

数据密集范式与水文学的未来

芮孝芳

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:讨论了水文实验客观上的局限性及进一步发展的困难,论述了提升水文观测技术和方法的重要性及重点发展的若干方面。在分析科学研究数据密集范式产生背景及其强大生命力的基础上,指出水文学研究适合应用数据密集范式的理由,并提出了初步设想。呼吁水文学家应抓住机遇,在大力、深入发展水文遥感的同时,将发展数据水文学提上议事日程,摆到重要位置。展望未来,水文学将是在数据密集范式驱动下,物理水文学、随机水文学、仿真水文学和数据水文学相互补充、融合发展的水文学。

关键词:数据密集范式;物理水文学;随机水文学;仿真水文学;数据水文学;水文遥感

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)06-0001-07

Hydrology future and data-intensive paradigm//RUI Xiaofang (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The objective limitations and the difficulties of further development in hydrologic experiments are discussed. The importance of improving hydrologic survey techniques, methods and some key development aspects are also discussed. The reasons that the data-intensive paradigm is applicable to hydrology study are pointed out, and a tentative idea is suggested based on the analysis of the background of data-intensive paradigm in scientific research and its great vitality. Hydrologists are appealed to take the chance to put data hydrology on the agenda and in an important position, while at the same time, to develop hydrological remote sensing energetically and deeply. In the future, under the driving force of data-intensive paradigm, hydrology will be mutual complementation and integrative development with physical hydrology, random hydrology, simulation hydrology and data hydrology.

Key words: data-intensive paradigm; physical hydrology; random hydrology; simulation hydrology; data hydrology; hydrologic remote sensing

任何一门学科都会不失时机地为着自身的发展去寻找合适之路,水文学也不例外。伴随着现代科学逐步成长起来的水文学,经过 300 多年的吐故纳新,在认识水文现象,揭示其形成机理,探索水文现象和水文特征值时空变化(演变)特点和规律,解决经济社会发展中出现的水文问题等方面都取得了丰硕的成果,已形成拥有众多分支学科的学科群^[1]。然而,这只是“回头看”得到的印象。如果“往前走”,那么结论就不是这样了。水文学发展到现在面临的主要困难是:历经了半个多世纪轰轰烈烈岁月的流域水文模型为什么没有多少实质性进步?为什么提高短期洪水预报精度如此困难?经过若干年努力,为什么江河流域仍主要使用经验相关法而不使用流域水文模型作洪水预报?为什么近代发展起来的

的时间序列分析理论和方法用于揭示水文特征值年际演变特点和规律难以奏效?为什么中长期水文预报的发展举步维艰?对认识、揭示水文现象形成机理起过重要作用的水文实验为什么“辉煌”不再?即使愿意花费巨资为什么还是没有让它再次“火”起来?为什么至今仍不能通过水文实验来揭示水文特征值年际演变特点和规律?世界科技发展,一日千里,日新月异,先进的观测技术和方法像雨后春笋般涌现,人类观测自然现象的能力迅速增强,科学研究范式也在与日俱进。笔者认为,水文学家只有尽力将人类科技宝库中积累的丰富资源为我所用,才可能使水文学从困境中走出来。本着这样的信念,本文试图通过“水文实验客观上的局限性”、“提升水文观测技术的重要性”、“呼之欲出的数据密集范

式”、“值得期待的数据水文学”、“从范式融合中寻求未来之路”等问题的讨论,阐述水文学未来的愿景。

1 水文实验客观上的局限性

“实验”开启了现代科学之门,是科学研究中发现问题、认识机理、探索和验证规律的基本而重要的手段。它对物理学、化学、生命科学等的发展,贡献巨大而持久。水文实验对水文学早期发展也曾起过重要的作用。明渠水流的 Chezy 公式和 Manning 公式、地下水运动的 Darcy 定律、植物截留、下渗和蒸散发的机理等都是经过无数次实验总结出来的。20 世纪中叶,水文实验曾经有过持续数十年的辉煌,例如:20 世纪 50~60 年代水利化、水土保持、城市化等水文效应的揭示;1963 年 Hewlett 等^[2]根据土槽试验证明非饱和侧向流的存在,并指出这是维持河流枯水期水流的主要机制;1970 年 Zaslusky 等^[3]通过野外试验也证实了非饱和侧向流的存在。这些都是水文实验的闪光点。1974 年出版的《山坡水文学》^[4]曾详细给出了 Dunne 设计的具有相对不透层的包气带的产流实验装置,记载了 Dunne 发现壤中径流和饱和地面径流的精彩片断。Dunne 通过实验对壤中水径流和饱和地面径流形成机理的揭示使 Horton^[5]1935 年提出的产流理论得到了完善,也导致了新安江流域水文模型^[6]的产流结构从“二水源”结构发展到“三水源”结构。但自 20 世纪 80 年代以来,试图通过水文实验推动水文学发展变得越来越困难,希望通过振兴水文实验破解水文学发展中遇到的一些难题未能如愿,水文实验似乎到了寸步难行的境地。借助实验发现问题、认识机理、探索和验证规律的难度越来越大。虽然这是许多学科面临的问题,带有一定的普通性,但像水文实验那样几乎到了寸步难行的境地却并不多见。

自然界发生的水文现象,林林总总,其中有的比较单纯,例如降水、植物截留、填洼、蒸散发、下渗、地面水流、地下水流、洪水波等,一般称之为基本水文现象。有的水文现象涉及到两个或两个以上基本水文现象,例如流域产流、流域汇流、流域降雨径流形成等,一般称之为复合水文现象。年径流量、年最大流量、年最小流量、年最高水位、年最低水位、时段洪量、时段枯水量、年降水量、时段雨量、年蒸发量、流域(区域)平均降雨量、流域(区域)平均蒸散发量、流域(区域)平均土壤含水量等,则是从基本水文现象或复合水文现象的时间变化或空间分布中提取的特征,一般称之为水文特征值。基本水文现象的形成机理,一般虽能通过水文实验予以认识或得以验

证,但将所揭示的规律或获得的参数移用于自然界,由于影响因素的复杂性,转换就十分困难了。用水文实验揭示复合水文现象形成机理,难度则远大于基本水文现象,而且将这样的实验结论推广到实际流域更是困难重重。至于试图通过水文实验揭示水文特征值的年际演变特点和规律,就几乎不可能了。

水文实验难以推动水文学深入发展的根本原因是承载水文现象的介质十分复杂。许多水文现象都要受到下垫面的作用,例如暴雨洪水,具有一定时空分布的暴雨只有在流域下垫面的作用下才能形成流域出口断面的洪水过程,假设没有下垫面作用,那就没有洪水,或者说洪水过程就是暴雨过程,可见下垫面对许多水文现象的形成和变化有着重要的影响。下垫面是地形、地貌、土壤、植被、河湖、湿地、地质条件、水文地质条件、土地利用等的总称。下垫面的复杂性不仅表现在它的组成多样,而且表现在它的空间变异极其复杂。对于有一定空间范围的下垫面,例如流域,总可以设想它是由无穷多个空间点集合而成(图 1)。容易理解,在水文现象形成过程中每个空间点对它的影响将不可能完全相同,而且空间点之间还可能存在一定的相互作用。由于水文实验不可能做到覆盖每个空间点,也无法考虑空间点之间的相互作用,因此,试图通过空间范围内少数一些点的水文实验达到精细、精准揭示流域中发生的水文现象的机理和时空变化特点或规律,几乎是不可能的。对于水文特征值的年际演变,由于是一个时间上无限延伸的问题,至今连进行水文实验的基本思路都还没有找到。

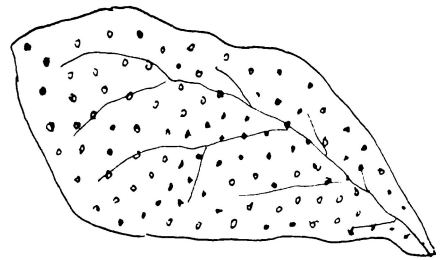


图 1 由无穷空间点集合而成的流域

水文学的发展需要实验支持,这已为事实所证明,但水文现象的特殊复杂性又使得依赖水文实验发展水文学十分困难。

2 提升水文观测技术的重要性

水文学的研究对象是自然界发生的水文现象和从中提取的水文特征值。水文学的研究任务是揭示水文现象形成机理,寻求水文现象和水文特征值的时空变化特点及规律。因此,对自然界发生的水文现象进行观测,取得其时空变化数据,然后设法去揭

示其形成机理,寻求水文现象和水文特征值时空变化特点和规律,也必然成为水文学研究途径之一。这与天文学、大气科学、海洋学等十分类似。这种研究途径与水文实验之不同在于,根据水文观测认识、研究水文现象是“被动”的,而通过水文实验认识、研究水文现象往往是“主动”的。天文学为什么常有新发现?数值天气预报为什么近年来进步较快?海洋学为什么也比水文学有起色?这都与天文、气象、海洋等的观测技术和方法的显著进步分不开。

其实,很早以前人们就知道水文观测对认识水文现象的重要性了。例如中国在距今 4 000 多年前的 大禹治水时期就有“随山刊木”的记载。所谓“随山刊木”,就是在水中立木进行水深测量,这是一种原始测量水深的方法。但长期以来,水文观测技术和方法的发展迟缓于天文、气象、海洋等观测。直到今天,水文观测项目仍主要局限于雨量、水位、流量、含沙量、蒸发器(皿)蒸发等;对下垫面条件的观测或者缺乏,或者粗糙;而且获取空间分布的手段仍主要建立在 对有限离散点观测的基础上。像水文学这样较强依赖于观测数据的学科,观测技术和方法的落后,掌握到的观测数据不完整、不充分、不密集,以及处理海量数据能力的薄弱,就如“巧媳妇难为无米之炊”,几乎很难得到进一步的发展和提高。

鉴于提升水文观测技术的必要性、重要性和迫切性,笔者提出如下几点建议:①应着力研制直接观测蒸散发量的技术和方法。现在的实际情况是:由水位站、流量站、雨量站、气(地)温观测点、土壤含水量观测点等测得的均为所在地点的实际出现值,唯独蒸发站测得的不是所在地点的蒸散发量,而是放置在此处的蒸发器(皿)的蒸散发量。由于这个缘故,人们有理由对水文学的某些结论提出质疑。例如在水体或区域或流域水量平衡分析中,因为蒸散发量没有直接观测值,故平衡结果必然将所有的误差统统计入蒸散发量之中,这样不仅不能正确评价降雨量和流量的观测误差和计算误差,而且影响水量平衡的真实性,也不利于对水体或区域或流域蒸散发量的时空变化规律进行客观揭示。设想如果有了观测水体或区域或流域上空输入和输出水汽量的技术和方法,那么直接测定水体或区域或流域蒸散发量就有了可能。②应着力研制能在空间上实现连续观测的技术和方法。很多水文现象不仅随时间变化,而且在空间上也呈连续变化。对水文现象时间上连续变化的观测已由“自记”技术和方法解决。但对水文现象空间上连续变化的观测,长期以来主要沿用布设站网或观测点来获取的思路,试图通过所谓“代表性”较好,甚至是“最优”的站网或采样点

来达到掌握水文现象空间连续变化的目的。这种传统的获取水文现象空间连续变化的思路和方法现在几乎陷入困境,因为依赖站网或采样点加密来达到掌握水文现象空间连续变化的思路和方法本质是一个极限问题,而不是一个“最优”问题,只有当站点的空间分布没有间隙时才能得到水文现象真实的空间分布,而这是布设站网或采样点的方法不可能做到的。③应将下垫面条件的时间变化和空间变异作为必须的水文观测项目。以流域降雨径流形成为例,降雨的时空分布是驱动因子,而流域下垫面条件时空变化是影响因子。两者对流域降雨径流形成都很重要。只掌握了降雨的时空分布,而不知流域下垫面当时的情况,也就不可能对未来产生的洪水情况作出合理或正确的预报。在水文观测中亟待改变那种只有“雨、水、流、含”,没有下垫面信息的局面。④应着力发展水文遥感,开发遥感理论和技术在水文观测中的应用。遥感的优势在于能频繁而持久地提供地表特征和发生于地表的一些水文现象的面状信息,这对于传统的以稀疏离散点为基础的对地观测手段是一场革命性变化。实现水文现象和下垫面条件空间连续变化的观测,最好的选择也许就是大力发展水文遥感^[7],而对于流域范围,采用无人机作为遥感搭载平台也许具有更明显的优势^[8]。

3 呼之欲出的数据密集范式

自然科学与技术发展史是一部记载人类认识自然、理解自然、寻求自然规律的历史,也是一部科学研究范式的发展史^[9]。“范式”是指成为一种模式,可以直接套用的特定方案或路线。科学研究范式就是可以用于进行科学研究的套路。

众所周知,欧洲文艺复兴是人类从相信神到相信科学的转折点。伽利略在这一时期所做的著名的自由落体实验开创了“实验范式”的先河。得益于希腊哲学家创立的形式逻辑,差不多在同一时期,“理论范式”应运而生。在科学发展的早期,实验范式与理论范式结合得如此完美,以致给人一种印象,不仅通过实验可以发现理论,而且任一理论的提出都能容易地被实验证实。牛顿力学定律就是这种完美结合的典型例子。实验范式和理论范式的双双出现使 17 世纪至 19 世纪末自然科学得到空前繁荣。20 世纪初由理论范式创立的量子力学和相对论直到很久以后才被所设计的复杂的实验装置证实的事实,使科学家开始意识到用实验验证和发现自然规律的艰巨性。随着科学研究的深入,用实验验证和发现自然规律的难度必然越来越大。仅依靠实验范式和理论范式的结合去认识、揭示更加复杂的自然

现象的发生机理和变化特点及规律已越来越力不从心。电子计算机的发明和迅速发展,使人们看到超凡的电脑已超越了实验,从而在 20 世纪中叶产生了科学研究的“仿真范式”。仿真范式的基本思想就是利用电子计算机对自然现象的形成和变化进行仿真模拟,通过对自然现象的建模和模拟,将自然现象的变化解释为一种计算过程,或者将对物理性质的研究视为一种计算结果。由于仿真范式具有通用、灵活、省时、投入少等特点,现在在许多情况下已替代了实验范式而成为一种常用的科学研究范式。在进入互联网时代的今天,由先进的观测技术和方法获取的关于自然现象形成机理和时空变化的数据呈现爆炸式的增长,密集的数据既能精细、精确地描述现象之“因”,也能精细、精确刻画现象之“果”,于是一种由仿真范式发展而来,但仿真范式又不能替代的新的科学研究范式即“数据密集范式”悄然而至,呼之欲出。

数据密集范式的基本理念是认为对自然现象观测获得的数据是其形成与时空变化的记录。因此,通过对观测数据的分析将能认识其形成机理,探索其时空变化特点或规律。令 X 为密集数据, Y 为自然现象的形成机理或时空变化特点或规律,则数据密集范式可表达为:

$$Y = \psi(X) \tag{1}$$

式中: $\psi(\cdot)$ 表示一种算法。

由式(1)可知,利用数据密集范式进行科学研究必须具备两个条件:①必须拥有全面、丰富、精确、密集的关于自然现象“因”与“果”的观测数据;②必须具有能够从海量数据中挖掘出自然现象发生机理和时空变化特点或规律的算法。对于数据密集范式,“数据”是基础,是主体,必须用科学的方法获取、分析和存储数据。“算法”也很重要,算法跟不上,数据的价值就会大打折扣。

数据密集范式法与仿真范式虽然都是由于电子计算机的发明和发展而产生的科学研究范式,但两者具有本质上的区别。仿真范式是先提出可能的理论,并构建模型,再收集有关数据,然后通过计算仿真对提出的理论进行验证。借助流域水文模型揭示流域降雨径流形成机理和时空变化特点或规律就是典型的仿真范式。数据密集范式则不同,它是先有了大量、完备的对自然现象的观测数据,然后通过数据挖掘,得出未知的理论。仿真范式主要利用电子计算机的计算仿真功能,而数据密集范式则主要发挥电子计算机强大的存储数据、精细识别的功能。

自然现象的发生总是有原因的,越是复杂的现象,发生的原因就越复杂。揭示自然现象发生的因

果关系,除了一些简单情况外,都不容易,甚至困难重重。为揭示并导出自然现象发生的因果关系,一般根据先前对它的认识,尽可能对发生原因进行分析、分解,然后建立一些定律或经验公式,并进行必要的推导。但先前的认识,也许并不完善,甚至可能有意无意地忽略了一些比较重要的原因。因此,只有更全面、完整、时空密集的观测数据才能将精确的因果关系隐含于其中,也只有根据这样的数据挖掘出的规律,才有可能对现象作出科学的预测。这就是相对于实验范式、理论范式和仿真范式而言,数据密集范式的重要意义之所在。

尽管实验范式、理论范式、仿真范式和数据密集范式都属于因果论范畴,但具体的思维方式是有区别的。实验、理论和仿真范式的思维方式是“由因求果”,而数据密集范式是“由果倒因”。“由因求果”,遵循因果顺序,是“顺向思维”,在数学物理上属于解“正问题”。“由果倒因”,由于逆因果顺序,故称为“逆向思维”,在数学物理上属于解“反问题”。在不同范式中数据起的作用并不相同。对于实验、理论和仿真范式,数据主要用于验证,一般不需海量数据;而对于数据密集范式,因要依赖数据揭示现象的发生机理和时空变化规律,故只有密集的海量数据,才能保证从观测数据中捕捉到现象发生的机理和时空变化特点或规律的完整痕迹。

数据密集范式表明,随着观测自然现象的技术和方法不断进步,一场新的科学思维方式的变革必将到来。

4 值得期待的数据水文学

数据密集范式给正感到有点迷茫的水文学带来了新的机遇。笔者曾在“水文学与大数据”^[10]一文中指出:人们通过观测得到的自然现象时空变化数据,实际上是描述其时空变化规律的微分方程在一定初始条件和边界条件下的解。虽然根据迄今为止人们所积累的知识还不能导出这个微分方程式,也不知道精确的初始条件和边界条件是什么,甚至永远无法导出这个微分方程及精确的初始条件和边界条件,但它的解却被人们真真切切地捕捉到了,这就是观测数据。由此,人们是否应当改变一下思维方式,从观测到的现象的时空变化数据入手,也就是从描写现象时空变化所遵循的微分方程在一定初始条件和边界条件下的一个个解入手,达到描述其时空分布,揭示其时空变化规律,预测预报其未来状态的目的。大数据也许是实现这种逆向思维,由果寻因的有效途径之一。建立微分方程原本不是目的,而是揭示现象时空变化规律的一种手段。大数据将会

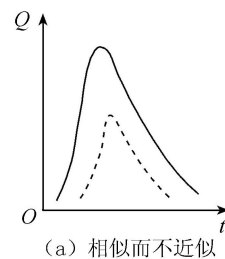
成为解决传统科学思维方式难以解决,甚至无法解决的复杂自然现象规律问题的方法。笔者还尝试提出了一些应用大数据方法揭示流域降雨径流形成机理的具体方法^[11-12]。

由水文学知,一个流域积累的降雨、蒸发、流量、土壤含水量等观测数据,以及所掌握的下垫面特征和人类活动信息是该流域过去和现在降雨径流形成的因果关系的真实记录。如果流域已经积累了 n 场完整的降雨及其所形成的出口断面流量过程的观测数据,那么就是得到了描写该流域降雨径流形成规律的微分方程在 n 种初始条件和边界条件下的解。 n 越大,所掌握的该流域降雨径流形成的信息就越丰富,未来将发生的情况就越有可能从历史观测数据中找到。当 n 大到大数据级别时,这种可能性就几乎接近必然性了。

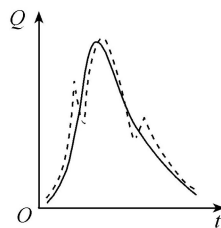
在科学实验中,只要实验条件完全相同,实验结果是能重现的。同样,在对自然现象的长期观测中发现,在完全相同的条件下,现象也是能重现的。这似乎是一个自然法则。因此,对于流域降雨径流形成,只要降雨、蒸发等的时空分布相同,下垫面情况、人类活动影响、初始条件等也相同,其所形成的出口流量过程也会相同;如果所有的条件只是近似相同,那么形成的出口断面流量过程也近似相同。据此,可将基于数据密集范式求解流域降雨径流问题的基本思路设想为:首先将一个流域历史上发生的所有场次洪水的降雨时空分布、蒸发时空分布等,以及相应的出口断面流量过程从观测资料中提取出来;其次将每场洪水发生时的下垫面情况、人类活动信息、初始条件分析整理出来;第三,建立专门数据库,将所提取的每场洪水的全部数据编辑加工后存储在其中。如果要进行洪水预报,那么只要给出面临的实测暴雨和蒸发的时空分布,或者预报暴雨和蒸发的时空分布,以及面临的下垫面情况、人类活动信息、初始条件等就可从数据库中找到答案。如果所有历史数据和信息均可以图形或影像的形式存储,那么不仅直观,而且可以避免遥感反演的麻烦和所引起的误差。

将相同或近似相同条件形成的流域出口断面流量过程的相同或近似相同说成是水文相似性是不合适的。图2以流域出口断面流量过程为例给出了“相似性”与“近似性”两个概念的区别,即相似不一定近似(图2(a)),近似不一定相似(图2(b)),既相似又近似则比较罕见。数据密集范式追求的结果显然是相同或满足一定精度的近似,而非以相似性唯是。

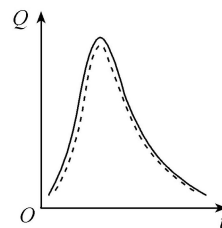
与仿真范式相比,用数据密集范式处理流域降



(a) 相似而不近似



(b) 近似而不相似



(c) 既相似又近似

图2 同一流域两次洪水过程的比较

雨径流形成问题,既不需要模型结构和参数,也不必率定模型参数,几乎完全避开了构建或选择模型结构的纠缠和率定参数的困扰,而且这样得到的结果在物理上具有直观性,对误差来源的认识也更为直接。

5 从范式融合中寻求未来之路

科学研究范式的与时俱进,使水文学能从中吸取养分,赢得自身的发展。早在17世纪中叶就有了基于实验范式和理论范式的水文学研究成果出现,并逐步形成基于确定性思维的水文学。这一时期的水文学,主要以实验来认识和揭示水文现象形成机理,以物理归纳、数学推导来导出动态规律,以观测数据来验证结果的正确性,故称为物理水文学,也有称确定性水文学的。Eagleson撰写的《Dynamic Hydrology》^[13]是物理水文学的代表性著作之一。物理水文学在发展中遇到的困难主要是面对空间变异十分复杂的水文现象不能以满意的精度揭示其规律。20世纪20年代,Hazen将概率引入水文学,试图通过观测数据揭示水文现象和水文特征值的统计规律,从而逐步形成以概率论、数理统计、随机过程、时间序列分析等为基础,基于不确定性思维的水文学即统计水文学和随机水文学。Yevjevich撰写的《Probability and Statistics in Hydrology》^[14]和《Stochastic Processes in Hydrology》^[15]是这方面的代表性著作。这种建立在概率基础上的不确定性思维,在揭示水文现象和水文特征值的统计规律时都有必需的假设:频率计算要求样本独立、同分布;时间序列分析要求一次现实应具有各态历经性。由于至今仍无法验证这些假设是否能满足,因此所得结果常常使人们在相信与疑惑之间犹豫。目前仅在确

定水利工程和其他涉水工程的设计标准中得到广泛应用。仿真范式的出现与电子计算机的诞生和发展密切相关。仿真范式问世后,许多学科纷纷将本学科的成就与计算机科学结合起来,从而产生了形形色色可应用于本学科的仿真模型,解决了一些依靠实验范式和理论范式不易解决的问题。在这种背景下,1966 年在美国 Stanford 大学诞生了世界上第一个流域水文模型即 Stanford 流域水文模型^[16]。这是一种将有关基本水文现象组装成可以仿真模拟流域降雨径流形成的结构。原型中发生的现象可通过驱动模型复现是仿真范式的基本特点。为适应流域水文模型的研制和应用,仿真水文学应运而生。仿真水文学又称模型水文学。但模型毕竟是原型的概化或近似,它不可能将原型的一切特征都精细、精确地刻画出来,尤其像流域降雨径流形成这样复杂的水文现象,而且在模型研制和应用中遇到的问题许多都属于反问题,例如模型参数率定就是一个典型的反问题。反问题一般是不适定的,而不适定就会带来求解的困难^[17-18]。凡此种种,就使得流域水文模型的发展道路并不平坦。

不同的科学研究范式是用不同的思维和方法揭示自然现象形成机理及时空变化特点或规律的。在观测技术和方法落后的情况下,要想通过观测数据对自然现象进行客观、正确的认识是困难的,因此,人们只能对那些不需要太多观测数据就能予以认识的简单、直观的现象,采用实验与理论相结合的范式或者仿真范式来揭示其形成机理及时空变化特点或规律,少量的观测数据主要用于对所获得的结论进行验证。但是,自然界总会存在一些复杂的现象,仅依靠实验、理论和仿真范式是难以、甚至不可能揭示其形成机理及时空变化特点或规律的。之所以出现这种情况,是因为人们对这类自然现象的观测还不够全面、不够密集、不够精确。设想一旦观测技术和方法的进步能获得自然现象的全面、密集、精确的观测数据,人们借助这样的观测数据就能加深对自然现象的认识,进而达到揭示其形成机理及时空变化特点或规律的目的。通过对自然现象的观测获得的数据原本就是其形成机理及时空变化特点或规律的记录,因此,只要积累了全面、密集、精确的对自然现象的观测数据,利用这样的数据来认识、揭示自然现象的形成机理和时空变化特点或规律是顺理成章的。在水文学研究中,当采用实验、理论、仿真等范式遇到困难时,选择数据密集范式是一种必然。据此产生的新水文学可称为数据水文学。

在水文学的发展历史上,曾经有一种观点,一门学科的发展如果强烈地依赖于观测数据,一般就认

为它缺乏理论性或理论水平不高。现在看来,这是一种偏见。在观测技术和方法越来越先进、观测数据呈爆炸式增加的时代,唯有在海量数据的支持下,实验、理论、仿真、数据密集等范式的互补融合,才能解决更复杂的科学问题,才是最高的理论水平。这应该是水文学发展可选择之路。

6 结 语

世界是物质的,也是数据的。自然现象的形成和变化都会留下踪迹,并可被观测,最终都可以用数据的形式记录下来。因此,密集的观测数据本质上是自然现象形成机理和时空变化特点或规律的精细且不失真的描述,其中必然隐藏着自然现象形成机理和时空变化特点或规律。但仅凭人类的感官来感知并获得这样的数据是十分有限的,一般不可能对复杂自然现象进行深入认识。科学技术发展到今天,人们对自然现象进行观测的技术和方法有了巨大的进步,可以替代或延伸人类感官的科学仪器仪表不断发明,精度不断提高;搭载这些仪器仪表的工具不仅已进入太空,而且正在进入地球的每个角落;观测数据呈爆炸式增加。因此,直接借助密集数据精细、精确地描述自然现象时空分布,揭示自然现象形成机理和时空变化特点或规律已不再是遥远的梦想。从这个意义上说,数据密集范式出现在当代,既是必然,是进步,也是回归。

水文现象的复杂性,使得实验范式受到极大限制,理论和仿真范式也面临一些难以克服的困难,但却能与数据密集范式对上号。事实上,水文学发展史中已有这方面的记载,例如:世界上两大自然灾害带的揭示^[19],胡焕庸^[20]线及其与中国 400 mm 等雨量线基本一致的发现,蓄满产流模式的发明^[21],Mushungum 法理论的建立^[22]等无不闪耀着数据密集范式的光辉。水文学遇上数据密集范式实属千载难逢,抓住这个机遇,发展数据水文学,是当代水文学家的责任担当。

水文学的发展已入佳境。未来的水文学将是物理水文学、随机水文学、仿真水文学和数据水文学相互补充、融合发展的水文学。

参考文献:

- [1] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [2] HEWELTT J D, HIBBERT A R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during dratinage[J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68 (4) : 1081-1087.
- [3] ZASLAUSKY D, SINAI G. Surface hydrology[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1981, 107 : 1-93.

[4] 柯克比基尼 M J. 山坡水文学[M]. 刘新仁,王炳程,译. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.

[5] HORTON R E. Surface runoff phenomena[R]. Detroit: Horton Hydrology Laboratory Publication,1935.

[6] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社,1984.

[7] 刘元波,吴桂平,柯长青. 水文遥感[M]. 北京:科学出版社,2016.

[8] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展及应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):505-513. (LI Deren, LI Ming. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2014,39(5):505-513. (in Chinese))

[9] 邓仲华,李志芳. 科学研究范式的演化[J]. 情报资料工作,2013(4):19-23. (DENG Zhonghua, LI Zhifang. The evolution of scientific research paradigm[J]. Information and Documentation Services, 2013 (4): 19-23. (in Chinese))

[10] 芮孝芳. 水文学与“大数据”[J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):1-4. (RUI Xiaofang. Hydrology and big data [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(3):1-4. (in Chinese))

[11] 芮孝芳. 随机产汇流理论[J]. 水利水电科技进展,2016,36(5):8-12. (RUI Xiaofang. Random theory of runoff yield and flow concentration [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (5): 8-12. (in Chinese))

[12] 芮孝芳. 单元嵌套网格产汇流理论[J]. 水利水电科技进展,2017,37(2):1-6. (RUI Xiaofang. Theory of runoff yield and confluence by grid inlaid in watershed basic unit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(2):1-6. (in Chinese))

[13] EAGLESON P S. Dynamic hydrology [M]. New York: McGraw Hill,1970.

[14] YEVEJEVICH V. Probability and statistics in hydrology [M]. Fort Collins:Water Resources Publications,1972.

[15] YEVEJEVICH V. Stochastic processes in hydrology [M]. Fort Collins:Water Resources Publications,1972.

[16] CRAWFORD N H, LINSLEY R K. Digital simulation in hydrology:Stanford Watershed Model IV [R]. Palo Alto, CA:Stanford Universtiy,1966.

[17] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):1-7. (RUI Xiaofang. Discussion of watershed hydrological mode[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(4):1-7. (in Chinese))

[18] 芮孝芳. 对流域水文模型的再认识[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):1-8. (RUI Xiaofang. More discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):1-8. (in Chinese))

[19] 仪垂祥,史增军. 熵产生和自然灾害[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),1994,30(2):276-280. (YI Chuixiang, SHI Peijun. Entropy production and natural hazards[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),1994,30(2):276-280. (in Chinese))

[20] 胡焕庸. 中国人口之分布:附统计表与密度图[J]. 地理学报,1935,2(2):33-74. (HU Huanyong. The distribution of population in China, with statistics and maps[J]. Acta Geographica Sinica,1935,2(2):33-74. (in Chinese))

[21] 赵人俊. 赵人俊水文预报文集:降雨径流关系的区域规律[M]. 北京:水利电力出版社,1994.

[22] 芮孝芳,张超. Muskingum 法的发展及启示[J]. 水利水电科技进展,2014,34(3):1-7. (RUI Xiaofang, ZHANG Chao. Development and inspiration of Muskingum method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(3):1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2018 - 04 - 03 编辑:郑孝宇)

• 简讯 •

第二届水利水电工程安全学术研讨会在河海大学召开

10月6日,第二届水利水电工程安全学术研讨会在南京河海大学召开。中国工程院院士吴中如教授、中国工程院院士王景全教授,河海大学党委书记唐洪武教授、校长徐辉教授等出席会议。唐洪武教授指出水利水电工程是调控水资源时空分布、优化水资源配置最重要的工程措施,其安全运行对于保障国家经济社会可持续发展具有重大意义。河海大学作为我国水利高等教育的发源地,始终秉承治水兴邦的历史使命,坚持面向国家重大需求,在水利水电工程安全监控、健康诊断、风险评定等方面广泛开展科技攻关,形成了以吴中如院士领衔的高水平学术队伍,取得了一系列创新性研究成果,为保障国家水利水电工程安全作出了突出贡献。

会上,顾冲时教授、李季教授、沈振中教授、何勇军教授、蔡新教授、马福恒教授分别作“重大水工程安全保障理论和技术”“李家峡高拱坝长期运行反馈分析”“水库大坝除险加固效果的量化评价”“长距离调水工程安全运行保障关键技术研究进展”“农村小水电新型水工结构及降损技术研究”“典型发达国家大坝安全监管机制分析及启示”主旨报告。其主要研究成果已刊登于CSCD核心、全国中文核心期刊《水利水电科技进展》2018年第5期“庆贺吴中如院士80华诞专刊”中。

(陈波供稿)