

引用格式:李玉琢,刘磊,冯佳睿,等. 2026. 川西北三叠系雷口坡组白云岩—蒸发岩共生体系特征及古地理重建[J]. 沉积学报, 44(2): 542-556.

LI YuZhuo, LIU Lei, FENG JiaRui, et al. 2026. Characteristics of Dolomite-Evaporite Paragenesis System in the Triassic Leikoupo Formation, Northwestern Sichuan Basin, and Reconstruction of the Paleogeography[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 542-556.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.030

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.030

# 川西北三叠系雷口坡组白云岩—蒸发岩共生体系特征及古地理重建

李玉琢<sup>1,2,3</sup>, 刘磊<sup>1,2,3</sup>, 冯佳睿<sup>4</sup>, 罗忠<sup>5</sup>, 张静<sup>5</sup>, 文华国<sup>1,2,3</sup>

1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

2. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

3. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

4. 中国石油勘探开发研究院油气资源勘探研究所, 北京 100083

5. 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 北京 100083

**摘要** 【目的】白云岩—蒸发岩共生体系在四川盆地中三叠时期广泛分布, 其沉积特征缺乏系统研究, 发育分布规律及主控因素尚不明确。进一步阐明共生体系沉积特征, 探讨共生体系发育的主控因素, 旨在为川西北地区白云岩—蒸发岩共生体系的研究提供新的认识, 指导区域古地理重建。【方法】基于钻井、岩心以及地震资料, 多尺度表征研究区发育的白云岩—蒸发岩共生体系沉积特征, 阐明不同类型共生体系的成因机制, 进一步揭示其时空发育分布规律及主控因素。【结果】(1)四川盆地川西北地区雷口坡组主要发育4种类型的共生体系: 厚层白云岩夹薄层蒸发岩、白云岩与蒸发岩互层、厚层蒸发岩夹薄层白云岩、厚层蒸发岩与厚层白云岩叠置, 其中厚层白云岩夹薄层蒸发岩在雷口坡四个沉积期均大面积分布, 厚层蒸发岩夹薄层白云岩、厚层蒸发岩与厚层白云岩叠置在雷三段、雷四段沉积期盆地中部最为发育。(2)西侧龙门山岛链隆升对盆地产生东南向挤压、东侧雪峰山隆升限制泸州—开江古隆起南向迁移, 秦岭的南向俯冲共同形成了四川盆地近北东—南西向的构造格局, 控制了盆地内膏岩以及共生体系总体呈北东—南西向展布。(3)受泸州—开江古隆起大幅度隆升的影响, 雷口坡组后期沉降中心向西侧迁移, 膏岩沉积中心以及四种共生体系也相应由早期的分散分布到后期集中向西迁移。【结论】综合共生体系沉积特征及其分布规律, 四类共生体系分别形成于含膏云质潟湖、含云膏质潟湖、膏盐湖以及膏盐盆。在不同类型共生体系分布规律的约束下重建了雷口坡组四个沉积期的古地理。

**关键词** 四川盆地; 雷口坡组; 白云岩—蒸发岩共生体系; 沉积环境; 古地理格局

**第一作者** 李玉琢, 女, 2000年出生, 硕士研究生, 碳酸盐岩沉积学, E-mail: 1600964486@qq.com

**通信作者** 冯佳睿, 女, 高级工程师, 沉积储层, E-mail: jrfeng2016@163.com

**中图分类号**: P618.13 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0550(2026)02-0542-15

## 0 引言

白云岩—蒸发岩共生体系在全球众多含油气盆地内均有分布且发育层系众多, 其作为重要油气储盖组合的同时, 也记录了沉积过程中气候、环境等众多重要信息, 受到国内外广泛关注(李凌等, 2012; Andreeva, 2015; 徐安娜等, 2016; Zorina, 2017; 胡安平, 2019; 文华国等, 2021; 钟寿康等, 2022)。现有研究认为共生体系的形成主要受海平面变化、古气

候转变、古环境变迁影响(Andreeva, 2015; Zorina, 2017; 文华国等, 2021), 共生体系形成过程中受海平面升降影响导致岩性变化, 蒸发岩较为发育的组合可能反应沉积过程中出现强蒸发作用导致水体盐度升高(李凌等, 2012; 徐安娜等, 2016; 胡安平, 2019; 钟寿康等, 2022)。由此可见, 白云岩—蒸发岩共生体系中不同的岩性组合序列可以反映沉积期环境的变化过程。据统计, 全球发现的碳酸盐岩油气田中, 由白云岩—蒸发岩共生体系形成储盖组合的

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2024-02-27; 录用日期: 2024-04-08; 网络出版日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102132); 中国石油“十四五”上游领域前瞻性基础性课题(2021DJ0302)

油气田约占碳酸盐岩油气的三分之一(李凌等, 2012; Andreeva, 2015; 徐安娜等, 2016; Zorina, 2017; 胡安平等, 2019; 文华国等, 2021; 钟寿康等, 2022), 我国鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组、塔里木盆地的寒武系以及四川盆地中、下三叠统均探明由碳酸盐岩—蒸发岩形成的气藏(胡安平等, 2019), 因此, 开展对共生体系的研究不仅对恢复古环境及古地理重建具有重要意义, 对油气勘探也具有重要的指导作用。

四川盆地中三叠时期发育大套潟湖沉积且存在多处多期次沉积形成的巨厚膏湖(李凌等, 2012), 与白云岩组合形成了良好的共生序列, 具有开展共生体系研究的绝对优势。现有研究认为雷口坡组内存在较为丰富的天然气资源, 但未形成规模性的勘探开发区域(辛勇光等, 2022)。雷口坡组的油气资源主要集中在雷三段、雷四段以及川中地区的雷一段, 其中多以蒸发岩作为盖层形成了良好的天然气藏。目前对于雷口坡组内共生体系的研究多侧重于盆地内膏岩成因、分布规律或其对储盖组合的影响(李凌等, 2012; 徐安娜等, 2016; 胡安平等, 2019; 杨威等, 2021; 辛勇光等, 2022; 钟寿康等, 2022)。同时, 前人基于单因素划分的雷口坡组岩相古地理格局也存在较大差异(吕玉珍等, 2013; 孙春燕等, 2018; 徐康和宫晗凝, 2023), 其主要原因为膏岩形成常是多期次叠置的结果, 而单因素统计过程可能会忽略不同单层膏岩的特殊成因, 从而导致岩相古地理的多解性, 如厚层膏岩可能为膏盐湖或膏盐盆的沉积响应, 也可能为多期次潮上蒸发结果。因此, 仅针对雷口坡组内整套蒸发岩成因的研究致使对其内部沉积过程中经历的气候和环境变迁缺乏系统论证, 并且其与白云岩之间的共生关系尚不清晰。基于此, 本文利用50余口钻井资料, 并结合川西北地区24条二维地震测线, 剖面长度约6 520 km, 控制面积75 000 km<sup>2</sup>, 对四川盆地西北部雷口坡组内白云岩—蒸发岩的沉积特征进行多尺度表征, 揭示其时空展布规律, 并进一步探讨其主控因素, 以期对盆地内古地理重建以及共生体系研究提供参考。

## 1 地质概况

### 1.1 区域构造

在Pangea超大陆汇聚的影响下, 古特提斯洋逐

渐关闭, 华南板块处于挤压的动力学背景(Wang *et al.*, 2023)(图1a)。四川盆地作为上扬子台地的一部分(杨威等, 2021), 中三叠雷口坡沉积期盆地四周发育古陆、盆内发育水下古隆起(Xu *et al.*, 2021)(图1b)。盆地东部江南古陆、西部松潘—甘孜洋盆、西北部龙门山造山带与北部大巴山共同形成了四川盆地半围陷的构造格局, 盆地在西南侧与开远海峡相沟通, 海水越过黔南堤礁成为四川盆地主要的海侵方向(吕玉珍等, 2013), 在周缘古陆以及海侵的协同影响下形成了雷口坡组特有的局限、水体循环受阻的构造—沉积格局(林良彪等, 2007; 李凌等, 2012; 吕玉珍等, 2013; 辛勇光等, 2022)。盆内由泸州—开江古隆起、天井山古隆起以及中西部凹陷共同构成隆坳相间的构造格局。其中泸州—开江古隆起在中三叠世出露水面, 古隆起核部雷口坡组遭到剥蚀, 仅残余雷一段。西北侧龙门山岛链在中三叠世活动较弱, 主要表现为水下古隆起, 雷口坡组保存完整, 但厚度相对较薄(李国辉等, 2018)。

### 1.2 地层

四川盆地中三叠雷口坡组广泛分布, 现有研究结果表明, 雷口坡组分布范围已超出现今四川盆地边界, 地层呈西厚东薄的特征(黄东等, 2011)。该时期气候干旱, 局限—蒸发台地环境下潟湖、潮坪较为发育(吕玉珍等, 2013; 孙春燕等, 2018; 徐康和宫晗凝, 2023), 盆地西侧向盆地中部由浅水环境向深水环境过渡, 形成海相碳酸盐岩与蒸发岩的不等厚互层(李凌等, 2012), 其顶部以海相碳酸盐岩与上覆须家河组的碎屑岩假整合接触, 底部以绿豆岩为界与下伏嘉陵江组整合接触。根据岩性组合特征, 将雷口坡组划分为雷一段、雷二段、雷三段、雷四段(黄东等, 2011)(图1d)。受盆地内泸州—开江古隆起以及天井山古隆起后期构造抬升的影响, 致使雷口坡上部地层在隆起区遭受了不同程度的剥蚀, 从而导致各段在盆地内分布范围不同。雷一段仅在泸州古隆起区遭受部分剥蚀, 岩性主要为灰色泥云岩、膏质云岩、膏岩, 颗粒云岩在南充—广安地区广泛分布。雷二段岩性以含泥云岩、云质膏岩为主。雷三段岩性以泥晶云岩、含泥灰岩为主, 膏岩、盐岩在川中地区广泛分布, 川西盆地边缘沉积藻砂屑云岩、鲕粒云岩。雷四段受剥蚀范围最大, 岩性以膏质云岩和含泥云岩为主, 夹部分颗粒云岩及藻云岩(图2)。

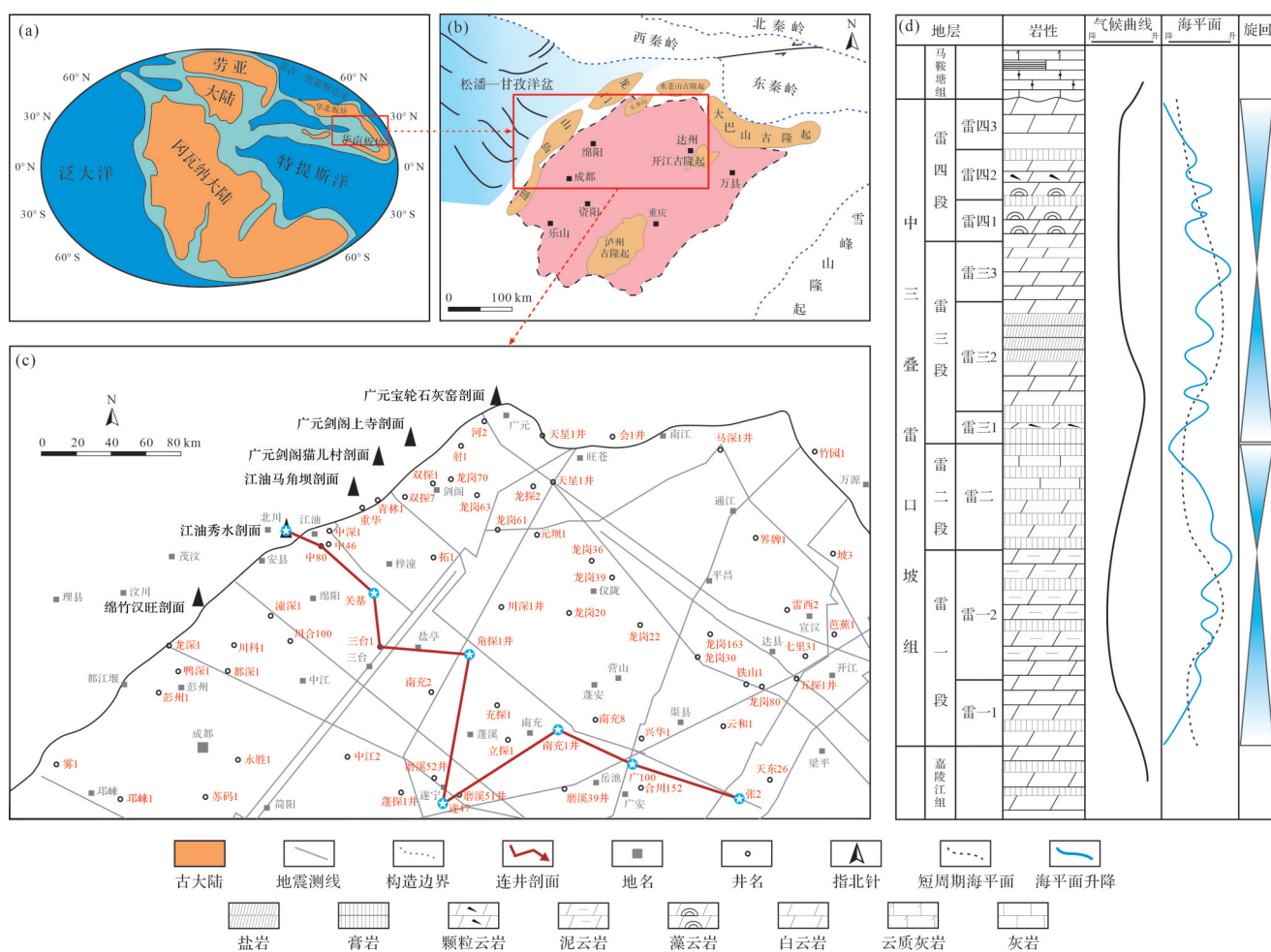


图1 四川盆地及邻区雷口坡沉积期构造单元及综合柱状图

(a)三叠纪全球古地理重建图(据Wang et al., 2023修改);(b)四川盆地及邻区中三叠纪雷口坡构造—古地理背景图(据Xu et al., 2021修改);(c)研究区井位与剖面位置图;(d)研究区综合柱状图(据He et al., 2011修改);海平面变化曲线引自何登发等, 2011;古温度变化曲线引自Liu et al., 2021

Fig.1 Structural units and comprehensive histogram of the Leikoupo sedimentary period in the Sichuan Basin and adjacent areas

## 2 白云岩—蒸发岩共生组合沉积特征

### 2.1 类型划分与识别标志

统计了川西北地区50余口发育白云岩—蒸发岩共生体系单井中单层蒸发岩厚度,整个雷口组蒸发岩单层厚度介于1~213 m,四个时期沉积的单层蒸发岩厚度差异较大,雷一段蒸发岩单层厚度介于10~56 m,雷二段蒸发岩单层厚度介于1~40 m,雷三段蒸发岩厚度介于20~60 m,在川中局部可超过100 m,雷四段蒸发岩单层厚度介于5~40 m,局部在100 m以上。

根据钻井岩性组合、测井曲线及地震反射特征,可将四川盆地中三叠雷口坡组共生组合划分为四种类型:厚层白云岩夹薄层蒸发岩(组合A)、白云岩与蒸发岩互层(组合B)、厚层蒸发岩夹薄层白云岩(组

合C)、厚层白云岩与厚层蒸发岩叠置(组合D)(图3)。

#### 1) 厚层白云岩夹薄层蒸发岩(组合A)

组合A在岩性序列上表现为蒸发岩以薄层状存在于厚层连续沉积的白云岩中(图4a),其中蒸发岩厚度在10.00 m内。该种组合中白云岩类型包括膏质白云岩(图4g)、泥质白云岩,蒸发岩主要是灰色硬石膏(图4i)。自然伽马(GR)测井曲线整体呈相对低值,在薄蒸发岩夹层处曲线出现指型突变。地震相上主要呈中振幅、中低频率反射、低连续性反射,地震波以对称的单波形为主。川西地区南充1井雷—2亚段3 032.14~3 127.00 m,岩性以泥质白云岩、灰质白云岩夹膏岩为主,自然伽马值介于18~103 API, GR测井曲线在薄蒸发岩夹层处呈指型突变。

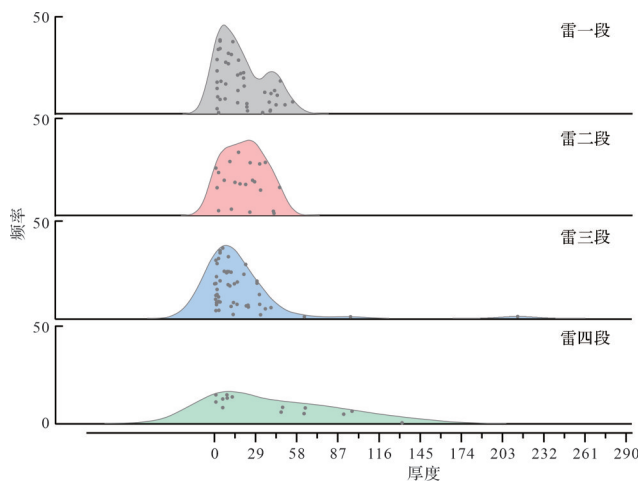


图2 川西北雷口坡组蒸发岩单层厚度分布统计图

Fig.2 Statistical distribution maps of the evaporites single-layer thicknesses in the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

2) 白云岩与蒸发岩互层(组合B)

该种组合在岩性序列上可见白云岩与蒸发岩交替出现(图4b),且二者单层厚基本相同,在5~10 m。组合中白云岩多为泥质白云岩(图4b),部分含有膏

质云岩(图4h),蒸发岩中未出现盐岩均为硬石膏。形成的共生体系组合中岩性变化频繁,自然伽马曲线形态变化幅度较大,整体呈锯齿状。声波时差(AC)测井曲线整体呈低值,局部形成高值异常对应薄层膏岩沉积段。地震相表现为弱振幅、中频率低连续性反射。川中地区龙岗61井雷一2亚段5 040~5 117 m,岩性以泥质云岩、膏质云岩和硬石膏交替沉积为主(图4b),自然伽马值介于18~97 API,测井曲线呈锯齿状,变化幅度较大。

3) 厚层蒸发岩夹薄层白云岩(组合C)

该种组合特征表现为白云岩以薄层状夹在膏岩中(图4c),岩性序列中以蒸发岩沉积为主,单层白云岩厚度小于5 m,单层蒸发岩厚度介于10~50 m。不同区域钻井岩性显示白云岩出现频率与单层厚度不同,在越靠近沉降中心处,该种组合中白云岩单层厚度越薄,向地貌平坦区域组合中白云岩出现频率逐渐增多。GR测井曲线整体呈微齿化箱形,在薄白云岩夹层处出现高值异常,与低值的箱形部分呈突变接触。地震相上可见强振幅、高频率、连续性反射。川中地区角探1井雷四2亚段3 687.90~3 857.20 m岩

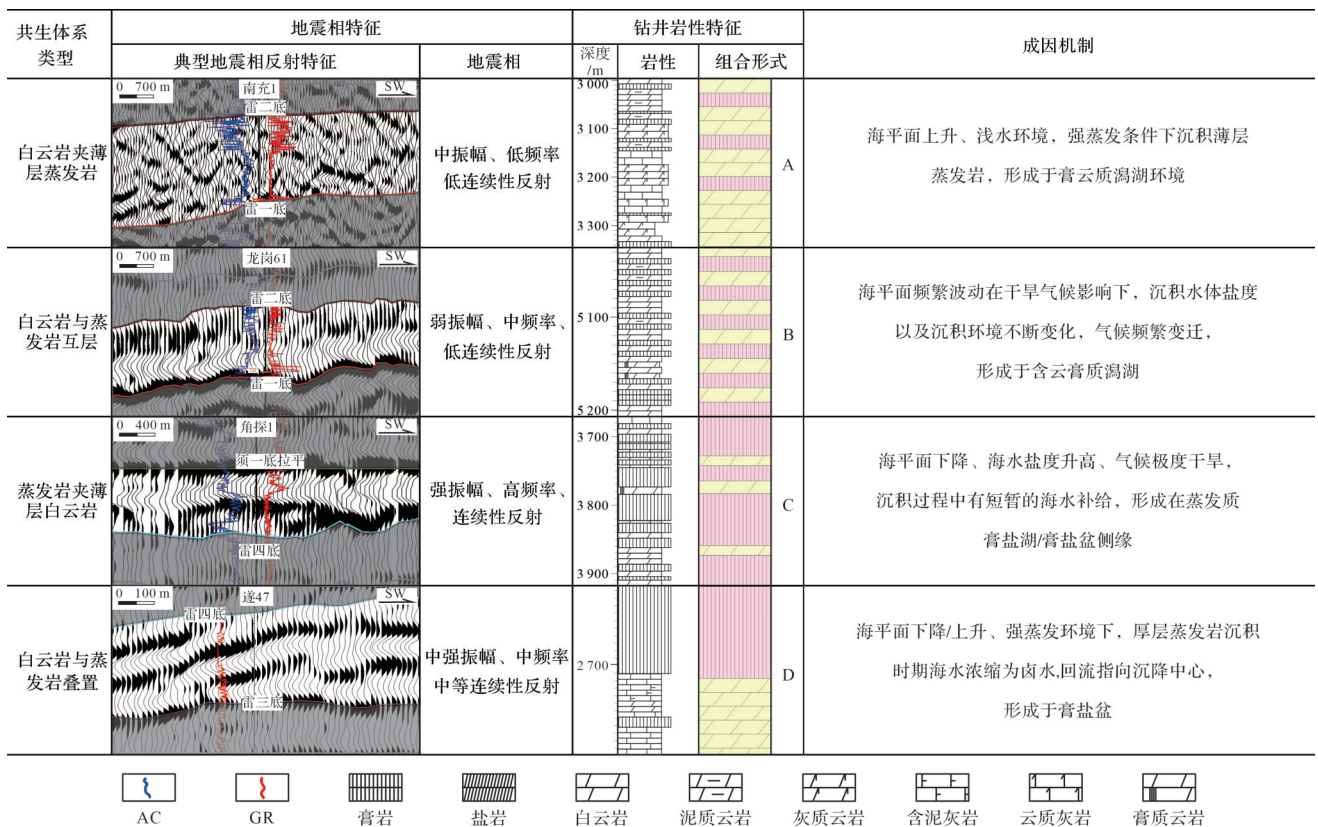


图3 川西北雷口坡组白云岩—蒸发岩共生体系沉积特征

Fig.3 Sedimentary characteristics of the dolomite-evaporite paragenesis system in the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

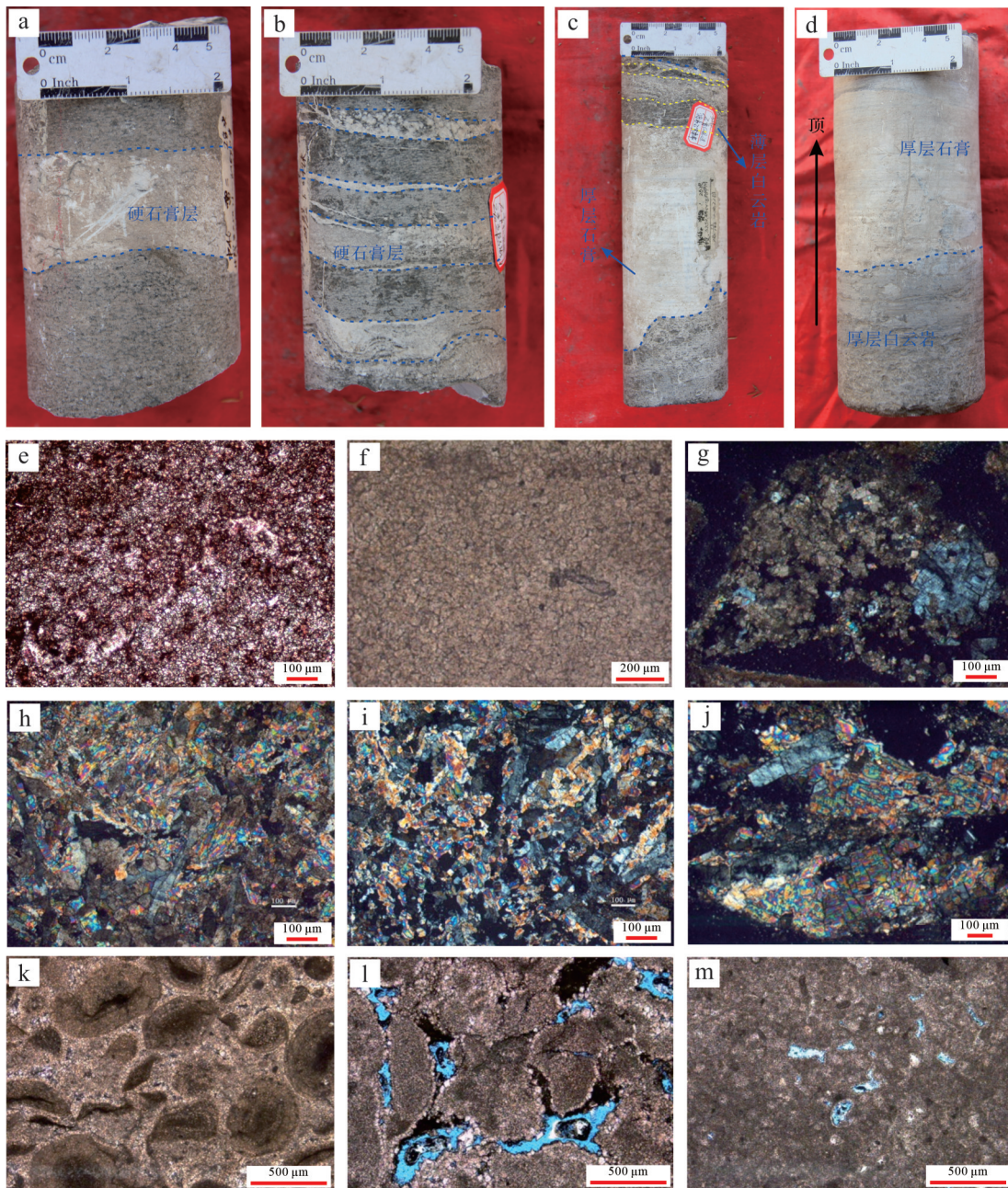


图4 川西北雷口坡组白云岩—蒸发岩共生体系岩石学特征

(a)共生体系A厚层白云岩夹薄层蒸发岩,中46井,3 255.00 m,雷三段,局限台地含膏云质泻湖;(b)共生体系B白云岩与蒸发岩互层,中46井,3 263.70 m,雷三段,局限台地含云膏质泻湖;(c)厚层蒸发岩夹薄层白云岩,中46井,3 255.00~3 255.80 m,雷三段,膏湖;(d)蒸发岩与白云岩叠置,中46井,3 339.70 m,膏盐盆;(e)泥晶灰岩,单偏光,遂47井,2 553.46 m,雷三段;(f)粉晶云岩,龙岗70井,4 956.00 m,膏云质泻湖;(g)含膏云岩,单偏光,龙岗70井,5 020.00 m,含膏云质泻湖;(h)云质膏岩,正交偏光,资探1井,2 638.00 m,含云膏质泻湖;(i)膏岩,正交偏光,资探1井,2 430.00 m,膏湖;(j)膏岩,正交偏光,双探9井,1 598.00 m,膏湖;(k)砂屑云岩,单偏光,龙岗70井,4 946.00 m,台内滩;(l)藻砂屑云岩,单偏光,蓝色为铸体,雷三3段,3 773.64 m,藻云坪;(m)藻云岩,单偏光,重华1井,台缘滩

Fig.4 Petrological characteristics of the dolomite-evaporite paragenesis system in the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

性序列上可见较为典型的厚层蒸发岩夹薄层白云岩组合,自然伽马值介于13~36 API,整体呈低值,在白云岩夹层处GR值略有升高。AC测井曲线平均值约为 $53 \mu\text{s}/\text{ft}$ ,薄层白云岩处出现低值异常。

#### 4) 厚层白云岩与厚层蒸发岩叠置(组合D)

白云岩与蒸发岩单层厚度相近(图4d),且连续沉积的单层蒸发岩厚度大于50.00 m,划分为白云岩与蒸发岩叠置。在四种类型中,该种组合中连续沉

积的单层蒸发岩厚度最大,介于50~100 m。川西北地区雷口坡组沉积期发育的该种组合中,多以蒸发岩上覆于白云岩序列为主,仅在龙岗地区局部出现厚层白云岩上覆于厚层蒸发岩的岩性组合序列。该种组合中有蒸发岩与膏质云岩、白云岩渐变接触,和蒸发岩与白云岩突变接触两种组合序列。测井相上,GR测井曲线呈箱形—钟形突变接触,蒸发岩沉积部位GR值较低。川西地区遂47井雷四段发育厚层蒸发岩上覆于白云岩这一组合,岩性序列上依次出现白云岩、膏质云岩以及膏盐岩,自然伽马值在15~65 API,测井曲线呈漏斗形,在厚层蒸发岩沉积部位出现高值异常,地震相上可见中强振幅、中频率,中等连续性反射。

2.2 共生体系时空分布规律

不同共生体系类型受岩性差异影响形成的地震反射特征不同,通过分析盆地内地震剖面地震反射特征,厘定四种类型共生体系在各段展布范围,并结合区域内钻井岩相组合统计进行校对,进而厘定每种类

型的展布范围。组合A在各段均有分布且展布范围最广,组合B在雷二段展布范围最大,组合C、D两种类型在雷三段最为发育,雷一段、雷四段局部发育。

1) 雷一段

雷一段沉积期共生体系在整个川西北地区几乎均有发育,组合A分布最广,组合B次之,局部可见厚层蒸发岩夹薄层白云岩组合,但分布面积较小。东西两侧主要发育组合A,中部主要发育组合B,组合C、D仅在盆地边缘发育,可见每种类型呈北东—南西向展布的特征(图5a)。组合A在四川盆地雷口坡组内最为常见,并且在雷口坡组各段中均有发育,雷一段向雷四段展布面积逐渐缩小。

2) 雷二段

雷二段沉积期盆地内主要发育组合A、B两种类型,相较于雷一段,该时期共生体系呈现明显的北东—南西向展布(图5b),大范围发育组合B这一类型,且展布范围较连续,盆地北侧仍不发育共生体系。

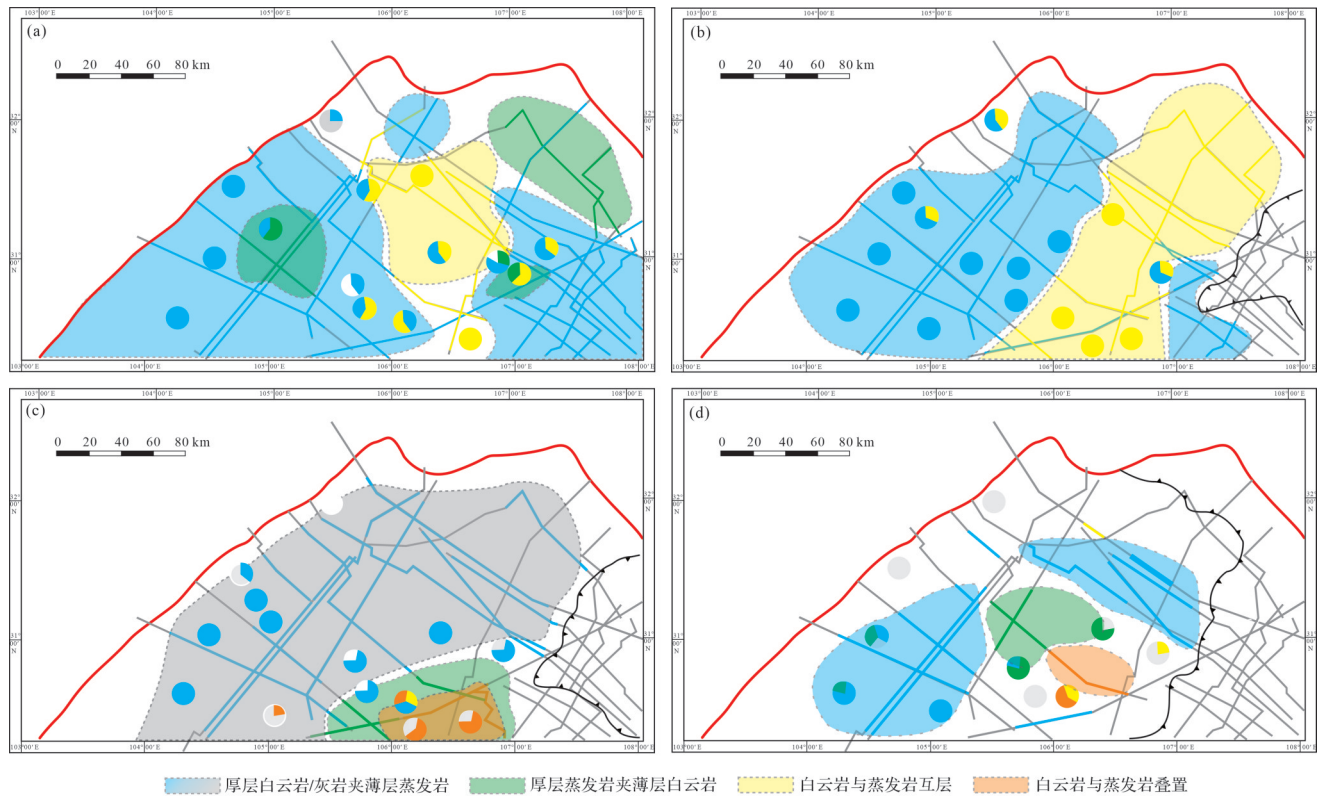


图5 川西北雷口坡组白云岩—蒸发岩共生体系平时空分布规律特征

(a)雷一段;(b)雷二段;(c)雷三段;(d)雷四段

Fig.5 Spatial and temporal distributions of the dolomite-evaporite paragenesis system in the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

### 3) 雷三段

该时期发育的共生体系类型以组合A为主,组合B几乎不发育,组合C、D两种类型在该时期最为发育,集中分布在盆地中部(图5c)。组合A展布方向与雷口坡前期一致,但展布范围相较于前期收缩更加明显,盆地周缘不发育共生体系。

### 4) 雷四段

该时期共生体系展布范围最小,类型以组合A为主,在盆地中部继承性发育C、D两种组合,但相较于雷三段沉积期共生体系展布规模有所缩小,分布位置整体向盆地西侧迁移(图5d)。

## 3 成因机制及控制因素

### 3.1 成因机制

沉积环境作为共生体系发育的基础,主要形成于局限—蒸发台地、潮坪潮上带以及蒸发盆地,三种水体局限的沉积环境(徐安娜等,2016;胡安平等,2019;文华国等,2021;钟寿康等,2022)。沉积过程中海平面升降、古气候以及古盐度变化导致了共生体系中岩相组合的差异。

#### 1) 厚层白云岩夹薄层蒸发岩(组合A)

该序列中沉积的蒸发岩以硬石膏为主,单层厚度相较于雷口坡组沉积的膏岩薄,在10 m以内,硬石膏中可见纹层发育(图4a),未见岩溶角砾等暴露标志,表明组合A中的蒸发岩为水下成因(李凌等,2012),形成于海侵背景下,在沉积过程中受短暂的

强蒸发作用影响,导致水体浓缩盐度升高(吕玉珍等,2013;徐彬等,2019;包洪平等,2023),沉积薄层蒸发岩。雷口坡沉积期受印支运动影响,中上扬子地区构造格局发生改变,龙门山岛链、米仓—大巴山的隆升为共生体系的发育提供了较为局限的沉积环境,加之炎热干旱气候的影响(吕玉珍等,2013),在盆地内部隆升幅度差异较小的区域形成该种共生体系序列(图6),该组合应形成于含膏云质潟湖环境(图7)。

#### 2) 白云岩与蒸发岩互层(组合B)

相较于共生体系类型A,组合B中蒸发岩单层厚度与其相近、岩性相同,但出现频率较高(图4b)。该组合类型的形成受控于沉积过程中海平面、气候频繁变迁,盐度、沉积环境不断变化的环境(黄道军等,2021;文华国等,2021;林晓杨等,2023),从而形成白云岩与蒸发岩互层的岩性组合序列(包洪平等,2023)。白云岩与膏岩互层在雷二段沉积期较为发育,该时期海平面逐渐下降,期间存在频繁的波动(何登发等,2011),交替出现白云岩与蒸发岩。沉积过程中单层膏岩的频繁叠置,导致段内蒸发岩累计厚度较大,但岩性序列中仍存在白云岩沉积,且多含有泥质,说明在沉积过程中并不是单一的强蒸发、极度干旱的沉积环境(钟寿康等,2022)。就最为发育该种类型的雷二段整体地貌(图6)和地层沉积厚度(图8)来看,雷口坡前期(雷一段—雷二段沉积期)地貌较为平坦,并未形成新的构造差异沉降中心,该共生体系应形成于含云膏质潟湖环境(图7)。

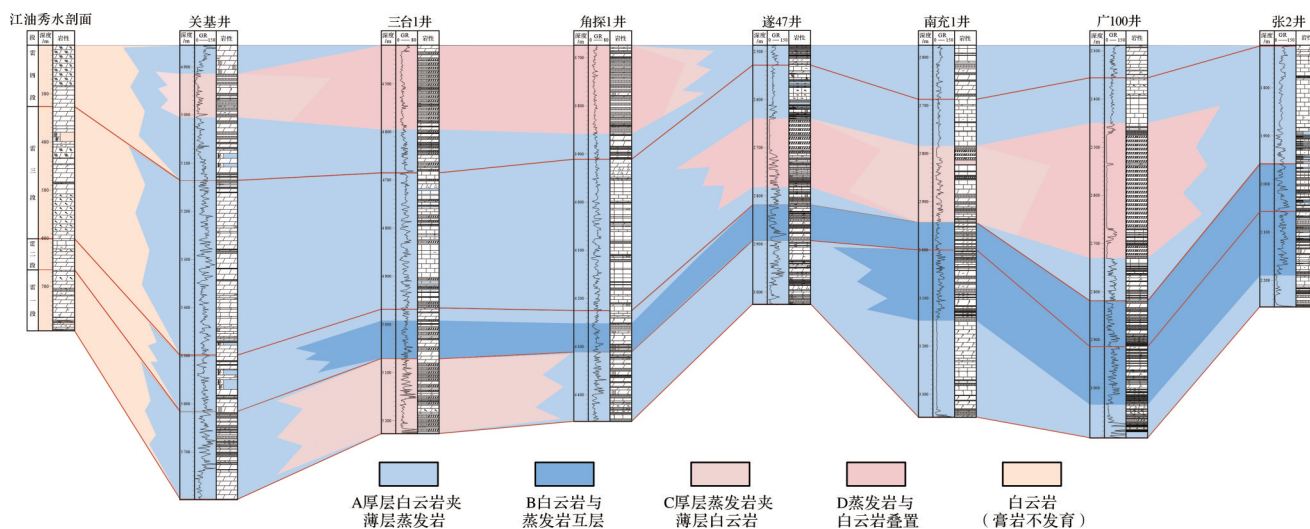


图6 川西北雷口坡组共生体系类型纵向分布特征(剖面位置见图1c)

Fig.6 Longitudinal distributions of paragenesis system types in the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin (see Fig.1c for the profile location)

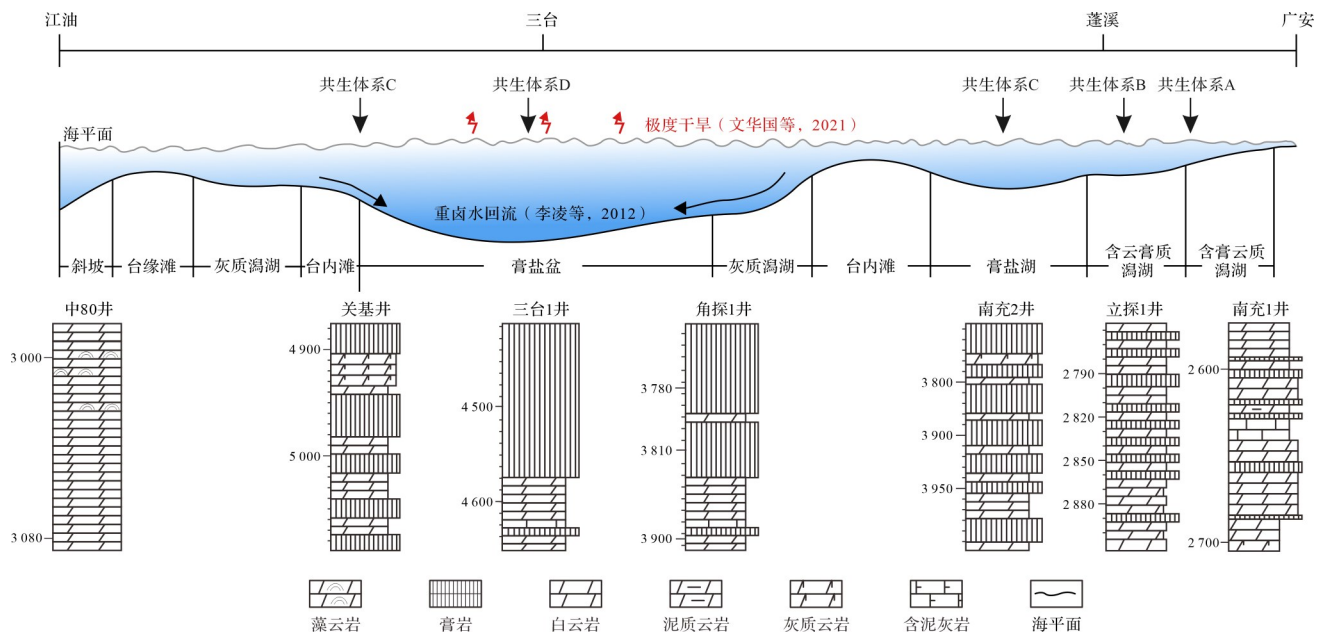


图7 川西北雷口坡组沉积地貌与共生体系发育模式图

Fig.7 Development model of sedimentary landform and paragenesis system in the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

### 3) 厚层蒸发岩夹薄层白云岩(组合C)

该组合在雷口坡后期(雷三段—雷四段沉积期)较为发育,岩性序列中蒸发岩以硬石膏(图4i)、盐岩沉积为主。发育厚层蒸发岩的共生体系,沉积过程中处于极度干旱环境(李凌等,2012),岩性序列中沉积的薄层白云岩说明曾出现短暂的气候变化。形成该组合地区的水位达到了相对低值,古盐度达到了相对高值(吕玉珍等,2013),但岩性序列中夹薄层白云岩说明发育该种共生体系的沉积环境还未演化到膏盐盆阶段(何江等,2013),可能形成于蒸发质膏盐湖或膏盐盆侧缘(图7)。

### 4) 厚层白云岩与厚层蒸发岩叠置(组合D)

该组合的形成主要受控于气候的突变,以及构造差异沉降的影响(李凌等,2012)。岩性序列中,不同的叠置关系可以反映不同的气候变化趋势(胡安平等,2019;包洪平等,2023)。雷口坡组内发育的该种共生体系的叠置关系主要为蒸发岩上覆于白云岩,岩性序列上多以白云岩、膏质白云岩、硬石膏向上渐变为主,反映沉积过程中水位不断降低,气候变干旱,水体变浅、咸化的过程(胡安平等,2019)。该种组合序列多分布在雷口坡沉积后期(雷三一雷四段沉积期)受构造活动影响形成的沉降中心区域。组合中上部连续沉积的厚层蒸发岩为构造差异沉降影响下,强蒸发环境导致海水浓缩盐度升高形成高密度卤水,高密度卤水向沉降中心处回流沉积形成

(李凌等,2012),形成的共生体系应发育在膏盐盆环境下(图7)。

## 3.2 控制因素

### 3.2.1 中三叠世气候、海平面与古盐度

扬子地块作为古特提斯洋域中三叠纪地层沉积最完整的地块(Xu *et al.*, 2021),其海平面整体变化趋势与全球海平面变化趋势相同,但在早期有所差别(Wang *et al.*, 2023)。早、中三叠世全球海平面变化表现为逐渐海侵,在中三叠世中期达到海侵最高峰后,中后期海平面变化曲线表现为下降趋势(何登发等,2011)(图1d)。同时,三叠纪是巨型季风气候发展的鼎盛时期(Boucot *et al.*, 2009),期间降水量少,季节交替过程中温差较大,蒸发岩在整个东特提斯地区广泛分布(辛勇光等,2013)。

雷一段沉积期,海平面存在短周期的升降交替,但整体呈现上升趋势,并在雷一段沉积末期达到最大海侵。而该时期气候相对干旱,温度逐渐上升,古盐度也有所上升但幅度较小(梁文君等,2015)。就整个雷一段沉积期而言,海侵规模逐渐增大,覆盖整个盆地,共生体系在川西北地区几乎均有分布,类型以组合A为主,蒸发岩受短暂强蒸发条件的影响在相对低地貌部位较为发育,其他地区沉积的蒸发岩厚度较小。

雷二段沉积期处于海退期,以西南方向为主的海侵逐渐后退,盆地东侧海平面变化明显,相对于雷

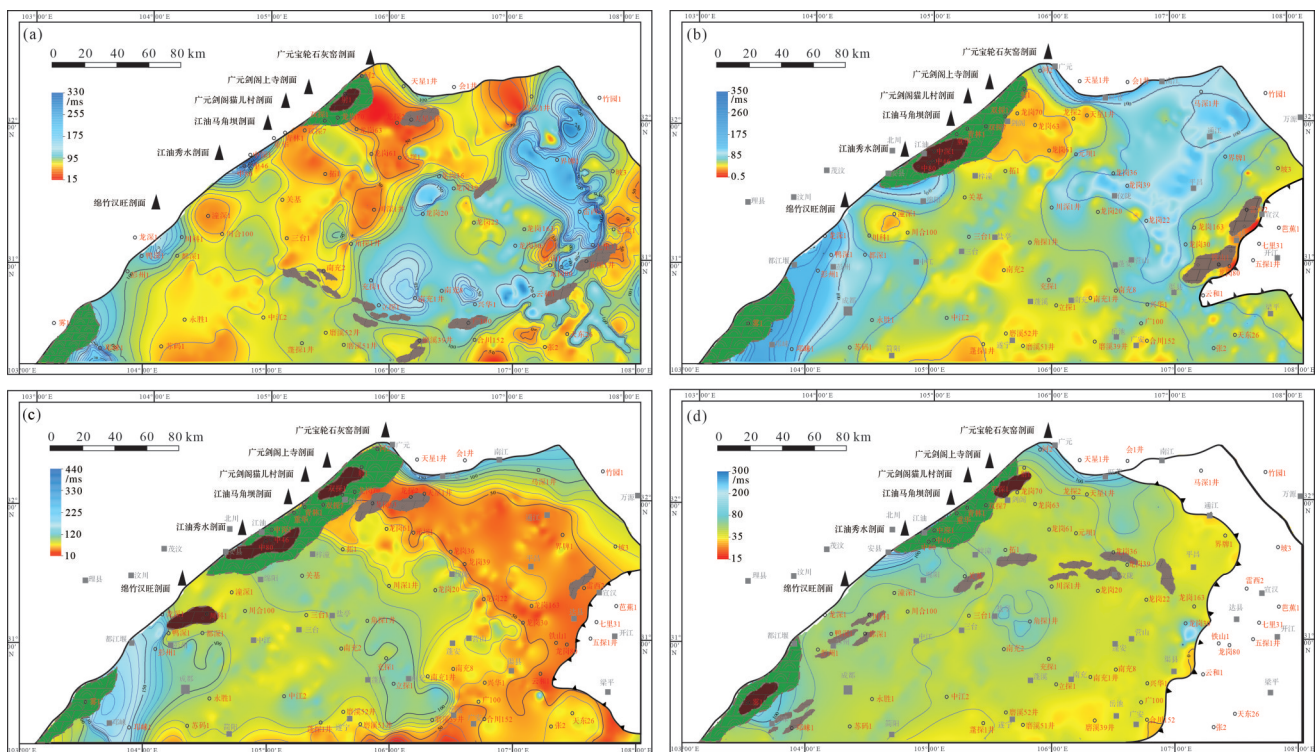


图8 川西北雷口坡组各时期地层厚度与滩相叠合图

(a)雷一段;(b)雷二段;(c)雷三段;(d)雷四段

Fig.8 Stratigraphic thickness and shoal facies overlay during different periods of the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

一段沉积期古温度、古盐度有所升高(梁文君等, 2015),也为蒸发岩的形成提供了环境条件,在动荡的海平面以及高温环境条件下,盆地东侧不断沉积薄层蒸发岩,形成组合B。盆地西南方向受海退影响较小,蒸发岩相对于盆地东侧沉积较少,共生体系类型仍以组合A厚层白云岩夹薄层蒸发岩为主。

雷三段沉积期与雷一段沉积期相同,海平面整体表现为上升趋势(图1d),但海侵过程中海平面升降周期变长,并且升降幅度较大。海平面升至最高时,海水越过盆地周缘隆起,与广海海水交换通畅,形成灰岩沉积(图6)。同时,该时期发生了中三叠纪内首个增温事件(Liu *et al.*, 2021),温度在整个雷口坡沉积期内达到最高(图1d),强蒸发环境使得海水迅速浓缩,古盐度相应达到了整个雷口坡沉积期的相对最高值(梁文君等, 2015)。在环境条件以及构造活动的协同影响下,海水浓缩为重卤水回流向构造沉降中心形成厚层蒸发岩沉积,发育C、D两种共生体系。

雷四段沉积期四川盆地受构造活动影响,盆地东部地层抬升,海平面下降,前期海平面尚有小幅波

动,后期处于明显的海退期。该时期古温度、古盐度有所降低,沉积环境由雷口坡早期(雷一段—雷二段沉积期)局限台地转换为蒸发台地。在海退与干旱气候的共同影响下,雷四段沉积期发育小范围共生体系。沉积期内不断地海退使盆地低洼地区在干旱的环境下沉积形成蒸发岩,与短暂海侵时期沉积的白云岩共同形成组合C。

### 3.2.2 周缘板块构造

晚二叠世至中三叠世,金沙江—澜沧江和理塘两个洋盆相继闭合,西秦岭、羌塘以及扬子板块共同挤压形成松潘—阿坝三角地质体,扬子地块开始向西俯冲至松潘—甘孜洋盆之下,导致上扬子地块西侧受到挤压(Wang *et al.*, 2023)。上扬子板块西侧俯冲至松潘—甘孜洋盆后,龙门山岛链受逆冲推覆作用逐渐隆升,在雷口坡沉积期以水下古隆起存在,并对盆地产生了北西向的挤压力。同时,受扬子板块与华夏板块碰撞影响,导致东侧雪峰山隆升,但该时期构造活动较弱,雪峰山仅在垂向上活动,并未发生剧烈的造山运动(颜佳新和赵坤, 2002; 李聪等, 2011),雪峰山的垂向隆升限制了盆内泸州—开江古

隆起的南向扩展,最终向西侧迁移(Xu *et al.*, 2021)。盆地东部泸州—开江古隆起在早期以水下古隆起存在,雷口坡沉积后期逐渐隆升并出露水面。最终与龙门山共同形成对四川盆地的北西—南东向的挤压,泸州—开江古隆起相对于龙门山隆升幅度大,后期隆起出露水面,地层遭到剥蚀,而龙门山岛链在雷口坡沉积期始终以水下古隆起形式存在(贾东等, 2003;李月等, 2008),指示雷口坡后期盆地西侧受挤压作用比东侧强烈。

中一晚三叠世,受扬子板块与华北板块碰撞影响(Wang *et al.*, 2023),四川盆地构造应力由拉张向俯冲挤压转换。随着秦岭与扬子板块碰撞贴合,产生了近南北方向挤压的区域构造应力场,从而使得米仓山由北向南逆冲,受前陆区陆相地层的阻挡,逐渐形成了一系列倾向向前的前陆单斜带(贾东等, 2003)。秦岭的南向俯冲同时导致盆地东北部早期发育的北西向的裂隙槽发生逆冲,形成正反转构造以及大规模逆冲断层,后期构造变形以前展式向前推进(颜佳新和赵坤, 2002)。米仓—大巴山的前展活动终止于盆地嘉陵江—雷口坡组膏岩滑脱层,其隆升进一步限制了盆地在北西—南东向挤压力作用下的北向伸展(李岩峰等, 2008)。

### 3.2.3 隆坳格局对膏岩及共生体系的影响

中三叠世,四川盆地主要海侵方向为西南侧(吕玉珍等, 2013),而该时期盆地西侧的龙门山岛链的隆升对盆地内广海海水补给产生了明显的影响。其作为水下古隆起,并未完全将海水阻挡在盆地之外,广海海水则越过岛链进入盆地内部,在岛链的坡折带形成厚度较大的低洼地区,蒸发质潟湖较为发育。龙门山岛链的隆升(贾东等, 2003)对盆地内盐度、能量的渐变也产生了明显的影响,导致雷口坡沉积期海水能量、盐度分布形成了渐次分异。古地貌高地与广海海水交换较为通畅,古地貌低洼处,海水循环受阻,在高温条件的影响下为共生体系的形成提供了环境基础。

四川盆地在中三叠雷口坡组主要处于张应力向挤压应力转换的关键时期,雷一段至雷三段早期盆地构造活动较弱,处于构造平静期(李凌等, 2012),整体地貌差异较小,盆地内膏岩沉积中心也相对较为分散,单层连续沉积厚度在50 m以内,并未形成膏盐盆沉积。雷三段后期,四川盆地进入构造活跃期,盆地内东侧泸州—开江古隆起大幅度隆升并出露水

面,与盆地西北侧龙门山古隆起形成对抗作用,产生北西—南东向的挤压应力,盆地受挤压作用增强。泸州—开江古隆起的隆升致使盆地东侧地层抬升,构造沉降中心向西侧迁移,在盆地西侧形成坳陷,沉积物可容空间增大,单层连续沉积的膏岩厚度最大可达200 m,形成膏盐盆。雷口坡后期雷四段膏盐岩沉积中心展布方向也可体现受北西—南东向挤压力影响呈北东—南西向展布,组合C、D两种蒸发岩较为发育的共生体系在后期规模也相应增大(图9b, c)。组合A在雷口坡四个沉积期均大范围发育,组合B在雷口坡中期盆地东侧较为发育,位置与膏岩沉积中心相一致(图9b)。

## 4 古地理重建

基于对共生体系控制因素的认识,结合其成因机制,认为A、B、C、D四种共生体系分别形成于含膏云质潟湖、含云膏质潟湖、膏盐盆侧缘以及膏盐盆。

川西北地区周缘古隆起以及盆内泸州—开江古隆起形成的构造格局(图1b)影响了水体交换,控制了盆地内沉积,在研究区内白云岩—蒸发岩共生体系广泛发育。雷一段沉积期,盆地内地貌差异较小,盆地内整体以共生体系A对应的含膏云质潟湖沉积为主,向蓬安—仪陇通江地带逐渐过渡为含云膏质潟湖,共生体系C对应的膏盐湖主要发育于川中及川北地区,零散分布且规模较小(图10a),颗粒滩在膏盐湖周缘受古地貌控制,呈环带状发育,藻云坪仅在西北部龙门山前局部发育。雷二段沉积期龙门山岛链开始小幅度隆升,盆地隆坳格局相较于雷一段沉积期更加明显,共生体系A对应的含膏云质潟湖仍大面积发育,共生体系B对应的含云膏质潟湖向川东地区迁移,展布范围进一步扩大,受益内泸州—开江古隆起小幅度隆升控制,颗粒滩零散发育在古隆起周缘(图10b)。雷三段沉积期周缘隆起隆升幅度增大,对盆地的挤压持续增强,盆地内出现新的沉降中心,共生体系展布范围向盆地中心收缩。在强蒸发作用影响下,川中地区沉积厚层蒸发岩,共生体系D对应的膏盐盆大面积发育,向外过渡为共生体系C对应的膏盐湖(图10c)。同时期受大幅度海侵影响,雷三段后期沉积大套灰泥岩,形成灰泥质潟湖。受益地周缘隆起隆升作用的影响,龙门山古隆起周缘藻云坪及颗粒滩相较于前期更加发育,在膏盐盆向周围平坦地貌过渡的坡折带处台内滩较为

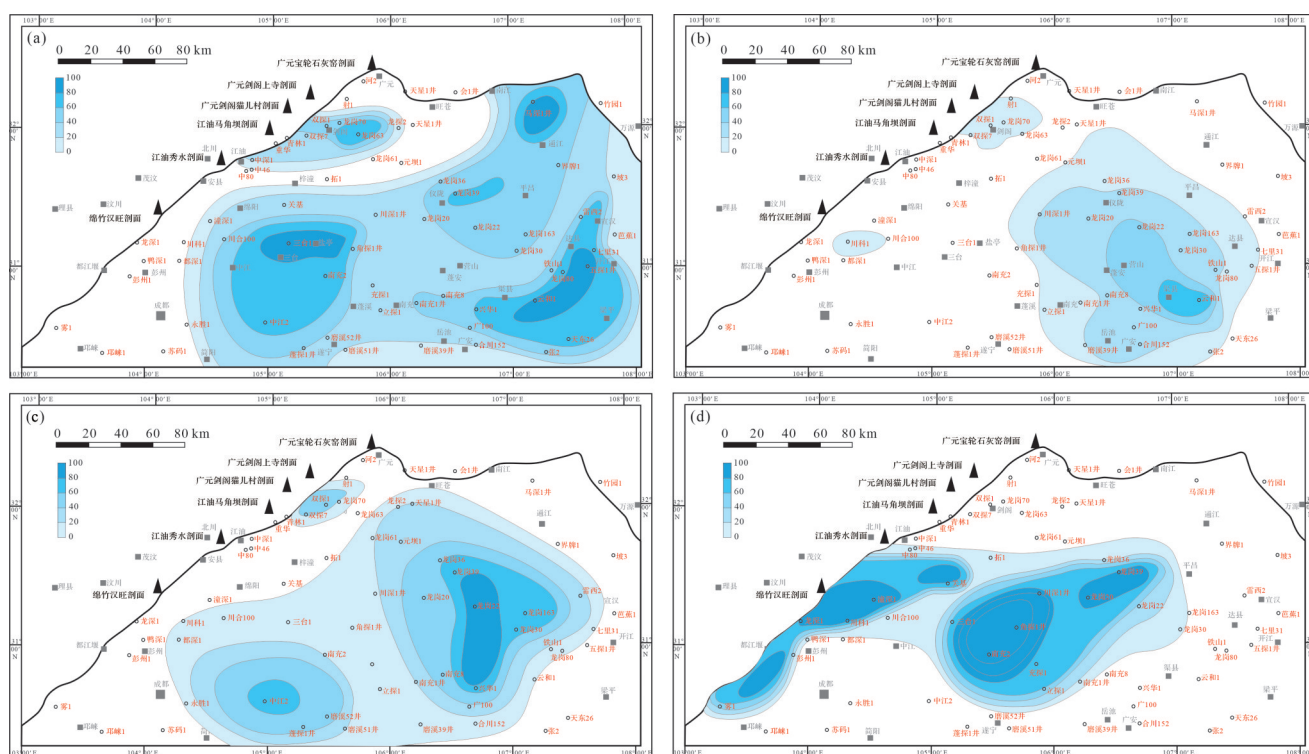


图9 川西北雷口坡组各时期膏岩厚度图

(a)雷一段;(b)雷二段;(c)雷三段;(d)雷四段

Fig.9 Thickness map of gypsum rocks in different periods of the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

发育。雷四段沉积期泸州—开江古隆起继续隆升，与龙门山古隆起形成三面围挡，受强蒸发作用影响，沉积相带沿共生体系D对应的膏盐盆向外呈环带发育，依次过渡为共生体系C对应的膏盐湖、共生体系B对应的含云膏质潟湖、共生体系A对应的含膏云质潟湖(图10d)，最外过渡到共生体系不发育的云质潟湖。台内滩主要发育于古隆起与膏湖间北侧坡折带，西南部受龙门山岛链的隆升及沉积作用，台缘滩及藻云坪均大面积发育。

综合雷口坡时期沉积演化过程可以发现，盆地在周缘古隆起形成的障壁作用、干旱和潮湿的气候交替以及海平面不断升降的变化过程共同形成了雷口坡沉积期局限—蒸发台地的沉积环境(梁文君等, 2015)。雷口坡沉积期整体上受干旱古气候条件的影响，海平面升降过程中伴随强烈蒸发作用，白云岩蒸发岩交替沉积，共生体系大面积发育。雷口坡沉积期东西两侧龙门山、泸州—开江古隆起渐次隆升，到后期泸州—开江古隆起出露水面与西侧龙门山水下古隆起形成对盆地内部的挤压作用，盆内共生体系相应由早期在龙门山山前以及泸州—开江古隆起前的低洼地区向盆地中心迁移(图11)，隆起附近A、

B两种膏岩厚度较小的共生体系较为发育。C、D两种共生体系在前期盆地内的洼陷以及后期龙门山前形成的新的沉降中心处发育，四种共生体系对应的相带也呈环带状过渡，表现为组合A形成的含膏云质潟湖→组合B对应的含云膏质潟湖→组合C对应的膏盐湖→组合D对应的膏盐盆的相带变化。除了由古隆起隆升形成的地貌差异控制台缘滩沉积外，在盆内共生体系C、D两种类型向A、B两种类型过渡区域存在的坡折带部位水体也较为动荡，有利于台内滩发育。

## 5 结论

(1) 四川盆地中三叠雷口坡沉积期，在周缘古隆起与海平面、古盐度、古气候的影响下形成了局限—蒸发台地的沉积环境。在这一环境背景下，白云岩—蒸发岩共生体系广泛发育，川西北地区主要发育厚层白云岩夹薄层蒸发岩、白云岩与蒸发岩互层、厚层蒸发岩夹薄层白云岩、厚层蒸发岩与厚层白云岩叠置四种共生体系类型。

(2) 雷一段、雷二段沉积期共生体系类型以厚层蒸发岩夹薄层白云岩和白云岩与蒸发岩互层两种类

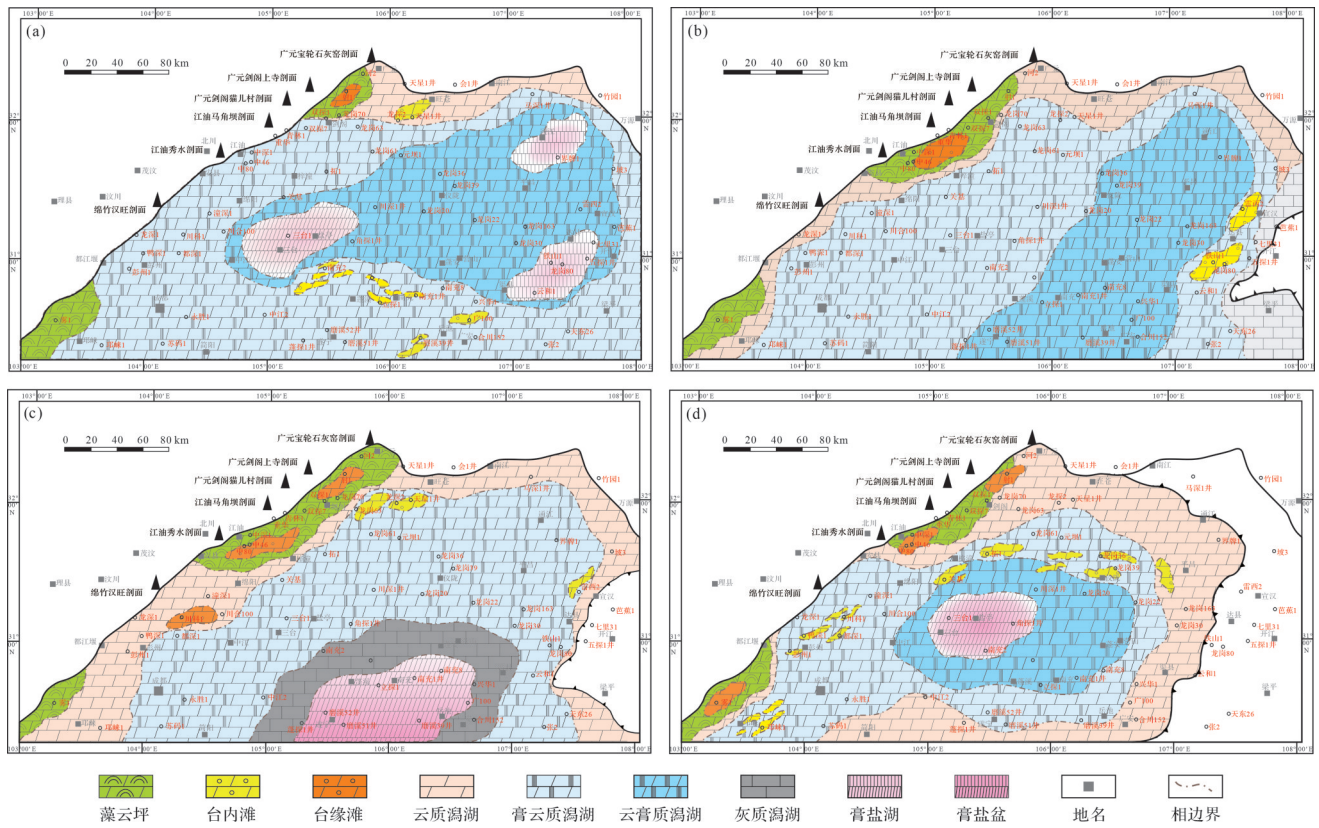


图10 川西北雷口坡组沉积期岩相古地理图  
(a)雷一段;(b)雷二段;(c)雷三段;(d)雷四段

Fig.10 Lithofacies and paleogeographic map in different period of Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

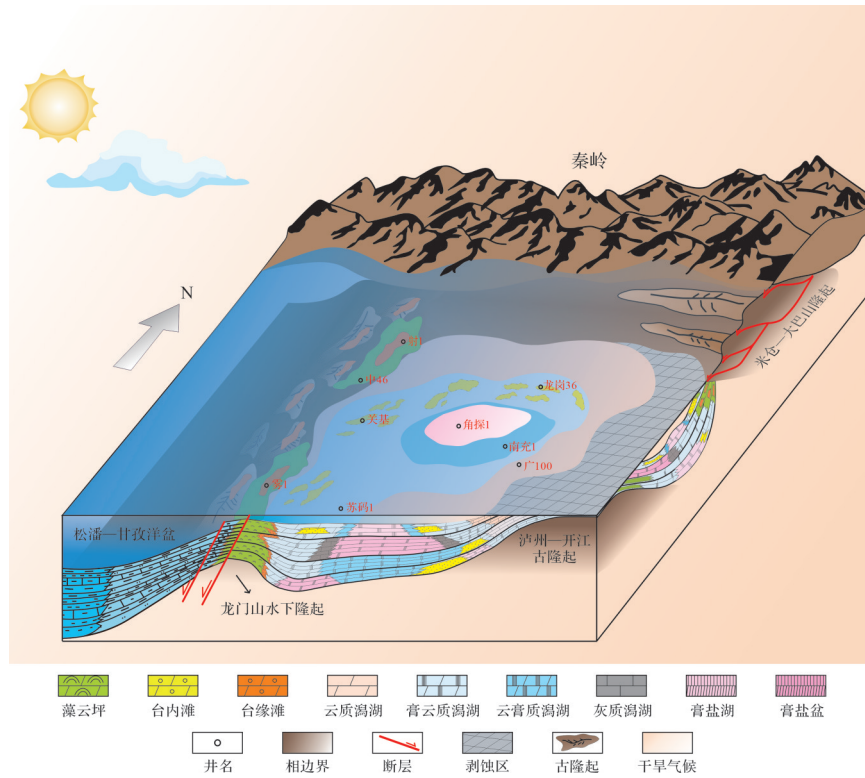


图11 川西北雷口坡组沉积演化模式图

Fig.11 Sedimentary evolution model of the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin

型为主;雷三段、雷四段沉积期厚层蒸发岩夹薄层白云岩、蒸发岩与白云岩叠置两种类型较为发育。

(3) 四种类型共生体系的形成受气候、海平面、古地貌的联合控制,分别形成于膏云质潟湖、云膏质潟湖、膏盐湖以及膏盐盆环境。根据不同类型共生体系对应不同的沉积环境,重建雷口坡组岩相古地理,形成演化模式。

## 参考文献(References)

- 包洪平,王前平,闫伟,等. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系碳酸盐岩—膏盐岩体系沉积特征与天然气成藏潜力[J]. 地学前缘, 30(1): 30-44. [Bao Hongping, Wang Qianping, Yan Wei, et al. 2023. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential of the Ordo-vician carbonate-evaporite paragenesis system in central and eastern Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 30(1): 30-44.]
- Boucot A J, 陈旭, Scotese C R, 等. 2009. 显生宙全球古气候重建[M]. 北京: 科学出版社: 1-173. [Boucot A J, Chen Xu, Scotese C R, et al. 2009. Reconstruction of Phanerozoic global paleoclimate [M]. Beijing: Science Press: 1-173.]
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3): 589-606. [He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589-606.]
- 何江, 赵忠军, 乔琳, 等. 2013. 白云岩储层中蒸发矿物的赋存形式与成因演化: 以鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组为例[J]. 石油与天然气地质, 34(5): 659-666. [He Jiang, Zhao Zhongjun, Qiao Lin, et al. 2013. Occurrence, genesis and evolution of evaporite minerals in dolomite reservoir: A case study of the Majiagou Formation in gas fields of the central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 34(5): 659-666.]
- 胡安平, 沈安江, 杨翰轩, 等. 2019. 碳酸盐岩—膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. 石油勘探与开发, 46(5): 916-928. [Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. 2019. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 916-928.]
- 黄道军, 钟寿康, 张道锋, 等. 2021. 蒸发背景沉积序列精细刻画及沉积学解译: 以鄂尔多斯盆地中部中奥陶统马五<sub>0</sub>亚段为例[J]. 古地理学报, 23(4): 735-755. [Huang Daojun, Zhong Shoukang, Zhang Daofeng, et al. 2021. Detailed characterization and interpretation of sedimentary sequences under evaporitic environments: A case from the Ma<sub>5</sub><sub>0</sub> submember of Middle Ordovician in central Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 23(4): 735-755.]
- 黄东, 张健, 杨光, 等. 2011. 四川盆地中三叠统雷口坡组地层划分探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 33(3): 89-95. [Huang Dong, Zhang Jian, Yang Guang, et al. 2011. The discussion of stratum division and stratum for the Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 33(3): 89-95.]
- 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 2003. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 9(3): 402-410. [Jia Dong, Chen Zhuxin, Jia Chengzao, et al. 2003. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, central China[J]. Geological Journal of China Universities, 9(3): 402-410.]
- 李聪, 陈世悦, 张鹏飞, 等. 2011. 雪峰陆内多期复合造山带震旦—三叠纪沉积演化特征[J]. 中国地质, 38(1): 43-51. [Li Cong, Chen Shiyue, Zhang Pengfei, et al. 2011. Palaeozoic-Mesozoic sedimentary evolution characteristics of the Xuefeng Mountain intracontinental orogenic belt[J]. Geology in China, 38(1): 43-51.]
- 李国辉, 杨光, 李莉, 等. 2018. 四川盆地西北缘天井山古隆起的形成与演化[J]. 天然气勘探与开发, 41(4): 1-7. [Li Guohui, Yang Guang, Li Li, et al. 2018. Formation and evolution of Tianjingshan paleo-uplift, northwestern margin of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 41(4): 1-7.]
- 李凌, 谭秀成, 邹春, 等. 2012. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及膏盐盆迁移演化与构造意义[J]. 地质学报, 86(2): 316-324. [Li Ling, Tan Xiucheng, Zou Chun, et al. 2012. Origin of the Leikoupo Formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in the Sichuan Basin, and their structural significance[J]. Acta Geologica Sinica, 86(2): 316-324.]
- 李岩峰, 曲国胜, 刘殊, 等. 2008. 米仓山、南大巴山前缘构造特征及其形成机制[J]. 大地构造与成矿学, 32(3): 285-292. [Li Yanfeng, Qu Guosheng, Liu Shu, et al. 2008. Structural characters and mechanism in the Micang Shan and southern Daba Shan mountains front[J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(3): 285-292.]
- 李月, 周瑶琪, 颜世永, 等. 2008. 龙门山造山带构造演化模式的建立[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(2): 12-15, 20. [Li Yue, Zhou Yaoqi, Yan Shiyong, et al. 2008. Establishment of tectonic evolution pattern of Longmenshan Orogen[J]. Journal of China University of Petroleum, 32(2): 12-15, 20.]
- 梁文君, 肖传桃, 肖胜. 2015. 川西地区中二叠世—中三叠世微量、常量元素与古环境、古气候关系研究[J]. 科学技术与工程, 15(11): 14-24. [Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Sheng. 2015. Study on relationships between paleoenvironment, paleoclimate of Middle Permian-Middle Triassic and constant, trace elements in western Sichuan[J]. Science Technology and Engineering, 15(11): 14-24.]
- 林良彪, 陈洪德, 张长俊. 2007. 四川盆地西北部中三叠世雷口坡组岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 27(3): 51-58. [Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhang Changjun. 2007. Sedimentary facies and palaeogeography of northwestern Sichuan Basin during the Leikoupoan (Middle Triassic) [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 27(3): 51-58.]
- 林晓杨, 张兵, 肖红平, 等. 2023. 川东三叠系白云岩与蒸发岩差异组合测井相模式及勘探意义[J]. 物探化探计算技术, 45(4): 443-

452. [Lin Xiaoyang, Zhang Bing, Xiao Hongping, et al. 2023. Logging facies mode and exploration significance of a differential combination of Triassic dolomite and evaporite in the eastern Sichuan Basin[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(4): 443-452. ]
- 吕玉珍,倪超,张建勇,等. 2013. 四川盆地中三叠统雷口坡组有利沉积相带及岩相古地理特征[J]. *海相油气地质*, 18(1):26-32. [Lü Yuzhen, Ni Chao, Zhang Jianyong, et al. 2013. Favorable sedimentary facies zones and lithofacies palaeogeography of Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 18(1): 26-32. ]
- 孙春燕,胡明毅,胡忠贵,等. 2018. 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积特征及有利储集相带[J]. *石油与天然气地质*, 39(3):498-512. [Sun Chunyan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. 2018. Sedimentary characteristics and favorable reservoir facies distribution of the Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 39(3): 498-512. ]
- 文华国,霍飞,郭佩,等. 2021. 白云岩—蒸发岩共生体系研究进展及展望[J]. *沉积学报*, 39(6): 1321-1343. [Wen Huaguo, Huo Fei, Guo Pei, et al. 2021. Advances and prospects of dolostone-evaporite paragenesis system[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1321-1343. ]
- 辛勇光,文龙,张豪,等. 2022. 四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征与勘探领域探讨[J]. *中国石油勘探*, 27(4):91-102. [Xin Yongguang, Wen Long, Zhang Hao, et al. 2022. Study on reservoir characteristics and exploration field of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 91-102. ]
- 辛勇光,周进高,倪超,等. 2013. 四川盆地中三叠世雷口坡期障壁型碳酸盐岩台地沉积特征及有利储集相带分布[J]. *海相油气地质*, 18(2): 1-7. [Xin Yongguang, Zhou Jingao, Ni Chao, et al. 2013. Sedimentary facies features and favorable lithofacies distribution of Middle Triassic Leikoupo barriered carbonate platform in Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 18(2): 1-7. ]
- 徐安娜,胡素云,汪泽成,等. 2016. 四川盆地寒武系碳酸盐岩—膏盐岩共生体系沉积模式及储层分布[J]. *天然气工业*, 36(6):11-20. [Xu Anna, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. 2016. Sedimentary mode and reservoir distribution of the Cambrian carbonate & evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 36(6): 11-20. ]
- 徐彬,李建国,张永庶,等. 2019. 柴西南英西地区下干柴沟组上段蒸发岩沉积旋回特征[J]. *高校地质学报*, 25(1):99-107. [Xu Bin, Li Jianming, Zhang Yongshu, et al. 2019. Sedimentary cycles of evaporite sequences in the upper member of the Lower Ganchaigou Formation in the Yingxi area, southwestern Qaidam Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(1): 99-107. ]
- 徐康,宫哈凝. 2023. 四川盆地雷口坡组岩相古地理特征及有利储集相带[J]. *古地理学报*, 25(4): 841-855. [Xu Kang, Gong Hanning. 2023. Lithofacies palaeogeographic characteristics and favorable reservoir facies of the Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 25(4): 841-855. ]
- 颜佳新,赵坤. 2002. 二叠—三叠纪东特提斯地区古地理、古气候和古海洋演化与地球表层多圈层事件耦合[J]. *中国科学:地球科学*, 32(9): 751-759. [Yan Jiaxin, Zhao Kun. 2002. Permian-Triassic paleogeographic, paleoclimatic and paleoceanographic evolutions in eastern Tethys and their coupling[J]. *Science China Earth Sciences*, 32(9): 751-759. ]
- 杨威,魏国齐,谢武仁,等. 2021. 古隆起在四川盆地台内碳酸盐岩丘滩体规模成储中的作用[J]. *天然气工业*, 41(4): 1-12. [Yang Wei, Wei Guoqi, Xie Wuren, et al. 2021. Role of paleo-uplift in the scale formation of intra-platform carbonate mound-bank body reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 41(4): 1-12. ]
- 钟寿康,谭秀成,胡广,等. 2022. 古地理格局对膏盐岩—碳酸盐岩共生体系沉积分异的控制:以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段6亚段为例[J]. *石油勘探与开发*, 49(4):728-740. [Zhong Shoukang, Tan Xiucheng, Hu Guang, et al. 2022. Control of paleogeographic pattern on sedimentary differentiation of evaporite-carbonate symbiotic system: A case study of the Sixth sub-member of Ordovician Majiagou Formation M5 member in central-eastern Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 728-740. ]
- Andreeva P V. 2015. Middle Devonian (Givetian) supratidal sabkha anhydrites from the Moesian Platform (northeastern Bulgaria) [J]. *Carbonates and Evaporites*, 30(4): 439-449.
- Liu D Y, Huang C J, Kemp D B, et al. 2021. Paleoclimate and sea level response to orbital forcing in the Middle Triassic of the eastern Tethys[J]. *Global and Planetary Change*, 199: 103454.
- Wang Y C, Shi K B, Liu B. 2023. Sedimentary structures of microbial carbonates in the Fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation, western Sichuan Basin, China[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 2300.
- Xu Q, Li L, Tan X C, et al. 2021. Middle Triassic sedimentary evolution in the Upper Yangtze region with implications for the collision between the South and North China Blocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 222: 104974.
- Zorina S O. 2017. Mineralogical composition of the Lower and Upper Kazanian (Mid-Permian) rocks and facies distribution at the Petchischi region (eastern Russian Platform) [J]. *Carbonates and Evaporites*, 32(1): 27-43.

# Characteristics of Dolomite-Evaporite Paragenesis System in the Triassic Leikoupo Formation, Northwestern Sichuan Basin, and Reconstruction of the Paleogeography

LI YuZhuo<sup>1,2,3</sup>, LIU Lei<sup>1,2,3</sup>, FENG JiaRui<sup>4</sup>, LUO Zhong<sup>5</sup>, ZHANG Jing<sup>5</sup>, WEN HuaGuo<sup>1,2,3</sup>

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

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

3. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4. Department of Petroleum Resources Exploration, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

5. Central Laboratory of Geological Sciences, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract:** [Objective] The aim was to update the sedimentary characteristics of the widely distributed Triassic dolomite-evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin and clarify its development and distribution patterns and main influences, provide new insights for its study and guide the reconstruction of the regional paleogeography. [Methods] Drill core and seismic data were used to investigate the sedimentary characteristics in the study area from a number of viewpoints and determine the genetic mechanisms of the different types of symbiotic systems and reveal their spatiotemporal distribution patterns and main controlling factors. [Results] (1) Overall, four types of symbiotic systems are present in the Leikoupo Formation, northwestern Sichuan Basin: (i) thick layers of dolomite interbedded with thin layers of evaporite; (ii) interbedded dolomite-evaporite; (iii) thick layers of evaporite interbedded with thin layers of dolomite; and (iv) overlapping thick layers of evaporite. Types (i) and (iv) are widely distributed throughout the four sedimentary periods in the Leikoupo region. Stacking of thick evaporite and thick dolomite occurs most frequently in the central part of the Lei-3 and Lei-4 sedimentary periods. (2) The uplift of the Longmen Mountain island chain on the western side caused southeastern compression on the basin, and the Xuefeng Mountain uplift to the east restricted the southward migration of the ancient Luzhou Kaijiang paleo-uplift, and the contemporaneous Qinling Mountains southward subduction has been occurred. formed a structural pattern trending almost northeast-southwest in the Sichuan Basin, which controlled the overall northeast-southwest distribution of gypsum rocks and symbiotic systems. (3) The significant extent of the Luzhou Kaijiang paleo-uplift caused subsequent migration of the Leikoupo Formation subsidence center toward the west, and the gypsum sedimentary center and four coexisting systems also migrated westward from their earlier dispersed locations. [Conclusions] The sedimentary properties and distribution patterns of the symbiotic system resulted in four types of symbiotic system: gypsum-dolomitic lagoons, dolomitic gypsum lagoons, gypsum salt lakes, and gypsum salt basins. The paleogeography of each of the four sedimentary periods of the Leikoupo Formation was reconstructed from the distribution patterns of these types of symbiotic system.

**Key words:** Sichuan Basin; Leikoupo Formation; Dolomite-Evaporite Paragenesis System; sedimentary environment; paleogeographic pattern

**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 42102132; CNPC's "14th Five-Year Plan" Upstream Field Prospective Basic Project, No. 2021DJ0302

**Corresponding author:** FENG JiaRui, E-mail: jrfeng2016@163.com