

灰色系统丛书

刘思峰 主编

冰凌灾害风险管理中的 灰色预测决策方法

—— 罗 党 著 ——



科学出版社

灰色系统丛书

刘思峰 主编

冰凌灾害风险管理中的 灰色预测决策方法

罗 党 著

国家自然科学基金面上项目(71271086)

河南省高等学校本科特色专业“数学与应用数学”建设基金

河南省重点学科(数学一级学科)建设基金

河南省研究生教育优质课程“灰色系统理论”建设经费



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍灰色预测决策方法及其在冰凌灾害风险管理中的应用实践。全书共 10 章,包括灰色预测决策方法和冰凌灾害风险管理研究概况、灰色预测决策方法基础、灰色关联决策方法、灰靶决策方法、灰色局势决策方法、灰色风险型决策方法、灰色预测方法、冰凌灾害形成机理及特征分析、黄河冰凌灾害风险管理实践以及冰凌灾害防灾减灾措施与政策建议等。本书在研究方法上突出灰数信息,特别是三参数区间灰数下的决策建模技术,应用上重点解决冰凌灾害风险管理中的风险识别、风险分析、风险评估以及风险决策等问题。

本书可供从事自然灾害风险管理的工程技术人员和科研人员参考使用,也可作为高等院校相关专业师生学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

冰凌灾害风险管理中的灰色预测决策方法/罗党著. —北京:科学出版社, 2018.2

(灰色系统丛书)

ISBN 978-7-03-032629-4

I. ①冰… II. ①罗… III. ①灰色预测模型-应用-防凌-风险管理
IV. ①TV875

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 033025 号

责任编辑:李静科/责任校对:邹慧卿

责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2018 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 2 月第一次印刷 印张:21 1/4

字数:408 000

定价:149.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书总序

灰色系统理论是 1982 年中国学者邓聚龙教授创立的一门以“小数据, 贫信息”不确定性系统为研究对象的新学说. 新生事物往往对年轻人有较大吸引力, 在灰色系统研究者中, 青年学者所占比例较大. 虽然随着这一新理论日益被社会广泛接受, 一大批灰色系统研究者获得了国家和省部级科研基金的资助, 但在各个时期仍有不少对灰色系统研究有兴趣的新人暂时缺乏经费支持. 因此, 中国高等科学技术中心 (China Center of Advanced Science and Technology, CCAST) 的长期持续支持对于一门成长中的新学科无疑是雪中送炭. 学术因争辩而产生共鸣. 热烈的交流、研讨碰撞出思想的火花, 促进灰色系统研究工作不断取得新的进展和突破.

由科学出版社推出的这套“灰色系统丛书”, 包括了灰色系统的理论、方法研究及其在医学、水文、人口、资源、环境、经济预测、作物栽培、复杂装备研制、电子信息装备试验、空管系统安全监测与预警、冰凌灾害预测分析、宏观经济投入产出分析、农村经济系统分析、粮食生产与粮食安全、食品安全风险评估及预警、创新管理、能源政策、联网审计等众多领域的成功应用, 是近 10 年来灰色系统理论研究和应用创新成果的集中展示.

CCAST 是著名科学家李政道先生在世界实验室、中国科学院和国家自然科学基金委员会等部门支持下创办的学术机构, 旨在为中国学者创造一个具有世界水平的宽松环境, 促进国内外研究机构和科学家之间的交流与合作; 支持国内科学家不受干扰地进行前沿性的基础研究和探索, 让他们能够在国内做出具有世界水平的研究成果. 近 30 年来, CCAST 每年都支持数十次学术活动, 参加活动的科学家数以万计, 用很少的钱办成了促进中国创新发展的大事. CCAST(特别是学术主任叶铭汉院士) 对灰色系统学术会议的持续支持, 极大地促进了灰色系统理论这门中国原创新兴学科的快速成长. 经过 30 多年的发展, 灰色系统理论已被全球学术界所认识、所接受. 多种不同语种的灰色系统理论学术著作相继出版, 全世界有数千种学术期刊接受、刊登灰色系统论文, 其中包括各个科学领域的国际顶级期刊.

2005 年, 经中国科协和国家民政部批准, 中国优选法统筹法与经济数学研究会成立了灰色系统专业委员会, 挂靠南京航空航天大学. 国家自然科学基金委员会、CCAST、南京航空航天大学和上海浦东教育学会对灰色系统学术活动给予大力支持. 2007 年, 全球最大的学术组织 IEEE 总部批准成立 IEEE SMC 灰色系统委员会, 在南京航空航天大学举办了首届 IEEE 灰色系统与智能服务国际会议 (GSIS). 2009 年和 2011 年, 南京航空航天大学承办了第二届、第三届 IEEE(GSIS).

2013 年, 在澳门大学召开的第四届 IEEE GSIS 得到了澳门特区政府资助. 2015 年, 在英国 De Montfort 大学召开的第五届 IEEE GSIS 得到了欧盟资助. 2017 年 7 月, 第六届 IEEE GSIS 将在瑞典斯德哥尔摩大学举办.

在南京航空航天大学, 灰色系统理论已成为本科生、硕士生、博士生的一门重要课程, 并为全校各专业学生开设了选修课. 2008 年, 灰色系统理论入选国家精品课程; 2013 年, 又被遴选为国家精品资源共享课程, 成为向所有灰色系统爱好者免费开放的学习资源.

2013 年, 笔者与英国 De Montfort 大学杨英杰教授合作, 向欧盟委员会提交的题为“Grey Systems and Its Application to Data Mining and Decision Support”的研究计划, 以优等评价入选欧盟第 7 研究框架玛丽·居里国际人才引进行动计划 (Marie Curie International Incoming Fellowships, PEOPLE-IIF-GA-2013-629051). 2014 年, 由英国、中国、美国、加拿大等国学者联合申报的英国 Leverhulme Trust 项目以及 26 个欧盟成员国与中国学者联合申报的欧盟 Horizon 2020 研究框架计划项目相继获得资助. 2015 年, 由中国、英国、美国、加拿大、西班牙、罗马尼亚等国学者共同发起成立了国际灰色系统与不确定性分析学会 (International Association of Grey Systems and Uncertainty Analysis).

灰色系统理论作为一门新兴学科以其强大的生命力自立于科学之林.

这套“灰色系统丛书”将成为灰色系统理论发展史上的一座里程碑. 她的出版必将有力地推动灰色系统理论这门新学科的发展和传播, 促进其在重大工程领域的实际应用, 促进我国相关科学领域的发展.

刘思峰

南京航空航天大学 and 英国 De Montfort 大学特聘教授

欧盟玛丽·居里国际人才引进计划 Fellow (Senior)

国际灰色系统与不确定性分析学会主席

2015 年 12 月

序 一

灰色系统理论是由中国学者邓聚龙教授于 1982 年创立的一种新的不确定性系统理论, 经过 30 多年的发展, 已基本建立起一门新兴学科的结构体系. 灰色系统理论以“部分信息已知、部分信息未知”的“少数据”“贫信息”不确定性系统为研究对象, 其主要内容包括: 灰数运算与灰色代数系统、灰色方程、灰色矩阵等灰色系统的基础理论; 以序列算子为基础的数据挖掘方法; 用于系统诊断、分析的灰色关联分析模型; 用于解决系统要素和对象分类问题的灰色聚类评估模型; 系列灰色预测模型 (GM) 及灰色系统预测方法和技术; 主要用于方案评价和选择的多目标灰靶决策模型和两阶段灰色综合测度决策模型; 以多方法融合创新为特色的灰色组合模型, 如灰色规划、灰色投入产出、灰色博弈、灰色控制等. 灰色系统理论应用领域十分广泛, 已取得了显著的社会效益和经济效益.

罗党教授撰写的《冰凌灾害风险管理中的灰色预测决策方法》一书, 针对冰凌灾害形成过程中普遍存在的灰色不确定性, 对冰凌灾害的数据特征进行系统分析和深入研究, 提出了以决策信息为灰数 (以三参数区间灰数为主) 条件下的灰色关联决策、灰靶决策、灰色局势决策以及灰色风险型决策等一系列灰色决策方法, 为更科学、更合理、更具柔性地解决冰凌灾害风险识别、风险分析、风险评估与风险决策等问题, 提供了新的研究工具. 同时, 对冰凌灾害形成机理和演化规律进行探究, 综合国内外最新研究成果, 提出了灰色 GMP(1,1,N) 模型、多变量灰色 GMC(1,N) 模型和离散多变量灰色 DGMC(1,N) 模型, 为冰情凌情预报和冰凌灾害风险预测提供了新的工具. 书中较为详细地介绍了灰色预测决策方法在黄河冰凌灾害风险管理中的应用成果, 为开展基于灰色系统理论的冰凌灾害风险管理研究提供了新思路.

该书针对江河冰凌预报与灾害防控的重大现实需求, 进行理论和方法探索, 注重理论研究成果与冰凌灾害风险管理实践紧密结合, 成功运用灰色系统方法和模型, 破解冰凌灾害风险管理难题, 取得了多项有价值的成果.

该书以罗党教授及其团队成员近年来在国内外重要期刊上发表的系列学术论文为基础凝练而成, 是作者多年来从事灰色系统理论与决策分析、冰凌灾害及干旱灾害风险管理、教学与实践的结晶. 我十分乐意向读者推荐这本有理论、有思想、有

创新、有应用的著作,相信该书的出版对推动灰色系统理论的研究和应用具有重要意义.

刘思峰

国家有突出贡献的中青年专家

南京航空航天大学特聘教授、博士生导师

国际灰色系统与不确定性分析学会主席

2017年8月23日

序 二

我们所生活的这个世界充满了各种各样的不确定性,大到宇宙的演化,小到日常生活的方方面面,有限的不完全信息无时无刻不围绕在我们周围.这在具有主观不确定性的人与具有客观不确定性的自然的相互作用的土木与水利工程中尤为突出.与大自然相比,人类的认识仍然是有限的,大数据技术的发展仍然无法从根本上改变工程中必须基于对有限和不完全数据的分析基础上的决策.尽管大数据技术的发展极大地提升了我们处理许多工程和社会问题的能力,但是,基于有限和不完全数据的分析与决策的理论和技術,仍然是人类社会迈入智能经济的一个不可或缺的前提条件.

对于工程实践中广为存在的不确定性,虽然长期以来学者们已经建立和发展了很多不确定性模型理论并已经取得了巨大的成果,但这些不确定性模型理论在处理有限和不完全数据时一般要求以大量数据为前提,同时对信息的不完全性考虑不足.在实际工程中,受限于我们对自然的理解、自然环境的动态变化和测量仪器,有效数据往往是非常有限并且不完全的.长期积累的大数据虽然对宏观尺度的分析非常有效,但还不能代替近期有限数据在微观分析上的作用.同时,数据信息的不完全性也不会随着数据量的增大而消失.因此,有效的基于有限和不完全数据的分析与决策仍然是工程中非常现实的挑战.灰色系统理论就是这样一种基于有限和不完全数据的分析与决策的理论和技術.自邓聚龙教授创立灰色系统的理论体系以来,以刘思峰教授和罗党教授为代表的灰色系统领域的杰出学者们进一步发展和完善了灰色系统的理论和应用.在他们的努力下,灰色系统已经发展成为一个以灰色代数、灰色预测、灰色关联、灰色聚类 and 灰色组合模型为基础,涵盖农业科学、经济管理、环境科学、医药卫生、矿业工程、教育科学、水利水电、图像信息、生命科学、控制科学和航空航天等众多应用领域的新兴学科.

对于一门新兴学科的发展至关重要的是其理论与实际相结合的能力.随着灰色系统理论在中国和世界范围内的推广,越来越多的来自各行各业的人已经开始关注和使用灰色系统模型去解决各种实际问题.他们所共同面对的一个挑战就是如何将灰色系统的理论应用到实际工作中.作为国际上灰色系统研究的领军人物之一,罗党教授不仅有对灰色系统理论发展上的卓越贡献,更有长期从事灰色系统理论在冰凌灾害风险管理中应用的实践,并积累了大量的宝贵经验.这些理论和应用经验无疑对冰凌灾害风险管理领域以及其他工程与社会领域的学者和技术人员具有非常宝贵的指导作用.罗党教授在该书中系统地阐述了灰色预测决策方法的理

论基础, 结合冰凌灾害管理实例深入浅出地解释了灰数的表征与运算、灰色预测、灰色关联、灰色聚类 and 灰色组合模型等方法, 并给出了一系列的案例来详细介绍这些方法如何在冰凌灾害风险管理中发挥作用和解决问题. 该书无疑会对那些面临有限和不完全数据的挑战的工程领域工作者提供巨大帮助. 该书虽然以冰凌灾害风险管理为应用背景, 但是其理论基础与应用方法对其他工程和社会应用领域也有巨大帮助.

我作为一个出身于工程领域, 又长期从事理论研究的工作者, 深感理论与工程应用相结合的必要. 在我们已经意识到研究成果对社会影响的重要性的今天, 这一点也尤为重要. 罗党教授这本书在这方面树立了一个典范, 也必将对灰色系统在冰凌灾害风险管理以及其他工程和社会领域的应用带来极大的促进作用. 因此, 我衷心感谢罗党教授及其团队及时地为我们提供了一本非常必要的书. 我相信该书的出版将为灰色系统的发展及其在冰凌灾害风险管理等工程与社会领域中的应用带来新的飞跃.

杨英杰

国际灰色系统与不确定性分析学会执行主席

英国 De Montfort 大学教授

2017 年 8 月 26 日

前 言

凌汛是河道里的冰凌对水流的阻力作用而引起的一种涨水现象,它直接影响到水利工程的运行和维护、水力发电、河流的生态与环境以及沿岸人民的生命财产安全等问题。世界上分布在北纬 40° 以北及南纬 40° 以南地区的河流在冬春季节都易出现不同程度的结冰现象,因此导致的凌汛灾害是人类世界重要的自然灾害之一。黄河是中国凌汛出现最为频繁的河流,其中宁蒙段最为严重。近年来受全球气候变化影响,我国极端天气频繁出现,黄河冰凌灾害严重,1986 年以来黄河宁蒙河段已发生了 6 次凌汛决口,防凌减灾工作已成为黄河防汛的重要内容,迫切需要对冰凌灾害的形成机理进行全面系统的分析,亟须建立健全冰凌灾害风险管理理论和方法体系。

冰凌灾害的形成过程是一个随机、模糊与灰色不确定性共存的复杂系统。现有研究大多基于水文气象资料,运用数理统计理论、信息扩散理论、随机分析、模糊数学等方法,研究冰凌灾害系统的随机性和模糊性特征。但是综合分析和有效处理包括灰色不确定性在内的冰凌灾害系统中的各种不确定性,识别与解析这些不确定性的物理内涵、动力学机制,以及相互作用、耦合和转化的物理关系,系统地分析冰凌灾害的数据特征,是冰凌灾害风险管理的重要研究内容;尤其是从灰色系统理论及应用角度,对冰凌灾害系统的不确定性特征进行系统分析、统一量化和有效处理,构建基于灰色系统理论的冰凌灾害风险管理体系,是亟须解决的问题,关于这一方面的学术专著尚未见报道。基于此,在国家自然科学基金项目“基于灰数信息的决策模型及其在黄河冰凌灾害风险管理中的应用研究”(71271086)系列研究成果的基础上,结合本团队已取得或在研关于灰色系统理论及应用的其他研究成果,在广大科研和实践领域工作者们的关怀和支持下,本书得以完成。

本书在写作过程中,遵循“理论指导实践,实践检验理论”的原则,重点突出灰色预测决策理论与方法对冰凌灾害风险管理实践的普遍指导意义,结合冰凌灾害风险识别、分析、评估、预测与决策等问题,力求给出基于灰色预测决策方法的冰凌灾害风险管理研究范式。本书主要包括灰色预测决策方法和冰凌灾害风险管理研究概况、灰色预测决策方法基础、灰色关联决策方法、灰靶决策方法、灰色局势决策方法、灰色风险型决策方法以及灰色预测方法等理论研究成果,还包括实践研究内容:以黄河宁蒙段为主,全面分析了冰凌灾害形成机理,解析了黄河冰凌灾害风险的不确定性特征,给出了黄河冰凌灾害风险管理流程;运用理论研究成果,着重介绍了两种黄河冰凌灾害风险评估、预测与决策方法,给出了冰凌灾害风险管理的

灰色预测决策方法研究范式;提出了冰凌灾害防灾减灾措施与政策建议,为冰凌灾害监测、预报、控制等管理工作提供借鉴。

本书的主要内容包括罗党教授及其研究团队成员的部分研究成果,其他引用成果可在书后的参考文献中找到。本书由罗党教授提出总体写作方案并组织撰稿。第1, 5章由李海涛执笔;第2章由韦保磊、毛文鑫执笔;第3章由韦保磊、孙慧芳执笔;第4章由孙慧芳执笔;第6章由李海涛、孙慧芳执笔;第7章由韦保磊执笔;第8, 10章由毛文鑫执笔;第9章由李海涛、韦保磊、毛文鑫执笔。张国政及刘敏、王浚婷、贾惠迪、王胜杰、叶莉莉、钱其存、王付冰等硕士研究生做了部分辅助工作。全书由李海涛统稿,罗党教授审定。

在此,作者谨向南京航空航天大学刘思峰教授、武汉大学谢平教授、合肥工业大学金菊良教授、英国 De Montfort 大学杨英杰教授、华北水利水电大学韩宇平教授以及本书参考文献的全体作者表示衷心的感谢!本书的出版有幸得到了国家自然科学基金项目“基于灰数信息的决策模型及其在黄河冰凌灾害风险管理中的应用研究”(71271086)、河南省高等学校本科特色专业“数学与应用数学”建设基金、河南省重点学科(数学一级学科)建设基金、河南省研究生教育优质课程“灰色系统理论”建设经费的资助,特此深表感谢!

灰色系统理论目前仍处于发展完善阶段,一些基本概念和基本理论尚缺乏严密的数学理论基础,与随机、模糊等其他不确定性理论之间的区别和联系研究亦不足,加之冰凌灾害形成的复杂性以及人类认知水平的有限性,本书的出版仅是抛砖引玉。受时间、专业素养、理论水平及可操作性的制约,本书研究中的理论、方法、结构安排、文字表达等方面难免有疏漏之处,敬请诸位同行专家予以批评指正。此外,书中对于其他专家学者的论点和成果都尽量给予了引证,如有不慎遗漏引证的,恳请诸位专家谅解。

作 者

2017年9月于郑州

目 录

丛书总序

序一

序二

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	灰色预测决策方法研究概况	1
1.1.1	灰色系统理论概述	1
1.1.2	灰色预测方法研究概况	2
1.1.3	灰色决策方法研究概况	6
1.2	冰凌灾害风险管理研究概况	13
1.3	本书目的与内容结构安排	16
第 2 章	灰色预测决策方法基础	20
2.1	灰数的表征与运算	20
2.1.1	灰数	20
2.1.2	灰数白化与灰度	21
2.1.3	区间灰数及其运算	24
2.1.4	广义灰数及其运算	27
2.2	灰数的排序	29
2.2.1	基于可能度的区间灰数排序	29
2.2.2	基于相对核和精确度的区间灰数排序	33
2.2.3	基于相对优势度的三参数区间灰数排序	35
2.3	序列算子	36
2.3.1	差分级比算子	36
2.3.2	累加生成算子	38
2.3.3	缓冲算子	39
2.4	本章小结	42
第 3 章	灰色关联决策方法	43
3.1	灰色关联算子	43
3.2	灰色关联分析	46
3.2.1	点关联分析	46

3.2.2	广义关联分析	51
3.3	灰数信息下的灰色关联决策方法	58
3.3.1	决策信息为区间灰数的关联决策方法	58
3.3.2	决策信息为三参数区间灰数的关联决策方法	66
3.3.3	决策信息为三参数区间灰数的相位关联决策方法	74
3.4	考虑决策者风险偏好的灰色关联决策方法	77
3.4.1	基于前景理论的灰色关联决策方法	77
3.4.2	基于后悔理论的灰色关联决策方法	81
3.5	本章小结	86
第 4 章	灰靶决策方法	88
4.1	灰靶决策基本原理	88
4.2	灰数信息下的多目标灰靶决策方法	91
4.2.1	区间灰数信息下的灰靶决策方法	91
4.2.2	三参数区间灰数信息下的灰靶决策方法	101
4.2.3	考虑灰数取值分布信息的多尺度灰靶决策方法	107
4.3	混合信息下的多目标灰靶决策方法	113
4.4	本章小结	120
第 5 章	灰色局势决策方法	122
5.1	灰色局势决策基本原理	122
5.2	目标权重未知的灰色局势决策方法	126
5.2.1	目标权重计算的二次规划法	127
5.2.2	目标权重计算的熵理论法	131
5.2.3	目标权重计算的综合偏差-关联测度矩阵法	134
5.3	多目标灰色局势群决策方法	141
5.3.1	基于 AHP 判断矩阵的灰色局势群决策方法	142
5.3.2	基于 Orness 测度约束的多阶段灰色局势群决策方法	143
5.3.3	基于模糊测度和 Choquet 积分的灰色局势群决策方法	147
5.3.4	基于灰色不确定语言变量的灰色局势群决策方法	154
5.4	本章小结	163
第 6 章	灰色风险型决策方法	165
6.1	灰色风险型动态决策方法	165
6.2	灰色风险型群决策方法	177
6.2.1	灰色多属性风险型群决策方法	177
6.2.2	灰色多阶段多属性风险型群决策方法	184
6.3	灰色随机决策方法	192

6.3.1	融合前景理论和集对分析的灰色随机决策方法	192
6.3.2	基于前景熵的灰色随机决策方法	199
6.4	本章小结	205
第 7 章	灰色预测方法	207
7.1	灰色 GM(1,1) 模型	207
7.2	灰色 GMP(1,1,N) 模型	213
7.3	多变量灰色 GMC(1,N) 模型	222
7.4	离散多变量灰色 DGMC(1,N) 模型	230
7.5	本章小结	242
第 8 章	冰凌灾害形成机理及特征分析	243
8.1	黄河冰凌概况	243
8.1.1	黄河流域概况	243
8.1.2	黄河流域冰凌灾害	244
8.1.3	黄河宁蒙河段冰情概况	245
8.2	冰凌的消长演变过程	247
8.2.1	结冰期	247
8.2.2	封冻期	248
8.2.3	解冻期	250
8.3	冰凌灾害的形成机理	250
8.3.1	冰塞灾害的演变过程	251
8.3.2	冰坝灾害的形成机理	252
8.3.3	历史凌灾统计	254
8.4	黄河宁蒙河段冰凌灾害特征分析	255
8.4.1	冰情变化影响因素分析	255
8.4.2	近年来宁蒙河段凌情新特征及变化分析	258
8.5	本章小结	262
第 9 章	黄河冰凌灾害风险管理实践	263
9.1	黄河冰凌灾害风险特征及其管理流程	263
9.1.1	黄河冰凌灾害风险特征	263
9.1.2	黄河冰凌灾害风险管理流程	265
9.2	黄河冰凌灾害风险的灰色关联预测方法	272
9.2.1	基于灰色相位关联测度的冰凌灾害风险评估	273
9.2.2	基于灰色 GM(1,1) 模型的冰凌灾害风险预测	276
9.3	黄河冰凌灾害风险评估的两阶段智能灰色粗糙方法	279
9.3.1	冰凌灾害风险评估指标体系	279

9.3.2	数据来源与数据预处理	280
9.3.3	两阶段智能灰色粗糙评估方法	280
9.3.4	基于两阶段智能灰色粗糙方法的冰凌灾害风险评估步骤	286
9.3.5	实证分析	287
9.4	黄河凌汛防灾物资管理的灰色决策方法	292
9.4.1	基于灰色关联聚类方法的凌汛防灾物资分类管理	292
9.4.2	基于灰色局势决策方法的凌汛防灾物资储备管理	299
9.5	本章小结	305
第 10 章	冰凌灾害防灾减灾措施与政策建议	307
10.1	冰情监测技术	307
10.2	冰凌灾害防灾减灾措施	309
10.2.1	工程措施	310
10.2.2	非工程措施	311
10.3	防凌政策建议	312
10.4	本章小结	314
参考文献		315

第1章 绪 论

1.1 灰色预测决策方法研究概况

1.1.1 灰色系统理论概述

随着科学技术的发展、人类社会的进步和人的认识能力的提高,人们对客观世界的认识正在经历一个向着多样性、复杂性和不确定性发展的根本变化. 20 世纪 50 年代以来,不确定性理论逐渐成为系统科学领域的研究热点和重要前沿. 在这种背景下,各种不确定性系统理论和方法不断涌现,其中产生广泛影响力的理论与方法有模糊数学 (Zadeh L A, 1965)、粗糙集理论 (Pawlak Z, 1982)、灰色系统理论 (邓聚龙, 1982)、集对分析 (赵克勤, 1989) 以及未确知数学 (王光远, 1990) 等. 这些研究成果与经典的概率论一起,从不同角度、不同侧面描述和处理各类不确定信息,揭示复杂系统内部更为深刻和更为本质的内在规律,极大地促进了科学技术的发展.

区别于概率论、模糊数学、粗糙集理论等不确定性理论,灰色系统理论以“部分信息已知、部分信息未知”的“少数据”“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过对部分已知信息的生成、开发,提取有价值信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控,具有原创性科学意义,是我国对系统科学的贡献. 灰色系统理论与其他三种最常用的不确定性理论的对比见表 1-1-1.

表 1-1-1 四种不确定性理论的对比

项目	灰色系统理论	概率论	模糊数学	粗糙集理论
研究对象	贫信息不确定	随机不确定	外延不确定	边界不清晰
理论基础	灰数集	康托尔集	模糊集	近似集
描述方式	可能性函数	概率密度函数	隶属函数	上、下近似
途径手段	灰序列算子	频率统计	模糊关系的合成	知识划分
数据要求	任意分布	典型分布	隶属度可知	等价关系
理论侧重	内涵	内涵	外延	内涵
理论目标	现实规律	历史统计规律	认知表达	概念逼近
理论特色	少数据	大样本	定性经验	信息表

灰色系统理论经过 30 多年的发展,通过国内外众多学者的共同努力,已基本形成一门新兴学科的结构体系. 灰色系统理论的主要内容包括:灰数运算与灰色代

数系统、灰色方程、灰色矩阵等灰色系统的基础理论; 序列算子和灰色信息挖掘方法; 用于系统诊断、分析的系列灰色关联分析模型; 用于解决系统要素和对象分类问题的多种灰色聚类评估模型; 系列灰色预测模型 (GM) 和灰色系列预测方法与技术; 主要用于方案评价和选择的系列灰色决策方法; 以多方法融合创新为特色的灰色组合模型, 如灰色规划、灰色投入产出、灰色博弈、灰色控制等. 灰色系统理论的应用领域十分广泛, 涉及农业科学、经济管理、环境科学、医药卫生、矿业工程、教育科学、水利水电、图像信息、生命科学、控制科学和航空航天等众多领域, 产生了显著的社会效益和经济效益 (刘思峰等, 2014).

灰色系统理论的迅速发展及其在众多科学领域中的成功应用, 赢得了国内外学术界的充分肯定和关注. 目前, 中国、英国、美国、日本、澳大利亚、加拿大、奥地利、俄罗斯、印度、南非、土耳其、瑞典等国家有许多知名学者从事灰色系统研究和应用. 我国是灰色系统研究的主战场, 涌现出了一批杰出学者及其团队, 为灰色系统理论建立、发展、完善和推广做出了重要贡献. 近年来, 大量灰色系统优秀学术著作相继出版, 如《灰色决策理论与方法》(罗党和王洁方, 2012)、《灰预测与决策方法》(肖新平和毛树华, 2013)、《灰色系统气质理论》(邓聚龙, 2014)、《灰色系统理论及其应用》(刘思峰等, 2014)、*Grey Data Analysis: Methods, Models and Applications* (Liu S F et al., 2017) 等. 先后有 100 多项灰色系统理论及应用的研究课题获得中国国家自然科学基金和欧盟委员会、英国皇家学会以及加拿大、西班牙、罗马尼亚等国家基金支持. 全世界相继有数千种学术刊物接收和刊登灰色系统论文, *The Journal of Grey System* (SCI 源刊)、*Grey System: Theory and Application* 等杂志均专门刊登灰色系统理论及应用方面的学术论文. 据不完全统计, 截至 2013 年底, SSCI, SCI, EI, ISTP, SA, MR 等国际权威检索机构收录我国学者的灰色系统论文超过 3 万篇. IEEE 灰色系统与智能服务国际会议 (IEEE International Conference on Grey System and Intelligent Services, IEEE GSIS)、全国灰色系统理论及应用学术会议等灰色系统的重要学术会议的成功召开, 促进了灰色系统理论的快速发展.

总之, 灰色系统理论作为一门新兴学科已经以其强大的生命力立于科学之林. 在大数据时代, 现实世界中仍然存在大量“少数据”“贫信息”不确定性系统, 这无疑为灰色系统理论提供了丰富的研究资源和广阔的发展空间.

1.1.2 灰色预测方法研究概况

灰色预测方法是研究最活跃、应用最广的灰色系统模型之一, 同时也是一类新的现代预测方法. 灰色预测方法在解决数据获取性较差的问题时, 以少量可获取的信息为基础, 利用灰色算子提高序列的光滑度、准指数性, 生成新序列, 进而实现预测, 提高了预测的精度, 有效解决了经济社会系统中数据缺失、不真实等影响研究工作的瓶颈问题, 弥补了大样本建模要求的不足 (党耀国等, 2015).