

地下水非稳定流理论的发展和应用

张宏仁等编译

地质出版社

地质出版社
GEOLOGICAL PUBLISHERS

地下水非稳定流理论的发展和应用

——纪念裘宗瀚先生



— — — — —

地下水非稳定流 理论的发展和应用

张宏仁等 编译

地质出版社

地下水非稳定流理论的发展和应用

张宏仁等 编译

•

地质总局书刊编辑室编辑

地质出版社出版

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

•

1975年11月北京第一版·1975年11月北京第一次印刷

印数1—3,150册·定价1.85元

统一书号:15038·新114

目 录

地下水非稳定流理论的发展和应用·····	张宏仁 (1)
地下水水力学·····	S. W. 洛曼 (10)
内布拉斯加州的抽水试验·····	L. K. 温策尔 (117)
承压含水层的可压缩性和弹性·····	O. E. 迈因策尔 (137)
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 (148)
论弹性承压含水层中的水流·····	C. E. 雅各布 (154)
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 (167)
根据抽水试验资料确定导水系数和贮水系数·····	周文德 (176)
确定承压水井有效半径的降深试验·····	C. E. 雅各布 (184)
漏承压含水层中的径向流·····	C. E. 雅各布 (197)
分布无限的漏含水层中的非稳定径向流·····	M. S. 汉士什 C. E. 雅各布 (204)
漏含水层中抽水试验数据的分析·····	M. S. 汉士什 (210)
漏含水层理论的改进·····	M. S. 汉士什 (226)
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 (241)
潜水条件下含水层试验的标准曲线解·····	T. A. 普里克特 (251)
井对附近河流的水流的影响·····	C. V. 泰斯 (263)
无边界含水层中孔群的计算·····	Φ. M. 鲍切维尔 (267)
流向定降深井的地下水流的计算方法·····	Φ. M. 鲍切维尔 H. H. 维里金 (277)
后记·····	(283)

地下水非稳定流理论 的发展和应用

张 宏 仁

随着我国社会主义建设事业的蓬勃发展，对地下水资源的需要量日益增长。大规模的群众性开发利用地下水的实践，积累了丰富的经验。毛主席教导我们：“我们的实践证明：感觉到了的东西，我们不能立刻理解它，只有理解了的东西才更深刻地感觉它。感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。这些问题的解决，一点也不能离开实践。”把我们在实践中的经验加以总结，使之上升为理论，并能动地指导新的实践，对于发展地下水资源的开发利用工作有重大意义。

毛主席指出：“自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。”我们在研究地下水水力学理论问题时，必须遵循毛主席所指示的革命路线。

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。本世纪三十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，会有助于我们独立自主地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，难免互不衔接或互有重复，为了便于同志们阅读，收进了一本篇幅较紧凑的教科书，即洛曼1972年所著的《地下水水力学》。

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十九世纪中叶才开始的，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，本译文集的第一篇，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^{*}，但结果却发现蒂姆公式有很大局限性。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。这个公式实质上和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。

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。所以我们把迈因策尔的论文选作第二篇。

温策尔、迈因策尔等人的文章表明，早在三十年代初期，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年美国入泰斯^{**}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

本书收集的第三篇文章，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

* 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。

** 过去有人译作蒂斯，也是由于从俄文译本转译过来造成的。

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），那末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。方法的实质及操作过程，在洛曼的教材中讲得比较清楚。

（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，那末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* 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**发生越流的注意。1930年德格里首先建立了理想的漏含水层中稳定流的公式。1939年斯特格文茨和范内斯又作了进一步讨论。雅各布于1946年首先建立了漏含水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水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，漏含水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。

直到六十年代初，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。直到七十年代，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。

* 漏含水层即有越流的含水层，英文为 leaky aquifer。

** 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。

（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。泰斯1941年的文章就是应用映射法的实例。洛曼的教材简略地介绍了方法的实质。

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。鲍切维尔对于不同的边界组合情况“发明”了一大堆“新”公式，其实并没有什么“新颖”之处。由于过去在实际工作中曾经使用过鲍切维尔的一些公式，所以仍把最常用的几种列在这本译文集中以便参考。在求解非稳定流问题时，一般都采用定流量变水位的方法，对定水位的讨论较少，所以又把鲍切维尔1961年关于这个问题的介绍附在最后，以资加深印象。

（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，那末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。这些就不是本译文集所准备包括的内容了。

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，到现在已经整整四十年了。从发展过程看，四十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。五十年代在漏含水层理论方面有新的发展。六十年代在有延迟给水的潜水含水层方面有所突破。六十年代末以来，注意力转向了电比拟和数字模拟方面。四十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。这本译文集所收的主要是资本主义国家的一些著作，唯心主义形而上学的糟粕是不不少的。在吸取对我们有用的东西的过程中，要用马克思主义毛泽东思想为武器，批判地接受。

我们伟大的社会主义祖国，在毛主席无产阶级革命路线指引下，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实践和科学实验，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。”

地下水水力学

S.W. 洛 曼

目 录

一、符号与因次	12
二、引言	16
三、无压含水层中地下水的分类	17
(一) 饱和带	17
1. 潜水面	17
2. 毛细带	18
(二) 非饱和带	18
四、毛细现象	18
五、含水物质的水理性质	20
(一) 孔隙度	20
1. 原生孔隙度	20
2. 次生孔隙度	20
(二) 控制碎屑物质孔隙度的因素	21
1. 颗粒(假定为球体且等粒)的排列	21
2. 颗粒的形状	21
3. 分选程度	21
(三) 孔隙比	21
(四) 渗透率	21
(五) 内在渗透率	22
(六) 水力传导率	23
(七) 导水率	24
六、无压含水层的给水与持水能力	24
(一) 给水度	24
(二) 持水度	24
(三) 水分当量	25
七、承压井——承压含水层	25
八、自溢井——无压含水层	26
九、承压含水层	26
(一) 水压面	26
(二) 贮水性质	27
1. 贮水系数	27
贮水系数的组成	28
2. 地面沉降	28

(1) 弹性承压含水层	28
(2) 非弹性承压含水层与含油层	29
十、地下水的运动——稳定流	29
(一) 达西定律	30
(二) 流速	30
十一、用水井法进行含水层试验——汇点或源点	31
(一) 无垂直运动的稳定径向流	31
例题	33
(二) 径向流的偏微分方程	34
(三) 无垂直运动的非稳定径向流	36
1. 涌水量保持不变	36
例题	42
直线解法	43
(i) 导水率	43
(ii) 贮水系数	44
例题	45
(iii) 注意事项	45
2. 降深保持不变	47
直线解法	48
例题	48
3. 瞬时抽水或瞬时注水	52
(1) “冲击”法	52
例题	53
(2) 提筒法	54
(四) 有垂直运动的漏承压含水层	55
1. 涌水量保持不变	55
(1) 稳定流	55
(2) 非稳定流	56
(i) 汉土什-雅各布法	56
例题	57
(ii) 汉土什修正法	58
例题	59
2. 降深保持不变	60
(五) 有垂直运动的无压含水层	61
各向异性含水层的例题	65
贮水量延迟给水的例题	67
十二、用渠道法进行含水层试验——汇线或源线(没有补给的非稳定流)	68
(一) 流量保持不变	68
(二) 降深保持不变	70
十三、用面积法进行含水层试验	72
(一) 数值分析法	72
例题	73
(二) 流网分析法	75

例题	77
(三) 闭合等值线法	77
(四) 以两条河流为边界的楔形无压含水层	77
十四、估算导水率的方法	80
(一) 井的单位涌水量	80
(二) 井和勘探孔的编录资料	81
十五、估算贮水系数的方法	82
十六、估算给水度的方法	83
十七、抽水井的干扰降深	83
十八、贮水系数与降落漏斗扩展的关系	85
十九、含水层的边界与映射理论	86
(一) “不透水”边界	88
(二) 水头保持不变的源线——常年河流	88
(三) 映射理论的应用	90
二十、“可靠出水量”	91
二十一、水井取水的来源	93
含水层及其开发的例题	94
1. 潮湿地区大的常年河流的河谷	94
2. 半干旱地区间歇性河流的河谷	95
3. 封闭的沙漠盆地	96
4. 得克萨斯州和新墨西哥州的南部高平原区	97
5. 科罗拉多州的大江克欣自流盆地	97
图版 1 至 9	99

一、符号与因次

〔括号中的数字系指符号首次出现或得到附加说明的方程式、页数或插图编号。书中也给出了符号的定义。为了保持原作的表示方法，符号有一些重复〕

符 号	因 次	说 明
A	L^2	面积(8); 影响面积(145)
B		$1/\sqrt{T/(K'/b')}$ (95)
B	L^{-1}	$\sqrt{T/\alpha S_i}$ (107)
B	L^2T^{-1}	常数 (140)
BE		承压井的气压率 (22)
C		常数 (7)
C, C'	L^2	比例常数 (144)
D	LT^{-1}	单位面积的排泄量 (151)
$D(u)_q$		流量保持不变时 u 的排水沟函数 (112)
$D(u)_h$		降深保持不变时 u 的排水沟函数 (118)
E_s	$ML^{-1}T^{-2}$	含水层固体格架的弹性体积模量 (20)
E_w	$ML^{-1}T^{-2}$	水的弹性体积模量 (20)