

水文学的发展及其所面临的若干前沿科学问题

芮孝芳,刘方贵,邢贞相

(河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 通过回顾水文学的发展史,指出客观上总是存在着两条相辅相成、互相促进、不断提高的水文学发展轨迹。通过归纳水文学已取得的主要学术成就,认为物理学的渗透和本构关系的揭示是水文学理论进步的重要条件。当今水文学面临的若干困惑,主要来自对其本构关系的研究相对薄弱,由此凝炼出水文学的前沿科学问题主要是 非线性问题、尺度转换问题、空间变异性问题、坡面流速问题、确定性与随机性互补问题、水文时间序列长期演变规律问题、“异参同效”问题、预测模型问题、时空探源问题和误差问题等。加强或重视对这些前沿科学问题的研究,将会有力地促进水文学的理论和应用水平不断提高。

关键词 水文学 本构关系 非线性 尺度转换 空间变异性 确定性 随机性 异参同效

中图分类号 P33 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2007)01-0075-05

Advances in hydrology and some frontier problems//RUI Xiao-fang, LIU Fang-gui, XING Zhen-xiang (College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on a review of some advances in hydrology and main achievements from the research, it is pointed out that there are two development lines in the research, which supplement each other, and it is considered that the introduction of physics and the revealing of the constitutive relationship in the research provide important conditions for the development of hydrological theory. At present, the research on hydrology is facing with some difficulties, mainly coming from the relatively weak research on the constitutive relationship. The main problems lay on the non-linearity, scale transformation, spatial variability, velocity of overland flow, complementation between determinacy and randomness, long-term change of hydrology time series, “equifinality for different parameters”, prediction model, spatio-temporal origin of water resources, and error analysis. Paying much attention to these problems will greatly promote the development of hydrological theories and improve the level of their application.

Key words : hydrology ; constitutive relationship ; nonlinearity ; scale transformation ; spatial variability ; determinacy ; randomness ; equifinality for different parameters

水文学的现状如何?它正处在什么发展阶段?是什么阻碍着它的进一步发展?如何减少水文学方法对资料的依赖程度,即在资料短缺的情况下如何使用水文计算方法或水文模型(这也是国际上当前开展 PUB 计划的初衷)?突破点在哪里?换言之,水文学的前沿科学问题是哪些?这不仅关系到对水文现象规律性的进一步探索揭示,而且也影响到对实际生产中所遇到的难题的进一步解决。这显然是科学家和工程师都十分关注的问题。

1 水文学的发展轨迹

水文学的发展与人类对水的认识和需求密切相关。人类对水的认识的不断加深,以及对水的需求方式的不断拓展,使得水文学的研究领域不断延伸

与丰富^[1]。在人类社会发展的早期,人们试图通过建造水利工程来防治水害,获取水利,因而工程水文方面的内容得到了发展,并于 20 世纪 30 年代至 60 年代得到快速发展,形成了分支学科——工程水文学。当人类社会进入 20 世纪 70 年代以后,由于经济迅猛发展和人口快速增长,各种自然资源出现了不同程度的紧张局面,水资源的供需矛盾显得更加突出,于是一个专事水资源供需预测、合理开发、优化配置和有效管理的水资源水文研究方向因此而迅速发展起来。与此同时,由于经济发展模式上的不合理,出现了严重的环境污染问题,水环境污染首当其冲。这不仅进一步加深了水资源的紧缺程度,而且危及经济社会的可持续发展。在此背景下,旨在为水环境保护和修复寻找良策的环境水文研究方向

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50309002)
作者简介 芮孝芳(1939—),男,江苏溧阳人,教授,从事水文学及水资源研究。

应运而生。水文学的分支学科‘水资源水文学’和‘环境水文学’几乎在 20 世纪 70 年代同时形成。长期以来,由于呈加剧趋势的水污染和水资源紧缺,已越来越明显地影响到一些地方的生态系统和安全,保护生态系统安全和生物多样性已成为人类面临的重要任务,与之相应,近 10 年来生态水文学^[2]得到较快发展,并成为水文学新的分支学科。

如果说人类对水的认识和需求支撑着上述应用水文学的发展轨迹,那么科学技术的发展为人们探索、揭示自然界水文现象的规律性和解决应用水文学中各种实际问题提供了理论和方法。事实必然是,人们欲通过上述应用水文学认识自然、改造自然,达到与自然和谐共处的目的,就必须借助于科学理论和技术来探索、揭示水文现象的规律性。因此,在水文学的发展过程中必定存在着与上述应用水文学发展轨迹相辅相成、互相促进的另一条理论水文学的发展轨迹。19 世纪牛顿力学体系的确立为水文学奠定了力学基础^[1]。此后,科学和技术的进步都会对水文学的发展产生影响。动力水文学^[3]是应用水动力学和热力学揭示水文规律的水文学分支学科。系统水文学^[4]是借助于系统论和控制论处理水文问题的水文学分支学科。随机水文学^[5]是依赖概率论、随机过程论和时间分析技术探讨水文规律的水文学分支学科。数字水文学^[6]是基于数字化技术分析水文规律和进行水文模拟的水文学分支学科。实验水文学^[7]是应用科学实验方法揭示水文规律的水文学分支学科。尤其值得一提的是,物理学对水文学的渗透是近 30 年来水文学发展的一个亮点。物理学对水文学的每次渗透都会对水文学理论创新产生重要影响,典型的例子有:1979 年 Rodriguez-Iturbe 等^[8]借助于统计物理学理论建立了地貌瞬时单位线理论;1986 年 Abbott 等^[9]应用连续介质力学理论建立了一个具有物理基础的分布式水文模型,即 SHE 模型;1991 年 Rinaldo 等^[10]基于扩散理论构建了新的地貌瞬时单位线表达式。1998 年 Reggiani^[11]将热力学系统理论引入水文学,建立了基于代表性单元流域(REW)的水文模型,强调了物理定律和流域水文本构关系在水文建模中各自的重要作用。

水文学始终沿着上述两条相互关联的轨迹处于不断的发展之中,其总和就是一部水文学的发展史。

2 现行水文学的理论支撑

水文学作为一门独立的学科,旨在探索和揭示自然界水文现象的规律性,即水文循环各子过程及其相互关联、陆地水体中水的运动和变化、水文要素

的长期演变,以及水文过程与生态环境、人类活动之间的相互作用等,通过认识自然界水文规律,为人类控制洪水与干旱、开发利用水资源和保护生态与环境提供科学基础和技术方法,达到人与自然和谐之目的。经过 300 余年的发展,水文学无论在理论上还是在应用上均有了长足的进步。是什么理论支撑着水文学发展到今天这样的水平呢?或者说,现有的水文学理论是建立在什么样的基础上的呢?可初步归纳如下^[1,12] :

a. 质量守恒定律——水量平衡和其他物质,如泥沙、氮、磷、碳等平衡的基础。这种平衡关系既可表达成微分方程式,也可针对有限空间和时间来建立。

b. 能量守恒定律——能量平衡和热量平衡的基础。这种平衡关系既可表达成微分方程式,也可针对有限的空间和时间来建立。

c. 牛顿三大定律——描述和分析不同介质中水流运动的基础。

d. 叠加性和均匀性原理——线性系统输入与输出之间定量表述的基础。

e. “门槛”效应——分析下渗、蒸散发和产流等水文现象,寻求其定量计算方法的基础。

f. 统计综合——定量分析各种因果关系最初等的方法,直观、简单而常用。

g. 随机独立性假设——现行水文频率分析和地貌瞬时单位线理论的前提,也是使用统计试验法分析本构关系的前提。

h. 平稳性假设——利用水文时间序列自身演变规律推测其未来变化的基础。

i. 重现性假设——以历史上发生的大洪水作为设计标准和以长系列操作结果作为设计依据的基础。

j. 空间分布均匀性假设——将流域作为整体研究即不考虑气象条件和下垫面条件空间分布不均匀影响的基础,也是由‘点’水文要素通过简单方法换算成‘面’水文要素的依据。

k. 相似性假设——假设气候条件相似和几何相似即水文过程相似。这是将一个流域的水文规律如何移用至另一个流域的基础。

上述所列之前 3 项,属于已经证明的物理学规律,表明了物理学对水文学的深刻影响。可以预示,随着科学的发展,物理学必然会更加广泛而深刻地影响着水文学。其余各项则属于现行对水文本构关系的认识。从哲学观点看,这些项几乎都是线性思维的产物。事实反复证明,它们只有在一定条件下才是正确的,而对于其他情况则是近似的,甚至是必须有所突破才能使水文学获得进一步的发展。这些有待突破的方面就应是水文学的前沿科学问题。

3 水文学的前沿科学问题

3.1 非线性问题

科学发展到今天,非线性至少有 3 种含义:

a. 数学上的含义。在代数学中称变量之间的直线函数关系为线性关系,对这种关系的偏离称为非线性。在数学物理方程中,称未知变量及其导数为一次方且其系数与未知变量无关的微分方程为线性微分方程,否则为非线性微分方程。在概率论中,若随机变量之间相互独立,则表现为线性关系,否则表现为非线性关系。

b. 系统论中的含义。凡既满足均匀性又满足叠加性的系统称为线性系统,否则为非线性系统,其中不满足均匀性但满足叠加性的称为第一类非线性系统,两者均不满足的成为第二类非线性系统。

c. 非线性科学中的含义。相互联系的事物之间不只是存在着一方受到来自其他方的影响,而是相互影响、相互制约、相互依存,这就是非线性科学的实质。非线性科学是一个正在发展的科学体系,目前主要包括研究自相似性的分形理论,研究内随机性的混沌理论和研究耗散结构的熵原理等。

从非线性如此多的含义足见其极端的复杂性。在现代科学中,非线性似乎已成为复杂性的同义词。

水文过程存在非线性的根源之一是其内部的相互作用,包括发生在同一介质中和不同介质中各种现象之间的相互作用;根源之二是外部条件如流域水系、地形地貌、地表覆盖、气候要素和人类活动等的复杂影响,至于其余的根源还有待人们进一步去解释。

3.2 尺度转换问题

这个问题的实质是如何揭示不同尺度条件下发生的同一水文现象之间的相互关系,诸如数学关系,统计关系,或物理关系等^[13]。具体地说,就是:

a. 流域面积及其他流域地形地貌参数有真值吗?这个问题的起因类似于“英国的海岸线有多长?”这样一个问题。由于对同一比例尺的地形图,采用不同分划单位,所得的结果不一样;对相同的分划单位,采用不同比例尺的地形图,所得结果也不一样。这样就会提出一个问题:在推求流域面积和其他流域地貌参数时应拟定一个作为基准的地形图比例尺,并应给出由其他比例尺地形图得到的数值订正到该基准的方法。

b. 在相同气候条件下,同一水文要素在不同流域上的表现是否存在转换关系呢?例如,两个形状、水系、坡度分布、覆盖情况完全相同、仅面积大小不相同的流域,它们的瞬时单位线或时段单位线可以

相互转换吗?一个流域的点产流量对流域面积的积分能等于该流域的总产流量吗?它们之间存在何种定量关系呢?

c. 即使对均匀介质,由不同尺度得到的同一水文参数相同吗?相互之间可以转换吗?例如,实践已揭示,即使对于均质土壤,由小尺度土块测得的水力传导度与由大尺度土块测得的水力传导度并不相同,在相同的土湿条件下,前者则远大于后者。

上述列举的尺度转换问题对水文学是一种严重挑战。由于我们解释水文规律总是首先针对一定尺度的流域的,而不可能对地球上所有的大小流域都设站进行水文观测,因此,这种挑战必然给我们探求无资料流域的水文规律和计算方法带来极大的困难。

3.3 空间变异性问题

对于“点”与“面”水文过程之间存在差异的问题,除了上述尺度转换关系外,还由于降雨和下垫面特征空间分布的不均匀^[14]。例如,产流面积的变化就是由于存在降雨和下垫面特征的空间分布不均匀;一个流域的流域单位线不唯一,除了非线性作用外,由流域单位线定义可知显然还与净雨的空间变异性有关。

水文要素或特征值或参数的空间变异性通常表现为分区性、非分区性和空间随机性。分区性是指区域性或地带性,区域与区域或地带与地带之间的变化是不连续的。非分区性是指随空间位置呈连续变化的特性。空间随机性是指空间分布具有随机性。不同表现形式的空间变异性,应该使用不同的处理方法。

遥感、雷达和 GIS 等新技术虽为探测降雨、地形、地貌、土壤、地面覆盖等空间变异性提供了有效工具,但仍有许多具体问题有待解决。例如,如何使这些新技术所测与直接测定法所测精度相同就是一个值得探讨的问题。

3.4 坡面流速问题

坡面流速问题的核心是如何确定流速公式的形式。对于明渠水流,如河流、湖泊、水库中的水流,其运动主要受来自其内部的相互作用的支配,现已建立了一套可用于解决实际问题的理论和方法,例如 Chezy 公式或 Manning 公式。但对于多孔介质水流,例如土壤孔隙中的水流,其运动主要不是受来自其内部的相互作用的支配,而是受其周围固体边界之影响。Darcy 的试验证明,在这种情况下 Chezy 公式或 Manning 公式不再适用,而必须采用 Darcy 公式。坡面水流则具有特殊性。由于微地形和地面覆盖的复杂性,坡面好似不平整的“地毯”,一定坡面水深以

下的水流与多孔介质水流相似,而一定坡面水深以上的水流则表现为明渠水流。坡面水流的这种复杂性使得坡面流速的问题至今悬而未决,以致一定程度地阻碍了流域汇流理论的发展与实用化。

此外,多孔介质水流扩散机理与明渠水流扩散机理的区别也是值得探讨的问题。

3.5 确定性与随机性互补问题

在过去相当长的时期内,人们总是将确定性与随机性看作是对立的。统计力学的出现第一次对此提出了挑战!通过物理实验得出的气体状态方程是一个确定性定律,统计力学则在考察气体分子的独立随机运动的基础上,借助于概率论中的大数定律等也导出了这一气体状态方程。这一事实说明了一个现象所表现出的确定性一面和随机性一面不是对立的,而是互补的。

半个世纪以来,水文学中出现了3件值得重视的事件:一是根据流域水系形成的随机模型证明了从实践中总结出的 Horton 地貌定律;二是地貌瞬时单位线理论的出现^[8];三是‘参数水文学’与‘随机水文学’关系的揭示^[16]。这3件事改变了人们认为水文确定性和水文随机性是对立的看法。

研究表明,水文确定性与随机性的互补至少可以体现在以下几个方面:

- a. 从微观上考虑表现出随机性,但从宏观上考量却表现出确定性。
- b. 确定性现象也包含着内随机性,即具有‘蝴蝶效应’的混沌性。
- c. 大量随机性之总和可表现出确定性,这就是大数定律所揭示的。

随机微分方程理论、随机系统理论和贝叶斯理论的出现^[18-19],为人们处理确定性与随机性的互补关系,或者说统一处理一个事物在发展过程中所表现的确定性一面和随机性一面提供了有力的工具。

由此还不难看出所谓误差实时校正技术在理论上存在的缺陷,随着研究的深入,对这一“过渡性”的技术将可能与上述理论归于统一。

3.6 水文时间序列的长期演变规律问题

支配水文时间序列的长期演变的原因,或者说驱动力是什么?这是水文学家长期不得而知的一个问题,也是中长期水文预报理论和方法长期没有实质性进展的根本原因。

虽然人们早就认识到水文要素是气候条件和下垫面条件的综合产物,但由于这两个条件既存在自然演化过程,又存在受到人类活动影响的一面,尤其是下垫面条件极易受到人类活动的影响。因此,解释水文时间序列演变必须从探索其自然演化规律和

人类活动影响两方面入手。

遗憾的是,人们至今还未掌握水文时间序列的自然演化的驱动因子或其演化规律,就连人类自身引起的问题,也因为其相当无序而无法确切地掌握。例如人们在地球上许多地方不约而同地发现,近10多年来,气温虽有所上升,但水面蒸发却在减少,这一“蒸发悖论”正说明了解释水文时间序列的长期演变规律是极其困难的。

长期以来,水文学家试图用趋势性、周期性、随机性、模糊性、灰色性、混沌性,或者它们之间的某种组合来描述水文时间序列的规律,但都不能奏效。因此,水文时间序列长期演变有无规律,可否预测,或者说在什么条件下才可以预测,至今仍是一个“谜”!

3.7 “异参同效”和预测模型问题

所谓‘异参同效’,严格地说是指对于相同的模型结构和相同的模型输入,会有多个最优参数组使所获得的模型输出具有相同的拟合精度。出现‘异参同效’的原因至少有:目标函数是多极值的,模型中包含的参数之间存在相互补偿作用,模型参数具有随机性。

尽管有人将水文模型评价得很高,但现行流域水文模型,由于其对水文物理过程的描写与定量计算过于粗略和概化,实际上只具有‘模拟’功能,属于“模拟模型”。这种模型容易做到模拟或复演过去已经发生过的水文现象,利用计算机的‘长处’,只要不断地调整模型的结构和参数,这是不难做到的。但在科学上和应用中,最具有价值、能预测未来的‘预测模型’或‘分析模型’的构建就不那么容易了!因为这只有在人们对水文过程的物理规律有了足够精确的认识和揭示的基础上才有可能实现!

避免‘异参同效’和构建‘预测模型’或‘分析模型’都必先加强对水文模型结构的物理机理的研究,其次才是对模型参数率定技术的研究。

3.8 时空探源问题

随着人们越来越关注水资源和水安全问题,探索水资源的来源问题不仅具有科学意义,而且具有实际价值。某地或某水体的水资源从何补给?是降水、冰川还是地下水?是何处的降水、冰川、地下水?人类的文明史大约只有5000年,在人类没有记载或因某种原因缺失记载的年代里有没有发生过极值水文现象?它发生在什么时候?数量有多大?

同位素技术的出现为解决上述问题提供了可能。因为根据稳定同位素的性质,可探测水体的补给类型及来源。根据放射性同位素的性质,可测定过去极值水文事件发生的年代。可见,发展同位素技

术在水文中的应用是有必要的。

3.9 误差问题

误差是指近似值与真值之差值。在水文学中具体是指观测值或计算值(模拟)值与其真值之间的差值。在进行水文观测时,真值一般是无法得知的,因此,真正的误差值是未知的,而在进行水文计算或模拟时,因通常以实测值代表真值,故误差就是计算(模拟)值与实测值之差值,可认为是已知的。

水文观测误差与观测仪器的性能和外界环境如温度、湿度、气压、风速等有关,其中既有系统误差,也有偶然误差。水文计算(模拟)误差,除了源于参与计算的资料的观测误差外,还与计算公式、模型、参数和计算方法的正确性或合理性有关。

水文学家认为,在当前科学水平下,对误差进行一定修正是提高水文观测和水文计算(模拟)精度的重要手段之一,而且认为,修正方法与误差的特性有关^[20]。对于计算或模拟误差,虽然提出了一些修正方法,例如:卡尔曼滤波法、递推最小二乘法、误差自回归分析法和交互式修正技术等,但对它们的理论基础仍是值得讨论的。而对于观测误差,由于连误差多大、什么是粗差、什么是错误、“冒大数”是不是粗差或错误都无法或难以识别,那么对其进行修正必然仍是一个悬而未决的问题了!

4 结 语

近 20 年来,在我国水文学的研究中似乎存在着一种注重新技术应用的倾向。基于下列原因,这是无可厚非的:一是在 20 世纪 70 年代之前我国的水文技术相对落后,深受技术落后之苦;二是水文学现在所涉及的新技术,实际上都是当今世界成熟的技术,比较容易做到立竿见影;三是水文学理论研究相对艰难,即使一点小进步也可能要付出巨大的努力,甚至付出了也可能“颗粒无收”!笔者认为这种倾向不应该再继续下去了!这也许就是笔者写作本文的初衷吧!

参考文献:

- [1] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.
- [2] BAIRD A J, WILBY R L. 生态水文学[M]. 赵文智, 王根绪, 译. 北京:海洋出版社, 2002.
- [3] EANLESON P S. Dynamic hydrology[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- [4] DOOGE J C I. Linear theory of hydrologic systems[R]. Washington, D. C.: USDA Tech Bull, 1468, 1973.
- [5] CHOW V T. Evolution of stochastic hydrology[C]//CHIN Chao-Lin. Application of Kalman Filter to Hydrology, Hydraulics

and Water Resources. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1978.

- [6] 芮孝芳, 石朋. 数字水文学的萌芽及前景[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 55-58.
- [7] KIRKBY M J. Hillslope hydrology[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1978.
- [8] RODRIGUEZ-ITURBE I, VALDES J B. The geomorphologic structure of hydrological response[J]. Water Resources Research, 1979, 15(6): 1409-1420.
- [9] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European Hydrologic System-System Hydrologique European, SHE[J]. J of Hydrol, 1986, 87: 45-77.
- [10] RINALDO A, MARANI A, RIGON R. Geomorphological dispersion[J]. Water Resources Research, 1991, 27(2): 3041-3049.
- [11] REGGIANI P, 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]. Advances in Water Resources, 1998, 22(4): 367-398.
- [12] 芮孝芳. 水文学的研究方法与理论创新[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(2): 46-50.
- [13] WOOD E F. Scale dependence and scale invariance in hydrology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [14] ROSSO R, PEANO A, BECCHI I, et al. Advances in distributed hydrology[M]. Colorado: Water Resources Publications, 1994.
- [15] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [16] QUIMPO R G. Link between stochastic and parametric hydrology[J]. J Hydraul Div Am Soc Civil Eng, 1973, 99: 461-470.
- [17] 孙颖娜. 随机汇流模型及基于随机理论确定 Nash 模型参数研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [18] KRZYSZTOFOWICZ R. Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model[J]. Water Resources Research, 1999, 35(9): 2739-2750.
- [19] 芮孝芳. 中国的主要水问题及水文学的机遇[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(3): 18-21.
- [20] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 94-98.
- [21] 芮孝芳, 蒋成煜, 张金存. 流域水文模型的发展[J]. 水文, 2006, 26(3): 22-26.

(收稿日期: 2006-09-26 编辑: 马敏峰)

