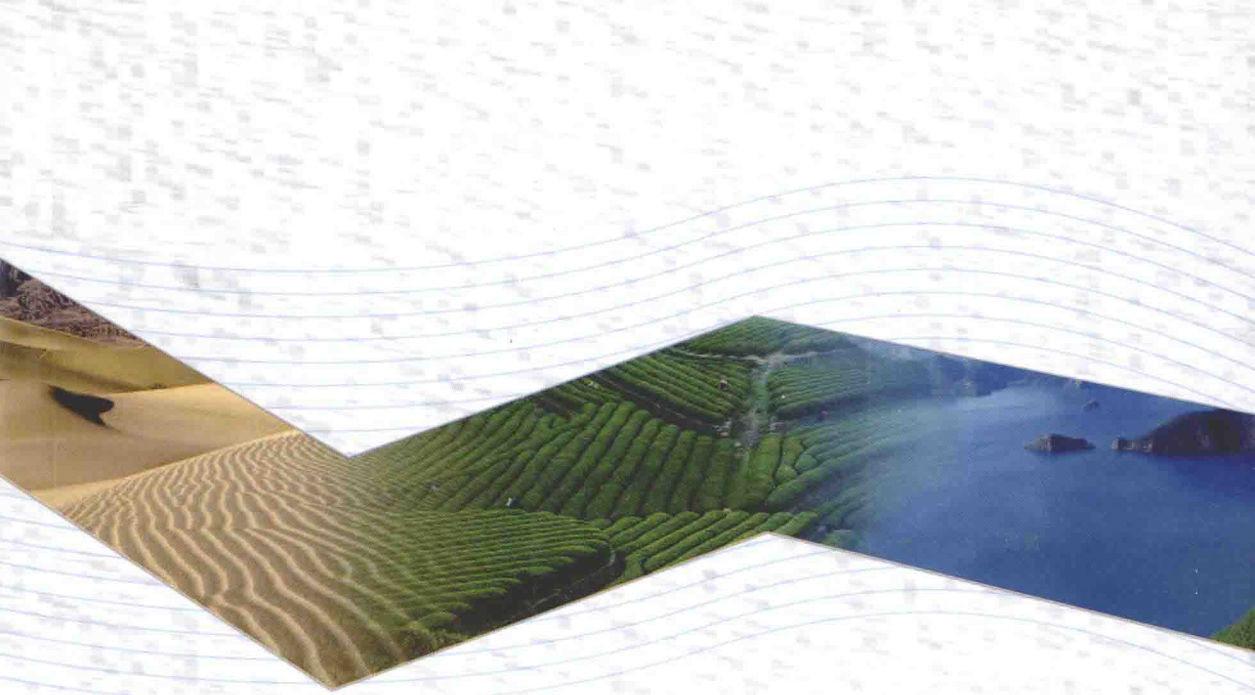




水资源系统评价 与预测的集对分析方法

潘争伟 吴成国 金菊良 著



科学出版社

水资源系统评价与预测的 集对分析方法

潘争伟 吴成国 金菊良 著

国家自然科学基金项目（51309004，51309072，51579059）

安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目（gxyqZD 2016393）资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以水资源系统评价与预测为研究对象,论述了系统评价与预测方法论、集对分析方法理论基础及其扩展、基于集对分析的系统评价与预测方法论,提出了基于集对指数势的影响因子分析方法、基于模糊数的集对分析系统评价方法和基于联系函数的系统评价方法,阐述了基于模糊集对分析的系统评价方法和基于集对分析的预测方法等,开展了上述系统评价与预测方法的应用研究,并结合学科特点和应用实践对其进行了完善和发展,初步建立了基于集对分析的水资源系统评价与预测的理论方法体系。

本书可作为高等院校水文水资源、环境科学与工程及其相近专业的高年级本科生和研究生的教学和科研参考书,也可供相关专业的科研、管理和工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统评价与预测的集对分析方法/潘争伟,吴成国,金菊良著. —北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-049707-9

I. ①水… II. ①潘… ②吴… ③金… III. ①水资源-资源评价 IV. ①TV211

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第204488号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016年9月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:330 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

随着世界人口不断增加、社会经济快速发展,人类所面临的水资源短缺、水环境污染和水灾害等水问题日趋严峻。水资源系统是一个涉及资源、社会、经济、生态环境等多方面的复杂系统,蕴含了诸多不确定性,水资源问题必须应用系统科学的观点和方法进行分析研究。水资源系统评价与预测是水资源系统工程的重要内容,也是做好水资源管理和水环境保护的重要前提。水资源系统评价与预测方法类型多种多样,且仍有新的系统评价与预测方法不断涌现,持续推动着水资源学科和系统科学的发展。

集对分析(Set Pair Analysis)是中国学者赵克勤先生于1989年提出的一种新的系统分析方法,该方法是从系统的角度研究集对中两个集合的确定性关系和不确定性关系,提出利用联系数对系统的确定性和不确定性进行全面刻画。鉴于其处理不确定性问题的独特性和方法的通用性,已在系统评价、决策、预测,以及相关分析、相似分析、模式识别、推理等方面得到广泛应用,取得了丰富成果。在此背景下,本书以集对分析建模方法论及其在水资源系统评价与预测中的应用为主线,开展了一系列基于集对分析水资源系统评价与预测的理论与应用研究,重点阐述基于集对指数势的影响因子分析方法,基于模糊集对分析的系统评价方法,基于模糊数的集对分析系统评价方法,基于联系函数的系统评价方法和基于集对分析的系统预测方法,以及这些方法在水资源系统评价与预测中的应用,并结合学科特点和应用实践对其进行了完善和发展,初步建立了基于集对分析的水资源系统评价与预测的理论方法体系。

该书反映了作者在资源与环境系统工程领域多年研究和应用所取得的进展,也体现了作者对水资源学科发展所作出的贡献。全书内容新颖、充实,结构清晰,论述深刻,系统性和逻辑性强,是一部理论性和实践性很强的优秀论著。相信此书将对水资源系统分析理论的发展与完善起到重要的推动作用,同时,对广大的水资源专业研究人员和从事工程应用的实践者来说无疑是一部不可多得的参考书,也将更有力地促进水资源学科和系统科学向更高、更新的方向发展。

四川大学水利水电学院博士生导师



2016年4月

于成都

前 言

水资源是支撑社会经济增长与可持续发展的最基本的要素之一。水资源系统工程是对水资源复杂系统进行科学规划、最优设计和优化运行管理的一门新兴交叉工程技术学科。从系统方法论的角度看,水资源系统工程的实质是由系统优化方法、建模方法、预测方法、模拟方法、评价方法和决策与调控方法组成的方法集,用以最佳地处理各种水资源系统问题。其中系统评价与预测是系统工程理论的重要组成部分,通过分析系统发展变化的规律性,判断系统未来发展变化趋势,为系统决策提供科学依据。集对分析方法是从系统的角度研究集对中两个集合的确定性关系和不确定性关系,已在系统评价、决策、预测、相关分析、相似分析,以及模式识别、推理等方面得到广泛应用,取得了丰富研究成果。

在国家自然科学基金(项目编号:51309004,51309072,51579059)和安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(项目编号:gxyqZD2016393)的资助下,本书作者通过多年的研究、归纳、总结、提炼,以集对分析建模方法论及其在水资源系统评价与预测中的应用为主线,初步建立了水资源系统评价与预测的集对分析方法体系,全书共七章:第一章为绪论,概述水资源系统评价与预测方法论和研究进展;第二章为水资源系统评价与预测的集对分析方法理论基础;第三章为基于集对指数势的水资源系统影响因子分析方法,包括集对指数势的基本概念,基于集对指数势的影响因子分析方法以及在水资源系统中的应用;第四章为基于模糊集对分析的水资源系统评价方法,包括模糊联系度和集对分析-可变模糊集的基本概念,基于模糊联系度的系统评价方法和基于集对分析-可变模糊集的系统评价方法,以及在水资源系统评价中的应用;第五章为基于模糊数的集对分析水资源系统评价方法,包括基于模糊数的联系数的基本概念,基于模糊数联系数的系统评价方法和基于模糊数随机模拟的集对分析系统评价方法,以及在水资源系统评价中的应用;第六章为基于联系函数的水资源系统评价方法,包括联系函数的基本概念,基于联系函数的系统评价方法以及在水资源系统评价中的应用;第七章为基于集对分析的水资源系统预测方法,包括集对分析预测方法的理论基础,基于集对分析的相似预测方法、基于集对分析的聚类预测方法和基于集对分析的自组织预测方法,以及在水资源系统预测中的应用。

本书内容新颖,结构清晰,突出理论基础和实际应用。本书对高等院校的研究人员、学生和从事实际工作的工程技术人员很有价值。

本书第一章由潘争伟、金菊良共同撰写;第二章、第三章由潘争伟撰写;第

四章 4.1 节、4.4 节由金菊良撰写，4.2 节由吴成国撰写，4.3 节由潘争伟撰写；第五章 5.1 节、5.4 节由金菊良撰写，5.2 节、5.3 节由潘争伟撰写；第六章由潘争伟撰写；第七章 7.1 节由金菊良撰写，7.2 节、7.3 节由潘争伟撰写，7.4 节、7.5 节由吴成国撰写；前言由潘争伟、金菊良共同撰写。全书由潘争伟负责统稿，金菊良负责审校定稿。在本书写作过程中得到汪明武、汪哲荪、吴开亚、张礼兵、刘丽、周玉良、蒋尚明、周戎星、罗月颖、王艳华、高苏蒂等老师的大力支持，在此特向他们表示最诚挚的谢意！

感谢提供资料、研究成果的国内外学者，特别感谢四川大学水利水电学院博士生导师丁晶教授为本书作序。作者还要感谢科学出版社的同志们为本书出版所倾注的心血。

由于时间和作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请各位专家和读者给予批评指正。

作 者

2016 年 4 月

于合肥

目 录

第一章 绪论	1
1.1 系统评价与预测方法论	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 方法论	5
1.2 研究进展	10
1.2.1 水资源系统评价与预测研究进展	10
1.2.2 集对分析方法研究进展	14
1.3 本书的目的与内容	23
1.3.1 本书的目的	23
1.3.2 本书的内容	24
第二章 系统评价与预测的集对分析方法理论基础	25
2.1 集对分析方法基本原理	25
2.1.1 矛盾的统一性	25
2.1.2 联系的普遍性	26
2.2 集对与关系	27
2.2.1 集合	27
2.2.2 集对	27
2.2.3 关系	28
2.3 联系度与联系数	29
2.3.1 联系度	29
2.3.2 联系数	30
2.3.3 联系数确定	30
2.3.4 联系数运算	34
2.4 集对势与偏联系数	35
2.4.1 集对势	35
2.4.2 偏联系数	37
2.5 联系变量与联系函数	38
2.6 集对分析方法的扩展	39
2.6.1 模糊联系度	39

2.6.2	基于模糊集的联系数	40
2.6.3	联系熵	41
2.6.4	联系概率	42
2.6.5	联系数物元	43
2.6.6	联系数与区间数	43
2.6.7	联系数与三角模糊数	43
2.7	系统评价与预测的集对分析方法论	44
第三章	基于集对指数势的水资源系统影响因子分析方法	45
3.1	概述	45
3.2	基于集对指数势的影响因子分析方法	46
3.2.1	基本理论	46
3.2.2	基于集对指数势的影响因子分析方法步骤	47
3.3	基于集对指数势的影响因子分析方法应用	49
3.3.1	流域水资源系统脆弱性影响因子分析应用	49
3.3.2	区域水环境系统脆弱性影响因子分析应用	54
3.4	小结	60
第四章	基于模糊集对分析的水资源系统评价方法	61
4.1	概述	61
4.2	基于模糊集对分析的系统评价方法	62
4.2.1	基本理论	62
4.2.2	基于模糊联系度的系统评价方法	68
4.2.3	基于集对分析-可变模糊集的系统评价方法	70
4.3	基于模糊集对分析的系统评价方法应用	72
4.3.1	基于模糊联系度的系统评价方法应用	73
4.3.2	基于集对分析-可变模糊集的系统评价方法应用	93
4.4	小结	131
第五章	基于模糊数的集对分析水资源系统评价方法	132
5.1	概述	132
5.2	基于模糊数的集对分析系统评价方法	134
5.2.1	基本理论	134
5.2.2	基于模糊数联系数的系统评价方法	141
5.2.3	基于模糊数随机模拟的集对分析系统评价方法	142
5.3	基于模糊数的集对分析系统评价方法的应用	143
5.3.1	基于三角模糊数联系数的系统评价方法应用	144
5.3.2	基于梯形模糊数联系数的系统评价方法应用	170

5.3.3 基于模糊数随机模拟的集对分析系统评价方法应用	179
5.4 小结	184
第六章 基于联系函数的水资源系统评价方法	186
6.1 概述	186
6.2 基于联系函数的系统评价方法	187
6.3 基于联系函数的系统评价方法应用	188
6.3.1 水体富营养化评价应用	189
6.3.2 自然灾害风险度评价应用	191
6.4 小结	196
第七章 基于集对分析的水资源系统预测方法	197
7.1 概述	197
7.1.1 系统预测方法	197
7.1.2 系统预测一般步骤	198
7.1.3 基于集对分析的系统预测方法	199
7.2 基于集对分析的水资源系统相似预测方法	199
7.2.1 基于集对分析的相似预测方法	200
7.2.2 基于集对分析的多因子回归预测方法应用	206
7.2.3 基于近邻估计的联系数回归预测方法应用	214
7.3 基于集对分析的水资源系统聚类预测方法	218
7.3.1 基于集对分析的聚类预测方法	218
7.3.2 区域用水量预测应用	219
7.3.3 区域生态足迹趋势预测应用	223
7.4 基于集对分析的水资源系统自组织预测方法	231
7.4.1 基于集对分析的自组织预测方法	231
7.4.2 年径流量预测应用	233
7.5 小结	237
参考文献	238

第一章 绪 论

1.1 系统评价与预测方法论

1.1.1 基本概念

1.1.1.1 系统与系统科学

系统的概念是在人类社会生产实践中逐渐形成和发展的。现代“系统”一词是弗雷德里克·泰勒 1911 年在《科学管理原理》一书（弗雷德里克·泰勒著，黄榛译，北京理工大学出版社，2012）中首次提出；冯·贝塔朗菲于 1928 年提出了“生物系统论”，1947 年又提出了“普通系统论”，奠定了一般系统论的基础（冯·贝塔朗菲，1987）。之后，由定量化系统思想方法及其应用相继形成了许多不同的学科，如：运筹学、协调学、管理科学、系统工程、系统分析等，这些学科的发展促进了现代系统概念、系统工程和系统科学的发展和完善。

钱学森（2007）明确提出系统科学是从事物的整体与部分、局部与全局以及层次关系的角度来研究客观世界。系统科学体系由四个层次构成（周硕愚，1988；冯尚友，1991；于景元，2011）：一是工程技术层次，是直接改造客观世界的工程技术，即系统工程，但和其他工程技术不同，它是组织管理技术；二是技术科学层次，是为工程技术直接提供理论基础的技术科学，如运筹学、控制论、信息论等；三是基础科学层次，是在技术科学基础上进一步抽象概括成为认识、揭示客观事物规律的基本理论科学，即系统学（Systematology）；四是科学哲学层次，是上述三个层次的系统科学经过系统论上升为辩证唯物主义，系统论是连接系统科学与辩证唯物主义的桥梁。

系统科学的理论与方法体系，一般包括五方面的内容：系统概念、一般系统理论、系统理论专论、系统方法论（系统工程）和应用系统工程（顾基发，1987；冯尚友，1991；金菊良等，2002b）。系统概念包括系统、要素、结构、环境等系统领域的各种概念；一般系统理论是指用数学公式的形式描述和确定系统的结构与行为的纯数学理论；系统理论专论是指为了解各种特定系统结构和行为的一些专门学科，如运筹学、控制论、信息论、模糊集、多目标和大系统理论等；系统方法论是指为了对系统对象进行分析、规划、设计和运用时所采取的具体应用理论及技术的方法与步骤，主要是指系统工程；应用系统工程是指将系统科学思想和方法用到各个具体实际领域，并解决实际问题，如社会系统工程、经济系统工

程、农业系统工程、环境系统工程、水资源系统工程（金菊良等，2002b）等。

系统科学研究和应用的基本对象是系统问题。对于系统的概念，一般认为：凡在一定环境下，为实现某一目标，由若干相互联系、相互制约、相互作用的因素（部分）而组成的集合体，就称为系统。

对系统概念的理解包括以下几点（汪应洛，2009；邱均平等，2010）：

（1）系统及其要素。系统是由两个以上要素组成的整体，构成这个整体的各个要素可以是单个事物（元素），也可以是一群事物组成的分系统、子系统等。系统内部的各环节（要素）之间存在着相互联系和相互作用，系统与其构成要素是一组相对的概念，取决于所研究的具体对象及其范围。因此，在进行系统分析时，要把系统的整体联系作为研究对象，在系统整体功能的基础上去组织各环节（要素）及其相互之间的活动，在整体的各环节（要素）相互依赖、相互制约的关系中去揭示系统的特征和运动规律。

（2）系统的层次与结构。任何一个系统都具有一定的结构层次，这是由世界的物质性决定的。即任何一个系统都可以分解成一系列的分系统，各个分系统又可分别由一系列子系统组成，依此类推，构成一个由若干分系统及其要素组成的层次结构系统。在构成系统的诸要素之间存在着一定的有机联系，这样在系统的内部形成一定的结构和秩序。结构即组成系统的诸要素之间相互关联的方式。系统的层次结构表明，对于社会、经济、资源系统的各种复杂问题，必须分别从系统的不同层次入手，进行深入的调查研究，从而才能得出科学的结论。

（3）系统的目的与功能。任何系统都有其存在的作用与价值，有其一定的目的，也即都有其特定的功能，系统的目的决定着其基本功能。系统的功能一般通过一系列任务来实现，这些任务的解决，构成了系统和其分系统、子系统功能过程的内容，其结果就是系统功能的最终目的。系统内部各个分系统、子系统的目标具有相互制约、相互作用的性质，这就是说，要实现系统全局的目标和任务，就要在系统内部的各个分系统、子系统目标之间寻求平衡、协调的方案，以实现其最终目标和获取最大的效益。系统的功能受到其环境和结构的影响。

（4）系统与环境。系统包括两个部分：一是系统本身，二是系统所处的环境。任何一个系统都处在一定的环境之中，并且是其所从属的一个更大系统（环境）的组成部分，并与其相互作用，受到环境的制约。系统连同其所处的环境一起形成系统总体。

1.1.1.2 系统的特征

由系统的概念及构成关系，可见系统的基本特性（汪应洛，1992；徐克绍，1996；杜瑞成等，1999；叶义成等，2006；梁军，2013）。

（1）整体性。整体性是系统最基本、最核心的特性，是系统属性的集中体现。

系统是由两个或两个以上的相互区别的要素构成。系统的整体性说明,具有独立功能的系统要素以及要素间的相互关系根据逻辑统一性的要求,协调存在于系统整体之中。就是说,任何一个要素不能离开整体去研究,要素间的联系和作用也不能脱离整体的协调去考虑,脱离了整体性,要素的机能和要素之间的作用便失去了原有的意义。系统要素及其功能、要素间的相互联系都要服从于系统整体的目的和要求、服从整体的功能。

集合的概念就是把具有某种属性的一些对象作为一个整体而形成的结果,因而系统集合性是整体性的具体体现。

(2) 目的性。通常系统都具有既定的目的和一定的功能,这是区别于其他系统的标志。

系统的目的一般用更具体的目标来体现,比较复杂的系统往往有一个整体目标,各个子系统又分别有各自的中、小目标,如水资源系统就是一个多目标系统。为了实现系统的多层次目标,就要在系统的各要素之间进行协调,这就是多层系统的优化问题,而怎样用数学表达式来描述系统的目标是系统工程的又一个重要问题,系统目标的数学表达式称为目标函数,有多个目标时称为多目标函数。对多层系统的优化问题,可以通过大系统的分解协调方法等加以解决。

(3) 层次性。从系统作为一个相互作用的诸要素的总体来看,它可以分解为一系列的子系统,并存在一定的层次结构,这是系统空间结构的一种形式。在系统层次结构中表述了不同层次子系统之间的从属关系或相互作用关系。不同层次子系统之间存在着动态的信息流与物质流,共同构成了系统的整体运动特性,为深入研究复杂系统的结构与功能和有效地进行控制与调节提供了条件。

(4) 相关性。相关性是指系统的各要素之间具有相互联系、相互作用,又相互依赖的关系,是系统的重要特征。相关性说明这些联系之间的特定关系和演变规律,如何用数学表达式来描述这种相关性则是系统工作的重要问题,也是系统分析的约束条件。

(5) 复杂性。系统通常由多维且不同质的要素所构成,各要素间相互作用关系所形成的系统结构日益复杂化和动态化;系统的功能和属性多样,由此而带来的多重目标间经常会出现相互消长或冲突的关系。

(6) 动态性。物质和运动是密不可分的,各种物质的特性、形态、结构、功能及其规律性,都是通过运动表现出来的,要认识物质首先要研究物质的运动,系统的动态性使其具有生命周期。开放系统与外界环境有物质、能量和信息的交换,系统内部结构也可以随时间变化。一般来讲,系统的发展是一个有方向性的动态过程。

(7) 适应性。系统的适应性是指系统对环境变化的适应程度。任何一个系统都存在于一定的物质环境(更大的系统)之中,它必然要与外界环境产生物质、

能量和信息的交换, 外界环境的变化必然会引起系统内部各要素之间的变化。因此, 系统必须具有对环境的适应能力, 一个系统能够经常与外界环境保持最佳的适应状况, 则认为它是理想的系统。

系统适应性要求, 研究系统时必须放宽眼界, 不但要看到整个系统本身, 还要看到系统的环境。只有在一定的环境中研究系统, 才能有效地解决系统问题。系统对于环境的适应性, 主要靠反馈来实现。

1.1.1.3 水资源系统

水资源系统概念是系统的概念在水资源领域的具体应用。

狭义的水资源系统特指水资源的赋存系统, 它是一个自然资源系统。随着人类对水资源的开发利用, 水资源赋存系统作为一个开放系统与外界社会、经济、生态、环境系统之间不断地进行着能量、物质、信息的交换, 就构成一个集自然、社会、经济、生态、环境为一体的复合系统。

水资源复合系统是由自然要素、社会经济因素、生态环境相互作用、相互联系组成的有机整体, 往往因一个因素的变化会触发其他多个因素的“链式”反应, 进而对系统整体产生根本的影响。因此, 在研究分析水资源问题时, 不能仅局限于其开发利用的量和满足要求的质, 还应注意它与资源环境的动态平衡关系, 它与经济、社会之间具有的互馈作用和抑制影响(林洪孝, 2012)。

水资源系统具有系统的所有基本特性, 还表现出特定的特征(张学真等, 2006; 刘汉湖等, 2007)。

(1) 整体性。水资源系统的整体性包括两层含义, 一是水资源系统的自然要素综合作用的特征, 二是水资源系统的现象或过程是其过去现象或过程的延续或反映, 因此水资源系统在时间上、空间上具有整体性的特征。

(2) 多目标性。水资源既具有自然资源属性, 又具有社会资源属性。因此, 除具有传统的经济目标外, 生态环境质量目标和社会福利目标也成了水资源系统的主要目标, 水资源系统的多目标体现了水资源系统社会价值。

(3) 复杂性。水资源系统复杂性特征具体表现在: 水资源系统是分层次的, 每个层次的演化现象不尽相同, 发展规律也各有差异; 水资源系统每个组成部分都不同程度地影响系统的发展变化; 不同部分不同层次, 甚至相同部分不同层次之间相互作用的复杂性。

(4) 动态性。受人类与环境, 以及各种社会、经济、自然因素的相互联系、相互作用的干预, 水资源系统始终处于不断的动态变化。水资源系统动态性主要体现在水资源由量、范围到质的变化, 水资源量的变化指水资源向某一个发展方向变化的速度或程度, 水资源范围的变化指某种水资源类型波动和变化范围的扩大或缩小幅度, 水资源质的变化指某种水资源类型被另一种类型所替代。

1.1.2 方法论

系统科学的主要研究问题是系统理论和系统方法论（邹珊刚等，1987；冯尚友，1991）。系统理论研究的是系统的基本概念、基本性质，以及系统进化的一般规律；系统科学方法论是根据系统科学的基本概念和基本原理研究系统方法的理论。

系统科学方法论的观点目前主要有：Hall A. D. 三维结构，Checkland 软系统方法论，钱学森综合集成方法论，WSR（物理—事理—人理）系统方法论等。目前被广泛接受是由 Hall A. D. 提出的三维结构理论。

Hall A. D. 三维结构的三维是时间维、逻辑维、专业维（如图 1.1 所示）。其中，逻辑维是把系统过程的每一个阶段分为摆明问题、确定目标、系统综合、系统分析、系统评价、决策、实施等 7 个步骤。

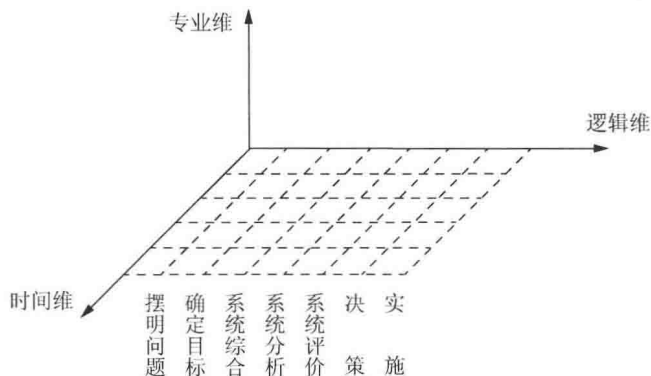


图 1.1 Hall A. D. 三维结构

Hall A. D. 方法论的贡献在于明确了系统分析、系统综合、系统评价等概念及其相互关系，这些概念是系统工程的核心概念和标志性概念（中国系统工程学会等，2007）。

1.1.2.1 系统分析

系统分析是系统工程中最基本、最普遍的定量化方法。

系统分析是对一个确定系统的基本问题，通过分析系统内有关要素、结构、功能、状态、行为等之间的关系及其与环境的相互关系；运用逻辑推理和分析计算，在确定或不确定条件下，找出可行方案；再经过分析、综合与评价技术，使系统整体效益达到最优的一种方法。

系统分析一般包括：确立系统的目标、调查分析、拟订方案、建立数学模型、进行定量分析、综合评价、提出结论等基本步骤和程序（殷永元等，2004；尚松

浩, 2007; 方子云, 2007; 方梦祥等, 2009; 刘肇祯, 2010)。

(1) 确立系统的目标。研究确定系统结构及构成要素, 明确建立该系统的目的和所要达到的目标。

(2) 调查分析。对作为研究对象系统的现状进行调查分析, 通过调查分析, 理清系统的结构、状态及构成要素之间的联系。了解系统的现状、特性及存在的各种问题。

(3) 拟订方案。根据调查分析获得的信息, 制定可行性方案。制定的可行性方案应包括能够实现系统目标的各种可能的途径、措施和办法。

(4) 建立数学模型。主要包括两个步骤: 一是通过分析系统状态变量的作用, 说明使系统发生状态变化的机制, 即建立某种模型结构, 以测定或说明系统各种要素及其相互之间的关系; 二是根据所建模型结构, 用实际样本值、优化方法等确定模型的参数和常数。

(5) 进行定量分析。运用所建立的数学模型, 对各个可行方案进行定量分析。

(6) 综合分析和评价。根据定量分析结果, 考虑各种定性因素, 对比系统目标达到的程度, 用标准来衡量分析结果的优劣。

(7) 提出结论。根据综合分析和评价结果, 提出系统分析结论。

1.1.2.2 系统评价

系统评价是系统科学研究评价理论的一个重要分支, 也是系统工程的特有内容和重要环节。

系统评价以系统问题为主要研究对象, 借助科学方法和手段, 对系统的目标、结构、环境、输入输出、功能、效益等要素, 构建指标体系, 建立评价模型, 经过计算和分析, 对系统的经济性、社会性、技术性、可持续性等方面进行综合评价, 为决策提供科学依据(叶义成等, 2006)。

从评价标准和评价对象的角度, 可把现有系统评价方法分为四类(金菊良等, 2008a; 郭亚军, 2012): 一是在没有系统评价标准下的评价, 可称为聚类评价方法, 如模糊聚类, 按照样本集的数据特征构造聚类中心, 并利用各样本对各聚类中心的隶属程度进行归类; 二是在已知系统评价标准下的评价, 可称为等级评价方法, 如模糊识别评价, 在已有了分类标准的条件下, 判定样本对各级别的归属; 三是在虚拟系统评价标准下的评价, 如理想点法和灰关联分析等; 四是以可行方案为评价对象的评价, 也就是基于决策分析的评价方法。其中, 前三类方法的评价对象是评价系统的客观状态, 其主要目的在于认识系统, 而第四类方法的评价对象是针对系统面临的各种自然状态所需采取的各种行动方案, 其主要目的在于管理系统。

系统评价问题主要由评价者、评价目标、评价对象、评价指标、评价标准、指标权重和评价模型 7 类要素组成。系统评价方法论就是处理各类系统评价问题的一般步骤,主要包括(史海珊等,1994;胡永宏等,2000;秦寿康,2003;金菊良等,2006b,2008a;王文圣等,2011;郭亚军,2012):

(1) 确定系统评价目标和评价对象系统。

(2) 建立评价指标体系(它由目标、准则和指标组成,具有层次性和关联性),对复杂评价系统的评价指标体系,一般需要建立评价指标的层次结构模型。

(3) 评价指标的测度(定量化)。

(4) 评价指标的一致无量纲化(规范化),又称单指标评价过程。

(5) 建立评价函数,把一个多指标问题综合成一个单指标的形式,包括确定各评价指标的权重,以及各无量纲化评价指标与指标权重的组合形式(综合评价模型)。

(6) 把评价对象的实际评价指标值代入综合评价模型,得到各评价对象的综合评价指标值,根据综合评价指标值的大小(由大到小,或由小到大)对各评价对象在总体上进行分类或排序。

(7) 反馈与控制,即根据评价结果,有时需要对以上有关步骤进行相应的调整、修正和多次迭代过程。

系统评价的主要目的就是综合判断系统运行的历史轨迹和当前状态,预测系统发展的未来趋势,建立必要的评价信息,指定并实施相应对策和行动方案,以促使系统协调地运行与发展(郭亚军,2002;金菊良等,2008a)。

1.1.2.3 系统预测

系统预测是系统工程理论的重要组成部分,它把系统作为预测对象,分析系统发展变化的规律性,判断系统未来发展变化趋势,为系统决策提供科学依据。系统预测是以系统分析和系统评价为基础。

所谓系统预测,就是根据系统发展变化的实际情况和历史数据、资料,运用现代科学理论方法,以及对系统的各种经验、判断和知识,对系统在未来一段时间内的可能变化情况,进行推测、统计和分析,并得到有价值的系统预测结论。

系统预测要具备三个方面的基础条件(梁军等,2013):一是系统预测应建立在科学的理论基础之上,要符合科学规律并正确运用所涉及的科学理论。二是系统预测要有先进的预测方法,不同的预测方法有可能产生不同的预测效果,应根据预测问题的具体特点选择具体的适用方法,并且尽量选择那些被证明是有效的方法。三是可信的预测结果离不开大量资料、数据的支撑,只有积累了足够量,且足够全面的详实资料和数据,才能得到正确的预测结果。

1.1.2.4 系统评价指标体系

为了对多层次、多因素的复杂系统进行评价,必须针对评价对象建立一个科学的评价指标体系。系统评价指标体系是由若干个单项评价指标所组成的有机整体,它应能反映出所要解决的问题的各项目标要求,能将被评价对象的大量相互关联、相互制约的因素之间的关系层次化、条理化,并能够区分它们各自对评价目标影响的重要程度。

根据指标属性将评价指标区分为定性指标和定量指标,或静态指标和动态指标:定性指标是指不可用数量描述的指标,定量指标是指可以通过分析、计算得到具体数量来描述的指标;静态指标是指不随时间、环境条件等因素变化而变化的指标,动态指标是指随时间、环境等条件变化而变化的指标。

1) 评价指标体系的建立原则

如何确立评价指标体系是系统评价的一个难题,建立科学、系统、合理的评价指标体系,应遵循以下原则(潘争伟, 2010a):

(1) 科学性与可行性原则。科学性与可行性是构建指标体系的最基本原则。科学性是指指标体系的建立必须具有充分的科学依据;各项指标概念明确、具有独立的内涵,具有一定的科学内涵和理论依据,能较客观、真实地反映系统发展的状态和各指标间的联系。可行性是指指标体系的建立不仅具有科学依据,而且要求指标数据易于查找、收集、整理,量化公式含义明确,分析计算简便;在时间和空间范围上具有可测性和可比性。

(2) 系统性与层次性原则。按照系统性和层次性原则,逐步分层次构建指标体系,建立包括目标层、约束层、准则层和指标层的综合指标体系。

(3) 整体性与独立性原则。建立的指标体系应能从系统目标所涉及各个不同侧面反映系统的现有特征和状况,能够体现系统的未来变化和发展趋势。但切忌不是越广泛越好,因为评价指标体系越大,对系统的评价就越困难。独立性原则要求指标尽可能无内在联系,减少指标之间的信息冗余,避免指标间的目标冲突、重叠。

上述基本原则不是单独起作用,各原则之间相互影响,相互制约;构建指标体系过程中,应全面考虑各原则的综合作用,构建一套科学、合理的系统评价指标体系。

2) 建立系统评价指标体系的过程

系统评价指标体系建立主要包括以下过程(陈庆华等, 2011):

(1) 目标分析。目标,就是系统所要达到的目的,是要求系统达到的期望状态。目标主要包括总体目标和分目标;战略目标和战术目标;近期目标和远期目标;单目标和多目标;主要目标和次要目标等。目标分析是建立指标体系的前提,