

# 四川盆地龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储层特征及古岩溶作用对其影响

李 玥<sup>1,2\*</sup>, 王兴志<sup>1,2</sup>, 王珏博<sup>1,2</sup>, 朱逸青<sup>3</sup>, 黄梓桑<sup>2</sup>, 康家豪<sup>1</sup>, 李 阳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

<sup>2</sup>西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都

<sup>3</sup>中国石油西南油气田分公司, 四川 成都

收稿日期: 2021年9月13日; 录用日期: 2021年10月11日; 发布日期: 2021年10月18日

## 摘 要

雷四<sup>3</sup>亚段作为雷口坡组主要含油气层段之一, 一直是近年的研究重点和热点。本文以四川盆地龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段为研究对象, 通过分析岩石学和地球化学特征, 探讨其储层特征以及古岩溶改造作用的影响。结果表明: 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段主要发育砂屑白云岩、鲕粒白云岩、粉晶白云岩和岩溶角砾岩四种储集岩, 储集性能以砂屑白云岩为最好。储集空间类型以粒间溶孔为主, 其次为粒内溶孔、晶间溶孔, 渗流空间主要为裂缝, 总体上储层表现为低孔、低渗的特征。此外, 在龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段中共识别出同生期岩溶作用、表生期岩溶作用、埋藏期岩溶作用三种类型的古岩溶作用。其中, 表生期岩溶作用是储层形成的基础, 控制着早期储层的形成与分布; 同生期岩溶作用是储层形成的关键, 不仅改善了原有孔隙的储集性能, 更为油气运移提供了更多的有效通道; 埋藏岩溶作用是储层进一步优化改造不可忽视的因素。

## 关键词

雷口坡组, 储层特征, 古岩溶作用, 龙岗地区, 四川盆地

# Reservoir Characteristics and the Influence of Paleokarstification in T<sub>2</sub>l<sub>4</sub><sup>3</sup> in Longgang Area, Sichuan Basin

Yue Li<sup>1,2\*</sup>, Xingzhi Wang<sup>1,2</sup>, Juebo Wang<sup>1,2</sup>, Yiqing Zhu<sup>3</sup>, Zisang Huang<sup>2</sup>, Jiahao Kang<sup>1</sup>, Yang Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University,

\*通讯作者。

文章引用: 李玥, 王兴志, 王珏博, 朱逸青, 黄梓桑, 康家豪, 李阳. 四川盆地龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储层特征及古岩溶作用对其影响[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(10): 1294-1305. DOI: 10.12677/ag.2021.1110125

Chengdu Sichuan

<sup>3</sup>PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu SichuanReceived: Sep. 13<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 11<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 18<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

As one of the main oil-bearing stratum in The Leikoupo Formation, the  $T_2l_4^3$  has been the research focus and hotspot in recent years. Based on the analysis of petrological and geochemical characteristics, this paper discusses the reservoir characteristics and the influence of paleokarstification in  $T_2l_4^3$  in Longgang area. The results show that Arenite dolomite, oolitic dolomite, silty dolomite and karstic breccia are mainly developed in  $T_2l_4^3$  of Longgang area. Arenite dolomite has the best reservoir property. The main storage space is intergranular dissolved pore, secondly is intragranular dissolved pore and intercrystal dissolved pore. The major influent space is fracture. Generally the reservoir is characterized by low pore and low permeability. In addition, there are three types of palaeokarstification in the research area: syndepositional karstification, epigenic karstification and buried karstification. syndepositional palaeokarstification is the foundation of reservoir formation and controls the formation and distribution of reservoirs in early stage. Epigenic palaeokarstification is the key to reservoir formation, which not only improves the storage performance of previous pores, but also provides more effective channels for oil and gas migration. Buried palaeokarstification is considered as the key factor for further optimization and reconstruction of reservoir.

## Keywords

Leikoupo Formation, Reservoir Characteristics, Paleokarstification, Longgang Area, Sichuan Basin

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

四川盆地是我国大型的含油气盆地，也是我国一个主要的叠合盆地[1] [2]，经多年的油气勘探实践，证实四川盆地油气资源丰富，勘探潜力巨大，至今已发现多个含气层位，其中中三叠统雷口坡组是主要含油气层系之一。

雷口坡组的油气勘探始于 20 世纪 60 年代[3]，经过多年的勘探开发，雷口坡组天然气储量和产量在四川盆地占有举足轻重的地位，陆续发现了中坝、卧龙、磨溪等气田以及观音场、罗渡溪、卧龙河等含气构造[4] [5] [6] [7]，展现出良好的勘探前景。雷四<sup>3</sup>亚段作为雷口坡组主要含油气层段之一，引起了众多学者的关注和研究，前人对雷口坡组雷四<sup>3</sup>亚段做了大量研究，积累了丰富的研究成果[8] [9] [10] [11]。但是，由于受研究手段和资料完善程度的限制，目前对四川盆地龙岗地区雷口坡组末期古岩溶作用研究甚少，并且对于古岩溶作用如何影响储层的发育过程研究尚有不足，龙岗地区雷口坡组的储层类型、储层特征等研究有待深入。因此本文以四川盆地龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段为研究对象，在已有研究成果的基础上，通过露头、岩心、测井及薄片观察等综合分析，系统研究了龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段的储层特征，并详细阐述古岩溶作用对龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段碳酸盐岩储层形成和演化的不同程度的影响，以期为该区域油

气勘探提供重要的理论依据。

## 2. 地质背景

研究区位于四川盆地中部,构造位置属于川北古中坳陷仪陇~平昌平缓构造带,其东北起于通江凹陷,向南止于川中隆起区北缘的营山构造,东南到川东高陡断褶带的华蓥山构造北倾末端,西北抵梓潼~苍溪凹陷[12],面积约为 5000 km<sup>2</sup> (图 1)。在震旦纪斜向俯冲作用下,扬子板块内部形成了张扭构造背景,研究区内褶皱强度小,构造平缓,构造轴向多为 NNE。受华蓥山断裂带抬升的影响,东侧出露地层较老,向西依次变新,整个构造呈东高西低的格局[13] [14]。中三叠世末,由于受印支运动的影响,四川盆地发生了大规模的抬升运动,导致雷口坡组上部地层遭受了不同程度剥蚀,普遍缺失雷五段,从而与上三叠统须家河组为不整合接触关系。

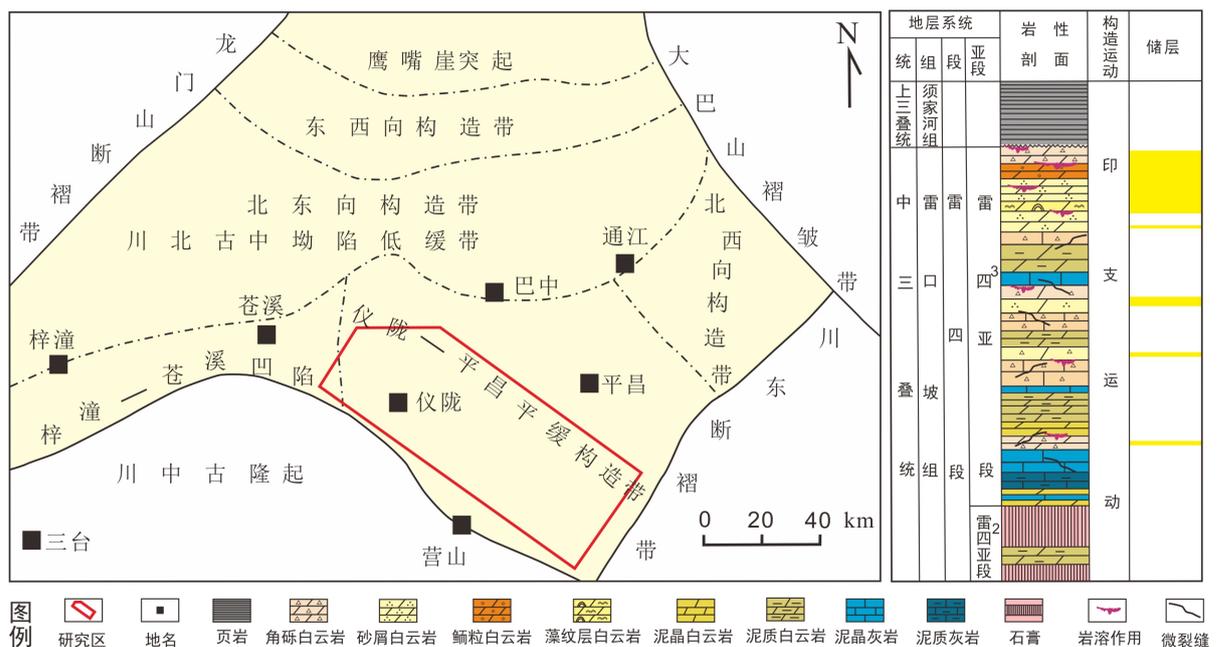


Figure 1. The location of the study area and comprehensive column of stratigraphy in  $T_2L_4$

图 1. 研究区位置及雷四<sup>3</sup>亚段地层综合柱状图

川中龙岗地区中三叠统雷口坡组地层被剥蚀后残余厚度约 800~950 m, 主要由一套深灰、褐灰色中-厚层灰岩、白云岩和厚层块状的膏岩不等厚互层组成[15]。雷口坡组纵向上依次划分为雷一段、雷二段、雷三段和雷四段[16]。根据岩性、电性、沉积旋回性等又将雷四段进一步划分为雷四<sup>1</sup>、雷四<sup>2</sup>和雷四<sup>3</sup>三个亚段。文章目的层段为雷口坡组雷四<sup>3</sup>亚段, 该亚段主要发育砂屑白云岩、鲕粒白云岩、粉晶白云岩和岩溶角砾岩等岩类(图 1)。

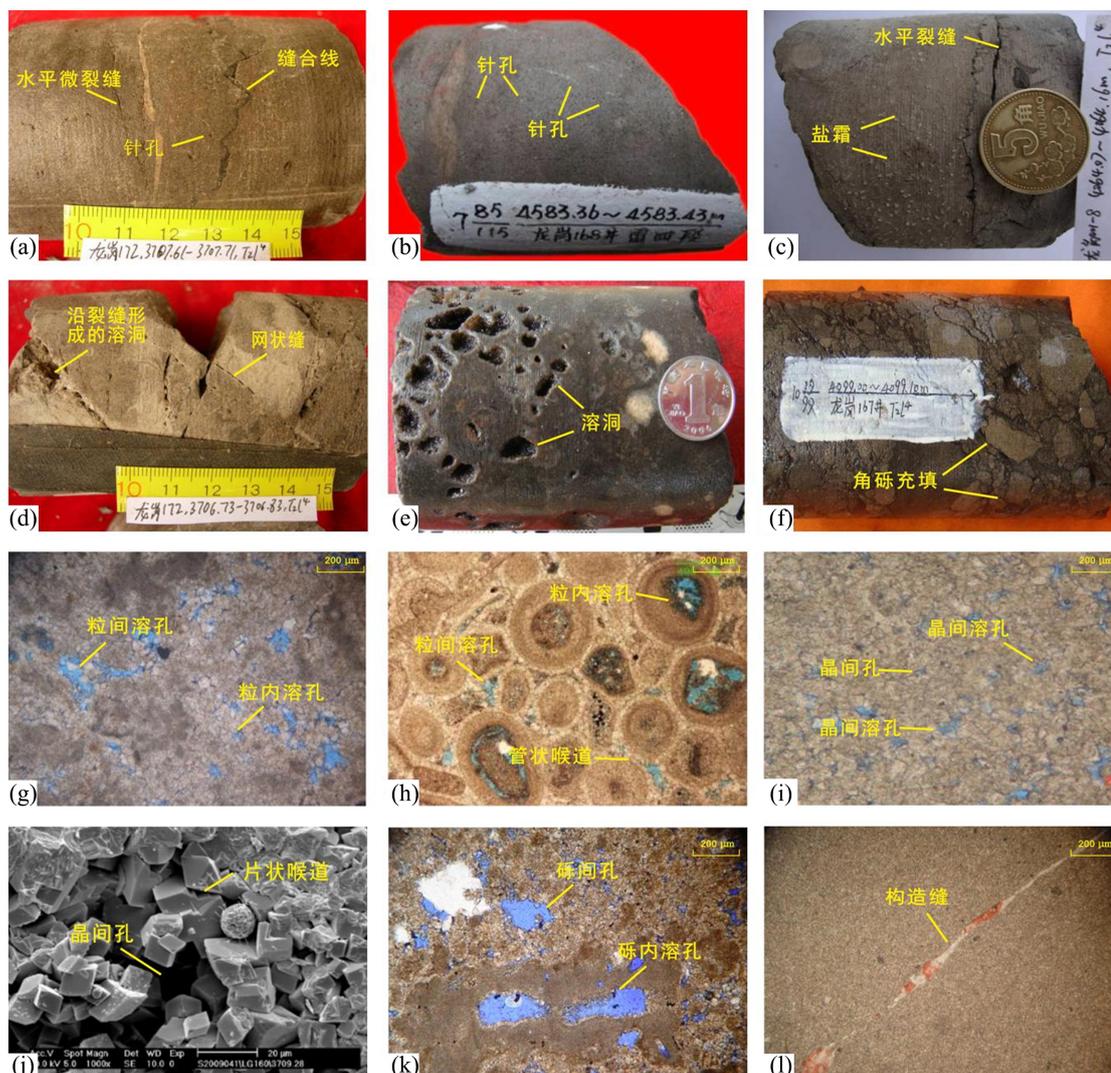
## 3. 储层特征

### 3.1. 储集岩类型特征

通过对龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段的钻井岩心、野外剖面以及室内薄片鉴定的综合分析, 认为雷四<sup>3</sup>亚段储集岩类主要为砂屑白云岩、鲕粒白云岩、粉晶白云岩以及岩溶角砾岩。其中以砂屑白云岩、鲕粒白云岩的储集性能为最好, 其次为粉晶白云岩。

### 3.1.1. 砂屑白云岩

砂屑白云岩在龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段中分布广泛。宏观上, 该类岩石为褐灰色, 中-厚层块状, 岩石中岩屑色暗, 含量一般大于 50%, 主要由泥-粉晶白云石和藻泥晶白云石构成, 可见大量针孔(图 2(a)、图 2(b))。显微镜下显示, 砂屑白云岩主要发育粒间溶孔和粒内溶孔, 颗粒间见两期亮晶白云石微充填(图 2(g)), 储集性能总体较好, 是龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段主要储集岩类之一。



(a) LG172 井, 3707.61 m~3707.71 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 砂屑白云岩, 见水平缝、缝合线及孤立的针孔; (b) LG168 井, 4583.36~4583.43 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 砂屑白云岩, 发育大量针孔; (c) LG001-8 井, 4064.07~4064.16 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 粉晶白云岩, 水平缝发育, 可见盐霜; (d) LG172 井, 3706.73 m~3706.83 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 粉晶白云岩, 网状缝洞发育; (e) LG161 井, 3692.00 m~3692.08 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 岩溶角砾岩, 溶洞发育, 局部被石英充填; (f) LG167 井, 4099.00 m~4099.10 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 岩溶角砾岩, 不规则角砾充填; (g) LG39 井, 4457.80 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 砂屑白云岩, 粒间孔、粒内溶孔发育; (h) LG168 井, 4585.12 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 亮晶鲕粒白云岩, 粒间溶孔、粒内溶孔发育, 局部被有机质微充填, 见管状喉道; (i) LG39 井, 4476.61 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 粉晶白云岩, 晶间孔、晶间溶孔发育; (j) LG160 井, 3709.28 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 粉晶白云岩, 晶间孔、片状喉道发育; (k) LG16 井, 3692.08 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 岩溶角砾岩, 砾间孔、砾内溶孔发育, 局部被硅质充填; (l) LG39 井, 4494.42 m, 雷四<sup>3</sup>亚段, 粉晶白云岩, 发育构造缝。

**Figure 2.** Macroscopic and microcosmic characteristics of the reservoir in  $T_2L_4$  in Longgang Area

**图 2.** 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储层宏观及微观特征

### 3.1.2. 鲕粒白云岩

宏观上, 该类储集岩为灰褐色, 厚度一般可达 0.3~1 m, 鲕粒含量在 50%~70%, 分选和磨圆均较好。显微镜下显示, 鲕粒白云岩主要发育粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔, 且孔隙常被两期胶结物充填, 可见缩颈状吼道(图 2(h)), 鲕粒白云岩储集性能极好, 但由于该类岩石形成厚度小、分布范围窄, 仅发育于雷四<sup>3</sup>亚段的局部位置。

### 3.1.3. 粉晶白云岩

宏观上, 粉晶白云岩主要为灰白色、褐灰色, 薄层状。岩石多由半自形-自形的粉晶白云石构成, 含少量石英、膏岩和粉屑等。在铸体薄片和扫描电镜下, 常见晶间孔和晶间溶孔(图 2(i)), 喉道发育以片状喉道为主(图 2(j)), 储集性能总体较好, 在龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段的粉晶白云岩表面常见有盐霜(图 2(c)), 成为该区次要的储集岩类。

### 3.1.4. 岩溶角砾岩

岩溶角砾岩是在表生成岩阶段由大气淡水淋滤溶蚀改造而成[17]。雷口坡末期, 由于印支运动导致四川盆地整体抬升, 暴露于地表的雷口坡组顶部地层一方面被剥蚀而缺失; 另一方面, 大气淡水沿地表裂缝、溶沟和溶洞进入地下, 将其地层中的易溶组分溶解, 当溶蚀空间较大时, 上覆地层在自身重力作用下发生垮塌, 形成岩溶角砾岩。在雷四段顶部常发育该类岩石, 颜色多为深褐色, 角砾为大小形状不一的岩块, 一般在 2~4 cm, 分选、磨圆差, 多为棱角状-次棱角状(图 2(f)), 砾间孔洞常被石英、泥质和方解石等充填, 岩性较为致密, 一般储集性较差, 但局部角砾内部组分极易被溶解, 可形成较多的砾内溶孔和砾间孔(图 2(k)), 具有较好的储集性能。

## 3.2. 储层空间类型特征

基于前人碳酸盐岩储层孔隙分类方法[18], 结合薄片、岩心及扫描电镜等观察, 将龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储集空间类型分为孔、洞、缝 3 大类 12 小类(表 1)。

### 3.2.1. 孔隙

区内雷四<sup>3</sup>亚段各类次生溶孔发育程度较高, 主要为粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔(图 3)。其中粒间溶孔边缘呈港湾状或不规则状, 孔隙大小在 0.2~1 mm, 面孔率为 3%~6%, 局部被硅质充填, 是区内雷四<sup>3</sup>亚段最主要的储集空间类型(图 2(g)); 粒内溶孔主要发育于鲕粒白云岩中(图 2(h)), 孔隙发育程度较高, 对储集空间影响较大, 但仅局限分布于雷四<sup>3</sup>顶部; 晶间溶孔是粉晶白云岩中最重要的储集空间类型, 其边缘常因被溶蚀而呈现孤岛状或港湾状, 孔隙局部被方解石充填, 面孔率平均可达 2%~4% (图 2(i))。

### 3.2.2. 洞穴

龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段在后期溶蚀作用和构造运动的影响下发育大量的次生溶洞, 大小在 0.1~1 cm。按成因可分为孔隙型溶洞、裂缝型溶洞和角砾间洞[19]。其中孔隙型溶洞在该区域研究层段中较为少见, 局限发育于砂屑云岩及粉晶云岩之中; 裂缝性溶洞是由于先期形成的裂缝, 被大气淡水或地层水溶蚀扩大, 形成的溶蚀缝洞(图 2(d)), 在研究区内裂缝性溶洞较为发育, 可作为良好的储集空间; 角砾间溶洞主要分布于龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段的岩溶角砾岩中, 常被石英、碎屑物质或胶结物微充填(图 2(e)), 是该区重要的储集空间类型之一。

### 3.2.3. 裂缝

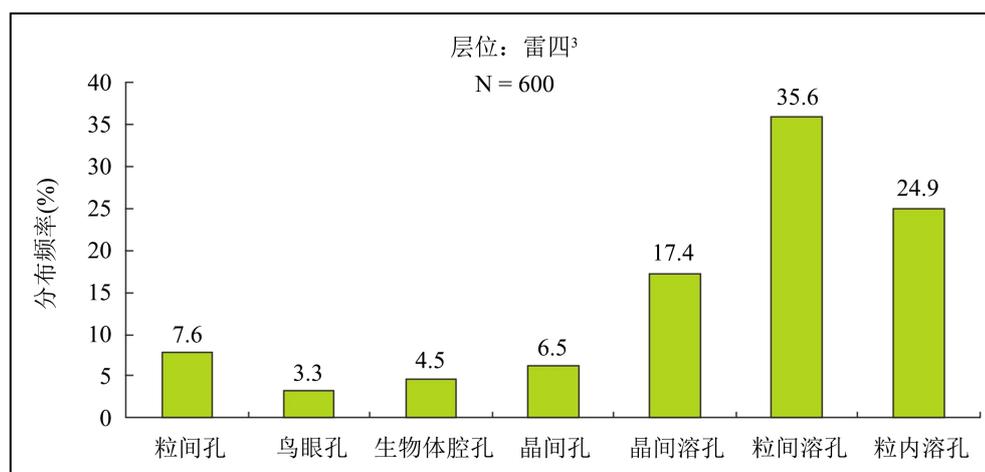
根据岩心观察并结合成像测井分析认为研究区雷四<sup>3</sup>亚段主要发育两期构造裂缝。第一期构造裂缝

多以低角度缝为主，缝宽一般大于 2 mm，常被多期白云石、方解石及泥质组分充填(图 2(i))，对现今储层影响不大；第二期构造裂缝多以未被充填的高角度微裂缝为主，缝宽一般小于 2 mm，局部较为发育，是油气的运移的重要渗流通道(图 2(d))，对储层影响较大。

**Table 1.** The types and characteristics of storage space in  $T_2I_4^3$  in Longgang Area

**表 1.** 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储集空间类型及特征

储集空间类型	特征	发育程度	附存的主要岩石类型	
原生 孔(直径小于 2 mm)	残余粒间孔	位于颗粒之间，大小在 0.05~0.5 mm，孔隙周围的胶结物或基质基本未发生溶解作用	低	鲕粒白云岩、砂屑白云岩
	鸟眼孔	沿纹理方向拉长排列，大小在 1~5 mm，被亮晶方解石、白云石或石膏等充填-半充填	低	粉晶白云岩
	晶间孔	位于晶粒之间，孔隙常呈三面或多面体，面孔率可达 2%~4%	低	粉晶白云岩
	晶间溶孔	经溶蚀扩大而成，孔隙边缘具明显溶蚀的港湾状、孤岛状痕迹，面孔率平均可达 2%~4%	中-高	粉晶白云岩
	粒间溶孔	孔隙边缘呈不规则状或港湾状，大小 0.5~1 mm，面孔率 3%~6%	高	鲕粒白云岩、砂屑白云岩
	粒内溶孔	颗粒内部被溶解后形成的孔隙，分布局限	中-高	鲕粒白云岩、砂屑白云岩
	铸模孔	颗粒或晶体被全部溶解，仅保留外形	中-高	鲕粒白云岩
次生 洞	孔隙性溶洞	在孔隙基础上进一步溶蚀扩大的洞，局部被白云石、方解石、石英和沥青半充填-全充填	低	各类碳酸盐岩
	裂缝性溶洞	大气淡水和地层水沿裂缝运移并发生溶解，将裂缝扩大所形成	低	各类碳酸盐岩
	砾间洞	分布在岩溶角砾岩的角砾之间，形态大小不一，常被碎屑、亮晶胶结物或石英微-半充填	中-低	岩溶角砾岩
缝	构造缝	由构造破裂而成，具有不同组系和特征	中	各类碳酸盐岩
	压溶缝	常见的为缝合线，由压溶而成，呈锯齿状	中-低	各类碳酸盐岩

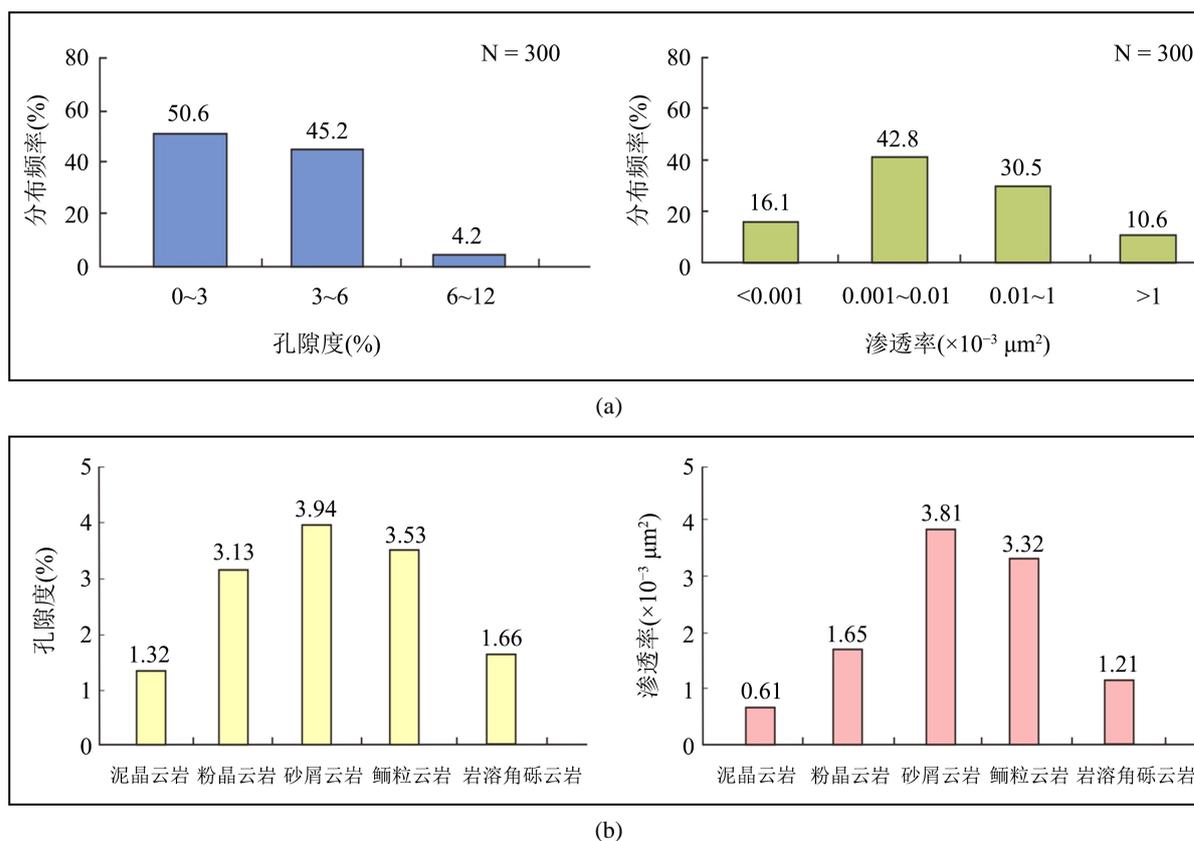


**Figure 3.** Distribution characteristics of pore types in  $T_2I_4^3$  in Longgang Area

**图 3.** 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段孔隙类型分布特征

### 3.3. 物性特征

对研究区内 300 个岩样进行物性统计分析表明, 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储层具有低孔、低渗特征, 局部为高孔、高渗(图 4(a)), 且不同储集岩类其储集物性差异较大, 总体上表现出砂屑白云岩 ≥ 鲕粒白云岩 ≥ 粉晶白云岩 ≥ 岩溶角砾岩 ≥ 泥晶云岩的趋势(图 4(b)), 其中砂屑白云岩储集物性最好, 孔隙度一般 1.3%~10.65%, 平均为 3.94%, 平均渗透率为  $3.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 因此可作为良好储层; 鲕粒白云岩物性较好, 孔隙度一般为 1.1%~9.56%, 平均可达 3.53%, 平均渗透率为  $3.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 是研究区重要的储集岩类; 粉晶白云岩次之, 其孔隙度一般为 1.35%~8.98%, 平均可达 3.16%, 平均渗透率为  $1.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 岩溶角砾岩储集物性相对较差, 平均孔隙度为 1.55%, 平均渗透率为  $1.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。晶粒细小的泥晶白云岩的物性最差, 孔隙度一般小于 1.32%, 渗透率一般小于  $1.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 一般难以作为有效储层。



**Figure 4.** Reservoir physical properties and distribution characteristics of average porosity and average permeability of different rock types in  $T_2^1$  in Longgang Area

**图 4.** 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储层物性特征及不同岩类平均孔隙度、平均渗透率分布特征

### 4. 古岩溶作用对储层的影响

古岩溶作用是古代地表水和地下水对可溶性岩石的改造过程及由此产生的地表与地下地质现象的总和, 它是碳酸盐岩储层孔隙系统形成的重要成岩作用之一[20] [21]。按碳酸盐岩发生岩溶作用的时间与环境差异, 通常将古岩溶划分为三种类型的溶蚀作用: 同生期岩溶作用、表生期岩溶作用和埋藏期岩溶作用[22]。经研究表明, 以上三种不同类型的岩溶作用对龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储层发育均有不同程度的影响, 是该区雷四<sup>3</sup>亚段储层形成的重要控制因素(表 2)。

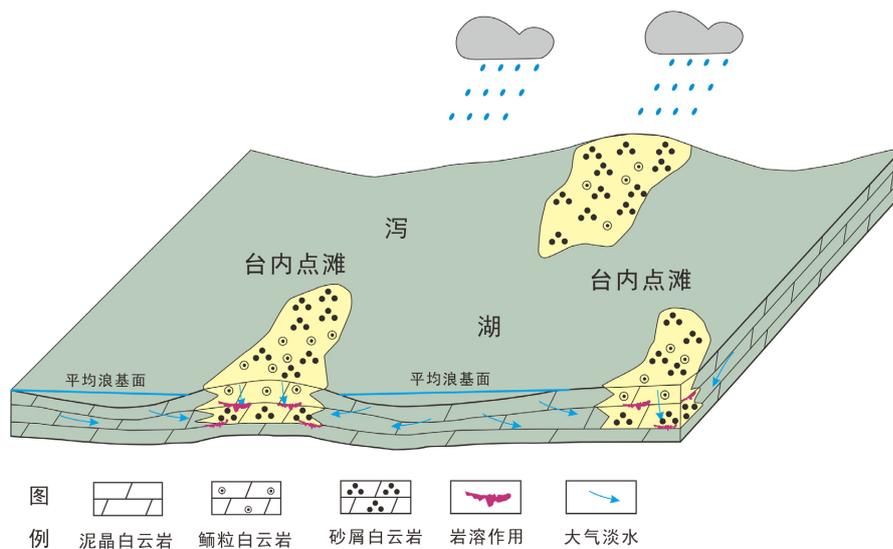
**Table 2.** Characteristics and types of Karstification in  $T_2l_4^3$  in Longgang Area**表 2.** 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段岩溶作用类型及特征

类型特征	同生岩溶	表生岩溶	埋藏岩溶	
			第一期埋藏溶蚀	第二期埋藏溶蚀
成岩阶段	同生 - 准同生期	表生期	中 - 深埋藏期	深埋藏期
流体性质	大气淡水、混和水	大气淡水、地层水	富含 $H_2S$ 、 $CO_2$ 和草酸等腐蚀性组分的地层水	
溶蚀特征	组构选择性溶蚀为主, 形成小型溶沟、晶间溶孔和铸模孔等, 常见暴露干裂构造	多由于构造运动或海平降导致, 大中型溶沟、溶洞, 岩溶角砾岩等并且同位素降低	多发生于早期地层薄弱部位, 主要形成粒间溶孔、小型溶洞等, 常伴有沥青充填	多发生于早期薄弱部位, 主要形成粒间溶孔、粒内溶和晶间溶孔等, 其中无沥青充填
溶蚀规模	较小	大	中等 - 大	中等 - 小
形成的孔隙度	1%~3%	10%~25%	5%~10%	1%~5%
孔隙保存情况	差	差	中等	好
对储集空间的贡献	极小	中等 - 大	中等 - 大	中等

#### 4.1. 同生期岩溶作用

同生期岩溶作用发生于同生(或准同生)大气成岩环境中, 主要受次级沉积旋回和海平面升降变化的控制[23]。在海退或向上变浅的沉积序列中, 由于海平面相对下降, 雷四<sup>3</sup>亚段时期发育的浅水碳酸盐沉积体, 如颗粒滩、云坪等发生间歇性的暴露, 从而受到富含  $CO_2$  的大气淡水的淋滤和溶蚀, 形成各类的溶蚀孔洞。

龙岗地区中三叠世雷口坡组时期主体为陆表海台地环境, 在雷四<sup>3</sup>亚段时期主要发育台内高能点滩, 这些滩相沉积的鲕粒白云岩、砂屑白云岩, 因水体浅、堆积快易暴露出水面, 接受富含  $CO_2$  的大气淡水和混合水的淋滤改造(图 5), 发生显著的选择性与非选择性溶蚀作用, 形成铸模孔、粒内溶孔、粒间溶孔以及溶缝、溶洞等, 为后期储集空间的进一步溶蚀扩大, 奠定了良好的基础条件。

**Figure 5.** The pattern of syndepositional karstification in  $T_2l_4^3$  in Longgang Area**图 5.** 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段同生期岩溶作用模式图

## 4.2. 表生期岩溶作用

表生期岩溶又称为风化壳岩溶,是由于重大海平面下降或构造运动而导致的可溶性岩层出露地表,遭受长期广泛的大气淡水淋滤改造而发生的溶蚀作用,它的形成常常与地层学的不整合面有关[22]。

前人研究表明,大气淡水与地层岩石发生相互作用时,将会使不整合面下的碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值增大, $\text{Sr}$ 含量、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值突然降低[24]。这使得未受表生期岩溶影响的区域与不整合面下受大气水溶蚀的区域之间将会存在一个地球化学跃变带。因此根据这一特征,对研究区两口井进行地球化学分析(表3),结果显示:向着雷四段顶部方向,碳、氧同位素普遍亏损和负偏,锶同位素富集,表明龙岗地区在雷口坡组末期由于印支运动的影响,导致该区域整体隆升,使得雷四<sup>3</sup>亚段普遍经受表生岩溶作用的改造(图6),使之与上覆须家河组间存在一个明显的不整合面。

在表生期岩溶作用的影响下,研究区内风化壳表层的上部受到大气淡水淋滤和地表径流的改造破碎而形成了一系列溶沟、溶洞、溶缝等,并且充填了大量的地表残积物(图6)。随着大气淡水及地层水沿着岩层中的裂缝和节理继续向下渗流,从而对流经的地层进行溶蚀作用形成了规模不等、形态各异的溶蚀孔洞(图6),部分溶孔被泥质渗流沉积物、白云石、方解石等物质半充填,当溶蚀作用进一步加强时,原岩崩落,在雷四<sup>3</sup>亚段顶部形成大量的岩溶角砾岩,以发育砾间孔、砾间溶孔为主,可作为该区良好的储集空间。表生期岩溶作用对雷四<sup>3</sup>亚段先期的孔隙和裂缝进行溶蚀扩大,产生了大量的溶孔、溶洞和溶蚀缝,很大程度的改善了原生孔隙的储集性能,并且为油气的运移提供了更多的有效通道。表生期岩溶作用是研究区内最为重要的一种岩溶作用。

**Table 3.** Stable isotope analysis table of The Triassic Leikoupo Formation in Well LG21 and LG22

**表 3.** LG21、LG22 井中三叠统雷口坡组稳定同位素分析表

样品号	井号	井深(m)	层位	岩性或成分	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
y21-2c	LG21	2658.73	雷 4	泥晶灰岩	0.70868	-1.152	-7.692
y21-3c	LG21	2659.71	雷 4	灰质白云岩	0.709752	-0.306	-8.006
y21-7c	LG21	2663.60	雷 4	微晶白云岩	0.709127	-4.21	-12.147
y21-3v	LG21	2659.71	雷 4	白云石	0.712895	-0.306	-8.006
y21-5v	LG21	2660.82	雷 4	方解石	0.713225	-3.387	-15.552
y21-7v	LG21	2663.61	雷 4	方解石	0.712732	-3.108	-14.781
y22-1C	LG22	3554.91	雷 1	微晶灰岩	0.708143	4.721	-5.454
y22-3C	LG22	3561.71	雷 1	泥晶灰岩	0.708185	5.544	-4.773
y22-10C	LG22	3586.17	雷 1	泥晶灰岩	0.708167	3.808	-5.642
y22-1V	LG22	3554.93	雷 1	方解石	0.708173	4.622	-5.342
y22-3v	LG22	3561.71	雷 1	方解石	0.708181	4.437	-5.66
y22-10V	LG22	3586.17	雷 1	石膏 + 方解石	0.708272	4.723	-4.093

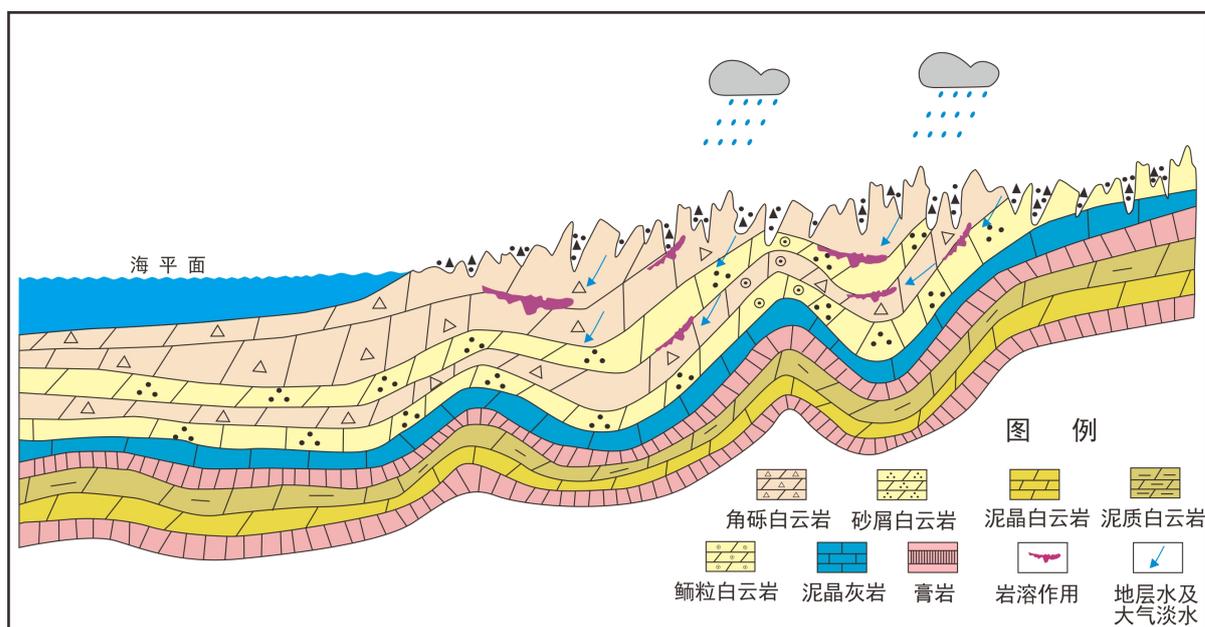


Figure 6. The pattern of epigenetic karstification in  $T_2l_4^3$  in Longgang Area

图 6. 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段表生期岩溶作用模式图

### 4.3. 埋藏期岩溶作用

埋藏期岩溶作用主要发生于碳酸盐岩在中-深埋藏阶段，与有机质热演化过程中伴生的有机酸溶蚀碳酸盐矿物有关[22]。在四川盆地龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段地层中已发现了多期次的、不同规模的埋藏岩溶作用。

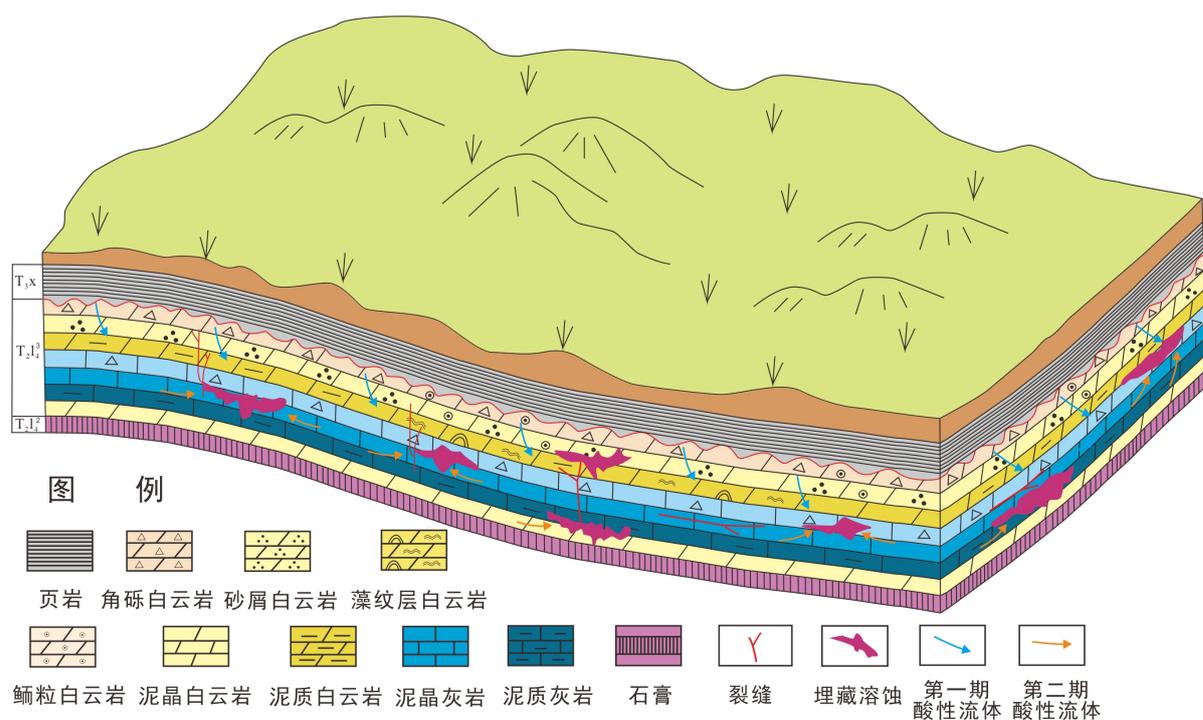
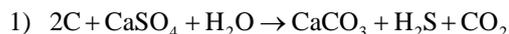


Figure 7. The pattern of buried karstification in  $T_2l_4^3$  in Longgang Area

图 7. 龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段埋藏期岩溶作用模式图

龙岗地区雷口坡组在侏罗系及其之后一直处于埋藏环境,具有良好的溶蚀条件,在雷四<sup>3</sup>时期共发育两期埋藏岩溶作用。第一期在中—深埋藏阶段,多发生于早期地层薄弱部位,由于先期受到表生期岩溶作用的影响,在雷口坡组顶部存在着一个不整合面,并在不整合面之下发育着一系列的孔、洞、缝系统。在进入埋藏期后,上覆须家河组底部发育的一套碳质泥页岩直接覆盖于雷口坡组顶部,随着地层温度升高直至超过 120℃时,上覆须家河组的烃类与雷口坡组顶部的硫酸盐矿物发生热化学还原作用,生成蚀变烃类、固态沥青、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>S,并释放出热量[25][26]。其形成过程如下:



上式反应产生的 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>S 等物质溶于水后形成具有腐蚀性的酸性流体进入到雷四<sup>3</sup>亚段地层中,进而发生第一期埋藏岩溶作用(图 7),形成粒间溶孔,晶间溶孔及少量小型溶洞,常见沥青充填。第二期埋藏岩溶作用发生于深埋藏阶段,随着埋深的增加,地温随之升高,地层中的有机质热成熟过程产生的有机酸以及有机酸大量脱羧产生的 CO<sub>2</sub>溶于水,从而形成富含腐蚀性组分的地层水,对先期形成的储集空间再次进行溶蚀使之进一步扩大(图 7)。埋藏岩溶作用一般是沿着先期形成的孔缝系统进行,并且对原有的孔缝进行溶蚀扩大,很大程度的改善和提升了储渗性能,对油气的储、运都有着重要的实际意义。因此,埋藏岩溶作用是该区域储层优化改造的最主要和直接因素。

## 5. 结论

1) 四川盆地龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段主要发育砂屑白云岩、鲕粒白云岩、粉晶白云岩和岩溶角砾岩四种储集岩类,砂屑白云岩、粉晶白云岩及岩溶角砾岩分布较为广泛且储集性能较好。鲕粒白云岩储集性能极好但分布范围较小。

2) 储集空间类型以粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔以及各类溶蚀缝洞为主,储层总体上具有低孔、低渗的特征,粒间溶孔是区内雷四<sup>3</sup>亚段最主要的储集空间类型。

3) 古岩溶作用是龙岗地区雷四<sup>3</sup>亚段储层形成的重要因素,在研究区主要发育有同生期岩溶作用、表生期岩溶作用和埋藏期岩溶作用三种古岩溶作用,其中表生期岩溶作用对储层的形成贡献最大,是研究区最重要的岩溶作用类型。

4) 同生期岩溶作用发生于同生—准同生阶段,主要由于早期的大气淡水选择性溶蚀形成的一系列溶蚀孔洞,是储层形成的基础条件。

5) 表生期岩溶作用与构造运动和海平面变化密切相关,是研究区内最为重要的岩溶作用,富含 CO<sub>2</sub>的大气淡水和地下水在早期形成的孔隙基础上,发生进一步的溶蚀扩大并且形成更多油气运移的通道,这一时期的岩溶作用往往是优质储层形成的关键。

6) 埋藏期岩溶作用与有机质热演化过程中伴随的有机酸以及热液溶蚀碳酸盐矿物有关,在原有孔缝的基础上再次溶蚀扩大并极大提高了储层的储渗性能,这一时期的岩溶作用是储层优化改造的重要因素。

## 基金项目

国家科技重大专项(2016ZX05007004-001)和(2017ZX05001001-002)。

## 参考文献

- [1] 刘树根,汪华,孙玮,等.四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析[J].石油与天然气地质,2008,29(6):781-792+818.
- [2] 史江龙,李剑,史海龙,等.四川盆地高石梯-磨溪地区震旦系-寒武系天然气的地球化学特征及成因[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,32(1):1-7.

- [3] 周进高, 辛勇光, 谷明峰, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探方向[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 16-19+121.
- [4] 廖凤蓉, 吴小奇, 黄士鹏, 等. 川西北地区中坝气田雷口坡组天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 108-115.
- [5] 李德星. 川中龙女寺——磨溪地区雷口坡组雷四-雷三段古岩溶储层研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [6] 孙腾蛟. 四川盆地中三叠统雷口坡组烃源岩特征及气源分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [7] 姜杨锦丰. 蜀南地区中三叠统雷口坡组储层特征及其控制因素[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- [8] 龙翼, 刘树根, 宋金民, 等. 龙岗地区中三叠统雷四~3 亚段储层特征及控制因素[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(6): 36-44.
- [9] 郝哲敏, 许国明, 陈洪德, 等. 川西拗陷马井地区雷四~3 亚段储层特征及成岩作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 586-596.
- [10] 周凌方, 钱一雄, 宋晓波, 等. 四川盆地西部彭州气田中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩孔隙表征、分布及成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 177-188.
- [11] 杨光, 石学文, 黄东, 等. 四川盆地龙岗气田雷四~3 亚段风化壳气藏特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(9): 17-24.
- [12] 吴仕玖, 曾德铭, 王兴志, 等. 川中龙岗-营山地区雷口坡组雷四~3 亚段储层成岩作用及孔隙演化[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 919-926.
- [13] 周世超, 王兴志, 曾德铭, 等. 川中龙岗地区中三叠统雷四~3 亚段气藏地球化学特征与成藏分析[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 415-422.
- [14] 黄东, 张健, 杨光, 等. 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), 2011, 33(3): 89-95+195-196.
- [15] 丁晓琪, 张哨楠, 潘怀孝, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型岩溶储层发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 210-217.
- [16] 郭振华, 李光辉, 吴蕾, 等. 碳酸盐岩储层孔隙结构评价方法——以土库曼斯坦阿姆河右岸气田为例[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 459-465.
- [17] 牛泽华. 川北下寒武统龙王庙组储层特征及控制因素[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [18] Wang, B.Q. and Al-Aasm, I.S. (2002) Karst-Controlled Diagenesis and Reservoir Development: Example from the Ordovician Main-Reservoir Carbonate Rocks. *AAPG Bulletin*, **86**, 1639-1658. <https://doi.org/10.1306/61EEDD28-173E-11D7-8645000102C1865D>
- [19] Li, J., Zhang, W.Z., Luo, X., *et al.* (2008) Paleokarst Reservoirs and Gas Accumulation in the Jingbian Field, Ordos Basin. *Marine and Petroleum Geology*, **25**, 401-415. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.01.005>
- [20] 陈景山, 李忠, 王振宇, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 858-868.
- [21] 钟怡江, 陈洪德, 林良彪, 等. 川东北地区中三叠统雷口坡组四段古岩溶作用与储层分布[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2272-2280.
- [22] Palmer, M.R. and Edmond, J.M. (1989) The Strontium Isotopic Budget of the Modern Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, **92**, 11-26. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90017-4)
- [23] 胡杨. 龙岗-营山地区雷口坡组雷四段储层特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [24] 李浩. 川中北部地区雷口坡组沉积、成岩作用及与储层的关系[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- [25] 焦方正, 杨雨, 冉崎, 等. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 92-101.
- [26] 李浩, 王兴志, 胡杨, 等. 川北仪陇-平昌地区雷口坡组顶部古岩溶的识别及其与储层的关系[J]. 海相油气地质, 2013, 18(3): 29-38.