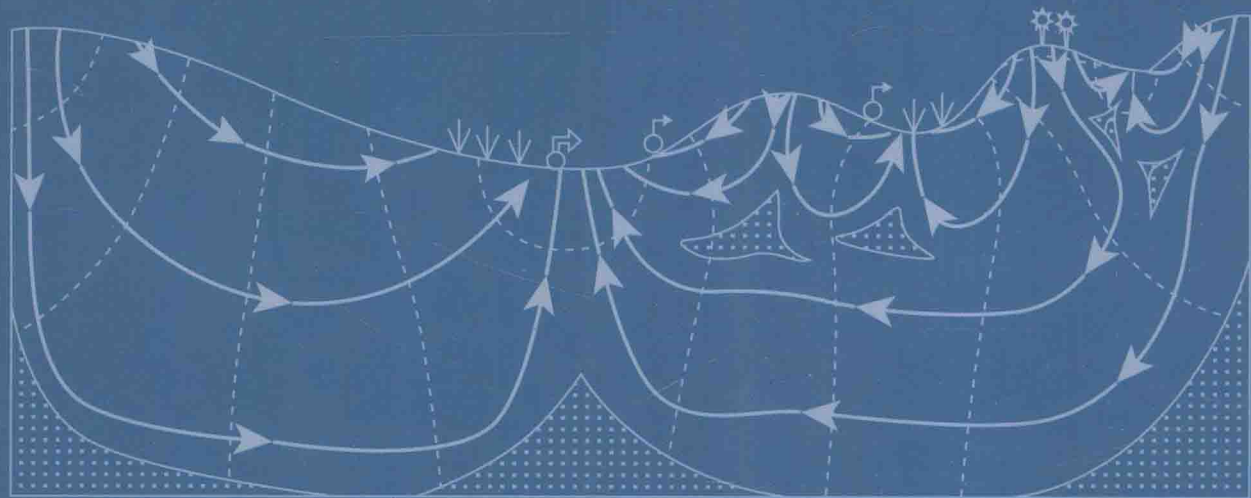


重力驱动地下水流系统 理论及其应用

【加】 József Tóth 著

张人权 梁 杏 靳孟贵 等译



地质出版社

重力驱动地下水流系统 理论及其应用

Gravitational Systems of Groundwater Flow
Theory, Evaluation, Utilization

【加】József Tóth 著

张人权 梁 杏 靳孟贵 等译

地 质 出 版 社

• 北 京 •

内 容 提 要

本书是加拿大水文地质学家约瑟夫·托特 (József Tóth) 用英文撰写的关于地下水流系统理论及应用的中文译本。本书全面总结了半个世纪以来托特本人以及国际水文地质学界对地下水流系统理论及其应用的研究成果,是当代水文地质学领域的经典著作。

本书可作为水文与水资源工程、地下水科学与工程、工程地质、环境地质、生态地质、矿产地质、石油地质、构造地质、大地构造等专业的本科生及研究生的教学参考书,也可供相关专业科研及生产人员参考使用。

József Tóth

Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization

© J. Tóth 2009

This publication is in copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

中文本依据剑桥大学出版社 2009 年版翻译

图书在版编目 (CIP) 数据

重力驱动地下水流系统理论及其应用 / (加) 托特著;
张人权等译. —北京:地质出版社, 2015.9

书名原文: Gravitational Systems of Groundwater
Flow: Theory, Evaluation, Utilization

ISBN 978-7-116-09392-8

I. ①重… II. ①托… ②张… III. ①地下水动力学
IV. ①P641.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 201231 号

Zhongli Qudong Dixiashuilu Xitong Lilun ji Qi Yingyong

责任编辑: 李惠娣

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 66554528 (邮购部); (010) 66554579 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554582

印 刷: 北京京科印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张: 14.25

字 数: 350 千字

印 数: 1—2000 册

版 次: 2015 年 9 月北京第 1 版

印 次: 2015 年 9 月北京第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-09392-8

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

Preface

It was with feelings of great honour and pleasure that I have accepted the kind invitation to write a Preface to the Chinese language edition of my book "Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization". For me, the book's translation is a clear, strong and welcome endorsement of the basic premise and consequences of the theory by one of the world's most powerful hydrogeologic communities. The premise, briefly put, is that gravity-driven groundwater flow is the only universal transport mechanism in the subsurface and, consequently, that the concept of regional groundwater flow systems is the core concept of modern hydrogeology.

The mathematical formulation of the concept was first proposed in the early 1960s. Basinal flow fields had been conceptualized before. However, lacking mathematical formality those models could not be developed into general theories. The initial analytical models of homogeneous rock framework, first with linearly sloping and later with spatially undulating water tables, were soon followed by numerical models of flow domains of increasing complexity such as arbitrary boundaries, heterogeneous-anisotropic rock and time dependent flow fields. By 1980, observations of basin-scale vertical flow across low permeability strata by hydrogeologists and the recognition of leakage through well-field scale aquitards by aquifer engineers converged to merge into the concept of *regional hydraulic continuity* of the rock framework.

Basin-scale groundwater flow was recognized already in the second half of the 1960s as a generator of various natural processes and phenomena, for instance, in soil salinization, botany, wetlands, soil-and rock mechanics, geothermics, icing and permafrost phenomena, karstification, mineral and petroleum accumulation, and so on. As a result, "*The Theory of Regional Groundwater Flow*" bifurcated naturally into two component or sub-theories: i) "*Groundwater Hydraulics of Drainage Basins*" and ii) "*Groundwater as a Geologic Agent*". The sections of the book are organized to reflect this duality of the parent theory. After the introductory Chapter 1, Chapters 2 and 3 deal with the subsurface hydraulics of drainage basins, thus representing the first sub-theory. This part is followed by Chapter 4, discussing the causes and manifestations of the geologic agency of groundwater, which are the subjects of the second sub-theory. Chapter 5 presents theoretical and practical examples of the theory's possible applications. The Epilogue, Chapter 6, fits the theory into the history of hydrogeology and presents it as the beginning of Modern Hydrogeology.

At this auspicious occasion, I would like to express my appreciation, gratitude and deeply felt friendship to my many young and not so young Chinese hydrogeologist colleagues for their kindness, courtesy and hospitality accorded to me during my four visits in China, between 1984 and 2011. Happily, they are too many to name them all individually. However, I owe special thanks to my good friend and soul-mate, Professor Zhang Renquan of China University of Geosciences (CUG), Wuhan, who initiated the idea of the book's translation and did also the arduous work of final coherent editing of the translated manuscript. Professors Liang Xing and Jin Menggui, also of CUG-Wuhan, have organized many graduate students, who did the primary translation of the book, and then proofread their works. I would also like to express my sincere gratitude to Professor Wang Yanxin, current President of CUG-Wuhan, at whose invitation I had the opportunity to visit his university. Professor Wan Li, Vice-President, has graciously invited me and hosted me jointly with Associate Professor Jiang Xiaowei at the CUG-Beijing. My decades long co-operation with the Chinese hydrogeological community has been one of the highlights of my professional carrier.

József Tóth

December 2014, Edmonton, Alberta, Canada

序 言

十分荣幸和高兴为我的著作《重力驱动地下水流系统理论及其应用》的中文版写此序言。对我来说,此书中文版的出版,意味着世界上最强大的水文地质学社群之一,对区域地下水流系统理论的基本前提及其推论,做出了明确、有力和热诚的支持。

简而言之,我其基本前提就是:重力驱动地下水流是普适性的地下传输机制;因此,区域地下水流系统理论乃是当代水文地质学的核心概念。

20世纪60年代初期,首次提出了区域地下水流系统理论概念的数学公式。在此之前,盆地水流模式的概念已经萌芽,但是,由于缺乏数学表达手段,模式未能发展成为普遍性理论。最初的均质解析模型采用线性坡度的地下水面,后来应用波状起伏的地下水面;随即很快出现越来越复杂的数值模型,如可以刻画任意边界、均质各向异性和时变流场的数值模型。1980年,水文地质学家观察到盆地尺度穿越低渗透岩层的垂向水流,含水层工程师识别出井流流场尺度通过弱透水层的越流;从而共同得出岩石框架区域水力连续性的概念。

20世纪60年代后期,盆地尺度地下水流已被认为是各种自然过程和现象的驱动者;此类自然过程和现象,诸如土壤盐渍化、植物、湿地、土壤-岩石力学、地热、结冰和多年冻土现象、喀斯特作用、矿产和石油的积聚等。因此,区域地下水流系统理论自然地分成两个部分:①流域盆地地下水力学;②地下水的地质营力作用。本书的章节安排体现了理论的两个部分。在第1章导论之后,第2章及第3章讨论了流域盆地地下水力学,为理论的第一部分。第4章讨论了地下水作为地质营力的原因和表象,为理论的第二部分。第5章表述了区域地下水流系统理论可能应用的各种理论和实际的例子。第6章结语部分,把区域地下水流系统理论综合到水文地质学发展史中,将其视为当代水文地质学的开端。

在此美好时刻,我想对我的年轻的以及已经不再年轻的中国水文地质同行表达我诚挚的感谢和深情厚谊,他们友善、多礼和好客。在我1984~2011年四次访问中国期间,有幸结识许多朋友,在此无法逐一列举。我要特别感谢我的好友和心灵知己——中国地质大学(武汉)的张人权教授,是他首先提议将此书翻译成中文,并为全书统稿润色。中国地质大学(武汉)梁杏教授和靳孟贵教授组织许多研究生完成本书的初步翻译,并对翻译内容加以校核。感谢校长王焰新教授邀请我访问中国地质大学(武汉)。感谢中国地质大学(北京)副校长万力教授邀请我访问,并与蒋小伟副教授共同亲切接待我。

我与中国水文地质学界数十年的长期合作,是我职业生涯中一个闪耀的亮点。

约瑟夫·托特

2014年12月于加拿大艾伯塔省埃德蒙顿

译者前言

地下水流系统理论的创建，是水文地质学具有里程碑意义的突破。

1963年，约瑟夫·托特（József Tóth）创建了多级次地下水流系统理论。经过半个世纪的发展完善，地下水流系统理论已经成为当代水文地质学的核心概念框架，并成功应用于解决地球科学多个分支的理论与实际问题。托特理论，将地下水科学从单纯应用型学科分支，提升为地球系统科学富有活力的基础性学科分支。

本书是托特撰写的地下水流系统理论及其应用的专著。一方面，详尽阐述了地下水流系统理论的起源及演变。另一方面，图文并茂地说明了应用地下水流系统理论解决各种科学问题以及实际问题的例证。这本当代水文地质学的经典之作，每一位从事与地下水有关的科学工作者及生产工作者，都值得一读。

托特理论内容深邃，涉及学科众多，需要反复琢磨，方能领会。仔细研读书中大量插图，可收事半功倍之效。参看本书书末的“术语”，有助于读者理解作者原意。

本书由靳孟贵和梁杏组织翻译，参加翻译的教师及研究生有（按拼音首字母排序）：陈焦、董晓亮、霍思远、靳孟贵、李静、李曼、栗现文、廉晶晶、梁杏、林丹、刘亚磊、刘彦、马斌、牛宏、宋启龙、王聪、王家乐、王在敏、文章、徐敏、杨露梅、张人权、朱常坤，由靳孟贵、梁杏对重点部分进行校对，最后由张人权统稿。

根据中国读者的需要，中文版将术语和索引合并调整为“术语和索引”。本书后的附录（Appendix A 和 Appendix B）是数学推导过程，直接保留附录原文于书后，未予翻译，有兴趣的读者看原文也容易明白。

本译著是中国地质调查局专项研究“地下水流系统理论与应用指南”、国家 973 课题（2010CB428802）以及国家自然科学基金（41272258，U1403282）的成果之一，本书得到这些项目经费的共同资助。原书作者托特给予了热情帮助，解答了翻译中的一些疑难，还为中文版专门写了序言。张倬元（成都理工大学）、蒋小伟（中国地质大学·北京）、王焰新（中国地质大学·武汉）等为我们的翻译工作提供了帮助，在此谨表示我们诚挚的谢意。

原书理论新颖，涉及众多学科，给翻译带来了不少困难。尽管我们反复核查，中文版依然难免错误与疏漏。对中文版的批评、建议和意见，请发至电子邮箱：xliang@cug.edu.cn，以利今后改进。

译者

2014年8月于中国地质大学（武汉）

作者简介

约瑟夫·托特 (József Tóth) 于 20 世纪 50 年代早期在匈牙利学习地球物理, 1956 年匈牙利革命后, 转到荷兰乌得勒支大学 (University of Utrecht) 就读, 随后, 移居加拿大。1960 年进入 (加拿大) 艾伯塔研究理事会 (Alberta Research Council) 工作。1965 年在乌得勒支大学通过博士论文答辩之前, 他在 1962 年及 1963 年发表的两篇突破性论文中, 摒弃了地下水顺层流动的传统模式, 提出了流域盆地穿层流动新范式以及地下水是重要地质营力的基础性概念。1966 年, 他成为加拿大艾伯塔大学的非全职教师。1980 年成为全职教授。现今, 他是艾伯塔大学的退休教授及匈牙利布达佩斯罗兰大学 (Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary) 的荣誉教授。



托特教授因其从事的水文地质研究而获得多个奖项: 1965 年, 获美国地质学会第一届 O. E. Meinzer 奖; 1966 年, 获国际水文地质学家协会主席奖; 2002 年, 获加拿大岩土工程学会水文地质分会 R. N. Farvolden 奖; 2003 年, 获美国国家地下水协会 M. King Hubbert 科学奖; 2004 年, 获美国水文协会 C. V. Theis 奖^①。

① 托特具有加拿大及匈牙利双重国籍; 2013 年, 在其八十寿辰时, 获得匈牙利国家十字勋章——译者注。

英文版内容简介

源自大气的地下水，在地壳表层数千米深度内，形成空间有序的水流系统。20 世纪 60 年代以来，随着水流系统概念的诞生，水文地质学的基本范式，从地下水在含水层内顺层流动，转化为流域盆地内的穿层流动。由此还认识到，地下水是一种重要的地质营力，产生与改变着各种具有科学意义、实际意义及经济意义的自然作用与自然现象。

这是第一本深入、广泛讨论重力驱动地下水流的专著。本书对于重力驱动地下水流的形成历史、原理、研究方法、实际应用及其自然作用效应，结合实例加以论述。本书完整的数学论证，着重阐述其方程的物理含义，而不涉及高深的数学基础，以便读者理解。作者着力于揭示看似互不关联的一系列过程与系统之间存在着内在联系，而重力驱动地下水流便是这种内在联系的根源。实例分析涉及不同应用领域，包括水文地质，土地利用规划，环境保护，湿地生态，农业，林业，岩土工程，核废料处置，矿物原料及石油勘查，以及地热流等。

这本当代水文地质学的奠基人之一写成的书，包含大量术语，对许多学科的学生及研究者均有助益，是水文地质学及油藏工程的研究者、咨询者以及研究生的关键性参考文献。

前 言

在这本专著中,从我个人的角度论述了重力驱动地下水流系统理论的形成、演变及其成果。重力驱动地下水流系统概念的出现,将单纯的供水课题,拓展成为面向地球科学多个学科分支的当代水文地质学,将传统的局限于含水层中的地下水流,转变为流域盆地中水力连续的穿层地下水流范式(paradigm)。

不久前,在美国地质学会 2007 年年会上,这一观点获得将近 25 篇论文的支持(Annual Meeting of the Geological Society of America, Denver, October 28—31, 2007, in the two sessions of Topic 34, ‘Regional Groundwater Flow:...’)。在首次发表地下水流系统概念(Tóth, 1962a, 1962b) 45 年以后,这些论文对区域地下水流(Regional Groundwater Flow)依然兴趣盎然,涉及领域更为广泛,实际应用更为多样,下列论文都体现了这种趋势: Glaser & Siegel (2007), Gleeson & Manning (2007), Madl—Szónyi (2007), Otto (2007), Rudolf & Ferguson (2007), Winter (2007)。

我的认识来自 47 年以来自己的水文地质研究、实际经验以及文献研读(Tóth, 2002, 2005, 2007)。本书是我以往论文、讲演以及课程讲稿的提炼总结。撰写时力求达到整体统一,融会贯通。实例来自我的野外研究和理论研究以及公开发表的文献。盆地尺度重力驱动天然地下水流系统是本书的主题。显然,“盆地尺度”是个相对概念,在 3.1.3 节中对此另有说明。本书分为三部分:①重力驱动地下水流系统理论形成、演变以及控制因素的数学表达;②查明及描述重力驱动地下水流系统的方法;③地下水流系统引发的各种自然后果与表象,包括水文、水文地球化学、地热、岩土力学、矿物、土壤、植物、生态等各个方面。

Domenico (1972) 及 Freeze & Cherry (1979) 的著作出版以来,许多水文地质学的专著及教科书,讨论了区域尺度重力水流系统的某些方面。本书试图对重力驱动地下水流系统进行全面综合论述。

本书不是水文地质学的入门读物,因此,只对与主题有关的基本概念加以说明。然而,我发现,学生难以掌握某些概念及参数,尤其是教科书里很少讨论的新概念及参数。为了透彻理解讨论的内容,有必要加以解释。解释着重于物理内涵,而不拘泥于数学方面。鉴于水文地质学的广泛传播,不同领域的专业人士很可能已经掌握有关基本知识,因此,本书的主要读者群体是,有关领域的大学毕业生、研究人员及咨询人员。本书的某些部分,也适合于水文地质学专业在读大学生、土地利用规划人员,以及水资源及自然资源管理者。

这本著作并不是一个人的劳动成果。在此,谨对众多对本书的出版做出贡献的朋友、同事及合作者致谢。通过广泛合作、个别讨论、提供个人及公众数据库以及其他方式,他们拓宽了我的知识;他们质疑、验证、补充并完善我的思路;他们提醒我避免进入死胡

同。对本书做出贡献的人太多，在此难以一一列举。我必须感谢艾伯塔大学（University of Alberta, Edmonton, Canada）的毕业生们，他们是一个勇于挑战、极有助益的群体。我相信，我的朋友，你们一定可以从本书各个章节中看到你们所做出的贡献。我还必须感谢以下人士：O. Batelaan 及 Zijl 博士，为了保证引自他们论文内容的准确，作了悉心校核和修改；E. Eberhardt 及 G. D. Lazear 博士，为本书提供他们论文的原始图件；和我并无私交的 D. Hansen 博士，自愿将我 40 多年前手稿中的数学推导打印成附录 A 及附录 B。最后，我要感谢匈牙利布达佩斯罗兰大学自然及应用地质系（Department of Physical & Applied Geology, Eötvös Loránd University, Hungary）为我提供了舒适温馨的著述环境。

有幸参与科学发展历史中此项微薄但有益的工作，让我享受到毕生的欢愉。

约瑟夫·托特

2008 年于布达佩斯

目 录

Preface

序 言

译者前言

作者简介

英文版内容简介

前 言

1 导论	1
1.1 主题: 定义, 历史, 研究方法	1
1.2 地下水流系统的描述	6
1.2.1 达西实验与达西定律	6
1.2.2 流体动力参量	7
1.2.3 拉普拉斯方程及扩散方程	16
2 “单元”盆地	18
2.1 基本水流模式	18
2.2 流体动力参量的基本模式	20
2.2.1 孔隙压力 p	20
2.2.2 垂向压力梯度 $dp/dd = -dp/dz = \gamma$: 压力-深度曲线或 $p(d)$ 曲线	20
2.2.3 动水压力增量 Δp	22
3 非均质复杂盆地水流模式	23
3.1 盆地几何形态的影响	23
3.1.1 地下水面形状的影响	23
3.1.2 盆地深度的影响	26
3.1.3 Zijl 对地下水位起伏尺度、水流系统穿透深度及时空尺度关系的分析	28
3.1.4 主要区域地形类型的影响	31
3.2 盆地地质结构的影响	34
3.2.1 地层的影响	34
3.2.2 透镜体的影响	40

3.2.3	断层的影响	45
3.2.4	各向异性的影响	47
3.3	地下水面时间变化的影响: 非稳定孔隙压力及水流系统	48
3.3.1	孔隙压力调节的时间滞后与尺度	50
3.3.2	对盆地水流模式的影响	53
3.4	水力连续性: 原理与概念	55
3.4.1	区域水力连续性的概念	56
3.4.2	区域水力连续性引起的结果	59
3.4.3	结论	61
4	地下水重力流动: 普遍的地质营力	63
4.1	引言	63
4.2	基本原因	64
4.2.1	地下水与环境相互作用的原位效应	64
4.2.2	水的流动: 系统性传输与分布的机制	64
4.2.3	普遍性与同步性	66
4.3	基本作用过程	66
4.3.1	化学作用	67
4.3.2	物理作用	68
4.3.3	动力作用或传输作用	69
4.4	伴生现象	70
4.4.1	水文地质环境	70
4.4.2	伴生现象的类型	70
4.5	小结	88
5	实际应用: 实例研究与历史	89
5.1	区域水文地质特征描述	89
5.1.1	加拿大艾伯塔地区水文地质图	90
5.1.2	澳大利亚水文地质图(比例尺 1:5 000 000)	91
5.1.3	美国地质调查局对明尼苏达州西北部的水文地质调查	93
5.1.4	基于地下水流系统分析的荷兰湿地生态系统保护与恢复	95
5.1.5	日本地下水盆地的环境管理	97
5.2	补给—排泄区特征对地下水有关实际问题的影响	97
5.2.1	加拿大艾伯塔的 Olds 城市地下水供水的选址及开发	99
5.2.2	印度泰米尔邦排泄区 Neyveli 开采褐煤对疏干水量及地面沉降的低估	101
5.2.3	加拿大艾伯塔州 Brooks 镇污水排放池因建于局部系统补给区而失败	104
5.2.4	荷兰中部补给区污染物进入深部以及排泄区咸水抬升	108
5.2.5	加拿大艾伯塔州地下水将近湖补给区的磷带入 Narrow 湖	110
5.2.6	加拿大艾伯塔的 Trochu 镇液化土地的产生原因及其修复	110

5.2.7	地下水流与热流异常：瑞士北部低热焓地热潜力评估	113
5.2.8	排泄区边坡敏感性增大直至破坏的理论分析	116
5.2.9	瑞士 Campo Vallemaggia 滑坡危害研究与治理	121
5.2.10	地下水流系统与生态水文地质条件：土地利用变化的影响研究	125
5.3	高放射性核废料处置场地选址：地下水流系统研究实例	129
5.3.1	加拿大：补给区概念（AECL：加拿大核能有限公司）	130
5.3.2	瑞典：瑞典核燃料供应公司核燃料安全部	135
5.3.3	瑞士：国家核废料处置集团	139
5.3.4	美国：得克萨斯州 Palo Duro 盆地	140
5.4	偏离重力驱动地下水流系统理论模式的现象分析及其应用	142
5.4.1	强渗透性透镜体	143
5.4.2	水流的水力屏障	147
5.4.3	水流系统边界两侧水化学突变	148
5.4.4	欠静孔隙压力产生机制	151
5.5	石油及金属矿物的勘查	157
5.6	地球化学找矿中水流系统分析的作用	163
5.6.1	铀矿勘查中的地下水流系统分析	164
5.6.2	地下水流系统与层控矿床	166
6	结语：重力驱动地下水流系统和水文地质科学	170
	参考文献	173
	术语和索引	188
	Appendices	197
	Appendix A	198
	Appendix B	203

1 导 论

1.1 主题：定义，历史，研究方法

重力驱动区域地下水流由地下水位高程差引起，自组织地呈现为嵌套式多级次水流系统模式。Tóth (1963, 4806 页) 将地下水流系统定义为：“一组流线，其在任意点邻接的两条流线，在整个流动范围内始终保持邻接；此组流线，可在任意部位被一个连续面所截切，截切面两边流向保持不变。”受地下水面形状控制的水流系统，其流动模式随岩石渗透性的非均质性而变化。

地形的控制效应普遍存在，陆地部分地下水流深度可达数千米。这一深度内的地下水，完全可以满足人们在大多数情况下的需求。除了满足需求外，重力驱动地下水流还在地面及地下产生一系列有经济意义的自然作用。认识地下水流特性、控制因素、效应、伴生现象，发展研究地下水流的方法与技术，加以改进，不仅有经济价值，也有环境意义。重力驱动地下水流深度不大，其控制因素、自然效应及伴随现象，易于观测与认识。因此，重力驱动地下水流的研究，有助于理解由其他力（盐分浓度差、热对流、沉积压实、构造挤压等）驱动的地下水流。

鉴于天然地下水流的实际意义及科学价值，长期以来，水文学家及水文地质学家，对其驱动力、空间分布模式以及控制因素的探讨，饶有兴趣；随后，地球科学家也加入了研究的行列。Munn 关于油气迁移的理论，是说明上述现象的众多实例之一。Munn (1909) 曾经设想，来自大气的地下水从地面向下流动，穿越砂页岩层，在毛细力作用下，驱动原本散布于岩层中的油气颗粒（图 1.1）。

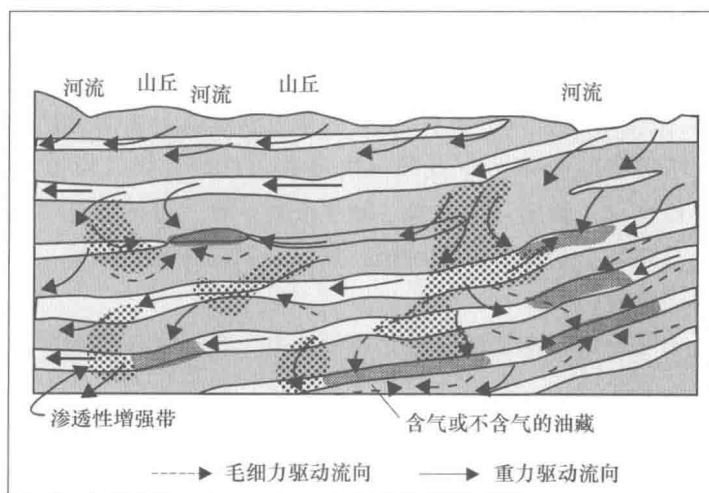


图 1.1 Munn 对地下水流动及烃类聚集的示意图

（据 Munn, 1909, 526 页，图 66，有修改）

岩层渗透性差异使流体界面推进速率不同,“最终,在水流相向流动地带,油气被捕获并保存”(Munn, 1909, 525 页, 图 77~79)。于是,提出了地下水流相向汇聚是油气圈闭形成机制的设想(油气勘探中重力驱动地下水流系统理论的应用, 详见 5.5 节)。然而, Munn 并没有具体说明流体流向的控制因素, 因此, 他提出的概念无法用来确定油气圈闭的位置。

也许, Fourmarier 在他的著作《水文地质学》(Hydrogéologie) 中, 最早公开提出了多级次地下水流系统的概念(Fourmarier, 1939, 87 页, 图 43; 转引自 D'Andrimont, 1906)。图 1.2 表示了一个主要分水岭, 在其左侧为一个次级盆地, 次级盆地两侧汇聚了两个局部水流系统, 局部系统叠置于从盆地主要分水岭指向主要河谷的大尺度水流系统之上。右边, 有两条细小的流线, 指向 Meyboom 编绘的“草原剖面”中盐化的“山坡河谷排泄区”(Meyboom, 1962, 图 2; 本书未引用)。细小的流线说明, 作者对于流线是否存在或者对于这些流线是否有意义, 并不确信。上述两张图, 是对复杂盆地中重力水流模式敏锐的概括。然而, 这些图件仅出于个人的想象, 没有相应的数学描述, 他人难以运用并加以发展。

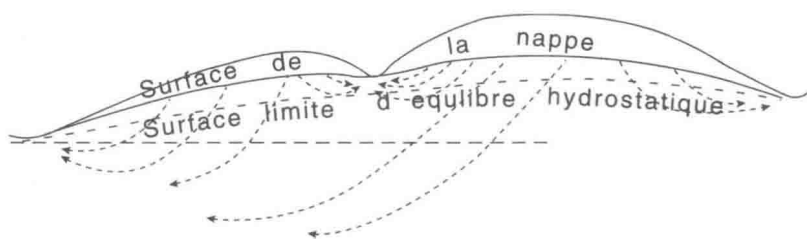


图 1.2 非承压含水层中复杂流动模式

(据 Fourmarier, 1939, 87 页, 图 43; 转引自 D'Andrimont, 1906)^①

地面以下实线为地下水面, 虚线箭头为地下水流向, 水平虚线为谷底高程

Hubbert (1940) 的论文《地下水运动理论》打开了一扇大门, 使区域地下水流模式, 从猜测及定性的概念, 转向严谨的数学分析。在这篇经典之作中, Hubbert 从重力定律^②导出流体势 Φ 的概念。他指出, 地下流体势 Φ 由两项组成: 孔隙水压力 p 及地形标高 z (由于流速缓慢, 惯性动能可以忽略); 单位质量流体运动的驱动力是流体势一阶导数的负值。从而, 给定水流范围边界上 Φ 或其一阶导数, 可以计算或模拟力场。反之, 已知力场及岩层水力学特性 (孔隙度、渗透性、储水系数) 时, 可得出流场。因此, 盆地水流系统模式, 数学上便是一个边界值求解问题。然而, 其后的 20 年里, 这一赠予水文地质学的礼物并没有得到重视。

作为加拿大负责艾伯塔中部工作的水文地质学家, 我在工作过程中发现, 野外观察到的实际情况与 Hubbert (1940) 的图 45 (本书图 1.3) 所表示的, 并不一致。

^① 译者说明: 此图注为法文, 且直接注于图面, 很不规范。与 Toth 沟通后得知, 他希望保持图的原貌, 因此, 图面仍保持原貌。

^② 原文为 “first principle” (第一定律), 与 Toth 商榷后, 他同意改用 “重力定律” ——译者注。

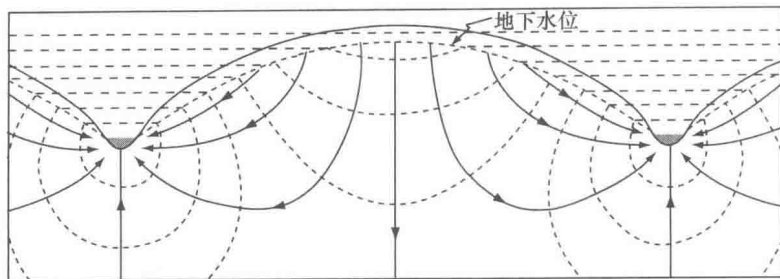


图 1.3 气-水界面势源与河谷势汇之间均质渗透介质的近似流动模型

(据 Hubbert, 1940, 930 页, 图 45)

Hubbert 在图中表示, 全部入渗水经由河谷湿周返回地表, 河流仿佛是排水沟。实际上, 那个地区许多溪流的河床在许多地方是干的, 只有冬季才在河底存在冻结的水。根据 Hubbert 的图示, 上述地区地形坡度大、地下水位浅 (深度小于 3 m)、岩层渗透性好, 应该有足够的水量供应村镇, 原本预期溪流会有经常性水流。有一天, 我终于意识到, Hubbert 图示的流线汇聚于湿周, 仅仅是假设, 而非实际结果! 我终于找到了可能解开谜团的思路, 于是决定去弄明白, 水究竟去向何方。于是, 我对一个形状简单的盆地求解拉普拉斯方程 (图 1.4; 附录 A; Tóth, 1962a, 4380 页, 图 3)。

结果证明: Hubbert (1940, 929 页) 关于“势汇局限于河谷有水的底部”的论断, 被 Tóth (1962a, 4380 页) 的“地下水排泄并非集中于谷底”的论断所替代。盆地的整个下半部都是“排泄区”。这一简单的发现, 导致一系列后续研究。

我在撰写上面提到的论文 (Tóth, 1962a) 时已经意识到, 设定线性谷坡确实过分简化。于是, 我设定一个线性区域坡度叠加正弦地面的流域盆地, 再次求解拉普拉斯方程 (图 1.4c; 附录 B; Tóth, 1962b; 1963~1983 重印, 4807 页, 图 3), 由此得出均质各向同性复杂盆地地下水流模式, Engelen & Jones (1986, 9 页) 将此贴切地称之为嵌套式多级次水流系统 (hierarchically nested flow systems)。

数值方法开始普及之际, 正巧加州大学伯克利分校的 R. Allan Freeze 在寻找博士论文题目。在导师 P. Witherspoon 的建议下, 他试图证明数值方法在解决地下水问题中的效用。Freeze 在我的研究基础上转而处理复杂盆地问题, 从他的博士论文中提炼并发表了具有开拓意义的 3 篇论文。这些论文表明: 与解析法不同, 数值法可以得出定量流网, 能够刻画任意形状地形、非均质和各向异性岩层组成的流域盆地重力驱动地下水流 (Freeze & Witherspoon, 1966, 1967, 1968)。

1962~1968 年间发表的这些论文, 从根本上改变了水文地质学发展方向, 扩大了研究视野, 加速了水文地质学随后的发展步伐。对于地下水资源勘察及开发而言, 除了含水层及管井水力学, 还增加了盆地尺度水力学研究。认识到流动地下水是产生多种后果的地质营力, 地下水流系统概念被引入许多学科研究之中。例如, 土壤学, 石油勘探, 生态地质, 地热学, 水文地球化学, 土力学, 沉积学, 成岩作用以及生态学。各种针对性野外研究, 扩展了水文地质学的研究领域。由此, 水文地质学转变为地球科学和水文科学中具有特色的基础性学科。此外, 随着水文地质学向有关领域扩展, 吸引了许多聪明能干的新的