

doi:10.3799/dqkx.2017.009

东海陆架盆地西湖凹陷超压成因机制

段谟东¹, 叶加仁^{2*}, 吴景富³, 单超⁴, 雷闯⁵

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 中海油研究总院, 北京 100027
4. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
5. 中国石油冀东油田公司, 河北唐山 063004

摘要: 西湖凹陷超压普遍发育, 成因机制复杂, 目前研究未见深入。从产生超压的主要因素入手, 采用定性分析与定量计算相结合的方法, 基于超压层段的测井响应特征、速度与垂直有效应力、沉积速率与孔隙度演化史、压力演化史与生烃强度史耦合的初步判断, 再通过定量的计算综合分析了西湖凹陷超压的成因机制。研究表明: 不平衡压实作用和生烃作用是西湖凹陷超压形成的主要机制, 但在不同的区带有一定的差异。其中保俶斜坡带以不平衡压实作用为主, 经过估算生烃作用贡献率为23%~57%, 平均达到41%; 而在中央背斜带超压形成机制有两种模式, 大部分是以生烃作用为主的增压模式, 贡献率为51%~78%; 个别井位研究显示以不平衡压实作用为主的增压模式。在三潭深凹超压的形成中, 不平衡压实作用与生烃作用相当, 生烃作用增压稍强于不平衡压实作用增压, 生烃作用的平均贡献率为60%左右。

关键词: 成因机制; 超压; 西湖凹陷; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)01-0119-11

收稿日期: 2016-06-06

Overpressure Formation Mechanism in Xihu Depression of the East China Sea Shelf Basin

Duan Modong¹, Ye Jiaren^{2*}, Wu Jingfu³, Shan Chao⁴, Lei Chuang⁵

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Research Institute of CNOOC, Beijing 100027, China
4. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
5. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063004, China

Abstract: Overpressure is widely developed in Xihu depression, which has complicated formation mechanism. However, there is no in-depth study on this topic at present. In this paper, starting from the main factors that produce overpressure, we use both the micro analysis and macro evidence to comprehensively analyze the mudstone overpressure formation mechanism in the Xihu depression of the East China sea shelf basin, based on the logging response characteristics of overpressure formation, as well as the relationship between speed and vertical effective stress, the relationship between the evolution history of deposition and porosity, the coupling of pressure evolution history and that of hydrocarbon-generated rate. It is concluded that overpressure formation in Baochu slope belt is mainly attributed to under-compaction, and its hydrocarbon generation contribution rate is estimated at 23%–57% with an average of 41%. In the central anticlinal belt, overpressure formation mainly has the following two models: one is the model of hydrocarbon generation with a contribution rate of 51%–78%, and the other is the model of under-compaction interaction. Both the hydrocarbon generation and under-compaction have played an important role in

基金项目: 国家“十二五”重大油气专项(No. 2011ZX05023-004-010).

作者简介: 段谟东(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事油气成藏压力预测、岩土工程的研究工作。ORCID: 0000-0002-8575-1318. E-mail: 376830199@qq.com

* **通讯作者:** 叶加仁, ORCID: 0000-0001-5699-8074. E-mail: jrye@cug.edu.cn

引用格式: 段谟东, 叶加仁, 吴景富, 等, 2017. 东海陆架盆地西湖凹陷超压成因机制. 地球科学, 42(1): 119–129.

the overpressure formation in Santan sag and the average contribution rate of hydrocarbon generation is about 60%.

Key words: formation mechanism; mudstone overpressure; Xihu depression; petroleum geology.

异常高孔隙流体压力(超压)是含油气盆地中普遍存在的现象,并与油气藏形成与分布关系密切(郝芳等,2002;何生等,2012). 现有油气勘探及地质研究成果表明,西湖凹陷深层超压发育,目前对凹陷超压的研究主要集中在超压局部的分布、成因及形成条件(张银国,2010;杨彩虹等,2013;刘金水,2015),超压层段的地质、地球物理及地球化学特征(叶加仁等,2005;张先平等,2007;张远兴等,2009;苏奥和陈洪汉,2015),超压与油气分布和油气成藏的关系等方面(叶加仁等,1999;张先平等,2008),但对整个凹陷超压分布及其成因机制的研究较薄弱. 本文从产生超压的主要因素入手,依据超压层段的测井响应特征、速

度与垂直有效应力、沉积速率与孔隙度演化史、压力演化史与生烃强度史耦合进行初步判断,再通过定量计算综合分析西湖凹陷超压的成因机制.

1 区域地质背景

西湖凹陷位于上海市以东的东海大陆架海域,西邻海礁凸起和渔山凸起,东以钓鱼岛隆褶带为界,总体呈 NNE 向展布,长约 440 km,宽约 130 km,面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$. 凹陷从西往东由保俶斜坡带、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹和天屏断裂带 5 个二级构造单元组成(图 1),是东海陆架盆地油气勘

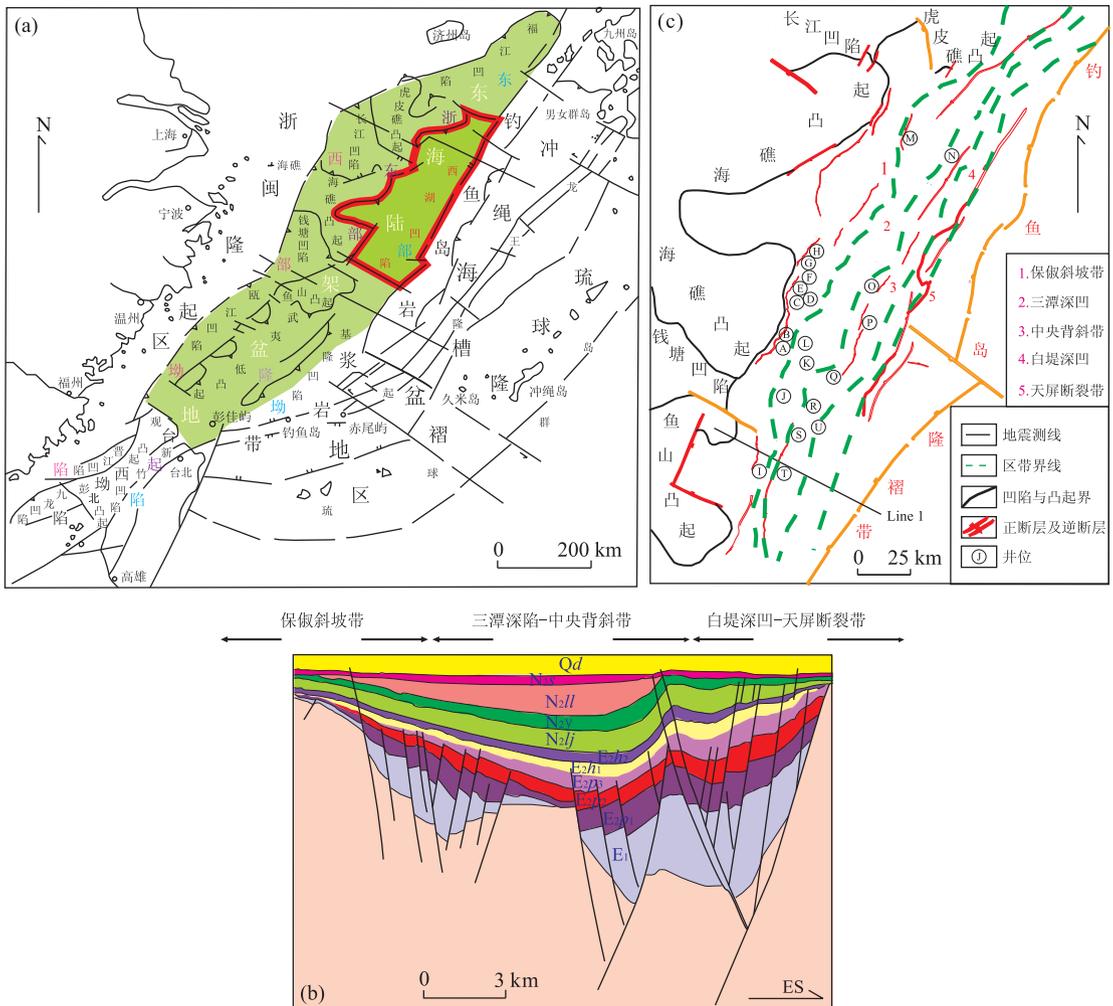


图 1 西湖凹陷位置及构造单元划分

Fig. 1 The division of tectonic units in Xihu depression

a. 东海陆架盆地; b. 西湖横剖面; c. 本文工区图

探的最重要场所。

西湖凹陷是一个以新生代沉积为主的东断西超断陷盆地,新生代地层层序自下而上为古新统(E_1),中下始新统宝石组(E_2b)、中上始新统平湖组(E_2p),渐新统花港组(E_3h),中新统龙井组(N_1l)、玉泉组(N_1y)和柳浪组(N_1ll),上新统三潭组(N_2s)及第四系东海群(Qd),最大沉积厚度达 15 km(张国华,2013)。古新统外,其余地层均已被钻井揭示,其中始新统平湖组和渐新统花港组是主要的烃源岩系,存在泥岩和煤(Su *et al.*, 2013)。

2 超压成因机制分析

对沉积盆地超压的形成机制,国内外油气地质学家作了大量的研究工作,提出了多种不同的认识,但总体上可归结为 4 类(张凤奇等,2013):不平衡压实、流体膨胀、超压传递和侧向构造应力。其中流体膨胀主要有生烃作用、石油裂解成气、水热增压、黏土矿物脱水等,对于含油气盆地而言,生烃作用是产生流体膨胀最主要的机制。

珠江口盆地(郑丹等,2010;吴娟等,2013)、琼东南盆地(祝建军等,2011;苏龙等,2012)、渤海湾盆地(邓津辉等,2009;郭小文等,2011;王冰洁等,2012;

李小强和赵彦超,2012;陈美玲等,2014;杨宝林等,2014)的超压成因研究成果表明,不平衡压实作用和生烃作用是中国近海断陷盆地超压形成最主要的机制。侧向构造应力(Luo *et al.*, 2007)引起的流体增压一般发育在挤压型盆地中,而西湖凹陷为中国近海断陷盆地,因此由侧向构造应力引起的增压作用微乎其微;目前钻井揭示西湖凹陷深部整体处于弱-中超压,个别区域达到强超压。目前,人们在西湖凹陷尚未有足够的证据证明超压传递是引起西湖凹陷大规模超压的主要原因。基于此研究现状,笔者认为构造应力与超压传递作用对西湖凹陷超压的贡献很小。同时结合前人对西湖凹陷超压研究的相关认识(张远兴等,2009;张建培,2012;张国华和张建培,2015),本文在对西湖凹陷超压成因机制分析时主要考虑不平衡压实作用和生烃作用。

2.1 测井参数响应特征

虽然不平衡压实成因和烃类生成成因的超压带均表现为“高声波时差,低视电阻率”的测井响应特征,但二者在泥岩密度测井曲线的响应特征存在差异(张凤奇等,2013):在不平衡压实型超压带中,泥岩密度曲线反向偏离其正常趋势线,出现异常低值区;而在生烃型超压带中,泥岩密度曲线则顺着正常趋势线方向缓慢增大并接近极值(图2)。当然,在实

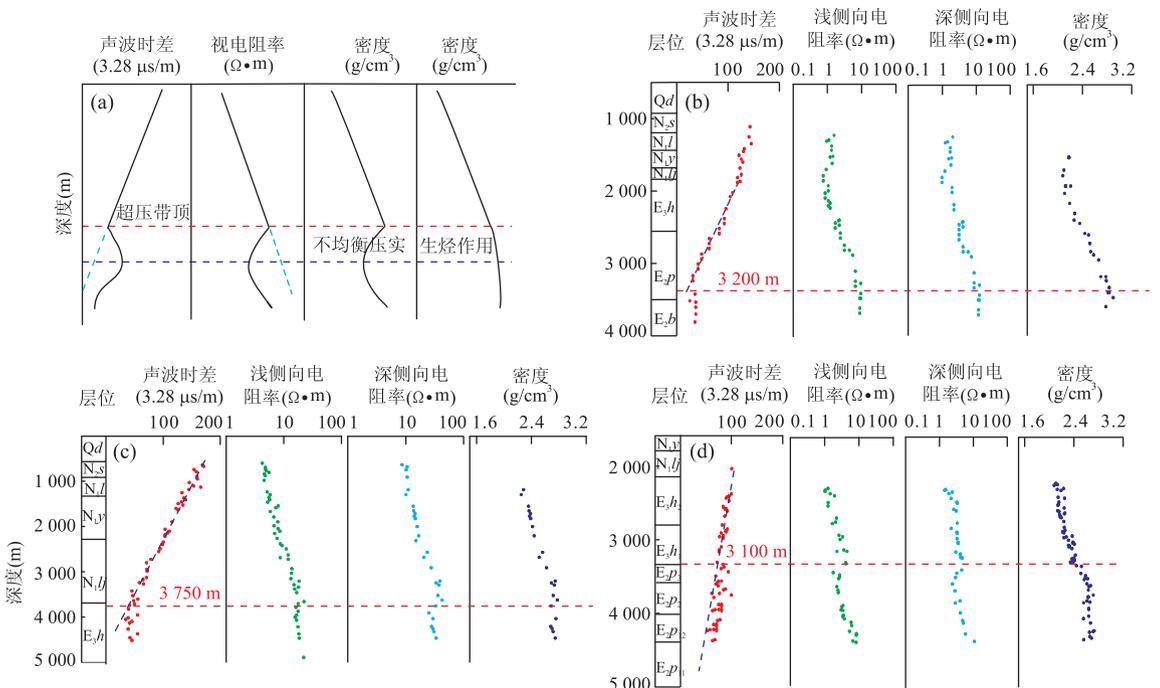


图 2 西湖凹陷代表性单井泥岩电性与超压分布

Fig. 2 The mudstone electrical and overpressure distribution of representative well in Xihu depression

a. 超压成因机制识别模式; b. 保俶斜坡带 T 井; c. 三潭深凹 W 井; d. 中央斜背带 J 井

表 1 西湖凹陷钻井泥岩超压成因分析统计

Table 1 Statistics of the drilling mudstone overpressure formation in Xihu depression

构造单元	井号	超压带顶(m)	层位	推测成因
保俶斜坡带	I井	3 200	平上段	不均衡压实+生烃作用
	G井	3 000	花上段	不均衡压实+生烃作用
	A井	3 300	平上段	不均衡压实+生烃作用
	D井	3 800	平中段	不均衡压实
三潭深凹	M井	3 750	花下段	不均衡压实+生烃作用
	T井	3 450	平上段	生烃作用
	S井	3 100	花下段	生烃作用
中央背斜带	R井	3 100	平下段	不均衡压实+生烃作用
	P井	2 850	花下段	生烃作用+不均衡压实
	Q井	3 100	花下段	不均衡压实+生烃作用
	N井	2 950	花下段	不均衡压实+生烃作用

实际地质条件下,超压常常是上述二者共同作用的结果,因此其在孔隙度和密度分布上表现为混合特征.

基于上述原理,本次研究对西湖凹陷主要构造单元代表性钻井的泥岩超压成因进行了定性识别(图 2,表 1).分析表明,保俶斜坡带泥岩超压成因以不均衡压实为主,烃类生成也占一定的比重;中央背斜带泥岩超压形成主要源于烃类生成,不均衡压实成因为辅;烃类生成和不均衡压实在三潭深凹泥岩异常压力的形成中均起了较重要的作用.

2.2 速度与垂直有效应力耦合

地层在经过一定程度压实后,其孔隙度将不会再发生变化,此时的有效应力称为原始有效应力.如果后续在某些因素的影响下流体温度增高,则孔隙会对流体膨胀起限制作用,并导致流体压力升高,同时降低岩石骨架的有效应力(陈美玲等,2014).

在超压成因分析中,有效应力特征(Tingay *et al.*, 1997;Burrs,1998;Hermanrud *et al.*, 1998)常常被用来判别盆地中超压的主要成因机制.前人经过大量的理论分析和实验研究,分别建立了不均衡压实和流体膨胀状态下垂直有效应力与声波速度的关系式,对应的曲线分别为原始加载曲线和卸荷曲线(刘金水,2015).垂直有效应力可以由垂直有效应力与声波速度之间的原始加载及卸荷曲线方程直接计算,而地层孔隙压力则可以由上覆岩层压力和垂直有效应力来确定(Bowers,1995).

在实际操作过程中,研究人员可以利用正常压力点的速度及垂直有效应力作出加载曲线,然后把超压点的数据投在速度—有效应力交会图中(图 3),不均衡压实成因的点一般在加载曲线的下部分(较低的声波速度和垂直有效应力),流体膨胀形成的超压点一般在卸荷曲线周围,并可以据此判断是

否存在流体膨胀超压.

对垂直有效应力与声波速度变换关系进行的研究表明,保俶斜坡带钻井中大部分超压点在加载曲线周围,个别井的超压点在压力系数较高时,明显偏离加载曲线,表明不均衡压实作用是保俶斜坡带超压形成的主要机制;而在中央背斜带,大部分实测压力皆为正常压力,笔者将仅有的 3 口钻井超压点投在交会图上发现投影点均在加载曲线周围,表明该单元的超压以流体膨胀作用(生烃作用)为主要成因机制;三潭深凹中的超压投影点在加载曲线和偏离加载曲线均有一定分布,表明不均衡压实和流体膨胀(生烃作用)均起到一定作用.

2.3 沉积速率史与孔隙度演化史耦合

沉积物的快速沉积是形成不均衡压实的前提条件.西湖凹陷花港组、平湖组的现今地层最大厚度分别约为 1 900 m 和 3 600 m,由于受到构造抬升作用地层被剥蚀,花港组实际沉积厚度估计在 3 000 m 以上,平湖组实际厚度在 5 500 m 以上(叶加仁等,1999).

笔者基于机械压实与生烃作用增压机制模型,运用 BasinMod-1D 盆地模拟软件对不同构造单元代表性钻井的沉积速率史和花港组与平湖组的孔隙度演化史进行模拟恢复.

结果表明,保俶斜坡带在新生代平均沉积速率大于 100 m/Ma(图 4a₁ 和 4a₂),其中,花港组沉积时期(25.0~35.5 Ma)的平均沉积速率在 100 m/Ma 以上,最高可达 300 m/Ma,平湖组沉积时期(40.5~35.5 Ma)的平均沉积速率在 200 m/Ma 以上;中央背斜带和三潭深凹在新生代平均沉积速率大于 150 m/Ma(图 4b₁, 4b₂, 4c₁, 4c₂),花港组沉积时期(25.0~35.5 Ma)的平均沉积速率在 200 m/Ma 以

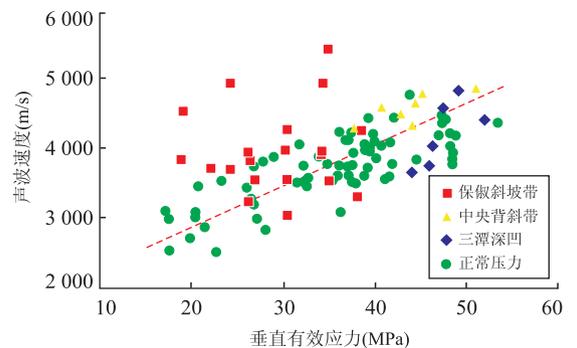


图 3 垂直有效应力与声波速度交会

Fig. 3 Profiles of the vertical effective stress versus sonic velocity

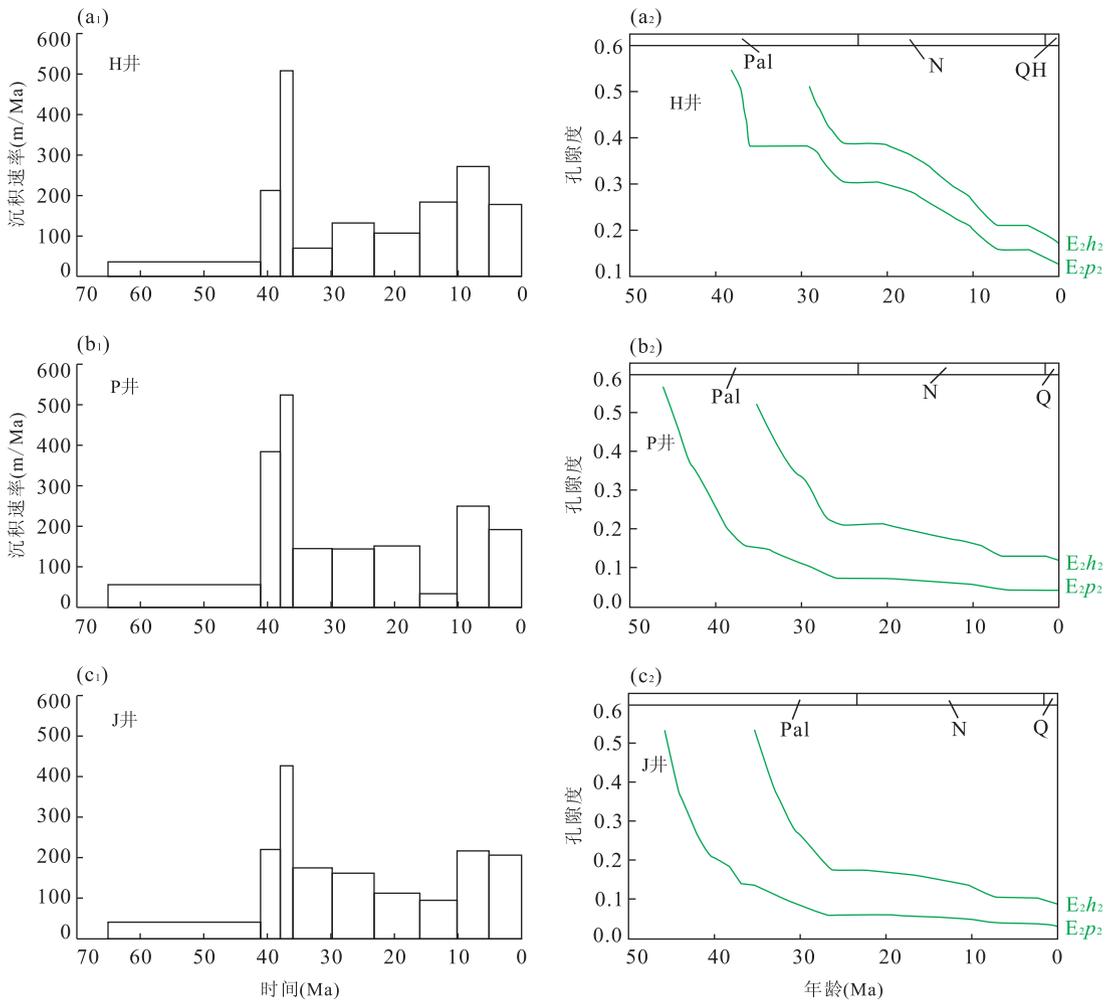


图 4 保俶斜坡带、中央背斜带代表性单井和三潭深凹 J 井的沉积速率史 (a₁、b₁ 和 c₁) 及其与花港组、平湖组孔隙度演化史 (a₂、b₂ 和 c₂)

Fig. 4 The history of deposition rate (a₁, b₁ and c₁) and porosity evolution history (a₂, b₂ and c₂) of Huagang and Pinghu Formation in Baochu slope belt, Central anticlinal belt and Santan sag

a₁ 和 a₂. 保俶斜坡带 H 井; b₁ 和 b₂. 中央背斜带 P 井; c₁ 和 c₂. 三潭深凹 J 井

上,最高可达 400 m/Ma, 平湖组沉积时期 40.5~35.5 Ma 的平均沉积速率在 300 m/Ma 以上. 显然,花港组和平湖组沉积时期高的沉积速率十分有利于形成不均衡压实作用和发育超压. 整个凹陷的地层孔隙度演化曲线均表现为两段式,其中第一段表现为急剧降低,对应的时间为 44~25 Ma,即平湖组 and 花港组沉积时期.

2.4 压力演化史与生烃强度演化史耦合

在单井压力模拟的基础上,笔者根据地震分层数据和地层岩性组合数据等建立地质模型,以机械压实作用与烃源岩生排烃作用耦合增压模型,应用 BasinMod-2D 软件系统进行二维剖面压力演化史模拟重建.

以 NW-SE 向展布的 Line1 测线为例,其压力

演化历史主要表现为(图 5):随着沉积物的不断充填,地层埋深的逐渐增加,剩余地层压力也随之增大(图 5a),在始新统平湖组沉积后期(37.0 Ma),剖面最大剩余压力接近 45 MPa,主要分布在凹陷深部古新统之中(图 5b),称为下部超压系统,同时在始新统平湖组中下部发育一最大剩余压力强度约 25 MPa 且较连续展布的超压带,称为上部超压系统;随着上覆渐新统花港组的沉积、埋藏,古新统和始新统平湖组中下部的异常压力逐渐积累,至花港组沉积末期(约 23.3 Ma),其上部超压系统最大剩余压力增加到 25 MPa 左右(图 5c),在花港运动期间剖面异常压力得以释放,但释放强度相对较低(图 5d);之后,虽然随着上覆中新统不断沉积、埋藏及烃源岩的成熟与生烃作用,到中新统沉积末期,剖面最

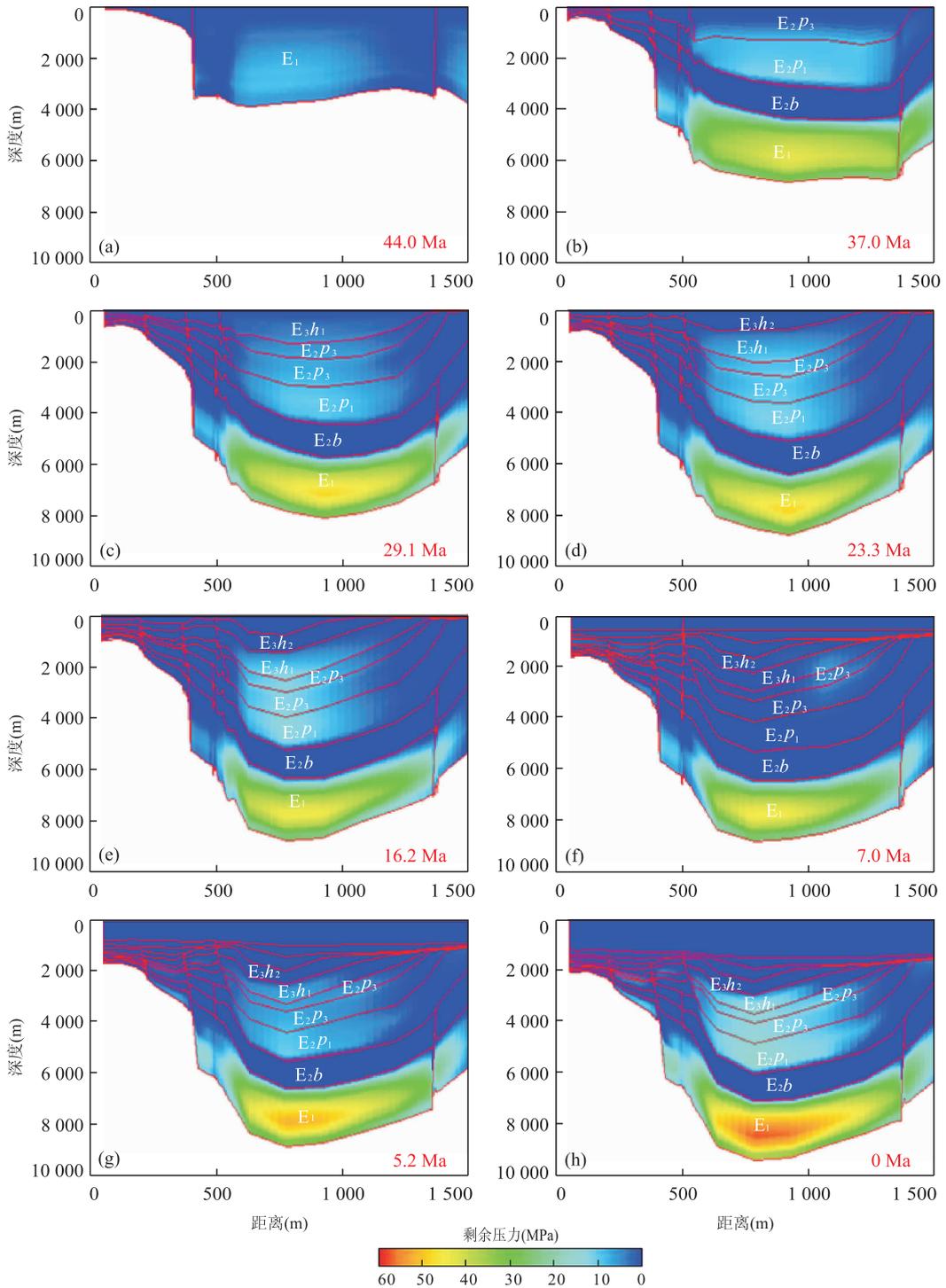


图 5 西湖凹陷 Line 1 测线二维压力演化史

Fig. 5 Profiles of the history of 2D excess pressure evolution at Line 1 in Xihu depression

a, 44.0 Ma; b, 37.0 Ma; c, 29.1 Ma; d, 23.3 Ma; e, 16.2 Ma; f, 7.0 Ma; g, 5.2 Ma; h, 现今

大剩余压力增大至 50 MPa, 主要分布在古新统深凹内(图 5e), 上部超压带(系统)则主要发育于始新统平湖组内, 其剩余压力约为 30 MPa; 龙井运动期间(7.0 Ma), 深部超压发生了调整、释放, 最大剩余压力约为 35 MPa, 上部超压部分基本释放(图 5f); 此

后接受上覆上新统三潭组和第四系东海群的沉积、埋藏, 上下超压系统又重新开始累计(图 5g), 随着后续沉积物充填, 地层埋深增加, 剩余地层压力也随之增大至现今(图 5h).

基于此压力演化背景, 笔者分析现今超压的主

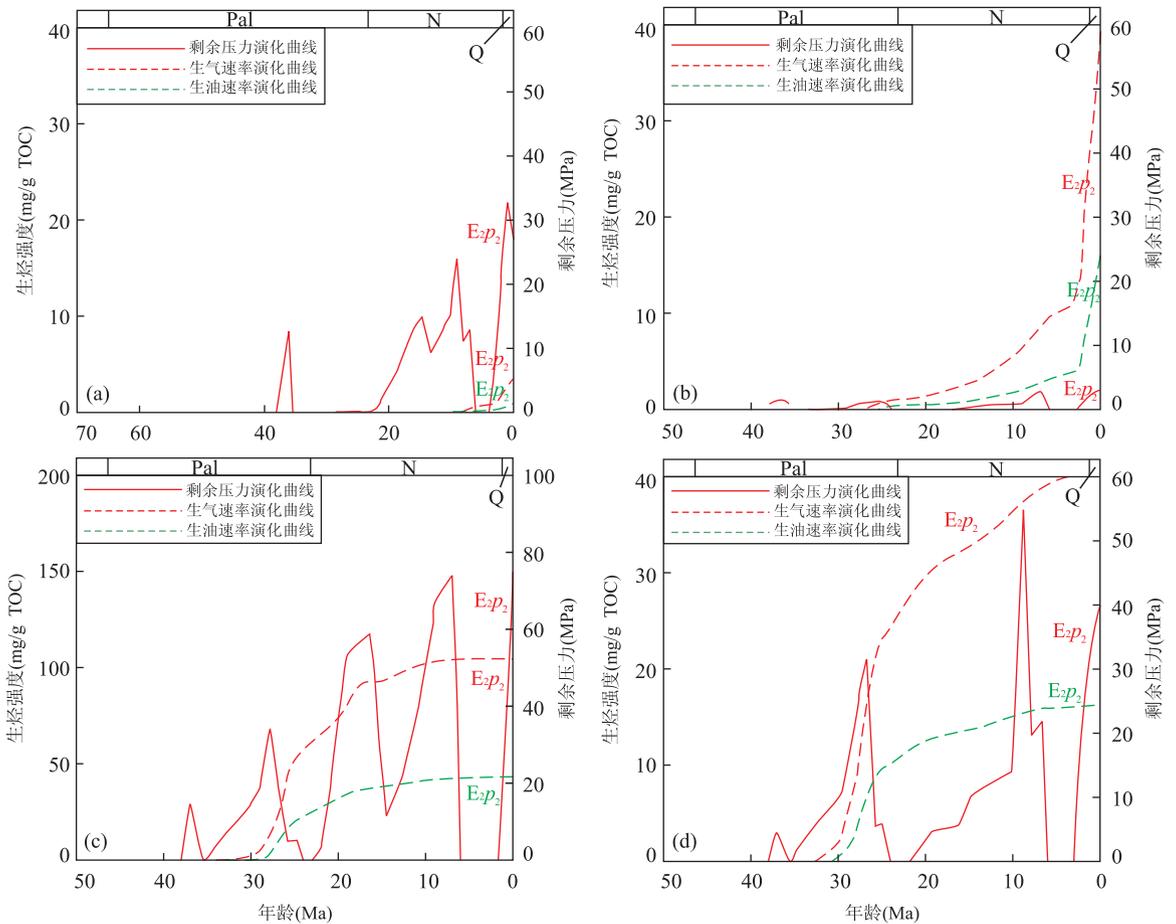


图 6 B 井(a)、T 井(b)、O 井(c)和 J 井(d)的剩余压力演化史与生烃强度关系

Fig. 6 The relationship between the evolution history of excess pressure and hydrocarbon generation rate on B well (a), T well (b), O well (c) and J well (d)

要形成机制, 主要根据超压释放完(约 7 Ma)后重新开始累计至现今的超压的时间与生烃期的耦合以及超压幅度与生烃量的耦合来确定。

平湖组作为西湖凹陷主力烃源岩, 此处笔者选取平湖组中段通过 BasinMod-1D 软件, 基于机械压实作用与烃源岩生排烃作用耦合增压模型, 模拟平湖组中段剩余压力演化史与生烃强度史关系, 并按区带逐个进行分析。

(1) 保俶斜坡带. 如图 6a 所示, 保俶斜坡带有三期增压和两期泄压过程. 模拟结果表明平湖组烃源岩在约 8 Ma 时才排烃, 因此在此之前的增压过程基本上全是以不均衡压实作用为主, 直到最后一期增压才伴有生烃作用的参与. 在约 6 Ma 时, 平湖组压力第 2 次释放完毕, 在约 5 Ma 时, 超压重新开始累计直到现今压力状态. 生烃曲线显示出在 5 Ma 以后一直有烃生成, 但是生烃强度很小, 最高才达到 4 mg/g TOC, 因此最后增压过程中生烃量有限. 换句话说生烃作用对现今超压的贡献度较小. 综合所

述, 保俶斜坡带现今超压主要成因机制是不均衡压实作用, 而生烃作用只占很小的比重。

(2) 中央背斜带. 中央背斜带压力演化过程与保俶斜坡带相似, 具有三期增压和两期泄压过程. 但在南部与北部超压幅度差别很大, 而且生烃强度也有一定的差别。

其中南部 T 井现今超压幅度小, 只有保俶斜坡带 B 井的 1/10 左右, 超压重新开始积累的时间与保俶斜坡带 B 井时间基本一致. 而 T 井平湖组烃源岩排烃时间较早(约 25 Ma), 生烃(生气、生油)强度逐渐增高, 在现今达到最高, 生气强度最高可达 40 mg/g TOC、生油强度最高可达 18 mg/g TOC (图 6b), 生烃强度可达 B 井 10 倍之多. 故 T 井的生烃总量比保俶斜坡带 B 井大的多. 由此说明 T 井的现今超压主要是由生烃作用而产生的。

而北部的 O 井现今超压幅度可达 70 MPa(约 B 井 2.5 倍), 与 T 井相比, 其超压积累时间更短, 生烃强度更大, 最高生气强度可达 100 mg/g TOC(图 6c)。

表 2 西湖凹陷代表井增压机制估算结果

Table 2 The estimation of overpressure mechanisms of typical wells in Xihu depression

井号	测点深度 (m)	地层压力 (MPa)	压力系数	剩余压力 (MPa)	垂直有效应力 (MPa)	声波速度 (km/s)	有效应力减小量 (MPa)	泥岩剩余压力 (MPa)	生烃作用贡献率 (%)	增压之和与实测剩余压力间的误差 (MPa)	
保俶斜坡带	A 井	4 280.50	73.53	1.72	30.72	22.15	3.88	12.60	19.70	41.01	1.58
	A 井	4 148.50	73.82	1.78	32.34	18.91	3.82	15.97	19.40	49.38	3.03
	B 井	3 620.75	55.58	1.53	19.37	25.40	3.68	5.84	13.90	30.14	0.37
	B 井	3 575.75	52.6	1.47	16.84	27.05	3.23	4.04	12.70	23.99	-0.10
	C 井	3 855.23	51.73	1.34	13.18	34.92	3.77	4.24	9.17	32.17	0.23
	C 井	4 184.00	57.82	1.38	15.98	36.21	3.68	4.75	9.50	29.72	-1.73
	E 井	3 804.00	53.38	1.40	15.34	30.17	3.02	3.62	11.40	23.59	-0.32
	H 井	3 802.89	45.72	1.20	7.67	38.43	3.29	4.40	3.99	57.36	0.72
中央背斜带	O 井	4 182.00	51.44	1.23	9.62	42.82	4.48	4.91	2.33	51.03	-2.37
	O 井	4 287.79	52.55	1.22	9.67	44.10	4.31	7.54	2.48	77.97	0.35
	O 井	4 390.00	53.75	1.22	9.85	45.20	4.78	5.11	2.96	51.87	-1.78
	P 井	3 359.70	49.49	1.47	15.89	27.45	3.64	3.25	12.10	20.44	-0.54
	J 井	3 971.70	58.27	14.70	18.55	27.07	4.45	10.56	4.47	56.92	-3.52
三潭	L 井	4 619.50	72.67	1.57	26.48	36.91	2.23	15.58	10.50	58.83	-0.40
	K 井	4 144.76	62.54	1.51	21.09	33.74	2.52	14.79	8.85	65.12	2.55

总体上其生烃总量比 T 井的生烃总量大,但其由于无法定量表明生烃总量与超压幅度的关系,笔者很难判断不平衡压实作用和生烃作用孰重孰轻,只能说明不平衡压实作用和生烃作用对现今超压均起到很大的贡献。

(3)三潭深凹.如图 6d 所示,三潭深凹中的 J 井与中央背斜带 O 井相似具有高生烃强度,以及大超压幅度的特征.因此三潭深凹现今超压不平衡压实作用和生烃作用均起到很大的贡献。

2.5 超压成因机制定量分析

前人认为不平衡压实和卸荷作用是超压的形成与发育机制.卸荷倾向于降低垂直有效应力的增压作用.引起卸荷的主要超压机制是流体膨胀、构造应力和超压传递,并在塔里木盆地库车坳陷(张凤奇等,2012)、四川盆地西部(王震亮等,2007)、柴达木盆地北部(Fan *et al.*, 2016)进行了超压成因定量分析,本文将方法运用到西湖凹陷,并进行超压成因定量分析。

笔者通过对泥岩压实作用的研究,运用平衡深度法估算了由不平衡压实作用引起的泥岩层内异常压力.假定卸荷引起流体增压后地层孔隙度基本不变,这时地层的声波速度也基本保持不变.在这个前提下通过图 3 可以求出垂直有效应力的减小量,在不考虑超压传递和构造应力引起的流体增压的情况下,笔者认为垂直有效应力的减小量就是流体膨胀引起的流体增压(表 2).估算结果表明,在保俶斜坡带生烃作用引起的流体增压贡献率占实测剩余压力

的 23%~57%,平均达到 41%;而在中央背斜带有两种增压模式,其中一种以 P 井为代表的增压模式,其生烃作用引起的流体增压只占 20%,另一种以 O 井为代表的增压模式,其不平衡压实作用引起的流体增压可达 51%~78%,显然生烃作用不是其主要的增压机制.而在三潭深凹,有限的测试数据计算结果表明,不平衡压实作用引起的流体增压占实测剩余压力的 58%~65%.笔者将计算的流体膨胀与不平衡压实增压机制所产生的增压之和与实际剩余压力对比,绝对误差在 4 MPa 之内,相对误差均在 15%,大部分在 10%以内,说明结果具有一定的可信度。

3 结论与认识

(1)不平衡压实作用和生烃作用是西湖凹陷超压形成的主要机制,但在不同的区带有一定的差异.其中保俶斜坡带以不平衡压实作用为主,经过估算生烃作用贡献率为 23%~57%,平均达到 41%;而在中央背斜带超压形成机制有两种模式,大部分是以生烃作用为主的增压模式,贡献率为 51%~78%.个别井位研究显示以不平衡压实作用为主的增压模式;在三潭深凹超压的形成中,不平衡压实作用与生烃作用相当,生烃作用增压稍强于不平衡压实作用增压,生烃作用的平均贡献率为 60%左右。

(2)本文在通过测井、钻井资料等常规方法定性判别超压成因之外,还提供了一种从地质要素演化

史角度定性判别超压成因机制的方法.

References

- Bowers, G. L., 1995. Pore Pressure Estimation from Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms beside Underpaction. *SPE Reprint Series*, 10(2): 78—84. doi: 10.2118/27488—PA
- Burrs, J., 1998. Overpressure Model for Plastic Rocks, Their Relation to Hydrocarbon Expulsion: A Critical Re-Evaluation. In: Law, B. E., Ulmishek, G. D., Slavin, V. I., eds., *Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments*. AAPG Memoir, 70: 35—63.
- Chen, M. L., Pan, R. F., Pan, J., 2014. On Overpressure Generation Mechanisms and Distribution Rules at Mid-Depth Formation in Huanghekou Region. *Journal of Oil and Gas Technology*, 36(7): 8—12 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. H., Wu, Q., Wei, G., et al., 2009. Forming Mechanism of Abnormally Overpressure in the Partial Jinzhou 27 Structure Area, Liaodong Bay. *Natural Gas Geoscience*, 20(6): 930—934 (in Chinese with English abstract).
- Fan, C. Y., Wang, Z. L., Wang, A. G., et al., 2016. Identification and Calculation of Transfer Overpressure in the Northern Qaidam Basin, Northwest China. *AAPG Bulletin*, 100(1): 23—39. doi: 10.1306/08031514030
- Guo, X. W., He, S., Song, G. Q., et al., 2011. Evidences of Overpressure Caused by Oil Generation in Dongying Depression. *Earth Science*, 36(6): 1085—1094 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H. Y., Ni, J. H., et al., 2002. Evolution of Overpressured Systems in Sedimentary Basins and Conditions for Deep Oil/Gas Accumulation. *Earth Science*, 27(5): 610—615 (in Chinese with English abstract).
- He, S., Song, G. Q., Wang, Y. S., et al., 2012. Distribution and Major Control Factors of the Present-Day Large-Scale Overpressured System in Dongying Depression. *Earth Science*, 37(5): 1029—1042 (in Chinese with English abstract).
- Hermanrud, C., Wensaas, L., Teige, G. M., et al., 1998. Shale Porosities from Well Logs on Haltenbanken (Offshore Mid-Norway) Show No Influence of Overpressuring. In: Law, B. E., Ulmishek, G. F., Slavin, V. I., eds., *Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments*. AAPG Memoir, 70: 35—63.
- Li, X. Q., Zhang, Y. C., 2012. Overpressure Genesis in the Liutun Salt-Lake Sag, Dongpu Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 18(5): 686—694 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. S., 2015. Characteristics of Formation Pressure and Their Relationship with Hydrocarbon Distribution in Pinghu Tectonic Belt of Xihu Sag, East China Sea. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 42(1): 60—69 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. R., Wang, Z. M., Zhang, L. Q., et al., 2007. Overpressure Generation and Evolution in a Compressional Tectonic Setting, the Southern Margin of Junggar Basin, Northwestern China. *AAPG Bulletin*, 91(8): 1123—1139. doi: 10.1306/02260706035
- Su, A., Chen, H. H., 2015. Geochemical Characteristics of Oil and Source Rock, Origin and Genesis of Oil in Xihu Depression, East China Sea Basin. *Earth Science*, 40(6): 1072—1082 (in Chinese with English abstract).
- Su, A., Chen, H. H., Wang, C. W., et al., 2013. Genesis and Maturity Identification of Oil and Gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration Development*, 40(5): 558—565. doi: 10.1016/S1876—3804(13)60073—7
- Su, L., Zheng, J. J., Wang, Q., et al., 2012. Formation Mechanism and Research Progress on Overpressure in the Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 23(4): 662—672 (in Chinese with English abstract).
- Tingay, M. R. P., Hillis, R. R., Swarbrick, R. E., et al., 1997. Origin of Overpressure and Pore-Pressure Prediction in the Baram Province, Brunei. *AAPG Bulletin*, 93(1): 51—74. doi: 10.1306/08080808016
- Wang, B. J., He, S., Song, G. Q., et al., 2012. Effective Stress Characteristics of Different Overpressured Origins in Dongying Depression of Bohai Bay Basin, China. *Geological Science and Technology Information*, 31(2): 72—79 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. L., Li, Y. H., Zhang, J., 2007. Analysis on Main Formation Mechanisms of Abnormal Fluid Pressure in the Upper Triassic, West Sichuan Area. *Oil & Gas Geology*, 28(1): 43—50 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Ye, J. R., Shi, H. S., et al., 2013. Overpressure Forming and Its Effect on Petroleum Accumulation in Central Faulted Structural Belt of Enping Depression, China. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(7): 2801—2811 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B. L., Ye, J. R., Wang, Z. S., et al., 2014. Hydrocarbon Accumulation Models and Main Controlling Factors in Liaodong Bay Depression. *Earth Science*, 39(10): 1507—1520 (in Chinese with English abstract).

- Yang, C. H., Sun, P., Tian, C., et al., 2013. Distribution and Formation Mechanism of Overpressure in Pinghu Formation, Xihu Sag, East China Sea. *Offshore Oil*, 33(3): 8—12 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J. R., Gu, H. R., Jia, J. Y., 2005. Research on the Hydrocarbon Accumulation Dynamics of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Natural Gas Industry*, 25(12): 5—8 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J. R., Wei, B. Z., Zhou, P., et al., 1999. Study on Underground Fluid Dynamical Fields of Xihu Sag, East China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 13(4): 255—260 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Q., Wang, Z. L., Zhao, X. J., et al., 2012. Genetic Mechanism of Overpressure and Its Relationship with Hydrocarbon Accumulation in Dina-2 Gasfield, Kuqa Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 33(5): 739—747 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Q., Wang, Z. L., Zhong, H. L., et al., 2013. Recognition Model and Contribution Evaluation of Main Overpressure Formation Mechanisms in Sedimentary Basins. *Natural Gas Geoscience*, 24(6): 1151—1158 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. H., 2013. Origin Mechanism of High Formation Pressure and Its Influence on Hydrocarbon Accumulation in Xihu Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 25(2): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. H., Zhang, J. P., 2015. A Discussion on the Tectonic Inversion and Its Mechanism in the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science Frontiers*, 25(1): 260—270 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. P., Tang, X. J., Zhang, T., et al., 2012. Application of Balanced Cross Section Technique to the Research of Tectonic Evolution of Xihu Sag in East China Sea. *Marine Geology Frontiers*, 28(8): 31—37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. P., Chen, H. H., Zhang, S. L., et al., 2008. Geotemperature-Pressure Systems and Related Reservoir Formation in the Xihu Sag, East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(2): 87—91 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. P., Zhang, S. L., Chen, H. H., et al., 2007. Abnormal Pressure and Related Reservoir Formation in the Pinghu Structural Belts of Xihu Depression, East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(3): 93—97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., 2010. Petroleum Geology and Hydrocarbon Distribution Pattern of Huagang Formation in the Xihu Sag of the East China Sea. *Petroleum Geology & Experiment*, 32(3): 223—226, 231 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. X., Ye, J. R., Su, K. L., et al., 2009. The Burial History and Evolution of Xihu Depression. *Geotectonica et Metallogenia*, 13(2): 215—223 (in Chinese with English abstract).
- Zhen, D., Xu, S. H., Shang, X. L., 2010. Characteristics and Genesis of Mudstone Compaction in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Earth Science and Environment*, 32(4): 372—377 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. J., Zhang, X. B., Zhang, G. C., et al., 2011. A Study of Abnormal Pressure Distribution and Formation Mechanism in Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(2): 324—330 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈美玲, 潘仁芳, 潘进, 2014. 黄河口地区中深层超压成因机制及分布规律研究. *石油天然气学报*, 36(7): 8—12.
- 邓津辉, 武强, 魏刚, 等, 2009. 辽东湾海域锦州 27 构造区局部异常超压成因机制. *天然气地球科学*, 20(6): 930—934.
- 郭小文, 何生, 宋国奇, 等, 2011. 东营凹陷生油增压成因证据. *地球科学*, 36(6): 1085—1094.
- 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等, 2002. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件. *地球科学*, 27(5): 610—615.
- 何生, 宋国奇, 王永诗, 等, 2012. 东营凹陷现今大规模超压系统整体分布特征及主控因素. *地球科学*, 37(5): 1029—1042.
- 李小强, 赵彦超, 2012. 东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地超压成因. *石油与天然气地质*, 18(5): 686—694.
- 刘金水, 2015. 西湖凹陷平湖构造带地层压力特征及与油气分布的关系. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 42(1): 60—69.
- 苏奥, 陈汉红, 2015. 东海盆地西湖凹陷油岩地球化学特征及原油成因来源. *地球科学*, 40(6): 1072—1082.
- 苏龙, 郑建京, 王琪, 等, 2012. 琼东南盆地超压研究进展及形成机制. *天然气地球科学*, 23(4): 662—672.
- 王冰洁, 何生, 宋国奇, 等, 2012. 东营凹陷不同超压成因的有效应力特征. *地质科技情报*, 31(2): 72—79.
- 王震亮, 李耀华, 张健, 2007. 川西地区上三叠统异常流体压力的主要形成机制. *石油与天然气地质*, 28(1): 43—50.
- 吴娟, 叶加仁, 施和生, 等, 2013. 恩平凹陷中央断裂构造带超压发育及成藏意义. *中南大学学报(自然科学版)*, 44(7): 2801—2811.
- 杨宝林, 叶加仁, 王子嵩, 等, 2014. 辽东湾断陷油气成藏模式

及主控因素. 地球科学, 39(10): 1507—1520.

杨彩虹, 孙鹏, 田超, 等, 2013. 东海盆地西湖凹陷平湖组异常高压分布及形成机制探讨. 海洋石油, 33(3): 8—12.

叶加仁, 顾惠荣, 贾建谊, 2005. 东海陆架盆地西湖凹陷油气成藏动力学. 天然气工业, 25(12): 5—8.

叶加仁, 韦必则, 周平, 等, 1999. 东海西湖凹陷地下流体动力场研究. 中国海上油气(地质), 13(4): 255—260.

张凤奇, 王震亮, 赵雪娇, 等, 2012. 库车坳陷迪那 2 气田异常高压成因机制及其与油气成藏的关系. 石油学报, 33(5): 739—747.

张凤奇, 王震亮, 钟红利, 等, 2013. 沉积盆地主要超压成因机制识别模式及贡献. 天然气地球科学, 24(6): 1151—1158.

张国华, 2013. 西湖凹陷高压形成机制及其对油气成藏的影响. 中国海上油气, 25(2): 1—8.

张国华, 张建培, 2015. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨. 地学前缘, 25(1): 260—270.

张建培, 唐贤君, 张田, 等, 2012. 平衡剖面技术在东海西湖凹陷构造演化研究中的应用. 海洋地质前沿, 28(8): 31—37.

张先平, 陈海红, 张树林, 等, 2008. 东海西湖凹陷温压系统与油气成藏. 海洋地质与第四纪地质, 28(2): 87—90.

张先平, 张树林, 陈海红, 等, 2007. 东海西湖凹陷平湖构造带异常压力与油气成藏. 海洋地质与第四纪地质, 27(3): 93—97.

张银国, 2010. 东海西湖凹陷花港组油气地质条件与油气分布规律. 石油实验地质, 32(3): 223—231.

张远兴, 叶加仁, 苏克露, 等, 2009. 东海西湖凹陷沉降史与构造演化. 大地构造与成矿学, 13(2): 215—223.

郑丹, 徐思煌, 尚小亮, 2010. 珠江口盆地惠州凹陷泥岩压实特征及其成因. 地球科学与环境学报, 32(4): 372—377.

祝建军, 张晓宝, 张功成, 等, 2011. 琼东南盆地异常压力分布与形成机理探讨. 天然气地球科学, 22(2): 324—330.

《地球科学》

2017 年 2 月 第 42 卷 第 2 期 要目预告

岩浆母质对蚀变粘土矿物的约束:以贵州新民剖面 P-T 界线附近火山灰层为例	洪汉烈等
江南东段平水地区桃红闪长岩:早新元古代洋壳消减的证据	谭清立等
哀牢山—红河断裂带哀牢山—大象山段渐新世—早中新世热史演化及成因	宫 伟等
北黄海盆地前中生代—中生代火山岩磁化率、地球化学特征及构造意义	许中杰等
冀东—辽西中—晚三叠世柏杖子花岗岩地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因	熊 乐等
西藏尼玛盆地北部古近系牛堡组物源及地质意义	密文天等
腾冲热海地热田高温热泉中的硫代砷化物及其地球化学成因	郭清海等
水力层析法与克立金法估算非均质含水层渗透系数场比较	蒋立群等