

提升水驱气藏开发效果的先期控水技术

李江涛¹ 柴小颖¹ 邓成刚¹ 蒲斌¹ 赵玉¹ 李润彤²

1. 中国石油青海油田公司 2. 中国地质大学

摘 要 活跃水驱气藏通常会因为水侵、水淹而造成开发效益降低,使得该类气藏的采收率远低于不活跃水驱气藏。为此,提出了先期控水的技术思路。其原理是对活跃水驱气藏在开发早期就采取控水措施,即在水驱气藏投入开发前,认清水体分布特征,预测水侵方向、方位及水侵量,在地层水侵入的源头利用控水井先期开展控水作业,尽量延缓气藏水淹的时间。具体方法是:在气藏发生水侵的高渗条带的来水方位上部署控水井,实施排采泄压、阻隔拦截、诱导转向,或利用水驱气藏下部的低压储层对气藏侵入水实施纵向灌注、邻层转储,以削弱侵入水的能量、改变侵入水的流向、抑制边底水的活跃性,达到减缓水侵速度、阻隔水侵路线、减少水侵面积的目的,进而提升水驱气藏的开发效果、提高水驱气藏的最终采收率。以柴达木盆地涩北气田为例,进行了先期控水技术的部署与尝试。结论认为:该项技术是与油田注水开发相似但又相反的,可实现水侵气藏均衡开采、控水稳气的保护性开发技术。

关键词 水驱气藏 先期控水 控水井 排采泄压 邻层转储 阻隔拦截 诱导转向 开发效果 柴达木盆地 涩北气田

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.08.017

Early-stage water control technology in improving the development efficiency of water drive gas reservoirs

Li Jiangtao¹, Chai Xiaoying¹, Deng Chenggang¹, Pu Bin¹, Zhao Yu¹ & Li Runtong²

(1. PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 7, pp.132-139, 7/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: An active water drive gas reservoir often suffers from water invasion and water flooding, making its development benefit low with its recovery factor far less than that of an inactive water drive gas reservoir. In this paper, the technology of early-stage water control was proposed, namely, water control measures are taken in the early development stage of active water drive gas reservoirs. Before a water drive gas reservoir is put into development, it is necessary to figure out the distribution characteristics of water body, predict the direction, azimuth and volume of water invasion and carry out water control from the source of formation water invasion by using water control wells, so as to delay the water flooding of the gas reservoir. Specifically, water control wells are deployed at water source locations of a high permeability zone where the gas reservoir suffers from water invasion to conduct drainage for pressure relief, cutoff and interception and induced diversion. Otherwise, the low pressure reservoir below the gas drive gas reservoir is used for vertical flowing of water invading the gas reservoir or transformed into water reservoir to diminish the energy of invasion water, divert the flowing direction of invasion water and inhibit the activity of edge and bottom water. Thus, the water invasion velocity is slowed down, the water invasion pathway is cut off and the water invasion area is reduced. As a result, the development effect of the water drive gas reservoir is improved and its ultimate recovery factor is enhanced. Taking the Sebei Gasfield in the Qaidam Basin as an example, we made the field application planning and tests of the early-stage water control technology. It is concluded that this protective development technology is similar to but opposite to water flooding development of oil fields. By virtue of this technology, balanced production, water control and gas stabilization of watered-out gas reservoirs will all be realized.

Keywords: Water drive gas reservoir; Earlier water control; Water control well; Water drainage for pressure relief; Transformation of the neighboring layer into water reservoir; Cutoff and interception; Induced diversion; Development effect; Qaidam Basin; Sebei Gasfield

基金项目: 国家科技重大专项 (编号: 2011ZX05015-004)。

作者简介: 李江涛, 1969年生, 高级工程师, 西南石油大学博士毕业; 长期从事天然气开发与科研生产管理工作。地址: (736202) 甘肃省敦煌市七里镇中国石油青海油田公司综合办公楼采气三厂办公室。ORCID: 0000-0002-2335-4050。电话: (0937) 8921811。E-mail: ljthq@petrochina.com.cn

对水驱气藏而言,通常会因为地层水活跃程度的不同而使得其开发效果和采收率差异较大。如果气藏水体大、能量大、地层水活跃,则通常在气藏开采初期(采出程度低于20%)部分气井便开始大量出水甚至水淹,致使气井减产、停产,造成气藏稳产难;并且受“水锁”影响形成“封闭气”,单向水侵、水窜切割气藏,局部卡断、绕流可形成封闭气,水窜封隔带可形成死气区;甚至地层水堵塞气通道降低储层渗透率、水侵降低生产压差,由此提高了气藏的废弃压力^[1]或降低了气藏的含气饱和度等。

1 先期控水理念的提出

笔者调研了国内外水驱气藏的开发方法和经验,基本上都是对已发生水侵的气藏或水淹的气井采取降低采速、封堵调层、排水采气等补救措施;并且多在水侵气藏范围内的出水气井单井点上实施局部治水工艺措施,主要技术方法是实施常规的机械堵水(打桥塞、加隔板、下封隔器等)和化学堵水(注水泥、凝胶等堵水剂),还有就是采用优选管柱、泡沫排水、柱塞气举等排水采气工艺^[2]。

水驱气藏投入开发后,根据局部水侵状况进行开发调控抑制水侵也是常见的方法之一,比如研究出水机理、分析气藏水体能量、预测水侵活动规律,实现提前预警,并根据水侵区构造位置的不同实施气井差异化管理,边部和腰部气井控制采气速度,高部位气井保持采气速度和生产压差,以减缓边、底水侵入速度。国内学者也提出了水侵不活跃气藏采用控制边部区域气井生产压差,裂缝—孔隙型边水活跃气藏早期边部排水,裂缝—孔洞型底水气藏早期高渗区气水界面以下层段排水^[3],缝洞发育型多裂缝系统水侵活跃气藏早期低部位区域排水和高部位控制开采速度等不同的途径和方法^[4]。

但是,从全气藏开发部署的角度,采取整体布控防治水侵的技术方法还很少有报道,特别是水驱气藏开发早期在部署和完善开发井网的过程中就同时考虑部署控水井的案例则更为鲜见。在来水方位利用老井强排泄压或用高分子聚合物黏稠液建立阻水屏障的实例也不多见。

已有的研究成果表明:①水驱气藏的采收率较纯气驱气藏有很大程度的降低^[5];②活跃水驱气藏的废弃相对压力通常大于等于0.5,采收率介于40%~60%;③而不活跃或无水气藏的废弃相对压力通常大于等于0.05,采收率介于70%~90%^[6]。

由此可见,将活跃的水驱气藏调控为不活跃的水驱气藏或使不活跃的水驱气藏继续保持温和驱替,探索和推广先期控水技术,控制地层水的活跃程度有可能是实现水驱气藏高效开发的最佳途径。

2 先期控水技术的确立

先期控水技术是一项水驱气藏保护性开发技术。其核心就是在水驱气藏投入正规开发前的试采阶段,以水体评价作为重点,在摸清气水关系、水驱能量和水体分布情况,确定气藏水侵的主控因素,预测水侵方位、水侵时间及水侵量的基础上,在气田开发方案编制时充分考虑水侵的影响,明确易发生边水指进或底水锥进的水侵区带,及早提出控水对策^[7],制定整体水侵防控专项技术方案,先期部署控水井实施排采泄压、邻层转储、阻隔拦截、诱导转向等控水措施,降低地层水的活跃程度,减缓减轻边、底水对气藏开发的侵害,最终实现水驱气藏高效开发的水侵水淹防控技术。

2.1 影响地层水活跃程度的主要因素

2.1.1 地质因素

地下水域受地层岩性和地质构造的控制,以地下的隔水边界及水流系统之间的分水界面为界,往往涉及很大深度,表现为立体的集水空间^[8]。这就为水体纵向泄排、邻层转储提供了条件。

水驱气藏边、底水如果本身属于高压水层,气藏地层倾角越缓,地层水就越容易从边、底部向高部位的气藏内部侵入;若水头开启,为具有自由水面的潜水且供水稳定,水头落差越大,水体能量就越大,即水侵的源供(补给水源)条件越优势,在重力作用下水体的能量就会越强;而埋藏并充满两个稳定隔层之间的含水层(层间水),通常不具有自由水面,而是在静水压力的作用下,以水交替的形式进行运动^[8]。

前人的研究成果表明,气藏生产水气比变化特征同相对高渗带渗透率与储层平均渗透率比值有关,比值越大气井见水后水气比上升速度就越快(图1);反之,上述比值越小,水气比上升速度则越缓^[9]。这说明,碎屑岩储层高渗条带是水侵的主要通道。

针对赋存于坚硬、半坚硬双重介质储层基岩裂隙中的地层水,基质渗透率越低,则地层水越容易沿裂隙突进;裂隙越长,沟通边、底水的可能性就越大;裂隙水的埋藏和分布具有不均一性和一定的方向性,其含水层的形态多种多样,并明显受到地质构造因

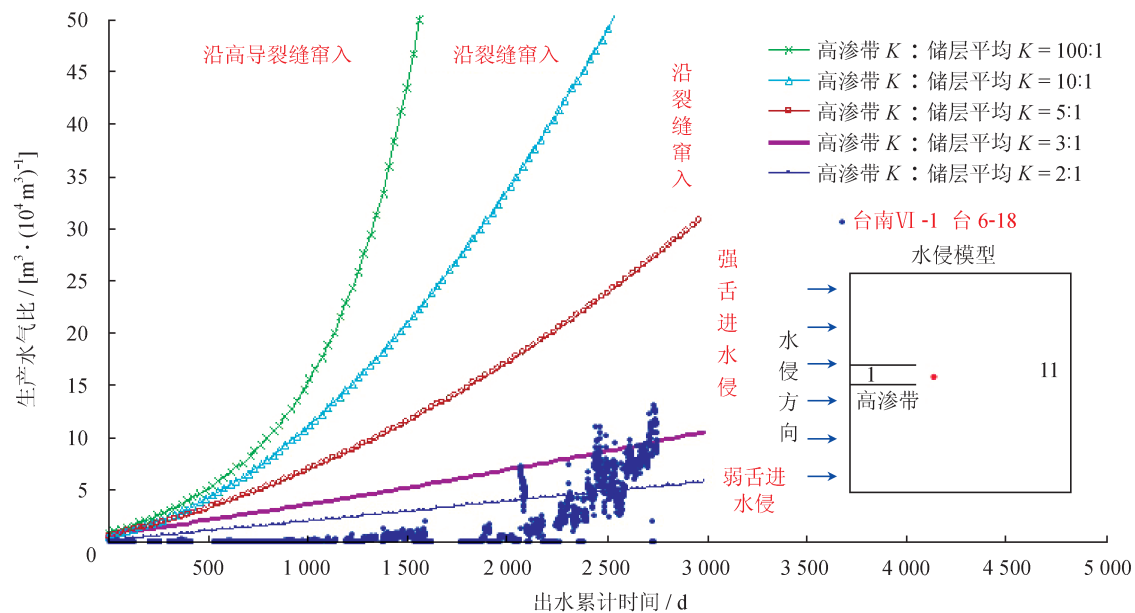


图1 气藏水侵特征图版(据何晓东等^[9])

素的控制,水动力条件比较复杂,“横侵纵窜”是裂缝性气藏水淹的主要特征^[8]。

2.1.2 开发因素

水驱气藏投入开发后,如果存在以下情况:①对气藏不同区带的气水关系、水体能量、地层水活跃程度认识不清,低估了地层水水侵危害程度或防控措施不当、不及时;②对裂缝缝洞型气藏的断裂发育、分布及延伸状况不清,对裂缝与水体的沟通状况认识不清;③气田开发配产指标安排不合理。其结果就有可能使局部井区采速过快、采出程度过高,水体区域与采气井区的压差过大,引起地层水向低压采气区流动,地层水开始活跃,进而造成边水指进或底水锥进。

2.2 先期控水技术的原理和关键环节

先期控水技术的原理是在水驱气藏投入开发前,认清水体分布特征,预测水侵方向、方位及水侵量,在地层水侵入的源头利用控水井先期开展侵入水的排采、阻隔、疏导,削弱地层水的能量或改变水侵的方向,控制或调整地层水侵入的速度和水侵路线,延缓气藏水淹的进度。该技术通过实施与油田注水开发相似但又相反的泄水降压、调控水侵前沿等措施,以实现水侵气藏控水稳气、均衡开采的目标^[10],是一项保护性的开发技术。

先期控水技术的关键环节主要包括以下方面:

1) 对水体的正确认识是制订有效控水方案的关键。对边、底水进行精细地质描述研究,认识气水分

布规律,正确评价水体的大小、能量的强弱以及与气藏的接触关系,并对气藏平面相带变化、储层非均质性、断层遮挡条件、不同井区的渗透率、含水饱和度、水侵方向等进行认识和评价,圈定侵入水源头、预测水侵区带。

2) 在圈定和预测源头或来水方向与位置的基础上,根据水体类型、大小和来水量等确定控水井网、井距,重点在来水方向的高渗侵入区带上部署控水井,以排采泄压和邻层转储为主,以阻隔拦截、诱导转向为辅,消减地层水的侵入能量或改变地层水的水侵方向。

3) 针对每一口控水井,在整体水侵防控方案的指导下,按气藏、水侵带的不同分别确定单井排采量、优选排采工艺。若水侵气藏纵向上有邻近的压力亏空层位,可实施地层水的邻层转储,即诱导水侵层的水通过井筒向亏空层位倒灌泄压;若是建立阻水屏障的井,优先考虑选择水平井建立胶坝并在胶坝末端实施排采泄压,以达到诱导水侵方向偏离气藏的目的。

4) 水驱气藏最终采收率还随初始地层压力、水层渗透率、水体大小和残余气饱和度等的增大而减小。影响水驱气藏采收率的主要可控因素是采气速度^[4],所以,采气速度的合理调控也是减缓水侵、减轻边水指进或底水锥进的主要手段之一。因此,在水驱气藏开发过程中,在对气水关系和水体性质正确认识的基础上,开展数值模拟研究,预测水侵过程,再把优化配产、调控压差、控制采速、均衡采气的理念贯穿于整个气田精细开发管理之中^[11],避免局

部井区出现强采或形式压降漏斗,减少边、底水突进。“预防为主,控排为先”是水驱气藏实现高效开发的关键。

2.3 控水井的合理部署和排堵功能的确定

控水井的合理部署和排堵功能的确定,是确保先期控水方案高效实施的基础。为此应严格按照以下工作步骤和设计原则进行研究论证。

2.3.1 高渗条带与水侵方向的确定

储层的高渗条带是造成水侵指进(舌进)的主要原因。从岩心及测井资料入手,研究高渗条带的分布范围,结合沉积相及生产动态对高渗条带进行识别与预测,可以为水侵高渗条带的治理及控采井网的建立提供依据。高渗条带形成与发展的影响因素有:沉积作用、岩石退胶结作用、流体黏度和开采过程,其中起关键作用的是岩石胶结程度。高渗条带识别难度大,通常采用岩心分析、沉积微相、测井曲线特征、生产动态分析等方法,并且需要多口井、多资料、多方法综合判别与预测,彼此相互验证,以此来预测和判识高渗条带的空间分布^[12]。

处于气水边界附近的气井若含水率持续上升,甚至水淹,说明该井区正在发生水侵,若其邻近气井不同时间段内也陆续发生含水率持续上升的事件,则可根据各井见水时间的不同而判断出来水的方向。结合储层沉积微相图、储层二维或三维地质模型、储层微细构造及裂缝分布图、储层岩相古地理图、储层泥质含量及非均质性评价图、气藏采出程度及压降图等资料,综合判断和预测气藏储层水侵条带与方向。

2.3.2 控采对应关系的建立

边、底水的渗流侵入受储层渗透性的控制,渗透率高的储层泄水能力较强,渗透性好的井点产气状况也好且见水后产水量也较大。这说明随着气藏天然气采出程度的增加,地层压力的降低,亏空的气藏针对边、底部等外围地层水的吸吮能力变强,易发生水侵水淹。因此,可以通过小层精细对比、沉积微相研究、储层特征分析、四性关系解释、物性及流动单元划分,结合气藏实际开采特征,明确气水运动规律、气水对应关系,认清泄水水域与采气井区的控、采地质条件,进而先期提出控、采参数调整意见,部署和完善控、采井网,确定控水稳气措施,以尽早建立有效排、堵、疏综合控采对应井组和系统。

2.3.3 控水井的部署原则与方法

必须树立在水驱气藏开发早期就部署“控、采

井网”实施超前控水,以降低边、底水活跃程度,延缓水侵的理念。根据气藏水侵早期的特征表现,基本可以确定水侵的方向、方位和源头,并且气田开发早期正处于上产、稳产阶段,有投资、成本低、效益好,此时就部署一批控水井,开展边、底水的排、堵、疏等作业,进行气藏水侵早期防控,是提高水驱气藏开发效果和采收率的关键。控水井部署原则主要包括:①控水井尽可能在气藏发生水侵时间不长且能够表现出水侵方向的早期部署;②控水井必须部署在边、底水侵入路线的高渗条带上,尽可能位于侵入水的上游,进行阻排水;③尽可能利用气藏边部的水淹停产井、低产气井等老井作为控水井,通过老井排水,还可采出部分水淹区的剩余气;④利用数值模拟技术优化不同类型控水井部署方案,力求气藏控水效果最好、稳产期最长、最经济。

2.3.4 控水井井型与功能的确定

根据水驱气藏不同构造部位气水关系、水体特征、水侵状况、水侵预测情况和藏内保护的需要,在各个水侵区域控水井所采取的控水工艺措施和所发挥的作用及功能是不同的,控水井排采等工艺侧重点和功能总体可分为以下几种:

1) 针对一个水侵的单层边水气藏,控水井在水侵指进(舌进)的来水方向上尽可能选择水平井的井型部署,可提高采水量以达到强排水泄压的目的。水平井的水平段必须垂直于水侵指进的方向,这样不仅可以提高采水量,而且也便于建立胶坝阻隔拦截水侵来水,并诱导或疏导来水改变侵入方向而减缓指进(舌进)。

2) 针对多层叠置水侵气藏,控水井尽可能部署直井,便于多层排水泄压,同时也可以利用井筒实现水侵气藏地层水垂向泄流转储到下部邻近压力亏空的废弃气藏或干层内。

3) 针对块状底水驱气藏底水的锥进,控水井可以同时考虑水平井和直井,便于在井筒内实现封下采上^[13]。水平井的部署还应便于压裂造缝,建立底水上升的阻挡隔板^[3]或底水上侵转为水平方向的疏导通道,可更有效的延缓地层水侵入气藏的速度。

2.3.5 水体能量及排采量的确定

通常,边、底水的能量主要依靠试气过程中射开水层的产水量、压力等资料来进行评价和确定,往往在气藏不同部位、不同井区气水关系不同,边、底水的压力和产量也差异较大。为此,在充分利用和分析水层测试资料的基础上,本着“先期建立控水井网,

提早制定水侵防控方案”的理念，应针对水驱气藏强化水体测试资料的求取，进一步评价和认识边、底水能量。与此同时，利用水驱气藏试采、开发过程中所获取的生产动态监测资料对水体进行深入评价，并通过分析气井含水率上升趋势和气藏出水规律，推算水域内水体能量的变化，计算单位压降泄水量、水侵速度及水侵量，进而得到控水井的排采量。

水驱气藏的水侵量既可以由李传亮根据物质平衡理论“储罐模型”特性所提出的气藏生产指示曲线直接计算得到^[14]，也可以运用王怒涛结合数值反演法建立的最优化数学模型求取^[15]。上述方法都避免了先求取水体大小等不容易确定的与水体有关的参数才能计算水侵量的弊端，而且简便快捷、实用性强。

3 先期控水技术的试用

笔者以柴达木盆地涩北气田为例，进行了先期控水技术的部署和尝试。

3.1 涩北二号气田Ⅲ-1-2 开发层组 3-3-5 小层

针对涩北二号气田Ⅲ-1-2 开发层组 3-3-5 小层(以下简称 3-3-5 小层)开发过程中各生产气井见水的情况，根据产气剖面测试资料确定小层出水状况，认为早期由南翼边部的气井先见水，并逐步向气藏中心部位推进。由此判断边水的主要推进方向为由南向北侵入。结合 3-3-5 小层的厚度、含气饱和度平面分布情况和非均质性研究成果，认为该小层南翼物性较好(图 2)。

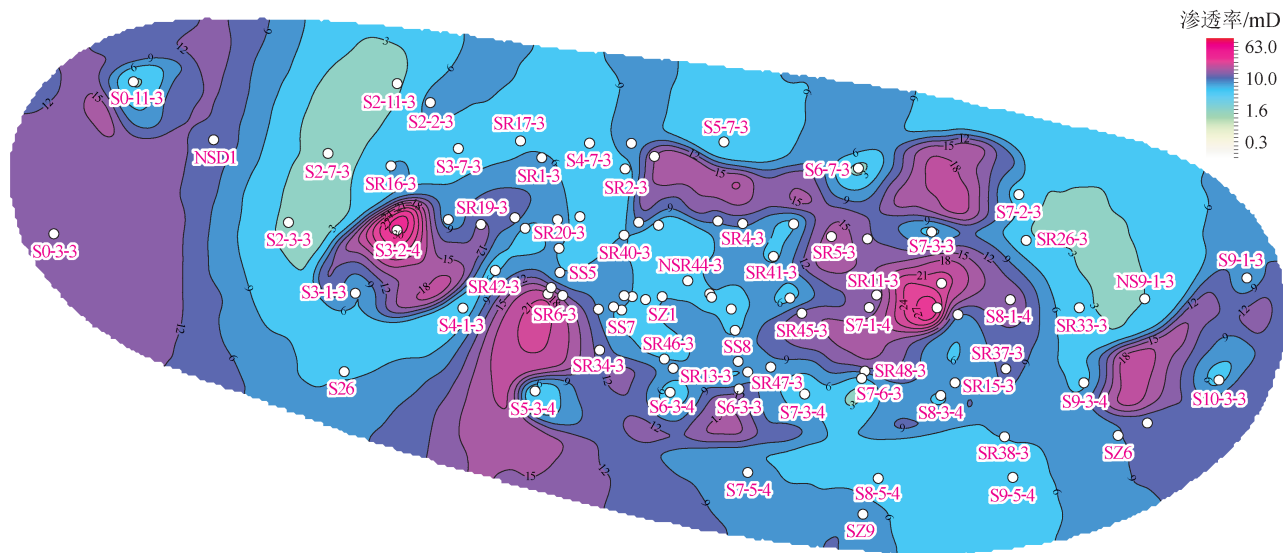


图 2 3-3-5 小层渗透率等值线平面分布图

综上所述，该小层南翼容易受到边水侵入的影响。再结合各井区采出程度(图 3)可看出，南翼并不是属于采出程度过高或压降过大区域(涩 8-5-4 井区除外)。这进一步证实了边水沿高渗区带侵入的规律。

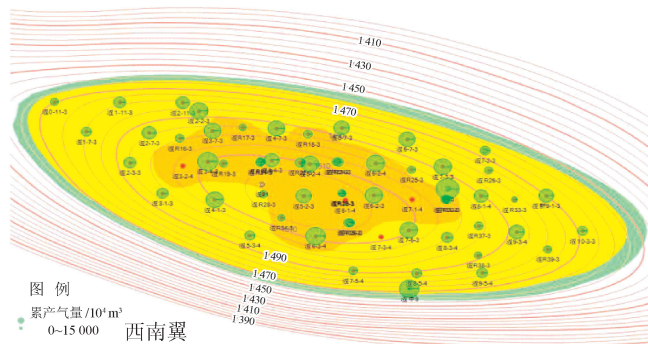


图 3 3-3-5 小层各井区采出程度对比平面图

由图 4 可知，南翼水侵区的地层压力受侵入水的影响普遍高于气藏中部的地层压力。这样形成的区带间的地层压差，势必会加剧边水向气藏中部的推进速度和距离。因此，选择边部水侵高压区部署控水井，采取一定的工艺措施抑制边水的侵入速度和距离，或者阻止边水直线向气藏中心推进的方向。

为了控制边水推进，减缓该小层边水推进速度，保护气藏内部采气井少受边水侵害，制定该小层(气藏)的边水水侵综合防控方案，即在南翼水侵前沿的水线外侧的气水过渡带上，利用目前边部已水淹老井(涩 1-7-3、涩 2-3-3、涩 3-1-3、涩 7-5-4、涩 8-5-4、涩 9-5-4 及涩 9-3-4、涩 7-2-3、涩 2-11-3)和新钻水平井涩 PH-1 与直井涩 P-1 作为控水井(图 5)，并根据各井区地质及水侵特点，制定不同的排、阻水工

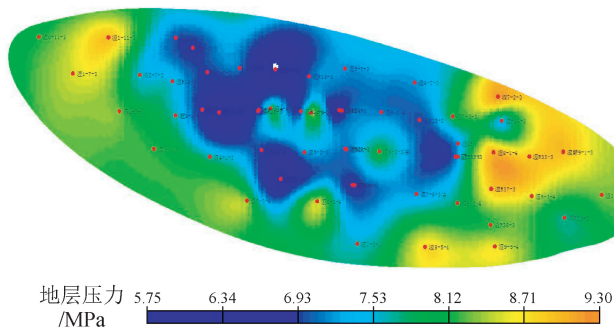


图 4 3-3-5 小层地层压力分布图

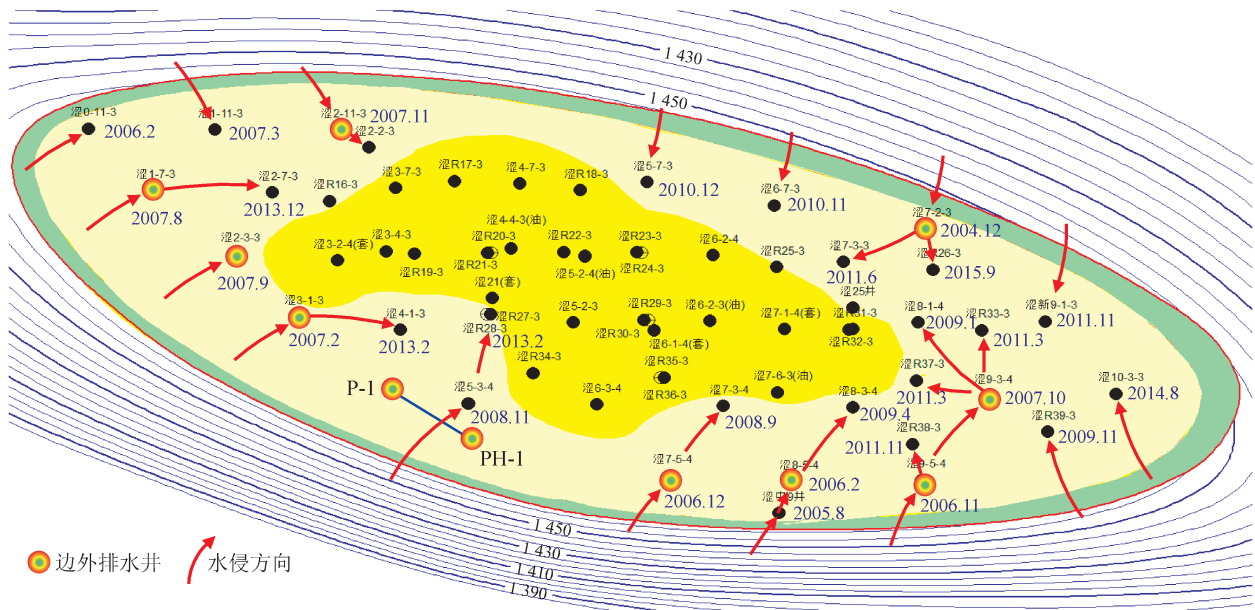


图 5 3-3-5 小层水侵流向及控水井部署平面图

1 500 m³。并且，该边水驱气藏的压降幅度较大，边水水体向气藏补给的水量并没有弥补气藏的亏空，说明边水的泄水能力有限。若针对其中一个典型出水层组，在确定的水侵通道上部置 10 口控水井，单井每天排采 150 m³ 即可起到抑制边水水侵的目的。取得控水成效的关键是对水侵优势通道或条带的准确定位。

3.2 涩北一号气田 II-4 开发层组

对涩北一号气田各开发层组而言，II-4 层组位于该气田的中—浅部，由于动用时间较晚地层压力较高，有一定的生产能力。为弥补早期开发的深部层组的递减产能，目前 II-4 层组配产高、采速快，含水率较高、水侵快（图 6）。

由图 7 可知，II-4 层组的水侵面积已经占到气藏总面积的 35% 左右，亟待开展控水治水工作，尽快抑制侵入水的活跃程度和水侵速度。

艺措施。

也可以利用物质平衡原理估算水侵量和控水井的初步排采量。涩北二号气田平均原始地层压力为 12.1 MPa，目前地层压力约为 7.5 MPa，累计产气 131.09×10⁸ m³、累计产水 100.158 4×10⁴ m³，估算气藏累计水侵量为 2 800×10⁴ m³。目前年产水 15×10⁴ m³，年水侵量约 200×10⁴ m³，平均日产水 410 m³，日水侵量 5 500 m³，在 9 个开发层组中，4 个水侵严重的层组平均日产水量和日侵水量总共约

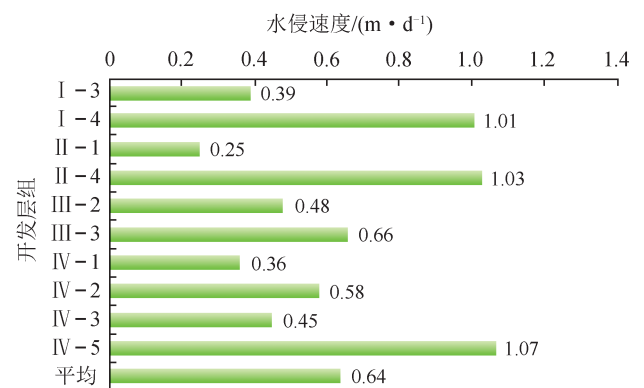


图 6 涩北一号气田分层组边水水侵速度对比图

对比纵向上 II-4 层组下部各开发层组的地层压力，并考虑其水侵状况、采出程度等，可以选择储量规模小、采出程度高、压降大、地层亏空严重的非主力气藏，即 IV-2 层组作为 II-4 层组侵入水的纵向邻层转储和诱导转向泄压的目的层位（图 8）。所以，利用连通这两个层组的老井，在井筒内进行调层补

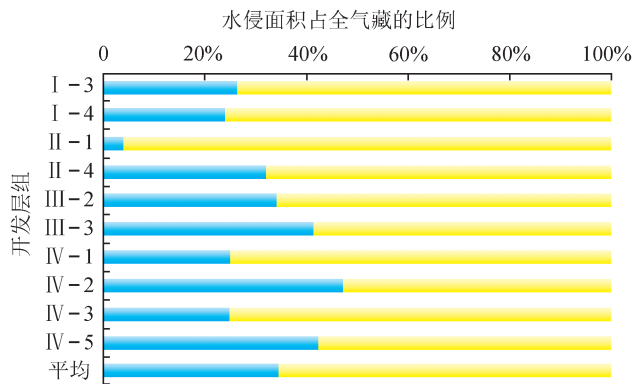


图 7 涩北一号气田各开发层组水侵面积对比图

注：蓝色代表已入侵面积占全气藏比例；黄色代表未入侵面积占全气藏比例

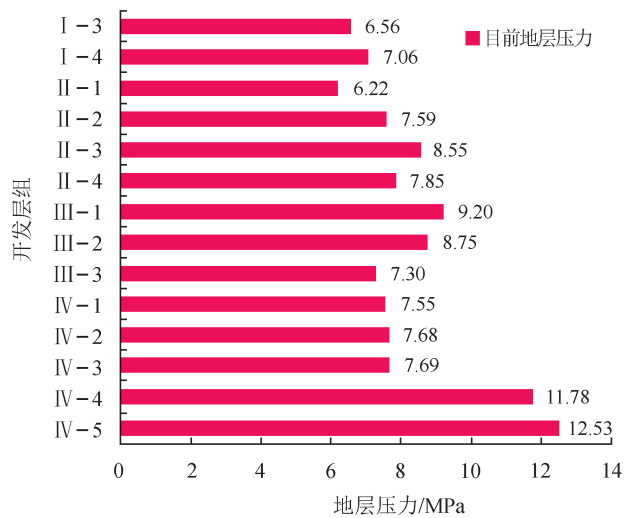
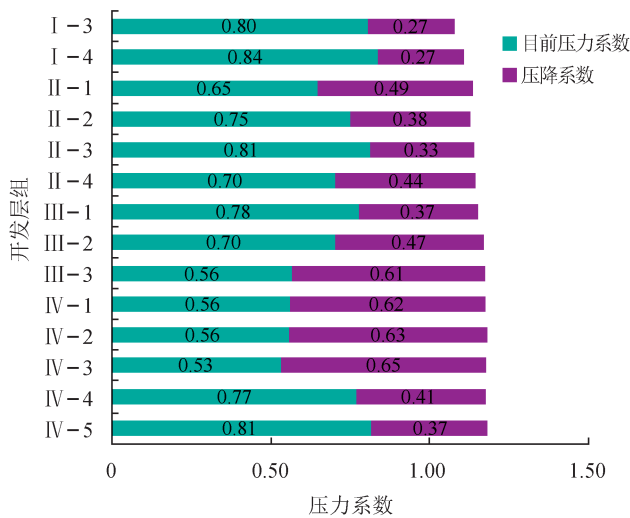


图 8 涩北一号气田各开发层组压力下降情况对比图

更加活跃，边、底水向气藏内部的侵入也加快。

2) 水驱气藏在开发早期阶段采取先期控水措施可提高开发效果和采收率。即在气藏水侵区域前沿部署控水井，实施排采泄压、阻隔拦截或诱导转向等控水技术，控制地层水活跃程度，保持水体的温和驱动，可达到减缓水侵、水害的目的。

3) 水驱气藏水侵防控技术有效性的关键是先期开展气藏水文地质调查，摸清邻近水体特征，明确气水对应关系、气水运动规律、预测水侵区带，认清泄水水域与采气井区的控、采地质条件，先期完善控、采井网等控水稳气措施，尽早建立有效排、堵、疏综合控水系统。

4) 水驱气藏水侵防控技术实施的重点是在各个水侵区域内控水井功能的定位和控水工艺措施的选择。主要考虑的因素包括水平井井型、水平段长度和方位、排水工艺和采量、邻近转储层位、直井回

孔，建立两层组的纵向水流通道，最终实现上水的下灌转储，预计将会对 II-4 开发层组取得一定的控水效果。

4 主要观点与认识

1) 水驱气藏的开发是一个逐渐使该类气藏变为活跃水驱气藏的过程。从水驱气藏的成藏机理可知，气藏的形成就是由水藏转变为气藏的过程，而开发则是一个由气藏转变为水藏的过程；并且，随着水驱气藏采出程度的不断提高，地层压降幅度变大，造成采气区与边、底水区域的压差变大，地层水变得

注方式、隔挡诱导转向井组建立、注胶量和排水量等。

5) 水驱气藏先期控水技术是一项系统工程，是开发早期地质和工艺结合的综合技术。要抑制地层水的活跃程度、减缓边水指进或底水锥进，还需要控制采气速度、优化配产、均衡开采，以及注重对地下水水侵的监测和预测、矿场控水工艺试验和技术的配套完善。

6) 笔者所提出的技术方向及控水理念还有待于生产实践的进一步检验。

参 考 文 献

[1] 李闽, 蒋琼, 廖志, 李滔. 水驱气藏采收率计算方法及其影响因素研究 [J]. 非常规油气, 2015, 2(1): 35-40.
 Li Min, Jiang Qiong, Liao Zhi & Li Tao. Calculation method and influencing factors of water drive gas reservoir recovery [J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2(1): 35-40.

[2] 孙来喜, 李允, 陈明强, 武健棠. 靖边气藏开发特征及中后期

- 稳产技术对策研究[J]. 天然气工业, 2006, 25(7): 79-81.
Sun Laixi, Li Yun, Chen Mingqiang & Wu Jiantang. Study on Jingbian gas reservoir production characteristics and technical counter-measures for depletion during middle and late developing phase[J]. Natural Gas Industry, 2006, 25(7): 79-81.
- [3] 杜殿发, 王青, 王芳, 崔红岩. 底水油藏采水消锥复合工艺优化设计[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(3): 419-423.
Du Dianfa, Wang Qing, Wang Fang & Cui Hongyan. Optimal design of composite technique for water extraction and cone control with gel barrier in bottom water reservoir[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(3): 419-423.
- [4] 夏崇双. 不同类型有水气藏提高采收率的途径和方法[J]. 天然气工业, 2002, 22(增刊 1): 73-77.
Xia Chongshuang. Ways and methods of enhancing recovery in various water-carrying gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(S1): 73-77.
- [5] 肖鹏, 刘洪, 于希南, 庞进. 水驱气藏采收率计算及影响因素分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(1): 116-118.
Xiao Peng, Liu Hong, Yu Xinan & Pang Jin. Computation and analysis on affecting factors of recovery ratio of water-drive gas reservoir[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2013, 15(1): 116-118.
- [6] 冈秦麟, 张伦友, 孙家征. SY/T6098—94 气田可采储量标定方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Gang Qinlin, Zhang Lunyou & Sun Jiazheng. SY/T6098-94 Method for calibrating recoverable reserves of gas fields[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [7] 张伦友, 贺伟. 提高水驱气藏采收率新途径——早期治水法[J]. 天然气勘探与开发, 1998, 21(3): 13-18.
Zhang Lunyou & He Wei. Improve water drive gas reservoir recovery way—yield early treatment method[J]. Natural Gas Exploration and Development, 1998, 21(3): 13-18.
- [8] 张元禧, 施鑫源. 地下水水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
Zhang Yuanxi & Shi Xinyuan. Ground water hydrology[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 1998.
- [9] 何晓东, 邹绍林, 卢晓敏. 边水气藏水侵特征识别及机理初探[J]. 天然气工业, 2006, 26(3): 87-89.
He Xiaodong, Zou Shaolin & Lu Xiaomin. A preliminary discussion on mechanism and recognition of water invasion characteristics in edge water drive gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3): 87-89.
- [10] 生如岩, 冯其红. 有限底水驱气藏气水均衡同采的实例评价[J]. 天然气工业, 2011, 31(2): 63-65.
Sheng Ruyan & Feng Qihong. Cases analysis and evaluation of gas water proportionally simultaneous production for limited bottom water drive gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2): 63-65.
- [11] 张烈辉, 梅青艳, 李允, 徐冰青. 提高边水气藏采收率的方法研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 101-103.
Zhang Liehui, Mei Qingyan, Li Yun & Xu Bingqing. The method of improving recovery efficiency of edge water drive gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11): 101-103.
- [12] 惠钢, 张国良, 李凡华. 动静结合识别储层高渗条带方法的探讨[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(20): 4746-4749.
Hui Gang, Zhang Guoliang & Li Fanhua. Methods of identifying the relatively high-permeability belt of reservoir combining geological study and production performance[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(20): 4746-4749.
- [13] 窦宏恩. 水平井开采底水油藏的消锥工艺及证明[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(3): 56-59.
Dou Hong'en. Cone process and proof of horizontal wells in bottom water reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(3): 56-59.
- [14] 李传亮. 气藏水侵量的计算方法研究[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 430-431.
Li Chuanliang. Determination of water influx in gas reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(5): 430-431.
- [15] 王怒涛, 唐刚, 任洪伟. 水驱气藏水侵量及水体参数计算最优化方法[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 75-78.
Wang Nutao, Tang Gang & Ren Hongwei. Optimized calculating method of aquifer influx and parameters for water-drive gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 75-78.

(修改回稿日期 2017-06-02 编辑 居维清)