

晚古生代构造—沉积分异对四川盆地 二叠系多类型气藏的控制作用

李龙龙, 罗开平, 刘 栩, 张长江, 曹清古, 陆永德, 彭金宁

中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126

摘要:基于晚古生代全球构造背景和上扬子地区构造环境、盆地原型及四川盆地二叠纪岩相古地理的分析,结合二叠系气藏特征和成藏条件认识,探讨了晚古生代构造—沉积分异对四川盆地二叠系多类型气藏的控制作用。结果表明,伸展背景下构造差异隆升或沉降形成隆凹相间的古地貌,导致四川盆地中二叠世—晚二叠世经历早期台地与台凹相间,晚期台地与裂隙槽(陆棚)相间的沉积格局的演化,台凹、潮坪—泻湖、斜坡、陆棚—盆地等相区(亚相—微相)控制发育的多套、多类型烃源岩,与受台地边缘礁滩、台内浅滩控制及后期成岩作用改造形成的多套、多类型储层构成下生上储、旁生侧储、自生自储等多种高效源储组合,构建了二叠系成藏的基本条件;多套、多类型储层是二叠系含气层系多、气藏类型多的根本原因。二叠系具备多领域、多类型、多层系综合、立体勘探的有利条件。

关键词:源储组合;气藏类型;构造—沉积分异;晚古生代;二叠系;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Controlling effect of Late Paleozoic tectonic and sedimentary differentiation on multi-type gas reservoirs in Permian, Sichuan Basin

LI Longlong, LUO Kaiping, LIU Xu, ZHANG Changjiang, CAO Qinggu, LU Yongde, PENG Jinning

Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China

Abstract: Based on the analysis of the Late Paleozoic global tectonic background and the tectonic environment of the Upper Yangtze area, the basin prototype and the Permian lithofacies paleogeography of the Sichuan Basin, combined with the understanding of the Permian gas reservoir characteristics and accumulation conditions, the controlling effect of the Late Paleozoic tectonic and sedimentary differentiation on the Permian multi-type gas reservoirs in the Sichuan Basin is discussed. Results showed that the tectonic differential uplift or subsidence under the extensional background formed the palaeogeomorphology of alternating uplift and depression, which led to the evolution of the sedimentary pattern from the Middle Permian to the Late Permian: platform alternating with platform and depression in the early stage, and platform alternating with rift trough (shelf) in the late stage. Multiple sets and types of source rocks formed in the platform sag, tidal plane-lagoon, slope, shelf-basin and other facies, sub-facies or micro-facies, and multiple sets and types of reservoirs controlled by beaches, platform edge sand and later diagenesis transformation constituted a variety of source-reservoir combinations such as lower generation and upper storage, side generation and side storage, self-generation and self-storage etc. These source-reservoir combinations constitute the basic conditions for hydrocarbon accumulations in Permian. Multiple sets and types of reservoirs are the fundamental reasons for the wide distribution of Permian gas-bearing strata and various gas reservoir types. The Permian strata has favorable conditions for comprehensive and three-dimensional exploration owing to multi-domain, multi-type and multi-layer.

Key words: source-reservoir combinations; gas reservoir type; tectonic and sedimentary differentiation; Late Paleozoic; Permian; Sichuan Basin

二叠系是四川盆地海相地层中油气发现最早、目前勘探最活跃的层系之一,从早期川南的栖霞

组—茅口组裂缝型、岩溶缝洞型气藏,到川东北建南、普光、元坝、龙岗气田为代表的长兴组台缘礁滩

收稿日期:2022-03-17;修订日期:2022-12-31。

作者简介:李龙龙(1994—),男,硕士,助理研究员,从事油气地质研究。E-mail:lilongl.syky@sinopec.com。

通信作者:罗开平(1964—),男,博士,研究员,从事盆地分析及油气地质综合研究。E-mail:luokp.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金(42072156)、中国石油化工股份有限公司科技部项目(P20059-7)和中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA14010402)联合资助。

型气藏,近年来又相继在梁山组、栖霞组、茅口组、吴家坪组(龙潭组)、大隆组发现台内滩相(热液)白云岩气藏、台缘礁滩型气藏、灰泥灰岩型气藏及页岩气,二叠系勘探发现呈现出“多层系、多领域、多类型”的特点^[1-11]。资源评价结果表明,四川盆地二叠系天然气资源量 $46\ 579 \times 10^8\ \text{m}^3$,占海相层系天然气总资源量的近 35%(自然资源部 2015 年油气资源动态评价成果),二叠系在四川盆地资源构成中占有重要地位。前人对四川盆地二叠系气藏的研究主要集中于对特定层位或类型的气藏开展研究^[12-14],很少系统地对对比分析二叠系多类型气藏的形成因素。本文在二叠纪全球构造板块背景及上扬子地区区域构造环境和盆地原型的基础上,通过对四川盆地二叠系岩相古地理的刻画及不同类型气藏特征的对比分析,探讨了构造—沉积分异作用对二叠系成藏条件的控制作用,揭示和阐明了二叠系多类型气藏形成的主要控制因素。

1 二叠系气藏基本特征

四川盆地二叠系具有“含气层多、满盆含气”的特点。从中二叠统栖霞组—茅口组、长兴组常规气到近几年在茅一段、龙潭组(吴家坪组)、大隆组非常规取得的突破,甚至过去一直不被重视的梁山

组也获得油气发现(靖和 1 井),迄今为止,二叠系每个组(段)都发现了工业油气,已成为四川盆地目前含气层段最多、气藏类型最多的层系。平面上,早期的油气藏(井)主要分布在川南(蜀南气田)、川东(建南)、川中(磨溪)、川东北(普光、元坝、龙岗、罗家寨等)地区,近年来川西北(以双鱼石构造为代表)、川西(平探 1 井、永探 1 井)、川东南(南川)地区一批探井相继获得高产工业气流,二叠系气藏(工业气井)几乎遍布于盆地的每个角落,形成了“满盆含气”的局面(图 1)。

气藏类型多是二叠系的另一个重要特征。根据目前已发现气藏的圈闭和储层成因(类型),将二叠系气藏分为构造裂缝型、岩溶缝洞型、礁滩型、热液白云岩型、火山岩型、泥灰岩型及页岩气等 7 种类型。裂缝型气藏主要的储集空间为灰岩裂缝,所以又称为裂缝体或裂缝储集体,多发育在褶皱转折端及断裂带等应力集中部位,这类储层的形成主要与后期构造变形作用相关,一般将这类气藏归为构造气藏,以川东高陡构造带和蜀南地区栖霞—茅口组气藏为代表;岩溶缝洞型气藏储集空间是由次生溶蚀孔洞和构造有效缝共同组成储渗体系,属于构造—岩性气藏或岩性气藏,这类气藏以川南地区自 2 井为代表,单井累产气近 $50 \times 10^8\ \text{m}^3$,

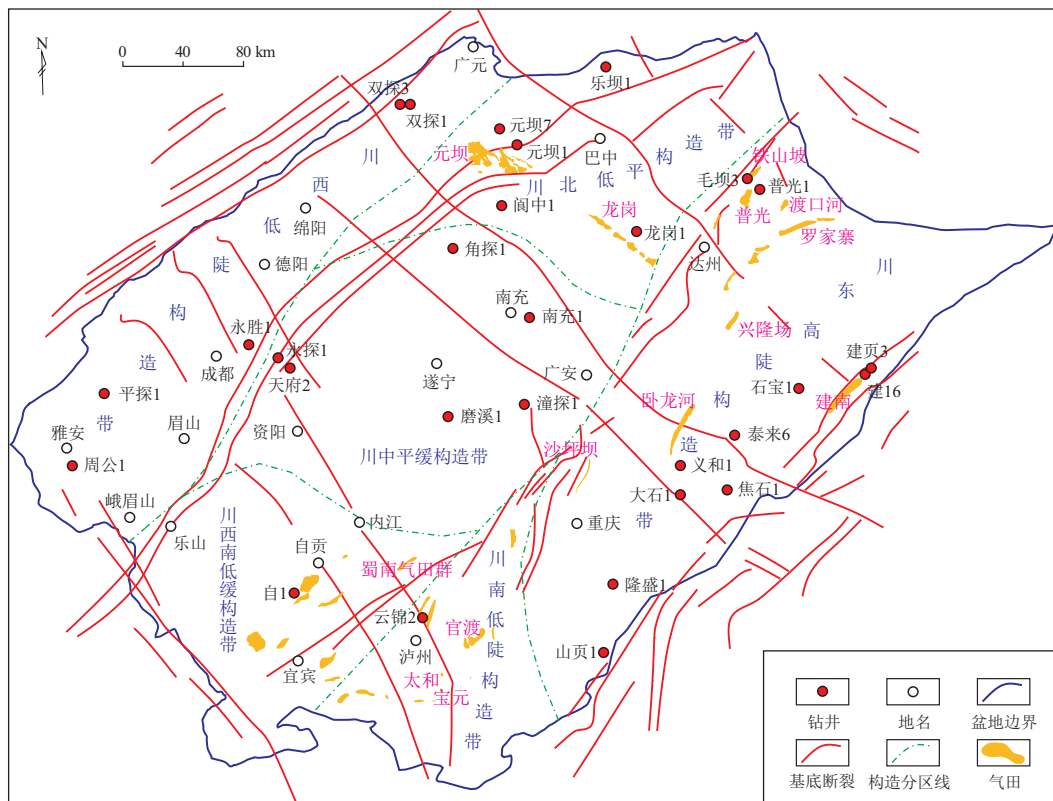


图 1 四川盆地二叠系气藏(主要气井)分布

Fig.1 Distribution of gas reservoirs (wells) in Permian, Sichuan Basin

开发效果好,是西南油气田累计产量最高的单井;礁滩型气藏可以分为台缘礁滩相和台内滩相两个亚类,前者以元坝长兴组生物礁气田为代表,后者以平探 1 井、双探 1 井栖霞组气藏为代表,两类气藏的主要储集空间均以粒间或粒内溶孔为主,储层岩性以白云岩为主,属于岩性或者构造—岩性气藏,这类气藏是二叠系目前为止发现最多的气藏类型;热液白云岩气藏主要分布在四川盆地 15 号、16 号基底断裂带或两侧的大池干井、卧龙河、板东、泰来等构造上^[15],以泰来 6 井为代表,均为岩性气藏,储层为茅三段含铁硅质白云岩,储集空间主要为白云石晶间孔、晶间溶孔、溶洞和裂缝;火山岩气藏主要分布在川西地区,受火山机构控制,爆发相是储层发育的有利相带,储层储集空间以粒间溶孔、晶内溶孔、残余气孔、裂缝为主,以周公 1 井、永探 1 井为代表,属于构造或者构造—岩性气藏;茅一段泥灰岩气藏主要分布在川东南茅一段“眼皮眼球状”泥灰岩地层中,以焦石 1 井、潼探 1 井和大石 1 井为代表,产层主要为灰黑色泥晶结构的泥灰岩、生屑灰岩,储集空间包括滑石成岩收缩孔缝、方解石溶孔、有机质孔和裂缝,其中以滑石成岩收缩孔缝贡献最大,具有“源储一体”的特征;页岩气藏主要分布在川东、川东北吴家坪组、大隆组深水陆棚相含硅质富有机质页岩(建页 3 井为代表)和川东南地区龙潭组潮坪相含煤泥岩中(山页 1 井为代表),两者在有机质类型和孔隙结构上具有明显的差异。因此,二叠系目前发现的气藏类型包含了常规和非常规领域,储层类型的多样性导致了二叠系气藏的多类型。

2 四川盆地二叠纪构造—沉积演化

2.1 区域构造背景

晚古生代全球构造演化主要受控于古特提斯洋扩张—消减^[16],在此背景下,华南大陆经历了裂离—拼合的演化过程^[17-20]。

早、中二叠世,扬子地块位于赤道附近,随着古特提斯洋的扩张,扬子地块成为古特提斯洋中的孤岛。其南、北两侧分别是古特提斯洋的分支洋——金沙江洋和昆仑—秦岭洋;西缘为龙门山陆内裂隙,松潘—甘孜地块与之相邻;东侧为赣湘桂陆缘裂隙,华夏地块与之隔海相对^[21]。四川盆地西南缘为康滇古陆,北缘和西缘为离散型被动大陆边缘,南缘和东南缘为陆缘深水裂谷,四川盆地及邻区整体表现出克拉通内拗陷与边缘裂陷盆地的性质。

晚二叠世,华南陆块位于赤道以北低纬度地区,被古特提斯洋和古太平洋所包围,华北陆块位于其北侧^[22]。中二叠世末,华南陆块和华北陆块的东段首先发生碰撞,形成北秦岭造山带,但华南陆块北缘仍表现为被动大陆边缘^[23-24];华南地块的西南是古特提斯洋的分支——金沙江洋,与之隔洋相对的是思茅—印支地块,金沙江洋向思茅地块的单向俯冲使得华南陆块西南缘也处于被动大陆边缘环境^[25];扬子地块西缘和南缘分别是松潘—甘孜海和(华南陆块内部的)江南—雪峰陆内裂隙,后者与右江裂隙带相连。晚二叠世上扬子地区以地块边缘的强烈拉张和地块内部的弱拉张为特点,发育了边缘裂陷盆地和陆内拗陷盆地,康滇地区峨眉山玄武岩喷发就是伸展作用的标志性事件^[26-27]。

2.2 中二叠世构造—沉积特征及演化

加里东运动及云南运动后,四川盆地及周缘形成西(西南)高、东(东北)低的古地貌,构成了二叠系沉积基底。梁山组在四川盆地及邻区广泛发育,厚度几米至几十米不等,总体上从盆地周缘向盆内逐渐减薄,以含煤碎屑岩沉积为主,上部发育白云岩、泥质白云岩和薄层灰岩,从盆缘向盆内依次为滨岸—砂坪—砂泥坪—泥坪,局部发育灰泥坪(图 2),代表了海侵初期由陆到海的转换。

栖霞组一段(简称栖霞一段,后同)沉积时期,随着海侵范围持续扩大,盆地西南缘康滇古陆范围缩小,海水越过雪峰古陆与湘桂裂陷盆地相连,在上扬子地区形成广阔的碳酸盐台地。康滇古陆往东到乐山、宜宾—南充、广安一线为局限台地,沉积以灰泥灰岩、硅质灰岩、砂质灰岩和白云质灰岩为主;局限台地往东北部到渠县—开县—城口一带,往西到成都—绵阳一带,往东到合川—石柱,为开阔台地,以深灰、灰黑色微晶灰岩、燧石结核灰岩和生屑灰岩为主;盆地东南缘为深水开阔台地,广泛沉积燧石条带灰岩、团块状灰岩和泥灰岩,夹薄层页岩。在局限台地和开阔台地相区,台内滩微相不同程度地发育;在盆地西缘,受控于龙门山古断裂的掀斜抬升及较高的古地貌,沿高桥—通口—广元西北乡一线发育近北东—南西向台缘滩亚相,以生屑灰岩和颗粒白云岩为特征。栖霞二段基本继承了栖霞一段时期的岩相古地理面貌,只是由于海平面下降,局限台地亚相区范围较栖霞一段扩大,往东到开江—石柱一带,开阔台地相区往东扩大到遵义—万足—宣恩—城口一线,深水开阔台地相区相应地往东退缩(图 3)。盆地西缘台地边缘亚相扩大并向西迁移,

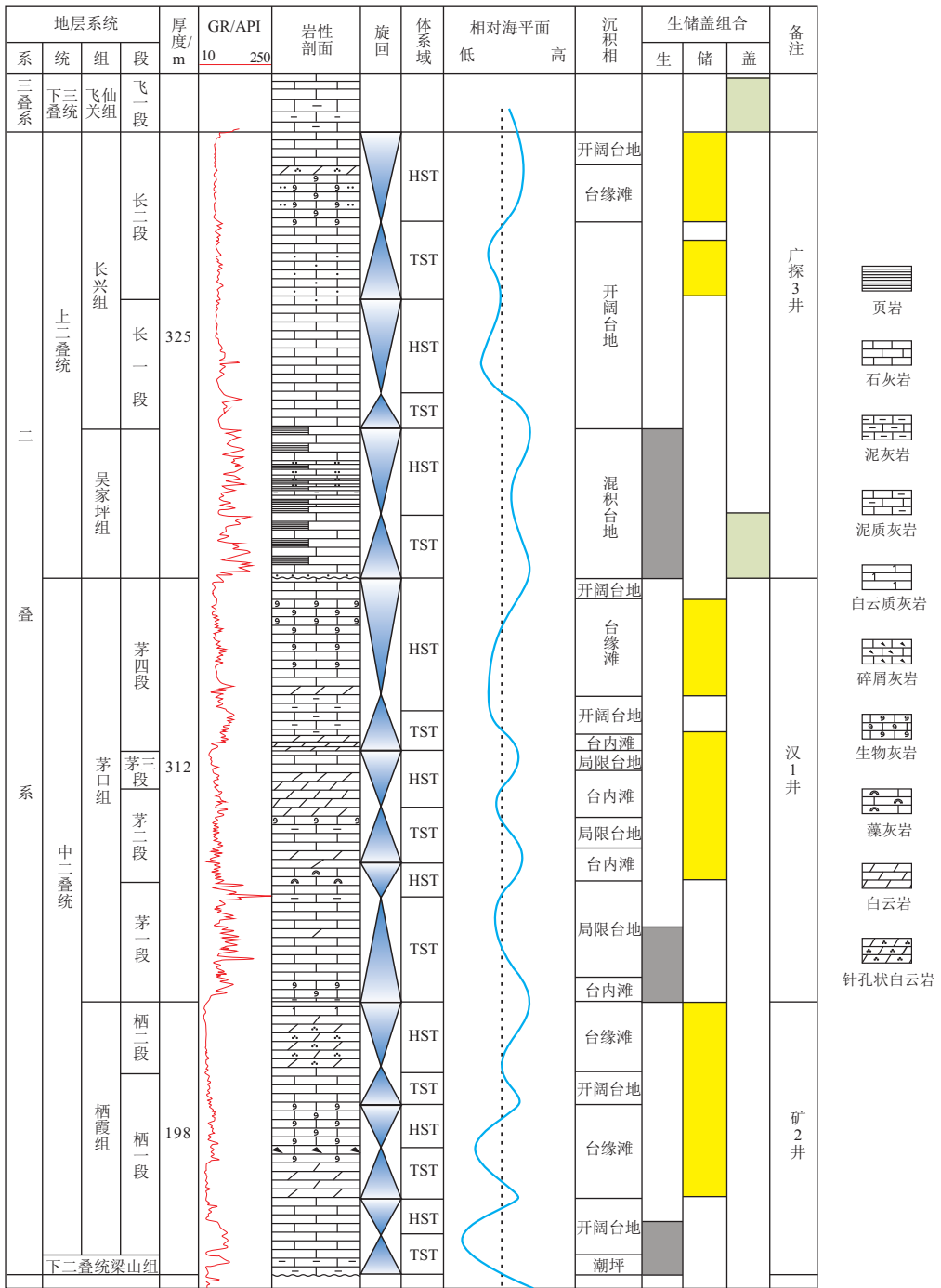


图 2 四川盆地二叠系地层层序与岩性综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic and sequence comprehensive histogram of Permian, Sichuan Basin

沉积了一套厚层中—粗晶白云岩。栖霞一段到栖霞二段表现为海进—海退旋回。

茅口组沉积时期具有与栖霞组沉积时期相同的大地构造环境,四川盆地总体上仍具有西南地势高、水体浅,向东北方向水体逐渐加深的古地貌特征。茅一段继承了栖霞二段末的古地理格局,由于更大规模的海侵,局限台地范围往西南退缩至成都—泸州—珙县一带,川北、川东地区演变为较深水开阔台地,其边界往南推进到川北通口—阆中—南

江—开江一带,往西推进到万县—垫江—合川—丁山—古蔺一带。在川东、川东南深水开阔台地—斜坡相区沉积了深灰色中层状眼皮眼球状泥微晶含生屑灰岩,夹薄层泥质灰岩、碳质泥岩,以石柱冷水溪剖面为代表,厚度约 65 m,成为茅一段标志性沉积。茅二段随着海平面下降,局限台地、开阔台地范围向北、向东扩展,深水台地相区相应往北、往东退缩;局限台地、开阔台地内和川西、川北台地边缘相区浅滩相广泛发育(图4)。茅三段相对于茅二

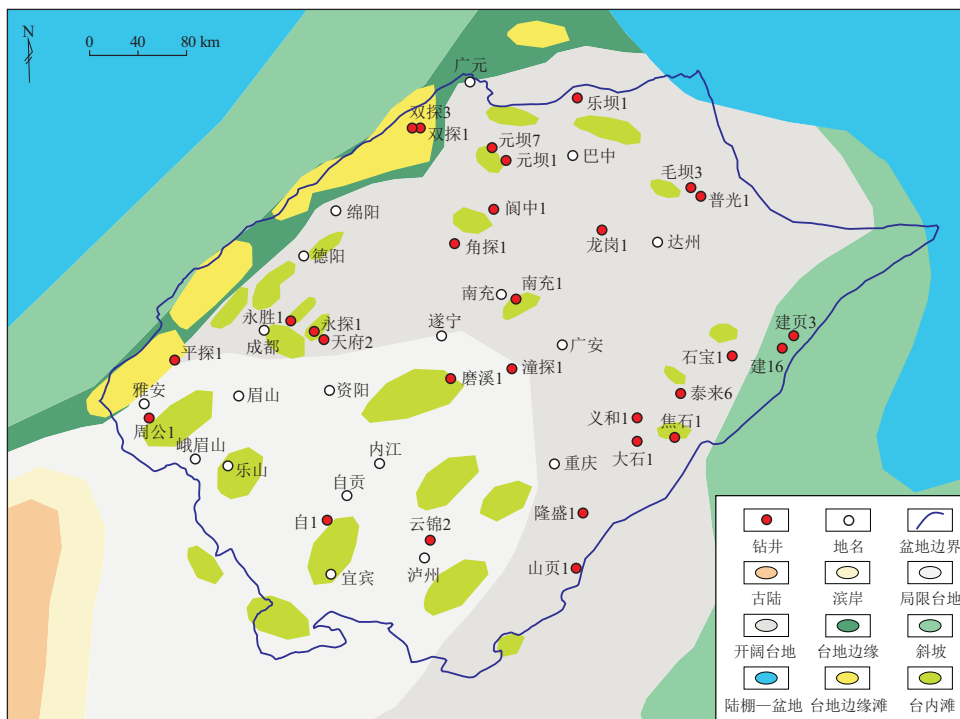


图 3 四川盆地及邻区二叠系栖霞组二段沉积时期岩相古地理

Fig.3 Lithofacies palaeogeography during the deposition of the second member of Permian Qixia Formation in the Sichuan Basin and its periphery

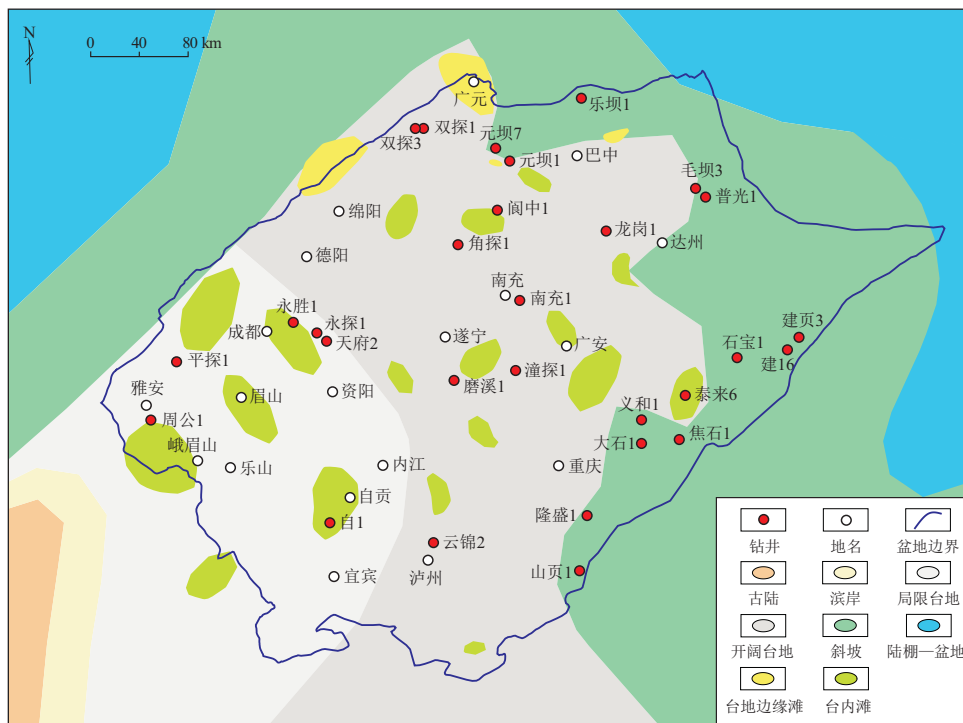


图 4 四川盆地及邻区二叠系茅口组二段沉积时期岩相古地理

Fig.4 Lithofacies palaeogeography during the deposition of the second member of Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its periphery

段海平面变化不大,但在前期填平补齐作用下,开阔台地范围显著扩大,在四川盆地西北部广元和绵阳地区出现两个裂隙的锥形,两侧发育台地边缘,

浅滩相更为发育。茅四段,四川盆地范围内几乎全部演变为开阔台地。四川盆地范围内茅口组总体上以浅灰、灰白色块状泥晶灰岩、微晶灰岩为主,含

有较多的生物碎屑,局部夹有钙质页岩和泥灰岩,形成眼球状、瘤状灰岩,夹有较多的白云岩、白云质灰岩^[28]。在盆地东部、北部常见结核状或条带状硅质岩或硅质灰岩,夹含硅质页岩。茅口组末期,由于东吴上升运动,茅三段和茅四段地层在川北和川中遭受不同程度的剥蚀,并在茅口组顶面形成明显的不整合岩溶风化壳^[13,29]。

2.3 晚二叠世构造—沉积特征及演化

茅口组沉积末期,由于峨眉地幔柱上涌导致地壳隆升,吴家坪期四川盆地及邻区西南高、北东低的古地貌分异进一步加剧。受其影响,四川盆地及邻区从西南向北东方向依次发育潮坪—滨岸、混积台地、开阔台地、斜坡和深水陆棚,与周缘陆缘盆地相接。在盆地西南部及中部地区,岩性以黄灰、黑色细砂岩、粉砂岩、碳质页岩为主,夹灰岩、泥岩和煤层(称为龙潭组),厚度 80~220 m;往北东方向岩性逐渐变化为以灰、深灰色灰岩为主,富含燧石结核,夹有硅质层、页岩、碳质泥岩及煤线(吴家坪组),厚度 70~270 m(图 5)。

长长期初期总体继承了吴家坪期末期古地理格局。但在“台缘强裂陷、台内弱拉张”构造背景下,在盆地东北缘和北部形成了城口—鄂西、广元—开江—梁平、德阳—武胜三个自东向西大致平

行排列、性质相似、从盆缘延伸至盆内的北西向的裂陷/海槽/台洼^[30-32]。吴家坪期业已存在的巴中—广元深水陆棚向东延伸至开江—万县一带,与盆地东侧的建始—恩施陆棚区相连,形成贯通盆地东北部的北西向深水陆棚区(海槽);早期茂县—北川深水陆棚区也向东扩大至盐亭、南充和广安地区,形成德阳—武胜台内洼陷^[33]。因此,长长期与吴家坪期最大的差别是,不平衡伸展断陷使得盆地内差异沉降愈加明显,台内裂陷槽(陆棚)与开阔台地相间形成台—棚(槽)分异沉积格局,加之海平面的上升,陆相沉积区范围显著减小。在深水陆棚相区,地层沉积厚度相对较薄,以灰、灰黑色薄层硅质页岩、页岩为主,夹薄层硅质灰岩(称为大隆组),厚度 15~42 m;在台地相区以厚层碳酸盐岩为主,夹少量碎屑岩,含有丰富的生物化石,厚度 20~400 m。在台地(裂陷槽)边缘发育台缘礁、滩相,生物礁、滩垂向上加积、侧向迁移形成多期叠置的空间展布特征(图 6)。

因此,四川盆地中二叠世是在扬子板块周缘洋盆扩张背景下扬子地台内由于地貌差异及海平面升降形成的不同相区、不同层序充填结构的差异;而晚二叠世则是在地壳差异沉降动力机制驱动下板块边缘强拉张导致的台地—台盆相间格局及板

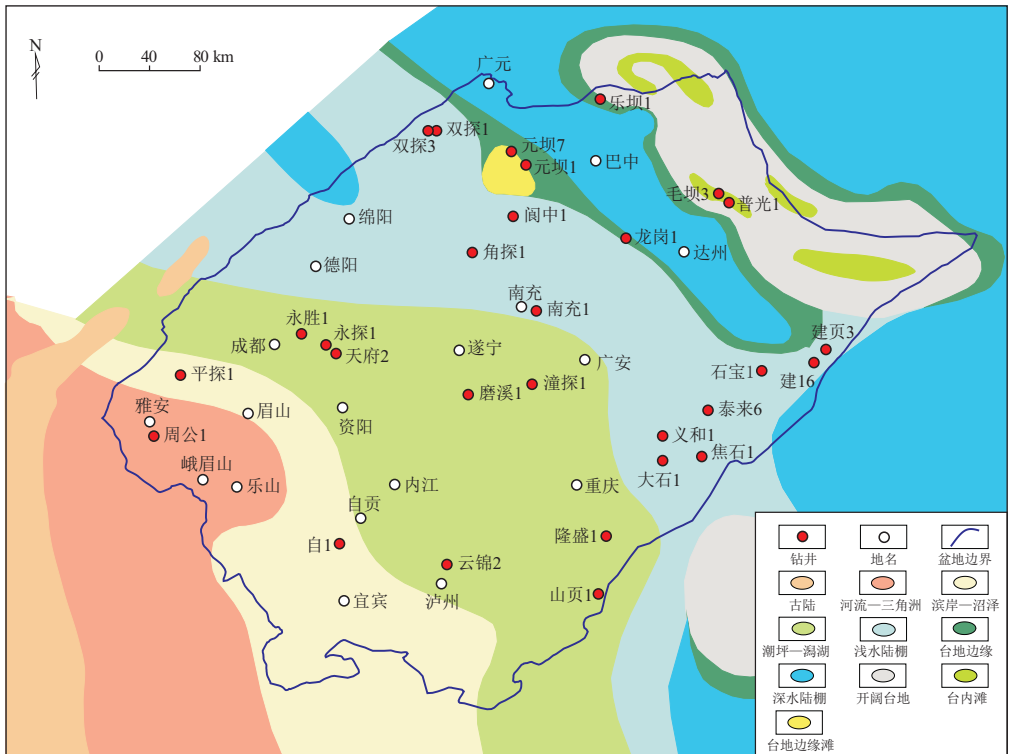


图 5 四川盆地及邻区二叠系龙潭组/吴家坪组沉积时期岩相古地理

Fig.5 Lithofacies palaeogeography during the deposition of Permian Longtan and Wujiaping formations in the Sichuan Basin and its periphery

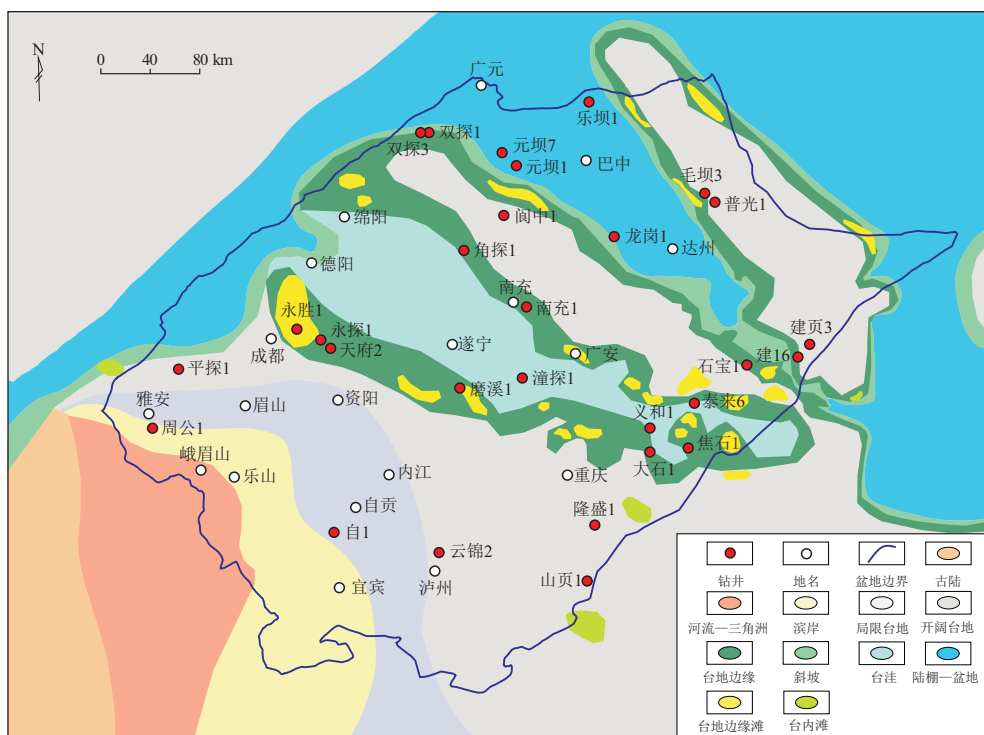


图 6 四川盆地及邻区二叠系长兴组沉积时期岩相古地理

Fig.6 Lithofacies palaeogeography during the deposition of Permian Changxing Formation in the Sichuan Basin and its periphery

块内部弱拉张导致的台隆—台凹相间格局控制下的充填结构的差异,形成两类不同的沉积(分异)模式(图 7)。

3 构造—沉积分异及控源、控储、控藏作用

构造—沉积分异(tectono-depositional differentiation)是近几年在南方海相中经常提及的一个概念^[33-34],它是相对于稳定、均一而言,是大型沉积盆地(如大型克拉通盆地)对其周边或/和内部应力环境和/或热体制变化的响应结果,伴随原型盆地演化阶段或原型盆地性质的转变,沉积盆地内部表现为不同部位的差异构造作用(古隆起、古裂陷—坳陷)及由此造成的地层层序、岩相、充填物质等有规律变化,控制了油气成藏要素的发育及组合,并对成藏和油气富集产生重要影响^[32]。构造沉积分异的控源、控储作用在四川盆地及邻区二叠系表现得非常典型,构造的差异隆升/沉降导致古地貌上的隆/凹,加之海平面升/降,使得不同地区沉积相和充填物表现出明显差异,岩相和岩性在空间上呈交错叠置的特点。构造、地貌和海平面升降等因素的“谐振”,导致沉积分异,控制了烃源岩、储层等成藏要素的发育、展布及组合,最终影响和控制了油气成藏和富集。

3.1 控源作用

四川盆地二叠系发育中二叠统和上二叠统两套不同类型的烃源岩。中二叠统烃源岩发育在栖霞组、茅口组,对应于海侵体系域的海平面上升减速期,台凹、较深水开阔台地及斜坡相区等水体较深、能量较低的相带(微相)是烃源岩发育的有利区,岩性以深灰、灰黑色微晶—泥晶灰岩、泥灰岩为主,夹薄层灰质泥岩或页岩。烃源岩累计厚度 70~200 m,从川中往川西南、川东、川北东厚度增大,以川东北地区厚度最大。总有机碳含量在 0.5%~1.5%,为一套中、低丰度烃源岩。在广元—巴中的川西北—川东北地区,茅三段发育一套深水陆棚—斜坡相的以硅质灰岩、含硅质页岩为主的烃源岩,虽然分布面积、厚度不大,但丰度高,总有机碳含量在 1.5%~7.0%。

上二叠统烃源岩主要发育在龙潭组/吴家坪组,厚度在 50~100 m 左右。川西南—川中地区岩性以瀉湖—潮坪相含煤泥岩为主(龙潭组),川东北地区相变为钙质泥岩、页岩及含硅质灰岩、硅质页岩,属于深水陆棚—盆地相沉积。这两种类型烃源岩均富含有机质,总有机碳含量在 1%~5%,但有机质类型不同,龙潭组以Ⅲ型为主,吴家坪组则为Ⅱ₁—Ⅱ₂型。另外,在开江—梁平深水陆棚区,大隆组(与长兴组同时异相)也是一套优质烃源

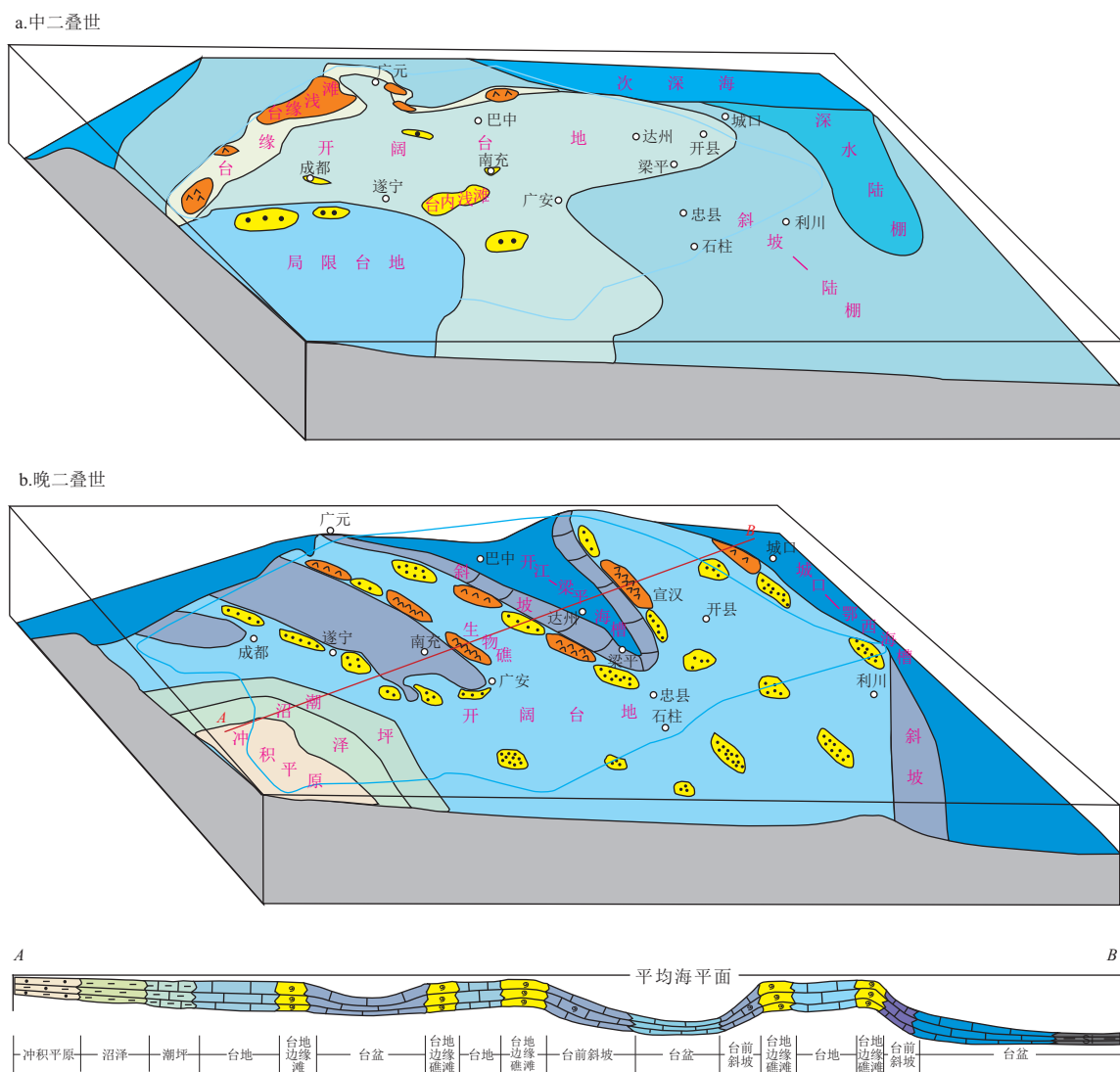


图 7 四川盆地及邻区中、晚二叠世沉积模式

Fig.7 Sedimentary models during the middle and late Permian in the Sichuan Basin and its periphery

岩,岩性以硅质、钙质泥岩为主,总有机碳含量为 2%~7%,有机质类型以 II₁ 型为主,推测在德阳—武胜台凹(拉张槽)内也有类似大隆组的烃源岩发育。

3.2 控储作用

二叠系发育多套多类型储层(前已述及),其形成受控于不同沉积环境(相)及后期的改造作用,但均具有明显的相控特征。

台缘生物礁滩型储层目前主要发现于长兴组、栖霞组,前者主要沿城口—鄂西海槽、广元—开江—梁平海槽及德阳—武胜海槽(台洼)两侧的台缘带展布,生物礁为主,以元坝气田、普光气田生物礁规模最大、最为典型;后者主要沿川西龙门山前带展布,滩为主,以广元西北乡剖面 and 矿 2 井栖霞组为代表。准同生期及埋藏期的溶蚀作用、白云岩化作用对这类储层形成具有重要影响,但有利沉积

微相(礁滩相)更是储层发育的基础^[14,36-37]。

台内滩(白云岩)储层主要发育在栖霞组、茅口组、长兴组局限台地、开阔台地相区,以双探 3 井、双探 1 井、旺苍正源剖面、南江桥亭剖面栖霞组为代表,这类储层形成与台缘礁滩型储层具有相似的机理,滩相沉积是基础,溶蚀作用和白云岩化作用是关键。

热液白云岩储层主要发育在茅三段。储层的原岩主要是颗粒灰岩、生屑灰岩,由于其较好的渗透性,有利于富镁热液流体与岩石的接触而发生白云岩化作用。因此,这类储层的形成根本上还是主要受沉积微相的控制。

岩溶缝洞型储层是二叠系分布最广、认识最早的一类储层,主要发育在茅口组顶面和上部距离东吴运动面一定深度范围内,由于断裂的影响,岩溶发育深度可达几十至上百米。岩溶古地貌是这类

储层发育的主要控制因素,岩溶高地和斜坡岩溶作用最强^[38]。新近钻井揭示表明,在同样条件下岩溶作用对岩性具有选择性,颗粒灰岩更容易被溶蚀,这与其具有较好的渗透性相关,其岩石结构有利于水—岩反应和溶蚀作用进行。因此,这类储层的发育也具有相控特点。

页岩气藏和茅一段灰泥灰岩气藏都表现为连续性气藏,具有源储一体的特征。页岩气储层的主要储集空间(孔隙)类型和占比在不同的岩性、有机质类型表现出显著的差异,与沉积微相具有明显相关性;茅一段灰泥灰岩(瘤状灰岩)储层孔隙主要是由无机矿物成岩转化(海泡石—富镁蒙脱石—滑石—伊利石)过程形成的成岩收缩缝和少量有机质孔、粒内溶孔构成。尽管这两类气藏储层成因均主要归结于有机质热演化和成岩作用,但两种岩石类型(富有机质页岩和瘤状灰岩)的发育和分布也受控于沉积环境,深水陆棚相富有机质页岩

和斜坡相瘤状灰岩是两类储层发育的有利岩石相类型。

四川盆地二叠系的源、储组合可以总结为“下生上储”(图 8b)、“棚生缘储(旁生侧储)”(图 8d)、“源储一体(自生自储)”(图 8b)三种模式(图 8)。

3.3 控藏作用

四川盆地二叠系气藏具有“多元供烃、近源聚集、岩性控藏、气油转化、晚期调整”的成藏富集模式,现今气藏富集主要受控于烃灶的分布、储层发育与规模及保存条件三个主要因素^[39]。将二叠系各组段不同类型储层发育的有利相带叠置在一起(图 9),与二叠系气藏分布(图 1)进行对比,两者之间具有高度的相关性。如双鱼石、平探 1 井等栖霞组气藏/井主要位于栖霞组台缘带;茅一段已发现的高产工业气流井多位于川中—川东地区的外缓坡相带;以茅口组为主要产层的蜀南气田群多为台内滩相受岩溶改造而形成的岩溶缝洞型气藏;长

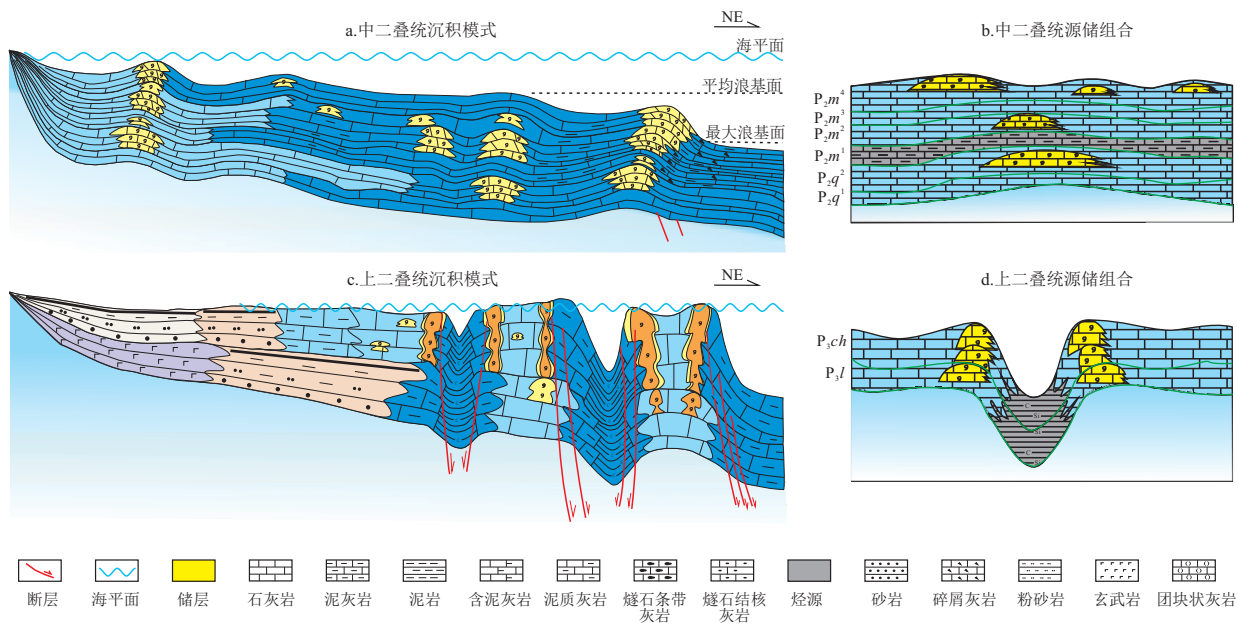


图 8 四川盆地二叠系沉积分异控制下的源储发育及组合模式

Fig.8 Source and reservoir development and combination models controlled by Permian sedimentary differentiation in Sichuan Basin

表 1 四川盆地二叠系主要气藏类型成藏特征

Table 1 Accumulation characteristics of main types of Permian gas reservoirs in Sichuan Basin

气藏类型	烃源岩	储层类型	源储配置	典型气藏/井
台缘生物礁滩型	志留系泥页岩、	台缘生物礁滩型储层	槽(旁)生缘(侧)储	普光长兴组气藏
台内滩型	中上二叠统陆棚—	台内白云岩储层	下生上储	角探 1 等井
不整合岩溶型	盆地深水暗色泥岩	岩溶缝洞型储层	下生上储	蜀南气田群
灰泥灰岩型	茅一段灰泥灰岩 烃源岩	茅一段灰泥灰岩	自生自储	潼探 1 等井
页岩气藏	吴家坪、龙潭等 页岩发育层段	吴家坪、龙潭等 页岩发育层段	自生自储	红页 1 等井

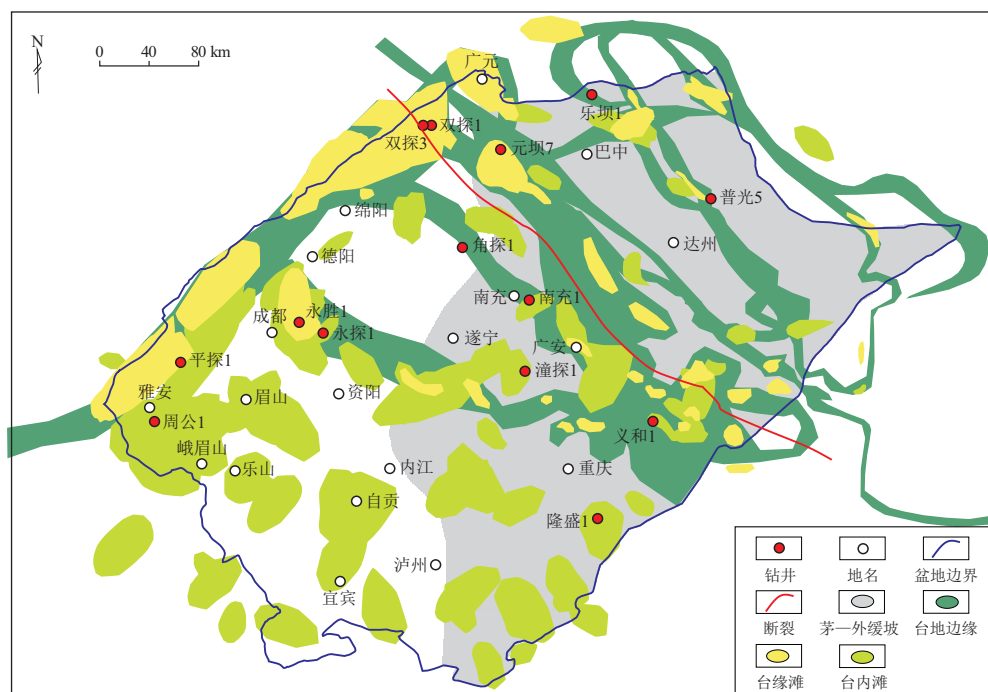


图9 四川盆地二叠系不同类型储层有利发育相带分布叠合图

Fig.9 Distribution and superposition of different types of Permian reservoirs in Sichuan Basin

兴组气藏主要为分布在开江—梁平海槽两侧台缘带的礁滩型气藏。因此,在烃源条件优越(大多具有下伏寒武系烃源岩、志留系烃源岩及二叠系自身烃源岩多源供烃条件)和良好的保存条件(上覆下三叠统巨厚膏盐岩盖层)下,优质储层发育、展布很大程度上成为油气成藏的关键要素,控制油气富集和气藏分布。所以,构造沉积分异作用控制下源、储发育及高效源储组合成就了二叠系丰富的油气资源,多样化储层导致了气藏的多类型。

4 认识与结论

(1)在潘基亚(Pangaea)大陆裂解、古特提斯洋扩张全球板块构造背景和华南陆块周缘强烈拉张区域构造环境下,四川盆地二叠纪经历了从中二叠世统一碳酸盐岩台地到晚二叠世台—槽分异格局的演化;构造差异隆升或沉降形成隆凹相间的古地貌,导致四川盆地二叠系经历早期台地与台凹相间、晚期台地与裂陷槽(陆棚)相间的沉积分异格局。

(2)中二叠世(栖霞组、茅口组)台洼(微相)、斜坡亚相及晚二叠世(龙潭组/吴家坪组、长兴组/大隆组)潮坪—潟湖、浅水—深水陆棚相区是烃源岩发育的有利相带,台内滩相、台地边缘是储层发育的有利相带。多套烃源岩与多套、多类型储层构成下生上储、旁生侧储、自生自储源储组合。

(3)充足烃源(外源+自源)和良好保存条件(中下三叠统膏盐岩盖层)造就四川盆地二叠系丰富天然气资源,多层系、多类型优质储层导致二叠系多个含气层系和多类型气藏。二叠系勘探应该走多层系、多类型兼顾、立体勘探之路。

参考文献:

- [1] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志: 卷十四四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
Sichuan Oil and Gas Field Drafting Group of Petroleum Geology of China. Petroleum geology of China: volume10[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [2] 姜智利, 朱祥. 四川盆地元坝地区二叠系茅口组油气成藏特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 639-646.
JIANG Zhili, ZHU Xiang. Hydrocarbon accumulation characteristics and main controlling factors for Permian Maokou Formation in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(4): 639-646.
- [3] 王利超, 周杨, 胡林辉, 等. 川西北下二叠统栖霞组斑马状白云岩地球化学特征及形成过程: 以ST18井为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 647-654.
WANG Lichao, ZHOU Yang, HU Linhui, et al. Geochemical characteristics and formation process of zebra dolomites in Lower Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin: a case study of well ST 18[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(4): 647-654.
- [4] 翟常博, 邓模, 曹清古, 等. 川东地区上二叠统龙潭组泥页岩基本特征及页岩气勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 921-932.

- ZHAI Changbo, DENG Mo, CAO Qinggu, et al. Basic characteristics and exploration potential of shale gas in Longtan Formation of Upper Permian in eastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(6): 921-932.
- [5] 魏子博, 陈雷, 冯亮, 等. 川东奉节地区长兴组沉积相及储层发育特征 [J]. *断块油气田*, 2021, (6): 816-822.
- WEI Zibo, CHEN Lei, FENG Liang, et al. Sedimentary facies and reservoir development characteristics of Changxing Formation in Fengjie area, eastern Sichuan Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, (6): 816-822.
- [6] 蔡珺君, 彭先, 李骞, 等. 四川盆地重点海相碳酸盐岩气藏产能评价现状及展望 [J]. *断块油气田*, 2021, (5): 655-660.
- CAI Junjun, PENG Xian, LI Qian, et al. Present situation and prospect of productivity evaluation of key marine carbonate gas reservoirs in Sichuan Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, (5): 655-660.
- [7] 夏威, 蔡潇, 丁安徐, 等. 南川地区栖霞—茅口组碳酸盐岩储集空间研究 [J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(2): 197-203.
- XIA Wei, CAI Xiao, DING Anxu, et al. Reservoir spaces of carbonate rocks in Qixia-Maokou Formation of Nanchuan area [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(2): 197-203.
- [8] 陈鑫, 陈雷, 刘菲, 等. 川东地区长兴组生物礁发育特征与迁移规律 [J]. *断块油气田*, 2022, (1): 26-32.
- CHEN Xin, CHEN Lei, LIU Fei, et al. Development characteristics and migration law of Changxing Formation reefs in eastern Sichuan Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, (1): 26-32.
- [9] 谢知含, 侯宇, 雷开强, 等. XC 地区茅口组岩溶储层发育有利区预测 [J]. *断块油气田*, 2021, (2): 230-234.
- XIE Zhihan, HOU Yu, LEI Kaiqiang, et al. Prediction of favorable development area of Maokou Formation karst reservoir in XC area [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, (2): 230-234.
- [10] 郭旭升, 胡东风, 段金宝. 中国南方海相油气勘探展望 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 675-686.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, DUAN Jinbao. Marine petroleum exploration in South China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 675-686.
- [11] 洪太元, 程喆, 许华明, 等. 四川盆地大中型气田形成的主控因素及勘探对策 [J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 406-414.
- HONG Taiyuan, CHENG Zhe, XU Huaming, et al. Controlling factors and countermeasures for exploring large and medium-sized gas fields in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(3): 406-414.
- [12] 郭旭升, 胡东风, 段金宝. 中国南方海相油气勘探展望 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 675-686.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, DUAN Jinbao. Marine petroleum exploration in South China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 675-686.
- [13] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶地貌及勘探选区 [J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 949-960.
- JIANG Qingchun, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 949-960.
- [14] 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等. 元坝长兴组超深层生物礁大气田优质储层发育机理 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1107-1114.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Developing mechanism for high quality reef reservoir (Changxing Formation) buried in ultra-depth in the big Yuanba Gas Field [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1107-1114.
- [15] 杨光, 汪华, 沈浩, 等. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向 [J]. *天然气工业*, 2015, 35(7): 10-16.
- YANG Guang, WANG Hua, SHEN Hao, et al. Characteristics and exploration prospects of Middle Permian reservoirs in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(7): 10-16.
- [16] 潘桂棠. 全球洋—陆转换中的特提斯演化 [J]. *特提斯地质*, 1994, 18: 23-39.
- PAN Guitang. An evolution of Tethys in global ocean-continent transformation [J]. *Thithyan Geology*, 1994, 18: 23-39.
- [17] 张旗, 张魁武, 李达同. 横断山区镁铁—超镁铁岩 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 18-21.
- ZHANG Qi, ZHANG Kuiwu, LI Datong. Mafic and ultramafic rocks in the Hengduan Mountains [M]. Beijing: Science Industry, 1992: 18-21.
- [18] 赖绍聪, 杨瑞英, 张国伟. 南秦岭西乡群孙家河组火山岩形成构造背景及其大地构造意义的讨论 [J]. *地质科学*, 2001, 31(3): 295-303.
- LAI Shaocong, YANG Ruiying, ZHANG Guowei. Tectonic setting and implication of the Sunjiahe volcanic rocks, Xixiang Group, in South Qinling [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 31(3): 295-303.
- [19] 赖旭龙, 殷鸿福, 杨逢清. 秦岭三叠纪古海洋再造 [J]. *地质科学: 中国地质大学学报*, 1995, 20(6): 648-656.
- LAI Xulong, YIN Hongfu, YANG Fengqing. Reconstruction of the Qinling Triassic paleo-ocean [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(6): 648-656.
- [20] 罗建宁, 张正贵. 三江特提斯沉积地质与成矿 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 55-77.
- LUO Jianning, ZHANG Zhenggui. Sedimentary geology and mineralization of Sanjiang Tethys [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 55-77.
- [21] 许效松, 徐强, 潘桂棠, 等. 中国南大陆古地理与 Pangea 对比 [J]. *岩相古地理*, 1996, 16(2): 1-23.
- XU Xiaosong, XU Qiang, PAN Guitang, et al. Palaeogeography of the South China continent and its correlation with Pangea [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1996, 16(2): 1-23.
- [22] 吴汉宁, 朱日祥, 白立新, 等. 扬子地块显生宙古地磁视极移曲线及地块运动特征 [J]. *中国科学(地球科学)*, 1998, 28(S1): 69-78.
- WU Hanning, ZHU Rixiang, BAI Lixin, et al. Phanerozoic paleomagnetic apparent pole shift curve and block movement characteristics of the Yangtze block [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(S1): 69-78.
- [23] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2013, 43(10): 1553-1582.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, WANG Yuejun, et al. Tectonics of

- South China continent and its implications [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2013, 56(11): 1804–1828.
- [24] 张国伟,董云鹏,赖绍聪,等.秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(12): 1121–1135.
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, LAI Shaocong, et al. The Mianlue tectonic belt and the Mianlue suture on the southern margin of the Qinling–Dabie orogenic belt [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(12): 1121–1135.
- [25] 张旗,钱青,王焰,等.扬子地块西南缘晚古生代基性岩浆岩的性质与古特提斯洋的演化[J]. *岩石学报* 1999, 15(4): 576–583.
- ZHANG Qi, QIAN Qing, WANG Yan, et al. Late Paleozoic basic magmatism from SW Yangtze massif and evolution of the Paleozoic Tethyan ocean [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(4): 576–583.
- [26] 罗志立.峨眉地裂运动的厘定及其意义[J]. *四川地质学报*, 1989, 9(1): 1–17.
- LUO Zhili. Determination and significance of Emei Taphrogenesis [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1989, 9(1): 1–17.
- [27] 刘树根,罗志立.四川龙门山地区的峨眉地裂运动[J]. *四川地质学报*, 1991, 11(3): 174–180.
- LIU Shugen, LUO Zhili. The Emei taphrogenesis in the Longmenshan area of Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1991, 11(3): 174–180.
- [28] 姚倩颖,刘一峰,江青春,等.川北—川东地区中二叠世晚期地层划分新认识及地质意义[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(2): 276–287.
- YAO Qianying, LIU Yifeng, JIANG Qingchun, et al. Geological significance of late Mid-Permian stratigraphy in northern and eastern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(2): 276–287.
- [29] 施泽进,夏文谦,王勇,等.四川盆地东南部茅口组古岩溶特征及识别[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 622–630.
- SHI Zejin, XIA Wenqian, WANG Yong, et al. Characteristics and identification of paleokarst in the Maokou Formation in the southeastern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 622–630.
- [30] 罗志立.峨眉地裂运动和四川盆地天然气勘探实践[J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(4): 419–424.
- LUO Zhili. Emei Taphrogenesis and natural gas prospecting practices in Sichuan Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(4): 419–424.
- [31] 罗志立,孙玮,韩建辉,等.峨眉地幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨[J]. *地质学前沿*, 2012, 19(6): 144–154.
- LUO Zhili, SUN Wei, HAN Jianhui, et al. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in Middle–Upper Yangtze area [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 144–154.
- [32] 马永生,牟传龙,谭钦银,等.关于开江—梁平海槽的认识[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 326–331.
- MA Yongsheng, MOU Chuanlong, TAN Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang–Liangping ocean trough [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3): 326–331.
- [33] 罗开平,曹清古,彭金宁,等.四川盆地德阳—武胜拉张槽西段构造—沉积特征及勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): 163–171.
- LUO Kaiping, CAO Qinggu, PENG Jinning, et al. Tectonic–sedimentary characteristics and exploration plays in the western section of Deyang–Wusheng Intracratonic Sag, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2): 163–171.
- [34] 张玺华,彭瀚霖,文龙,等.四川盆地西北部灯影组深水沉积的发现及油气地质意义[J]. *天然气勘探与开发*, 2020, 43(4): 10–21.
- ZHANG Xihua, PENG Hanlin, WEN Long, et al. Discovery of deep-water deposits in northwest Sichuan Basin during Dengyingian period: implications for petroleum geology [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2020, 43(4): 10–21.
- [35] 刘树根,孙玮,宋金民,等.四川盆地海相油气分布的构造控制理论[J]. *地质学前沿*, 2015, 22(3): 146–160.
- LIU Shugen, SUN Wei, SONG Jinmin, et al. Tectonics–controlled distribution of marine petroleum accumulations in the Sichuan Basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 146–160.
- [36] 牟传龙,马永生,王瑞华,等.川东北地区上二叠统盘龙洞生物礁成岩作用研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2005, 25(1/2): 198–202.
- MOU Chuanlong, MA Yongsheng, WANG Ruihua, et al. Diagenesis of the Upper Permian Panlongdong organic reefs in northeastern Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(1/2): 198–202.
- [37] 沈安江,陈娅娜,蒙绍兴,等.中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(4): 1–14.
- SHEN Anjiang, CHEN Yanan, MENG Shaoxing, et al. The research progress of marine carbonate reservoirs in China and its significance for oil and gas exploration [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(4): 1–14.
- [38] 郭旭升,李宇平,魏全超.川东南地区茅口组古岩溶发育特征及勘探领域[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(6): 1–8.
- GUO Xusheng, LI Yuping, WEI Quanchao. Palaeokarst reservoirs and exploration areas of Maokou Formation in the southeast of Sichuan Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2012, 34(6): 1–8.
- [39] 郭旭升,黄仁春,付孝悦,等.四川盆地二叠系和三叠系礁滩天然气富集规律与勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 295–302.
- GUO Xusheng, HUANG Renchun, FU Xiaoyue, et al. Gas accumulation and exploration direction of the Permian and Triassic reservoirs of reef–bank facies in Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 295–302.