

引用格式:李跃杰,袁海锋,徐国盛,等. 2026. 川中北部地区二叠系茅三段—吴一段铁白云岩成因机制研究[J]. 沉积学报, 44(2): 557-576.

LI YueJie, YUAN HaiFeng, XU GuoSheng, et al. 2026. Study on the Genesis Mechanism of the Permian Maosan-Wuyi Iron Dolomite in North-Central Sichuan Area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 557-576.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.073

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.073

川中北部地区二叠系茅三段—吴一段铁白云岩成因机制研究

李跃杰^{1,2}, 袁海锋^{1,2}, 徐国盛^{1,2}, 肖钦仁^{1,2}, 匡明志^{1,2}, 徐婷^{1,2}, 叶子旭^{1,2}

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

2. 成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 成都 610059

摘要 【目的】目前川中北部地区茅三段—吴一段铁白云石成因机制尚不明确。【方法】基于茅三段—吴一段岩矿特征, 结合岩石TIMA扫描、全岩X射线衍射分析、微区原位主微量元素、锶同位素流体包裹体均一温度以及铁白云石原位U-Pb年代学等手段, 对铁白云石成因机制展开研究。【结果】(1)茅三段与吴一段岩石类型为灰岩类、白云岩类以及沉凝灰岩类。灰岩类岩相主要包括泥晶生屑灰岩、亮晶生屑灰岩及云质灰岩; 白云岩类岩相为半自形—自形粉—细晶白云岩; 沉凝灰岩类岩石主要由火山碎屑、碳质、钙镁质、砂级碎屑以及金属矿物等组成, 其中火山碎屑为玻屑、玄武岩等碎屑, 钙镁质主要成分为白云石与方解石。(2)茅三段与吴一段顶部白云石微量元素平均值表现为具极高的Fe含量($1.0678.40 \times 10^6$), 较高的Mn含量(822.95×10^6)、Si含量($1.929.81 \times 10^6$)、Al含量(394.11×10^6)及高(Na+K)含量(362.38×10^6), 指示封闭环境下成岩流体具有高盐度、高碱性金属含量的特征。铁白云石与泥晶生屑灰岩中基质部分的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr介于茅口组—吴家坪组同时期海水范围内, 同时 Σ REE值的偏低, LREE的亏损与海水的LREE亏损模式一致, 指示白云石化成岩流体与同时期海水具有相似特征。(3)茅三段与吴一段中粉—细晶白云石U-Pb年龄为 245.36 ± 1.08 Ma, 白云石化作用主要发生于晚二叠世—早三叠世。【结论】茅三段与吴一段粉—细晶白云石的白云石化流体为上覆吴一段、吴二段泥质沉凝灰岩、凝灰质泥岩中黏土矿物发生脱水作用产生。此过程中析出大量Mg²⁺、Fe²⁺、Al³⁺、Si⁴⁺等离子, 以同期茅口组—吴家坪组残余海水为载体, 运移至茅三段与吴一段顶部的颗粒灰岩进而发生交代形成铁白云石。

关键词 铁白云石; 二叠系; 茅三段; 吴一段; 川中北部地区

第一作者 李跃杰, 男, 1999年出生, 硕士研究生, 储层地质学, E-mail: 2030319088@qq.com

通信作者 袁海锋, 男, 教授, 储层地质学及油气成藏地球化学, E-mail: yuanhaifeng08@cdut.cn

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)02-0557-20

0 引言

铁白云石是白云石的一种类质同象体, 由层状金属原子与层状碳酸基团交替组成(庞江等, 2019; 王晓晓等, 2020; 韩雪等, 2022)。作为碳酸盐岩储层中常见的伴生矿物, 在Ca-Mg-Fe质碳酸盐岩矿物中, 当Mg²⁺与Fe²⁺摩尔比 $\leq 4:1$ 或Fe(Mn)CO₃摩尔含量 $\geq 10\%$ 时, 白云石可定义为铁白云石, 因而铁白云石的形成通常晚于白云石(王晓晓等, 2020; 韩雪等, 2022)。铁白云石按成因机制差异可划分为原生沉淀与次生两种(张军涛等, 2017)。目前, 在铁白云石的成因模式中一般为次生产物, 故形成的铁白云石

中铁元素含量可反映成岩流体的性质及来源。次生铁白云石形成的必要条件主要包括, 充足Fe²⁺来源以及适宜的铁白云石交代环境, 在经典的碳酸盐岩分布模式研究中, 铁白云石通常在50 MPa且温度至100 °C~200 °C最易沉淀, 所以铁白云石的形成多发生于中晚成岩阶段(庞江等, 2019; 王晓晓等, 2020; 韩雪等, 2022)。铁白云石较方解石与白云石更加稳定, 具有更好的抗压实性。而原生铁白云石通常在微生物介导情况下析出(由雪莲等, 2018)。

目前, 铁白云石的研究以次生为主, 其成因机制主要与热液流体或黏土矿物转化过程相关。如柳益群等(2010)在研究湖相喷流型热水白云岩中发现,

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2024-05-14; 录用日期: 2024-06-24; 网络出版日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572133, 41872130)

纹层状白云岩中含有极高的铁白云石,成岩流体来源与地幔流体上升致使超基性岩发生蛇纹石化而释放的大量镁、铁离子及铁柱金属元素有关,并伴有钠长石、方沸石等大量热液矿物。戴朝成等(2018)对深湖相形成的铁白云石地球化学特征研究认为,其为一类具有特殊成因意义的湖相热水沉积白云岩。张军涛等(2017)对奥陶系马家沟组富铁白云石成岩研究表明,其成岩流体与上覆铁质黏土岩、黏土岩及铝土矿等富铁层建造相关,而铁质黏土岩可作为下伏马五段白云岩中铁质的直接来源。王晓晓等(2020)对咸水湖和盐湖环境中铁白云石成因讨论表明,目标层中存在大量黏土矿物转化的中间产物伊蒙混层及天青石等热液矿物,因而认为富铁流体主要来源于热液和黏土矿物转换过程的释放。

川中北部上二叠统吴家坪组沉凝灰岩来源于峨眉山火山序列酸性熔结凝灰岩的风化壳中,形成以蒙脱石为主的黏土矿物沉积物(李红等,2021;李双建等,2021;肖钦仁等,2023)。Shang *et al.* (2023)研究表明泥岩中黏土矿物的转化可提供 Mg^{2+} 的来源,如蒙脱石的伊利石化可向孔隙水中释放 Mg^{2+} 。梁俊红和孙宝亮(2016)关于黏土矿物成岩作用的研究指出,当有 Al^{3+} 与 K^+ 存在的碱性还原环境下,蒙脱石便能向伊利石转化析出 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等碱性金属离子等。受不同成因机制控制,不同的白云石具有不同产状以及地球化学特征。而在热液影响下形成的白云石具有明显的Eu正异常、铈同位素高于同时期海水中铈同位素、伴生典型的热液矿物以及阴极发光为暗红光—红光等特征(戴朝成等,2018;李红等,2021;李双建等,2021;肖钦仁等,2023)。

近年来四川盆地北部中上二叠统油气勘探取得重大突破,川中北部YB7、YB701、YB8等钻井茅三段与吴一段钻遇岩相以灰岩、云质灰岩及白云岩为主。研究表明,川中北部茅口组与吴家坪组钻遇白云岩为具有较高的Fe、Mn及Al等含量的铁白云石,阴极发光为不发光,其成因机制仍不明确。为此,本文对其开展了详细的岩矿鉴定和地球化学分析,结合阴极发光、微区原位微量元素、岩石TIMA(TESCAN Intergrated Mineral Analyzer,综合矿物分析系统)、全岩X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)及白云石原位U-Pb同位素定年等手段,明确铁白云石成岩流体来源,建立白云石成因模式。

1 区域地质背景

研究区位于四川盆地北部的米仓山南麓,构造分区为上扬子西北缘川北低陡褶皱带与川西山前凹陷带。中泥盆世时期华南板块南缘裂谷作用和火山作用强烈、台盆分异明显,同时华南板块北缘的南秦岭洋也于此时打开,此时为峨眉地裂运动伊始(王晓晓等,2020)。而从中泥盆世到石炭纪,华南板块南缘的海盆,台块—台槽构造发育,海水不断向北进侵,但仍保留南海北陆的古地理格局。至中二叠世晚期峨眉地幔柱上升对岩石圈底部的动力冲击导致地壳抬升,而东吴运动本质上是一次地壳的快速差异抬升,故位于上扬子北部的茅口组经历了1~3 Ma的暴露与剥蚀(何斌等,2003;窦立荣等,2022)。同时学者们认为峨眉山玄武岩的喷发系东吴运动在上扬子西缘最突出的表现(张军涛等,2017;戴朝成等,2018)。晚二叠世时期,西侧因峨眉山玄武岩大面积喷发成为川滇古陆即形成覆盖于云南、贵州、四川三省的大火成岩省(何斌等,2003)。东侧再次出现华夏古陆,形成东西两大古陆中夹中上扬子浅海台地的古地理格局;经历大规模海侵之后,四川北部在拉张背景下形成堑垒断陷的古地貌格局,中晚二叠世时期受峨眉地幔柱持续活动以及勉略洋被动大陆边缘伸展构造控制,于川中北部地区形成台槽分异(图1a)。环裂陷周缘多叠置发育呈NW—SE展布的台地边缘相带,经历多幕次沉积构造分异与海平面升降变化,形成茅口与吴家坪期沉积—古构造格局(何斌等,2003;徐安娜等,2014;冯冲等,2015;田野,2018;张本健等,2019;曾琪等,2020)。

上扬子茅口组为典型的碳酸盐台地沉积,岩性和厚度比较稳定,中晚二叠世之交上扬子岩相古地理在空间上发生了突变,于川南等地表现为由茅口期浅海台地碳酸盐岩突变为宣威组陆相和龙潭组滨浅海碎屑岩(徐安娜等,2014);吴家坪期由于受峨眉地幔柱隆升与大火成岩省的形成的影响(梁新权等,2013;王兴志等,2021;钟原等,2021),沉积分异加剧,四川盆地内由西南向北东向依次形成火山岩相、陆相、海陆过渡相、海相沉积格局(梁新权等,2013)。川中北部研究区茅口期—吴家坪期主要发育海相碳酸盐岩沉积。研究区茅口组与吴家坪组地层划分均采用三分法,自下而上依次为茅一段、茅二段、茅三

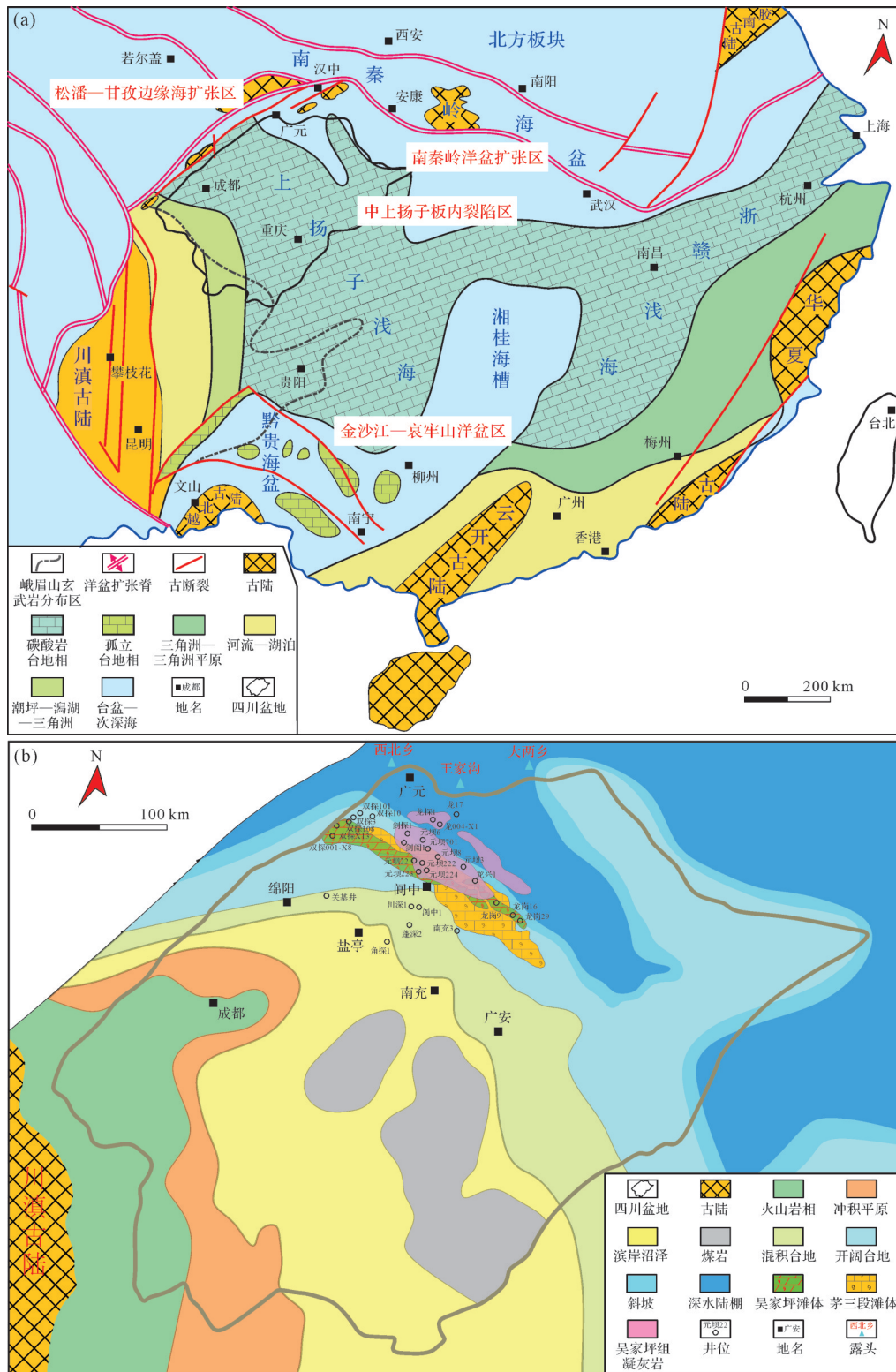


图1 四川盆地峨眉山地列运动构造特征与沉积相带展布

(a)华南板块上二叠统峨眉山裂运动构造特征图(何斌等, 2003; 王晓晓等, 2020); (b)四川盆地沉积相带展布与茅三段—吴一段台地边缘相带滩体展布及元坝构造沉积凝灰岩分布特征(曾琪等, 2020; 杨雨等, 2021)

Fig.1 Tectonic characteristics of the Emei geotraverse in the Sichuan Basin and the distribution of facies belt

(a) tectonic characterization of the Upper Permian Emei rift movement of the South China Plate (He *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2020); (b) characteristics of the spreading of the cenolithic phase zone in the Sichuan Basin with the spreading of the beach body in the marginal phase zone of the Maosan-Wuyi platform and the distribution of sedimentary tuffs in the Yuanba tectonics (Zeng *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2021)

2 实验技术与方法

针对研究区茅三段—吴一段采集选取样品 150 余件,岩石制片 300 余片,阴极发光分析 80 片,原位微区主微量、稀土元素及铍同位素共计点位 150 个,流体包裹体测温 8 件,岩石成像 TIMA 以及全岩矿物 X 射线衍射分析各 10 件以及岩矿鉴定 12 件。

岩矿鉴定是在廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成,岩石/矿石中矿物含量采用目估法,含量估值仅为相对含量。本文阴极发光鉴定均用西南石油大学 CL8200 MK5 型阴极发光仪完成,附件为 Leica DM2500 显微镜。微区原位主微量、稀土元素及铍同位素在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。实验仪器为安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900)与多接收质谱 MC-ICP-MS(Neptune Plus)。测试样品均采用相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLas HD),激光能量 80 mJ,频率 5Hz,激光束斑直径 44 μm ,同时稀土元素(Rare Earth Element, REE)均经过澳大利亚后太古宇平均页岩(Post-Archean Australian Shale, PAAS)标准化来消除元素的奇偶效应。流体包裹体测温实验是在北京核工业地质研究院完成,实验仪器为 LINKAM THMS600 型冷热台。白云石 U-Pb 年代学在北京科荟测试技术有限公司 Jena PQ MS 光谱仪及 RESOLUTION 193 nm 准分子激光剥蚀系统平台上完成。TIMA 能够快速准确地提供岩矿样品中的全岩矿物及化学组成、元素赋存状态及矿物共生组合关系,同时可计算出矿物的质量与体积分数以及反应矿物的内部结构特征等(黄思静,1992;黄思静等,2008;陈倩等,2021)。岩石薄片 TIMA 扫描与全岩矿物 X 射线衍射分析在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,TESCAN TIMA 基于 MIRA 肖特基场发射或者 VEGA 钨灯丝扫描电子显微镜,样品台有 EDX/BSE 校准标准、铂 Faraday 筒(BSE 信号校准)与锰、铜、石英、碳和金元素(系统性能检查)等。XRD 采用高分辨率衍射仪 SmartLab SE,测量分析软件为 SmartLab Guidance。沉凝灰岩岩矿鉴定分析结果由廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成。

3 岩矿特征及成岩演化序列

3.1 岩矿特征

3.1.1 灰岩类

研究区灰岩类中岩相以泥晶生屑灰岩、亮晶生

屑灰岩及云质灰岩为主,分布在茅三段与吴一段顶部,生屑颗粒中常见有完整或破碎藻类、棘皮类、有孔虫、腕足、介形虫及蜓类等。其中深灰色泥晶生屑灰岩原生孔隙不发育,但受表生期岩溶作用影响下局部发育残余粒间与晶间溶蚀孔隙。而灰白色亮晶生屑灰岩处于台地边缘沉积相带,沉积水体能量较高。受东吴运动的影响,茅三段与吴一段顶部亮晶生屑灰岩中多发育被完全充填或半充填的溶洞、溶孔及溶缝等,是研究区内主要的储集空间类型;研究区内云质灰岩主要发育茅三段与吴一段中上部,白云石化流体多交代生屑颗粒,孔隙不发育(图 3a~c)。

3.1.2 白云岩类

研究区白云岩类中岩相以晶粒白云岩与灰质云岩为主,主要分布在茅三段与吴一段顶部。白云石晶粒大小介于 10~200 μm ,为半自形—自形的粉—细晶白云岩。白云石化流体以交代颗粒灰岩中的颗粒为主,晶粒云岩中可见生物碎屑残余幻影,白云石可见雾心亮边结构,发育晶间溶蚀孔隙,但整体上保留了早期灰岩中的残余粒间溶蚀孔洞特征(图 3d~f)。

3.1.3 沉凝灰岩类

受峨眉山玄武岩喷发影响,研究区吴家坪组中吴一段与吴二段底部海侵体系域内沉积一套火山碎屑物质。YB8 井凝灰岩段岩矿鉴定分析显示,沉凝灰岩主要由碳质、钙质、砂级碎屑、火山碎屑,金属矿物等组成,其中钙质主要成分为白云石,约占岩石总量 25%,碎屑物质约占岩石总量 35%(主要成分为石英、长石、云母类、安山岩、玄武岩等碎屑及其分解物),火山碎屑物质主要为玻屑(Hya)、玄武岩(Bas)碎屑等,粒径介于 0.005~0.500 mm,玻屑发生不同程度的脱玻化或泥化,占岩石总量 20%~25%。沉凝灰岩中储层以溶蚀孔洞、裂缝为主要储集空间,镜下观察孔洞未被充填或被沥青、方解石、磁铁矿、黄铁矿等半充填(图 3g~i)。沉凝灰岩主要分布于剑阁、阆中至旺苍一带,其厚度中心位于剑阁,厚度可达 90 m,而研究区内元坝构造中吴家坪组沉凝灰岩厚度介于 10~40 m,主要见于吴二段,吴一段厚度较薄。

本次共选取研究区内 10 件沉凝灰岩样品,进行岩石薄片 TIMA 矿物扫描分析(图 4a~h),部分样品的分析结果如表 1 所示。研究区内吴一段、吴二段的沉凝灰岩中所含矿物类型以白云母(含量介于

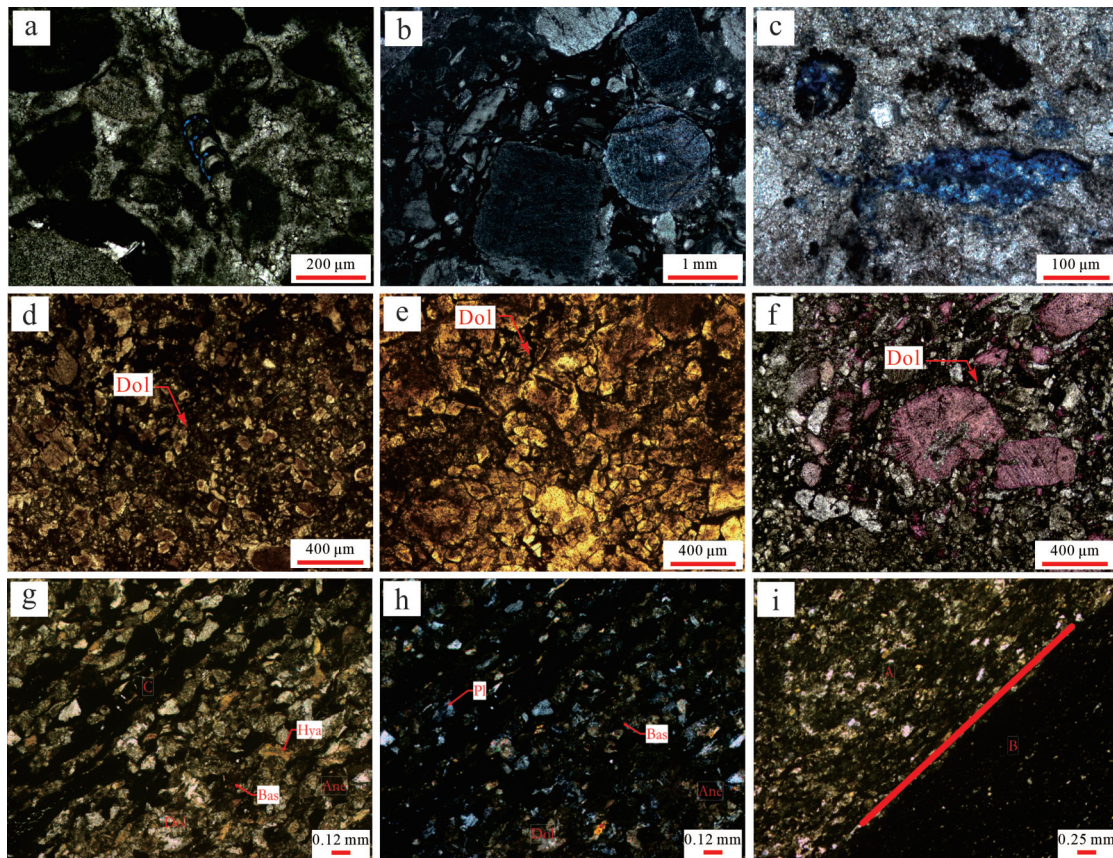


图3 川中北部地区茅三段—吴一段储层岩矿特征

(a) 亮晶生屑灰岩, 见腹足、介壳等生物碎屑, 以及残余粒内溶蚀孔隙; (b) 含泥晶生屑灰岩, 见棘皮类(海百合)与腹足生物碎屑; (c) 亮晶生屑灰岩, 见腹足、介壳等生物碎屑, 以及残余粒内溶蚀孔隙; (d) 粉—细晶白云岩, 白云岩为半自形—自形, 可见残余生物碎屑的幻影; (e) 细晶白云岩, 白云岩为半自形—自形, 可见残余生物碎屑的幻影, 部分白云石具有雾心亮边结构; (f) 灰质细晶白云岩, 见棘皮类(海百合)与腹足生物碎屑, 及残余颗粒幻影; (g) 纹层状含炭凝灰质砂岩, 碎屑分布不均匀, 碳质局部聚集呈纹层状, 岩石中的玻屑强烈的脱玻化或泥化, 部分残留有气孔、炸裂状(Hya); 岩石中含一定量的碳酸盐矿物, 大部分为自生矿物或长石等矿物的碳酸盐化, 滴加茜素红—铁氰化钾试剂不变色, 确定其为白云石; (h) 为(g)同视域下正交偏光特征; (i) 纹层状含炭凝灰质砂岩与凝灰质砂岩接触处, 凝灰质砂岩层(左图右下部B)与含炭凝灰质白云岩层(左图左上部A)接触处, 岩石中的玻屑强烈的脱玻化或泥化(Cly); 岩石中含有碳酸盐矿物为白云石

Fig.3 Characteristics of reservoir rocks and minerals in the Maosan-Wuyi, north-central Sichuan area

(a) bright-crystalline bioclastic chert, with bioclasts such as gastropods and mesoclasts, and residual intragranular dissolution porosity; (b) mud-bearing mud-crystalline bioclastic chert, with echinoderms (sea lilies) and gastropods; (c) bright-crystalline bioclastic chert, with bioclasts such as gastropods and mesoclasts, and residual intragranular dissolution porosity; (d) powdery-to-fine crystalline dolomite, dolomite is semiautomorphic-to-automorphic, with phantoms of residual bioclastic debris; (e) fine crystalline dolomite, dolomite is semiautomorphic-to-automorphic, with phantoms of residual bioclastic debris, several dolomites have haze-centered bright-rimmed structure; (f) grayish fine crystalline dolomite, echinoderms (sea-lilies) with gastropod bioclastic debris, and phantoms of residual granularity; (g) grainy laminated carbonaceous tuffaceous sandstone, clastic distribution is not uniform, carbonaceous local aggregation is grainy laminated, the rock in the glassy clasts exhibit strong deglaciation or mud, residual air holes, blasted (Hya); the rock contains a certain amount of carbonate minerals, most are authigenic minerals or feldspar and other minerals of the carbonate drop of alizarin red-potassium ferrocyanide reagent, does not change the color, determined that it is a white dolomite; (h) orthogonal polarization characteristics in the same field of view as (g); (i) contact between grainy charcoal-bearing tuff and tuffaceous carbonaceous sandstone, and the contact between the tuffaceous carbonaceous sandstone layer (lower right B in the left panel) and the charcoal-bearing tuffaceous dolomite layer (upper left A in the left panel), where the glassy clasts in the rock are strongly deglassed or mudded (Cly); the rock contains carbonate minerals for dolomite

18.65%~42.89%)、铁白云石(含量介于9.32%~49.59%)、黑云母(含量介于1.18%~23.36%)、斜长石(含量介于6.56%~36.33%)、石英(含量介于3.71%~16.01%)为主, 含有少量的黄铁矿、钛铁矿等矿物, 其中沉凝灰岩段中白云石矿物相平面呈层状分布特征, TIMA扫描为铁白云石, 主要为后期交代成因, 同时局部交代仍保留部分原岩沉凝灰岩结构特征, 岩

石薄片中对白云石为半自形—自形粉—细晶白云石。结合岩心样品全岩XRD分析结果(表2), 研究区内沉凝灰岩或凝灰质泥岩中黏土矿物含量介于16.0%~51.0%, 石英含量介于12.0%~35.0%, 斜长石含量介于5.0%~30.0%, 白云石含量介于6.0%~42.0%, 其次含有少量菱铁矿与黄铁矿等矿物等(图4i)。

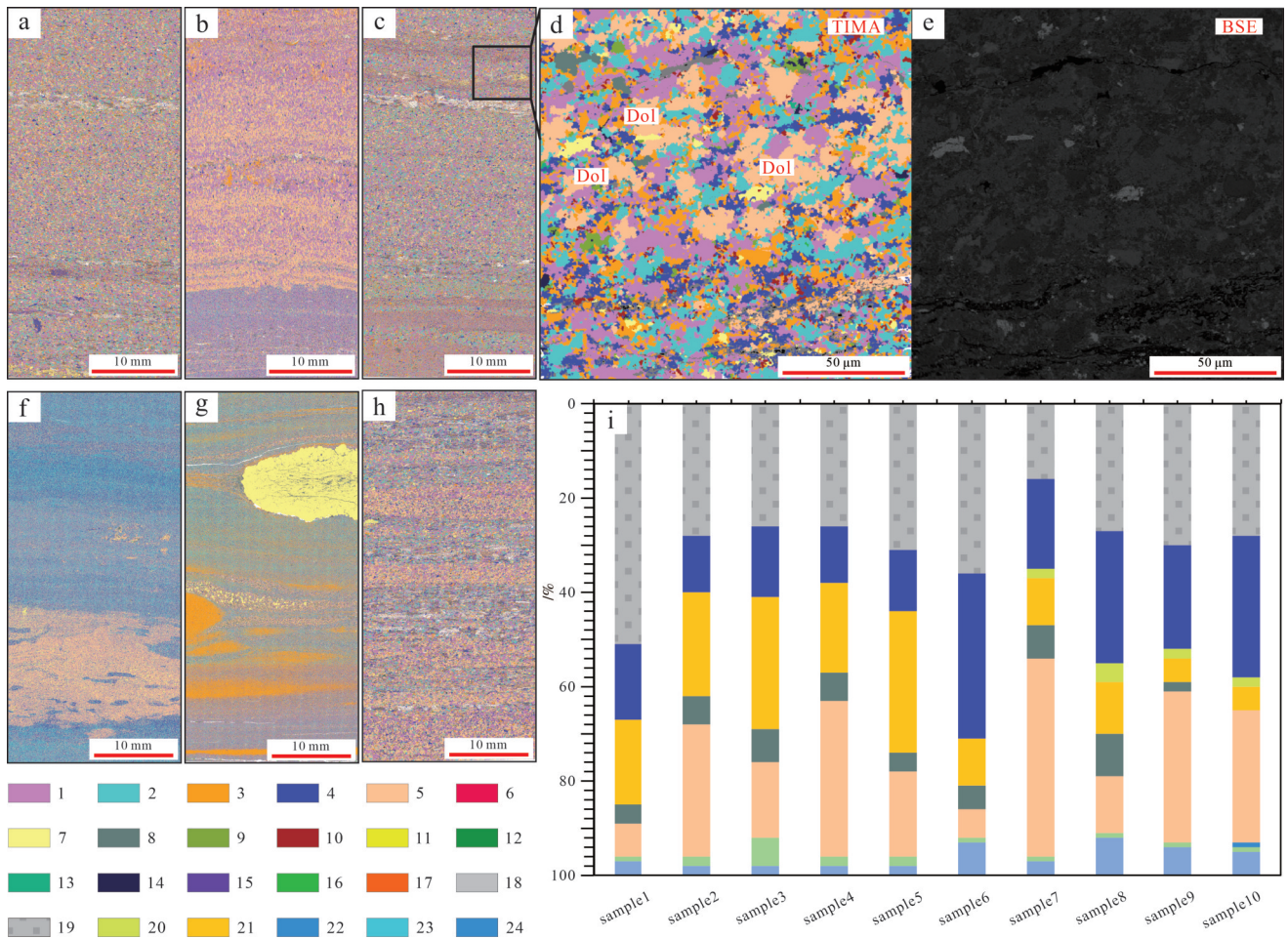


图4 川中北部地区吴家坪组沉凝灰岩段岩石TIMA

(a-h)为凝灰岩段岩石薄片TIMA扫描,(i)为凝灰岩全岩XRD分析结果;1. 白云母;2. 斜长石;3. 黑云母;4. 石英;5. 铁白云石;6. 石榴石—红柱石;7. 黄铁矿;8. 方解石;9. 钛铁矿;10. 赤铁矿/磁铁矿;11. 磁黄铁矿;12. 高岭石;13. 硅—铝—钛—钾—铁;14. 金红石;15. 阳起石;16. 硅灰石;17. 黄铜矿;18. 孔洞;19. 黏土矿物;20. 钾长石;21. 斜长石;22. 石盐;23. 菱铁矿;24. 黄铁矿

Fig.4 TIMA of rocks in the sedimentary tuff section of the Wujiaping Formation, north-central Sichuan area

(a-h) are TIMA scans of rock thin sections of the tuff section, and (i) is the result of whole-rock X-diffraction (XRD) scanning analysis of the tuff; 1. albite; 2. plagioclase; 3. smectite; 4. quartz; 5. Fe-albite; 6. garnet-rocksite; 7. pyrite; 8. calcite; 9. titanomagnetite; 10. hematite/magnetite; 11. magnetopyrite; 12. kaolinite; 13. silicon-aluminum-titanium-potassium-iron; 14. rutile; 15. actinolite; 16. wollastonite; 17. chalcopyrite; 18. porosity; 19. clay minerals; 20. potassium feldspar; 21. plagioclase feldspar; 22. rock salt; 23. rhodochrosite; 24. pyrite

3.2 成岩演化序列

通过观察研究区茅三段—吴一段取心段储层岩石显微结构及阴极发光特征等,认为茅三段—吴一段主要成岩作用类型有胶结充填作用、溶蚀作用、破裂作用以及白云石化作用等。

(1) 胶结与充填作用:主要表现为海底成岩环境下形成第I期粒状粉晶方解石胶结,阴极发光为不发光;同生—准同生期形成第II期粒状粉—细晶方解石,阴极发光为发红色光(图5a, b, g, h);浅埋藏期形成第III期细—中晶方解石充填于早期形成的孔隙、孔洞之中,阴极发光为昏暗色—不发光,在该期方解石中捕获了均一温度分布在72℃~85℃的液烃

包裹体及盐水包裹体,对应地质年代为中—晚三叠世,为第I期古油藏形成阶段;中深埋藏期形成第IV期中—粗晶方解石(图5i, j),阴极发光为昏暗色—不发光,该期方解石中捕获了均一温度为118℃~141℃的液烃包裹体和盐水包裹体、均一温度为141℃~163℃的气烃包裹体与沥青质包裹体以及均一温度为176℃~180℃的气烃包裹体,对应地质年代为早侏罗世—中白垩世,为第II~IV期古油藏—古气藏演化阶段(图6),研究区内茅三段较常见。

(2) 溶蚀作用:主要表现为同生—准同生期,受沉积前古地貌影响,吴一段多发生第I期大气淡水溶蚀作用,形成早期的粒内溶蚀孔隙或铸模孔隙(图

表1 川中北部地区吴家坪组凝灰岩沉段岩石薄片TIMA面扫矿物定量分析结果

Table 1 Quantitative mineral analysis results of thin-section TIMA face-sweep minerals in the sedimentary tuff section of the Wujiaping Formation, north-central Sichuan area

矿物类型	化学式	Sample1(%)	Sample2(%)	Sample3(%)	Sample4(%)	Sample5(%)
白云母	$\text{NaAl}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})_2(\text{OH})_2$	32.51	19.09	41.95	28.65	42.89
铁白云石	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})[\text{CO}_3]_2$	9.32	7.36	21.91	22.14	30.10
斜长石	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	21.05	23.67	16.59	16.56	10.61
黑云母	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	20.14	23.36	3.29	5.32	6.57
石英	SiO_2	7.98	3.88	7.79	7.05	3.71
方解石	CaCO_3	1.87	4.41	0.36	7.88	0.19
黄铁矿	FeS_2	0.42	9.34	2.67	5.17	1.53
硅—铝—钛—钾—铁	Si-Al-Ti-K-Fe	0.78	0.35	1.20	0.54	0.54
钛铁矿	FeTiO_3	1.61	0.62	0.60	0.39	0.23
硅灰石	CaSiO_3	0.13	1.00	0.05	0.41	0.02
阳起石	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	0.10	0.22	0.28	0.27	0.23
赤铁矿	Fe_2O_3	1.39	0.11	0.02	0.07	0.03
金红石	Al_2O_3	0.25	0.23	0.36	0.27	0.18
高岭石	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	0.01	0.01	0.02	0.11	0.07
角闪石	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	0.02	0.03	0.02	0.03	0.05
磁黄铁矿	Fe_3O_4	0	0.07	0.01	0.06	0.01
石榴石—红柱石	$\text{A}_3\text{B}_2[\text{SiO}_4]_3$	0	0	0.01	0.01	0.01
磷铝铈石	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$	0.01	0	0.01	0	0.01
黄铜矿	CuFeS_2	0.02	0.01	0.01	0	0
重晶石	BaSO_4	0	0.02	0.02	0	0
闪锌矿	ZnS	0.01	0.01	0	0	0
未分类	—	0.30	0.11	0.18	0.15	0.05
合计	—	97.92	93.90	97.35	95.08	97.03

表2 川中北部地区吴家坪组凝灰岩段全岩XRD分析结果

Table 2 Results of whole-rock XRD analysis in the tuff section of the Wujiaping Formation, north-central Sichuan area

样品号	岩石类型	矿物成分含量/%								
		黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	石盐	菱铁矿	黄铁矿
01	凝灰岩	51	16	0	18	4	7	0	1	3
02	凝灰质泥岩	28	12	0	22	6	28	0	2	2
03	凝灰质泥岩	26	15	0	28	7	16	0	6	2
04	凝灰质泥岩	26	12	0	19	6	33	0	2	2
05	凝灰岩	31	13	0	30	4	18	0	2	2
06	凝灰质泥岩	36	35	0	10	5	6	0	1	7
07	凝灰质泥岩	16	19	2	10	7	42	0	1	3
08	凝灰岩	27	28	4	11	9	12	0	1	8
09	碳质泥岩	30	22	2	5	2	32	0	1	6
10	碳质泥岩	28	30	2	5	0	28	1	1	5

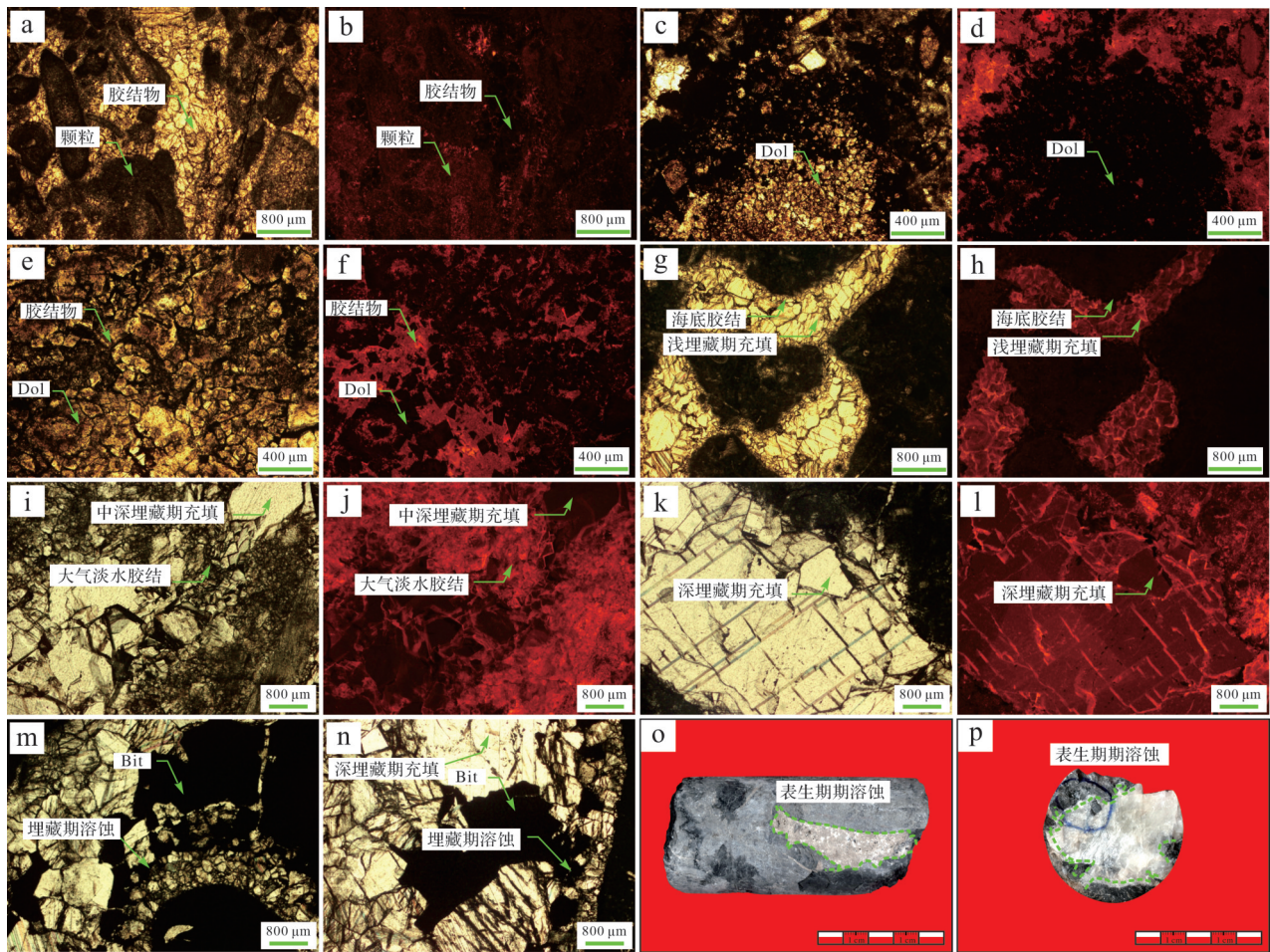


图5 川中北部地区茅三段—吴一段岩石阴极发光特征与成岩作用类型

(a)亮晶颗粒灰岩,见腹足、介壳等生物碎屑,阴极发光下颗粒发暗红色光,胶结物不发光;(b)为(a)同视域下阴极发光,其中颗粒发暗红光,胶结物为不发光;(c)灰质细晶白云岩,可见残余生物碎屑的幻影;(d)为(c)同视域下的阴极发光,其中白云石不发光,基质为泥晶生屑灰岩发暗红色光—红光;(e)细晶白云岩,见残余颗粒幻影,白云石主要交代颗粒,部分白云石具有雾心亮边结构;(f)为(e)同视域下的阴极发光,其中白云石不发光,基质为泥晶生屑灰岩不发光;(g)泥晶生屑灰岩,基岩边界为海底方解石胶结,之后为浅埋藏期细—中晶方解石充填;(h)为(g)同视域下的阴极发光,其中基质泥晶生屑灰岩不发光,海底方解石胶结不发光,浅埋藏期方解石胶结发暗红色光;(i)亮晶生屑灰岩,见大气淡水方解石胶结与浅埋长期中晶方解石胶结;(j)为(i)同视域下阴极发光,其中大气淡水方解石胶结发暗红色光,浅埋长期中晶方解石胶结发暗红色光;(k)溶洞中埋藏期粗晶方解石充填;(l)为(k)同视域下阴极发光,其中基质与粗晶方解石发暗红色光;(m)与(n)为晶间孔隙沥青充填与埋藏期溶蚀作用;(o)与(p)表生期岩溶作用形成溶缝与溶洞,同时被晚期方解石充填

Fig.5 Characteristics of cathodoluminescence and diagenetic types in rocks of the Maosan-Wuyi section, north-central Sichuan area

(a) bright crystalline granular chert, with bioclasts such as gastropods and mesoclasts, and cathodoluminescence in which the granules glow dark red and the cement does not; (b) cathodoluminescence in the same field of view as (a), in which the granules glow dark red and the cement is non-luminous; (c) grayish, fine-crystalline dolomite, with phantoms of residual bioclasts; (d) cathodoluminescence in the same field of view as (c), in which dolomite is non-luminous, and the matrix is a mud-crystalline bioclastic chert that glow dark reddish-reddish light; (e) fine-crystalline dolomite, with phantoms of residual grains, dolomite mainly accounting for the grains, and several dolomite crystals with haze-centered bright-rimmed structures; (f) cathodoluminescence in e-synoptic field of view, where dolomite is not luminescent, and the matrix is mud-crystalline biotite is not luminescent; (g) mud-crystalline biotite, with submarine calcite cemented at the boundary of the basement rock, and followed by fine- to medium-crystalline calcite infilling in the shallow burial stage; (h) cathodoluminescence in the same field of view as (g), in which the matrix mud-crystalline clastic tuff is non-luminous, the seafloor calcite cementation is non-luminous, and the shallow-burial calcite cementation glows dark red; (i) leuco-crystalline clastic tuff, seen as atmospheric fresh-water calcite cementation with shallow-burial long-term intermediate-crystalline calcite cementation; (j) cathodoluminescence in the same field of view as (i), in which the atmospheric fresh-water calcite cementation glows red, and the shallow-burial long-term intermediate-crystalline calcite cementation glows dark red; (k) caverns, with coarse-crystalline calcite filling in the buried phase; (l) cathodoluminescence in the (k) isoview, in which matrix and coarse-crystalline calcite glow dark red; (m) and (n) intergranular pore asphalt filling and dissolution in the buried phase; and (o) and (p) dissolution crevices and caverns formed by epigenetic karst and filled by late-stage calcite

3a~c)。东吴运动构造抬升,茅三段发生第Ⅱ期表生期岩溶作用,形成大量的溶蚀孔隙与孔洞等(图5o, p)。中深埋藏期,有机质成熟脱羧作用产生了大量

的 CO_2 和 H_2O 使水介质转变为对碳酸盐矿物具溶蚀性的酸性水并发生第Ⅲ期溶蚀作用,孔隙中可见沥青充填(图5m, n)。

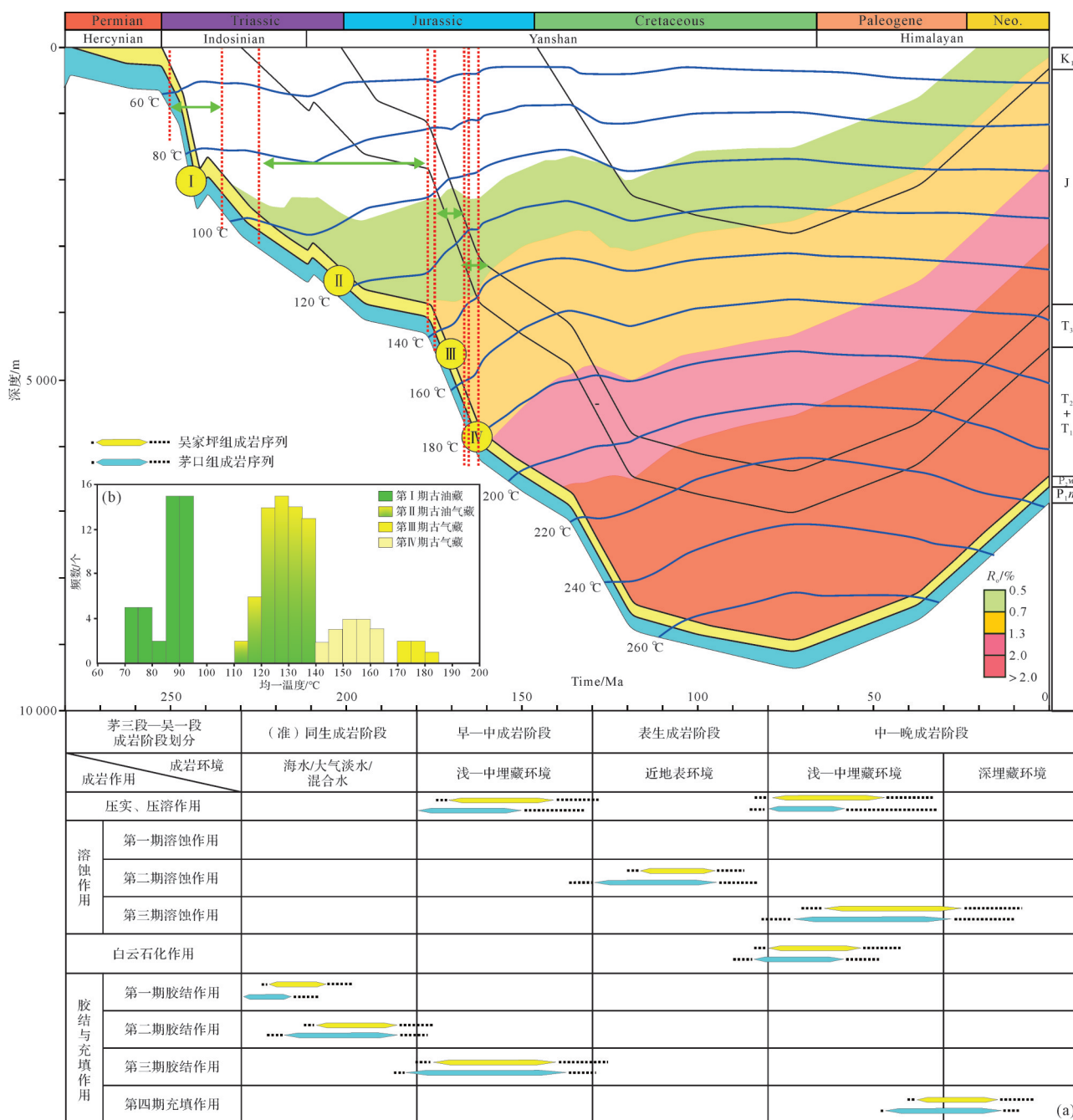


图6 川中北部地区茅三段—吴一段成岩序列综合判别图

(a)成岩演化序列及埋藏—热演化史图;(b)包裹体均一温度直方图

Fig.6 Comprehensive discrimination diagram of diagenetic sequence in the Maosan-Wuyi, north-central Sichuan area

(a) sequence of orogenic evolution and burial-thermal evolution history; (b) histogram of mean temperature of inclusions

(3) 白云石化作用:主要表现为茅三段顶部—吴一段顶部半自形—自形的粉—细晶铁白云石(图5c~f),阴极发光为不发光,该期次白云石捕获了均一温度分布在69℃~80℃的液烃包裹体,对应地质年代为早三叠世。多为交代生物碎屑中灰泥的自形粉晶—细晶白云石及完全交代生屑及生屑间胶结物的白云石。

(4) 茅三段—吴一段成岩序列为(图6a):同生—准同生期海底阶段发生第I期海底方解石胶结,暴露后形成第II期大气淡水胶结作用,而发生第I期组构选择性溶蚀作用;浅埋藏期发生第III期中—粗晶方解石充填作用;受东吴运动构造抬升影响,茅口组晚期—吴家坪组发生第II期溶蚀作用;之后进入浅—中埋藏时期,在浅埋藏早期发生第I期白云石

化作用,形成浅埋藏期的白云石化作用;中—深埋藏期,缝洞中充填第Ⅳ期粗晶方解石,而后有机质成熟脱羧作用产生了大量的CO₂和H₂O使水介质转变为对碳酸盐矿物具有溶蚀性的酸性水(李双应等,1995;Kramer *et al.*,2001;朱东亚等,2007;刘宏等,2016;刘伟等,2016),发生第Ⅲ期溶蚀作用。

4 铁白云石地球化学特征

4.1 微量元素

研究区内茅三段—吴一段激光原位微区微量元素分析显示,铁白云石中的微量元素与泥晶生屑颗粒中基岩部分及粉—细晶方解石胶结物(下文均简化为基质与方解石胶结物)有明显差异。铁白云石中Na、K、Fe、Mn、Si和Al等微量元素含量远高于基质骨架与方解石胶结物,Sr含量整体偏低,其铁白云石中Sr含量介于115.4×10⁻⁶~413.26×10⁻⁶,平均值为179.36×10⁻⁶,而基质与方解石胶结物中Sr含量介于45.91×10⁻⁶~423.14×10⁻⁶(表3)。方解石胶结物相较于大气淡水方解石胶结物具有更高的Fe、Mn离子含量,

Fe含量均值在119.08×10⁻⁶,Mn含量均值在127.83×10⁻⁶。远大于大气淡水方解石胶结物的Fe、Mn离子含量,因此可以排除研究区方解石胶结物为大气淡水胶结物。

Na与K是活动性极强的碱金属元素,均一分布在海水中,其含量是盐度的直接标志,水体盐度越高,Na、K更易被黏土吸附或进入伊利石晶格内(常华进等,2009;蒋宜勤等,2015)。铁白云石中Na+K含量远高于基质,这与白云石形成于持续的高盐度流体中有关(张学丰等,2008;常华进等,2009;蒋宜勤等,2015)。而极高的Fe含量与较高的Mn、Si、Al含量(图7a~d)主要受吴家坪组吴一段、吴二段底部沉凝灰岩影响,这与茅三段—吴一段中铁白云石成因机制密切相关。Mn/Sr比值是判断海相碳酸盐岩蚀变程度的一个灵敏指标,通常情况下Mn/Sr<10的碳酸盐岩遭受蚀变作用较弱,在铁白云石中1.35<Mn/Sr<9.31,基质灰岩中0.26<Mn/Sr<1.45,因而在这些矿物的元素地球化学特征可近似反映其沉积古环境及综合判断成岩系统的开放与封闭信息(Mazzini *et al.*,2004),所以高Fe、Mn与低Sr含量指示铁白云

表3 川中北部地区茅三段—吴一段铁白云石、基质及胶结物微量元素和稀土元素

Table 3 Trace elements and rare earth elements in iron dolomite, matrix and cement of the Maosan-Wuyi, north-central Sichuan area

	铁白云石				基质(泥晶生屑灰岩)				粉—细晶方解石胶结物			
Na	252.03	144.18	551.81	36.29	338.46	22.63	33.47	24.03	269.52	93.44	30.54	
K	148.73	5.64	196.27	6.28	36.40	85.92	30.36	52.50	20.36	34.18	4.90	
Na+k	400.76	149.82	748.07	42.57	374.86	108.55	63.83	76.54	289.88	127.62	35.44	
Si	2 185.25	1 626.00	1 735.20	1 100.00	517.60	899.24	78.68	723.56	763.69	755.75	639.10	
Fe	16 159.44	12 288.88	11 694.95	36 608.23	10 339.27	102.09	89.36	72.15	94.48	123.58	139.00	
Mn	562.57	1 058.20	1 469.14	2 565.01	559.88	17.61	275.40	156.57	26.15	102.33	255.01	
Al	622.83	41.02	642.44	53.92	189.00	184.56	65.75	115.67	7.32	7.28	1.21	
La	6.12	4.73	4.43	3.42	1.71	3.75	4.70	8.33	0.53	1.63	0.75	
Ce	10.64	9.16	6.01	3.91	2.96	2.26	3.41	5.31	0.27	0.81	1.02	
Pr	1.29	1.15	0.85	0.55	0.44	0.48	0.70	1.17	0.07	0.20	0.12	
Nd	5.29	4.78	3.11	2.03	1.48	2.16	3.00	5.15	0.30	0.96	0.55	
Sm	1.05	0.74	0.49	0.38	0.27	0.36	0.53	0.79	0.07	0.10	0.07	
Eu	0.20	0.15	0.11	0.07	0.06	0.09	0.13	0.21	0.01	0.01	0.01	
Gd	0.93	0.75	0.79	0.45	0.28	0.43	0.55	1.02	0.10	0.28	0.16	
Tb	0.13	0.08	0.12	0.06	0.05	0.05	0.09	0.11	0.01	0.03	0.02	
Dy	0.68	0.63	0.69	0.49	0.41	0.27	0.51	0.76	0.03	0.21	0.16	
Y	4.71	3.69	7.29	5.59	3.83	3.39	5.83	7.89	1.31	3.22	1.76	
Ho	0.15	0.11	0.20	0.12	0.09	0.06	0.10	0.17	0.06	0.05	0.03	
Er	0.40	0.33	0.46	0.33	0.30	0.18	0.27	0.33	0.04	0.17	0.11	
Tm	0.04	0.05	0.08	0.04	0.05	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	
Yb	0.32	0.23	0.44	0.36	0.29	0.16	0.19	0.28	0.01	0.08	0.08	
Lu	0.04	0.03	0.08	0.05	0.03	0.01	0.02	0.04	0	0.01	0.01	
ΣREE	27.28	22.92	17.86	12.26	8.42	10.28	14.23	23.71	1.51	4.55	3.10	

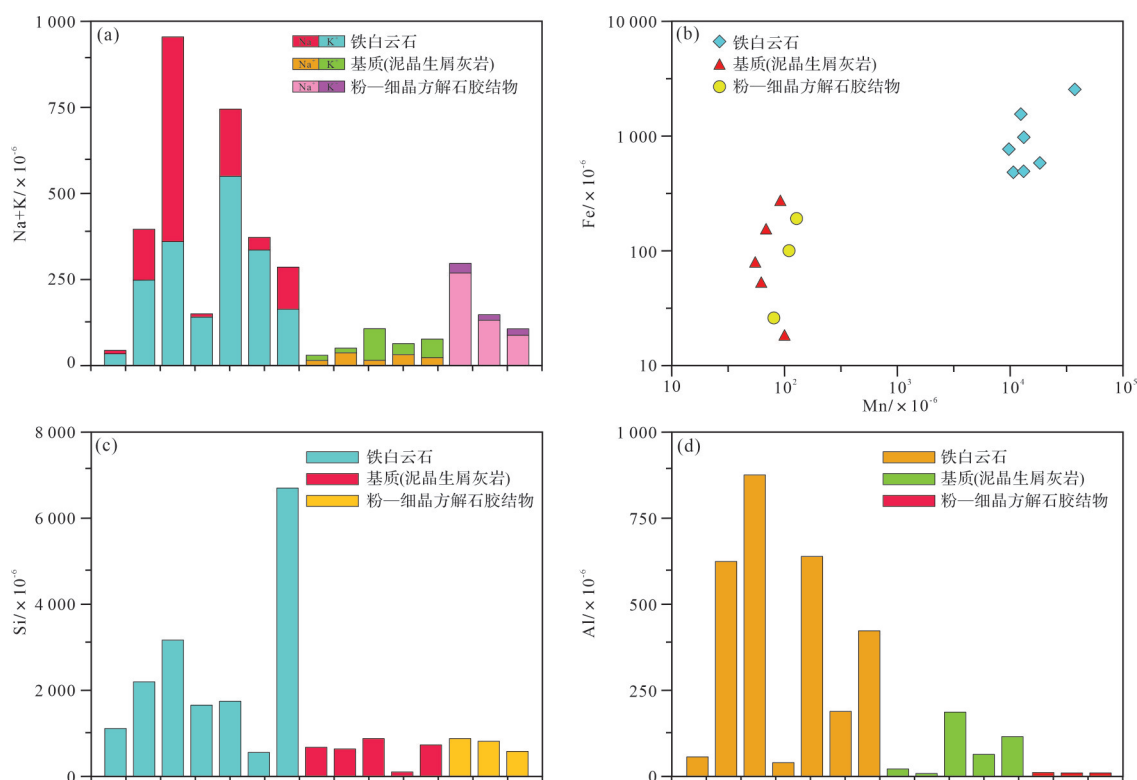


图7 川中北部地区茅三段—吴一段微量元素含量及相关图

(a) Na+K 含量直方图; (b) Fe-Mn 元素散点图; (c) Si 含量直方图; (d) Al 含量直方图

Fig.7 Content and related graph of trace elements in the Maosan-Wuyi, north-central Sichuan area

(a) histogram of Na+K content; (b) scatter plot of Fe-Mn elements; (c) histogram of Si content; and (d) histogram of Al content

石并未受到后期成岩蚀变的影响,同时微量元素的特征也与川中地区角探1井中的茅口组热液白云岩具有明显的差异性(Mazzini *et al.*, 2004; 倪善芹等, 2010; 郑荣才等, 2012; Johannesson *et al.*, 2017; Xiang *et al.*, 2021; 窦立荣等, 2022)。

4.2 稀土元素

碳酸盐岩中REE特征是沉积水体中REE特征有效的载体,后期成岩改造对碳酸盐相态REE组成影响很小,对古海洋沉积环境及成岩流体来源具有重要指示意义(赵彦彦等, 2019)。为消除元素的奇偶效应,本次REE与Y数据均采用后太古代澳大利亚页岩PAAS进行标准化处理,并结合阴极发光特征讨论白云石成因机制。茅三段—吴一段原位微区稀土元素处理结果显示(表3),铁白云石中 Σ REE总体上高于基质颗粒,其 Σ REE介于 $8.6 \times 10^{-6} \sim 42.4 \times 10^{-6}$ (平均值为 23.7×10^{-6}),基质 Σ REE介于 $5.1 \times 10^{-6} \sim 37.7 \times 10^{-6}$ (平均值为 17.1×10^{-6});铁白云石中Y含量介于 $3.5 \times 10^{-6} \sim 16.2 \times 10^{-6}$ (平均值为 6.3×10^{-6}),基质Y含量介于 $3.4 \times 10^{-6} \sim 7.9 \times 10^{-6}$ (平均值为 5.2×10^{-6});其中铁白云石Y/Ho值介于31.3~53.1,基质

Y/Ho值介于46.8~74.4。

本次铁白云石数据结果显示部分具有La正异常特征,基于Lawrence *et al.* (2006)的认识本次采用 Pr_N/Tb_N 代替 $LREE_N/MREE_N$ 、 Pr_N/Yb_N 代替 $LREE_N/HREE_N$ 、 Tb_N/Yb_N 代替 $MREE_N/HREE_N$,其中 Pr_N/Tb_N (平均值为0.83)、 Pr_N/Yb_N (平均值为0.98) <1 、 Tb_N/Yb_N (平均值为1.16) >1 ,表现为LREE相对MREE、HREE亏损特征。Pr化学性质稳定,在海水中一般无明显异常,所以学者采用Pr异常(δPr)时反应Ce异常(δCe)特征(图8a);结果表明铁白云石中 δPr 平均值为1.03(>1), δCe 平均值为0.96(<1),具有Ce负异常特征,而部分样品 $\delta Ce < 1$ 和 $\delta Pr \approx 1$ 则代表了La正常,而不是Ce的异常,与太古宙海洋碳酸盐岩沉积物特征相似(Lawrence *et al.*, 2006; 赵彦彦等, 2019)。还原环境下变价金属Eu由 Eu^{3+} 离子被还原成 Eu^{2+} ,邻元素性质发生分异所引起Eu正异常(赵彦彦等, 2019)($\delta Eu > 1$);结果表明铁白云石中 δEu 值介于0.61~1.12(平均值为1.01),基质灰岩中 δEu 值介于0.85~1.15(平均值为1.04) >1 ,Eu的负异常或无异常指示了与海水相关的成岩环境(胡忠贵等, 2009; 冯轲等,

2018;王宇航等,2018;赵彦彦等,2019)(图8a)。

4.3 锶同位素

锶同位素的组成与演化是地质时间的函数,能较好地代表成岩流体中组成及变化趋势(胡忠贵等,2009;冯轲等,2018;王宇航等,2018)。受地质事件控制,当构造隆升伴随海平面下降的同时,古陆壳风化使得古海水中的壳源锶含量增加致使 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 升高;当海底扩张与地幔活动等伴随海平面升高的同时,幔源锶含量增加致使 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 降低,因而锶同位素可以提供指示古环境、古气候的定量的依据(黄思静等,2001,2004;胡作维等,2009;冯轲等,2018;潘立银等,2022)。

综合前人对茅口组、吴家坪组锶同位素特征研究结果,二叠系海相碳酸盐岩同期海水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.706 6~0.708 2,茅口组 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素介于0.706 7~0.707 8(黄思静等,2001),吴家坪组 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素介于0.706 7~0.707 6(黄思静等,2001;翟如一,2020),同时期峨眉山玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.704 3~0.707 4(姚素珠和董宜宝,1988;黄思静等,2001;王晓峰等,2021);川中北部区域茅口组热液成因的白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.707 4~0.710 2(黄思静等,2004;胡作维等,2009;窦立荣等,2022)。研究区内铁白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 波动范围为0.707 0~0.707 3(平均值为0.707 0),泥晶生屑灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 波动范围为0.706 8~0.707 4(平均值为0.707 0),指示成岩流体主要为茅口晚期—吴家坪早期的海水特征,与幔源流体存有差异性(图8b)。

5 铁白云石化成因机制

5.1 铁白云石化时间

茅三段—吴一段铁白云石原位—微区U-Pb同位素年代学分析显示,铁白云石等时线年龄为 245.36 ± 1.08 Ma(图9a),表明铁白云石形成时间为晚二叠世—早三叠世,是浅埋藏期形成的产物。同时流体包裹体分析表明,铁白云石中捕获的液烃包裹体或富沥青包裹体盐水均一温度为 $69\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,结合研究区埋藏—热演化史分析,其对应地质年代形成于晚二叠世—早三叠世,代表了第I期原油充注阶段(图6a)。值得注意的是,测试点位选取交代生屑及其间胶结物的细晶白云石,阴极发光均为不发光,其基质发生大规模的白云石化作用的时间相对更早,即茅三段—吴一段发生白云石化的时间为中生—准中生期—浅埋藏早期(图9b~e)。

5.2 铁白云石成岩流体来源

茅三段—吴一段铁白云石极高的Fe含量与较高Mn、Al、Si、Na+K含量,主要受控于成岩流体的浓度、沉积环境的开放水平等影响,能有效地反映白云石化流体的性质,并且受较高Fe与Mn含量影响,铁白云石在阴极射线下为不发光。其中高(Na+K)含量说明白云石形成于高盐度的海源性介质中(黄思静等,2004)。REE配分模式显示,铁白云石具有Ce负异常与Eu轻微正异常或无异常,同时具有LREE的亏损等;受海水中 Y^{3+} 与 Ho^{3+} 的地球化学行为差异的影响,通常情况下海相碳酸盐岩的Y/Ho大于40;铁白云石

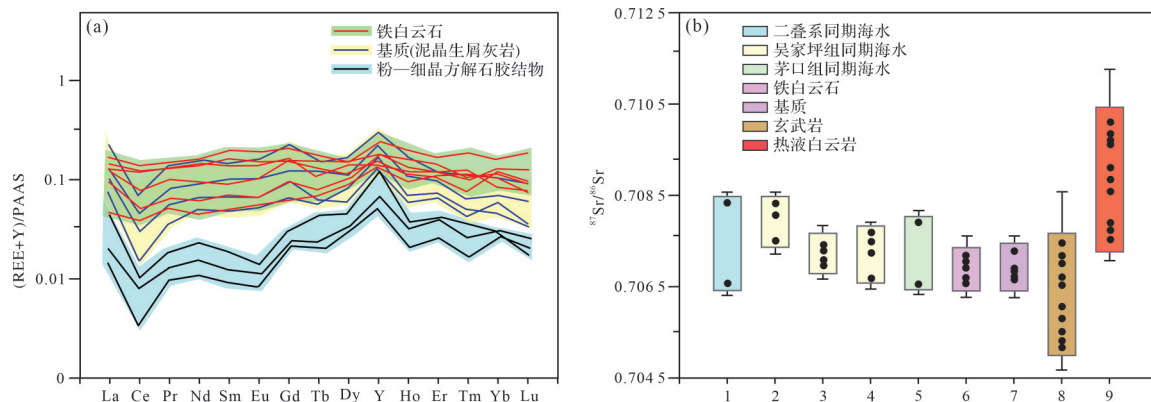


图8 川中北部地区茅三段—吴一段稀土元素与锶同位素分布图

(a) 茅三段—吴一段铁白云石与基质稀土元素及钇元素配分模式; (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 散点图; 1-5, 8-9 数据来源(姚素珠和董宜宝, 1988; 黄思静等, 2001, 2004; 李红等, 2021; 李双建等, 2021; 王晓峰等, 2021; 肖钦仁等, 2023); 6. 茅三段—吴一段铁白云石锶同位素; 7. 茅三段—吴一段基质锶同位素

Fig.8 Distribution of rare earth elements and strontium isotopes in the Maosan-Wuyi, north-central Sichuan area

(a) patterns of rare-earth element and yttrium element compositions of ankerite from the Maosan-Wuyi section with the matrix; (a) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ scatter plots; 1-5, 8-9 data sources (Yao and Dong, 1988; Huang et al., 2001, 2004; Li et al., 2021; Li et al., 2021; Wang et al., 2021; Xiao et al., 2023); 6. Strontium isotopes of Ankerite from the Maosan-Wuyi; 7. Strontium isotopes from the matrix in the Maosan-Wuyi

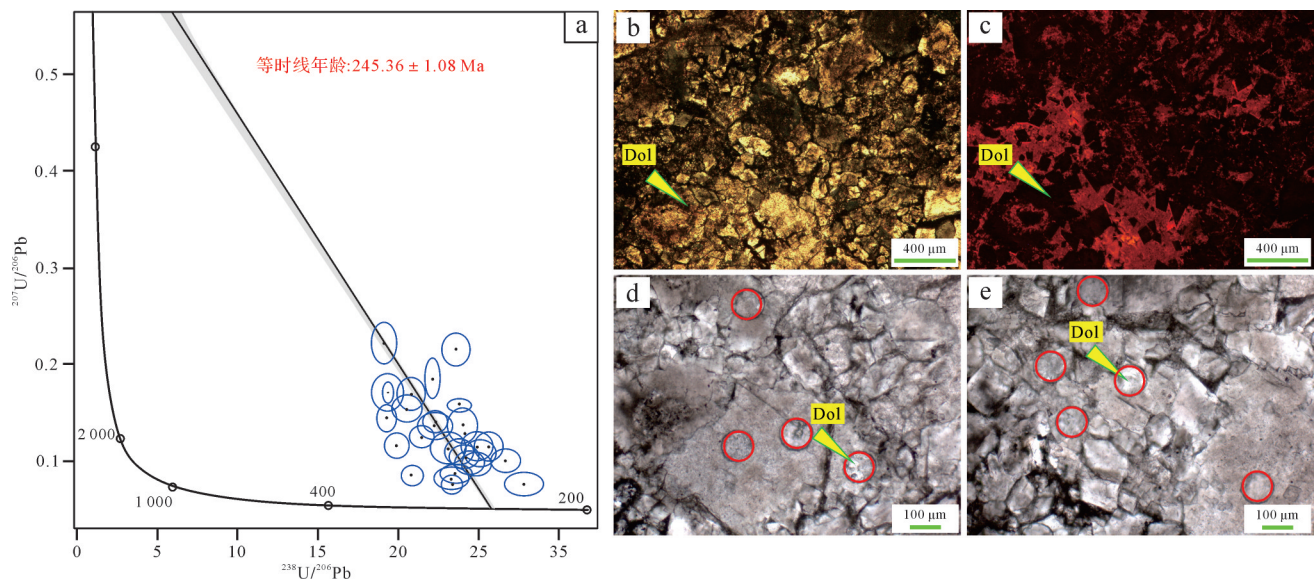


图9 川中北部地区茅三段—吴一段白云石 U-Pb 同位素定年及对应点位包裹体镜下照片

(a) 铁白云石激光原位 U-Pb 定年结果; (b) 茅三段测试铁白云石显微照片; (c) 为 b 相同视域下阴极发光特征, 铁白云石不发光; (d, e) 包裹体测试点位, 白云石胶结物中捕获的液烃(富沥青)包裹体, Th: 69 °C~80 °C

Fig.9 U-Pb isotope dating of dolomite from the Maosan-Wuyi, north-central Sichuan area, and microscopic photographs of inclusions at the corresponding sites

(a) laser in situ U-Pb dating results of ankerite from the Maosan-Wuyi; (b) micrographs of tested ankerite from the Maosan; (c) cathodoluminescence characteristics in the same field of view as b, an ankerite is not luminescent; (d, e) liquid hydrocarbon (asphaltene-rich) inclusions captured in the dolomite cement at inclusions tested from the Maosan-Wuyi, Th: 69 °C~80 °C

中 Y/Ho 平均值为 37.6, 泥晶生屑颗粒中 Y/Ho 平均值为 56.3, 其中铁白云石中 Y/Ho 小于 40 主要与高 Fe、Mn 含量影响下导致的 Ho 相对 Y 富集有关(赵彦彦等, 2019)。同时铁白云石与泥晶颗粒中基质 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 波动范围与茅口组—吴家坪组同期海水一致。以上分析表明, 铁白云石成岩流体与海水具有相似特征。

张晗等(2020)研究发现, 川中北部吴家坪组凝灰岩主要来源于峨眉山大火成岩省相关的酸性火山喷发作用。而酸性火山岩与火山凝灰岩的风化壳经过风化剥蚀后会形成以蒙脱石为主要成分的黏土矿物(顾长光, 1990), 经由风化与剥蚀作用搬运后沉积形成吴家坪组 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 较为富集的沉凝灰岩段。而早期由铝硅酸盐矿物及火山玻璃分解形成的以蒙脱石为主的黏土矿物, 随着埋藏深度、压力及地温增加, 导致层间水释放以及层间阳离子转移进而形成以伊利石与伊蒙混层为主的黏土矿物(顾长光, 1990; 张帅等, 2018; Lei *et al.*, 2022; Du *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2023)。伴随着温度升高(80 °C~100 °C, 元坝地区浅埋藏期白云石化作用发生时温度区间, 图6), 以水分子形式存在于蒙脱石晶体单元层之间的水(早期海水)脱出, 蒙脱石向伊蒙混层黏土转化并伴有 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 等碱性金属离子析出(田

和明等, 2014; 张帅等, 2018; McArthur *et al.*, 2020; Lei *et al.*, 2022; Du *et al.*, 2023; Jiao *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2023), 在浅埋藏期的还原环境下, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} , 从而置换早期形成的白云石中的 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} (向坤鹏等, 2019; Du *et al.*, 2023), 这与铁白云石中高碱性金属元素特征相契合。

同时 Fe^{2+} 的置换需要一定的温度条件才更容易进入白云石晶格之中(翟如一, 2020), 所以白云石化作用的发生时间相对更早, 约在晚二叠世时期(图6)。研究区铁白云石微区原位 U-Pb 同位素年龄及烃包裹体均一温度所反映的地质时间均指示铁白云石形成于晚二叠世—早三叠世(U-Pb 同位素年龄为 245.36 ± 1.08 Ma)。川中北部茅三段与吴一段顶部白云石与吴家坪组沉凝灰岩段在空间上具有一致性, 而黏土矿物发生脱水作用后导致碱性金属元素的迁出, 为研究区铁白云石的形成提供了 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 来源。川中地区角探1井、川深1井、阆中1井等并无铁白云石出现, 并且与角探1井中热液白云石在微量元素、锶同位素以及稀土元素等均存在明显的差异性, 指示研究区白云石化流体来源差异性(陈维涛等, 2007; 窦立荣等, 2022)。

5.3 铁白云石发育模式

综合茅三段—吴一段岩矿特征与铁白云石地球化学分析结果认为,铁白云石主要形成于同生—准同生期—浅埋藏期,白云岩的U-Pb同位素测年为 245.36 ± 1.08 Ma,对应地质年代形成于晚二叠世—早三叠世。

中二叠世晚期,受上扬子板块与秦岭微板块俯冲影响,盆地被动大陆边缘发生伸展裂解形成NE—SW向拉张应力及峨眉地幔柱隆升形成拉张应力,诱导形成基底断裂活动,同时期南秦岭勉略洋打开海平面升高,在吴家坪组底部沉积一套火山碎屑岩——主要为凝灰岩、沉凝灰岩和凝灰沉积岩等(田和明等,2014;向坤鹏等,2019;张晗等,2020)(图10a)。川中北部沉

凝灰岩平面上主要分布于剑阁、阆中至旺苍一带,其厚度中心位于剑阁,纵向上分布于吴一段以及吴二段,这与研究区铁白云石的形成具有良好的空间耦合关系。晚二叠世时期吴家坪组沉凝灰岩中黏土矿物逐渐发生脱水作用,其脱出孔隙水具有沉积时期海水的特征。而早期孔隙中的海水经过压实作用后导致海水盐度升高,致使白云石中(Na+K)含量偏高,同时 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与REE配分模式特征保留了早期海水的特征。受上覆富 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 沉凝灰岩段影响,这些离子以茅口组—吴家坪组同期海水为载体,受地层封盖以及重力等因素影响,白云石化流体向下伏吴一段与茅三段运移(图10b),于晚二叠世—早三叠世浅埋藏阶段交代形成铁白云石。

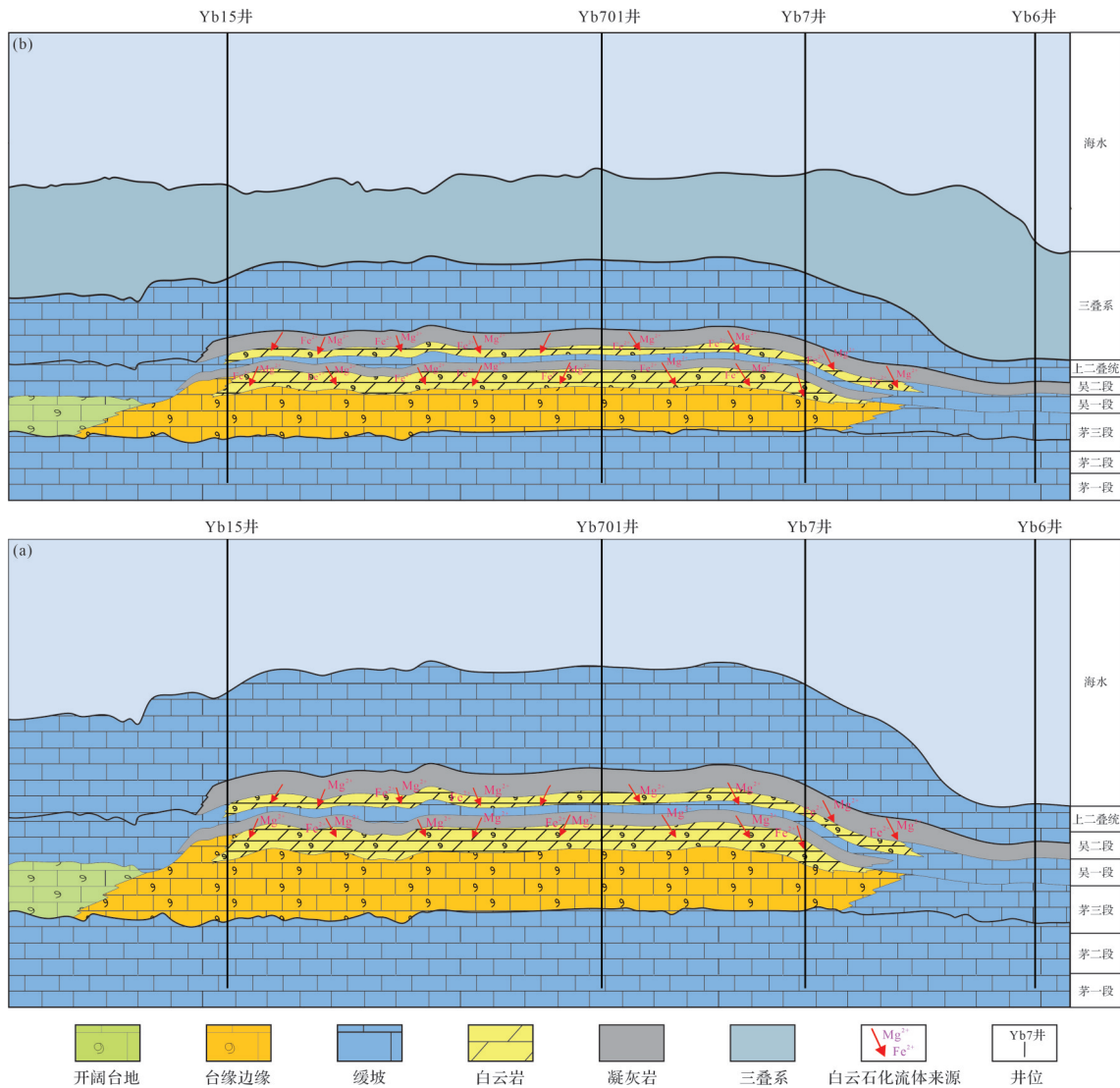


图10 川中北部地区茅三段—吴一段铁白云石的白云石化模式图

Fig.10 Dolomitization patterns of iron dolomite in the Maosan-Wuyi, north-central Sichuan area

6 结论

(1) 川中北部地区茅三段与吴一段储层发育在缓坡背景下的台地边缘相带,岩矿类型主要为灰岩类、白云岩类、沉凝灰岩类;其中灰岩类岩相以泥晶生屑灰岩、亮晶生屑灰岩及云质灰岩为主,白云岩类岩相以半自形—自形的粉—细晶白云岩为主;沉凝灰岩类岩相由碳质、钙质、砂级碎屑、火山碎屑,金属矿物等组成,其中火山碎屑物质主要为玻屑、玄武岩等,钙质主要成分为白云石,呈成层状分布特征。

(2) 川中北部地区茅三段与吴一段顶部发育铁白云石,阴极发光为不发光,白云石化流体多交代骨架颗粒以及黏土矿物等。铁白云石微量元素具有极高的Fe与较高Mn、Al、Si及高(Na+K)含量特征,说明铁白云石在局限环境下高盐度、高碱性金属离子含量的介质中形成。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 波动范围介于茅口组—吴家坪组同期海水范围内,稀土元素具有 Σ REE值偏低,LREE的亏损,表现出Ce负异常、Eu负异常或无异常等特征,指示铁白云石形成的成岩流体具有与海水相似特征。

(3) 川中北部地区茅三段与吴一段中粉—细晶白云石U-Pb年龄为 245.36 ± 1.08 Ma,结合埋藏—热演化史与包裹体均一温度分析表明,铁白云石形成于晚二叠世—早三叠世,即铁白云石形成于浅埋藏阶段。

(4) 在茅三段—吴一段进入浅埋藏环境后,受压实作用及地温升高影响,位于吴一段与吴二段底部凝灰岩中黏土矿物发生脱水作用,析出富 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 等碱性海源性流体。在脱水作用与重力等因素驱动影响下,成岩流体是以早期孔隙中的茅口组与吴家坪组的同期海水及部分层间水为载体,向下伏茅三段与吴一段运移发生交代作用而形成铁白云石。

参考文献 (References)

常华进,储雪蕾,冯连君,等. 2009. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 55(1): 91-99. [Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. 2009. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies[J]. Geological Review, 55(1): 91-99.]

陈倩,宋文磊,杨金昆,等. 2021. 矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用:以捷克泰思肯公司TIMA为例[J]. 矿床地质, 40(2): 345-368. [Chen Qian, Song Wenlei, Yang Jinkun, et al. 2021. Principle of automated mineral quantitative analysis system and its application in petrology and mineralogy: An

example from Tescan TIMA[J]. Mineral Deposits, 40(2): 345-368.]

陈维涛,周瑶琪,马永生,等. 2007. 关于龙门山地区东吴运动的存在及其性质的认识[J]. 地质学报, 81(11): 1518-1525. [Chen Weitao, Zhou Yaoqi, Ma Yongsheng, et al. 2007. The knowledge on the existence and nature of the Dongwu movement in the Longmen Mountain area[J]. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1518-1525.]

戴朝成,任军平,饶强,等. 2018. 四川盆地川中地区须家河组古盐度特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 24(3): 390-400. [Dai Chaocheng, Ren Junping, Rao Qiang, et al. 2018. Paleosalinity of the Xujiahe Formation in central Sichuan Basin and its geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 24(3): 390-400.]

窦立荣,李大伟,温志新,等. 2022. 全球油气资源评价历程及展望[J]. 石油学报, 43(8): 1035-1048. [Dou Lirong, Li Dawei, Wen Zhixin, et al. 2022. History and outlook of global oil and gas resources evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 43(8): 1035-1048.]

冯冲,邹华耀,郭彤楼,等. 2015. 川东北地区二叠系—三叠系礁滩相储层发育机理[J]. 特种油气藏, 22(6): 1-4. [Feng Chong, Zou Huayao, Guo Tonglou, et al. 2015. Development mechanism of Permian-Triassic reef shoal reservoir in northeastern Sichuan Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 22(6): 1-4.]

冯轲,徐胜林,陈洪德,等. 2018. 四川盆地西南部中二叠统白云岩成因分析:来自锶同位素、稀土元素证据[J]. 中国岩溶, 37(5): 659-670. [Feng Ke, Xu Shenglin, Chen Hongde, et al. 2018. Genesis of the Middle Permian dolomite in the southwestern Sichuan Basin: Evidence from strontium isotope and rare earth elements[J]. Carso-logica Sinica, 37(5): 659-670.]

顾长光. 1990. 浅论粘土矿物的脱水机理与热分析[J]. 贵州地质, 7(3): 243-251. [Gu Changguang. 1990. A discussion on dewatering mechanism of clay minerals and heat analysis[J]. Guizhou Geology, 7(3): 243-251.]

韩雪,徐维海,罗云,等. 2022. 南沙群岛南科1井白云岩发育特征及铁白云石成因机制的初步研究[J]. 热带海洋学报, 41(5): 74-88. [Han Xue, Xu Weihai, Luo Yun, et al. 2022. Preliminary studies on the development characteristics of reef dolostones and the formation mechanism of iron dolomite in the well Nanke 1, Nansha islands[J]. Journal of Tropical Oceanography, 41(5): 74-88.]

何斌,徐义刚,肖龙,等. 2003. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布:来自沉积地层学的新证据[J]. 地质学报, 77(2): 194-202. [He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. 2003. Generation and spatial distribution of the Emeishan Large Igneous Province: New evidence from stratigraphic records[J]. Acta Geologica Sinica, 77(2): 194-202.]

胡忠贵,郑荣才,胡九珍,等. 2009. 川东—渝北地区黄龙组白云岩储层稀土元素地球化学特征[J]. 地质学报, 83(6): 782-790. [Hu Zhonggui, Zheng Rongcai, Hu Jiuzhen, et al. 2009. Geochemical characteristics of rare earth elements of Huanglong Formation dolomites reservoirs in eastern Sichuan-northern Chongqing area[J].

- Acta Geologica Sinica, 83(6): 782-790.]
- 胡作维, 黄思静, 王春梅, 等. 2009. 锶同位素方法在油气储层成岩作用研究中的应用[J]. 地质找矿论丛, 24(2): 160-165. [Hu Zuowei, Huang Sijing, Wang Chunmei, et al. 2009. Application of strontium isotope geochemistry to the oil and gas reservoir diagenesis research[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 24(2): 160-165.]
- 黄思静. 1992. 碳酸盐矿物的阴极发光性与其Fe, Mn含量的关系[J]. 矿物岩石, 12(4): 74-79. [Huang Sijing. 1992. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals[J]. Mineralogy and Petrology, 12(4): 74-79.]
- 黄思静, 刘树根, 李国蓉, 等. 2004. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(1): 1-7. [Huang Sijing, Liu Shugen, Li Guorong, et al. 2004. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 31(1): 1-7.]
- 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 2008. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 33(1): 26-34. [Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, et al. 2008. Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianquan Formation of Triassic, eastern Sichuan Basin of China[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 33(1): 26-34.]
- 黄思静, 石和, 张萌, 等. 2001. 上扬子石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化与全球海平面变化[J]. 沉积学报, 19(4): 481-487. [Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, et al. 2001. Strontium isotope evolution and global sea-level changes of Carboniferous and Permian marine carbonate, Upper Yangtze Platform[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 19(4): 481-487.]
- 蒋宜勤, 柳益群, 杨召, 等. 2015. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷凝灰岩型致密油特征与成因[J]. 石油勘探与开发, 42(6): 741-749. [Jiang Yiqin, Liu Yiqun, Yang Zhao, et al. 2015. Characteristics and origin of tuff-type tight oil in Jimusar Depression, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 42(6): 741-749.]
- 李红, 王良军, 柳益群, 等. 2021. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液活动特征[J]. 古地理学报, 23(1): 153-174. [Li Hong, Wang Liangjun, Liu Yiqun, et al. 2021. Hydrothermal activities in the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 23(1): 153-174.]
- 李宏博, 朱江. 2013. 峨眉山玄武岩与茅口组灰岩的接触关系: 对峨眉山幔柱动力学模型的指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 37(4): 571-579. [Li Hongbo, Zhu Jiang. 2013. Contact between the Emeishan Basalt and Maokou Formation: Implication for the geodynamic model of the Emeishan mantle plume[J]. Geotectonica et Metallogenia, 37(4): 571-579.]
- 李双建, 杨天博, 韩月卿, 等. 2021. 四川盆地中二叠统热液白云岩化作用及其储层改造意义[J]. 石油与天然气地质, 42(6): 1265-1280. [Li Shuangjian, Yang Tianbo, Han Yueqing, et al. 2021. Hydrothermal dolomitization and its role in improving Middle Permian reservoirs for hydrocarbon accumulation, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 42(6): 1265-1280.]
- 李双应, 金福全, 王道轩. 1995. 碳酸盐岩成岩作用的微量元素地球化学特征[J]. 石油实验地质, 17(1): 55-62, 33. [Li Shuangying, Jin Fuquan, Wang Daoxuan. 1995. Geochemical characteristics of carbonate rock diagenesis[J]. Experimental Petroleum Geology, 17(1): 55-62, 33.]
- 梁俊红, 孙宝亮. 2016. 泥质岩成岩作用中的黏土矿物研究[J]. 地质找矿论丛, 31(4): 543-549. [Liang Junhong, Sun Baoliang. 2016. Research on clay minerals during diagenesis of argillaceous rock[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 31(4): 543-549.]
- 梁新权, 周云, 蒋英, 等. 2013. 二叠纪东吴运动的沉积响应差异: 来自扬子和华夏板块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石LA-ICPMS U-Pb年龄研究[J]. 岩石学报, 29(10): 3592-3606. [Liang Xinquan, Zhou Yun, Jiang Ying, et al. 2013. Difference of sedimentary response to Dongwu Movement: Study on LA-CPMS U-Pb ages of detrital zircons from Upper Permian Wujiaping or Longtan Formation from the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(10): 3592-3606.]
- 刘宏, 马腾, 谭秀成, 等. 2016. 表生岩溶系统中浅埋藏构造—热液白云岩成因: 以四川盆地中部中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 43(6): 916-927. [Liu Hong, Ma Teng, Tan Xiucheng, et al. 2016. Origin of structurally controlled hydrothermal dolomite in epigenetic karst system during shallow burial: An example from Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(6): 916-927.]
- 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 2016. 塔里木盆地热液特点及其对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 天然气工业, 36(3): 14-21. [Liu Wei, Huang Qingyu, Wang Kun, et al. 2016. Characteristics of hydrothermal activity in the Tarim Basin and its reworking effect on carbonate reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 36(3): 14-21.]
- 柳益群, 李红, 朱玉双, 等. 2010. 白云岩成因探讨: 新疆三塘湖盆地发现二叠系湖相喷流型热液白云岩[J]. 沉积学报, 28(5): 861-867. [Liu Yiqun, Li Hong, Zhu Yushuang, et al. 2010. Permian lacustrine eruptive hydrothermal dolomites, Santanghu Basin, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(5): 861-867.]
- 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 等. 1988. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. 地质论评, 34(1): 11-24. [Luo Zhili, Jin Yizhong, Zhu Kuiyu, et al. 1988. On Emei taphrogenesis of the Upper Yangtze Platform[J]. Geological Review, 34(1): 11-24.]
- 罗志立, 孙玮, 韩建辉, 等. 2012. 峨眉地幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨[J]. 地学前缘, 19(6): 144-154. [Luo Zhili, Sun Wei, Han Jianhui, et al. 2012. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in Middle-Upper Yangtze area[J]. Earth Science Frontiers, 19(6): 144-154.]

- 罗志立, 雍自权, 刘树根, 等. 2004. “峨眉地裂运动”对扬子古板块和塔里木古板块的离散作用及其地学意义[J]. 新疆石油地质, 25(1): 1-7. [Luo Zhili, Yong Ziquan, Liu Shugen, et al. 2004. Divergent role of "Emei Tafrogeny" on Yangtse palaeoslab and Tarim palaeoslab and its significance in geoscience[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 25(1): 1-7.]
- 倪善芹, 侯泉林, 王安建, 等. 2010. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义: 以北京下古生界碳酸盐岩为例[J]. 地质学报, 84(10): 1510-1516. [Ni Shanqin, Hou Quanlin, Wang Anjian, et al. 2010. Geochemical characteristics of carbonate rocks and its geological implications: Taking the Lower Palaeozoic carbonate rock of Beijing area as an example[J]. Acta Geologica Sinica, 84(10): 1510-1516.]
- 潘立银, 郝毅, 梁峰, 等. 2022. 白云岩储层成因的激光原位 U-Pb 定年和同位素地球化学新证据: 以四川盆地西北部中二叠统栖霞组白云岩储层为例[J]. 石油学报, 43(2): 223-233. [Pan Liyin, Hao Yi, Liang Feng, et al. 2022. New evidence of laser in-situ U-Pb dating and isotopic geochemistry for the genesis of dolomite reservoir: A case study of dolomite reservoir from Middle Permian Qixia Formation in northwestern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 43(2): 223-233.]
- 庞江, 罗静兰, 马永坤, 等. 2019. 白云凹陷第三系储层中铁白云石的成因机理及与 CO₂ 活动的关系[J]. 地质学报, 93(3): 724-737. [Pang Jiang, Luo Jinglan, Ma Yongkun, et al. 2019. Forming mechanism of ankerite in Tertiary reservoir of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, and its relationship to CO₂-bearing fluid activity[J]. Acta Geologica Sinica, 93(3): 724-737.]
- 田和明, 代世峰, 李大华, 等. 2014. 重庆南川晚二叠世凝灰岩的元素地球化学特征[J]. 地质论评, 60(1): 169-177. [Tian Heming, Dai Shifeng, Li Dahua, et al. 2014. Geochemical features of the Late Permian tuff in Nanchuan district, Chongqing, southwestern China [J]. Geological Review, 60(1): 169-177.]
- 田野. 2018. 四川盆地上二叠统吴家坪期岩相古地理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京). [Tian Ye. 2018. Lithofacies palaeogeography of the Upper Permian Wu Jiaping period in the Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 王晓峰, 熊波, 戚戎辉, 等. 2021. 滇东北昭通地区峨眉山玄武岩钕—锶—铅同位素特征: 峨眉山地幔柱源区性质与 Rodinia 超大陆事件的耦合关系[J]. 地质通报, 40(7): 1084-1093. [Wang Xiaofeng, Xiong Bo, Qi Ronghui, et al. 2021. Nd-Sr-Pb isotopes of Emeishan basalt in the Zhaotong area of northeastern Yunnan-Coupling relationship between source of Emeishan mantle plume and Rodinia supercontinent[J]. Geological Bulletin of China, 40(7): 1084-1093.]
- 王晓晓, 韩作振, 李明慧, 等. 2020. 柴达木盆地西部 SG-1 钻孔中白云石成因探讨[J]. 高校地质学报, 26(5): 520-529. [Wang Xiaoxiao, Han Zuozhen, Li Minghui, et al. 2020. On the origin of dolomite in laustrine sediments of the borehole SG-1 in western Qaidam Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 26(5): 520-529.]
- 王兴志, 李博, 杨西燕, 等. 2021. 四川盆地北部中二叠世晚期“广元—旺苍”海槽特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 48(3): 562-574. [Wang Xingzhi, Li Bo, Yang Xiyang, et al. 2021. Characteristics of "Guangyuan-Wangcang" trough during late Middle Permian and its petroleum geological significance in northern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 562-574.]
- 王宇航, 朱园园, 黄建东, 等. 2018. 海相碳酸盐岩稀土元素在古环境研究中的应用[J]. 地球科学进展, 33(9): 922-932. [Wang Yuhang, Zhu Yuanyuan, Huang Jiandong, et al. 2018. Application of rare earth elements of the marine carbonate rocks in paleoenvironmental researches[J]. Advances in Earth Science, 33(9): 922-932.]
- 向坤鹏, 安亚运, 贺永忠, 等. 2019. 华南板块西南缘中三叠统底部火山灰来源: 以右江盆地者堡敢南一带凝灰岩为例[J]. 地质论评, 65(2): 319-334. [Xiang Kunpeng, An Yayun, He Yongzhong, et al. 2019. Provenance of the volcanic ash in the bottom of Middle Triassic, southwest margin of the South China Plate: A case study of the tuff in Gannan region, Zhebao, Youjiang Basin[J]. Geological Review, 65(2): 319-334.]
- 肖钦仁, 袁海锋, 叶子旭, 等. 2023. 川中北部地区八角场构造二叠系茅口组白云岩储层成因机制[J]. 天然气地球科学, 34(7): 1218-1236. [Xiao Qinren, Yuan Haifeng, Ye Zixu, et al. 2023. Genetic mechanism of dolomite reservoir in Permian Maokou Formation in Bajiaochang structure in north central Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 34(7): 1218-1236.]
- 徐安娜, 汪泽成, 江兴福, 等. 2014. 四川盆地开江—梁平海槽两侧台地边缘形态及其对储层发育的影响[J]. 天然气工业, 34(4): 37-43. [Xu Anna, Wang Zecheng, Jiang Xingfu, et al. 2014. Morphological characteristics of platform margins along the Kaijiang-Liangping trough and their influences on reservoir development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 34(4): 37-43.]
- 杨雨, 谢继容, 赵路子, 等. 2021. 四川盆地茅口组滩相孔隙型白云岩储层天然气勘探的突破及启示: 以川中北部地区 JT1 井天然气立体勘探为例[J]. 天然气工业, 41(2): 1-9. [Yang Yu, Xie Jirong, Zhao Luzi, et al. 2021. Breakthrough of natural gas exploration in the beach facies porous dolomite reservoir of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its enlightenment: A case study of the tridimensional exploration of well JT1 in the central-northern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 41(2): 1-9.]
- 姚素珠, 董宜宝. 1988. 四川攀西地区基性超基性层状岩体锶同位素比值[J]. 成都地质学院学报, 15(3): 26-31. [Yao Suzhu, Dong Yibao. 1988. Strontium isotopic ratios in basic-ultrabasic layered rocks of Panxi area, Sichuan province[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 15(3): 26-31.]
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 24(1): 1-12. [Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. 1999. South China defined as part of tethyan archipelagic ocean system[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 24(1): 1-12.]
- 由雪莲, 贾文强, 徐帆, 等. 2018. 铁白云石矿物学特征及原生次生成

- 因机制[J]. 地球科学, 43(11):4046-4055. [You Xuelian, Jia Wenqiang, Xu Fan, et al. 2018. Mineralogical characteristics of ankerite and mechanisms of primary and secondary origins[J]. Earth Science, 43(11): 4046-4055.]
- 曾琪,胡欣,屈海洲,等. 2020. 川西北部地区上二叠统吴家坪组的地层划分及有利储集岩分布[J]. 天然气勘探与开发, 43(4):33-47. [Zeng Qi, Hu Xin, Qu Haizhou, et al. 2020. Division of strata and distribution of favorable reservoir rocks of the Upper Permian Wujiaping Formation in the northwestern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 43(4): 33-47.]
- 翟如一. 2020. 昌都地区达孜剖面粘土矿物组合和微量元素特征与沉积—成岩环境研究[D]. 西宁:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所). [Zhai Ruyi. 2020. Clay mineral assemblages and trace element characteristics in Dazi section in Changdu area and study on sedimentary-diagenetic environmental[D]. Xining: University of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences).]
- 张本健,王宇峰,裴森奇,等. 2019. 川西北地区上二叠统吴家坪组沉积演化[J]. 天然气地球科学, 30(12):1709-1720. [Zhang Benjian, Wang Yufeng, Pei Senqi, et al. 2019. Sedimentary evolution of the Upper Permian Wujiaping Formation in the northwestern Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 30(12): 1709-1720.]
- 张晗,黄虎,侯明才. 2020. 四川广元地区朝天剖面上二叠统吴家坪组凝灰岩成因及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 42(1):36-48. [Zhang Han, Huang Hu, Hou Mingcai. 2020. Origin of tuffs from Upper Permian Wujiaping Formation in Chaotian section of Guangyuan area, Sichuan, China and its geological significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 42(1): 36-48.]
- 张军涛,何治亮,岳小娟,等. 2017. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段富铁白云石成因[J]. 石油与天然气地质, 38(4):776-783. [Zhang Juntao, He Zhiliang, Yue Xiaojuan, et al. 2017. Genesis of iron-rich dolostones in the 5th member of the Majiagou Formation of the Ordovician in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 38(4): 776-783.]
- 张帅,柳益群,焦鑫,等. 2018. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷中二叠统芦草沟组云质岩沉积环境及白云石成因探讨[J]. 古地理学报, 20(1):33-48. [Zhang Shuai, Liu Yiqun, Jiao Xin, et al. 2018. Sedimentary environment and formation mechanism of dolomitic rocks in the Middle Permian Lucaogou Formation Jimusar Depression, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 20(1): 33-48.]
- 张学丰,胡文瑄,张军涛,等. 2008. 塔里木盆地奥陶统白云岩化流体来源的地球化学分析[J]. 地学前缘, 15(2):80-89. [Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, et al. 2008. Geochemical analyses on dolomitizing fluids of Lower Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 15(2): 80-89.]
- 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. [Zhao Yanyan, Li Sanzhong, Li Da, et al. 2019. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(1): 141-167.]
- 郑荣才,刘合年,吴蕾,等. 2012. 阿姆河盆地卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩储层地球化学特征和成岩流体分析[J]. 岩石学报, 28(3):961-970. [Zheng Rongcai, Liu Henian, Wu Lei, et al. 2012. Geochemical characteristics and diagenetic fluid of the Callovian-Oxfordian carbonate reservoirs in Amu Darya Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(3): 961-970.]
- 钟原,杨跃明,文龙,等. 2021. 四川盆地西北部中二叠统茅口组岩相古地理、古岩溶地貌恢复及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 48(1):81-93. [Zhong Yuan, Yang Yueming, Wen Long, et al. 2021. Reconstruction and petroleum geological significance of lithofacies paleogeography and paleokarst geomorphology of the Middle Permian Maokou Formation in northwestern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(1): 81-93.]
- 朱东亚,胡文瑄,张学丰,等. 2007. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. 石油学报, 28(5):57-62. [Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, et al. 2007. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe oilfield[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(5): 57-62.]
- Du Y, Wang X Z, Tang R F, et al. 2023. Extraordinarily high organic matter enrichment in Upper Permian Wujiaping Formation in the Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin[J]. Energies, 16(1): 349.
- Jiao X, Liu Y Q, Yang W, et al. 2023. Microcrystalline dolomite in a Middle Permian volcanic lake: Insights on primary dolomite formation in a non - evaporitic environment[J]. Sedimentology, 70(1): 48-77.
- Johannesson K H, Palmore C D, Fackrell J, et al. 2017. Rare earth element behavior during groundwater-seawater mixing along the Kona coast of Hawaii[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 198: 229-258.
- Kramer W, Weatherall G, Offler R. 2001. Origin and correlation of tuffs in the Permian Newcastle and Wollombi coal measures, NSW, Australia, using chemical fingerprinting[J]. International Journal of Coal Geology, 47(2): 115-135.
- Lawrence M G, Greig A, Collerson K D, et al. 2006. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways [J]. Aquatic Geochemistry, 12(1): 39-72.
- Lei H, Huang W H, Jiang Q C, et al. 2022. Genesis of clay minerals and its insight for the formation of limestone marl alterations in Middle Permian of the Sichuan Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 218: 111014.
- Li R, Xiong Z F, Wang Z C, et al. 2023. Lithofacies, mineralogy, and pore characteristics of Permian marine tuffaceous rocks in the Sichuan Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 1054276.
- Lu F F, Tan X C, Xiao D, et al. 2023. Sedimentary control on diagenetic paths of dolomite reservoirs in a volcanic setting: A case study of the Permian Chihhsia Formation in the Sichuan Basin, China[J]. Sedimentary Geology, 454: 106451.
- Mazzini A, Ivanov M K, Parnell J, et al. 2004. Methane-related

- authigenic carbonates from the Black Sea: Geochemical characterization and relation to seeping fluids[J]. *Marine Geology*, 212(1/2/3/4): 153-181.
- McArthur J M, Howarth R J, Shields G A, et al. 2020. Strontium isotope stratigraphy[J]. *Geologic Time Scale 2020*, 1: 211-238.
- Shang W L, Xu S H, Li X G, et al. 2023. Utilizing 2D seismic forward modeling to constrain the seismic response and plane distribution of grain shoal reservoir in the northern slope of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 152: 106228.
- Su W, Hu S Y, Jiang Q C, et al. 2020. Sedimentary responses to the Dongwu movement and the influence of the Emeishan mantle plume in Sichuan Basin, Southwest China: Significance for petroleum geology[J]. *Carbonates and Evaporites*, 35(4): 108.
- Xiang F, Yu X T, Huang H X, et al. 2021. Mineralogical characterization and diagenetic history of Permian marine tuffaceous deposits in Guangyuan area, northern Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 104744.

Study on the Genesis Mechanism of the Permian Maosan-Wuyi Iron Dolomite in North-Central Sichuan Area

LI YueJie^{1,2}, YUAN HaiFeng^{1,2}, XU GuoSheng^{1,2}, XIAO QinRen^{1,2}, KUANG MingZhi^{1,2}, XU Ting^{1,2}, YE ZiXu^{1,2}

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

2. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: [Objective] At present, the iron dolomite genesis mechanism of the Maosan-Wuyi in north-central Sichuan is not clear. [Methods] Based on the rock-mineral characteristics of the Maosan-Wuyi, we combined rock TI-MA scanning, whole-rock X-ray diffraction analysis, microzonation in situ main trace elements, strontium isotopes fluid inclusions homogeneous temperature, and in situ U-Pb chronology of iron dolomite to study the mechanism of iron dolomite genesis. [Results] The study shows that: (1) the rock types of the Maosan and Wuyi are cherts, dolomites and tuffs. The tuffs mainly include mud crystal clastic, bright crystal clastic, and cloudy tuff; the dolomites are semi-autogenous-to-autogenous powdery-to-fine crystalline dolomite; the sedimentary tuffs are mainly composed of volcanic clasts, carbonaceous, calcium-magnesium, sand-grade clasts, and metallic minerals, among which the volcanic clasts are glassy clasts, basalt, and other clasts, and the calcium-magnesium mainly consists of dolomite and calcite. (2) The average values of trace elements in the dolomite at the top of Maosan and Wuyi show extremely high Fe content ($10\ 678.40 \times 10^{-6}$), high Mn content (822.95×10^{-6}), Si content ($1\ 929.81 \times 10^{-6}$), Al content (394.11×10^{-6}), and high Na+K content (362.38×10^{-6}), indicating that the fluids in the closed environment are characterized by high salinity and alkaline metal content. This also indicates that the rock-forming fluids in the confined environment are characterized by high salinity and high alkaline metal content. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in the matrix of ankerite and mud crystal clastic tuffs are within the range of seawater from the same period in the Maokou and Wujiaping groups, and they also have low total rare earth element (REE) values and light REE (LREE) loss, consistent with the LREE loss pattern of seawater, indicating that the dolomitized diagenetic fluids and seawater of the same period have similar characteristics. (3) The U-Pb age of powdery-to-fine crystalline dolomite in the Maosan and Wuyi is 245.36 ± 1.08 Ma, and the dolomitization mainly occurred in the Late Permian to Early Triassic. [Conclusions] The source of dolomitization fluids in the powdery-to-fine crystalline dolomite of the Maosan and Wuyi is the dewatering of clay minerals in the argillaceous tuffite and tuffaceous mudstone of the overlying Wuyi and Wuer. During this process, a large number of Mg^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , and Si^{4+} -rich ions were precipitated and transported to the granular tuffs at the top of Maosan and Wuyi to form iron dolomite using the seawater residual from the Maokou Formation to Wujiaping Formation during the same period as the carrier.

Key words: ankerite; Permian; Maosan; Wuyi; north-central Sichuan

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41572133, 41872130

Corresponding author: YUAN HaiFeng, E-mail: yuanhaifeng08@cdu.cn