

坡面产流机制研究刍议

吴 伟¹,王雄宾²,武 会²,张宏芝²,祁生林³,陈峻崎⁴,鲁绍伟²

(1. 北京市水务局潮白河水库管理处,北京 101300;2. 河北农业大学,保定 071000

3. 北京林业大学,水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点开放实验室,北京 100083;

4. 北京市林业局,北京 100029)

摘 要:随着水文学的发展,坡面产流问题越来越受到水文学领域的重视。对坡面产流机制(这里的坡面产流包括地表径流产流和壤中流产流两个部分)的研究现状详细进行了回顾与分析,并提出了目前产流机制所面临的问题,以期推动降雨产流计算方法和流域水文模型机构的发展。

关键词:坡面产流;地表径流;壤中流;机制

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2006)04-0084-03

Study on the Mechanism of Slopes-runoff

WU Wei¹,WANG Xiong-bin²,WU Hui²,ZHANG Hong-zhi²,

QI Sheng-lin³,CHEN GJun-qi⁴,LU Shao-wei²

(1. Management Office of Chaobai Rese of Beijing Water Affairs,Beijing 101300;

2. A gricultural University of Hebei,Baoding 071000, China;

3. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating,
Ministry of Education, Beijing 100083;4. Forestry Department of Beijing,Beijing 100029, China)

Abstract:With the development of hydrology,the question of slopes-runoff has got more and more attention by the field of hydrology. The authors review and analyze the actuality of the mechanism of run-off (run-off including surface runoff and interflow) particularly,and advance the question of present slopes runoff in order to drive the development of calculation ways of rainfall-runoff and the model of watershed hydrology.

Key words:slopes-runoff;surface runoff;interflow;mechanism

地下水、土壤水和大气水是水资源系统的有机组成部分。构建统一水资源系统模型的关键之一是地下水、土壤水、大气水和地表水转化规律的研究,而不同形式水分转化规律研究的基础是界面水分转化的研究。对于地表径流的产流机制概括起来有蓄满产流模型、超渗产流模型和综合产流模型;对于壤中流的产流机制而言,可分为符合达西定律的土壤渗流和不符合达西定律的优先流。

1 坡面产流机制研究现状

早在 1933 年,Horton^[1]就指出,雨强超过下渗强度超渗的地表径流,包气带含水量超过田间持水量则产生地下径流。这一概念是微观的点源概念,明确的阐明了均质包气带的产流机制,但是不能解释非均质或表层透水性极强的包气带的产流机制^[2]。

在 Horton 理论建立的同时,表层流(壤中流)的概念相继产生。1943 年 Lowdermilk^[1]把暴雨径流看成是“浅层渗水或季节性泉流”,并将表层流与一定的土壤剖面联系起来。在 1936~1944 年间许多水文学者通过在试验场的观测,指出壤中流参与暴雨径流形成的重要性。当时并未得到重视,

直到近二三十年才得到重视,但还未能在全流域水文模型中得到有效的应用。

1963 年,Hewlett 等人^[3]曾由试验发现非饱和流也能形成壤中流或地下径流,甚至断言:陡峻流域土层中的非饱和流在过程分析中不能忽视。上个世纪 70 年代,Dune 等^[2]在大量的观测与式样基础上证实,非均质包气带具备产生壤中流的条件。

2 地表径流产流机制研究现状

地表径流产流不只是一个产水的静态的概念,而是一个具有时空变化的动态概念。包括产流面积在不同时刻的空间发展及产流强度随降雨过程和土壤入渗的时程变化。这一过程受到诸多因素的影响,但是其关键之一是土壤水分渗透特性。近年来,国内外的学者在这方面大量的研究,取得了一定的进展。60 年代以来,我国水文学者曾先后提出了湿润地区以蓄满产流为主,干旱地区以超渗产流为主的理论^[4],可以用于界面产流及不同自然条件的统一产流模型^[5]。超渗产流及蓄满产流模型,其实质是入渗的简化,只是简化侧重点不同而已。现总结如下。

* 收稿日期:2006-01-21

作者简介:吴 伟(1967-),男,硕士,工程师,主要研究方向:水土保持与流域治理;责任作者:祁生林(1978-),男,宁夏彭阳县人,博士,主要从事土壤水分运动、小流域治理和城市水土保持研究。

地表径流产流机制可以分成两大产流模式,即蓄满产流模型与超渗产流模型。在包气带土壤含水量达到田间持水量以后产流的称为蓄满产流;在包气带未蓄满前因雨强大于渗强而产流的称为超渗产流。

地表径流产流是地表的供水与下渗、蒸发等消耗综合作用后的地面积水。其水量平衡方程为^[6-7]

$$R_s(t) = \int_0^t I dt - \int_0^t I_n dt - \int_0^t e dt - \int_0^t S_d dt - \int_0^t f dt \quad (1)$$

式中: $R_s(t)$ ——地表产流量(mm); I ——降雨强度(mm/min); f ——入渗强度(mm/min); I_n ——植物截留率(mm/min); e ——蒸散发率(mm/min); S_d ——填洼率(mm/min)。

在一次降雨过程中, I_n 、 e 及 S_d 量级甚小,变化也较弱,且不直接参与径流形成,可以忽略。参与径流形成的主要因素为首末两项,简化微分式(1)可得

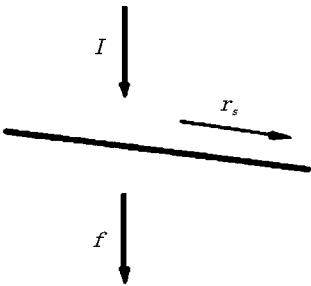


图 1 坡面产流机制

在实际降雨产流过程中,当净降雨强度超过入渗强度时,就会因超渗而产流,随着入渗量的累积,直到土壤含水量达到田间持水量以后又将转化为蓄满产流。因此,在一场降雨中,将产流机制绝对的表述为蓄满产流或超渗产流是不合理的。1999 年,白清俊等人将降雨、入渗和土壤蓄水量合起来分析,得到综合产流模型。

3 壤中流产流机制研究现状

壤中流是指水分在土壤内的运动包括水分在土壤内的垂直下渗和水平侧流。对任何一场降雨,至少有一部分甚至全部水分将沿着土壤内的孔隙入渗到土壤内部形成土壤水,土壤水在土壤内的流动形成壤中流。壤中流的正常作用,首先是在流域面上建立土壤水分的分布;其次是壤中流的侧向流直接形成流域的洪水过程和枯季流量。它与地表径流、地下径流一起构成流域的径流过程,在某些情况下,壤中流甚至可以形成洪水的洪峰;再次是壤中流通过改变土壤内的水分含量,从而影响到地表径流和地下径流的形成与变化。由此可见,壤中流作为水分在土壤中再分配与水分循环的一个重要环节,对整个流域径流产生及洪水预报、流域水文循环的计算都具有相当重要的作用。

虽然壤中流研究在理论上和应用上均有重要作用,但由于问题的复杂性,在相当长的时期内,只能处于定性的描述或用各种经验的方法处理生产实践中不断遇到的土壤水问题,伴随着土壤水分研究的发展而发展。自从 1907 年白金汉(Buckingham)提出毛管势理论,1931 年理查兹(Richards)导出非饱和流方程,数学物理方法被逐步引入了土壤水的研究,使该领域的研究有了长足的进步,逐步由静止走向动态、定性描述走向定量、经验走向机理。从国际潮流上用能态观点研究土壤水逐步地取代以形态学观点与方法(以苏联 A. A. 罗戴为代表)研究的趋势。1864 年 Schumacher(1882 年, Lawes)等在研究中发现了不符合达西定律的优先流(Preferential flow),是指土壤在整个入流边界上接受补给,但水

$$\frac{dR_s(t)}{dt} = r_s = I - f \quad (2)$$

式中: r_s ——地表径流产流率(mm/min)。

由式(2)可以看出,地面径流产流率 r_s 的发展受 I 与 f 关系制约,是供水与下渗消长发展的产物(如图 1 所示)。当 $I > f$ 降雨产生剩余,则 $R_s > 0$,即为超渗产流;当 $I = f$ 时,下垫面包气带可以看作是一个最大容量为 W_m ,初始水量为 W_0 的水箱(图 2),水箱下开一孔,为包气带排水率 $h(t)$,水箱底为不透水层或相对不透水层。入渗是水箱水源的主要补充,土壤含水量 W 在达到田间持水量 W_m 以前,入渗水量一部分被土壤吸收,成为薄膜水和张力水,另一部以壤中流的参与流域汇流,则 $R_s = 0$;在土壤含水量 W 达到 W_m 以后,水箱即满,土壤的下渗率为稳定下渗率 f_c ,则 $R_s > 0$,即为蓄满产流。

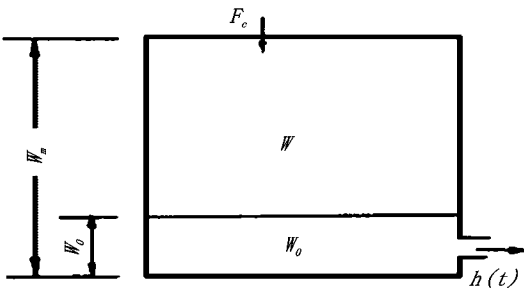


图 2 水箱示意图

分和溶质绕过土壤基质,只通过少部分土壤体的快速运移^[8]。以后很长一段时间内并没受到人们的重视,本世纪 60、70 年代只做过少量研究,1981 年 Beven^[9]提出了动力波模型,直到 Beven 和 Germann(1982)的文章发表后,土壤中优先流的研究才越来越引起人们很大的兴趣。1984 年 Sloan^[10]提出了贮水泄流模型,这些模型的提出以及后来的发展极大的推动了壤中流的研究进程。

近 20 年来,随着电子技术以及计算机的高速发展,为壤中流的模型与模拟研究提供了有力的工具,以及壤中流所占有的重要作用,使壤中流研究逐渐的走向成熟化、系统化。

对于壤中流产生的主要机制,许多学者已有研究,并利用不同的假设发表了许多关于壤中流产生的机理模型。根据这些模型所依据的主要原理可以分为以下 3 类^[11-13]:(1) Richards 模型;(2)动力波模型;(3)贮水泄流模型。

3.1 Richards 模型

Richards 模型,该模型由 Richards1 93 3 提出,是从微观的角度进行分析,根据土壤水运动的连续性原理(又称均衡原理)和达西定律相结合而得出的。其方程的基本形式为:

$$\nabla (K_s K_r \nabla h) = c \frac{\partial}{\partial t} - Q \quad (3)$$

式中: ∇ ——哈密顿算子,既是微分运算符号,同时又是矢量; K_s ——饱和渗透系数; K_r ——相对渗透系数, h ——总水头(= + z);——压力水头; z ——重力水头; c ——比持水量(= /);——体积含水量; t ——时间; Q ——任意流

出入源项。

式(3)是一个非线性方程,要对其进行解析求解几乎是不可能的,因而只能对它进行数值求解或进一步简化后求其数值解或某些情况下的级数解或解析解。根据求解过程中对 Richards 方程进行简化的程度,可将其分为一维 Richards 模型、二维 Richards 模型和三维 Richards 模型。

3.2 动力波模型

动力波模型,该模型由 Beven 提出,并作了以下假设:不

透水或准不透水边界上饱和区域内流线平行于底板(或基岩),且水力梯度等于基岩坡度,该模型的形式如下:

$$\begin{cases} q = K_s H_x \sin \\ c \frac{\partial H_x}{\partial t} = -K_s \sin \frac{\partial H_x}{\partial x} + i \end{cases} \quad (4)$$

式中: q ——单宽泄流量; H_x ——不透水边界上饱和区域的厚度; K_s 同上; 理想坡面倾角; i ——单位面积内从非饱和区域向饱和区域的输水速度; c ——比持水量 ($= \partial / \partial h$)。

该模型在以后的研究中又被扩展成包括非饱和区域的饱和非饱和流模型,并且模型中的 K_s 已作为随深度变化的物理量,采用 Beven 经验公式:

$$K_s = K_0 e^{-f} \quad (5)$$

式中: K_s 同上; K_0 ——土壤表面饱和渗透系数; f ——常数。Koussis 对稳定状态下的动力波模型作了解析求解。

3.3 贮水泄流模型

贮水泄流模型,该模型由 Sloan 等提出,其基本原理是从宏观方面进行研究,利用整个山坡的水量平衡(如质量连续性方程)原理对壤中流进行研究,并假设这一理想山坡有一不透水边界或底板,斜坡倾角 α ,坡长 L ,土壤厚度 D ,模型的基本形式为:

$$\frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} = iL - \frac{q_2 - q_1}{2}$$

式中: V ——单位宽度的饱和区域内可排放的水的体积; t ——时间; q ——坡面中单宽排水率; i ——单位面积内从非饱和区域向饱和区域的输水速度;下标 1、2 分别为时段的开始和结束。Stagniti 等将这一模型推广应用于流域范围,对整个流域的水文反应进行了模拟研究。另外,根据对饱和土壤水水面及水力坡度的不同假设,该模型又可以分为动力贮水泄流模型和 Boussinesq 贮水泄流模型。

参考文献:

- [1] 文康,等.地表径流过程的数学模拟[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [2] Stephenson S, Meadows M E. Kinematic hydrology and modeling[J]. Development in Water Science, 1986, 26: 148 - 156.
- [3] Hewlett J D, Hibbert A R. Factors affecting the response of small water shed to preupitation in humid areas[M]. Inter symp. On forest hydrology, Pregramon Press, 1967, (6): 768 - 781.
- [4] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [5] 芮孝芳.基于径流形成原理的若干洪水预报理论评述[J].水科学进展, 1992, 3(3): 233 - 240.
- [6] 张洪江,王礼先.长江三峡花岗岩坡面土壤流失特性及其系统动力学仿真[M].北京:中国林业出版社,1997.
- [7] 白清俊,刘亚相.流域坡面综合产流数学模型的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 54 - 58.
- [8] Andreini M S, steenhuis T S. Preferential paths of flow under conventional and conservation tillage[J]. Geoderma, 1990, 46: 85. 102.
- [9] Beven, K. On subsurface stormflow, prediction with simple kinematic theory for saturated rated flows[J]. Water Resour. Res., 1982, 18(6): 1627 - 1633.
- [10] Sloan, P G, Moore, I D. Modeling subsurface stromflow on steeply sloping forested watersheds[J]. Water Resour. Res., 1984, 20(12): 1815 - 1822.
- [11] 裴铁, 李金中.壤中流模型研究的现状及存在问题[J].应用生态学报, 1998, 9(5): 543 - 548.
- [12] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green - Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J].农业工程学报, 2002, 18(2): 13 - 16.
- [13] 李金中, 裴铁, 牛丽华, 等.森林流域坡地壤中流模型与模拟研究[J].林业科学, 1997, 35(4): 2 - 8.
- [14] 杨金忠, 叶自桐, 等.野外非饱和土壤中溶质运移试验研究[J].水科学进展, 1993, 4(4): 245 - 252.
- [15] 杨金忠, 叶自桐.野外非饱和土壤水流运动速度的空间变异性及其对溶质运移的影响[J].水科学进展, 1994, 5(1): 9 - 17.
- [16] 刘亚平, 陈川.土壤非饱和带中的优先流[J].水科学进展, 1996, 7(4): 367 - 374.
- [17] 张洪江, 程云, 史玉虎, 等.长江三峡花岗岩坡面管流产流特性研究[J].水土保持学报, 2001, 15(1): 5 - 8.
- [18] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resour. Res., 1982, 18(5): 1311 - 1325.
- [19] Bouma J. Influence of soil macroporosity in environmental quality[J]. Advanced in Agronomy, 1991, 46: 137.
- [20] Brusseau M I, Rao P S C. Modeling solute transport in structured soils[J]. Geoderma, 1990, 46: 149 - 192.
- [21] Czapar G F, Horton R, fawcett R S. Herbicide and tracer moment in soil columns containing an artificial macropores[J]. J. Environ, Qual, 1992, 21: 110 - 115.

近年来我国学者已不再停留在室内试验阶段,对现场测定参数亦作了一定的研究^[14~15],有了一定的进展。壤中流的研究由均质走向非均质体现在对优先流^[16~17]的研究。优先流是近年来研究土壤水运动所提出的术语,优先流是近年来研究土壤水运动所提出的术语,由于其形成不同,因而有多个名称,如大空隙流(macroporeflow)、绕流(bypassing)、漏斗流(funnel flow)、指状流(finger ring)、沟槽流(channeling)、短路流(short circuiting)和管流(pipeflow)等^[18~21]。

目前,对优先流已有一些理论研究和实验成果,包括运用“水分视觉技术”,即在二维土样背面装均匀光源,前面一架摄像机将穿过土样光线录在录像带上,借助于计算机图象处理方法分析录象带上图象即可得含水量。也可用 X 射线测定二维指流。亦有运用地面渗透雷达测绘层状土及土壤夹层状况用计算机软件处理和分析,在理论上亦推导出一些模型,但总的说来优先流的机理仍在探索阶段。

4 坡面产流机制研究存在的问题

产流机制研究的进展,有力地推进了降雨产流计算方法和流域水文模型机构的发展。然而,由于问题的复杂性及人类认识水平和研究手段的限制,目前对于产流机制的研究还有许多未知领域。部分问题的假设和概化不符合实际情况,对于地表径流产流机制的判断是以降雨强度是否大于土壤表层导水率为标准,没有考虑地被物对表层土壤导水率的影响。对与壤中流产流机制研究而言,存在以下两个方面的问题,所有的模型都是在雨强不变的基础上建立的,而实际中的雨强通常都是一个随时间变化的函数。模型中土壤饱和和导水率随深度递减的假设是否符合实际有待进一步研究。