

水文学确定性和不确定性方法的耦合初探

王文圣^{1,2}, 丁晶²

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:水文现象具有确定性和不确定性,常用确定性方法和不确定性方法分析。这两种方法在水文学中广泛应用并愈来愈密切耦合。对这种耦合的背景、实质和途径等进行了初步分析。给出了水文学确定性方法和不确定性方法耦合的内涵;分析了耦合的客观背景,指出确定性和不确定性辩证的统一、不确定性和确定性在一定条件下相互转化是耦合的哲学基础;总结了耦合的三大主要途径:(1)简单混合。对某一个水文问题的解决分成两个部份,一个部份用确定性方法,另一个部份用不确定性法;(2)一般嵌入。指在某种分析法的总体框架下,局部或某些部分嵌入另一种分析法以达到提高分析可靠性之目的;(3)复杂的渗入。指两种方法相互渗透,充分发挥各自特色促使耦合效应独突。

关键词:确定性方法;不确定性方法;耦合

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2014)02-0003-05

1 耦合之内涵

众所周知,水文现象发生和演变有确定性的一面也有不确定性的一面^[1-3]。在水文分析计算、预测和评价时,既用确定性方法^[4-5],也用不确定性方法^[6-13]。前者是根据水文现象发生和演变中一种内在、本质和稳定的联系通过物理因果分析而形成的水文学方法;后者根据水文现象发生和演变中受多种因素的综合影响而出现不稳定和偏离的不确定性联系,通过概率统计、模糊、灰色等途径而形成的水文学方法。这两种方法在水文学中广泛应用,但是应用时有一个明显的特点,即在某些情况下不是孤立地应用某种方法,而是将二者有效地结合起来^[6]。有两种常见的组合:一种是在确定性方法中恰当地结合不确定性法,另一种是在不确定性法中有机地结合确定性方法。多年的实践表明:两种方法的结合有助于实际问题的有效解决。近年人们愈来愈重视二者的结合,并对这种结合的背景、实质和途径等作进一步的探索,以便更合理地使二者科学地结合起来,更好地在实践中主动地应用。因此,有必要从方法论的高度对两种方法的结合加以剖析和论述。

从科学层面而言,上述的“组合”或“结合”并不准

确,以后的论述中将“组合”和“结合”改为“耦合”。用耦合二字强调它们不是简单地拼凑在一块,而是有机地相互渗透在一起。要对二种方法耦合给出较为确切的科学含意,并不简单。但在现阶段,至少可以这样来理解:为了解决水文学中的复杂问题,根据水文现象所表现出的二重性(确定性和不确定性),将确定性和不确定性方法按照分析要求,科学地交织在一起并有机地相互渗透形成一种独特的方法,这种方法可谓耦合方法。

2 耦合的客观背景

耦合是具有客观背景的^[1-3],分述如下。

2.1 确定性和不确定性辩证的统一

水文学中,确定性方法和不确定性方法的耦合根植于水文现象变化的固有属性。水文现象的确定性和不确定性是辩证统一的。确定性实质上是对具体的、特殊水文现象的科学抽象,它刻画了事物的本质,反映了水文现象特性的一个重要方面。同时,水文现象存在于纷繁复杂的环境中,在其演变过程中会受到众多因素的影响,确定性最终以形形色色摇摆和偏离并通过丰富多彩的个性表现出来,这种个性就是不确定性。也就是说,确定性总是通过不确定性表现来实现自身。这两

收稿日期:2013-05-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2013CB036401);科技基础性工作专项项目(2011HM011000);国家自然科学基金项目(51179110)

作者简介:王文圣(1970-),男,四川宣汉人,博士,教授,从事水文水资源系统分析。E-mail: wangws70@sina.com

种特性本质上是不同的,但又是辩证的统一。举例说明:一个正常的流域,年降雨量必然会产生对应的年径流量,这是确定性的稳定本质。但是受年内降雨过程分布不同等因素的影响,即使同样数量的年降雨绝不会产生相同的年径流量,每个年径流量总是通过形形色色摇摆和偏离以不确定的数值形式表现出来。显然,年降雨量以确定不移的趋向产生对应的年径流量。但是这种实现却是以摇摆不确定的形式出现的。“年降雨产生年径流量”这一水文现象既具有确定性,又具有不确定性,前者指“产生年径流量”是确定的,后者指“年径流量的大小”是不确定性的。“年降雨产生年径流量”水文现象的确定性是通过产生大小不同的年径流量的不确定性而体现出来的。进一步说,每一个年径流量的实现尽管数值有大有小,但是明白无疑地显示了这个确定不移的特性,即产生年径流量。因此“年降雨产生年径流”兼有确定性和不确定性,这种两重性是同一事物所固有的两个方面,是辩证统一的。

我们研究的众多水文现象和“年降雨产生年径流”现象类似,既赋有确定性又赋有不确定性。因此,对这一类水文现象的分析、计算、预测和评估,无疑应将确定性和不确定性方法有机地耦合起来。这是“耦合”出现的客观背景之一。

2.2 不确定性和确定性在一定条件下相互转化

水文现象的确定性中隐藏着不确定性,即确定性通过大量的不确定性表现出来,而且是通过不确定性来实现。另一方面,水文现象的不确定性中隐藏着确定性,即不确定性由多种因素造成但主导因素受确定性所支配。不确定性表现出的形形色色、丰富多彩的结果,从根本上还是由水文现象内部固有的稳定联系(确定性)所左右。确定性和不确定性是不可分的。确定性现象寓于不确定性现象之中。因此,确定性和不确定性在一定条件下可以相互转化。这就是说在一定条件下隶属于确定性现象,在另一条件下则可能演变为不确定性现象。确定性和不确定性之间的关系必须全面地、发展地和辩证地从哲学的高度来审视和评判。这里尤其值得重视的是确定性和不确定性之间的相互转化取决于一定的条件。就复杂的水文现象而言,这个条件可能是:①层次:宏观层次和微观层次;②空间尺度:大尺度和小尺度;③时间尺度:长时间和短时间。以下将分别予以论述。

有些水文现象在微观层次上显示出不确定性,但在宏观层次上却转化为确定性。例如,一场暴雨降落到

某一个流域,从微观上分析,流域各个位置的微小水量(水滴)向出口断面汇集的过程显然是不确定的。但是就宏观而言,出口断面会显示出涨水、洪峰和退水三个阶段的确定性过程。

有些水文现象在空间小尺度上显示不确定性,但当尺度逐渐加大,大到一定程度就可能转化为确定性。例如“多年平均径流深”水文现象,当流域面积较小时,各流域的多年平均径流深受到各流域的特殊因素影响是不确定的,但是当流域面积逐渐增大,一般到中等流域面积时,多年平均径流深就显露出一种确定性的地区规律。正是依据这一特性人们才绘制出年平均径流深等值线图,并在实践中获得了成功应用。

至于时间尺度的差异造成水文现象由确定性向不确定性转化的例子是非常多的。例如,要预报一个大流域的洪水(洪峰、流量),当暴雨已下落到流域后,即预见期较短时(时间尺度短),据洪水的产流和汇流确定性规律,一般可以作出较准确的预报。换言之,在这种情况下,未来的洪水现象可以视作为确定性的。但是,当暴雨尚未下落到流域即预见期较长时(时间尺度长),影响暴雨量及其分布的因素非常复杂,导致洪水具有不确定性,在这种情况下,未来的洪水现象可以视作为不确定性的。总之,同一种暴雨洪水现象,当预报的时间尺度不一样时,确定性和不确定性可以相互转化。

综上所述,水文现象的确定性和不确定性在一定条件下可以相互转化。正是这种转化的客观存在为确定性和不确定性方法之间的有机耦合奠定了基础,这是“耦合”出现的背景之二。

3 耦合的主要途径

上面重点论述了“耦合”的客观背景。这是“耦合”出现的坚强基础,也是人们主动广泛利用“耦合”的依据所在。在水文学中已出现的“耦合”,花样繁多。它们都是人们在实践中自觉或不自觉地逐渐摸索出来的。对现有的“耦合”途径加以分类,可以归纳出下述三大主要途径。

3.1 简单混合

对某一个水文问题(水文现象的分析、计算、预测和评估等)的解决分成两个部份。一个部份用确定性方法,另一个部份用不确定性法。整个问题的最终解决由这两个部份混合而获得。下面举例说明之。

(1) 提高短期水文预报精度

一般短期水文预报以确定性途径(确定性模型)作出。通常情况下,预报的精度会达到实用的要求,但在某些特殊情况下(如流域条件异常)精度可能较低。为提高预报精度,可对预报误差进行不确定性分析建立不确定性误差模型,籍此推估未来的误差值。这样既能对确定性模型作出的预报值给予校正,从而提高预报精度。显然这是确定性和不确定性法的混合,其示意如图1所示。



图1 提高短期水文预报精度的耦合方式
Fig.1 The coupling way of deterministic and nondeterministic method for the accuracy of short time forecast

(2)由暴雨推求设计洪水

当实测洪水资料的长度不足以推求出符合精度要求的设计洪水,而暴雨资料相对充分时,一般由暴雨推求设计洪水。这是典型的不确定性法和确定性法的简单混合,如图2所示,其中,设计暴雨由不确定性方法推求,产、汇流由确定性方法确定。

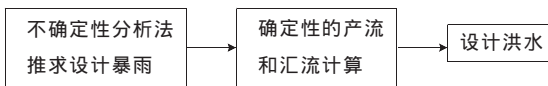


图2 由暴雨推求设计洪水的耦合
Fig.2 Copuling of deterministic and nondeterministic method for the designed flood

(3)无资料地区综合单位线

单位线是以确定性途径推求出的表征流域汇流特性的数学曲线,在水文学中有广泛的应用。一般而言,单位线是基于实测的暴雨洪水资料在某些假定的条件下推演而得,对于无资料的流域难以获得适用的单位线。但是实践表明,单位线的要素(例如洪峰、滞时、底长)与流域自然地理特征存在着一定的关系,这种关系是不确定性的,因此,以不确定性分析法(相关法)寻求单位线,即将单位线的要素通过相关法和地理特征联系起来,习惯上称这样的单位线为综合单位线。由它可望得到无暴雨洪水资料地区的单位线。综合单位线是明显的确定性和不确定性法的混合,如图3所示。

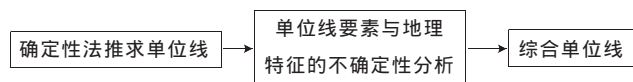


图3 无资料地区综合单位线推求
Fig.3 Obtaining of comprehensive unit hydrograph in ungauged region

3.2 一般嵌入

这里嵌入的含义是指在某种分析法的总体框架下,局部或某些部分嵌入另一种分析法以达到提高分析可靠性之最终目的。一般可能有两种情况:一是在确定性分析法中嵌入不确定性法,另一种是在不确定性法中嵌入确定性法。下面举例说明。

(1)基于地面露点的可能最大降水估算

可能最大降水估算一般采用确定性法。例如以水汽放大法估计可能最大降水就是一个确定性的框架。为求得可能最大降水必须估计该框架中的一个重要因子——可能最大露点。它可以依据地面露点间接推求,具体说,就是将地面露点视作随机变量以不确定性法推求。嵌入的示意图4。

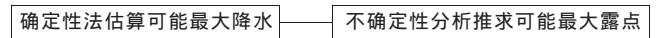


图4 基于地面露点的可能最大降水估算
Fig.4 The estimation of PMP based on dew point of the earth's surface

(2)基于实际典型过程探求设计水量的分配过程

在我国水文计算的实践中,广泛应用不确定性推求某种设计标准的总水量(例如频率为95%的枯水年水量),然后从实测资料中选择典型的分配过程(例如以月水量表示的枯水年水量分配过程),最后以典型分配过程作为模式将设计标准的总水量进行分配,求得设计分配过程,例如求得频率为95%的设计枯水年水量分配过程。显然这种设计水量分配过程的推求方法是在不确定法中嵌入确定性,即在不确定法推求总水量的基础上嵌入确定的典型过程。示意图5所示。



图5 基于实际典型过程探求设计水量的分配过程
Fig.5 The designed water quantity distribution process based on observed typical hydrology process

(3)确定性的水量平衡嵌入随机解集

随机水文学中的解集模型广泛得到应用,其主要原因在于将确定性法(水量平衡)嵌入到不确定性法(总量随机解集成分量)中。例如年水量随机分解成12个月水量,尽管月水量分配多种多样,但是12个月水量之和必须等于年水量。这种受到水量平衡确定性支配的随机分解反映了水文变化的客观特性,大大提高了解集结果的可靠性。本例的嵌入示意图6。

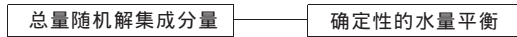


图6 确定性的水量平衡嵌入随机解集方式
Fig.6 Stochastic disaggregation mode based on water balance

3.3 复杂的渗入

上述确定性法和不确定性法的混合和嵌入是一种初级耦合。本节论述一种高级耦合——复杂的渗入，其主要涵义是两种方法相互渗透，充分发挥各自特色促使耦合效应独突。这里要强调的是“渗入”既不是简单的混合，也不是一般的嵌入，而是一种方法深度地渗透到另一种方法的机制中。下面举例详细说明之。

(1)基于卡尔曼滤波的实时水文预报

实时预报基于重要的新息对预报值作实时校正，提高了预报精度，填补了传统水文预报技术空白，在作业预报中发挥了显著的积极作用。实时预报之所以能达到提高预报度的效果，其根本原因在于将确定性法和不确定性法紧密渗透在一起而客观反映了水文预报过程的实际情况。具体而言，对于一个特定流域以确定性法建立这个流域暴雨洪水模型（如谢尔曼单位线以卷积形式表示的模型）或多个河段组成的河系汇流系统的模型（河段马斯京根汇流模型）。这些模型就作为构成状态方程的基础。以不确定性法即卡尔曼滤波法，根据受随机干扰的系统状态方程以及受随机干扰的系统观测方程，运用现代随机估计理论作出系统状态的无偏最小方差估计。基于这种估计理论，根据新息实时校正状态向量达到实时预报的目的。卡尔曼滤波实时预报实现了自动化的现时校正并取得了良好的实用效果。本例相互渗入耦合的示意图见图7。

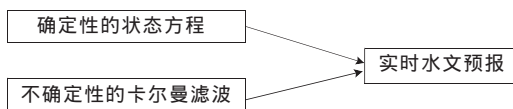


图7 基于卡尔曼滤波的实时水文预报
Fig.7 Real hydrologic forecast based on Karlman filter

(2)基于小波分析的水文随机模拟

小波分析的主要作用是将变化非常复杂的水文序列（如日、月、年流量序列）分解成不同尺度下的小波变换序列。这些变换序列经过重构可以得到原水文序列。

人们常常避开复杂的原水文序列，而间接地利用变化特性相对简单的变换序列探求水文现象的各种变化特性。

小波变换是确定性方法，而重构时引进随机组合

的理念隶属于不确定性法。由于不同尺度下的小波序列随机组合经过重构将得到大量的随机模拟序列。显然这种随机模拟是确定性法和不确定性法相互渗入的结果，示意图8。

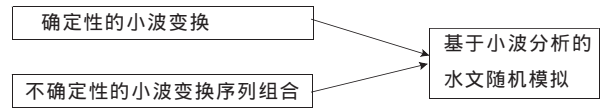


图8 基于小波分析的水文随机模拟
Fig.8 Hydrologic stochastic simulation based on wavelet analysis

(3)确定性的成因分析渗入暴雨频率计算

暴雨频率计算基于暴雨量为随机变量用不确定性统计法估计出设计频率的暴雨量。在短资料情况下，较大的抽样误差将导致设计暴雨量可靠性差。为了提高可靠性，一般将邻近地区已发生的大暴雨移植到设计站以提高暴雨的代表性，减少抽样误差。实践表明这是非常有效的途径。事实上这一途径就是将确定性的成因分析方法渗入到不确定性统计法中的耦合途径。特大暴雨移置建立在暴雨成因分析的基础上，可以说，没有暴雨成因分析就没有暴雨移量的可能。在这里暴雨移量意味着确定性成因分析法。将移置的特大暴雨量和原有的暴雨量样本组合在一起组成一个特殊的统计样本，以统计法估计设计暴雨量，显然是一种确定性渗入到统计法的耦合典范。示意图9。

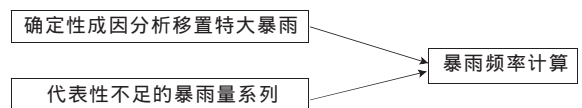


图9 确定性的成因分析渗入暴雨频率计算
Fig.9 Frequency calculation of Rainfall based on deterministic analysis

4 小结

以上就水文学的确定性和不确定性方法的耦合，从客观背景到多种耦合途径作了初步探讨，获得了一些新认识。归纳总结这些新认识对推动这一领域的继续研究，正确使用耦合途径和提升其实用性都是非常重要的。

(1)水文确定性和不确定性法的耦合根植于水文现象固有属性，有其坚强的哲学基础。

(2)耦合呈现出多种多样的形式，大体可归纳出三大类：简单混合、一般嵌入和复杂渗入，但这种分类是初步的，有待于进一步探索。

(3)确定性和不确定性法的耦合是当前水文学中

被公认的一种有效方法。在使用这一方法时关键在于深刻理解水文问题的性质、特点、涉及哪些水文要素(变量)和这些要素的变化特性。

(4)确定性和不确定性法耦合的探讨尚存在不少必须进一步研究的问题,特别是对耦合原理的研讨要给予高度重视。

参考文献:

- [1] 谢龙主编.现代哲学观念[M].北京:北京大学出版社,1990.(XIE Long. Perception of Modern Philosophy [M]. Beijing: Beijing University Press, 1990.(in Chinese))
- [2] 胡承正.统计物理学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社,2004.(HU Chengzheng. Statistic Physica [M].Wuhan: Wuhan University Press, 1990.(in Chinese))
- [3] 周上章.统计物理学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社,1991.(ZHOU Shangzhang. Statistic Physica [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.(in Chinese))
- [4] 林三益主编.水文预报[M].北京:中国水利水电出版社,2001. (LIN Sanyi. Hydrology Forecast [M]. Beijing: China waterpower Press, 2001.(in Chinese))
- [5] 王国安.水文原理、定律和假说初探 [M]. 郑州: 黄河出版社,2002. (WANG Guoan. Preliminary Study on Hydrologic Theorems, laws and Hypotheses[M]. Zhengzhou: Yellow River Press, 1990.(in Chinese))
- [6] 廖松.工程水文学 [M]. 北京: 清华大学出版社,1991.(LIAO Song. Engineering Hydrology [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1991. (in Chinese))
- [7] 王文圣,张翔,金菊良,等.水文学不确定性分析法[M].北京:科学出版社,2011.(WANG Wensheng, ZHANG Xiang, JIN Juliang, et al. Methods of Uncertainty Analysis for Hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2011.(in Chinese))
- [8] 张济世,刘立昱,程中山,等.统计水文学 [M]. 黄河出版社,2006. (ZHANG Shiji, LIU Liyu, CHENG Zhongshan, et al. Statistic Hydrology[M]. Zhengzhou: Yellow River Press, 2006.(in Chinese))
- [9] 丁晶.丁晶水文水资源文集[M].成都:四川科技出版社,2006.(DING Jing. Collected Works of Ding Jing about Hydrology and Water Resources[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2006. (in Chinese))
- [10] 金菊良,丁晶.水资源系统工程[M].成都:四川科技出版社,2002.(JIN Juliang, DING Jing. Water Resources System Engineering [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [11] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005 (WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing. Wavelet Analysis in Hydrology[M].Beijing: Chemistry Industry Press,2005.(in Chinese))
- [12] 王文圣,丁晶,金菊良.随机水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2008.(WANG Wensheng, DING Jing, JIN Juliang. Stochastic Hydrology[M].Beijing: China waterpower Press, 2008.(in Chinese))
- [13] 王文圣,李跃清,丁晶,等.水文水资源集对分析[M].北京:科学出版社,2010. (WANG Wensheng, LI Yueqing, DING Jing, et al. Pair Set Analysis for Hydrology and Water Resources systems[M].Beijing: Science Press, 2010.(in Chinese))

Exploration on Coupling of Deterministic Methods and Nondeterministic Methods in Hydrology

WANG Wensheng^{1,2}, DING Jing²

(1.Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072, China;

2.College of Hydraulic Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Hydrological phenomena with certainty and uncertainty, have been commonly analyzed based on the deterministic methods and nondeterministic methods. These two methods have been widely used in hydrology and increasingly close to couple. This paper made a preliminary study on the coupling to the background, essence and approach. The first connotation of coupling based on hydrology deterministic methods and nondeterministic methods were given; Then the objective background of coupling was analyzed, the philosophical foundation of coupling about dialectical unity of the certainty and uncertainty, mutual transformation of uncertainty and certainty of under certain conditions were pointed out; In the end, the three main ways of coupling were concluded: (1) Simple mixing way for the solution of a hydrological problem was divided into two parts, one part is based on a deterministic method, another part is based on nondeterministic methods; (2) General embedded way in a general framework on a deterministic method and a nondeterministic method were embedded in order to improve the reliability; (3) Complex coupling it means mutual penetration of a deterministic method and a nondeterministic method for giving full play to their respective features.

Key words: deterministic method; nondeterministic method; coupling