



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

DIXIASHUI DONGLIXUE

地下水动力学 (第三版)



● 主编 薛禹群 吴吉春

地质出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

地下水动力学

(第三版)

主编 薛禹群 吴吉春

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书叙述了地下水运动的基本原理、计算方法和实验方法。全书共分9章,内容包括渗流理论基础,区域地下水流问题,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,地下水向不完整井的运动,非饱和带的地下水运动,地下水中的溶质(污染物)运移和热量运移,研究地下水运动的物理模拟方法。

本书是在1997年出版的《地下水动力学》(第二版)的基础上修编而成的。编者对原书中的一些内容进行了删改,部分进行了更新,并补充了一些最新的研究成果。

本书可作为高等院校相关专业学生的学生用书,也可供水文地质科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水动力学 / 薛禹群等主编. —3版. —北京:
地质出版社, 2010. 3
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-116-06499-7

I. ①地… II. ①薛… III. ①地下水动力学-高等学校-教材 IV. ①P641.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第027848号

责任编辑:李惠娣
责任校对: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
传 真:(010)82324340
印 刷:北京地质印刷厂
开 本:787mm×1092mm $\frac{1}{16}$
印 张:15.25 插图:6
字 数:370千字
印 数:1—3000册
版 次:2010年3月北京第3版·第1次印刷
定 价:22.80元
书 号:ISBN 978-7-116-06499-7

(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)

前 言

地下水动力学是地下水科学与工程、水文与水资源工程等专业的一门基础理论课。学习本课程目的在于掌握地下水运动的基本理论，能初步运用这些理论分析水文地质问题，建立相应的数学模型并提出适当的计算方法，对地下水资源进行定量评价，预测地下水污染的发展趋势，控制地下水污染。本课程要求学生重点掌握各种条件下地下水水流方程和溶质运移方程的原理，以及稳定流和非稳定流解析解的原理和计算方法，深刻理解其适用条件。

早在1979年，薛禹群、朱学愚就编写并出版了文化大革命后我国第一本《地下水动力学》教材，至今已30年有余。1981年6月，地质矿产部水文地质学教材编审委员会第一次会议制订了地下水动力学课程教学大纲。根据这个大纲编写的普通高等学校地质矿产类规划教材《地下水动力学原理》于1986年12月正式出版，这是本教材的第一版。此后，1997年9月又出版了它的修订本《地下水动力学》（第二版）。它们都受到广大师生、水文地质科研人员和工程技术人员的欢迎和高度评价，曾多次重印。时过境迁，随着地下水科学的发展，课程教学计划已有了很大调整，教材的修订不仅必要，而且必须。但原书的基本风格、基本内容以及它的严谨性仍应继承，并尽量汲取近年来国内外新的研究成果，同时根据新的专业特点作适当调整。

考虑到现有教学计划一般都有水力学课程，所以附录“水力学基础”已经删除。模拟法除保存部分相似基础和砂槽模拟外，其余也一并删除。同时，根据学科发展和地下水污染日益严重的事实，把原来“地下水运动中的若干专门问题”分为两章论述，以加强非饱和带地下水运动和地下水中溶质运移部分。海水入侵本质上是溶质运移，所以并入新增的溶质运移一章中；双重介质学说则作为基础理论放入第1章中。另一方面，不再局限于地下水向河渠的运动，改为更广阔的区域地下水流问题，包含基本的水工建筑物附近地下水运动。贮水系数、贮水率的符号也根据国际惯例作了更改。这样本教材共9章。第1章介绍渗流基本概念、基本定律、基本方程、定解条件及数学模型的建立和解法，是全书的基本理论部分和重点内容之一，要求学生深入理解和牢固掌握；第2章为区域地下水流问题；第3章、第4章、第5章、第6章全面介绍了地下水向井的运动和求参数的方法，其中第3章、第4章的地下水向完整井的稳定和非稳定运动也是本教材重点内容之一；第7章、第8章介绍非饱和带中地下水的运动和地下水中的溶质运移和热量运移；第9章则扼要介绍模拟方法。考虑到参与本书第一版、第二版编写的同志都已退休，如果从各校再组织一些新同志来修编，由于不熟悉原书风格，不仅他们会有困难，而且根据以往经验，还会增大主编将来统稿修改的工作量。为此，根据地质出版社提出的修编意见，在向相关院校师生广泛征询对原书修改意见的基础上，修订工作由我们代劳。但参与本书第一版、第二版写作的同志的功绩是永远应该牢记的，是他们奠定了本书的基础，现在的工作只是

在他们的基础上根据时代要求进行了修改。

本书的著作权始终是包括他们在内的所有作者的。他们是：第一版，南京大学薛禹群（主编）、朱学愚；长春地质学院刘金山、贾贵庭。第二版，南京大学薛禹群（主编）、朱学愚、吴吉春；长春地质学院李同斌、林绍志；河北地质学院贾贵庭。

时光流逝，对于一个向八旬迈进的老人来说，显然已不可能像第三版这样，十多年后，再自主编这本书的第四版了，但地下水动力学的教学还要继续下去，显然，只有依靠年轻同志来完成这项工作了。为了保持工作的连续性，本版为此增加了一位主编，这是需要向第一版、第二版的老同志说明并请给予理解的。

编者对所有为本书修改、出版付出辛勤劳动的同志致以衷心的感谢。本书内容涉及面广，不当之处在所难免，恳请读者给予指正。

薛禹群
2010年1月

第二版前言

地下水动力学是水文地质或水文地质工程地质等专业的一门重要的专业基础理论课。学习本课程的目的，在于掌握地下水运动的基本理论，并能初步运用这些基本理论分析水文地质问题，建立相应的数学模型和提出适当的计算或模拟方法，对地下水资源进行定量评价。本课程要求学生重点掌握各种条件下地下水稳定流和非稳定流的解析解的原理和方法，深刻理解其适用条件。

根据1981年6月在武汉召开的地质矿产部水文地质学教材编审委员会第一次会议上制订的本课程教学大纲，于1986年12月出版的《地下水动力学原理》一书发行几年来，得到了广大师生、水文地质科研人员和工程技术人员的欢迎和高度评价，曾几度重印。同时，读者也诚恳地指出了该书篇幅过多及部分内容过深的不足。因此，我们根据这几年的教学实践和学科发展，对该书进行了全面修编；并应出版社要求，将篇幅压缩1/4左右。但原书的基本风格和基本内容仍保持不变，并尽可能汲取国内外最新研究成果。

本教材共八章。第一章介绍渗流基本概念、基本定律、基本方程、定解条件及数学模型的建立和解法，这是全书的基本理论部分和重点内容之一，要求学生深入理解并牢固掌握；第二章为地下水向河渠的运动；第三章、第四章、第五章、第六章全面介绍了地下水向井的运动和求参数的方法，其中第三章、第四章是地下水向完整井的稳定和非稳定运动，也是本教材重点内容之一；第七章介绍了本学科中几个重要新领域中一些主要问题；第八章为研究地下水运动的实验室方法；本书最后附有“水力学基础”，是学习地下水动力学须先行掌握的基础知识。

参加这次修编的有南京大学的薛禹群、朱学愚、吴吉春，长春地质学院的李同斌、林绍志和河北地质学院的贾贵庭。绪言，第一章，第四章第4节，第七章第2节、第3节、第4节，以及符号与量纲的说明由薛禹群、吴吉春执笔；第五章、第七章第1节和附录由朱学愚执笔；第二章，第四章第1节、第2节、第3节、第4节由贾贵庭执笔；第三章、第六章由李同斌执笔；第八章由林绍志执笔。最后由主编薛禹群在吴吉春的协助下，统一修改、编撰、定稿。其中的三章，由于与第一版相比，初稿改动甚少，不符合出版要求，最后定稿时主编作了较大改动，以压缩篇幅。1994年5月，水文地质课程教学指导委员会对本教材进行了全面评审。会后由薛禹群根据会上提出的意见统一作了修改，最后定稿。

编者对所有为本书审订、修改、出版付出辛勤劳动的同志致以衷心感谢。本书内容广泛，不当之处在所难免，恳请读者给予指正。

编者

1997年1月

· III ·

第一版前言

地下水动力学是水文地质或水文地质工程地质等专业的一门重要专业基础理论课。学习本课程目的在于掌握地下水运动的基本理论，能初步运用这些基本理论分析水文地质问题，并能建立相应的数学模型和提出适当的计算或模拟方法，对地下水进行定量评价。本课程要求学生重点掌握各种条件下地下水稳定流和非稳定流的解析解的原理和方法，深刻理解其适用条件。

本教材是根据1981年6月在武汉召开的地质矿产部水文地质学教材编审委员会第一次会议上制订的本课程教学大纲编写的。考虑到从制订大纲到本教材出版，中间有五六年时间，情况已有很大变化，故在编写本教材时，根据现代地下水动力学的发展，对少数章节作了少量调整，如适当增加了有关渗透系数张量、水动力弥散（地下水污染问题）和非饱和带中地下水运动的内容，以适应现代科学的发展。各校在讲授时可视具体情况灵活掌握。

本教材共八章。第一章介绍渗流基本概念、基本定律、基本方程、定解条件、数学模型的建立和解法，这是全书的基本理论部分和重点内容之一，要求学生深入理解并牢固掌握；第二章为地下水向河渠的运动；第三章、第四章、第五章、第六章全面介绍了地下水向井的运动和求参数的方法，其中第三章、第四章是地下水向完整井的稳定和非稳定运动，也是本教材重点内容之一；第七章介绍了本学科中几个主要的新领域中的一些主要问题；第八章为研究地下水运动的实验室方法；本书最后附有“水力学基础”，作为学习地下水动力学的先行基础知识。

本教材由南京大学和长春地质学院合编。绪言，第一章，第二章第4节，第四章第4节，第七章第2节、第3节、第4节由薛禹群执笔；第一章、第三章、第五章，第七章第1节和附录由朱学愚执笔；第二章第1节、第3节、第4节，第四章第1节、第2节、第3节、第4节由贾贵庭执笔；第六章由腾绪金执笔；第八章由刘金山执笔。最后由薛禹群统一修改、编撰、定稿。1985年9月，在水文地质学教材编审委员会大连会议上对本教材进行了全面评审。会后由薛禹群根据会上提出的意见统一修改，最后定稿，并编写了符号说明和索引。

本书图件由郑意春清绘，张彩霞植字。编者对所有为本书审订、修改、出版付出了辛勤劳动的同志，对地质矿产部水文地质学教材编审委员会致以衷心感谢。由于本书内容广泛，不当之处在所难免，恳请读者予以指正。

编者

1986年1月

符号与量纲

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
A	面积	L^2	E_0	水面蒸发强度	LT^{-1}
a	相对粗糙度		g	重力加速度	LT^{-2}
	压力传导系数	L^2T^{-1}	H	总水头、水头	L
B	宽度或距离	L		孔隙中水头	L
	越流因素	L	H_f	裂隙中水头	L
b	裂隙宽度	L	H_n	测压管水头	L
C	井损常数	$L^{-5}T^2$	H_0	水头初值, 潜水流初始厚度	L
	容水度	L^{-1}		咸淡水界面坡脚处的潜水水位	L
	多孔介质热容量	$ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$		作用水头, 上下游水头差	L
C_w	水的热容量	$ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$	H_r	上下游总水头差	L
c	浓度	ML^{-3}	\bar{H}	平均水头	L
c_0	含示踪剂液体的浓度	ML^{-3}	H^*	浸润面上的水头	L
	初始浓度	ML^{-3}	h	液柱高度	L
c_s	与最大密度 (ρ_s) 对应的浓度	ML^{-3}		潜水流厚度	L
c^*	注入水的浓度	ML^{-3}		等效淡水水头 (参考水头)	L
\bar{c}	第一类边界上给定的浓度	ML^{-3}		咸淡水界面在隔水顶板以下深度	L
D	水动力弥散系数 (弥散系数)	L^2T^{-1}	h_c	毛管压力水头	L
	疏干因素	L	h_f	淡水高出海平面的高度	L
	扩散系数	L^2T^{-1}	h_m	潜水流平均厚度	L
D'	机械弥散系数	L^2T^{-1}	h_s	淡咸水界面位于海平面下的深度	L
D''	多孔介质中的分子扩散系数	L^2T^{-1}		井壁水位	L
D_d	溶液中的分子扩散系数	L^2T^{-1}	h_w	井中水位	L
D_L	纵向弥散系数	L^2T^{-1}	I	水动力弥散单位时间通过单位面积的溶质质量	$ML^{-2}T^{-1}$
d	直径	L	I'	机械弥散单位时间通过单位面积的溶质质量 (弥散通量)	$ML^{-2}T^{-1}$
	含水层颗粒平均粒径	L	I''	分子扩散单位时间通过单位面积的溶质质量 (扩散通量)	$ML^{-2}T^{-1}$
	含水层顶板到过滤器顶部距离	L			
	隔水顶板到海平面的垂直距离	L			
E	蒸发强度	LT^{-1}			

符号	说明	量纲
$I_v(x)$	第一类 v 阶虚宗量 Bessel 函数	
i	斜率	
i_E	早期直线段斜率	
i_L	后期直线段斜率	
i_p	曲线拐点处斜率	
J	水力坡度	
$J_v(x)$	第一类 v 阶 Bessel 函数	
K	渗透系数	LT^{-1}
K_c	紊流时渗透系数	LT^{-1}
K_{cp}	平均渗透系数	LT^{-1}
K_d	垂向、水平渗透系数比值	
K_f	含水层对淡水的渗透系数	LT^{-1}
K_p	平行层面的（等效）渗透系数	LT^{-1}
K_r	水平径向渗透系数	LT^{-1}
K_v	垂直层面的（等效）渗透系数	LT^{-1}
K_s	垂向渗透系数	LT^{-1}
K^f	裂隙渗透系数	LT^{-1}
K_1, K_2	弱透水层 1, 2 的渗透系数	LT^{-1}
K^0	淡水条件下的渗透系数	LT^{-1}
$K_v(x)$	第二类 v 阶 Bessel 函数	
k	渗透率	L^2
k_r	相对渗透率	
L	潜水面埋深	L
l	距离, 长度	L
	过滤器长度	L
	海水入侵深度	L
l'	含水层顶板到过滤器底部距离	L
l_0	起始断面到承压流转为无压流处距离	L
M	含水层厚度	L
	(层状含水层) 总厚度	L
m	质量	M
	水头带数目	
m_1, m_2	弱透水层 1, 2 的厚度	L
	过滤器中部至隔水顶、底板的距离	L

符号	说明	量纲
m_0	过滤器中部至隔水底板的距离	L
n	孔隙度	
	外法线方向	
	降深次数、流带数目、井数	
n_e	有效孔隙度	
n_x, n_y, n_z	外法线方向单位矢量在各坐标轴上投影	
P	压力	MLT^{-2}
Pe	Peclet 数	
p	压强	$ML^{-1}T^{-2}$
p_a	大气压强	$ML^{-1}T^{-2}$
p_c	毛管压强	$ML^{-1}T^{-2}$
p_w	水的压强	$ML^{-1}T^{-2}$
Q	流量 (涌水量)	L^3T^{-1}
Q_{pf}	单位体积含水层单位时间从孔隙流入裂隙的水量	T^{-1}
Q_r	断面 r 处流量	L^3T^{-1}
q	单宽流量	L^2T^{-1}
	单位涌水量	L^2T^{-1}
	单位体积含水层中源或汇的流量	T^{-1}
q_0	流向海洋地下淡水单宽流量	L^2T^{-1}
R	影响半径	L
	水力半径	L
R_d	阻滞 (延迟) 因子	
Re	Reynolds 数	
Re_c	临界 Reynolds 数	
r	径向距离	L
r_w	水井半径	L
\bar{r}	无量纲距离	
r_1	观测孔到实井的距离	L
r_2	观测孔到虚井的距离	L
r^*	等效距离、等效半径	L
S	贮水系数	
	吸力	L
S_s	贮水率	L^{-1}
S^f	裂隙贮水系数	
S_s^f	裂隙贮水率	L^{-1}

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
S_w	饱和度		V_b	多孔介质样品总体积	L^3
S_{w0}	不能再降低的饱和度		V_i	入渗总量	L^3
s	水位降深或抬高	L	ΔV_0	典型单元体积 (REV)	L^3
	距离	L	V_s	固体颗粒体积	L^3
s_d	无量纲降深		V_v	孔隙体积	L^3
s_f	裂隙中水位降深	L	$(V_v)_e$	有效孔隙体积	L^3
s_p	停抽时刻水位降深	L	$(\Delta V_v)_0$	REV 中的空隙体积	L^3
s_P	拐点处水位降深	L	$(V_w)_0$	REV 中水的体积	L^3
s_w	抽水井中水位降深	L	v	断面平均流速	LT^{-1}
s'	剩余降深	L		渗流速度 (渗透速度、 比流量)	LT^{-1}
	修正后的水位降深	L	v_c	临界流速	LT^{-1}
s^*	停抽后任一时刻水位上 升值	L	W	单位时间单位面积上的入 渗量	LT^{-1}
T	导水系数	L^2T^{-1}		单位时间单位面积 (或 体积) 上垂向水量交换	LT^{-1} (或 T^{-1})
	温度	K		单位时间单位体积的抽 水量	T^{-1}
T_0	温度初值	K	W_R	单位时间单位体积的注 水量	T^{-1}
T_p	(平行层面) 等效导水 系数	L^2T^{-1}	x	坐标	L
T^f	裂隙导水系数	L^2T^{-1}	x_s	驻点坐标	L
T_1, T_2	弱透水层 1, 2 的导水 系数	L^2T^{-1}	x_w	抽水井到海岸的距离	L
t	时间	T	\bar{x}	无量纲距离	
t_E	抽水早期 $s-t$ 直线段在 $s_d=0$ 轴上的截距	T	y	坐标	L
t_L	抽水后期 $s-t$ 直线段在 $s_d=0$ 轴上的截距	T	y_s	驻点坐标	
t_p	主井停抽时间	T	z	坐标	L
t_P	拐点出现的时间	T		位置水头	L
t_n	自抽水开始至观测孔水位 下降速度为零的时间	T		标高	L
	无量纲时间		z_0	假想过滤器与真实过滤器 交点纵坐标	L
$t_{w,t}$	迟后重力排水已不再影响 降深的开始时间	T	α	多孔介质压缩系数	$M^{-1}LT^2$
	无量纲时间			延迟指数的倒数	T^{-1}
t_y	无量纲时间			水迁移系数	T^{-1}
t'	抽水停止后的恢复时间	T		多孔介质弥散度	L
\bar{t}	相对时间 (无量纲时间)			弥散度	L
u	流速	LT^{-1}	α_L	纵向弥散度	L
	实际流速	LT^{-1}	α_p	孔隙压缩系数	$M^{-1}LT^2$
\bar{u}	实际平均流速	LT^{-1}	α_s	有效岩石压缩系数	$M^{-1}LT^2$
V	体积	L^3	α_T	横向弥散度	L

符号	说明	量纲
β	液体体积压缩系数	$M^{-1}LT^2$
	热弥散度	L
Γ	研究区边界	
Γ_1, Γ_2	第一、第二类边界	
γ	容重	$ML^{-2}T^{-2}$
	承压水迁移系数	T^{-1}
γ_f	淡水容重	$ML^{-2}T^{-2}$
γ_s	海水容重	$ML^{-2}T^{-2}$
Δ	地下水埋深	L
	裂隙绝对粗糙度	
δ	表示水流通道形状特征的系数	
	咸淡水界面在海面以下深度为该处淡水高出海面高度的倍数	
	作用在多孔介质表面的压强	$ML^{-1}T^{-2}$
ε	密度差率	
η	密度耦合系数	L^3M^{-1}
θ	角度	
	含水率	
θ_0	不能再降低的含水率	
θ_s	饱和含水率	

符号	说明	量纲
λ	热动力弥散系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
λ_c	多孔介质热传导系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
λ_v	热机械弥散系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
μ	给水度或饱和差	
	动力黏滞系数	$ML^{-1}T^{-1}$
μ_t	淡水黏滞系数	$ML^{-1}T^{-1}$
ν	运动黏滞系数	L^2T^{-1}
$\xi, \xi_a,$	不完整井阻力系数	
ξ_b, ξ_0		
π	圆周率 3.1416	
ρ	密度	ML^{-3}
ρ_0	淡水密度	ML^{-3}
ρ_s	最大密度	ML^{-3}
σ	总应力	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_s	粒间应力	$ML^{-1}T^{-2}$
σ'	有效应力	$ML^{-1}T^{-2}$
	越流系数	T^{-1}
τ	抽水开始以后的时间	T
φ	势函数	L
	已知函数	
Ψ	流函数	L^2T^{-1}
ψ_i	注水井井壁温度	K

目 录

前 言	
第二版前言	
第一版前言	
符号与量纲	
绪 言	(1)
第 1 章 渗流理论基础	(3)
1.1 渗流的基本概念	(3)
1.1.1 地下水在含水岩石中的运动	(3)
1.1.2 地下水和多孔介质的性质	(3)
1.1.3 贮水率和贮水系数	(5)
1.1.4 渗流	(8)
1.1.5 渗流速度	(9)
1.1.6 地下水的水头和水力坡度	(10)
1.1.7 地下水运动特征的分类	(11)
1.1.8 地下水流态的判别	(12)
1.2 渗流基本定律	(13)
1.2.1 Darcy 定律及其适用范围	(13)
1.2.2 渗透系数、渗透率和导水系数	(15)
1.2.3 非线性运动方程	(17)
1.3 岩层透水特征分类和渗透系数张量	(17)
1.3.1 岩层透水特征分类	(17)
1.3.2 渗透系数张量	(18)
1.4 突变界面的水流折射和等效渗透系数	(19)
1.4.1 越过透水性突变界面时的水流折射	(19)
1.4.2 层状岩层的等效渗透系数	(20)
1.5 流 网	(22)
1.5.1 流函数	(22)
1.5.2 流网及其性质	(24)
1.5.3 流网的应用与土的渗透稳定性	(26)

1.6	渗流的连续性方程	(29)
1.7	承压水运动的基本微分方程	(31)
1.8	越流含水层中地下水非稳定运动的基本微分方程	(33)
1.9	研究潜水运动的基本微分方程	(35)
1.9.1	Dupuit 假设	(35)
1.9.2	Boussinesq 方程	(37)
1.10	双重介质渗流学说	(39)
1.10.1	基本假定	(39)
1.10.2	微分方程的建立	(40)
1.11	定解条件	(42)
1.11.1	边界条件	(43)
1.11.2	初始条件	(47)
1.12	描述地下水运动的数学模型及其解法	(47)
1.12.1	地下水流问题的数学模型	(47)
1.12.2	地下水流问题的解法	(50)
思考题		(51)
第2章 区域地下水流问题		(53)
2.1	河渠间地下水的稳定运动	(53)
2.1.1	潜水的稳定运动	(53)
2.1.2	承压水的稳定运动	(58)
2.1.3	坝基渗流和绕坝渗流	(59)
2.1.4	区域地下水流系统	(62)
2.2	河渠间地下水的非稳定运动	(62)
2.2.1	河渠水位迅速上升(或下降)为定值时,河渠间地下水的非稳定运动	(63)
2.2.2	河渠水位变化时,河渠间地下水的非稳定运动	(66)
2.2.3	应用分析	(66)
思考题		(69)
第3章 地下水向完整井的稳定运动		(70)
3.1	概 述	(70)
3.1.1	水井的类型	(70)
3.1.2	井附近的水位降深	(70)
3.2	地下水向承压水井和潜水井的稳定流动	(72)
3.2.1	承压水井的 Dupuit 公式	(72)
3.2.2	潜水井的 Dupuit 公式	(74)
3.2.3	Dupuit 公式的应用	(77)
3.2.4	Dupuit 公式的讨论	(78)

3.3	非线性流情况下的地下水向完整井的稳定运动	(80)
3.3.1	承压水井	(80)
3.3.2	潜水井	(80)
3.4	越流含水层中地下水向承压水井的稳定流动	(81)
3.5	流量和水位降深关系的经验公式	(85)
3.6	地下水向干扰井群的稳定运动	(88)
3.6.1	叠加原理	(88)
3.6.2	干扰井群	(91)
3.7	均匀流中的井	(94)
3.8	井损与有效井径的确定方法	(96)
思考题		(99)
第4章 地下水向完整井的非稳定运动		(100)
4.1	承压含水层中的完整井流	(100)
4.1.1	定流量抽水时的 Theis 公式	(100)
4.1.2	流量变化时的计算公式	(104)
4.1.3	Theis 公式的近似表达式	(104)
4.1.4	对 Theis 公式和与之有关的几个问题的讨论	(105)
4.1.5	利用 Theis 公式确定水文地质参数	(108)
4.1.6	定降深井流的计算	(114)
4.2	有越流补给的完整井流	(118)
4.2.1	基本方程	(118)
4.2.2	公式讨论	(119)
4.2.3	利用抽水试验资料确定越流系统的参数	(121)
4.3	有弱透水层弹性释水补给和越流补给的完整井流	(128)
4.3.1	基本方程	(128)
4.3.2	公式讨论	(132)
4.3.3	利用抽水试验资料确定水文地质参数	(133)
4.4	潜水完整井流	(133)
4.4.1	考虑迟后疏干的 Boulton 模型	(134)
4.4.2	考虑流速垂直分量和弹性释水的 Neuman 模型	(140)
思考题		(150)
第5章 地下水向边界附近井的运动		(152)
5.1	镜像法原理及直线边界附近的井流	(152)
5.1.1	镜像法原理	(152)
5.1.2	直线边界附近的井流	(153)
5.2	扇形含水层中的井流	(158)

5.2.1 象限含水层 (θ 角为 90°)	(159)
5.2.2 其他角度的扇形含水层	(161)
5.3 条形含水层中的井流	(162)
思考题	(164)
第6章 地下水向不完整井的运动	(165)
6.1 地下水向不完整井运动的特点	(165)
6.2 地下水向不完整井的稳定运动	(166)
6.2.1 半无限厚含水层中的不完整井	(166)
6.2.2 有限厚含水层中的不完整井	(169)
6.3 地下水向承压水不完整井的非稳定运动	(170)
6.3.1 基本方程	(170)
6.3.2 根据抽水试验资料确定水文地质参数	(173)
思考题	(175)
第7章 非饱和带的地下水运动	(176)
7.1 关于非饱和带水分的基本知识	(176)
7.1.1 含水率、饱和度和田间持水量	(176)
7.1.2 毛管压强	(177)
7.1.3 土壤水分特征曲线	(178)
7.1.4 非饱和流动中的给水度概念	(179)
7.2 非饱和带水运动的基本方程	(179)
7.2.1 运动方程	(179)
7.2.2 基本微分方程	(180)
7.3 入渗条件下的水分运动	(182)
7.3.1 入渗过程	(182)
7.3.2 垂直入渗的数学模型	(182)
7.3.3 Green-Ampt 模型及其解	(183)
7.3.4 垂直入渗条件下的 Philip 解法	(185)
7.4 蒸发条件下的土壤水分运动	(187)
7.4.1 基本概念	(187)
7.4.2 潜水的稳定蒸发	(187)
7.4.3 土壤水的非稳定蒸发	(190)
思考题	(190)
第8章 地下水中的溶质(污染物)运移和热量运移	(191)
8.1 溶质运移机理	(192)
8.2 弥散通量、扩散通量和水动力弥散系数	(195)
8.2.1 弥散通量和扩散通量	(195)

8.2.2 水动力弥散系数	(195)
8.3 对流-弥散方程(污染物的运移方程)及其定解条件	(199)
8.4 海岸带含水层中的咸淡水界面	(203)
8.4.1 作突变界面处理——静止界面的近似解	(203)
8.4.2 考虑过渡带的解法	(207)
8.5 多孔介质中的热量运移	(208)
思考题	(209)
第9章 研究地下水运动的物理模拟方法	(210)
9.1 模拟的相似基础	(210)
9.2 砂槽模拟	(211)
9.2.1 砂槽结构	(211)
9.2.2 砂槽模型	(212)
9.2.3 模拟方法	(213)
思考题	(213)
参考文献	(215)
中英文名词对照	(217)

绪 言

地下水动力学是研究地下水在孔隙岩石、裂隙岩石和喀斯特（岩溶）岩石中运动规律的科学。它是模拟地下水流基本状态和地下水中溶质运移过程，对地下水从数量和质量上进行定量评价和合理开发利用，以及兴利除害的理论基础。

地下水是一种十分宝贵的资源。从人们的日常生活到发展工业、农业，以至国防建设都需要地下水。这里不仅有正确评价水资源、合理布置取水建筑物的问题，还有如何既充分利用水资源又不致引起资源枯竭、出现地面沉降、海水入侵、水质恶化等环境问题；另外，地下水在一定条件下，有可能危及矿床开采及基坑、水坝的安全，也可使土壤发生次生盐碱化、沼泽化。如何预测未来的矿坑涌水量及土壤中水、盐动态，规划基坑排水、减压，降低坝底扬压力和坝脚地下水逸出速度等是因地制宜采取有效防范措施的重要依据。

随着生产的发展，还出现了许多与地下水有关的新课题，如在一些集中开采地下水的地区出现的区域性水位下降和部分地区出现的地面沉降（我国东、中部地区，沉降总面积已达 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ），海水入侵到正在被利用的含水层，“三废”的大量排放等导致地下水受到污染等。这些人为影响地下水的规模愈来愈大，正在使地下水资源在数量和质量上不断恶化，并引起其他方面的不良后果。我们的任务是根据地下水动力学的理论和方法估计并预测这些影响的规模和速度，以便提出相应的治理措施。此外，含水层可作为“贮冷”和“贮热”的地下库，为此需要研究热量的移动问题。

由于地下水运动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却经历了很长的历史过程。在 19 世纪以前，还谈不上对地下水进行科学的定量评价。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。达西（Henry Darcy）于 1856 年通过长期试验得出了水在多孔介质中的渗透定律，即著名的 Darcy 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。接着，J. Dupuit（1863）以 Darcy 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，以后 P. Forchheimer 等研究了更复杂的渗流问题，从而奠定了地下水稳定流理论的基础。此后数十年内，地下水动力学一直沿着这条道路前进，对生产实践起过重要作用。直到今天，稳定流理论仍有一定的适用价值。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，具有一定的局限性。这是与当时生产力水平相对较低有关。在开采量不大的情况下，井中水位一般来说很快会出现似稳定状态，因而可以近似地认为地下水不随时间变化，用稳定流理论来描述。

到 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