

川东南地区茅口组岩溶古地貌恢复及特征

胡修权¹, 施泽进^{1,2}, 田亚铭³, 王长城^{1,2}

HU Xiu-quan¹, SHI Ze-jin^{1,2}, TIAN Ya-ming³, WANG Chang-cheng^{1,2}

1. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059;

3. 成都理工大学地球科学院, 四川 成都 610059

1. College of Energy Resources; Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要: 东吴运动造成茅口组灰岩暴露地表并经历了表生风化作用。钻井揭示, 气藏储层段与古岩溶所处的位置及强度密切相关, 古地貌是控制古岩溶发育与分布的主要因素。针对钻井较少且分布不均、勘探程度不高的川东南地区, 将钻井与地震紧密结合, 分别运用残余厚度法与印模法对茅口组岩溶古地貌进行恢复, 结果对比发现, 这2种方法恢复出来的古地貌趋势基本一致。结合研究区的地质特征和实际资料, 认为印模法可信度更高。在古水系特征分析的基础上, 结合古地质图和钻井资料, 把研究区划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地, 其中岩溶斜坡又可分为岩溶陡坡与岩溶缓坡。研究区西南岩溶高地与蜀南岩溶高地为同一岩溶高地, 呈北西—南东向展布, 且相对蜀南地区隆起幅度更高。在岩溶斜坡区, 地下水以径流为主, 溶蚀孔洞发育, 是岩溶勘探开发的有利地区。

关键词: 川东南; 茅口组; 岩溶古地貌; 印模法; 岩溶斜坡

中图分类号: TE122.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2014)06-0874-09

Hu X Q, Shi Z J, Tian Y M, Wang C C. The restoration of karst ancient landform of the Maokou Formation in southeastern Sichuan basin. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(6):874-882

Abstract: The Dongwu Movement caused the exposure of Maokou limestone on the earth's surface and made it experience the supergene weathering process. Drilling reveals that the gas reservoir is closely related to the location and intensity of ancient landforms. Palaeogeomorphology is the main factor that affects the development and distribution of ancient karst. Southeastern Sichuan basin has had less drilling and is unevenly distributed, with insufficient exploration. Combining drilling with seismic survey, the authors exquisitely restored ancient karst landform of Maokou by applying the impression method and the residual method. A comparison of these two methods show that both methods can recover the same basic trend palaeogeomorphology. According to the geological features and practical data of the study area, the authors hold that the impression method has higher reliability. Based on an analysis of the ancient water system, the authors divided the study area into karst highland, karst slope and karst basin by combining it with paleogeologic map and drilling. The NW-SE trending karst highland in the southwest of the study area has the same highland as the karst highland in Shunan area, but it is higher than Shunan area. The groundwater runoff and corrosion holes of the karst slope area make it a favorable area for karst exploration.

Key words: southeastern Sichuan; Maokou Formation; karst landform; impression method; paleokarst slope

收稿日期: 2014-02-18; 修订日期: 2014-03-10

资助项目: 国家自然科学基金委员会与中国石油化工股份有限公司联合基金项目(编号: 40739903)

作者简介: 胡修权(1985-), 男, 在读博士生, 从事地震地层及储层预测研究。E-mail: hu-200432@qq.com

通讯作者: 施泽进(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事石油地质学的教学与科研。E-mail: szj@cdut.edu.cn

在中国油气勘探开发中,与风化面有关的碳酸盐岩古岩溶储层普遍发育,并占有十分重要的地位。古岩溶是指地质历史时期而非现代营力环境形成的岩溶^[1]。近年来,不同学者对岩溶储层进行了深入且全面的研究,在岩溶垂向分带^[2-4]、古地貌平面分区^[5-7]、地球化学^[8-13]、地球物理(测井、地震)^[14-21]、储层建模^[22-26]和油气田开发^[27-30]研究方面硕果累累。前人^[31-37]在川东南及周缘地区茅口组做了大量的研究工作,如在川南古宋地区的大湾剖面,卢武长等^[31]通过同位素资料证实该区古岩溶的存在;胡志水等^[33]开展了下二叠统古岩溶分类,并分析了各种岩溶作用特征及意义;王运生等^[34]探讨了下二叠统白云岩及古岩溶与峨眉地裂运动的关系;张三元等^[35]总结了天堂坝地区茅口组4种岩溶缝洞体的地震响应特征等。前人^[38]对川东南及周缘地区所做的工作主要集中在古岩溶分类、地震反射特征,以及古岩溶与断裂、有利构造部位、地裂运动等的关系方面,对影响水动力场大小和岩溶作用强度的岩溶古地貌涉及较少,而古地貌在控制碳酸盐岩次生储集空间的形成和展布方面起着决定性作用。本文将钻井与地震紧密结合,首先分别运用残余厚度法与印模法对茅口组岩溶古地貌进行恢复,在具体恢复过程中去除了断层周围数据,同时使用钻井厚度对地震时深转换的厚度进行了校正,使得结果更加准确;然后对这2种方法的效果进行比较,结合研究区地质特征及实际资料情况,最终确定茅口组岩溶古地貌的恢复方法。结合古地质图和古水系特征,进一步对岩溶古地貌进行划分,并指出下一步油气勘探开发的有利区带。

1 地质背景

川东南地区茅口组位于克拉通盆地内部,主要沉积海相碳酸盐岩,东吴运动的构造抬升作用导致茅口组灰岩长时间(8~7Ma)出露地表^[39-44],经历了大气水影响的表生风化作用阶段,其顶面发生暴露溶蚀和弱冲刷。古地势从高到低形成了古水文区域分带,即补给区、径流区、排泄区和汇集区^[45],地势的差异和地下水流方向的不同,使得各古水文区域岩溶分布和强度存在差异。东吴运动又称为峨眉地裂运动^[46],不仅使四川盆地上升为陆,且具有拉张性质,在固结灰岩中产生裂隙或垂直节理。大量酸性气体因峨眉山玄武岩喷发而溢

出地表。晚二叠世早期泥炭沼泽相的出现说明当时气候为温暖潮湿型。上述条件都是东吴期岩溶作用产生的有利因素,可以形成较大型或大型的岩溶洞穴^[47]。

受中二叠世末期东吴运动的影响,华蓥山断裂带出现张裂活动,其东侧可见泸州古隆起的雏形,中二叠统经受不同强度的剥蚀,泸州古隆起的核部位于荣昌—福集一带,地层已剥蚀至茅口组二段,其外侧来苏—泸州—隆昌一带剥蚀到茅口组三段,茅口组四段分布于外围^[48]。泸州古隆起是华蓥山大断裂上盘的一个区域性继承性隆起带,在东吴期形成雏形,印支期早幕定形^[49-50]。

2 古地貌恢复方法

影响碳酸盐岩岩溶发育的因素有可溶地层出露的范围、先存的孔洞系统、古气候、海平面升降、风化壳古地貌等。其中,风化壳古地貌决定了古岩溶的深度、范围及强度^[51]。古地貌恢复属于盆地分析的研究内容之一,基于沉积记录资料的不同,恢复精度存在一定差异。目前可用的古地貌恢复方法虽然较多,但是基本上还停留在定性、半定量阶段,主要有沉积学方法、层序地层学方法、残余厚度法、印模法和地球物理方法。这些方法有各自的优势和不足^[52],应根据研究区的资料情况,尽量运用多种方法进行古地貌恢复,取长补短,精确恢复古地貌。受研究区资料和研究程度的限制,本次研究主要运用了残余厚度法和印模法对川东南地区二叠系茅口组岩溶古地貌进行恢复,并对这2种方法恢复的岩溶古地貌进行对比。

残余厚度法的基本理论是假定目的层剥蚀前的原始沉积厚度较为均一,以目的层下伏某个标志层作为等时基准面,以待恢复古地貌顶界面与该基准面之间的残余厚度来描述古地貌形态,残余厚度小的地方表征古地貌低势区,残余厚度大的地方表征古地貌高势区^[53]。应用残余厚度法的前提是需要明确地层原始沉积厚度变化不大及确定等时基准面,且地层分布数据比较准确。

印模法根据补偿沉积原理,将紧邻目的层的上覆地层顶界作为等时基准面,以待恢复侵蚀面顶界与该基准面之间的厚度,通过镜像关系来描述古地貌形态^[54],厚度小的地方为古地貌高势区,厚度大的地方为古地貌低势区。该基准面需满足3个条件:

①能够代表当时海平面,必须是全区范围内分布的等时界面;②该基准面离侵蚀面比较近,距离风化壳越接近,后期构造运动对其影响就越小,侵蚀面与沉积界面间的地层厚度越能反映当时古地貌特征;③这个界面不论在钻井、测井曲线还是地震剖面上都容易识别和对比,岩性突变面最好^[55]。

3 茅口组岩溶古地貌恢复及特征

3.1 残余厚度法古地貌恢复

石炭系沉积后期四川盆地发生大规模的侵蚀作用,沉积基底基本被夷为平地,中二叠世发生海侵时,四川盆地总体为开阔台地环境,沉积的栖霞组海相碳酸盐岩厚度相差不大,其顶界面被认为是一个相对等时界面。随后继续沉积茅口组,沉积环境仍然为开阔台地,茅口组的沉积厚度较为均一,具备应用残余厚度法进行古地貌恢复的基本条件^[54]。

根据岩性、古生物化石分带和电性特征,将四川盆地茅口组自上而下划分为4个岩性段。茅四段岩性以黑灰色生屑灰岩、泥晶灰岩为主;茅三段以一套灰白色、浅灰亮晶生屑灰岩为主,颗粒含量较高;茅二段为灰色厚层块状泥晶灰岩;茅一段为灰色泥质灰岩、灰岩夹黑色页岩。在地层划分、对比的基础上,对研究区钻井进行了分层统计,结果显示,研究区茅口组受到不同程度的剥蚀,在关圣场—丁山—旺隆—太和所包围的弧形区域地区残余茅三段,缺失茅四段,茅口组呈北西方向展布,其中在xia14井和guan3井零星分布有茅四段。茅四段主要分布于茅三段周围,但在局部茅三段分布区也零星有茅四段分布,如xia19井(图1)。此外,钻井中茅四段+茅三段的厚度统计结果显示,由关圣场—丁山—旺隆—太和包围的弧形区域的茅四段+茅三段厚度向中心逐渐增厚,古地貌逐渐增高。该弧形区域之外,

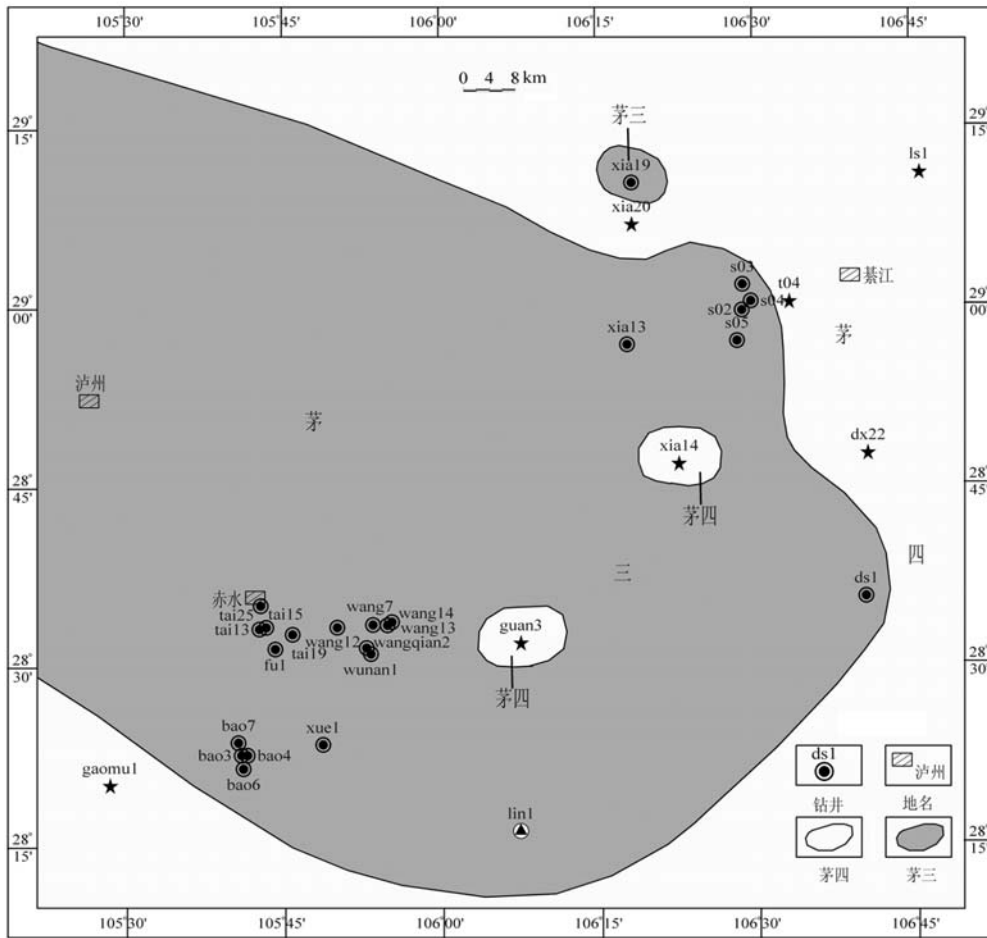


图1 川东南地区上二叠统沉积前古地质图

Fig. 1 Paleogeologic map of upper Permian pre-sedimentation in southeastern Sichuan basin

整体厚度薄,局部茅四段+茅三段也存在厚度较大的地方,如xue1井茅四段+茅三段厚度可达70.97m。

川东南地区地震资料以二维资料为主,因茅三段底界层位解释非常难,地震上难以用茅四段+茅三段的厚度来进行茅口组古地貌的恢复,只能通过茅口组厚度恢复上二叠统沉积前研究区的古地貌(图2)。在逆断层附近,由于地层重复使得厚度增大,数据选取应避免逆断层的地方,取值于地层厚度稳定的地方,否则,恢复的古地貌不可靠,同时使用钻井厚度数据对地震数据形成的平面图进行了校正。

3.2 印模法古地貌恢复

晚二叠世研究区再次下沉接受沉积。上二叠统龙潭组主要为一套沼泽相的灰黑色页岩与灰色铝土质泥岩,二者不等厚互层,夹深灰色凝灰质粉砂岩,厚度变化不大,其顶面可近似看作是一个等

时界面。龙潭组岩性与下伏茅口组岩性差异大,在GR、AC、RD、RS等测井曲线上特征界线明显,同时,龙潭组与上覆长兴组及下伏茅口组的阻抗差异较大,均可形成强反射界面,层位解释相对容易。

利用钻井进行了分层厚度对比(拉平龙潭组顶),结果显示,如果龙潭组厚度较厚,如xia20井龙潭组厚度达到了143m,则茅口组处于古地貌低部位;反之,如果龙潭组厚度较薄,如s03井龙潭组厚度仅85m,则茅口组处于古地貌高部位(图3)。过井地震剖面对比也得出了相同的结论。因此,认为龙潭组的厚度可以精细地反映上二叠统沉积前茅口组的古地貌,这也是印模法恢复古地貌研究的一个重要基础。

龙潭组的厚度可以反映上二叠统沉积前茅口组的古地貌。首先,利用钻井资料了解龙潭组厚度

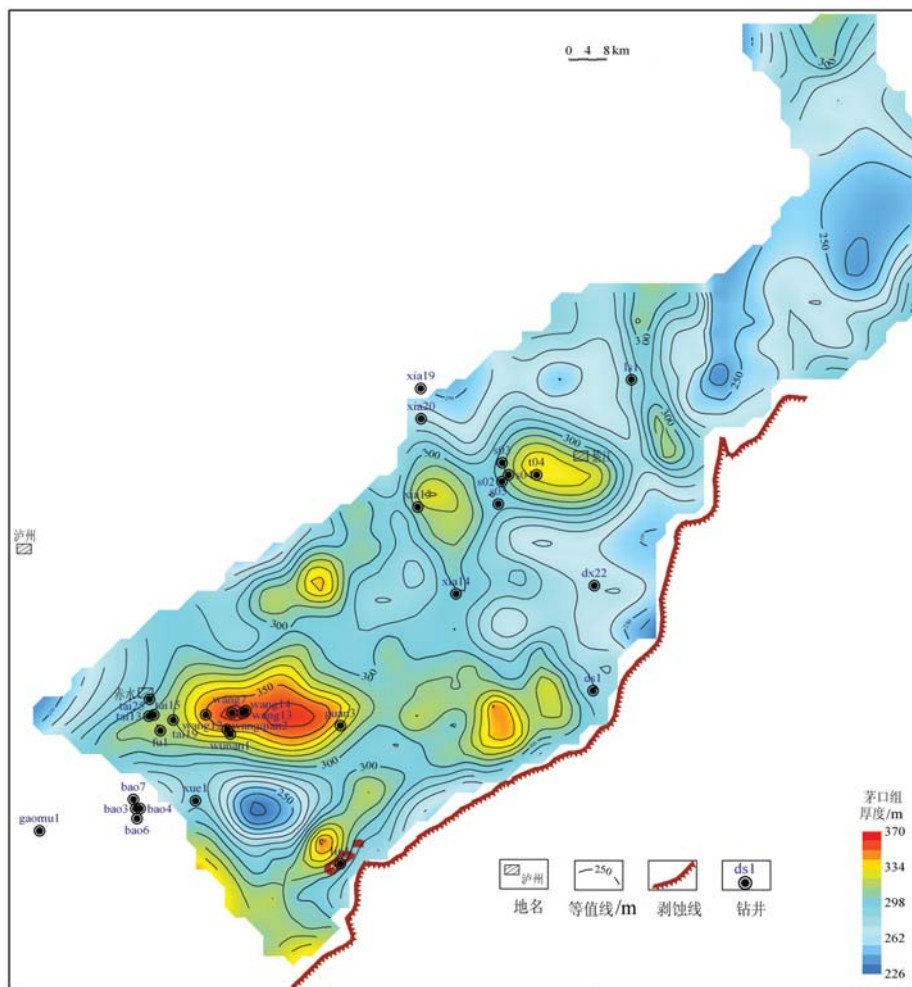


图2 川东南地区茅口组厚度分布

Fig. 2 Thickness of Maokou Formation in southeastern Sichuan basin

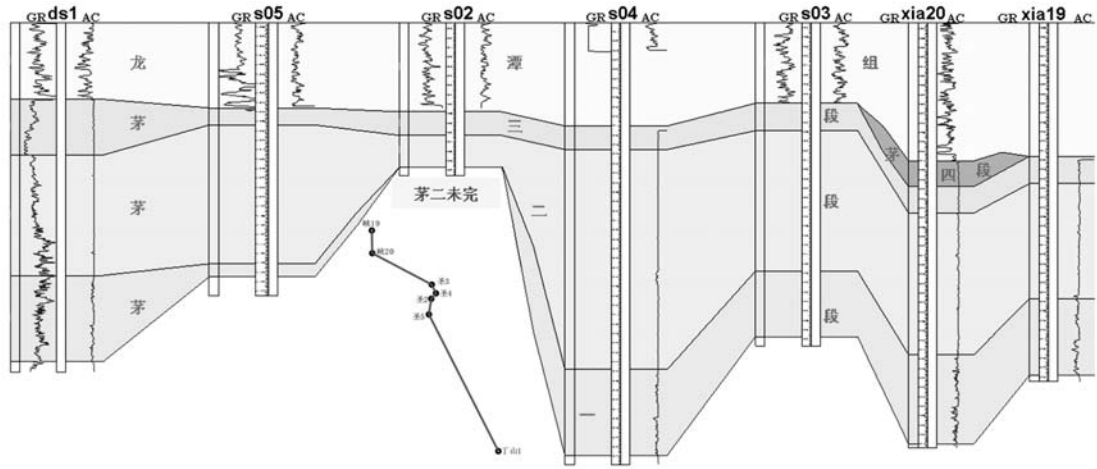


图3 南北向钻井剖面茅口组地层对比(拉平龙潭组顶)

Fig. 3 Well stratigraphic correlation of Maokou Formation in NS direction (flattening the top of Longtan Formation)

的分布状况,关圣场—丁山—旺隆—太和包围的弧形区域的龙潭组厚度向中心逐渐减薄(图4),根据印模法可知其古地貌逐渐增高,这与由钻井茅四

段+茅三段厚度研究古地貌得出的结论一致;其次,在地震剖面上追踪解释了龙潭组的顶和底,避开逆断层的地方,在地层厚度稳定的地方取值,通过时

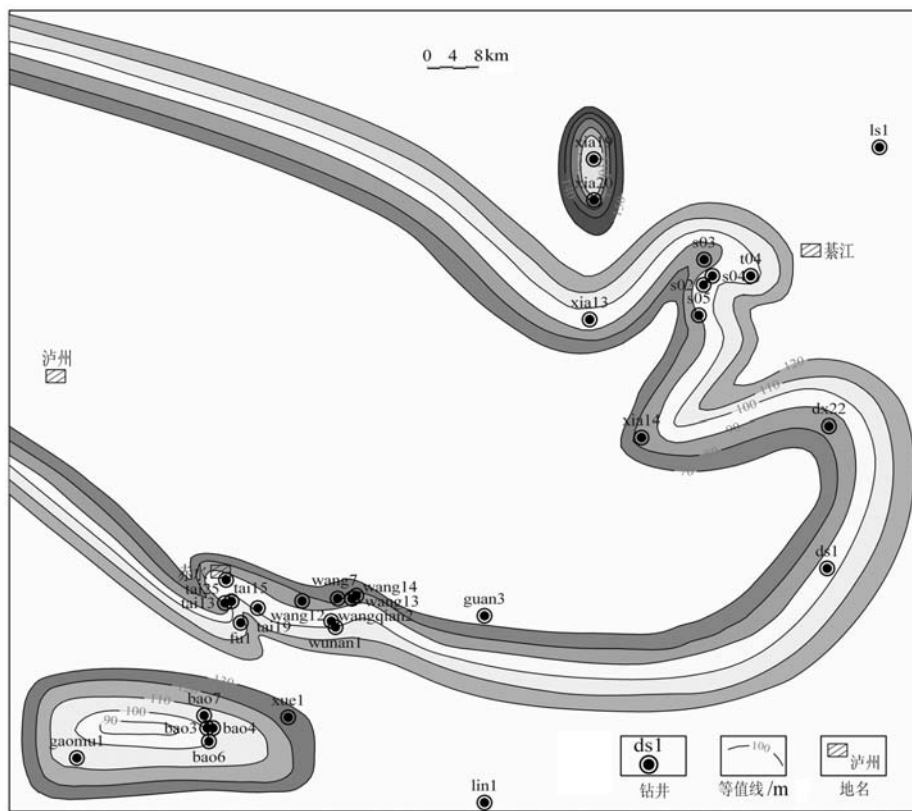


图4 川东南地区龙潭组钻井厚度分布

Fig. 4 Well thickness of Longtan Formation in southeastern Sichuan basin

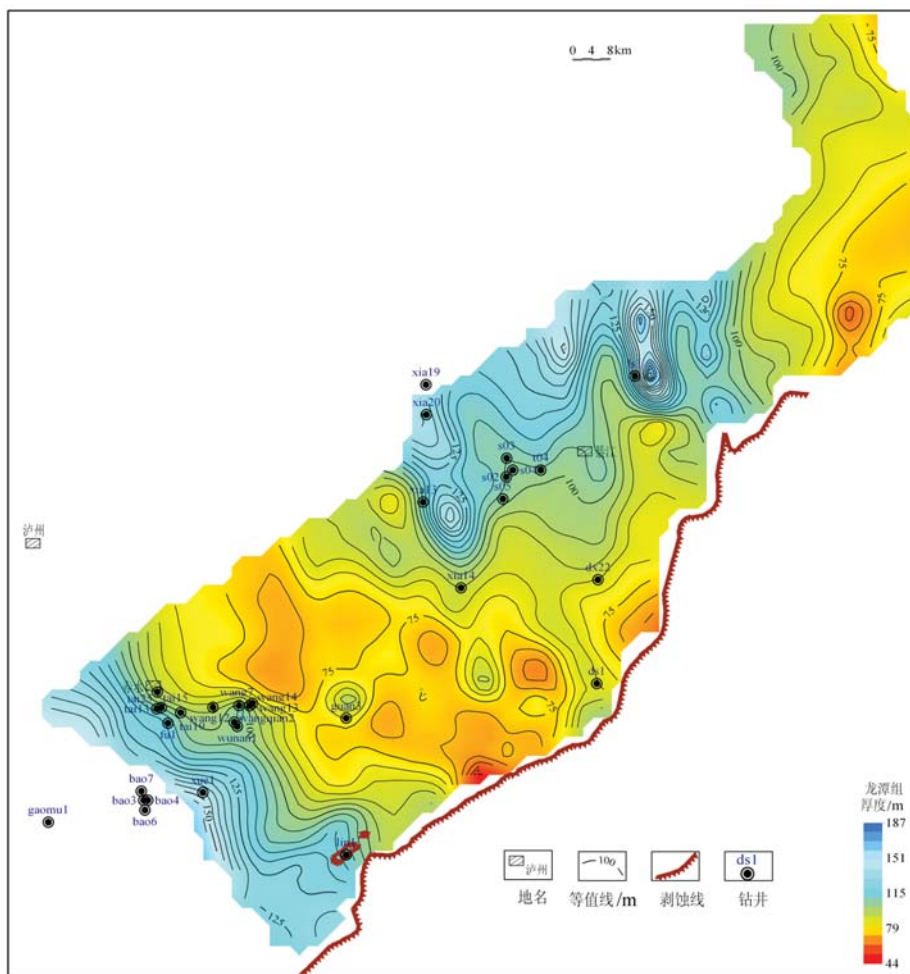


图5 川东南地区龙潭组厚度分布

Fig. 5 Thickness of Longtan Formation in southeastern Sichuan basin

深转换并用钻井数据进行了校正,得到龙潭组厚度平面分布图(图5),据此来精细刻画晚二叠纪沉积前的茅口组古地貌特征。

3.3 茅口顶部岩溶古地貌特征

对比残余厚度法和印模法恢复的古地貌结果,二者的趋势基本一致,关圣场—丁山—旺隆—太和包围的弧形区域处于古地貌高部位。茅口组与栖霞组呈整合接触,阻抗特征差异不大,反射系数较小,反射振幅较弱,对层位的准确解释较困难,笔者认为,在研究区使用茅口组的残余厚度进行茅口组古地貌精细恢复可信度不高,仅供参考。龙潭组以泥页岩为主,上覆长兴组和下伏茅口组均以灰岩为主,岩性、电性区分明显,阻抗特征差异大,层位精确解释相对容易,认为印模法恢复的古地貌可信度更高。

根据印模法恢复出来的古地貌,对研究区高地、沟谷及古地形特征在平面上的分布和相互配置关系进行分析,进而了解研究区茅口组古水系分布特征。古水系分布总体上呈现出由古隆起核部向四周低地流动的趋势,山间盆地、地势高的洼地等汇水区为水系源头,水流下切形成的槽谷、峡谷为河道的支流或干流,地势低的平原地区为水系的汇水区^[56](图6)。

茅口组古地形起伏变化剧烈,高差悬殊,地形相对高差在140m左右,考虑上二叠统沉积前的古地貌背景,结合研究区上二叠统沉积前的古地质图,综合考虑沉积环境的影响、局部地形的展布情况、水系发育情况、风化壳表面侵蚀溶蚀特征及钻井资料,将茅口组划分为3种古地貌单元,分别为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地。需要说明的是,本次岩溶古地

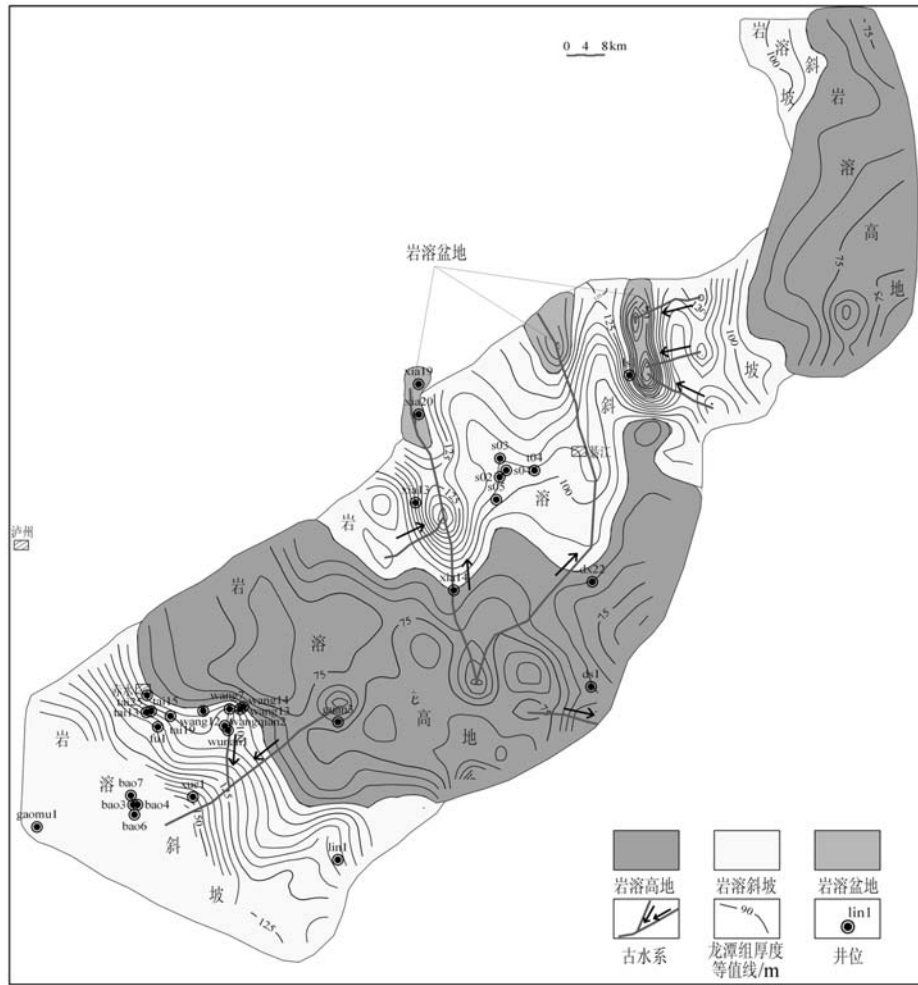


图6 川东南地区茅口组岩溶古地貌单元划分

Fig. 6 Paleokarst landform units of Maokou Formation in southeastern Sichuan basin

貌只划分了研究区有钻井资料或者地震资料的区域，为了保证划分的精度，没有进行外推。

(1)岩溶高地

岩溶高地龙潭组厚度均小于90m，以龙潭组厚度90m等值线为界，研究区茅口组发育2个岩溶高地，一个分布在研究区西南，另外一个分布在研究区东北。通过与前人对蜀南地区茅口组岩溶古地貌的对比分析^[6]，认为研究区西南岩溶高地与蜀南岩溶高地为同一岩溶高地，呈北西—南东向展布，是蜀南岩溶高地向南西的延伸，且研究区西南岩溶高地相对蜀南地区隆起幅度更高。岩溶高地的古地形整体地势高，降水入渗补给地下水，岩溶作用以垂向渗滤为主，循环深度浅，深部岩溶不发育，所

以在岩溶高地主要发育纵向及少量横向溶洞。岩溶高地上地层展布平缓，相对高差小，地层剥蚀强度大，茅四段基本缺失，茅三段出露。但局部地区也存在洼地，如guan3井附近就存在一个洼地，该井出露茅四段，为西部水系的一个源头。

(2)岩溶斜坡

以龙潭组厚度90~140m等值线分布区域作为岩溶斜坡分布的区域，在西部岩溶高地西南边缘的岩溶斜坡，等值线密集，坡降较大，且地势陡，山体不处于同一高程，相对高差大，属于岩溶陡坡。而在西部岩溶高地和东部岩溶高地之间的岩溶斜坡，等值线相对稀疏，相对岩溶高地地形、地势起伏较大，山体处于不同高程，坡降明显，但坡降较岩溶陡

坡小,属于岩溶缓坡。岩溶斜坡区,地表径流速度慢,岩溶水渗透量大,水平潜流带极为发育,充填作用弱,主要发育水平溶洞,易于形成良好的溶蚀孔洞储集体,且坡度越大,径流越明显,溶洞越发育。西部的太和、旺隆和宝元构造处于西南边缘的岩溶陡坡,勘探已经证实,茅口组岩溶储层发育,高产井多,勘探开发成效显著。处于东部岩溶缓坡的1s1井,钻井过程中出现钻时加快,测井解释储层10.7m(4层),酸压测试产气 $20.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}^{[37]}$ 。虽然岩溶缓坡的坡降不如岩溶陡坡,溶蚀物质被带走的速度不如岩溶陡坡,但不可否认其依然存在未被充填的溶蚀孔洞,1s1井勘探的成功说明该区域勘探前景依然可观,应引起重视。

(3) 岩溶盆地

处于龙潭组厚度等值线大于140m的区域,受掌握资料的限制,在研究区发育的面积小、坡度小、地势低、地形起伏不大,处于汇水区,渗流带不发育,地下水流动缓慢,易于形成 CaCO_3 过饱和,化学胶结充填作用强,不利于古岩溶储层的形成。

4 结论与认识

通过对川东南地区茅口组岩溶古地貌恢复及古地貌特征的刻画,得出以下结论和认识。

(1) 研究区钻井较少,且分布不均,茅口组与栖霞组呈整合接触,阻抗特征差异不大,对层位的准确解释较困难,在研究区使用残余厚度法进行茅口组古地貌恢复,可信度不高,仅供参考。

(2) 通过钻井及地震剖面拉平龙潭组顶发现,研究区龙潭组厚度可以镜像反映茅口组的古地貌,龙潭组薄的地方,晚二叠世沉积前茅口组古地貌高;龙潭组厚的地方,晚二叠世沉积前茅口组古地貌低。根据研究区的地质特征及实际资料,将钻井与地震紧密结合,最终选用印模法对川东南地区茅口组进行了岩溶古地貌的恢复。

(3) 在古水系特征分析的基础上,结合古地质图和钻井资料,将研究区划分为岩溶盆地、岩溶斜坡和岩溶高地,其中岩溶斜坡又分为岩溶缓坡和岩溶陡坡。

(4) 研究区西南岩溶高地与蜀南岩溶高地为同一岩溶高地,呈北西—南东向展布,是蜀南岩溶地向南西的延伸,且相对蜀南地区隆起幅度更高。在岩溶斜坡区,地下水以径流为主,溶蚀作用强烈,

溶蚀孔洞发育,是勘探开发的有利地区。

致谢: 中石化南方勘探分公司外围工作部的同志对论文研究提出了宝贵的建议,审稿专家提出了建设性的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 夏日元. 油气田古岩溶与深岩溶研究新进展[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 76.
- [2] 陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 244-253.
- [3] 王宝清, 张金亮. 古岩溶的形成条件及其特征[J]. 西安石油学院学报, 1996, 11(4): 8-10.
- [4] He J, Fang S X, Hou F H, et al. Vertical zonation of weathered crust ancient karst and reservoir evaluation and prediction—A case study of M55-M51 sub-members of Majiagou Formation in gas fields, central Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40: 572-581.
- [5] 拜文华, 吕锡敏, 李小军, 等. 古岩溶盆地岩溶作用模式及古地貌精细刻画[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 292-298.
- [6] 张庆玉, 陈利新, 梁彬, 等. 轮古西地区前石炭纪古岩溶微地貌特征及刻画[J]. 海相油气地质, 2012, 17(4): 23-26.
- [7] Zhang B, Zheng R C, Wang X B, et al. Paleokarst features and reservoir distribution in the Huanglong Formation of eastern Sichuan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38: 257-267.
- [8] 刘小平, 吴欣松, 张祥忠. 轮古西地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层碳、氧同位素地球化学特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 69-79.
- [9] Calner M, Lehnert O, Nolvak J. Palaeokarst evidence for widespread regression and subaerial exposure in the middle Katian (Upper Ordovician) of Baltoscandia: Significance for global climate[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 296: 235-247.
- [10] 张涛, 云露, 邬兴威. 锶同位素在塔河古岩溶期次划分中的应用[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 299-303.
- [11] Katz B G, Bullen T D. The combined use of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and carbon and water isotopes to study the hydrochemical interaction between groundwater and lakewater in mantled karst[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60: 5075-5087.
- [12] 夏日元, 唐建生, 邹胜章, 等. 塔里木盆地北缘古岩溶充填物包裹体特征[J]. 中国岩溶, 2006, 25(3): 246-249.
- [13] Li J, Zhang W Z, Luo X, et al. Paleokarst reservoirs and gas accumulation in the Jingbian field, Ordos Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25: 401-415.
- [14] 张松扬, 范宜仁, 李会银. 基于自然伽马能谱测井的岩溶型碳酸盐岩储层层位划分和对比[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(6): 35-41.
- [15] Uyanik N A, Uyanik O, Akkurt I. Micro-zoning of the natural radioactivity levels and seismic velocities of potential residential areas in volcanic fields: The case of Isparta (Turkey)[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 98: 191-204.
- [16] 钟广法, 刘瑞林, 柳建华, 等. 塔北隆起奥陶系古岩溶的电成像测

- 井识别[J]. 天然气工业, 2004, 24(6): 57-60.
- [17] Manda A K, Culpepper A R. Characterizing moldic and vuggy pore space in karst aquifers using borehole-wall, slabbed-core and thin-section images[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 88: 12-22.
- [18] 杨风丽, 程海生, 董良国, 等. 岩溶储层地震反射波场特征及多场信息预测——以塔中Zh1井区为例[J]. 2007, 26(3): 242-248.
- [19] Dou Q F, Sun Y F, Sullivan C, et al. Paleokarst system development in the San Andres Formation, Permian Basin, revealed by seismic characterization[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75(2): 379-389.
- [20] 龚洪林, 李闯, 王宏斌, 等. 应用AVO分析技术预测塔中岩溶储层含油性[J]. 新疆石油天然气, 2011, 7(2): 1-3.
- [21] Forte E, Pipan M, Casabianca D, et al. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 81: 76-87.
- [22] 马晓强, 侯加根, 胡向阳, 等. 论古岩溶洞穴型储层三维地质建模——以塔河油田四区奥陶系为例[J]. 地质论评, 2013, 59(2): 315-324.
- [23] 赵彬, 侯加根, 刘钰铭. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储层三维地质建模与应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(5): 12-16.
- [24] 刘钰铭, 侯加根, 胡向阳, 等. 塔河油田古岩溶储集体三维建模[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 34-38.
- [25] 侯加根, 马晓强, 胡向阳, 等. 碳酸盐岩溶洞型储集体地质建模的几个关键问题[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 64-69.
- [26] Zhou F D, Allinson G, Wang J Z, et al. Stochastic modelling of coalbed methane resources: A case study in Southeast Qinshui Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 99: 16-26.
- [27] 杨敏. 塔河四区岩溶缝洞型碳酸盐岩储层井间连通性研究[J]. 新疆地质, 2004, 22(2): 196-199.
- [28] Harden H S, Roeder E, Hooks M, et al. Evaluation of onsite sewage treatment and disposal systems in shallow karst terrain[J]. *Water Reserch*, 2008, 42: 2585-2597.
- [29] 田冷, 代金友. 鄂尔多斯盆地古岩溶储层流动单元研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 275-279.
- [30] Morales T, Uriarte J A, Olazar M, et al. Solute transport modelling in karst conduits with slow zones during different hydrologic conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 390: 182-189.
- [31] 卢武长, 杨绍全, 贾疏源. 川南大湾剖面栖霞、茅口灰岩古岩溶的氧、碳同位素研究[J]. 矿物岩石, 1986, 6(3): 112-120.
- [32] 陈立官, 王洪辉, 陆正元, 等. 川南地区古岩溶与阳新统天然气局部富集关系探讨[J]. 成都地质学院学报, 1992, 19(4): 99-105.
- [33] 胡志水, 陈琴芳. 川南下二叠统碳酸盐岩古岩溶作用及其余天然气藏的关系[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(3): 14-18.
- [34] 王运生, 金以钟. 四川盆地二叠统白云岩及古岩溶的形成与峨眉地裂运动的关系[J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(1): 8-16.
- [35] 张三元, 谢迟初, 凡睿. 天堂坝地区茅口组岩溶缝洞体储层地震异常识别[J]. 江汉石油职工大学学报, 2006, 19(6): 10-14.
- [36] 桑琴, 未勇, 程超, 等. 蜀南地区茅口组古岩溶缝洞系统与地层水化学性质关系[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 228-235.
- [37] 郭旭升, 李宇平, 魏全超, 等. 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.
- [38] 康志宏, 吴铭东. 利用层序地层学恢复岩溶古地貌技术——以塔河油田6区为例[J]. 新疆地质, 2003, 21(3): 290-292.
- [39] 胡世忠. 论东吴运动构造事件与二叠系分统界线问题[J]. 地层学杂志, 1994, 18(4): 309-315.
- [40] 冯少南. 东吴运动的新认识[J]. 现代地质, 1991, 18(4): 378-384.
- [41] 陈维涛, 周瑶琪, 马永生, 等. 关于龙门山地区东吴运动的存在及其性质的认识[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1518-1525.
- [42] 张祖圻. 论东吴运动[J]. 煤田地质与勘探, 1983, 4(3): 14-21.
- [43] 陈显群, 刘应楷, 童鹏. 东吴运动质疑及川黔运动之新见[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(4): 412-423.
- [44] 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, 2005, 30(1): 89-96.
- [45] James N P, Choquette P W. 古岩溶与油气储层[M]. 成都地质学院沉积所和长庆勘探开发研究院合译. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.
- [46] 罗志立. 试从地裂运动探讨四川盆地天然气勘探新领域[J]. 成都地质学院学报, 1983, 10(2): 1-13.
- [47] 陆正元, 陈立官, 王洪辉. 四川盆地二叠统气藏储层模式的再认识[J]. 石油天然气与地质, 1999, 20(1): 11-14.
- [48] 王鑫. 泸州古隆起地区三叠系嘉陵江组层序地层与储层研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2007.
- [49] 张廷山, 陈晓慧, 姜照勇, 等. 泸州古隆起对贵州赤水地区早、中三叠世沉积环境和相带展布的控制[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 583-592.
- [50] 李延钧, 李其荣, 杨坚, 等. 泸州古隆起嘉陵江组油气运聚规律与成藏[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 20-24.
- [51] 田纳新, 徐国强, 李学永, 等. 塔中地区早海西期风化壳古岩溶控制因素分析[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(2): 61-63.
- [52] 苏中堂. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系马家沟组沉积相与古岩溶储层特征[D]. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2008.
- [53] 梁峰, 秦启荣, 陈昌, 等. 威远—安岳地区下二叠统古地貌恢复及其油气富集关系研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2008, 10(6): 7-10.
- [54] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. 2012, 33(6): 950-960.
- [55] 赵俊兴, 陈洪德, 时志强. 古地貌恢复技术方法及其研究意义[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3): 260-266.
- [56] 桑琴, 未勇, 程超, 等. 蜀南地区二叠系茅口组古岩溶地区水系分布及岩溶地貌单元特征[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 393-402.