

大尺度生态水文模型的构建及其与 GIS 集成

孙鹏森, 刘世荣*

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要: 基于过程模拟手段揭示森林植被的生态水文功能和变化机制, 已经成为生态水文学研究的重要手段。由于陆地生态水文过程的非线性和尺度问题的广泛性, 基于过程的坡面或小流域尺度的分布式水文模型不适合大流域的水文过程的分析和预测; 另外, 传统的水文模型主要侧重水文物理过程, 只有充分耦合植被生态过程, 才能从机制上揭示森林植被参与水文循环的调控作用。依据大流域的水文过程特点, 从 5 个方面阐述了大尺度生态水文模型构建过程中的主要问题: ①大尺度生态水文模型的概念和结构; ②尺度的界定与匹配; ③离散化数据集的建立, 着重分析了植被覆盖、土壤质地、山地气候等主要数据集的建立方法; ④分布式与集总式模型, 这两类模型可以从他们的基本空间单元上进行区分, 数字流域的建立和空间分析手段使得集总式模型和分布式模型得到了很好的结合; ⑤生态水文模型与 GIS 的集成, 分析了 4 种不同的集成方式, “松散型”的集成方式因其编程工作量小而被广泛采用。集成的目的不仅是要提高模拟的技术水平, 更要提高系统整体的概念化水平。

关键词: 生态水文过程; 大尺度; 分布式模型; 地理信息系统; 离散化数据集

Large scale eco-hydrological model and its integration with GIS

SUN Peng-Sen, LIU Shi-Rong (Research Institute of Forest Ecology and Environment, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2115~2124.

Abstract: Process-based modeling is an effective way in the current eco-hydrological study to explore the interacting mechanism of ecological and hydrological processes in relation to forest vegetation. Because of the nonlinearity of terrestrial eco-hydrological processes and diversity of scales, the process-based distributed hydrological models based on slope or small catchments can not be used to make an explicit prediction for large scale watersheds. More over, the eco-hydrological function of forest vegetation could not be quantitatively evaluated without coupling the interaction of ecological and hydrological processes because eco-hydrological processes are not merely a physical process of water movement. According to the characteristics of large scale eco-hydrological processes, in this paper the following five major issues were discussed in the process-based eco-hydrological models: (1) Conception and structure of large scale eco-hydrological models. Large scale eco-hydrological models are usually applied to the scale of more than 10, 000km² valleys with relatively low spatial resolution and long temporal interval. The kernels of the model are water balance and the coupling of ecological and hydrological processes on the basis of spatial elements. (2) The notions of process scale, observational scale and modeling scale are discussed to determine the temporal and spatial scale of the model. Because the modeling scale is usually different with the

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(30125036); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111504)

收稿日期: 2002-11-29; **修订日期:** 2003-05-28

作者简介: 孙鹏森(1971~), 男, 山东莱州人, 博士, 主要从事生态水文学研究。E-mail: sunpsen@forestry.ac.cn.

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 30125036) and National “973” Fundamental Research Program (No. 2002CB111504)

Received date: 2002-11-29; **Accepted date:** 2003-05-28

Biography: SUN Peng-Sen, Ph. D., main research field: eco-hydrology.

observation scale, scale matching is needed to acquire datasets with the same resolution. Spatial scale and temporal scale, hydrological scale and ecological scale, hydrological scale and general circulation model (GCM) scale are key pairs to be matched. (3) Development of discretization datasets. Land use and vegetation cover, soil texture, topographic and climatic data need to be matched and specified to each grid point of discrete surfaces. Indices of vegetation property are important to simulate eco-hydrological processes because they are used to be a joint of the two processes. Several indices including LAI and NDVI have been compared and tested. To build up discrete surfaces of meteorological factors in grids, surface-fitting software including ANUSPLIN, MTCLIM-3D and PRISM are briefly introduced in this article. (4) Distributed model and lumped model can be identified by the modeling elements or units in space such as square grid vs. "catchment-shaped" cell. We suggest an approach to combining distributed model with lumped model by means of delineation of digitizing watershed and GIS techniques. (5) Process-based models integrated with geographic information system. Four integration approaches have been widely used, they are: a. Embedding GIS-like functionalities into eco-hydrological modeling packages; b. Embedding eco-hydrological modeling into GIS packages; c. Loose coupling, eco-hydrological modeling and GIS are integrated via data exchange using either ASCII or binary data format, there is no common user interface among different software. d. Tight coupling, integrate eco-hydrological models with GIS via either GIS macro or conventional programming, this approach needs a well defined interface to the data structure held by GIS. The advantage of "loose coupling" is that redundant programming can be avoided and it is a realistic method to be adopted in modeling work. After all, it is conceptualization compatibility rather than a technology-driven problem that should be adequately addressed in the integration.

Key words: eco-hydrological process; large scale; distributed model; GIS; discretization dataset

文章编号: 1000-0933(2003)10-2115-10 中图分类号: P338+.1, S715, S718.5 文献标识码: A

20 世纪 90 年代以来,生态水文学作为一门边缘学科逐渐兴起^[1],它注重研究生态学和水文学的交叉领域,是描述生态格局和生态过程水文学机制的科学^[2]。在这一领域研究中不再把植被作为水文景观的静态部分,例如,过去水文学家在使用曼宁 1889 年通用流量公式时把河道中的植物仅作为静态的特殊粗糙度系数来考虑,现在更加注重水文循环与生态过程的关系;这一理念也同样应用于生态学研究领域,越来越多的人将目光转向植物的生态与水文过程之间的双向耦联,从而应用在群落演替等方面^[3~5]。

在森林植被与生态环境的相互关系中,生态水文过程是最为重要的方面之一^[6]。在过去的 10a 中,生态水文学研究领域内越来越多的人对模拟大尺度的生态水文过程感兴趣^[7~11]。主要基于以下几个方面的原因:首先,模拟较大区域的环境资源的变异性,比仅仅用实测数据具有更高的空间分辨率;其次,由于气候变化和空间异质性而对流域生态水文过程产生的影响,小尺度过程与机制的研究结果直接推绎到大尺度时存在较大的难度和不确定性,其模拟预测结果的可靠性不如直接进行大尺度的研究;最后,只有在大尺度上建立的生态水文模型才能用于集成到 GCM 模型中。GCM 可以模拟全球气候变化的情况,但由于 GCM 只能提供大尺度范围的结果,所以,常规的坡面尺度的水文生态模型无法和 GCM 结合,生态水文过程与气候变化的相互关系难以解释^[12],森林植被的环境和生态功能也难以准确定量。因此需要建立适合大尺度生态水文模型籍以应用于大的地理区域生态水文过程的模拟。大尺度模型必须将整个研究区域的空间信息进行离散化,然后对每个研究单元根据可获取的空间信息进行参数化。要得到较为准确的预测结果,模型必须将对水文物理过程和生态过程有机的结合。但是,数据获取的难度大大限制了大尺度生态水文模型的表达形式,本文旨在探讨模型构建和程序化过程中的主要问题。

1 大尺度生态水文模型

Turner, M. G. 认为,“一种尺度上的重要参数和过程,在另一尺度上常常是不重要的或不能预测的,当在较小的空间分辨率上考虑空间(或时间)数据时,往往需要舍弃一些信息”^[13]。在过去的 10a 中,科学家

根据这一理念,已经开发出若干个生态水文模型用于研究大地理区域。目前比较完善的基于概念的大尺度水文模型 WBM/WTM(WBM 是水量平衡模型,WTM 是水量传输模型)由 Vörösmarty 等人研发^[8,9]。模型基于 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的栅格,时间步长是 1 个月,参数从栅格化的各类数据集中导出。该模型将每个栅格视为基本单元,假定栅格内属性不存在异质性。该模型自动产生汇流路径,从而阐明大流域的径流量和水分传输问题,首次应用于巴西亚马逊流域和南美洲其它地区,随后又应用在 Zambesi 流域^[7]。大尺度概率分布式水文模型(Macro-PDM)^[14]是从 Moore 的概率分布式模型(PDM)^[15]发展过来的,其原理与 ARNO 模型^[10]和 VIC 模型^[16]类似。模型最初是用以模拟大区域尺度气候变化,后来用以模拟生态水文过程,先后应用于欧洲^[14]、非洲南部^[11]乃至全球^[17]。Macro-PDM 特点是利用 3 种随机模型将月降雨量转变为日的降雨量,但其空间分辨率仍然很低,为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$;另外,Macro-PDM 的检验内容不但包括最终模拟的结果,而且对所输入的数据集也要进行检验。Andersen 运用修正后的 MIKE SHE 模型模拟 37.5 万 km^2 的塞内加尔河流域水文过程,模型采用 $4\text{km} \times 4\text{km}$ 的大小的栅格单元,土层厚度的影响在该模型中得到了充分的考虑^[18]。

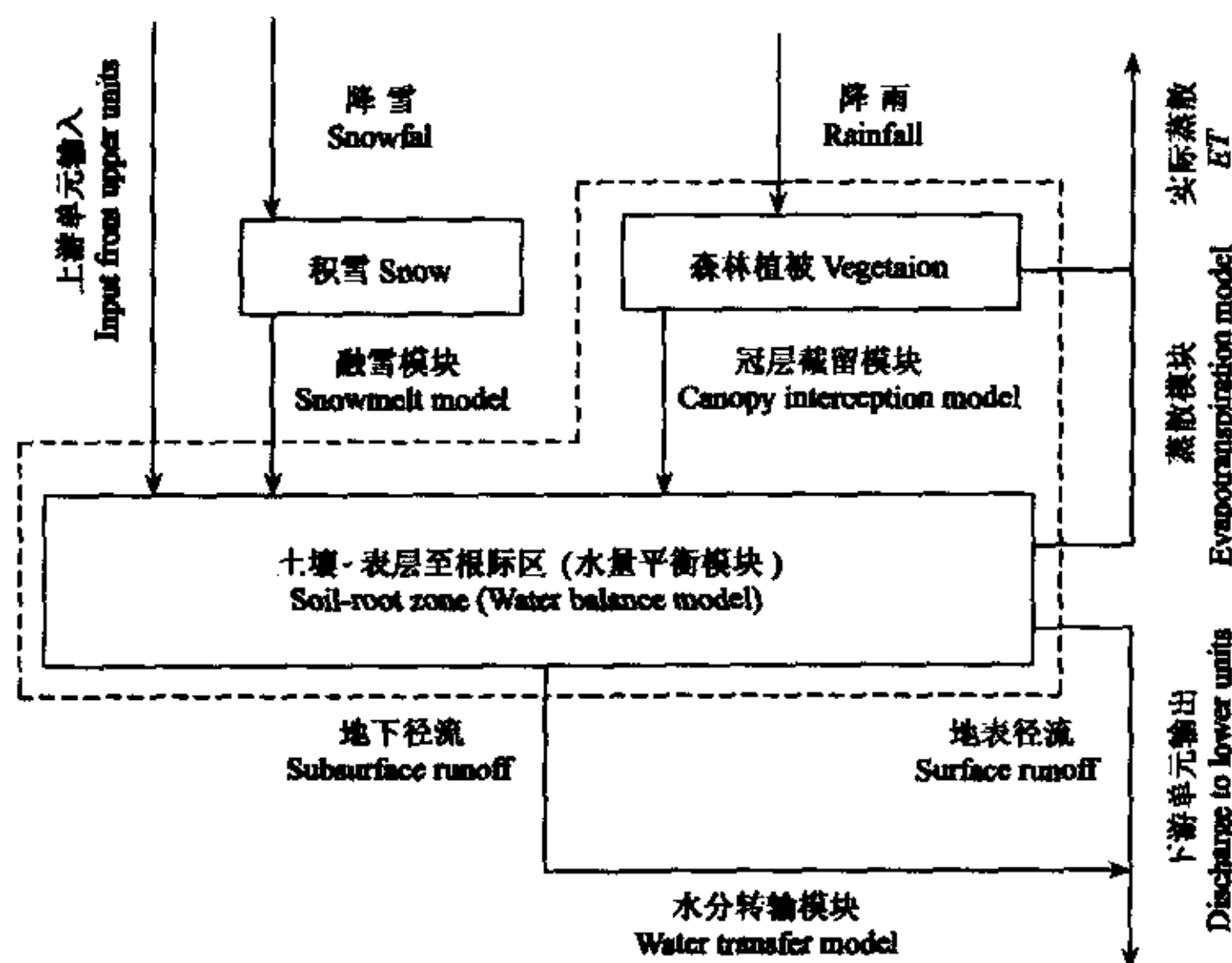


图 1 大尺度生态水文模型的结构模式

Fig. 1 Structure of large scale ecohydrological model

基本单元从概念上讲,包含虚线框内的两个实体对象,但运用在水量平衡模块中的实体对象往往只包括土壤层,实际上是忽略植被本身的水文调节机制 Spatial unit is conceptually consisted of the 2 objects inside the dash line, which is slightly different from the unit we usually use in the water balance model, the latter, actually, neglects the effect and function of plants

图 1 为大尺度生态水文模型的一个概念性的结构模式,森林植被作为组成基本单元的实体对象之一,在以往的水文物理模型中往往是被忽略或简单考虑的,因此,是否充分考虑植被的影响,是生态水文模型区别于传统水文物理模型的重要标志。综上所述,大尺度生态水文模型具有以下共同特性:(a)大尺度生态水文模型研究对象一般是不低于 $10,000\text{km}^2$ 的大流域,基本空间单元一般不低于 1km^2 ;(b)对应较低的空间分辨率,模型一般采用较大的时间步长;(c)模型忽略坡面土壤水动力学的具体细节,而将栅格水量平衡和植被调节机制作为研究的核心;(d)大尺度模型同时需要集总式和分布式两种建模方式,并使二者得到统一。因为大流域通常包含多个子流域,在模型的验证过程中,需要利用各子流域出口水文站进行验证。

2 尺度的界定与匹配

“尺度问题”已经成为生态学和环境科学研究的重要科学问题,已经被美国水文学特设委员会确定为优先研究项目^[19]。这里所说的尺度,应当包括以下 3 个含义,即过程尺度、观测尺度和模型工作尺度^[20]。

过程尺度是指事件的发生发展对空间和时间的依赖性。过程尺度在时间上既可以定义为持续的时间、一个特定时期或者是固定时间步长,这取决于过程的性质。而在空间上,过程尺度并不存在很明显的自然界限,例如降雨,但通常根据过程的性质确定合适的空间尺度。观测尺度的定义源于观测样本的有限性,因此,观测尺度在时间和空间上可以被定义为:(a)数据集在空间或时间上的扩大;(b)观测时间间隔;(c)样本总量。一般情况下,观测的空间分辨率不能满足水文过程所要求的分辨率,观测尺度对设备的依赖性很强,例如从土壤剖面观测的是局地点的土壤理化性质,而遥感卫星影像可以提供较大范围的地表特性图层^[22]。模型的工作尺度取决于过程尺度和观测尺度。Dooge 在空间上将尺度划分为以下几个典型范围:(a)局地(点)尺度(1m);(b)坡面尺度(100m);(c)流域尺度(10km);(d)区域尺度(1000km)^[23]。在时间上,分为以下几个典型尺度:(a)事件尺度(1d);(b)季相尺度(1a);(c)长期(100a)。模型的工作尺度选取依据所要解决的问题的不同而异。例如在研究坡面水分运移和区域水文循环显然需要不同的尺度,前者可能需要 10~50m 的空间分辨率和以小时为单位时间步长,后者在时间和空间上要大得多。

模型尺度经常远大于或远小于观测尺度,因此经常需要尺度之间的转换使之相互匹配。尺度之间的匹配问题可以分为以下 3 个方面:(a)生态水文过程与气候过程的尺度匹配。由于目前的大气环流特征都是低分辨率的(数千平方公里),而多数生态水文过程分辨率明显较高(几米到几十公里)。为解决这个问题,1995 年,美国的植被和生态系统模拟与分析项目(VEMAP)提出了降尺度气候学调整值,作为输入生态水文模型中的数据^[2]。因此,大尺度研究必须依赖“降尺度”,以便从中获取温度、降水、辐射以及与地形有关的气候因素。(b)生态与水文过程尺度匹配。在坡面尺度与小流域尺度上因下垫面的均一性,两者能够很好的结合,而在景观尺度上的匹配目前尚在探索阶段。(c)时空尺度匹配。目前只有这样的认识,大的空间尺度只能和低的时间分辨率结合。这个问题也是构建大尺度模型的基础,即不同尺度侧重于解决不同的问题,大尺度上很难像小尺度模型那样以小时或分钟来考虑问题,有的过程是可以被忽略的,但考虑哪些过程和忽略哪些过程正是问题的所在。

3 离散化数据集的建立

数据集是模型运行的基础,然而,由于我国对于数据集的标准化工作处于起步阶段,所以,往往导致许多研究工作不能基于相同的数据集来进行;另外,精度要求不同,所以导致不同研究之间的可比性差。所谓离散化数据集即将基于点的观测信息和面的连续信息在空间上进行离散化,形成具有特定分辨率的数据源,数据源的基本单位一般采用栅格格式,每个栅格单元内部认为是同质的。一般来讲,模型运行所需要的各个数据层应当采用相同的空间分辨率、相同的投影参考系、相对应的时间,数据层的这些准备工作往往比建立模型本身还有耗费大量的工作量。而对于大尺度模型来讲,由于所需数据集在空间分辨率上的精度通常要求不高,所以,在离散化数据集的准备工作上一般应当尽可能采用公共数据源以减少工作量。下面分别介绍在建立植被结构、土壤质地、气象数据、地形信息数据集方面国内外的最新研究进展。

3.1 植被结构特征的分类及表达

目前并不是所有的水文模型都会把植被的生态学过程作为重要因素考虑。代表性的有如 TOPMODEL,1979 年由 Beven 等人首次应用于水文学研究中,它是基于 Dune 和 Black 的变动产流面积理论基础上建立起来的。成功之处在于利用地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 和后来改进的土壤-地形指数 $\ln(\alpha/T_0\tan\beta)$ 概化了变动产流面积(其中 α 为经由某点的单位等高线长度的上游坡面面积, β 为该点的坡度, T_0 为坡面流饱和和导水率)^[24]。模型在后期逐步得到改进,但在现有模型的 9 个参数中,没有直接反映地上植被结构的参数,只是加入了根系层厚度的参量。它基本上是一个以地形为基础的水文物理过程的模型^[25]。近来随着生态水文学研究的兴起,越来越多的研究开始注重将生态过程耦合到水文过程中。

在植被结构的表示上,有些研究采用植被分类的方法分别研究不同植被类型的生态水文功能。Vörösmarty 的大陆尺度 WTM/WBM 水文模型中 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 分辨率的植被和土地利用数据来源于 Matthews 全球植被和土地利用公共数据源^[26],在此基础上对南美的生态系统包括森林、灌丛和草地三大

类,共 14 个亚类的生态系统,从而分别计算其蒸散、产流等^[7]。Arnell 的 Macro-PDM 模型在计算蒸散和土壤水分特性时,只将植被类型分为森林和草地两个类型来考虑^[14]。国内相关研究中,曾有依据植被覆盖率确定多林期参数和少林期参数进而模拟森林植被的水文效应的报道^[27],如此难以准确描述植被的动态变化,即植被的生态学过程。植被不仅有长期的演变过程,而且在一年中有着明显的生长规律和物候变化。

Watson 等人应用 LSSMs 大尺度模型对 163km² 的墨尔本东北部的集水流域进行了研究。其中的植被结构参数利用 *LAI* 来表示,*LAI* 通过两种方法获得,一种是通过利用 TM 卫星影像获取 *NDVI* 并换算为 *LAI* 求得;另一种方法是通过冠层分析仪对混交林、纯林和雨林分别采样后再统一赋值,两种方法取得了较为一致的结果^[28]。由于森林冠层调节蒸散的作用显著,所以对冠层叶面积指数 *LAI* 的精确预测能够更好的反映植被结构及其作用。Watson 首先假定并检验了这样的定律:叶面积指数变化引起的蒸散的变化从而改变流域年总径流量。他们通过两种途径建立桉树林 *LAI* 的预测曲线:一种方法是建立地面观测 *LAI* 值与 TM 卫星得到的 *TNDVI* 指数之间的回归关系;另一种方法伐木测量 *LAI*,并建立 *LAI* 与胸径的相关关系^[28]。叶面积指数的引用极大的提高了模型的预测精度,但在长期总径流量的预测中,“单位叶面积指数的水分利用效率”是更为有效的参数。虽然 Watson 的研究已经在很大程度上考虑了植被的影响,但在他所研究的尺度,植被的变异性不大(同一树种,年龄有差异),笔者认为,这种方法在应用到植被类型复杂的大流域(如大于 10000km²)中仍有相当大的局限性。

3.2 土壤质地与水分贮存

土壤的水分特性无论是在水量平衡还是水分运动的模拟中都是非常重要的变量。在概念性和基于过程的物理模型中,侧重于推求土壤水分运动的特征参数,诸如土壤非饱和导水率、土壤非饱和扩散率、比水容量、土壤饱和导水率与土壤水分特征曲线等。但这些参量多用在小尺度模型中。而在大尺度上,由于土壤和植被的变异性较大,土壤水分在坡面的运移过程并不是考虑的重点,所以描述土壤的物理特性大多偏重于与土壤的蓄水特性有关的参数,如土壤的田间持水量 *FC*、植物可利用水 *AWC*、凋萎点 *WP* 等。Vörösmarty 利用土壤质地(FAO 标准)、植被分类(森林、草地和灌木两类)和根系深度 *RD* 计算出两个土壤水分特性值 *FC* 和 *AWC*,而这两个值对水量平衡中的土壤含水量 *SM*、潜在蒸散 *PET*、融雪入渗 *RS*、径流 *RO* 的计算非常关键^[7]。而另一大尺度水文模型——Macro-PDM 基本上沿袭了这一计算方法^[14]。

Andersen 通过改进分布式水文模型 MIKE SHE 而将其应用在塞内加尔河流域,由于当地土壤不是沙土就是粘土,中等质地的土壤不到 1%,所以,土壤质地只合并为两类考虑,但土层厚度却是非常敏感的因子,因此,将土层厚度分为 5 个等级考虑,但是由于没有将土层厚度和地上植被的相关性考虑在内,所以,模拟的水文变化图明显存在滞后的效应,而且径流量的也偏低^[18]。

另外,其根系深度与植物可利用水分及蒸发都密切相关。Vörösmarty 在验证潜在蒸发量(*E_p*)模型时发现,桑斯维特法和彭曼法存在较大的误差,并且发现阔叶树种的蒸散经常预测偏大^[9],误差源于模型所采用的根系深度数据。Vörösmarty 认为,在大尺度上,对土壤水分有效性的研究很重要,但要对不同植被类型与土壤的组合都定量化却比较难,对于未经人类干预的植被类型,将根系深度数据调小,使其能够体现较低的水分有效性,反而比使用标准根系深度数据准确。

3.3 气象数据集与山地气候模拟

气象因子是水文过程的驱动力之一,大尺度生态水文模型要求将气象要素在空间上离散化,即分布到每个栅格单元中,而目前的气象观测大多是基于气象站的点的观测数据,在时间和空间尺度上并不连续(也不可能连续),因此,气象数据的空间插值是构建分布式水文模型的必然要求。由于山区地形的特点,气象要素的变化呈现一定的规律性,因此,对山地气候进行模拟的山地气候模型相继产生^[29],并有相关软件。目前,国外同类研究多采用以下 3 个软件:即 ANUSPLIN, MTCLIM-3D 和 PRISM。ANUSPLIN 由澳大利亚国立大学资源与环境研究中心研制,利用样条平滑方法对多因变量受干扰数据进行空间插值,并且提供综合统计分析、数据诊断和空间分布标准差计算功能^[30]。PRISM 模型是美国 Oregon 州立大学空间气候研究中心建立的一种基于地理空间特征和回归统计方法生成气候地图的模型。在美国,PRISM 模型技术已经广泛应用于气候制图的诸多领域^[31]。MTCLIM-3D 由美国蒙大纳州立大学林业学院的土地动态数字

模拟专家组研制。由于采用智能地形技术,其最大的特点是具有较高的地形敏感性和空间相关性^[32,33]。这3个模型各有优劣,但是对比研究表明,这3个模型模拟的结果具有相似的统计规律^[34]。无论如何,气象模拟软件提供了普通的GIS软件的插值程序不具备的功能,它只需具备较少的气候知识便能进行复杂的气象模拟,但是,要提高它的精度,必须具备足够数量的站点观测数据。

3.4 数字高程模型与数字流域

地形信息可表达为高程、坡度、坡位、坡长、坡降、坡向等。在地形信息数字化后,为了适应分布式模型的计算要求,通常需要将矢量的等高线转为基于栅格的数字高程模型(DEM),除高程以外的其他的地形信息也可以通过DEM推求。因此,DEM成为水文模型的基本数据源。

美国地质勘探局提供标准的美国及全球的DEM数据集。其对全球开放DEM精度达1000米,这套在“HYDRO1k”计划下建立的地理数据集提供了统一的地理坐标系统下的数据集,还包括了大量的包括亚洲在内的大陆尺度的水文地理信息(<http://edcdaac.usgs.gov>)。USGS的这套DEM数据集使用独立的数据格式,必须进行转换才能应用到水文模型中。利用Arcinfo(ESRI, inc.)和Erdas(ERDAS, inc.)等GIS软件可以导入。Arcinfo下可以使用IMAGEGRID命令导入,但是由于IMAGEGRID不支持影像数据的负值,所以负16位的影像值不能正常导入。还需在GRID模块下执行以下命令进行修正:

```
out_grid = con(in_grid >= 32768, in_grid-65536, in_grid)
```

然而,如果需要更高分辨率的DEM,可以按如下方法:以美国环境系统研究所研制的地理信息系统软件ARC/INFO作为工作平台,首先应用ARC模块中数字化子系统将流域地形图高程等高线和点的高程(如山顶)输入计算机中,再应用TIN模块生成不规则三角网,最终由GRID模块生成特定边长的数字高程模型DEM;或者通过TOPGRID命令,输入相应的参数即可产生。这样产生的DEM是不能直接应用于水文模型中的,必需进行DEM凹陷区域识别与填充处理^[35,36]。

处理好的DEM可以用于子流域的产生与水系的生成。首先计算DEM每一栅格单元与其相邻的八个单元之间的坡度,然后按最陡坡度原则设定该单元的水流流向,Fairfield和Leymarie将此种方法称为D8(8邻域识别法)^[37]。需要注意的是,DEM栅格图层范围要比研究流域的区域略大一些,这样利于边界处格网单元流向的确定,从而输出包含所有格网单元水流方向的新的栅格图层^[36]。

DEM及其数字流域的分析方法主要用于解决水文模型中的水分传输过程。即WTM水量传输模型。奥斯汀的德克萨斯州立大学水资源研究中心是研究数字流域与水文模型的权威机构,每年在网上推出大量的研究报告,并设有建立数字流域与水文模型的网上课堂。他们的模型大多是基于水文物理过程的模拟,并且和地理信息系统软件ArcGIS结合。近来推出的ArcGIS水文数据模型就是利用水文分析组件ArcHydroTools,该组件集成到ArcGIS环境中,提供了一种可视化的水文模型开发界面。因此,从水系生成、流域划分、河道编码与拓扑关系建立完全在ArcMap(Esri, Inc.)下即可完成。

4 集总式与分布式模型

基于GIS的水文模型经历了从集总式到半分布式再到分布式的发展规律。集总式模型在时间或者空间或是时空同时汇集数据。在汇集区域和汇集时段内的异质性是被忽略的。在GIS的建模环境中,集总式模型通常使用矢量多边形数据格式,根据关键参数的分布特点,将研究区分成不同的区域,在这些区域中该参数是同质的。模型运行利用各个区域的属性记录,计算结果也将应用于整个区域。这种模型主要应用于空间格局上斑块比较大,时间精度要求不高的情况下^[38]。

分布式模型注重较高分辨率下参数的空间分布与变异性,当斑块变小,斑块数量增加时,模型就更加趋于分布式(图2)。只要提供足够多的点的实测数据,然后对栅格图层进行科学的空间插值,分布式的模型是可以提供一个能够反映空间异质性的预测数据。可是,必须指出的是,对应空间分辨率的提高,分布式模型同样需要一个具有较高时间精度的数据集。在GIS的建模环境下,分布式模型通常使用栅格数据格式,模型通常逐个计算栅格单元,其中包括无数据的空值的单元。

对于分布式模型中“基本单元”的术语的认定问题,按照人们普通的理解,应当是规则的正方体,但Arnell提出了不同的理解,基本单元可以是正方体形状,也可以认为是小流域形状的^[14](图2)。利用DEM

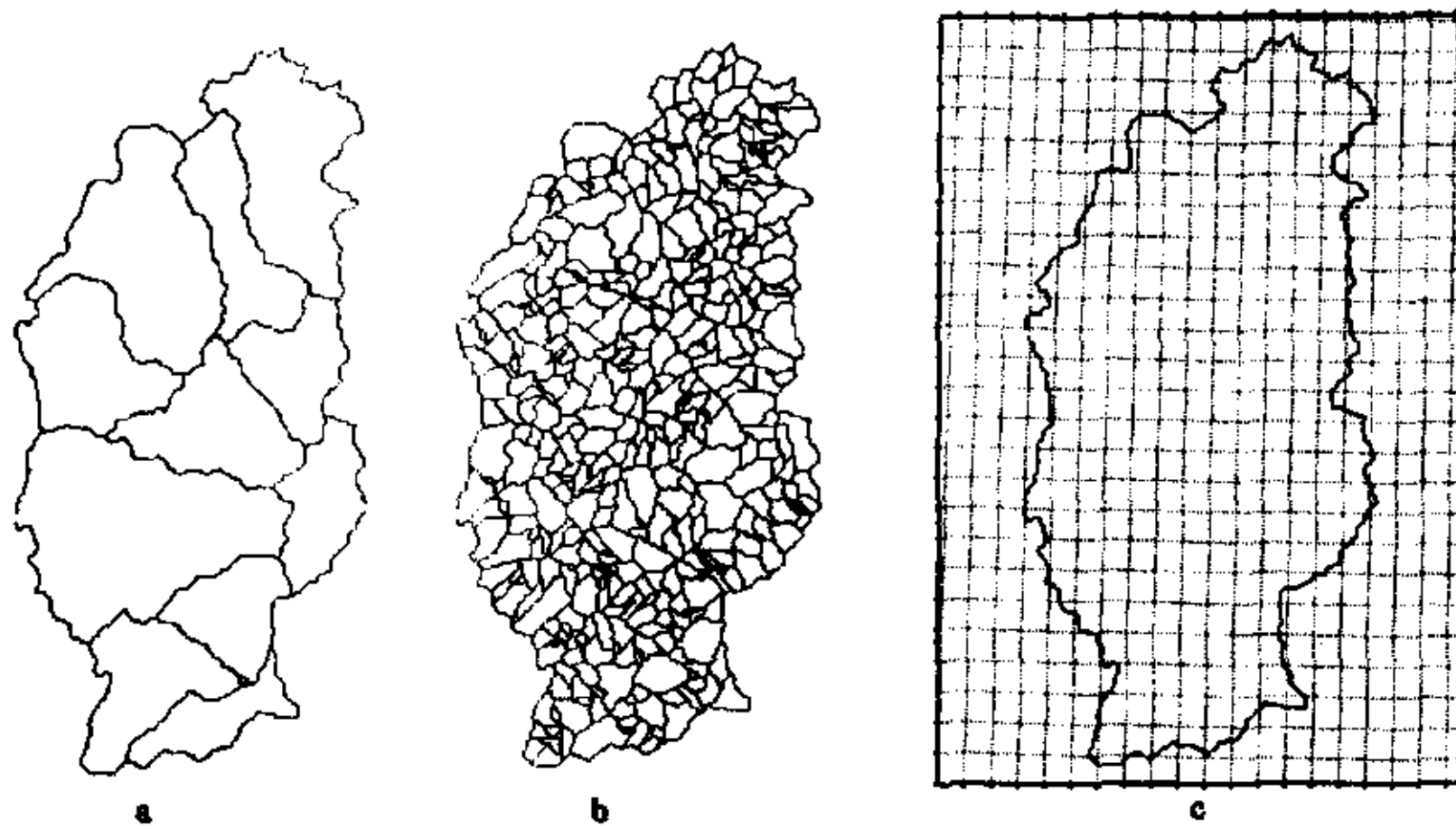


图 2 集总式水文模型和分布式水文模型对基本单元的认定比较(岷江上游)

Fig. 2 Subdivision of catchments according to lumped model and distributed model (upper reaches of Mingjiang River)

a: 集总式模型按照 1000km^2 阈值划分的基本单元 Catchment delineation threshold 1000km^2 (lumped model); b: 集总式模型按照 25km^2 阈值划分的基本单元(子流域越小, 模型越趋于分布式) Catchment delineation threshold 25km^2 (lumped model is similar to distributed model as the size of the cells decrease); c: 分布式模型按面积为 25km^2 的栅格化基本单元 distributed model with 25km^2 grid size

模型, 可以建立任意大小的空间栅格化单元; 也同样可以根据汇流特点自动产生不同大小的小流域, 只要给定一定的汇流阈值^[39], 在每个小流域内, 认为所有的属性是同质的。

理论上讲, 无论是基于矢量多边型的集总式模型还是栅格化的分布式模型, 当研究的基本单元面积相同或相近时, 在结果上并不存在多大的差异, 但是两方面原因导致分布式模型比集总式模型优越: (1) 在利用 DEM 作水文分析时, 由于集总式模型在子流域勾绘时不可能无限小, 因而其空间分辨率不及分布式模型; (2) 当和大面积的遥感数据(栅格数据)相匹配时, 集总式模型很难做到空间单元的多个属性层之间的严格对应。

但分布式模型也并不能完全代替集总式模型的作用, 例如, 通常取得的水文站的数据就是建立在流域或子流域的汇水节点上, 因此, 分布式模型要想利用水文站的数据来验证, 必须将汇水节点以上所有单元的水汇集起来, 并且对水系进行编码, 以便标记每个子流域的产水量, 在这里就显示出集总式模型的优越性了。因此, 集总式模型和分布式模型应当结合起来。

5 水文生态模型与 GIS 集成

GIS 应用于水文模型始于 20 世纪 80 年代末, 在随后的 10a 中, 两者的结合得到了长足的发展。通常 GIS 与水文模型一共有 4 种集成方式^[40]。

(1) 将 GIS 的功能嵌入到水文模型中 这种方法认为 GIS 与水文模型之间没有内在的关联, GIS 只是一个制图工具而已。模型的运行虽然不受 GIS 数据结构的影响, 但模型在数据管理和可视化能力方面没法与专业的 GIS 软件相提并论。

(2) 将水文模型嵌入 GIS 软件包中 近年来, 不少的 GIS 软件商在他们的产品中加入了水文分析和建模功能。例如 ESRI 在它的 ArcGIS 产品 ARCGRID 和 ARCSTORM 中内建水文分析模块。但其功能比较简单, 有些模型并不是依据统一的工业标准, 没有进行验证。

(3) 松散关联型 这种方法通常包含 3 部分内容: 一个标准的 GIS 软件包(如, ArcGIS), 一个水文模型软件(如, HEC-1, HEC-2, STORM 等), 一个统计分析软件包(如, SAS, SPSS)。水文模型和 GIS 实现集成, 通过 ASCII 码文件和二进制文件交换数据, 3 个部分没有一个共同的界面。这种方法的优点是大大减

少了编程工作,但是不同软件间的数据交换工作很繁琐。但由于编程任务较少,所以这个方法是大多数水文模型与 GIS 集成研究中普遍采用的方法。

(4)紧密关联型 这种方法采用商业软件提供的宏语言(如 ESRI 的 Avenue 和 AML)或常规编程工具将特定的水文模型嵌入到 GIS 中,这样,可以通过执行批处理的命令和通过用户界面进行操作,完成特定的功能。由于宏语言的功能有限,所以对于比较复杂的模型还需要通过其他的编程工具完成。

现在,GIS 与水文模型的集成的主要问题已经不是技术层面的了,如何在特定的时空尺度下将水文过程准确表达出来,从而将系统提高到一个新的概念化水平,这才是问题的核心。因此,笔者更为推崇两者松散的集成方法(图 3),充分利用 GIS 对数据的管理和分析功能,在模拟软件的开发中集中精力解决生态水文过程的内在机制。

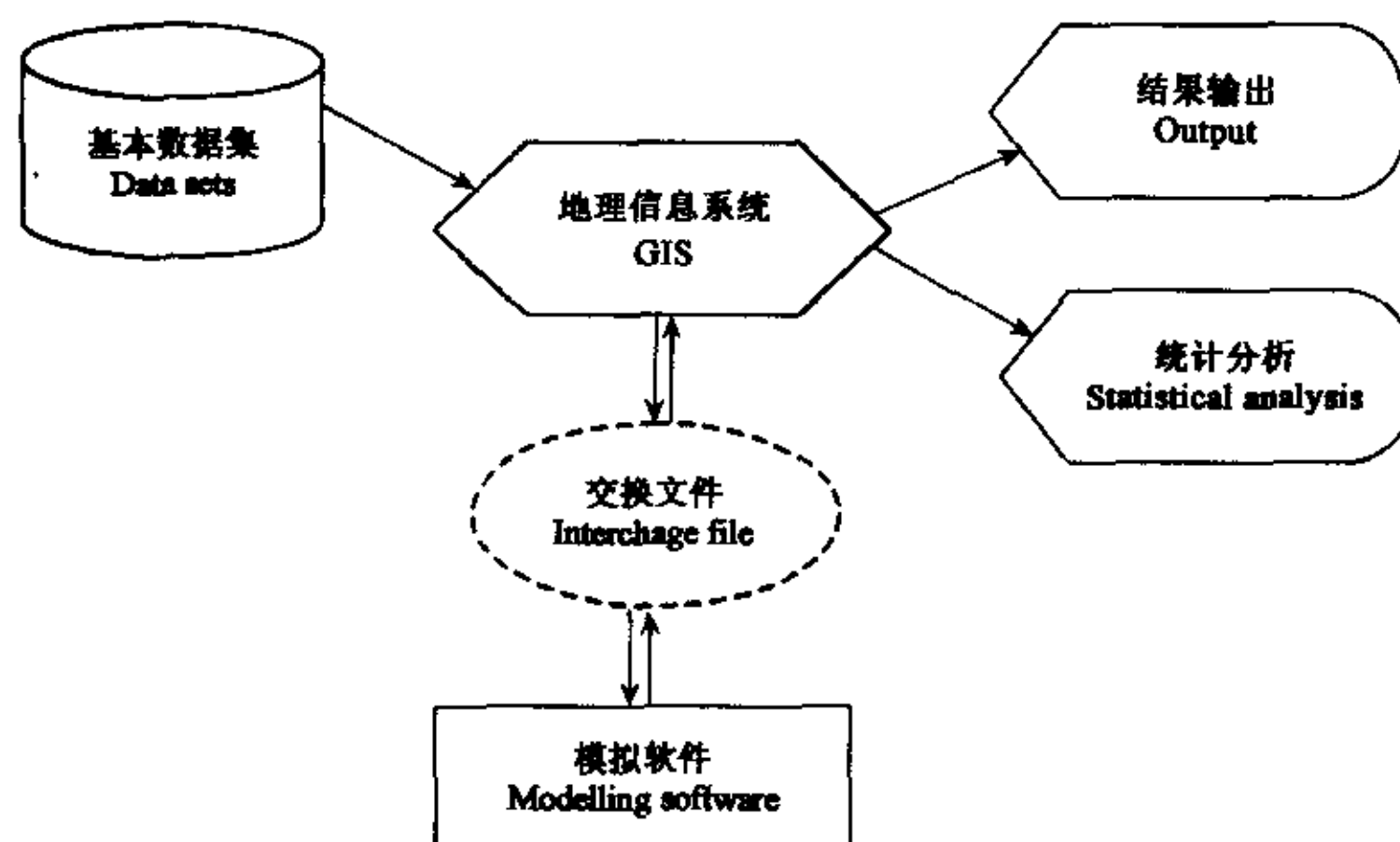


图 3 生态水文模型与 GIS 的松散集成方式

Fig. 3 A loose coupling of ecohydrological model with GIS

6 结语

迄今为止,该领域研究取得的一些共同认识是:(1)大尺度生态水文模型研究对象是大流域,具体的讲,就是大到不能假设任一因子在流域内是同质的,一般不低于 $10,000\text{km}^2$ 的大流域;(2)基本空间单元一般不低于 1km^2 ,空间单元大小的确定不能仅依据单一因子的精度,如 DEM,还要综合考虑植被、气象等,否则单纯空间分辨率提高没有意义;(3)对应较低的空间分辨率,模型一般采用较大的时间步长;(4)模型忽略坡面土壤水动力学的具体细节,集中解决栅格内水量平衡和栅格间水分传输问题;(5)大尺度模型同时需要集总式和分布式两种建模方式,并使二者得到统一。

大尺度生态水文过程模拟真正的难点在于,从技术层面上看,数据集的获取是最大的问题,由于水量平衡各分量分别依据不同精度的数据源推算,模型总体的精度取决于精度最低的分量,即所谓的“木桶效应”,例如,虽然可以利用高分辨率遥感图像解译提高植被数据集的精度,同时还需要改进降雨量的时空分布模拟精度,但目前还只能依赖较少的气象站观测记录进行插值;和坡面和小流域尺度不同,大尺度模型不能假设植被、气象、土壤等因子在总体上是同质的,这种广泛的异质性问题使模型的建立与检验都非常困难。从机理层面上讲,目前的大尺度模型还只能过多偏重于水量平衡而非水分传输,基于坡面和小流域尺度的建模方式能否直接用于大尺度还不确定。生态与水文过程的耦合方式与机制也是非常重要的环节,目前研究较多集中在应用植被指数、生物量或叶面积指数的物候节律体现植被的影响,植物(尤其是乔木)的生长过程中参与水文循环的机制有待进一步研究。

References:

- [1] Andrew J. Baird, Robert L. Wilby. Ecohydrology-plants and water in terrestrial and aquatic environment. USA,

- Routledge, 1990.
- [2] Zhao W Z, Wang G X. *Ecohydrology*. Beijing: China ocean press, 2002.
- [3] Veenendaal E M, Swaine M D, Agyeman V K, *et al.* Differences in plant and soil water relations in and around a forest gap in west Africa during the dry season may influence seedling establishment and survival. *Journal of ecology*, 1996, **84**: 83~90.
- [4] Stocker R, Leadley P W and Köner Ch. Carbon and water fluxes in a calcareous grassland under elevated CO₂. *Functional ecology*, 1997, **11**: 222~230.
- [5] Wood E F. Effects of soil moisture aggregation on surface evaporative fluxes. *Journal of hydrology*, 1997, **190** (3~4): 397~412.
- [6] Zhang Z Q, Yu X X, Zhao Y T. Effects of forest on hydrological process from slope-scale to watershed-scale: experiments, mechanism and models. *Chinese journal of applied ecology*, 2002, **13**(4).
- [7] Vörösmarty C J, Berrien Moore L G Annette. Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America. *Global biogeochemical cycles*, 1989, **3**(3): 241~265.
- [8] Vörösmarty C J, Willmott C J, Choudhury B J. Analyzing the discharge regime of a large tropical river through remote sensing, ground-based climatic data, and modeling. *Water resources research*, 1996, **32**(10): 3137~3150.
- [9] Vorosmarty Charls J, Federer C A, Schloss A L. Potential evaporation functions compared on US watersheds: possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of hydrology*, 1998, **207**: 147~169.
- [10] Todini E. The ARNO rainfall-runoff model. *J. hydrology*, 1996, **175**: 339~382.
- [11] Reynard N S, Andrews A J, Arnell N W. The derivation of a runoff grid for southern Africa for climate change impact analyses. In: *FRIEND'97-Regional Hydrology: concepts and models for sustainable water resource development*. International Association of Hydrological Sciences, 1997. Publ. **246**: 23~30.
- [12] Guo S L, Liu C Z. Study on coupling macro-scale hydrological models with general circulation models. *Shuili xuebao*, 1997, **7**: 37~41.
- [13] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape pattern. *Landscape ecology*, 1990, **4**: 21~30.
- [14] Arnell N W. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. *Journal of hydrology*, 1999, **217**: 314~335.
- [15] Moore R J. Global probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. *Hydro. Sci. J.*, **30**: 273~297.
- [16] Wood E F, Lettenmaier D P, Zartarian V G. A landsurface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: D3, 2717~2728.
- [17] Arnell N W, King R. The impact of climate change on water resources. In: DETR/The Met. Office. Climate Change and its Impacts: a Global Perspective, Department of the Environment, Transport and the Regions, 1997. 10~11.
- [18] Andersen Jens, Refsgaard Jens C, Hensen, *et al.* Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin—model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 2000, **247**: 200~214.
- [19] James L D. NSF research in hydrological sciences. *Journal of Hydrology*, 1995, **172**: 3~14.
- [20] Blöschl G and Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review. *Hydrological process*, 1995, **9**: 251~290.
- [21] Clark W. Scales of climate impacts. *Climate change*, 1985, **7**: 5~27.
- [22] Dozier J. Opportunities to improve hydrologic data. *Rev. geophys.*, 1992, **30**: 315~331.
- [23] Dooge J C I. Looking for hydrologic laws. *Wat. Resour. Res.*, 1986, **22**: 46S~58S.
- Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 1991, **27** (4): 29~61.
- [24] Beven K J and Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology *Hydro. Sci. Bull.*, 1979, **24**(1): 43~69.

- [25] Beven K, Wood E F, Sivapalan M. On hydrological heterogeneity: catchment morphology and catchment response. *J. of Hydrology*, 1988, **100**:129~138.
- [26] Matthews E. Global vegetation and land use: New high resolution data sets bases for climate studies. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 1983, **22**: 474~487.
- [27] Chen Z M, Ren S X. Forest hydrological functions of Minjiang upper reaches. *Journal of Geographical Sciences*, 1992, **47**(1): 49~57.
- [28] Watson F G R, Grayson R B, and Vertessy R A. Large scale distribution modeling and the utility of detailed ground data. *Hydrological processes*, 1998, **12**: 873~888.
- [29] Weng D M, Luo Z X. *Mountain climate*. Beijing: China meteorology press, 1990.
- [30] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines 1. Two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*. 1998, **2**: 152~167.
- [31] Zhu H Z, Luo T X, Daly C. Validation of simulated grid data sets of China's temperature and precipitation. *Geographical research*, 2003, **22**(3).
- [32] Thornton P E, Running S W & White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J. Hydrol.*, 1997, **190**: 214~251.
- [33] Thornton P E, Running S W. Generating daily surfaces of temperature and precipitation over complex topography. In: Goodchild, M. F.; Steyaert, L. T.; Parks, B. O., eds. *GIS and environmental modeling: progress and research issues*. Fort Collins, CO: GIS World Books, 1996.
- [34] Stillman Sara. A comparison of three automated precipitation simulation models; ANUSPLIN, MTCLIM-3D, and PRISM, 98. [Wilson] Graduate Programs in Geography and Geology. Department of earth sciences. Montana state university, bozeman, 1996, Available on line <http://www.montana.edu/wwwes/text/geogms.htm>.
- [35] Martz L W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computer & Geoscience*, 1992, **18**(6): 747~761.
- [36] Ren L L, Liu X R. Hydrological processes modeling based on digital elevation model. *Geographical research*, 2000a, **19**(4): 369~376.
- [37] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water resources research*, 1991, **27**(5): 709~717.
- [38] Whitehead P G and Robinson M. Experimental basin studies——and international and historical perspective of forest impacts, *J. Hydrol.*, 1993, **145**:217~230.
- [39] Ren L L, Liu X R. Hydrological processes modeling based on digital valley. *Journal of natural disasters*, 2000b, **9**(4): 45~52.
- [40] Sui D Z, Maggio R C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment, and Urban Systems*, 1999, **23**: 33~51.

参考文献:

- [2] 赵文智,王根绪. 生态水文学. 北京:海洋出版社,2002.
- [6] 张志强,余新晓,赵玉涛. 森林从坡面到流域尺度对水文过程的影响:实验、机制与模拟. 应用生态学报, 2002, **13**(4).
- [12] 郭生练,刘春霖. 大尺度水文模型及其与气候模型的联结耦合研究. 水利学报, 1997, **7**: 37~41.
- [27] 陈祖明,任守贤. 岷江上游森林水文效应研究. 地理科学, 1992, **47**(1): 49~57.
- [29] 翁笃鸣,罗哲贤. 山区地形气候. 北京:气象出版社,1990.
- [31] 朱华忠,罗天祥, Daly C. 中国高分辨率温度和降水模拟数据精度分析. 地理研究, 2003, **22**(3).
- [36] 任立良,刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟. 地理研究, 2000a, **19**(4): 369~376.
- [39] 任立良,刘新仁. 基于数字流域的水文过程模拟研究. 自然灾害学报, 2000b, **9**(4): 45~52.