

文章编号:1000-0550(2020)06-1284-12

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.108

# 川东北地区下寒武统龙王庙组白云岩成因分析

余晶洁<sup>1,2</sup>, 宋金民<sup>1,2</sup>, 刘树根<sup>1</sup>, 杨迪<sup>1</sup>, 王瀚<sup>1,2</sup>, 赵聪<sup>1,2</sup>, 邓双林<sup>1,2</sup>, 何宇<sup>1,2</sup>, 李立基<sup>1,2</sup>

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

2. 成都理工大学能源学院, 成都 610059

**摘要** 通过剖面实测、薄片鉴定、阴极发光分析和地球化学分析,对川东北地区下寒武统龙王庙组白云岩成因进行了研究。研究表明:研究区龙王庙组自下而上发育灰岩—过渡岩性—白云岩,以颗粒结构为主,白云石主要为泥—粉晶,呈它形—半自形晶,阴极发光呈昏暗光—暗红光。样品的MgO与CaO呈负相关,白云岩 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 较低,高Na含量,低Sr、Fe、Mn含量,白云石有序度较低,各岩性稀土元素配分曲线平行一致分布, $\delta Ce$ 无异常, $\delta Eu$ 负异常,灰岩 $\delta^{13}C$ 偏正, $\delta^{18}O$ 处于同期海水内,白云岩 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 偏正, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 高于同期海水值。结合区域地质背景、岩石学特征和地球化学分析结果,研究区白云石化流体为高盐度蒸发海水,研究区白云岩为渗透回流白云石化作用形成。

**关键词** 白云岩;龙王庙组;寒武系;地球化学特征;川东北

**第一作者简介** 余晶洁,男,1995年出生,硕士研究生,油气储层地质,E-mail: yujingjie@vip.qq.com

**通信作者** 宋金民,男,副教授,E-mail: songjinmin@sohu.com

**中图分类号** P618.13 **文献标志码** A

## 0 引言

自安岳气田发现以来,四川盆地下寒武统龙王庙组展现出巨大的油气勘探开发潜力,成为近期研究的热点<sup>[1]</sup>。前人针对四川盆地龙王庙组沉积、储层、成藏等方面做了大量的研究<sup>[1-4]</sup>,认为龙王庙组储层主要发育在白云岩中,以颗粒白云岩和晶粒白云岩为主。关于四川盆地龙王庙组白云岩的成因,前人也进行了深入的探讨<sup>[5-7]</sup>,取得了较为丰富的成果,但目前还存在以下问题:1)对于四川盆地龙王庙组白云岩的成因存在争议,有人认为是单一的白云石化成因,也有人认为是不同类型白云石化动态连续成因<sup>[7]</sup>;2)川东北地区龙王庙组发育灰岩、白云岩及过渡岩性,前人多只针对白云岩段研究,而忽略了灰岩段和过渡岩性段。

本文以川东北地区捞旗河剖面为研究对象,通过剖面实测和镜下薄片观察,并结合地球化学特征,分析龙王庙组白云石化流体来源和白云岩成因,建立白云石化模式,为该地区龙王庙组白云岩储层分

布预测和下一步油气勘探部署提供科学依据。

## 1 地质背景

四川盆地是以上扬子克拉通为基础,经历多次旋回演化而形成的由元古代、古生代海相—海陆过渡相沉积与中、新生代陆相沉积叠合发育的含油气盆地<sup>[8-10]</sup>。受桐湾运动二幕影响,四川盆地及周缘地区在震旦纪末期大规模抬升至地表被剥蚀,至寒武纪时期沉降接受沉积<sup>[11-12]</sup>。早寒武世早期,四川盆地及周缘地区发生了寒武纪最大的一次海侵,自西向东发育滨岸—陆棚相<sup>[13]</sup>;至沧浪铺期,海平面开始波动性下降<sup>[5,14-16]</sup>,陆源碎屑向东迁移,盆地中西部—东部发育滨岸—陆棚相,晚期盆地逐渐被填平补齐,总体上具有西北高、东南低的趋势<sup>[4,5,17]</sup>;至龙王庙期,盆地气候变暖,水体变清,以沉积海相碳酸盐岩为主,同时由于川中古隆起和达州—开江水下古隆起的继承性发育<sup>[18]</sup>,盆地形成了隆凹相间的沉积格局<sup>[4,13-14]</sup>,自西向东发育潮坪—局限台地—开阔台地—台地边缘—斜坡—盆地相(图1b)。此时川东北地区以镇巴

收稿日期:2019-08-06; 收修改稿日期:2019-12-10

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2018JZ0078);国家自然科学基金项目(41872150);国家科技重大专项(2017ZX05005003-007)[Foundation: Key Project of Sichuan Science & Technology Bureau, No. 2018JZ0078; National Natural Science Foundation of China, No.41872150; National Science and Technology Major Project, No.2017ZX05005003-007]

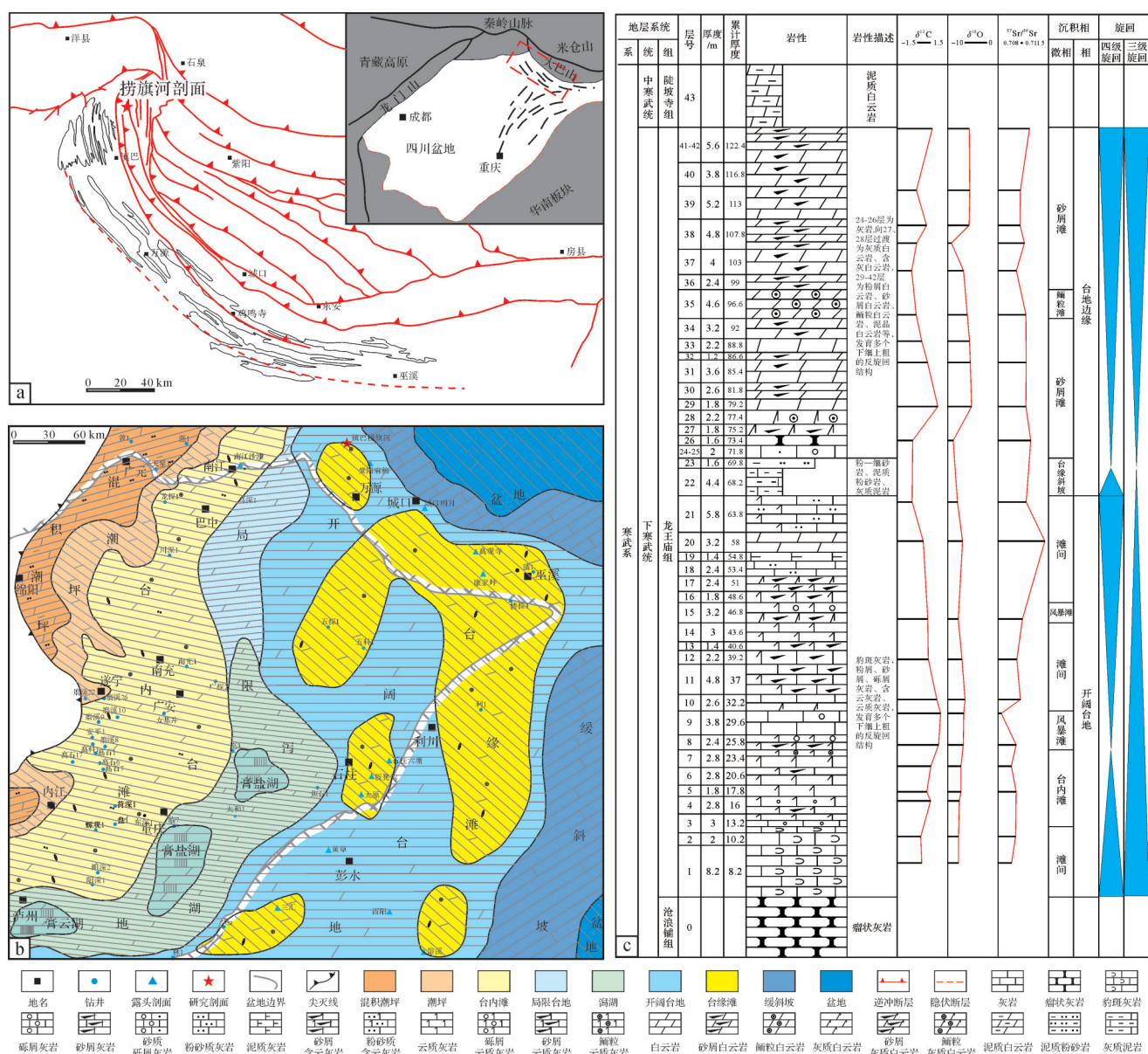


图1 研究区位置、构造、岩相古地理及柱状图(据文献[5,18-20]修改)

(a)研究区构造位置;(b)川东北地区龙王庙组岩相古地理图;(c)捞旗河剖面龙王庙组综合柱状图

Fig.1 Location, structure, lithofacies paleogeographic map and synthetic column of the study area(modified from references[5,18-20])

一城口一巫溪为界,向西发育斜坡—盆地相,向东发育开阔台地—台地边缘相,以台缘带颗粒滩的大量发育为特征<sup>[18]</sup>。

川东北捞旗河剖面地理位置位于陕西省镇巴县境内,构造上处于四川盆地东北缘与南秦岭南大巴山冲断带形成的叠合部位,镇巴断层附近<sup>[21-23]</sup>,龙王庙组为开阔台地—台地边缘相沉积(图1a,b),岩性以灰岩、白云岩为主,与上覆陡坡寺组和下伏沧浪铺组均为整合接触(图1c)。

## 2 样品采集及测试

本次研究的22块岩石样品取于整个龙王庙组。样品的岩性主要有灰岩、含云灰岩、云质灰岩、灰质云岩、白云岩,样品均采样自新鲜露头,未见明显风化,制备样品磨制薄片并保留副样。经镜下薄片观察后使用牙钻对对应的副样进行微区取样,并粉碎至200目以下,开展地球化学分析。

阴极发光分析在西南石油大学地球科学与技术学院完成,阴极发光分析在CL8200 MK-5 阴极发光

仪(配合 Lecia 显微镜)下进行,测试条件选择束电压 9 kV,束电流 300  $\mu$ A;普通薄片、铸体薄片观察在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成,薄片经茜素红染色后在 Nikon E600 Pol+ 偏光显微镜及照相系统下观察并拍照。X 射线衍射和碳、氧同位素测试在成都理工大学材料与化学化工学院专业综合实验室完成,X 射线衍射测试在 Riguka Dmax-III C 型 X 射线粉晶衍射仪上进行,碳、氧同位素采用采用 McCrea 正磷酸法,仪器为 Finnigan MAT253 气体同位素质谱仪,碳、氧同位素均采用 PDB 标准,测得的碳、氧同位素精度在  $\pm 0.1\%$  和  $\pm 0.2\%$ ;主量元素测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,稀土元素测试在中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室完成,测试仪器为 Thermo X-7 series 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS);锶同位素测定在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成,采用热电离同位素质谱仪 Triton plus 型质谱仪测定;激光微区原位微量元素分析在武汉上谱分析测试实验室完成,测试仪器为 GeoLas-HD 193nm 准分子激光剥蚀系统和 Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。

### 3 岩石学特征

川东北捞旗河剖面龙王庙组实测地层剖面共 43 层,总厚度 122.4 m,为开阔台地—台地边缘沉积环境,自下而上发育灰岩、云质灰岩、钙质泥岩、灰质云岩、白云岩等多种岩石类型(图 1c),结构上可见晶粒结构和颗粒结构。

#### 3.1 灰岩

灰岩在研究区含量较少,主要分布在龙王庙组下部,总厚度约 16.7 m,其白云石含量小于 10%,总体上向上部白云石含量增多,按结构可以分为泥晶灰岩和颗粒灰岩,以颗粒灰岩为主。

泥晶灰岩:宏观上常呈深灰色薄—中层状(图 2a);微观上方解石晶粒多小于 0.01 mm(图 2g),局部发育裂缝和缝合线,裂缝多被粉—细晶方解石充填,缝合线常被沥青、泥质等充填,储集空间不发育;阴极发光程度较弱,多呈昏暗光。

颗粒灰岩:颗粒灰岩可以分为鲕粒灰岩、粉屑灰岩、砂屑灰岩、砾屑灰岩(图 2j)等,以砂屑为主,宏观上常呈深灰色薄—中层状,局部呈厚层状,多为下细

上粗的反旋回结构;微观上砾屑多呈椭球状或长条状,大小在 2~4 mm,砂屑多呈球状或椭球状,大小在 0.3~1.8 mm,鲕粒多在 0.2~1.5 mm,胶结物方解石以泥晶为主,偶见粉—细晶,裂缝、溶孔较发育,多被亮晶方解石全充填;阴极发光程度较弱,胶结物方解石较颗粒发光稍强,呈昏暗光(图 2j,m)。

#### 3.2 过渡岩性

过渡岩性主要分布在龙王庙组中下部,累计厚度 52.1 m,可以分为含云灰岩、云质灰岩、灰质云岩、含灰云岩等,研究区主要的过渡岩性为云质灰岩和灰质云岩,以颗粒结构为主,总体向上部云质含量增多,灰质含量减少。

云质灰岩:宏观上呈深灰色薄—中层状,局部呈豹斑结构,豹斑顺层发育(图 2b),条带状分布,多呈残余颗粒结构(图 2c),可见鲕粒、粉屑、砂屑、砾屑等,以砂屑为主,多发育下细上粗的反旋回结构;白云石晶粒多在 0.01~0.1 mm,以粉晶为主,颗粒以砂屑、砾屑为主,呈圆状或椭圆状,方解石胶结物呈粉—细晶,局部被粉晶白云石交代;阴极发光方解石发昏暗光,白云石发昏暗—暗红光(图 2k,n)。

灰质云岩:宏观上呈深灰色中—厚层状,条带状分布多呈(残余)颗粒结构(图 2e),可见鲕粒、粉屑、砂屑等,以残余砂屑结构为主,多发育下细上粗的反旋回结构(图 2d);微观上白云石晶粒多在 0.01~0.1 mm,以粉晶为主,呈半自形晶,颗粒多呈残余结构(图 2h),部分被白云石交代,发育裂缝、溶孔,多被亮晶方解石全充填;阴极发光发昏暗光。

#### 3.3 白云岩

白云岩主要分布在龙王庙组上部 29~42 层,累计厚度 59 m,方解石含量小于 10%,按结构可以分为泥—粉晶白云岩和(残余)颗粒白云岩,以(残余)颗粒白云岩为主。

泥—粉晶白云岩:宏观上常呈中深灰色中—厚层状(图 2f);白云石晶粒大小在 0.01~0.1 mm,局部小于 0.01 mm,晶形呈半自形晶,发育溶孔、裂缝,部分被方解石、石英充填或半充填,局部粉—细晶白云石充填;阴极发光呈昏暗—暗红色光(图 2l,o)。

(残余)颗粒白云岩:宏观上呈中深灰色薄—厚层状;微观上颗粒可见(残余)鲕粒、粉屑、砂屑等,以(残余)鲕粒、砂屑为主,白云石晶粒多小于 0.01 mm,局部在 0.01~0.1 mm,晶形呈它形—半自形晶,发育溶孔、裂缝,部分被方解石、石英、粉—细晶白云石充

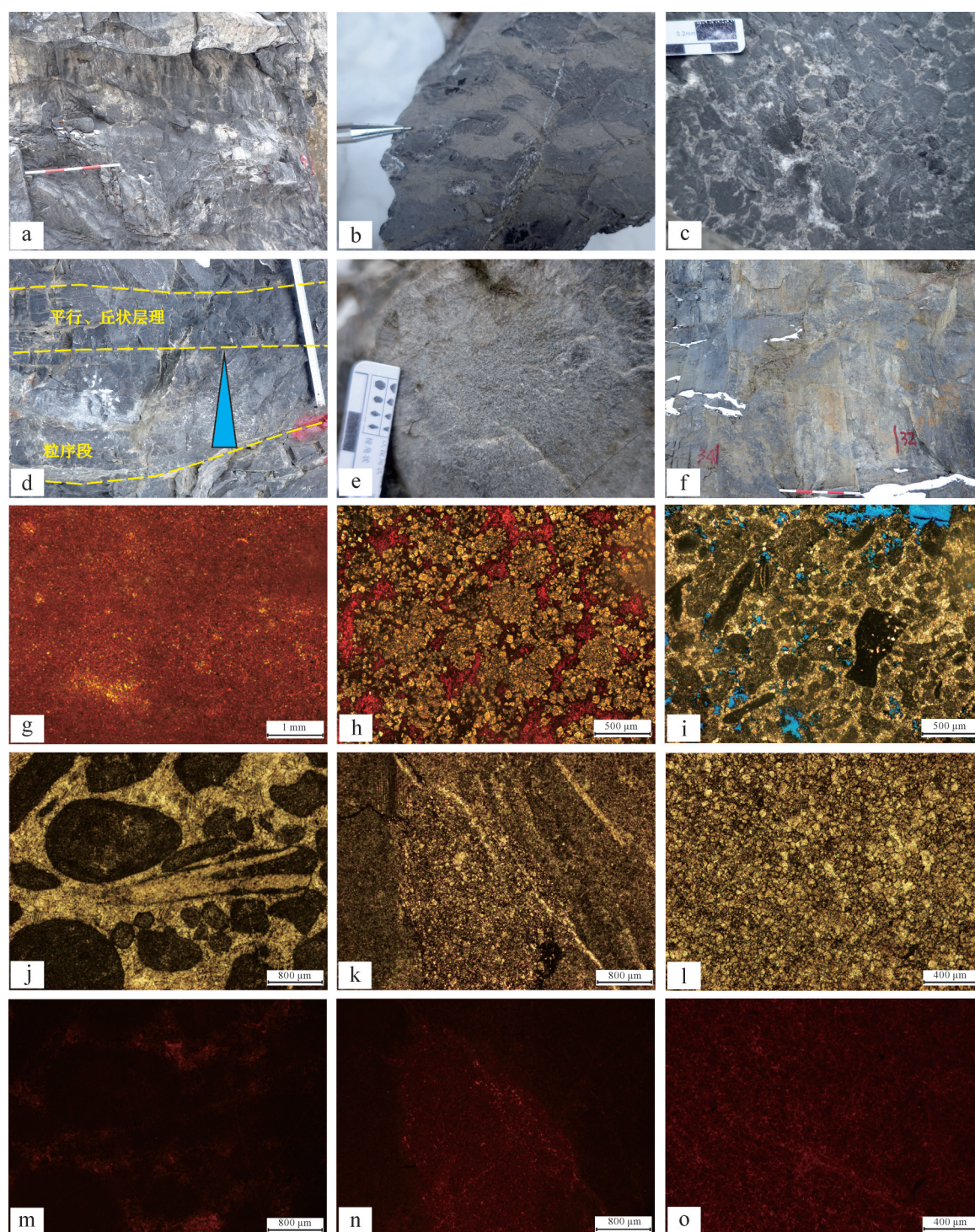


图2 捞旗河剖面龙王庙组岩石学特征

(a)第9层,下部为深灰色泥晶灰岩,上部为深灰色砾屑灰岩;(b)第1层,深灰色豹斑灰岩,豹斑顺层发育;(c)第4层,深灰色砾屑云质灰岩,砾屑大小0.4~1.5 cm;(d)第15层,风暴沉积层,旋回下部为深灰深灰色含砾屑泥晶灰质云岩,上部为深灰色纹层粉屑泥晶灰质云岩,再向上发育平行、丘状层理;(e)第28层,深灰色亮晶鲕粒灰质云岩;(f)第33层,深灰色泥晶白云岩;(g)LQH-9-6B,泥晶灰岩,见少量白云石,单偏光,茜素红染色;(h)LQH-28-1W,残余鲕粒砂屑灰质白云岩,鲕粒被泥—粉晶白云石交代,单偏光,茜素红染色;(i)LQH-38-2B-ZT,砂屑泥晶白云岩,砂屑颗粒呈椭球状或长条状,未充填溶孔发育,单偏光,茜素红染色;(j)LQH-9-1B,砾屑砂屑泥晶灰岩,砾屑呈椭球状或长条状,单偏光;(k)LQH-3-2-1B,云质灰岩,单偏光;(l)LQH-39-1B,泥—粉晶白云岩,单偏光;(m)LQH-9-1B,与(j)同一视域,砾屑颗粒发昏暗光,胶结物发暗红光,阴极发光;(n)LQH-3-2-1B,与(k)同一视域,白云石发暗红光,方解石发昏暗—暗红光,阴极发光;(o)LQH-39-1B,与(l)同一视域,白云石发暗红光,白云石边缘发光稍强,阴极发光

Fig.2 Petrological characteristics of Longwangmiao Formation in Laoqihe section

填,上部可见未充填的溶孔(图2i);阴极发光呈昏暗—暗红色光,胶结物白云石发光较颗粒稍强。

## 4 地球化学特征

### 4.1 主量元素特征

根据前人研究,主量元素中CaO和MgO的含量在一定程度上可以反映白云岩的结晶形式<sup>[5,7]</sup>。沉积成因的白云岩 $Mg^{2+}$ 与 $Ca^{2+}$ 应以1:1的比例沉淀形成 $CaMg(CO_3)_2$ ,CaO和MgO的含量随着白云石的增加而增加,呈正相关性<sup>[24-28]</sup>;而交代成因的白云岩是 $Mg^{2+}$ 替换 $Ca^{2+}$ 的方式形成,随着交代白云石的增多,CaO含量减少,MgO含量增加,呈负相关性<sup>[27,29]</sup>。

通过对研究区22个样品主量元素数据的详细分析,发现研究区龙王庙组灰岩—含云灰岩—云质灰岩—灰质云岩—白云岩样品MgO和CaO呈明显的负相关性(图3a),白云岩 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 比值较低,在0.59~0.61(表1),表明其中的白云石为沉积后交代成因。

### 4.2 微量元素特征

微量元素Na、Sr、Fe、Mn等是指示岩石沉积成岩环境和成岩流体性质的重要标志,可以有效分析白云岩的成因<sup>[27-31]</sup>。前人研究表明,海水是富Na、Sr而贫Fe、Mn的流体,在海相碳酸盐岩的成岩过程中,元素迁移的总体趋势是Na、Sr元素的丢失和Fe、Mn元素的获取,Fe、Mn元素含量随成岩作用的增强而增加,Sr元素含量降低<sup>[5,27-31]</sup>;Na元素还受控于成岩流体的盐度<sup>[5,32]</sup>。

对研究区LQH-9-1B(灰岩)和LQH-41-2B(白云岩)薄片的14个点位进行了原位激光微区微量元素测定(图4),灰岩Na含量均值为 $145.05 \times 10^{-6}$ ,Sr含量均值为 $233.87 \times 10^{-6}$ ,Fe含量均值为 $436.86 \times 10^{-6}$ ,Mn含量均值为 $69.27 \times 10^{-6}$ ;白云岩的Na含量均值为 $688.83 \times 10^{-6}$ ,Sr含量均值为 $186.92 \times 10^{-6}$ ,Fe含量均值为 $1\,090.53 \times 10^{-6}$ ,Mn含量均值为 $181.9 \times 10^{-6}$ (表2)。表明研究区龙王庙组白云岩的成岩蚀变较灰岩稍强。白云岩Na含量较高,Fe、Mn元素含量相对较低,代表其形成于盐度较高的卤水环境。

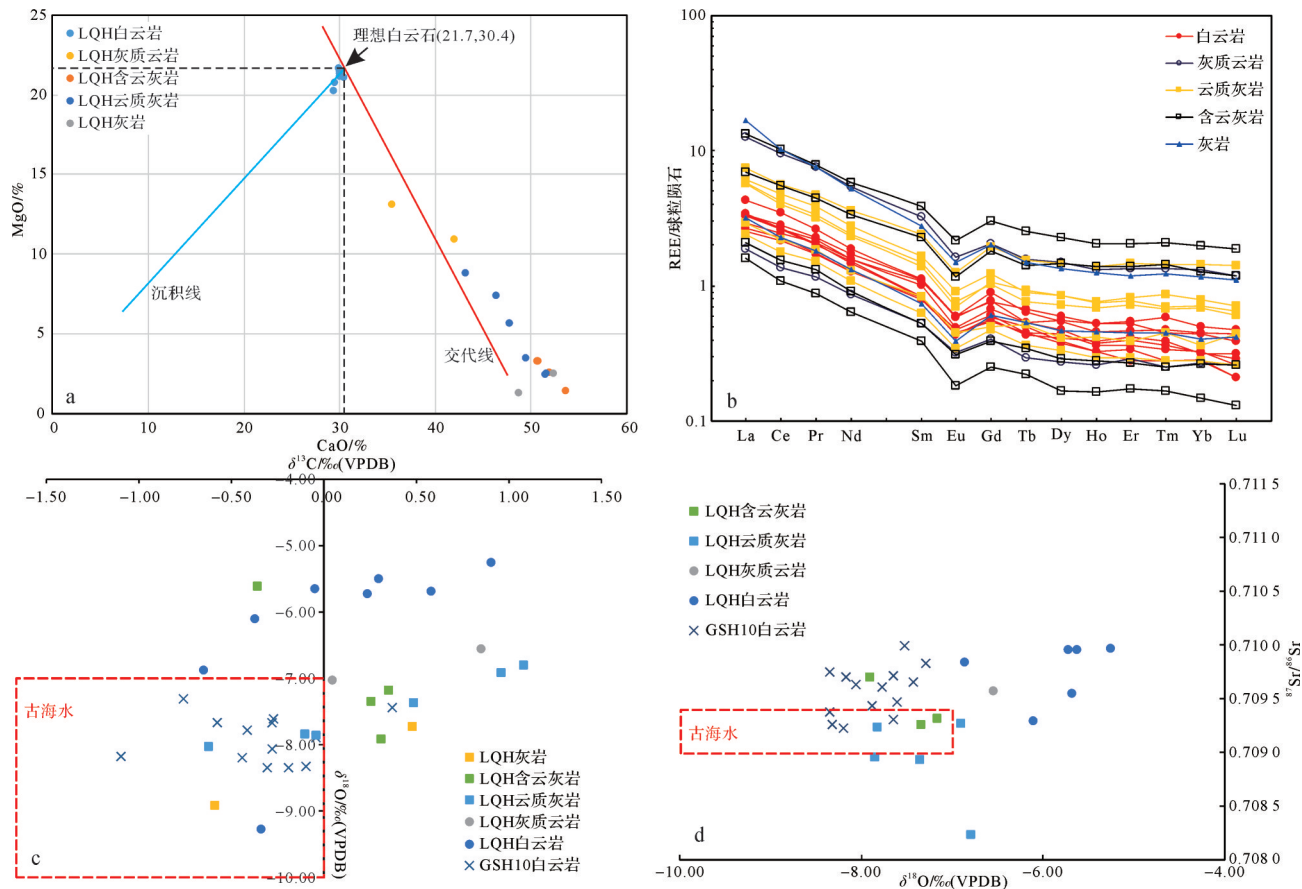


图3 捞旗河剖面龙王庙组地球化学分析图

(a)MgO-CaO交会图;(b)稀土元素配分模式图;(c) $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ 交会图;(d) $^{87}Sr/^{86}Sr$ - $\delta^{18}O$ 交会图

Fig.3 Geochemical analysis of Longwangmiao Formation in Laoqihe section

表1 捞旗河剖面龙王庙组主量元素、有序度、碳氧同位素、锶同位素数据表

Table 1 Major elements, dolomite order, carbon and oxygen isotope and strontium isotope data for Longwangmiao Formation in Laoqihe section

| 样品号       | 岩性   | 主量元素/% |       | Mg/Ca | 有序度  | $\delta^{13}\text{C}$ | $\delta^{18}\text{O}$ | Z      | t/℃   | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ |
|-----------|------|--------|-------|-------|------|-----------------------|-----------------------|--------|-------|---------------------------------|
|           |      | CaO    | MgO   |       |      | (VPDB)‰               |                       |        |       |                                 |
| LQH-39-2B | 白云岩  | 29.29  | 20.33 | 0.59  | 0.5  | -0.34                 | -9.27                 | 121.99 | 44.20 | —                               |
| LQH-38-2B | 白云岩  | 29.95  | 21.23 | 0.60  | 0.58 | 0.58                  | -5.69                 | 125.65 | 27.71 | 0.709 544 31                    |
| LQH-38-1B | 白云岩  | 29.47  | 20.82 | 0.60  | 0.66 | -0.65                 | -6.87                 | 122.55 | 32.86 | 0.709 833 92                    |
| LQH-37-1B | 白云岩  | 29.94  | 21.42 | 0.60  | 0.56 | -0.37                 | -6.11                 | 123.50 | 29.51 | 0.709 283 36                    |
| LQH-35-1B | 白云岩  | 29.88  | 21.73 | 0.61  | 0.66 | -0.05                 | -5.64                 | 124.39 | 27.49 | 0.709 945 55                    |
| LQH-33-3B | 白云岩  | 29.97  | 21.55 | 0.61  | —    | 0.30                  | -5.50                 | 125.18 | 26.90 | —                               |
| LQH-31-2B | 白云岩  | 30.44  | 21.14 | 0.59  | 0.62 | 0.91                  | -5.26                 | 126.54 | 25.89 | 0.709 961 98                    |
| LQH-29-1B | 白云岩  | 30.42  | 21.14 | 0.59  | 0.75 | 0.24                  | -5.73                 | 124.94 | 27.88 | 0.709 950 46                    |
| LQH-20-1B | 灰质云岩 | 35.45  | 13.14 | 0.31  | —    | 0.05                  | -7.03                 | 123.90 | 33.58 | —                               |
| LQH-10-1B | 灰质云岩 | 41.91  | 10.96 | 0.22  | —    | 0.85                  | -6.55                 | 125.78 | 31.43 | 0.709 563 80                    |
| LQH-21-1B | 云质灰岩 | 43.07  | 8.85  | 0.17  | —    | -0.62                 | -8.03                 | 122.03 | 17.03 | —                               |
| LQH-9-5B  | 云质灰岩 | 47.69  | 5.68  | 0.10  | —    | 1.08                  | -6.80                 | 126.13 | 11.40 | 0.708 229 93                    |
| LQH-8-3B  | 云质灰岩 | 46.27  | 7.48  | 0.14  | —    | 0.96                  | -6.91                 | 125.82 | 11.89 | 0.709 266 22                    |
| LQH-7-1B  | 云质灰岩 | 49.39  | 3.52  | 0.06  | —    | 0.49                  | -7.37                 | 124.63 | 13.98 | 0.708 927 54                    |
| LQH-2-1B  | 云质灰岩 | 51.60  | 2.55  | 0.04  | —    | -0.10                 | -7.83                 | 123.20 | 16.10 | 0.709 233 02                    |
| LQH-1-2B  | 云质灰岩 | 51.43  | 2.50  | 0.04  | —    | -0.04                 | -7.86                 | 123.30 | 16.24 | 0.708 950 25                    |
| LQH-42-1B | 含云灰岩 | 50.69  | 3.35  | 0.06  | —    | -0.36                 | -5.62                 | 123.76 | 6.20  | —                               |
| LQH-15-3B | 含云灰岩 | 53.59  | 1.48  | 0.02  | —    | 0.31                  | -7.91                 | 124.00 | 16.47 | 0.709 693 03                    |
| LQH-12-1B | 含云灰岩 | 51.84  | 2.64  | 0.04  | —    | 0.35                  | -7.17                 | 124.45 | 13.07 | 0.709 311 94                    |
| LQH-4-3B  | 含云灰岩 | 50.60  | 3.35  | 0.06  | —    | 0.26                  | -7.35                 | 124.17 | 13.89 | 0.709 253 00                    |
| LQH-26-1B | 灰岩   | 48.68  | 1.33  | 0.02  | —    | -0.59                 | -8.90                 | 121.66 | 21.15 | —                               |
| LQH-4-1B  | 灰岩   | 52.27  | 2.54  | 0.04  | —    | 0.48                  | -7.72                 | 124.44 | 15.59 | —                               |

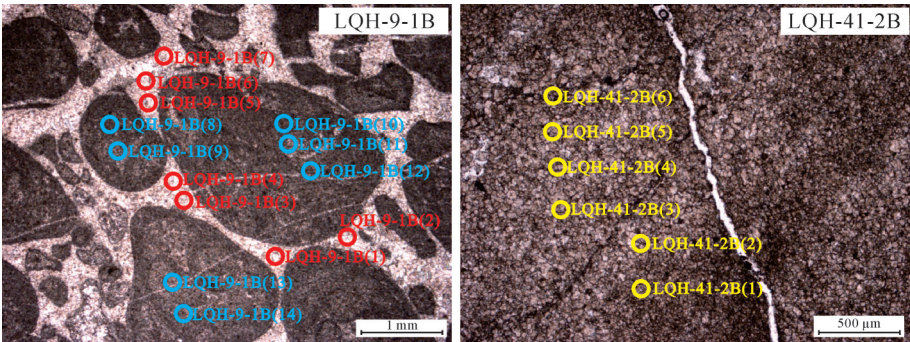


图4 激光微区原位微量元素点位分布图

Fig.4 Sample distribution of in-situ trace elements by laser micro-analysis

4.3 稀土元素特征

研究区龙王庙组样品稀土元素总含量( $\Sigma\text{REE}$ )在 $2.57\times10^{-6}\sim24.28\times10^{-6}$ (表3),处于正常海相碳酸盐岩稀土元素含量 $1\times10^{-6}\sim50\times10^{-6}$ 范围内,平均值为 $9.1\times10^{-6}$ ,其中,灰岩和靠近碎屑岩段的样品稀土元素含量较高,白云岩样品稀土元素含量相对较低,可见白云岩保留了原始灰岩的稀土元素特征<sup>[25,32]</sup>。将

测得的稀土元素数据使用Taylor *et al.*<sup>[33]</sup>发表的球粒陨石数据进行标准化处理,绘制出稀土元素配分模式图如图3b所示,所有样品的稀土元素趋势呈现平行一致分布,整体上表现为右倾型,LREE/HREE为5.47~10.78,平均值为7.74,轻稀土元素富集而重稀土元素亏损; $\delta\text{Ce}$ 范围为0.91~1.06,平均值为0.98,表现为无异常—弱负异常, $\delta\text{Eu}$ 范围为0.57~0.7,平均

表2 激光微区原位微量元素数据表

Table 2 In-situ micro-analysis data for trace elements using laser technique

| 样品号      | 岩性       | 微量元素/ $\times 10^{-6}$ |        |          |        | Mn/Sr |
|----------|----------|------------------------|--------|----------|--------|-------|
|          |          | Na                     | Sr     | Fe       | Mn     |       |
| 41-2B-01 | 泥—粉晶白云岩  | 685.44                 | 97.76  | 1 627.66 | 177.60 | 1.82  |
| 41-2B-02 | 泥—粉晶白云岩  | 623.90                 | 262.69 | 619.77   | 194.04 | 0.74  |
| 41-2B-03 | 泥—粉晶白云岩  | 215.36                 | 430.02 | 183.68   | 196.18 | 0.46  |
| 41-2B-04 | 泥—粉晶白云岩  | 534.36                 | 129.70 | 1 006.54 | 178.74 | 1.38  |
| 41-2B-05 | 泥—粉晶白云岩  | 804.39                 | 113.44 | 1 896.80 | 175.65 | 1.55  |
| 41-2B-06 | 泥—粉晶白云岩  | 669.53                 | 87.93  | 1 208.74 | 169.20 | 1.92  |
| 9-1B-01  | 颗粒灰岩,胶结物 | 24.61                  | 154.67 | 403.49   | 117.86 | 0.76  |
| 9-1B-02  | 颗粒灰岩,胶结物 | 14.13                  | 561.91 | 196.15   | 54.39  | 0.10  |
| 9-1B-03  | 颗粒灰岩,胶结物 | 157.54                 | 98.29  | 170.83   | 68.94  | 0.70  |
| 9-1B-04  | 颗粒灰岩,胶结物 | 177.75                 | 159.39 | 211.21   | 72.97  | 0.46  |
| 9-1B-05  | 颗粒灰岩,胶结物 | 115.34                 | 102.50 | 123.35   | 47.59  | 0.46  |
| 9-1B-06  | 颗粒灰岩,胶结物 | 294.53                 | 134.30 | 165.53   | 66.26  | 0.49  |
| 9-1B-07  | 颗粒灰岩,胶结物 | 62.76                  | 375.86 | 242.75   | 86.05  | 0.23  |
| 9-1B-08  | 颗粒灰岩,颗粒  | 172.29                 | 230.08 | 220.08   | 59.28  | 0.26  |
| 9-1B-09  | 颗粒灰岩,颗粒  | 241.73                 | 228.36 | 327.03   | 58.11  | 0.25  |
| 9-1B-10  | 颗粒灰岩,颗粒  | 167.12                 | 224.03 | 272.09   | 60.14  | 0.27  |
| 9-1B-11  | 颗粒灰岩,颗粒  | 123.32                 | 222.48 | 304.87   | 54.91  | 0.25  |
| 9-1B-12  | 颗粒灰岩,颗粒  | 216.59                 | 159.98 | 659.31   | 99.41  | 0.62  |
| 9-1B-13  | 颗粒灰岩,颗粒  | 117.96                 | 243.36 | 1 178.99 | 60.20  | 0.25  |
| 9-1B-14  | 颗粒灰岩,颗粒  | 7 932.42               | 239.00 | 1 640.29 | 63.66  | 0.27  |

注:表中斜体为异常值,不参与计算。

值为0.63,表现为负异常,说明研究区基本未受热液影响,白云石化流体为准同生—浅埋藏的海源流体<sup>[32]</sup>。

#### 4.4 白云石有序度特征

白云石有序度是反映其结晶程度好坏的指标,也可以反映白云石形成过程中的物理、化学等环境条件<sup>[34]</sup>。研究区7个白云岩样品的白云石有序度值在0.5~0.75之间(表1),平均值为0.62,有序度值较低,反映为早期白云石化形成,推测其形成于准同生—早成岩阶段<sup>[34-35]</sup>。

#### 4.5 碳氧同位素特征

碳氧同位素可以反映岩石形成时的盐度和温度,从而判断白云石化流体的来源和白云岩的成因<sup>[34]</sup>。研究区龙王庙组灰岩样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-0.59\text{‰}$ ~ $0.58\text{‰}$ ,均值 $0.19\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-8.9\text{‰}$ ~ $-5.69\text{‰}$ ,均值 $-7.53\text{‰}$ ;过渡岩性样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-0.62\text{‰}$ ~ $1.08\text{‰}$ ,均值 $0.27\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-8.03\text{‰}$ ~ $-5.62\text{‰}$ ,均值 $-7.2\text{‰}$ ;白云岩样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-0.65\text{‰}$ ~

$0.91\text{‰}$ ,均值 $-0.04\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-9.27\text{‰}$ ~ $-5.26\text{‰}$ ,均值 $-6.25\text{‰}$ (表1,图3c),以上数值均为PDB标准。与早寒武世海水值 $\delta^{13}\text{C}$ : $-2\text{‰}$ ~ $0\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ : $-10\text{‰}$ ~ $-7\text{‰}$ 相比<sup>[36]</sup>,灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ 处于同期海水范围内, $\delta^{13}\text{C}$ 偏正,白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均偏正,代表白云石化流体为高盐度蒸发海水。川中地区白云岩样品 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均处于同期海水范围内,表明研究区白云石化流体与川中可能存在差异。通过Keith *et al.*<sup>[37]</sup>提出的经验公式: $Z=2.048\times(\delta^{13}\text{C}+50)+0.498\times(\delta^{18}\text{O}+50)$ 可以计算盐度指数 $Z$ , $Z$ 值大于120代表海水成岩环境,小于120代表淡水成岩环境<sup>[6,37]</sup>。计算发现研究区及川中地区样品 $Z$ 值均大于120,表明成岩环境为高盐度海水环境,未受大气淡水影响。此外,根据 $\delta^{18}\text{O}$ 值通过公式:灰岩 $\delta_{\text{c}}-\delta_{\text{w}}=18.03\times 10^3/T-32.42$ <sup>[38-39]</sup>,白云岩 $\delta_{\text{c}}-\delta_{\text{w}}=3.2\times 10^6/T^2-3.3$ <sup>[38,40]</sup>,公式中 $\delta_{\text{c}}$ 为实测样品的 $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta_{\text{w}}$ 为同期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ , $T$ 为开尔文温度;任影等<sup>[41]</sup>,Wallmann<sup>[42]</sup>认为寒武纪海水的氧同位素组成为 $-8\text{‰}$ SMOW。最后计算得出灰岩和含云灰岩形成

表3 捞旗河剖面龙王庙组稀土元素数据表

Table 3 Rare earth element data for Longwangmiao Formation in Laoqihe section

| 样品号       | 岩性   | 稀土元素/ $\times 10^{-6}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | $\Sigma$ REE/<br>$\times 10^{-6}$ | LREE/<br>HREE | $\delta$ Ce | $\delta$ Eu |
|-----------|------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------|---------------|-------------|-------------|
|           |      | La                     | Ce    | Pr    | Nd    | Sm    | Eu    | Gd    | Tb    | Dy    | Ho    | Er    | Tm    | Yb    | Lu    |                                   |               |             |             |
| LQH-39-2B | 白云岩  | 0.938                  | 2.057 | 0.235 | 0.908 | 0.184 | 0.039 | 0.166 | 0.026 | 0.144 | 0.028 | 0.07  | 0.01  | 0.069 | 0.008 | 4.882                             | 8.370         | 1.03        | 0.68        |
| LQH-38-2B | 白云岩  | 1.569                  | 3.349 | 0.359 | 1.332 | 0.258 | 0.052 | 0.276 | 0.037 | 0.209 | 0.039 | 0.116 | 0.017 | 0.111 | 0.017 | 7.741                             | 8.417         | 1.05        | 0.60        |
| LQH-38-1B | 白云岩  | 1.229                  | 2.676 | 0.315 | 1.232 | 0.256 | 0.051 | 0.239 | 0.031 | 0.212 | 0.045 | 0.131 | 0.016 | 0.11  | 0.015 | 6.558                             | 7.208         | 1.01        | 0.63        |
| LQH-37-1B | 白云岩  | 1.26                   | 2.542 | 0.283 | 1.045 | 0.19  | 0.038 | 0.178 | 0.029 | 0.149 | 0.028 | 0.085 | 0.01  | 0.071 | 0.008 | 5.916                             | 9.602         | 1.00        | 0.63        |
| LQH-35-1B | 白云岩  | 0.982                  | 2.182 | 0.239 | 0.909 | 0.191 | 0.041 | 0.187 | 0.026 | 0.169 | 0.031 | 0.09  | 0.012 | 0.082 | 0.01  | 5.151                             | 7.486         | 1.06        | 0.66        |
| LQH-33-3B | 白云岩  | 1.231                  | 2.521 | 0.303 | 1.123 | 0.233 | 0.043 | 0.205 | 0.031 | 0.18  | 0.032 | 0.099 | 0.013 | 0.08  | 0.011 | 6.105                             | 8.378         | 0.97        | 0.60        |
| LQH-31-2B | 白云岩  | 1.216                  | 2.513 | 0.277 | 1.086 | 0.194 | 0.038 | 0.172 | 0.025 | 0.156 | 0.033 | 0.104 | 0.014 | 0.079 | 0.012 | 5.919                             | 8.948         | 1.01        | 0.64        |
| LQH-29-1B | 白云岩  | 1.072                  | 2.335 | 0.286 | 1.121 | 0.25  | 0.052 | 0.233 | 0.039 | 0.227 | 0.045 | 0.137 | 0.021 | 0.125 | 0.018 | 5.961                             | 6.054         | 0.99        | 0.66        |
| LQH-20-1B | 灰质云岩 | 4.627                  | 9.15  | 1.037 | 3.84  | 0.743 | 0.142 | 0.63  | 0.091 | 0.571 | 0.112 | 0.332 | 0.048 | 0.328 | 0.045 | 21.696                            | 9.058         | 0.98        | 0.63        |
| LQH-10-1B | 灰质云岩 | 0.685                  | 1.317 | 0.16  | 0.613 | 0.122 | 0.028 | 0.124 | 0.017 | 0.104 | 0.022 | 0.072 | 0.009 | 0.067 | 0.01  | 3.350                             | 6.882         | 0.93        | 0.70        |
| LQH-21-1B | 云质灰岩 | 2.24                   | 4.594 | 0.527 | 1.96  | 0.382 | 0.079 | 0.376 | 0.052 | 0.321 | 0.064 | 0.195 | 0.025 | 0.178 | 0.025 | 11.018                            | 7.914         | 0.99        | 0.64        |
| LQH-9-5B  | 云质灰岩 | 1.075                  | 2.11  | 0.251 | 0.921 | 0.193 | 0.039 | 0.154 | 0.03  | 0.158 | 0.036 | 0.098 | 0.016 | 0.091 | 0.017 | 5.189                             | 7.648         | 0.95        | 0.69        |
| LQH-8-3B  | 云质灰岩 | 0.885                  | 1.705 | 0.207 | 0.77  | 0.145 | 0.03  | 0.145 | 0.021 | 0.128 | 0.025 | 0.073 | 0.01  | 0.07  | 0.01  | 4.224                             | 7.763         | 0.93        | 0.63        |
| LQH-7-1B  | 云质灰岩 | 2.745                  | 5.383 | 0.649 | 2.547 | 0.56  | 0.108 | 0.598 | 0.089 | 0.562 | 0.118 | 0.366 | 0.051 | 0.355 | 0.054 | 14.185                            | 5.468         | 0.94        | 0.57        |
| LQH-2-1B  | 云质灰岩 | 2.088                  | 3.839 | 0.433 | 1.664 | 0.324 | 0.061 | 0.329 | 0.054 | 0.324 | 0.065 | 0.204 | 0.031 | 0.196 | 0.027 | 9.639                             | 6.837         | 0.95        | 0.57        |
| LQH-1-2B  | 云质灰岩 | 2.137                  | 4.038 | 0.46  | 1.718 | 0.344 | 0.066 | 0.318 | 0.044 | 0.277 | 0.059 | 0.179 | 0.024 | 0.171 | 0.023 | 9.858                             | 8.003         | 0.95        | 0.61        |
| LQH-42-1B | 含云灰岩 | 4.886                  | 9.838 | 1.073 | 4.139 | 0.894 | 0.187 | 0.925 | 0.147 | 0.87  | 0.176 | 0.512 | 0.074 | 0.49  | 0.072 | 24.283                            | 6.435         | 1.01        | 0.63        |
| LQH-15-3B | 含云灰岩 | 0.584                  | 1.049 | 0.121 | 0.454 | 0.091 | 0.016 | 0.077 | 0.013 | 0.064 | 0.014 | 0.043 | 0.006 | 0.037 | 0.005 | 2.574                             | 8.938         | 0.92        | 0.58        |
| LQH-12-1B | 含云灰岩 | 0.76                   | 1.493 | 0.18  | 0.643 | 0.121 | 0.027 | 0.12  | 0.02  | 0.111 | 0.024 | 0.067 | 0.009 | 0.066 | 0.01  | 3.651                             | 7.550         | 0.95        | 0.68        |
| LQH-4-3B  | 含云灰岩 | 2.541                  | 5.274 | 0.608 | 2.386 | 0.528 | 0.102 | 0.559 | 0.082 | 0.555 | 0.118 | 0.346 | 0.051 | 0.316 | 0.045 | 13.511                            | 5.521         | 0.99        | 0.57        |
| LQH-26-1B | 灰岩   | 6.131                  | 9.801 | 1.039 | 3.69  | 0.643 | 0.129 | 0.616 | 0.086 | 0.511 | 0.106 | 0.295 | 0.044 | 0.288 | 0.042 | 23.421                            | 10.781        | 0.91        | 0.63        |
| LQH-4-1B  | 灰岩   | 1.165                  | 2.184 | 0.247 | 0.936 | 0.171 | 0.034 | 0.187 | 0.031 | 0.177 | 0.039 | 0.112 | 0.016 | 0.101 | 0.016 | 5.416                             | 6.976         | 0.95        | 0.58        |

的平均温度在 14.4 ℃,云质灰岩和灰质云岩形成的平均温度在 18.96 ℃,白云岩形成的平均温度在 30.31 ℃,为典型的古常温。表明白云岩形成于盐度较高、温度常温的海源流体环境。而川中地区白云岩形成的平均温度在 37.49 ℃,稍高于川东地区。

4.6 锶同位素特征

锶同位素的组成可以反映白云石化流体来源<sup>[32]</sup>。早寒武世古海水 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值为 0.709 0~0.709 4<sup>[36]</sup>。研究区 14 个样品锶同位素 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值在 0.708 23~0.709 962 之间(表 1,图 3d),其中,含云灰岩和云质灰岩 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 平均值为 0.709 1,处于同期海水值内;灰质云岩 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值为 0.709 6,稍高于同期海水值;白云岩 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 平均值为 0.709 8,高于同期海水值。有随白云石化程度增高,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值增大, $\delta^{18}\text{O}$  值逐渐偏正的趋势,为连续变化过程,代表成岩流体为逐渐浓缩的古海水,<sup>87</sup>Sr 逐渐富集<sup>[32]</sup>。研究区样品 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值与川中地区白云岩相差不大, $\delta^{18}\text{O}$  值偏正。

5 白云岩成因分析及白云石化模式

5.1 白云岩成因分析

研究区龙王庙组白云石多呈泥—粉晶,少量为粉—细晶,未见示顶底构造,有序度值较低,为早期白云石化形成;同时 Na 含量较高,Fe、Mn、Sr 含量较低,表明其形成于高盐度海源流体环境,受大气淡水影响较小,Mn/Sr 比值小于 2,表明白云岩经历的成岩蚀变较弱;稀土元素配分曲线上,白云岩、灰岩和过渡岩性呈平行一致分布,Ce 表现为无异常,Eu 表现为负异常,表明白云岩保留了灰岩的稀土元素特征,未受热液流体影响;灰岩  $\delta^{18}\text{O}$  处于同期海水范围内, $\delta^{13}\text{C}$  偏正,白云岩  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  均偏正,根据  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  同位素计算出的盐度指数 Z 值大于 120,温度为古常温,表明白云岩形成于高盐度常温海源流体环境;白云岩 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值稍高于同期海水值,代表成岩流体为逐渐浓缩的古海水。

综合以上分析,研究区龙王庙组白云石化流体来源为蒸发浓缩的高盐度海水。同时,结合研究区龙王庙组灰岩、过渡岩性、白云岩均有发育,且自下而上白云质含量有增加的趋势,白云石多呈泥—粉晶,少量为粉—细晶,有序度值较低,样品主量元素MgO和CaO呈负相关性,认为研究区白云岩为高盐度海水交代成因。

## 5.2 白云石化模式

四川盆地及周缘下寒武统龙王庙期地势西高东低,受桐湾运动影响,川中古隆起和达州—开江水下古隆起继承演化<sup>[18]</sup>,形成了两隆两凹,隆凹相间的沉积格局<sup>[4,13-14]</sup>,为以海相碳酸盐岩沉积为主的镶边台地沉积环境<sup>[4-5,19]</sup>。川东北捞旗河地区龙王庙组为开阔台地—台地边缘沉积环境,初期为开阔台地沉积,以沉积泥晶灰岩和颗粒灰岩为主,后期伴随海平面下降,沉积环境转变为有颗粒滩障壁的台地边缘,以颗粒灰岩沉积为主,夹有少量泥晶灰岩。受颗粒滩障壁影响由开阔转变为局限环境,研究区海水不再与外海沟通。同时受干旱炎热的古气候影响,海水蒸发作用强,流体环境转化为高盐度蒸发海水,镁离子由不饱和转化为过饱和状态,高盐度富镁海水在

密度驱动下沿海底向海洋回流,并向下渗透,初期沉积的灰岩发生渗透回流白云石化作用向白云岩转化,由于海平面的持续下降,白云石化流体供应不足,初期沉积的灰岩白云石化不完全,故在纵向上呈现向上部白云质含量增多的情况(图5)。川中地区处于潮坪—局限台地环境,锶同位素及碳氧同位素特征表明其与川东地区白云石化流体为同源流体,川中地区白云岩形成的温度稍高于川东地区,表明川中地区更为局限,其白云石化作用也更完全。

## 6 结论

(1) 川东北捞旗河地区龙王庙组为开阔台地—台地边缘沉积环境,自下而上发育灰岩、过渡岩性、白云岩,向上白云质含量增加,结构上可见晶粒结构和颗粒结构,阴极发光呈昏暗光—暗红光;白云石以泥—粉晶为主,晶形呈它形—半自形晶。

(2) 研究区样品MgO与CaO呈负相关,白云岩 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 比值在0.59~0.61,具有较高的Na含量和较低的Sr、Fe、Mn含量,稀土元素配分曲线表现为平行一致分布,Ce无异常,Eu负异常,白云石有序度值范围为0.5~0.75。与同期海水值相比,灰岩 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 处

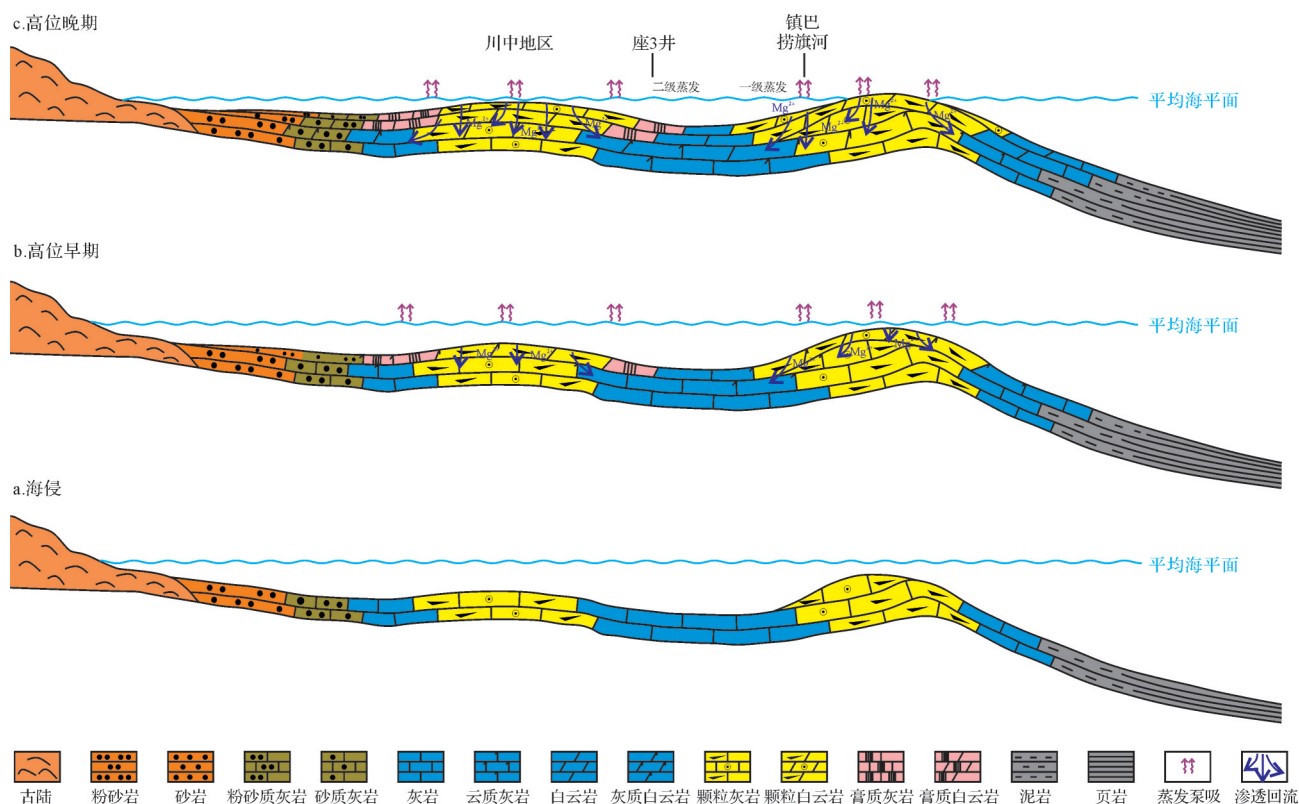


图5 研究区白云石化模式图

Fig.5 Dolomitization model of study area

于同期海水内,白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高于同期海水值。

(3) 川东北地区龙王庙组白云石化流体为高盐度蒸发海水,经历渗透回流白云石化作用形成,下部白云石化作用不完全。

## 参考文献(References)

- [1] 刘树根,宋金民,赵异华,等. 四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 657-670. [Liu Shugen, Song Jinmin, Zhao Yihua, et al. Controlling factors of formation and distribution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation high-quality reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 657-670.]
- [2] 宋金民,刘树根,赵异华,等. 川中地区中下寒武统风暴岩特征及沉积地质意义[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 30-42. [Song Jinmin, Liu Shugen, Zhao Yihua, et al. Characteristics and sedimentary geological significances of Lower-Middle Cambrian tempestites in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 30-42.]
- [3] 杜金虎,邹才能,徐春春,等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268-277. [Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.]
- [4] 周进高,徐春春,姚根顺,等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166. [Zhou Jingao, Xu Chunchun, Yao Genshun, et al. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 158-166.]
- [5] 任影,钟大康,高崇龙,等. 川东寒武系龙王庙组白云岩地球化学特征、成因及油气意义[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1102-1115. [Ren Ying, Zhong Dakang, Gao Chonglong, et al. Geochemical characteristics, genesis and hydrocarbon significance of dolomite in the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1102-1115.]
- [6] 田艳红,刘树根,赵异华,等. 四川盆地中部龙王庙组储层成岩作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 671-683. [Tian Yanhong, Liu Shugen, Zhao Yihua, et al. Diagenesis of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in central area of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 671-683.]
- [7] 孙海涛,张玉银,柳慧林,等. 四川盆地东部下寒武统龙王庙组白云岩类型及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 318-329. [Sun Haitao, Zhang Yuyin, Liu Huilin, et al. Typological analysis and genetic mechanism of dolomite in the Lower Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 318-329.]
- [8] 刘树根,孙玮,宋金民,等. 四川盆地海相油气分布的构造控制理论[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 146-160. [Liu Shugen, Sun Wei, Song Jinmin, et al. Tectonics-controlled distribution of marine petroleum accumulations in the Sichuan Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 146-160.]
- [9] 汪泽成,赵文智,彭红雨. 四川盆地复合含油气系统特征[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 26-28. [Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Peng Hongyu. Characteristics of multi-source petroleum systems in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 26-28.]
- [10] 何登发,李德生,张国伟,等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589-606. [He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 589-606.]
- [11] 汪泽成,姜华,王铜山,等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 305-312. [Wang Zecheng, Jiang Hua, Wang Tongshan, et al. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 305-312.]
- [12] 武赛军,魏国齐,杨威,等. 四川盆地桐湾运动及其油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 60-70. [Wu Saijun, Wei Guoqi, Yang Wei, et al. Tongwan movement and its geologic significances in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 60-70.]
- [13] 唐娜. 四川盆地寒武统岩相古地理研究[D]. 荆州:长江大学, 2017. [Tang Na. Study on lithofacies palaeogeography of the Lower Cambrian in the Sichuan Basin[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017.]
- [14] 梅冥相,张丛,张海,等. 上扬子区下寒武统的层序地层格架及其形成的古地理背景[J]. 现代地质, 2006, 20(2): 195-208. [Mei Mingxiang, Zhang Cong, Zhang Hai, et al. Sequence-stratigraphic frameworks and their forming backgrounds of paleogeography for the Lower Cambrian of the Upper-Yangtze region[J]. Geoscience, 2006, 20(2): 195-208.]
- [15] 黄文明,刘树根,张长俊,等. 四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 566-575. [Huang Wenming, Liu Shugen, Zhang Changjun, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the high quality Cambrian reservoirs in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 566-575.]
- [16] 李晓清,汪泽成,张兴为,等. 四川盆地古隆起特征及对天然气的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 347-351. [Li Xiaoping, Wang Zecheng, Zhang Xingwei, et al. Charac-

- teristics of paleo-uplifts in Sichuan Basin and their control action on natural gases [J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22 (4): 347-351. ]
- [17] 郑和荣, 胡宗全. 中国前中生代构造: 岩相古地理图集[M]. 北京: 地质出版社, 2010. [Zheng Herong, Hu Zongquan. Tectonic and lithofacies paleogeographic atlats of Pre-Mesozoic in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. ]
- [18] 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等. 四川盆地达州—开江古隆起沉积构造演化及油气成藏条件分析[J]. *天然气工业*, 2016, 36(8): 1-10. [Yang Yueming, Wen Long, Luo Bing, et al. Sedimentary tectonic evolution and reservoir-forming conditions of the Dazhou-Kaijiang paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(8): 1-10. ]
- [19] 李王鹏, 刘少峰, 钱涛. 城口—房县断裂带的构造变形分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(5): 755-768. [Li Wangpeng, Liu Shaofeng, Qian Tao. Analysis of structural deformation of the Chengkou-Fangxian fault zone[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(5): 755-768. ]
- [20] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41 (3): 278-293. [Zou Caineng, Du Jinhui, Xu Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 278-293. ]
- [21] 李智武, 刘树根, 罗玉宏, 等. 南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(3): 294-304. [Li Zhiwu, Liu Shugen, Luo Yuhong, et al. Structural style and deformational mechanism of southern Dabashan foreland fold-thrust belt in central China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30(3): 294-304. ]
- [22] 李金玺. 大巴山弧形构造特征及成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [Li Jinxi. Structure feature and formation mechanical of Dabashan arcuate orogenic belt [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. ]
- [23] 裴先治, 李瑞保, 丁仁平, 等. 陕南镇巴地区大巴山与米仓山构造交接关系[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 576-583. [Pei Xianzhi, Li Ruibao, Ding Saping, et al. Tectonic intersection relationship between Dabashan and Micangshan in Zhenba area southern Shanxi province[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 576-583. ]
- [24] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/2/3): 1-81.
- [25] 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 多参数综合识别塔里木盆地古生界白云岩成因[J]. *石油学报*, 2012, 33(增刊2): 145-153. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Multi-parameter comprehensive identification of the genesis of Lower Paleozoic dolomite in Tarim Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 33(Suppl 2): 145-153. ]
- [26] 黄思静, Qing Hairuo, 胡作维, 等. 封闭系统中的白云石化作用及其石油地质学和矿床学意义: 以四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩为例[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2955-2962. [Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, et al. Closed-system dolomitization and the significance for petroleum and economic geology: An example from Feixianguan carbonates, Triassic, NE Sichuan Basin of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2955-2962. ]
- [27] 何勇, 刘波, 刘红光, 等. 塔里木盆地西北缘通古孜布隆剖面下奥陶统蓬莱坝组白云石化流体来源及白云岩成因分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(4): 781-791. [He Yong, Liu Bo, Liu Hongguang, et al. Origin of Mg-rich-fluids and dolomitization of Lower Ordovician Penglaiba Formation at Tongguzibulong outcrop in the northwestern margin of Tarim Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(4): 781-791. ]
- [28] 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩成因及分布规律[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(6): 600-604. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Genesis and distribution of the Cambro-Ordovician dolomite in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(6): 600-604. ]
- [29] 陈永权, 周新源, 赵葵东, 等. 塔里木盆地中寒武统泥晶白云岩红层的地球化学特征与成因探讨[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(4): 583-592. [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Zhao Kuidong, et al. Geochemical research on Middle Cambrian red dolostones in Tarim Basin: Implications for dolomite genesis [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(4): 583-592. ]
- [30] Walker G, Abumere O E, Kamaluddin B. Luminescence spectroscopy of  $Mn^{2+}$  rock-forming carbonates [J]. *Mineralogical Magazine*, 1989, 53(370): 201-211.
- [31] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2230-2238. [Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2230-2238. ]
- [32] 贺训云, 寿建峰, 沈安江, 等. 白云岩地球化学特征及成因: 以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组合为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41 (3): 375-384. [He Xunyun, Shou Jianfeng, Shen Anjiang, et al. Geochemical characteristics and origin of dolomite: A case study from the middle assemblage of Majiagou Formation member 5 of the west of Jingbian gas field, Ordos Basin, North China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 375-384. ]
- [33] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [34] 金民东, 谭秀成, 李毕松, 等. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因[J]. *沉积学报*, 2019, 37(3): 443-454. [Jin Mindong, Tan

- Xiucheng, Li Bisong, et al. Genesis of dolomite in the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(3): 443-454. ]
- [35] 钟倩倩, 黄思静, 邹明亮, 等. 碳酸盐岩中白云石有序度的控制因素: 来自塔河下古生界和川东北三叠系的研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3): 50-55. [Zhong Qianqian, Huang Sijing, Zou Mingliang, et al. Controlling factors of order degree of dolomite in carbonate rocks: A case study from Lower Paleozoic in Tahe oilfield and Triassic in northeastern Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2009, 21(3): 50-55. ]
- [36] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/2/3): 59-88.
- [37] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- [38] 陈永权, 徐彦龙, 张艳秋, 等. 塔中—巴楚地区下奥陶统云灰岩地球化学与成因探讨[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1344-1353. [Chen Yongquan, Xu Yanlong, Zhang Yanqiu, et al. Geochemistry and genesis research on Lower Ordovician limestones-dolostones transitional rocks in Tazhong-Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1344-1353. ]
- [39] Kim S T, O'Neil J R. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(16): 3461-3475.
- [40] Land L S. The application of stable isotopes to studies of the origin of dolomite and to problems of diagenesis of clastic sediments[M]//Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, et al. *Stable isotopes in sedimentary geology*. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1983: 1-22.
- [41] 任影, 钟大康, 柳慧琳, 等. 渝东地区寒武系第四阶龙王庙组古环境演化的稳定同位素与主、微量元素证据[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4066-4095. [Ren Ying, Zhong Dakang, Liu Hui-lin, et al. Isotopic and elemental evidence for paleoenvironmental evolution of Cambrian Stage 4 Longwangmiao Formation, East Chongqing, China [J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4066-4095. ]
- [42] Wallmann K. Controls on the Cretaceous and Cenozoic evolution of seawater composition, atmospheric  $\text{CO}_2$  and climate[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(18): 3005-3025.

## Genesis of Dolomite in the Lower Cambrian Longwangmiao Formation, Northeastern Sichuan Basin

YU JingJie<sup>1,2</sup>, SONG JinMin<sup>1,2</sup>, LIU ShuGen<sup>1</sup>, YANG Di<sup>1</sup>, WANG Han<sup>1,2</sup>, ZHAO Cong<sup>1,2</sup>,  
DENG ShuangLin<sup>1,2</sup>, HE Yu<sup>1,2</sup>, LI LiJi<sup>1,2</sup>

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

2. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** Based on measurement of field outcrops, microscopic thin section identification, cathodoluminescence analysis and geochemical analysis, this paper systematically studied the genesis of dolomite in the lower Cambrian Longwangmiao Formation, northeastern Sichuan Basin. It was found that limestone-transitional lithology-dolomite was developed from bottom to top in the study area, and the rocks have a predominantly grainy texture. The dolomite is mainly subhedral-xenotopic micritic to powder crystalline, and exhibits dim, dark-red luminescence. The MgO and CaO contents of the samples are negatively correlated. The  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  ratio, the Sr, Fe and Mn contents and the order degree of the dolomite are relatively low, but the Na content is relatively high. The distribution curves of rare earth elements (REE) in each lithology are parallel and uniform, and it shows  $\delta\text{Eu}$  anomalies but no  $\delta\text{Ce}$  anomalies. The  $\delta^{18}\text{O}$  value of the limestone is consistent with that of coeval seawater. The  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of the dolomite and the  $\delta^{13}\text{C}$  values of the limestone are slightly higher than for coeval seawater. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of the dolomite is higher than for coeval seawater. Combined with the regional geological background, petrological characteristics and geochemical analysis results, it is considered that the dolomitization fluid in the study area was highly saline evaporating seawater. The dolomite in the study area was formed by seepage-reflux dolomitization.

**Key words:** dolomite; Longwangmiao Formation; Cambrian; geochemical characteristics; northeastern Sichuan Basin