

四川盆地威远构造震旦系灯影组 气烟囱特征及其地质意义

梁霄^{1,2}, 刘树根^{1,2}, 夏铭³, 孙玮¹, 邓宾^{1,2}

(1. 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; 2. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059;
3. 中国石油 川庆钻探工程有限公司 地球物理勘探公司, 四川 成都 610213)

摘要:四川盆地威远构造震旦系灯影组气藏充满度仅为25%,与早寒武世拉张槽相隔的高石梯-磨溪构造灯影组则为充满度近100%的特大型整装气田。两者的区域背景和生储盖组合条件相近,但气田充满度出现很大差异。威远构造2D和3D地震剖面存在较多震旦系—三叠系管状异常特征,有的出露地表或隐伏浅层之下,分析可能为气烟囱特征。其主要特征包括:①受气烟囱效应影响,威远构造地表三叠系嘉陵江组出露附近河流中有大量气苗;②上覆寒武系遇仙寺组气藏、洗象池组气藏及二叠系阳新统气藏的天然气非烃气体中的氮、氩、氦成分与威远气田震旦系灯影组天然气成分相似,具有灯影组气藏天然气上窜特征;③威远构造震旦系—二叠系压力系数均为1.0左右,高石梯-磨溪构造灯影组压力系数也为1.0左右,但其上覆层位均为超压。威远构造气烟囱表明,震旦系灯影组气藏封闭系统基本失效,保存条件较差,天然气垂向运移,直接影响现今气藏的规模。

关键词:气烟囱;天然气;灯影组;威远构造;四川盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Characteristics and geological significance of gas chimney of the Sinian Dengying Formation in the Weiyuan Structure, Sichuan Basin

Liang Xiao^{1,2}, Liu Shugen^{1,2}, Xia Ming³, Sun Wei¹, Deng Bin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
3. Sichuan Geophysical Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan 610213, China)

Abstract: Fullness coefficient of the Upper Sinian Dengying Fm gas reservoir in the Weiyuan Structure is only 25%, while that in the Gaoshiti-Moxi Structure separated with the former by the Cambrian intracratonic sag is approximately 100%. Though the Dengying Fm in the two structures have similar regional background and source-reservoir-cap assemblage conditions, they have large differences in the fullness coefficient of natural gas reservoir. Abnormal tubular characteristics can be found in the Sinian-Triassic on 2D and 3D seismic profiles of the Weiyuan Structure. Some of them expose on the surface or are subtle under the shallow layer. They are supposed to be the characteristics of “gas chimney”. Their major features are as follows: ① Affected by the gas chimney, a large amount of gas seepages can be found in rivers near the Lower Triassic Jialingjiang Formation outcrops of the Weiyuan Structure; ② Non-hydrocarbon gases components such as nitrogen, argon and helium of the gas reservoirs in the Upper Cambrian Yuxiansi Formation, Xixiangchi Formation and Lower Permian Yangxin Formation are similar to the Upper Sinian Dengying Formation in Weiyuan, indicating the upward channeling of gas in the Upper Sinian Dengying Fm; ③ Although the pressure coefficient is 1.0 in the Dengying Formation of Gaoshiti-Moxi Structure, the overlying strata have overpressure. The existence of gas chimneys in Weiyuan shows that the seal system of the Upper Sinian Dengying Fm gas reservoir is basically failed, thus the sealing conditions are poor. The vertical migration of natural gas directly affects the scale of the current gas reservoir of the Weiyuan Structure.

Key words: gas chimney, natural gas, Dengying Formation, Weiyuan Structure, Sichuan Basin

收稿日期:2015-11-23;修订日期:2016-06-02。

第一作者简介:梁霄(1991-),男,硕士研究生,石油与天然气地质学。E-mail:101528356@qq.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214805)。

威远构造位于四川盆地东南部,威远县城西北部,早寒武世“绵阳—长宁”拉张槽^[1]西侧(图1),是盆地内乐山—龙女寺隆起带上的一个巨型穹窿背斜。威远构造为喜马拉雅期侧向挤压形成,但定型的具体时期与期次仍存在争议^[2-3]。威远构造的形成演化经历了多期构造运动(拉张—挤压—抬升)作用的叠加^[4]。现今威远构造由于受力作用较大,为盆地内较强改造区,受基底构造控制。1964年威远气田勘探发现,主力产层为震旦系灯影组。以地表侏罗系底面构造计算,威远构造闭合面积达1 751 km²。按震旦系顶面计算,构造闭合面积为850 km²。尽管威远构造为大型穹窿状背斜,然而震旦系灯影组气藏探明地质储量约为400 × 10⁸ m³,充满度仅为25%。2005年新一轮滚动勘探发现寒武系遇仙寺组与洗象池组气藏,但规模较小。

2011年,高石1井于高石梯—磨溪构造灯影组获高产天然气。次年8月,磨溪8井在寒武系龙王庙组同样获高产气流,揭开了四川盆地地下古生界自1964年威远构造灯影组气藏勘探成功后的又一重大发现。威远地区在40 Ma左右抬升形成现今构造,为盆地内地表除川东高陡构造外唯一出露三叠系嘉陵江组和雷口坡组的区域。最新研究表明,广安—龙女寺—磨溪—

高石梯—威远是喜马拉雅期区域隆升过程中圈闭溢出点海拔逐渐抬高的灯影组系列圈闭。威远地区为现今盆地内灯影组构造最高点,灯影组天然气现今存在大范围长距离的运移^[5]。隆升剥蚀作用在威远构造顶部可能形成了天然气逸散的“天窗”。地球化学方法难以确定地表气体是否与深部震旦系灯影组天然气同源。因此,本文结合国内外气烟囱研究实例与威远构造实际地质条件,通过地表与地腹资料相结合,并利用地质、地球物理和地球化学综合研究方法,对威远构造是否有灯影组天然气形成的气烟囱及其效应进行探讨。

1 气烟囱及其效应

1.1 “气烟囱”和“气烟囱效应”

“气烟囱”是指流体(塑性流体、天然气等)自下而上运移,导致区域地质条件发生改变的一种地质构造现象,在地震资料上表现为一种异常特征。同时,气烟囱也是流体、尤其是天然气运移的重要通道。气烟囱存在多种模式,有断裂—裂缝型、压力封闭失效型、底

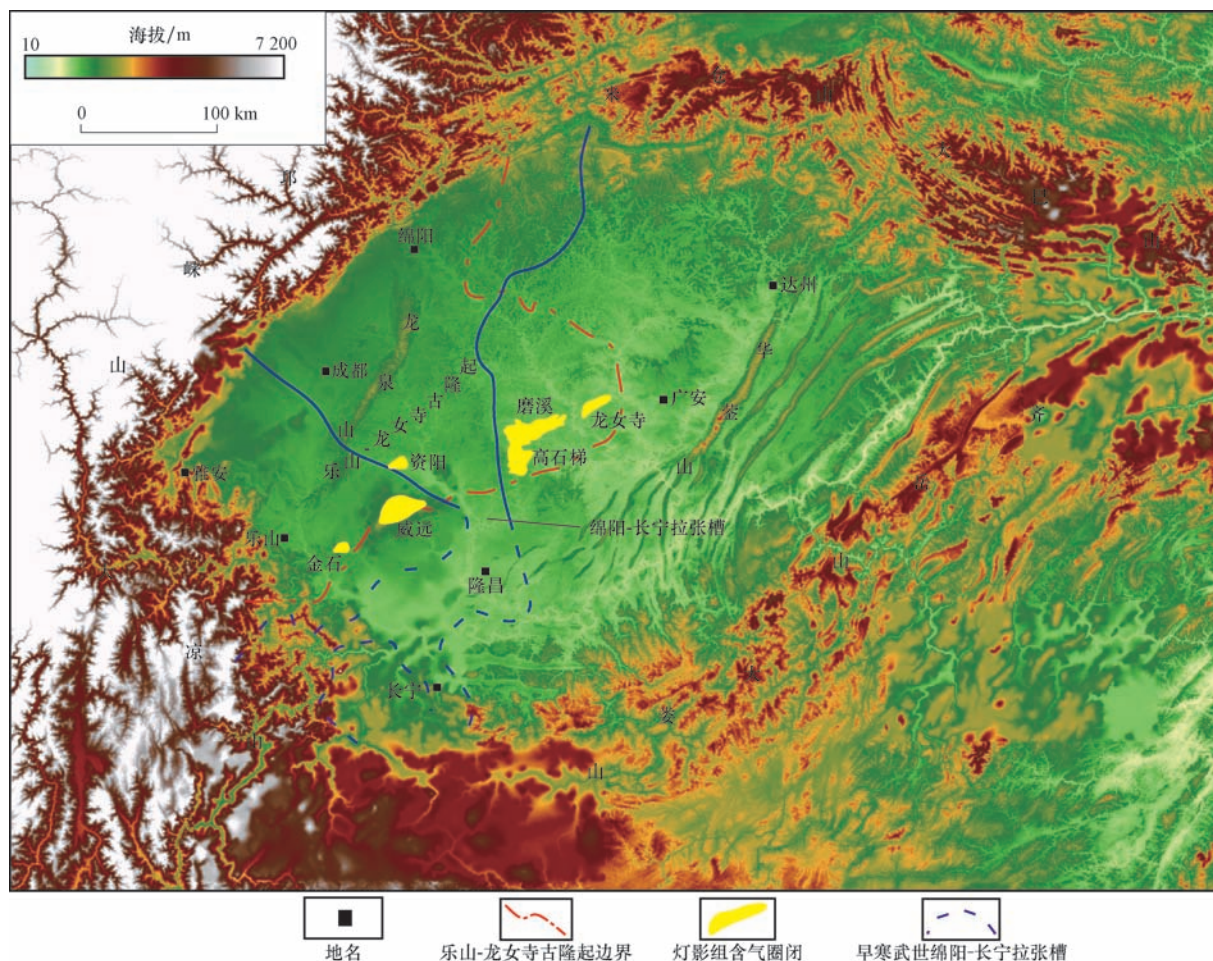


图1 四川盆地威远构造区域数字高程

Fig. 1 Regional digital elevation map of the Weiyan Structure in the Sichuan Basin

辟作用(泥火山)型等^[6](图2)。“气烟囱效应”是与气烟囱构造伴生的因果地质现象,对石油天然气地质而言,其最直观体现在油气勘探历史初期所遵循的通过地面油气苗寻找背斜油气藏。由于气体垂向输导,可能对区域自下而上多套层系的天然气组分、压力系数和地球化学等特征产生影响。气烟囱效应分析能作为地震资料证据的有效补充,证实气烟囱存在。

1.2 海洋和陆地气烟囱形成机理差异

1.2.1 海洋气烟囱特征

最初气烟囱多是在海洋中被发现的。国内对气烟囱的研究集中于南海北部湾地区,尤其以莺歌海盆地为重点。研究认为,气烟囱是因流体运移而形成的一种伴生构造,包含垂向泄压形成的底辟构造与侧向泄压形成的层间伴生构造。由于这种伴生构造曾经是热流体(气、液)的泄压通道且形似烟囱,且具烟囱效应,故名“气烟囱”^[7]。该区域气烟囱表现为泥底辟作用。由于泥底辟同时也可作为烃源岩,而流体垂向运移与扩散形成油气渗漏系统,气烟囱也代表了一种油气运聚关系^[8-11]。

国外对气烟囱效应研究也集中在海洋勘探领域,并进行了细致分析^[12-13]。挪威北海盆地为其代表地区^[14],该区域底辟作用强烈,断裂发育,油气逸散形成气烟囱效应。Heggland(1997)指出,地震资料中的锥形异常特征为深部泥火山成因的气烟囱,气体沿断层与裂缝垂向运移至海底,并扩散至海面^[15]。Hansen(2005)以气烟囱的构造定量特征,将北海盆地气烟囱分为3类,即弱-低幅度丘状型、陡峭丘状型和渐变-不连续丘状型^[16]。

1.2.2 陆地气烟囱特征

借鉴海洋气烟囱研究经验,国内也开展陆地气烟囱研究并在勘探中取得了成效。柴达木盆地三湖坳陷第四系生物气成因气田——涩北和台南气田,认为其为

基底断裂引发深部(新近系)气源岩形成的张性构造薄弱带,为气烟囱发育提供了场所。第四系发育的饱含高矿化度地层水的泥岩盖层具有一定的封闭能力,有助于气烟囱形成。气烟囱效应连通了三湖地区深部新近系气源岩和第四系储层,对第四系气藏的成藏起到重要作用^[17]。大庆海拉尔盆地贝尔凹陷白垩系气烟囱的识别分析发现,连通油源与储层的较密集微裂缝和小断层构成气烟囱,具有T型和S型两类气体疏导方式^[18]。

1.2.3 海洋和陆地气烟囱形成机理差异

通过比较海洋和陆地气烟囱特征,发现两者气烟囱形成机理有所不同。

对于海洋气烟囱,首先,地层发生在新生界古近系、新近系和第四系,压实作用低,密度低,含水饱和度高,容易受外力作用发生变形。其次,气烟囱构造多为泥底辟构造,柱状性高温、高压流体(天然气),突破隔离层向上垂直运移,灌入上覆密度低的古近系、新近系和第四系,气体可直达海底,或隐伏浅层盖层之下。若气源充足,气体不断向上运移,顶部盖层持续遮挡,形成背斜型气藏。

陆地气烟囱通道与围岩地层岩性物理参数(密度、速度、孔隙度和渗透率等)没有发生明显改变。首先,国内除柴达木盆地三湖坳陷生物气气藏是第四系外,其余均为中生界和古生界,压实作用强,密度高,固结成岩,不容易受外力作用发生变形。其次,气烟囱构造多为裂缝-断层输导性构造,深层气体通过裂缝-断层输导,可直达地表形成气苗,或隐伏浅层盖层之下形成气藏。陆地气烟囱通道与围岩地层岩性物理参数差异较小。

1.3 海洋和陆地气烟囱特征判别差异

气烟囱对烃类而言是一种特殊的流体运移通道,气体垂向运移,上、下地层压力系数趋于平衡。气烟囱顶部气体富集,导致气烟囱顶界面与上覆盖层间波阻抗差异明显,在地震剖面上多表现连续强振幅反射。

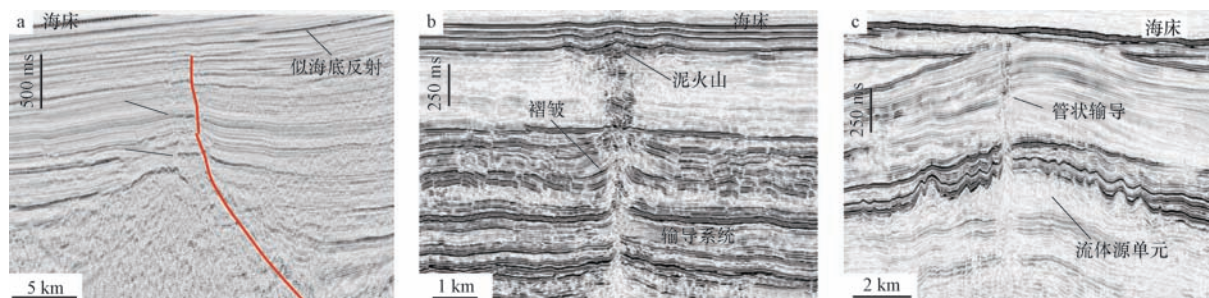


图2 Cartwright 气烟囱(流体输导系统)模式分类^[6]

Fig. 2 Classification of gas chimney (seal bypass systems) by Cartwright^[6]

- 断裂-裂缝型气烟囱流体以断裂为输导体系,遇沉积盖层聚集形成的凸起构型,未连通地表;
- 底辟-泥火山型气烟囱流体在沉积盖层中发生底辟作用,垂向运移,并继续沿上部断裂系统逸散,在深部表现为埋藏泥火山;
- 管状输导(封闭失效)型气烟囱流体通过渗透性地层垂向扩散,在深部形成宽缓的凸起构型,整体表现为柱状或管状“模糊带”

若气源充足,气体不断向上运移,顶部盖层持续遮挡,这时顶部气体向地层两侧扩散,气烟囱顶界面波阻抗异常面积易发生增大,而底界面深部地震资料分辨率降低,一般较难识别^[19]。气烟囱内部由于含气导致地层连续性变差,在地震剖面上总体表现为区域性弱振幅、弱连续性,同相轴突变杂乱。当内部气体局部富集,会造成区域段部分界面因波阻抗差异而具有强震幅反射。同时,气体充注导致层速度降低,在地震剖面上易具有下拉现象。当气体充注量达到临界值后可能导致地层向上发生弧形破碎,同相轴在垂向上可能出现上提。

海洋地震资料信噪比高,气烟囱通道与围岩地层岩性物理参数差异大,形成强波阻抗界面,地震反射能量强,管状异常特征明显,易于识别(图3a,b)。相对于海洋而言,陆地地震资料相对海洋地震资料信噪比较低,气烟囱通道与围岩地层岩性物理参数差异不大,管状特征不十分明显,识别相对较困难(图3c,d)。

2 威远构造气烟囱特征

对于威远构造这种较复杂山地地震勘探所采集的地震资料而言,由于地表地震地质条件影响,有时地震剖面会出现疑似“管状”异常,可能为采集或处理“脚印”,容易解释为气烟囱现象。由于现今气烟囱研究无

论是在海洋与陆地差异性、地表地层出露年代久远程度、资料采集难度等方面均与威远构造存在较大差异,因此在威远震旦系气田地震剖面气烟囱识别中,通过与采集处理人员合作分析地震资料品质,结合区域地质、构造受力条件与流体、压力及气源等可能为气烟囱效应所影响特征进行综合分析,力争提高威远构造气烟囱识别的可靠性。

气苗在实际工作中为气烟囱判定的最直接证据,但气苗仅在区域河流中容易被发现并识别。通过对威远地区进行野外地质考察,威远构造核部三叠统嘉陵江组出露附近河流中发现了大量气苗。因此,以威远构造嘉陵江组出露区为核心,结合发现气苗的位置,通过精细解释并分析对比地震与钻井资料,探寻威远构造气烟囱及其效应的存在依据。

2.1 地震剖面

证实气烟囱的主要依据即存在地震资料响应。通过对2005年威远构造采集的34条地震测线与2010年威远构造核部东南三维资料进行精细对比,结合断层分析,寻找构造核部周围,尤其是嘉陵江组出露深部附近地震异常特征(图4)。地表下三叠统嘉陵江组出露区附近,正好为二维工区与三维工区重叠区域。因此,对该区域作为重点研究。

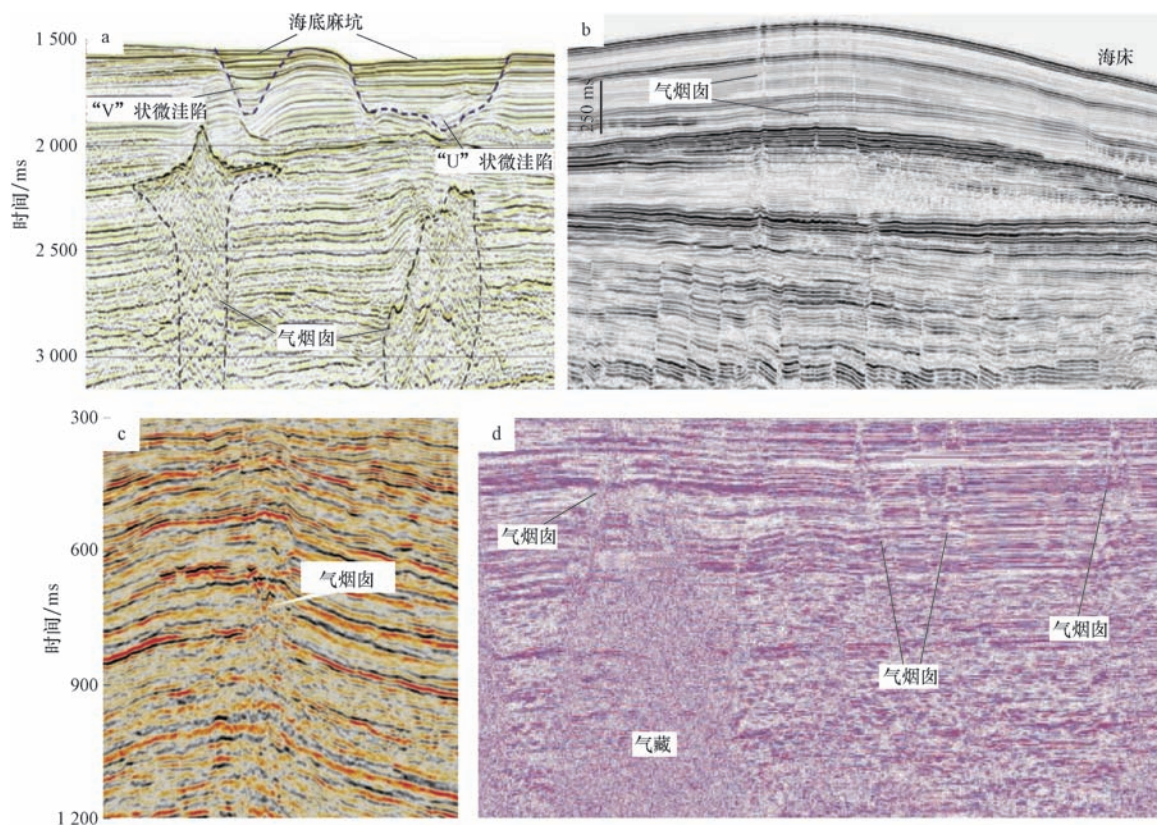


图3 海洋与陆地地震资料气烟囱特征异常对比(据文献[6,17-19])

Fig.3 Comparison of gas chimney characteristics between offshore and onshore seismic data (modified after the references of[6,17-19])

a. 琼东南盆地,地震剖面从深到浅呈现气烟囱-微洼陷-麻坑的组合样式;b. 挪威北海盆地,见明显“管状”地震资料异常特征;

c. 海拉尔盆地,气烟囱异常特征表现为同相轴上拉现象;d. 柴达木盆地,气烟囱特征较难识别

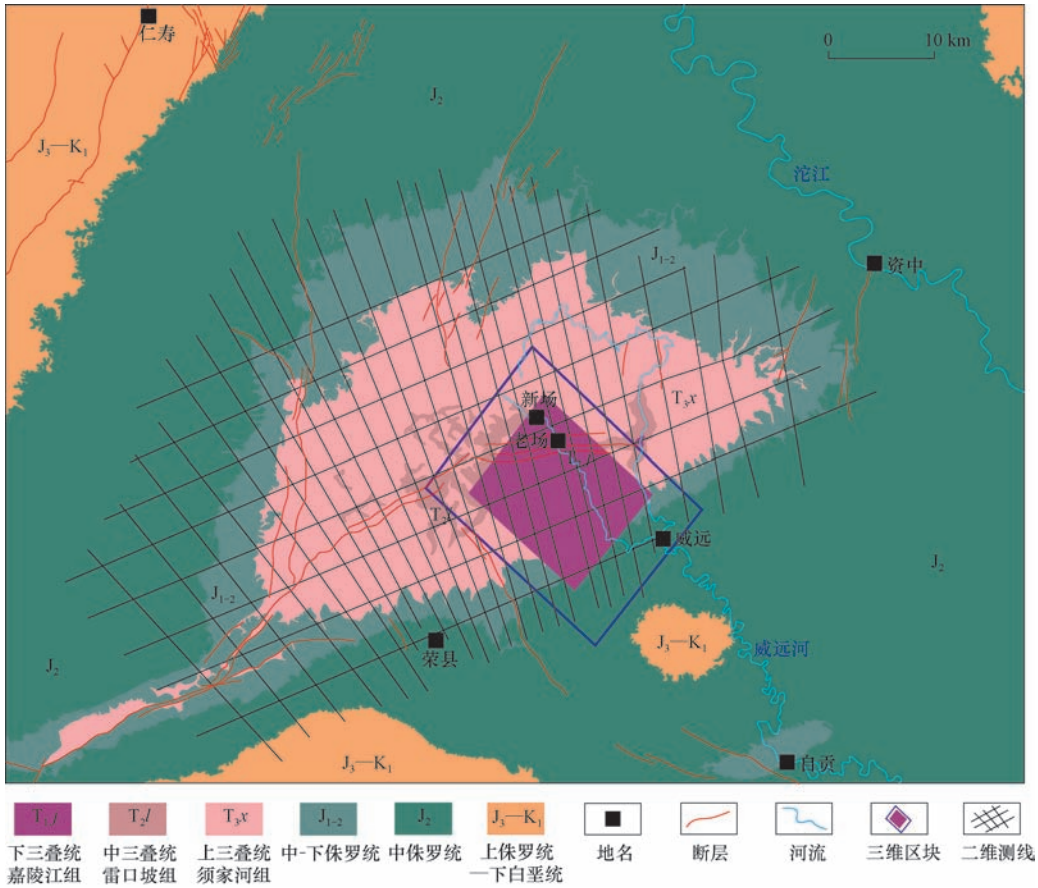


图 4 威远构造地震工区测网
Fig. 4 Seismic grid of the Weiyan Structure

资料品质对地震响应的影响可以通过对比二维与三维资料得出一定的认识。例如,二维工区 05WY16 线发现疑似气烟囱特征,因考虑 2D 资料激发条件和精度等原因,为提高特征可信度,通过区域叠加覆盖的最新 3D 资料比较,发现寒武系与上部阳新统底部同相轴反射特征明显、连续,而中间所夹地层有明显杂乱

反射,同相轴微下拉,而两侧反射特征较清晰,证实存在气烟囱(图 5)。

针对三维工区,Trace155 叠前时间偏移剖面在灯影组以上可见挠曲构造,挠曲两侧,同相轴存在较明显异常,同相轴上、下连续表现为由强到弱再到强反射。相邻的 Trace257 线,寒武系底部构造高点以上可见垂

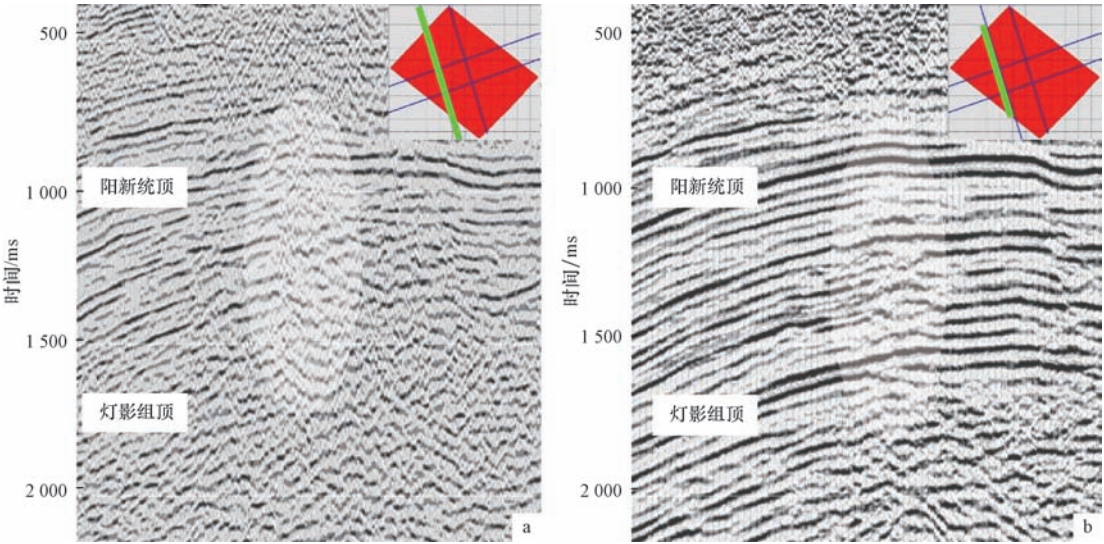


图 5 威远构造核部 2D 和 3D 叠加区域地震资料气烟囱效应典型特征
g.5 Typical features of gas chimney of the core area of the Weiyan Stucture with overlapping 2D and 3D acreage
a. 05WY16 叠前时间偏移剖面,气烟囱特征模糊;b. 2010WY3D 偏移剖面,气烟囱特征清晰

直带状分布的同相轴下拉现象,表明层速度较低,可能有气体充注,或是自下而上有气体上窜影响,结合地区二维地震剖面分析,为气烟囱可能性极大(图6)。

裂缝-断裂作为油气运移的重要通道,是气烟囱主要模式之一。威远构造灯影组顶部发育四条断裂(图6),其分别位于灯影组气藏内部1条,边界外3

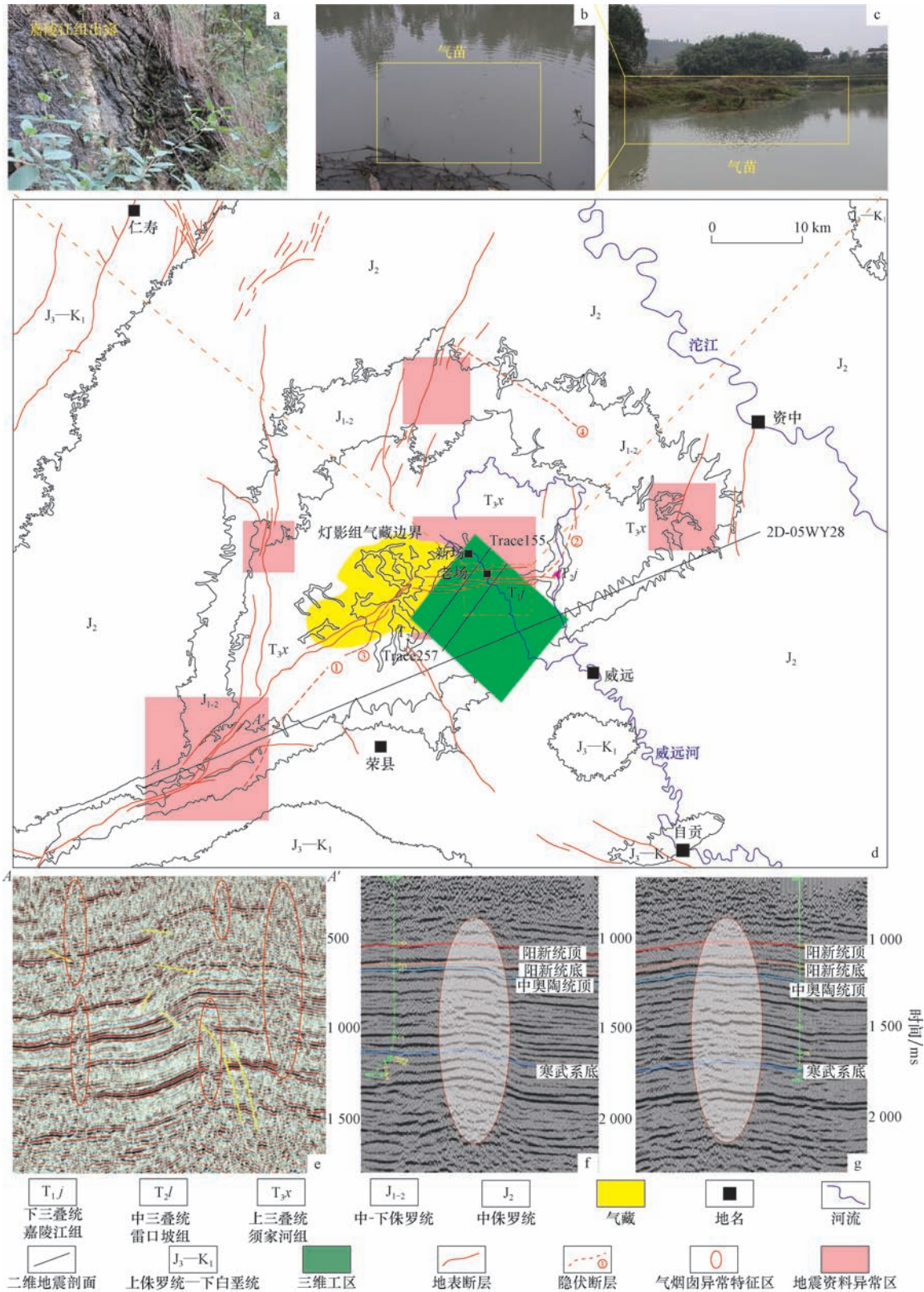


图6 威远构造地表地质特征与气烟囱气体逸散关系

Fig.6 Relationship between surface geological features and gas escape via gas chimney in the Weiyuan Structure

a. 威远构造核部三叠系嘉陵江组出露,见较强变形作用;b. 气苗区气体溢散作用强烈;c. 威远构造核部河流中,野外见大范围气苗;d. 地震资料异常以核部为中心向外分散;e. 为典型断裂控制型气烟囱特征;f. 表现为不同地层因气烟囱运移形成含气性差异,同相轴具有横向不连续特征;g. 表现为气体垂向运移,多套地层因气体充注导致层速度降低,同相轴具有下拉现象。

条。其中,对威远构造灯影组气藏影响最大断层为威远构造西南倾末端,称为威1号隐伏逆断层,该断裂断距大,断面倾向南东,延伸方向北东,长度为13 km,落差范围为30~170 m,向上断开上三叠统须家河组底部,向下断开灯影组顶部,消失于震旦系内部。其次为威2号逆断层,位于构造东南翼近轴部,断面倾向北西,断层延伸方向基本与构造轴线一致,延伸长度为11.5 km,落差范围为20~90 m,向上消失于奥陶系,向下消失于震旦系。

综合地震资料中异常特征表明:①地表出露三叠系区域,尤其在嘉陵江组与雷口坡组出露区域,存在大面积地震资料异常(图6);②异常特征分布区域以灯影组气藏为中心向边界外分散。灯影组气藏边界以外区域,地震资料异常多与断裂有关。

2.2 压力系数

压力系数直观反映了气藏现今的地质环境。威远地区作为现今四川盆地灯影组构造高点,灯影组天然气存在大范围、长距离运移至威远构造成藏,因此具有一个相对稳定的、压力系数近似为1的常压系统^[5]。威远地区各层位压力系数自下而上较相似,灯影组压力系数为1.05,寒武系九老洞组为1.049,

遇仙寺组为1.0,洗象池组为1.003,阳新统为1.02。压力系数分析表明,威远地区均为常压-弱低压环境,威远地区存在一个自下而上相互连通的压力系统,在气烟囱效应影响下灯影组天然气发生大规模垂向逸散。

对比溢出点海拔较低的高石梯-磨溪构造,分析其压力系数与高部位威远构造的差异(图7),反映天然气垂向输导情况。高石梯-磨溪构造深部震旦系灯影组压力系数介于1.06~1.14,其中灯二段压力系数平均为1.10,灯四段为1.106,自下寒武统沧浪铺组开始,至上部龙王庙组、洗象池组、二叠系阳新统均为超压,压力系数介于1.587~1.696,沧浪铺组最高可达1.9。灯影组上覆含气层的超压表明了垂向上较好的保存条件,不具有气烟囱形成条件。

2.3 地球化学同位素

收集分析威远构造地球化学同位素数据,资料显示威远构造震旦系气藏3口井 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值分别为4 440,7 332和9 255,平均值为7 009。威26井寒武系 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为7 681,略低于震旦系灯影组,至上覆二叠系气藏2口井 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值仍高达2 855,5 222,平均值为4 038(表1),与区内其他二叠系气藏截然不

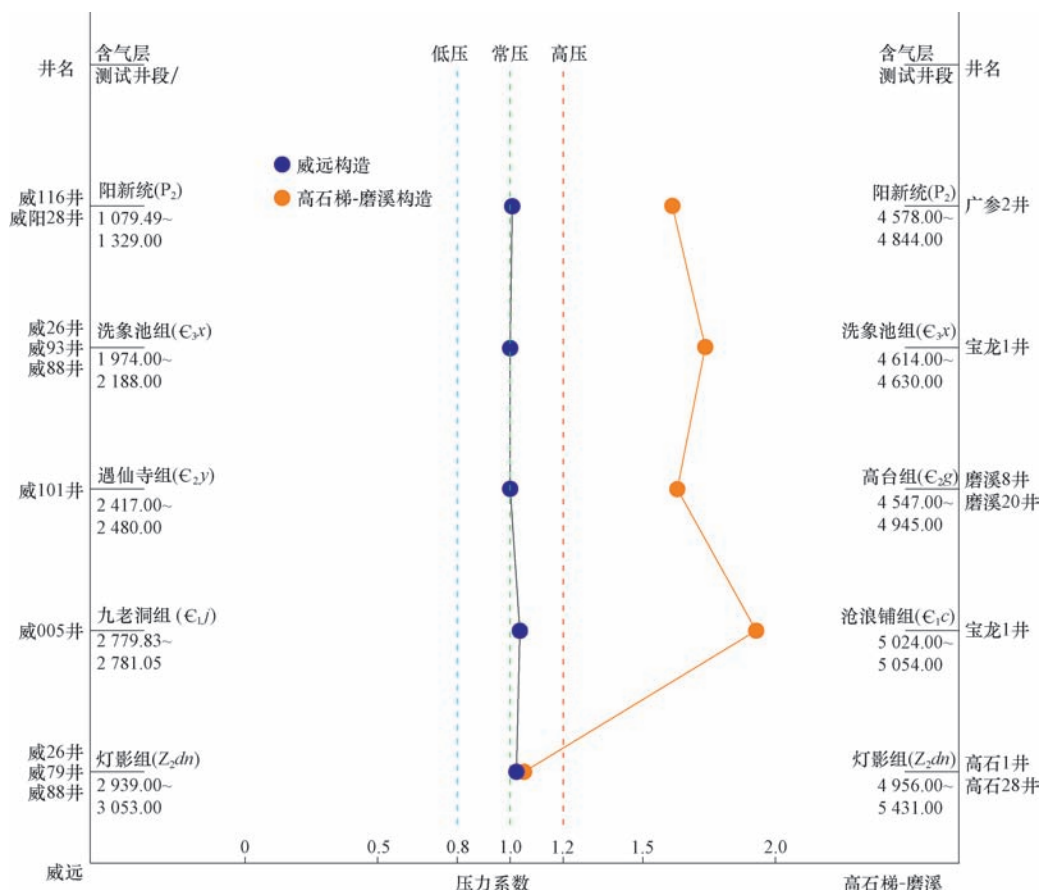


图7 威远-高磨地区压力系数剖面对比

Fig. 7 Comparison of pressure coefficient between Weiuan and Gao-Mo areas

表1 威远构造同位素地球化学统计
Table 1 Statistics of isotope geochemistry in
the Weiyuan Structure

井号	层位	取样井段/m	$\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$
威5	栖霞组	1 365.76	-33.6	2 855	3.03×10^{-8}
威7	栖霞组三段	1 079.49		5 222	
威26	寒武系		-32.2	7 681	1.8×10^{-8}
威23	灯影组			7 232	
威2	灯影组	2 836.5 ~ 3 005	-31.8	9 255	2.9×10^{-8}
威28	灯影组		-32.1		
威29	灯影组				2.8×10^{-8}

同^[20](分布区间340~1 622), $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值由下至上稳定。威远构造寒武系—二叠系气藏同位素地球化学特征表明灯影组天然气上窜明显,表明威远构造具有气烟囱发育特征。

对比高石梯—磨溪构造,其震旦系灯影组天然气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值较高,分布区间为1 132~9 559,平均为4 696;但至龙王庙组 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值衰减较快,与震旦系相比较低,仅为1 024~1 388,平均为1 229。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 平均值由灯影组 7.443×10^{-8} 急剧衰减为寒武系龙王庙组 2.781×10^{-8} ^[21]。同位素特征表明灯影组与龙王庙组为上、下两套不连通、相对独立的油气系统。

2.4 非烃气体组分

根据对威远气田震旦系气藏、寒武系遇仙寺组气藏和洗象池组气藏、二叠系阳新统气藏等多层系气藏非烃气成分对比,发现威远气田灯影组上覆气藏气体成分特征与震旦系灯影组气藏特征具相似性。

四川盆地灯影组气藏以有机成因油裂解气为主^[22-25],但具有高含二氧化碳(CO_2)、氮(N_2)、氦(He)、氩(Ar)等非烃气体(稀有气体)特征(图8)。据钻井数据:①威远构造垂向上各气藏 CO_2 组分含量较高。下组合除威寒101井外, CO_2 含量可达4.63%~8.39%,平均为5.16%。至二叠系栖霞组—茅口组,含量逐步由4.529%减为2%。②威远构造灯影组气藏 N_2 含量普遍为6%~8%,威117井最高可达15.46%,中寒武统遇仙寺组 N_2 含量介于5.690%(威寒6井)~7.364%(威寒1井),上寒武统洗象池组 N_2 含量为6%~7%,至威远构造最上部含气层二叠系茅口组 N_2 含量平均值仍可达3.2%。威远地区非烃气体 N_2 含量由深部灯影组至浅部二叠系含量逐渐降低,含气层系氮气含量远高于高石梯—磨溪构造相对应层位(分布区间为0.5%~1%)。③稀有气体 He 含量同样由震旦系灯影组至上部二叠系茅口组平缓减弱。其中,深部灯影组 He 含量普遍大于0.2%,威34井最高可达0.342%,遇仙寺组(C_{2Y}) He 含量为0.154%~0.217%,洗象池组(C_{2-3X}) He 含量为0.15%~0.19%,顶部二叠系茅口组

He 平均含量为0.14%,组分含量呈递减趋势变化。威远构造含气层系 He 含量远高于邻区高石梯—磨溪构造对应层位,其灯影组 He 平均含量为0.06%,龙王庙组(C_{2I})平均含量为0.02%。④威远构造各含气层稀有气体 Ar 含量均存在异常高值,由深至浅均为 10^{-2} 百分比量级,个别井寒武系高达 10^{-1} 百分比量级,均具备工业开采价值。 Ar 含量与 N_2 , He 由深到浅递减变化趋势相一致,顶部二叠系气藏 Ar 含量仍高达0.02%,远高于邻区多套含气层系(川中为0~0.05%,川东最高约为0.15%)。⑤区域内自流井、黄家场等构造二叠系气藏气体成分中含有丙烷、丁烷等重烃类,而威远气田阳新统气藏气体成分中无丙烷、丁烷等重烃类,其近似于震旦系灯影组天然气成分特征^[26]。

单就非烃气组分变化规律而言,单一的气组分变化规律是具有偶然性的,但若多种气组分变化均具有这种规律,应表现为必然性。灯影组作为充满度25%的气藏,而上覆地层产微气,因此原理可概括为由于形成气烟囱,灯影组上覆气藏为下部气藏向上输导后继续小规模成藏,随着运移势能不断降低,只有一部分气体能继续发生垂向调整。依次类推,垂向上表现为不断的混合交换、再运移过程。因此,威远构造存在气烟囱效应,作为气藏散失的主要标志,非烃气体组分百分比在垂向上应当具有依次减小的这一规律,也应为气烟囱效应的具体表现。根据非烃气体与稀有气体含量递减的变化趋势,分析认为其与压力系数、同位素地球化学一道为典型的气烟囱效应特征,反映出威远构造灯影组天然气存在明显上窜现象,为威远构造存在气烟囱的证据补充。

3 威远构造气烟囱形成机理和地质意义

威远构造气组分特征、压力系数、同位素地球化学等气烟囱效应的证实,为灯影组天然气的垂向逸散提供了最充分的证据。喜马拉雅期强烈的挤压运动致使威远地区隆升剥蚀幅度大,威远地区抬升形成现今构造。大幅度的隆升剥蚀造成四川盆地区域盖层嘉陵江组与雷口坡组膏岩遭到剥蚀,威远构造封盖强度较大幅度降低,伴随的是沉积盖层无法对灯影组气藏起到封闭作用。威远构造灯影组气藏缓慢泄漏,发育封闭失效型管状气烟囱。隆升剥蚀同时,地质作用改造过程中,开始形成自基底至二叠系,部分直通浅层甚至地表的数条大规模断裂,断裂与裂缝加速连通了最初因区域盖层缺失而垂向上缓慢运移的天然气,使威远构造上下各气藏与地表形成具有均一压力系数的完整的成藏体系。因此,威远构造封闭失效型与断裂—裂缝型气烟囱为伴生发育(图9)。

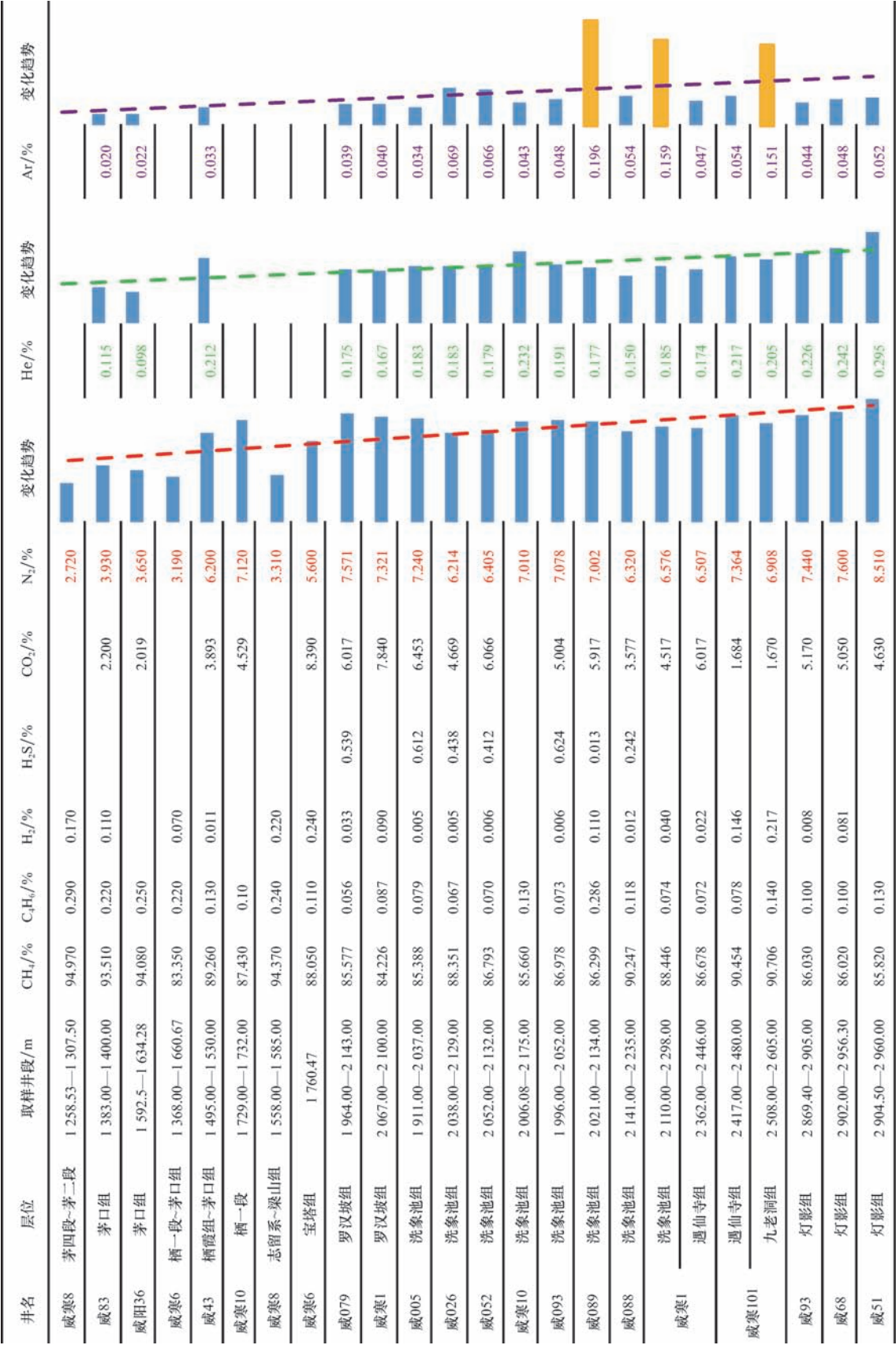


图8 威远构造主要非烃气体垂向含量变化趋势
Fig.8 Vertical trend of the main non-hydrocarbon gas contents in the Weiyuan Structure

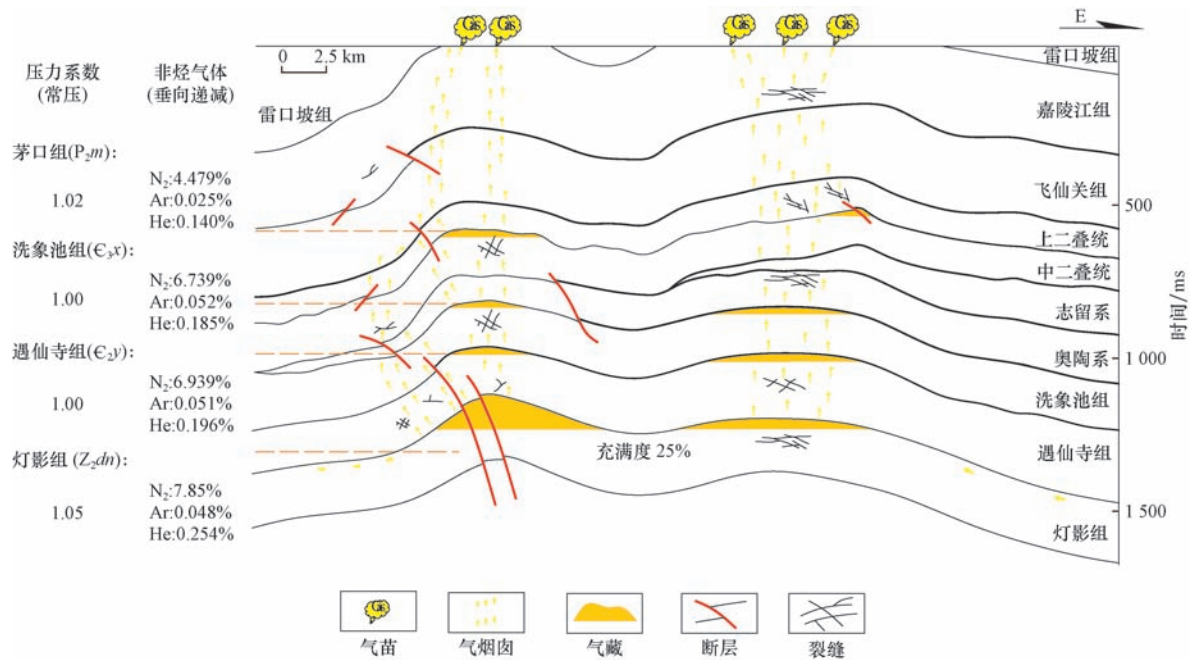


图9 威远构造气烟囱模式

Fig.9 Model of gas chimney in the Weiyuan Structure

两类气烟囱致使整个区域内灯影组气藏压力系数、流体特征和储气规模等大幅度动态调整,并在威远构造核部大规模逸散,形成地表气苗。然而由于威远构造处在四川盆地灯影组气藏差异聚集的最高部位,且为巨型穹窿背斜,具有较大的闭合面积与高度,使得区域内灯影组天然气沿桐湾期不整合面源源不断运移至威远构造成藏,这也是威远构造虽然垂向保存条件较差,但仍然具有25%充满度的最重要原因。

4 结论

1) 陆地气烟囱与海洋气烟囱地震反射特征具有差异性。陆地气烟囱的识别应基于区域地质特征,综合分析各种成藏特征,寻找气烟囱效应规律,为气烟囱识别提供更多证据。

2) 强烈的隆升剥蚀造成三叠系嘉陵江组和雷口坡组区域盖层缺失,形成封闭实效型气烟囱,并与构造挤压变形形成断裂-裂缝型气烟囱伴生发育,为威远构造气烟囱的主要模式。

3) 区域构造高部位、充足的气源是威远构造气烟囱形成的前提。威远构造处于四川盆地灯影组成藏系统的高部位,侧向上充足的气源可由桐湾期不整合面,沿龙女寺—磨溪—高石梯—威远一线源源不断运移到威远构造,以气烟囱形式逸散。

参 考 文 献

[1] 钟勇,李亚林,张晓斌,等. 四川盆地组合张性构造特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,05:498-510.

Zhong Yong, Li Yalin, Zhang Xiaobin, et al. Features of extensional structure in pre-Sinian to Cambrian strata, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 05: 498-510.

[2] 包茨,杨先杰,李登湘. 四川盆地地质构造特征及天然气远景预测[J]. 天然气工业,1985,5(4):1-11.

Bao Ci, Yang Xianjie, Li Dengxiang. Characteristic of geological structure and predication of gas prospect of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1985, 5(4): 1-11.

[3] 甘昭国,梁恩宇. 四川盆地褶皱形成时间及其对油气聚集的控制[J]. 天然气工业,1988,8(4):1-6.

Gan Zhaoguo, Liang Enyu. Formation time of the folds in Sichuan Basin and its control on oil and gas accumulations[J]. Natural Gas Industry, 1988, 8(4): 1-6.

[4] 刘顺. 四川盆地威远背斜的形成时代及形成机制[J]. 成都理工学院学报,2001,28(4):340-343.

Liu Shun. Formation time and formation mechanism of the Weiyuan anticline in Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(4): 340-343.

[5] 刘树根,孙玮,赵异华,等. 四川盆地震旦系灯影组天然气的差异聚集分布及其主控因素[J]. 天然气工业,2015,01:10-23.

Liu Shugen, Sun Wei, Zhao Yihua, et al. Differential accumulation and distribution of natural gas and their main controlling factors in the Upper Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 10-23.

[6] Cartwright J A, Huuse M, Aplin A. Seal bypass systems[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(8): 1141-1166.

[7] 张为民,李继亮,钟嘉猷,等. 气烟囱的形成机理及其与油气的关系探讨[J]. 地质科学,2000,04:449-455.

Zhang Weimin, Li Jiliang, Zhong Jiayou, et al. A study on formation mechanism of gas-chimney and relationship with petroleum[J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 04: 449-455.

[8] 何家雄,黄火尧,陈龙操. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与油气运

- 聚机制[J]. 沉积学报, 1994, (3): 120-129.
- He Jiaxiong, Huang Huoyao, Chen Longcao. The formation and evolution of mud diapir and its relationship with hydrocarbon accumulation mechanism in Yinggehai Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 03: 120-129.
- [9] 何家雄, 陈伟煌, 钟启祥. 莺歌海盆地泥底辟特征及天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 1994, 06: 6-9, 113.
- He Jiaxiong, Chen Weihuang, Zhong Qixiang. Mud diapir characteristic and natural gas prospects in Yinggehai Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 06: 6-9, 113.
- [10] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 莺歌海盆地油气渗漏系统及油气勘探前景[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 01: 1-10+189.
- He Jiaxiong, Zhu Youhai, Weng Rongnan, et al. Oil and gas leakage system and the prospects for oil and gas exploration, Yinggehai Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 01: 1-10, 189.
- [11] Sun Y B, Wu S G, Dong D D, et al. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea [J]. Marine Geology, 2012: 311-314, 32-40.
- [12] Loseth H, Gading M, Wensaas L. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 1304-1319.
- [13] Nourollah H, Keetley J. Gas chimney identification through seismic attribute analysis in Australia [J]. The Leading Edge, 2010, 29(6): 896-901.
- [14] Hustoft S, Bunz S, Mienert J. Three-dimensional seismic analysis of the morphology and spatial distribution of chimneys beneath the Nyegga pockmark field, offshore mid-Norway [J]. Basin Research, 2010, 22: 465-480.
- [15] Heggland R. Detection of gas migration from a deep source by the use of exploration 3D seismic data [J]. Marine Geology, 1997, 137: 41-47.
- [16] Hansen J P V, Cartwright J A, Huusew M, et al. 3D seismic expression of fluid migration and mud remobilization on the Gjallar Ridge, offshore mid-Norway [J]. Basin Research, 2005, 17: 123-139.
- [17] 梁全胜, 刘震, 常迈, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系气藏形成与“烟囱效应”[J]. 新疆石油地质, 2006, 02: 156-159.
- Liang Quansheng, Liu Zhen, Chang Mai, et al. Gas chimney effect and formation of Quaternary gas pool in Sanhu area, Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 02: 156-159.
- [18] 杨瑞召, 李洋, 庞海玲, 等. 倾角导向体控制的气烟囱识别技术及其在海拉尔盆地贝尔凹陷中的应用[J]. 现代地质, 2013, 01: 223-230.
- Yang Ruizhao, Li Yang, Pang Hailing, et al. 3D seismic chimney detection technology based on dip steering and its application on Buir Sag of Hailar Basin [J]. Geoscience, 2013, 01: 223-230.
- [19] 杨涛涛, 吕福亮, 王彬, 等. 琼东南盆地南部深水区气烟囱地球物理特征及成因分析[J]. 地球物理学进展, 2013, (5): 2634-2641.
- Yang Taotao, Lv Fuliang, Wang Bin, et al. Geophysical characteristics and genetic mechanism of the gas chimney in deep water area of southern Qiongdongnan Basin [J]. Progress in Geophysics 2013, 05: 2634-2641.
- [20] 徐永昌, 王先彬, 吴仁铭, 等. 天然气中稀有气体同位素[J]. 地球化学, 1979, 04: 271-282.
- Xu Yongchang, Wang Xianbin, Wu Renming, et al. Rare gas isotopic composition of natural gases [J]. Geochimica, 1979, 04: 271-282.
- [21] 魏国齐, 王东良, 王晓波, 等. 四川盆地高石梯—磨溪大气田稀有气体特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 05: 533-538.
- Wei Guoqi, Wang Dongliang, Wang Xiaobo, et al. Characteristics of noble gases in the large Gaoshiti-Moxi gas field in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 05: 533-538.
- [22] 戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. 石油实验地质, 2003, 05: 473-480.
- Dai Jinxing. Pool-forming period sand gas sources of Weiyuan gas field [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2003, 25(05): 473-480.
- [23] 孙玮, 刘树根, 马永生, 等. 四川盆地威远—资阳地区震旦系油裂解气判定及成藏过程定量模拟[J]. 地质学报, 2007, 08: 1153-1159.
- Sun Wei, Liu Shugen, Ma Yongsheng, et al. Determination and quantitative simulation of gas pool formation process of Sinian cracked gas in Weiyuan-Ziyang area, Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1153-1159.
- [24] 刘树根, 马永生, 孙玮, 等. 四川盆地威远气田和资阳含气区震旦系油气成藏差异性研究[J]. 地质学报, 2008, 03: 328-337.
- Liu Shugen, Ma Yongsheng, Sun Wei, et al. Studying on the differences of Sinian natural gas pools between Weiyuan Gas Field and Ziyang gas-bronearea, Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 328-337.
- [25] 孙玮, 刘树根, 王国芝, 等. 四川威远震旦系与下古生界天然气成藏特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 05: 481-489.
- Sun Wei, Liu Shugen, Wang Guozhi, et al. Characteristics of gas formatted from Sinian to Lower-Paleozoic Weiyuan area of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2010, 37(5): 481-489.
- [26] 赵景续. 一个岩溶型气藏—威远气田阳新统气藏分析[J]. 中国岩溶, 1988, S2: 203-209.
- Zhao Jingxu. A karst gas reservoir-analysis of Yangxin gas reservoir in the Weiyuan Gas Field [J]. Carsologica Sinica, 1988, S2: 203-209.

(编辑 张玉银)