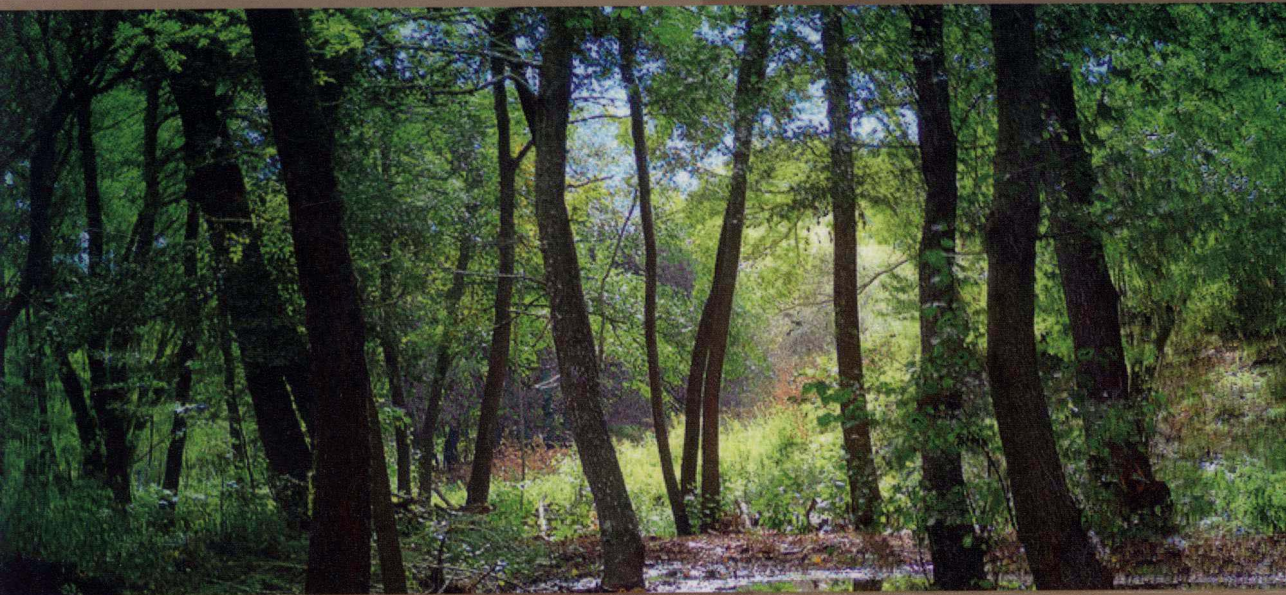


【水土保持与荒漠化防治系列专著】



森林生态系统 优先流研究

牛健植 余新晓 邵文伟 肖自幸 朱蔚利 等/著



科学出版社

水土保持与荒漠化防治系列专著

森林生态系统优先流研究

牛健植 余新晓 邵文伟 肖自幸 朱蔚利 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对优先流的概念、类型、运移特征、相关理论、目前存在的问题以及未来的发展趋势给予了系统的介绍,并分别以长江上游暗针叶林生态系统以及华北土石山区鹫峰国家森林公园的优先流为研究对象,以四川贡嘎山森林生态系统定位监测站和首都圈森林生态系统定位监测站为研究基地,通过野外示踪影像试验与室内土柱示踪实验有效结合,实验方法与数学模拟相结合,系统分析了长江上游暗针叶林和华北土石山区森林的优先流类型、特征、运移路径、运移规律以及优先流形成的驱动影响因子,研究成果对研究区域的径流形成、土壤水分运动、地表地下水质净化等具有一定的理论指导及技术支撑作用。

本书可供水土保持、森林水文、水资源、土壤物理及环境科学等领域的科技工作者参考,也可作为水土保持、环境科学、生态学、水利和林业等专业的高年级本科生、研究生和相关教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

森林生态系统优先流研究 / 牛健植等著. —北京:科学出版社,2013. 3

(水土保持与荒漠化防治系列专著)

ISBN 978-7-03-036974-1

I. ①森… II. ①牛… III. ①森林生态系统-土壤水-运动-研究 IV. ①S718.55
②S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 045710 号

责任编辑:朱 丽 杨新政 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 3 月第一次印刷 印张:13 3/4 插页:1

字数:270 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

水土流失与荒漠化直接关系到国家生态安全。严重的水土流失与荒漠化,是生态恶化的集中反映,已成为我国生态环境最突出的问题之一。水土流失与荒漠化不仅导致土地退化、毁坏耕地,制约山区社会经济发展,使人们失去赖以生存的基础,而且加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,加剧贫困,威胁国家粮食安全和生态安全;这不仅影响当代发展,而且影响子孙后代的生存。因此,加强水土保持与荒漠化防治基础理论研究,找出科学合理的防治方法与措施,开展生态环境建设、资源与社会可持续发展的理论研究与实践,已成为关系国家生态安全和社会可持续发展的当务之急。

《水土保持与荒漠化防治系列专著》是在北京林业大学“985”优势学科创新平台“脆弱生态系统退化机制与恢复重建”和“211”工程(三期)的资助下编写出版的,分册相对独立,以水土保持与荒漠化防治基础理论与水土流失和荒漠化综合防治实践为基础,从不同角度、综合反映了研究团队新的科研成果。该系列专著以土壤侵蚀动力学过程及其机制、生态水文过程与调控、植被力学过程与调控、土壤风蚀过程与防控、水土流失区林草植被快速恢复与生态修复关键技术、开发与建设城市化损毁土地生态系统快速恢复与重建技术等为主要研究内容,系统反映了在长期水土保持荒漠化防治实践中积累的丰富防治经验,有针对性地提出了我国水土保持荒漠化防治生态建设面临的主要问题的防治对策,为今后进一步加强水土保持荒漠化防治研究奠定了坚实的基础。

该系列著作的内容均为水土保持与荒漠化防治研究领域的热点问题,引领了该学科的发展方向,在理论框架、新方法和新技术方面做了很多开创性的工作,在推动水土流失与荒漠化防治综合防治关键技术研究方面进行了有益的探索,对我国进行水土保持与荒漠化防治综合管理研究起到了积极的推动作用。

该系列著作不仅为地学、生态学、环境学、土壤学等学科的科研和教学工作提供有益的参考,也是我国水土保持与荒漠化防治生态建设相关技术人员、行政管理人员的一部好的参考书。该系列著作的出版,无疑将对我国水土保持与荒漠化防治生态建设的深入开展起到积极的推动作用。

中国工程院院士

李文华

2011年5月

前 言

非饱和土壤带是近年来水文学的一个热点研究领域,因其内部生长着植物而存在根系层,水分运动变化复杂,水除只在部分孔隙中流动外,也会在另一部分孔隙内停滞不流动,是连接地表水和地下水的重要通道。开展优先流研究是土壤水运动机理研究由均质走向非均质领域的标志,它是一种较为常见的土壤水分运动形式,但是它从萌芽开始之后的较长一段时间并未引起人们的重视,20世纪六七十年代兴起的管流研究是其最初研究类型。到20世纪70年代末、80年代初,人类文明和环境变异并存初期,人们发现这种快速到达深层土壤甚至地下的水分极大地影响地表及地下径流过程,是山体崩塌、泥石流和滑坡等灾害事件形成的诱发因素之一,其所运移的溶质造成了严重的地下水水质恶化。土壤优先流现象与人类的生产、生活活动及生态安全息息相关,许多科研学术团体及科研工作者开始重视此现象研究。

中国科技部、教育部及国家自然科学基金委员会针对中国森林水文学基础研究特点以及国家生态环境建设的需要,资助了多项有关“优先流”的项目,给此领域研究充分的“养分”支持,并有利地促进了土壤学和环境科学等相关学科的发展。本书所述内容是在国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目子专题“森林植被对土壤侵蚀过程的调控机理(2002CB111502)”、国家自然科学基金重点项目“长江上游暗针叶林生态系统水文过程调节机制的研究(39930130)”、国家自然科学基金青年项目“密云水库集水区基于模型的溶质优先迁移过程对水质影响研究(30800888)”和国家自然科学基金面上项目“林木根系对溶质优先运移的影响机制研究(41271044)”的资助下完成的。

优先流现象极大地影响流域地表及地下径流形成机制,具有快速非平衡的运移特征,是洪水灾害发生的诱发因素之一。众所周知,1998年长江流域发生了一场旷世罕见的洪水灾害,为有效分析并解决问题,需要在长江上游暗针叶林生态系统开展优先流研究;华北土石山区水资源短缺、土少石多、土壤瘠薄、土壤孔隙较大,水分沿着优先流路径向下运移,使贫瘠的地表水区域更加缺水。本项研究就是针对上述水资源问题,在长江上游暗针叶林生态系统及华北土石山区鹫峰国家森林公园这两个优先流发生的典型森林生态系统,通过实验分析与理论研究相结合,对研究区域土壤优先流运移过程及发生规律进行系统分析,采用解析及数值分析方法,深入揭示研究区域土壤水分优先流运动机理,研究探讨优先流对径流的影响、优先流形成的驱动影响因素,研究成果对长江上游暗针叶林生态系统及华北土石山区森林生态系统土壤水分运动规律研究及有效流域管理提供理论支持,并对研究区域及其相似地区的生态环境建设,人民生活条件改善及遏制、预测泥石流和滑坡的发生具有重要意义。

本书的编写力求理论性和实践性相结合,通过对两大区域森林生态系统的优先流类型、特征及其影响因子进行分析,力图向读者展示更加全面的优先流分析过程。本书共3章:第1章是优先流的起源、研究进展及发展趋势,由牛健植、余新晓、邵文伟等参与编写;

第2章是长江上游暗针叶林生态系统优先流研究,由牛健植、余新晓等参与编写;第3章是华北土石山区鹞峰国家森林公园优先流研究,由邵文伟、肖自幸、朱蔚利、牛健植等编写;全书由张英虎帮助统稿。科学出版社的朱丽女士对本书的出版给予了大量的帮助,她及她的同事们付出了极其辛苦的劳动,特此向他们表示由衷的感谢。

三十余年前,人们发现了优先流现象,其对径流形成,地表和地下水质都具有重要影响,优先流研究的意义重大。但长期以来,优先流的研究进展缓慢,主要原因在于优先流在常规手段下较难获取,并且开展优先流这一非平衡流研究作为模型建立、水分运移等一些理论研究增加了难度。本书的编写以两个特定区域为例,室内实验及野外示踪试验相结合,实验技术与数学模型相结合,捕获优先流,以期分析研究区域优先流在水分运移中的作用。但是优先流对森林生态水文研究作用深远,并且由于作者才疏学浅,加上时间仓促,书中难免会有欠妥之处,诚请读者不吝斧正。

牛健植

2012年12月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 优先流研究起源、研究进展及发展趋势	1
1.1 优先流问题研究概述	1
1.1.1 优先流基本内涵	2
1.1.2 优先流表现类型	4
1.1.3 优先流特征	7
1.1.4 优先流研究的科学意义	10
1.2 优先流形成的驱动影响因素	12
1.2.1 内部因素	13
1.2.2 外部因素	17
1.3 优先流研究的基本理论	18
1.3.1 能量理论	18
1.3.2 混沌及分形理论	18
1.3.3 渗透理论	20
1.3.4 非稳定湿润锋理论	21
1.3.5 优先流模型	21
1.4 优先流研究的发展历史	23
1.4.1 Monte Verita 会议(1989)	23
1.4.2 Monte Verita 研讨会(2006)	24
1.4.3 Monte Verita 研讨会(2009)	25
1.5 优先流研究实验技术方法	26
1.5.1 示踪技术	27
1.5.2 微张力测量技术	28
1.5.3 非侵入式影像获得技术	28
1.5.4 地下雷达探测技术	29
1.6 优先流与尺度	29
1.6.1 孔隙尺度	30
1.6.2 心土尺度	31
1.6.3 单个土体尺度	32
1.6.4 区域尺度	33
1.7 优先流研究中存在的主要问题和的发展趋势	33
1.7.1 存在的主要问题	33

1.7.2 研究发展趋势	34
第2章 长江上游暗针叶林生态系统优先流研究	36
2.1 研究区域状况	36
2.1.1 研究区域概况	36
2.1.2 试验区概况	39
2.2 研究内容与研究方法	42
2.2.1 研究目标和内容	42
2.2.2 研究思路	42
2.2.3 研究技术路线	42
2.2.4 研究方法	44
2.3 优先流分类体系	53
2.3.1 优先流分类类型表征	54
2.3.2 优先流现象表述	55
2.3.3 优先流分类体系	57
2.4 优先流产生判定与类型分析	59
2.4.1 优先流获取方法	59
2.4.2 优先流产生的判断依据	60
2.4.3 长江上游暗针叶林生态系统优先流判定	62
2.4.4 长江上游暗针叶林生态系统优先流类型分析	71
2.5 优先流特征分析	74
2.5.1 研究区域土壤水流特征分析	74
2.5.2 优先流特征分析	78
2.6 优先流过程分析	87
2.6.1 KDM 优先流模型构建	88
2.6.2 模型参数	91
2.6.3 KDM 优先流模型评价与分析	93
2.6.4 优先流对径流的影响分析	94
2.7 优先流产生因子分析	96
2.7.1 土壤孔隙状况	96
2.7.2 降雨特征分析	97
2.7.3 地被物层及根系层特性分析	98
第3章 华北土石山区鹫峰国家森林公园优先流研究	104
3.1 研究区概况	104
3.1.1 研究区位置与地质地貌特征	104
3.1.2 研究区的气候特征	104
3.1.3 研究区的土壤特征	104
3.1.4 研究区的植被特征	104
3.1.5 试验样地概况	105

3.2 研究目标、内容及方法	107
3.2.1 研究目标	107
3.2.2 研究内容	107
3.2.3 研究技术路线	108
3.2.4 实验方案	108
3.3 优先流路径分类及因子分析	110
3.3.1 样地土壤基本性质	110
3.3.2 鹭峰地区优先流类型分析	110
3.4 不同因子对优先流路径的影响	117
3.4.1 优先路径的定量表征	117
3.4.2 不同因子对优先流路径的影响	118
3.5 根系对优先流形成的驱动影响	129
3.5.1 试验方法	131
3.5.2 根系分布特征	131
3.5.3 试验样地染色情况分析	138
3.5.4 根长对优先流的影响	147
3.5.5 根系生物量对优先流的影响	151
3.6 土壤特性对优先流形成的驱动影响	153
3.6.1 土壤孔隙对优先流的影响	155
3.6.2 土壤孔隙分维对优先流的影响	158
3.6.3 优先流路径综合因子分析	159
3.7 土壤溶质运移研究	163
3.7.1 基本理论	163
3.7.2 土壤溶质运移研究状况	166
3.7.3 土壤溶质运移模型研究	169
3.7.4 土壤在饱和及非饱和两种状态下溶质运移研究	170
参考文献	182
彩图	

第1章 优先流研究起源、研究进展及发展趋势

1.1 优先流问题研究概述

土壤水分是土壤内所有物质运移过程的携带者,土壤内所含有的许多物质运移活动都是以土壤水分运移路径为基础,植物从土壤中吸取养分过程也包括在内,土壤水分运移研究是近几个世纪的焦点。早期的土壤水分运移认为其整体过程是一种相对平衡、均匀的流动,到20世纪70年代,这种观点逐渐弱化,如当时出版的 *Hillslope Hydrology* 一书中,水分在土壤中运移的壤中流过程分为基质流和管流两种形式。在20世纪七八十年代,多次发生“怪异”现象。如1980年,居住在美国长岛东部的居民非常惊恐地发现他们有大约1000多个饮用水井被涕灭威(aldicarb)所污染,而这种杀虫剂通常是用来杀死科罗拉多番茄瓢虫。熟悉当地情况的管理者对此现象也很疑惑,为什么这种杀虫剂到达地下水如此快,并且如此高浓度?长岛现象并不是个例,随后又多次有此类问题出现,如农业上化肥和农药使用量日益增加、工业废水大量排放、城市垃圾和污染物处理不当,因此农药和重金属在土壤内的运移以及对土壤和水体所造成的污染已成为世界性问题,土地资源日益退化,土壤盐渍化越来越严重。从2009年至今,我国已发生30多起特大重金属污染事件。随着城市化步伐的加快,城市垃圾污染问题、垃圾及渗滤液重金属污染问题、固体废弃物不合理堆放与填埋、重金属污染物会污染地下水源,对人类生存造成严重威胁。通过淋洗作用,土壤内可溶性污染物会运移至地下水,造成地下水污染。

这种地下水含较高浓度的杀虫剂现象以及各类污染问题与本书所谈的优先流现象密切相关。其实早在一个多世纪以前的1864年,研究入渗过程中的“大孔”就是优先流研究的萌芽阶段。Laves等于1882年,通过排水实验文字记载了此类现象。他们在Rothamsted研究降雨和排水的数量和成分时发现加到土壤表面上的水有相当数量通过大孔隙快速迁移,而与土壤本身所含水分只发生微弱的作用,快速排水后的排出水才更好地代表土壤基质中的水。因此他们认为,土壤排出水可以分为两部分,一部分是土壤开口管道排出的水,该部分在迁移过程中其成分未发生很大变化;另一部分是由土壤饱和部分的孔隙排出的水。1940年,Free等在研究68种土壤的理化性质时,发现入渗速率与非毛管孔隙度之间(大孔隙)有一定的联系;1943年,Bodman等发现当水被加入到干旱土壤时有一个特殊的湿润锋,其最大土壤含水量接近田间持水量;Horton认为土壤裂隙、虫孔和根孔都能显著增加入渗;1952年,Hill发表文章,以说明多孔介质孔隙的重力驱动下的非饱和流存在。上述现象都是早期有关优先流的描述,但当时并未引起人们的重视。

直到1982年,Beven和Germann的文章发表后,土壤优先流的研究才越来越引起人们的兴趣;1991年,Helling和Gish以土壤中植物根系穿插而产生的根孔、动物的运动通道和土壤的干缩缝等对水分和溶质运移的传导作用为依据,将其称为“优先路径”;2005年,

Peterson 和 Wicks 证明优先流较不流动水和扩散作用而言,对溶质运移影响更大;2009 年, Köhne 等分析了土壤结构特征与优先流发生强度之间的关系,并用典型染色模式进一步解释优先流;Nimmo(2012)阐释了非饱和条件下优先流发生的现象。优先流在土壤中普遍存在,而且在森林生态系统中优先流研究颇为重要(牛健植等,2007;Bogner et al.,2012)。

优先流及优先迁移在作为专业术语广泛地应用于表层水和地下水领域研究时,也以较高频率出现在科学和工程文献中,并得到了工业和制造业的承认,如制造业文献报道过大孔隙具有提高和降低工业物质迁移效率的作用(Dogu,1998);在采矿业,优先流现象影响到采矿操作中尾料处理工作,将干净物质放置于被断定是较易发生优先流的地方,以减少有害物质渗流量。优先流一词被不同社会阶层所使用,并各自表达了自己对“优先流”的理解,形成了许多观点。为便于研究工作的开展进行,促进未来理论工作及实验创新顺利开展进行,我们首先需要明确“优先流”的含义。

1.1.1 优先流基本内涵

优先流(preferential flow)是指涵盖所有水分及溶质沿某一路径迁移,同时绕过部分土壤基质的运动过程(Gerke,2006;Clothier et al.,2008;Flury and Flühler,1994),是描述在多种环境条件下发生的非平衡流过程的术语(牛健植等,2006)。它是近年来针对土壤水运动所提出的术语,但最初这一词的出现却没有真正的定义,仅被作为“pars pro toto”(法文,用部分代整体)用于描述快速流动现象。在美国遗产词典中,对“preferential”的解释有两种,一是“of, relating to, or giving advantage or preference”,二是“manifesting or originating from partiality”,即具有“相关,有利于、适宜和优先;表明或起源于偏袒、适宜”含义。从这些解释中,我们可以感受到这种“有利”或“适宜”意思就是在一个多孔介质中,流体沿一个相对有利的方向运动。上述表述中的流体分子并不代表整个多孔介质,而是流体内诸如溶质或重力垂直物等组成物质,随着流动的液体运动。“优先”一词仅仅是“转移”的补充修正,它本身的意思是某些有益或偏袒的成分融入非饱和溶质或悬着物中,其组成的溶质或物质的分子整体并不代表整个孔隙介质,而是在具有优先流特征和伴随溶质/悬着体的优先迁移基础上,以一分散的有限聚合体的形式存在(Nittmann et al.,1985;Flury and Flühler,1994)。

从广义上讲,“优先流”是结构非连续体、细或粗的平面及微小结构、根网结构、洞穴、裂隙的水文机械特征,同时也是有直接或间接关系的动物及其他结构生物体的骨骼几何特征和排列等方面的空间异质性的反应。这种各向异性是活跃的或不依靠水饱和度的(Ursino,1999),水饱和区域通常是由流动控制的,边缘水流动发生改变,水饱和区域的空间分布改变,并累及流动区域变化。对于所有的优先流,其流动过程都可以看作为流聚集进入集中区域。这种聚集可以在土壤表面及亚表面发生。“优先流”和“优先迁移”作为名词术语,用于描述一个过程,在这一过程中,大多数水和污染物质通过一个孔隙介质,沿着优先流动路径并绕过介质中的其他部分而做快速运移,作为水平衡的一个结果,中部的保留部分,水必须流动得相当慢,或根本不动。这一概念既不排出也不暗示不流动区对流迁移,它只是暗指在相对不流动区的对流溶质移动时间比优先流路径还要长,并且,如果水真的不动,此过程将无限延长。对于后者情况,局部的溶质在水分可动和不可动区域之间

的转换就代表另一个重要的溶质迁移过程。

优先流绕过部分土壤基质决定了其不平衡性(湿润锋的不稳定)和快速性(Skopp et al., 1981),同时还表现出不同时空尺度上的异质性(Köhne and Gerke, 2005)和因土壤滞后性影响而导致的路径稳定性(Ritsema and Dekker, 2000)。这些性质除了与水的黏度和溶质本身性质相关之外,还与生物孔隙(Sander and Gerke, 2009)、干湿或冻融交替引发的裂隙(Täumer et al., 2006)、土壤结构和质地(Kodešová et al., 2009)、土壤发生层(Franklin et al., 2007)、土壤斥水性(Doerr et al., 2007)、土壤的初始含水量(盛丰等, 2009; Sheng et al., 2009)、地形地貌(Kodešová et al., 2008)以及降水和灌溉性质(Gish et al., 2004; McGrath et al., 2010)相关。水分和溶质通过优先流路径快速迁移,不仅减少了植物对水分的利用效率,而且导致农药(Siczek et al., 2008)、重金属(Li and Zhou, 2010; Kobler et al., 2010)等有毒物质也快速迁移到深处,减少了与土壤的接触时间和空间(Weiler, 2005),导致地下水污染。从这个层面上,我们可以看出优先流已不单是水分运动规律的研究,更是关于生态环境安全的研究。

优先流是土壤中普遍存在的一种运动形式。Flury 等(1994)在研究了十几种不同类型土壤的优先流发生状况后提出优先流是普遍存在的,而不是某一特定条件下的特殊结果。现研究也证实了这一观点。从湿润地区到干旱及半干旱地区(van Schaik et al., 2008);从农田生态系统(Janssen and Lennartz, 2008),湿地生态系统(Ronkanen and Kløve, 2009),草地生态系统(Bachmair et al., 2009)到森林生态系统(牛健植等, 2007; Bogner et al., 2012);从质地和结构良好的壤土和黏土(Petersen et al., 2001)到质地粗糙、结构性差的砂土(Dekker and Ritsema, 2000);从单个孔隙(Hincapié and Germann, 2009b),单个土体(Öhrström et al., 2004)到区域水平上的集水区(Dadfar et al., 2010);从耕作方式上的传统耕作到现代的免耕耕作都存在着优先流现象(Cullum, 2009)。优先流运动的普遍性改变了我们对土壤水分运动的旧有的观念,使我们认识到水分运动已经不是达西定律和 Richards 方程所描述的均匀和稳定的运动,优先流更能从本质上描绘水分及溶质的运动过程(Buczko and Gerke, 2005; Šimůnek and van Genuchten, 2007)。

图 1-1(Jarvis, 2007)表示了优先流研究论文的发表情况,可看出近 30 年来论文数量表现出急剧增长的趋势。优先流研究内容已不再是纯粹的水分运动,更多的是杀虫剂、氮磷钾(Bundt et al., 2001)、胶体(Mishurov et al., 2008; Kjaergaard et al., 2004)、微生物(Brennan et al., 2010)和非水相流体(NAPLs)(Seyedabbasi et al., 2008; Tzovolou et al., 2009)等物质特别是对环境有害的物质迁移规律的研究。同时,研究也表现为多尺度上的结合,既有微观深入(胶体、病毒),又有宏观延伸,如研究集水区(van Verseveld et al., 2008)、分水岭(Eastman et al., 2010)和山坡水文(Graham et al., 2010)等大尺度上的优先流状况。在研究方法上,染色示踪法(Morris and Mooney, 2004; Sander and Gerke, 2007; Kasteel et al., 2005)、时域反射仪(TDR)法、电子计算机 X 射线断层扫描法(简称 CT 扫描法)(Luo et al., 2008)以及荧光示踪法(Burkhardt et al., 2008)得到了最广泛的应用,同时也有人使用乳胶结合染色的方法获得优先流运动的三维图。优先流研究方法的一个重要趋势是融入了越来越多的地学研究手段,特别是电阻率层析成像(ERT)法(Boucher et al., 2009; Koestel et al., 2009)。众多观测方法的互补和结合使得

在不同尺度上研究优先流成为可能。同时,基于大量的基础研究,也提出了许多优先流模型,做到了在一定精度上的预测(Köhne et al., 2009a, 2009b)。虽然我们对优先流本身的性质以及影响其发生和运动的因子已有了一定的认识,但仍然很难找到一个合适的模型来模拟预测优先流在土壤中的运动。寻找更加先进的可视化的技术来观察优先流的运动过程成为当务之急。

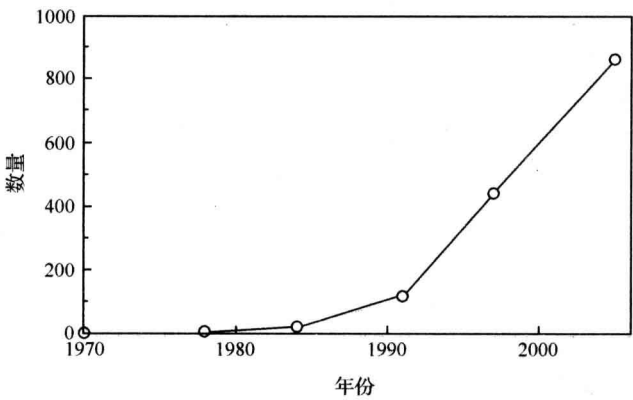


图 1-1 主题为大孔隙流的科技论文历年发表情况(Jarvis, 2007)

1.1.2 优先流表现类型

优先流表现类型多样,并且具有各自的空间尺度范围。表现类型主要包括孔隙流(macropore flow)、环绕流(bypass flow)、漏斗流(funnel flow)、指流(finger flow)、沟槽流(channel flow)、短路流(short circuiting flow)、部分置换流(partial displacement flow)、地下强径流(subsurface storm flow)、非饱和重力流(gravity-driven unstable flow)、异质流(heterogeneity-driven flow)、摆动流(oscillatory flow)及低洼再蓄满(depression-focused recharge)等。优先流表现类型见表 1-1;

表 1-1 优先流表现类型分类(Lin, 2010)

优先流类型	发生位置	流动方向	流动状况(土壤饱和度)	主要特点和机制	通常发生条件	文献记载
回归流	土壤表面	横向流动	饱和或非饱和	水分在坡面上部下渗后以和坡面平行的方向流动,在坡面下部重新渗出土表	主要发生于陡峭山坡的坡底或接近河道的地区	(Dunne et al., 1975)
洼地流	土壤表面	纵向流动	饱和	水流聚集在局部低洼地形处	常见于地表起伏不平的地区,尤其发生在强降雨和显著融雪后	(Mosley, 1979)
干流	土壤表面	纵向和横向流动	非饱和	通过植物的茎和树木的树干而流到枯落物层或土壤表面矿物层的水流,通常伴随着水质的改变	常见于强降雨后有乔木或其他植被覆盖的地区	(Levia and Frost, 2003)和(Li et al., 2009)

续表

优先流 类型	发生 位置	流动 方向	流动状况 (土壤饱和度)	主要特点和机制	通常发生条件	文献记载
穿透流	土壤 表面	纵向和 横向 流动	非饱和	水流通过植被冠顶而不 被截留直接到达土壤表 面(水质不发生变化)或 者在截留后以水滴的形 式从叶尖或枝头滴落到 土壤表面(通常水质发生 变化)	常见于有植被覆盖的地 区,尤其是乔木和作物的 树冠完全形成后	(Burch, 1989)和(Levia and Frost, 2003)
大孔 隙流	土壤 表层及 亚表层	纵向和 横向 流动	饱和或 非饱和	重力作用下通过各种表 面连通或不连通的孔隙 (直径通常>0.075mm) 的水流,如根孔、虫洞、裂 缝、团聚体之间的孔隙、 活着的根之间的孔隙以 及岩石碎块与周围土壤 基质的孔隙	常发生于有植物生长和 掘穴动物活动的各种土 壤中,以及结构良好的土 壤或有裂缝的土壤中(如 胀缩性强的黏土)	(McDonnell, 1990)
非饱和 重力流	土壤表 层及亚 表层	纵向和 横向 流动	非饱和	重力作用下通过各种连 通孔隙的水流	常发生于有植物生长和 掘穴动物活动的各种土 壤中	(Hill and Parlange, 1972)和(Bauters et al. ,1998)
斥水性 引起的 径流	土壤表 层及亚 表层	纵向或 横向 流动	非饱和	由土壤斥水性引起的人 渗差异或局部地表径流	常见于干旱季节或火灾 后的林地或草地	(Burch,1989) 和(Ritsema et al. ,1993)
异质流	土壤表 层及亚 表层	纵向或 横向 流动	饱和或 非饱和	土壤异质性导致的不均 匀流,影响因素上除了包 括其他类型优先流的诱 导因子外,还受到有土壤 有机物含量空间差异或 点状分布的松散土壤,波 状发育的土壤发生层,土 壤亚表层的局部斥水性, 岩石碎片和微生物活动	水分下渗中土壤剖面表 现出异质性	(Flühler et al. , 1996)
管流	亚表层	主要是 横向 流动	主要是饱和	一些孔径大而且连通性 好的高度集中的大孔隙 (叫做管流,经常直径> 1cm),主要包括大树的 腐烂孔、动物巢穴、化学 溶解或内部侵蚀	主要发生在森林河源流 域或存在穴居动物活动 的草地	(Uchida et al. , 2002)

续表

优先流类型	发生位置	流动方向	流动状况(土壤饱和度)	主要特点和机制	通常发生条件	文献记载
膜流	亚表层	横向流动	非饱和	特殊情况下的 大孔隙流,水沿着大孔隙壁流动(而不是填满整个大孔隙)	不饱和条件下,大孔隙或者中间孔隙的孔隙壁被湿润	(Germann et al., 2007)
垫面流 (枯落物流)	亚表层	横向流动	饱和或非饱和	主要是发生在土壤 O 层和 A 层的接触面(比如在森林的枯枝落叶层)	发生在林地,特别是在融雪或者大暴雨期间;当土壤冻结和土壤较湿时也易发生	(McDonnell and korsmeyer, 1991)
指流 (不稳定流)	亚表层	纵向流动	非饱和	当土壤质地表现为上粗下细,存在斥水性或者孔隙含有空气时,湿润锋变的不稳定并分裂形成形状窄、能快速运动的“指流”	大多发生在质地较粗的砂质土	(Ritsema et al., 1993)
漏斗流	亚表层	纵向或横向流动	饱和或非饱和	含有低渗透性透镜体的倾斜土层改变不饱和流的下渗方向并且水分在土层间或穿透土层后汇集	发生在含有黏土透镜体或者其他类型透镜体的砂质土壤中	(Kung, 1990a)
穿透流 (地下强径流)	亚表层	侧向流动	饱和或非饱和	不透水层促使水流向坡下运动,伴随有滞水层	发生在含有不透水层的土壤中或具有下列特征的土壤(如脆盘、硬磐、冻融层、冻土、石化钙积层、石化石膏层、薄胶层和其他黏土土层堆积导致弱隔水层或隔水层),最常见的是在高地地形上,特别是在潮湿的环境中,土壤有较高的导水率和土层中存在不透水层时的陡峭地形中	(Dunne et al., 1975)
土壤-基岩界面流	亚表层	侧向流动	饱和	发生在土壤-基岩界面	水分难以入渗的基岩,含有不透水层的分层或者密度极高的地质物质(C 层和 R 层),形成滞水层和水平方向上的水流运动	(Graham et al., 2010)
低洼再蓄满	土壤表层及亚表层	横向流动	饱和	土壤低洼地	地形低洼位置处	

发生在土壤环境中的16种优先流类型,每种类型都不是互相排斥的,通常情况下是几种类型共同存在于一个剖面中。

1.1.3 优先流特征

1.1.3.1 优先流环绕特征

优先流作为水在土壤中的某一部分的运移快于其他部分现象的反映形式,使土壤剖面出现不规则的湿润程度,所以优先流的一个重要特征是在湿润时,含水量峰值部分能够快速蔓延至某种深度,而绕过大部分的基质孔隙空间,这个重要特征就是优先流环绕特征(蒋小金等,2010)。

染色示踪技术是研究优先流环绕特征的重要手段,主要利用染色示踪及影像分析技术来判断,也可以通过双环入渗仪和染色示踪技术相结合的方法,对某一地区土壤优先流的环绕特征进行探讨,通过染色示踪技术可以标记优先路径,进而可以观测水分和养分运动过程,为农药和化肥对环境的污染提供理论依据。

牛健植等(2007)采集野外示踪影像图,除去没有被染色示踪剂染色的区域,仅仅留下染色较重的部分,最后对染色图进行分析与判定。通常可见土壤水分常沿一条或者几条较为明显的染色路径向下迁移运动,并且染色路径代表优先流路径,而非染色路径则代表基质流路径,土壤水分沿优先流路径向下运动而环绕土壤基质的部分则反映出该研究区域优先流的环绕特征。同时我们也会注意到一般水流过的区域的含水量大于其周边范围没有水流过的区域的含水量,此则表明水通常会绕过非染色区域,只在示踪染色区域运动,这也充分证明了优先流的环绕特征。

优先流环绕特征在一定的土壤深度范围内比较明显,并不是在每一土壤深度范围内均可明显的观察到,而且在不同的区域,优先流环绕特征亦会相应的改变,一般在优先流发生的土壤深度范围内较明显。

1.1.3.2 优先流非平衡特征

优先流作为一个流动路径,此路径中,入渗水没有充分的时间与土壤基质的缓慢运移的其他部分保持平衡,而具有非平衡性,这就是优先流的非平衡特征。牛健植等(2007)采用土柱水流速波动曲线图分析了优先流非平衡特征,通过土壤水分在优先流路径中的流动速度和基质流中的流动速度作比较,可以明显观察到水分运动呈现某种波动,流动速度不是平衡的也不是稳定不变的,而且我们也会注意到优先流路径中的流动速度大于基质流中的流动速度,因此可以反映出土壤中确实存在某种不稳定的非平衡流。

优先流是发生在土壤中的一种水分快速非平衡运动,它的出现导致传统达西定律推算的迁移速度、迁移时间和迁移量不可信。它是在瞬间流动区域内的一个非平衡、不稳定现象的反映,摩擦力和重力在短时间内不能较快平衡,所以就可能出现一种不可以忽略的惯性时间滞后力,来维持整体平衡,同时毛管力、惯性力以及复杂孔隙路径中阻力都可能出现,这些力在一个大尺度过程中,作用效果达到极点,就可能导致排出水孔隙中水流弥散。不仅在土壤中存在优先流现象,在油藏渗流过程中也同样存在优先流问题。我们认

为开展优先流研究可以有效地解释油藏渗流过程中一些无法解释的问题,由于优先流问题具有非平衡性,加大了油气渗流研究的难度及深度。

1.1.3.3 优先流快速穿透特征

优先水流能够快速地穿透土体,优先水流存在时,在水流穿透过程中机械弥散和分子扩散的作用相对较弱,非平衡管道流占据着支配地位,这时水流沿土壤大孔隙形成的管道迅速穿透土体,出现优先穿透,此时毛管力对水流穿透的影响很小,优先水流所携带的各种溶质包括土壤养分以及各种农业化学物质(无论是可吸收还是不可吸收的化学成分)在水流快速穿透土壤过程中,也快速地穿过土壤而出现在土壤的底层或地下水中,这就是优先流快速穿透特征(Richards et al., 2005)。在土壤优先水流存在下,非吸附性离子能够快速地穿透土体,穿透深度将远远超过按平衡流理论计算的深度。

蒋小金等(2010)在实验中也同样证明了在不同土壤深度情况下,一些优先路径,比如裂隙和孔隙,使得土壤中的运移速度增加了,水分和养分将会通过这些优先路径快速运移,表现出了土壤优先流的快速穿透的特征。

Petersen 等(2001)通过影像图进行分析,发现无论是在春季还是秋季,土壤优先流均能够穿透深层土壤层。Birkholzer 等(2004)应用概念模型来分析优先流穿透热裂隙岩体的可能性,这种概念模型包括两个主要部分:①实验室研究中在自然裂隙条件下的小尺度流动模型;②模拟优先流穿透热岩体时的半解析法模型。实验分析表明优先流能够穿透热岩体,原因就是优先流特征的多样性,甚至一些水流会快速穿透岩体,这些结果表明我们不能忽略优先流的存在。

1.1.3.4 优先流侧向入渗特征

优先水流的侧向入渗可以使溶质快速分布于土体的各个层次,土壤中溶质的径向分布以大孔隙为中心呈辐射状,表现为距大孔隙中心越近溶质浓度越高。盛丰等(2009)通过对田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究,进而对显色信息进行提取与分析,利用临界方法进行处理,同时将剖面的染色水流分布模式图片转化成黑白二元化信息图片,最终记录的是染色水流实际的分布模式,进而计算出染色面积与入渗深度之间的关系。通过分析,我们可以注意到染色面积随着入渗深度的增加总体呈现下降的趋势,但是染色面积并不是随着入渗深度的增加而单调递减,而是在局部区域会出现染色面积随着入渗深度的增加而增大。

之所以在局部区域会出现染色面积随着入渗深度的增加而增大,主要是土壤水侧向入渗的结果,并且在最大入渗深度以上的土壤区域并没有完全染色,这也是优先流侧向入渗因素的影响。

盛丰等(2009)对显色分析结果说明优先流侧向入渗随着土壤深度的增加,其明显程度也相应的发生变化,一般在土壤表层优先流侧向入渗不明显,随着深度的增加会愈加明显,当接近最大入渗深度时,侧向入渗强度反而减小,因此随着土壤深度的增加,侧向入渗强度会先增大后减小。蒋小金等(2010)通过双环入渗仪和染色示踪技术相结合的方法来研究典型黑土耕地上土壤优先流现象,对纵剖面染料分布特征和横剖面染料分布特征进