第 28 卷 第 2 期
2026 年 4 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY (Chinese Edition)

Vol. 28 No. 2
Apr. 2026

文章编号：1671-1505(2026)02-0582-18 DOI:10.7605/gdlxb.2026.055

自生高岭石形成与保存机制及其对致密砂岩储集层物性的影响：以川西南邛西—白马庙地区须四段为例*

李文才[1] 刘明洁[1] 唐大海[2] 杨 迅[2] 孙志昀[2]
王旭丽[2] 金彦忻[1] 黄 嵌[2] 林 凯[3]

1 西南石油大学地球科学与技术学院，四川成都 610500
2 中国石油西南油气田分公司川西北气矿，四川江油 621741
3 成都理工大学地球物理学院，四川成都 610059

摘 要 川西南邛西—白马庙地区须四段底部致密砂岩储集层自生高岭石发育，为探究其形成与保存机制及与优质储集层分布的关系，综合运用物性分析、铸体薄片、扫描电镜、流体包裹体、阴极发光、原位微区碳氧同位素等资料，对研究区须四段致密砂岩储集层自生高岭石微观特征、期次、形成与保存机制及其对储集层物性的影响进行分析讨论。研究发现，须四段致密砂岩储集层岩性为岩屑砂岩，储集空间以粒内溶孔为主，且主要发育岩屑粒内溶孔。储集层中自生高岭石多呈“蠕虫状”、“手风琴状”充填粒间孔和粒内溶孔；储集层中发育早、晚 2 期自生高岭石，且均来源于储集层内含铝硅酸盐岩屑和长石的溶蚀，其中早期溶蚀流体为邻近煤系地层产生的腐殖酸，晚期溶蚀流体来源于泥岩中有机质成熟脱羧产生的有机酸。须四段砂岩储集层钾长石含量较少，仅能提供极少量 K^+，晚期有机酸充注时地层温度较低，而随着成岩作用的进行，有机酸逐渐被消耗，同时来自泥岩中的 Fe^{2+}、Mg^{2+} 大量参与铁白云石沉淀被消耗，因而成岩流体中的 K^+、Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 无法达到自生高岭石大规模伊利石化和绿泥石化所需的含量，地层温度和有机酸浓度无法同时达到自生高岭石地开石化所需的条件，导致自生高岭石无法大量向伊利石、绿泥石和地开石转化并得以保存至今。因此，在强水动力条件下形成的粒度较粗、分选较好的砂岩溶蚀作用较强，储集层内自生高岭石发育且物性较好。研究表明：研究区须四段自生高岭石独特的保存机制，在一定程度上保持了储集层的孔隙度与渗透率，并使得其含量能够反映溶蚀作用的强弱，进而指示储集层物性的好坏，可作为川西南邛西—白马庙地区须四段致密砂岩优质储集层发育的标志。

关键词 须四段 须家河组 致密砂岩 自生高岭石 保存机制 四川盆地 邛西—白马庙地区

第一作者简介 李文才，男，2000 年生，硕士研究生，主要从事油气储层地质学研究。E-mail：15184493494@163.com。

通讯作者简介 刘明洁，男，1985 年生，副教授，主要从事油气储层地质学研究。E-mail：mjliu@swpu.edu.cn。

中图分类号：P618.13 **文献标志码**：A

Formation and preservation mechanism of authigenic kaolinite and its impact on tight sandstone reservoir properties: a case study of the Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area of southwestern Sichuan Basin

* 国家自然科学基金项目(编号：41872154)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 41872154)]
收稿日期：2025-07-14 改回日期：2025-10-20

LI Wencai[1]　LIU Mingjie[1]　TANG Dahai[2]　YANG Xun[2]　SUN Zhiyun[2]
WANG Xuli[2]　JIN Yanxin[1]　HUANG Qian[2]　LIN Kai[3]

1 *School of Geoscience and Technology*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu* 610500, *China*
2 *Northwest Sichuan Gasfield*, *PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company*, *Sichuan Jiangyou* 621741, *China*
3 *College of Geophysics*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *China*

Abstract　Authigenic kaolinite is developed in the tight sandstone reservoirs at the bottom of Xu 4 Member in the Qiongxi-Baimamiao area of southwestern Sichuan Basin. To investigate its formation and preservation mechanisms and their relationship with high-quality reservoir distribution, we conducted a comprehensive study integrating petrophysical analysis, rock thin sections, scanning electron microscopy (SEM), fluid inclusion analysis, cathodoluminescence (CL), and in-situ micro-scale carbon-oxygen isotope analysis. This research focuses on analyzing the microcharacteristics, formation stages, formation and preservation mechanisms of authigenic kaolinite, and its impact on reservoir quality of the Xu 4 Member tight sandstones. The study reveals that the tight sandstone reservoirs of Xu 4 Member are predominantly composed of lithic sandstones, and the reservoir space is dominated by intragranular dissolution pores, with lithic intragranular dissolution pores being the most prevalent type. Authigenic kaolinite in the reservoirs predominantly exhibits "worm" and "accordion" shapes, filling intergranular pores and intragranular dissolution pores. The reservoir contains two distinct stages of authigenic kaolinite formation, both derived from the dissolution of aluminosilicate lithics and feldspars within the reservoir. The early-stage dissolution was facilitated by humic acids sourced from adjacent coal-bearing strata, while the late-stage dissolution resulted from organic acids generated through decarboxylation of mature organic matter in mudstones. The potassium feldspar content in the sandstone reservoir of the Xu 4 Member is relatively low, providing only a minimal amount of K^+. When late-stage organic acids are charged, the formation temperature is relatively low. As diagenesis progresses, the organic acids are gradually consumed. Meanwhile, a significant amount of Fe^{2+} and Mg^{2+} from mudstone participate in the precipitation of ankerite and are thus depleted. Consequently, the concentrations of K^+, Fe^{2+}, and Mg^{2+} in the diagenetic fluids are insufficient to facilitate large-scale illitization and chloritization of authigenic kaolinite. The formation temperature and the organic acid concentration can not simultaneously meet the conditions necessary for the transformation of authigenic kaolinite to dickite. As a result, authigenic kaolinite has not been able to convert in significant quantities into illite, chlorite, and dickite, and has been preserved to this day. Therefore, sandstones formed under high-energy hydrodynamic conditions with coarser grain sizes and better sorting exhibit stronger dissolution, resulting in developed authigenic kaolinite and superior reservoir properties. Research indicates that the unique preservation mechanism of authigenic kaolinite in Xu 4 Member has partly maintained reservoir porosity and permeability. Moreover, authigenic kaolinite content can reflect the intensity of dissolution, further indicating the quality of reservoir properties. Consequently, kaolinite content can be used as a reliable marker for identifying high-quality tight sandstone reservoirs in Xu 4 Member of the Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin.

Key words　Xu 4 Member, Xujiahe Formation, tight sandstone, authigenic kaolinite, preservation mechanism, Sichuan Basin, Qiongxi-Baimamiao area

About the first author　LI Wencai, born in 2000, a master degree candidate, is mainly engaged in oil and gas reservoir geology. E-mail: 15184493494@163.com.

About the corresponding author LIU Mingjie, born in 1985, an associate professor, is mainly engaged in oil and gas reservoir geology. E-mail: mjliu@swpu.edu.cn.

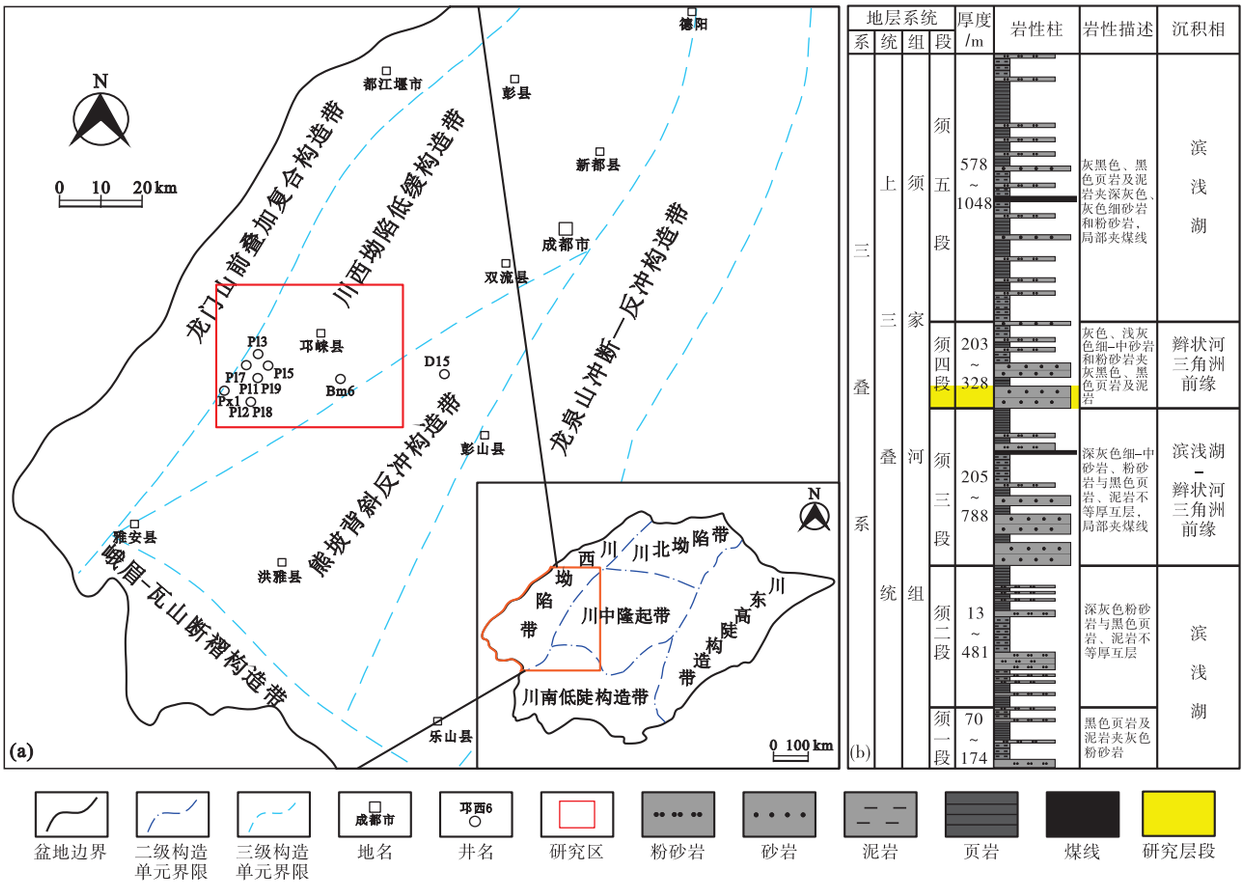
自生高岭石是致密砂岩储集层中常见的一类黏土矿物，因其发育程度与优质储集层关系密切（陈鑫等，2009），受到众多学者的关注。研究发现自生高岭石与储集层物性的关系较为复杂：在长石溶蚀形成自生高岭石过程中，伴随有次生孔隙和自生高岭石晶间微孔的产生，能够改善储集层物性（张雪芬等，2013），且铝、硅质流体的迁移数量越多对储集层物性的改善越明显（周晓峰等，2019）；但与此同时自生高岭石及其蚀变产物伊利石会堵塞孔隙喉道，降低渗透率，对储集层物性会产生负面影响（王亚男等，2019）。前人针对自生高岭石赋存状态、成因机制、转化条件及其对储集层物性的影响开展了大量研究表明，长石等铝硅酸盐矿物的溶蚀能够产生 Al^{3+}、Si^{4+}，当孔隙流体中 Al^{3+}、Si^{4+} 达到饱和后，自生高岭石随即发生沉淀（周晓峰等，2019；蔡来星等，2023）。当地层温度达到 120～140 ℃且成岩环境偏碱性时，自生高岭石在储集层所含钾长石的作用下可向伊利石发生转化（黄思静等，2009；王亚男等，2019）；在富 Fe^{2+}、Mg^{2+} 的碱性环境下自生高岭石可向绿泥石发生转化（赵雷昭等，2018；蔡来星等，2023），在成岩流体为富有机酸或二氧化碳流体、温度在 100～130 ℃时，自生高岭石会向地开石转化（赵杏媛，1997；伏美燕等，2012）。一般情况下，自生高岭石主要发育在浅埋藏的相对低地温环境（朱筱敏，2020），但现今经历过深埋藏与相对高地温条件的储集层中仍可见自生高岭石普遍发育，且针对此类经历深埋藏高地温环境自生高岭石的研究主要集中在来源与成因（张雪芬等，2013；王亚男等，2019），缺乏进一步深入探讨其保存机制。

川西地区须四段最大埋深达 4500 m，最高地层温度超过 160 ℃（陈冬霞等，2016；Chen *et al.*，2024），此外川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层铁白云石胶结物普遍发育，表明成岩过程中存在较多的 Fe^{2+}、Mg^{2+} 来源（王琪等，2010；胡榕等，2022），具备自生高岭石向绿泥石转化的先决条件。但现今该区须四段底部致密砂岩储集层仍发育大量自生高岭石，其形成保存机制未进行系统深入分析，进而导致在保存机制约束下的自生高岭石发育程度与优质储集层分布关系认识不清，严重制约了研究区须四段致密砂岩气的勘探与开发。针对以上问题，本次研究基于 9 口取心井 90 张铸体薄片及 127 张岩屑片镜下观察，综合阴极发光、扫描电镜、包裹体均一温度测试、原位微区碳氧同位素、物性分析等手段，对川西南邛西—白马庙地区须四段致密砂岩储集层岩石学特征、储集空间特征、物性特征及自生高岭石微观特征进行系统表征，并结合自生高岭石伴生矿物特征分析自生高岭石发育期次，明确自生高岭石物质来源及溶蚀流体来源，探讨储集层中自生高岭石的形成及保存机制，进而基于保存机制分析自生高岭石对储集层物性的影响，阐明自生高岭石发育程度与优质储集层分布的关系，以期对川西南部邛西—白马庙地区须四段致密气的勘探开发提供理论借鉴。

1 区域地质概况

四川盆地是基于上扬子克拉通发展起来的典型多旋回叠合含油气盆地（马永生等，2010；何登发等，2011），根据构造特征可将其划分为川西坳陷带、川北坳陷带、川中隆起带、川东高陡构造带、川南低陡构造带等 5 个构造单元（文龙等，2025）。川西南部邛西—白马庙地区位于四川盆地西南部，构造位置处于川西坳陷带内的川西坳陷低缓构造带（图 1-a）。

川西南部邛西—白马庙地区上三叠统须家河组主要发育辫状河三角洲—湖泊沉积体系（图 1-b），发育 1 套以砂岩、泥岩、页岩为主的煤系地层（李熙喆等，2008；郑荣才等，2008；孟昊等，2016），自下而上可划分为须一段、须二段、须三段、须四段和须五段，研究区须四段主要发育辫状河三角洲前缘沉积，岩性以深灰色、灰色细砂岩为主，夹灰黑色、黑色泥岩和页岩，是须家河组主要的储集层和产层，自下而上可划分为 3 个亚段（须四 1、须四 2、须四 3），本次研究的主要对象为须四 1 亚段，即须四段底部致密砂岩储集层



a—川西南部邛西—白马庙地区地理位置图；b—川西南部邛西—白马庙地区须家河组综合柱状图

图 1　川西南部邛西—白马庙地区位置及上三叠统须家河组区域地质背景

（据李文茂等，2022；雷越等，2023；文龙等，2025；有修改）

Fig. 1　Location of Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin and regional geological background of the Upper Triassic Xujiahe Formation (modified from Li *et al.*, 2022; Lei *et al.*, 2023; Wen *et al.*, 2025)

(图 1-b)。前人对川西地区须四段埋藏史及热演化史研究表明，须四段在晚三叠世沉积后快速沉降，并在早白垩世末期达到最大埋深 4500 m，晚白垩世以来地层开始抬升，现阶段埋深仍超过 3000 m，且埋藏过程中最高地温超过 160 ℃（李嵘等，2011；陈冬霞等，2016）。

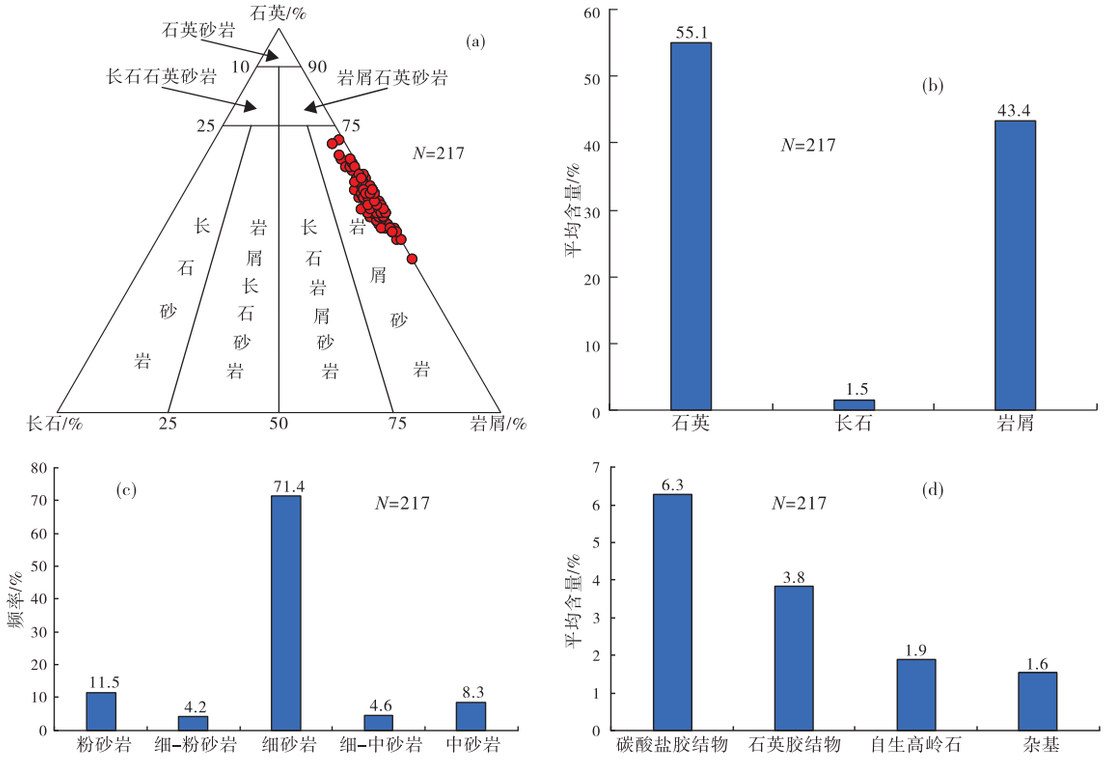
2　储集层基本特征

2.1　岩石学特征

川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层主要发育岩屑砂岩(图 2-a)，其中石英含量介于 39.6%~70.7%之间（平均含量 55.1%），长石含量介于 0%~5.3%之间（平均含量 1.5%），岩屑含量介于 27.4%~60.4%之间（平均含量 43.4%）(图 2-b)。整体上，研究区须四段砂岩储集层粒度以细粒为主(图 2-c)，分选中等—好，磨圆度以次圆状—圆状为主，支撑类型为颗粒支撑型，颗粒间主要呈线—凹凸接触关系，整体上砂岩的成分成熟度较低，结构成熟度中等。此外，胶结物主要类型为碳酸盐胶结物、石英胶结物和自生高岭石，其中碳酸盐胶结物平均含量为 6.3%，石英胶结物平均含量为 3.8%，自生高岭石含量介于 0%~12%之间，平均含量为 1.9%(图 2-d)。

2.2　储集空间特征

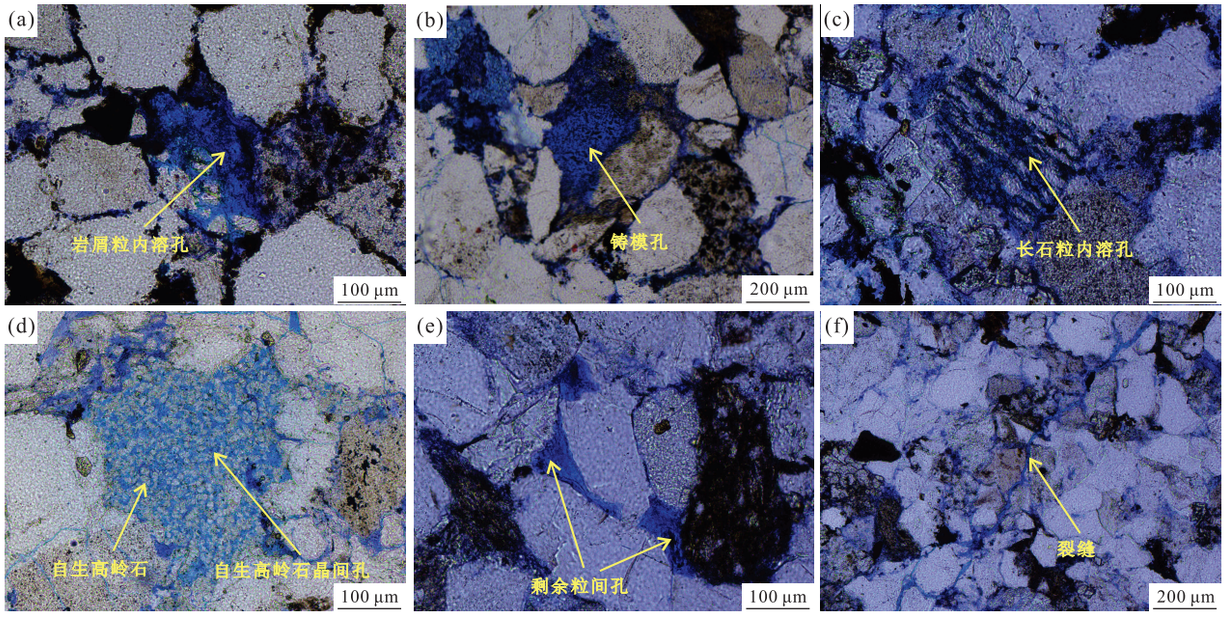
通过铸体薄片镜下观察发现，研究区须四段砂岩储集层储集空间主要为粒内溶孔，且以岩屑粒内溶孔为主，常见岩屑颗粒内部不完全溶蚀残余部分岩屑(图 3-a)，当岩屑颗粒溶蚀程度较强时可形



a—岩性三角图；b—碎屑颗粒平均百分含量直方图；c—粒度分布直方图；d—填隙物平均百分含量直方图

图 2 川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层岩石学特征

Fig. 2 Petrologic characteristics of the Xu 4 Member sandstone reservoir in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin



a—岩屑粒内溶孔，Pl9 井，3236.06 m，单偏光；b—铸模孔，Pl5 井，3487.13 m，单偏光；c—长石粒内溶孔，Pl3 井，3356.6 m，单偏光；d—自生高岭石晶间孔，Pl5 井，3487.84 m，单偏光；e—剩余粒间孔，Pl3 井，3365.29 m，单偏光；f—裂缝，Px1 井，3695.58 m，单偏光

图 3 川西南邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层储集空间类型

Fig. 3 Types of reservoir spaces at the bottom of Xu 4 Member sandstone reservoir in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

成具原始颗粒轮廓外形的铸模孔(图 3-b)。同时可见长石颗粒沿解理缝溶蚀形成少量粒内溶孔(图 3-c)，以及自生高岭石晶体沉淀析出形成的晶间孔(图 3-d)。此外，偶见局部发育剩余粒间孔(图 3-e) 和裂缝(图 3-f)。

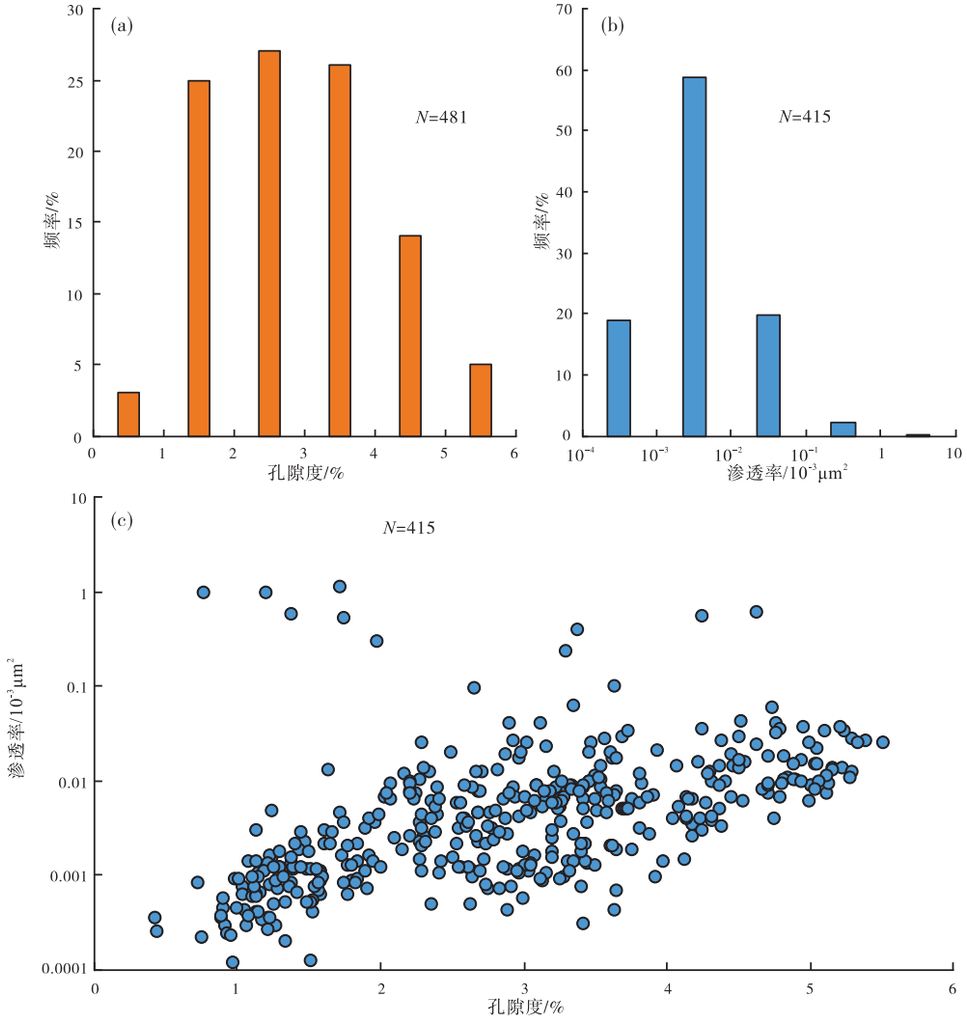
2.3　物性特征

川西南邛西—白马庙地区须四段岩心物性测试数据统计分析结果表明：须四段砂岩储集层孔隙度分布范围为 0.43%~5.51%，平均值 2.83%，主要分布在 1%~5%之间(图 4-a)。渗透率分布范围为 (0.000119 ~ 1.15) × 10^{-3} μm^2，平均值 0.0224 × 10^{-3} μm^2，主要分布在 (0.000119 ~ 0.1) × 10^{-3} μm^2 之间(图 4-b)。整体上，研究区须四段砂岩储集层属典型的致密砂岩储集层，且以孔隙型储集层为主，孔隙度与渗透率具有一定的正相关关系(图 4-c)，局部发育裂缝-孔隙型储集层。

3　自生高岭石特征

3.1　自生高岭石微观特征

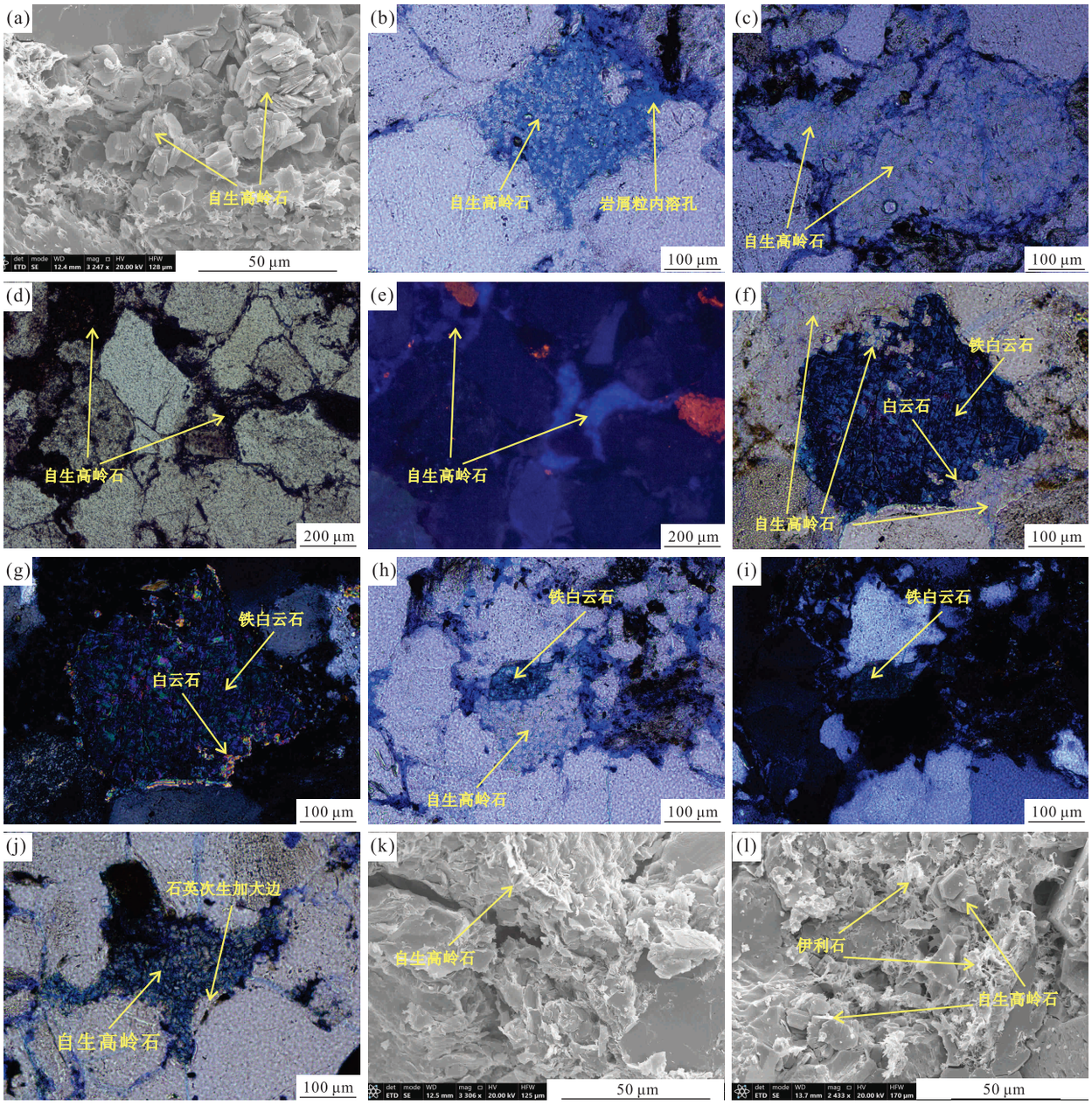
研究区须四段致密砂岩储集层自生高岭石在扫描电镜下单晶呈假六方片状，集合体呈书页状(图 5-a)，铸体薄片镜下主要呈蠕虫状、手风琴状(图 5-b 至 5-d)，在阴极发光下主要发靛蓝色和浅靛蓝色光(图 5-d，5-e)。常见自生高岭石充填粒间



a—孔隙度分布直方图；b—渗透率分布直方图；c—孔隙度与渗透率交会图

图 4　川西南邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层物性特征

Fig. 4　Petrophysical characteristics of sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin



a—自生高岭石单晶呈假六方片状、集合体呈书页状充填粒间孔、粒内溶孔，Pl5 井，3492.75 m，扫描电镜；b—自生高岭石呈蠕虫状充填岩屑粒内溶孔，Pl2 井，3245.05 m，单偏光；c—自生高岭石呈手风琴状充填粒间孔、粒内溶孔，Pl5 井，3492.75 m，单偏光；d—自生高岭石充填粒间孔和粒内溶孔，Pl7 井，3595.61 m，单偏光；e—自生高岭石呈靛蓝色、浅靛蓝色充填粒间孔和粒内溶孔，Pl7 井，3595.61 m，阴极发光；f—铁白云石、白云石、自生高岭石充填粒间孔、粒内溶孔，Pl7 井，3595.61 m，单偏光；g—铁白云石、白云石充填粒间孔、粒内溶孔，Pl7 井，3595.61 m，正交偏光；h—铁白云石、自生高岭石充填粒间孔、粒内溶孔，Pl3 井，3353.65 m，单偏光；i—铁白云石充填粒间孔、粒内溶孔，Pl3 井，3353.65 m，正交偏光；j—石英次生加大边、自生高岭石充填粒间孔、粒内溶孔，Pl6 井，3351.15 m，单偏光；k—自生高岭石向伊利石转化，Pl5 井，3499.88 m，扫描电镜；l—伊利石与自生高岭石共生，Pl3 井，3352.86 m，扫描电镜

图 5 川西南邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层自生高岭石微观特征

Fig. 5 Microscopic features of authigenic kaolinite in sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

孔和粒内溶孔，并与碳酸盐胶结物（图 5-f 至 5-i）和石英胶结物伴生（图 5-j），局部可见自生高岭石集合体中心单晶向外发生卷曲、变薄（图 5-k），以及自生高岭石与伊利石共生现象（图 5-l）。

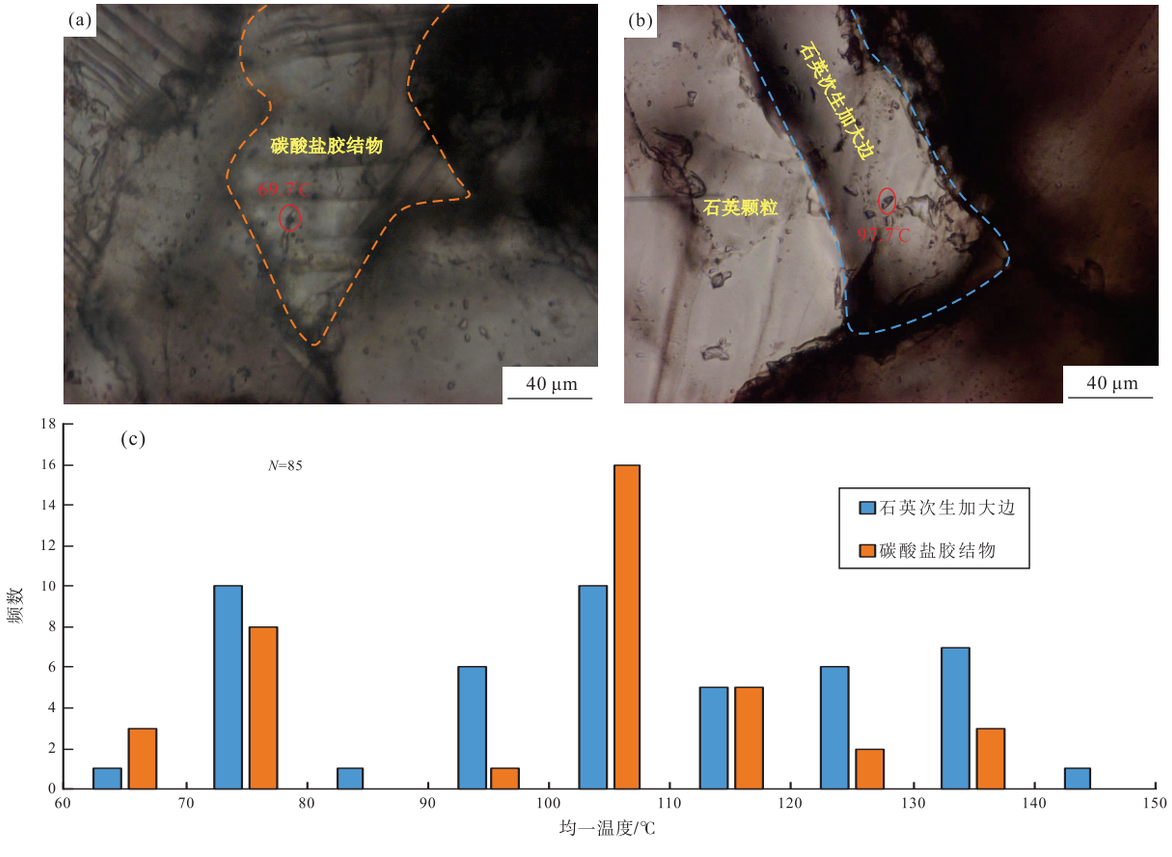
3.2　自生高岭石发育期次

3.2.1　伴生矿物流体包裹体特征

研究区须四段致密砂岩储集层碳酸盐胶结物、石英次生加大边普遍发育原生盐水包裹体，整体上包裹体呈气液两相，形态以椭圆状为主，长轴直径介于 4~9 μm 之间（图 6-a，6-b）。通过对包裹体进行均一温度测试发现，碳酸盐胶结物内部盐水包裹体均一温度介于 68 ~ 132 ℃之间（平均值 99.97 ℃），石英次生加大边内部盐水包裹体均一温度介于 66~141 ℃之间（平均值 104.68 ℃）。对 2 类胶结物中盐水包裹体均一温度作分布直方图发现，碳酸盐胶结物包裹体均一温度峰值区间分别为 70~80 ℃和 100~120 ℃，石英次生加大边包裹体均一温度峰值区间分别为 70~80 ℃和 90~140 ℃（图 6-c）。由此可见，碳酸盐胶结物包裹体均一温度与石英次生加大边包裹体均一温度分布特征相似，均存在 2 个峰值区间，表明研究区须四段砂岩储集层发育 2 期碳酸盐胶结物及 2 期石英胶结物。此外，根据峰值区间的均一温度范围（图 6-c），可推测早期、晚期胶结物（碳酸盐胶结物和石英胶结物）分别形成于早成岩 B 期（古温度范围为 65~85 ℃）和中成岩 A 期（古温度范围为 85~140 ℃）（刘创新等，2024）。

3.2.2　碳酸盐胶结物原位碳氧同位素特征

碳酸盐胶结物的碳氧同位素特征能够反映其形成时的环境（尤丽等，2021）。其中氧同位素主要受温度控制，在不受其他条件影响的情况下，碳酸盐胶结物形成温度越高，$\delta^{18}O_{PDB}$ 值越低；而碳同位



a—碳酸盐胶结物中盐水包裹体显微照片，Px1 井，3701.88 m，单偏光；b—石英次生加大边中盐水包裹体显微照片，Pl2 井，3245.05 m，单偏光；c—碳酸盐胶结物和石英胶结物盐水包裹体均一温度分布直方图

图 6　川西南邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层盐水包裹体特征

Fig. 6　Characteristics of cement-hosted saline fluid inclusions in sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

素值主要受碳酸盐胶结物的碳源所控制，$\delta^{13}C_{PDB}$值越偏负，通常表明在碳酸盐胶结物形成过程中受有机碳的影响越大（付锁堂等，2015；贾业等，2024）。本次研究共测试 20 组原位微区碳、氧同位素数据，其中$\delta^{13}C_{PDB}$值介于－8.764‰～0.448‰之间（平均值－4.064‰），$\delta^{18}O_{PDB}$值介于－15.061‰～－5.258‰之间（平均值－11.277‰）（表 1）。通过绘制研究区须四段砂岩储集层碳酸盐胶结物碳、氧同位素数据交会图发现，碳氧同位素呈现 2 期分布特征，早期碳氧同位素略负偏，晚期碳氧同位素较负偏（图 7）。基于碳酸盐胶结物$\delta^{13}C_{PDB}$、$\delta^{18}O_{PDB}$值的分布特征，同时结合碳酸盐胶结物中盐水包裹体均一温度分布特征，可将研究区须四段砂岩储集层碳酸盐胶结物划分为 2 期（图 7）（张庄等，2022）。综上所述，川西南邛西—白马庙地区须四段致密砂岩储集层发育 2 期碳酸盐胶结物，分别为早期温度相对较低时（早成岩 B 期）形成的碳酸盐胶结物和晚期温度相对较高（中成岩 A 期）时形成的碳酸盐胶结物。

表 1 川西南邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层碳酸盐胶结物原位微区碳氧同位素数据

Table 1 In situ micro-area carbon and oxygen isotopes data of carbonate cements in sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

序号	井名	深度/m	$\delta^{13}C_{PDB}$/‰	$\delta^{18}O_{PDB}$/‰
1	Px1	3701.88	－5.334	－10.421
2	Px1	3701.88	－2.202	－13.417
3	Px1	3701.88	－4.210	－14.778
4	Px1	3701.88	－1.281	－13.179
5	Pl3	3358.60	－4.965	－12.848
6	Pl3	3358.60	－2.798	－12.793
7	Pl3	3358.60	－5.949	－9.281
8	Pl3	3358.60	－4.724	－11.105
9	Pl6	3341.51	－6.836	－14.925
10	Pl6	3341.51	－8.764	－12.182
11	Pl6	3341.51	－7.552	－11.480
12	Pl6	3341.51	－7.358	－15.061
13	Pl6	3359.25	－2.753	－9.703
14	Pl6	3359.25	－3.137	－12.036
15	Pl6	3359.25	－3.271	－11.951
16	Pl6	3359.25	－2.650	－9.638
17	Pl7	3570.03	0.448	－5.258
18	Pl7	3570.03	－2.130	－9.070
19	Pl7	3570.03	－2.391	－9.581
20	Pl7	3570.03	－3.427	－6.838

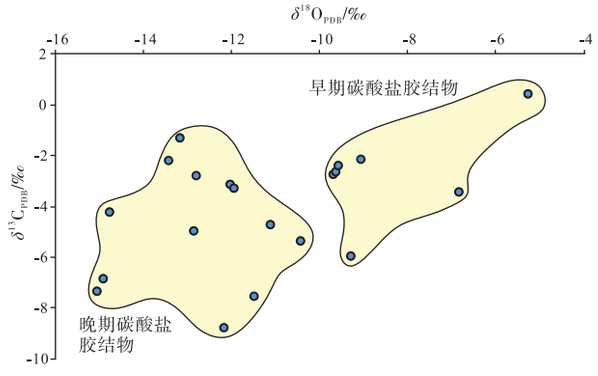


图 7 川西南邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层碳酸盐胶结物原位微区碳氧同位素特征

Fig. 7 Characteristics of in situ micro-area carbon and oxygen isotopes in carbonate cements in sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

3.2.3 自生高岭石期次

通过分析不同类型胶结物相互接触关系发现，研究区须四段底部砂岩储集层早期自生高岭石形成于铁白云石胶结之前（图 5-f），晚期自生高岭石形成于铁白云石胶结之后（图 5-h），在阴极发光下，自生高岭石也呈现出 2 种发光特征，分别为靛蓝色和浅靛蓝色（图 5-e），表明 2 类自生高岭石的 Fe/Mn 值差异较大（宋进，2017），进而说明 2 类自生高岭石形成的时间不同，以上岩相学证据表明研究区须四段底部砂岩储集层发育 2 期自生高岭石。此外，通过前文对自生高岭石伴生矿物流体包裹体均一温度及碳氧同位素分析，表明自生高岭石伴生矿物发育 2 期，且分别形成于早成岩 B 期和中成岩 A 期，即自生高岭石同样具有早晚 2 期发育特征。综上所述可知，川西南部邛西—白马庙地区须四段底部致密砂岩储集层发育 2 期自生高岭石，且早期自生高岭石形成于早成岩 B 期，晚期自生高岭石形成于中成岩 A 期。

4 自生高岭石形成及保存机制

4.1 自生高岭石物质来源

前人研究表明，自生高岭石的物质来源主要为长石等铝硅酸盐矿物的溶蚀（张永旺等，2015；陈思芮等，2019；王亚男等，2019）。此外，硅、铝离子在沉积盆地地层水中的溶解度极低，仅百万

分之一量级，很难进行长距离迁移（Bjørlykke and Jahren，2012；Gao *et al.*，2022），对研究区须四段 3 套单砂体内自生高岭石含量与距强溶蚀段纵向距离作交会图，发现两者呈明显负相关关系（图 8），即在单套砂体内距强溶蚀段越远，自生高岭石含量越低，表明二氧化硅、铝离子没有发生长距离迁移，并且据单砂体厚度（1.54～2.46 m）分析，二氧化硅、铝离子最大迁移距离仅为纵向米级尺度。川西南部邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层岩性为岩屑砂岩，碎屑组分中岩屑颗粒较多，长石颗粒较少（图 2-b），通过铸体薄片镜下观察发现，研究区须四段底部致密砂岩储集层自生高岭石的沉淀常与岩屑颗粒、长石颗粒溶蚀现象伴生，多见自生高岭石充填岩屑粒内溶孔（图 9-a），局部见自生高岭石充填长石粒内溶孔（图 9-b），研究区须四段砂岩储集层总溶蚀量可用溶蚀孔隙度（孔隙度×溶蚀面孔率/面孔率）定量表征（周晓峰等，2019），研究发现溶蚀孔隙度与自生高岭石百分含量呈一定的正相关关系（图 9-c），即岩屑、长石溶蚀量越大，自生高岭石含量越高，表明自生高岭石的形成与岩屑、长石的溶蚀有关。综上所述，川西南部邛西—白马庙地区须四段储集层自生高岭石的物质来源为储集层内部含铝硅酸盐岩屑及少量长石的溶蚀。

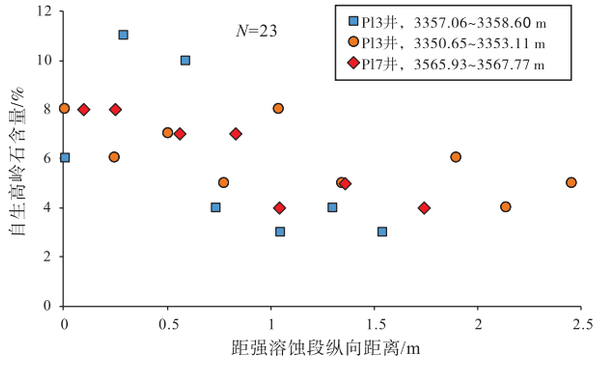


图 8　川西南邛西—白马庙地区须四段底部自生高岭石含量与距强溶蚀段纵向距离关系

Fig. 8　Relationship between authigenic kaolinite content and vertical distance from strong dissolution section at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

4.2　酸性流体来源

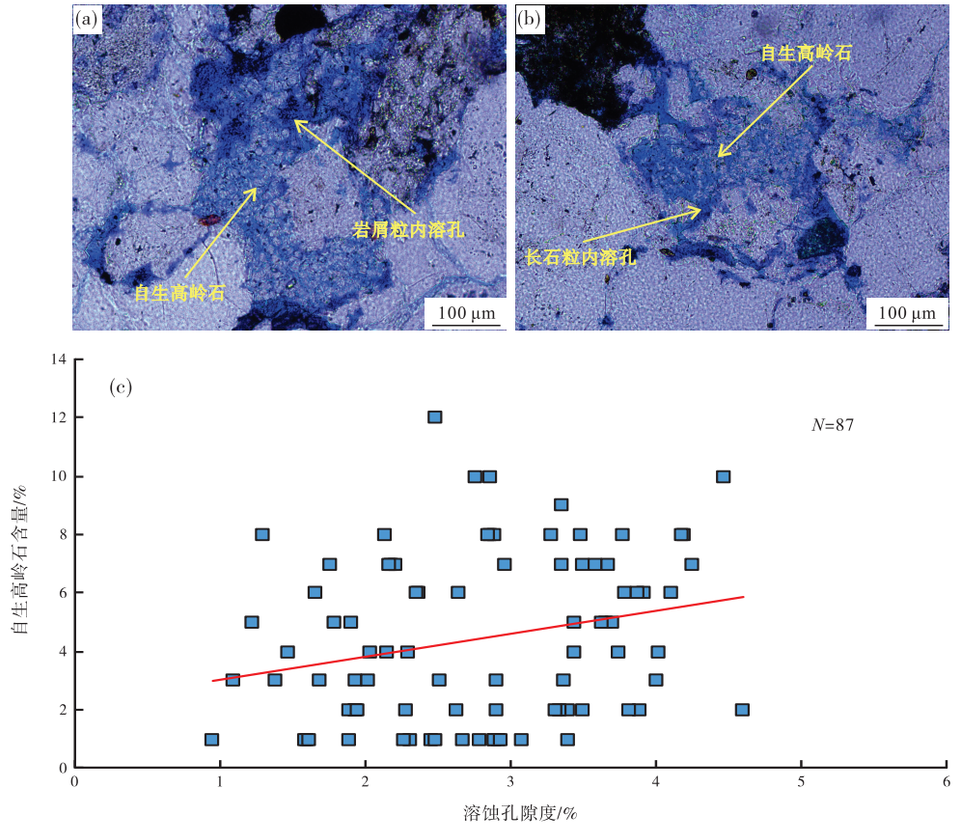
长石等铝硅酸盐类矿物在酸性条件下易发生溶蚀，前人研究认为砂岩储集层中与铝硅酸盐类矿物溶蚀有关的酸性流体主要包括：砂岩储集层近地表经受的大气淡水、邻近煤系地层腐殖酸以及烃源岩中有机质成熟脱羧产生的有机酸（黄思静等，2003；邹华耀等，2005；丁晓琪等，2014）。

根据前人对川西地区须四段埋藏及热演化史的研究表明，须四段在晚三叠世埋深迅速增加，在早白垩世末期达到最大埋深（约 4500 m），自晚白垩世地层开始抬升，现今埋藏深度仍超过 3000 m（李嵘等，2011；陈冬霞等，2016；Chen *et al.*，2024）。因此，川西南邛西—白马庙地区须四段地层在埋藏过程中并未抬升至近地表，故可排除大气淡水作为酸性流体来源（张雪芬等，2013；Gao *et al.*，2022）。同时川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层 2 期碳酸盐胶结物$\delta^{13}C_{PDB}$值均表现出负偏特征，说明 2 期碳酸盐胶结物均受到有机碳的影响（刘四兵等，2014），且晚期碳酸盐胶结物$\delta^{18}O_{PDB}$较早期明显偏轻（图 7），表明早期碳酸盐胶结物形成温度相对较低，而晚期碳酸盐胶结物形成温度相对较高，这一结果与碳酸盐胶结物中盐水包裹体均一温度分布特征也较为一致（图 6-c）。据此可推测研究区须四段砂岩储集层经历了 2 期有机酸性流体充注，即早期温度相对较低时和晚期温度相对较高时分别充注的有机酸性流体。此外，由于川西南上三叠统须家河组煤系地层发育，在低温条件下煤系地层中的腐殖型有机质氧化反应能够产生腐殖型有机酸（李熙喆等，2008；郑荣才等，2008；黄思静等，2009）。据此推测早期有机酸为邻近煤系地层产生的腐殖酸；晚期碳酸盐胶结物碳氧同位素均较轻，其形成与有机质热脱羧作用有关（张庄等，2022），即晚期有机酸为泥岩中有机质成熟脱羧产生的有机酸。综上所述，川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层中溶蚀铝硅酸盐类矿物的酸性流体共有 2 期，早期为邻近煤系地层产生的腐殖酸，晚期为泥岩层段中有机质成熟脱羧产生的有机酸。

4.3　自生高岭石形成及保存机制

4.3.1　自生高岭石形成机制

基于前述自生高岭石物质来源以及酸性流体来源分析，本次研究认为早成岩阶段 A 期，砂岩处于半固结状态，碎屑组分中岩屑含量较多，长石含量较少，碎屑颗粒主要呈点—线接触（图 10-a）。早成岩阶段 B 期，邻近煤系地层浅埋藏低温条件



a—自生高岭石充填岩屑粒内溶孔，Pl3 井，3358.36 m，单偏光；b—自生高岭石充填长石粒内溶孔，Pl3 井，3353.65 m，单偏光；c—自生高岭石含量与溶蚀孔隙度相关图

图 9 川西南部邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层自生高岭石与长石及岩屑溶蚀关系

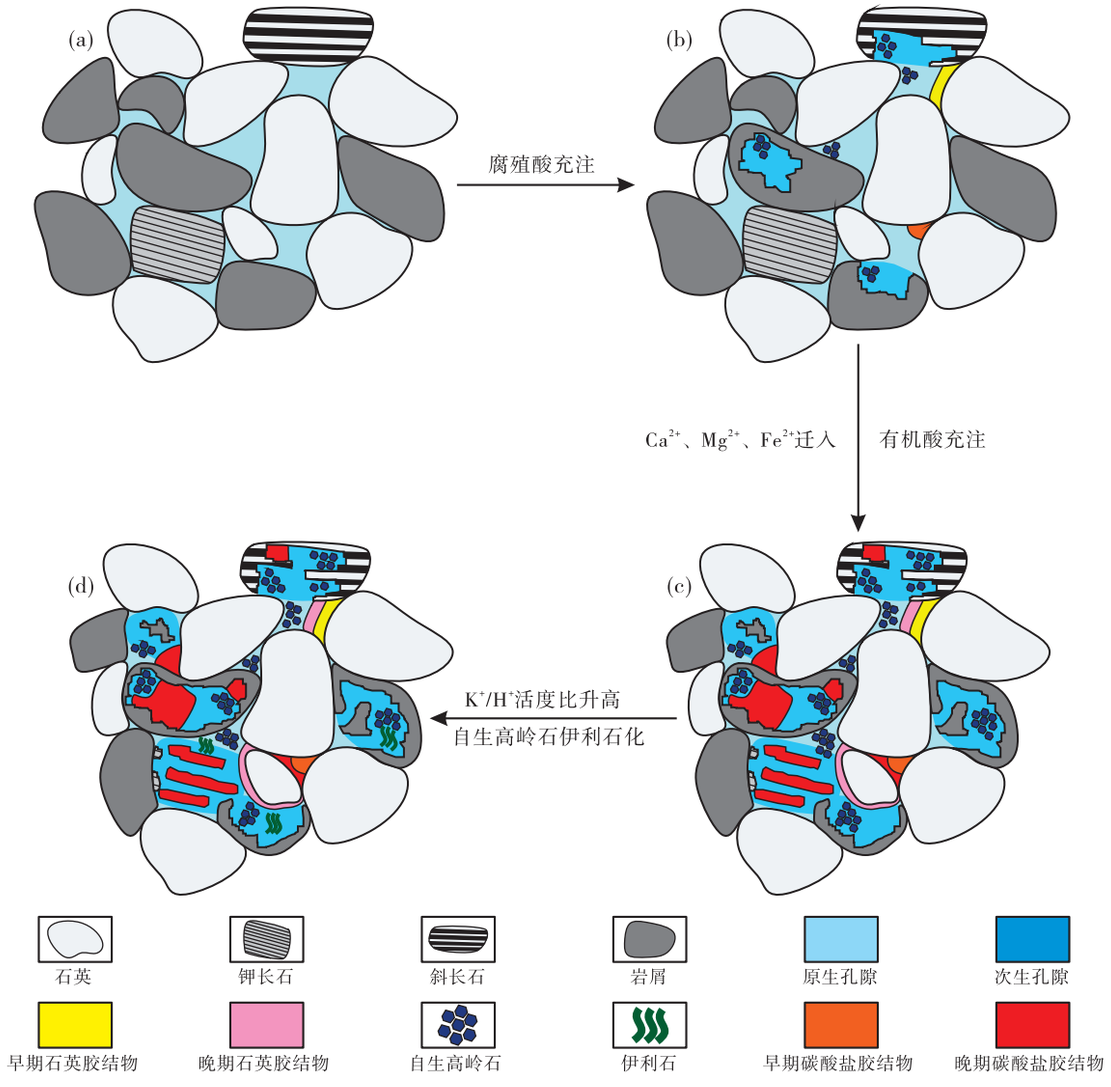
Fig. 9 Relationship between authigenic kaolinite and dissolution of feldspar and rock fragments in sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

下产生的腐殖酸进入储集层（黄思静等，2009），部分岩屑与长石颗粒在腐殖酸的作用下发生溶蚀（图 10-b）。在此情况下，偏基性的斜长石（如钙长石）因在低温条件下发生溶解反应的吉布斯自由能增量较钾长石低，相对更不稳定因而更易与酸性流体作用发生溶蚀（反应式（1）），而钾长石在此阶段相对稳定，不易发生溶蚀（史基安等，1994；黄思静等，2009；曹斌风和孙卫，2011）。因此，在早成岩阶段 B 期，少量偏基性的斜长石及含铝硅酸盐岩屑的溶蚀提供了二氧化硅和铝离子，进而形成早期自生高岭石（张永旺等，2015），同时与之伴生早期碳酸盐胶结物和早期石英胶结物。中成岩阶段 A 期，随着埋深增大，压实作用变强，此时邻近泥岩层段中黏土矿物转化产生的 Ca^{2+}、Fe^{2+}、Mg^{2+}等离子，在压实作用下随有机质成熟脱羧产生的有机酸充注进入储集层（Huang *et al.*，2024）。在此阶段，储集层内岩屑与长石在有机酸的作用下发生进一步溶蚀，并提供二氧化硅和铝离子，形成晚期自生高岭石，并同时伴生晚期碳酸盐胶结物和晚期石英胶结物（图 10-c）。

$$CaAl_2Si_2O_8(\text{钙长石}) + 2H^+ + H_2O = Al_2Si_2O_5(OH)_4(\text{高岭石}) + Ca^{2+} \quad (1)$$

4.3.2 自生高岭石保存机制

1）钾长石含量较少仅能提供极为有限的 K^+。大量研究表明，自生高岭石可向伊利石发生转化（黄思静等，2009；韩信等，2016；蔡来星等，2023），且该反应主要受 K^+/H^+活度比及地层温度控制（黄思静等，2009；黄可可等，2012；Zhu *et al.*，2022）。据扫描电镜观察，研究区须四段储集层局部存在自生高岭石集合体中心单晶向外发生卷曲、变薄（图 5-k），以及自生高岭石与伊利石共生现象（图 5-l），表明部分自生高岭石发生了伊



a—早成岩 A 期；b—早成岩 B 期；c—中成岩 A 期；d—中成岩 A 期末

图 10　川西南部邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层自生高岭石形成与保存机制模式

Fig. 10　Formation and preservation mechanisms of authigenic kaolinite in sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan

利石化（陈朝兵等，2021；蔡来星等，2023）。中成岩 A 期(图 10-c)，有机酸进入储集层后溶蚀钾长石产生 K^+（反应式（2）），但此时地层中 H^+浓度较大且地层温度未达到阈值温度（120～140 ℃），因此自生高岭石不易发生伊利石化。随着溶蚀作用的进行，埋藏深度的增加，H^+浓度降低、K^+/H^+活度比增大，且温度达到阈值温度(120～140 ℃)（黄思静等，2009），自生高岭石在中成岩 A 末期发生伊利石化（反应式（3））(图 10-d)。由于此时地层因较大埋深已经处于封闭状态（黄思静等，2009），自生高岭石伊利石化所需的钾离子只能由储集层中钾长石的溶蚀提供，且自生高岭石伊利石化反应一旦发生，将持续进行直至储集层中钾长石或自生高岭石全部耗尽（黄思静等，2009；孟万斌等，2011）。川西南部邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层中长石含量较少(平均百分含量 1.29%)，在自生高岭石发育位置(最大百分含量 12%)，钾长石含量远低于自生高岭石含量(图 2-b)。因此，可推测须四段致密砂岩储集层中的钾长石基本消耗殆尽，仅极少量自生高岭石发生了伊利石化，大部分自生高岭石未向伊利石转化得以保存。

2）晚期碳酸盐胶结物消耗大量的 Fe^{2+}、Mg^{2+}。自生高岭石在 Fe^{2+}、Mg^{2+}富集的碱性环境下会发生绿泥石化（陈鑫等，2009；蔡来星等，2023）（反应式（4））。根据铸体薄片及扫描电镜观察，研究区须四段砂岩储集层不发育绿泥石，表明在成岩过程中，自生高岭石的绿泥石化作用并未发生。研究区须四段砂岩储集层 Fe^{2+}、Mg^{2+}主要来自于泥岩层段，又因晚期碳酸盐胶结物主要发育铁白云石（图 5-f 至 5-i），且靠近泥岩层段的砂岩储集层碳酸盐胶结物异常发育（图 11-a），表明随有机酸一同进入砂岩储集层中的 Ca^{2+}、Fe^{2+}、Mg^{2+}参与了铁白云石的沉淀，且铁白云石形成早于晚期高岭石胶结（图 5-h）。在此情况下，因 Fe^{2+}、Mg^{2+}参与形成铁白云石大量被消耗，导致 Fe^{2+}、Mg^{2+}无法富集达到自生高岭石绿泥石化所需的环境条件，故须四段致密砂岩储集层自生高岭石未向绿泥石转化并得以保存。

3）有机酸性流体进入储集层时地层温度较低。在较高温度（100～130 ℃）的富酸性流体作用下，自生高岭石会向地开石发生转化（赵杏媛，1997；伏美燕等，2012）。据前人研究成果，川西地区须四段致密砂岩储集层不发育地开石（王亚男等，2019），此外通过铸体薄片及扫描电镜观察，邛西—白马庙地区须四段储集层不发育地开石，表明研究区须四段自生高岭石没有发生地开石化。据前文分析，研究区须四段致密砂岩储集层成岩过程中经历了 2 期有机酸性流体充注，早期为煤系地层产生的腐殖酸（图 10-b），晚期为泥岩中有机质成熟产生的有机酸（图 10-c），石英胶结物均一温度分布特征表明晚期有机酸充注时的地层温度在 80～90 ℃之间（图 6-c），晚期有机酸充注时地层温度未达到自生高岭石地开石化所需的温度条件（100 ℃），因此早期自生高岭石未发生地开石化，而随着成岩作用的进行，酸性流体逐渐被消耗，晚期自生高岭石沉淀，当地层温度达到 100 ℃时，成岩流体不再具有富酸性，因此研究区须四段储集层早晚 2 期自生高岭石均没有发生地开石化。

综上所述，川西南部邛西—白马庙地区须四段致密砂岩储集层自生高岭石保存机制为：（1）碎屑组分中钾长石含量少，仅部分自生高岭石发生了伊利石化；（2）Fe^{2+}、Mg^{2+}不断被消耗参与形成晚期铁白云石，导致 Fe^{2+}、Mg^{2+}无法富集，不能达到自生高岭石向绿泥石转化所需要的环境条件；（3）地层温度和有机酸浓度未能同时达到自生高岭石地开石化条件，因而自生高岭石得以大部分保存。

$$2KAlSi_3O_8(\text{钾长石}) + 2H^+ + H_2O = Al_2Si_2O_5(OH)_4(\text{高岭石}) + 2K^+ + 4SiO_2 \quad (2)$$

$$3Al_2Si_2O_5(OH)_4(\text{高岭石}) + 2K^+ + OH^- = 2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2(\text{伊利石}) + 2H^+ + 3H_2O \quad (3)$$

$$3.5Fe^{2+} + 3.5Mg^{2+} + 9H_2O + 3Al_2Si_2O_5(OH)_4 = Fe_{3.5}Mg_{3.5}Al_{6.0}Si_{6.0}O_{20}(OH)_{16}(\text{绿泥石}) + 14H^+ \quad (4)$$

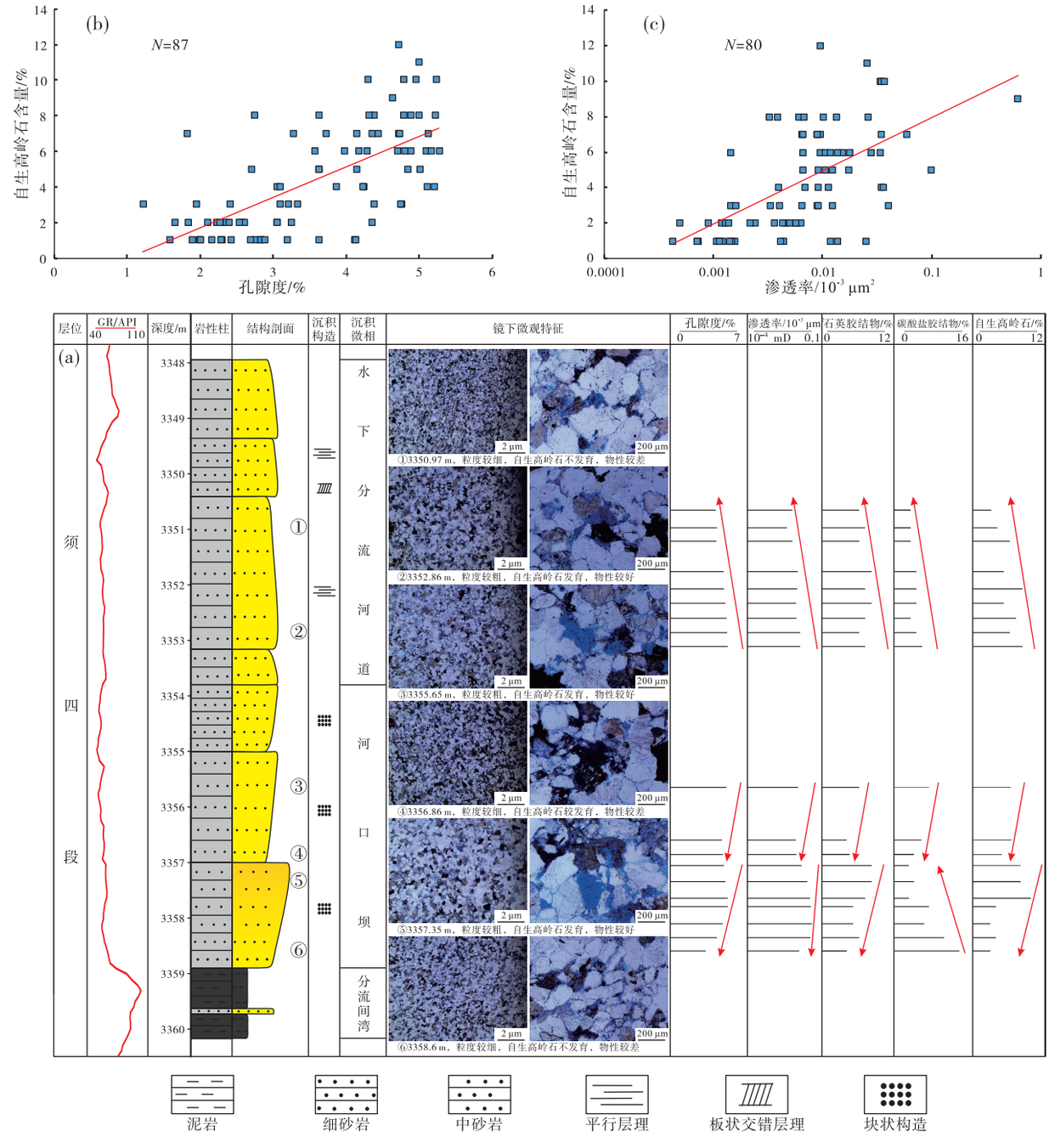
5 自生高岭石对储集层物性的影响

伊利石、绿泥石充填孔隙会堵塞孔隙喉道，降低储集层渗透率（孟万斌等，2011；田建锋等，2014），此外孔隙充填式绿泥石对储集层孔隙还具有破坏作用（陈国松等，2021）。川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层自生高岭石仅极少量伊利石化且无绿泥石化，其独特的保存机制在一定程度上保持了储集层的孔隙度与渗透率。

研究区须四段底部砂岩储集层自生高岭石发育，且整体上其含量与储集层物性呈正相关（图 11-b，11-c）。同时，自生高岭石在纵向上的分布也与储集层物性密切相关，表现为自生高岭石发育部位储集层物性较好，且相对优质储集层主要分布在水下分流河道正旋回砂体底部和河口坝反旋回砂体顶部（图 11-a）。

据前文分析可知，自生高岭石物质来源为储集层中含铝硅酸盐岩屑与长石的溶蚀，且由于研究区须四段砂岩储集层自生高岭石独特的保存机制，绝大部分自生高岭石得以保存，即自生高岭石含量能够反映长石、岩屑的溶蚀量，进而反映溶蚀作用的强弱。自生高岭石的含量越多表明溶蚀作用越强，产生的次生孔隙越多。因此，整体上研究区须四段砂岩储集层自生高岭石含量与储集层物性呈正相关关系（图 11-b，11-c）。

此外，因辫状河三角洲前缘水下分流河道和河口坝沉积环境水动力较强，所形成的砂岩粒度较粗、分选较好，且粒间孔喉条件较好，为酸性溶蚀流体的迁移与改造提供了有利条件（张永旺等，2015），进而有利于早期腐殖酸和晚期有机酸在粒度较粗的水下分流河道底部和河口坝顶部发生大量溶蚀，形成较多溶蚀孔且显著改善储集层物性的同时，沉淀较多的自生高岭石和石英胶结物（图 11-a）。



a—Pl3 井须四段储集层综合柱状图；b—自生高岭石百分含量与孔隙度相关图；c—自生高岭石百分含量与渗透率相关图

图 11　川西南部邛西—白马庙地区须四段底部砂岩储集层自生高岭石与物性关系

Fig. 11　Relationship between authigenic kaolinite and physical properties of sandstone reservoir at the bottom of Xu 4 Member in Qiongxi-Baimamiao area, southwestern Sichuan Basin

综上所述可知，川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层自生高岭石含量一定程度上能反映溶蚀作用的强弱，同时指示储集层物性的好坏，可作为研究区须四段优质致密砂岩储集层段的识别标志。

6　结论

1）川西南邛西—白马庙地区须四段砂岩储集层岩性为岩屑砂岩，碎屑组分中长石含量较少，岩屑含量较多；储集空间类型主要为粒内溶孔，以岩

屑粒内溶孔为主，见少量长石粒内溶孔，局部发育剩余粒间孔和裂缝；孔隙度分布范围为 0.43%~5.51%，渗透率分布范围为（0.000119~1.15）×10^{-3} μm^2，主要分布在（0.000119~0.1）×10^{-3} μm^{2}之间。属典型的致密储集层，孔渗相关性较好。

2）须四段致密砂岩储集层自生高岭石在扫描电镜下单晶呈假六方片状，集合体呈书页状，铸体薄片镜下呈蠕虫状、手风琴状，在阴极发光下呈靛蓝色和浅靛蓝色。主要充填粒间孔和粒内溶孔，常与碳酸盐胶结物、石英胶结物伴生。整体上发育 2 期自生高岭石，分别为早期相对低温条件下（早成岩 B 期）形成的自生高岭石和晚期相对高温条件下（中成岩 A 期）形成的自生高岭石。

3）研究区须四段致密砂岩储集层 2 期自生高岭石的物质来源为储集层内含铝硅酸盐岩屑以及长石颗粒的溶蚀。早期酸性流体来源为邻近煤系地层产生的腐殖酸，晚期酸性流体来源为泥岩层段中有机质成熟脱羧产生的有机酸。晚期有机酸充注时，地层温度较低，随着地层温度升高，有机酸也逐渐被消耗，导致自生高岭石未向地开石转化，中成岩 A 期末，自生高岭石发生伊利石化，但储集层中钾长石含量少，仅极少量自生高岭石转化成伊利石，并且由于注入储集层中的 Fe^{2+}、Mg^{2+}不断被消耗参与形成铁白云石，无法富集，导致自生高岭石未发生绿泥石化，因此大部分自生高岭石得以保存。

4）研究区须四段致密砂岩储集层自生高岭石独特的保存机制在一定程度上保持了储集层的孔隙度与渗透率。此外，在强水动力条件下形成的粒度较粗、分选较好的砂岩溶蚀作用较强、自生高岭石较发育、对应的储集层物性较好。自生高岭石含量能够在一定程度上反映溶蚀作用的强弱，进而指示储集层物性的好坏，可作为川西南部邛西—白马庙地区须四段致密砂岩优质储集层段发育的标志。

参考文献（References）

蔡来星，杨田，田景春，易娟子，任启强. 2023. 致密砂岩储层中黏土矿物发育特征及其生长机理研究进展. 沉积学报，41(6)：1859-1889.［Cai L X，Yang T，Tian J C，Yi J Z，Ren Q Q. 2023. Advances in studies of development and growth mechanisms of clay minerals in tight sandstone reservoirs. Acta Sedimentologica Sinica，41(6)：1859-1889］

曹斌风，孙卫. 2011. 吴旗地区薛岔区块延长组长 6 砂岩储层成岩作用研究. 天然气地球科学，22(6)：951-960.［Cao B F，Sun W. 2011. Diagenesis of Chang 6 sandstone reservoirs in Xuecha block of Wuqi area. Natural Gas Geoscience，22(6)：951-960］

陈冬霞，庞雄奇，杨克明，祝渭平，严青霞. 2016. 川西坳陷深层叠复连续型致密砂岩气藏成因及形成过程. 吉林大学学报（地球科学版），46(6)：1611-1623.［Chen D X，Pang X Q，Yang K M，Zhu W P，Yan Q X. 2016. Genetic mechanism and formation of superimposed continuous tight sandstone reservoir in Deep Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression. Journal of Jilin University（Earth Science Edition），46(6)：1611-1623］

陈国松，孟元林，郇金来，戴天骄，肖丽华，周武. 2021. 自生绿泥石对储集层质量影响的定量评价：以北部湾盆地涠西南凹陷涠洲组三段为例. 古地理学报，23(3)：639-650.［Chen G S，Meng Y L，Huan J L，Dai T J，Xiao L H，Zhou W. 2021. Quantitative evaluation of impact of authigenic chlorite on reservoir quality：a case study of the Member 3 of Weizhou Formation in Weixinan sag，Beibu Gulf Basin. Journal of Palaeogeography（Chinese Edition），23(3)：639-650］

陈思芮，曲希玉，王冠民，王清斌，曹英权. 2019. 渤中凹陷 CFD18-2 油田高岭石胶结作用及其对储层物性的影响. 吉林大学学报（地球科学版），49(5)：1235-1246.［Chen S R，Qu X Y，Wang G M，Wang Q B，Cao Y Q. 2019. Kaolinite cementation and its influences on reservoir properties in CFD18-2 Oilfield in Bozhong Sag. Journal of Jilin University（Earth Science Edition），49(5)：1235-1246］

陈鑫，钟建华，袁静，聂可可，杨玉平. 2009. 渤南洼陷古近系高岭石发育特征及转化机理. 石油勘探与开发，36(4)：456-462.［Chen X，Zhong J H，Yuan J，Nie K K，Yang Y P. 2009. Development and formation of Paleogene kaolinite，Bonan subsag. Petroleum Exploration and Development，36(4)：456-462］

陈朝兵，赵振宇，付玲，高建荣，宋微，陈新晶. 2021. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组 6 段深水致密砂岩填隙物特征及对储层发育的影响. 石油与天然气地质，42(5)：1098-1111.［Chen Z B，Zhao Z Y，Fu L，Gao J R，Song W，Chen X J. 2021. Interstitial matter and its impact on reservoir development in Chang 6 deepwater tight sandstone in Huaqing area，Ordos Basin. Oil & Gas Geology，42(5)：1098-1111］

丁晓琪，韩玫梅，张哨楠，伏美燕，万友利. 2014. 大气淡水在碎屑岩次生孔隙中的作用. 地质论评，60(1)：145-158.［Ding X Q，Han M M，Zhang S N，Fu M Y，Wan Y L. 2014. Roles of meteoric water on secondary porosity of siliciclastic reservoirs. Geological Review，60(1)：145-158］

伏美燕，张哨楠，胡伟. 2012. 碳酸盐岩中地开石的分布特征及其成因. 沉积学报，30(2)：310-317.［Fu M Y，Zhang S N，Hu W. 2012. The distribution and origin of dickite in carbonate. Acta Sedimentologica Sinica，30(2)：310-317］

付锁堂，王震亮，张永庶，王爱国，孔红喜，范昌育. 2015. 柴北缘西段鄂博梁构造带储层碳酸盐胶结物成因及其油气地质意义：来自碳、氧同位素的约束. 沉积学报，33(5)：991-999.［Fu S T，Wang Z L，Zhang Y S，Wang A G，Kong H X，Fan C Y. 2015. Origin of carbonate cements in reservoir rocks and its petroleum geologic significance：Eboliang structure belt，northern margin of Qaidam Basin. Acta Sedimentologica Sinica，33(5)：991-999］

韩信，蒋艳霞，黄树光. 2016. 砂岩储层中自生高岭石的研究进展. 中

外能源,21(3)：31-40.［Han X,Jiang Y X,Huang S G. 2016. Research progress of authigenic kaolinite in the sandstone reservoirs. Sino-Global Energy,21(3)：31-40］

何登发,李德生,张国伟,赵路子,樊春,鲁人齐,文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学,46(3)：589-606.［He D F,Li D S,Zhang G W,Zhao L Z,Fan C,Lu R Q,Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin,China. Chinese Journal of Geology,46(3)：589-606］

胡榕,王翀峘,陈曦,雷宁,董文娟. 2022. 马岭地区长 6_3 亚段砂岩储层特征及碳酸盐胶结物对储层的影响. 石油地质与工程,36(2)：22-28.［Hu R,Wang C H,Chen X,Lei N,Dong W J. 2022. Sandstone reservoir characteristics of Chang 6_3 in Maling area and influence of carbonate cement on reservoirs. Petroleum Geology and Engineering,36(2)：22-28］

黄可可,黄思静,吕杰,兰叶芳. 2012. 鄂尔多斯盆地东北部太原组砂岩中伊利石的特征及成岩演化. 吉林大学学报(地球科学版),42(S2)：43-52.［Huang K K,Huang S J,Lyu J,Lan Y F. 2012. Nature and diagenetic evolution of illite in the sandstone reservoirs of Taiyuan Formation,Northeast Ordos Basin. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),42(S2)：43-52］

黄思静,武文慧,刘洁,沈立成,黄成刚. 2003. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用：以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例. 地球科学,28(4)：419-424.［Huang S J,Wu W H,Liu J,Shen L C,Huang C G. 2003. Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure：an example from Yanchang Formation sandstone of Triassic of Ordos Basin. Earth Science,28(4)：419-424］

黄思静,黄可可,冯文立,佟宏鹏,刘丽红,张雪花. 2009. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成：来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究. 地球化学,38(5)：498-506.［Huang S J,Huang K K,Feng W L,Tong H P,Liu L H,Zhang X H. 2009. Mass exchanges among feldspar,kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis：a case study on the Upper Paleozoic,Ordos Basin and Xujiahe Formation,Western Sichuan Depression. Geochimica,38(5)：498-506］

贾业,刘晓健,黄晓波,庞小军,卢欢,付鑫. 2024. 碳酸盐胶结物对深层优质碎屑岩储层影响研究. 天然气与石油,42(4)：53-62.［Jia Y,Liu X J,Huang X B,Pang X J,Lu H,Fu X. 2024. The influence of carbonate cement on deep high-quality clastic rock reservoir. Natural Gas and Oil,42(4)：53-62］

雷越,黄嵌,王旭丽,杨涛. 2023. 四川盆地川西坳陷南部上三叠统须四段有利勘探区优选. 见：第 33 届全国天然气学术年会论文集(01 地质勘探). 广西南宁：785-796.［Lei Y,Huang Q,Wang X L,Yang T. 2023. Preferential selection of favorable development areas in Upper Triassic Xujiahe 4 Member,southwest Sichuan Depression. In：Proceedings of the 33rd National Natural Gas Academic Conference(Vol. 01 Geological Exploration). Guangxi Nanning：785-796］

李嵘,张娣,朱丽霞. 2011. 四川盆地川西坳陷须家河组砂岩致密化研究. 石油实验地质,33(3)：274-281.［Li R,Zhang D,Zhu L X. 2011. Densification of Upper Triassic Xujiahe tight sandstones,Western Sichuan,China. Petroleum Geology & Experiment,33(3)：274-281］

李文茂,张天操,钟玉梅,杨永剑,南红丽. 2022. 川西坳陷须四段砂岩碳酸盐胶结物形成机制：来自微量元素的证据. 海相油气地质,27(2)：175-184.［Li W M,Zhang T C,Zhong Y M,Yang Y J,Nan H L. 2022. Formation mechanism of carbonate cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression：evidence from trace elements. Marine Origin Petroleum Geology,27(2)：175-184］

李熙喆,张满郎,谢武仁,李晓革,盛日正. 2008. 川西南地区上三叠统须家河组沉积相特征. 天然气工业,28(2)：54-57.［Li X Z,Zhang M L,Xie W R,Li X G,Sheng R Z. 2008. Sedimentary facies of Upper Triassic Xujiahe Formation in Southwest Sichuan Basin. Natural Gas Industry,28(2)：54-57］

刘创新,高红艳,刘彬彬,李文俊,黄志龙,屈童,杨易卓,夏瑜,单理军. 2024. 西湖凹陷中央反转带花港组储层成岩演化南北差异及其影响因素分析. 地质论评,70(4)：1353-1365.［Liu C X,Gao H Y,Liu B B,Li W J,Huang Z L,Qu T,Yang Y Z,Xia Y,Shan L J. 2024. Analysis on the difference of diagenetic evolution and its influencing factors between north and south of Huagang Formation reservoir in central inversion zone of Xihu Sag. Geological Review,70(4)：1353-1365］

刘四兵,黄思静,沈忠民,吕正祥,宋荣彩. 2014. 砂岩中碳酸盐胶结物成岩流体演化和水岩作用模式：以川西孝泉—丰谷地区上三叠统须四段致密砂岩为例. 中国科学：地球科学,44(7)：1403-1417.［Liu S B,Huang S J,Shen Z M,Lü Z X,Song R C. 2014. Diagenetic fluid evolution and water-rock interaction model of carbonate cements in sandstone：an example from the reservoir sandstone of the Fourth Member of the Xujiahe Formation of the Xiaoquan-Fenggu area,Sichuan Province,China. Science China：Earth Sciences,44(7)：4103-1417］

马永生,蔡勋育,赵培荣,罗毅,张学丰. 2010. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向. 石油学报,31(3)：347-354.［Ma Y S,Cai X Y,Zhao P R,Luo Y,Zhang X F. 2010. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica,31(3)：347-354］

孟昊,钟大康,李卓沛,刘云龙,赵靖,杨越东. 2016. 川西坳陷中段上三叠统须家河组须五段层序格架与沉积相. 地层学杂志,40(3)：278-289.［Meng H,Zhong D K,Li Z P,Liu Y L,Zhao J,Yang Y D. 2016. Sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Fifth Member of Upper Triassic Xujiahe Formation of the middle part of the West Sichuan Depression,South China. Journal of Stratigraphy,40(3)：278-289］

孟万斌,吕正祥,冯明石,张世华,李敏,麦发海. 2011. 致密砂岩自生伊利石的成因及其对相对优质储层发育的影响：以川西地区须四段储层为例. 石油学报,32(5)：783-790.［Meng W B,Lü Z X,Feng M S,Zhang S H,Li M,Mai F H. 2011. The origin of authigenic illite in tight sandstones and its effect on the formation of relatively high-quality reservoirs：a case study on sandstones in the 4th member of Xujiahe Formation,western Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica,32(5)：783-790］

史基安,晋慧娟,薛莲花. 1994. 长石砂岩中长石溶解作用发育机理

及其影响因素分析. 沉积学报,12(3): 67-75. [Shi J A, Jin H J, Xue L H. 1994. Annnalysis on mechanism of feldspar dissolution and its influencing factors in feldspar-rich sandstone reservoir. Acta Sedimentologica Sinica, 12(3): 67-75]

宋进. 2017. 阴极发光显微镜在川西凹陷中段须家河组储层中的应用. 中国石油石化,(6): 16-17. [Song J. 2017. Application of cathodoluminescence microscope in Xujiahe Formation Reservoir in the middle section of west Sichuan depression. China Petrochem, (6): 16-17]

田建锋,喻建,张庆洲. 2014. 孔隙衬里绿泥石的成因及对储层性能的影响. 吉林大学学报(地球科学版),44(3): 741-748. [Tian J F, Yu J, Zhang Q Z. 2014. The pore-lining chlorite formation mechanism and its contribution to reservoir quality. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 44(3): 741-748]

王琪,郝乐伟,陈国俊,张功成,张瑞,马晓峰,王欢. 2010. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理. 石油学报,31(4): 553-558,565. [Wang Q, Hao L W, Chen G J, Zhang G C, Zhang R, Ma X F, Wang H. 2010. Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag. Acta Petrolei Sinica, 31(4): 553-558,565]

王亚男,林良彪,余瑜,李晔寒,郭炎,邓小亮. 2019. 川西拗陷须家河组第四段致密砂岩高岭石及其对储层物性的影响. 成都理工大学学报(自然科学版),46(3): 354-362. [Wang Y N, Lin L B, Yu Y, Li Y H, Guo Y, Deng X L. 2019. Characteristics of kaolinite in tight sand reservoirs of Member 4 of Upper Triassic Xujiahe Formation in west Sichuan depression and its influence on physical properties of reservoirs. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 46(3): 354-362]

文龙,罗冰,王小娟,谢继容,冉崎,潘珂,金值民,关旭. 2025. 四川盆地陆相致密油气勘探新领域及资源潜力. 石油学报,46(1): 77-88. [Wen L, Luo B, Wang X J, Xie J R, Ran Q, Pan K, Jin Z M, Guan X. 2025. New exploration fields and resource potential of continental tight oil and gas in Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 46(1): 77-88]

尤丽,范彩伟,吴仕玖,罗静兰,李才,代龙,李驰. 2021. 莺歌海盆地乐东区储层碳酸盐胶结物成因机理及与流体活动的关系. 地质学报,95(2): 578-587. [You L, Fan C W, Wu S J, Luo J L, Li C, Dai L, Li C. 2021. Genesis of carbonate cement and its relationship with fluid activity in the Ledong area, Yinggehai Basin. Acta Geologica Sinica, 95(2): 578-587]

张雪芬,陆现彩,刘庆,张林晔,李娟,马野牧,张立虎. 2013. 东营凹陷沙河街组砂岩中自生高岭石特征及其成因探讨. 南京大学学报(自然科学版),49(3): 331-342. [Zhang X F, Lu X C, Liu Q, Zhang L Y, Li J, Ma Y M, Zhang L H. 2013. Characteristics and genetic mechanism of authigenic kaolinite in the sandstones of the Shahejie formation in the Dongying depression. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 49(3): 331-342]

张永旺,曾溅辉,曲正阳,陈俊兵. 2015. 东营凹陷砂岩储层自生高岭石发育特征与成因机制. 石油与天然气地质,36(1): 73-79. [Zhang Y W, Zeng J H, Qu Z Y, Chen J B. 2015. Development characteristics and genetic mechanism of authigenic kaolinite in sandstone reservoirs of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin. Oil & Gas Geology, 36(1): 73-79]

张庄,庞江,杨映涛,操延辉,戚明辉,张烨毓,张玲,马森. 2022. 川西坳陷中段须家河组四段砂岩中碳酸盐胶结物碳、氧同位素特征及成因探讨. 地质学报,96(6): 2094-2106. [Zhang Z, Pang J, Yang Y T, Cao Y H, Qi M H, Zhang Y Y, Zhang L, Ma S. 2022. Carbon and oxygen isotope characteristics and genesis of carbonate cements in sandstone of the 4th Member of the Xujiahe Formation in the central western Sichuan depression, Sichuan basin, China. Acta Geologica Sinica, 96(6): 2094-2106]

赵雷昭,刘腾腾,庞江,张帆. 2018. 砂岩储层中自生高岭石的成因与演化. 辽宁化工,47(2): 116-118,121. [Zhao L Z, Liu T T, Pang J, Zhang F. 2018. Formation causes and evolution of authigenic kaolinite in sandstone reservoir. Liaoning Chemical Industry, 47(2): 116-118,121]

赵杏媛. 1997. 塔西南坳陷下奥陶统风化壳中地开石的发现及其意义. 新疆石油地质,18(4): 307-312,4-5. [Zhao X Y. 1997. Discovery of dickite and its significance in weathering crust of lower Ordovician, southwest depression in Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 18(4): 307-312,4-5]

郑荣才,朱如凯,翟文亮,高红灿,戴朝成,耿威. 2008. 川西类前陆盆地晚三叠世须家河期构造演化及层序充填样式. 中国地质,35(2): 246-255. [Zheng R C, Zhu R K, Zhai W L, Gao H C, Dai C C, Geng W. 2008. Tectonic evolution and sequence filling patterns in the western Sichuan foreland-like basin in the Upper Triassic Xujiahean period. Geology in China, 35(2): 246-255]

周晓峰,唐海忠,魏军,周在华,肖文华,李景,于均民. 2019. 砂岩高岭石赋存状态、成因机制及其对物性的影响: 以酒泉盆地营尔凹陷下沟组为例. 东北石油大学学报,43(1): 40-49,59. [Zhou X F, Tang H Z, Wei J, Zhou Z H, Xiao W H, Li J, Yu J M. 2019. Occurrences and formation mechanisms of kaolinite cements in sandstones and their effects on sandstone property: taking Xiagou Formation in Yinger Depression, Jiuquan Basin as an example. Journal of Northeast Petroleum University, 43(1): 40-49,59]

朱筱敏. 2020. 沉积岩石学(第五版). 北京: 石油工业出版社. [Zhu X M. 2020. Sedimentary Petrology (5th Edition). Beijing: Petroleum Industry Press]

邹华耀,郝芳,柳广弟,隋成. 2005. 库车冲断带巴什基奇克组砂岩自生高岭石成因与油气成藏. 石油与天然气地质,26(6): 786-791,799. [Zou H Y, Hao F, Liu G D, Sui C. 2005. Genesis of authigenic kaolinite and gas accumulation in Bashijiqike Fm sandstone in Kuqa thrust belt. Oil & Gas Geology, 26(6): 786-791,799]

Bjørlykke K, Jahren J. 2012. Open or closed geochemical systems during diagenesis in sedimentary basins: constraints on mass transfer during diagenesis and the prediction of porosity in sandstone and carbonate reservoirs. AAPG Bulletin, 96(12): 2193-2214.

Chen X L, Ji Y L, Yang K M. 2024. Impacts of sedimentary characteristics and diagenesis on reservoir quality of the 4th member of the Upper Triassic Xujiahe formation in the western Sichuan basin, southwest China. Marine and Petroleum Geology, 167(6): 106981.

Gao J C, Ma B B, Lu Y C, Zhang W, Cao Q. 2022. Origin of authigenic kaolinite with implications for Permian tight gas sandstone reservoirs

in the northern Ordos Basin, Central China. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 99(1): 104429.

Huang P, Liu M J, Cao B, Ren Y, Tan X C, Zeng W, Lian C B. 2024. Formation mechanism of carbonate cement in tight sandstone reservoirs in the depression zone of foreland basin and its impact on reservoir heterogeneity: the Upper Triassic Xujiahe Formation in Western Sichuan foreland basin, China. Marine and Petroleum Geology, 167(6): 106971.

Zhu P, Meng X H, Wang X, Dong Y X, Li X W, Zhang C H, Li Z Q, Ma T, Wei W, Guo J. 2022. Geochemical characteristics of diagenetic fluid and densification model of tight gas sandstone reservoirs in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 138(1): 105496.

（责任编辑　李新坡）

《古地理学报》2025 年度高被引论文发布

时光沉淀真知，引用彰显价值。作为地质学中文核心期刊，《古地理学报》（中文版）始终以刊发高质量、高影响力中文研究成果为使命，搭建古地理学者交流合作平台，推动学科前沿探索与发展。

依据国内外期刊评价数据库 2023—2024 年度论文在 2025 年度的引文统计数据，我们正式梳理出《古地理学报》2025 年度高被引论文 TOP10。这些论文涵盖细粒沉积、碳酸盐岩沉积与储集层以及成矿作用、测井地质学等热点研究方向，服务国家能源战略，引领学科发展。

1 操应长，梁超，韩豫，葸克来，王俊然，籍士超，梅俊芳. 2023. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨. 古地理学报，25(4)：729-741.

2 张美洲，朱筱敏，姜振学，朱德宇，叶蕾，谌志远. 2023. 陆相淡水湖盆页岩有机质富集主控因素研究：以四川盆地东北部侏罗系自流井组为例. 古地理学报，25(4)：806-822.

3 杜远生，余文超，周琦，郭华，靳松，刘志臣，黄恒，刘海，王萍，齐靓，徐源，许灵通，王宇航，王翰文. 2023. 超大陆裂解与中国大规模成锰作用的耦合关系探讨. 古地理学报，25(6)：1211-1234.

4 王岚，李文厚，刘群，王大兴，张盟勃，白斌. 2023. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 黑色页岩岩相分类与沉积环境恢复. 古地理学报，25(3)：598-613.

5 施振生，王红岩，赵圣贤，周天琪，赵群，祁灵. 2023. 川南地区上奥陶统—下志留统五峰组—龙马溪组快速海进页岩特征及有机质分布. 古地理学报，25(4)：788-805.

6 匡明志，张小兵，袁海锋，陈聪，张玺华，彭瀚霖，徐婷，肖钦仁，李天军，山述娇. 2024. 川中地区茅口组碳酸盐岩层序地层及沉积相特征. 古地理学报，26(5)：1201-1220.

7 吕奇奇，辛红刚，王林，罗顺社，淡卫东，冯胜斌. 2023. 鄂尔多斯盆地宁县地区三叠系延长组 7 段湖盆细粒重力流沉积类型、特征及模式. 古地理学报，25(4)：823-840.

8 赖锦，李红斌，张梅，白梅梅，赵仪迪，范旗轩，庞小娇，王贵文. 2023. 非常规油气时代测井地质学研究进展. 古地理学报，25(5)：1118-1138.

9 刘惠民，王勇，李军亮，张鹏飞，张顺，魏晓亮，秦峰. 2023. 济阳坳陷始新统页岩岩相发育主控因素及分布特征. 古地理学报，25(4)：752-767.

10 乔占峰，于洲，佘敏，潘立银，张天付，李文正，沈安江. 2023. 中国古老超深层海相碳酸盐岩储集层成因研究新进展. 古地理学报，25(6)：1257-1276.

学术引领，逐光前行。本次是《古地理学报》第一次发布年度高被引论文。未来，本刊将继续坚守学术初心，聚焦学科前沿与国家战略需求，刊发更多高质量中文研究成果，助力中国古地理学科高质量发展。感谢所有作者、审稿人、读者的支持与厚爱！

《古地理学报》编辑部

2026. 03. 17