

水文过程及其尺度响应

王鸣远, 杨素堂

(中国林业科学院研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局重点开放性实验室-森林生态环境实验室北京, 100091)

摘要:水文循环机制涉及到各个尺度界面的水文过程关系。水文变量(降雨、径流等)随时间和空间变化很大,是与尺度响应的非线性过程。尺度转换是建立合适的参数去描述这些过程,涉及到如何穿越不同尺度约束体系(水文过程)的限制。基于对水文响应及其尺度转换认识所建立起来的现行水文模型的主流是还原分析方法,采用小尺度演绎方法,过度参数化成为习以常规,导致无资料流域预测结果的很大不确定性。因此,尺度转换是水文过程研究所面临的主要难点和热点问题。水文模型只有建立在对尺度相关的水文过程深刻理解基础上,对于预测水文响应才是有效的。预测径流在时间和空间的结果是根据径流系统穿越尺度过程的动态分析得出的,把尺度分析转变于水文变量的谱分析,即通过水文变量的谱相分析,认识发生在不同尺度范围内潜在的秩序和规律,研究他们形成的机制,寻求决定水文过程规则的通用表达方式,开发尺度转换的方法。

关键词:水文过程;尺度转换;水文模型

文章编号:1000-0933(2008)03-1219-10 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Hydrological processes as well as their responses to scales

WANG Ming-Yuan, YANG Su-Tang

The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry Forest Ecology and Environment Laboratory Affiliated to RIFEEP, the State Forestry Administration Beijing, 100091

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1218 ~ 1228.

Abstract: The water cycle constitutes a set of hydrological processes on various conditions of scales. Hydrological variables are greatly impacted by time and space parameters, being nonlinear processes related to scale responses. As such, some parameters established through scale conversion should be available for description of these processes, and the methods established to interlink / interconnecting the status of parameters with the different scales. Scale conversion is restricted across different scales (different hydrological processes). Based on understanding of the hydrological responses and scale conversion, current artery of hydrology is reductive methods, i. e. deducted method through small scales, over parameterization has led to a great uncertainty of prediction concerning watersheds because of lack of observation data. Therefore, scale conversion has become difficult issues focused on the research of hydrological process. Only hydrological models based on understanding of hydrological processes in relation to scales could provide a satisfactory prediction of hydrological responses. Predicting action of runoff in space and time is obtained by the dynamic process analysis of the runoff system across scales. Therefore this paper tries to change scale analysis into an analysis of score of the hydrological variables and develops the methods of scale conversion, finding from them the potential laws and orders existing at different scales and searching for their mechanism in order to achieve the universal ways for expressing regulation of hydrological

基金项目:国家自然科学基金资助项目(39970592)

收稿日期:2006-10-24; **修订日期:**2007-12-12

作者简介:王鸣远(1957 ~),男,山西长子县人,博士,研究员,主要从事林业环境影响评价和恢复生态学研究. E-mail: wmyuan@forestry.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 39970592)

Received date:2006-10-24; **Accepted date:**2007-12-12

Biography: WANG Ming-Yuan, Ph. D., Professor, mainly engaged in environmental impact assessment of forestry and restoration ecology. E-mail: wmyuan@forestry.ac.cn

processes, and developing the method of scale conversion.

Key Words: hydrological processes; scale conversion; hydrological models

降水量、潜在蒸发率和积温分别在纬度方向上和垂直地带控制着植被分布的格局;大气降水、土壤水分和干燥度(湿度)指数是在经度方向上控制区域景观格局的主要因素。

一方面,气候、水文及生态过程都具有显著的时空异质性,主要是指:(1)水文异质性:在一个流域内,斑块产生不同的水量及其污染物进入径流,依赖于斑块所在位置和物理属性。反映流域的非生物属性,诸如降水和温度的季节性波动、地形、土壤性质、水位和土壤前期含水量等物理特征。(2)生态异质性:生态异质性是根据植被斑块的结构、植物种的组成和布局以及调节水文过程的综合效应之间的关系提出的。虽然把集水区当作一个均一单元,实际上存在很大的空间异质性(图1)。

另一方面,生态学、水文学和气象学由于所关注的问题和系统的过程不同,所采取的研究尺度截然不同。然而,三者的共性是,其一,都要求在不同的研究尺度上取得异质性参数表达,研究尺度的等级越高,控制异质性的界限越明显,反之亦然;其二,在某一尺度上构建的模型,一般不能移植到高级或低级时间/空间问题中求解,这是因为主要过程在不同尺度上是不相同的,或者系统行为具有高度非线性化。因此,把水文定律联结到不同尺度上的尺度转换问题应当关注的是在某一尺度上十分重要的参数和过程在另一尺度上往往并不重要或是可预见的,尺度转换往往导致时空数据信息丢失成为水文过程研究所存在的主要问题;其三,通常研究地区越大、相关的时间尺度越长。人类世代或几十年的尺度是研究全球变化关注的焦点。水文现象、气候现象和生态过程在小尺度上常表现出随机特性,而大尺度上可体现出均化的结果。

尺度性与异质性和稳定性有着重要联系,因此对于水文模拟预测和检验水文过程所带来的主要问题是^[1]:(1)虽然系统的复杂性和异质性对于理解系统的功能很重要,但是描述它们很困难;(2)因为水文尺度的异质性所带来的非线性性,模型不能考虑所有水文过程;(3)水文资料缺乏。面临上述3个问题,在建立水文模型时,存在如下几个方面的困难:(1)对于定性描述水文过程的途径是容易的,但如果没有假设的前提条件,对水文过程的数学分析是困难的;(2)许多结构不同的模型可以拟合所取得的观测资料。同样,对于特定的模型,可以存在多组通过标定的参数。模型的多样性及其参数的可疑性成为水文模拟的障碍和机会;(3)观测尺度和模拟尺度的不匹配要求整合水文模型的尺度效应,需要开发和检验模型综合比较评价的技术。在缺乏选择唯一模型的标准情况下,根据合理的假设条件,相应选定多个模型。

所以,对于不同尺度水平上的预测至少应当包括3个方面:(1)水文过程随时空尺度变化的测控因子分析;(2)从某一尺度到另一尺度预测的转换方法;(3)预测结果和研究方法的多尺度检验。

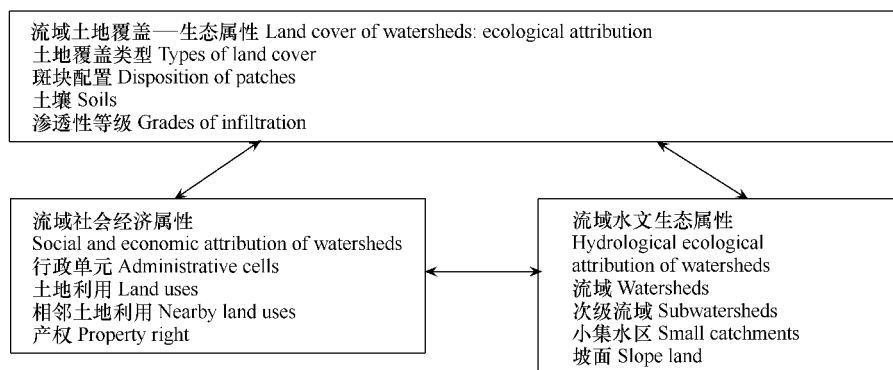


图1 流域异质性特征

Fig. 1 The characteristics of watershed heterogeneity

1 水文尺度响应及其尺度转换

1.1 水文尺度响应(异质性特征)

水文循环机制涉及到各个尺度界面水文过程关系。水文尺度是指水文要素(截留量、蒸腾量、蒸发量、降水量、径流量、地下水位、土壤水分等)或过程的空间维和时间维。空间尺度是指所研究面积的大小及其水文要素异质性的空间分辨率水平(等级),而时间尺度是其动态变化的时间间隔。水文变量(降雨、径流等)随时间和空间变化很大,是与尺度响应的非线性过程。在不同的时空尺度上,水文环及其要素具有相应的表现形式(表1)。

表1 水文学研究尺度的一般性概念比较

Table 1 Comparison of different scales in hydrology

研究尺度 Research scales	全球尺度 Global scales	宏观尺度 Macroscopical scales	中观尺度 Middle scales	集水区 Catchment	土壤水文尺度 Soil hydrological scales
水文过程的空间分辨率特征 Saptial differentiated degree of hydrological proceses	海陆水文循环 Ocean-land hydrological cycle	区域水文循环 Regional hydrological cycle	流域水文循环 Watershed hydrological cycle	降水、截留、入渗、产流、汇流 Precipitation, intercept, infiltration, runoff and confluence	土壤-植物-大气连续体 Soil-plant-air continuum
水文过程的时间分辨率特征(时间尺度) Temporal differentiated degree of hydrological proceses (Temporal scale)	多年或一个水文年 Multiple years or one hydrological year	多年或一个水文年、雨季 Multiple years or one hydrological year and rainy season	多年或一个水文年、雨季 Multiple years or one hydrological year and rainy season	雨季或次降雨过程 Rainy season or the process of one event	雨季和生长季 Rainy season growth season
异质性特征(水文性质) Heterogeneity (Hydrological properties)	全球气候周期性变化特征,全球气候变化特征,水文气象变化特征 The characteristics of global climate periodic changes, the characteristics of global climate change and the characteristics of hydrological and meteorological changes	生物气候特征,潜在蒸发蒸腾率 和湿度指数,地貌特征,土地利用结构,土壤类型及其分布,森林覆盖率,森林分布格局 The characteristics of phenology, potential transpiration rate, humidity index, topography, land use structure, soil types as well as their distribution, forest cover and forest disposition	年降水量及其季节分布,流域几何特征,土地利用结构,土壤类型,林分类型及其分布格局,森林覆盖率 Annual precipitation as well as its seasonal distribution, the characteristics of watershed geometry, land use structure, soil types, forest types and disposition and forest cover	次降水量及其时间分配,集水区几何特征,土壤水分参数的空间变异,林分类型、郁闭度、密度、地被物特征 Precipitation of an event, the characteristics of catchment geometry, parameters of soil water as well as their spatial difference, stand types, close degree and density and the characteristics of earth surface cover	降雨入渗率,土层厚度,土壤质地,土壤水分常数,土壤水分动态,树冠特征,种蒸腾率,地下水位 Infiltration rate of soil, soil thickness, soil texture, soil water constant, the characteristics of tree crown, species transpiration and underground water table
水文研究 Hydrological reseraches	全球能量与水循环实验(GEWEX)*研究。大尺度土壤-植被-大气传输(SVAT)模型 The Global Energy and Water Cycle Experiment and Soil-Vegetation-Air Transfer Model	水文分区研究,洪水来源及组成,土壤侵蚀类型、程度和分布,植被区域、森林分布及其径流模数研究 Researches of hydrological sub-areas, Component of flood source, soil erosion types, degree and distribution, vegetable region, forest distribution and runoff modulus	径流的年内分配,径流的年际变化,径流系数,地下水资源总补给模数,森林蒸发散 Runoff distribution of a year, runoff changes among years, runoff coefficient, modulus of total groundwater supply and vegetable transpiration	集水区(有林和无林)对比研究,林分截留作用研究,林分蒸发散,降水-径流(产沙)关系 Contrast researches of catchments with vegetative cover (forest) and without ones, researches of forest interception, forest transpiration and rainfall-runoff (sediment yield) relationship	树冠截留作用模型,SPAC模型和一些简单实用的蒸腾蒸发模型 Models of interception, SPAC and some practical models of transpiration

续表

研究尺度 Research scales	全球尺度 Global scales	宏观尺度 Macroscopical scales	中观尺度 Middle scales	集水区 Catchment	土壤水文尺度 Soil hydrological scales
尺度转换的约束体系 The system of restriction related to scales conversion	大气环流、气象过程 Atmosphere circumfluence and meteorologic process	降水径流的时空分布,旱、涝过程 Spatial and temporal distribution of precipitation and runoff, drought and waterlogging processes.	降水过程、径流过程、蒸发散过程 Processes of precipitation, runoff and evapotranspiration	降水过程、截留过程、产流过程、蒸发散过程 Processes of precipitation, runoff, inception and transpiration	入渗过程、蒸腾蒸发过程 Processes of precipitation, infiltration, runoff and transpiration

* GEWEX (The Global Energy and Water Cycle Experiment)旨在改善模拟全球降水和蒸发的能力,提供精确评估大气辐射和云的敏感程度以及水分循环、水资源,对全球气候变化的响应;从模式研制、资料同化到有关观测系统的应用和运行,把所有气候研究各个方面结合成一个协调的计划。GEWEX 的科学目标是通过适合的模型模拟和预测全球水文特征的变化及其对大气和陆面的影响,区域水文过程和水资源变化以及他们对诸如温室气体增加等环境变化的响应。GEWEX 将极大地改进全球降水和蒸发的模拟以及大气辐射和云量对气候变化敏感性的评价

* The Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) is a program initiated to observe, understand and model the hydrological cycle and energy fluxes in the atmosphere, at land surface and in the upper oceans. GEWEX is an integrated program of research, observations, and science activities ultimately leading to the prediction of global and regional climate change. The goal of GEWEX is to reproduce and predict, by means of suitable models, the variations of the global hydrological regime, its impact on atmospheric and surface dynamics, and variations in regional hydrological processes and water resources and their response to changes in the environment, such as the increase in greenhouse gases. GEWEX will provide an order of magnitude improvement in the ability to model global precipitation and evaporation, as well as accurate assessment of the sensitivity of atmospheric radiation and clouds to climate change.

例如,对于大气水文或“汽态水文”模拟来说,只有当大的水文循环尺度是有效的,水汽和能量通量是主要的掌控因子。然而,对于“液态水文”(地表水、土壤水和地下水)来说,地表强烈地影响水文作用,例如干/湿、裸露/植被覆盖、林地/非林地、平地/山坡等应当划分为不同的地表单元或相似的水文性质类型,即所谓小尺度的“斑块研究”。另一方面,影响水文过程变量随尺度而变化或者没有变化,但变量的相对重要性有变化。例如,对于一个叶片或一株树,蒸发和蒸腾受表面气压差和气孔过程所控制,而太阳辐射是区域尺度上蒸散发的主要因子;又如,对于单点产流过程取决于单点降雨强度与入渗强度的对比关系,而河川径流过程取决于集水区面积大小和降水的空间分布(均匀降雨、主雨分布类、局部暴雨类、暴雨走向类)和时间变化特征。所以,在不同尺度之间的预测要求对随尺度变化的参数重要性的分析。例如通过数学分析(回归分析)和层次分析在不同尺度上对一组变量的重要性进行实验评价,对于检验尺度相关的实验设计是非常有价值的。现行水文过程尺度效应分析存在的问题一般是将小尺度上的水文过程经过重新组合而在较大尺度上形成的水文过程,与之相伴的是小尺度单元信息趋向规则化以及水文过程类型的减少和简化。即尺度效应表现为小尺度单元面积随尺度增大而增大,其水文过程类型则有所转换,多样性减小。稳定性和独特性是简单系统的特征,由此所简化的水文过程容易建立因果关系。然而,尺度效应使问题变的复杂。由于水文过程是复杂的尺度相关的动态系统,以不稳定性和因果关系的多重性为特征,结果使建立模式、过程和机制之间的联系变的困难。

1.2 水文尺度转换研究的现状

由于不同的时空尺度上存在不同的水文响应过程,尺度转换问题是建立合适的参数去描述这些过程,也需要在不同尺度之间连结参数状态的方法^[2,3]。包括从上到下和从下到上的尺度转换研究,两者都具有确定性研究和随机分析研究。前者采用主成分分析方法预测小尺度上的现象,针对每个尺度鉴别主成分因子。从下到上的研究是从个体或单元测定开始,并增添合理的约束条件预测大尺度的现象,目的是用小尺度上信息预测缺乏实验资料的大尺度现象。例如,降雨径流过程的尺度变化导致许多不同的条件形成,首先径流量随尺度变化,其次,边界条件对径流的影响是尺度相关的,最后流域自然条件(物理和化学条件)作为尺度的函数对于模型体系构建是最基本的。尺度转换涉及到如何穿越不同尺度约束体系(水文过程)的限制,传统的尺度转换问题是基于几何相似和动力相似的线性原理,水文学研究尺度转换的本质应当是一种水文性质(响应)转换到另一种水文性质(响应)的现象。

水文模型只有建立在对尺度相关的水文过程深刻理解基础上,对于预测水文响应才是有效的。(1)坡面水文过程成为水文过程研究的基础。在坡面尺度上快速径流响应和慢速径流响应机制影响着小集水区尺度上($<10\text{km}^2$)洪峰径流的大小,大集水区尺度上($10\sim100\text{km}^2$)的径流过程。坡面上降雨期间的水分储存机制和无雨期的释放机制影响着小集水区的径流的可持续性,对大尺度枯水径流有重要影响。坡面上侧向径流形成、累积和再分布机制影响着土壤湿度分布状况。(2)土壤性质沿坡面的空间变异以及降水的变异意味着以地形为基础的水文模型是不适宜的。因为这些模型要求一致的土壤水文性质,而降雨-径流是高度非线性和空间自相关过程,土壤物理和水力性质的空间变异是不规则的,地形也是不规则变化的。径流首先从低的地形、低的土壤水力传导率、高的土壤容重和高的土壤初始含水量地点开始,径流生成的面积随降雨的历时增加而增加。统计分析表明饱和和水力传导率、容重、坡面位置、坡度、土壤初始含水量等是径流生成的主要参数。尺度转换是开发这些参数由小区尺度向坡面尺度、流域尺度转换的方法和程序。(3)径流形成过程是流域水文最重要的过程。在一个流域内,由于坡面性质和水文响应存在极大的差异,诸如地形(坡面形状和大小)地质、土壤、植被等,解决扩大尺度的问题存在着困难,即从已有的坡面资料建立起坡面水文的普遍特征,现行的坡面水文模拟集中在定义模型的基本模拟单元和过程。有几种方法:数字模型、分维和相似性分析、随机分析等。然而如何建立起坡面水文过程和流域水文响应之间的联系,从而进行水文预测,需要通过在流域尺度上的降雨和径流观测资料直接建立概念化模型,并且独立于坡面尺度上概念化模型;另一类方法是缩小尺度的概念化模型研究。通过两种方法所得到的概念化模型应当一致,并且把坡面尺度和流域尺度上的模型参数联系起来。

水文过程的尺度?模拟水文过程的合适尺度及其方法?包括由点到面的外推、内推、聚类、分类等,即地理统计、动态模拟、组合研究。水文观测尺度和模型尺度可以看作是过滤器,它们对于水文过程的反映是控制尺度效应的参数。首先,根据流域空间结构,推断随机水文变量发生在哪个尺度,并且通过模型尺度的选择进行无偏估计,是检验尺度相依存在的简便方法。第2个方法是由物理概念分布模型组成,表达非线性过程,阐明水文过程控制变量。在分布模型中,有关水文过程尺度和计算网格的模型尺度不匹配性带来了许多尺度划分问题,是否存在最优的网格大小?第3种方法是吸收前两种方法的优点,进行从点到面的表达水文过程的分类研究,既考虑主要的水文过程又避免尺度问题,充分利用第1种方法的研究成果。

2 现行水文模型^[4~13]

基于对水文响应及其尺度转换认识所建立起来的现行水文模型,可以分为如下基本类型:(1)黑箱模型\经验性模型或称集总式模型,采用统计方法(时间序列分析、多元回归分析)或计算机方法(神经元网),从长系列资料中得到输入和输出的关系。代表性模型有:总径流线性响应模型(TLR)、线性扰动模型(LPM)、以及神经网络(ANN)等。(2)概念性模型:把集水区作为一个整体,采用概念性、推理性观点,例如水库串联或简化的物理系统进行模拟。代表性模型有:美国的斯坦福模型(SWM)、日本的水箱模型(Tank)、我国的新安江模型(XJM)等。(3)半分布物理模型:集水区被分成功能单元,在某个或多个特征上具有一致性,诸如土地利用、土壤类型、或结构性元素(坡度、水文网)、或水文功能。通过一些假设和分析方法,采用简化的物理方程进行模拟计算。其典型代表是以地形为水文过程空间变异性基础的 TOPMODEL 模型。(4)分布式过程数字模型:采用规则或不规则的格状网描述集水区。对多孔介质的物理特性和水力学特性采用部分微分方程,通过数字程式(有限差分或有限元)求解。代表模型有 SHE 模型,DBSIN 模型等。(5)混合模型。

概念性模型参数通常有多个,参数通过检验来确定。由于参数的物理含义不确定,在参数检验时,主要的问题是定义参数的应用领域。超出检验条件以外的情况,模型预测精度下降。如果参数检验所用的资料包括各种各样条件,甚至包括一个集水区内的变化,模型的有效性增加,但适合性降低。如果模型用于考察目的,如评价系统内一个变化效应,可以用有限的资料进行检验,然后分析变化后模拟值和观测值的差异。

半分布物理模型有许多参数,随时空而变化,因为参数具有明确的物理意义和可测定性,这类模型不需要检验。事实上,由于系统的异质性和非线性性,根据小尺度均一系统建立起来的方程应用在网格尺度上无效。

其次,即使是方程式有效的,参数的有效性必须定义在网格尺度上。第三,对每个网格测定所有的参数是不可能的。所以半分布物理模型必须进行检验,在一个系统模拟中,要求检验众多的参数是困难的。

参数检验带来许多的问题。然而对于定性模型的研究,可以不要求参数检验:(1)灵敏度,在不确定性范围内,模型对于参数改变不灵敏。(2)在有效性范围内,模型在不需要新的资料情况下可以外推。(3)明确性,当模型用于不同的景观条件下,对于模拟结果之间的比较,因变量和参数必须明确。(4)模拟结果的有效性,解释模拟结果的差异性。

综上所述,水文(流域)模型分类主要依据描述水文过程(流域过程)的方法、时空尺度和使用目的。集总参数模型,把整个流域作为一个整体,不考虑水文过程的空间变异、输入、边界条件和流域的水文特性。分布式模型通过求解网格结点方程,反映流域的空间变异。事实上,集总参数模型过于简化,分布式模型要求大量的实测资料,两者都不适合流域水文模拟。因此提出把流域分为具有相似水文性质单元的部分分布或半分布模型。水文模型中的水文过程描述可以是确定性的、随机性的或两者兼有。确定性模型中没有随机变量,随机性模型使用每个变量的分布产生模型输入的随机变量。因此随机性模型的输出本身是随机的,有它们自己的分布和确信度取值。如果一个模型中有部分变量通过概率法则来描述,通常称之为半确定性、半随机性或混合模型(图2)。

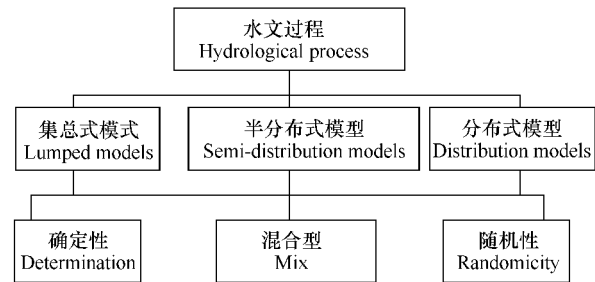


图2 现行水文模拟模型

Fig. 2 The current hydrological simulating models

流域水文模型随着遥感技术、地理信息系统、数据库、误差分析、风险和可靠性分析、专家系统的应用而发展^[14~16]。使在有资料地区和无资料地区开发分布式水文模型成为可能。然而,水文模型的开发必须以实用为目的。最基本的问题是:什么样的模拟技术较好?开发真实物理模型的困难在于(1)具有明确物理意义的水文响应参数的确定;(2)尺度转换,即小尺度的异质性在大尺度模型中的体现,不同尺度上异质性问题模型不成功的关键所在。由于缺乏主要水文过程与集水区的定量描述、气候特性之间的关系分析,定义集水区相似性的标准是一个难点。

3 水文模拟研究的探索

3.1 水文过程及其形成机制

现行水文学的主流是还原分析方法^[3],采用小尺度演绎方法,把流域分解为足够小的单元以获得均匀一致的性质。土壤物理、气象学、和水力学等同类研究领域也有同样的进展,计算机的出现加速了这种趋势。无数模型联系现实的唯一途径是通过实测资料对参数进行标定。过度参数化成为习以为常,导致无资料流域预测结果的很大不确定性。

降水径流生成机制的研究对于明确水文模型参数的物理意义具有重要的价值。在渗流过程中均匀流和优先流两种类型的径流通常同时发生。因为优先流以不同的标量产生,标量成为主要的分类标准^[17,18]:大孔渗流、达西渗流和面流。大孔渗流和裂隙流可以是饱和或非饱和优先流。达西渗流是发生在石质土壤、均质土壤、层次土壤的不稳定流,优先流生成是由于土壤水力性质变化所致。面流由于洼地和不连续性土层生成优先流。对于短历时低雨强,渗透过程表现出优先性和异质性,优先流在土壤水分输导中起着重要的作用。对于长历时高强度降水,渗透过程表现出均一性和活塞特征,优先流表现不明显。在降水初期,渗透过程表现出优先性和异质性,从土层中部分区域生成。然而对于连续性降水,渗透面积扩大到整个土层,渗透过程成为均一性和活塞作用。

以水文过程为基础模型建立在一种概念基础上,在一个集水区的径流形成是径流随时空变化的结果。最显著的径流过程机制的区分有以下几个方面:通过渗透能力生成的径流(霍顿地表径流);通过土壤饱和和能

力生成的径流(饱和地面径流);通过沿着优先路径的快速渗透和侧向径流生成(亚表层径流);深层渗透生成的慢速径流。在某一个地点,几种径流生成机制同时发生,但对径流形成贡献最大的称为主导径流过程。在一个集水区里,如果获得主导径流过程的分布,可以得到每种径流过程模型的组合,从而减少参数的数量。(1)强调水文网和大孔径流作为坡面水文过程的主导因素。通过从平地、坡地到山地的自然景观,鉴别控制坡面水文过程的水文网和大孔径流的因子。这些因子反映水文网的影响,诸如水文网的组成和解体、静态与动态、在集水区减弱或增强坡面水文过程的客体,例如洼地、湿地、湖泊等^[9]。(2)要在集水区尺度上把坡面和河岸的研究整合起来研究坡面位置和河岸带对于径流产生的相对重要性。来自坡面和河岸带的径流决定集水区出口处的径流量,河岸水源和坡面水源的比例随集水区尺度的增加而增加。坡面长度的变化是有界的,但河岸面积、河岸的宽度随集水区面积而增加。在暴雨期间,集水区径流由河岸径流占主导变为坡面径流占主导。坡面径流的贡献率随降雨量的大小而增加。在集水区径流中,坡面水源和河岸水源的时间和比例是降雨量大小、集水区尺度和河岸水源和坡面水源比率的函数。(3)河网径流通常和坡面径流机制研究分割开来。因此在一个集水区水文模型中,河道演进计算成为预测洪水量级、速度和洪水波形状的方法。坡面水文过程研究有两个补充目的:不考虑河道径流过程,单独进行小尺度坡面径流研究;给整个集水区的大尺度研究提供输入(表2)。

如何把穿越不同尺度的概念联系起来,坡面和河网水文响应可以从物理上描述(见表2),而流域单位线的物理含义可以看作是水文响应时间的分布。以这种方式,通过相互关联的概念以及尺度划分,把较小尺度上的水文过程描述联系到流域尺度上去表达。根据非平衡态热力学的最小熵产生原理或最小能耗率原理知,一个开放的动力系统在其演变过程中总是朝着熵产生或能耗率减小的方向发展,直到系统到达与约束条件相适应的某个非平衡定态为止。此时,熵产生或能耗率为最小值。在降雨-径流过程研究中,山坡水文尺度下水动力扩散作用与坡面上流速分布有关,一般取决于地形坡度和糙率的分布,可采用坡面产流时间反映能耗率

表2 水文过程及其尺度响应特征

Table 2 The hydrological processes as well as their features in responses to scales

水文过程 Hydrological processes		主要测控因子(参数) Main measured factors		尺度转换的参数 Parameters of scale conversion
		坡面尺度 Slope scale	集水区尺度(流域尺度) Catchment scale (watershed scale)	
截留过程 Interception process	边界条件 Boundary conditions	土地利用、植被类型、叶面积指数 land uses, vegetation types and leaf area index	土地利用、植被类型、叶面积指数 land uses, vegetation types and leaf area index	截留量统计参数 Statistical parameters of interception
	起始条件 Initial conditions	植被冠层湿润指数 Wetness index of vegetation canopy	植被冠层湿润指数 Wetness index of vegetation canopy	
	水文响应 Hydrological responses	冠层截留量和截留率、树干茎流量和茎流率 Interception of canopy as well as its interception rates, stem flow as well as its stem flow rates	冠层截留量和截留率、树干茎流量和茎流率 Interception of canopy as well as its interception rates, stem flow as well as its stem flow rates	
入渗过程 Infiltration process	边界条件 Boundary conditions	地形几何特征(地形属性(如 $\ln(a/\tan\beta)$ 指数)、土壤特征(土壤物理特征) Topographical geometrical features such as $\ln(a/\tan\beta)$ index and soil features such as soil physical features	地形组合特征、集水区几何特征、土壤类型组合特征(土壤厚度的概率分布函数) Topographical assembled features, catchment geometrical features and assembled features of soil types such as probability distribution of soil thickness	大孔渗流、达西渗流和面流机制生成的优先流参数 Parameters of preference flow resulting from big aperture seepage, Darcy infiltration and surface flow
	起始条件 Initial conditions	土壤含水量 Soil water content	土壤湿度(指数)空间分布 Spatial distribution of soil wetness index	

续表

水文过程 Hydrological processes		主要测控因子(参数) Main measured factors		尺度转换的参数 Parameters of scale conversion
		坡面尺度 Slope scale	集水区尺度(流域尺度) Catchment scale (watershed scale)	
	水文响应 Hydrological responses	土壤的水分储存能力、渗透能力 Deposited capacity of soil water and infiltration	变动产流面积 Changeable runoff areas	
径流过程 Runoff processes	边界条件 Boundary conditions	土壤水力传导率和土壤饱和含水量 Soil hydraulic conductivity and soil saturated content	地形(土壤)参数的频率分布生成土壤水力传导率和土壤饱和含水量的空间分布 Soil hydraulic conductivity and spatial soil saturated content of distribution resulting from topographical parameters spatial distribution	大孔渗流、达西渗流和面流机制生成的优先流参数 Parameters of preference flow resulting from big aperture seepage, Darcy infiltration and surface flow
	起始条件 Initial conditions	降水特征(如短历时低雨强或长历时高雨强) Rainfall characteristics such as low rainfall intensity with short duration or high rainfall intensity with long duration, etc.	降水参数的时空分布特征 Characteristics of spatio-temporal Distribution of rainfall parameters	
	水文响应 Hydrological responses	均匀流和优先流 Uniform flow and preference flow	在一个集水区里,在土壤水分输导中优先流或主导径流过程 Preference flow or dominate runoff processes in soil water transfer in a catchment	
汇流过程 Conflux processes	边界条件 Boundary conditions	坡面水文过程的水文网和优先流因子 Hydrological network and factors of preference flow in slope hydrological processes	河网几何特征、河网密度 Density and geometrical feature of river network	产流时间/汇流时间 Time of runoff produced/ conflux time
	起始条件 Initial conditions	渗透过程的均一性特征或优先性特征 Uniform or preference characteristics in infiltration process	渗透过程的均一性和活塞性特征或优先性特征 Uniform or preference and plunger characteristics in infiltration process	
	水文响应 Hydrological responses	水文网的组成和解体、静态与动态以及侧向径流的形成和消失 Formation and dismantle of hydrological network, static state and dynamic as well as lateral runoff forming and disappearance.	河道径流过程线 Riverway flow process	

或熵产生的状况,产流时间越长,能耗率越大。地貌扩散作用取决于流域大小、形状和水系分布状况,可采用汇流时间反映能耗率或熵产生的状况,汇流时间越长,能耗率越大。比较不同尺度条件下坡面或流域的熵产生或能耗率,可采用(坡面产流时间/坡面汇流时间)之比衡量,该值的差异表明尺度转换可以从熵值转换来体现。

3.2 水文模拟研究探索

水文模拟随计算机技术的发展而发展,但缺乏一个完善的理论来作指导^[19]。现在人们面临着许多模型并没有足够的理论支撑,解决这个问题可能途径是:(1)通过对水文过程的形成概念和系统的研究减少参数

数量。(2)定义参数的物理意义,可以独立于模型结构和研究地点对它们进行评价。(3)研究新的理论和技术,把新的信息引入模拟和检验过程,并对预测结果的不确定性进行定量评价。

降水、入渗、径流、汇流和蒸发散等水文变量的谱相构成驱动流域的水文过程,它们之间的联系及其变化决定流域水文过程的变化,而且可以独立于模型结构和研究地点对它们进行评价。

对于流域中某一点来说,在一次降水事件中,降水强度随雨型而发生变化;相应地,入渗强度随雨强和入渗界面的物理特性而变化;降雨过程和入渗过程的相互作用形成产流(积水)强度并随雨型而变化。由于研究界面所存在的异质性,这些水文变量的谱相特征参数在流域的空间分布具有随机性,似乎漫无规律可循,但在由点到面转化的条件下,对于径流研究来说,径流系统依赖于结构和约束而存在:实测降水表明了在一系列尺度范围内(小尺度、中尺度、大尺度、天气尺度)的时空变化模式;地质形态伴随者它们的形成过程具有离散性,有时以一定的次序组成;土壤的发育是地形状态的响应;河流把景观切割为河网,具有对称性;气候、土壤、植被之间相互作用关系包含着自然流域的结构和功能方面许多有价值的水文信息。

在径流系统发展中,系统的组织和结构发生变化并通过动态层次传播,一方面,小尺度径流网结构或径流组成驱动了大尺度径流结构或径流组成的形成;另一方面,大尺度径流过程对小尺度层次施加约束(例如河床切割深度对坡面径流的影响);径流网结构或径流组成的涌现、维持和破坏是由于穿越尺度的相互作用,某个尺度径流结构或径流组成随时间和空间的稳定性依赖于这些相互作用的强度。如果一个径流结构或径流组成的尺度行为可以由谱分析方法来表示,维持其稳定性就意味着维持所分析的谱存在。一个径流系统的稳定性范围也是所应用的谱范围,预测系统在时间和空间的行为是根据一个系统所存在的穿越尺度过程的动态分析得出的,把尺度分析转变于水文变量的谱分析,开发尺度转换的方法。即通过水文变量的谱分析,认识发生在不同尺度范围内潜在的秩序和规律,研究他们形成的机制,寻求决定水文过程规则的通用表达方法。(1)层次(尺度)的标识说明整个系统的嵌套组成,即:[...流域[集水区[坡面[[斑块[小区[单点]]]]],这种结构建立在的直觉基础上。一个特定层次(尺度)水文系统分析应关注变化,一个阶段如何发展到下一个阶段。来自低层次或小尺度的信息如何体现在高层次和大尺度,水文变量的谱分析不仅得出不同尺度上事件和动态的嵌套,而且得到相互之间的影响和不同层次之间的反馈。(2)层次可以内推得到添加层次,新层次出现通过增加亚层次的方式过程,这种情况下,一个层次的实际形成过程是通过高层次边界条件所导引的低层次单元之间的关联。不同层次之间的动态是通过相互约束(通过水文信息联系)而相互影响,所以层次之间的信息交换应当通过层次间的水文变量谱相分析的边界条件来说明。

在径流系统中,可以把变量分解为两种类型:时序变量和控制(约束)变量。对于入渗和径流等时序变量是在降水时序变量和多个控制变量,诸如地形变量、土壤变量和植被覆盖变量等的相互作用下生成的,不同的尺度所关注的控制变量是不同的,然而对于降水、入渗和径流、蒸发散等时序变量的关注是一致的,但量级上有大的差异。时序变量的量级差异反映了尺度动态变化及其控制变量的改变。因此,谱分析的重心应是不同尺度的降水、入渗和径流、蒸发散时序间的交叉谱,通过交叉谱相图来推断在同一尺度条件下时序变量和控制变量间的相互反馈效应和不同尺度条件下尺度转换的边界条件。

边界条件参数化和模型简化是水文模型开发的两个步骤。定义不同空间尺度条件下,与水文过程相关的控制变量的几何特性和属性,(1)用相同的(随机的)参数值划分地形单元;(2)模拟参数值的空间分布;(3)计算反映径流系统结构变化有效的(时序变量和控制变量)参数;(4)通过 GIS 和特别的谱分析运算规则取得集水区的参数,通过分析建立集水区参数与水文指标的关系,对参数不确定性所带来的水文模拟误差进行估计。基于 GIS 水文模型,采用面向对象的分析方法,将流域抽象概化为水文模型对象的集合,并从地理空间角度和水文角度对其进行了解析,最终完成了水文模型对象类的抽象,为建立通用型的径流预测软件平台打下基础。

References:

- [1] Beven K J. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling. Adv. Water Resource., 1993, 16, 41—51.

- [2] Beven K J. Linking parameters across scales: sub-grid parameterisations and scale dependent hydrological models. *Hydrol. Proc.*, 1995, 9, 507—526. also in J. Kalma and M. Sivapalan (Eds.) *Scale Issues in Hydrological Modelling*, Wiley, Chichester, UK.
- [3] Beven K J. Uniqueness of place and the presentation of hydrological processes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2000, 4, 203—213.
- [4] Wu J F, Liu C M, Progress in Watershed Hydrological Models, *Progress in Geography*, 2002, 21(4), 341—348.
- [5] Vijay P. Singh, F. ASCE, and David A. Woolhiser, M. ASCE, Mathematical Modeling of Watershed Hydrology, America Society of 15th Anniversary Civil Engineers Paper. *Journal of hydrologic engineering*, July-August, 2002, 270—292.
- [6] Beven K J. A discussion of distributed modelling. Chapter 13A. In: J.-C. Refsgaard and M. B. Abbott eds. *Distributed Hydrological Modelling*, Kluwer, Dordrecht, NL, 1996a. 255—278.
- [7] Beven K J, Binley A M. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Proc.*, 1992, 6, 279—298.
- [8] Watson F G R I, Vertessy R A 2, Grayson R B, Large Scale, Long Term, Physically Based Prediction of Water Yield in Forested Catchments, *Proceedings, International Congress on Modelling and Simulation (Modsim 97)*, Hobart, Tasmania, 8-11 December, 1997. 397—402.
- [9] Ganoulis J. Sur la modélisation des phénomènes hydrologiques. *Rev. Sci. Eau.*, 1996, 9, 421—434.
- [10] Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resour. Res.*, 1998, 34, 751—763.
- [11] Higby C, Musy A. Digital terrain analysis of the Haute-Mentue catchment and scale effect for hydrological modelling with TOPMODEL. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2000, 4, 225—237.
- [12] Parkin G, O'donnell G, Ewen J, Bathurst J, O'CONNELL P E, LAVABRE J. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts I. Case study for a Mediterranean catchment. *J. Hydrol.*, 1996, 175, 595—613.
- [13] Yapo P O, Gupta H V, Sorooshian S. Multi-objective global optimisation for hydrologic models. *J. Hydrol.*, 1998, 203, 83—97.
- [14] Flügel W. Delineating hydrological response units by Geographical Information System analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Br? l, Germany. *Hydrol. Process.*, 1995, 9, 423—436.
- [15] Freer J, Beven K J, Ambroise B. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach. *Water Resour. Res.*, 1996, 32, 2161—2173.
- [16] Schultz G. Remote sensing applications to hydrology: runoff. *Hydrol. Sci. J.*, 1996, 41, 453—475.
- [17] Flury M, Fluhler H, Jury W A, Leuenberger J. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resour. Res.*, 1994, 30, 1945—1954.
- [18] McDonnell J J, Freer J, Hooper R, Kendall C, Burns D, Beven K J, Peters J. New method developed for studying flow on hillslopes. *EOS, Trans. AGU*, 1996, 77 (47), 465/472.
- [19] Patrick durand, Chantal gascuel-odoux, Marie-Odile cordier, Parameterisation of hydrological models: a review and lessons learned from studies of an agricultural catchment (Naizin, France), *Agronomie* 22 (2002) 217—228 INRA, EDP Sciences, 2002 DOI: 10.1051/agro;2002001.
- [20] Zhou M C, Li Z H, Jayawardena A W. The generation of digital elevation model and the assessment of its hydrogeomorphological information. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 2, 71—74, 78.
- [21] Scott A, Wooldridge and Jetse D Kalma. Regional-scale hydrological modelling using multiple-parameter landscape zones and a quasi-distributed water balance model, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001, 5(1), 59—74.
- [22] Mackay N G, Chandler R E, Onof C, Wheater H S. Disaggregation of spatial rainfall fields for hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001, 5(2), 165—173.

参考文献:

- [4] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展. *地理科学进展*, 2002, 21(4), 341—348.
- [20] 周买春, 黎子浩, A. W. Jayawardena, 数值地形图的生成及其水文地貌特征评价. *水利学报*, 2002, 2, 71—74, 78.