

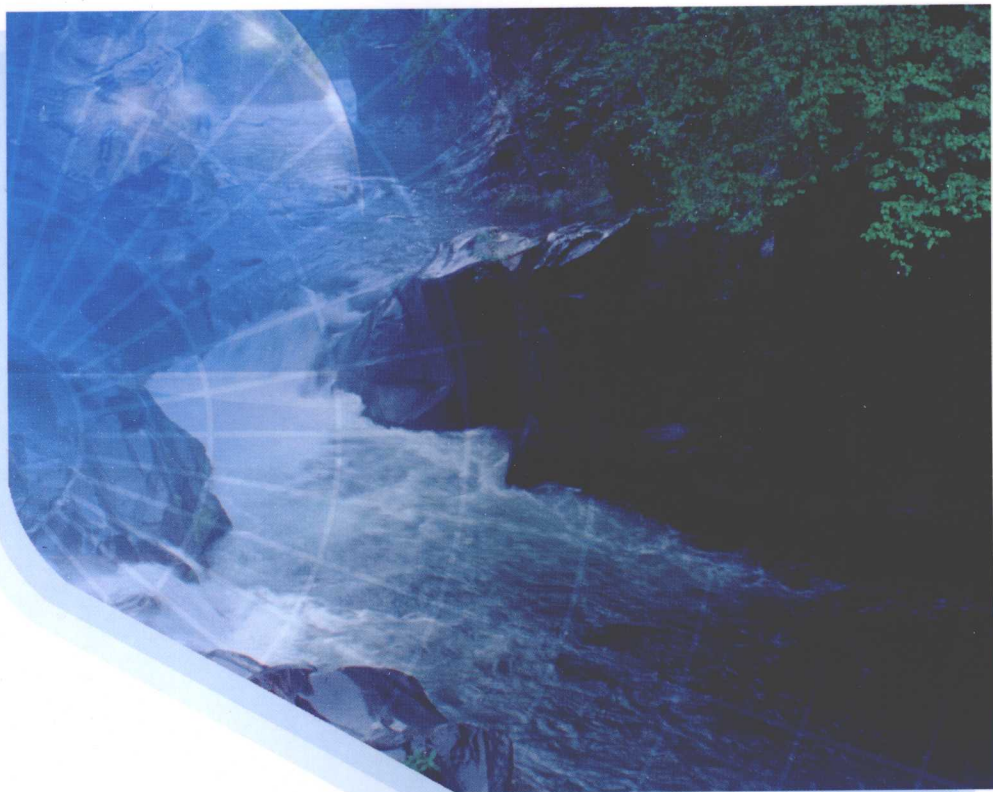


教育部高职高专资源勘查类专业教学指导委员会审查通过  
高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

主编：蒋 辉 曾 波 潘宏雨

# 地下水动力学

DIXIASHUI DONGLIXUE



地 质 出 版 社



教育部高职高专资源勘查类专业教学指导委员会审查通过  
高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

# 地下水动力学

主编：蒋 辉 曾 波 潘宏雨

主审：桂和荣

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书主要阐述了地下水运动的基本原理、计算方法、实验方法和实际应用。全书共分八章，内容包括：渗流理论基础，地下水在含水层中的运动，地下水向完整井的稳定运动，地下水向完整井的非稳定运动，地下水向边界附近井的运动，地下水向非完整井的运动，地下水运动中的若干专门问题、地下水运动的物理模拟。书末附有水力学基础、实验与实训、用计算机进行抽水试验参数计算。

本书理论与应用并重，知识与技能兼容，内容深入浅出，简明易懂。全书既具有较好的系统性和完整性，更有较高的适用性和可读性。应用性和实用性是本书的主要特色。

本书可作为高职高专院校水文地质工程地质专业、地下水科学与工程专业、水文与水资源工程专业、地质工程及相关专业的基本教材，也可作为成人教育相关专业的教材和有关专业科研人员、工程技术人员参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

地下水动力学 / 蒋辉主编. —北京: 地质出版社,  
2009. 8

(高职高专院校资源勘查类专业系列教材)

ISBN 978 - 7 - 116 - 06149 - 1

I. 地… II. 蒋… III. 地下水动力学 - 高等学校: 技术  
学校 - 教材 IV. P641. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 128597 号

---

策划编辑: 王章俊 魏智如

责任编辑: 王春庆 李惠娣

责任校对: 李 玫 杜 悦

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)82324508 (邮购部); (010)82324514 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真: (010)82324340

印 刷: 北京地质印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 16 插页: 7 页

字 数: 400 千字

印 数: 1—3000 册

版 次: 2009 年 8 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 25.80 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 06149 - 1

---

(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)

# 高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

## 编 委 会

主 任：桂和荣

副主任：王章俊

委 员（以姓氏笔画为序）：

马艳平	马锁柱	刘 瑞	李立志	李 华
李军凯	陈洪冶	罗 刚	肖 松	辛国良
范吉钰	郝志贤	殷 瑛	徐汉南	徐耀鉴
夏敏全	韩运宴	靳宗菊	魏智如	

## 编写院校

安徽工业经济职业技术学院

长春工程学院

重庆科技学院

东北大学

甘肃工业职业技术学院

湖北国土资源职业学院

湖南工程职业技术学院

河北地质职工大学

江西应用技术职业学院

吉林大学

辽宁地质工程职业学院

南京大学

徐州建筑职业技术学院

云南国土资源职业学院

郑州工业贸易学校（郑州地校）

中国地质大学（北京）

## 主审院校

安徽理工大学

安徽工业经济职业技术学院

北方机电工业学校

长春工程学院

河南理工大学

湖北国土资源职业学院

湖南工程职业技术学院

淮南职业技术学院

吉林大学

江西理工大学

江西应用技术职业学院

昆明理工大学

昆明冶金高等专科学校

克拉玛依职业技术学院

宿州学院

山东胜利职业学院

石家庄职业技术学院

太原理工大学

徐州建筑职业技术学院

云南国土资源职业学院

郑州工业贸易学校（郑州地校）

中国地质大学（北京）

中国地质大学（武汉）

## 编写说明

随着我国社会经济的快速发展,对高技能应用型人才的需求不断增大,我国政府逐年加大了对职业教育的投入。在这一背景下,地学职业教育也取得了长足进展。但是,由于历史原因,我国的地学职业教育起步较晚,基础相对薄弱,一直没有一套比较系统的专业教材。组织编写一套能够满足各校教学需要,特色鲜明的地学类高等职业教育教材成为教育管理部门和广大师生的强烈愿望和迫切要求。

经过深入调研和精心准备,教育部高等学校高职高专资源勘查类专业教学指导委员会(以下简称“教指委”)会同地质出版社,于2006年7月初组织全国分属地矿、冶金、有色、石油、核工业等部门的10所高职高专院校的一线教师,在河南郑州召开了教材编写研讨会。会议决定,先期编写23种急需的资源勘查类、地质工程与技术类专业高职高专教材,以满足各校教学之需。首批编写的教材包括《普通地质学》、《矿物学基础》、《岩石学》、《地球化学找矿方法》、《岩土工程勘察》等,并分别于2007年8月、2008年1月出版。

2008年5月,教指委在湖南长沙组织召开了“全国高等学校高职高专资源勘查类专业教学改革与教材建设研讨会”。会议决定,继续组织编写第二批资源勘查类专业高职高专层次的专业教材。第二批列选的教材共20种,包括:《普通化学》、《晶体光学及光性矿物学》、《区域地质调查工作方法》、《矿山地质学》、《基础工程施工技术》等,分别于2009年8月、2010年1月出版。

本套教材的编写紧扣高等职业教育的培养目标,努力彰显下列特点:

1. 坚持理论够用,注重实践的编写原则。高职高专教育既是我国高等教育又是职业教育的组成部分,并以培养高技能应用型人才为目标。因此,教材内容不仅要具备高等教育的知识内涵,同时还要兼具职业能力与技术培养的要求,以满足学生综合素养和职业素质两方面能力的提升。

2. 教材内容紧跟形势,体现出与时俱进的科学发展观。最近10年来,地学基础研究领域的新理论、新发现、新成果层出不穷,地学应用领域的新技术、新标准、新方法日新月异。将这些最新成果融入教材,使学生所学知识与行业需求紧密结合是教材编写的基本要求之一。

3. 体现系列教材的特点,内容避免重复。由于各校教学大纲及课程设置上的差异,对教材编写立项和取材造成了困难。本套教材以各校教学大纲为参考,内容安排和课时设计遵循从众原则,最大限度地避免了不同教材之间的内容重复。

4. 教材篇幅与课时设计紧密挂钩,内容力求简明精炼。本套教材编写以各校的教学大纲为基础,以专业规范为标准,努力控制篇幅,突出重点。

5. 充分考虑职业教育的特点,编写体例有所创新,便于教、学双方使用。为培养学生的实际动手能力和实践认知能力,多数教材附有实习(实验)指导书,或以附录的形式附于书末。此外,每章开篇增加了内容简介、学习目的等导读性内容;结尾总结本章应掌握的重点、难点等总结性内容;最后,针对本章重点列出本章的复习思考题。

本套教材的编写组织严密,管理到位。教材编写从立项伊始就成立了以教指委主任桂和荣教授为主任委员、以地质出版社副社长王章俊编审为副主任委员的教材编写委员会。编委会积极开展工作,充分发挥参编院校、教指委、出版社的不同职能,保证了教材编写、评审、出版过程的有序进行。为保证教材质量,教指委承担了绝大多数教材的审稿任务,并分别于2007年4月、2009年5月两次主持召开教材评审会,对每种教材进行严格的质量评审。

本套教材的编写与出版还得到了中国地质学会教育研究分会的支持和帮助。教材编写过程中,分会领导提出了许多指导性意见和建议,并积极推荐知名专家参与教材的审稿把关工作。

这套教材的出版,从品种上构建了我国资源勘查类专业高等职业教育教材建设的体系和框架,极大地缓解了这一专业层次教材的短缺和不足。精品教材的诞生有一个反复锤炼的过程,本套教材的编写虽经多方努力,问题和不足仍在所难免,恳请各校师生及广大读者提出宝贵意见,以便修订时更改和完善。

教材编写委员会

2009年6月

# 前 言

《地下水动力学》是教育部高等学校高职高专资源勘查类专业教学指导委员会（以下称“教指委”）、地质出版社于2008年5月共同立项编写的资源勘查类专业高职高专教材。地下水动力学是研究地下水在岩石空隙中运动规律的一门科学，同时，也是水文地质工程地质专业、地下水科学与工程专业、水文与水资源工程等专业的核心课程。本教材不仅适用于上述专业的高职高专学生，也可供地质工程等专业的学生选用。

编者认真研究了各有关院校地下水动力学课程的教学大纲，在总结该门课程多年教学经验和教学规律的基础上，制定了教材编写大纲和编写计划，确认教学时数为80~86学时。编者力求使学生通过本课程的学习，具备从事水文地质工程地质工作的基本能力和专业素质；能运用本课程的基本知识进行有关水文地质计算；能运用本课程的有关知识，分析、研究和解决实际水文地质问题。

教材以培养“应用型”人才为目标，充分体现“职业教育”与“地质教育”的双重性，做到理论与应用并重，知识与技能兼容，理论联系实际，突出职业教育特色，力争做到科学性、先进性和应用性的统一。教材编写努力做到深入浅出、简明易懂，便于学习；基础理论以“必需、够用、能用”为原则；专业知识突出实用性。教材采用模块结构，各章既相互联系，又相互独立。教师可根据专业层次、教学要求和学时数灵活选用。带\*号的章节为选学内容。每章开篇有内容提要与学习指南；章末有本章小结和复习思考题与习题；书末附有实验与实训等实践性内容。

教材内容共八章，包括：绪论，渗流理论基础，地下水在含水层中的运动，地下水向完整井的稳定运动，地下水向完整井的非稳定运动，地下水向边界附近井的运动，地下水向非完整井的运动，地下水运动中的若干专门问题，地下水运动的物理模拟。书末附有水力学基础，实验与实训，用计算机进行抽水试验参数计算等。

本书由郑州工业贸易学校（原郑州地质学校）牵头编写，蒋辉任主编。



编写分工为：蒋辉编写绪论、第一章至第五章、第七章、附录二；蒋辉、潘宏雨（郑州工业贸易学校）共同编写第八章；周亮（郑州工业贸易学校）编写附录一；盛利芳（郑州工业贸易学校）编写第六章；曾波（湖北国土资源职业学院）编写附录三。全书最后由蒋辉统编定稿。

教材编写完成后，教指委主任、博士生导师桂和荣教授作为主审通读了全部书稿，提出了许多宝贵的修改意见和建议。2009年5月，教指委和地质出版社在江西赣州共同组织召开了教材评审会议，与会专家对初稿给予了较高评价，对审稿意见做了补充和完善，认为教材经进一步修改后达到了公开出版水平。会后，编者根据评审意见对教材做了最后的修改和完善。编者谨对主审和业界同行提出的宝贵意见致以诚挚的感谢！

教材编写过程中，编者所在院校领导对教材编写给予了大力支持；郑州工业贸易学校水工教研室的老师对本书的编写提出了许多建设性意见；云南国土资源职业学院何俊杰教授对编写大纲提出了很好的修改意见。编者收集并引用了大量的国内外文献，参阅了许多国内大专院校的教材和讲义。在此，编者谨向上述同仁及所引用文献的版权所有者表示衷心的感谢！

本书内容广泛，涉及面宽，理论性较强，计算内容较多，加之编者水平有限，不当与疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2009年6月于郑州

# 目 次

## 前 言

绪 论 .....	(1)
一、地下水动力学的含义、研究内容、研究方法和应用 .....	(1)
二、地下水动力学的发展概况 .....	(2)
复习思考题与习题 .....	(4)
第一章 渗流理论基础 .....	(5)
第一节 渗流的基本概念 .....	(5)
一、多孔介质与渗流 .....	(5)
二、渗流的运动要素 .....	(9)
三、渗流分类 .....	(12)
第二节 渗流基本定律 .....	(15)
一、达西 (Darcy) 定律 (线性渗透定律) .....	(15)
二、非线性渗透定律 .....	(18)
三、水均衡原理 .....	(18)
第三节 岩层的透水特征分类和流网 .....	(19)
一、岩层透水特征分类 .....	(19)
二、流网 .....	(20)
第四节 突变界面的水流折射和等效渗透系数 .....	(24)
一、越过透水性突变界面的水流折射 (折射定律) .....	(24)
二、层状岩层的等效渗透系数 .....	(25)
第五节 描述地下水运动的数学模型及其解法 .....	(27)
一、地下水运动的数学模型概述 .....	(27)
二、地下水运动微分方程 .....	(28)
三、定解条件 .....	(33)
四、地下水运动数学模型实例 .....	(36)
五、地下水流问题的解法 .....	(37)
复习思考题与习题 .....	(39)
第二章 地下水在含水层中的运动 .....	(41)
第一节 含水层与河渠间地下水的稳定运动 .....	(41)

一、潜水的稳定运动 .....	(41)
二、承压水的稳定运动 .....	(48)
第二节 河渠附近地下水的非稳定运动 .....	(50)
一、河渠水位迅速上升(或下降)为定值时,河渠附近地下水的非稳定运动 .....	(51)
二、河渠水位变化时,河渠附近地下水的非稳定运动 .....	(53)
复习思考题与习题 .....	(54)
<b>第三章 地下水向完整井的稳定运动 .....</b>	<b>(56)</b>
第一节 概 述 .....	(56)
一、水井的类型 .....	(56)
二、井及附近的水位降深 .....	(57)
第二节 地下水向承压水井和潜水井的稳定运动 .....	(58)
一、承压水井的裘布依(Dupuit)公式 .....	(58)
二、潜水井的裘布依(Dupuit)公式 .....	(60)
三、裘布依(Dupuit)公式的推广和扩展 .....	(62)
四、裘布依(Dupuit)公式的应用 .....	(63)
五、裘布依(Dupuit)公式的讨论 .....	(66)
第三节 流量和水位降深关系的经验公式 .....	(68)
一、 $Q-s$ 曲线的类型、鉴别及参数确定 .....	(68)
二、应用实例 .....	(71)
第四节 地下水向干扰井群的稳定运动 .....	(72)
一、干扰井与叠加原理 .....	(72)
二、任意排列的干扰井群的计算 .....	(73)
三、几种规则布井的干扰井群计算公式 .....	(74)
第五节 非线性流和均匀流中的井 .....	(76)
一、非线性流中的井 .....	(76)
二、均匀流中的井 .....	(76)
复习思考题与习题 .....	(78)
<b>第四章 地下水向完整井的非稳定运动 .....</b>	<b>(81)</b>
第一节 承压含水层中的完整井流 .....	(81)
一、定流量抽水的泰斯(Theis)公式 .....	(81)
二、泰斯(Theis)公式的近似表达式 .....	(82)
三、流量变化时的计算公式 .....	(87)
四、对泰斯(Theis)公式的分析与讨论 .....	(87)
五、利用泰斯(Theis)公式进行水位预测和水量计算 .....	(91)
六、利用泰斯(Theis)公式确定水文地质参数 .....	(92)

七、定降深井流的计算 .....	(101)
<b>第二节 有越流补给的完整井流 .....</b>	<b>(103)</b>
一、越流补给与越流系统 .....	(103)
二、有越流补给的完整井流的基本方程及其解 .....	(103)
三、公式分析与讨论 .....	(105)
四、利用抽水试验资料确定越流系统的参数 .....	(107)
五、有越流补给的承压完整井的稳定态解及参数计算 .....	(115)
<b>第三节 潜水完整井流 .....</b>	<b>(118)</b>
一、潜水井流的特点与仿泰斯公式 .....	(118)
二、考虑迟后疏干的博尔顿 (Boulton) 模型 .....	(119)
三、考虑流速垂直分量和弹性释水的纽曼 (Neuman) 模型 .....	(127)
<b>第四节 地下水向干扰井的非稳定运动 .....</b>	<b>(136)</b>
一、无限含水层中定流量干扰井的非稳定运动 .....	(137)
二、计算实例 .....	(138)
复习思考题与习题 .....	(139)
<b>第五章 地下水向边界附近井的运动 .....</b>	<b>(144)</b>
<b>第一节 镜像映射法原理及直线边界附近的井流 .....</b>	<b>(144)</b>
一、镜像映射法原理 .....	(144)
二、直线边界附近的井流 .....	(145)
<b>第二节 扇形含水层与条形含水层中的井流 .....</b>	<b>(152)</b>
一、扇形含水层中的井流 .....	(152)
二、条形含水层中的井流 .....	(157)
<b>第三节 边界附近的干扰井 .....</b>	<b>(159)</b>
一、直线补给边界附近稳定流干扰井 .....	(159)
二、直线边界附近的非稳定流干扰井 .....	(159)
三、应用实例 .....	(160)
复习思考题与习题 .....	(161)
<b>第六章 地下水向非完整井的运动 .....</b>	<b>(164)</b>
<b>第一节 非完整井的类型及地下水向非完整井运动的特点 .....</b>	<b>(164)</b>
<b>第二节 地下水向非完整井的稳定运动 .....</b>	<b>(165)</b>
一、半无限厚含水层中的非完整井 .....	(165)
二、有限厚含水层中的非完整井 .....	(168)
<b>第三节 地下水向承压非完整井的非稳定运动 .....</b>	<b>(169)</b>
一、计算公式 .....	(169)
二、根据抽水试验资料确定水文地质参数 .....	(173)

复习思考题与习题·····	(176)
<b>第七章 地下水运动中的若干专门问题</b> ·····	(178)
<b>第一节 水工建筑区(水库区)的地下水运动概述</b> ·····	(178)
一、坝基渗流量(坝下渗失量)计算·····	(178)
二、绕坝渗漏(坝肩渗漏)·····	(180)
<b>第二节 基坑降水设计与计算</b> ·····	(181)
一、露天基坑排水·····	(181)
二、钻孔降低地下水位(水头)·····	(184)
三、应用实例·····	(185)
<b>第三节 水中溶质(污染物)弥散</b> ·····	(187)
一、溶质(污染物)在地下水中的运移·····	(187)
二、一维弥散问题及其解·····	(190)
复习思考题与习题·····	(192)
<b>第八章 地下水运动的物理模拟</b> ·····	(194)
<b>第一节 地下水物理模拟的相似原理</b> ·····	(194)
一、相似模型·····	(194)
二、相似条件·····	(195)
三、相似比例·····	(196)
<b>第二节 模拟方法</b> ·····	(198)
一、砂槽(渗流槽)模拟·····	(198)
二、电模拟·····	(201)
复习思考题与习题·····	(204)
<b>附录一 水力学基础</b> ·····	(206)
<b>第一节 流体的基本特征及其主要物理力学性质</b> ·····	(206)
一、连续介质的假设和液体的基本特征·····	(206)
二、液体的主要物理力学性质·····	(206)
<b>第二节 水静力学基础</b> ·····	(208)
一、作用于液体上的力·····	(208)
二、静水压力·····	(209)
<b>第三节 水动力学基础</b> ·····	(211)
一、流体运动(水流)的有关概念·····	(211)
二、稳定流的连续性方程·····	(212)
三、稳定流的能量方程——伯努里(Bernoulli)方程·····	(213)
<b>第四节 水流型态、水流阻力及水头损失</b> ·····	(216)
一、流动的两种类型——层流和紊流·····	(216)

二、水流阻力与水头损失 .....	(218)
复习思考题与习题.....	(220)
<b>附录二 实验与实训 .....</b>	<b>(222)</b>
实验一 伯努里 (Bernoulli) 能量方程实验 .....	(222)
实验二 潜水平面稳定运动渗流槽实验 (河间地块潜水运动模拟实验) .....	(225)
实验三 潜水完整井径向稳定运动渗流槽实验 .....	(228)
实验四 承压完整井非稳定运动渗流槽模拟实验 .....	(232)
<b>* 附录三 用计算机进行抽水试验参数计算 (Aquifer Test 软件简介与应用) .....</b>	<b>(236)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(242)</b>

# 绪 论

## 一、地下水动力学的含义、研究内容、研究方法和应用

地下水动力学是研究地下水在岩石空隙中运动规律及其应用的一门科学，主要为地下水的定量计算和评价及合理开发利用提供理论依据。地下水动力学是水文地质学的重要组成部分，是水文地质工程地质专业、地下水科学与工程专业、水文与水资源专业理论性较强的核心课程。

地下水动力学主要研究渗流计算问题，其研究内容主要包括：地下水在含水层的稳定运动和非稳定运动；地下水向井孔的稳定运动和非稳定运动理论。由于生产的不断发展，研究地下水运动的新领域不断扩展，如非饱和理论、双重介质渗流理论、咸淡水界面的运移理论、弥散理论等已逐渐成为地下水动力学研究的重要内容。

地下水动力学的研究是以数学、物理学及水力学等学科理论为基础，应用数学分析和模拟试验等一系列的方法进行综合研究。主要研究方法有：解析法、数值法、物理模拟法等。

地下水动力学的理论应用非常广泛。随着我国社会主义现代化建设事业的发展，地下水的合理开发、利用与管理显得日益重要。地下水动力学与水文地质学的其他学科配合起来，正在用来解决国民经济建设中的许多重大问题和生产实际问题。地下水动力学的应用大体上可归纳为以下几个方面：

1) 水资源是人类赖以生存发展的物质基础，地下水是水资源的重要组成部分，是十分宝贵和有限的水资源。地下水动力学着重研究如何计算、评价、预测地下水的水量和水质，如何合理、科学、经济有效地开发利用地下水，保护地下水资源。

2) 在人类生产活动中，为克服地下水产生的负面效应，对矿山采矿、建筑基础施工和防止土壤盐渍化、沼泽化等方面引起的降低地下水位和土壤改良等问题作出相应的计算和论证。

3) 在水利水电工程建筑中，对涉及坝基渗漏，绕坝渗漏，库区渗漏，库岸地下水壅水以及渠道渗漏等问题的定量计算和研究。

4) 环境地质保护与地质灾害防治方面的研究。例如：不合理开采地下水导致地下水资源枯竭、泉水消失、海水（咸水）入侵、地面沉降、地面（岩溶）塌陷、土地沙漠化、水质恶化、生态环境退化、滑坡中的地下水活动和对核废料地质处理等问题的论证、计算、评价（包括演化趋势的预测和防治措施的论证等）。

5) 把含水层当作地下库进行“贮冷”（冬灌夏用）、“贮热”（夏灌冬用），为此需要应用地下水动力学理论，研究热量的运移问题。

6) 水动力弥散、污染物运移预测计算等。

7) 其他有关方面的应用。

## 二、地下水动力学的发展概况

地下水动力学的形成和发展与其他学科一样，与人类的生产、生活和实际需要密切相关，是在生产实践和实际需要中逐步形成和发展的，是人们在利用地下水或者同地下水危害作斗争的长期生产实践中的经验总结。

由于地下水运动问题本身的复杂性和受生产力发展水平的限制，尽管人类利用地下水已有几千年的历史，但对地下水运动规律的认识和学科的发展却经历了很长的历史过程。

1) 19世纪中叶提出的达西定律，奠定了地下水计算的基础。19世纪中叶，随着地下水开发利用规模的扩大，生产中有了计算水井涌水量的要求。1856年法国水力工程师达西(H. Darcy)通过长期实验(水在砂柱中的渗透实验)，得出了水在孔隙介质中渗透的基本定律，即著名的达西定律。这个定律是定量认识地下水运动的开始，直到今天仍然是地下水运动理论的基础，是地下水动力学中最基础、最重要的定律。

2) 19世纪中后期，形成了以裘布依公式为代表的稳定流理论。1863年，法国水力工程师裘布依(J. Dupuit)以达西定律为基础研究了一维稳定流动和向水井的二维稳定运动，提出圆岛状含水层中心一口完整抽水井条件下的地下水稳定流动的方程和计算公式。19世纪80年代，福希海默(P. Forchheimer)研究了干扰井、非完整井等更复杂的稳定流问题，从而奠定了地下水稳定流理论的基础。1904年，法国水利学家布西涅斯克(J. Boussinesq)导出潜水非稳定流的微分方程。19世纪末，苏联学者卡明斯基提出了非均质含水层中地下水的稳定运动理论，建立了潜水稳定运动的有限差分方程。此后数十年，地下水动力学一直沿着稳定流理论发展，在生产实践中起了重要作用。直到今天，稳定流理论仍有很大的实用价值。但这种理论不包括时间这个变量，因而不能反映不断发展、变化的地下水实际运动状态，只能用来描述在一定条件下，地下水所达到的一种暂时的相对的平衡状态，有一定的局限性，这是与当时生产力发展水平相适应的。在开采量不大或有补给边界的条件下，井中水位一般说来会很快出现似稳定状态，因而可以近似地认为地下水不随时间变化，可用稳定流理论进行计算。

3) 自1935年开始，形成了以泰斯公式为代表的非稳定流理论。20世纪20年代末期，美国地下水的开采规模越来越大，地下水的天然状态不断受到破坏，一些地区地下水位出现持续下降，地下水的运动状态表现出明显的随时间变化的特征，于是人们开始注意地下水运动的不稳定性和承压含水层的贮水性质。1935年，美国学者泰斯(C. V. Theis)，在数学家的帮助下，利用热传导方程首次提出了地下水向承压水中的非稳定流公式，即著名的泰斯公式。泰斯公式的出现使地下水动力学的发展进入了一个新阶段，开创了现代地下水运动理论的新纪元，具有里程碑的意义。泰斯公式不仅把含水层视为导水层，同时也视为近似弹性体的贮水层，这不仅在理论上，而且在实际应用上为研究地下水向井孔的非稳定运动理论的发展奠定了基础。在泰斯公式出现以后的三四十年来，非稳定流解析法得到了很大发展，对泰斯公式的使用作了各种推广，导出了不同条件下的新公式，扩大了泰斯公式的应用范围。20世纪50年代，雅各布(C. E. Jacob)、汉图什(M. S. Hantush)等人提出了越流补给条件下的非稳定井流公式，在地下水动力学发展历史上具有非常重要的意义。稍后又出现了考虑潜水含水层滞后疏干效应的博尔顿(N. S. Boulton)公式、纽曼(Neuman)公式和非完整井的非稳定流公式，使得非稳定井流公式的应用更加广泛。事实



上,地下水运动的非稳定流理论,不仅可以研究地下水运动状态随时间的变化过程,而且可以把稳定流理论作为非稳定流理论在某些条件下的特例。正由于此,非稳定流理论更符合生产实际。但由于实际水文地质条件较解析法所依据的假设条件(含水层均质各向同性,形状较规则等)要复杂得多,所以,当把稳定流或非稳定流解析法应用于大范围的含水层时,其局限性较大。换言之,解析法难以描述非均质含水层中和复杂条件下的地下水运动规律。

4) 20世纪40~60年代,地下水模拟方法技术开始应用。20世纪50年代末期,出现了以电网络模拟为代表的模拟技术(主要有水电模拟、 $R-R$ 模拟方法、 $R-C$ 模拟方法等),到60年代初,它已成为解决大范围含水层系统的有力工具。60年代中后期,随着快速大容量电子计算机的出现和广泛使用,人们开始把数值模拟应用到地下水计算中来,很快地下水数值算法(主要是有限差分法与有限单元法)在地下水计算中得到了推广和较快发展,解决了非稳定流解析法计算中难以解决和复杂条件下的水文地质计算问题。同电网络模拟相比,数值模拟迅速显示出巨大的优越性,不仅易于处理电网络模拟不易处理的潜水流问题和无法处理的溶质运移问题,而且其本身又有很大的通用性。因此,目前在发达国家,数值模拟已完全代替了电网络模拟,后者已经被淘汰了。数值方法不仅可以有效地解决地下水流问题,还能解决污染物在地下水中的运移问题、咸-淡水分界面移动问题及地下水的最佳管理问题等。

总之,100年来,地下水动力学理论有了很大的发展。主要是:①解析法有了很大发展。目前,解析法主要有分离变量法、积分变换法、保角映射法、速端曲线法、格林(Green)函数法、镜像法等。它们分别适合于解不同类型的地下水运动问题。②数值法也发展了多种方法,如有限差分法、有限单元法、边界元法、有限分析法、特征线法、混合有限元法、多尺度有限元法等。实际上,在解决地下水流问题时,应用数值法所显示出来的计算能力已远远超过我们为此搜集计算机输入所需野外资料的能力。总的说来,近20多年来,随着计算机和计算技术的进步,人们在分析地下水问题的能力上有了突破性的进展。美国地质调查局开发的用于孔隙介质中地下水流动的三维有限差分数值模拟软件MODFLOW及加拿大水文公司研制的用于进行地下水三维流动及溶质(污染物)运移数值模拟与可视化软件Visual MODFLOW在国内外都很流行,从而使得地下水模拟已开始向标准化、规范化方向发展。近10多年来,介质非均质性的研究逐渐引起人们的重视,并取得长足进步。我国的地下水研究工作,无论在理论上还是在实际上都已接近和达到世界先进水平。

尽管地下水动力学有了很大发展,但还有不少薄弱环节和不足。随着人类活动的加强,出现了许多有关地下水运动方面的新课题。预计今后的研究将着重放在突破这些薄弱环节和新课题上。其中主要有:地下水在裂隙介质、岩溶介质中运动机制和基础运动规律的研究,非饱和带水、盐运动理论的研究,水中溶质运动机制和运移理论的研究,热量在地下水中运移的研究,地下水最佳管理问题的研究和介质非均质性研究等。除了继续加强解析法的研究外,对有效地解决各种实际渗流问题的数值模拟方法进行研究将是一个主要的方面。随机理论还会进一步引入到水流和溶质运移研究中来。

水文地质学和其他学科一样,都是随着生产的不断发展而逐步趋向成熟的。国民经济建设中有许多问题,需要利用水文地质学方法去解决,而且面临的各类水文地质问