

济阳拗陷新生代古地温分析

姜惠超¹ 肖永军² 周 丽²

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092;

2. 中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 古地温是影响沉积盆地形成与演化的重要因素, 确定古地温对研究其生烃史和油气成藏史具有重要的意义, 研究古地温的方法很多, 主要有“将今论古”法和地质温度计法。本文主要应用自生伊利石结晶度和自生绿泥石化学成分, 对济阳拗陷新生代古地温梯度进行分析。研究表明, 济阳拗陷新生代古地温梯度为 37.2~38.2°C/km。这一认识对济阳拗陷油气地质研究和勘探评价很有意义。

关键词: 济阳拗陷; 自生伊利石结晶度; 自生绿泥石化学成分; 古地温梯度

中图分类号: P618.130.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)02-0273-06

含油气盆地内蕴藏着丰富的石油、天然气、地热等资源, 古地温及热演化史在油气生成、运移、聚集等方面有着密切的关系, 对盆地油气资源评价及寻找有利的生油区有很重要的意义^[1]。研究沉积盆地古地温的方法很多, 根据其侧重点不同, 可以大致分为两类, 一是利用古温标方法研究热历史; 另一是用地球热动力学方法研究沉积盆地的古地温。笔者利用自生伊利石结晶度和自生绿泥石化学成分来探讨济阳拗陷新生代地层的古地温, 并与前人研究成果进行对比验证。

1 区域地质概况

济阳拗陷由东营、惠民、沾化和车镇 4 个凹陷及义和庄凸起、陈家庄凸起、滨县凸起、林樊家凸起、青城凸起、埕子口凸起、宁津凸起、无棣凸起、垦东青坨子凸起等若干凸起组成, 是渤海湾盆地含油气最丰富的地区之一(图 1)。粘土矿物在济阳拗陷新生代地层中分布非常广泛, 本次采集的粘土样品来自拗陷中部的郝科 1 井和盘深 3 井(图 1), 共计 15 块(表 1)。

2 自生伊利石结晶度反映的古地温及其古地温梯度

自生伊利石的结晶度是伊利石的晶畴大小、结构膨胀程度、晶体缺陷和化学成分不均一性的综合反映, 其数值大小取决于形成环境的温度、压力、岩性、K 含量以及生长时间, 其中温度的作用最为重要。伊利石的结晶度主要随温度的增加而提高, 这已被一系列的室温水热实验所证实^[2-4]。目前国际上通用 Kübler 提出的利用伊利石 10×10^{-10} m 衍射峰的半高宽来反映伊利石的结晶度, 用 $IC(\Delta 2\theta)$ 表示, IC 值越小, 峰形越尖锐, 结晶程度越好^[5,6]。

对于伊利石结晶度与其形成温度间的关系, 前人已进行了大量研究^[3,7], 笔者主要利用最新的有关伊利石结晶度与温度之间的研究成果, 来计算自生伊利石的形成温度, 其结晶度与温度间的公式如下:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 384.98e^{-0.6219 * IC}$$

根据伊利石结晶度计算样品经历的最高古地温, 主要是利用从样品中提取、分离出的粘土矿物的

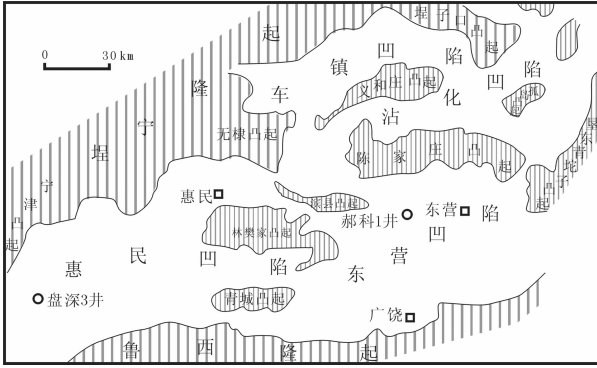


图1 济阳拗陷构造区划

Fig.1 Tectonic divisions of the Jiyang depression

X射线衍射数据进行的,与研究粘土矿物组合的X射线衍射分析相比,用于计算伊利石结晶度的X射线衍射分析,其 2θ 只到 14° ,但步进距要更小,每步 0.01° 。表1列出了郝科1井和盘深3井所测样品的伊利石结晶度及其计算的古地温。

利用样品的井位深度和古地温资料,可以探讨济阳拗陷新生代的古地温梯度。图2为计算济阳拗陷古地温梯度的图解,样品投影点的相关性非常好,相关系数的平方(R^2)达到0.9525,而伊利石结晶度反映的济阳拗陷新生代古地温梯度为: $37.2^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

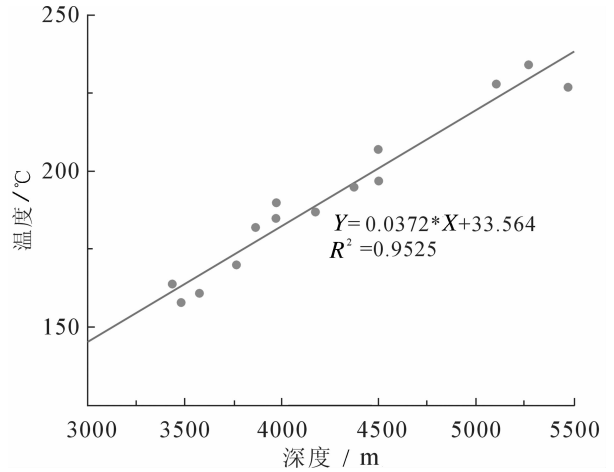


图2 济阳拗陷新生代由伊利石结晶度反映的古地温梯度

Fig.2 Paleogeothermal gradient reflected by crystallinity of illite in Cenozoic strata of the Jiyang depression

3 自生绿泥石化学成分反映的古地温及其古地温梯度

绿泥石在自然界分布很广,是沉积岩、低级变质岩及水热蚀变岩中的主要矿物之一,在不同的地质环境中,绿泥石的化学成分变化很大,影响绿泥石化学成分的物理化学参数主要有:温度、 f_{O_2} 、溶液pH

表1 济阳拗陷新生代地层的自生伊利石结晶度及其反映的古地温

Table 1 Crystallinity of authigenic illite and its reflected subsurface temperatures in Cenozoic strata of the Jiyang depression

采样井号	深度	采样层位	岩性特征	粘土矿物组合	结晶度	形成温度
	(m)				IC ($^\circ\Delta 2\theta$)	($^\circ\text{C}$)
郝科1井	3435	Es ₄	粉砂质泥岩	R ₂₋₁ I/S	1.37	164
	3767	Es ₄	黑色泥岩	R ₃ I/S + Chl	1.31	170
	3970	Es ₄	褐红色泥岩	I + Chl	1.13	190
	4497	Es ₄	红色泥岩	I + Chl	1.00	207
	5105	Ek	红色泥岩	I + Chl	0.84	228
	5270	Ek	红色泥岩	I + Chl	0.80	234
	5476	Ek	黑色泥岩	I + Chl	0.85	227
盘深3井	3480	Ek ₁	紫红色泥岩	R ₂₋₁ I/S + I + Chl	1.43	158
	3575	Ek ₁	灰红色泥岩	R ₂₋₁ I/S + I + Chl	1.40	161
	3766	Ek ₂	褐色粉砂岩	R ₃ I/S + Chl	1.31	170
	3865	Ek ₂	褐色泥岩	R ₃ I/S + Chl	1.20	182
	3969	Ek ₂	灰黑色粉砂岩	R ₃ I/S + Chl	1.18	185
	4174	Ek ₂	灰色粉砂质泥岩	I + Chl	1.16	187
	4371	Ek ₂	灰绿色泥岩	I + Chl	1.09	195
	4500	Ek ₂	灰绿色泥岩	I + Chl	1.08	197

值、 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值以及围岩的化学成分等。对于绿泥石化学成分地质温度计,前人已做了大量的研究,一系列研究发现在成岩和地热系统中,随着埋藏深度的增加,绿泥石的 Al (IV) 的含量逐步增加, Si (IV) 的含量逐步降低^[8,9]。Cathelineau 等^[10,11]通过对墨西哥 Los Azufres 和 Salton Sea 地热体系中绿泥石的系统研究,认为绿泥石的 Al(IV) 与形成温度间存在正相关关系,此后,许多学者都对 Cathelineau 等提出的公式进行了不同的修正。但该方法受非温度参数的影响较大(如全岩化学成分、 f_{O_2} 等),难以推广到公式背景以外的地质环境中。

对于面网间距 d_{001} 与绿泥石化学成分之间的关系,前人也做了大量的研究工作,笔者主要利用 Rausell Colom 等^[12]提出、经 Nieto^[13]修改的绿泥石化学成分与 d_{001} 之间的关系式来计算 d_{001} 值:

$$d_{001} = 14.339 - 0.1155 \text{ Al(IV)} - 0.0201 \text{ Fe}^{2+}$$

利用上述公式,就可从自生绿泥石的化学成分计算出形成温度。

利用自生绿泥石化学成分来反演其形成时的古地温,是在对从样品中分离、提取出的粘土矿物进行 X 射线衍射分析基础上进行的,从 X 射线衍射资料可以获得样品中是否存在自生绿泥石,对存在自生绿泥石的样品,进行岩石光薄片磨制,在对光薄片进行喷碳后,直接将样品光薄片置于电子探针下进行观察、分析。由于自生绿泥石颗粒非常细小,因此观察样品的放大倍数正常应该在 3000~5000 倍。笔者是利用 JEOL JXA-8800 M 型电子探针对自生绿泥石进行分析的,使用的测试标样为美国国家标准局的矿物标样,工作条件为:加速电压 15 kV,探针电流 10nA,探针直径 $<1 \mu\text{m}$ 。

对电子探针测试获得的自生绿泥石化学成分,以 14 个氧为基础,计算绿泥石的化学结构式,并利用绿泥石化学成分与 (001) 面网间距 d_{001} 之间的关系以及 d_{001} 与温度之间的关系,可求得自生绿泥石的形成温度。

对采集的郝科 1 井和盘深 3 井的岩心样品中的自生绿泥石化学成分进行了测试,每个深度的样品中均测试了 10 多个自生绿泥石的成分,共计 139 个,表 2 列出了郝科 1 井和盘深 3 井不同深度岩心样品中自生绿泥石的化学成分及其计算的形成温度。

每个样品的深度资料以及自生绿泥石反映的古

地温数据(平均值),来估算济阳拗陷新生代的古地温梯度。图 3 为利用自生绿泥石化学成分反映的济阳拗陷新生代古地温梯度图解,从图中可以清楚地看出,样品投影点的相关性非常好,相关系数的平方 (R^2) 达到 0.9818,而自生绿泥石化学成分反映的济阳拗陷新生代古地温梯度为: $38.2^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

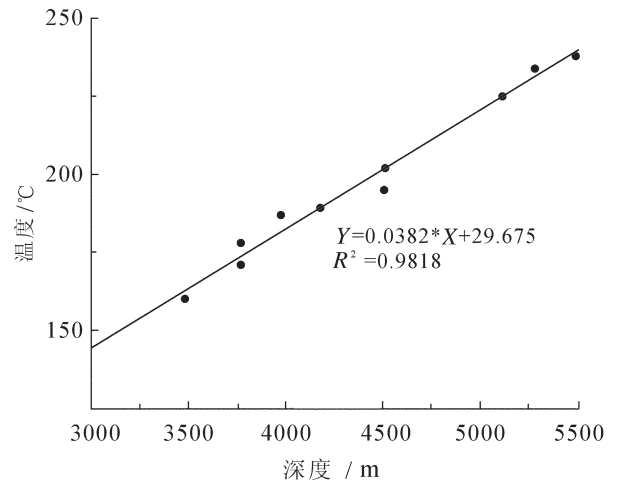


图 3 济阳拗陷新生代由自生绿泥石化学成分反映的古地温梯度

Fig.3 Paleogeothermal gradients reflected by the chemical composition of authigenic chlorite in Cenozoic strata of the Jiyang depression

从自生伊利石结晶度和自生绿泥石化学成分反映的古地温梯度看,两者基本一致,可见,济阳拗陷新生代的古地温梯度在 $37.2\sim 38.2^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

前人对济阳拗陷新生代古地温梯度也有一些研究和认识。李荣西等^[14]利用镜质体反射率资料得出济阳拗陷新生代的古地温梯度为 $37.6^\circ\text{C}/\text{km}$,这与笔者的研究结果极为接近。龚育龄等^[15]利用 703 口钻井测温得出济阳拗陷现今地温梯度平均为 $35.5^\circ\text{C}/\text{km}$,由此得出了古地温梯度比现今地温梯度大的结论,故在研究有机质演化史时不能用现今地温梯度代替新生代时期的古地温梯度。因此,利用自生伊利石结晶度和自生绿泥石化学成分综合恢复沉积盆地古地温,与其他研究古地温的方法起到了相互补充的作用,所得到的结果可靠性是比较高的。

表 2 济阳拗陷新生代地层中自生绿泥石化学成分及计算的形成温度
 Table 2 Chemical composition of authigenic chlorite and calculated formation temperatures in Cenozoic strata of the Jiyang depression

样号	绿 泥 石 化 学 成 分 / %										形成温度/°C
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量	单个
郝科1井 3767 m Es ₄	30.06 最小值	0.07	22.06	18.47	0.00	9.31	0.24	0.03	0.45	85.78	166.14
	31.71 最大值	0.15	22.15	19.16	0.26	15.36	3.48	1.44	1.59	89.71	176.54
	30.91 平均值	0.13	22.11	18.88	0.12	12.54	1.38	0.27	1.03	87.37	171.55
郝科1井 3970 m Es ₄	28.55	0.04	17.70	18.32	0.05	11.35	0.30	0.10	0.28	85.21	182.24
	31.7	3.60	24.24	23.57	0.55	18.44	1.35	0.79	1.20	91.99	191.07
	29.96	1.07	20.29	21.21	0.21	14.77	0.48	0.32	0.83	89.15	187.85
郝科1井 4497 m Es ₄	28.05	0.04	18.16	20.68	0.08	8.38	0.15	0.01	0.52	85.65	192.34
	29.34	1.59	24.36	25.34	0.32	13.74	1.46	0.44	2.16	90.32	199.09
	28.61	0.30	21.94	23.17	0.21	10.85	0.63	0.17	0.98	86.85	195.88
郝科1井 5105 m Ek ₁	25.72	0.01	18.88	17.96	0.05	11.62	0.00	0.00	0.08	86.44	221.31
	27.94	0.43	24.86	27.61	0.33	18.6	0.52	0.15	1.03	91.96	229.42
	26.74	0.12	22.44	23.92	0.17	15.05	0.18	0.07	0.44	89.12	225.13
郝科1井 5270 m Ek ₁	24.60	0.00	16.80	21.90	0.04	6.71	0.06	0.01	0.11	87.04	230.34
	26.77	1.60	24.62	27.88	0.40	17.11	0.35	0.26	1.55	91.31	237.32
	25.75	0.40	21.24	25.44	0.20	14.72	0.17	0.11	0.46	88.50	234.30
郝科1井 5476 m Ek ₁	25.02	0.00	18.74	20.29	0.00	12.83	0.09	0.01	0.01	87.07	234.72
	26.18	1.78	24.47	26.51	0.29	21.01	2.38	0.16	0.59	90.98	243.74
	25.40	0.35	21.81	25.27	0.11	14.85	0.48	0.08	0.24	88.59	238.88
盘深3井 3480 m Ek ₁	31.03	0.00	16.15	17.18	0.10	9.52	0.09	0.01	0.03	84.68	157.92
	32.84	1.21	22.55	22.04	0.77	17.48	2.79	2.95	1.55	90.60	163.43
	32.05	0.24	19.03	20.29	0.35	14.55	0.43	0.32	0.63	87.89	160.97
盘深3井 3766 m Ek ₂	29.79	0.00	16.75	19.57	0.09	11.66	0.10	0.07	0.03	85.94	175.47
	31.33	2.98	21.52	23.11	0.40	18.60	0.35	0.77	1.41	90.57	182.83
	30.48	0.33	18.83	21.03	0.23	16.21	0.24	0.18	0.72	88.25	178.96
盘深3井 4174 m Ek ₂	28.85	0.00	18.54	20.10	0.06	10.68	0.12	0.03	0.10	86.00	185.06
	32.14	1.45	24.04	27.49	0.29	18.70	0.86	0.65	1.36	95.29	192.24
	30.31	0.13	21.49	23.10	0.16	13.13	0.34	0.16	0.73	89.56	189.14
盘深3井 4500 m Ek ₂	27.37	0.00	17.64	18.67	0.15	12.23	0.09	0.00	0.03	85.45	197.00
	29.48	1.49	21.48	24.82	0.62	18.97	0.50	0.87	1.61	91.40	205.85
	28.37	0.14	20.23	22.57	0.34	15.69	0.18	0.11	0.44	88.07	202.58

4 结 论

(1) 济阳坳陷新生代平均地温梯度是 37.2~38.2 °C/km。这为研究济阳坳陷构造-热演化历史提供了地温数据,也为烃源岩的成烃演化研究提供了重要的基础资料。

(2) 利用自生伊利石结晶度和自生绿泥石化学成分综合恢复沉积盆地古地温是一种行之有效的手段,具有广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 崔军平, 任战利, 肖晖. 海拉尔盆地呼和湖凹陷热演化史与油气关系[J]. 中国地质, 2007, 34(3):522-527.
Cui Junping, Ren Zhanli, Xiao Hui. Relations between the thermal history and petroleum generation in the Huh Lake depression, Hailar basin [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (3):522-527 (in Chinese with English abstract).
- [2] Maxwell D T, Hower J. High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian belt series [J]. *Am. Mineral*, 1967, 52:843-857.
- [3] Frey M. Very low-grade metamorphism of elastic sedimentary rocks [C]// Frey M, Blackie, L (eds.). *temperature Metamorphism*. 1987, 8:9-58.
- [4] Ji Junfeng, Browne P R L. Experimental investigation on the illitization of mixed-layers I/S and the crystallinity of illite using samples from the Waiotapu geothermal system, New Zealand [C]// *Proceedings of 17th NZ Geothermal Workshop*. 1995:85-89.
- [5] Kübler B. La Cristallinite de l'illite et les Zones Tout a Fait Superieures du Metamorphism [C]//Anon. *Etages Tectoniques*. Neufchatel:Colloque de Neufchatel, 1967:105-122.
- [6] Kübler B. Evaluation quantitative du metamorphisme par la cristallinite de l'illite [J]. *Bulletin du Centre de Recherches de Pau-SNPA*, 1968, (2):385-397.
- [7] Chi Ma, Browne P R L, Harvey C C. Crystallinity of subsurface clay minerals in the Te Mihi Sector of the Wairakei geothermal system, New Zealand [C]//14th New Zealand Geothermal Workshop, 1992:267-272.
- [8] Macdowell S D, Elders W A. Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore I, Slaton Sea geothermal field, California, USA [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1980, 74:293-310.
- [9] Jähren J S, Aagaard P. Compositional Variations in diagenetic chlorites and illites, and relationship with formation-water chemistry [J]. *Clay Mineral*, 1989, 24(2):157-170.
- [10] Cathelineau M, Nieva D. Chlorite solid solution geothermometer: The Los Azufres (Mexico) geothermal system [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1985, 91:235-244.
- [11] Cathelineau M, Nieva D. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature [J]. *Clay Miner*, 1988, 23:471-485.
- [12] Rausell-colom J A, Wiewiora A, Matesanz E. Relation between composition and d001 for chlorite [J]. *The American Mineralogist*, 1991, 76(7/8):1373-1379.
- [13] Nieto F. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach [J]. *European Journal of Mineral*, 1997, 9(4):829-841.
- [14] 李荣西, 廖永胜, 周义. 济阳坳陷石炭-二叠系热演化与生烃阶段[J]. *地球学报*, 2001, 22(1):85-90.
Li Rongxi, Liao Yongsheng, Zhou Yi. Thermal history of the Permo-Carboniferous coal source rocks in Jiyang Depression, Shengli Oilfield[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(1):85-90 (in Chinese with English abstract).
- [15] 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳坳陷地温场分布特征[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(5):652-658.
Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, et al. Distribution characteristics of geotemperature field in Jiyang Depression, Shandong, North China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(5):652-658 (in Chinese with English abstract).

Analysis of Cenozoic subsurface temperatures of the Jiyang depression

JIANG Hui -chao¹, XIAO Yong-jun², ZHOU Li²

(1. *Tongji University College of Ocean and Earth Science, Shanghai 200092, China;*

2. *Institute of Geology, Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, Shandong, China*)

Abstract: The Jiyang depression is an important exploration target of the Shengli oilfield. The subsurface paleotemperature was an important factor for affecting the formation and evolution of sedimentary basins and the determination of subsurface paleotemperatures has great significance for the study of the hydrocarbon generation history and entrapment history. There are many methods for the study of subsurface paleotemperatures, of which the use of “the past as the key to the present” and geothermometry are the main methods. In this study the crystallinity of authigenic illite and chemical composition of authigenic chlorite was used to analyze the Cenozoic paleogeothermal gradients in the study area. The study indicates that the Cenozoic paleogeothermal gradients in the Jiyang depression were 37.2–38.2°C/km. This understanding is of great significance for the study, exploration and evaluation of the petroleum geology of the Jiyang depression.

Key words: Jiyang depression; crystallinity of authigenic illite; chemical composition of authigenic chlorite; paleogeothermal gradient

About the first Author: JIANG Hui-chao, male, born in 1969, senior engineer, Ph.D. mainly engages in the research on oil geology exploration; E-mail: dkyjhc@sohu.com.