

文章编号: 1671-1505(2026)03-0906-12 DOI:10.7605/gdxb.2026.124

中国南方二叠纪岩相古地理研究现状与进展*

何幼斌^{1,2} 杨星宇^{1,2} 胡滑志帆^{1,2} 罗进雄^{1,2} 赵仲祥^{1,2}

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北荆州 434023

摘要 在系统回顾中国南方二叠纪岩相古地理由宏观定性描述向高精度定量化演进的现状基础上, 重点探讨了以栖霞组—茅口组的白云岩与孤峰组、大隆组的硅岩为核心的岩石演化特征及成因机制。研究表明, 岩相的时空分布深刻反映了大地构造的控制作用, 尤其是在剪刀式碰撞与地幔柱远端效应驱动下的动力学背景, 这些因素决定了沉积格局的时空演化及台-盆分异的特征。针对当前相带边界厘定的瓶颈问题, 本研究提出, 应依托古生物地理相似性指标强化时空约束, 并结合大数据与人工智能技术, 推动从静态图绘制到动态过程预测的转型, 旨在为非常规油气勘探中的“甜点区”评价提供更加严谨的岩石学证据与演化模型支撑。

关键词 岩相古地理 岩石成因 大地构造 定量化分析 二叠纪 中国南方

第一作者简介 何幼斌, 男, 1964 年生, 教授, 主要从事岩相古地理、深水沉积学研究工作。E-mail: heyb122@163.com。

中图分类号: P534.46 文献标志码: A

Research status and progress of the Permian lithofacies palaeogeography in southern China

HE Youbin^{1,2} YANG Xingyu^{1,2} HUHUA Zhifan^{1,2} LUO Jinxiong^{1,2} ZHAO Zhongxiang^{1,2}

1 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2 Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Hubei Jingzhou 434023, China

Abstract Based on a systematic review of the evolution from macroscopic qualitative description to high-precision quantitative analysis of the Permian lithofacies palaeogeography in southern China, this study focuses on the rock evolution characteristics and formation mechanisms centered on the dolomite of the Qixia Formation – Maokou Formation and the siliceous rocks of the Gufeng Formation, Dalong Formation. The study emphasizes that the spatiotemporal distribution of lithofacies profoundly reflects the control of tectonics, especially the dynamic background driven by scissor-like collision and the distal effect of mantle plumes, which determine the spatiotemporal evolution of the sedimentary pattern and the characteristics of the platform-basin differentiation. In response to the current bottleneck problem in the delimitation of facies belts, this study proposes that the spatiotemporal constraints should be strengthened by relying on palaeobiogeographic similarity indicators, and combined with big data and artificial intelligence technologies, to promote the transformation from static map drawing to dynamic process

* 谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

收稿日期: 2026-03-12 改回日期: 2026-05-15

prediction, aiming to provide more rigorous petrological evidence and evolution models for the evaluation of “sweet spots” in unconventional oil and gas exploration.

Key words lithofacies palaeogeography, petrogenesis, tectonics, quantitative analysis, Permian, southern china

About the first author HE Youbin, born in 1964, is a professor in School of Geosciences, Yangtze University. He is mainly engaged in palaeogeography and sedimentology. E-mail: heyb122@163.com.

1 引言

岩相古地理学是一门基于沉积特征、古环境要素及构造背景分析的学科（刘宝珺，1985；冯增昭，1989），旨在恢复地质历史时期的海陆时空演化格局，并揭示沉积环境演变对油气成藏机理的深刻影响。岩相古地理的研究历程大致可分为3个阶段（李增学等，2021；郑秀娟等，2023）。第一阶段为1980年前的起步期，以黄汲清（1957）、刘鸿允（1959）等学者为代表，主要在古生物地层学的指导下进行海陆分布的大轮廓绘制。古生物地层学主导，以海陆轮廓恢复为核心。第二阶段为1980—2000年的快速发展期，板块构造理论的引入促进了研究方法的创新，冯增昭（1977，2004）提出了“单因素分析多因素综合”定量编图法，研究逐步由定性分析向定量分析转变，并开始服务于资源评价工作。板块构造理论引入，开始定量编图。第三阶段为2000年以来的现代深化期，研究以构造演化为主线（牛小兵等，2024），陈洪德等（2006）、朱筱敏等（2020）等学者结合层序地层学与地震沉积学理论在不同阶段。学者们采用了不同的作图方法（表1），一步一步深化了岩相古地理学的研究。目前主要是结合层序地层和地震沉积学，GIS/数字盆地/AI开始进入。随着大数据与人工智能技术的迅速发展，现阶段的研究已从传统的静态图绘制转向动态过程模拟，并能够直接支持页岩油气等“甜点区”的精准预测（李增学等，2021；王惠君等，2025）。

为了更系统地展示学科进展，文中重点综述了以下内容：首先是关键岩石的成因，包括栖霞组—茅口组的白云岩成因，以及孤峰组、大隆组硅岩的成因。其次是沉积相类型的划分，详细分析了浅海陆棚（缓坡）向镶边台地的转变规律，并在此基础上讨论沉积相演化特征。同时，探讨了相带边界的定量化确定方法。此外，分析了大地构造（如

东吴运动和地幔柱效应）对相带分布的控制作用。最后，总结了岩相古地理在油气勘探实践中的应用价值。希望通过这些整合研究，为该领域的理论和实践提供参考。

2 岩石成因问题探讨

2.1 栖霞组—茅口组白云岩成因

四川盆地中二叠统的勘探过程中，JT1与PY1等高产井的发现引起了广泛关注。这些井展示的大规模滩相白云岩储集层，现有研究普遍认为，白云岩的形成并非单一机制控制，而是沉积环境、构造活动及成岩流体共同作用的结果。渗透回流模式由于能够较好地解释台内局限环境、高盐流体来源以及滩相颗粒灰岩选择性交代等特征，因此被认为是目前最具解释力的机制之一（Yang *et al.*, 2021；Yang *et al.*, 2025）。尤其是在茅口期海平面下降背景下，局限台地环境增强，蒸发浓缩形成的富镁流体沿高孔渗滩体向下运移，为白云石化提供了有利条件。该模式不仅有效解释了岩石的化学转变，还揭示了当时特殊的古地理环境对储集层发育的控制作用（牟传龙，2022）。然而，对于四川盆地中二叠统栖霞组—茅口组白云岩的形成机制，学界尚未形成完全统一的认识。

成因机制与层序演化密切相关。在茅口期早期，全球海平面出现了显著下降趋势。海退过程与四川盆地局部古地貌的抬升相结合，导致台地内部形成了相对封闭的局限环境（Yang *et al.*, 2024）。在强烈的蒸发作用下，海水逐渐浓缩为高盐度的咸化盐水。由于盐水的较高密度，重力作用驱使盐水沿原本疏松多孔的滩相颗粒灰岩向下渗透。在此过程中，镁离子替代了钙离子，最终将原始灰岩交代成白云岩（厚刚福等，2017）。观察相关数据可以看出，交代过程对原始孔隙度的依赖性较高（Xiao

表 1 不同学者制图方法及其主要特点

Table 1 Different scholars' mapping methods and their main characteristics

学者	核心方法	主要特点	核心参考文献
刘鸿允	古生物地层学方法	第一本系统论述中国各地质时代沉积地层的古地理轮廓专著；侧重宏观海水进退,对相带内部动态演化关注较少	《中国古地理图·第2版》
王鸿祯	构造古地理/ 地史制图	全球视野;从板块构造演化角度审视古地理;对陆块位置的恢复具有权威性	《中国古地理图集》
关士聪	大地构造学和 岩相学方法	多体现为大区域、跨时代的海陆分布图,重点勾勒海水进退的宏观轮廓;具有鲜明的应用导向,重点分析海陆变迁及海域沉积相对油气形成与分布的约束作用	《中国海陆变迁海域沉积相与油气》
冯增昭	单因素分析多因素 综合作图法	定量化程度高;强调单因素(如砂岩含量、灰质含量)的客观分布;避免了人为对环境的主观判断	《中国南方早中三叠世岩相古地理》
刘宝珺	岩相古地理基础法	结合板块构造与盆地分析,强调沉积环境与相带的系统还原	《中国南方震旦纪—三叠纪岩相古地理图集》
马永生	构造—层序岩相 古地理	服务油气勘探;重点分析大地构造对相带的控制;强调“构造控盆、盆控相”	《中国南方构造—沉积演化与油气控制》
牟传龙	层序岩相古地理 制图法	时空演化感强;将相带分布于层序框架下;特别适合解释南方二叠纪这种剧烈的“台—盆”转化	《中国岩相古地理图集》
罗伯特· 马克斯	定量古生物 地理约束法	数据驱动的经验约束;利用生物相似性指标(Simpson等)定量还原板块位置	《生物地球科学》

et al., 2023; 印长海等, 2023)。因为滩相颗粒灰岩具有较高的初始连通孔隙,可为富镁流体提供有效运移通道。

从微观特征来看,白云岩表现出明显的成岩印记。显微镜下,白云石晶体多为粉晶至细晶结构,晶粒形态通常规则,呈现自形或半自形特征。虽然白云石化过程产生了一定的晶间孔隙,这些孔隙往往被后期的泥质或黑色沥青充填。这些沥青的存在实际上记录了古代油气曾在此处大规模聚集并发生热裂解的历史轨迹(谭秀成等, 2025)。填充现象在一定程度上也降低了储集层的有效性。

由于成岩作用受局部地貌和渗透路径的影响,这些储集层在空间分布上表现出明显的非均质性。在横向上通常不是连续的层状,而是呈现出互不相连的透镜状或者斑块状(Yang *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2025)。分布特征给油气田的精确描述带来了挑战(牛小兵等, 2024)。在实际的勘探场景中,研究人员需要结合高精度的地震数据,才能更准确地捕捉这些“甜点”区的空间位置。由于成岩局部性导致的横向不连续性,这种横向不连续性与渗透回流作用局部化发育的特征较为一致(山述娇等, 2023)。部分研究还结合碳氧同位素、流体包裹体及稀土元素特征,对白云岩化流体来源进行了约束。

仅依靠渗透回流模式仍难以完全解释部分地区

白云岩的成因特征。例如,一些白云岩表现出较高的成岩温度、异常稀土元素配分及构造裂缝充填特征,这些现象可能与深部热液活动或构造流体改造有关(Xiao *et al.*, 2023)。此外,不同地区白云岩在晶体结构、孔隙类型及空间展布上的差异,也说明其形成过程可能具有明显的阶段性与多期叠加特征。

因此,未来研究需要进一步结合碳氧同位素、Sr同位素、流体包裹体及稀土元素等多种地球化学指标,对白云石化流体来源、运移路径及成岩演化阶段进行综合约束。相比于简单归因于单一模式,从“多机制耦合”的角度理解白云岩形成过程,可能更符合四川盆地复杂的构造—沉积背景。

2.2 孤峰组、大隆组硅岩成因

孤峰组与大隆组硅岩的硅来源问题,是当前华南二叠纪深水沉积研究中的重要争议之一。传统观点认为,硅质物质主要来源于深水环境中的生物硅沉积,例如放射虫、硅质海绵等生物遗骸的堆积与重结晶(Shen *et al.*, 2015)。这一认识能够较好地解释硅质岩与深水缺氧环境、高有机质丰度之间的共生关系(何幼斌和罗进雄, 2010; 厚刚福等, 2017)。但近年来,越来越多研究指出,仅依赖生物成因难以解释部分地区硅岩中异常高的SiO₂含量及热液元素富集特征。一些学者认为,峨眉山地

幔柱活动相关的热液输入，可能为盆地深水区提供了额外硅源 (Yan *et al.*, 2020)。与此同时，火山灰蚀变作用也被认为是潜在的重要硅来源之一。特别是在晚二叠世频繁火山活动背景下，火山物质向海洋释放大量可溶硅，为硅质沉积提供了物质基础。目前来看，孤峰组、大隆组硅岩更可能表现为“多源混合”特征，即生物硅、热液硅及火山硅共同参与沉积过程，而不同地区和不同沉积阶段，其主导来源可能并不一致。未来需要进一步结合稀土元素、硅同位素及热液敏感元素等指标，对硅来源进行定量区分，并建立硅循环与海洋环境演化之间的耦合关系。

在孤峰组的沉积过程中，构造抬升与海平面下降的共同作用导致海水蒸发作用变得尤为显著，从而形成了局部高盐度水体，高盐环境可能改变水体化学性质，从而影响硅质物质的富集与沉积 (Yang *et al.*, 2024)。硅质物质的富集与沉积过程受到不同沉积环境的影响。在大隆组中，由于深水环境的存在 (胡朝伟等, 2020; 付小东等, 2021)，富含硅质物质的水体沉积成为该地层的关键特征 (Shen *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2020)。硅质物质在沉积过程中逐渐胶结为硅质岩，最终形成了优质储集层。

微观观察表明，这些硅岩颗粒呈现规整形状，晶粒粒度较小。通过偏光显微镜观察，可以发现硅质岩的主要成分为石英，且石英颗粒呈现典型的光学特征，如双折射，微晶石英集合体和隐晶结构，表明其具有较高的成岩程度。

2.3 沉积构造特征

在华南中二叠统茅口组的野外露头中，广泛发育一种具典型形态特征的差异性沉积构造，即由椭圆状石灰岩结核（眼球）及其外缘包裹的薄层泥质条带（眼皮）构成的组合。这种眼球—眼皮状石灰岩不仅具有显著的宏观识别特征，更是保存地质历史时期物理化学环境演变的“时空记录载体” (牟传龙, 2022)。

关于沉积构造的成因，地质学界曾有过长期的争论。早期的观点多倾向于差异成岩作用，认为这是由于后期压实不均导致的。虽然早期研究倾向于差异压实作用，但近年来越来越多学者认为其与古地震诱发的软沉积变形有关。在中二叠世末期，受东吴运动的影响，华南板块的构造活动变得异常活

跃 (何幼斌和罗进雄, 2010)。频繁的地震活动产生了强烈的地震波，这些波动传导至尚未完全固结的碳酸盐淤泥中。

地震触发的液化作用是形成构造的核心机制。在地震震动的影响下，半固结的沉积物发生了液化和塑性流动 (Yang *et al.*, 2024)。较纯的钙质组分倾向于聚集形成球状结核，而泥质组分则被排挤到边缘，形成了如同眼睑般的包裹层。在野外观察中可以发现，这些“眼球”的排列往往具有一定的定向性，可能反映沉积物在外部应力作用下的定向调整。

特殊的构造序列在空间上通常具有良好的可对比性。它们不仅出现在四川盆地，也广泛发育在黔桂等深水盆地边缘。这些古地震记录为还原东吴运动的强度和频率提供了第一手资料。同时，剧烈的震动也极大地改变了原始沉积物的孔隙结构。物理性质的改变，对于后期成岩流体的运移和储集层的发育具有潜在的影响 (牟传龙, 2022)。从微观构造推导宏观背景的方法，是现代古地理研究的重要组成部分。

3 沉积类型和阶段划分

3.1 浅海陆棚阶段

采用四川盆地中二叠统三级层序划分方案，将栖霞组—茅口组划分为 SQ1-SQ5 这 5 个三级层序 (Hu *et al.*, 2012; 胡朝伟等, 2020)。在中二叠世早期，也就是 SQ1 到 SQ2 层序发育阶段，中国南方的地理格局相对简单 (图 1)。这一时期地壳活动比较平稳，整个扬子板块表现为一个巨大的、坡度极缓的碳酸盐岩均质缓坡，尽管整体上表现为缓坡背景，但局部地区可能已出现微地貌差异或同沉积构造活动 (牟传龙, 2022)。由于当时板块处于赤道附近的低纬度地区，温暖的气候非常适合海洋生物生长，这为大规模碳酸盐岩的堆积提供了物质基础 (Marks *et al.*, 2025)。

从沉积结构来看，SQ1-SQ2 阶段的相带分布具有很强的规律性。研究者们通常根据水动力强弱和水体深浅，将这一阶段的沉积相从岸向海划分为内缓坡、中缓坡和外缓坡 3 个部分 (Yang *et al.*, 2024)。内缓坡主要靠近古陆，环境比较封闭，经常发育一些潮坪和局限潟湖。在这里，可以发现大

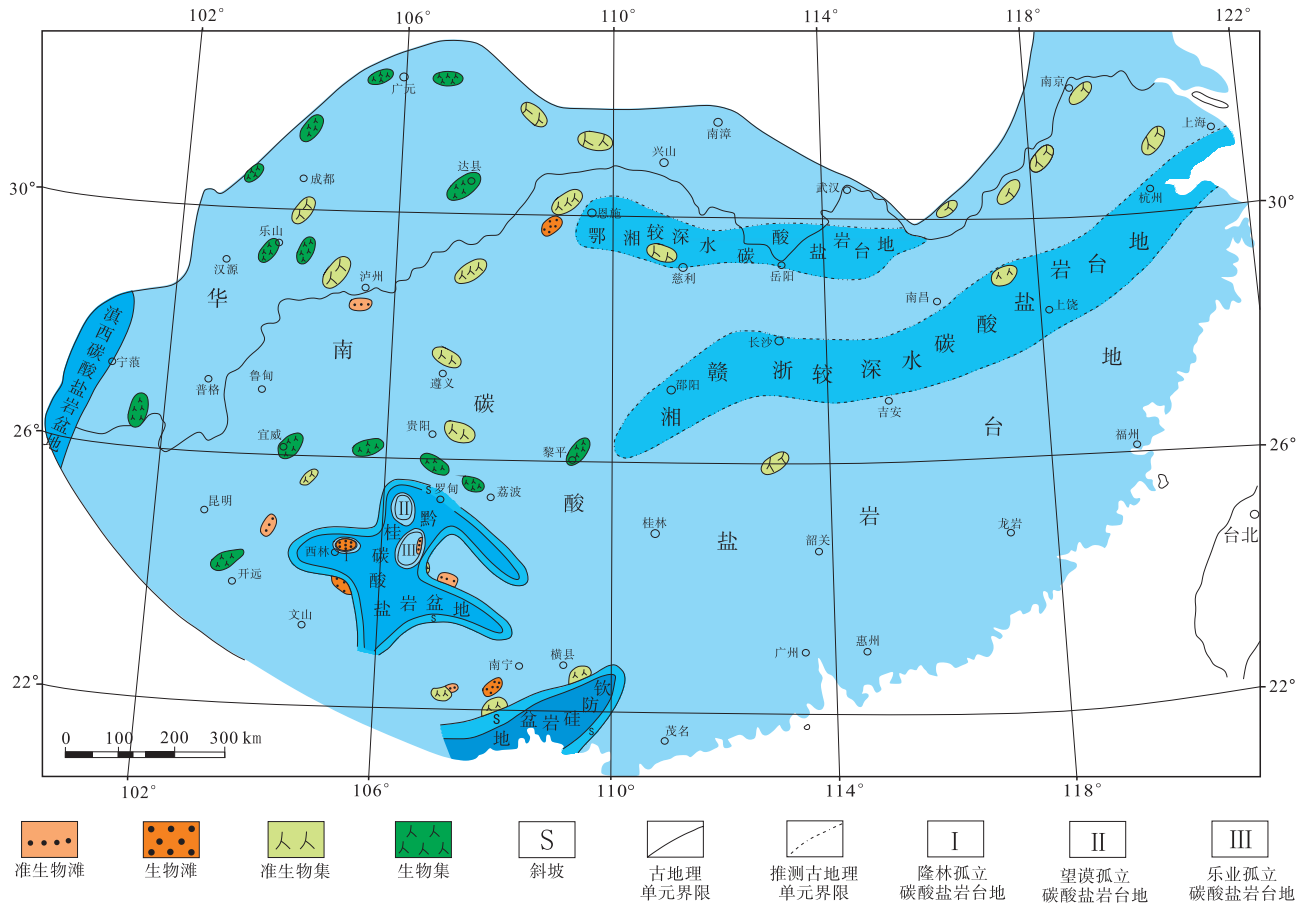


图 1 中国南方中二叠世栖霞期岩相古地理 (据冯增昭等, 1996)

Fig. 1 Lithofacies palaeogeography of the Middle Permian Qixia Period in southern China (after Feng *et al.*, 1996)

量的泥晶灰岩和云质灰岩。

与此同时，中缓坡是能量最高的区域。由于这里位于浪基面以上，波浪和洋流不断冲刷，形成了大量的生屑滩和鲕粒滩。颗粒滩的形成还受到波浪能量、海平面变化及古地貌条件的共同控制。这些颗粒滩是后期优质储集层发育的关键。在查阅四川盆地的地质资料时注意到，SQ2 时期的滩体规模通常比 SQ1 时期更大，且分布更加广泛。外缓坡则逐渐过渡到深水环境，水体较深且安静，沉积物以深色的薄层石灰岩和泥质灰岩为主，含有较多的浮游生物化石（何幼斌和罗进雄，2010）。

演化规律方面，SQ1-SQ2 阶段记录了 1 次完整的海平面升降过程（Haq and Schutter, 2008）。SQ1 初期，全球海平面开始缓慢上升。海水从盆地边缘向陆地内部侵入，形成了大面积的浅海环境。在这一过程中，沉积物表现出明显的下细上粗特征。SQ2 时期，海平面进入相对稳定的阶段，甚至

出现了小规模的下降。由于堆积空间充裕，颗粒滩开始大规模向海洋方向推进（进积）。相带的动态迁移，直接导致了中缓坡的高能相带在纵向上不断叠加（牟传龙，2022）。

环境背景对这一时期的沉积演化也有显著影响。研究表明，中二叠世早期的海洋生产力一直维持在较高水平（Shen *et al.*, 2015）。丰富的营养物质促使底栖生物大量繁衍，这些生物碎屑最终成了缓坡上颗粒滩的主要成分。整体上，SQ1-SQ2 以缓坡沉积为主，而在 SQ3 之后，台、盆分异逐渐增强，但不同地区构造响应时间可能存在差异。从生物活动到地质堆积的演化逻辑，构成了 SQ1-SQ2 阶段古地理恢复的核心线索。稳定的缓坡格局，也为后期 SQ3 阶段向“镶边台地”的剧烈演变埋下了伏笔（Yang *et al.*, 2024）。

3.2 镶边台地阶段

中二叠世晚期，层序 SQ3 到 SQ5 发育的这段

时间，中国南方的海底面貌发生了翻天覆地的变化（图 2）。原本平整的缓坡在构造力的拉扯下开始碎裂，变成了高低错落的台地和深盆，称之为台-盆分异（牟传龙，2022）。格局的剧烈转变，主要归功于当时发生的东吴运动。差异沉降形成的坡折带增强了波浪能量集中，并为礁滩生物持续向上建造提供了有利条件。地壳的强烈拉张让一些地方快速陷落成了深海槽，而另一些地方则保持在浅水环境，变成了被礁滩环绕的镶边台地（何幼斌和罗进雄，2010）。

在这一阶段，根据地貌起伏和水体能量，可以将沉积相划分为台地内部、台地边缘、斜坡以及深水盆地。台地内部由于被边缘的礁滩墙挡住了波浪，水体非常安静。这里主要发育局限台地相，沉积物以泥晶灰岩为主。而在台地边缘，环境则完全不同。这里直接面对开阔的大海，波浪能量极高，是生物礁和生屑滩最喜欢生长的地方（Yang *et al.*, 2024）。分析四川盆地的钻井资料发现，正是这些

台缘礁滩复合体，构成了后期最重要的油气储集空间。

穿过台地边缘向海的方向，地形会突然变陡，形成斜坡带。在重力的作用下，台地上的泥沙和碎屑经常会发生塌方，沿着斜坡滑入深海，形成特有的重力流沉积（Yang *et al.*, 2024）。而最深的地方就是盆地中心，这里远离陆地，水体极度缺氧，慢慢堆积起了孤峰组或大隆组的黑色硅质岩和富有机质泥岩（Shen *et al.*, 2015）。这些深水沉积物不仅记录了当时的环境危机，也是现在大家非常关注的页岩气产层。

关于演化规律，SQ3 层序是整个沉积事件的序幕。随着东吴运动的爆发，原本统一的缓坡开始出现褶皱和断裂，相带分布开始变得零碎。到了 SQ4 和 SQ5 时期，分化达到了顶峰。随着海槽不断加深，台地边缘的礁滩体为了跟上海平面的上升，开始持续向上加积，并逐渐向盆地中心推进。由平变陡的过程，使得相带在极短的距离内就发生了剧烈

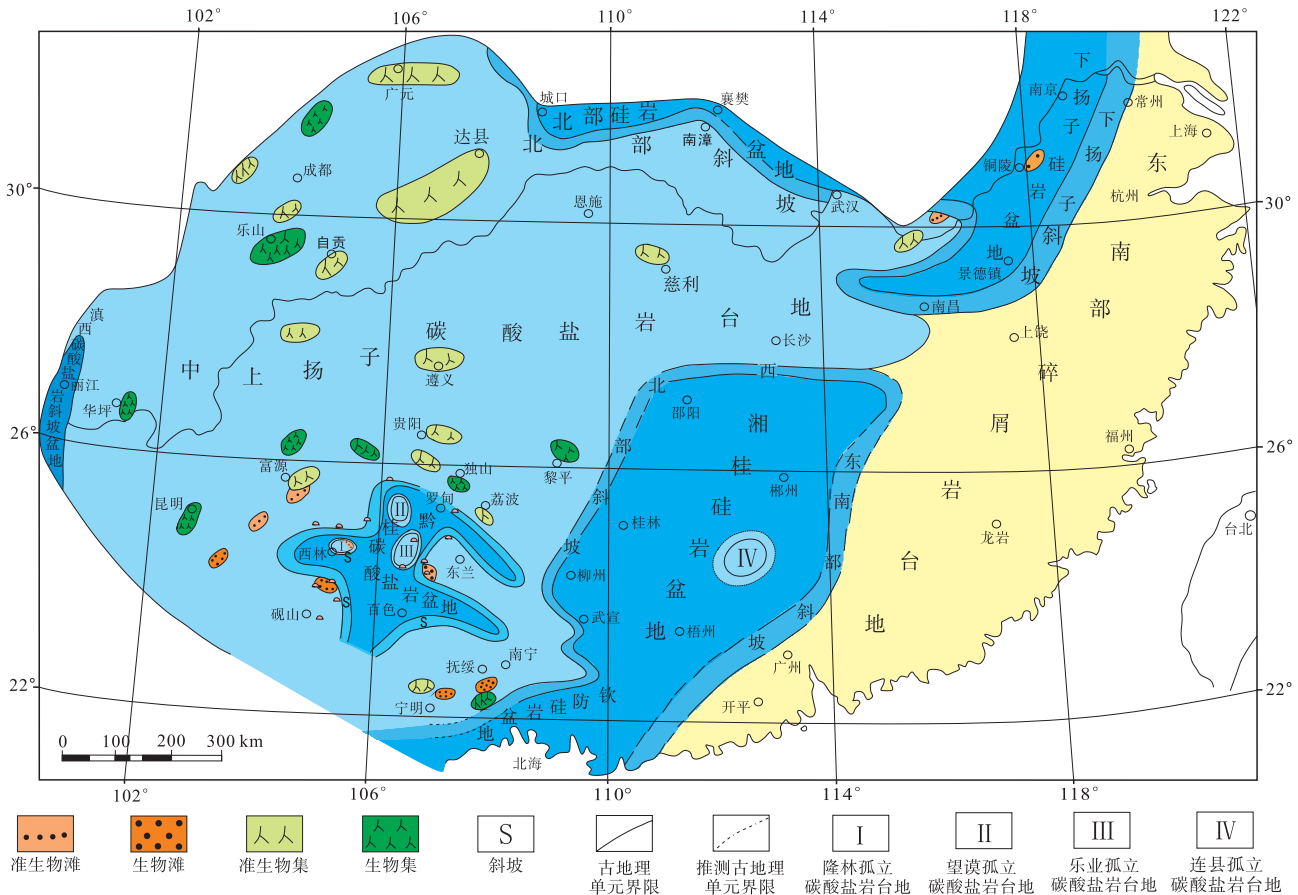


图 2 中国南方中二叠世茅口期岩相古地理（据冯增昭等，1996）

Fig. 2 Lithofacies palaeogeography of the Middle Permian Maokou Period in southern China (after Feng *et al.*, 1996)

变化 (牟传龙, 2022)。

到了 SQ5 末期, 台-盆格局已经非常成熟 (图 3)。台地和盆地之间存在着巨大的地形高差, 这不仅改变了海水的流动路径, 也直接控制了有机质的堆积模式 (Yang *et al.*, 2024)。正是剧烈的地貌分异, 为后期大规模油气的生成和储存提供了绝佳的物理框架。从简单缓坡到复杂镶边台地的演变, 是中国南方二叠纪地质历史上最具典型的变化。

3.3 局限台地与潮坪阶段

在镶边台地发育成熟以后, 台地边缘的礁滩体像一道天然的防波堤, 挡住了外海的高能波浪。这使得台地内部变成了一个水流缓慢、相对封闭的区域, 也就是局限台地 (牟传龙, 2022)。在四川盆

地的中二叠统中, 环境分布非常广泛, 是理解台地整体演化的重要组成部分。

从岩石特征来看, 局限台地主要堆积的是低能环境下的泥晶灰岩或泥粒灰岩。因为水体流动性差, 生物种类相对单调, 只有一些耐盐性较强的生物能够在这里生存。在观察相关的薄片资料时注意到, 这里的岩石往往含有较多的泥晶基质, 反映了极低的水动力背景 (Yang *et al.*, 2024)。在一些局部区域, 如果蒸发作用特别强烈, 海水盐度会升高, 发生前文提到的渗透回流白云石化, 形成重要的储集层 (牟传龙, 2022)。

当水体进一步变浅, 台地出露海面或处于极浅水状态时, 就进入了潮坪环境。潮坪通常位于局限台地的边缘, 紧邻古陆。根据淹没程度的不同, 可以将其细分为潮上带、潮间带和潮下带 (何幼斌

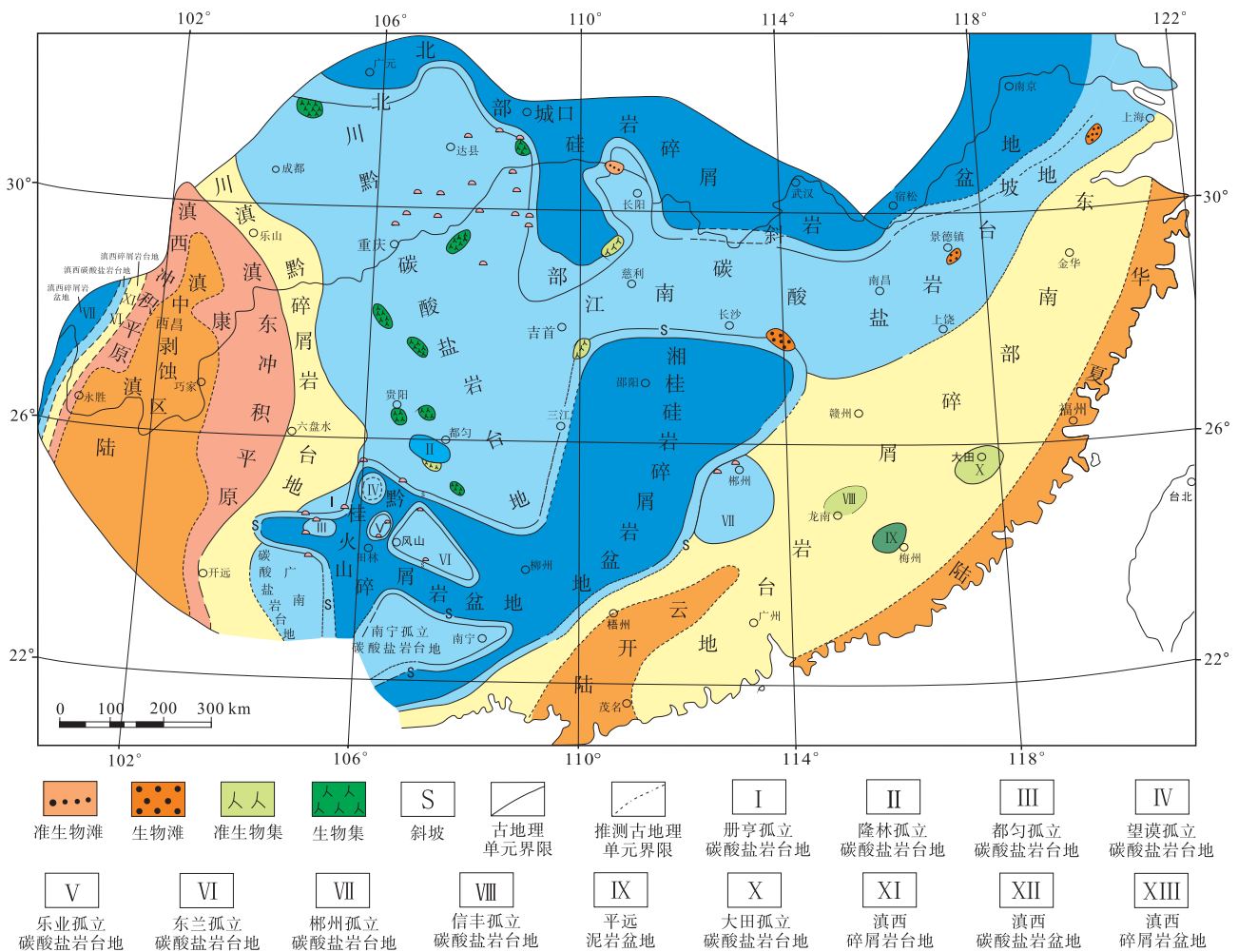


图 3 中国南方晚二叠世长兴期岩相古地理图 (据冯增昭等, 1996)

Fig. 3 Lithofacies palaeogeography of the Late Permian Changxing Period in southern China (after Feng *et al.*, 1996)

和罗进雄, 2010)。潮坪蒸发环境形成的晶间孔与溶蚀孔, 可进一步改善白云岩储集层物性。这里最典型的识别标志就是各种暴露构造, 比如泥裂、鸟眼构造以及由藻类形成的纹层状结构(曾允孚和夏文杰, 1986; 冯增昭, 1993)。这些特征反映当时的沉积面经常会暴露在空气中受阳光曝晒。

在SQ3到SQ5的演化过程中, 局限台地与潮坪相的分布范围经历了显著的变化。随着东吴运动引起的台地差异升降, 一些原本开阔的区域逐渐被隔绝, 局限环境的面积不断扩大(Yang *et al.*, 2024)。在四川盆地内部, 可以看到由于局部高地的存在, 潮坪相带在横向上不断迁移。相带的更替, 实际上是全球海平面变化与区域构造活动共同博弈的结果(Marks *et al.*, 2025)。

研究局限台地和潮坪相不仅是为了还原古地理景观, 更因为它与油气富集密切相关。在这些相对封闭的环境里, 如果水体能够保持长期的缺氧状态, 也可能有利于有机质的保存(Shen *et al.*, 2015)。同时, 潮坪环境下的膏盐层或者致密石灰岩, 往往能成为优良的盖层, 保护下方礁滩储集层中的油气不流失。礁滩储矿、局限封堵的组合, 正是在四川盆地寻找大型气田的理想模式。

4 大地构造对沉积格局的定量约束与控制

4.1 古生物地理相似性指标与陆块位置定量约束

确定地质历史时期陆块在全球坐标系中的精确位置, 是古地理研究的难点。古地磁数据能有效约束纬度, 但经度的恢复则主要依靠古生物分布的定量化分析。Marks等(2025)利用全球早二叠世腕足类化石数据, 通过辛普森(Simpson)、杰卡德(Jaccard)和戴斯(Dice)等相似性指标衡量板块间的空间亲疏关系。这些指标通过量化共有属种比例, 建立板块间“生物相似性—空间距离的统计联系”。针对早二叠世华南陆块的定位, 研究者对比了W13、M16及Y19等构造方案。Spearman秩相关测试证实, Y19模型(103°E)最符合腕足类动物群随距离递减的生物地理特征。这一准确定位不仅解决了板块运动速度异常的力学难题, 还揭示了华南陆块分隔古特提斯洋南北两支的宏观格局。

将古生物数据与构造背景深度融合, 为相带边界的定量约束提供了新的思路, 标志着中国岩相古地理研究进入了精准恢复的新阶段。

4.2 构造背景对沉积相带的控制机理

华南二叠纪的沉积演化并非局部孤立现象, 而是周缘复杂大地构造背景下应力场与沉积响应耦合的结果。该时期, 华南板块位于古特提斯洋俯冲、勉略洋闭合和峨眉山幔柱活动的动力交汇点, 这些构造背景共同塑造了该地区的沉积格局(何幼斌和罗进雄, 2010; 牟传龙, 2022)。古特提斯洋俯冲与勉略洋闭合导致了周缘构造的剪刀式闭合, 推动了沉积相带的穿时性演变, 并引发了台、盆分异格局的形成。此外, 地幔柱活动及区域伸展应力的作用促使沉积环境发生显著变化, 尤其是碳酸盐岩缓坡向台、盆分异格局的转型, 这一转型过程为油气藏的形成创造了有利条件。

深部动力学驱动的构造-沉积联动机制, 不仅重塑了华南地区的古地理格局, 也为富有机质岩系的差异化发育提供了构造约束。构造背景的变化促使沉积物类型、沉积速率和孔隙度等特征发生变动, 为油气勘探提供了重要的理论支持。总的来说, 华南二叠纪的沉积演化是由复杂的构造-沉积耦合作用引起的, 这一机制为非常规油气资源勘探提供了宝贵的理论依据和实践指导。

4.2.1 碰撞造山与相带穿时性

华南板块在二叠纪的构造演变表现出显著的非同步性。受古特提斯洋闭合驱动, 板块间的碰撞呈现剪刀式(Zou and Yin, 2009; Chen *et al.*, 2019; Xiong *et al.*, 2019), 由一端向另一端推进, 其沉积格局深受剪刀式构造运动的控制。这种非同步的碰撞模式导致应力传递存在时空差异, 进而驱动了相带的穿时演化。受古特提斯洋闭合影响, 华南板块内部发生差异性拉张, 形成了深水海槽与浅水台地并存的台-盆格局。由于构造拉张具序次性, 深水硅质岩的沉积层位在空间上表现出明显的非等时性。此外, 构造驱动的局部沉降诱发了上升洋流, 提升了海洋生产力, 使得孤峰组、大隆组硅质岩的分布成为构造拉张槽演化的直接投影。

4.2.2 伸展构造与台-盆分异

中二叠世四川盆地西北缘的沉积格局受控于勉略洋俯冲与地幔柱驱动的伸展应力场。原本稳定的碳酸盐岩缓坡在应力下发生解体, 诱发基底断裂与

差异沉降, 导致台-盆格局的形成。这种构造转折在层序上演化清晰, SQ1-SQ2 阶段为均一沉积背景; SQ3-SQ5 阶段随伸展加剧, 地形高差凸显, 促使台缘礁滩相与盆地深水相带差异发育。此外, 构造驱动的盆底沉降诱发上升洋流, 提升了海洋生产力 (Chen *et al.*, 2019; Xiong *et al.*, 2019)。这种从构造动力到环境响应的演化逻辑, 不仅塑造了特殊的沉积面貌, 也为页岩气“甜点区”的分布提供了根本约束。

4.2.3 地幔柱活动

峨眉山地幔柱被广泛认为是控制华南晚二叠世构造-沉积演化的重要深部动力来源, 但其规模、持续时间及影响范围, 目前仍存在较大争议。一部分研究认为, 峨眉山地幔柱属于典型的大火成岩省事件, 其热隆升作用导致茅口组顶部广泛剥蚀, 并诱发东吴运动及区域性台-盆分异 (何幼斌和罗进雄, 2010)。在这一框架下, 地幔柱不仅改变了华南地区的古地貌格局, 也通过伸展作用控制了深水海槽及台缘礁滩体系的形成。

然而, 也有学者认为, 现有证据尚不足以完全支持“大规模地幔柱统一控制”的模式。例如, 部分地区东吴运动表现出明显的差异性和穿时性, 说明构造响应可能受到局部断裂活动及区域应力场共同影响。此外, 关于地幔柱热穹窿范围、抬升幅度以及古特提斯构造体系之间的耦合关系, 目前仍缺少统一认识。

因此, 峨眉山地幔柱更可能并非单独控制华南二叠纪沉积演化, 而是在古特提斯洋闭合、区域伸展及局部断裂活动共同作用下, 形成复杂的构造-沉积响应体系。未来需要结合高精度年代学、地球物理反演及盆地数值模拟, 对地幔柱活动的时空范围及动力学机制进行进一步约束。

5 岩相古地理为油气勘探服务的实践

岩相古地理研究在中国南方二叠系油气勘探中具有重要的实际意义, 其核心作用在于恢复沉积体系展布特征, 并进一步预测有利储集层、烃源岩及盖层的空间配置关系 (刘宝珺, 1985; 冯增昭, 2004; 胡明毅等, 2010)。尤其是在四川盆地及其周缘地区, 栖霞组-茅口组碳酸盐岩储集层和孤峰

组/大隆组页岩气层系的勘探突破, 很大程度上依赖于岩相古地理恢复成果的指导 (马永生等, 2009; Hu *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2025)。

在中二叠统栖霞组-茅口组勘探中, 岩相古地理研究主要服务于台缘礁滩体及白云岩储集层预测 (胡明毅等, 2010; Hu *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2021)。研究表明, SQ3 之后随着东吴运动增强, 盆地内部开始出现明显的台-盆分异, 台缘坡折带逐渐形成, 高能滩相颗粒灰岩沿台缘稳定发育 (胡朝伟等, 2020; Chen *et al.*, 2019; 何幼斌和罗进雄, 2010)。这些高能滩体不仅具备较好的原始孔隙条件, 也更容易发生白云石化作用, 从而形成优质储集层 (Yang *et al.*, 2021; Xiao *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2025)。因此, 台缘带逐渐成为天然气勘探的重要目标区。近 20 年来双鱼石等地区的勘探实践表明 (马永生等, 2009), 岩相古地理恢复对于台缘滩体展布预测具有较强指导意义。

与此同时, 岩相古地理研究在页岩气勘探中同样发挥了重要作用。上二叠统孤峰组与大隆组深水硅质页岩主要发育于台盆转换带及深水海槽区 (Shen *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2020; 付小东等, 2021), 这些区域通常具有较高有机质丰度和较强硅质富集特征, 是页岩气形成的重要物质基础 (胡朝伟等, 2020; 付小东等, 2021)。通过恢复深水沉积中心及缺氧环境分布, 可以有效预测优质烃源岩和页岩气甜点区的位置。例如, 在川东及上扬子西缘地区, 深水陆棚-盆地相带恢复对于页岩气有利区评价具有重要参考价值 (Shen *et al.*, 2015; 付小东等, 2021)。

此外, 岩相古地理研究还能够为储集层-烃源岩-盖层组合分析提供区域背景。局限台地与蒸发潮坪环境形成的膏盐层和致密灰岩, 可作为区域性封盖层; 而台缘礁滩及白云岩储集层则为油气运聚提供有利空间 (Yang *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2025)。这种“相控储集层、相控烃源、相控封盖”的认识 (冯增昭, 1993), 已经成为四川盆地二叠系油气勘探的重要理论基础之一。

近年来, 随着地震沉积学、层序地层学及地球化学技术的发展, 岩相古地理研究正在逐渐由传统静态编图向定量化预测方向发展。特别是在三维地震解释、储集层建模及机器学习等技术的辅助下, 古地理恢复结果已经能够更直接地参与储集层预测

与勘探部署。未来，如何进一步建立“构造-沉积-储集层”之间的动态耦合模型，并提高有利相带预测精度，仍将是岩相古地理服务油气勘探的重要发展方向。

6 结论与展望

中国南方二叠纪岩相古地理研究已经从早期以岩性与古生物为基础的定性恢复，逐渐发展为融合层序地层学、构造地质学、地球化学及盆地动力学的综合研究体系。特别是在四川盆地及其周缘地区，栖霞组-茅口组台地演化、孤峰组、大隆组深水沉积以及东吴运动背景下的台-盆分异等问题，已经形成较为系统的认识框架。

现有研究普遍认为，中二叠世早期（SQ1-SQ2）整体以缓坡碳酸盐岩台地沉积为主，而自SQ3开始，受东吴运动及区域构造活动影响，台地边缘坡折逐渐形成，沉积格局由相对均一的缓坡体系向镶边台地-盆地体系转变。这种构造-沉积耦合过程不仅控制了台缘礁滩、深水硅质岩及优质烃源岩的空间分布，也对后期油气储集层形成产生了重要影响。

与此同时，目前仍存在一些关键问题尚未完全统一。首先，栖霞组-茅口组白云岩形成机制仍具有明显争议，渗透回流、热液改造及埋藏白云石化等不同模式可能在不同地区共同作用；其次，孤峰组与大隆组硅岩的硅来源尚未形成统一认识，生物硅、热液输入及火山灰蚀变等多种来源之间的相对贡献仍需进一步约束；此外，峨眉山地幔柱的规模、持续时间及其对华南二叠纪古地理格局的控制程度，目前仍缺少统一的动力学解释。

未来研究需要进一步加强多学科交叉与定量化研究。一方面，应结合高精度年代学、同位素地球化学、流体包裹体及盆地模拟等方法，对构造活动与沉积响应之间的时空关系进行更精细约束；另一方面，GIS、机器学习及数值模拟等新技术的引入，也将推动岩相古地理研究从传统静态编图逐步向动态演化恢复与沉积过程预测发展。

总体而言，中国南方二叠纪岩相古地理研究已经进入由“格局恢复”向“过程机制解释”转变的新阶段。如何建立构造活动、海平面变化、古海洋环境与沉积响应之间的统一动力学框架，仍将是未来研究的重要方向。

后记：值此冯增昭先生百年诞辰之际，我们怀着无比崇敬与深切怀念之情，追忆先生为地质科研与教育事业倾尽一生的光辉足迹。先生虽 2023 年元月驾鹤西去，但其严谨治学的风骨、开拓创新的精神，早已化作照亮后辈科研之路的明灯，永远镌刻在地质科学的发展史上。

回望六载半求学时光，我在先生指导下深耕中国南方二叠纪定量岩相古地理研究。先生以“单因素分析多因素综合作图法”为钥，为我叩开定量研究的大门，从野外剖面的精准踏勘，到数据的反复推敲，每一个环节都以严苛标准锤炼我，让我在科研道路上学有所成；而先生藏在严厉背后的关爱，又在我遇挫时给予温暖支撑，护佑我顺利完成学业。先生毕生致力于定量岩相古地理学的开拓，其研究成果为国家油气勘探筑牢科学根基，这份奠基之功，早已融入国家能源事业的发展脉络。

先生虽已远行，然精神不朽。他创立学科、创办期刊、培育英才的担当，他“何苦来”也要为地质事业奉献的执着，始终激励着我们。我们将带着先生的嘱托，传承其学术衣钵，在科研路上笃行不怠，以更扎实的成果告慰先生，让先生毕生追求的地质事业薪火相传、再谱新篇！

（第一作者何幼斌为冯增昭先生的 1986 年硕士研究生、1989 年博士研究生）

参考文献 (References)

- 陈洪德,侯明才,许效松,田景春. 2006. 加里东期华南的盆地演化与层序格架. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(1): 1-8. [Chen H D, Hou M C, Xu X S, Tian J C. 2006. Tectonic evolution and sequence stratigraphic framework in South China during Caledonian. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 33(1): 1-8]
- 冯增昭. 1977. 华北下奥陶统岩相古地理新探. 华东石油学院学报, (3): 57-79. [Feng Z Z. 1977. A new exploration of the Lower Ordovician lithofacies Palaeogeography in North China. Journal of Petroleum Institute of East China, (3): 57-79]
- 冯增昭. 1989. 碳酸盐岩岩相古地理学. 北京: 石油工业出版社. [Feng Z Z. 1989. Lithofacies Palaeogeography of Carbonate Rocks. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学: 第二版. 北京: 石油工业出版社. [Feng Z Z. 1993. Sedimentary Petrology: Second Edition. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 冯增昭,鲍志东,李尚武. 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 北京: 石油工业出版社. [Feng Z Z, Bao Z D, Li S W. 1997. Lithofacies Palaeogeography of the Early and Middle Triassic in Southern

- China. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 冯增昭. 2004. 单因素分析多因素综合作图法: 定量岩相古地理重建. 古地理学报, 6(1): 3-19. [Feng Z Z. 2004. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method: reconstruction of quantitative lithofacies palaeogeography. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 6(1): 3-19]
- 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 何幼斌, 吴胜和, 辛文杰, 鲍志东, 谭健. 1996. 中国南方二叠纪岩相古地理. 沉积学报, 14(2): 1-11. [Feng Z Z, Yang Y Q, Jin Z K, He Y B, Wu S H, Xin W J, Bao Z D, Tan J. 1996. Permian lithofacies palaeogeography in Southern China. Acta Sedimentologica Sinica, 14(2): 1-11]
- 付小东, 陈娅娜, 罗冰, 李文正, 张建勇, 王小芳, 邱玉超, 吕学菊, 姚倩颖. 2021. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义. 地质学报, 95(6): 1903-1920. [Fu X D, Chen Y N, Luo B, Li W Z, Zhang J Y, Wang X F, Qiu Y C, Lü X J, Yao Q Y. 2021. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 95(6): 1903-1920]
- 关士聪. 1984. 中国海陆变迁海域沉积相与油气: 晚元古代~三叠纪. 北京: 科学出版社. [Guan S C. 1984. Sedimentary Facies and Oil and Gas in the Sea Area of China Sea-land Transition: Late Proterozoic~Triassic. Beijing: Science Press]
- 何幼斌, 罗进雄. 2010. 中上扬子地区晚二叠世长兴期岩相古地理. 古地理学报, 12(5): 497-514. [He Y B, Luo J X. 2010. Lithofacies palaeogeography of the Late Permian Changxing age in Middle and Upper Yangtze Region. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 12(5): 497-514]
- 厚刚福, 周进高, 谷明峰, 姚倩颖, 杨柳, 潘立银, 郝毅. 2017. 四川盆地中二叠统栖霞组、茅口组岩相古地理及勘探方向. 海相油气地质, 22(1): 25-31. [Hou G F, Zhou J G, Gu M F, Yao Q Y, Yang L, Pan L Y, Hao Y. 2017. Lithofacies paleogeography and exploration realms of Middle Permian Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 22(1): 25-31]
- 胡朝伟, 胡广, 张玺华, 陈聪, 彭翰霖, 高兆龙, 廖志伟, 庞谦, 游杰. 2020. 川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价. 石油实验地质, 42(2): 202-214. [Hu C W, Hu G, Zhang X H, Chen C, Peng H L, Gao Z L, Liao Z W, Pang Q, You J. 2020. Sedimentary environment, hydrocarbon potential and development of black rocks in upper Maokou Formation, northwestern Sichuan. Petroleum Geology & Experiment, 42(2): 202-214]
- 胡明毅, 魏国齐, 胡忠贵, 杨威, 胡九珍, 刘满仓, 吴联钱, 向娟. 2010. 四川盆地中二叠统栖霞组层序: 岩相古地理. 古地理学报, 12(5): 515-526. [Hu M Y, Wei G Q, Hu Z G, Yang W, Hu J Z, Liu M C, Wu L Q, Xiang J. 2010. Sequence-lithofacies palaeogeography of the Middle Permian Qixia Formation in Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 12(5): 515-526]
- 黄汲清. 1957. 中国主要地质构造单位. 北京: 地质出版社. [Huang J Q. 1957. Main geological structural units in China. Beijing: Geological Publishing House]
- 李增学, 李莹, 刘海燕, 王东东, 王平丽, 宋广增, 李晓静, 贾强, 赵洪刚. 2021. 岩相古地理优势相方法及应用: 兼谈“广义”与“狭义”岩相古地理及若干新的研究方向. 古地理学报, 23(3): 489-506. [Li Z X, Li Y, Liu H Y, Wang D D, Wang P L, Song G Z, Li X J, Jia Q, Zhao H G. 2021. Method and application of lithofacies palaeogeographic dominant facies: also discuss the lithofacies palaeogeography in broad and narrow sense and some new research directions. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(3): 489-506]
- 刘宝珺. 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社. [Liu B J. 1985. Lithofacies Palaeogeography Foundation and Working Method. Beijing: Geological Publishing House]
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方震旦纪—三叠纪岩相古地理图集. 北京: 科学出版社. [Liu B J, Xu X S. 1994. Atlas of Sinian-Triassic Lithofacies Paleogeography in Southern China. Beijing: Science Press]
- 刘鸿允. 1959. 中国古地图. 2版. 北京: 科学出版社. [Liu H Y. 1959. Paleogeographic Map of China. 2nd ed. Beijing: Science Press]
- 马永生, 陈洪德, 王国力. 2009. 中国南方构造—层序地层岩相古地理. 图集(震旦纪—新近纪). 北京: 科学出版社. [Ma Y S, Chen H D, Wang G L. 2009. Atlas of tectonic-sequence lithofacies and paleogeography in Southern China: Sinian-Neogene. Beijing: Science Press]
- 牟传龙. 2016. 中国岩相古地理图集{埃迪卡拉纪—志留记}. 北京: 地质出版社. [Mou C L. 2016. Lithofacies Paleogeographic Atlas of China (Ediacaran-Silurian). Beijing: Geological Publishing House]
- 牟传龙. 2022. 中国岩相古地理研究进展. 沉积与特提斯地质, 42(3): 340-349. [Mou C L. 2022. The research progress of lithofacies paleogeography in China. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3): 340-349]
- 牛小兵, 李程善, 范立勇, 肖庆, 付斯一, 任军锋, 张成弓, 苏中堂. 2024. 克拉通盆地不同级次构造—岩相古地理编图思路与实践: 以鄂尔多斯盆地早古生代为例. 地质科学, 59(3): 603-611. [Niu X B, Li C S, Fan L Y, Xiao Q, Fu S Y, Ren J F, Zhang C G, Su Z T. 2024. Mapping ideas and practice of different tectonic-lithofacies paleogeography in craton basin: early Paleozoic of Ordos Basin as an example. Chinese Journal of Geology, 59(3): 603-611]
- 山述娇, 陈聪, 张玺华, 谢忱, 陈延贵, 徐正华. 2023. 川中地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及发育主控因素. 天然气勘探与开发, 46(4): 27-34. [Shan S J, Chen C, Zhang X H, Xie C, Chen Y G, Xu Z H. 2023. Dolomite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan Basin: Characteristics and main influential factors. Natural Gas Exploration and Development, 46(4): 27-34]
- 谭秀成, 何如意, 杨文杰, 罗冰, 师江波, 张连进, 李明隆, 唐宇欣, 肖笛, 乔占峰. 2025. 四川盆地武胜—潼南地区中二叠统茅口组二段下亚段白云岩薄储层成因及分布模式. 石油勘探与开发,

- 52(1): 112-127. [Tan X C, He R Y, Yang W J, Luo B, Shi J B, Zhang L J, Li M L, Tang Y X, Xiao D, Qiao Z F. 2025. Origin and distribution model of thin dolomite reservoirs in the lower sub-member of Mao 2 Member of Middle Permian Maokou Formation in Wusheng-Tongnan area, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(1): 112-127]
- 王惠祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 中国地图出版社. [Wang H Z. 1985. Atlas of Ancient Chinese Geography. Beijing: China Cartographic Publishing House]
- 王惠君, 杨锐, 舒志国, 邓模, 刘计勇, 何涛华. 2025. 川东南二叠系吴家坪组深层页岩气生排滞潜力评价. *地质科技通报*, 44(6): 96-109. [Wang H J, Yang R, Shu Z G, Deng M, Liu J Y, He T H. 2025. Quantitative evaluation of hydrocarbon generation, expulsion, and retention potential in deep Permian Wujiaping Formation shale gas reservoir, southeastern Sichuan Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(6): 96-109]
- 印长海, 师江波, 郑剑锋, 王显东, 田小彬, 鞠林波, 韦裕琳, 汪海燕, 张慧君, 白雪晶. 2023. 四川盆地合川—潼南地区茅二段滩相白云岩储层特征、主控因素及勘探意义. *大庆石油地质与开发*, 42(1): 1-10. [Yin C H, Shi J B, Zheng J F, Wang X D, Tian X B, Ju L B, Wei Y L, Wang H Y, Zhang H J, Bai X J. 2023. Characteristics, controlling factors and exploration significance of shoal facies dolomite reservoirs in 2nd member of Maokou Formation in Hechuan-Tongnan area of Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Oilfield development in Daqing*, 42(1): 1-10]
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社. [Zeng Y F, Xia W J. 1986. Sedimentary Petrology. Beijing: Geological Publishing House]
- 郑秀娟, 李新坡, 张西娟, 鲍志东. 2023. 冯增昭教授简介与主要著作. *古地理学报*, 25(1): 3-9. [Zheng X J, Li X P, Zhang X J, Bao Z D. 2023. Brief introduction and main works of professor Feng Zengzhao. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(1): 3-9]
- 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 林承焰, 张宪国. 2020. 中国地震沉积学研究现状和发展思考. *古地理学报*, 22(3): 397-411. [Zhu X M, Dong Y L, Zeng H L, Lin C Y, Zhang X G. 2020. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(3): 397-411]
- Chen Z X, Li W, Wang L N, Lei Y L, Yang G, Zhang B J, Yin H, Yuan B G. 2019. Structural geology and favorable exploration prospect belts in northwestern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46: 413-425.
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic Sea-level changes. *Science*, 322(5898): 64-68.
- Hu M Y, Hu Z G, Wei G Q, Yang W, Liu M C. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir potential of the Maokou Formation in Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39: 51-61.
- Marks R J, Flament N, Lee S, Shi G R. 2025. Early Permian longitudinal position of the South China Block from brachiopod paleobiogeography. *Biogeosciences*, 22: 6119-6135.
- Shen J, Schoepfer S D, Feng Q L, Zhou L, Yu J X, Song H Y, Wei H Y, Algeo T J. 2015. Marine productivity changes during the end-Permian crisis and Early Triassic recovery. *Earth-Science Reviews*, 149: 136-162.
- Xiao Q, Yuan H, Ye Z, Chen C, Zhang X, Xu T. 2023. Genetic mechanism of dolomite reservoir in Maokou Formation of permian in bajiaochang structure in north central sichuan. *Nat. Gas. Geosci.* 34: 1218-1236.
- Xiong L, Yao G, Xiong S, Shen A, Hao Y. 2019. A method of stratum restoration for fault belt based on balanced cross-section: a case study of the middle devonian guanwushan Formation in the longmenshan area, western Sichuan Basin, China. *Geotect. Metallogenia* 43: 1079-1093.
- Yan S T, Tan C H, Qin M, Li H, Duan Y H. 2020. Geochemical characteristics and geological significance of permian-triassic siliceous rocks in litang area, sichuan province (article). *Acta Geosci. Sin.* 41: 504-514.
- Yang R, Yang X Y, Li Y, Fan C H, Li Y, Huang Z S, Huo F, Wang X Z, Fan X Y. 2025. Multi-stage dolomitization controlled by sedimentary facies and basement faults: insights from the Middle Permian Maokou Formation of the Eastern Sichuan Basin, SW China. *Marine and Petroleum Geology*, 176: 107334.
- Yang W J, Tan X C, Tang D H, Zhang Z K, Hu X, Li M L, Zeng Z X, Xiao D. 2024. Sequence lithofacies paleogeography evolution of the Middle Permian Maokou Formation in the northwest margin of the Sichuan Basin. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1301302.
- Yang Y, Xie J R, Zhao L Z, Huang P H, Zhang X H, Chen C, Zhang B J, Wen L, Wang H, Gao Z L, Shan S J. 2021. Breakthrough of natural gas exploration in the beach facies porous dolomite reservoir of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its implications: a case study of the tridimensional exploration of Well JT1 in the central-northern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry B*, 8: 393-401.
- Zou F, Yin H. 2009. Analysis on the patterns and mechanism of inversion structures in longmen Shan region, Sichuan, China. *Geotect. Metallogenia*, 33: 321-333.

(责任编辑 王绍华 郑秀娟)