

滇西北河西地区上三叠统三合洞组灰岩地球化学特征及其地质意义

杨志娟, 朱志军, 丁婷, 马原驰, 王田, 周世豪

(东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013)

摘要: 对滇西北河西地区三叠纪三合洞组碳酸盐岩开展了碳、氧同位素及稀土与微量元素地球化学分析, 结果表明, 三合洞组碳酸盐岩的碳、氧同位素符合正常海相碳酸盐岩碳、氧同位素的数值范围; 微量元素 Sr、Ba 含量高, Co、Cu、Th、U、Ho 等含量低, 稀土元素总量较低, 轻稀土元素相对富集, 具有 Eu 负异常; 古盐度参数 Z 值、Sr/Ba 值、Sr/Cu 值、Rb/Sr 值指示干热气候下的海相咸水环境; Cu/Zn、V/Cr、Ni/Co、U/Th 值指示缺氧环境; Y/Ho 值、 δCe 及 δEu 值反映三合洞组灰岩沉积时受成岩作用影响小。这些特征与四川盆地北部地区须家河组稀土元素地球化学特征、氧化还原环境相似, 指示兰坪盆地与上扬子板块四川盆地在晚三叠世时期可能具有相同的构造背景和沉积环境, 这些认识可为兰坪-思茅地块古环境与大地构造属性研究提供依据。

关键词: 兰坪盆地; 三合洞组; 碳、氧同位素; 微量元素; 沉积环境

中图分类号: P588.24⁺5; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)04-0856-15

Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Triassic Sanhedong Formation limestone in the Hexi Area of Northwest Yunnan Province

YANG Zhi-juan, ZHU Zhi-jun, DING Ting, MA Yuan-chi, WANG Tian and ZHOU Shi-hao

(School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: This article conducts carbon and oxygen isotopes, rare earth, and trace element geochemical analyses of carbonate samples from the Triassic Sanhedong Formation in the Hexi Area of the northwest Yunnan Province. The analyzed results demonstrate that their carbon and oxygen isotope values are consistent with the normal marine carbonate rocks. Samples from the Sanhedong Formation have a high Sr and Ba content, low Co, Cu, Th, U, Ho and total rare earth element content, and a negative anomaly of Eu, but they are slightly enriched in light rare earth elements. Paleosalinity parameter Z value, and Sr/Ba, Sr/Cu and Rb/Sr ratios indicate that they deposited in a marine saline water environment with dry-hot climate. The ratios of Cu/Zn, V/Cr, Ni/Co and U/Th indicate an anoxic environment. Y/Ho, δCe and δEu values indicate that the limestone of the Sanhedong Formation is less affected by diagenesis during sedimentation. These characters are similar to that of the Xujiahe Formation in the northern part of the Sichuan Basin, indicating that the Lanping Basin and the Sichuan Basin in the Upper Yangtze Plate probably

收稿日期: 2023-09-08; 接受日期: 2024-01-25; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42362018)

作者简介: 杨志娟(1998-), 女, 汉族, 硕士, 研究方向为沉积地质研究, E-mail: 1900139147@qq.com; 通讯作者: 朱志军(1976-), 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向为沉积学, E-mail: zhuzj013@163.com。

网络首发时间: 2024-01-31; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240130.1615.002.html>

have a similar tectonic and sedimentary environment during Late Triassic, which can help to study the paleoenvironment and tectonic attributes of the Lanping-Simao Block.

Key words: Lanping Basin; Sanhedong Formation; carbon and oxygen isotopes; trace elements; sedimentary environment

Fund support: National Natural Science Foundation of China(42362018)

近年来,元素地球化学测试分析方法被广泛用于碳酸盐岩沉积区的地层对比研究、古环境与古气候重建(Algeo and Maynard, 2004; 田洋等, 2014; Glein and Waite, 2020; 邓小亮等, 2020)。碳、氧同位素可以有效反映古海洋盐度,这有利于研究古海洋的沉积环境(张建军, 2017)。稀土元素在沉积过程中具有难溶、稳定性强的特点,且在成岩过程中难以发生迁移,因此沉积物稀土元素变化特征可以直接反映物源区的地球化学特性,从而较好地反映水体介质特征及沉积物源区信息(杨虎城等, 2022)。滇西北地区的兰坪盆地普遍缺失下-中三叠统,而晚三叠世是滇西兰坪地区构造格局形成的关键时期(陈跃昆等, 2004)。前人对兰坪盆地三叠系的研究主要集中在盆地演化(谭富文等, 2001; 陶晓风等, 2002; 廖宗廷等, 2005; 苗忠英等, 2017; 杨立飞, 2020)、成矿背景(薛春纪等, 2002; 陈跃昆等, 2004; 张峰等, 2010; 李峰等, 2012; 朱多录等, 2013; 杨尖絮等, 2013; 李以科等, 2017)、沉积时限(刘琴, 2014; 唐靓等, 2016)等方面,而对晚三叠世沉积地球化学特征的研究相对较少。目前关于晚三叠世的沉积盆地类型及大地构造背景存在众多争议,有学者认为晚三叠世扬子板块已经与兰坪-思茅地块拼合一体(Zi *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2018),亦有学者认为扬子板块与兰坪-思茅地块在晚三叠世末才开始拼合(李朋武等, 2005; Huang and Opdyke, 2016; 吴强旺等, 2022)。本文对滇西兰坪盆地河西地区上三叠统三合洞组碳酸盐岩开展了C-O同位素、稀土、微量元素地球化学分析,探讨三合洞组沉积环境并为揭示兰坪-思茅地块的大地构造属性提供基础数据。

1 区域地质背景

滇西兰坪盆地(图1)位于澜沧江断裂带与金沙江断裂带之间,呈近南北向展布的狭长状沉积,是昌都-思茅地块及“三江”构造带的重要组成部分,东连扬子板块,西接藏滇微板块(薛春纪等, 2002)。中

三叠世晚期,由于澜沧江和金沙江-哀牢山两条深大断裂的作用,兰坪盆地东西两边发生裂陷,进入到陆内裂谷演化阶段;中侏罗世开始,西侧怒江洋开始打开所产生的向东推挤,使盆地逐渐抬升进入拗陷盆地演化阶段;白垩纪末期雅鲁藏布江洋盆开始闭合,印度和欧亚两大板块的前缘部分发生碰撞导致盆地再次抬升,兰坪盆地进入周缘前陆盆地演化阶段;新生代以来印度板块向欧亚板块俯冲碰撞,强烈的近南北向挤压在板块东缘产生剪切,使盆地NNW向断裂带发生走滑形成兰坪等拉分盆地,发育含多个膏盐层位的红色碎屑岩建造(牟传龙等, 1999; 薛春纪等, 2002; 徐仕海等, 2005; 张峰等, 2010; 苗忠英等, 2017)。

区内主要充填了中上三叠统、侏罗系、白垩系、古近系及新近系。兰坪盆地三叠纪沉积主要分布于北部、西部及东部,普遍缺失下三叠统,自下而上沉积了中三叠统上兰组、攀天阁组 and 上三叠统崔依比组、歪古村组、三合洞组、挖鲁八组、麦初箐组。上兰组属活动大陆边缘的半深海复理石沉积;攀天阁组为一套中酸性火山岩夹少量板岩、灰岩;崔依比组下部为火山角砾岩、凝灰岩、玄武岩等,上部为碎屑岩夹流纹岩、硅质岩等;歪古村组主要为紫红色砂泥岩、砾岩等(牟传龙等, 1999)。上三叠统三合洞组广泛出露于兰坪、永平、巍山一带,为一套浅海至半深海碳酸盐岩沉积建造,至今已探明多个铅锌多金属矿床(杨丽梅等, 2015; 杨东华等, 2016);其中以碳酸盐台地相为主部分地区为潮坪相沉积(余谦等, 2000);古温度在20.7~40.5℃,显示当时温暖-炎热的古气候(李志明等, 2004),且至少存在2套含盐层位(李以科等, 2012);灰岩中发育有铅锌银铜矿(杨波等, 2020)。挖鲁八组以灰黑色含碳质、钙质泥岩为主。麦初箐组为滨-浅海至海陆交互相沉积。

黄晓明等(2017)通过对三合洞组岩石地层、古生物化石、微体化石及碎屑锆石U-Pb年代学研究,提出三合洞组时代为晚三叠世;张远志(1996)认为三合洞组年代为卡尼阶,而李以科等(2012)认为其

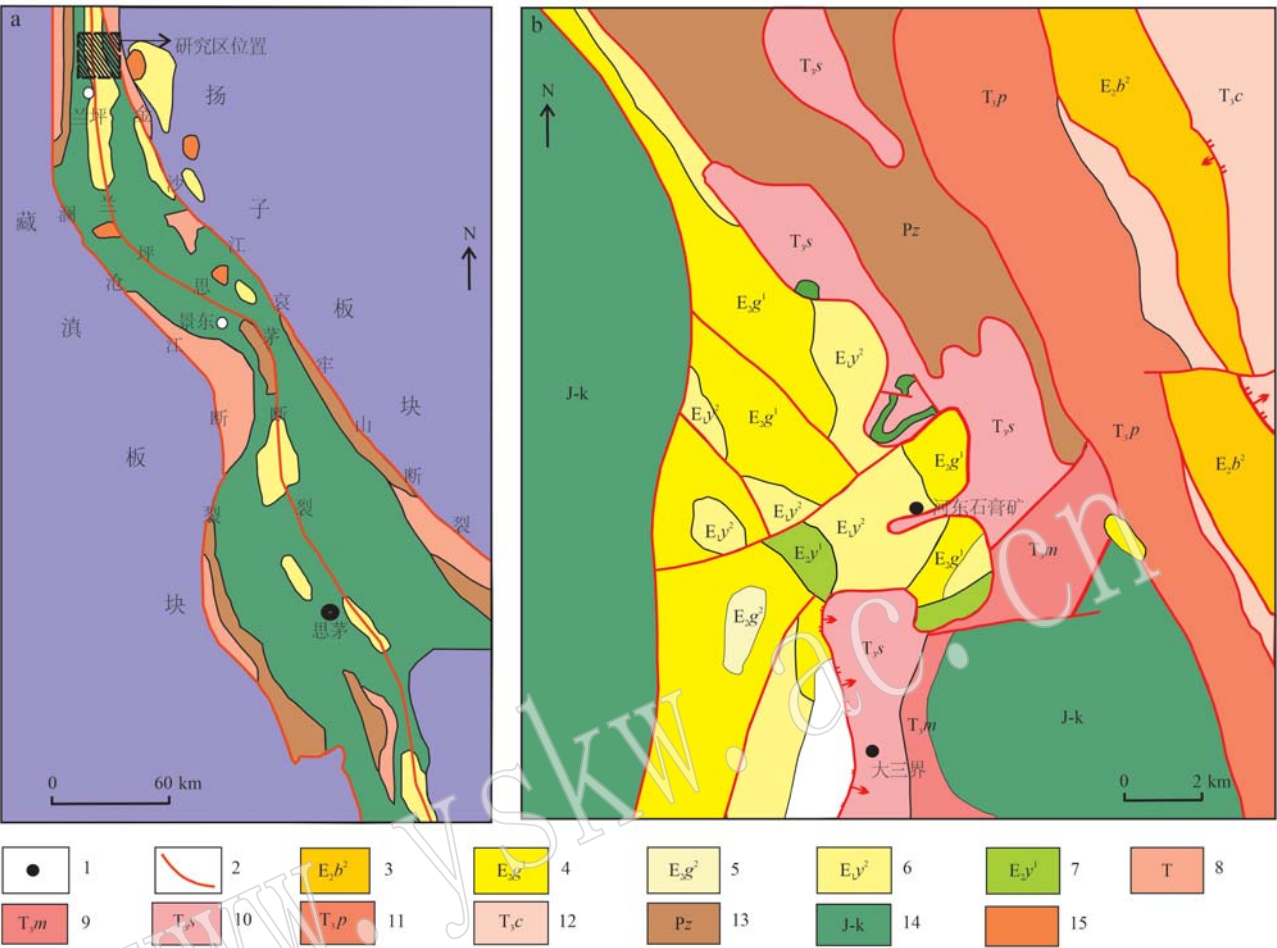


图 1 兰坪中生代盆地地质与构造略图[a, 据薛春纪等(2002)修改]与研究区区域地质简图(b)
Fig. 1 Geological and tectonic sketch map of Lanping Mesozoic-Cenozoic Basin (a, after Xue Chunji *et al.*, 2002) and regional geological sketch map of the study area(b)

1—采样点位置; 2—断层; 3—古近系始新统宝相寺组; 4—古近系古新统果郎组下段; 5—古近系古新统果郎组上段; 6—古近系古新统云龙组上段; 7—古近系古新统云龙组下段; 8—三叠系; 9—上三叠统麦初菁组; 10—上三叠统三合洞组; 11—中三叠统攀天阁组; 12—三叠系崔依比组; 13—早古生代; 14—侏罗系-白垩系; 15—新生代碱性岩
1—sampling point; 2—fault; 3—Paleogene Eocene Baoliang Formation; 4—Upper Paleogene Paleocene Guolang Formation; 5—Lower Paleogene Paleocene Guolang Formation; 6—Upper Paleogene Yunlong Formation; 7—Lower Paleogene Yunlong Formation; 8—Triassic; 9—Upper Triassic Maichujing Formation; 10—Upper Triassic Sanhedong Formation; 11—Triassic Central Pantiange Formation; 12—Triassic Cuiyibi Formation; 13—Early Paleozoic; 14—Jurassic-Cretaceous; 15—Cenozoic alkaline rocks

属于下诺利阶,文海霞等(2011)通过研究三合洞组牙形石组合,认为其属于诺利期早期。吴强旺等(2022)在对三合洞剖面中碳酸盐岩中的牙形石进行鉴定后得出其种属为 *Epigondolella vialovi*、*Epigondolella uniformis* 和 *Epigondolella aff. Triangularis*, 时代为早诺利期(Lacian 亚期)。

2 样品与实验方法

本次样品采集于滇西北兰坪盆地河西地区大三界锆矿与河东石膏矿,在野外对地层进行系统划分,

采集上三叠统三合洞组的新鲜样品 26 件,其中碳酸盐岩 24 件,与石膏相伴生的碳酸盐岩有 8 件,锆矿 2 件,取样层位如图 2 所示。野外采集的岩石样品为岩石的新鲜部分,未受到风化、次生裂隙的影响。样品所有地球化学分析项目均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。碳、氧同位素分析在室内将采集样品研磨至 200 目,在真空条件下,加入磷酸后通过乙醇-液氮冷冻剂反应制取 CO₂,运用 MAT-253 气体同位素质谱计(仪器编号 9444)计算、校准得到 δ¹³C 和 δ¹⁸O 值,检测根据 DZ/T0184. 17-1997《碳酸盐矿物或岩石中碳、氧同位素

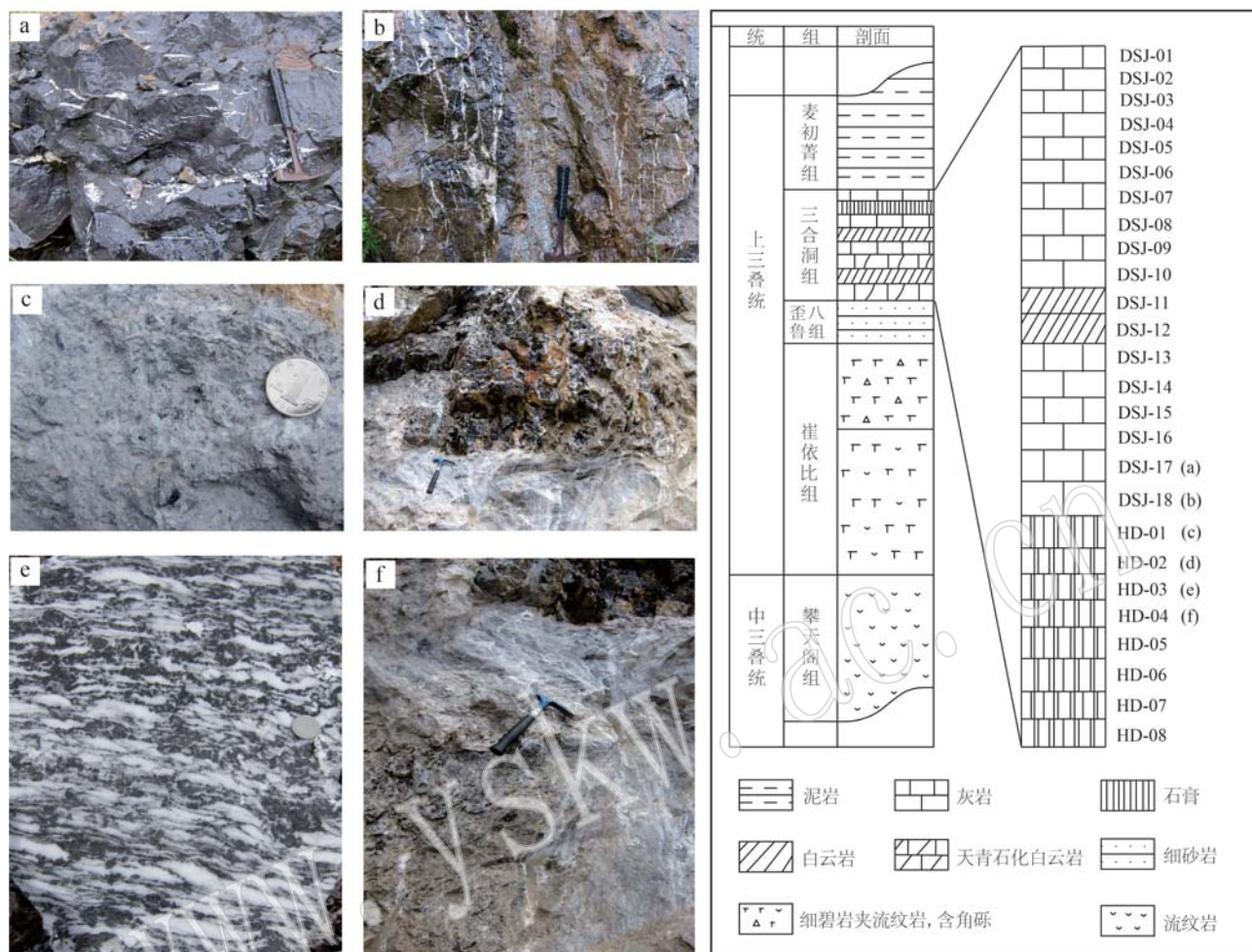


图2 滇西兰坪三合洞组灰岩特征及采样层位图(据李以科等, 2012)

Fig. 2 Limestone characteristics and sampling horizon map of Sanhedong Formation in Lanping, Western Yunnan (after Li Yike *et al.*, 2012)

组成的磷酸法测定》执行,依据 V-PDB 标准进行研究分析,以 ‰ 单位表示,标准偏差为 0.1‰。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱仪的方法测试,将所选样品破碎,在玛瑙钵中研磨至 200 目,放入封闭容器中利用氢氟酸和硝酸溶解,电解板上蒸发干净氢氟酸,再用硝酸密封溶解,稀释后直接测定。检测依据 GB/T14506.30-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分:44 个元素量测定》执行,测试环境温度 21℃,湿度为 35%,分析误差小于 5%。

3 测试结果

3.1 数据有效性分析

碳酸盐岩容易受到后期成岩与风化作用影响,

造成元素差异性富集和分馏,进而改变古环境原始记录(Elderfield *et al.*, 1990; 赵彦彦等, 2019),因此可以利用碳、氧同位素的相关关系特征对样品数据进行有效性分析。当 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出离散特征,反映岩石受成岩作用小,反之表明影响较大(Qing and Veizer, 1994)。三合洞样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现出离散的特征,二者不存在明显的正相关关系($R^2=0.32$) (图 3),表明样品受成岩蚀变影响较小。

成岩作用对 Ce 和 Eu 影响大,当 Ce 存在负异常, δCe 与 δEu 呈现正相关关系, δCe 与 ΣREE 之间表现出正相关关系时,表明样品受到了成岩作用的影响(刘士林等, 2006)。而研究区样品的 $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ (图 4a)、 $\Sigma\text{REE}-\delta\text{Ce}$ (图 4b)并不存在明显的正相关关系,反映研究区稀土元素受成岩作用的影响小。

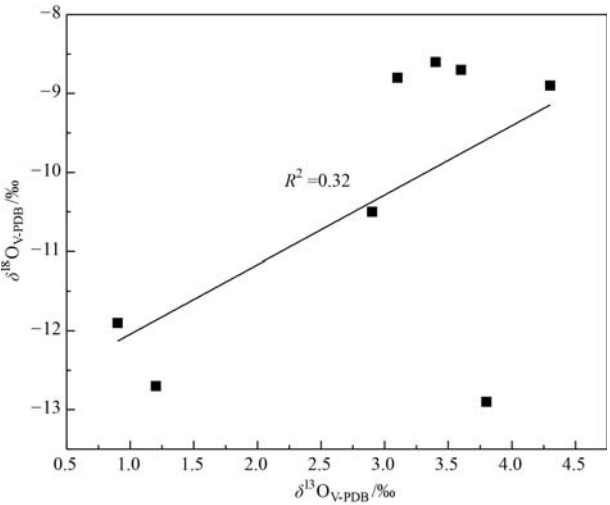


图 3 大三界上三叠统三合洞组碳、氧同位素相关性图解
Fig. 3 Correlation diagram of carbon and oxygen isotopes of Upper Triassic Sanhedong Formation

3.2 碳、氧同位素组成特征

碳、氧同位素含量见表 1, 研究区灰岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $0.9\text{‰} \sim 4.3\text{‰}$, 平均值为 2.9‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值在 $-10.5\text{‰} \sim 12.9\text{‰}$, 平均值为 -10.4‰ 。

3.3 稀土、微量元素特征

微量元素和 ΣREE 含量分别见表 2 和表 3。三合洞组微量元素 Sr、Ba 含量偏高, Co、Cu、Th、U、Ho 含量偏低; 大三界样品 ΣREE 平均为 44×10^{-6} ($10.62 \times 10^{-6} \sim 102.20 \times 10^{-6}$); 河东石膏矿样品 ΣREE 平均为 9.55×10^{-6} ($1.28 \times 10^{-6} \sim 33.87 \times 10^{-6}$), 稀土元素总量较低。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 表示分布曲线斜率, 反映曲线的倾斜程度, 分析样品的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $2.86 \sim 12.31$ (表 4), 平均 5.54, 表明轻、重稀土元素分异程度中等。 $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 亦反映相同的情况。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 分别反映轻稀土元

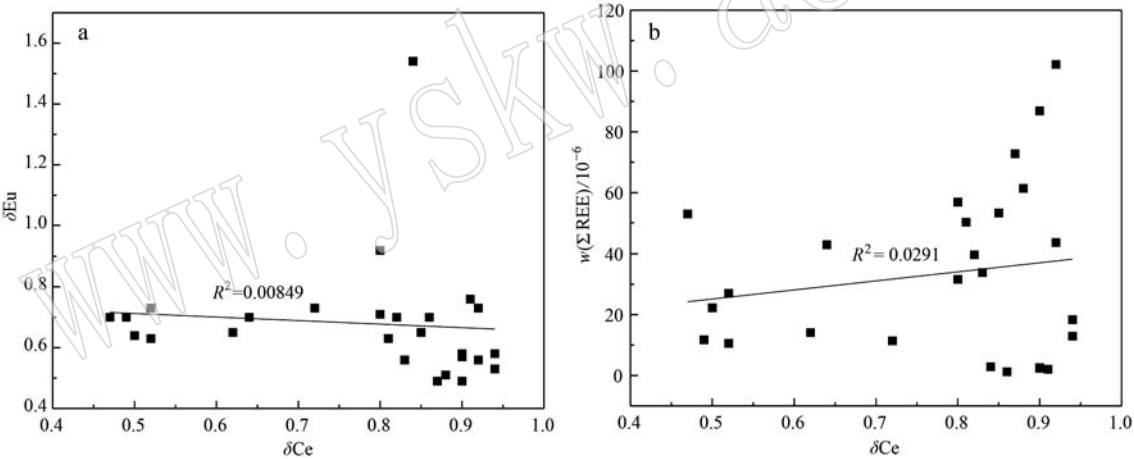


图 4 三合洞组 $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ (a)、 $\Sigma\text{REE}-\delta\text{Ce}$ (b) 相关关系图
Fig. 4 Plots of $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ (a) and $\Sigma\text{REE}-\delta\text{Ce}$ (b) for the Sanhedong Formation

表 1 三合洞组灰岩碳、氧同位素组成
Table 1 Carbon and oxygen isotopic composition of the Sanhedong Formation

样品原号	岩石	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SNOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$	Z 值
DSJ-01	灰岩	17.6	-12.9	3.8	128.66
DSJ-03	灰岩	22.0	-8.6	3.4	129.98
DSJ-05	灰岩	21.8	-8.8	3.1	129.27
DSJ-07	灰岩	20.1	-10.5	2.9	128.01
DSJ-09	灰岩	18.7	-11.9	0.9	123.21
DSJ-13	灰岩	21.7	-8.9	4.3	131.67
DSJ-15	灰岩	21.9	-8.7	3.6	130.34
DSJ-17	灰岩	17.9	-12.7	1.2	123.43

素与重稀土元素之间的分馏程度, 分析样品的 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 在 $1.51 \sim 6.62$ 之间, 平均 3.46, 表明轻稀土元素之间分异一般; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 $0.78 \sim 1.73$ 之间, 平均 1.27, 表明重稀土元素之间分异不明显。 δCe 为 $0.028 \sim 2.389$, 平均 0.35; Eu 为明显的负异常, δEu 在 $0.48 \sim 1.51$ 之间, 平均 0.67, 与北美页岩标准值 ($\delta\text{Eu} = 0.65$) 比较接近。通过北美页岩标准值 (McDonough and Sun, 1995) 对三合洞组样品进行标准化 (图 5), 稀土元素分布模式为轻稀土元素相对富集, 总体呈 Eu 负异常, 分布曲线显示轻重稀土元素分异不明显, 大三界部分灰岩样品呈 Ce 负异常。

表2 三合洞组灰岩样品微量元素含量

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 Contents of trace elements of limestone samples in the Sanhedong Formation

样品编号	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Ba	Th	U	Y	Ho
DSJ-02	7.86	11.2	1.2	19.4	3.18	101	654	10.1	0.35	0.745	5.77	0.18
DSJ-03	6.63	8.16	1.41	24.7	1.36	14.7	743	33.5	0.484	1.14	10.4	0.416
DSJ-04	13.6	16.7	1.81	21.2	5.67	12.9	712	20.3	0.53	0.897	8.08	0.335
DSJ-05	11.5	9.06	2.18	24.6	3.71	29.3	749	83.3	0.644	0.852	9.27	0.385
DSJ-06	12.1	15.8	1.97	24.8	3.56	43	824	69.8	1.09	2.27	9.96	0.315
DSJ-07	19.3	17.1	2.07	26.5	5.46	23.9	863	67.8	0.91	3.9	14.1	0.456
DSJ-08	21	24.4	3.11	14.7	8.67	16.1	422	286	4.33	2.21	19	0.71
DSJ-10	18.7	20.5	1.91	15.2	5.63	535	526	32.7	2.97	2.18	11.9	0.371
DSJ-11	17.6	74.5	2.73	33.5	6.87	554	356	48.3	2.38	2.14	18.2	0.587
DSJ-12	5.14	17.8	2.03	26.1	2.39	22.4	1350	16.5	0.198	0.616	3.69	0.098
DSJ-13	7.73	41.4	2	35.4	1.72	13.4	722	9.79	0.294	0.537	8.42	0.194
DSJ-14	9.35	10.2	2.91	26.8	4.86	74.8	1 028	214	0.402	1.03	16.5	0.396
DSJ-15	5.45	8.67	1.96	27.5	3.06	32.9	689	8.43	0.197	0.503	7.6	0.16
DSJ-16	8.68	22.7	3.4	36.6	5.87	41.1	651	16.5	0.353	1.5	33	0.84
DSJ-18	40.5	35.8	6.97	16.3	23.5	324	119	198	6.47	0.966	25.8	1.02
HD-01	6.74	8.46	2.95	21.5	1.31	8.41	1 002	2.25	0.144	1.38	0.602	0.02
HD-02	6	13.1	0.868	18.5	0.923	46.9	2 472	5.03	0.166	1.9	0.635	0.022
HD-03	7.89	8.29	0.833	14.7	0.946	7.22	12 318	867	0.163	1.13	0.593	0.014
HD-04	7.52	7.76	1.61	22	2.77	18.1	920	14.1	1.79	2.77	6.61	0.182
HD-05	7.77	8.18	0.898	14.3	1.71	11.5	5 252	24.4	0.61	0.501	5.85	0.21
HD-06	8.43	9.32	1.27	15.4	2.19	7.8	2 285	15.9	1.01	1.8	4.45	0.154
HD-07	7.3	7.52	1.07	18.9	0.411	42.2	254	2.97	0.156	1.2	0.599	0.019
HD-08	6.67	6.33	2.09	22.2	1.16	118	21 770	473	0.172	2.37	0.907	0.019

表3 三合洞组灰岩稀土元素含量

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Contents of rare earth elements of limestone samples in the Sanhedong Formation

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
DSJ-01	4.51	4.63	0.957	4.45	1.07	0.258	1.46	0.293	1.81	0.388	1.05	0.178	1.07	0.152	22.276
DSJ-02	2.4	2.43	0.44	1.98	0.433	0.103	0.587	0.129	0.779	0.18	0.507	0.081	0.5	0.073	10.622
DSJ-03	17.5	29.8	3.34	11.7	2.07	0.346	2.25	0.409	2.17	0.416	1.13	0.197	1.24	0.182	72.75
DSJ-04	6.46	10.6	1.39	5.77	1.21	0.309	1.47	0.291	1.69	0.335	0.897	0.155	0.946	0.129	31.652
DSJ-05	8.61	13.9	1.68	6.93	1.48	0.361	1.7	0.334	1.93	0.385	1.05	0.175	1.04	0.149	39.724
DSJ-06	12.4	19.4	2.26	8.62	1.59	0.322	1.55	0.293	1.57	0.315	0.82	0.142	0.845	0.118	50.245
DSJ-07	11.4	19.5	2.34	9.47	1.92	0.415	1.98	0.384	2.29	0.456	1.29	0.222	1.39	0.204	53.261
DSJ-08	17.6	32.8	3.93	15.8	3.35	0.528	3.19	0.611	3.58	0.71	1.92	0.343	2.19	0.312	86.864
DSJ-09	8.61	16.5	1.96	7.82	1.59	0.296	1.62	0.32	1.89	0.388	1.09	0.205	1.3	0.19	43.779
DSJ-10	12.8	21	2.76	10.8	2	0.596	1.95	0.341	1.88	0.371	1	0.167	1.03	0.146	56.841
DSJ-11	10.6	21.2	2.97	12.7	2.78	0.462	2.69	0.535	3.07	0.587	1.59	0.272	1.71	0.231	61.397
DSJ-12	2.91	3.92	0.491	1.94	0.375	0.094	0.419	0.081	0.468	0.098	0.264	0.044	0.251	0.036	11.391
DSJ-13	3.06	3.81	0.62	2.69	0.604	0.138	0.697	0.143	0.886	0.194	0.545	0.091	0.566	0.081	14.125
DSJ-14	6.02	6.24	1.24	5.56	1.26	0.33	1.53	0.299	1.86	0.396	1.04	0.175	1.01	0.132	27.092
DSJ-15	2.86	2.71	0.537	2.35	0.531	0.134	0.648	0.126	0.747	0.16	0.43	0.07	0.414	0.06	11.777
DSJ-16	11.6	11	2.39	10.9	2.69	0.675	3.28	0.655	4.02	0.84	2.21	0.354	2.08	0.282	52.976
DSJ-17	8.8	11.9	2.04	9.23	2.14	0.507	2.31	0.438	2.47	0.472	1.21	0.194	1.14	0.157	43.008
DSJ-18	17.3	35.2	4.52	19.5	5.17	1.26	5.47	1.1	5.82	1.02	2.51	0.426	2.56	0.339	102.195
HD-01	0.404	0.75	0.086	0.382	0.077	0.02	0.086	0.016	0.099	0.02	0.057	0.01	0.061	0.008	2.076
HD-02	0.505	0.878	0.093	0.382	0.08	0.015	0.08	0.016	0.1	0.022	0.059	0.013	0.083	0.012	2.338
HD-03	0.258	0.438	0.051	0.225	0.053	0.012	0.051	0.01	0.067	0.014	0.039	0.008	0.045	0.007	1.278
HD-04	9.08	13.9	1.46	5.2	0.856	0.158	0.88	0.147	0.847	0.182	0.494	0.087	0.501	0.076	33.868
HD-05	2.59	5.86	0.83	3.93	1.07	0.185	1.04	0.228	1.24	0.21	0.533	0.087	0.53	0.072	18.405
HD-06	2	4.32	0.574	2.55	0.662	0.128	0.694	0.149	0.834	0.154	0.385	0.065	0.403	0.058	12.976
HD-07	0.558	1.02	0.117	0.448	0.09	0.017	0.09	0.017	0.094	0.019	0.054	0.01	0.058	0.008	2.6
HD-08	0.666	1.09	0.126	0.495	0.099	0.049	0.095	0.017	0.108	0.019	0.056	0.008	0.056	0.008	2.892

表 4 三合洞组灰岩样品稀土元素比值

Table 4 Ratios of rare earth elements of limestone samples in the Sanhedong Formation

样品编号	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Ce/Yb) _N	(Gd/Yb) _N	δEu	δCe
DSJ-01	1.72	2.863	2.632	1.136	1.104	0.629	0.077
DSJ-02	0.72	3.261	3.461	1.276	0.950	0.623	0.165
DSJ-03	4.66	9.587	5.279	6.312	1.468	0.486	0.037
DSJ-04	2.03	4.639	3.334	2.943	1.257	0.705	0.085
DSJ-05	2.65	5.624	3.633	3.510	1.322	0.692	0.069
DSJ-06	3.22	9.969	4.870	6.030	1.484	0.617	0.050
DSJ-07	2.14	5.571	3.708	3.685	1.152	0.643	0.052
DSJ-08	3.73	5.459	3.281	3.934	1.178	0.485	0.034
DSJ-09	2.65	4.499	3.382	3.334	1.008	0.557	0.070
DSJ-10	2.84	8.442	3.997	5.355	1.532	0.908	0.043
DSJ-11	4.11	4.211	2.381	3.256	1.273	0.508	0.048
DSJ-12	2.00	7.876	4.846	4.102	1.351	0.720	0.197
DSJ-13	1.13	3.673	3.164	1.768	0.996	0.646	0.144
DSJ-14	2.27	4.049	2.984	1.623	1.226	0.724	0.060
DSJ-15	0.56	4.693	3.363	1.719	1.266	0.696	0.127
DSJ-16	1.78	3.789	2.693	1.389	1.276	0.692	0.028
DSJ-17	1.25	5.244	2.568	2.742	1.639	0.691	0.048
DSJ-18	4.23	4.591	2.090	3.611	1.729	0.717	0.032
HD-01	2.32	4.499	3.276	3.229	1.141	0.746	1.549
HD-02	3.12	4.133	3.942	2.778	0.780	0.565	1.341
HD-03	0.30	3.895	3.040	2.556	0.917	0.694	2.389
HD-04	4.28	12.312	6.624	7.287	1.421	0.550	0.075
HD-05	2.16	3.320	1.512	2.904	1.588	0.528	0.196
HD-06	3.31	3.371	1.887	2.815	1.393	0.571	0.270
HD-07	3.14	6.536	3.872	4.619	1.255	0.570	1.121
HD-08	0.45	8.079	4.201	5.112	1.372	1.519	0.932

$\delta\text{Ce} = 2 \text{ Ce}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$; $\delta\text{Eu} = 2 \text{ Eu}_N / (\text{La}_N + \text{Pr}_N)$; 北美页岩标准化值引自 McDonnough and Sun, 1995。

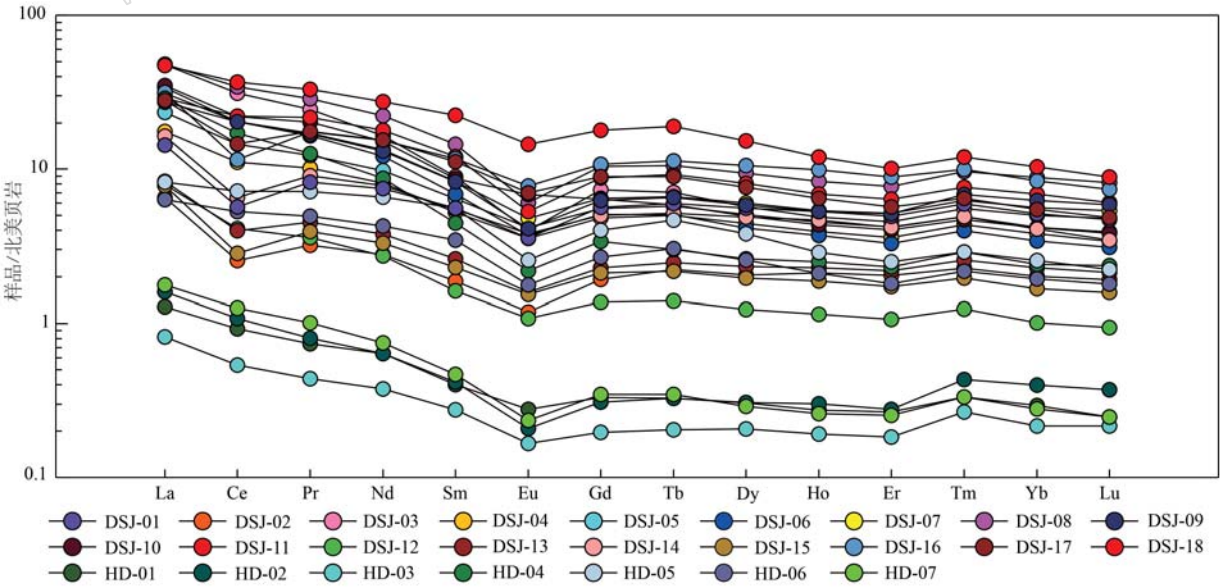


图 5 三合洞组灰岩稀土元素配分图

Fig. 5 Rare earth distribution diagram of the Sanhedong Formation

4 讨论

4.1 古盐度

古盐度可为古环境重建提供重要依据。Keith 和 Weber (1964) 利用碳、氧同位素组成研究灰岩和含钙化石, 提出了经验公式 $Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$, 来研究侏罗纪以及年代更新的样品, 当 Z 值大于 120, 指示海相碳酸盐岩; Z 值小于 120, 指示淡水碳酸盐岩。公式中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均为 V-PDB 标准。三合洞灰岩分析样品计算结果如表 1 所示, Z 值在 123.43~131.67 之间, 均大于 120, 表明三合洞组碳酸盐岩沉积于海洋环境。

由于同位素交换作用, 使湖相淡水碳酸盐岩与海相碳酸盐岩中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值十分相似, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值显示出明显不同, 因此, 利用 $\delta^{13}\text{C}$ 来表示古盐度的研究方法较为准确可靠(张秀莲, 1985)。三合洞组样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 0.9‰~4.3‰之间, 属于海相碳酸盐类与蒸发碳酸盐类(图 6), 反映当时水体含盐度较高。

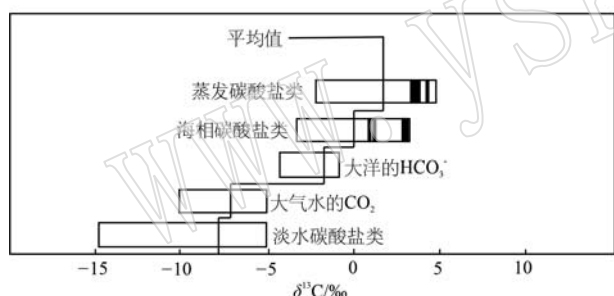


图 6 碳同位素在各种碳酸盐岩和有关物质中的分布 (Schopf, 1980)

Fig. 6 The distribution of C isotope in carbonate and other related materials (Schopf, 1980)

阴影部分为三合洞组碳酸盐岩的碳同位素分布范围
the range of C isotope composition in carbonate of the Sanhedong
Formation expressed by the shadow area

Ba 的溶解度较 Sr 的低, 在水体中早期就会沉淀析出, 之后才析出 Sr。Sr/Ba 值上升指示水体盐度上升, 气候干旱, 蒸发强烈; 比值下降则表明气候湿润, 蒸发弱; Sr/Ba 值大于 1.0, 为咸水环境, 0.6~1.0 为半咸水环境, 小于 0.6 为淡水环境 (Wignall *et al.*, 1995; Drummond, 2002)。

大三界灰岩样品的 Sr/Ba 值为 0.60~81.82, 平均值为 30.84, 表明大三界灰岩样品形成于海相咸水

环境。河东石膏矿灰岩 Sr/Ba 值为 14.21~491.45, 平均 188.34, 同样形成于海相咸水环境。三合洞组灰岩样品的 Sr/Ba 值为 0.60~491.45, 平均 85.62 (表 5), 指示三合洞组灰岩形成于海相咸水环境。

4.2 古气候

Sr/Cu 值可以用来判别气候的温湿与干热, 研究认为, Sr/Cu 值在 1.3~5 之间表示气候温湿, 大于 5 表示气候干热 (Lerman and Baccini, 1978)。三合洞组灰岩样品的 Sr/Cu 值在 5.06~18 767.24 之间, 平均值为 1 691.15 (表 5), 指示干热的气候条件。高 Rb/Sr 值指示湿润的气候条件, 低 Rb/Sr 值指示干旱的气候条件 (何刚等, 2006; 郁科科等, 2023), 这与 Sr/Cu 值对古气候的指示相反。三合洞组灰岩样品 Rb/Sr 值低, 存在与 Sr/Cu 值相反的演变趋势, 同样指示干热环境。

4.3 氧化-还原条件

沉积环境的氧化-还原情况可以利用 Cu/Zn 值来反映, Cu/Zn 值越高, 水体的含氧量就会越低, 还原程度就越高 (郑一丁等, 2015)。田景春 (1900) 认为 Cu/Zn < 0.21, 为还原环境, 在 0.21~0.35 时为弱还原环境, 在 0.35~0.50 时为还原-氧化环境。在不受大规模变质作用的影响下, 沉积物中的 Cu/Zn 值保持相对稳定, 才可以用来反映古沉积环境 (樊秋爽等, 2022)。三合洞组灰岩样品的 Cu/Zn 值在 0.01~0.75 之间 (表 6), 平均 0.16, 指示还原环境。U、V、Cr、Co 等微量元素对特定的氧化还原环境敏感, 氧化还原条件控制这些微量元素的富集程度 (Russell and Morford, 2001)。U、V、Ni、Cr 和 Co 元素在氧化环境中易迁移, 在还原环境中易沉淀, Th 元素在这两种环境下溶解度都不高, 容易富集在沉积物中。通常认为 V/Cr 值小于 2 时表示含氧的沉积环境, 2~4.25 为贫氧的沉积环境, 大于 4.25 时指示还原环境; Ni/Co 值小于 5 时指示氧化环境, 5~7 之间为贫氧环境, 大于 7 时指示缺氧环境; 一般 U/Th 值大于 1.25, 为缺氧环境, 在 0.75~1.25 之间为贫氧环境, 小于 0.75 为氧化环境 (Adams and Weaver, 1958; Jones and Manning, 1994; Algeo and Maynard, 2004)。三合洞组样品 V/Cr 值在 0.19~1.93 之间, 平均 0.85, 指示含氧沉积环境; Ni/Co 值在 2.34~21.31 之间, 平均 12.48, 指示缺氧环境; U/Th 值在 0.15~13.78 之间, 平均 3.85, 显示为缺氧环境。

沉积期的海水稀土元素组成、杂质的混染与其他流体注入以及后期成岩作用的改造都影响海相碳

酸盐岩稀土元素分布特征(汤好书等, 2009)。研究表明,陆源沉积物与海相沉积物中 Y/Ho 值差距较大,陆源沉积物 Y/Ho 值一般在 26~28,海相沉积物一般为 44~72(Webb and Kamber, 2000; Nothdurft *et*

al., 2004)。因此, Y/Ho 值可以有效地指示海相沉积环境受陆源物质的混染程度。三合洞组样品的 Y/Ho 值平均为 33.31(表 5), 小于 44, 反映研究区沉积时受到陆源碎屑混染的影响, 当 Cr 受陆源碎屑影

表 5 三合洞组微量元素比值
Table 5 Ratios of trace elements in the Sanhedong Formation

样品原号	Sr/Ba	Sr/Cu	Rb/Sr	Cu/Zn	V/Cr	Ni/Co	U/Th	Y/Ho
DSJ-01	57.52	228.45	0.002	0.19	0.82	12.12	11.28	31.44
DSJ-02	64.75	205.66	0.002	0.03	0.70	16.17	2.13	32.06
DSJ-03	22.18	546.32	0.005	0.09	0.81	17.52	2.36	25.00
DSJ-04	35.07	125.57	0.005	0.44	0.81	11.71	1.69	24.12
DSJ-05	8.99	201.89	0.003	0.13	1.27	11.28	1.32	24.08
DSJ-06	11.81	231.46	0.005	0.08	0.77	12.59	2.08	31.62
DSJ-07	12.73	158.06	0.004	0.23	1.13	12.80	4.29	30.92
DSJ-08	1.48	48.67	0.130	0.54	0.86	4.73	0.51	26.76
DSJ-09	9.01	350.35	0.004	0.14	1.93	15.75	4.23	29.90
DSJ-10	16.09	93.43	0.023	0.01	0.91	7.96	0.73	32.08
DSJ-11	7.37	51.82	0.043	0.01	0.24	12.27	0.90	31.01
DSJ-12	81.82	564.85	0.001	0.11	0.29	12.86	3.11	37.65
DSJ-13	73.75	419.77	0.003	0.13	0.19	17.70	1.83	43.40
DSJ-14	4.80	211.52	0.003	0.06	0.92	9.21	2.56	41.67
DSJ-15	81.73	225.16	0.002	0.09	0.63	14.03	2.55	47.50
DSJ-16	39.45	110.90	0.003	0.14	0.38	10.76	4.25	39.29
DSJ-17	16.30	33.24	0.020	0.75	1.18	6.38	0.53	33.90
DSJ-18	0.60	5.06	0.424	0.07	1.13	2.34	0.15	25.29
HD-01	445.33	764.89	0.001	0.16	0.80	7.29	9.58	30.10
HD-02	491.45	2 678.22	0.001	0.02	0.46	21.31	11.45	28.86
HD-03	14.21	13 021.14	0.001	0.13	0.95	17.65	6.93	42.36
HD-04	65.25	332.13	0.005	0.15	0.97	13.66	1.55	36.32
HD-05	215.25	3 071.35	0.001	0.15	0.95	15.92	0.82	27.86
HD-06	143.71	1 043.38	0.001	0.28	0.90	12.13	1.78	28.90
HD-07	85.52	618.00	0.004	0.01	0.97	17.66	7.69	31.53
HD-08	46.03	18 767.24	0.001	0.01	1.05	10.62	13.78	47.74

表 6 三合洞组氧化还原环境判别参数表
Table 6 Table of discrimination parameters for redox environment of the Sanhedong Formation

氧化还原元素比值	比值范围	氧化还原环境	三合洞组
Cu/Zn	0.35~0.50	还原-氧化	0.01~0.75 (0.16)
	0.21~0.35	弱还原环境	
	<0.21	还原环境	
V/Cr	>4.25	次氧-缺氧环境	0.19~1.93 (0.85)
	2~4.25	贫氧环境	
	<2	含氧环境	
Ni/Co	>7	缺氧环境	2.34~21.31 (12.48)
	5~7	次富氧环境	
	<5	氧化环境	
U/Th	>1.25	缺氧环境	0.15~13.78 (3.85)
	0.75~1.25	贫氧环境	
	<1.25	氧化环境	

响,使 V/Cr 值降低,在判定氧化还原环境时效用会受到一定制约,所以 V/Cr 值显示的氧化环境的结果并不一定准确。

上述研究结果显示,河西地区上三叠统三合洞组总体形成于缺氧的还原环境。

4.4 大地构造位置

晚三叠世末,秦岭海槽、特提斯海槽闭合,扬子板块与兰坪-思茅地块拼合(Huang and Opdyke, 2016),龙门山和大巴山台缘拗褶带发生逆冲推覆,盆山转化,形成前陆盆地(李勇等, 2011)。须家河组一段位于扬子地块西北部四川盆地的龙门山前陆盆地,属晚三叠世卡尼期-诺利期(邓康龄等, 1982; 黄国清, 1982),沉积年代与三合洞组相似,在地球化学特征上与研究区三合洞组具有相似性。具体表

现在须家河组一段与三合洞组沉积岩稀土元素标准化配分曲线基本上一致(须家河组一段稀土元素含量明显高于三合洞组,但总体配分趋势近于一致)(图7)。

通过 La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10 和 Th-Co-Zr/10 图解(图8)发现三合洞组样品有效落点大部分都落在大陆岛弧范围,须家河组样品一段绝大部分也都落在大陆岛弧范围,说明二者在构造背景上具有相似性。

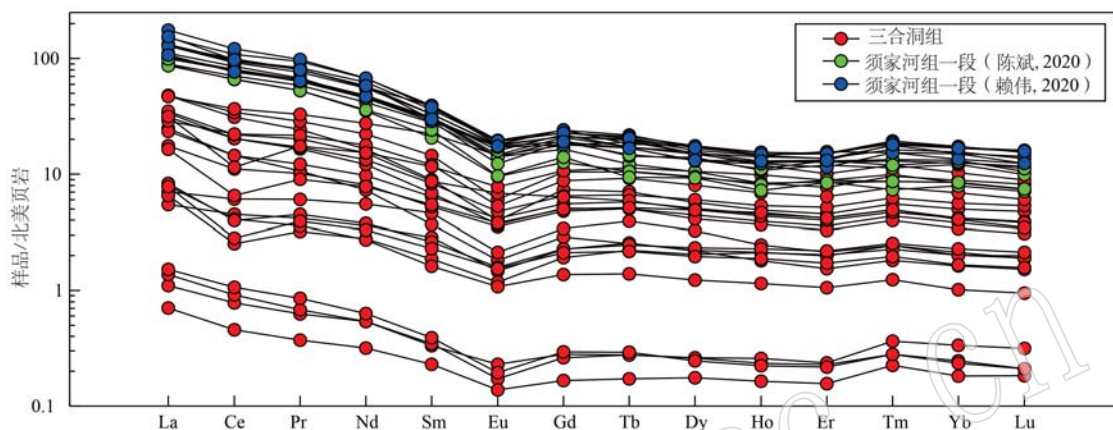


图7 三合洞组与须家河组一段稀土元素配分图

Fig. 7 REE distribution map of the first member of the Sanhedong Formation and Xujiahe Formation

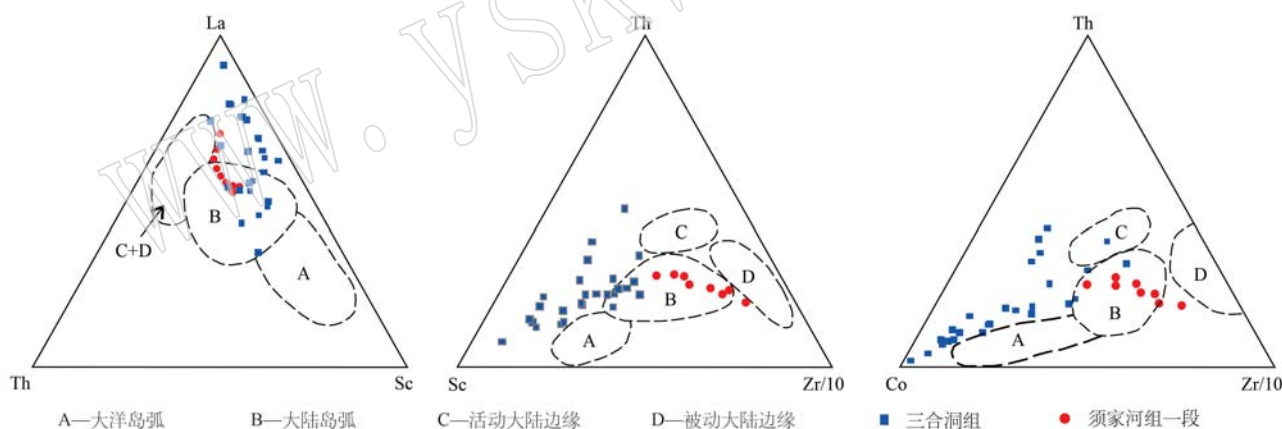


图8 三合洞组与须家河组一段组样品构造背景判别图解(据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 8 Background discriminant diagrams of sample structure in the Sanhedong Formation and Xujiahe Formation (Bhatia and Crook, 1986)

赖玮等(2019)、陈斌(2020)、赖玮(2020)通过须家河组一段 Sr/Ba、V/Cr、U/Th 值和 δEu 指标判别须家河组一段为海相还原环境,这一结果与三合洞组沉积环境相似,这些地球化学特征指示兰坪盆地北部与上扬子板块北部沉积岩的地球化学特征相似。不仅如此,三合洞组 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 值平均 0.708 0,上扬子板块南部地区的贵州关岭生物群中海百合化石 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 值绝大部分大于 0.707 7(王尚彦, 2005)(表7),显示三合洞组与关岭生物群中海百合化

表7 三合洞组与须家河组一段数据对比

Table 7 Comparison of data from the first section of the Sanhedong Formation and Xujiahe Formation

层位	Sr/Ba	V/Cr	U/Th	δEu	$^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$
三合洞组	0.601~ 491.45	0.19~ 1.27	0.15~ 13.78	0.11~ 0.42	0.707 7~ 0.709 0
须家河组一段 (陈斌, 2020)	0.60~ 1.05	2.49~ 3.59	0.32~ 0.89	—	—
须家河组一段 (赖玮, 2020)	—	—	—	0.21~ 0.24	—
贵州关岭生物群 (王尚彦, 2005)	—	—	—	—	>0.707 7

石⁸⁶Sr/⁸⁷Sr 值相似,表明在晚三叠世两个地区海平面相差不大。

6 结论

(1) 三合洞组碳酸盐岩 Z 值计算结果全部大于 120,且 Sr/Ba 值平均 78.93,远大于 1,揭示了三合洞组为海相咸水沉积环境,Sr/Cu 值为 5.06~18 767.24,平均 1 696.48,Rb/Sr 值低,存在与 Sr/Cu 值相反的演变趋势,都反映三合洞组形成于干热的气候条件。Cu/Zn 平均值 0.16、V/Cr 平均值 0.85、Ni/Co 平均值 12.48、U/Th 平均值 3.85,共同反映三合洞组总体形成于缺氧的还原环境。

(2) $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ 图解与 $\Sigma\text{REE}-\delta\text{Ce}$ 图解显示不出明显的正相关关系,表明三合洞组灰岩的稀土元素地球化学组成较少受到后期成岩作用的影响,但 Y/Ho 值反映在沉积时陆源碎屑混染作用不同程度地影响了 V/Cr 值。

(3) 兰坪盆地北部晚三叠世卡尼期-诺利期三合洞组与同时期四川盆地北部地区须家河组具有相似的稀土元素地球化学特征、氧化还原环境,指示兰坪盆地与上扬子板块四川盆地可能具有相一致的构造背景和沉积环境。

References

- Adams J A and Weaver C E. 1958. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes; Example of concept of geochemical facies[J]. AAPG Bulletin, 42(2): 387~430.
- Algeo T J and Maynard J B. 2004. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. Chemical Geology, 206(3~4): 289~318.
- Azmy K, Veizer J, Michael G, *et al.* 1998. Oxygen and carbon isotopic composition of Silurian brachiopods: Implications for coeval seawater [J]. Geological Society of America Bulletin, 110 (11): 1 499~1 512.
- Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92(2): 181~193.
- Chen Bin. 2020. The Sedimentary Characteristics and Formation Mechanism of Black Shale in the Southern Longmenshan Foreland Basin in the Late Triassic[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuekun, Liao Zongting, Wei Zhihong, *et al.* 2004. Characteristics and tectonic evolution of the Lanping-Simaao Mesozoic Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 26(3): 219~222, 228(in Chinese with English abstract).
- Drummond C N. 2002. Immanence and configuration[J]. Journal of Geoscience Education, 50(3): 346~348.
- Deng Kangling, He Li, Qin Dayou, *et al.* 1982. The earlier Late Triassic sequence and its sedimentary environment in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 3(3): 204~210(in Chinese with English abstract).
- Deng Xiaoliang, Lin Liangbiao, Yu Yu, *et al.* 2020. Geochemical characteristics and palaeoenvironmental significance of Qixia Formation in Jianghe area, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 47(2): 198~209 (in Chinese with English abstract).
- Elderfield H, Upstill-Goddard R and Sholkovitz E R. 1990. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(4): 971~991.
- Fan Qishuang, Xia Guoqing, Li Gaojie, *et al.* 2021. Analytical methods and research progress of redox conditions in the paleo-ocean [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1 151~1 171 (in Chinese with English abstract).
- Glein C R and Waite J H. 2020. The carbonate geochemistry of Enceladus' ocean [J]. Geophysical Research Letters, 47(3): e85885.
- He Gang and Li Shuangying. 2006. Global palaeoclimate characteristics and research technique of late palaeozoic [J]. Geology of Anhui, 16(4): 241~246, 256(in Chinese with English abstract).
- Huang Guoqing. 1982. Discussion on paleontological characteristics and age division of anticline Ziliujing Formation and Xujiache Formation in Kaixian Hot Spring[J]. Acta Geologica Sichuan, 3(2): 73~74 (in Chinese with English abstract).
- Huang K and Opdyke N D. 2016. Paleomagnetism of the Upper Triassic rocks from south of the Ailaoshan Suture and the timing of the amalgamation between the South China and the Indochina Blocks[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 119: 118~127.
- Huang Xiaoming and Cong Feng. 2017. An approach to the stratigraphic ages of the Upper Triassic Sanhedong Formation in Lushi, Yunnan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(2): 40~45 (in Chinese with English abstract).

- Jones B and Manning D A. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 111(1~4): 111~129.
- Keith M and Weber J. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10~11): 1 787~1 816.
- Lai Wei. 2020. Geochemical Characteristics of Xujiahe Formation Mudstones in the Northeast Sichuan and their Geological Significance [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Lai Wei, Ruan Zhuang, Wang Lidong, *et al.* 2019. Geochemical characteristics of Xujiahe Formation mudstones in the Qilixia section of northeast Sichuan area and their geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(5): 657~672 (in Chinese with English abstract).
- Lerman A and Baccini P. 1978. Lakes: Chemistry, geology, physics [J]. *Journal of Geology*, 88(2): 249~250.
- Li Feng, Ru Shanshan and Wu Jing. 2012. Journal of Yunnan University Regional tectonic and Cu-polymetallic metallogenic evolution in Lanping-Simaobasin [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 34(S2): 134~142 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengwu, Gao Rui, Cui Junwen, *et al.* 2005. Paleomagnetic results from the three rivers region SW China: Implications for the collisional and accretionary history [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(5): 387~404 (in Chinese with English abstract).
- Li Yike, Wang Anjian, Cao Dianhua, *et al.* 2012. Sequence stratigraphic definition of Late Triassic salt-bearing horizons in northern Lanping basin of northwestern Yunnan Province and its implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1 313~1 322 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Su D C, Dong S L, *et al.* 2011. The recognition of the basal unconformity in the Longmenshan foreland basin: Transition from passive continent margin to foreland basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2 413~2 422.
- Li Yike and Wang Anjian. 2017. The tectonic transformation mechanism and metallogenic response of the Lanping-Simaobasin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(S1): 11~14 (in Chinese with English abstract).
- Liao Zongting and Chen Yuekun. 2005. Nature and evolution of Lanping-Simaobasin prototype [J]. *Journal of Tongji University (Natural Sciences)*, 33(11): 1 527~1 531 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qin. 2014. Structural Deformation Characteristics and Development Mechanism of Maocaoping Copper Deposit in the Western Margin of Lanping Basin [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Liu Shilin, Liu Yunhua, Lin Ge, *et al.* 2006. REE geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Neogene Nantpu Sag, Bohai Basin [J]. *Geoscience*, 20(3): 449~456 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223~253.
- Miao Zhongying, Zhang Zhen, Zheng Mianping, *et al.* 2017. Tectonic evolution of eastern Tethys and formation of evaporite in Lanping-Simaobasin, Southwest China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(6): 883~896 (in Chinese with English abstract).
- Mou Chuanlong, Wang Jian, Yu Qian, *et al.* 1999. The evolution of the sedimentary basin in Lanping area during Mesozoic Cenozoic [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 19(3): 30~36 (in Chinese with English abstract).
- Nothdurft L D, Webb G E and Kamber B S. 2004. Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia: Confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(2): 263~283.
- Qing H R and Veizer J. 1994. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(20): 4 429~4 442.
- Russell A and Morford J L. 2001. The behavior of redox-sensitive metals across a laminated-massive-laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia [J]. *Marine Geology*, 174(1~4): 341~354.
- Schopf T J. 1980. Paleooceanography [M]. Harvard University Press.
- Tan Fuwen, Pan Guitang and Wang Jian. 2001. Devonian Triassic Basin-range transformation and the tectonic evolution of paleo-tethys in Western Yunnan, China [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(3): 179~185 (in Chinese with English abstract).
- Tang Haoshu, Chen Yanjing, Wu Guang, *et al.* 2009. Rare earth element geochemistry of carbonates of Dashiqiao Formation, Lioche Group, eastern Liaoning Province: Implications for Lomagundi event [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3 075~3 093 (in Chinese with English abstract).
- Tang Liang, Xue Chuandong, Yang Tiannan, *et al.* 2016. Late permian to early triassic tectonostratigraphy of Madeng area, northwestern Yunnan, S. W. China: Volcanics zircon U-Pb dating [J]. *Acta*

- Petrologica Sinica, 32(8): 2 535~2 554 (in Chinese with English abstract).
- Tao Xiaofeng, Zhu Lidong, Liu Dengzhong, *et al.* 2002. The formation and evolution of the Lanping basin in western Yunnan[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 29(5): 521~525 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jingchun. 2016. Sedimentary Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 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).
- Wang Shangyan. 2005. Environmental significance of crinoid fossils $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Guanling biota, Guizhou [C]//Geological Society of China. The 6th World Chinese Geological Science Symposium and the 2005 Academic Annual Meeting of the Geological Society of China Abstracts (in Chinese).
- Webb G E and Kamber B S. 2000. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: A new shallow seawater proxy[J]. Geochimica et Cosmochimica acta, 64(9): 1 557~1 565.
- Wen Haixia, Shi He and Wang Daoyong. 2011. New information and geological sense of bivalve fossils from the Waigucun Formation in southeast of the Simao basin, Yunnan, China[J]. Geological Bulletin of China, 30(1): 179~183 (in Chinese with English abstract).
- Wignall P, Hallam A, Lai X L, *et al.* 1995. Palaeoenvironmental changes across the Permian/Triassic boundary at Shangsi (N. Sichuan, China)[J]. Historical Biology, 10(2): 175~189.
- Wu Qiangwang, Du Yixing, Jin Xin, *et al.* 2022. Conodont biostratigraphy and sedimentary facies of the Sanhedong Formation (Norian, Upper Triassic) in Weishan, western Yunnan Province[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 61(1): 51~64 (in Chinese with English abstract).
- Xu Shihai, Gu Xuexiang, Tang Juxing, *et al.* 2005. Stable isotopic geochemistry of three major types of Cu-Ag polymetallic deposits in the Lanping Basin, Yunnan[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24(4): 309~316 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, *et al.* 2002. Analysis of ore-forming background and tectonic system of Lanping Basin, western Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 21(1): 36~44 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bo, Peng Zejian and Zou Qiping. 2020. The feature and genesis of Huachangshan mississippi-type Pb-Zn deposit in Lanping[J]. Yunnan Geology, 39(3): 383~388 (in Chinese with English abstract).
- Yang Donghua, Tan Bo, Yin Liuqing, *et al.* 2016. The feature of Donzhiyuan Pb-Zn deposit an prospecting suggestion in Lanping Yunnan[J]. Yunnan Geology, 35(2): 147~150 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hucheng, Lin Liangbiao, Yu Yu, *et al.* 2022. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of middle carbonate rocks in Tianquan area, southwestern Sichuan Province, China[J]. Mineralogy and Petrology, 42(2): 47~59 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianxu, Yin Hongwei, Zhang Zhen, *et al.* 2013. Geologic Settings of the Potassium Formations in the Lanping-Simao Basin, Yunnan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 37(4): 633~640 (in Chinese with English abstract).
- Yang Limei, Wu Jianjing, Luo Guangming, *et al.* 2015. The feature and genesis of Luoza Pb-Zn multimetallic deposit in Weixi, Yunnan [J]. Yunnan Geology, 34(2): 257~261 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lifei. 2020. Tectonic Evolution and Metallogenic System in Lanping Basin, Yunnan Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Yang Lin, Wang Qingfei, Wang Yanning, *et al.* 2018. Proto-to Paleotethyan evolution of the eastern margin of Simao block[J]. Gondwana Research, 62: 61~74.
- Yu Keke, Liu Lipeng, Li Aizhen, *et al.* 2023. The Rb/Sr ratios of the bulk sediments in Lake Chaonaqiu of Liupan Mountains, the western Chinese Loess Plateau and its paleoclimate implications[J]. Quaternary Sciences, 43(1): 122~130 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Feng, Tang Juxing, Chen Hongde, *et al.* 2010. Evolution of Lanping Basin and characteristics of minerogenic fluid in Lanping Basin [J]. Acta Mineralogica Sinica, 30(2): 223~229 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianjun. 2017. Research on Sedimentary Characteristics and Provenance of Pliocene Epoch Formation in Husa Basin, Western of Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiulian. 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and aliootemperature of Seawater[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 3(4): 17~30 (in Chinese with English abstract).

- Zhao Yanyan, Li Sanzhong, Li Da, *et al.* 2019. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications geotectonica et metallogenia[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 141~167(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanzhi. 1996. Rock Stratigraphy in Yunnan Province[M]. China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yiding, Lei Yuhong, Zhang Liqiang, *et al.* 2015. Characteristics of element geochemistry and paleo sedimentary environment revolution of Zhangjatan shale in the southeast of Ordos Basin and its geological significance for oil and gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(7): 1 395~1 404(in Chinese with English abstract).
- Zhu Duolu, Deng Haijun, Kang Hongjie, *et al.* 2013. Structural features of faults in the Baiyangping-Yanzidong area of the Lanping-Simaobasin and their relationship to mineralization[J]. *Geology and Exploration*, 49(2): 323~329(in Chinese with English abstract).
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, *et al.* 2012. Triassic collision in the Paleotethys Ocean constrained by volcanic activity in SW China[J]. *Lithos*, 144~145: 145~160.
- 陈 斌. 2020. 晚三叠世龙门山前陆盆地南部黑色页岩的沉积特征与形成机制[D]. 成都: 成都理工大学.
- 陈跃昆, 廖宗廷, 魏志红, 等. 2004. 兰坪-思茅中生代盆地的特征及构造演化[J]. *石油实验地质*, (3): 219~222, 228.
- 邓康龄, 何 鲤, 秦大有, 等. 1982. 四川盆地西部晚三叠世早期地层及其沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 3(3): 204~210.
- 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.
- 樊秋爽, 夏国清, 李高杰, 等. 2022. 古海洋氧化还原条件分析方法与研究进展[J]. *沉积学报*, 40(5): 1 151~1 171.
- 何 刚, 李双应. 2006. 晚古生代全球古气候特征及其研究方法[J]. *安徽地质*, 16(4): 241~246, 256.
- 黄国清. 1982. 开县温泉赫天词背斜自流井组与须家河组的古生物特征及时代划分的讨论[J]. *四川地质学报*, 3(2): 73~74.
- 黄晓明, 丛 峰. 2017. 云南鲁史三合洞组地层时代讨论[J]. *沉积与特提斯地质*, 37(2): 40~45.
- 赖 玮. 2020. 川东北须家河组泥岩地球化学特征及地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 赖 玮, 阮 壮, 王黎栋, 等. 2019. 川东北地区七里峡剖面须家河组泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(5): 657~672.
- 李 峰, 汝珊珊, 吴 静. 2012. 兰坪-思茅盆地区域构造及铜多金属成矿演化[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 34(S2): 134~142.
- 李朋武, 高 锐, 崔军文, 等. 2005. 西藏和云南三江地区特提斯洋盆演化历史的古地磁分析[J]. *地球学报*, 26(5): 387~404.
- 李以科, 王安建. 2017. 滇西兰坪-思茅盆地构造转换机制及成矿响应[J]. *地球学报*, 38(S1): 11~14.
- 李以科, 王安建, 曹殿华, 等. 2012. 滇西兰坪盆地北部上三叠统含盐层位的厘定及其意义[J]. *地质通报*, 31(8): 1 313~1 322.
- 李 勇, 苏德辰, 董顺利, 等. 2011. 龙门山前陆盆地底部不整合面: 被动大陆边缘到前陆盆地的转换[J]. *岩石学报*, 27(8): 2 413~2 422.
- 李志明, 张长江, 廖宗廷, 等. 2004. 滇西兰坪盆地上三叠统三合洞组沉积古温度研究[C]//第三届全国沉积学大会. 第三届全国沉积学大会论文摘要汇编.
- 廖宗廷, 陈跃昆. 2005. 兰坪-思茅盆地原型的性质及演化[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(11): 109~113.
- 刘 琴. 2014. 兰坪盆地西缘茅草坪铜矿区构造变形特征及发育机制[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 刘士林, 刘蕴华, 林 舸, 等. 2006. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 20(3): 449~456.
- 苗忠英, 张 震, 郑绵平, 等. 2017. 东特提斯构造演化与兰坪-思茅盆地蒸发岩的形成[J]. *地球学报*, 38(6): 883~896.
- 牟传龙, 王 剑, 余 谦, 等. 1999. 兰坪中新生代沉积盆地演化[J]. *矿物岩石*, 19(3): 30~36.
- 谭富文, 潘桂棠, 王 剑. 2001. 滇西泥盆纪-三叠纪盆-山转换过程与特提斯构造演化[J]. *矿物岩石*, 21(3): 179~185.
- 汤好书, 陈衍景, 武 广, 等. 2009. 辽东辽河群大石桥组碳酸盐岩稀土元素地球化学及其对 Lomagundi 事件的指示[J]. *岩石学报*, 25(11): 3 075~3 093.
- 唐 靓, 薛传东, 杨天南, 等. 2016. 滇西马登地区晚二叠世-早三叠世地层组合及年代学: 火山岩锆石 U-Pb 定年证据[J]. *岩石学报*, 32(8): 2 535~2 554.
- 陶晓风, 朱利东, 刘登忠, 等. 2002. 滇西兰坪盆地的形成及演化[J]. *成都理工学院学报*, 29(5): 521~525.
- 田景春. 1900. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 文海霞, 石 和, 王道永. 2011. 云南思茅盆地东南部上三叠统歪古村组双壳化石的新资料及其地质意义[J]. *地质通报*, 30(1): 1~10.

179~183.

- 吴强旺, 杜怡星, 金鑫, 等. 2022. 滇西巍山地区上三叠统诺利阶三合洞组牙形石年代及沉积相分析[J]. 古生物学报, 61(1): 51~64.
- 徐仕海, 顾雪祥, 唐菊兴, 等. 2005. 兰坪盆地三类主要铜银多金属矿床的稳定同位素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(4): 309~316.
- 王尚彦. 2005. 贵州关岭生物群中海百合化石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的环境意义[C]//中国地质学会. 第六届世界华人地质科学研讨会和中国地质学会二零零五年学术年会论文摘要集.
- 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 2002. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 21(1): 36~44.
- 杨波, 彭泽建, 邹启平. 2020. 云南兰坪县华昌山类密西西比型铅锌矿特征与成因[J]. 云南地质, 39(3): 383~388.
- 杨东华, 谭波, 尹留青, 等. 2016. 云南兰坪县东至岩铅锌矿特征及找矿建议[J]. 云南地质, 35(2): 147~150.
- 杨虎城, 林良彪, 余瑜, 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.
- 杨尖絮, 尹宏伟, 张震, 等. 2013. 滇西兰坪-思茅盆地成钾地质条件分析[J]. 大地构造与成矿学, 37(4): 633~640.
- 杨立飞. 2020. 兰坪盆地构造演化与成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学.
- 杨丽梅, 伍建兢, 罗光明. 2015. 云南维西县洛扎铅锌多金属矿特征及成因[J]. 云南地质, 34(2): 257~261.
- 郁科科, 刘利鹏, 李爱珍, 等. 2023. 六盘山朝那湫湖泊沉积物Rb/Sr比值及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 43(1): 122~130.
- 张峰, 唐菊兴, 陈洪德, 等. 2010. 兰坪盆地演化与盆内成矿流体特征[J]. 矿物学报, 30(2): 223~229.
- 张建军. 2017. 滇西地区户撒盆地上新世沉积特征及物源分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 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, 3(4): 17~30.
- 张远志. 1996. 云南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 赵彦彦, 李三忠, 李达, 等. 2019. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 141~167.
- 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 2015. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 26(7): 1395~1404.
- 朱多录, 邓海军, 康鸿杰, 等. 2013. 兰坪-思茅盆地白秧坪-燕子洞地区断裂构造特征及与成矿关系[J]. 地质与勘探, 49(2): 323~329.