

# 论四川盆地海相三叠系气田地层水 水动力驱动条件及对水资源分布的控制

林耀庭<sup>1</sup>, 李承军<sup>2</sup>

(1. 西南石油局第二地质大队, 四川自贡 643013; 2. 西南石油局流体矿产研究所, 四川自贡 643013)

**摘要:**四川盆地海相三叠系嘉陵江组—雷口坡组(T<sub>1j</sub>—T<sub>2L</sub>)气田地层水按其构造开启程度、埋藏深度及水化学特征的不同,可划分出沉积变质水和渗入淋滤水两种基本成因类型,分属两种性质迥然不同的水动力系统,各自依据地静压力和静水压力由高压区向低压区驱动的水动力条件,控制了盆地海相三叠系气田地层水资源及气藏的保存和分布。

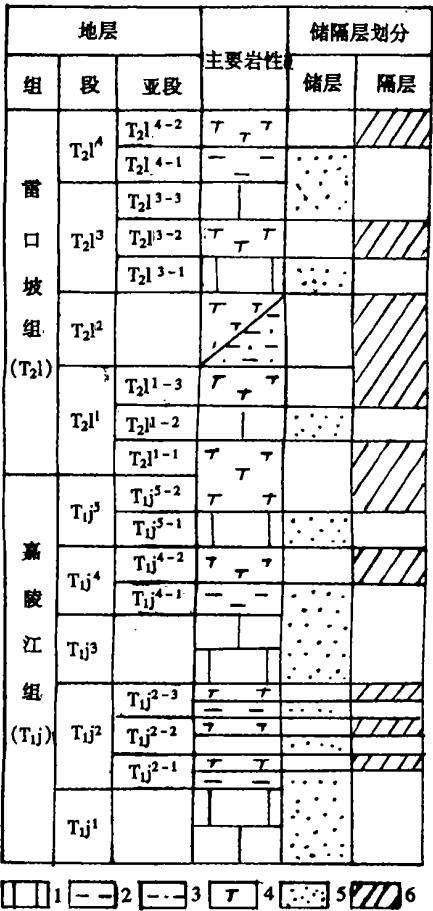
**关键词:**气田地层水;成因类型;水动力驱动条件;水资源分布;海相三叠系;四川盆地

**中图分类号:**P641.2      **文献标识码:**A      **文章编号:**1008—858X(2002)03—0005—08

四川盆地是一个半开启的大型自流水盆地。海相三叠系嘉陵江组—雷口坡组(T<sub>1j</sub>—T<sub>2L</sub>)地层中,蕴藏着气田地层水资源,其分布和保存与其水动力驱动条件关系密切。然而对盆地海相三叠系气田地层水水动力驱动条件的认识极不一致,长期以来多认为静水压力是气田地层水运移的主要驱动力,存在着由盆地边缘向内部补给→径流→排泄的区域水动力循环。笔者在长期从事四川盆地盐卤钾资源勘查开发中,也触及气田地层水水动力问题。研究认为盆地海相三叠系露头区及深埋区气田地层水明显的分属两种不同成因类型,即渗入淋滤水和与相邻盐系关系密切的沉积变质水,两者并不存在分布规律性的演变现象,显然两者不能用统一的水动力系统加以解释。本文拟从水文地质发展角度出发,联系水文地球化学特征,对盆地海相三叠系气田地层水水动力场的划分、驱动条件及水资源分布进行初步研究,以利推动和促进该研究工作的深入和发展。

## 1 气田地层水形成演化的地质背景及发展史

四川盆地早、中三叠世在上扬子台地海水旋进旋退及总的浅水海退背景条件下,形成大面积潮上蒸发岩和浅水碳酸盐岩的交替沉积,其分布遍及整个盆地,面积超过 40×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,厚度 800~1300m<sup>[1]</sup>。从盆地数百口钻井的岩性、物性特征及油、气、水等资料的统计表明,盆地海相三叠系可划分出下三叠统嘉陵江组的 T<sub>1j</sub><sup>1</sup>、T<sub>1j</sub><sup>3</sup>、T<sub>1j</sub><sup>4-1</sup>、T<sub>1j</sub><sup>5-1</sup>和中三叠统雷口坡组的 T<sub>2L</sub><sup>1-2</sup>、T<sub>2L</sub><sup>3-1</sup>、T<sub>2L</sub><sup>3-3</sup>、T<sub>2L</sub><sup>4-1</sup>等 8 个较稳定的碳酸盐岩储集层,其中发育有不同程度的粒间——晶间孔隙、层间裂缝、微细裂隙等空间,具有相对较好的储集性能<sup>[2]</sup>,尤其是在后期构造应力作用下形成的裂隙发育带,往往有利油气和气田地层水的聚集和富集。而各储集层之间的 T<sub>1j</sub><sup>2</sup>、T<sub>1j</sub><sup>4-2</sup>、T<sub>1j</sub><sup>5-2</sup>、T<sub>2L</sub><sup>1-1</sup>、T<sub>2L</sub><sup>1-3</sup>、T<sub>2L</sub><sup>2</sup>、T<sub>2L</sub><sup>3-2</sup>、T<sub>2L</sub><sup>4-2</sup>为蒸发岩或含膏泥岩层,其分布稳定,结构致密,可塑性强,在外力作用下,以连续性形变为主,难以产生裂隙,而构成区域稳定



1. 石灰岩 2. 白云岩 3. 泥质白云岩  
4. 硬石膏 5. 储卤层 6. 隔卤层

图 1 四川盆地 T<sub>1j</sub>—T<sub>2L</sub> 储隔层划分示意图

Fig.1 Schematic distribution diagram of the storage layers of T<sub>1j</sub>—T<sub>2L</sub> in the Sichuan Basin

的隔层。两者在剖面上组成了储、隔层相间平行叠置,并无水力联系的储集岩组(图 1)。各储集层中气田地层水化学特征及其浓度与其相邻蒸发岩段的盐类组合相当。两者处于统一的水—盐物理化学平衡体系。

中三叠世末盆地受印支运动影响,结束海相沉积历史,并以盆地南部的泸州隆起为中心,经历不同程度的古剥蚀(图 2),在古剥蚀最剧烈的泸州古隆起及附近,为古渗入水的淋滤循环创造条件,但其范围有限。晚三叠世及中生代时,盆地再次沉降,广泛接受了 5000~7000m 的湖沼砂泥岩沉积,海相三叠系气田地层水随同其沉积层相间叠置被埋藏下来,在上覆层的重荷下,各沉积层及气田地层水经历一个地温

缓慢增加,地静压力逐渐增大的过程,沉积层被压密脱水,地层水被渗入置换,从而使原储层中的气田地层水由此受到影响和变化,体现了与相邻盐系关系极其密切的沉积变质水的特征。

喜马拉雅运动是区内重要的一次构造运动,它奠定了盆地构造的基本轮廓,结束了盆地广泛的沉积历史,而且对盆地地形、地貌及地下水运动起着主导控制作用。由于喜马拉雅运动,盆地东部生成了一系列隔档式褶皱,在褶皱强烈的背斜轴部,地形高耸,后经剥蚀,海相三叠系蒸发盐系裸露地面,遭受淋滤剥蚀,为浅层水纵深循环提供了条件。而向斜及盆地西部地区,仍覆盖巨厚的砂泥岩层,蒸发盐系依然深埋地腹。四川盆地海相三叠系地层水即在上述漫长的沉积、成岩、剥蚀淋滤及深埋封闭等地质背景及水文地质发展历史阶段逐步形成的。纵观四川盆地海相三叠系(T<sub>1j</sub>—T<sub>2L</sub>)地层水乃经历了一个完整的水文地质发展旋回,并大体可划分出四个水文地质发展的历史阶段(图 3)。

2 气田地层水基本成因类型

盆地海相三叠系气田地层水按其构造开启程度和埋深条件的不同,对盆地深埋封闭地区及背斜轴部露头裸露区地层水,可明显划分出沉积变质水和渗入淋滤水两种基本成因类型。它们的矿化度、水型、水化学特征及其含量、比值均有显著的不同。

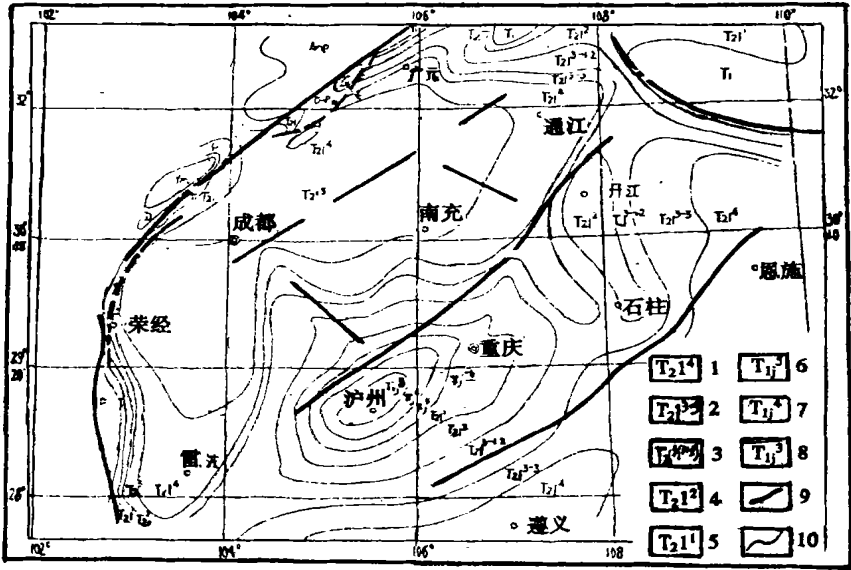
2.1 沉积变质水

沉积变质水主要分布在盆地广大持续深埋拗陷地区,如盆地西部及东部的宽阔的向斜地带,其分布与相邻蒸发盐系关系很密切,两者平行叠置,相间成层。水型多为氯化钠型,矿化度多在 100g/L 以上,乃至 300g/L 以上,Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>量比值小于 1,Br<sup>-</sup>·10<sup>3</sup>/Cl<sup>-</sup>量比值在 2—13 之间。

2.2 渗入淋滤水

主要分布在强烈褶皱的高背斜露头区及其附近,断裂裂隙发育,剥蚀作用强烈,于当地侵蚀基准面上下,隔层已遭受破坏或正遭受破坏,构成了统一的水体。水型多为硫酸钙—钠型

水,矿化度小于 100g/L,多为几到几十克每升, 值变化较大,多数小于 1。  
Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>量比值≥1,贫 Br<sup>-</sup>,Br<sup>-</sup>·10<sup>3</sup>/Cl<sup>-</sup>量比 两类水型分布及水化学特征详见表 1。



1. 雷口坡组四段;2. 雷口坡组三段三亚段;3. 雷口坡组三段二及一亚段;4. 雷口坡组二段;5. 雷口坡组一段;  
6. 嘉陵江组五段;7. 嘉陵江组四段;8. 嘉陵江组三段;9. 古断裂线;10. 古地质介线。

图2 四川盆地晚三叠世前古地质略图  
Fig.2 Draft geological diagram of the prehistoric late Trias Sichuan Basin

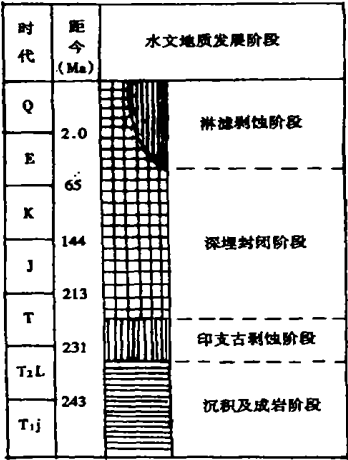


图3 气田地层水水文地质发展阶段示意图  
Fig.3 Schematic diagram of hydro-geological development stages of the gas field in-place water

表1 四川盆地海相三叠系气田地层水成因类型及其水化学特征  
Table 1 Formation types and hydro-chemical characteristics of the gas field in-place water

| 气田地层水<br>基本成因类型                                                    | 沉积<br>变质水                        | 渗入淋滤水                                                        |                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                    |                                  | 积极交替带                                                        | 缓慢循环带                                                                                                  |
| 水化学特征                                                              |                                  |                                                              |                                                                                                        |
| 优势组分                                                               | Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> 、Na <sup>+</sup> ;<br>Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> |
| 水型水类 <sup>①</sup><br>Na <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup> 量比           | 氯化物型<br><1                       | 多为硫酸钠型<br>>1                                                 | 硫酸钠型<br>≥1                                                                                             |
| Br <sup>-</sup> ·10 <sup>3</sup> /Cl <sup>-</sup> 量比               | 3-13                             | 贫 Br <sup>-</sup> 、Cl <sup>-</sup> ,<br>变化极大                 | 贫 Br <sup>-</sup> ,多<1                                                                                 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ·10 <sup>2</sup> /Cl <sup>-</sup> 量比 | <10                              | 变化极大                                                         | >10                                                                                                    |
| 矿化度(g/L)                                                           | >100                             | <1                                                           | <100                                                                                                   |
| 分布                                                                 |                                  |                                                              |                                                                                                        |
| 纵向                                                                 | 深埋<br>拗陷区                        | 当地侵蚀基<br>准面以上                                                | 当地侵蚀基<br>准面以下                                                                                          |
| 横向                                                                 | 覆盖区                              | 背斜轴部<br>露头区                                                  | 露头区及其<br>附近地带                                                                                          |

①按 M.r 瓦里亚什科分类法。

### 3 气田地层水水动力场的划分及驱动条件

四川盆地地形与构造轮廓一致,海相三叠

系地层分布,由于所处构造部位不同,埋藏条件变化很大。盆地边缘露头区,海拔在 1000m 左右,盆地东部背斜轴部露头区多在 500~1000m 之间,其它地区均深埋地下。以中三叠统雷口

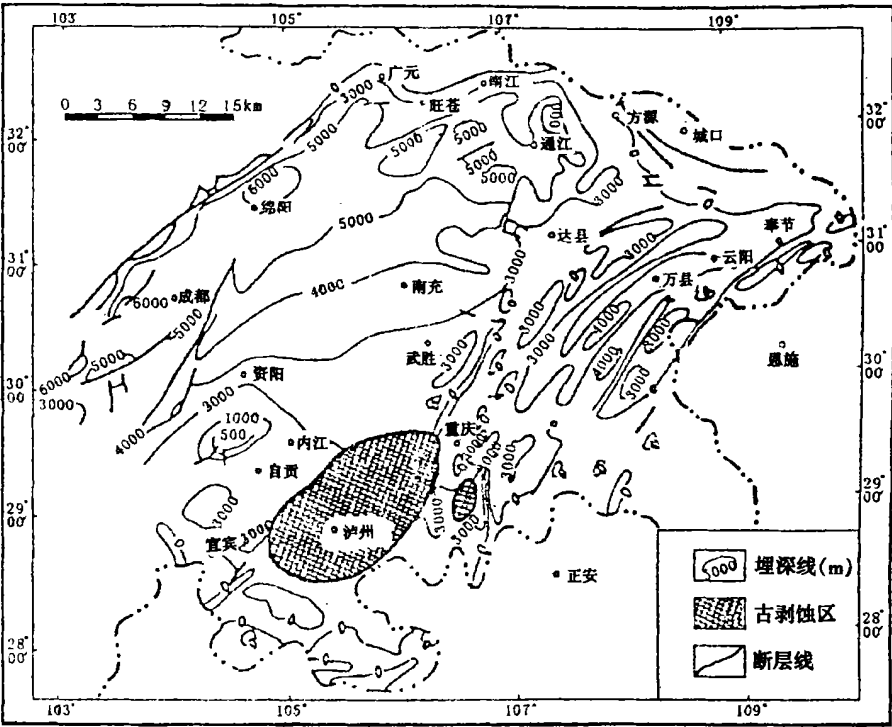


图 4 四川盆地“绿豆岩”埋深图

Fig.4 Burial diagram of the gram rocks in the Sichuan Basin

坡组底部的“绿豆岩”为标准层，盆地西北边缘坳陷埋深最大，在 6000m 以上，其它地区埋深也都在 3000m 左右(图 4)。

盆地海相三叠系气田地层水，依据其构造开启程度及埋深条件的不同，分属两个性质迥然不同的水动力系统。沉积变质水处于深埋封闭条件，主要受地静压力驱动控制；渗入淋滤水分布在背斜露头区及其附近浅部地区，主要受静水压力驱动控制。

3.1 沉积变质水水动力驱动条件受地静压力控制

沉积变质水主要分布在盆地西部及东部向斜深埋地带的碳酸盐岩储集层，长期处于深埋封闭条件。碳酸盐岩在深埋成岩过程中，因压密作用，孔隙度大为缩小，连通性极差。据资料，盆地海相三叠系碳酸盐岩孔隙度普遍小于 5%，渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ ，属低孔隙、低渗透特征。地层水运移极为缓滞，该特点可从三叠系气、水往往同层，工业性气藏较多得到证实。天然气的运移能力较气田地层水为强，但据盆地已知气藏的

统计，无一例外均为后期构造控制的裂隙性气藏。因此碳酸盐岩储集层在其上、下皆为隔层，而本身渗透又极差的情况下，基本上可视作一个近似封闭的承压体系。在这种情况下，地层压力是其压力源，压头是在上覆层的压力下，沉积层被压实过程中，沉积水被挤入储层造成的。上覆层压力一部分为沉积岩层承担，另部分直接作用于地层沉积水，为两者所共同承担。盆地海相三叠系上覆层厚度数千米，地层水承受的地静压力极大，在盆地深井油气勘查过程中，常发现海相三叠系地层水的“超高压”现象便是一个很好的佐证。在这些“憋压区”的地层水水压已超过盆地边缘露头区的静水压力，已知水头最高可达海拔 5000m 以上。因此当其被钻并揭开时，表现出良好的承压性能，气田地层水往往自流溢出井口，普遍具较高的承压水头，呈现异常高压特征。总体上表现为随埋深增大而压力也增大的趋势(表 2)。如盆地卧龙河、油罐顶、老关庙、罗家坪等构造三叠系地层水埋深较大，地层压力也大，表现出良好的承压自流性质。

表 2 四川盆地海相三叠系气田地层水水压与埋深关系  
Table 2 The relation between the hydraulic pressure and burial depth of the gas field in Triassic water

| 构造名称 | 井名     | 层位                             | 水层顶板埋深(m)   | 地静压力(MPa) | 地层压力(MPa) | 折算水头标高(m) |
|------|--------|--------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 邓井关  |        | T <sub>1j</sub> <sup>5-1</sup> | 800~1 200   | 30.3      | 10.3      | 374.2     |
| 雾中山  | 雾 1 井  | T <sub>2L</sub> <sup>4</sup>   | 2 027~2 150 |           |           | 1 203.0   |
| 卧龙河  | 卧 16 井 | T <sub>2L</sub> <sup>3</sup>   | 2 193       | 59.1      | 32.7      | 1 553.2   |
| 龙女寺  | 女 4 井  | T <sub>2L</sub> <sup>3</sup>   | 2 723~2 727 |           |           | 1 402.0   |
| 油罐顶  | 油 1 井  | T <sub>2L</sub> <sup>3</sup>   | 3 125       | 82.7      | 41.5      | 1 939.0   |
| 罗家坪  | 川 25 井 | T <sub>2L</sub> <sup>1-2</sup> | 3 258       | 86.2      | 46.8      | 1 838.8   |
| 老关庙  | 关基井    | T <sub>2L</sub> <sup>1-2</sup> | 5 800       | 152.6     | 83.0      | 5 094.2   |

注:1)资料来源据 1985 年中国地质大学(北京)李慈君、杨立中;  
2) 地层压力为完井测试资料。

3.2 渗入淋滤水水动力驱动条件受静水压力驱动

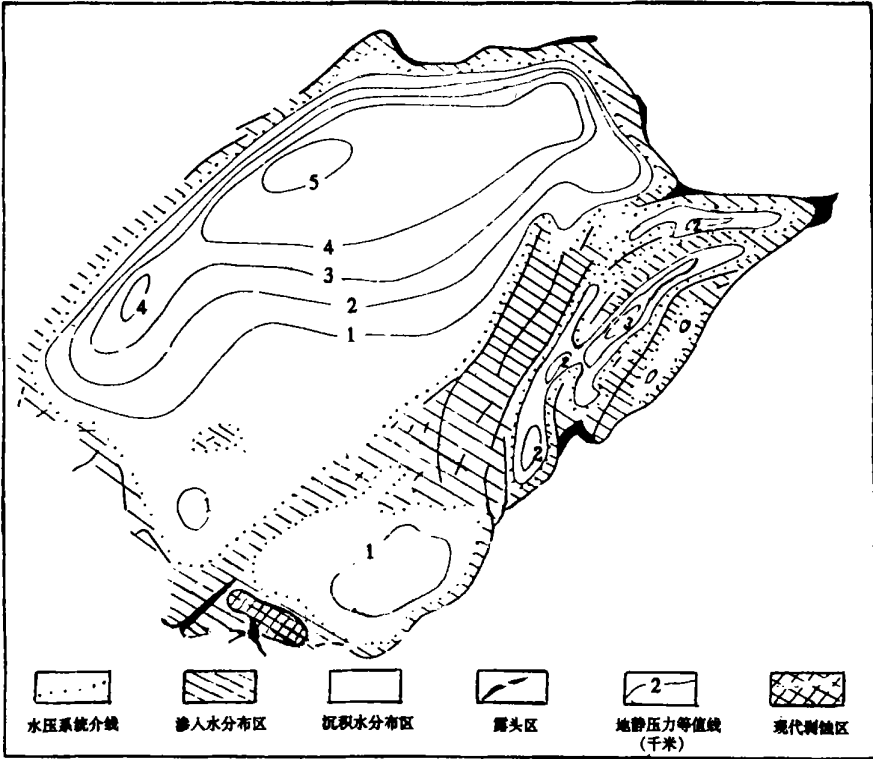
盆地深埋封闭状态延续时间很长,直至喜马拉雅构造运动,强大的扭压应力奠定了盆地构造基本轮廓,形成一系列褶皱,后经构造剥蚀,海相

三叠系在背斜轴部裸露地面,从而改变了海相三叠系气田地层水的展布格局及水动力条件。

在强烈褶皱的高背斜区,断裂裂隙较发育,剥蚀作用强烈,为浅层水向纵深循环提供了条件,从而逐步深入淋滤置换原储集层的沉积变质水,并不断“蚕食”,扩大渗入淋滤水的分布范围,导致这些地区的盐类被淋滤,储、隔层平行叠置状态被破坏,地静压力被释放,成为以静水压力为主导的渗入淋滤水分布区,调整了地静压力的分布。以地热增温为主要热能的盐泉、矿水,则反映了其渗入已深入循环至少超过 1000m。如华蓥山背斜西侧前缘带的钻井(华 13 井)资料证实,沉积变质水已为渗入淋滤水所置换,深度已达 2000m 以上。

3.3 两种水动力系统的讨论

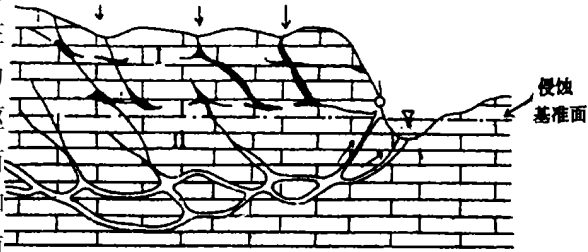
盆地海相三叠系地层水依构造开启程度及埋深条件分属两个完全不同性质的水动力系统,而地静压力分布是基本的,静水压力为主导的渗入淋滤水则是对前者实现了局部或地区性的改造(图 5)。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
图 5 四川盆地下、中三叠统地下水水动力略图

Fig.5 Draft hydrodynamics diagram of the lower and middle Trias ground-water layer of the Sichuan Basin

基于盆地海相三叠系地层水实际上分属两种完全不同的水动力系统,因此两者并不存在规律性的演变现象,显然不能用统一的水动力系统加以解释,可见它并不存在受静水压力驱动的由盆地边缘向内部的区域水动力循环,而是沉积变质水和渗入淋滤水各自按地静压力和静水压力由高压区向低压区的运移。在此尚值得指出的是渗入淋滤水的水压系统又可依据径流条件、水化学特征的差异进一步分上、下两个带;即当地侵蚀基准面之上的积极交替带和之下的缓慢循环带(图 6, 参表 1)。这些不同类型的地层水,依构造开启程度和埋深条件交织分布,水动力特征各异,大体可归纳于表 3。



I 积极交替带; II 缓慢循环带

图 6 淋滤型地下水动力分带示意图

Fig. 6 Hydrodynamic distribution diagram of the pemeeating leach type of ground water

表 3 四川盆地海相三叠系气田地层水水压系统及特征

Table 3 Hydraulic pressure systems and their characteristics of the gas field in—place water

| 特    征 | 渗    入    水    压    系    统     |            | 沉积水压系统       |
|--------|--------------------------------|------------|--------------|
| 水动力带   | I . 积极交替带                      | II . 缓慢循环带 | 极滞           |
| 运动特征   | 垂直及水平运动                        | 连通管式       | 渗透扩散         |
| 流量及状态  | 大小不一,变化大                       | 大小不一相对较稳定  | 普遍较小,局部富集    |
| 水层特征   | 隔层遭破坏,构成统一水体                   | 隔层正遭破坏     | 储隔层平行叠置,相间成层 |
| 储集空间   | 岩溶—裂隙—孔隙                       | 裂隙—岩溶—孔隙   | 孔隙—裂隙—岩溶     |
| 纵向分布   | 当地侵蚀基准面以上                      | 当地侵蚀基准面以下  | 深埋拗陷区        |
| 横向分布   | 背斜轴部露头区                        | 露头区及其附近地带  | 覆盖区          |
| 水压分布   | 由露头区高压向低处构成完整的局部或地区性循环,水压依地形降低 |            | 随埋深减小,压力渐减   |
| 主压力源   | 静水压力                           |            | 地静压力         |
| 成因类型   | 渗入淋滤型水                         |            | 沉积变质型水       |

4 地层水资源分布

盆地海相三叠系地层水,从水资源的角度考虑,可分以下四个区,各区水资源特征如下:

(1) 华蓥山背斜构造以西地区(川西地区)  
该区地层水深埋地下 2500m 以上,缓滞高压(除威远背斜轴部高点附近海相三叠系裸露区外),普遍储集浓度极高的沉积变质水,矿化度多在 200~350 g/L 除 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 含量很高外,尚富含 K<sup>+</sup>、Br<sup>-</sup>、I<sup>-</sup>、B<sup>3+</sup>、Li<sup>+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、Rb<sup>+</sup> 等有用

元素,并随埋深增大,封闭条件变好,变质程度加深,含量也相对增高<sup>[3]</sup>,其含量均可达到或超过有关工业指标,构成优质的化工原料水,有的 K<sup>+</sup>、B<sup>3+</sup> 含量特高,分别达 25~54g/L 和1 694~4 994mg/L,为世界罕见的液态钾、硼资源<sup>[4,5]</sup>,实际上是富钾、富硼卤水,是一种综合性的液态矿产资源,属多层段化工原料水分布区。

(2) 明月峡构造以东地区(川东地区)  
该区为隔档式褶皱区,海相三叠系地层水或深埋,或裸露,水资源条件很不一致。在向斜深埋地区与华蓥山背斜构造以西地区相同,各

层段地层水分层叠置,蕴藏着化工原料水资源,水交替极为缓滞;而背斜裸露地段,则往往构成统一的含水层,水交替强烈,主要为淡水分布,在河流切割的低点及构造适宜部位,则常有温、热的盐泉分布,以单一的  $\text{NaCl}$  或者以  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水为主,矿化度多小于  $50\text{g/L}$ ,处于硫酸盐淋滤阶段,对油气藏及盐类保存不利,而是重要的医疗用温热矿水分布区。在川东各背斜构造(指万县、云阳、开县、奉节一带)就水温、水质分析,渗入水循环相对较浅,并仍处于氯化钠的淋滤阶段,在一些河流横切构造地段,可见温、热的盐水出露,反映出盐类保存条件较差,但在一定深度内,仍有盐类矿产保存。可见该区为盐水、淡水和变质水间隔分布。

### (3)盆地南部泸州—叙永地区(川南地区)

该区气藏分布较多,气田地层水多以气藏的底水或边水形式存在,因受泸州隆起古渗入水的影响,矿化度多小于  $100\text{g/L}$ ,由隆起中心向南增高,变质程度加深,出现  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$  型水,溴、碘含量较高,为淡盐水分布区。

### (4)华 山褶皱带

华 山背斜轴部海相三叠系广泛遭受剥蚀,隔层普遍被淋滤破坏,构成含水不均匀的统一含水岩体。淡水广泛分布,在当地侵蚀基准

面以上,岩溶发育,均有可能提供良好的供水水源。而在河流切割低点及构造适宜部位,可见较多温、热的  $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$  型泉水出露,矿化度仅  $2\text{g/L}$  左右,水温  $30^\circ\text{C} \sim 47^\circ\text{C}$ 。在向斜深部地层水矿化度也仅为  $11\text{g/L}$ ,是以淡水为主,为温、热的矿水间杂分布区。

综上所述,盆地海相三叠系气田地层水资源丰富,经济价值很高,深层沉积变质水构成经济价值极高的化工原料;淋滤的温热的矿水,就其地域的分布,具有开辟浴疗及旅游之类“无烟工业”的优越条件,如重庆市的北温泉和南温泉等;浅层淡水则是重要的供水水源,具有饮用及农用灌溉之用。因此对盆地海相三叠系气田地层对资源的分布研究具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 林耀庭,高立明.四川盆地海相三叠系硫同位素组成及其地质意义[J].地质地球化学,1998,(4):43—44.
- [2] 林耀庭.四川盆地液态钾矿成因问题研究[J].化工地质,1994,(1):17—18.
- [3] 林耀庭,何永红.论四川盆地液态钾盐及其形成机制[J].中国井矿盐,1998,(4):24.
- [4] 林耀庭.四川盆地液态钾矿资源及开发有关问题探讨[J].化工地质,1994,(2):100—101.
- [5] 杨立中.论四川盆地地下卤水资源开发利用的现状及对策[J].四川地质学报,1992,(3):227—228.

On the Hydrodynamic Driving Conditions of the Gas Field in-place  
Water in the Trias Marine Bed of Sichuan Basin and  
Their Control of the Distribution of Water Resources

LIN Yao-ting<sup>1</sup>, LI Cheng-jun<sup>2</sup>

- (1. *The second geological group of Southwest Bureau of Petroleum, Zigong, Sichuan 643013, China;*
- 2. *Fluid and Mineral Institute of Southwest Bureau of Petroleum, Zigong, Sichuan 643013, China*)

**Abstract**: In terms of the differences in the degree of opening the structures, the depth of the burial and the hydro-chemical characteristics between the gas field in-place water of Jialinjiang group and Leikoupuo group in the Sichuan Basin, the water can be classified as two basic formation types. The types are sedimentary de-generative water and permeating leach water, which belong to two quite different hydrodynamic systems. The hydrodynamic systems control the distribution and storage of the gas field in-place water and gas resources in the Trias marine bed of the Sichuan Basin, according to the conditions that the driving force is from high pres-sure zone to low pressure zone.

**Key words**: Gas field in-place water; Formation types; Hydrodynamic driving conditions; Distribution of water resources; Trias marine bed; Sichuan Basin