



地学前缘
Earth Science Frontiers
ISSN 1005-2321, CN 11-3370/P

《地学前缘》网络首发论文

题目：白云石晶体结构和地化特征对沉积环境响应：以扬子地台晚埃迪卡拉纪灯影组白云岩为例
作者：杨志波，季汉成，鲍志东，史燕青，赵雅静，向鹏飞
收稿日期：2023-01-17
网络首发日期：2023-07-28
引用格式：杨志波，季汉成，鲍志东，史燕青，赵雅静，向鹏飞. 白云石晶体结构和地化特征对沉积环境响应：以扬子地台晚埃迪卡拉纪灯影组白云岩为例 [J/OL]. 地学前缘. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.3370.P.20230728.1315.003.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

白云石晶体结构和地化特征对沉积环境响应：以扬子地台晚埃迪卡拉纪灯影组白云岩为例

杨志波^{1, 2}, 季汉成^{1, 2, *}, 鲍志东^{1, 2}, 史燕青^{1, 2}, 赵雅静^{1, 2}, 向鹏飞^{1, 2}

(1 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

*通信作者 季汉成(1966-), 男, , 中国石油大学(北京)地球科学学院教授, 博士生导师, 主要从事储层地质学、沉积学等研究。

E-mail: jhch@cup.edu.cn

摘要 受沉积环境的影响, 在白云石形成过程中, 其晶体结构与地球化学记录着相应的环境信息。本文以扬子地台晚埃迪卡拉纪灯影组杨坝剖面为例, 通过系统采样研究了白云石的晶体结构和地化特征, 明晰了基于岩石学和地球化学特征的灯影组沉积环境演化, 归纳出了白云石晶体结构、地化特征与形成环境的耦合关系。结果表明: 1) 杨坝剖面灯影组主要发育叠层石、核形石、泡沫棉石及凝块石等 4 种微生物白云岩和少量的晶粒、颗粒及角砾白云岩, 垂向发育多期的微生物白云岩叠置韵律层, 主要为局限台地潮坪相-颗粒滩相。2) 地球化学分析表明, 灯影组沉积演化过程为一段主要为干旱气候、较高盐度的较浅水体、, 发育泥、粉晶白云岩沉积, 二段下部水体加深、潮湿低盐度, 微生物白云岩最为发育; 二段中上部水体总体相对较浅, 湿度降低、盐度略增高; 四段时水体先加深后迅速变浅、湿度逐渐降低、盐度亦逐渐增大。3) 研究区白云石晶体结构特征突显出典型的高 Mg/Ca 环境下流体参与形成, 在干旱、高盐度的环境下, 导致 a/c 负偏, 在潮湿、低盐度的环境下会导致晶胞参数 a/c 值正偏。有序度分布表明随有序度的增加, a/c 逐渐靠近理想白云石。该结果不仅阐明准同生白云石晶体结构与形成环境关联, 还揭示元古界晚期灯影组古海水环境特征。

关键词 晶体结构 地球化学特征 沉积环境 扬子地台 灯影组

Dolomite crystal structure and geochemical characteristics in response to depositional environment: an example of dolomite from the Late Ediacaran Dengying Formation of the Yangzi Plateau

Yang Zhibo^{1, 2}, Ji Hancheng^{1, 2, ✉}, Bao Zhidong^{1, 2}, Shi Yanqing^{1, 2}, Zhao Yajing^{1, 2}, Xiang Pengfei^{1, 2}

(1.College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2.State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract Affected by the sedimentary environment, its crystal structure and geochemistry record the corresponding environmental information during the formation of dolomite. In this paper, the Yangba section of the Late Ediacaran Dengying Formation in the Yangtze Platform is taken as an example. The crystal structure and geochemical characteristics of dolomite are studied by systematic sampling. The sedimentary environment evolution of Dengying Formation based on petrological and geochemical characteristics is clarified, and the coupling relationship between dolomite crystal structure, geochemical characteristics and formation environment is summarized. The results show that:(1) The Dengying Formation in the Yangba section mainly develops four kinds of microbial dolomite, such as stromatolites, oncolites, foam asbestos and thrombolite, and a small amount of grain, particle and breccia dolomite. Vertically, multi-stage microbial dolomite

收稿日期: 2023-01-17

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2017YFC0603104; 2019YFB1504101)与中国石油化工股份有限公司重点科技项目(编号: JP21005)联合资助

作者简介: 杨志波(1995-), 男, , 博士研究生, 研究方向为地质工程专业。E-mail: 1132081603@qq.com

网络首发时间: 2023-07-28 16:47:21 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.3370.P.20230728.1315.003.html>

superimposed rhythmic layers are developed, mainly restricted platform tidal flat facies-grain beach facies. (2) Geochemical analysis shows that the sedimentary evolution process of the Dengying Formation is mainly a shallow water body with arid climate and high salinity, with mud and powder crystal dolomite deposits. The water body in the lower part of the second section is deepened, humid and low salinity, and microbial dolomite is the most developed. The water body in the middle and upper part of the second section is relatively shallow, the humidity decreases and the salinity increases slightly. In the fourth period, the water body first deepened and then quickly became shallow, the humidity gradually decreased, and the salinity gradually increased. (3) The characteristics of dolomite crystal structure in the study area highlight the participation of typical Mg^{2+} -rich fluid. In the arid and high salinity environment, it leads to a/c negative deviation, and in the humid and low salinity environment, it leads to a/c positive deviation. The order degree distribution shows that a/c gradually approaches the ideal dolomite with the increase of order degree. The results not only clarify the relationship between the crystal structure of penecontemporaneous dolomite and the formation environment, but also reveal the characteristics of the ancient seawater environment of the late Proterozoic Dengying Formation.

Key words crystal structure, geochemical characteristics, depositional environment, yangtze platform, dengying Formation

0.引言

扬子地台在晚埃迪卡拉纪灯影组 (ca.551Ma~540Ma) 保存着巨厚的碳酸盐岩沉积, 主要以泥粉晶白云岩及微生物白云岩为主^[1-2]。前人针对这厚层碳酸盐岩成因开展了长期的研究, 得出的普遍结论认为灯影组白云岩主要为原生沉积 (准同生) 低温成因白云岩为主, 同时认为这类原生沉积 (准同生) 低温成因白云岩所蕴含的地球化学信息是可以用于体现灯影组沉积时期原始海水环境的特征^[3-9]。

对于理想白云石而言, 晶胞参数 ($a=b=4.8069$ (Å), $c=16.0034$ (Å), 轴角 $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$) 是白云石晶体结构完整定量分析最直观的特征, 在不同的形成环境下, 如 Fe^{2+} 和 Sr^{2+} 等相对于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子为半径更大的微量元素的混入, 会导致晶胞参数 a 、 c 的值发生明显的变化^[10-11]。白云石有序度是白云石矿物学特征的重要表征参数, 不同类型白云石的有序度可与其形成环境建立相应的联系^[12-13]。雷怀彦等 (1992) 首次依据晶胞参数和结晶有序度参数, 分析四川盆地震旦系灯影组白云岩的形成, 包括原生和次生成因。此外, 地球化学元素 (如常、微量元素以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素) 在碳酸盐岩中可较好地用于沉积环境分析, 指示反映古水深、古盐度和古气候等地质特征^[14-17]。

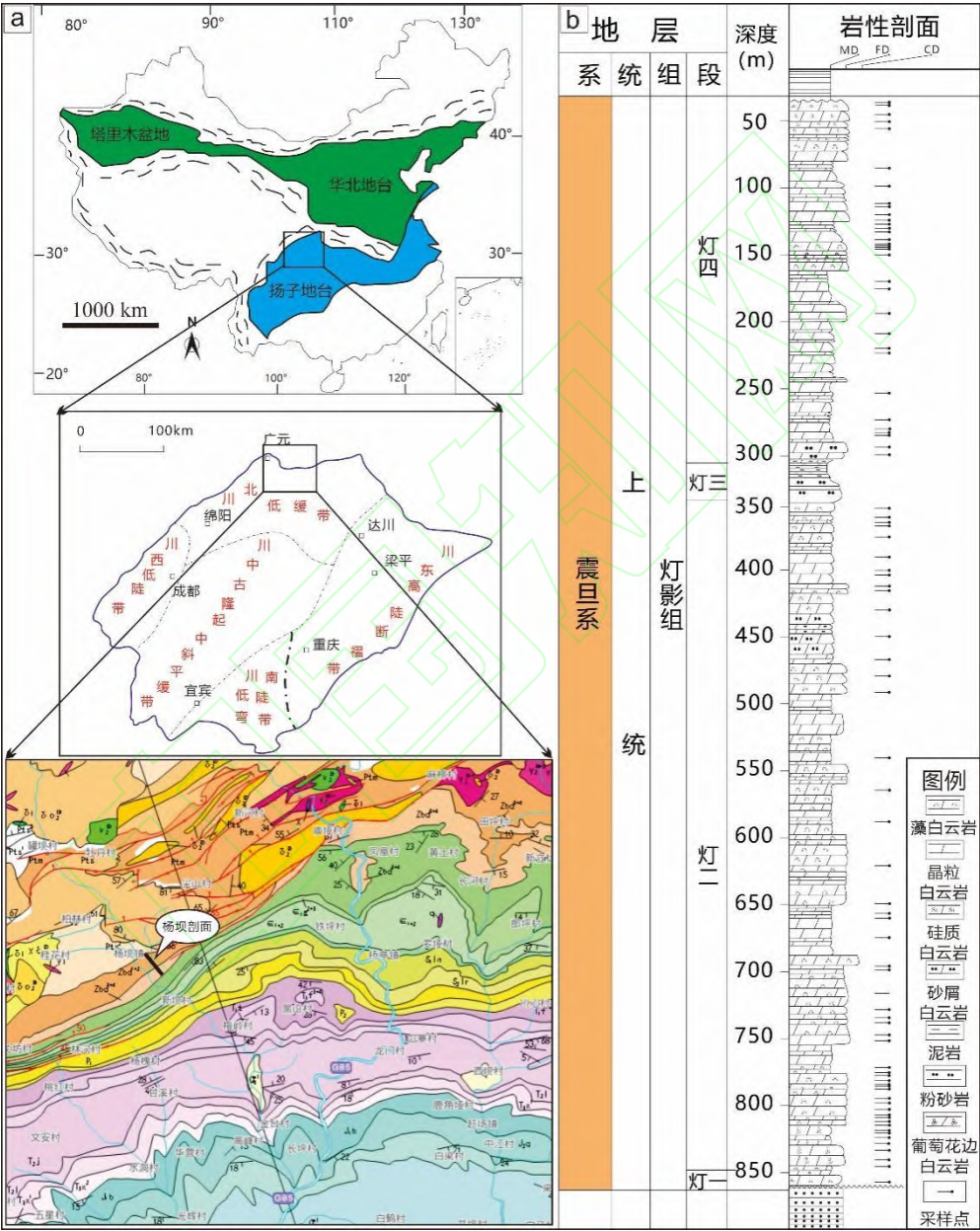
扬子地台埃迪卡拉纪沉积地层是记录着软体动物向着后生动物转变的重要时间记录, 前人针对其古生物演化、海水性质以及环境做了相应的研究^[10-18], 但结合对白云石的晶体结构和地化特征与沉积环境的相应上还相对薄模糊。因此在前人研究的成果基础上, 以杨坝剖面野外露头为研究对象, 系统明晰了灯影组二段、四段的岩石学特征, 基于薄片、阴极发光、有序度和晶胞参数等分析, 优选出相应样品展开主、微量元素、碳氧同位素等地球化学测试分析, 分析了扬子地台晚埃迪卡拉纪灯影组沉积环境演化, 同时建立起白云石晶体结构、地化特征与形成环境的耦合关系, 为准同生白云石沉积环境研究打下基础。

1.地质概况

杨坝剖面位于川东北南江县, 构造上位于米仓山构造带南缘, 是一个出露较为完整的灯影组碳酸盐岩剖面 (图 1.a)。米仓山位于扬子地台北侧, 北依秦岭造山带、南临四川盆地, 东西分别与大巴山和龙门山构造带相接^[19-20]。新元古晚期扬子板块北缘发育汉南古陆, 西南侧为康滇古陆, 因而总体上扬子板块呈现西高南低的沉积格局^[21]。震旦纪至早寒武世早期, 四川盆地及其周边处于区域性拉张的构造环境, 桐湾运动导致整个灯影组沉积期遭受了 2 次大幅度的差异性抬升^[22-25]。其中一幕发生在灯二段末期, 造成灯三段一套区域性碎屑岩假整合于灯二段白云岩之上, 而二幕发生在灯四段末期, 使得震旦世与早寒武世之间呈假整合接触, 并发育了区域性的岩溶风化壳。

研究区灯影组绝大部分时期处于碳酸盐岩台地环境, 沉积多发生于浪基面之上, 有利于藻类的生

长和发育，特定的环境下孕育着特殊的沉积物种类及其结构特征^[26-27]。杨坝剖面灯影组厚度达 800 余米，主要以白云岩为主，自下而上依照岩性演化分为四段（图 1.b）。灯一段的沉积厚度较薄，主要为贫藻白云岩发育为主，到灯二段时，主要发育微生物白云岩（典型葡萄石状）以及砂屑白云岩为主，灯一、二段的岩相古地理基本变化不大，主要为局限台地亚相^[28]。灯三段时期，受川中地区裂陷继续扩张，局限台地面积减小的同时全球海平面上升，研究区发育着深水泥质陆棚和浅水陆棚沉积，灯四段时期，川中裂陷进一步扩张，研究区主要由陆棚沉积过渡到局限台地沉积为主，主要发育晶粒白云岩、藻白云岩、硅质云岩以及砂屑云岩等^[29]。



(a、剖面位置点；b、杨坝剖面岩性柱状图及采样位置)

图 1 研究区地质概况综合图
Fig. 1 Comprehensive geological survey map of the study area

2. 样品来源及测试方法

本文研究的测试样品均来自南江县杨坝野外露头,共采集新鲜样品 108 块。选样时遵循受后生成岩作用影响小、岩性均质、不含明显裂缝或孔洞充填物的四个要求,选取相应样品。所有的样品均被抛光磨制成 0.03mm 的薄片,并用茜素红半染色来区别方解石和白云石。再根据显微镜和阴极发光下识别和观察结构、构造观测,明确岩石类型。再对样品进行筛选、粉碎,将样品使用玛瑙研钵研磨至 200 目以下,自行分装,继而在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成 X 衍射分析(XRD)、碳氧同位素、主微量元素等试验等实验测试。据统计,共选取 108 个新鲜样品进行 XRD 分析,试验仪器为 Bruker D2 PHASER X 射线衍射仪,设备编号为 1703935N,检测标准为 SY/T 5163-2010;103 个样品进行碳氧同位素分析,使用的是 ThermoFisher MAT 253 稳定同位素质谱仪(No: A2018A01292),测试方法为常规磷酸法;分析误差为 $\pm 0.5\%$,测试结果以 PDB 为标准,主要流程:将新鲜粉末加入到预热 50~60℃的磷酸中,同时,将其密封并抽真空,在 75℃恒温装置下,反应 16h,将收集的气体输送到稳定同位素质谱仪 ThermoFisher MAT 253 中,进行碳、氧同位素分析。48 个样品进行主微量元素分析,采用 X 衍射射线荧光光谱法(XRF),试验仪器为 AxiosmAX PW4400(A2020A05371);分析误差 0.05%,主要流程:将粉末样品用压样机进行压制成饼,放入样品杯送入 AxiosmAX PW4400 中,使用 SuperQ 软件进行半定量分析测试。

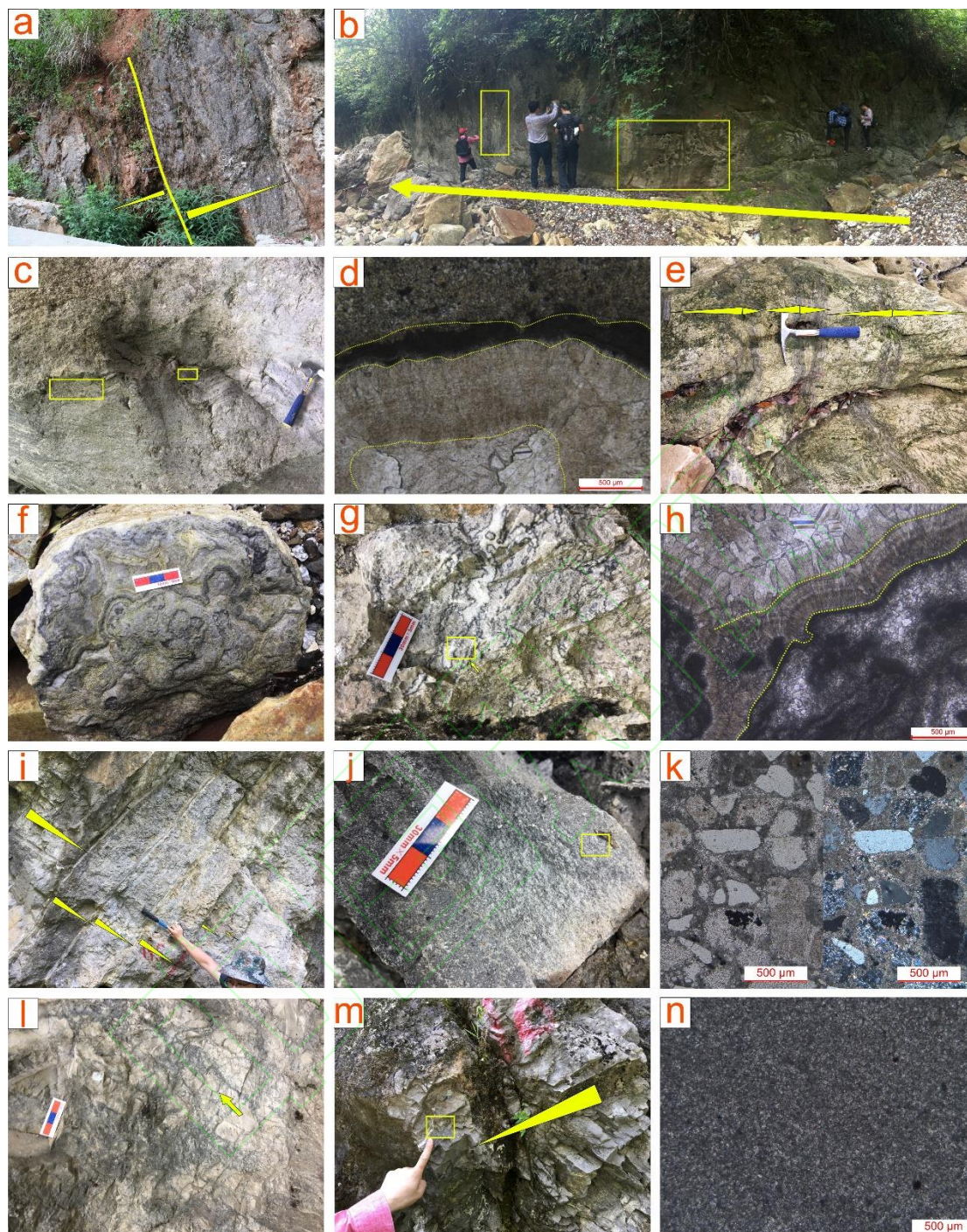
3. 灯影组岩相特征

3.1 岩性、岩相特征

1) 岩石学特征

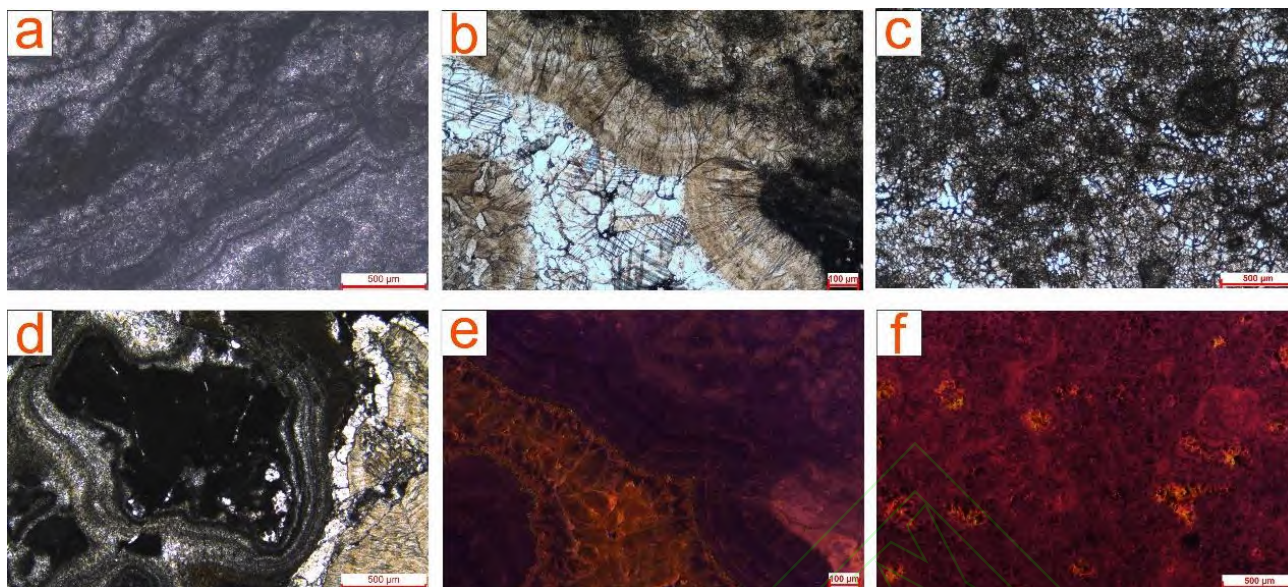
杨坝剖面灯影组主要发育藻白云岩、晶粒白云岩、颗粒白云岩和角砾白云岩(图 2)。微生物白云岩是杨坝剖面的主要白云岩类型,依据 Riding 对微生物岩的分类标准^[30],研究区微生物白云岩主要的包括叠层石白云岩、核形石白云岩、泡沫棉石白云岩以及凝块石白云岩等四类(图 3)。叠层石白云岩宏观上具有斗篷状、平行纹层特征(图 2.c),具有一定的韵律性,由厚层灰白色纹层白云岩与薄层灰黑色充填腔体互层(图 2.e),表明受海平面变化影响而呈现出的水体逐渐变浅的沉积旋回,微观下主要有两种结构类型:一是纹层边界具有环带状纹层结构,为泥晶白云石—等厚纤维状白云石晶壳—细-中晶白云石演化过渡(图 2.d);二是不具有环带状纤维结构,明暗相间互层,深色富藻纹层主要以泥晶白云石为主(图 3.a),而浅色纹层主要由亮晶白云石组成,较波状、丘状叠层石而言,晶间孔和溶蚀孔相对不发育。核形石白云岩,核形石以次椭圆形为主,内部主要为泥晶白云石,部分发生重结晶,壳层为富藻暗层和晶粒相间的同心圈层结构,长短轴比值中等(图 3.d)。泡沫绵石藻白云岩,在显微镜下呈现球状、似球状藻粒,边界泥晶化(图 3.c),部分内部发生重结晶现象,粒间亮晶白云石充填;阴极发光下,泥晶边界呈现暗红色,粒间呈现橙红色,且具有环带状生长层理(图 3.f)。凝块石白云岩,凝块石主要以泥晶白云石为主,含葡萄花边(图 2.f、图 3.b)、窗格状(图 2.g),厚层环带纤维状介壳在阴极发光下呈暗红色,核部浅红色,壳间中-粗晶白云石呈现橙红色,发育着明暗相间的生长纹层(图 3.e)。

颗粒白云岩,主要分布灯影组二段顶部,在露头上呈现灰黑色块状构造(图 2.j),显微镜下具有明显颗粒结构,颗粒主要内碎屑泥晶白云岩和燧石为主,粒间泥晶白云石充填为主(图 2.k)。角砾白云岩,露头可见角砾呈棱角状,主要成分为白云岩内碎屑,发育平直裂缝,为构造角砾云岩,角砾间充填灰黑色泥晶白云岩(图 2.l)。晶粒白云岩,以块状构造为主,野外露头呈现为灰黑色,结构均一,以泥晶、粉晶白云石为主,不发育明显的溶蚀孔洞发育(图 2.i、2.m),显微镜下可见泥晶白云石重结晶现象,形成星点状亮晶白云石晶斑(图 2.n)。块状泥晶白云岩在研究区主要分布于灯一段和灯四段底部。



a) 观音崖组砂岩与灯影组白云岩分界处，由底部的石英砂岩过渡到上部的白云岩；b) 厚层泥、粉晶藻白云岩（黄色方框），灯一段（黄色箭头指示顶部）；c) 纹层白云岩，具有斗篷状、瓦状纹层结构，镜下微观特征（c中黄色方框微观特征d），纹层边界具有环带状纹层结构，灯二段；e) 藻纹层白云岩韵律层，灯二段；f) 葡萄状凝块石白云岩，呈现圈层结构的肾球、椭球以及不规则的球体特征，灯二段；g) 窗格构造凝块石白云岩，宏观上为斑状溶蚀空分布，溶蚀边界呈现灰黑色，溶蚀孔道不均一，内部充填灰白色白云石，微观特征具有环带状纹层结构（h），灯二段；i) 薄层泥质条带与中厚层泥晶白云岩互层，反应水体逐渐增生的沉积旋回，灯二段；j) 硅质砂屑白云岩，杨坝剖面，灯四段；k) 图j的显微镜下微观特征；l) 角砾白云岩，发育平直裂缝（黄色箭头），杨坝剖面，灯四段；m) 灰黑色泥粉晶白云岩，块状结构，向上逐渐过渡到泥粉晶白云岩（n），杨坝剖面，灯四段。（黄色正三角表示沉积水动力由强变弱）

图2 杨坝剖面灯影组野外典型白云岩岩石类型
Fig.2 Typical dolomite types of the Dengying Formation in Yangba profile



a) 纹层状叠层石，杨坝剖面，灯二段。b) 凝块石，含葡萄花边，厚层环带纤维状介壳阴极发光下呈现暗红色，核部浅红色，壳间中-粗晶白云石呈现橙红色，且存在亮暗相间生长层理（e）。c) 泡沫绵石，球状、似球状藻粒，泥晶化边界，部分内部发生重结晶现象，粒间亮晶白云石充填，阴极发光下，泥晶边界呈现暗红色，粒间呈现橙红色，且具有环带状生长层理（图 f）。d) 核形石，次椭圆形为主，内部主要以泥晶组分为主，部分发生重结晶，壳层由富藻暗层和晶粒相间的同心圈层结构，长短轴比值中等。

图 3 杨坝剖面灯影组微生物白云岩镜下特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of microbial dolomite in the Dengying Formation of Yangba profile

2) 垂向岩相演化

杨坝剖面沉积环境演化主要为局限台—深水陆棚—局限台地，一段沉积厚度较薄，约 50 米，藻白云岩相对较少，主要发育泥晶、粉晶白云岩，属于潮上带蒸发沉积环境为主。灯二段为继承性沉积，厚度约为 500 米，沉积古环境相较灯一段变化较小，沉积物变为微生物白云岩，其中水动力环境决定了微生物发育类型，纹层状叠层石主要生长在水动力较弱的低能环境，主要发育于潮上带的下部—潮间带的上部，核形石相对于纹层状叠层石更倾向于生长在水动力较强的环境中，主要发育于潮下带的上部—潮间带下部^[19]。凝块石、泡沫棉石则多形成于核形石之下的水动力条件相对较弱的潮下带底部。垂向上表现为凝块石-核形石、泡沫棉石-纹层石，核形石、泡沫棉石-纹层石及凝块石-核形石、泡沫棉石的韵律层，因此在灯二段表现出多期沉积韵律。灯三段，受桐湾运动一幕运动导致的区域性海平面波动影响，水体变深，发育砂屑泥晶云岩、薄层泥质云岩及泥岩^[29]。灯四段沉积时期，水体逐渐变浅，底部以泥粉晶沉积为主，藻类相对较少，中上部以凝块石-纹层状叠层石以及泥粉晶白云岩为主，上部偶见条带状硅质白云岩，与顶部筇竹寺组灰黑色泥岩呈现不整合接触^{[31]、[32]}。

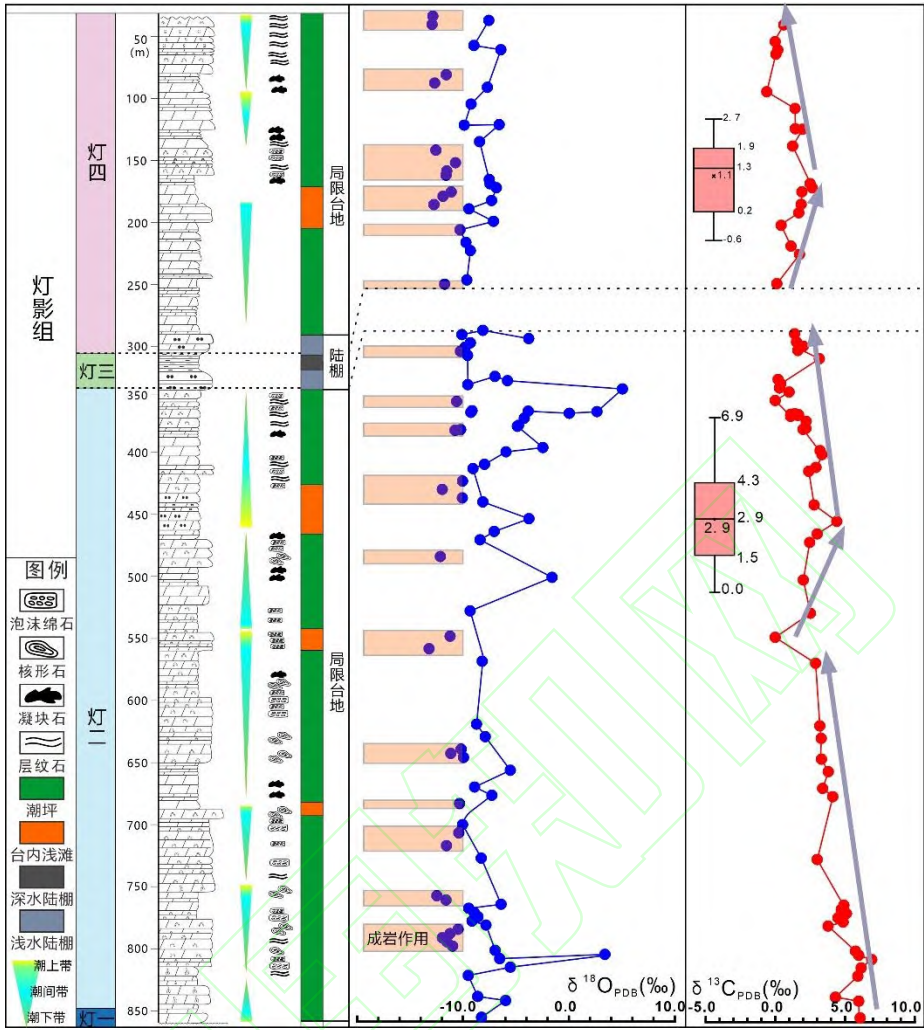


图 4 杨坝剖面灯影组地层柱状图
Fig.4 Comprehensive strata histogram of the Dengying Formation in the Yangba profile

4.地球化学特征

4.1 沉积后作用影响

灯影组碳酸盐岩地层沉积至今长达 5 亿多年，可能受到了某种程度上的后期蚀变作用，从而所蕴含的地球化学特征是否能反映当时的原始沉积古环境值得考量，因此在使用测试数据之前，首先应检验其是否经历强烈的后期蚀变作用而影响而同位素组成发生了改变并排除相关样品数据。在根据手表本和显微镜下的观察，选择较为新鲜的样品研磨分析时，Mn/Sr 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值对后期蚀变作用较为敏感，亦可作为定量判断沉积后作用强弱的标志^[33]。研究认为，Mn/Sr<10 的碳酸盐岩表明它未遭受强烈的蚀变，其碳同位素值可以反映原始沉积记录； $\delta^{18}\text{O}<-10\text{‰}$ 时，表明岩石样品发生了强烈蚀变，其碳同位素数据已不能使用，研究区灯影组碳酸盐岩样品中 Mn/Sr 值均小于 10，但部分数据 $\delta^{18}\text{O}<-10\text{‰}$ ，表明后期经历相对较为严重得成岩蚀变作用，排除相对应碳同位素值，剩下得样品 Mn/Sr 值都小于-10，且 $\delta^{18}\text{O}$ 值都在-10‰以上，表明这些样品所受后期蚀变作用的影响较小，基本保留了原始同位素信息（图 4）。

4.2 晶体结构及地球化学特征

1) 有序度与晶胞参数

白云石有序度和晶胞参数不仅是结晶程度好坏的标志，也能反映其形成的环境物理、化学条

件^[10]。研究区剖面的有序度值区间 0.495~1.000，平均值为 0.791，整体来看研究区的白云石样品有序度较高，范围变化较大，即反映了其具有早期白云岩化的特征，又体现了沉积后成岩作用的影响^[12-34]。杨坝剖面白云岩的晶胞参数 a 的数值分布在 4.801-4.823Å 之间， c 值分布在 15.976-16.075Å 之间， a/c 值区间为 0.2995~0.3007，与前人研究的灯影组葡萄花边围岩的泥晶白云石（0.30019）和泥晶白云石（0.30079）分布范围最为相近（图 5）^[10]，平均值为 0.30026，与理想白云石晶胞参数（0.3003）相近。

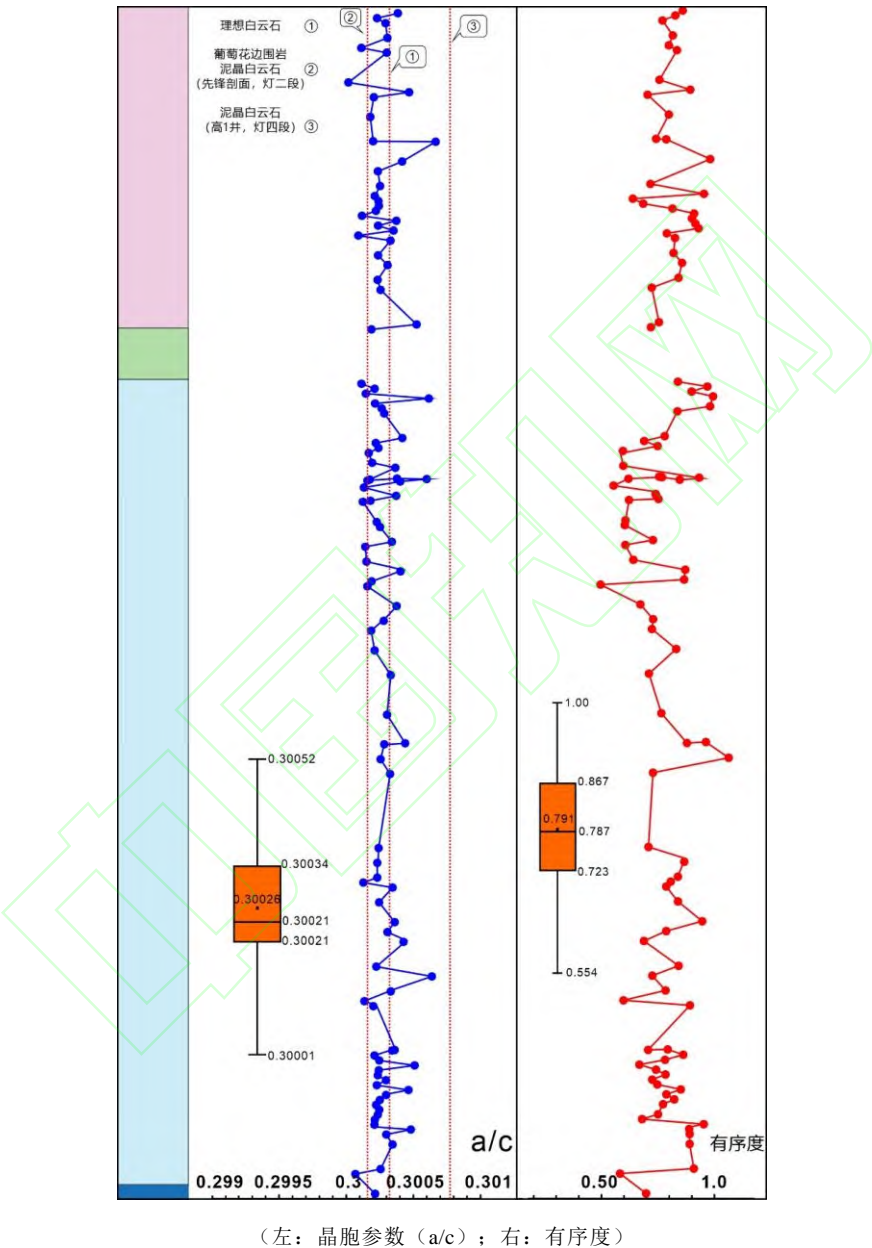


图 5 杨坝剖面灯影组白云岩晶体结构分布图
Fig.5 Crystal structure distribution map of dolomite in the Dengying Formation of Yangba profile

2) 主、微量元素

研究认为，碳酸盐岩中所蕴含的主、微量元素能够较好地反映碳酸盐岩沉积古环境，各个元素指标对古气候（ Mg/Ca ）、古盐度（ $m=MgO/Al_2O_3$ ）、古水深（ Sr 、 $1000 \cdot Sr/Ca$ ）等具有较好的指示意义^[35]。研究区中灯影组白云岩 Mg/Ca 值主要分布为 0.694~0.751，均值 0.707，灯一段相对较高，近

0.724，至二段略有降低后趋于稳定，到四段下部时相对较低为 0.714，至四段上部时突然增大到 0.751； MgO/Al_2O_3 值远大于 500，主要表现二段下部数值相对较高，到上部略有降低后处于稳定；Sr 值范围为 5.54~24ppm，均值为 12.65ppm， $1000 \times Sr/Ca$ 值区间为 0.067~0.204，均值为 0.125，二者在剖面上的演化具有一定的相似性，整体上呈现出二段下部数值较大，向上逐渐减小后趋于稳定，四段时，先增加后迅速减小。

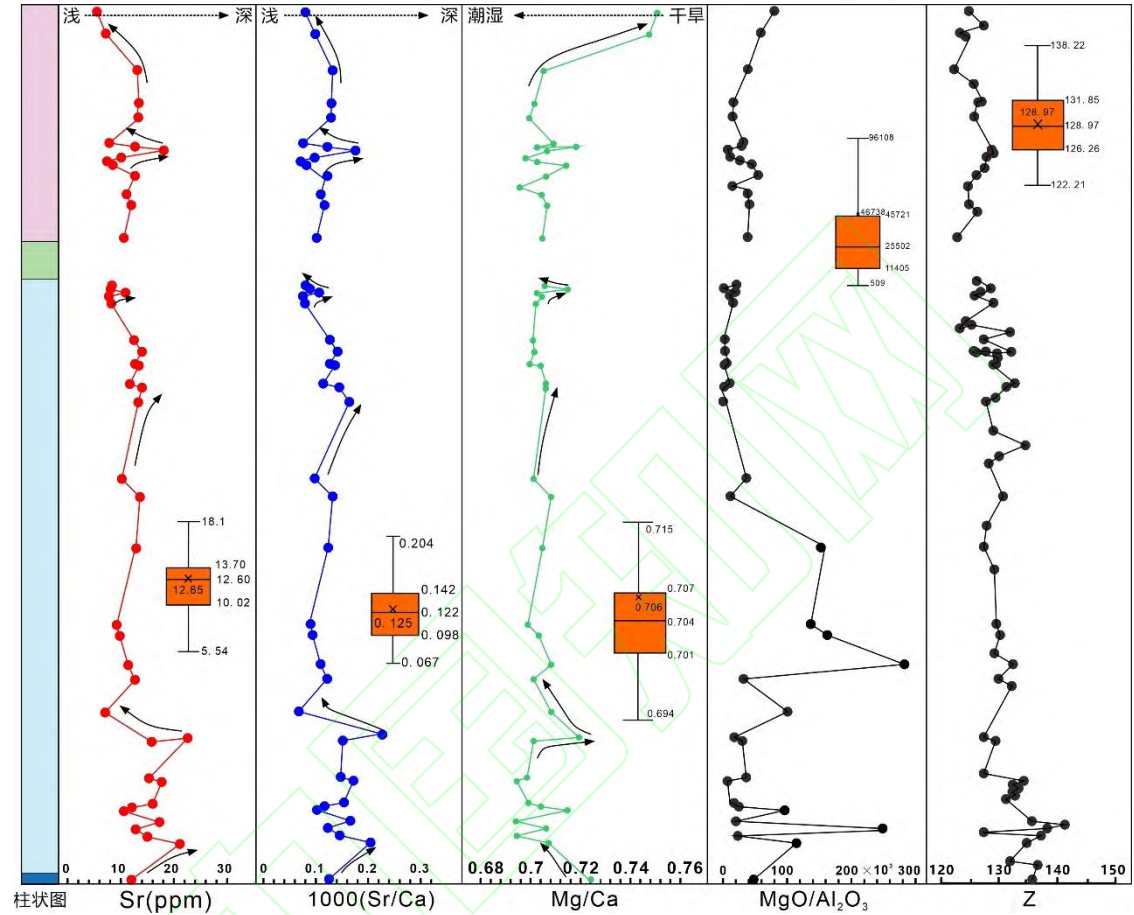


图 6 杨坝剖面灯影组白云岩地球化学柱状图
Fig.6 Geochemical histogram of dolomite in the Dengying Formation of the Yangba profile

3) 碳、氧同位素

研究学者们对灯影组碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 进行了大量的研究^[16、36-37]，其中 $\delta^{13}C$ 值变化曲线，与本文剖面的 $\delta^{13}C$ 所呈现的变化趋势相一致（图 7），但杨坝剖面 $\delta^{13}C$ 的数值相对较高，表明该地区沉积水深相对更浅一些，生物产率和埋藏速率相对较大，正好与该地区灯影组发育的巨厚微生物白云岩相对应。研究区灯影组碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值变化范围主要集中在 -0.6‰~6.9‰，均值为 2.4‰，总体上呈现逐渐降低的趋势，其间有一定的波动，二段下部 $\delta^{13}C$ 值相对较大，接近于 7‰，向上逐渐减小至 0‰。 $\delta^{18}O$ 数值范围为 -14.2‰~5.1‰，均值为 -8.5‰，整体偏负，与同期准同生海水出现了较大程度的负偏^[38-39]。

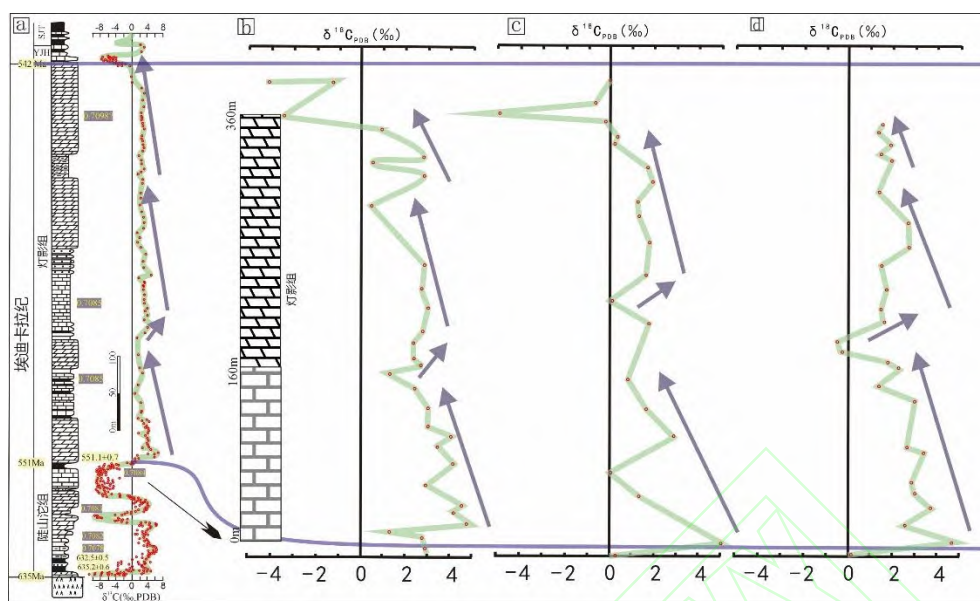


图7 扬子地台区灯影组碳酸盐岩碳同位素对比图 (a-据 Ganqing Jiang, 2011、b-据张同钢, 2004、c-据 Lambert, 1987、d-据 Yang Jiedong, 1999)

Fig.7 Carbon isotope comparison of carbonate rocks in the Dengying Formation of the Yangtze Platform

5.讨论

5.1 灯影组沉积古环境分析

1) 古水深

Veizer (1973, 1974) 指出碳酸盐岩沉积从浅水向深水过渡过程中, Sr 的绝对含量有明显的增加趋势, 碳酸盐岩沉积物中 Sr 的含量主要受原始矿物和成岩作用的影响^[40-41]。研究区内灯影组白云岩的 Sr 和 1000 (Sr/Ca) 分布具有较好的一致性 (图 6), 曲线变化趋势表明灯二段沉积古水深从下至上波动式逐渐变浅, 灯四段从下至上主要为从下到上先变深后逐渐变浅的一个沉积水体演化过程。

2) 古盐度

镁铝比值 $m=1000 \times (\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 是根据沉积岩中 MgO 的亲海性和 Al_2O_3 的亲陆性特征而建立的, 其比值 m 则是沉积环境古盐度分析的一个有效指标, 当 m 值大于 500 时, 指示为较为典型的陆表海环境 (或泻湖碳酸盐岩沉积环境)^[35]。研究区灯影组白云岩的 m 值远大于 500 (图 6), 同时结合 Keith and weber 提出的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与海水盐度关系: $Z=2.048 \times (\delta^{13}\text{C}+50)+0.498 \times (\delta^{18}\text{O}+50)$ 来看^[42], 研究区灯影组白云岩的 Z 平均值为 129.16 (以 Z 值为 120 为海水和淡水的分界线, 且数值越大盐度越高), 范围变化从 122.21~141.27。二者曲线变化均表现出灯二段呈现波动式逐渐由高低, 灯四段整体盐度整体由低增高。

3) 古气候

Veizer 和 Demovic (1974) 表明在干旱气候下 Mg/Ca 值高、斜率陡, 和数值低但相对高值 K^+ 、 Na^+ 等, 潮湿环境下则相反。研究区灯影组白云岩 K^+ 、 Na^+ 值普遍较低, Mg/Ca 值表明从灯一段相对干旱过渡到灯二段相对潮湿环境下后, 二段总体以潮湿为主, 出现了三次的相对干旱环境, 二段主要表现为相对潮湿逐渐过渡为干旱环境 (图 6)。

5.2 白云石的晶体结构对环境响应

对于显生宙以来的全球海水性质的波动, 前人做了大量的研究, 对作为主要影响碳酸盐岩矿物形成的 Mg/Ca 值进行了大量统计, 根据海水中 Mg/Ca 比值的波动, 将碳酸盐岩沉积环境划分为“文石海—高镁方解石海” ($\text{Mg}/\text{Ca} > 2$) 和“方解石海” ($\text{Mg}/\text{Ca} < 2$)^[43-46], 对于新元古界晚期的全球海水性质研究相对较少, 但也一定的探讨, 提出了文石海—白云石海的验证^[47], 但总体上其地化性质

要表现出较高的 Mg/Ca 值。同时结合前人研究，在 Mg/Ca 值较高的成岩流体下形成的白云石的 a 、 c 值相对偏小^[11]，研究区内 a 、 c 变化具有典型的高 Mg/Ca 流体特征（图 8.a），这与前人对新元古界海水的高 Mg/Ca 特征相一致。通过 a/c 与 Z （图 8.b）、 Mg/Ca （图 8.d）等沉积环境指标分析，发现随沉积环境的盐度的升高、湿度的减小，白云石晶体结构特征 a/c 值会逐渐相对负偏，反之，随着沉积环境盐度的降低、湿度的增加，白云石晶体结构会逐渐正偏。初步认为是在干旱、高盐度的环境下，除了 Mg^{2+} 的富集外，还会富集 Sr^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子， Sr^{2+} 、 Mn^{2+} 等大的离子半径的微量元素的混入，会导致晶胞参数 c 值的增大^[10]，从而导致 a/c 负偏的现象，而在潮湿、低盐度的环境下， Mg^{2+} 的含量有所降低，会导致 a/c 值得正偏^[11]。同时，有序度分布也表明，随着有序度的增加， a/c 从偏离逐渐靠近理想白云石（图 8.c）。

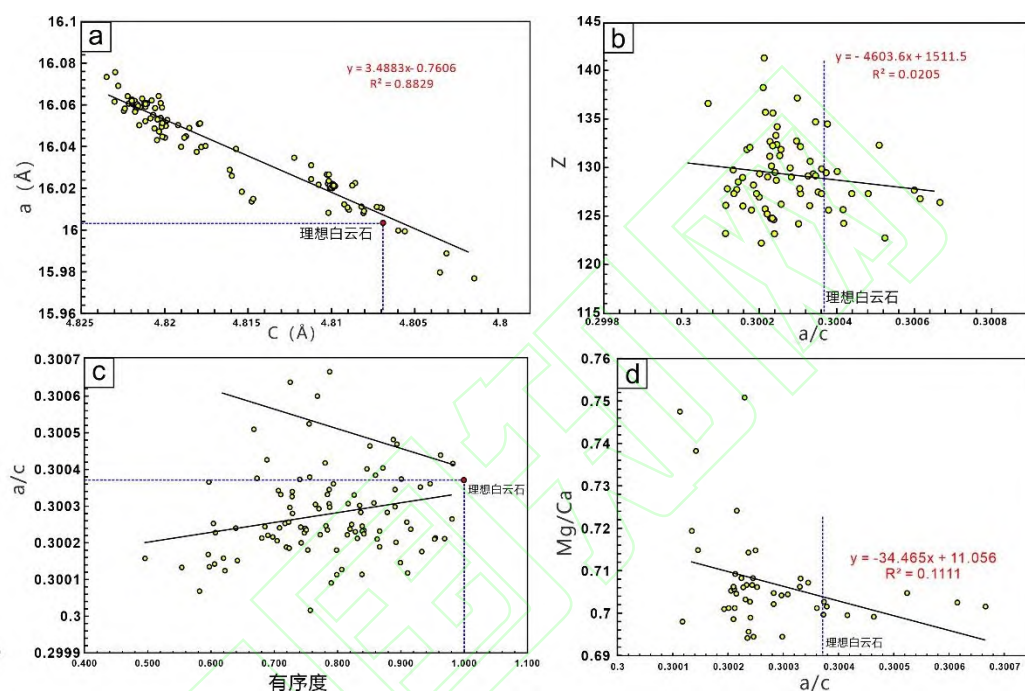


图 8 杨坝剖面灯影组白云岩晶体结构与地球化学特征交汇图

Fig. 8 Intersection diagram of crystal structure and geochemical characteristics of dolomite in Dengying Formation of Yangba section

6. 结论

1. 杨坝剖面灯影组白云岩主要包括藻白云岩、晶粒白云岩、颗粒白云岩和角砾白云岩，以微生物白云岩为主，大致分为叠层石白云岩、核形石白云岩、泡沫棉石白云岩和凝块石藻白云岩，泥粉晶结构，体现为原生（准同生）特征。垂向上主要为局限台地-陆棚-局限台地演化，剖面上显示了多期的凝块石-核形石、泡沫棉石-纹层石，核形石、泡沫棉石-纹层石及凝块石-核形石、泡沫棉石的韵律层系。

2. 结合岩石学、地化分析看出灯影组沉积环境演化过程中一段主要为水体较浅（ Sr 、1000（ Sr/Ca ）值低）、较为干旱盐度较高（ Mg/Ca 值高， m 、 Z 值相对高），主要以泥、粉晶白云岩沉积为主，二段下部水体较深（ Sr 、1000（ Sr/Ca ）值高）、较为潮湿，盐度相对降低（ Mg/Ca 值低， m 、 Z 值相对低），微生物最为发育（ $\delta^{13}\text{C}$ 值较大）。二段中上部水体总体相对较浅（ Sr 、1000（ Sr/Ca ）值低），湿度降低、盐度略增高（ Mg/Ca 值降低， m 、 Z 值相对高）。四段时水体先加深后迅速变浅（ Sr 、1000（ Sr/Ca ）值先增加后逐渐降低）、湿度逐渐降低、盐度亦逐渐增大（ Mg/Ca 值升高， m 值相对升高）。

3. 研究区白云石晶体结构特征（ a 、 c 值）反映了显著的高 Mg/Ca 值形成环境，同时，晶体结构中晶胞参数（ a/c ）表现出了在干旱、高盐度的环境下，导致 a/c 负偏，在潮湿、低盐度的环境下会导致

a/c 值得正偏。有序度分布亦表明随着有序度的增加, a/c 从偏离逐渐靠近理想白云石。

致谢 感谢审稿人花费宝贵的时间对文稿提出建设性的修改意见。

参考文献

- [1] Zhang S, Jiang G, Zhang J, et al. U-Pb sensitive high-resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in south China: Constraints on late Neoproterozoic glaciations[J]. *Geology*, 2005, 33(6):473-476.
- [2] Condon, D. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. *Science*, 2005, 308 (5718), 95-98.
- [3] Zhao, D.; Tan, X.; Hu, G et al. Characteristics and Primary Mineralogy of Fibrous Marine Dolomite Cements in the End-Ediacaran Dengying Formation, South China: Implications for Aragonite-Dolomite Seas[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 581, 110635.
- [4] 鲍志成, 季汉成, 梁婷等. 中新元古界原生白云岩: 以中国典型台地区为例[J]. *古地理学报*, 2019, 21 (6): 869-884.
- [5] 金民东, 谭秀成, 李毕松等. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因[J]. *沉积学报*, 2019, 37 (3): 443-454.
- [6] 赵文智, 沈安江, 乔占峰等. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45 (6): 923-935.
- [7] 王勇. “白云岩问题”与“前寒武纪之谜”研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006 (8): 857-862.
- [8] 梅冥相, 周鹏, 张海等. 上扬子区震旦系层序地层格架及其形成的古地理背景[J]. *古地理学报*, 2006 (2): 219-231.
- [9] 雷怀彦, 朱莲芳. 四川盆地震旦系白云岩成因研究[J]. *沉积学报*, 1992 (2): 69-78.
- [10] 张杰, 寿建峰, 张天付等. 白云石成因研究新方法——白云石晶体结构分析[J]. *沉积学报*, 2014, 32 (3): 550-559.
- [11] Warren, J. Dolomite: Occurrence, Evolution and Economically Important Associations[J]. *Earth-Science Reviews* 2000, 52 (1-3), 1-81.
- [12] 钟倩倩, 黄思静, 邹明亮等. 碳酸盐岩中白云石有序度的控制因素——来自塔河下古生界和川东北三叠系的研究[J]. *岩性油气藏*, 2009, 21 (3): 50-55.
- [13] Manche, C. J.; Kaczmarek, S. E. A Global Study of Dolomite Stoichiometry and Cation Ordering through the Phanerozoic[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2021, 91 (5), 520-546.
- [14] 田春景, 张翔. 沉积地球化学[M]. 第一版. 北京: 地质出版社, 2016. 1: 41-77
- [15] Anbar, A. D. Proterozoic Ocean Chemistry and Evolution: A Bioinorganic Bridge? [J]. *Science*, 2002, 297 (5584), 1137-1142.
- [16] 张同钢, 储雪蕾, 张启锐等. 扬子地台灯影组碳酸盐岩中的硫和碳同位素记录[J]. *岩石学报*, 2004(3): 717-724.
- [17] 郑剑锋, 刘禹, 朱永进等. 塔里木盆地乌什地区上震旦统奇布拉克组地球化学特征及其地质意义[J]. *古地理学报*, 2021, 23 (5): 983-998.
- [18] Cherry L B, Gillelaudeau G J, Grazhdankin D V, et al. A diverse Ediacara assemblage survived under low-oxygen conditions[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-11.
- [19] 张云峰, 唐雨, 唐洪明等. 川西北杨坝剖面埃迪卡拉系灯影组核形石组构特征[J]. *沉积学报*, 2022, 40 (5): 1302-1312.
- [20] 魏显贵, 杜思清, 何政伟等. 米仓山地区构造演化[J]. *矿物岩石*, 1997 (S1): 110-116.
- [21] Zhu M, Zhang J, Yang A, et al. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow-to deep-water environments of the Yangtze Platform: an integrated approach[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(12): 951-960.
- [22] 武赛军, 魏国齐, 杨威等. 四川盆地桐湾运动及其油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27 (1): 60-70.
- [23] 李宗银, 姜华, 汪泽成等. 构造运动对四川盆地震旦系油气成藏的控制作用[J]. *天然气工业*, 2014, 34 (3): 23-30.
- [24] 汪泽成, 姜华, 王铜山等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41 (3): 305-312.
- [25] 李启桂, 李克胜, 周卓铸等. 四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34 (4): 516-521.
- [26] 梅冥相. 从凝块石概念的演变论微生物碳酸盐岩的研究进展[J]. *地质科技情报*, 2007 (6): 1-9.
- [27] 牟传龙, 王秀平, 梁薇等. 上扬子区灯影组白云岩葡萄体特征及成因初探——以南江杨坝地区灯影组一段为例[J]. *沉积学报*, 2015, 33 (6): 1097-1110.
- [28] Ding, Y.; Chen, D.; Zhou, X. et al. Cavity-filling Dolomite Speleothems and Submarine Cements in the Ediacaran Dengying Microbialites, South China: Responses to High-frequency Sea-level Fluctuations in an 'Aragonite-Dolomite Sea.' [J]. *Sedimentology* 2019, 66 (6), 2511-2537.
- [29] 邢凤存, 侯明才, 林良彪等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论[J]. *地学前缘*, 2015, 22 (1): 115-125.
- [30] Riding, R. Microbial Carbonates: The Geological Record of Calcified Bacterial-Algal Mats and Biofilms[J]. *Sedimentology*, 2000, 47, 179-214.
- [31] 冯明友, 伍鹏程, 鄢晓荣等. 四川峨边震旦系灯影组三段泥页岩地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36 (3): 493-501.
- [32] 周进高, 张建勇, 邓红婴, 陈娅娜, 郝毅, 李文正, 谷明峰, 罗宪婴. 四川盆地震旦系灯影组岩相古地理与沉积模式[J]. *天然气工业*, 2017, 37 (1): 24-31.
- [33] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications[J]. *Precambrian Research*, 1995, 73(1-4):27-49.
- [34] 黄思静. 四川渠县龙门峡三叠系嘉陵江组第三、四段白云石有序度及其形成条件探讨[J]. *矿物岩石*, 1985 (04): 57-62+129. DOI: 10. 19719/j. cnki. 1001-6872. 1985. 04. 007.
- [35] 李丹秋. 华北地台中元古代高于庄组沉积期古海洋环境条件: 沉积地质与地球化学证据. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. 05: 19-22.
- [36] Yang Y. Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater?[J]. *Precambrian Research*, 1999.
- [37] Jiang G, Shi X, Zhang S, et al. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635-551 Ma) in South China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(4):831-849.
- [38] Gao Y, Zhang X, Zhang G, et al. Ediacaran negative C-isotopic excursions associated with phosphogenic events: Evidence from South China[J]. *Precambrian Research*, 2018, 307:218-228.

- [39] 王宗哲, 杨杰东, 孙卫国. 扬子地台震旦纪海水碳同位素的变化[J]. 高校地质学报, 1996 (1): 112-120.
- [40] Veizer J, Demovic R. Environmental and climatic controlled fractionation of elements in the Mesozoic carbonate sequences of the western Carpathians[J]. Journal of Sedimentary Research, 1973.
- [41] Veizer J, Demovic R. Strontium as a tool in facies analysis[J]. Journal of sedimentary petrology. 1974.03.93-115
- [42] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10-11):1787-1816.
- [43] Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T, et al. Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidence from fluid inclusions[J]. Science, 2001, 294(5544): 1086-1088.
- [44] Stanley S M, Hardie L A. Secular oscillations in the carbonate mineralogy of reef-building and sediment-producing organisms driven by tectonically forced shifts in seawater chemistry[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1998, 144(1-2):3-19.
- [45] Hardie L A. Secular variation in seawater chemistry: An explanation for the coupled secular variation in the mineralogies of marine limestones and potash evaporites over the past 600 m.y.[J]. Geology, 1996.
- [46] Schwab, Frederic L. Secular trends in the composition of sedimentary rock assemblages—Archean through Phanerozoic time[J]. Geology, 1978, 6(9):532-536.
- [47] Hood A V S, Wallace M W, Drysdale R N. Neoproterozoic aragonite-dolomite seas? Widespread marine dolomite precipitation in Cryogenian reef complexes[J]. Geology, 2011, 39(9):871-874.

