

文章编号:0559-9350(2018)01-0136-08

水文模型的不确定性和异因同果性: 认知的回顾

杨小柳, 王艺臻

(北京大学, 北京 100871)

摘要: 本文藉回顾不确定性和异因同果性的认知过程, 管窥水文模型研究中的理念之争。文中概述不确定性的不同来源说, 总结有关讨论的正反方观点, 分析近期研究的热点和趋势; 梳理异因同果性的产生背景、研究进展、主要成果和面临挑战。文末从四源说、水文学边缘化、非主流观点和异因同果性等4个方面, 评述认知过程中出现的不同声音, 揭示不同研究流派在认识论和方法论上的差异。

关键词: 水文模型; 不确定性; 异因同果性

中图分类号: P334

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170856

在水文模型诸多性质中, 不确定性和异因同果性是近期热议的话题。本文沿着这两条线索, 条分缕析, 一窥水文模型研究的动态。

1 不确定性

1.1 不确定性及其来源 1997年, 人工智能专家Zimmermann定义了数学模型的不确定性: “如果拥有定性的和/或定量的信息, 可以确切地从数量上描述和甄别某系统的现状或预测其未来, 即为确定性, 反之则为不确定性”^[1]。2009年, Todini描述了水文模型的不确定性: “基于目前所有知识和经学习推理所获信息, 对未来事件发生概率的主观评估”^[2]。通常, 水文界会在两种背景下谈论不确定性, 一是水文模型, 二是基于水文模型的水文预报。为讨论方便, 本文将它们统称为模型不确定性。

其实, 水文学家更关心不确定性的来源, 而不是其定义, 有关研究可以追溯到上世纪70年代末Kirkby^[3]和Kitanidis等^[4]的工作。虽然围绕模型不确定性的讨论已经持续了40余年, 但对其来源仍然莫衷一是。大致可将曾经出现的不同观点归纳为两种学说: 三源说和四源说。三源说以Krzysztofowicz^[5]为代表, 认为模型不确定性有3个来源: 系统运行、输入和水文模型。持四源说的人比较多, 但也没有形成一致意见。其中, Kitanidis等^[4]的4个来源是: 模型输入、模型结构、模型参数和水文系统的初始状态; Melching^[6]的4个来源指: 水文因子随机性、数据测量误差、模型结构和模型参数; Montanari等^[7]的4个来源为: 水文因子随机性、模型输入、模型结构和模型参数。

Maskey等^[8-9]对近期出现的四源说做了如下概括和说明: ①模型输入不确定性, 指输入水文模型的降雨、蒸发、径流等资料的测量误差; ②模型结构不确定性, 指水文模型中的物理假设和数学概化; ③模型参数不确定性, 指水文模型参数率定的偏差; ④天然或人为不可预见因素的不确定性, 前者指溃坝、滑坡、泥石流、冰凌洪水等事件, 后者指系统软硬件故障、实测数据缺失等系统运行中的失误。

1.2 关于不确定性的大讨论 模型不确定性研究的第一个高峰出现在1980—1990年代, Kitanidis等^[4]、

收稿日期: 2017-09-04; 网络出版日期: 2018-01-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180124.1151.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471017)

作者简介: 杨小柳(1958-), 男, 北京人, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xlyang11@pku.edu.cn

Rodriguez-Iturbe 等^[10]、Georgakakos^[11]等分别研究了模型不确定性的分类方法、统计特性、概率分布和修正方法等等。在水文模型的研究中，不确定性扮演了重要的角色，与可靠性(reliability)、敏感性(sensitivity)、稳定性(stability)和稳健性(robustness)等一同被视作分析和检验模型的重要指标^[12-17]。

近些年来，水文界最引人瞩目的事情，莫过于关于模型不确定性的讨论。这场大讨论将模型不确定性的研究推向又一个高峰，涌现出一批难得一见的学术评论^[18-22]和研究成果^[23-26]，有关讨论延宕至今^[27-28]。在这次大讨论中，人们关注的议题比以往更加广泛，讨论的形式也更加活跃，水文学家首次从政府和社会的角度审视水文模型及其不确定性，对有关研究“品头论足”，水文专业杂志上频现“水文模型的信任危机”、“水文学的社会公信力”等前所未见的词汇，一时的热闹，乃水文界之罕见。

大讨论中最主要的辩题：是否将模型不确定性纳入防洪决策体系并告知全社会？讨论持续数年，从不同角度展开，形成了针锋相对的观点，可大致归纳如下。

从水文学、管理学和社会学的综合角度，赞成者认为，若将模型不确定性信息“隐而不报”，会降低水文学的社会公信力，丧失决策者和社会公众对水文模型的信任^[29-30]，并且批评道：“之所以政府决策者和社会公众至今还不了解模型不确定性的重要意义，其原因和责任在水文界，因为水文专业人士从未就此与决策者和社会公众进行过充分和有效的沟通”^[31]。反对者也寸步不让：“理解模型不确定性需要深厚的专业知识，不应奢望决策者和社会公众能对其有正确的理解，更不应将之硬性地嵌入防洪决策过程，这会增加决策的难度，造成决策的失误”，并直率地指出：“某些水文学家试图以模型不确定性为借口，将自己的责任和风险转嫁给不明就里的决策者和社会公众”^[32]。

在技术层面，此辩题更加引起水文界的关注。因为许多人意识到，如果模型不确定性成为防洪决策的主要依据和社会公众的重要信息，则意味着一场“革命”将在水文学领域发生，现今的水文预报系统、防洪决策系统和防洪应对机制等等，将因其在技术上发生根本性的变化。反对这一观点的人认为，模型不确定性对防洪决策毫无价值，对社会公众毫无意义，其因有二：一是任何水文模型/预报系统都必须经过严格检验后方可投入使用，因此模型不确定性微不足道，不会对决策产生显著影响；二是模型不确定性的分析方法过多地依赖假设，所给出的变化区间太大，提供给决策者和社会公众的信息过于主观和夸张。赞成者回应道：“科学假设在科学研究中是必要的，不确定性分析中的假设与水文模型中的假设没有本质上的不同”^[33]；同时坦承：“不确定性研究尚面临诸多难题，距离实际应用还有很长的距离”^[33]，但强调：“这些都不应该成为拒绝将模型不确定性融入决策体系和社会管理的理由”^[33]。

1.3 不确定性的研究热度、方向和趋势 本文根据2005年以来的文献，从水文预报的角度，考察模型不确定性研究的近期发展趋势。为此，共收集到论文398篇，其中英文论文205篇，中文论文193篇。表1给出了统计结果。

表1 水文预报论文分类统计表(2005年以来) (单位：%)

	实时预报系统	模型/方法改进	实时观测技术	特殊洪水规律	不确定性研究
英文篇数/英文总篇数	10	28	2	5	55
中文篇数/中文总篇数	16	53	1	3	27
文献篇数/总篇数	13	40	2	4	41

当然，表中数字的准确性会受到一些因素的影响，例如：文献的收集难免挂一漏万，有些英文论文作者是国内研究人员，有些论文横跨两个以上的分类，等等。但这些因素并不妨碍根据表1做出如下大致判断：①总体而言，模型不确定性和模型/方法改进是研究中最受关注的两个方面；②国外的研究更偏重前者；③国内的研究更偏重后者。

对文献的进一步分析发现，关于模型不确定性有4个主要研究方向：①基于模糊集理论的方法，例如Lohani等^[34]和Chen等^[35]的工作，其论文数目占到模型不确定性研究论文总数的19%；②基于

概率论的方法，比如蒙特卡洛方法、一次二阶矩法、Rosenblueth点估计法等，例如Wang等^[36]的工作，占比4%；③混合方法，例如Chapi等^[37]的工作，占比1%；④贝叶斯方法。Krzysztofowicz是采用此法的主要推动者^[5-23]，他的研究团队提出了分析框架和计算方法^[5-38]，研究了不同的案例^[39-40]。紧随其后，贝叶斯方法的研究引起了水文界的广泛关注^[25, 26, 28-36]。此类文献占比高达76%。

从模型不确定性研究论文发表的时间看，约两成的英文论文和约一半的中文论文发表在2011年之后。隐约可见，在国际上退热的同时，国内正在升温。

2 异因同果性

几乎可以肯定，凡使用过水文模型的同行都有过这样的经历：采用不同的模型可以获得同样(类似)精度的模拟结果；类似地，当不同使用者采用同一模型时，虽然他们研究同一流域，使用相同资料，获得同样(类似)精度，但率定出的参数不同。

Beven高度重视这一现象，将之命名为水文模型异因同果性(equifinality)，即：“采用不同结构的模型或同一模型的不同参数组，均可获得可接受的模拟结果”^[41]，并在之后的十多年时间里，对其进行了深入细致的研究。在1996年至1998年期间，Beven团队研究了地貌学^[42]、水文模型^[43-44]、水力学数学模型^[45]的异因同果性；1999年至2001年，围绕异因同果性研究了模型参数的唯一性^[45]和模型的假设检验^[47-48]；2004年至2007年，提出了量化异因同果性的理论和方法^[49-50]。Beven的主要贡献可概括为：①证明在同一模型参数组当中不存在“最优”；②澄清异因同果性与稳健性、模糊性(ambiguity)、非唯一性(non-uniqueness)、病态依赖性(ill-posedness)、可辨识性(identifiability)等的关系；③将异因同果性纳入水文模型的评价验证、假设检验、参数空间等的分析中；④提出评估方法的理论框架和基本算法。

Beven^[49]力主深化水文模型异因同果性的研究，为此提出如下八项具体研究内容：①水文资料观测误差的量化方法；②水文模型可接受度的量化方法；③模型输入误差与模型结构误差的分离方法，以及它们单独作用和共轭作用效果的评估方法；④模型参数的高效空间搜索方法；⑤使模型在不同时空条件下保持一致精度的方法；⑥模型输入错误的处理方法；⑦避免过度参数化的方法；⑧流域特征变化对水文模型参数影响的评估方法。Beven鼓励研究者们以持之以恒的态度，面对上述研究中可能遇到的困难。

3 关于不确定性和异因同果性的不同声音

3.1 不确定性的3种不同观点

3.1.1 前后四源说 有不少关于模型属性的论述，其中Bonitzer的说法比较具有代表性：“……模型是原型的抽象表达……，客观世界的原型具有无数属性，而模型只能考虑原型的有限属性，所以模型与原型之间必然存在差异”^[51]。因此，不确定性就是模型与原型在属性上的差异，是那些模型忽略掉的、无法考虑的和考虑不周的原型属性。基于这样的认识，Georgakakos等^[11]和Kachroo等^[52]秉持一种四源说，认为模型不确定性来自模型结构、模型参数、模型的初始状态和模型的边界条件。为讨论方便起见，我们将这一较早出现的四源说称之为“前四源说”，将后来出现的以Maskey等^[8]为代表的四源说称之为“后四源说”。

对比发现，后四源说并没有脱离上述关于模型属性的认识，只是在前四源说的基础上，添加了对决策中可能遇到的天然和人为不可预见因素的考虑。换言之，后四源说对模型不确定性的认知范围从水文模型外延到防洪决策。从划分上看，似乎各有道理。但从研究的角度看，两者采用了不同的方法论。前四源说尽量将模型不确定性单一化、单纯化，采取“就事论事”的研究方式；后四源说将模型不确定性多元化、复杂化，站在模型使用者的立场上看待不确定性，采取面向服务对象的研究方式。虽然后四源说在近期比较流行，但坚持前四源说者也不乏其人^[53]。当然，孰优孰劣取决于

哪一种学说更有助于推进研究工作。但从目前各自的研究进展看,在后四源说与前四源说之间,尚难分伯仲。

3.1.2 水文学边缘化 不确定性的三源说^[5]令人费解。众所周知,模型结构与模型参数的不确定性在本质、性质、机制等方面十分不同,但三源说硬性地将这些性质迥异的不确定性合并,概之以“水文不确定性”。究其原因,是为了满足贝叶斯方法的需要。所以,三源说不是水文学的学说,而是水文学为统计学所做的“削足适履”。

如表1显示,贝叶斯方法较受研究者青睐。但需要引起注意的是,统计学界认为贝叶斯方法在实际应用中存在很大的局限性:“只有在先验分布具有一种不依赖主观的意义,且能根据适当的理论或以往的经验决定时,才允许在(贝叶斯)统计推断中使用先验分布,否则就会丧失客观性”^[54]。Andreassian等^[55]采用经验法证明:贝叶斯方法缺乏客观性,不适合模型不确定性的分析。但这些没有引起人们足够的重视。

上述情况令人尴尬,一方面水文学不得不削足适履,另一方面统计学不得不勉为其难,似乎水文学家在做一件两面不讨好的事情。Klemes曾注意到水文学研究中的类似现象:“(有些研究者)为了使用数学而重新定义(水文学)问题……常常为数学而牺牲水文学”^[56],并预言了这种研究方式的危害:“会使水文学中充斥越来越多的数学、统计学等非水文学的内容,使得水文学中真正属于水文学的东西变得越来越少”^[56]。一言以蔽之,水文学的“削足适履”将使自己边缘化。

3.1.3 非主流观点 有些观点虽应者甚少,未形成主流,却也不乏见地。Andreassian等^[55]认为,造成模型不确定性的主要原因,是研究者们忽视模型的稳健性,如果能从研究方法的细节入手,可在很大程度上降低水文模型/预报的不确定性。具体而言:①充分利用现有的计算机能力,采用多流域、长系列、连续演算的研究模式,摈弃以往的“次洪”和“单一流域”的模式;②杜绝“筛选”实测数据的不良做法。有些研究者“习惯性地”选用那些模拟/预报效果好的数据段,用于展现他们模拟/预报的精度。这种“吹嘘”精度的做法,应予以根除;③以实事求是的态度报道研究成果。在发表的学术论文中,不仅报告模型/预报的成功,还应揭示其失败。Kirchner^[57]也提出了两条很有价值的建议:①采用现代高新技术,重新布设水文监测站网,尽可能地使水文实测数据具有空间上的均匀性;②高度重视过度参数化问题,力求模型参数数目的最少化。

西方的学术研究曾深受波普尔的影响,上述这些非主流观点就显示出鲜明的波普尔色彩。Andreassian等^[55]对实证资料和大样本检验的强调,实际上是波普尔方法论“以猜想和驳斥的方式获取知识”^[58]的实践;Kirchner^[57]对过度参数化问题的高度重视,更是波普尔“低维度理论比高维度理论更具普适性和严格性”^[59]理念的具体化。如今,喜欢波普尔方法论的人趋少,热衷后现代科学观的人趋多,这大概是上述观点受人冷落的原因。但是,热衷归热衷,解决问题还是需要集思广益,因此上述的非主流观点及其所采用的方法论值得关注。

3.2 重新认识异因同果性 据Aronica等所言^[45],水文模型异因同果性受到了地貌学的启发。追踪到地貌学,我们发现其异因同果性是来自贝塔朗菲的一般系统论^[60]。不妨一睹贝塔朗菲描述的异因同果性^[61]:“……在有机体的发育过程中,从不同的初始状态出发和/或沿着不同的成长路线,可以达到同一最终状态或‘目标’。例如从下列之一的情况发育成为正常有机体的现象:一个完整的卵细胞、被分割成几部分的卵细胞碎片、融合在一起的两个卵细胞、水螅或涡虫的一小片,等等。它们都是从不同的初始尺寸,经过不同的发育过程,达到了既定的最终尺寸……”。原来,一般系统论描述的是生物学现象。继贝塔朗菲之后,地貌学领域也发现了类似的现象——不相同的历史演变过程会形成类似的地貌。是故,地貌学借此词一用。

我们注意到,生物学和地貌学的异因同果性都是自然现象,生物学的不同发育过程和地貌学的不同演变过程都是客观现实。与之比较,水文模型不是自然现象,模型在结构或参数上的不同也不是客观现实。因此,水文模型与生物学和地貌学现象不具有可比性,所谓水文模型异因同果性值得商榷。

或许,力学的发展过程对水文模型研究更具参考意义。库恩描述了力学发展过程中的一个特殊

阶段：“……从18世纪到19世纪，许多欧洲著名的数学物理学家，如欧拉、拉格朗日、汉密尔顿、雅可比和赫兹等等，曾反复尝试以同等效果的不同数学表达式重构力学理论，希冀力学能够在逻辑上更加严谨，形式上更加完美……”^[63]，而且发现：“……类似的数学重构阶段曾出现在其它科学分支的发展过程中……”^[63]。据此，如果人们认为水文模型的发展正处在力学当时的阶段，那就应该坚持以往对水文现象的基本判断，相信水文过程存在必然性、普遍性和可预测性，继续以兼具独立性和重复性的观测数据为基础，致力于水文模型及其理论的“重构”。

如此看来，Hamilton的批评也不无道理：“(水文模型)异因同果性向人们发出了错误的信号：水文模型的发展已经达到了极限，……(提出异因同果性)是在为水文模型的缺陷和不足，寻找‘优雅’而‘巧妙’的借口”^[62]。

4 几句题外话

关于模型不确定性和异因同果性的讨论，在水文界营造出了持续良久的学术争鸣氛围，实在难能可贵。翻阅有关文献，可以感受到所有参与者都在以平和的心态探讨问题。虽然观点各异、针锋相对，但语言婉转、不失风雅。旁观他们的争执实在是一种享受。如此看来，形成良好的学术争鸣氛围不仅在于倡导，还在于参与者的修养，两者缺一不可。

文中提到了Beven、Andreassain、Kirchner等的观点，姑且不论其正确与否，但值得称道的是他们对水文学问题本身的思考。过去，在资料获取困难的手工计算时期，水文界诞生了不少充满想象力的成果(比如单位线法、马斯京根法)，其原因就在于当时的水文学家能够心无旁骛地专注于水文学问题。现如今，有功能强大的计算机和方便使用的数学软件……，如果水文学研究者们能够依然专注于水文学问题，而不是迷失于这些外部工具，则好的水文模型研究成果来日可期。

前些年在全球出现的现代科学观与后现代科学观之争，对水文模型研究产生了明显的影响。或许有人有过这样的疑问：不确定性的研究为什么会再次兴起？为什么将模型不确定性的思考空间外延？为什么会突然间提出水文模型异因同果性？如果将这些难以理解的变化与当时国际上出现的后现代科学观联系起来，就很容易明白个中曲直。因此，水文模型研究者应关注国际上关于科学哲学的讨论，这不仅仅是为了理解水文模型研究中发生的变化，而且是为了更好地把握未来的研究方向。

参 考 文 献

- [1] ZIMMERMANN H J . A Fresh Perspective on Uncertainty Modelling: Uncertainty vs. Modelling[C]//Uncertainty Analysis in Engineering and Sciences: Fuzzy Logic, Statistics, and Neural Network Approach . New York: Kluwer Academic Publisher . 1998 .
- [2] TODINI E . Predictive uncertainty assessment in real time flood forecasting[C]//Uncertainties in Environmental Modelling and Consequences for Policy Making. Dordrecht (The Netherlands): Springer . 2009 .
- [3] KIRKBY M J . Tests of the random network model and its application to basin hydrology[J] . Earth Surface Processes and Landforms, 1976, 1: 197–212 .
- [4] KITANIDIS P K, BRAS R L . Real-time forecasting with a conceptual model, 1 . Analysis of Uncertainty[J] . Water Resources Research, 1980, 16(6): 1025–1033 .
- [5] KRZYSZTOFOWICZ R . Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model[J] . Water Resources Research, 1999, 35 : 2739–2750 .
- [6] MELCHING C S . Reliability Estimation[C]//Computer Models of Watershed Hydrology . Colorado: Water Resources Publications . 1995 .
- [7] MONTANARI A, SHOEMAKER C A, van de Giesen N . Introduction to special section on uncertainty assess-

- ment in surface and subsurface hydrology: an overview of issues and challenges[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45, W00B00 .
- [8] MASKEY S, GUINOT V, PRICE R K . Treatment of precipitation uncertainty in rainfall–runoff modelling: a fuzzy set approach[J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(9): 889–898 .
- [9] MASKEY S . Modelling Uncertainty in Flood Forecasting Systems[M]. London: Taylor & Francis . 2004 .
- [10] RODRIGUEZ–ITURBE I, EAGLESON P S . Mathematical models of rainstorm events in space and time[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(1): 181–190 .
- [11] GEORGAKAKOS K P, SMITH G F . On improved hydrologic forecasting—results from a WMO real–time forecasting experiment[J]. *Journal of Hydrology*, 1990, 114(1/2): 17–45 .
- [12] WARWICK J J, WILSON J S . Estimating uncertainty of stormwater runoff computations[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 1990, 116(2): 187–204 .
- [13] MELCHING C S . An improved first–order reliability approach for assessing uncertainties in hydrological modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 1992, 132:157–177 .
- [14] ORESKES N, SHRADER–FRECHETTE K, BELITZ K . Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earthsciences[J]. *Science*, 1994, 263(5147):641–646.
- [15] SCHULZ K, HUWE B . Uncertainty and sensitivity analysis of water transport modelling in a layered soil profile using fuzzy set theory[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 1999, 1(2):127–138.
- [16] SCHULZ K, HUWE B, PEIFFER S . Parameter uncertainty in chemical equilibrium calculations using a fuzzy set theory[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 217: 119–134 .
- [17] GUYONNET D, COME B, PERROCHET P, et al . Comparing two methods for addressing uncertainty in risk assessments[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1999, 125(7): 660–666 .
- [18] HALL J W, ANDERSON M G . Handling uncertainty in extreme or unrepeatable hydrological processes—the need for an alternative paradigm[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1867–1870 .
- [19] BEVEN K J . On undermining the science?[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20: 3141–3146 .
- [20] TODINI E, MANTOVAN P . Comment on: “On undermining the science?” by Keith Beven[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20: 3141–3146 .
- [21] HALL J, O’CONNELL E, EWEN J . On not undermining the science: discussion of invited commentary by Keith Beven[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(7): 985–988 .
- [22] IVANOVIC R F, FREER J E . Science versus politics: truth and uncertainty in predictive modelling[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23:2549–2554.
- [23] KRZYSZTOFOWICZ R . Bayesian system for probabilistic river stage forecasting [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 268: 16–40 .
- [24] RENARD B, KAVETSKI D, KUCZERA G, et al . Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: W05521 .
- [25] BIONDI D, DE LUCA D L . A Bayesian approach for real–time flood forecasting [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012, 42/44: 91–97 .
- [26] BIONDI D, DE LUCA D L . Performance assessment of a Bayesian Forecasting System (BFS) for real–time flood forecasting[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 479: 51–63 .
- [27] BARBETTA S, COCCIA G, et al . The multi temporal/multi–model approach to predictive uncertainty assessment in real–time flood forecasting[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 555–576 .
- [28] XU X, ZHANG X, FANG H, et al . A real–time probabilistic channel flood–forecasting model based on the Bayesian particle filter approach[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 88: 151–167 .
- [29] BRUGNACH M, TAGG A, KEIL F, DE LANGE W J . Uncertainty matters: computer models at the science–policy interface[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21: 1075–1090 .
- [30] BOROWSKI I, HARE M . Exploring the gap between water managers and researchers: difficulties of model–based tools to support practical water management[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21:1049–1074 .
- [31] FAULKNER H, PARKER D, GREEN C et al . Developing a translational discourse to communicate uncertainty in flood risk between science and the practitioner[J]. *Ambio*, 2007, 36(8): 692–703 .

- [32] SIVAKUMAR B . Undermining the science or undermining Nature? [J] . Hydrological Processes, 2008, 22: 893–897 .
- [33] PAPPENBERGER F, BEVEN K J. Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis [J] . Water Resources Research, 2006, 42: 1–8.
- [34] LOHANI A K, GOEL N K, BHATI K K S . Improving real time flood forecasting using fuzzy inference system [J] . Journal of Hydrology, 2014, 509: 25–41 .
- [35] CHEN C S, JHONG Y D, WU T Y, CHEN S T . Typhoon event–based evolutionary fuzzy inference model for flood stage forecasting [J] . Journal of Hydrology, 2013, 490: 134–143 .
- [36] WANG H, WANG C, WANG Y, GAO X, YU C . Bayesian forecasting and uncertainty quantifying of stream flows using metropolis–hastings markov chain monte carlo algorithm [J] . Journal of Hydrology, 2017, 549: 476–483 .
- [37] CHAPI K, SINGH V P, SHIRZADI A, et al . A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment [J] . Environmental Modelling & Software, 2017, 95: 229–245 .
- [38] KRZYSZTOFOWICZ R, KELLY K S . Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting [J] . Water Resources Research, 2000, 36: 3265–3277 .
- [39] KRZYSZTOFOWICZ R . The case for probabilistic forecasting in hydrology [J] . Journal of Hydrology, 2001, 249 : 2–9 .
- [40] KRZYSZTOFOWICZ R, HERR H D . Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting: Precipitation–dependent model [J] . Journal of Hydrology, 2001, 249: 46–68 .
- [41] BEVEN K J . Prophecy reality and uncertainty in distributed hydrological modelling [J] . Advances in Water Resources, 1993, 16: 41–51 .
- [42] BEVEN K J . Equifinality and uncertainty in geomorphological modelling [C] // The Scientific Nature of Geomorphology . Chichester (UK) : John Wiley & Sons . 1996 .
- [43] BEVEN K J . A discussion of distributed modelling [C] // Distributed Hydrological Modelling, Dordrecht (The Netherlands) : Kluwer . 1996 .
- [44] BEVEN K J . The limits of splitting: Hydrology [J] . Science of the Total Environment, 1996, 183: 89–97 .
- [45] ARONICA G, HANKIN B, BEVEN K . Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data [J] . Advances in Water Resources, 1998, 22(4) : 349–365 .
- [46] BEVEN K J . Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling [J] . Hydrology and Earth System Sciences, 2000, 4(2) : 203–213 .
- [47] BEVEN K J . On hypothesis testing in hydrology [J] . Hydrological Processes, 2001, 15: 1655–1657 .
- [48] BEVEN K J . Towards a coherent philosophy for environmental modelling [J] . Proceedings of the Royal Society of London A460, 2002, 458: 2465–2484 .
- [49] BEVEN K J . A manifesto for the equifinality thesis [J] . Journal of Hydrology, 2006, 320: 18–36 .
- [50] BEVEN K J . Rainfall–Runoff Modelling: A Primer [M] . Oxford (UK) : Willey Blackwell . 2012 .
- [51] BONITZER J . Les Chemins de la Science [M] . Paris: Scandéditon/Éditions sociales. 1993 .
- [52] KACHROO R, LIANG G . River flow forecasting: Part 2 . Algebraic development of linear modelling techniques [J] . Journal of Hydrology, 1992, 133(1/2): 17–40 .
- [53] BUTTS M B, PAYNE J T, KRISTENSEN M, et al . An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation [J] . Journal of Hydrology, 2004, 298(1/4) : 242–266 .
- [54] 华罗庚, 苏步青 . 中国大百科全书·数学 [M] . 北京: 中国大百科全书出版社 . 1988 .
- [55] ANDREASSIAN V, LERAT J, LOUMAGNE C, et al . What is really undermining hydrologic science today? [J] . Hydrological Processes, 2007, 21: 2819–2822 .
- [56] KLEMES V . Delettantism in hydrology: Transition or destiny? [J] . Water Resources Research, 1986, 22: S177–S188 .
- [57] KIRCHNER J W . Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology [J] . Water Resources Research, 2006, 42: W03S04 .
- [58] POPPER K R . The logic of scientific discovery [M] . New York: BASIC BOOKS . 1962
- [59] POPPER K R . Conjectures and refutations [M] . New York: Routledge Classics . 2005

- [60] HAINES-YOUNG R H, PETCH J R . Multiple working hypotheses: equifinality and the study of landforms[J] . Transactions Institute of British Geographers, 1983, 8: 458-466 .
- [61] von BERTALANFFY L . General System Theory: Foundations, Development, Applications[M] . New York: George Braziller . 1968 .
- [62] HAMILTON S . Just say NO to equifinality[J] . Hydrological Processes, 2007, 21: 1979-1980 .
- [63] KUHN T S . The structure of scientific revolutions[M] . 3rd ed . London: University of Chicargo Press, 1996 .

Cognition in the uncertainty and equifinality of hydrological model: a systematic review

YANG Xiaoliu, WANG Yizhen

(Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This paper reviews the cognitive processes of uncertainty and equifinality to understand the idea debates on hydrological models. It briefs various doctrines on uncertainty sources, summarizes the supporting and opposing views of the discussion and analyzes the hotspots and trends of relevant research work. It also conducts an analysis on the equifinality of hydrological model in terms of academic background, research progress, main achievements and challenges faced. In the regards of the four-source doctrines, hydrology marginalization, minority views and equifinality, it comments on different points of view concerning uncertainty and equifinality and gives some reflections on the epistemology and methodology adopted by different research schools.

Keywords: hydrological model; uncertainty; equifinality

(责任编辑: 李 琳)