

成岩相——储集体预测的新途径

陈彦华 刘莺

(地矿部石油地质中心实验室, 无锡 214151)

储集体的分布与储集体内部的非均质性主要受成岩作用不均一性所控制。根据这一认识, 本文通过对有效储集空间形成作用定量分布的研究, 划分出不同孔渗条件的成岩相, 并通过建立成岩相与沉积相、地震相、测井相的相关判别模式, 把点上成岩相的研究扩展到面上三维空间的定量研究, 编制成岩相分布图, 圈定有利成岩相区, 预测储集区和储集体, 并提出了用成岩相-孔隙体积法估算储集量的新思路。

关键词 成岩相 有效储集空间 判别模式 储集体预测

第一作者简介 陈彦华 男 54岁 高级工程师 沉积学与石油地质

1 术语定义

随着学科的发展和研究的深入, 逐渐出现了一些新的术语, 其含义很不统一, 为便于对本文的理解, 对本文中的一些重要术语作了如下定义:

成岩相 反映成岩环境的物质表现, 即反映成岩环境的岩石学特征、地球化学特征和岩石物理特征的总和(陈彦华等, 1985)。

成岩相区 指某类成岩相时空分布的范围。

有效储集空间 指与烃类运移聚集期相匹配的储集空间。

2 方法依据与思路

大量储层研究资料表明, 主要储集空间成因为次生成因。其形成和分布主要受成岩作用的类型和强度所控制, 同时也控制了储集体的分布以及储集体内部的非均质性。而成岩作用的类型和强度又受构造环境和沉积环境所制约。沉积环境主要通过沉积物的矿物组分、沉积结构和沉积介质性质对成岩特征施加影响, 构造环境则主要通过盆地沉积物埋藏和抬升的幅度、速率、频率所引起的温度、压力变化以及有机质热演化对成岩特征施加影响。构造和沉积两大要素对沉积物成岩演化综合影响结果造成了地层成岩特征在纵向上的旋回性和横向上的分带性, 孔渗层与致密层在纵向和横向上交替分布, 说明成岩相的分布是有规律可寻的, 不同类型的沉积体具有不同的成岩相组合, 同一类型的沉积体由于其所处的构造部位不同其成岩相的组合也截然不同, 受构造控制的成岩相经常可以跨越多个沉积体。因此成岩相的研究必须与沉积相研究和构造演化研究紧密结合。只有搞清楚成岩相分布的规律才能真正理解和认识储集体分布的规律以及储集体内部非均质性的实质。

根据以上认识, 本文提出如下研究思路(图1): 通过对不同构造部位, 不同类型沉积体钻井岩芯和露头剖面的成岩相详细研究、有效储集空间形成作用的定量分布的研究, 结合测

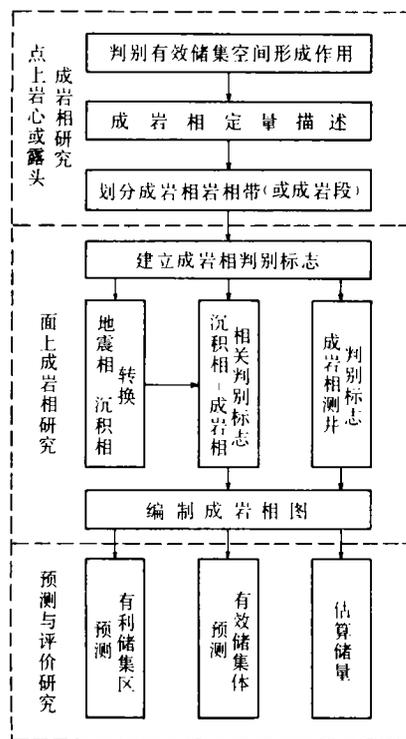


图1 成岩相与储集体预测研究程序框图

包体成分、包体均一温度、阴极发光等资料的综合分析确定进烃的时序和有效储集空间及其形成作用。

有效储集空间的形成作用主要有以下几种：(1)有机和(或)无机作用下的深溶作用；(2)流体超高压条件下的裂缝产生和张开作用(包括层间缝和缝合线的张开)；(3)刚塑两种岩性间互地层，在强大载荷压力下由差异压实作用产生的微裂缝，此种张裂缝多限于刚性岩层中，一般不切穿塑性层，这一点明显区别于构造缝和流体超压缝；(4)岩层构造形变产生的微裂缝，有储集意义的主要有层间脱空缝和形变中性面以上，上凸方向的张裂缝；(5)在深部封闭系统中，在缺乏外来 CO_2 带入条件下的白云化作用形成的白云化孔隙；(6)在深部封闭系统中，在缺乏外来物质带入条件下碳酸盐矿物的重结晶作用产生的晶间孔，它主要通过重结晶—孔隙转换作用，使原先非渗透的微孔，随着晶体的长大转换为可渗透的大孔隙。

3.1.2 成岩相划分与命名

由于目前的岩石都经历了极其复杂的成岩史，构造的多旋回性控制了成岩作用的多旋回性，使其经受了多种成岩环境下多种作用的叠加与改造，因此它不可能是某种单一成岩环境的产物，然而，其中必定有一种或两种主要的作用控制着孔隙的演化并决定其目前的总貌。我们就以控制孔隙演化的主要作用，作为划分和命名成岩相的依据。成岩相的命名采用岩性加主要作用(或作用环境)联合命名的原则，例如：砂岩-深溶相；灰岩(白云岩)-表生溶蚀相；灰岩(白云岩)-深埋重结晶相；砂岩-深埋压嵌胶结相；××岩-差异压实微裂缝相等。

井和地震相资料，建立适合本地区具体地质条件的成岩相与沉积相、测井相、地震相的相关判别模式，把点上成岩相的定量研究扩展到面上三维空间的研究，圈定有利成岩相区，为储集体的预测和储集体内部非均质性的研究，提供一种有效的方法途径，这对油气勘探开发具有重要的实际意义。由于这一方法是以油气运移聚集期相匹配的有效储集空间形成作用的定量分布为依据，因此它比单纯根据沉积相预测更合理、更接近实际。同时本文还提出了用成岩相-有效孔隙体积法估算储量的新思路，在勘探的早期阶段它将比由生烃量到资源量的估算更逼近储量。

3 研究内容与要点

3.1 点上成岩相研究

3.1.1 有效储集空间形成作用识别

识别有效储集空间形成作用、形成条件和分布是本研究的核心和关键。它可以通过对钻井岩心，岩屑和盆地露头的成岩演化和孔缝演化的研究并结合油气和沥青产状以及各期充填物的有机

当出现两种以上作用同时控制岩石成岩特征时则可采用复合命名,例如:灰岩-压溶-白云化相;白云岩-重结晶-深溶相等。当成岩作用环境一时难以确定的情况下,成岩相可用成岩作用来命名,例如当表生溶解与深埋溶解一时难以确定时,可统称为溶蚀相。当差异压实微裂缝,流体超压微裂缝与构造微裂缝难以区分时,可统称为微裂缝相。

3.1.3 成岩相定量描述

(1)成岩相厚度参数

该参数通过对剖面成岩相的详细研究和划分,分别统计所研究层段各类成岩相的厚度及厚度比,它们是描述各类成岩体几何形态和大小的重要定量参数。

(2)有效储集空间形成作用强度参数

用有效储集空间形成作用强度及其强度系数两个参数,定量描述某一作用所形成的孔隙量及其占总次生孔隙量的相对比例。

有效储集空间形成作用强度直接用该作用的铸体面孔率来表达,如深溶作用所形成的溶孔面孔率6%,白云化晶间孔面孔率3%,微裂缝面孔率为1%,它们分别代表上述三种作用所形成的各自孔隙强度。三种作用形成的总的强度为10%。

孔隙形成的强度系数(k_i)用某一作用形成的孔隙度(φ_i)与各作用形成的总的孔隙度之和的比值来表达:

$$k_1 = \varphi_1 / (\varphi_1 + \varphi_2 + \cdots \varphi_n)$$

$$k_2 = \varphi_2 / (\varphi_1 + \varphi_2 + \cdots \varphi_n)$$

$$k_i = \varphi_i / \sum \varphi_i$$

当 $k_i \geq 50\%$ 时表明作用*i*是形成有效孔隙的最重要的作用。以上述三种作用为例,深溶作用的强度系数为60%,白云化作用强度系数为30%,微裂缝作用的强度系数为10%,表明深溶作用是形成有效孔隙的最主要作用,其次为白云化作用,因此深溶相和白云化相两类成岩体应为有利的储集体。

同时根据物性孔隙度与总的次生孔隙度的差值可用来近似的判断原生孔保留的程度,如以原生孔为主的储集岩,储集体的预测应从沉积相研究入手。

3.2 面上成岩相研究

把点上成岩相研究推向面上三维空间定量研究,首要的问题是建立由点到面的“桥梁”,即建立成岩相与沉积相、测井相、地震相之间的相关判别模式,然后利用上述三个相关判别模式把点上成岩相研究扩展到面上的研究。在实际使用时应根据油气勘探不同阶段的具体条件选用不同的桥梁”。

3.2.1 建立成岩相-沉积相相关判别模式

由于沉积环境通过沉积结构、构造、矿物组分和流体性质对成岩特征有不同程度的控制和影响,因而成岩相与沉积相之间存在着时空上的相关性,即成岩相在沉积体内部的分布存在一定的规律性。这一规律性通过对沉积体的一系列剖面成岩相的详细研究,搞清楚沉积体内部成岩相的组合类型,各类成岩相的组合分布方式以及在纵向上和横向上成岩相组合比例变化的规律,在此基础上建立成岩相-沉积相的相关判别模式。有了这一模式我们就可以根据沉积体的展布预测成岩相的展布,无需对所有资料点都进行详细成岩相的研究,只需要对少量控制点进行验证和修正。同时这一模式还清楚地揭示了沉积体内部储集性不均一性

的实质,即成岩相分布的差异性把沉积体分割为若干个孔渗性的储集体和致密性的成岩封隔体。

为了加深对成岩相-沉积相相关判别模式的理解,列举下列三个假设性例子作具体的说明:

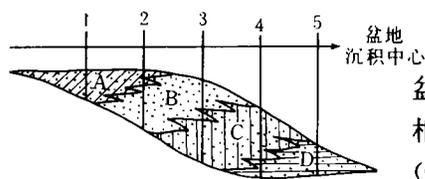


图2. 前积砂体成岩相侧向分带模式
A—硅质强胶结相; B—硅质胶结、溶蚀相;
C—钙质强胶结相; D—钙质胶结、溶蚀相

例1, 前积砂体成岩相侧向分带模式(图2)

该砂体由4种成岩相组成,呈侧向分带,从盆地边向盆地中心方向,成岩相分别为:砂岩-硅质强胶结相(A相);砂岩-硅质胶结-溶蚀相(B);砂岩-钙质强胶结相(C);砂岩-钙质胶结-溶蚀相(D)。其剖面线上各剖面点各类成岩相的厚度比分别为:1点,A相=100%;2点,A相/B相=1/4;3点,B相/C相=1/1;4点,C相/D相=4/1;5点,D相=100%。研究确定B相和D相为有利储集相,B相有效储集空间为长石溶孔和部分残留原生孔,D相有效储集空间为钙质胶结物次生溶孔,A相和C相为致密砂岩封隔相。

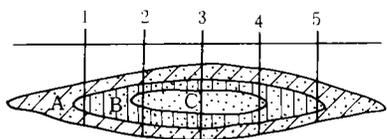


图3. 砂体成岩相同心环状分带模式
A—泥质砂岩压实相; B—强胶结相;
C—弱胶结相

例2, 砂体成岩相同心环状分带模式(图3)

此类砂体由三种成岩相组成,由外向内呈同心环状分带;分别为泥质砂岩-压实相(A);砂岩-强胶结相(B);砂岩-弱胶结相(C)。剖面线上各剖面点各类成岩相厚度比:1点,A/B=2/1;2点,A/B/C=2/2/1;3点,A/B/C=1/1/1;4点,A/B/C=2/2/1;5点,A/B=3/1。研究确定C相为有利储集相,有效储集空间主要为残留原生孔,A和B相为致密砂岩封隔相。

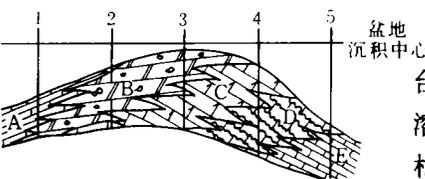


图4. 台缘碳酸盐建隆成岩相侧向分带模式

A—白云岩压实相; B—白云岩重结晶、溶蚀相; C—灰岩胶结、白云化相; D—灰岩压溶、白云化相; E—灰岩压实相

例3, 台缘碳酸盐建隆成岩相侧向分带模式(图4)

此类沉积体由5种成岩相组成,它们呈侧向分带,由台地向盆地分别为:白云岩-压实相(A);白云岩-重结晶-溶蚀相(B);灰岩-胶结-白云化相(C);灰岩-压溶-白云化相(D);灰岩-压实相(E)。剖面线上各剖面点各类成岩相厚度比分别为:1点,A/B=4/1;2点,A/B/C=1/6/3;3点,B/C=1/1;4点,C/D/E=4/5/1;5点,D/E=1/4。研究确定B相为孔隙性储集相,其有效储集空间为溶蚀孔和白云石重结晶晶间孔,D相为裂缝-微孔性储集相,A相、C相和E相为致密碳酸盐岩封隔相。

上述三个成岩模式是简单化,理想化了的模式,实际

模式要比上述例子复杂得多。相同类型的沉积体,在不同地区,不同层段,不同构造部位,由于所经受的成岩史不同,成岩相的组合和分布规律也不相同,因而成岩模式也不相同。每一个成岩模式只适用于一个特定的范围和条件,不能普遍套用,但建立成岩相的方法和思路则可以普遍借鉴。

3.2.2 建立成岩相-测井相相关判别标志

一个探区,由于取芯井很有限,而取芯井段则更有限,因此要把成岩相的研究推向面上就必需借助测井资料,为此必须拟订一套获取成岩信息的测井方法系列和数据处理程序。

各种测井方法对地层的响应是组成地层岩石骨架的矿物组成、孔隙度和孔隙流体物理特性的表现。在岩石骨架矿物组成确定的条件下,地层的密度、电阻率、声速和放射性等物理特性主要是岩石成岩强度的表现,即岩石胶结程度、压实程度和次生孔缝发育程度的表现。根据这一认识,就有可能根据同类岩石的测井特性的差异,定性和定量判别岩石的成岩强度,并找到相应的判别标志。

(1)岩性与骨架矿物组分测井识别:岩性和岩层骨架矿物识别是成岩相研究的基础,只有在岩性正确识别的条件下,才能对岩石的胶结程度,压实程度和次生孔缝发育程度作出正确的解释和定量判别。

用测井识别岩性的方法很多,各种测井方法对岩性都有一定的识别能力。砂泥岩地层常用的方法主要用自然电位(SP)和自然伽玛(GR)测井来区分砂岩和泥岩,然后用SP幅度或自然伽玛指数(I_{GR})进一步确定砂岩中泥质的含量,把砂岩细分为含泥砂岩、泥质砂岩和纯净砂岩。碳酸盐岩地层或碳酸盐岩与砂泥岩间互地层用岩性-密度测井(LDT)比较有效,它根据光电截面(P_e)和密度(ρ)响应曲线可区分出灰岩、白云岩、石膏层、砂岩和泥岩类。然后根据密度(DEN),中子(CNL)和声波(AC)测井资料交会,借助MID图版可求得岩石骨架矿物的组成(具体方法细节略)。

(2)成岩特征的测井识别:当组成地层的岩石骨架矿物组成确定后,测井方法对地层响应的差异性主要由岩石胶结程度、压实程度和次生孔缝发育程度的不同以及孔隙流体性质的差异引起的,根据这一认识,本文探索性的建立了一套成岩特征测井判别方法系列和判别标志(表1)。

(A)胶结程度和压实程度定性识别:地层电阻率(R_t)测井:一般用感应测井(ILD),或深侧向测井(LLD),可获得地层电阻率资料,含水的砂岩和颗粒碳酸盐岩的电阻率随胶结强度的增强而增大(烃类充填的高阻层需用微电极测井进一步区分)。泥岩和泥状结构碳酸盐岩的电阻率则主要反应岩石的压实程度,它们的电阻率随压实程度增加而变大。

微电极(ML)测井:根据微梯度与微电位的幅度和幅度差可有效地区分岩石的致密程度,弱胶结的孔隙层(不管是水层或油气层)均具有明显的正幅度差(微电位>微梯度)和中等幅度,而强胶结的致密层则无明显的幅度差和高幅度为其特征。受控于压实作用的泥岩和泥状碳酸盐岩,微电极测井的主要特征是微电位与微梯度无幅度差,而幅度的大小主要反应它们的压实程度,微电极的幅度随压实程度增大而增高。

双侧向重叠法测井:根据深浅侧向测井曲线叠加幅度差和幅度大小可判别岩石的胶结程度和压实程度。强胶结的砂岩和颗粒碳酸盐岩以及压实的泥岩和泥状碳酸盐岩,由于无泥浆侵入,故过渡带电阻率(浅侧向)与地层电阻率(深侧向)相同,因而无幅度差并为高阻值。弱胶结的水层表现为负幅度差和低阻值,但弱胶结油气层表现为明显的正幅度差和高阻值。

(B)胶结程度和压实程度的定量判别:对主要以胶结方式成岩的岩石,孔隙量主要反映岩石的胶结程度,用密度,中子和声波3种测井方法均能求得相应的孔隙度 φ_0 、 φ_N 、 φ_A ,然而3种结果常常出现很大差别,为此,D. W. Hilchie提出综合利用3种孔隙度测井资料正确求解孔隙度的方法,斯伦贝谢公司拟定了一系列求解图版。对所求得的孔隙量中,其中多少是残

留原生孔,多少是次生孔,是由哪些作用形成的次生孔,这只能依赖对区域成岩相和有效储集空间形成作用的研究才能作出合理的解释。对以压实方式成岩的岩石,在确定岩石成分的基础上用声波测井和密度测井资料,经过对声波时差和密度值的定量标定可以对岩石的压实程度作出定量解释。

表1 成岩特征测井判别标志

成岩特征		判别方法与判别标志			
		地层电阻率测井 (R_t)	微电极测井 (ML)	双侧向 重叠法	
胶结 程度 测井 判别	强胶结 致密砂岩		高值	低幅度差 高 值	无幅度差 高 值
	强胶结 颗粒碳酸盐岩		高值	低幅度差 极高值	无幅度差 高 值
	弱胶结 砂 岩	烃类 充填	高值	明显正幅度差 中等值	正幅度差 中—高值
		水充填	低值	明显正幅度差 中等值	负幅度差 低 值
	弱胶结 颗 粒 碳酸盐岩	烃类 充填	高值	明显正幅度差 中等值	正幅度差 中—高值
		水充填	低值	明显正幅度差 中等值	负幅度差 低 值
压测 实井 程判 度别	低压实泥岩和 泥状碳酸盐岩		低—中值	无幅度差 低—中值	无幅度差 低—中值
	中—高压实泥岩和 泥状碳酸盐岩		中—高值	无幅度差 低—中值	无幅度差 低—中值
	其他判别方法		压实程度低→高;(1)测井密度值(ρ)小→大; (2)声波时差(Δt)大→小;(3)钻时快→慢		
裂缝测井识别		裂缝识别测井 (FIL)	岩性密度测井 (LDT)	双侧向— R_{xo} 测井	
		明显低阻异常	光电截面曲线出现 明显 P_e 高值	R_{xo} 明显低值,并与 双侧向电阻率存在明 显幅度差	
次生孔(洞)测井识别		当密度与中子测井交会孔隙度(ϕ_{DN})大于声波测井孔隙度(ϕ_A)时,表明 可能发育次生孔隙。差值大小反映次生孔隙发育程度			

(C)次生孔(洞)测井判别:在岩石矿物组分正确判定的条件下,用密度与中子交会孔隙度(ϕ_{DN})与声波孔隙度 ϕ_A 进行比较来判别次生孔隙,如果 $\phi_A < \phi_{DN}$,同时声波测井又不存在其他问题,则表明可能发育次生孔隙,因为声波测井测不出次生孔隙,它们差值大小反映次生孔发育程度和数量。

(D)裂缝测井识别:裂缝识别测井(FIL):用高分辨率地层倾斜测井,根据4个极板响应曲线叠加的幅度异常进行判别,水平缝在4条曲线上均显示为一个薄的低阻尖峰,垂直和倾斜缝只在两条或一条曲线上出现低阻异常。裂缝出现低阻异常的主要原因是由于电流沿裂缝流动引起岩石电阻率明显降低。

岩性-密度测井(LDT):用混有重晶石的泥浆钻井,由于重晶石具有很大的光电截面,当重晶石泥浆沿裂缝侵入,则在光电截面曲线上出现很尖的 P_e 值异常。

双侧向- R_{xo} 测井: R_{xo} 主要用微侧向(MLL)或微球形聚焦(MSFL)测井测得,根据双侧向测得的过渡带电阻率与冲洗带电阻率(R_{xo})之间的明显低阻异常可作为判别裂缝的一项重

要标志。

(3)测井相-成岩相转换:由于成岩特征的测井识别标志在不同的地质条件下常常有多解性,不同的测井方法对不同地质条件其标征效果也很不相同,要把测井获取的成岩信息转换为成岩相,对测井剖面作出较确切的成岩特征的定性和定量解释还必需经岩心成岩相观察结果的验证、修正和标定,在此基础上建立适合特定地区、特定层段的成岩相识别标志和相应的测井方法系列。只有这样才能实现测井相-成岩相的转换,把测井剖面转换为成岩相剖面。

3.2.3 地震相-沉积相-成岩相转换

用地震波资料直接用来判别岩石的成岩特征目前还难以做到,但根据地震波反射结构特征和反射单元的几何形态与沉积类型之间相关性建立地震相模式,用来判别沉积环境,这方面国内外许多学者已作过大量的研究并积累了丰富经验。地震相在成岩相研究中只能起到间接的作用,但这一作用很重要,因它可以为区域成岩相研究提供一个区域的沉积和构造的框架。有了这个框架后,再利用成岩相-沉积相相关模式(上文已有详细介绍)把地震相通过沉积相转换为成岩相。

3.3 预测与评价研究

3.3.1 储集区与储集体预测

在区域成岩相定量研究基础上,根据测网点上各类成岩相厚度和厚度比资料编制成岩相分布图(包括平面、剖面和立体图)。根据有效储集空间形成作用的强度参数编制有效储集空间形成作用强度分布图。综合上述两类图件,对各类成岩体的储集条件进行分类评价,划分出不同级别的储集体,把储集体集中分布的范围圈定为有利储集区。

3.3.2 储集量估算

在有利储集区和储集体圈定的条件下,根据成岩相定量研究图件,很容易根据成岩体的几何形态计算出它们的体积,再根据成岩体平均孔隙度、油气水饱和度等资料计算出油气的储量。用成岩体体积法估算储量在油气勘探的不同阶段均可以进行,所估算储量的精度随着勘探的深入、资料密度和精度的提高通过不断修正逐渐逼近实际的储量。

(收稿日期:1993年11月12日)

参 考 文 献

- 1 陈彦华等.下扬子区寒武系成岩相与油气.中国南方油气勘查新领域探索论文集,北京:地质出版社,1988
- 2 刘 莺等.扬子区上震旦统一寒武系成岩相与有利储集区预测.中国南方古、中生界海相油气勘查研究,北京:科学出版社,1993
- 3 Hilchie DW.现代测井解释.北京:石油工业出版社,1989
- 4 Payton CE.牛毓荃等译.地震地层学.北京:石油工业出版社,1980
- 5 张万选等.陆相断陷盆地区域地震地层学研究.北京:石油工业出版社,1988

DIAGENETIC FACIES—A NEW APPROACH TO THE PREDICTION OF RESERVOIR ROCKS

Chen Yanhua Liu Ying

(Central Lab of Petroleum Geology, MGMR)

Abstract

Reservoir distribution and the heterogeneity within reservoir rocks are dominated by varying diagenesis. Up this knowledge allows studies on the quantitative distribution of the effective reservoir rocks with respect to their geologic process and clarification of the diagenetic facies with various porosities and permeabilities. Furthermore, the study is extended from a point to an overall 3-D quantitative analysis by establishing discriminant correlation models between diagenesis and sedimentology, seismology and well—logging. Eventually the paper suggests a new approach to estimating reservoir capacity by diagenetic facies—pore volume.

世界天然气的资源量、探明储量与生产量

据各家资料估算,全球拥有的天然气资源量近 500 万亿 m^3 ,尚有 230~240 万亿 m^3 的储量尚未发现。截止 1994 年 1 月 1 日,估计探明储量为 142 万亿 m^3 ,如按目前的平均年消费量 2.1 万亿 m^3 算,可供人类 60~70 年的需求。事实上世界人口的不断增长,消耗量也不断上升。专家们乐观的分析地估计,到 2050 年天然气将会出现危机。

从世界目前消耗主要能源石油来看,全球最终可采石油资源量为 2740~3560 亿吨 t,年产量为 29.8 亿吨 t (截止 1994 年 1 月 1 日)。石油与天然气相比较,其储量增长数小,而消耗量大,因而到 21 世纪世界能源将从石油转向天然气。

目前世界上储气与产气国家(1993 年资料)如下:

1. 探明储量(亿 m^3):(1)独联体 565151,(2)伊朗 206590,(3)卡塔尔 70750,(4)阿联酋 53317,(5)沙特 52457,(6)美国 46699,(7)委内瑞拉 36479,(8)阿尔及利亚 36224,(9)尼日利亚 33960,(10)伊拉克 30989,(11)加拿大 26835,(12)马来西亚 21706。

2. 年产量(亿 m^3):(1)独联体 8150,(2)美国 5080,(3)加拿大 1130,(4)荷兰 800,(5)英国 540,(6)阿尔及利亚 510,(7)印度尼西亚 440,(8)沙特 291,(9)罗马尼亚 290,(10)挪威 275,(11)墨西哥 270,(12)阿联酋 220。

原载《石油物探信息》第 235 期第 4 版

作者:莫杰