

# 四川盆地西北缘早-中三叠世界线附近沉积岩 地球化学特征及古环境意义

李宸<sup>1</sup>, 周游<sup>1</sup>, 郎兴海<sup>1</sup>, 邓煜霖<sup>1</sup>, 王旭辉<sup>1</sup>, 何青<sup>1</sup>, 李壮<sup>2</sup>, 娄渝明<sup>1</sup>,  
向佐朋<sup>1</sup>, 吴伟哲<sup>1</sup>, 詹宏宇<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川成都 610059; 2. 内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川内江 641100)

**摘要:** 通过分析四川盆地峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组沉积岩元素地球化学及碳、氧同位素特征, 探讨了其古环境意义, 为四川盆地西北缘早-中三叠世古环境研究提供基础信息。结果表明: 样品  $\Sigma$  ( $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{LOI}$ ) 为 13.98% ~ 93.31%, 反映了相对动荡的沉积环境。 $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围是  $-6.95\text{\textperthousand}$  ~  $0.36\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为  $-9.06\text{\textperthousand}$  ~  $-0.99\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  值总体表现趋势为降低-升高-降低-升高。海水盐度呈现先升高、后降低、复又升高的多段式变化; 海水温度  $7.11\text{~}34.94^\circ\text{C}$ , 平均温度  $21.99^\circ\text{C}$ , 古海水温度经历了降低-升高-降低的变化趋势, 在早-中三叠世界线附近温度急剧升高。研究区整体处于氧化的沉积环境, 间有贫氧的沉积环境出现。以上各个地球化学指标间耦合关系较好, 一致反映了研究区早-中三叠世为相对潮湿-相对于热-相对潮湿气候下的海相沉积环境。

**关键词:** 碳酸盐岩; 地球化学; 古环境; 早-中三叠世; 四川盆地

中图分类号: P588.2; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)02-0220-17

## Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of sedimentary rocks near the Early-Middle Triassic boundary on the northwest margin of the Sichuan Basin

LI Chen<sup>1</sup>, ZHOU You<sup>1</sup>, LANG Xing-hai<sup>1</sup>, DENG Yu-lin<sup>1</sup>, WANG Xu-hui<sup>1</sup>, HE Qing<sup>1</sup>, LI Zhuang<sup>2</sup>,  
LOU Yu-ming<sup>1</sup>, XIANG Zuo-peng<sup>1</sup>, WU Wei-zhe<sup>1</sup> and ZHAN Hong-yu<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China)

**Abstract:** The elemental geochemistry and carbon and oxygen isotope characteristics of sedimentary rocks from the Jialingjiang Formation-Leikoupo Formation in the Emeishan area of the Sichuan Basin were analyzed to explore their paleoenvironmental significance and provide basic information for the study of the Early-Middle Triassic paleoenvironment on the northwest margin of the Sichuan Basin. The results show that the samples  $\Sigma$  ( $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{LOI}$ ) ranged from 13.98% to 93.31%, reflecting a relatively turbulent sedimentary environment. The data show that the variation range of  $\delta^{13}\text{C}$  value is from  $-6.95\text{\textperthousand}$  to  $0.36\text{\textperthousand}$ , and the variation range of  $\delta^{18}\text{O}$  value is from  $-9.06\text{\textperthousand}$  to  $-0.99\text{\textperthousand}$ . The overall performance trend of  $\delta^{13}\text{C}$  value is decreasing-increasing-decreasing-increasing. The seawater salinity shows a multi-stage change of rising, then decreasing, and then rising again; the seawater temperature ranges

收稿日期: 2022-10-16; 接受日期: 2023-02-09; 编辑: 尹淑萍

基金项目: 四川省科技计划项目(2020JDJQ0042); 国家自然科学基金项目(41972084); 成都理工大学珠峰科学研究计划(2020ZF11407)

作者简介: 李宸(1996-), 男, 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学, E-mail: 1057785163@qq.com; 通讯作者: 郎兴海(1982-), 男, 教授, 长期从事西藏主要成矿带构造-岩浆演化与成矿作用研究工作, E-mail: langxinghai@126.com。

from 7.11 to 34.94°C, with an average temperature of 21.99°C, and the ancient seawater temperature experiences a trend of decreasing-increasing-decreasing, with a sharp increase in temperature near the Early-Middle Triassic boundary. The study area as a whole is in an oxidized sedimentary environment, with intermittent occurrences of oxygen-poor sedimentary environments. The above geochemical indicators are well coupled and consistently reflect a relatively humid-relatively dry and hot-relatively humid marine depositional environment in the Early-Middle Triassic boundary of the study area.

**Key words:** carbonate rock; geochemistry; palaeoenvironment; Early-Middle Triassic; Sichuan Basin

**Fund support:** Sichuan Science and Technology Program (2020JDJQ0042); National Natural Science Foundation of China (41972084); Everest Scientific Research Program of Chengdu University of Technology (2020ZF11407)

晚二叠世-早三叠世之交发生了地质历史上规模最大的生物灭绝事件(PTB事件),早-中三叠世蕴含着生物复苏的重要信息,也是生态系统重建的重要时期(Bambach *et al.*, 2002; Alroy, 2010; McGhee *et al.*, 2013)。碳酸盐岩记录了沉积环境以及重大地质事件等重要信息。然而,在早-中三叠世全球大部分地区缺失了海相碳酸盐岩沉积地层,仅少数地区具有较好的研究剖面(黄可可, 2013)。连续的碳酸盐岩沉积使得华南成为了拥有早-中三叠世最完整地层和古生物记录的地区之一,四川盆地发育连续的三叠系地层,中下三叠统为稳定的海相沉积,也是记录突变期海相沉积记录的理想地区,但尚未见有记录峨眉山地区早-中三叠世碳酸盐岩碳、氧同位素以及元素地球化学特征的报道。

目前,运用碳酸盐岩进行古环境重建已被大部分学者所应用(田洋等, 2014; 李小宁, 2017; 邓小亮等, 2020)。利用碳、氧同位素以及元素地球化学特征可以恢复古环境特征,了解古环境温度、气候以及古海洋等有关信息。关于四川盆地及周缘地区二叠-三叠纪界线附近的碳酸盐岩的地球化学特征、古生物学、地层学以及沉积相等特征前人已有报道(陈锦石等, 1984; Baud *et al.*, 1996; 董庆民等, 2021; 王秀平等, 2022),二叠-三叠纪界线附近碳同位素发生负漂移在全球范围内都有记录(Holser *et al.*, 1989; Stemmerik *et al.*, 2001; Heydari *et al.*, 2003, 2008; Payne *et al.*, 2004; Richoz, 2004; Grasby and Beauchamp, 2008; Horacek *et al.*, 2010),而对于早-中三叠世碳酸盐岩的地球化学特征,特别是碳、氧同位素研究则很少(Huang *et al.*, 2012; 黄可可等, 2016),利用沉积地球化学方法恢复古环境的研究较为薄弱,亟需进行相关研究。本文对四川盆地峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组沉积岩样品进行了系统采样,在野外露头和镜下薄片分析基础上,开展了全

岩主量、微量元素地球化学测试和碳、氧同位素测试,并对四川盆地早-中三叠世古气候、古海洋环境进行了分析,旨在探讨沉积环境的指示意义。

## 1 区域地质背景

四川盆地是中国西部四大盆地之一,是在扬子准地台基础上发育的复合型盆地,大地构造上位于扬子板块西缘,北以秦岭造山带为界,东南以齐岳山为界,西以松潘-甘孜造山带为界(郭正吾等, 1996; 汪泽成等, 2002; 张岳桥等, 2011; 米色子哈, 2012)。四川盆地作为中上扬子地台的一级构造单元,在漫长的形成和发展中与周边的地质构造有着密切关系(汪泽成等, 2002; 邓宾, 2013)。根据区域构造特征,前人将盆地从西向东划分为川西低缓褶皱带、川中平缓褶皱带、川西南低缓褶皱带、川东高陡构造带、川北平缓褶皱带等二级构造单元(图1a)(林茂炳, 1994; 刘和甫等, 1994; 李智武等, 2009; 郑荣才等, 2009; 万元博, 2016)。

研究区位于川西南低缓褶皱带,峨眉山地区西侧紧邻龙门山造山带和松潘-甘孜褶皱带,处于一个多边界的构造交接部位(图1b)。该地区经历了长期的、性质多变的构造演化,表现出十分复杂的构造格局(Chilingar *et al.*, 1972; Shanley *et al.*, 2004; Desai and Rierson, 2007; Chafetz, 2013; Archilha *et al.*, 2016)。盆地基底由前震旦系变质地层组成,经历中元古代(1.8~1.0 Ga)多次地壳增生作用,最终于晋宁运动(1 000~830 Ma)固结(Chen and Jahn, 1998; Qiu *et al.*, 2000; 陆松年等, 2004; Zheng *et al.*, 2006; 李宸等, 2020),并经历了震旦纪-中三叠世的海相碳酸盐岩台地、晚三叠世-始新世的陆相碎屑盆地和渐新世以来的构造盆地三大演化阶段(刘树根等, 2011; 龚大兴等, 2015)。

峨眉山地区地层发育较完整,从元古界至新生界均有分布,三叠纪出露的地层主要为东川组( $T_1d$ )、飞仙关组( $T_1f$ )、嘉陵江组( $T_1j$ )、雷口坡组( $T_2l$ )和须家河组( $T_2x$ )(图1c)。嘉陵江组( $T_1j$ )地层底部为白云岩夹泥岩,中部以灰岩及泥灰岩为主,上部为白云岩夹膏溶角砾岩,雷口坡组( $T_2l$ )底部为火山活动形成的凝灰岩、云泥岩及白云岩,中部以灰

岩为主,上部为白云岩、含石膏白云岩夹膏溶角砾岩(图1d)。

## 2 样品采集

本次分析测试样品采自峨眉山地区的早-中三叠世界线附近的嘉陵江组-雷口坡组灰岩、白云岩以

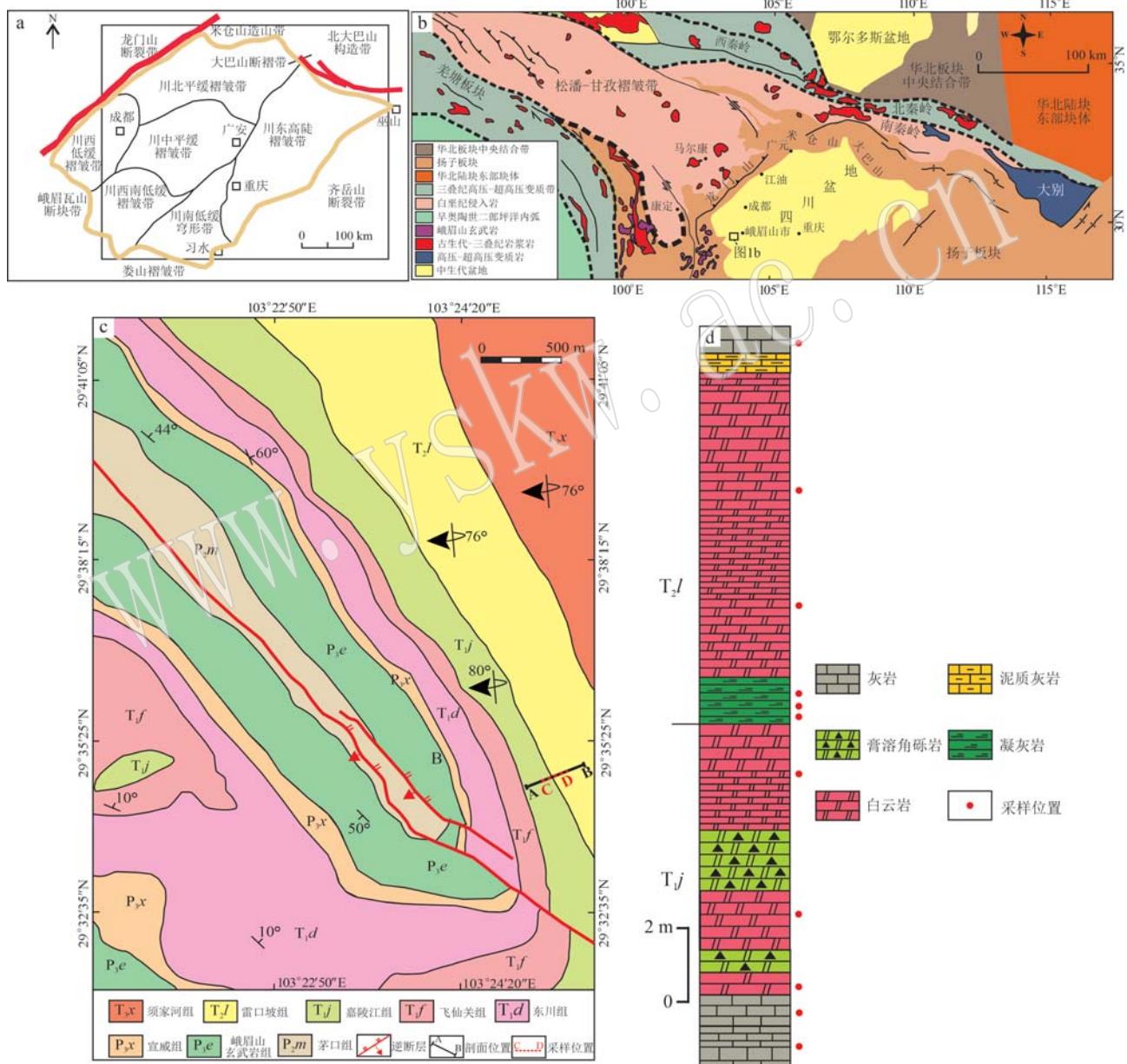


图 1 四川盆地现今构造图(a, 黄昊源等, 2020)、四川盆地及邻区构造背景图(b, 据 Enkelmann *et al.*, 2007; 邓煜霖等, 2018; 李宸等, 2020)、研究区地质略图(c, 据李宸等, 2020)和峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组界线附近地层柱状图(d)

Fig. 1 Present-day tectonic map of the Sichuan Basin (a, after Huang Haoyuan *et al.*, 2020), tectonic background map of the Sichuan Basin and adjacent areas (b, after Enkelmann *et al.*, 2007; Deng Yulin *et al.*, 2008; Li Chen *et al.*, 2020), geological sketch of the study area (c, after Li Chen *et al.*, 2020) and stratigraphic column near the boundary of the Jialingjiang Formation-

#### Leikoupo Formation in the Emeishan area (d)

及凝灰岩。剖面起点坐标: N 29°34'40", E 103°24'50"; 终点坐标: N 29°35'05", E 103°25'18"。共采集 11 件样品, 其中 3 件凝灰岩、2 件灰岩、6 件白云岩样品, 样品均采自于新鲜岩石, 采集时远离方解石脉(图 2、表 1)。采集的样品特征如下: 嘉陵江组下段为白色薄层灰岩, 层厚约 5 mm~2 cm, 偶夹厚层灰

岩, 层厚约 70 cm, 嘉陵江组中段为白色中层灰岩夹薄层灰岩, 中层厚约 15~20 cm, 薄层层厚约 3 cm, 上段为厚层白云岩, 层厚约 90 cm。雷口坡组下段为浅绿色、灰白色凝灰岩, 厚度约 1 m, 中段为灰白色中层白云岩, 层厚 20 cm, 上段为灰白色薄层白云岩, 层厚约 5 cm。

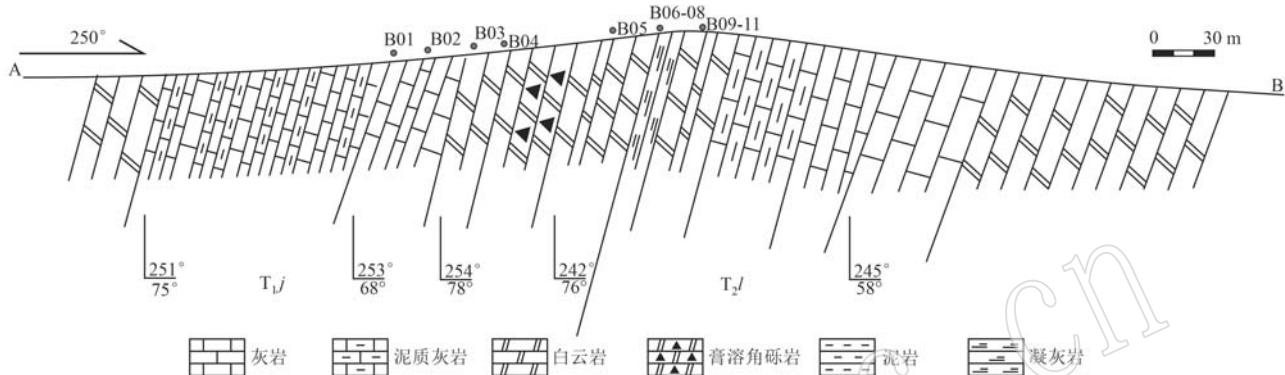


图 2 峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组实测剖面图

Fig. 2 Measured section of the Jialingjiang Formation-Leikoupo Formation in the Emeishan area

表 1 峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组界线附近地层采集样品信息

Table 1 Sample information of stratigraphic collections near the Jialingjiang Formation-Leikoupo Formation boundary in the Emeishan area

样品号	地层	岩性	采样点距层底距离/m
B01		薄层灰岩	1
B02		中层灰岩	12
B03	嘉陵江组(T <sub>1j</sub> )	薄层白云岩	23
B04		薄层白云岩	34
B05		厚层白云岩	45
B06		凝灰岩	56
B07		凝灰岩	57
B08		凝灰岩	58
B09	雷口坡组(T <sub>2l</sub> )	中层白云岩	65
B10		薄层白云岩	72
B11		厚层白云岩	79

### 3 分析测试方法

样品的主量、微量元素(稀土)元素分析在西南冶金地质测试中心完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)分析, 分析仪器为 AxiosmAX 型波长色散 X 射线荧光光谱仪, 测试温度 24°C, 相对湿度 53%, 误差优于 3%; 微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法在 NexIon 300x ICP-MS 仪器上完成测

定, 含量大于  $10 \times 10^{-6}$  的元素分析误差小于 5%, 含量小于  $10 \times 10^{-6}$  的元素误差小于 10% (Ramsey et al., 1995; 刘颖等, 1996)。

碳、氧同位素的样品分析测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。美国 Thermo Fisher 公司的 MAT253 气体同位素质谱仪直接测定产生的 CO<sub>2</sub> 同位素组成。分析精度采用国家标样 GBW04405, 标准偏差为 0.1‰, 分析结果以  $\delta$ (‰) 单位表示, 采用 VPDB 标准。

## 4 岩石学及元素地球化学特征

### 4.1 岩石学特征

研究区出露的岩石类型主要有流纹质凝灰岩、泥晶灰岩和中细晶白云岩。流纹质凝灰岩呈浅绿色, 块状构造(图 3a、3b), 镜下观察可见凝灰质结构, 硅质颗粒(图 3g), 火山角砾为强蚀变流纹质凝灰岩, 棱角状, 大小一般 2~5 mm, 部分达 5~10 mm。晶屑为石英, 棱角状, 大小一般 0.1~0.2 mm, 部分达 0.2~0.3 mm, 星散状分布。玻屑弧面棱角状, 杂乱分布, 均脱玻化, 呈假像产出, 界限多模糊不清或消失。岩屑为强蚀变流纹质凝灰岩, 大小一般 1~2 mm, 部分 0.5~1 mm, 杂乱分布(图 3h)。泥晶灰岩呈灰白色、浅黄色, 中厚层状构造(图 3c、3d), 细晶-微晶

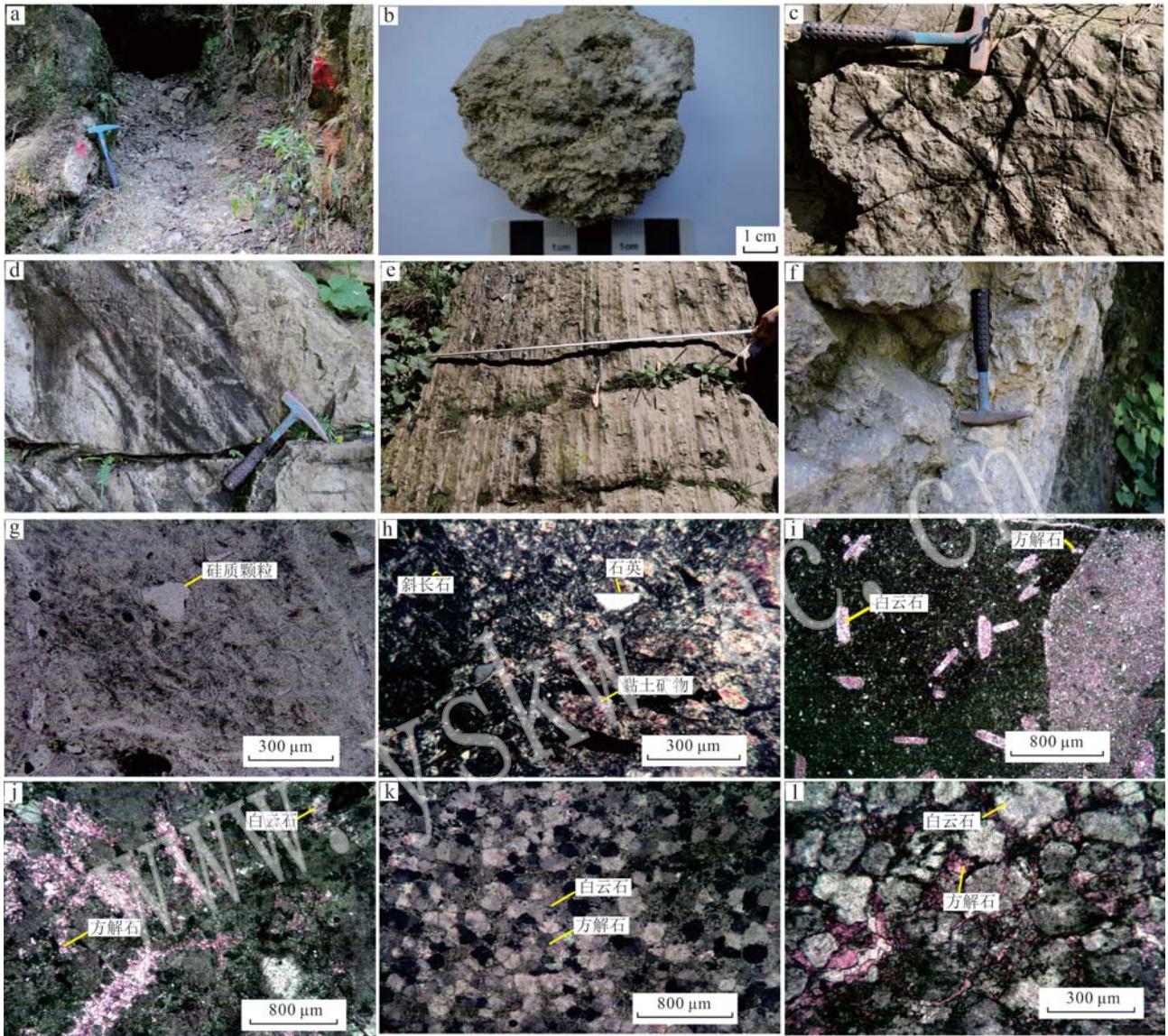


图3 四川盆地峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组沉积岩野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscopic photographs of sedimentary rocks of the Jialingjiang Formation-Leikoupo Formation in the Emeishan area of the Sichuan Basin

a, b—雷口坡组底部凝灰岩野外和手标本照片; c—嘉陵江组灰岩野外照片; d—雷口坡组灰岩野外照片; e—嘉陵江组白云岩野外照片; f—雷口坡组白云岩野外照片; g, h—雷口坡组底部凝灰岩的单偏光和正交偏光照片; i—嘉陵江组灰岩的正交偏光照片; j—雷口坡组灰岩的正交偏光照片; k—嘉陵江组白云岩的正交偏光照片; l—雷口坡组白云岩的正交偏光照片

a, b—field and hand specimen photo of tuff at the bottom of the Leikoupo Formation; c—field photo of limestone of Jialingjiang Formation; d—field photo of limestone of Leikoupo Formation; e—field photo of dolomite of Jialingjiang Formation; f—field photo of dolomite of Leikoupo Formation; g, h—plane-polarized light and cross-polarized light photograph of the tuff at the bottom of the Leikoupo Formation; i—cross-polarized light photograph of the limestone of the Jialingjiang Formation; j—cross-polarized light photograph of the limestone of the Leikoupo Formation; k—cross-polarized light photograph of the dolomite of the Jialingjiang Formation; l—cross-polarized light photograph of the dolomite of the Leikoupo Formation

结构,主要矿物成分为方解石以及少量白云石(图3i,3j),白云石为他形晶,可见白云石边缘被方解石交代的去白云石化现象。砂级内碎屑为粉泥晶灰岩、泥晶灰岩,次棱-次圆状,大小一般0.5~2.0 mm,

部分达0.05~0.5 mm,杂乱分布。泥晶基质为泥晶方解石,他形粒状,大小一般0.001~0.01 mm,填隙状分布,白云石化明显。结构组分为泥晶方解石75%~80%、白云石25%~30%。中细晶白云岩呈灰

白色、浅黄色,厚层状构造、局部为中-薄层状构造、可见膏溶孔(图3e、3f),微晶结构,岩石由细晶白云石、中晶白云石组成,硅质及陆源砂级碎屑少量(图3k、3l)。白云岩化程度较高,方解石含量较低,偶见方解石石膏假晶,表明白云岩形成于盐度较高的海水中,白云石的晶体粒径分布在泥微晶范围内,孔隙度较低。细晶白云石半自形粒状,大小一般0.05~0.25 mm,杂乱分布,为岩石主体部分,被方解石交代。中晶白云石半自形粒状,大小一般0.25~0.5 mm,杂乱分布,被方解石交代。硅质为石英,自形-半自形粒状,大小一般0.02~0.2 mm,星散状分布。陆源砂级碎屑为含粉砂黏土岩,次圆状,大小一般0.2~1.0 mm,部分1~2 mm,岩石中白云石和方解石分布不均一。

#### 4.2 数据有效性分析

碳酸盐岩主量、微量元素及碳、氧同位素富含了丰富的古环境信息,有助于定量、定性重建沉积时期的古环境(曹高社等,2019)。由于碳酸盐岩在成岩后可能遭受蚀变作用,从而无法准确的反映沉积环境的信息,因此在利用碳酸盐岩恢复古环境前,对样品有效性进行评价是必要的。

目前,样品代表性评价主要有3种方法:①若 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 存在相关性,说明 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 发生了协同变化,碳酸盐岩遭受了强烈的成岩蚀变作用,样品有效性差,反之,则样品具有较好的代表性(郭晓强等,2020;杨庆坤等,2022);②碳酸盐岩成岩期后,受大气降水及热液流体影响, $\delta^{18}\text{O}$ 较 $\delta^{13}\text{C}$ 更易与外界发生交换,从而使得 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值降低,黄思静等(2012)认为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值小于-10‰时样品已发生了后期强烈成岩蚀变,不能够代表沉积时的环境特征, $-10\% < \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} < -5\%$ 时样品可以代表原始的沉积环境特征;③海相碳酸盐岩蚀变,其实质是Mn的获取和Sr的丢失变化的过程(黄思静等,2012), $\omega(\text{Mn})/\omega(\text{Sr})$ 值<2,表明样品对沉积环境具有较好的代表性; $\omega(\text{Mn})/\omega(\text{Sr})$ 值介于2到10,则说明样品虽经历蚀变,但依然保留了沉积时期的古环境信息,具有恢复古环境的指示意义(郝松立等,2011;陈强等,2012)。

从图4、表2、表3可以看出 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 分布离散,未见明显相关性( $R_2=0.344$ ),说明样品受到成岩期后蚀变作用较小;其次,样品的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 数值介于-10‰~ -5‰之间,表明样品依然具有代表性;所有样品 $\omega(\text{Mn})/\omega(\text{Sr})$ 值均介于0.000 03~6.19之

间,较好地保留了沉积时期的古环境信息。以上结果表明样品具有重建沉积时期古环境有效性。

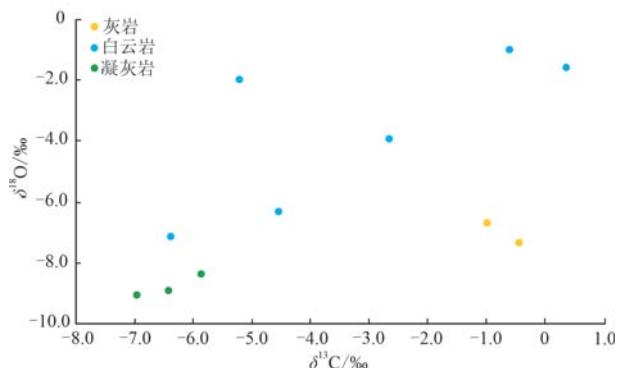


图4 峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组界线附近地层 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 散点图

Fig. 4 Scatterplot of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of strata near the Jialingjiang Formation-Leikoupo Formation boundary in the Emeishan area

#### 4.3 主量元素特征

由表2可见,峨眉山地区早-中三叠世界线附近碳酸盐岩CaO含量介于22.65%~43.68%,均值33.14%;MgO含量在2.61%~19.68%之间,均值9.88%;LOI含量介于29.19%~44.40%区间,均值36.63%。碳酸盐岩SiO<sub>2</sub>含量在3.55%~29.48%,平均14.38%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量在0.68%~6.36%之间,平均值2.43%;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量0.96%~3.28%,平均1.64%。凝灰岩CaO含量介于1.02%~1.71%之间,均值1.30%;MgO含量在6.04%~6.23%之间,均值6.11%;LOI含量位于6.91%~7.65%区间,均值7.20%。凝灰岩SiO<sub>2</sub>含量在61.46%~64.01%,平均值62.97%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量在13.38%~14.05%,平均值13.65%;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量0.52%~0.69%,平均0.60%。

#### 4.4 稀土、微量元素特征

研究区剖面样品ΣREE为 $24.91 \times 10^{-6}$ ~ $150.03 \times 10^{-6}$ ,平均 $73.18 \times 10^{-6}$ ;LREE为 $20.50 \times 10^{-6}$ ~ $128.83 \times 10^{-6}$ ,平均 $63.57 \times 10^{-6}$ ;HREE为 $3.06 \times 10^{-6}$ ~ $21.20 \times 10^{-6}$ ,平均 $9.61 \times 10^{-6}$ ;轻稀土元素与重稀土元素分馏较为明显,LREE/HREE为 $4.65 \times 10^{-6}$ ~ $10.65 \times 10^{-6}$ ,平均 $7.08 \times 10^{-6}$ ;( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub>为 $4.62 \times 10^{-6}$ ~ $14.63 \times 10^{-6}$ ,平均 $8.59 \times 10^{-6}$ ;δEu值为0.18~0.81,平均0.57;δCe值为0.93~1.14,平均1.04。喜湿元素V含量 $8.2 \times 10^{-6}$ ~ $62.8 \times 10^{-6}$ ,平均 $25.1 \times 10^{-6}$ ;Cr含量 $2.25 \times 10^{-6}$ ~ $59.8 \times 10^{-6}$ ,平均 $17.14 \times 10^{-6}$ ;

表2 峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组界线附近地层样品主量( $w_B/\%$ )、微量和稀土( $w_B/10^{-6}$ )元素含量  
Table 2 Main ( $w_B/\%$ ) and trace ( $w_B/10^{-6}$ ) element contents of stratigraphic samples near the Jialingjiang Formation-Leikoupo Formation boundary in the Emeishan area

地层 样品编号	嘉陵江组( $T_1j$ )					雷口坡组( $T_2l$ )					
	B01 岩性	B02 薄层灰岩	B03 中层灰岩	B04 薄层白云岩	B05 薄层白云岩	B06 厚层白云岩	B07 凝灰岩	B08 凝灰岩	B09 凝灰岩	B10 中层白云岩	B11 薄层白云岩
SiO <sub>2</sub>	21.42	10.37	10.20	6.01	17.93	64.01	61.46	63.45	29.48	16.05	3.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.36	1.78	2.83	1.60	0.88	13.38	14.05	13.52	0.68	4.39	0.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.28	1.37	1.67	1.12	0.96	0.69	0.52	0.60	1.12	2.35	1.31
MgO	2.61	3.40	12.85	14.43	6.13	6.23	6.04	6.05	3.85	16.07	19.68
CaO	33.30	43.68	31.37	33.61	37.37	1.19	1.71	1.02	33.96	22.65	29.23
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.05	0.08	0.08	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.09	0.08
K <sub>2</sub> O	2.73	1.00	1.53	0.86	0.45	6.23	6.86	6.55	0.29	2.21	0.42
TiO <sub>2</sub>	0.63	0.24	0.23	0.14	0.08	0.22	0.23	0.24	0.06	0.34	0.07
MnO	0.06	0.06	0.03	0.04	0.04	0.002	0.003	0.002	0.05	0.05	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.08	0.06	0.05	0.05	0.13	0.17	0.15	0.05	0.1	0.04
LOI	29.19	37.55	38.69	41.91	35.77	7.03	7.65	6.91	29.97	35.58	44.40
Total	99.75	99.58	99.54	99.84	99.70	99.11	98.72	98.51	99.54	99.88	99.84
La	18.9	16.3	7.05	4.67	4.37	24.5	21.9	32.2	6.43	19.3	6.05
Ce	38.7	37.4	14.5	10.9	9.37	46.3	41.4	57.7	12.2	38.7	14.4
Pr	4.48	4.46	1.76	1.33	1.07	5.45	4.79	7.14	1.24	4.42	1.58
Nd	16.9	17.4	6.97	5.53	4.41	19.8	17.5	25.5	4.80	16.6	6.40
Sm	3.39	3.54	1.43	1.24	1.04	4.88	4.57	6.03	1.13	3.24	1.46
Eu	0.80	0.83	0.34	0.30	0.23	0.29	0.28	0.33	0.20	0.67	0.34
Gd	2.89	2.91	1.23	1.05	1.14	4.60	4.39	5.34	1.24	2.61	1.33
Tb	0.44	0.44	0.20	0.15	0.18	0.92	0.91	1.03	0.22	0.39	0.21
Dy	2.49	2.33	1.10	0.82	1.17	5.40	5.49	5.95	1.45	2.09	1.16
Ho	0.49	0.42	0.22	0.16	0.26	1.11	1.12	1.22	0.34	0.40	0.22
Er	1.35	1.05	0.60	0.40	0.77	3.06	3.03	3.32	1.01	1.08	0.56
Tm	0.19	0.14	0.09	0.06	0.11	0.50	0.49	0.53	0.16	0.15	0.08
Yb	1.23	0.87	0.53	0.36	0.68	3.01	3.05	3.32	1.00	0.95	0.46
Lu	0.18	0.12	0.08	0.05	0.10	0.45	0.44	0.49	0.15	0.14	0.07
Y	14.5	12.3	6.54	4.74	9.00	31.2	31.7	32.9	13.0	11.2	6.47
Mn	516	510	244	299	374	0.0015	0.0019	0.0014	406	442	769
Rb	55.9	13.9	24.2	13.8	6.97	166	183	172	5.82	56.4	14.6
V	62.8	18.4	47.0	23.5	12.4	8.19	8.78	10.4	13.0	49.1	22.1
Cr	59.8	23.3	26.1	13.6	8.48	2.86	2.60	2.25	8.57	33.2	7.91
Ni	23.9	7.55	14.5	7.99	3.99	1.44	1.40	2.08	2.00	15.6	8.82
Ba	129	129	46.0	30.4	14.0	75.6	68.5	62.4	24.2	68.2	18.1
Cu	12.9	6.25	21.1	9.65	2.86	10.3	13.9	93.6	3.48	25.9	20.8
Zn	36.9	9.30	15.6	43.8	6.53	22.4	22.9	22.4	4.80	16.9	9.76
Sr	268	154	155	150	133	46.6	25.3	31.4	96.1	105	124
As	2.54	2.46	4.23	4.13	4.51	1.72	1.86	1.78	2.87	8.30	3.69
Co	9.47	4.60	5.83	3.78	1.49	0.59	0.86	1.50	1.05	7.20	5.12
Th	4.85	2.36	2.28	1.22	0.76	21.6	25.7	27.5	0.91	4.95	0.95
Ta	0.77	0.29	0.32	0.2	0.13	1.02	1.24	1.38	0.11	0.45	0.11
U	1.76	0.62	2.56	1.99	1.48	7.66	9.71	9.71	1.05	1.64	0.85
Mn/Sr	1.93	3.31	1.58	1.99	2.80	0.00003	0.00008	0.00005	4.23	4.19	6.19
ΣREE	92.43	88.26	36.12	27.02	24.91	120.25	109.35	150.03	31.56	90.78	34.30
LREE	83.16	79.97	32.05	23.97	20.50	101.20	90.43	128.83	25.99	82.99	30.22
HREE	9.27	8.29	4.06	3.06	4.41	19.05	18.92	21.20	5.58	7.80	4.08
LREE/HREE	8.97	9.65	7.89	7.84	4.65	5.31	4.78	6.08	4.66	10.65	7.41
(La/Yb) <sub>N</sub>	10.99	13.50	9.47	9.26	4.63	5.84	5.15	6.95	4.62	14.63	9.47
δEu	0.78	0.79	0.78	0.81	0.66	0.19	0.19	0.18	0.50	0.71	0.75
δCe	1.03	1.07	1.01	1.07	1.06	0.98	0.99	0.93	1.06	1.03	1.14

表3 峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组界线附近地层碳、氧同位素及相关地球化学表征参数

Table 3 Carbon and oxygen isotopes and related geochemical characterization parameters of the stratigraphy near the Jialingjiang Formation-Leikoupo Formation boundary in the Emeishan area

样品号	岩性	PDB/‰		古海水温度 t/℃	古海水盐度 Z	古海水盐度 100×MgO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		古气候		古海水深度 Sr/Ba
		δ <sup>13</sup> C	δ <sup>18</sup> O			MgO/CaO	Rb/Sr			
<b>嘉陵江组(T<sub>1</sub>J)</b>										
B01	薄层灰岩	-0.44	-7.36	34.94	124.38	41.04	0.078	0.21	2.08	
B02	中层灰岩	-0.99	-6.70	31.57	123.58	191.01	0.078	0.09	1.19	
B03	薄层白云岩	-2.66	-3.96	18.77	121.52	454.06	0.410	0.16	3.36	
B04	薄层白云岩	0.36	-1.58	9.24	128.89	901.88	0.429	0.09	4.95	
B05	厚层白云岩	-4.54	-6.31	29.63	116.50	696.59	0.164	0.05	9.55	
<b>雷口坡组(T<sub>2</sub>l)</b>										
B06	凝灰岩	-5.87	-8.39	-	-	-	-	-	-	
B07	凝灰岩	-6.42	-8.93	-	-	-	-	-	-	
B08	凝灰岩	-6.95	-9.06	-	-	-	-	-	-	
B09	中层白云岩	-6.38	-7.16	33.91	112.31	566.18	0.113	0.06	3.98	
B10	薄层白云岩	-5.20	-1.99	10.78	117.30	366.06	0.709	0.53	1.55	
B11	厚层白云岩	-0.59	-0.99	7.11	127.24	2028.87	0.673	0.12	6.86	

Ni 含量  $1.40 \times 10^{-6} \sim 23.9 \times 10^{-6}$ , 平均  $8.12 \times 10^{-6}$ ; Cu 含量  $2.86 \times 10^{-6} \sim 93.6 \times 10^{-6}$ , 平均  $20.1 \times 10^{-6}$ ; Zn 含量  $4.80 \times 10^{-6} \sim 43.8 \times 10^{-6}$ , 平均  $19.21 \times 10^{-6}$ ; Ba 含量  $14.0 \times 10^{-6} \sim 129.0 \times 10^{-6}$ , 平均  $60.5 \times 10^{-6}$ 。喜干元素 Sr 含量  $25.0 \times 10^{-6} \sim 268.0 \times 10^{-6}$ , 平均  $117.0 \times 10^{-6}$ ; U 含量  $0.62 \times 10^{-6} \sim 9.71 \times 10^{-6}$ , 平均  $3.55 \times 10^{-6}$ ; As 含量  $1.72 \times 10^{-6} \sim 8.30 \times 10^{-6}$ , 平均  $3.46 \times 10^{-6}$ ; Ta 含量  $0.11 \times 10^{-6} \sim 1.38 \times 10^{-6}$ , 平均  $0.55 \times 10^{-6}$ 。

#### 4.5 碳、氧同位素特征

表3 中, 研究区剖面 δ<sup>13</sup>C 值的变化范围是 -6.95‰~0.36‰, 平均值为 -3.61‰。下三叠统嘉陵江组 δ<sup>13</sup>C 值变化范围为 -4.54‰~0.36‰, 平均值为 -1.65‰; 中三叠统雷口坡组 δ<sup>13</sup>C 变化范围为 -6.95‰~-0.59‰, 平均值为 -5.24‰。碳同位素在剖面曲线上整体呈现波动性变化。

δ<sup>18</sup>O 值变化范围为 -9.06‰~ -0.99‰, 平均值为 -5.68‰。氧同位素在剖面曲线上整体呈现波动性变化, 下三叠统嘉陵江组 δ<sup>18</sup>O 值变化范围为 -7.36‰~-1.58‰, 平均值为 -5.18‰; 中三叠统雷口坡组 δ<sup>18</sup>O 变化范围为 -9.06‰~ -0.99‰, 平均值为 -6.09‰(图5)。

## 5 古环境分析

### 5.1 古海水盐度

古盐度可以很好地记录沉积岩在古环境中对水介质盐度的反映情况。δ<sup>13</sup>C 和 δ<sup>18</sup>O 与盐度的变化密

切相关, 前人提出关于计算古盐度的公式:  $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$  (张秀莲, 1985; 王鹏万等, 2016), 公式中的 δ<sup>13</sup>C 和 δ<sup>18</sup>O 均为 PDB 标准值。用 Z 值可以判断侏罗纪以及时代更晚的碳酸盐岩水体介质环境;  $Z > 120$  时, 为海相碳酸盐岩;  $Z < 120$  时, 为淡水碳酸盐岩。而在比侏罗纪更早的年代中, δ<sup>18</sup>O 的值会发生显著变化, 故将公式中的 δ<sup>18</sup>O 值替换为上文提到的校正值 δ<sup>18</sup>O 进行校正(郭晓强等, 2020)。根据 Mg 具有亲海的特征, Al 具有亲陆的特征, 本次研究针对三叠系碳酸盐岩, 采用前人所建立的公式  $M = 100 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (史冀忠等, 2021; 杨虎城等, 2022)。一般认为,  $M < 1$  为淡水沉积环境,  $1 < M < 10$  为海陆过渡环境,  $10 < M < 500$  为海相沉积环境,  $M > 500$  则为陆表海或泻湖沉积环境(杨振宇等, 2009; 赵晓辰等, 2017; 张健等, 2020)。

嘉陵江组 Z 值介于 116.50~128.89 之间, 平均 122.98; 雷口坡组剖 Z 值介于 112.31~127.24 之间, 平均 118.95。嘉陵江组 M 值范围 41.04~901.88, 平均 456.92; 雷口坡组 M 值范围 366.06~2028.87, 平均 987.03。嘉陵江组 Z 的平均值大于 120, M 的平均值大于 10 且小于 500; 雷口坡组 Z 的平均值小于 120, M 的平均值大于 500。中三叠世末, 四川盆地受构造运动的影响, 导致雷口坡组受到大气淡水淋滤溶蚀作用(He et al., 2019), Z 值和 M 值的耦合关系较好, M 值的升高和 Z 值的减小可能受到干热气候条件的影响且可能与海退有关, 说明在早-中三叠世四川盆地峨眉山地区整体环境较为动荡, 可能

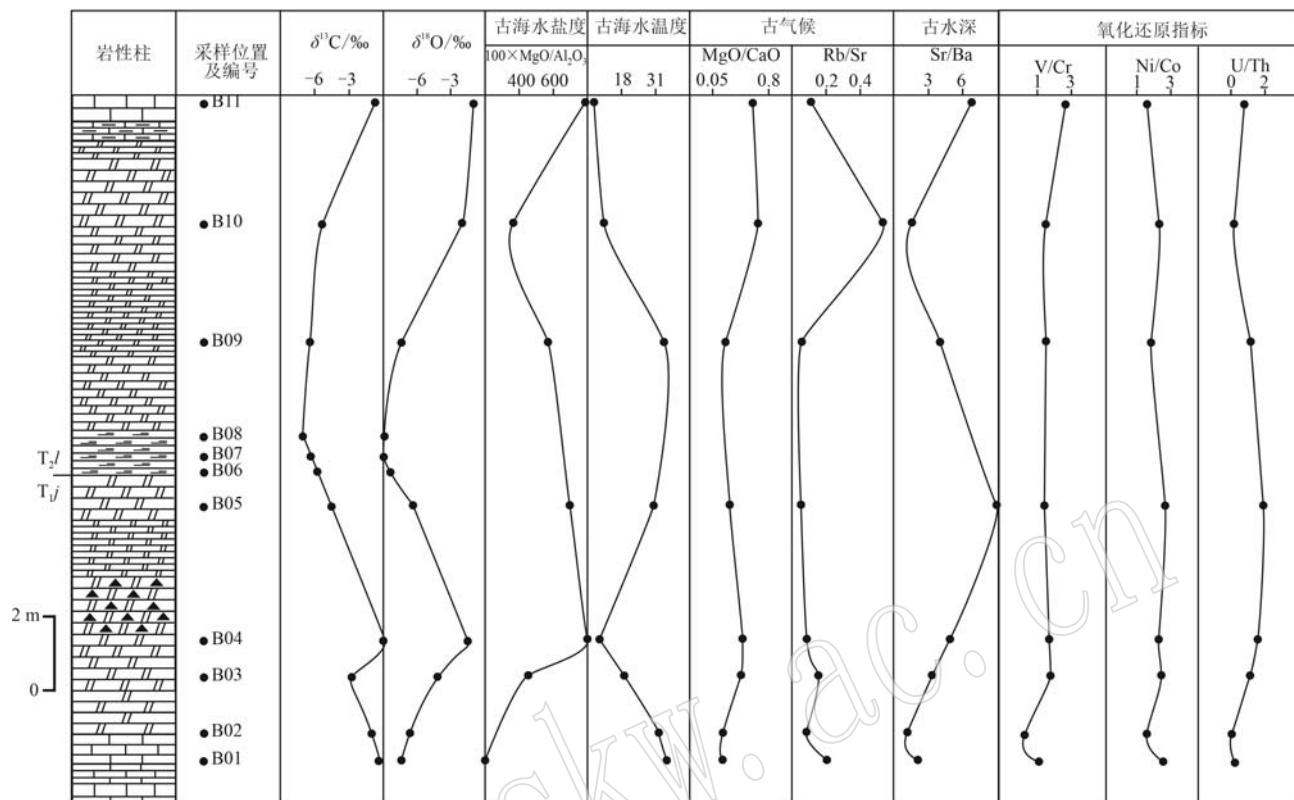


图5 峨眉山地区嘉陵江组-雷口坡组界线附近地层地球化学表征参数

Fig. 5 Geochemical characterization parameters of the stratigraphy near the Jialingjiang Formation-Leikoupu Formation boundary in the Emeishan area

存在由海相沉积环境转变为陆表海沉积环境。

## 5.2 古海水温度

碳酸盐岩碳、氧同位素组成同样受沉积介质温度影响,当沉积介质盐度保持不变时,其温度越高 $\delta^{18}\text{O}$ 值越低。因此,需通过第四纪海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值(-1.2‰)对灰岩和白云岩样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行“年代效应”校正。剖面灰岩和白云岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为-4.51‰,  $\Delta\delta^{18}\text{O} = -3.31\text{‰}$ ;用 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 进行校正,得到校正值 $\delta^{18}\text{O}$ 。按照 $t(\text{°C}) = 16.9 - 4.2 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}} + 0.22) + 0.13 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}} + 0.22)^2$ 来计算古海水温度(陈强等, 2012; 杨雪琪等, 2017; 李乾等, 2018)。

在早-中三叠世附近,嘉陵江组海水温度9.24~34.94°C,平均24.83°C;雷口坡组海水温度7.11~33.91°C,平均17.26°C。早-中三叠世整体水温较高,嘉陵江组平均水温高于雷口坡组水温,雷口坡组底部水温有较大波动,其中雷口坡组底部白云岩处古海水温度由9.24°C急剧升高至29.63°C,推测与形成凝灰岩的火山活动有关。

总的来说,早-中三叠世附近古海水温度经历了降低-升高-降低的变化趋势,海水温度的多次变化,反映出环境动荡。

## 5.3 古气候

地质历史时期沉积环境极易受到古气候演化的影响,从而导致沉积物内元素的含量发生变化,因而可以利用沉积物内相关元素的含量变化来恢复古气候演化。前人总结出反映古气候变化的指标,分别为MgO/CaO值和Rb/Sr值(田洋等, 2014; 周长勇等, 2014; 孟昊等, 2016; 王琳霖等, 2018; 郭晓强等, 2020; 杨虎城等, 2022)。

溶解在海水中Ca的量远远小于Mg的量,仅有少量的Mg在海水中产生碳酸盐沉淀,海水中的Ca常常析出形成碳酸盐沉积物。海水中碳酸钙的溶解度随着温度和pH值的升高而降低,因此,MgO和CaO的比值可以反映碳酸盐岩沉积时的古气候条件,MgO/CaO低值表示潮湿气候,高值表示干热气候,其中样品MgO/CaO值小于0.30,指示潮湿气候(杨振宇等, 2009; 孟昊等, 2016; 王琳霖等,

2018)。研究区早-中三叠世碳酸盐岩样品的  $MgO/CaO$  值在 0.078~0.709, 均值为 0.332。嘉陵江组均值为 0.232, 雷口坡组均值为 0.499, 总体呈先降低后升高的趋势, 指示研究区早-中三叠世气候经历了相对潮湿-相对干热-相对潮湿的变化趋势。

岩石中 Rb 元素含量较低, Sr 元素的含量受它置换含钙矿物中  $Ca^{2+}$  的程度的制约(刘英俊等, 1984), 在干热的气候条件下  $CaO$  的含量增加, Sr 的浓度也增加, Sr 元素置换  $Ca^{2+}$  的程度增大, 形成的岩石中 Sr 含量也随之增加。因此, 利用微量元素 Rb/Sr 值也可判断古气候。Rb/Sr 为高值时指示古气候相对潮湿, 反之则相对干燥(王琳霖等, 2018; 郭晓强等, 2020)。研究区早-中三叠世世界线附近嘉陵江组样品 Rb/Sr 值在 0.05~0.21 区间, 平均 0.12, 气候相对干燥; 雷口坡组样品 Rb/Sr 值在 0.06~0.53 区间, 平均 0.23, 气候相对潮湿。从剖面上来看, 靠近凝灰岩处的样品 Rb/Sr 值极低, 说明在界线处附近总体相对干旱。垂向上, 总体上先降低后升高再降低, 指示研究区早-中三叠世气候由相对潮湿变为相对干热再变为相对潮湿的过程。

#### 5.4 古海水深度

海平面的升降意味着海水深度的变化。海相碳酸盐岩的碳、氧同位素可以作为海平面升降的评价指标, 且与海平面升降呈正相关。针对古近纪之前的地层, 因碳同位素较氧同位素更加稳定, 所以更适合用来作为评价指标(赵宗举, 2015)。

当海平面上升时, 海洋生产力较大, 较高的生物量使得海水中有机碳的氧化减少、相对埋藏速率增大、海水中 $^{12}C$  相对减少, 因此碳酸盐岩的  $\delta^{13}C$  值正偏(Wang et al., 2019); 当海平面下降时, 造成大量生物死亡, 沉积岩中的 $^{13}C$  减小, 相对应的  $\delta^{13}C$  值也降低。所以,  $\delta^{13}C$  值可以很好地反映海平面变化情况(郭晓强等, 2020)。除此之外, 火山作用过程中, 会释放大量富含 $^{12}C$  的  $CO_2$  气体, 将极大冲击海洋的碳循环, 造成  $\delta^{13}C$  负偏移(施泽进等, 2019)。垂向上,  $\delta^{13}C$  值总体表现为降低-升高-降低-升高, 说明研究区沉积环境较为动荡, 可识别 2 次升降旋回, 海水振荡式上升与下降。

$Sr/Ba$  值常用来判断古海水深度,  $Sr/Ba$  值的原理是化学性质相近的 Sr 与 Ba 在迁移能力和化合物溶解度上存在的明显差异(赵晓辰等, 2017), Sr 常常在深海中富集, 而 Ba 则主要富集于近岸水体。 $Sr/Ba$  值常常用来判断沉积环境及沉积期海水相对

深度和离岸距离。当  $Sr/Ba > 1$  时为海相,  $0.6 < Sr/Ba < 1$  为半咸水相,  $Sr/Ba < 0.6$  为微咸水相(Miliman, 1978; 郭晓强等, 2020)。研究区样品  $Sr/Ba$  值的范围为 1.19~9.55, 平均 4.19, 均大于 1, 整体为海相沉积。嘉陵江组平均值为 4.23, 雷口坡组平均值为 4.13。垂向上, 从下至上  $Sr/Ba$  值先升高, 嘉陵江组晚期达到最大值, 说明在嘉陵江组晚期古海水最深; 然后  $Sr/Ba$  值急剧下降, 在雷口坡组早期的值最低, 可能受火山活动影响, 温度升高, 气候干燥, 导致水体变浅; 最后  $Sr/Ba$  值在一个相对较低值的范围内波动, 指示古水深较浅, 整体变化趋势与古盐度相似。

#### 5.5 氧化还原条件

重建古海洋氧化还原条件对生命演化和沉积物形成有着重要意义, 是古环境研究中的重点。通过对某些微量元素的含量及其比值的研究, 可得出当时水介质的氧化-还原环境。针对研究区嘉陵江组-雷口坡组碳酸盐岩的特征, 选择  $V/Cr$ 、 $Ni/Co$ 、 $U/Th$  值作为碳酸盐岩古氧相判别的指标, 用来判断氧化-还原条件(Hatch et al., 1992; Jones and Manning, 1994; Baioumy and Lehmann, 2017)。

Jones 等(1994)提出:  $Ni/Co < 5$  指示氧化环境,  $5 \leq Ni/Co < 7$  代表次富氧环境,  $Ni/Co \geq 7$  指示还原环境。从表 1、图 5 中可知, 研究区碳酸盐岩  $Ni/Co$  值为 1.64~2.69, 平均值为 2.16, 指示研究区碳酸盐岩沉积时为氧化环境。Baioumy 等(2017)提出  $U/Th$ 、 $V/Cr$  值可以反映古氧化还原条件;  $U/Th < 0.75$  反映氧化环境,  $0.75 < U/Th < 1.25$  反映贫氧环境,  $U/Th > 1.25$  反映还原环境, 研究区碳酸盐岩  $U/Th$  值为 0.26~1.94, 平均值为 0.96, 指示研究区碳酸盐岩沉积的氧化-还原环境呈现弱分层贫氧-富氧间有贫氧的沉积环境。 $V/Cr < 2.00$  反映氧化环境,  $2.00 < V/Cr < 4.25$  反映贫氧环境,  $V/Cr > 4.25$  反映强还原条件, 研究区碳酸盐岩  $V/Cr$  值为 0.79~2.79, 平均值为 1.58, 指示研究区碳酸盐岩沉积时为富氧的海相沉积环境。综合以上地球化学特征可以得出, 研究区整体处于氧化的沉积环境, 间有贫氧的沉积环境出现。

### 6 古环境探讨

古环境为一有机整体, 古气候、古盐度、古水温、古水深及古海平面变化等古环境要素之间也存在一

定的耦合关系,当其中某一要素发生变化时,其他要素也随之发生改变(Fairbridge, 1981; 杨子庚, 2004; 严兆彬等, 2005; 王鹏万等, 2016)。研究区古环境各要素之间具有较明显的相关性,显示出联动性和系统性。剖面上,  $\Sigma(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{LOI})$  在早-中三叠世界线附近的嘉陵江组地层中先上升后下降,下降趋势持续至雷口坡组底部凝灰岩后又呈上升趋势,显示出研究区早-中三叠世界线附近沉积环境动荡。 $\Sigma(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  在嘉陵江组地层中的值逐渐降低,在雷口坡组底部升到相对高值并上下波动,最后有小幅度下降。 $\Sigma(\text{V}+\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Cu}+\text{Zn}+\text{Ba})$  值位于  $48.22 \times 10^{-6} \sim 325.29 \times 10^{-6}$  之间, $\Sigma(\text{Sr}+\text{U}+\text{As}+\text{Ta})$  值位于  $100.13 \times 10^{-6} \sim 272.94 \times 10^{-6}$  之间,以上主量、微量元素变化较大,暗示该区早-中三叠世界线附近环境较为动荡。四川盆地在早三叠世海侵开始加速,海水分别从东向西和从南向北侵入(林雄, 2011),嘉陵江组有两次主要的沉积旋回,早三叠世嘉陵江期,地壳活动强烈,四川盆地处于西高东低向东高西低转换阶段,在总体为海退的环境下,盆地东部水下降起逐渐隆升,海水变浅。岩性主要由海侵-海退序列沉积的石灰岩、白云岩等组成(谭志远等, 2021; 张雄等, 2022)。中三叠世以来,大规模海退趋于稳定,代之以频繁出现的较小规模的海水进退为主。中三叠世末,四川盆地受印支运动影响发生了广泛的构造抬升,导致雷口坡组暴露地表并发生大气淡水淋滤溶蚀作用,之后海水退出,四川盆地逐渐过渡到陆相沉积演化阶段(孟昱璋, 2017; 阮蕴博等, 2022; 苏成鹏等, 2022)。四川盆地中三叠统雷口坡组主要为局限蒸发台地相碳酸盐岩沉积,华南板块西北的四川盆地中下三叠统属于典型的海相碳酸盐岩台地环境(郑绵平等, 2012; 龚大兴等, 2015)。四川盆地在中下三叠统发生过海侵、海退事件,继嘉一期、嘉三期发生大规模海侵后,在雷三期再次发生大规模海侵,其余时期主要以海退为主(冯增昭等, 1997; 林良彪等, 2007; 黄东等, 2011)。本次研究结果反映研究区早-中三叠世界线附近经历了复杂的沉积环境,海平面可识别出2次升降旋回。嘉陵江组晚期气候相对干热,古海水温度升高,古盐度升高。雷口坡组底部海平面降低,  $\delta^{13}\text{C}$  值发生显著负漂,可能与火山活动有关。火山作用过程中产生的低值碳源的加入,环境恶化导致的生物产率的急速下降,使得  $\delta^{13}\text{C}$  值显著降低(彭冰霞等, 2006)。雷口坡组顶部海平面上升,古温度

下降,造成海洋可容空间增加,生产力增大,有机碳埋藏速度加快,从而导致重碳同位素富集,  $\delta^{13}\text{C}$  值正漂。频繁的小规模海平面升降导致了不稳定的、动荡的水体,沉积环境有利于该时期灰岩与白云岩的发育。

## 7 结论

(1) 研究区嘉陵江组-雷口坡组11件有效样品的  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围是  $-6.95\text{\textperthousand} \sim 0.36\text{\textperthousand}$ , 平均值为  $-3.61\text{\textperthousand}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为  $-9.06\text{\textperthousand} \sim -0.99\text{\textperthousand}$ , 平均值为  $-5.68\text{\textperthousand}$ 。样品的  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  值不具相关性,较好地保留了沉积环境信息,可作为古环境分析的可靠对象。

(2) 嘉陵江组平均古水温  $24.83^\circ\text{C}$ ,  $\text{MgO}/\text{CaO}$  平均值 0.232,  $Z$  平均值 122.98,  $M$  平均值 456.92; 雷口坡组平均古水温  $17.26^\circ\text{C}$ ,  $\text{MgO}/\text{CaO}$  平均值 0.499,  $Z$  平均值 118.95,  $M$  平均值 987.03; 共同反映研究区早-中三叠世为相对潮湿-相对干热-相对潮湿气候下的海相沉积环境。

(3)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  和  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值反映嘉陵江组平均水深更大,嘉陵江组-雷口坡组海水可识别出有2次升降旋回;结合  $\text{V}/\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}/\text{Co}$ 、 $\text{U}/\text{Th}$  值等氧化还原指标以及野外露头观察,判断研究区早-中三叠世整体处于氧化的沉积环境,间有贫氧的沉积环境出现。

## References

- Alroy J. 2010. The shifting balance of diversity among major marine animal groups [J]. *Science*, 329(5996): 1191~1194.
- Archilha N L, Missagia R M, Hollis C, et al. 2016. Permeability and acoustic velocity controlling factors determined from X-ray tomography images of carbonate rocks [J]. *Aapg Bulletin*, 100(8): 1289~1309.
- Baioumy H and Lehmann B. 2017. Anomalous enrichment of redox-sensitive trace elements in the marine black shales from the Duwi Formation, Egypt: Evidence for the late Cretaceous Tethys anoxia [J]. *Journal of African Earth Science*, 133: 7~14.
- Bambach R K, Knoll A H and Sepkoski Jr J J. 2002. Anatomical and ecological constraints on phanerozoic animal diversity in the marine realm [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(10): 6854~6859.

- Baud A, Atudorei V and Sharp Z. 1996. Late Permian and Early Triassic evolution of the northern Indian margin: Carbon isotope and sequence stratigraphy [J]. *Geodinamica Acta*, 9(2~3): 57~77.
- Cao Gaoshe, Yu Shuangjie, Sun Fengyu, et al. 2019. Carbon and oxygen isotopic composition and palaeoenvironment analysis of lacustrine carbonate rocks in the upper member of Early Triassic Sunjiagou Formation, Yiyang area, western Henan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(5): 1 137~1 153 (in Chinese with English abstract).
- Chafetz H S. 2013. Porosity in bacterially induced carbonates: Focus on micropores [J]. *Aapg Bulletin*, 97(11): 2 103~2 111.
- Chen J F and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 284(1~2): 101~133.
- Chen Jinshi, Shao Maorong, Huo Weiguo, et al. 1984. Carbon isotope of carbonate strata at Permian-Triassic boundary in Changxing, Zhejiang [J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 19: 88~93 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qiang, Zhang Huiyuan, Li Wenhua, et al. 2012. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of the Ordovician carbonate rocks in Ordos and their implication [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 14(1): 117~124 (in Chinese with English abstract).
- Chilingar G V, Mannon R W and Rieke H H I. 1972. Oil and gas production from carbonate rocks [J]. American Elsevier Publishing Company Inc New York, 96(5): 86~91.
- Deng Bin. 2013. Meso-Cenozoic Architecture of Basin-mountain System in the Sichuan Basin and its Gas Distribution [D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiaoliang, Lin Liangbiao and Yu Yu, 2020. Geochemical characteristics and palaeoenvironmental significance of Qixia Formation in Jiang area, Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 47(2): 198~209 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yulin, Lang Xinghai, Cui Zhiwei, et al. 2018. A study of the claystone around the Permian-Trassic boundary along the Cilinbao section at Majiaoba, Jiangyou, Sichuan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(3): 417~433 (in Chinese with English abstract).
- Desai D R and Rierson S L. 2007. Confronting the genericism conundrum [J]. Social Science Electronic Publishing.
- Dong Qingmin, Hu Zhonggui, Chen Shiyue, et al. 2021. Isotope geochemical responses and their geological significance of Changxing-Feixianguan Formation carbonates, northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 42(6): 1 307~1 320 (in Chinese with English abstract).
- Enkelmann E, Weislogel A, Ratschbacher L, et al. 2007. How was the Triassic Songpan-Ganzi basin filled? A provenance study [J]. *Tectonics*, 26(4): TC4007.
- Fairbridge R W. 1981. Holocene Climate Changes [M]. Natrue, 292: 670~671.
- Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Wu Shenghe, et al. 1997. Lithofacies palaeogeography of the early and Middle Triassic of South China [J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, (2): 212~220 (in Chinese with English abstract).
- Gong Daxing, Zhou Jiayun, Wu Chihua, et al. 2015. Lithofacies paleogeography and salt-forming model of Lower-Middle Triassic in the Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2 075~2 086 (in Chinese with English abstract).
- Grasby S E and Beauchamp B. 2008. Intrabasin variability of the carbon-isotope record across the Permian-Triassic transition, Sverdrup Basin, Arctic Canada [J]. *Chemical Geology*, 253(3~4): 141~150.
- Guo Xiaoqiang, Li Haobin, Wei Rongzhu, et al. 2020. Characteristics of elemental geochemistry of the Cambrian carbonate rocks and their palaeoenvironmental implication in western margin of Qinshui Basin, Shanxi Province [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 42(10): 1 508~1 522 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. 1996. Sichuan Basin Formation and Development [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Hao Songli, Li Wenhua, Liu Jianping, et al. 2011. Characteristics of carbon and oxygen isotopes geochemistry of organic reef facies carbonates of Ordovician in Southern margin of Ordos [J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(2): 52~56 (in Chinese with English abstract).
- Hatch J R, Leventhal J S and Meyers P A. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A [J]. *Chemical Geology*, 99(1/3): 65~82.
- He D F, Ma Y S, Li Y Q, et al. 2019. New directions in an established gas play: Promising dolomite reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation of the Sichuan Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 103(1): 1~29.
- Heydari E, Arzani N and Hassanzadeh J. 2008. Mantle plume: The invisible serial killer-application to the Permian-Triassic boundary mass extinction [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 264(1~2): 147~162.
- Heydari E, Hassanzadeh J, Wade W J, et al. 2003. Permian-Triassic

- boundary interval in the Abadeh section of Iran with implications for mass extinction: Part 1 [J]. *Sedimentology Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 193(3~4): 405~423.
- Holser W T, Schonlaub H P and Attrep A J. 1989. A unique geochemical record at the Permian/Triassic boundary [J]. *Nature*, 337: 39~44.
- Horacek M, Povoden E, Richoz S, et al. 2010. High-resolution carbon isotope changes, litho-and magnetostratigraphy across Permian-Triassic boundary sections in the Dolomites, N-Italy. New constraints for global correlation [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 290(4): 58~64.
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Huang Haoyuan, Tian Yaming, Zeng Tao, et al. 2011. Characteristics and genesis of lower Ordovician Tongzi Formation dolomite in southern Sichuan basin [J]. *Mineralogy and Petrology*, 40(2): 92~103 (in Chinese with English abstract).
- Huang Keke. 2013. Sedimentary Geochemistry of Lower Triassic Carbonate Rocks from Sichuan Basin in China [D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Huang Keke, Huang Sijing, Hu Zuowei, et al. 2016. Carbon isotopic composition and evolution of the Lower Triassic marine carbonates from Dukou of Xuanhan and Beibei of Chongqing, Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 18(1): 101~114 (in Chinese with English abstract).
- Huang S J, Huang K K, Jie L, et al. 2012. Carbon isotopic composition of Early Triassic marine carbonates, Eastern Sichuan Basin, China [J]. *Science China*, 55(12): 2 026~2 038.
- Huang Sijing, Huang Keke, Lü Jie, et al. 2012. Carbon isotope composition and evolution of Early Triassic seawater from the eastern Sichuan Basin [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 42(10): 1 508~1 522 (in Chinese with English abstract).
- Jones B and Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 111(1/4): 111~129.
- Li Chen, Lang Xinghai, Deng Yulin, et al. 2020. Geochronological and geochemical characteristics of the claystone (Mung Bean Rock) at the bottom of the Leikoupo Formation in the Emeishan Area, Sichuan Basin, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(4): 810~825 (in Chinese with English abstract).
- Li Qian, Xu Shenglin, Chen Hongde, et al. 2018. Geochemical characteristics and palaeo-environmental implication of Middle Permian Maokou Formation in Wangcang region, Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 45(3): 268~281 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoning. 2017. Stable Carbon and Oxygen Isotope Composition of Marine Carbonate Rocks of the Lower Triassic in Sichuan and Chongqing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract)
- Li Zhiwu, Liu Shugen, Lin Jie, et al. 2018. Structural configuration and its genetic mechanism of the West Sichuan depression in China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6): 645~653 (in Chinese with English abstract).
- Lin Liangbiao, Chen Hongde and 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 (in Chinese with English abstract).
- Lin Maobing. 1994. A discussion on the basic textural style of the nappe tectonic belt in Longmen mountains [J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, (3): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Lin Xiong. 2011. Study on the Relationship Between Reservoirs Rocks Characteristics and Sedimentary-diagenesis Evolution of Triassic Jialingjiang Formation in Sichuan basin [D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Liu Hefu, Lian Huishe, Cai Liguo, et al. 1994. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(2): 101~118 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shugen, Li Zhiwu, Sun Wei, et al. 2011. Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 46(1): 233~257 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ying, Liu Haichen and Li Xianhua. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS [J]. *Geochimica*, 25(6): 552~558 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming and Li Zhaolin. 1984. Elemental Geochemistry [M]. Beijing: Science and Technology Publishers, 147 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huakun, Chen Zihong, et al. 2004. Relationship between Neoproterozoic cratons of China and the Rodinia [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 515~523 (in Chinese with English abstract).
- McGhee Jr G R, Clapham M E, Sheehan P M, et al. 2013. A new ecological-severity ranking of major Phanerozoic biodiversity crises [J].

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 370: 260~270.
- Miliman J D. 1978. Marine Carbonate [M]. Beijing: Science Press, 115~128.
- Meng Hao, Ren Ying, Zhong Dakang, et al. 2016. Geochemical characteristic and its paleoenvironmental implication of Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 27(7): 1 299~1 311 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yuzhang. 2017. The Differences Study of Natural Gas Accumulation of Triassic Jialingjiang and Leikoupo Formation in Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- MiSe Ziha. 2012. The Reservoir Characteristics of the Mid-Triassic Leikoupo Formation, in the Central Segment of the Western Sichuan Depression [D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Payne J L, Lehrmann D J, Wei J Y, et al. 2004. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction [J]. Science, 305(5 683): 506~509.
- Peng Bingxia, Wang Yuejun, Fan Yuming, et al. 2006. Carbon isotope composition changes of Maokouan-Wuchiapingian and the environmental effect of Emeishan large igneous province at Lekang section, Guizhou Province [J]. Geochimica, 35(2): 126~132 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. 2000. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics [J]. Geology, 28(1): 11~14.
- Ramsey M H, Potts P J, Webb P C, et al. 1995. An objective assessment of analytical method precision: Comparison of ICP-AES and XRF for the analysis of silicate rocks [J]. Chemical Geology, 124(1~2): 1~19.
- Richoz S. 2004. Stratigraphie et Variations Isotopiques du Carbone dans le Permien Supérieur et le Trias inférieur de la Néotéthys (Turquie, Oman et Iran) [D]. Switzerland: University of Lausanne.
- Ruan Yunbo, Zhou Gang, Huo Fei, et al. 2022. Source-reservoir characteristics and configuration of the third member of Middle Triassic Leikoupo Formation in central Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 34(5): 139~151 (in Chinese with English abstract).
- Shanley K W, Cluff R M and Robinson J W. 2004. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs: Implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis [J]. Aapg Bulletin, 88(8): 1 083~1 121.
- Shi Jizhong, Niu Yazhuo, Xu Wei, et al. 2021. Geochemical Characteristics and sedimentary environment of carboniferous Baishan Formation carbonate in Shibanquanxi of Yingen-Ejin Banner Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(3): 680~693 (in Chinese with English abstract).
- Shi Zejin, Zhang Jin, Li Wenjie, et al. 2019. Characteristics of rare earth element and carbon-strontium isotope and their geological significance of Guadalupian carbonate in Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(4): 1 095~1 106 (in Chinese with English abstract).
- Stemmerik L, Bendix-Almgreen S E and Piasecki S. 2001. The Permian-Triassic boundary in central East Greenland: Past and present views [J]. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 48: 159~167.
- Su Chengpeng, He Ying, Song Xiaobo, et al. 2022. Reinterpretation of gas sources in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan gas field, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 43(2): 341~352 (in Chinese with English abstract).
- Tan Zhiyuan, Hou Xuewen, Wei Jisheng, et al. 2021. Sedimentary facies and palaeogeography of the Lower Triassic Jialingjiang Formation in Sichuan Basin during the salt-forming period [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 41(4): 563~572 (in Chinese with English abstract).
- Tian Yang, Zhao Xiaoming, Wang Lingzhan, et al. 2014. Geochemical characteristics and its paleoenvironmental implication of Permian Qixia Formation in Shizhu, Chongqing [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32(6): 1 035~1 045 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yuanbo. 2016. Tectonic Evolution of Southwestern Sichuan and its Effect on the Accumulation of Oil and Gas in the Three Permian Series [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wang F M, Lu X L, Sanders C J, et al. 2019. Tidal wetland resilience to sea level rise increases their carbon sequestration capacity in United States [J]. Nature Communications, 10(1): 1~11.
- Wang Linlin, Fu Yun and Fang Shijie. 2018. Elemental geochemical characteristics and geological significance of Majiagou Formation, eastern Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 40(4): 519~525 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pengwan, Si Chunsong, Zhang Runhe, et al. 2016. Characteristic of the Cambrian carbonate paleo-ocean environment in the Dianqianbei depression and its geological significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(5): 811~818 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiuping, Wang Qiyu and An Xianyin. 2022. Characteristics of sedimentary environment and evolution of Permian in southern Sichuan Basin: An example from the profile of Gulin Bajiaocun in Sichuan Province [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3):

- 398~412 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zecheng. 2002. Tectonic Sequence and Natural Gas Exploration in the Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~287 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhaoxin, Guo Fusheng, Pan Jiayong, et al. 2005. Application of C, O and isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(1): 53~56 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hucheng, Lin Liangbiao, Yu Yu, et al. 2022. Geochemical characteristics and paleo-environmental significance of Middle Permian carbonates rocks in Tianquan area, Southwestern Sichuan Province, China [J]. Mineralogy and Petrology, 42(2): 47~59 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qingkun, Liu Yong, Zhang Xiaoliang, et al. 2022. Hydrothermal sedimentary origin of the Ningguo Formation in Jiangshan, Zhejiang Province: Evidence of elemental geochemistry and C-O isotopes [J]. Marine Geology Frontiers, 38(1): 24~32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xueqi, Zhong Dakang, Ren Ying, et al. 2017. Characteristics and significance of carbon and oxygen isotopes of the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Chongqing [J]. Journal of Palaeogeography, 19(5): 865~878 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhenyu, Shen Weizhou and Zheng Liandi. 2009. Elements and isotopic geochemistry of Guadalupian-Lopingian boundary profile at the Penglaitan section of Laibin, Guangxi Province, and its geological implications [J]. Acta Geologica Sinica, 83(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zigeng. 2004. Marine Geology [M]. Jinan: Shandong Education Press, 480 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jian, Zhang Haihua, Chen Shuwang, et al. 2020. Geochemical characteristics and geological significance of Upper Permian Linxi Formation in Northern Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50(2): 518~530 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiong, Zhu Zhengjie, Cui Zhiwei, et al. 2022. Genesis of polyhalite and its significance of Jialingjiang Formation in Dianjiang salt basin, Eastern Sichuan Basin [J]. Earth Science, 47(1): 27~35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiulan. 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater [J]. Acta Sedimentologica Sinica, (4): 17~30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, et al. 2011. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan basin [J]. Geology in China, 38(2): 233~250 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiaochen, Liu Chiyan, Zhao Yan, et al. 2017. Geochemical characteristics of the Shuiquanling Formation carbonates in the Southwestern margin of Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 47(1): 101~109 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongju. 2013. Indicators of global sea-level change and research methods of marine tectonic sequences: Take Ordovician of Tarim Basin as an example [J]. Acta Petrolei Sinica, 36(3): 262~273 (in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 2006. Widespread Archean basement beneath the Yangtze Craton [J]. Geology, 34(6): 417~420.
- Zheng Mianping, Zhang Zhen, Zhang Yongsheng, et al. 2012. Potash exploration characteristics in China: New understanding and research progress [J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 280~294 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcui, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, et al. 2009. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Geological Review, 55(4): 484~495 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Changyong, Zhang Qiyue, Lü Tao, et al. 2014. Geochemical characteristics and sedimentary environments of the fossiliferous layers of Middle Triassic Luoping Biota, Yunnan Province [J]. Geological Review, 60(2): 285~298 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹高社, 余爽杰, 孙凤余, 等. 2019. 豫西宜阳地区三叠纪早期孙家沟组上段湖相碳酸盐岩碳氧同位素和古环境分析 [J]. 地质学报, 93(5): 1137~1153.
- 陈锦石, 邵茂革, 霍卫国, 等. 1984. 浙江长兴二叠系和三叠系界限地层的碳同位素 [J]. 地质科学, 19: 88~93.
- 陈强, 张慧元, 李文厚, 等. 2012. 鄂尔多斯奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其意义 [J]. 古地理学报, 14(1): 117~124.
- 邓宾. 2013. 四川盆地中-新生代盆-山结构与油气分布 [D]. 成都: 成都理工大学.
- 邓小亮, 林良彪, 余瑜, 等. 2020. 川西北剑阁地区栖霞组地球化学特征及古环境意义 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 47

- (2): 198~209.
- 邓煜霖, 郎兴海, 杨宗耀, 等. 2018. 四川江油马角坝刺林包剖面二叠-三叠系间粘土岩研究[J]. 岩石矿物学杂志, 237(3): 417~433.
- 董庆民, 胡忠贵, 陈世锐, 等. 2021. 川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩同位素地球化学响应及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 42(6): 1 307~1 320.
- 冯增昭, 鲍志东, 吴胜和, 等. 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理[J]. 地质科学, (2): 212~220.
- 龚大兴, 周家云, 吴驰华, 等. 2015. 四川盆地早中三叠世成盐期岩相古地理及成盐模式[J]. 地质学报, 89(11): 2 075~2 086.
- 郭晓强, 李好斌, 魏荣珠, 等. 2020. 山西沁水盆地西缘寒武系碳酸盐岩的元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 中国科学: 地球科学, 42(10): 1 508~1 522.
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 1996. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 郝松立, 李文厚, 刘建平, 等. 2011. 鄂尔多斯南缘奥陶系生物礁相碳酸盐岩碳氧同位素地球化学特征[J]. 地质科技情报, 30(2): 52~56.
- 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.
- 黄昊源, 田亚铭, 曾韬, 等. 2020. 川南地区下奥陶统桐梓组白云岩特征及成因分析[J]. 矿物岩石, 40(2): 92~103.
- 黄可可. 2013. 四川盆地下三叠统海相碳酸盐岩的沉积地球化学特征[D]. 成都: 都理工大学.
- 黄可可, 黄思静, 胡作维, 等. 2016. 四川盆地宣汉渡口和重庆北碚下三叠统海相碳酸盐碳同位素组成与演化[J]. 古地理学报, 18(1): 101~114.
- 黄思静, 黄可可, 吕杰, 等. 2012. 早三叠世海水的碳同位素组成与演化——来自四川盆地东部的研究[J]. 中国科学: 地球科学, 42(10): 1 508~1 522.
- 李宸, 郎兴海, 邓煜霖, 等. 2020. 四川盆地峨眉山雷口坡组底部黏土岩(绿豆岩)的年代学及地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39(4): 810~825.
- 李乾, 徐胜林, 陈洪德, 等. 2018. 川北旺苍地区茅口组地球化学特征及古环境记录[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 45(3): 268~281.
- 李小宁. 2017. 川渝地区下三叠统海相碳酸盐岩的碳氧同位素研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 李智武, 刘树根, 林杰, 等. 2009. 川西坳陷构造格局及其成因机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(6): 645~653.
- 林良彪, 陈洪德, 张长俊. 2007. 四川盆地西北部中三叠世雷口坡期岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 27(3): 51~58.
- 林茂炳. 1994. 初论龙门山推覆构造带的基本结构样式[J]. 成都理工学院学报, (3): 1~7.
- 林雄. 2011. 四川盆地三叠系嘉陵江组沉积-成岩特征与孔隙演化关系研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 1994. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 68(2): 101~118.
- 刘树根, 李智武, 孙玮, 等. 2011. 四川含油气叠合盆地基本特征[J]. 地质科学, 46(1): 233~257.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确定定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 25(6): 552~558.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~147.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亞超大陆的关系[J]. 地学前缘, 11(2): 515~523.
- 孟昊, 任影, 钟大康, 等. 2016. 四川盆地东部寒武系龙王庙组地球化学特征及其古环境意义[J]. 天然气地球科学, 27(7): 1 299~1 311.
- 孟昱璋. 2017. 四川盆地三叠系嘉陵江组-雷口坡组天然气成藏差异性研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 米色子哈. 2012. 川西坳陷中段中三叠统雷口坡组储层特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- 彭冰霞, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2006. 贵州乐康剖面茅口阶-吴家坪阶碳同位素组成变化及峨眉山大火成岩省的响应[J]. 地球化学, 35(2): 126~132.
- 阮蕴博, 周刚, 霍飞, 等. 2022. 川中地区中三叠统雷口坡组三段源储特征及配置关系[J]. 岩性油气藏, 34(5): 139~151.
- 史冀忠, 牛亚卓, 许伟, 等. 2021. 银额盆地石板泉西石炭系白山组碳酸盐岩地球化学特征及其环境意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(3): 680~693.
- 施泽进, 张瑾, 李文杰, 等. 2019. 四川盆地 Guadalupian 统碳酸盐岩稀土元素和碳-锶同位素特征及地质意义[J]. 岩石学报, 35(4): 1 095~1 106.
- 苏成鹏, 何莹, 宋晓波, 等. 2022. 四川盆地川西气田中三叠统雷口坡组气藏气源再认识[J]. 石油与天然气地质, 43(2): 341~352.
- 谭志远, 侯学文, 魏继生, 等. 2021. 四川盆地下三叠统嘉陵江组主要成盐期岩相古地理特征[J]. 沉积与特提斯地质, 41(4): 563~572.
- 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 2014. 重庆石柱二叠纪栖霞组地球化学特征及其环境意义[J]. 沉积学报, 32(6): 1 035~1 045.
- 万元博. 2016. 川西南地区构造演化及其对中三叠统雷口坡组油气聚集的影响[D]. 成都: 成都理工大学.

- 王琳霖, 浮 咻, 方诗杰. 2018. 鄂尔多斯盆地东缘马家沟组元素地球化学特征及古沉积环境[J]. 石油实验地质, 40(4): 519~525.
- 王鹏万, 斯春松, 张润合, 等. 2016. 滇黔北坳陷寒武系碳酸盐岩古海洋环境特征及地质意义[J]. 沉积学报, 34(5): 811~818.
- 王秀平, 王启宇, 安显银. 2022. 川南地区二叠系沉积环境及其演化特征——以四川古蔺芭蕉村剖面为例[J]. 沉积与特提斯地质, 42(3): 398~412.
- 汪泽成, 赵文智, 张 林, 等. 2002. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1~287.
- 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 等. 2005. 碳酸盐岩C, O, Sr同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. 地质找矿论丛, 20(1): 53~56.
- 杨虎城, 林良彪, 余 瑞, 等. 2022. 川西南天全地区中二叠统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义[J]. 矿物岩石, 42(2): 47~59.
- 杨庆坤, 刘 勇, 张小亮, 等. 2022. 浙江江山宁国热水沉积事件的岩石地球化学及碳氧同位素证据[J]. 海洋地质前沿, 38(1): 24~32.
- 杨雪琪, 钟大康, 任 影, 等. 2017. 重庆东部地区寒武系龙王庙组碳、氧同位素特征及其意义[J]. 古地理学报, 19(5): 865~878.
- 杨振宇, 沈渭洲, 郑连弟. 2009. 广西来宾蓬莱滩二叠纪瓜德鲁普统-乐平统界线剖面元素和同位素地球化学研究及地质意义[J]. 地质学报, 83(1): 1~15.
- 杨子廉. 2004. 海洋地质学[M]. 济南: 山东教育出版社, 480.
- 张 健, 张海华, 陈树旺, 等. 2020. 松辽盆地北部上二叠统林西组地球化学特征及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(2): 518~530.
- 张 雄, 朱正杰, 崔志伟, 等. 2022. 四川盆地东部垫江盐盆早三叠世嘉陵江组四段杂卤石成因及对成钾的指示[J]. 地球科学, 47(1): 27~35.
- 张秀莲. 1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, (4): 17~30.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 2011. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. 中国地质, 38(2): 233~250.
- 赵晓辰, 刘池洋, 赵 岩, 等. 2017. 鄂尔多斯西南缘水泉岭组碳酸盐岩地球化学特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 47(1): 101~109.
- 赵宗举. 2015. 全球海平面变化指标及海相构造层序研究方法——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 石油学报, 36(3): 262~273.
- 郑绵平, 张 震, 张永生, 等. 2012. 我国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报, 33(3): 280~294.
- 郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 等. 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序-岩相古地理特征[J]. 地质论评, 55(4): 484~495.
- 周长勇, 张启跃, 吕 涛, 等. 2014. 云南中三叠世罗平生物群产出地层的地球化学特征和沉积环境[J]. 地质论评, 60(2): 285~298.