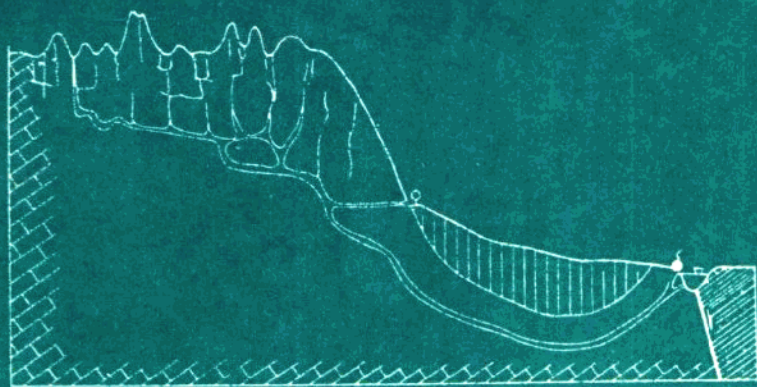


国家自然科学基金资助项目

岩溶地下水资源评价 灰色系统理论与方法研究

郭纯青等 著



地质出版社

p641.8
G-228

国家自然科学基金资助项目

岩溶地下水资源评价 灰色系统理论与方法研究

郭纯青 夏日元 刘正林
易连兴 李文兴 王 刚 著
戴爱德 张 卫

地质出版社

(京)新登字 085 号

内 容 简 介

本书在系统论述我国南北方岩溶在下系统的特征与差异,并按系统域的大小、结构与功能进行系统类型划分的基础上,论证了岩溶地下水系统为灰色系统,进而全面而系统地引用灰色系统理论与方法解决岩溶地下水资源评价各方面问题。通过我国南北方不同类型的岩溶区近 10 个典型范型的研究,探讨了岩溶地下水系统灰色建模过程和信息处理方法,提出了岩溶地下水灰数学模型,为岩溶地下水资源评价方法开辟了一条新的途径。书中还将灰色系统理论与方法与常规岩溶地下水资源分析评价方法进行了对比,指出了其解决问题的特点以及推广应用中应注意的问题。

本书可供从事岩溶水文地质、地下水资源评价和环境地质工作的生产、科研工作者参考,也可作有关专业大专院校的教学参考书。

国家自然科学基金资助项目

岩溶地下水资源评价 灰色系统理论与方法研究

郭纯青 等著

*

责任编辑:高天平

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京市春华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所经销

*

开本:787×1092¹/16 印张:8.625 字数:210,000

1993 年 2 月北京第一版·1993 年 2 月北京第一次印刷

印数:1—1000 册 定价:7.90 元

ISBN7-116-01266-4/P·1058

005012

概 述

我国是世界上岩溶分布面积较广的国家之一。随着国民经济的发展,岩溶地下水已成为重要的水源。岩溶地区特殊的资源和环境问题——复杂的岩溶形态(地表和地下),多变的地下水流,各类岩溶地下水系统及脆弱的环境,造成勘察、评价和管理地下水资源,治理矿坑水——等诸多研究方面的困难,给水文地质工作者提出了许多重要的任务和课题。

上述任务和问题的解决在许多方面取决于有效地利用、引进、发展和改进最新科学技术、方法、成就和思想,为全面深入地处理和解决岩溶地区各种水文地质问题开辟良好的条件。

本课题于1988年向国家自然科学基金委员会申请,次年获得批准。课题工作从1989年开始实施。通过对广西桂林东区、山西太原东山、山西娘子关、广西环江北山矿区、河南焦作矿区、贵州凯里地区、湖南洛塔地区、桂林岩溶水文地质试验场及云南蒙自南洞地下河等岩溶供水源地与岩溶充水矿床的勘察和水资源计算工作,将灰色系统理论的指导思想和方法与地下水动力学、水文学和近代数学方法相结合,开拓出一条研究岩溶地下水系统资源(评价和管理等)的新途径。

灰色系统理论是我国邓聚龙教授于1982年独立创立的一门新理论。它为系统研究提供了新的科学方法和数学手段,已逐步形成了一门覆盖面较大、渗透力较强的新兴研究领域;并在社会科学和自然科学的沟通、抽象对象的“实体化”与量化、新型控制系统的创建等方面显示出明显的作用。目前,它已应用于农业区划、农业经济、农田灌溉、粮食预测、工业经济、工业规划、气象、生态、环境、遗传、植保、水文水利、地质、水电、交通、城建、医学、金融等领域,并取得了可喜的成果。

岩溶地下水系统是有物理原型但只能部分可观测的非本征性灰系统。其主要信息是大气降水、水位、水量、水质、水温的记录(长期或短期)及有关钻孔资料等。上述信息的不完全和伪假现象是常见的。重要的水量、水位或钻孔资料往往要付出较大的代价才能得到,要通过多渠道校核它们是很困难的,甚至几乎不可能。因此,岩溶地下水系统的灰性是很突出的和不可避免的,水量、水质计算和预测无法获得足够的信息来利用以往的数学手段及方法进行有效地处理。事实上,有关岩溶地下水系统资源评价、管理等方案也不能待全部有关资料掌握之后才作业。因此,岩溶地下水系统资源评价更迫切地要求在灰条件下进行数学与物理研究的科学方法。

在本书中,我们无意去研究有关灰色系统中某些具体方法的合理性,因为那些内容偏离了我们目前所关心的问题。我们的主导思想是在具体工作中引入灰色系统理论的思想;在建模、预测和计算过程中,将灰色系统理论思想、方法与地下水动力学、水文学和近代数学物理理论方法相结合,完善和开拓灰色系统理论自身和其应用范围,找出岩溶地下水系统资源评价的新途径。这样,我们将把灰色系统理论与岩溶地下水系统资源评价有机地结合,并把这种结合产生的一切现象和所涉及的概念,贯穿于全书之中。

从岩溶水文地质学的角度及系统论的观点来看:岩溶地下水系统就是指由结构有序、数

量一定、性质不同的要素组成的具有一定尺寸，补、径、蓄、排条件的以层次化碳酸盐岩为主的含水岩石集合体。它们有一定的时空特征，在特定的规律制约下，自身之间或与周围环境（外部系统）之间进行物质（水的量与质）和能量（水的热能、势能和动能）的交换和贮存，并以“水流”的方式一以贯之，形成具有特定水量和水质类型组合的相对独立体系。

表 0-1 岩溶地下水系统结构要素

要素	状态	特征	作用
系统组构与维数	含水层（承压和无压）	三维空间展布，有一定的面积和厚度，是地下水主要存贮区与径流区	影响岩溶地下水系统对抽水和其它作用的反应；影响岩溶地下水系统的补给和排泄条件；决定岩溶地下水系统受污染的程度
	弱透水层和隔水层	三维空间展布，构成含水层的顶板或底板	
	主要含水层的岩性	包括可溶的与不可溶的岩石类型	
介质	孔、隙、缝、管、洞	它们的存在与排列方式导致三种类型的介质结构：①小间距小通道为主的细结构；②以大间距大通道为主的粗结构；③介于二者之间的结构	使介质性质呈现非均质和各向异性；水流的运动形式分为管流和散流；速度上分为快速水流和慢速水流；流态上分为层流与紊流
参数	导水系数 贮水系数	导水系数和贮水系数的量值变化很大	控制水位、水量、水温、水质的动态变化，决定井的出水量；决定系统内部分水量的存贮与转换
水的流态与性质	层流紊流 承压无压	层流与紊流在系统内交替出现，且以二者之一为主。水的性质承压与无压在系统内随季节和地段不同交替出现	影响水位、水量、水温、水质的动态响应和水流的运动方式
边界条件	上部边界	由河流和渠道的回归和渗漏，以及大气降雨入渗补给构成	控制系统的水量、水质的输入和输出，影响系统动态的变化和特征；决定系统长期水量平衡
	一类边界	一般由岩溶山区潜流量或地表分水岭，构成变流量或零流量边界	
	混合边界	由一类和二类边界组成构成	
时间时间条件		时间条件在此主要是指系统内部水流运动要素与时间的关系。从时变与时不变的角度来分，有非稳定水流和稳定水流，时变是水流运动的根本，时不变是相对的、暂时的	决定系统内水流的运动方式，影响水位、水量、水温和水质的动态；使地下水长期处于动平衡之中

构成岩溶地下水系统的要素有系统的尺度、组构与维数，介质、水的流态与性质，参数、边界条件和时间条件等（见表 0-1）。

在岩溶地下水系统中，任一个要素的改变，必然引起水流方式的改变（包括水流的路径、方向和强度）；水流方式的改变也就必然影响其它要素，最终导致系统结构和功能发生变异。

从灰色系统理论的角度来看，岩溶地下水系统自身的结构与功能及组成的各要素都具有不同程度的灰性。因此，在岩溶地下水系统资源评价的灰色程度和方法使用问题上，显

然有许多微妙的和无休止地争论。在本书中，我们所关心的是有关灰色构模过程，特别是模型如何建立的，如何检验其内容的一致性以及如何使用它们计算和预测水资源量。本着这个目的，我们把本书分成四章，两个部分：第一部分（一、二章）是基础部分，第二部分（三、四章）是应用部分。

本书的第一部分研究了岩溶地下水系统形成的地质地理背景，类型及内部结构与功能；灰色建模方法与灰色数学物理模型。我们将按照各章的顺序，依次介绍地质背景，类型划分与异同性，水资源特征，灰色系统思想与方法的引入与应用，灰色变量选取，边界条件处理与灰色模型构成等概念、方法和过程。

本书的第二部分论述应用。其中，我们将介绍与岩溶水文地质学和灰色系统理论等新学科有关的一系列模型。我们将说明，如何利用灰色系统思想和方，有效地处理原始资料和数据，建立岩溶地下水系统资源模型。同时，我们还将用模型进行评价与预测，说明如何从模型中得出信息，以及信息有什么用处，借助什么方法进行灰色变换而使它们更加有用。我们还要讨论某些典型模型，说明它们的使用范围。

在给出的每个例子和应用中，我们将应用本书第一部分中所阐述的基本原理，具体说明如何研制和论证模型，并提供由模型结果的合理评价。实际上，第二部分与第一部分是相辅相成、混为一体的。第一部分提供专门性的技术或资料；第二部分给出具体使用与实际问答。

目 录

概述

第 一 章	灰色系统理论与岩溶地下水系统	(1)
第一节	灰色系统理论概述	(1)
第二节	岩溶地下水系统的灰性与研究方法	(4)
第三节	岩溶地下水系统灰色建模与信息处理	(8)
第 二 章	中国南北方岩溶地下水系统基础研究	(12)
第一节	中国南北方岩溶环境与发育特征	(12)
第二节	中国南北方岩溶地下水系统间的差异与类型划分	(14)
第三节	中国南北方岩溶地下水系统灰色数学模型及资源评价方法	(26)
第 三 章	北方岩溶地下水系统应用研究	(32)
第一节	用灰色系统理论对焦作岩溶地下水系统进行降雨量预测与降雨入渗分析	(32)
第二节	灰色系统理论与娘子关泉域	(46)
第三节	灰色系统理论在焦作岩溶地下水系统资源分析中的应用	(53)
第四节	岩溶矿井涌水量灰色预测的基本原理与实例	(59)
第 四 章	南方岩溶地下水系统应用研究	(85)
第一节	灰色系统理论在贵州凯里岩溶地下水系统建模及其资源评价中的应用	(85)
第二节	南方岩溶管道水系统灰结构模型研究	(101)
第三节	灰聚类分析在湖南洛塔岩溶地下水系统中的应用	(114)
第四节	灰关联分析在岩溶泉评价中的应用	(122)
结语		(127)
参考文献		(129)

Contents

Introduction

Chapter 1 . Grey Systematic Theories and Karst Groundwater Systems	(1)
1. Summary of Grey Systematic Theories	(1)
2. The Grey Properties of Karst Groundwater Systems and Study Methods	(4)
3. Setting up Grey Models and Treating Messages of Karst Groundwater Systems	(8)
Chapter 2 . The Basic Research of Karst Groundwater Systems in South and North China	(12)
1. The Karst Environment and Characteristics of Karst Development in South and North China	(12)
2. The Differences and Division of Types Between Karst Groundwater Systems in South and North China	(14)
3. The Grey Mathematic Models and Resources Evaluation Methods of Karst Groundwater Systems in South and North China	(26)
Chapter 3 . The Application Research of Karst Groundwater Systems in North China	(32)
1. The Forecast of Precipitation and Analysis of Rain Permeating By Using Grey Systematic Theories in Jiao Zuo Karst Groundwater System	(32)
2. The Grey Systematic Theories and The Niang Ziguan Spring Catchment	(46)
3. The Application of Grey Systematic Theory in Resources Analyzing in Jiao Zuo Karst Groundwater System	(53)
4. The Principle and Example of Grey Forecasting of Karst Pit Yield	(59)
Chapter 4 . The Application Research of Karst Groundwater Systems in South China	(85)
1. The Application of Grey Systematic Theory in Setting up Model and Resources Evaluation of Kaili Karst Groundwater System, Guizhou Province	(85)
2. The Research of Grey Strutral Model in Karst Conduit Water Systems of South China	(101)
3. The Application of Grey Grouping Analysis in Luota Groundwater System, Hunan Province	(114)
4. The Application of Grey Relational Analysis in Karst Springs Evaluation	(122)
Conclusion	(127)
References	(129)

第一章 灰色系统理论与岩溶地下水系统

第一节 灰色系统理论概述

一、灰色系统理论的基本概念

(一) 灰色系统及灰色系统理论的创立背景

颜色的深浅在控制理论中常用来形容信息的多少。灰色系统是指研究对象信息（或结构、参数、机理、资料）部分清楚、部分不清楚的系统。它是相对于信息全部未知的黑色系统和信息全部已知的白色系统而言的。实际上自然界绝大多数系统都是灰色的，黑色、白色系统只不过是极端的情况。灰色系统较真实、全面地反映了我们对一个实际系统的认识程度。对任何实际系统，我们不可能也没必要了解与之有关的所有信息，从这个意义上讲，对系统的研究就不得不从灰色的角度出发。

长期从事自动化、系统工程和控制理论研究的邓聚龙教授于 1979 年开始研究参数不完全大系统、未知参数系统的控制问题，并于 1982 年在荷兰《系统与控制通讯》国际杂志上正式发表奠基性论文《灰色系统的控制问题》。灰色系统理论自提出以来，受到了国内外许多知名学者的好评，目前已逐步形成一门覆盖面较大、渗透力较强的新兴研究领域。

(二) “灰”的含义及“灰”与“白”的辩证关系

“灰”的概念反映了人们在认识事物过程中一种过渡、渐变、折衷、灵活的方式。对于不同的问题，“灰”的含义可有不同的理解。当人们讨论获取的系统资料的完善程度时，“灰”可以理解为介于完善与不完善、部分完善与部分不完善之间；当讨论对事物的认识程度时可以理解为介于清晰与不清晰之间的朦胧……。

从实质看，系统分析过程一般是由“白”到“灰”的过程。系统是白还是灰，往往与观测的层次有关。同一个系统、同一个参数，在宏观、整体的高层次来看可能是白的，而在微观、局部的低层次来看就是灰的了。更多的情况是由“灰”变“白”。具体说来就是将有限的信息作合理的加工、处理，以生成更多的信息，使问题尽可能变得清楚些，使判断尽可能准确些。

(三) 灰色系统的几个基本概念

灰色系统用灰色参数（简称灰数或灰元）、灰色方程、灰色矩阵等来描述事物。某个只知道大概范围而不知道确切值的数，称之为灰数，用 $\otimes$ 来表示。含有灰元的方程与矩阵则分别称为灰色方程与灰色矩阵。灰数有以下几类：区间灰数，信息型灰数（也称邓氏灰数），连续灰数与离散灰数，本征灰数与非本征灰数。

本征灰数是指永远不可能或者暂时还不可能找到一个白数作为“代表”的数。比如，地球上水资源总量，某地下水位的预测值（在时间未到来之前）等都是本征灰数。非本征灰数是指凭已知信息或间接手段，可能找到一个白数作为“代表”的数。这个白数称为灰数的白化值，如通过抽水试验获取的渗透系数、导水系数等。

灰色系统理论认为,区别白色系统与灰色系统的主要标志是:系统因素之间是否具有确定的关系。例如,电流和电压、电阻之间可用欧姆定律 $I=U/R$ 来描述,由电压变化序列可以唯一地确定一个电流序列,这是一个白色系统。因此可以说白色系统的特征是因素之间存在映射关系。因素之间有明确的映射关系,要求系统有明确的作用原理、明确的结构和物理原理。然而许多系统,如岩溶地下水系统,虽然有物理原型,知道影响系统的某些因素,但很难明确全部因素,很难确定各因素之间的映射关系。我们以往建立的模型都是在一定的假设条件下,按某种逻辑推理、某种理性认识得到的,这种关系充其量只能是原系统的“代表”,这类系统可称为非本征性灰色系统。岩溶地下水系统就属此类。

二、灰色系统理论研究的基本方法

(一) 系统分析法

目前,系统分析的量化方法大都属数理统计方法,如回归分析、方差分析、主成分分析等。其中,以回归分析法用得最多,然而回归分析有下述弱点:要求大样本量;要求样本有较好的分布规律;计算工作量较大;可能出现量化结果与定性分析结果不符的现象。

灰色系统理论提出了一种新的分析方法,称为系统的灰关联度分析法。它是根据因素之间发展势态的相似或相异程度,来衡量因素间关联程度的方法。灰关联度是按发展趋势作分析,对样本量的多少没有过分要求,也不需要典型的分布规律,计算量小,且不致出现灰关联度量化结果与定性分析不一致的情况。

灰关联度分析方法是目前水文地质领域应用较广泛的一种方法。在岩溶矿区防治水方面,可用该方法寻找影响矿井突水的主要因素。如某矿矿井涌水量可能受多个含水层、地表水及大气降水等多种因素的影响,在生产过程中,将实测的矿井涌水量序列作参考序列,将各含水层水位、地表水水位、降雨量等序列作为比较序列,进行灰关联度分析就可以找出矿井突水的主要影响因素,为制定防治水方案提供依据。该方法还可用于分析含水层间的水力联系、确定地下水动态的影响因素等。

(二) 灰色建模法

灰色系统理论基于灰色关联空间、光滑离散函数等概念,定义了灰导数与灰微分方程,进而用离散数据列建立了微分方程型的动态模型,考虑到这是本征灰色系统的基本模型,且模型非唯一,是近似的,故称为灰模型,记为GM (Grey Models)。

灰色理论之所以能够建立近似的微分方程型模型,是基于下述概念、观点、方法和途径。

①灰色理论将随机量当作是一定范围内变化的灰量,将随机过程当作是在一定幅区和一定时区变化的灰过程。

②灰色理论将无规律的原始数据变为较有规律的生成数列后再建模,灰色模型GM实际上是生成数据模型。

③通过GM模型得到的数据,必须经过逆生成还原后才能用。

④灰色理论是针对符合光滑离散函数条件的一类数列建模,一般原始数据作累加生成(AGO)后,可得到光滑离散函数。

⑤基于光滑离散函数的收敛性与灰关联空间的极限概念,定义了灰导数。

⑥灰色系统认为微分方程是背景值与各阶导数(灰导数)的某种组合:若组合是线性的,系数是常数,则称为线性微分方程;若组合是非线性的,则是非线性微分方程。

⑦灰色理论通过灰数的不同生成,数据的不同取舍,不同级别的残差GM模型的补充、调整、修正,提高模型精度。

⑧灰模型在考虑残差GM模型的补充后,变成了近似的差分微分模型。

⑨一般采用三种方法检验和判断GM模型的精度:A.残差大小检验,为逐点检验。B.关联度检验,是模型曲线形状与参考曲线形状接近程度的检验。C.后验差检验,是残差分布、残差统计特征的检验。

⑩对高阶系统建模,灰色理论通过GM(1, N)模型群来解决,GM模型群即一阶微分方程组。此外,也可以通过多级残差GM模型的补充修正来解决。

(三) 灰色预测法

灰预测是直接采用GM(1, 1)模型对系统行为特征值的发展变化进行的预测(数列预测);对行为特征值中异常值发生时刻进行估计(灾变预测);对在特定时区发生的事件,作未来时间分布的计算(季节灾变预测);对杂乱波形的未来态势与波形所作的整体研究(拓朴预测);对系统多个因子的动态关联,进行GM(1, 1)与GM(1, N)的配合研究(系统预测)。

以往常用的预测模型都是因子模型,建立因子模型的关键是要找出与预测对象相关性好,彼此间独立的预测因子。由于岩溶地下水系统本身及其发展过程的灰性,有时很难给我们提供预测因子的准确信息,所以要建立因子预测模型是困难的,有时甚至是不可能的。而灰模型为预测事物的发展变化过程提出了新的理论和方法,其中应用最广泛的是单一序列一阶线性动态GM(1, 1)预测模型。GM(1, 1)预测模型是与相对无限系统相适应的,根据预测变量自身数据预测自身的进展,完全不考虑与其它因子的相关性,只要GM(1, 1)模型与不同数据生成处理相结合,就能作出不同要求的预测。

灰色建模及预测方法可用于矿井涌水量、突水量、地下水位、水质、泉流量、地面沉降、滑坡等方面的预测。

(四) 灰色决策方法

所谓决策,是指发生了某些事件,考虑许多对策去应付;不同对策的效果不同,从这些对策中挑选一批效果最佳者,去对付这些事件。灰色决策理论解决了许多传统决策方法所不能解决的问题。决策模型中含有灰元或一般决策模型与GM(1, 1)模型组合时进行的决策,称为灰色决策。

灰色决策方法有灰统计决策、灰聚类决策、优势分析、灰层次决策、灰局势决策、灰线性规划决策及系统总体协调仿真等。

灰色决策方法可应用于岩溶地下水系统资源定量评价、矿坑水质综合评判及地下水资源的最优控制与科学管理等方面。

三、灰色系统理论与模糊数学、黑箱分析方法的区别

一般认为,“灰色系统”与“模糊数学”、“黑箱”的区别,主要在于对系统内涵与外延处理态度的不同,研究对象内涵与外延性质的不同。

灰色系统着重外延明确、内涵不明确的对象。模糊数学着重于外延不明确、内涵明确的对象。

“导水系数为300—350m²/d”,是灰色系统的命题。因为是指“导水系数”而不是其它参数,所以外延明确,然而我们对导水系数的确切值并不清楚,只知其范围,这表明内涵

不明确。在研究方法上,灰色系统的命题,可以通过信息的补充转化性质。比如对含水层做抽水试验,就可以确定它的参数值,便可将导水系数灰的内涵转化为白的内涵。

“透水性好”作为概念模糊数学的命题。因为“透水性好”是相对于“透水性一般”、“透水性差”而言的,其内涵明确;而透水性好坏的划分指标是很难确定的。因此,其外延不明。在研究方法上,扎德(Zadeh)提出用模糊集来描述“透水性好”,而不是通过信息补充来使命题的性质转化。

“黑箱”分析方法是着重系统外部行为数据的处置方法,是因果关系的量化方法,是取外延而弃内涵的处置方法。

灰色建模方法是着重系统行为数据间内在关系挖掘的量化方法,是内涵外延化的方法,是外延内涵均取的方法。如GM(1,1)模型的灰作用量,形式是外延的,而内容是内涵的。“黑箱”方法因果是明确的,建模的序列必有前因序列(输入序列)与后果序列(输出序列),必须是双“序列”。而灰色系统的GM(1,1)模型则是以单序列建模,可以通过辨识,找出外延形式的作用量即灰作用量,因果关系不一定非明确不可。

模糊数学属数学范畴,以特有模糊集合为基础,用隶属度来讨论问题,灰色系统理论属系统理论范畴,以经典数学方法为基础,是一种新的系统思想,而不是一种新的数学方法。

模糊数学以概念、思维的量化为宗旨,侧重于对事物的描述,在水文地质领域,目前多用于聚类分析、水质综合评判等。灰色系统理论除具有与之相近的功能外,主要以信息的利用与开拓为宗旨,以客观现象的量化为目标,除对事物描述外,更侧重于对事物发展过程进行动态研究。

概言之,灰色系统与模糊数学的区别在于:

①数学基础不同。模糊数学以模糊集作为主要数学手段,建立在多值逻辑的基础上。灰色系统建立在一般数学基础上(数学分析、线性代数、泛函数、拓扑等),而不是逻辑问题。

②任务不同。模糊数学研究概念描述、研究逻辑的量化关系。灰色系统研究本身是自然科学,是系统论的分支,控制论的发展,是运筹学与控制论的结合。

③研究角度不同。模糊数学研究的概念比较明确,但量化模糊,不是从信息和信息完备角度提出问题和解决问题。灰色系统是从信息是否完备的角度来研究问题。

小 结

在过去十年中,灰色系统的理论和应用研究取得了很大的进展。但机遇与挑战同在,困难与希望并存。从理论角度看,有许多问题需解决;从应用范围与效果观,有许多领域需开拓,有许多成果需总结。

总之,灰色系统的理论研究与应用探索的发展前景亦是灰色的,在世界科学发展过程中它会找到属于自己的席位。

第二节 岩溶地下水系统的灰性与研究方法

应当指出,岩溶地下水系统的灰性在于其本身。岩溶地下水系统结构、功能和域值(范围)的复杂多变性,决定着其灰性的程度要大于其它类型的地下水系统。岩溶地下水系统自身有多变性、适应性与统一性。在这个统一性中,水循环支撑着含水介质空隙空间由小

到大,由分到合;推动着系统“生命”的运转;支配着系统自身发育演化。不同类型的含水介质通过水流的贯穿,相互联系,相互作用构成各类岩溶地下水系统。岩溶地下水系统在其“生命”的过程中,受环境影响,其结构、功能和域值的不断变化,造成并加深了其自身的灰性。

一、岩溶地下水系统灰的根源

灰作为岩溶地下水系统的特性,是相当普遍的客观存在。我们在探讨岩溶地下水系统灰性时,首先会碰到灰性的根源问题。我们需要思考:灰的根源是什么?换言之,岩溶地下水系统的灰性究竟从何而来?只有对这个问题作出明确的回答,才能进一步探讨灰现象问题。

如前所述,越来越多的资料说明,岩溶地下水系统灰的根源在于其自身。在回答这个问题时,提出如下的看法:

其一,灰是系统自身发育演变过程中,在时空上的变化。从时间这个侧面纵向观察岩溶地下水系统,可以发现系统的岩溶化程度是前后相继的由低级向高级发展的多级过程。在这一过程中,要把握其某一阶段的岩溶化程度是困难的;从空间这个侧面横向观察岩溶地下水系统,发现系统与系统之间,系统与环境之间是相互为邻的多层、多态、多域复杂的大系统,要准确划分出其间联系是不可能的。

其二,灰是系统结构与功能的体现,任何岩溶地下水系统都具有与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力,这就是它们的功能;而系统内部各种要素间的有机结合和相互关联,就是它们自身的结构。系统的功能与结构间的对立、统一与矛盾运动,构成系统发生发展的动力,致使系统自身及与环境间的相互作用始终处于变化之中,使人们难以把握住其“真实”面貌。

其三,灰是系统信息量的表述。岩溶地下水系统信息有多种多样,对其信息分析与提取存在一定困难,我们仅能获取其部分信息。例如,水动态信息是其结构和输入输出多维向量在时空变化的综合反映;包括典型岩溶地下水系统排泄量动态,如北方岩溶大泉、南方地下河及岩溶泉等;典型岩溶地下水系统水位动态,如岩溶水源地、矿山等人工流场扩展趋势等。对岩溶地下水系统水动态信息的分析与提取,应包括对天然环境与人工影响二次输入信息进行定量化研究,对系统输入输出信息合成、分解及反馈进行处理。如我们对已掌握的中国南北方著名岩溶大泉与地下河,水动态某些特征值——降水有效入渗系数、降水与流量峰现的滞后时间,流量不稳定过程的相对和绝对值等——说明中国南北方岩溶地下水系统的差异,提供有关岩溶含水介质结构信息。岩溶地下水系统信息提取与分析过程中,所存在的问题和今后的具体任务是:

①对我们所掌握的信息应全面分析,去伪存真,找出不同层次(级别)的有用信息,研究它们彼此间各自与整体之间的相似程度与相关性,尽力降低系统的灰度,使研究得到深化。

②在此基础上,应尽可能找出包含系统整体信息量最多,最能反映岩溶发育层次化与整体特征的有用信息(高级信息),并归纳、总结其分布规律,以便提高工作效率,加快研究进展。

③对系统信息的提取与分析应以宏观结构与显微结构两个方面入手,并要处理好它们的结合问题。引进当代新概念和新技术方法,包括分维理论与分形技术,对复杂多变的岩

溶现象进行深入的分析研究。

在本部分我们通过三个方面的论述,说明灰的根源在于系统本身,也是对本部分命题的回答。

二、岩溶地下水系统中灰的现象

在中国南北方岩溶区,岩溶地下水系统与环境间的质能交换与传输过程中,呈现出各种灰的现象,引人究其根源,想入非非,大有“物含妙理总堪寻”之势。

①千姿百态的岩溶空隙空间。从洞穴探险的目视,经钻探的岩芯取样,借显微镜下的观察,所显示的大小不一,形态各异的含水介质类型——孔、隙、洞、缝、管——的多种组合方式,令人难以窥视其内涵。

②变幻莫测的岩溶水动态。岩溶地下水系统水动态类型众多,变化剧烈。无论在水位、流量及水化学和水温度等方面都是如此,给监测工作带来很大困难,难以获取其全部信息。

③厚度多变的包气带,活动频繁的季节变动带,极不均一的饱水带为岩溶地下水系统又一灰象。

加之,多源的补给,时变的疆域,多级的调蓄,快速的“三水”转化等等,全是岩溶地下水系统所呈现出的种种灰象。时至今日,人们从岩溶地下水系统自身运动中已经寻找到了许多灰的现象,但还有更多的灰象待我们去探寻。

三、研究岩溶地下水系统灰性的基本方法

(一) 岩溶地下水系统的灰分类

根据人们对岩溶地下水系统输入、输出和内部结构的认识程度与信息分析和提取量,来划分六种不同的灰类型(见表 1-1)。

表 1-1 岩溶地下水系统灰类型划分

性 质 依 据	类 型	1	2	3	4	5	6	7	8
系 统 结 构		已 知	已 知	已 知	已 知	未 知	未 知	未 知	未 知
系 统 输 入		已 知	未 知	未 知	已 知	未 知	已 知	已 知	未 知
系 统 输 出		已 知	已 知	未 知	未 知	已 知	未 知	已 知	未 知
备 注		白 系统	灰 系统	灰 系统	灰 系统	灰 系统	灰 系统	灰 系统	黑 系统

(二) 岩溶地下水系统表征体元 (REV) 分析

在岩溶地下水系统中,多孔(连续)介质方法的使用范围, J. Bear 提出了一个明确的约束条件。针对岩溶含水介质内任何一点 P_i , 有一个明确的空间规模 V_i , V_i 内的空隙度 (n_i) 有一变化区间, 当统计 V_i 的数量足够多时, 根据数学中的大数定律 (law of large numbers), 平均值不再与平均的个数有关, 空隙度趋向一个极限 (见图 1-1)。这时我们称统计体 V_i 为表征体元 (represent element volume, 简称 REV)。

表征体元的体积远远小于整个岩溶地下水系统的体积。表征体元在一定范围内变化,而空隙度变化不大时,用多孔(连续)介质的方法是有效的。

考察岩溶地下水系统的含水介质,特别对以管道为主的含水介质,就难以找出上述有确定空隙度区间的 REV。从图 1-2 中可见,当统计体积 V_i 由小到大时,空隙度变化从两个方面向系统平均空隙度趋近。上方偏大的空隙度曲线是沿主管道随机采样的统计;下方偏小的曲线则为离开主管道外任意点采样统计的空隙度变化,可以看出,此类系统含水介质中不存在表征体元 REV,也不适于使用多孔(连续)介质方法来描述其水流运动规律。

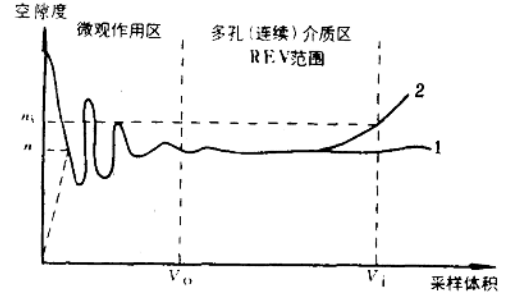
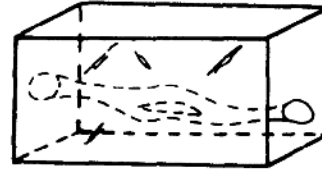


图 1-1 表征体元 (REV) 与孔隙率关系曲线图
(多孔介质方法适用范畴, 据 J. Bear, 1972)

1—均匀介质; 2—非均匀介质



岩溶管道介质概念示意

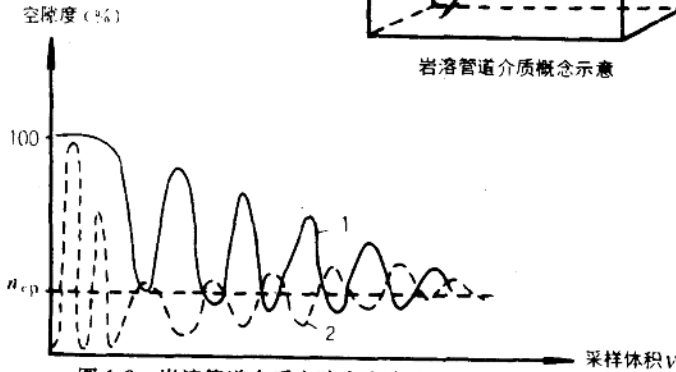


图 1-2 岩溶管道介质空隙率变化曲线示意图

1—沿主管道随机采样统计空隙度曲线; 2—主管道外随机采样统计空隙度曲线

(三) 岩溶地下水系统灰的数学物理方法

针对岩溶地下水系统灰的分类与 REV 存在性, 我们从以下三个方面来讨论灰的数学物理方法问题。

①对结构已知, 输入或输出部分未知, 存在 REV 的岩溶地下水系统, 可采用地下水流方程进行描述。在求解过程中, 部分未知的输入或输出信息, 可通过灰色水量均衡分析, 进行处理。

②对结构未知 (部分或全部), 输入或输出信息已知或有一方未知, 存在 REV 的岩溶地下水系统, 亦可采用地下水流方程进行描述。在求解过程中, 结合优化方法或混合模型方法, 对未知的边界, 参数或含水介质组构进行灰处理。

③与上述二者信息量相同, 仅 REV 不存在的岩溶地下水系统, 不能直接采用地下水流

方程来描述。因此有必要另找途径——灰色物理模拟方法，灰色系统方法，陆地水文学方法等等。

小 结

在本节，我们集中讨论了岩溶地下水系统的灰性，论证了灰的根源在于岩溶地下水系统自身，例举了灰的现象。针对岩溶地下水系统的灰性，进行了系统灰分类，通过 REV 是否存在的命题，讨论了含水介质的特性，将灰分类与 REV 的有无进行结合，从三个方面讨论了岩溶地下水系统灰的物理数学基本方法。

从机理上看，目前岩溶水文地质学主要着重于研究水的质能在岩溶含水介质中的迁移。野外的介质骨架结构、空隙形状异常复杂，人们无法直接观测水质点在介质中的运动，只能从等效、平均的角度来研究问题，岩溶含水介质中许多机理将永远是灰的，其资源具灰性。另外，地下水开采，水文地质条件具有随时间变化的特征，目前并没有从根本上解决水资源的预测与评价，一些主要方法都是借鉴多孔介质中地下水运动理论，将岩溶水文地质条件加以高度概化后，加以利用。

从影响因素来看，岩溶地下水系统许多输出变量如水位动态、泉或地下河流量变化等都是各种自然及人为因素综合作用的结果。特别是在岩溶矿区，系统受人为因素干扰更为严重。在众多的影响因素中，只能了解局部的、主要的影响因素，因此，我们已认识到的岩溶地下水系统的影响因素，只是所有影响因素的一部分。

从获得的信息来看，由于测试手段不够先进，系统本身还可能呈现某些假象；再者由于人为因素的影响，使得获取的资料或精度不够、或不连续；都是有一定变化范围的灰数。

从水文地质边界来看，自然界没有绝对隔水边界或绝对的定水头边界，且随着岩溶地下水系统开采，水文地质边界的性质和位置有可能改变，所以系统的边界条件也是灰的，即灰边界。

从研究目的看，岩溶地下水系统庞大而复杂，根本无法也没有必要对其进行“精确”的监测与控制。例如在进行矿井涌水量预测时，设计部门有时采用的涌水量值可能是我们提供的涌水量的几倍，甚至几十倍。这就是说，实际生产中并不要求提供涌水量的某一精确数值，只要求提供涌水量的变化区间。总之，作为水文地质工作者，我们所要达到的目的是灰的。

综上所述，岩溶地下水系统是一个部分信息已知，部分信息未知的灰色系统。

第三节 岩溶地下水系统灰色建模与信息处理

建立模型和用模型对岩溶地下水系统进行水资源评价、预测和研究的置信度，先取决于对岩溶水文地质条件典型化、概化与灰化的质量；后依靠信息的提取、分析与处理的方式和方法。一个好的系统模型，能成为我们研究复杂系统的有力“武器”。

一、岩溶水文地质条件典型化、概化与灰化原理

岩溶水文地质条件典型化是区域水文地质分区或亚系统、子系统和分系统的划分。这种分区或次一级系统的划分是按含水介质组构类型，水流的传输条件和水力学状态，边界类型和作用在边界上的边界条件等一些特点来选择的。分区或次一级系统划分都是通过地下水流传输、水动态特征与水均衡的构成条件等方面存在一定的规律性来表现的。

岩溶水文地质条件的概化,就其本质讲是一种研究,是对复杂岩溶地下水系统的简化与再创造过程。因此,要求对系统的输入、输出、结构与功能有深刻的了解,通晓研究的过程赖以建立模型的原理与假设,对系统自身的时空分布、变异性与整体特征及其地质和水文地质条件有全面掌握。概化可分以下几个方面进行。

①系统结构空间和形状的简化。在研究中,我们通常把系统结构的空间维数简化成一维、二维或拟三维状态,使复杂的结构与多变水流传输方式的矛盾得以缓解、处理起来较为方便。

②系统水均衡要素的概化。确定系统与环境间的“三水”转化关系与量化指标。“三水”间的转化,能分则分,不能分则和。对系统内部水流的传输方式,条件允许,则细分;条件不允许,则粗分。

③边界和边界条件的概化。对地下分水岭与地表分水岭界限和形态的变化给予确定;对流量边界量化;对混合边界给予明确的划分。

④对整个系统结构与含水介质的不均匀性的概化。对结构层次性与含水介质的不均匀性的概化可分为宏观和微观两个方面。在宏观上,根据岩溶化程度,岩层的构造与结构的变化、岩相的变化、构造破碎带等划分出若干个块段。在微观上,根据含水介质类型与结构,水流的传输方式与水文地质参数的变化,在宏观概化的基础上,进一步划分出若干个小单元(每一块段可包括多个小单元),认为每一块段或小单元内系统结构单一,含水介质均匀。

灰化可以包括以下几个方面的内容:

①系统结构的灰化。包括组成结构的各要素。例如,对可动和可变流量边界的灰化——灰边界;对含水介质结构的灰化——灰含水介质结构;对水文地质参数的灰化——灰参数等等,并给出灰数或灰元的变化区间与组合方式等。

②系统输入信息的灰化。包括输入源量值的灰化与输入方式、地点等的灰化,得出相应的灰输入源(降雨入渗,地表水补给,人工补给等)和灰输入方式(点补给,面补给,线带补给等)等等。

③系统输出信息的灰化。包括输出量值的灰化与输出方式和地点位置等的灰化,得出相应灰输出量与灰输出方式(泉流,地下河流,潜流,越流等)和灰地点位置等。

二、岩溶信息的提取、分析与处理

岩溶地下水系统信息的提取、分析与处理是在定性分析的基础上,在与系统有关的众多信息量中,定量提取有用信息,处理复合信息。与系统有关的信息可分为两大类:内部结构信息与环境功能信息。

内部结构信息反映了系统内部结构的变化,内部结构信息量体现了人们对系统内部结构的研究程度。环境功能信息反映环境与系统间相互作用,包括环境的变化和系统输入输出的变化等;环境功能信息量体现了人们对环境与系统功能的了解深度。

内部结构信息与环境功能信息二者间的关系可分为三种类型:

①继起信息,即在时间顺序上各种信息有承先启后的关系。

②联动信息,即各种信息相互间有其依存关系。这里又可以分为两种:其一是因果或主从关系,其二是连理关系。

③并行信息,即在时间上无先后,在空间上并存。各种信息相互间无牵连,它们分别体