

# An Issue about Complexity of Groundwater System

Zujin Yao, Yisu Qin

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geosciences, Shijiazhuang  
Email: qinyisu@sina.com

Received: Apr. 15<sup>th</sup>, 2013; revised: May 17<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jun. 5<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Zujin Yao, Yisu Qin. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** Based on the introduction of the complexity in the category of scientific philosophy, the groundwater system is demonstrated a system at the edge of chaos (complexity) between order and out-of-order, but not a deterministic and order system. The present theories are just a rough approximation for the truths. The entanglement between Ontology complexity and Cognition complexity was elucidated, and the technical way to deal with the entanglement was put forward.

**Keywords:** Groundwater System; Complexity; Hydrogeology

## 地下水系统的复杂性问题

姚足金, 秦毅苏

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄  
Email: qinyisu@sina.com

收稿日期: 2013年4月15日; 修回日期: 2013年5月17日; 录用日期: 2013年6月5日

**摘要:** 在介绍复杂性这一科学哲学范畴基础上, 作者应用实际资料和文献, 论证了地下水系统不是“确定的、有序系统”, 而是处在有序、无序之间的“混沌边缘(复杂性)系统”。现今的学理只是对真实地下水系统的一种粗糙的逼近。作者进一步讨论了本体复杂性与认知复杂性两者之间存在纠结关系, 并提出理清这类纠结关系的技术途径。

**关键词:** 地下水系统; 复杂性; 水文地质

### 1. 引言

上世纪 70 年代计算机模拟技术成熟后, 许多领域都尝试用之预测未来, 气象学家用于天气预报, 经济学家用于预测货币流动, 然而, 世界上最好的长于二、三天的天气预报也仅仅是推测而已, 超过六、七天的预报基本上没有多大价值, 原因就在于所模拟的对象——天气系统, 它不是一个简单的有序系统, 而是一个复杂的混沌系统。正确认识系统的科学属性很重要。

讨论地下水系统是“确定的、有序系统”, 还是

处于有序、无序之间的“混沌边缘系统”, 这不是空洞的学理探讨, 而可以涉及: 对现今有关方法、结论适用程度的重新审视; 而可以涉及: 在学科创新方面, 是否存在新的走向提供思路。

属于什么性质的系统应从“现象”入手论证。限于当今研究程度, 我们未能从显示混沌的典型现象入手来作分析, 而是从作者认识到的复杂性现象来讨论, 从列举出的这些复杂性现象, 我们很难把地下水系统归属到“确定的、有序的”范畴。

“地下水系统”在这里仅表示讨论的是——属于

“水资源”中的地下水部分的系统，不涉及更多的学理内涵。

## 2. 复杂性——一个科学哲学范畴

复杂性研究从上世纪末兴起，至今在国内外已成为许多学科领域的研究前沿和热点，有人称它是一门 21 世纪科学。它能解释过去的科学还原论方法无法加以分析、解释的现象，其中最著名的如：蝴蝶效应，达尔文进化论在细胞层次演化上的无能等。

国外有人统计，不同作者对复杂性的定义有 45 种之多，也就是说，不存在大家一致认可的复杂性定义。下面列举一些定义中涉及的核心概念：信息；熵；算法复杂性；参数个数或自由度或维数；分形维；自相似；自组织；随机复杂性；分层复杂性；同源复杂性；复杂适应系统；混沌边缘……下面列举国外出版的有影响的书名(截至 1997 年)：《理性之梦》(1988)；《复杂性——混沌边缘的生命》(1992)；《复杂化——用新奇科学来阐释悖论》(1994)；《混沌之解释——从复杂世界发现简单》(1994)；《复杂性的前沿——在混沌世界中寻求秩序》(1995)。国内有人说，中医学是复杂性思维的体现，黄帝内经的学术思想就蕴含复杂性的思考：整体观念，多脏腑相关等。从所列核心概念和书名，可以对复杂性概念的内涵及其广度，有个初步认识，下面作进一步介绍。

复杂性不等同于混沌，但与之密不可分，它是介于随机和有序之间，是随机背景上无规律地组合起来的某种结构和秩序，是混沌性的局部与整体之间的非线性联系形式。复杂性不会出现在完全无秩序状态中，复杂性的涌现和稳定需要秩序，与之形成对照的是，混沌展示了高秩序度，尽管这种秩序是特殊的、独特的随机秩序，在这种情况下，复杂性不仅能、而且真实地涌现出来，因为恰恰随着这种随机性的出现，将带来秩序的各种特殊形式。

混沌通向复杂性，整体论同样通向复杂性。复杂性是被偶然性、随机性和缺乏受自然规律支配的规则性所确定的，但这还不是全部，因为很明显，规则系统自身也可能或多或少是复杂的，于是出现这样的结果：给定了各部分的性质以及它们之间交互作用的条件，仍然不能由此推断其整体的性质，这样的复杂系统实际上存在在从原子到银河系；从人类细胞到人类社会活动，无所不在。

系统的复杂性是关于系统组成要素的数量和多样性的问题，是关于组织构造和运作构造的相互关系精巧性的问题。

美国哲学家尼·雷舍尔<sup>[1]</sup>认为复杂性在功能意义上同时具有正负两面性，他写道：“随着时间，科学研究中的进步逐渐呈现，这种进步要求技术更精致更复杂，导致科学本身变得愈益复杂。在科学和技术的进步过程中，我们给自己建造了一座越来越高耸的复杂性之塔，好像它就是如此。因此，我们所谓的进步也有其消极的一面，它就像是某种深陷更加困难境地的旅程。这种正在进行中的复杂化(complexification)，导致我们的科学本身变得越来越精细复杂、繁复多样，甚至真正蜕变分裂”。“复杂性是实在(reality)的一种深刻的特性”。

## 3. 地下水系统的复杂性

作者分别从径流流态，径流过程，系统边界和系统的时间维这四个方面来讨论，这四个方面的每一个都直接影响到——作为一个系统，它所具有的组分、结构和功能的特征。

### 3.1. 径流流态的复杂性

水文地质脱胎于陆地水文，地表水、地下水作为两类不同的径流，对其流态研究作一比较，有助于更好地认识地下径流。

层流与紊流是流体流动的两种基本流态，两者划分的判据为雷诺数——流体流动时的惯性力与粘滞力(内摩擦力)之比值。天然河道中河水的流态为紊流中的“缓流”，当河流流速大于波浪速度时，这时流态就由缓流转变为“射流”，两者划分的判据为霍特数——流速与波速之比值。河水流动，在雷诺数小于 500 时为层流；大于 2000~4000 时为紊流。

作为地下水动力学主要基石的达西定律，它依据的实验是在层流流态下进行的，因此渗透系数及其一系列的衍生概念和参数都带上层流的烙印。达西定律适用范围是雷诺数小于 10；在大于 10 的层流、紊流流态时，流速与水力梯度之间不是线性关系。实践证明，地下径流在一般情况作为层流处理是可行的，而在流速较大时，就不宜作这样简单化处理。

对于高流速的地下水，学界没有从径流自身的流

动特征方向进行探索(“低雷诺数流”在流体力学中已成为一个活跃的分支学科),而是另辟技术途径——结合其地质产状分类区别处理,于是得出:灰岩中的“岩溶水”;基岩中的“裂隙水”;碎屑岩中的“孔隙水”;断层-裂隙系统中的“偏流及脉状水”;与大气圈相接的“包气带水”等,实践证明这是行之有效的技术途径,但与之同时,在某些现象和问题面前,现有途径、学理又显得无力和不充分。下面举一个简单例子来说明。在“非承压”条件下,地下水可以由低处向高处流,这“异常现象”直接关系到——在没有承压含水层分布的地区,能否打成自流井的重要问题,现今学理认为:地形势能,除了能使径流获得位能外,还能使水的体积被压缩从而使径流获得压能,于是在释放这部分压能的同时,水可以由低处流向高处。或许从径流自身的流动特征——例如紊流、对流等途径进行探索,会找出更充分的解释。

张人权<sup>[2]</sup>强调:与水力梯度作为水流驱动力相比,渗透流速更具普适性,他写道:“实际上,均质各向同性介质场中水力梯度  $I$  作为水流驱动力,只是渗透系数  $K$  为常数时的一个特例。渗透流速  $V$  表征水流驱动力,具有普适性。理解这一要点,便掌握了定性以及定量分析地下水流模式的钥匙”。我们或许可以从这里作进一步延伸:流速是与雷诺数呈正相关,流速大过某临界点后,地下径流即呈紊流流态——流线开始出现波状摆动,摆动的频率及振幅随流速增大而增大,就流场中的质点来说,它的流动速度和方向是随时间呈不规则变化,于是流体的各项物理参数:速度,压力,温度等都随时空发生随机变化。紊流是对空间不规则、时间无秩序的一种非线性、多尺度的流体流态。许多水文地质现象或可从中得到新的解释。

“自由对流”是一种由浮力驱动的径流运动,流体的密度差导致浮力形成,密度差可以是因温度差所致,亦可是因盐度差所致。地下水动力学中,自由对流是被忽略的,但是有根据表明,它在地下水系统中是一种客观存在,一种普遍存在。J.R. Wood 和 T.A. Hewett<sup>[3]</sup>用理论计算证明了:大多数达到一定尺度规模的饱水地质体(弱胶结的砂岩等),在受到大致为正常地温梯度(25℃/km)的温度影响时,地质体内的地下水就会自发地、持续地出现公里尺度的对流胞,其临

界雷诺数为  $4 \text{Pr}^2 \approx 40$ 。对流胞的存在表明:饱水地质体内的相应部位,存在稳定的自下而上的上行径流运动,与之同时的另一侧存在自上而下的下行垂向运动,在他给定的参数条件下计算出的流速约为  $1 \text{ m/a}$ 。

径流的非层流运动,展示着系统的复杂性。

### 3.2. 径流过程的复杂性

垂向为公里尺度的真实的地下水系统,应是水动力场、水化学场、温度场相联系的恰合系统。地下水在补、径、排的侧向、垂向运动过程中,不间断地进行的水岩作用——溶解反应,沉淀析出反应,氧化还原反应,使水质和含水层的水理性同时发生不间断的改变。众所周知,承压井成井后,水头、水量或早或迟都会逐渐下降,我们用弹性释放效应来解释,有没有可能是水岩作用改变了储层的水理性所致? J.R. Wood 和 T.A. Hewett<sup>[3]</sup>的研究论证出——地下水自由对流运动时,对流胞的特定部位砂岩发生被溶解,与之相应的特定部位,砂岩孔隙被化学沉淀充填。对具有一定尺度的真实的地下水系统来说,径流过程不是单一的动力学过程,而是综合着物理、化学变化的非稳定的复杂过程。

北京昌平小汤山温泉,50年代为自流状态,主泉口水温50℃,自流量  $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{月}$ ,1974年流量锐减,1975年在主泉口附近打一个刚进入基岩的76.5 m的钻井,用泵开采。作者对小汤山温泉区三个时段的水化学监测资料和相应的开采量记录进行专门研究<sup>[4]</sup>,这三个时段分别相当于:50年代的原生态;1962~1967小规模钻井开发;1987~1990大规模钻井开发。

80年代与60年代、50年代相比,水质发生明显变化,主要是硬度增大,氟减少,硫酸根减少;80年代监测数据显示:主要化学组分含量,与取样月份的泵采量呈线性相关,其中与硬度有关的钾、钠、钙、镁、重碳酸根、矿化度呈正相关,与氯、氟、硫酸根为负相关,因此,小汤山温泉水质改变,不仅发生在四分之一世纪时间尺度上,同样性质的改变可以发生在月尺度上。

小汤山地下水系统内主要发育三种水文地球化学作用:白云石溶滤作用,氟钙络合作用和含硫矿物氧化作用。可以对白云石水岩反应建立微分方程,用以计算:地下径流质点,以不同流速流经温度场、动

力学场时,水岩间发生的白云石的溶解-沉淀反应数量。所得计算结果与观测数据的高度一致,得以从机理和数值上证实:当温泉改为泵采后,泵采量超过某个阈值后,引起水热系统内部原先处于动平衡的状态作出调整,从而导致流体、围岩发生化学的、物理学的、矿物学的和水理性参数的相应改变。数据表明:在小汤山实例中,当开采量超过自然径流量 3~3.5 倍时,水质发生明显改变。

钻井泵采中的地下水系统,其在径流过程方面呈现的复杂性,已不是单一的自然径流过程复杂性,而是叠加了社会需求、人为干预的径流过程复杂性。

### 3.3. 系统边界的复杂性

系统边界在这里主要涉及:系统的垂向底界;反映含水层结构的系统边界以及系统中包含生态子系统后的边界,这三类边界的模糊性、不确定性导致复杂性。

天津市塘沽区,截止 1997 年打成热水井 23 口,井深都为 2000 m 上下(天津市地矿局,地矿部水文地质工程地质研究所 1998《天津市塘沽区地热流体回灌研究》未刊)。地热水是沿着近东西向的海河断裂带从基岩贯入上覆第三系碎屑岩建造。有关热田的开发、管理都是以埋深近 2 km 的上第三系馆陶组底砾岩作为含水系统的底界。作者通过研究热水水化学长期监测资料和当年降水量记录发现:1) 热田地下径流的厚度(储层厚度)不是定值,干旱少雨年份,径流底界埋深变浅,即储层厚度相应变薄;丰水年份,径流底界向深处下移,即厚度变大。2) 当年采出的热水,其量的 40%源自地面沉降释放水,其中的 8%属于粘性土层不可逆的压缩释放水。这两点使得热田(含水系统)真实的几何边界——从底界到平面都变得模糊和不稳定。

华北平原,东北平原,渭河谷地及大型山脉的山前平原等地区,当今地下水开发深度经常是几百公尺、上千公尺,许多地热井都达到 4 公里深度,而地下水系统的补给来源,仍然统统归之于邻近地区大气降水侧向入渗补给,这显然是一种过于简单化的设定,相应地这使地下水系统几何边界的划定比较容易。众所周知,大型盆地深部径流会通过弱透水层向上呈面状排泄;会通过构造破碎带向上集中排泄,这

可以是水静压力驱动,也可以是叠加了岩静压力、甚至构造应力的复合驱动,这种由内源性、外源性动力驱动的深部径流的上行排泄,现在简单化地设定发生在含水层系统内部的“越流补给”。深部径流的上行流动使得地下水系统真实的底界变得模糊和难以确定。

与同样是开采流体的石油专业相比,他们除了注意研究岩层含油性外,更重视从岩相——古地理角度研究含油层的结构。水文地质界也开始从把岩层划分为不同的含水层、弱透水层、隔水层的简单化研究转向重视含水层结构的研究,可以设想由两种不同学术方向导出的地下水系统,两者的几何边界应有明显不同,从边界划分的依据来讲后者无疑更为合理,认知上更趋复杂。

当地下水系统包含某种大型生态环境作为子系统时,由于生态系统自身的复杂性(埃及阿斯旺水坝,筑坝后的生态影响,直达下游一千公里之外的地中海盛产沙丁鱼的渔场),将导致整个系统的边界由之蕴含很大的假设性和不确定性。

### 3.4. 系统时间维的复杂性

地下水系统和所有的自然系统一样,有其生、盛、衰、竭的过程,可以设想,在其存在的每个阶段,它的“活力(熵)”是不同的。现今学理是把它作为机械系统,而不是自然系统来处理,在这意义上可以说——地下水系统时间维的缺失。

作者在祁连山区玉门——昌马一带,观察过发生在第四纪晚期的多期大型洪积扇的叠置,这些被疏干了的洪积扇,其巨厚的砾石层,形成近百米高的陡壁,可以看作地下水系统的化石,它宣示构造内动力对地下水系统生灭进程的影响。法国巴黎地球物理所曾与国家地震局合作研究 1932 年发生的昌马地震破碎带。该年 7.6 级的地震,沿昌马断裂带产生一条长 120 km,宽数十至百余米、走向 NNW 的左旋走滑地震破碎带,东端终止于 NNW 走向的文殊山——祁连山主峰横向隆起,西端止于阿尔金断裂。历经 60 多年,现在地面仍能清晰见到断续分布的地震地质、地貌现象:地震断层——可区分出走滑断层,逆断层和正断层;地面裂缝;伴随挤压运动形成的地面鼓包,大者长 20~35 m,宽 5~10 m,高 1~3 m;垄脊一般长 50~100 m。法

国论文<sup>[5]</sup>中提供了许多可以从地下水运动意义上考虑的有价值的数量描述。全新世一万年以来断层左旋滑动水平距达 55 m, 北盘相应的上升量为 27 m, 平均水平滑动速度为  $5.5 \pm 2.2 \text{ mm/a}$ 。1932 年地震运动是在小的时间尺度上重现全新世的断层活动, 地震断层左旋水平位移  $6.2 \pm 0.6 \text{ m}$ , 垂向位移大于 1 m。走滑断层的引张分量——岩体相向分移的倾向距离, 自全新世以来达 7.7 m。在地面下发生类似这样的裂缝空间、规模和形成速度(驱动力), 足够使地下径流或停滞或活动或重新开启。广义的构造活动无处不在, 只有规模、强度、性质之别。

作为一个自然系统, 在补给条件相对稳定的前提下, 都处在特定的水岩反应阶段; 都处在特定的构造应力影响阶段, 每一个系统都在沿着它特定的时间序列发生、发展。不同时间序列的系统, 其可采水量的前景、可开采量及超量开采的判断原则, 应不相同。

#### 4. 中国地下水科学基本学理的发展 ——认知上的复杂性

中国水文地质学界, 从 20 世纪 50 年代开始, 研究的是地下水分区、分带理论, 70 年代开始转向研究地下水系统理论。陈梦熊<sup>[6]</sup>提出一幅水文地质学新学科体系综合图表, 表中表示从传统水文地质学向现代水文地质学转化过程的各种标志性理论, 按时间先后次序排列为: 水文地质分带分区理论(50 年代)→地下水稳定流理论(50 年代)→非稳定流理论(60 年代)→环境水文地质理论(70 年代)→地下水系统理论(70 年代)→地下水模型理论(80 年代)→地下水信息系统理论(90 年代)。中国水文地质基本学理的形成和发展, 是有特定的社会历史影响因素, 但更本质地看, 它符合认知上的由简单到复杂(到无限复杂)的探索规律。

地下水系统, 在其物理组成、基本结构方面可以是一种有限复杂的自然之物, 但在时间维度演进过程中, 在大自然和社会人的“运作”影响下, 可以导致地下水系统成为无限复杂之物, 这就像作为有限复杂的棋子和下棋规则, 在经过不同的演进运作下, 可以得出无限多种不同的棋局, 于是, 由棋子、规则加上运作, 构建出棋局的无限复杂性。

地下水系统的复杂性, 在认知上不等同于混乱、无序, 而是在认知上展现着某种更高阶次规律的涌

现, 它包含的“不确定”, 不是不存在“确定性”, 而是存在以或然性形式呈现的确定性。

#### 5. 结语

地下水系统复杂性作为一种本体的实在, 即使在当今, 它亦远远不止表现在文中提出的四个方面, “实在”的复杂性是无限的。地下水系统不是确定的、有序系统, 现今的学理只是对真实的一种粗糙的逼近。

作为一个科学哲学范畴的复杂性概念的形成, 是人类在认知能力方面的一种提升。工业时代牛顿体系形成后, 人们以为什么都可以搞清楚, 甚至已经搞清楚了, 巨人牛顿的墓志铭刻上: “自然和自然之道躲在黑暗中, 上帝说——让牛顿出来吧! 于是世界便被照亮。”三百年后, 相对论、量子理论的出现, 人们才发觉世界并没有被牛顿完全照亮, 作为后工业时代的当今, 法国一著名女权主义思想家, 为尊重那不可知的神秘, 在呐喊: “请不要照亮一切, 也不要想一切都会被照亮!” 穿越 300 年时空的两种不同声音, 展现着复杂性是实在的一种深刻的特性, 同时, 亦展现着人类的认知复杂性。

本体论复杂性和认知复杂性两者是一种纠结关系。量子力学测不准原理告诉人们: 观测的本身, 就会直接影响观测的结果。现实世界并非完全是物质世界, 在某种意义上说, 我们的宇宙可能是一种属人现象, 对它的把握取决于观察行为——因而也取决于人的意识自身。量子理论创始人普朗克说: “科学不能解决自然界最终之谜, 这是因为在最后的分析中, 我们自身也是这个待解之谜的一部分”。

打开这种纠结关系, 就能揭示出更深层次的真实, 就像当年物理学认识了量子既是波又是粒子一样。作者认为: 当今一些学科的发展史, 往往只是对事件、过程作归纳和记录, 没有从“两个复杂性”的角度来审视历史, 忽略了分析作为主体的人们, 在认知上的独特性, 作者提出: 从解构、重组学科发展史入手, 可能是打开这两复杂性纠结关系的一条值得探索的途径。

#### 参考文献 (References)

- [1] 尼古拉斯·雷舍尔. 复杂性——一种哲学概观[M]. 上海: 上海科教出版社, 2007: 1-253.

## 地下水系统的复杂性问题

- [2] 张人权等. 水文地质学基础(第六版)[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-184.
- [3] J. R. Wood, T. A. Hewett. Fluid convection and mass transfer in porous sandstones—A theoretical model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 1707-1713.
- [4] 姚足金. 华北热田的成因模式和地下径流效应[J]. 中国地质科学院水文地质工程地质研究所所刊, 1993, 9: 1-17.
- [5] G. Peltzer, et al. Offsets of late quaternary morphology, rate of slip and recurrence of large earthquakes on the Chang Ma fault (Gansu, China). *JGR*, 1988: 93(B7): 7793-7812.
- [6] 陈梦熊. 中国水文地质环境地质问题研究[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 10-13.