

文章编号: 1006-6616 (2017) 03-0348-10

滇东北镇雄西部栖霞—茅口组碳酸盐岩 地球化学特征及环境意义

潘明, 郝彦珍, 吕勇, 山克强, 苏光样

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘要: 镇雄县安家坝一带中二叠统栖霞组-茅口组地层出露较好, 沉积连续。以此剖面为基础, 连续采集碳酸盐岩样品 42 个, 根据其显微特征、元素相关性、元素组份含量及相关元素的比值特征, 探讨了研究区碳酸盐岩沉积地球化学特征与古环境意义。研究表明 (1) 样品中 CaO 与 SiO_2 、 MgO 呈现出比较明显的负相关关系, 且后两者在岩石中的含量很低, 说明样品在沉积和成岩过程中受陆源物质影响或改造的程度较小。(2) 通过对元素含量以及相关元素比值的垂向分布特征分析, 如 Sr/Ba 、 MgO/CaO 和 $\text{V/V} + \text{Ni}$ 等, 对不同沉积阶段进行了古水深和古氧相等方面的研究, 数据表明茅口组沉积环境相比栖霞组具有较明显的差异。

关键词: 碳酸盐岩; 地球化学特征; 古环境; 栖霞组; 茅口组

中图分类号: P595

文献标识码: A

0 引言

前人对特定时期古环境和古气候的研究和重建, 主要是基于沉积时期的岩石矿物特征^[1-3]、古生物特征^[4-5]、遗迹组构和地球化学特征^[6-7]等信息。近年来, 很多学者应用主量、微量元素和稳定同位素^[8-9]在研究古海洋环境、海平面变化、古气候和古海水盐度等方面取得了系列进展。中二叠世栖霞组和茅口组地层是在全球大规模海侵背景下形成的一套碳酸盐岩, 然两者的沉积环境各有不同, 前人通过对扬子和华南等地栖霞组的研究^[10-11], 认为其形成于缺氧的沉积环境, 一些学者通过对重庆地区栖霞组元素地球化学的研究^[12], 探讨了栖霞组沉积时期的古水深、古氧相和古气候等特征; 前人对茅口组地层的研究则多与油气储层相关, 且多集中在四川盆地及周边, 部分学者对茅口组的层序格架、沉积微相和储层特征进行了较为深入的研究^[13-15]。而针对云贵交界处乌蒙山区栖霞组和茅口组的沉积环境研究还不深入,

本文将对该区中二叠世栖霞组和茅口组进行地球化学结论分析, 以丰富其古海洋环境认识。

1 区域地质背景

研究区位于云南镇雄和贵州赫章一带 (见图 1a), 碳酸盐岩分布面积广泛, 沉积有半局限台地相的白云岩、白云质团块灰岩、开阔台地相的巨厚层生屑泥晶灰岩和发育于碳酸盐岩台地内部的台盆相的硅质岩 (见图 1b)。在二叠系栖霞阶早期, 研究区继承了晚石炭世的古地理格局, 特提斯海水由南及南西方向侵入贵州^[16], 此时黔西北为潮坪-泻湖相带, 在下伏剥蚀不整合面上形成了碎屑滨岸沉积, 发育了一套梁山组 (P_2l) 砂页岩夹煤的组合, 构筑了碳酸盐台地的基座。

栖霞阶中期海侵进一步扩大, 是古生代以来的最大海侵时期, 由于陆源物质供给减少, 研究区由半局限台地形成了开阔台地环境, 发育栖霞组 (P_2q) 碳酸盐岩沉积, 岩石主要为颜色较深的微泥晶生屑灰岩。

收稿日期: 2016-11-08

基金项目: 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目 (No. 2015015); 中国地质调查局地质调查项目 (12120114042601, DD20160061)

作者简介: 潘明 (1985-), 男, 助理研究员, 主要从事区域地质调查和碳酸盐岩方面的研究。E-mail: panming@karst.ac.cn

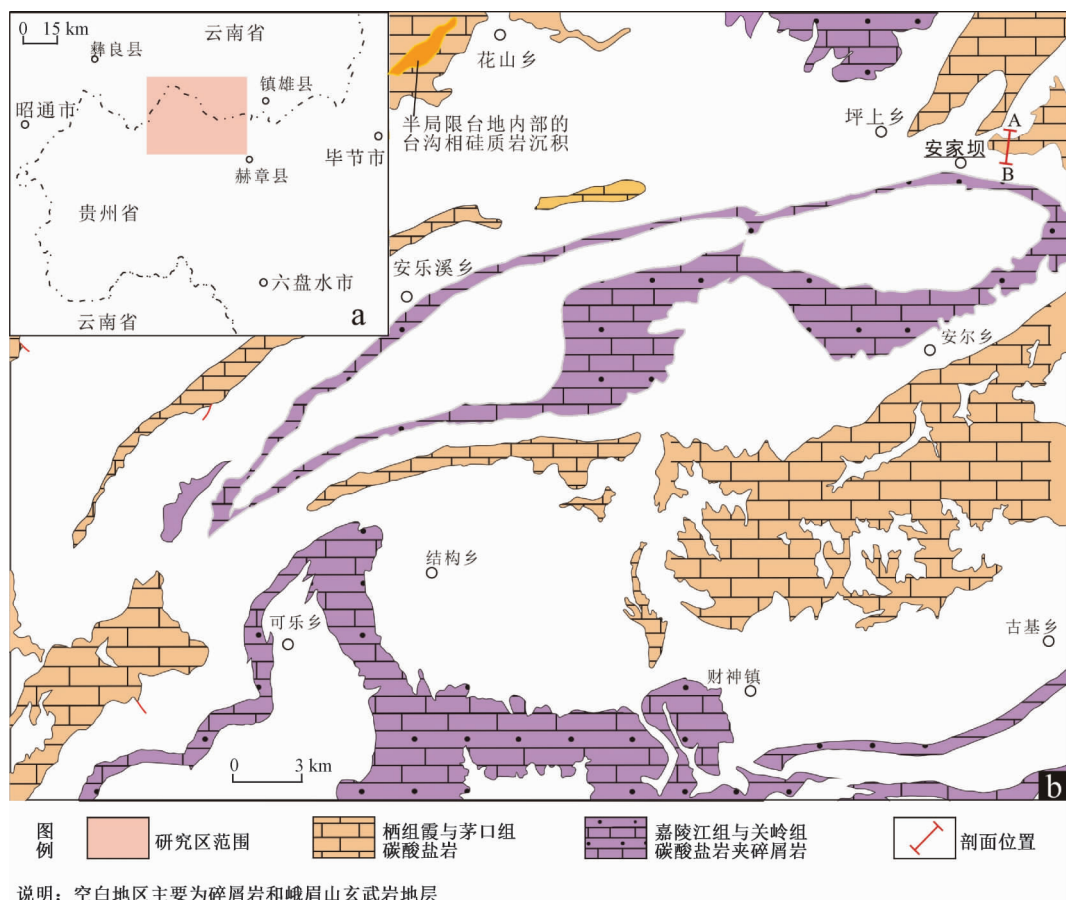


图1 研究区地理位置图(a)和研究区碳酸盐岩地层分布特征(b)

Fig. 1 Location map of study area (a) and distribution characteristics of the carbonate rocks in the study area (b)

祥播阶中早期,研究区的古地理沉积格局延续了栖霞阶的特点,但在东吴运动的影响下,祥播阶晚期至茅口阶早期的古地理格局发生了改变,由开阔台地环境向半局限台地转变,沉积了茅口组(P_2m)微泥晶生屑灰岩、亮晶藻砂屑生屑灰岩、燧石团块、条带灰岩、含藻屑蜓灰岩和叶状藻灰岩等,而且在半局限台地内还发育有大小不等的深水槽状台盆沉积,台盆内发育一套深灰色、灰黑色薄层具微细纹层的硅质岩。

2 地层及岩石学特征

2.1 栖霞组地层沉积特征

根据岩性差异及生物群特征,可大致分为两段(见图2栖霞组)。

第一段总体为颜色深灰-灰黑色含泥质生屑灰岩和泥晶灰岩,局部可见底部中厚层含碳泥质灰岩夹黑色炭质页岩(见图2a),岩石中含绿藻、蜓、双壳类等化石。

第二段底部为深灰、浅灰色块状-厚层状亮晶藻砂屑生屑灰岩,向上见中厚层微晶至厚层泥晶生物屑灰岩,藻砂屑生屑灰岩(绿藻),顶部为厚-巨厚层含有机质泥质微晶至泥晶灰岩,含有丰富的介形虫、有孔虫和绿藻以及腕足和双壳类化石。

2.2 茅口组地层沉积特征

茅口组地层顶底齐全,出露连续,岩石以深灰至浅灰色厚层块状灰岩,燧石灰岩及藻灰岩为主,夹少量白云质灰岩。生物以蜓类、有孔虫和藻类最丰富,常见腕足类及棘皮。厚约215 m,与下伏栖霞组连续沉积。本组依岩性及古生物差异,可分三段(见图2茅口组):

第一段产出浅灰、深灰色巨厚层-厚层块状细-粉晶白云岩、微-泥晶生屑灰岩,泥晶藻屑灰岩和泥晶介壳灰岩。底部常以厚层白云质团块灰岩(豹斑状含硅质细-粉晶白云岩)(见图2b)与下伏栖霞组分界,其是茅口组沉积早期半局限台地沉积环境下的产物。

第二段以碳酸盐岩台地相沉积为主。在研究

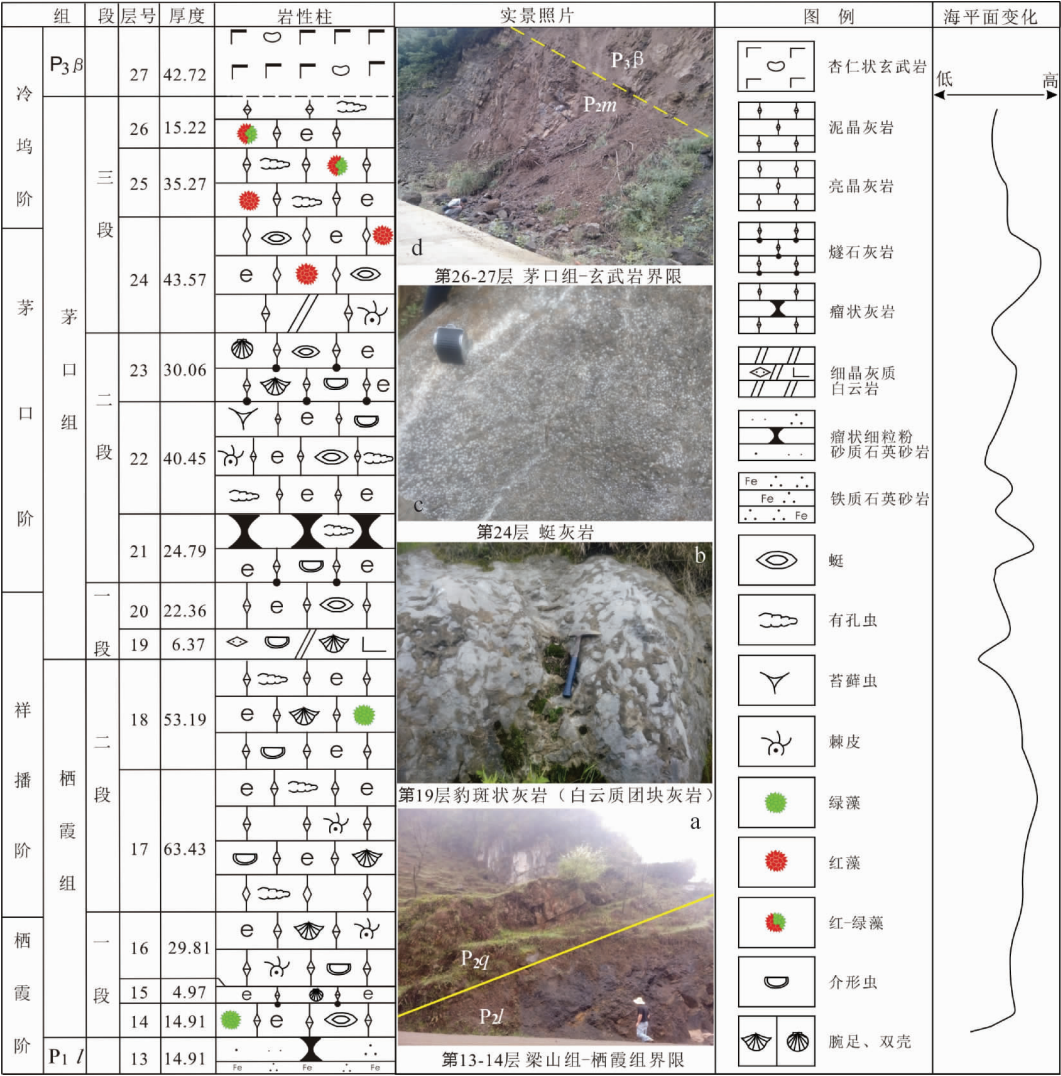


图 2 栖霞组-茅口组地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of Qixia-Maokou formation

区内分布较广。主要岩性为深灰、灰黑色中薄层厚层微晶至泥晶生屑绿藻屑灰岩、燧石团块灰岩。底部常以富含孔虫、腕足类的泥晶灰岩或大套燧石团块灰岩，作为与下伏第一段厚层块状灰岩的划分标志。研究区内局部地区在本段层位还发育有台盆或台沟相沉积，可见一套暗色薄层硅质岩，发育水平层理，因其发育于台地内部，而往往形成局部封闭的缺氧环境。

第三段底部以微一泥晶棘皮屑红藻屑白云质灰岩与下伏巨厚层状黑色生物碎屑泥晶灰岩为界。中下部主要为棘皮屑、蜓屑等生屑红藻屑灰岩，越向顶部绿藻屑越丰富，上部常见叶状藻灰岩，厚度 8 ~ 10 m，由底部普遍发育的红藻，然后到红-绿藻，直至上部出现的叶状藻，反映了水体逐渐变浅的沉积环境。顶部为微泥晶生物（蜓、有

孔虫）灰岩（见图 2c），与上覆峨眉山玄武岩地层假整合接触（见图 2d）。

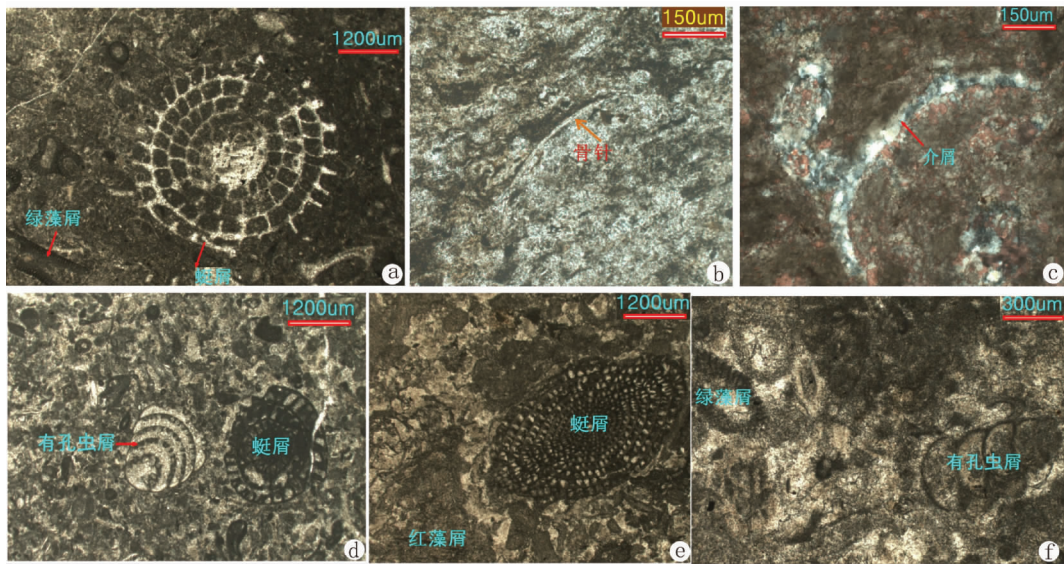
2.3 典型样品岩石学特征

通过对采集的 42 个碳酸盐岩样品进行的薄片观察，发现以下几种主要的岩石类型（岩石命名主要以岩石内部结构特征以及各种颗粒的类型和含量为依据；样品薄片因照片视野范围有限，部分生物化石未能在照片中显示）。

微泥晶生屑灰岩（见图 3a），微一泥晶生物屑结构，层状构造。样品基本上由生物屑及微一泥晶方解石充填物等组分组成。生物屑特征为：藻屑（绿藻屑，含量约 15%）、蜓屑（含量约 10%）、介形虫屑（含量约 10%）、有孔虫屑（含量约 5%）、腹足屑（含量约 5%）、棘皮屑（含量约 5%）、腕足屑（含量约 5%）及少量其它门类

生物屑 (含量约 5%, 三叶虫屑等)。除蜓屑、有孔虫屑保存较为完整其它门类破碎程度强烈、保

存不完整。微—泥晶方解石填隙物对生物屑起胶结作用 (相当于基底式胶结)。



(a) —第 14 层, 微泥晶生屑灰岩; (b) —第 15 层, 燧石结核灰岩; (c) —第 19 层, 细-粉晶生物屑含硅质灰质白云岩; (d) —第 22 层, 藻砂屑生物屑灰岩; (e) —第 24 层, 亮-泥晶棘皮屑蜓屑红藻屑灰岩; (f) —第 25 层, 有孔虫屑红-绿藻屑灰岩

图 3 碳酸盐岩显微照片 (c 为正交偏光 + 锥光, 其余为单偏光)

Fig. 3 Hand specimens and photomicrographs of the carbonates with plane polarized light

燧石结核灰岩 (见图 3b), 微—泥晶骨针屑结构, 其中燧石基本上由生物屑及微—泥晶填隙物等组分组成。生物屑特征: 约占样品总量 70%。分布较为均匀。粒度基本上以砾砂级生物屑为主见。见骨针屑 (含量约 65%) 及其它门类生物屑 (有孔虫屑、棘皮屑、介形虫屑、腕足屑等, 含量约 5%) 等, 多为石英 (含量约 50%) 和方解石 (含量约 20%) 替代。

细—粉晶生物屑含硅质灰质白云岩 (见图 3c), 生物屑细-粉晶结构, 层状构造样品基本上由白云石基底、方解石基底及生物屑等组分组成。白云石基底特征为: 约占样品总量 50%, 分布较为均匀, 结晶粒度 $<0.25 \sim 0.03 \text{ mm}$, 细-粉晶级, 半自形, 粒状。方解石基底特征为: 约占样品总量 23%, 结晶粒度 $<0.25 \text{ mm}$, 细-粉-微-泥晶级, 它形, 粒状。生物屑特征为: 约占样品总量 25%, 分布较为均匀, 粒度基本上 $<2.00 \sim 0.06 \text{ mm}$, 以砂级生物屑最为主见, 种类见及介形虫屑 (含量约 10%)、腕足屑 (含量约 10%) 及少量其它门类生物屑 (含量约 5%, 棘皮屑等), 破碎程度强烈、保存不完整, 为异地生物屑, 为白云石 (含量约 15%) 及石英 (含量约 10%) 替代。

藻砂屑生物屑灰岩 (见图 3d), 样品基本上由粒

屑 (生物屑及藻内碎屑) 及微-泥晶方解石填隙物等组分组成。生物屑特征为: 约占样品总量 45%。分布较为均匀。粒度基本上 $<5.00 \sim 0.06 \text{ mm}$, 以砾砂级生物屑最为主见。种类见及有孔虫屑 (含量约 10%)、蜓屑 (含量约 5%)、珊瑚屑 (含量约 5%)、介形虫屑 (含量约 5%)、腕足屑 (含量约 5%)、棘皮屑 (含量约 5%)、苔藓虫屑 (含量约 5%) 及少量其它门类生物屑 (含量约 5%, 绿藻屑等)。有孔虫屑、蜓屑保存较为完整。藻内碎屑占样品总量 25%, 粒度 $<2.00 \sim 0.06 \text{ mm}$, 为砂级藻内碎屑。呈次圆状、次椭圆状等, 为蓝绿藻及其分泌物粘结方解石质灰泥在塑性-半塑性条件下盆内打碎、盆内沉积的产物, 具分选性, 见藻迹。

棘皮屑蜓屑红藻屑灰岩 (见图 3e), 亮-泥晶生物屑结构, 样品基本上由粒屑 (生物屑及少量藻内碎屑) 及亮—泥晶方解石填隙物等组分组成。生物屑特征为: 约占样品总量 65%。分布较为均匀。粒度基本上 $<5.00 \sim 0.06 \text{ mm}$, 以砾砂级生物屑最为主见。种类见及红藻屑 (含量约 35%)、蜓屑 (含量约 15%)、棘皮屑 (含量约 10%) 及少量其它门类生物屑 (介屑等, 含量约 5%)。

有孔虫屑红-绿藻屑灰岩 (见图 3f), 微-泥晶生物屑结构, 样品基本上由生物屑及微—泥晶方解石

填隙物等组分组成。生物屑特征为：约占样品总量 60%。分布较为均匀。粒度基本上 < 5.00 ~ 0.06 mm，以砾砂级生物屑最为主见。种类见及绿藻屑（含量约 15%）、红藻屑（含量约 15%）、有孔虫屑（含量约 10%）、介屑（介形虫屑、腕足屑等，含量约 10%）及少量其它门类生物屑（棘皮屑等，含量约 10%），为方解石替代，具泥晶化现象。

3 地球化学特征

3.1 样品分析方法

在碳酸盐岩中，各元素含量主要受原始沉积

环境、陆源区及成岩作用的影响。通过对不同沉积阶段碳酸盐岩地球化学数据元素的纵向分布特征及相关比值分析，可以恢复当时的沉积环境。

本次研究共采集碳酸盐岩样品 42 个，测试工作在国家地质实验测试中心完成，主量元素的检测依据：GB/T14506.28 - 2010。方法要点：称取试样 0.5000 g，于 1200 ℃ 左右熔融制成玻璃片，使用 X-射线荧光光谱仪（XRF）测定。其方法精密度 RSD < 2 ~ 8%。微量元素的检测依据为 DZ/T 0223 - 2001 和《国家地质实验测试中心检定细则》。使用等离子体质谱仪 ICP-MS 测定，其方法精密度 RSD < 2 ~ 10%。测试结果详见表 1。

表 1 栖霞-茅口组碳酸盐岩主量（%）和微量（×10⁻⁶）分析结果

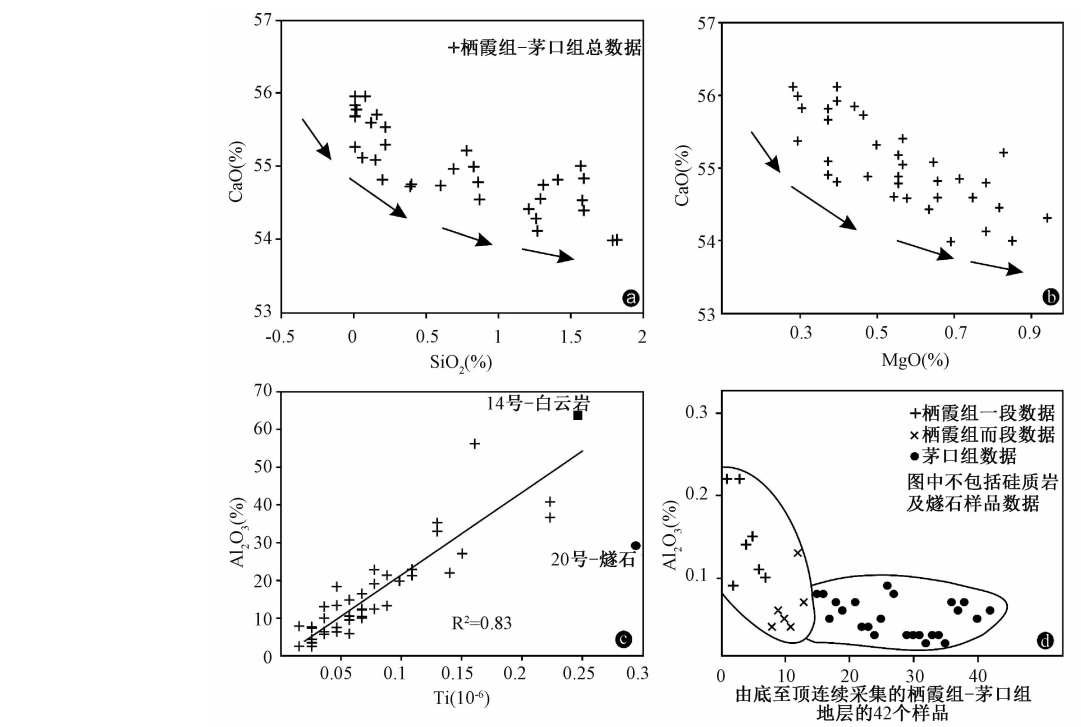
Table 1 The analysis results of the major elements (%) and trace elements (× 10 ⁻⁶) of the carbonate rocks in															
Qixia-Maokou formation															
样品号	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Sr	Ba	V	Ni	Ti	Mg	MgO/CaO	Sr/Ba	Ni/V	V/V + Ni
Y1	泥晶生物屑灰岩	1.29	0.22	54.55	0.53	196.00	5.35	18.30	0.05	40.20	0.32	0.010	36.64	0.00	1.00
Y2	泥晶生物屑灰岩	0.83	0.09	54.99	0.62	304.00	3.11	3.65	0.05	13.70	0.37	0.011	97.75	0.01	0.99
Y3	微—泥晶生物屑灰岩	0.87	0.22	54.54	0.71	284.00	9.45	5.98	0.05	36.20	0.43	0.013	30.05	0.01	0.99
Y4	生物屑微—泥晶灰岩	0.69	0.14	54.96	0.55	383.00	4.40	12.80	0.05	22.10	0.33	0.010	87.05	0.00	1.00
Y5	微—泥晶生物屑灰岩	0.39	0.15	54.72	0.54	776.00	10.80	22.40	8.25	27.00	0.32	0.010	71.85	0.37	0.73
Y6	微—泥晶生物屑灰岩	0.40	0.11	54.75	0.63	631.00	8.17	21.80	7.62	23.00	0.38	0.012	77.23	0.35	0.74
Y7	微—泥晶生物屑灰岩	0.87	0.10	54.54	0.63	1322.00	11.50	12.30	9.43	20.00	0.38	0.012	114.96	0.77	0.57
Y8	亮—泥晶含藻砂屑生物屑灰岩	1.00	0.04	51.47	0.46	528.00	1.38	2.33	9.06	13.50	0.28	0.009	382.61	3.89	0.20
Y9	微—泥晶生物屑灰岩	1.59	0.06	54.83	0.38	594.00	1.75	3.98	6.54	6.63	0.23	0.007	339.43	1.64	0.38
Y10	微—泥晶含藻砂屑生物屑灰岩	1.57	0.05	55.00	0.38	347.00	1.39	2.90	0.05	8.20	0.23	0.007	249.64	0.02	0.98
Y11	微—泥晶含藻砂屑生物屑灰岩	0.01	0.04	55.95	0.30	233.00	2.06	1.25	3.45	6.47	0.18	0.005	113.11	2.76	0.27
Y12	泥晶生物屑灰岩	0.28	0.13	52.77	2.48	384.00	2.28	11.80	19.10	32.70	1.49	0.047	168.42	1.62	0.38
Y13	瘤状生物屑微—泥晶灰岩	1.79	0.07	53.98	0.66	543.00	2.02	12.10	16.00	12.90	0.40	0.012	268.81	1.32	0.43
Y14	含硅质含灰质生物屑细—粉晶白云岩	12.66	0.25	49.42	7.97	410.00	7.32	21.10	4.21	63.90	4.78	0.161	56.01	0.20	0.83
Y15	介屑有孔虫屑微—泥晶灰岩	0.78	0.08	55.21	0.49	912.00	2.92	12.10	7.58	19.30	0.29	0.009	312.33	0.63	0.61
Y16	泥晶绿藻屑灰岩	1.27	0.08	54.11	0.74	479.00	1.97	5.40	0.53	12.90	0.44	0.014	243.15	0.10	0.91
Y17	微—泥晶生物屑灰岩	1.82	0.05	53.99	0.80	556.00	2.74	19.20	2.24	18.60	0.48	0.015	202.92	0.12	0.90
Y18	泥晶绿藻屑灰岩	1.26	0.07	54.28	0.88	540.00	3.06	13.60	9.48	16.80	0.53	0.016	176.47	0.70	0.59
Y19	介屑（绿）藻屑微—泥晶灰岩	0.60	0.06	54.73	0.74	682.00	3.22	10.80	5.11	11.10	0.44	0.014	211.80	0.47	0.68
Y20	微—隐晶硅质岩或燧石	88.97	0.29	40.38	0.07	174.00	6.70	8.89	4.89	28.20	0.04	0.002	25.97	0.55	0.65
Y21	绿藻屑泥晶灰岩	1.59	0.07	54.39	0.61	760.00	2.68	4.77	8.39	12.70	0.37	0.011	283.58	1.76	0.36
Y22	泥晶绿藻屑灰岩	1.21	0.04	54.41	0.77	710.00	2.47	14.00	8.66	10.60	0.46	0.014	287.45	0.62	0.62
Y23	微—泥晶含藻砂屑生物屑灰岩	1.41	0.04	54.81	0.47	495.00	1.68	5.58	1.42	7.14	0.28	0.009	294.64	0.25	0.80
Y24	微—泥晶藻砂屑生物屑灰岩	1.31	0.03	54.74	0.40	662.00	4.00	5.50	0.05	4.34	0.24	0.007	165.50	0.01	0.99
Y25	微—泥晶生物屑灰岩	0.22	0.05	55.53	0.38	376.00	2.88	20.50	7.59	7.10	0.23	0.007	130.56	0.37	0.73
Y26	微—泥晶生物屑灰岩	1.58	0.09	54.53	0.56	335.00	3.60	8.31	17.20	21.50	0.34	0.010	93.06	2.07	0.33
Y27	微—泥晶含藻砂屑生物屑灰岩	0.86	0.08	54.78	0.68	327.00	3.17	7.85	3.20	22.90	0.41	0.012	103.15	0.41	0.71
Y28	生物屑泥晶灰岩	6.24	0.11	51.13	0.57	324.00	3.58	9.05	13.30	21.40	0.34	0.011	90.50	1.47	0.40
Y29	生物屑泥晶灰岩	0.02	0.03	55.77	0.40	498.00	3.00	3.11	22.30	8.38	0.24	0.007	166.00	7.17	0.12
Y30	生物屑泥晶灰岩	5.50	0.03	52.47	0.42	468.00	2.25	5.72	15.30	5.19	0.25	0.008	208.00	2.67	0.27
Y31	微—泥晶棘皮屑红藻屑含白云质灰岩	0.03	0.03	50.19	2.01	376.00	3.42	5.26	20.50	4.24	1.21	0.040	109.94	3.90	0.20
Y32	亮—泥晶含藻砂屑棘皮屑红藻屑灰岩	0.01	0.02	55.67	0.38	465.00	3.90	2.35	12.40	3.39	0.23	0.007	119.23	5.28	0.16
Y33	亮—泥晶含藻砂屑棘皮屑红藻屑灰岩	0.01	0.03	55.68	0.32	379.00	4.16	0.91	8.68	3.35	0.19	0.006	91.11	9.54	0.09
Y34	亮—泥晶棘皮屑蛭屑红藻屑灰岩	0.01	0.03	55.26	0.31	427.00	4.53	0.83	22.00	8.03	0.19	0.006	94.26	13.51	0.04
Y35	亮—泥晶蛭屑棘皮屑红藻屑灰岩	0.01	0.02	55.83	0.31	395.00	3.94	2.30	12.00	8.53	0.19	0.006	100.25	5.22	0.16
Y36	生物屑泥晶灰岩	0.08	0.07	55.95	0.40	461.00	1.56	2.57	20.40	10.60	0.24	0.007	295.51	7.94	0.11
Y37	微—泥晶红藻屑棘皮屑灰岩	0.12	0.06	55.59	0.46	315.00	2.21	5.81	14.00	10.10	0.28	0.008	142.53	2.41	0.29
Y38	微—泥晶有孔虫屑红—绿藻屑灰岩	0.06	0.07	55.11	0.78	441.00	1.98	10.20	15.50	11.00	0.47	0.014	222.73	1.52	0.40
Y39	泥晶介屑红—绿藻屑灰岩	0.20	0.16	54.81	0.54	1398.00	8.34	29.10	26.20	55.00	0.32	0.010	167.63	0.90	0.53
Y40	亮—泥晶有孔虫屑红—绿藻屑灰岩	0.22	0.05	55.29	0.55	563.00	2.62	2.68	16.60	13.80	0.33	0.010	214.89	6.19	0.14
Y41	红—绿藻屑泥晶生物屑灰岩	0.15	0.13	55.08	0.54	652.00	4.58	31.90	13.50	34.90	0.32	0.010	142.36	0.42	0.70
Y42	亮—泥晶红藻砂屑生物屑灰岩	0.16	0.06	55.70	0.44	520.00	3.07	2.86	21.10	15.20	0.26	0.008	169.38	7.38	0.12

3.2 主量元素地球化学特征

样品最明显的特征是 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 和 MnO 等元素的含量极低, 多数都小于 0.01%, 上述元素一般易于富集在代表陆源组分的铁泥质以及粘土矿物中, 这说明岩石中陆源组分的含量很低。样品在沉积和成岩过程中受陆源物质影响或改造的程度较小, 岩石数据具有较高的可信度。

样品中除去 Y20 硅质岩、Y14 白云岩和 Y31 号

白云质灰岩外, 其余样品中 CaO 和 CO_2 的含量很高而且保持稳定, CaO 含量在 51.13% ~ 55.95% 之间, 平均为 54.66%, CO_2 含量平均值为 42.32%, 十分接近纯灰岩中 CaO 和 CO_2 的化学成分理论值 (56% 和 44%), 反映了比较稳定的沉积环境。且大多数样品中 CaO 与 SiO_2 、 MgO 呈现出比较明显的负相关关系 (见图 4a、4b), 且后两者在岩石中的含量又很低, 这说明大部分样品在成岩过程中遭受硅化和白云岩化改造作用的程度较小。



a、b、c—元素的相关性分析; d— Al_2O_3 在不同沉积阶段的分布情况

图 4 元素相关性及分布情况

Fig. 4 The correlation and distribution of the elements

大部分岩石样品中陆源元素 Al_2O_3 与 Ti 的含量很低, 且呈强烈的正相关 ($R = 0.83$)。但值得注意的是栖霞组第 1 段岩石中 Al_2O_3 的含量明显高于其后期沉积的岩石 (见图 4c), 这主要是因为栖霞组底部梁山组海陆交互的碎屑岩含煤地层为栖霞组早期沉积提供了物源, 随着海侵不断扩大, 海平面逐渐升高, 沉积区离物源越来越远, 因此栖霞组沉积后期至茅口组沉积时期能够获得的陆源物质就更少, 在垂向上则表现为 Al_2O_3 和 Ti 含量的不断降低直至保持在某一平均数值水平。

4 古海洋环境分析

4.1 古水深和离岸距离

Sr/Ba 值由浅滩分别向局限海湾和深水斜坡-盆地方向随沉积水体的加深 (或变浅) 而增大 (或变小), 可作为判断古水深的标志^[17~18]。

Sr/Ba 值常用来研究沉积区海水深度、沉积环境蒸发作用的强弱及其离岸距离。 Sr 、 Ba 的化学性质相近, 但 Sr 的迁移能力大于 Ba , 一般情况下 Ba 多在近岸沉积物中富集, 因此靠近物源区的海相沉积物中 Ba 含量较高, 而 Sr 含量较低, 较高的 Sr/Ba 值反映沉积时期处于海水更深、离岸更远的

环境^[19]。图 5 反映出, 栖霞组沉积开始至一段与二段界线处, Sr/Ba 值由 36.64 迅速升高至 339.43, 是栖霞组一段持续海侵的沉积地球化学响应; 第二段 Sr/Ba 值在波动中逐渐降低, 但整体维持在较

高水平, 至栖霞组与茅口组界线处达到最低值 56.01, 海水深度变浅, 产出的细粉晶白云岩是最明显的标志。

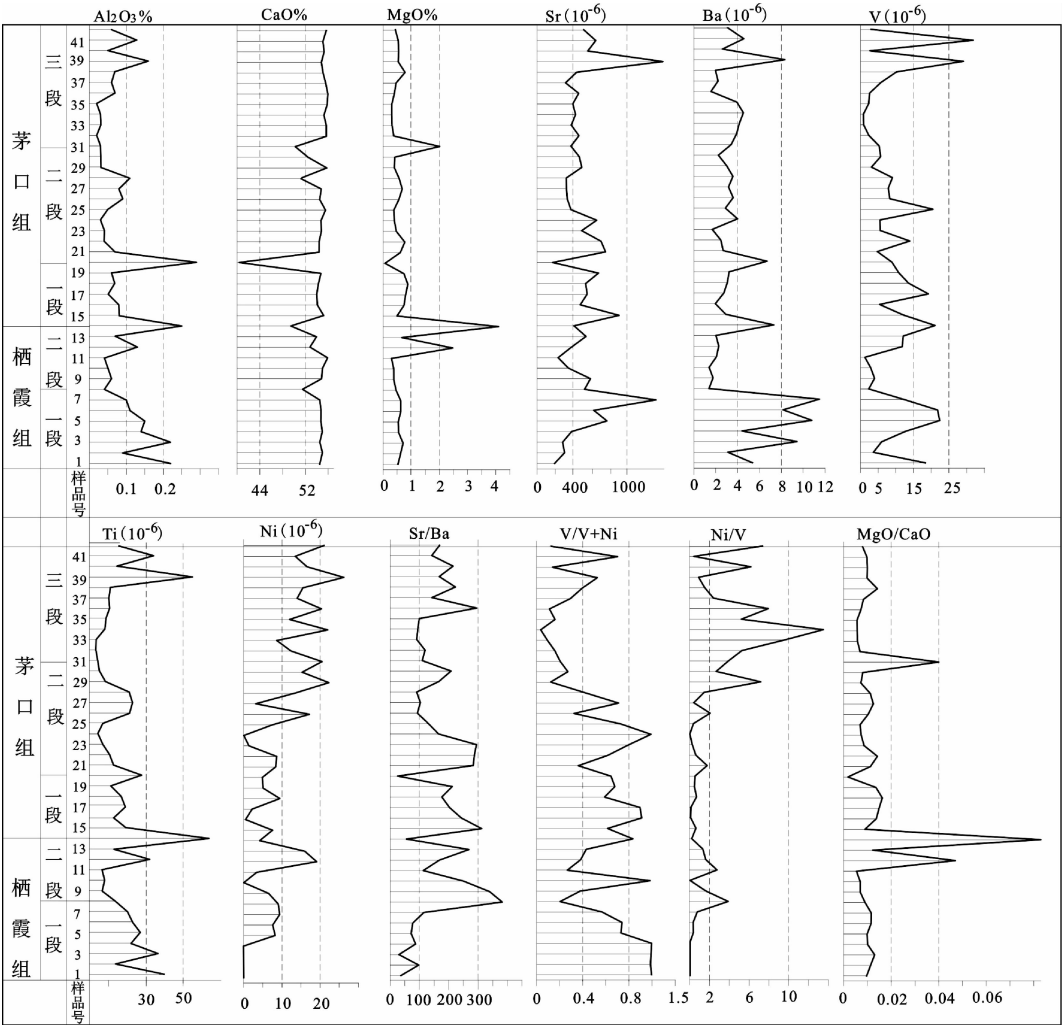


图 5 常量元素和微量元素分布特征

Fig. 5 Variation curves of major elements (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of carbonate rocks

茅口组三个沉积阶段 Sr/Ba 平均值分别为 200、168、155, 总体趋势具向上减小的特点。茅口组一段亲陆元素含量的减少以及 Sr/Ba 值明显的攀升, 是茅口组沉积初期海侵的响应, 至二段 Sr/Ba 值明显降低, 且这种现象延续到第三段初期, 该时期为整个茅口组沉积环境变化的转折期, 即岩性从第二段开阔台地环境下沉积的微泥晶灰岩变为第三段浅滩相的亮晶生屑灰岩, 显示了水体动能由弱到强的过程, 也是海平面相对升高的反映。经过短暂的波动 (24 层), 海平面在第三段上部开始新一轮的下降, 代表亲陆性质的 Al_2O_3 和 Ti 元素含量开始升高。

4.2 古氧相

具有敏感性氧化还原元素可以作为重建沉积水体古氧相的有效指标, 这些元素的溶解度及其比值与水体的氧化还原环境具有很好的耦合性。微量元素 $V/(V + Ni)$ 和 Ni/V 比值常作为恢复水体氧化还原条件的地球化学指标。一般的 $V/(V + Ni) > 0.54$ 代表厌氧环境, 比值介于 $0.46 \sim 0.54$ 之间表示贫氧的沉积环境, $V/(V + Ni) < 0.46$ 指示富氧的沉积环境^[20]。栖霞组一段和二段 $V/(V + Ni)$ 平均值依次为 0.86 和 0.44, 分别代表强的还原环境和富氧环境, 说明第 1 段因海侵, 导致水体变深, 形成了缺氧环境, 第 2 段时期海水

又逐渐变浅,为深度适中的富氧环境,这与 Sr/Ba 值具所反映的海水深度变化现象具有一致性;茅口组一段至三段 $V/(V+Ni)$ 平均值依次为 0.73、0.5 和 0.25,反映了茅口组沉积阶段海水由强还原环境、贫氧环境到富氧环境的逐渐过渡趋势,但此过程不是一簇而就的,每一阶段随着海水深度的变化存在着贫、富氧环境的交替。

4.3 古气候

灰岩的 MgO/CaO 值对古气候的变化具有良好的指示作用。当钠盐、钾盐等易溶性盐类不参与沉淀时,在潮湿气候条件下, MgO/CaO 值较低,在干热气候条件下, MgO/CaO 值较高^[21~22]。如图 5 所示,栖霞组-茅口组样品 MgO/CaO 值总体偏低,且整体变化幅度小,平均值在 0.008 ~ 0.012 之间,反映其沉积时期总体为潮湿气候。但值得注意的是在栖霞组与茅口组沉积界线处以及茅口组第 2 段和第 3 段界线处, MgO/CaO 值出现了两次峰值 (0.083 和 0.04),说明在栖霞组向茅口组沉积转换过程中以及茅口组内部均出现过短暂的干燥气候时期,产出的细粉晶灰质白云岩和白云质灰岩就是很好的证明。

4.4 物源供给情况

碳酸盐岩中 Al_2O_3 和 Ti 的含量与碎屑矿物的含量密切相关^[23],其含量越高,说明沉积区离物源区更近。纵向观察代表亲陆性质的 Al_2O_3 和 Ti 元素含量,它们在整个沉积过程有三次较为明显的高值阶段:栖霞组沉积早期,底部梁山组碎屑岩含煤地层为其提供了物源;茅口组沉积早期和晚期,海平面下降明显,产出的云化斑状灰岩和细晶白云证明了其形成于离物源区更近,气候干燥的半局限台地沉积环境。

5 结论

本文对栖霞-茅口组剖面连续采集的碳酸盐岩样品进行了地球化学特征和沉积环境分析,得出以下几点认识

1、Sr/Ba 值的垂向分布特征表明:栖霞组沉积阶段,海水经历了由浅变深再变浅的演变;茅口组第一段和第三段的海侵反映出两次海水变深的过程,具体到整个茅口组沉积时期,表现为两次规模较大的海水由浅变深再变浅的循环,但两次事件时间的持续性具有较大差异。

2、氧化还原环境的演变与海平面升降变化具有密切关系。栖霞组一段和二段 $V/(V+Ni)$ 的平均值分别代表强的还原环境和富氧环境;茅口组一段至三段 $V/(V+Ni)$ 的平均值反映了海水由强还原环境、贫氧环境到富氧环境的逐渐过渡趋势,其中第三段初期极低的 $V/(V+Ni)$ 值,是海平面升高后,滩相富氧沉积环境的良好响应。

3、MgO/CaO 值特征反映出仅在栖霞组向茅口组沉积转换过程中以及茅口组内部出现过短暂的干燥气候,然而其余时期的 MgO/CaO 值总体偏低,且整体变化幅度小,代表了比较稳定的湿润气候环境。

4、纵观栖霞组和茅口组碳酸盐岩样品中 Al_2O_3 和 Ti 元素的含量变化发现,在栖霞组沉积早期,茅口组沉积初期和晚期,有三次较为明显的高值阶段,反映了沉积区离物源区更近的沉积环境,其余大部分时期则为受陆源影响较小的远岸沉积环境。

参 考 文 献

- [1] 施春华,黄秋,颜佳新. 广西来宾栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征 [J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21 (2): 72 ~ 77.
SHI Chun-hua, HUANG Qiu, YAN Jia-xin. Geochemistry of the dysaerobic sedimentary environments of the Qixia Formation in Laibing, Guangxi [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2001, 21 (2): 72 ~ 77.
- [2] 舒晓辉,张军涛,李国蓉,等. 四川盆地北部栖霞组-茅口组热液白云岩特征与成因 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33 (3): 442 ~ 448, 458.
SHU Xiao-hui, ZHANG Jun-tao, LI Guo-rong, et al. Characteristics and genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33 (3): 442 ~ 448, 458.
- [3] 周新平,何幼斌,罗进雄,等. 川东地区二叠系结核状、条带状及团块状硅岩成因 [J]. 古地理学报, 2012, 14 (2): 143 ~ 154.
ZHOU Xin-ping, HE You-bin, LUO Jin-xiong, et al. Origin of the Permian nodular, striped and lump siliceous rock in eastern Sichuan Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14 (2): 143 ~ 154.
- [4] 邓宝柱,黎黎雪,王永标,等. 湖北赤壁二叠纪-三叠纪之交古海洋沉积环境演化 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2015, 40 (2): 317 ~ 326.
DENG Bao-zhu, YU Li-xue, WANG Yong-biao, et al. Evolution of marine conditions and sedimentation during the Permian-Triassic transition in Chibi of Hubei Province [J]. Earth Science-Journal of China University Geosciences, 2015,

- 40 (2): 317 ~ 326.
- [5] 刘采, 房强, 景秀春. 四川盆地中东部二叠系瓜德鲁普统茅口组牙形刺生物地层及色变指标研究 [J]. 微体古生物学报, 2016, 33 (1): 9 ~ 20.
- LIU Cai, FANG Qiang, JING Xiu-chun. Study of the conodont biostratigraphy and color alternation index in the Permian Maokou formation from the mid-eastern Sichuan Basin, Southwest China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2016, 33 (1): 9 ~ 20.
- [6] 周新平, 何幼斌, 杜红权, 等. 四川宣汉地区二叠系硅岩地球化学特征及成因研究 [J]. 古地理学报, 2009, 11 (6): 670 ~ 680.
- ZHOU Xin-ping, HE You-bin, DU Hong-quan, et al. Geochemical characteristics and origin of the Permian siliceous rocks in Xuanhan region of Sichuan Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11 (6): 670 ~ 680.
- [7] 汪凯明, 罗顺社. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义——以冀北拗陷长城系高于庄组为例 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30 (3): 343 ~ 349.
- WANG Kai-ming, LUO Shun-she. Geochemical characters of carbonates and indicative significance of sedimentary environment——an example from the Gaoyuzhuang Formation of the Changcheng System in the northern Hebei Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30 (3): 343 ~ 349.
- [8] Newton R J, Peivitt E L, Wignall P B, et al. Large shifts in the isotopic composition of seawater sulphate across the Permian-Triassic boundary in northern Italy [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 218 (3/4): 331 ~ 345.
- [9] Bai X, Luo G M, Wu X, et al. Carbon isotope records indicative of paleoceanographical events at the Latest Permian Dalong Formation at Shangsi, Northeast Sichuan, China [J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19 (5): 481 ~ 487.
- [10] 施春华, 胡瑞忠, 颜佳新. 栖霞组沉积地球化学特征及其环境意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23 (2): 144 ~ 148.
- SHI Chun-hua, HU Rui-zhong, YAN Jia-xin. Sedimentary geochemistry of the Qixia formation and its environmental implication [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23 (2): 144 ~ 148.
- [11] 颜佳新. 华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义 [J]. 沉积学报, 2004, 22 (4): 579 ~ 587.
- YAN Jia-xin. Origin of Permian Chihshian carbonates from South China and its geological implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22 (4): 579 ~ 587.
- [12] 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 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, 2014, 32 (6): 1035 ~ 1045.
- TIAN Yang, ZHAO Xiao-ming, WANG Ling-zhan, et al. Geochemical characteristics and its Paleoenvironmental implication of Permian Qixia Formation in Shizhu, Chongqing [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32 (6): 1035 ~ 1045.
- [13] 张运波, 王根厚, 余正伟, 等. 四川盆地中二叠统茅口组米兰科维奇旋回及高频层序 [J]. 古地理学报, 2013, 15 (6): 777 ~ 786.
- ZHANG Yun-bo, WANG GEN-hou, YU ZHENG-wei, et al. Milankovitch cycles and high-frequency sequences of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15 (6): 777 ~ 786.
- [14] 王长城, 施泽进, 胡修权, 等. 川东南茅口组缝洞型储层地球物理响应特征及形成机制研究 [J]. 地球物理学进展, 2011, 26 (5): 1683 ~ 1689.
- WANG Chang-cheng, SHI Ze-jin, HU Xiu-quan, et al. Geophysical response and formation mechanism analysis of fractured-vuggy reservoir in Maokou formation in southeast Sichuan [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26 (5): 1683 ~ 1689.
- [15] 肖笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组二段沉积微相研究 [J]. 沉积学报, 2015, 33 (6): 1182 ~ 1191.
- XIAO Di, TAN Xiu-cheng, SHAN Shu-Jiao, et al. Sedimentary microfacies of the second member in Maokou Formation, Middle Permian, South Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33 (6): 1182 ~ 1191.
- [16] 贵州省地质矿产局区域地质调查大队. 贵州岩相古地理图集 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1992, 67 ~ 70.
- Regional Geological Surveying Team Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources. Atlas of lithofacies and paleogeography of Guizhou [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House Co. Ltd, 1992, 67 ~ 70.
- [17] 胡明毅. 塔北柯坪奥陶系碳酸盐岩地球化学特征及环境意义 [J]. 石油与天然气地质, 1994, 15 (2): 158 ~ 163.
- HU Ming-yi. Geochemical characters and environmental significance of Ordovician carbonate rocks in Keping Area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15 (2): 158 ~ 163.
- [18] 汪凯明, 罗顺社. 燕山地区中元古界高于庄组和杨庄组地球化学特征及环境意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28 (4): 356 ~ 364.
- WANG Kai-ming, LUO Shun-she. Geochemical characteristics and environmental significance of Gaoyuzhuang and Yangzhuang formations in Yanshan region [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28 (4): 356 ~ 364.
- [19] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪 [J]. 地球与环境, 2011, 39 (3): 405 ~ 414.
- XING Xiao-hui, XIAO Jia-fei. Geochemical indicators of sedimentary environments—a summary [J]. Earth and Environment, 2011, 39 (3): 405 ~ 414.
- [20] 马素萍, 夏燕青, 田春桃, 等. 南襄盆地泌阳凹陷湖相碳酸盐岩烃源岩沉积环境的元素地球化学标志 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32 (4): 456 ~ 462.
- MA Su-ping, XIA Yan-qing, TIAN Chun-tao, et al. Elemental geochemical indicators for sedimentary environment in lacustrine

carbonate source rocks of the Biyang depression, Nanxiang basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32 (4): 456 ~ 462.

[21] 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义 [J]. 沉积学报, 1997, 15 (1): 65 ~ 70.

WANG Sui-ji, HUANG Xing-zhen, TUO Jin-cai, et al. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan formation, Biyang depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15 (1): 65 ~ 70.

[22] 何宏, 彭苏萍, 邵龙义. 巴楚寒武—奥陶系碳酸盐岩微量元素及沉积环境 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25 (6): 631 ~ 633.

HE Hong, PENG Su-ping, SHAO Long-yi. Trace elements and sedimentary settings of Cambrian-Ordovician carbonates in Bachu Area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25 (6): 631 ~ 633.

[23] 毛玲玲, 伊海生, 季长军, 等. 柴达木盆地新生代湖相碳酸盐岩岩石学及碳氧同位素特征 [J]. 地质科技情报, 2014, 33 (1): 41 ~ 48.

MAO Ling-ling, YI Hai-sheng, JI Chang-jun, et al. Petrography and carbon-oxygen isotope characteristics of the Cenozoic lacustrine carbonate rocks in Qaidam Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33 (1): 41 ~ 48.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND ENVIRONMENTAL SIGNIFICANCE OF THE CARBONATE ROCKS IN QIXIA-MAOKOU FORMATION IN WESTERN ZHENXIONG, NORTHEASTERN YUNNAN

PAN Ming, HAO Yan-zhen, LV Yong, SHAN Ke-qiang, SU Guang-yang
(Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Qixia-Maokou Formation in Middle Permian, in Anjiaba of Zhenxiong County, is well outcropped and continuously deposited. Making this section as the research object, collecting 42 samples of carbonate rocks, based on the microscopic characteristics, the elements correlation, the elements content as well as the ratio characteristics of the related elements, the geochemical characteristics and the paleo environmental significance of the carbonate rocks in the study area were discussed. Some conclusions have been drawn. Firstly there are obvious negative correlations between CaO and SiO₂, MgO in the rock samples, and the contents of the latter two in rocks are rather low, which both indicate that the samples are less affected and transformed by the terrigenous material in the process of deposition and diagenesis. Secondly, based on the analysis of the element contents and the vertical distribution characteristics of the relevant elements ratios, such as Sr/Ba, MgO/CaO and V/V + Ni etc, and the study of the paleo-water depth and the paleo-oxygenation facies in different sedimentary stages, the data show that compared with Qixia Formation, the sedimentary environment of Maokou Formation has obvious difference.

Key words: Carbonate rocks; Geochemical characteristics; palaeoenvironment; Qixia Formation; Maokou Formation