

高等院校地学研究生教学用书

地下水流系统

——理论 应用 调查

*Groundwater Flow Systems:
Theory, Application and
Investigation*

● 梁 杏 张人权 靳孟贵 著

地质出版社

高等院校地学研究生教学用书

地下水流系统

——理论 应用 调查

梁 杏 张人权 靳孟贵 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

地下水流系统理论是当代水文地质学的核心概念。本书内容包含地下水流系统理论及研究方法、国内外典型地区地下水流系统分析实例、不同领域应用地下水流系统理论的实例,以及基于地下水流系统理论的水文地质调查方法。

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、石油地质等研究生及高年级本科生的教学参考用书,也可供相关专业生产和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水流系统:理论应用调查/梁杏等著. —

北京:地质出版社,2015. 3

ISBN 978-7-116-09191-7

I. ①地… II. ①梁… III. ①地下水系统-研究
IV. ①P641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 054490 号

Dixia Shuiliu Xitong: Lilun Yingyong Diaocha

责任编辑:李惠娣

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 66554642(邮购部);(010) 66554579(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554582

印 刷:北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm^{1/16}

印 张:11.25

印 数:1—2000 册

字 数:270 千字

版 次:2015 年 3 月北京第 1 版

印 次:2015 年 3 月北京第 1 次印刷

定 价:22.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-09191-7

(如对本书有意见或建议,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

Foreword

“Groundwater Flow Systems” are three dimensional-bundles of groundwater flow lines that run side-by-side and remain together in a topographically defined drainage basin. The flow lines start in a *recharge area*, where they enter the groundwater body, and terminate in a *discharge area*, at the boundary of the flow domain. The “flow system” was defined and proposed in the early 1960s as an elementary unit of groundwater flow distribution in a drainage basin. Since then it has become the core concept of the science of hydrogeology.

Flow systems are gravitationally generated by the relief of the water table. Small, local undulations of the water table induce local flow systems while regional systems are due to major basinal uplands. Depending on the topography, geology and climate of a basin, several systems of different orders of magnitude may develop between the local and regional ones, thus completing the groundwater flow pattern of an entire drainage basin. The various properties, natural effects, study methods and exploitation of flow systems for utilitarian purposes are treated by *the theory of regional groundwater flow*.

The “Theory of regional groundwater flow” comprises two complementary sub-theories, namely: 1) “The Hydraulics of Basin-Scale Groundwater Flow Systems” and 2) “The Geologic Agency of Regional Groundwater Flow”. The appreciation and utilization of the first sub-theory requires highly developed mathematical and modeling skills. The second one is for the scientist or engineer interested in natural processes and phenomena such as soil- and water- salinization, mineral and petroleum deposits, wetland development and wetland ecology, botany, karst development and hydrology, subsurface ecology, soil- and rock-mechanics, and so on.

The book you are holding in your hands is a treasure-trove of knowledge, methodology, philosophy and real-life examples pertaining to regional groundwater flow systems. In ten logically organized chapters the book treats of the history of the concept from its birth in the early 1960s to today’s state of the art; the structure, parameters and methods of characterization of basinal flow patterns; as well as of their empirical evaluation. It presents numerous examples and case histories, both from China and abroad, of basinal groundwater flow systems and their investigation, and the effects of their interaction with the natural environment. In the concluding chapter, hydrogeological investigations based on today’s theory of regional groundwater flow systems are squarely juxtaposed against those based on traditional approaches.

The authors, who are trailblazer students, practitioners and teachers of the science and art of regional groundwater flow, must be thanked and congratulated for the realization of this unique and comprehensive treatise on the core concept of modern hydrogeology.

József Tóth

2015 February, Edmonton, Alberta, Canada

序 言

“地下水流系统”是流域盆地中始终保持平行的三维地下水流线簇的集合。流线始于补给区进入地下水体，终结于边界排泄区。20 世纪 60 年代初提出将“地下水流系统”作为流域盆地的基本单元，成为水文地质学的核心概念。

水流系统由地下水位起伏的重力差形成。局部性地下水位起伏形成局部水流系统，区域性主要高地则形成区域水流系统。地形、地质及气候的不同，发育不同级次与规模的水流系统，决定着流域盆地的地下水流模式。

区域地下水流理论应用于：基于各种实际目的，探究地下水流系统的特性、自然效应、研究方法及其开发利用。

“区域地下水流理论”包括两个互补的理论，即：①“流域尺度地下水流系统水力学”；②“区域地下水流的地质营力作用”。前者的定量评估及应用，要求具备先进的数学及模拟技能。后者则为工程师或科学家感兴趣的自然作用及现象提供理论依据；这些自然作用及现象包括：土壤-水的盐化，成矿及油气成藏，湿地发育及湿地生态，植物学，喀斯特发育与喀斯特水文学，地下生态，岩土力学等。

作者的这本书，是有关地下水流系统的知识、研究方法、科学哲学以及实际例子的宝库。在组织严谨的十章里论述了：20 世纪 60 年代初地下水流系统概念的诞生到当前不断丰富提高的历史；盆地地下水流结构、参数，以及水流模式表征方法及其经验性评估；阐述了大量中国及国际地下水流系统及其研究实例，讨论了地下水流系统与自然环境的相互作用。在最后一章中，针对传统方法的不足，提出了基于当代区域地下水流理论的水文地质调查方法。

本书作者是对区域地下水流系统理论与技巧富于开拓精神的学习者、实践者及传播者。他们以独特而全面的方式，论述了当代水文地质学的核心概念。他们的贡献，值得感谢和祝贺。

约瑟夫·托特

2015 年 2 月于加拿大阿尔伯塔省埃德蒙顿

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，托特（József Tóth）创建了多级次地下水流系统理论——Tóth本人称之为“区域地下水流理论”。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。

Tóth理论包含两个不可分割的部分：地下水流具有复杂的、自组织的时空结构，以及流动地下水是普遍而重要的地质营力。从而，将系统方法引入水文地质学，为我们提供了一个地下水本身与其环境相互作用的时空有序图景，揭示了地下水本身及其与环境相互作用的内在规律；将现象归纳为主的传统水文地质学，转变为探索机理的当代水文地质学；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的富有活力的基础性学科分支。

水文地质学的发展，从找水水文地质学开始，经由资源水文地质学，进而转为生态环境水文地质学。水文地质学面临一系列复杂的挑战，传统的概念、理论与方法难以满足需求，势必让位于以地下水流系统理论为范式的当代水文地质学。

1984年，陈梦熊等将地下水流系统理论介绍到国内，引起中国水文地质学家的极大兴趣。随之，Tóth、英格伦（G. B. Engelen）等国际主要地下水流系统理论研究者多次访华讲学。Engelen、扎伊尔（Zijl）等还曾为武汉地质学院（今中国地质大学·武汉）地下水流系统培训班讲授有关理论与方法。

三十余年来，作者始终追踪国内外有关理论与实践的发展，从事相应的理论研究与实际应用，并与Tóth、Engelen等长期保持学术联系。多年的学术交流、阅读、思考、实践与研究，催生了这本中文专著。

本书的目的是为中国读者提供一个简明易懂的地下水流系统理论及其应用的入门性读本。因此，书中很少涉及数学推导（有兴趣的读者可以参考：Tóth, 2009, *Gravitational Systems of Groundwater: Theory, Evolution, Utilization*. Cambridge University Press。此书的中译本为：托特著，张人权、梁杏、靳孟贵等译，2015，重力驱动地下水流系统理论及其应用，地质出版社）。与此同时，本书结合物理模拟及数学模拟，多方面探讨了地下水流系统的物理机制。结合国内外实例，说明应用地下水流系统理论解决各种实际问题的思路和方法，以及基于

地下水流系统理论的水文地质调查方法。

本书写作分工如下：梁杏主持本书构思以及图件设计，并负责撰写第4、6、7章；张人权负责撰写第1、2、3章及8.2、8.4等节；第5、8（不包括8.2、8.4节）、第9章由梁杏、靳孟贵共同完成；第10章由张人权、梁杏共同完成；靳孟贵负责英文目录及图表名；图件加工由牛宏、彭凤娟和梁晓雯协助完成。

此外，作为中国地质大学·武汉地下水流系统研究组成员的孙蓉琳（副教授）、研究生刘宇、权董杰、刘彦、牛宏等，也为本书涉及的某些原创性研究做出了贡献。沈仲智工程师参与了物理模拟仪器的研制和调试。

本书的撰写得到以下各位的启发与帮助：王瑞久（中国地质环境监测院），焦纠赳（香港大学），张之淦（岩溶地质研究所），蒋小伟、万力（以上为中国地质大学·北京），文冬光、郝爱兵和吴爱民（以上为中国地质调查局水文地质环境地质部），周爱国、周宏、陈植华、马腾、王涛（以上为中国地质大学·武汉）。本书得到中国地质调查局水文地质环境地质发展部的专项研究资助，以及国家自然科学基金“土壤水流动系统及其应用研究”（49972083）、“华北平原厚层黏性土孔隙水地球化学特征及其环境意义”（41272258）、国家自然科学基金-新疆联合重点支持项目（U1403282）、国家重点基础研究发展计划（973计划）课题（2010CB428802）等项目资助。承蒙 Tóth 为本书撰写序言并审改英文目录。在此我们谨对以上各位及有关单位表示诚挚谢意。

在与 Tóth 多次探讨过程中，Tóth 对于我们的某些提法（主要涉及水头上边界及通量上边界的比较）并不完全认同。尽管如此，每当我们请他审核与修改我们的著作初稿时，他总是尊重我们的看法，细致修改评述，使我们受益匪浅。从中我们深刻体会到，作为地下水流系统理论的创建者，作为当代水文地质学的奠基人，Tóth 的大师风范与宽广胸怀。

地下水流系统理论还处于发展完善之中，依然存在一些尚未解决的难题。因此，我们的论述难免疏漏与偏颇。对本书的批评与建议，请发至电子邮箱：xliang@cug.edu.cn。

作者

2015年1月于武汉

目 录

Foreword

序 言

前 言

第1章 导言	1
第2章 地下水流系统理论的创建、演变与发展方向	4
2.1 水文地质学中系统概念的引入	4
2.1.1 系统概念向水文地质学的渗透	4
2.1.2 与地下水有关的各种系统概念	4
2.2 地下水流系统理论的创建	7
2.3 地下水流系统理论的演变	8
2.4 地下水流系统理论是当代水文地质学的范式	11
2.4.1 地下水流系统理论对水文地质学的突破性贡献	11
2.4.2 当代水文地质学面临的挑战	12
2.4.3 Toth 理论是当代水文地质学的范式	13
2.5 地下水流系统理论的现状与发展方向	13
第3章 地下水流系统的基本概念与特征	16
3.1 地下水流系统的概念及术语	16
3.1.1 地下水流系统	16
3.1.2 地下水流系统的级次性	16
3.1.3 补给区与排泄区：势源及势汇	17
3.1.4 局部地下水流系统	17
3.1.5 中间地下水流系统	17
3.1.6 区域地下水流系统	17
3.1.7 水力捕集带、准滞流带、滞流带及滞流区	18
3.1.8 驻点与驻线	18
3.1.9 盆地地下水流模式	18
3.2 地下水流系统的基本特征	19
3.2.1 地下水流动的驱动力	19
3.2.2 地下水流系统的动力特征	19
3.2.3 地下水流系统的水化学特征	20
3.2.4 地下水流系统的水温度特征	22
3.2.5 地下水流系统中的微生物	23
第4章 盆地地下水流模式模拟及控制因素分析	24
4.1 盆地地下水流模式	24

4.2	Tóth 等对盆地地下水流模式的数学模拟及控制因素分析	25
4.2.1	Tóth 对盆地地下水流的数学模拟	25
4.2.2	Tóth 等对盆地地下水流模式影响因素的分析	26
4.2.3	水头上边界数学模拟的局限性	27
4.3	盆地地下水流模式的物理模拟	30
4.4	通量上边界的盆地地下水流模式的数学模拟	31
4.4.1	模型设计及模拟结果	32
4.4.2	模拟结果分析	38
4.4.3	物理机制初步探讨	39
4.4.4	盆地地下水流模式与最小能耗率原理	41
第 5 章	盆地地下水流模式的时间演变	44
5.1	晚更新世以来气候变化与地下水补给的同位素记录	44
5.2	Edmunds 的“地下水地层学”	45
5.3	盆地地下水流模式的时间演变	46
第 6 章	实际条件下盆地地下水流模式的构建与判识	48
6.1	实际条件下盆地地下水流模式构建的特点	48
6.2	盆地地下水流模式的分析与判识	49
6.2.1	盆地地下水流模式的地质自然地理背景分析	49
6.2.2	应用水化学/同位素信息判识盆地地下水流模式	49
6.2.3	判识盆地地下水流模式的其他信息	52
6.3	盆地地下水流模式构建与判识举例	52
6.3.1	澳大利亚 Murry 盆地地下水流系统	52
6.3.2	四川雅砻江官地水电站玄武岩裂隙水流系统	53
6.3.3	鄂尔多斯盆地白垩系地下水流系统	56
第 7 章	地下水流系统与地下水的地质营力作用	58
7.1	概述	58
7.2	地下水流系统的水分传输与分布	58
7.3	地下水流系统的水盐分布对土壤及植被的影响	59
7.4	地下水流系统与生态系统	60
7.5	地下水流系统与岩土体变形和破坏	60
7.6	地下水流系统与地貌的塑造	60
7.7	地下水流系统与油气成藏	61
7.8	地质流体及其意义	61
第 8 章	典型地区地下水流系统分析示例	64
8.1	中国岩溶水流系统	64
8.1.1	中国岩溶水流系统地域特征	64
8.1.2	北方岩溶水流系统圈划	65
8.1.3	西南岩溶水流系统发育特征	70

8.1.4 高岚河岩溶水流系统划分与图示	77
8.2 河北平原第四系孔隙地下水流系统	80
8.2.1 自然地理及地质背景	81
8.2.2 河北平原第四系地下水流系统的研究历史	82
8.2.3 河北平原第四系地下水流系统概念模型	84
8.2.4 末次盛冰期以来海平面变化及区域地下水流系统的形成	86
8.2.5 中部平原早期中间地下水流系统发育的依据及特征	87
8.2.6 大陆盐化咸水形成及中部平原晚期中间地下水流系统的发育	89
8.2.7 中部平原及滨海平原的局部地下水流系统	91
8.2.8 初步结论	92
8.2.9 地下水资源合理利用及生态环境保护对策	93
8.3 石羊河流域干旱内陆盆地孔隙地下水流系统	94
8.4 匈牙利多瑙河-蒂萨河河间地块地下水流系统与土壤及湿地盐化	98
8.5 荷兰地下水流系统调查方法与成果	100
8.5.1 问题的提出	100
8.5.2 调查步骤及调查方法要点	100
8.5.3 成果及应用	102
第9章 专门领域地下水流系统理论应用实例	106
9.1 山西忻州盆地奇村地热田系统	106
9.1.1 忻州盆地地质和水文地质背景	107
9.1.2 奇村地热田系统的水化学指示	107
9.1.3 奇村地热田水流系统模式	112
9.2 地下水流系统与地下水污染分析	113
9.3 地下水流系统与核废料地质处置场地选址	115
9.4 珠江口盆地东部古近-新近纪古地下流体系统与油气聚集	116
9.4.1 盆地演化及地质结构	117
9.4.2 珠 I 坳陷古地下水动力场分析	118
9.4.3 化学场及温度场分析	119
9.4.4 珠江口盆地东部古地下水动力场演变模拟	120
9.5 水电站渗漏分析:溪洛渡水电站库首岩溶渗漏研究	124
9.5.1 问题与方法	124
9.5.2 地质背景与含水系统的圈划	125
9.5.3 岩溶水流系统发育模式分析	127
9.5.4 蓄水条件下岩溶水流系统的灰域模拟	130
9.6 地下水流系统与成矿作用	132
9.7 地下水流系统与水文地球化学找矿	132
9.8 地下水流系统与地质灾害	135
9.8.1 潜蚀与管涌	136
9.8.2 滑坡	136

第 10 章 基于地下水流系统理论的水文地质调查方法 138

10.1 地下水流系统调查与传统水文地质调查的异同 138

10.2 基于地下水流系统理论的区域水文地质调查目标 138

10.3 基于地下水流系统理论的区域水文地质调查的理念与思路..... 139

10.3.1 以系统思想为指导，将查明含水系统及地下水流系统作为核心任务 139

10.3.2 将地下水资源作为水文地质调查的突破口 140

10.3.3 加强成因分析，重塑地质历史及历史时期的地下水演变 140

10.3.4 目标导向前提下的问题导向 141

10.3.5 工作假设先行，避免调查的盲目性 142

10.3.6 加强信息提取与组织 143

10.3.7 多通道信息核对，保证结论的信度 144

10.3.8 正确处理定性分析与定量研究的关系 144

10.4 地下水流系统调查的组织与实施 146

10.4.1 国内外地下水流系统调查的现状 146

10.4.2 地下水流系统调查的组织与内容 146

10.5 地下水流系统调查的成果表达..... 148

参考文献 150

中英文对照索引 158

Contents

Foreword

Preface

1 Introduction	1
2 The birth, evolution and direction of development of groundwater flow systems	4
2.1 System concept introduced into hydrogeology	4
2.1.1 Penetration of the system concept into hydrogeology	4
2.1.2 Various system concepts related to groundwater	4
2.2 The birth of groundwater flow systems	7
2.3 The evolution of groundwater flow systems	8
2.4 Groundwater flow systems: the paradigm of modern hydrogeology	11
2.4.1 Groundwater flow systems: top contributions to hydrogeology	11
2.4.2 Challenges faced with modern hydrogeology	12
2.4.3 The paradigm of modern hydrogeology: Tóthian theory	13
2.5 Current situation and direction of development of groundwater flow systems	13
3 Basic concepts and characterization of groundwater flow systems	16
3.1 Concepts and terms of groundwater flow systems	16
3.1.1 Groundwater flow systems	16
3.1.2 Hierarchy of groundwater flow systems	16
3.1.3 Recharge and discharge areas: potential sources and sinks	17
3.1.4 Local system of groundwater flow	17
3.1.5 Intermediate system of groundwater flow	17
3.1.6 Regional system of groundwater flow	17
3.1.7 Hydraulic trap, quasi-stagnation and stagnation belts and stagnation zones	18
3.1.8 Stagnation point and line	18
3.1.9 Flow patterns of basal groundwater	18
3.2 Basic characteristics of groundwater flow system	19
3.2.1 Driving force of groundwater flow	19
3.2.2 Hydro-dynamic characteristics of groundwater flow systems	19
3.2.3 Chemical characteristics of groundwater flow systems	20

3.2.4	Temperature characteristics of groundwater flow systems	22
3.2.5	Microorganism characteristics of groundwater flow systems	23
4	Mathematic modeling of groundwater flow patterns and analysis of dominating factors	
		24
4.1	Basinal groundwater flow patterns	24
4.2	Mathematic modeling of basinal groundwater flow patterns and dominating factors analyzed by Tóth and others	25
4.2.1	Modeling of basinal groundwater flow patterns by Tóth	25
4.2.2	Influencing factors of basinal groundwater flow patterns analyzed by Tóth and others	26
4.2.3	Limitation of given-head upper boundary condition in mathematic modeling	27
4.3	Physical simulation of basinal groundwater flow patterns	30
4.4	Mathematic modeling of basinal groundwater flow pattern with upper flux boundaries	
		31
4.4.1	Design of model and results of simulations	32
4.4.2	Analysis of simulation results	38
4.4.3	Discussion on physical mechanism	39
4.4.4	Basinal groundwater flow patterns and principles of minimum energy consumption rate	41
5	The evolution of basinal groundwater flow patterns	44
5.1	Climate changes and groundwater recharge recorded with isotopes since late pleistocene	
		44
5.2	The groundwater ‘stratigraphy’ proposed by Edmunds	45
5.3	Temporal evolution of basinal groundwater flow patterns	46
6	Reconstruction and identification of basinal groundwater flow patterns in real conditions	
		48
6.1	Features of reconstruction of basinal groundwater flow patterns in real conditions	48
6.2	Analysis and identification of basinal groundwater flow patterns	49
6.2.1	Geological and geographical analysis of basinal groundwater flow patterns	49
6.2.2	Hydro-chemical and isotopic data for identification of basinal groundwater flow patterns	49
6.2.3	Other information for identification of basinal groundwater flow patterns	52
6.3	Examples for reconstruction and identification of basinal groundwater flow patterns	52
6.3.1	Groundwater flow systems of Murry Basin, Australia	52
6.3.2	Groundwater flow systems in fractured basalt, Guandi hydro-power plant over Yalongjiang River, Sichuan, China	53

6.3.3	Cretaceous groundwater flow systems in the Ordos Basin, China	56
7	Groundwater flow systems and the geologic agency of flowing groundwater	58
7.1	Overview	58
7.2	Water transportation and distribution of groundwater flow systems	58
7.3	Distribution of moisture and salt of groundwater flow systems and its effect on soils and vegetations	59
7.4	Groundwater flow systems and eco-systems	60
7.5	Groundwater flow systems and deformation and failure of rocks and soils	60
7.6	Groundwater flow systems and geomorphology	60
7.7	Groundwater flow systems and oil and gas entrapment	61
7.8	Geo-fluid and its significance	61
8	Analysis of groundwater flow systems in typical regions	64
8.1	Karst water flow systems in China	64
8.1.1	Regional characters of karst water flow systems in China	64
8.1.2	Mapping of karst water flow systems in Northern China	65
8.1.3	Characteristics of karst water flow systems in Southwest China	70
8.1.4	Mapping of karst water flow systems in Gaolan River	77
8.2	Quaternary-porous groundwater flow systems in Hebei Plain, China	80
8.2.1	Background of geography and geology	81
8.2.2	Study history of Quaternary groundwater flow systems in Hebei Plain	82
8.2.3	Conceptual model of Quaternary groundwater flow systems in Hebei Plain	84
8.2.4	Sea level changes and formation of regional groundwater flow systems since the Last Glacial Maximum (LGM)	86
8.2.5	Development evidences and characters of intermediate flow systems in the middle plain during the early LGM	87
8.2.6	Formation of continental saline water and intermediate flow systems in the middle plain during the late LGM	89
8.2.7	The local groundwater flow systems in the middle plain and the coastal plain	91
8.2.8	Primary conclusions	92
8.2.9	Strategies for sustainable use of groundwater resources and eco-environment protection	93
8.3	Porous-rock groundwater flow systems in Shiyang River watershed, an arid inland basin in Gansu, China	94
8.4	Soil and wetland salinization in the Duna-Tisza interfluvium related to groundwater flow	

systems in Hungary	98
8.5 Methods and results of groundwater flow systems investigation in the Netherlands	100
8.5.1 Background	100
8.5.2 Investigation procedures and methods	100
8.5.3 Results and applications	102
9 Cases application of the theory of groundwater flow systems for special fields	106
9.1 Qicun geothermal systems in Xinzhou Basin, Shanxi, China	106
9.1.1 Geology and hydrogeological setting of Xinzhou Basin	107
9.1.2 Hydro-geochemical indicators of Qicun geothermal systems	107
9.1.3 Groundwater flow pattern of Qicun geothermal systems	112
9.2 Groundwater flow systems and groundwater pollution analysis	113
9.3 Groundwater flow systems and site selection for nuclear waste disposal	115
9.4 Paleo-groundwater flow systems and accumulation of oil and gas in Paleogene-Neogene, Pearl River Mouth Basin, Sothern Sea, China	116
9.4.1 Geological setting and basin evolution	117
9.4.2 Analysis of paleo-groundwater flow field for Zhu 1 Depression	118
9.4.3 Analysis of chemical and thermal fields	119
9.4.4 Modeling of paleo-groundwater flow systems for eastern Pearl River Mouth Basin	120
9.5 Leakage analysis of reservoir for hydropower plant: case study in Xiluodu hydropower plant, China	124
9.5.1 Problem and methods	124
9.5.2 Geological setting and aquifer system mapping	125
9.5.3 Analysis on development of karst water flow pattern	127
9.5.4 Grey domain modeling of karst water flow systems under reservoir storing water	130
9.6 Groundwater flow systems and ore deposits	132
9.7 Groundwater flow systems and hydro-geochemical prospecting	132
9.8 Groundwater flow systems and geo-hazards	135
9.8.1 Subsurface erosion and piping	136
9.8.2 Landslides	136
10 Hydrogeological investigation based on the theory of groundwater flow systems ...	138
10.1 Similarities and differences between traditional hydrogeological investigations and the new way based on theory of groundwater flow systems	138

10.2	Objectives of regional hydrogeological investigations based on the theory of groundwater flow systems	138
10.3	The idea and approach to regional hydrogeological investigation based on the theory of groundwater flow systems	139
10.3.1	Identification of aquifer systems and groundwater flow systems being the key task	139
10.3.2	Groundwater resources as the breakthrough of hydrogeological investigation	140
10.3.3	Strengthen genetic analysis on groundwater flow systems and their evolution	140
10.3.4	Objectives oriented and problems-oriented	141
10.3.5	Leading by working hypothesis to avoid blindness	142
10.3.6	Information extraction and organization	143
10.3.7	Checking information through different channels to guarantee reliability	144
10.3.8	Qualitative analysis and quantitative simulation	144
10.4	Organization and implementation of groundwater flow systems investigation	146
10.4.1	The current state of groundwater flow systems investigation	146
10.4.2	Investigation organization and research contents of groundwater flow systems	146
10.5	Expression of results for groundwater flow systems investigation	148
References		150
Index		158

第1章 导言

20 世纪中期以来,出现了值得注意的趋势:人类活动强烈干预自然过程,引发一系列制约人类生存和发展的生态环境问题;以系统论为代表的交叉科学的涌现,多学科交叉渗透成为主流。在这样的背景下,地球科学进入新的阶段:20 世纪 80 年代,原先分别描述地球各种现象的学科,融合为一个相互关联的整体,成为揭示机理、预测未来、应对全球环境变化、支撑可持续发展的地球系统科学(Earth System Science)。

作为地球科学的重要分支,水文地质学也发生了革命性变化:长期沿用的含水层和隔水层的概念受到冲击,产生了(地下)含水系统(aquifer system)及地下水流系统(groundwater flow system)的概念。

地下水流系统理论的建立,是继达西定律以后,水文地质学具有里程碑意义的突破。

匈牙利裔加拿大人托特(József Tóth)于 20 世纪 60 年代提出地下水流系统理论,20 世纪 80 年代,理论框架基本成型。Tóth 指出,地下水位存在高程差,在重力驱动下自组织地形成嵌套式多级次流系统模式(Tóth, 1963)。这一简单的定义,难以概括地下水流系统理论的丰富内涵,后文将从不同角度进一步说明。Tóth 理论的另一重要内容是,流动的地下水是一种普遍的地质营力,以自组织的地下水流系统模式,控制着与地下水有关的各种自然现象和自然作用的空间有序分布(Tóth, 1966, 1971, 1972, 1999, 2009)。

通过 Tóth 的一张综合性示意图(图 1.1),可以对地下水流系统理论有一个概括性认识。

在特定的自然地理、地质条件控制下,盆地地下水呈现多级次水流模式。每个地下水流系统内,从补给源到排泄汇,水流由下降运动,转为水平运动,再呈现上升运动。不同级次地下水流系统,循环深度不等,水交替强度有序变化。各级次系统的汇合部位,地下水流相对停滞,来自不同部位的水流所携带的组分交汇于此,相互作用,在此积聚。由补给源到排泄汇,地表及土壤的水分由相对亏缺,到平衡状态,再到过剩状态;矿物组分由溶滤带走,经过输运,在排泄区及有利部位积聚。地下水的温度及压力,由增温、加压转为降温、减压。地下水流系统不同部位发生不同物理化学及生物化学作用,使组分的绝对含量以及相对含量发生有序变化。在地表,不同级次地下水流,从补给源到排泄汇,由于旱缺水到过度湿润,由脱盐到累盐,从而控制耐旱植物、喜水植物、耐盐植物,以及盐碱地、沼泽湿地等呈现空间有序分布。各级次系统的排泄汇,上升水流使孔隙水压力增大,有效应力降低,岩土体易于发生侵蚀、潜蚀、滑坡等位移和破坏。

地下水流系统理论,以地下水流网为载体,将渗流场、化学场及温度场(未来还可能包括微生物场)融为一体;将地下水各个部分、地下水与环境相互作用,以及地下水伴生现象,整合成为一个演变有序的时空结构;从而为看来似乎互不相关的现象及作用过程,提供了一个易于理解、相互关联的完整图景(张人权等, 1990)。

地下水与地表水体、岩土体、土壤以及生物群落之间,通过物质(水分、盐分、气体成分、有机养分等)循环及能量交换,相互作用,相互依存,构成动态平衡系统(图 1.2,