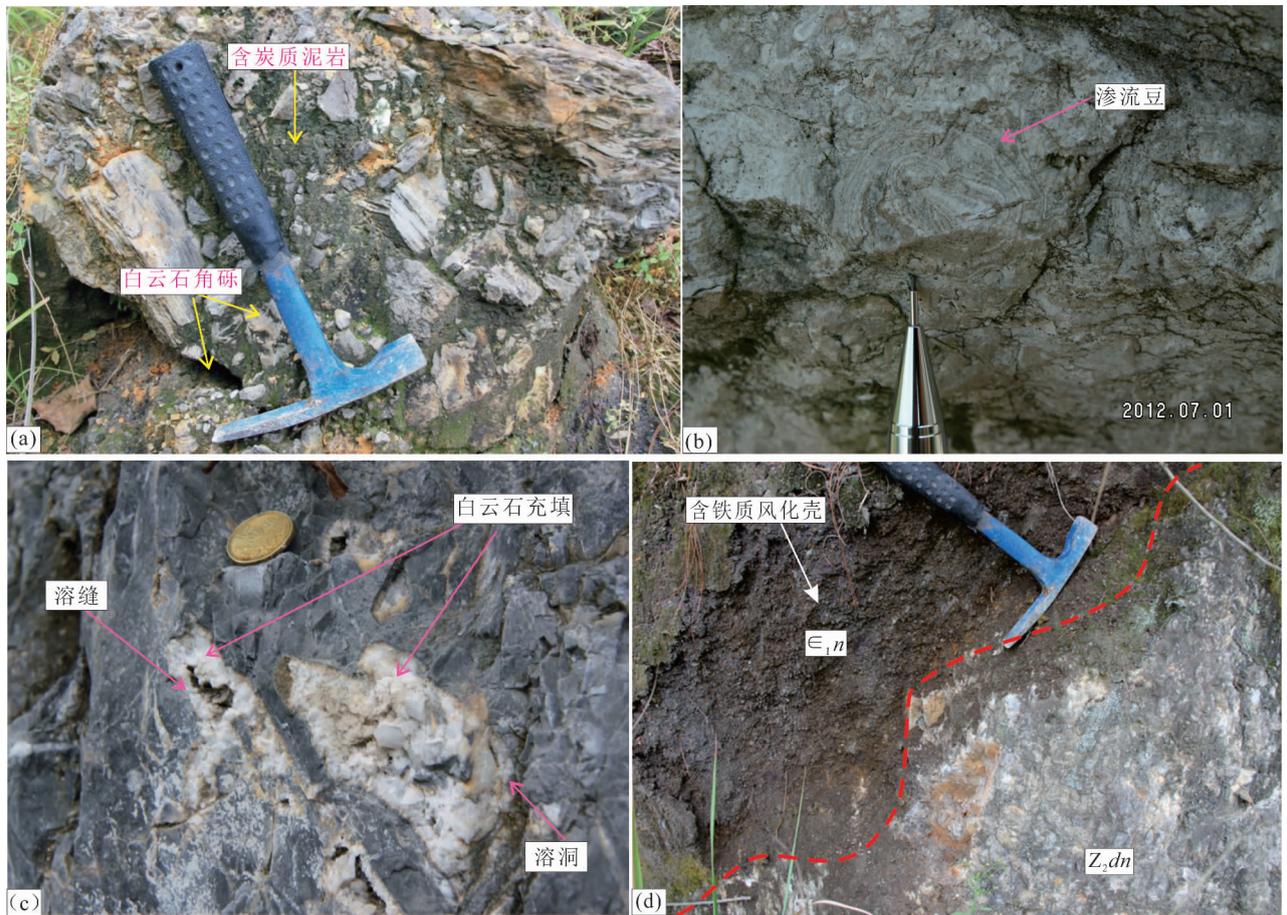


图3 川东南—黔西北灯影组古岩溶宏观特征

Fig. 3 Characteristics of paleokarst in the Dengying Formation, Sinian (Ediacaran), in the Southeastern Sichuan and Northwestern Guizhou

(a) 灯影组顶部岩溶角砾岩(遵义松林);(b)灯影组中上部渗流豆(金沙岩孔);(c)灯影组上部溶蚀缝洞充填物(遵义松林);(d)  $E_{1n}$ — $Z_{2dy}$  不整合面之上的古风化壳(遵义松林)

(a) Karst breccia on the top of the Dengying Formation, Sinian (Ediacaran), (Zunyi Songlin); (b) vadose pisolith in the middle and upper part of the Dengying Formation (Jinsha Yankong); (c) karst crack and karst cave in the upper part of the Dengying Formation, Sinian (Ediacaran), (Zunyi Songlin); (d) weathering crust above the  $E_{1n}$ — $Z_{2dy}$  unconformity surface (Zunyi Songlin)

cm 厚含铁质古风化壳(图 3d)。而桐湾运动Ⅲ幕产生的不整合面在中上扬子地区均发育,具有良好的对比性,例如邻区贵州织金戈仲伍剖面可见麦地坪组(戈仲伍组)顶部的古岩溶不整合面(毛铁等, 2015)(图 4)。另外,区内“灯三段+灯四段”的残余厚度变化较大,在 0~400 m 之间变化,在开阳洋水剖面“灯三段+灯四段”被剥蚀缺失,而残厚最厚在宁 2 井约 400 m,表明桐湾运动Ⅲ幕和Ⅱ幕导致“灯三段+灯四段”地层受到不同程度的剥蚀,桐湾运动Ⅱ幕和Ⅲ幕造成古地貌高程差和坡降相对增大。

### 3 桐湾期古地貌恢复

#### 3.1 古地貌恢复方法

岩溶古地貌揭示了不整合侵蚀面之下的碳酸盐岩在表生期遭受溶蚀、剥蚀所形成的各种古地貌。岩溶古地貌的恢复常用的方法有残余厚度法、“印模”法、“V”字填图法等(夏日元等, 1999; 向芳等, 2001; Loucks et al., 2004; 文华国等, 2009; 汪泽成等, 2014)。一般较多采用残余厚度法或“印模”法恢复岩溶古地貌。

笔者等在研究过程中发现,利用“残余厚度法”恢复灯影组古岩溶地貌存在以下问题:川东南—黔西北地区震旦系灯影组露头 and 钻井很少,且大多出露不完整或未钻穿,而灯三段、灯四段划分也比较困难,因此不论统计整个灯影组厚度还是统计“灯三

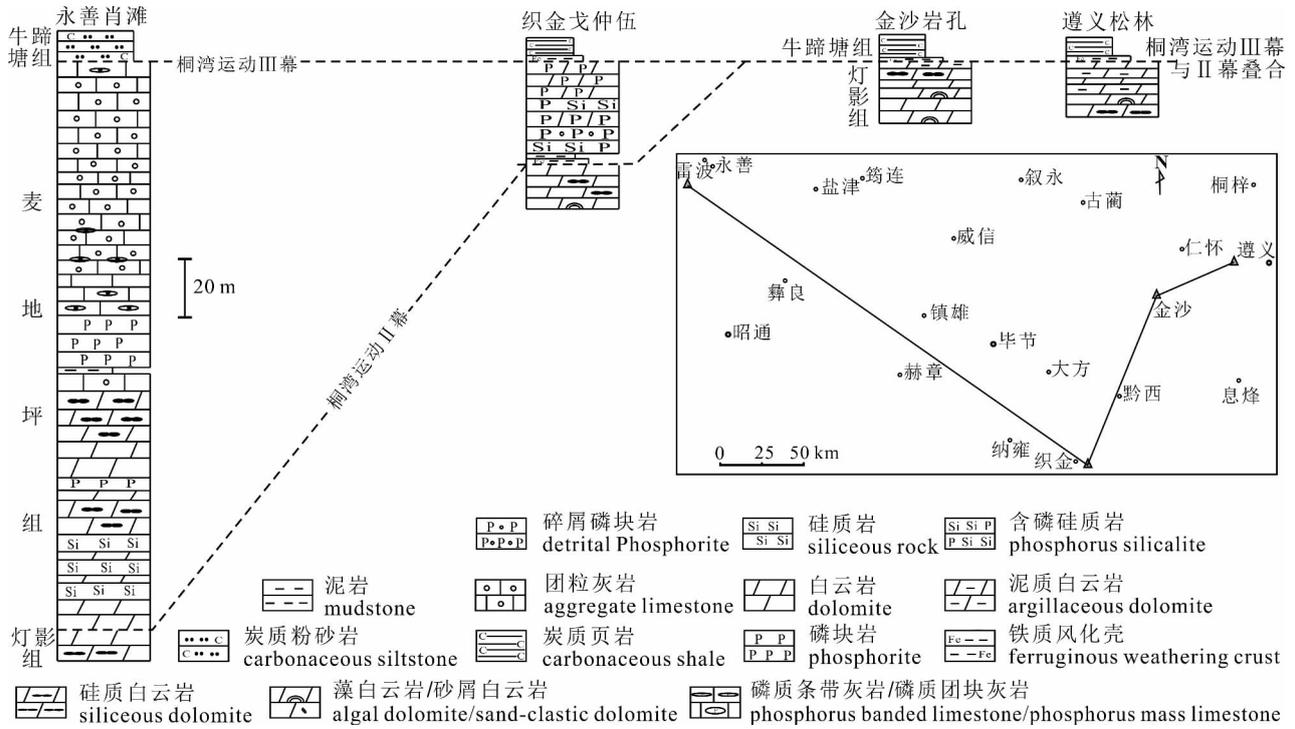


图4 川南—黔中—黔西北麦地坪组横向变化(永善肖滩剖面据李国祥等, 2001; 织金戈仲伍剖面据毛铁等, 2015)

Fig. 4 Lithostratigraphic and thickness changes of the Maidiping Formation (data of the Xiaotan profile in Yongshan County from Li Guoxiang et al., 2001& ; data of the Gezhongwu profile in Zhijin county from Mao Tie et al., 2015& )

段+灯四段”残余厚度,实际上通过“残厚法”进行桐湾期岩溶古地貌的恢复均不可行。

与“残厚法”比较,“印模法”恢复桐湾运动Ⅲ幕的岩溶古地貌具有的主要优点是分布稳定、易于识别、可对比性强、数据点较多等优点,其结果也更为合理。采用“印模法”恢复古地貌,其基准面的选择尤其关键。本文采用金顶山组顶界作为“印模法”的基准面,其原因有以下几个方面:

(1) 研究区内桐湾运动Ⅲ幕不整合面之上依次沉积了下寒武统牛蹄塘组、明心寺组、金顶山组,属于一个完整的海侵—海退二级旋回,该旋回内不存在不整合面,即不存在地层剥蚀或沉积间断(李伟等, 2012; 孟晓庆, 2007),但在邻区黔北瓮安白岩剖面金顶山组顶部存在一套累计厚度可达 10 m 的海退型紫红色铁质砂岩、含砾粗砂岩,表明金顶山组/清虚洞组之间存在隆升暴露及沉积间断,因此“印模”不应包括清虚洞组。

(2) 金顶山组之上为清虚洞组,该期整个上扬子均为浅水碳酸盐台地沉积区域,海底古地貌高程差很小(冯伟明等, 2014),充填于上扬子盆地的“牛蹄塘组+明心寺组+金顶山组”碎屑岩之上,对桐湾期末的古地貌具有“填平补齐”作用(汪正江

等, 2012),因此可忽略金顶山组顶界的古地貌高程差。

(3) 研究区内灯影组以及麦地坪组沉积期都位于台地相区,不存在由浅水台地相演变为深水盆地相的问题,沉积相相对“印模法”影响较小。

有人也采用了“印模法”恢复整个四川盆地及邻区的灯影组岩溶古地貌,其“印模”包括了麦地坪组的残余厚度(杨雨等, 2014; 刘宏等, 2015; 金民东等, 2017),但笔者等认为存在一些不足之处。因为四川盆地及邻区平面上面积大,而麦地坪组的残厚变化大,大都在 0~200 m 之间(陈志明等, 1987; 李国祥等, 2001; 薛耀松等, 2006),云南禄劝岔河厂一带厚度最大,可达 251 m(陈志明等, 1987; 薛耀松等, 2006),麦地坪组顶界为桐湾运动Ⅲ幕产生的平行不整合面,该组底界为Ⅱ幕产生的平行不整合面(图2、图4)。在缺失麦地坪组的区域,其恢复的是桐湾运动Ⅲ幕之前的古地貌;而在残留麦地坪组的区域,其恢复的是桐湾运动Ⅱ幕之前的古地貌(图4),从等时性来看,他们选择的“印模”恢复的古地貌具明显穿时性,笔者等根据前人的测年资料(王富良等, 2016; 周明忠等, 2008),估算穿时可达 10 Ma 以上。

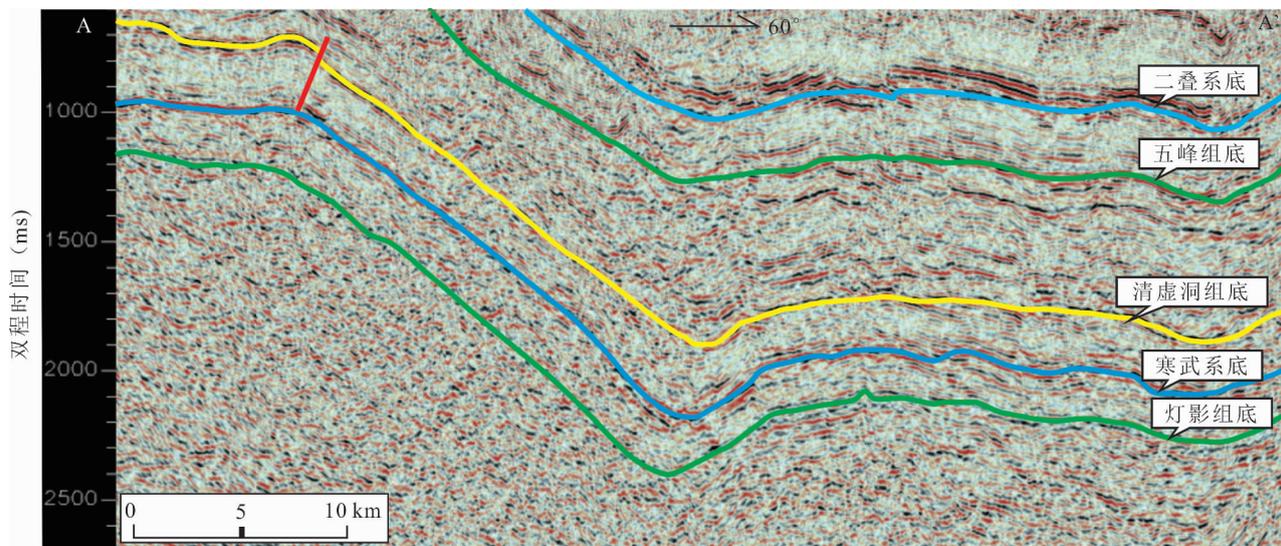


图 5 过毕节普宜地震剖面 A—A'地质解释图(剖面大致位置见图 6)

Fig. 5 Geological interpretation of the A—A' seismic profile through Puyi, Bijie (profile location as shown in Fig. 6)

由于桐湾运动 I 幕强度较小,并未明显造成研究区内灯二段地层的剥蚀,对于古地貌的高程差和坡降影响很小;桐湾运动 II 幕和 III 幕强度较大,造成了地层的大量剥蚀,在大部分区域表现为桐湾运动 III 幕和 II 幕不整合面的叠合。因此,本文恢复的桐湾运动期古地貌,主要指的是桐湾运动 III 幕产生的震旦系与寒武系之间的不整合形成时的古地貌。本文以下寒武统“牛蹄塘组 + 明心寺组 + 金顶山组”的印模厚度分布图为基础,恢复桐湾运动 III 幕岩溶期研究区内古地貌高差。

### 3.2 “印模”地层分布及古地貌指示

基于上述地层划分方案和印模选择分析,统计了川东南—黔西北地区 9 个露头剖面、5 个钻井剖面及 4 条二维地震剖面的下寒武统“牛蹄塘组 + 明心寺组 + 金顶山组”的地层厚度(表 1,图 5),绘制了研究区桐湾运动 III 幕不整合面之上“印模”地层厚度等值线图(图 6)。

需要说明的是,在研究区北西侧的古蔺—叙永—兴文一带,无钻井资料,借助少量保密的二维地震资料进行了地层厚度计算。图 5 二维地震剖面中灯影组底界连续性较差,难以追踪;灯影组的顶界(即寒武系牛蹄塘组底界)呈强振幅连续性特征,横向上可追踪对比;清虚洞组的底界也表现为强振幅强连续性,横向上易追踪对比;“印模”厚度具向东逐渐减少的趋势。

东部的习水土河场—习水润南—林 1 井一带及遵义松林—开阳洋水一带的“印模”地层厚度急剧

减薄,均小于 500 m;而在西部的长宁地区的宁 2 井和大方地区的方深 1 井的“印模”地层厚度显著增大,最厚处宁 2 井可达 1000 m 以上。从图 6 来看,研究区的“印模”地层厚度具有东部较小,向西逐渐增厚的特征。

表 1 川东南—黔西北“牛蹄塘组 + 明心寺组 + 金顶山组”厚度统计

Table 1 Thickness statistics of Niutitang Formation & Jingdingshan Formation & Mingxinshi Formation on the Southeastern Sichuan and Northwestern Guizhou area

编号	剖面(钻井)位置	厚度(m)	所属图幅
1	习水润南	463	桐梓幅
2	习水土河场	431	
3	习水良村	586	
4	金沙岩孔	629	遵义幅
5	仁怀石塔	538	
6	遵义庙子湾	605	
7	遵义松林	461	
8	湄潭梅子湾	625	湄潭幅
9	开阳洋水	442	息烽幅
10	丁山 1 井	519	钻井
11	林 1 井	438	
12	方深 1 井	817	
13	宁 2 井	1038	
14	九坝 1 井	728	

川东南—黔西北在灯影组和麦地坪组沉积期都位于浅水台地相区,不存在由浅水台地相演变为深水盆地相的问题,因此“印模”地层厚度大者代表古

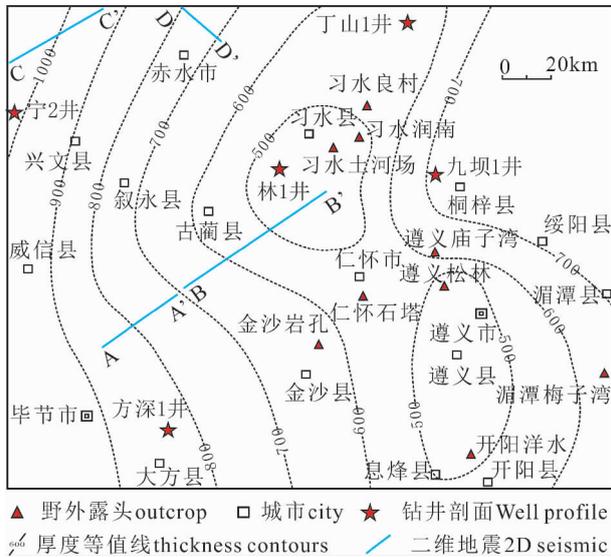


图6 川东南—黔西北“牛蹄塘组+明心寺组+金顶山组”地层厚度等值线图

Fig. 6 Thickness contour map of the Niutitang Formation + the Mingxinshi Formation + the Jingdingshan Formation on the Southeastern Sichuan and Northwestern Guizhou area

地貌低地、厚度小者代表古地貌高地。研究区存在一近南北向的“印模”地层减薄带，由西向东地层厚度逐渐减小，西部“印模”地层厚度较大，宁2井厚度最大，指示其为古地貌低地；而东部区域则“印模”地层厚度较小，指示了古地貌高地（图6）。另外，在下寒武统牛蹄塘组沉积之前区内古地貌存在次一级的古地貌凸起或凹陷，“印模”厚度值的较小变化也可指示了宏观古地貌背景下的次一级凸起或凹陷（图5）。

### 3.3 古地貌特征

根据区内桐湾期古岩溶和地形高差变化特征，综合前人对岩溶古地貌划分的研究成果（夏日元等，1999；向芳等，2001；陈时学等，2004；Loucks et al., 2004；文华国等，2009；Zeng Hongliu et al., 2011；杨雨等，2014；刘宏等，2015），将川东南—黔西北地区桐湾期岩溶古地貌划分为：岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地三个不同的岩溶古地貌单元。三个不同的岩溶古地貌在“印模”厚度等值线图上表现不同，本文将“印模”地层厚度小于600 m区域归为岩溶高地；“印模”厚度为600~900 m代表了岩溶斜坡；“印模”厚度大于900 m则归为岩溶洼地。在上述基础之上，根据刻度更小的“印模”厚度变化可划分出次级岩溶古地貌类型，例如岩溶高地可进一步分为残丘、平台，本文定义“印模”厚度小于500 m

为残丘，“印模”厚度在500~600 m之间为平台；岩溶斜坡可进一步划分为上斜坡、下斜坡等，“印模”厚度在600~750 m定义为上斜坡，“印模”厚度在750~900 m定义为下斜坡（图6、图7）。

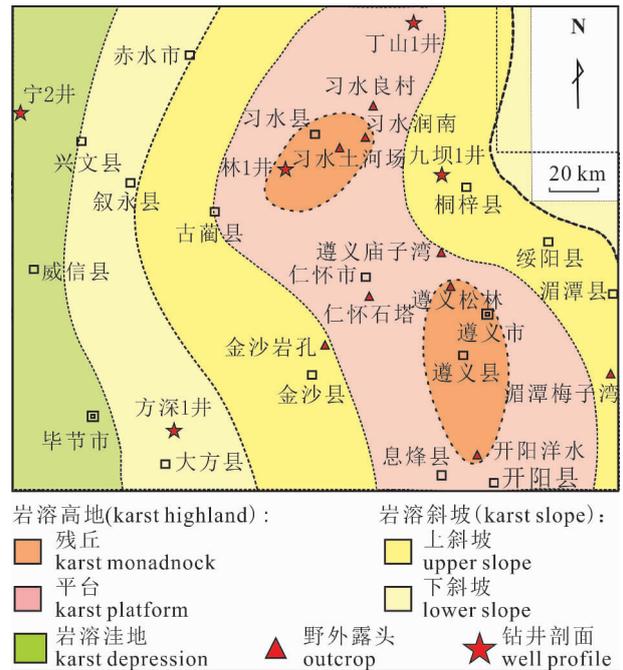


图7 川东南—黔西北桐湾期岩溶古地貌

Fig. 7 Paleokarst landform of the Tongwan movement period in the Southeastern Sichuan and Northwestern Guizhou

川东南—黔西北桐湾期岩溶古地貌受到桐湾期近南北向裂隙槽的控制，表现了较大的古地形起伏，从整体上看，岩溶古地貌的走向主要呈南北向，具有明显的东高西低的特征。有人从构造地质学的角度来研究晚震旦末期—早寒武世早期上扬子地区构造性质（刘树根等，2013；汪泽成等，2014；谷志东等，2014；刘树根等，2016），指出桐湾期宁2井一带存在近南北向拉张槽（或称为拉张作用形成的侵蚀谷），而笔者等恢复的川东南—黔西北桐湾期岩溶古地貌主体呈南北走向、具东高西低的特征，与他们的观点也基本吻合。

东部遵义—仁怀—习水一带发育岩溶高地，主体位于遵义松林附近，该剖面的灯影组残余厚度仅365 m左右。习水润南—林1井一带和遵义松林—开阳洋水一带发育岩溶高地上的残丘，两个残丘被仁怀石塔—遵义庙子湾一带平台分割。西侧长宁—威信—镇雄一带为岩溶洼地，宁2井发育典型的岩溶洼地，灯影组残余厚度达到1100 m以上；中部赤水—叙永—大方一带则发育岩溶斜坡，其中方深1

井位于下斜坡内(图7),该井灯影组岩溶储层孔隙较好,溶蚀缝洞常见沥青不完全充填,产大量水,在井深1729 m处发现气测显示,经测试,主要为氮气,推测天然气的保存受到了通达地表断裂系统的破坏。

大量灯影组常规天然气勘探开发实践证明,岩溶储层发育区与古岩溶地貌的关系密切,岩溶斜坡带内天然气井产能最好,而岩溶高地内的天然气高产井也都位于靠近岩溶斜坡一侧(向芳等,2001;陈时学等,2004; Hollis C., 2011; 杨雨, 2014; 刘宏等, 2015; 罗冰, 2015; 金民东等, 2017)。因此笔者等推测赤水—叙永—金沙一带的岩溶斜坡是相对最有利于灯影组岩溶型储集层的发育区带。

## 4 结论和讨论

(1)上扬子范围内,桐湾三幕运动的强度、规模和持续时间差异较大,整体上来看桐湾运动I幕造成的古地貌高程差和坡降都相对很小,I幕的强度相对最弱,Ⅲ幕和Ⅱ幕的构造活动强度大小则较难判断。川东南—黔西北绝大部分地区发育桐湾运动Ⅲ幕和Ⅱ幕叠加形成的寒武系/震旦系平行不整合面;其还造成了大量地层的剥蚀;并可见大量的含铁质古风化壳、溶蚀缝洞、岩溶角砾岩、渗流豆等古岩溶标志;区内未见I幕产生的古风化壳。

(2)岩溶古地貌的恢复的方法较多,由于资料点缺乏,针对上扬子范围内灯影组的岩溶古地貌恢复,前人普遍使用“印模法”,如果选择的“印模”包括了麦地坪组,而麦地坪组的顶底界线均为桐湾期的不整合面,从上扬子“印模”地层对比发现,“印模”底界必然存在较大的穿时性,穿时可能达10 Ma以上。另外,从岩溶古地貌恢复的实际应用角度来看,如果选择的“印模”包括了麦地坪组,上扬子地区麦地坪组的厚度0~200 m,上扬子局部地区灯影组的岩溶古地貌恢复可能并不准确。

(3)通过“印模法”恢复得出的桐湾Ⅲ幕岩溶古地貌呈现出整体上南北向展布,东高西低的特征,东部发育岩溶高地,中部则发育岩溶斜坡,西侧为岩溶洼地。岩溶高地可以进一步划分为残丘、平台,岩溶斜坡则可进一步划为上斜坡、下斜坡等次级岩溶古地貌。其中,赤水—叙永—金沙一带的岩溶斜坡是相对最有利于灯影组岩溶型储集层的发育区带。桐湾期岩溶古地貌控制了灯影组岩溶型储集层的平面分布,但在川东南—黔西北这样的构造复杂区,灯影组的油气勘探还须考虑油气保存条件等因素的影

响。

**致谢:**本文得到了中国地质调查局成都地质调查中心余谦教授级高工、牟传龙研究员、谭富文研究员的帮助,以及审稿专家的宝贵意见。在此一并表示感谢!

## 注释 / Note

①汪正江. 2011. 雪峰山西侧海相沉积岩相古地理研究成果报告. 中国地质调查局成都地质调查中心内部资料

## 参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 曹建文,梁彬,张庆玉,淡永. 2012. 黔中古隆起及其周缘地区灯影组古岩溶储层发育特征和控制因素. 地质通报,31(11):1902~1909.
- 陈时学,易万霞,卢文忠. 2004. 中国油气田古岩溶与油气储层. 沉积学报,22(2):244~253.
- 陈雅丽,储雪蕾,张兴亮,翟明国. 2015. 陕南镇巴地区灯影组白云岩的碳、硫同位素和微量元素指示:埃迪卡拉纪末期浅海的氧化还原环境. 中国科学:地球科学,45(7):963~981.
- 陈志明,陈其英. 1987. 扬子地台早寒武世梅树村早期的古地理及其磷块岩展布特征. 地质学报,60(3):246~257.
- 冯动军,胡宗全,高波,彭勇民,杜伟. 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏条件分析,地质论评,62(6):1521~1532.
- 冯伟明,谢渊,刘建清,汪正江,林家善,黄学平. 2014. 上扬子下寒武统龙王庙组沉积模式与油气勘探方向. 地质科技情报,33(3):106~111.
- 谷志东,李宗银,袁苗,黄平辉,梁东星,张黎,乔琳,李梅. 2014. 四川盆地及其周缘晚震旦世—早寒武世早期区域抬升运动对岩溶储层发育的影响. 天然气工业,34(8):1~9.
- 黄思静. 2010. 碳酸盐岩的成岩作用. 北京:地质出版社,148~176.
- 金民东,谭秀成,童明胜,曾伟,刘宏,钟波,刘庆松,连承波,周星合,许浒,罗冰. 2017. 四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组岩溶古地貌恢复及地质意义. 石油勘探与开发,44(1):1~11.
- 劳秋元,张步春,蔡文伯. 1980. 中国前震旦纪地壳构造运动旋回的划分. 地震地质,2(3):19~30.
- 李国祥,张俊明,朱茂炎. 2001. 滇东肖滩剖面下寒武统梅树村阶岩石地层及生物地层. 古生物学报,40(增刊):40~53.
- 李伟,余华琪,邓鸿斌. 2012. 四川盆地中南部寒武系地层划分对比与沉积演化特征. 石油勘探与开发,39(6):681~690.
- 李英强,何登发,文竹. 2013. 四川盆地及邻区晚震旦世古地理与构造—沉积环境演化. 古地理学报,15(2):231~245.
- 李宇翔. 2009. 川东南地区震旦系灯影组层序地层与储层特征研究. 导师:李国蓉. 成都:成都理工大学硕士学位论文:21~67.
- 刘宏,罗思聪,谭秀成,李凌,连承波,曾伟,罗冰,山述娇. 2015. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义. 石油勘探与开发,42(3):1~11.
- 刘怀仁,刘明星,胡登新,付强. 1991. 川西南上震旦统灯影组沉积期的暴露标志及其意义. 岩相古地理,12(5):1~10.
- 刘树根,王一刚,孙玮,钟勇,洪海涛,邓宾,夏茂龙,宋金民,文应初,吴娟. 2016. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用. 成都理工大学大学学报(自然科学版),43(1):35~43.
- 刘树根,孙玮,罗志立,宋金民,钟勇,田艳红,彭瀚霖. 2013. 兴凯地

- 裂运动与四川盆地组合油气勘探. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(5): 511~520.
- 罗贝维, 贾承造, 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 许海龙. 2015. 四川盆地上震旦统灯影组风化壳古岩溶特征及模式分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(3): 9~19.
- 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 文龙, 王文之, 陈康. 2015. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布. 石油学报, 36(4): 416~426.
- 毛铁, 杨瑞东, 高军波, 毛家仁. 2015. 贵州织金寒武系磷矿沉积特征及灯影组古喀斯特面控矿特征研究. 地质学报, 89(12): 2374~2388.
- 孟晓庆. 2007. 导师: 梅冥相. 贵州及邻区下寒武统层序地层格架及其古地理演化. 北京: 中国地质大学硕士学位论文: 16~62.
- 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 李凌, 刘宏. 2015. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义. 古地理学报, 17(4): 441~456.
- 王富良, 付勇, 江冉, 周文喜, 葛枝华, 魏帅超, 梁厚鹏, 张鹏. 2016. Re-Os 同位素在晚新元古代至早寒武世测年及古环境演绎中的应用进展. 岩矿测试, 35(5): 530~541.
- 王立成, 刘成林, 张华. 2013. 华南地块震旦纪晚期一早寒武世古大陆位置暨灯影组蒸发岩成钾条件分析. 地球学报, 34(5): 585~593.
- 王兴志, 黄继祥, 侯方浩, 刘仲宣, 叶念慈, 夏绍文, 吕宗刚. 1996. 四川资阳及邻区灯影组古岩溶特征与储集空间. 矿物岩石, 16(2): 47~54.
- 汪泽成, 姜华, 王铜山, 鲁卫华, 谷志东, 徐安娜, 杨雨, 徐兆辉. 2014. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义. 石油勘探与开发, 41(3): 1~8.
- 汪正江, 谢渊, 杨平, 卓皆文, 何江林, 谢尚克. 2012. 雪峰山西侧震旦纪一早古生代海相盆地演化与油气地质条件. 地质通报, 31(11): 1795~1801.
- 文华国, 郑荣才, 沈忠民, 胡忠贵, 李伟, 张志杰. 2009. 四川盆地东部黄龙组古岩溶地貌研究. 地质论评, 55(6): 817~826.
- 武赛军, 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 曾富英. 2016. 四川盆地桐湾运动及其油气地质意义. 天然气地球科学, 27(1): 60~70.
- 夏日元, 唐健生, 关碧珠, 罗伟权, 马振芳, 周树勋, 于忠平, 潘令红. 1999. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征. 石油与天然气地质, 22(2): 133~136.
- 向芳, 陈洪德, 张锦泉. 2001. 资阳地区震旦系古岩溶作用及其特征讨论. 沉积学报, 19(3): 421~424.
- 邢凤存, 侯明才, 林良彪, 徐胜林, 胡华蕊. 2015. 四川盆地晚震旦世一早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论. 地学前缘, 22(1): 115~125.
- 许清华, H. Oberhansli, 高计元, 孙枢, 陈海泓, U. Krahenbuhl. 1986. 寒武纪生物爆发前的死劫难海洋. 地质科学, 29(1): 1~6.
- 薛耀松, 周传明. 2006. 扬子区早寒武世早期磷质小壳化石的再沉积和地层对比问题. 地层学杂志, 30(1): 64~75.
- 杨威, 魏国齐, 赵蓉蓉, 刘满仓, 金惠, 赵佐安, 沈珏红. 2014. 四川盆地震旦系灯影组岩溶储层特征及展布. 天然气工业, 34(3): 55~60.
- 杨雨, 黄先平, 张健, 杨光, 宋家荣, 宋林珂, 洪海涛, 谭秀成, 文龙. 2014. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义. 天然气工业, 34(3): 1~6.
- 张鹏, 张金川, 黄宇琪, 吕艳南, 尉菲菲, 邓恩德. 2015. 黔西北上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气聚集条件分析. 地质论评, 61(1): 155~162.
- 张同钢, 储雪蕾, 张启锐, 冯连君, 霍卫国. 2004. 扬子地台灯影组碳酸盐岩中的硫和碳同位素记录. 岩石学报, 20(3): 717~724.
- 周慧, 李伟, 张宝民, 刘静江, 邓胜徽, 张师本, 单秀琴, 张静, 王晓波, 姜华. 2015. 四川盆地震旦纪末期一早寒武纪早期台盆的形成与演化. 石油学报, 36(3): 310~424.
- 周明忠, 罗泰义, 李正祥, 赵辉, 龙汉生, 杨勇. 2008. 遵义牛蹄塘组底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 53(1): 104~110.
- 朱东亚, 金之均, 张荣强, 张殿伟, 何治亮, 李双建. 2013. 震旦系灯影组白云岩多级次岩溶储层叠合发育特征及机制. 地学前缘, 20(4): 1~11.
- 邹胜章, 夏日元, 刘莉, 唐建生, 梁彬. 2016. 塔河油田奥陶系岩溶储层垂向带发育特征及其识别标准. 地质学报, 90(9): 2490~2501.
- Cao Jianwen, Liang Bin, Zhang Qingyu, Dan Yong. 2012. The development features and controlling factors of reservoirs of Sinian Dengying Formation in central Guizhou uplift and its adjacent areas. Geological Bulletin of china, 31(11): 1902~1909.
- Chen Xueshi, Yi Wanxia, Lu Wenzhong. 2004. The Paleokarst Reservoirs of Oil/ Gas Fields in China. Acta Sedimentologica Sinica, 22(2): 244~253.
- Chen Yali, Chu Xuelei, Zhang Xingliang, Zhai Mingguo. 2015. Carbon isotopes, sulfur isotopes, and trace elements of the dolomites from the Dengying Formation in Zhenba area, Southern Shaanxi: Implications for shallow water redox conditions during the terminal Ediacaran. Science China: Earth Sciences, 45(7): 963~981.
- Chen Zhiming, Chen Qiyang. 1987. Paleogeography of Yangzi Platform and the characteristics of the Phosphorite distribution of early meishucun stage, early Cambrian. Scientia Geologica Sinica, 60(3): 246~257.
- Feng Dongjun, Hu Zongquan, Gao Bo, Peng Yongmin, Du Wei. 2016. Analysis of Shale gas reservoir-forming condition of Wufeng Formation—Longmaxi Formation in the Southeast Sichuan Basin. Geological Review, 62(6): 1521~1532.
- Feng Weiming, Xie Yuan, Liu Jianqing, Wang Zhengjiang, Lin Jiashan, Huang Xueping. 2012. Sedimentary model and hydrocarbon exploration targets of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the Upper Yangtze Area. Geological Science and Technology Information, 31(11): 1902~1909.
- Gu Zhidong, Li Zongyin, Yuan Miao, Huang Pinghui, Liang Dongxing, Zhang Li, Qiao Lin, Li Mei. 2014. Influences of regional uplifting during the Late Sinian—Early Cambrian on the development of karst reservoirs in the Sichuan Basin and its peripheral area. Natural Gas Industry, 34(8): 1~9.
- Hoffman P F, Li Zhengxiang. 2009. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 277(4): 158~172.
- Hollis C. 2011. Diagenetic controls on reservoir properties of carbonate successions within the Albian—Turonian of the Arabian Plate. Petroleum Geoscience, 17(3): 223~241.
- Huang Sijing. 2010. Carbonate Diagenesis. Beijing: Geological Publishing House, 148~176.
- Kenneth Hsu, H. Oberhansli, Gao Jiyuan, Sun Shu, Chen Haihong, U. Krahenbuhl. 1986. Strangelove ocean before the Cambrian explosion. Scientia Geologica Sinica, 29(1): 1~6.
- Jin Mindong, Tan Xiucheng, Tong Mingsheng, Zeng Wei, Liu Hong, Zhong Bo, Liu Qingsong, Lian Chengbo, Zhou Xinghe, Xu Hu, Luo Bing. 2017. Karst paleogeomorphology of the fourth Member of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti—Moxi area, Sichuan Basin, SW China: Restoration and geological significance. Petroleum Exploration and Development, 44(1): 1~11.
- Li Da, Ling Hongfei, Jiang Shaoyong, Pan Jiayong, Chen Yongquan, Cai Yuanfeng, Feng Hongzhen. 2009. New carbon isotope

- stratigraphy of the Ediacaran—Cambrian boundary interval from SW China: implications for global correlation. *Geology*, 146 (4):465 ~ 484.
- Lao Qiuyuan, Zhang Buchun, Cai Wenbo. 1980&. Classification of the Pre-Sinian orogeny cycles in China. *Seismology and Geology*, 2 (3):19 ~ 30.
- Li Guoxiang, Zhang Junming, Zhu maoyan. 2001&. Lithostratigraphy and biostratigraphy of the Lower Cambrian Meishucunian Formation in Yunnan Xiaotan section. *Acta Palaeontologica Sinica*, 40 (Supplement): 40 ~ 53.
- Li Wei, Yu Huaqi, Deng Hongbin. 2012&. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central—southern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6):681 ~ 690.
- Li Yingqiang, He Dengfa, Wen Zhu. 2013&. Palaeogeography and tectonic—depositional environment evolution of the Late Sinian in Sichuan Basin and adjacent areas. *Journal of Palaeogeography*, 15 (2): 231 ~ 245.
- Li Yuxiang. 2009&. The fine study of sequence Stratigraphy and reservoir of the Sinian system Denying Formation in the Southeast of Sichuan. Advisor: Li Guorong. Chengdu: Chengdu University of Technology; 21 ~ 67
- Liu Hong, Luo Sicong, Tan Xiucheng, Li Ling, Lian Chengbo, Zeng Wei, Luo Bing, Shan Shujiao. 2015&. Restoration of paleokarst geomorphology of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin and its significance, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(3):1 ~ 11.
- Liu Huairan, Liu Mingxing, Hu Dengxin, Fu Qiang. 1991&. The exposure indicators formed during the deposition of the Upper Sinian Dengying Formation in southwestern Sichuan and their significance. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 12 (5):1 ~ 10.
- Liu Shugen, Wang Yigang, Sun Wei, Zhong Yong, Hong Haitao, Deng bin, Xia Maolong, Song Jinmin, Wen Yingchu, Wu Juan. 2016&. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(1): 35 ~ 43.
- Liu Shugen, Sun Wei, Luo Zhili, Song Jinmin, Zhong Yong, Tian Yanhong, Peng Hanling. 2013&. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian strata in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40(5):511 ~ 520.
- Loucks R G, Mescher P K, McMechan G A. 2004. Three dimensional architecture of a coalesced, collapsed paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, Central Texas. *AAPG Bulletin*, 88 (5):545 ~ 564.
- Luo Beiwei, Jia Chengzao, Wei Guoqi, Yang Wei, Xie Wuren, Xu Hailong. 2015&. Characteristics and models of weathering paleokarst in Upper Sinian, Sichuan Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 39(3):8 ~ 19.
- Luo Bing, Yang Yueming, Luo wenjun, Wen Long, Wang Wenzhi, Chen Kang. 2015&. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(4):416 ~ 426.
- Mao Tie, Yang Ruidong, Gao Junbo, Mao Jiaren. 2015&. Study of sedimentary Feature of Cambrian phosphorite and ore-controlling feature of old karst surface of Dengying Formation in Zhijin, Guizhou. *Scientia Geologica Sinica*, 89(12):2374 ~ 2388.
- Meng, Xiaoqing. 2007&. Sequence-Stratigraphic Framework and Its Palaeogeographical Evolution of the Lower Cambrian Series in Guizhou and Its Adjacent Areas. Advisor: Mei Mingxiang. Beijing: China University of Geosciences; 16 ~ 62.
- Nieto L M, Rodriguez-Tovar F J, Molina J M., Reolid M., Ruiz-Ortiz P A. 2014. Unconformity surfaces in pelagic carbonate environments: a case from the Middle Bathonian of the Betic Cordillera, SE Spain. *Geology*, 84(3), 281 ~ 295.
- Sofiya P H, Tadeusz M P. 2003. Sulfate Cavity Filling in the Lower Werra Anhydrite (Zechstein, Permian), Zdrada Area, Northern Poland: Evidence for Early Diagenetic Evaporite Paleokarst Formed Under Sedimentary Cover. *Journal of Sedimentary Research*, 73 (3):451 ~ 461.
- Tan Xiucheng, Xiao Di, Chen Jingshan, Li Ling, Liu Hong. 2015&. New advance and enlightenment of eogenetic karstification. *Journal of Palaeogeography*, 17(4):441 ~ 456.
- Wang Fuliang, FuYong, Jiang Ran, Zhou Wenxi, Ge Zhihua, Wei Shuaichao, Liang Houpeng, Zhang Peng. 2016&. Research progress on Re-Os isotopes application in dating and paleoenvironmental interpretation during the Neoproterozoic to Early Cambrian periods. *Rock and Mineral Analysis*, 35(5):530 ~ 541.
- Wang Licheng, Liu Chenglin, Zhang Hua. 2013&. Tectonic and sedimentary settings of evaporites in the Dengying Formation, South China block: implications for the potential of potash formation. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5):585 ~ 593.
- Wang Xingzhi, Huang Jixiang, Huo Fanghao, Liu Zhongxuan, Ye Nianci, Xia Shaowen, Lv zonggang. 1996&. The Relations between paleokarst and reservoirs procity in Denying Formation, Sinian of Ziyang and neighboring area, Sichuan. *Journal of Mineralogy Petrology*, 16(2):47 ~ 54.
- Wang Zecheng, Jiang Hua, Wang Tongshan, Lu Weihua, Gu Zhidong, Xu Anna, Yang Yu, Xu Zhaohui. 2014&. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 305 ~ 312.
- Wang Zhengjiang, Xie Yuan, Yang Ping, Zhuo Jiewen, He Jianglin, Xie Shangke. 2012&. Marine basin evolution and oil and gas geology of Sinian—early Paleozoic period on the western side of the Xuefeng Mountain. *Geological Bulletin of China*, 31(11):1795 ~ 1811.
- Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Shen Zhongmin, Hu Zhonggui, Li Wei, Zhang Zhijie. 2009&. Study on the carboniferous palaeokarst landform in Eastern Sichuan Basin. *Geological Review*, 55(6):817 ~ 826.
- Wu Saijun, Wei Guoqi, Yang Wei, Xie Wuren, Zeng Fuying. 2016&. Tongwan Movement and its geologic significances in Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(1):60 ~ 70.
- Xia Riyuan, Tang Jiansheng, Guan Bizhu, Luo Weiquan, Ma Zhenfang, Zhou Shuxun, Yu Zhongping, Pan Linghong. 1999&. Ordovician palaeokarst landform ordos Basin and gas enrichment characteristics. *Oil & Gas Geology*, 22(2):133 ~ 136.
- Xiang Fang, Cheng Hongde, Zhang Jingquan. 2001&. Paleokarst and Its Characteristics of Dengying Formation in Ziyang Area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(3):421 ~ 424.
- Xing Fengcun, Hou Mingcai, Lin Liangbiao, Xu Shenglin, Hu Huarui. 2015&. The records and its dynamic Genesis of Tectonic Movement During the Late Sinian and the Cambrian of Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 115 ~ 125.
- Xue Yaosong, Zhou Chuanming. 2006&. Resedimentation of the early

- Cambrian phosphatized small fossils and correlation of the Sinian—Cambrian boundary strata in the Yangze region, Southern China. *Journal of Stratigraphy*, 30(1): 64~75.
- Yang Wei, Wei Guoqi, Zhao Rongrong, Liu Mancang, Jin Hui, Zhao Zhuo'an, Shen Juehong. 2014. Characteristics and distribution of karst reservoirs in the Sinian Dengying Fm, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(3):55~60.
- Yang Yu, Huang Xianping, Zhang Jian, Yang Guang, Song Jiarong, Song Linke, Hong Haitao, Tan Xiucheng, WenLong. 2014. Features and geologic significances of the top Sinian karst landform before the Cambrian deposition in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(3):1~6.
- Zeng Hongliu, Loucks R, Janson X, Wang Guizhong, Xia Yiping, Yuan Bingheng, Xu Ligui. 2011. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin, western China. *AAPG Bulletin*, 95(12):2061~2083.
- Zhang Peng, Zhang Jinchuan, Huang Yuqi, Lv Yannan, Wei Feifei, Deng Ende. 2015. Shale gas accumulation conditions of the Upper Ordovician Wufeng Formation—Lower Silurian Longmaxi Formation in Northwestern Guizhou. *Geological Review*, 61(1):155~162.
- Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Zhang Qirui, Feng Lianjun, Huo Weiguo. 2003. Variations of sulfur and carbon isotopes in seawater during the Doushantuo stage in late Neoproterozoic. *Acta Petrology Sinica*, 20(3):717~724.
- Zhou Hui, Li Wei, Zhang Baomin, Liu Jingjiang, Deng Shenghui, Zhang Shibin, Shan Xiuqin, Zhang Jing, Wang Xiaobo, Jiang Hua. 2015. Formation and Evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplatformal basin in Sichuan Basin. *Acta Petrology Sinica*, 36(3):310~424.
- Zhou Mingzhong, Luo Taiyi, Li Zhengxiang, Zhao Hui, Long Hansheng, Yang Yong. 2008. Tuff zircon SHRIMP U-Pb age and Geological significance of Bottom Niutitang Formation in Zunyi. *Chinese Science Bulletin*, 53(1):104~110.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Zhang Rongqiang, Zhang Dianwei, Li Shuangjian. 2013. Characteristics and Developing mechanism of Sinian Dengying Formation Dolomite Reservoir with multi-stage Karst. *Earth Science Frontiers*, 20(4):1~11.
- Zou Shengzhang, Xia Riyuan, Liu Li, Tang Jiansheng, Ling Bin. 2016. Vertical zone characteristics and identification standard of Ordovician karst reservoirs in the Tahe oilfield. *Scientia Geologica Sinica*, 90(9):2490~2501.

## Restoration of Karst Palaeotopography on the Tongwan Movement Period in the Southeastern Sichuan and Northwestern Guizhou

FENG Weiming<sup>1,2)</sup>, XIE Yuan<sup>1,2)</sup>, LI Rong<sup>1,2)</sup>, LUO Jianning<sup>1)</sup>,  
LIN Jiashan<sup>1,2)</sup>, LIU Jianqing<sup>1,2)</sup>, ZHAO Zhan<sup>1,2)</sup>

1) Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, 610081;

2) Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources of Ministry of Land and Resources, Chengdu, 610081

**Abstract:** Through the outcrops and core observation of the Dengying Formation in the Southeast Sichuan and Northwest Guizhou, it is considered that the upper dolomite of Dengying Formation had developed a series of paleokarst identification, including karst breccias, karst caves and cracks filled, limonite weathering crust, and so on. Based on previous research on the upper Yangtze Tongwan movement, the parallel unconformity between Cambrian and Ediacaran was formed by movement of Episode III and Episode II in most areas. Moldic thickness methods are comprehensively used to restore the karst paleogeomorphology of Tongwan movement Episode III, the moldic thickness include Niutitang Formation, Mingxinsi Formation and Jindingshan Formation, barring Maidiping Formation. Which has obvious diachronism. According to the instructions of moldic thickness and ancient landform, it is indicated that, karst palaeogeomorphology distributed from north to south, the East part was high, the West part was low. Karst highland was developed in the East part, karst depression was developed in the West part, and Karst Slope was developed in the Central part. Which can be furtherly divided into secondary karst palaeogeomorphology units, such as monadnock, platform and upper slope, lower slope.

**Keywords:** Paleokarst makers; Tongwan movement; Karst palaeotopography; Dengying Formation; Maidiping Formation; Southeast Sichuan and Northwest Guizhou

**Acknowledgements:** This study was financially supported by China Geological Survey project (No. 1212010782003, 12120115004101) and CDCGS Youth Science Fund project (No. [2014]-02).

**First author:** FENG Weiming, male, born in 1986, master, engineer, is mainly engaged in the study of sedimentology and petroleum geology. Email: fengweiming009@163.com.

Manuscript received on: 2016-12-26; Accepted on: 2017-06-10; Edited by: LIU Zhiqiang.

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2017.05.010