

应用耗散结构理论分析地下水系统演化*

姜纪沂, 曹剑峰, 李 升, 王 博
(吉林大学 环境与资源学院, 长春 130026)

摘 要: 地下水系统的演化是在天然或人为因素影响下, 以新的宏观状态取代旧的宏观状态的耗散过程。提出基于耗散结构理论研究地下水系统演化机制的新思路。地下水系统是一个复杂的开放系统, 其演化过程处于非平衡有序状态且不可逆, 与地下水系统相关的各子系统之间的作用是非线性的, 强烈的人为因素对地下水系统演变的影响显著。华北平原中部“冀枣衡”深层地下水漏斗是人类活动强烈干扰下地下水系统异常涨落的产物。大规模超量开采地下水导致衡水市地下水动力场、水化学场和含水介质空间结构变异等问题, 地下水系统进入人为活动强烈干扰下的新的演化时期。

关键词: 耗散结构理论; “冀枣衡”漏斗; 人为活动; 地下水系统演化

中图分类号: P641.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2008)01-0122-03

Analysis on the Evolution of Groundwater System
Using the Theory of Dissipative Structure

JIANG Jiyi, CAO Jianfeng, LI Sheng, WANG Bo
(College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The theory of dissipative structure promotes the development of system science. The evolution of groundwater system is a dissipative process of old macroscopic state being permuted by new macroscopic state influenced by natural and human factors. The authors present the new method of studying the evolution mechanism of groundwater system based on the dissipative structure theory. The groundwater system is an opened and complicated system. The evolution process is irreversibility and in the state of non equilibrium sequence. The interaction between the subsystems connect with groundwater system is non linear. The high intensity human factor is important for the evolution of groundwater system. The “Ji Zao Heng” groundwater depression cone is the outcome of groundwater system abnormal fluctuation under the effect of high intensity human activity. The large scale overexploitation of groundwater caused the variation of groundwater dynamic field, chemical field, space structure of water bearing medium, and so on. The groundwater system is entering the new evolution stage under the influence of human activities.

Key words: theory of dissipative structure; “Jizhou Zaoqiang Hengshu” groundwater depression cone; human activities; evolution of groundwater system

20 世纪 70 年代新三论(即耗散结构、突变理论和协同论)的崛起给传统的科学思维带来了强大的冲击。普利高津(Prigogine)的耗散结构理论揭示了系统在一定的外界条件下其内部的演化机理, 具有重要的方法论意义^[1]。耗散结构理论对系统的研究得出的关于系统非平衡、开放与有序、非线性作用等结论对非线性系统理论的贡献是卓越的^[2], 这对系统科学的进一步发展奠定了严密的科学基础^[3]。该理论自创立以来, 已被广泛地应用于生物生态、地质科学、地球物理和社会科学等领域^[4]。

自 1970 年至今, 人类大规模的地下水开发利用对衡水市地下水环境产生了重大影响, 破坏了自然条件下的水循环规律, 改变了地下水资源的补给能力, 导致地下水资源的数量、质量及其时空分布规律发生了显著的变化。探讨人类活动影响下地下水系统的演化机制及演变趋势具有重要的理论与实际意义。

地下水系统的演变过程是在天然或人为因素影响下, 地下水系统以新的宏观状态取代旧的宏观状态的过程。地下水系统演化由一因果链构成, 表现为稳定态向非稳定态, 再由非稳定态向新的稳定态转化^[5]。自然界中一切自发发生的过程都是不可逆的, 因而演化过程中经历的状态全为非平衡态, 非平衡态演变过程中能形成非平衡结构^[6]。水资源系统是一耗散结构^[7], 水循环演化过程是一个耗散过程^[8]。地下水系统的演化过程是一个非线性复杂系统的演化过程。地下水系统与外界存在着物质、能量与信息广泛交流, 它是一个既不孤立也不封闭的复杂的开放系统。普利高津认为, 当开放系统与环境之间发生持续的能量和质量交换时, 系统将有可能从近平衡态被推移远离平衡态, 并且由于不可逆过程所导致的系统能量的消耗, 可以使之发生“自组织”, 并产生时间和空间上有序的“耗散结构”。基于耗散结构探讨地下水系统在人为活动影响下的演化机制, 以期对地下水

* 收稿日期: 2006 08 28
基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999043606)
作者简介: 姜纪沂(1979-), 男, 山东沂南人, 博士研究生, 主要从事地下水系统与水资源系统工程研究。

系统分析提供一种新的研究思路。

1 耗散结构理论

耗散结构,是指一个远离平衡态的开放系统,当其变化达到一定的阈值,通过涨落有可能发生突变,由原来的混乱无序状态过渡到一种空间上、时间上和功能上有序的状态,这种在远离平衡的非线性区形成的新的稳定有序结构,需要与外界环境交换物质、能量才能维持,这种稳定有序的结构就叫耗散结构,即在非平衡条件下产生的,依靠物质、能量、信息不断输入和输出来维持其内部非线性相互作用的动态有序系统。

耗散结构理论认为,在具有不可逆过程的系统内,其熵变化 ds 由两部分组成,即 $d_i s$ 和 $d_e s$ 。 $d_i s$ 为系统内部不可逆过程的熵产生,它总是使系统的熵增加,即: $d_i s \geq 0$ 。 $d_i s$ 为外界提供的熵流项,可正可负,系统的熵变 ds 满足: $ds = d_i s + d_e s$ 。 $ds < 0$ 时,系统趋向某种时空有序状态。此时,在特定的条件下,系统将形成耗散结构。耗散结构系统的 4 个基本特征:(1)耗散结构系统是开放系统;(2)耗散结构系统中各要素、各子系统间呈现非平衡状态,系统整体上是非平衡的“活”的有序结构。(3)耗散结构系统中各要素、各子系统的相互作用呈现一种非线性机制;(4)耗散结构系统中各子系统存在竞争机制,系统整体呈涨落的特征。耗散结构系统的开放使其与环境交换物质、能量和信息成为可能,系统内各子系统的竞争和协同是系统的非平衡和非线性的体现,而竞争和协同的实质是对输入物质的竞争与协同。

2 地下水系统演化的耗散结构认识

地下水系统是一个错综复杂,包括各种天然因素、人为因素所控制的,具有不同等级的互相联系又互相影响,在时空分布上具有四维性质和各自的特征,不断运动演化的若干独立单元的统一体。地下水系统的演化很大程度上受地表水输入与输出系统的控制^[9]。地下水系统具有资源、生态、环境和调蓄多重属性的功能,这些多重属性功能彼此之间的相互作用和制约关系的动因是区域地下水更新能力和水循环系统的演化^[10]。

随着非线性系统动力学及耗散结构理论的问世,应用全新的思维观念来审视地下水系统演化问题成为可能,一个关键的问题是从观念上认识地下水系统的演化是一个非线性复杂系统的演化过程,以下拟从几个方面来探讨这个问题。

2.1 地下水系统是复杂的开放系统

地下水系统与其存在的环境有密切的联系。即使处于地壳深处,封闭条件极好的古埋藏水,水与围岩的物理化学作用、介质结构对地应力的适应都表现出它绝非脱离环境而存在的独立之物,它会在地质历史的长期演变中乃至固体潮的作用下进行着信息的传输。首先,环境对地下水系统输入物质、能量和信息,同时又接受地下水系统对环境的各种输出,从而使系统中具有物质流、信息流的运动,得以维持系统的存在。其次,环境的作用影响地下水系统的结构、功能和有序性以及地下水系统的形成、发展和消亡的全过程。因此,地下水系统与外界存在着持续的物质、能量与信息的广泛交流,是一个复杂的开放系统。

2.2 地下水系统演化是处于非平衡有序状态的不可逆过程

系统达到平衡态的标志是各要素均匀单一、无序、熵值

极大,混乱程度最大,平衡态系统处于熵值极大的混乱无序状态,不可能产生新的有序结构。不平衡是有序之源,不稳定是产生新结构的动力^[11]。

地下水系统是在长期地质历史发展过程中逐步形成并不断得到改造的实体,它从未达到不再随时间变化的平衡态。构成地下水系统的各要素不仅是自然界动态过程的产物,同时其本身也还是一个过程,从较长的时间段看,地下水系统在不同时刻有不同的表现,从空间看也表现为空间的变化。因此,以地质时间作为时间尺度来考虑,地下水系统是一种空间有序、时间有序和功能有序的非平衡结构。地下水系统随着水文地质建造和改造作用的不断进行而发生水循环系统、渗流场和水化学场的发展与演变,如岩溶作用,构造演化(尤其是新构造运动),气候、环境变迁等不可逆因素决定着地下水系统的演化是不可逆的。因此,地下水的系统演化是其远离平衡态不断向有序化发展的不可逆过程。

2.3 地下水系统各子系统之间的相互作用是非线性的

非线性系统具有非均匀性、非对称性和相干性^[12]。组成地下水系统的各个子系统是相互联系,相互作用的。任何一个子系统状态的变化最终会波及整个地下水系统。地下水系统总体的特征和生活方式寄寓于各个子系统,并在它们的相互联系、作用、制约过程中表现出来。但是,它们各自独立的特征和活动的总和,并不能反映系统整体的特征和生活方式。即作为整体中的组成要素具有它自身所没有的整体性,且与它们独立存在时有质的区别。也就是说,这些子系统作用的综合是不能用线性方程描述出来的,通常是一种非线性的耦合作用。系统内部各子系统存在着非线性的相互作用,是地下水系统不断向着有序化演化的必备条件之一。

2.4 人类活动对地下水系统的演化影响显著

地下水系统的时空分布与演变规律,既受自然因素的制约,又受社会环境,特别是人类活动的影响而发生变化。人类活动对地下水系统物质、能量与信息的输入支配着地下水系统的演化模式。

地下水系统的涨落是地下水系统演化的主要标志,它与传统的地下水动态有着本质的区别^[13]。地下水系统的两种状态是稳定态和非稳定态。稳定态的前提是环境条件不随时间改变。当系统的结构与输入、输出关系变化足够小时,可认为地下水系统处于稳定态。事实上,地下水系统一旦遭受人类活动干扰,就会变为自然-人工复合系统,地下水人工开采等活动作为新的环境因素而使地下水系统涨落增大,导致地下水系统失稳。地下水系统在宏观稳定态条件下其状态变量呈正常涨落,在非稳定态条件下呈异常涨落。

人类活动的强度决定了地下水系统演化的性质与速度,如地下水的人工开采-回灌,人类的地表与地下工程活动,人类的生产生活污染等,使地下水的天然源汇项逐渐被人工源汇代替或弱化,地下水系统的流场、地下水介质空间结构、水化学场先后进入异常涨落,地下水系统将向新的状态演化。对于远离平衡态的开放的地下水系统,是非线性非平衡态结构,且各子系统之间的非线性作用,可能使微小的涨落放大形成巨涨落,使系统内部非线性作用的子系统自发地产生协同作用,从而产生有序的稳定化自组织-耗散结构,突发性的释放能量,产生变形与变异,产生环境地质灾害。区

域地下水降落漏斗、地面沉降、浅层咸水体下移使深层地下水咸化等水环境问题是地下水系统在人为活动影响下异常涨落,由先前的稳定态向非稳定态演化过程中的产物。

3 人类活动影响下地下水系统演变趋势

自 20 世纪 70 年代以来,衡水市地下水系统在强烈的人为活动干扰下,地下水系统的流场、地下水介质空间结构、水化学场先后进入异常涨落状态,地下水系统向着新的状态演化。1970 年以前,衡水地区地下水系统基本处于宏观稳定态,地下水的介质空间结构、流场、水化学场处于正常涨落状态,无明显的趋势性变化。1970 年以后,随着地下水开采量的增大和开采深度的加深,地下水位出现异常涨落,水位持续下降,涨落幅度逐渐增大,地下水系统因失调而进入非稳定态,地下水位、水质异常涨落,形成了大面积的水位降落漏斗(“冀枣衡”漏斗),地下水矿化度增高,水化学类型改变。与此同时,地下水的介质结构也开始发生演变,出现了地面沉降等地面变形地质灾害。

3.1 地下水流场演变

衡水市深层地下水水质好,矿化度均小于 1 g/L,自 1968 年以来第 III 含水组被长期的大规模开采。深层地下水的可开采量为 2.43 亿 m³/a,1992 年以来实际开采量都超过 5 亿 m³/a,且逐年增加。深层地下水的开采量远超过其补给量,导致地下水位持续下降,地下水的流场发生变异,宏观稳定态下的地下水流动系统被破坏,形成了以人工源汇控制的流场。

“冀枣衡”深层水位降落漏斗形成于 20 世纪 70 年代初。

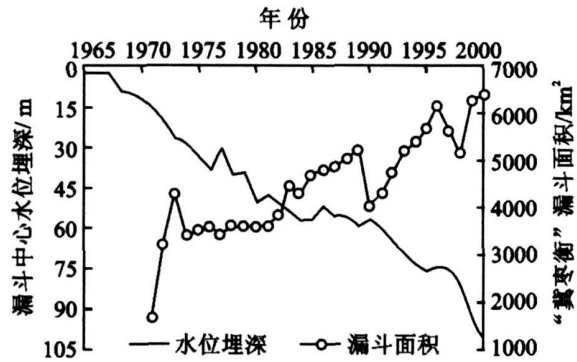


图 1 “冀枣衡”漏斗动态特征

3.3 地下水化学场演变

地下水化学场的演化要比流场滞后很多,但是地下水系统的整体性决定了地下水化学场最终要适应地下水流场的演变过程。在人为活动强烈的地区,地下水水质出现异常涨落,主要表现为淡水咸化,如图 3。

(1)“冀枣衡”漏斗成为人工汇区,地下水向漏斗中心汇流,此外,黏性土的压密释水加速了固相和液相的互相作用,使得固相中的离子析出,造成漏斗区地下水的矿化度缓慢升高,也就形成了从漏斗外向漏斗中心深层地下水矿化度增高的趋势。

(2)除安平、饶阳两县和深州市的部分区域为全淡水区外,全市其它县(市、区)深层地下淡水的上部普遍存在着厚度不等的咸水体。深层地下水位的大幅下降导致浅层含水体与深层含水层之间的水头差加大,较大的水力梯度作用驱使浅层地下水垂向越流补给深层地下水,上部咸水体逐渐

1968 年初,第 III 含水组水位埋深仅 2.94 m,随着深层地下水开采量的迅速增加,水位不断下降,1972 年漏斗中心水位埋深增至 20.98 m,年平均下降 4.51 m。随后下降速率有所降低,至 1990 年,漏斗中心最大水位埋深达 56.4 m,漏斗中心水位下降速率 2.24 m/a,漏斗面积达 4 032 km²,接近衡水市总面积的一半。1993 年漏斗开始由封闭逐渐外移到区外而使漏斗敞开,东部分水岭因受沧州、德州漏斗影响而左右摆动。2000 年 6 月末漏斗中心水位埋深达 101.00 m,比 1995 年同期下降 19.10 m,平均降速 3.82 m/a,见图 1。位于漏斗区中部的枣强、武邑南部一带深层地下水位埋深与衡水市区水位埋深接近,冀州南部已超过衡水市区水位埋深。漏斗中心与东部分水岭之间的水位差值逐渐减少,漏斗底部越来越开阔、平展,呈整体向纵深发展的趋势,见图 2。

3.2 地下水介质空间结构演变

自 20 世纪 70 年代以来,随着地下水的大规模开采,在地下水流场异常涨落的同时,地下水系统的介质空间结构也呈现异常涨落的趋势,产生地面沉降、地裂缝等地质灾害。1975–1981 年“冀枣衡”漏斗区开始产生地面沉降。1981–1988 年,随着地下水系统的整体失稳,地面沉降的范围和下降速率开始增加,此阶段的沉降量达 128 mm,沉降速率 16 mm/a。随着地下水位下降速率的加快,地面沉降的速率加快,范围进一步扩大。1988–1990 年沉降量 51 mm,沉降速率 25.5 mm/a。沉降量最大处是衡水市区中心,由中心向漏斗四周逐渐变小,地面沉降分布特征与地下水位降落漏斗形态一致。

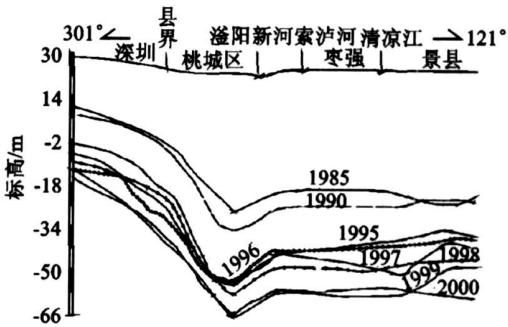


图 2 “冀枣衡”漏斗地下水位动态剖面

下移,咸水下移速率为 0.1~0.2 m/a^[4],使深层地下水呈现恶化的趋势。

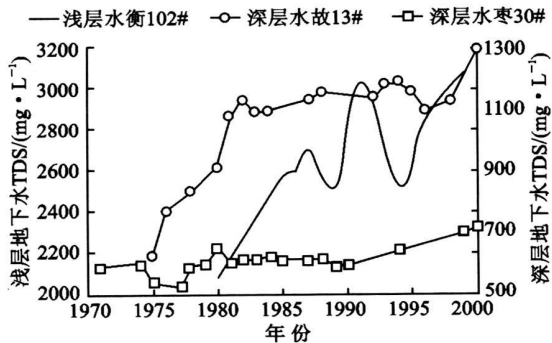


图 3 地下水系统水质异常涨落

(3)开采条件下,淡水区水位下降,使咸水入侵到淡水区,造成淡水矿化度出现增大的趋势。同时,潜水位下降造

(下转第 127 页)

$$H = [0.9659 \quad 0.9514 \quad 0.9623 \quad 0.9538 \quad 0.9611 \quad 0.9652 \quad 0.9612 \quad 0.9647 \quad 0.9656 \quad 0.9620 \quad 0.9475]$$

最后计算确定评价指标的熵权

$$w = [0.0776 \quad 0.1107 \quad 0.0858 \quad 0.1051 \quad 0.0885 \quad 0.0791 \quad 0.0884 \quad 0.0805 \quad 0.0783 \quad 0.0864 \quad 0.1196]$$

2.3 计算滇池生态系统熵权综合健康指数

将表 1 中评价指标的归一化值及其熵权代入式(1), 可得滇池所选时间序列的生态系统熵权综合健康指数见表 2。

表 2 滇池生态系统熵权综合健康指数

指标	1988 年	1994 年	2001 年
熵权综合健康指数	0.906	0.756	0.721

3 结 论

由表 2 的计算结果可见, 1988 年、1994 年和 2001 年滇池生态系统的熵权综合健康指数呈递减趋势, 这表明滇池生态系统健康状况总体上呈下降趋势。近几十年来, 人类的经济活动对滇池生态系统产生了巨大的影响, 滇池生态目前严重恶化, 其生态调解机制已不能保持系统的良性循环, 系统向退化方向演替。该文的计算结果与滇池的实际情况相符合, 验证了文中采用的熵权综合健康指数法的可靠性和实用性。该方法可用于湖泊不同时空健康状况的对比, 得出湖泊生态系统的演替趋势, 为湖泊生态系统的管理、保护和生态恢复提供依据, 从而促进湖泊水资源的可持续利用, 最终实现湖泊生态系统的健康发展。

参考文献:

[1] 张志诚, 欧阳华, 肖风劲, 等. 生态系统健康研究现状及其定量化研究初探[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12 (3): 184-187.

[2] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2106-2116.

[3] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍, 等. 湖泊生态系统健康定量评价方法[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1466-1474.

[4] Rapport D J, Bohn G, Buckingham D, et al. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead[J]. Ecosystem health, 1999, 5: 82-90.

[5] 刘永, 郭怀成, 戴永立, 等. 湖泊生态系统健康评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 723-729.

[6] 孟庆生. 信息论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 19-36.

[7] 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 32-86.

[8] 闫文周, 顾连胜. 熵权决策法在工程评价中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报, 2004, 36(1): 98-100.

[9] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.

(上接第 124 页)

成蒸发量减少, 土壤盐分下移, 淋滤作用增强, 使得大量盐分进入地下水, 浅层地下水水质发生剧烈变化。

4 结 论

- (1) 地下水系统是一耗散结构系统, 也是一个复杂的开放系统, 其演化过程处于非平衡有序状态且不可逆, 与其相关的各子系统之间的作用是非线性的, 强烈的人为因素对其演变的影响显著, 地下水系统的演化经历宏观稳定态—非稳定态—重建稳定态的过程。
- (2) “冀枣衡”漏斗是人类活动强烈干扰下地下水系统演化过程中的产物。大规模超量开采地下水导致衡水市地下水动力场变异、地下水化学场变异等问题, 人为活动使地下水系统进入人为因素强烈干扰下新的演化时期。
- (3) 人类目前还不能完全按照自己的意愿塑造新的地下水系统而不产生其它不良的环境问题, 因此, 系统的失稳或功能的改变往往是开发利用地下水时必须加以避免的约束条件之一。
- 参考文献:
- [1] 吴雪娟. 耗散结构系统的负熵及其实现过程[J]. 系统辩证学学报, 1995, 3(2): 74-77.
- [2] 管晓刚. 系统演化的辩证法: 耗散结构理论的整体观[J]. 系统辩证学学报, 1999, 7(2): 12-15.
- [3] 池英剑. 浅谈耗散结构理论的应用和科学价值[J]. 三明高等专科学校学报, 2002, 19(2): 104-108.
- [4] 陈剑平. 岩土体变形的耗散结构认识[J]. 长春科技大

学学报, 2001, 31(3): 288-293.

[5] 廖吉方. 地下水系统进化的环境问题: 下清河灌区地下水系统剖析[J]. 甘肃水利水电技术, 1997(1): 28-30.

[6] 申维. 自组织理论和耗散结构理论及其地学应用[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3): 1-6.

[7] 畅建霞, 黄强, 王义民, 等. 基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究[J]. 水利学报, 2002(11): 107-112.

[8] 张光辉, 聂振龙, 陈宗宇. 全新世以来华北平原层圈间水循环演化过程与区域地下水演化周期性[J]. 地球学报, 2001, 22(4): 293-297.

[9] 陈梦熊, 马凤山, 中国地下水资源与环境[M]. 北京: 地震出版社, 2002: 385-427.

[10] 张光辉, 费宇红, 刘克岩. 海河平原地下水演变与对策[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 30-46.

[11] 杨杰, 张道明, 贾丽萍, 等. 从熵概念到耗散结构理论[J]. 石家庄经济学院学报, 1998, 21(5): 500-505.

[12] 秦葆瑚. 耗散结构混沌分形等新理论在地质学研究中的应用[J]. 湖南地质, 1994, 13(4): 241-249.

[13] 徐恒力, 肖国强, 李红. 人为活动条件下河北平原第四系地下水系统的演化[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 7-12.

[14] 张宗祜, 施鸿德, 任福弘, 等. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(2): 168-173.