

水 科 学 前 沿 丛 书

土壤大孔隙流机理 及产汇流模型

冯 杰 解河海 著
黄国如 张东辉



科学出版社

水科学前沿丛书

土壤大孔隙流机理及产汇流模型

冯 杰 解河海 黄国如 张东辉 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在详细论述土壤大孔隙流国内外研究进展的基础上,开展土柱 CT 扫描实验,得到不同土柱各横断面的 CT 扫描图像;采用基于 GIS 的图像处理技术,左拐弯和九方向判断相结合的大孔隙空间结构识别技术以及逐层分析法和向上、向下追踪法相结合的大孔隙空间结构特征参数分析技术,得到大孔隙空间分布特征;开展含有大孔隙的室内土柱和土槽人工降雨实验,确定大孔隙土壤水力参数和溶质运移参数,分析评价大孔隙流对产汇流的影响。构建考虑大孔隙分布的不同尺度的产汇流模型,采用 Lattice Boltzmann 方法进行求解。

本书可供农田灌溉、土壤物理、水土保持、流域产汇流和水环境保护等领域的科技人员使用,也可作为上述专业高年级本科生、研究生和相关教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土壤大孔隙流机理及产汇流模型 / 冯杰等著. —北京: 科学出版社, 2012
(水科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-035547-8

I. ①土… II. ①冯… III. ①土壤—大孔隙渗流—研究 IV. ①S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 217681 号

责任编辑: 杨帅英 朱海燕 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 高海英

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2012 年 11 月第一次印刷 印张: 20 1/4

字数: 486 000

定价: 178.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

顾	问	曹文宣	陈志恺	程国栋	傅伯杰
		韩其为	康绍忠	雷志栋	林学钰
		茆智	孟伟	王超	王浩
		王光谦	薛禹群	张建云	张勇传
主	编	刘昌明			
常	务副主编	徐宗学			
编	委	蔡崇法	常剑波	陈求稳	陈晓宏
		陈永灿	程春田	方红卫	胡春宏
		黄国和	黄介生	纪昌明	康跃虎
		雷廷武	李怀恩	李义天	林鹏
		刘宝元	梅亚东	倪晋仁	牛翠娟
		彭世彰	任立良	沈冰	王忠静
		吴吉春	吴建华	徐宗学	许唯临
		杨金忠	郑春苗	周建中	

《水科学前沿丛书》出版说明

随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化，实现人与自然和谐相处的压力与日俱增，水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响，与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国，水科学研究一直是基础研究计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力，我国在水科学研究方面取得了重大进展，并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展，迫切需要对过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此，科学出版社与北京师范大学共同发起，联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队，策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题，对相关研究成果加以凝练与集成，力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说，工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果，对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平，经得起同行和时间检验，组织了国内多位知名专家组成丛书编委会，他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物，对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信，通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作，会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世，为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用，为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。

刘昌明

2012年9月

序

在自然界的水循环和物质循环中，土壤水都起着重要的作用。土壤水是联系降水、地表水、地下水的纽带，是“四水”（大气水、地表水、土壤水、地下水）转化过程中的中心环节；是土壤中物质传输和运移的载体；还是农作物和自然植被所需水分的主要来源。因此，对土壤水问题的研究是必要的，也是重要的。

土壤中的水处于饱和状况和非饱和状况。人们对饱和土壤水运动问题的研究有较长的历史，其科学理论的出现始于150年前法国工程师Darcy所进行的实验，经过不断发展和完善，形成了现在的地下水动力学。非饱和土壤水分问题一直是土壤学研究的重要课题之一。19世纪下半叶以来，非饱和土壤水分问题的研究主要采用形态学观点，定性地描述或分析土壤水分保持和运动。20世纪初出现了土壤水分能态观点，中后期发展到将数学物理方法引入其研究领域，加之计算机科学的发展应用和各学科的相互渗透，非饱和土壤水分的研究发生了由经验到理论、从定性到定量的深刻变化。20世纪80年代，我国《土壤水动力学》专著问世。土壤水动力学采用土壤水分能态观点，将土壤看成均质多孔介质，以达西定律为基础，通过大量室内外实验和数学模型相结合，对非饱和土壤水分、溶质和热量迁移转换问题进行定量研究。

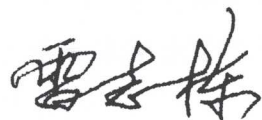
随着对土壤结构及其水流运动研究不断深入，发现土壤水运动中存在优先流，大孔隙是其表现形式之一，是一种不遵循达西定律的运动形式。对大孔隙流的研究，可追溯到19世纪中后期，但以后很长一段时间没有受到人们的重视。20世纪六七十年代只做过少量研究，80年代以后土壤大孔隙流的研究才越来越引起人们的兴趣，成为国内外土壤水研究的热点领域之一。由于土壤大孔隙结构的高度空间变异性，土壤大孔隙流研究亦是土壤水研究的难点之一。因此，土壤大孔隙结构及其水流和溶质运移问题是土壤水研究的前沿问题。该书正是在这方面做出了有益的探索。

自1998年，在国家自然科学基金项目等的支持下，该书作者便开始进行土

壤大孔隙结构及其水流与溶质运移的研究。经过十多年的不懈努力，作者及其团队在系统分析室内外实验资料的基础上，借鉴国外的研究经验，在土壤大孔隙结构、土壤大孔隙水流运动和溶质运移、大孔隙流对坡面产汇流的影响等方面取得了众多的研究成果，在国内尚不多见，一定程度上反映出我国在这方面的最新研究进展，该书是其多年来研究工作的系统总结。正是作者及其研究团队始终坚持这一应用基础性的研究，并为之付出艰辛的劳动，体现了一丝不苟的科研态度和勇于探索的精神，取得的成果是可贵的。

该书对农田水利、水土保持、水文及水资源、生态环境等学科的科研、教学、工程技术工作者而言，是一本可读的书。尽管书中难免存在不足或疏漏，但毕竟是我国目前在该领域研究和探索的阶段性成果，拓宽了我国土壤水分运动理论的研究范围，也为相关研究领域提供了新的研究内容。希望该书的出版能够进一步推动我国大孔隙流的探讨与研究。

中国工程院院士、清华大学教授



2012年5月于北京

前 言

由于土壤干湿作用造成的收缩和膨胀，土壤中可溶性物质的溶解、冻融的循环交替，人类耕种等活动、蚯蚓和啮齿动物的活动以及植物根系的生长，土壤巾存在着大量的大孔隙。当土壤巾存在大孔隙时，进入土壤巾的水及溶质就绕过大部分土壤基质，经过大孔隙快速到达土壤深处或地下水中，即使在土壤基质没有完全饱和的情况下也会发生。大孔隙巾的水流速度远大于土壤基质流，其中水流运动不符合达西定律。大量的室内和田间实验表明，大孔隙流是土壤巾的一种普遍存在的现象，而不是一种特例。

近年来，气候变化导致降水时空分布更加不均匀，干旱灾害频繁发生，农业用水时常不能得到保障，严重威胁我国农业生产与粮食安全。而在当前国家粮食安全形势非常严峻的情况下，保障农业用水是非常重要的。这就要求一方面必须准确预报土壤墒情，另一方面要开展节水灌溉。研究考虑大孔隙分布的入渗模型和产汇流模型及其解法，可以应用于土壤墒情预报和节水灌溉工作中，不仅可以提高土壤墒情的预测精度，而且可以提高节水效果。

随着农业生产的发展，农业上大量使用化肥和农药。2009年，全国化肥施用量5404.4万t，平均利用率约35%，其余65%残留土壤或流失，农药施用量173万t，平均利用率约35%，残留农药污染农田1.36亿亩^①。自1980~2009年，我国化肥施用量从平均每亩16斤^②增加到58斤，增长2.6倍，已是发达国家允许用量的193%，农药用量从每亩0.66斤增加到1.92斤，增长1.9倍，杀虫剂所占的比例比发达国家高30个百分点。降水和灌溉都可能使化肥和农药进入土壤巾，经过大孔隙快速到达地下水中，污染地下水。特别是农业生产巾施放到土壤表面的营养物质，也随雨水或灌溉水通过大孔隙很快进入土壤深处或地下水中，而来不及被土壤基质吸附或被植物利用，既造成了肥料利用率的降低又造成了地下水的污染。随着人口增加、经济发展，全国城镇污废水排放量迅速增加，从20世纪80年代的315亿t增加到2009年的1050亿t，垃圾从1.21亿t增加到2.64亿t，全国畜禽粪便排放量达到40亿t，再加上农村污水排放，这些工业和生活“三废”若不合理弃置，都可能进入土壤巾，经过大孔隙污染地下水。另外，近年来由于水资源匮乏，在我国农村尤其是北方农村大面积进行污水灌溉，污水灌溉面积达4950万亩，占总灌溉面积的7.3%，经土壤大孔隙污染地下水的现象越来越严重。因此土壤大孔隙流的研究有助于我们判断合理的废物处置基地和处置方法，采用科学合理的耕作制度和灌溉制度，开展节水农业，提高农业水利用效率，降低农业成本，防止造成地下水的污染。

此外，大孔隙流的存在，改变了地表径流、壤中流和地下径流的形成过程和比例，因此开展土壤大孔隙流研究，还可以明确径流机理，提高产汇流预测精度，并对有效开展地表水和地下水资源管理，防止地下侵蚀及山体崩塌、泥石流滑坡等具有重要作用。

土壤大孔隙及与之相关的水流和溶质运移现象，早在19世纪中后期就被发现，但以后

① 1亩≈667m²。

② 1斤=500g。

很长一段时间没有受到人们的重视, 20 世纪六七十年代只做过少量研究, 直到 Thomas 和 Phillips 以及 Beven 和 German 发表文章后, 土壤中大孔隙流的研究才越来越引起人们很大的兴趣, 近 30 多年来已成为欧洲和美国等地区和国家从事水、环境和土壤物理等科学家们研究的热点领域之一。我国由于在理论和实验等方面的薄弱, 对这个问题的研究虽有一定成果, 但还不够深入。

本书从土壤大孔隙结构和分布特征研究、土壤大孔隙室内和室外水流实验以及数学模型研究等方面, 对土壤大孔隙流及大孔隙流的存在对地下水环境和地表产汇流的影响等国内外研究进展进行了详细论述。综合分析研究现状可知: 虽然通过大量的室内外实验已对大孔隙流问题有了很多认识, 但由于大孔隙流在时间和空间上的极大变化性, 仍存在不少难点问题需要解决。因此, 在当前和未来较长一段时间内, 有关大孔隙流问题的研究应侧重于进行大量的室内和田间综合实验, 获得足够多的数据资料, 并提高模拟技术。这其中包括以下几个方面。

(1) 土壤大孔隙空间结构研究: 现在对大孔隙结构研究大多数局限于平面或二维结构研究, 而对大孔隙空间结构研究得相对较少, 而真正影响大孔隙流的是大孔隙的空间结构(大孔隙的空间结构可用大孔隙的水力半径、长度、埋深、弯曲率、倾斜度和单位体积中的数目等参数来表示), 因此应通过映像技术、分形理论等, 加强对大孔隙空间结构的研究, 确定大孔隙空间分布特征。

(2) 大孔隙流运动机理研究: 由于大孔隙流运动过程的高度非平衡性以及大孔隙流具有区域特点, 所以到目前为止, 对于大孔隙流运动机理尚未明确。包括大孔隙水流运动规律和溶质运移转化规律、大孔隙流与基质流之间的水力联系和溶质运移转化关系; 大孔隙空间结构对大孔隙流运动的影响等。

(3) 大孔隙流模拟方法研究: 鉴于土壤大孔隙流的高度非线性和非稳定问题以及大孔隙流的尺度效应, 需要发展新的模拟方法来解决, 包括分形网络理论和随机模拟方法。

近几年来, 我国开展了许多有关大孔隙流的研究工作, 并取得了一些成果, 但与国际大孔隙流的研究水平相比, 还有许多工作要做。表现在以下两个方面。

对大孔隙结构的研究, 仅限于平面或二维结构, 还没有发展到空间结构; 研究方法以染色法居多, 但该方法存在以下不足之处: ①不能精确确定大孔隙的大小; ②实验结果不能在同一地点重复获得; ③所选的染色剂可能对土壤和地下水造成污染。因此需要采用新的方法和技术对土壤大孔隙空间结构进行研究。

对大孔隙流的研究, 仅停留在大孔隙流所表现出的特征, 而没有深入研究大孔隙流运动的机理。对溶质运移的研究, 仅限于保守性溶质, 还未涉及非保守性溶质。至于大孔隙流的存在对地下水环境和地表产汇流的影响, 也只是做了初步研究。

在国家自然科学基金项目(批准号: 50609005、50309002、50479017、59779022)、博士点基金资助项目(批准号: 20050294002)、霍英东基金项目(批准号: 101075)、国家重点基础研究发展项目(批准号: G1999011803)和河海大学国家重点实验室开放基金项目(批准号: 2005408511)、武汉大学国家重点实验室开放基金项目(批准号: 2005B020)、中国科学院水土保持国家重点实验室开放基金项目(批准号: 10501-155)和南京水利科学研究所开放流动研究基金项目等支持下, 研究团队从研究土壤中大孔隙的几何形状、概率分布、连通网络等因素着手, 采用实验和数学模型相结合的方法, 研究大孔隙流机理和产汇流模型, 分析评价大孔隙流的存在对地下水环境和产汇流的影响, 建立一套从土壤微观孔隙和

水流分析到宏观土壤水流分析和产汇流分析的研究体系。具体如下：

(1) 构建描述土壤大孔隙空间结构的指标体系（大孔隙的水力半径、长度、埋深、弯曲度、倾斜度和大孔隙网络的分支、密度、配位数、连通性和亏格等），研究并提出大孔隙土壤 CT 扫描图像处理技术、大孔隙空间结构识别技术和大孔隙空间结构特征参数分析技术，通过土柱 CT 扫描实验，采用以上技术，深入分析土壤大孔隙空间结构分布特征。通过对土壤大孔隙空间结构的研究，建立了一套土壤大孔隙空间结构特征分析方法。

(2) 采用实验和模型相结合的方法，合理确定了土壤大孔隙的饱和导水率和非饱和导水率、含有大孔隙的原状土土壤水分特征曲线和水动力弥散系数，并分析了大孔隙对这些参数的影响。通过对以上参数的研究，提出了大孔隙土壤水力参数和溶质运移参数的确定方法。

(3) 通过开展一系列含有不同大孔隙土柱的水流实验，深入分析了大孔隙的数量、形状、大小对土壤水分运移的影响，并分析了土壤质地对含有大孔隙土柱中水分运移的影响。通过开展两套土槽系统的人工降雨实验，全面分析了包括植被、坡度和大孔隙分布等下垫面和降雨强度对坡面产汇流及溶质运移的影响。

(4) 将土壤分为大孔隙域和基质域，基质域水分运动符合达西定律，模型采用 Richards 方程计算，溶质迁移模型采用对流弥散方程；大孔隙域中水流主要受重力作用，模型采用运动波方程，溶质迁移模型采用对流方程；两域间的水分交换采用一阶扩散方程，溶质交换采用浓度差计算方程。分别构建土柱尺度和坡面尺度的入渗模型（两域模型）。由于 Lattice Boltzmann（以下简称 LBM 方法）具有算法简单、程序易于实施、利于并行计算等特点，并且由于土壤水盐运移模型中广泛采用的 Richards 方程、对流弥散方程和运动波方程都是广义 Burgers 方程的特殊形式，因此，采用 LBM 方法求解模拟大孔隙流的两域模型，并根据土柱水流实验和土槽人工降雨实验资料，验证了 LBM 方法的有效性。

(5) 在考虑大孔隙的坡面下渗模型的基础上，采用圣维南方程的运动波来描述坡面汇流，建立坡面尺度的汇流模型，并根据土槽人工降雨实验资料，验证了 LBM 方法的有效性。

(6) 采用模糊神经网络，以降雨强度、降雨历时、坡度、大孔隙特征尺度和离子吸附系数等因子为网络输入，以坡面累积溶质流失量为网络模型输出，建立了坡面溶质流失模型，并根据土槽人工降雨实验资料，验证了模型的有效性。

(7) 在考虑大孔隙的坡面入渗模型的基础上，坡面汇流采用基于网格的运动波理论，建立运动波方程，采用 LBM 法进行求解。河道洪水演进采用线性扩散波方程，同样采用 LBM 法求解，最终建立流域尺度的产汇流模型。将模型应用于东江流域的星丰子流域，与不考虑大孔隙分布的产汇流模型相比，模型模拟的精度进一步提高。

本书主要内容是作者十多年的研究成果。虽然是从土壤大孔隙结构研究开始，进行了一系列包括室内土柱水流实验、人工降雨土槽实验等不同尺度实验在内的系统研究，但就大孔隙流发展规律和认识过程而言，也仅仅是初步的不成熟的认识，然而毕竟可以作为一个阶段性成果，以书的形式展现给有兴趣的读者和相关研究同行面前，以供大家参考，为共同探讨大孔隙流运动规律，推动大孔隙流的深入研究提供一个可以相互交流的媒介。

本书主要内容是研究团队集体智慧的结晶，是大家投入大量精力和时间辛勤工作取得的，借此机会，谨向参与本研究工作的有关人员表示感谢。感谢尚煜廷在大孔隙土壤水力参数和溶质运移参数研究以及大孔隙土柱和土槽人工降雨实验中所做的大量工作；邵伟和张东辉副教授在基于格子波尔兹曼方法的土壤大孔隙流模型研究中所做的大量工作；张小娜和解河海

在室内大孔隙土槽人工降雨实验及模型研究中所做的大量工作；感谢舒茂、刘方贵、胡友兵、刘佩贵、王波、黄燕、郭娜、陈庆海、陈升、朱源在实验规划和数据观测分析中所做的大量工作；郝振纯教授、张佳宝研究员、芮孝芳教授、李致家教授、梁忠民教授和朱安宁副研究员在项目研究过程中给予的指导和帮助。

另外，还要特别感谢国家自然科学基金委员会、霍英东基金委员会和教育部科技发展中心等给予的大力支持。对河海大学、武汉大学、中国科学院水土保持研究所等单位的国家重点实验室和南京水利科学研究院等给予的支持，在此表示深深的谢意。感谢中国工程院院士、清华大学雷志栋教授在百忙之中为本书作序。限于作者的研究水平和研究经历，书中难免存在疏漏，恳切希望同仁批评指正。

作者

2012年5月于北京

目 录

《水科学前沿丛书》出版说明

序

前言

第 1 章 土壤大孔隙流及其对坡面产汇流影响的研究进展	1
1.1 研究背景与目的意义	1
1.1.1 背景介绍	1
1.1.2 目的意义	2
1.2 优先流的分类及其基本理论	2
1.3 大孔隙流理论的研究现状	3
1.3.1 大孔隙的定义	4
1.3.2 大孔隙的成因	4
1.3.3 大孔隙流产生的条件	5
1.3.4 大孔隙流产生的影响及后果	7
1.3.5 影响大孔隙流的因素	9
1.4 大孔隙流理论的发展趋势	10
1.4.1 分形几何在土壤学及大孔隙流理论中的应用	10
1.4.2 流体力学新方法在大孔隙流理论中的应用	14
1.4.3 大孔隙流理论发展趋势	15
1.5 土壤大孔隙流实验技术研究进展	16
1.5.1 土壤大孔隙结构的观测技术	16
1.5.2 大孔隙土壤中含水量及其空间分布特征的观测技术	20
1.5.3 大孔隙土壤水力学特征参数的观测技术	20
1.5.4 大孔隙流室内和田间实验	20
1.5.5 大孔隙流实验技术进展总结	22
1.6 土壤大孔隙流模拟技术研究进展	22
1.6.1 两域 (two-domain) 模型	22
1.6.2 多域 (multi-domain) 模型	32
1.6.3 数值 (numerical) 模型	33
1.6.4 两阶段 (two-phase) 模型	34
1.6.5 混合层 (mixing-layer) 模型	35
1.6.6 多尺度平均 (multiple-scale average) 模型	37
1.6.7 随机 (stochastic) 模型	38
1.6.8 模拟技术研究进展总结	38
1.7 大孔隙流及溶质迁移数值软件	39

1.7.1	MACRO 模型	39
1.7.2	HYDRUS 模型	40
1.7.3	IN ³ M 模型	41
1.7.4	RZWQM 模型	41
1.7.5	SIMULAT 模型	42
1.7.6	可用于大孔隙流计算的其他模型	42
1.8	大孔隙流理论在流域模型中的应用进展	43
1.8.1	DSFDM 模型	44
1.8.2	DHSVM 模型	44
1.8.3	CATFLOW 模型	45
1.8.4	MIKE-SHE 模型	45
1.8.5	HYDAS-DRAIN 模型	46
	参考文献	46
第2章	CT 确定土壤大孔隙空间分布	57
2.1	CT 扫描原理	57
2.2	国内外研究进展	57
2.3	CT 扫描实验材料和图像处理	59
2.3.1	土柱	59
2.3.2	CT 扫描	61
2.3.3	图像处理	64
2.4	大孔隙空间网络的识别	65
2.5	大孔隙空间网络参数的确定	69
2.5.1	大孔隙网络和分支	70
2.5.2	弯曲度	70
2.5.3	空间水力半径	70
2.5.4	大孔隙网络的密度、配位数、连通性和亏格	71
2.5.5	确定大孔隙空间网络分布参数	72
2.5.6	大孔隙网络分布参数的分析	76
2.6	造影剂在土壤大孔隙中的运移	109
	参考文献	110
第3章	大孔隙土壤水力参数和溶质运移参数研究	112
3.1	土壤基本性质	112
3.2	饱和导水率的确定	112
3.2.1	土壤基质的饱和导水率	112
3.2.2	土壤大孔隙的饱和导水率计算	115
3.2.3	原状土壤整体的饱和导水率	118
3.2.4	饱和导水率实验	118
3.2.5	土壤大孔隙饱和导水率估算值与实测值的对比分析	120
3.3	土壤水动力弥散系数的确定	120
3.3.1	实验材料、原理和方法	121

3.3.2	大孔隙对土壤水动力弥散系数的影响	123
3.4	土壤水分特征曲线	124
3.4.1	土壤水分特征曲线及应用	124
3.4.2	描述土壤水分特征曲线的模型	125
3.4.3	土壤水分特征曲线的测定	126
3.4.4	土壤水分特征曲线的拟合及运动参数的推求	127
3.4.5	大孔隙对土壤水分特征曲线形状的影响	129
3.4.6	大孔隙对土壤水分特征曲线参数的影响	130
3.4.7	大孔隙对田间持水量和凋萎系数的影响	130
3.5	比水容重和土壤非饱和导水率	130
3.5.1	原状土和扰动土比水容重的对比分析	131
3.5.2	原状土和扰动土非饱和导水率的比较分析	133
	参考文献	134
第4章	大孔隙土柱水流实验和土槽人工降雨实验研究	136
4.1	大孔隙土柱水流实验	136
4.1.1	实验材料与方法	136
4.1.2	大孔隙数量对水分在土壤中运移的影响	139
4.1.3	大孔隙形状对水分在土壤中运移的影响	144
4.1.4	大孔隙直径对水分在土壤中运移的影响	150
4.2	土槽人工降雨实验	152
4.2.1	实验设计	152
4.2.2	下垫面和降雨强度对产汇流及溶质迁移转化的影响	170
	参考文献	195
第5章	基于格子波尔兹曼方法的大孔隙土壤下渗模型研究	196
5.1	格子波尔兹曼方法的基本原理	197
5.1.1	LBM-BGK 模型简介	197
5.1.2	Burgers 方程还原方法	199
5.2	两域模型的构建及数值解法研究	203
5.2.1	两域模型的构建方法概述	203
5.2.2	两域模型构建	204
5.2.3	两域模型的数值解法研究	207
5.3	土柱下渗模型及验证	229
5.3.1	土柱实验介绍	229
5.3.2	均质模型在扰动土柱水盐运移模拟中的应用	230
5.3.3	两域模型在原状土柱水盐运移模拟中的应用	233
5.4	坡面下渗模型分析及验证	236
5.4.1	建模原理	236
5.4.2	模型参数及求解	241
5.4.3	模型率定及验证	245
	参考文献	251

第 6 章 含有大孔隙的坡面汇流模型以及溶质流失模型研究	253
6.1 坡面汇流模型分析及验证	253
6.1.1 引言	253
6.1.2 坡面运动波讨论	254
6.1.3 Preissmann 四点隐式差分法	257
6.1.4 Lattice Boltzmann 法	260
6.1.5 方法比较	262
6.1.6 实验验证	268
6.2 溶质流失模型分析和验证	271
6.2.1 引言	271
6.2.2 影响土壤溶质流失的因素	271
6.2.3 大孔隙对坡面溶质流失的影响	274
6.2.4 模糊神经网络	278
6.2.5 建模思想	280
6.2.6 仿真验证	281
参考文献.....	283
第 7 章 基于大孔隙的流域产汇流模型研究	285
7.1 模型构建	285
7.1.1 产流模型	285
7.1.2 汇流模型	287
7.2 流域概况介绍	293
7.2.1 自然地理概况	293
7.2.2 水文气象情况	294
7.2.3 资料整理	296
7.2.4 精度指标	299
7.3 模型应用	299
参考文献.....	307

第 1 章 土壤大孔隙流及其对坡面产汇流影响的研究进展

1.1 研究背景与目的意义

1.1.1 背景介绍

土壤是自然界陆地生物生长和繁育的基地,也是人类赖以生存的一种重要的自然资源。自 20 世纪 70 年代以来,环境科学蓬勃发展,土壤开始不仅单纯地被视为农业生产的基本物质资源或农田生态系统的组成部分,而且还被看成是以人类社会为主体的大生态系统的重要组成部分。

随着社会经济的发展和现代化程度的提高,人们对土壤生态环境提出了更高的要求,发现了许多有关土壤水流及溶质运移的新现象,这些现象无法用常规的土壤水流及溶质运移机制来解释。人们通常认为,土壤对污染物具有很强的自净能力,进入土壤的污染物能够与土壤和土壤生物发生一系列的化学作用,如吸附作用、沉淀作用及各种微生物的降解作用等,使污染物的危害性降低,甚至消失。另外,土壤的污染及其去污,取决于污染物的进入量与土壤天然净化力之间的消长关系,当污染物进入量超过土壤净化能力时则导致土壤污染,污染物才会向土壤深部运移,进而污染地下水。同时人们认为,水及污染物在土壤中的运移是非常缓慢的,深部土壤及地下水接受水的补给及污染物造成的污染是一个长期的过程。但大量的室内外实验监测发现,即使进入土壤中的污染物的量没有超过土壤的自净能力时,也能对深部土壤和地下水造成污染,并且水的补给及污染物造成的污染是一个比较短暂的过程。Leaney 等^[1]研究了山坡水文降水、土壤基质水和壤中流中氘和氯化物的含量,发现壤中流中氘和氯化物浓度与降水中的浓度相等,而与土壤基质水中浓度不相等;Turton 等^[2]研究了美国俄克拉何马州和阿肯色州山区森林集水域中地下水流的发生、速度和历时,发现地下水对降雨的响应非常快;Wells 和 Krothe^[3]对 20 口井中硝酸盐浓度进行了监测,发现地下水中硝酸盐含量对农业施肥的响应非常敏感。由此看来,必然存在着另外一种机制,驱使着水及溶质向土壤深部快速运移,这便是优先流。

土壤是结构复杂的多孔介质,自然界中的土壤在不同尺度下其水力学特征参数都具有很强的空间变异性,因此土壤水分运动和溶质迁移的机理和现象都十分复杂。人们通常认为,土壤中水流的运动可分为均匀流(uniform flow)和非均匀流(non-uniform flow)两种类型,均匀流入渗形成了与土壤表面平行的湿润峰,而如果土壤局部地区的水流运动速率快于其他区域,就会形成不规则的湿润峰,产生优先流(preferential flow)^[4]。优先流是指土壤中的水及溶质绕过基质或者大部分区域,而优先通过导水能力强的渗透路径快速运移到土壤深部和地下水的现象,也称为非平衡流(non-equilibrium flow)^[5]。早在 1882 年,Lawes

等^[6]在其著作中就阐述了大孔隙对下渗和溶质运移的重要影响,但长久以来,由于对优先流缺乏充分的研究,人们通常用传统的 Richards 方程和对流弥散方程描述土壤中的水分运动及溶质迁移过程。

均质土壤下渗理论 (Richards 方程) 和溶质迁移理论 (对流弥散方程) 假定土壤在代表体积元 (representative elementary volume) 中为均质连续统一体,下渗过程中土壤各个深度基质势、含水量和溶质浓度等参数都是可以根据基本方程的数值解计算^[7]。然而自然界中土壤的空间变异性可能会导致非平衡流的产生。水及溶质垂向迁移时,大孔隙等优先路径中的水流速率和溶质运移速率会明显高于土壤基质,并且大孔隙等优先路径和基质的水分交换、溶质交换速率也相对较慢,导致土壤含水量和溶质浓度在水平方向的非平衡性。特别是在积水入渗或坡面漫流情况下,优先流的作用会变得显著,水流会绕过土壤基质,在少数优先路径中汇集形成通路并且快速下渗到土壤深处。

1.1.2 目的意义

土壤中优先流现象对下渗过程和污染物迁移等方面产生的影响是普遍存在的,而传统理论并不能模拟并预测这一现象^[5,8],因此优先流逐渐成为水文、地质、环境、农林等研究人员关注的热点问题。最近 40 年,随着研究方法和实验技术的不断发展,每年都有大量的关于优先流运动和溶质迁移的相关文献发表,优先流的概念、分类、成因以及对下渗和溶质迁移造成的影响等相关理论也在不断完善,随之大量的模型被提出^[8]以用于优先流及溶质运移过程的模拟。优先流的相关研究已经成为土壤水动力学的研究重点。

我国是一个农业大国,随着农业生产的发展,农业上大量使用化肥、人们的环境意识还不是很强以及大量的工业和生活“三废”的不合理弃置都可能使污染物进入土壤中,经过大孔隙污染地下水或经过侧向土壤大孔隙径流污染地表水。另外,近年来由于水资源匮乏,我国北方的农村进行大面积污水灌溉,经土壤大孔隙污染地下水的情况越来越严重。与之相反,通过合理的耕作制度在土壤中保持一定数目的大孔隙有利于水土保持并能减少农业化肥随地表径流而污染地表水,并且促进植物的生长,提高作物的产量(河海大学冯杰在南京郊区所做的扰动土与非扰动土对比实验中,明显地看出非扰动土地块小麦的生长情况好于扰动土地块)。因此土壤大孔隙流的研究有助于我们判断合理的废物处置方法,采用合理的耕作制度和灌溉制度,既不造成地下水污染和减轻地表水污染,又可增加作物产量。

近年来,气候变化导致降雨时空分布更加不均匀,干旱灾害频繁发生,农业用水时常不能得到保障,严重威胁我国农业生产与粮食安全。而在当前国家粮食安全形势非常严峻的情况下,保障农业用水是非常重要的。这就要求一方面必须准确预报土壤墒情,另一方面开展节水灌溉。研究考虑优先流的入渗模型和产汇流模型及其解法,可以应用于土壤墒情预报和节水灌溉工作中,不仅可以提高土壤墒情的预测精度,而且可以提高节水效果。优先流的存在,改变了地表径流、壤中流和地下径流的形成过程和比例,因此开展土壤优先流研究,可以明确径流机理,提高产汇流预测精度,对有效开展地表水和地下水资源管理,防止水土流失、地下侵蚀及山体崩塌、泥石流滑坡等具有重要作用。

1.2 优先流的分类及其基本理论

根据研究尺度和产生机制的不同,可以把优先流划分为两大类,微观尺度下的大孔隙流