

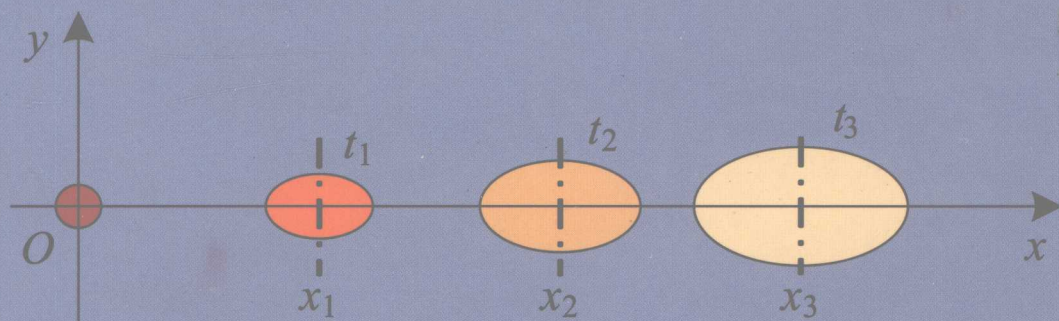


国家科学技术
学术著作出版基金资助

多孔介质污染物 迁移动力学

Dynamics of Fluid Flow and Contaminant Transport
in Porous Media

王洪涛 编著 by Hongtao Wang



高等教育出版社

**Dynamics of Fluid Flow and Contaminant
Transport in Porous Media**

by
Hongtao Wang

多孔介质污染物迁移动力学

王洪涛 编著

高等教育出版社

内容提要

本书系统论述了污染物在多孔介质中的迁移动力学。内容包括流体运动和污染物迁移的理论基础;水运动和污染物迁移的控制方程和数学模型;水运动数学模型的解析解;污染物迁移问题的解析解;求解水运动和污染物迁移数学模型的常用数值方法,即有限差分法和有限单元法;水运动和污染物迁移应用模拟的技术方法。另外本书还给出了相关内容的附录,以及名词的汉英对照表,方便读者查阅。本书在数值求解方法等多方面的诸多创新点反映了学科研究和发展的前沿,值得参考。

本书适合从事环境污染防治、水利工程、石油工程、地下水资源开发和管理、区域环境管理等方面工作的学生、教师和科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

多孔介质污染物迁移动力学/王洪涛编著. —北京:
高等教育出版社, 2008.3

ISBN 978-7-04-022267-8

I. 多… II. 王… III. 多孔介质-污染物-迁移-动力学 IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 190495 号

策划编辑 陈正雄 责任编辑 张海雁 封面设计 张申申
版式设计 陆瑞红 责任校对 杨雪莲 责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 850×1168 1/16
印 张 42
字 数 1 250 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 3 月第 1 版
印 次 2008 年 3 月第 1 次印刷
定 价 90.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22267-00

高等教育出版社自然科学学术出版中心

高等教育出版社是教育部所属的国内最大的教育出版基地,其自然科学学术出版中心下设研究生教育与学术著作分社和自然科学学术期刊分社,正努力成为中国最重要的学术著作出版单位和最大的学术期刊群出版单位。

研究生教育与学术著作分社充分发掘国内外出版资源,为研究生及高层次读者服务,已出版《教育部推荐研究生教学用书》、《当代科学前沿论丛》、《中国科学院研究生院教材》、《中国工程院院士文库》、《长江学者论丛》等一系列研究生教材和优秀学术著作。

自然科学学术期刊分社主要负责教育部大型英文系列学术期刊出版项目 *Frontiers in China* 中基础科学、生命科学、工程技术类期刊的出版工作,目标是搭建国内学术界与海外交流的平台,以及国内学术期刊界合作的平台。

地 址:北京市朝阳区惠新东街4号富盛大厦15层(100029)

网 址:<http://academic.hep.com.cn/>

购书电话:010-58581114/1115/1116/1117/1118

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

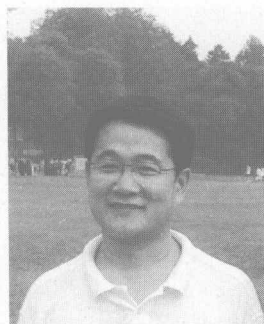
通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

作者简介



王洪涛, 1960年8月生, 辽宁本溪人, 博士, 清华大学教授, 博士生导师, 国家“863计划”资源环境技术领域主题专家。主要从事固体废物控制和污染物迁移动力学方面的教学和科研工作, 在生物反应器填埋技术、堆肥化技术、生物质能源转化(沼气、氢气、乙醇)技术和污染物迁移模拟治理等领域取得了积极的研究成果。主持“滇池流域面源污染控制-农村固体废物无害化处理技术研究”、“Sustainable Development of Rural Area in China”等国家专项, 国家“863计划”, 国家科技支撑计划和国际合作等项目多项。研究成果获省部级科技进步一等奖和三等奖5项。主编学术专著和教材4部, 参编3部。发表学术论文100余篇。获国家发明专利4项、软件著作权2项。为国际期刊 *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China* 编委。

前 言

多孔介质污染物迁移动力学是研究流体和污染物在多孔介质中运动与转化规律的科学。研究的对象是流体和随流体运动的污染物,物质运动的载体是具有相互连通空隙的多孔介质。流体运动研究的理论基础是 Darcy 定律,污染物迁移研究的理论基础是 Fick 定律。研究的方法包括数学分析方法、电模拟方法、试验分析方法等,本书侧重采用数学分析方法。

撰写本书的初衷,是为“多孔介质污染物迁移动力学”课程提供一本教材。多年来,作者在清华大学讲授“多孔介质污染物迁移动力学”课程,一直没有合适的教材可供使用。有鉴于此,作者开始查阅资料,总结教案,归纳科研成果,着手撰写本书,到成稿转眼就是几年的时间。学科发展,科技进步,日新月异。随之,书的深度和广度不断增加,百万余字已超出一本教科书的容量,但仍觉不够深透。

考虑到一些学生在学习“多孔介质污染物迁移动力学”课程之前并没有学习地下水水力学或地下水动力学方面的知识,而掌握流体在多孔介质中的运动规律是认识污染物迁移转化规律的基础,两者不可割裂,所以本书涉及了两方面的内容,第一方面是流体运动动力学,第二方面是污染物迁移动力学。

多孔介质中的流体包括液体和气体两大类,本书侧重讨论前者。在讨论非饱和带水分问题时,也涉及气态流体。液态流体的研究方法对于不可压缩气体也是适用的。多孔介质中的液态流体有多种类型,其中水和水溶液是最主要的,此外还有石油和其他液体如填埋场渗滤液等。水中的物质种类繁多,其化学成分主要分为天然成分和人为成分两部分。天然成分是水在天然环境中通过溶滤等作用而形成的化学成分;人为成分则是通过人类活动而直接或间接地引入地下水中的成分。水中的物质可有多种形态,包括溶解态、胶体态、悬浮态、混溶态等等,其中溶解态物质是我们讨论的重点。

多孔介质中的污染物是在多孔介质中存在的对人体或环境有直接或间接危害的物质。污染通常是指人类活动所造成的具有危害性的结果,并不包括自然作用,所以从严格意义上说,我们所指的污染物也是人为污染物质。但在很多情况下,流体中有危害性的物质究竟是在人为作用下产生的还是自然产生的并不容易划分开来,且两者可能叠加在一起,在这样的情况下,我们统称为污染物。

流体中的有些物质并不构成污染物,包括一些人为引入的物质在内,它们无论是对环境还是对人体健康都是无害的。由于这些物质是非污染物,因此它们的迁移、转化也不属于污染物迁移、转化讨论的范畴。然而,无论是污染物还是非污染物,其在多孔介质中的迁移、转化、滞留、衰减、消除等作用具有相同或类似的规律,可以按照同样的动力学理论加以描述。况且,污染物和非污染物也是相对的,对人体有益的物质未必对其他生物或环境也有益。因此,从强化环境污染防治的角度考虑,当我们讨论流体中物质迁移、转化时,我们

使用“污染物”这一术语统一称谓流体中的物质。

污染物是随流体一起运动的。在很多情况下,流体运动所产生的对流作用是污染物迁移的主要动力,因此,研究污染物迁移问题,离不开对流体运动问题的研究。当考虑流体运动时,我们使用“水流”或“流体”这样的术语,其中的污染物也是流体的组成部分,而不加区分。当我们考虑污染物迁移、转化问题时,我们把特定的污染物与流体分开讨论,分称为“水流”(或“流体”)和“污染物”。

多孔介质污染物迁移动力学是环境科学、水文地质学和工程地质学、土力学和土壤水力学、石油工程学等学科的重要理论基础,在环境污染防治、水利工程、石油工程、地下水资源开发和管理、区域环境管理等多方面得到了广泛应用。近年来,土壤和地下水污染呈加重趋势,已对我国农产品质量和生态环境质量构成严重威胁。土壤和地下水的污染源众多,美国环保局的研究报告列举的污染源有六大类30余种。工业污染源包括工业废渣、石油类、重金属类、放射性废物等,农业污染源包括农药、化肥、污水回灌等,生活类污染源包括生活污水、垃圾堆场和填埋场等,矿业污染源包括矿坑水和矿渣等,养殖业污染源包括养殖粪便和废水等,此外,滨海区抽取淡水造成的海水入侵也构成了地下水污染源。多孔介质污染物迁移动力学为揭示污染物在介质中的迁移规律奠定了基础,同时也为受污染土壤和地下水的修复提供了模拟分析方法。

本书共分七章。第一章讨论流体运动和污染物迁移的理论基础。第一章的内容包括多孔介质的定义、类型和性质;流体的物理力学性质;渗流的 Darcy 定律、分量表示式及其适用范围;各向异性渗透系数的计算方法;流函数、势函数和流网;包气带土壤性质和非饱和 Darcy 定律;污染物的对流迁移和水动力弥散;宏观弥散与尺度效应;污染物的吸附、解吸和滞留作用;等温吸附模式和非平衡吸附作用;多孔介质中的离子交换作用、化学生物反应、单相反应、化学平衡反应、动态化学反应、放射性衰变、父子链反应和多组分快速反应等。

第二章讨论水运动和污染物迁移的控制方程和数学模型,为以后各章节求解数学模型奠定基础。本章首先介绍数学模型方法,其次讨论水运动问题的控制方程和常用数学模型,包括承压水和潜水二维流微分方程、三维流微分方程、非饱和流微分方程、饱和-非饱和流联合微分方程和二维、三维问题的数学模型。再次讨论污染物迁移的对流弥散方程和含有吸附/解吸、化学生物反应、零阶和一阶源汇项的污染物迁移微分方程的一般形式,以此方程为基础可以得到各种条件下物质迁移、转化的控制方程。最后,讨论污染迁移问题的数学模型,包括初始条件、边界条件、常用数学模型等。

第三章讨论水运动数学模型的解析解,包括承压水和潜水含水层以及越流系统中水运动的一维稳定流和非稳定流解析解;完整井稳定流的 Dupuit 公式和越流系统中的稳定井流公式;叠加原理、干扰井群和双井系统问题;完整井非稳定流的 Theis 公式和大口径井流的 Papadopulos - Cooper 公式;各向异性介质中完整井流的 Papadopulos 模型解和 Hantush 方法;非稳定越流系统中的井流解析解;潜水井流的 Neuman 公式;镜像法原理和边界附近井流问题的解;水平井井流问题的解析解;标准曲线配线法和直线法等多种求参数方法。

第四章讨论污染物迁移问题的解析解,包括定浓度注入问题、瞬时注入问题和给定对流弥散通量问题的一维和二维迁移问题解析解;平面径向流场中污染物迁移问题的解析解;三维扩散问题的基本解和瞬时注入问题的解析解;点、线、面、体源作用下的二维和三维迁移问题的解析解库;多组分链式反应迁移问题的解析解和有机污染生物修复问题的降解去除率等。以解析解为基础,讨论了配线法、直线法、拐点法和弥散晕法等常规求参数方法,此外还给出了广为适用的试算拟合求参数方法。

第五章讨论求解水运动和污染物迁移数学模型的常用数值方法——有限差分法。本章的内容可分为两部分,第一部分是水运动问题和弥散作用为主污染物迁移问题的有限差分法,包括差分的概念、差分格式的收敛性及稳定性;一维、二维、准三维和三维水运动和污染物迁移问题的有限差分格式和求解方法;潜水问题、剖面问题和非饱和问题的数值方法;流函数模型的差分方程;含有吸附/解吸作用和多组分复合化学反应问题的数值方法等。第二部分在介绍数值解的振动与数值弥散的基础上,讨论对流作用为

主污染物迁移问题的有限差分法,包括上游加权法, Taylor 法,特征线法,数值误差修正方法,对流项的高精度差分格式,总变化趋小(TVD)方法和质点示踪法等。

第六章讨论求解水运动和污染物迁移数学模型的另一种常用数值方法——有限单元法。本章的内容也可分水运动问题和弥散作用为主污染物迁移问题的有限单元法和对流作用为主污染物迁移问题的有限单元法两部分。第一部分的内容包括求解一维水运动和污染物迁移问题加权余量 Galerkin 有限元法,求解二维问题的三角形单元法和等参数元法和求解三维问题的 Galerkin 有限元法等。第二部分的内容包括上游加权有限单元法,上游加权最小二乘法, Taylor - Galerkin 有限元法,算子分裂法,上游加权多单元均衡法,特征线分裂法以及混合有限元和有限差算子分裂法等。第五章和第六章详细讨论了水运动和污染物迁移问题的有限差分法和有限单元的基本方法,同时介绍了对流为主污染物迁移模型数值解法的最新进展。

第七章讨论了水运动和污染物迁移应用模拟的技术方法,包括确定模拟目的,获取信息,建立概念模型、数学模型和模拟模型,模型参数调试、校正和敏感性分析,模拟预报等。本章不仅逐次讨论了应用模拟的步骤,还给出了主要模型参数的参考值,并讨论了裂隙岩体等效渗透系数的确定方法。

衷心感谢对本书的撰写和出版做出贡献的人们。感谢英国 Cardiff 大学杨悦所博士对本书大纲制定、内容编写提出的建议和提供的资料;感谢聂永丰教授和刘建国副教授对本书提出的宝贵意见;感谢殷勇、黄得阳、杨仕建、赵岩、刘晋文、赵晨曦、沙涛、吴华勇、迟子芳在资料查阅、图件绘制、文字校对等方面所付出的劳动;感谢高等教育出版社对本书出版所给予的支持和付出的辛劳;最后,感谢我的家人的理解和支持。

本书可作为研究生教材,也可作为相关领域工程技术人员的参考书。受作者水平所限,书中难免有错误或不当之处,敬请批评指正。

王洪涛

2007年2月28日于清华园

符号和量纲表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
A	面积	L^2	c	形状因子	
	顶板高度	L	C	浓度	ML^{-3}
	电子受体的浓度	ML^{-3}		容水度	L^{-1}
A_0	电子受体的初始浓度	ML^{-3}	C_0	初始浓度	ML^{-3}
A_D	无量纲电子受体浓度			注入流体所含污染物的浓度	ML^{-3}
$A_{i,j}$	矩阵中的元素		$C_{0,x}$	稳定浓度	ML^{-3}
A_x	在垂直 x 方向上 A 的投影面积	L^2	C_1	第一类边界上的浓度	ML^{-3}
A_y	在垂直 y 方向上 A 的投影面积	L^2		算子分裂法弥散步浓度	ML^{-3}
a	压力传导系数	L^2T^{-1}	C_2	算子分裂法对流步浓度	ML^{-3}
	井到边界的垂直距离	L	C_b	形成稳定分布时注入流体浓度	ML^{-3}
$a_{i,j}$	系数矩阵 $[a]$ 中的元素		C_b	下边界浓度	ML^{-3}
B	底板高度	L	C_D	无量纲浓度	
	越流因素	L	C_e	注入液体所含污染物浓度	ML^{-3}
	$2D_L/u$	L	C_{fi}	第 i 裂隙上的污染物浓度	ML^{-3}
B_r	河床底高度	L	C_{fj}	第 j 裂隙上的污染物浓度	ML^{-3}
b	含水层厚度	L	C_i	初始浓度	ML^{-3}
b^β	含水层厚度在单元 β 上的值	L	C_i	网格 i 上的浓度	ML^{-3}
b_i	第 i 裂隙的水力开度	L		节点 i 上的浓度	ML^{-3}
	厚度在网格 i 上的值		$C_{i,j}$	网格 (i,j) 上的浓度	ML^{-3}
$b_{i,j}$	厚度在网格 (i,j) 上的值	L	$C_{i,j,l}$	网格 (i,j,l) 上的浓度	ML^{-3}
	列向量 $\{b\}$ 中的元素		C_j	节点 j 上的浓度	ML^{-3}
$b_{i,j,l}$	厚度在网格 (i,j,l) 上的值	L	C^k	第 k 时间步的浓度	ML^{-3}
b_j	右端项列向量 $\{b\}$ 中的元素		C_l	左边界浓度	ML^{-3}
$b_{i-\frac{1}{2}}$	厚度在网格 $i-1$ 与 i 间的值	L	C_m	最大浓度	ML^{-3}
$b_{i+\frac{1}{2}}$	厚度在网格 i 与 $i+1$ 间的值	L		连续介质域的污染物浓度	ML^{-3}

续表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
C_p	抽水井中的污染物浓度	ML^{-3}	D'	机械弥散系数	L^2T^{-1}
	点源作用下的最大浓度	ML^{-3}	D'_L	纵向机械弥散系数	L^2T^{-1}
C_R	无量纲浓度(C 与 C_0 的比值)			D_L 与滞留因子的比值	
Cr	Crount 数		D'_T	横向机械弥散系数	L^2T^{-1}
C_r	右边界浓度	ML^{-3}	D_{xx}	弥散系数张量的分量	L^2T^{-1}
C_s	固相浓度		D_{yy}		
C_u	上边界浓度	ML^{-3}	D_{zz}		
C_w	液体所含污染物浓度	ML^{-3}	D_{xy}		
C_{wi}	裂隙域注入液体的浓度	ML^{-3}	D_{xz}		
C_{wm}	连续介质域注入液体的浓度	ML^{-3}	D_{yx}		
C'	越流时间因数	T	D_{yz}		
C_m^*	m 组分在对流弥散步的浓度	ML^{-3}	D_{zx}		
$C_{i,j}^{k+1*}$	对流作用浓度	ML^{-3}	D_{zy}		
\bar{C}	浓度试探解	ML^{-3}	$D_{xx}(\theta)$	水分扩散度张量的分量	L^2T^{-1}
D	水动力弥散系数,弥散系数	L^2T^{-1}	$D_{yy}(\theta)$		
	水分扩散度	L^2T^{-1}	$D_{zz}(\theta)$		
D^*	有效扩散系数	L^2T^{-1}	$D_{xy}(\theta)$		
D_a	人工弥散系数	L^2T^{-1}	$D_{xz}(\theta)$		
D_d	扩散系数	L^2T^{-1}	$D_{yx}(\theta)$		
D_{ijk}	第 i 裂隙的弥散系数张量	L^2T^{-1}	$D_{yz}(\theta)$		
D_i	弥散系数在网格 i 上的值	L^2T^{-1}	$D_{zx}(\theta)$		
$D_{i,j}$	弥散系数在网格 (i,j) 上的值	L^2T^{-1}	$D_{zy}(\theta)$		
$D_{i,j}$	弥散矩阵元素		D'_x	D_x 与滞留因子的比值	L^2T^{-1}
$D_{i,j,l}$	弥散系数在网格 (i,j,l) 上的值	L^2T^{-1}	D'_y	D_y 与滞留因子的比值	L^2T^{-1}
Div	散度运算符		D'_z	D_z 与滞留因子的比值	L^2T^{-1}
D_m	连续介质域的弥散系数张量	L^2T^{-1}	$D_{i-\frac{1}{2}}$	弥散系数在网格 $i-1$ 与 i 间的值	L^2T^{-1}
D_n	数值弥散系数	L^2T^{-1}	$D_{i+\frac{1}{2}}$	弥散系数在网格 i 与 $i+1$ 间的值	L^2T^{-1}
D_p	蒸发带深度	L	d	源距顶面的距离	L
D_r	径向弥散系数	L^2T^{-1}		固体颗粒的平均粒径	L
D_L	纵向水动力弥散系数	L^2T^{-1}	E	贮水参数,等于 S 或 S_y	
D_T	横向水动力弥散系数	L^2T^{-1}	E_m	残差的方差	

续表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
E_s	标准误差			连续介质域	
E_s	多孔介质的弹性模量	$ML^{-1}T^{-2}$		重量	
E_w	水的弹性模量	$ML^{-1}T^{-2}$		降解单位质量碳氢化合物的用氧量	$M_0M_C^{-3}$
e	单元计数符号		G_i	第 i 裂隙的计算域	
e_N	以 j 节点为顶点的单元数		Grad	梯度运算符	
erf	误差函数		\bar{G}	离散后的研究域	
erfc	余误差函数		g	重力加速度	LT^{-2}
exp	e 指数函数			第三类边界对流弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$
e_{3j}	以 j 为顶点且含第三类边界边的单元数			第三类边界对流弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$
F	水动力弥散通量	$ML^{-2}T^{-1}$		污染物注入通量	$ML^{-2}T^{-1}$
	附加阻力系数		g_0	污染物注入的初始通量	$ML^{-2}T^{-1}$
F_r	附加阻力系数		g_b	下边界对流弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$
F_a	对流量	$ML^{-2}T^{-1}$		下边界对流弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$
$F(y)$	正态概率积分		g_{fi}	裂隙域第三类边界上的对流弥散通量	$ML^{-1}T^{-1}$
F_d	扩散通量	$ML^{-2}T^{-1}$	g_l	左边界对流弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$
F_j	列向量 $\{F\}$ 的元素			左边界对流弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$
F_m	机械弥散通量	$ML^{-1}T^{-1}$	g_r	右边界对流弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$
f	第二类边界弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$		右边界对流弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$
	第二类边界弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$	g_u	上边界对流弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$
f_{fi}	裂隙域第二类边界上的弥散通量	$ML^{-1}T^{-1}$		上边界对流弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$
f_l	左边界弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$	H	总水头, 水头	L
	左边界弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$	H_0	初始水头	L
f_{oc}	介质中的有机碳含量		$H_{0,1}$	左断面初始水头	L
f_r	右边界弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$	$H_{0,2}$	右断面初始水头	L
	右边界弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$	$H_{0,x}$	断面间稳定水头	L
f_u	上边界弥散通量(一、三维)	$ML^{-2}T^{-1}$	H_1	第一类边界上的水头	L
	上边界弥散通量(二维)	$ML^{-1}T^{-1}$	H_1	左断面水头	L
G	研究域	MLT^{-2}	H_2	右断面水头	L

续表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
H_b	下边界水头	L	h_m	分水岭处水位	L
H_{G_i}	第 i 裂隙上的水头	L	h_u	微生物降解能力常数	$M_c M_M^{-1} T^{-1}$
H_{G_j}	第 j 裂隙上的水头	L	h_{ua}	厌氧微生物降解能力常数	$M_c M_M^{-1} T^{-1}$
H_i	网格 i 上的水头	L	h_w	井中水位	L
	节点 i 上的水头	L	I	迁移问题的源汇强度	$ML^{-3} T^{-1}$
$H_{i,j}$	网格 (i,j) 上的水头	L	I_c	抑制因子	ML^{-3}
$H_{i,j,l}$	网格 (i,j,l) 上的水头	L	I_i	污染源汇强度在网格 i 上的值	$ML^{-3} T^{-1}$
H_j	节点 j 上的水头	L	$I_{i,j,l}$	污染源汇强度在网格 (i,j,l) 上的值	$ML^{-3} T^{-1}$
H^k	第 k 时间步的水头	L	I^k	污染源汇强度在 k 时间步的值	$ML^{-3} T^{-1}$
H_1	左边界水头	L	I_M	二维迁移问题的源汇强度	$ML^{-2} T^{-1}$
H_m	连续介质域的水头	L	$I_{M,i,j}$	污染源汇强度在网格 (i,j) 上的值	$ML^{-2} T^{-1}$
H_u	上边界水头	L	$I_v(x)$	第一类 v 阶修正的 Bessel 函数	
H_w	井中水头	L	I'	I 与滞留因子的比值	$ML^{-3} T^{-1}$
H_r	河水位	L	I_M^k	污染源汇强度在 k 时间步的值	$ML^{-2} T^{-1}$
	右边界水头	L	I_M^β	污染源汇强度在单元 β 上的值	$ML^{-2} T^{-1}$
\bar{H}	水头试探解	L	I_m^v	污染物体状源汇强度	$ML^{-3} T^{-1}$
h	压力水头	L	I_p^v	污染物点状源汇强度	MT^{-1}
	潜水含水层厚度, 潜水位	L	I_a^β	污染物面状源汇强度	$ML^{-2} T^{-1}$
h_0	潜水含水层初始厚度	L	I_l^v	污染物线状源汇强度	$ML^{-1} T^{-1}$
	初始压力水头	L	i	直线斜率	
$h_{0,1}$	左断面初始水位	L		计数符号	
$h_{0,2}$	右断面初始水位	L	i	单位坐标矢量	
$h_{0,x}$	断面间稳定水位	L	i_p	拐点处的斜率	
h_1	第一类边界上的压力水头	L	J	水力梯度, 也称水力坡度	
	左断面水位	L	J_0	启动水力梯度	
h_2	右断面水位	L	J_c	浓度梯度	ML^{-4}
h_c	毛细上升高度	L	$J_v(x)$	第一类 v 阶 Bessel 函数	
h_i	节点 i 上的潜水层厚度	L	J_x	水力梯度 J 的 x 坐标分量	
$h_{i,j}$	网格 (i,j) 上的潜水层厚度	L	J_y	水力梯度 J 的 y 坐标分量	
h^k	第 k 时间步的潜水层厚度	L	J_z	水力梯度 J 的 z 坐标分量	

续表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
j	计数符号		K_{xy}		
\mathbf{j}	单位坐标矢量		K_{xz}		
K	渗透系数	LT^{-1}	K_{yx}		
$K(\theta)$	非饱和渗透系数	LT^{-1}	K_{zx}		
$K(h)$			K_{yz}		
$K_\nu(x)$	第二类 ν 阶修正的 Bessel 函数		K_{zy}		
K_a	厌氧条件下碳氢化合物的半饱和和浓度	ML^{-3}	K'	弱透水层的渗透系数	LT^{-1}
K_A	电子受体的半饱和浓度常数	ML^{-3}	$K_{i+\frac{1}{2}}$	渗透系数在网格 i 与 $i+1$ 间的值	LT^{-1}
K_C	碳氢化合物的半饱和浓度常数	ML^{-3}	$K_{i-\frac{1}{2}}$	渗透系数在网格 $i-1$ 与 i 间的值	LT^{-1}
K_d	分配系数	L^3M^{-1}	$K'_{i,j,l}$	弱透水层渗透系数在 (i,j,l) 上的值	LT^{-1}
K_{eq}	平衡常数		k	渗透率	L^2
K_{ex}	热力学平衡常数			计数符号	
K_f	Freundlich 吸附常数		\mathbf{k}	单位坐标矢量	
K_{fi}	第 i 裂隙渗透系数	LT^{-1}	L	长度, 距离	L
K_h	水平方向上的渗透系数	LT^{-1}	$L(\)$	线性算子	
K_i	渗透系数在网格 i 上的值	LT^{-1}	L_s	表征迁移距离	
$K_{i,j}$	渗透系数在网格 (i,j) 上的值	LT^{-1}	$L_{T_3}^l$	第 l 个第三类边界边的长度	L
$K_{i,j}$	渗透矩阵元素		$L_{T_2}^l$	第 l 个第二类边界边的长度	L
$K_{i,j,l}$	渗透系数在网格 (i,j,l) 上的值	LT^{-1}	$L_{T_3}^e$	单元 e 中第三类边界边的长度	L
K_m	岩块的渗透系数张量	LT^{-1}	l	距离	L
K_0	氧的半饱和浓度常数	ML^{-3}		开采井的进水段长度	L
K_{OC}	有机物在水和纯有机碳间的分配系数	L^3M^{-1}		计数符号	
K_{OW}	有机物在辛醇和水之间的分配系数	L^3M^{-1}	l_0	观测孔的进水段长度	L
K_r	方向渗透系数	LT^{-1}	M	承压含水层厚度	L
K_x	渗透系数主值	LT^{-1}		液体的质量	M
K_y				好氧微生物的浓度	ML^{-3}
K_z				残差的均值	
K_{xx}	渗透系数张量的分量	LT^{-1}	M_0	微生物的初始浓度	ML^{-3}
K_{yy}			M_a	厌氧微生物的浓度	ML^{-3}
K_{zz}				绝对残差的均值	

续表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
M_D	无量纲微生物浓度	ML^{-3}	N_t	时间域离散的步长数	
M_f	进出系统的物质量之差	M	N_x	x 方向上的网格数	
$M_{i,j}$	质量矩阵元素		N_y	y 方向上的网格数	
M'	弱透水层厚度	L	N_z	z 方向上的网格数	
$M'_{i,j,l}$	弱透水层厚度在网格 (i,j,l) 上的值	L	N_{β_j}	以 j 节点为顶点的单元个数	
m	质量	M	N_{v_j}	以 j 节点为顶点的单元数	
	待求水头或浓度的节点数		N_{r_1}	已知水头/浓度的节点数	
m_0	单位时间注入污染物的质量	MT^{-1}	n	空隙度	
m_a	单位过水断面上注入污染物的质量	ML^{-2}		井的数量	
m_l	单位长度上的污染物注入量	ML^{-1}		高斯点数	
m_p	单位时间点源注入的污染物质量	MT^{-1}	n	边界外法线矢量	L
	点源瞬时注入物质质量	M	n_0	初始空隙度	
m'_a	m_a 与滞留因子的比值	ML^{-2}	$n_{i-\frac{1}{2}}$	空隙度在网格 $i-1$ 与 i 间的值	
m'_0	m_0 与滞留因子的比值	MT^{-1}	$n_{i+\frac{1}{2}}$	空隙度在网格 i 与 $i+1$ 间的值	
m'	质量与滞留因子的比值	M	n_n	第 i 裂隙的空隙度	
m'_p	m_p 与滞留因子的比值	MT^{-1}	n_i	空隙度在网格 i 上的值	
N	组分数		$n_{i,j}$	空隙度在网格 (i,j) 上的值	
N_0	非活性节点数		$n_{i,j,l}$	空隙度在网格 (i,j,l) 上的值	
N_1	已知水头或浓度的节点数		n_m	连续介质域的空隙度	
N_{2j}	以 j 为顶点的第二类边界边数		n^β	空隙度在单元 β 上的值	
N_{2j}	以 j 为顶点且含第二类边界边的单元数		O	液相中氧(电子受体)的浓度	ML^{-3}
N_{3j}	以 j 为顶点的第三类边界边个数		$O[]$	截断项	
N_{3j}	以 j 为顶点且含第三类边界边的单元数		p	压力	$ML^{-1}T^{-2}$
N_e	单元数		p_0	初始压力	$ML^{-1}T^{-2}$
N^e	单元 e 上的基函数		p_a	大气压	$ML^{-1}T^{-2}$
N_f	裂隙数		P_d	扩散量	MT^{-1}
N_i	节点 i 的基函数		Pe	Peclet 数	
$N_{i,j}$	i 和 j 两节点的共用单元数		Pe_x	x 坐标方向上的 Peclet 数	
N_j	节点 j 的基函数		Pe_y	y 坐标方向上的 Peclet 数	
N_p	节点数		Pe_z	z 坐标方向上的 Peclet 数	

续表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
Q	渗流量	L^3T^{-1}	R_c	单位厚度上的污染物降解去除率	$ML^{-1}T^{-1}$
	井的流量	L^3T^{-1}	R_{CD}	无量纲降解去处率	
Q_p	单位厚度上的抽水流量	$L^3T^{-1}L^{-1}$	R_d	滞留因子	
Q_r	以 r 为半径的圆柱形过水断面 上的流量	L^3T^{-1}	R_{dfi}	第 i 裂隙的滞留因子	
Q_w	单位厚度上的注入流量	$L^3T^{-1}L^{-1}$	R_{di}	滞留因子在网格 i 上的值	
Q'	Q 与滞留因子的比值	L^3T^{-1}	$R_{di,j}$	滞留因子在网格 (i,j) 上的值	
q	第二类边界水流通量(一维、三 维)	LT^{-1}	$R_{di,j,l}$	滞留因子在网格 (i,j,l) 上的值	
	第二类边界水流通量(二维)	L^2T^{-1}	R_{dm}	连续介质域的滞留因子	
	单宽流量	L^2T^{-1}	Re	Reynolds 数	
	单位过水断面上瞬时注入的水量	L^3L^{-2}	REV	代表性单元体	
q_0	初始单宽流量	L^2T^{-1}	R_i	第 i 井的影响半径	L
	体源初始源强度	$ML^{-3}T^{-1}$	R_M	物质剩余量	M
q_a	面源源强度	$ML^{-2}T^{-1}$	RMS	残差的均方根	
q_b	下边界水流通量(一维、三维)	LT^{-1}	R_d^β	滞留因子在单元 β 上的值	
	下边界水流通量(二维)	L^2T^{-1}	r	圆的半径, 径向距离	L
q_{fi}	第 i 边界面上的水流量	L^2T^{-1}		毛细管半径	L
q_l	线源源强度	$ML^{-1}T^{-1}$		相关系数	
q_l	左边界水流通量(一维、三维)	LT^{-1}	r_D	无量纲径向距离	
	左边界水流通量(二维)	L^2T^{-1}	r_i	到 i 井中心的距离	L
q_m	连续介质域第二类边界水流通 量	LT^{-1}	r_L	研究域的半径	L
q_p	点源源强度	MT^{-1}	r_w	井的半径	L
q_r	右边界水流通量(一维、三维)	LT^{-1}	r_{wD}	无量纲井半径	
	右边界水流通量(二维)	L^2T^{-1}	\bar{r}	相对径向距离	L
q_u	上边界水流通量(一维、三维)	LT^{-1}	S	弹性贮水系数	
	上边界水流通量(二维)	L^2T^{-1}	s	降深	L
q_x	x 断面上的单宽流量	L^2T^{-1}	S^β	贮水系数在 β 单元上的值	
R	液面蒸发强度	LT^{-1}	s^*	水头回升值	L
	影响半径	L	s_D	无量纲降深	
	注入水的平均前峰面距井中心 的距离	L	SE	标准差	
R_0	多井的联合影响半径	L	S_f	地表高度	L

续表

符号	说明	量纲	符号	说明	量纲
S_{fi}	第 i 裂隙贮水系数		t	时间	T
s_i	第 i 井在计算点的降深	L	t_0	注入的时间长度	T
S_i	贮水系数在网格 i 上的值		$t_{0.16}$	浓度比值为 0.16 的时间	T
s_p	停止开采时的水头降深	L	$t_{0.5}$	浓度比值为 0.5 的时间	T
	拐点处的降深	L	$t_{0.84}$	浓度比值为 0.84 的时间	T
S_s	贮水率	L^{-1}	$t_{1/2}$	半衰期	T
S_{si}	贮水率在网格 i 上的值	L^{-1}	t_D	无量纲时间	
S_{sm}	连续介质域贮水率	L^{-1}	t_k	第 k 时间步的时间	T
S_w	饱和度		t_m	最大浓度值对应的时间	T
s_w	井中降深	L	t_p	停止开采的时间	T
S_y	给水度			拐点出现的时间	T
S_{yi}	给水度在网格 i 上的值		t_R	无量纲时间	
T	流体的表面张力	MT^{-2}	t_w	从线源上一点运动到抽水井的时间	T
	导水系数	L^2T^{-1}	\bar{t}	相对时间	
	弯曲度		U	出流液体体积比数	
T^β	导水系数在 β 单元上的值	L^2L^{-1}	U_i	注水总体积	L^3
T_{fi}	第 i 裂隙导水系数张量	L^2T^{-1}	$U_{i,j}$	对流矩阵的元素	
T_r	方向导水系数	L^2T^{-1}	U_p	累计抽水量	L^3
$T_{i,j}$	导水系数在网格 (i,j) 上的值	L^2T^{-1}	u	实际速度, 空隙平均速度	LT^{-1}
$T_{i,j}$	导水矩阵的元素		u_c	污染物的迁移速度	LT^{-1}
T_x	导水系数的主值	L^2T^{-1}	u_i	实际速度在网格 i 上的值	LT^{-1}
T_y			$u_{i,j}$	实际速度在网格 (i,j) 上的值	LT^{-1}
T_z			$u_{i,j,l}$	实际速度在网格 (i,j,l) 上的值	LT^{-1}
T_{xx}	导水系数张量的坐标分量	L^2T^{-1}	u^k	第 k 时间步的实际速度	LT^{-1}
T_{yy}			u_{mj}	连续介质域的水流实际速度	LT^{-1}
T_{zz}			u_x	实际速度的 x 坐标分量	LT^{-1}
T_{xy}			u_y	实际速度的 y 坐标分量	LT^{-1}
T_{xz}			u_z	实际速度的 z 坐标分量	LT^{-1}
T_{yx}			u'	实际速度与滞留因子的比值	LT^{-1}
T_{yz}			$u_{i-\frac{1}{2}}$	实际速度在网格 $i-1$ 与 i 间的值	LT^{-1}
T_{zx}			$u_{i+\frac{1}{2}}$	实际速度在网格 i 与 $i+1$ 间的值	LT^{-1}
T_{zy}					