

# 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, 袁海锋, 徐国盛, 肖钦仁, 匡明志, 徐婷, 叶子旭

油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都理工大学能源学院, 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、炭质、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 ( $822.95 \times 10^{-6}$ )、Si 含量 ( $1.929.81 \times 10^{-6}$ )、Al 含量 ( $394.11 \times 10^{-6}$ ) 及高 (Na+K) 含量 ( $362.38 \times 10^{-6}$ ), 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  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  介于茅口组—吴家坪组同时期海水范围内, 同时  $\Sigma\text{REE}$  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  $245.36 \pm 1.08$  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  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$  等离子, 以同期茅口组—吴家坪组残余海水为载体, 运移至吴一段、茅三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

**第一作者简介** 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** P588.24+5 **文献标志码** A

## 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<sup>[1-3]</sup>。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  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{Fe}^{2+}$  摩尔比  $\leq 4:1$  或  $\text{Fe}(\text{Mn})\text{CO}_3$  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<sup>[2-3]</sup>。铁白云石按成因机制差异可划分为原生沉淀与次生两种<sup>[4]</sup>。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  $\text{Fe}^{2+}$  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<sup>[1-3]</sup>。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<sup>[5]</sup>。

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<sup>[6]</sup>在研究湖相喷流型热水白云岩中发现,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<sup>[7]</sup>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<sup>[4]</sup>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<sup>[3]</sup>对咸水湖和盐湖环境中铁白云石成因讨论中表明,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<sup>[8-10]</sup>。Shang *et al.*<sup>[11]</sup>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  $Mg^{2+}$ 。梁俊红等<sup>[12]</sup>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。而在受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<sup>[7-10]</sup>。

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、微区原位主微量元素、岩石 TIMA、全岩 X 衍射及白云石原位 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<sup>[3]</sup>。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 1~3Ma 的暴露与剥蚀<sup>[13-14]</sup>。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<sup>[4,7]</sup>。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<sup>[14]</sup>。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<sup>[4-19]</sup>。

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<sup>[15]</sup>；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<sup>[20-22]</sup>，导致沉积分异加剧，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<sup>[22]</sup>。川中北部研究区茅口—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、茅三段，吴一段、吴二段、吴三段<sup>[23-26]</sup>。茅一段主要为海侵时期形成的深灰色薄层生屑泥晶灰岩、泥晶灰岩及泥质灰岩等岩相；茅二段多发育有泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩及亮晶生屑灰岩等，与茅一段同为碳酸盐岩缓坡相沉积；茅三段多发育亮晶生屑灰岩、灰质云岩、云质灰岩及白云岩等，为缓坡台缘相沉积，同时受东吴期构造运动影响，茅三段多有暴露岩溶特征。吴家坪期主要发育缓坡与缓坡台缘等相带，受火山喷溢影响，吴一段底部发育王坡页岩、火山碎屑岩、硅质岩等，顶部多为泥晶灰岩、亮晶生屑灰岩、白云岩等；吴二段与吴三段多发育泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩与亮晶生屑灰岩及凝灰岩等（图 2）。前人研究认为川中北部地区上二叠统吴家坪组凝灰岩来自峨眉山大火成岩省相关的酸性火山喷发作用，即为峨眉山大火成岩省火山活动的延续（图 1b）<sup>[27-31]</sup>。

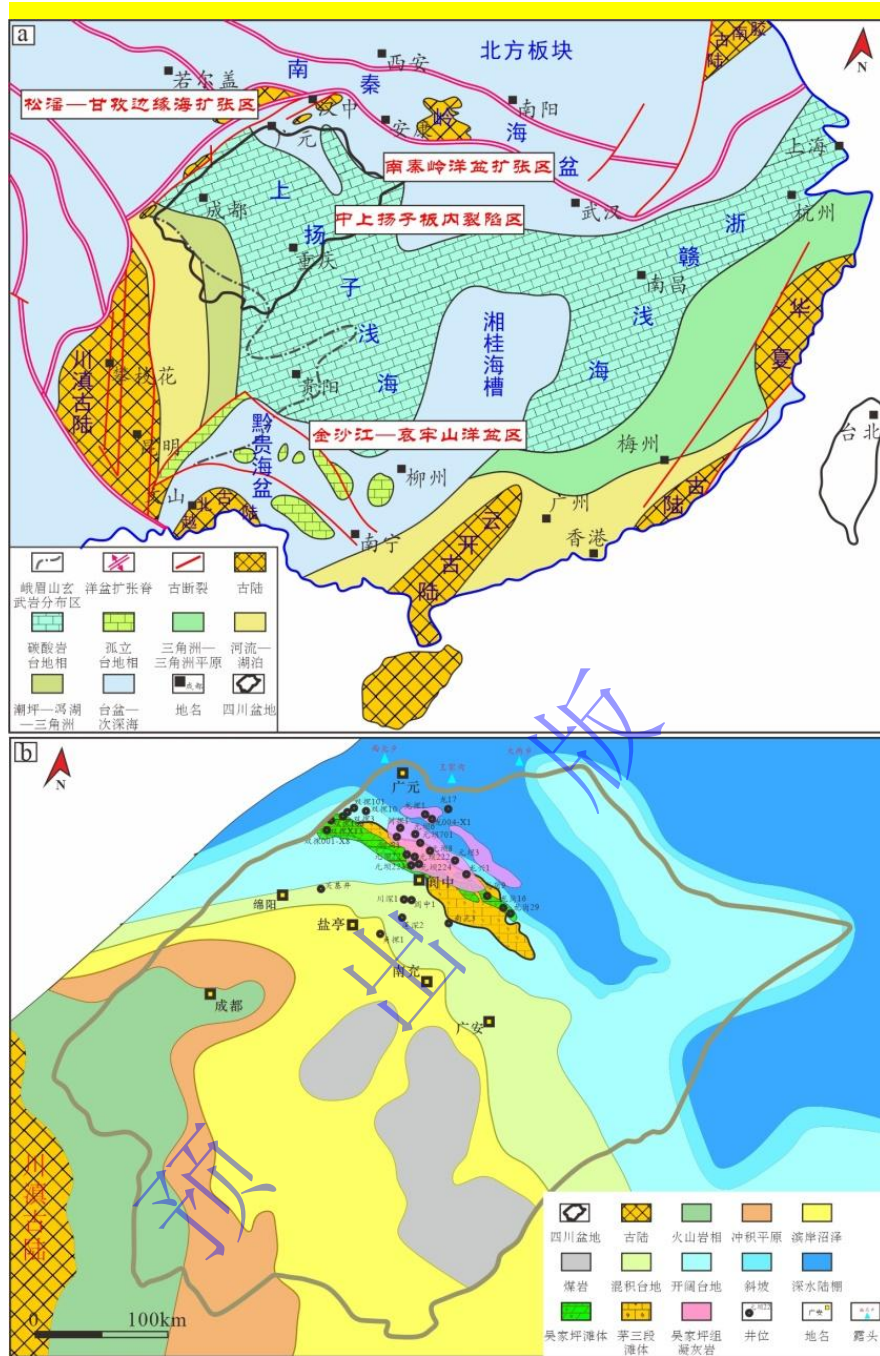


图 1 四川盆地峨眉地列运动构造特征与沉积相带展布

(a) 华南板块上二叠统峨眉地裂运动构造特征图<sup>[3,14]</sup>; (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凝灰岩分布特征<sup>[19,31]</sup>

Fig.1 Tectonic characteristics of the Emei geotraverse in the Sichuan Basin and the distribution of sedimentary zones

(a) Tectonic characterization of the Upper Permian Emei rift movement of the South China Plate<sup>[3,14]</sup>; (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–Wu Diyan platform and the distribution of sedimentary tuffs in the Yuanba tectonics<sup>[19,31]</sup>



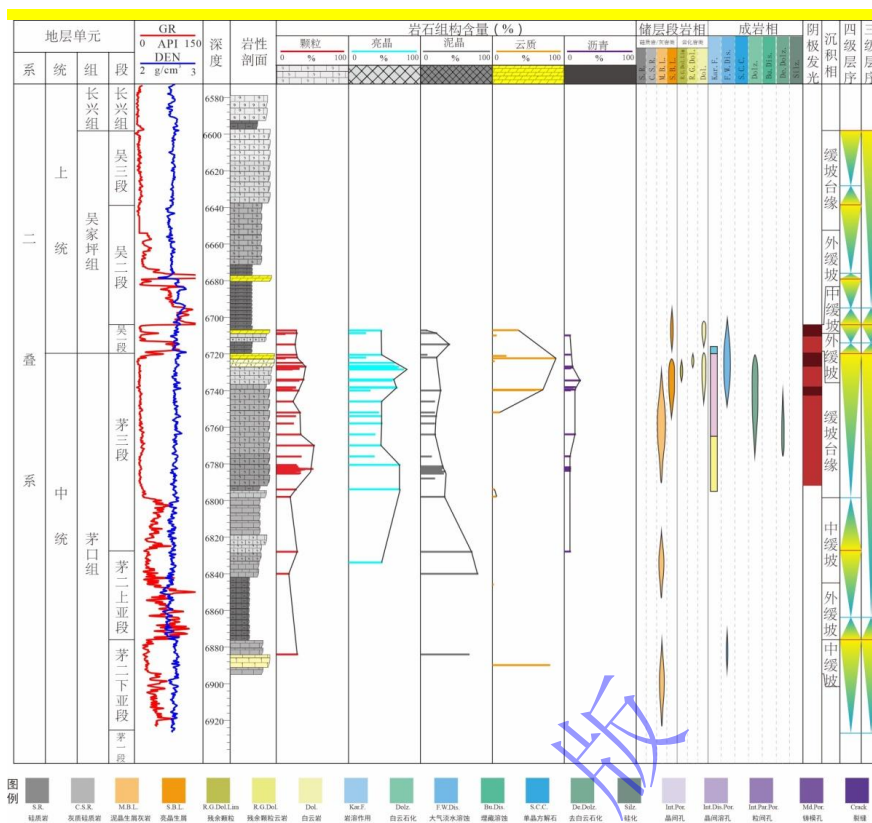


图 2 四川盆地北部茅口组与吴家坪组综合柱状图

该柱状图为岩心及岩屑薄片观察下完成绘制，阴极发光为碳酸盐岩基质部分的发光特征

Fig.2 Comprehensive histogram of the Maokou and Wujiaping formations in the northern Sichuan Basin

This histogram was completed using observations of core and thin section of rock chips, and the cathodoluminescence is characteristic of the luminescence of the basal part of carbonate rocks

## 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、稀土元素及锶同位素共计点位 150 个，流体包裹体测温 8 件，岩石成像 TIMA (TESCAN Intergrated Mineral Analyzer, 综合矿物分析系统) 以及全岩矿物 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 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、稀土元素及锶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 193nm 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 Sha

le, 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<sup>[32-34]</sup>。岩石薄片 TIMA 扫描与全岩矿物 X 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  $\mu\text{m}$ , 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, 晶粒云岩中可见有生物碎屑残余幻影, 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, 沉凝灰岩主要由炭质、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 0.005~0.5 mm，玻屑发生不同程度的脱玻化或泥化，约占岩石总量 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约为 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、吴二段的沉凝灰岩中所含矿物类型以白云母（含量介于 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）。

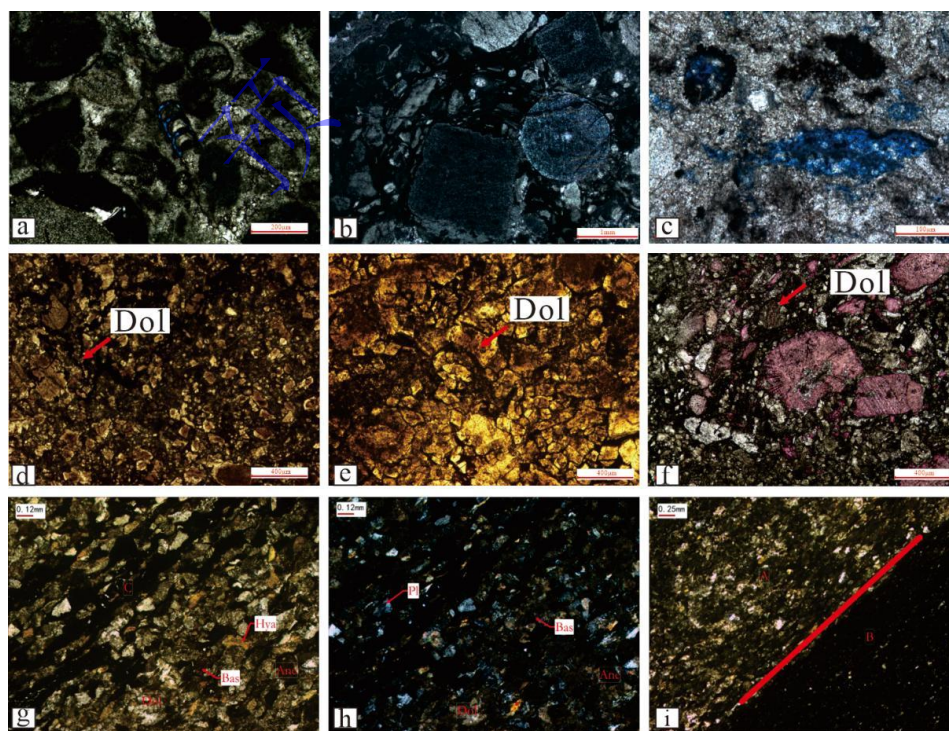


图 3 川中北部地区茅三段-吴一段储层岩矿特征



(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, 炭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-Wu section in 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

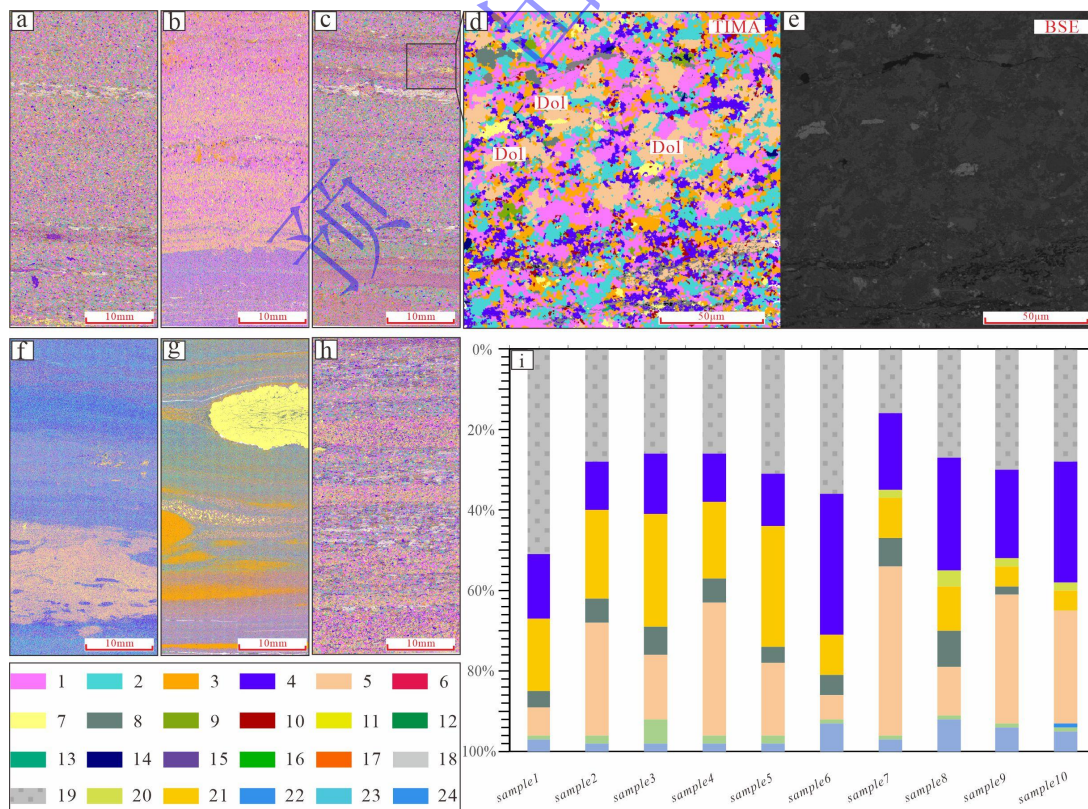


图4 川中北部地区吴家坪组沉凝灰岩段岩石 TIMA



(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 in north-central Sichuan (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

表 1 川中北部地区吴家坪组沉凝灰岩段岩石薄片 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 Province, China

| 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       | $(\text{Ca}, \text{Na}) (\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_8$                     | 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        | $\text{SiO}_2$  | 7.98        | 3.88        | 7.79        | 7.05        | 3.71        |
| 方解石       | $\text{CaCO}_3$   | 1.87        | 4.41        | 0.36        | 7.88        | 0.19        |
| 黄铁矿       | $\text{FeS}_2$  | 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       | $\text{FeTiO}_3$  | 1.61        | 0.62        | 0.60        | 0.39        | 0.23        |
| 硅灰石       | $\text{CaSiO}_3$  | 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       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$   | 1.39        | 0.11        | 0.02        | 0.07        | 0.03        |
| 金红石       | $\text{Al}_2\text{O}_3$   | 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      | $\text{Fe}_3\text{O}_4$   | 0.00        | 0.07        | 0.01        | 0.06        | 0.01        |
| 石榴石-红柱石   | $\text{A}_3\text{B}_2[\text{SiO}_4]_3$  | 0.00        | 0.00        | 0.01        | 0.01        | 0.01        |
| 钛铁矿       | $\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$                                     | 0.01        | 0.00        | 0.01        | 0.00        | 0.01        |
| 黄铜矿       | $\text{CuFeS}_2$  | 0.02        | 0.01        | 0.01        | 0.00        | 0.00        |
| 重晶石       | $\text{BaSO}_4$   | 0.00        | 0.02        | 0.02        | 0.00        | 0.00        |
| 闪锌矿       | $\text{ZnS}$  | 0.01        | 0.01        | 0.00        | 0.00        | 0.00        |
| 未分类       | -   | 0.30        | 0.11        | 0.18        | 0.15        | 0.05        |
| 合计        | -   | 97.92       | 93.9        | 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 of the tuff section of the Wujiaping Formation in north-central Sichuan

| 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  | 炭质泥岩  | 30         | 22 | 2   | 5   | 2   | 32  | 0  | 1   | 6   |
| 10  | 炭质泥岩  | 28         | 30 | 2   | 5   | 0   | 28  | 1  | 1   | 5   |

### 3.2 成岩演化序列

通过观察研究区茅三段—吴一段取芯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°C~85°C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 °C~141 °C 的液烃包裹体和盐水包裹体、均一温度为 141 °C~163 °C 的气烃包裹体与沥青质包裹体以及均一温度为 176 °C~180 °C 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 期古油气藏—古气藏演化阶段（图 6a），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 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  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  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）。

（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 °C~80 °C 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 6b）：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  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  使水介质转变为对碳酸盐矿物具溶蚀性的酸性水<sup>[35-39]</sup>，发生第 III 期溶蚀作用。



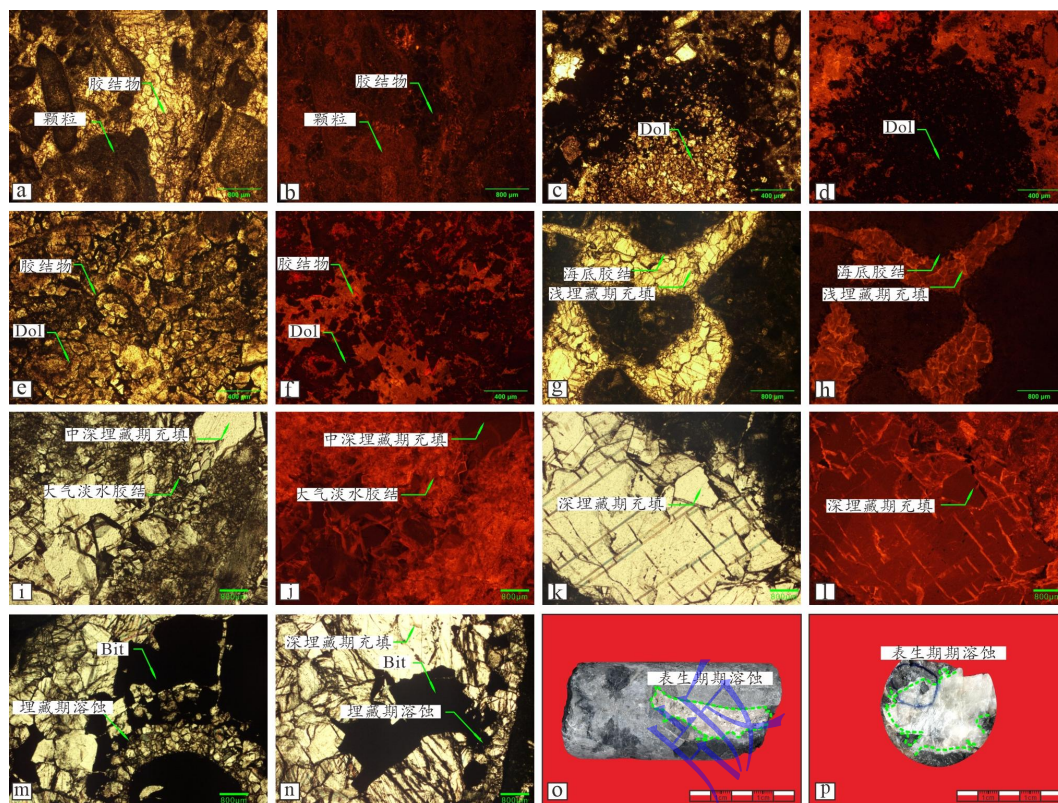


图5 川中北部地区茅三段—吴一段岩石阴极发光特征与成岩作用类型

(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—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 types of diagenesis in rocks of the Maosan-Wu section in the north-central Sichuan Province, China

(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 g-synoptic field of view where g (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) leucocrystalline 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

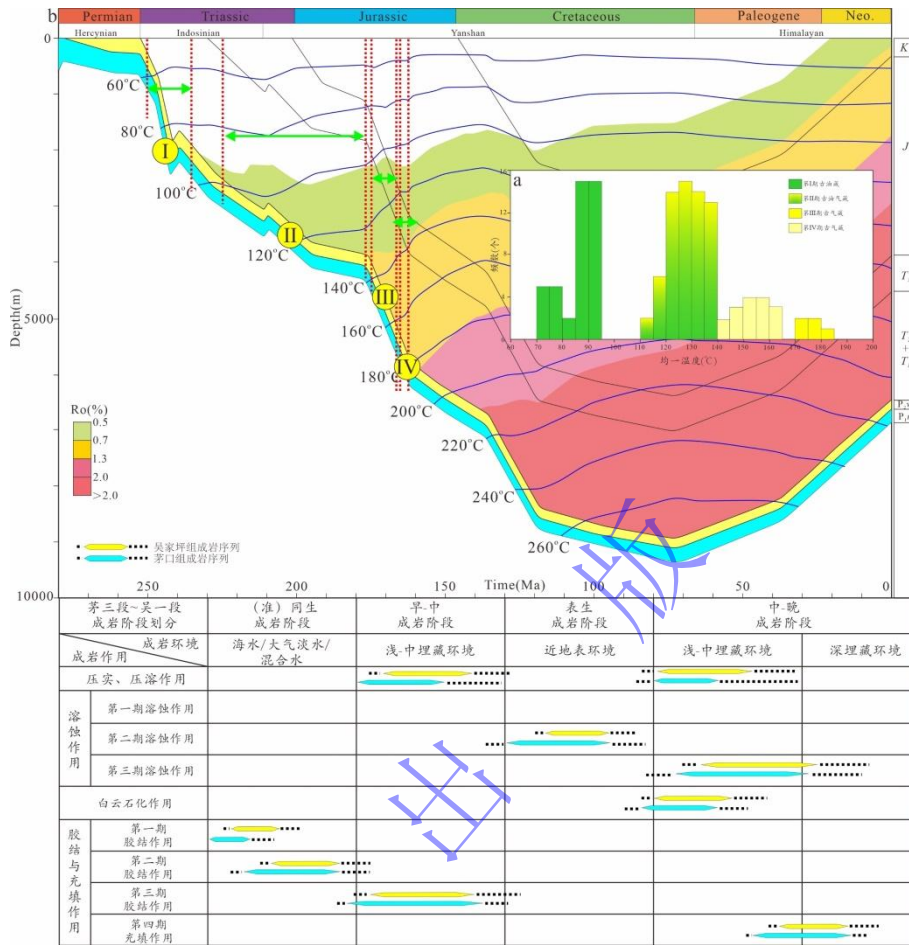


图6 川中北部地区茅三段—吴一段成岩序列与埋藏演化史及包裹体均一温度直方图

(a) 川中北部茅三段—吴一段成岩演化序列及埋藏—热演化史图; (b) 川中北部茅三段—吴一段包裹体均一温度直方图

Fig.6 Diagenetic sequence and burial evolution history of the Maosan-Wu section in north-central Sichuan.

(a) Sequence of orogenic evolution and burial-thermal evolution history of the Maosan-Wu section in north-central Sichuan; (b) Histogram of mean temperature of inclusions in the Maosan-Wu section in north-central Sichuan

## 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 $115.4 \times 10^{-6} \sim 413.26 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $179.36 \times 10^{-6}$ ,而基质与方解石胶结物中Sr含量介于 $45.91 \times 10^{-6} \sim 423.14 \times 10^{-6}$ (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 $119.08 \times 10^{-6}$ ,

Mn 含量均值在  $127.83 \times 10^{-6}$ 。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，均一分布于海水中，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<sup>[40-41]</sup>。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<sup>[40-42]</sup>。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应期沉积古环境及综合判断成岩系统的开放与封闭信息<sup>[43]</sup>，所以高 Fe、Mn 与低 Sr 含量指示铁白云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<sup>[13,43-47]</sup>。

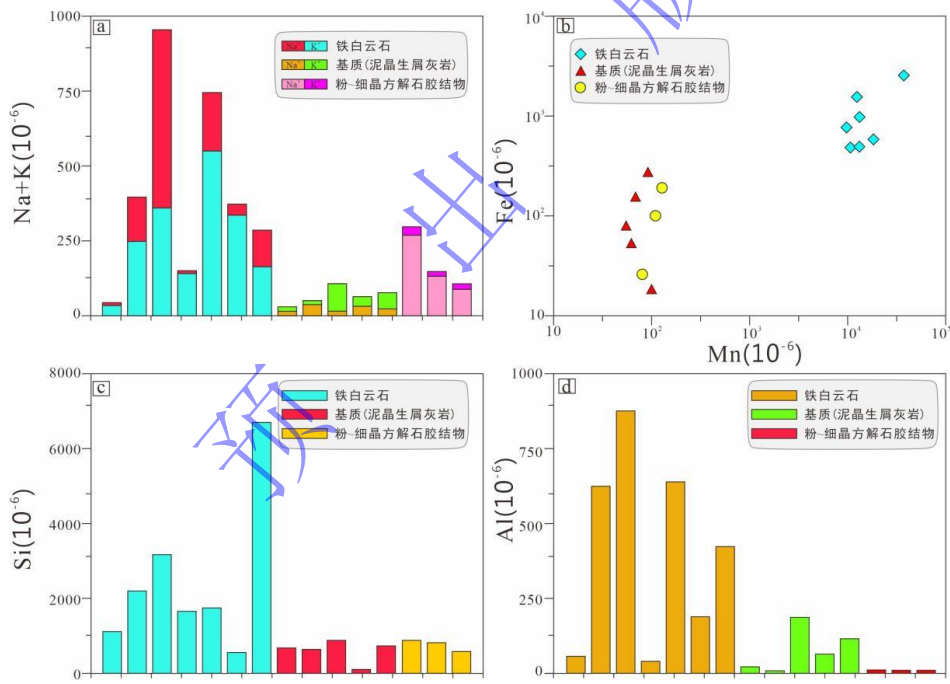


图 7 川中北部地区茅三段—吴一段白云石微量元素直方图

(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 Histogram of trace elements of dolomite from the MaosanWu section in north-central Sichuan

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

#### 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<sup>[48]</sup>。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 $\Sigma\text{REE}$ 总体上高于基质颗粒，其 $\Sigma\text{REE}$ 介于 $8.6\times 10^{-6}\sim 42.4\times 10^{-6}$ （平均值： $23.7\times 10^{-6}$ ），基质 $\Sigma\text{REE}$ 介于 $5.1\times 10^{-6}\sim 37.7\times 10^{-6}$ （平均值： $17.1\times 10^{-6}$ ）；铁白云石中Y含量介于 $3.5\times 10^{-6}\sim 16.2\times 10^{-6}$ （平均值： $6.3\times 10^{-6}$ ），基质Y含量介于 $3.4\times 10^{-6}\sim 7.9\times 10^{-6}$ （平均值： $5.2\times 10^{-6}$ ）；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等<sup>[49]</sup>的认识本次采用 $\text{Pr}_N/\text{Tb}_N$ 代替 $\text{LREE}_N/\text{MREE}_N$ 、 $\text{Pr}_N/\text{Yb}_N$ 代替 $\text{LREE}_N/\text{HREE}_N$ 、 $\text{Tb}_N/\text{Yb}_N$ 代替 $\text{MREE}_N/\text{HREE}_N$ ，其中 $\text{Pr}_N/\text{Tb}_N$ （平均值为0.83）、 $\text{Pr}_N/\text{Yb}_N$ （平均值为0.98） $<1$ ， $\text{Tb}_N/\text{Yb}_N$ （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（ $\delta\text{Pr}$ ）时反应Ce异常（ $\delta\text{Ce}$ ）特征（图8a）；结果表明铁白云石中 $\delta\text{Pr}$ 平均值为 $1.03>1$ ， $\delta\text{Ce}$ 平均值为 $0.96<1$ ，具有Ce负异常特征，而部分样品 $\delta\text{Ce}<1$ 和 $\delta\text{Pr}\approx 1$ 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<sup>[48-49]</sup>。还原环境下变价金属Eu由 $\text{Eu}^{3+}$ 离子被还原成 $\text{Eu}^{2+}$ ，邻元素性质发生分异所引起Eu正异常<sup>[48]</sup>（ $\delta\text{Eu}>1$ ）；结果表明铁白云石中 $\delta\text{Eu}$ 值介于0.61~1.12（平均值：1.01），基质灰岩中 $\delta\text{Eu}$ 值介于0.85~1.15（平均值：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<sup>[48,50-52]</sup>（图8a）。

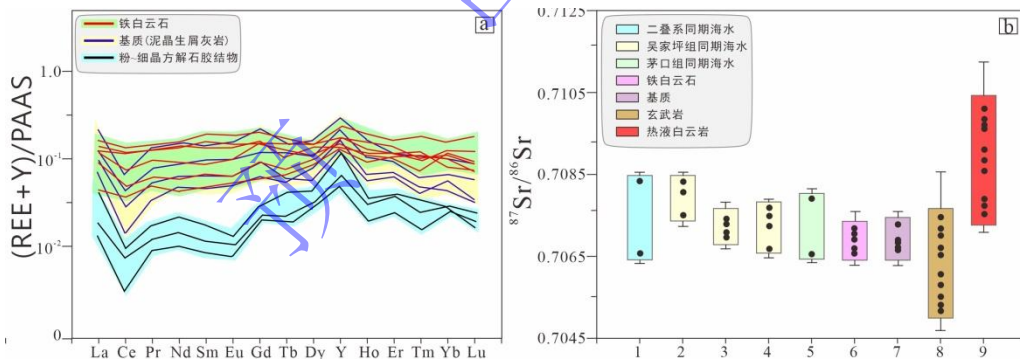


图8 川中北部地区茅三段—吴一段稀土元素与锶同位素分布图

(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) <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 散点图（1-5,8-9 数据来源 [8-10,53-54,59-60]，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-Wuosan section of north-central Sichuan region

(a) Patterns of rare-earth element and yttrium element compositions of Ankerite from the Maosan-Wu section with the matrix; (a) <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr scatter plots (1-5,8-9 data sources [8-10,53-54,59-60], 6. Strontium isotopes of Ankerite from the Maosan-Wu section, and 7. Strontium isotopes from the matrix in the Maosan-Wu section)

### 4.3 锶同位素

锶同位素的组成与演化是地质时间的函数,其能较好地代表成岩流体中组成及变化趋势<sup>[50-52]</sup>。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<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>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<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>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<sup>[50,53-56]</sup>。

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<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值介于0.706 6~0.708 2,茅口组<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr同位素介于0.706 7~0.707 8<sup>[53]</sup>,吴家坪组<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr同位素介于0.706 7~0.707 6<sup>[53,57-58]</sup>,同时期峨眉山玄武岩<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值介于0.704 3~0.707 4<sup>[53,59-60]</sup>;川中北部区域茅口组热液成因的白云石<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值介于0.707 4~0.710 2<sup>[13,54-55]</sup>。研究区内铁白云石<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr波动范围介于0.707 0~0.707 3(平均值:0.707 0),泥晶生屑灰岩<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr波动范围介于0.706 8~0.707 4(平均值: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)。

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 in the Maosa n-Wu section, 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   | 0.00  | 0.01  | 0.01  |
| ΣREE | 27.277 | 22.911 | 17.846 | 12.259 | 8.416 | 10.274 | 14.235 | 23.720 | 1.504 | 4.556 | 3.106 |

## 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  $245.36 \pm 1.08$  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  $69$  °C~ $80$  °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同生—准同生期—浅埋藏早期（图 9b~e）。

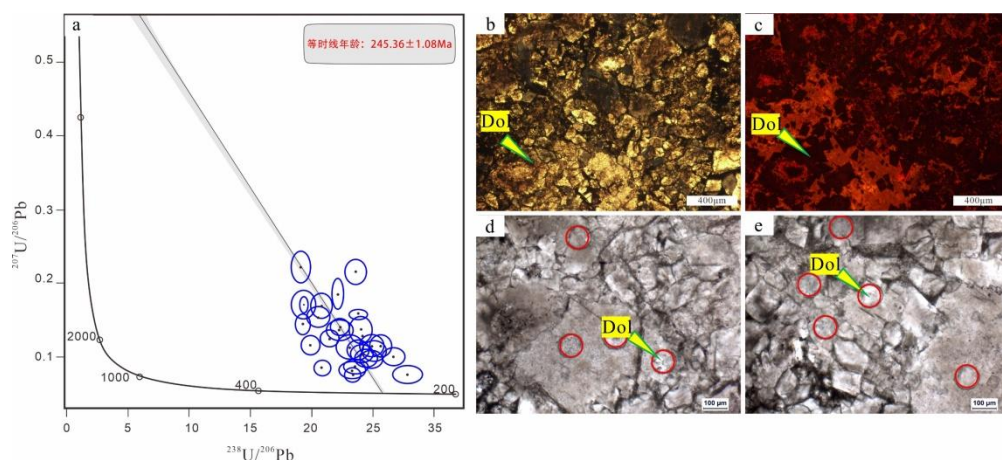


图 9 川中北部地区茅三段—吴一段白云石 U-Pb 同位素定年测点、结果及对应点位包裹体镜下照片  
(a) 川中北部茅三段—吴一段铁白云石激光原位 U-Pb 定年结果；(b) 川中北部地区茅三段测试铁白云石显微照片；(c) 为 b 相同视域下阴极发光特征，铁白云石不发光；(d, e) 为川中北部地区茅三段—吴一段包裹体测试点位，白云石胶结物中捕获的液烃（富沥青）包裹体，Th: 69 °C~80 °C

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

(a) Laser in situ U-Pb dating results of Ankerite from the Maosan-Wu section, north-central Sichuan; (b) micrographs of tested Ankerite from the Maosan section, north-central Sichuan; (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-Wu section, north-central Sichuan. Th: 69 °C~80 °C

## 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<sup>[54]</sup>。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<sup>3+</sup>与 Ho<sup>3+</sup>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<sup>[48]</sup>。同时铁白云石与泥晶颗粒中基质 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>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。

侯明才等<sup>[30]</sup>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<sup>[61]</sup>，经由风化与剥蚀作用搬运后沉积形成吴家坪组  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 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<sup>[61-65]</sup>。伴随着温度升高（约  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，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  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等碱性金属离子析出<sup>[62-69]</sup>，在浅埋藏期的还原环境下， $\text{Fe}^{3+}$ 被还原成  $\text{Fe}^{2+}$ ，从而置换早期形成的白云石中的  $\text{Mg}^{2+}$ 与  $\text{Ca}^{2+}$ <sup>[65,70]</sup>，这与铁白云石中高碱性金属元素特征相契合。

同时  $\text{Fe}^{2+}$ 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<sup>[58]</sup>，所以白云石化作用的发生时间相对更早，约在晚二叠世时期开始发生（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  $245.36\pm 1.08\text{ Ma}$ ）。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  $\text{Mg}^{2+}$ 与  $\text{Fe}^{2+}$ 来源。川中地区角探 1、川深 1、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<sup>[13,28]</sup>。

### 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  $245.36\pm 1.08\text{ Ma}$ ，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<sup>[30,69-70]</sup>（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  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 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。

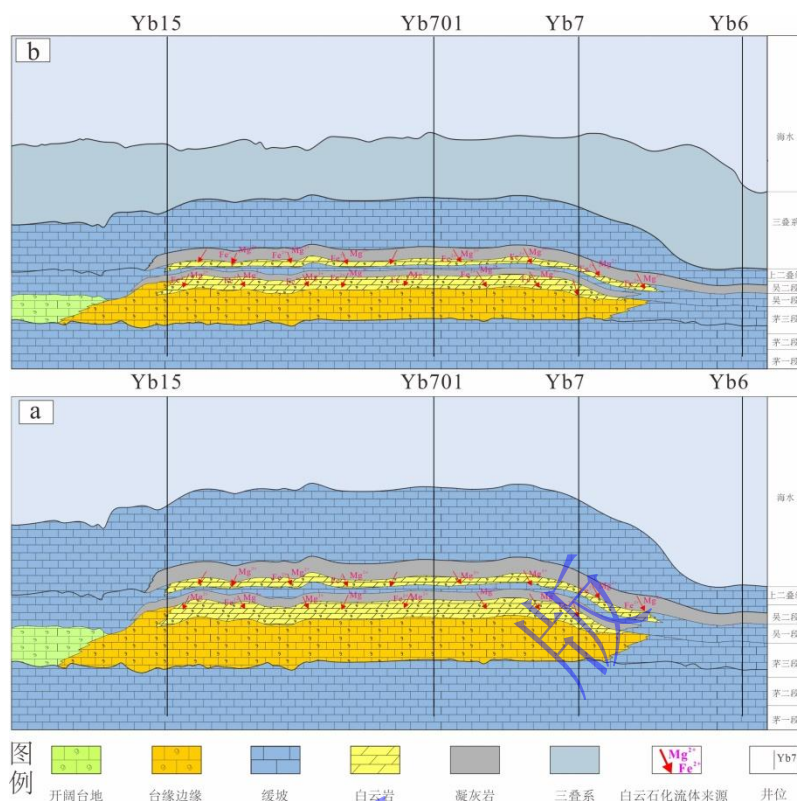


图 10 川中北部地区茅三段—吴一段铁白云石的白云石化模式图

Fig.10 Patterns of dolomitization in iron dolomite from the Maosan-Wu section in north-central Sichuan region

## 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；沉凝灰岩类岩相由炭质、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。<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>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  $\Sigma$ 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  $245.36 \pm 1.08$  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)

- [1] 庞江, 罗静兰, 马永坤, 等. 白云凹陷第三系储层中铁白云石的成因机理及与  $CO_2$  活动的关系[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 724-737. [Pang Jiang, Luo Jinglan, Ma Yongkun, et al. Forming mechanism of ankerite in Tertiary reservoir of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, and its relationship to  $CO_2$ -bearing fluid activity[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 724-737.]
- [2] 韩雪, 徐维海, 罗云, 等. 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, 2022, 41(5): 74-88. [Han Xue, Xu Weihai, Luo Yun, et al. 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, 2022, 41(5): 74-88.]
- [3] 王晓晓, 韩作振, 李明慧, 等. 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, 2020, 26(5): 520-529. [Wang Xiaoxiao, Han Zuozhen, Li Minghui, et al. On the origin of dolomite in Laustrine sediments of the borehole SG-1 in western Qaidam Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2020, 26(5): 520-529.]
- [4] 张军涛, 何治亮, 岳小娟, 等. 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, 2017, 38(4): 776-783. [Zhang Juntao, He Zhiliang, Yue Xiaojuan, et al. Genesis of iron-rich dolostones in the 5th member of the Majiagou Formation of the Ordovician in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 776-783.]
- [5] 由雪莲, 贾文强, 徐帆, 等. 铁白云石矿物学特征及原生次生成因机制[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4046-4055. [You Xuelian, Jia Wenqiang, Xu Fan, et al. Mineralogical characteristics of ankerite and mechanisms of primary and secondary origins[J]. Earth Science, 2018, 43(11): 4046-4055.]
- [6] 柳益群, 李红, 朱玉双, 等. 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水白云岩[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 861-867. [Liu Yiqun, Li Hong, Zhu Yushuang, et al. Permian lacustrine eruptive hydrothermal dolomites, Santanghu Basin, Xinjiang province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 861-867.]
- [7] 戴朝成, 任军平, 饶强, 等. 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, 2018, 24(3): 390-400. [Dai Chaocheng, Ren Junping, Rao Qiang, et al. Paleosalinity of the Xujiahe Formation in Central Sichuan Basin and its geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(3): 390-400.]
- [8] 李红, 王良军, 柳益群, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液活动特征[J]. 古地理论, 2021, 23(1): 153-174. [Li Hong, Wang Liangjun, Liu Yiqun, et al. Hydrothermal activities in the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(1): 153-174.]
- [9] 李双建, 杨天博, 韩月卿, 等. 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, 2021, 42(6): 1265-1280. [Li Shuangjian, Yang Tianbo, Han Yueqing, et al. Hydrothermal dolomitization and its role in improving Middle Permian reservoirs for hydrocarbon accumulation, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1265-1280.]
- [10] 肖钦仁, 袁海锋, 叶子旭, 等. 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, 2023, 34(7): 1218-1236. [Xiao Qinren, Yuan Haifeng, Ye Zixu, et al. Genetic mechanism of dolomite reservoir in Permian Maokou Formation in Bajiaochang structure in North Central Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(7): 1218-1236.]



- [11] Shang W L, Xu S H, Li X G, et al. 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*, 2023, 152: 106228.
- [12] 梁俊红, 孙宝亮. 泥质岩成岩作用中的黏土矿物研究[J]. *地质找矿论丛*, 2016, 31(4): 543-549. [Liang Junhong, Sun Baoliang. Research on clay minerals during diagenesis of argillaceous rock[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2016, 31(4): 543-549.]
- [13] 窦立荣, 李大伟, 温志新, 等. 全球油气资源评价历程及展望[J]. *石油学报*, 2022, 43(8): 1035-1048. [Dou Lirong, Li Dawei, Wen Zhixin, et al. History and outlook of global oil and gas resources evaluation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(8): 1035-1048.]
- [14] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 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*, 2003, 77(2): 194-202. [He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan Large igneous province: New evidence from stratigraphic records[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(2): 194-202.]
- [15] 徐安娜, 汪泽成, 江兴福, 等. 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*, 2014, 34(4): 37-43. [Xu Anna, Wang Zecheng, Jiang Xingfu, et al. Morphological characteristics of platform margins along the Kaijiang-Liangping Trough and their influences on reservoir development in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(4): 37-43.]
- [16] 冯冲, 邹华耀, 郭彤楼, 等. 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*, 2015, 22(6): 1-4. [Feng Chong, Zou Huayao, Guo Tonglou, et al. Development mechanism of Permian-Triassic reef shoal reservoir in northeastern Sichuan Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2015, 22(6): 1-4.]
- [17] 田野. 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), 2018. [Tian Ye. Lithofacies palaeogeography of the Upper Permian Wu Jiaping Period in the Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.]
- [18] 张本健, 王宇峰, 裴森奇, 等. 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*, 2019, 30(12): 1709-1720. [Zhang Benjian, Wang Yufeng, Pei Senqi, et al. Sedimentary evolution of the Upper Permian Wujiaping Formation in the northwestern Sichuan[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(12): 1709-1720.]
- [19] 曾琪, 胡欣, 屈海洲, 等. 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*, 2020, 43(4): 33-47. [Zeng Qi, Hu Xin, Qu Haizhou, et al. 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*, 2020, 43(4): 33-47.]
- [20] 王兴志, 李博, 杨西燕, 等. 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*, 2021, 48(3): 562-574. [Wang Xingzhi, Li Bo, Yang Xiyan, et al. 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*, 2021, 48(3): 562-574.]
- [21] 钟原, 杨跃明, 文龙, 等. 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*, 2021, 48(1): 81-93. [Zhong Yuan, Yang Yueming, Wen Long, et al. 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*, 2021, 48(1): 81-93.]
- [22] 梁新权, 周云, 蒋英, 等. 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*, 2013, 29(10): 3592-3606. [Liang Xinquan, Zhou Yun, Jiang Ying, et al. Difference of sedimentary response to Dongwumovement: 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*, 2013, 29(10): 3592-3606.]
- [23] 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 等. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. *地质论评*, 1988, 34(1): 11-24. [Luo Zhili, Jin Yizhong, Zhu Kuiyu, et al. On Emei taphrogenesis of the Upper Yangtze platform[J]. *Geological Review*, 1988, 34(1): 11-24.]
- [24] 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 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*, 1999, 24(1): 1-12. [Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. South China defined as part of tethyan archipelagic ocean system[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(1): 1-12.]

- [25]罗志立, 孙玮, 韩建辉, 等. 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, 2012, 19(6): 144-154. [Luo Zhili, Sun Wei, Han Jianhui, et al. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in Middle-Upper Yangtze area[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 144-154.]
- [26]李宏博, 朱江. 峨眉山玄武岩与茅口组灰岩的接触关系: 对峨眉山地幔柱动力学模型的指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 571-579. [Li Hongbo, Zhu Jiang. Contact Between the Emeishan Basalt and Maokou Formation: Implication for the Geodynamic Model of the Emeishan Mantle Plume[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 571-579.]
- [27]罗志立, 雍自权, 刘树根, 等. “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, 2004, 25(1): 1-7. [Luo Zhili, Yong Ziquan, Liu Shugen, et al. Divergent role of "Emei Tafrogeny" on Yangtze Palaeoslab and Tarim Palaeoslab and its significance in geoscience[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(1): 1-7.]
- [28]陈维涛, 周瑶琪, 马永生, 等. 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, 2007, 81(11): 1518-1525. [Chen Weitao, Zhou Yaoqi, Ma Yongsheng, et al. The knowledge on the existence and nature of the Dongwu movement in the Longmen Mountain area[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1518-1525.]
- [29]Su W, Hu S Y, Jiang Q C, et al. 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, 2020, 35(4): 108.
- [30]张晗, 黄虎, 侯明才. 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, 2020, 42(1): 36-48. [Zhang Han, Huang Hu, Hou Mingcai. 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, 2020, 42(1): 36-48.]
- [31]杨雨, 谢继容, 赵路子, 等. 四川盆地茅口组滩相孔隙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, 2021, 41(2): 1-9. [Yang Yu, Xie Jirong, Zhao Luzi, et al. 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, 2021, 41(2): 1-9.]
- [32]黄思静. 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, 1992, 12(4): 74-79. [Huang Sijing. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals[J]. Mineralogy and Petrology, 1992, 12(4): 74-79.]
- [33]黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 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, 2008, 33(1): 26-34. [Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, et al. 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, 2008, 33(1): 26-34.]
- [34]陈倩, 宋文磊, 杨金昆, 等. 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, 2021, 40(2): 345-368. [Chen Qian, Song Wenlei, Yang Jinkun, et al. Principle of automated mineral quantitative analysis system and its application in petrology and mineralogy: An example from Tescan TIMA[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(2): 345-368.]
- [35]李双应, 金福全, 王道轩. 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, 1995, 17(1): 55-62, 33. [Li Shuangying, Jin Fuquan, Wang Daoxuan. Geochemical characteristics of carbonate rock diagenesis[J]. Experimental Petroleum Geology, 1995, 17(1): 55-62, 33.]
- [36]刘宏, 马腾, 谭秀成, 等. 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, 2016, 43(6): 916-927. [Liu Hong, Ma Teng, Tan Xiucheng, et al. 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, 2016, 43(6): 916-927.]
- [37]刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 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, 2016, 36(3): 14-21. [Liu Wei, Huang Qingyu, Wang Kun, et al. Characteristics of hydrothermal activity in the Tarim Basin and its reworking effect on carbonate reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(3): 14-21.]

- [38]朱东亚, 胡文瑄, 张学丰, 等. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 57-62. [Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, et al. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe oilfield[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 28(5): 57-62.]
- [39]Kramer W, Weatherall G, Offler R. Origin and correlation of tuffs in the Permian Newcastle and Wollombi Coal Measures, NSW, Australia, using chemical fingerprinting[J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 47(2): 115-135.
- [40]蒋宜勤, 柳益群, 杨召, 等. 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, 2015, 42(6): 741-749. [Jiang Yiqin, Liu Yiqun, Yang Zhao, et al. Characteristics and origin of tuff-type tight oil in Jimusar Depression, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 741-749.]
- [41]常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 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, 2009, 55(1): 91-99. [Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 91-99.]
- [42]张学丰, 胡文瑄, 张军涛, 等. 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, 2008, 15(2): 80-89. [Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, et al. Geochemical analyses on dolomitizing fluids of Lower Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 80-89.]
- [43]Mazzini A, Ivanov M K, Parnell J, et al. Methane-related authigenic carbonates from the Black Sea: Geochemical characterisation and relation to seeping fluids[J]. Marine Geology, 2004, 212(1/2/3/4): 153-181.
- [44]Johannesson K H, Palmore C D, Fackrell J, et al. Rare earth element behavior during groundwater-seawater mixing along the Kona Coast of Hawaii[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017, 198: 229-258.
- [45]郑荣才, 刘合年, 吴蕾, 等. 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, 2012, 28(3): 961-970. [Zheng Rongcai, Liu Henian, Wu Lei, et al. Geochemical characteristics and diagenetic fluid of the Callovian-Oxfordian carbonate reservoirs in Amu Darya Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 961-970.]
- [46]Xiang F, Yu X T, Huang H X, et al. Mineralogical characterization and diagenetic history of Permian marine tuffaceous deposits in Guangyuan area, northern Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 104744.
- [47]倪善芹, 侯泉林, 王安建, 等. 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, 2010, 84(10): 1510-1516. [Ni Shanqin, Hou Quanlin, Wang Anjian, et al. 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, 2010, 84(10): 1510-1516.]
- [48]赵彦彦, 李三忠, 李达, 等. 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, 2019, 43(1): 141-167. [Zhao Yanyan, Li Sanzhong, Li Da, et al. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(1): 141-167.]
- [49]Lawrence M G, Greig A, Collerson K D, et al. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways[J]. Aquatic Geochemistry, 2006, 12(1): 39-72.
- [50]冯轲, 徐胜林, 陈洪德, 等. 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, 2018, 37(5): 659-670. [Feng Ke, Xu Shenglin, Chen Hongde, et al. Genesis of the Middle Permian dolomite in the southwestern Sichuan Basin: Evidence from strontium isotope and rare earth elements[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 659-670.]
- [51]王宇航, 朱园园, 黄建东, 等. 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, 2018, 33(9): 922-932. [Wang Yuhang, Zhu Yuanyuan, Huang Jiandong, et al. Application of rare earth elements of the marine carbonate rocks in paleoenvironmental researches[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(9): 922-932.]
- [52]胡忠贵, 郑荣才, 胡九珍, 等. 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, 2009, 83(6): 782-790. [Hu Zhonggui, Zheng Rongcai, Hu Jiuzhen, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements of Huanglong Formation dolomites reservoirs in eastern Sichuan-northern Chongqing area[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 782-790.]
- [53]黄思静, 石和, 张萌, 等. 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, 2001, 19(4): 481-487. [Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, et al. Strontium isotope evolution and global sea-level changes of Carboniferous and Permian marine carbonate, Upper Yangtze Platform[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 481-487.]

- [54]黄思静, 刘树根, 李国蓉, 等. 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), 2004, 31(1): 1-7. [Huang Sijing, Liu Shugen, Li Guorong, et al. 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), 2004, 31(1): 1-7.]
- [55]胡作维, 黄思静, 王春梅, 等. 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, 2009, 24(2): 160-165. [Hu Zuwei, Huang Sijing, Wang Chunmei, et al. Application of strontium isotope geochemistry to the oil and gas reservoir diagenesis research[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2009, 24(2): 160-165.]
- [56]潘立银, 郝毅, 梁峰, 等. 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, 2022, 43(2): 223-233. [Pan Liyin, Hao Yi, Liang Feng, et al. 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, 2022, 43(2): 223-233.]
- [57]屈红军, 汪立, 关利群, 等. 上扬子北部二叠系锶同位素演化特征及地质意义[J/OL]. 地球科学. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180619.0858.002.html>. [Qu Hongjun, Wang Li, Guan Liqun, et al. Strontium isotopic evolution characteristics and its geological significance of Permian in the northern Upper Yangtze Region[J/OL]. Earth Science. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180619.0858.002.html>.]
- [58]翟如一. 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), 2020. [Zhai Ruyi. 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), 2020.]
- [59]王晓峰, 熊波, 戚戎辉, 等. 滇东北昭通地区峨眉山玄武岩钕—锶—铅同位素特征: 峨眉山幔柱源区性质与 Rodinia 超大陆事件的耦合关系[J]. 地质通报, 2021, 40(7): 1084-1093. [Wang Xiaofeng, Xiong Bo, Qi Ronghui, et al. 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, 2021, 40(7): 1084-1093.]
- [60]姚素珠, 董宜宝. 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, 1988, 15(3): 26-31. [Yao Suzhu, Dong Yibao. Strontium isotopic ratios in basic-ultrabasic layered rocks of Panxi area, Sichuan province[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1988, 15(3): 26-31.]
- [61]顾长光. 浅论粘土矿物的脱水机理与热分析[J]. 贵州地质, 1990, 7(3): 243-251. [Gu Changguang. A discussion on dewatering mechanism of clay minerals and heat analysis[J]. Guizhou Geology, 1990, 7(3): 243-251.]
- [62]张帅, 柳益群, 焦鑫, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷中二叠统芦苇沟组云质岩沉积环境及白云石成因探讨[J]. 古地理学报, 2018, 20(1): 33-48. [Zhang Shuai, Liu Yiqun, Jiao Xin, et al. Sedimentary environment and Formation mechanism of dolomitic rocks in the Middle Permian Lucaogou Formation Jimusar Depression, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(1): 33-48.]
- [63] Lei H, Huang W H, Jiang Q C, et al. 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, 2022, 218: 111014.
- [64] Lu F F, Tan X C, Xiao D, et al. 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, 2023, 454: 106451.
- [65] Du Y, Wang X Z, Tang R F, et al. Extraordinarily high organic matter enrichment in Upper Permian Wujiaping Formation in the Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin[J]. Energies, 2023, 16(1): 349.
- [66] Li R, Xiong Z F, Wang Z C, et al. Lithofacies, mineralogy, and pore characteristics of Permian marine tuffaceous rocks in the Sichuan Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1054276.
- [67] Jiao X, Liu Y Q, Yang W, et al. Microcrystalline dolomite in a Middle Permian volcanic lake: Insights on primary dolomite Formation in a non - evaporitic environment[J]. Sedimentology, 2023, 70(1): 48-77.
- [68] McArthur J M, Howarth R J, Shields G A, et al. Strontium isotope stratigraphy[J]. Geologic Time Scale 2020, 2020, 1: 211-238.



- [69]田和明, 代世峰, 李大华, 等. 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, 2014, 60(1): 169-177. [Tian Heming, Dai Shifeng, Li Dahua, et al. Geochemical Features of the Late Permian tuff in Nanchuan District, Chongqing, southwestern China[J]. Geological Review, 2014, 60(1): 169-177.]
- [70]向坤鹏, 安亚运, 贺永忠, 等. 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, 2019, 65(2): 319-334. [Xiang Kunpeng, An Yayun, He Yongzhong, et al. 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, 2019, 65(2): 319-334.]

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

LI Yuejie, YUAN Haifeng, XU Guosheng, XIAO Qinren, KUANG Mingzhi, XU Ting, YE Zixu

State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering (Chengdu University of Technology), Chengdu University of Technology College of Energy, Chengdu, Sichuan 610059, China

**Abstract:** [Objective] At present, the mechanism of iron dolomite genesis for the Maosan-Wu section in north-central Sichuan is not clear. [Methods] Based on the rock-mineral characteristics of the Maosan-Wu section, we combined rock TIMA 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-Wu section 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 Section 3 and Wu Section 1 show extremely high Fe content ( $10,678.40 \times 10^{-6}$ ), high Mn content ( $822.95 \times 10^{-6}$ ), Si content ( $1,929.81 \times 10^{-6}$ ), Al content ( $394.11 \times 10^{-6}$ ), and high Na+K content ( $362.38 \times 10^{-6}$ ), 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-Wu section is  $245.36 \pm 1.08$  Ma, and the dolomitization mainly occurred in the Late Permian to Early Triassic. [Conclusion] The source of dolomitization fluids in the powdery-to-fine crystalline dolomite of the Maosan-Wu section is the dewatering of clay minerals in the clayey sedimentary tuff and tuffaceous mudstone of the overlying Wu section. 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 Wu Sections 1 and 3 to form iron dolomite using the seawater residual from the Maokou to Wujiaping formations during the same period as the carrier.

**Keywords:** ankerite; Permian; Maosan section; Wu section; north-central Sichuan

