

土壤水分动态变化 与径流响应机理研究

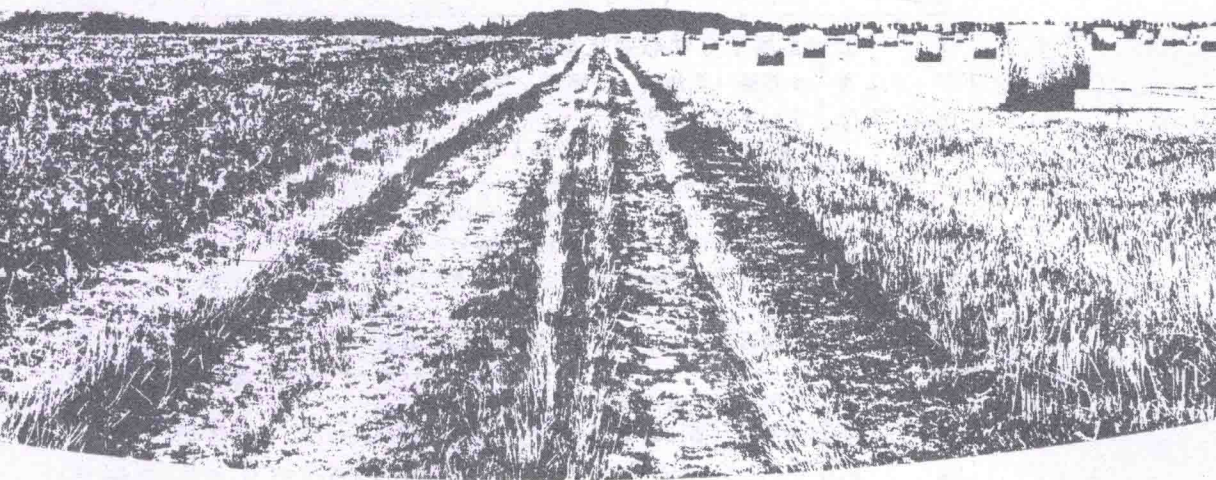
于福亮 李传哲 赵娜娜 刘佳 穆文彬 田济扬 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土壤水分动态变化 与径流响应机理研究

于福亮 李传哲 赵娜娜 刘佳 穆文彬 田济扬 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统阐述了降雨产流机制、影响因素以及土壤水分变化与降雨径流的关系。通过开展人工模拟降雨试验,着重分析了不同下垫面条件下降雨产流变化规律,不同降雨条件下土壤水分实时动态演变过程以及土壤水分与降雨产流的响应机理;在小流域尺度上,分析了自然降雨条件下不同尺度坡面径流场的降雨径流关系及土壤水分变化过程,研究了小流域尺度的土壤水分与降雨径流的动态响应关系;基于点尺度和小流域尺度的试验研究结果,对集总式水文模型(SIMHYD Model)进行了改进,并在中尺度流域上进行了校准和验证,取得了较好的模拟效果,为变化环境下流域降雨产流模拟提供了重要依据。

本书可供水文水资源、农业水土工程等专业的本科生、研究生学习,也可供从事水文、农业科学的相关研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土壤水分动态变化与径流响应机理研究 / 于福亮等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5170-3993-8

I. ①土… II. ①于… III. ①土壤水—动态—变化—关系—降雨径流—动态响应—研究 IV. ①S152.7
②P333.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321394号

书 名	土壤水分动态变化与径流响应机理研究
作 者	于福亮 李传哲 赵娜娜 刘佳 穆文彬 田济扬 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12印张 350千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序 | >>>

在气候变化和人类活动的双重影响下,流域水循环演变发生着深刻变化。气候变化通过降水、气温、日照、风、相对湿度等影响水文循环,进而改变降水、径流、蒸发、土壤湿度等水文要素的时空分布。人类活动则通过改变流域下垫面和水量的时空分布格局等影响水文循环过程。近几十年来,在全球气候变暖、人口增长及社会经济发展的共同影响下,我国一些地区或流域的水循环发生了明显的改变。大量观测事实表明,相同降水条件下,过去产流的区域现在产流量锐减甚至根本不产流了。是什么原因导致降水产流的变化呢?驱动降水产流变化的主导因素是什么?各影响因素的作用机理和驱动过程如何?未来降水产流发展变化趋势如何?这些均是变化环境下降水产流研究迫切需要回答的基础科学问题。

本书在传统水文学研究的基础上,以“试验研究-模型模拟-机理分析”为基本研究思路,对土壤-植被-大气相互作用的土壤水分与降雨径流之间的响应机制开展研究。在点尺度上,基于不同下垫面、地形坡度的人工降水产流试验,分析了植被类型、地形坡度等因素对地表径流、壤中流的影响,探讨了试验土槽中不同坡位、深度的土壤水分时空变异性,剖析土壤水分变化对降水径流响应关系的影响机理。在面尺度上,以崇陵流域为研究对象,对不同尺度的坡面降水-径流关系以及崇陵流域的土壤水分变化与径流响应关系进行分析和研究,并结合点尺度试验研究结果和小流域模拟与实测结果比对,对集总式水文模型 SIMHYD 在壤中流估算方法上予以修正和改进,并将改进后的模型应用到崇陵流域及大清河水系中阜平和紫荆关水文测站以上控制流域,取得了较好的效果。

本书系统地揭示了土壤水分对降水产流响应关系的影响机理,为深入分析和研究土壤水分时空变异性对流域降水产流过程、径流响应的阈值关系、水文连通性以及流域水文模型的模拟精度等影响提供了理论依据,同时也为推动基础水文学及新方法和新理论研究方面提供了有益的探索,为当前土壤水文学的发展以及变化环境下水文学的研究提供了一定的理论支撑和技术

指导。

水文学经过近 300 余年的发展，其在理论与应用技术上均获得了长足的进步，尤其是我国在 20 世纪 70 年代后水文应用技术发展相对较快，而水文学的基础理论研究则相对艰难。在全球气候变暖以及人类活动的影响下，水文学的研究也面临着更多挑战和机遇。本书的研究正是基于当前的变化环境对水文过程以及水文学研究的影响进行的初步探索，在此向本书作者表以真诚祝贺的同时，也期待他们能够更进一步深入研究，取得新的成绩，为推动变化环境下水文学研究作出更大的贡献。

中国工程院院士
中国水利水电科学研究院
水资源研究所名誉所长



2015 年 8 月

前言 | >>>

土壤水对区域水资源的分布起着关键作用,其时空变异性对流域降水产流过程、径流响应的阈值关系、不同尺度间的水文连通性以及流域水文模型的模拟精度等有重要的影响,如何更好地分析不同尺度上土壤水分的时空变异性是水文研究工作面临的挑战之一。在水文循环过程中,土壤水分也通常被用于描述流域水文响应的关键状态变量,直接影响着流域降水产流及洪水预报等水文过程。因此,研究土壤水分变化、降水和径流之间的关系,系统揭示土壤水分对降水产流响应关系的影响机理,对生态、农业及水文过程等具有重要的理论和实践意义。

本书的研究以不同降雨、植被、地形等条件下土壤水分动态变化及其对降雨径流的响应关系和机制为主要研究内容,通过试验研究、模型模拟、机理分析等方法,探索和研究土壤水分变化与降雨径流的响应机理,以期为变化环境下降雨产流演变机制及水文模型的发展提供理论依据和技术支撑。

全书内容共分7章。第1章理论基础及研究现状,概述了土壤水在水循环过程中的重要作用,同时对产流形成过程、基本理论和主要影响因素进行归纳,总结了土壤水分变化对降水产流过程的影响及其在水文模型中的作用,提出了当前土壤水分变化与降水产流模型研究中存在的问题;第2章试验设计及观测方法,针对不同尺度的试验设计方案、观测方法及研究流域概况进行扼要阐述和说明,介绍了点尺度下开展的不同下垫面人工模拟降水产流试验设计,包括试验材料及测量方法、试验观测项目、土壤水分传感器的布设等;简要阐明崇陵流域的基本概况及不同尺度坡面径流场试验观测项目及内容;第3章不同下垫面降雨产流机理分析,主要分析了不同下垫面条件(春玉米、小麦、草地及裸地)下地表径流、壤中流的产流规律,并对壤中流的退水规律进行回归分析和模型模拟,同时采用多元线性回归模型对地表径流、壤中流的主要影响因素进行研究和分析,讨论和分析试验条件下的主要降水产流机制及试验研究中存在的不足;第4章不同下垫面土壤水分动态变化过程,研究了不同下垫面类型、不同坡度下土壤水分动态变化过程,同时采用高时间频率的土壤水分监测数据,刻画降水产流过程中土壤水分实时动态变化过程,

连续降水及不同前期含水率下的土壤水分变化、降水结束后的土壤水蓄变量以及不同植被的土壤入渗率进行分析和模拟计算,最后采用排序稳定性方法分析了不同深度的土壤水分时间稳定性;第5章土壤水分变化与降雨产流响应机理,重点分析了不同前期降雨条件下,不同深度的土壤水分变化与地表径流、壤中流、径流系数之间的关系,探讨土壤水分变化与降雨产流的响应机理;第6章典型流域降雨产流过程模拟,简要介绍了SIMHYD水文模型的主要计算原理,并针对模型实际应用时存在的一些问题,结合点尺度及小流域尺度的降水产流过程的物理试验,对SIMHYD水文模型的水文计算过程进行修正和改进,使得改进后的水文模型更适于我国华北半湿润半干旱地区降水径流的模拟和估算;第7章结论与展望,总结了主要研究成果和结论,从降水产流试验研究方面、模型构建方面以及不同尺度间土壤水分时空变异性及降水径流关系方面,对未来降水产流理论的发展趋势进行了展望。

本书的研究工作得到了中国水利水电科学研究院“十二五”重大科研专项(资集1232)、国家自然科学基金项目(51209225、51409270)、国家国际科技合作专项(2013DFG70990)、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2014490611)、水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金(2012B093)的共同资助。本书具体编写分工如下:第1章由于福亮、李传哲、赵娜娜、刘佳、张伟、王恒执笔;第2章由于福亮、赵娜娜、李传哲、刘佳、穆文彬执笔;第3章由赵娜娜、李传哲、于福亮、穆文彬、田济扬、李义豪执笔;第4章由赵娜娜、李传哲、顾艳玲、李春丽、穆文彬执笔;第5章由赵娜娜、李传哲、刘佳执笔;第6章由李传哲、赵娜娜、刘佳、李兰涛执笔;第7章由于福亮、李传哲、赵娜娜、刘佳、尹吉国、田济扬执笔。全书由于福亮、李传哲、赵娜娜、刘佳统稿。

在本书的撰写过程中,王浩院士给予了精心的指导和建议,中国科学院水利部水土保持研究所赵军,保定市水土保持试验站张广英、王胜宝等专家在试验布设与实施过程中给予了鼎力帮助和支持,书稿校审过程中也得到了河海大学芮孝芳教授、河北省水文水资源勘测局刘克岩教授的仔细校阅与指导。在此,向各位参与本书编写以及给予帮助和支持的各位专家和团队成员表示衷心的感谢!

由于降雨产流形成过程的复杂性,鉴于作者水平有限,书中的一些观点、方法等可能存在缺陷与不妥之处;同时,在引用文献时,也可能存在挂一漏万的问题,殷切希望广大读者与同行专家给予批评指正,以便作者在今后的研究工作中不断补充、完善。

作者

2015年8月

目录 | >>>

序
前言

第 1 章 理论基础及研究现状	1
1.1 降雨产流基本理论	2
1.1.1 降雨产流过程	2
1.1.2 产流机制	3
1.2 产流主要影响因素	6
1.2.1 降雨类型	6
1.2.2 土地利用/覆被变化	8
1.2.3 土壤物理特性	10
1.3 土壤水分变化对降水产流的影响	10
1.3.1 土壤水分的人渗	11
1.3.2 土壤水分的空间变异性	15
1.3.3 初始土壤含水率	17
1.3.4 大孔隙流	18
1.4 降雨产流模型	19
1.4.1 水文模型的发展历程	19
1.4.2 水文模型的分类	22
1.4.3 土壤水分运动的模拟	23
1.4.4 水文模型中土壤水分数据的同化吸收	30
1.5 存在的问题	30
1.6 本章小结	31
第 2 章 试验设计及观测方法	32
2.1 点尺度试验设计与观测方法	32
2.1.1 试验土槽设计及土壤特性	32
2.1.2 土壤水分传感器布设与校准	33
2.1.3 下垫面类型及设计雨强	35
2.1.4 试验测量项目及统计方法	37
2.2 小流域基本概况及试验观测项目	39

2.2.1 自然地理概况	39
2.2.2 土地利用及社会经济概况	40
2.2.3 水文气象	41
2.2.4 试验观测项目	42
2.3 本章小结	43
第3章 不同下垫面降雨产流机理分析	44
3.1 不同下垫面地表径流变化规律	44
3.1.1 冬小麦不同坡度下各生育阶段地表径流变化过程	44
3.1.2 春玉米不同坡度下各生育阶段地表径流变化过程	47
3.1.3 草地及裸地地表径流变化过程	50
3.1.4 坡度、雨强变化对地表径流的影响	53
3.2 不同下垫面壤中流变化规律	56
3.2.1 不同坡度下冬小麦壤中流径流变化过程	56
3.2.2 不同坡度下春玉米壤中流径流变化过程	56
3.2.3 草地、裸地壤中流径流变化过程	58
3.2.4 不同下垫面壤中流退水规律分析	60
3.3 不同下垫面径流含沙量对比	65
3.4 不同下垫面降雨径流分析	69
3.4.1 径流系数	69
3.4.2 径流滞后时间	74
3.4.3 产流量影响因素的定量分析	76
3.5 本章小结	79
第4章 不同下垫面土壤水分动态变化过程	81
4.1 坡面土壤水分年内变化规律	81
4.2 降雨产流条件下土壤水分动态变化过程	86
4.2.1 次降雨过程中土壤水分实时动态变化规律	86
4.2.2 连续降雨条件下土壤水分动态变化	93
4.3 不同前期土壤含水率下的土壤水分动态变化过程	93
4.4 土壤水蓄变量变化	97
4.4.1 不同坡位、深度处的土壤水蓄变量	97
4.4.2 不同植被的土壤入渗率比较	101
4.5 土壤水分时间稳定性分析	105
4.5.1 排序稳定性分析	105
4.5.2 自相关分析	110
4.6 本章小结	114
第5章 土壤水分变化与降雨产流响应机理	116
5.1 前期土壤含水率与径流系数的关系	116

5.2	不同植被类型下土壤水分变化与产流响应机理	118
5.2.1	土壤水分变化与地表径流响应关系	118
5.2.2	土壤水分变化与壤中流响应关系	123
5.3	土壤水分与径流的响应时间	128
5.4	崇陵流域土壤水分变化与降雨径流响应机理	132
5.4.1	不同径流区降雨产流对比分析	132
5.4.2	崇陵流域降雨径流关系分析	135
5.4.3	流域土壤水分变化对降雨径流的响应	138
5.5	本章小结	140
第6章	典型流域降雨产流过程模拟	141
6.1	模型概述	141
6.1.1	模型结构	141
6.1.2	模型主要计算过程	142
6.1.3	模型改进	143
6.2	坡面径流场降雨产流过程模拟	145
6.3	阜平和紫荆关流域径流模拟	147
6.3.1	流域概况	147
6.3.2	阜平流域降雨径流模拟	150
6.3.3	紫荆关流域降雨径流模拟	156
6.4	本章小结	160
第7章	结论与展望	162
7.1	结论	162
7.2	展望	165
	参考文献	167

第1章 理论基础及研究现状

水文循环过程与气候变化及人类活动的关系甚为密切。一方面,气候变化通过降雨、气温等影响水文循环过程,使蒸发、径流、土壤水分等水文要素的时空分布发生变化。我国近50年来平均气温和降雨量呈逐年上升趋势,尤其是近几年我国极端天气气候事件频发,南方干旱及持续高温,而北方地区的汛情则时有发生。国家气候资料显示,南方部分地区2013年7月平均气温与历史同期相比偏高 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。南方干旱情势严重,7—9月长江中下游地区降雨量达到了1951年以来的最低值(仅116.6mm);珠江和淮河流域的降雨量也比常年同期分别偏少了17%和16%。而东北地区嫩江、松花江、黑龙江干流水位持续超警戒水位,7—9月全国平均降雨量169.2mm,东北、华北、西北地区的降雨量分别比常年同期多了36%、35%和36%。近年来的降雨观测数据表明,我国主要雨带逐渐北移,南北地区的降雨量呈现北方增加、南方减少的趋势。从20世纪90年代初开始,我国夏季主雨带从长江以南至长江、黄河之间逐渐移动,2009—2012年运移至华北南部至黄淮一带。与之相反,最近4年南方地区夏季降雨总体偏少,“南方水多,北方水少”的格局在气候变化和人类活动的影响下逐渐发生改变。

另外,人类活动也通过改变流域下垫面和水量的时空分布等影响着全球水文循环,这与极端降雨事件直接相关^[1]。人类活动所导致的全球变暖是20世纪下半叶北半球2/3的陆地区域强降雨事件增多的诱因之一^[2]。20世纪全球降雨变化趋势表明,人类活动对北半球中纬度地区降雨量的增加及热带和亚热带地区的逐渐干旱、南半球热带和亚热带地区的湿润有显著影响^[3]。这些由于人类活动所引起的降雨、气温等全球水文循环要素的变化对生态系统、农业以及人类健康的影响要远比通过模型模拟估算的结果大,尤其是在对降雨变化等较为敏感的地区。

全球水文循环中,土壤水起着至关重要的作用,是水文循环的关键环节之一,但其在全球水资源储量中所占比例非常小。据估计,全球土壤水储量为1650万 m^3 ,分别占全球水资源总量和淡水总量的0.0012%、0.05%,但是却对大气、陆地及地下水之间的交互影响起着关键作用。土壤水对许多水文过程,如产流、坡面侵蚀、滑坡、土壤形成过程、溶质运移、净辐射中潜热和显热通量的比例以及土地利用、水资源及其他自然资源的管理等影响巨大,尤其是浅层土壤水,决定着地球表面水量和能量的分配比例,在全球水文循环中起着核心作用^[4]。此外,土壤水分的变化也会对点尺度上霍顿坡面流及饱和坡面流的产生^[5]、亲水性及疏水性之间的转换^[6]、入渗过程和植被动态变化^[7]以及山坡和流域尺度上产流对极端降雨事件的响应等^[7-11]产生影响。

土壤水通过陆地、大气间的交互机制对区域水资源的分布起着关键作用,其时空变异性对流域降雨产流过程、径流响应阈值及不同尺度水文连接性、流域水文模型的模拟精度等有重要的影响,如何更好地分析不同尺度上土壤水分的时空变异性是水文研究工作面临的挑战

之一。在水文循环过程中，土壤水分也通常被用于描述流域水文响应的关键状态变量；而前期土壤水分状态对流域降雨产流机制及洪水预报等水文过程起着关键控制作用。因此，土壤水分数据的监测及其时空分辨率对生态、农业及水文过程和水文模型的研究有很大帮助。

在全球气候变化和人类活动影响不断加剧的双重压力下，近几年，我国北方地区强降雨事件频发，引发山洪、泥石流等地质灾害以及城市内涝。因此，开展变化环境下我国北方地区尤其是华北地区人类活动影响剧烈区域降雨产流机制的演变机理及流域水文演变规律的模拟研究，以及与之相应的土壤水分的变化、时空分布格局对降雨产流过程、流域水文响应关系的影响研究等，加强对流域产汇流变化规律的认识，尽可能避免或降低区域洪涝灾害事件的发生，对区域生态环境和农业管理以及水资源可持续利用发展具有重大理论和实践意义。

1.1 降雨产流基本理论

1.1.1 降雨产流过程

一场降雨中究竟有多少水量能够转换为河道径流是水文学研究中的重要问题之一，降雨后水的去向、在流域内滞留的时间以及流向河道的水流路径等都是降雨-产流过程中需要解决的问题。降雨到达地面后被分解为两部分：一部分以地表径流（overland flow）的形式直接流入到河道内；另一部分则入渗（infiltration）到土壤中，入渗水量可能在土壤中进行侧向流动，较快地进入到河道中，即壤中流（interflow 或 subsurface flow），也有部分入渗水量以深层渗漏（percolation）的形式补给地下水，维持河道内的稳定流量，通常称之为基流（baseflow）。图 1-1 即为降雨产流过程的概略描述，图中如陆面蒸发、叶面蒸腾等各种基本概念在此不再赘述。

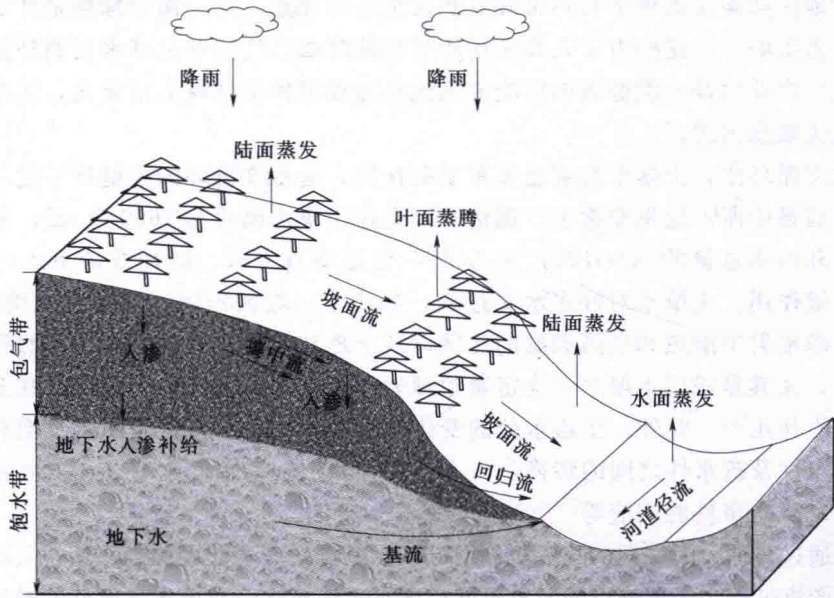


图 1-1 降雨产流过程概略图

径流中的地表径流 (surface runoff) 和壤中流通常会在较短的时间内流入河道 (具体时间视情况而定), 而通过深层渗漏到达地下水的部分水流入渗速度非常缓慢, 可能需要较长一段时间才能到达河道内, 如几周、几个月甚至几年的时间。传统水文学中通常将这种快速流与慢速流的形式作为对径流 (runoff) 与基流的描述和区别, 快速流通常源于降雨, 而慢速流的主要成分则为地下水径流或者壤中流。但是 Kirchner (2003) 通过研究认为事实并非如此, 在许多小流域中河道径流对降雨响应迅速, 但示踪同位素的波动却受到严重抑制, 这说明在这些流域中的暴雨径流大多是“旧水” (old water), 随之而来的问题是流域是如何将这些水储存了几周或几个月后却又在降雨发生的短短的几分钟或几个小时内释放呢? 这也是目前流域水文学研究中存在自相矛盾的问题之一^[12]。那么一次降雨径流中如何区分“新水” (new water) 与“旧水”呢? 这些“旧水”究竟储存了多长时间呢? 对水分运移时间分布的量化和模拟可以很好地回答上述问题。水分从土壤/地下运移到河网的时间 (即水分运移时间) 可以用来描述该流域内水分的储存、水流路径的非均匀性及来源过程, 是生物地球化学过程以及流域对人类活动、污染物及土地利用变化敏感性的重要约束条件。如何将运移时间用于定量描述流域水流过程及降雨产流模型的进一步发展和检验仍是未来水文研究面临的挑战之一^[13]。

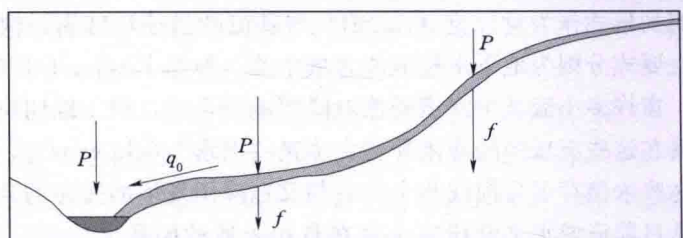
1.1.2 产流机制

降雨产流主要取决于下垫面结构及降雨特性, 霍顿于 1935 年提出的产流理论指出了产流的基本物理条件: 降雨强度超过地面下渗能力和包气带的缺水量得到充分补给, 即下渗水量与蒸发量之差超过包气带的缺水量^[14], 即一场降雨是否能够产流主要受控于包气带在地表的“筛子”作用和包气带土层的“门槛”作用^[15,16]。这也为“蓄满产流”和“超渗产流”的提出奠定了理论基础, 同时也是新安江二水源流域水文模型划分地表水、地下水的依据^[17]。霍顿产流理论只能解释均质包气带的产流机制, 随着研究的深入, 人们发现在一些表层土壤十分疏松且下渗能力很大的地区即使降雨强度不够大, 也会有地面径流产生^[18,19], 对此现象, 经典的霍顿产流并不能解释。

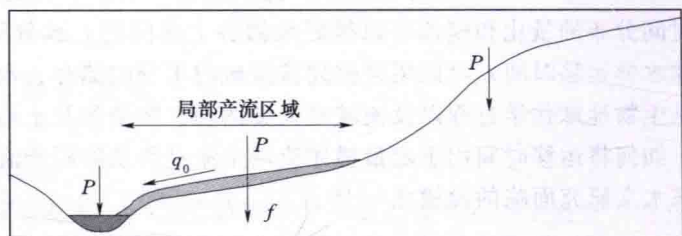
自 20 世纪 60 年代起, Hewlett^[20] 就关注到这个问题, 直至 20 世纪 70 年代初期, Kirkby^[21] 等在大量的水文学试验的基础上提出了山坡水文学产流理论, 对壤中流和饱和地面径流的形成机制进行了详细的阐述: 两种透水性能不同的土层交汇部分存在着相对不透水界面, 该相对不透水界面上能够形成临时饱和带并发生侧向流动, 即壤中径流。如果该界面上土层的透水性远远大于下土层, 则随着降雨的继续, 临时饱和带逐渐向上扩延直至上层土壤达到饱和; 此时如仍有降雨补给, 则会形成地面径流, 即饱和地面径流。

山坡水文学的发展使得产流机制的研究更为深入, 人们对自然界复杂的产流现象的认识也进一步加深。芮孝芳等^[19] 对近几十年来的产流理论及计算方法的发展进行了详细的阐述, 指出了现有产流机制中存在的不足, 即忽略了地形坡度和土层各向异性对产流的影响。此外, 壤中流和地下水径流形成过程中非饱和侧向流的作用也没有得到充分考虑。他认为对地形坡度、土层各向异性及非饱和侧向流的作用进行深入的试验和分析, 将会有力地推动产流机制的进一步研究。于维忠^[22] 和芮孝芳等^[15,16,19] 进一步剖析了地面径流、壤中流、饱和地面径流及地下水径流的产生机制, 将其归为界面产流规律, 即任何一种径流成分都是在两种不同透水性介质的界面上形成的。

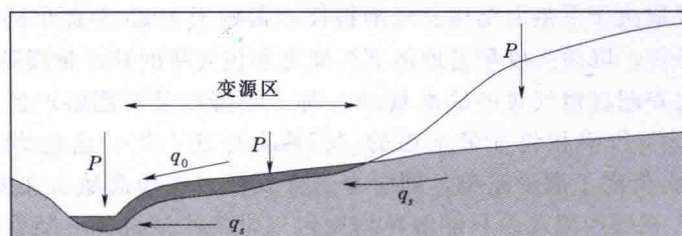
主要的产流机制如图 1-2 所示,每一种产流机制在产流量、径流峰值及到达河道的时间上对降雨/融雪的响应不同,其每一个过程的重要程度主要受气候、地质、地形、土壤特性、植被及土地利用的影响,主要产流过程可能会随着降雨强度的改变而不断变化^[23]。



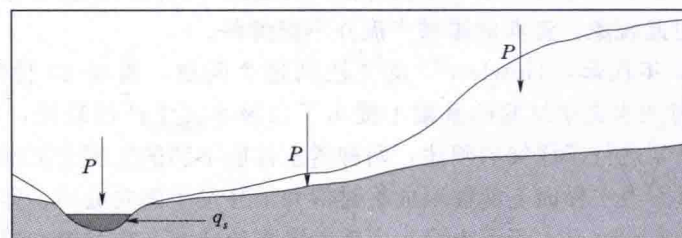
(a) 超渗产流



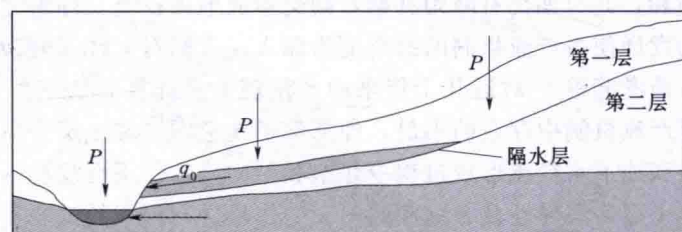
(b) 局部区域超渗产流



(c) 饱和产流



(d) 地下径流



(e) 上层滞水产流

图 1-2 产流机制分类 (Beven, 2011)

超渗产流也叫霍顿坡面流 (infiltration excess overland flow), 是由定量水文学之父霍顿 (Horton) 于 1933 年提出的 [图 1-2 (a)], 将土壤入渗能力 (infiltration capacity) 引入到水文模型中^[24]; 20 世纪 60 年代, 美国水文学家对降雨产流进行了大量的试验研究和分析, 通过在田纳西河流域的研究发现, 由于土壤性质的空间变异性对土壤入渗能力的影响及降雨空间变异性, 一次降雨中并非整个流域都会发生超渗产流。因此 Betson (1964) 提出了流域部分产流 (partial area) 的理论, 即一场降雨条件下仅有一小部分流域面积存在超渗产流, 他认为既然入渗能力随着土壤水分的增加而减小, 且水流沿山坡向下流动会使坡脚土壤更为湿润, 那么产流面积也会由刚开始的河道附近逐渐向坡顶扩展 [图 1-2 (b)]。坡面产流后沿着坡向流动到土壤入渗能力较高的地方就会入渗到土壤中 (“run-on” process), 同时, 如果产流历时较短, 这部分产流量很可能全部入渗而无法汇入河道。超渗产流通常发生在没有植被或者植被稀少的地方, 半干旱地区的牧地及耕地在强降雨条件下会有超渗产流发生。此外, 城市区域的水泥路面也可观测到非常明显的超渗产流。

在大部分土壤入渗能力较高的湿润区, 植被覆盖可使土壤免受雨水击打和冲刷, 同时由于土壤中的腐殖质及微生物活动使得土壤结构比较松散, 降雨强度很难超过土壤入渗能力, 超渗产流几乎不可能发生, 只有当降雨区域达到饱和后才会有产流发生, 即饱和产流机制 (saturation excess overland flow)^[25], 如图 1-2 (c) 所示。地下径流的产流机制如图 1-2 (d) 所示。

由于前期条件、土壤特性及降雨强度不同, 同一流域在不同的时间或地点也可能有超渗产流、饱和产流及单一壤中流 3 种不同的产流机制发生。此外, 在土壤水平边界渗透性能非常低的地方可能形成超渗产流, 致使土壤中产生部分滞留水甚至会使非饱和带的表层土壤达到饱和^[26] [图 1-2 (e)]。由于浅层地下水位的波动性, 饱和区面积也会随着时间和季节变化, 即为变源区 (variable source area)^[27], Dunne 对不同环境下的主要降雨产流机制转换进行总结归纳^[28], 如图 1-3 所示。

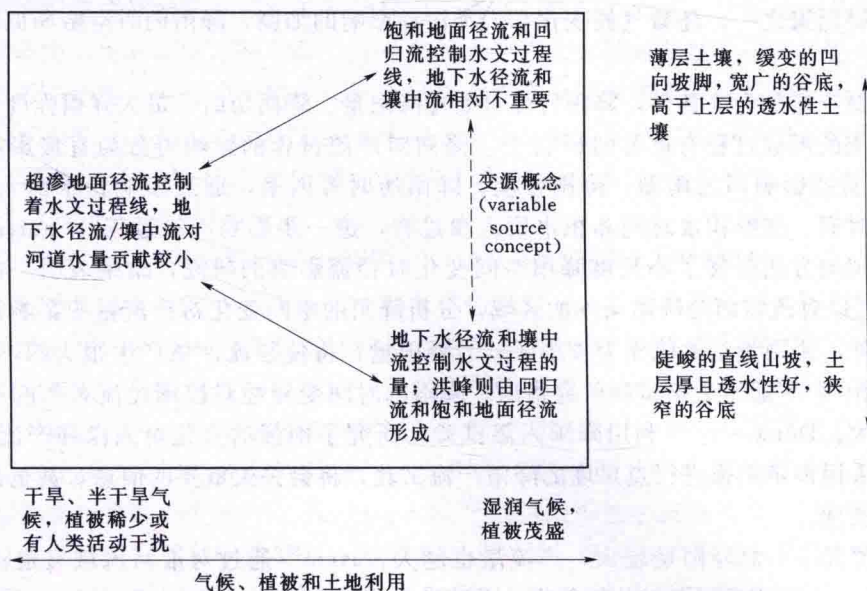


图 1-3 山坡降水产流主要控制过程及转化示意图 (Dunne, 1978)

产流机制和产流过程不仅与降水过程中的条件有关,前期条件(antecedent conditions)以及对陆地水文循环过程的理解与描述也是降水产流中需要定量分析的,这对水文模型的不断发展至关重要。上述对产流机制及产流过程在概念上进行了简述,事实上流域产流过程是非常复杂的,每个流域或山坡的地形、土壤及物理属性等都是不同的,因此水文模型面临的挑战就是如何平衡物理概化与模型复杂性,以及在水文模型中扩充/增加对物理属性的详细描述。目前对于产流的理解包含了水分在土壤孔隙及大孔隙中的运移,这些水分在土壤中的运移一般遵照流体运动的物理法则,但是由于缺乏对其详细的流体几何学的了解而无法应用流体运动理论,最终也只能对产流过程进行概化或参数化。水文模型就是将这种实际的物理过程进行概化并通过数学描述的形式来模拟实际降水产流过程,如何减小模拟与实际过程的差异以便更好地模拟降水产流过程是目前水文研究中的热点之一。

1.2 产流主要影响因素

降雨产流过程受区域气候、雨强、植被、土地利用、地形及土壤等因素的控制。图1-3简单描述了不同降水产流机制下的主要控制因素,它随着气候、地形、土地利用等因素的变化而变化,在干旱、半干旱以及人类活动(如农业活动、城镇化等)影响较大的区域入渗能力是其主要限制因素,其产流机制主要为超渗产流,而在大多数湿润地区主要的产流为壤中流及饱和坡面径流^[29]。降水产流的影响因素较多,本研究主要从降水、土地利用及土壤特性等方面分析不同条件下产流变化的主要影响因素。

1.2.1 降雨类型

降雨是水文循环过程的关键要素,降雨的不确定性和时空变异性是影响流域水文模拟结果的关键因素之一。随着气候变化和人类活动影响的加剧,降雨的时空格局也随之发生变化。

降雨是产流的先决条件,降雨特性(如总降雨量、降雨历时、最大降雨强度等)及其变化对产流的形成过程有重要的影响^[30]。降雨对产流过程的影响可分为直接影响和间接影响^[31]。直接影响即为雨型、降雨强度、降雨历时等因素,通过影响积水前入渗过程、初始积水时间、持续积水时间和积水后入渗过程,进一步影响产流过程。Faurès等^[32]采用数值模拟的方法开展了小尺度降雨空间变化对径流影响的研究,结果表明,在小尺度(5hm²)且以对流雷雨为降雨条件的区域,分析降雨的空间变化对产流量的影响是很有必要的。此外,用雨量站的值作为较小区域的降雨量,将使径流评估产生很大的不确定性。Wainwright等^[33]通过大量试验研究指出,降雨的时间变异性对控制径流系数的尺度依赖性影响较大。Dunkerley^[34]利用降雨入渗试验,研究了雨强的变化对入渗和产流的影响,并指出若采用恒定雨强进行点尺度的降雨产流试验,将会丢失重要的信息,甚至会歪曲径流产生的机理。

一般情况下,总降雨量越大,产流量也越大。Han^[35]通过对淮河流域五道沟试验站的30场降雨径流的观测资料分析得出,总降水量与产流之间的相关性最大。雨强的变化会对起流历时、产流量等产生影响。在我国黄土高原地区,起流历时一般与雨强呈幂函数

关系,起流历时随雨强的增大而缩短;而暴雨条件下,干燥黄绵土的坡面产流过程可简化为3个阶段:暴雨产流阶段、产流后入渗率不稳定阶段及入渗率相对稳定且变化主要受雨强影响阶段^[36]。David等^[34]利用人工降雨模拟器对变化雨强和恒定雨强下的产流和入渗过程进行对比分析,变化雨强下的径流系数及峰值流量比远高于恒定雨强,差异非常显著。因此在进行点/小尺度上的入渗和侵蚀研究时,连续采用一个恒定雨强来模拟天然降雨很可能无法观测到径流产生过程中一些很重要的信息,并使产流机制失实。在平原区天然降雨极值强度与径流系数关系成立的前提是土壤饱和度不超过0.6,次平均降雨量要大于 $0.05\text{mm}/\text{min}$ ^[37]。

我国沈冰等^[38]通过黄土坡地降雨径流形成过程的试验,研究了短历时降雨强度对坡地入渗、坡面产流等过程的影响,阐明短历时雨强对入渗的影响表现为地表积水前,雨强对入渗量及湿锋下移速率有明显影响,积水后影响甚小可忽略不计。李裕元等^[39]通过人工模拟降雨试验,研究了黄绵土不同雨强条件下坡面入渗过程与产流特征。结果表明,在地表坡度 15° 、土壤容重 $1.28\sim 1.30\text{g}/\text{cm}^3$ 的条件下,坡面平均入渗率与降雨强度具有极显著的抛物线函数关系;初始产流时间随雨强的增大而减小,二者呈幂函数关系。坡面产流以后,入渗率随降雨历时呈幂函数形式降低,坡面产流强度随降雨历时的延长呈对数函数形式增加。王占礼等^[40]采用试验的方法研究了黄土裸坡地的降雨产流过程,结果表明,雨强对径流深的影响可用线性相关方程表示,且影响程度远大于坡长、坡度因子。屈丽琴等^[41]利用室内小流域降雨产流试验得出,稳定雨强条件下,流量过程线呈现出产流、稳定和退水3个明显的阶段,产流和退水过程涨落的剧烈程度、稳定阶段的流量大小随雨强增大而增大,稳定阶段的持续时间与降雨历时成正比;变雨强的情况下,流量过程线没有稳定的阶段,流量随雨强变化而变化。

基于野外/室内降雨产流试验可以具体地分析和比较不同条件下的产流过程,建立产流与其影响因素之间的关系式,便于对降雨产流过程的深入研究。但是这种基于试验的研究,受其研究尺度和研究范围所限,在一些较大的研究区域或流域,很难反映其空间变异对产流结果的影响。水文模型的产生和发展则为不同尺度的降水产流过程模拟和计算提供了一个很好的平台。降雨作为模型的主要输入参数,其准确性对模型的输出结果产生很大的影响,因此,降雨分布不确定性、空间变异性等是水文科学研究一直探讨的热点问题^[42,43]。

Shah等^[44,45]建立了随机降雨模型并结合SHE模型对降雨的空间变异性与流域响应之间的关系进行研究和探讨,结果表明:在不同的状态下,采用流域平均计算的降雨对径流预测结果影响很大,降雨的空间变异性与土壤含水率的空间分布之间的相互作用,使得湿润状态下流域响应具有高度的非线性。降雨分布的不确定性会影响到径流量、洪峰流量和产沙量的不确定性,尤其是雨量站站网密度、雨量站的空间布局以及暴雨的时空特性等都对流域径流计算和模拟有较大的影响^[46],同时降雨的空间分布及观测精度会影响流量过程线,引起模型参数的变异^[47]。Bronstert等^[48]通过对山坡小流域尺度上降雨强度的时间变异性对超渗产流过程影响的研究,得出山坡小流域尺度上,尤其是在超渗产流时,降雨对水文过程起更为主导的作用,且降雨强度的时间变异性会引起产流量的增加。张士锋等^[49]分析了黄河流域降雨的时空不均性与产流量的关系,结果表明:降水的空间分布不