

川西中二叠统表生岩溶发育规律及控制因素研究

韩月卿¹, 金振奎², 韩文彪³

¹中国石化石油勘探开发研究院, 北京

²中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京

³中国石化油田部, 北京

收稿日期: 2022年3月14日; 录用日期: 2022年4月7日; 发布日期: 2022年4月14日

摘要

川西地区中二叠统地层主要为碳酸盐岩台地相沉积, 中二叠世末发生的东吴运动导致茅口组地层抬升遭受大气淡水淋滤剥蚀, 发育表生岩溶古地貌, 产生大量的溶蚀孔洞, 为储集油气提供良好条件。针对川西地区中二叠统表生岩溶发育规律及控制因素研究认识不清的问题, 本文以野外露头、岩心、测井、地球化学等资料为依托, 对栖霞组和茅口组的岩溶典型特征进行了详细总结。通过对于岩溶响应特征的统计分析, 本文系统总结了岩溶储层在垂向和平面上的发育规律。利用残余厚度法开展了茅口组和栖霞组顶部古地貌形态的精细刻画, 将其划分为岩溶洼地、岩溶斜坡和岩溶高地3种地貌单元。通过把钻井放空漏失情况和野外露头岩溶现象进行叠合, 认为岩溶洼地最有利于表生岩溶储层的发育。岩溶洼地虽能汇水, 但不积水, 地表水汇聚后对地层下蚀和侧蚀, 有利于岩溶储层发育。经讨论分析得到, 川西地区中二叠统表生岩溶储层主要受控于古地貌、沉积间断、岩性和沉积相等因素。本次研究可为川西地区中二叠统表生岩溶储层勘探开发提供地质理论和依据。

关键词

四川盆地西部, 中二叠统, 表生岩溶, 发育规律, 控制因素

Development Pattern and Controlling Factors of Middle Permian Epigenetic Karst in Western Sichuan Basin

Yueqing Han¹, Zhenkui Jin², Wenbiao Han³

¹Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing

²College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing

³Oil-Field Department, SINOPEC, Beijing

文章引用: 韩月卿, 金振奎, 韩文彪. 川西中二叠统表生岩溶发育规律及控制因素研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(4): 483-494. DOI: 10.12677/ag.2022.124049

Abstract

The middle Permian strata in western Sichuan basin are mainly carbonate platform face deposits. The Dongwu Movement at the end of the Middle Permian resulted in the uplift of the Maokou Formation, which was eroded by atmospheric fresh water leaching and developed the epigenetic karst palaeogeomorphology, producing a large number of dissolution pores and providing good conditions for the storage of oil and gas. In response to the poor understanding of the development pattern and controlling factors of the Middle Permian epigenetic karst in western Sichuan, this paper summarizes in detail the typical characteristics of karst in Qixia and Maokou formations based on field outcrops, cores, logs and geochemistry. Through the statistical analysis of karst characteristics, this paper systematically summarizes the development pattern of karst reservoir in vertical and plane. The palaeogeomorphology of the top of Maokou formation and Qixia Formation is described by residual thickness method, which is divided into three geomorphic units: karst depression, karst slope and karst highland. Based on the superposition of drilling and outcrop karst, it is concluded that karst depression is the most conducive to the development of epigenetic karst reservoirs. Although the karst depression can collect water, it does not accumulate water. The convergence of surface water is conducive to the development of karst reservoirs by downward and lateral erosion of strata. After discussion and analysis, it is obtained that the epigenetic karst reservoirs of Middle Permian in western Sichuan basin are mainly controlled by palaeogeomorphology, sedimentary interruption, lithology and sedimentation. This study can provide geological theory and basis for the exploration and development of Middle Permian epigenetic karst reservoirs in western Sichuan Basin.

Keywords

Western Sichuan Basin, Middle Permian, Epigenetic Karst, Development Pattern, Controlling Factors

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

前人对于川东及川西北地区的沉积相与白云岩成因多有研究,认为茅口组和栖霞组地层主要是碳酸盐岩台地相沉积,进一步划分出潮坪、局限台地、开阔台地及台地边缘等相类型[1][2],白云岩成因包括准同生白云化[3]、埋藏白云化[4]、热液白云化[5]。近年来,四川盆地中二叠统茅口组油气勘探取得重大突破,钻探证实了表生岩溶的改造是区内茅口组优质储层的主要形成机制[6]。表生岩溶是指由于地壳上升构造运动或海平面下降,使地层长期暴露地表,大气淡水对其进行淋滤、溶蚀而发生的岩溶,又称“风化壳岩溶”[7]。本区中二叠统表生岩溶主要发育在茅口末期和栖霞末期[8]。岩溶古地貌的恢复是岩溶型储层发育区带预测的关键,前人曾对四川盆地茅口组和栖霞组顶面进行了古地貌恢复,并划分为岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶洼地,认为岩溶斜坡是最有利于岩溶储层发育的地区[9],但由于井资料主要在四川盆地中部和南部,对于川西地区古地貌恢复并不准确,且对川西地区茅口组和栖霞组岩溶特征、发育规律和控制因素尚未有深入研究和概括总结,不同古地貌对表生岩溶的控制作用不明确。

本文基于川西地区中二叠统野外地质剖面勘测岩溶的宏观特征、显微镜下观察的普通薄片微观特征、扫描电镜、测井响应、分析化验数据等方面的研究成果，针对川西地区二叠系表生岩溶的典型特征和发育规律进行了系统总结，并详细分析古地貌、沉积间断、岩性、沉积相对岩溶发育的控制作用。

2. 区域地质背景

研究工区范围为四川盆地西部地区，兼顾周缘地区，面积约为 12 万平方公里(图 1)。从二叠纪开始，地壳全面下沉，上扬子古陆全被淹没，只有位于西北边的龙门山古陆，位于东北边的大巴山古陆、位于东边的江南古陆还有西边的康滇古陆呈岛链露出水面，广泛的海侵使下二叠统地层沉积在石炭系等地层上。川西地区二叠系地层主要出露于盆地边缘地带，在华蓥山部分地区也有零星出露。而在川中地区埋藏很深，埋藏于地下 1500~3000 米，拗陷区更是深达 5000 米以上[10] [11]。

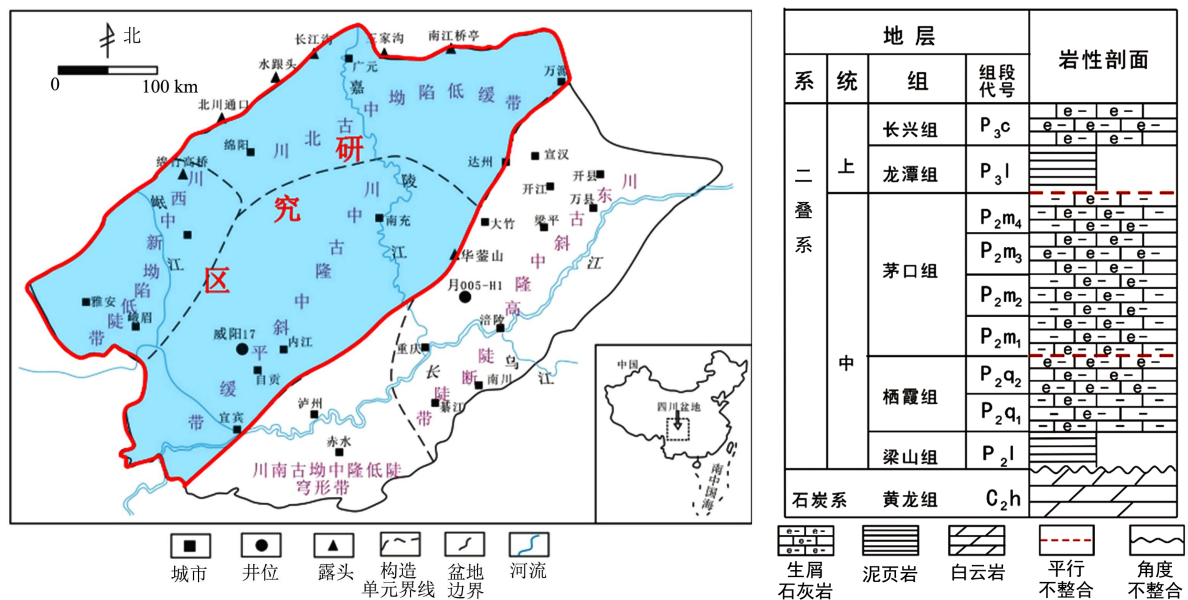


Figure 1. Geographical position and tectonic units of Middle Permian in Sichuan Basin
图 1. 四川盆地中二叠统区域构造划分图及研究区位置图

在中二叠世末期，东吴运动引起扬子地台再次抬升发展变为陆地，上、中二叠统在大范围内呈角度不整合接触关系[12]。该构造运动主要表现为：茅口组地层遭受了约 1.5 Ma 的剥蚀暴露，出露地表并开始接受大气淡水的溶蚀淋滤，形成大量的溶蚀孔缝，发育了风化壳岩溶储层[13]；四川盆地西部受甘孜—理塘一带强烈拉张影响，使紧邻的上扬子西部川滇黔一带破裂而发生大陆裂谷型峨眉玄武岩大规模喷发事件，盆地内部沿龙泉山、华蓥山也发现有玄武岩和辉绿岩体[14]。

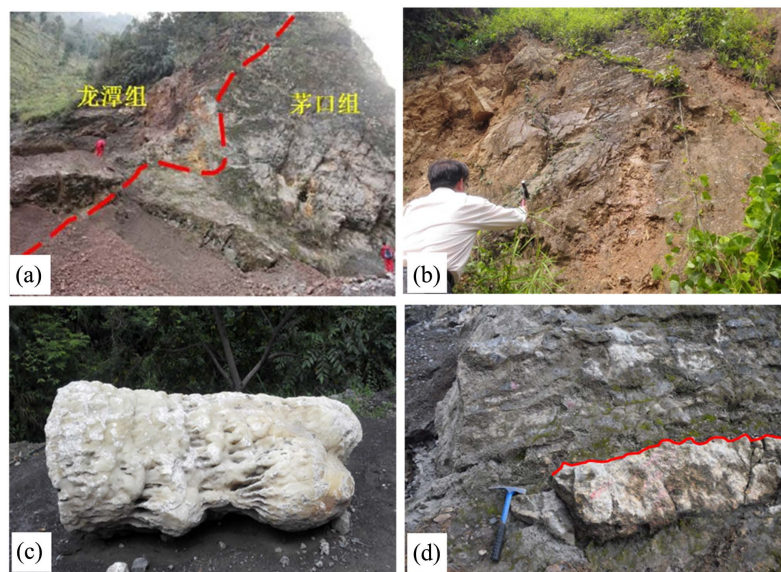
川西地区内栖霞组自下而上可划分为栖霞一段和栖霞二段(图 1)。栖霞一段沉积时期为二叠纪第一个沉积旋回的海侵期。栖霞一段生屑石灰泥石灰岩颜色普遍较深，泥质含量比较高。栖霞二段为海退期沉积的产物，此时沉积速率已经大于等于海平面上升速率，水体普遍变浅，水体能量大，阳光和氧气充足，生物生长迅速，大量的生物碎片快速堆积，在原先局部生屑滩发育的地带开始逐渐发育较大型的台缘或台内生屑滩，川西北地区发育的条带状台缘生屑滩成为典型代表。栖霞组沉积末期，海退使得局部地区暴露受到剥蚀，形成平行不整合面，但没有缺失化石带。栖霞二段石灰岩颜色较浅，为浅灰色、灰黑色灰泥生屑石灰岩，局部白云石化，溶孔较为发育，顶部常见豹斑状云质灰岩。在江油-雅安、宜宾一带和龙女寺、万源等地，还出现一些生物浅滩，以前者规模最大，为亮晶生屑灰岩、云斑灰岩及细—粗晶白云岩[15]。

川西地区内茅口组由下而上可划分为四段(图 1)。茅一段沉积时期为海侵期,处于整个茅口组沉积时期海侵的早期阶段,海平面上升快,水体较深,滩相不发育。茅一段整体为灰色生屑质灰泥石灰岩夹有泥质灰岩,具有眼球状构造,含有腕足类、有孔虫等古生物。茅二段、茅三段沉积时期,因川黔运动的影响,引起区内广泛海退,水体变浅,沿龙门山一带形成台缘滩,台内颗粒滩也发育。茅二段整体为灰色生屑石灰岩夹泥质灰岩,眼球状构造更加明显,古生物有腕足类、有孔虫等。茅三段为灰泥生屑石灰岩,无眼球状构造,层面波状起伏,产筴类等化石。茅四段沉积早期,海平面再次上升,区内再次演化为水体相对较深的开阔海环境,滩相不发育;晚期因东吴运动影响,海水变浅及至整个碳酸盐岩台地裸露于海面之上,致使茅口组顶部在区域上广泛受到剥蚀[16]。

3. 岩石学特征

3.1. 宏观特征

本次研究的古岩溶是指在茅口末期和栖霞末期发生的岩溶。在露头上,茅口组顶部见岩溶角砾岩、红土、铁质沉积物等风化壳岩溶现象(图 2),红土为湿热条件下的碳酸盐岩风化残余的土壤。在茅口组大型溶洞中还见钟乳石发育,钟乳石是自岩溶洞顶向下生长的一种以碳酸钙为主的沉积形态,开始时发育小突起附在洞顶,后来逐渐增长,具有同心圆状结构(图 2(c))。栖霞组顶面可见凹凸不平的侵蚀间断面,且凹陷处充填有深灰色的泥质灰岩,该界面在很可能为一不整合面,这也为栖霞组上部岩溶作用的发生创造了有利条件(图 2(d))。界面上下岩性特征差异较为明显,茅口组岩性泥质含量较高,而栖霞组岩性相对较粗较纯。



(a) 红土沉积物,茅口组顶部,大邑大飞水剖面;(b) 溶洞内充填铁质沉积物,茅口组顶部,北川永庆剖面;(c) 溶洞充填钟乳石,茅口组,华蓥山二崖剖面;(d) 凹凸不平的侵蚀间断面,栖霞组顶部,华蓥山二崖剖面

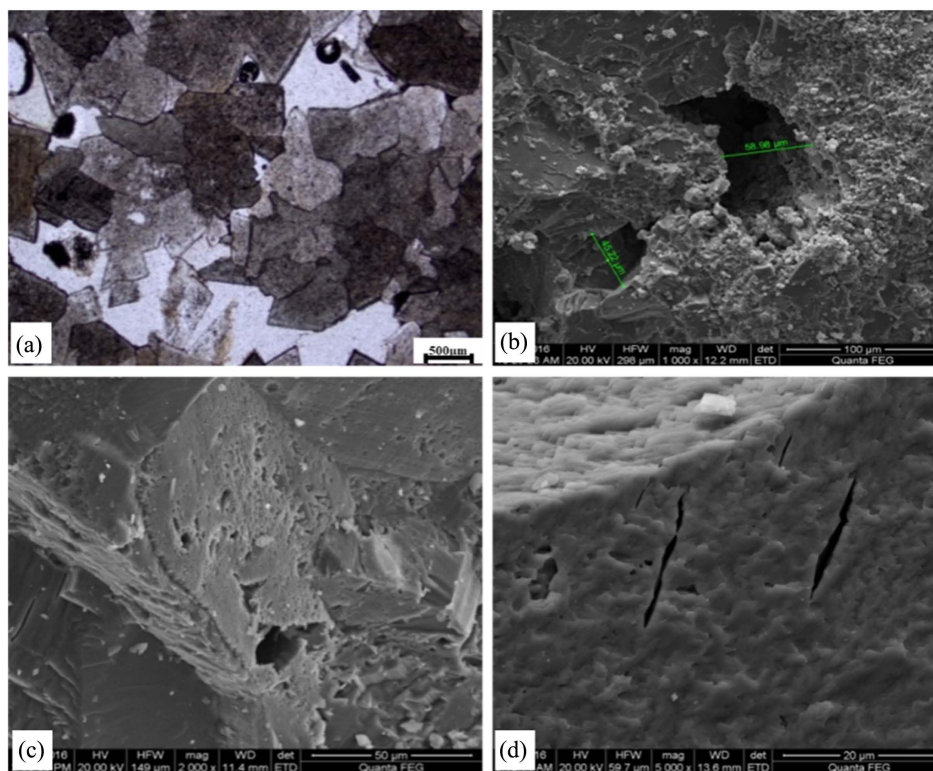
Figure 2. Karst phenomenon of Middle Permian in western Sichuan basin

图 2. 川西中二叠统古岩溶现象

3.2. 微观特征

根据普通薄片、阴极发光片、扫描电镜的观察统计结果,表明川西中二叠统表生岩溶储层中的孔隙类型主要包括晶间溶孔、晶内溶孔、晶内溶缝、粒间溶孔。

晶间溶孔是在白云石晶间孔的基础上溶蚀扩大而形成的孔隙，是栖霞组白云岩储层中较为常见的孔隙类型，大小一般为 0.5~2 mm。部分生屑内部的粉晶白云石晶体间、裂缝和溶洞内的亮晶充填物之间也可见此类孔隙(图 3(a))。粒间溶孔主要是碳酸盐岩颗粒之间的孔隙，有些粒间溶孔被继续溶蚀扩大，部分被方解石胶结物完全充填(图 3(b))。扫描电镜下在白云石晶体表面可见大量的晶内溶孔，孔隙直径分布范围较大，常见 5~10 μm (图 3(c))。晶内溶缝是指在扫描电镜下白云石晶体上发育的溶缝，可能是流体溶蚀白云石的现象(图 3(d))。



(a) 白云岩晶间溶孔，单偏光，栖霞二段，上江沟剖面；(b) 灰岩粒间溶孔，栖霞二段，扫描电镜，双汇剖面；(c) 白云石晶内溶孔，扫描电镜，栖霞二段，上江沟剖面；(d) 白云石晶内溶缝，扫描电镜，大邑大飞水剖面

Figure 3. Dolomite intercrystalline solution pores of Qixia formation

图 3. 栖霞组白云岩晶间溶孔

4. 岩溶响应特征

4.1. 测井响应特征

由于溶孔溶洞充填的物质和成分具有很大差别，因此它在测井曲线上的响应特征也是不尽相同的。四川盆地东吴运动时期发育的古岩溶储层最明显测井识别标志，就是测井曲线的高自然伽马特征。由于茅口组上覆的龙潭组发育煤系和泥质岩，其成岩环境为沼泽相沉积，在茅口组岩溶孔洞中常常充填煤块、泥质及岩溶角砾，这些物质富含放射性，所以体现在测井曲线上就表现为高 GR，进而指示了茅口组中发育缝洞储层。

元坝 8 井茅口组顶部溶洞、溶缝发育，多被铝土质及上覆地层泥质充填，测井曲线电阻较低，但伽马较高，具有岩溶泥质充填特征(图 4)。向下溶蚀扩大发育高角度溶沟，裂缝及溶沟被方解石、硅质充填，残余部分溶洞，GR 随岩性变化而出现波动现象。

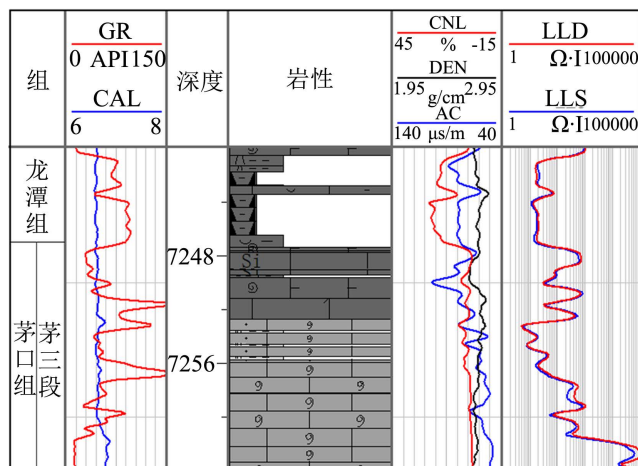


Figure 4. Logging response characteristics of weathering crust karst in Maokou formation of Well Yuanba 8
图 4. 元坝 8 井茅口组古岩溶风化壳测井响应特征

4.2. 钻录井响应特征

钻具放空、钻井液漏失、蹩、跳钻现象还有井涌是识别古岩溶储层的重要标志。漏失防空情况统计显示中二叠统共发生 661 次井漏、110 次放空。老官庙构造关基井茅口组地层发育深灰色白云岩浅灰色亮晶生屑灰岩，缝洞发育，充填石英和方解石，透明及半透明，部分晶形较好。7154~7156.62 米蹩跳严重。7156.52~7159.5 米似有放空，加不上压力，最大钻压 1 吨，泥浆气侵严重，强烈井喷。大兴场构造大深 1 井茅三段 5378.0~5380.69 m 泥浆漏失严重，累计漏失 43.5 m³。该段岩心有裂缝 45 条，方解石充填，15 条张开缝，晶洞 11 个，74 处冒气，但物性较差，孔隙率 0.49%~1.70%，属于低孔隙裂缝型气层。栖霞组地层的泥浆漏失情况同样严重，属于裂缝型漏失，裂缝中方解石半充填，其余为泥炭质全充填。

4.3. 碳氧同位素特征

大气水环境的流体比海水具有更低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值，与碳同位素相比，氧同位素易因矿物之间、矿物与流体间交换或因温度、压力等因素而分馏，且对成岩作用更为敏感，但是近地表温度条件下从大气水中沉淀的方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应在 -8‰ 以上 [17]。根据川西地区岩溶孔洞中充填的方解石的碳氧同位素交会图，大部分方解石是在大气淡水环境中形成的，少数是在埋藏环境中形成的 (图 5)。

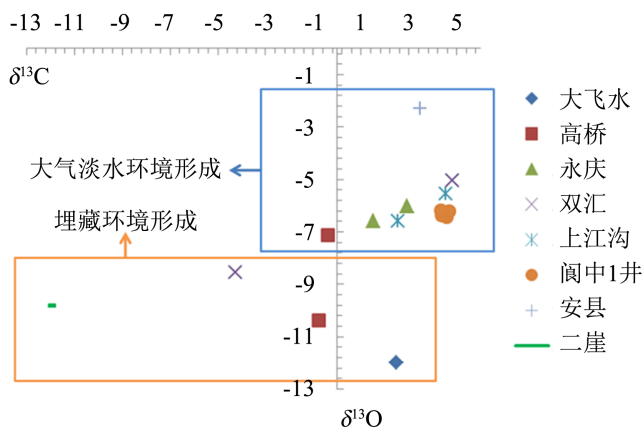


Figure 5. C-O isotopic crossplot of calcite cement filled in karst caves of Middle Permian in West Sichuan Basin
图 5. 川西地区中二叠统地层溶蚀缝洞中充填的方解石碳氧同位素交汇图

5. 岩溶发育规律

5.1. 垂向分布规律

漏失钻井液大多于茅口组顶部下面 50 m 左右的范围内发生,漏失层位主要集中在茅二段以上。本次研究对川西地区钻井统计显示,发生井涌近 300 次,个别井甚至发生了井喷。茅一段和茅二段的气测显示较多,而茅三段和茅四段的气测显示较低。钻井过程中的蹩、跳井现象普遍存在(图 6)。

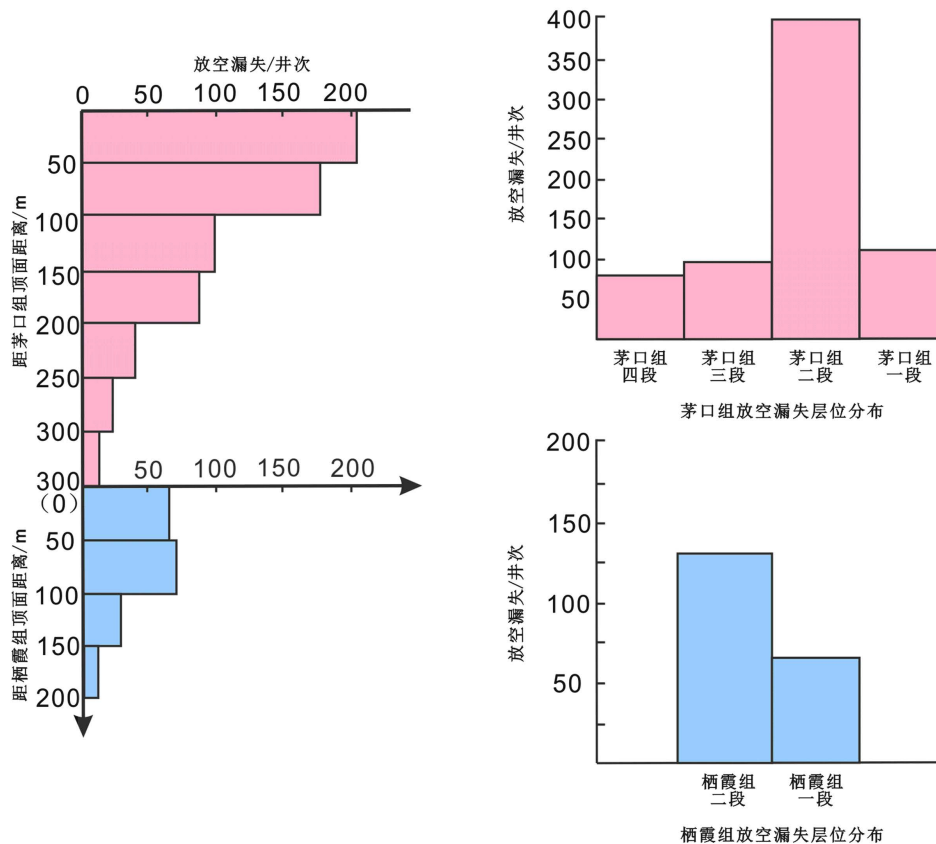


Figure 6. Leakage and emptying histogram of drillings in Middle Permian in Sichuan Basin
图 6. 四川盆地中二叠统钻井放空漏失分布直方图

从放空漏失深度看,栖霞组顶部以下 0~250 m 的范围内均有漏失,但漏失主要发生在栖霞组顶部以下 0~100 m 范围内,占总漏失次数的 81%,其中 0~50 m 范围内 52 井次,50~100 m 范围内 53 井次,其下 100~250 m 范围则很少发生,油气显示也随着深度的增加而减少(图 6)。这也显示栖霞组岩溶具有与茅口组顶部风化壳岩溶储层类似的分布特征,即栖霞组岩溶主要为表生岩溶成因。从放空漏失范围看,川南、川东北、川中、川西北地区均有发育,表明四川盆地栖霞组岩溶普遍发育。总体来看茅口组放生放空漏失的井数远大于栖霞组。

5.2. 平面分布规律

风化壳古地貌决定了地下水的作用深度、活动范围及强度,古地形比较高的位置会暴露出地表而被大气淡水溶蚀淋滤,受到强烈的机械破坏作用,地形低的部位被剥蚀程度较弱。当前比较常用的古地貌恢复方法包括残余厚度法、印模法、沉积学法和地球物理法[18][19][20]。

这些方法各有优点及缺点，应考虑研究区的钻测井资料情况以及研究目的，选择合适有效的方法开展进行古地貌恢复。由于晚二叠世吴家坪组-长兴组沉积期发生强烈的张性断裂活动以及差异沉降，形成广元-旺苍海槽，台地与海槽出现极大的沉积速率差异，用印模法难以较真实恢复川西地区岩溶古地貌。因此，本文采用残余厚度法对川西地区中二叠统茅口组和栖霞组地层开展古岩溶地貌的恢复，把茅口组和栖霞组的残余厚度图直接绘制成相对高程图即可绘制出岩溶古地貌图[21]。

通过统计 150 口钻井资料和 9 个实测剖面资料的茅口组和栖霞组残余厚度数据得到：茅口组残余厚度比较大的地区位于雅安 - 宜宾 - 泸州和重庆西南部，厚度为 300~470 m；其次为川中地区，厚度一般为 160~220 m；四川盆地西北部和东北部最薄，厚度一般为 50~150 m，其中以双探 1 井为中心有厚度增大现象，茅口组厚达 332 m。栖霞组数据资料统计显示：四川盆地西北部安县地区及重庆东南部地区最厚，厚度为 130~160 m；其次为雅安 - 南充 - 万县地区以及宜宾 - 泸州地区，厚度为 100~130 m；大邑、峨眉以及元坝地区最薄，厚度一般为 40~100 m。

通过地层对比以及残余厚度计算，残余厚度越大，出露层位越新，地层剥蚀量越小，为相对岩溶负地形；残余厚度越小，出露地层越老，地层剥蚀量越大，为相对岩溶高地形，说明古地表侵蚀作用比较强。根据这些原理分析厚度范围，可以恢复出茅口组和栖霞组顶面的古地貌(图 7、图 8)。

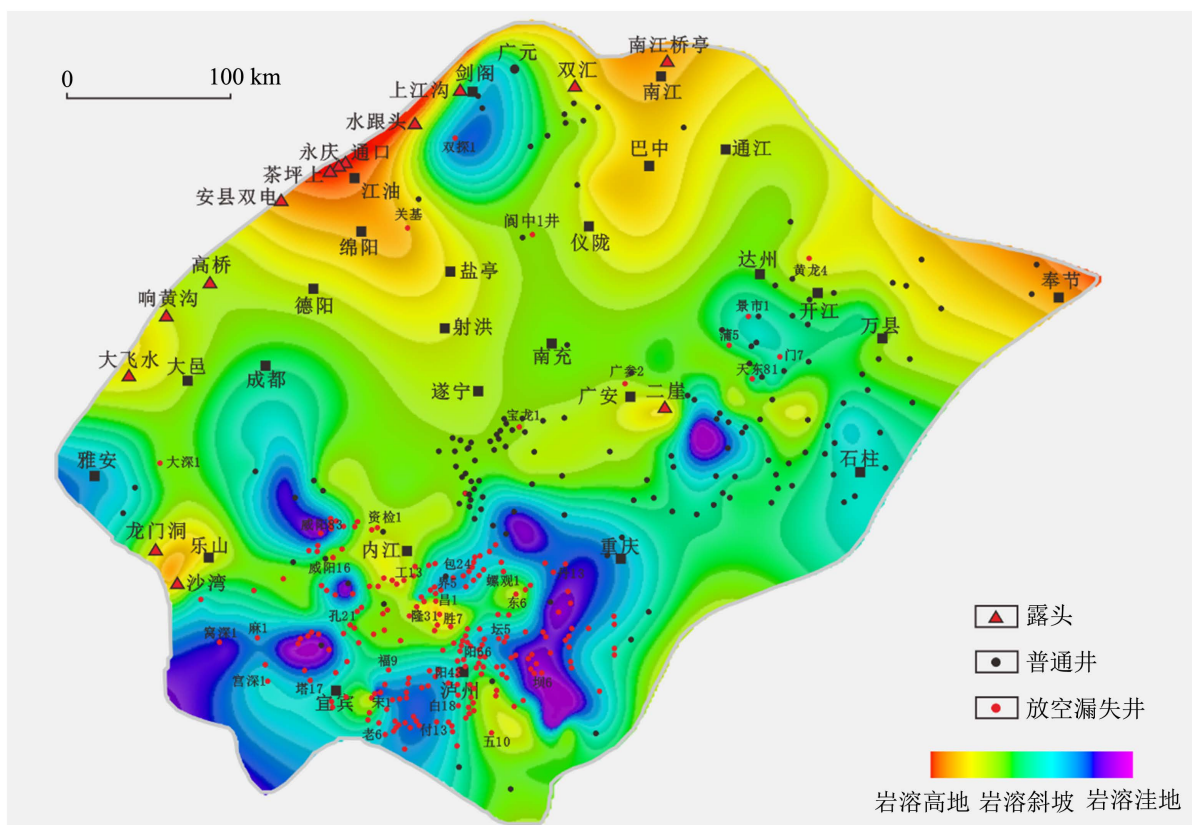


Figure 7. Weathering crust karst paleogeomorphology of Maokou formation
图 7. 茅口组顶部风化壳岩溶古地貌图

综合考虑沉积作用对环境的影响、野外露头剖面实测数据、部分地区地形展布、风化壳表面侵蚀溶蚀特征及钻井资料，可以茅口组和栖霞组分别划分出以下 3 种古地貌单元：岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地。

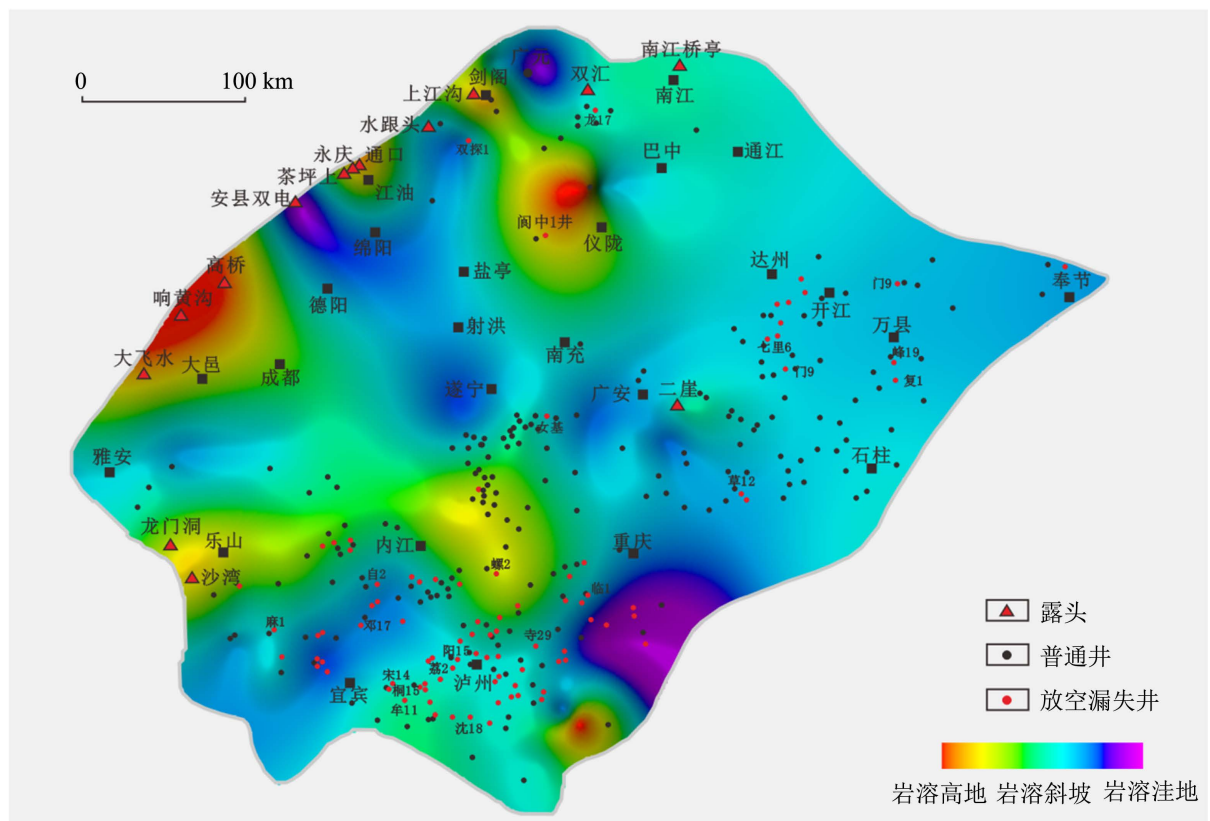


Figure 8. Weathering crust karst paleogeomorphology of Qixia formation
图 8. 栖霞组顶部风化壳岩溶古地貌图

岩溶高地因其地表远高于潜水面，长期处于裸露风化状态，易于遭受大气淡水的淋滤，整体为地下水的补给区，岩溶作用以垂向渗滤为主，形成垂向溶蚀带、落水洞等岩溶形态。四川盆地岩溶高地主要分布于泸州、龙女寺、开江古隆起，以及雅安和乐山一带，川西南地区被玄武岩覆盖而暴露时间更短，其岩溶和岩溶型储层发育差于中东部。

岩溶斜坡是岩溶高地与岩溶平原之间的过渡地带，广泛发育在岩溶高地四周，常呈环带状分布，是地下水的径流区。斜坡区地下水除了垂向渗流外，主要受重力梯度控制并沿水平方向流动，水平潜流岩溶带发育。

岩溶洼地地貌相对平缓，岩溶高地与斜坡地表水、地下水汇聚于岩溶洼地上形成地表径流区。在岩溶洼地上，因整体较低的地貌，地表水汇聚形成地表径流，下蚀和侧蚀作用形成沿基底断裂分布的侵蚀沟谷，并进一步把岩溶洼地分为溶丘、岩溶洼地斜坡和侵蚀沟谷三个二级岩溶地貌单元。溶丘地貌仍高于潜水面，暴露时间相对岩溶高地和斜坡短，但仍受大气淡水淋溶改造，形成垂向溶蚀带和水平潜流带。

6. 岩溶储层控制因素讨论

6.1. 古地貌

前人的研究普遍认为岩溶斜坡是溶蚀作用最强烈的地区[22]，但是经过本次研究，岩溶洼地最有利于岩溶的发育。根据钻井露头的岩溶现象与地貌类型的统计，位于岩溶洼地的放空漏失钻井最多，尤其是岩溶洼地斜坡的周缘，是礁滩相的发育带，可能会形成礁滩型风化壳岩溶优质储层。

岩溶洼地可分两类。一类是处于基准面之下的岩溶洼地，这类洼地长期积水，形成湖泊。洼地中地

下水几乎是静止的，溶蚀作用弱，而胶结作用强烈，不利于岩溶储层发育。另一类是处于基准面之上的岩溶洼地，这种洼地虽能汇水，但不积水，其汇集的地下水又向更低的地区流动，水流量大，溶蚀作用较强，有利于岩溶储层发育。对于茅口组和栖霞组顶部岩溶古地貌的恢复在前文已有表述，本区岩溶洼地的类型属于后者，因为其不整合面上有红色残积物，说明它长期处于暴露的氧化环境中[23]。经过古地貌与发育表生岩溶储层的地区进行叠合后，在表生岩溶模拟实验的验证下，可以发现岩溶洼地是表生岩溶储层发育的良好地带。总结出来的表生岩溶储层的发育过程如下图所示(图9)。

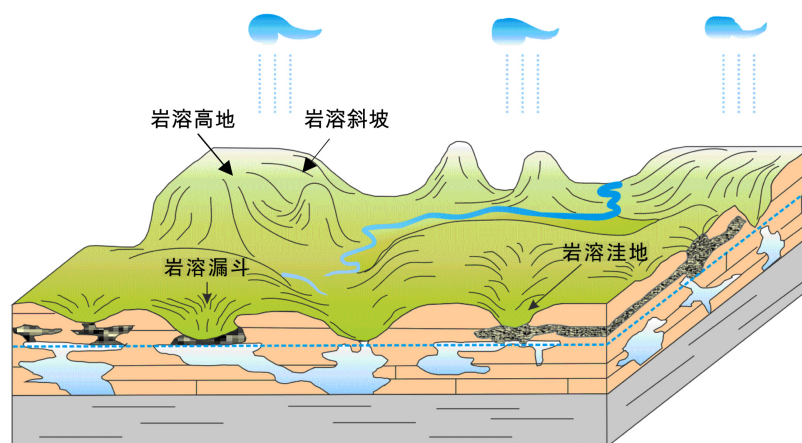


Figure 9. Development model of epigenetic karst under the control of palaeogeomorphology
图9. 古地貌控制表生岩溶发育模式图

6.2. 沉积间断

经过生物地层对比，上扬子地区的茅口组地层以大理一米易为中心剥蚀程度由强变弱。四川西南部地区茅口组地层主要由 *Neoschwagerina simplex* 带、*Afghanella-Neoschwagerina craticulifera* 带的地层组成，厚 200~350 m，局部地区缺失 *Yabeina-Neomiselinina* 带。四川中部地区剥蚀程度减弱，剥蚀面见含煤线、铁锰质等。据何斌等(2004)的研究，早晚二叠世之间发生的东吴运动，其动力来源于峨眉山幔柱对岩石圈底部的冲击，造成地壳抬升，时间约为 1~3 Ma [24] [25]。在川西南地区，东吴运动的构造界面在茅口组和峨眉山玄武岩之间，在四川其它地区，这一界面位于龙潭组或吴家坪组与茅口组之间，刚好是中上二叠统的分界。

川西龙门山前地区栖霞组沉积中晚期古地貌位置较高，野外露头剖面在其顶部常见暴露侵蚀的特征，揭示台缘带的发育。川西龙门山前地区通口剖面，在栖霞组顶面发现薄层泥岩，厚 2~3 cm；芦山至中林一带，在栖霞组顶面发现有地层被侵蚀的现象，可能为暴露不整合；在峨眉山和华蓥山二崖地区，栖霞组顶面呈波状起伏；在天全、宝兴一带，发现栖霞组顶面有薄层泥质砂岩，与其上覆茅口组发育的“眼球眼皮”灰岩分界；在剑阁磨刀垭剖面上的栖霞组顶部灰岩层面上，发现有植物印模化石，发育于红树林沼泽环境，说明水体非常浅，栖霞组顶部层曾暴露于海平面之上，有沼泽化趋势。这些现象表明栖霞组沉积晚期处于古地貌高地，曾短暂暴露于海平面之上，同时也证明了台缘带的发育环境[26]。

根据以上分析可以得出，茅口组地层顶面受到风化剥蚀的时间远大于栖霞组顶面的短暂暴露时间，因此茅口组顶面在这种暴露环境下发育了大型风化壳岩溶地貌。

6.3. 岩性控制

根据储层孔隙度数据统计可以得出，白云岩的储集性比石灰岩的好，良好的储集层和放空漏失现象

常发育在白云岩段(图 10)。这主要是两种因素控制: 首先, 一般情况下白云岩的脆性比石灰岩大, 在受到压力后更容易形成裂缝; 第二, 白云岩常见粉晶至细晶结构, 发育很多晶间孔, 石灰岩常发育泥晶结构, 因此不发育晶间孔。纯白云岩比泥质白云岩有利于岩溶储层发育。泥质白云岩本身难以形成储层, 而其上与之紧邻的较纯的白云岩通常是良好的储层。这是由于泥质白云岩泥质含量高, 塑性大, 不利于形成裂缝, 也不利于溶蚀, 但这种比较致密的岩层却是好的隔水层, 在其之上地下水可大量汇集, 导致其上覆岩层的强烈溶蚀, 形成好的储层。在广元上江沟剖面, 栖霞组云斑灰岩地层露头上可见云斑多被溶蚀, 而灰质多被保留下来, 形成凹凸不平的墙面。

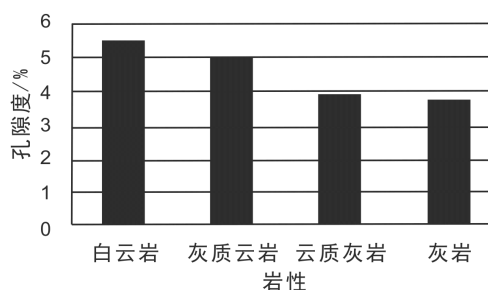


Figure 10. Relationship between porosity and lithology

图 10. 孔隙度与岩性关系图

6.4. 沉积相

生物礁和颗粒滩一般发育于正常浪基面以上, 水体比较浅, 海水通畅, 具有较强的水动力。在这种环境下形成的滩, 生屑含量一般比较高, 以亮晶方解石胶结为主, 灰泥少, 原始渗滤能力较好, 而且由于滩相沉积的古地貌位置比较高, 易遭受风化剥蚀而产生溶孔。而在开阔台地或局限台地的低能环境下沉积的生屑质灰泥石灰岩、灰泥石灰岩和泥岩则通常由于原始孔渗性差, 大气淡水难以渗入, 因此往往难以发育大规模的溶蚀带。颗粒滩中的不同微相, 即滩核和滩缘微相的溶蚀充填特征也存在明显差异: 在滩核微相的颗粒灰岩中, 可见颗粒边缘及早期亮晶胶结物被溶蚀离解呈微亮晶化和泥晶化; 而滩缘微相颗粒灰岩胶结致密, 颗粒以及粒间的第 1 期纤状和第 2 期粒状方解石胶结物均保存完整, 表明它们几乎未收到溶蚀作用的影响。

7. 结论

1) 川西地区中二叠统地层主要为碳酸盐岩台地相沉积, 中二叠世末发生的东吴运动导致茅口组地层抬升遭受大气淡水淋滤剥蚀, 发育表生岩溶古地貌, 产生大量的溶蚀孔洞, 为储集油气提供良好条件, 在野外、岩心、测井、钻录井、地球化学上均有典型的响应特征。

2) 川西地区中二叠统表生岩溶在古地貌、沉积间断、岩性、岩相的共同控制下, 主要在茅口组和栖霞组顶部的不整合面之下 100 m 内发育。经过古地貌与发生放空漏失井位的叠合, 认为岩溶洼地是最有利于表生岩溶发育的部位, 这与前人认为的岩溶高地和斜坡有利于岩溶发育的认识不同。岩溶洼地虽能汇水, 但不积水, 地表水汇聚后对地层下蚀和侧蚀, 有利于岩溶储层发育, 寻找岩溶洼地古地貌区是今后探索的主要方向。

基金项目

国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003); 中国科学院 A 类战略性先导项目(XDA14010201)。

参考文献

- [1] 白晓亮, 杨跃明, 文龙, 罗冰, 洪海涛. 四川盆地中二叠统栖霞组沉积相展布及勘探意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 13-24.
- [2] 刘文栋, 钟大康, 孙海涛, 曾鑫耀, 梁雪祺, 胡欣, 李荣容, 彭思桥, 宋雨佳. 川西北中二叠统栖霞组沉积特征及古地貌响应[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1275-1291.
- [3] 芦飞凡, 谭秀成, 钟原, 等. 四川盆地西北部二叠系栖霞组准同生期砂糖状白云岩特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1134-1148.
- [4] 何溥为, 胥旺, 张连进, 等. 川中磨溪-高石梯地区栖霞组白云岩特征及成因机制[J]. 沉积学报, 2021, 39(6): 1532-1545.
- [5] 李红, 王良军, 柳益群, 曾韬, 张冬冬, 李文厚, 周鼎武, 杨康, 董杨坤, 彭毅峰. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液活动特征[J]. 古地理学报, 2021, 23(1): 153-174.
- [6] 刘冉, 罗冰, 李亚, 邱楠生, 王尉, 张宇, 何青林, 裴森奇. 川西地区二叠系火山岩展布与茅口组岩溶古地貌关系及其油气勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 575-585.
- [7] 郑聪斌, 贾疏源. 陕甘宁盆中部奥陶系风化壳岩溶岩及岩溶相模式[J]. 低渗透油气田, 1996, 1(1): 22-28.
- [8] 颜其彬, 庞雯. 川南茅口灰岩岩溶特征与油气关系[J]. 西南石油学院学报, 1993, 15(3): 11-16.
- [9] 王海真, 池英柳, 赵宗举, 等. 四川盆地栖霞组岩溶储层及勘探选区[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 833-842.
- [10] 王必君, 包茨, 肖明德. 中国石油地质志(卷十)四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [11] 郝子文, 姚冬生, 谢贻谋, 等. 四川省区域地质志[M]. 北京: 北京地质出版社, 1982.
- [12] 孟宪武. 川西二叠系沉积储层特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [13] 桑琴, 黄静, 程超, 等. 蜀南地区茅口组古岩溶地貌与缝洞系统发育关系研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(2): 212-219.
- [14] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义[J]. 地质论评, 2006, 52(1): 30-37.
- [15] 刘小洪, 刘畅, 李宁辛, 冯明友, 王兴志, 张本健, 尹宏. 差异型碳酸盐岩缓坡特征及沉积格局——以川西地区中二叠统栖霞-茅口组为例[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(2): 242-250.
- [16] 胡笙, 谭秀成, 罗冰, 张本健, 张亚, 苏成鹏, 芦飞凡, 李明隆. 四川盆地西北部二叠系栖霞阶层序地层特征及地质意义[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1109-1126.
- [17] 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 45-53.
- [18] 胡修权, 施泽进, 田亚铭, 等. 川东南地区茅口组岩溶古地貌恢复及特征[J]. 地质通报, 2014, 33(6): 874-882.
- [19] 占小刚, 赵俊省, 欧阳甜子, 等. 川东北普光地区二叠系茅口组古地貌恢复研究[J]. 四川地质学报, 2016, 36(2): 210-212.
- [20] 唐大海, 肖笛, 谭秀成, 等. 古岩溶地貌恢复及地质意义——以川西北中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 689-695.
- [21] 庞艳君, 代宗仰, 刘善华, 等. 川中乐山-龙女寺古隆起奥陶系风化壳古地貌恢复方法及其特征[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(5): 8-10.
- [22] 康保平, 张帆, 张箭, 陈雷, 汪娟. 川东石炭系地层-构造复合圈闭控制因素研究[J]. 石油天然气学报, 2008(1): 184-187+394.
- [23] 金振奎, 邹元荣, 蒋春雷, 等. 大港探区奥陶系岩溶储层发育分布控制因素[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 530-535.
- [24] 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2005, 30(1): 89-96.
- [25] 田景春, 林小兵, 郭维, 等. 四川盆地二叠纪玄武岩喷发事件的油气地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 14-20.
- [26] 魏国齐, 杨威, 朱永刚, 等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442-448.