

文章编号: 1000-0550(2006) 02-0193-09

沉积盆地地下水动力场特征研究 ——以松辽盆地为例

楼章华¹ 程军蕊^{1,2} 金爱民¹

(1 浙江大学海洋系 杭州 310028; 2 宁波大学建筑工程与环境学院 浙江宁波 315211)

摘要 盆地地下水动力场的形成演化与油气运移、聚集关系密切。由多个水动力体系组成的松辽盆地地下水动力场的形成与演化在平面上具有明显的不对称性,总体上盆地北部为大气水下渗向心流区;中央拗陷区为离心流区和越流泄水区;盆地南部以地下水的越流—蒸发泄水浓缩为主要特征,盆地边缘和隆起剥蚀区的局部地区为大气水下渗区。且形成在地层压力、流动方向、流体势、垂直压力梯度等方面各具特征的局部水动力单元。同时,地下水动力场的形成与演化具有阶段性,其水动力强度在纵向上具有分带性,由浅到深,可以划分出强、弱、停滞 3 个带。

关键字 松辽盆地 地下水动力场 局部水动力单元 油气运聚

第一作者简介 楼章华 男 1963 年出生 教授 博士生导师 油田水文地质学及水文水资源学

中图分类号 TE121.1⁺4 **文献标识码** A

1 前言

生油岩中的有机质和烃类与地下水的数量相比是很小的,大量的地下水运动必然影响甚至控制着烃类的运移方向和效果。有关地下水运动在油气初次运移中的作用已经开展了大量的研究工作^[1-10],如 Magara^[7]和 Payne 等^[10]认为生油岩中水运动机理包括压实流体、水热效应、渗透效应、粘土脱水作用引起的流体运动。而沉积盆地地下水动力场在油气二次运移、聚集成藏过程中亦有十分重要的作用,并被石油地质学家们广泛接受。沉积盆地地下水动力包括重力作用下的地下水流动和泥岩压实水离心流,其中泥岩压实水离心流是油气从生油岩中排出后进入储层导致二次运移,并促使油气从分散到圈闭中聚集的主要动力来源^[11-32]。重力作用下的地下水流动对沉积盆地边缘和盆地内局部隆起区以及残留盆地中的油气运移、聚集起到了重要的控制作用^[12-14, 16, 19, 22, 27, 33-39],同时也是水动力圈闭在鼻状构造中油气聚集的决定因素^[9, 40]。

因此,研究地下水动力场对认识油气藏的形成,预测油气分布规律,指导油气勘探方向都是重要的依据之一^[9, 22]。本文以松辽盆地为例探讨了含油气沉积盆地地下水动力场形成、演化的基本规律和分布特征。

2 地质背景

松辽盆地是一个位于克拉通内部的大型中生代陆相含油气沉积盆地。盆地内发育了以白垩系为主的中新生代地层,最大厚度达 10 000 m,由冲积—湖泊沉积体系形成的砂泥岩地层组成。盆地从形成到结束,经历了多期构造运动^[15],即热隆张裂、裂陷、拗陷和萎缩 4 个发展阶段^[41]。自中侏罗世,盆地以断陷为主。早白垩世开始持续沉降,形成大型沉积拗陷区。盆地白垩系底面表现了中拗、边隆的构造景观。松辽盆地沉积盖层的构造主要形成于中白垩世末期、白垩纪末期和第三纪末期,同时也是油气运移、聚集期^[15, 24]。另外,由于嫩江组沉积以后的三次构造运动和动力主要来自盆地东侧,致使白垩系褶皱和剥蚀具有东强西弱的特点^[15]。根据中浅层构造和地层特点,可将松辽盆地划分为 6 个一级构造单元和 31 个二级构造单元^[15](图 1)。

3 现今地下水动力场的基本特征

3.1 松辽盆地现今地下水动力场

3.1.1 压力场

松辽盆地的沉积盖层具有良好的渗透性,孔隙流体供排基本平衡,以正常地层压力为主。只有中央拗陷区的局部地区发育高压。黑帝庙和萨、葡、高油层

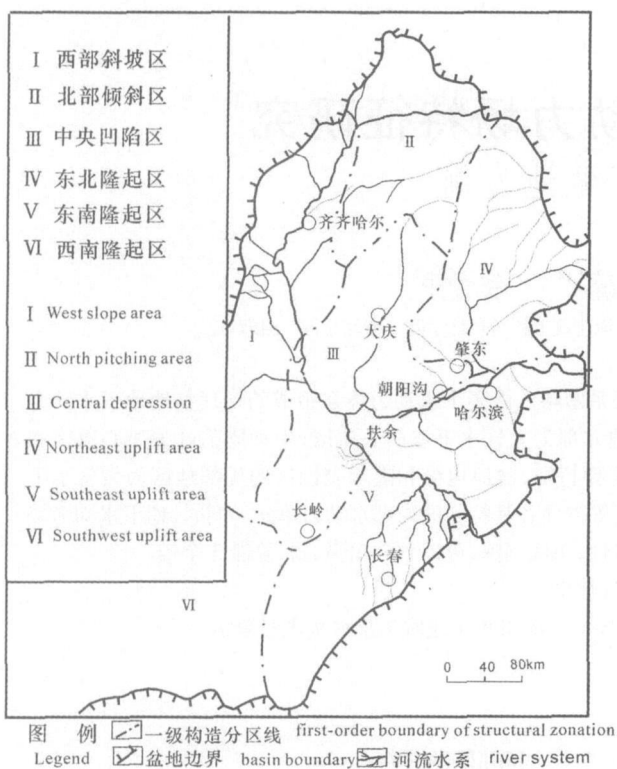


图 1 松辽盆地构造平面图(据杨万里、高瑞祺等, 1985)

Fig 1 Planary structure division map of Songliao Basin
(from Yang Wanli Gao Ruiqi et al 1985)

的高压分布范围小。在沉积埋藏过程中, 孔隙水通过离心流泄水降压。随着压实作用的减弱, 由于离心流的泄水作用、天然气的漏失作用, 只在凹陷中心的局部地区保存了高压。由于青一段盖层的封闭能力强, 加上扶杨油层砂岩成岩强度大, 储层致密, 孔渗性差, 导水能力弱, 从而导致在中央拗陷区的扶杨油层较大范围的高压区。深部地层的封闭性由于断裂作用遭到破坏, 并且没有区域性的良好盖层, 以正常地层压力为主。

3 1 2 流体势

通常流体流动方向由流体势的大小来判断, 流体由相对高势区流向相对低势区, 流动方向垂直于等势线(面)。流体势是指单位质量流体所具有的势能, 取海平面为基准面, 可表示为^[11, 12]:

$$\varphi = gz + \frac{p}{\rho_w} \quad (1)$$

式中 φ —水势, m^2/s^2 ; ρ_w —水的密度, kg/m^3 ; p —地层流体压力, Pa; z —测压点离基准面的高度, m; g —重力加速度, m/s^2

如果用 g 除 (1) 式, 得水头的计算公式:

$$h = \frac{\varphi}{g} = z + \frac{p}{\rho_w g} \quad (2)$$

很显然, 水头 h 与 φ 之间为线性正比关系。水头越大, 水势越大。因此, 水头也常用来判断地下水的流动方向^[42]。

松辽盆地东北隆起区、北部倾没区大气水下渗, 水头往倾没方向降低, 形成向心流。在三肇凹陷、齐家—古龙凹陷形成了压力系数、水头的相对高值区, 发育离心流(图 2)。因此, 总体上以盆地北端为主的盆地边缘是大气水下渗—向心流淡化区; 中央拗陷区为泥岩压实排水—离心流淡化区; 越流泄水区为过渡区; 盆地南部以越流—蒸发泄水为主, 只有盆地边缘和隆起的局部地区有间断性的大气水下渗作用, 即形成了松辽盆地不对称分布的现今地下水动力场(图 3)。结合盆地构造和沉积环境, 松辽盆地地下水动力单元大致可以划分为: 泥岩压榨水离心流、大气水下渗向心流、层间越流与越流—蒸发泄水和滞流四种类型。

3 2 局部水动力单元的分布规律

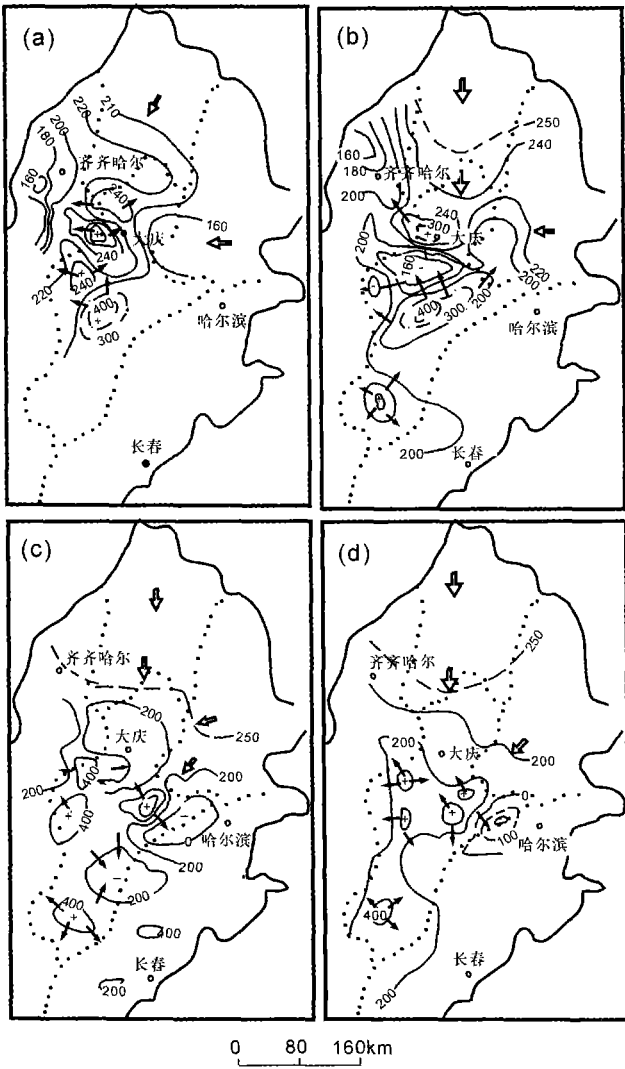
3 2 1 泥岩压榨水离心流

沉积环境及其演化决定了不同岩性地层单元在三维空间上的组合关系, 也决定了地下水动力场分布的基本格局。松辽盆地沉积盖层的沉积环境为冲积—湖泊体系, 相带呈环状分布, 砂泥比向拗陷中心方向降低, 湖相泥岩主要分布在中央拗陷地区。因此, 松辽盆地离心流主要发育在齐家—古龙凹陷、三肇凹陷, 其次是长岭凹陷和黑鱼泡凹陷。离心流呈放射状由凹陷中心高势区指向凹陷边缘的低势区。离心流区地层压力以高压为主, 在离心流方向上, 压力系数呈不规则环状降低。地下水被泥岩压实排出水交替, 矿化度、 Na^+ 、 Cl^- 浓度相对较低, 盐化系数较小, 形成了矿化度、 Na^+ 、 Cl^- 浓度和盐化系数的盆心低值区。而 $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 、 SO_4^{2-} 浓度和变质系数、脱硫系数大, 形成了 $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 、 SO_4^{2-} 浓度和变质系数、脱硫系数盆心高值区。在离心流方向上, 地层水的矿化度、 Na^+ 、 Cl^- 浓度和盐化系数升高; $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 、 SO_4^{2-} 浓度和变质系数降低。

3 2 2 大气水下渗向心流

盆地边缘或盆内隆起剥蚀区, 由于地形差或地层内部能量降低, 如十屋断陷的天然气的漏失作用, 促使大气水在重力作用下, 从盆地边缘或隆起剥蚀区下渗, 发育大气水下渗向心流。

大气水下渗补给包括大气降水补给和河水渗漏



(a) 萨尔图油层, (b) 高台子油层, (c) 扶余油层, (d) 杨大城子油层
 a. Saertu reservoir, b. Gaotaizi reservoir, c. Fuyu reservoir, d. Yangdachengzi reservoir
 → 泥岩压挤水离心流 Centrifugal flow of mudstone-compacted water
 ⇨ 大气水下渗向心流 Centripetal flow of meteoric water down-permeating
 ····· 一级构造分区线 first-order boundary of structural zonation

图 2 松辽盆地静水头(海拔 m)平面分布与
 现今地下水流动方向图

Fig 2 Planary distribution of stable water head(sea level(m))
 and present flow direction of formation water

补给。据估算,盆地北部补给区多年平均大气降水量为 469.2 mm,即每年为 $1.5014 \times 10^{10} m^3$,其中渗入补给地下水量为 $2.746 \times 10^9 m^3$ 。在盆地北部和西部,有很多河流从山区流入盆地,其中乌裕尔河和双阳河均系盲尾河,河水除地面蒸发损失以外,全部渗漏补给地下水。此外,还有嫩江、讷莫尔河、诺敏河、阿伦河、雅鲁河等大小河流流入盆地,在丰水期直接渗漏补给地下水。因此,松辽盆地地下水的渗入补给量是

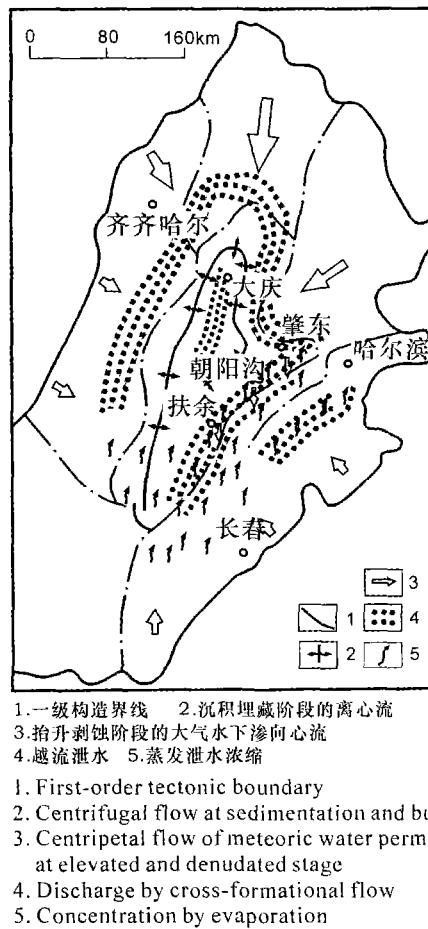


图 3 松辽盆地现今水动力场分布图

Fig 3 Distribution of present hydrodynamics of Songliao Basin

丰富的,主要的大气水下渗向心流区有: 盆地北端大气水下渗向心流区,包括东北隆起区、北部倾没区; 西部斜坡区盆地边缘大气水下渗向心流区; 长春岭背斜带—扶余隆起区局部大气水下渗向心流区。

3 2 2 1 盆地北端大气水下渗向心流区

盆地北端是松辽盆地发育河流—三角洲沉积体系的主要地区,也是一个继承性的大气水下渗向心流区。渗透层中的孔隙水供排平衡,以正常地层压力为主。大气水的连续继承性下渗使得地层水的矿化度、离子浓度低,脱硫作用彻底。由盆地北部边缘下渗的大气水,在流动过程中逐渐渗滤浓缩,矿化度、离子浓度由北往南升高。同时,大气水的下渗作用降低了向心流区的地层温度和地温梯度。

3 2 2 2 西部斜坡区盆地边缘大气水下渗向心流区

从现今水头分布可知,这个地区的水势由西部斜坡区的盆地边缘往盆地中心方向升高,垂向上各层段的水头差别也很小,没有明显的现今大气水下渗向心

流作用。但是从地下水化学参数的特征中可以发现, 该区存在过大气水下渗向心流作用, 使得地下水的矿化度、离子浓度偏低, 并造成由北往南, 由盆地西部边缘往中心方向, 地下水的矿化度、 Na^+ 、 Cl^- 浓度和盐化系数增加。与北端大气水下渗向心流作用相比影响范围小, 时间短, 且主要局限在西部斜坡区的北端。

3.2.2.3 长春岭背斜带—扶余隆起区局部大气水下渗向心流区

该区是一个伴随古水文地质旋回由越流—蒸发和大气水局部下渗两种局部水动力交替作用的叠合单元, 并且以蒸发—越流为主。在古水文地质旋回的大气水下渗阶段, 由于局部和间断性的大气水下渗作用, 在长春岭背斜带和扶余隆起区的顶部, 扶杨油层的地下水保留了相对低矿化度、低离子浓度的地下水化学性质。

3.2.3 越流泄水

大气水下渗和泥岩压实排水都给储层提供了地下水, 只有通过泄水才能保持物质平衡。泄水方式包括越流泄水和蒸发泄水。随着埋深的增加, 蒸发泄水作用减弱。越流泄水是埋藏较深层段地下水的主要泄水方式。

松辽盆地的主要泄水区有: 大庆长垣的越流泄水区; 朝阳沟阶地—长春岭背斜带—扶余隆起区的越流—蒸发泄水区; 西部斜坡区的越流—蒸发泄水区; 齐齐哈尔—大庆—肇东一带越流泄水区。

3.2.3.1 大庆长垣越流泄水区

大庆长垣位于黑鱼泡凹陷、齐家—古龙凹陷、三肇凹陷包围的中心, 是一个离心流集中指向的位置。离心流补给的地下水往浅部越流排泄, 保持长期的供排平衡。

3.2.3.2 朝阳沟阶地—长春岭背斜带—扶余隆起区的越流—蒸发泄水区

位于三肇凹陷、齐家—古龙凹陷的南侧, 是一个仅次于大庆长垣的离心流集中指向区, 以压榨水交替阶段的离心流补给的地下水往浅部越流、蒸发泄水为最显著的特征。大气水下渗交替阶段, 在局部隆起区可有短时期、小范围的大气水下渗淋滤作用。

3.2.3.3 西部斜坡区的越流—蒸发泄水区

以齐家—古龙凹陷的中央轴线为界, 离心流分向东和向西两大方向。向东离心流指向大庆长垣, 向西离心流指向西部斜坡区, 在流动过程中往浅部越流、蒸发泄水。

3.2.3.4 齐齐哈尔—大庆—肇东一带越流泄水

由离心流和向心流汇合形成的越流泄水区。这一带是盆地发育过程中长期的沉积环境过渡区, 地层岩性组合的过渡带。该带以南以湖相泥岩丰富和泥岩压实排水形成离心流为主; 该带以北以冲积成因的砂泥岩互层为主, 并以大气水下渗形成向心流为特征。离心流和向心流的汇合势必导致地下水的越流泄水, 形成越流泄水区。在地下水化学性质上具有明显的过渡性, 地下水以浓缩为特征。

3.2.4 滞流

随着地层埋深增加, 泥岩压实排水趋于枯竭, 大气水下渗受阻, 发育滞流的水动力环境^[19]; 另外, 盆地中局部空间的能量下降, 且处于相对封闭状态, 也会出现暂时性的滞留现象。

3.3 水动力体系

水动力体系是指具有完整独立的流体供、排系统在成因上有紧密联系的几个局部水动力单元的最小组合。水动力体系以盆地的凹陷为中心, 以盆地边缘或相邻的隆起脊线为边界, 从水动力体系的边缘往凹陷中心方向, 依次发育大气水下渗向心流和(或)越流、离心流。并且两个凹陷之间的越流泄水区在水动力体系的划分中往往具有重叠性(图 4)。如图 4 所示, 发育了 1、2 两个水动力体系, 凹陷之间的隆起区为两个水动力体系的叠合越流泄水区。沉积盆地的水动力场往往由一个或多个水动力体系所组成。从松辽盆地的整体上看, 可以划分出三肇水动力体系、齐家—古龙水动力体系两个主要的水动力体系, 其次还包括依安—乌裕河—黑鱼泡水动力体系、长岭水动

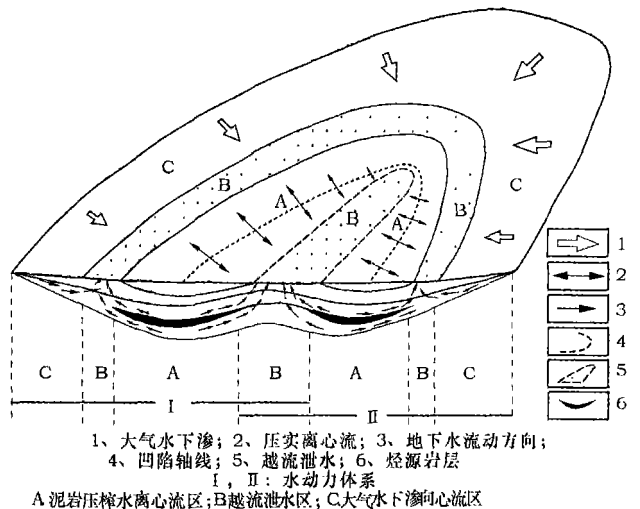


图 4 沉积盆地局部水动力单元与水动力体系关系示意图

Fig 4 Sketch map of the relationship between local hydrodynamic units and a hydrodynamic system

力体系、宾县王府水动力体系。

4 沉积盆地地下水动力场的形成演化

4.1 控制沉积盆地水动力场形成演化的因素

地层水在沉积盆地中的流动有许多机制, 其中最重要的是沉积压实和地形差^[23, 43], 相应地, 泥岩压实排水补给和大气水下渗补给则分别形成了地下水的内外补给源。因此, 含油气沉积盆地水动力场的形成、演化是沉积盆地演化在孔隙流体中的综合反映, 它直接受盆地地貌、水文网、沉积环境、构造性质及它们演化史的控制。

水文网 水文网控制了盆地的汇水系统、大气水下渗区、径流区和排泄区。对于陆相沉积盆地来说, 在盆地形成到消亡过程中水文网的基本特征通常与盆地的基底结构、沉积环境、气候有关。

沉积史 盆地沉积史决定了沉积相带和不同岩性地层单元在空间上的组合关系。水下沉积的泥岩具有高孔隙度和富含孔隙水的特点, 是控制压实水离心流形成、分布的关键因素之一。盆地边缘的冲积—河流沉积体系通常是大气水下渗补给区。

构造史 盆地的基底构造特征既控制了河流水系、沉积相带的展布; 也决定了地层之间的接触关系, 及水文地质旋回中压实水离心流阶段和大气水下渗向心流阶段的交替组合。

4.2 水文地质旋回

沉积盆地的水文地质特征具有旋回性。卡尔采夫^[21]指出, 一个水文地质旋回可以划分为两个阶段: 沉积水文地质阶段(泥岩压实水形成的离心流发育阶段)和渗入水文地质阶段(大气水下渗形成的向心流发育阶段)。前者包括从区域沉降和水侵开始, 发生沉积作用和埋藏沉积水的整个时期; 后者是当区域隆起、水退、含水岩石遭受剥蚀并发生大气水渗入的整个时期。

实际上, 水文地质旋回可能还要复杂一些。即沉积水交替和渗入水交替可同时在一个盆地的不同地区进行着^[21]。根据我国陆相盆地的特点, 每个水文地质旋回可以划分为 a、b 两个阶段(图 5): a 沉积埋藏压实排水形成的压实水离心流阶段; b 抬升剥蚀导致的大气水下渗向心流阶段。

表示沉积、剥蚀和地层上、下接触关系的综合柱状图、各时期岩相古地理图和盆地构造演化史, 是划分水文地质旋回和阶段的主要依据。嫩江组沉积末期、明水组沉积末期、早晚第三纪之间和第三纪末期

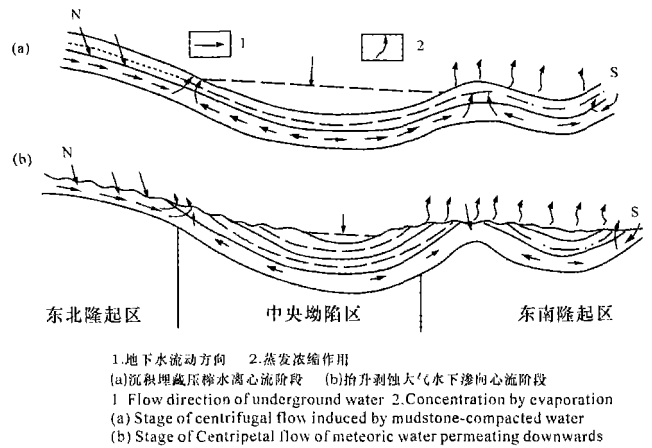


图 5 松辽盆地古水文地质旋回模式图

Fig 5 Models of paleohydrogeological cycles of Songliao Basin

的四次构造运动决定了松辽盆地的主要水文地质旋回。

嫩江组沉积以后, 发生了断裂活动和褶皱变动, 导致了嫩江组及其以下地层不同程度的剥蚀作用。总体上有东强西弱的特征, 以东南隆起区、中央拗陷区的东南侧和大庆长垣的抬升剥蚀作用最为强烈, 其中伏龙泉—梨树地区、长春岭背斜带、朝阳沟阶地最为明显, 使得局部地区嫩江组以上地层直接超覆于泉头组之上。晚白垩世末期的构造运动形成了白垩系与第三系的区域性不整合, 剥蚀强度东强西弱, 以大庆长垣、中央拗陷的东南侧和东南隆起区最为强烈。喜山运动(一幕)^[24]使得大安组、泰康组之间不整合接触, 抬升剥蚀具有更明显的东强西弱的特点。因此, 从泉头组沉积开始, 松辽盆地经历了 5 个水文地质旋回, 每个旋回可以划分为压榨水阶段和大气水渗入阶段。

4.3 地层埋藏压实与离心流

泥岩压实排水是沉积盆地水动力场演化过程中重要的孔隙水来源, 其形成的离心流很大程度上决定了沉积盆地水动力场的形成与演化。通过压出水水头的计算^[16, 22], 可以分析沉积盆地离心流的成因与演化。压出水水头是通过每一个钻孔资料计算出某一地质历史时期一定范围内盆地内循环水动力系统(离心流)的地层压缩厚度。因为不考虑地层在横向上的压缩, 故压出水水头实际上等于两个时期地层厚度之差, 即孔隙缩小值。

青山口组、姚家组和嫩江组泥岩的压实排水作用决定了松辽盆地离心流性质和石油运移方向。本文

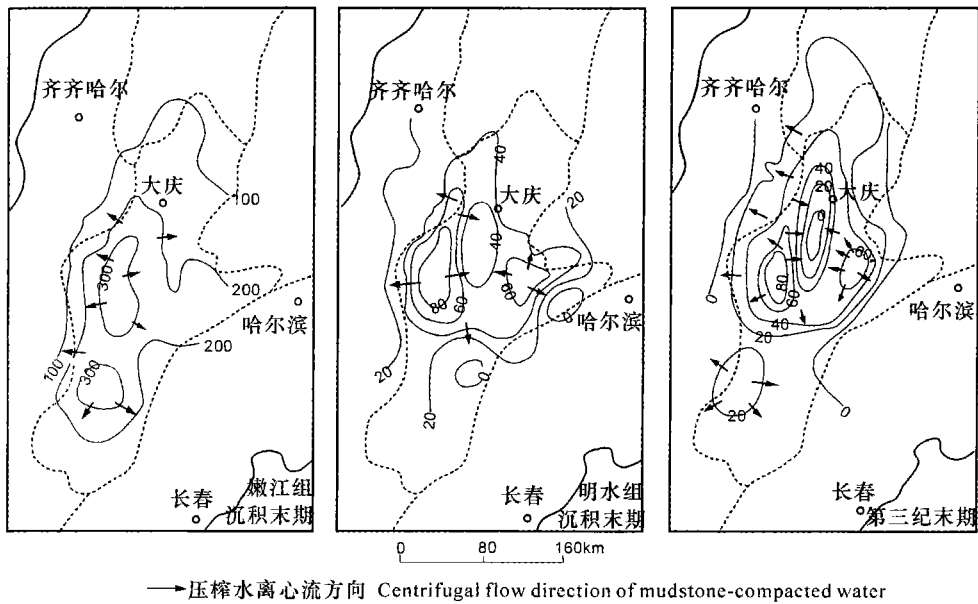


图 6 青一段泥岩压榨水水头 (m) 与离心流方向平面分布图

Fig 6 Planary distribution of compacted-water head(m) and centrifugal flow directions

以青山口组为例, 按所划分的水文地质旋回计算, 编绘了三个主要水文地质旋回阶段末的水动力图 (图 6)。嫩江组沉积以前, 压出水水头向中央拗陷中心呈环状升高, 离心流的方向由拗陷中心向边缘呈放射状排列。嫩江组沉积以后的燕山运动和喜山运动, 形成了松辽盆地内的二级构造单元, 大庆长垣地区的抬升降起改变了中央拗陷区的离心流性质, 分别以黑鱼泡凹陷、齐家—古龙凹陷、长岭凹陷、三肇凹陷为中心, 分割成多个离心流区。在嫩江组沉积以后, 大庆长垣地区由于间断性的抬升剥蚀作用, 压出水水头低, 形成了齐家—古龙凹陷、三肇凹陷靠近长垣一侧离心流的汇合区和越流泄水区。齐家—古龙凹陷的西侧和三肇凹陷东南侧的离心流指向盆地边缘。

4.4 松辽盆地地下水动力场的形成与演化

松辽盆地地下水动力场的形成、演化, 在平面上具有明显的不对称性, 总体上盆地北部和东部为大气水下渗向心流区; 南部以地下水的蒸发—浓缩泄水为特征, 只有盆地边缘和隆起剥蚀的局部地区有间断性的大气水下渗; 中央拗陷区为离心流区和离心流的越流泄水区 (图 7)。

青山口组沉积时期 (图 7a) 整个盆地还处于统一的拗陷时期, 沉积盖层的埋藏深度浅。在沉积埋藏过程中, 沉积物压实排水形成离心流。中白垩世末期, 沉积盖层的二级构造开始形成, 盆地中心南北向的大庆长垣隆起把拗陷分割成位于东、西两侧的两个主要

的次一级的凹陷, 这两个凹陷在沉积埋藏时期分别形成离心流区; 盆地边缘的地表水由于地形差在重力作用下渗入地下, 形成向心流; 在凹陷边缘离心流、向心流汇合形成越流泄水区。大庆长垣则成为东凹陷向西流动的离心流和西凹陷向东流动的离心流的共同指向区, 是这两部分离心流的共同越流泄水区 (图 7b)。晚白垩世的沉积、沉降中心向西移动, 东西两个凹陷的离心流的轴心也向西移动 (图 7c)。第三纪末期盆地东部抬升剥蚀, 东凹陷的离心流减弱、消亡。西凹陷的沉积沉降中心缩小, 且进一步向西偏移, 离心流的轴心也随之向西略有偏移 (图 7d)。因此, 自中白垩世末期二级构造形成以后, 松辽盆地地下水动力场的基本特征具有相似性和继承性。

地下水动力场的形成与演化还具有阶段性, 即水文地质旋回性: 区域沉降时期的压榨水离心流阶段; 抬升剥蚀时期的大气水下渗向心流阶段。另外, 在纵向上, 随着埋深的增加, 地层的压实强度增加, 压实排水作用减弱、消失, 离心流也减弱、停止, 因此在拗陷中心的深部地层中可能发育滞留的水动力环境。大气水下渗作用也随着埋深的增加而减弱。因此, 在离心流区, 纵向上可以划分出强离心流、弱离心流和滞留三个带 (图 8); 在大气水下渗向心流区也可以划分出强大气水下渗向心流 (自由交替带)、弱大气水下渗向心流 (交替阻滞带)、滞留 (交替停滞带) 三个带^[22]。

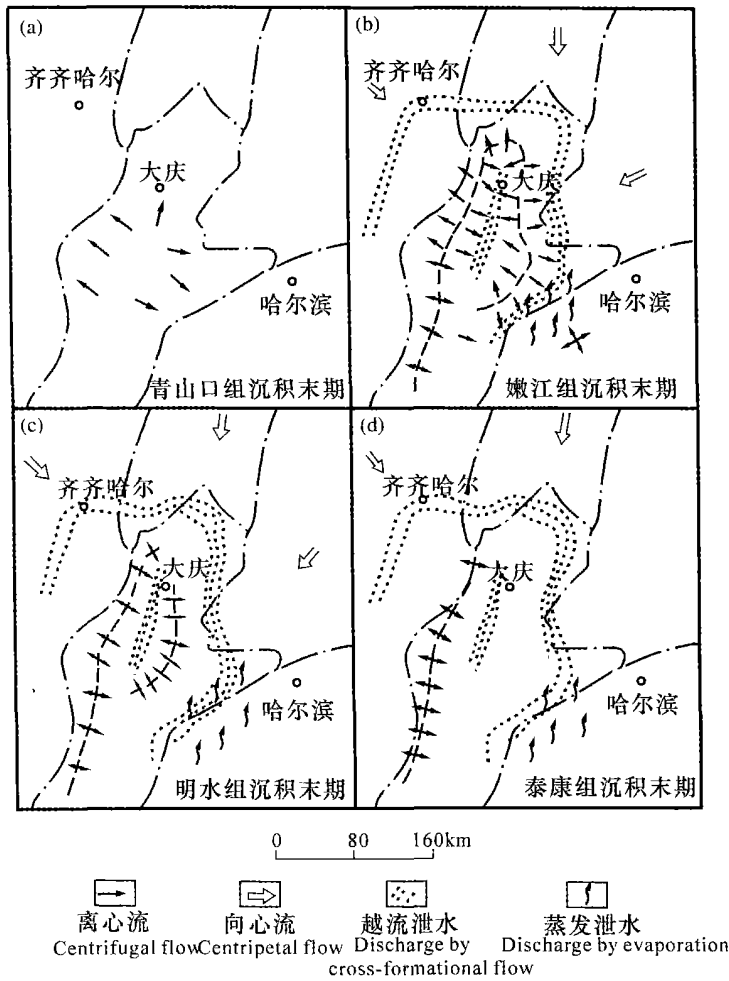


图 7 松辽盆地地下水动力场演化模式图

Fig 7 Evolution models of hydrodynamics for Songliao Basin

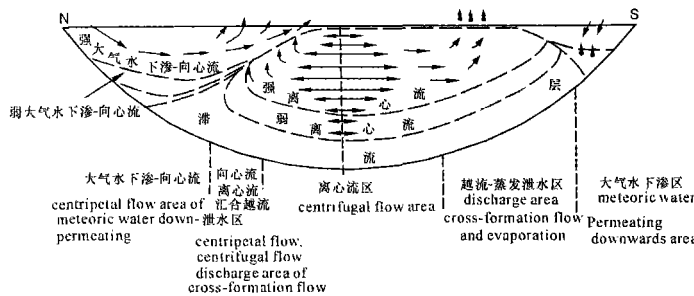


图 8 松辽盆地水动力场剖面模式图

Fig 8 Profile model of hydrodynamics for Songliao basin

5 结论

地下水动力场的形成、演化是不同岩性地层单元在三维空间上的组合规律、构造性质与演化在孔隙水中的综合反映, 直接受盆地地貌、水文网、沉积环境、构造性质及其演化史的控制。

松辽盆地地下水动力场的形成与演化在平面上具有明显的不对称性, 总体上盆地北部为大气水下渗向心流区; 中央拗陷区为离心流区和越流泄水区; 盆地南部以地下水的越流-蒸发泄水浓缩为特征, 只有盆地边缘和隆起剥蚀区的局部地区为大气水下渗区。且各水动力单元在地层压力、水流方向、测势面和垂

直压力梯度等方面各具特征。

地下水动力场的形成与演化具有阶段性: 即区域沉降时期的压榨水离心流阶段; 抬升剥蚀时期的大气水下渗向心流阶段。

在纵向上, 松辽盆地的水动力场具有分带性: 在离心流区, 可以划分出强离心流、弱离心流和滞留三个带; 在大气水下渗向心流区, 可以划分出强大气水下渗向心流(自由交替带)、弱大气水下渗向心流(交替阻滞带)、滞留(交替停滞带)三个带。

参考文献 (References)

- 1 Athy L F. Compaction and oil migration. *AAPG Bulletin*, 1930, 14: 25~35
- 2 Gussow W C. Differential entrapment of oil and gas—a fundamental principle. *AAPG Bulletin*, 1954, 38: 816~853
- 3 Snarsky A N. Relationship between primary migration and compaction of rocks. *Geologiya Nefii Gaza* Engl. trans. *Petroleum Geology*, 1961, 5: 362~365
- 4 Powers M C. Fluid-release mechanisms in compacting marine mudrocks and their importance in oil exploration. *AAPG Bulletin*, 1967, 51: 1240~1254
- 5 Tissot B and Pelet R. Nouvelles données sur les mécanismes de génèse et de migration du pétrole: simulation mathématique et application à la prospection. 8th World Petroleum Congress, Conference Proceedings, 1971, 35~46
- 6 Pakiauskas V V and Doménico P D. Microfracture development in compacting sediments: relation to hydrocarbon-maturation kinetics. *AAPG Bulletin*, 1980, 64: 927~937
- 7 Magara K 著, 童晓光, 贾承造译. 石油圈闭的地质模型. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991 [Magara K ed., translated by Tong Xiaoguang, Jiao Chengzao. *Geological Model of Petroleum Trap*. Wuhan: Publishing House of Chinese Geology University, 1991]
- 8 Ahn J H and Peacor D R. Illite/smectite from Gulf Coast shales: a reappraisal of transmission electron microscope images. *Clays and Clay Minerals*, 1989, 37: 542~546
- 9 李明诚. 石油与天然气运移. 北京: 石油工业出版社, 1994: 2~174 [Li Mingcheng. *Migration of Oil and Gas*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 2~174]
- 10 Payne D F, Tuncay K, Park A, Cramer J B and Ortoleva P. A reaction-transport-mechanical approach to modeling the interrelationships among gas generation, overpressuring, and fracturing: implications for the Upper Cretaceous natural gas reservoirs of the Piceance basin, Colorado. *AAPG Bulletin*, 2000, 84: 545~565
- 11 Hubbert M K. The theory of ground-water motion. *Journal of Geology*, 1940, 48: 785~944
- 12 Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *AAPG Bulletin*, 1953, 37: 1954~2026
- 13 Chiarelli A. Hydrodynamic framework of eastern Algerian Sahara: influence on hydrocarbon occurrence. *AAPG Bulletin*, 1978, 62: 667~685
- 14 Chapman R E. Effects of oil and gas accumulation on water movement. *AAPG Bulletin*, 1982, 66: 368~378
- 15 杨万里, 高瑞祺. 松辽盆地陆相油气生成运移和聚集. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985: 57~138 [Yang Wanli, Gao Ruiqi. *Formation, Migration and Accumulation of Oil and Gas in Nonmarine Songliao Basin*. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1985: 57~138]
- 16 地质矿产部水文地质工程地质研究所. 油田古水文地质与水文地球化学——以冀中拗陷为例. 北京: 科学出版社, 1987: 29~67 [Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources. *Paleo-hydrogeology and Hydrogeochemistry As an Example of Jizhong Depression*. Beijing: Science Press, 1987: 29~67]
- 17 Bredehoeft J D, Djevanshir R D and Belitz K R. Lateral fluid flow in a compacting sand-shale sequence: south Caspian basin. *AAPG Bulletin*, 1988, 72: 416~424
- 18 Garven G. A hydrogeologic model for the formation of the giant oil sands deposits of the western Canada sedimentary basin. *American Journal of Science*, 1989, 289: 105~166
- 19 杨绪充. 论含油气盆地地下水动力环境. *石油学报*, 1989, 10(4): 27~34 [Yang Xuchong. On the underground hydrodynamic environment in an oil and gas basin. *Acta Petrolei Sinica*, 1989, 10(4): 27~34]
- 20 Bethke C M, Reed J D and Oltz D F. Long-range petroleum migration in the Illinois basin. *AAPG Bulletin*, 1991, 75: 925~945
- 21 程汝楠, 杨淑贞. 古水文地质及其应用. 北京: 地质出版社, 1981: 23~24 [Cheng Runan and Yang Shuzhen, eds. *Paleohydrogeology and Its Application*. Beijing: Geological Publishing House, 1981: 23~24]
- 22 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理. 北京: 石油工业出版社, 1991: 97~215 [Liu Fanghuai, Yan Wansun. *Principle of Hydrogeology in Oil and Gas Fields*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 97~215]
- 23 Bjørlykke K. Fluid flow in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 1993, 86: 137~158
- 24 王志武, 杨继良, 高瑞祺. 中国石油地质志(卷二). 北京: 石油工业出版社, 1993: 145~186 [Wang Zhiwu, Yang Jiliang and Gao Ruiqi. *Petroleum Geology in China (Vol 2)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 47~63]
- 25 Berg R R, Demis W D and Misdaffer A R. Hydrodynamic effects on Mission Canyon (Mississippian) oil accumulations: Billings Nose area, North Dakota. *AAPG Bulletin*, 1994, 78: 501~518
- 26 Lee M K and Bethke C M. Groundwater flow, late cementation, and petroleum accumulation in the Permian Lyons Sandstone, Denver basin. *AAPG Bulletin*, 1994, 78: 217~237
- 27 Bachu S. Synthesis and model of formation water flow, Alberta basin, Canada. *AAPG Bulletin*, 1995, 79: 1159~1178
- 28 楼章华, 蔡希源, 高瑞祺. 松辽盆地流体历史与油气藏分析. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1998: 69~90 [Lou Zhanghua, Cai Xiuyan, Gao Ruiqi. *Analysis of Fluid History and the Formation of*

- Oil and Gas Fields in the Songliao Basin. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1998. 69~90]
- 29 Yahin N, Schaefer R G and Litke R. Petroleum generation and accumulation in the Berkine basin, Eastern Algeria. AAPG Bulletin, 2001, 85: 1439~1467
- 30 曾澹辉. 台北凹陷地下水动力特征及其对油气运移和聚集的影响. 沉积学报, 2000, 18(2): 273~279 [Zeng Jianhui. Hydrodynamic characteristics and its effect on oil-gas migration and accumulation in Tabei depression, Tu-Ha basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(2): 273~279]
- 31 李明诚. 沉积盆地中的流体. 石油学报, 2001, 22(4): 13~17 [Li Mingcheng. Fluids in sedimentary basins. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 13~17]
- 32 王震亮, 陈荷立. 试论古水动力演化的旋回性与油气的多期次运聚. 沉积学报, 2002, 20(2): 339~344 [Wang Zhenglai, Chen Heli. A view on cycles of Paleo-hydrodynamics evolution and phase of hydrocarbon migration and accumulation. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 339~344]
- 33 Tóth J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. Journal of Geophysical Research, 1963, 68: 795~4812
- 34 Tóth J. Gravity induced cross-formational flow of formation fluids. Red Earth region, Alberta, Canada: analysis, patterns and evolution. Water Resources Research, 1978, 14: 805~843
- 35 Tóth J. Cross-formational gravity-induced flow of groundwater: a mechanism of transport and accumulation of petroleum (the generalized hydraulic theory of petroleum migration). In: Roberts W H, and Cordell R J, eds. Problems of petroleum migration. AAPG Studies in Geology, 1980, 121~167
- 36 Tóth J. Gravity induced cross-formational flow of formation fluids. Red Earth Region, Alberta, Canada: analysis, patterns and evolution. Water Resources Research, 1987, 14(5): 805~843
- 37 Hitchon B. Fluid flow in the western Canadian sedimentary basin. 1. effect of topography. Water Resources Research, 1969a, 5: 186~195
- 38 Hitchon B. Fluid flow in the western Canadian sedimentary basin. 2. effect of geology. Water Resources Research, 1969b, 5: 460~469
- 39 Michal K and Bachu S. Fluids and pressure distribution in the foreland-basin succession in the west-central part of the Alberta basin, Canada: evidence for permeability barriers and hydrocarbon generation and migration. AAPG Bulletin, 2001, 85: 1231~1252
- 40 Freeze R A and Witherspoon P R. Theoretical analysis of regional groundwater flow—2. effect of water-table configuration on subsurface permeability variation. Water Resources Research, 1967, 3: 623~634
- 41 杨继良, 史若衍. 松辽盆地构造特征及其与油气的关系. 见: 中国含油气区构造特征. 北京: 石油工业出版社, 1989. 47~63 [Yang Jiliang and Shi Ruoyan. Structural characteristics of Songliao Basin and their relationship with oil and gas. In: Structural Characteristics of Oil-bearing Region in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. 47~63]
- 42 Luszczynski N. J. Head and flow of groundwater of variable density. Journal of Geophysics Research, 1961, 66: 4247~4256
- 43 Villegas M E, Bachu S, Ramon J C, and Underschutz J R. Flow of formation waters in the Cretaceous-Miocene succession of the Llanos basin, Colombia. AAPG Bulletin, 1994, 78: 1843~1862

Origin and Evolution of the Hydrodynamics in Sedimentary Basins

——A case study of the Songliao Basin

LOU Zhang-hua¹ CHENG Jun-ni^{1, 2} JIN Aimin¹

(1. Department of Ocean Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310028)

2. Institute of Architecture and Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211)

Abstract Origin and evolution of the hydrodynamics has important relationship with the migration and accumulation of petroleum in sedimentary basins. The hydrodynamics made of several hydrodynamic systems in the Songliao basin is asymmetrical obviously, with the characteristics of gravity-induced centripetal flow recharged by meteoric water mainly at its northern and northeastern regions; centrifugal flow and cross-formational flow at the basin center area, as well as cross-formational flow-evaporation at its southern area. And every hydrodynamic unit of the hydrodynamics in the Songliao basin has its own characters in aspects of stratum pressure, the water-flow direction, potential level and vertical pressure grads. Meanwhile, the origin and evolution of the hydrodynamics is characterized by stages, and its intensity has the property of vertical zonation, with the depth increasing, strong, weak and stagnant water-zones could be divided.

Key words Songliao basin, hydrodynamics, local hydrodynamic units, petroleum migration and accumulation