

# 越流系统水流运动规律研究综述

孟宪萌<sup>1</sup>, 邵骏煜<sup>1</sup>, 尹茂生<sup>1</sup>, 刘登峰<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**阐述了越流系统水流运动规律研究的必要性,介绍了该领域的国内外研究现状,对越流系统研究方法及模型的建立、低渗非达西流的存在性、低渗非达西流的判据以及有关低渗非达西流的模型与运动方程等问题进行了评述,指出越流与低渗非达西流的耦合问题是今后越流系统水流运动规律研究的一个重要的发展方向,需要从不同的空间尺度和时间尺度两方面对越流系统中水流的非达西作用以及固结、弹性储释水等对水流的影响开展研究。

**关键词:**越流系统;地下水;非达西流;低渗透介质;综述

**中图分类号:**P641.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2015)04-0105-07

**Review of studies on flow motion law in leaky aquifer system**//MENG Xianmeng<sup>1</sup>, SHAO Junyu<sup>1</sup>, YIN Maosheng<sup>1</sup>, LIU Dengfeng<sup>2</sup>(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** This paper explains the necessity of the study on flow motion law in leaky aquifer system and reviewed its research status at home and abroad. Then, it discusses the research methods and model building in leaky aquifer systems, the existence and criterions of non-Darcy flow in low permeability media, and the related models and equations for non-Darcy flow in low permeability media. Finally, it points out that the coupling of the leakage and non-Darcy flow in low permeability media is one of the most important development directions of the study on flow motion law in leaky aquifer system in future. The influences of non-Darcy flow, consolidation, and elastic storage and release on flow in leaky aquifer system need to be studied from a spatio-temporal perspective.

**Key words:** leaky aquifer system; groundwater; non-Darcy flow; low permeability media; review

地下水是水资源的重要组成部分,在国民经济发展中起着举足轻重的作用。随着工农业发展以及人民生活水平的提高,人们对地下水资源开发利用程度也在不断提高。目前,我国地下水供水量已超过1040亿m<sup>3</sup>,占总供水量的18.4%<sup>[1]</sup>,并且还在以每年25亿m<sup>3</sup>的速度递增<sup>[2]</sup>。另一方面,地下水污染问题日益突出,据《2012年中国国土资源公报》报道,全国4929个地下水监测点中,近60%的水体水质为“差”,其中16.8%的监测点水质呈极差级别。在浅层地下水的水量及水质都已无法满足生产与生活需求的情况下,深层承压水的开采呈现出急剧增加的态势。据《全国地下水污染防治规划(2011—2020年)》中的统计数据显示,2009年全国共监测到地下水降落漏斗240个,其中浅层地下水降落漏斗115个,深层地下水降落漏斗125个,华北平原东部深层地下水降落漏斗面积超过7万km<sup>2</sup>,

部分城市地下水水位累计下降达30~50m,局部地区累计水位下降超过100m。

在关注浅层地下水污染及深层承压水超量开采的同时,开采深层地下水是否会导致浅层地下水中的污染物通过弱透水层越流进入深层承压水以及如何评价承压含水层受到污染的可能性已成为当前迫切需要解决的问题。开展越流系统水流运动规律的研究成为解决上述问题的基础。

由主含水层、弱透水层和相邻含水层组成的越流系统是一不断演变的复杂动态系统,受人为影响显著,而有弱透水层的存在使得含水介质中具有达西流和非达西流并存的特点,至今尚无一套系统完整的模型能够准确描述水流的运动规律。针对这些特点与问题,需分析越流系统的数学模型、低渗非达西流特点及两者的关系,以揭示越流系统水流运动规律。

本文综述了越流系统中水流运动规律的国内外

研究现状,系统地分析了前人的研究成果以及存在的主要问题并展望其发展趋势。通过对越流系统水流运动规律的深入研究可为承压含水层的保护以及深层地下水资源的合理开发提供科学依据。

## 1 越流系统水流运动规律研究进展

越流指抽水层上面或下面不是隔水层而是弱透水层,相邻含水层通过弱透水层或者弱透水层自身弹性储量的储存、释放与抽水层发生水力联系的水力现象。这种包含抽水层、弱透水层和相邻含水层的系统称为越流系统<sup>[3]</sup>。

在研究越流系统时,根据是否考虑弱透水层弹性储释水及相邻含水层的水头是否变化,可将其分为三大类<sup>[4]</sup>:第一类,弱透水层的弹性储释水可以忽略不计,且在主含水层抽水期间相邻含水层的水头保持不变;第二类,考虑弱透水层的弹性储释水,且相邻含水层的水头保持不变;第三类,相邻含水层的水头随着主含水层的抽水而变动。

第一类越流系统的水文地质条件相对简单,模型易于概化,使得解析法成为求解第一类越流系统的基本方法。解析法是研究地下水流动问题的基本方法,其解析解可直观看出各因素对地下水流动的影响。例如 20 世纪 50 年代中期, Hantush 和 Jacob<sup>[5]</sup>提出了描述第一类越流系统中有关水流运动的 Hantush-Jacob 公式,该公式揭示了弱透水层的渗透系数、越流补给系数等因素对降深的影响。

随着渗流理论的发展,解析法被广泛应用于求解一定条件下的第一类越流问题。在生产实践中,由于工作量较大及观测精度和观测结果的代表性等问题,通过实际观测难以准确获取适合地下水流动模型的水文地质参数,因此一般通过模型试算<sup>[6-7]</sup>进行推断或反演<sup>[8]</sup>。有关第一类越流问题研究的另一研究领域是通过建立水文地质概念模型,采用理论推导的手段推求相应水头降深的解析解,如 Malama 等<sup>[9-10]</sup>通过双重 Laplace-Hankel 空间变换后导出了越流系统中井流量问题的半解析解;刘凯等<sup>[11]</sup>在建立第一类越流系统中非完整抽水井附近渗流物理模型的基础上求得了相应的近似解析解。

对于第二类越流系统,其井流问题的解析解为无穷积分,往往需要根据具体情况考虑运用解析法或者数值法进行求解,也有学者采用数值积分求解解析解的方法求解该问题<sup>[12]</sup>。对于第三类越流系统,由于其复杂程度更高、假定条件更苛刻,使得解析法的应用受到限制,目前最有力的手段是数值法<sup>[13-15]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来,有限差分法、有限单元法等数值模拟方法的引入,解决了以往用解析

法很难处理的不规则边界、非均质和各向异性等问题<sup>[16]</sup>。Modflow<sup>[17-19]</sup>和 Feflow<sup>[20]</sup>的研发使得可以通过计算机模拟地下水水流,它们都具有直观且强有力的图形交互界面,模型剖分、参数输入和模拟结果都可直接通过图形显示,并支持三维可视化。Modflow 采用有限差分法,对所模拟的地质体采用矩形网格进行剖分,易于用户准备数据文件,便于输入文件的规范化。利用 Modflow 软件,孟宪萌<sup>[21]</sup>建立了三维地下水流与污染物运移模型,并构建了基于一维描述的越流区承压含水层脆弱性简化评价方法;唐仲华等<sup>[22]</sup>阐述了越流承压含水层非稳定流问题有限差分法的稳定条件

除了对上述三类传统越流系统的研究之外,近年来有关越流系统中弱透水层的压缩释水及与前期固结应力有关的弹性释水方面的研究正逐步开展<sup>[23-25]</sup>。朱伟武<sup>[26]</sup>通过结合越流系统水力性质及压密性质后指出,越流系统中弱透水层的释水压密作用比越流作用更为普遍。在越流系统中水位升降引起的黏性土释水、吸水与越流发生过程之间关系的问题上,曹文炳等<sup>[27-30]</sup>通过研究得出承压含水系统水头下降后黏性土释水与越流发展过程具有明显的阶段性,越流发生明显滞后于水头差形成的时间,存在“越流滞后时间”,且该时间与土的固结程度有关;王莹等<sup>[31]</sup>则从地下水中氟离子浓度的变化角度解释了弱透水层释水机理,并采用二元混合模型估算出地下水开采资源组成中越流与释水所占份额。这些成果对于进一步研究越流系统中水的来源与组成、水化学成分的变化、咸水下移,防止已污染的浅层地下水通过越流污染深层承压水具有重要意义。

以上对越流系统中的水动力问题的研究,绝大部分都基于达西定律,但在很多地下水水流运动问题中,特别是对于由低渗透介质组成的弱透水层,水流运动规律难以用达西定律描述。

## 2 低渗透介质非达西流研究现状

达西定律<sup>[4]</sup>表明压力损失完全由黏滞力引起,而流体在低渗透介质中渗流时压力损失不完全由黏滞阻力产生,因此不服从达西定律<sup>[32]</sup>。低渗透介质中不符合达西定律的流体流动称为低渗非达西流。

关于低渗非达西流模型与运动方程,不同学者通过实验和理论分析,得出不同的解释。现阶段研究主要集中在以下三方面:

### 2.1 低渗非达西流的存在性

Hansbo<sup>[33]</sup>和 Miller 等<sup>[34]</sup>较早发现了低渗透介质中存在非达西流现象,该现象可表述为流速与水力梯度呈非线性关系,存在启动压力梯度。目前国

内外学者通过大量的研究工作,证实了低渗透介质中存在非达西流现象。

在油气藏领域,闫庆来等<sup>[35-36]</sup>等通过室内模拟实验法得到低渗油层中流体渗流曲线,证明了渗流存在非线性段和启动压力梯度。另一些学者则相继通过数值实验法<sup>[37-38]</sup>、试井解释法<sup>[39-42]</sup>确定了低渗透油藏的启动压力梯度。

对于黏土等低渗透介质,一般通过渗流实验论证低渗非达西流的存在性,如 Nilson<sup>[43]</sup>通过一维非达西流实验证明了渗流早期存在非达西流;陈永敏等<sup>[44]</sup>在分析大量实验数据的基础上论证了渗流启动压力的存在及非线性的低速非达西流规律;徐德敏等<sup>[45]</sup>通过实验验证了低渗透介质中存在非达西流现象,并根据非达西流线性段的渗流特点推算了拟启动压力梯度值。

## 2.2 低渗非达西流的判据

虽然不少学者证明了非达西流的存在,但对于非达西流的临界条件、达西流和非达西流区域的识别至今还没有统一的判别标准,在大多数情况下通常采用反映介质物性和流体物性的雷诺数作为非达西渗流的判据<sup>[46-47]</sup>,如李中锋等<sup>[48]</sup>通过室内实验得出非达西流出现的临界雷诺数约为  $8.95 \times 10^{-5}$ ,从超低速区向低速区过渡的临界雷诺数约为  $1.08 \times 10^{-6}$ ;王道成等<sup>[49]</sup>将黏滞力系数与雷诺数的半对数关系图划分为非达西流区、过渡区、达西流区,给出束缚水饱和度下油驱和残余油饱和度下水驱低速非达西流的临界雷诺数分别约为  $5 \times 10^{-4}$  和  $1 \times 10^{-3}$ 。

由于流体或多孔介质性质的改变对临界雷诺数的影响较大,导致非达西流的临界雷诺数并非一个定值,因此单用临界雷诺数判别显得不够全面。阮敏等<sup>[50]</sup>采用因次分析法综合考虑拟启动压力梯度、渗透率、黏度、密度、孔隙直径、吼道直径等因素,提出了新的评价指标——压力数  $\lambda_N$ ,当  $\lambda_N > 5$  时,低渗多孔介质中的渗流表现为非达西流特征,当  $\lambda_N < 2$  时,表现为达西流特征。

## 2.3 低渗非达西流模型及渗流特点

低渗透介质中非达西流现象是客观存在的,当前对低渗非达西流的研究主要集中在相关模型的建立及渗流特点的探索上,其中理论分析与渗流实验是研究低渗非达西流的主要方法。理论分析主要包括解析法和数值法,常用的解析法有积分变换法(傅里叶变换和拉普拉斯变换等)、格林函数法和 Bessel 函数法等。如冯文光等<sup>[40]</sup>采用有限积分变换与拉普拉斯变换建立了单一介质、双重介质非定常非达西低速渗流的数学模型,用格林函数表示无界地层问题时拉氏空间的特解。对于非稳定流、空

间无限延展的含水层的复杂井流问题,难以采用解析法推导相应的解析解,因此,常采用数值法求解,数值法包括有限差分法、有限元法和边界元法等,如朱长军等<sup>[51]</sup>在充分考虑低渗非达西流及动边界的基础上,建立了低渗介质中地下水污染和地下水渗流的耦合数学模型。渗流实验是研究非达西流问题的另一有效方法,从渗流实验中可以分析出所需物理量之间的本构关系,为非达西流模型的建立提供依据,如 Swartzendruber<sup>[52]</sup>通过对低速非达西流的实验数据分析,提出了忽略非线性段的非达西流模型;Irmay<sup>[53]</sup>通过黏土介质中的非达西流实验,提出了不考虑下凹曲线段的非达西流模型;齐添等<sup>[54]</sup>通过固结渗流联合试验验证了非达西现象的存在,并提出了最符合萧山黏土渗流规律的折线渗流模型。

综上所述,在低渗透介质中,非达西流现象的存在性已被诸多学者所证实,但至今还没有统一、全面的判别其临界条件的标准。在研究非达西流规律与模型建立方面,理论推导与渗流实验是两条主要途径,可从各自的角度相互验证,不断对非达西流理论进行丰富和发展。然而,目前仅在油气藏领域对其有较为全面的研究,在黏土等低渗透介质中的研究相对较少。

## 3 基于非达西流理论的越流系统水流运动规律研究现状与展望

随着对越流系统水流运动规律的深入研究,越来越多的学者开始重视非达西流与越流的耦合问题,如文章等<sup>[55-62]</sup>构建了越流系统中抽水井附近非达西流动的两区模型,分别推出两区模型的水位降深在拉氏空间下的解析解,并基于 Forchheimer 定律求得了非达西流区域水位降深的数值差分解,分析了非达西流、越流和井储效应对水位降深的影响;Sen<sup>[63]</sup>基于 Izbash 定律研究了越流系统中抽水井附近非达西流问题;Birpinar 等<sup>[64]</sup>基于 Forchheimer 定律推出越流系统中非达西流模型的解析解;王全荣等<sup>[65]</sup>采用基于有限差分原理的迭代法模拟了越流系统中大口径完整井附近达西流区与非达西流区界面位置随时间变化的规律。上述研究均考虑了越流系统中的非达西流问题,但只单纯考虑了抽水井附近的非达西流,忽略了对弱透水层中的低渗非达西流的研究,而低渗介质中的非达西流现象的存在性已被诸多学者所证实,且已有学者从考虑低渗非达西流的弱透水层中的地下水污染<sup>[51]</sup>及固结计算<sup>[66-67]</sup>角度说明了运用达西定律来指导非达西地下水流动问题会出现一定的误差。

综上所述,忽略弱透水层中的低渗非达西流可

能难以较好地研究越流系统中的水流运动问题,而对于越流系统中低渗非达西流的研究目前还少有报道。现有的研究在实验方面多半单从黏性土本身的非达西特性考虑,而未从整个越流系统出发,探索非达西流在整个系统中的作用。笔者认为在未来的研究中需要从不同的空间尺度和时间尺度两方面开展研究。一方面需要开展越流系统的实验室以及野外区域等不同空间尺度上的渗流实验,通过对已有的低渗非达西流的本构方程和应用条件的完善和总结,探索适应于考虑低渗非达西流的越流系统的渗流规律,并引入新的理论和数学手段以揭示不同空间尺度下低渗非达西流对越流系统中水流运动规律的影响,而后重新分析现有的基于达西定律推求越流系统参数的可靠性和准确性,或在某类特定条件下采用非达西理论进行替换,或提出相应的修正系数以减小采用达西定律所带来的误差。另一方面需要从时间尺度上探讨越流与水头差之间的滞后关系,研究由于时间尺度产生的固结、弹性储释水等作用对水流的影响,并根据研究问题的时间尺度来决定是否考虑非达西流对越流系统中水流运动的影响。

## 4 结 语

越流与低渗非达西流的耦合问题研究是未来有关越流系统水流运动规律研究的一个重要的发展方向。本文总结了越流系统中水流运动规律的研究进展,分析了目前该领域研究的不同思路,并分别对越流规律、低渗非达西流的特点进行了介绍和评析。目前的研究成果在一定程度上代表着越流系统水流运动规律的特点,但由于研究领域的局限性较大,越流与低渗非达西流结合程度低,仍需从越流系统整体出发,在不同的时间和空间尺度上开展关于越流系统中低渗非达西流实验及相应的理论研究。

有关越流问题的研究,不同学者针对不同条件对越流系统水流运动规律的相关解析解与数值解做了大量工作,然而由于描述越流系统的模型是经过概化的,模型参数不再具有原有的物理含义,对能准确表达越流系统特点的有效参数难以获取,因此需要深入研究参数的“有效性”问题,以提高模型的准确性与可靠性。

在低渗非达西流的判据、成因及数学模型等方面,目前已有的研究已较为成熟,但研究成果都是在一定的渗流环境中得到的,适用性不高,且主要集中在油气藏领域,而在黏土等低渗透介质中的研究相对较少,因此需在研究的普适性、综合性方面进一步提高。

越流与低渗非达西流的耦合是对越流系统水流

运动规律研究的丰富和发展,但该领域的研究才刚刚起步,理论还不够完善,实验也有待进一步深入,这亟须新的理论和数学手段的支撑。分形、分岔、混沌等非线性理论<sup>[68-70]</sup>可以在多孔介质结构的描述方面拓展研究思路,但仍需对本构关系及其普适性进行更为深入的探讨。

## 参考文献:

- [1] 吕书君. 我国地下水污染分析[J]. 地下水, 2009, 31(1): 1-5. (LÜ Shujun. Analysis on groundwater contamination in our country [J]. Ground Water, 2009, 31(1): 1-5. (in Chinese))
- [2] 周璐. 地下水超采已越来越严重: 全国地下水环境简述[EB/OL]. (2011-11-25). <http://www.chinacitywater.org/zwdt/swyw/81614.shtml>.
- [3] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [4] BEAR J. Hydraulics of groundwater [M]. New York: McGraw-Hill, 1979.
- [5] HANTUSH M S, JACOB C E. non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer [J]. Transactions, American Geophysical Union, 1955, 36(1): 95-100.
- [6] 李培月. 非稳定流抽水试验确定越流承压含水层水文地质参数方法对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [7] CHRISTENSEN S, ZLOTNIK V A, TARTAKOVSKY D M. On the use of analytical solutions to design pumping tests in leaky aquifers connected to a stream [J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(3/4): 341-351.
- [8] 王浩, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 1-12. (WANG Hao, LU Chuiyu, QIN Dayong, et al. Advances in method and application of groundwater numerical simulation [J]. Science Frontiers, 2010, 17(6): 1-12. (in Chinese))
- [9] MALAMA B, KUHLMAN K, BARRASH W. Semi-analytical solution for flow in a leaky unconfined aquifer toward a partially penetrating pumping well [J]. Journal of Hydrology, 2008, 356(1/2): 234-244.
- [10] MALAMA B, KUHLMAN K, BARRASH W. Semi-analytical solution for flow in leaky unconfined aquifer-aquitard systems [J]. Journal of Hydrology, 2007, 346(1/2): 59-68.
- [11] 刘凯, 文章, 刘壮添, 等. 第一类越流含水层系统中非完整井附近非达西渗流近似解析解[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 966-971. (LIU Kai, WEN Zhang, LIU Zhuangtian, et al. Approximate analytical solution for non-Darcian flow to a partially penetrating well in the first kind of leaky aquifer [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 966-971. (in Chinese))
- [12] 吴健华. 第二类越流系统完整井非稳定流解的分析及含水层水文地质参数计算[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [13] 陈崇希, 唐仲华. 地下水流动问题数值方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990.

- [14] 叶淑君,戴水汉. 地下水流二维、准三维及三维模型模拟结果比较[J]. 水文地质工程地质,2003,30(5):23-27. (YE Shujun, DAI Shuihan. Comparing of results of two dimensional, quasi three dimensional and three dimensional models for groundwater [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2003,30(5):23-27. (in Chinese))
- [15] 伍兆聪. 夹弱透水层的双抽水含水层越流系统数学模型及有限元解法[J]. 水文地质工程地质,1979,6(3):39-40. (WU Zhaocong. Numerical model and its finite element solution of double pumping leaky system containing aquitard [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,1979,6(3):39-40. (in Chinese))
- [16] 李竞生,姚磊华. 含水层参数识别方法[M]. 北京:地质出版社,2003.
- [17] MCDONALD G. MICHAEL, ARLEN W. HARBAUGH. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model [M]. Washington D. C.: United States Government Printing Office, 1988.
- [18] 武强,董东林,武钢,等. 水资源评价的可视化专业软件 (Visual Modflow) 与应用潜力[J]. 水文地质工程地质,1999,26(5):23-25. (WU Qiang, DONG Donglin, WU Gang, et al. Professional visual software (Visual Modflow) for water resources assessment and its application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999, 26(5):23-25. (in Chinese))
- [19] 吴剑锋,朱学愚. 由 MODFLOW 浅谈地下水流数值模拟软件的发展趋势[J]. 工程勘察,2000(2):12-15. (WU Jianfeng, ZHU Xueyu. Development trend of groundwater numerical simulation software from MODFLOW [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2000(2):12-15. (in Chinese))
- [20] DIERSCH H J. Interactive, graphics-based finite-element simulation system FEFLOW for modeling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes [M]. Berlin:WASY Institute for Water Resource Planning and System Research Ltd., 1996.
- [21] 孟宪萌. 基于过程模拟的越流区承压含水层脆弱性评价研究[D]. 北京:清华大学,2010.
- [22] 唐仲华,向东进. 越流承压含水层不稳定流问题有限差分法的稳定条件[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1998,23(5):95-97. (TANG Zhonghua, XIANG Dongjin. Stability constraints of finite difference method for solving unsteady confined leaky aquifer system [J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences,1998,23(5):95-97. (in Chinese))
- [23] 王玉林,谢康和,王坤,等. 循环抽水越流承压含水层水位变化与变形分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(5):975-979. (WANG Yulin, XIE Kanghe, WANG Kun, et al. Drawdown of underground water and compact of the leakage confined aquifer due to cyclic pumping [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010,6(5):975-979. (in Chinese))
- [24] 吴浩,谢康和,黄大中. 第二类越流系统中结构性弱透水土层一维固结解析解[J]. 岩土工程学报,2014,36(9):1688-1695. (WU Hao, XIE Kanghe, HUANG Dazhong. Analytical solution for one-dimensional consolidation of structured aquitard soils in second kind of leakage system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(9):1688-1695. (in Chinese))
- [25] 吴在宝. 越流含水系统抽水试验的压力效应及其水文地质意义[J]. 西安地质学院学报,1985,7(2):77-81. (WU Zaibao. Pressure effects of pumping test in leakage aquifer system and hydrogeological significance of those [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,1985,7(2):77-81. (in Chinese))
- [26] 朱伟武. 越流含水层系统水力性质及压密性质的研究[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1991,16(1):95-104. (ZHU Weiwu. The research on the hydraulic properties and compression properties of leaky aquifer systems [J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences,1991,16(1):95-104. (in Chinese))
- [27] 曹文炳. 孔隙承压含水系统中黏性土释水及其在资源评价中的意义[J]. 水文地质工程地质,1983,10(4):8-13. (CAO Wenbing. Water releasing of clayey soil in porous confined aquifer system and its significance for water resources assessment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,1983,10(4):8-13. (in Chinese))
- [28] 曹文炳,李克文,刘英兰. 研究黏性土释水和渗透特性的多用途渗透固结试验装置[J]. 水文地质工程地质,1986,13(4):44-47. (CAO Wenbing, LI Kewen, LIU Yinglan. Osmotic oedometer for research on water releasing and permeability characteristic of clayey soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1986, 13(4):44-47. (in Chinese))
- [29] 曹文炳,李克文. 水位升降引起黏性土层释水、吸水与越流发生过程的室内研究方法[J]. 勘察科学技术,1986(4):22-29. (CAO Wenbing, LI Kewen. Laboratory research on water releasing & absorption and leakage of clay layer caused by water level fluctuations [J]. Site Investigation Science and Technology, 1986(4):22-29. (in Chinese))
- [30] 曹文炳,万力,龚斌,等. 水位变化条件下黏性土渗流特征试验研究[J]. 水文地质工程地质,2006,33(2):118-122. (CAO Wenbing, WAN Li, GONG Bin, et al. Experiments on osmosis through clayey soil under the condition of variable water levels [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(2):118-122. (in Chinese))
- [31] 王莹,陈宗宇,费宇红,等. 沧州市深层水中氟离子变化与地层释水估算[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011(增刊1):298-302. (WANG Ying, CHEN Zongyu, FEI Yuhong, et al. Estimation of water released from aquitard compaction indicated by fluorine in Cangzhou [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011(Sup1):298-302. (in Chinese))
- [32] 徐维生,柴军瑞,王如宾,等. 低渗透介质非达西渗流研

- 究进展[J]. 勘察科学技术, 2007(3): 20-24. (XU Weisheng, CHAI Junrui, WANG Rubin, et al. Progress on study of non-Darcy seepage in low permeability media [J]. Site Investigation Science and Technology, 2007(3): 20-24. (in Chinese))
- [33] HANSBO S. Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains [J]. Swedish Geotechnical Institute Proc, 1960, 18(1): 141-159.
- [34] MILLER R J, LOW P F. Threshold gradient for water flow in clay systems [J]. Soil Science Society of American Journal, 1963, 27(6): 605-609.
- [35] 闫庆来, 何秋轩, 尉立岗, 等. 低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 1990, 5(2): 1-6. (YAN Qinglai, HE Qiuxuan, WEI Ligang, et al. A laboratory study on percolation characteristics of single phase flow in low-permeability reservoirs [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Edition of Natural Science, 1990, 5(2): 1-6. (in Chinese))
- [36] 吴景春, 袁满, 张继成, 等. 大庆东部低渗透油藏单相流体低速非达西渗流特征[J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(2): 82-84. (WU Jingchun, YUAN Man, ZHANG Jicheng, et al. Characteristics of single-phase low-velocity of non-Darcy flow in a low-permeability reservoir in eastern Daqing [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(2): 82-84. (in Chinese))
- [37] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [38] 巢华庆. 大庆低渗透油田开发技术与实践[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 1-3. (CHAO Huaqing. Development technology and its application in low permeable oil and gas fields in the peripheral part Daqing [J]. Petroleum Geology & Development in Daqing, 2000, 19(5): 1-3. (in Chinese))
- [39] 刘慈群. 有起始比降固结问题的近似解[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 107-109. (LIU Ciqun. Approximate solution of consolidation issue with threshold gradient [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(3): 107-109. (in Chinese))
- [40] 冯文光, 葛家理. 单一介质、双重介质中非定常非达西低速渗流问题[J]. 石油勘探与开发, 1985, 12(1): 56-62. (FENG Wenguang, GE Jiali. Study on low velocity non-Darcy seepage with variable parameters in single & double medium [J]. Petroleum Exploration and Development, 1985, 12(1): 56-62. (in Chinese))
- [41] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 76-80. (FENG Wenguang. Review and prospect of low-velocity non-Darcy flow [J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(4): 76-80. (in Chinese))
- [42] 冯文光, 葛家理. 单一介质中非达西低速渗流时续流和表皮效应的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 1988, 7(2): 45-50. (FENG Wenguang, GE Jiali. Influence of after flow and skin effect for the non-Darcy flow at low velocity through single medium [J]. Petroleum Geology & Development in Daqing, 1988, 7(2): 45-50. (in Chinese))
- [43] NILSON R H. Transient fluid flow in porous media: inertia-dominated to viscous-dominated transition [J]. Journal of Fluids Engineering, 1981, 103(2): 339-343.
- [44] 陈永敏, 周娟, 刘文香, 等. 低速非达西渗流现象的实验论证[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(增刊1): 59-61. (CHEN Yongmin, ZHOU Juan, LIU Wenxiang, et al. Experimental demonstration of the non-Darcy phenomenon during low velocity flow through porous [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(Sup1): 59-61. (in Chinese))
- [45] 徐德敏, 黄润秋, 邓英尔, 等. 低渗透软弱岩非达西渗流拟启动压力梯度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 57-60. (XU Demin, HUANG Runqiu, DENG Yinger, et al. non-Darcy flow quasi-threshold pressure gradient experimental study for low permeability soft rock [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 57-60. (in Chinese))
- [46] 姚约东, 葛家理. 低渗透油藏不稳定渗流规律的研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(2): 55-58. (YAO Yuedong, GE Jiali. non-steady flow in low-permeability reservoir [J]. Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition, 2003, 27(2): 55-58. (in Chinese))
- [47] 刘建军, 刘先贵, 胡雅祯. 低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 556-561. (LIU Jianjun, LIU Xiangui, HU Yaren. Study on nonlinear seepage of rock low permeability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 556-561. (in Chinese))
- [48] 李中锋, 何顺利. 低渗透储层非达西渗流机理探讨[J]. 特种油气藏, 2005, 12(2): 35-38. (LI Zhongfeng, HE Shunli. non-Darcy percolation mechanism in low permeability reservoir [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2005, 12(2): 35-38. (in Chinese))
- [49] 王道成, 李闽, 陈浩, 等. 低速非达西流临界雷诺数实验研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 332-334. (WANG Daocheng, LI Min, CHEN Hao, et al. The experimental study of critical reynolds number on low-velocity non-Darcy flow [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(3): 332-334. (in Chinese))
- [50] 阮敏, 何秋轩. 低渗透非达西渗流综合判据初探[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 1999, 14(4): 53-55. (RUAN Min, HE Qiuxuan. A study of the overall criterion for judging the non-Darcy flow through low permeability porous media [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 1999, 14(4): 53-55. (in Chinese))
- [51] 朱长军, 李文耀, 郝阵纯, 等. 低渗透非达西流场中的一维溶质运移模拟[J]. 地球与环境, 2006, 41(3): 19-22. (ZHU Changjun, LI Wenyao, HAO Zhenchun, et al.

- Simulation of one-dimension contaminant transport in non-Darcy flow field through low permeability porous media [J]. *Earth and Environment*, 2006, 41 (3): 19-22. (in Chinese))
- [52] SWARTZENDRUBER D. non-Darcy flow behavior in liquid-saturated porous media [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67(13): 5205-5213.
- [53] IRMAY S. Solutions of the non-linear diffusion equation with a gravity term in hydrology [M]. Wageningen, The Netherlands: IAHS Symposium on Water in the Unsaturated Zone, 1966.
- [54] 齐添, 谢康和, 胡安峰, 等. 萧山黏土非达西渗流形状的试验研究 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2007, 41 (6): 1023-1028. (QI Tian, XIE Kanghe, HU Anfeng, et al. Laboratorial study on non-Darcy seepage in Xiaoshan clay [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2007, 41 (6): 1023-1028. (in Chinese))
- [55] 文章, 黄冠华, 李健, 等. 承压含水层中抽水井附近非达西流的近似解析解 [J]. *水利学报*, 2008, 39 (7): 815-821. (WEN Zhang, HUANG Guanhua, LI Jian, et al. Approximate analytical solution of non-Darcy flow towards the well in confined aquifer [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39 (7): 815-821. (in Chinese))
- [56] WEN Z, HUANG G, ZHAN H. Non-Darcian flow toward a finite-diameter vertical well in a confined aquifer [J]. *Pedosphere*, 2008, 18 (3): 288-303.
- [57] WEN Z, HUANG G, ZHAN H. non-Darcian flow to a well in an aquifer-aquitard system [J]. *Advance in Water Resources*, 2008, 31 (12): 1754-1763.
- [58] 文章, 黄冠华, 李健, 等. 承压含水层中扩展井附近非达西流数值解 [J]. *水利学报*, 2009, 40 (4): 398-402. (WEN Zhang, HUANG Guanhua, LI Jian, et al. A numerical solution of non-Darcy flow toward an extended well in a confined aquifer [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40 (4): 398-402. (in Chinese))
- [59] 文章, 黄冠华, 李健, 等. 承压含水层中大口径井附近非达西流的线性化近似解与数值解 [J]. *水利学报*, 2009, 40 (7): 863-869. (WEN Zhang, HUANG Guanhua, LI Jian, et al. Approximate analytic and numerical solutions for non-Darcy flow towards large diameter well in confined aquifers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40 (7): 863-869. (in Chinese))
- [60] 文章, 黄冠华, 李健, 等. 越流含水层中抽水井附近非达西流动模型的数值解 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2009, 24 (4): 448-454. (WEN Zhang, HUANG Guanhua, LI Jian, et al. A numerical solution for non-Darcy flow towards a well in a leaky aquifer [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2009, 24 (4): 448-454. (in Chinese))
- [61] 文章, 朱宠莲, 白振江. 第二类越流系统中抽水井附近非达西流近似解析解 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2010, 25 (6): 806-812. (WEN Zhang, ZHU Chonglian, BAI Zhenjiang, et al. An approximate analytical solution for non-Darcian flow near a well in a second kind of leaky aquifer system [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2010, 25 (6): 806-812. (in Chinese))
- [62] 文章, 黄冠华, 刘壮添, 等. 越流含水层中抽水井附近非达西流两区模型近似解析解 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36 (6): 1165-1172. (WEN Zhang, HUANG Guanhua, LIU Zhuangtian, et al. An approximate analytical solution for two-region non-Darcy flow toward a well in a leaky aquifer [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36 (6): 1165-1172. (in Chinese))
- [63] SEN Z. non-Darcian groundwater flow in leaky aquifers [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2000, 45 (4): 595-606.
- [64] BIRPINAR M, SEN Z. Forchheimer groundwater flow law type curves for leaky aquifers [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2004, 9 (1): 51-59.
- [65] 王全荣, 唐仲华, 文章, 等. 越流含水层抽水井附近非达西流与达西流区界面位置变化规律研究 [J]. *水利学报*, 2012, 43 (10): 1171-1178. (WANG Quanrong, TANG Zhonghua, WEN Zhang, et al. Numerical simulation for flow to a pumping well with moving boundary of the non-Darcy flow in a leaky aquifer [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43 (10): 1171-1178. (in Chinese))
- [66] 谢海澜, 武强, 赵增敏, 等. 考虑非达西流的弱透水层固结计算 [J]. *岩土力学*, 2007, 27 (5): 1061-1065. (XIE Hailan, WU Qiang, ZHAO Zengmin, et al. Consolidation computation of aquitard considering non-Darcy flow [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 27 (5): 1061-1065. (in Chinese))
- [67] 刘忠玉, 孙丽云, 乐金朝, 等. 基于非 Darcy 渗流的饱和黏土一维固结理论 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28 (5): 973-979. (LIU Zhongyu, SUN Liyun, LE Jinchao, et al. One-dimensional consolidation theory of saturated clay based on non-Darcy flow [J]. *Chinese Journal of Rock and Engineering*, 2009, 28 (5): 973-979. (in Chinese))
- [68] 李云开, 杨培岭, 任树梅, 等. 土壤水分与溶质运移机制的分形理论研究进展 [J]. *水科学进展*, 2005, 16 (6): 892-899. (LI Yunkai, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Development in research on the fractal theory of soil water and solute transport mechanisms [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16 (6): 892-899. (in Chinese))
- [69] 李晓鹏, 刘建立, 张佳宝, 等. 华北冲积平原壤质潮土的土壤粒径分形空间尺度分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (4): 118-124. (LI Xiaopeng, LIU Jianli, ZHANG Jiabao, et al. Analysis of fractal magnitude of soil particles in loamy Chao soils in North China Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (4): 118-124. (in Chinese))
- [70] 王红瑞, 宋宇, 刘昌明, 等. 混沌理论及在水科学中的应用与存在的问题 [J]. *水科学进展*, 2004, 15 (3): 400-407. (WANG Hongrui, SONG Yu, LIU Changming, et al. Application and issues of chaos theory in hydrosience [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15 (3): 400-407. (in Chinese)) (收稿日期: 2014-07-30 编辑: 熊水斌)