

# 水溶气资源富集的主控因素及其评价方法探讨

武晓春<sup>1</sup>, 庞雄奇<sup>2,3</sup>, 于兴河<sup>1</sup>, 王 明<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学能源系, 北京 100083;

2. 石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249;

3. 石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

**摘 要:** 水溶气是天然气的一种, 其主要成份是甲烷。水溶气在地下的富集主要受温度、压力、水矿化度和储层水容量等因素的控制。储水量越大、水介质温压越高, 地下可能储集的水溶气资源量越大。在水量和水介质温度压力条件相同的情况下, 水的矿化度越低、水的溶气饱和度越高, 水的储气量就越大。评价水溶气资源除应考虑地下天然气富集量之外, 还应考虑钻探井的水日产量及采出地表后的释放气量。水溶气被采到地表时温压降低的幅度越大, 释放出的气量越大。一般说来, 每方水在地下含气饱和度在  $1 \sim 10 \text{ m}^3$  之间; 在我国东部沉积盆地这一数值为  $1 \sim 6 \text{ m}^3$ 。大庆长垣及其以西地区萨尔图、葡萄花和高台子组储层的水溶气量高达  $4\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 依油气当量计算, 相当于一个储量超过  $4\,5 \times 10^8 \text{ t}$  的大油田。在我国, 水溶气具有广阔的勘探前景。

**关键词:** 松辽盆地; 水溶气; 油气资源; 油气聚集

**中图分类号:** TE122.1

**文献标识码:** A

## 1 水溶气资源的基本概念与研究意义

### 1.1 水溶气的基本概念

水溶气是一种特殊类型的天然气资源。通常, 天然气可以被溶解的方式富集于地下储水层中, 当地下水被采到地表后, 溶解在水中的天然气将会因水溶气饱和度的降低而从水中析出, 成为与常规天然气一样的可利用的工业燃料或原料。

沉积盆地的有机质在生物改造和热化学动力学作用下生成的油气, 在从源岩排出和在向储集层运移过程中, 其中的一部分会被孔隙水溶解和围岩吸附。但是, 只有在溶解和吸收量得到满足后它们才能以游离态富集成藏<sup>[1,2]</sup>。因此可以认为, 凡是已经找到了油气聚集的盆地都存在水溶气资源, 只是数量大小不同。此外, 那些没有发现工业价值油气藏的盆地也可能有水溶气资源。从理论上讲, 水溶气资源的分布领域较常规天然气的领域更加广泛。

### 1.2 国外水溶气资源开发现状

全世界水溶气资源丰富<sup>[3~5]</sup>。前苏联的水溶气

资源约有  $400 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 美国仅德克萨斯州和路易斯安那州的水溶气原始资源量就有  $6\,17 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 日本的水溶气储量约为  $(0\,739 \sim 0\,887) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。此外, 匈牙利、菲律宾、尼泊尔、伊朗、意大利等国的水溶气资源也很多。全世界的水溶气资源总量在  $n \times 10^{16} \sim n \times 10^{18} \text{ m}^3$ 。不同国家和不同地区的每口井日产水量和产气量差别很大。一般说, 日产水量  $5 \sim 200 \text{ m}^3$  时, 产水溶气量可达  $100 \sim 40\,000 \text{ m}^3$ 。日本是目前开采水溶气最多的国家, 仅 1977 年开采量就达  $5\,45 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 到 1978 年开采量累计超过  $1\,3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

### 1.3 中国的水溶气资源及研究意义

中国的水溶气资源调查研究工作目前基本处于空白状况<sup>[6]</sup>, 只有一些零散的研究成果, 尽管如此, 这些成果对于我们进一步开展水溶气资源研究仍十分宝贵。

根据日本和其他国家水溶气田的分布规律, 张

收稿日期: 2003-02-12; 修回日期: 2003-04-22.

基金项目: 国家重大基础研究项目(编号: G1999043310)资助

作者简介: 武晓春(1972-), 女, 辽宁盘锦人, 博士生, 主要从事油气资源评价与油气勘探理论研究.

恺等 采用类比法预测出我国水溶气资源总量约为  $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 与我国常规气层气资源量接近。杨远聪等 对我国四川盆地部分地区进行了考察, 认为在中深层高压区带内存在大量的水溶气资源。本文从基础研究出发探讨制约水溶气资源富集的地质因素和水溶解资源的评价方法。

## 2 地下水溶气资源富集的主控因素

在油气勘探过程中经常遇到高产水井, 伴随水有时产出石油, 有时产出天然气, 其产量也因地区、层位和深度不同而异。研究和阐明水溶气富集的地质因素, 对于预测和评价该类天然气资源具有重要意义。

### 2.1 在气源条件好的沉积盆地地下水容易富集天然气

我国松辽盆地已发现的油气藏都分布在滨州铁路以西, 主要目的层是青山口组之下的扶杨油层(FY)和青山口组与嫩江组之间的萨尔图(S)、葡萄花(P)、高台子(G)3套油层。钻探结果表明, 滨州铁路以东的滨北地区油气井单位水产气量远不及铁路以西大庆长垣等含油气地区的大。前者  $1 \text{ m}^3$  水产的气量平均不足  $2 \text{ m}^3$ , 处于欠饱和状态, 仅为后者的  $1/5$ 。在滨州铁路以西地区, 黑帝庙组(浅层)及其以上地层随水产出的气量远不及黑帝庙下部的萨尔图、葡萄花和高台子组油层和扶杨油层的大, 前者不到后者的 20%。这说明, 水溶气富集与油气富集有密切关系。从理论上分析后认为, 油气大量富集的地区, 一方面由于油气生成量大, 油气在水中几乎已经达到饱和, 因而钻探过程中随水采出的气量也大。另一方面已经富集成藏的油气会因构造变动强烈和地表淡水的淋漓作用而受到破坏, 如松辽盆地滨北地区和黑帝庙油层之上浅层水溶气量较少(目前尚未达到饱和), 主要与地表淡水的淋漓作用和天然气的扩散作用有关(图 1)。

### 2.2 地下储水量大的层位储气量大

在气源较充足的情况下, 水溶气量的大小与地下储水层分布面积( $S$ )、厚度( $H$ )和孔隙度( $\Phi$ )等因素有关。 $S$ 、 $H$ 、 $\Phi$ 等3个参数大的层位储水量大, 储气量大。一般说来, 地下水储量的大小是决定地下水溶气资源量的最基本的地质条件, 它的计算公式为(式 1):

$$V_w = S \times H \times \Phi \times S_w \times 10^6 \quad (1)$$

式中:  $V_w$  为地下储层储水量,  $\text{m}^3$ ;  $H$  为地下储层厚度,  $\text{m}$ ;  $S$  为地下储层面积,  $\text{km}^2$ ;  $\Phi$  为地下储层孔隙

度, 小数;  $V_w$  为地下储层含水饱和度, 小数。

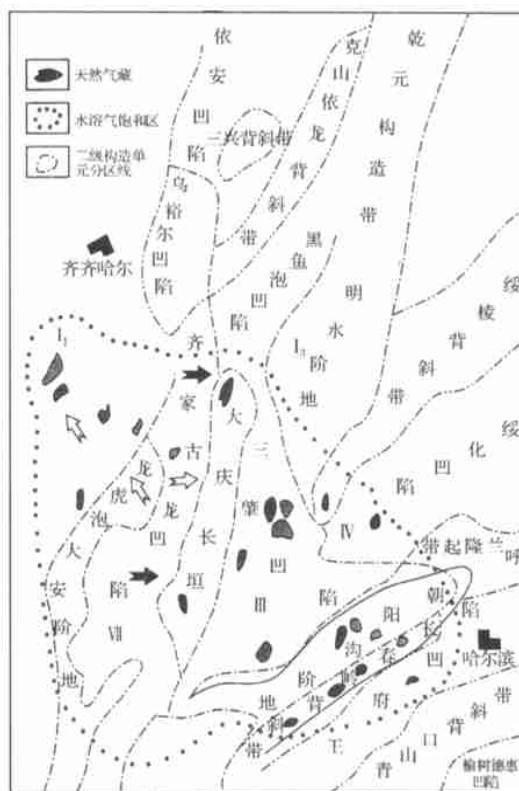


图 1 松辽盆地北部天然气富集与水溶气饱和度和量关系

### 2.3 地下水溶气量的大小取决于水在地下的溶气能力

在不同的地质条件下, 相同水量的溶气能力不同, 因而溶气量也不同。水在高压和低矿化度条件下溶解的气量大, 在同样条件下, 对低分子烃气的溶解量大于高分子烃。温度对水溶气量的影响较为复杂。低于  $80^\circ\text{C}$  时, 水溶气量随温度升高而减少, 高于  $80^\circ\text{C}$  时, 水溶气量随温度升高而增大<sup>[7]</sup>。在沉积盆地一般的温度和压力条件下,  $1 \text{ m}^3$  水能够溶解的最大气量在  $0.5 \sim 12 \text{ m}^3$  之间。表 1 是一些学者的水溶气能力物理模拟实验数据<sup>[4, 8, 9]</sup>。不难看出, 淡水在地下的溶气能力最高(表 1)<sup>[7]</sup>。

### 2.4 地下水溶气量的计算

在确知地下储水层厚度( $H$ )、面积( $S$ )、孔隙度( $\Phi$ )、含水饱和度( $S_w$ )和单位体积水的溶气量( $q_{wg}$ )的情况下, 地下水溶气量( $Q_{wg}$ )可以通过下列公式计算, 即:

$$Q_{wg} = H \times S \times \Phi \times S_w \times q_{wg} \times 10^{-4} \quad (2)$$

式中:  $Q_{wg}$  为地下水溶气总量,  $\text{m}^3$ ;  $q_{wg}$  为地下每立方

表 1 水溶气能力物理模拟实验数据

水的标准 含盐度(g) (每升水含 氯化钠量)	温度 ( )	压力(M Pa)					
		5	10	15	20	25	30
20	20	1.232	2.098	2.775	3.305	3.740	4.103
	40	0.995	1.666	2.225	2.710	3.122	3.488
	60	0.812	1.455	1.986	2.423	2.812	3.131
	80	0.763	1.388	1.912	2.348	2.712	3.027
100	20	0.755	1.322	1.757	2.110	2.407	2.648
	40	0.603	1.101	1.495	1.810	2.083	2.305
	60	0.541	1.030	1.328	1.704	1.982	2.201
	80	0.502	0.945	1.318	1.642	1.905	2.124
200	20	0.433	0.791	1.081	1.301	1.443	1.552
	40	0.339	0.641	0.899	1.101	1.259	1.343
	60	0.302	0.583	0.819	0.998	1.152	1.255
	80	0.281	0.547	0.781	0.961	1.108	1.209
300	20	0.269	0.478	0.657	0.781	0.876	0.912
	40	0.247	0.439	0.608	0.724	0.808	0.842
	60	0.228	0.407	0.578	0.697	0.778	0.820

米水中的溶气量,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $H$  为储水层厚度,  $\text{m}$ ;  $S$  为储水层分布面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Phi$  为储水层孔隙度, %;  $S_w$  为储水层孔隙中含水饱和度, %。

### 3 地下水溶气资源评价方法

#### 3.1 水溶气释放机理

开采水溶气资源时, 首先将水及水溶气同时采出地面, 在温度、压力降低情况下, 溶解于水的天然气就会释放出来。释放出来的气量与地下目的层的水溶气能力和地表条件下的水溶气能力相关, 计算公式为:

$$\Delta Q_{wg} = V_w \cdot [q_{wg}(z) - q_{wg}(z_0)] \quad (3)$$

式中:  $\Delta Q_{wg}$  为水溶气采到地表后的释放量,  $\text{m}^3$ ;  $V_w$  为从目的层采出的水体积,  $\text{m}^3$ ;  $q_{wg}(z)$  为目的层内单位体积水的溶气量 (小于或等于水的溶气饱和度),  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $q_{wg}(z_0)$  为单位体积地下水采到地表后的溶气饱和度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

图 2 是松辽盆地地质条件下, 水溶气饱和度随埋深的变化情况。由图 2 可知, 将 2 500 m 深处的地下水采到 1 000 m 处时, 约有 50% 的溶解气析出, 当被采到地表时, 约有 95% 溶解气析出,  $1 \text{ m}^3$  水析出的天然气量可高达  $3 \sim 4 \text{ m}^3$ 。

#### 3.2 水溶气析出成藏物理模拟实验

随着地层的压实成岩作用的增强, 地质条件下源岩内部的水溶气将随水的不断排出而排出。当水的温压条件或矿化度条件发生了变化时, 部分天然气便释放出来。这部分的析出的天然气在浮力作用下

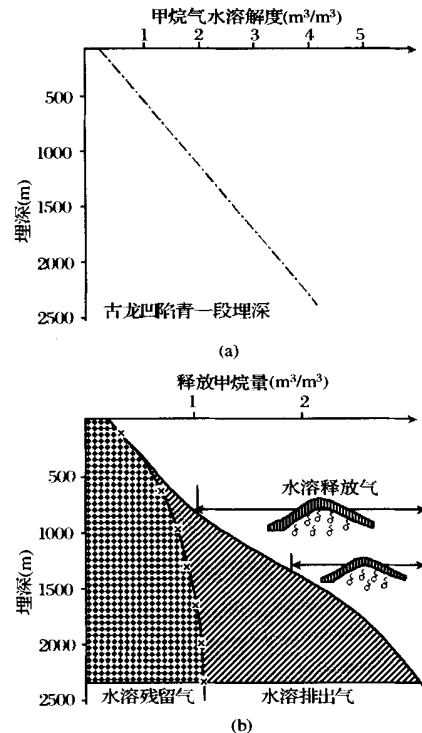


图 2 松辽盆地青山口组一段地质条件下水溶气饱和度随埋藏深度变化

(a) 甲烷气水溶解度随埋深变化; (b) 每立方米岩石水溶排运气释放量随上升高程变化

向上运移, 遇到合适的圈闭就能富集成藏。图 3 为一物理模拟实验。实验时, 首先使容器中的水饱含天然气, 然后将水顺透明胶管向上排泄, 并在不同的高程处安置有集气瓶 (类同于天然气在地质条件下运移遇到的圈闭)。从水中释出的天然气能够在“圈闭”中聚集。实验结果表明, 靠近容器附近的“圈闭”中聚集的天然气量最少, 离容器最高最远的“圈闭”中聚集的天然气量最多, 其他“圈闭”聚天然气量介于二者之间。在这一实验中, 没有考虑温度条件, 仅反映了压力变化对水溶气析出量的影响。在地质条件下, 地下水向上运移时, 温度和压力都在降低, 因而释放出来的气量更多。

#### 3.3 水溶气析出临界深度的确定与水溶气析出量的模拟计算

在计算地下水溶气资源量时有两个基本概念需要弄清: 一是水溶气的饱和度, 二是水溶气析出的临界深度。

(1) 水溶气饱和度。系指每立方米水在实际地质条件下能够溶解的最大气量。一般说来, 埋深越大的地层达到饱和的可能性越大, 这是因为埋深大的地层内生成的气量大, 能很容易使地下水溶气量达

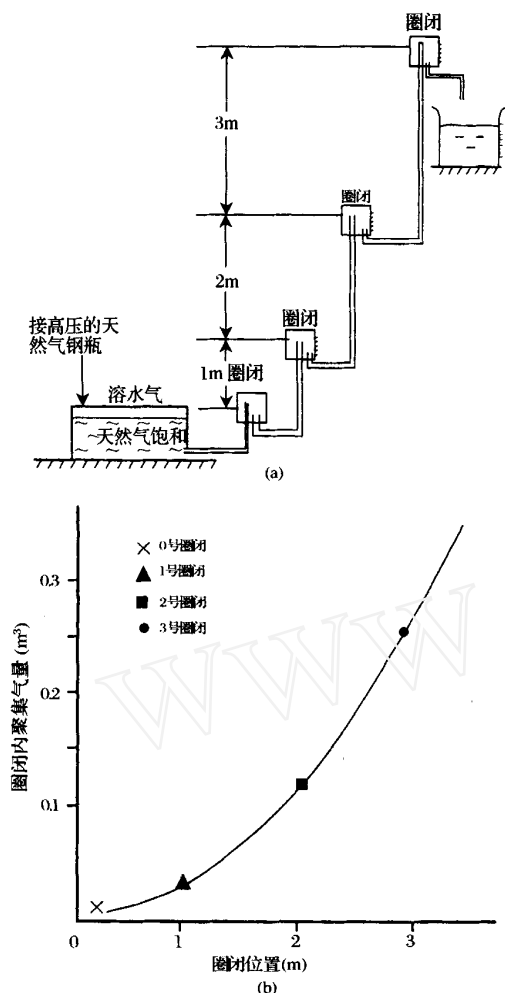


图3 水溶相天然气运聚释放成藏机理  
物理模拟实验与结果

(a) 装置简图; (b) 圈闭位置与聚气量关系

到饱和。另外, 浅部地层水中溶解的天然气量容易在浓度梯度作用下向地表扩散, 从而使含气量达到饱和的地层水变为不饱和。松辽盆地各探井油、气、水试产结果表明<sup>[10]</sup>(图4), 当埋深达到750m后, 水中溶解的气量达到饱和。同时也说明, 该地区750m以下是寻找和勘探水溶气资源最有利的目标层段。

(2) 水溶气析出临界深度。这一临界深度系指地下目前含气量尚未达到饱和的水被采到使其含气量达到饱和并开始析出气时对应的深度。这一深度对于计算水溶气资源量和设计水溶气开采方案都具有重要的研究意义。研究表明: 这一深度越大, 一立方米水采到地表后释放出来的气量越大; 这一深度越浅, 1 m<sup>3</sup>水采到地表后能够释放出来的气量越小。确定这一临界深度需要考虑2个条件: 一是研究区地下水溶气饱和度随埋深的变化规律; 二是研究区水溶气目的层每立方米水当前实测溶气量的大小

(图5)。

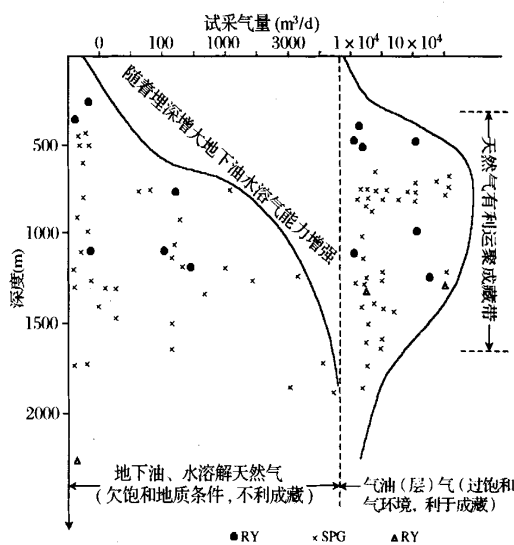


图4 大庆长垣及其以西地区探井  
试产气量与埋深关系(庞雄奇, 1995)

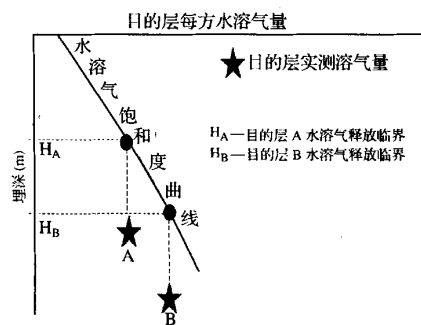


图5 水溶气饱和度与水溶气释放临界  
深度及研究意义

在确定了目的层埋深、水溶气量及其析出临界深度后, 水溶气资源量可以依据式(3)计算。

$$Q = V_w [q_{wg}(z) - q_{wg}(z_0)] \quad (4)$$

式中:  $Q$  为目的层可采出水量, m<sup>3</sup>;  $V_w$  为对应于目的层释放气临界深度( $z$ )处的水溶气饱和度, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  $q_{wg}(z)$  为对应于目的层在地表条件下的水溶气饱和度, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。

## 4 大庆长垣及其以西地区水溶气资源评价

### 4.1 地质条件简介

大庆长垣及其以西地区白垩系发育, 其主力源岩层是青山口组及其上部的嫩江组, 在两组之间发育的姚家组既是研究区最重要的含油气层, 也是主要的产水层。目前, 在钻探萨尔图、葡萄花和高台子组过程中发现有大量的水溶气资源, 单井日产水



成藏。

(2) 计算水溶气资源量除了需要考虑地下水溶气总量之外, 还需要考虑水的采出率、水溶气释放的临界埋深以及单位体积水自地下采到地表后的释放气量等。

(3) 对大庆长垣以其以西地区约  $1\ 200\ \text{km}^2$  的萨尔特、葡萄花和高台子组油层的水溶气远景资源评价结果约为  $4\ 500 \times 10^8\ \text{m}^3$ , 依油气当量换算相当于一个储量达  $4\ 5 \times 10^8\ \text{t}$  的大油田, 它们的开发利用有待于将来科学技术的进步。

#### 参考文献:

- [1] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 160
- [2] 庞雄奇, 姜振学, 李建青, 等. 油气成藏过程中的地质门限及其控油气作用[J]. 石油大学学报, 2000, 24(1): 53-58
- [3] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [4] 包茨. 中国天然气地质学[M]. 北京: 中国地质出版社, 1988
- [5] 张子枢. 水溶气浅谈[J]. 天然气地球科学, 1995, 6(6): 29-34
- [6] 关德师, 牛嘉玉, 郭丽娜, 等. 中国非常规油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995. 104-112
- [7] Pang X, lan Lerche. Constraints on hydrocarbon migration from the Qingshahou Source rock in the west of the North Shongliao Basin[M]. China: Petroleum Geoscience, 1997, 3: 73-94
- [8] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995. 270
- [9] 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等. 深盆气成藏门限及其物理模拟实验[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 207-214
- [10] 庞雄奇, lan Lerche, 王雅春, 等. 煤系源岩排烃门限理论研究与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 276

## DISCUSSION ON MAIN CONTROL FACTORS AND EVALUATION METHODS IN THE CONCENTRATION OF WATER SOLUBLE GAS

WU Xiao-chun<sup>1</sup>, PANG Xiong-qi<sup>2,3</sup>, YU Xing-he<sup>1</sup>, WANG Ming<sup>3</sup>

(1. China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. Education Department

Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanism, Petroleum University, Beijing 102249, China;

3 Basin and Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract** Water soluble gas is one kind of natural gas which are mainly composed of methane. The concentration of water soluble gas is dominantly controlled by temperature, pressure, water salinity as well as the water capability of the reservoir. The water-soluble gas resource underground become rich as water storage capacity rises at higher temperature and pressure of the water medium. Both the quantity of natural gas resources underground and the water production of the drilling well per day as well as the quantity of gas released on the surface should be concerned. The more highly decreasing of the water soluble gas producing pressure, the more amount of gas being released. Commonly, gas saturation of water underground varies from  $1\ \text{m}^3$  to  $10\ \text{m}^3$ , but in east sedimentary basin of china such as Daqing area the figure is highly up to  $4\ 500 \times 10^8\ \text{m}^3$  that equal to a over  $4\ 5 \times 10^8\ \text{t}$  reserve field. The exploration of water soluble gas in our country has good respects.

**Key words** Songliao basin; Water-soluble gas; Oil and gas resource; Oil and gas concentration