

文章编号: 0253-9985(2006)02-0180-07

鄂尔多斯盆地剥蚀厚度恢复及其对上古生界 烃源岩热演化程度的影响

高胜利^{1,2}, 任战利¹

(1. 西北大学 地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

Restoration of eroded thickness and its influence on thermal evolution of Upper Paleozoic source rocks in Ordos basin

Gao Shengli^{1,2}, Ren Zhanli²

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069)

2. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710021)

Abstract The eroded thickness of Mesozoic in Ordos basin is restored by using vitrinite reflectance-depth profile (R_oH), and the thermal evolution of the Upper Paleozoic is comprehensively studied based on thermal simulation experiment of source rocks. The R_oH profile models can be divided into 3 types: single segment, double segments and three segments. The eroded thickness in the eastern part of the basin is large, in the range from 1 400m to 2 200m; while that in the western part is relatively small, in the range from 400m to 1 000m. Isothermal-complementary thermal evolution simulation experiments of source rocks show that the R_o increases with time, but the incremental rate decreases when heating the rock samples to a certain temperature and then cooling them; in the same time interval, the larger the temperature drop is, the lower the hydrocarbon-generating capacity would be and the hydrocarbon generating capacity would be getting very low with time when the temperature lowers to a certain value. These results show that temperature plays a key role between the time scale of heating and thermal effects of source rocks. In the eastern and middle parts of the basin, the erosion thickness is much larger than the minimum erosion thickness causing the stagnation of thermal evolution of source rocks, which indicates that the thermal evolution of source rocks in these areas would have been in stagnation. While in the western part, the thermal evolution of source rocks might have lasted slowly till the Cenozoic in the area from Bu1 to Tian1 wells where the erosion thickness is relatively thinner.

Key words vitrinite reflectance; thermal event; erosion thickness; Ordos basin

收稿日期: 2005-12-10

第一作者简介: 高胜利 (1974—), 男, 博士生, 盆地分析与油气藏评价

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2003CB2146000); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT0559)

1 问题提出

鄂尔多斯盆地自晚古生代沉积以来, 经历了印支、燕山等多期地层抬升-沉降构造运动, 特别是在早白垩世末, 燕山运动使盆地全面抬升, 造成强烈的剥蚀。盆地东、西部的差异抬升剥蚀, 从西向东剥蚀量增大。烃源岩热演化主要受地温、埋藏时间和压力三者的影响, 并集中表现在上覆地层增厚或减薄变化之中。盆地最迟在 23 Ma 以来, 地层抬升剥蚀引起冷却事件^[1, 2], 使现今地温低于古地温^[1, 3~5], 地层中的有机质地温降低。在烃源岩热演化过程中, 尽管存在时间-温度的补偿关系, 但在降温之后至今的时间内, 当温度降低到一定程度, 即使烃源岩受热时间无限延长, 烃源岩热演化仍处于停滞状态^[3]。温度的降低幅度与剥蚀厚度密切相关, 而温度又是决定烃源岩热演化最主要的因素。

2 剥蚀厚度恢复

2.1 镜质体反射率

镜质体反射率反映的是有机质在整个受热地

质历史中的最大古地温信息, 具有不可逆性。在正常地质背景下, 烃源岩成熟度受控于温度和有效加热时间, 而主要受古地温场的控制^[4], 它是地温梯度与沉积速率的函数。对连续沉积的地层, 镜质体反射率 (R_o) 与埋深 (H) 在半对数直角坐标系中为线性相关关系。所以, 在地层欠补偿的情况下, 即间断面之下的热史记录没有被再沉积地层破坏而保留原来的记录, 可以利用 R_o 资料恢复地层剥蚀厚度。然而, 在有热异常 (岩浆体侵入、火山活动等) 的地质背景下, 利用 R_o 资料恢复地层剥蚀厚度前, 必须剔除由于热异常使 R_o 受到影响而偏离正常趋势线的点^[6]。

鄂尔多斯盆地在早古生代-中生代早期地温梯度一直下降, 中生代晚期急剧增高, 新生代又发生回落^[3, 4]。盆地在中生代晚期存在一期与隐伏岩浆的侵入有关^[7]的构造热事件^[1, 3~8]。苦深 1 井 R_o 与 H 关系曲线表明 (图 1c), 在侏罗系与三叠系之间和奥陶系与石炭系之间不整合面附近 R_o 发生突变, 甚至出现上高下低的反常现象, 奥陶系与石炭系之间不整合面附近的异常范围达 568 m。从 R_o - H 曲线形态看, 不整合面上、下构造层中 R_o 随深度的“跳跃”主要是由热事件引起的。

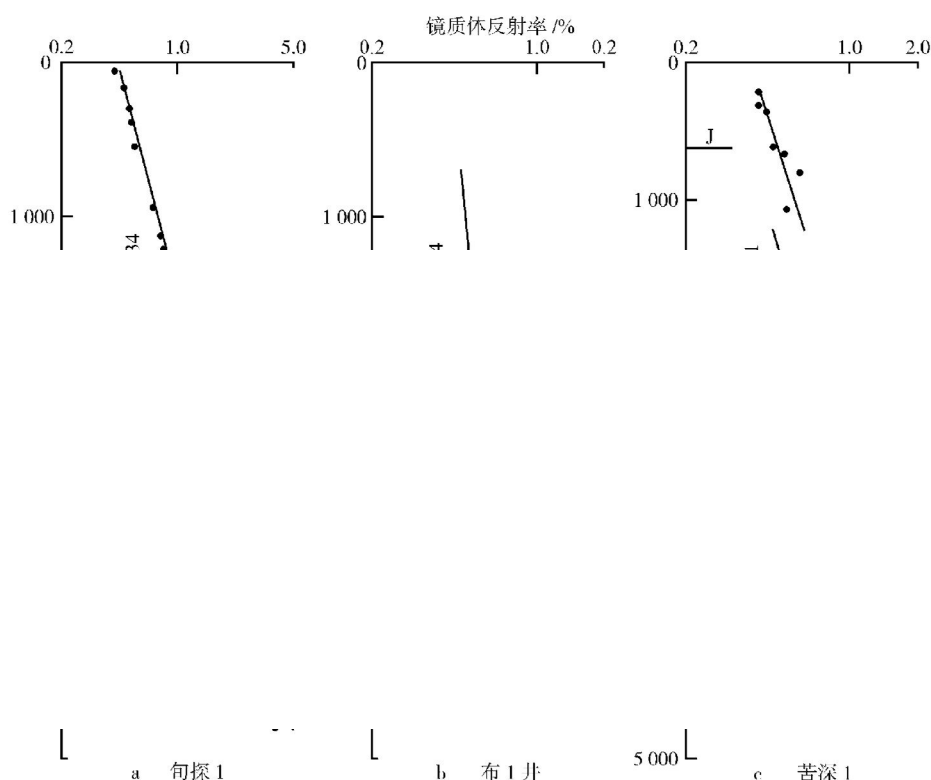


图 1 镜质体反射率与深度 (R_o - H) 剖面图

Fig. 1 Profile of vitrinite reflectance vs. depth

大量的 R_o-H 关系曲线表明,在盆地不同的地区、不同层位,热异常大小不同。因此,可把盆地中 R_o-H 在半对数直角坐标系中的关系分为 3 类。

第一种为单段式(图 1a)。 R_o 随深度的增加而线性增加, R_o 与 H 按其正常规律变化,例如旬探 1 井。第二种为双段式(图 1b)。在侏罗系与三叠系地层,有明显的热异常,表现为上覆地层的 R_o 值比其下地层 R_o 大的反常现象,例如布 1 井。第三种为三段式(图 1c)。在侏罗系与三叠系和奥陶系与石炭系地层之间, R_o-H 关系有明显的错位现象,例如苦深 1 井。

上述 R_o-H 关系的错位现象,说明鄂尔多斯盆地地温场经历过热改造作用,这种热改造在盆地周边-沁水盆地等地也有表现^[9]。由于地温场的改造有多种方式^[10],中生代以来地层地温场的改造作用方式为热事件改造作用方式^[1,3,5,6,11],至于盆地早期的热改造,可能是由于热事件改造作用或应力改造作用或者是两者共同作用的结果。地温场的改造作用结果体现在镜质体反射率受到热影响而偏离其正常的变化规律,地层经历的最高地温远高于按正常沉降增温所计算的地温值。

由于盆地在不同地区热活动强弱不同^[12],镜质体反射率受热影响程度不同,因而上述 3 种 R_o-H 关系类型在盆地不同地区的分布不同,从盆地大量单井的 R_o-H 关系可归结出: I 类主要分布于盆地的中东部地区, II 类主要分布在盆地西部地区, III 类主要分布在盆地的北部地区。

2.2 剥蚀厚度恢复

利用 R_o 资料恢复地层剥蚀厚度时,对于第二种情况,可以剔除上覆地层受热异常影响的 R_o 数

据点,利用下段的 R_o-H 线性关系恢复地层的剥蚀厚度;对于第三种情况,可以剔除上覆和底部地层受热异常影响的 R_o 数据点,取中间段的 R_o-H 线性关系恢复地层的剥蚀厚度。对于第一种情况,则可以直接利用所有 R_o 数据点恢复剥蚀厚度。

鄂尔多斯盆地中生代以来曾经历了两次抬升剥蚀。一次发生在中生代早一中侏罗世之后,早白垩世之前;另一次发生在早白垩世志丹群沉积之后。例如,孤 1 井第四系地层直接覆盖在三叠系延长组之上,苦深 1 井第三系地层直接覆盖在侏罗系直罗组之上,胜 1 井第四系地层直接覆盖在白垩系志丹组之上。

应用 R_o 法恢复的剥蚀厚度应为两期总的剥蚀量,即中生界地层的剥蚀厚度。

根据盆地部分单井 $\ln(R_o)-H$ 回归方程(表 1)和恢复的剥蚀厚度分布规律(图 2),发现剥蚀厚度变化规律具有盆地东部剥蚀厚度大(1 400 ~ 2 200 m),东南部剥蚀厚度最大。西部剥蚀厚度小(400 ~ 1 000 m),西部天环向斜剥蚀厚度最小,一般小于 600 m。表 2 为盆地内不同地区由包裹体测温所获的古地温与现今地温的差值,剥蚀厚度大的地区,古今地温差值较大,反之,则较小。表明盆地剥蚀厚度的分布特征与盆地古今地温的差值分布特征有相似的规律,也足以说明,鄂尔多斯盆地现今地温相对古地温降低是由于早白垩世后盆地普遍整体抬升所致。

3 烃源岩热演化停滞时的剥蚀厚度

3.1 时温互补热演化模拟实验

鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩在晚侏罗世末

表 1 鄂尔多斯盆地部分探井 R_o-H 回归方程

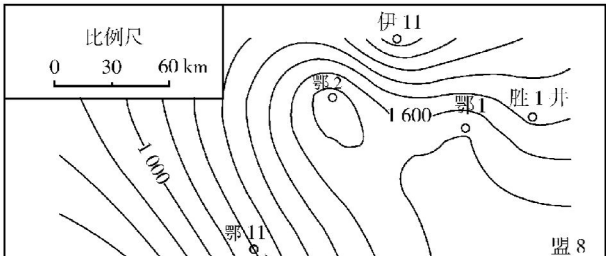
Table 1 Regression equations of R_o-H for some exploratory wells in Ordos basin

井号	方程	相关系数	剥蚀厚度 /m	斜率 /10 ⁻⁴
牛 1	$\ln(R_o) = 0.000\ 470\ 173\ 117\ H - 0.740\ 920\ 283$	0.983 246	1 847.2	4.702
陕参 1	$\ln(R_o) = 0.000\ 420\ 480\ 883\ H - 0.876\ 360\ 318$	0.956 785	1 743.4	4.205
陕 56	$\ln(R_o) = 0.000\ 515\ 788\ 967\ H - 1.078\ 138\ 755$	0.976 397	1 030.1	5.158
惠探 1	$\ln(R_o) = 0.000\ 358\ 148\ 800\ H - 1.043\ 619\ 962$	0.909 820	1 579.8	3.581
乐 1	$\ln(R_o) = 0.000\ 549\ 273\ 512\ H - 1.002\ 654\ 113$	0.872 298	1 104.7	5.493
苦深 1	$\ln(R_o) = 0.000\ 398\ 344\ 618\ H - 1.204\ 434\ 861$	0.923 883	1 016.7	3.983
天 1	$\ln(R_o) = 0.000\ 491\ 363\ 545\ H - 1.426\ 980\ 881$	0.734 101	371.3	4.914
布 1	$\ln(R_o) = 0.000\ 443\ 821\ 704\ H - 1.399\ 231\ 984$	0.903 202	473.6	4.438

表 2 鄂尔多斯盆地不同地区古今地温对比表

Table 2 Comparison of present-geotherms and paleo-geotherms in different areas in Ordos basin								
地 区	层 位	古温度 /℃			现今温度 /℃			平均差值 /℃
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
东胜-榆林	山 2	160	140	150	106.5	80.6	91.9	58.1
	盒 8	160	140	150	104.5	78.6	89.9	60.1
苏里格庙	山 1	170	160	165	115.7	103.1	107.0	58.0
	盒 8	170	160	165	114.7	102.1	106.0	59.0
佳县-米脂	盒 8	140	120	130	91.7	57.1	68.7	61.3
天环	山 1			150	132.1	112.6	123.8	26.2
西缘前陆	山 2-盒 8			120	84.8	23.8	72.5	47.5
南部地区	盒 8			170	118.8	90.9	102.5	67.5

注: 空白处无数据



源岩埋深变浅时温互补热模拟实验研究。

3.1.1 实验仪器

实验应用澳大利亚 SGE 公司生产的高温热解器 (SGE 热解器), 美国惠普公司 HP5890A 型气相色谱仪及微机系统组装的一套热模拟分析仪

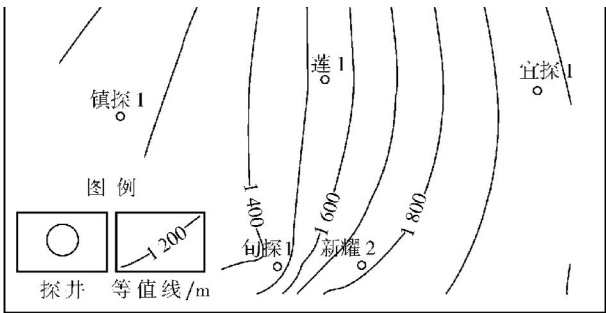


图 2 鄂尔多斯盆地中生界地层剥蚀厚度图
Fig.2 Map showing the erosion thickness of the Mesozoic in Ordos basin

期到早白垩世末期古地温达到最大, 烃源岩快速成熟并大量生气。早白垩世末期后, 盆地经历抬升剥蚀, 烃源岩经受的地温降低, 降温之后至今这段时间内, 烃源岩能否继续生烃? 为此, 开展了烃

品 (海则庙山西组煤样, R_o 为 0.66%) 和高成熟样品 (神 7 井太原组煤样, R_o 为 1.71%) 供升温降温模拟实验用样品。

3.1.3 实验条件

采用开放体系, 在氦流作用下, 热解器中样品在不同温度下生成的气体随时进入收集装置中。根据样品的成熟度不同, 升至不同的加热温度。低成熟样品、成熟样品和高成熟样品最高加热温度分别为 400℃、500℃和 600℃, 加热 0.5 h 后, 分别降温到 380℃、460℃和 550℃。它们的加热时间分别为 0.5 h 和 2 h 等。

3.2 实验结果

源岩样品加热到一定温度后降温再延长加热

方程的斜率(半对数坐标系)与现今烃源岩 R_o 值与其现今埋深时的线性关系方程(半对数坐标系)的斜率相同。

根据上述实验结果数据, R_o 值为 1.71% 的样品(神 7 井), 加热到 600℃ 时, R_o 为 1.98%, 视为原始 R_o 值, 当降温至 550℃ 时持续加热 2.5 h 后, R_o 升到 2.21%, ΔR_o 为 0.23%。 R_o 为 0.66% 的样品(海则庙煤样), 加热到 500℃ 时, R_o 为 1.1%, 视为原始 R_o 值, 当降温至 460℃ 时持续加热 2.5 h 后, R_o 升到 1.4%, ΔR_o 为 0.3%。依据公式 $\Delta H = \ln(1 + \Delta R_o / R_{o1}) / k$ 可计算出源岩生烃停滞时单井的最小剥蚀厚度。

R_o 为 1.98% 时, k 取盆地井的斜率相对小的值, 此时求出的 ΔH 相对较大。例如西部地区的惠探 1 井, k 为 2.981×10^{-4} , ΔH 约为 370 m。 R_o 为 1.1% 时, 同样取 k 为 2.981×10^{-4} , ΔH 约为 810 m。可以近似认为, 现今盆地 R_o 值为 1.98% 的烃源岩分布区, 剥蚀厚度至少要达到 370 m (即最小剥蚀厚度), 烃源岩热演化才会处于停滞状态, 而 R_o 值为 1.1% 的烃源岩分布区, 剥蚀厚度至少要达到 810 m, 烃源岩热演化才会处于停滞状态。

4.2 地层抬升后的生烃过程

鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩 R_o 现今值资料表明, 除盆地周缘及东北部外, 盆地内绝大部分烃源岩 R_o 值都大于 1.8%, 热演化程度非常高。结合盆地剥蚀厚度的恢复结果, 盆地中东部、南部以及东北部地区的实际剥蚀厚度远大于最小剥蚀厚度。在这些地区经早白垩世末地层抬升剥蚀之后, 烃源岩热演化作用已处于停滞状态。盆地中西部天环向斜的布 1 至天 1 井区, 剥蚀厚度较小。在早白垩世末, 虽然经历了抬升剥蚀作用, 烃源岩地温降低, 但烃源岩的热演化在新生代仍然有可能继续缓慢进行。

根据气源灶受热历史, 鄂尔多斯盆地气源灶属于早期快熟型气源灶, 即早期受较高地温条件的作用, 气源岩进入生气门限后, 生气高峰期出现较早^[13]。从整个地质历史看, 盆地上古生界烃源岩热演化生烃作用可划分为两个阶段: 第一阶段, 从晚三叠世至早白垩世末, 烃源岩持续埋深, 热演化程度不断加强, 上古生界烃源岩逐步达到最大古埋深, 烃源岩的受热温度也逐步达到最大, 气

(油)不断生成, 在受燕山期构造热事件的影响后, 这一时期上古生界烃源岩的生气达到高峰^[3, 4]; 第二阶段, 早白垩世末盆地抬升至现今, 地层遭受剥蚀、地温降低, 燕山期构造热事件逐步消退, 盆地大部分地区气源岩的生烃作用明显降低并趋于停止^[3, 4]。

参 考 文 献

- 1 赵孟为. 磷灰石裂变径迹分析在恢复盆地沉降抬升史中的应用——以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 地球物理学报, 1996 39(增刊): 238~246
Zhao Mengwei. The application of apatite fission track analysis to the reconstruction of the subsidence and uplift history of sedimentary basins: a case study from the Ordos basin [J]. Geophysical Science 1996 3(S0): 238~246
- 2 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地新生代抬升冷却事件的确定 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(1): 109~112
Ren Zhanli, Xiao Hui, Liu Li, et al. Determination of Cenozoic uplift cooling event in Qingshui basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005 26(1): 109~112
- 3 任战利, 赵重远. 鄂尔多斯盆地古地温研究 [J]. 沉积学报, 1994 12(1): 56~65
Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan. Research on paleotemperature in the Ordos basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 1994 12(1): 56~65
- 4 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究 [J]. 石油学报, 1996 17(1): 18~22
Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in the Ordos basin [J]. Acta Petrologica Sinica 1996 17(1): 18~22
- 5 任战利, 赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究 [J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 134~137
Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos basin and Qingshui basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 1997, 15(2): 134~137
- 6 陈刚, 赵重远, 李丕龙, 等. R_o 反演的盆地热史恢复方法与相关问题 [J]. 石油与天然气地质, 2002 23(4): 343~346
Chen Gang, Zhao Zhongyuan, Li Pilong, et al. R_o inversion of thermal history reconstruction in sedimentary basin and its related problems [J]. Oil & Gas Geology, 2002 23(4): 343~346
- 7 赵孟为, Hans Ahrendt, Klaus Wimmer. 鄂尔多斯盆地志留-泥盆纪和侏罗纪热事件——伊利石 K-Ar 年龄证据 [J]. 地质学报, 1996 70(2): 186~194
Zhao Mengwei, Hans Ahrendt, Klaus Wimmer. Silurian-Devonian and Jurassic thermal events in the Ordos basin, China: evidence from K-Ar dating on illites [J]. Acta Geologica Sinica 1996 70(2): 186~194
- 8 孙少华, 李小明. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究 [J]. 科学通报, 1997, 42(3): 286~271
Sun Shaohua, Li Xiaoming. Study on tectonic heat event in the

- Ordos basin [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(3): 286–271
- 9 任战利, 赵重远, 陈刚. 沁水盆地中生代晚期构造热事件 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 21(1): 46–48
- Ren Zhanli Zhao Chongyuan Chen Gang Tectonic thermal events of Late Mesozoic in Qingshui basin [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 21(1): 46–48
- 10 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 33–36
- Ren Zhanli Comparison of thermal evolution history in sedimentary basins North China [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 33–36
- 11 高峰, 王岳军, 刘顺生, 等. 利用磷灰石裂变径迹研究鄂尔多斯盆地西缘热历史 [J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(1): 87–91
- Gao Feng Wang Yuejun Liu Shunsheng et al Thermal history study in the west of the Ordos basin using apatite fission track analysis [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24(1): 87–91
- 12 王贵玲, 刘志明, 蔺文静. 鄂尔多斯周缘地质构造对地热资源形成的控制作用 [J]. 地质学报, 2004, 78(1): 44–50
- Wang Guiling Liu Zhiming Lin Wenjing Tectonic control of geothermal resources in the periphery of Ordos basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 44–50
- 13 Katz B J Pfeifer R N, Schunk K J Interpretation of discontinuous vitrinite reflectance profiles AAPG, 1988, 72(8): 926–913
- 14 柳益群, 周立发. 用镜质体反射率法确定吐鲁番–哈密盆地的古地温梯度和估算地层剥蚀厚度 [J]. 西北大学学报, 1997, 27(3): 254–257
- Liu Yiqun Zhou Lifa Definition of paleogeothermal gradient and eroded strata thickness of Turpan–Hami basin by means of vitrinite reflectance [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1997, 27(3): 254–257
- 15 张金亮, 常象春. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏研究 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 30–35
- Zhang Jinliang Chang Xiangchun Deep basin gas trap in the Upper Paleozoic of Ordos basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2000, 27(4): 30–35
- 16 杨华, 张文正. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气的地球化学研究 [J]. 沉积学报, 2004, 22(增刊): 39–43
- Yang Hua Zhang Wenzheng Geochemical study of the Upper Paleozoic gas in the northern Ordos basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(S0): 39–43
- 17 赵文智, 汪泽成. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低效气藏的形成机理 [J]. 石油学报, 2005, 26(5): 5–8
- Zhao Wenzhi Wang Zecheng Forming mechanism of low efficiency gas reservoir in Sulige gas field of Ordos basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 5–8

(编辑 高岩)

我国石油供需矛盾突出

1996年以来, 中国原油产量基本在 $1.56 \times 10^8 \sim 1.69 \times 10^8$ t 之间徘徊, 2000年为 1.626×10^8 t, 2001年增加到 1.649×10^8 t, 2003年达到 1.698×10^8 t。但现在东部油田在减产, 西部发展比预期慢, 海洋油田产量仍较低。据预测, 2005年、2010年、2015年我国原油产量只能分别达到 1.73×10^8 , 1.75×10^8 , 1.85×10^8 t。我国石油产量不可能大幅增长, 2020年预计为 $1.8 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^8$ t, 然后将逐渐下降。在排除我国原油出口的前提下, 2005年、2010年和 2015年我国原油缺口将分别为 9500×10^4 t, 1.37×10^8 t 和 1.94×10^8 t。据国际能源机构 (IEA) 分析, 2010年中国石油需求将有一半依赖进口, 2020年中国石油需求将有 80% 依赖进口。2002和 2003年分别进口成品油 2034×10^4 和 3720×10^4 t, 2005年进口成品油约达 4000×10^4 t。1993—2003年 10年间, 中国的石油消费量年均增长 6.66%, 而同期的石油产量年均增速仅为 1.75%。

我国石油对外依存度 2002年达到 33%, 2003年达到 36.5%。2003年我国已经成为仅次于美国的世界第二大石油消费国, 全年原油消费量 2.5×10^8 t 以上。2004年全国原油产量达到 1.72×10^8 t, 而原油消费需求将达到 2.75×10^8 t, 为缓解不足, 进口原油数量会超过 1×10^8 t。对外依存度达到 37%, 超过 2003年的 34.5%。2004年中国油品消费量突破 3×10^8 t, 达到 30800×10^4 t。2004年中国原油加工量达到 2.7×10^8 t。全年石油净进口量达 1.2×10^8 t。到 2010年, 我国的石油需求将达 3.2×10^8 t, 届时石油进口量将达 1.6×10^8 t, 我国石油消费 50% 将靠进口, 未来 10年, 中国石油净进口需求仍将以年均 10% 的速度增长。到 2020年, 我国石油消费量最少也要 4.5×10^8 t, 石油对外依存度很可能达到 60% ~ 62%, 超过美国目前的 58%。

(摘自《世界能源导报》)