

文章编号: 1671-1505(2022)05-0852-19 DOI: 10.7605/gdxb.2022.05.062

四川盆地震旦系灯影组地层厘定与岩相古地理特征^{*}

赵文智^{1,2} 王小芳^{2,3} 王鑫^{2,3} 王坤¹ 沈安江^{2,3}

1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江杭州 310023

3 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

摘 要 埃迪卡拉(震旦)系是元古代第 2 次大氧化事件(NO₂)后形成的具有良好生储盖条件的碳酸盐岩沉积组合,已在四川盆地获得原生气藏勘探重大突破,但德阳—安岳台内裂陷及周缘区灯影组划分对比尚不统一,制约了对台缘带丘滩体横向分布特征的认识。基于露头、钻井和地震资料,通过岩石学、电性和地球化学特征分析,开展了灯影组地层层序重新厘定,在此基础上对灯影组岩相古地理进行了重建,取得以下研究成果:(1)建立了宁强胡家坝灯影组典型剖面,明确了灯影组分段岩性组合特征,指出高石 131X、中江 2、蓬探 1 井原划分的灯二段应归属灯四段,台缘带灯四段具有三分性,特征明显,并构建了等时地层格架。(2)明确了等时地层格架内丘滩体迁移规律,即德阳—安岳台内裂陷东段灯四段台缘丘滩体垂直相带展布方向呈由东向西进积、平行相带方向呈由南向北迁移特征,灯四下亚段丘滩体发育于南部的川中古隆起一带,灯四中亚段丘滩体发育于中部太和区块,灯四上亚段丘滩体则发育于北部的宁强区块。(3)根据灯四下、中、上亚段构造-岩相古地理特征,预测了德阳—安岳台内裂陷及周缘灯影组有利储集层展布,对指导天然气勘探具有重要意义。川中古隆起、太和区块和宁强区块均位于震旦纪同一台缘带上,南部的川中古隆起已探明安岳万亿立方米大气田,中部的太和区块含气规模达万亿立方米的大气区已初步明朗,北部的宁强区块也具备形成万亿立方米大气区的有利条件。

关键词 等时地层格架 台缘丘滩体 岩相古地理 灯影组 德阳—安岳台内裂陷 四川盆地

第一作者简介 赵文智,男,1958年生,1982年毕业于西北大学地质学系,博士,中国工程院院士,主要从事油气勘探地质综合研究工作。E-mail: zzw@petrochina.com.cn。

中图分类号: P531; P534 文献标志码: A

Stratigraphic sequence re-determination and lithofacies palaeogeographical characteristics of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin

ZHAO Wenzhi^{1,2} WANG Xiaofang^{2,3} WANG Xin^{2,3} WANG Kun¹ SHEN Anjiang^{2,3}

1 *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*

2 *Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou 310023, China*

3 *PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China*

* 庆贺西北大学建校 120 周年!

中国石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目(编号:2021DJ0501)、中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金(编号:2018D-5008-03);中国石油天然气股份有限公司科技项目(编号:2019D-5009-16)联合资助。[Co-funded by the 14th Five-year Forward Basic Major Project of Science and Technology, PetroChina (No. 2021DJ0501), the Foundation for Basic Research and Strategic Reserve Technology Research of Affiliated Institutes, PetroChina (No. 2018D-5008-03) and the Science and Technology Project of PetroChina (No. 2019D-5009-16)]

收稿日期: 2022-06-13 改回日期: 2022-07-10

Abstract The Ediacaran (Sinian) stratum is a carbonate sedimentary assemblage with good source-reservoir-cap conditions formed after the Proterozoic Second Great Oxidation Event (NOE), where a major breakthrough had been made in the exploration of primary gas reservoirs in the Sichuan Basin. The stratigraphic division and comparison of the Dengying Formation in the Deyang-Anyue intra-platform rift and the surrounding area are not uniform, which restricts the understanding of the lateral distribution characteristics of the mounds and shoals in the platform margin. Based on drilling, outcrop and seismic data, through petrological, electrical and geochemical analysis, this paper carried out the re-determination of the Dengying Formation stratigraphic sequence. On this basis, the lithofacies palaeogeography of the Dengying Formation was reconstructed, and the followings were concluded: (1) The Dengying Formation standard profile and segmented lithologic assemblages in Hujiaba (Ningqiang County, Shaanxi Province) area were established, and it was pointed out that the strata in Wells Gaoshi-131X, Zhongjiang-2 and Pengtan-1 were originally classified as the Member 2 should belong to the Member 4 of Dengying Formation, and the Member 4 on the platform margin is trichotomous with distinctive features, and the isochronous stratigraphic framework was constructed. (2) The migration law of the mounds and shoals within the isochronous stratigraphic framework was clarified, that is, in the eastern segment of the Deyang-Anyue intra-platform rift, the Member 4 of Dengying Formation platform margin mounds and shoals prograde from east to west, while in a direction perpendicular to the facies belt, they shifted from south to north. The mounds and shoals of the lower, middle and upper sub-member of the Member 4 of Dengying Formation are developed in the south of central Sichuan paleo-uplift, in the Taihe area in the center of the basin, and in the Ningqiang area in the north of basin, respectively. For this, three tectonic-lithofacies palaeogeographic maps were compiled for the lower, middle and upper sub-members of the Member 4 of Dengying Formation. (3) The above understanding is of great significance for the prediction of favorable reservoir distribution in the Deyang-Anyue intra-platform rift and the surrounding Dengying Formation and for guiding natural gas exploration. Central Sichuan paleo-uplift, Taihe area and Ningqiang area are all located on the same platform margin belt in Sinian. In the Central Sichuan Paleo-uplift in the south, the Anyue trillion cubic gas field has been discovered, and a gas block at a scale of one trillion cubic meters has been preliminarily determined in the Taihe area in the center, and the Ningqiang area in the north also has favorable conditions to form a trillion-cubic-meter gas large block, which is worth looking forward to.

Key words isochronous stratigraphic framework, platform margin mounds and shoals, lithofacies palaeogeography, Dengying Formation, Deyang-Anyue intra-platform rift, Sichuan Basin

About the first author ZHAO Wenzhi received a B.S. (1982) from Northwest University in Xi'an, and M.S. (1984) and Ph.D. (2003) degrees from the PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED) in mineral resource prospecting and exploration. He became an academican of the Chinese Academy of Engineering in 2013. He has received several honorable and scientific and technological awards for his contributions, among them the Prize for Outstanding Young Scientists of Sun Yueqi Foundation (1994), the Golden Hammer Medal of China Geological Society (1994), National Early Career Awards for Scientists and Engineers (1998), the Li Siguang Geological Science Medal (2003), the First Prize of National Scientific and Technological Progress Award (2007), the Prize for Energy Technological Achievements of the Sun Yue-Qi Foundation (2007). E-mail: zzw@petrochina.com.cn.

1 概述

埃迪卡拉(震旦)系是元古代第2次大氧化事件(NO₂)发生以后在中国古大陆区形成的具有良好生储盖条件的碳酸盐岩沉积组合。在四川盆地安岳气田已探明的1.03万亿立方米地质储量中,震旦系探明储量超过5700亿立方米,占比56.3%。经气源地球化学对比证实,震旦系烃源岩为震旦系已探明天然气储量提供了39%~68%的气源输入(赵文智等,2021),表明震旦系是四川盆地大气田的有效烃源岩。碳酸盐岩储集层是决定震旦系能否形成原生大型气藏的重要因素之一,对其分布的客观预测是找气勘探最关注的问题之一。已有大量研究揭示,德阳—安岳地区在晚震旦世—早寒武世发育一个特殊的构造-沉积单元,即德阳—安岳克拉通内裂陷带。有关这一裂陷带的发育演化,不同学者认识不同。汪泽成等(2014)、李忠权等(2015)认为其是拉张背景下的侵蚀谷,魏国齐等(2015)、杜金虎等(2016)、刘树根等(2016)认为其是克拉通内裂陷。本研究采用沈安江等(2020)提出的由侵蚀谷向台内裂陷演化的观点,即灯影组二段沉积期为统一的小克拉通浅水台地,受桐湾运动I幕影响,灯二段沉积末期遭受抬升风化剥蚀,形成侵蚀谷,灯三段沉积期发生海侵,灯四段沉积期在侵蚀谷基础上发生台内拉张,形成台内裂陷,裂陷内发育优质烃源岩,裂陷周缘发育优质微生物白云岩储集体。早寒武世早期碳酸盐岩台地被淹没,形成广覆式烃源岩,中期(沧浪铺组沉积期)发生填平补齐沉积作用,晚期(龙王庙组沉积期)进入缓坡台地演化阶段。

四川盆地震旦系灯影组已成为十分重要的油气勘探层系,在德阳—安岳台内裂陷东侧的台缘带及紧邻的台内区已发现安岳大气田,目的层主要为灯影组和寒武系龙王庙组,其中震旦系灯四段是主要产层,其次是灯二段(王翔,2017;贺川航等,2021)。继安岳气田发现之后,川中古隆起北斜坡太和区块又先后有蓬探1井、中江2井和角探1井等风险探井获得重要突破,灯二段是主要目的层之一(赵路子等,2020),又一个万亿立方米储量规模的大气区正在勘探建设中,展示了震旦系是四川盆地新储量发现和增长的重要勘探新领域。

微生物丘滩白云岩储集层主要发育在台缘带,是灯影组最重要的勘探目的层段,岩性以凝块石和

叠层石白云岩为主,沉积厚度大,物性条件较好。但由于埋藏深度较大,地震成像分辨率较低,储集层横向延展识别难度大,需要在构造单元划分基础上,对岩相古地理展布进行重建,以提高有利储集相带预测的准确性。台地内微生物白云岩储集层以叠层石白云岩为主,厚度较小,品质相对较差(陈娅娜等,2017),但通过水平井及储集层改造措施,同样能获得工业气流(肖富森等,2018;王茜等,2020;谢军等,2021)。

研究认为四川盆地德阳—安岳地区存在以下2个问题:(1)德阳—安岳台内裂陷及邻区灯影组展布与对比问题。按照目前的统层方案,位于台缘带上的蓬探1井、中江2井缺失灯四段,而位于台内区的高石16井、磨溪39井灯四段厚度则近300m,这是一个难以合理解释的问题;(2)台内裂陷东侧台缘带灯影组微生物丘滩体的侧向迁移问题。按照目前的分层方案,台缘带丘滩体随海平面升降的横向迁移变化不明显,甚至存在局部台缘带宽度不协调与台缘跳相等问题(如从灯二段跳到灯四段)。这导致灯影组微生物丘滩体分布和迁移规律不清,制约了储集层分布预测和有利勘探靶区评价,尤其是继川中古隆起和其北斜坡太和区块获得勘探突破之后,该区还面临第3个万亿立方米大气区在哪里找的问题。因此,迫切需要在震旦系岩相古地理重建基础上,做好有利储集层分布预测。

基于对宁强胡家坝剖面、峨边先锋剖面和青川八角村剖面的观测和U-Pb同位素测年等分析测试,以及磨溪16井、磨溪19井、高石131X井、蓬探1井、中江2井的岩心观察和U-Pb同位素测年等分析测试,通过电性和地球化学特征分析,结合地震和钻井资料,系统开展了德阳—安岳台内裂陷及邻区灯影组等时地层对比与重新厘定,建立了新的地层统层方案,并以此为基础重新认识德阳—安岳台内裂陷的演化,重新编制灯二段和灯四段构造-岩相古地理图,进而揭示台内裂陷槽东侧台缘带微生物丘滩体侧向迁移变化规律,为储集层分布预测和勘探有利区评价提供依据。

2 区域地质背景

四川盆地面积18万平方千米,由川中古隆起中斜平缓带、川南低陡穹形带、川东高陡断褶带、川北低缓带和川西低陡带5个构造单元构成。震旦

系灯影组自下而上可划分为灯一段、灯二段、灯三段和灯四段(图 1)(陈娅娜等, 2017)。

2.1 灯影组地层序列和特征

灯一段以泥粉晶白云岩为主, 夹砂屑白云岩, 局部夹硅质条带和燧石团块, 厚度在 200~300 m 之间, 与下伏陡山沱组呈不整合接触; 灯二段岩性以藻泥晶白云岩为主, 少量凝块石、藻纹层、藻砂屑白云岩, 厚度在 300~400 m 之间, 中部发育几十米到上百米厚的葡萄花边白云岩, 见残留溶蚀孔洞, 是灯二段典型的标志层, 与下伏灯一段整合接触。灯一段和灯二段在整个扬子地区岩相和厚度都比较稳定, 地层横向可对比性好。灯三段岩相变化较大, 既有沼泽相泥岩、河流相砂岩以及台地相碳酸盐岩, 也有深水陆棚相黑色薄层泥岩, 厚度几米至十几米, 与下伏灯二段呈不整合接触, 沉积环境与岩性岩相横向变化显然与灯二段沉积末期发生的桐湾 I 幕构造运动有关, 代表第 2 个海侵旋回的开始。灯四段岩相和厚度变化大, 以藻叠层和藻格架

白云岩、凝块石白云岩、(藻)砂屑白云岩为主, 夹泥晶白云岩或与之呈互层, 基质孔和溶蚀孔洞发育, 残留厚度在 30~400 m 之间, 是四川盆地重要的勘探目的层段。灯四段与下伏灯三段呈整合接触关系。灯四段沉积后发生了桐湾 II 幕构造运动, 其强度和影响要比桐湾 I 幕大得多, 很多地区的寒武系直接覆盖在灯二段之上, 有些地区灯四下亚段或灯三段与寒武系呈不整合接触。

2.2 灯影组古地理背景

整个扬子地区(包括四川盆地)灯影组沉积期主体为浅水碳酸盐岩台地, 由于台地边缘大多被俯冲到造山带之下(沈安江等, 2020), 关于台地的属性(镶边台地还是缓坡台地)并不清楚。受罗迪尼亚(Rodinia)大陆裂解的影响, 该区区域构造总体具伸展背景, 几条较大的基底断裂总体表现为拉伸特征, 部分断层也兼具走滑性质。基底断裂总体表现出差异升降, 控制了台内裂陷与台内洼地的形成与分布, 这是台内烃源岩和储集层发育基

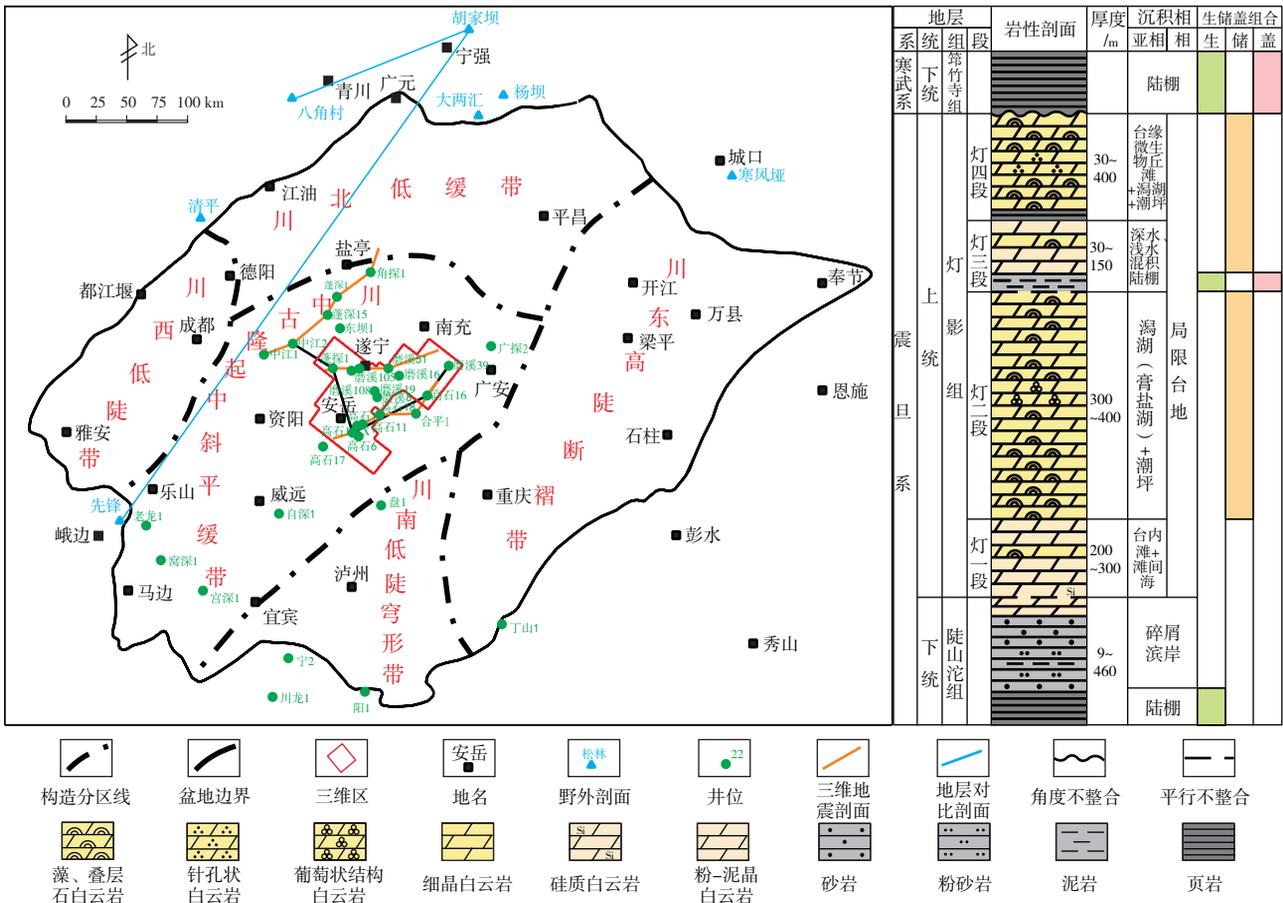


图 1 四川盆地构造区划与震旦系灯影组地层序列及资料分布

Fig. 1 Tectonic division of Sichuan Basin and stratigraphic sequence and data distribution of the Sinian Dengying Formation

本的古地理背景，也是勘探找气领域由台缘带向台内区扩展的基础。“十三五”期间，国家碳酸盐岩油气重大专项研究认为灯二段沉积期，四川盆地及邻区发育德阳—安岳台内裂陷的雏形和鄂东—渝西裂陷(图 2-a)，灯四段沉积期，德阳—安岳台内裂陷处于鼎盛期，向南延伸至蜀南，鄂东—渝西裂陷进一步发育(图 2-b)，这种隆坳格局控制了四川盆地灯影组台内烃源岩和规模储集层的发育分布(沈安江等，2020)。

2.3 研究区构造演化史

文中研究区重点是指德阳—安岳裂陷带东翼，位于四川盆地中部。四川盆地加里东古隆起自灯影组沉积以后，大致经历了 5 个构造演化阶段(李伟等，2014)：(1) 加里东旋回早期构造演化阶段：发生桐湾 I 幕和桐湾 II 幕 2 期构造运动，分别导致灯二段和灯四段的抬升和剥蚀，灯影组底的埋深达到 1500 m；(2) 加里东旋回中晚期构造演化阶段：寒武纪—奥陶纪发生了 3 次超覆沉积与 3 次隆升剥蚀，分别为兴凯运动、郁南运动和都匀运动，志留纪末期的广西运动导致川中加里东古隆起整体抬升剥蚀，灯影组底的埋深达到 3500 m；(3) 海西期构造演化阶段：泥盆系—石炭系整体隆升剥蚀，石炭纪末受云南运动影响，川中进一步遭受剥蚀，灯影组底的埋深回返至 2000 m，二叠纪川中主体处于沉降沉积期，灯影组底的埋深再次达到 3500 m；(4) 印支—燕山期构造演化阶段：中—晚三叠世之交的印支运动完成了川中古隆起由海相向陆相沉积的转换，上覆中生代陆相沉积使灯影

组底的埋深达到近 7000 m；(5) 喜山期构造演化阶段：古隆起东段的高石梯—龙女寺相对稳定，灯影组底的埋深近 6000 m，而古隆起西段的乐山—资阳强烈褶皱抬升，灯影组底的埋深近 3000 m。加里东早期桐湾 I 幕和桐湾 II 幕构造运动对研究区灯影组的发育分布、构造-岩相古理展布等都具重要控制作用。

3 灯影组典型剖面的建立和对比

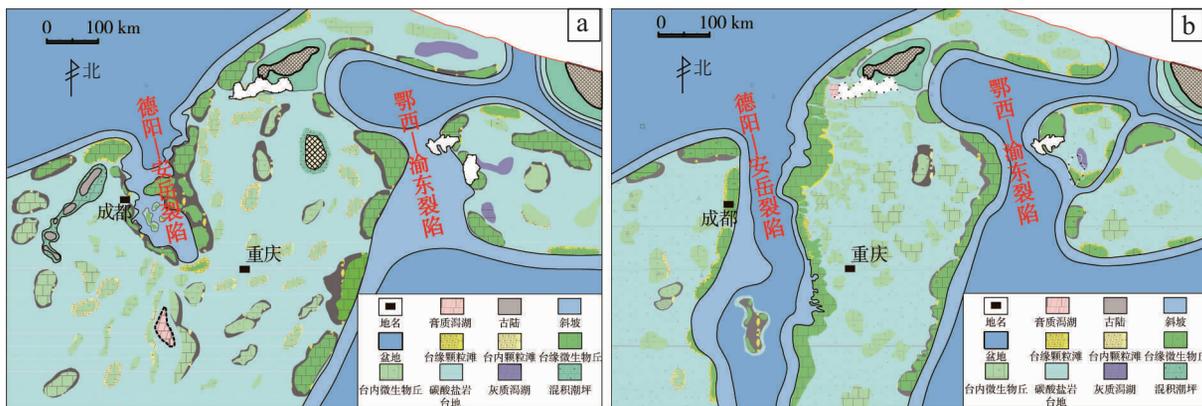
扬子区埃迪卡拉系包括陡山沱组和灯影组 2 套地层，Condon 等(2005)、周传明等(2019)根据湖北三峡地区埃迪卡拉系剖面中火山灰锆石 U-Pb 同位素年龄数据，将埃迪卡拉系的起始年龄限定为 635 Ma，灯影组的起始年龄限定为 551 Ma。

3.1 台缘带灯影组典型剖面建立

作者对宁强胡家坝剖面灯影组进行了详细研究，该剖面位于台缘带，由左家村剖面和高家山剖面平移拼接构成，下与陡山沱组、上与筇竹寺组均呈不整合接触(郭旭升等，2018)，并建立了典型对比剖面(图 3)。

该剖面灯影组的地层序列、岩性、电性和地球化学特征比较清楚，灯影组可划分为灯一、灯二、灯三和灯四段，灯四段岩性具有三分性(表 1)。

除岩性、电性和地球化学特征差异明显外，还开展了灯影组白云石 U-Pb 同位素年龄测定，利用测年资料结合岩电资料对露头区灯影组的三分性进一步求证。碳酸盐矿物 U-Pb 同位素测年



a—灯二段沉积期构造-岩相古地理；b—灯四段沉积期构造-岩相古地理
图 2 四川盆地及邻区灯影组灯二段和灯四段沉积期构造-岩相古地理

Fig. 2 Tectonic lithofacies palaeogeography of the depositional periods of Member 2 and Member 4 of Dengying Formation deposition in Sichuan Basin and its adjacent areas

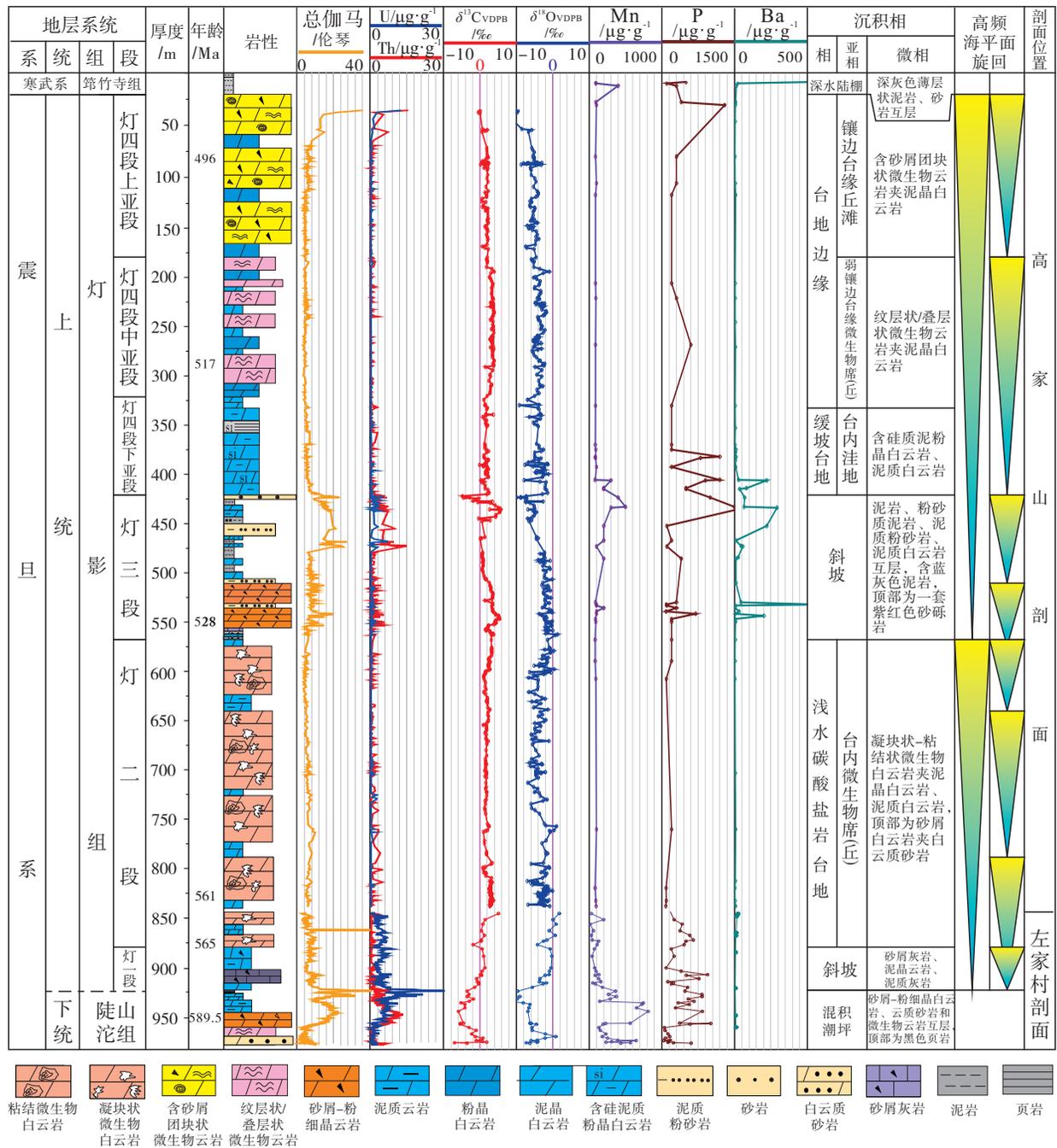


图 3 四川盆地宁强胡家坝剖面灯影组综合地层柱状图

Fig. 3 Comprehensive stratigraphic column of the Dengying Formation of Hujiaba section, Ningqiang County, Sichuan Basin

已经是一项比较成熟的技术 (Rasbury and Cole, 2009; Woodhead *et al.*, 2009; Pickering and Kramers, 2010; Woodhead and Pickering, 2012; Hill *et al.*, 2016), 但所测年龄的地质意义需要地质家结合地质条件给予解释。从成岩环境介质中直接沉淀出来的成岩矿物, 在从沉淀之时的 U-Pb 同位素就被认为进入了封闭体系, 因而测得的年龄

能够代表矿物形成时间, 未发生蚀变的围岩的 U-Pb 同位素年龄则代表地层的年龄。发生蚀变的围岩, 如灰岩发生白云石化, 说明围岩的 U-Pb 同位素体系是开放性的, 此情况下测得的年龄更倾向于白云石化发生时间或稍晚。如果白云石化发生于准同生期, 则测得的年龄就基本代表了地层年龄或略晚一些 (Rasbury and Cole, 2009;

表 1 四川盆地宁强胡家坝剖面灯影组地层序列、岩性和电性特征

Table 1 Stratigraphic sequence, lithology and electrical property of the Dengying Formation of Hujiaba section, Ningqiang County, Sichuan Basin

序号	段与界面	岩性特征	电性和地球化学特征	沉积相
1	灯四段与寒武系分界	寒武系砂泥岩与灯影组碳酸盐岩分界清楚,灯四段见顶	①伽马值和 U、Th 含量在界线附近发生突变,进入寒武系突然增大;②碳氧同位素进入寒武系也明显负偏	台地淹没,碳酸盐岩台地消失
2	灯四段 (上富藻段)	上	以凝块石、叠层石格架丘为主,与泥粉晶白云岩构成多个旋回	水体进一步变浅,典型台缘带
3		中	纹层状或叠层状白云岩,与泥粉晶白云岩构成多个旋回	水体变浅,台缘锥形
4		下	含硅质泥粉晶白云岩与泥粉晶白云岩互层	水体进一步加深(硅质)
/	灯三段与灯四段分界	/	伽马值和 U、Th 含量在界线附近发生突变,灯三段具有很高的伽马值和 U、Th 含量,进入灯四段几乎降为零	/
5	灯三段	砂泥岩为主,夹砂屑白云岩	①伽马值和 U、Th 含量高,Th 含量明显大于 U 含量;②碳氧稳定同位素由下向上逐渐偏负的趋显,顶与灯四段明显突变面,碳氧稳定同位素明显负偏	海侵,灯二段台地淹没
6	灯二段 (下富藻段)	葡萄花边状白云石夹泥粉晶白云石	①伽马值和 U、Th 含量总体偏低,Th 含量明显大于 U 含量,均明显高于灯四段;②碳氧同位素与灯四段总体相似,但顶部有 1 段(约 50 m)明显偏重,碳同位素变化幅度不大,总体低正偏,氧同位素变化幅度大,总体低负偏	极浅的碳酸盐岩台地,大气淡水淋溶
7	灯一段(贫藻段)	泥粉晶白云岩为主,夹砂屑白云岩	①伽马值和 U、Th 含量中等,高于灯二段和灯四段,U 含量明显大于 Th 含量,Th/U 值接近于零;②碳氧稳定同位素接近于零或微弱正偏	碳酸盐岩台地,水体比灯二段深
8	灯一段与陡山沱组分界	陡山沱组薄层黑色薄层泥岩与灯一段泥晶白云岩分界清楚,灯一段见底	由陡山沱组跨入灯影组,电性、同位素和元素特征发生明显突变(明显变低)	混积潮坪

Woodhead *et al.*, 2009; Pickering and Kramers, 2010; Woodhead and Pickering, 2012; Hill *et al.*, 2016; 沈安江等, 2019)。

在宁强胡家坝剖面和关键井的陡山沱组和灯影组白云岩围岩中,测得 1 组 U-Pb 同位素年龄(图 4),陡山沱组顶部白云岩围岩的 U-Pb 同位素年龄为 589.5 ± 6.7 Ma,灯三段和灯四段测得 528 ± 14 Ma、 517 ± 14 Ma、 496 ± 18 Ma 共 3 个 U-Pb 同位素年龄,对年龄的地质含义分析如下。

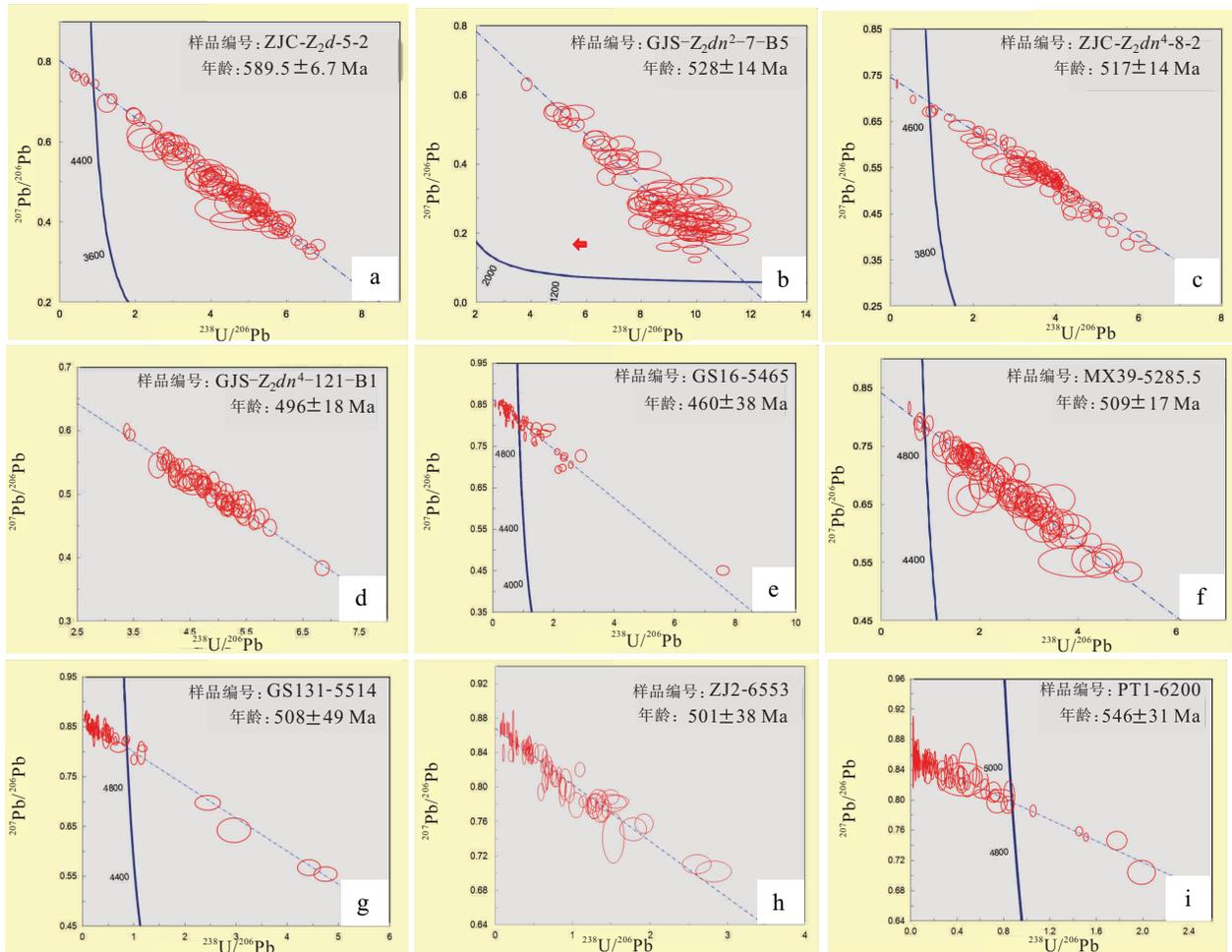
陡山沱组顶部白云岩围岩的年龄(589.5 ± 6.7 Ma)早于国际地科联定义的震旦纪与寒武纪分界年龄(541 Ma),与沙庆安(2001)认为围岩白云石化发生于准同生期是吻合的,白云石化年龄基本代表地层年龄。灯三段和灯四段测得的 3 个 U-Pb 同位素年龄(528 ± 14 Ma、 517 ± 14 Ma、 $496 \pm$

18 Ma)均比 541 Ma 晚,也代表了稍晚发生的白云石化年龄,与灯影组地层沉积年龄有较好的匹配性。这种绝对年龄序列虽然不能完全代表地层的绝对年龄,但考虑到该区白云石化事件发生具有相对等时性,这些测年数据可以为四川盆地及邻区灯影组各段发育的完整性判断与次级地层单元之间的对比关系建立提供年代学依据。

另外,该剖面上灯四段岩性三分性很明显。下亚段为水体较深环境沉积的含硅质泥粉晶白云岩,中亚段为水体较浅的纹层状或叠层状白云岩,上亚段则为水体进一步变浅环境中形成的凝块石、叠层石白云岩格架丘,总体构成一个向上由深变浅的沉积旋回。

3.2 台内—台缘—台盆区灯影组对比

基于上述基础资料横向对应关系的建立,构建



a—陡山沱组顶部白云岩围岩，宁强胡家坝左家村剖面；b—灯三段底部白云岩围岩，宁强胡家坝高家山剖面；c—灯四中亚段底部白云岩围岩，宁强胡家坝左家村剖面；d—灯四上亚段中部白云岩围岩，宁强胡家坝高家山剖面；e—白云岩围岩，高石 16 井，灯四段；f—白云岩围岩，磨溪 39 井，灯四段；g—白云岩围岩，高石 131X 井，灯四段；h—白云岩围岩，中江 2 井，灯四段；i—白云岩围岩，蓬探 1 井，灯四段

图 4 四川盆地重点露头 and 关键井陡山沱组和灯影组白云岩围岩 U-Pb 同位素年龄

Fig. 4 U-Pb isotopic age of host rocks of the Doushantuo Formation and Dengying Formation dolomite from key outcrops and wells in Sichuan Basin

了峨边先锋（台内）—宁强胡家坝（台缘）—青川八角村（台盆）灯影组露头剖面等时地层格架（图 5），明确了岩性横向分布特征（表 2）和相应古地理迁移变化。

由图 5 所示，灯一段沉积期，宁强胡家坝剖面以泥粉晶白云岩夹砂屑白云岩为主，峨边先锋剖面以泥粉晶白云岩夹藻纹层、藻叠层白云岩为主。分析认为，与宁强胡家坝地区相比，峨边先锋地区海水要相对更为安静而稳定，但二者均位于台内沉积环境，而青川八角村剖面岩性为浅水陆棚泥质粉砂岩，与台地相区发育的泥粉晶白云岩明显不同，且二者呈横向相变关系。此时未见明显的镶边台缘沉

积，以发育缓坡台地为主。

灯二段沉积期，宁强胡家坝剖面 and 峨边先锋剖面均以葡萄花边状白云岩夹泥粉晶白云岩为主，表现为典型的台地相区沉积特征，分布广泛，横向连续性与可对比性均好，说明宁强胡家坝地区灯二段沉积期，尚未形成台地边缘，仍以缓坡台地沉积为主。

灯三段沉积期，峨边先锋剖面岩性为灰黑色页片状碳质页岩，与宁强胡家坝剖面灯三段砂泥岩夹砂屑白云岩相比存在相变，峨边地区可能代表了台内沼泽环境沉积。事实上，这套地层在台内岩性变化很大，钻井揭示台内还有石英砂岩沉积，是桐湾

表 2 四川盆地台内—台缘—台盆区灯影组横向变化特征

Table 2 Lateral variation of the Dengying Formation from interplatform through platform margin to basin in Sichuan Basin

地层序列	峨边先锋(台内)剖面	宁强胡家坝(台缘)剖面	青川八角村(盆地)剖面
灯四段	以泥粉晶白云岩为主,夹少量藻纹层、藻叠层白云岩和砂屑白云岩,碳氧稳定同位素与宁强胡家坝剖面变化趋势一致,伽马值比台缘偏大3~5倍	以凝块石、叠层石格架丘和叠层状白云岩为主,下部为(含硅质)泥粉晶白云岩	以硅质岩、泥粉晶白云岩为主,夹白云岩透镜体,伽马值和 U、Th 含量及碳氧稳定同位素与宁强胡家坝剖面灯四段相近
灯三段	灰黑色页片状碳质页岩,碳氧稳定同位素与宁强胡家坝剖面完全可以对比,而且均具有向上逐渐负偏的趋势,伽马值明显偏大	砂泥岩为主,夹砂屑白云岩	泥岩,与宁强胡家坝剖面灯三段砂泥岩夹砂屑白云岩构成相变,但伽马值和 U、Th 含量总体相近,碳氧稳定同位素明显负偏
灯二段	葡萄花边状白云岩夹泥粉晶白云岩,碳氧稳定同位素比灯四段偏正,与宁强胡家坝剖面灯二段的变化趋势非常吻合,伽马值明显偏大	葡萄花边状白云岩夹泥粉晶白云岩	以粉砂质泥岩为主,上部夹灰岩透镜体,伽马值和 U、Th 含量呈逐渐减小趋势,与下伏灯一段明显不同,侧向上与宁强胡家坝剖面灯二段变化趋势一致,但明显偏高,灰岩透镜体碳氧稳定同位素高负值,与宁强胡家坝剖面灯二段区别明显
灯一段	以泥粉晶白云岩夹藻纹层、藻叠层白云岩为主,碳氧稳定同位素低正偏或低负偏,与宁强胡家坝剖面灯一段完全可以对比,无论与宁强胡家坝剖面灯一段比,还是与本剖面灯二段比,伽马值明显偏大	泥粉晶白云岩为主,夹砂屑白云岩	浅水陆棚泥质粉砂岩,伽马值和 U、Th 含量稳定但明显高于上覆的灯二段,也明显高于宁强胡家坝剖面的灯一段

运动 I 幕之后的海侵期沉积产物。青川八角村剖面灯三段岩性为浅水陆棚相泥岩,说明桐湾运动 I 幕的地层剥蚀并未波及到台盆区。

如前述,灯四段沉积期宁强胡家坝剖面岩性三分明显。灯四下亚段(含硅质)以泥粉晶白云岩为主,代表着镶边台缘形成之前的沉积;灯四中亚段纹层状或叠层状白云岩夹泥粉晶白云岩表明已出现了弱镶边台缘,可视为台缘形成初期产物;灯四上亚段凝块石、叠层石格架丘建造表明镶边台缘已经形成。而此时,峨边先锋地区仍为台地相泥粉晶白云岩夹少量藻纹层、藻叠层白云岩和砂屑白云岩,青川八角村剖面为台盆地相硅质岩,下部所夹的灰岩透镜体代表原地沉积,上部所夹的白云岩透镜体可能来自台缘微生物丘的垮塌。从伽马值和 U、Th 含量及碳氧稳定同位素等方面看,与宁强胡家坝剖面的灯四段很相近,这进一步说明宁强胡家坝地区灯四段沉积阶段,镶边台缘的发育呈现由无到强的建造过程。

从地层横向对比看,灯一段—灯二段沉积时,研究区是一个由台地向盆地逐渐进积的沉积体系,在宁强胡家坝一带没有明显的镶边台缘,整体是一个远端变陡的碳酸盐岩缓坡。灯三段沉积期是在灯

二段沉积末整体侵蚀基础上发生的海泛过程,横向上表现出了较大的变化。灯四段则表现为台缘从无到有的完整发育过程,在宁强胡家坝一带从灯四下亚段台地相沉积开始,经灯四中亚段弱镶边台地沉积,演化出灯四上亚段强镶边台地沉积结束。

4 台内和台缘灯影组地层重新厘定

4.1 台内高石 16 井、磨溪 39 井灯四段地层厘定

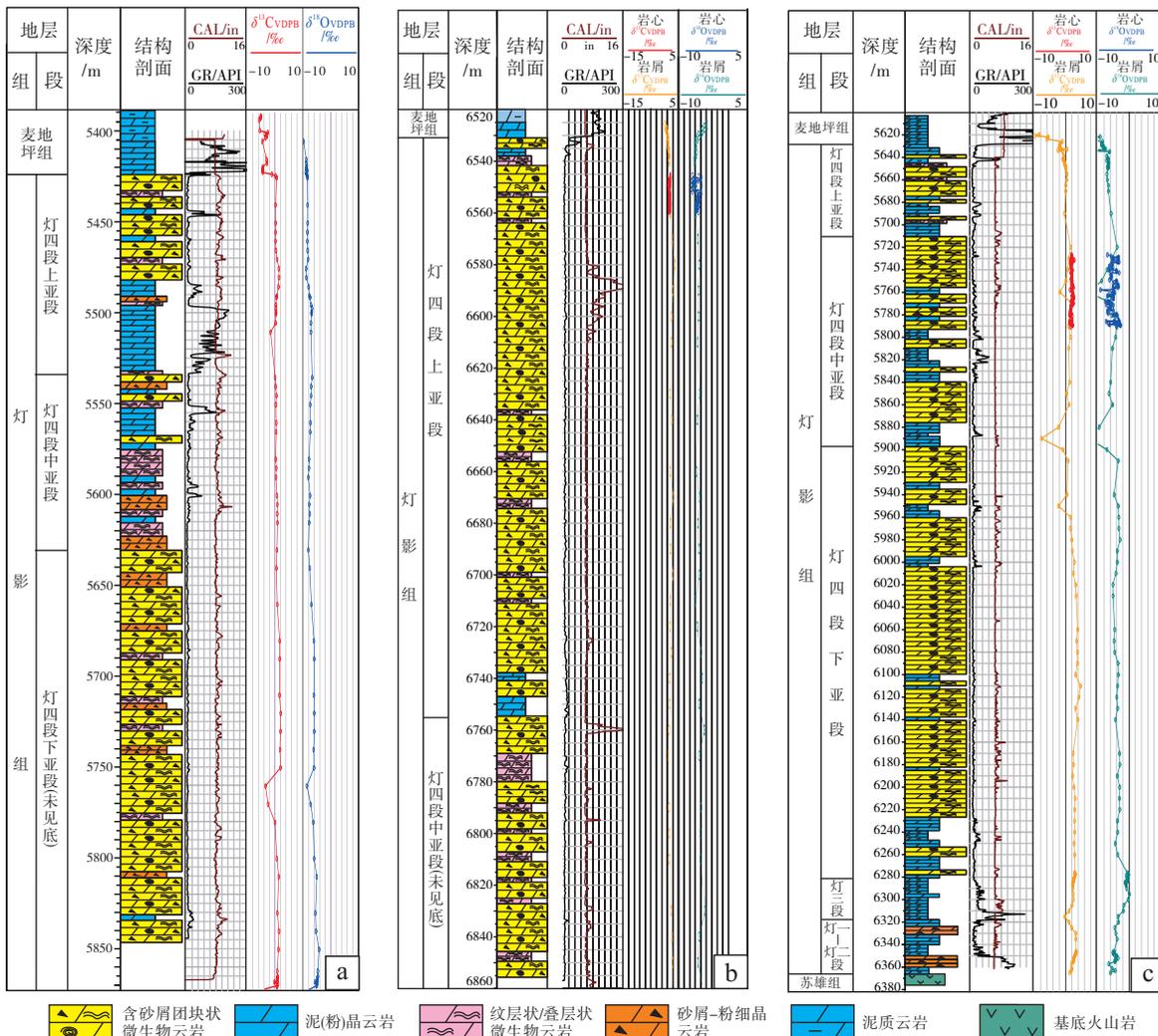
高石 16 井、磨溪 39 井位于灯影组台内沉积区。地质录井提出的地层划分方案是灯影组发育灯四段和灯三段,上覆筇竹寺组,缺失灯二段。作者认可该划分方案,理由如下:(1)未见灯二段典型的葡萄花边状白云岩标志层;(2)岩性组合可与峨边先锋剖面灯四段(台内)对比;(3)高石 16、磨溪 39 井灯四段台内沉积厚 300 m 左右,比台缘带灯四段略薄是合理的;(4)碳氧稳定同位素特征与峨边先锋剖面灯四段相似;(5)白云岩围岩 U-Pb 同位素年龄(高石 16 井 460 ± 38 Ma;磨溪 39 井 509 ± 17 Ma)偏年轻,应属于白云石化年龄,不代表地层年龄,与宁强胡家坝剖面灯四段测得的年龄相当。

4.2 台缘高石 131X 井、中江 2 井、蓬探 1 井灯影组地层厘定

高石 131X 井、中江 2 井和蓬探 1 井灯影组均位于沉积台缘带内。其中，高石 131X 井地质录井划分方案是，以井深 5500 m 为界，之上 75 m 归属灯四段，与下寒武统麦地坪组呈不整合接触，5500~5850 m 归属灯三段和灯二段，未见底。作者基于前述的综合研究，认为 5500~5850 m 井段划归灯三段和灯二段的层段也属于灯四段(图 6-a)，理由如下：(1) 未见灯二段典型的葡萄花边状白云岩标志层；(2) 岩性完全可与宁强胡家坝剖面灯四段凝块石、叠层石、纹层石白云岩对比，属台缘格架丘建造；(3) 高石 16 井、磨溪 39 井台内灯四段厚

300 m 左右，按本研究划分方案高石 131X 井台缘灯四段厚 450 m 左右(未见底)，台缘比台内地层厚度大是合理的；(4) 碳氧稳定同位素特征与宁强胡家坝剖面灯四段相似；(5) 白云岩围岩 U-Pb 同位素年龄(508±49 Ma) 偏年轻，与宁强胡家坝剖面灯四段测得的年龄更接近。另外，该井灯四段格架丘建造发育，三分性明显，综合显示都为灯四段沉积特征，而与灯三段和灯二段差异较大。

中江 2 井揭示的灯影组，厚度大于 330 m(未见底)(图 6-b)，按地质录井划分方案全部归属灯二段，与上覆麦地坪组呈不整合接触，缺失灯三段和灯四段。作者认为该井揭示的麦地坪组之下的灯影组全部为灯四段，而非灯二段，理由如下：



a—高石 131X 井灯影组新老地层划分方案对比；b—中江 2 井灯影组新老地层划分方案对比；c—蓬探 1 井灯影组新老地层划分方案对比

图 6 四川盆地台缘高石 131X、中江 2 和蓬探 1 井灯影组地层的重新厘定

Fig. 6 Re-determination of the Dengying Formation of Wells Gaoshi 131X, Zhongjiang 2 and Pengtan 1 on platform margins in Sichuan Basin

(1) 未见灯二段大规模发育的典型的葡萄花边状白云岩标志层；(2) 岩性完全可以与宁强胡家坝剖面灯四段凝块石、叠层石、纹层石白云岩对比，属台缘格架丘建造；(3) 高石 16、磨溪 39 井台内灯四段厚 300 m 左右，中江 2 井台缘灯四段厚 300 m 左右，台缘理应比台内地层厚度更大，是未见底造成的；(4) 碳氧稳定同位素特征与宁强胡家坝剖面灯四段相似；(5) 白云岩围岩 U-Pb 同位素年龄 (501 ± 38 Ma) 偏年轻，与受后期白云石化有关，而与宁强胡家坝剖面灯四段测得的年龄更接近。此外，该井灯四段格架丘建造特征明显，井下仅见中、上 2 个亚段，下段并未钻穿。

蓬探 1 井钻遇灯影组厚度近 650 m (图 6-c)，地质录井划分方案认为归属灯三段，缺失灯四段。作者研究后认为 6280 m 之上均为灯四段，理由如下：(1) 未见灯二段典型的葡萄花边状白云岩标志层；(2) 岩性完全可与宁强胡家坝剖面灯四段对比，属台缘格架丘建造；(3) 高石 16、磨溪 39 井台内灯四段厚 300 m 左右，蓬探 1 井台缘灯四段厚 500 m 左右，与中江 2 井灯四段厚度相当；(4) 碳氧稳定同位素特征与宁强胡家坝剖面灯四段相似；(5) 测得的 U-Pb 同位素年龄 (546 ± 31 Ma)，虽然比灯四段时代偏老，也在测试误差范围内。该井格架丘建造比较发育，且三分性强，综合看归入灯四段更合理。

4.3 灯影组地震地层问题讨论

如前述，经与高石 16 井、磨溪 39 井、宁强胡家坝剖面灯四段对比，在岩石学、地球化学与 U-Pb 同位素年龄等方面均表明高石 131X、中江 2 和蓬探 1 井存在灯四段，而且过蓬探 1 井—磨溪 105 井—磨溪 51 井地震剖面也揭示蓬探 1 井区存在灯四段(图 7-a)。但对过中江 2 井—高石 131X 井地震剖面上是否存在灯四段，目前存在争论。在目前的地震解释方案中，过中江 2 井(图 7-b)地震剖面没有解释出灯四段。作者认为，因碳酸盐岩台缘带多期丘滩体叠置以后极易造成地震反射同相轴的横向中断和变化，这造成基于地震资料的地层横向追踪对比和层位标定比较容易容易出现串层。如果将灯二段顶界下压至如图 7-c 的层位，把原方案灯二段归入灯四段，不论从台缘带丘滩体发育特征还是从灯四段区域地层厚度变化看，都有其合理性。同

样地，高石 131X 井(图 7-c) 在地震剖面上也没有解释出灯四段，作者仔细分析过井地震剖面后发现，寒武系底界和灯二段顶界的解释都有调整的可能性。从碳酸盐岩沉积环境与相带展布特征，结合岩性组合与测年资料综合分析认为，过高石 131X 井—中江 2 井—蓬探 1 井的地震剖面上应该存在灯四段。

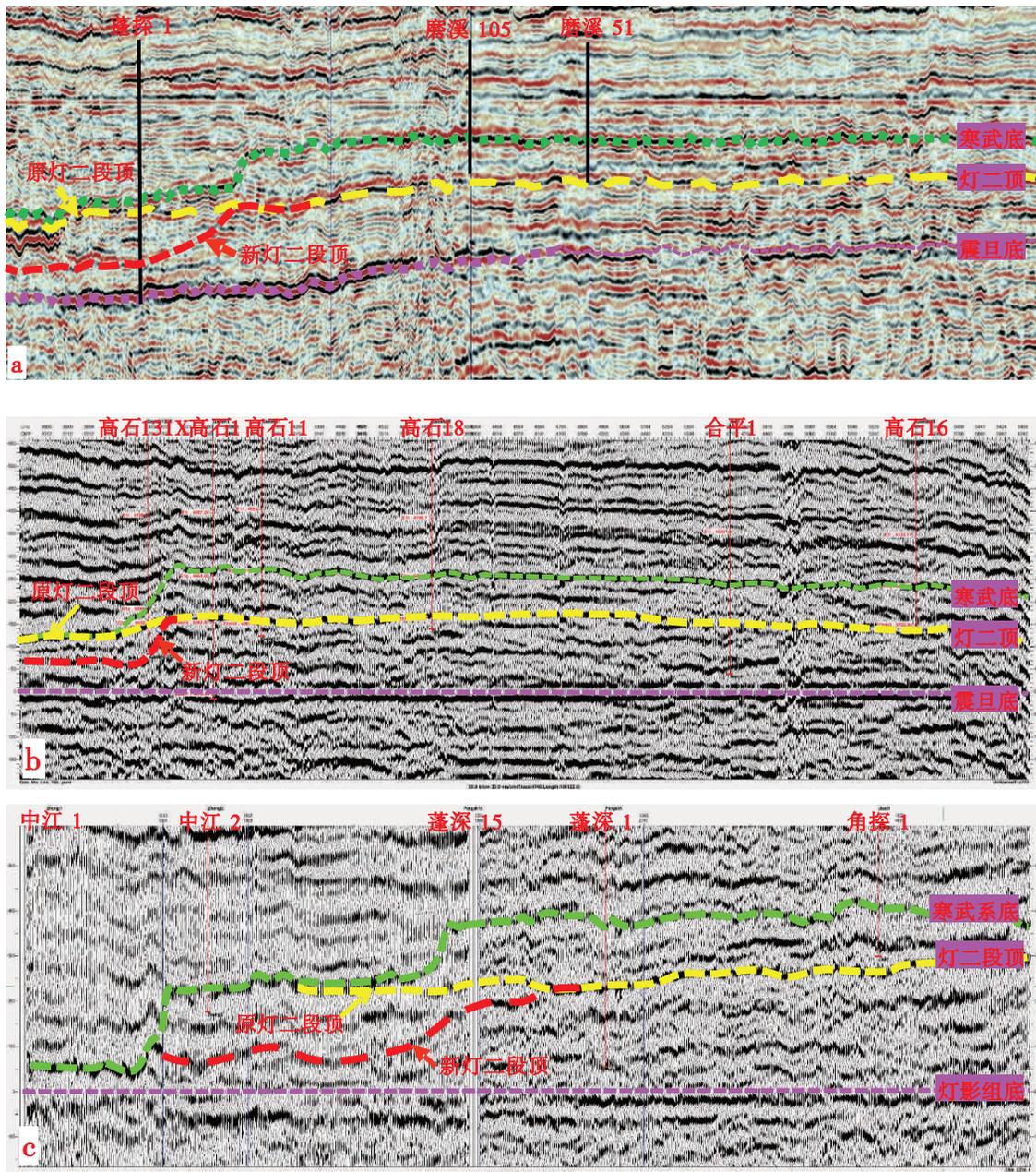
总之，通过峨边先锋(台内)、宁强胡家坝(台缘)和青川八角村(台盆)等典型露头剖面的地层综合划分与对比，以及对高石 16 井(台内)、磨溪 39 井(台内)、高石 131X 井(台缘)、中江 2 井(台缘)和蓬探 1 井(台缘)灯影组重新厘定，作者认为高石 131X 井、中江 2 井和蓬探 1 井原灯二段应属于灯四段，这为等时地层格架内台缘带储集体横向分布与空间变化特征的识别和建立奠定了基础。

5 构造-岩相古地理重建

5.1 灯影组等时地层格架与台缘迁移特征

基于重新厘定的灯影组地层划分方案和多口单井沉积相分析成果，建立了德阳—安岳台内裂陷东缘磨溪 39 井—高石 16 井—高石 131X 井—蓬探 1 井—中江 2 井灯四段等时地层格架，明确了等时地层格架内灯四段丘滩体由台地向裂陷槽的进积过程。地层和沉积相对比剖面(图 8)揭示灯四下亚段沉积期，台缘带位于高石 131X 井—蓬探 1 井区一带，微生物丘滩体发育，岩性以凝块石、藻砂屑白云岩为主，厚度大。该带以东的磨溪 39 井—高石 16 井区，则以台内叠层石白云岩、泥晶白云岩为主，厚度明显变薄。到了灯四中亚段沉积期，台缘带丘滩体向东迁移至中江 2 井区，高石 131X 井—蓬探 1 井区相变为台缘内侧的叠层石白云岩、泥晶白云岩、凝块石、藻砂屑白云岩互层。进入灯四上亚段沉积期，台缘带丘滩体进一步向东迁移，高石 131X 井—蓬探 1 井区相变为台内叠层石白云岩、泥晶白云岩。

同样地，基于前述的多项对比资料，作者还建立了德阳—安岳台内裂陷东侧沿台缘带方向的灯四段等时地层格架，即沿高石 131X 井—蓬探 1 井—中江 2 井—东坝 1 井—宁强胡家坝剖面，明确了等时地层格架内灯四段台缘带丘滩体由南



a—过蓬探 1 井—磨溪 105 井—磨溪 51 井三维地震剖面，存在灯四段残留地质体；b—高石 131x 井—高石 1 井—高石 11 井—高石 18 井—合平 1 井—高石 16 井连井三维地震剖面（沿灯影组底拉平），可以解释出灯四段；c—中江 1 井—中江 2 井—蓬深 15 井—蓬深 1 井—角探 1 井连井三维地震剖面（沿灯影组底拉平），可以解释出灯四段

图 7 四川盆地过蓬探 1 井、高石 131X 井和中江 2 井地震剖面揭示灯四段残留地质体

Fig. 7 Seismic section crossing Wells Pengtan 1, Gaoshi 131X and Zhongjiang 2 in Sichuan Basin showing residual geologic body in the Member 4 of Dengying Formation

向北的迁移变化。揭示在台缘带方向上，灯四下亚段沉积期，台缘带丘滩体主要分布于川中古隆起高石 131X—蓬探 1 井区一带；到灯四中亚段沉积期，台缘丘滩体向北迁移至川中古隆起北斜坡太和区块的中江 2 井区；灯四上亚段沉积期，台

缘带丘滩体进一步向北迁移至宁强区块的东坝 1 井、宁强胡家坝一带。此时，太和区块台缘带丘滩体依旧发育。前人（马奎等，2022）认为德阳—安岳台内裂隙具南高北低、南侵蚀北沉积的特征，作者识别出的灯四段台缘丘滩体由南向北的

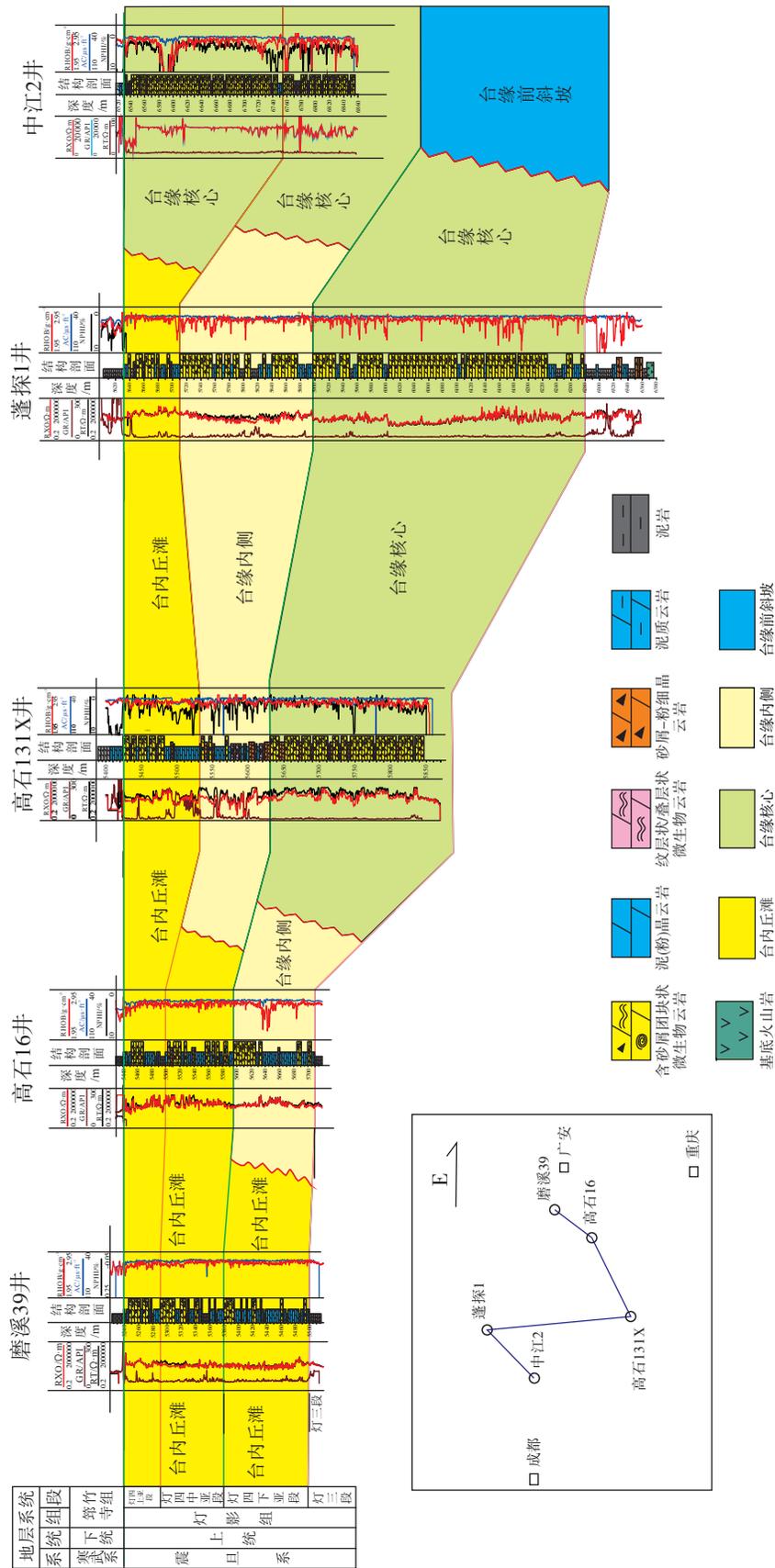


图 8 四川盆地磨溪 39 井—高石 16 井—高石 131X 井—蓬探 1 井—中江 2 井灯四段等时地层格架

Fig. 8 Isochronous stratigraphic framework of the Member 4 of Dengying Formation cross Wells Moxi 39-Gaoshi 16-Gaoshi 131X-Pengtan 1-Zhongjiang 2 in Sichuan Basin

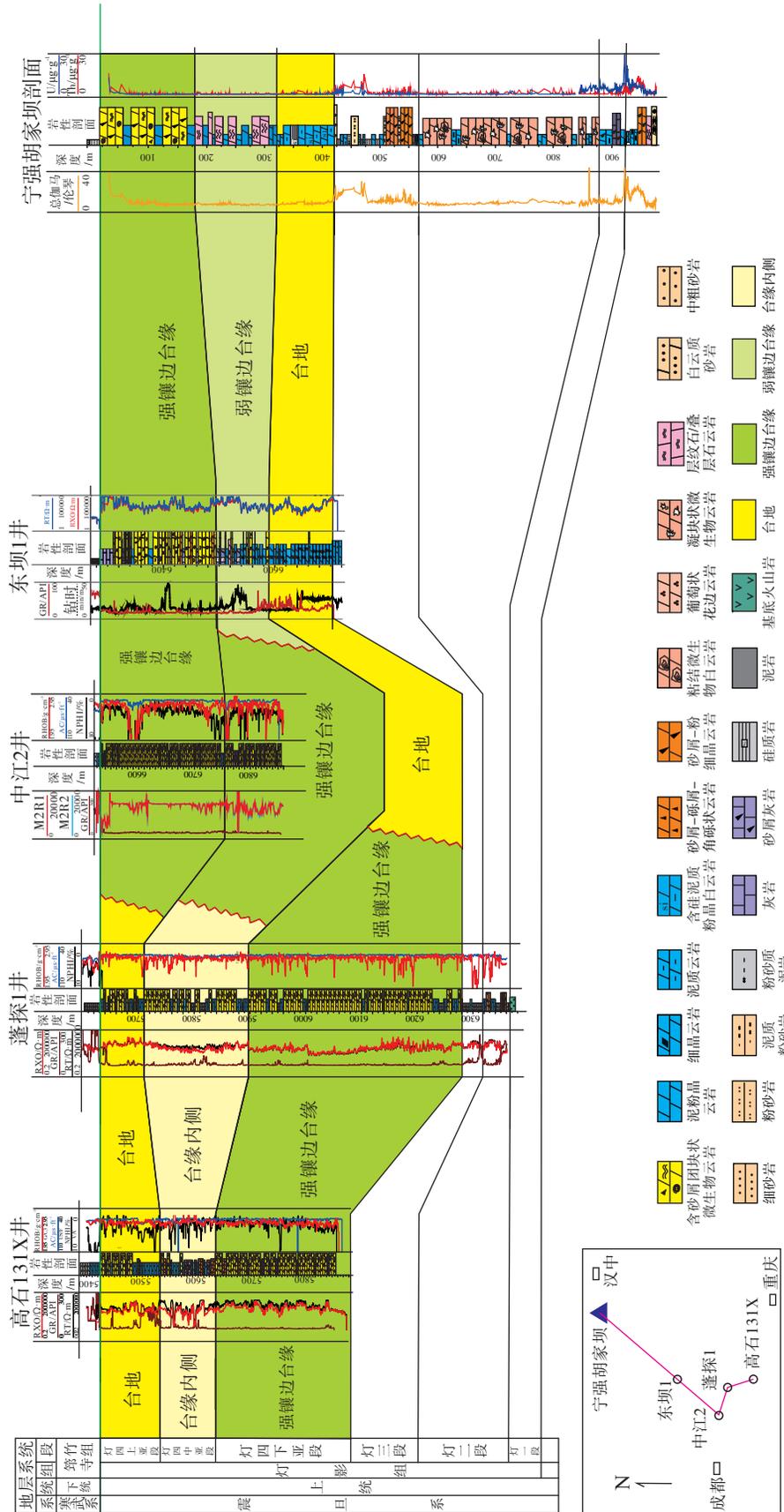


图 9 四川盆地高石 131X 井—蓬探 1 井—中江 2 井—东坝 1 井—宁强胡家坝剖面灯四段等时地层格架
Hujiaba outcrop (Ningqiang) in Sichuan Basin

Fig. 9 Isochronous stratigraphic framework of the Member 4 of Dengying Formation cross Wells Gaoshi 131X-Pengtan 1-Zhongjiang 2-Dongba 1 and Hujiaba outcrop (Ningqiang) in Sichuan Basin

迁移变化符合这一特征。

5.2 灯影组构造-岩相古地理重建

综合重新厘定的灯影组地层划分方案、台缘带展布和丘滩体迁移变化，在单井相和地震相分析基础上，重建了德阳—安岳台内裂陷及周缘灯四段沉积期的构造-岩相古地理(图 10)，为有利储集层相带分布预测和评价提供了基础。

灯四下亚段沉积期(图 10-a)，德阳—安岳台内裂陷处于发育鼎盛期，台缘带向南可延伸至泸州一带，东侧台缘带丘滩体主要分布在川中古隆起的永川—遂宁一带，岩性以凝块石、藻砂屑白云岩为主，厚度较大，是优质储集层发育区。台内的南充—广安一带，由于紧邻永川—遂宁台缘带，台内丘滩体也比较发育，岩性以叠层石白云岩、泥晶白云岩、凝块石、藻砂屑白云岩互层为特征，虽然厚度变小，但依然发育品质相对较好的“甜点”储集层段，可通过储集层改造措施获得较高产量。南江—平昌—广安—石柱—重庆等广大的台内区，丘滩体是否发育则与古地貌高低有关，总体厚度较小，分布有局限性。

灯四中亚段沉积期(图 10-b)，德阳—安岳台内裂陷的南端向北收缩至威远一带，东侧台缘丘滩体由东向西进积的同时，也自南向北迁移至遂宁—阆中一带。此时，仪陇—南充一带，由于紧邻遂宁—

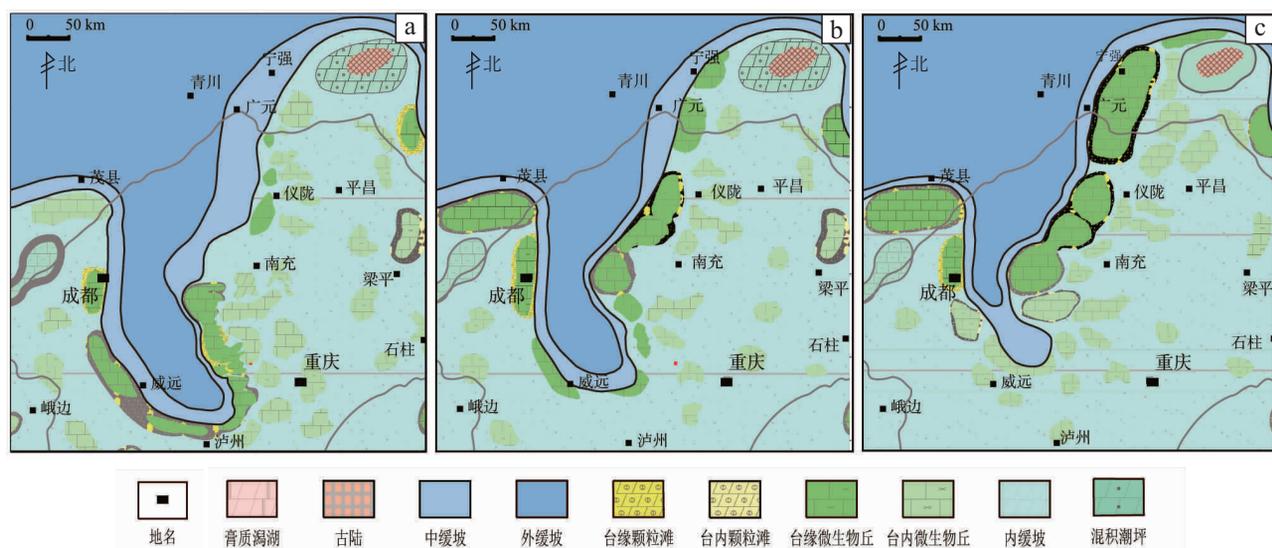
阆中台缘带，台内丘滩体也发育，而南充—永川一带台内丘滩体并不发育，南江—平昌—广安—开江—石柱—重庆等广大的台内区，丘滩体的发育类似于灯四下亚段期沉积特征，总体厚度小，分布局限。

灯四上亚段沉积期(图 10-c)，德阳—安岳台内裂陷的南端进一步向北退缩至成都以北，遂宁—阆中台缘带丘滩体依旧发育，但在其北部的阆中—广元—宁强一带形成强镶边台缘，台缘丘滩体发育，在宁强胡家坝剖面发育了厚度大、物性好的凝块石、藻砂屑白云岩，并见大量沥青充填。此时，南江—仪陇—南充以西，由于紧邻遂宁—阆中—宁强台缘带，台内丘滩体发育，平昌—广安—石柱—重庆—泸州等台内区，丘滩体欠发育。

应该说，对茂县—成都—威远西侧台缘带丘滩体的东西向进积和南北向迁移变化特征的认识，由于受资料限制，目前尚处于早期阶段。但推测其与东侧台缘带一样，具有相似的迁移规律，丘滩体发育前景与勘探潜力同样值得期待。

6 灯影组油气勘探选区

基于重新厘定的灯影组地层划分方案，德阳—安岳台内裂陷东侧台缘带形成的天然气藏应归属灯四段气藏，包括蓬探 1 井和中江 2 井气藏，目前尚



a—灯四下亚段构造-岩相古地理；b—灯四中亚段构造-岩相古地理；c—灯四上亚段构造-岩相古地理

图 10 四川盆地德阳—安岳台内裂陷及周缘灯四段沉积期构造-岩相古地理图

Fig. 10 Tectonic lithology palaeogeography of the depositional periods of Member 4 of Dengying Formation in Deyang—Anyue intraplate rift and surroundings in Sichuan Basin

无井揭示灯二段气藏。

川中古隆起位于德阳—安岳台内裂陷东侧台缘带南段，目的层系为灯四段下亚段微生物丘滩白云岩储集层，已探明了万亿立方米储量规模的大气田(图 11)。川中古隆起北斜坡太和区块，位于德阳—安岳台内裂陷东台缘带中段，目的层系为灯四中—上亚段微生物丘滩白云岩储集层，基于蓬探 1 井、中江 2 井等风险探井的突破，第 2 个万亿立方米大气区正在推进建设中(图 11)。

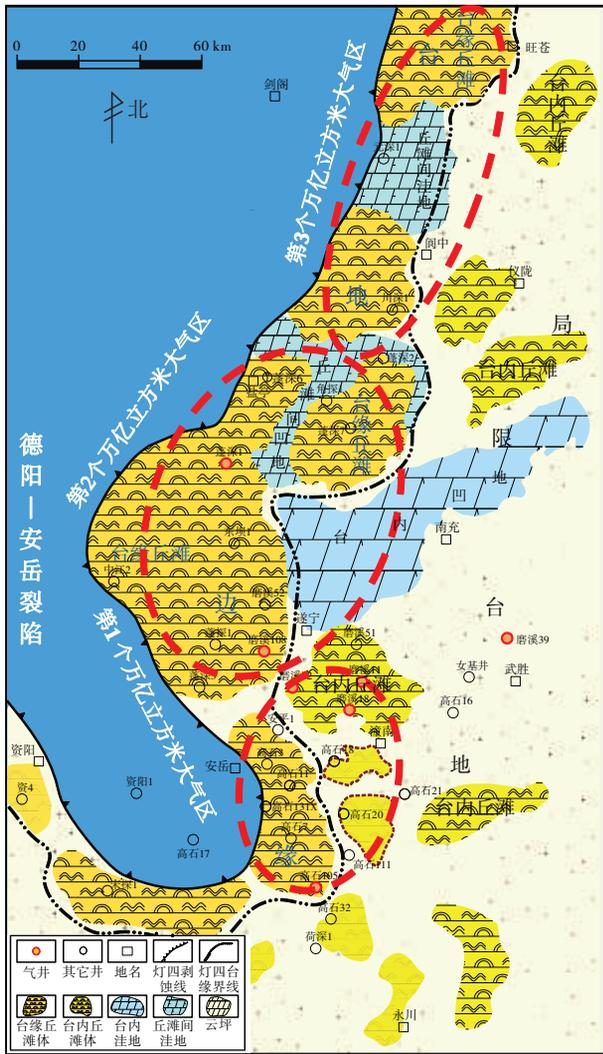


图 11 四川盆地德阳—安岳台内裂陷东台缘带勘探前景评价
Fig. 11 Prospect evaluation map of east margin of Deyang-Anyue intraplate rift in Sichuan Basin

盆地北缘宁强区块位于德阳—安岳台内裂陷东侧台缘带北段，目的层系为灯四上亚段微生物丘滩白云岩储集层，丘滩体分布面积达 7000 km²，是一个极具突破前景、值得探索的新含气区(图 11)。

川中古隆起、太和区块和宁强区块均位于东侧台缘带，灯四段台缘丘滩体由南向北层位逐渐抬高，但向北却靠近米仓山山前前渊斜坡区，地层埋深偏大，气源条件会更好，所以宁强区块目的层虽然埋深变大，但是发现第 3 个万亿立方米大气区的前景依然值得期待。

7 结论和建议

等时地层格架的建立是构造-岩相古地理重建的基础，德阳—安岳台内裂陷及周缘灯影组地层划分对比目前存在不同方案，这制约了对台地属性、台地边缘类型、展布与空间迁移变化的认识。根据岩石学资料、电性和地球化学特征，结合 U-Pb 同位素测年资料、地震和钻井资料等，作者对灯影组地层进行重新厘定，取得以下研究成果：

1) 建立了宁强胡家坝灯影组典型剖面，结合峨边先锋(台内)、青川八角村(台盆)灯影组露头剖面，明确了灯影组各段岩性组合特征，指出高石 131X 井、中江 2 井和蓬探 1 井原灯二段应归属灯四段，台缘带灯四段岩性具有明显三分性，从而构建了灯四段等时地层格架。

2) 明确德阳—安岳裂陷东段灯四段台缘丘滩体的发育具有垂直相带展布方向呈由东向西进积、平行相带方向呈由南向北迁移的特征。灯四下亚段丘滩体主要发育于南段川中古隆起一带，灯四中—上亚段丘滩体主要发育于中段太和区块，灯四上亚段丘滩体则主要发育于北段宁强区块，紧邻台缘带内侧的台内区，也发育较大规模台内丘滩体，虽然厚度变小，但依然发育“甜点”储集层。

3) 川中古隆起、太和区块和宁强区块均位于灯四段同一台缘带上，南段在川中古隆起已探明万亿立方米大气田，中段的太和区块规模达万亿立方米的大气区正在勘探建设中，北段的宁强区块也具备形成万亿立方米大气区的有利成藏条件，值得期待。

参考文献 (References)

陈娅娜,沈安江,潘立银,张杰,王小芳. 2017. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布:以四川盆地震旦系灯影组四段为例. 石油勘探与开发, 44(5): 704-715. [Chen Y N, Shen A J, Pan L Y, Zhang J, Wang X F. 2017. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: a case study of 4th Member of Sinian

- Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 704-715]
- 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 徐春春, 沈平, 张宝民, 姜华, 黄士鹏. 2016. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用. *石油学报*, 37(1): 1-16. [Du J H, Wang Z C, Zou C N, Xu C C, Shen P, Zhang B M, Jiang H, Huang S P. 2016. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field. *Acta Petroli Sinica*, 37(1): 1-16]
- 郭旭升, 胡东风, 段金宝, 吴浩, 李毕松. 2018. 四川盆地北部宁强胡家坝灯影组四段岩石特征及沉积环境分析. *石油实验地质*, 40(6): 749-756. [Guo X S, Hu D F, Duan J B, Wu H, Li B S. 2018. Rock features and sedimentary environment of the fourth member of Dengying Formation in Hujiaaba section of Ningqiang, northern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(6): 749-756]
- 贺川航, 赵小辉, 彭才, 范晓晓, 张巧依, 乐锦波. 2021. 高石梯地区灯二段气藏高产气井主控因素及预测方法研究. 见: 西安石油大学、中国石油大学(华东)、陕西省石油学会. 油气田勘探与开发国际会议论文集(下册). 陕西西安: 西安石油大学出版社, 356-363. [He C H, Zhao X H, Peng C, Fan X X, Zhang Q Y, Le J B. 2021. Major controlling factors and predict method of high-yielding gas wells of Member 2 of Dengying Formation in Gaoshiti area in Sichuan Basin. In: Xi'an Shiyou University, China University of Petroleum (East China), Petroleum Committee in Shaanxi Province. International Field Exploration and Development Conference. Xi'an, Shaanxi Province: Xi'an Shiyou University Press, 356-363]
- 李伟, 易海水, 胡望水, 杨庚, 熊璇. 2014. 四川盆地加里东古隆起构造演化与油气聚集的关系. *天然气工业*, 34(3): 8-15. [Li W, Yi H Y, Hu W S, Yang G, Xiong X. 2014. Tectonic evolution of Caledonian paleohigh in the Sichuan Basin and its relationship with hydrocarbon accumulation. *Natural Gas Industry*, 34(3): 8-15]
- 李忠权, 刘记, 李应, 杭文艳, 洪海涛, 应丹琳, 陈骁, 刘冉, 段新国, 彭戟. 2015. 四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化. *石油勘探与开发*, 42(1): 26-33. [Li Z Q, Liu J, Li Y, Hang W Y, Hong H T, Ying D L, Chen X, Liu R, Duan X G, Peng J. 2015. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 42(1): 26-33]
- 刘树根, 王一刚, 孙玮, 钟勇, 洪海涛, 邓宾, 夏茂龙, 宋金民, 文应初, 吴娟. 2016. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 43(1): 1-23. [Liu S G, Wang Y G, Sun W, Zhong Y, Hong H T, Deng B, Xia M L, Song J M, Wen Y C, Wu J. 2016. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(1): 1-23]
- 马奎, 文龙, 张本健, 李勇, 钟佳倚, 王云龙, 彭瀚霖, 张玺华, 严威, 丁一, 陈骁. 2022. 四川盆地德阳—安岳侵蚀裂陷槽分段性演化分析和油气勘探意义. *石油勘探与开发*, 49(2): 274-284. [Ma K, Wen L, Zhang B J, Li Y, Zhong J Y, Wang Y L, Peng H L, Zhang X H, Yan W, Ding Y, Chen X. 2022. Segmented evolution of Deyang-Anyue erosion rift trough in Sichuan Basin and its significance for oil and gas exploration, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 274-284]
- 沙庆安. 2001. 混积岩一例: 滇东震旦系陡山沱组砂质砂屑白云岩的成因. *古地理学报*, 3(4): 56-60. [Sha Q A. 2001. An example of hunji rock: origin of sandy dolarenite of the Sinian Doushantuo Formation in eastern Yunnan Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 3(4): 56-60]
- 沈安江, 胡安平, 程婷, 梁峰, 潘文庆, 俸月星, 赵建新. 2019. 激光原位 U-Pb 同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩—孔隙演化中的应用. *石油勘探与开发*, 46(6): 1062-1074. [Shen A J, Hu A P, Cheng T, Liang F, Pan W Q, Feng Y X, Zhao J X. 2019. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 46(6): 1062-1074]
- 沈安江, 陈娅娜, 张建勇, 倪新锋, 周进高, 吴兴宁. 2020. 中国古老小克拉通台内裂陷特征及石油地质意义. *石油与天然气地质*, 41(1): 15-25. [Shen A J, Chen Y N, Zhang J Y, Ni X F, Zhou J G, Wu X N. 2020. Characteristics of intra-platform rift in ancient small-scale cratonic platform of China and its implications for hydrocarbon exploration. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 15-25]
- 王茜, 陈伟华, 黄馨, 李松, 刘飞. 2020. 四川盆地高磨震旦系台内低渗储层水平井分段酸压技术研究与应用. 见: 西安石油大学、成都理工大学、陕西省石油学会. 陕西西安: 油气田勘探与开发国际会议论文集, 1318-1327. [Wang X, Chen W H, Huang X, Li S, Liu F. 2020. The study and application of multi-stage acid fracturing technique on horizontal wells for low permeable in-platform Sinian formation, Gaoshi-Moxi Area, Sichuan Basin. In: Xi'an Shiyou University, Chengdu University of Technology, Petroleum Committee of Shaanxi Province. Shaanxi Xi'an: Proceedings of the International Conference on Oil and Gas Exploration and Development, 1318-1327]
- 王翔. 2017. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组储层评价. 西南石油大学硕士学位论文. [Wang X. 2017. Reservoir evaluation of Sinian Dengying Formation in the Gaoshiti-Moxi area in Central Sichuan Basin. Engineering Masteral dissertation of Southwest Petroleum University]
- 汪泽成, 姜华, 王铜山, 鲁卫华, 谷志东, 徐安娜, 杨雨, 徐兆辉. 2014. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义. *石油勘探与开发*, 41(3): 305-312. [Wang Z C, Jiang H, Wang T S, Lu W H, Gu Z D, Xu A N, Yang Y, Xu Z H. 2014. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 305-312]
- 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 徐春春, 邹才能, 谢武仁, 曾富英, 武赛军. 2015. 四川盆地震旦一早寒武世克拉通内裂陷地质特征. *天然气工业*, 35(1): 24-35. [Wei G Q, Yang W, Du J H, Xu C C, Zou C N, Xie W R, Zeng F Y, Wu S J. 2015. Geological character-

- tics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 24-35]
- 肖富森,陈康,冉崎,张旋,谢冰,刘兴刚,徐伟,罗文军. 2018. 四川盆地高石梯地区震旦系灯影组气藏高产井地震模式新认识. *天然气工业*, 38(2): 8-15. [Xiao F S, Chen K, Ran Q, Zhang X, Xie B, Liu X G, Xu W, Luo W J. 2018. New understandings of the seismic modes of high productivity wells in the Sinian Dengying Fm gas reservoirs in the Gaoshiti area, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 38(2): 8-15]
- 谢军,郭贵安,唐青松,彭先,邓惠,徐伟. 2021. 超深古老白云岩岩溶型气藏高效开发关键技术: 以四川盆地安岳气田震旦系灯影组气藏为例. *天然气工业*, 41(6): 52-59. [Xie J, Guo G A, Tang Q S, Peng X, Deng H, Xu W. 2021. Key technologies for the efficient development of ultra-deep ancient dolomite karst gas reservoirs: a case study of the Sinian Dengying Formation gas reservoir in the Anyue Gas Field of the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 41(6): 52-59]
- 杨跃明,文龙,罗冰,王文之,山述娇. 2016. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征. *石油勘探与开发*, 43(2): 179-188. [Yang Y M, Wen L, Luo B, Wang W Z, Shan S J. 2016. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnüsi paleohigh, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 179-188]
- 杨跃明,杨雨,杨光,宋家荣,文龙,邓传光,夏茂龙,冉崎,段国彬,罗冰,谢冰. 2019. 安岳气田震旦系、寒武系气藏成藏条件及勘探开发关键技术. *石油学报*, 40(4): 493-508. [Yang Y M, Yang Y, Yang G, Song J R, Wen L, Deng C G, Xia M L, Ran Q, Duan G B, Luo B, Xie B. 2019. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies of Sinian and Cambrian gas reservoirs in Anyue gas field. *Acta Petrolei Sinica*, 40(4): 493-508]
- 赵路子,汪泽成,杨雨,段书府,魏国齐,罗冰,文龙,马石玉,冯庆付,刘静江,孙夕平,谢武仁. 2020. 四川盆地蓬探 1 井灯影组二段油气勘探重大发现及意义. *中国石油勘探*, 25(3): 1-12. [Zhao L Z, Wang Z C, Yang Y, Duan S F, Wei G Q, Luo B, Wen L, Ma S Y, Feng Q F, Liu J J, Sun X P, Xie W R. 2020. Important discovery in the second member of Dengying Formation in Well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(3): 1-12]
- 赵文智,谢增业,王晓梅,沈安江,魏国齐,汪泽成,王坤. 2021. 四川盆地震旦系气源特征与原生含气系统有效性. *石油勘探与开发*, 48(6): 1089-1099. [Zhao W Z, Xie Z Y, Wang X M, Shen A J, Wei G Q, Wang Z C, Wang K. 2021. Sinian gas sources and effectiveness of primary gas-bearing system in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1089-1099]
- 周传明,袁训来,肖书海,陈哲,华洪. 2019. 中国埃迪卡拉纪综合地层和时间框架. *中国科学: 地球科学*, 49(1): 7-25. [Zhou C M, Yuan X L, Xiao S H, Chen Z, Hua H. 2019. Ediacaran integrative stratigraphy and timescale of China. *Science China Earth Sciences*, 62: 7-25]
- 朱联强,柳广弟,宋泽章,赵文智,田兴旺,戴鑫,王云龙,杨岱林,李强,江林,李成海,胡丽. 2021. 川中古隆起北斜坡不同地区灯影组天然气差异及其影响因素: 以蓬探 1 井和中江 2 井为例. *石油科学通报*, 6(3): 344-355. [Zhu L Q, Liu G D, Song Z Z, Zhao W Z, Tian X W, Dai X, Wang Y L, Yang D L, Li Q, Jiang L, Li C H, Hu L. 2021. The differences in natural gas from the Dengying Formation in different areas of the north slope of the central Sichuan Paleouplift and its controlling factors: taking Pengtan-1 and Zhongjiang-2 wells as examples. *Petroleum Science Bulletin*, 6(3): 344-355]
- Condon D, Zhu M, Bowring S, Wang W, Yang A, Jin Y. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308: 95-98.
- Hill C A, Polyak V J, Asmerom Y, Provencio P P. 2016. Constraints on a Late Cretaceous uplift, denudation, and incision of the Grand Canyon region, southwestern Colorado Plateau, USA, from U-Pb dating of lacustrine limestone. *Tectonics*, 35(4): 896-906.
- Pickering R, Kramers J D. 2010. A re-appraisal of the stratigraphy and new U-Pb dates at the Sterkfontein hominin site, South Africa. *Journal of Human Evolution*, 56: 70-86.
- Rasbury E T, Cole J M. 2009. Directly dating geologic events: U-Pb dating of carbonates. *Reviews of Geophysics*, 47(3): 4288-4309.
- Woodhead J, Hellstrom J, Maas R, Drysdale R, Zanchetta G, Devine P, Taylor E. 2009. U-Pb geochronology of speleothems by MC-ICPMS. *Quaternary Geochronology*, 1(3): 208-221.
- Woodhead J, Pickering R. 2012. Beyond 500 ka: progress and prospects in the U-Pb chronology of speleothems, and their application to studies in palaeoclimate, human evolution, biodiversity and tectonics. *Chemical Geology*, 322-323: 290-299.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)