

山坡蓄量动力学理论及其在水文模拟中的应用前景

刘金涛^{1,2,3}, 陈喜^{1,3}, 吴吉春²

(1 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 2 南京大学水科学系, 江苏 南京 210093

3 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 山坡地貌特征, 即山坡地形曲率的敛散、凹凸等性质, 是影响土壤含水量、产流面积空间分布的重要地形控制因子。山坡蓄量动力学理论 (Hillslope storage dynamics) 是一种融合地貌特征的山坡水文模拟方法。其引入宽度函数和土壤厚度函数的概念, 建立基于土壤蓄水能力的一维山坡蓄量动力学方程, 这是采用低维方法描述山坡复杂三维结构的水文响应的一种简化方法, 大大降低了模型的复杂程度。该理论解决流域水文模拟的尺度和参数化问题的潜力已经得到重视, 但仍需开展尺度效应研究, 通过野外观测事实和大量理论分析成果为此项研究提供支撑。

关键词: 山坡蓄量动力学; 地形曲率; 尺度; 参数化; 水文模拟

中图分类号: P334

文献标识码: A

我国受山洪灾害威胁的山丘区面积约为 $463 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占我国陆地面积的 48%, 区内共有人口约 5.56 亿, 占全国总人口的 44.2%。由于山区面积比重大, 人口多, 因此山洪造成的灾害损失往往十分严重, 给山区国民经济的持续发展造成严重影响。近年来, 大江大河防洪标准逐步得到提高, 而山区小流域防洪标准目前还比较低, 短期内难以大幅提高。为此, 《全国山洪灾害防治规划》将“初步建成山洪灾害重点防治区以预报、预警等非工程措施为主与工程措施相结合的防灾减灾体系”作为近期 (2010 年) 规划目标。因此, 认识和理解山坡水动力过程, 深入研究山区小流域产汇流机制, 建立预测山洪的水文模拟方法, 显然具有重要的理论和现实意义。

研究表明: 在山丘区, 经由坡地进入河道的水量占总量的 95%^[1], 山坡水文过程在水文循环中占据重要地位。影响山坡产流的重要地貌特征包括: 坡形、尺寸 (坡长和坡度) 等^[2], 这里坡形指山坡垂向和水平曲率 (profile curvature and planform curvature), 即山坡的收敛、发散、凹和凸等特征。早期的

实验研究^[3-5] 和数学模拟研究^[6-7] (尽管仅停留在理论分析上) 已经证明, 山坡地貌特征对于其土壤含水量、产流面积空间分布等来说是重要的地形控制因子。因此, 融合地貌特征的山坡水文模拟研究具有重要的水文学、地貌学及水土保持等多方面的意义。

1 概述

地貌特征对水文过程的重要影响已为人们所认识, 在山坡水文模型 (hillslope hydrological model) 中有不同程度的体现。这里按照流域计算单元的离散形式将山坡水文模型划分为以下 4 类。

1. 单元网格型模型, 如 SHE 模型^[8]。该类模型采用栅格型的空间离散方式, 这是一种显式的考虑地形空间变化的方法, 为众多模型所采用^[9]。

2. 规则山坡单元型模型。此类模型将流域概化为河道及规则形状的山坡单元。如 KINEROS 模型^[9-10] 中山坡单元为具有特征长度、宽度和坡度的

收稿日期 (Received date): 2009-09-27; 改回日期 (Accepted): 2010-07-19.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (40801013); 教育部科学研究重大项目 (308012); 中国博士后科学基金资助项目 (20090450146). [The National Natural Science Foundation of China (Grant No.: 40801013) the Key Research Grant from Chinese Ministry of Education (Project No. 308012) China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (20090450146).]

作者简介 (Biography): 刘金涛 (1977-) 男, 河北唐山人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤水文学及流域水文模拟方面研究。[LIU Jintao (1977-

), male, associate professor, major in soil hydrology and hydrological modeling. E-mail: jtiu@hhu.edu.cn]

矩形平面 (plane)。杨大文等在所建立的 GBHM 模型中根据汇流路径划分汇流网带, 在每一个汇流网带上, 将流带进一步等分为若干相同的对称矩形坡面^[11]。

在以上两类模型中, 山坡尺寸通常被显式的考虑, 而坡形因素则被忽略或隐式表达。模型为了能更有效的反映山坡地形起伏和山坡实际的形状, DEM 分辨率需要足够的细致。Grayson 等认为将这种流域自然下垫面的径流概化为平坦表面流 (sheet flow) 的做法是缺乏物理基础的^[12]。更为重要的是, 两类模型中均存在参数化和尺度问题, 计算网格尺度细化与其参数确定是相关联的一对矛盾, 也是目前水文研究的难点, 解决此问题需引入新的理论方法。

3. 基于假想山坡单元的模型。显式考虑山坡地貌特征 (尤指坡形) 的水文模拟研究可追溯到 1960s^[13 14], 但当时的研究针对的是高度几何概化的山坡, 如平坡或者采用几何模型函数生成的“假想山坡 (hypothetical hillslopes)” 。这些研究具有理论上的意义, 但缺乏实际地形的代表性, 更难推广到流域尺度的研究。

4. 基于自然山坡单元的模型。地貌特征被显式考虑, 代表性模型如 IHDM 模型^[15]、CATFLOW 模型^[16]等。此类模型一般采用经典的土壤水动力方程——Richards 方程描述山坡径流过程, 但由于其高度的非线性, 即便对于小尺度问题, 仍然要求解大规模方程系统^[17]。此外, Richards 方程需要大量的土壤水力学参数, 这在流域尺度也是很难获取的。问题在于: 能否建立低维或简化的方程来描述复杂三维结构下的山坡水文系统的水动力过程?

关于上述问题, 在过去的十几年间, 已经取得了一定的研究进展。Salucci 等采用统计动力学方法模拟了平坡、收敛和发散型山坡饱和与非饱和带土壤水运动^[18], 但此方法的不适合模拟山坡降雨径流过程。Reggiani 等对局部方程在时间和空间上均化, 得到代表性单元流域 (REW) 尺度上描述主要水文过程的闭合的常微分方程组^[19]。随后这一理论得以发展, 如田富强等对模型结构进行了扩展, 并研制了 THModel^[20]。

与 Reggiani 流域均化的思想不同, 由 Fan 等人^[21]首先提出的并经 Troch 等人^[17 22 23]不断发展起来的山坡蓄量动力学理论 (Hillslope-storage dynamics) 采用低维动力方程描述复杂三维结构下的山坡水动力过程, 该理论提供了一种融合地貌特征

的山坡水文模拟方法, 是构建新的无资料山区小流域分布式水文模型的理论基础, 为解决水文模拟中的尺度扩展 (Upscaling) 问题指出了新方向^[21], 而基于流域山坡地貌特征的水文模拟尺度效应研究, 是将山坡蓄量动力学理论应用于流域尺度水文模拟的急待解决的关键问题之一。

2 山坡蓄量动力学理论及方法

山坡是构成流域的基本单元, 由河道连接起来, 按照与河道联结的方式, 可以划分为两大类: 源头坡 (Headwaters) 和边坡 (Sideslopes)。源头坡顾名思义是河道源头的汇水区, 而边坡则是河道两侧的汇水区。近年发展起来的山坡蓄量动力学理论, 其特点在于有效融合了山坡地形地貌的三维结构, 即山坡地形几何曲率的敛散、凹凸等性质, 并且其采用的是低维简化的方法。具体做法是引入宽度函数的概念将三维结构的山坡单元概化为一维剖面, 引入沿剖面的土壤厚度函数, 建立基于土壤蓄水能力的一维山坡蓄量动力学方程。这是考虑山坡复杂三维结构的一种简化方法, 同时降低了模型的复杂程度。这有利于推求描述山坡水文过程与地貌特征关系的解析关系, 有助于深入理解山坡水动力学机制, 并使得此理论未来应用到流域尺度成为可能。Troch 等人认为该理论将为解决流域水文模拟的尺度和参数化问题提供理论基础^[24], 但仍需开展尺度效应研究, 通过野外观测事实和大量理论分析成果为其提供支撑。

2.1 山坡地形几何曲率的空间变异及分析方法

陆地水文循环受下垫面地形地貌条件控制, 是流域尤其无资料流域进行水文模拟的关键。山坡几何曲率指山坡投影方向收敛、平、发散及剖面方向的凹、直、凸等属性, 图 1 给出了 9 种基本的山坡类型, 这 9 中基本的山坡类型为三种水平形状 (收敛、平、发散) 和三种垂向剖面曲率 (凹、直、凸) 的组合, 山坡可称为收敛型凹坡, 也称为平直型山坡, 则被称为发散型凸坡。一般说来, 源头山坡多为收敛型山坡, 而边坡多为发散型山坡。由于流域内水流往往汇聚于出口一点, 因此通常认为流域整体上是收敛的。与此相反, 一项关于流域尺度山坡宽度函数的研究表明流域整体上是发散的^[2], 分析显示流域内多数山坡确是发散的, 但是如果考虑河网水系, 整个流域又是收敛的, 这主要是河网水系所属的单元是强烈收敛的。

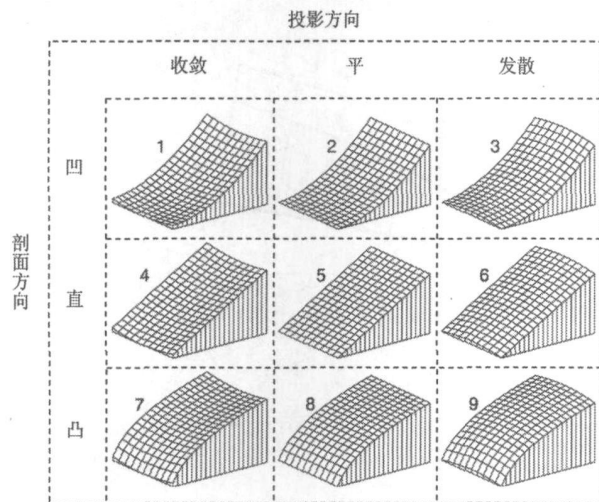


图 1 九种基本的山坡类型^[21]

Fig 1 Three dimensional view of nine basic type of hillslope^[22]

地形曲率是控制山坡及流域水文响应的直接影响因素, 而水文模型中没有直接考虑这一要素。原因主要是缺乏切实可行的数学理论定性定量描述地形曲率的特征, 目前主要采用如下公式计算地形曲率^[23]

$$c_p = \frac{f_{xx}f + 2f_{xy}ff + f_{yy}f^2}{(f + f)(f + f + 1)^{3/2}} \quad (1)$$

$$c_e = \frac{f_{xx}f - 2f_{xy}ff + f_{yy}f^2}{(f + f)^{3/2}} \quad (2)$$

式中 c_p 、 c_e 分别描述地形的凹凸、敛散等性质, f 为地形函数的一、二阶偏导数, c_p 为正 (负) 代表地形剖面曲率为凹 (凸) 的, c_e 为正 (负) 代表地形水平曲率为收敛 (发散) 的。

在山坡蓄量动力学模型中, 除了需要定义山坡表面地形曲率, 还需要给出山坡基岩曲率, 以定义山坡土壤蓄水能力。在模型中, 描述山坡曲率的参数分别为宽度函数和土壤厚度函数。山坡宽度函数与水流路径长度密切相关, 因此水流路径长度对于定义模型中宽度函数具有重要意义。一般认为, 山坡宽度函数沿程分布等价于水流路径长度出现的频率分布, 即水流路径概率密度函数。土壤厚度函数则与多种因素有关, 如岩石母质、气候和地形甚至生物条件等等, 需要实地勘测或模型模拟得到。

2.2 山坡蓄量动力学数学理论

尽管山坡地貌特征的水文响应研究可以追溯到 1960s 但如何采用低维简化方法描述复杂山坡水文过程一直困扰水文学家。Fan 等引入了山坡土壤蓄水能力 $S_c(x)$ 的概念^[21]

$$S_c(x) = w(x)d(x)\epsilon \quad (3)$$

式中 $w(x)$ 为山坡宽度函数, $d(x)$ 为剖面方向土壤厚度函数, ϵ 为土壤有效孔隙率。如图 2 所示, 其假定山坡降雨强度 $N(t)$ 均匀分布, 并且直接补给土壤饱和带, 不考虑非饱和带的影响, 依据水量平衡方程和运动波近似的动量方程建立了山坡土壤蓄量运动波方程, 并成功推导出了适用于复杂山坡的次表层流 (subsurface flow) 运动波方程解析解。其连续方程如下

$$a(x) \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = N(t)w(x) \quad (4)$$

式中 S 为山坡土壤实际蓄量, $N(t)$ 为降雨强度, $a(x) = -K \times i / \epsilon$, 其中 K 为土壤饱和导水率, i 为坡度。在其数学模型中, 他们引入土壤蓄水量以取代水头高度, 将三维结构的山坡概化为一维的剖面, 并应用此一维蓄量运动波方程解析解研究山坡土壤水运动规律。

基于 Fan 等^[21] 的理论, Troch 等推导了更加通用的山坡蓄量运动波方程 (hillslope storage kinematic wave equation hskw) 解析解, 还给出了 9 种不同地貌结构特征的山坡特征响应函数 (见图 1)^[22]。由于运动波理论不能反映水分的扩散效应, 因此导致其仅适合应用于有一定坡度即重力作用远大于扩散作用的山坡。为了在模拟中考虑山坡水分扩散作用, Troch 等建立了复杂山坡次表层流山坡蓄量 Boussinesq 方程 (Hillslope storage Boussinesq equation hsb), 见式 (5), 并给出此方程简化及线性化的表达式^[17]。此模型理论适用于土层较薄、土壤透水性强且不考虑非饱和带滞水效应、土壤水力参数均一旦水流近似平行于山坡基岩, 这些条件一般在湿润地区易于满足。式 (5) 为山坡蓄量 Boussinesq 方程 (hillslope storage Boussinesq equation hsb), 其适用于图 2 右图所示山坡水文过程, 如下

$$\epsilon \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{K \cos i}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{S}{w} \left(\frac{\partial S}{\partial x} - \frac{S}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + K \sin i \frac{\partial S}{\partial x} + \epsilon N(t)w(x) \quad (5)$$

通过采用数值方法求解式 (5), 并将其结果与简化及线性化的方程对比, 作者得出结论: 山坡土壤水动力过程很大程度上依赖于山坡的水平形状及基岩坡度 (及垂向曲率), 收敛型山坡排水速度远小于发散型山坡。进一步分析显示, 当坡度 $< 5\%$ 时, 近似解的模拟误差均较大, 不能反映复杂地貌结构山坡的次表层流水动力特性; 而坡度 $> 30\%$ 时, 近似解 (如 hskw 等) 的模拟结果与 hsb 模拟的结果相近。

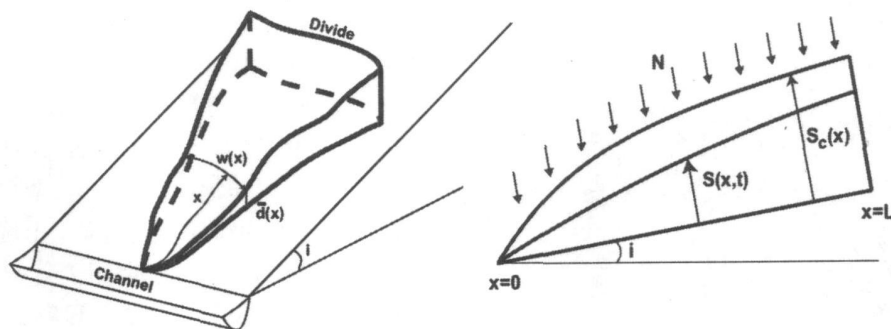


图 2 收敛型凸坡三维结构及其一维剖面蓄水示意图^[17]

Fig 2 A three dimensional view of a convergent hillslope overlying a straight and a definition sketch of the cross section of a one-dimensional hillslope aquifer^[17]

Paniconi等将 3D Richards方程与 hsB方程数值解结果进行了对比实验,总体上模拟结果精度较高,而收敛型山坡的模拟结果要好一些,垂向曲率对模拟结果的影响要远远小于山坡水平形状因子^[23]。通过 Troch等^[12-23]、Paniconi等^[23]以及 Hilberts等^[26]的研究奠定山坡蓄量动力学相关研究的理论基础,为后续的理论发展和应用指明了方向。

2.3 山坡地形几何曲率的水文响应研究

蓄量动力学理论采用降维的方式处理山坡复杂的几何曲率,并应用于山坡土壤水动力模拟,这为研究地形几何曲率的水文响应问题提供了有效工具。Troch等人^[12-22]和 Paniconi等^[23]的研究已经证明,坡度 $>30\%$ 或发散型的山坡中水流受重力作用更加突出,而模拟坡度 $<5\%$ 或收敛型山坡的水流过程时,扩散作用不能忽视。相对简化的数学方法使得求解、推求其方程解析解成为可能,而后者有助于深入理解山坡土壤水动力过程。基于线性化的山坡土壤蓄量对流—扩散方程所推导出的解析解, Beme等给出其无因次特征响应函数式,提出了次表层流相似度参数即山坡 Péclet数 (hillslope Péclet number),旨在表达地貌特征与山坡水文响应的关系,揭示山坡水文过程机理^[27]

$$Pe = \frac{UL}{2K} = \left[\frac{L}{2pD} \right] \tan i - \left[\frac{aL}{2} \right] \quad (6)$$

$$K = \frac{kD \cos i}{\epsilon} \quad (7)$$

$$U = \frac{k \sin i}{\epsilon} - aK \quad (8)$$

式中 k 为土壤饱和导水率, D 为土壤厚度, p 为线性化参数, a 为宽度函数指数常数。为了验证山坡 Péclet数对实际流域山坡水文响应的意义, Lyon等将其应用于实际流域山坡尺度水文响应研究,理论

值与观测值的较好的匹配表明了 Péclet数对描述湿润地区山坡水文响应的重要意义,同时作者认为其提供了一种尺度扩展了方法^[28]。

3 在流域水文模拟中的应用前景

正如山坡 Péclet数所揭示的,山坡地貌特征对其水文响应具有控制作用。山坡蓄量动力学理论为在流域水文模型中考虑地貌特征提供了一种低维方法,将为解决尺度扩展问题提供了崭新的方法^[24],在流域水文模拟研究中有着广泛的应用前景。

首先,山坡蓄量动力学理论为分布式水文模型建模提供了新的理论基础及技术途径。如果说,20世纪60年代末和70年代初兴起的山坡水文学研究推动了其后30a间水文模型发展的话^[29],山坡蓄量动力学理论作为山坡水文学研究的最新的成果,将给未来流域水文模型研究提供新的理论方法。这主要体现在水文模型中流域的离散方式、空间信息的融合和组织、数学模型的建模和求解方式等等。

其次,山坡蓄量动力学理论为分布式水文模型尺度扩展提供了方法。目前,基于 Freeze和 Harlan (1969, 简称 FH69)“蓝本”的物理性流域水文模型得到了广泛应用,但尺度问题仍然是分布式水文模型建模所需面对的关键问题。对尺度问题的解决成为限制 FH69类型分布式水文模型发展的瓶颈,需要新的理论基础和技术途径支撑未来流域水文模型的发展^[30-31]。蓄量动力理论采用低维方法描述山坡地貌结构的空问特征,这为流域水文模拟尺度扩展提供了新的途径方法。其针对自然山坡单元建立水文模型,而非规则的三角网格或正交网格等虚拟的空间单元,使得尺度扩展具有物理依据和基础。

第三,山坡蓄量动力学理论为水文模型参数化提供了方法。蓄量动力学理论采用“地貌特征参数函数化”的概念,即引入山坡宽度函数、土壤厚度函数等描述山坡地貌特征的空间结构,并在方程中以参数的形式表现。这种参数函数化的方式使得该理论有效的融合了地貌特征空间信息,便于推求方程解析解,为深入理解山坡水文过程提供了条件,为水文模型参数化提供了可行的途径。

4 存在问题

Troch等人建立的山坡蓄量动力学理论有助于我们理解山坡水动力过程^[32],但将其方法应用于流域尺度上仍然需要在理论和方法上不断完善,其在解决尺度扩展和参数化问题上的重要意义有待进一步分析验证,具体包括:

基于山坡单元的地貌特征的数学描述。Fan等(1998)提出了自然山坡提取的理论构想,但仅停留在一般性描述,未给出详细的步骤及实施方法^[21]。目前,多数基于自然山坡单元的分布式模型在提取山坡单元时多采用GIS工具与手工结合的方式(“on-screen”方法),例如CATFLOW模型。从原理上讲自然山坡并不像子流域一样存在清晰的边界,这是目前自动提取自然山坡单元的最大困难所在^[3]。但问题在于,如何通过引入合适的山坡宽度函数和土壤厚度函数等将山坡的三维空间结构有效的概化为一维的剖面,即将三维水流问题转化为一维问题。

山坡蓄量动力学理论假定不发生坡面流并且不考虑土壤非饱和带对饱和带过程的影响。因此,建立流域尺度水文模拟模型首先需要完善模型理论,建立与描述山坡饱和带动力过程一致的融合山坡地貌特征的坡面流与土壤非饱和带过程的数学模拟方法。

山坡尺度变化与其参数化的水文模拟效应分析。山坡蓄量动力学理论在有效融合地貌特征方面已经证明了其理论的先进性。但该理论对土壤性质、植被等下垫面因素等空间变异性的描述能力仍然需要进一步提高,即参数函数化理论有待进一步完善和拓展。

此外,基于山坡蓄量动力学理论的水文尺度效应研究也需要流域空间上多尺度的验证。野外观测一直是山坡水文研究的重要环节,山坡水流路径、饱

和带与非饱和带的交互影响机理、山坡土壤孔隙结构及其水文效应等问题需要实验观测来进一步揭示。此外,需要进一步加强山坡和流域水文过程的观测,以验证数学物理理论在流域实际地形及土壤条件下的应用效果。

参考文献 (References)

- [1] Kirkby M. Hillslope runoff processes and models [J]. J. Hydrol., 1988, 100: 315~339
- [2] Bogart P W, Troch P A. Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response [J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2006, 10: 925~936
- [3] Beston R R, Marius J B. Source area of storm runoff [J]. Water Resour. Res., 1969, 5: 574~582
- [4] Dunne T, Black R D. An experimental investigation of runoff production in permeable soils [J]. Water Resour. Res., 1970, 6: 478~490
- [5] Anderson M, Burt T P. The role of topography in controlling through-flow generation [J]. Earth Surf. Processes, 1978, 3: 331~344
- [6] Freeze R A. Role of subsurface flow in generating surface runoff 2. Upstream source areas [J]. Water Resour. Res., 1972, 8: 1272~1283
- [7] Smith R E, Hebert R H B. Mathematical simulation of interdependent surface and subsurface [J]. Hydrol. Proc., 1983, 19: 987~1001
- [8] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen “SHE”, 1. History and philosophy of a physically-based distributed modeling system [J]. J. Hydrol., 1986, 87: 45~59
- [9] Woolhiser D A, Smith R, Goodrich D C. A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. Report 77 [R]. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, 1990
- [10] Canfield H E, Goodrich D C. The impact of parameter lumping and geometric simplification in modelling runoff and erosion in the shrublands of southeast Arizona [J]. Hydrol. Process., 2006, 20: 17~35. doi:10.1002/hyp.5896
- [11] Yang D, Herath S, Musiak K. Hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions [J]. Hydrol. Sci. J., 2002, 47: 49~65
- [12] Grayson R B, Moore I D, McMahon T A. Physically based hydrologic modeling 2. Is the concept realistic? [J]. Water Resour. Res., 1992, 26: 2659~2666
- [13] Woolhiser D A. Overland flow on a converging surface [J]. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 1969, 12: 460~462
- [14] Takasao T, Shiba M. Incorporation of the effect of connection of flow into the kinematic wave equations and its application to runoff system lumping [J]. J. Hydrol., 1988, 102: 301~322
- [15] Beven K J, Calver A, Morris E M. The Institute of Hydrology Distributed Model, Rep. 81 [R]. Inst. of Hydrol., Wallingford, 1987

- [16] Maurer T. Physikalisch begründete zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen rdllichen Einzugsgebieten [D]. Universität Karlsruhe: Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. PhD-thesis. 1997.
- [17] Troch P A, Paniconi C, van Loon E E. Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes. 1. Formulation and characteristic response[J]. Water Resour. Res., 2003, 39. doi:10.1029/2002WR001728.
- [18] Salucci G, Entekhabi D. Hillslope and climatic controls on hydrologic fluxes[J]. Water Resour. Res., 1995, 31: 1725~1739.
- [19] Reggiani R, Sivapalan M, Hassanizadeh S M. A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics [J]. Adv. Water Resour., 1998, 22: 367~398.
- [20] Tian F Q, Hu H P, Lei Z D, et al. Extension of the representative elementary watershed approach for cold regions via explicit treatment of energy related processes[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2006, 10: 619~644.
- [21] Fan Y, Bras R. Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow[J]. Water Resour. Res., 1998, 34: 921~927.
- [22] Troch P, van Loon H, Hilberts E A. Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow[J]. Adv. Water Resour., 2002, 25: 637~649.
- [23] Paniconi C, Troch P A, van Loon E E, et al. The hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes. 2. Intercomparison with a three-dimensional Richards equation model[J]. Water Resour. Res., 2003, 39: 1317. doi:10.1029/2002WR001730.
- [24] Troch P A, Dijkster H, Van Lanen A J, et al. Towards improved observations and modelling of catchment scale hydrological processes: bridging the gap between local knowledge and the global problem of ungauged catchments[A]. Predictions in Ungauged Basins. PUB Kick-off. IAHS Publ. 2007, 309: 173~185.
- [25] Schmidt J, Evans I S, Brinkmann J. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation[J]. Int. J. Geogr. Inf. Sci., 2003, 17: 797~814.
- [26] Hilberts A G J, Troch P A, Paniconi C. Storage dependent drainable porosity for complex hillslopes[J]. Water Resour. Res., 2005, 41: W06001. doi:10.1029/2004WR003725.
- [27] Berne A, Uijlenhoet R, Troch P A. Similarity analysis of subsurface flow response of hillslopes with complex geometry[J]. Water Resour. Res., 2005, 41: W09410. doi:10.1029/2004WR003629.
- [28] Lyon S W, Troch P A. Hillslope subsurface flow similarity: Real-world tests of the hillslope Peclet number[J]. Water Resour. Res., 2007, 43: W07450. doi:10.1029/2006WR005323.
- [29] Singh V P, Woolhiser D A. Mathematical modeling of watershed hydrology[J]. J. Hydrol. Eng., 2002, 7: 270~292.
- [30] Beven K J. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modeling system[J]. Hydrol. Process., 2002, 16: 189~206.
- [31] Hu Heping, Tian Fuqing. Advancement in research of physically based watershed hydrological model[J]. J. Hydraul. Eng., 2007, 38: 511~517. [胡和平, 田富强. 物理性流域水文模型研究新进展[J]. 水利学报, 2007, 38: 511~517.]
- [32] Du J K, Xie S P, Xu Y P, et al. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins[J]. J. Hydrol., 2007, 336: 334~346.

The Hillslope-storage Dynamics Theory and Its Application in Catchment Hydrology Modeling

LIU Jintao^{1,2,3}, CHEN Xi^{1,3}, WU Jichun²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Department of Hydrosocieties, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China.)

Abstract: Topographic convergence (or divergence) and convex (or concave) are first order controls over stream flow and saturation, etc. Hillslope-storage dynamics provides a theoretical method that is able to capture the essential behavior of the natural system by low dimensional equations pertaining to hillslope length, slope and form. The low dimensional equations of hillslope scale flow processes can be formulated by introducing hillslope width function and soil depth function such that the essential physical behaviour of the natural system is preserved. Hillslope-storage dynamics need to be verified for solving scale and parameterization problems through theoretical analysis and experimental observations. And related studies will improve our understanding of hillslope hydrodynamics and mechanism of rainfall-runoff in mountain catchment, which will provide theoretical and technical supports for mountain catchment flash flood forecasting.

Key words: Hillslope-storage dynamics; topographic curvature; scale; parameterization; hydrological modelling.