

水文尺度问题及尺度转换研究进展

彭立^{1,2}, 苏春江^{1*}, 徐云¹, 满正闯^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:在介绍了水文尺度、尺度问题和尺度转换概念的基础上,分析了进行尺度转换的4种途径,即分形理论、小波分析、分布式水文模拟、混沌理论。提出了水文尺度研究涉及的关键问题,包括尺度问题的不确定性、水文过程尺度和水文观测尺度、水文现象的空间异质性和时空变异性。最后在已有成果的基础上,提出了目前研究中存在的问题及未来的发展方向。水文尺度转换需要多学科的交流和理论与技术的创新。

关键词:水文科学;水文尺度;尺度转换

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1001-7461(2007)03-0179-06

Research Progress on the Problems of Scale in Hydrology and Hydrologic Scaling

PENG Li^{1,2}, SU Chun-jiang¹, XU Yun¹, MAN Zheng-chuang^{1,2}

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the introduction of some concepts about hydrological scale, scale issue and scaling, four approaches to scale were discussed, namely, fractal theory, wavelet principle, distributed modeling, and chaotic theory. The key problems were put forward related to the scale issue in hydrology such as uncertainty principle in the scale problem, observing scale and hydrological processes of different scale-up, and the spatial heterogeneity of hydrologic phenomenon. Existing problems and prospects of research on hydrological scale were put forward. It was pointed out that the combination of various techniques and theories would motivate hydrologic scaling research and the research of hydrology scale would drive the development of hydrological science.

Key words: hydrology; hydrological scale; scaling

水文尺度问题及其尺度转换是当今水文学研究的热点和前沿,它是指水文系统在不同尺度之间进行尺度转换时所遇到的问题。自20世纪90年代初水文尺度问题被正式提出后,尺度问题在水文学中一直受到广泛的关注和重视^[1,2],成为水文学研究的理论焦点。

水文学家在研究同一水文现象时,由于各自所采用的时间和空间尺度大小不一,往往结论差别很大。虽然人们已经认识到时空尺度的重要意义,但是如何选择合适的尺度对某一水文过程进行研究,还没有形成完整的理论和方法体系。迄今,国际水文界已多次举办过水文学尺度问题专题会议,在第

21、22届国际地球物理与大地测量(IUGG)大会上,国际水文协会(IAHS)又将水文尺度问题列为六大讨论专题之一。本研究通过分析近十几年来水文学中有关尺度问题的主要研究成果,在此基础上就水文学中尺度的概念、特征和尺度转换方法等进行论述,对水文学尺度问题认识的深入无疑会在一定程度上促进水文学理论和实践的进一步发展。

1 尺度及尺度转换

1.1 尺度的概念

尺度是指研究对象的过程及其观测或模拟的特征时间或特征长度^[3],即时间尺度和空间尺度。

收稿日期:2006-11-01 修回日期:2006-12-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB415201-5)

作者简介:彭立(1983-),男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事水资源与生态环境方面的研究。

*通讯作者:苏春江。

水文尺度是指水文过程、水文观测或水文模型的特征时间或长度。Bloschl 等^[3]将水文尺度划分为过程尺度、观测尺度和模拟尺度 3 种。其中,过程尺度是水文过程发生的尺度,这是水文过程本身所具有的客观属性,又称为特征尺度。过程尺度可以用水文过程的时空幅度、发生周期和相关长度来衡量。观测尺度和模拟尺度则是进行水文研究时的观测和模拟尺度,需根据研究条件主观选定。观测尺度包括测量的时空幅度、取样的解析度和样本大小。理论上,观测尺度、模拟尺度应该尽量与过程尺度相吻合,但是受到测量技术和模拟水平的限制,往往实际上达不到。根据研究对象和研究现状,任何水文学家都能划定若干需要研究的水文尺度,关键在于划定的尺度能不能和真正操作的尺度重合,假定划定的尺度和真正操作的尺度分别为 A 和 B ,那么 A 和 B 常见的集合关系是 $B \subseteq A$ 和 $B \supseteq A$; $B \cap A \neq \emptyset$ (不包括 $B \subseteq A$ 和 $B \supseteq A$) 和 $B \cap A = \emptyset$,两种情况一般少见,它们是盲目转换的结果。如何做到由 B 向 A 的研究有意义,这就涉及到尺度转换的问题。

1.2 尺度转换

尺度转换 (scaling) 又称标度化和尺度推绎,是指利用某尺度上所获得的信息和知识来推测其他尺度上的现象^[4],它是不同时间和空间层次上过程联结的概念。不同尺度上水文现象和过程的性质受制于相应的尺度,而每一尺度都有其约束体系和临界值。经典等级理论认为,尺度转换必然要超越这些约束体系和临界值,转换后所获得的结果将很难理解。但是,在不同尺度的系统之间存在着物质、能量和信息的交换与联系,正是这种联系为尺度转换提供了客观依据。

按照尺度转换的方向,尺度转换分为尺度上推 (up scaling) 和尺度下推 (down scaling)。尺度上推是把给定尺度信息向更大尺度转换,是一种信息的聚 (aggregation); 尺度下推即向较小尺度转换^[3],是一种信息的分解 (disaggregation)。

按照构建尺度转换模型的过程,尺度转换可分为显式尺度转换 (explicit scaling) 和隐式尺度转换 (implicit scaling)^[5]。隐式尺度转换是指针对特定的环境条件,在模型构建过程中将与尺度有关的因素考虑在内,这样模型本身就体现了对模型时空粒度 (temporal and spatial grain of the model) 进行尺度转换的系统过程。显式尺度转换是在数字集成或综合分析的基础上,在时间和空间尺度上对“局部”模型 (local model) 的响应进行尺度上推。

2 尺度转换途径

2.1 以分形理论为基础的尺度转换

分形理论 (fractal theory) 是一种非线性理论科学,旨在揭示非线性系统中的有序与无序、确定性与随机性的有机统一^[6]。以维数为对象的分形数学定义为:如果某一物体存在 $Q \propto L^D$ 的幂律关系 (power law),则该物体为分形体^[7]。简单来说分形就是指各个部分组成的形态,每个部分以某种方式与整体相似,它具有自相似性和标度不变性。分形体的自相似性表现为整体结构可由结构单元的反复叠加而形成。按照分形理论,在一定尺度范围内具有自相似性的对象,其某种统计量在不同尺度下的相互关系决定于一种简单变换——标度变换。

设水文变量为 x ,影响该变量变化的主要尺度为 a ,则 $x(a)$ 表示 x 随 a 而变。若尺度 a 变为 λa (为一比例数),只要 $x(\lambda a)$ 和 $x(a)$ 的变化具有自相似性,则下列关系成立:

$$\{x(\lambda a)\} \text{dis} \{\lambda^\theta x(a)\} \quad (1)$$

式中:dis 表示概率分布相同, θ 为标度指数。

根据式(1),对一定概率 P ,则:

$$x(\lambda a) = \lambda^\theta x(a) \quad (2)$$

(2)式表明,对尺度 a 的水文变量,当尺度由 a 转换到另一个尺度 λa 时,其相应水文变量的分位值(一定频率的变量值)可由原尺度水文变量的分位值通过非常简单的关系式转换而得。简言之,就是通过改变来实现尺度转换, $\lambda < 1$ 时表示尺度缩小; $\lambda > 1$ 时表示尺度放大^[8],其中,转换的关键在于确定标度指数(θ)。这样,(2)式为水文尺度转换指明了方向。

常福宣^[9]等将(2)式用于降水强度的尺度转换。由(2)式得:

$$i(\lambda t) = \lambda^\theta i(t) \quad (3)$$

在这种情况下,(2)式中的 x 为降水强度 i ,而尺度 a 为降水历时 t 。(3)式表明,某一频率的降水强度随降水历时尺度而变化的特性和定量关系。在暴雨计算中,可以利用这种关系,由已知历时的降水强度推算不同历时的降水强度。

前面提到转换的关键在于确定标度指数(θ),实际上当标度指数(θ)随频率(P)变化时,称作多标度,当 θ 不随 P 变化时,称作单标度。在进行水文尺度转换性时,区别这两种情况是非常重要的。许多研究结果表明,水文现象多数呈现出多标度特性。统计单标度和多标度的思想为进一步理解水文过程的物理结构提供了自然框架。

以上仅是分形理论在水文统计变量尺度转换中的应用,分形理论还可以用来模拟发生在异质性区域上的过程以及连接微尺度(如土壤空隙)与大尺度(如流域)上的信息。Wilson^[10]等证明了微尺度流域的分形维数与主要河网的分形维数相似,这种联系表明,可以用河网的概念来描述小流域的地表径流。为了确定河网的分形维数,Rosso等^[11]用代数关系证明了河网的分形特征和河道地形之间的关系, D 与Hack参数 h 存在简单的代数关系,这证实了在水文系统的地形特征与尺度转换之间存在着根本联系。Rigon^[12]阐述了自然河网应用分形理论进行一系列空间尺度的尺度转换,表明了流程 L (沿河道的长度)和相应分形的流域面积 $A(L)$ 的分布函数具有相同的形式,并强调了Hack定律作为表征 L 和 A 的基本分形关系的重要性。

分形理论在尺度转换中的应用对于水文学的发展来说起到了巨大的推动作用,但是从现状应用来讲仍有很多不足的地方,在尺度转换中对于移用条件、适用范围和结果合理性等方面,分析还不够完善和深入,需要继续进行探索。

2.2 以小波分析为基础的尺度转换

小波分析^[13]是20世纪80年代初发展起来的一种信号时频局部化分析新方法,自产生以来就在信号处理、图像压缩和应用统计等领域表现出了非凡的应用潜力和价值。在尺度研究方面小波的应用基本上是刚起步,但是已经在遥感数据的尺度和格局分析中表现出一定的优势。小波的主要优点^[14]是:适用于时间和空间数据分析并且可以很好地对具有明显不连续性的数据进行近似;在一定的近似水平上,小波可以表达多种类型的函数;在计算上,小波变换效率很高,小波没有对数据平稳性的要求,因而可以分析非平稳空间数据。小波分析的时频局部化功能有利于研究系统的多时间尺度变化。所谓多时间尺度,是指系统变化并不存在真正意义上的周期性,而是时而以这种周期变化,时而以另一种周期变化,并且同一时段中又包含各种时间尺度的周期变化。多时间尺度研究,将为系统分析、预测提供重要依据。

小波分析涉及小波函数和小波变换,其基本思路是以一簇函数去表示水文序列并刻画其特性。这一簇函数称为小波函数系,它是通过一种基本小波函数(母函数)的不同尺度的平移和伸缩构成。小波分析的关键是小波变换,由此可以得到一群变换系数,通过对它们的分析,可识别研究对象多时间尺度演变特性。王文圣等^[15]通过重建的宜昌站长期年平

均流量序列,分析了宜昌近100 a年径流量在不同时段表现出不同的周期变化和径流量异常的具体时间及丰枯交替变化过程,得出了32 a、16 a和10 a³个尺度的丰枯变化趋势(图1)。

研究表明,小波分析能够揭示比较复杂的数据信息中的潜在规律,适合于多尺度时空数据的尺度转换与优化问题,特别是复杂的非线性问题。

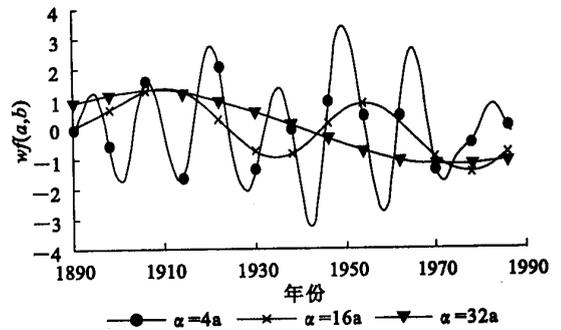


图1 年平均流量标准化过程不同时间尺度下的Marr小波变换系数

Fig.1 Marr wavelet transform coefficients of standard annual average flow at different time scales

2.3 利用分布式水文模型进行尺度转换

分布式水文模型是近年来流域水文模型的发展热点,基于分布式水文模型进行尺度转换已经成为解决尺度问题的新途径。不同尺度水文循环的机理不同,水文模型的结构也不同,以往许多水文模型是将小尺度物理机制直接用于大尺度,但是这种方法并不理想^[16]。

如何考虑流域水文过程的时空异质性和空间变异性是尺度问题的关键,其主要影响因素是流域的地形、植被覆盖度、土壤及降水、蒸发等气候因素^[17]。分布式水文模型的优点是模型的参数具有明确的物理意义,可以通过连续方程和动力方程求解,可以更准确地描述水文过程,具有很强的适应性^[18]。因此在模拟土地覆盖、水土流失变化的水文响应以及面源污染、陆面过程、气候变化影响评价等方面应用具有显著优势。

利用分布式水文模型解决尺度问题的研究思路是:(1)确定所要研究的水文过程和对象及在不同尺度上影响该过程的主要参数;(2)通过定量分析找出信息在不同尺度之间进行转换的规律,建立合理的模型结构;(3)在不同时空尺度上检验该模型的预报和模拟能力。

在建立分布式水文模型后,利用模型模拟的方法进行尺度转换的关键在于不同尺度间的模型参数、状态变量、输入数据等信息的转换,假设 $g(s, \theta,$

i) 是小尺度上的模型参数、状态变量及输入的水文响应函数, 相应的 $G(S, \theta, I)$ 是大尺度上的函数, 即尺度转换包括参数、状态变量、输入及水文响应函数的信息转换:

$$s \leftrightarrow S; \theta \leftrightarrow \Theta; i \leftrightarrow I; g(s; \theta; i) \leftrightarrow G(S; \Theta; I) \quad (4)$$

近年来, 许多学者利用分布式水文模型进行尺度转换。Ciarapica 等^[19]采用 TOP-KAPI 模型结构对不同尺度的降雨—径流过程进行模拟, 利用得到的 DEM、土壤图、土地利用图等信息, 选择了尺度分别为 0.56、210、1 051 km² 的 3 个流域, 其网格单元的大小从 20 m 到 400 m 不等, 结果表明该方法可以用来模拟无流量观测地区及土地利用或气候条件发生变化地区的水文过程。Connolly 等^[20]选用 ANSWERS 模型在 1 m² 和 88 m² 的试验区内进行模拟, 将修正后的模型结构用于 0.07、0.2、3.2 hm² 3 个尺度的小流域上, 检验其预报能力。在地形、植被等自然特征已知的条件下, 该模型能够较好地模拟不同尺度的水文过程, 因此, 只要找到适合不同尺度流域的模型结构及主要参数, 分布式模拟方法用于尺度转换是可行的。

2.4 以混沌理论为基础的尺度转换

在水文研究中很多问题常常涉及到降尺度, 也就是依据大尺度水文现象显示的变化特性来推论小尺度相应水文现象的变化特性, 所以水文降尺度变换就成为研究的重点。当前降尺度变换的一种新方法是探讨分解系数的变化规律, 并通过分解系数由大尺度转换到小尺度。

例如, 可将时间尺度为年的径流量 x (年) 降为时间尺度为月的径流量 x (月), 图 2 中, w_1, w_2, \dots, w_{12} 为分解系数, 支配着大尺度如何分配为小尺度。一般而言, 分解系数是变化的。若掌握了分解系数 (w) 的变化规律, 并求得 w , 那么就可以将一种尺度的水文变量转换到另一尺度的水文变量, 实现降尺度的目的。这样, 问题的关键在于寻求 w 的变化规律。Sivakumar^[21]对降水量的降尺度分析结果表明, 权重 (w) 的变化具有混沌性。混沌性可简单地理解为确定性的混乱, 是由确定性规律决定的系统所表现出的一种类似随机性的行为。

当 w 的变化被论证具有混沌性质, 便可依据混沌理论建立 w 的模型, 表现其非线性动态变化规律, 并在此基础上对 w 随时间的变化作出定量预测, 获得下一步的分解系数 (w)。据此, 即可将下一步大尺度的总量 (如年径流量) 分解为小尺度的分量 (如月径流量), 实现降尺度的目的。目前, 基于混沌理论的降尺度分析法尚不成熟, 还需要进一步研究

和完善。

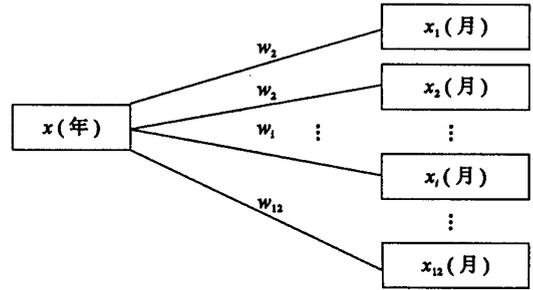


图 2 年径流量分解为月径流量

Fig. 2 Annual runoff decomposed into monthly runoff

3 水文尺度研究的关键问题

3.1 尺度问题的不确定性

在同一尺度域中, 由于过程的相似性, 尺度转换容易, 模型简单适宜, 预测的准确性高; 而跨越多个尺度域时, 由于不同过程在不同尺度上起作用, 且又有相互间的作用, 尺度转换则必然复杂化。在尺度域间的过渡带多会出现混沌、灾变或是其他难以预测的非线性变化^[4]。尺度选择的不同, 可能会导致对水文过程及其相互作用规律不同程度的把握, 最终影响研究成果的科学性和实用性。在受操作尺度限制的情况下, 还没有更好的数学方法和技术, 使尺度转换后的误差达到可以忽略的程度, 因为无法摆脱不确定性的影响。这种不确定性反映在水文学研究领域中的各种尺度之中。

假定划定的研究尺度和操作尺度分别是 A 和 B , 影响 A 、 B 的函数分别为:

$$f_A(I_a, S_a, T_a, R_a, \dots, X_a, \dots) \xrightarrow{\text{决策}} A$$

$$f_B(I_b, S_b, T_b, R_b, F_b, \dots, X_b, \dots) \xrightarrow{\text{决策}} B$$

其中, I_a 和 I_b 、 S_a 和 S_b 、 T_a 和 T_b 、 R_a 和 R_b 、 X_a 和 X_b 分别为影响 A 尺度和 B 尺度的自身信息、自身状态、时段、与其他尺度间的关系、不确定性因素, F_b 为影响 B 的资金。

将 I 、 S 、 T 、 R 、 X 定义的越准确, 意味着每一个值的区间必定是无限小, 即是完全确定的一个值, 该值只代表尺度发展变化的一个瞬间, 这时决策得到的尺度也只是整个尺度的一个点。同样, 根据一个精确到点的尺度分析它的信息和状态, 不能反映尺度现在的外界联系, 因为尺度是一个开放的耦合系统。 F_b 的限制性因素越强, T_b 就越受限制, 从而 I_b 、 S_b 、 R_b 的全面性难以得到保证, 影响尺度 B 的最终确定, 并且在尺度转换的前提下, I_a 和 I_b 、 S_a 和 S_b 、 T_a

和 T_b 、 R_a 和 R_b 、 X_a 和 X_b 之间不可能有完全相似的关联性,因此,真正操作尺度 B 上的信息不能完全适用于尺度 A 。

综上所述,尺度问题中的不确定性不可避免,然而,在尺度转换时又必须要求尽可能低的灾变和误差。因此,研究尺度问题时,要求在选择操作尺度和进行尺度转换时考虑一切可能的不确定性因素,选择一个能反映研究尺度的最佳“尺度态势”。这就引入了一个“态”的概念,称为“尺度态”(scale-state)^[22]。目前,如何能找到最优的函数来表示“尺度态”,找到尺度转换的最佳路径,是尺度问题研究的一个方向。

3.2 水文过程尺度和水文观测尺度

由于水文过程是一个具有高度非线性化的巨系统,而且这个系统具有重要的尺度层次^[23]。水文过程在不同尺度上是不同的,即不同尺度下数学表达式有区别。如在微观尺度层次上的水文过程可用水动力学方程进行描述,但在中观、宏观尺度层次上,水文过程的总体响应不同于微观尺度上个体的叠加。单元与系统的关系决定了不同尺度间的再参数化不等于简单的积分和推广,当尺度变化到一定范围时,单元由多个非线性或空间变异的单元组成,但整体却表现出新的特征。因此,识别不同尺度上的水文过程,是进行尺度转换的先决条件。

从前面的论述中可知,水文观测尺度应该与过程尺度相一致。若观测尺度的粒度远远小于过程尺度的粒度,将难以反映真实的趋势;若观测尺度的粒度远远大于过程尺度的粒度,将会导致“噪音”比“信号”还强,从而引起对变量的错误理解。如 Wood^[24]基于 $0.1 \sim 1.0 \text{ km}^2$ 的野外观测,发现非饱和土壤水参数空间变异达两个多数量级。因此,选择适当的观测尺度成为水文研究的关键。由于大多数空间现象(如降水、地貌、植被类型)的分布都展示出正空间自相关的特性,这个“合适尺度”应该满足类内差异最小、类间差异最大的原则,即寻找一种阈值尺度。在阈值尺度内,保持线性关系,可以使用连续假定,而不必考虑地貌、土壤或降雨的实际空间变化形式,若跨越阈值则会产生非线性变化^[25]。为确定阈值尺度,有必要计算各种不同尺度上的地形因子、土地利用类型、植被状况与水文过程的相关关系,并用方差、变异系数、空间自相关指数等描述水文过程的尺度响应,然后才能确定合适的观测尺度,避免尺度转换的“失真”。

3.3 水文现象的空间异质性和时空变异性

水文现象随空间和时间变化,水文条件(如流域

的地形地貌、土壤类型、植被条件、土地利用状况和流域前期储水特征)的空间异质性和水文通量的时空变异性(如降水、蒸发散在流域空间的不均匀性与分散性)是水文尺度问题的根源。空间异质性是指介质特性(如土壤渗透系数)的空间变化,时空变异性是指通量特性(如径流)或状态变量(如土壤水分)的时空变化^[26]。水文现象的空间异质性和时空变异性使得将小流域的结果上推至大流域时、一个流域的结果应用于另一流域甚至将同一流域的模型应用于不同时期时模拟结果发生很大的变化。如 Wood^[27]等发现在 1 km^2 尺度的流域内,平均径流量的差异很大。

目前,通常采用变量空间和时间分布的统计规律来综合描述对水文过程的影响,如描述土壤含水量空间分布的具有地形和土壤水力特性的湿度指数,表示流域响应的尺度特性的瞬时地貌单位线(GIUH)等,还有采用分布式的离散方法,如代表单元区域(REA)^[28]这一概念所引伸出的水文相似单元、水文响应单元等。虽然许多专家作了很多努力,不过目前为止还没有找到一个普适性的理论来解决这一问题。水文过程的空间异质性和变异性增加了水文过程的复杂性和非线性,是不同水文尺度问题研究和尺度转换的关键及难点。

4 水文尺度问题发展趋势与展望

随着实践力度的加大以及新理论和新技术的引入,水文尺度转换途径变的更加丰富,尺度转换的精度和真实度也不断提高。从水文尺度问题的研究现状来看,今后应从以下几方面加强研究:(1)随着GIS和遥感技术的发展,人们已经能够较好的掌握流域的下垫面信息,在此基础上应继续加强对影响流域水文特性的主要因素(地形、土壤、植被等)的处理方法以及空间异质性的尺度响应方面的研究;(2)不同的水文过程发生在不同的尺度上,并且每一尺度上的(主导)优势过程不同^[29],随着尺度变化。应准确把握水文系统在不同尺度下的主导过程,使水文系统可以在不同的水文尺度上得到与观测尺度相符的描述;(3)近年来基于物理基础的分布式水文模型的研究很多,实践表明,利用分布式水文模拟进行尺度转换是一个比较可行的方法,不过尽管陆面过程参数化和中小尺度水文模型的研究已取得了可喜进展,然而由于水文变量时空分布的不均匀性和水文过程转换的复杂性,建立能够模拟变化尺度的水文物理模型以及能与气候模型时空尺度相匹配的大尺度水文模型仍没有取得令人满意的结果。(4)未来

水文科学的发展在很大程度上取决于水文数据的获取和精度^[30]。由于受观测手段的影响,一般观测资料的时间分辨率比空间分辨率高,严重影响流域水文模拟的精度。新技术的发展和运用,如遥感、DEM、环境同位素等,可以扩大数据的空间幅度,提高数据精度,今后应继续在先进的测量方法的基础上,提高流域观测的空间分辨率,从而提高模拟精度;(5)尽管水文尺度问题研究经历了一段时间,但迄今尚处在研讨和发展阶段,其中不少内容需要完善,特别是在实践中加以应用以不断修正和提高。在今后的工作中,不仅应该注重水文过程的深入研究,还应结合生态、气象等资料及原理,加强跨学科的综合研究,为进一步解决尺度问题开拓新思路。

参考文献:

- [1] Gupta V K, Waymine E. Multiscaling properties of special rainfall and river flow distribution[J]. *J. Geophysical Res.*, 1990, 95 (3): 1999-2009.
- [2] Gupta V K, Mesa O J, Dawdy D R. Multiscaling theory of flood peaks: Regional quantile analysis[J]. *Water Resource Res.*, 1994, 30(12): 3405-3421.
- [3] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review[M]. *Hydrol. Process*, 1995, 9: 251-290.
- [4] 郭建强. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 62-153, 181-184.
- [5] Harald B, Marcus L, Petra L, et al. Scaling issues in forest succession modelling [J]. *Climatic Change*, 2000, 44(3): 265-289.
- [6] 王东升, 汤鸿霄, 栾兆坤. 分形理论及研究方法[J]. *环境科学学报*, 2001(S1): 10-16.
- [7] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 16-41, 202-236.
- [8] 刘建梅, 裴铁璠. 水文尺度转换研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2305-2310.
- [9] 常福宣, 丁晶. 降雨历时时变化标度性质的探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(1): 79-83.
- [10] Wilson B N, Storm D E. Fractal analysis of surface drainage networks for small upland areas[J]. *Trans ASAE*, 1993, 36: 1319-1326.
- [11] Rosso E, Bacchi B. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks[J]. *Water Resour. Res.*, 1991, 27: 381-387.
- [12] Rigon R, Rodriguez I I. On Hack's law[J]. *Water Resour. Res.*, 1996, 32 (11): 3367-3374.
- [13] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [14] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法[J]. *生态学*, 2001, 21(12): 2096-2105.
- [15] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2002, 34(6): 14-17.
- [16] Bashford K E, Beven K J, Young P C. Observational data and scale-dependent parameterizations: Explorations using a virtual hydrological reality[J]. *Hydrol. Process*, 2002, 16: 293-312.
- [17] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(4): 341-348.
- [18] 董先勇, 樊明兰. 基于分布式水文模型的尺度分析[J]. *东北水利水电*, 2004, 22(9): 33-35.
- [19] Ciarpica L, Todini E. TOPKAPI: A model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales[J]. *Hydrol. Process*, 2002, 16: 207-229.
- [20] Connolly R D, Silburn D M. Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchment scales using rainfall simulator data I. Application to spatially uniform catchments[J]. *J. Hydrol.*, 1995, 172: 105-125.
- [21] Sivakumar B. A chaotic approach to rainfall disaggregation [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(1): 61-72.
- [22] 孟宝, 张勃, 丁文晖. 地理尺度问题中不确定性原理的假设探讨[J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(6): 29-32.
- [23] Kirkby M J, Baird A J, Diamond S M, et al. A physically based process model for hydrology, ecology and land degradation interactions[A]. In: Brandt C J, Thornes J B. Mediterranean desertification and land use[C]. Chichester: Wiley, 1996. 303-354.
- [24] Wood E F, Lettenmaier D P, Zartarian V G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models[J]. *J. Geophysical Res.*, 1992, 97: 2717-2728.
- [25] Reggiani P, Sivapalan M, Hassanizadeh S M. Conservation equations governing hill slope response: exploring the physical basis of water balance [J]. *Water Resource Research*, 2000, 7: 1836-1845.
- [26] Chen X, Chen Y Q. Scale issues in the hydrological processes[A]. In: New issues, technologies and methods in 21st century Chinese hydrological research[C]. Beijing: Science Press, 2001. 28-37.
- [27] Wood E F, Sivapalan M, Beven K, et al. Effects of spatial variability and scale with implication to hydrological modeling [J]. *J. Hydrol.*, 1988, 102: 29-47.
- [28] Wood E F. Scale analyses for land-surface hydrology [A]. In: Garrison S. Scale dependence and scale invariance in hydrology[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 1-29.
- [29] 钟晔, 金昌杰, 裴铁璠. 水文尺度转换探讨[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1537-1540.
- [30] James L D. NSF research in hydrological sciences[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 17(2): 3214.