

97-101

第25卷 第4期
1997年8月西北农业大学学报
Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalisVol. 25 No. 4
Aug. 1997

19

论水文系统混沌特征的研究方向

冯国章

李佩成

(西北农业大学农业水土工程研究所, 陕西杨陵 712100)

(西安地质学院水文地质与工程地质系, 西安 710054)

摘要 简要介绍了混沌的概念, 回顾了水文系统的混沌研究进展, 从哲学上论证了水文系统混沌演化的普遍性, 指出当前水文系统混沌研究的重点应该是探索水文系统混沌演化的普遍性, 揭示水文系统混沌演化的成因机理和基本规律及其因果关系, 提出了宏观、中观和微观时空尺度相结合, 理论分析和计算机模拟相结合的水文系统混沌研究方法, 讨论了形成混沌水文学的可能性。

关键词 水文系统, 混沌, 混沌特征, 非线性科学, 哲学, 自组织理论, 混沌水文学

中图分类号 P33

水文系统是一个开放的、复杂的巨系统, 同时又是一个动态的非线性复合系统。一方面, 它是地球大气圈环境内相互作用和相互依赖的若干水文要素组成的具有水文循环与演化功能的整体, 另一方面, 它又受地球自身及宇宙不可抗拒的自然力的作用及不同程度的人类生产活动影响, 从而形成了水文系统复杂的演化规律——确定性、随机性和混沌性规律。然而, 由于哲学观和科学技术方法论的限制, 长期以来, 人们一直用传统的确定性方法或随机性方法, 或二者结合的方法来描述水文过程, 得以揭示的是水文系统的确定性规律和外在随机性规律, 而运用混沌理论及其分析方法对水文系统演化的混沌性规律的研究则刚刚开始, 认识还很肤浅, 需要研究的问题还很多。本文试图在简要阐述混沌概念、回顾现有的水文系统混沌研究成果的基础上, 分析论证水文系统混沌演化的普遍性及其研究方向。

1 水文系统的混沌研究进展

混沌学说源于我国古代。混沌生太极, 太极生两仪, 两仪生四象, 四象生八卦, 八卦演化世间万事万物的我国古代哲学观, 精辟地概括了事物的混沌演化规律。当代混沌的科学研究, 始于六十年代, 以美国气象学家 Lorenz^[1]于 1963 年在《大气科学学报》上发表其著名论文“确定性的非周期流”为开端。研究表明^[2~6], 一些完全确定的非线性动力系统, 甚至一些由确定性方程描述的简单系统, 在一定条件下可表现出极为复杂的、貌似无规的类随机运动。人们把确定性非线性系统由于系统内部非线性相互作用所产生的貌似无规的类随机现象称为混沌(chaos)。混沌理论为人们在研究系统演化规律的确定论和概率论之间架起了一座桥梁, 已成为非线性科学及其自组织理论的重要组成部分, 形成了混沌动力学、混沌工程学、混沌经济学、混沌医学等许多重要混沌分支学科, 被成功地应用于包括自

收稿日期 1997-03-18

课题来源 陕西省自然科学基金资助项目

作者简介 冯国章, 男, 1950 年生, 副教授

然科学和社会科学在内的众多科学领域^[2,3,7,8~14]。混沌理论被认为是当代科学革命的重大成就之一,具有划时代的哲学意义和科学意义^[15,16]。用混沌理论研究水文系统的演化规律,对水文科学的发展同样具有十分重要的意义。

混沌理论在水文学中的应用起步较晚,但也取得了一些进展。在国外,Rodriguez-Iturbe等^[17]分析了美国波斯顿一次自记暴雨过程,发现其具有一定的混沌特性,进而讨论了混沌理论在水文学中应用的潜力。Wilcox等^[18,19]分析了美国爱达华 Reynolds 山流域(0.4 km²)的 24 年逐日融雪径流过程,以寻求其混沌特性。Rodriguez-Iturbe等^[20]在气候尺度上建立了一个非线性土壤水动力系统模型,从理论上作了有益的混沌分析,揭示出大尺度土壤水动力系统复杂的混沌演化规律。Jayawardena等^[21]对香港一些日降水和径流序列的混沌特征作了分析和预测。王文均等^[22]对长江干流 5 个水文站的年径流序列的混沌特性作了定量分析,发现长江干流年径流序列的相空间维数和正 Lyapunov 指数呈上游大下游小的规律,说明长江年径流具有混沌特性,而且随流域面积增大更加明显。丁晶^[23]指出,混沌分析是探索水文现象变化的新途径。傅军等^[24]对金沙江屏山水文站汛期日径流过程的混沌分析显示,洪水时间序列具有混沌动力系统的一些特性,认为看来复杂的洪水现象可能是洪水内在的非线性动力系统演化的结果。近年来,冯国章等对渭河流域一些河流不同时空尺度的河川径流过程作了混沌分析,显示出研究区各种时空尺度的径流过程具有明显的混沌特征。尽管国内外与水文学有关的主要学术刊物上尚不多见混沌理论应用于水文学的研究成果,但上述研究成果已初步显示出水文系统存在混沌。

2 水文系统混沌演化观及其哲学支持

如上所述,水文系统的混沌研究刚刚开始,现有的研究成果所揭示的水文系统的混沌演化特征只是初步和有限的,甚至是不确定的。然而,从混沌的哲学意义上讲,水文系统的混沌演化应该是肯定的和普遍的。

首先,水文系统是一个复杂的非线性系统,具有产生混沌的基本条件——对初始条件的敏感性和内在随机性。研究表明,在同一水文系统(流域),不同的初始条件会产生完全不同的水文过程。如一次暴雨过程,可能因其时空分布及流域储水条件的很小变化,而使在流域出口断面产生的洪水过程完全不同。长期以来,人们一直试图准确预报水文过程,但是,即使是采用了当前最先进的预测(报)技术,预测(报)与实际之间仍存在一定差距或误差,特别是对具有战略意义的大时空尺度水文系统预报的准确率还很低,甚至表现出不可预测性。这种误差和不可预测性,除了预测(报)技术与方法上的不足外,还可能与受水文系统内在随机性和对初始条件的敏感性的影响有关。

其次,水文系统是一个远离平衡态的开放系统,遵循着混沌→有序→新的混沌→新的有序……的自然演化的基本规律。根据耗散结构理论、协同学等非平衡系统的自组织理论,一个远离平衡态的开放系统,通过与外界交换物质和能量,从外界获得负熵流,来抵消自身的熵产生,有可能在一定条件下使系统从一种混乱无序的状态,转化成一种稳定有序的结构^[15,16]。这说明,远离平衡态的开放的水文系统的平衡和有序是有条件的、相对的,而非平衡和无序则是无条件的、绝对的。水文系统正是在平衡和非平衡、稳定和不稳定、有序和无序等的对立统一中演化的。

3 水文系统混沌研究的方向

3.1 水文系统混沌研究的关键问题

鉴于目前对水文系统混沌现象的认识的有限性,需要继续研究的问题还很多。其中,需要首先研究的关键问题有:①水文系统的混沌演化的普遍性,及混沌理论与研究方法在水文系统研究中的普适性;②水文系统混沌演化的成因机理及其形成条件——导致水文系统产生混沌的内在影响因子及其变化范围;③水文系统混沌演化的基本规律,以及表征这些规律的混沌特征量在时空尺度上变化的定量描述方法;④水文系统混沌演化的成因机理与演化规律间的因果关系的定性分析与定量描述方法。

3.2 研究方法

研究水文系统的混沌特征,解决上述关键问题,应采用宏观、中观和微观时空尺度相结合,理论分析和计算机模拟相结合的研究方法。

3.2.1 宏观、中观和微观时空尺度相结合 由于水文系统的复杂性,水文现象在不同的时空尺度上的变化十分复杂。从分形理论讲,在同一自然地理区域内,不同空间尺度的水文系统,如一个流域的各级支流与干流的地理要素与水文要素都具有自相似性。然而,事实表明,许多在微、中观时空尺度上取得的杰出研究成果很难有效地推广到宏观尺度上。这与水文系统的内在随机性——混沌不无关系。大量研究发现^[2~10],混沌的产生对系统初始条件极为敏感,在完全确定的系统中,当初始条件达到一定值时,系统行为即表现为混沌。从现有的水文混沌分析成果可以推论,在不同的流域及同一流域的不同时间尺度上引起混沌的初始条件可能不尽相同。因此,应从宏观、中观和微观时空尺度研究水文系统的混沌。它关系到从实质上弄清水文系统的可预测时空尺度等水文科学亟待解决的问题。

3.2.2 理论分析 研究水文系统的混沌演化规律与机理,理论分析至关重要。理论分析,包括辩证唯物主义哲学观和现代科学技术方法论的应用及研究对象的物理成因和数理统计分析等多方面,它既可以从哲学的高度认识问题,把握方向,又可以从具体水文系统的物理成因上分析问题,探明机理。

研究中,应运用非线性科学的理论体系——自组织理论,从哲学观和方法论阐明水文系统产生混沌的物理机制,建立反映水文系统混沌演化的理论模式,并借助非线性数学方法建立相应的数学模型。同时,在理论上建立的数学模型及其计算(模拟)结果,尚需在实践中进行检验,而这种检验应是建立在可靠的理论基础上的。特别是对从有限的现有水文资料中计算的混沌特征量描述,只有通过严密的理论分析,才能避免就事论事,牵强附会,“照葫芦画瓢”等现象,才能客观合理地评价引起系统混沌演化的影响因子及其变化范围,真正找到水文系统混沌演化的物理成因和内在规律。

3.2.3 计算机模拟 利用计算机模拟技术进行物理系统的模拟,已成为当今世界,包括水文科学在内的众多科学领域进行科学研究的有效途径和重要“实验”手段之一^[25,26]。它把在计算机应用中诞生的两门新兴学科——“计算物理”和“实验数学”相结合,对再现复杂物理系统的混沌运动极为有效。事实上,也正是由于计算机的发展和应用,以及“计算物理”和“实验数学”的诞生,才使人们发现了物理系统的混沌演化特性,在非线性科学的形成和复杂性探索中起到了关键作用。

按照常规,寻找混沌,可通过对系统主要特征动态变化的观测来确定是否观察到系统复杂的演化轨迹。但是,动态观测很难弄清系统演化轨迹到底是具有很长周期的周期行为还是非周期行为。而且,对于水文系统,目前尚不具备混沌实验的理论基础和技术条件。因此,问题就成为通过解数学模型方程来证明是否存在混沌现象。但是,事实并非这样简单,因为即使一个方程中确实存在着混沌解,通常也无法用解析方法将其简单地求出。因此,需要用计算机进行数值模拟,通过观察解的表现来判定系统是否存在混沌现象,并通过模拟来寻找引起混沌的影响因子及其影响程度。

4 结论与讨论

综上所述,混沌理论在水文科学研究中取得了一定进展,但需要研究的问题还很多。当前,应采用宏观、中观和微观时空尺度相结合,理论分析和计算机模拟相结合的研究方法,认识水文系统的混沌演化的普遍性和混沌理论与研究方法在水文学研究中的普适性;研究水文系统混沌演化的成因机理及其形成条件,水文系统混沌演化的基本规律及其定量描述方法,以及水文系统混沌演化的成因机理与演化规律间的因果关系的定性分析与定量描述方法。

回顾水文科学的发展,从本世纪五十年代把随机过程理论引入水文学而形成随机水文学概念后,很快就发展成为一门相当成熟的水文科学分支——随机水文学;六十年代提出模糊集概念后,随着模糊数学的发展又形成了模糊水文学;随着系统科学的发展及其在水文学中的应用,实际上已形成了系统水文学。现在,与研究水文系统的混沌特性有关的耗散结构理论、突变理论、协同理论、分形理论以及研究手段如计算机仿真(模拟)等,实际上已比上述水文科学分支形成和发展过程中所依赖的数学物理等基础科学和研究手段更加成熟、完善、有效。在如此坚实的基础上,开展水文系统的混沌研究,定会更加全面地揭示水文系统的基本演化规律,有力地推动水文科学的发展,并有可能形成一门新的水文科学分支——混沌水文学。

参 考 文 献

- 1 Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, 20(1): 130~141
- 2 Moon F C. *Chaotic and Fractal Dynamics: A Introduction for Applied Scientists and Engineers*. New York: Wiley, 1992
- 3 Rusband N. *Chaotic Dynamics of Nonlinear System*. New York: John Wiley & Sons, 1990
- 4 Gleick J. *Chaos: Making a New Science*. New York: Viking, 1987
- 5 Baker G L, Gollub J P. *Chaotic Dynamics*. Cambridge: Cambridge University, 1990
- 6 Ruelle D. *Chance and Chaos*. Princeton: Princeton University, 1991
- 7 王东生, 曹 磊. 混沌、分形及其应用. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995
- 8 仪垂祥. 非线性科学及其在地学中的应用. 北京: 气象出版社, 1995
- 9 刘式达, 刘式适, 谭本道. 非线性大气动力学. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 10 Weiss M D. Nonlinear and chaotic dynamics: an economists' guide. *J Agri Econ Res*, 1991, 43: 2~17
- 11 Cramer F. *Chaos and Order: the Complex Structure of Living Systems*. New York: Weiheim, 1993
- 12 Kesting R. Product Development and the Science of Chaos. *J Technol Transf*, 1993, 18: 22~31
- 13 Bianchi M M, Arizmendi C M, Sanchez J R. Detection of Chaos: a New Approach to Atmospheric Pollen Time-Se-

- ries. *Int J Biometeorol*, 1992, 36: 172~175
- 14 Morrison F. *The Art of Modeling Dynamic Systems, Forecasting for Chaos, Randomness, and Determinism*. New York: John Wiley & Sons, 1991
 - 15 沈小峰. 混沌初开——自组织理论的哲学探索. 北京: 北京师范大学出版社, 1993
 - 16 沈小峰, 胡 岗, 姜 璐. 耗散结构论. 上海: 上海人民出版社, 1987
 - 17 Rodriguez-Iturbe I, De Power D E, Sharifi M B et al. Chaos in Rainfall. *Water Resour Res*, 1989, 25: 1667~1675
 - 18 Wilcox B P, Seyfried M S, Blackburn W H et al. Chaotic Characteristics of Snowmelt Runoff: A Preliminary Study. Presented at Symposium on Watershed Management, Durango, Colorado, Am Soc Civil Eng, 1990
 - 19 Wilcox B P, Seyfried M S, Mauson T H. Searching for Chaotic Dynamics in Snowmelt Runoff. *Water Resour Res*, 1991, 27: 1005~1010
 - 20 Rodriguez-Iturbe I, Entekhabi D, Lee J S et al. Nonlinear Dynamics of Soil Moisture at Climate Scales 2. Chaotic Analysis. *Water Resour Res*, 1991, 27: 1907~1915
 - 21 Jayawardena A W, Feizhou L. Analysis and Prediction of Chaos in Rainfall and Stream Flow Time Series. *J Hydrol*, 1994, 153: 23~52
 - 22 王文均, 叶 敏, 陈显维. 长江径流时间序列混沌特性的定量分析. *水科学进展*, 1994, 5(2): 87~94
 - 23 丁 晶. 探索水文现象的复杂性——混沌分析. 见: 夏军等编: 现代水科学不确定性研究与进展. 成都: 成都科技大学出版社, 1994
 - 24 傅 军, 丁 晶, 邓育仁. 洪水混沌特性初步研究. *水科学进展*, 1996, 7(3): 226~230
 - 25 Bessant C. *Computer and Chaos*. London: Sigma Press, 1992
 - 26 赵松年. 非线性科学: 它的内容、方法和意义. 见: 中国科学院《复杂性研究》编委会编: 复杂性研究. 北京: 科学出版社, 1993, 372~467

On the Study of Chaotic Characteristics in Hydrological Systems

Feng Guozhang¹ Li Peicheng²

(1 Institute of Agricultural Water-Soil Engineering, Northwestern Agricultural University, Yongling, Shaanxi 712100)

(2 Department of Hydrogeology and Engineering, Xi'an Institute of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054)

Abstract In this paper, the conception of chaos is briefly introduced, the advance in the study on chaos in hydrological systems is reviewed and the universality of chaotic evolution in hydrological systems is philosophically proved. It is pointed out that the current focal points to chaos study in hydrological systems are to explore the universality of chaotic evolution, as well as to find the mechanism and law of chaotic evolution and their causation in the systems. A methodology of two combinations, i. e. the combination of macroscopic, mid-scopic and microscopic spacial and temporal scales, and the combination of theoretical analysis and computer simulation, is proposed. The possibility to develop a new hydrologic sub-discipline, chaotic hydrology, is discussed.

Key words hydrologic system, chaos, chaotic characteristics, non-linear science, philosophy, self-organization theory, chaotic hydrology