目　录

第一章　绪　　论……（1）
　第一节　水文地球化学的基本概念……（1）
　第二节　水文地球化学找油法发展简史……（3）
　第三节　水文地球化学找油法的研究意义……（5）
第二章　水文地球化学找油法原理……（10）
　第一节　元素的水文地球化学性质……（10）
　第二节　水的结构与性质……（28）
　第三节　地下水中元素的迁移类型与模式……（32）
　第四节　含油气盆地古水文地质作用……（43）
　第五节　水化学异常形成的地质构造背景……（57）
第三章　油田水文地质特征……（67）
　第一节　油田水文地质条件……（67）
　第二节　油田水化学成分的基本特征……（76）
第四章　水文地球化学找油气标志……（100）
　第一节　直接指标……（101）
　第二节　间接指标……（118）
　第三节　环境指标……（123）
　第四节　反映构造的指标……（127）
　第五节　成因指标……（129）
第五章　水文地球化学找油的基本工作方法……（132）
　第一节　水文地球化学找油阶段的划分……（132）
　第二节　水文地球化学找油的准备工作……（135）
　第三节　水文地球化学找油的野外调查……（138）
　第四节　样品分析测试……（150）
　第五节　资料整理研究……（165）

第六章　我国水文地球化学找油的典型实例……(203)
第一节　我国水文地球化学找油的基本特点……(203)
第二节　松辽盆地水文地球化学找油测量结果……(207)
第三节　某拗陷水文地球化学找油测量结果……(222)
第四节　河套盆地水文地球化学找油测量结果……(231)
第五节　泌阳拗陷水文地球化学找油测量结果……(234)
参考文献……(239)

第一章 绪 论

第一节 水文地球化学的基本概念

水文地球化学是研究水圈及其与自然环境（包括岩石圈、大气圈、生物圈等）之间地球化学作用的一门科学。具体地说，它研究水圈各部分的化学组成与化学演变的历史，以及化学元素（包括同位素）在自然界各种不同的物理化学条件下的性状和分布规律；研究各种地质环境及地质历史过程中天然水（主要是地下水）与其周围介质相互作用时，化学元素迁移、演变历史和再分配的规律。

油田水文地球化学是水文地球化学的重要组成部分，是水文地质学的一个分支。它是建立在水文地质学、石油地质学和地球化学之间的一门新的边缘学科，其主要研究任务和内容是：第一，研究含油气盆地内地下水中各种组分的含量和在各种不同热力条件下的均衡状况、各种元素及其同位素在地质、水文地质历史中集中、分散和再分配的规律；第二，研究含油气盆地内油田水化学成分的纯化与演变规律，阐明不同类型油田水的成因及水分散晕的形成原理；第三，研究地下水的化学成分对油气生、运、集、散的作用，以及与油气藏的关系，阐明油气藏的形成、保存和破坏的水文地质条件和水文地球化学环境（包括现代的和古代的），充分运用地下水化学成分在含油气盆地中的变化规律，预测和寻找有利的含油气地区（段）。

在含油气盆地内所发生的一切地质、地球化学作用，无不是在水的积极参与下进行的。水在自然界占有极为重要的地位。地壳中（包括油气）的化学元素都不同程度地溶解于水，并与水一

起运动。在另一些条件下，元素又可从水中沉淀出来。所以说，地下水的循环或水与岩石相互作用时，既是水破坏岩石圈中元素的共生组合，使元素在天然水中分散和集中的过程，又是化学元素从水中析出，使元素重新组合，并且形成新的矿物或者矿体（包括油气藏）——水文地球化学形迹的过程。

含油气盆地内地下水的化学成分随着油气的形成、运移、聚集和散失，经历了复杂而漫长的水文地球化学过程，它“记录”了油气形成、保存、发展和消亡的演变史。

对于地下水化学成分在油气藏形成过程中的性状及演变规律，很难直接观察到，一般只能根据水文地球化学形迹，通过重建古水文地球化学场和古水动力场，来恢复原始水的成分和性状。古水文地球化学形迹是观察和研究古水文地质作用和环境的重要标志和依据，它是指与地下水活动有关的自然地质历史形成物。换言之，它是地下水化学成分在不同热力条件和物理化学条件下，元素向岩石圈中迁移过程中所遗留下来的蛛丝马迹，是地下水化学成分沉淀、析出的产物。详细研究各个含油气盆地内不同的水文地质期和遗留下来的各种水文地球化学形迹，就可以恢复沉积盆地从陆解（或海解）阶级至成岩过程的沉积水的原始成分和它的演变历史，以及它们在石油、天然气形成和运移过程中的作用。含油气盆地内沉积物堆积时，总是包含着相当数量的水（即软泥水），其含盐量和化学成分，与当时地表水体的化学成分相似。根据水文地球化学形迹，恢复原始水的成分、性质和特征，可以追索和查明油气形成和运移的途径、方向和规模，寻找油气富集的有利地段。

水文地球化学找油法，是油气田水文地球化学普查与勘探的简称，是应用水文地球化学的理论寻找油气藏的方法。用这种方法可研究地下水化学成分受油气藏影响或与油气相互作用时的规律性变化，查明在油气田上方形成的与油气组分有关的特殊水文地球化学场，根据地下水化学组分的分布规律，预测地下含油气远景，追索和寻找油气聚集的有利地区，进而确定油气藏的位

置。

第二节　水文地球化学找油法发展简史

我国是世界上最早发现、开采和利用石油及天然气的国家之一。利用天然水化学成分进行找矿的思想很早就产生了。公元前1122—前770年，就有了在水面上出露气苗的记录。常璩（晋）著《华阳国志》记载："临邛县……有火井、夜时，光映上昭，民欲其火，先以家火投之，顷许，如雷声，火焰出，通耀数十里，以竹筒盛其光藏之，可拽行终日不灭也。井有咸水，取井火煮之，一斛水得五斗盐"。也就是说，二千二百年前，四川邛崃县西南劳动人民就已开始利用天然气进行照明和煮盐了。

从上述可以看出，我们中华民族的祖先，以勤劳、勇敢和智慧，在认识、利用天然水化学成分进行找矿以及在开采石油与天然气资源方面，积累了丰富的知识和宝贵的经验，曾为我国科技史写下了辉煌的篇章。

本世纪三十年代，A. M. 奥弗琴尼科夫等人，首先提出了水文地球化学作用的概念，并逐渐被人们所接受[1]。

在十九世纪末和本世纪初期，人们就已经比较明确地认识到，某些水化学成分与油气藏有关[2]。在以后的年代里，虽然也提出利用水化学成分预测地下含油气性的问题，但是，系统地提出和总结水文地球化学找油法是苏联的B. A. 苏林、A. A. 瓦洛夫和Л. A. 古良耶娃等人。四十年代水文地球化学找油法与其它地球化学方法一样，曾在苏联等国试验研究。但是，当时野外研究方法和技术不完善，测试、分析手段简单，石油化探工作者不重视基础理论和地质条件的研究，脱离石油地质普查与勘探工作，试图以纯化学观点单独解决找油问题。此外，当时也有人认为地球化学异常应当是油气藏的映像，如此对待化探成果，难免有些苛求。因而在五十年代后期，该方法受到冷遇，处于停滞状态。以后地质学家和地球化学家们致力于总结经验，发表了一些

研究成果，撰写了一些理论专著，如A. A. 卡尔茨夫等著《油气田地球化学普查与勘探法》，并继续研究水文地球化学找油的理论基础，综合运用物理化学和现代分析方法，研究水与周围介质之间的关系，建立了水文地球化学试验场，确定水文地球化学测量原则，使得人们对此法的兴趣又复苏了。苏联、美国以及西欧等国家，恢复了该方法的广泛运用，并经实践证明了此法是寻找油气藏的一种有效的方法[29,30]。只是由于各国的经济基础、石油勘探历史背景等方面的差异，因而在运用该方法上有所区别。总的来看，苏联强调区域调查和找油指标的综合运用；美国等西方国家多采用单指标。近年来，水文地球化学找油工作，被视为石油地质领域中比较完善的常规找油方法之一。特别是海上石油地质事业的蓬勃兴起，促进了水文地球化学找油法的发展。

我国水文地球化学找油工作是解放后从苏联引进的。五十年代在关士聪教授的主持下，西北地质局633地质队首先成立了以找油气为主要目标的水文地质队。1964年地质部石油普查勘探局将分散在各石油普查勘探大队的地球化学工作者集中起来，成立了石油化探队（即地质部石油普查勘探局101队），用传统的化探方法（包括水文地球化学法）在已知油田及其外围进行找油气试验研究。二十多年来，运用水文地球化学找油法，在全国主要含油气盆地和海域开展了大面积的试验研究工作，评价了众多盆地的含油气远景，圈定出一批有远景的地区，为石油地质普查勘探提供了可靠的水文地球化学基础资料。

1976年全国第一届石油化探会议，水文地球化学找油方法受到了生产、科研和教学部门的重视，进入试生产阶段。石油化探工作者先后在鄂尔多斯盆地、二连盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、江汉盆地、南襄盆地、周口盆地等地开展了水文地球化学找油工作，获得了良好的效果，在圈定的水文地球化学异常范围内，发现了油气田。1981年在全国油田水文地球化学会议上，该方法进一步得到人会者的肯定。

近几年来，随着石油地质勘探事业的发展和科学技术的进

步，水文地球化学找油法，得到了长足的发展。

第三节　水文地球化学找油法的研究意义

水文地球化学找油法的研究在理论和实践上都具有重要意义。

一、文水地球化学找油法是油气理论研究的重要组成部分

石油和天然气的成因学说，分为有机和无机两大学派，目前，在我国以有机成因学说占优势。有机成因学说理论认为，油气是在地壳的负向单元内，由沉积岩中分散存在的有机质生成的，地下水携带着分散点滴石油从拗陷中心的高压区，向拗陷边缘的低压区运移，使临近生油拗陷的构造，优先富集油气，所以油气田多围绕着生油凹陷呈环状分布（图1-1）。

无机成因学说认为，石油的主要原始物质是金属碳化物，它与地壳深处炽热的水相遇，形成碳氢化合物。或由地壳深处的岩浆侵入上覆沉积物，在喷出地表的过程中发生化学反应，在温度和压力适宜的地带生成石油和天然气，而后析出，进入邻近的孔隙岩层中，故油气田主要沿着深大断裂分布。我国东部主要油气田，如下辽河、大港、胜利、苏北等油田，基本上沿着郯庐大断裂分布，是我国学者持无机成因学说的证据之一。

各派观点不同，但值得注意的是，无论哪派都承认，水是油气运移载体的重要组成部分，油气在水溶液中呈溶液状态和胶束溶液状态，被运移至储集层中。油气的形成与水化学成分有关，地下水化学成分（特别是古水化学成分）的演变，反映了含油气盆地的地质发展历史以及油气形成、演化的总过程。

油气在生油层中生成时，是呈分散状态存在的，它之所以能在储集层中聚集起来形成油气藏，是由于油气运移的结果。近年来，研究油气藏形成、保存和破坏以及运移的水文地质规律，日

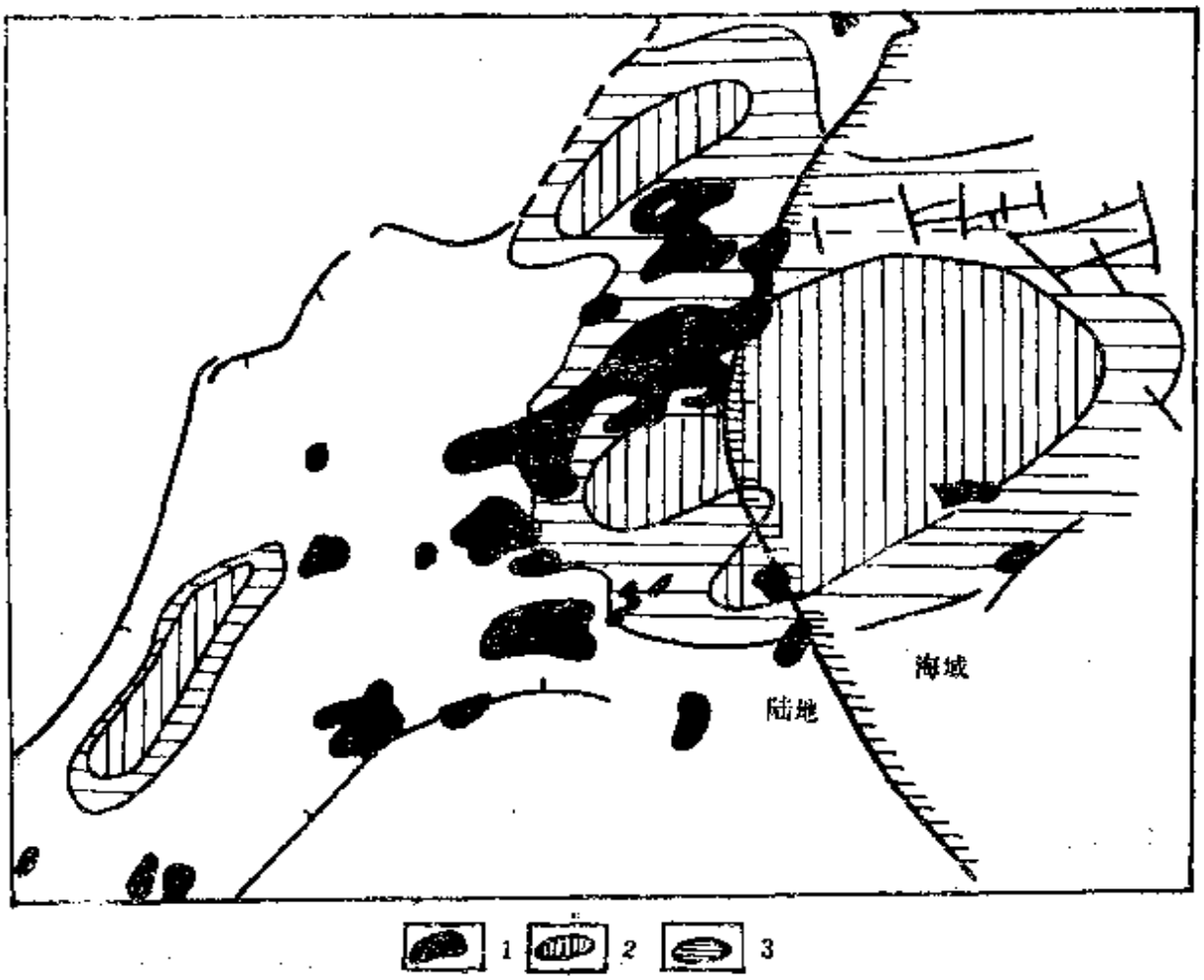


图 1-1　黄骅拗陷油气田分布与生油拗陷关系图
（据大港油田，1977）
1—油田；2—最有利的生油区；3—有利的生油区

益被人们所重视。油气的生、运、集、散规律，在很大程度上取决于沉积水的作用，特别是沉积作用水（即软泥水）及软泥本身，是石油成生的重要物理化学和生物地球化学演变的场所。而沉积成因水则是石油运移的动力和载体。

沉积作用水从陆解（或海解）阶段一开始就含有一些有机物质（数mg/l），从软泥水中继承下来，进行着十分复杂的物理化学和生物化学作用，并积极地参与了烃的形成过程（水此时起媒介作用）。在沉积水形成阶段，由于盆地的不均匀下沉作用，使水发生运动，但运动速度很小（每年数厘米），介质的还原性强，氧化能力极低，这种环境有利于石油的形成和保存。此时，水一

方面参加了石油的组成，另一方面还聚集泥岩中分散状的油滴（据韦尔特估计，在生油岩中油珠的直径为1000—100000Å*）。随着上覆沉积物的加厚，地静压力逐渐加大，进入成岩阶段，使沉积作用水逐渐被挤出。由于沉积物孔隙性的差异，形成的水头压力差，促使沉积作用水同石油一起向储集层运移。冀中拗陷任丘油田下第三系沙河街组第三段泥岩在3000m左右的压实深度上，不仅有大量沉积水同石油一起压出，而且，蒙脱石转变为伊利石，并脱出大量结晶水（达粘土沉积物含水量的25%）[7]。这些水大大提提了烃类的溶解度，成为石油离开生油岩的载体。

在含油气盆地内，由于拗陷作用和沉积过程不均匀地进行，某些相对隆起的地段成为水的潜伏排泄区，是油气聚集的有利地带。

当油气进入构造圈闭后，油、气、水三者发生重力分异作用，形成气在上、油居中、水位于最低层的空间分布规律。水文地球化学找油的任务之一，就是研究油气藏的形成、保存和破坏的规律，查明油气藏的分布特征及其油（气）、水界面高度和位置，为油气藏普查勘探和开发提供依据。

随着石油地质勘探事业的不断深入发展，目前在时代较新的地层中发现的油气藏越来越多，进一步要求地下水化学成分的研究在探讨油气藏的形成和分布规律等方面，发挥更大的作用。运用水文地球化学的现代理论和先进技术，无疑，将有助于石油和天然气形成、演化等基本理论问题的研究与解决。

综上所述，油气生、运、聚、散同地下水的密切关系，为水文地球化学找油提供了依据和可能性，并成为油气地质普查与勘探的一种有效的手段。

二，水文地球化学找油法是寻找油气藏的现代方法

用地质构造分析和地球物理方法所圈定地下潜伏构造，并不

---

* $1Å = 10^{-10}$m。

能直接回答构造中是否含有油气的问题。如果把这些方法与地球化学方法结合起来，建立地质—地球物理—化探（包括水文地球化学法）三位一体的油气田勘探程序，并且水文地球化学普查先行一步，就会更确切地评价地下构造的含油气远景、圈定储油气构造的位置、以及回答构造内是否含有油气的问题。从而可提高油气探井的成功率及经济效益，使油气地质普查与勘探工作，建立在更科学的基础上。

在油气普查与勘探中，充分发挥水文地球化学找油法的优点，不仅能直接发现油气藏，而且还能为地球物理勘探工作指出有利的测量范围，达到优选靶区、缩小有利勘探面积和节省勘探资金的目的。

目前，我国已经有了一支技术力量雄厚的油气地球化学勘探队伍，创建地质—物探—化探三位一体的油气普查勘探程序业已成熟，并且已经在寻找和开发我国丰富的油气资源中显示了强大的生命力。

回顾油气勘探历史，在多数国家，最早的油气田都是在地面油苗、沥青沉积附近用钻探方法或根据肉眼可见的油气渗逸证据发现的。我们的祖先对四川天然气、玉门和延长等油田的发现，也是从地面油气苗开始的。美国最早也是在地表观察到的碳氢化合物渗出的地方，经钻探发现油气田的。自那以后在较长的一段时间里，几乎完全靠地球化学技术来找油气，如斯平德列托普油田和皮尔斯杰克逊油田就是根据石蜡垢发现的，是美国用化探方法找油的典型例子。只是由于这些根据渗出物发现的浅层油气田被采竭，油气勘探者才依赖于地质学方法在断层、褶皱以及其它构造圈闭里寻找石油。半个世纪以来地球物理找油方法获得了重大发展。在用来查明区域构造和圈闭的地震、重力、磁力和电法等地球物理手段中，折射或反射地震法一直居于重要地位，由于它能提供岩石圈结构的确切资料、查明地层分界面、断裂面和有关油气构造等，所以，这种方法是油气勘探的重要方法。当前，地球物理勘探正在探索利用油气聚集及其上方晕的各种物理效应

进行直接找油气的试验研究。随着现代科学技术的发展，出现了高灵敏度、高分辨率的测试仪器和电子计算机，使水文地球化学找油法进入了一个新的发展阶段，人们重视了化探成果的综合运用。美国南梅索迪斯特大学地球与人类研究所在得克萨斯州达拉斯市已召开了三届（1963、1979、1984）关于石油与天然气非常规勘探方法专题讨论会，讨论了石油勘探中地球化学技术。在苏联的油气勘探中，更重视应用地球化学勘探成果，建立了全国性和地方性的油气化探研究机构，大多数含油气省设有专业队伍，并将油气化探列入油气普查勘探序列。进入80年代，苏联每隔两年召开一次地球化学勘探会议，平均每年有100篇油气化探文献。

近十几年来，国外对水文地球化学勘探之所以表现出极大的兴趣，其中一个重要原因在于构造油气藏的发现机率大幅度下降，普查与勘探工作的难度和深度不断增加，易于发现的大型油气田已基本查明。石油地质工作者，开始把注意力集中到非构造油气藏（岩性、地层、水动力、构造屏障、混合等）的勘探和开发上。而这些油气藏，无论在新的油区，还是老的油区，都有可能被发现。在我国，隐蔽油藏的勘探与开发刚刚开始，有着不可估量的发展前景。利用地球物理方法对隐蔽油气藏进行勘查，目前还有一系列技术问题需要解决。而利用水文地球化学找油法寻找这类油气藏，有它的独道之处。

水文地球化学找油法之所以有生命力，还在于它能迅速、准确地取得反映深部的大批而有用的油气信息。工作效率高，勘探周期短，费用低廉，这是其它方法所无法比拟的。在我国同一测量面积的综合油气化探投资仅为地震勘探的十分之一。水文地球化学测量（1:10万比例尺精度）的投资，每平方公里只有50—60元，可见费用是很低的。

第二章　水文地球化学找油法原理

油田水对其上部地下水化学成分影响和改造的程度，取决于诸多方面因素，其中元素的水文地球化学性质、水的结构与性质、地下水中元素迁移与富集规律、含油气盆地的古水文地质条件与作用，以及地质构造背景等起着主导作用。

第一节　元素的水文地球化学性质

元素的化学性质和水文地球化学特征，决定了它们在自然界（包括天然水系）中的分布、存在形式及其活动性。要研究水文地球化学找油法原理，合理地选择水文地球化学找油气指标，首先必须了解元素的基本性状和水的结构特点。

一、原子的电子构型及水文地球化学意义

不同原子有不同的结构，因而元素的水文地球化学性质亦各异。为了研究元素之间相互作用（制约、共生、迁移等）的性状，必须研究原子核与电子之间的关系，特别是最外层易活动的电子的状态，也就是研究原子的电子构型与元素水文地球化学性质的关系。

水圈中的原子，在一定的地质环境中均能与其它原子发生作用，因此，在研究原子结构（包括排列方式）时必须统一考虑与其发生作用的原子。原子核外的电子，一方面绕核旋转，角动量各异，另一方面电子绕核自旋，顺逆不一。就每个电子来讲，并不与核保持不变距离，也不严格遵循一定的轨道，而在瞬间可以位于原子核附近空间的任一点，但就电子云分布整体来看，离核一定距离和位向上，电子都呈一定的概率分布，即电子云密度在

表 2-1　西伯利亚地下水中微量元素的平均含量和迁移系数

活动性	元素	平均值 (ppm)	克拉克值*	迁移系数 ($\times\cdot10^{-4}$)	离子半径 (R_i)	外电子层构型
弱活动性元素	Hg	0.8	8.3×10^{-6}	100	1.12(2)	$5d^{10}6s^2$
	Au	0.02	4.3×10^{-7}	46.5	1.37(1)	$5d^{10}6s^1$
	Sb	1.10	5.0×10^{-5}	22.0	0.62(5)	$4d^{10}5s^25p^3$
	Ag	0.12	7.0×10^{-6}	17.1	1.13(1)	$4d^{10}5s^1$
	Ca	0.20	1.3×10^{-5}	15.0	1.03(2)	$4d^{10}5s^2$
	Bi	0.01	9.0×10^{-7}	11.1	1.20(3)	$6s^26p^3$
	Mo	1.00	1.1×10^{-4}	9.0	0.68(4)	$4d^55s^1$
	U	1.00	2.5×10^{-4}	4.0		$5f^36d^17s^2$
	As	0.65	1.7×10^{-4}	3.8	0.04(5)	$4S^24P^3$
	Ge	0.40	1.4×10^{-4}	2.9		$4S^24p^2$
	Zn	14.30	8.3×10^{-3}	1.7	0.83(2)	$3d^{10}4s^2$
	W	0.10	1.3×10^{-4}	0.77	0.68(6)	$5d^46s^2$
	Sn	0.12	2.5×10^{-4}	0.48	0.74(4)	$5S^25p^2$
	Cu	2.20	4.7×10^{-3}	0.48	0.96(4)	$3d^{10}4s^2$
	Pb	0.71	1.6×10^{-3}	0.44	1.32(2)	$6s^26p^2$
弱活动性元素	Mn	28.00	1.0×10^{-1}	0.28	0.91(1)	$3d^54s^2$
	B	0.10	3.8×10^{-4}	0.26	0.34(2)	$2s^2$
	Cr	1.90	8.3×10^{-3}	0.23	0.65(3)	$3d^54s^1$
	Ni	1.10	5.8×10^{-3}	0.18	0.78	$3d^84s^2$
	V	1.50	9.0×10^{-3}	0.16	0.62(3)	$3d^34s^2$
	Ba	8.20	6.5×10^{-2}	0.13	1.43(2)	$6s^2$
	Zr	1.60	1.7×10^{-2}	0.09	0.87(4)	$4d^25s^2$
	Co	0.05	1.8×10^{-3}	0.04	0.82(2)	$3d^74s^2$
	Ti	3.50	0.45	0.008	0.64(4)	$3d^24s^2$

* 据A. П. 维诺格拉多夫
（据П. А. 乌多多夫资料，1961年）

不同距离位向上不等，形状不同。每一运动着的电子都有一定的能量，同一能量状态的电子组合，可以看作是按一定能级的“轨道”在运动，能级不同，“轨道”大小、形状也不一样。

电子在原子核外不同“轨道”的不同充填方式，赋予各种元

素以不同的性状，使得元素的水文地球化学性质不同。元素在水圈中的活动性，有强有弱，在漫长的水文地球化学过程中，具有各自独特的性状。

外层充填，意味着新的电子离核更远，吸引力减弱，外层电子易于离开原子，即原子的电离势将会下降，电价也易于改变，原子半径趋向增大，元素的化学性质更加活泼，对阳离子而言，碱性程度增大，原子活泼性变强，意味着元素趋于分散。

内层充填，表示电子和核的结合力增强，因而使相邻元素的原子半径相似或降低；电离势和电价也接近相等；电子以相同方式作内层充填的原子，在水文地球化学活动性上相对变弱，并且有许多共同特征，因而构成同一族，如第四周期的元素出现 d 轨道，第六、七周期出现 f 轨道等。

П.А.乌多多夫等人对西伯利亚地区地下水中微量元素的研究表明，地下水微量元素的平均含量与迁移系数的关系，严格受原子的电子壳构造控制。他把微量金属元素分成强活动性和弱活动性两组（见表2-1）。此外，原子的电子层结构，还决定元素形成的配合物的性能，元素在溶液中配合物的稳定性，按递减顺序排列如下：

$$Ti^{3+}>Bi^{3+}>Sb^{3+}>Fe^{3+}>Cr^{3+};$$

$$Hg^{2+}>Pa^{2+}>Cd^{2+}>Pb^{2+}>Ca^{2+}>Zn^{2+}>Ni^{2+}>$$
$$Co^{2+}>Fe^{2+}>Mn^{2+};$$

$$Au^{+}>Ag^{+}>Cu^{+}>Na。$$

二、水文地球化学中的热力学规律

在自然界，天然水溶液体系内的物质之间能否发生化学反应，除决定于物质的内在性质外，还决定于反应时的温度、压力和组分的浓度等外在因素。当温度、压力、浓度等条件发生变化时，必然引起体系内组分浓度的不平衡，而组分浓度的不平衡是服从质量作用定律的。作用的动向必定符合吕·查德理原理，反应所能达到的限度可用相律来表述。可根据上述基本原理来阐明在

各种水文地球化学过程中，化学元素在天然水中富集、分散与共生组合的机理。

自然界中，所有的水文地球化学作用都是趋于平衡的。如果压力、温度、组分浓度等条件不变，则可能接近或达到平衡。但自然界的条件是很少保持不变的，从作用的整体和长期来看，不平衡（不可逆）是绝对的，而平衡性（或可逆过程）是相对、局部和暂时的。水文地球化学过程，就是随时间和外界条件的改变而不断演化，或各种演化（运动）与平衡的交替，只有个别演化趋向于平衡，而整个作用（运动）又再破坏个别的平衡而发生移动，在新的条件下，又趋于平衡。服从吕·查德理原理，即"当体系已达平衡时，如果条件改变，则平衡发生移动，其移动方向是消弱或解除这些改变的影响"。这就是说，平衡的移动制约着干扰。例如：

（一）温度条件

在压力不变的条件下，如果外界温度增高，引起吸热反应，平衡就向吸热方向移动；如果外界温度降低，引起放热反应，平衡就向散热方向移动。

（二）压力条件

在温度不变的条件下，如果外界压力增大，平衡就向抵消压力影响的方向移动，发生凝聚、结晶，生成比容小、比重和结合能大的矿物，以缩小体积来消除增压的影响；如果外界压力减小，平衡便向消除压力影响的方向移动，发生溶化、气化，以膨胀体积来消除压力的影响，以达到新的平衡。

（三）物质浓度条件

在一定的温度和压力下，反应物质的浓度和反应产物的浓度积之比为一常数，如果反应物质浓度增加了，则平衡即发生移动，析出多余组分以消除其影响，反之，则发生溶解。

以湖泊（包括古湖泊）中盐类的沉淀和溶解为例，在秋季和初冬，随温度下降发生结晶时，放热量最大的盐类首先从水中沉淀出来；相反，在春季和夏季，随着温度的升高发生溶解时，吸

热量最大的盐类从沉淀中转入水中。

在表生带的低压环境下，缺乏亲和力的元素，在高温、高压的深成环境又可具有亲和力，例如：

$$Ca^{2+} + F^- \rightleftharpoons CaF_2$$

在干旱草原及荒漠条件下，化学反应从左向右进行，即沉淀CaF_2，但在气候湿润及水交替活跃地区，地下水溶解CaF_2，平衡向左进行。

自然界发生的元素迁移过程，都是自发地向熵值增加或自由能减小的方向进行的不可逆过程。因此，确定水文地球化学作用过程的方向性时，可根据自由能改变量（ΔZ_T^0）的正负值判断反应是否自动进行的标准。如果ΔZ_T^0是负值，意味着终态自由能（Z_2）小于始态自由能（Z_1），即生成物的自由能的总和小于反应物的自由能的总和，化学反应过程就自动地向自由能减小的方向进行。如果ΔZ_T^0是正值，表示终态自由能大于始态自由能，也就是反应生成物自由能的总和大于反应物自由能的总和，则反应不能自动进行。如果$\Delta Z_T^0 = 0$，表示生成物自由能总和等于反应物自由能的总和，反应处于平衡状态。自由能可用下式计算：

$$\Delta Z_T^0 = \sum Z^0_{\text{生成物}} - \sum Z^0_{\text{反应物}} \qquad (2.1)$$

式中：ΔZ_T^0——标准反应自由能变化量；

$\sum Z^0$——化合物的标准生成自由能变化总和。

三、元素的水文地球化学参数

元素的水文地球化学参数是描写天然水化学元素的原子运动特性的指标，它表征着元素活动性的内在因素和外在因素的总和。

元素的水文地球化学参数，主要有与原子电子层结构有关的化学键类型、电负性、化合价，离子半径等；与介质条件有关的酸碱性（pH）、氧化还原电位（Eh），以及迁移系数等。

（一）化学键类型

1．离子键：原子之间靠静电引力的作用结合在一起。形成离

子键的两种原子，在化学性质上有显著差别。靠这种键联结的化合物很牢固，但是，在强电解质中就立即解体，分离为正负离子，这就决定了它们在天然水中运移的主要作用。自然界中，绝大多数卤化物、氧化物和含氧酸盐矿物均属离子型晶体，这类晶体易为溶剂的极性改变而溶解。

2．共价键：化合物双方（同类和不同类原子间）由共用一对或几对电子联结的键。又可分为非极性键（为气体分子所特有）和极性键（CO_2、H_2O等）。

共价键和离子键，虽然都是电子的吸引或排斥，但是离子键的形式是以电子转移产生正负离子为基础的；而共价键则是通过电子云的重叠，靠共用电子对与两核间相互作用为基础。共价键有方向性和饱和性，而离子键则没有。

3．金属键：通过自由电子使金属原子或离子在金属晶格内联结起来，形成电子云，决定着金属的导热性和导电性，易溶于氧化剂中。

分析元素结合时可能的键性强度，在研究元素的水文地球化学性质方面具有一定的意义。在一般情况下，不同键性的元素不能结合，即使结合，键力也是比较弱的。

（二）电负性

电负性是指一种原子与它种原子作用时得失电子的相对能力（或指原子在分子中吸引价电子的能力）。电负性可表征原子形成阴离子（吸收价电子）或阳离子（放出价电子）的相对倾向。电负性越大，愈易形成阴离子，反之，则易形成阳离子。原子的电负性包括两个方面的能量：一方面是电离能，亦即使原子放弃其外层电子所消耗的能量；另一方面是对电子的亲和能力，亦即使原子得到电子时所释放出来的能量。

电负性可判断原子在水文地球化学过程中的化学行为，决定着元素相互作用的键性，于是也决定了元素在自然界的存在形式。两个互相作用的原子电负性差，决定着电子的迁移方向。当两个元素的电负性相差很大时，由于价电子易于从电负性小向电

负性大的一方向转移，直到全部集中在电负性大的原子上，因而形成离子晶格，这种晶格相当牢固，所以在自然界能相对稳定地存在，含氧盐在自然界分布极广就与此有关。

（三）化合价

元素在天然水中很少以原子状态存在，经常是以离子的形式出现。因为所带电荷不同，有阳离子和阴离子之分，离子的电荷表现为电价。共用电子的数目为键价。

在晶格结点为离子（离子晶格）的矿物中，一价碱金属的化合物通常是易溶的（NaCl、Na_2SO_4等）。二价的碱土金属则形成较难溶解的化合物（$CaCO_3$、$CaSO_4$等）。三价的金属如Al、Fe的化合物更难溶解。阴离子也有同样的规律性，即三价的阴离子（团）（PO_4^{3-}）化合物比二价阴离子（团）（SO_4^{2-}）和一价阴离子（Cl^-）化合物更难溶解。

对变价元素来说，同一化学元素不同价的离子具有不同的化学性质（其性质就像不同元素一样）。电价的改变，主要取决于环境，如果环境富氧，那么电价就高；反之，还原环境则电价低。铁族元素（Ti、V、Mn、Fe、Co、Ni）具有最明显的变价性，因而不同价的离子，只有在不同的地球化学环境下才能稳定，例如铁离子有Fe^{2+}和Fe^{3+}之别，在内生条件下以Fe^{2+}为主，Fe^{3+}处于从属地位；但在表生条件下，由于Fe^{2+}易转变为稳定的Fe^{3+}，它们彼此的性能均有显著差别。

化合价具有重要的水文地球化学意义。各元素的外层电子都有达到最稳定的排布倾向——得失电子以达到外层8电子或18电子的倾向，这个倾向就是促使原子发生迁移和化合的内在动力。因此，同一元素其价态不同，则水文地球化学性质亦不同，其化合物的溶解度也有很大差别，因而影响到元素的迁移和沉淀。

（四）离子半径

离子半径是由于核外电子的得失和排布方式所决定的。键性不同，半径也异，得电子多，则半径大；反之，则半径小。它是决定离子电位大小的重要指标，即离子半径愈大，则离子的电位

愈小；反之，则离子电位愈大。离子半径的大小，对离子的水化作用有很大的影响。

在实际工作中，经常用离子电荷（原子价）与离子的半径之比——离子势，表明元素的酸碱性，如K、Na、Ca、Mg、Sr、Ba、Li、La、Si、Al、Hf和其它一些元素，最外层电子数均为8个，其离子势值为0.5—4.7，这就决定了这些元素属碱性。金属的离子势愈高，则易引起水分子的极化，从而使水解作用更强烈，使金属本身的碱性降低。离子势愈小，碱性表现愈强。离子势还可说明形成络阴离子的能力，离子势高的离子，电荷愈大，半径愈小，极化能力强，易形成牢固的络阴离子（团），且使水溶液呈酸性，它们在水溶液中，可以独立存在。如离子势大于8.6的元素有NO_3^-、PO_4^{3-}、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}等。某些元素的离子的离子势值为4.7—8.6，它们在水溶液中形成两性化合物。另外，Cu、Zn、Pb及其它一些元素的原子最外层电子数是18个，其离子势小于2时，呈碱性；在2—6之间时，呈两性；大于6时，呈酸性。

在水文地球化学找油中，应用上述水文地球化学参数，研究油田水化学成分的特征，评价地下水的性质，预测含油气远景，已取得了良好的地质效果（见图2-1）。

（五）介质的酸碱性（pH）[3]

Bronsted的质子理论认为，在化学反应中酸是质子的给体，即给出质子的物质称为酸。物质的酸碱性是一种相对的概念，是同一物质存在的不同形态。有一些物质具有两性特点，例如，多元酸的中间产物都是两性的。质子在水溶液中不能单独存在，有给出质子的物质，必有接受质子的物质存在，即酸和碱是同一体系内相比较而存在的。

酸和碱的强度是给体和受体共同决定的。一般来说，弱酸给出质子的能力弱，强碱夺取质子的能力强。酸碱的“绝对”强度是很难确定的。按习惯，在水溶液中以水作为酸碱强度的衡量标准，相对于水而言，更易给出质子的是酸，更易接受质子的是碱

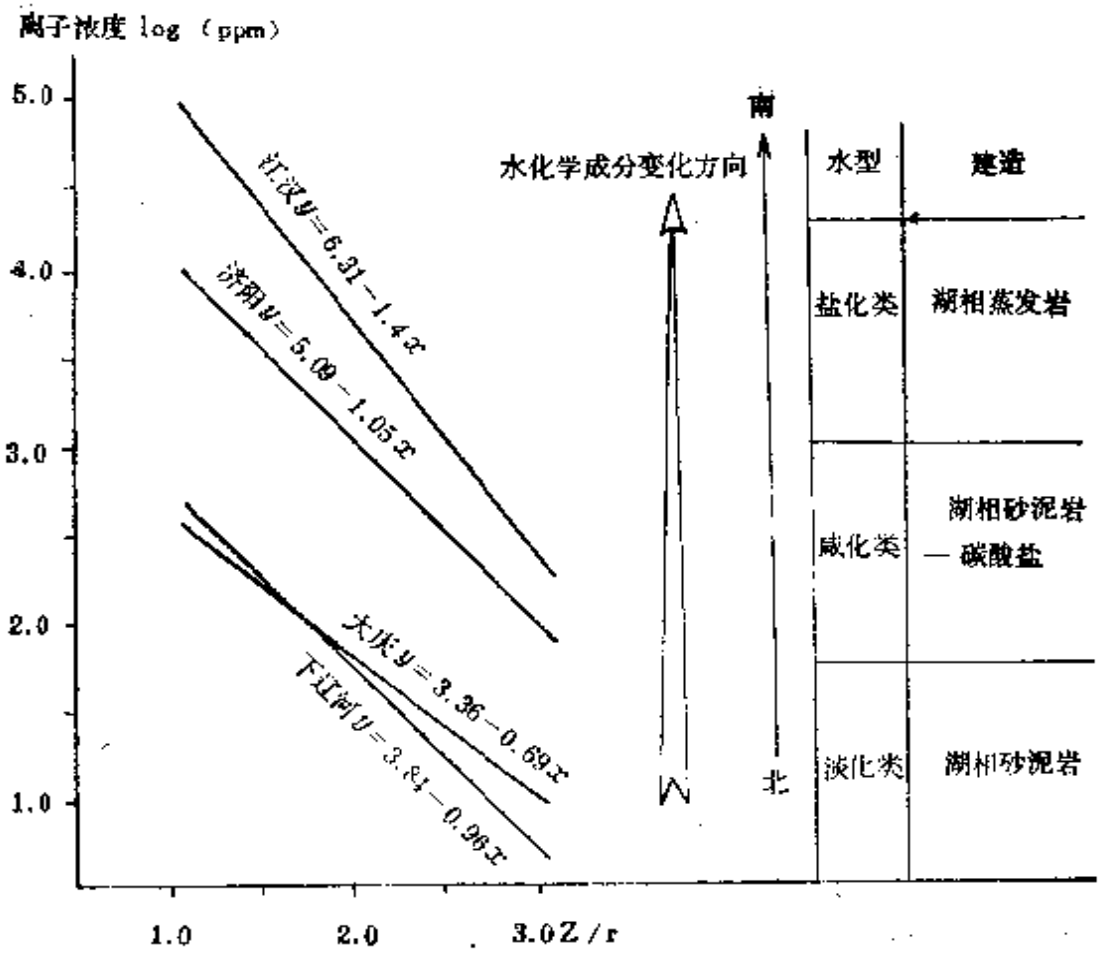


图 2-1　水文地球化学参数图解

（水本身是两性的），即所谓酸和碱的强度是相对于水而言的。

例如，以水为例说明酸碱的强度：如果水给出一个质子为弱酸时：

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^- \qquad (2.2)$$

由于质子（H^+）不能单独存在，在水溶液中，以水合质子（H_3O^+）形式存在。为了表达方便仍以H^+代之。

水的平衡常数为：

$$Kw = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} \qquad (2.3)$$

根据方程（2.1）式和$\Delta Z^\circ = -RT\ln K$，求得$Kw = 10^{-14}$。将（2.3）式两边取对数后得：

$$pH = pKw + \lg\frac{[OH^-]}{[H_2O]} \qquad (2.4)$$

（2.4）式说明，水溶液的pH值实际上应理解为水酸（碱）体系自由能的函数。当水的活度$a_{H_2O}=1$时：

$$pH = \Delta Z^{\circ}_{T}/2.3RT + \lg[OH^-] \qquad (2.5)$$

水作为接受质子的弱碱时，自由能变量$\Delta Z^{\circ}_{T}=0$；而水作为给出质子的弱酸时，自由能的变量为19.095×4.1868kJ/mol，因此，水中最强的酸为H_3O^+，最强的碱为OH^-，即强酸给出质子时，自由能应降低，强碱被质子中和时，自由能应大于19.095×4.1868kJ/mol。所以，酸和碱反应时，如果自由能变量在0—19.095×4.1868kJ/mol之间，均为弱酸和弱碱，平衡常数$K=1-10^{-14}$。

根据上述关系，可以计算任何弱酸和弱碱的平衡常数、自由能变化量和pH值。

为了应用上的方便，用$[H^+]$离子浓度的负对数值作为水溶液的酸碱性的指标。

$$pH = -\lg[H^+]$$

由此可得：中性水pH＝7；酸性水pH＜7；碱性水pH＞7。

由于纬度和气候的不同，天然水的pH值变化很大，影响元素的迁移。如北极圈中，地表水pH＝2时，SiO_2的迁移就受到限制，发生SiO_2的沉淀。热带的水pH＝3，为普通的酸性水，Fe在其中沉淀，雨水和河水的pH＝6—7，常发生Fe、Mn等元素的沉淀。而沙漠地带溶液的pH＝9—12，碱性程度很高，对Ca^{2+}、Mg^{2+}、Ba^{2+}、Sr^{2+}、K^+、Na^+等元素的迁移有所限制，因此，在沙漠地带上述元素常发生沉淀。

介质pH值对Al、Si在溶液中的迁移以及它们再析出具有特殊意义，如在酸性介质中铝硅酸盐岩石风化的最终产物是高岭石，而在碱性溶液中形成蒙脱石（见图2-2）。

高温热水溶液多呈酸性，主要是由于温度增高时H^+较OH^-活动性强引起的，随着温度的降低，而趋向碱性。

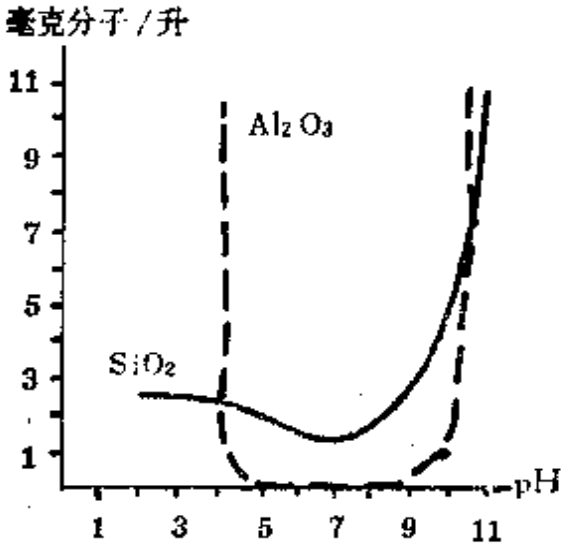


图 2-2　溶液的pH与SiO_2和Al_2O_3溶解度的关系

（六）介质的氧化还原电位（Eh）

原子或离子失去电子（电价升高）为氧化；得到电子（电价降低）为还原。用下列半反应表示：

$$m = M^{n+} + ne \tag{2.6}$$

M处于氧化数低的状态，为还原剂（red），而M^{n+}处于氧化数高的状态，称为氧化剂（ox），因此，电极半反应还可以写成：

$$ox + ne = [red] \tag{2.7}$$

氧化还原平衡常数K为：

$$K = \frac{[red]}{[ox][e]^n} \tag{2.8}$$

将（2.8）式两边取对数后：

$$pE = \frac{1}{n} \lg K + \frac{1}{n} \lg \frac{[ox]}{[red]} \tag{2.9}$$

式中：K——氧化或还原平衡常数；

n——参加氧化还原反应的电子数；

〔ox〕——体系中不平衡时，氧化态物质浓度；

〔red〕——体系中平衡时，还原态物质浓度；

pE——体系平衡时，电子活度值（无量纲）。当〔ox〕=〔red〕

时：

$$pE^0 = \frac{1}{n} \lg K \tag{2.10}$$

式中：pE^0—体系平衡时，相对电子活度值（无量纲）。

又知$\Delta Z_T^0 = -RT\ln K$

$$pE^0 \frac{-\Delta Z_T^0}{n2.3RT} \tag{2.11}$$

所以，pE^0也是反应标准自由能的函数。

pE与Eh的关系：

$$pE = \frac{nF\,Eh}{2.3RT} \tag{2.12}$$

式中：F ——法拉弟常数；

R ——气体常数；

T ——热力学温度；

n ——参加氧化还原反应的电子数；

Eh ——氧化还原电位值（mV）。

当$n=1$时，电子活度与氧化还原电位的关系式为：

$$pE = \frac{F \cdot Eh}{2.3RT} = 16.91Eh \tag{2.13}$$

水稳定场与氧化还原强度：水稳定场可按下式推导：

$$2H_2O = 2H_2 + O_2 \tag{2.14}$$

25℃时，平衡常数为：

$$K = P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2} = 10^{-81.4} \tag{2.15}$$

在一个大气压条件下，水稳定场的上限决定于水与氧气之间的平衡：

$$2H_2O = O_2 + 4H^+ + 4e \tag{2.16}$$

$$K = PO_2 \cdot [H^+]^4 [e]^4 = 10^{-81.3} \tag{2.17}$$

$$pE = 20.78 + \frac{1}{4} P_{O_2} - pH \tag{2.18}$$

$$Eh = 1.23 + \frac{0.059}{4}\lg PO_2 - 0.059pH \qquad (2.19)$$

在选择$PO_2=1$时，（2.18）式和（2.19）式可分别为：

$$pE = 20.78 - pH \qquad (2.20)$$

$$Eh = 1.23 - 0.059pH \qquad (2.21)$$

式（2.20)和(2.21)为水稳定场上限方程,见图2—3。在101325Pa条件下，水稳定场下限方程决定于水同氢之间的平衡：

$$H_2 = 2H^+ + 2e \qquad (2.22)$$

在25℃时，平衡常数为：

$$K = \frac{[H^+]^2[e]^2}{P_{H_2}} = 1 \qquad (2.23)$$

$$pE = -pE - \frac{1}{2}P_{H_2} \qquad (2.24)$$

同理可以写$Eh = -0.059pH - \frac{0.059}{2}\lg P_{H_2}$ （2.25）

在选择$P_{H_2}=1$时，（2.24）和（2.25）式分别为：

$$pE = -pH \qquad (2.26)$$

$$Eh = -0.059pH \qquad (2.27)$$

（2.26）和（2.27）两式分别为用pE和Eh值表示的水稳定场下限方程，见图2-3。

电子活度值高于上限的物质，水分子中的O^{2-}氧化成O_2，使水失去稳定性。电子活度值低于下限的物质，水分子中的H^+还原成H_2，也会使水失去稳定性。所以，在水溶液中不能存在比O_2还强的氧化剂，也不能存在比H_2还强的还原剂。

天然水系中，各种水在pE(Eh)—pH图上的稳定分布范围如图2-4所示。

pE(Eh)—pH图解，反映了地下水中化学元素所处的天然环境和迁移条件的综合水文地球化学参数。pE值是反映了环境中电子的丰度（$pE=-\lg[e^-]$)；pH值反映了环境的质子丰度

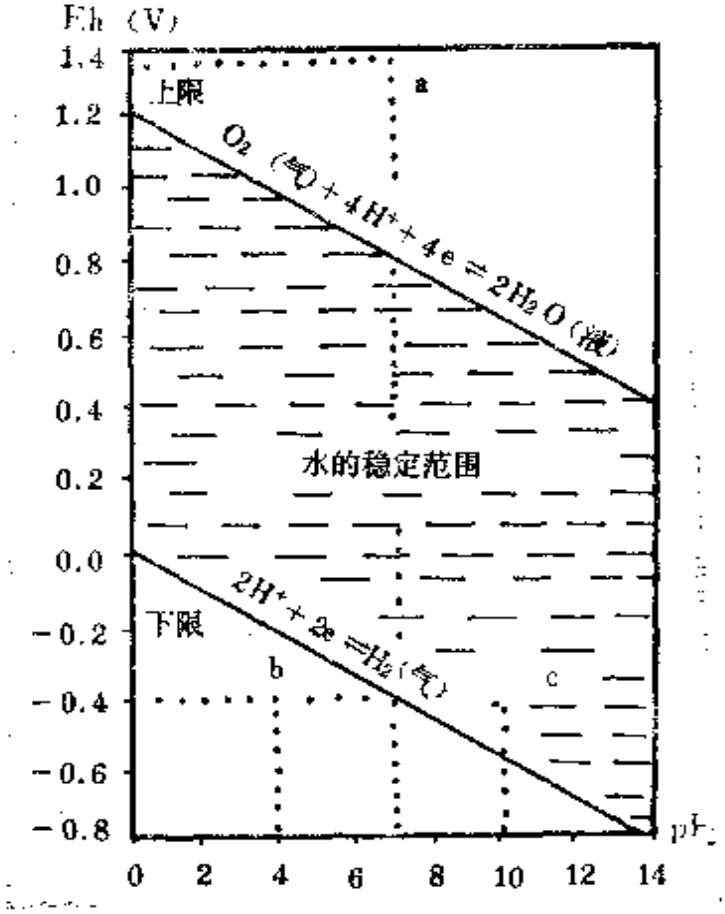


图 2-3 水的Eh—pH图

（$pH=-\lg[H^+]$）。因为电子和质子有相反的电荷，所以，可预测在给定的环境中一个丰富，另一个贫乏。也就是说，氧化环境可以利用的电子少、pE值高、可利用的质子多、pH 低，趋向酸性环境；而还原环境则相反，即pE值低、pH 值高，趋向碱性环境。在图2-3中上限和下限线都斜向右边，因为当pH值升高时，pE 值降低。利用该图可描述同一元素液相和固相之间的平衡特点，以及物质的溶解种类和存在形式。在图上不仅能决定元素的活动性，而且还能分出元素的迁移能力和元素在不同相态中减少的条件，即分出不同天然水成分特征和水文地球化学形迹带。

（七）迁移系数（Kx）

水迁移系数是指天然水的干渣中，元素的含量与该区岩石中相应含量的比。

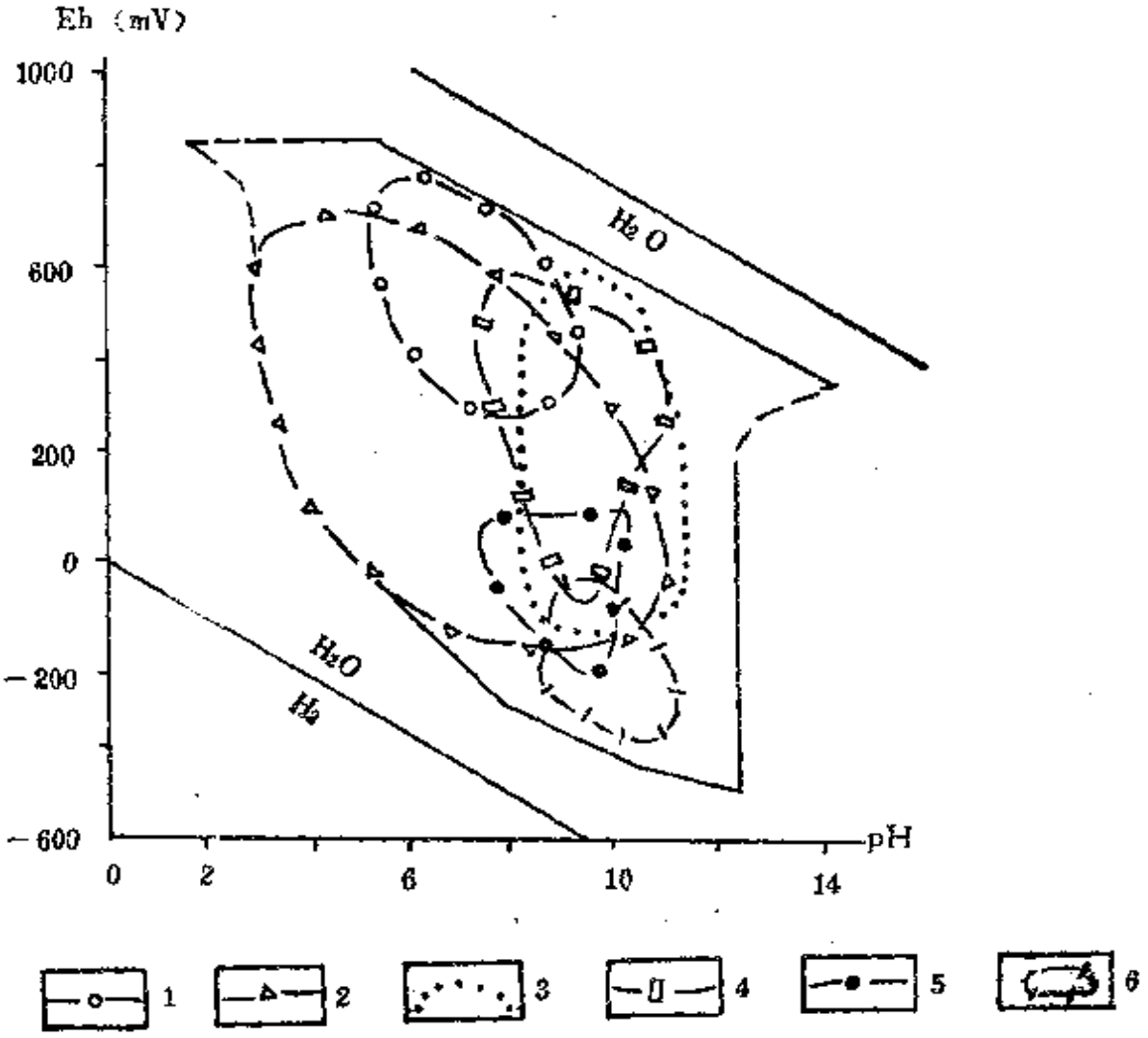


图 2-4　几种天然水的pH—Eh近似稳定场

1—大气降水；2—热水；3—海水；4—潜水；5—封存水；6—油田水

$$Kx=\frac{mx\cdot 100}{a\cdot nx} \qquad (2.28)$$

式中：Kx——某元素的水迁移系数，无量纲；

mx——某元素在天然水中的含量（mg/l）；

a——水的矿质残渣（mg/l）；

nx——某元素在天然水流径区域岩石中的平均含量(%)。

也可以用元素在水中的平均含量（以重量百分比）与克拉克值的比值表示：

$$A=\frac{B\times 10^{-4}}{C} \qquad (2.29)$$

式中：A——地下水中元素的迁移系数；

B——地下水中元素的平均含量；

C——克拉克值（%）；

10^{-4}——转变系数，以 mg/l 为单位的金属含量与水重量之比的百分数。

根据上述系数，可划出天然水相对活动性（见表2-1）。

四、元素的迁移特征

天然水中的元素处于不断的运动之中，水文地球化学找油的基本原理是建立在元素的扩散迁移的基础上，而元素的水文地球化学性质决定着元素的迁移强度和迁移类型。例如，元素从风化壳岩石中浸出以及在水中的迁移能力很大程度上取决于离子势。

离子在天然水溶液中吸引水分子，即：阳离子吸引邻近水分子偶极之负端；阴离子吸引正极端。因此，紧密围绕着一个离子的水分子的数目，就决定于离子的大小。离子愈大，围绕的水分子就愈多。同时，离子水化的程度还取决于离子表面电荷的强度，如电荷相同的Li^+和Cs^+，虽然前者的半径（0.68 Å）比后者的半径（1.67 Å）小，但却容易水化，而 Cs^+ 则不发生水化。

天然水系中某些主要元素的水文地球化学性状如图2-5所示。

A. И. 彼列尔曼（1961）根据表生带元素的迁移形式和迁移强度概念，将元素分为空气迁移和水迁移两大类。

（一）空气迁移的气体

1. 活泼的——H、C、N、O、I；

2. 不活泼的——He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn；

（二）水介质迁移的元素

1. 非常活泼的（$Kx=10n$）：Cl、S；

2. 活泼的（$Kx=n$）：Li、Na、Ca、Mg、Sr、F；

3. 弱活泼的（$Kx=0.0n$）：Si、P、K；

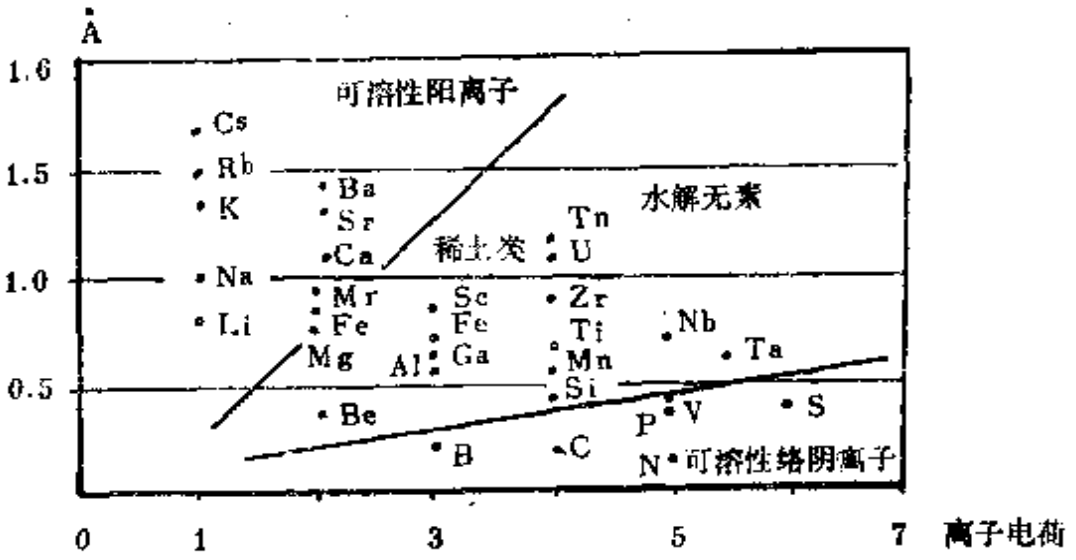


图 2-5 某些主要元素的水文地球化学性状

4. 氧化介质中活泼的和弱活泼的（$Kx=0.n$），而还原介质中为随机性的（$Kx<0.1n$）；

（1）在氧化环境的酸性和弱酸性水中迁移能力强，而在中性和碱性水中迁移能力弱：Cu、Ni、Pb、Zn、Cl；

（2）在氧化环境中的酸性和碱性水中迁移能力强：U、V、Mo、Se；

5. 在还原介质中是活泼的、弱活泼的（$Kx=0.n—n$），而在氧化介质中是隋性的（$Kx=0.0n$）：Fe、Mn；

6. 在大多数环境中不活泼的（$Kx<0.0n$）：Al、Sc、Ti、Ga、Y、Zr、Nb、Ru、Rh、Pd、Sn、TR、Hf、Ta、W、Os、Pt、Th。

这种分类与表 2-1 按元素迁移系数的大小排列有一致的规律性。利用上述分类，在很多方面可以解释天然水中元素的共生组合关系。如Cl^-、SO_4^{2-}是最易迁移的离子；Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、F^-次之；Si、Ni、Cu、Co、Mo、Mn再次；迁移最弱的是Al、Fe、Ti、Sc、Zr等。各元素迁移强度的变化范围很大，如Cl、S比Al、Si等大1000倍以上。天然水系中元素的迁移总的趋势是易迁移的元素形成扩散晕，而最不易迁移的元素对矿床的指示意义

较小。

天然水系中元素的迁移形式是多种多样的，对金属元素来讲，络合物的迁移形式具有重要意义，这是因为：(1) 络合物在气体和液体中，比普通离子化合物的溶解度大许多倍；(2) 络合物在溶液中稳定性高；(3) 许多元素从矿物中溶于溶液时，易变成络离子。自然界中大部分元素形成络合物的能力很强，许多物质往往以络合物的形式溶解、迁移，如卤素离子、S^{2-}、CO_3^{2-}、SO_4^{2-} 等，以及溶解于天然水中的各种有机化合物、各种土壤酸类——腐殖酸，当它们与某些微量元素形成易溶酸和乳酸络合物后，就能在水溶液中稳定存在。这些金属有机化合物主要为含氧硫、氮的化合物，具有阴离子基团（例如—OH、—SH等）或不带电的碱性基团（如==N—、==O等）。这些基团易与金属形成共价的螯合物，如卟啉化合物（图2-6）。因此，易溶的络合物是金属元素迁移的基本方式之一。

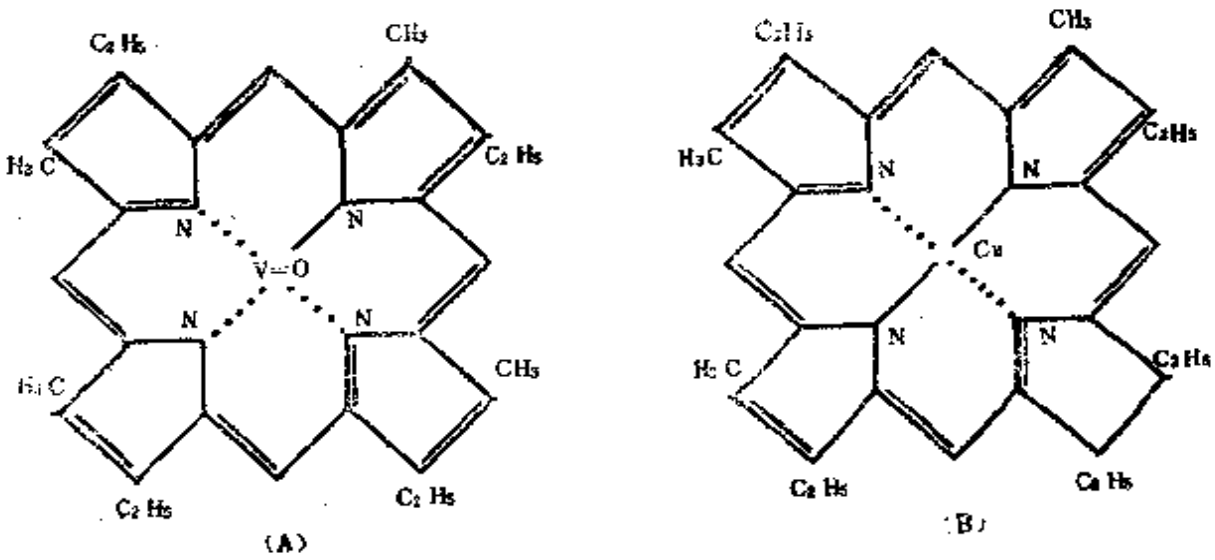


图 2-6 金属卟啉化合物结构示意图

（据伍大俊，1983）

（A）一镍卟啉；（B）一铜卟啉

第二节　水的结构与性质

一、水分子的内部结构

地下水是一种复杂的天然水溶液，它不仅能溶解许多固体物质（包括有机物和无机物），也能溶解某些液体和气体物质。化学元素在水介质中的溶解、富集、迁移，除与本身的地球化学性质有关外，还与水本身的结构有关。

水分子结构特点是：氢原子围绕氧原子的排列是不对称的，它们不是排列在通过氧原子中心的一条直线上，而是具有一定角度（见图2-7）。氢原子核比氧原子核小，并侵入于氧原子的核外电子云中。这样，在水分子中，氢、氧原子核是呈等腰三角形排布的，从而构成水的分子核。氧核位于两腰相交的角顶上，而两个氢核（质子）则位于等三角形的两个底角顶上，两腰间的夹角为 104°45′。整个水分子核侵入于其核外 10 个电子所组成的电子云中。水分子核的半径为1.38 Å。水分子在结构上，正负电荷重心不相重合，使水分子具有偶极性质。

分子轨道的杂化理论，解释了水分子的偶极性。当两个氢原子与一个氧原子键合后，使氧原子的一个 $2s$ 轨道和 3 个 $2p$ 轨道产生杂化，从而形成了 4 个 sp^3 新型杂化轨道，它们具有近似相同的能量，但是稍小于 $2p$ 和稍大于 $2s$ 轨道（$2p>sp^3>2s$）。经计算，这 4 个 sp^3 轨道间的夹角应为 109°47′，这时，氧原子的 8 个核外电子有如下电子构型：

$$_8O^{16}\cdots\cdots\underbrace{1s^2 2(sp^3)^2 2(sp^3)^2 2(sp^3)^1 2(sp^3)^1}_{\text{第二主能层上 4 个}sp^3\text{轨道}}$$

组成水分子时，每个氢原子的1s轨道就和氧原子中仅有一个电子的$2(sp^3)^1$轨道交叠成键，形成水分子如图2-8 所示。

从图2-8可以看出，水分子的核外电子云中共有 10 个电子，两个氢原子提供 2 个电子，一个氧原子提供 8 个电子。它们分别

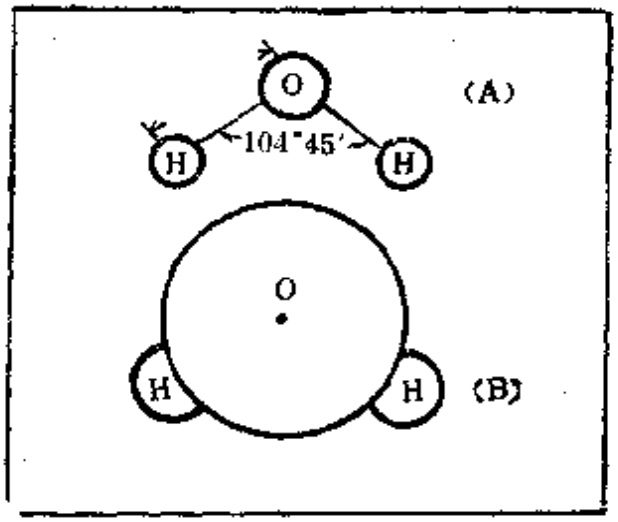


图 2-7　水中氢键及水分子间联结立体示意图
(A)—水采子氢键联结；
(b)—水的四面体

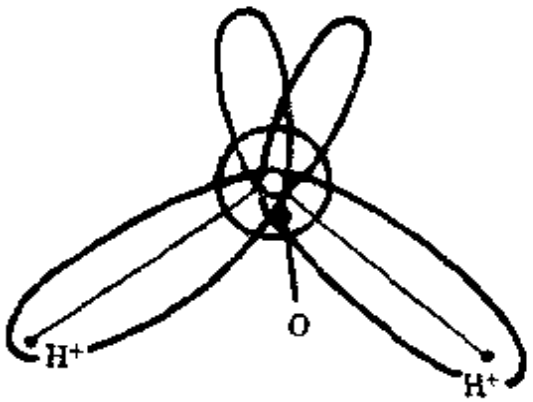


图 2-8　水分子核外电子轨道示意图

配对偶合之后沿五条轨道运转，而两个氢原子中的 $1s$ 电子则与氧原子中的 $2s$ 及 $2p$ 电子（共 6 个电子）产生轨道杂化，形成四个椭圆形轨道，其中两个轨道是由两个氢原子中的 $1s$ 电子同氧原子两个 $2(sp^3)^1$ 电子组成共用电子对的轨道；而另两个椭球形轨道是由氧原子中的两个 $2(sp^3)^2$ 电子轨道，即两对“弧对”电子对形成的轨道。所以，在靠近氢一端形成正极，靠近氧一端形成负极。形成了一种极性键，水分子中的“弧对”电子起着决定性的作用。

偶极分子的极性，可用偶极矩度量，偶极矩（μ）是说假如一个水分子有两个带相反电荷 $\pm q$ 的质点，其点间距离为 d，这时偶极矩就可被定义为：

$$\mu = q \cdot d \qquad (2.30)$$

偶极矩是一个表征电场性质的物理量，可以通过实验测得，它是一种矢量，其方向由正电荷到负电荷。水分子的 $\mu = 1.86 \times 10^{-18}$cm·静电单位。习惯上把 10^{-18}cm·静电单位作为偶极矩的单位，并称为“德拜”，以 D 表示之，这样，水分子的偶极矩又可

写成 $\mu=1.86D$。偶极矩的大小，是分子非常重要的特性，它决定着分子对其它分子的引力。由于水分子中，正负电荷中心之间的距离较大，故水分子的偶极矩比其它物质的分子都要大些（表2-2）。

表 2-2 某些物质的偶极矩值

名　　称	分　子　式	μ（10—18）
硫　化　碳	CS_2	0.00
氯　化　氢	HCl_2	1.03
二　乙　硫	$(C_2H_5)_2S$	1.12
阿　姆　尼　亚	NH_3	1.50
乙　　醇	C_2H_5OH	1.74
水	H_2O	1.86

（据O.A.阿列金，1960）

由于相邻水分子有氢键联结，使水能以巨型水分子〔$(H_2O)n$〕形式存在，此时，水中每个氧原子被周围四个氢原子所包围。这种由单分子水结合成比较复杂的多分子水，而不引起水的化学性质改变的现象，称作水分子的缔合作用。当温度升高时，水分子的缔合程度降低；温度降低时，水分子缔合程度增强。自然界中的水，只有以气态形式存在时，才为单分子的水，而以液态和固态存在时，均呈巨型分子形式存在。

二、水的特殊性质

水与一般液体相比，有许多特殊性质，只有了解这些特异性质，方能研究和解决水文地球化学问题。

（一）水具有独特的热理性质

水具有生成热很高、沸点高和水的热传导、热容、熔化热、汽化热及热膨胀高的特点。因此，水能在地球初期炽热状态下存留下来。水在达到沸点以前有极长的液态阶段，使地球上得以有

大量的液态水存在。

水的热理性质，是由水分子的偶极性结构和水分子间的氢键联结形成的缔合作用决定的。

（二）水具有粘度小和流动性大的特点

水分子在热运动过程中，经常不断地重新排列和联结，使水具有粘度小和流动性大的特点，在1V/cm的电场下，水分子中的H^+和OH^-的活动性分别为32.5cm/s和17.8×10^{-4}cm/s，而其它离子的活动性只有6×10^{-4}cm/s。

（三）水具有较大的表面能

在液体中除汞之外，水的表面能最大（表2-3）。在很大程度上，表面能影响着水溶液中的吸附作用，产生着毛细现象。

表 2-3 几种常见液体的表面能（20℃）

液　　体	表 面 能 (J/cm^2)
水	72.8
苯	28.8
四 氯 化 碳	26.8
甲　苯	27.9
甲　醇	22.6
乙　醇	22.8
乙　醚	18.0

（据沈照理等，1984）

（四）水具有很大的介电常数

水的介电常数在常温下等于81，因此，水为离子化合物的良好溶剂。

（五）水具有良好的溶解性质

水在某种程度上，具有溶解许多物质的性能，使盐类产生水化作用的能力较高。

在水文地球化学找油中，研究元素的水文地球化学性质和水的结构是非常必要的。一方面可以为正确地选择和应用分析方法提供理论依据，如水中可溶气态烃的脱气方法，是根据甲烷及其

同系物在水中有较高的溶解度、比较活泼、水分子在热运动过程中经常不断地重新排列和联结、在升温、减压的分析流程中、可以将溶解于水的烃类气体脱出的特性建立的。另一方面，在选择和应用水文地球化学找油指标时，应充分考虑各元素（指标）的迁移特性，即应选择易迁移的元素作为指示深部油气信息的指标。基于这种认识，通常选择常量组分中的Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-和微量组分中的Li、Ni、Mn、Cu等及有机组分作为找油气指标。在对水化学找油指标进行地质解释时，还必须了解温度、压力以及介质条件等因素对指示元素的离子浓度的影响，如在碱性介质环境中，有利于酚等芳烃组分的富集；Eh(pE)值较低，是水中有机物质赋存的有利条件。由于水具有良好的溶解性质、在自然界中分布非常广泛，故水溶液是最重要的溶液。各种可溶解的固体物质之间的大部分化学反应，都是在水溶液中进行的。石油和天然气化学成分几乎都溶解于水或被水所“捕获”，水的这种特性，是利用水化学成分预测油气藏，并能获得多维、可靠油气信息的理论依据。

查清各元素（指标）在天然水中赋存的内在因素和外界条件，是水文地球化学找油法研究的重要内容之一。

第三节　地下水中元素的迁移类型与模式

一、迁移类型

石油与天然气形成于古代湖泊（海洋）沉积物中，主要是由水域的生物体演化而成。古湖盆（包括海盆、海湖交互盆）从富集、容纳有机物质到石油的生成、运移、聚集或逸散的整个历史过程是在水的积极参与下随着盆地的成生、发展和消亡而进行的。

古湖盆内沉积物是物源区的岩石、矿物被风化后，经天然水搬运而来的。除固态物质外，还有以溶液形式搬运到湖泊内的化

学物质。母岩或沉积物与天然水相接触的过程中被溶解或溶滤，从而使某些元素进入水中，并在水中迁移和富集。研究盆地内地下水中元素的迁移类型和富集规律，对于正确确定水文地球化学找油指标、评价盆地（或地层）的含油气远景、建立浅层水文地球学化异常的形成模式，是很重要的。

地下水中元素的迁移与富集，是指元素在岩石圈和水圈之间发生的位移，即化学元素在地壳中的转移和再分配，它是整个元素迁移的一部分。与地下水活动有关的元素迁移，首先是岩石圈中含的各种组分间天然水中转移，使水中相对富集了某些元素，从而引起元素从高浓度处向低浓度处扩散迁移，或随着地下水对流运移。元素在地下水中的位移，是水文地球化学研究中，寻找油气藏的理论基础的一部分。

地下水中元素迁移和富集，除了元素本身原子结构的固有性质所决定的内在因素外，还取决于外界的天然环境。

水圈和岩石圈中各种元素在漫长的地质历史过程中，处于平衡和破坏平衡的交替运动中，从而引起元素的迁移和富集作用。地下水中元素迁移的方式和类型，按水流特征可分为扩散迁移和对流迁移两个基本类型。

（一）扩散迁移

扩散迁移是分子布朗运动的一种现象，是均一体系中元素迁移的基本方式。元素通过扩散迁移产生微观的位移。扩散作用的动力是温度差、压力差和浓度差。在一个体系内，某元素或某种组分的浓度不均匀时，在浓度梯度作用下元素发生定向扩散，即地下水中的元素自动地从高浓度处通过含水岩系的孔隙或裂隙向低浓度处迁移，使体系内任一点的每一种元素或组分浓度均一化，达到热动力平衡状态。所以扩散是一种体系内各部分浓度均一化的过程。它具有下列特点：

1．扩散是一个连续的物质迁移过程，在此过程中体系内元素的浓度发生连续的变化；

2．扩散时，介质不一定发生移动，体系内浓度梯度的存在

是扩散的基本动力；

3．扩散的速度与浓度梯度成正比，因而随着距离增大而减小，即扩散服从菲克定律，即：

$$Im = -Dm \cdot Cg \qquad (2.31)$$

式中：Im——扩散量（物质通过单位面积的数量）；

Cg——物质的浓度梯度；

Dm——分子扩散系数（cm^2/s）。

式中右边的负号，说明物质向浓度减小的方向扩散。

4．扩散作用受浓度、介质的粘滞性和孔隙度以及岩性等因素影响。

分子的扩散作用，不仅在液体静止时发生，在运动状态下同样也会发生，不但有沿运动方向上的横向扩散，还有垂直于运动方向的纵向扩散。

含油气盆地中地下水的化学成分同油气的生、运、集、散一样，经历了复杂而漫长的水文地球化学演化过程。它在含油气盆地的发育过程中伴随着石油的生成而形成，经历了沉积、浅埋、深埋、变质及淋滤等水文地质历史发育阶段。由于它埋藏在封闭的还原环境里，与油气长期共存，元素之间的相互交换作用使其不断地改变着自己的原始成分和类型。我国含油气盆地原始水化学成分，大部分属于含盐量较低的淡水或微咸水，只有个别为含盐量很高的咸水（表2-4）。

随着地质历史的发展，盆地水逐渐演化成有较高浓度和不同离子组成的油田水。应用现代淡水湖泊的水，进行模拟试验，在常温、常压、室内自然蒸发条件下，各离子随含盐量的增加而增高。当含盐量达到现今油田水的浓度时，以Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}的增加速率最大，其次是Mg^{2+}和HCO_3^-，而Ca^{2+}增加最慢。如果再考虑脱硫等作用，那么在原始淡水的含油气盆地中，必然形成以Cl^-、HCO_3^-和Na^+为主的离子组合。在一个小的凹陷中，同样有使原始淡水高度浓缩的现象。水与围岩发生活跃的盐分交换，使沉积水化学成分重新分配和组合，发生正向变质，朝着含盐量增

表 2-4 我国主要含油气盆地生油岩中Cl^-含量

盆地	时代	含量（%）	盆地	时代	含量（%）
准噶尔	J	0.008—0.010	民和	J_3—1	0.009—0.014
	T	0.007—0.014	四川	J—T	0.037—0.059
塔里木	R	0.55	鄂尔多斯	J_2—1	0.006—0.012
	J_2-1	0.005—0.031		T	0.024—0.08
	J_3	0.03—0.09	涩阳	E	0.011—0.014
柴达木	E	0.063	江汉	E	0.007—0.432
酒泉	K	0.053—0.064	松辽	K	0.014—0.035
	J	0.01—0.08	华北	E	0.005—0.062

（据范璞、尚慧云等，1982）

高的方向发展。这样，导致油田水化学成分与油田上方地下水化学成分之间，形成较大的浓度差，使油田水中的某些元素缓慢地向上移动，富集于浅层地下水中，形成水文地球化学异常区（带）。

（二）对流迁移

对流迁移是物质在孔隙或裂隙岩石中，随着运动介质（地下水）一起迁移，由于渗流速度的影响，迁移较远。它是自然界引起物质运移的主要方式之一。

物质对流迁移的量与物质浓度和介质的运动速度有关，可用下式表示：

$$Ik = C \cdot V \qquad (2.32)$$

式中：Ik——物质对流迁移量；

C——物质在地下水中的浓度或活度；

V——运动介质（地下水）的渗流速度。

物质的对流迁移是很复杂的，因为地下水在多孔介质渗流时，实际流速的分布是很不均匀的，特别是在纵向上运动介质通过不同时代的含水层或非均质岩层时，更是如此。

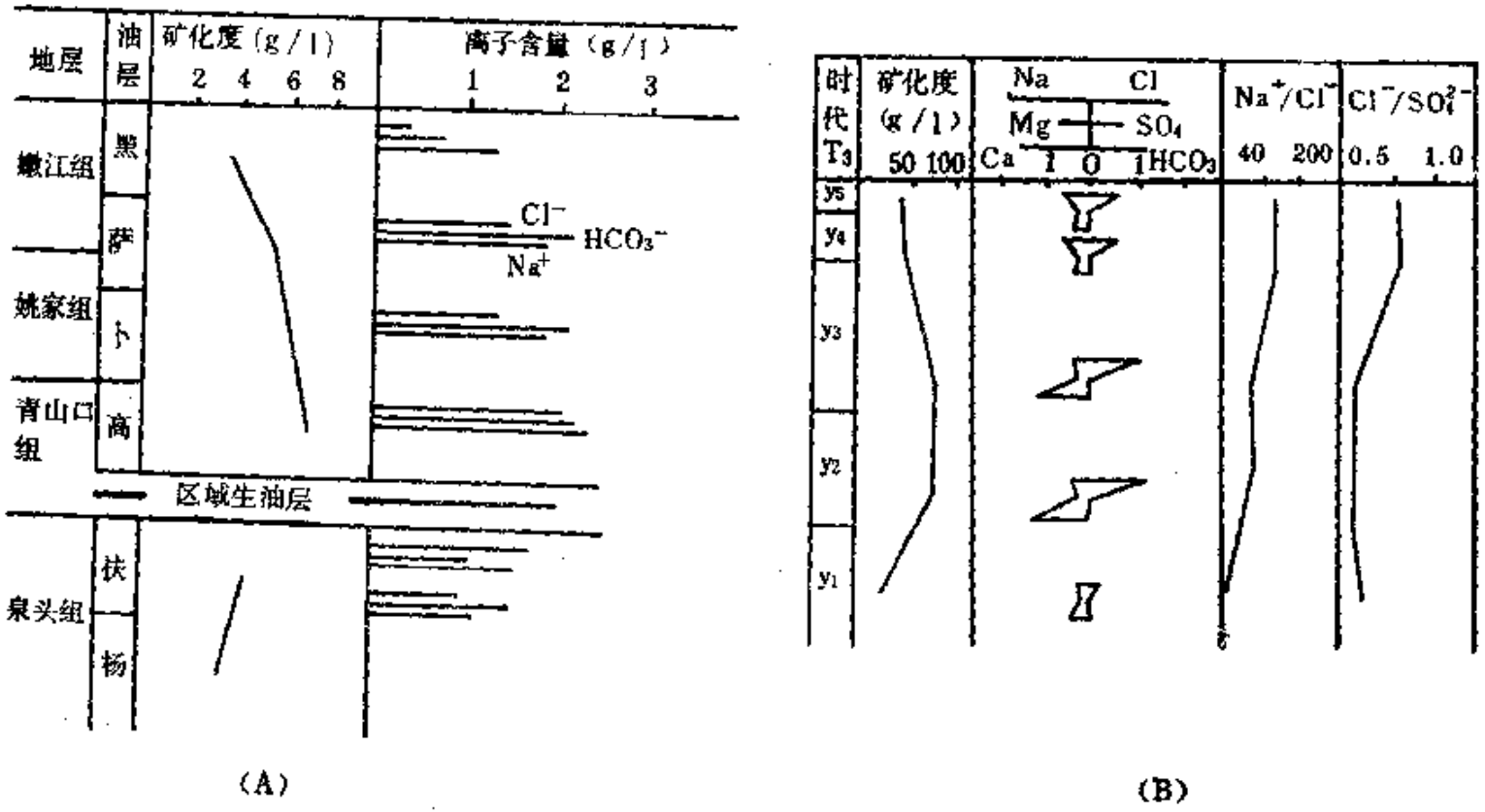


图 2-9 水化学成分在纵向上的变化规律

(A)—松辽盆地，(B)—鄂尔多斯盆地

表 2-5 大港油田油气水在纵向上的变化

地层		项目	原油性质					天然气性质			油田水性质		
			比重 (D_4^{20})	粘度 50℃, 10^{-3}Pa·S	含蜡量 (%)	凝固点 (℃)	胶质沥青质 (%)	比重	甲烷含量 (%)	重烃含量 (%)	矿化度 (mg/l)	Cl (mg/l)	水型 (苏林分类)
上第三系	明化镇组	二段	0.9322	112.6	6.1	-15.3	17.6	0.5734	96.95	2.12	3385	1029	$NaHCO_3$
		三段	0.9184	62.7	8.0	-1.3	15.6	0.6093	93.50	6.61	3321	1009	〃
		四段	0.8991	29.8	9.0	2.8	12.6	0.6626	85.00	12.94	3772	1118	〃
	馆陶组	一段	0.8878	18.3	9.2	16——16	9.2	0.6568	85.61	12.00	4952	977	〃
		二段	0.8777	62.0	11.9	21	12.3	0.7081	77.04	17.40	4962	1146	〃
		三段	0.8695	25.6	14.7	24.8	9.8	0.7316	75.98	21.98	4753	1192	〃
		四段	0.8546	11.7	14.8	30.5	7.2	0.7827	71.43	27.74	5097	1678	〃
下第三系	东营组		0.8411	4.99	16.37	25	8.67	0.7023	80.71	17.48	17277	6880	〃
	沙河街组	一、二段	0.8583	7.59	18.26	21	9.66	0.6856	82.95	15.05	17313	8089	〃
		三段	0.8280	2.87	12.49	23	5.66	0.7528	75.21	23.22	15953	8295	〃

（据大港油田石油勘探开发研究院，1977）

物质的对流迁移在断陷式或断裂比较发育的含油气盆地中具有重要意义，是形成强度较大的浅层水文地球化学异常的主要迁移方式。如次生油气藏的形成和地表油气苗的出现等，油气多是以断裂或不整合面为通道发生再运移的结果，或是由地下水携带直接排泄而成。而这些次生油气藏，一般埋藏较浅，对上部浅层含水岩系的水化学成分产生深远的影响。使地下水化学成分在纵向上呈现有规律的分布或形成连续的水化学分散晕，如图 2-9 和表2-5所示。

准噶尔盆地的克拉玛依油田，发育有一系列的高角度逆断层，深部的油田水化学组分沿着断裂带迁移，在断层附近的浅层地下水中形成较强的水文地球化学异常（图2-10）。

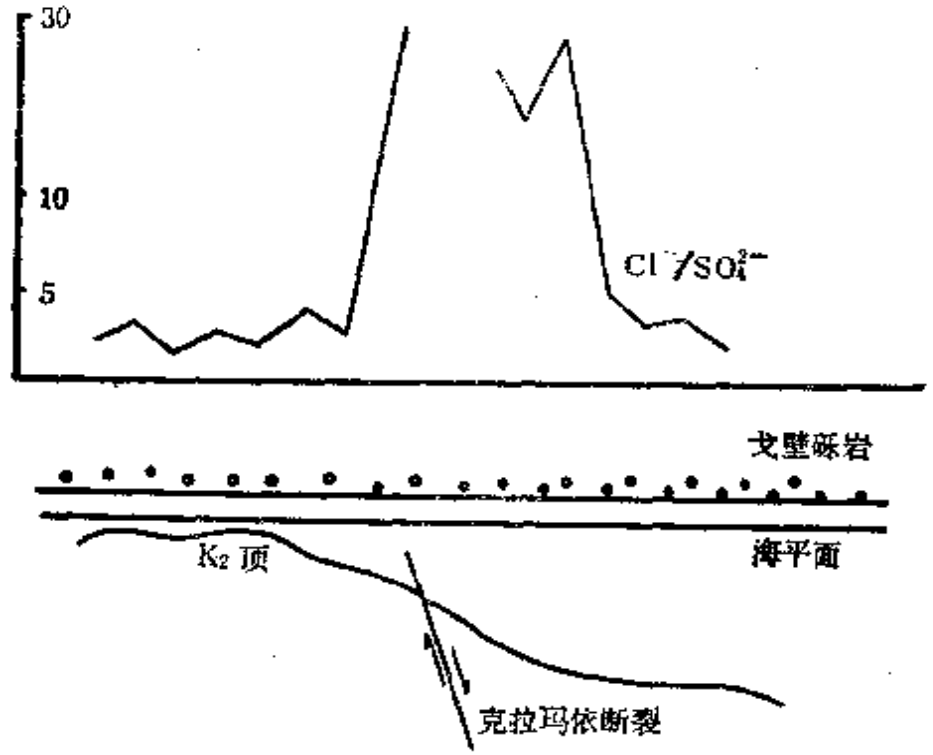


图 2-10　水化学异常形成的地质构造背景

综上所述，地下水中同时存在着两种基本类型的物质重新分配机理，即扩散迁移和对流迁移，前者是由物质的浓度梯度引起的，后者是因水力梯度等因素的存在而发生的，但两种迁移方式不是孤立进行的，而是有一定的内在联系。如地下水中元素向

上迁移时，在压力梯度的作用下，物质（元素）沿着一定通道（构造面）发生整体粘滞性流动，并相继向围岩孔隙和微裂隙均匀渗透。此时，对流作用是主导的，扩散作用虽然已经发生，但是处于次要地位。随着时间的推移，压力梯度逐渐变小，趋于动平衡状态，而开放性裂隙孔洞逐渐充满了溶液，含水岩系中较大规模的物质流动相对停止，此时，从裂隙到围岩因物质浓度梯度不同，而发生扩散迁移，从而取代了对流迁移。

对流和分子扩散在迁移中所占的优势可用贝克莱特（Peclet）数（Pl）来判别。

$$Pl=\frac{V\cdot d}{Dm} \tag{2.33}$$

式中：V ——渗透速度；

d ——表示多孔介质特征参数，在圆球形介质中做试验时，可取球粒直径；

Dm ——分子扩散系数。

很显然，根据Pl可以判断物质在地下水圈中迁移类型：当$Pl<n\times10^{-2}$（$n<5$）时，以分子扩散占优势；$Pl>10$时，以对流迁移占优势；$n\cdot10^{-2}<Pl<10$时，物质迁移具有混合性质。据经验资料，在粘土质岩中，当渗流速度大于10^{-6}cm/d时，则以对流迁移占优势，扩散迁移次之（图2-11）。

从图2-11可以看出，在地下水交替比较活跃的地质构造范围内，物质迁移主要以对流迁移占优势。

冀中拗陷下第三系含水岩系的发育过程和地下水的形成历史，可进一步说明深层地下水在纵向上的运动和物质的扩散-对流迁移在地质历史发展中是持续不断进行的。例如，冀中拗陷始新统含水岩系的埋藏条件为半封闭型的水文地质结构，由大气降水和地表水补给，随时间的推移，至渐新世末期，其裸露区已趋萎缩，地下水的补给区，只限于拗陷边缘，而其内部E_3^1的裸露区已成为地下水的排泄带。渐新统（E_3^1、E_3^2、E_3^3）含水岩系，在早第三纪末均是半封闭型的水文地质结构，就其地质历史发展

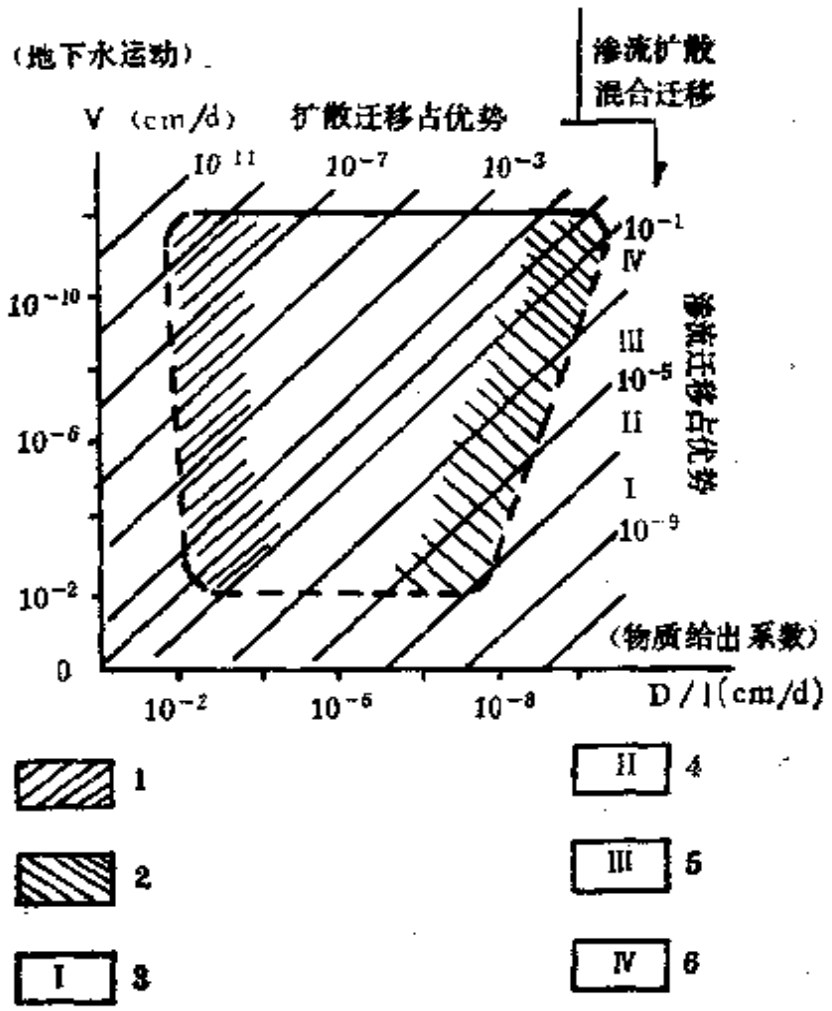


图 2-11 渗流和扩散状态的优势分布图

1—岩石中物质迁移场；2—地质构造内物质扩散场；3—活动水交替带；4—较活动水交替带；5—缓慢流动水交替带；6—极缓慢流动水交替带

而言，其半封闭程度由强变弱。新生断裂、古断裂、边界断裂发育，切割或贯通了各含水层，使上下含水层发生水力联系。上第三系和第四系含水层，基本上继承着渐新世末期的古水动力场，地下水接受周边山区（太行山和燕山）的降水和地表水补给，而深层地下水沿着新构造活动断裂带、裂隙向上传递热能，从而改变或影响着第四系地下水的水温、水文地球化学场及古水动力场，形成与深部流体有关的水文地球化学场。

在上述内在因素和外部条件的控制下，处于高温、高压环境

的高浓度油田水中的组分，必然沿着一定的通道向低温、低压、低浓度的浅层地下水进行长期而缓慢的扩散运移，形成特殊的水文地球化学场。亦就是说，在一定的深度范围内，由深到浅，存在着一个天然流体的“推挤-抽吸”系统。

二、迁移模式

地下水中元素迁移的各种物理-化学过程是连续的，彼此之间有密切的联系，表现在元素迁移类型上，往往逐渐过渡或互相转化。根据前述地下水中元素（物质）迁移与富集的机理，油田水或油气藏的浅层水文地球化学效应的形成模式可分为：对流-扩散单式迁移和对流-扩散复式迁移两种基本模式（图2-12）。

（一）对流-扩散单式迁移模式的基本特点

1．含油层系中地下水中的物质迁移，始于对流迁移，结束于扩散迁移。

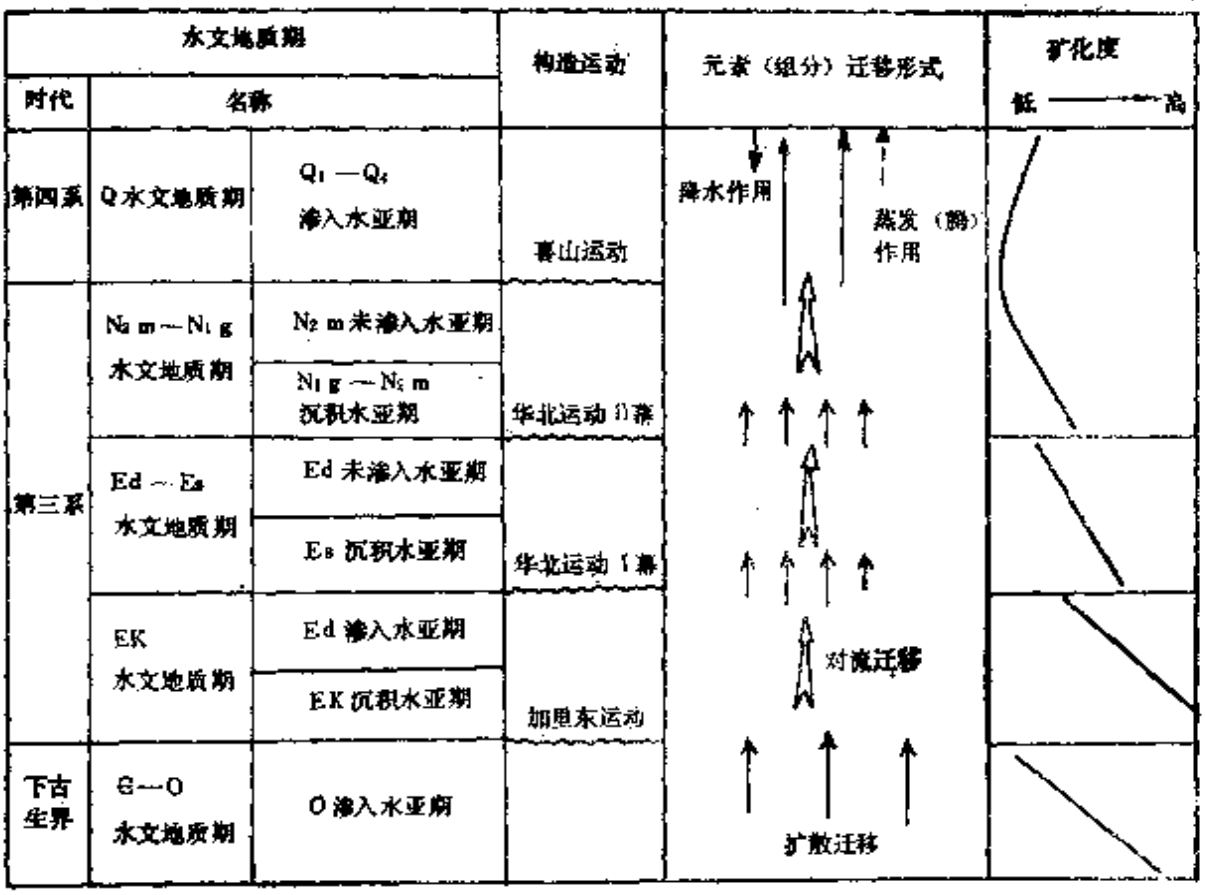
2．单式迁移发育的古水文地质特征是：渗入水亚期与其后的沉积水亚期之间，没有发生明显的构造变动，不同时代的地层沉积是一个连续的或过渡关系。地下水发育历史比较简单。

3．含油层系中最早的一组含水岩系位于风化壳或剥蚀面上，由于裂隙或孔隙比较发育，水动力条件比较好，易发生对流迁移，地下水中的物质在孔隙或裂隙中随着水流一起迁移，至后期的水文地质期，水动力条件改变，水中物质在浓度梯度的作用下，自动地从高浓度向低浓度方向扩散迁移。在纵向上，水中多数元素的浓度呈连续性变化。

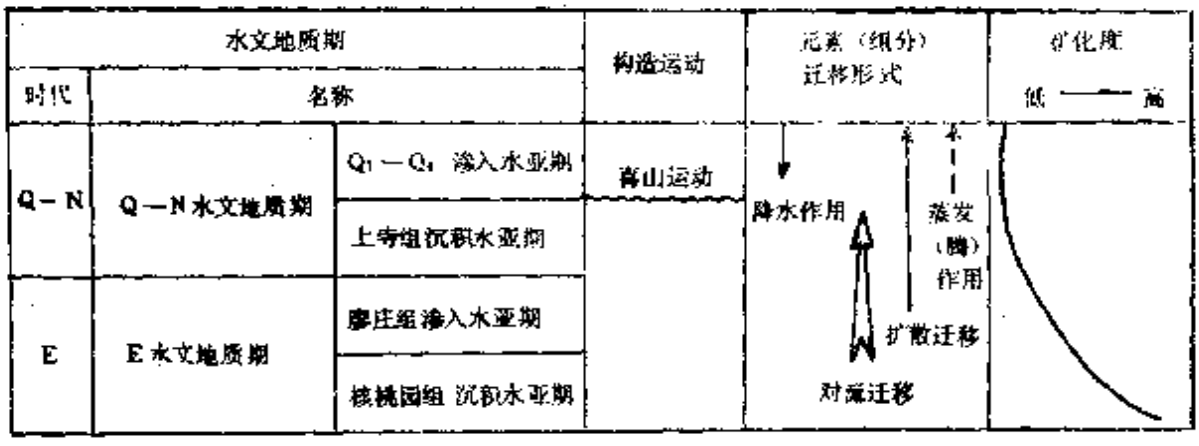
4．由这种类型迁移模式形成的水化学异常，具有连片性好、异常强度大、同一指标的浓度比较均匀、各异常的可比性较高的特点。异常能比较客观、全面地揭示地下含油气特征，换句话说，油气藏或含油气圈闭在浅层地下水化学成分方面会有不同程度的反映。

（二）对流-扩散复式迁移模式的基本特点

1．含油层系中地下水的物质迁移，由对流迁移转变为扩散



（A）



（B）

图 2-12 地下水中元素迁移模式

（A）—对流-扩散复式迁移模式（以华北地区为例）；（B）—对流-扩散单式迁移模式（以南襄盆地为例）

迁移后，并没有终止，继而又转为对流迁移，再过渡到扩散迁移，形成周而复始循环的复式迁移。

2．复式迁移发育的古水文地质特征是：各渗入水亚期与后期的沉积水亚期之间，有明显的构造活动，在接触关系上多为不整合，地下水的形成过程比较复杂，一般都经历了沉积、深埋、变质、淋滤等水文地质发育阶段。水化学成分变化较大。

3．每一水文地质期都含有两个或两个以上的渗入水亚期—沉积水亚期，在不同的水文地质期之间，地下水的横向流动比较活跃。地下水中物质迁移，在纵向上呈现“跳跃”式的变化，表现在水化学成分的浓度上为高、低相间的特征。

4．由该类迁移模式形成的水化学异常，在平面上多表现为断续分布，异常强度大小不一，同一指标的浓度变化较大，各异常的可比性较低。与油气藏或含油气圈闭有关的部分异常，很可能被掩盖或复杂化。

第四节　含油气盆地古水文地质作用

一、油气形成的沉积环境

（一）古湖盆形成及其演化

古湖盆是陆相油气形成的主要场所。我国中新生代以来发育有许多陆相湖盆，在其发展演化过程中形成了丰富的油气资源。但是，我国中新生代陆相盆地基底时代不同、类型众多、岩性各异、硬化程度不等。基底的不均一性，是我国陆相盆地内部不均衡发育的主要原因。

陆相盆地的成盆方式，可分为断陷型、断拗型、台拗陷型及及褶断型等四类盆地。成盆方式控制着盆地的形态、沉积特征和沉积速度。而湖盆的形成和发展又可分为单旋回和多旋回沉积两种情况。松辽盆地为单旋回沉积的一个实例。它在形成的初期阶段，气候比较干燥，沉积物以红色碎屑岩为主，为冲积平原

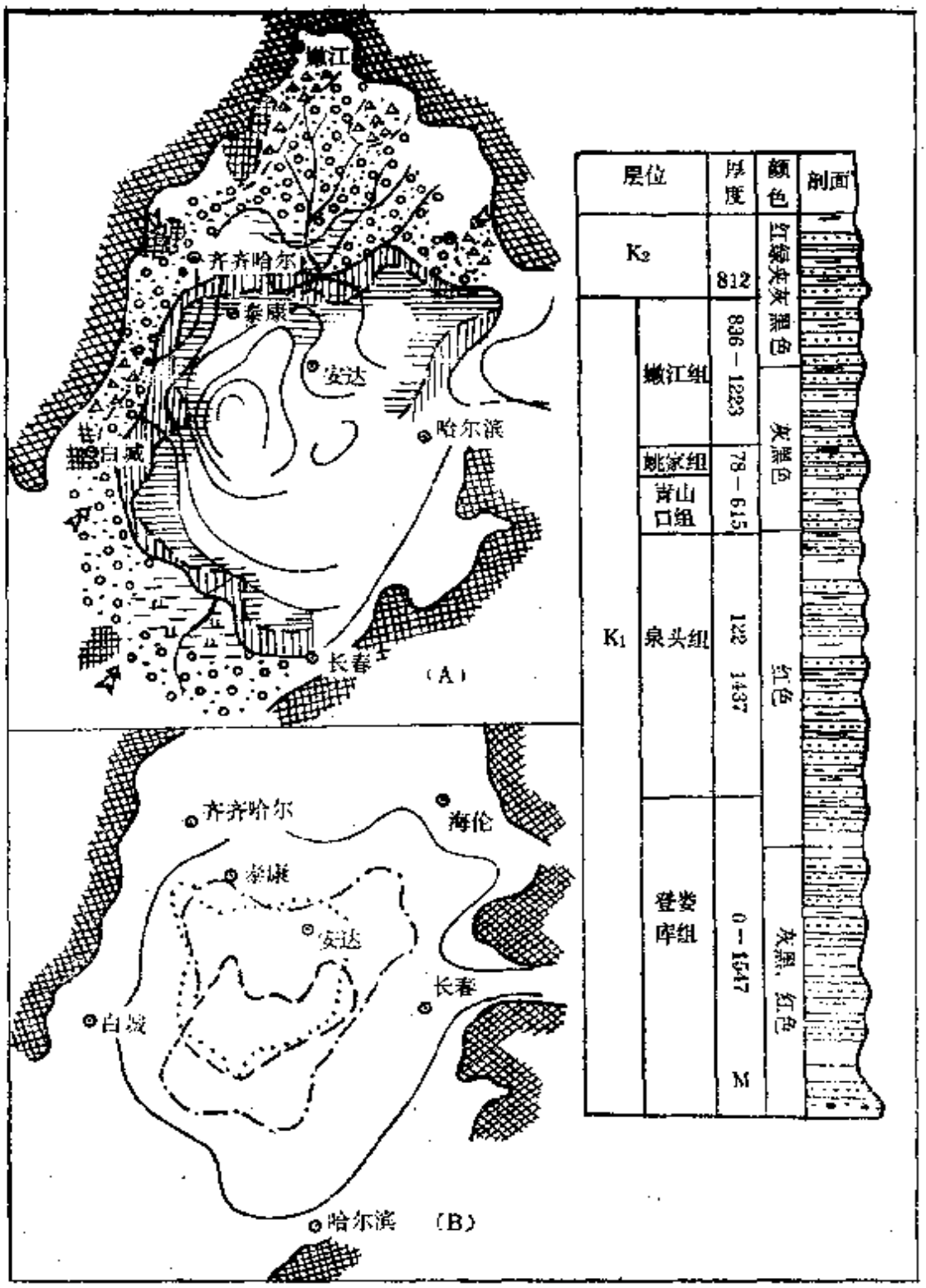


图 2-13　松辽盆地白垩纪湖泊发育综合图

（据大庆油田科学研究院资料，1977）

（A）—青山口组一段沉积相图；（B）—姚家组、青山口组湖泊位置图；1—剥蚀区；2—湖积相；3—河流相；4—滨湖相；5—浅—深湖相；6—物源方向；7—青山口组暗色泥岩厚度；8—古水系；9—姚家组一段沉积时期湖岸线；10—姚家组二、三段沉积时期湖岸线；11—青山口组一段沉积时期湖岸组；12—青山口组二、三段沉积时期湖岸线

表 2-6 松辽盆地早白垩世古湖泊演化数据

地层		沉积厚度 (m)	湖区面积 (10^4km^2)	生油层厚度 (m)	有利生油面积 (10^4km^2)	岩石颜色	沉积相
上白垩统		600				灰黑灰绿棕红	河流泛滥平原相
嫩江组	三一五段	600				灰黑、灰绿、棕红	
	二 段	200	0.96			黑色	深湖相
	一 段	200	10.00	95	5.24		
姚家组	二、三段	100	1.85	100—150	0.73	黑色、灰绿色	河流泛滥平原相
	一 段	50	0.98			灰绿、棕红色	三角洲、滨湖相
青山口组	二、三段	450	3.45—6.80	300—500	2.28	黑色	浅湖、深湖相
	一 段	100	8.77		4.44		深湖相
泉头组	四 段	1500		100±		红色为主	冲积平原相
	三 段						
	二 段						
	一 段						
登娄库组	上 部	1500				红色为主	冲积平原相
	下 部						

（据大庆油田资料1977）

相。盆地全盛时期气候渐变温湿，水体扩大、加深，生物极为繁盛，形成一套富含有机质的深水湖相沉积（图2-13）、表2-6。暗色泥岩厚度大，常见生物灰岩、鲕状灰岩、钙质泥岩、泥灰岩及白云岩等。泥岩中Cl^-的平均含量只有0.014—0.035%，比正常海水沉积物中低几十倍。泥岩中微量元素的含量与比值也普遍较低（表2-7）。在沉积旋回晚期，湖盆萎缩。

表 2-7　松辽盆地白垩系微量元素含量表（单位：ppm）

层　位	B	Sr	Ga	Ni	Cr	V	Sr/Ba	B/Ga	Cr/V
嫩江组一段	81.1	352.0	25.3	22.5	64.7	77.1	0.45	3.17	0.87
姚家组二段	73.7	298.0	30.8	19.7	55.1	73.8	0.37	2.47	0.75
姚家组一段	67.6	344.0	30.0	20.3	57.5	74.7	0.39	2.28	0.82
青山口组二、三段	64.0	338.0	28.9	19.3	57.9	79.6	0.38	2.37	0.78
青山口组一段	50.6	475.0	20.4	21.6	51.3	81.8	0.86	2.66	0.66
泉头组	51.9	316.0	28.1	29.8	65.4	90.0	0.44	1.91	0.76
登娄库组	48.7	420.0	37.7	37.7	61.7	123.7	0.53	1.28	0.50

（据大庆油田资料，1977）

多旋回沉积盆地是在先期沉积盆地的基础上，又接受新的沉积物，具有多期的生油层、储油层、盖层组合，而其中的沉积水和渗入水也经过多期的混合和再分配过程。

我国东部地区主要是燕山期形成的盆地，生油层时代比较单一，多为单旋回沉积盆地。而西部地区的一些盆地多在海西及印支早期形成，具有多旋回沉积的特征。

（二）湖水来源及演化

大陆水体来源于两种类型的水：一是残留海盆，或在发展过程中曾一度或多次与海有过连通的湖泊，水源于海水或有海水补给，并在大陆水的影响下，逐渐发展成为淡水和微咸水湖泊。二是分布在潮湿、半潮湿气候下的淡水—微咸水湖泊，或者虽然处于干燥、半干燥气候带，但补给水系的广大流域面积进入潮湿、

半潮湿气候带，汇集大量水源而成淡水一微咸水湖泊。它们的水体都是来源于潮湿气候带下的水系补给。我国中新生代陆相湖泊，主要是大陆水系补给形成的，但也有些湖盆在发展过程中，与海有过连通，如渤海湾、苏北及三水等盆地。水质多为淡水和微咸水。即使是残留海水，由于受大陆水系的影响，也多是微咸水。生油岩系中富含淡水、微咸水生物群落和一些植物碎屑。含盐量一般不高，平均为0.01—0.03%，部分为0.05—0.1%。微量元素B、Sr、Ni、Cr、V等的含量属于淡水或微咸水的范畴。但也有少数生油岩含盐量高于海水，像江汉盆地就有大量的石膏、盐岩沉积。在地史中，由于构造运动的发展和古气候、水质的演化，形成了类型众多的湖泊，从总体上看，有以下几种类型[4]：

1．与潮湿气候和半潮湿气候有关的淡水一微咸水湖泊：如松辽盆地下白垩系泥岩中Cl^-平均含量只有0.014—0.035%，水化学成分趋向对碳酸盐类型。

2．与潮湿气候有关的淡水湖泊：主要见于上三叠统顶部和中、下侏罗统，以鄂尔多斯、准噶尔和塔里木盆地为代表。含盐量低，大都属于淡水水域。这种湖泊边缘为湖沼相，有大量煤和油页岩、高岭石粘土及菱铁矿等沉积，镓、锗、铀含量比较高，到盆地中心过渡为湖相沉积，暗色泥岩增厚，还原作用增加，有机质含量增多。

3．与半干燥和干燥气候有关的微咸水一咸水湖泊：这种类型湖泊以柴达木盆地上新统和江汉盆地第三系为代表。湖泊发育初期为淡水泥岩中Cl^-含量为0.03%—0.08%，有少量硫酸盐沉积，而后逐渐咸化，泥岩中Cl^-含量增高（1.49%），在湖泊相对淡化阶段，有利于油气形成，当湖泊咸化，特别是硫酸盐大量出现之后，生物逐渐贫乏，有机质含量较低，对生油不利。

4．残留海盆或与海水有暂短连通的近海湖泊：这是陆相湖泊的一种特殊水体，多形成于不同时期近海活动构造带的拗陷中，但也可以深入内陆。我国东部一些第三纪的近海盆地属于这

种类型。海西运动，使中国北部形成褶皱带，经印支运动，在海西褶皱带古老的基底上形成了一系列的拗陷，处于晚三叠世近海、潮湿气候带的拗陷，其中有的可能与海有过暂短的联系。

我国陆相含油气盆地，就湖泊水质演化的总体而言，可划分为三个阶段[5]，即趋向碳酸盐阶段、硫酸盐阶段和氯化物阶段。这种演化特征对水文地球化学异常有一定的影响，一般来讲，水质趋向于碳酸盐阶段的含油气盆地，在浅层地下水中容易形成水文地球化学异常，强度较高；趋向硫酸盐阶段的含油气盆地，浅层地下水中出现的油气效应常常被掩盖，而且具有特殊的化探指标，强度一般偏低；趋向氯化物阶段的含油气盆地，在浅层地下水中极易形成异常，且强度大。

古湖盆水介质演化的三种类型，在现代湖中仍可见到，如表2-8所示。

在古湖盆内，上述演化阶段并非非此即彼，而是浅化、咸化

表 2-8　我国现代湖泊的水化学成分

类型	湖泊	化学成分 (meq/l)						矿化度 (g/l)
		$K^+ + Na^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	$HCO_3^- + CO_3^{2-}$	
酸盐趋向于碳	太湖	0.94	1.03	1.35	0.88	0.83	1.61	0.18
	巢湖	0.73	0.67	1.30	0.40	0.62	1.68	0.13
	微山湖	2.70	1.48	1.66	1.55	1.40	2.89	0.32
趋向于氯化物	青海湖	149.98	68.19	0.45	148.35	43.67	23.80	12.37
	喀拉俊湖	5367.00	358.90	8.96	5174.00	557.97	3.45	334.93
	额吉诺尔	2393.72	694.32	50.16	2757.86	345.84	34.50	166.03
	运城盐湖	1086.84	273.71	24.92	1057.64	313.11	14.45	81.81
	艾丁湖	3944.30	33.43	35.55	3640.00	369.10	2.17	233.46
	秀吉诺尔	3277.55	827.49	27.22	3266.60	743.11	106.65	244.44
硫酸盐趋向于	巴里申湖	725.05	210.40	7.73	536.90	391.50	8.04	59.09
	疏勒诺尔	285.33	48.96	20.96	179.20	165.22	4.02	22.00

相互交替出现（包括纵向和水平方向），但就总的演化方向来看，不同的湖盆在一定的历史阶段，往往趋向某种类型。

二、油气水形成的古水文地质作用

为了研究油气水形成、运移及相互更替的过程，油气藏形成、保证和破坏的关系恢复盆地水文地质历史是必要的。

（一）含油气盆地沉积水及其化学组分的演变和转移机理

1．含油气盆地沉积水的演变和转移

含油气盆地沉积水包括沉积作用水（湖底软泥水）和沉积成因水两种。沉积作用水是在湖底沉积物堆积时同软泥一起沉积下来的水，而沉积成因水的主要来源是湖底软泥水演化。随着时间的推移，古湖盆沉积物逐渐加厚，由于岩柱重力作用，水底沉积物被压实，其中一部分水被挤压进入孔隙相对较大的岩石中成为沉积成因水，即埋藏的层状水；另一部分软泥水仍保留在泥岩沉积物中，或重新返回地表水体。例如我国青海湖，现代湖相沉积物的早期成岩作用，经历了脱水、压实和固结作用阶段，沉积物中仍保留有10—15%的水分。

鲍尔斯对上述变化过程进行研究后指出，当沉积物厚度达600—1800m时，由于压实作用，使大部分孔隙水失去，泥岩的孔隙度小于10%。此时，各种粘土矿物的晶格中仍然存留有层间结合水[6]，这是发生在干酪根演化成石油之前的过程中。当分布在沉积物中的干酪根成为有机质的主要形式时，随着沉积物埋藏深度的加大，至中期成岩阶段，干酪根在温度、压力和催化剂的作用下，进入了热催化裂解的成油时期。在形成大量分散状石油和气的同时，粘土矿物进一步脱水石化，含有层间结合水的蒙脱石，在温度升高的情况下，再次被压实，向伊利石方向转化，不仅排除剩余层间结合水，而且放出结晶水，沉积物含水量由30%减至5%，这些析出的水是石油运移的载体。在黄骅拗陷压实试验中，从沙河街组一段泥岩中挤出较大量的水[7]。

关于粘土脱水阶段的划分如图2-14所示。

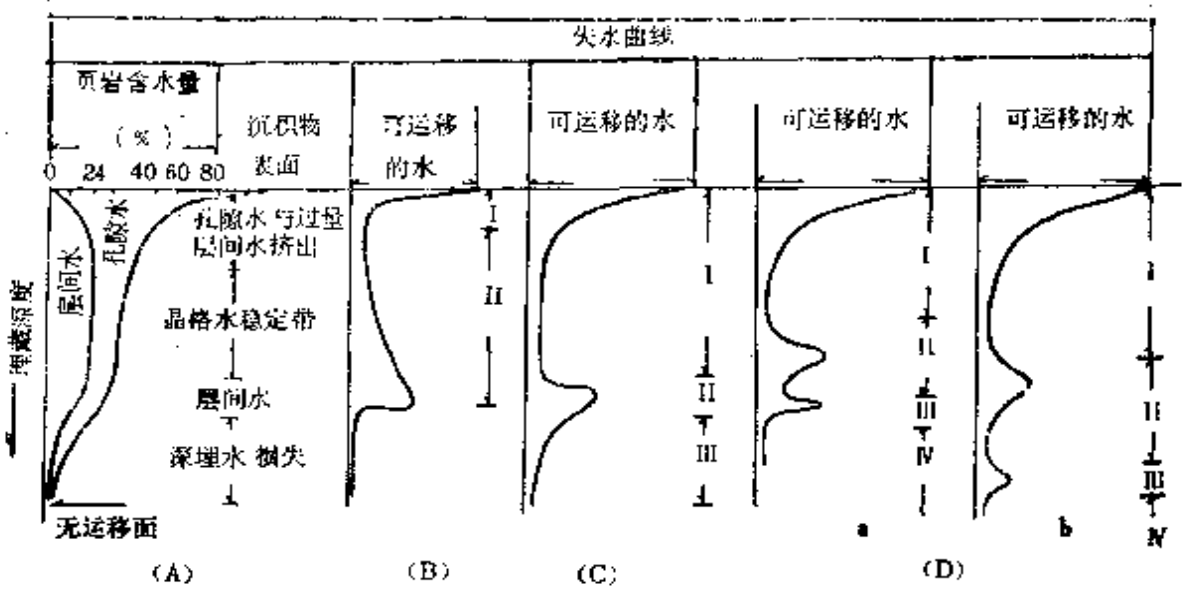


图 2-14　粘土岩脱水阶段的划分

（A）—J.F.伯斯特（1969）资料；（B）—M.C.鲍尔斯（1967）资料；（C）—J.F.伯斯特（1969）资料；（D）—E.A.小佩里和J.豪尔（1972）资料；a—高地热梯度；b—低地热梯度；Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ—第一、二、三、四次脱水阶段

此外，古湖（海）盆中富集的大量有机物体，主要由水组成，如海洋浮游生物含水大于90%，一部分是细胞和组织的自由成分，一部分是结合的。在成岩时，约有40%的有机物质转化为水，成为湖盆内地下水的组成部分。

我国的一些含油气盆地粘土矿物的特征表明，在成岩过程中均有不同程度的脱水现象，如四川盆地的侏罗系沉积物的粘土矿物是伊利石、高岭石和绿泥石，而无蒙脱石，即使是有混合层的矿物，其晶格中蒙脱石含量亦很少。又如渤海湾地区渐新统（生油层）泥质岩中粘土矿物的特点是伊利石的相对含量（55—80%）高于蒙脱石的相对含量，并混有少量的绿泥石。我国其它含油气盆地中的粘土矿物均含有一定量的伊利石。

2．含油气盆地沉积水化学成分的演变在湖盆中，软泥水化学成分的演变受诸多因素的控制，影响最大的是有机物质。在有机物质少的软泥中，水的化学成分几乎不发生硫酸盐的还原作用，离子的扩散作用和交换作用进行得也很缓慢，埋藏在软泥中

的沉积作用水的化学成分，虽然有的经过几十万年的时间，除向单一的盐化方向发展外，仍然与沉积前的湖水化学成分特点相似。在富含有机物质的软泥水中，发生硫酸盐的还原作用，使水的化学成分和类型变为几乎不含硫酸盐的氯化物碱性水，多为Cl-Na-Ca型水，其中碱土金属的浓度很低，与最初埋藏的软泥水有完全不同的盐类成分。

在软泥水中富含有机物质的厌氧条件下，生物化学作用，使水的化学成分发生变化，此时，水文地球化学环境中以细菌、蛋白质分解、脱硫酸作用为主，有时还有脱硝酸作用。作用的结果，产生甲烷、氢、碳及氨基化合物，并富集Br、I、Li、B等微量元素；碳酸盐减少或消失；HCO_3^-和H_2S增高，其化学反应如下：

$$SO_4^{2-} + 2C + 2H_2O = H_2S + 2HCO_3^-$$

$$SO_4^{2-} + 4H_2 = S^{2-} + 4H_2O$$

S^{2-}进入水中能水解成HS^-及OH^-，其反应式如下：

$$S^{2-} + H_2O = HS^- + OH^-$$

H_2S与Fe化合，先形成水陨硫铁（$FeS.nH_2O$），最后形成黄铁矿。如软泥中没有Fe存在时，H_2S就在水中聚集起来，在硫酸盐还原过程中，使水中HCO_3^-和CO_3^{2-}的含量增高，在沉积物中形成方解石、菱铁矿、菱镁矿、白云石等。还有部分镁离子消耗在形成蒙脱石的粘土矿物中。此时，可能出现$NaHCO_3$型沉积水，再进一步向着形成$CaCl_2$型水的方向演变发展。$CaCl_2$型水（即Cl-Ma-N水）的出现，是离子吸附交替作用的结果（还有白云岩化和深成成因），水中Na/Cl比值低，Ca/Cl比值高。以上两种苏林分类的油田水类型，是我国陆相油田水的基本类型。根据现有资源，埋藏在含油气盆地中的沉积水多属$NaHCO_3$型水和CaCl型水，其中Br，I，B、Li、Ni、Mn、Cu、Co、V等微量元素含量高，气体成分中含有较高的N、H_2S、CH_4及其同系物；有机物质高度富集。

浓度梯度的存在，促使离子和某些组分产生扩散作用，向上部地下水中运移。有人曾计算过底层水中的氯化物通过黑海海底

沉积物时，1m²的面积内每年有4.7—6.6g进入沉积物中，这是导致黑海海底淤泥含盐量增加的重要原因。

总之，在沉积作用水文地质期里，水化学成分变化的总趋势是向不断浓缩、盐化的正变质方向演化。其规律是水中稳定组分聚集，不稳定组分贫化，氧化组分减少，还原组分增多。

中国现代油田水化学成分的景观，是在古湖盆的沉积作用水化学成分的基础上，在漫长的地质历史中经封闭、溶滤、浓缩、及弥散等作用的结果。在有机质向石油转化的过程中，沉积作用水除积极参与了石油的形成外，沉积水本身的性质也受到了改造，一方面形成与所处的地球化学环境相一致的化学组分与类型，另一方面在从还原环境迁移至氧化环境时，水中某些元素发生质的变化，或在围岩中形成了与古沉积水有关的水文地球化学形迹，例如H_2S、FeS_2、$FeCO_3$、$MgCO_3$、$CaCO_3$、$CaMg(CO_3)_2$、$BaSO_4$、$SrSO_4$、CaF_2以及天然碱、石膏和盐岩等。它们除了可以用于恢复原始水的化学成分外，本身也是水文地球化学找油的重要指标。如阴山-燕山以北的诸多含油气盆地中，普遍含有菱铁矿；秦岭以南的江汉、三水等盆地中均含有一定量的石膏；在上述两地区之间的含油气盆地，均出现盐岩沉积。

（二）含油气盆地的古水文地质分期划分

古水文地质分期，是根据地壳升降运动来划分的，从地壳下降接受沉积物开始，到地壳上升遭受剥蚀，至新的地壳下降开始前的地质时期内水文地质条件的发育过程，称为一个水文地质期。又可将其分为沉积作用和隆剥作用两个亚期。下面以几个盆地为例，说明古水文地质期的划分。

根据区域地质发展史及地下水成生史，松辽盆地白垩世可划分为三个水文地质期：

Ⅰ、早白垩世登娄库组水文地质期：包括K_1d沉积水亚期（I_1），它包括登娄库组1—3段沉积物形成到沉积作用停止这段时期；K_1d渗入水文地质亚期（I_2），包括登娄库组4段沉积后，地层隆起剥蚀遭到淋滤这段时期。Ⅱ、早白垩世泉头组—嫩

江组水文地质期，包括K_1g—K_1n沉积水亚期（II_1），即泉头组、青山口组、姚家组和嫩江组1—4段沉积物形成至沉积作用停止这段时期；K_1n渗入水文地质亚期（II_2），包括嫩江组5段开始沉积至早白垩世末的这段时期，该水文地质期以深埋封闭为主。Ⅲ、晚白垩世四方台—明水组沉积水文地质期，包括K_2s沉积水文地质亚期（III_1），系指四方台组沉积全部时期；K_2n渗入水文地质亚期（III_2），系指明水组全部时期，该水文地质期以淋滤作用为主。

翼中拗陷是一个叠置在华北古生界陆台上的新生界断陷盆地。古潜山地区地下水的成生过程经历了早期隆起剥蚀和后期沉降埋藏两个水文地质历史时期，发展过程如图2-15所示。

华北地区第三纪生油岩系古水文地质期的划分如图2-16所示。

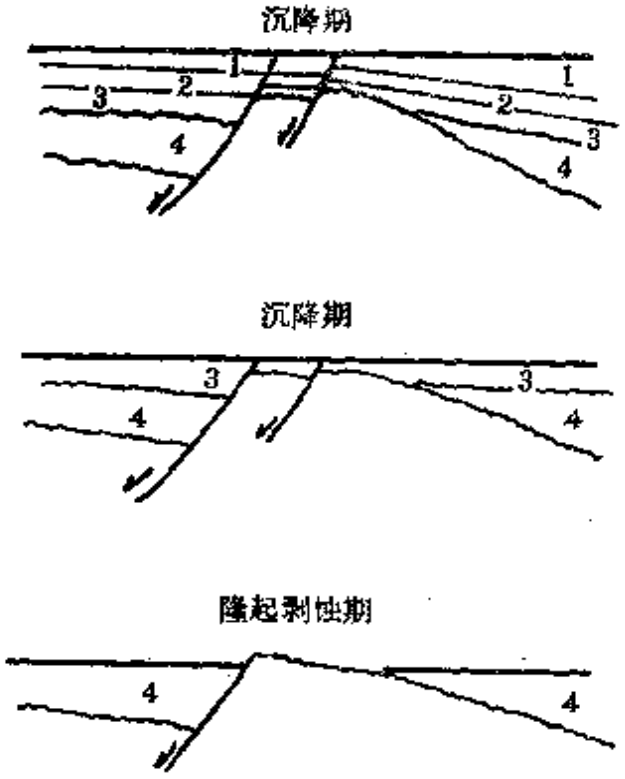


图 2-15　古潜山油田水文地质期发育过程

1—Ed；2—Es_1；3—Es_{2-3}；4—Ek

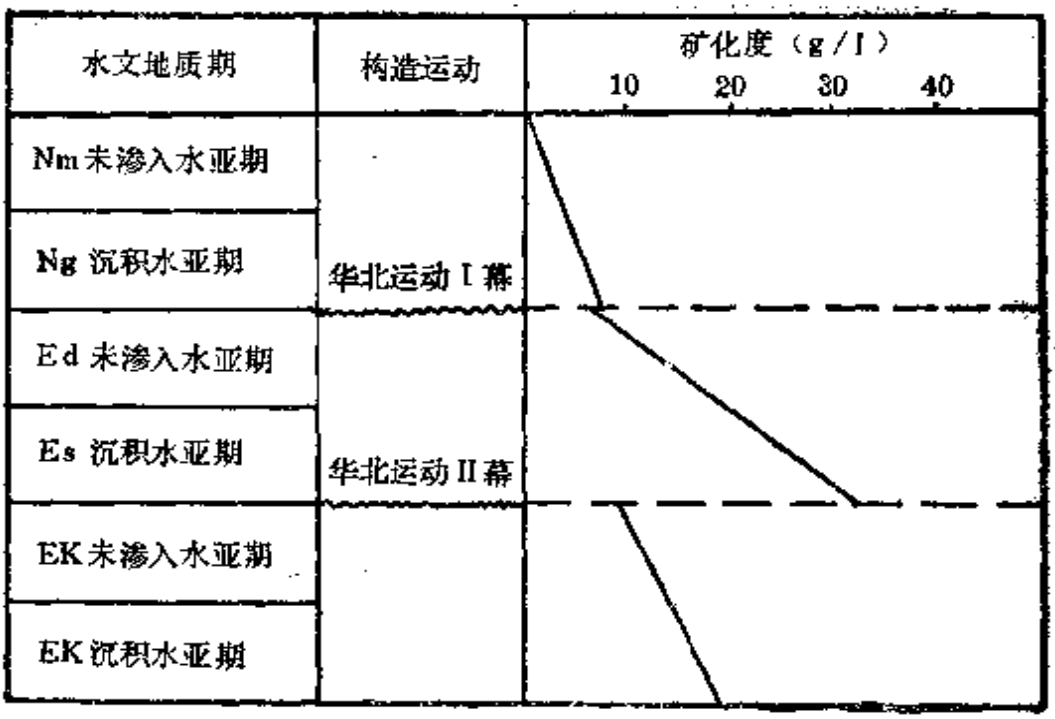


图 2-16 华北第三纪古水文地质期的划分

南襄盆地第三纪古水文地质期可划分为：核桃园-廖庄组沉积水文地质期和上寺组渗入水文地质期。

（三）含油气盆地的古水动力条件

研究含油气盆地的古水动力条件，就是从地质历史发展的观点，恢复天然水压系统。地下水本身具有流动的特性，按其运动的动力源，分为沉积水压系统和淋滤水压系统两大类。

1．沉积水压系统

沉积水压系统对油气运移和异常的形成具有重要意义。含油气盆地在形成发展过程中，沉积物随着盆地下沉而增厚，上部地层加在下部地层的压力也越来越大，在沉积物的压实和固结中，沉积作用水被挤到储集层。显而易见，沉积水压系统的压力主要来自地静压力和水动压力，故可称地静水压系统。在某些情况下，由构造应力引起沉积水量释放的量度差异，必然形成水头差，从而引起水的流动。试验证明，在压实过程中粘土层的重力水、结合水甚至结晶水都可被挤出，进入砂岩储集层中。H、Б、

瓦索耶维察认为，粘土压缩的结果，从中泄出大量的水。因此，在洼地深部，处于粘土层之间砂层的水，主要由粘土泄出。

从古水动力条件研究油气水文地球化学勘探机理，是从“根本”上解决流体运移的途径、方向及强度。

沉积成因水的运动方向，严格受古地貌、岩相古地理、古构造形态的控制，因拗陷中心或沉积中心是形成地静压力的高压中心，是水压头形成带；而斜坡、凸起、盐丘与断裂破碎带往往是地静压力卸压带。因此，沉积成因水携带油气从拗陷中心的高压区，向着上倾方向，即沿着压力降低的方向发生移动，聚集在有利的圈闭内。一般来讲，圈闭多位于隆起带或斜坡带、褶皱、断裂及裂隙相对比较发育、上覆盖层较压力源区薄的地区。圈闭内的压力处在不断脉动的动平衡状态，油气易于通过上覆沉积物，向自由水交替带扩散、对流，形成水文地球化学异常（图2-17）。

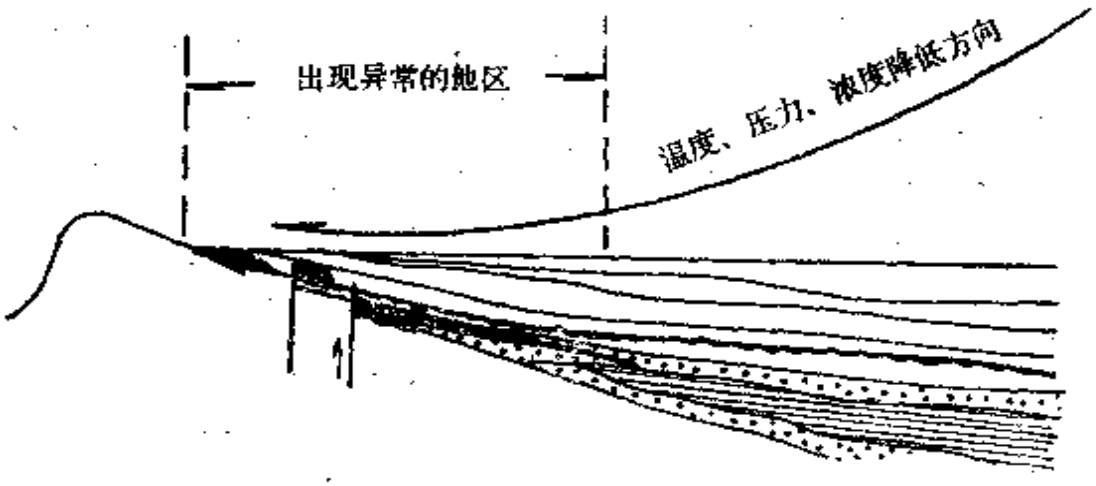


图 2-17　浅层水文地球化学异常出现的有利地区

沉积成因水沿着阻力最小的途径向卸压区运移的距离一般都较短，我国陆相含油气盆地多在30km左右，最远的在60—80 km[83]。多数油田围绕着生油凹陷分布的事实，是地下水短距离运移的佐证。地下水运动的速度和强度，受多种因素控制，其中最主要的是区域背景构造，即凹陷与隆起区的相对位置、高差及其发展史，含水岩系在纵向上的发育特征，通道条件，断裂特征

等。

在含油气盆地内，随着地史的发展，同一含水岩系，可以轮流地由沉积水压系统和淋滤水压系统组成。在水文地质发育的沉积阶段，含水岩系为沉积水压系统组成，在水文地质发育的淋滤阶段，含水岩系又受淋滤水压系统控制。在断块基础上发展起来的含油气盆地，分割性较强，可产生多拗陷或在拗陷中产生多凹多凸的现象，即具有多拗陷中心或沉降中心的特点，并随时代的延续，按一定的规律转移（图2-18）。

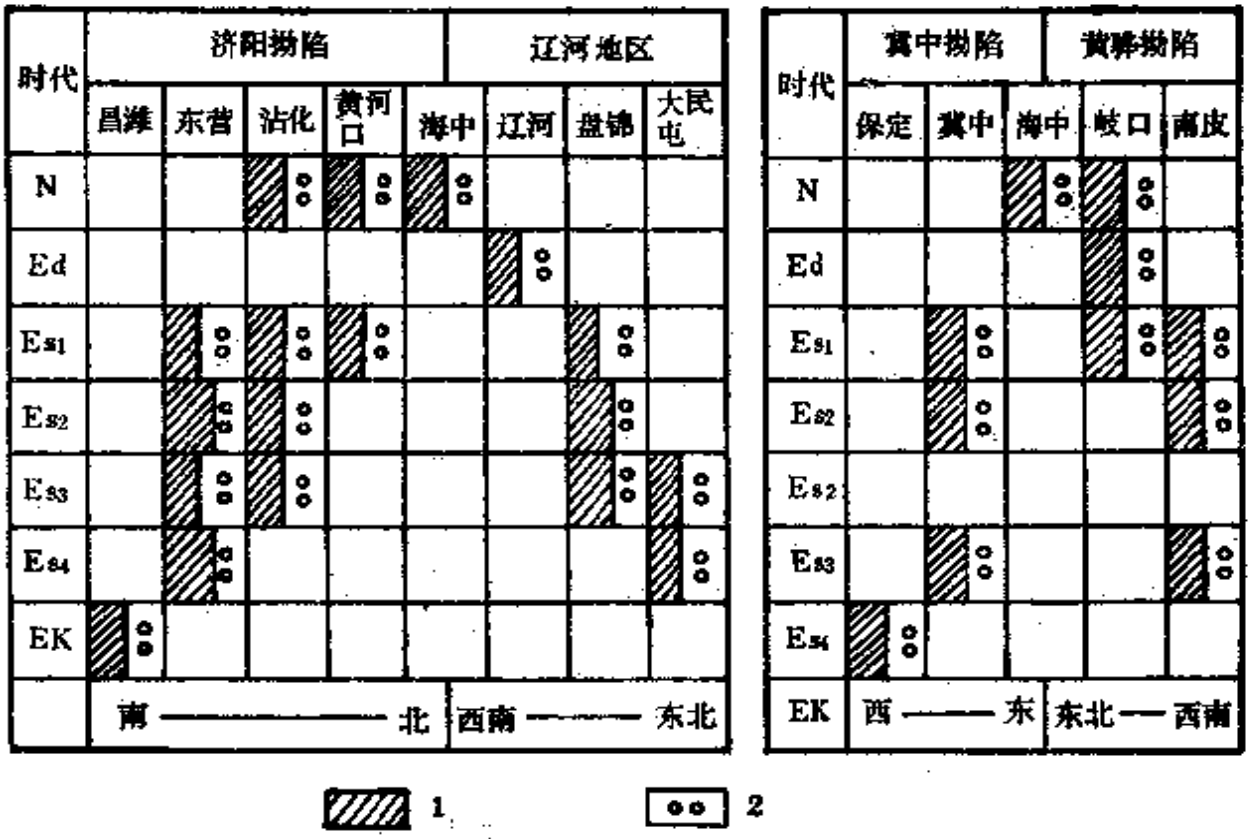


图 2-18 华北盆地第三纪时不同时期的拗陷中心转移图

（据石油部海洋指挥所）

1—生油层；2—储集层

有些盆地的拗陷中心与沉积中心不相吻合，影响着沉积水压系统的发育使其在盆地内的发展中具有复杂多变，活动多期的特点。受其影响，在浅层地下水中形成多种多样的异常。

2。淋滤水压系统

淋滤水压系统的压力是由大气降水和地表水渗入到储集层中的渗透作用以及由这种水形成静压力负荷而造成的。淋滤水压系统在水文地球化学异常的形成中起一定的作用。当沉积水压系统促使油气运移与淋滤水压系统相遇处于平衡状态时，在两者形成的"锋面"附近，流体将垂直运动。如松辽盆地南部的红岗油田，就是这样的典例，在乾安-长岭凹陷生成的油气，在沉积水压系统的作用下，从凹陷中心沿着砂体向西运移；而当时盆地西部为淋滤水压系统所控制，进入地层的水必然向东运移，二者在红岗一带形成压力平衡带——"锋面"，不仅促使油气在那里聚集形成油气藏，而且这两个运动方向不同的水压系统相遇后，形成一个向上的分力，促使深部流体向上运移，这是在油田上方形成比较强的水文地球化学异常的重要原因之一。

综上所述，油气田的浅层效应是地史时期内地质构造、水文地质条件及油气扩散综合作用的结果。

第五节　水化学异常形成的地质构造背景

一、异常形成的地质条件

浅层水文地球化学异常的形成受多种因素影响和控制，其形成条件各种各样，比较复杂，其中地质构造是异常形成最重要、最基本的条件之一。

（一）地质构造条件

1．在含油气盆地或凹陷中，必须具备能够提供地下水越流运动的压力体系（地静压力和静水压力）。

油田水在形成过程中，随着时间的推移和上覆沉积物逐渐加厚，地静压力增大，在压实过程中，特别是由沉积作用水转变为沉积成因水时，被挤出的流体将以垂直运动为主，即深部流体向上运动。如翼中拗陷下第三系各含水岩系中的地下水，由于上覆地层厚度不同而引起的压力差，导致下部的地下水向上部含水层

系中越流，由于含水岩系是多层叠瓦式展布的，引起了层层顶托补给而发生水力联系，从而在同一含水岩系内和它们之间形成上升运动的水流，使得化学成分极为相似，离子组合相同，如表2-9所示。

表 2-9　上下含水岩系的矿化梯度与地温梯度对比表

井号	层位	离子含量(meq%) Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na/Cl	水型（苏林）	矿化梯度 (mg/l·m)	地温梯度 (℃/100 m)
新留1	Ng	1.35	3.46	1.42	4.27	1.02	Na_2SO_4	4.09	5.09
新留5	Z	1.18	1.18	2.54	3.51	1.02	Na_2SO_4	3.52	4.06

（据华北油田资料，1982）

对于与油气有关的浅层地下水化学成分异常的形成来讲，静水压力的作用是不可忽视的因素。盆地内储集层的水动力系统形成以后，地层的静压力主要由颗粒支架结构所支承，此时储集层中的孔隙水所承受的压力主要是静水压力引起的，其水压头的大小决定于补给区和泄水区间的高差。就我国陆相含油气盆地现代水动力场而言，由于受地质构造和沉积岩性控制，大部分属于封塞式的内循环系统，地下水没有直接外泄流出盆地，而以潜伏泄水为主要特征。如泌阳拗陷下第三系渐新统核桃园组的沉积相带从边缘到中心由三角洲、浅湖相过渡为深湖相，由砂岩、砂泥岩渐变为泥岩和碳酸盐岩。盆地周边的多种大小砂体，前缘砂层向拗陷中心变薄，向腹地插入较深湖相泥岩中，形成尖灭，砂体间互不连通。循环于砂岩储集层中的地下水，自盆地边缘获得补给，沿砂体向盆地中心汇集，最后沿着断层和裂隙向上运移。故纵向上水化学成分的性质类似。此外核桃园组油田水具有较高水头压力（可喷出地表）的事实也是很好的证据。

2．通道条件：断层、裂隙、沉积间断、古剥蚀面及各种穿刺构造的接触面等均是地下水的良好通道，深层地下水经这些通道发生运动。如冀中拗陷内所有的断层均为正断层，具有一定的

开启性，成为流体垂向或侧向二次运移的通道，如在断层附近有油气显示，水文地球化学异常集中出现，断层附近的地下水的矿化度低，r_{Na}/r_{Cl}比值较高，原油的高比重、高凝固点特点（表2-10）等可作为旁证。

表 2-10 原油性质沿断裂的变化

井号	层位	原油性质			通道断层	运移方向
		比重D_4^{20}	含蜡量(%)	胶、沥青质(%)		
文1	Es′	0.8704	15.05	16.67	文1断层	向西
文3	Es′	0.9185	15.49	45.36	文1断层	向东

（据华北油田资料，1982）

又如河间断块呈北东向，形成于砂河街组四段沉积期，消亡于第三纪末，油气以断裂和不整合面为通道自E_s^4和E_s^3间向中、上元古界及东营组运移（图2-19）。

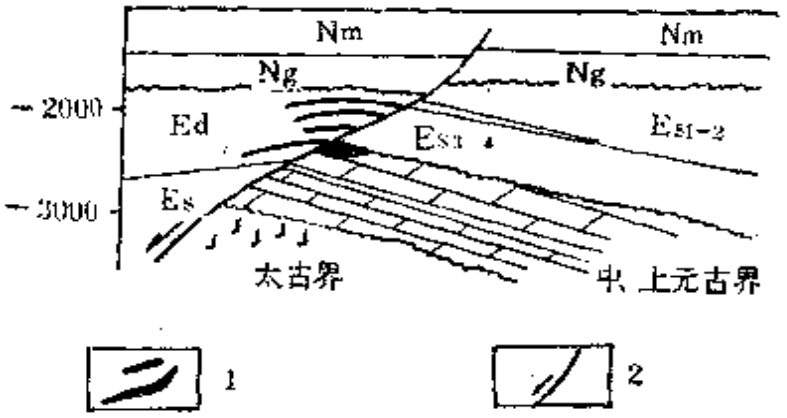


图 2-19 油气以断层为通道运移图

1—油（气）田；2—通道断层

3．油气藏埋藏浅、盖层薄、渗透性好的次生油气藏比较发育。

4．新构造动运发育，沿老构造线复活，使沉积物结构发生变化，或使胶结物重新溶解，沟通了上下含水岩系的水力联系。

总之，在地史上，含油气盆地内构造活动强烈的地区，在油田上方形成的宏观油气显示和异常就明显。此外，月球和太阳

的引力、大洋里的风暴也会使微裂隙发生张开和封闭的反复脉动，使碳氢化合物向地表运移。有人还研究地震之后，壤底中的甲烷及其同系物的浓度有明显的增高，在开采钻孔中涌水量增大[9]。

（三）地下水流系统的特征

含油气盆地内地下水径流必须是“滞流型”，即水力坡度极小，以垂直或混合（垂向与侧向）式的越流形式排泄为主。

（三）具有高的地热场

由于温度差而产生的温度梯度——热流转移，促使水化学成分进行扩散迁移，形成异常。同时，温度增高使有机质裂解的速度加快，挥发性物质增多，加速了元素的迁移速度。我国的含油气盆地一般具有较高的地热梯度（表2-11），为油气水在纵向上扩散运移于浅层形成分散晕创造了有利条件。

表 2-11 我国某些含油气盆地地温梯度

盆地	地温梯度	盆地	地温梯度
准噶尔盆地(T－J)	2.2—2.3	济阳拗陷(E＋N)	3.1—3.9
酒泉盆地(E＋N)	2.3(2.6)	黄骅拗陷(E＋N)	3.6—3.8(3.95)
四川盆地(J)	2.2—2.4(2.7)	冀中拗陷(Z)	3.7(4.2)
鄂尔多斯盆地(J)	2.75(2.8)	松辽盆地(K)	3.1—4.8(6.2)
中南某盆地(E)	3.1(3.25)	泌阳拗陷(E)	3.7

* 括号内为最大梯度值

（四）油田水化学成分具有较高的浓度

油田水与上部地下水化学成分之间，必须有较大的浓度差。我国油田水与上部潜水化学成分之间的浓度差高达数倍或数百倍（表2-12）。在适宜的条件下，便可在一定的范围内形成水化学异常。

表 2-12 油田水与上部浅层地下水离子浓度对比

盆地	凹陷	水的类型	矿化度 (g/l)	meq*/l		
				Cl^-	HCO^-_3	Na^+
南襄	泌阳	潜水	0.51	1.27	4.23	1.47
		油田水	5.20	72.00	35.50	110.50
	南阳	潜水	0.95	2.83	3.10	1.85
		油田水	11.56	137.40	80.00	215.60
松辽	古龙	潜水	1.05	9.21	6.32	14.15
		油田水	6.97	83.40	47.42	120.80
	长岭	潜水	1.85	13.50	18.72	30.10
		油田水	21.75	240.50	200.17	418.50
黄中	饶阳	浅层承压水	0.45	1.02	3.25	5.37
		油田水	26.95	448.36	9.26	352.32
济阳	惠民	潜水	1.22	21.25	10.10	9.57
		油田水	33.73	501.20	6.17	489.60
鄂尔多斯	西部	潜水	1.65	14.27	9.82	29.01
		油田水	88.01	1517.00	6.08	1325.00
	东部	潜水	0.95	4.13	4.79	3.54
		油田水	28.50	431.10	19.60	449.00
酒泉	老君庙	潜水	0.78	3.24	3.36	6.78
		油田水	31.37	541.95	1.47	478.45
三水		潜水	1.42	5.51	1.20	7.30
		油田水	62.69	840.61	15.29	826.53
江汉	潜江	潜水	2.87	10.12	0.90	9.85
		油田水	301.00	4698.60	17.00	4983.49
苏北	秦潼	潜水	0.32	0.96	1.02	1.85
		油田水	31.23	415.63	6.37	480.17

* meq 为毫克当量，为非法定计量单位。

二、异常形成的构造类型

（一）单斜构造形成的异常

单斜构造可能是被破坏的褶曲构造的翼部、沉积形成的单斜地层或砂岩体，在含水岩系的倾没端由于岩性变化（孔隙度和透水性减小）、含水层尖灭、断层切割封闭或阻水体的存在而形成的自流斜地。

在单斜构造条件下，出现水文地球化学异常的有利地段（图2-20）。但是，这些异常的强度和性质诸方面有明显的差异。含

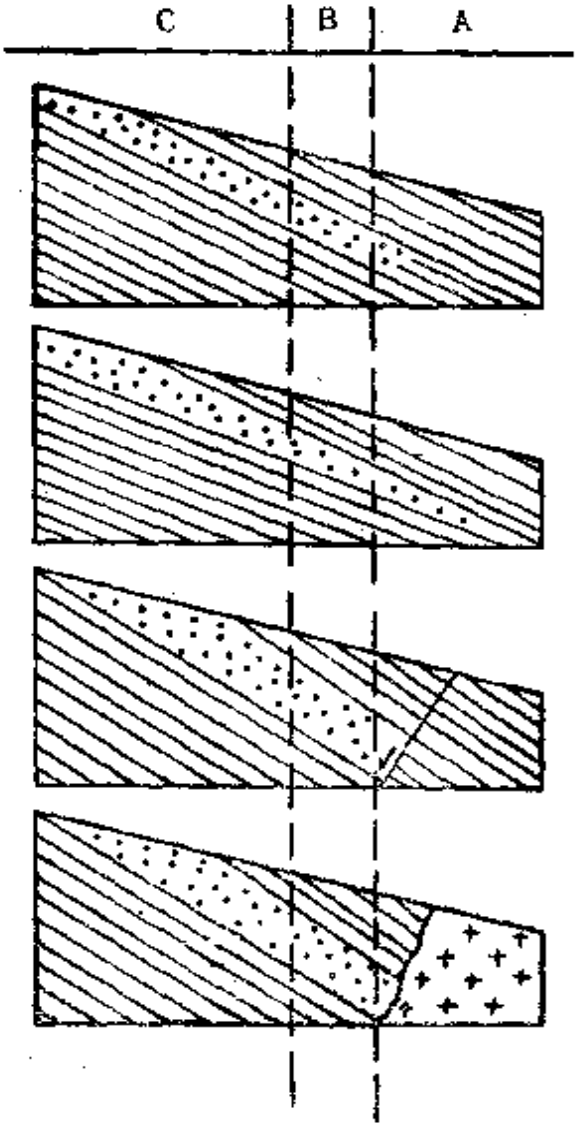


图 2-20　单斜构造水文地球化学异常的分布特征

水层的尖灭带往往是单斜构造的承压区，在沉积成因水的压力作用下，在图中的A地区出现的异常是地下水沿着导水断层(岩阻)向上排泄，或通过上覆地层中的孔隙与裂隙以越流的方式排泄而形成的。异常强度较高，水中有机组分指标比较灵敏。在图中B地区出现的异常位于古沉积成因水和淋滤成因水的“锋面”上，其具体位置随上述两种水的水力梯度大小而异。异常的强度虽然也较高，但找油气指标受到一定程度的干扰，与A地区的指标相比产生变异。在图中C地区出现的异常，是沉积成因水运动的结果，异常强度一般较低，各指标的变异比较明显。

（二）向斜构造形成的异常

在古湖盆的发育过程中，砂、泥岩交替，在构造的控制下形成了含水层与隔水层相互迭置的向斜构造或构造盆地。向斜中心与生油拗陷中心相一致或略有偏移，组成良好的承压水含水体系，其卸压带——地下水的排泄区无疑是形成水文地球化学异常的有利地带（图2-21）。

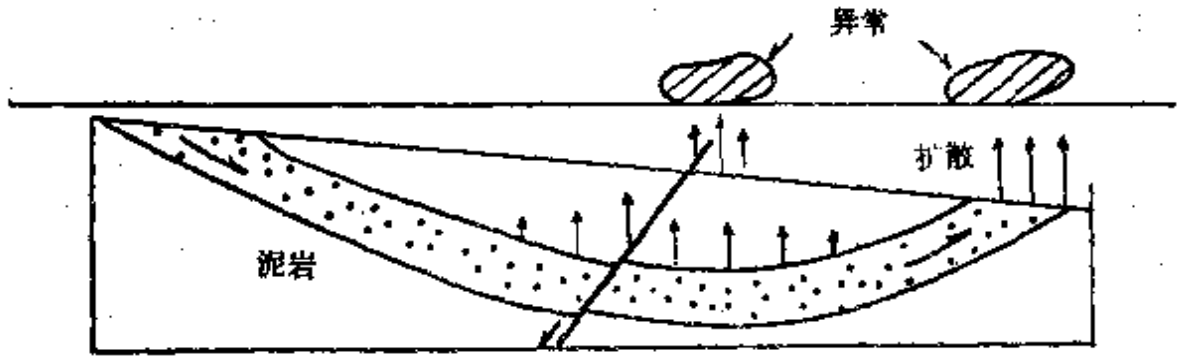


图 2-21　向斜构造水文地球化学异常的分布特征

向斜构造形成的异常，有以下几种情况：

1．中心异常区：地下水通常多沿断层或不同构造的接触带向上排泄，形成带状水文地球化学异常。在复式向斜的局部隆起构造中，容易形成次生油气藏。

2．环形异常区：由于地下水的承压水头较高，水穿越隔水层以渗透越流方式向上排泄，这种越流排泄多发生在向斜中心的

外围，使浅层水文地球化学异常大致呈环状分布。

3．翼部异常区：卸压区位于含水层标高较低的一翼上，该翼又是地下水的排泄区，此区所出现的异常，往往与地下水运动过程中携带的油气组分溢出有关，因此，异常不能指示油气藏的具体位置。

（三）背斜构造形成的异常

储集在背斜构造中的地下水，由于封闭条件比较好，油水边界稳定，水化学成分变化程度较大。地下水一般多沿背斜轴部的裂隙或边缘断层穿越隔水层向上运动，或在接近地表时横向运移。异常在平面分布上，多围绕着背斜构造呈环状（沿背斜轴部扩散的水文地球化学异常多呈块状分布），但往往被断层所复杂化。有些背斜构造的形成与古地形和褶皱作用等有关，由于突起和周围沉积物的厚度不同，负荷差异运动，促使流体向上运移，形成次生油气藏和较强的水文地球化学异常。

（四）断裂构造形成的异常

流体在断层或断裂带上的运移是比较复杂的，由于断层的力学性质、倾角、两盘的岩性及断裂带内流体的性质不同等因素，因此，对断裂在水文地球化学异常形成中的作用，要进行具体分析。

从宏观上讲，断裂带及周边形成的羽状断层和裂隙，是地下水串通流动的通道，尤其是那些活动时间长，继承性比较强、断距大的断裂，对水文地球化学异常的形成有着重要的作用。另一方面，多期活动的断层和多级断层（如叠瓦状断层）的活动，有时会使含油层的埋藏深度变浅，有利于浅层水文地球化学异常的形成。但是，异常的强度、范围、形状等变化多样，差异较大。水文地球化学异常带，是由许多大小不等、形状各异、强度不同的局部异常组成的。与断裂构造（包括断层牵引形成的背斜、各类的断层遮挡等）伴生的水文地球化学异常偏离含油构造的程度一般较大（图2-22）。

（五）刺穿构造形成的异常

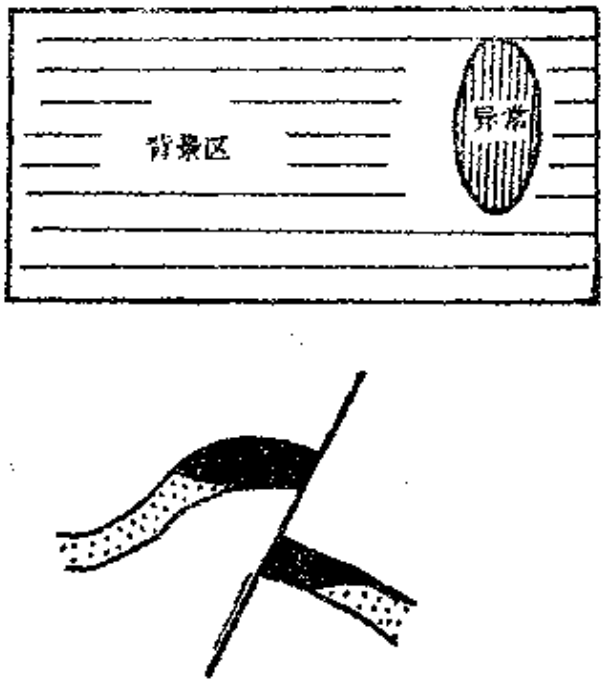


图 2-22 断裂构造水文地球化学异常的分布特征

盐岩一类的可塑性岩层，在差异负荷作用下，向着压力低的上方拱起，并刺穿上覆地层。因而在刺（侵）入的岩体周围形成刺穿接触式圈闭，在一定条件下，形成油气藏。刺穿作用使上覆地层产生较多的裂隙，在构造的周边形成较多的断层，且越接近刺穿构造的核心部分，地层倾角越陡，错动也越剧烈，在其上方容易形成异常。其特征比较复杂，指标组合产生变异。

（六）隐蔽油气藏形成的异常

主要是由不同时期沉积之地层的彼此组合关系和岩性变化形成的油气藏，如古潜山油气藏、生物礁油气藏、不整合覆盖形成的油气藏、地层超覆油气藏、各种砂岩体组成的油气藏及水动力屏障油气藏等。该类油气藏形成的水文地球化学异常，多呈块状，各指标的浓度比较均匀，变化幅度小，以水中有机组分指标为主。但异常规模多变，强度普遍较低，因此，在平面上容易产生偏移。

（七）不同构造过渡带上形成的异常

不同构造（尤其是凹陷与凸起）的接触带常常是水化学异常比较集中出现的地带。凸起与凹陷相比，不仅地处高岗（相对），而且物理条件（流体压力、地温梯度、孔隙空间、地下水含盐量等）有一定的差别。油气在凹陷内离开生油岩后进行运移，主要决定于水动力和浮力，而水动力方向和浮力方向，基本上受盆地的区域构造控制，也就是受凹陷与凸起区的相对位置及其发育历史所控制。在一般情况下，位于凹陷附近的凸起带及斜坡带常为油气运移的主要指向。同时，水动力和浮力也为油气向上微渗透形成水化学异常提供了动力源。水动力与地质条件的有利配合，易在过渡带形成较多的水化学异常。这些异常不仅沿着一定的方向延伸、分布，而且各异常的特点（指标组成、衬度等）基本相似，它们是不同类型油气藏的反映。

第三章　油田水文地质特征

第一节　油田水文地质条件

研究油田水文地质条件，目的在于阐明油气运移的水文地球化学条件及其对水化学异常形成和分布的控制作用，更有效地预测和寻找油气藏。

一、油田水的分布规律

油田水的分布严格地受地质构造和沉积环境等因素的控制，在我国的海相和陆相沉积盆地中，从新生界到晚元古界，即从第三系到长城系广泛地分布着油田水，其中以第三纪到侏罗纪陆相碎屑沉积中贮存的油田水为主。陆相油田水分布面积广，成因复杂，构成我国独具特征的多种油田水类型。海相油田水主要分布在新疆、四川等地区及古潜山油气田中。

我国西部含油气盆地分布着年代较老的多层油田水，如四川盆地上三叠统和中、下侏罗统油田水；鄂尔多斯盆地上二叠统、上三叠统和下侏罗统油田水；柴达木盆地中、下第三系和古生界油田水；塔里木盆地的三叠系、侏罗系和第三系油田水；准噶尔盆地的上二叠统、三叠系和第三系油田水等。

我国东部的含油气盆地，油田水分布较为单一，时代较新，如松辽盆地主要分布着下白垩统油田水，其次有侏罗系油田水；渤海湾盆地以第三系油田水为主；苏北地区、南襄盆地、江汉盆地及三水盆地等均为第三系油田水；我国海域也主要为第三系油田水。

上述油田水的形成与分布，是含油气盆地长期复杂的地质-

水文地质历史发展的具体反映，如表3-1所示。

表 3-1 我国油田水分布特征

特征 \ 时代	二叠纪	三叠纪	侏罗纪	白垩纪	第三纪
矿化度(g/l)	4	28	88	10	62
主要离子组合	$Cl \cdot HCO_3$—Na Cl—Na	Cl—Na	$Cl \cdot SO_4$—Na Cl—Na	$Cl \cdot HCO_3$—Na	Cl—Na $Cl \cdot SO_4$—Na
古气候	潮湿→半干燥			潮湿→半干燥、干燥	

二、我国油田水的起源

油田水主要有沉积成因水、渗入成因水组成，其次是凝结成因水和深成成因水[5]。我国的含油气盆地在成盆期均堆积了较厚的松散沉积物，如表3-2所示，其中伴随着沉积物一起埋藏有较丰富的沉积水。根据泥岩压实试验参数可计算各盆地沉积成因水的储量，即泥岩在压实作用下孔隙度减小的体积也就是相当从泥岩中挤出来的流体量，如冀中拗陷沙河街四段泥岩，在早第三纪末挤出水的总量为1799.045Km³❶。

渗入成因水是大气降水和上覆地层中的沉积水通过裂隙掺合于油田水中。凝结水是气态水因地热环境的变化转变为液态水。深成水是来自上地幔带软流圈中初生水的高热离解水、高热饱气初生水及岩浆水（包括岩浆分异水、底部岩浆分异水和重熔再生水）。

我国众多的含油气盆地油田水的来源和组成不尽相同。如松辽盆地、黄骅拗陷、济阳拗陷、东濮拗陷、苏北地区及鄂尔多斯盆地等的油田水以沉积成因水为主。泌阳拗陷、二连盆地、下辽河地区等，虽以沉积成因水为主，但有一定量的渗入水。华北古潜山

❶ 汪蕴璞等：冀中拗陷油田水成生史，1984年。

表 3-2 我国主要含油气盆地地质资料

盆地	沉积特征	沉积面积 (km^2)	中、新生界沉积厚度 (m)	主要生油段最大埋藏深度 (m)	生油岩厚度(m)
塔里木	库　东	30,000	7,000	3,000	1,000
	西　南	50,000	9,000—10,000	6,500	350
准噶尔	西北部	22,000	5,000	1,500—2,000	1500 (?)
	南　缘	28,000	12,000	3,000—4,000	200(N)；400(E)；1200(J)；400(T)；800(P)
柴达木	西南部	30,000	9,500	2,500—3,500	200 (N)；1000—1,500(E)
	中北部	90,000	8,500	3,000—4,000	500(J)
吐鲁番		40,000	7,000—8,000	2,000—3,000	800
酒　泉		12,000	7,000	3,000—3,500	600
潮　水		9,000	5,000	1,500—2,000	200—300
伦坡拉		12,000	>3,000		
四　川		230,000	7,000	2,300	80(J)；200—400 (T_3)
鄂尔多斯		320,000	4,000—5,000	2,500—3,000	100(J)；400(T_3)
松　辽		260,000	>6,000	1,500—1,800	500
渤海湾		120,000 (E)	8,000—10,000	3,000—4,000	1,000—1,600
南　襄		17,000	6,000—7,000	1,500	1,600—1,900
江　汉		28,000	8,000—10,000	1,500—2,000	2,100
苏　北		35,000	8,000	3,200	1,000—1,400
三　水		2,500	5,000	1,000	500
北部湾		35,000	5,000以上	1,200 (N)；4,000(E)	300(N)；800(E)

据黄第藩资料，1982。

油田渗入成因水在改造沉积成因油田水中起了相当重要的作用，它使晚元古代—早古生代海相沉积物，不断遭受淋滤、脱盐、淡化、变质等作用，与原来沉积成因水的化学成分之间有较大的差异。如现今古潜山地下水与正常海水相比，浓度低7倍之多，各种离子含量均偏低（Mg^{2+}低30倍、Br^{-}低20倍），而r_{Na}/r_{Cl}和r_{Cl}/r_{Br}均大于现代海水的比值。江汉等盆地油田水以沉积成因水为主，也有凝结水的存在。深成成因水主要出现在与深大断裂有关的油田中，如沿庐江-郯城断裂附近分布的油田等。

但是，无论是那种起源的油田水，它的原始成分与现在水的成分都是不同的。这是因为地下水经历了溶滤、浓缩、交换、扩散和分异纯化等作用，使油田水化学成分变得异常复杂。

三、油田水的埋藏和径流条件

（一）油田水的基本贮集类型

油田水按其储水空间特征分为三种基本类型，即孔隙型、裂隙型及溶蚀型油田水。

1．孔隙型油田水：是指埋藏在孔隙含水层中颗粒空间的地下水，分布比较均匀，常呈层状，多以层流形式运动，服从达西定律。

孔隙型油田水主要贮集在碎屑岩中，各种砂岩体，如冲积锥砂砾岩体、河床砂岩体、三角洲砂岩体、沿岸堤坝砂岩体及浊流砂岩体等是该类型油田水的主要含水层。在我国陆相含油气盆地中，孔隙型油田水占有较大的比重。

准噶尔盆地克拉玛依油田是由冲积锥砂砾岩体形成的，在五区、八区和百口泉区冲积锥体腰部是油、水聚集的有利地区，如图3-1所示。

陕甘宁盆地侏罗系底部的延安砂岩是河床砂岩体，它充填在三叠纪末形成的沟谷中，其中浅滩沉积的中—细砂岩物性好（如49井渗透率平均高达1502MD，最高达6630MD），有利于油、水储集，日产水量达82.8—744.7m^3[8]。

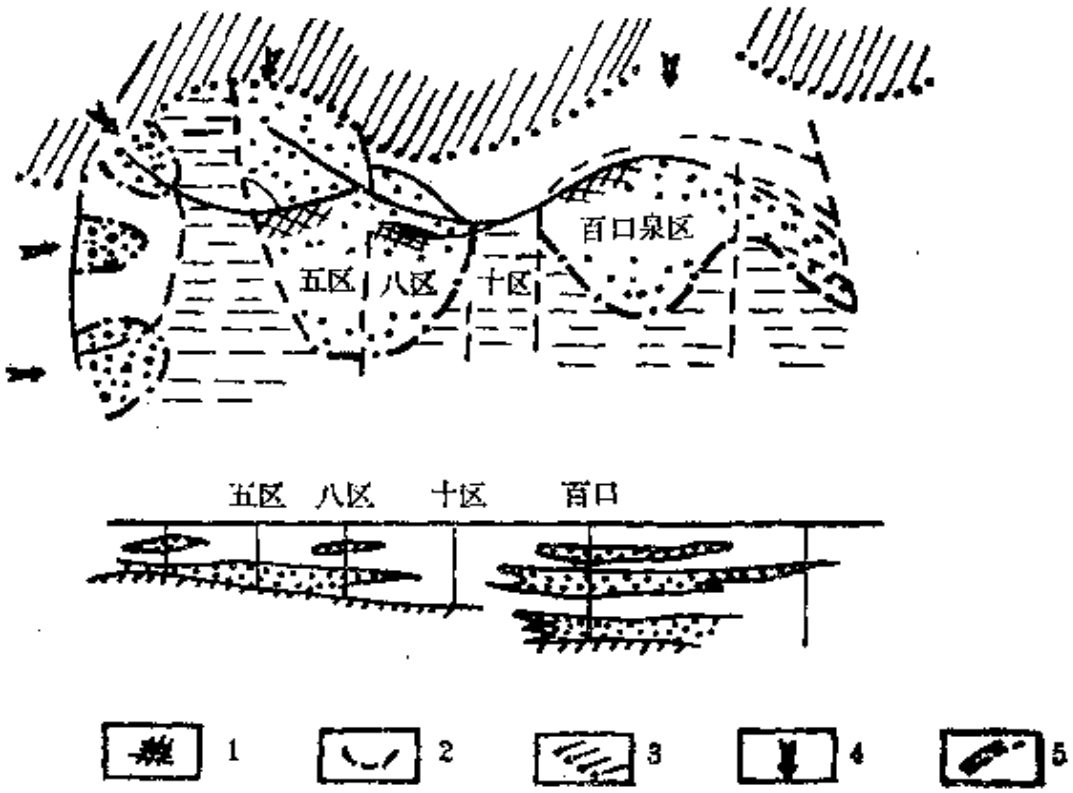


图 3-1 克拉玛依冲积锥与油气高产区

（据石油部规划院，1977）

1—高产区；2—冲积锥体；3—老山边界；4—供给物方向；5—断层

大庆长垣北部油气多分布于分流河道砂岩体中，具有统一的油水边界，如表3-3所示。

表 3-3 油气聚集与沉积环境关系对照表

油田名称	油 层	构造类型	相 带	储集地貌单元
喇嘛甸油田	S_{II+II}	背 斜	泛滥平原相	河床砂
萨尔图油田	S_{II2}	背 斜	三角洲分流平原相	分流河床砂、决口砂
杏树岗油田	S_{II2}	背 斜	三角洲前缘相	席状砂
杏树岗油田	P_{T3}	背 斜	三角洲前缘相	透镜状砂
葡萄花油田	P_I	背 斜	三角洲平原相	分流河床砂
杏西油田	P_I	鼻状构造	三角洲平原相	分流河床砂
高西油田	P_I	鼻状构造	三角洲平原相	分流河床砂
葡西油田	P_I	鼻状构造	三角洲平原相	分流河床砂
升平油田	P_I	鼻状构造	三角洲平原相	分流河床砂、席状砂

沉积物在成岩过程中，由于孔隙被充填、胶结，使粒度孔隙发生变化，影响地下水的储量。当地下水循环交替条件较差时，在矿化作用下，水中溶解盐类达到过饱和状态，则会沉淀出部分盐类，使孔隙变小，如鄂尔多斯盆地上三叠统延长组砂岩，由于胶结物的充填，使孔隙度和渗透率大大降低，只有千分之几MD)，富水程度较差。反之，如果地下水循环交替条件良好，则地下水不断溶滤岩石成分，使孔隙增大，富水程度增加，如松辽盆地下白垩统各组砂岩。

2．裂隙型油田水：以岩石裂隙或不整合面为储集空间和运移通道。主要赋存在成岩裂隙、构造裂隙、风化裂隙、卸荷裂隙及不整合面上的裂隙空间中。储藏在裂隙中的油田水，其埋藏、分布和运动规律主要受岩石裂隙发育特点的制约，水动力性质极不均一。如柴达木盆地的油泉子油田，背斜轴部节理、裂隙发育，贮集层为中新统一渐新统钙质泥岩和砂质泥岩，石油高产井多集中在断裂和节理发育的轴部高点上，油气底部为裂隙型油田水所充填。

鄂尔多斯盆地东部的延长油田，贮集层为上三叠统延长组第三段粉、细砂岩，岩性横向变化大，渗透率很低，裂隙储油，裂隙发育的地区油气和地下水聚集（图3-2）。

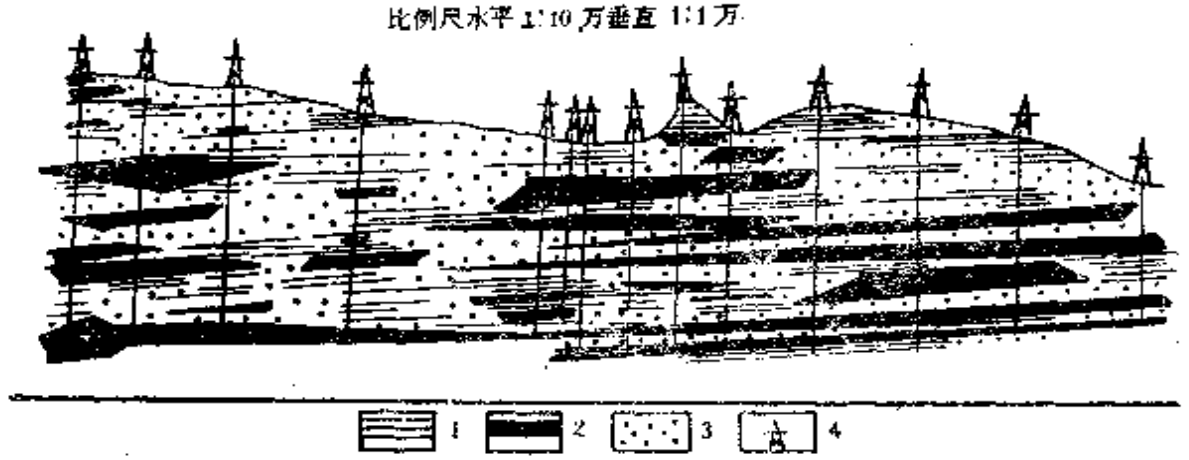


图 3-2　延长油田岩性横向变化图
（据延长油田，1960）
1—泥质岩类；2—油层；3—砂岩；4—钻孔

含油气盆地中孔隙型油田水和裂隙型油田水，常常组合在一起，形成孔隙-裂隙型油田水，或裂隙-孔隙型油田水。

3．溶蚀型油田水：贮存在碳酸盐岩体的孔、洞、缝中。水量一般比较丰富，但分布很不均匀。此类型的油田水，既有相对统一的自由水面，又是相对隔离的孤立水体。储存于溶洞与裂隙中的水对围岩不断地进行改造，它的发展总趋势是使可溶岩体的透水性变好，使无数细微裂隙网逐渐变成大大小小的管道，使具有层流运动的裂隙流逐渐变为具有紊流运动的明渠流，水的动态变化很大，使储集空间复杂化。如任丘油田，不同时代的碳酸盐岩经构造和溶蚀等作用，孔、洞、缝极为发育，其上又为老第三系泥岩所覆盖，形成良好的圈闭条件，油水界面分异清楚，油的下面是油田水，具有统一的油水界面和统一的水动力系统。

（二）油田水的产状

油田水的产状比较复杂，主要有以下几种：

1．层状油田水：在油气藏中呈层状分布，在水平方向上延伸较远，与区域含水层或含水岩系相连，在垂直方向上呈多层叠加，水量丰富，压力递减慢，水化学成分相对稳定，有统一的油水边界，在区域上形成统一的水动力系统。在油藏中以底水和边水的形式存在，多属孔隙型油田水，分布较广。

2．席状油田水：埋藏于砂泥岩交互层或单斜构造带上，一般单层厚度较薄，似席状，与区域含水层联系较弱，主要是沉积成因水。在油田开发中压力递减快，水量变化大，水化学成分变化程度较高。

3．不规则油田水：多发育在不规则的砂岩透镜体和岩石裂隙中，由于孔隙和裂隙发育不均，连通性较差或因断层（或相变）分割，导致油田水在空间上呈不规则分布。无统一的油水界面，水量较小，且不稳定，在油田开发中油、气、水的动态变化较大。

4．混合状油田水：在油气藏圈闭的范围里具有不同产状的油田水埋藏在一起。

（三）湖盆的水文地质结构

含油气盆地是不包括地下水补给区的自流水盆地。埋藏与循环于其中的油田水，除遵循自流水盆地的一般规律外，在形成、分布、埋藏、径流等水文地质条件方面具有独特的规律。

我国西部的含油气盆地以内陆山间盆地或山前盆地为主，是在古生代构造格局上发育形成的。东部含油气盆地以陆缘近海块断盆地为主，固然也受老构造格局的影响，但主要是伴随着中—新生代大断裂活动而形成的，并不断地受到海水侵入。发育于不同构造背景含油气盆地的油田水，其水文地质条件比较复杂，但有一定的发育和展布规律。

从湖盆边缘到中心有两个主要部分组成，即1.边缘由水下冲积扇叠加接连组成的山前倾斜地带，具有类似于山前倾斜平原的水文地质特征，沿冲积扇延伸方向，可分为深埋带（径流带、溶滤带）—溢出带（浅埋带、盐分过渡带）—垂直交替带（盐分堆积带）；2.中间为河湖冲积-淤积平原带（有河床相、漫滩相、牛轭湖相、湖沼相等）构成面积较大的、以湖相沉积为主的河湖平原。地下水径流滞缓，形成良好的蓄水盆地，如图3-3所示。

在横向上，即平行周边山脉的方向，上述两带构成封闭的环状或半环状带，各种冲积扇由中间的粗粒相到边缘的细粒相相互交叉连接在一起构成形式繁多的含水岩系。

在垂直方向上，随着时代的延续，构造的频繁活动及气候条件变迁等因素，形成粗细交替的沉积韵律，埋藏了层次多、富水程度差异大的含水岩系。

在上述水文地质结构的控制下，沉积成因的油田水一般埋藏在河湖平原的各种砂岩体中（如三角洲的分流河道砂、前缘相砂、河床砂岩体等）和水下冲积扇的垂直交替带；渗入成因水主要分布在水下冲积扇的深埋带；而溢出带常常埋藏着上述两种成因的混合水。总之，寓居于湖盆中的油田水含水层在纵向上（沿着水运动方向）呈迭瓦状分布，由湖盆中心向边缘埋藏深度依次变浅；在横向上（垂直水运动方向）呈不均一的串珠状分布；在垂

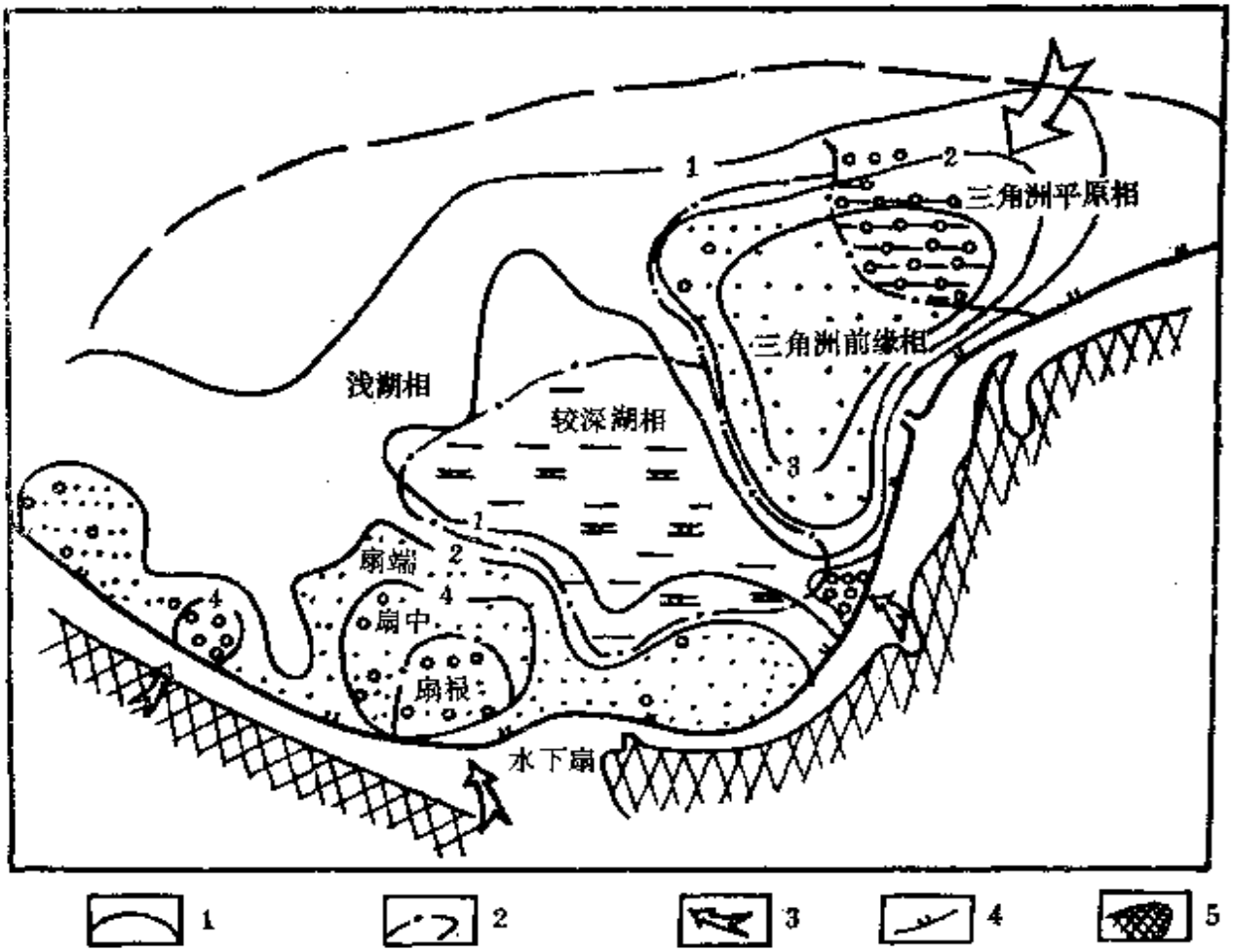


图 3-3 泌阳拗陷核桃园组（三段）沉积相图

（据南阳油田，1980）

1—砂岩厚度等值线（n×100m）；2—沉积相分界线；3—物源方向；4—断层；5—盆地边界

向上呈多层系的连续分布，构成了复杂多变的含水岩系。

含油气盆地的现代径流条件比较单一，均有补给—径流—排泄的一般运动规律[10]。值得提及的是：

1．大多数含油气盆地属于闭塞式的自流水盆地，即油田水径流最终没有将可溶于水的盐分带出盆地，而是以越流的形式向上覆含水层内排泄。如松辽盆地白垩系下统油田水，由周边山区补给，向盆地中心汇集流动，水头压力平均每公里下降0.6m。主要排泄途径是沿着松辽断裂、黑鱼泡-孤店断裂带及第二松花江断裂或透过“天窗”向上越流排泄。泌阳拗陷核桃园组三段油

田水，基本上是从拗陷的北、东、南三边补给，向拗陷中心汇集径流，越流向上排泄[11]。

2．现今油田水处于动态平衡状态，径流流动十分缓慢（4×10^{-5}m/a）。

3．油田水的形成严格受盆地内次一级构造单元——沉积拗陷的控制，它在水文地质条件上构成了较完整的自流水盆地型水文地质特征，循环于其中的油田水，有它自己的补给、排泄等运动规律和系统。

综合上述，油田水以埋藏深（浅者数百米，深者高达五、六千米）、压力大（可自喷）、径流滞缓、水化学成分变化程度高为特征。

第二节　油田水化学成分的基本特征

油田水化学成分的类型和特征，是研究浅层水文地球化学效应的基础，决定着水文地球化学找油指标的选择和应用，影响着异常的强度与指标的组合类型。

一、油田水化学成分与含量

油田水与其它天然水有截然不同的化学组成和含量（图3-4）。

图3-4揭示了我国陆相油田水化学成分的一般特征，以及阴、阳离子随矿化度增高而有规律变化的情况。

表3-4列出了我国油田水化学成分的平均值，其主要特征是：

（一）油田水的矿化度较高

油田水有较高的矿化度，但波动幅度较大（0.5—350g/l），多数油田水的含盐量低于大洋水的平均含盐量，其含量高低主要受古气候、沉积特征及构造封闭程度的控制。与沉积变质的古海水、古盐湖水有成因联系的油田水矿化度普遍很高；在淡水的河湖相沉积中的油田水矿化度一般偏低。就一个盆地而言，从盆地边缘到盆地中心矿化度逐渐增高（图3-5）。在纵向上，不同层位的油田水矿化度亦有差异，在同一水动力体系内，随埋藏深度的

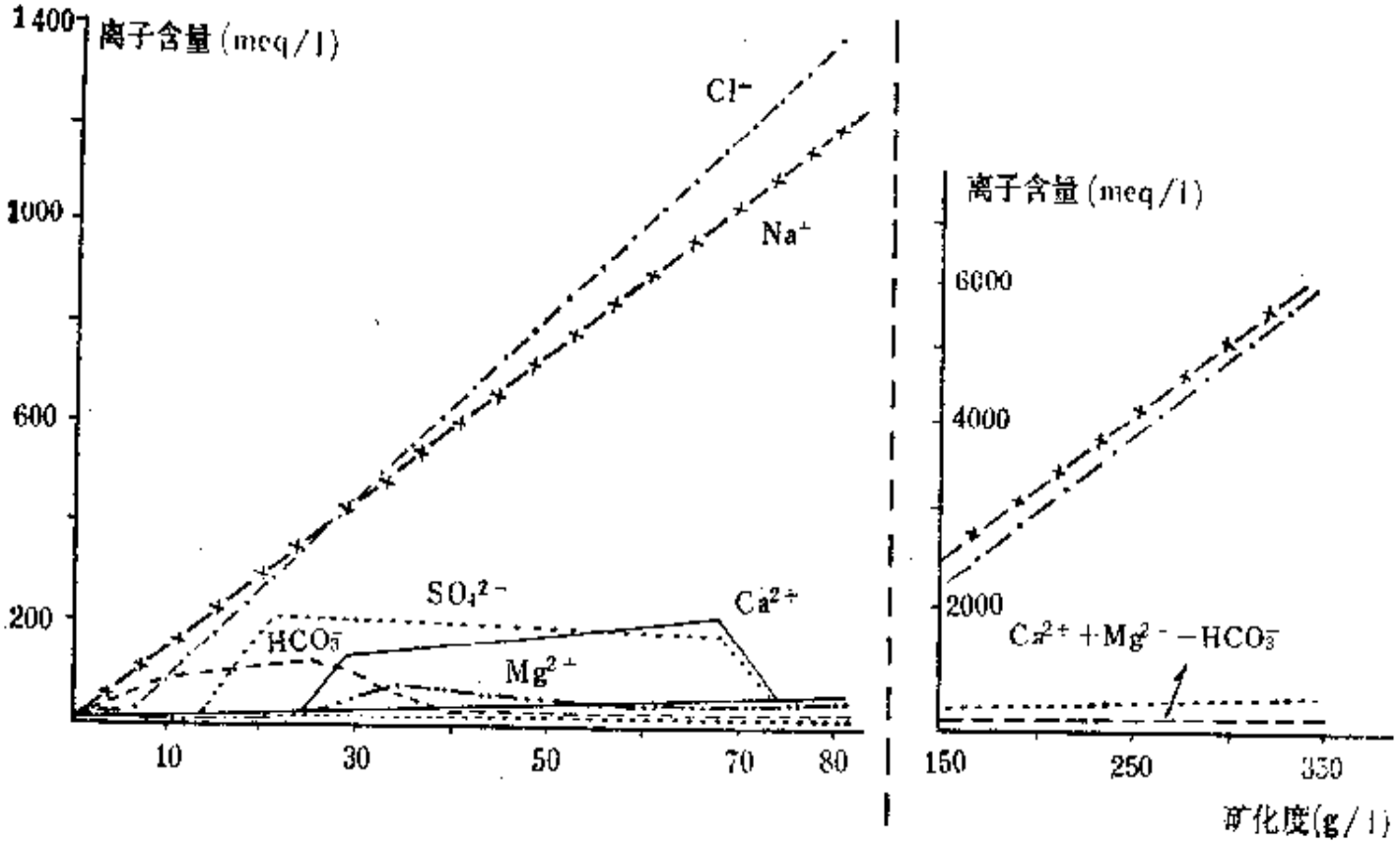


图 3-4　我国陆相油田水化学成分特征

表 3-4 油田水化学成分平均值

盆地（油田）	时代	离子含量 (meq/l)						矿化度 (g/l)	样品数（个）
		$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-		
下辽河	E	54.20	1.15	1.09	11.03	1.07	43.50	1.93	30
泌阳	E	19.60	0.06	0.17	2.14	1.11	17.06	1.09	54
大港	E	95.52	2.98	1.77	79.14	0.39	20.17	5.93	80
冀中	Zw	61.00	0.60	1.90	50.30	1.50	11.80	3.70	46
扶余	K	77.20	1.75	0.49	51.40	1.02	28.40	6.19	150
大庆	K	120.80	1.01	0.74	83.40	1.34	47.40	6.97	42
冀中	E	136.90	4.52	1.72	111.71	6.61	20.93	8.30	70
苏北	E	366.05	15.49	3.64	340.35	27.29	18.06	23.17	20
鄂尔多斯	T	449.00	20.30	23.10	331.10	141.80	19.60	28.50	135
酒泉	E	478.45	76.03	21.73	541.95	29.88	1.47	31.37	27
柴达木	N—J	407.00	134.00	64.00	577.60	2.39	1.81	33.41	40
济阳	E	489.60	35.48	7.08	501.20	0.20	6.17	33.73	78
四川	J	824.90	75.70	49.45	947.00	0.00	12.36	64.00	30
三水	E	826.53	28.45	9.02	840.61	170.08	15.29	62.69	32
鄂尔多斯	J	1325.00	169.00	65.20	1517.00	29.80	6.08	88.01	93
中原	E	4071.96	234.14	253.14	4742.67	15.90	2.47	264.52	10
江汉	E	4983.49	55.29	13.28	4698.60	343.88	17.00	301.00	60

增加而增高。

我国主要产油区油田水矿化度的区间值为3—50g/l。

（二）油田水的离子分异现象明显

无机组分是油田水化学成分的重要组成部分，就常量组分（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}）而言，含量高低不等，差异悬殊，相对含量高低相差达数十至数百倍。在阳离子中Na^+占了绝对优势，而Ca^{2+}、Mg^{2+}含量甚低（个别地区Ca^{2+}有一定的含量）。除与元素的地球化学性质有关外，油田水所处的水文地球化学环境有利于Na^+或钠盐（尤其是氯化钠）富集；并为溶解度较低的Ca^{2+}、Mg^{2+}及其盐类的沉淀创造了有利条件（温度、烃类的存在等）。在阴离子中，Cl^-占优势，只有在烃类氧化和生物地球化学作用比较强的含油气盆地内，HCO^{3-}的含量剧增，甚至超过Cl^-，而跃居首位。SO_4^{2-}在一般的

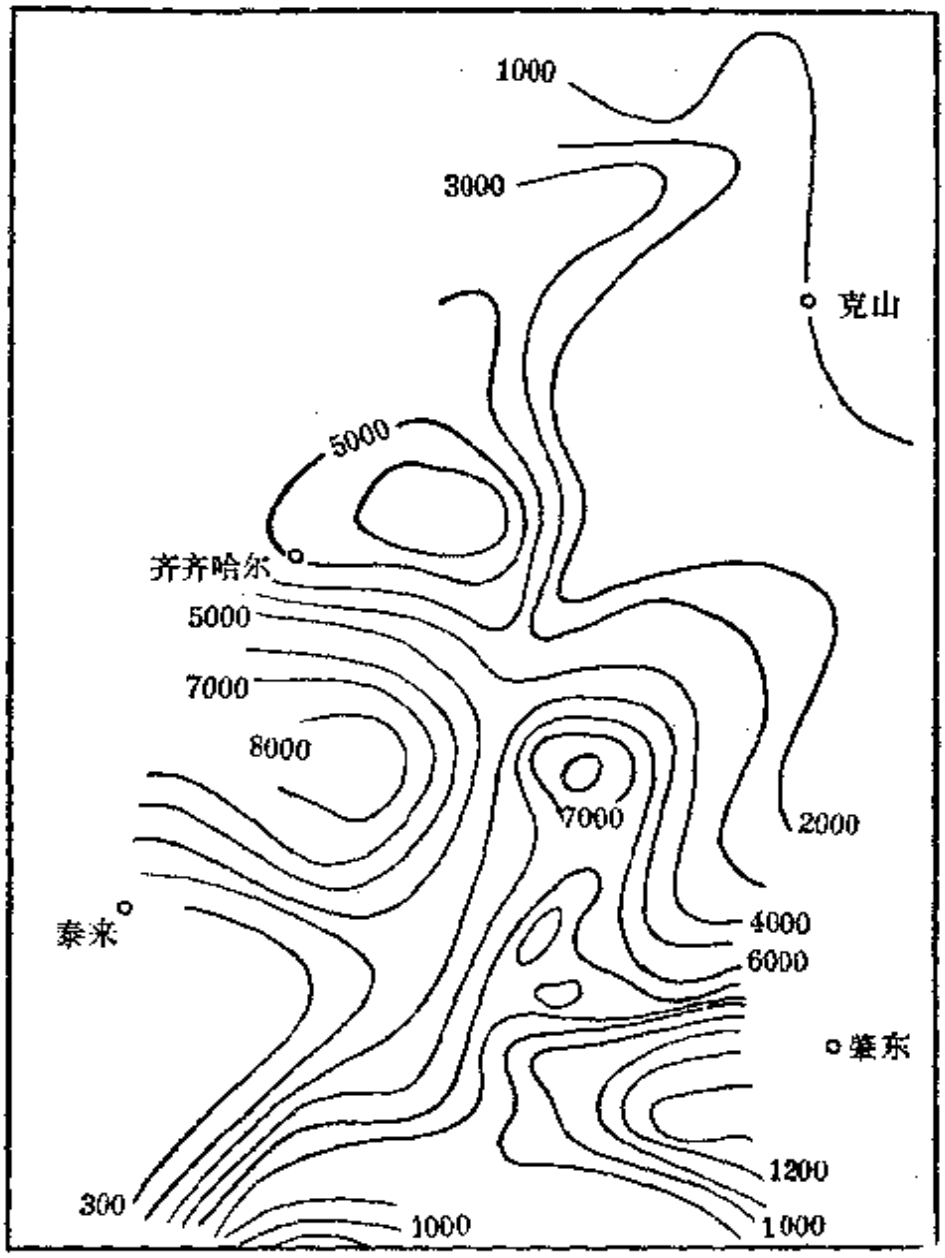


图 3-5 松辽盆地白垩系下统地下水矿化度等值线图

情况下缺失或含量甚低，但是在硫酸盐沉积物发育的含油气盆地中，该离子的绝对含量增高（成为占第二位的阴离子）。其原因是：硫酸盐矿物在石油形成的后期转入液相中，在矿化度增高的前提下，由于NaCl的大量富集，碱土金属含量不高，提高了硫酸盐的溶解度。另一方面是陆相油田水起源于大陆水，缺乏径流（相对海湾）的古湖泊，在蒸发作用下，水化学成分向着富集硫酸钠盐的方向发展，在逐步沉淀出 $Ca.Mg(HCO_3)_2$ 和 $Ca.MgSO_4$

之后，开始富集 Na_2SO_4。因此，与海相油田水相比，尽管陆相油田水矿化度低，但 SO_4^{2-} 的绝对含量却超过海相油田水，说明古湖盆的性质在油田水化学成分中留下鲜明的烙印。油田水中含有一定量的 SO_4^{2-}，并非是没有发生生物化学作用，而是脱硫细菌只能利用容易分解的低分子有机物质，并且需在适宜的条件下（温度不超过60℃、pH＝6—9，以及一定的埋藏深度等）才能繁殖活动，因此，主要在石油形成的初期比较活跃。

由上述可以看出，油田水中各种离子按含量高低排列的顺序是：阳离子为 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$；阴离子多数为 $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$；其次为 $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ 和 $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$。

（三）油田水中含有较多的微量元素

油田水中的微量元素如表3-5所示，其含量以淡水湖盆的河湖沉积相—半咸水湖盆的海陆交互沉积相—咸水湖盆的盐湖沉积相依次升高，在纵向上随沉积环境和埋藏深度的变化有较大的差异（图3-6）。它们与原油和岩石中的微量元素有成因上的联系，

表 3-5　油田水中微量元素的含量

盆地（地区）	含量（ppb）										水介质
	Ni	Mn	Li	V	Cr	Sr	Co	Cs	Rs	Cu	
四川	2700	3280	4000 ～ 100,000		1800	500,000	22000	5000	40000	640	咸 ↓ 淡
江汉	4300 — 5000	3600 — 8080	34400 — 54400		630 — 54400	4000 — 460000	5000 — 6200	1000 — 12000	5000 — 12000	60 — 1200	
济阳	4 — 200	100 — 280	5 — 6600	40 — 100	60 — 140	17 — 100	200 — 800	30 — 1,000	100 — 400		
松辽	50 — 260	50 — 190	2 — 400	34 — 56	Ga 0.86 — 3.40				80 — 250	4 — 8	
南襄	40 — 55	80 — 200	45 — 1220	10 — 35			80 — 135	10 — 70	50 — 90	30 — 50	

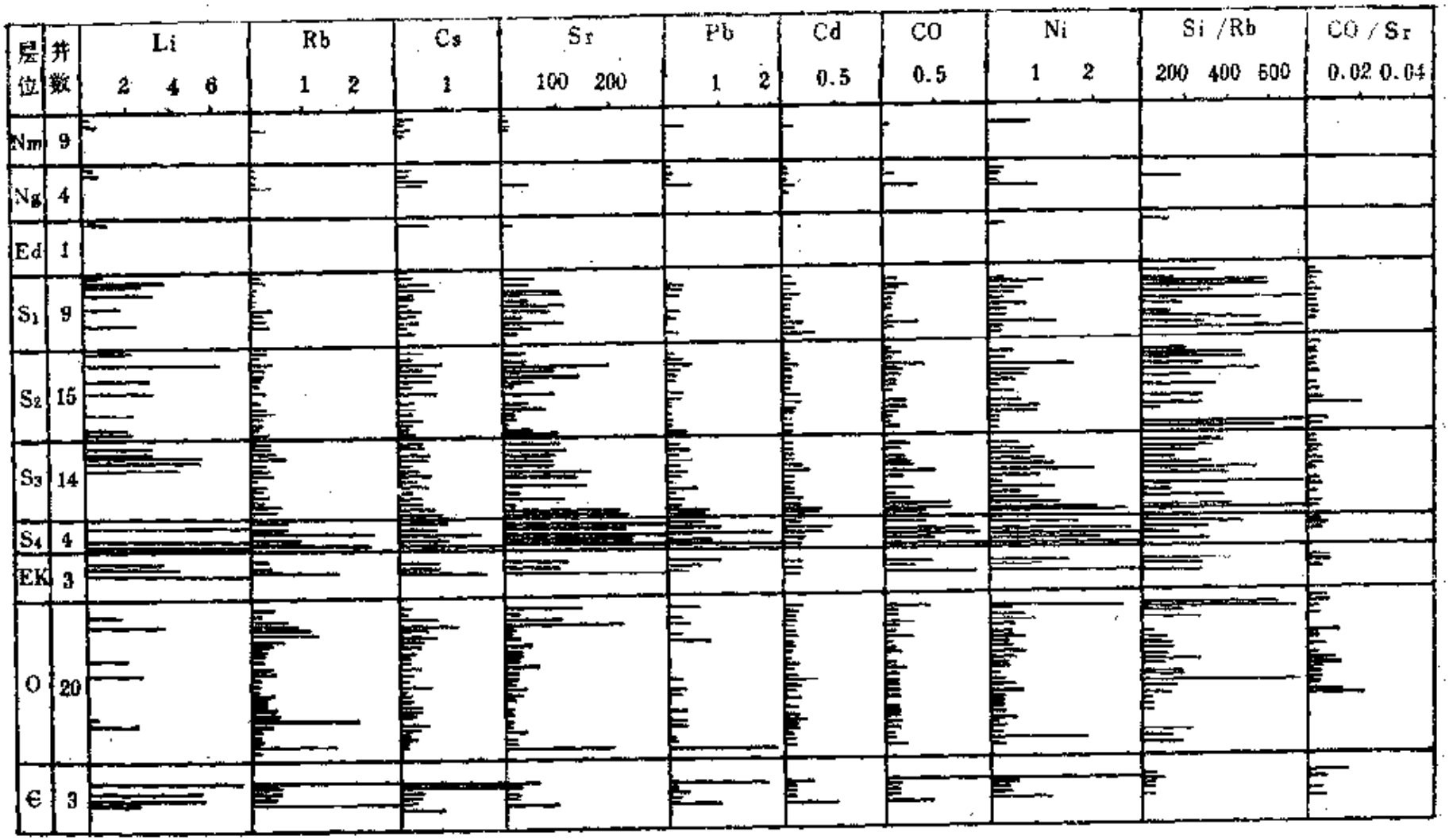


图 3-6 济阳拗陷地层水中微量元素含量变化特征

(据胜利油田资料，1977)

并与矿化度、pH值等具有一定的消长关系。此外，油田水含有一定量的I、Br、F、B等元素。以I、Br为例，油田水中的含量在天然水系中仅低于盐湖水或卤水(表3-6)，含量的高低除与沉积环境有关外，还与生油岩有机质类型、烃类和有机碳的含量有关，如表3-7所示。

表 3-6 油田水中I、Br含量

元素＼地区	松辽	冀中	四川	贵州	鄂尔多斯	克拉玛依	独山子	志君庙	江汉	济阳	南襄
I	7.81	12.23	13.50	16.95	0.47	25.4	63.5	31.8	22.0	14.2	6.8
Br	10.23	9.68	228.50	161.24	21.50	25.0	72.0	12.0	900.0	250.0	29.5

表 3-7 I、Br与有机质性质的关系

地层		沉积环境	有机质类型	有机碳（%）	烃（%）	I (ppm)	Br (ppm)
嫩江组	一段	浅湖	腐殖质	0.881	0.027	5.8	5.0
	二段	浅湖	腐泥	2.976	0.198	6.0	13.0
姚家组		较深湖	腐泥	0.619	0.013	6.0	13.0
青山口组		较深湖	腐泥	1.999	0.213	12.0	19.0
泉头组		浅湖	腐殖质	0.500	0.015	7.5	15.2

（四）油田水中有机物质比较丰富

油田水中普遍富集较多的有机物质，目前研究较多的有：可溶气态烃、苯及其同系物、酚及其同系物、有机酸、脂肪酸及生物标记化合物等。

1．油田水中含有以甲烷为主的烃类气体，其特点是：总烃高、组分全、重烃（C_2—C_5）多，缺失不饱和烃，属甲烷-重烃系列（表3-8）。与原油伴生气的特点相同，而与深层非油田水以甲烷系列为主的特点有别。

表 3-8 油田水中可溶气态烃的含量(μl/l)

地区		时代	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	重烃	总烃
油田水	济阳	E	18915.35	3021.00	24.45	4.21	3049.66	21965.01
	泌阳	E	4.19	2.19	1.94	0.83	4.96	9.15
	下辽河	E	43.20	21.60	0.31	0.48	22.39	65.59
	江汉	E	1515.39	380.21	332.57	69.96	782.74	2298.13
	苏北	E	28399.68	226.32	131.70	92.14	450.76	28850.44
	冀中	E	35.64	11.91	26.00	27.10	65.01	100.65
	冀中	Zw	0.82	0.17	0.18	0.05	0.40	1.22
	松辽	K	3868.60	4.61	2.40	4.68	11.69	3900.29
	新疆	K	221.19	13.23	12.92	27.50	53.65	274.84
	鄂尔多斯	J	2761.16	948.22	1106.78	259.90	2314.90	5076.06
	鄂尔多斯	T	2880.22	1072.74	802.63	94.22	1969.59	4849.81

总的来讲，以沉积成因为主的油田水，烃类含量较高。在平面上，随接近含油边界水中烃类含量增高。油田水中可溶气态烃的高含量与主要生油层段相吻合[12]，随含油时代变老，甲烷化程度增高（表3-9）。

表 3-9 可溶气态烃随时代变化的平均值

时代	含量 (μl/l)	松辽盆地	重烃/甲烷
第三系	12	萨尔图油层	0.0324
白垩系	5.4	葡萄花油层	0.0262
侏罗-三叠系	4.0	扶余油层	0.0135
古生界	0.02		

2．石油中的芳烃组分易溶于水，而使油田水中苯、酚等组分的含量增高。苯系物的组成如表3-10所示。酚系物中主要有酚、间甲酚、邻甲酚、对甲酚、二甲酚等。在同一个含油气盆地中，苯、酚的绝对含量与水型有一定的关系，一般按 $HCO_3 \cdot Ca\ (Mg) \rightarrow HCO_3 \cdot Na \rightarrow HCO_3 \cdot Cl \cdot Na$ 的水型顺序而增加。此外，

表 3-10 油田水中苯系物的组成（ppb）

井 号	苯	甲 苯	乙 苯	邻二甲苯	对二甲苯	间二甲苯
1	1552.0	2555.4	162.5	391.1	803.6	117.9
2	528.0	1181.5	73.0	90.5	483.2	148.2
3	13.72	1988.2	106.9	352.0	590.1	126.7
4	520.0	717.9	91.3	111.2	250.1	90.5
5	1271.7	2034.0	—	426.1	536.8	235.4
6	1.13	5.33	0.31	1.11	2.52	
7	0.19	0.18	0.04	0.08	0.09	
8	0.12	0.35	0.12	0.37	0.52	
9	0.05	0.13	0.04	0.10	0.69	
10	0.18	0.67	0.25	0.39	0.01	

在同一地质时代中，随地下水埋藏深度增加含量增高。

3．紫外吸收光谱和荧光光谱特征，反映了油田水中芳烃的组成比较复杂，有单环、双环及稠环之分，利用单位消光值和比例系数K（双环芳烃/多环芳烃，表示总芳烃中双环芳烃的多少）组成的函数图象，可以区分不同类型的地下水及其所处的水文地球化学环境，追索地下水在纵向上的联系（图3-7）。

4．油田水中可溶有机质的含量较高，皮克和霍奇森（1966、1967）认为高达150ppm[29]，我国油田水的监检范围值达80—140ppm，其组成是非烃＞烷烃＞芳烃＞沥青质（表3-11）。红外吸收光谱以类脂化合物的吸收为主要特征，而在非油田水中较强的甲基（CH_3）、次甲基(CH_2)吸收峰(如2920cm^{-1}、2860cm^{-1}、1460cm^{-1}、1380cm^{-1}）、以含氧、硫、氮的基团吸收峰（如1270cm^{-}）及酯、酮、醇、醛、羟基吸收峰（如1720cm^{-1}、1700cm^{-1}、1680cm^{-1}）等在油田水中很弱或消失；如与长脂肪链有关的吸收峰（如720cm^{-1}）和与酚羟基有关的吸收峰（如3400cm^{-1}）等在

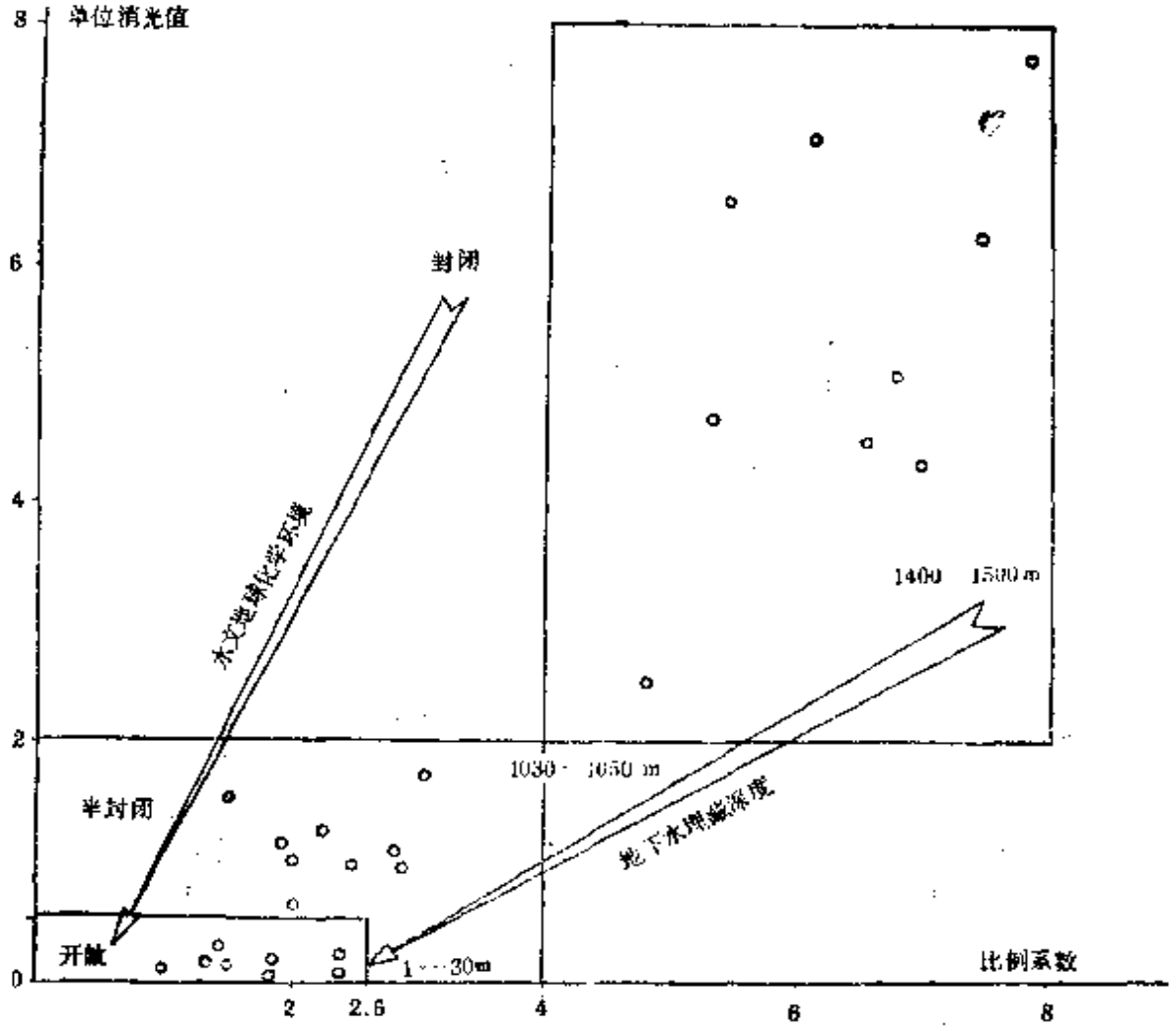


图 3-7 地下水中单位消光值与比例系数K的关系

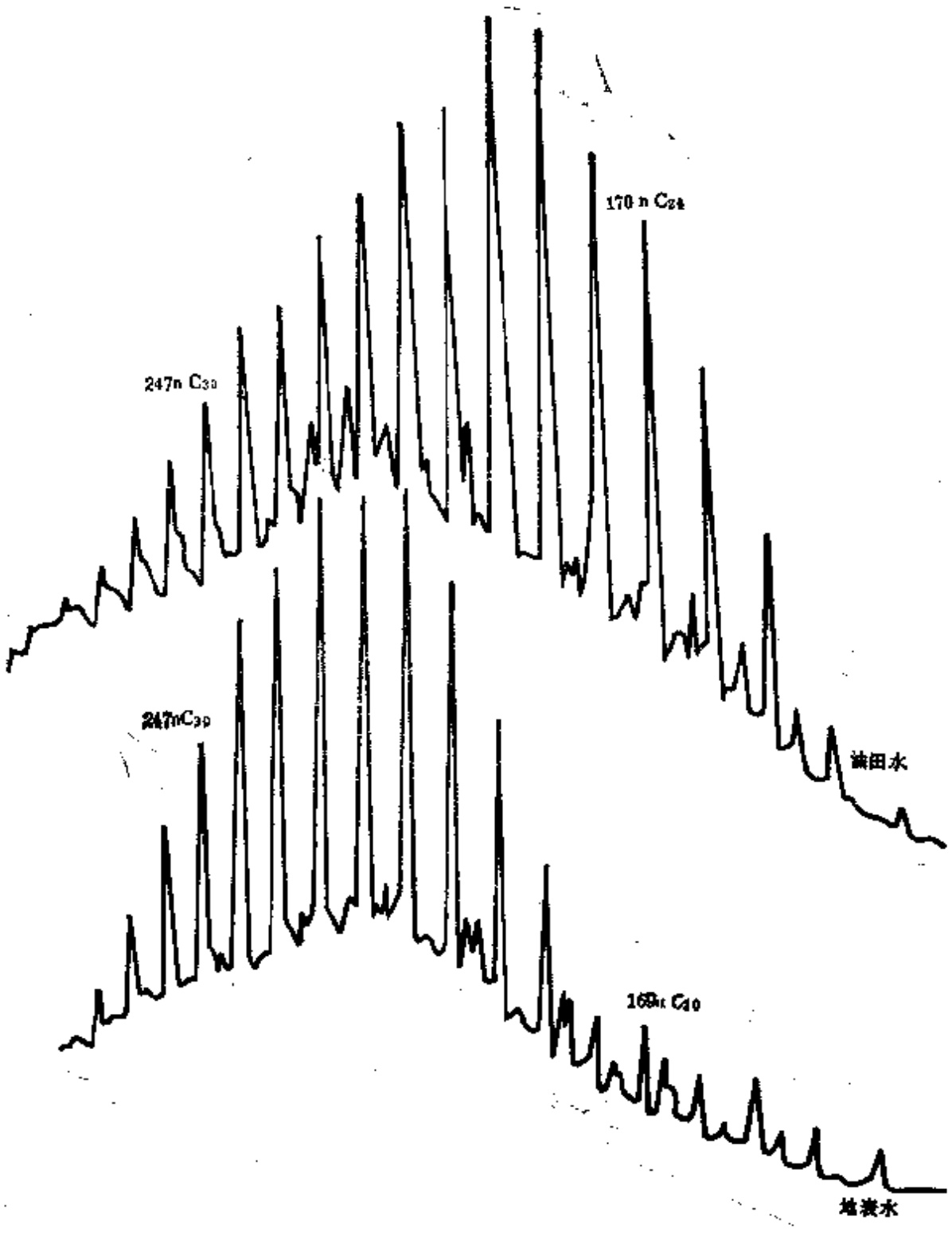


图 3-8　水的烷烃色谱图

油田水中基本消失，说明水中有机质演化程度高。油田水全烃色谱主峰碳多在nC_{21}、nC_{23}，OEP值为1.01—1.20，$\in nC_{23}$前/$\in nC_{24}$后大于1，与生油岩可溶有机质的特征相似（图3-8）。

5．此外，油田水中还普遍含有较高的脂肪酸、环烷酸（冀中拗陷含量为1.7—4.8mg/l），腐殖酸、有机氯、有机酸、氨等。油田水中有机质在纵向上的变化如图3-9所示。从中看出与原油浸泡液含量相对应。

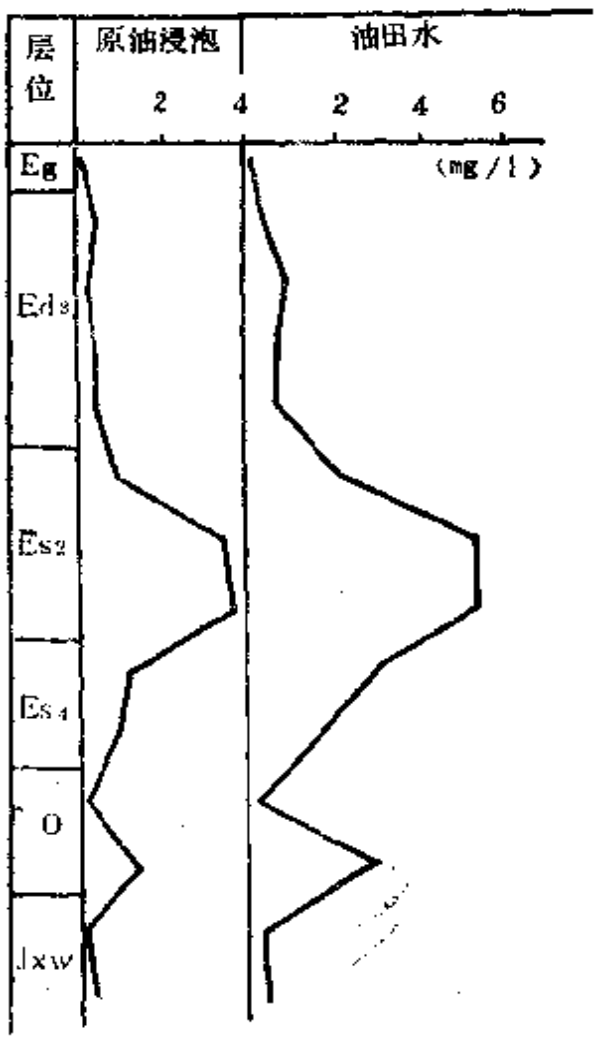


图 3-9　冀中拗陷原油浸泡液与油田水中酚类化合物的含量对比图

（五）油田水的同位素特征

油田水中重水含量的平均值为2‰左右（以北京自来水为标

准），高于海水、河水及深层非油田水，接近于盐湖卤水的含量。油田水中氢和氧同位素组成如图3-10所示。从图中可看出，δD值为－57.95——69.88‰，$\delta^{18}O$值为－8.38——9.98‰，介于大气降水线与海水关系线之间。油田水中甲烷碳同位素（$\delta^{13}C_1$）为－52.40——33.80‰（PDB标准），属热裂解成因气的范畴。

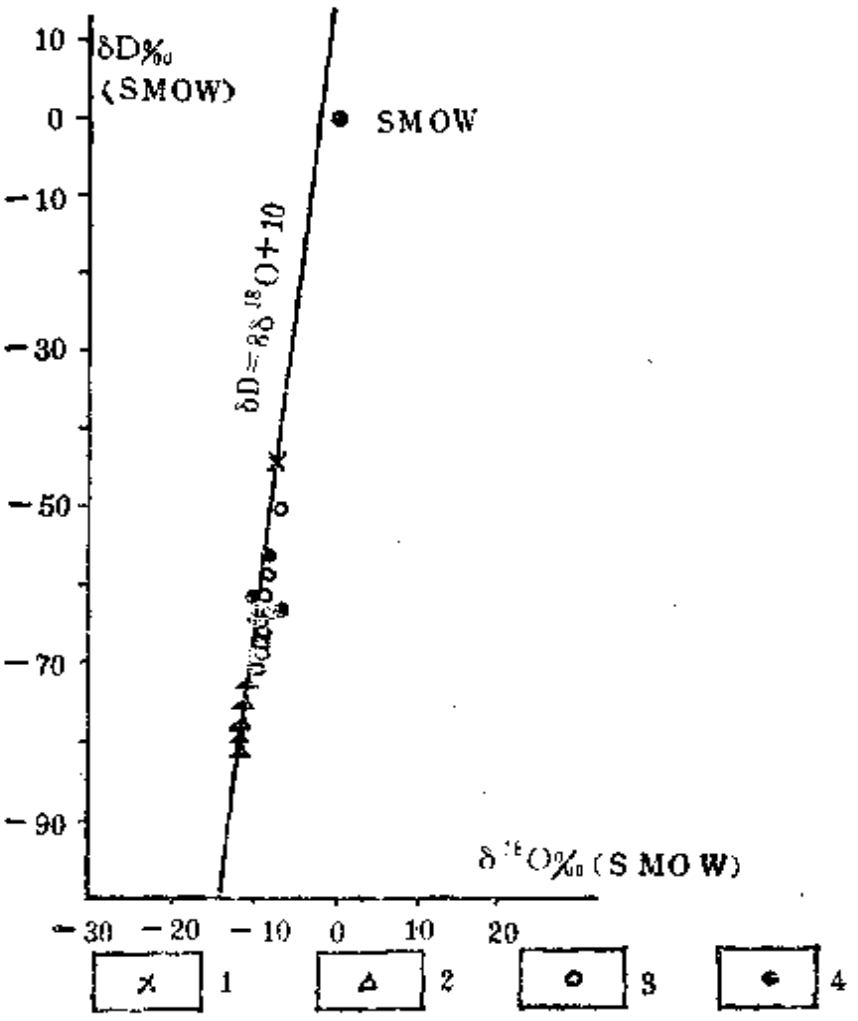


图 3-10　冀中拗陷水的同位素组成

（据孙杉等，1981）

1—雨水与地表水；2—Q-N地层水；3—E地层水；4—下古生界与震旦系地层水

（六）油田水中其它组分特征

油田水中含有放射性（铀、镭、氡等）及稀土元素等，并含有多种微生物。具有较高的地温场及低的氧化还原电子活度pE

(Eh)值——－7.375（－125mV）——20.65（－350mV）。如冷湖四号油田水pE（Eh）平均值为－7.906（－134mV），变化范围1.593（－27mV）——15.34（－260mV）；鄂尔多斯盆地油田水的pE（Eh）为－8.56（－145mV）；渤海湾地区油田水的pE（Eh）值为－7.375（－125mV）[13]。

二、油田水化学成分的基本类型与分布

按化学成分区分油田水类型，是揭示油田水化学成分的分布和演变规律的重要方面，所以，对油田水化学成分类型的划分，一直是国内外水文地球化学和石油地质工作者关心的问题，他们进行了卓有成效的研究。最早的油田水化学成分分类法是帕尔米尔（Palmer）于1911年提出的。1946年B.A.苏林(Сулин)继承了帕尔米尔分类中特性系数的优点，创立了新的油田水化学成分分类法[14]。苏氏分类法不仅在苏联得到了广泛应用，而且在世界上许多国家不同程度地应用着，成为油田水化学成分的主要分类方案。1970年博雅尔斯基（Bojarski）发展了苏林分类法，在苏氏分类的基础上将$CaCl_2$型水进一步细分为五类，力求用水型达到预测油气藏的目的。1955年奇巴塔雷夫（Chebotarev）根据溶解的碳酸盐、硫酸盐和氯化物对水化学成分进行分类。同年绍勒尔（Schoeller）根据水中溶解组分——氯化物、硫酸盐、重碳酸盐和碳酸盐和碱交换指数（IBE）以及阴离子和阳离子的关系进行分类，以氯化物含量为基础，将水分为六类，进一步据硫酸盐含量分成四个亚类。

我国长期以来研究油田水时沿用苏林分类法，该分类较其它分类有较多的优点，在理论与实践上，尤其是与石油地质结合上有独道之处，在人们对油田水化学成分特征的认识过程中起了积极的作用。然而，苏林分类毕竟是一定历史阶段和一定科学技术水平的产物。我国油田水化学成分的复杂、多变性，超出了苏林分类法所能判别的范围，故该分类显示了一定的局限性。结合我国的实际资料，探讨新的油田水化学成分分类方案是十分必要

的。

（一）油田水分类的基本要点

苏林和其它学者的分类，主要考虑六个常量离子的比例与地质条件的关系，而没有考虑与油气有成因联系的有机组分，因此，水型不能直接指示油气藏的存在与否，只能说明地下水所处的水文地球化学环境。这是因为六种离子虽然是水化学成分的组成部分，但它们的形成与石油成分无直接关系。另外，这些离子在水中含量的变化，主要取决于各自盐类的溶解度和饱和极限，而与油气无关。

作者从水文地球化学找油的角度认为，应当将与油气有成生联系的那些组分作为油田水分类的主要组分，并可用作寻找油气藏的标志，同时要反映出水化学类型的变化规律。

从上述观点出发，选择能够灵敏地表征油气藏存在的有机组分作为油田水化学成分分类的主要依据，并以其命名水的类型。大量的实际资料表明，溶解于水中的烃类气体（甲烷及其同系物）是指示油气藏存在的最为敏感的组分。这是因为：①甲烷及其同系物是油气的主要成分之一，是油田水化学成分的特殊组分；②它是有机质向石油转化过程中或油气运移时被水“捕获”的，在水中有较高的溶解度，迁移性能良好；③在油田水与非油田水中溶解的烃类气体在含量和组成上有明显的区别。前者不仅甲烷的绝对含量高，还含有较高的乙烷、丙烷和丁烷（正丁烷、异丁烷）；后者一般只含有甲烷或痕量的乙烷和烯烃，基本上缺失C_2以上更重的组分。根据这一特点，能够从天然水系中鉴别出油田水。

在油田水分类时，为了消除生物地球化学作用生成的烃类气体的干扰，选用了C_3+C_4总量作为分类的主要依据，根据数值大小的数量级分为高烃类（大于100μl/l）、中烃类（10—100μl/l）、低烃类（小于10μl/l）和无烃类（不含）。

利用可溶气态烃的浓度，对油田水进行分类的意义，还在于其本身就是寻找油气藏的有效指标，使分类具有重要的实用意

义。

在油田水分类中，除考虑有机组分外，还要考虑常量离子与其主要盐类成分的类型等。因为它们反映了水化学成分在含油盆地内的变化规律，反映了水化学成分的形成作用和方向，决定着水的基本性质，可以确定水的化学成分与围岩成分的相互关系，说明有利于油气形成的地球化学环境。前已述及，油田水中的离子有明显的分异现象，某些离子往往有很高的浓度，在水化学成分中起着主导的地位。至于哪些离子参与水的分类，是根据各个离子在水化学成分中所起作用的重要程度来确定的，即用数理统计的方法，将矿化度（离子总量）视为因变量，各个离子看作自变量，求出它们之间的相关系数（包括简单相关和偏相关）。如果某离子与矿化度的相关系数，大于一定信度的临界值，并且与偏相关系数相差不大时，那么这个离子就可参与油田水的分类与命名。下面以松辽盆地的实际资料为例，说明上述计算方法的运用。从表3-12中看出，在阴离子中Cl^-、HCO_3^-与矿化度的关系很

表 3-12　离子与矿化度的相关系数（n=50）

离子 / 相关类型	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+
简单相关	0.73	0.46	0.24	0.84
偏相关	0.71	0.40	0.04	0.83

密切、稳定，而SO_4^{2-}与矿化度的两种相关系数相差很大，说明二者之间的相关性很差。在阳离子中，只有Na^+对矿化度的相关系数大于0.05信度的临界值，而Ca^{2+}和Mg^{2+}与矿化度的相关性很差。说明在本区油田水中起主要作用的离子是Cl^-、HCO_3^-和Na^+。

进一步求出各个离子参与分类和命名时的最低含量，一般应用回归的方法（表3-13）。

据表3-13中各离子与矿化度的方程，当矿化度为250meq/l时，Cl^-、HCO_3^-和Na^+参与分类和定名的最低含量分别要超过

表 3-13 主要离子与矿化度的回归直线方程

离子	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
方程	$\hat{y}=13.3+0.257x$	$\hat{y}=-4.9+0.205x$	$\hat{y}=10.1+0.45x$
上限	$y'=26.3+0.257x$	$y'=10.1+0.205x$	$y'=20.94+0.45x$
下限	$y''=0.3+0.257x$	$y''=-19.9+0.205x$	$y''=-0.74+0.45x$
意义	矿化度每增加1g，Cl^-平均增加0.257g	矿化度每增加 1g，HCO_3^-平均增加0.205g	矿化度每增加1g，SO_4^{2-}平均增加 0.45g

64.55meq/l，31.35meq/l，111.76meq/l。

按上述原则，求出我国主要含油气盆地油田水的离子组合有Cl·HCO_3-Ma、HCO_3·Cl-Na、HCO_3-Na、Cl-Na、Cl-Na·Ca、Cl·SO_4-Na等六种类型，这些组合参与分类，命名为Cl·HCO_3-Na型水……等。

油田水的矿化度在一定程度上反映了油田水形成的水文地球化学环境和古湖盆的含盐量（图3-11），以组的形式参与分类。

利用矿化度对地下水化学成分进行分类，目前还没有统一的标准。本分类所应用的矿化度分类界限是在研究我国主要含油气盆地油田水中各个离子与矿化度的关系之后确定的。当矿化度小于10g/l时，水中主要离子是Cl^-、HCO_3^-和Na^+；矿化度大于10g/l而小于50g/l时，HCO_3^-含量明显降低，Cl^-直线增加，阳离子中仍以Na^+为主，在少数地区（或样品）中出现Ca^{2+}增加的现象；矿化度大于50g/l时，Na^+在水中占了绝对优势，Ca^{2+}基本上稳定在一定的含量范围内，阴离子中以Cl^-为主，并出现SO_4^{2-}的相对高含量。根据上述规律与特征，可以选用矿化度指标参与油田水的分类与命名，即将矿化度小于10g/l者为淡化组，10—50g/l者为咸化组，大于50g/l者为盐化组。

综合上述，新分类的原则是：可溶气态烃作为油田水分类的

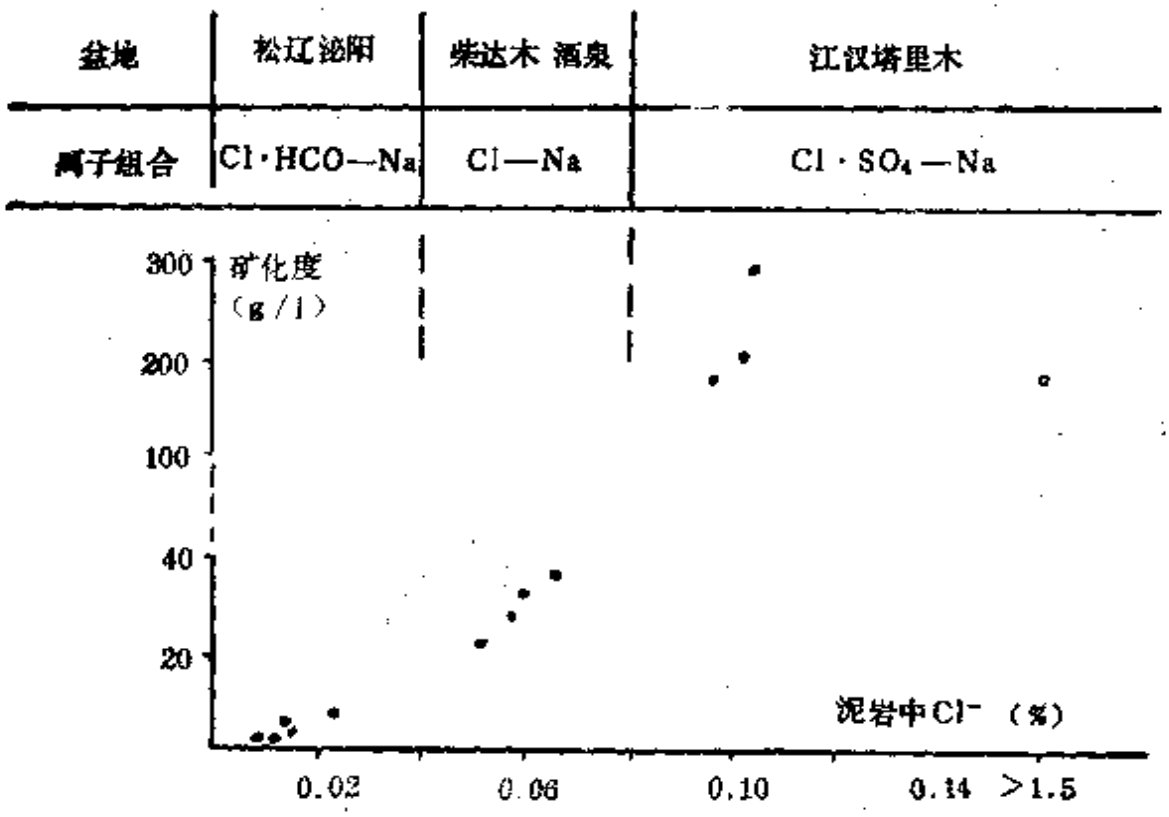


图 3-11 油田水矿化度与泥岩中Cl^-含量的关系

第一因素，是划分水类的依据；水中主要离子和盐分作为油田水分类的第二因素，是划分水型的依据；矿化度作为油田水分类的第三因素，是划分水组的依据。据此，将我国油田水化学成分分为“三类、六型、三组”，即：

低烃类$Cl\cdot HCO_3$-Na型淡化组；

低烃类HCO_3-Na型淡化组；

低烃类$HCO_3\cdot Cl$-Na型淡化组；

中烃类Cl-Na型咸化组；

中烃类Cl-Na·Ca型咸化组；

高烃类$Cl\cdot SO_4$-Na型盐化组。

（二）油田水分类的意义

利用新分类研究我国油田水化学成分获得比较满意的结果，与苏林分类相比有较多的优点。

1、低烃类$Cl\cdot HCO_3$-Na型淡化组

该类型水是一个比较大的“家族”，包括HCO_3-Na型水和HCO_3·Cl-Na型水。在苏林分类中统归为$NaHCO_3$型水。实际上三者是有明显区别的，Cl·HCO-Na型水是微经浓缩的水。HCO_3-Na型水是比较典型的淋滤成因水。而HCO_3·Cl-Na型水是介于二者之间的过渡水，大部分是在Cl·HCO_3-Na型水的基础上被淡化的结果，或者是在HCO_3-Na型水的基础上演化的结果。典型的水化学成分如表3-14所示。这种水在含油气盆地内的分布，一般是混杂在Cl·HCO_3-Na型和HCO_3-Na型水的中间。由此可见，上述三种水既有区别，又有联系，在时空分布上呈现有序的变化。即从盆地边缘到中心，在垂直剖面上从上到下，基本上是由HCO_3-Na型过渡到HCO_3·Cl-Na型，最后是Cl·HCO_3-Na型。

表 3-14 HCO_3·Cl-Na型水的化学成分

成分 / 含量	离子含量(meq/l)						矿化度 (g/l)	主要盐分
	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-		
最小值—最大值	41.8—112.2	0.25—0.99	0.42—0.9	16.2—47.0	0.3—0.7	24.9—76.1	1.9—3.8	$NaHCO_3$
平均值	71.47	0.54	0.64	27.22	0.44	46.9	2.69	

该类型水在我国分布比较广泛，如松辽盆地、二连盆地、下辽河地区、泌阳拗陷以及次生油气藏的油田水均属该类型。它是在温暖潮湿的淡水古湖盆沉积作用水的基础上形成的，油田水资源比较丰富，以沉积成因水为主，淋滤成因水对其有较大的影响。在石油地质勘探中该类型水具有重要意义，是寻找大型油气藏的有利水型。赋存该类型水的含油气盆地，浅层水文地球化学效应好，异常的强度和衬度较大，指示油气藏存在的水化学指标，在异常内比较集中出现。

2．中烃类Cl-Na型咸化组

包括Cl-Na·Ca型水（在矿化度增高时，由Cl-Na型水演变而成）。主要分布在渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地（T）、酒泉盆地及

柴达木盆地等。该类水按苏林分类由三个天然环境截然不同的水型组成，即大陆环境的$NaHCO_3$型、海洋环境的$MgCl_2$型和深成环境的$CaCl_2$型，它们在空间和时间上相互交替穿插，比较混乱(表3-15)，由此可见苏林分类的弊病。该类水是在半潮湿、半干旱的微咸水古湖盆氯化物碱性水的基础上发育演变而成的。油田水由沉积成因水组成。在地史上与海水有过联系或受过海侵的影响，存在着有利于趋向NaCl富集的环境和条件。油田水埋藏于封闭的还原环境里，是寻找油气藏的有利地区。在该类水发育的含油气盆地内，浅层水文地球化学效应较好。

表 3-15 某盆地水化学成分

成分 / 孔号	离子含量(meq/l)						矿化度 (g/l)	苏林分类	深度 (m)
	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-			
1	246.48	31.35	9.23	281.77	0.0	5.29	16.73	$CaCl_2$	1636—1639
2	397.00	12.21	4.49	395.42	0.0	18.28	24.53	$NaHCO_3$	1989—1991
3	241.07	9.76	4.73	243.51	0.0	12.05	15.18	$MgCl_2$	井内自溢
4	445.96	11.72	6.80	447.50	0.0	17.00	27.37	$MgCl_2$	1591—1592
	459.56	12.10	4.30	459.00	0.0	16.96	28.18	$NaHCO_3$	1600—1601
	455.70	26.20	11.10	475.00	0.0	18.00	29.08	$CaCl_2$	1602—1603
	459.84	11.38	5.38	464.31	0.0	12.29	28.10	$MgCl_2$	1648—1658

3．高烃类$Cl \cdot SO_4$-Na型盐化组

该类水主要分布在江汉盆地、三水盆地、鄂尔多斯盆地(J)及中原油田等。它是在干旱或半干旱的咸水湖泊的基础上发育起来的。按苏林分类属于没有含油气远景的Na_2SO_4型水。该类水与众不同的特征是Na_2SO_4含量和$r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$比值相对较高（平均0.45)、NaCl/矿化度偏低，说明古湖盆水体在趋向于向氯化物演化过程中，曾处于硫酸钠的富集阶段。浅层水文地球化学效应相对较弱，易被掩盖，必须有一定量的水化学背景资料衬托，方

能正确地鉴别出与油气有关的水化学异常。

新分类基本上概括了我国油田水化学成分的基本特征及其演变规律，各种类型水在一定程度上反映了油田水的形成历史和所处的水文地球化学环境，根据新分类法所划分的油田水类型，可以确定是油田水还是非油田水（主要是第一因素——烃类），结合地质构造特征可以为普查勘探及开发油气藏提供依据，为水文地球化学找油提供良好信息。

综上所述，上述类型水在我国由北而南呈现了规律有序的变化，北部（燕山-阴山-天山以北）以低烃类 $Cl\cdot HCO_3$-Na（包括 HCO_3-Na、$HCO_3\cdot Cl$-Na）型淡化组为主；中部（上带以南，大别山-秦岭以北）主要为中烃类 Cl-Na（包括Cl-Na·Ca）型咸化组为主；南部（中部以南）主要为高烃类$Cl\cdot SO_4$-Na 型盐化组。例如，我国东部第三纪油田水，自北而南可溶气态烃由低到高；由氯化物-碳酸盐型过渡到氯化物型，再到氯化物-硫酸盐型；矿化度由低到高，显示了明显的分带性。

三、油田水化学成分的演变规律

在盆地形成、发展和消亡的过程中，控制油田水化学成分演变方向的水文地质因素发生相应的变化，使油田水化学成分在某一地质时期具有定向发生变化的特点。定了油田水化学成分的性质和演变规律（表3-16）。

同一含水岩系中各含水层之间水化学成分的变化比较复杂，概括起来，受下列因素的控制和影响：

（一）生油岩对水化学成分的影响

油田水化学成分以区域生油岩系为界，形成不同的水动力体系，如松辽盆地白垩系青山口组以上各承压含水层的矿化度随埋藏深度的增加而增高；青山口组以下的泉头组、登娄库组各含水层组的矿化度恰恰相反，随埋藏深度增加而降低[15]，二者的承压水位亦高低不一，一般含水层埋藏愈深，水头标高愈高。总之，自上而下水化学成分形成一个由低到高，再降低的完整的水

表 3-16　油田水的性质与地球化学环境的关系

油田水特征	水型（苏林）	$NaHCO_3$	$CaCl_2$	Na_2SO_4
	主要离子组合	HCO_3^--Na^+ Cl^--HCO_3^--Na	Cl^--Na^+ Cl^--Na^+-Ca^{2+}	Cl^--SO_4^{2-}-Na
	矿化度(g/l)	一般小于10	20—50	一般大于50
地球化学环境	岩性、岩相特征	浅水—深水湖相，砂泥岩为主，岩性比较稳定	半深水—深水湖相砂泥岩和泥质砂岩，岩性、岩相比较稳定	深水内陆湖相
	沉积建造	湖相砂泥岩建造	湖相砂泥岩-碳酸盐建造，局部有海侵	湖相蒸发岩建造
	含水综合体中盐类物质特征	主要是呈菱面体状的鲕状碳酸盐	主要为石盐，其次是石膏和碳酸盐	富集大量的芒硝、硫酸钾、镁盐，其次是石盐
	古湖水性质	淡水湖，趋向于碳酸盐阶段，泥岩中Cl^-含量小于0.04%	淡水—微咸水，趋向氯化物阶段，泥岩中Cl^-含量为0.01—0.08%	咸水—微咸水，趋向氯化物-硫酸盐阶段，泥岩中Cl^-含量大于0.1%
	古气候	潮湿—半潮湿	半潮湿—半干旱	半干旱—干旱
岩石溶滤液		$NaCl$和$NaHCO_3$占85%以上	$NaCl$占绝对优势	主要为Na_2SO_4，其次是$NaCl$

文地球化学“旋回”。油田水含盐量较高的鄂尔多斯盆地、江汉盆地，亦有类似的情况。

（二）不整合面对水化学成分的影响

不整合面是上、下含水层组之间的良好隔水层，如渤海湾盆地在早第三纪时经历了两个活动期，即华北运动Ⅰ幕和Ⅱ幕，油田水化学成分以沉积间断为界，组成了三个有次序的迭变阶段。沉积间断为渗入水（古水文地质期）的侵入创造了有利条件，由此而使地下水化学成分受到改造，使上、下含水层组的化学成分呈现不连续的分布特点。此种情况，在我国不少含油气盆地中见及。

（三）断裂活动对水化学成分的影响

断裂活动对油田水化学成分有深远的影响。一方面，它切断了地下水的空间联系，使流体重新分配或被封存阻挡，各含水层组间水化学成分变化较大，多呈高低相间的“包裹体”状分布。一般位于断层下降盘的水的矿化度较差，如惠民拗陷中临盘断裂带两侧沙河街组一、二段的地下水矿化度相差1—2倍。同一油田中高断块和低断块的油田水化学成分亦有显著差异（表3-17）。另一方面，断裂（尤其是张性断裂）又可沟通上、下含水层间的水力联系，使断裂带及其附近的水来源于不同的含水层，如济阳拗陷孤岛地区，地下水沿断裂运移，使上部馆陶组地下水矿化度由 3—6g/l 增加到10g/l，HCO_3^- 含量的优势被深层地下水中的主

表 3-17 断块两侧油田水矿化度变化表

断　块	油　层	矿化度(g/l)
低断块	甲油层	53—67
	乙油层	63—87
高断块	甲油层	29—50
	乙油层	43—68

要离子——Cl^-所取代。再如准噶尔盆地地下水沿克-乌断裂运移等。我国许多次生油气藏的水化学成分的演变多与断裂有密切关系。

（四）沉积拗陷对水化学成分的影响

沉积拗陷是控制油田水化学成分演变的基本地质单元，在拗陷中油田水化学成分显示了一定的水平分带规律，如济阳的东营拗陷油田水矿化度由边缘向中心递增，水的类型由多类型变为单一的Cl-Na型水；松辽盆地齐家-古龙拗陷油田水矿化度在中部为5—9g/l，边缘降低至2—4g/l；南襄盆地泌阳拗陷油田水矿化度由边缘向中心呈同心圆状依次增高。同一盆地（拗陷）中的不同拗陷，油田水化学成分也有明显的差异（表3-18）。

表 3-18　不同拗陷油田水矿化度的变化

盆地 / 拗陷 / 矿化度	松辽		济阳		江汉		南襄		苏北		
	齐家-古龙	长岭	东营	惠民	潜江	江陵	泌阳	南阳	溱潼	金湖	高邮
均值(g/l)	6.9	19.2	37.5	34.5	294.5	185.2	5.2	11.6	26.1	60.3	21.3
时　代	K		E		E		E		E		

第四章　水文地球化学找油气标志

所谓的水文地球化学找油气标志，系指石油和天然气的某些组分迁移至地下水中，使水中的元素与化合物含量增高或减少，或形成特殊组分。

目前，国内外应用的水文地球化学找油气指标甚多，概括起来主要有常量组分、微量组分、有机物质、放射性元素、同位素、微生物、惰性气体、氧化还原电位及水温等。但在指标的具体运用上，不同国家的学者不尽一致。如美国、日本等国的学者主要应用单一的有机指标，尤其是苯和挥发性的酚。联邦德国的学者着重应用甲烷的碳同位素指标。苏联学者坚持应用以B.A.苏林建立的水型与各种比值为主，配合微量元素(Br、I、B等)、环烷酸和水溶烃等。持这种观点者以苏林学派及A.A.卡尔茨夫为代表[2]。七十年代，K.B.费拉多夫等在考虑地质构造条件的同时，根据各指标的存在形式，对不同性质的水化学找油气指标与地质背景进行组合，提出以下四类组合指标：①地质构造-储集层特征（固体）；②水化学成分中的常量和微量组分（液相）；③气体成分，尤其是可溶性的甲烷及其同系物（气相）；④水中微生物（有生命物质）。并将这四组指标进一步分为区域的和局部的、直接的和间接的指标。其优点是注意与强调了地球化学勘探方法与地质构造条件的相互结合[31]。近年来，Л.М.左尔金等，在强调各种地球化学勘探方法（气体方法、沥青方法、生物化学方法、岩石化学方法、水文地球化学方法）综合运用的同时，对水文地球化学找油气指标进行筛选，只将水中的SO_4^{2-}、I、Br、苯、甲苯及H_2^+视为找油气指标，并且与其它油气化探方法联合运用[32]。E.A.巴尔斯在《含油气盆地有机水文地球化学》一书中，强调了地下水中有机物质在石油地球化学勘探中的

作用和意义[33]。

合理地运用水文地球化学找油气指标，是提高化探方法找油气效果的关键。我们在吸取国外经验的基础上，结合我国石油地质特征和丰富的实际资料，对水文地球化学指标的油气地质意义进行了比较系统的研究，从水化学成分与油气关系的角度，提出五类指标，即直接指标、间接指标、环境指标、成因指标及反映构造的指标。

第一节　直接指标

在成因上与石油（气）成分有直接联系并溶解于水的组分称为水文地球化学找油气的直接指标。主要指在水中有较高溶解度的有机物质，如可溶气态烃、苯及其同系物、酚及其同系物、有机碳、有机酸、脂肪酸及氨等。它们是一组反映油气信息较敏感的指标，故又称灵敏指标，是水文地球化学找油的主要指标。对该类指标在水中赋存的条件与主要影响因素进行综合分析之后发现，有机物质的高含量和组合特征，能够阐明区域含油气远景、评价构造的含油气性、指出油气聚集的利有地区（带）。

水分子的“类冰”结构，能够容纳众多类型的有机物质，当烃类转入到烃-水溶液时，便产生相互作用（烃-烃键之间的相互作用是不连续的），在接近溶质分子的表面增加“类冰”结构，这是利用水中有机物质作为水文地球化学找油气指标的理论基础。

一、可溶气态烃

可溶气态烃一般系指溶解于水的甲烷、乙烷、丙烷及丁烷等。

（一）可溶气态烃的地球化学性质

烃类气体以吸附、游离及溶解三种形式存在于自然界里。在空气中的含量小于6×10^{-5}%，沼气中可达50—60%，油气藏中达50—90%，煤田气中甲烷高达98—99%[16]。岩盐、光卤石及

钾石盐中也含有一定量的烃类气体，如江汉盆地含盐沉积物吸附烃的平均含量超过1300μl/kg。

地下水中富集可溶气态烃的程度，取决于水的化学性质、温度、压力、围岩中烃类的含量及本身的物理化学性质。当温度、压力或水化学成分改变时，由于水分子重新排列组合，使水中可溶气态烃的含量发生变化。通常烃在水中的溶解度随温度升高而增大，并随水中含盐量的增加而降低（图4-1）。当温度从150℃下降到25℃时，烃类在水中的溶解度以4.5—20.5的系数而降低。表4-1说明丙烷和丁烷比甲烷更容易转变为液态烃或溶解于水。

烃类气体在一定的温度、压力下，产生气态烃⟷液态烃⟷

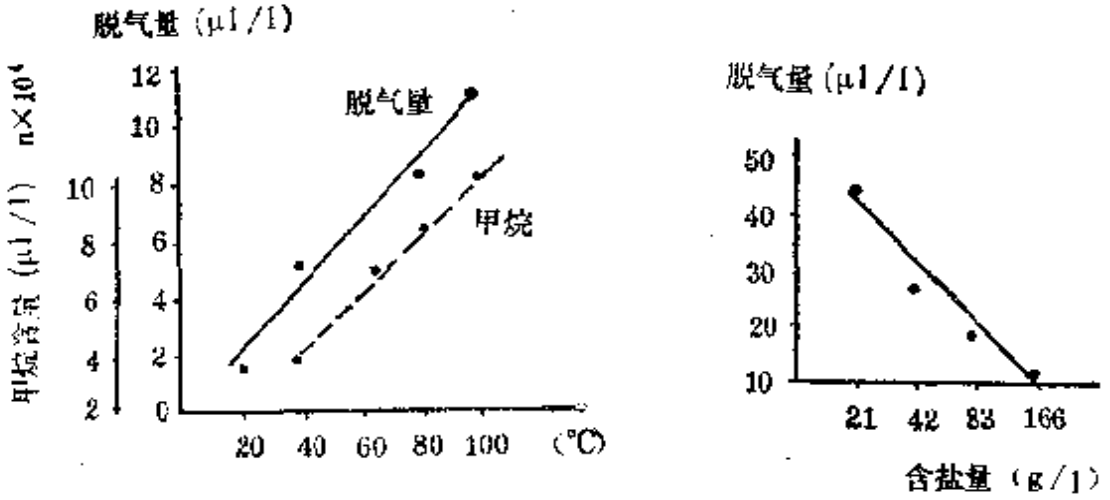


图 4-1　可溶气态烃与含盐量、温度的关系

表 4-1　烃类气体的临界温度与临界压力

气　体	临界温度（℃）	临界压力 ×101325Pa	溶解系数（20℃，101325Pa）
CH_4	—82	46.7	0.033
C_2H_6	32	49.2	0.047
C_3H_8	96	42.8	0.037
C_4H_{10}	153	36.7	0.036

（据B. A. 索柯洛夫，1959）

表 4-2 自然界中烃类气体的含量（检测极限值、μl/kg）

类型 \ 含量		甲烷	重烃	不饱和烃	时代
许层岩（灰岩）	砂岩	240.51	31.05		K
	油页岩	385.70	56.40		K
	泥岩	168.80	20.77		K
	泥岩	495.10	35.20		E
	灰岩	97.87	19.52		古生代
	灰岩	40626.20	12915.64		古生代
	灰岩	10384.58	2883.60		古生代
泥炭土	黑褐色泥炭	3.52			Q
	黑褐色泥土	2.34			Q
海洋淤泥	黄海	261.64	17.54		Q
	东海	1250.10	30.05		Q
	渤海	326.50	18.00		Q
	南海	384.20	21.50		Q
近代沉积物	亚砂土	381.30	46.0		Q
	亚粘土	60.0	4.7		Q
	粘土	70.50	5.2		Q
	粉砂土	294.20	38.7		Q
煤层	气肥煤	1376.77	150.03	90.34	J
	无烟煤	1933.49	108.41	99.90	J
	石煤	2364.56	324.63	2329.30	J
湖泊淤泥	洪泽湖	754.39	17.40		Q
	太湖	7.53	0.51	0.58	Q
	高邮湖	9.75	0.13	0.08	Q
	洞庭湖	22.10	0.67	0.1	Q
	巢湖	1.95			Q
	东湖	16.62	0.66	0.12	Q

（据崔秀荣资料，1983年）

固态烃的循环。固态烃多呈水化的形式存在，如$CH_4 \cdot 7H_2O$。

循环于沉积物中的地下水，所含可溶气态烃的多寡，与沉积物中烃类气体的含量和性质紧密相关。几乎在所有的沉积物中均含有烃类气体，但它们在量和质上却有很大的差异。我国现代沉积物中烃类气体的特点是含量因地而异，且变化幅度很大（表4-2），以甲烷为主，含有少量重烃，如东北、华北等地区甲烷含量高达90%以上。泥炭土和海域（如黄海和东海）淤泥中甲烷含量的平均值高达95%[17]。

因内、外一些具有代表性的近代沉积成因的气体也是以甲烷为主，微含或不含重烃[6]。古老岩石中吸附烃的含量显著增高。煤系地层中吸附烃的含量虽然也突出增高，但不饱和烃的含量占有较大的比例。

沉积物中的烃类气体（包括吸附烃和游离烃）与水中可溶气态烃在成因上有亲缘关系，而且经历了比较复杂的循环交替过程。近代沉积物中的烃类气体是有机物质（一般沥青"A"含量极低）经生物化学作用转化而成的，如CO_2的还原，即CO_2被H_2还原生成甲烷或脂肪酸，受热去羧基生成烃类气体等[18]：

$$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$$

而古老沉积物中的烃类气体则是干酪根经热催化裂解后形成的。尽管它们的成因不同，但都是在水里形成的。上述两种作用或方式形成的烃类气体，一部分溶解于水，另一部分被岩石所吸附（因岩石一般都有较大的吸着作用）。埋藏在地下深部的沉积物，在成岩作用过程中随着结合水和晶格水的排出，部分烃类气体将逸出转入液体中。

烃类气体在液体和固体之间的转化过程及其演变的地球化学作用，对研究水中可溶气态烃的分布、变化特征及指示油气藏的存在等方面具有重要的意义。

（二）可溶气态烃的油气化探意义

天然水中可溶气态烃主要以甲烷、甲烷-重烃及甲烷-重烃-不饱和烃三种系列存在（图4-2），其地球化学特征如表4-3所

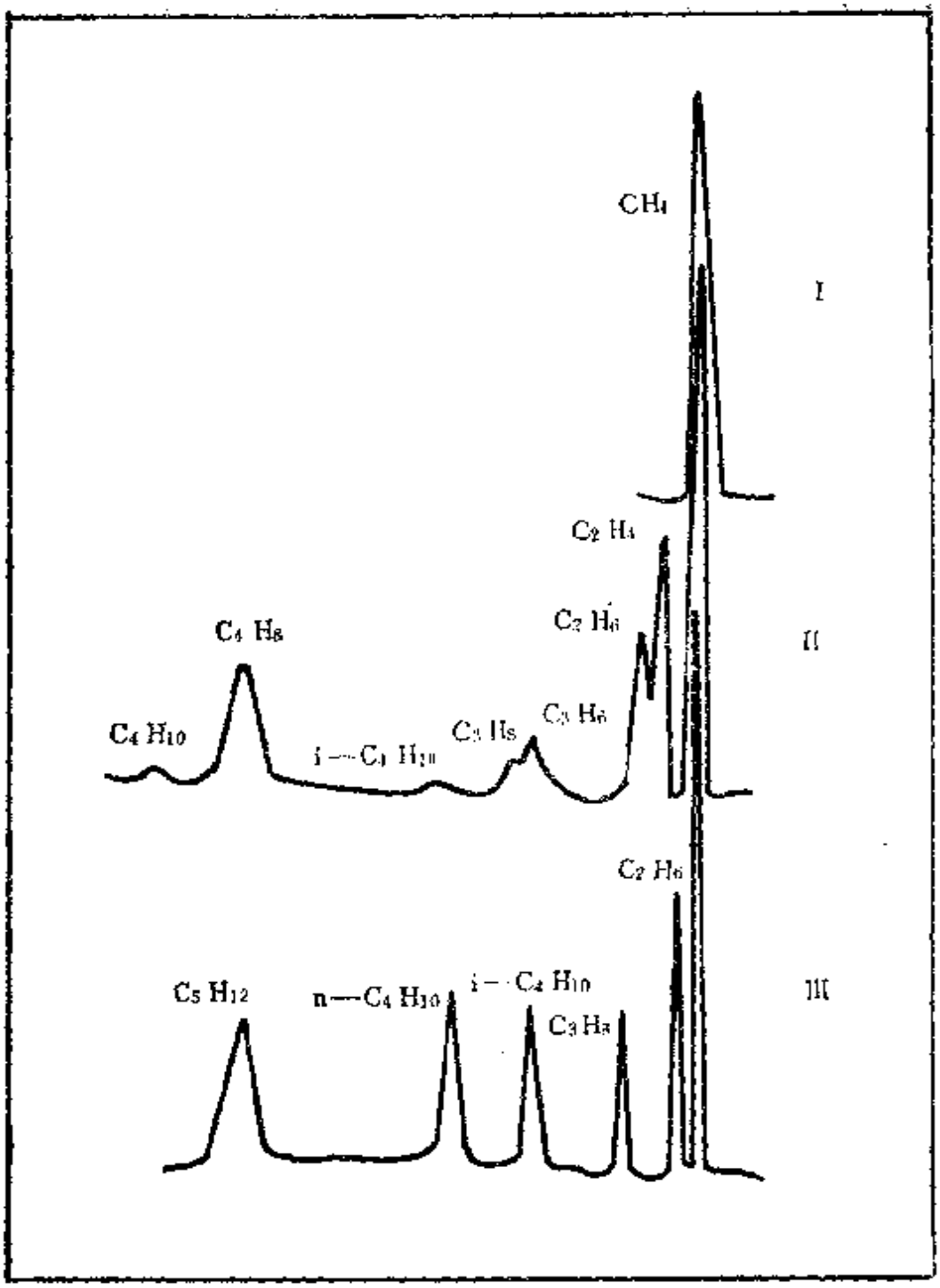


图 4-2 地下水中可溶气态烃的组成

I—甲烷系列；II—甲烷—重烃—不饱和烃系列；III—甲烷—重烃系列

表 4-3　可溶气态烃的分布特征

系　列	水的赋存条件		含　量 (μl/kg)	$\delta^{13}C_1$ (‰)	成　因
甲烷系列	地表水	河　水	0.4—3	−17—−87	有机质（一般沥青"A"含量较低）经生物化学作用转化而成
		湖　泊	0.5—52		
		海　洋	0.2—0.5		
		降　水	1—2.5		
		潜　水	0.2—250		
甲烷—重烃—不饱和烃系列	煤层水	鄂托克旗地区	0.15—2.5	−35—−58	有机质经自然低温热催化形成；煤层或围中分散有机质热变质作用形成
		江苏东风煤矿	0.3—1.5		
		淮北地区煤浸泡	800—1750		
甲烷—重烃系列	油田水或受油气影响的地下水	潜　水	0.4—30	−30—−48	有机质向石油转化过程中或油气运移时被水"捕获"溶解的气体
		济阳坳陷	21965		
		松辽盆地	3900		
		江汉盆地	5249.5		
		陕甘宁盆地	5076.1		

示。

利用该指标作为水文地球化学找油气指标时，应注意以下几点[19]：

1．可溶气态烃有良好的迁移性能，在水中赋存比较稳定，是指示油气藏存在较灵敏的指标。在具体运用时，要十分重视气体的组合系列、烃类的浓度及其不同组分之间的比例关系。

2．甲烷系列在水中的含量，受自然地理景观和表生地球化学作用的影响，当其浓度超越背景含量、分布有一定地质规律、且碳同位素散布范围值高于−60‰时，可能是深部烃类气体向上扩散运移的反映。

3．地下水中出现甲烷-重烃系列的分散晕、重烃含量增高

是油气存在的信息，其晕圈范围往往超过油田范围，并受地下水流向、通道条件等因素影响而偏离油田一侧。

4．在浅层地下水中，出现比较复杂的气体系列时，是多种成因气体相互叠加的结果，根据碳同位素资料，可以鉴别烃类气体的成因。

国内、外许多学者，都把烃类气体视为重要的直接找油气指标。

二、苯、酚及其同系物

（一）苯、酚的地球化学性质

苯、酚及其同系物是石油中单环芳香烃化合物。与芳香烃其它化合物一样，它们易溶解于水。许多研究者在研究了水-苯、水-酚体系后，一致认为随温度升高，苯、酚在水中的溶解度增大。对于酚来说，温度在20℃时，15份水可溶1份酚。当温度升高至68℃以上时，则可与水完全混溶。对于苯而言，当温度从18℃升高至107.4℃时，溶解度增加3.3倍。在200℃时，苯的溶解度是100℃的10倍；在300℃条件下，苯的溶解度又比200℃时大7倍。在氧化和高温的条件下，苯是稳定的[34]安德鲁斯（Andrews）等人发现，苯及其同系物的溶解度与银离子浓度成正比，原因是苯和阳离子之间形成了π络合物。

由于苯、酚及其同系物且离迁移特性、热力学的稳定性，并与油气在成因上有密切的联系，所以被用作寻找油气藏的直接水文地球化学指标。另一方面，在生油岩系和原油中均有一定量的芳

表 4-4　生油岩与原油中芳烃的含量

油田或盆地	芳烃含量（%）	油田或盆地	芳烃含量（%）
任　丘	15	四　川	7.8—25
大　港	18	陕甘宁	18—22.6
准噶尔	13—22.6	泌　阳	12.2—16.8

香族化合物（表4-4）。

就生油岩有机物质类型而言，腐泥型有机物质含芳香烃化合物在15—25%。腐殖型有机物质其母质主要为缩合多核芳香族化合物，其芳香烃含量为10—22%。上述两者之间的混合型有机质芳香烃为5—25%。在含煤系地层的有机质中，芳香烃含量高达20—30%[4]。

（二）苯、酚的油气化探意义

通常在凝析油气藏的水中，苯含量达到最高值，与稠油伴生的水，苯含量最低，而与稀油伴生的水，苯含量介于上述二者之间。一般认为，当水中苯的含量达到每升十分之几毫克时，就证明有油气显示，地下水中苯含量的升高，说明石油和天然气矿床就在附近，亦就是说，地下水中苯含量随接近油藏而增高。目前在活的有机体、植物和细菌中还没有发现这一类型的低分子成分。因此，苯的合理运用，可作为寻找油气藏的直接水文地球化学指标，对于鉴别和圈定石油和天然气的聚集是比较可靠的。

国外学者认为，与石油和天然气伴生的水，酚含量的变化范围为0.05—1mg/l（与油气无关的地下水，酚含量大都低于0.05mg/l），而挥发性酚的含量为0.79—2.09mg/l。在接近油气藏时，酚含量急剧增高。

在我国水文地球化学找油气的研究中，十分重视水中芳烃组分的研究与应用，一直将苯、酚及其同系物作为重要的指标，它们在时空分布及其与油气关系诸方面显示了以下几点水文地球化学规律：

1．天然水系中不同类型水普遍含有苯、酚，但含量的检测值差异较大。如我国海域的水中酚含量在0.01—0.05mg/l，苯含量甚低，且随着海水深度的增加，苯、酚含量增高。大气降水中一般缺失苯，酚含量小于0.009mg/l。不同地区的潜水中苯含量为40—120mg/l，酚含量为0.01—0.03mg/l。苯、酚除在油田水中含量较高外，在煤系地层、现代泥炭土以及近代生物地球化学作用比较发育的地区，均会出现高含量。因此，它们的成因

和来源是多方面的。

2．苯和酚在水中虽然可以呈游离状态，但主要是呈金属化合物的盐类状态存在，如钠盐等。它们在水中的赋存一般与水化学类型、pH值等有一定的关系。即从重碳酸钙（镁）→重碳酸钠→重碳酸·氯化物钠型水，苯和酚的含量依次增加（表4-5）。

3．在纵向上随着地下水埋藏深度的增加和温度的升高，苯和酚的含量向着增高的方向演变（图4-3），并随着接近油气藏而增高，其含量与原油性质有一定的联系（表4-6）。在潜水中苯与酚的高含量多分布在油田或深大断裂带上方（图4-4）。

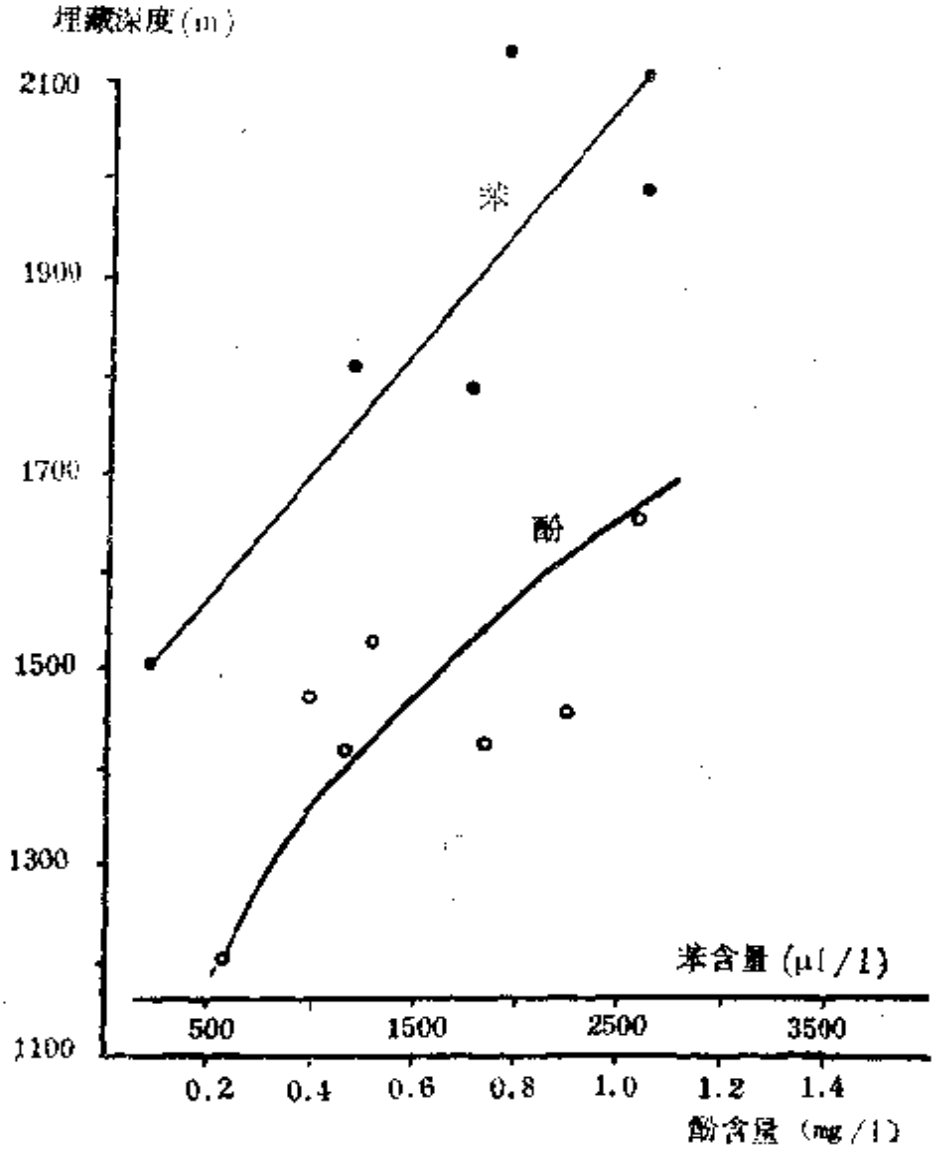


图 4-3　地下水中苯、酚含量与埋藏深度关系

表 4-5　酚含量与水化学成分的关系

成　分	HCO_3—Ca(Mg)	HCO—Na	HCO_3·Cl—Na	地区
酚	0.2—0.5	0.7—1.0	1.2—1.6	松辽
(mg/l)	0.1—0.3	0.4—0.6	大于0.9	华北
矿化度	低——————→高			
酸碱性	酸性——————→碱性			

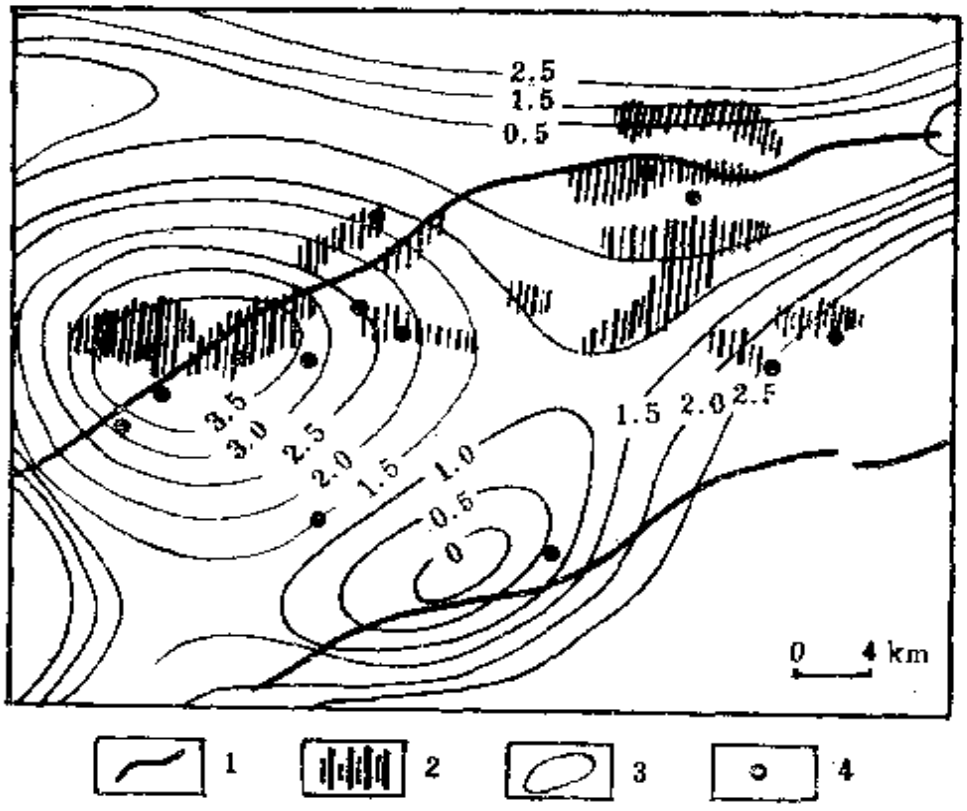


图 4-4　油田上方潜水中酚的四次趋势面分析

1—断裂；2—已知含油区；3—酚的四次趋势面等值线；4—酚的四次趋势面分析剩余异常点

原油浸泡模拟试验，可以从一个方面说明石油和天然气是水中苯和酚主要来源之一(见表5-3)。浸泡非生油岩，浸泡液中苯、酚含量几乎不增加。

在具体利用苯和酚预测含油气远景时，要注意两个问题。一

表 4-6 酚含量与原油性质的关系

井号	时代	比重 (D_4^{20})	含蜡量 (%)	胶质与沥青质 (%)	酚 (ppm)
31	Z	0.8948	10.90	30.60	0.1
3	O	0.8527	15.71	17.40	0.214
11	E	0.8324	18.30	6.70	0.314
8	E	0.7993	14.15	5.22	0.268

据华北油田资料，1982

要考虑苯和酚的组成，当地下水中出现甲苯且含量大于苯，间甲酚、邻甲酚和二甲酚是酚系物的主要成分时[20,21]，可以确认地下水化学成分受到油气的影响，据苯和酚的异常确定油气藏的位置。二要考虑苯和酚的绝对含量及其与背景值的差异，高衬度（即异常值与背景值之比）苯和酚异常的出现，可以视为深部油气藏的反映。

近几年来，国外(特别是西方国家)的学者对地下水中苯和酚在石油化探中的应用进行了比较多的研究。如日本学者对新潟油气田进行研究测得油层的边缘水中苯含量为 30—75ppb，气层的边缘水中苯的含量很低。新胎油田凝析油层的水中苯为 70ppb，

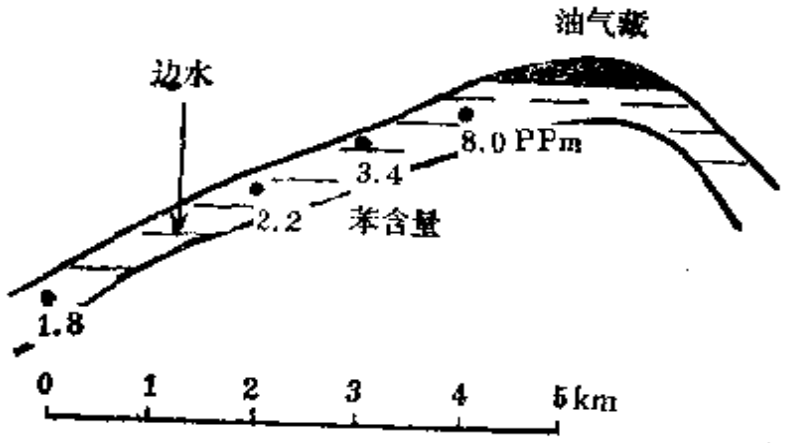


图 4-5 水中苯随着接近油气藏含量变化示意图

而气层的水中苯为9—16ppb。加拿大阿尔伯塔省油田的资料表明，按照离开油藏的距离，地下水中的苯含量在8—12ppm之间发生有规律的变化（图4-5）。苏联学者对水中苯和酚做了很多研究工作，将苯系物视为水文地球化学找油的5个主要指标之一。

三、芳香烃及其衍生物的紫外吸收光谱和荧光光谱特征

紫外吸收光谱是一种复合光谱，是由物质分子中介电子的跃迁而引起的。许多芳烃及其衍生物从紫外吸收光区直到可见光区均存在特征吸收谱。在包封情况上，环数愈多，波长愈向长波方向推移。根据这类性质，地矿部石油地质101队的技术人员首先在国内倡导了把紫外吸收光谱技术用于水文地球化学找油之中。

荧光光谱分析测定的物质是石油的重组分和芳香烃组分。荧光是原油所固有的一种内在特征，它是一种分子受到激发或吸收了激发光之后而发射的光，这种把激发光转变成荧光的技术，可用来确定和检测石油和天然气中的芳烃分子。分子荧光光谱法是油气化探中应用较早的一种技术，但由于当时受技术条件的限制，未取得明显的效果。近年来，光学技术和电子技术发展很快，高分辨率和高灵敏度荧光光度计相继出现，为检测痕迹芳烃化合物提供了必备的技术条件。

这两种方法的主要研究对象是芳烃及其衍生物。紫外吸收光谱主要研究轻芳烃和杂环化合物，而荧光光谱主要研究稠环芳烃。这些化合物是油气的重要组分。由于它们的自由能和离域能低，一般在生物化学作用下难以在现代沉积物中形成或形成的量甚微，这对作为水化学找油指标而言，具有背景低这一有利条件，为捕获油气在浅层地下水中形成特殊的水文地球化学场的信息奠定了基础。同时，芳烃同烷烃相比具有更高的溶解度。另一方面，强大的地层压力，促使芳烃更多、更迅速地转入水中。在水动力和化学势的驱使下，微量芳烃和衍生物可向上扩散运移，从而成为捕获油气藏的良好指标。目前，在水文地球化学找油中，主

要运用以下几个波段：

荧光405nm（由波长365nm的光源激发）在一定的条件下，其强度系水中三环芳烃一蒽浓度的反映。紫外222nm和315nm的吸收带，主要是由双环芳烃引起的；紫外254—258nm是具有共轭双键精细结构的吸收带（包含有单环芳烃）；紫外280nm的吸收带，反映了单环和双环芳烃的特征；紫外365nm的吸收带，主要反映双环芳烃的特征。它们的相对高强度可以提供较为可靠的油气信息，故往往在油气田上方出现高值区（图4-6）。

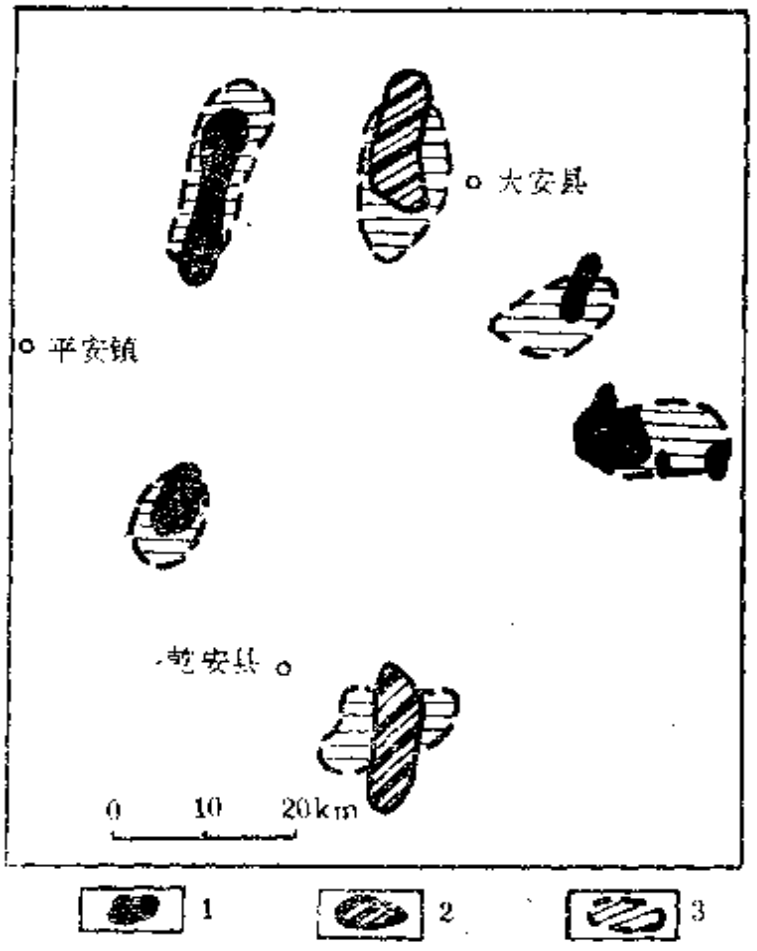


图 4-6 油田上方潜水中出现紫外吸收光谱、荧光光谱高值区

1—油田；2—含油构造；3—紫外吸收光谱、荧光光谱高值区

四、氮

水中的氮主要呈氮化物状态存在，油气中含氮物质的分解或

在厌氧条件下有机质生物化学分解并溶解于水中是地下水氨的重要来源。该指标作为水文地球化学找油气标志的理论基础是：石油里的氮化物主要来自于蛋白质的形成，蛋白质分解的结果形成各种氨基酸类，氨基酸经继续脱氨基作用形成氨和各种有机酸或比较简单的产物：

$$R-\underset{\underset{NH_4}{|}}{CH}-COOH + 2H \rightarrow R-CH + CO_2 + NH_3$$

溶解于水的氨形成水化物$NH_3 + nH_2O$。同时，由于氨和水分子彼此相互作用形成NH_4^+和OH^-：

$$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$$

由于溶液的碱性反应，决定这个平衡剧烈地向左位移（平衡常数1.8×10^{-5}），出现OH^-的机会较少。

地下水中氨异常含量的最小极限值，在不同的地球化学条件下是不一样的。氨的高含量是良好的含油气指标。地下水中氨的含量与矿化度和地下水运动速度有一定的关系（表4-7）。从表中可看出，地下水运动速度缓慢时，矿化度增高，氨含量增加。在一般情况下，当pH＝4—5时，氨含量最高可达到1000mg/l；pH大于6.4时，氨的含量不超过260mg/l。只有个别的情况下较高，

表 4-7　地下水运动速度、矿化度和氨的关系

地　区	矿化度 (g/l)	水的运动速度 (m/a)	氨的含量 (mg/l)
1	12—317	40—242	7.92
2	26—31.8	100	10.4
3	13.7—21.7	11—87	9.1—45
4	15—127	20—130	11—160
5	54—196	21—97.7	6—286
6	100—215	15—100.7	10—285
7	66—279	5.5	15—1825
8	110—437	—	22779
9	173—599	1—9	4—1238

（据А·В·Кудельский，1975）

氨含量随着地下水pH值降低而增高的原因是在酸性介质条件下，OH^-和H^+影响了平衡向右移动的速度；在碱性介质条件下平衡向左移动，在溶解气体中析出NH_3。地下水中氨的最高含量与沉积物中致密的碳酸盐和卤化物占优势相联系。在泥岩压实的过程中往往会出现高度吸附氨的可能性。

在水文地球化学找油中，要注意利用氨与碘、氮、硫化氢、

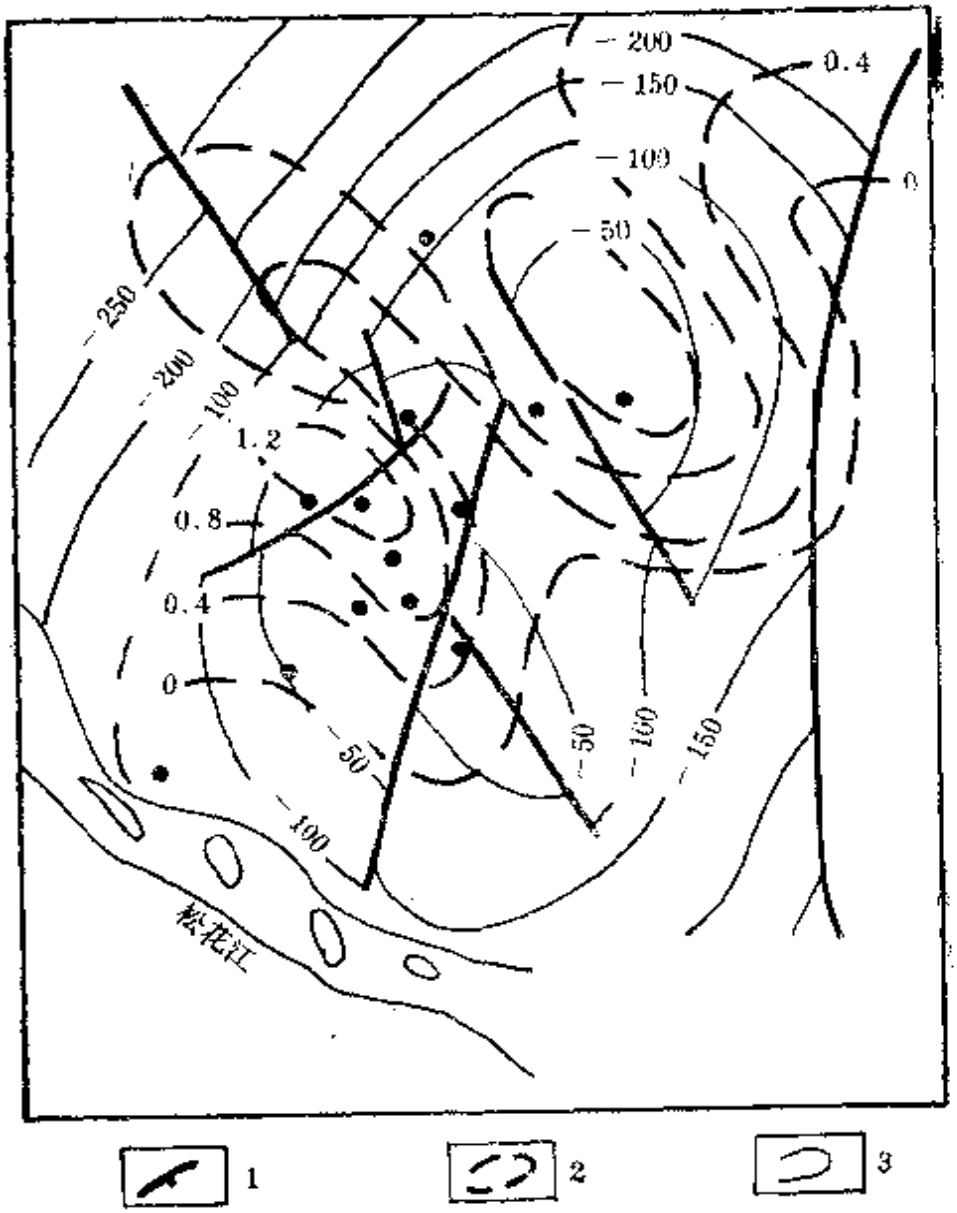


图 4-7　扶余油田 I 号构造潜水中氨含量等值线

（据高洪发，1985）

1—断裂；2—T_2构造线；3—氨含量等值线（mg/l）

硫酸盐-碳酸盐水以及碳氢化合物浓度之间的依赖关系。通常在高盐度的卤水中，当pH值不超过6.4时，用氨评价局部构造的含油气性是有效的。利用氨作为水文地球化学找油气指标最不利的条件是在比较强烈的水交替带、地下水矿化度不高、pH值较高（6.5—7.5）的酸性—碱性条件，此时，利用氨指标判别微含油气的圈闭比较困难。

在地下水循环条件较好和水交替作用比较活跃的松辽盆地潜水中，氨的含量在0.1—3.4mg/l之间，平均值为1.21mg/l。扶余油田Ⅰ号构造上潜水中氨的含量有明显增高的现象（图4-7）。在乾安-长岭拗陷中，除在海坨子和乾安含油构造的已知区内发现有氨异常外，还在未经油气勘探的地区圈定了8个氨异常，有的异常已被钻探所证实是有含油气远景的。这些实例证明该指标可以作为识别地下油气藏的水化学指标。

五、环烷酸

地下水中的环烷酸是石油中环烷酸直接进入水中溶解或由于环烷烃的氧化而形成的。其含量的高低与下列因素有关：

1．石油的化学成分：石油中烷烃组分含量越高，水中环烷酸的含量越高。

2．水的性质：水的含盐量对环烷酸的含量有一定的影响，如在高矿化度的Cl-Na型水中，由于易形成难溶的环烷酸钙（镁）盐，故环烷酸含量甚低。在矿化度较低的HCO_3-Na型水中，容易形成易溶的环烷酸钠盐，使环烷酸在水中的含量增高。

3．油气藏的破坏程度：当油气藏遭到氧化破坏时，水中环烷酸的含量增高。

一般认为，水中环烷酸含量的多寡没有特殊意义，因为石油被氧化或油气藏遭受破坏时，有较多的环烷酸进入水中，其最大含量往往处于距油气藏较远的地方。

在鄂尔多斯盆地仅在Cl·HCO_3-Na型的潜水中发现有环烷酸，从图4-8中看出，水中环烷酸的含量与油气藏息息相关，也

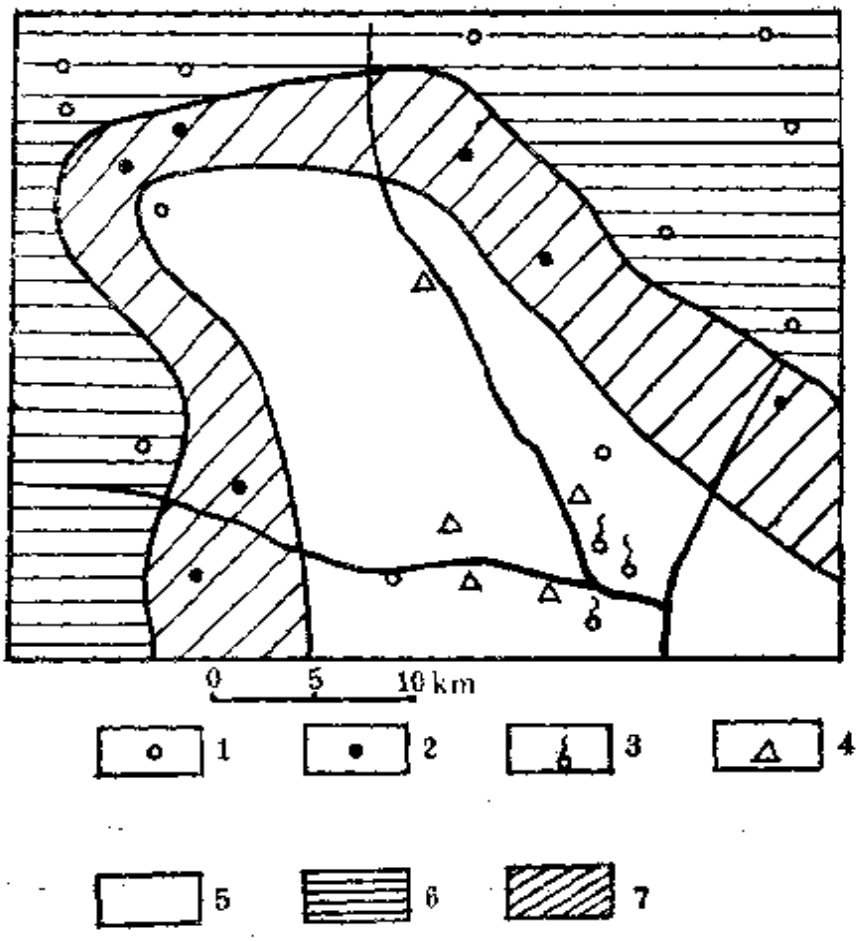


图 4-8 $Cl \cdot HCO_3-Na$型水中环烷酸分布图

1—无环烷酸水样点；2—有环烷酸水样点；3—H_2S泉；4—油苗；5—油苗分布区；6—无油气显示区；7—环烷酸分布区

说明水中环烷酸来源于石油。

六、其它有机组分

不同类型水中可溶有机质的总量为30—50ppm，族组分不尽相同。与油气无关的水有烷烃>沥青质>非烃>芳烃的组成特征[22]，当地下水中出现非烃和芳烃含量增高的现象可能是深部油气藏的浅层效应，应给予足够的重视。

应用可溶有机质红外光谱特征，可以认识地下水中有机质的结构和组成，当与脂肪族链烃有关的吸收峰，以含氧、硫、氮的基团吸收峰以及酯、酮、醇、醛、羧基基团的伸展振动吸收峰的强到弱，与长脂肪链有关的吸收峰和酚羧基有关的吸收峰由强到

基本消失时，就说明水中有机质的演化向着成熟的方向发展，是油气信息的反映。

正构烷烃碳数分布范围的变化特征，也可作为水化学找油指标。当主峰碳在C_{22}—C_{25}之间、OEP值在1.00—1.20时，均说明水化学成分发生了变异。

此外，作为水文地球化学找油指标的有机组分还有脂肪酸、有机碳、有机氯等（表4-8）。

表 4-8 松辽盆地不同类型水中有机酸含量

类　型	地表水	潜　水	煤层水	油田水
有机酸(mg/l)	117	90—140	70—90	170—540

油田水中含有较丰富的有机物质，并且影响着浅层地下水中有机物质的含量、组成和结构，在油田上方出现水文地球化学晕。在研究区域水文地质条件的基础上，利用水中有机物质作为找矿标志预测含油气远景收到了一定的效果，这一研究领域的开拓，不仅具有重要的理论意义，而且可提供寻找隐蔽油气藏的较敏感的指标。我国是利用有机质寻找油气藏研究较早、应用较广、深度较大的国家之一。随着分析仪器的更新和测试技术的提高，该指标在石油化探工作中具有广阔的发展远景。

第二节　间接指标

与油气有关的深部地下水向上运移与浅层地下水混合，或由还原环境转变为氧化环境时，水化学成分在复杂的水文地球化学作用影响下，形成某些特殊形迹，其中包括在不同热力条件和物理-化学条件下，地下水中的某些元素向岩石圈中反向迁移所形成的某些矿物。它们虽然不是石油和天然气的成分，但与油气有一定的成生联系。属于这一类的指标有：CH_4-CO_2-H_2S气体组分、SO_4^{2-}的降低，钙（镁）碳酸盐络合物以及黄铁矿等。

一、钙镁碳酸盐络合物

由两个或两个以上的含有自由离子对（盐基）的分子或离子（称为配位体）与含有空轨道的中心原子或离子相结合的化合物叫络合物。在络合物中，中心离子与配位体直接接触。地下水化学成分中作为配位体的宏量组分是Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-和CO_3^{2-}，而作为中心离子的宏量阳离子是Na^+、Ca^{2+}和Mg^{2+}。但是在浅层水文地球化学带中，钙和镁的氯化物离子对是不可能形成的。而HCO_3^-、CO_3^{2-}的钠盐离子对只有在苏打发育区才形成，所以在一般条件下，能够形成离子对的离子就只剩下HCO_3^-、SO_4^{2-}和Ca^{2+}、Mg^{2+}[23]。

利用水中碳酸盐络合物作为水文地球化学找油指标的理论依据是、油气藏中烃类气体，通过扩散-渗透作用，影响上覆沉积物和地下水的化学成分，形成水化学晕（异常）。从油气藏中迁移出来的烃类气体向表层运移时，由于地球化学环境的改变（如由还原环境过渡为氧化环境等）而被氧化，产生二氧化碳和水，进而形成重碳酸根离子，后者又与溶解于地下水中的钙、镁离子化合形成不同形式的钙、镁碳酸盐和络合离子。其反应方程式为：

$$CH_4 + 2O_2 \rightleftharpoons 2H_2O + CO_2$$

$$CO_2\text{（溶解的）} + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$$

或

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow Ca(HCO_3)^+ + HCO_3^-$$

$$Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaCO_3\downarrow + CO_2 + H_2O$$

$$Mg^{2+} + 2HCO_3^- \rightleftharpoons Mg(HCO_3)_2$$

或

$$Mg^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow Mg(HCO_3)^+ + HCO_3^-$$

作用的结果，一方面导致地下水化学成分中Ca^{2+}、Mg^{2+}的含量发生变化，形成钙、镁碳酸盐（或硫酸盐）的络合离子；另一方面在围岩中出现“蚀变”现象——碳酸盐或硫酸盐沉淀聚集。因此，当浅层地下水中出现浓度较高的钙、镁碳酸盐或硫酸盐络合

离子时，可被视为与深部气体和低分子的烃类气体扩散-渗透到地表有关。查明络合物的浓度和分布规律，能够预测盆地的含油气远景的潜在的含油气构造。

油田水中碳酸盐络合物一般较高，并与S^{2-}、Fe^{3+}/Fe^{2+}、剩余有机碳等指标有良好的对应关系，相关系数很高。在已知油田上方的潜水中，碳酸盐络合物的浓度普遍高于背景值，尤其是$CaHCO_3^+$和$MgHCO_3^+$，因此，它们是指示油气藏存在的良好指标。

二、CH_4-CO_2-H_2S或CH_4-CO_2-N_2组合

深部烃源向上扩散运移过程中，由于水文地球化学环境的改变，受生物化学和氧化作用诸因素的影响，使上覆含水岩系的水中富集甲烷、CO_2和H_2S，如在运移的途径上遇到铁矿物，H_2S与之作用，便形成黄铁矿，H_2S含量急剧降低，而黄铁矿可以作为寻找油气田的水文地球化学形迹。水中溶解气体成分在区域上变化的总趋势是沿着地下水的流向从盆地（凹陷）边缘向中心不断地富集甲烷及其同系物，不可燃的气体组分一般很少超过10%，而在盆地边缘N_2的浓度增高，CO_2却减少。

在含油气盆地中，气体组合的变化规律如表4-9所示。

表 4-9 气体组合在盆地中的变化规律

位置	气体组合	含量（%）			
		CH_4	重烷烃	N_2	CO_2
盆地边缘	$C_nH_{2n+2}>N_2>CO_2$	80—95	< 0.5	20	0.5—2
过渡带	$C_nH_{2n+2}>CO_2>N_2$	89/95	2—3	5—7	2—10
盆地中心	$C_nH_{2n+2}>N_2>CO_2$	> 95	3—5	3—6	1—1.5

出现CO_2气体特高含量，就是与基底岩石中游离的CO_2气体沿区域断层向上运移有关。

在盆地边缘，由于地下水的淋滤作用比较强烈，溶解气体中

出现较高的N_2。在盆地中心地区，由于深部成因的分散有机质在压实过程中经改造而向上迁移是挥发性气体组分增高的重要原因。从表4-10可知，挥发性组分是有机物质碳化后的产物。

表 4-10 有机质变质作用阶段与挥发性组分的关系

挥发性组分	分散有机质变质作用阶段（腐殖质期%）		
	褐煤—长焰煤	长焰煤—气煤	气煤—肥煤
H_2O	16.4	12.5	14.1
CO_2	40.5	33.9	39.1
C_nH_{2n+2}	21.5	16.0	18.7
H_2S	20.1	35.7	25.0
H_2	1.1	1.9	3.1
挥发性组分占分散有机质含量	14.9	15.6	6.4

（据Ю·ГЗИМИН，1976）

碳化作用伴随着形成相当数量的氨、H_2S和CO_2气体等化学性质活泼的化合物。除此之外，在分散有机质变质作用阶段中氨的含量增高。

油田水中H_2S是石油被硫酸盐氧化和石油中含硫组分分解的结果，H_2S在水中的富存与下列因素有关：

（一）水中氧化作用的影响

当水中有游离氧存在时，氧化作用使H_2S转变成自然硫，即$2H_2S+O_2\rightarrow 2S+2H_2O$。

（二）岩石化学成分的影响

岩石化学成分对水中H_2S的含量有直接的影响，如石膏的存在，可使水中H_2S的含量急剧增加；铁矿物的存在，也影响着水中H_2S的含量，即$H_2S+Fe_2O_3\rightarrow S+2FeO+H_2O$

$2H_2S+Fe_2O_3\rightarrow FeS_2+FeO+2H_2O$。

（三）pH值的影响

当pH值大于6时，对H_2S在水中的聚集不利。

（四）其　它

地下水的径流速度、岩浆活动、脱硫作用等对H_2S的含量都有一定的影响。

在上述因素的影响下，水中H_2S的含量变化范围很大，为0.1—1200mg/l，一般在封闭的水文地质环境里比开敞的水文地质环境偏低，其绝对含量与SO_4^{2-}和$r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$比值成正比（表4-11）。

表 4-11　地下水中H_2S与SO_4^{2-}的关系表

井　　号	H_2S (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	$r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$
C—4	6.03	0.10	0.002
H—2	11.45	0.15	0.002
H—8	13.75	0.51	0.017
H—5	22.90	1.23	0.040
C—3	24.80	1.64	0.120
H—12	30.53	3.04	0.070
H—13	221.38	5.03	1.570
H—14	248.10	9.73	1.960

三、SO_4^{2-}与$r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$比值

地下水中SO_4^{2-}缺失或$r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$比值降低是预测盆地含油气性的间接指标，实际上后者是对SO_4^{2-}和Cl^-的综合利用，在油田水或油气藏上方地下水中，这两个离子的含量向两极方向发展，即SO_4^{2-}含量减少，Cl^-含量增高。

（一）影响地下水中SO_4^{2-}含量的因素

1．脱硫作用：深部烃类或地下水向上扩散-对流迁移至表生地球化学带时，易发生脱硫作用，即：$SO_4^{2-}+2C+2H_2O=H_2S+2HCO_3$，结果水中硫酸盐被还原，从而消失或减少。

2．含油气盆地封闭性愈好，则SO_4^{2-}含量减少（表4-12），其原因除与硫酸盐被还原外，还与Cl-Na或Cl-Na·Ca型水的存在有关。

3．围岩的性质：岩石中硫酸盐矿物增多或膏岩发育的地

表 4-12 鄂尔多斯盆地水中SO_4^{2-}的变化特征

指　　标	开敞的水文地质环境	半封闭的水文地质环境	封闭的水文地质环境
SO_4^{2-}（平均值）	4.6	3.8	0.5
Cl^-（平均值）	103.7	408.1	1127.1

（单位　meq/l）

区，水中SO_4^{2-}含量普遍增高。

（二）影响地下水中Cl^-含量的因素

1．随地下水含盐量增加和水化学成分变化程度的增高而升高。

2．在地下水径流的阻滞带或停滞区含量增高；随水文地质封闭程度变好而增加。

3．含水层的物理性质，特别是渗透率影响着水中Cl^-的含量，二者成反比。

在石油和天然气的影响下，水中SO_4^{2-}和Cl^-含量的有规律变化，为选择$r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$比值作为预测含油气性间接指标提供了条件。

第三节　环境指标

该类指标只能判明地下水所处的水文地球化学环境或有利于油气存在的水文地质条件，它们在成因上与油气没有直接关系，如常量组分中的盐分、矿化度、离子含量（组合）及各种比值、微量组分、氧化还原电位、pH值、地温等。它是解释其它水文地球化学指标指示油气意义的重要基础资料。

对于该类指标的应用，传统的作法是将其单独应用，例如苏联等国学者仍然承袭四十年代苏林分类的做法，美国等国学者至今没有统一的应用标准和方法，大都是独立地使用各种化学成分[29]。这样不仅难以捕获可靠的油气信息，而且资料整理的工

作量很大。作者从七十年代初期开始探索这些指标的综合利用问题，主要认识如下：

一、常 量 组 分

水中常量组分（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}）与矿化度均呈现一定的相关关系，通常各离子的含量随矿化度的增加而有规律地变化，在查清影响水中离子组成的主要因素之后，利用矿化度和各离子之间的线性关系（直线或抛物线）、斜率、截距等，可以阐明背景区水化学特征，从而衬托出异常地段的离子组合形式。

离子组合是水中化学元素在一定的区域水文地球化学环境下物理化学平衡的结果，一般来讲，在低矿化度和低pH值的条件下，水中离子浓度达不到$Mg(OH)_2$和$CaCO_3 \cdot MgCO_3$沉淀的要求，故Ca^{2+}和Mg^{2+}处于积累过程。当受深部烃类气体影响时，上述碳酸盐的平衡条件发生变化。当pH>7时，由于烃类分解，使CO_3^{2-}含量增加，极易发生$CaCO_3$、$Ca(HCO_3)_2$、$Mg(HCO_3)_2$及$MgCO_3$等的沉淀，使土壤（岩石）中上述化学成分的含量突增。由于碳酸盐的转移，使水中Ca^{2+}（或Mg^{2+}）的含量减少，围岩中碳酸盐含量相对增加，物理性质变差，地下水的径流条件由好变差，在矿化度升高的同时，Na^+、Cl^-在水化学成分中占居一定的地位，破坏了水化学成分随地下水流向而变化的一般规律，呈现了高、低相间的变化现象，在某些地段出现了异常区。与油气有关的离子组合，主要有$Cl \cdot HCO_3$-Na、HCO_3-Na、Cl-Na、其次为Cl-Na·Ca。在确定水化学异常时，还可用B、A、苏林的水型分类。当地下水矿化度较高、$CaCl_2$型水在平面上的分布与地质构造相吻合时，往往是深成地下水化学成分在浅层的反映。与脱硫作用有关的$NaHCO_3$型水也是与油气藏有关的指标。

据矿化度、离子组合和水型三个指标编制常量组分异常叠合图，在生产实践中取得了良好的地质效果（表4-13）。

表 4-13 已知油田潜水中常量组分异常叠合特征

盆地或油田	常量组分异常叠合特征
松辽盆地（大庆、红岗、扶余油田）	矿化度大于1.2g/l，$Cl\cdot HCO_3$—Na 组合，$NaHCO_3$型水位于含油构造两侧
下辽河	矿化度大于0.8g/l，HCO_3-Na组合，$NaHCO_3$型水分布于含油构造上
济阳拗陷	矿化度四次趋势面分析的剩余异常值大于50，Cl-Na 组合，$CaCl_2$ 型水与控制油气藏分布的断裂吻合
马家滩油田	矿化度大于 1.5g/l，Cl-Na 组合，$CaCl_2$ 型水与含油构造较吻合
任丘油田	矿化度大于0.4g/l，HCO_3-Na组合，$NaHCO_3$型水与含油潜山基本吻合
泌阳拗陷	矿化度大于 0.5g/l，$Cl\cdot HCO_3$-Na 组合，$NaHCO_3$型水与含油构造基本一致

二、微量组分

微量组分作为水文地球化学找油气指标，国外应用的元素达20多个[29]，但效果欠佳。考其原因，主要是没有考虑各个元素的地球化学性质，而仅仅依据含量的高低进行含油气远景评价。大家知道，受油气藏影响而形成的地球化学场，表现在微量元素上应该是具相似地球化学性质的元素发生相似的变化。根据这个道理，近年来我们按微量元素性质分类，应用数理统计方法（如典型趋势面分析等）提取它们的公共信息，评价盆地的含油气远景显示了较好的地质效果。常用的微量元素组合有：

① Li、Rb、Cs等组合；

② Be、Sr、Ba等组合；

③ Fe、Mn等组合；

④ Cu、Zn、Se等组合；

⑤ F、Cl、Br、I等组合；

⑥ Pb、Cd等组合。

在济阳拗陷的临盘油田，潜水中的Li、Rb、Cs和Fe、Mn等组合的异常范围，限于含油边界之内。松辽盆地的扶余油田，潜水中F、Cl、Br、I的高值点绝大部分位于含油气构造上。利用水中微量元素组合作为找油气指标，在许多地区得到了与其它指标相吻合的异常。

三、氧化还原电位

氧化还原电位可以反映地下水所处的水文地球化学环境。位于氧化环境中的地下水，Eh值往往较高。而处于还原环境中的地下水，Eh值偏低。实践证明，位于油田上方的地下水，一般具有较低的Eh值，如鄂尔多斯盆地西缘的马家滩油田水化学异常内的Eh值平均为65.2mV，而异常外大都超过100mV。在河套盆地临河拗陷的水化学异常内Eh值均低于60mV，松辽盆地潜水水化学异常内Eh值多为30—40mV。氧化还原电位除作为找油气指标外，还是研究水中其它化学组分迁移机理与溶解度的重要资料。

表 4-14 油区内井下地温资料

井 号	温度(℃)	井 号	温度(℃)	井 号	温度(℃)	井 号	温度（℃）
49	72	0—8	71.6	2—14	66	4—6	69
43	71	0—9	72	2—12	72	4—9	69
47	70	1—10	73	2—8	74	3—12	69
15	68.5	1—11	71	2—7	74	4—13	72
0—7	72.6	2—17	70	44	69.5	3—14	69
2—3	69	2—5	70	3—3	70	4—17	68.5
1—4	75	1—7	71	3—5	70	4—19	68
2—4	74	1—9	75	3—6	70	4—21	69
1—6	76.5	1—8	73	2—9	69.5	3—17	68

（据李鹤庆，1975）

四、地　温

油气藏是一个较大的地热场，故油区内地热梯度一般高于非油区。冀中拗陷的任丘油田地温与深度的关系式为：

$$T=0.0357H+14.9$$

式中：H——与T相应的深度；

14.9——恒温带的温度（°C）。

济阳拗陷胜利油田地温测量结果，深度为1800m的温度资料如表4-14所示，明显高于非油区。

第四节　反映构造的指标

系指地下水中能“记录”地质构造活动形迹和揭示地质构造特征的指标。主要有放射性元素（U、Ra、Rn）和氘、氚等。在水文地球化学找油中我国首创利用铀及其络合物预测断裂构造的方法，并取得良好的地质效果。

金属铀在表生地球化学带不能单独存在，天然条件下只有四价铀和六价铀的络合离子是稳定的，前者主要赋存在还原环境中，在氧化环境下氧化成U^{6+}，进而转换成铀酰离子：

$$U^{4+}+2H_2O\rightarrow UO_2^{2+}+4H^++2e$$

六价铀主要赋存于氧化环境，具有双重性质，即在强碱性介质中呈酸性，在酸性、中性及弱碱性介质中呈弱碱性，形成盐类（如UO_2SO_4）和某些络离子。油田水中含有较多的四价铀，随水迁移至氧化带即转变成六价铀。六价铀迁移性能较强，并以铀酰离子的形式迁移。铀酰离子形成络合物的能力较强，能与多种络阴离子形成比较稳定的铀酰络合物，在酸性水介质中形成羟基铀酰离子UO_2OH^+、$UO_2(OH)_2^0$，在碱性水介质中形成二碳酸铀酰$UO_2(CO_3)_2^{2-}$和三碳酸铀酰$UO_2(CO_3)_4^{3-}$。水中铀络合离子的含量和形式，除与pH值密切相关外，还决定于Eh值的高低。Eh_1、Eh_2、Eh_3、Eh_4、Eh_5分别为UO_2^{2+}、UO_2OH^+、$UO_2(OH)_2^0$、

$UO_2(CO_3)_4^{4-}$、$UO_2(CO_3)_3^{2-}$等铀络合离子与UO_2相平衡的氧化还原电位值，它们增高时，水中相应的铀络合离子含量增加。Eh_6和Eh_7分别表示不同含氧系数氧化铀（$UO_{2.25}$、$UO_{2.67}$）与$UO_2(CO_3)_3^{4-}$相平衡的氧化还原电位值，其高低可以说明水中铀络合离子含量的多少。

在潜水中利用铀络合物（离子）作为找油气指标，主要用来指示油气运移的通道或断裂构造，如济阳拗陷临盘油田潜水中铀络合物以三碳酸铀酰为主，占95.5%（样品数为156个）。其次为二碳酸铀酰，占4.5%。它们的高浓度值集中出现在控制油气聚集的NEE向断裂带上（图4-9），显示了该指标的实用价值。这是由于四价铀从深部的还原环境，沿断裂向上运移至浅层的氧化环

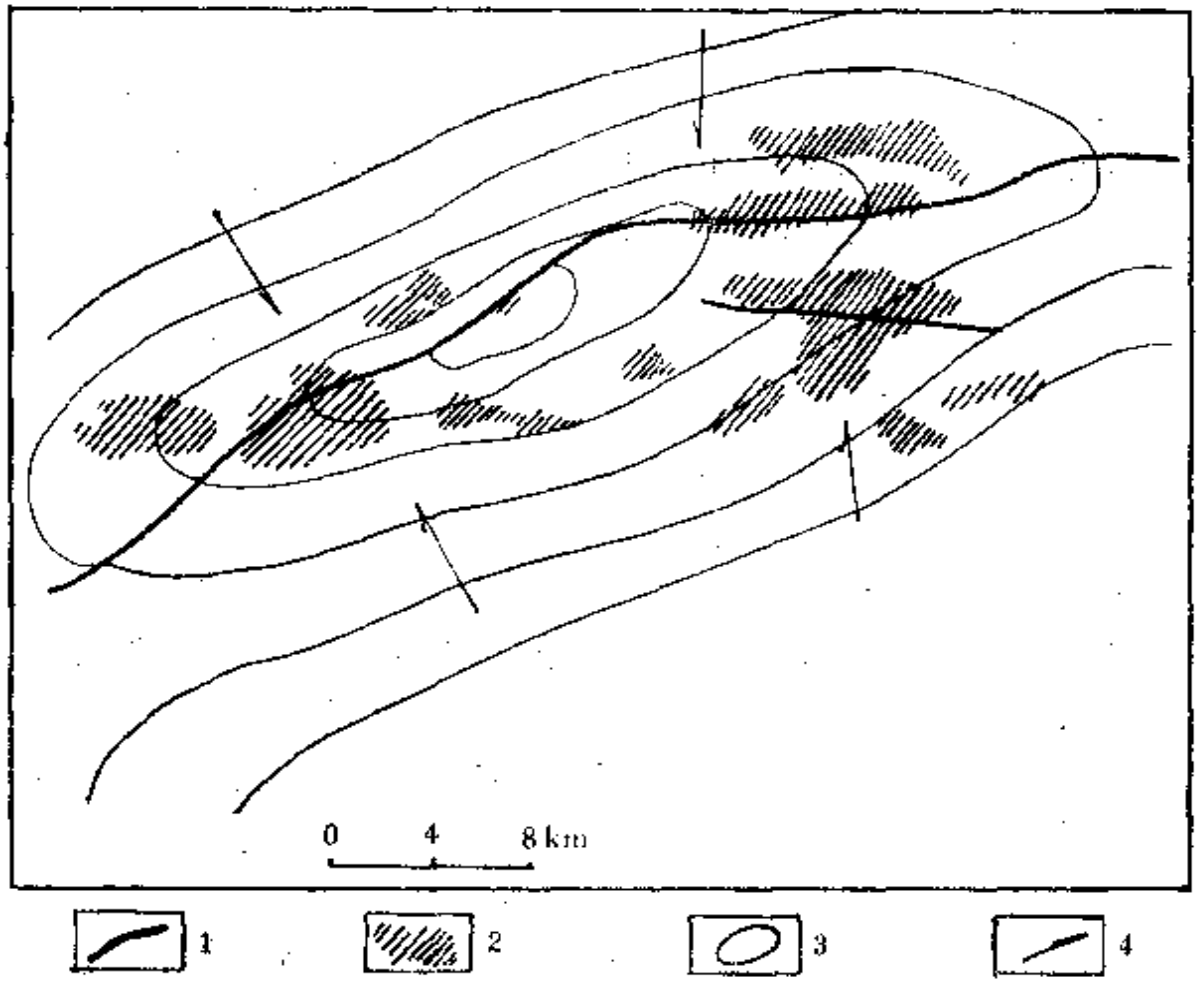


图 4-9 潜水中$UO_2(CO_3)_3^{4-}$趋势面分析

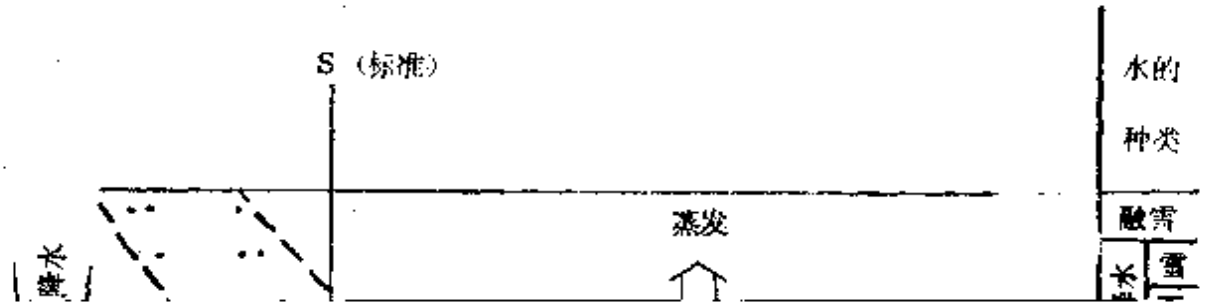
1—断裂；2—油田；3—趋势面等值线；4—趋势值增高方向

境时，转换成六价铀和铀酰离子，在碱性条件下（本区浅层地下水的pH＝9-12）形成沿断裂分布的三碳酸铀酰和二碳酰铀酰。因此，铀络合物是反映断裂构造的良好指标。

第五节　成因指标

一、氢、氧同位素

主要指能判明地下水来源和成因的同位素指标。在水文地球化学找油中应用最早的同位素是用浮沉子法测量重水的含量。从宏观上看，不同类型的水，有其不同的重水含量界限（图4-10）。但由于精度差、速度慢，不能适应水文地球化学找油的需要，被



稳定同位素——氢、氧、碳同位素所取代。在油田范围内，不同类型和不同时代的地下水，氢、氧稳定同位素的含量变化是有规律的（表4-15）。从表中看出，第四纪地层水与新第三纪地层水的δD和$\delta^{18}O$值具有明显的一致性，结合水中的其它组分，说明它们之间有着密切的成因联系[10]。

表 4-15 任丘油田δD与$\delta^{18}O$在纵向上的变化

井　　号	时　　代	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)
5—1	Q_{1+2}	-76.92	-10.87
5—3	$Q_1+N_{明}^{上}$	-74.50	-10.56
60	E_{s_2}	-69.29	-9.45
84	O	-63.21	-9.99

（据孙杉资料，1982）

二、碳同位素

近年来，在水文地球化学找油中广泛运用可溶气态烃的甲烷碳同位素，鉴别和评价水化学异常的成因。不同成因类型的甲烷碳同位素的范围值是：生物成因气体的$\delta^{13}C_1=-92$——58‰；石油伴生气的$\delta^{13}C_1=-58$——42‰；过成熟气的$\delta^{13}C_1=-48$——18‰。

表4-16是我国不同类型地下水的甲烷碳同位素实际资料[24]。

我国已知油田上方潜水中的$\delta^{13}C_1$变化幅度在-43——55‰。

表 4-16 水中甲烷碳同位素值

水的类型	与油气无关的潜水和地表水	油田上方的深层水	油田水	凝析油田水
‰(PDB)	-86——62	-58——47	-49——28	-25——15

松辽盆地红岗油田为－45‰左右；泌阳拗陷各油田在－45—－47‰；江汉盆地潜江拗陷的油田为－44—－55‰；任丘油田在－43‰左右。它们与原油伴生气中的$\delta^{13}C_1$大体相同，说明可溶气态烃受油气藏的影响和控制。

从上述资料不难看出，应用水中甲烷碳同位素成果，可以确定水化学异常的性质，对于鉴别异常的真伪是一个良好的指标。

第五章　水文地球化学找油的基本工作方法

水文地球化学找油，除了运用地质-水文地质方法外，还必须采用现代物理-化学、流体力学、数学地质等学科的理论和方法来研究地下水中元素的活动历史和水文地球化学作用过程，因此，在研究工作程序上有其自身的特点。概括起来，首先要查清含油气盆地水文地质条件，确立研究目的层及其埋藏规律与水动力场特征；采取不同类型水的样品，对其进行多项目全分析与测试，总结水化学成分的基本特征，从而衬托出研究目的层水化学成分的空间分布规律及其不同水动力带上水化学成分的量的差异；建立水文地球化学试验场，进行模拟实验；应用电子计算机技术对繁杂的数据进行处理；从运动、发展的观点，用自然历史分析法对所取得的资料进行综合分析，研究规律性，从而为石油普查勘探提供地球化学依据。

水文地球化学找油已初步形成一套较完整的工作程序和研究方法。

第一节　水文地球化学找油阶段的划分

水文地球化学找油方法在石油和天然气地质普查与勘探的各个阶段均可进行，根据研究对象的不同和测量的可信度，可分为四个普查阶段，即概查阶段、普查阶段、详查阶段和勘探阶段。每一个阶段均有一套相应的普查勘探内容，而每一阶段的工作量、性质及对成果的要求是各不相同的。

一、概查阶段

在该阶段一般进行大面积、小例比尺的调查，即从含油气（自流水）盆地的整体出发，进行路线调查，采用的比例尺一般为1:50万—1:100万。路线布置应以垂直盆地的主要构造线的方向为主，线距不小于10km，点距应不小于2km。本阶段调查的主要目的与任务是收集调查区域内的一般地质、地貌、水文地质等资料，研究盆地内不同类型水（主要是上部水文地球化学带的潜水、地表水、大气降水及泉水等）化学成分的特征，结合收集到的资料，加以综合分析研究，得出调查区内水文地质条件的初步认识。综合运用地质、物探和地球化学资料，编制区域性小比例尺的地球化学预测图。在划分水文地质分区和元素地球化学带（如元素的迁移带、富集带、淋滤带等）的基础上，确定区域背景值。为论证盆地的含油气远景、找油气的可能性以及为下一步继续进行水文地球化学调查提供必要的设计资料，指导调查工作的顺利进行。在这个阶段，可能查明与区域含油气远景评价相联系的油气显示。

二、普查阶段

水文地球化学普查是在概查的基础上进行的，采用的比例尺一般是1:20万—1:10万，取样密度不应小于每10km²2—4个点，仍属于面积性水文地球化学测量。它的主要工作目的是获得对上部水文地球化学带的区域水文地质条件的总评价，必须取得每个含水层（组）的分布、范围、厚度、埋藏深度、水质和水量的资料，以及补给、径流、排泄区的位置。提交相应比例尺的水文地球化学图和含油气远景预测图等基本图件。当异常的衬度较高，并有一定数量的异常点相对集中出现时，可圈定为异常区，指出油气聚集的有利地带和普查勘探方向，为下一阶段水文地球化学调查提供必要的设计资料。

为了达到上述目的，仅靠地面地质调查是不行的，还必须在

地质构造、地形地貌、水文地质条件最有意义的地方布置钻孔和勘探坑，认识深层水文地质和地球化学条件。

三、详查阶段

水文地球化学详查在水文地球化学普查的基础上进行，比例尺一般大于1:5万，最常用的为1:5万—1:1万，采样点的密度每10km²6—20个。调查面积限于水文地球化学综合异常区或通过地质、物探方法查明的局部构造范围内。不仅要研究上部水文地球化学带的特征，而且要研究下部水文地球化学带的特征。在调查过程中，必须详细地研究工区内的地质构造、油气运移条件、水文地质特征、岩石性质等，阐明含水层之间的水力联系及异常形成的地质地球化学背景，确定异常的性质，筛选掉没有含油气远景的构造，提供进行油气勘探的有利地段，为布置钻孔提供依据。

应当指出，本阶段对成果的要求相当高，因为这些资料和成果是布置油气勘探钻孔的主要依据之一。

四、勘探阶段

在勘探阶段，水文地球化学测量主要是在专门的水文地球化学钻孔或石油探井中进行，通过水文地质条件和水化学成分的评价，研究构造的封闭程度、油气性质、油气运移的方向和规模，进行油层对比和油源对比。用水文地球化学观点，阐明油气藏的形成和保存条件，指出油气聚集的有利井段，提出最佳的布井和开采方案，为石油勘探与开发提供水文地球化学参数。

该阶段工作的重要性还在于它为水文地球化学找油理论的研究，提供了实验场所和实际资料。

在实际工作中，不一定完全按上述调查阶段的顺序依次进行，各调查阶段的工作也不是截然地分开，而是相互交叉、叠置在一起。但在运用水文地球化学资料阐明或解决石油地质问题时，必须考虑水文地球化学找矿的调查阶段与精度，以达到最好的找油

气效果。

最后应当提出，水文地球化学找油各调普阶段所采用的地形底图，应该是最新的和比实际测量比例尺较大（一倍）的地形底图，因为利用较大比例尺地形底图测量时，能够比较详细、准确地绘出野外观测的结果。

第二节　水文地球化学找油的准备工作

不同调查阶段的水文地球化学找油，均分为四个步骤，即准备、野外调查采样、室内分析与测试、资料整理研究。

准备工作是搞好水文地球化学找油工作的基础，一般包括下列内容：

一、调查区现有资料的收集与研究

收集与研究工区内现有资料，了解前人的工作情况，作为布置工作的参考，以便于采取技术措施，确保水文地球化学找油工作的顺利进行。收集的内容包括：调查区自然地理、地质与水文地质、环境污染等方面的资料。

（一）自然地理方面

自然地理方面必须搜集的资料有：

1．水文资料：主要河流、湖泊（水库）、渠道等水系分布位置、流量、流域面积、径流系数以及与地下水的关系等。

2．气象资料：气温、年平均降水量、年平均蒸发量、降水量的季节变化等。

3．地形地貌：山脉、丘陵、河流（湖）阶地、汇水洼地及微地貌变化特征等。

4．土壤植被：土壤类型、分布范围，主要农作物和植被分布等。

5．其它：如交通情况、当地风俗习惯等。

（二）地质方面

收集较大比例尺的区测报告、地质（包括第四系地质）剖面、代表性的钻孔（特别是石油和无然气勘探钻孔）资料，了解调查区地层、构造（包括新构造运动）、近代地震活动情况，矿产（特别是可然矿床）分布、油气苗出露地点以及各种地球物理资料等。

（三）水文地质方面

需要收集以下几方面的资料：

1．区域水文地质普查报告和农田供水水文地质报告，借以了解调查区内的含水层分布，水化学特征等。

2．有关泉（特别是上升泉）水资料、钻孔水文地质资料(包括试水资料)、热水分布等。

3．民用井分布情况、井的类型与深度、水位动态变化、取水设备等。

（四）环境水文地质方面

1．收集调查区厂矿分布情况、排污资料，三废（废水、废气、废碴）处理资料。

2．区内污染状况与程度、水污染的主要因素等。

3．农药使用情况。

4．主要地方病与分布情况。

对收集到的各种资料，进行分类、登记，编成卡片。通过分析研究，客观地评价前人成果，并将重要内容摘录或编成有关图件。

二、现场踏勘

通过收集资料对调查区有概要的了解后，要组织有关人员进行现场踏勘，踏勘路线应穿越调查区水文地质和地貌条件比较复杂的地区、油气苗出露区以及第四纪地层比较完整或有代表性的地区，并重点采取少量样品，进行分析。

通过踏勘进一步确定本次调查的技术细节和应采取的技术措施，使水文地球化学找油工作的各项实施方案与客观实际相符

合、踏勘中要了解交通运输和生活条件，选择好野外基地和实验室所在地，为野外调查做好准备。

三、编写设计书

为了使水文地球化学找油工作有计划、有步骤地进行，确保任务的顺利完成，根据水文地球化学找油调查的比例尺和上级下达的研究任务、工作定额，结合已收集和踏勘所取得的资料进行综合分析，编写设计书。它是水文地球化学找油工作的依据，一切工作都要按照设计书的规定去做，设计书对工作的每一个环节都要有详细而严格的要求，因此，设计书的质量如何，直接影响工作的好坏，编写过程中要求切合实际、详细准确，安排合理。设计书的基本内容包括：总论、专论和经济预算三部分。

（一）总论部分

主要阐述工区的位置、工作目的和任务、调查区的自然地理条件、经济条件、区域研究的历史、地质与水文地质、矿产分布、油气地质普查及水文地球化学找矿等，对上述诸方面均需进行详细描写。该部分是设计的地质基础。

（二）专论部分

该内容是生产技术部分，据总论中提出所要解决的问题，论述水文地球化学找油方法的可行性，提出具体的工作方法和相应的技术措施，要详细写出工作量、工作计划、工作定额以及依据、工作组织与人员编制、保证安全的措施等。该部分是设计的主要内容。

水文地球化学找油的人员与组织形式如表5-1所示。

课题负责人的任务是：负责设计和报告的编写、课题任务的全面实施及质量全面负责。

（三）经济预算

经济预算主要是根据各项工作的量和各项工作的技术经济指标进行财经预算。

设计书除文字部分外，应附各种图表，如地质略图、区域研

表 5-1 人员与组织形式

课题负责人	组别	任务
	地质—水文地质组	1.野外地面调查，填写水井调查记录卡； 2.填写送样单； 3.整理实际材料图； 4.进行资料整理研究
	采样组	1.准备采样工具，如洗涤样品瓶等； 2.野外采样； 3.填写采样标签与样品交接单
	测试组	1.准备现场萃取试剂与工具； 2.萃取水样； 3.基地样品处理与分析； 4.室内样品分析与测试； 5.模拟样品配制与分析
	质量检查组	1.验收、检查各采样组送交的样品； 2.水井调查表、实际材料图和样品交接单的核对； 3.分析化验质量的检查，计算分析测试误差与合格率； 4.运回室内样品的登记、装箱
	行政后勤组	1.负责生活、物质采购与财务计划； 2.负责交通运输； 3.安全生产的检查

究程度图、水文地球化学概要图、人员组织与分工表等。

总之，设计书所提出的工作量要恰当，并符合经济要求，工作方法要先进、技术思路要清楚，工作组织计划要切实可行，工作成果要提得明确，文字力求简明扼要，图表清晰、准确。

设计书批准后，课题负责人组织全面实施。

第三节 水文地球化学找油的野外调查

水文地球化学找油研究的对象是整个水圈（由大气圈的水、

地球表面的水和地球内部的水三部分组成），因此，必须进行大量的野外调查研究，并结合室内分析资料，探求水化学成分的演变规律及与油气的内在联系。亦就是说，要从野外到室内，由宏观到微观，对所取得的第一手资料，进行加工整理，做出比较符合客观实际的区域含油气远景评价的结论。水文地球化学找油的野外调查过程，就是对调查区水文地球化学特征的认识研究过程，是获得第一手资料的主要手段，这是一项极为重要、艰苦而复杂的工作。它包括了与地下水有关的各种自然现象的观察和研究。

一、野外调查的基本内容

（一）地质与第四系地质研究

水文地球化学找油法是建立在地质调查的基础上的找矿方法，因此，必须对研究区的地质状况作深入细致的调查研究，要求查明区内地层的层序、厚度、岩性、分布、区域构造特征（包括新构造运动）及其对地下水的控制作用，查明第四系沉积物的成因类型、物质成分、厚度变化和岩相特征等。在基岩出露区，要查明地层产状、构造破碎程度、注意研究各组节理与裂隙的发育方向、成因、富水程度以及与盆地内（尤其是第四系）地下水径流的关系。

（二）水文地质研究

在地质与第四系地质调查的基础上，划分含水层或含水岩系，查明地下水的类型、成因、分布及埋藏条件。通过区域调查与研究，搞清地下水的运动方向，划分地下水的补给区、径流区、排泄区。对采样目的层的含水层岩性、埋藏深度及纵、横向上的变化规律、地下水的动态类型及水量、水位的周期性变化进行比较详细的调查研究。查明地形地貌、河流、湖泊与地下水的关系。

除上述外，要十分注意对地下水化学成分、物理性质与其变化规律，以及可能引起水质变化的各种因素的调查研究，如水中

有无气体逸出、有无漂浮的油花和特殊臭味，水中有无沉淀物、水温的变化以及其它水文地球化学现象等。

（三）地形地貌研究

在水文地球化学找油中，研究地形地貌的意义，主要有以下两个方面：

1．现代地形地貌的形成与分布，在一定程度上是新构造运动的产物，通过地貌形态的研究，探讨新、老构造运动之间关系，为认识区域构造特征（尤其是在第四系沉积物覆盖区）提供重要的依据。

2．地形地貌对浅层地下水水动力条件和水化学成分有一定的影响，要了解和认识地下水化学成分与地貌之间的关系，为建立水化学异常形态类型与成因模式创造条件。

地形地貌研究的主要内容有：地貌成因类型（包括河流、湖泊阶地）、地貌形态的分布规律与地形发展史、新构造运动的地貌形迹与特征。要查明与地形形成有关的近代地质作用的性质与发展。

（四）地下水露头的研究

地下水露头主要包括泉水、民用井水及钻孔水。

泉水是地下水天然露头的最可靠标志，它是判断调查区地下水赋存条件、含水层的层位、富水程度、地下水化学成分与油气藏关系的重要水文地质资料，应特别注意泉水中所含气体和有机组分的调查研究，它们往往是盆地内含油气性的直接反映。民用井水和钻孔水研究是了解第四系沉积物覆盖区地下水赋存和特点的主要手段。要注意调查井所处的地貌单元、地形特征、绝对高度、井深与水位埋藏深度、井的地质剖面（可访问）、含水层的地质时代、水的物理与化学性质、水量丰富程度、井壁结构、井的类型（完整或不完整的）、取水设备、井附近的卫生条件、可能污染源、井的主要用途（饮用与灌溉）和动态。为查明调查区地下水化学成分的变化规律及其与油气藏的关系，按一定密度采取水样。水井调查记录表（见表5-2）。

表 5-2　水井调查记录表

地区：　　组别：

编　号		位置				图幅	
地面标高		井口标高		井深（m）		静止水位（m）	
井壁结构		形状大小		打井年代		气温（℃）	
调查日期		天气		汲水设备		地层剖面	
含水层 岩性年代		涌水量（l/s）		水温（℃）			
含水层 埋藏深度（m）		水位降低（m）		臭			
含水层 厚　度（m）		单位涌水量（Q）		味			
含水层 复盖岩层		测量法		色			
含水层 下部岩层		恢复时间		透明度			
井水变化							
井水用途							
卫生环境							
地表水及其它水影响							
分析项目							

记录：　　课题负责人：

此外，对调查区内的地表水（河流、湖泊、水库等）也应进行调查研究，以了解地下水与地表水之间的关系，确定潜水径流参数，为认识当地的水文地质条件提供依据。

（五）与地下水作用有关的自然地质现象的研究

在水文地球化学找油中要研究沼泽化和盐渍化，因为它们的成因除与地下水流泄不畅和地下水埋藏较浅遭受强烈的蒸发有关外，还与地下油气向上微运移有关。调查时要查明沼泽化和盐渍化的分布范围、发育深度与程度、分布规律、盐渍化类型（碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型）及其与地质构造的关系。并取土样进行分析，土样中的某些组分本身就是寻找油气藏的标志。

（六）地表植被特征的研究

在一定的自然地理环境和地质条件下，往往有某些特殊的植物出现，或者某些植物出现变异现象。在水文地球化学找油中研究植被特征的原因是：植被能够反映地下水的某些特征，如植物的分布与潜水水位的埋藏深度有关、植物有依赖于地下水化学成分的现象等；其次是有些植物具有极其狭窄的生态分布，对环境条件要求很严格，它们只能存在于具有特殊条件的地区，这是利用植被作为指示油气藏指标的依据之一。在野外测量过程中，应进行生态观察，确定植物种属和分布，测试植物灰分中的微量元素。

（七）油气苗的调查研究

国内外许多油气藏是从地面油气苗入手进行勘探而找到的。油气苗调查在含油气盆地的早期远景评价中具有重要的地质意义，它是指示油气存在和聚集的直接指标。在水文地球化学找油中要注意访问当地居民，查阅历史资料（如县志等）。对油气苗要查明出露的地理位置，与当地基准面的相对高差、地质构造特征、油气苗的动态变化、可燃性、物理-化学性质。要研究油气苗出露的地质因素，即油气苗出露与地形有关还是与断裂构造有关；油气苗是随地下水外溢还是从岩石中渗出；是孤立的一个点还是在一定的沿伸方向上连续出现等。必要时可进行坑探。根据所观察的资料绘素描示意图。采取油（气）样及其周边的土样与水样。填写油气苗调查登记表（见表5-3）。

（八）环境污染的调查研究

由于人类活动的影响，在不同程度上破坏了地下水化学成分

表 5-3 油（气）苗调查记录表

地区：　　组别：

编　　号		图　幅	
位　　置		调查日期	
出露标高		天　气	
出露地形		地　质　剖　面	
岩性与时代			
顶、底岩层			
流出形态			
有无气体			
物理性质			
附近有无蚀变现象			
动态特征			

记录：　　课题负责人：

的平衡（即从补给区到排泄区的规律性变化），使地下水朝着水质恶化的方向发展。对水文地球化学找油来讲，调查环境污染、查明地下水的污染程度是非常重要的，因为有机物质等造成的地下水污染，干扰或影响了某些水文地球化学找油气指标的应用和可靠性，甚至会出现以假乱真的局面。因此在野外测量过程中，必须搞清地下水化学成分是否遭受污染，如有污染要查明主要污染源，包括生活污染源（主要指城镇生活污水和生活垃圾）、工业污染源（主要指工业污水、工业垃圾及工业废水）、农业的污染源（主要指灌溉回返水、农药、化肥及动物废物等）、自然环

境污染源（主要指大气降水对易溶地层的淋滤、其它水体的入侵等）。要研究各种污染物在含水层中的变化机制及迁移规律、影响或造成地下水污染的地质与水文地质条件、地下水的污染程度与范围。在污染较重的地区需建立水质监测网（站）。

二、测量点的布置原则与描述

由前述可知，水文地球化学找油法的调查内容是多方面的，为了获得足够的资料，进行野外测量时必须按照对不同比例尺的调查成果精度的要求，合理地布置测量点。测量点是集中观测地质与水文地质现象的窗口，其布置原则是：

（一）测量点要控制全区

水文地球化学找油应以面积测量为主（特别是在普查阶段和详查阶段），测量面积和范围要大于含油气盆地（凹陷）的边界，即应包括周边山区的地下水补给区，按照从区域入手，解剖局部构造的原则进行工作。众所周知，含油气盆地统一含水系统内的地下水，具有统一的流体循环系统和成生史，是不可分割的统一整体，其化学成分是地下水运动的随机变量，有其自身的变化规律。在区域调查中，必须采集大量样品进行分析测试，查清盆地内地下水化学成分全貌和变化规律，正确确定区域背景值，检出与油气有关的水化学异常。利用地下水化学成分预测含油气远景是很复杂的工作，它的复杂性在于很多自然因素互相交织在一起，这些因素又随着地质历史演变和盆地内地下水的循环过程多次地改变和重新组合。而水文地球化学异常的形成，正是这些自然因素综合作用的结果。要对异常作出正确评价，必须广泛研究和对比区域上不同自然地理和地质条件下所形成的异常特征。因此，必须从盆地的整体出发，研究地下水的来龙去脉，解剖各水动力场的水文地球化学特征，从运动、发展的观点探索异常形成的水文地球化学规律。

（二）采样点要均匀

油气扩散-对流迁移在浅层形成扩散晕时，强度一般较低，

油气信息比较微弱，为了能够在平面上准确地圈出水文地球化学异常的范围和边界，要求测量点网格力求均匀、规则，以保证获得正确而具有代表性的资料。采样点的均匀度，必须超过布点检验X^2的计算值[25]，即：

$$X^2=\frac{(O-E)^2}{E}$$

式中：O——小区的样品数；

E——实际样品数/小区样品数。

在均匀布点的前题下，测量点应尽量布置在最有地质意义的地方，如地层分界线、构造破碎带、地貌分界处、矿体(油气苗)露头处、阶地边缘、自然地质现象发育处及较容易获得水样的地方，以便观测到最多的地质现象和取得所需要的资料。在水样点不均匀的情况下，要适当布置浅钻等，人工揭露含水层。

对每个测量点都要进行详细的观察和认真的描述，观察和描述的范围不仅限于所定的某一个点，而要以所定的点为中心对其周围进行观察和描述，点与点之间要进行路线描述，以保证取得全面、可靠的第一手资料。应当指出的是，在第四系沉积物覆盖区，主要通过访问当地老乡和观察新挖的水井等途径，取得所需要的资料。

三、野外采样方法与要求

野外采样是水文地球化学找油工作的重要内容，采样质量的好坏直接影响着分析结果和地质成果。因此，应给予足够的重视。

(一) 选取统一采样层位

浅层地下水化学成分的随机性比较强，一方面它随着地下水的流向，从补给区到排泄区发生规律性的区域变化。另一方面受地形、地貌、气候、岩性、地表水渗入等诸因素的影响发生局部性变化。这些变化，在不同时代的含水层内沿着各自的演变方向进行着，同时地下水的循环系统不尽一致，影响地下水化学成分

的因素亦不相同，因此，时代不同的含水层，其化学成分有一定的差异和区别。水文地球化学找油是根据区域上相对比较而存在的异常进行含油气远景评价的，如果所取水样本身的可比性很差，势必给地质解释带来一定的困难，甚至使水文地球化学异常失真。因此，要求所取得的水样必须是区域上可以对比的同一流体系统内的地下水。这就是说，要选取同一地质时代的取样层位作为主要研究目的层，获得同一地球化学背景下的样品，使样品具有较高的代表性。

（二）缩短采样时间

前已述及，地下水化学成分、水位、水量等均随季节变化，为消除气候和季节诸因素的影响，应尽量缩短野外调查时间，选取当地最佳取样季节（一般在地下水的枯水期）集中采取样品，提高样品的可靠程度。如果调查区的面积较大，水文地球化学测量要跨年度进行，采取水样的季节必须前后一致。

（三）取样注意事项

1．在水文地球化学找油中，必须特别注意取样工作，因为由取样错误或取样方法不当而造成化学分析数据的差异是无法纠正的。因此取样工作应保证所取水样的化学成分与原井内的水化学成分一致。在开始工作之前，必须将水样瓶（磨口塞的硬质玻璃细口瓶、聚乙烯塑料瓶、盐水瓶）用5%的盐酸溶液洗涤，接着先用清水冲洗数次，然后用蒸馏水至少涮洗两遍，晾干。橡皮塞要先用5%的盐酸溶液煮两次，每次20—30min（每次都要用新的盐酸溶液），接着在5%的苏打溶液中煮5—10min，最好用蒸馏水冲刷干净，晾干后，用其将瓶封好，备用。

2．在取水样前，取样瓶与瓶塞至少用所取之水冲洗两遍。按分析项目的要求，分别取样。用于分析可溶气的水样需500ml，装入盐水瓶中（稍留一点空间），将瓶盖好后，倒置放于通风阴凉处；用于分析微量金属元素的水样，取样后立即往瓶中滴加盐酸（每升水中加入2ml盐酸），使其酸化；用于分析H_2S的水样需加醋酸镉溶液，使H_2S转换成cds沉淀；用于分析氢、氧等同位素

的水样（250ml）要在现场采取，密封盖好口；全分析水样需取2l。

取样时，如井口有取水设备（如压水机），可用瓶子直接灌取。如果用水桶取样，需要用橡皮虹吸管，将其一端放到水桶底部，另一端放入瓶底，使水从水桶流入瓶中，防止空气和其它杂质（砂子、杂草等）混入。

3．为防止水中有机物质发生化学变化，应在采样的现场进行萃取。萃取的分析项目有：苯及其同系物、酚及其同系物、环烷酸、紫外吸收光谱和荧光光谱等。

（1）苯用二硫化碳萃取，取水样100ml，置于125ml的分液漏斗中，加入化学纯NaCl及CS_2，振荡，静置待分层后，弃去水相，将CS_2溶液倒入玻璃试管中，密封保存，待分析。

（2）酚用氯仿萃取，取水样1000ml，置于1500ml的分液漏斗中，加氯仿后激烈摇动，静置待分层后，将有机相保存于棕色玻璃瓶中。密封保存，待分析。

（3）环烷酸用石油醚萃取，取水样1000ml，置于1500m的分液漏斗中，加甲基橙、硫酸和石油醚，激烈摇动，静置待分层后，将有机相保存于玻璃试管中，密封保存，待分析。

（4）紫外吸附光谱与荧光光谱用正己烷萃取取水样100ml，置于250ml的分液漏斗中，加正己烷，激烈摇动，静置待分层后，将有机相保存于玻璃试管中，密封保存，待分析。

所用萃取试剂，必须预先进行处理（蒸馏法和柱色层法），使之不含相应的组分。

近年来，对水中有机物质的萃取与富集开始运用大孔树脂106即派克（SEP-PAK）吸附水中的有机物质。

4．现场分析测试的项目有pH和Eh值等，一般用酸度计进行测试。

5．特殊分析项目样品，如各种模拟试验样品，要按不同分析方法的不同要求采取。

6．由于含油气盆地形成时间早晚不同，延续时间长短不一，

古湖盆所处的自然地理位置与环境又不尽相同，气候因素影响较大，因此，地质构造不同的含油气盆地，水文地球化学背景有极大差异。油田水对上部浅层地下水化学成分的影响，不是后者重复前者的组分，而是在后者中出现与周边地下水化学成分不同的变异或衍生物[26]。加强深层地下水水文地球化学特征的研究，寻求水化学成分在纵向上的联系，在水文地球化学找油中具有重要的意义。在有可能的前题下，要有控制、有计划地采取不同层位的深层地下水水样。

对有意义的地表水，也应适当采取。

7．要采取经抽水后地下水位恢复正常的、新鲜的、没有弄脏的及没有被雨水冲淡的水样。严禁采取经人为或其它自然因素污染过的水样，样品中不应有其它杂质和悬浮物。

8．填写水样标签，一张贴在样品瓶上，一张作存根。也可按测量点统一编号。要使样品瓶上的编号与记录卡片的编号、地形图上的测点编号相一致。

9．将测量点的位置、准确地标绘在地形底图上，并注明点号。

四、野外基地样品分析与处理

为保证分析质量，应在采样的当日，将样品送至在野外临时设置的分析基地。水中常量组分（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}）应尽快（在12—72h内）分析，如放置时间过长，会对分析结果产生影响。水中可溶气态烃应在24h内进行脱气，保存在盛有饱和盐水的瓶中。将萃取处理好待分析的样品，进行核对与检查，逐一登记、填写送样单（一式三份——一份放入样品箱中、一份送化验室、一份留作存根）当完全没有问题时，将样品包装入箱，及时送化验室进行分析测试（要先分析控制调查区剖面的样品）。

五、野外测量资料的整理工作

野外资料的整理工作，有两部分内容：

（一）当天野外测量资料的整理工作

地质人员对当天的野外观察资料需要及时地进行整理，内容包括：整理野外记录和样品交接单、测量点着墨（在地形图上），上述三者的编号、位置等的核对、整理各种素描图、随手剖面示意图和柱状图、试坑的示意剖面图等、特殊自然地理与地质现象的综合。将测量结果、工作量及存在的问题向课题负责人汇报。

各测量组准备第二天工作时所需要的用品和工具。

（二）野外资料的初步整理工作

在野外测量工作结束之前，要对全区的有关资料、调查结果和分析成果进行初步整理。主要内容有：

1．各种记录的整理：野外记录卡（表）按号码顺序排列装订成册、分析记录的检查和校对、送样清单的整理及其它表格的清查与整理。

2．各种图件的整理：将工区内的测量点、转绘在较大比例尺（比工作底图大一倍）的实际材料草图上。据已有的分析成果编制单指标的水化学平面图和区域水化学剖面图，结合野外观察所获得的地质-水文地质资料进行初步的研究、归纳及解释，粗略地绘出水化学变异的地区与异常。

3．填写并整理水分析综合表。

4．对收集到的前人资料与成果，进行初步整理、分类、建档，对取得的各种资料和分析成果进行登记。

5．讨论野外测量工作中存在的问题，提出解决和弥补的措施与办法。对工作进行总结，做好野外测量验收的准备工作。

六、异常检查

根据测量调查所获得的第一手实际资料和现有分析成果所发现的水化学异常，需要进行检查，有计划、有目的地进行重复取

样或者加密采样点，以进一步验证异常的可靠程度、稳定性及重现性。如发现异常不吻合，需进一步查明和分析原因。

第四节　样品分析测试

水文地球化学找油法是随着分析技术和测试手段的提高而逐渐发展起来的，在兴衰起落的曲折发展历史中，固然与多种原因有关，其中分析测试技术起着重要的作用。在该方法的创建初期，主要运用一般的化学分析方法，从所获得的分析数据中进行简单的对比，用其相对数值的高低圈定异常。在这种简单的分析手段下，只能在极少数的特定地区（油气扩散-对流迁移作用强的地区）见到找油效果。随着找寻油气藏工作的深入，找油气的难度越来越大，该方法的应用受到限制，在相当长的一段时间里处于不景气的衰落状态。60年代以后，特别是近十几年来，由于高灵敏度、高分辨率分析仪器的广泛应用，不仅可检测出浅层水化学成分中的微量或痕量油气组分，而且能够对混合物中某一单一化合物进行鉴别，从而提高了运用水文地球化学找油的成功率，在生产实践中取到了良好的勘探效果，使该方法进入了一个新的历史阶段。由此不难看出，水文地球化学方法的再度兴起在很大程度上依赖于现代的分析技术和测试手段。目前，把水文地球化学找油法与其它化探方法相配合用于区域测量，在我国的油气普查中发挥了重要作用。

水文地球化学找油法要求分析化验人员尽快地完成各项分析测试任务，并且一定要严格按照设计的分析和测试方法、操作规程及技术要求进行，以保证分析结果的质量。按照一定的管理程序及时将分析报告交付课题组。

一、分析方法

（一）容量分析法

溶量分析析法是将一种确知浓度的试剂滴加到被测物质的溶

液中，与被测物质起反应，滴加至反应进行到试剂的当量数恰好等于被测物质的当量数为止，然后根据试剂的浓度和用去的体积通过当量数相对的关系，计算出被测物质的量。

容量分析法，主要测定下列项目：

1．水的硬度测定：水的测定项目硬度主要是钙离子和镁离子，使用EDTA二钠盐试剂。即取25—100ml水样置于150ml锥形瓶中，加5ml缓冲液，加2滴指示剂，用标准EDTA滴至酒红色消失转变为蓝色即达到终点。按下式计算其含量：

$$\text{硬度（毫克当量/升）}=\frac{V\times N\times 1000}{V_1}$$

式中：V——滴定中消耗的EDTA溶液之毫升数；

N——EDTA的当量浓度；

V_1——测定时水样的毫升数。

2．钙离子测定：取水样25—100ml于锥形烧瓶中，加2N NaOH溶液9ml，放置3—5min，再加钙指示剂少许，用标准EDTA滴定至蓝色。其含量的计算公式同硬度。

3．碱度的测定：碱度是指水中含有能与强酸（盐酸、硫酸）相作用的所有物质的含量。水的碱度主要是由重碳酸盐、碳酸盐及氢氧化物硼酸盐、磷酸盐和硅酸盐决定的。

测定步骤：取25—100ml水样于125ml锥形烧瓶中，加3滴酚酞指示剂，如呈红色，用标准盐酸溶液滴至颜色消失，记下盐酸消耗量为P。在上述溶液中加3滴甲基橙指示剂，用标准盐酸溶液滴至呈橙色，记下以甲基橙为指示剂的盐酸消耗量为M。按下式计算其含量。

$$\text{总碱度（毫克当量/升）}=\frac{T\times N\times 1000}{V}$$

$$\text{酚酞碱度（毫克当量/升）}=\frac{P\times N\times 1000}{V}$$

$$\text{甲基橙碱度（毫克当量/升）}=\frac{M\times N\times 1000}{V}$$

式中：N——标准盐酸当量浓度；

V——测定时水样的毫升数；

T——滴定中消耗盐酸标准溶液总量（$T=P+M$）。

4．氯离子测定：取水样100ml（或更适量，使氯化物含量在10—80mg/l）于250ml锥形瓶中，加入1ml10%浓度的铬酸钾溶液，用标准$AgNO_3$溶液滴定，边滴边振荡，直至生成淡桔黄色而颜色永远不消退为止，记下用量，用下式计算其含量：

$$Cl^-\ (mg/l)=\frac{V_1\times T\times 1000}{V_2}$$

式中：T——与硝酸银1ml相当的Cl^-之毫克数；

V_1——所消耗的硝酸银溶液之毫升数；

V_2——测定时水样的毫升数。

5．硫酸根离子测定：取25ml水样于50ml锥形烧瓶中，加2—3滴1:1盐酸酸化样品，煮沸1—2min，然后加入适量的0.04N的钡镁混合溶液，再煮沸1—2min，冷却后加入5ml升缓冲液及数点络黑T指示剂，用标准EDTA溶液滴定到由红色变为纯蓝色。按下式计算其含量：

$$SO_4^{2-}\ (mg/l)=\frac{(B+C-A)\times T}{V}\times 100\%$$

式中：B——加入钡镁混合溶液消耗的EDTA毫升数；

C——测定水样中同体积硬度所消耗同浓度EDTA之毫升数；

A——最后滴定时所消耗EDTA之毫升数；

V——测定时水样的毫升数；

T——EDTA滴定度。

（二）原子吸收光谱法

原子吸收光谱分析法，一般用来分析测试水中微量元素（Li、Rb、Cs、Sr、Cu、Pb、Zn、Ni、Cd、Mn等）。它受干扰较小，灵敏度较高，有些元素的检测限达到ppb级，重现性好，测定元素泛围广，操作方便，分析速度快。由于这些优点，该方法在油

气化探测量中得到比较广泛地应用。

1．Cs、Rb、Li的测定：取5ml水样，加0.1ml硝酸铷溶液，与标准系列同时测定上述元素，按下式计算其含量：

$$M\ (\text{ppb}) = \frac{C}{V} \times 1000$$

式中：M——某金属元素；

C——在V毫升水中M的微克数；

V——测定时水样的毫升数。

2．Mn、Cu、Ni、Pb、Zn、Cd的测定：将水样过虑后，取100ml水样于烧杯中，加2—3滴HNO_3，加热浓缩至近干，然后加入少量去离子的水，移入到5ml柱塞刻度试管中进行测试，按上述公式计算其含量。

3．Sr的测定：取5ml水样于试管中，加1ml硝酸铷溶液进行测试，按上述公式计算其含量。

（三）比色法

比色法是吸取一定量的水样，加入化学试剂进行处理后，形成有色溶液，然后用目视比色法或光电比色法、分光光度法等比较溶液颜色的深浅来确定物质含量的分析方法。

比色法主要用来测定下列项目：

1．UO_2^{2-}测定：取50ml水样于100ml烧杯中，加10ml浓HNO_3溶液和10gNH_4NO_3，放置24h，然后倒入125ml分液漏斗中，加入10ml有机溶液（磷酸三丁酯与苯的混合液），猛烈摇动2min，待澄清分层后，弃去水相，如果Ca^{2+}、Mg^{2+}含量过高时，加EDTA溶液洗一次，随后用1%的NaF洗一次，再用蒸馏水洗一次，弃去水相，在分液漏斗中加5ml1%Na_2CO_3溶液，摇动1min，放置澄清。待分层后，将水相放入50ml瓷坩埚中，加4ml 2.5%NaF溶液，搅匀放在电热板上缓缓加热蒸干，用水搅成糊状，放在铂金丝上用喷灯烧成球珠，然后在365nm汞灯照射下与标准进行比较，按下述公式计算其含量：

$$UO_2^{2+}\ (\text{微克/升}) = \frac{T}{V} \times 100$$

式中：T——比色的微克数；

V——测定时水样的毫升数。

2．挥发性酚的测定：在野外现场取1000ml水样于1500ml分液漏斗中，加100ml氯仿，激烈摇动2min，放置澄清，将有机相保存于棕色瓶中。将有机相溶液转入150ml分液漏斗中，加30ml 2NNaOH，振荡1min，分层后将水相转入蒸馏烧瓶中。剩下的有机相用去离子水洗一次，合并到烧瓶中，加5ml1∶2H_2SO_4酸化，然后进行蒸馏，用50ml容量瓶接收。加1ml缓冲液和0.5ml4%的4-氨基安替吡啉，摇匀。用8%高铁氰化钾稀释至刻度（50ml），放置10min然后转入60ml分液漏斗中。加5ml氯仿萃取1min，澄清后，将有机相转入离心管中。在比色计上于460nm下测量其光密度。最后在标准曲线上求其含量：

$$\text{酚（微克/升）} = \frac{\text{测量的微升数}}{V} \times 1000$$

式中：V——测定时水样的毫升数。

（四）气相色谱法

气相色谱法具有选择性高。分离效率高、灵敏度高及分析速度快等优点，是分析水中有机组分的重要手段之一。近年来，微型电子计算机与气相色谱仪联用，可自动对分析结果进行数据处理，进一步提高了分析速度和分析结果的准确性，成为油气化探中不可缺少的分析方法。

在水化学找油中，利用气相色谱法主要分析可溶气态烃、苯及其同系物。甲烷稳定碳同位素分离等。

1．可溶气态烃的测定：将脱气的玻璃装置抽真空至负760毫米汞柱，取200ml水样于分液漏斗中，通过水浴锅加热，沸腾后，延续30min。脱出的气体经氢氧化钠吸收除去CO_2气体后，用注射器取出全部气体，用排水吸气法将气体保存在盛有饱和盐水的瓶中。取一定量脱出的气体，迅速注入色谱柱中，然后根据图谱

进行分析，据下列公式计算其含量：

$$\text{可溶气态烃}\ (\mu l/l) = \frac{Ai \cdot Ki \cdot M}{V_2} \times V_1$$

式中：Ai——某烃类气体组分流出色谱峰面积（Cm^2）；

Ki——相对光分子影响校正因子；

M——产生单位峰面积所需乙炔量（$\mu l/cm^2$）；

V_1——1升水的脱气量（μl）；

V_2——色谱分析进样量（μl）。

2．苯的测定：在现场，取水样100ml于150ml的分液漏斗中，加2—4g化学纯NaCl和2mlCS_2，振荡3min，静置。待分层后弃去水相，将CS_2溶液倒入柱塞玻璃试管中，并放入少许水封闭。取一定量的处理后样品测试。

（五）紫外吸收光谱与荧光光谱法

在水化学找油中，利用紫外吸收光谱和荧光光谱法测定水中芳烃及其相应的杂环化合物是八十年代的新技术。

1．紫外吸收光谱的测定方法：使用非吸性溶剂（正已烷、环已烷、石油醚等）进行萃取，静置分层后，弃去水相，有机相中少量水用无水硫酸钠消除，在仪器上从200nm—400nm进行扫描。

标准模拟：首先用不同标准进行扫描，确定所使用仪器对各物质的最低检出下限、灵敏度和特征吸收峰及其克分子吸收系数。

混合标样摸拟：用不同的标准混合、扫描，应用模糊因子分析确定各特征波段、各化合物的贡献值及相互关系。

样品图谱分类：根据图谱色峰波长和聚类分析结果进行分类，然后再据标准摸拟和混合标样摸拟来分析各种类型与油气组分的关系，提取特征的ΔA（ΔE）、λE值，确定异常。

2．荧光分析法：样品处理同紫外吸收光谱。建立标准档案和测试条件。

样品分析：抽取经紫外分析的不同类型样品，分别进行发射

谱、吸收谱分析，求出最佳$\Delta\lambda$进行同步扫描，分析该区特征荧光物质，然后用这物质最佳激发谱进行扫描。

图谱分析、分类其方法同紫外吸收法，然后求出各特征荧光峰的强度值成图。

（六）其它方法

测定水中同位素应用质谱法。目前正利用高效热相色谱法探讨新的找油气指标。

二、分析误差及计算结果表示方法

（一）分析数据记录

为了取得准确的分析结果，需要正确记录分析数据。在分析中将实际测得的数字称为有效数字，有效数字中除保留的最后一位外，其它数字都应是准确的，亦就是说，最后一位数是估计出来的。因此，在分析中要严格按分析结果进行记录。

（二）准确度与精密度

在定量分析中，除测定水样中某组分的含量外，还要判断分析结果是否准确可靠，通常用准确度和精密度表示之。

1．准确度：是对分析方法误差的度量，指测得值与真实值之间的符合程度。常用误差的大小表示，误差愈小，表示分析结果准确度愈高。误差的大小可用绝对误差和相对误差两种方法来表示。

绝对误差＝测得值－真实值（或平均值）

$$\text{相对误差}=\frac{\text{绝对误差}}{\text{真实值}}\times 100\%$$

绝对误差和相对误差都有正负之分。

2．精密度：是对分析方法重现性的测量，指重复测定结果彼此相符合的程度。精密度多用标准偏差表示，偏差愈小，精密度愈高。

$$\text{标准偏差}\ S=\sqrt{\frac{\sum\ (X_i-\bar{X})^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{\sum d^2}{n-1}}$$

表 5-4 各指标分析方法与误差一览表

分析项目		分析方法	灵敏度 (ppb)	允许误差
常量组分	K^+ Na^+	直接喷雾、原子吸收法	10	
	Cl^- SO_4^{2-} HCO_3^- CO_3^{2-} Ca^{2+} Mg^{2+}	直接取样容量法		绝对误差(meg/1) 含量1—10(±2) 含量10—50(±3) 含量50—100(±5) 含量100—500(±10) 有效数值三位
微量组分	Cu Ni Li Mn	富集法，原子吸收光谱法或等离子色谱法	1 2 10 1	相对误差 0—2ppb，20% 2—5ppb，15% >5ppb，10%
有机组分	可溶气态烃	真空热脱气，气相色谱法	0.01μl	±30%
	苯系物	萃取法，气相色谱法	1	30%
	酚	萃取法，比色法	0.1	绝对误差(ppb) 0—0.2ppb(±0.1) 0.2—1ppb(±0.2) 1—10ppb(±0.2)
	紫外吸收光谱	萃取法，紫外吸收光谱	0.001吸光度	15%（吸光度）
	荧光光谱	萃取法，分子诱导荧光法	蒽(10^{-9}g)	15%（发射强度）
碳同位素		脱气、分离、质谱分析		

式中：n——重复测定次数；

Xi——每次测定结果；

X——n次测定结果平均值；

d——算术平均偏差。

（三）误差产生的原因

分析误差是客观存在的，根据它的性质可分为系统误差和偶然误差两类：

1．系统误差：亦称可测误差。它是分析过程中的某些经常原因造成的，能设法减小到可忽略的程度，如：

（1）仪器误差：因使用的仪器本身不够精密引起的误差。

（2）方法误差：是因分析方法本身造成的误差，如前述的滴定误差等。

（3）试剂误差：因试剂不纯或蒸馏水中含有杂质等因素引起的误差。

（4）操作误差：由于分析者掌握操作条件与操作规程稍有出入而造成的误差。

2．偶然误差：又称未定误差，是由不固定的原因引起的，它的大小和正负是可变的。一般通过多次测定，取其平均值，可使正负偶然误差相互抵消，平均值就会接近真实值。

在分析测试过程中，一方面要进行多次测定，以消除偶然误差，提高精密度，另一方面通过做空白试、校正仪器等措施，尽量消除系统误差，就可得到较好的准确度。

水文地球化学找油法各指标的分析方法与误差要求，如表5-4所示。

三、模拟试验研究❶

在水文地球化学找油中所进行的模拟实验，一般是在野外调查和综合研究的基础上，对研究区内水文地球化学特征、变化规

❶ 参加模拟试验的有伍大俊、陈炳、张金来、王永芝等同志。

律及各种水文地球化学作用等方面有了一定程度的认识之后进行的。其目的是为了探索和研究地下水化学成分的形成，与油气有关的各种水文地球化学形迹的产生，以及为了判定各种水文地球化学作用的进行方向与速度等。通过模拟试验，可以验证野外调查的结果，为根据实测资料引出正确结论提供旁证材料。

例如，在自然条件下，区域水化学成分变异程度和演变方向的模拟研究，一般采用补给源地下水经自然蒸发浓缩的方法进行。图5-1是利用内陆湖泊水，来模拟陆相油田水化学成分的发育和演变过程的图件。从图中可以看出：油田水化学成分在演变过程中趋于富集的离子，均着落于蒸发曲线的左方，趋于分散的离子，均着落于蒸发曲线的右方。由于不同的油田水中的离子分布在浓缩曲线的不同方位，因此，在进行水文地球化学找油测量

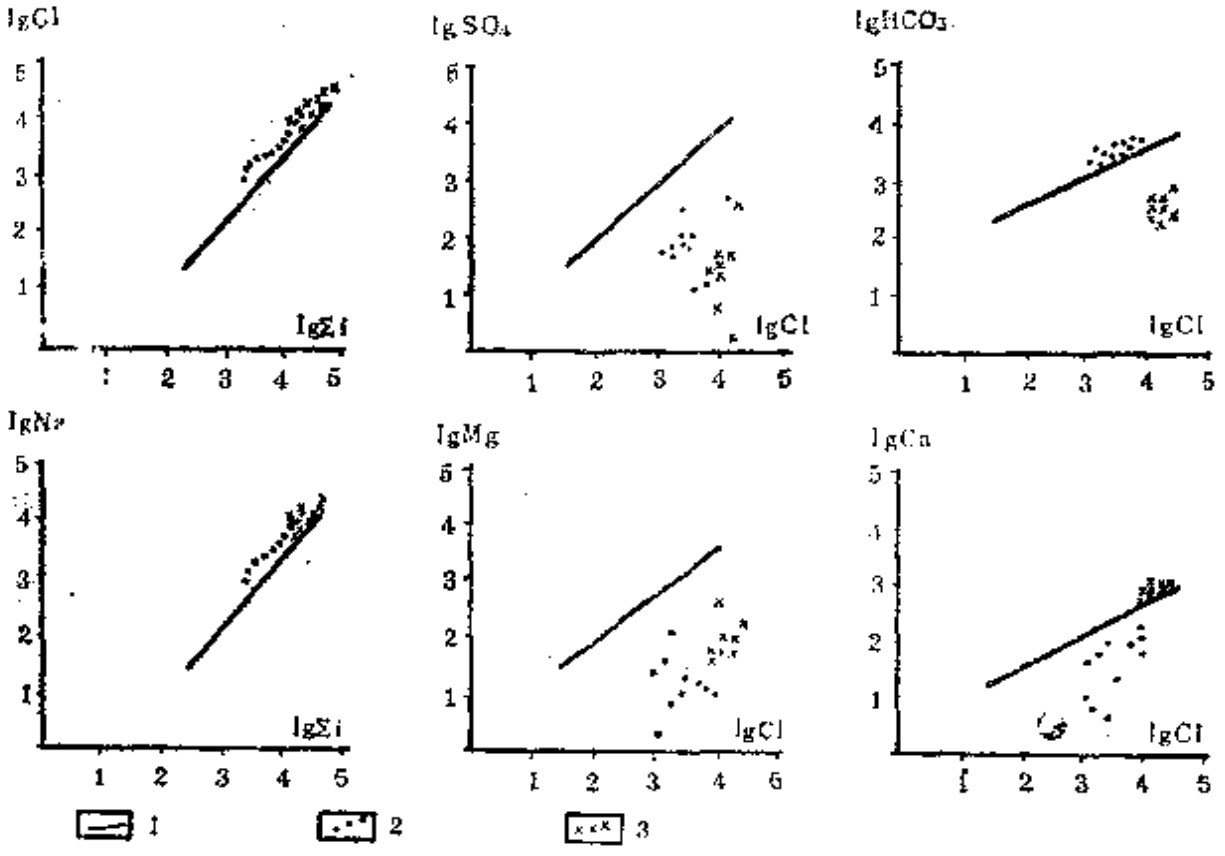


图 5-1　不同类型油田水与室内蒸发曲线比较图

（据张金来资料，1980）

1—室内蒸发曲线；2—$Cl \cdot HCO_3$-Na型水；3—Cl-Na·Ca型水

时，利用测区内地表水或补给源的地下水进行蒸发浓缩，能为水化学找油指标的选择和地下水化学成分形成特点研究提供依据。

模拟地下水相互作用时，常用不同类型水进行混合试验。图5-2说明：低烃类$Cl\cdot HCO_3$–Na型油田水与淡水按比例进行混合达到1:16时，水化学类型开始发生变化；达到1:64时，水化学性质完全改变。通过混合试验可以掌握本区不同类型水化学成分在纵向上的变化规律及其形成过程，获得圈定水化学异常所需要的参考资料。

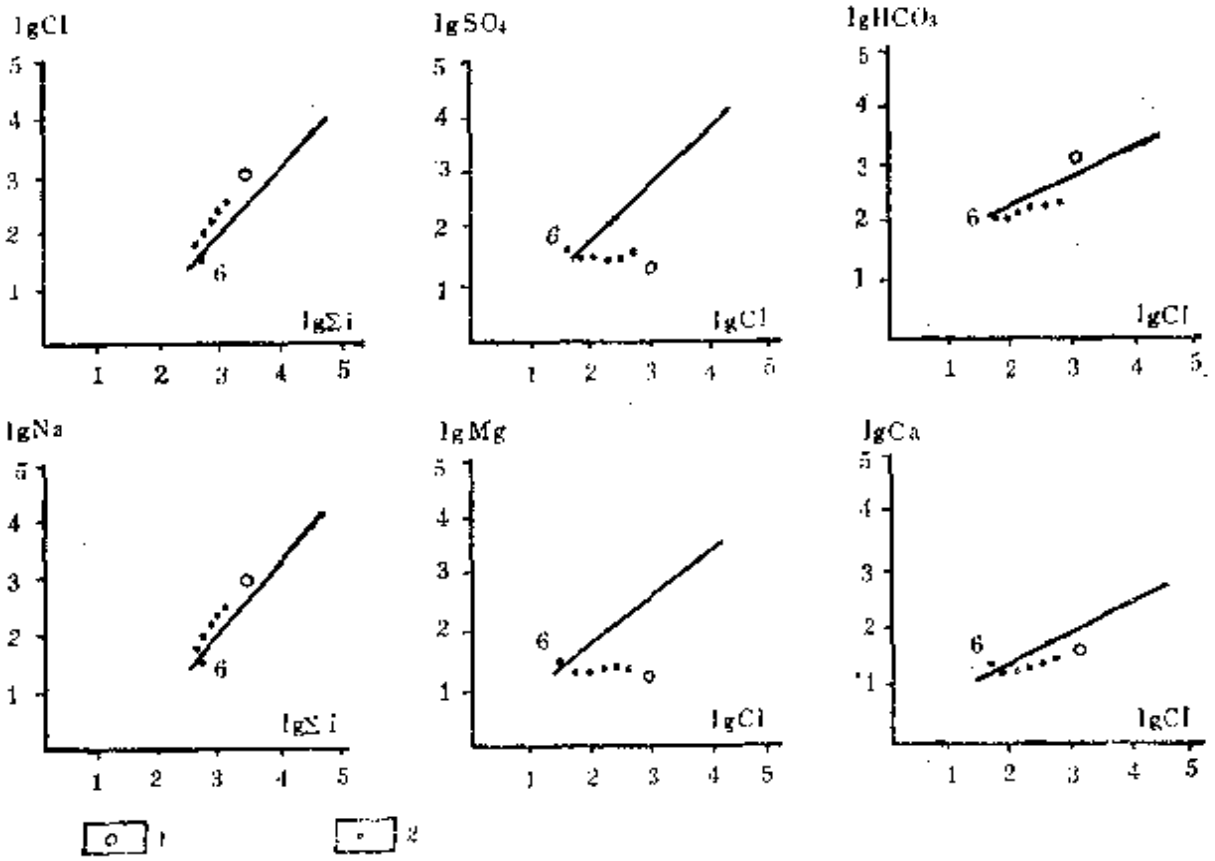


图 5-2　混合实验与室内蒸发曲线比较图

（据张金来资料，1980）

1—油田水；2—混合实验样。6号点油田水与淡水混合的比例为1:64

模拟研究水与岩石（油气）相互作用时应用浸泡或浸泡-抽提法。通常的做法是利用测区内研究目的层的地下水，在不同温度、压力下浸泡原油、生油岩和非生油岩，分析测试浸泡液中某

些组分的变化规律（表5-5）。这对于阐明区内水化学成分的形成和某些组分的富集、消失特征无疑是有益的。根据模拟实验正确地选择和应用水化学找油指标是常用的辅助方法。

表 5-5 浸泡原油试验

浸泡试验条件		离子含量（meq/l）							有机组分（ppm）	
		$K^+ + Na^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	酚	苯
浸泡液	1	0.38	0.34	1.28	0.19	0.11	1.70		微	未检出
	2	1261.54	10.60	0.52	808.25	136.80	56.20	274.41	〃	〃
1号浸泡液	20℃	0.66	0.48	1.24	0.19	0.32	1.87		0.005	0.059
	50℃	0.69	0.56	1.36	0.19	0.36	1.96		0.006	0.140
	100℃	0.62	0.00	1.72	0.19	0.28	1.87		0.009	0.145
2号浸泡液	20℃	1277.77	11.24	0.56	808.25	133.44	88.74	259.14	0.005	0.059
	50℃	1259.36	11.32	2.40	812.15	135.04	66.75	259.14	0.010	0.059
	100℃	1264.45	8.64	0.44	812.15	138.24	83.34	239.90	0.012	0.120

模拟烃类气体对水中某些离子的影响时，可在密封的容器内通进CH_4等烃类气体，观察和测试水中Ca^{2+}、Mg^{2+}、及HCO_3^-等的变化特征。从而为在碳酸钙、镁类型水发育的地区寻找与油气有关的水文地球化学形迹（钙、镁络合物、ΔC）提供依据。

此外，还可以模拟地壳深部地下水，即深成水对油田水化学成分演变和水文地球化学场的影响；也可做有机物质化学作用和微生物化学作用方面的模拟实验。

四、建立水化学试验场

（一）水化学试验场的任务

建立水化学试验场的目的，主要在于研究水文地球化学异常的变化规律，以便在生产实践上获得最佳化探效果，其任务是：

1．观测异常的稳定性、重现性和可靠程度；

2．选取可信度较高的水文地球化学找油气指标；

3．探讨异常的偏移规律（方向、距离等）；

4．研究异常的形成机制以及化探中遇到的问题。

水化学试验场应选择在石油地质和水文地质条件研究程度较高、利于油气扩散运移的构造部位，以及油气藏埋藏深度适中的油田上。

（二）水化学试验场的地质背景

以济阳拗陷临盘油田试验场为例，该试验场建立于1965年，位于临邑背斜带上，这个背斜由新生代地层组成，走向基本上为北东东向。它是在前新生代基底隆起的基础上发展起来的，其上断裂构造极为发育，主断层走向与背斜轴向一致，长达76km之多，断面向南倾，倾角45°—60°，该断层在老第三系沙河街组沉积早期即已存在，到第三纪晚期，活动强烈，断距达1000m，控制了背斜带上局部构造的发育和展布。主断层两侧断裂系统复杂，断层繁多，主要有平行主断层走向与斜交主断层的北东、北西向断层等，它们是与主断层伴生的一系列羽状排列的断层。区内新生代内陆湖相沉积极为发育，厚达数千米。第四系是一套在氧化条件下形成的河流-浅湖相沉积，岩性与厚度较为稳定。第三系为砂泥岩互层，其厚度由于受断裂的控制各地不一，岩性横向变化甚大。含油层系多，从新第三系的明化镇组到老第三系的沙河街组油气显示普遍，均获工业油流，含油层分布井段长达数百米至千余米。储油类型以砂岩孔隙储油为主，灰岩中赋存有工业油流。由于受断裂长期活动的控制，形成以断层圈闭和构造圈闭为主的油藏。含油面积小，主油层均可自喷。油水关系复杂，断块间没有统一的油水边界，地下水矿化度变化很大，油气水在纵向上有明显的水力联系。

区内地形平坦，地貌条件比较单一，属堆积平原，总的是由西南向东北微倾，标高15—20m。潜水含水层埋深3—8m，地下水流向与地形倾斜方向一致。第四系承压水可自喷。

（三）试验场内水文地球化学异常特征

通过水文地球化学测量，发现与油气有关的综合异常带，具有以下特征和规律：

1．水文地球化学综合异常带在空间展布上大致呈北东东向，与控制本区油气分布的主断裂有明显的依赖关系，绝大多数单指标的异常点集中分布在断裂带上。

2．水文地球化学综合异常带构成一定的分布面积，异常点分布虽然不均匀，但点与点之间可以连成一片，构成一定的分布面积。

3．水文地球化学异常有一定的强度和衬度，主要指标的绝对含量较高，异常值与背景值的差异幅度比较大，异常值一般比背景值高出3—5倍，最高达8—10倍。

4．综合异常带内水化学指标的吻合程度较高，主要水化学指标在单个异常点上的显示比较齐全。

（四）试验场内异常的稳定性

在试验场内曾进行了多年的重复采样、不同季节采样、简易抽水、水动力观测与试验、土壤盐分析以及采取油田水和承压水样等。综合这些实验成果和资料，可以看出：

1．水化学异常是比较稳定的。经过数年的观测和采样分析，水化学异常的范围和面积基本一致。单个异常点的水化学成分相差无几（表5-6），说明异常的稳定性较高。

2．水化学异常在同一年份的不同季节，其异常值的波动幅度不大，虽然枯水期异常值略有升高、丰水期异常值略有下降，但幅度只有6—15%（枯水期异常值—丰水期异常值/异常平均值）。抽水前后，水化学异常值无明显变化（表5-7）。

3．水化学异常带内，地下水化学成分在纵向上有一定的相似性，显示了某些共同的水文地球化学特征，如不同时代含水岩系的化学成分均呈现了相同的离子组合$Cl-HCO_3-Na$，矿化度相对较高。

4．随着石油勘探开发，水化学异常的范围和略有扩大，且

表 5-6 不同年份同一井水化学成分对比表

井号	年份	离子含量 (meq/l)						矿化度 (meq/l)
		$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	
99	1965	16.52	5.76	13.40	17.20	6.98	11.50	71.36
	1970	19.74	4.86	15.33	19.64	8.61	11.89	79.86
	1971	13.09	7.98	13.91	14.79	7.41	12.78	69.96
	1972	12.22	6.48	13.01	15.53	4.24	12.00	63.44
41	1965	10.53	10.12	23.10	25.34	7.86	10.55	87.50
	1970	11.41	11.29	24.58	25.74	8.11	11.63	94.56
	1971	11.75	11.92	20.75	23.06	8.09	12.64	87.58
	1972	9.92	11.32	20.35	24.30	4.32	12.97	87.18
2	1965	6.00	22.45	42.16	50.28	7.38	12.95	
	1970	6.11	23.13	40.26	46.80	8.94	13.76	139.00
	1971	7.07	24.20	44.65	52.24	9.16	14.52	151.84
	1972	5.71	24.34	42.34	52.99	6.99	12.41	144.78
7	1965	13.15	12.09	28.96	30.51	10.00	13.69	108.40
	1970	11.42	14.88	29.62	32.26	9.15	14.51	118.34
	1971	14.75	15.93	32.00	40.58	7.10	15.60	125.36
	1972	12.28	13.96	30.44	38.98	5.14	12.54	113.36

表 5-7 抽水前后水分析成果

井号	抽水	离子含量 (meq/l)						矿化度 (meq/l)	阴离子顺序
		$K^+ + Na^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-		
12	前	4.76	5.27	5.16	4.00	2.29	9.90	32.38	HCO_3—Cl—SO_4
	后	5.86	5.91	5.41	4.00	3.42	9.76	34.36	HCO_3—Cl—SO_4
15	前	4.72	55.78	18.24	60.13	3.32	15.23	157.38	Cl—HCO_3—SO_4
	后	3.98	56.14	18.33	59.49	3.42	15.54	156.90	Cl—HCO_3—SO_4
41	前	5.47	21.41	10.91	21.07	3.92	12.80	87.58	Cl—HCO_3—SO_4
	后	6.25	21.53	10.75	21.56	4.12	12.86	87.50	Cl—HCO_3—SO_4

异常值略升高。在异常内的水井中注入淡水，在比较短的时间内，异常即可恢复。

此外，在地下水的丰水期，异常有略向地下水径流方向偏移的现象。

第五节　资料整理研究

水文地球化学找油是在地质分析基础上，运用地球化学的理论与方法，评价区域的含油气远景，指出油气聚集的有利地带（段）。在研究区域水文地球化学特征，揭示水文地球化学现象实质的过程中，必须注意水介质环境的研究，必须注意区域自然地理与地质发展史、水文地质变迁史及地下水运动史等各种历史过程综合作用的研究。不仅要从直觉感知出发，而且要从理性上进行逻辑推理和判断；不仅要研究现代水文地球化学景观，而且要恢复和再造不同地质历史发展阶段中的水文地球化学环境的变化和特点。因此，必须设计和选择一个切合实际的研究方案和正确的技术思路。水文地球化学找油研究的研究步骤如图5-3所示。

一、区域地质方面的研究

区域地质研究着重于区域地质构造特点、生油岩地球化学特征、古水文地质条件及表生地球化学背景诸方面的研究。其研究方法与地质学、地球化学和水文地质学的方法基本一致，故不再赘述。

应当指出，上述方面的研究是为解释水文地球化学找油成果提供基础资料，因此研究的重点是总结规律，指出形成异常的有利地区和地质依据，而不是从地质构造诸方面进行含油气远景评价。就这一意义而言，水文地球化学找油中的区域地质研究，同石油地质调查中的地质构造研究、地球化学中的生油岩研究、水文地质测绘中的古水文地质条件的研究等方面有一定的区别。

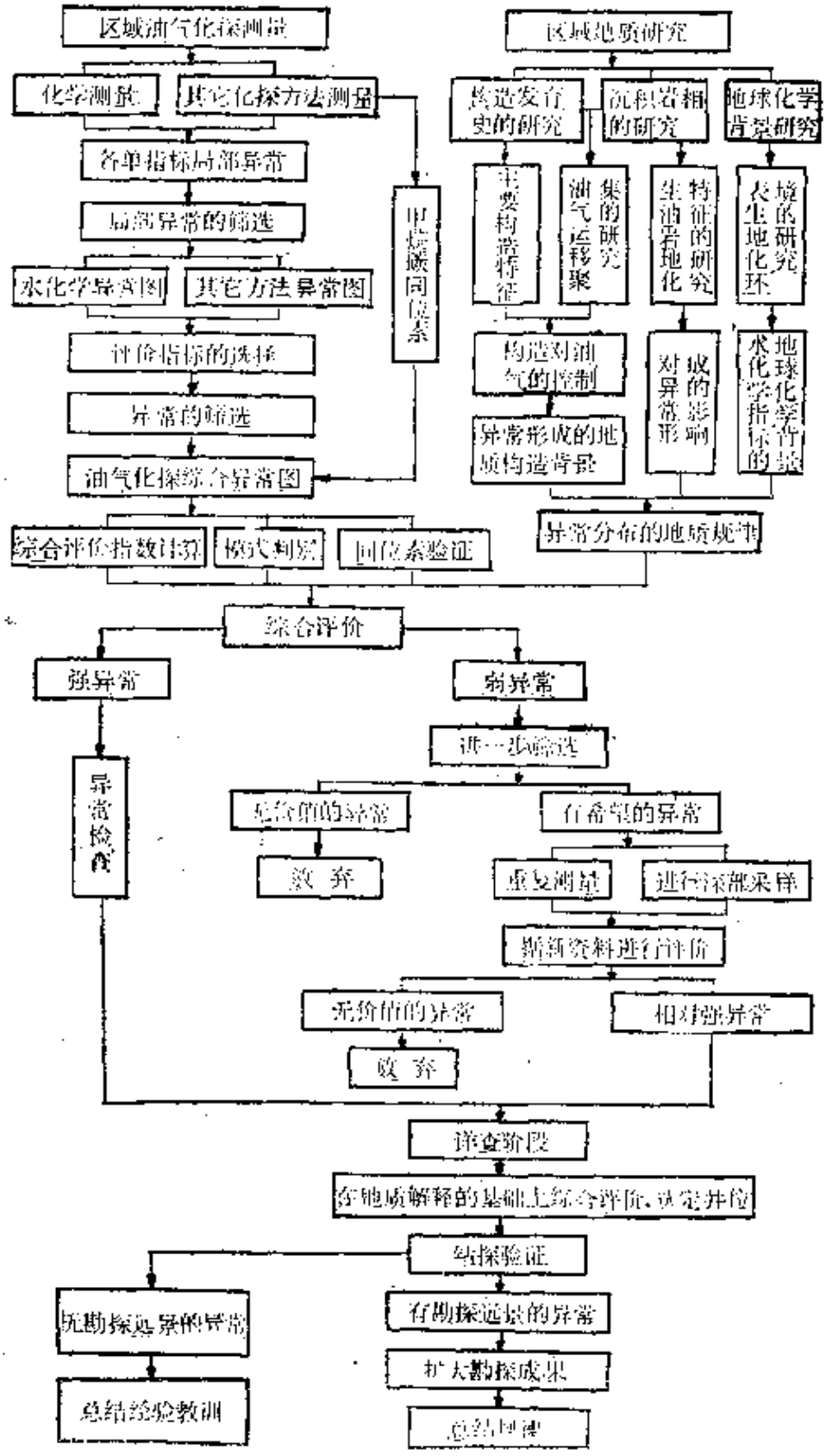


图 5-3　水文地球化学找油基本研究步骤

二、数据电算处理的优化系统

对水文地球化学调查取得的大量资料和分析数据，充分地加以整理研究之后，选择恰当的数理统计方法和电子计算机处理程序进行统计处理，借以提高水文地球化学异常解释的可靠性。现代电子计算机技术，将为浩瀚的分析测试数据，提供先进的、科学的资料管理、统计处理及解释方法，是水文地球化学找油法走向科学化、系统化、规范化的重要环节。水化学成分中所包含的油气信息隐藏在大量的分析数据之中，因此，通过电子计算技术挖掘有用信息是资料整理研究阶段的一个重要方法。作者在实践中提出如图 5－4 所示的电算优化系统。

数据电算处理方法的作用和意义，概述如下：

（一）分析数据的标准化

对各指标进行概率统计，力求在均值趋向于零，方差趋向于 1 的前题下，进行多元统计分析，通过偏度和峰度检验，确认分析数据是否服从正态分布（对数正态和算术正态），了解分析数据的分布特征与可利用的程度，求出各指标在同一母体内的均值、标准偏差及异常下限值。

（二）筛选指标和指标组合

利用因子分析、R 型聚类分析、典型相关分析等方法，排列各指标在决定异常中所起的作用和顺序及指标间的组合关系。

1．聚类分析：此种分析方法根据水化学指标和样品的分析数据，对数字分类的一种常用的统计方法，主要用于研究各指标之间的相互关系、组合类型及其与油气的内在联系，区分不同样品和异常类型。其具体过程是：计算各指标观测值之间的相似和相关程度，据此将参于运算的各个指标进行多次分类，直到把所有样品都归类完毕，形成一个由小到大的分类系统，最后用聚类分析谱系图，表示指标（样品）间的亲疏关系，提供分类的初步结果（图5-5）。

2．因子分析：是研究多变量之间相关关系的一种统计方法，

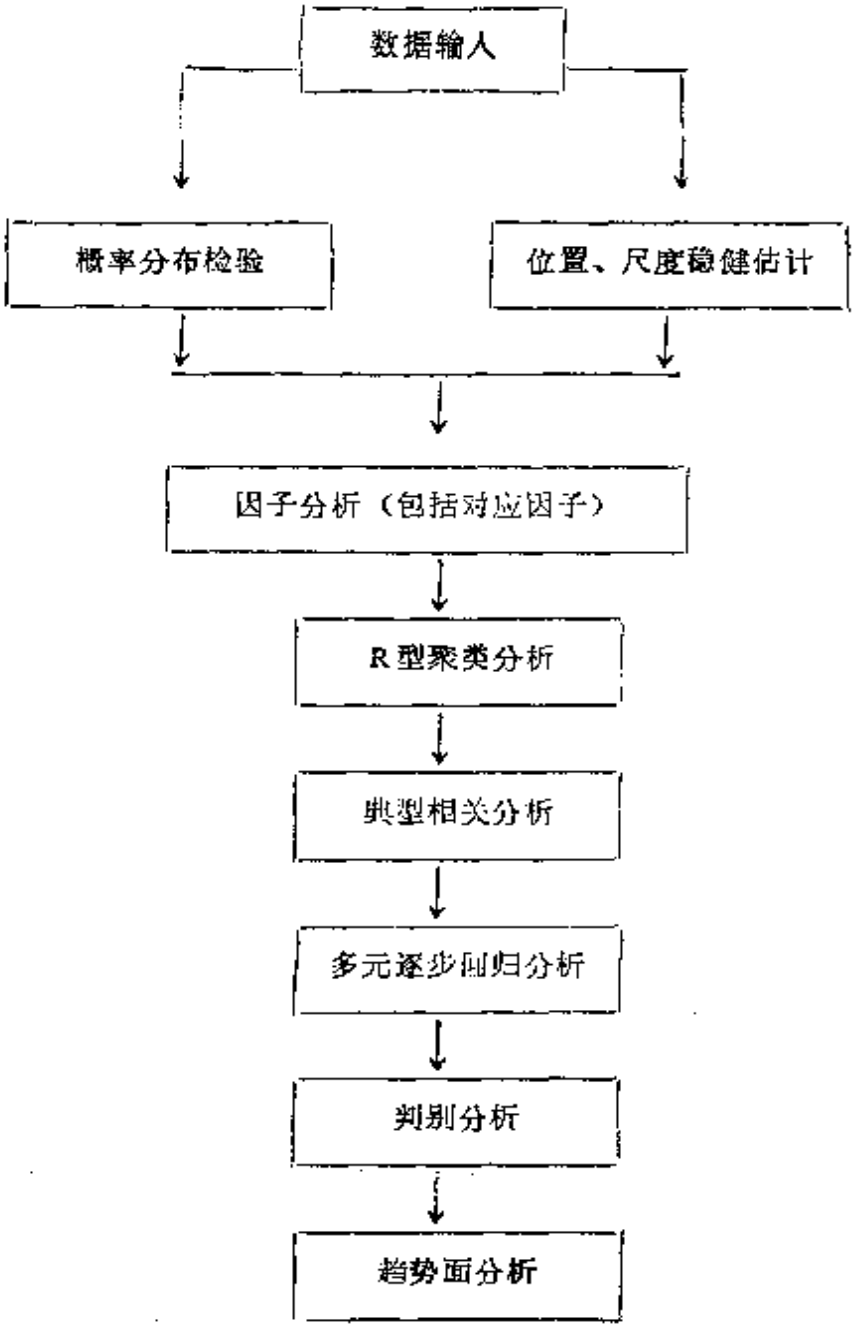


图 5-4　数据电算处理方法与流程

其主要作用为：

（1）对水文地球化学测量中具有复杂关系的样品，通过研究它们相关矩阵（或方差矩阵）的内部结构，找出若干个对这组样品起支配作用的独立的新因子（Q型分析），用这些独立的新因子，来表达所有变量及其提供的信息，在极少损失原始信息的前提下，简化观察系统，起到浓缩信息的作用，抓住主要矛盾，为

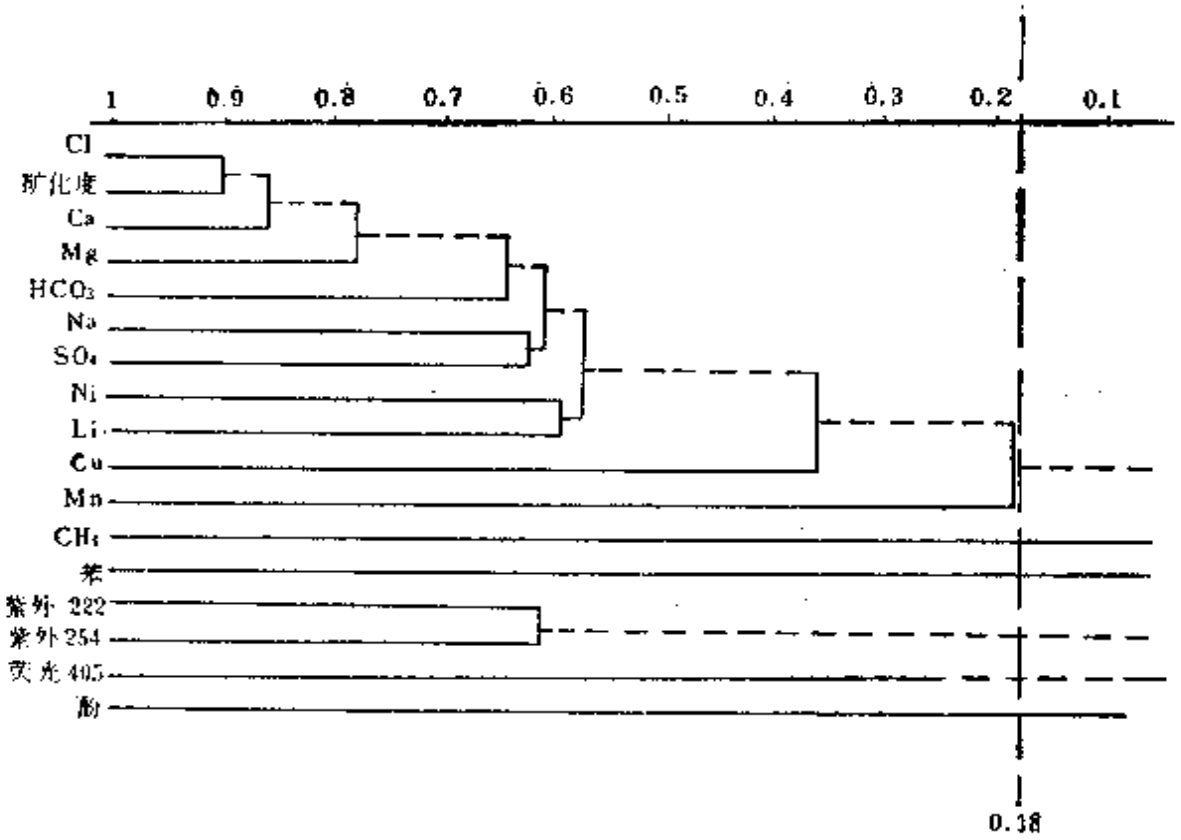


图 5-5　R型聚类分析谱系图

研究样品的系统分类和成因分类创造条件。

（2）前已述及，水文地球化学找油中应用较多的指标，它们之间有一定的相互关系，通过因子分析（R型分析）把众多的指标综合为少数几个指标。这少数几个指标，既能最大限度地反映出原来多个指标的信息，又是互相独立的，从而压缩了变量。由于因子分析可以把变量分成共同因子和单一因子两个部分，提供变量的因子载荷，所以可以定量地排列各指标在决定异常中所起的作用、顺序及其相应的组合，有利于地质解释。

3．对应分析：综合了R型和Q型因子分析的优点，使二者获得对立的统一，将样本和变量表示在同一因子平面上，有利于地质解释和推断，可以阐明变量的成因联系和样本的种类属性。

4．计算举例

以某地区水文地球化学测量的691个样品，17个指标的分析数据为例，说明利用电子计算机筛选指标和指标组合的具体运

表 5-8 相关分析（常量组分）（n = 691）

	$K^+ + Na^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	矿化度
$K^+ + Na^+$	1	0.475	0.327	0.538	0.539	0.598	0.676
Mg^{2+}		1	0.611	0.774	0.644	0.588	0.821
Ca^{2+}			1	0.851	0.412	0.549	0.820
Cl^-				1	0.498	0.491	0.898
SO_4^{2-}					1	0.307	0.646
HCO_3^-						1	0.707
矿化度							1

表 5-9 相关分析（微量组分）（n = 691）

	Li	Ni	Mn	Cu	矿 化 度
Li	1	0.335	0.055	0.175	0.531
Ni		1	0.215	0.309	0.564
Mn			1	0.134	0.318
Cu				1	0.323
矿 化 度					1

表 5-10 相关分析（有机组分）（n = 691）

	CH_4	苯	酚	荧 光 405nm	紫 外 222nm	紫 外 254—258nm
CH_4	1	—0.0194	—0.0169	—0.0130	—0.0168	—0.0113
苯		1	—0.0218	0.0300	—0.0183	—0.0369
酚			1	—0.0028	0.0781	0.0331
荧光405nm				1	0.2410	0.1130
紫外222nm					1	0.5830
紫外254—258nm						1

用。

从表5-8、9、10中可以看出：

（1）常量组分（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、

HCO_3^-、矿化度）之间具有明显的相关关系，决定水化学性质的主要离子是Cl^-、HCO_3^-、Mg^{2+}及Ca^{2+}；

（2）微量组分之间的相关性，虽然较常量组分之间的相关性差些，但也显示了一定的内在联系。它们与矿化度的相关关系，说明水化学性质影响着微量元素的赋存条件。因此，将微量元素与常量组分视为同一类指标；

（3）有机组分中，除紫外吸收光谱222nm和254—258nm以外，各组分之间互不相关，说明它们的地球化学性质和行为不同，因此，将它们视为各自独立的一类指标。

因子分析选取9个因子，即可包含17个指标全部信息的82.72%，方差极大旋转和斜交旋转后，九个因子轴上的载荷贡献与初始因子解基本相似。

根据表5-11可知，常量组分在第一因子轴获得最大载荷，微量组分主要在第一因子轴（除Mn在第三因子轴、Cu在第九因子轴获得一定的载荷）获得较大的贡献值，与常量组分一起反映了32.93%的信息，该因子轴的物理意义是比较集中地反映了本区水文地球化学背景的一般特征—渗入、径流型的元素迁移带。也就是说，常量和微量组分是统一地球化学场的产物，在油气水文地球化学普查勘探中所起的作用基本上是一致的。紫外222nm和紫外254—258nm在第二因子轴获得最大载荷，反映了9.99%的信息。可溶气态烃在第四因子轴获得最大的载荷，反映了6.24%的信息。荧光405nm在第七因子轴获得最大载荷，反映了5.35%的信息。苯在第六因子轴获得最大载荷，反映了5.47%的信息。酚在第六因子轴获得最大载荷，反映了5.82%的信息。这些有机指标各具独立的地球化学特性，多角度、多方面、多层次地反映了该区的地球化学的变异特性及其它们与油气的内在联系（可按最大载荷贡献大小来衡量）。

在不同的含油气盆地内，各个指标所提供的油气信息的可信度是不一样的，而且它们在确定和评价异常性质中所起的作用（贡献）大小不一。如在松辽盆地南部确定的水化学异常的众多

表 5-11 水化学指标的因子分析（初始因子）

因子轴	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	公因子方差
$K^+ + Na^+$	0.680	0.076	—0.319	—0.101	0.087	—0.092	—0.188	—0.201	—0.044	0.6739
Mg^{2+}	0.858	0.015	—0.061	0.004	0.048	—0.029	—0.021	—0.087	—0.063	0.7552
Ca^{2+}	0.825	—0.027	0.157	—0.069	—0.069	0.024	0.120	0.233	—0.071	0.7853
Cl^-	0.904	0.003	0.055	—0.070	—0.045	0.027	0.037	0.100	—0.050	0.8420
SO_4^{2-}	0.658	—0.010	—0.251	0.062	0.099	0.034	—0.155	—0.450	—0.313	0.8358
HCO_3^-	0.716	0.062	—0.126	0.112	0.085	—0.156	—0.001	0.155	0.162	0.6263
矿化度	0.967	0.020	—0.064	0.009	0.016	—0.022	—0.018	0.002	—0.064	0.9439
Li	0.617	0.025	—0.098	—0.099	0.005	0.041	0.010	0.499	0.175	0.6822
Ni	0.658	—0.093	0.361	—0.033	—0.130	0.014	0.011	0.006	—0.041	0.5926
Mn	0.181	—0.046	0.583	0.291	—0.025	0.502	0.180	—0.017	—0.336	0.8578
Cu	0.402	0.071	0.382	—0.242	0.016	0.080	0.152	—0.463	0.602	0.9782
CH_4	0.010	—0.050	0.129	0.775	0.501	—0.163	0.080	0.034	0.211	0.9495
苯	0.023	—0.027	—0.601	0.103	0.022	0.711	0.199	0.006	0.207	0.9617
酚	—0.080	0.140	0.063	—0.493	0.804	0.630	0.181	0.056	—0.171	0.9917
荧光405	0.023	0.456	—0.192	0.076	—0.198	—0.274	0.767	—0.090	—0.133	0.9795
紫外222	—0.045	0.875	0.048	0.042	—0.005	0.595	—0.102	0.031	—0.014	0.7868
紫外254—258	—0.428	0.821	0.120	0.065	—0.026	0.135	—0.318	0.045	0.048	0.8195
累计特征值(%)	32.93	42.92	50.43	56.67	62.49	67.96	73.31	78.12	82.72	

指标中，经降维、筛选，主要指标（常量和微量组分除外）的贡献大小依次是苯及其同系物、紫外吸收光谱、荧光光谱、甲烷、酚。在句容拗陷中常量组分和微量组分汇集在一起，而甲烷、酚、紫外吸收光谱、苯等成独立的体系。选择对于鉴别油气特征相对贡献大的指标，作为确定水文地球化学异常的主要指标。如果这些指标在成因和化学性质上有内在联系，那么它们在对应因子分析、聚类分析及非线性映照浓缩参数和降维时，会自然地聚合在一起，构成评价异常的水文地球化学指标组合。

（三）圈定异常区（带）

将上述选择的指标或指标组合，通过判别分析、趋势面分析、典型趋势面分析等数理统计方法圈定异常区（带）。

1．判别分析：是在已知一些样品类别的情况下，根据多变量特征来确定未知样品属于哪一类别，即利用所选定的水化学指标或指标组合来划分异常。利用判别函数式所计算的综合R值，绘制R等值线图，凡大于分界值（R_0）者为异常，其异常是多指标的综合信息，提高了异常的准确度和可靠性。例如冀中拗陷任丘油田浅层地下水化学成分判别函数值为：

$R_1=0.2956$（含油边界内）

$R_2=0.2776$（含油边界外）

$R_0=0.2900$（分界值）

根据判别函数式所计算的综合值（R）进行分区，则R的高值点主要为含油边界内的水样所占有，而含油边界之外的水样，R值普遍偏低，其错判率只有16%左右（图5-6）。

在南襄盆地利用潜水中荧光405nm、420nm、254nm、紫外吸收光谱228nm、310—374nm、酚和甲烷等八个指标进行综合判别，获得的判别式如表5-12所示[27,28]。用其所圈定的异常，已经钻探证实是油气聚集的有利地区。

2．趋势面分析：是拟合数学面的一种统计方法，就是用一定的函数对水文地球化学找油气指标在空间上的分布进行分析，

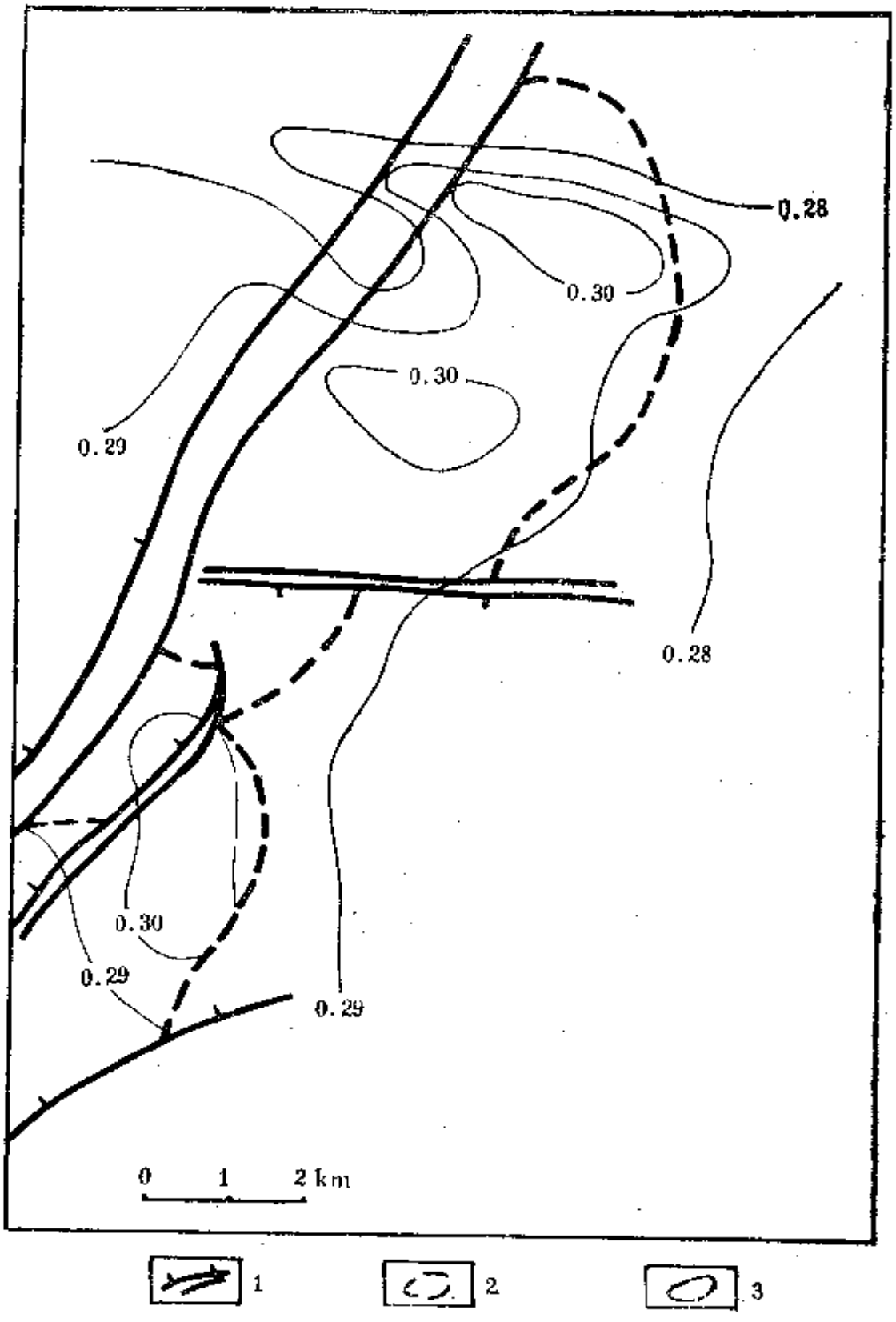


图 5-6 水化学指标判别分析R_o等值线

1—断裂；2—油水边界；3—R_o等值线

表 5-12　南襄盆地潜水化学成分综合判别

地区 / 指标	南阳拗陷		泌阳拗陷	
	系数	得分	系数	得分
荧光405nm	—19.8448	—0.2518	10.6894	0.4796
荧光420nm	19.1328	0.2866	—0.4933	—0.0155
荧光254nm	—2.1041	0.0109	16.9493	—0.1316
紫外222nm	116.5990	0.3784	38.2263	0.2330
紫外228nm	—20.6038	—0.0550	56.8883	0.3039
紫外310—374nm	25.2710	0.5242	3.8213	0.1301
酚	3.0408	0.1215	0.6046	—0.0130
甲烷	—1.0528	—0.1406	—0.0276	—0.0040
$R_1 = 52.9612$ $R_2 = 28.5923$ $R_0 = 34.8586$			$R_1 = 62.0152$ $R_2 = 52.8352$ $R_0 = 56.5096$	

用该函数所代表的面来逼近（或拟合）指标的趋势变化（即区域背景）。水文地球化学测量的大量分析测试数据中，包含着三部分变化：

（1）区域性变化：数据中反映规律性变化的部分，即区域性总变化，受区域水文地质条件和水文地球化学特征所控制。

（2）局部性变化：反映局部范围变化的特点，受油气藏或地质构造诸因素所控制的异常峰值。

（3）随机性变化：由随机因素所造成的偏差。

趋势面分析，就是对数据中所包含的三部分变化进行分解，排除随机性干扰，主要解决以下问题：

通过区域水化学成分变化特征，预测油气分布的趋势，指出油气聚集的有利地区；突出局部异常，圈出油气富集的有利构造或部位，以求算的趋势面为基础，计算指标的剩余值，去掉随机性影响，圈定反映局部性变化规律的剩余异常图。通过趋势面分析，可以提供背景和异常样本，更好地认识区域性变化规律和局部变化特征。

图5-7是济阳拗陷临盘油田潜水矿化度四次趋势面分析结果，所圈定的异常区与已发现的油气田基本一致。

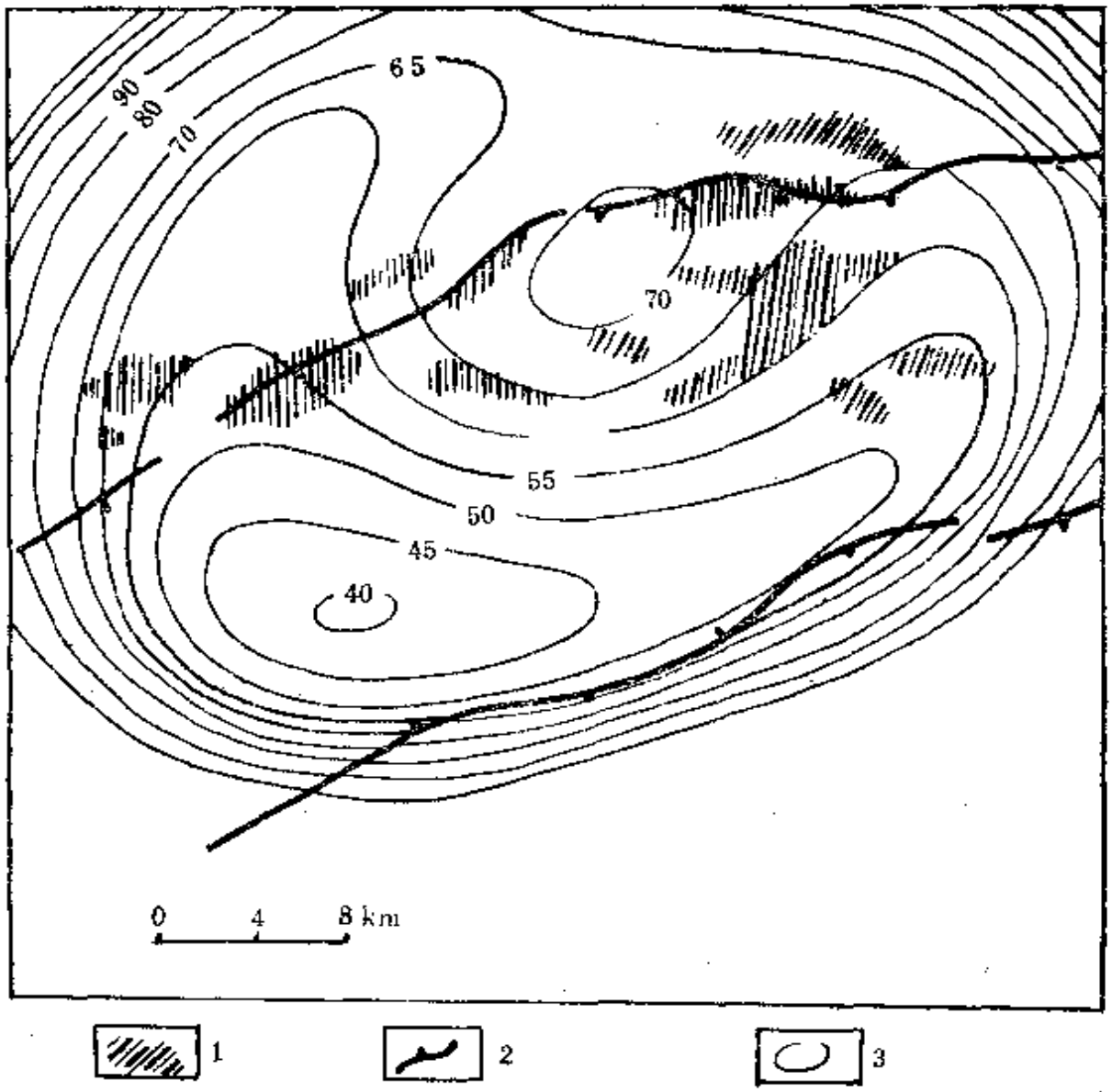


图 5-7　临盘油田潜水矿化度四次趋势面分析

1—油田或含油区；2—断裂；3—趋势等值线（meq/l）

3．典型趋势面分析：是用数学函数拟合第一组变量样本的指标与第二组变量水化学指标的空间分布规律。其优点是能够计算一组变量的共同趋势，把多种指标综合成一个变量组合，将表示单一母体的多变量空间分布的一套趋势图，叠合成综合趋势图和总剩余异常图。它的最大相关性质提供了母体反应面和样本反

应面之间的较高信度。因此，既可以提供区域性综合异常区（带），又可提供局部综合异常。充分挖掘了埋藏在各个水化学指标中的综合油气信息，从而提高了异常的可信度。松辽盆地南部梨树拗陷水化学指标五次典型趋势面分析如图5-8所示。它是利用潜水中可溶气态烃、苯、甲苯、酚、紫外吸收光谱和荧光光

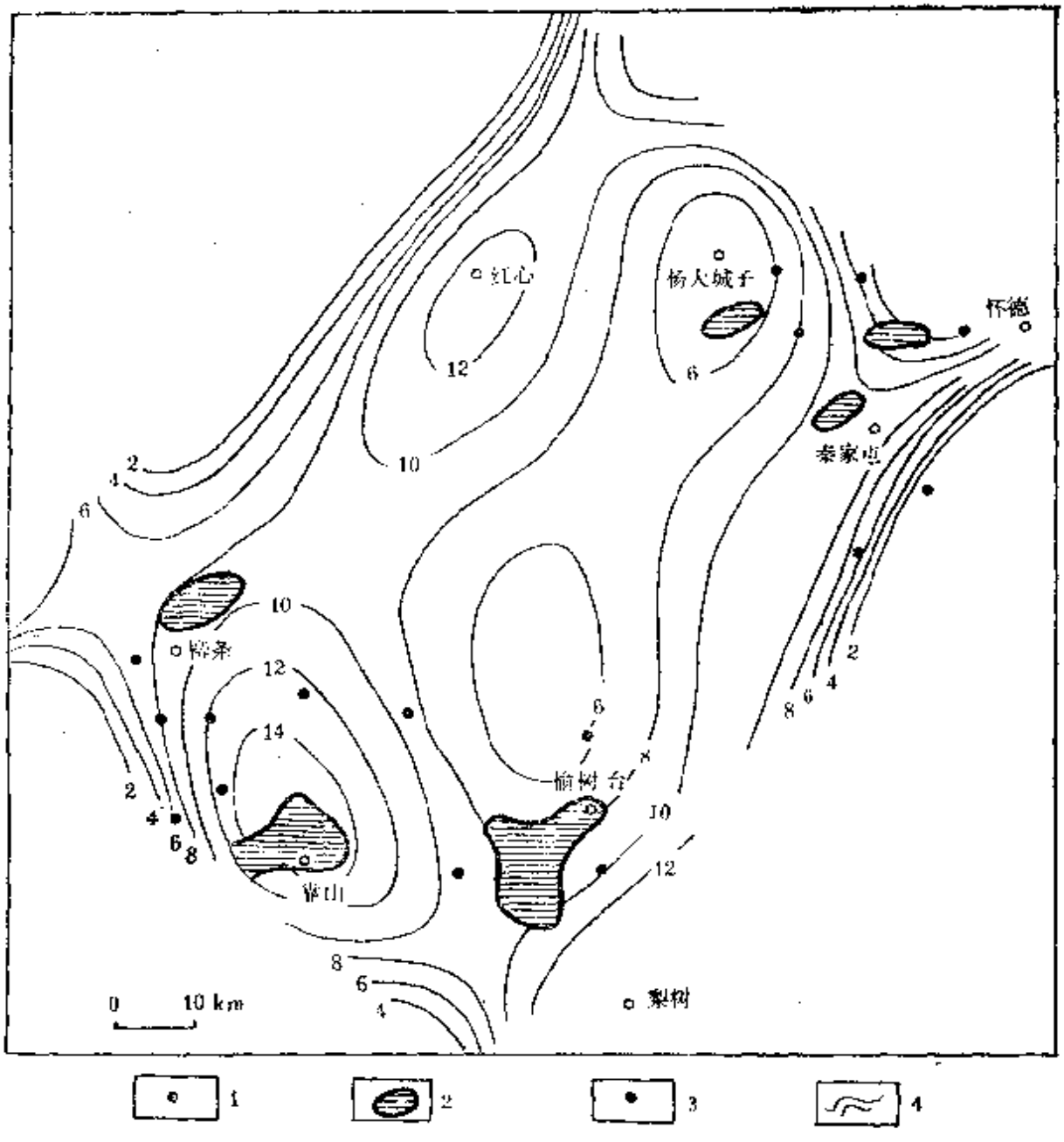


图 5-8 梨树凹陷潜水中有机组分五次典型趋势面分析

（据张金来等，1983）

1—城镇；2—水文地球化学异常；3—剩余异常点；4—趋势等值线

谱等七个指标进行数理统计的。从图中可看出，水化学异常与剩余异常点，基本上沿着拗陷中心呈环状分布，显示了一定的石油地质规律，在异常附近已获工业油气流。

（四）评价异常

它是利用剩余异常值与趋势值（或异常的平均值与背景值）之比来表示异常的衬度，对异常进行评价。按衬度大小可将异常划分为三级，即低衬度（1—1.5）；中等衬度（1.5—2.0）；高衬度（大于2.0者）。利用选择的各指标衬度，通过一定的计算公式，能定量地评价异常（后述）。

利用上述数理统计的优化系统处理分析数据确定异常的优点是：能排除干扰因素、提取指标的最大信息、选取最优指标或指标组合、给出单个指标或指标组合的定量评价、有利于同地质构造和水动力条件诸因素结合在一起的综合解释，能帮助处理大量分析资料、促进和加快水文地球化学找油的速度、降低成本。随着水文地球化学找油数据库的建立，将会提取更全面、更有价值的油气信息。

应当指出，选择最优指标或指标组合，是正确运用上述电算优化系统和获得可靠油气信息的关键。虽然前面用实例说明了选择最优指标的方法，但在实际运用中不能生搬硬套，要认真处理好指标的多寡、异常的“质”和“量”的关系。换句话讲，在电算处理过程中既要防止掩盖和“平调”最优指标的指矿作用与评价意义，又要充分利用多指标捕获全部油气信息。这对矛盾如果处理不当，不是漏掉异常，就是降低了异常的可靠性。最优指标选择的恰当如否，决定于地球化学工作者对区域地质条件的认识程度、对各类水文地球化学找油指标性质的掌握和熟练运用的技巧。

不难看出，上述电算优化系统不是完美无缺的，其一，它是用一个平面和光滑的曲面来拟合地球化学背景，在某些情况下与客观实际不一定完全符合；其次，没有从成因的角度来考虑和研究地球化学背景及指标间的相互关系。因此，利用该系统圈定的

异常和提供的油气信息，要紧密结合地质构造条件、油气藏类型、地球化学特征、自然地理景观诸因素，对异常的真伪和可靠性进行剔除、解释和评价。

近年来，模糊数学（灰色系统）和稳健统计等技术发展很快，有可能成为处理大量化探分析数据的有效手段和提取油气信息的重要研究课题，应引起水文地球化学工作者的高度重视。

三、水文地球化学图的编制

在水文地球化学找油气中，对所取得的大量资料和分析数据需要进行深入细致的整理研究，得出的规律性认识要用图件的形式直观地表现出来，制图就成为系统总结资料的基本方法。一般需要编制以下各类图件：

（一）基础图件

1．实际材料图：这种图件是反映水文地球化学找油测量工作量完成情况的图件，是编制其它图件的依据。在图上应该用符号准确地表示出所有的测量点与各种试验样品点及其编号，比例尺等。

2．第四纪地质图：水文地球化学找油的主要研究对象是埋藏在第四系沉积物中的地下水，因此，对第四纪地质必须进行比较详细的研究，编制第四纪地质图。在图上应准确地表示出沉积物的成因类型、岩性成分、分布范围及地质时代等。在图上要尽可能较全面地反映出调查区沉积物的相互关系。由于第四系沉积物的产状大都近似水平，故在平面上只能表示出其中的少数几层，大多数岩层只能在河谷或陡坡上以狭长的条带表示出来，为解决这一矛盾，常在正图的下方附剖面图。剖面线要尽可能通过区域内所有的第四系主要成因类型，剖面图的水平比例尺应与平面图相同，垂直比例尺以清楚地绘出所要表示的岩层为准。必要时可在图的右侧附综合第四纪地层柱状图，图上应表明岩性、生物化石、地层接触关系及侵入体等，图的比例尺以能反映出调查区第四纪综合地层的厚度为原则。

3．地貌图：地形地貌是控制地下水（尤其是潜水）分布的一个主要因素，对水化学成分的演变有一定的影响，另外，地形地貌也在一定程度上反映出区域新构造运动的特点。查清区域地貌条件并编制地貌图，是正确认识区域水文地球化学特征、解释水化学异常的重要方面。编制地貌图必须以野外调查资料为基础。在野外工作时，应特别重视搜集与水文地球化学有关的地貌地形资料。在地貌图上主要应反映出调查区地貌的成因类型、地貌形态及形成年代。为了说明地形发展的过程，要将有意义的自然地质现象表示在图上。地貌图应附剖面图，剖面线应尽可能地穿过区域内各种地貌的成因类型。

4．水文地质图：这种图件是反映调查区第四系水文地质条件的图件。在图上要反映出区域主要含水岩系（层）的分布、埋藏条件、含水量或富水程度及主要钻孔的分布等。要划分出有共同特征或共同规律的水文地质区。并在图的下方附有代表性的水文地质剖面，剖面线应沿着地下水流向与垂直地下水流向两个不同方向分布。

5．构造纲要图：地质构造，尤其是长期发育的不同构造单元的过渡带或不同构造线的交叉部位是形成水化学异常的有利部位。根据地质调查和地球物理资料编制的区域构造纲要图，是分析和评价水化学异常性质的重要地质依据。这种图的主要内容应包括：控制区域地质发展的断裂、主要的局部构造、含油目的层的顶板或底板构造等高线及构造分区等。

（二）单指标水化学异常图

前已述及，水文地球化学找油指标较多，在资料整理过程中，对每个指标都要汇总编图，如水化学类型图、常量组分异常图、离子比值图、微量组分异常图及各有机组分异常图等。水文地球化学测量的结果，就是通过上述各个指标在平面图上圈出与深部油气有关的异常。

为辩认和圈定异常，首先应根据调查区地球化学特征和取得的实际资料确定各指标的正常背景值。背景值是一定平面范围

内，非含油气地区水化学指标（元素）的平均含量，它是一种区域丰度。但在实际工作中，在测量之前并不知道哪是油区，哪是非油区。在这种情况下，常将调查区研究目的层水中各指标(元素)均一低含量的平均值作为背景值，而后求出异常下限值，将大于异常下限值的测量点用内插法圈出来，就绘制成异常图。

1．背景值的确定

背景值的确定在水文地球化学找油工作中具有重要意义，其方法很多，通常有平均值计算法、图解法、百分比统计法、滑动平均法、趋势分析法等。一般习惯运用平均值计算法（包括算术均值法和几何均值法）。

当各指标分析数据呈线性变化时，采用以下计算公式：

$$\overline{X}=\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

当各指标分析数据呈非线性变化时，采用以下计算公式：

$$\overline{X}=\sqrt[n]{X_1 \cdot X_2 \cdots\cdots X_i}$$

或者

$$\lg \overline{X}=\frac{\lg X_1+\lg X_2 \cdots\cdots \lg X_i}{n}$$

式中：$\overline{X}$——某元素的平均值；

n——参加计算的样本数；

X_i——各样品某元素的含量；

$\lg \overline{X}$——某元素平均值的对数。

2．异常下限的确定方法

各单指标的异常下限值是划分水文地球化学异常（点）的起始值，也可作为定量评价某元素与深部油气关系的标准尺度，其数值的确定，多采用以下两种方法：

（1）平均值加标准偏差（S）的方法，即：

$$T=\overline{X}+S$$

分析数据经检验，若呈正态或对数正态分布，标准差的计算公式如下：

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}{n-1}}$$

分析数据经检验，若不呈正态分布，标准偏差的计算公式如下：

$$S=\sqrt{\frac{\Sigma(M_0-X)}{n'-\frac{1}{2}}}$$

式中：M_0——频率分布的众值。

（2）趋势面分析法

选用各指标的一定序次的趋势面分析结果，以剩余异常下限值为各指标的异常下限值。

$$\text{剩余异常下限值}=\frac{\Sigma X}{K}$$

式中：ΣX——正剩余值之总和；

K——经验系数。

K值一般选用样本总数（n）的$\frac{1}{2}$或$\frac{2}{3}$，其原则是满足以下两点的需要：一是异常出现的机率（异常点数与样本总数的百分比）在10—15%左右，使之符合概率统计的理论要求；二是异常点在平面上的分布与区域地球化学特征的变化相一致。

表5-13是我国东部某含油气盆地潜水中各指标的异常下限和K值的选择应用。

3．异常图的编制

据上述方法确定的异常下限值，编制各指标的异常图，一般采用分区与等值线的方法表示。具体编图过程如下：

（1）常量组分异常图

A．矿化度异常图：以矿化度等值线图为底图，将各观测点的矿化度值标绘于一定比例尺的实际材料图上，用内插法编制等值线图。再将大于异常下限值等值线所圈定的范围用一定符号表

表 5-13 趋势分析剩余异常参数表

指　　标	样本数（个）	K值	剩余异常下限值	频　率（%）
矿化度	691	$n/2$	804.00	15.02
微量组分	691	$n/2$	0.4004	14.53
可溶气态烃	691	$n/2$	24.00	12.70
荧光405nm	691	$n/2$	11.23	11.72
紫外254—258nm	691	$n/2$	11.27	12.45
紫外222nm	691	$n/2$	64.19	11.42
酚	691	$2/3n$	0.762	17.28
苯	691	$n/2$	2.00	16.64

示出来，即为矿化度异常。

B．水型分布图：在编制水型分布图时，国内外广泛运用B. A苏林的成因分类方法来表示水的类型[14]，即根据$K^+ + Na^+$、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-六个离子实测的数据换算成水型，并用不同颜色表示各种水型的分布。结合测区内的水文地质条件，对各种水型的形成进行分析，筛选与油气有关的水型作为水化学成分产生变异、纯化的异常水型。也可用本文提出的分类法编制水型分布图。

C．离子组合分布图：是工作中经常使用的图件。将决定水化学性质的主要离子（含量大于参与水化学分类和命名的含量界限者），按照先阴离子、后阳离子的顺序，标绘在实际材料图上，通过分区的方法，将离子组合相同的两个或两个以上的相邻点，圈定在一起，在背景区离子组合特征的衬托下，显示局部异常。

通常将矿化度四次趋势面分析的正剩余异常点，与经过筛选的上述三个指标的异常图叠合在一张图上，构成水化学常量组分综合异常图（图5-9）。或者以水中可溶气态烃的等值线图为背景，用一定的线条花纹，表示水的离子组合，以符号表示矿化度的高低，编成水型异常图。

（2）微量组分异常图

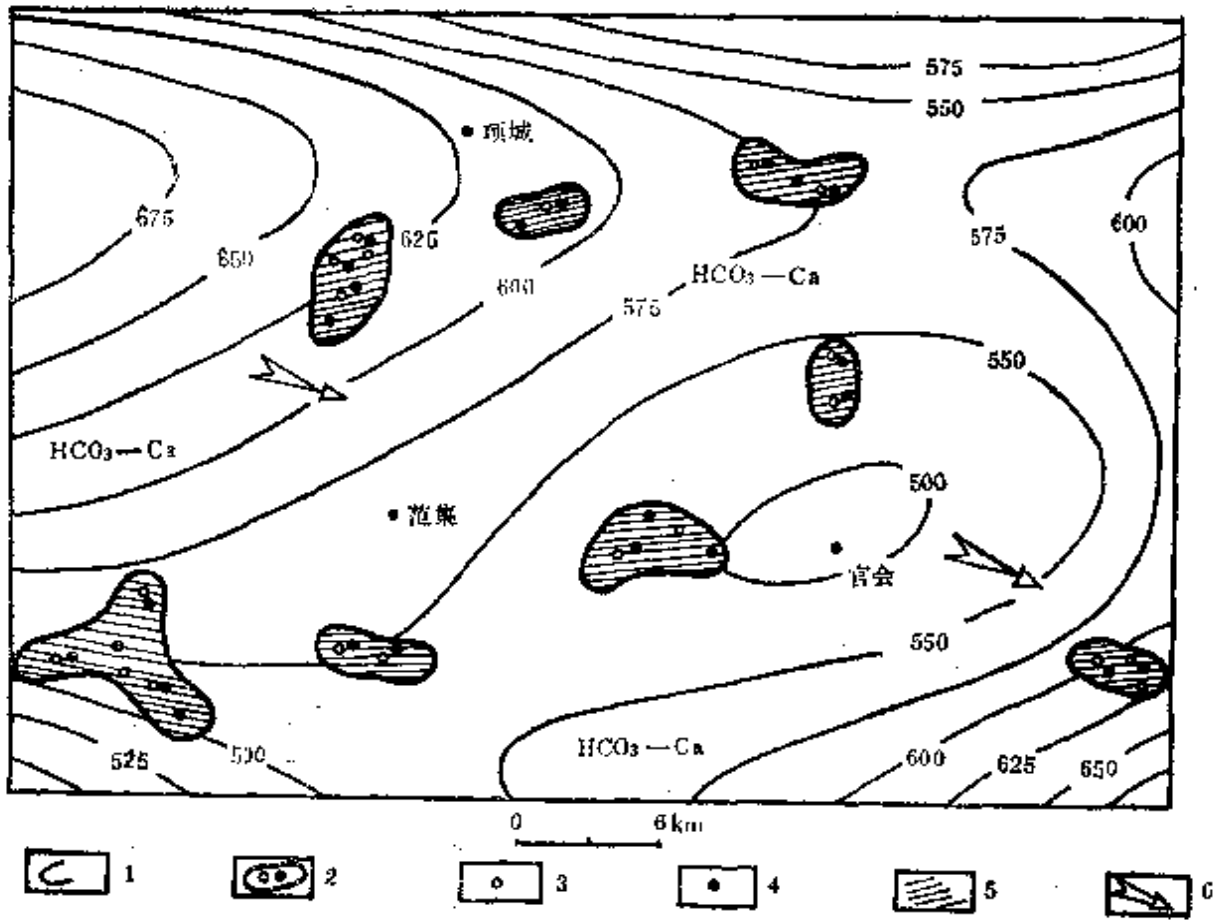


图 5-9 水化学常量组分异常图

1—矿化度等值线（mg/l）；2—水化学异常；3—$CaCl_2$型水；4—矿化度四次趋势面分析正剩余异常点；5—离子组合为$Cl \cdot HCO_3$-Na者；6—地下水流向

对Li、Ni、Mn、Cu等组分，进行典型趋势面分析，提取它们的“公共”信息，把正剩余异常值的点标绘在实际材料图上，用内插法编制分区图或等值线图，并以此为底图，再将大于剩余异常下限值的点，用一定的图例或符号表示在图上，即为微量组分的异常图。

（3）有机组分异常图

将水中主要有机组分（可溶气态烃、苯、酚、荧光405nm、紫外222nm、紫外254—258nm等）分别编制剩余异常图，一般根据趋势面分析所求算的正剩余异常标绘于实际材料图上，用内插法编制等值线图，以此为底图，再将大于剩余异常下限值等值线所圈定的范围，用一定的符号表示出来，即为有机组分异常

图。

其它指标异常图的编制方法与上述图件基本一致。

在上述各指标的水化学异常图中，根据强度（各指标的绝对含量）和衬度划分异常级别，并用数字或一定的颜色表示之。

随着电子计算机技术的普及和发展，地球化学工作者将广泛运用计算机绘制三维的水文地球化学图，从平面和空间的不同角度，表现水化学特征。

（三）综合水化学异常图

综合水化学异常图是水文地球化学找油气的最重要图件，它是在上述各类图件的基础上编制而成的，重点表现主要水化学找油指标提供的油气信息，并将这些信息进一步归纳、提炼，有机地综合在一张图上，用图示法（小柱状图示法、圆形指示灯图示法、玫瑰花图示法、立体曲线图示法等）表示水文地球化学异常，做出结论性的含油气远景评价。

该图包含的内容虽然繁多，但要求图面必须简明，清晰地显示出区域水文地球化学背景和异常特征。该图的编制原则如下：

1．油气化探综合水文地球化学异常图集中反映了各单指标异常的特征，综合水化学异常的数目、范围、级别、形状等，不超越上述各单指标所限定的范畴。

2．油气化探综合水文地球化学异常图的范围与界限，一般是根据各个指标经筛选后的有限变量（最优指标）的典型趋势正剩余异常值分区线，结合各指标异常图的叠合范围确定的。

3．油气化探综合水文地球化学异常级别的划分要依据各指标异常的级别，并考虑异常的叠合面积。

油气化探综合水文地球化学异常图的具体编制方法是：以环境指标的典型趋势分析等值线图为底图，将研究区中起主导作用的最优指标所确定的异常，以不同的线条或符号，叠合在典型趋势图上；根据前述原则圈定综合水化学异常图的界线并用数字表示异常的级别（异常级别的划分及其原则，见下章）。图 5-10 是根据某含油气盆地水文地球化学测量的实际资料编制的综合水文

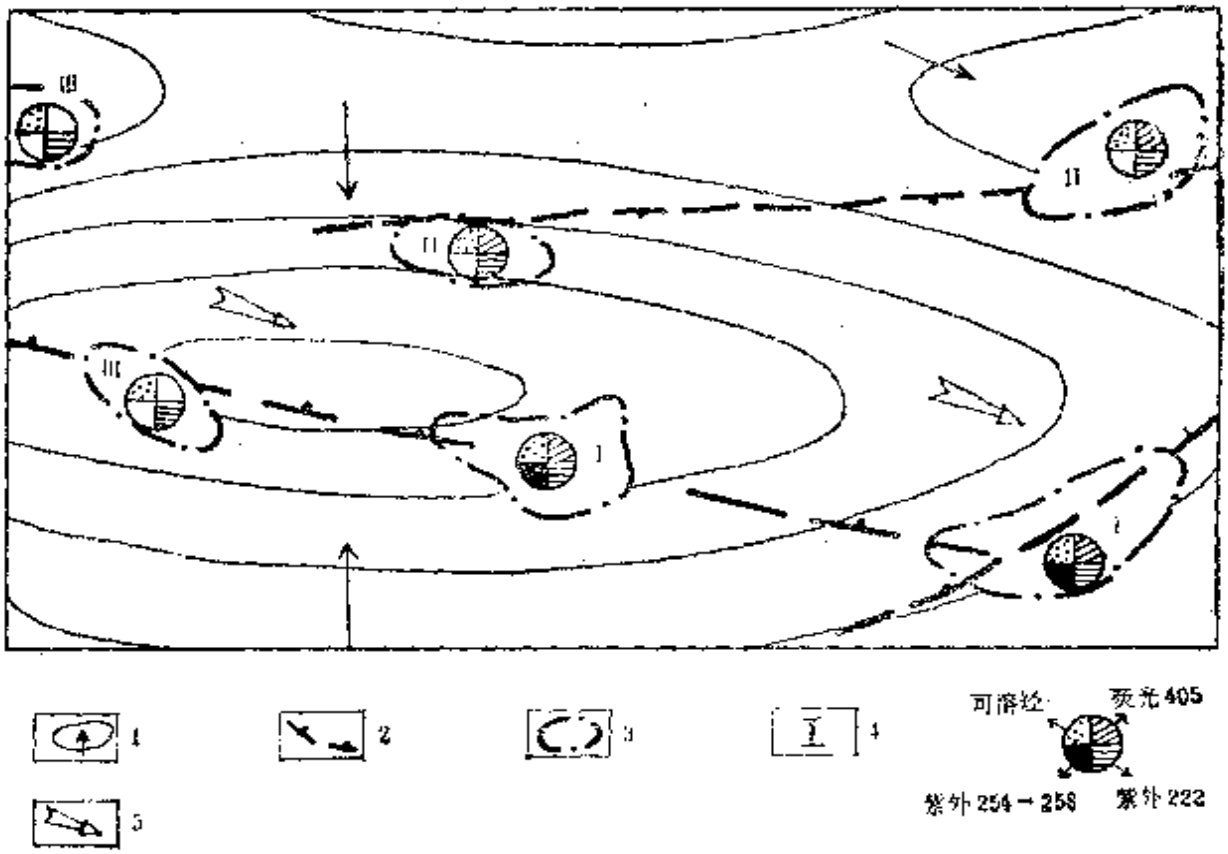


图 5-10　综合水文地球化学异常图

1—常量、微量组分典型趋势等值线的增高方向；2—断裂；3—综合异常范围；4—异常级别；5—地下水流向

地球化学异常图。

各类水文地球化学图的编制，不是简单的资料汇总，而是地球化学工作者结合石油地质、构造特征、水文地质条件及水文地球化学环境综合分析、研究水化学成分与油气内在关系的最终结果，集中体现了认识客观地质体的过程和水平。

在水文地球化学找油中，除编制上述平面图外，还要编制多种剖面图，如表示地下水化学成分及其特征在垂直方向上的分布与变化规律的剖面图；水化学成分与油气关系、埋藏深度、油藏类型剖面图等。图5-11是我国东部临盘油田的水文地球化学剖面图。从图中可明显看出，浅层水化学成分严格受深部油气藏和断裂的控制和影响。

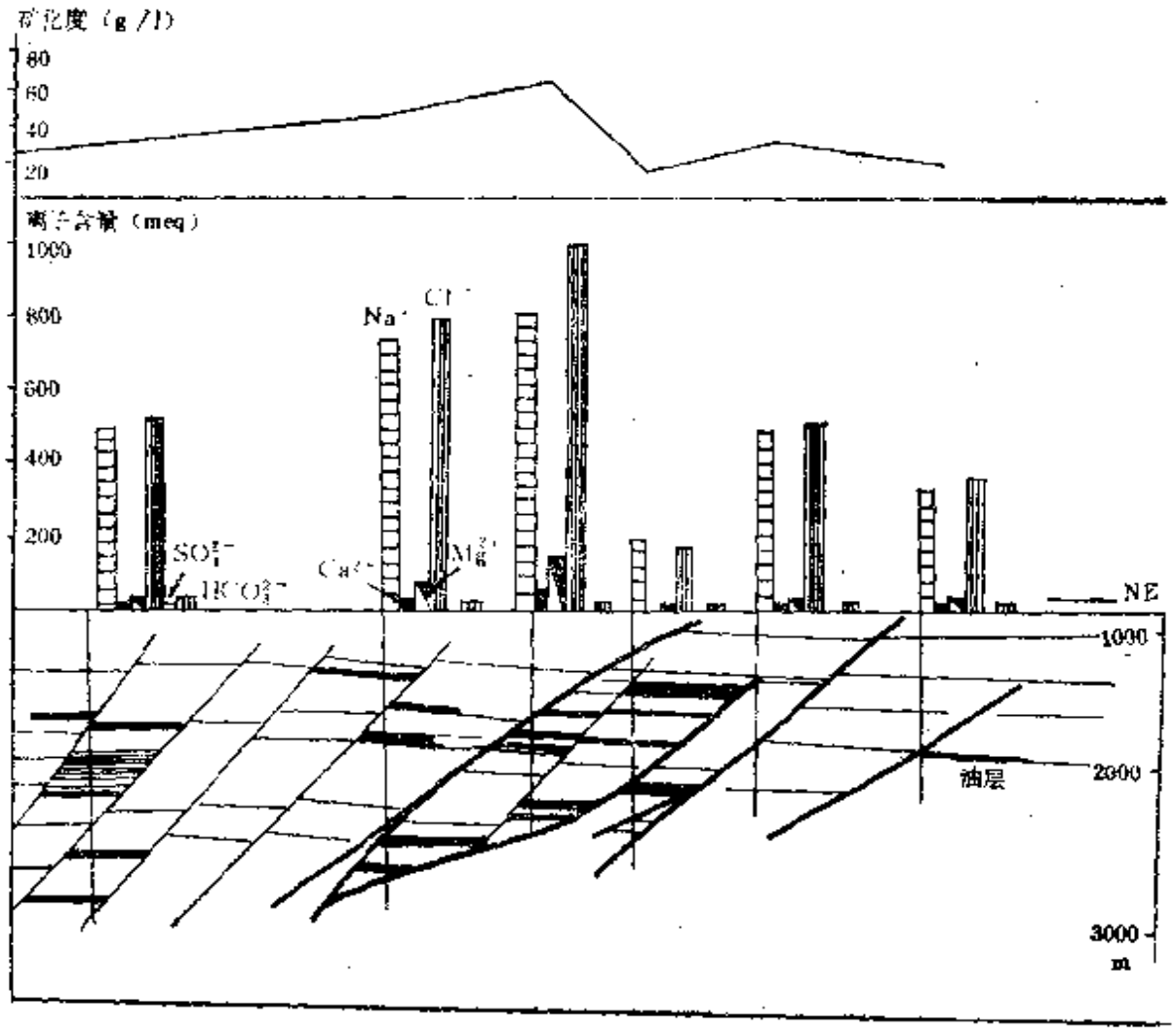


图 5-11　水文地球化学剖面图

此外，还要编制各类关系曲线图，如矿化度与离子含量关系曲线图、各离子之间的关系曲线图、有机组分之间关系曲线图、可溶气态烃与碳同位素关系曲线图、各水化学指标在不同年(月)份变化曲线图等。通过这些图件寻求和表示地下水化学成分与某些因素之间的相关关系。

四、综合异常的含油气远景评价

（一）水化学异常的基本模式

当烃类从深部向地表运移，影响浅层地下水化学成分而形成异常时，由于受地质构造、油气藏类型、封闭程度、地下水动

力条件、新构造运动及地貌形态等因素的控制，形成多种多样的形式。换句话说，异常模式是深部油气信息在一定地质构造特征和地理地貌条件下，于浅层形成综合地球化学效应的外在表现。异常模式是认识复杂多样油气浅层效应及其形成过程的简化形式。每种模式所涉及的地球化学问题、油气勘探的有利部位等都有自己的特色，因此，研究化探异常模式，有利于探索异常与含油气构造和圈闭的内在联系，是钻探井位不可缺少的资料，也为对丰富多彩的浅层异常进行科学分类提供了可能。

经常见及的水化学异常模式有：环状异常、新月状异常、块状异常、串珠状异常、同心圆状异常及带状异常等。

1．环状异常

环状异常系指在平面上几个异常围绕含油气圈闭分布，组成边缘环状，三维空间为筒状。它的形成一方面决定于构造圈闭类型，主要出现在背斜油气藏（褶皱作用、基底活动、地下柔性物质活动、剥蚀突起等有关的背斜油气藏及与同生断裂有关的滚动背斜油气藏）、岩体刺穿接触油气藏及地层不整合遮挡油气藏的上方；另一方面决定于新构造运动的性质，即继承性活动使现今地形仍处于相对较高的正地形，是形成该类异常模式的重要条件。其主要特征是：

（1）深部烃源或与油气有关的地下水，以断层和裂隙为通道向上扩散-对流迁移时，由于地形较高，运移的烃类接近或到达地面后，受大气降水渗入等因素的影响，向四周横向运移，致使背斜轴部水化学成分的浓度低于翼部，构成“卫星”式的异常群（组）。

（2）指示油气藏存在的主要水化学指标或指标组合，在各个异常中基本上是一致的，其浓度比较均匀，即各指标的异常值或各指标的绝对含量在各观测点中高低相差无几，异常的稳定性相对较高。

（3）各个异常虽然独立存在，但其形态多呈一边内凹、一边外凸的“腰子”形。各异常长轴方向的连接线所限定的范围，

基本上代表了潜伏构造的形状。

（4）环状异常含油气远景最有利的部位，通常位于异常的中部。

（5）当大气降水渗入和淋滤作用比较强烈，表层沉积物的透水性较好、地下水径流比较活跃时，异常强度往往很低，多出现不规则的环状异常，甚至被完全破坏。

环状水化学异常是一种常见的异常模式，是有较高的石油勘探意义。图5-12是比较典型的环状异常模式。

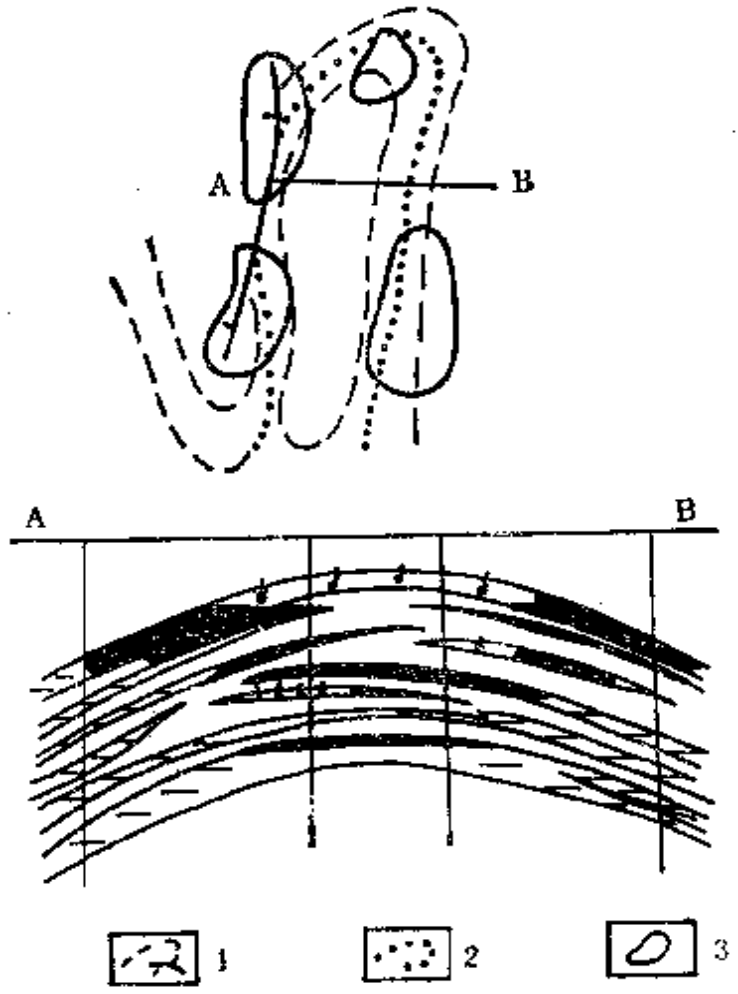


图 5-12　环状异常形成的基本模式

1—构造线与断裂；2—含油边界；3—水化学异常范围

2．新月状异常

新月状异常在平面展布上，呈现两头略窄、中间稍宽、一侧

内凹、一侧外凸的形状，类似于月牙，由此得名。这种形状的异常也是常见的一种异常形式。主要发育在以断层遮挡为主的油气藏上方（断层与鼻状构造相结合的油气藏、弯曲断层或交叉断层与单斜构造相结合的油气藏、两个弯曲断层两侧相交的油气藏、断层与单斜及岩性尖灭相结合的油气藏等）。其主要特征是：

（1）水化学找油指标在新月状异常的单个观测点上重叠性比较好，即在同一个观测点上多种指标显示异常值，强度高、衬度大。

（2）新月状异常是一定地质构造和水动力条件相结合的产物。其形成过程是：深部的烃沿断层向地壳上部运移，在浅层扩散形成晕圈时，由于受地下水运动推移、携带，在地下水运动的主流线方向上形成半自形异常。异常的长轴方向，基本上与断层走向一致，异常边界内凹、外凸的方向是研究目的层地下水运动的指向。在水文地球化学找油调查中，由于受诸多因素的影响，如采样点的不均匀、局部水源的补给等，新月形异常的形状并非都是规则和标准的。

（3）新月形异常含油气远景最有利的部位多靠近异常边界内凹的一侧。

图5-13是比较典型的新月形异常模式

3．块状异常

块状异常是水化学找油中常见的另一种异常模式。它在平面的展布上呈孤立的块状，主要发育在岩性油气藏的上方（地层尖灭岩性油气藏、砂岩透镜体油气藏及低渗透层中高渗透带透镜体油气藏等）和水动力遮挡油气藏上。其主要特征是：

（1）水化学找油指标的异常值，在测区内一般属于中等或中高偏低（部分水动力遮挡油气藏偏高），异常内各指标的吻合程度相对较高，异常比较稳定。

（2）异常的形状多是不规则的，以大小不等的扁圆状为主。虽然地下水运动的方向、地貌形态对异常形状有所影响，但不会形成特殊的异常外形。块状异常的范围，一般超过含油气边

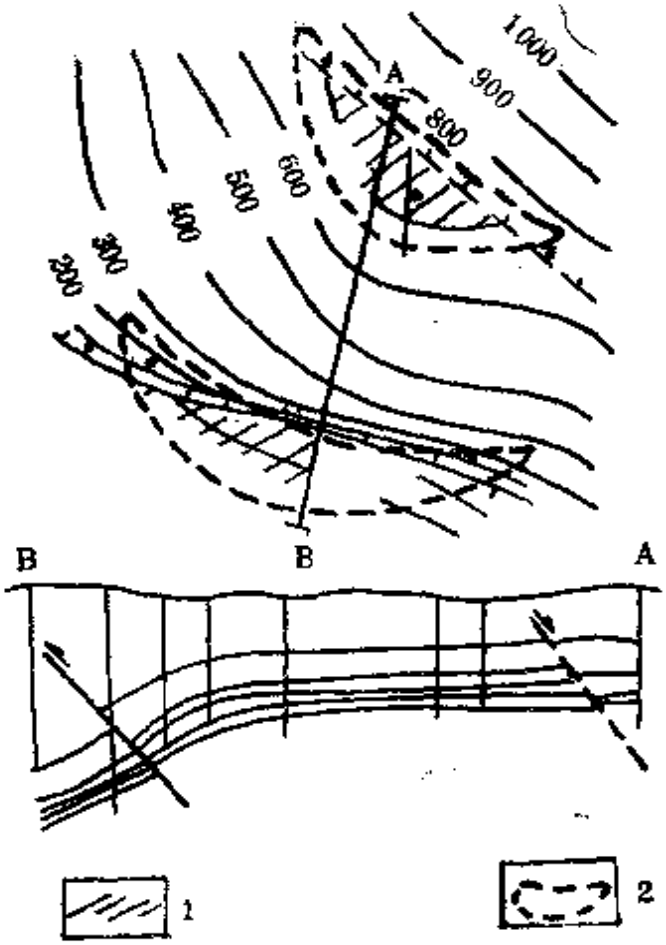


图 5-13　新月形异常形成的基本模式

1—平面上的含油气范围；2—水化学异常范围

界。

（3）块状异常含油气远景最有利的部位，一般出现在异常中部。

4．串珠状异常

这种形状的异常在平面分布上沿着某一方向断断续续地成组、成串出现，是断陷盆地或断块油田内常见的一种水化学异常形态。特别是那些发育早、断距大的基底断裂或生长断层，是形成串珠状水化学异常最有利的构造部位。这种异常的主要地球化学特征如下：

（1）由两个或两个以上水化学异常组成，它们多为椭圆或

不规则的椭圆形，其长轴的沿伸方向大体一致。异常多沿断裂带的走向断续分布。

（2）指示异常存在的水化学指标或指标组合，在各个异常内基本一致或相同，同类指标的强度、衬度变化不大。

（3）水文地球化学找油中，常发现有不同形状与方向的异常与串珠状异常叠合或交叉在一起，这种情况往往与断层的相互切割和交叉断层的存在有关。

（4）串珠状异常是断块油气藏具有的浅层水文地球化学效应，由于断裂系统的复杂性以及对油气控制作用的多样性，因此，在评价异常的含油气远景时，应对地质构造特征进行具体分析，如分析断层的发育史与油气聚集的关系、断层与地层组合之间的关系、断层面的性质及其开启和封闭程度等，对异常的石油地质意义得出正确的认识。

（5）串珠状异常在我国东部含油气盆地中是一种多见的油气化探模式，具有重要的石油地质意义。

5．同心圆状异常

同心圆状异常既可以在构造油气藏上方见及，又可以在岩性油气藏上方出现，其形成与地貌形态有直接的关系，主要发育在地形相对低洼、地下水径流条件较差的地区。水化学找油指标的浓度（尤其是直接指标和环境指标）由边缘向中心依次增加，形成同心圆状异常。异常内水化学成分有明显富集，异常值较高。如果研究目的层中地下水处于闭流状态，将会集中发现较多的高强度异常点，它们是深层地下水化学成分影响与表生地球化学作用的产物。评价同心圆状异常的含油气远景，要比评价上述几种异常复杂得多。它的存在和出现，只能说明该异常内有含油气的可能性。要比较具体地指出油气聚集的有利部位，阐明异常反映的油气藏类型和特征，必须进行长期观测和模拟试验。

图5-14是同心圆状水化学异常形成的基本模式。

综上所述，水化学异常的形成模式和类型远比上述所列类型丰富得多。目前所认识到的模式，只是当前人们对水文地球化学

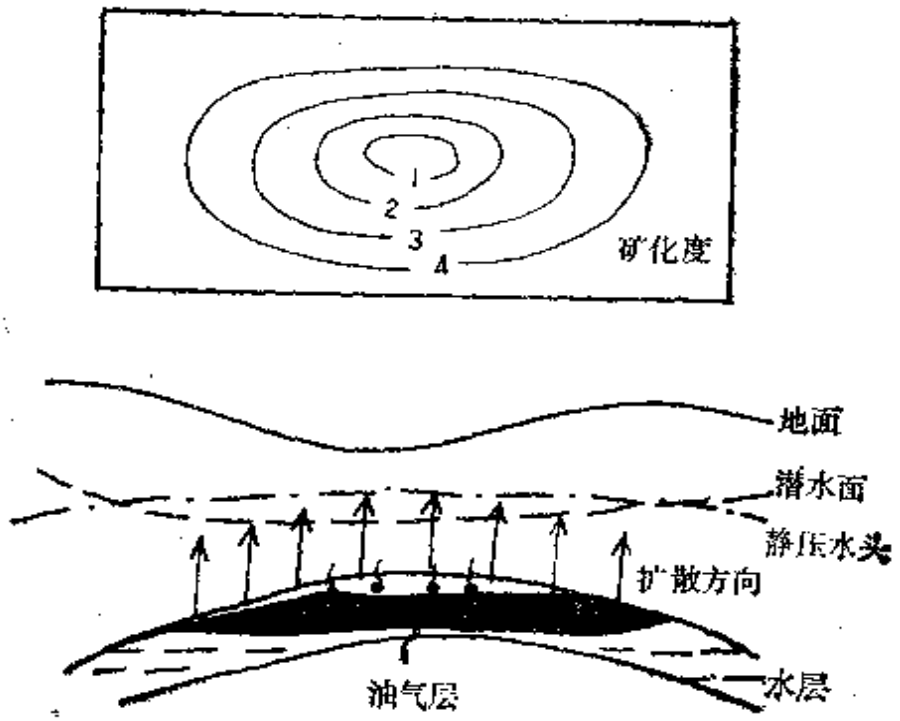


图 5-14　同心圆状异常形成的基本模式

找油的一般规律性认识。

由于油气藏类型众多、特征各异，其所处的地质构造又复杂多变，因此，以油气藏成因、油气藏形态、油气运移基理及指标展布特征为基础建立起来的水化学异常模式，并非都是前述那样标准和单一，而往往是多种类型异常叠加在一起，形成“复合式”异常形态。在评价水化学异常的性质和含油气远景时，考虑异常的模式和类型固然是重要的，但必须结合研究区的具体石油地质特征和水文地质条件，历史地、全面地进行研究和分析，方能收到良好的勘探效果。

（二）水化学异常的偏移规律

正如前述，由于自然地理、水文地质条件诸多方面因素的影响，浅层水化学异常不一定完全位于含油气构造或油气藏的正上方，而可能有一定的偏移。引起偏移的原因，有以下几个方面：

1．地下水的运动条件

地下水运动条件可以改变异常的位置和形状，尤其是在地下

水径流比较活跃、循环条件较好的地区，它是造成异常偏移的一个重要原因。以泌阳拗陷双河油田为例，潜水主要埋藏于三夹河河漫滩及一级堆积阶地的松散沉积物中，含水层以砂砾石为主，埋藏深度1—3m，潜水由河水补给，自南向北流动。在地下水的推动下，异常略向北偏移，在地水下运动的主流线方向上，异常向北凸出（图5-15）。

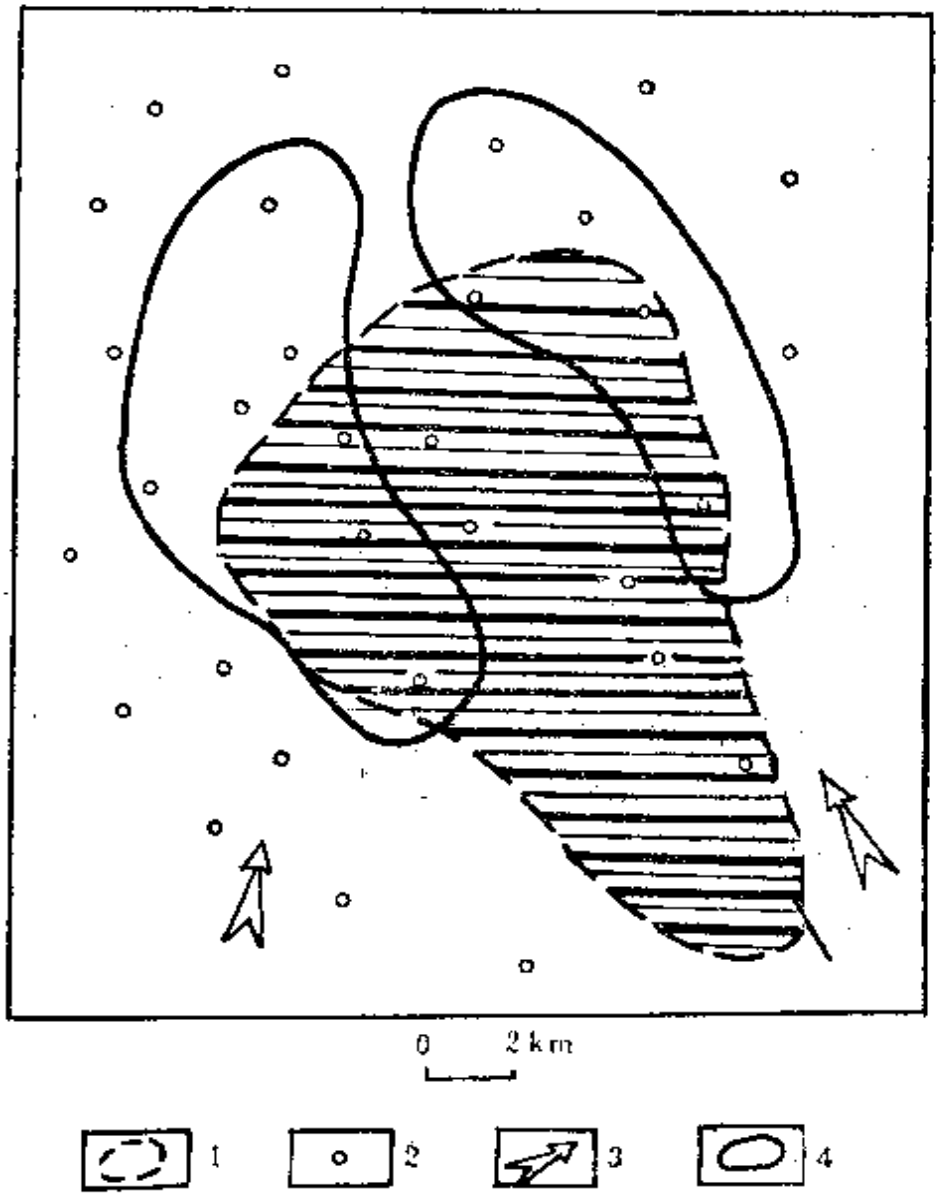


图 5-15　水化学异常偏移原因分析

1—油田；2—取样点；3—地下水流向；4—水化学异常

在水化学测量中经常遇到一些弱异常或者在异常上主要指标显示残缺不全的现象，对这些异常不能轻率地予以否定，需要查明原因。如沁陆拗陷的王集油田，虽然埋藏较浅，但水化学异常显示却很弱，仅在局部出现可溶气态烃的零星异常点和荧光405nm的判别分析异常，其它水化学指标均无异常迹象。分析其原因是由于地处潜水分水岭上，地下水的冲刷作用较强，使各指标的衬度降低（图5-16），降低了水化学异常的强度。此外，局部水动力条件的变化，古河道的存在，特种矿物的富集等因素，均能使异常强度降低。

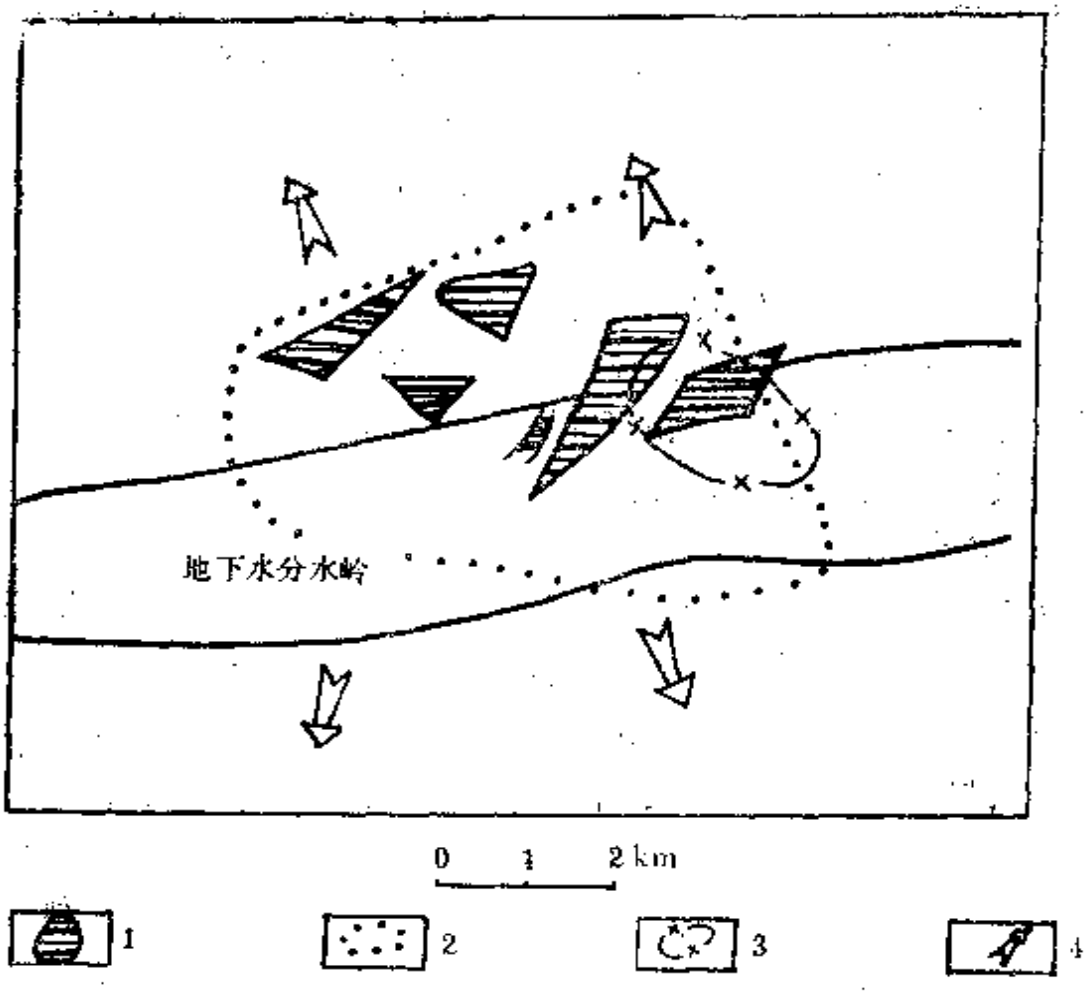


图 5-16 水化学异常微弱的原因分析

（据张金来，1984）

1—油田；2—荧光405nm判别异常；3—可溶气态烃异常；4—地下水流向

2. 构造的封闭程度

含油气构造（圈闭）的不同部位，封闭程度有差异，浅层水化学异常向封闭程度差的一方偏移。如分布在单斜构造上的某岩性圈闭油气藏，埋藏较浅（500—800m），水化学异常偏离油田约500m。如果储油构造（包括岩性圈闭）被断层切割，水化学异常则集中出现在断层的上方，而偏离含油气构造。

3. 水文地质结构

在水文地质结构比较复杂的含油气盆地内，如含水岩系较多、侵蚀（剥蚀）基准面比较发育等，使地下水的运动速度出现较大差异（在纵向上），当油气从含油构造向上运移至地下水流速较大的含水岩系时，由于油气向上运移的能量小于地下水横向运移的能量，油气将进行水平运动，在适宜的条件下，再沿通道向上运移，形成水平运动与垂直运移相结合的迁移方式。因此，在浅层形成的水化学异常与地下含油气构造在平面上有一定的偏移。

（三）综合异常的含油气远景评价

综合异常的含油气远景评价是水文地球化学找油的最终勘探成果，许多学者都在探索和研究异常的评价方法。本文根据多年来的实践，提出以下两种方法：

1. 定性评价方法

（1）评价指标的分级：不同的水文地球化学找油气指标与异常的石油地球化学意义及其所能提供油气信息的程度是不等的，因此，在运用它们进行含油气远景评价时，应予以分级。

一般将在成因上与油气有联系、数理统计分析贡献值大的直接指标，作为划分异常依据的一级指标，据它们所圈定的异常如果在平面分布上有某种规律（模式），属于含油气远景最有利的地区。二级指标多为间接指标、构造指标或者直接指标中变异幅度不大、强度较小、检出机率较低者，它们在数理统计中的贡献值较一级指标低。三级指标主要指与油气无直接关系的常量组分和微量组分。

（2）综合异常的分级：由各单指标异常图汇总而成的综合水化学异常，据以下几个方面划分级别。

A．指标的组合类型：水化学找油指标间的组合类型反映了水化学异常的性质。通常在水化学异常中出现的组合类型有：一级指标间的组合、一级指标和二级指标间的组合等。

一般将依据三个或三个以上的一级指标构成的组合类型所确定的异常，定为Ⅰ级水化学异常；依据两个一级指标和二级指标（数量可不限）相互构成的组合类型所确定的异常，定为Ⅱ级水化学异常；依据一个一级指标和二级指标（数量可不限）构成的组合类型所限定的异常，定为Ⅲ级水化学异常。在各级异常中，三级水化学找油指标均有异常反映。

B．异常的叠合特征：各个水化学找油指标所确定的异常的叠合特征（程度），反映了异常指示油气藏的可靠程度。在实际工作中，单指标异常点或异常之间全部重合的现象极为少见。一般将据一级指标所确定的异常相互叠合程度高（即两个一级指标的异常点，在异常中重合出现的几率超过或接近50％）的划分为Ⅰ级水化学异常；一级指标的异常点，在异常中重合出现的几率接近20％的为Ⅱ级水化学异常；一级指标和二级指标的异常点，重合的几率超过或接近50％的为Ⅲ级水化学异常。

C．异常的衬度：从Ⅰ级到Ⅲ级水化学异常，其主要指标的衬度由高到低。

D．其它：如甲烷的碳同位素成果，$\delta^{13}C_1$的含量属于石油伴生气范畴的异常，含油气远景评价的级别高；$\delta^{13}C_1$的含量属于生物成因范畴的异常，含油气远景评价的级别低。

上述异常级别的划分，只是从水化学找油气指标一个方面来讲的，实际上，还要从石油地质特征、异常模式及水文地球化学背景等方面，进行综合分析和研究。

水化学异常反映了油气聚集的具体有利地段。一般用罗马数字在水文地球化学综合异常图上表示出水化学异常的级别。Ⅰ级综合异常属于最有含油气远景的地区；Ⅱ级综合异常属于有含油

气远景的地区；Ⅲ级综合异常属于较有含油气远景的地区。对水化学异常进行评价时，要着重描述确定异常的主要水化学指标或指标组合、各异常的强度和衬度、异常的分布范围、大小、延伸方向、异常形状、异常在区域上的分布规律、异常所处的水文地球化学环境以及与地质构造的关系等。

通过对水化学综合异常的划分与评价，进一步划分水文地球化学异常区（带），从水文地球化学的角度对区域含油气远景进行评价，指出油气聚集的有利地区和优先进行石油勘探的靶区。水化学异常区（带），需要具备下列条件：

异常区是水化学异常石油（气）地质意义的集中反映，需要有两个或两个以上的异常组成，具有一定的展布方向，占有一定的面积。异常区内的地质构造背景是一致的，水文地球化学特征类似。

水文地球化学找油综合异常的含油气远景评价过程，将在下章结合具体地区的实例进行论述。

2。定量评价方法

上述综合异常的定性评方法是采用各指标异常平面叠合的办法，优点是简单、快速，缺点是异常级别的划分没有统一的标准，给异常评价和对比带来一定的困难，并带有主观性。随着水化学找油技术的发展和在油气普查勘探中的广泛应用，仅对异常做定性评价是不够的，还必须进一步做定量评价。

前人曾利用水化学指标的强度（绝对含量）作为定量评价异常的标准，它虽然能表示出异常的相对强弱，但脱离地球化学背景，指标强度的大小，包含着很多不确定因素。后来有人利用衬度(绝对含量与背景值的比值)作为定量评价的标准。就某一个水化学指标而言，作用衬度评价异常比利用强度评价异常有更大的适用价值，是比较好的方法。问题是在于多指标时如何利用衬度进行综合评价，虽然可以采用将各指标的衬度异常叠合的办法，但这是一种从定量评价又转回到定性评价的方法，显然也是不可取的。

作者在实践中，运用“主指标”法对异常进行定量评价获得良好的效果。其基本含义是：在充分考虑和分析各水化学指标的指矿（石油、天然气）意义的基础上，通过电子计算机对指标进行筛选，选出能够反映所有指标（参与运算的）绝大部分信息的主要指标，作为评价异常的标准，应用下列数字公式将各指标有因子的浓度值，变为无因次的评价指数，计算过程如下：

（1）单指标的评价指数：

$$Pi = Ci/Csi$$

式中：Pi——单指标的评价指数；

Ci——某指标的实测浓度；

Csi——某指标的背景值（平均值）。

（2）综合评价指数：

$$PI = \sqrt{\frac{(Ci/Csi)^2_{最大} + (Ci/Csi)^2_{平均}}{2}}$$

式中：PI——多指标综合评价指数；

$(Ci/Csi)_{最大}$——各指标中最大的Ci/Csi值；

$(Ci/Csi)_{平均}$——各指标的平均Ci/Csi值。

利用上述公式计算结果，对综合异常的含油气远景进行评价的优点是：在各个主要水化学指标单独评价的基础上，综合应用多指标进行评价；突出了在异常中起主导作用的指标——单指标评价参数值最大的指标；直观地表现了各指标在异常中所起作用的顺序与优势，为判认异常的油气性质提供了可能和依据，能比较客观地反映出综合异常的实际情况。

例如在我国东部某盆地进行油气化探面积测量，以水化学法为主，辅以土壤吸附烃法，测量面积近5000km²，测量点1250个。用数理计法经电子计算机从29个指标中筛选出7个主要找油气指标，确定了11个化探异常。应用综合评价指数对各异常进行定量评价，其结果如表5-14所示。综合评价指数大于10者为Ⅰ级综合异常；综合评价指数4—10者为Ⅱ级综合异常；综合评价指数小于4者为Ⅲ级综合异常。这些异常的圈定、异常级别的划分与目

表 5-14 油气化探综合异常评价参数

异常编号	异常名称	水化学评价参数								土壤吸附烃评价参数						PI值	异常级别
		紫外222nm		荧光405nm		紫外 254—258nm		可溶气态烃		重烃		温度		甲烷			
		强度	衬度	强度	衬度	强度	衬度	强度	衬度	强度	衬度	强度	衬度	强度	衬度		
1	大刘庄	5307	15.3	2307	15.5	28.0	13.7	2.6	0.5	14.7	11.8	0.2	2.4	94.1	11.9	13.1	I
2	冀 店	1178	3.4	512	3.5	54.5	26.4	8.2	1.6	28.1	22.6	0.1	1.9	172.7	21.8	16.9	
3	汝 南	979	2.8	1044	7.1	1.3	0.6	9.4	1.8	0.2	0.2	0.1	1.9	1.9	0.3	5.2	
4	沟 张	663	2.2	320	2.3	0.9	0.5	3.2	0.7	4.9	4.2	0.1	1.7	40.5	5.2	4.1	II
5	朱老店	476	1.4	587	3.9	0.6	0.3	8.8	1.7	5.3	4.3	0.1	1.9	41.9	5.3	4.2	
6	宋 集	70	0.2	14	0.1	5.4	2.2	14.3	2.8	10.4	5.7	0.1	1.9	43.5	5.5	5.1	
7	东 洪	534	1.6	482	3.2	—	—	8.2	1.6	0.5	0.4	0.1	1.1	5.5	0.7	2.5	
8	上 蔡	744	2.2	155	1.0	0.1	0.1	7.0	1.3	0.9	0.9	0.1	1.7	8.4	1.1	1.8	
9	西 洪	101	0.1	35	0.2	3.4	1.8	12.8	2.5	1.6	1.3	0.1	1.7	11.7	1.5	1.6	III
10	杨 庄	1022	3.0	87	0.6	—	—	61.7	11.9	0.3	0.2	0.1	0.9	5.3	0.7	1.1	
11	朱里庄	258	0.3	201	1.4	1.8	1.5	11.4	2.2	0.1	0.1	0.1	0.5	2.3	0.3	1.8	

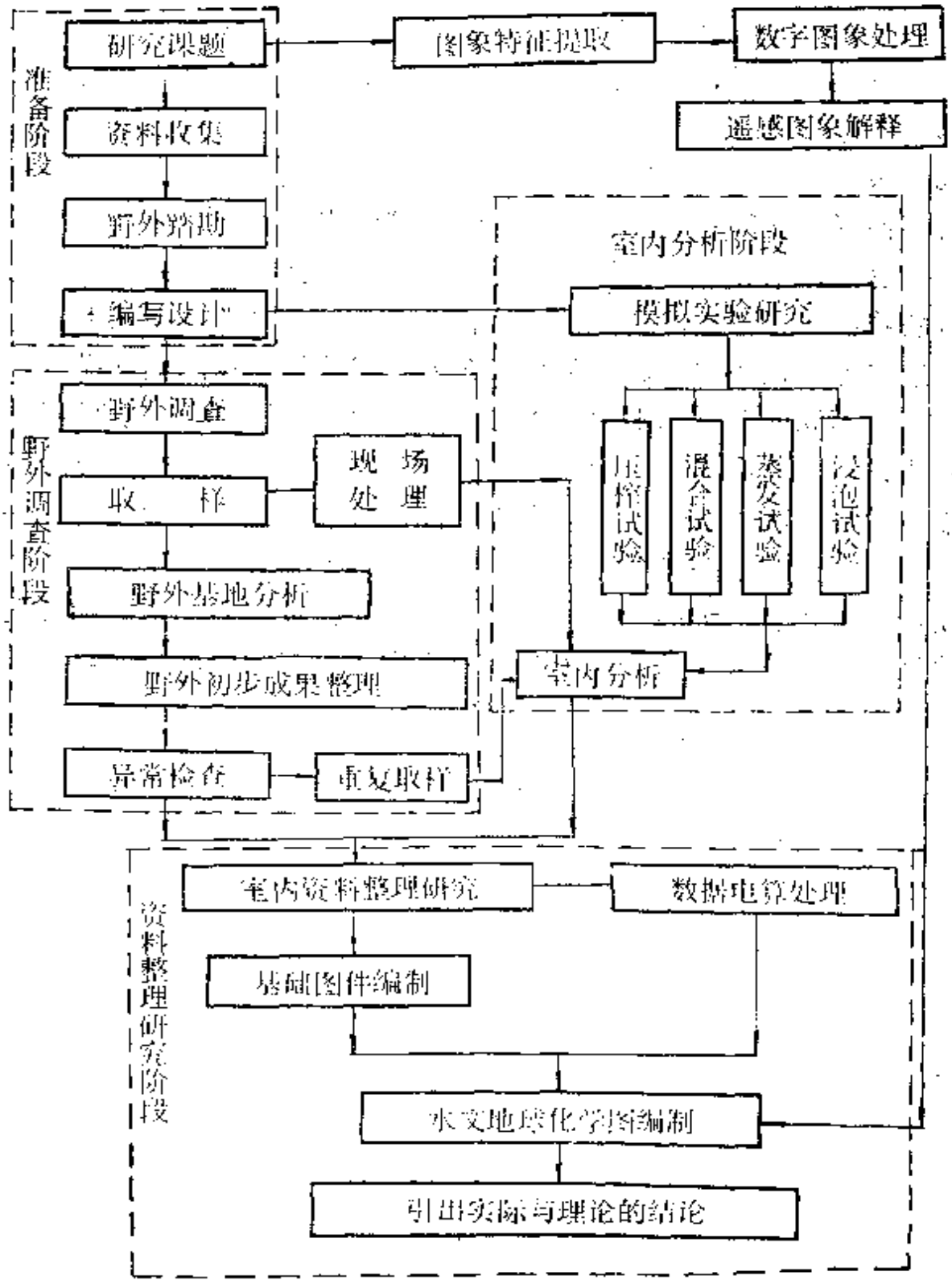


图 5-17　水文地球化学找油工作流程

前掌握的石油地质条件基本吻合。

五、报告的编写

在资料整理、综合分析研究的基础上，编写水文地球化学成果报告。一般包括绪言、工作方法与质量评述、区域地质与水文地质条件、水文地球化学测量结果、综合异常的含油气远景评价、油气勘探部署意见、结论与建议等内容。

总之，水文地球化学找油是专门性的水文地质研究工作，有其独特的工作方法，而合理、严密的工作程序，是准确捕获大量、多维化探数据的基础。多年来，在大面积油气化探测量过程中，我们对不同比例尺的水文地球化学找油法进行了研究，取得不少新认识，而且形成了一套概查→普查→详查→勘探这样一个逐步缩小勘探靶区的工作程序。在我国许多含油气盆地中发现和进一步查明、证实了一批各种类型有利于油气保存聚集的构造和圈闭，为进一步扩大油气勘探领域，提供了比较可靠的依据和有利地区。这些成果均是按照图5-17的工作流程进行而取得的。

第六章　我国水文地球化学找油的典型实例

第一节　我国水文地球化学找油的基本特点

我国水文地球化学找油的实验研究在深度和广度上均取得较大的进展，油气化探工作者结合我国的石油地质特征，开创了新的研究途径，在石油地质普查勘探中发挥了一定的作用。目前，我国水文地球化学找油法已纳入油气勘探的正规程序，成为比较完整、独立的油气化探方法。与国外相比有以下特点：

一、重视区域与局部、油气与水、深部与浅部关系的研究

国外水化学找油试验研究工作，一般仅限于一个狭小的地区范围内。我国水化学找油试验研究的一个鲜明特点是从含油气盆地的整体出发，进行大面积的测量工作、有计划、有目的地对主要含油气盆地进行水化学找油“扫面”测量。

油田水化学成分的基本类型和特征，是研究浅层水化学效应的基础，它是形成水化学异常的“母体”，决定着水化学指标的选择、应用以及异常的强度。为此，我国油气化探工作者对我国不同类型的油田水化学成分进行了深入的研究，基本认识了我国油田水化学成分的基本特征和演变规律。

油（气）与水是一对孪生的姊妹，为了探索油（气）与水之间元素相互转移的关系，以及各种离子的演变特征，进行了大量的室内模拟试验，不仅揭示了油（气）和水化学成分之间的内在

联系及弥散过程，而且为水化学异常的形成，提供了理论依据。

我国水文地球化学找油工作，遵循着从已知到未知，从试验研究到生产实践的途径进行。首先在不同地区、不同时代、不同类型的含油气盆地进行了水化学找油工作，在查明我国主要已知油田水化学异常的分布规律，异常模式及指标特征的基础上，在未知区进行生产实践，用已知的规律指导水化学找油实践。

总之，我国水化学找油研究领域之广、面积之大，投入力量之多在外国是罕见的。

二、水化学找油指标的选择、分类与综合运用

在水文地球化学找油指标的应用上，通过实践筛选和总结出一套能够提供油气(构造)多方面信息的指标系列，同美国、日本及西欧等国的学者只重视某一直接指标的单独应用形成鲜明的对照，也同苏联对水化学找油指标的提取却过于狭窄(只选取 SO_4^{2-}、H_2^+、I^-、Br、苯及甲苯六个指标）有明显的区别。

由于国外学者选择指标的局限性，削弱了水化学法的运用，这也是导致该方法没有取得实质性突破的重要原因之一。

前已述及，水文地球化学找油指标分为五大类，但在具体运用上，这些指标不能“等量齐观、并驾齐驱”，要结合测区地质特征进行提取和选择，应用最能揭示石油地质规律的那些指标进行综合解释。通常以直接指标为主，构造和间接指标为辅、环境指标为背景、成因指标判断异常性质的作法圈定异常，评价其含油气远景。关于水化学找油气指标的具体选择和应用，在典型实例中进行介绍。

三、水化学异常的确定与认识方法

水文地球化学找油方法最终要在研究区的平面或纵向上圈出与背景值不同的异常，进而评价这些异常的性质及其含油气远景，对异常的确定，前人的传统做法是：

1．对比法：将研究区的分析资料与油田水或已知油（气）田

上方的地下水化学成分进行对比，性质类似、类型相同者视为异常。

2．衬托法：将研究区内水化学成分的几何平均值作为背景值，高于背景值（或者加标准偏差）者视为异常，从而衬托出本区水化学异常。

3．断流法：在研究区域水文地质条件的基础上，沿着地下水运动方向，将化学成分不符合或与地下水流向不相一致的水样点（地区）定为异常。

上述确定异常的方法固然是可行的，但有许多不足之处，主要问题是：其一，水化学成分（包括组成与含量）是一定地质和水文地质条件下的随机变量，用油田水或已知油田的水文地球化学特征来套未知区，只能限于条件一致的地区；其二，只能单独地去考虑每个指标所提供的油气信息。油田水对上部地下水化学成分的影响是全面而深刻的，因此，孤立地运用各个指标，不利于挖掘全部分析数据所蕴藏的内在联系及其与油气藏的关系，不能从水化学成分的“整体”上评价测区的含油气远景；其三，即便是考虑或运用了指标间的相互关系来圈定与评价异常，也是人为地硬性搭配，各个指标在评价异常中所起的作用，难以给出确切的数量概念和等级。对水化学找油中的干扰因素的排除比较困难；其四，对各指标的石油地球化学意义与表示方法，多是通过经典的人工绘等值线或三角图法实现的，其工作量大、速度慢，不利于提取有效指标和最佳信息。

针对传统方法存在的弊端，建立了用电子计算机处理多母体大数据量的系统工程来确定和认识异常，不仅缩短了研究周期、充分挖掘了信息，而且提高了确定化探异常的可靠性和解释水平。

四、异常级别的划分

以往在水化学找油中，对圈定出的异常没有进一步划分和研究。众所周知，各个异常所反映的石油地质信息是有一定差异

的，对这种差异，在含油(气)远景评价时，应当进行定量研究。为此，建立了划分异常级别的依据和标准，将水化学异常的解释水平和可信度向前推进了一步。

五、水化学找油工作程序的建立

前已述及，水化学找油工作共分四个阶段，二十余项研究内容，它们之间具有机联系，互相交叉。多年的实践证明，是一套完整系统、经济快速的工作程序。

六、多种方法的综合运用

水文地球化学找油法，固然是寻找油气田的有效方法，但是，它必竟是从液体介质这一个方向来捕获油气信息的。石油和天然气对上覆地质体的影响，既涉及到液体介质，也涉及到固体（岩石、土壤）和大气层等介质，利用浅层效应的研究成果预测盆地的含油气远景时，应该从多角度、多侧面提取信息，应用多种化探方法进行测量，综合评价。各种方法“取长补短”，互相补充、验证，可以提高水化学法预测油气藏的准确性和可靠程度。目前，与水化学法配合运用的油气化探方法有：土壤（岩石）吸附烃法、遥感法、ΔC法、沥青法、同位素法及测汞法。

七、压榨水的试验研究

应用水盐平衡的理论研究水化学成分的变异特征，进行了压榨水的试验研究，即在采取水样的同时，对应采取土样，进行人工压榨。研究沉积物压榨水的化学成分及其与地下水化学成分之间的关系，有益于鉴别水化学异常的真伪，提高含油气远景预测或评价的成功率。

经过长期实践研究，我国水文地球化学找油法，已形成独特的工艺体系。

第二节　松辽盆地水文地球化学找油测量结果

一、地质构造背景

研究区位于松辽盆地中央拗陷区南部，以红岗阶地和乾长拗陷为主。它是白垩纪一第四纪长期发育的沉积拗陷，沉积中心和沉降中心一致。中、晚白垩世地层按垂直相序划分为泉头组-青山口组和姚家组-嫩江组两个旋回，在旋回间，青山口组上部缺失部分地层。白垩系沉积物厚2000—6000m，洪积相、泛滥平原相及三角洲分流平原相，依次围绕河湖相呈环状分布。目前已发现的油气藏主要分布在下白垩统河湖过渡相及三角洲前缘砂体中。区内断裂可分为早、中、晚三期。早期者为切割基底及T_3、T_5的大断裂❶，以NE、NNE向为主，均为正断层，断距大，断层倾角小。中期者为切割T_1、T_2的小断层，具有张断性质，以NNE与NW向为主，往往集中呈雁行排列；晚期断裂，为压扭性断裂。区内构造单元划分如表6-1所示。

在松辽盆地南部已发现扶余、新立、木头、新北及红岗五个油田，集中分布在中央拗陷扶新构造隆起带及红岗阶地上，具有多油气组合和油源丰富的特点。

松辽盆地是一个完整的大型自流水盆地，在地貌上为一周边高、中间低的负地形，内部地形平坦，几乎没有被切割，湖泊和沼泽湿地广布，土壤盐渍化和沼泽化现象比较严重。盆地内含水岩系的水文地球化学特征如表6-2所示。

白垩系油田水以沉积成因水为主，也有一定量渗入成因水。水化学成分为低烃类$Cl\cdot HCO_3$-Na型淡化组，总的演变方向趋向浓缩，盐分或离子进一步分异纯化。第三系和第四系下更新统承

---

❶ T_1—姚家组顶的地震反射界面；T_2—泉头组顶的地震反射界面；T_3—登娄库组顶的地震反射界面；T_5—古生界顶的地震反射界面

表 6-1　测区及周边构造单元划分

一级构造单元	二级构造单元	亚二级构造单元	局部构造名称	鼻状构造名称
西部斜坡区中段			平安镇构造	
中央拗陷区南部	红岗阶地		红岗、大安、海坨、海坨南及海坨东等构造	海坨西台地
	古龙大安拗陷南端			八郎西
	乾安—长岭拗陷	西缓坡带		乾安西
		黑帝庙构造带	情子、情北、情西、黑帝庙、黑东等构造	窗户、前七
		乾长西构造带	乾安、乾西北构造	让子井、乾113井
		东陡坡带		查干
	扶新隆起带		四克占、扶余三号构造、木头、新北等	乾101井
	华字井阶地		弧店、弧西、大敖、大老爷、双坨、白楼花、西里嘎等构造	
东南隆起区西缘	登娄库背斜带		扶余一号、登娄库、伏龙泉、顾家店、钓鱼台等构造	

压水源远流长，有统一的补给、径流及排泄系统，水交替作用比较活跃。主要靠地下径流和潜水渗入补给，除消耗于人工开采外，地下径流是重要的排泄通道，水量丰富。水化学成分演变的总趋势向淡化方向发展。第四系上更新统和全新统潜水的分布、埋藏条件主要受地貌形态的控制，以垂直交替为主，大部分消耗

表 6-2 松辽盆地含水岩系的水文地球化学特征

含水岩系	岩 性	沉积相	地下水类型	埋 深 (m)	环 境	水化学特征
白垩系	碎屑岩	内陆湖相	孔隙-裂隙承压水	300—1250	封闭的还原环境	矿化度较高，10—50 g/l，以Cl·HCO_3-Na离子组合为主，有机物质丰富
第三系-下更新统	砂岩，砂砾岩	河流相、水碳相	孔隙承压水	60—120	半封闭之氧化-还原环境	矿化度 1—2g/l，以HCO_3·Cl-Na或HCO_3-Na离子组合为主，含有机组分
上更新统-全新统	粉细砂	河流-湖泊相	孔隙潜水	2—15	开敞的氧化环境	矿化度 0.5—3g/l，离子组合变化较大，有机组分的含量变化较大

于土壤蒸发和植物蒸腾，部分以缓慢的地下径流排泄于河流和湖泊，为渗入-蒸发型，地下水聚盐速度较快，大都被咸化。

总之，上述不同类型水，有各自的成因和循环系统。水中主要离子（组分）的浓度在纵向上呈现“高、低、高”的分布特征。反映了盆地的地质发展与水文地球化学环境经历了不同的演变阶段。

松辽盆地南部就上部水文地球化学带而言，从盆地边缘到中部可划分为元素迁移带、元素富集带和元素淋滤带。本次调查采取全新统孔隙潜水水样559个，N-Q孔隙承压水水样262个，地表水样28个。

二、组分的浓度特征与选择

（一）组分的浓度特征

在本区应用的水化学指标有：常量组分、微量组分、U^{+6}、可溶气态烃、苯、酚、紫外吸收光谱等，它们的浓度分布特征如表

表 6-3　松辽盆地南部水化学组分浓度特征

	指　标	单　位	最大值	最小值	平均值
常量组分	$K^+ + Na^+$	meq/l	15.95	2.36	8.21
	Mg^{2+}	meq/l	15.63	1.66	6.44
	Ca^{2+}	meq/l	8.26	0.97	5.51
	Cl^-	meq/l	16.70	0.21	5.34
	SO_4^{2-}	meq/l	2.21	0.29	1.02
	HCO_3^-	meq/l	24.05	8.73	13.17
	矿化度	mg/l	3092.50	404.00	1074.97
微量组分	Li	ppb	25.00	5	16.5
	Ni	ppb	108	2.5	10.00
	Mn	ppb	102.5	10.2	32.5
	Cu	ppb	98.0	7	28.2
	Sr	ppb	364	5	191.5
有机组分	甲烷	ml/l	21553.4	0.07	22.39
	酚	ppb	14.0	0.0	2.3
	苯	ppb	8	0.0	0.89
紫外吸收光谱		LgE×1000	1.85	0.24	0.70
六　价　铬		ppb	3.00	0.20	1.20
$\delta^{13}C_1$(PDB标准)		(‰)	−42.00	−74.20	

6-3所示❶。

（二）指标选择的依据

1．各指标在已知油田潜水中显示的强度和分布特征。红岗油田潜水中的常量组分、甲烷、酚等指标均显示一定强度的异常值。表6-4是主要水化学指标在扶余1号含油构造上的反映。

2．应用数理统计方法选择指标。因子分析表明，常量分析、微量组分、可溶气态烃及酚等指标具有较大的载荷贡献，可达85.5%。常量组分在第一因子轴获得最大载荷贡献（32%），它表征着地下水化学成分所处的环境。因子得分最高的一组离子

❶ 地质矿产部石油地质综合大队101队，1983年，松辽盆地南部石油化探总结报告

表 6-4　扶余油田潜水中各指标参数表

指　　标	均　值	偏　差	背景值	异常值	衬　度
甲烷(μl/l)	1896	24.10	4306	6227	1.45
氨(mg/l)	3.14	2.24	5.38	9.68	1.38
有机酸(mg/l)	80.60	26.00	57.00	80.60	1.41
苯(ppb)	6.09	2.22	4.49	6.09	1.36
甲苯(ppb)	9.50	3.41	6.08	9.50	1.58

（据高洪发，1985）

(HCO_3^-、Cl^-、Na^+)，代表着水化学成分演变的阶段和方向——趋向于碳酸盐类型。可溶气态烃和酚分别在第二、三因子轴获得最大载荷贡献，分别为28.2%和18%。它们是指示油气存在的主要指标。微量组分主要在第四因子轴获得最大载荷贡献(7.3%)，是指示油气存在的次要指标。利用可溶气态烃、酚、常量组分中的Cl^-、$\gamma Cl^-/\gamma Na^+$、$\gamma Cl^-/\gamma SO_4^{2-}$、微量组分中的Cu、Ni等七个指标，进行判别分析，一组为已知油田；二组为经钻探证实无油或远景较差的样本；三组为待判样品。其判别函数式为：

$R=0.94$ (Cl^-) $+65.02$ (酚) $+0.02$ (可溶烃) $+3.6$(Ni) $+0.31$ (Cu) -7.58 ($\gamma Cl^-/\gamma Na^+$) -1.77 ($\gamma Cl^-/\gamma SO_4^{2-}$)。

$R_1=154.22$ (已知油田)；

$R_2=60.98$ (非含油)；

$R_0=100.94$ (判别值)；

统计量检验：$D^2=93.25$

$F=116.47>F0.01$ (3.22)，说明高度显著。

各变量得分：酚为39.8；可溶气态烃为37；$\gamma Cl^-/\gamma Na^+$为12.2；Cl^-为9.0；Ni为5.4；Cu为4.6；$\gamma Cl^-/\gamma SO_4^{2-}$为8.1。从中看出，它们在判别油气信息中起到较大的作用，尤其是酚和可溶气态烃。

依据上述，可用常量和微量组分为基础指标，利用有机组分

所提供的信息圈定异常。

三、已知油田的浅层水化学效应

（一）红岗油田

红岗油田位于松辽盆地中央拗陷区西部，是龙虎泡-红岗阶地南端的一个背斜带，背斜轴向NNE，西翼较陡，以断层与西部斜坡相接，东翼较缓。油田内部构造的主体比较完整，断层少、断距小、延伸矩。该构造是早白垩纪末期形成的，属构造控制但与岩性有一定关系的油气藏。具有多套油气层和埋藏浅的特点（萨尔图油层主要生产层的埋深为1200m）。渗透率比较低，平均为132MD。其上分布有明水组气藏，埋深400m。

地形自西向东缓倾，地下水沿地形倾斜方向流动，在水文地球化学分带上处于元素的迁移带和富集带的过渡地区。第四系沉积物厚70—80m，主要含水层由下更新统白土山组的孔隙承压水和中—上更新统、全新统潜水组成，前一含水层岩性为砂砾石，水量丰富，水位深3—5m；后一含水层岩性为粉细砂与粘土质粉砂，水量较小，水位深度2—8m。不同含水层的水化学成分有一定的区别。为统一水文地球化学背景，选择相对比较稳定的全新统下部含水层为主要研究对象，含水层岩性为粉砂岩—细砂岩，埋藏深度5—8m。按普查阶段的要求采取水样，各种水化学组分

表 6-5　油田内外水化学指标变化值

构造位置	区间	$K^+ + Na^+$	Cl^-	HCO_3^-	矿化度 (g/l)	可溶烃 ($\mu l/l$)	酚	U^{4+}	Li	Sr
含油构造内	最小值	5.65	0.62	9.03	0.56	309.93	0.5	0.2	10	128.8
	最大值	15.10	16.7	13.64	1.54	5895.45	1.6	0.6	25	344.0
含油构造外	最小值	2.36	0.21	6.21	0.69	6.9	0.1	1.8	5	5
	最大值	15.95	0.71	14.65	1.59	2304.4	1.2	3.0	25	364

表中$K^+ + Na^+$、Cl^-、HCO_3^-的单位为meq/l；酚、U^{4+}、Li、Sr的单位为ppb。

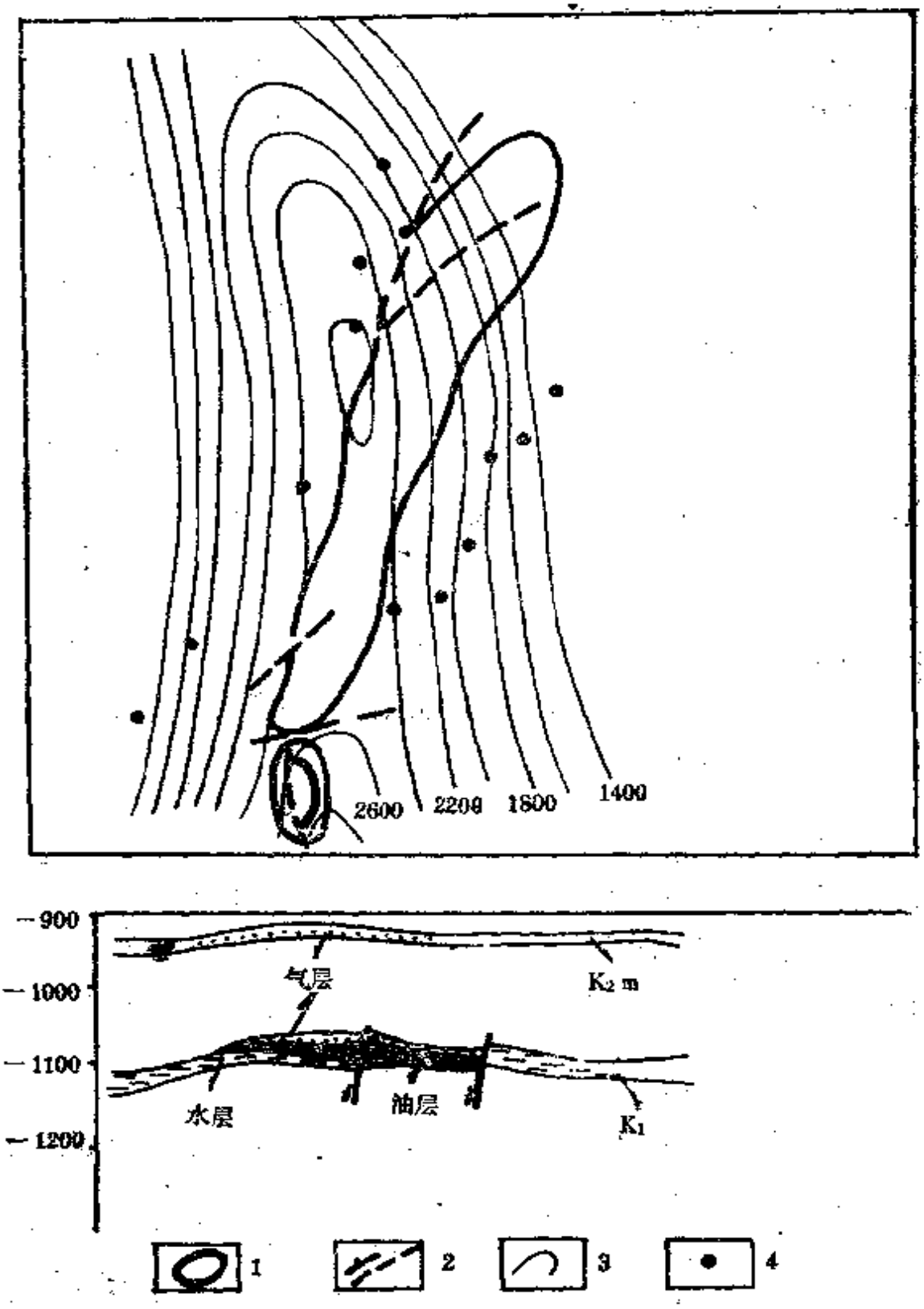


图 6-1 红岗油田潜水水化学异常图

1—含油构造；2—断层；3—可溶气态烃三次趋势面（μl/l）；4—矿化度四次趋势面剩余异常值大于500mg/l的点

的浓度分布如表6-5所示。

主要水化学指标在油田及其周围均有反映，指标的叠合程度高。在宏观上，主要指标的异常形态与含油构造极为相似（图6-1）。可溶气态烃中甲烷碳同位素比较重，约为－42‰，为热裂解成因，说明浅层水化学异常的形成与深部油气藏有成因上的联系。异常区水化学类型为低烃类$Cl\cdot HCO_3$-Na型淡化组。

水化学异常与油田在空间位置上略向两侧偏移，考其原因有两个方面：一是受红岗西侧断裂的影响，该断裂在深部碳氢化合物向上扩散运移中起了通道作用，影响浅层地下水化学成分；二是红岗油田在微地貌上为一岗状地形，绝对标高比周围略高，大气降水渗入补给，使构造上的潜水受到冲刷，相对淡化，并向东西两侧流动，矿化度四次趋势面分析剩余异常值的高值点，沿构造高点的两侧分布，正是这种作用的结果。

（二）农安含油气构造

农安构造是松辽盆地东南隆起区德惠拗陷的背斜带，它是在上侏罗系断块隆起的基础上发育起来的，轴部主要由白垩系下统（泉头组、青山口组、姚家组）组成，缺失白垩系上统。据泉头组顶面绝对高程所圈定的构造呈NE—SW向，分为北部和南部两个构造高点，前者主要产天然气，后者则主要产油，油气生成于侏罗系暗色泥岩，向上运移储集于泉头组第三段。断裂比较发育，新构造运动使该区地形仍处于拱形隆起阶段，有利于浅层水化学异常的形成。油田水化学成分为低烃类HCl·Cl-Na和$Cl\cdot HCO_3$-Na型淡化组。

本区在地貌上为河谷冲积平原。研究自的层主要为全新统和上更新统孔隙潜水，其岩性，全新统为淡黄、灰黄色黄土状亚砂土和砂砾石，上更新统上部为黄土状亚砂土，下部为灰黑色亚粘土，底部为砂或砂砾层，水位深度1—5m。自流水盆地处于元素淋滤带，矿化度较低，主要离子组合为HCO_3-Ca（Na）。

浅层地下水中有机组分在农安含油气构造上有比较明显的异常，表6-6给出了有关指标的异常参数。

表 6-6 有机组分异常参数表

参数 / 项目		均值 $(\bar{X})$	标准差 (S)	异常下限	异常点（个）	异常频率（%）	异常均值	衬度
可溶烃(Al/l)		12.29	17.07	63.15	10	18.51	579.84	9.18
酚(ppb)		0.48	0.52	2.05	5	9.25	8.12	6.06
紫外 $E\times1000$	260nm	1.969	0.092	2.06	9	16.66	2.09	1.02
	310nm	1.70	0.15	1.85	12	20.37	1.88	1.02
荧光光谱(I_3)		2.77	1.07	4.82	5	9.25	14.81	3.01
苯ppb		13.76	6.13	26.02	4	7.84	31.28	2.27
甲苯(ppb)		27.47	4.04	39.59	11	21.15	41.28	1.51

图6-2是水中有机指标在构造上的展布特征从图中可看出：

1．可溶气态烃作为确定水化学异常的主要指标，较为灵敏地指示了油气藏的存在，特别是重烃，在产气的构造北高点异常范围较大，而在构造的南高点上异常的分布范围较小。构造上甲烷的碳同位素为－40.93——26.56‰，属深部热裂解成因气。

2．酚异常点主要集中在构造的南部，构造北部仅有零星异常点出现。

3．紫外吸收光谱（260nm与310nm）主要出现在构造北部，分布范围较大。荧光光谱所显示的异常，呈新月型分布在南部构造上。

总之，潜水中有机指标在含油气构造上有不同程度的异常显示和反映，与非油区有明显的差异（组分、含量），它们是预测油气藏的重要指标或标型组分。从上述看出，气藏形成的浅层水化学异常，较油藏形成的异常范围偏大，某些指标的敏感性较强。由于本区处于地下水交替的活动带，水中化学成分（元素）遭受较强的淋滤作用，对异常的强度有一定的影响。

四．未知区水化学异常的确定与特征

（一）中央拗陷区

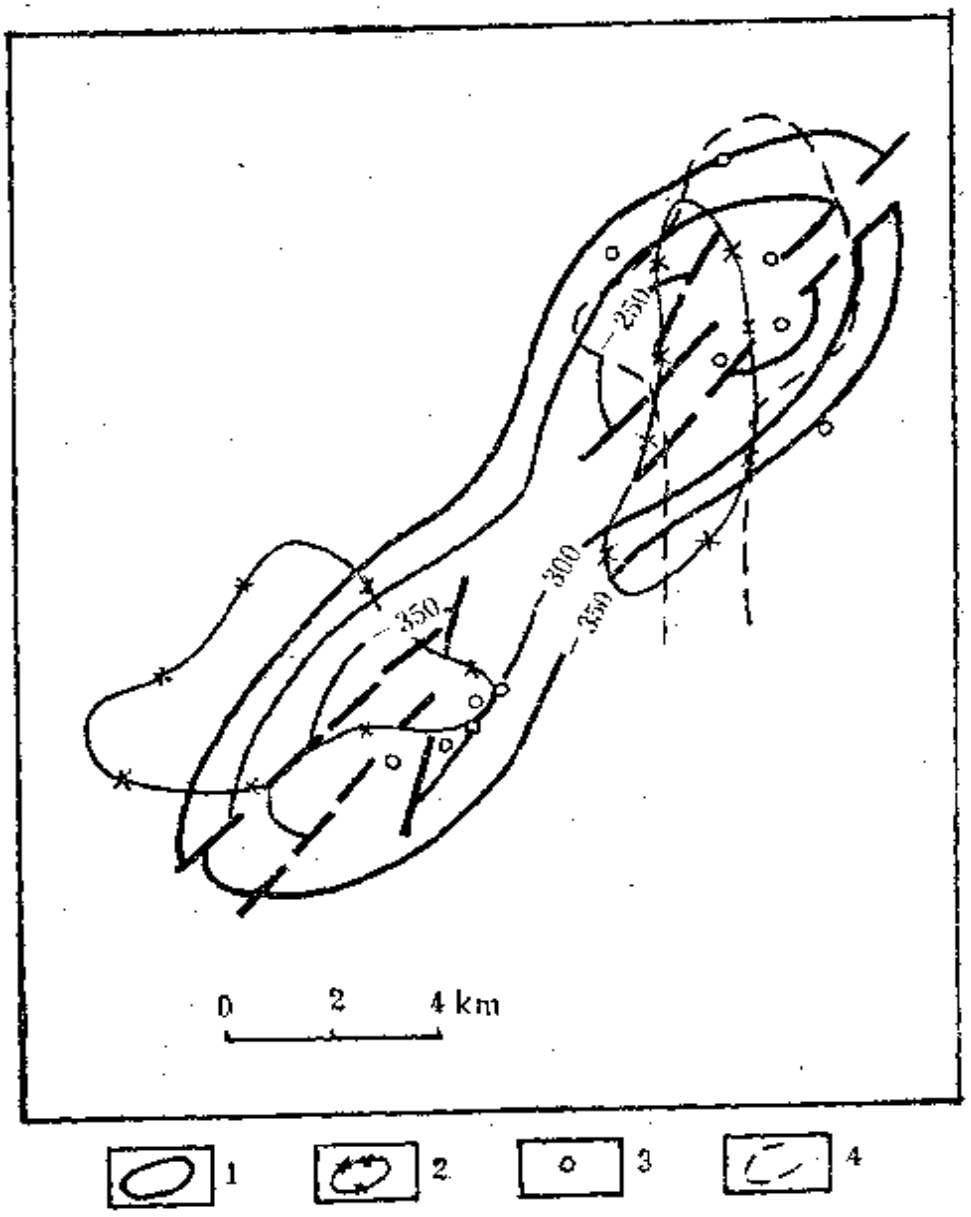


图 6-2 松辽盆地农安含油气构造潜水中有机组分异常图

1—泉头组顶面等高线；2—甲苯异常；3—重烃异常；4—紫外吸收光谱异常

本区潜水水化学成分的分布特征是：由盆地边缘至中心，由低矿化度(小于0.5g/l) 的HCO_3-Ca型水过渡为矿化度等于0.5—1g/l的HCO_3-Na·Mg型水，中心部位变为矿化度大于1g/l的HCO_3-Na或HCO_3·Cl-Na型水，呈现比较完整的环状分布。测区基本上位于盆地中心，由于径流滞缓，含水层埋藏较深，地下水循环条件较差，使地下水矿化度增高，易迁移的元素，如Cl^-、Na^+等含

量增加，Ca^{2+}含量减少。离子含量$Na^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$，$HCO_3^{-}>Cl^{-}>SO_4^{2-}$，阳离子随矿化度的变化曲线如图6-3所示。上述的水化学成分的演变规律，主要与深层地下水的活动和影响有关，在越流条件下，通过弱透水层相互补给，使浅层地下水化学成分与深部地下水有相似的特征，为在浅层地下水中提取油气信息奠定了基础。

区内各指标经概率检验，基本上服从或接近正态分布，故应用以下两种方法确定异常，一是均值加标准偏差的方法确定异常

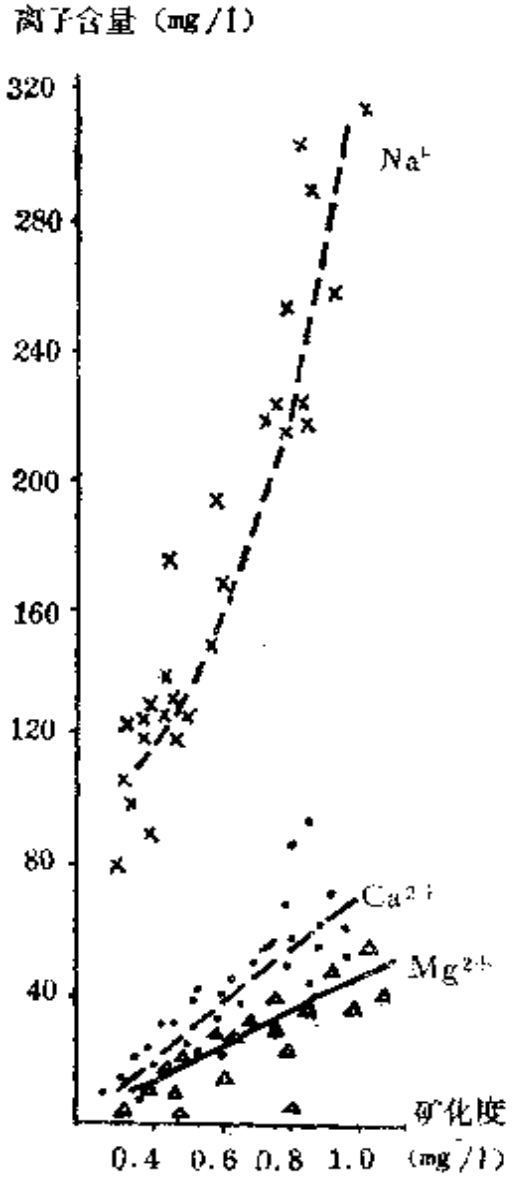


图 6-3 地下水中阳离子与矿化度关系曲线

表 6-7 主要指标异常值参数表

指　　标	均　值 $(\overline{X})$	标准差 $(\overline{S})$	异常下限	异常率 (%)
酚(ppb)	0.853	0.897	$\overline{X}+S=1.75$	10.5
可溶气态烃 (μl/l)	23.40	292.6	$\overline{X}+S=316.0$	17.4
苯(ppb)	10.70	4.13	$\overline{X}+S=14.89$	16.5
紫外吸收光谱 ($E\times1000$)	0.70	0.05	$\overline{X}+S=0.75$	14.0

下限值（表6-7）；二是利用前述判别分析的方法，凡是判别值大于R。分界值的均视为异常点，将R。值作趋势面分析（四次），求算正剩余异常点。在本区反映油气信息最灵敏的指标是可溶气态烃、苯、酚及紫外吸收光谱。

由上述两种方法确定了各指标的异常下限值后，再圈出它们的异常，并叠置于常量组分的典型趋势面分析图上，即构成综合水文地球化学异常图。再结合土壤吸附烃类和壤气汞的测量结果，提出了七个水化学异常，如图6-4所示。

1．八郎西异常：位于扶余构造带，八郎-大洼鼻状构造上，与新北油田有相似的地质背景与成油条件。水中可溶气态烃、酚、紫外吸收光谱、Cl^-及脱硫系数等指标，有较强的异常显示，异常衬度在2—2.5之间，各指标间吻合较好。该异常不仅在潜水中有显示（5个潜水异常点组成的），而且在深层地下水（Q_1—N承压水）中亦有显示（3个测量点）。异常面积约35km²。

2．海坨子西南异常：位于缓坡带的海坨子构造上，水中可溶气态烃、酚、紫外吸收光谱及Cu等指标均有较强的异常显示，衬度为2.33，由5个潜水异常点组成。壤气汞亦有异常显示。异常面积约38km²。

3．乾安西北异常：位于向斜构造鞍部的乾安北构造上，异常具有多指标重合的特点，其中酚、可溶气态烃、紫外吸收光谱、

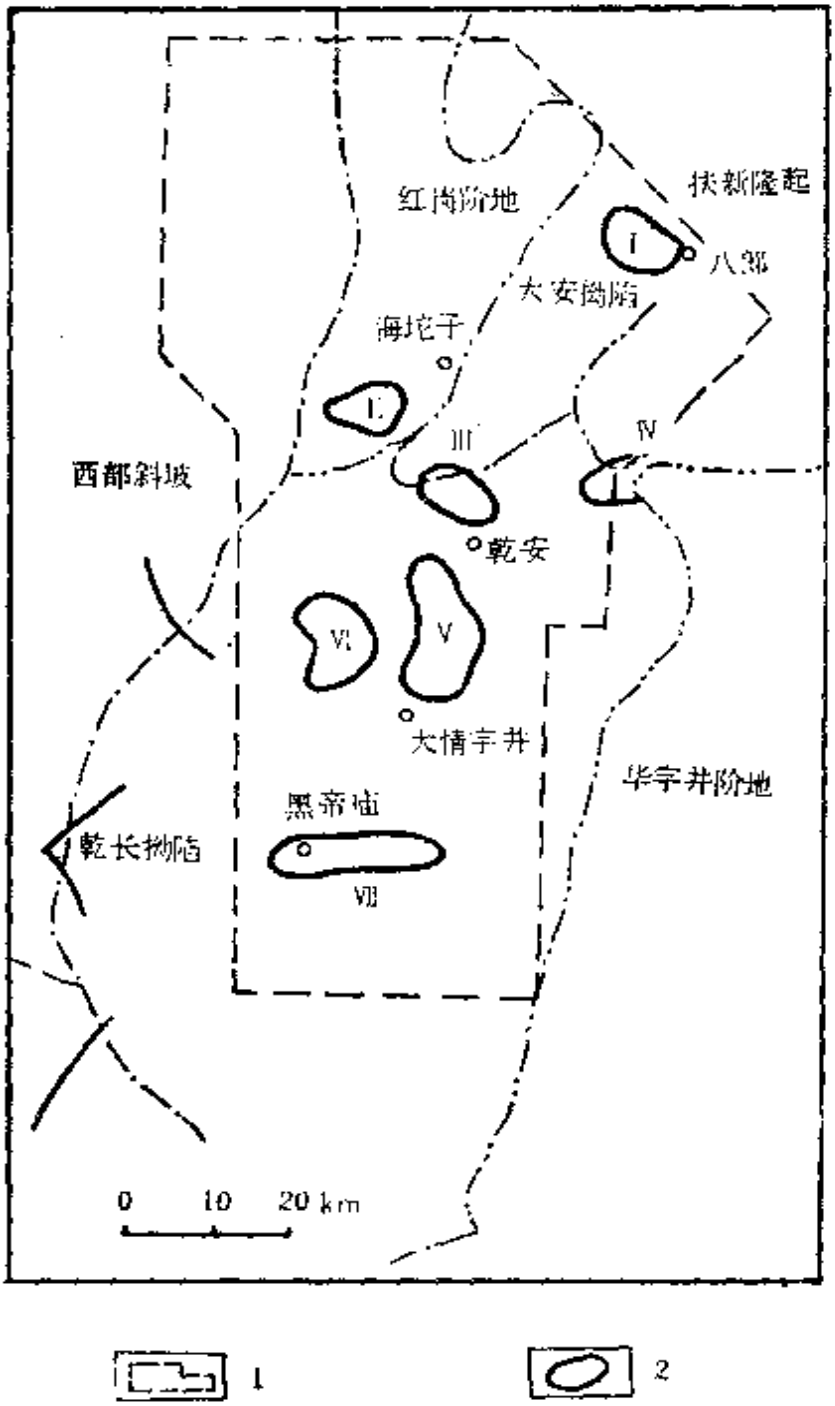


图 6-4 松辽盆地南部水化学综合异常图

(据龚维淇，1983)

1—工作区范围；2—异常

Cl^-、Cu、Ni等指标的异常显示较好。$\delta^{13}C_1=-43‰$，衬度为2—2.5。由3个承压水异常点和6个潜水异常点组成。壤中气汞和土壤吸附烃类气体均有异常显示。异常面积约为50km²。

4．巨字井异常：位于巨字井鼻状构造上。异常由紫外吸收光谱、酚和可溶气态烃等组成，与壤中气汞和土壤吸附烃类气体异常吻合较好。

5．大情字井北异常：位于大情字井构造北部，处于河湖过渡带的保安砂岩体上。是一个由多指标组合而成的异常，其中酚、可溶气态烃、紫外吸收光谱等指标显示良好，衬度大（2.5—9）。异常各由6个潜水和承压水异常点组成。面积约为85km²。

6．大麻苏北异常：所处地质构造部位与大情字井北异常基本一致。异常由酚、紫外吸收光谱、Cl^-、Cu、Ni等组成，衬度在2—3之间。由5个承压水异常点和6个潜水异常点组成。异常面积在50km²左右。

7．黑帝庙异常：处于长岭凹陷中心的黑帝庙构造上。异常由酚、可溶气态烃、紫外吸收光谱、Cl^-、Cu、Ni等组成，衬度2—3。由3个承压水异常点和11个潜水异常点组成。呈东西向分布。异常面积约80km²。

1984年，石油部吉林石油指挥部在所圈定的Ⅲ号异常（海坨子西南）和Ⅴ号异常（大情字北）内进行钻探，获得了工业油流，并开发生产。证明水文地球化学找油法所圈定的异常是可靠的。其它异常有待以后钻探验证。

（二）东南隆起区

在本区的次一级构造单元的梨树拗陷进行了水化学测量，主要研究目的层为下更新统承压水。采集水样357个，采样点的分布基本上是均匀的（表6-8）。

对各指标进行概率分布检验，均呈偏态（正、负）分布。根据因子分析结果，苯系物、紫外吸收光谱、荧光光谱、可溶气态烃及酚分别居第一到第五因子轴，表明它们在决定异常中起了重要作用。在相关分析中，上述指标间具有一定的相关性，说明它

表 6-8 样点均匀性检验表

区	点数	$\frac{(Q-E)^2}{E'}$	区	点数	$\frac{(Q-E)^2}{E'}$	区	点数	$\frac{(Q-E)^2}{E'}$	区	点数	$\frac{(Q-E)^2}{E'}$
1	7	4.1	7	13	0.21	13	11	0.97	19	15	0.003
2	15	0.003	8	19	1.19	14	21	2.60	20	17	0.33
3	19	1.19	9	7	4.10	15	18	0.69	21	16	0.09
4	18	0.09	10	12	0.52	16	20	1.83	22	13	0.21
5	11	0.97	11	17	0.33	17	14	0.04	23	15	0.003
6	14	0.04	12	12	0.52	18	17	0.33	24	15	0.003

$\chi^2 = 20.96$，在0.05水平下χ^2临界值为33.92

们之间有一定的内在联系，从而提高了有机指标组合的石油地球化学意义和异常的可信度。利用上述指标的趋势面分析和典型趋势面分析的剩余异常值，圈定了七个局部异常（见图5-5），其特征如下：

1．靠山异常：长轴NE向，向西南未封口，由4个综合异常点组成，趋势背景高，衬度较大（5.35），由苯、甲苯、酚、可溶气态烃、荧光光谱异常组成，重合性好。

2．双山异常：由4个综合异常点组成的北东向异常，趋势背景属中等，衬度大（87.6），圈闭完整，由苯、甲苯、紫外吸收光谱、荧光光谱、可溶气态烃异常组成，重合性较好。上述两个异常，位于近SN向断裂带的中部和古潜山上，可能是古潜山和不整合面油气藏的反映。

3．秦家屯西异常：为一衬度较大（12.09）的异常，由苯、甲苯、紫外吸收光谱、酚异常组成。重合性较差。

4．秦家屯北异常：由2个综合异常点组成，衬度小（4.74），由甲苯、酚、荧光光谱异常组成，重合性差。

秦家屯西和秦家屯北两个异常，位于同一断裂带上。

5．红心异常：

趋势值低，主要由酚、可溶气态烃、荧光光谱、紫外吸收光谱（260nm）异常组成，位于断裂带的北端。

6．榆树台镇异常：异常的主体近南北向分布，趋势背景低，衬度大，由7个综合异常点组成，异常封闭，以苯、甲苯、酚为主，重合性较好。位于继承性隆起的榆树台鼻状构造上，是寻找油气藏的有利地区。

7．杨大城子异常：由2个异常点组成，趋势值低，衬度小（4.77），由苯、甲苯、荧光光谱、紫外吸收光谱有异常显示，重合性较好❶。

上述水化学异常的石油地质意义，有待以后钻探证实。值得提及是，石油部吉林石油指挥部和地矿部吉林石油勘探局已重视该区的油气勘探远景，在异常的外围相继发现了油气显示。

第三节　某拗陷水文地球化学找油测量结果

一、地质构造背景

测区位于某褶皱带的东缘，北与Ⅰ号断裂及甲隆起相接，东与Ⅱ号断裂及乙隆起带毗邻，西以Ⅲ号断裂及丙断陷为界，南与丁凸起相接。面积约1325km²。

该区断裂比较发育，主要有东西向、北东与北北东向及北西向三组，前两组断裂规模大，断距达百米以上甚至千米。后一组规模较小，且具有平移性质，形成于燕山期和喜山期，切割前期形成的断裂和褶皱。各组断裂多为倾角较陡的正断层、逆断层和具有平移性质的横断层。拗陷内的局部构造有：

1．A凹陷：位于拗陷北部，走向东西，印支侵蚀基准面埋深2000m。

2．B凹陷：位于拗陷西部，走向北东，印支侵蚀基准面埋深2500m。

❶ 地质矿产部石油地质综合大队101队，1983年松辽盆地梨树拗陷油气化探报告

3．C凹陷：位于拗陷东部，走向北东，印支侵蚀基准面埋深1500m。

4．中央隆起：位于拗陷中部，走向北东，印支侵蚀基准面埋深500—1000m。

已发现的局部构造均分布在中部隆起上，它们是：

（1）一号背斜：位于北部，轴向北东，由南北两个构造高点组成，为一被断层复杂化了的长轴背斜，长轴约7km，短轴约1.3km，面积为12.6km²。轴部由青龙群组成，埋深300—400m。

（2）二号背斜：位于中部，走向北东，由南北两个构造高点组成，长约23km，宽3—4km，为一被断层复杂化了的长轴背斜。侏罗系上统云合山组直接覆盖在志留系之上，埋深500m。

（3）三号背斜，位于南部，面积约3.3km²，闭合差约150m，顶部埋藏（海拔）—1350m。侏罗系之下为二叠系和泥盆系。

（4）剩余重力高：在中部隆起上还存在着三个剩余重力高。

该区发育了加里东、海西—印支两个稳定下沉的成油期，形成了震旦纪—志留纪和泥盆纪—三叠纪两个陆—海—陆沉积旋回，在每一旋回的中期（海浸最盛期）都沉积了较厚的海相碳酸盐岩为主的生储油岩系。在三叠统青龙灰岩中已获得了少量的工业油流。

新构造运动使周边山脉多次隆起，在盆地内相对的沉降区形成河流侵蚀地貌，丘陵起伏，台地与河谷相间，残留阶地具有多种形态。

测区是自流水盆地的一部分，北部和东部山区是地下水的补给区，中部堆积平原是地下水的径流和排泄区，为一向西开口的半封闭盆地。盆地内部大部分为第四系沉积物所覆盖。由盆地边缘向中心依次是剥蚀地形（山区）、剥蚀堆积地形（三级阶地）和堆积地形（一、二级阶地和冲积平原）。区内水系比较发育，湖塘较多，分支河流多汇入主河流而外泄。

水化学测量主要采样介质为第四系松散岩类裂隙-孔隙水，它有三种含水层结构：第一种分布在一级阶地与湖积平原上，为灰黄色砂质粘土和粘土质砂互层的“多层含水结构”；第二种分布在古河床地段，含水层颗粒变粗，为“准二元结构”；第三种分布在二级阶地上，为粘土裂隙结构型。这些含水层具有相对统一的水动力系统，接受周边山区基岩裂隙水的补给，向拗陷内各级阶地方向流动，呈现水平交替运动。地下水主要消耗于蒸发、蒸腾和人工开采，部分排泄于渠河之中，运动的总方向是从北向南，由东而西向主河流方向汇集，而后流出本区。单井涌水量一般10—15t/d，地下水位深度随地形和地貌条件变化而起伏，一般在0.5—2m。

二、组分的浓度特征与选择

水化学测量按均匀布点的方式，采取样品218个。样点的均匀度经布点检验符合要求。

本区的水化学找油指标有常量组分、微量组分（Li、Ni、Mn、Cu、Cd）、可溶气态烃、苯（苯与甲苯）、酚、紫外吸收光谱（222nm）、六价铀、水型、离子组合等24个。经相关分析和R型聚类分析，把24个指标归并为五个类型即：矿化度、可溶气态烃、酚、苯、紫外吸收光谱，它们之间互不相关，独成体系（表6-9，图6-5）。在因子分析中，它们各占一个因子轴，反映了全部指标信息的89.5%。因此，可选用这5个类型的指标作为划分异常和评价其含油气远景的重要指标。

从图6-6中看出，常量组分中主要离子与矿化度之间具一定的相关关系，各个离子随矿化度而变化，反映了水化学成分变化的总趋势。从找油的角度讲，可以利用矿化度指标，代替常量组分中各个离子所反映地球化学环境的大部分信息。

所选用的五个类型指标的分布特征见表6-10。

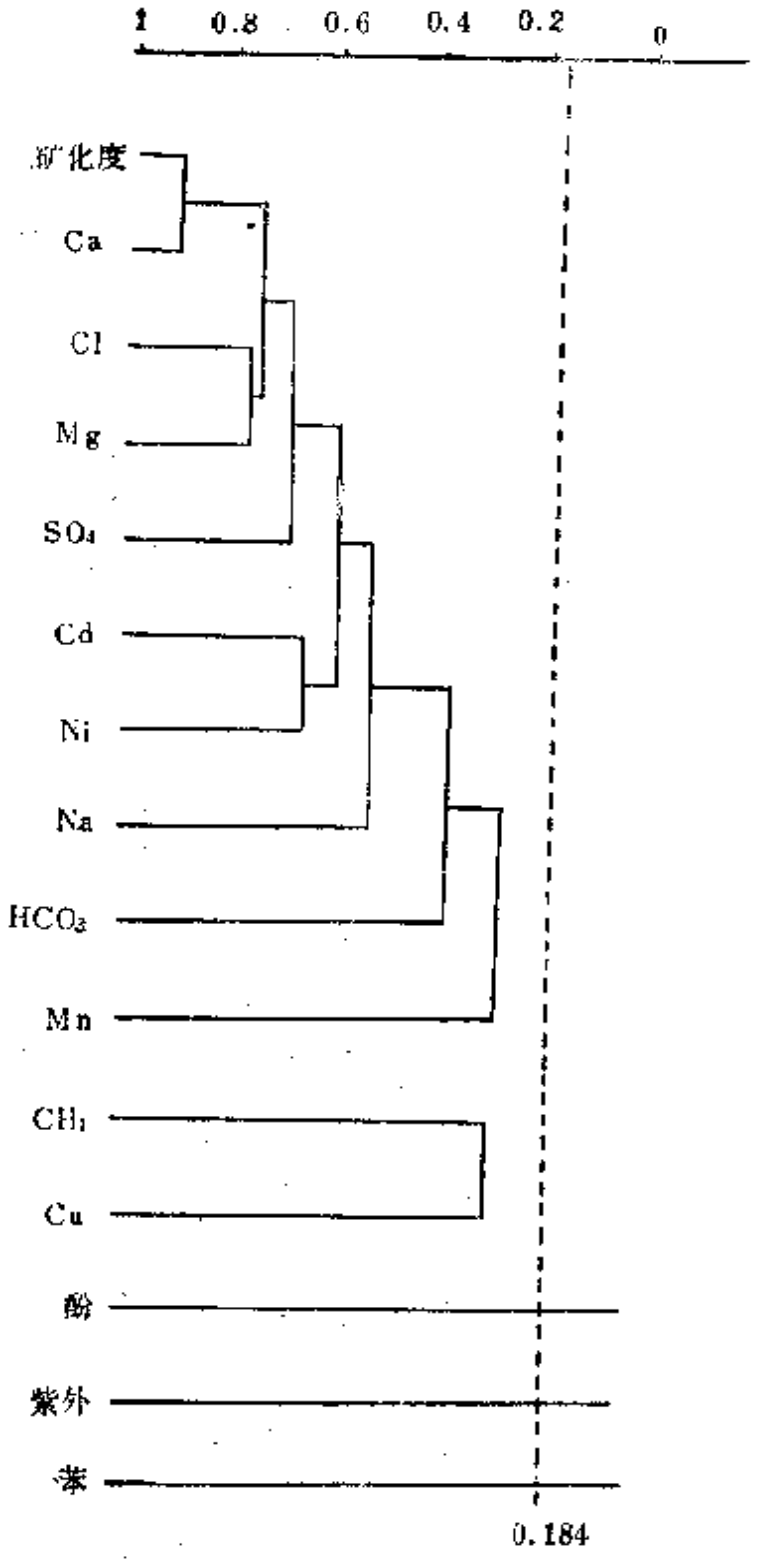


图 6-5　水化学指标R型聚类分析谱系图

表 6-9 水化学指标相关分析

	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO^-_3	Σi	酚	CH_4	Ni	Cu	Mn	Cd	紫 外
Na^+	1													
Mg^{2+}	0.53	1												
Ca^{2+}	0.41	0.75	1											
Cl^-	0.70	0.76	0.68	1										
SO_4^{2-}	0.40	0.68	0.65	0.49	1									
HCO_3^-	0.37	0.34	0.40	0.22	0.06	1								
Σi	0.68	0.88	0.90	0.82	0.69	0.44	1							
酚	−0.13	−0.07	−0.01	−0.15	−0.01	0.05	−0.07	1						
可溶烃	0.02	−0.10	−0.16	−0.10	−0.14	0.06	−0.12	0.09	1					
Ni	0.44	0.59	0.66	0.63	0.50	0.27	0.69	−0.20	−0.12	1				
Cu	0.08	0.10	0.09	0.15	0.10	−0.04	0.09	−0.12	0.29	0.16	1			
Mn	0.27	0.45	0.45	0.39	0.42	0.18	0.49	0.02	−0.11	0.36	0.07	1		
Cd	0.53	0.60	0.62	0.62	0.43	0.36	0.68	−0.09	−0.10	0.65	0.07	0.48	1	
紫 外	−0.07	−0.17	−0.16	−0.19	−0.19	0.05	−0.17	0.09	0.09	−0.18	0.02	0.01	−0.06	1

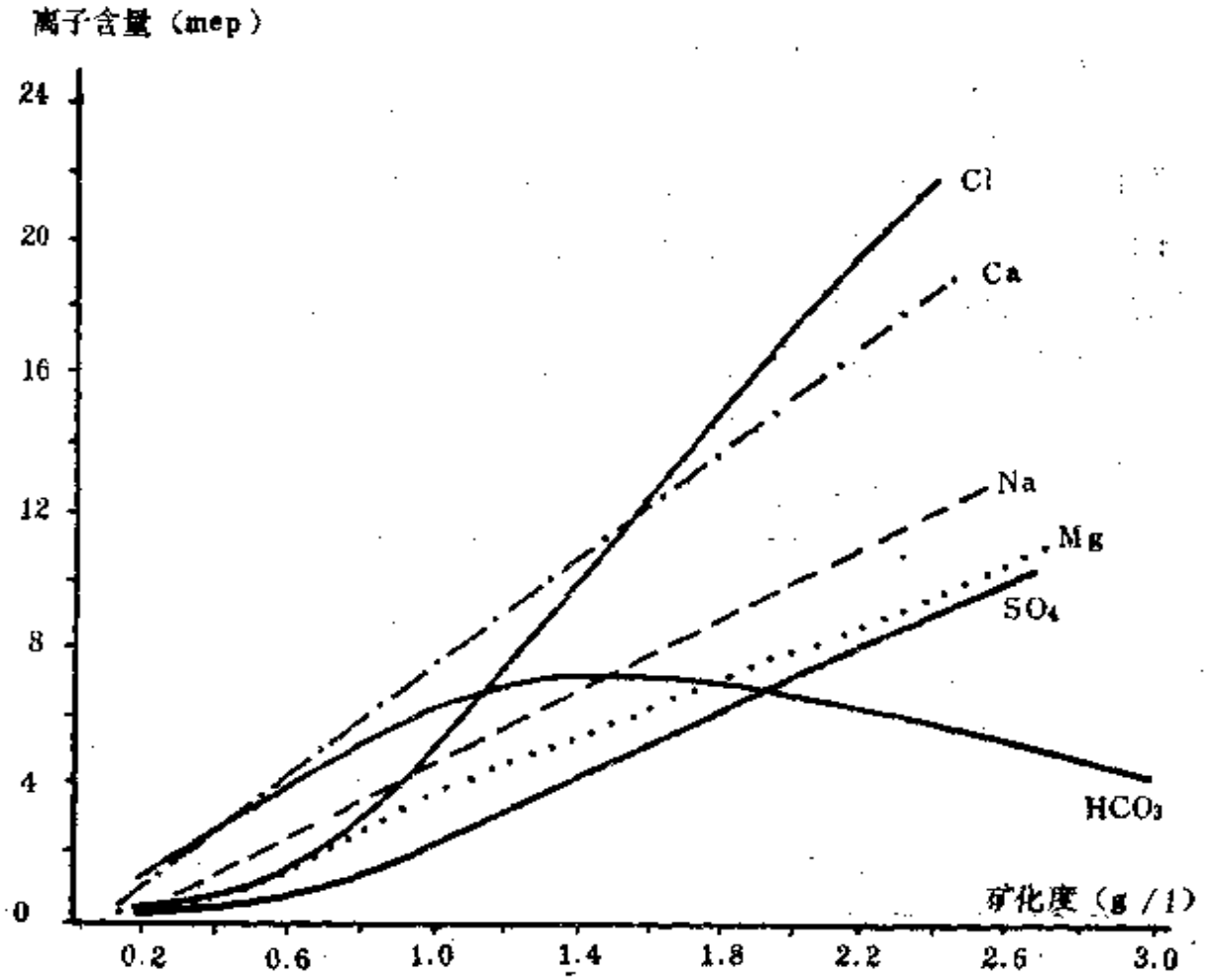


图 6-6　潜水矿化度与离子关系图

表 6-10　主要指标的分布特征

指　标	单　位	最大值	最小值	均　值
可溶气态烃	μl/l	846.55	0.50	1.37
酚	ppb	5.38	0.10	0.71
矿化度	g/l	3.20	0.10	0.92
紫外吸收光谱	lgE·1000	3.46	0.68	1.40
苯	ppb	1569.00	0.00	15.80

三、已知油田的浅层水化学效应

区内一号背斜经钻探获得油流，为已知含油构造。油田水矿化度为9.5g/e，有机物质含量普遍较高，属低烃类HCl.Cl-Na型淡化组。上述五类指标，在构造内外有明显差异，与区域背景值相比显示了一定的区别，异常的强度和衬度较高（表6-11）。这些指标组合，在背斜构造上集中出现高值点，突破了水化学成分随地下水流向在平面上呈现有序变化的一般规律。各指标圈定的异常叠合程度较高，其范围基本上反映了背斜构造的轮廓。

表 6-11 构造内外水化学成分特征

指 标	矿化度 (mg/1)	可溶烃 (μl/l)	酚 (ppb)	紫 外 (lgE·1000)	苯 (ppb)
构造内	1245.40	215.60	1.18	2.87	31.20
构造外	916.09	157.37	0.73	1.40	15.80
衬 度	1.40	1.37	1.62	2.05	2.05

构造内甲烷碳同位素变化幅度值在－45.32——－66.50‰，属于热成因气和生物成因气的范畴，说明深部来源的烃类气体与近代生物地球化学作用形成的烃类气体混合在一起，异常在一定程度上反映了油气藏的信息。

四、未知区水化学异常的确定与特征

根据水中离子的变化特征，在平面上可分为三个明显的演变阶段：即低矿化度的重碳酸盐阶段，中等矿化度的重碳酸-氯化物阶段；高矿化度的氯化物阶段。亦就是说，本区水化学成分的演变，始于重碳酸盐阶段，在缺失硫酸盐阶段的情况下，结束于氯化物阶段，而且这种演变与地下水的运动方向是相悖的。低矿化度的重碳酸盐类型的演变阶段为本区地下水化学成分提供了背景，它保持着补给源的基本特征。氯化物阶段的出现是本区水化

学成分趋向浓缩的产物，其中有较多的$CaCl_2$型水，具有低烃类$Cl\cdot HCO_3$-Na或$HCO_3\cdot Cl$-Na型淡化组水型的特点。在这样一个基本认识的基础上，利用上述指标确定异常。

区内各指标经概率分布检验，大致服从正态分布，应用均值加标准偏差的方法，确定异常下限值（表6-12）。根据异常值编制单指标的异常图，将它们叠合在一起，得到综合水化学异常图，结合壤气汞和土壤吸附烃类气体测量结果，共确定了14个水化学

表 6-12 各指标异常值参数表

指标	均值 ($\bar{X}$)	标准差 (S)	异常下限值	异常频率 (%)	异常个数
矿化度 (mg/l)	916.00	64.30	$\bar{X}+S=980.30$	13.70	8
可溶气态烃 (μl/l)	1.37	0.85	$\bar{X}+S=2.22$	16.40	9
酚 (ppb)	0.738	0.592	$\bar{X}+S=1.33$	12.39	7
紫外吸收光谱 (lgE·1000)	1.40	1.30	$\bar{X}+S=2.70$	17.00	10
苯 (ppb)	15.80	3.50	$\bar{X}+S=19.30$	12.00	10

异常（图6-7）。这些异常具有多指标吻合的特点，其中以酚、紫外吸收光谱和苯组合占多数。部分异常以可溶气态烃为主，辅以其它指标。

14个异常在平面上呈现有序的分布：一是沿拗陷边界与周边山区的衔接带断续分布（如1—5号异常、13号异常）；二是沿着与本区主要构造线一致的方向——NEE（6—8号异常）和NNE向（9—14号异常）分布。

上述异常形成的地质构造背景和含油气远景评价如表6-13所示。

值得提及的是，在圈定的6号水化学异常内打钻发现多层油气显示，预示着本区是具有含油气远景的地区。说明水化学找油法在确定海相地层的含油气远景方面也是有效的。

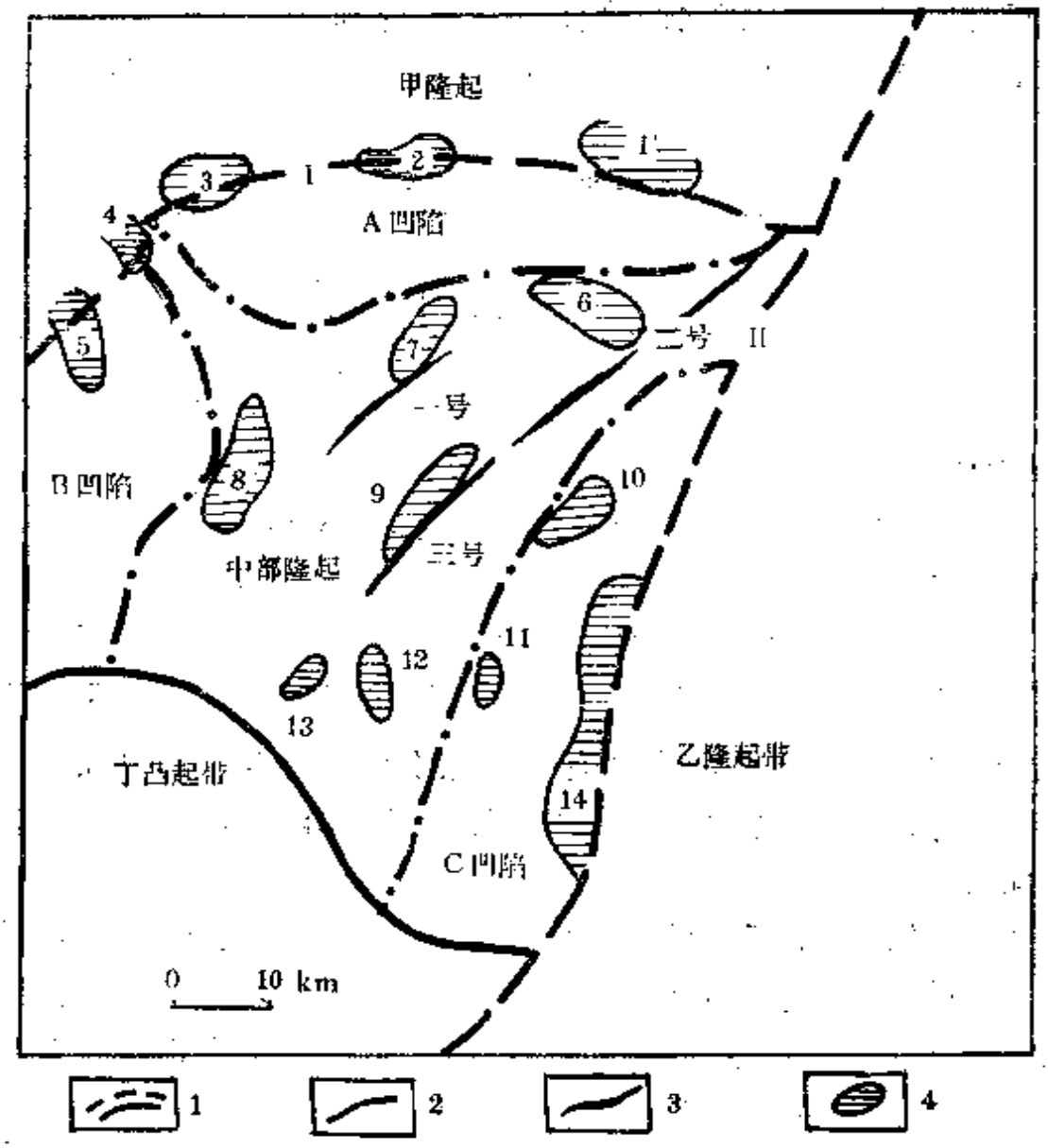


图 6-7 某拗陷潜水水化学综合异常图

(据龚维琪，1983)

1—边缘断裂；2—构造分区界线；3—背斜带；4—水化学综合异常

表 6-13 水化学综合异常评价表

区	异常编号	方向	地质构造特征	水文地质背景	异常特征		评价
					组合	强度	
北区	1—5号	EW	位于拗陷北缘某背斜南翼，依附于J、K超复线及Ⅰ号大断裂	邻近补给区，冲刷作用较强水变质程度低	酚、可溶气态烃、紫外吸收光谱	较强	与P、T露头或浅埋区附合，属于较有远景的地区
中区	6—8号	NNE—NEE	位于拗陷中相对隆起部位，印支侵蚀面埋深500—20000m	处于缓慢径流区，水变质作用强	酚、可溶气态烃、紫外吸收光谱	中等	异常与构造高及剩余重力高符合，属含油气远景最好的地区
东区	9—14号	SN—NNE	位于拗陷东部边缘，印支侵蚀面埋深大于2000m	邻近补给区，冲刷作用较强，水变质程度低	主要以紫外吸附光谱、苯、酚为主	中等	与Ⅱ号大断裂及鼻状构造吻合，属于有远景的地区

第四节 河套盆地水文地球化学找油测量结果

一、地质构造背景

河套盆地南临黄河、北以阴山弧形断裂为界，向西延伸到贺兰山西麓，向东沿色尔腾山南麓和乌拉山、大青山山前断裂延伸。自西向东发育有吉兰泰、临河、乌拉山及呼和浩特四个拗陷。

本区是一个中、新生代断陷区，经燕山运动成为大型内陆湖盆，相继堆积了下白垩系、老—新第三系和第四系湖相沉积物。

本区地处内蒙地轴与鄂尔多斯台向斜的结合部，地质构造复杂，有多条新构造断裂发育，多数与基底断裂有关，它们多是在老构造线上发展的继承性断裂，也有新发育的断裂。继承性断裂以东西向压性和压扭性为主，新断裂为北北东向的压扭性断裂。全新统地下水比较发育，含水层埋藏深度在3—5m。地下水主要接受北部山区的补给，向盆地内部富集、流动，靠天然蒸发和人工开采排泄。

二、未知区水化学异常的确定与特征

1968年曾对临河拗陷进行水文地球化学普查，采取水样392个，从区域入手调查和研究盆地内部以及周边山区的水文地质条件和水化学成分的变化规律，通过地下水的长期观测、简易抽水、在不同季节采集水样、建立试验观测站等手段，圈定了三排水化学异常（图6-8）。这些异常带内的水化学成分，在平面上的变化不符合地下水运动的一般规律，在纵向上与深层地下水有一致的特点，如硫酸根含量普遍较低、出现$NaHCO_3$和$CaCl_2$型水及Br^-、I^-、K^+等离子的含量增高等，为低烃类$Cl\cdot HCO_3$—Na型淡化组水型，它们是深层地下水沿构造带上涌浸染浅层地下水的结果。水中可溶气态烃、氧化还原电位及常量组分等指标均有异常显示，异常下限值和背景值的划分见表6-14。值得指出的是可溶气态烃在区域上以甲烷为主，而异常带内不仅组分全，而且重烃含量明显增高，绝对值超过用烷，异常值较补给源或湖沼水的含量大10倍之多，显然不是近代生物地球化学作用的结果，而与深层烃源有关。

在三个异常带内，Ⅰ、Ⅱ号异常带呈北东向分布，处于拗陷的上翘部位，异常带东端位于不同构造线的交叉部位上，异常的形成与深部流体有一定的关系，是寻找油气藏的有利部位，在化探报告的结束语中，我们曾建议进行钻探，但当时并没有引起人们的重视。十年后，石油部长庆油田在异常带内打钻，在白垩纪地层中发现了工业油流，证明水化学找油的结论是正确的。Ⅲ号

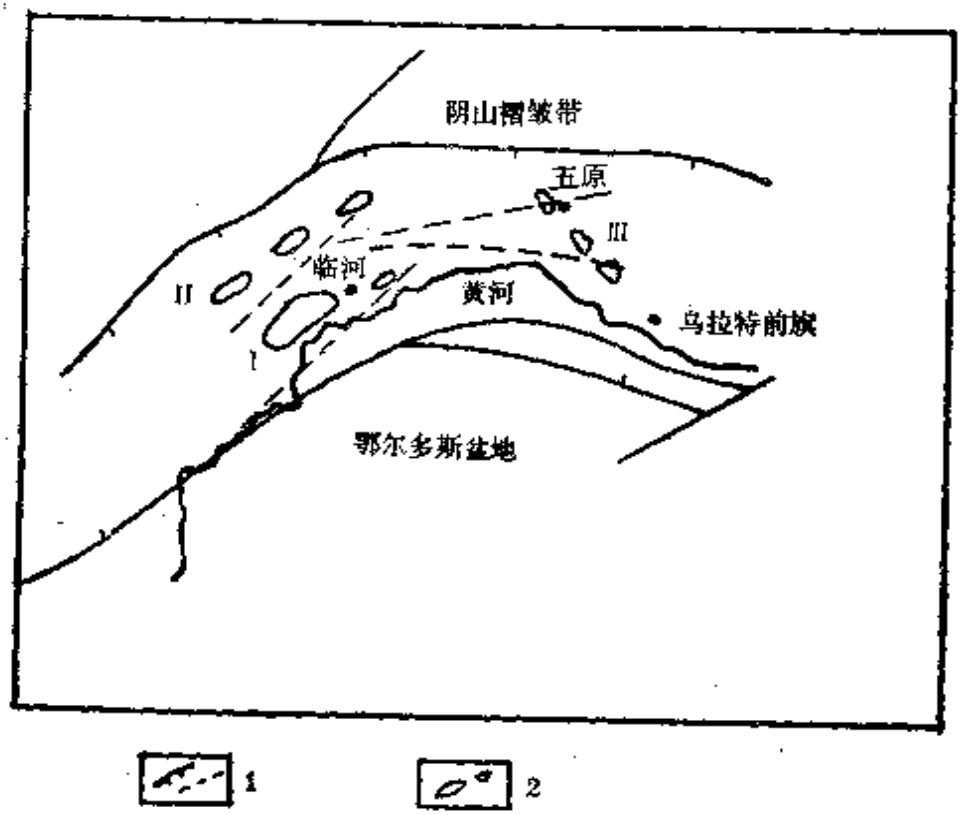


图 6-8　临河拗陷潜水水化学异常图

1—断裂；2—水化学异常

表 6-14　临河拗陷水化学异常值和背景值

指　标	水　型（苏林）	矿化度（meq/l）	主要假定盐份	Eh 值（mV）	可溶气态烃（$\times 10^{-2}\mu l/l$）		
					甲　烷	丙　烷	重烃/甲烷
背景值	Na_2SO_4	30—60	$Mg(HCO_3)_2$ $Ca(HCO_3)_2$	>60	<30	<30	<3
异常下限值	$NaHCO_3$ $CaCl_2$	≥60	NaCl Na_2SO_4	≤60	≥30	≥30	≥3

异常带中的南部和北部两个局部异常也可能是深部油气沿五原断层和复兴断层向上运移的结果，应当引起足够的重视。

第五节　泌阳拗陷水文地球化学找油测量结果

一、地质构造背景

泌阳拗陷位于南襄盆地东北隅，是在东秦岭褶皱带结晶变质岩系的基础上，经断块陷落形成的新生代早期陆相山间淡水盆地，面积约1000km²。该拗陷在形成、发展过程中，由于东南边缘弧形大断裂的继承活动，形成南深北浅的箕状形态。拗陷发育初期，为充填式碎屑岩建造，最盛期（核桃园组沉积时期）为湖相砂泥岩建造，后期湖盆萎缩，晚第三纪及第四纪逐渐演化为今日面貌。

沉积岩最大厚度约8000m，其中核桃园组是一套暗色砂、泥岩互层，夹油页岩、白云岩。泥岩中常见黄铁矿结核和团块。中、上部是生油层和含油层段。核桃园组沉积时，山间河流发育，碎屑物丰富，形成水下冲积扇砂岩体和三角洲砂岩体。水下冲积扇分布在湖盆的断岸边缘，紧临深拗陷一侧，古河流入湖即进入深水区，形成具有浊流性质的扇形砂体。三角洲分布在拗陷的北部缓坡部位。这些砂体直接与生油岩相穿插，形成有利的生、储、盖层组合。

泌阳拗陷构造相对比较简单，断裂不发育，仅在北部的缓坡部位发育有NNE和NE向两组阶梯式断裂，前者切割后者。该拗陷可进一步划分为6个二级构造带和14个局部构造。圈闭类型以鼻状构造和逆牵引构造为主。由于砂岩发育，多形成岩性圈闭的油气藏。目前已发现了双河、下二门、王集及赵凹等油田。外围部分井中亦见油流或油气显示。在拗陷中部的白云岩中获得工业油流。

总之，泌陷拗陷沉积物源丰富，断陷深，沉积速度快，生油条件好，是一个典型的“小而肥”的早第三纪生油拗陷。

泌阳拗陷的地貌成因类型有堆积和侵蚀类型两种，前者主要发育在河流的两侧，如河漫滩及阶地等；后者主要表现为岗状地形，其上多为坡积-洪积物。潜水含水层沿河流以砂砾石为主，多为孔隙水，在岗状地形上以亚粘土为主，多为孔隙-裂隙水，埋藏深度均在1—5m之间。

二、水化学成分的变化规律

本区水文地球化学测量采样点的密度平均为1个/3.5km²，所运用的指标有常量组分、微量组分、有机组分及$\delta^{13}C_1$等。

本区潜水化学成分在水文地质条件、地形地貌、地质构造及油气诸因素的控制和影响下，呈现复杂多变的特点。从宏观上看，水化学成分有明显的东西分区，南北分带的现象，即沿着地下水的流向，从东向西地下水矿化度有逐渐增高的特点；拗陷的南部水质一般较好，而北部相对较差。这一变化趋势又因横穿测区的泌阳河和三夹河的干扰而更加复杂化。统计资料表明，HCO_3^--Ca^{2+}是区域背景水的离子组合，在异常地段，Na^+的增加速度较快，呈现$Na^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}$的顺序，水型主要是低矿类HCO_3·Cl-Na型淡化组。按苏林分类，主要水型是$NaHCO_3$型水和Na_2SO_4型水，其次是$MgCl_2$型水和$CaCl_2$型水，主要分布在测区北部及断裂发育地带。水中有机组分也显示南北有别的特点，就总体而言，拗陷北部或东北部以轻组分为主，显示了以油气或稀油为主的特征；而南部或西南部以重质组分为主，显示了以稠油为主的特点。水化学成分发生分异的原因固然很多，但深部油气的存在和性质上的差异，是一重要原因。

三、已知油田的浅层水化学效应

泌阳拗陷油田水化学成分具有独特的风貌，矿化度很低（最低者只有0.5g/l），由拗陷边缘向中心呈同心圆状递增，最高可达20g/l左右。随矿化度增高，水化学成分或离子组合发生有规律的变化，即由单一的HCO_3-Na型水过渡为Cl·HCO_3-Na或Cl-Na

型水。水中可溶气态烃等有机组分也显示同样的规律性变化。这些特点说明，地下水径流是汇集型的，最终没有将溶于水的盐类带出拗陷，而是赋存于流体自身中，以“越流”排泄的形式补给上部地下水。水化学成分在纵向上可分为两个水文地球化学带，上带埋藏深度在1500m左右，矿化度不超过5g/l，淡化系数（$Cl^-/HCO_3^- + CO_3^{2-}$）为0.3—0.6；下带矿化度增高，水化学成分向浓缩富集的方向发展。这种水文地质结构和特点，为浅层水化学异常的形成奠定了基础。

将常量组分、微量组分（Li、Ni、Mn、Cu）、有机组分及甲烷碳同位素等全部指标经电算处理后，结合指标的地球化学性质和在确定异常中所起作用的大小，划分为Ⅰ级指标——紫外吸收光谱（222nm、315nm、254—258nm、360nm）、荧光光谱（405nm）和可溶气态烃；Ⅱ级指标——苯、酚等；Ⅲ级指标——常量组分和微量组分。已知油田的浅层水化学成分有明显的异常出现，就水化学异常形态类型和模式来讲，有块状异常、环状异常及同心圆状异常三种。就指标组合而言，大都是Ⅰ级水化学指标反映较好，其它指标不稳定。利用紫外吸收光谱、荧光光谱、可溶气态烃、苯、酚作为综合评价指数，计算各油田上方潜水的PI值，大都在3—5之间。

四、水化学成果的油气勘探意义

（一）拗陷北斜坡是寻找油气藏的有利地区

1983年，石油部河南石油勘探局在泌阳拗陷开展二次油气勘探，仍把重点放在拗陷南部，对拗陷北斜坡的油气勘探远景认识不尽一致，影响了勘探工作的布署和进展。经水文地球化学测量后，在斜坡带上发现了一系列水化学异常，异常的指标组合类型、强度、衬度等方面均显示了与油气有关的迹象，而且异常模式亦较多（块状异常、环状异状、同心圆状异常），认为该区是油气聚集的有利地区。根据水文地球化学测量成果，加密地震测线，选择有利构造和圈闭进行钻探，发现了工业油流和天然气、井相

继建成两个油田。

（二）在水化学异常内发现了油气田

1．井楼块状异常区：位于拗陷的西部斜坡区，由紫外吸收光谱的重芳烃组分(222nm，和360nm）和荧光405nm等Ⅰ级指标组成强异常。各指标的主体异常范围叠合较好。1985年经钻探证实为一背斜和断层鼻状圈闭，控制了一定的石油储量。油层埋藏浅，以稠油为主，目前已投产采油。

2．古城环状异常区：位于拗陷西北斜坡带，出现以水中可溶气态烃为主、紫外吸收光谱的轻芳烃组分(254—258nm，315nm)和荧光光谱为辅的环状异常。$\delta^{13}C_1$值较大。现已探明为南倾的鼻状构造，构造轴向NW，被一系列NE走向的断层切割为多个断块。含油砂岩的物性较好，油层较厚，埋深220—1040m，是稠油、稀油和天然气三位一体的油气田。

3．付湾块状异常区：位于拗陷北部斜坡，为一较好的鼻状构造。水化学异常由Ⅰ级指标组成，Ⅱ级指标有一定的显示，但指标间的叠合程度相对较差。在异常内，经钻探见到较好的油层。

4．涧岭店同心圆状异常区：位于拗陷北部斜坡带，主要由紫外吸收光谱、荧光光谱和酚指标的异常组成，可溶气态烃在异常西部有一定的强度。当时对其石油地质条件认识尚不清楚，为了验证水化学异常，在据化探成果布钻的钻孔中，于400m处的砂岩中见到油气显示。1986年在该异常周围发现了两个含油区块。

（三）水化学测量成果对油气勘探的指导作用

泌阳拗陷的西部边缘为一低凸起，对其含油气的可能性，没有引起人们的足够重视。经水文地球化学测量，在低凸起上，发现大面积的弱异常，是寻找油气的新领域。该异常目前已受到生产部门的重视，准备进行钻探，可望有新的发现。

总之，从水文地球化学测量成果评价泌阳凹陷的油气远景，仍有很大的油气勘探潜力。

上述事实说明，水文地球化学测量是油气勘探的有效方法之一，它既能指出油气聚集的有利地区和勘探方向，又能为布置钻孔提供可靠的依据。

参 考 文 献

〔1〕 沈照理等：水文地质学，科学出版社，1985。

〔2〕 俞志汉等译：油气田地球化学普查与勘探法，石油工业出版社，1960。

〔3〕 沈照理：水文地球化学基础，地质出版社，1986。

〔4〕 黄第藩等：中国陆相油气生成，石油工业出版社，1982。

〔5〕 刘崇禧：我国陆相盆地油田水文地球化学特征，地球化学，1982，第2期。

〔6〕 付家模等：石油演化理论与实践，地球化学，1976，第2期。

〔7〕 华北石油会战指挥部石油勘探开发研究院渤海湾地区石油地质研究所：渤海湾地区古潜山油气田，石油工业出版社，1978。

〔8〕 西北大学地质系：石油地质学，地质出版社，1979。

〔9〕 石慧馨等：我国发现的地下流体地震前兆实例及其机理初步探讨，科学通报，1979，第23期。

〔10〕 孙杉等：冀中坳陷地下水的氢和氧同位素组成与成因，石油与天然气地质，1982，第3卷，第3期。

〔11〕 汪义先：泌阳坳陷油田水地球化学特征及其与油气的关系，石油实验地质，1983，第5卷，第4期。

〔12〕 刘崇禧等：油田水中可溶气态烃的组成与含量的地球化学意义，石油勘探与开发，1984，第11卷，第2期。

〔13〕 刘崇禧：我国中、新生代陆相盆地油田水文地球化学特征及油气聚集的关系，石油勘探与开发，1983，第2期。

〔14〕 王成义译，天然水系中的油田水，石油工业出版社，1956。

〔15〕 刘崇禧：我国东部油田水化学成分的基本特征，石油学报，1983，第4卷，第4期。

〔16〕 郑厚安等译：油气运移，科学出版社，1959。

〔17〕 崔秀荣：我国渤海—东海表层沉积物中吸附烃的特征，海洋地质与第四纪地质，1983，第1期。

〔18〕 刘崇禧：我国某些地区地下水中可溶气态烃的分布特征，水文地质与工程地质，1981，第5期。

〔19〕 刘崇禧：地下水中有机物质的石油化探效果，石油实验地质，1985，第3期。

〔20〕 蔡映宝：地层水中苯系物的色谱分析方法及其石油地质意义，石油实验地质，1982，第1期。

〔21〕 伍大俊：薄层层析法分离与鉴定水中酚系物，石油实验地质，1983，

37395

第1期。

〔22〕 吴德云：水沥青的分析方法及石油地质意义，石油实验地质，1982，第4期。

〔23〕 文朴等：地下水分析资料整理及钙镁离子转移形式和分配数的计算程序，成都地质学院学报，1986，第1期。

〔24〕 刘崇禧：松辽盆地南部地下水中甲烷的成因及碳同位素的地球化学意义，水文地质与工程地质，1985，第3期。

〔25〕 蔡崇文：数学地质的方法与应用，冶金工业出版社，1980。

〔26〕 刘崇禧：油气矿床的水文地球化学普查，物探与化探，1983，第7卷，第2期。

〔27〕 张金来：南襄盆地南阳、泌阳凹陷水化学法油气化探，石油学报，1986，第7卷，第4期。

〔28〕 张金来：双河油田综合化探异常及其找油意义，石油实验地质，1987，第1期。

〔29〕 Collins A. G.：Geochemistry of Oilfield Waters, New York, 1975。

〔30〕 Зорькин Л. М. Карус Е. В.：Геохимические поиски Месторождений нефти и газа, Советская Геология, 1977, № 11。

〔31〕 Филатов К. В.：Основные закономерности формирования химического соства подземных вод и поисковые признаки нефтегазоносности, МОСКВА, НЕДРА, 1967。

〔32〕 Зорькин Л. М. Карус Е. В.，Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений, МОСКВА НЕДРА, 1980。

〔33〕 Барс Е. А.：Органинеская гидрогеохимия нефтегазоносных бассейнов, МОСКВА, НЕДРА, 1981。

〔34〕 Штогрин О. Д. и Др：1978, Бензол В подземных водах крыма и Его связь С нефтегазоносностью недр, ГЕОХИМИЯ, 1978, № 2。

