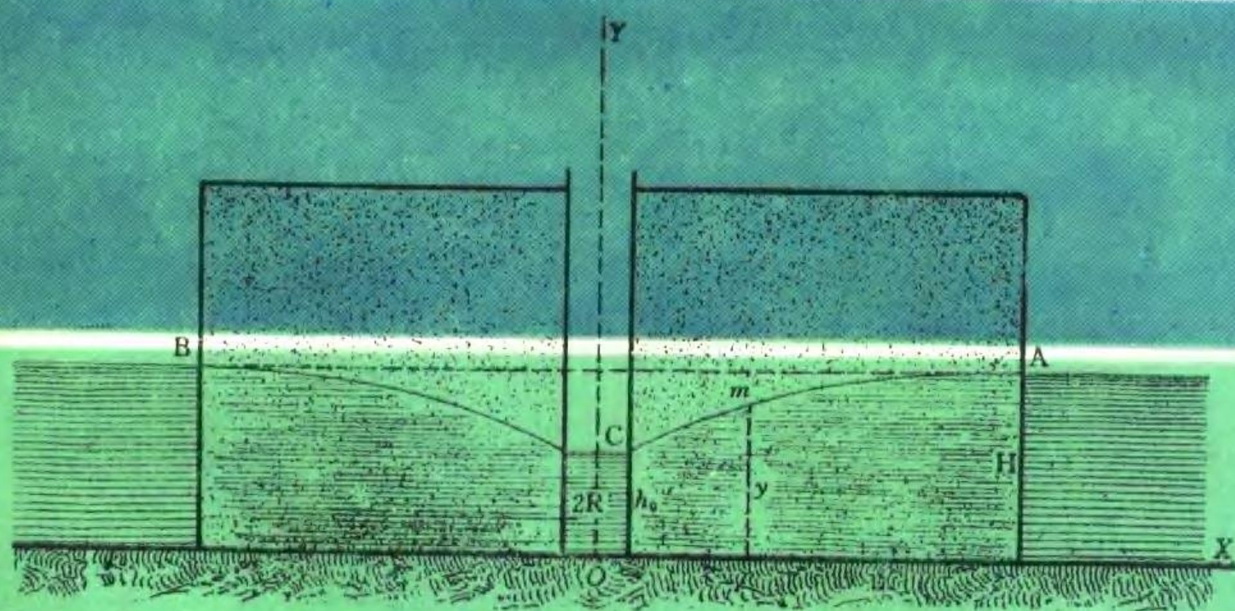


地下水水力学的发展

张宏仁 等 编译



地质出版社

地下水水力学的发展

张宏仁 等 编译

地质出版社

(京)新登字085号

内 容 简 介

1975年出版的《地下水非稳定理论的发展和应用》，系统地搜集了地下水水力学的主要经典文献，受到读者的广泛欢迎。本书此次再版补入了达西和裘布依 100 多年前论述地下水的有关篇章及当时未编入的数值解的重要文献，删除了洛曼对地下水非稳定流的介绍和另外几篇较不重要的文献。总之，本书现在入选的19篇文章，都是地下水水力学研究史中具有里程碑性质的重要文献，反映了地下水水力学发展的全貌，所以，本书改名为《地下水水力学的发展》。

凡是从事地下水勘查、开发、研究的人员和有关院校的师生，都有必要人手一册，用作参考。

地下水水力学的发展

张宏仁 等 编译

*

责任编辑：高天平

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：14.625 字数：345000

1992年2月北京第一版·1992年2月北京第一次印刷

印数：1—800册 定价：9.70元

ISBN 7-116-01075-0/P·905

序

地下水水力学作为一门科学,是以130多年前达西定律的发表为开端的。达西定律加上质量守恒原理构成了今天地下水水力学大厦的基础。地下水开发利用的规模一开始比较小,不足以造成对地下水动态的显著影响,人们的注意力被局限在单个取水工程的效率问题上。地下水稳定渗流方程的各种解,对绝大多数实际工程问题来说已够用了。因此,虽然数学家早就掌握了必要的工具,但直到本世纪30年代,地下水非稳定渗流问题仍没有受到重视。

随着人们对地下水开发利用强度的加大,对地下水动态的人为影响日趋显著。生产实践对解释及预测地下水动态变化提出了发展新理论的要求。1935年泰斯公式的发表,在地下水水力学的历史上开创了一个新纪元,地下水非稳定渗流方程的各种解开始大量涌现。水文地质学以这一理论性的开拓为基础,登上了一个新台阶。

由于历史的原因,我国的水文地质教学在很长一段时间里主要采用苏联的教材。而在苏联直到本世纪70年代,地下水非稳定渗流理论一直没有得到广泛传播。这就使得地下水非稳定流理论在泰斯公式发表30多年后,在我国仍鲜为人知。我国气候受东南亚季风的影响,降雨量极不均匀,许多地区的工农业生产及人民生活用水,对地下水的依赖程度很高。随着社会主义经济建设的发展,地下水开发利用规模迅速地扩大。实践早就提出了一系列与地下水开发利用有关的问题,而其中与地下水动态变化有关的许多问题单靠稳定渗流理论是无法解决的。掌握地下水非稳定流理论已成为生产实践的迫切需要。

大约在20年前,沈树荣同志建议为推广地下水非稳定流理论编一本书。当时在我国有关这方面的零星知识,大多是从苏联文献翻译过来的第二手材料。其中有些文章给人们造成一种假象,似乎地下水非稳定流理论是凭空产生的,是从数学到数学的神秘的东西。这很容易使当时缺乏数学知识准备的广大水文地质工作者望而生畏,又可能助长另一些人在还没有把地下水渗流力学基本概念弄清楚之前便陷入繁琐的数学推导中,产生钻牛角尖的偏向。这两种倾向对在我国迅速地推广有关地下水非稳定流理论及应用方面的新知识都是非常有害的。而克服上述倾向的有效措施,就是把能较正确、全面地反映这一理论如何在实践中产生,并通过实践不断地完善、丰富,在地下水水力学发展史上具有里程碑意义的一系列原著直接提供给广大水文地质工作者。这将成为在我国推广地下水非稳定流理论,提高水文地质工作者理论水平及实践才干强有力的工具。这些论文分散在从本世纪20年代到70年代的多种外国期刊中,是广大水文地质工作者不容易接触到的。为了克服这一困难,我们从浩瀚的文献中经过反复筛选,挑出了比较有代表性的十几篇文章编集成册。这项工作在地质出版社的支持帮助下,利用近两年的业余时间,以《地下水非稳定流理论的发展及应用》为书名的译文集于1975年终于问世了。沈树荣同志为译文集的编辑出版作了大量默默无闻的工作,唐宁华同志则奔波于北京水文队与地质出版社之间。这是回顾译文集出版情景时所不能不回想到的。

从上述译文集出版到现在,已过去18年。实践证明,译文集对在我国传播地下水非稳

定流理论是有帮助的,至今仍是教学、科研、生产中实用的工具书。但从选题到今天的20年内出现了一些新情况,使得现在重印译文集时,有必要作适当的增补和删减。

在地下水水力学发展的历程中,首先应当提到法国人H·达西(Darcy)、J·裘布伊(Dupuit)的开创性工作。但70年代初着手编译文集时,找遍北京各大图书馆都没法收集到他们的经典论文,只好不无遗憾地放弃了这个打算。1981年访问法国后从巴黎回北京,临上飞机前总算在巴黎国立图书馆找到并复印了关键性的章节。利用今天再次出版译文集的机会,补上两位法国学者的论文摘录,以填充原来留下的历史空白。

其次,当时的所谓地下水非稳定流理论,主要局限于单井非稳定渗流问题在各种理想化条件下的解析解。由于数学工具的局限性,即使在译文集出版前已显示出这方面的发展很难再有大的突破。20年的历史证明了这一点。在这20年中新发展的解析解,大多形式繁杂而难以在实际工作中利用,有的甚至不得不求助于电子计算机。作为单井水力学问题解析解的历史回顾,原来的译文集即使不增补新的内容也是比较完整的。从今天的水平看,论文的选择也是基本合理的。美国人R. A. Freeze等1983年按相似思路编的里程碑论文集(Benchmark Papers in Geology V.72)所选的论文与我们1973年所选的大致相同。然而,20年一次的再版毕竟是个难得的机会。利用这次机会,在单井水力学问题解析解以外,增补了三篇有关数值解的文章。早在译文集出版前,在国外,当解析解的发展已经步履艰难,而且在非均质、不规则边界以及其他复杂的渗流问题面前显得力不从心的时候,随着电子数字计算机的推广,数值解法在地下水水力学中的应用便应运而生。但在70年代初,电子计算机在我国还远不是广大水文地质工作者,甚至专业科研人员所能利用的工具。故论文集中没有编入这方面的文章。新增的三篇有代表性的论文中,第一篇是H·N·泰松(Tyson)1964年写的。它在清晰的概念模式基础上,运用麦克尼尔(MacNeal)发展的数值方法,简单明了地介绍了不规则网格有限差分法及其在地下水盆地模拟中的应用。泰松所用的方法被后人称为“加利福尼亚模型”,经过一些非原则性的、技巧上的改进后,至今仍被广泛应用。第二篇G·F·平德(Pinder)等人的论文介绍了方格网有限差分法在地下水渗流问题中的应用。这一方法至今在发达国家油气及地下水开发的生产实践中仍是应用得最广的。不幸的是由于方法的简捷和朴实无华,在我国却受到了不应有的轻视。这是由于电子计算机在我国普及得比较晚,当有较多的人开始学习数值方法时,除方格网有限差分法以外又出现了其他新方法,使得许多人一开始就选择了别的方法而不是方格网有限差分法。长期很少有人使用的现实更加深了对方格网有限差分法的偏见。消除偏见最好的办法还是实践。用不同的方法试一试就更容易体会各自具有的优点和缺点。第三篇是G·F·平德等人有关有限单元法在含水层数值模型应用中比较有代表性的一篇论文。除了常规的线性三角形单元外,著者还使用了被认为比较时髦的等参量四边形单元。值得注意的是,这篇论文的主要著者也是第二篇论文的主要著者。G·F·平德用两种方法分析了同一地下水盆地,从而也提供了两种数值方法的对比。这对了解两种数值方法的相对优缺点有一定帮助。

这次新增加的最后一篇论文是J·托特(Tóth)关于流域规模地下水渗流系统分析方面的代表作。托特的理论逐渐受到越来越多的注意,特别是对大范围地下水缓慢而长周期的深循环在理论上的分析,对正确理解地下热水、矿泉水的形成,油、气驱动机制乃至火山、热液活动中水的循环具有重要意义。这一理论对人们接触最多的地下淡水资源无疑也

是正确的，但由于深循环在淡水资源中不占重要的地位，托特理论在这方面所起的作用就有限了。

本译文集没有专门收入在地下水水力学研究中曾经风行一时的电模拟方面的论文。这是由于电模拟今天已完全可以用更先进的数字计算机来代替，而且泰松及平德的论文中都提到了电模拟方法的基本原理。本译文集没有涉及到的另一个重要领域是地下水中的溶质运移问题。一方面因为这方面的论文较多，单独出一本译文集也许更好；更重要的是虽经10多年的努力，这项研究至今在理论及方法上仍没有成熟到足以解决大量实际问题的程度。唯一比较实用的是仅仅考虑对流项的溶质运移模型。而这种模型的主要基础仍是本译文集新收入的有关地下水渗流问题的数值解模型。

20年前，当地下水非稳定流理论在我国还鲜为人知的时候，将它作为不同于传统的稳定流理论的东西提出来，曾经是必要的。今天这种必要性也许已不复存在。这也就是把译文集的名字改为《地下水水力学的发展》的原因。

希望这本译文集对我国水文地质科学的发展，对新一代水文地质工作者的成长有帮助。

张宏仁

1992年2月14日于北京

目 录

地下水非稳定流理论的发展和应用.....	张宏仁 (1)
水穿越砂流动定律的确定	H·达西 (9)
水穿越可渗透地层的运动	J·裘布伊 (13)
内布拉斯加州的抽水试验	L·K·温策尔 (21)
承压含水层的可压缩性和弹性	O·E·迈因策尔 (41)
利用地下水贮水量的井其流量和抽水时间与水压面下降的关系	C·V·泰斯 (52)
论弹性承压含水层中的水流	C·E·雅各布 (58)
评价地层参数和概括井区历史的通用图解法.....	H·H·小库珀 C·E·雅各布 (71)
根据抽水试验资料确定导水系数和贮水系数.....	周文德 (80)
确定承压水井有效半径的降深试验	C·E·雅各布 (88)
漏承压含水层中的径向流	C·E·雅各布 (101)
分布无限的漏含水层中的非稳定径向流	M·S·汉土什 C·E·雅各布 (108)
漏含水层中抽水试验数据的分析	M·S·汉土什 (114)
漏含水层理论的改进	M·S·汉土什 (130)
考虑贮水量延迟给水的非稳定抽水试验资料分析	N·S·博尔顿 (145)
潜水条件下含水层试验的标准曲线解	T·A·普里克特 (155)
地下水盆地的计算机模拟.....	H·N·泰松 E·M·韦伯 (167)
数字计算机在含水层评价中的应用.....	G·F·平德 J·D·布雷德赫夫特 (180)
加辽金方法对含水层分析的应用.....	G·F·平德 E·O·弗林德 (203)
小型汇水盆地中地下水流的理论分析.....	J·托特 (216)

地下水非稳定流理论的发展和应用

张 宏 仁

长期以来,在地下水水力学中,都沿用以裘布伊公式为代表的稳定流理论。实践证明,这套理论在一定范围内虽有应用价值,但有它的局限性。本世纪30年代发展起来的非稳定流理论,在一定程度上克服了稳定流理论的某些局限性,把地下水水力学向前推进了一大步,从而逐步得到了广泛的传播和应用。认真研究地下水非稳定流理论,取其精华,去其糟粕,会有助于我们进一步发展地下水水力学理论。

编这本译文集的目的,正是为了向广大水文地质工作者系统地提供一些原著,使大家能更好地了解非稳定流理论发生和发展的过程,有助于打破迷信,认识这套理论的本质。这本译文集所收集的十来篇论文,大多是在非稳定流理论发生发展过程中曾起过一定作用的代表作。这些论文分散在不同年份的外国期刊中,一般不容易找到。现在把它们收集在一起,对同志们可能提供一定的方便。但也正由于这些论文出自不同年代的不同著者,故难免互不衔接或互有重复。

下面就几个主要问题作一简要说明:

一、稳定流理论的局限性

现代的地下水水力学是从19世纪中叶才开始的,比别的学科要晚得多。这是由于对地下水的大规模开发利用开始得比较晚造成的。1856年,法国人达西通过实验提出了水在孔隙介质中渗透的定律,即达西定律。达西定律的数学表现式和电学中的欧姆定律以及固体介质中的热传导定律是一致的。这反映了三种运动形式内在的共性。

与达西同时的裘布伊,以达西定律为基础,推导出了地下水单向及平面径向稳定流公式。这些公式描绘了特定条件下的地下水运动状态,很快得到了广泛的传播和应用。裘布伊公式的出现,对当时地下水水力学的发展起过重要的作用,直到今天仍有一定的实用价值。裘布伊公式出现后的很长一段时间,地下水水力学虽有一定程度的发展,但总是没有超出稳定流理论的范围。

地下水稳定流理论的应用有很大的局限性。最大的缺陷在于,稳定流理论所描绘的,仅仅是在一定条件下,地下水的运动经过很长时间所达到的一种平衡状态,这种平衡状态是不随时间而变化的。而地下水的实际运动状态却总是在不断变化。因而,稳定流理论的应用就只能局限于在某些特定条件下,解释地下水运动的状态,而不能说明从一个状态到另一个状态之间的整个发展过程。或者用数学语言来说,裘布伊公式的最大缺陷,在于没有包括时间这个变量。

如果说,当地下水开发利用规模与地下水天然补给量相比很小的时候,还可以近似地符合于稳定流的理论,那么,当开发规模越来越大,地下水位年复一年地发生明显的持续

下降时，就要求有新的理论来解释地下水动态变化的过程，而稳定流理论在这方面正好是无能为力的。

二、地下水非稳定流理论的产生

地下水非稳定流理论的出现，比其他学科的相应理论要晚一个多世纪。还在地下水稳定流理论出现之前，在经典物理学中就已提出了电流和热传导等方面的非稳定运动理论问题。这些从实践中提出的问题，大大促进了当时数学（如偏微分方程）的发展。而数学的发展反过来又促进了物理学中有关学科的发展。由于地下水运动的客观规律和电学以及固体中热传导问题有很多共性的东西，因而，电学和热传导理论的发展早就为地下水非稳定流理论打下了基础，并准备了现成的数学工具。

然而，这一点却长时间没有为从事地下水研究的人们所认识。并不是因为这些人不够聪明，而是由于生产实践的深度和广度，还没有提供出足够丰富的感性认识材料。地下水的开发规模，还不足以对地下水动态造成引人注目的变化。这往往使人们把地下水极其缓慢的非稳定运动，错当作稳定的运动，而满足于以裘布伊公式为代表的稳定流理论。这就长时间地阻碍了非稳定流理论的发生和发展。

值得我们深思的是下列事实：达西定律和裘布伊公式是在法国提出的，有关热传导的数学理论是法国人福里哀早在达西定律出现以前就建立了的。但地下水非稳定流理论却不是法国，而是在美国首先得到发展。这是由于法国地表水资源比较丰富，地下水开发量不大，因而长期停留在裘布伊公式的水平上。而美国由于有大片干旱半干旱地区，加上由于资本主义发展的不平衡性，一段时期内对地下水资源需要量增长得比较快，正是生产实践中提出的一系列问题，促进了非稳定流理论的发生和发展。恩格斯曾经精辟地说明过科学的发展是怎样依赖于生产需要的，他指出：“社会一旦有技术上的需要，则这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。”

为了说明地下水非稳定流理论是怎样通过实践产生的，我们选用了温策尔等人在美国内布拉斯加州所作的一次抽水试验总结报告的一部分。这次试验的目的，本来是为了验证蒂姆公式^①，但结果却发现蒂姆公式有很大的局限性。蒂姆公式是本世纪初德国人根室·蒂姆提出的，曾经风行一时。这个公式实质上 and 裘布伊公式是相同的，只是他用了两个观测孔的资料作为积分上下限，以代替裘布伊假设的圆柱形岛状含水层，并提出了用抽水试验求含水层渗透系数的方法。

温策尔通过抽水试验，发现了一系列重要现象，并作了比较正确的解释。其中主要的几点是：

① 在分布宽广的潜水含水层中抽水是个逐渐疏干含水层的过程，首先主要是疏干抽水井附近的部分含水层。以后，随着降落漏斗的扩大，逐渐更多地疏干远处的含水层。

② 因而，在抽水井附近最先达到接近于稳定的状态，越远越偏离稳定状态。

③ 既然降落漏斗发展的过程是漏斗中含水层疏干的过程，那么这个过程必然与含水层的给水度有关。反过来，根据疏干发展的过程，应该能计算出含水层的给水度。

① 蒂姆过去译为齐姆，这是由于从德文先译成俄文，再从俄文转译成中文造成的，按发音及习惯译法，应作蒂姆。

温策尔的结论，几乎已包含了地下水径向非稳定流的全部主要思想。然而，由于缺乏数学准备，他只能限于定性的解释，没有能推导出实用的公式。

温策尔的文章只解释了潜水含水层中发生的非稳定的过程与含水层的疏干有关。而在承压含水层中，并不发生含水层的疏干，那么是否就不存在非稳定过程了呢？

迈因策尔1928年写的论文首先回答了这个问题，他根据大量长期观测资料，认为承压含水层是可压缩而且是有弹性的。随着抽水引起的承压水头的下降，承压含水层也能释放出一部分贮存的水，因而在分布宽广的承压含水层中抽水的过程，也是不断消耗含水层中贮水量的过程。他以达科他砂岩中几十年抽水的实际材料证明了这一点。

温策尔、迈因策尔等人的文章表明，早在30年代初期，由于开发利用地下水规模的扩大，已经为潜水和承压含水层中的地下水非稳定流理论准备了比较丰富的实践基础。而固体中热传导理论的发展又为非稳定流理论准备了现成的数学工具。这样，非稳定流理论出现的时机也就成熟了。

1935年美国人泰斯^①正是利用了迈因策尔、温策尔等人的实际材料和观点，在数学家柳宾帮助下，利用热传导理论中现成的公式加以适当改造，第一次提出了实用的地下水径向非稳定流公式——即所谓的泰斯公式。

三、泰斯公式及其应用

本书收集的第五篇文章，就是泰斯1935年发表的非稳定流公式的原著。这篇论文篇幅不大，但却比较深刻地说明了非稳定流公式的实质、它的应用和可能的局限性。

泰斯首先指出他的公式的主要优点是包含了时间这个变量，这正是非稳定流公式与稳定流公式的根本区别。

关于公式的应用，可以有两个方面。即：一方面可以根据抽水过程中的降深观测计算含水层参数——导水系数和贮水系数；另一方面，可以用来预计抽水对未来地下水位的影响。下面我们分别讨论一下这两个方面的应用。

首先讨论一下，如何根据抽水过程中的降深观测数据，计算含水层参数。

由于待确定的未知数只有两个（导水系数和贮水系数），那么只要有两次降深观测数据（同一时间不同地点，同一地点不同时间，或不同地点不同时间的都可以）代入泰斯公式，得出两个方程式就可以联立求解。这种代数学理论上能成立的方法在实用上却行不通，这是因为：

1. 由于含水层的不均一性和观测误差及其他偶然因素的干扰，如果只用两个观测数据，往往会造成较大的偶然误差。为了消除这类误差，最好将尽量多的观测数据充分利用起来。

2. 由于泰斯公式中含有无法直接求解的指数积分，用普通的代数方法直接解联立方程式是不可能的。

以上两条困难，后一条可以用无穷级数展开指数积分来解决，前一条可以联立大量方程式，用最小二乘法求出均方误差最小的解。这两种方法加在一起，使计算工作变得很繁

① 过去有人译作蒂斯，也是由于从俄文译本转译过来造成的。

琐。在有电子计算机的条件下，当然还是可以办到的。但在通常情况下，可以用图解法很简单地得到令人满意的结果。主要的图解方法有以下几种：

（一）标准曲线法

对于无法直接求解的函数，标准曲线法是一种很有效而简便的方法。它的优点除简便外，还在于能同时利用大量观测数据，最大限度地利用试验成果，减小偶然误差的影响。这个方法又有很大的灵活性，当实测曲线偏离泰斯公式而服从其他公式时，在图上可以直观地看出来。由于以上优点，直到目前，标准曲线法仍是应用得最广，通用性最强的方法。标准曲线法也是泰斯首先提出来的，但他本人没有写过文章专门叙述这个方法，只在雅各布的文章中有简单的转述。

（二）直线法

这种方法在库珀和雅各布合写的论文中有详细介绍。现在大多被叫做雅各布法。其实这个方法的基本原理在泰斯1935年的文章中已讲到了，不过泰斯只用它来解析恢复曲线。表面上看，直线法简单易行，又不需要准备标准曲线，因而从事实际工作的人很乐于采用。也正因为这样，我们要特别指出这种方法的局限性。首先，它只适用于严格遵循泰斯公式的曲线。如果滥用到偏离泰斯公式的抽水试验中去，会造成很大误差。其次，它只适用于 u 值较小的条件（小于0.01）。随意地把直线法扩大到 u 值大的范围内去，也会造成很大误差。

（三）周文德法

1953年周文德提出了一种切线法，企图既免除准备标准曲线的麻烦，又弥补直线法不能应用于大 u 值的缺陷。这个方法在理论上是成立的，但它只能应用少量观测数据，有可能出现较大的偶然误差，因而没有得到广泛应用。这个方法的某些原理，被汉士什吸取了，用于分析漏含水层抽水试验数据。

除上面提到的以外，还有很多种方法，大都限于利用个别或少量数据。有的方法还对数据的收集提出特殊要求，这些方法都没有得到广泛应用。

泰斯公式的第二个用途是预测抽水对地下水动态的影响。这是我们的主要目的。

如果自然界一切条件，都和泰斯假设的理想条件相一致，那么这个任务是比较容易完成的。只要将各种参数代入公式，就可以求出答案。然而现实的含水层是很复杂的，这就使表面上看来简单的问题，实际做起来很困难，这在下面还要谈到。

四、地下水运动的基本偏微分方程

一般教科书上介绍非稳定流理论，总是先讲偏微分方程的建立，然后再把泰斯公式作为偏微分方程在一定的边值和初值条件下的特解介绍出来。而在这本译文集中次序却是倒过来的。这是因为起初泰斯公式并不是直接从偏微分方程出发推导出来，而是从热传导理论中找类似的公式借用过来的。泰斯公式出现以后五年，雅各布才参照热传导理论中的方法，依样画葫芦，建立了地下水运动的基本微分方程。当然，雅各布还是有贡献的，特别是阐明了承压含水层贮水系数的构成，这样就把迈因策尔当年定性评价过的东西，用较严格的数学形式确定下来了。

了解这一段历史，对于破除迷信是有好处的。因为从事地下水资源勘测的水文地质工作者，并不是所有的人在数学知识方面都有足够的基础，看到一大堆数学公式往往不是产

生畏难情绪就是感到厌烦。看到这段历史，大家就会了解到，连泰斯公式的发明人泰斯自己，当初也并没有能从偏微分方程出发，推导出以他命名的公式。泰斯之所以能在数学家帮助下建立非稳定流公式，首先在于他能比较正确地理解地下水非稳定流的内在矛盾，把握住问题的实质。更何况在一般应用非稳定流理论的情况下，即使记不住公式是怎样推导出来的，也并不妨碍我们进行必要的运算。

然而，如果要更进一步地深入了解非稳定流理论的实质，针对各种偏离理想条件的情况推导出新的公式，对偏微分方程的深入理解就是必要的了。加上近年来含水层电比拟和数学模拟的方法发展很快。这些方法都是建立在偏微分方程近似解法基础上的。这就更要求我们对地下水运动的偏微分方程有深入的了解。

整个地下水运动的基本偏微分方程，实质上包括两条基本定理。一条是物质不灭定理。就是说水不会自生自灭，任一瞬间流进某一体积含水层的水和流出这个体积含水层的水以及这个体积的含水层中储存着的水总量的增减应互相抵销，收、支、积累之间应建立平衡。另一条叫能量不灭定理。在地下水水力学中就是达西定律。在地下水运动中的能量转换关系，实质上就是地下水的位能在粘滞运动中转化为热能的过程。因为地下水运动速度极慢，动能的变化小到可以忽略不计，在单位距离上位能的变化表现为水力梯度，而单位流量的水通过单位横断面含水层所需要的能量大小与含水层渗透能力有关，渗透性愈差，所需的能量愈大，达西定律的实质就在这一点上。把以上两条原理结合起来，就可以得出地下水运动的基本微分方程。记住以上两条，整个微分方程就不难理解了。

五、泰斯公式的局限性及非稳定流理论的进一步发展

泰斯在建立非稳定流公式时，是从以下理想条件出发的：

1. 含水层均质，各向同性；
2. 含水层水平分布，面积无限广阔；
3. 含水层的导水系数不随时间而改变，而且到处都同样大小；
4. 抽水井穿透了整个含水层；
5. 抽水井的直径无限小；
6. 当水位一下降，从贮水量中的排水应该是瞬时发生的；
7. 含水层顶底板绝对不透水。

完全符合以上理想条件的情况，在自然界是不存在的，现实条件总是或多或少地偏离上述理想条件。泰斯当时也看到了这一点，并对各种偏离理想条件的情况可能引起的后果，作了比较正确的定性评价。然而，适应不同条件的新公式，是在1935年以后逐步发展起来的。这些公式主要可分以下几个方面：

（一）漏含水层^①公式

含水层顶底板没有绝对不透水的（正如没有绝对不导电或不导热的绝缘体一样），当含水层内外有水头差时，就会引起向内或向外的越流。当降落漏斗发展到一定程度时，井的

① 漏含水层即有越流的含水层，英文为 leaky aquifer。

出水可以完全由越流进入含水层的水来满足。在这种情况下盲目使用泰斯公式,就会导致错误的结论,得出假象的贮水系数和导水系数。

荷兰人在围海造田的过程中,进行了大面积沼泽低地的疏干。这一实践引起他们对于通过半透水围闭层^①发生越流的注意。1930年德格里首先建立了理想的漏含文层中稳定流的公式。1939年斯特格文茨和范内斯又作了进一步讨论。雅各布于1946年首先建立了漏含文层中非稳定流的偏微分方程,以后雅各布、汉土什为不同情况下漏含文层中的非稳定流求出了许多新公式,并为公式中出现的各种函数列了表。汉土什还把拉普拉斯变换,福里哀变换等数学工具应用来为各种新建立的微分方程求解,这促成了一大批新公式的出现。本书收集了雅各布的一篇,汉土什的二篇,两人合作的一篇。

附带说明一下,漏含文层这个词传到苏联后,翻译成“有越流的含水层”,在西欧有些国家又叫半承压含水层,说的都是一回事。

(二) 有延迟给水的潜水含水层

对理想含水层的要求之一是,当水位一下降,贮水量中水的释放应当是瞬时发生的。泰斯在1935年就已经看到,在潜水含水层中,疏干往往落后于水位的下降,他还正确地指出,随着抽水时间的延长,疏干速度会逐渐赶上水位下降速度。这些现象,在温策尔等人所作的抽水试验中也曾经观测到。然而泰斯当时还没能建立起相应的微分方程,用公式说明延迟疏干现象比较显著的潜水含水层中抽水早期阶段的过程。

直到60年代初,美国的沃尔顿才通过抽水试验,发现了潜水含水层中的水位下降曲线有三个明显的区段。1964年,英国人博尔顿根据沃尔顿的观察结果,提出了有延迟给水的潜水含水层中地下水运动的偏微分方程,并为微分方程求了解。他的公式所描绘的水位下降曲线,较好地重现了沃尔顿所指出的三个区段。以后,美国人普里克特对博尔顿公式的应用方法又作了具体化。直到70年代,对于有延迟给水的潜水含水层中非稳定流公式还断续有讨论,但并没有重大突破。本文集收集了博尔顿和普里克特的文章。

(三) 对井附近潜水面的降深改正

对理想的含水层的要求包括导水系数不应随时间地点而改变。但在实际的潜水含水层中,即使抽水开始前导水系数到处都一样大,但只要抽水一开始,随着水位下降,含水层厚度减小,导水系数也就相应地减小了,而且离抽水井愈近,减少得愈多。然而,正如泰斯所正确指出的,如果潜水面的下降量比起含水层厚度来说很小的时候,这种导水系数的差别不会有太大影响,一般可以忽略不计。但在较薄的含水层中,尤其在抽水井附近,对这种影响就不能不加考虑。在这种情况下可以采用当年裘布伊-福尔海梅用过的简化假设,即假设不存在三维流,而且对于本来应当用正弦计算的水力梯度改用正切代替,这样可以

用 $\left(s - \frac{s^2}{2m}\right)$ 代替实测的降深值 s (m 为含水层的饱和厚度)。改正后的降深一般更接近于泰斯公式理论值。

(四) 非完整井

在稳定流理论发展过程中,已有人为非完整井附近的降深分布进行过推导。对非稳定流来说,那些原则基本上是适用的。一般认为,如果观测孔离抽水井的距离大于一倍半含

① 英文为 confined bed, 与习惯上所用的“隔水层”涵义不尽相同, 暂用“围闭层”这一新词。

水层厚度，对井的非完整性可以不加校正。而对于较近距离内的校正方法曾有过一些讨论，然而由于种种复杂因素的影响，这些校正往往并不能很好地解决定量问题。

（五）井损计算

地下水由含水层进入井内之前，要经过井壁、过滤器。由于它们的影响造成附加的水头损失。这个损失的大小受多种因素影响，不好估计，因此抽水井内的水位观测数据往往不能直接用来计算含水层参数。而另设观测孔又要增加投资。特别是当主含水层埋藏较深的情况下，另设观测孔一般很难实现。为了确定井损的大小，1947年雅各布设计了一种阶梯抽水试验方法，1953年罗拉鲍又作了改进。但他们的方法仍然需要一个观测孔用来求贮水系数。近年来对于方法本身能否成立还有过争论。本书收集了雅各布1947年的文章供大家参考。

（六）叠加原理

在微分方程理论中，有一个对于扩大非稳定流公式应用范围很有利的原理，即叠加原理。从微分方程理论中我们知道，线性微分方程的一个以上的解相加，结果又能得到一个解。在符合泰斯所假设的理想含水层中，地下水运动的偏微分方程是线性的，所以对泰斯公式就可以适用叠加原理。叠加原理应用于单井，可以求一个断续抽水的井或抽水流量有阶梯式变化的井引起的降深。泰斯1935年文章中关于恢复曲线的讨论，实际上就是叠加原理在单井问题上应用的例子。

叠加原理可以成功地应用于多井问题。当多井同时抽水，对某一观测井中水位的影响，等于单个井影响的代数和。一般情况下，流传很广的所谓阿尔托夫斯基的“干扰抽水试验”，完全可以用叠加原理简单地解决。库珀和雅各布合写的文章就是叠加原理在多井问题中应用的例子。

严格地讲，对潜水含水层来说，偏微分方程不再是线性的了，因而叠加原理是不适用的。但如果降深和含水层厚度相比很小的时候，仍近似线性，所以一般仍可应用叠加原理。

（七）含水层边界的处理方法——映射法

泰斯所假设的理想含水层，面积是无限广阔的，而现实的含水层却总是有边界的。如果边界离抽水井很远，可以近似地将含水层看成无限的，而不会引起显著误差，尤其在抽水时间不长的情况下更是这样。这时对边界可以不加考虑。然而对于预测地下水长期动态，或对于较近的边界来说，就不能不考虑边界的影响。

处理边界的方法也是从热传导和电学中借用的。最简单而实用的是映射法。这个方法的实质在于：当一个井从含水层中抽水时，直线定水头边界的作用相当于一个灌水井，而直线隔水边界的作用相当于另一个抽水井。这样，我们应用叠加原理，就可以求出在不同边界附近的抽水井在不同时间地点造成的降深。

映射法的应用又进一步扩大了泰斯公式的适用范围，对解决现实含水层中的大量实际问题具有很重要的意义（如解决沿河岸布井问题）。当含水层具有一个以上的边界时，还可以用多次映射来解决。我们只要弄清楚了方法的实质，就可以根据具体情况灵活运用。

（八）一个难以克服的困难——含水层的非均质性

泰斯所假设的理想含水层是均质、等厚、各向同性的，而现实的含水层却总是非均质、厚度不等和各向异性的。如果说上面提到的七个问题还多少有一些处理的办法，那么含水层的非均质性则是用泰斯一类的公式所难以解决的。再加上边界形状的不规则，就使

整个问题更加复杂化了。

正因为存在这种难以克服的困难，所以对于在空间分布上不均匀的含水层，地下水动态的预测就要求助于各种近似解法。电比拟和数字模拟得到了广泛的应用。电子计算机的推广，大大促进了数字模拟方法的发展。

六、稳定流理论的应用范围

总的来说，非稳定流理论比稳定流理论更丰富、更完善。但在一定领域内稳定流理论还是有用的。由于稳定流公式比较简单，凡是能用稳定流公式解决问题的地方，当然还是用稳定流公式更方便一些。

稳定流公式首先适用于具有两个定水头边界的条件，如岛状含水层、河边抽水的井、有定水头含水层补给的漏含水层等等。在这些条件下，经过较长时间的抽水，稳定流公式的适用性是显而易见的。

对于在分布广阔的、没有定水头边界的含水层中抽水的井，稳定流公式一般是不适用的。但如果抽水时间比较长，在抽水井附近地区，两类公式所描绘的降落漏斗形状几乎完全一致。只是从非稳定流理论中我们知道，这个形状基本保持不变的降落漏斗，随着抽水时间的延长，还会继续缓慢地发展。而从稳定流公式中则得不出这个结论。由于两类公式描绘的降落漏斗形状相同，所以用它们计算出来的导水系数也是相同的。然而用稳定流公式不能求得含水层的贮水系数，因为它没有反映漏斗形成的过程。

这样，稳定流公式的应用范围也就明确了。即只能用来根据长时间抽水结果，利用抽水井附近的观测井数据求含水层的导水系数。此外，在开采量远远小于补给量的地区，如果已经知道了含水层导水系数，可用来大致预测不同抽水流量下抽水井内及其附近的降深。但对于预测大规模开发地下水引起的动态变化，则是完全无能为力的。

七、小 结

通过这本译文集，可以大概地看到地下水非稳定流理论是怎样从实践中发生和发展起来，又是怎样经过实践逐步丰富和完善起来的。

地下水非稳定流理论的应用，如果从1935年算起，到现在已经整整40年了。从发展过程看，40年代主要是在泰斯公式的理论基础和应用方面，丰富了许多内容，使非稳定流理论得以迅速传播开来。50年代在漏含水层理论方面有新的发展。60年代在有延迟给水的潜水含水层方面有所突破。60年代末以来，注意力转向了电比拟和数字模拟方面。40年来地下水非稳定流理论虽然有了很大发展，但直到目前仍然是很不完善的。

我们伟大的社会主义祖国，正在朝气蓬勃地向前发展。群众性开发、利用、改造地下水资源的生产和科学实验，正以前所未有的宏大规模进行着。优越的社会主义制度和广大群众的丰富的实践经验，为地下水水力学的发展提供了极好的条件和强大的推动力。在这方面，我们相信，一定能遵照毛主席的教导：“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”

《地下水非稳定流理论的发展和应用》(1975)一书的序

水穿越砂流动定律的确定

H·达西

我现在着手叙述我和工程师 Ch·里特 (Charles Ritter) 先生共同在第戎 (Dijon) 为确定水穿越砂流动的定律而作的试验。这些试验已由总工程师博姆加登 (Baumgarten) 先生重复做过。

图 1 所示所采用的仪器，是由一个高为 2.5m 的直立圆柱构成的，而该圆柱为 0.35m 内径的一段管子，两头都用平板封固。

在管内，底部以上 0.20m 处有一用水平筛网成的隔板，用来托住砂子，并把立柱分为两室。隔板由底向上是由 0.007m 粗的菱形小棒制成的铁栅网，由 0.005m 圆柱形小棒制成的栅网和网眼为 0.002m 的金属网重叠在一起构成的。每一层栅网铁棒之间的距离等于其厚度，而两层栅网安放得使铁棒的方向互相垂直。

立柱的上室由连到医院水管上的管子供水，管子上有一阀门以便随意改变流量；下室则由另一阀门通向边长为 1m 的计量池。

立柱两端的压强由 U 形水银测压计指示；每一室的末端都配备有通向空气的阀门。它对于仪器的操作是很重要的。

试验是用圣纳 (Saône) 河的石英砂做的，由以下组成：

58% 的砂过	0.77 mm 筛
13%	1.10
12%	2.00

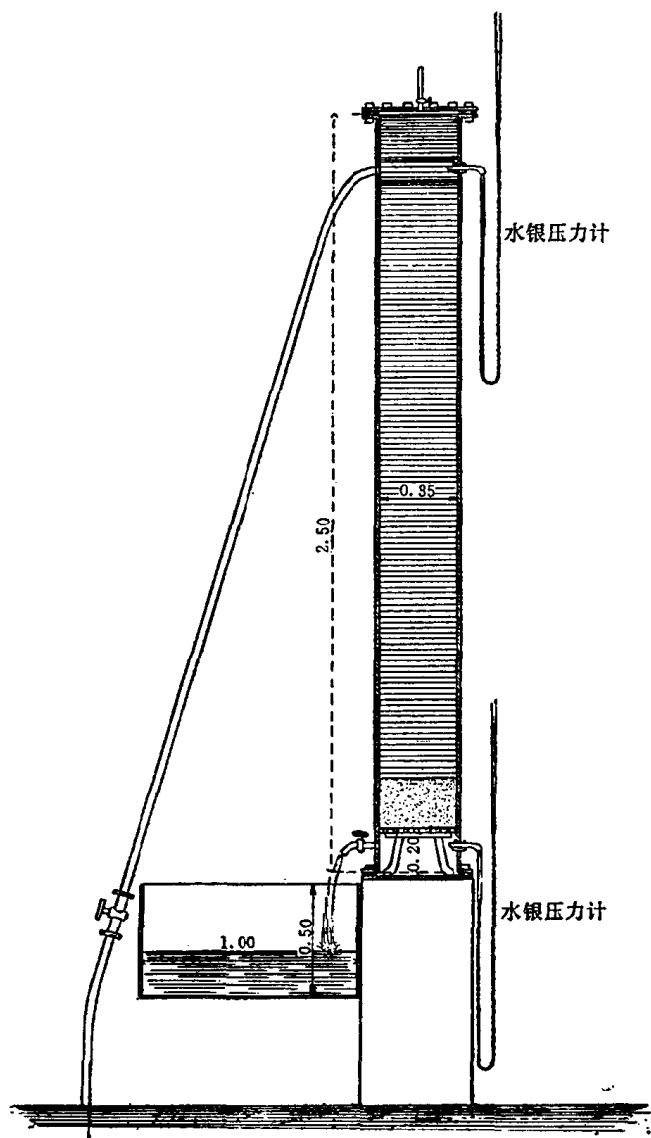


图 1

17% 为细砾、贝壳碎片等^①。

其孔隙率约为 38%。

砂子倒入并装填在事先充满水的立柱中，以免过滤体的孔隙中含有空气，砂的高度只在每组试验末尾，当砂子因水通过而相当压密以后才测量。

每次试验要在主柱的上室，用调节进水阀的办法建立一定的压强；然后，当通过两次观测确信水流已显然变得很均匀时，记录下在一定时间渗透的流量并计算每分钟的平均流量。

对于较小的水头差，测压计的水银几乎完全静止，使得读数可达毫米，相当于 26.2 mm 水柱；而当压强很大时，进水阀门几乎完全打开，尽管装有孔板的测压计仍不断波动；然而，仅偶尔有较强的波动；可读到平均水银柱高度 5 mm，也就是说可读出约 1.3 m 水柱压强。

所有这些测压计的波动都是由于安装仪器所在的医院的大量水龙头频繁地开关产生的

1855 年 10 月 29、30 日及 11 月 2 日在第戎所做试验的结果

试验序号	延续时间 (min)	平均流量 (L/min)	平均压强	体积与压强之比	备 注
第一组，砂层厚度 0.58 m					
1	25	3.60	1.11	3.23	砂子未洗过
2	20	7.65	2.36	3.24	
3	15	12.00	4.00	3.00	
4	18	14.28	4.90	2.91	测压计仅有轻微波动
5	17	15.20	5.02	3.03	
6	17	21.80	7.63	2.86	
7	11	23.41	8.13	2.88	波动极明显
8	15	24.50	8.58	2.85	
9	13	27.80	9.86	2.82	测压计强烈波动
10	10	29.40	10.89	2.70	
第二组，砂层厚度 1.14 m					
1	30	2.66	2.60	1.01	砂子未洗过
2	21	4.28	4.70	0.91	
3	26	6.26	7.71	0.81	
4	18	8.60	10.34	0.83	极强波动
5	10	8.90	10.75	0.83	
6	24	10.40	12.34	0.84	
第三组，砂层厚度 1.71 m					
1	31	2.13	2.57	0.83	砂子洗过
2	20	3.90	5.09	0.77	
3	17	7.25	9.46	0.76	
4	20	8.55	12.35	0.69	极强波动
第四组，砂层厚度 1.70 m					
1	20	5.25	6.98	0.75	砂子洗过，粒度比前几组略大， 由于测压计口部分阻塞，波动较弱
2	20	7.00	9.95	0.70	
3	20	10.30	13.93	0.74	

① 以上 4 行的 58%、13%、12%、17% 在原文中为 0.58 m、0.13 m、0.12 m 及 0.17 m，译者注。