

川东北普光地区下三叠统蒸发岩沉积特征与演化 及其对钾盐矿形成的控制作用

左璠璠¹⁾, 张永生^{1, 2, 3)*}, 苏 奎¹⁾, 桂宝玲¹⁾, 邢恩袁¹⁾,
牛新生¹⁾, 彭 渊¹⁾, 商雯君¹⁾

1)中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

2)中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3)中国地质科学院 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100037

摘 要: 四川盆地中一下三叠统地层中发育大量膏-盐沉积, 其中与石盐共伴生杂卤石(被命名为“新型杂卤石钾盐矿”)的大量发现和重新评估引起了近年来的广泛关注。但当前对此类杂卤石的研究主要集中在其矿物发育特征与成因类型等方面, 对于其发育地层的沉积特征与演化规律的精细剖析及其对杂卤石形成的控制作用研究较少。本文利用川宣地 1 井连续取心的目的层段岩心资料进行了沉积微相和高精度层序地层学分析。共识别出 14 种沉积微相类型, 并将其划分为 6 个微相组合, 依次代表从局限台地到蒸发台地不同的沉积相带及能量、环境特征。在此基础上根据沉积微相的纵向发育演化、地层厚度以及典型诊断界面等信息, 划分出 4 个四级沉积层序以及其内部的多个五级旋回。研究认为川东北地区与石盐共伴生的原生杂卤石是明显受不同级别海平面波动影响和控制的, 主要发育在四级层序海退末期与五级旋回海侵的叠加时期, 前者的强蒸发条件为杂卤石的形成提供了重要基础, 但后者带来的海水补给则是其形成的必要条件。

关键词: 沉积微相; 层序地层; 沉积控矿; 杂卤石; 下三叠统; 川东北

中图分类号: P619.211 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.062401

Sedimentary Characteristics and Evolution of the Lower Triassic Evaporite and Its Control on the Formation of Potassium Ore in the Puguang Area, Northeastern Sichuan Basin

ZUO Fanfan¹⁾, ZHANG Yongsheng^{1, 2, 3)*}, SU Kui¹⁾, GUI Baoling¹⁾, XING Enyuan¹⁾,
NIU Xinsheng¹⁾, PENG Yuan¹⁾, SHANG Wenjun¹⁾

1) MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) MNR SinoProbe Laboratory, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Thick layers of anhydrite and salt are deposited in the Middle and Lower Triassic strata in the Sichuan Basin. The rediscovery and transvaluation of polyhalite associated with salt, which has been called “a new type of polyhalite potassium ore”, has brought widespread attention to this mineral in recent years. However, research on this type of polyhalite has focused mainly on the aspects, such as the mineral development characteristics and genetic types, etc. Studies focusing on high-resolution analyses of the sedimentary characteristics and evolution

本文由国家重点研发计划项目“重点含盐盆地钾盐成矿规律、勘查技术与增储示范”所属课题“川东北海相新型杂卤石钾盐矿成矿规律、勘查技术与增储示范”(编号: 2023YFC2906503)、中国地质调查局地质调查二级项目“四川盆地东北部锂钾资源综合调查评价”(编号: DD20190172)和中国地质调查局地质调查三级项目“我国重要含盐盆地钾盐重点调查区区块优选与综合研究”(编号: DD20230296)联合资助。

收稿日期: 2024-05-13; 改回日期: 2024-06-11; 网络首发日期: 2024-06-26。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 左璠璠, 女, 1987 年生。博士, 助理研究员。主要从事盐湖沉积学、同位素地球化学、化学地层学研究。

E-mail: fanfan.zuo@hotmail.com。

*通信作者: 张永生, 男, 1963 年生。博士, 研究员, 博士生导师。主要从事盐类矿床与“油钾兼探”研究。E-mail: zys_601@126.com。

of the surrounding strata and its control on the formation of polyhalite are rare. Therefore, in this study, microfacies and high-precision sequence stratigraphy analyses were carried out using core data of the continuous coring target interval of well CXD1. Fourteen microfacies types were identified and divided into six microfacies associations representing different sedimentary facies zones with different energy and environmental characteristics ranging from restricted to evaporative platform. On this basis, according to the vertical development of microfacies, stratigraphic thickness and typical diagnostic interfaces, four fourth-order sedimentary sequences and multiple fifth-order cycles within them were defined. The results implied that the primary polyhalite associated with salt in the northeast Sichuan Basin was obviously affected and controlled by sea level fluctuations. Specifically, it developed mainly in the superposition period between the end of regressions in the fourth-order sequences and transgressions of the fifth-order cycles. The evaporative condition in the former provided an important basis for the formation of polyhalite; however, the external seawater replenishment provided by the latter was the necessary condition.

Key words: microfacies; sequences stratigraphy; sedimentary control on mineralization; polyhalite; Lower Triassic; northeastern Sichuan Basin

在二叠纪末的生物灭绝事件之后,早—中三叠世时期的四川盆地在低纬度季风的影响下整体处于一个干旱炎热的气候条件(Fraiser et al., 2007; Twitchett, 2007; Retallack et al., 2011; Retallack, 2013)。这样的气候条件会对浅海沉积环境的沉积特征产生巨大影响。当处于干旱炎热的气候条件下,加上区域地质过程和海平面波动的影响,厚层的蒸发岩可能在浅海台地的潮间-潮上带大量发育(袁见齐, 1980; Kendall, 1992; 唐敏等, 2009; Warren, 2010)。四川盆地在三叠世海退背景的环境下,沉积了大面积的浅水碳酸盐岩与蒸发岩(李亚文等, 1998; 林耀庭等, 2001; 郑绵平等, 2010; 龚大兴, 2016),并在中—下三叠统厚层蒸发岩系中发育多套含盐层系(蔡克勤等, 1986; 林耀庭等, 2008; 郑绵平等, 2010, 2018)。

钾盐是我国最紧缺的矿产资源之一,其作为植物生长的必要物质,对于农业的发展极其重要,因而备受重视。在上述的沉积环境和气候条件下,四川盆地极有可能成为重要的成盐聚钾盆地,是我国钾盐勘查的重点区域和层位(郑绵平等, 2010)。在前期基础钾盐勘查工作和新一轮钾盐找矿工作的推动下,已发现杂卤石是该区域的主要钾盐矿物(李亚文等, 1987; 林耀庭等, 1998; 王淑丽等, 2014; 郑绵平等, 2018)。杂卤石($K_2Ca_2Mg[SO_4]_4 \cdot 2H_2O$)是最早由德国化学家Stromeyer在奥地利发现的一种硫酸盐型钾盐矿物,以前通常被视为重要的找可溶性钾盐的标志(侯学文等, 2020; 张雄等, 2022)。近年来的研究表明,川东北普光地区下三叠统与石盐共生的碎屑颗粒杂卤石可以通过水溶法进行有效开采利用,成为一种优质缓释型钾肥,具有重要的经济价值,并被命名为“新型杂卤石钾盐矿”(郑绵平等, 2018; 张永生等, 2021)。众多学者通过对杂卤石宏观特征、矿物形态以及地球化学指标等的分析,认为川东北的杂卤石主要为准同生或原生杂卤石,并根

据锶、硫、钙等同位素的分析判断其物源主要为海水(郑绵平等, 2018; 仲佳爱等, 2018; Zhong et al., 2020; Shang et al., 2021a, b; 商雯君等, 2021; 张永生等, 2021)。但针对于有杂卤石发育的下三叠统地层的沉积演化精细分析及其对杂卤石形成的具体影响和控制作用的研究则相对匮乏,进而阻碍了杂卤石成矿机制的建立及完善。

本研究拟在前人工作的基础上,利用最新的钾盐勘探井岩心资料,通过精细的沉积学分析,识别出目的层段的不同沉积微相及微相组合类型,并在此基础上基于高精度的层序地层学分析,探讨沉积演化对杂卤石形成的控制作用,建立该区域的杂卤石形成模式图,为杂卤石形成机制的解密提供重要的证据,并为我国海相钾盐找矿工作及下一步的钾盐勘探提供参考。

1 地质背景

研究区位于四川盆地东北部宣汉盐盆,构造上属于上扬子古陆块的西北缘(图1)。三叠纪早期,上扬子古陆块地势上总体为西北高、东南低,四川盆地在此基础上形成了一套由西向东的滨海碎屑岩—浅水碳酸盐岩沉积(何登发等, 2011)。早三叠世嘉陵江期,地壳活动强烈,四川盆地处于西高东低向东高西低转换阶段,盆地东部水下隆起逐渐隆升,海水变浅,研究区所在的川东北地区也成为相对封闭的凹陷,沉积由碳酸盐岩主导逐渐转变成蒸发岩主导(赵艳军等, 2015; 黄涵宇等, 2019)。至中三叠世,东南部江南古陆强烈抬升,西北部龙门山古陆下沉,使台地地势转变为东南高、西北低,并最终迫使海水向西撤出扬子古陆(蔡克勤等, 1986; 冯增昭等, 1997),四川盆地内部在此大构造背景下,东部大面积抬升,泸州—开江古隆起明显上升,两侧的拗陷则因强烈的下陷形成百余米的岩盐沉积。中三叠世末,海水全部退出,四川盆地结束了海相沉积的历史(何登发等, 2011)。

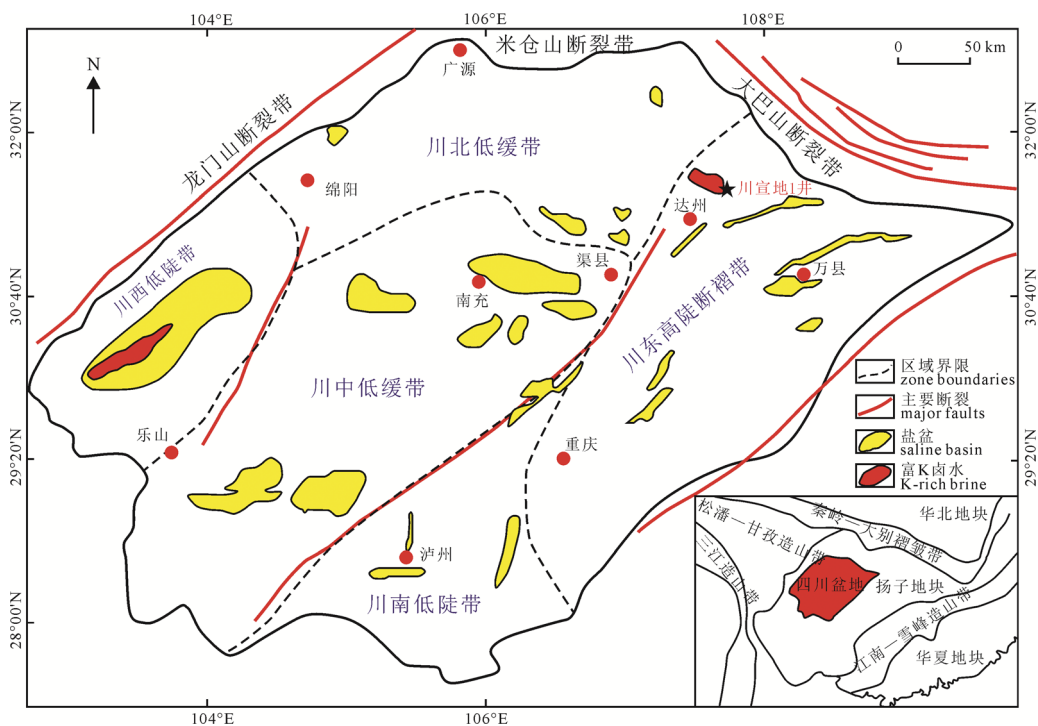


图1 四川盆地地质简图(据黄涵宇等, 2019; Gong et al., 2021; Shang et al., 2021a)

Fig. 1 Simplified regional geological map of Sichuan Basin
(from HUANG et al., 2019; Gong et al., 2021; Shang et al., 2021a)

四川盆地的含盐地层主要出露于中一下三叠统, 其中早三叠世嘉陵江组和中三叠世雷口坡组共发育 6 个成盐期。本研究目的层段嘉四-五段属于上述成盐期之一, 且杂卤石广泛分布其中(李亚文等, 1998; 林耀庭等, 2001, 2008; 龚大兴等, 2015; 郑绵平等, 2018), 是开展四川盆地海相钾盐成因研究及沉积控矿分析的首选层位。

2 样品和实验方法

本次研究所用的样品来自川宣地 1 井钻孔岩心 (2 880~3 160 m)。通过开展宏观和微观的观察和描述为相分析和沉积环境解释提供了重要证据。首先, 通过全段岩心的宏观观察和描述为进一步微观分析样品的选取提供了重要的岩石学和沉积学信息。基于上述信息, 192 个样品被采集并制作了镜下薄片, 取样间隔平均为 1.5 m, 并在杂卤石发育的重点层段进行了加密取样(最小取样间隔为 0.1 m)。微相的划分参考了 Dunham(1962)的方案。相带划分和沉积模型的建立依托于 Wilson(1975)和 Flügel(2004)的经典模式。相分析主要包括基质和颗粒、沉积结构、化石类型、岩石类型以及标准相带等。

本文对于层序地层解释主要依据沉积微相类型的垂向演化、地层厚度的变化以及典型的诊断界面, 并重点参考了 Handford et al.(1992)提出的与本文的研究地层相似的干旱气候背景下碎屑岩-蒸发岩-碳酸盐岩共伴生地层的沉积模式。同时, 考虑到本研究

主要依据钻井资料进行层序的划分, 相应层序地层术语主要依据 Strasser et al.(1999)的方案, 采用“海侵沉积”和“高位沉积”代替常规采用的“海侵体系域”和“高位体系域”(Vail et al., 1991)。

3 沉积微相及相组合分析

共识别出 14 种沉积微相类型(MF), 不同的微相类型具体特征已在表 1 中列出并在图 4 和图 5 中进行了说明。所有的沉积微相类型被归于 6 个沉积微相组合(MA)中, 代表了从局限台地到蒸发台地范围内的不同相带, 指示不同的沉积环境。

MA1: 局限台地台内滩沉积

描述: 该微相组合主要发育在嘉四-五段的上部(图 2), 整体表现为厚层块状, 层厚与膏盐岩或与其互层的云岩相比较薄, 范围在 1.9~5.8 m。沉积微相类型为块状残余颗粒含云/云质灰岩(MF1, 表 1), 并表现出与 MF2 互层的发育规律, 岩心上可见上述两种微相清晰的接触层面(图 3a)。

特征与解释: 因该沉积相在与蒸发台地膏盐岩相邻的厚层白云岩层中作为夹层出现, 因此从沉积相的过渡关系上可确定其属于局限台地沉积环境(雷卞军等, 2006; Warren, 2006)。但由于发育较多生屑和其他难以辨别的碎屑颗粒(图 4a), 说明其发育在局限台地中能量相对较高与外海相对连通的地方, 即局限台地碳酸盐颗粒滩沉积(雷卞军等, 2006; 林耀庭等, 2008; 胡明毅等, 2010)。

表 1 川东北普光地区下三叠统沉积微相类型
Table 1 Types of sedimentary microfacies of Lower Triassic in Puguang area, northeast Sichuan Basin

微相组合	微相编号	微相名称	特征
MA1: 局限台地台内滩	MF1	块状残余颗粒含灰/云质灰岩	大部分原始生物形态清晰可见,如腕足类壳体,但腔体和基质已发生明显的簇状嵌晶重结晶作用,壳体或颗粒边界被重结晶的程度相对较弱(图 4a);部分已整体被重结晶或白云石化,仅可见颗粒原始形态轮廓,颗粒边界和内部均发生彻底重结晶作用。
	MF2	块状残余颗粒含灰/灰质云岩	部分层段原始颗粒结构已不能识别,但颗粒和基质的残影模糊可见,整体为均质的含灰/灰质云岩,颗粒大小约 15~25 μm,并可见因白云岩与灰岩比例变化导致的韵律变化;部分层段颗粒或残余颗粒结构明显,颗粒主要为球粒(图 4b),颗粒内部为暗色细-粉晶白云石或方解石颗粒,基质更多为浅色重结晶他形细-中晶白云石。
MA2: 局限台地灰-云坪	MF3	块状含硬石膏脉细粉晶白云岩	灰色-深灰色的白云岩可见灰白色-浅灰色的硬石膏脉穿插(图 4c),硬石膏脉多数较细窄,部分则以不规则的形态穿插在白云岩中,局部表现为斑点状分布特征。镜下主体成分为均质的细粉晶白云石,可见因泥质含量变化导致的结核状或似颗粒状结构。
	MF4	块状含云膏岩/云质膏岩	硬石膏岩与白云岩相互交错穿插,通常表现为结核状、指状、岩脉状等形式,并可见纹层揉皱现象。硬石膏多为颗粒状,相互挤压在一起,可见压溶结构;局部可见条状硬石膏分布在泥质/云质基质中(图 4d),属于原始石膏晶体脱水形成硬石膏保留的假晶结构。
MA3: 局限-蒸发台地膏-云坪过渡带	MF5	薄互层状膏-云岩	硬石膏岩与白云岩呈薄互层,可见平行层理构造,层理厚度为毫米-厘米级,通常以其中某一种成分为岩石主体,另一种成分则以更薄的薄层与之平行发育。镜下通常表现为顺层分布的硬石膏层与颜色较深的细-粉晶白云岩互层(图 4e),可见指示石膏假晶的条状和放射状硬石膏普遍发育。
	MF6	薄层状含菱硬石膏岩	灰色至深灰色含菱硬石膏岩,多数硬石膏表现为等轴粒状,菱镁矿与粒状硬石膏共生,菱镁矿含量为 1%~28%,但随菱镁矿含量变化导致宏观上表现为薄层状结构,且多为毫米级薄纹层,且菱镁矿含量偏高时,硬石膏颗粒碎小(图 4f)。局部可见硬石膏颗粒表现为放射状特征,菱镁矿则作为基质充填在硬石膏颗粒边界。此外,还可见部分厘米级含泥质结核或团块分布在硬石膏岩中。
MA5-1: 蒸发台地膏湖	MF7	硬石膏岩(定向/非定向排列)	宏观上新鲜截面表现为浅灰色-灰色,也可见薄纹层结构发育,镜下硬石膏颗粒表现为不规则粒状或片状。在嘉四-五上段,主要表现为定向紧密排列的片状,具有明显的顺层分布特征(图 4g);而嘉四-五下段的硬石膏岩则主要为不规则等轴粒状,上述两种结构都伴有明显的颗粒间压溶现象。
	MF8	块状含盐/盐质膏岩	宏观上表现为块状或薄纹层状硬石膏岩(同 MF7)中包含不规则形状团块或薄层状岩盐,局部也可见硬石膏岩被条带状岩盐切割现象。微观上,硬石膏岩多表现为顺层分布特征,仅局部顺层性不是很明显,颗粒边界有明显压溶现象(图 4h);此外,局部也可见放射状和针状硬石膏晶体。
MA5-2: 蒸发台地杂卤石沉积期膏湖	MF9	(含盐)硬石膏-杂卤石岩	宏观上表现为灰白色块状或薄层状,可见平行层理构造,仅发育在上矿层段,可见顺层面或不规则的盐脉或溶蚀孔洞发育,盐含量在 2%~22%之间,且杂卤石和硬石膏含量呈现一定的韵律性变化。多数含一定比例的菱镁矿,含量范围为 2%~8%。微观上可见不同类型的杂卤石晶体,如粒状、糜棱状、集合体状、放射状等,但以糜棱状和集合体状为主(图 4i),粒状多发育在集合体的边缘或者作为裂隙的充填,可见明显的聚片双晶,放射状仅局部可见。
	MF10	盐质硬石膏-杂卤石岩	块状硬石膏-杂卤石岩被盐脉穿插切割,但被切割的原始岩石形态及边界仍清晰可见,且可拼接复原,但在岩盐含量较高的部位,可见被切割的颗粒碎屑漂浮在岩盐基质中(图 4j)。在上矿层,整体以杂卤石为主,硬石膏含量较少,也可见少量菱镁矿,含量在 2%~15%之间,在下矿层硬石膏比例明显增加。杂卤石微观特征多数与 MF9 相同,局部可见纤维状或花瓣状杂卤石。
MA6-1: 蒸发台地盐湖	MF11	膏质岩盐	硬石膏颗粒以粒屑的形式漂浮在岩盐基质中,粒屑大小不一,但在局部多以相似粒径的颗粒出现,偶尔伴生大个颗粒,具有一定的磨圆性,岩盐基质多表现为黑色。微观上,团块状硬石膏颗粒多为粒状结构(图 4k),但在团块内部可见明显的压溶及揉皱现象,局部可见放射状硬石膏颗粒组成的粒屑分布在石盐基质中。
	MF12	含膏岩盐	极其细小的硬石膏颗粒均匀分布在石盐基质中,肉眼下难以分辨,但石盐表面不光滑或出现瘤状特征,局部偶见较大硬石膏粒屑成层状或不规则的分布在石盐基质中;此外石盐基质可见颜色上的韵律变化,浅色和深色石盐基质以 10~50 cm 的厚度交替出现。微观上,单个硬石膏晶体或者硬石膏团块漂浮在石盐基质中,大个硬石膏团块表现出中间的硬石膏颗粒碎小,颗粒边界难以辨认,但在团块的边界颗粒较大且边界清晰。
MA6-2: 蒸发台地杂卤石沉积期盐湖	MF13	含硬石膏-杂卤石岩盐	仅在上矿层可见,硬石膏-杂卤石颗粒以极细小的粒屑均匀分布其中,外观接近纯净岩盐,局部可见顺层分布的杂卤石碎屑颗粒漂浮在石盐基质中,石盐含量最高达 90%(图 3f)。微观上在杂卤石粒屑的内部,主要表现为糜棱状,但在与石盐的接触部位,杂卤石颗粒多表现为完整的或较大的粒状,可见明显的聚片双晶。此外,可见完整单晶漂浮在石盐基质中,杂卤石典型微观特征(二级蓝绿干涉色、聚片双晶)清晰可见。
	MF14	硬石膏-杂卤石质岩盐	硬石膏-杂卤石颗粒以粒屑的形式漂浮在岩盐基质上,局部表现为顺层分布现象,但多数表现为大小不一的粒屑均匀分布在基质中,在上矿层,粒屑成分主要为杂卤石,硬石膏所占比例较少,在下矿层则以硬石膏为主,杂卤石含量较低。微观上整体与 MF13 相同(图 4l)。

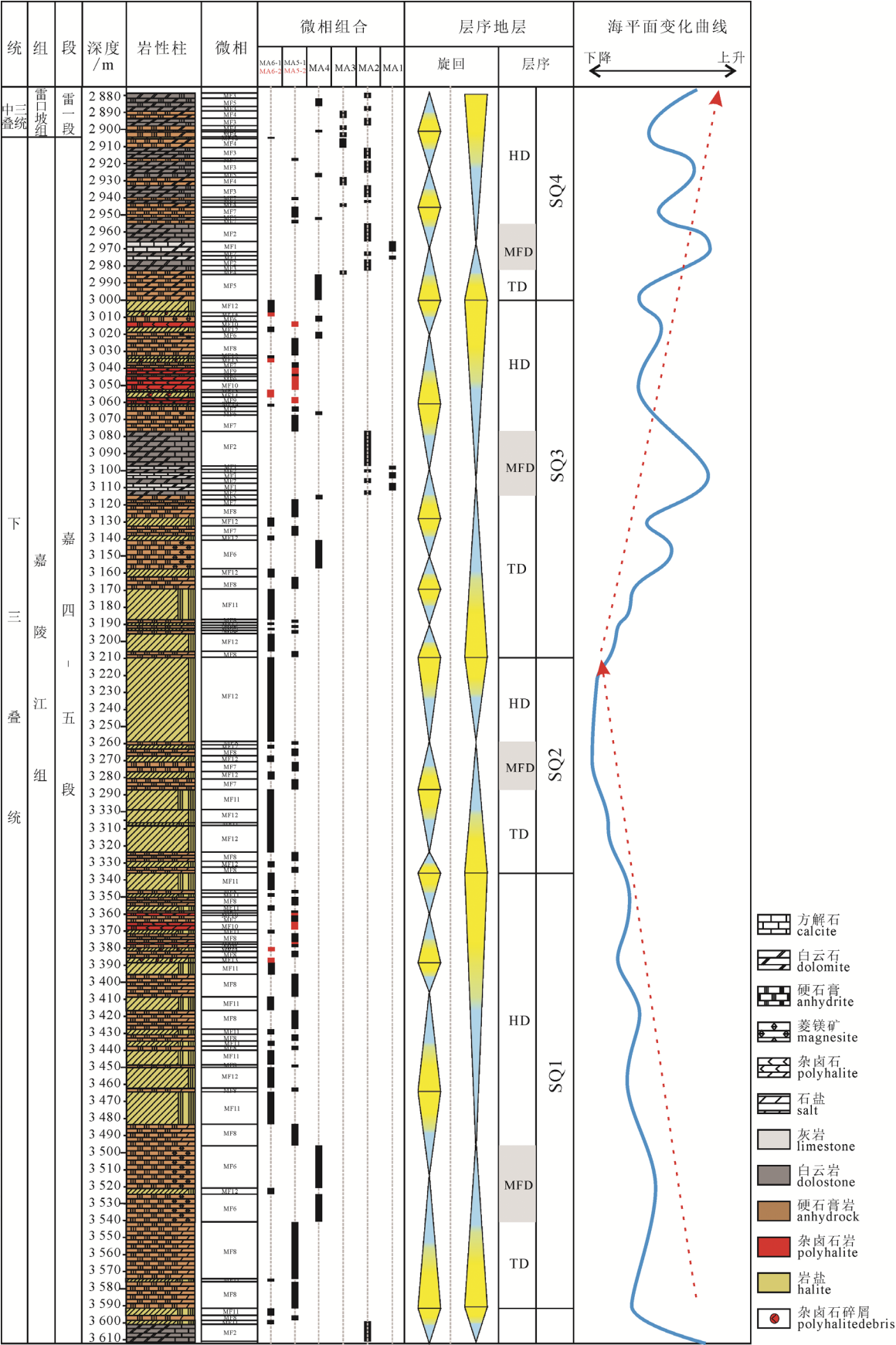
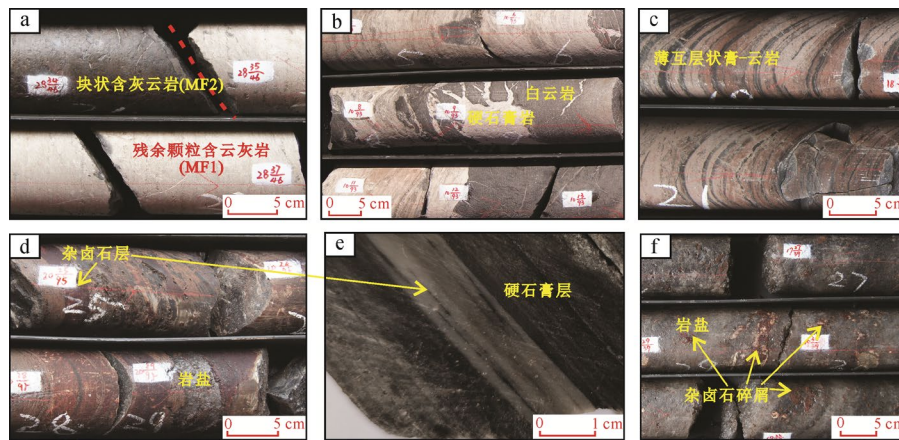


图 2 川宣地 1 井(CXD1)嘉四-五段沉积综合柱状图, 包含岩性、沉积微相、微相组合、层序地层以及海平面变化信息

Fig. 2 Integrated sedimentary log of the fourth and fifth member of Jialingjiang Formation in well CXD1 including lithology, microfacies, microfacies association, sequence stratigraphy and sea level changes

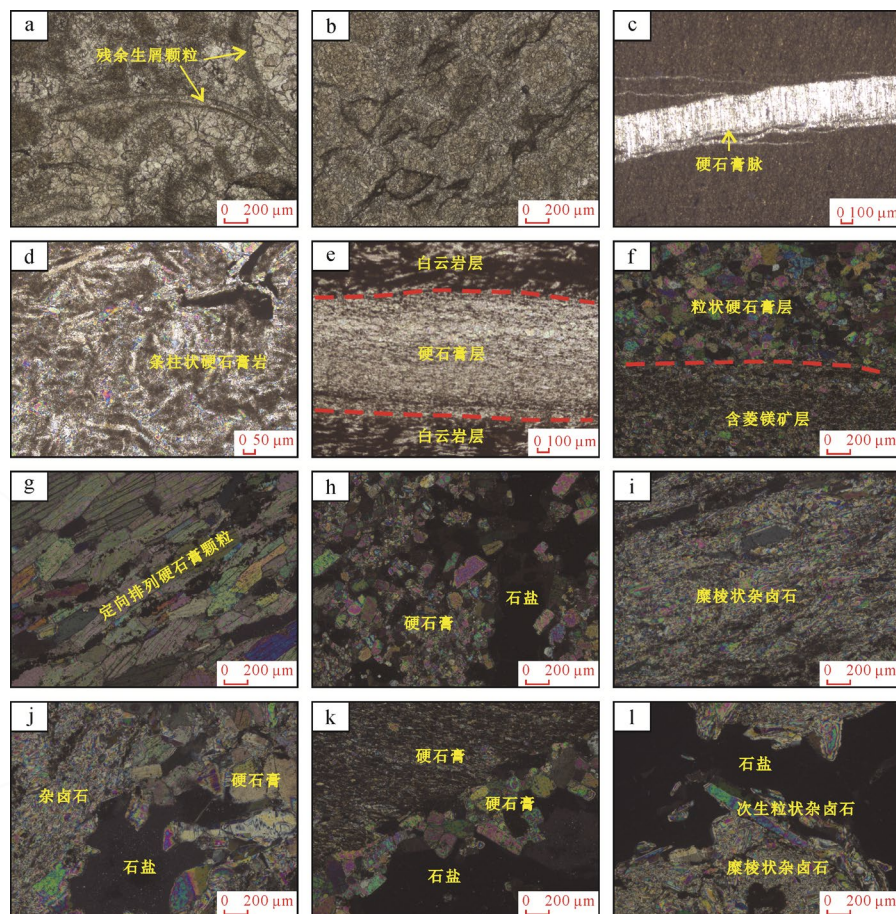


a—残余颗粒含云灰岩(MF1)与块状含灰云岩(MF2), 以及两者界面; b—块状含云膏岩/云质膏岩(MF4); c—薄互层状膏-云岩(MF5); d—盐质硬石膏-杂卤石岩(MF10), 岩心整体; e—盐质硬石膏-杂卤石岩(MF10), 岩心横斜面, 杂卤石呈层状与硬石膏和岩盐共生; f—含硬石膏-杂卤石岩盐(MF13), 杂卤石颗粒呈层状分布在岩盐基质中。

a—dolomite-bearing limestone with residual structure of bioclasts (MF1) and massive lime-bearing dolostone (MF2), showing the boundary between them; b—massive dolomite-bearing anhydrite/dolomitic anhydrite (MF4); c—thin interbedded anhydrite-dolostone (MF5); d—halitic anhydrite-polyhalite rock (MF10) of the core; e—halitic anhydrite-polyhalite rock (MF10) in cutting surface, polyhalite is stratified with anhydrite and halite; f—anhydrite-polyhalite bearing halite (MF13), with polyhalite particles distributed in the rock salt matrix as a layered manner.

图3 川宣地1井岩芯宏观特征

Fig. 3 Macroscopic characteristics of cores in well CXD1



a—块状残余颗粒含云灰岩(MF1); b—块状残余颗粒含灰/灰质云岩(MF2); c—块状含硬石膏脉细晶白云岩(MF3); d—块状含云膏岩/云质膏岩(MF4); e—薄互层状膏-云岩(MF5); f—薄层状含菱硬石膏岩(MF6); g—定向排列硬石膏岩(MF7); h—块状含盐/盐质膏岩(MF8); i—(含盐)硬石膏-杂卤石岩(MF9); j—盐质硬石膏-杂卤石岩(MF10); k—膏质岩盐(MF11); l—硬石膏-杂卤石质岩盐(MF14)。

a—massive dolomite-bearing limestone with residual structure of bioclasts (MF1); b—massive lime-bearing or calcite dolostone (MF2); c—massive crystal powder or fine-crystalline dolostone with anhydrite veins (MF3); d—massive dolomite-bearing anhydrite/dolomitic anhydrite (MF4); e—thin interbedded anhydrite-dolostone (MF5); f—thin bedded magnesite bearing anhydrite (MF6); g—anhydrite with shape preferred orientation (MF7); h—massive halite-bearing/halitic anhydrite (MF8); i—(halite-bearing) anhydrite-polyhalite rock (MF9); j—halitic anhydrite-polyhalite rock (MF10); k—anhydritic halite (MF11); l—anhydritic-polyhalitic halite (MF14).

图4 川宣地1井岩心镜下微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of cores in well CXD1

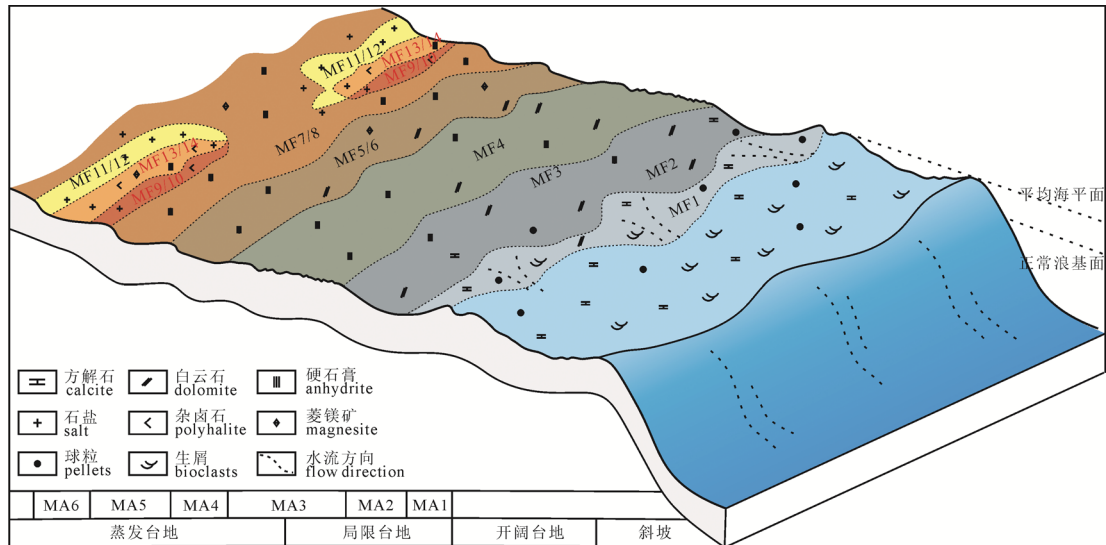


图 5 川东北地区下三叠统沉积模式图

Fig. 5 Lower Triassic sedimentary model in northeastern Sichuan Basin

MA2: 局限台地灰-云坪

描述: 该相带主要发育在嘉四-五段上部, 并向上过渡到雷口坡组底部(图 2), 厚层块状, 偶见硬石膏脉穿插其中, 层厚为 0.5~20.5 m, 由块状残余颗粒含灰/灰质云岩(MF2, 表 1)和块状含硬石膏脉细粉晶白云岩(MF3, 表 1)组成, 与 MA1 或 MA3 交替发育, 在嘉陵江组上部主要与 MA1 互层, 但在嘉陵江组与雷口坡组界限附近主要与 MA3 呈薄互层发育(图 2)。

特征与解释: 球粒的发育以及其缺少生屑的特征, 指示其发育在与外海连通较差且盐度偏高的低能局限沉积环境(Flügel, 2004; 雷卞军等, 2006; Shabafrooz et al., 2013; 龚大兴等, 2015), 结合其与 MF1 互层发育的规律特征及原始成分特征, MF2 应指示局限台地灰-云坪沉积(雷卞军等, 2006; 龚大兴等, 2015)。MF3 中硬石膏岩的侵入及其局部可见的薄水平纹层特征(图 4c), 指示局限台地潮上云坪沉积(雷卞军等, 2006)。因此, 由 MF2 和 MF3 组成的沉积微相组合 MA2 指示低能量水体环境的局限台地潮间及潮上坪沉积。

MA3: 局限-蒸发台地膏-云坪过渡带

描述: 该沉积类型主要发育在嘉四-五段顶部并向上延伸至雷口坡组底部(图 2), 主要表现为厚层块状含云/云质膏岩(MF4, 表 1)。主要发育在 MA2 与 MA4 的过渡带, 表现出与块状含硬石膏脉细粉晶白云岩(MF3)和薄互层状膏-云岩(MF5)互层。

特征与解释: 局部可见的石膏残余结构(图 4d), 指示硬石膏为石膏脱水生成(Peryt et al., 1998; Leitner et al., 2017), 硬石膏与白云石的同时发育且相互交叉, 说明其发育在限台地云坪向蒸发台地膏

湖的过渡区域(雷卞军等, 2006; 龚大兴等, 2015)。

MA4: 蒸发台地云膏质泻湖

描述: 该微相组合主要发育在嘉四-五段上部, 下部仅个别层位可见(图 2)。该组合包含薄互层状膏-云岩(MF5, 表 1)和薄层状含菱硬石膏岩(MF6, 表 1)2 种微相类型。在嘉陵江组顶部和雷口坡组底部主要与 MA3 相应的微相类型薄互层发育, 但在嘉四-五段下部的局部主要与 MA5 沉积互层, 且以厚层为主。

特征与解释: 薄层状硬石膏岩与白云岩交互, 表现出明显的水平纹层(图 3c, 4e), 且多以硬石膏为主体成分, 说明水动力能量低, 以静水沉积为主, MF5 因此指示在海平面波动比较频繁的时期, 与局限台地紧邻的蒸发台地低能泻湖沉积(雷卞军等, 2006; Warren, 2006; Shabafrooz et al., 2013; 龚大兴等, 2015)。含菱膏岩的薄纹层特征(图 4f)以及菱镁矿的发育指示与外海隔绝的低能泻湖沉积(白超等, 2022)。综上, 均发育有薄纹层结构的上述膏-云岩和含菱膏岩指示蒸发台地云-膏质泻湖沉积。

MA5-1: 蒸发台地膏湖

描述: 该沉积相带几乎贯穿在整个目的层中, 至嘉四-五段顶部开始消失(图 2)。主要由硬石膏岩(MF7, 表 1)和含盐/盐质膏岩(MF8, 表 1)组成, 可见水平纹理和厚层块状, 但不同层位厚度变化较大, 在嘉四-五底部主要与 MA4 相应的微相类型互层, 厚度较大, 最厚单层可达 33 m, 向上层厚变薄, 与代表蒸发台地盐湖沉积的微相组合(MA6)互层时, 仅一米到数米厚。

特征与解释: 通过硬石膏岩的局部定向排列特征(图 4g), 推断其是沉积早期, 颗粒未固结之前受构造应力影响所致。较纯的硬石膏岩呈团块或层状

特征指示典型的蒸发台地泻湖沉积(Schreiber et al., 2000; 雷卞军等, 2006; Shabafrooz et al., 2013), MF7 中薄纹层状硬石膏也发育在低水动力环境沉积, 因此指示近陆方向的膏质泻湖(林耀庭等, 2008; 龚大兴等, 2015)。MF8 中硬石膏与岩盐共伴生(图 4h), 且一般向上退积为蒸发台地盐湖沉积(图 2), 属于蒸发台地膏湖近盐湖方向的沉积。

MA5-2: 蒸发台地杂卤石沉积期膏湖

描述: 在川宣地 1 井中, 与杂卤石沉积有关的微相类型主要发育在 3 006.5~3 060.5 m 和 359.5~3 388.5 m 之间的“新型杂卤石钾盐矿”层段(图 2), 该沉积相带在上述两个层段均有发育, 主要包括(含盐)硬石膏-杂卤石岩(MF9, 表 1)和盐质硬石膏-杂卤石岩(MF10, 表 1), 表现为岩盐与硬石膏-杂卤石岩伴生, 前者岩盐以不规则块状或盐脉的形式发育在以硬石膏-杂卤石为主的薄层状沉积中(图 3d, 3e, 4i), 后者多数表现为较大的硬石膏-杂卤石颗粒中间夹石盐基质(图 4j)。

特征与解释: 研究区的杂卤石以原生为主(将在后文讨论中阐述), 与主体为交代成因的杂卤石不同, 应单独将其划为一种微相类型, 指示特定沉积背景下的环境和特征。结合前人对杂卤石析出条件的研究, 认为原生杂卤石是卤水浓缩到石盐沉积阶段, 积累了大量的 K^+ 和 Mg^{2+} , 当有外来 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 补给加入的情况下在盐湖中与石盐和硬石膏共伴生生成(赵德钧等, 1987; Peryt et al., 1998, 2005)。MF9 与 MF10 一般共伴生, 前者在后者之后沉积, 并发育在 MA6-2 沉积微相类型之后, 整体反应了因外来物质的加入, 从石盐沉积阶段开始有杂卤石和硬石膏析出, 但因为卤水的稀释和沉淀的进行, 石盐的析出逐渐减少, 杂卤石和硬石膏慢慢增多, 伴随逐渐海侵进入到下一膏湖沉积期(图 2)。在上矿层段, 以石盐和杂卤石沉积为主, 硬石膏伴生较少, 但在沉积的过程中偶尔可见硬石膏薄夹层。下矿层段则以硬石膏和石盐偏多, 杂卤石伴生其中, 这可能受不同时期的海水成分差异影响。李东东等(2015, 2021)通过实验研究证明当外来补给溶液中 Ca^{2+} 过量时, 就会出现石盐-硬石膏-杂卤石共同析出现象, 因此当溶液中不同离子比例发生变化时, 就会导致上述矿物比例的不同结果。综上, MF5-2 指示杂卤石沉积期蒸发台地盐湖淡化过程中演化而来的膏湖沉积。

MA6-1: 蒸发台地盐湖

描述: 该相带主要发育在嘉四-五段的中部和下部, 同时是该层段的主力沉积相类型, 主要包括膏质岩盐(MF11, 表 1)和含膏岩盐(MF12, 表 1), 整体厚度和单层厚度在所有沉积微相类型中最厚, 并

主要与 MA5 微相组合中的沉积微相类型共伴生, 共同组成蒸发台地膏-盐湖的主体沉积; 在嘉四-五段的上部, 则主要以较薄层发育在杂卤石沉积期未达到杂卤石析出条件的薄夹层。

特征与解释: 硬石膏碎屑颗粒带有一定的磨圆度均匀漂浮在岩盐基质中(图 4k), 应属于后期构造应力作用将原始沉积的石膏层破碎并与岩盐掺杂在一起而形成, 局部破碎初期仍呈条带状分布的碎屑以及在与硬石膏岩的过渡带中虽被切割、但仍可拼接复原的原始团块形态都是较好的证明。但总体上岩盐基质作为主体证明 MF11 属于蒸发台地蒸发较强时期的盐湖沉积(Warren, 2006; 龚大兴等, 2015)。MF12 中岩盐明暗交替的韵律层证明岩盐为原始沉积(Warren, 2006; Shabafrooz et al., 2013), 且最厚的单层沉积近 50 m, 是气候干旱蒸发量较大时期的盐湖沉积特征。

MA6-2: 蒸发台地杂卤石沉积期盐湖

描述: 与 MA5-2 同属于杂卤石沉积期沉积相类型, 且两者多共伴生, 都发育在上、下两个“新型杂卤石钾盐矿”层段(图 2), 由含硬石膏-杂卤石岩盐(MF13, 表 1)和硬石膏-杂卤石质岩盐(MF14, 表 1)共同组成, 层厚较薄。

特征与解释: 硬石膏-杂卤石碎屑颗粒的顺层分布现象表明原生的杂卤石薄层被后期的构造运动破碎, 但仍未被均匀的卷入岩盐基质中, 保留原生层的基本形态(图 3f)。其微观特征同 MA5-2 类似, 同样证实了其主体的原生成因(图 4l)。但因为此组合中, 岩盐为主体, 杂卤石多以较碎小的颗粒甚至肉眼难以辨别的细晶级碎屑(MF13)分布在石盐中, 因此属于上述 MA5-2 中提到的石盐沉积阶段因有外来物质的加入, 石盐-杂卤石-硬石膏刚刚开始共同析出的盐湖早期阶段(侯学文等, 2020; Gong et al., 2021)。

4 沉积模式

综合沉积相分布特征和地层结构, 前人认为川东北地区早三叠世嘉四-五段沉积环境以蒸发台地-局限台地为主(胡明毅等, 2010; 陈安清等, 2015; 龚大兴等, 2015)。本研究通过沉积特征及微相的精细描述和划分, 建立了川东北地区嘉四-五段沉积模式图(图 5)。不同的沉积微相类型从远端—近端依次发育, 揭示了受海平面变化和周缘古隆起共同影响的水动力能量和水体封闭的差异性(Flügel, 2004; Warren, 2006)。通过上述沉积微相及相组合的精细解释可以看出, 整体上研究区目的层段以蒸发台地沉积为主, 包括云膏质泻湖、膏湖以及盐湖等。而局限台地沉积只在周期性的海泛沉积期少量发育, 表现为局限台地台内滩和灰-云坪沉积(图 5, 表 1)。

块状残余颗粒含云/云质灰岩中生屑的发育说明其发育在与外海相对连通且能量相对中等-较高的沉积环境,结合其与膏岩互层的沉积演化特征,被解释为局限台地碳酸盐颗粒滩沉积(MA1),是本研究序列中指示沉积能量最高、最近海的沉积微相类型(Flügel, 2004; 雷卞军等, 2006)。向陆方向在局限台地灰-云坪沉积中(MA2),因开阔海进入台内的水体受阻,水体盐度发生变化,水动力变弱,生屑几乎不发育,颗粒只有少量的球粒,岩石主体为白云岩,含少量灰岩。局限与蒸发台地过渡带主要发育膏-云坪沉积(MA3),硬石膏岩与白云岩呈不规则形状相互交错,且硬石膏含量的明显增多,证明已经开始满足蒸发台地发育的相应环境条件(Schreiber et al., 2000; Warren, 2006)。继续向陆方向,彻底进入蒸发台地沉积环境,在靠近局限台地的方向,首先发育云膏质泻湖(MA4),薄纹层状沉积结构以及菱镁矿的出现说明其处于水动力能量很弱的静水沉积(雷卞军等, 2006; Warren, 2006)。蒸发台地膏湖沉积(MA5-1)以出现大量的硬石膏岩和含盐/盐质膏岩为特征,且也可见薄纹层状特征,岩盐的少量发育,说明卤水的蒸发浓缩程度不断增加,已达到岩盐开始析出的阶段,但受海平面波动及卤水的淡化影响,整体仍处于以膏岩沉积为主的阶段(陈郁华, 1983)。最终,卤水蒸发到最大程度,开始发育蒸发台地盐湖沉积(MA6-1),以发育带有颜色韵律的岩盐为沉积主体,并伴有不同比例的硬石膏,且硬石膏以不同粒径的颗粒漂浮在石盐基质中,应属于与石盐互层的膏岩经后期构造叠加改造而形成。同时,在两个特殊的沉积时期,在上述盐湖和膏湖沉积中发育杂卤石,表现为杂卤石与石盐和硬石膏共伴生的情况(MA5-2/MA6-2),结合本研究中的证据以及前人对杂卤石成因的研究,认为此处的杂卤石是在卤水达到石盐沉积阶段时,加之 K^+ 、 Mg^{2+} 在此蒸发沉积环境中的不断富集,此时在外来 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的补给之下原生沉积而成,关于成因的讨论将在后文中具体论述。

5 层序地层

蒸发岩是研究区沉积序列的主体,当海平面下降导致蒸发台地与大海的连通受阻甚至完全隔绝时,伴以强烈的蒸发作用,就可以产生大量的蒸发沉积;但反之,海平面的上升,可能仅是几米,就可以再次打开与大海的连通通道,开始相应的浅海沉积,因此,与碎屑岩沉积体系或相对与海连通的碳酸盐沉积体系相比较,在蒸发岩-碳酸盐沉积体系里会表现出更频繁的、更快速的海平面变化(Tucker, 1991)。在本研究中,我们采用 Strasser et al.(1999)

提出的具有一定相似性的、针对相对浅海的沉积体系的层序地层术语。本研究中对于层序的划分主要依据沉积微相的垂向演化规律和层序界面特征。可能受构造活动和海平面的频繁波动影响,目的层段虽以蒸发台地相沉积序列为主,但未见明显暴露不整合发育,层序界面主要为岩性转换面,多数为海退末期的厚层岩盐向膏-盐互层沉积或膏岩沉积转换,在个别含局限台地灰云岩的沉积序列中,可能表现为膏岩向膏-云共生/互层的沉积转换,基于上述方法,在嘉四-五段沉积地层中识别出的4个沉积层序,分别如下:

SQ1 位于本研究层段的最下部(3 337~3 591 m),包含3个次级别旋回,主要由硬石膏岩、石盐以及杂卤石岩相关的沉积微相组成,属于蒸发台地相沉积序列。其下部的海侵沉积主要由厚层的含盐膏岩(MF8)夹薄层膏质岩盐(MF11)组成,说明该时期为蒸发台地膏湖沉积;向上其最大海泛期沉积以含菱膏岩(MF6)为主,海平面上升导致沉积相带向局限台地方向迁移,转换为蒸发台地云-膏质泻湖或膏云坪沉积环境;海退初期以膏(MF8)-盐(MF11/MF12)互层为主,指示在海平面波动和蒸发条件的共同作用下,沉积相带转换为蒸发台地膏湖与盐湖交替发育(Tucker, 1991; Warren, 2006)。在层序的顶部发育杂卤石与石盐和硬石膏共伴生的现象,属于本研究中的“新型杂卤石钾盐矿”下矿层。该段沉积中杂卤石相关沉积以盐质硬石膏-杂卤石岩(MF10)和硬石膏-杂卤石质岩盐(MF14)为主,其与指示蒸发台地膏湖沉积(MF7/MF8)和蒸发台地盐湖沉积(MF11)的微相类型互层发育,共同组成海退末期的蒸发盐湖沉积。

SQ2 位于本研究层段中部(3 210~3 337 m),包含2个次级别旋回,该段以蒸发台地盐湖沉积为主,仅在次级别旋回的海侵沉积期发育薄层的膏湖沉积。海侵沉积以岩盐沉积为主,但因硬石膏含量的不同,表现为膏质岩盐(MF11)与含膏岩盐(MF12)的韵律变化,在最底部发育薄层含盐膏岩(MF8)。在最大海泛沉积期,发育蒸发台地膏湖与盐湖的频繁波动,表现为硬石膏岩或含盐/盐质膏岩(MF7/MF8)与含膏岩盐(MF12)呈薄互层发育,海退期则整体表现为厚层含膏岩盐(MF12),为相对稳定的盐湖沉积期,仅可见岩盐颜色的韵律变化。虽发生了海平面的波动及相带的迁移,但该时期整体上都处于与外海相对隔绝的蒸发台地膏-盐湖沉积区(陈安清等, 2015; 龚大兴等, 2015)。

SQ3 位于本研究层段的中上部(3 000~3 210 m),包含4个次级别旋回,整体上包含了从蒸发台地盐湖到局限台地台内滩多种沉积微相类型。其下部的

海侵沉积从中-厚层膏质岩盐(MF11)和含膏岩盐(MF12)夹薄层含盐膏岩(MF8)指示盐湖的沉积微相类型逐渐过渡为中-厚层含盐/盐质膏岩(MF7/MF8)或含菱膏岩(MF6)为主夹含膏岩盐(MF12)的沉积特征,指示蒸发台地膏湖或云膏质泻湖的沉积(Schreiber et al., 2000; 雷卞军等, 2006; Shabafrooz et al., 2013)。在最大海泛沉积期,主要沉积残余颗粒含云/云质灰岩(MF1)和残余颗粒含灰/灰质云岩(MF2),并以后者为主,前者主要作为薄夹层发育其中,指示局限台地内滩和灰-云坪沉积。伴随海退,沉积转化为以发育蒸发台地膏湖和盐湖沉积互层为主,并夹有少量蒸发台地云膏质泻湖(MF6),同时,此段中代表杂卤石沉积期的蒸发台地膏-盐湖沉积大量发育(MF9/MF10/MF13/MF14),属于本研究中“新型杂卤石钾盐矿”上矿层。该层序是包含沉积相带范围最广的旋回,表明其相对海平面波动幅度较大。

SQ4 位于本研究层段的顶部(2 880~3 000 m),包含 2 个完整次级别旋回和 1 个部分海侵旋回,整体上以局限台地灰-云坪沉积(MA2)和局限-蒸发台地过渡带膏-云坪沉积(MA3)互层为主。在下部的海侵沉积可见薄互层状膏-云岩(MF5),向上逐渐过渡为与 SQ3 最大海泛沉积同样的局限台地沉积微相(MF1/MF2)。在海退沉积期以含云膏岩/云质膏岩(MF4)与含硬石膏脉细粉晶白云岩(MF3)交互沉积为主,局部可见指示蒸发台地云-膏质泻湖和膏湖沉积的薄互层状膏-云岩(MF5)和硬石膏岩(MF7)。整体上该层序与其他层序相比更靠近开阔海,属于本研究层段中海平面最高的时期(Tucker, 1991; Warren, 2006)。

6 讨论

根据蒸发实验结果,杂卤石是可以在沉积体系达到一定平衡时直接形成的(韩蔚田等, 1982; 李东东, 2015),且通过最新的热力学模拟和实验研究发现,杂卤石在 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} - H_2O 六元体系中的形成区域极为可观,是先前实验结果的数倍(李东东等, 2021)。本文通过大量镜下观察,认为研究区的杂卤石以粒状和糜棱状为主,并在宏观上表现出一定的薄纹层状原始沉积结构(图 3d),因此,认为区域内的杂卤石以原生为主。并且硬石膏与杂卤石的伴生状态,或以粒状晶粒混杂在一起但边界清晰无明显交代现象,或以互层状发育且纹层界限明显(图 3e, 4g),也证实了上述原生论证。但也可见少量放射状杂卤石在局部发育,以及个别颗粒边界的次生交代现象(图 4l),

这些现象表明研究区杂卤石虽以原生沉积为主,但也伴生有少量后期成岩过程中的交代成因杂卤石。这与前人对四川地区以及研究区杂卤石成因研究的认知一致(Zhong et al., 2020; Gong et al., 2021; Shang et al., 2021a)。

通过海水蒸发实验表明,单纯使用海水模拟蒸发浓缩过程是难以析出杂卤石的,因此,杂卤石虽然可以通过原生沉积形成,但必须满足一定的外来补给条件(孙宏伟等, 2014; 李东东, 2015; 李东东等, 2021; 白超等, 2022)。川东北地区原生杂卤石生成的外来补给从何而来是破解杂卤石成因之谜的关键问题。结合 Sr/S 等同位素的证据分析已证实,川东北地区杂卤石的物源主要是海水,较少受火山作用和陆源水的影响(商雯君等, 2021)。因此,海水在恰当时期的必要补给可能是杂卤石能否原生形成的关键,所以,受构造和海平面共同控制的相对海平面变化则可能是影响杂卤石形成的主控因素之一。全球海平面在早一中三叠世是逐渐上升的,但受扬子区构造运动影响,四川盆地在早三叠世中期海侵达到高峰后,海平面开始下降(Vail et al., 1991; 陈安清等, 2015)。前人层序地层研究结果表明,四川盆地早三叠世嘉陵江组共发育 2~3 个三级层序,一种观点认为,嘉一段和嘉三段以开阔台地沉积为主,而嘉二段和嘉四-五段以局限台地和蒸发台地为主,因此,整体上可划分为两个三级旋回(陈安清等, 2015; 龚大兴, 2016);另一种观点认为嘉五段顶部已经开始淡化,发育以局限台地为主的第 3 个三级沉积旋回底部沉积(胡明毅等, 2010)。这可能是由于嘉陵江组和雷口坡组之间的界限划分方案不一致导致。但总体上嘉四-五段应属于 1~2 个三级旋回的部分沉积,因此,本研究中识别的 4 个层序应该属于三级层序内部的四级层序,而进一步识别出的层序内小规模旋回则对应于五级旋回。同时, SQ1 与 SQ2 均为蒸发台地沉积序列,且整体上逐渐海退,对应于三级层序的海退期; SQ3 以蒸发台地为主,但开始伴生局限台地沉积, SQ4 时期则以局限台地沉积为主,夹蒸发台地膏岩沉积,因此整体上进入下一个三级旋回的海侵期(图 2),这与上述前人的层序地层研究结果可进行对比。

本研究通过高精度的层序地层分析发现,两个“新型杂卤石钾盐矿”矿层分别位于 SQ1 和 SQ3 的海退末期,石盐和石膏伴生的沉积阶段,说明四级海平面下降所导致的蒸发台地大规模暴露和干旱气候条件造成的蒸发浓缩为其形成提供了有利的环境和场所。同时,杂卤石层均发育在三级层序的海

退中末期和海侵初期,说明长期的蒸发浓缩积累,使得蒸发台地中的 K^+ 、 Mg^{2+} 离子逐渐得到累积富集(图 2, 6a)。在四级层序海侵期,受海平面上升影响,原蒸发台地与外海有了短暂的沟通, K^+ 、 Mg^{2+} 离子得到了一定程度的稀释,但同时也输入了更多的物源,为其进一步积累打下了基础(图 6b)。直到四级层序海退末期,蒸发台地再一次与外海相对隔绝,同时在上述三级层序海退和四级层序海侵-海退多个旋回的积累下,卤水中的 K^+ 、 Mg^{2+} 离子已得到充分的积累,达到一定浓度(图 6c)。因此,随蒸发程度不断增加,卤水中 K^+ 和 Mg^{2+} 不断富集,是杂卤石形成的前提条件。同时,研究表明杂卤石层主要发育在四级层序海退末期与层序内小规模旋回(五级层序)海侵的叠加期,受五级海平面上升影响,蒸发盆地与外界发生一定程度的连通,此时海水带来一定的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 补给,但又不会造成卤水中 K^+ 、 Mg^{2+} 的大量稀释(图 6c),最终达到了六元体系中可生成原生杂卤石的离子浓度条件,得到了原生杂卤石沉积。因此,小规模海侵带来的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 补给是形成原生杂卤石的必要条件。

此外,层序地层结果显示,SQ2 时期属于三级层序的海退最末期,是目的层段中蒸发程度最高的阶段,但却并未发育杂卤石沉积。从上述的分析可见,杂卤石的生成既需要达到一定的蒸发阶段作为前提,又需要与外界有相对的连通作为小规模补给才能共同促成其原生发育,而 SQ2 时期是在 SQ1 层序的基础上海平面继续下降和蒸发浓缩持续加强形成,属于蒸发台地中更靠陆的盐湖沉积,虽满足了杂卤石形成的基本前提条件,但因其与外界的沟通更加受限而无法得到 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 补给,因此也难以形成杂卤石。

综上所述,川东北地区杂卤石的原生沉积是在区域构造背景基础上,受多级别的海平面波动共同控制、多条件耦合而形成。

7 结论

(1)川东北普光地区下三叠统地层中共识别出 14 种沉积微相类型和 6 种沉积微相组合,依次分布在从局限台地台内滩到蒸发台地盐湖之间的不同相带,代表不同的沉积环境和沉积能量条件,基于此建立了研究区沉积模式图。

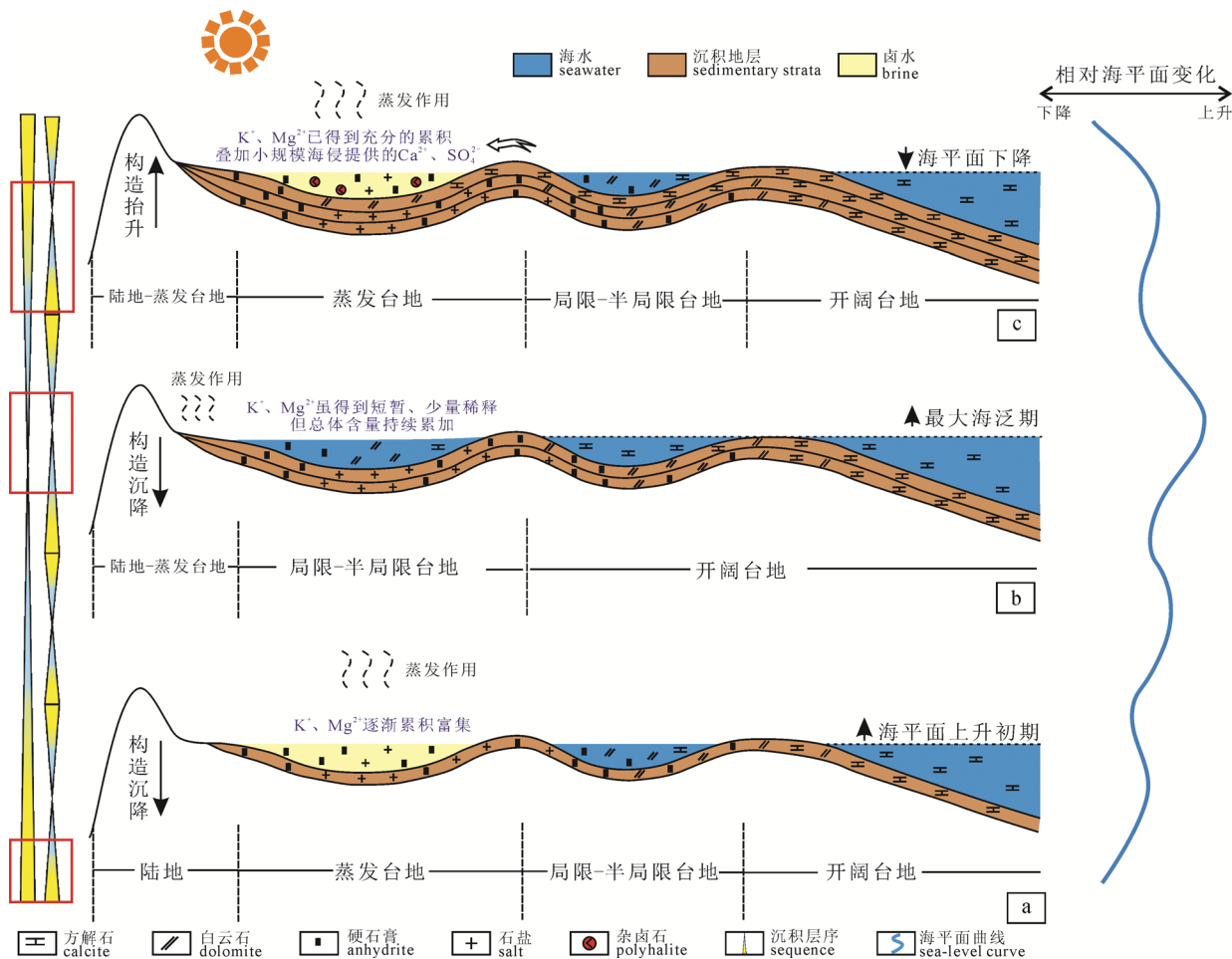


图 6 川东北地区下三叠统原生杂卤石形成模式图

Fig. 6 Formation model of Lower Triassic primary polyhalite in northeast Sichuan Basin

(2)通过沉积微相的纵向叠置关系、地层厚度及界面接触关系等信息,共划分出4个四级层序及11个层序内部小规模旋回,整体上底部两个层序为三级层序的海退期,上部两个层序对应于三级层序的新一期的海侵期。

(3)结合前人研究成果,并通过大量的镜下薄片信息,判断研究区内与石盐共伴生的杂卤石主体部分应为原生沉积。通过对杂卤石发育层位与层序地层分析的结果对比,认为研究区杂卤石的生成是明显受控于不同级别海平面波动。只有当四级层序的海退末期与五级层序的海侵叠加的时候才具备形成杂卤石的基础和必要条件。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program (No. 2023YFC2906503), and China Geological Survey (Nos. DD20190172 and DD20230296).

参考文献:

- 白超, 刘建伟, 2022. 四川南充盐盆下中三叠统杂卤石形成条件及找钾意义[J]. 地下水, 44(1): 174-177.
- 蔡克勤, 袁见齐, 1986. 四川三叠系钾盐成矿条件和找矿方向[J]. 化工地质, (2): 1-9.
- 陈安清, 王立成, 姬广建, 等, 2015. 川东北早-中三叠世聚盐环境及海水浓缩成钾模式[J]. 岩石学报, 31(9): 2757-2769.
- 陈郁华, 1983. 黄海水 25 °C 恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素分布规律[J]. 地质学报, 57(4): 379-390.
- 冯增昭, 鲍志东, 吴胜和, 等, 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理[J]. 地质科学, 32(2): 212-220.
- 龚大兴, 2016. 四川盆地三叠纪成盐环境、成钾条件及成因机制[D]. 成都: 成都理工大学.
- 龚大兴, 周家云, 吴驰华, 等, 2015. 四川盆地早中三叠世成盐期岩相古地理及成盐模式[J]. 地质学报, 89(11): 2075-2086.
- 韩蔚田, 谷树起, 蔡克勤, 1982. K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}/Cl^- 、 SO_4^{2-} -H₂O 六元体系中杂卤石形成条件的研究[J]. 科学通报, 27(6): 362-365.
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等, 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3): 589-606.
- 侯学文, 龚大兴, 文华国, 等, 2020. 四川盆地三叠系杂卤石的时空分布、显微特征及成因研究[J]. 地质论评, 66(6): 1555-1571.
- 胡明毅, 魏国齐, 李思田, 等, 2010. 四川盆地嘉陵江组层序—岩相古地理特征和储层预测[J]. 沉积学报, 28(6): 1145-1152.
- 黄涵宇, 何登发, 李英强, 等, 2019. 四川盆地东南部泸州古隆起的厘定及其成因机制[J]. 地质前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 26(1): 102-120.
- 雷卞军, 周跃宗, 杨金利, 等, 2006. 川中—川南过渡带嘉陵江组二段沉积相及其展布特征[J]. 中国地质, 33(5): 1149-1158.

- 李东东, 2015. Li-Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O 体系多温热力学平衡模型开发及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 李东东, 高丹丹, 边绍菊, 等, 2021. Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}/Cl^- 、 SO_4^{2-} -H₂O 六元体系中杂卤石形成条件的再认识[J]. 地质前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 28(6): 46-55.
- 李亚文, 蔡克勤, 韩蔚田, 1998. 四川盆地三叠系蒸发岩的变质作用与富钾卤水的成因[J]. 现代地质, 12(2): 222-228.
- 李亚文, 韩蔚田, 1987. 四川盆地三叠系杂卤石形成条件的实验研究[J]. 现代地质, 1(3-4): 400-411.
- 林耀庭, 卞慕英, 2001. 碳酸盐组分在四川盆地三叠纪蒸发岩系中的分布及其成盐标志研究[J]. 化工矿产地质, 23(3): 145-150.
- 林耀庭, 陈绍兰, 2008. 论四川盆地、中三叠统蒸发岩的生成模式、成盐机理及找钾展望[J]. 盐湖研究, 16(3): 1-10.
- 林耀庭, 高立民, 宋鹤彬, 1998. 四川盆地海相三叠系硫同位素组成及其地质意义[J]. 地质地球化学, 26(4): 43-49.
- 商雯君, 张永生, 邢恩袁, 等, 2021. 川东北普光地区新型杂卤石钾盐矿的物源: Sr、S 同位素证据[J]. 地质学报, 95(2): 506-516.
- 孙宏伟, 曹养同, 张华, 2014. 蒸发岩盆地杂卤石成因及找钾意义[J]. 化工矿产地质, 36(1): 8-12.
- 唐敏, 刘成林, 焦鹏程, 等, 2009. 世界海相钾盐矿床特征定量分析及其意义[J]. 沉积学报, 27(2): 326-333.
- 王淑丽, 郑绵平, 2014. 川东盆地长寿地区三叠系杂卤石的发现及其成因研究[J]. 矿床地质, 33(5): 1045-1056.
- 袁见齐, 1980. 钾盐矿床成矿理论研究若干问题[J]. 地质论评, 26(1): 56-59.
- 张雄, 朱正杰, 崔志伟, 等, 2022. 四川盆地东部垫江盐盆早三叠世嘉陵江组四段杂卤石成因及对成钾的指示[J]. 地球科学, 47(1): 27-35.
- 张永生, 郑绵平, 邢恩袁, 等, 2021. 川宣地 1 井发现厚层海相可溶性“新型杂卤石钾盐”工业矿层[J]. 中国地质, 48(1): 343-344.
- 赵德钧, 韩蔚田, 蔡克勤, 等, 1987. 大汶口凹陷下第三系含盐段杂卤石的成因及其找钾意义[J]. 地球科学, 12(4): 349-356.
- 赵艳军, 刘成林, 龚大兴, 等, 2015. 泸州-开江古隆起对川东三叠纪成盐成钾环境的控制作用[J]. 地质学报, (11): 1983-1989.
- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 等, 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 84(11): 1523-1553.
- 郑绵平, 张永生, 商雯君, 等, 2018. 川东北普光地区发现新型杂卤石钾盐矿[J]. 中国地质, 45(5): 1074-1075.
- 仲佳爱, 郑绵平, 唐学渊, 等, 2018. 川东北黄金口背斜三叠系深部杂卤石特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 37(1): 81-90.

References:

- BAI Chao, LIU Jianwei, 2022. Formation conditions of Lower-Middle Triassic polyhalite in Nanchong Salt Basin, Sichuan and its potassium prospecting significance[J]. Ground Water, 44(1): 174-177(in Chinese with English abstract).
- CAI Keqin, YUAN Jianqi, 1986. Metallogenic conditions and prospecting direction of Triassic potash in Sichuan[J]. Geology of Chemical Minerals, 2: 1-9(in Chinese).

- CHEN Anqing, WANG Licheng, JI Guangjian, et al., 2015. Evaporitic environment and the concentration model of potash in the Early-Middle Triassic, northeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2757-2769(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuhua, 1983. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation(25 °C) of the Huanghai sea water[J]. *Acta Geological Sinica*, 57(4): 379-390(in Chinese with English abstract).
- DUNHAM R J, 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture[J]. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1: 108-121.
- FENG Zengzhao, BAO Zhidong, WU Shenghe, et al., 1997. Lithofacies Palaeogeography of the Early and Middle Triassic of south China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 32(2): 212-220(in Chinese with English abstract).
- FLÜGEL E, 2004. Microfacies of carbonate rocks, 2nd edn[M]. Heidelberg: Springer.
- FRAISER M L, BOTTJER D J, 2007. Elevated atmospheric CO₂ and the delayed biotic recovery from the end-Permian mass extinction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(1-2): 164-175.
- GONG Daxing, 2016. The Triassic Salt-forming Environment, Potash-forming Conditions and Genetic Mechanism in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University Technology(in Chinese with English abstract).
- GONG Daxing, XIAO Bin, BAGAS L, et al., 2021. Origin of the Early to Middle Triassic polyhalite minerals in the Sichuan Basin, SW China: New evidence from calcium and sulphur isotopes and microfabrics[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104439.
- GONG Daxing, ZHOU Jiayun, WU Chihua, et al., 2015. Lithofacies paleogeography and salt-forming model of Lower-Middle Triassic in the Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2075-2086(in Chinese with English abstract).
- HAN Weitian, GU Shuqi, CAI Keqin, 1982. On the formative conditios of polyhalite in the six-component system K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺/Cl⁻, SO₄²⁻-H₂O[J]. *Chinese Science Bulletin*, 27(6): 362-365(in Chinese).
- HANDFORD C R, LOUCKS R G, 1993. Carbonate depositional sequences and systems tracts-responses of carbonate platforms to relative sea-level changes. carbonate sequence stratigraphy[J]. *Ecological Economics*, 57(1): 3-41.
- HE Dengfa, LI Desheng, ZHANG Guowei, et al., 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 46(3): 589-606(in Chinese with English abstract).
- HOU Xuewen, GONG Daxing, WEN Huaguo, et al., 2020. Study on the temporal and spatial distribution, microscopic characteristics and genesis of Triassic polyhalite in Sichuan Basin[J]. *Geological Review*, 66(6): 1555-1571(in Chinese with English abstract).
- HU Mingyi, WEI Guoqi, LI Sitian, et al., 2010. Characteristics of sequence-based lithofacies and paleogeography and reservoir prediction of the Jialingjiang Formation in Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1145-1152(in Chinese with English abstract).
- HUANG Hanyu, HE Dengfa, LI Yingqiang, et al., 2019. Determination and formation mechanism of the Luzhou paleo-uplift in the southeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 102-120(in Chinese with English abstract).
- KENDALL A C, 1992. Evaporites\\WALKER R G, JAMES N P (Eds.), *Facies models: Responses to sea level change*[M]. Canada: Geological Association of Canada.
- LEI Bianjun, ZHOU Yuezong, YANG Jinli, et al., 2006. Sedimentary facies of the Second Member of the Jialingjiang Formation in the central-southern Sichuan transition zone and its distribution characteristics[J]. *Geology in China*, 33(5): 1149-1158(in Chinese with English abstract).
- LEITNER C, WIESMAIER S, KÖSTER M H, et al., 2017. Alpine halite-mudstone-polyhalite tectonite: Sedimentology and early diagenesis of evaporites in an ancient rift setting (Haselgebirge Formation, eastern Alps)[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 129(11/12): 1537-1553.
- LI Dongdong, 2015. Development and Application of Multi Temperature Thermodynamic Phase Equilibrium Model for Li-Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- LI Dongdong, GAO Dandan, BIAN Shaoju, et al., 2021. Revisiting the crystallization field of polyhalite in the Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺//Cl⁻, SO₄²⁻-H₂O ternary system[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 46-55(in Chinese with English abstract).
- LI Yawen, CAI Keqin, HAN Tianwei, 1998. Origin of potassium-rich brine and the metamorphism of Triassic evaporites in Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 12(2): 222-228(in Chinese with English abstract).
- LI Yawen, HAN Tianwei, 1987. An experimental study on the formative conditions of polyhalite in Triassic system in Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 1(3-4): 400-411(in Chinese with English abstract).
- LIN Yaoting, BIAN Muying, 2001. Distribution of carbonate component as salt-forming mark in Triassic evaporite in Sichuan Basin[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(3): 145-150(in Chinese with English abstract).
- LIN Yaoting, CHEN Shaolan, 2008. Discussion on the Evaporite Generating Modes, Saltforming Mechanism and Potassium-hunting Prospect of Lower-middle Triassic in Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 16(3): 1-10(in Chinese with English abstract).
- LIN Yaoting, GAO Limin, SONG Hebin, 1998. Sulfur isotopic composition of the marine Triassic in the Sichuan Basin and its geological significance[J]. *Geology and Geochemistry*, 26(4): 43-49(in Chinese with English abstract).
- PERYT T M, PIERRE C, GRYNIV S P, 1998. Origin of polyhalite deposits in the Zechstein (Upper Permian) Zdrada platform (northern Poland)[J]. *Sedimentology*, 45(3): 565-578.
- PERYT T M, TOMASSI-MORAWIEC H, CZAPOWSKI G, et al., 2005. Polyhalite occurrence in the Werra (Zechstein, Upper

- Permian) peribaltic Basin of Poland and Russia: Evaporite facies constraints[J]. *Carbonates Evaporites*, 20(2): 182-194.
- RETALLACK G J, 2013. Permian and Triassic greenhouse crises[J]. *Gondwana Research*, 24: 90-103.
- RETALLACK G J, SHELDON N D, CARR, et al., 2011. Multiple Early Triassic Greenhouse crises impeded recovery from Late Permian mass extinction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308(1-2): 233-251.
- SCHREIBER B C, TABAKH M, 2000. Deposition and early alteration of evaporites[J]. *Sedimentology*, 47(S1): 215-238.
- SHABAFROOZ R, MAHBOUBI A, MOUSSAVI-HARAMI R, et al., 2013. Facies analysis and sequence stratigraphy of the evaporite bearing Sachun Formation at the type locality, South East Zagros Basin, Iran[J]. *Carbonates Evaporites*, 28(4): 457-474.
- SHANG Wenjun, ZHANG Yongsheng, LI Kong, et al., 2021b. Evidence of sulfur isotope about the sedimentary environment of new type of polyhalite potassium ore in the northeast Sichuan Basin[J]. *Carbonates and Evaporites*, 36(3): 56.
- SHANG Wenjun, ZHANG Yongsheng, XING Enyuan, et al., 2021. The source material for a new type of polyhalite potassium ore in the Puguang area, northeast Sichuan: Evidence from Sr and S isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 506-516(in Chinese with English abstract).
- SHANG Wenjun, ZHENG Mianping, ZHANG Yongsheng, et al., 2021a. Characteristics and origin of a new type of polyhalite potassium ore in the Lower Triassic Jialingjiang Formation, Puguang area, northeastern Sichuan Basin, SW China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(1): 4.
- STRASSER A, PITTET B, HILLGÄRTNER H, et al., 1999. Depositional sequences in shallow carbonate-dominated sedimentary systems: concepts for a high-resolution analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 128(3-4): 201-221.
- SUN Hongwei, CAO Yangtong, ZHANG Hua, 2014. The geneses of polyhalite in evaporite basin and their significance in potash formation[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 36(1): 8-12(in Chinese with English abstract).
- TANG Min, LIU Chenglin, JIAO Pengcheng, et al., 2009. Quantitative Analysis and Significance of the Marine Potash Deposits in the World[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(2): 326-333(in Chinese with English abstract).
- TUCKER M E, 1991. Sequence stratigraphy of carbonate-evaporite basins: Models and application to the Upper Permian (Zechstein) of northeast England and adjoining North Sea[J]. *Journal of the Geological Society*, 148(6): 1019-1036.
- TWITCHETT R J, 2007. The Lilliput effect in the aftermath of the end-Permian event[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(1-2): 132-144.
- VAIL P R, AUDEMARD F, BOWMAN S A, et al., 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology overview[C]//EINSEKE G, RICKEN W, SEILACHER A (eds) *Cycles Events Stratigraphy*. Berlin: Springer-Verlag.
- WANG Shuli, ZHENG Mianping, 2014. Discovery of Triassic polyhalite in Changshou area of East Sichuan Basin and its genetic study[J]. *Mineral Deposits*, 33(5): 1045-1056(in Chinese with English abstract).
- WARREN J K, 2006. *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*[M]. Berlin: Springer.
- WARREN J K, 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 98(3-4): 217-268.
- WILSON J L, 1975. *Carbonate Facies in Geologic History*[M]. Berlin: Springer.
- YUAN Jianqi, 1980. Some problems on metallogenic theory of potassium salt deposit[J]. *Geological review*, 26(1): 56-59(in Chinese).
- ZHANG Xiong, ZHU Zhengjie, CUI Zhiwei, et al., 2022. Genesis of Polyhalite and Its Significance of Jialingjiang Formation in Dianjiang Salt Basin, Eastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 47(1): 27-35(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yongsheng, ZHENG Mianping, XING Enyuan, et al., 2021. Discovery of thick marine soluble "new type of polyhalite potassium salt" orebody from No.1 well in the Chuanxuandi area[J]. *Geology in China*, 48(1): 343-344(in Chinese).
- ZHAO Dejun, HAN Weitian, CAI Keqin, et al., 1987. The study of polyhalite genesis and its significance of potash-finding in Dawenkou Depression, Shandong Province[J]. *Earth Science*, 12(4): 349-356(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yanjun, LIU Chenglin, GONG Daxing, et al., 2015. The Luzhou-Kaijiang paleouplift control on the formation environments of Triassic salt and potassium of deposits in eastern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1983-1989(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mianping, YUAN Heran, ZHANG Yongsheng, et al., 2010. Regional Distribution and Prospects of Potash in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1523-1553(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mianping, ZHANG Yongsheng, SHANG Wenjun, et al., 2018. Discovery of a new type of polyhalite potassium ore in Puguang region, northeastern Sichuan[J]. *Geology in China*, 45(5): 1074-1075(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jiaai, ZHENG Mianping, TANG Xue, et al., 2018. Sedimentary characteristics of Deep Polyhalite in HuangJingKou anticline of Northeast Sichuan and its genetic study[J]. *Mineral Deposits*, 37(1): 81-90(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jiaai, ZHENG Mianping, ZHANG Yongsheng, et al., 2020. Sedimentary and geochemical characteristics of Triassic new type of polyhalite potassium resources in Northeast Sichuan and its genetic study[J]. *Scientific Reports*, 10(1): 13528.