

文章编号: 1001-6112(2008)02-0154-08

# 含油气盆地水文地球化学规律

赵克斌<sup>1,2</sup>, 刘崇禧<sup>3</sup>, 李伟<sup>4</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石油大学, 北京 102249; 3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 合肥石油化探研究所, 合肥 230022; 4. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:** 从自流盆地整体出发, 研究了盆地油气成藏的水文地球化学演变规律, 得出以下新认识: 1) 盆地内地下水的水平运动, 使水化学成分从供水区到排泄区呈现有序变化, 为研究油气水之间的关系、揭示油气成藏的分布规律提供了水文地质依据; 2) 自流盆地内存在2种截然不同的水文地质系统, 其变化受控于盆地的次一级构造单元; 3) 自流盆地内渗入成因水和沉积成因水的径流特征、驱动能量、水化学成分具有很大差异, 对油气的生、运、聚、散会产生不同的影响, 二者形成的锋面是不同性质油气聚集的地理分界线; 4) 与油气有关的浅层水文地球化学效应可分布在自流盆地的不同水文地质单元内, 尤其是控油断裂带与生油中心区上方。总体上看, 含油气盆地地下水化学异常的变化特点与分布规律均与油气藏存在密切关系, 因此可用于评价盆地含油气远景, 预测油气赋存有利区。

**关键词:** 地下水; 水动力场; 水化学场; 水文地球化学效应; 油气勘探; 含油气盆地

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

## HYDROGEOCHEMICAL REGULARITY OF PETROLIFEROUS BASINS

Zhao Kebin<sup>1,2</sup>, Liu Chongxi<sup>3</sup>, Li Wei<sup>4</sup>

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing, 100083 China;*

2. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China;* 3. *Hefei Institute of Petroleum Geochemical*

*Exploration, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Hefei, Anhui 230022, China;*

4. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** The hydrogeochemical evolution regularity of oil and gas accumulation in an artesian basin has been studied by taking the artesian basin as a whole. Some new understandings are gained as follows: 1) The horizontal movement of the underground water within the basin causes the hydrogeochemical compositions to change regularly from the water recharge area to the water discharge area, providing the hydrogeological basis for studying both the relationship among oil, gas and water, and the distribution regularity of oil and gas accumulations. 2) Two distinct hydrogeological systems exist in the artesian basin, which are controlled by the sub-structures of the basin. 3) The runoff characteristics, the drive energy and the geochemical compositions of the penetration water and the sedimentary water within the artesian basin may differ obviously, and may exert different effects on the generation, the migration, the accumulation and the dispersion of oil and gas. And the front interface of the two kinds of water can act as the geographical border of the oil accumulations with different properties. 4) The shallow hydrogeochemical effects related to oil and gas may distribute in various hydrogeological units of the artesian basin, especially in the oil-controlling fault zones and the oil-generative centers. In a whole, the characteristics and the distribution regularity of the hydrogeochemical anomaly are closely related to oil and gas, and can be used to evaluate the oil and gas prospects, as well as to predict the favorable zones for oil and gas to accumulate.

**Key words:** underground water; groundwater dynamic field; groundwater chemical field; hydrogeochemical effect; oil and gas exploration; petroliferous basin

收稿日期: 2007-12-28; 修订日期: 2008-03-10。

作者简介: 赵克斌(1964—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事油气地球化学勘探研究工作。E-mail: zhaokb@pepris.com。

# 1 含油气盆地与自流水盆地的关系

广义的自流水盆地由几个不同时代的自流水层或次级自流水盆地组成。这些自流水层或次级自流水盆地在平面上常常彼此连接或相互重叠,构成现代补给区、承压水层分布区和排泄区之间的特定联系(图 1)<sup>[1]</sup>。分布在盆地内不同级次构造中的油气藏,都对自流水盆地的承压水具有从属关系,也即不同程度地受压域水文地质条件的控制。油气勘探实践<sup>[2]</sup>证明,每一个含油气盆地其周边都被出露于地表的或潜伏的分水岭所包围,使自流水盆地控制范围远远大于含油气盆地面积,形成了含油气盆地坐落在自流水盆地之中的局面。下文以准噶尔盆地为例来说明盆地水文地质条件对油气形成与分布特征的控制作用。

准噶尔盆地是以中生代和上古生代陆相沉积建造为主的地台型、封闭性大型自流水盆地,地下水补给区分布于北部的天山、西部的准噶尔界山和北部的阿尔泰山。这些山脉是盆地内地下水和地表水系的发源地,除第四纪自流水外,对于第三纪、中生代、上古生代自流水来讲,其集水面积在盆地南部已跨入霍尔果斯断裂带以南的天山山脉<sup>[2]</sup>。该盆地周边山区海拔高程多在 2 000~ 3 000 m(最高 5 500 m),盆地内部地形由南或东南向北或西北倾斜,标高值在 200~ 700 m,巨大的地形高差为现代受水区的渗入水向盆地内部渗流提供了很大势能。以盆地内部二叠系底界深度(4 000 m 以下)推算,折算水位标高值为 1 439 m(八区检 5 井),

表明沉积成因水在盆地内部具有较高的水头压力或水压系统。因此,沉积成因水与渗入成因水的接触“锋面”主要偏向于盆地边缘的内侧一带,此处地下水矿化度普遍较高,最高达 113.6 g/L(九区 438 井),水型以 NaHCO<sub>3</sub> 型和 CaCl<sub>2</sub> 型为主,水的变质程度较高,处于弱还原—还原环境的阻滞带,有利于油气富集而形成油气藏。该区油田多沿盆地边缘分布的特点与地下水活动有直接关系。在地下水“锋面”的外侧附近,以来自补给区的渗入水为主,矿化度普遍较低(多在 2~ 4 g/L),以 NaHCO<sub>3</sub> 型和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 型水为主<sup>[2]</sup>。但这并不意味着盆地内部含油气性差或不存在油气藏,恰恰相反,在盆地内部水压系统平衡带,即渗入成因水渗入较远的盆地腹部地区,同样会形成油气藏<sup>[3,4]</sup>。

小型自流水盆地也具有上述大型自流水盆地的水文地质规律。从水文地质角度讲,含油气盆地是自流水盆地中巨厚沉积岩层的内带部分,它不包括自流水盆地现代受水区和强烈的水交替区。

# 2 水动力场与水化学场的统一性

## 2.1 水动力场及其对水化学场的影响

水动力场与水化学场是盆地内水文地质过程统一体 2 种不同的表现形式。含油气盆地内地下水的水平运动包含着垂向运动的性质,因此涉及地下很大的深度,它的水流系统及其集水范围都表现为空间上的立体形态。最简单的地下水流是地下水在均质各向同性含水介质(岩系)中的运动。地下水在渗流运动中,其水流系统由众多的流线组成。流线方向在不同水文地质区带内是不同的:在地下水补给区是下降的;在排泄区是上升的;在径流区总体是水平的。但流线方向也会随地质构造条件等而变化。所有流线都起始于补给区,经过不同的深度,最后指向排泄区<sup>[2]</sup>。地下水任一标高处的测压水面都比自由水面高,二者在中线相交,因此,在补给区井深增加时,井中水位会上升。在这种情况下,主要排泄区地下某一标高处的测压水面高于地面,即使没有隔水层存在,在井深加大到一定深度时,也能打到自流水。也就是说,在均质含水岩系内,地下水流系统的排泄区均可存在自流水<sup>[5]</sup>。这是在地下水排泄区寻找油气藏以及与油气有关水化学异常形成的理论基础。

地下水流会引起一系列油气地球化学、生物化学、物理化学及水文化学等方面的特殊变化<sup>[6~9]</sup>,主要表现在以下几个方面:1)地下水溶解矿物质的能力及其含量随着水与岩石接触的时间而增加,因

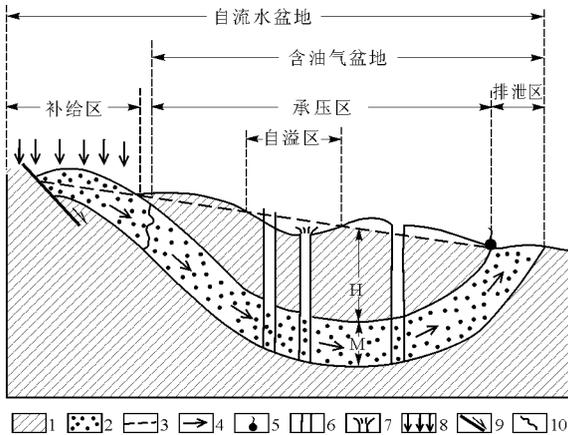


图 1 自流水盆地与含油气盆地关系示意<sup>[1]</sup>

- 1. 隔水层; 2. 含水层; 3. 地下水测势面;
- 4. 地下水流向; 5. 上升泉; 6. 钻孔; 7. 自喷孔;
- 8. 大气降水; 9. 断层; 10. 氧化-还原界面
- H. 与含水层顶面压力相当的高度; M. 含水层厚度

Fig. 1 Schematic diagram showing the distribution of the artesian basin and the petroliferous basin

此在积极交替的局部水流动系统内的补给区,水中矿物质的含量比较低;而在排泄区及深循环的区域缓慢流动系统中,水中矿物质的含量较高。2)在2个或3个水流系统相会合的部分,流网变得稀疏,水的流动缓慢,水搬运物质的能力下降,因而容易产生溶解物、悬浮物、乳化物或胶状物质的堆积,形成水文地质工作者俗称的水动力圈闭带。3)由于不同系统的水流分别来自不同的补给区,而且流经不同的距离和时间,因而在水流系统之间(尤其是横向上)会存在水质分异,使水型和离子组合发生变化。穿越不同水流系统的交界面(分水界面),在垂向上往往可以追溯到矿化度及水质类型的内在联系,但又存在一定的差异,尤其是局部水流系统和区域水流系统之间,这种差异尤为明显。这与来自不同供水区或流经不同距离的水源交叉、重叠等作用有关。4)沉积盆地内地下水不同流动系统及运动方向的叠加,使地表温度等参数发生变化,从而引起植被、土壤类型、微地貌特征及盐类聚集等自然现象的改变,在形成深部油气地球化学形迹的同时,也为水化学找油指标与异常形成带来一定的干扰。加强水文地质条件尤其是区域流动系统的研究,是鉴别油气信息、剔除局部流动系统假异常的有效途径。5)在供水区,向下流动的低温水将降低地温梯度,而在流动系统向上运动的一侧(泄水区),则可能出现正的地温异常。

从上文分析可知,沉积盆地内地下水的运动,总会沿着阻力最小的通道流动,在横向上具有连续渗流、流线多变的特征,在纵向上具有混源穿层流动及分带性的特征。地下水流动对于油气的运移、聚集成藏以及含油气区水文地球化学特征的形成均可产生深远的影响。

### 2.2 含油气盆地水化学场的地球化学特征

水化学成分与水动力条件存在着密切的关系,前者随着后者而变化。总体而言,从盆地的供水区到排泄区,沿着地下水的运动方向,水化学成分会发生有序的变化,在纵向上不同含水岩系之间的水化学成分存在着蛛丝马迹的相互联系,地下水的化学性质及水化学场的分布模式,在一定程度上能够刻划盆地的水动力状态。以吐哈盆地台北凹陷为例讨论如下。台北凹陷位于吐哈盆地北部,凹陷内晚二叠世—第四纪沉积层厚达8000余米,其中存在上二叠统、中—上三叠统、中—下侏罗统3套生油岩系。在该凹陷内发现了上三叠统克拉玛依组、中侏罗统西山窑组、三间房组上、三间房组下及七克台组等5套含油层组合。台北凹陷地势为北高

(海拔1300m左右)南低(海拔440m左右)、东高(海拔1000m左右)西低(海拔400m左右)。凹陷呈近东西向,自北而南分为博格达山麓褶皱带、台北向斜带及火焰山—七克台褶皱带。主要供水区为博格达山,露头多为晚石炭世的火山喷发岩与变质岩。供水区的水源沿可渗透地层、不整合面(沉积层中存在8个不整合面)及断裂系统向盆地中心运动,在火焰山—七克台褶皱带及其北侧泄出,以泉的形式渗出地面或通过中、下侏罗统一上新统帕卡拉格组地层露头蒸发排泄。沿着地下水运动方向,中侏罗统地下水化学场呈现有序的变化。从图2可以比较清楚地看出,北部的水化学异常,矿化度为3~6g/L;向凹陷内部矿化度增加速率较快,一般在10~32g/L;再向南矿化度起伏变化较大,出现了高低相间的混杂局面。在东西方向上,大致可分为3带:西带矿化度以中、高含量为主;中间带(二塘沟—台南1井)矿化度较高,但变化较大;东带在高含量的背景上,矿化度呈规则的环状分布。其它水化学参数,如钠氯比、钙镁比、脱硫系数、碳酸盐平衡系数及微量元素等,在平面上的展布均显示了同矿化度类似的特征。在纵向上,不同时代地下水中诸多水化学参数,其含量组成3个由低到高的正向水化学剖面(图3)。从图3可以看出,许多参数含量高低的变化趋势基本一致,一方面说明本区地下水化学场比较稳定,另一方面也说明水化学成分在纵向上存在着一定的内在联系。

台北凹陷区域水文地球化学场与水动力场的特征可归结为:1)随着地下水的运动,水型自北而南由以NaHCO<sub>3</sub>型为主逐渐演变为以CaCl<sub>2</sub>型为主,前者主要分布在巴喀、丘陵及鄯8—4井及其以北地区,后者主要分布在凹陷中部和南部的广大地区。2)矿化度在北低南高的背景上存在局部变化,北部(如丘陵地区)矿化度最低,中部(如鄯善油田等地区)矿化度增高,南部(如连坎、温西④—温吉

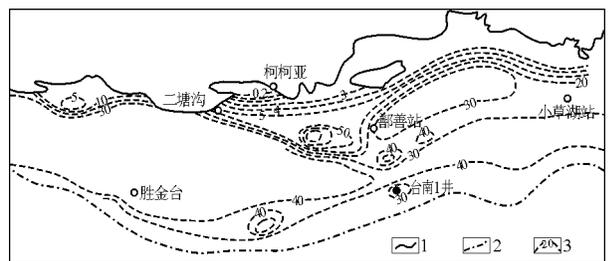


图2 吐哈盆地台北凹陷中侏罗统地下水矿化度等值线  
1.盆地边界;2.凹陷分界线;3.矿化度等值线/(g·L<sup>-1</sup>)

Fig. 2 Contour distribution of groundwater mineralization degrees of the Middle Jurassic in Taibei Sag, the Tuha Basin

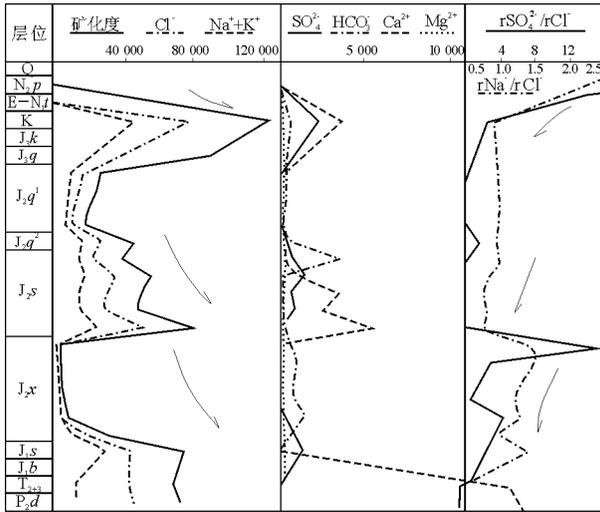


图 3 吐哈盆地台北凹陷地下水化学成分纵向剖面  
浓度单位为 mg/L。

Fig. 3 Vertical profiles of geochemical parameters of the groundwater in Taibe Sag, the Tuha Basin

桑①号构造等地区) 高达 30~ 50 g/L。但在中南部偶见 5 g/L 的低矿化度油水。3) 地下水的变质程度具有北低、中高、南部较低的特点。北部地下水的变质系数多在 35~ 60 之间; 中部较高, 可达 30~ 40; 而到南部的七克台—火焰山褶皱带又降到 2~ 6, 台孜油田降到 3~ 29。4) 水文地质封闭程度北部较差、中部较好、南部变化较大。反映水文地质封闭程度的脱硫系数, 在巴喀—丘陵以北地区为 10~ 15 以上; 到凹陷中部鄯善油田—温吉桑油田一带降到 0.5~ 1.5; 到南部的七克台—火焰山褶皱带则降为 0.01~ 8.50。反映与地表水联系强弱或交替程度的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量, 具有北高(10%~ 15%)、中低(大都小于 1%)、南部变化幅度大(0.1%~ 7.7%) 的特点。5) 以上侏罗统齐古组—中侏罗统七克台组上部泥岩段和中侏罗统沙溪庙组—西山窑组下部泥岩段 2 个区域性隔水层为界, 在纵向上根据水化学参数由低到高的变化特征, 可划分为 3 个水文地质发育阶段。

实例说明, 沉积盆地内同一含水岩系地下水的水动力场与水化学场在具有自身变化特征的同时, 二者还构成密切联系的统一体。在区域水动力条件的背景下, 水化学成分发生相应的变化, 换句话说, 地下水循环条件的变更, 必然伴随着水化学成分的变化, 并且具有横向上分区、纵向上分带的特征。水动力与水化学的相互关联与时空场的一致性, 为研究油气水之间的关系, 指示油气聚集、分布的变化区带奠定了基础。

### 3 凹陷对水文地球化学特征的控制

凹陷是油气生成与成藏的主要场所, 控制沉积成因水的起源与发展。含油气盆地内沉积成因水是沉积物在上覆地层重量所引起的地静压力作用下压榨出来的孔隙水。虽然在盆地不同部位都有可能形成沉积水, 但大量的沉积成因水是沉积凹陷内形成的。这是因为凹陷多数是盆地的中心和沉降中心, 不仅沉积物厚度大, 泥质或细粒成分多, 而且此处地静压力最大, 所以凹陷是沉积成因水的源区。

沉积成因水的流动, 主要是在地静压力差的作用下, 从凹陷中心向周边(尤其是隆起区地静压力最小) 方向运动(包括含水岩系内由泥质层压入储集层的水及储集层本身的沉积水)。当孔隙流体承受的压力超过静水压力时, 就形成剩余压力(亦称孔隙流体超压力或过剩压力)。剩余压力使孔隙流体排出, 导致沉积成因水流动, 一般是从剩余压力较大处流向剩余压力较小处。

沉积成因水的垂向和横向运动不是单一或独立地进行的, 而是联系在一起组成相互协调统一的流动系统。它们的流动速度一般比较缓慢, 在构造变动尤其是断裂活动时, 流动速度才会加剧加快。在碎屑岩沉积盆地内, 从微观上讲, 沉积成因水总是由泥岩向砂岩中流动; 从宏观上看, 沉积成因水总是由深部向浅部、由沉积凹陷中心向凹陷边缘运动。如渤海湾盆地济阳拗陷各凹陷在古近纪就形成了相对独立的沉积体系, 始新统和渐新统 2 套含水岩系的沉积成因水都源于凹陷, 其运动方向都是从沉积凹陷中心指向边缘(图 4)。

我国油田水(包括海相和陆相) 的化学组成比

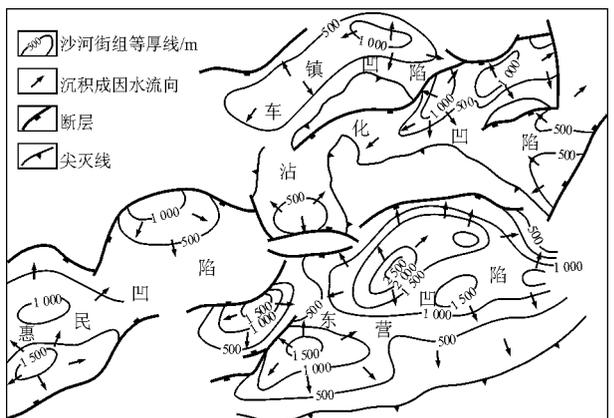


图 4 渤海湾盆地济阳拗陷沙河街组沉积成因水的运动方向<sup>[10]</sup>  
Fig. 4 Flow directions of the sedimentary water in Shahejie Formation, Jiyang Depression, the Bohai Bay Basin

较复杂, 独具风貌, 但在盆地水文地质总特征格架下, 不同凹陷具有一定的差异。沉积凹陷是含油气盆地的油源区, 循环于其中的地下水经历了油气生成、运移、聚集的全过程, 油气成藏后, 如果没有构造变动, 地下水就会处于动平衡状态。在诸多因素(地质条件、地温环境及油气演化程度等)的严格控制下, 水化学成分会朝着一定的方向发展, 致使各凹陷之间的水化学组成与性质存在一定的区别<sup>[11~16]</sup>。也就是说, 含油气盆地次一级构造的油气水文地球化学成分, 在保持盆地水化学成分总特征的基础上, 具有自身固有的风格及发展方向, 尤其是生油凹陷区。生油凹陷区是控制油田水化学成分演化的基本地质单元, 不同生油凹陷区水化学特征个性突出(表 1)。

## 4 地下水锋面与不同性质油气的分布

### 4.1 地下水锋面的形成

沉积成因水和渗入成因水是含油气盆地 2 种

表 1 同一盆地不同生油凹陷地下水矿化度的变化

Table 1 Changes of groundwater mineralization degrees of different petroleum generative sags of the same basin

盆地	凹陷	矿化度均值/ (g · L <sup>-1</sup> )	时代
松辽	齐家—古龙	6.9	K
	长岭	19.2	
济阳	东营	37.5	E
	惠民	34.5	
南襄	泌阳	5.2	E
	南阳	11.6	
二连	阿南	4.3	K
	额仁卓尔	> 0	
三水	西部	112.0	E
	东部	18.0	
珠江口	惠州	42.0	E
	陆丰	32.0	
莺琼	岸南	1.8	E
	岸北	16.3	
北部湾	乌石	26.0	E
	围西南	32.0	
酒泉	西部	65.0	E(L 层)
	东部	50.0	
鄂尔多斯	西部	10.0	T
	东部	32.0	
柴达木	西部	17.0	N
	北部	45.0	
塔里木	满加尔	220.0	J—T
	阿瓦提	280.0	
苏北	溱潼	26.2	E
	金湖	60.3	
	高邮	21.3	

主要成因的地下水, 它们在成因、径流特征、驱动能量以及水化学成分等方面存在很大区别。沉积成因水与地层压实作用有关, 故地下水位或测势面在盆地沉降最深部位最高, 向盆地边缘逐渐降低, 形成凸状, 与盆地中现今地层的埋藏深度成影像关系。因此, 沉积成因水的横向流动方向是从盆地中间指向边缘, 在垂向上沉积成因水沿着阻力最小的方向向上或向下流动。沉积成因水的水源补给主要是从泥岩层中被挤压出来的水。

渗入成因水的流动特性在盆地周边主要受地形和重力作用的影响, 在基岩出露区, 潜水由高处往低处流动; 大气降水和地表水在势能作用下向地下渗入。渗入成因水的流动方向由盆地边缘沿孔隙度较大的地层向下渗入到盆地内部的一定深度范围内, 在通道条件比较好的地段(断裂带、构造天窗等)以越流形式向上泄出。所以渗入成因水的流动总方向是指向盆地中心和上方。含油气盆地内渗入成因水的流动, 主要受动水压力系统的控制。从山区的补给区到盆地内的排泄区, 地形高差极大, 是形成水压头的重要因素, 其折算压力(水位)总是补给区大于排泄区, 渗入成因水沿着测势面的倾斜方向流动。其测势面形如凹状, 与盆地的地貌形态及含水岩系的埋藏深度基本一致。渗入成因水的水位, 在补给区随深度增加而降低, 即补给区渗入成因水会向下渗入; 在泄水区随深度增加而升高, 即泄水区渗入成因水会向上流动; 在盆地的中心区, 水位与深度基本上不存在线性关系, 即地下水处于水平渗流状态。

含油气盆地内 2 种不同成因的地下水, 是 2 股流动方向完全相反的地下水。在一定的范围或深度内这 2 股地下水相遇是普遍存在的现象。从水动力方面讲, 二者相遇会形成对立统一的水流混合带; 从水化学方面讲, 二者相遇会构成相互混溶的立体空间区。盆地内不同成因水相遇而形成的水流混合带称为地下水锋面。作者认为, 地下水锋面是水流系统之间的分水界面。被地下水锋面分开的 2 股水流, 分别向着各自的水位较低处流动: 渗入成因水不能直接渗入到锋面靠盆地内部一侧已被沉积成因水充满的区域; 反过来, 沉积成因水也不能跨过锋面而直接进入盆地外部由渗入成因水所占领的区域。因此, 地下水锋面两侧的地下水处于动平衡的状态。

促使地下水流动的动力因素——压实作用引起的异常高压和重力作用引起的流体动压等, 在地下水锋面附近均处于能量极小或无能量状态, 致使

锋面附近的地下水基本上呈静止的不流动状态。此时地下水动力参数的特点是: 水的测势面近似水平, 折算压力均衡, 垂向压力梯度(单位深度内压力的增加值) 等于静水压力梯度, 动力增量(动压力与静水压力之差) 为零。水化学成分开始发生变生变异。作为油气运移的重要载体, 并与油气朝夕相处的地下水, 在地下水锋面附近呈现滞流状态, 必然对油气藏特征与空间分布产生一定的影响。利用地下水锋面在凹陷内的变化规律, 可为油气勘探提供有价值的水文地质信息和依据。

#### 4.2 地下水锋面对不同性质原油分布的影响

在含油气盆地内, 地下水锋面是不同成因水的分水岭。从石油地质角度看, 地下水锋面是不同性质原油地理分布的分界线。地下水锋面内侧是烃源岩发育的最佳区域, 油气的生成、运移和聚集主要是在该区内完成的。例如东营凹陷沙河街组沉积中心在凹陷内部, 沙四段和沙三段生烃量占本区总量的 95% 左右, 排烃量占总排烃量的 90% 以上, 说明地下水锋面内侧是该凹陷最主要的油气来源。在地下水锋面内侧范围内, 只要具备良好的圈闭和储盖组合, 沉积水的势能就足以携带油气从高势能区向低势能区运移(包括水平与垂直方向) 并聚集成藏。从水文地质条件方面看, 地下水锋面内侧是沉积作用和埋藏封闭作用发育时间最长、发育程度最强的地段, 同时是淋滤作用相对最弱、水文地质期最短的地段。地下水动力场的滞流环境, 不仅有利于油气的生成, 而且也有利于油气藏的保存。表现在水化学场上, 处于高度浓缩—变质阶段和还原环境, 矿化度高, 一般大于 60 g/L, 最高超过 200 g/L(凹陷中心)。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 趋向消失, 富集 Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup>, rNa<sup>+</sup>/rCl<sup>-</sup> 比值超过海水的平均值, 多介于 0.63~0.84, 形成单一的 CaCl<sub>2</sub> 型水。原油为比重较低、粘度较小的普通(轻质)油。

在地下水锋面外侧, 石油地质特征和水文地质景观与地下水锋面内侧存在很大区别。不仅油藏数量少, 而且主要是重质油(稠油)藏。我国许多含油气盆地(凹陷)发现的重质油, 主要发育在古代与现代地下水锋面外侧或附近。重质油的形成除决定于有机质成熟度与地质构造背景等因素外, 还与渗入成因水的活动密切相关。

起源于大气降水、地表水及潜水的渗入成因水, 其化学成分的稳定性较差, 含有较多“活性”组分, 对于原油来讲, 是一种很强的溶剂和氧化剂。渗入成因水的径流水带处于强渗滤带和强透水带, 一般也是水化学元素迁移急剧变化的地区。由于渗入水的

不断淋滤, 在生物降解作用、氧化作用和水洗作用的改造下, 从生油凹陷(即地下水锋面内侧)运移而来的原油或已形成的油藏会演变为重质油。

在水文地质研究中, 地下水锋面位置(不同时代)可以作为预测油气潜力、确定不同性质原油分布范围的准则和界线, 即地下水锋面内侧是寻找油气藏尤其是轻质油的有利区, 而地下水锋面外侧附近的构造斜坡、低凸起等是勘探稠油的有利区带。因此, 深部地下水地球化学特征研究可从一个方面为油气勘探决策提供依据。

## 5 含油气盆地浅层水文地球化学效应

油气水文地质研究的目的是为油气勘探开发服务。水文地球化学勘查可在预测盆地含油气远景、指示油气富集有利区带、评价圈闭含油气性等方面提供水文地质依据。我国油气水文地质工作者在 50 余年的科研和生产实践中, 对主要含油气盆地(包括海域)进行了大规模的水文地质条件与油气关系研究, 同时还研究了包括浅层水文地球化学效应在内的油气垂向微渗漏形迹, 总结出油气藏上方浅层水文地球化学方面的诸多特点与分布规律。

### 5.1 不同水文地质单元内的浅层水化学异常

与油气有关的浅层水化学异常, 可分布在盆地的不同水文地质单元之内。

在地下水补给区(除含水岩系裸露地表外), 邻近盆地内侧多以低矿化度的淡水为主, 多数水文地球化学指标属于低值异常; 在地下水径流区, 区域水文地球化学背景与异常相对容易分离和确定; 而在地下水排泄区, 水文地球化学指标含量达到盆地最高值。水化学异常在不同水文地质单元内出现的几率, 以水化学异常的范围与面积(在油田规模相等的前提下)计, 排泄区最大, 径流区水化学异常的范围最接近含油圈闭的闭合面积, 邻近地下水补给区的水化学异常, 多沿地下水流向分布, 呈弥散态。浅层水化学异常区内的指标组成在不同的水文地质单元内也存在一定区别。可以说, 浅层水化学效应本身不是用水化学指标种类与数量确定的, 而是根据选用的有效指标组合, 利用含量的变化幅度确定的。

### 5.2 浅层水化学异常与控油断裂带

浅层水化学异常在控油断裂带上出现的几率较高。

水化学异常分布在断裂带上的原因, 一是含油气盆地内广泛发育的断裂活动(尤其是在我国东部地台区)破坏了地层的结构性和连续性, 在断层周边形成破碎带(包括不同方向断层交叉及裂隙、裂

表 2 河套盆地临河拗陷潜水水化学异常值与背景值

Table 2 Anomaly and background of various hydrogeochemical indicators in Linhe Depression, the Hetao Basin

指标	水型 (苏林分类法)	主要盐分	矿化度/ (mmol·L <sup>-1</sup> )	Eh 值/ mV	可溶气态烃		
					甲烷/ (μL·L <sup>-1</sup> )	丙烷/ (μL·L <sup>-1</sup> )	重烃/ 甲烷
背景	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	30~ 60	> 60	< 30	< 30	< 3
异常	NaHCO <sub>3</sub> CaCl <sub>2</sub>	NaCl Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	> 60	< 60	> 30	> 30	> 3

缝等), 为油气垂向运移提供了通道条件, 尤其是那些发育时间早、活动时间长、断距大的继承性断裂, 沟通了油气藏与其上覆地层或近地表烃类之间的联系, 形成较强的浅部水文地球化学异常带。二是断裂作用形成的多种多样的圈闭, 是油气富集的主要场所, 油气的微渗漏在近地表形成水化学异常, 与断裂有关的油气藏形成水化学效应, 在我国许多含油气盆地均有发现(表 2)。

综上所述, 水化学成分在控油断裂带上方, 既有原地生成的“土著”成分, 也有远源而来的“移民”成分。控油断裂带上方浅层水文化学异常沿断裂带呈串珠状分布, 是客观存在的一种地质—地球化学现象。

### 5.3 浅层水化学异常与生油中心

水化学异常在空间上的展布主要受 3 个因素控制: 一是是否存在油气田, 二是油气垂向运移的通道条件, 三是地下水锋面的位置。在沉积凹陷(生油凹陷)内, 这些因素往往是有机地组合在一起促使水化学异常的形成。如东营凹陷古近系生油中心生烃强度高值从垦利—滨州—博兴之间的  $3.61 \times 10^6$  t/km<sup>2</sup>, 向中心增高至  $32.4 \times 10^6$  t/km<sup>2</sup>, 呈有规律的同圆心状递增。围绕生油中心在周边分布着大小不等、形状各异的诸多水化学异常, 从一个侧面说明油气资源是很丰富的。这些异常的指标参数在凹陷内的不同部位变化很大。总体来讲, 凹陷中心矿化度最高(3~ 5 g/L), 以 Cl<sup>-</sup>—Na<sup>+</sup> 离子组合为主; 凹陷北部矿化度次之(2~ 4 g/L), 在以 Cl<sup>-</sup>—Na<sup>+</sup> 离子组合为主的同时, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 增加速率较快; 南部的的水化学异常矿化度普遍较低(多为 1 g/L), 以 Cl<sup>-</sup>·HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>—Na<sup>+</sup> 组合为主。异常中的可溶性气态烃、苯和酚及其同系物、荧光光谱等指标都具有较高的衬度值。土介质的烃类气体普遍是总烃高, 但甲烷所占比例较大, 近代海侵活动对现代沉积物的影响甚大。又如南襄盆地泌阳凹陷 1984 年进行油气水文地球化学调查, 采集水样 212 个, 其后又进行了以 500 m × 500 m 的网度均匀布点

的详查, 应用水化学和土介质(弥补水样点不足) 2 种方法, 进行多指标综合测量, 所发现的水化学异常与已知油田的浅层地球化学效应共同组成了一个以生油凹陷为中心、坐落有序的环状异常带。研究区油气资源丰富、生烃强度高、油层埋藏适中、元素扩散—对流作用和油气微渗漏条件好, 所以在已知油田上方均显示很强的水化学异常, 具有多参数吻合程度好的特点<sup>[2]</sup>。地质条件和表生地球化学作用的差异, 使各个异常在指标主次关系、组合与含量、形态类型与规模等方面不尽相同。

生油中心控制水化学异常形成与分布的现象, 在其他盆地的沉积凹陷内也是一种普遍现象。多年观测资料证明, 与油气有关的水化学异常重现性比较好, 重复检验异常参数及特征保持不变。表 3 所列资料进一步说明, 不仅是无机组分, 就是易于变化的有机组分在不同年份同样具有较高的可比性, 用来确定异常是稳定可靠的。南襄盆地泌阳凹陷的浅层水化学异常, 20 年后重复采样分析, C<sub>1</sub> 的均值仅降低了 0.09 μL/kg, 标准偏差由 0.92 变为 0.94; 由于油田长期注水开采, 水溶烃异常平均降低了 2.31 μL/L, 标准偏差由 0.94 变为 0.96。可以看出异常是极其稳定的。

### 5.4 浅层水化学异常与油气富集区

近地表水化学异常的形成是深部油气水影响和作用的结果, 根据浅层水化学异常的成分规律, 可以预测盆地的含油气远景、指示油气富集的有利地区。油气勘探实践证明, 综合应用水文地球化学

表 3 南襄盆地泌阳凹陷不同年份水化学成分中有机组分含量对比

Table 3 Comparison of the organic contents in the groundwater in different years from Biyang Sag, the Nanxiang Basin

年份	水化学			土介质	
	酚, 10 <sup>-9</sup>	水溶烃/ (μL·L <sup>-1</sup> )	F320nm	甲烷/ (μL·kg <sup>-1</sup> )	重烃/ (μL·kg <sup>-1</sup> )
1991	0.54	0.36	1 759	278.55	34.49
1995	0.58	0.44	1 810	264.19	32.63

勘探技术,是加快油气勘探步伐、突破出油关的一个方面。现列举几个勘探成功实例。

南襄盆地泌阳凹陷是我国系统进行水文地球化学勘查较早的地区,已被后期钻探证实并建成油气田。该区浅层水化学异常较多,如后吴庄异常,综合评价指数高达 31.6,同步荧光光谱 320nm, 380nm 和 405nm 均显示一定强度,但以反映低环芳烃特征的 320nm 强度最高,显示本异常的石油属性以轻质油为主。目前,已在 N65 井和 N67 井获得高产油流,其中 N65 井核三段 2 678.5~ 2 681.9 m 厚 3.4 m 的层段,经测试日喷原油 23.1 m<sup>3</sup>; 2 704.9~ 2 707.5 m 层段经测试日产原油 4.5 m<sup>3</sup>; N67 井核三段 2 623.3~ 2 626.8 m 层段,经测试日产原油 4.32 m<sup>3</sup>。该异常控制面积 3.2 km<sup>2</sup>,新增石油地质储量 1.16 × 10<sup>6</sup> t, 创造了一定的经济效益<sup>[2]</sup>。值得提及的是水化学异常提供的凹陷南部以勘探普通(轻质)油为主,凹陷北部以勘探重质(稠)油与天然气为主的信息是可靠的。

临南斜坡带是济阳拗陷惠民凹陷的次一级构造单元的组成部分。按照普查、详查、精查的地球化学勘探程序,在 2 000 km<sup>2</sup> 面积内采取水样 1 244 个,土样 5 175 个。普查结果认为夏口断裂附近的北带是油气富集有利区带。其后运用水化学和土质相结合的方法,对该断裂北带进行详查,并对重点区域进行精查。在发现的水化学异常中,曲古 1 井在井深 1 515~ 1 520 m 层段(沙二段)和曲 10 井、曲斜 8 井、曲斜 9 井等均获工业油气流。垛石桥水化学异常是精查发现的异常之一,主要指标特征如表 4 所示。该异常吸附丝、三维荧光、水中甲烷稳定碳同位素等参数,都显示了煤成气的特征。经钻探验证,曲古 1 井测试出气(煤成气) 14 000 m<sup>3</sup>/d。

表 4 渤海湾盆地济阳拗陷垛石桥异常水化学特征

Table 4 Hydrogeochemical characteristics of Duoshiqiao anomaly in Jiyang Depression, the Bohai Bay Basin

指标	水化学			土介质	
	酚, 10 <sup>-9</sup>	水溶烃/ (μL · L <sup>-1</sup> )	F320nm	甲烷/ (μL · kg <sup>-1</sup> )	重烃/ (μL · kg <sup>-1</sup> )
强度	2.50	22.86	125.50	367.28	44.43
衬度	4.63	37.48	6.01	1.39	1.36

## 6 结束语

含油气盆地是自流水盆地的一部分。水动力场与水化学场时空变化的一致性和连续性,是盆地水文地球化学研究的基础;沉积凹陷控制着水化学成分演变的方向,形成不同风貌的水文地质单元,地下水锋面内侧,由于滞流的还原环境,是油气成藏的主要场所;近地表水化学异常的形成是深部油气水影响和作用的结果。根据水化学异常的分布规律,可以预测盆地含油气远景,指示油气富集有利地区,因此水文地球化学勘查是加快油气勘探步伐的一种技术方法。

### 参考文献:

- 王大纯, 张人权, 史毅虹等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986
- 刘崇禧, 孙世雄. 水文地球化学找油理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1988
- 吴金才, 孟闲龙, 王离迟等. 准噶尔盆地腹部隐蔽油气藏及勘探思路[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6): 683~ 685
- 侯明才, 伍新和, 陈义才. 准噶尔盆地腹部陆梁油气田地层水特征研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 34~ 37
- 刘方槐, 颜婉荪. 油田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.1~ 271
- 蔡希源, 楼章华. 地下水动力场与地下水化学场、地层压力场的关系[J]. 石油实验地质, 1995, 17(增刊): 76~ 78
- 查明, 陈发景, 张一伟. 压实流盆地流体势场与油气运聚关系: 以东营凹陷为例[J]. 现代地质, 1996, 10(1): 103~ 110
- 李伟, 李小地. 应用油田水地球化学及流体势追踪油气运聚途径[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(6): 34~ 37
- 曾溅辉. 台北凹陷地下水动力特征及其对油气运移和聚集的影响[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 273~ 278
- 杨绪充. 济阳拗陷古水文地质条件与油气移聚[J]. 石油实验地质, 1986, 8(3): 205~ 214
- 汪义先. 泌阳凹陷油田水地球化学特征及其与油气的关系[J]. 石油实验地质, 1983, 5(4): 298~ 303
- 蔡希源, 楼章华. 松辽盆地油田水化学场的分布特征[J]. 石油实验地质, 1995, 17(增刊): 33~ 38
- 陈新军, 石万忠, 陈萍丽. 惠民凹陷油田水化学场分布特征与油气聚集关系[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(6): 7~ 10
- 刘崇禧, 赵克斌, 余刘应等. 中国油气化探四十年[J]. 北京: 地质出版社, 2001.1~ 208
- 郭建华, 吴东胜, 刘辰生. 辽河盆地大民屯凹陷油水变化规律与油气富集[J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 458~ 462
- 张小莉, 查明, 赫栓柱. 渤海湾盆地坳陷凹陷地层水化学纵向分带性与油气富集[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 187~ 190

(编辑 吴传芝)