

SANJIANGPINGYUAN
NONGYE SHUIWENXITONG
FUZAXING CEDU
FANGFA YU
YINGYONG

三江平原农业水文系统复杂性 测度方法与应用

刘东 周方录 王维国 戴春胜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

三江平原农业水文系统复杂性 测度方法与应用

刘东 周方录 王维国 戴春胜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

复杂性是区域农业水文系统的重要演化特征,已经成为水文领域中的研究热点。本书以复杂性测度方法为逻辑主线,以揭示区域农业水文系统动力学结构的复杂性特征为出发点,将复杂性科学引入到国家产粮核心区——三江平原农业水文水资源系统分析中,开展了熵理论、符号动力学、分形理论、小波理论等系统复杂性测度方法的研究与应用,对区域关键农业水文要素(地下水位、降水)复杂性进行了测度分析;对复杂农业水文要素发展态势进行了分析预测;进而提出了复杂性视角下的区域水资源可持续利用对策,为当地水资源可持续开发利用、粮食增产及农民增收提供了保障。

本书结合大量的实证分析对各种数据处理方法进行了详细的介绍,对于推动复杂性科学应用领域的纵深发展及解决三江平原水资源问题具有较强的理论指导意义,可供从事农业水土工程、水文水资源、环境工程、系统工程、管理科学及其他相关专业的教学、科研和管理人员借鉴与参考。

图书在版编目(CIP)数据

三江平原农业水文系统复杂性测度方法与应用 / 刘东等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.12
ISBN 978-7-5084-9370-1

I. ①三… II. ①刘… III. ①三江平原—农业—水文系统—复杂性—研究 IV. ①P641.623.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281458号

书 名	三江平原农业水文系统复杂性测度方法与应用
作 者	刘东 周方录 王维国 戴春胜 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 296千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	001—900册
定 价	46.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

系统复杂性是系统内部性质、结构和功能的综合表征，例如系统的非线性（不可叠加性）与动态性、多样性与多层性、非周期性与开放性、涌现性、不可逆性、自适应性、积累效应（初值敏感性）、奇怪吸引性及结构自相似性（分形性）等，都属于复杂性。20 世纪 80 年代兴起的复杂性科学是一门研究复杂系统行为与演变规律的科学，被誉为“21 世纪的科学”，已经成功应用于电力、医学、金融、教育、交通、资源、环境、社会等诸多领域中，具有广阔的应用前景。当然，作为一门新兴的交叉边缘学科，复杂性科学自身理论体系还不够完善，仍处于不断探索与发展之中。

系统复杂性测度是描述非线性时间序列携带信息量大小的一个重要参数，是系统复杂性的量化表征，一般包括系统分析与指标数据采集、可测度分析与测度方法选择、测度与评价几个步骤。系统分析与指标数据采集就是在明确系统要素、目标、环境与边界、层次结构的基础上，依据客观、全面、科学及可量化原则，构建能够表达系统复杂属性的指标体系，并进行全面数据采集；可测度分析与测度方法选择就是了解各种可能复杂性测度算法适宜性、优缺点、可改进性、数据阈值要求及能否实现可比化度量等，分析系统具有何种复杂性、哪些（种）算法可以测度此种复杂性、现有数据是否满足算法阈值要求，最后判断出系统复杂性是否可测度，并选用适宜测度方法；测度与评价就是运用所选择的方法对系统复杂性进行测度，并对系统复杂性程度、测度结果的物理意义与管理学启示及测度算法可靠性等进行评价分析。在上述系统复杂性测度过程中，复杂性测度算法是度量系统复杂性的核心。

农业水文系统是农业大系统的有机组成部分，在岩石圈、生物圈、大气圈和人类圈的共同作用下，不断与周围的自然与人文环境发生物质、能量、信息因素方面的交换和作用，由于这些环境的变化和不确定性，导致农业水文系统越来越呈现出显著的复杂性演化特征。建立在传统科学范式基础上的研究成果和假设已经越来越无法圆满解释、解决当今水文学领域中所面临的水资源短缺、水位下降及水质恶化等诸多复杂问题，引起了国内外学者的广泛关注和探索。而以复杂适应系统理论、涌现生成理论、混沌边缘理论及进

化计算理论为核心的复杂性应用技术理论体系突破了线性、均衡、简单还原的传统研究范式，极大地推动了科学的纵深发展，使得人类对复杂事物的认知水平上升到了一个崭新的阶段。因此，运用和借鉴复杂性科学理论，对区域农业水文系统复杂性测度理论及方法进行深入研究，在水文学研究领域中进行前沿性探索，具有重要学术价值。

三江平原是国家重要的商品粮基地，粮食生产能力约为 100 亿 kg/a，约占黑龙江年粮食生产能力的 20% 左右，商品率高达 75% 以上，是实现黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”及“全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划”战略目标的关键所在。三江平原是我国最大的淡水沼泽湿地集中分布区，2002 年被列入《湿地公约》国际重要湿地名录，在世界上有重要影响。新中国成立后，三江平原共经历了四次垦荒高潮，加剧了耕地开垦与湿地保护之间的冲突，湿地资源正面临日益严峻的挑战，湿地面积日益萎缩，湿地的生态功能日益退化。为了解决土壤质地黏重、排水能力差、很容易形成涝灾而减产的问题，从 20 世纪 80 年代开始，三江平原掀起了打井种稻的热潮。

长期以来，三江平原由于盲目扩展水田面积，农业灌溉以超强度开采地下水为主，加之农民在经济利益驱使下过量施用化肥、农药，旱涝灾害频繁发生，已经诱发了地下水位下降、水环境恶化、水土流失加剧、湿地生态功能退化、粮食减产等严重问题，三江平原农业水资源开发利用中的复杂性特征日益明显，受到了国内学者的普遍关注。然而以往国内学者在研究三江平原农业水资源可持续利用问题时，往往忽略了系统自身的复杂性，导致难以充分挖掘复杂农业水文系统所蕴含的信息，研究成果难以真正实现区域农业水资源的可持续利用。此种背景下，著者期望本书提出的三江平原农业水文系统复杂性测度分析方法，可以丰富完善复杂性基础理论体系，为国内相关领域从事系统复杂性研究的科技工作者提供借鉴与参考；同时也期望本书提出的复杂性诊断框架下的农业水文系统发展态势分析及水资源可持续利用对策，可以为国内产粮核心区进行农业水资源可持续利用研究提供一种研究模式，为复杂水资源系统的有效管理及黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”、“三江平原农业综合开发试验区”建设提供科学依据。

全书共分七章，第一章介绍了复杂性科学缘起、区域农业水文系统复杂性研究的目的、意义、进展及本书主要内容，由刘东负责撰写；第二章介绍了建三江分局的地形、地貌、气象、水文地质、土壤及水资源开发利用中存在的问题等基本情况，由刘东、戴春胜负责撰写；第三章介绍了目前较为常用的熵理论、符号动力学、分形理论等系统复杂性测度理论与方法，由刘东、

戴春胜负责撰写；第四章采用多种系统复杂性测度方法，对建三江分局关键农业水文系统要素（地下水埋深、降水）复杂性进行了综合测度分析，由周方录负责撰写；第五章采用国内较为先进的数据处理方法，构建了建三江分局复杂地下水埋深序列耦合预测模型，由刘东负责撰写；第六章采用国内流行的小波分析方法，分析了建三江分局复杂降水序列多时间尺度变化特征，由王维国负责撰写；第七章采用定量—定性分析相结合的方法，提出了复杂性视角下建三江分局水资源可持续利用对策，由周方录负责撰写。

在本书编写过程中，我们参阅、借鉴了许多有关于水文系统复杂性与发展态势方面的学术论文及专著，在此向各位作者表示衷心感谢。另外，本书编写工作的顺利完成还得到了建三江分局水务局赵清、周明，东北农业大学吕萍、刘萌、于苗等同志的大力协助，在此表示真诚的谢意。

由于本书是对三江平原产粮核心区水文系统复杂性研究的一次大胆尝试，加之编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请同行专家和广大读者多提宝贵意见，给予批评指正，我们将在今后的研究工作中加以改进。

本书得到国家自然科学基金（No.41071053）、中国博士后科学基金（No.20080440832）、中国博士后科学基金特别资助（No.201003410），高等学校博士学科点专项科研基金（No.20102325120009）、黑龙江省自然科学基金（No.C201026）、黑龙江省教育厅科学技术研究项目（No.11541024）、东北农业大学博士启动基金（No.2009RC37）、黑龙江省高校节水农业重点实验室的联合资助。

著 者

2011年6月

目 录

前言

第一章 引论	1
第一节 复杂性科学缘起与复杂性测度	1
第二节 农业水文系统复杂性研究的目的和意义	2
第三节 农业水文系统复杂性与发展态势研究进展	5
第四节 本书的主要研究内容	9
参考文献	10
第二章 研究区域基本情况	18
第一节 地形、地貌	18
第二节 气象	18
第三节 水文地质	19
第四节 土壤	21
第五节 社会经济及农业生产	22
第六节 建三江分局水资源开发利用中存在的问题	23
参考文献	24
第三章 系统复杂性测度理论与方法	25
第一节 基于小波变换的信息量系数	25
第二节 近似熵	27
第三节 符号动力学	28
第四节 分形理论	29
参考文献	34
第四章 区域农业水文系统复杂性测度	39
第一节 基于小波变换信息量系数的水文序列复杂性研究	39
第二节 基于近似熵的水文序列复杂性研究	44
第三节 基于符号动力学的水文序列复杂性研究	48
第四节 基于分形理论的水文序列复杂性研究	55
第五节 建三江分局水文序列复杂性综合测度分析	65
参考文献	71
第五章 区域复杂地下水埋深序列发展态势分析	74
第一节 建三江分局北区复杂地下水埋深序列动态变化规律研究	74

第二节 建三江分局中区复杂地下水埋深序列动态变化规律研究	85
第三节 建三江分局南区复杂地下水埋深序列动态变化规律研究	91
参考文献	108
第六章 区域复杂季节降水序列多时间尺度变化特征分析	114
第一节 小波分析基本原理	114
第二节 建三江分局北区复杂季节降水序列多时间尺度分析	115
第三节 建三江分局中区复杂季节降水序列多时间尺度分析	131
第四节 建三江分局南区复杂季节降水序列多时间尺度分析	146
参考文献	161
第七章 复杂性视角下区域水资源可持续利用对策分析	164
第一节 加强节水教育,提高农民水商品意识	164
第二节 适度发展水田面积,有效涵养地下水资源	166
第三节 推广水田节水灌溉技术,推进节水农业发展	173
第四节 提升防灾减灾能力,推进粮食产能工程建设	176
第五节 控制化肥农药施用量,推进环境友好型社会建设	179
第六节 推进农业水价改革,加快节水型社会建设	181
参考文献	183

第一章 引 论

第一节 复杂性科学缘起与复杂性测度

一、复杂性科学缘起

系统复杂性是系统内部性质、结构和功能的综合表征，任何系统都具有复杂性，区别在于表现程度不同，当系统复杂性累积到一定程度时，就转化为复杂系统^[1]。复杂系统具有非线性（不可叠加性）与动态性、多样性与多层性、非周期性与开放性、涌现性、不可逆性、自适应性、积累效应（初值敏感性）、奇怪吸引性及结构自相似性（分形性）等诸多复杂性特征^[2,3]，致使运用传统科学认知复杂系统规律时显得力不从心。此种背景之下，复杂性科学应运而生，20 世纪 80 年代兴起的复杂性科学是一门研究复杂系统行为与演变规律的科学，被誉为“21 世纪的科学”^[4,5]。复杂性科学突破了线性、均衡、简单还原的传统研究范式，极大地推动了科学的纵深发展，使得人类对复杂事物的认知水平上升到了一个崭新的阶段^[2]。1984 年，美国成立了专门的复杂性研究机构——圣菲（Santa Fe）研究所，标志着复杂性科学范式的初步建立^[6]。目前，圣菲研究所致力于构建以复杂适应系统（Complex Adaptive System，简称 CAS）理论、涌现生成理论、混沌边缘理论及进化计算理论为核心的复杂性应用技术理论体系，已经成为世界复杂性问题的研究中枢^[4]。而在国内，最早探索复杂性方法论的是我国著名科学家钱学森，他与戴汝为、于景元等学者共同提出了“开放的复杂巨系统理论”，认为“复杂性实际上是开放的复杂巨系统的动力学特性”，并从方法论的角度提出了“从定性到定量的综合集成法”^[3,4]，为复杂性科学的发展做出了卓越贡献。正是在这些科学先驱的引领下，使得复杂性科学逐步得到学术界的认可，并广泛应用于诸多领域中。当然，作为一门新兴的交叉边缘学科，复杂性科学自身理论体系还不够完善，仍处于不断探索与发展之中。

二、复杂性测度

复杂性测度是描述非线性时间序列携带信息量大小的一个重要参数^[7]，是系统复杂性的量化表征。随着复杂性科学的发展，已经形成了多种系统复杂性测度方法，其中，较为流行的系统复杂性测度方法见表 1-1，具体算法详见后述。

表 1-1

复杂性测度方法一览表

方 法	类 型
熵理论	信息熵 ^[8] 、近似熵 ^[9] 、样本熵 ^[10] 、排列熵 ^[11] 、联合熵 ^[12] 、多尺度熵 ^[13] 、小波熵 ^[14] 等

续表

方 法	类 型
符号动力学	二值粗粒化、多值粗粒化、等概率粗粒化算法 ^[15] 等
分形理论	极差分析分形理论 ^[16] 、小波分形理论 ^[17] 、多重分形理论 ^[18] 、小波多重分形理论 ^[19] 等
混沌理论	关联维数 G-P 算法 ^[20] 、小波 G-P 算法 ^[21,22] 、斜面滤波点相关算法 ^[23] 、快速算法 ^[24] 等

第二节 农业水文系统复杂性研究的目的和意义

一、区域农业水文系统复杂性研究已经成为水文学领域中的研究热点

农业水文系统是农业大系统的有机组成部分,对于区域社会经济可持续发展及粮食生产有着重要的影响。随着人口的不断增加和经济的飞速发展,人类对农业水文系统的干扰强度不断增加。在岩石圈、生物圈、大气圈和人类圈的共同作用下,区域农业水文系统越来越表现出随机、非线性、混沌等复杂特征^[17,25]。尤其是近几十年来,随着太阳黑子活动、厄尔尼诺现象、温室效应、土地沙漠化、森林面积锐减影响的日益加剧,全球社会经济发展市场化、信息化、一体化趋势日益明显,导致区域农业水文系统的复杂性特征日益凸显^[26]。建立在传统科学范式基础上的研究成果和假设已经越来越不能圆满地解释或解决当今水文学领域中所遇到的水资源短缺、水位下降及水质恶化等诸多复杂问题,引起了国内外学者的广泛关注和探索。复杂性科学是一门 20 世纪 80 年代发展起来的用以研究复杂性和复杂系统的新兴综合性交叉学科^[27-30],已经成功应用于电力^[31,32]、医学^[33,34]、金融^[35,36]、教育^[37,38]、交通^[39,40]、资源^[41,42]、环境^[43,44]、社会^[45,46]等诸多领域中,具有广阔的应用前景。随着复杂性科学的产生,具有鲜明前沿性、交叉性和挑战性的区域农业水文系统复杂性研究已经成为当今水文学领域中研究的一个热点。因此运用和借鉴复杂性理论,对区域农业水文系统复杂性测度理论及方法进行深入研究,在水文学研究领域中进行前沿性探索,可以为区域农业水资源优化调控提供重要的科技支撑。

二、复杂性是区域农业水文系统演化的重要特征,复杂性测度方法研究具有重要学术价值

作为农业大系统的重要组成部分,农业水文系统不断与周围的自然与人文环境发生物质、能量、信息因素方面的交换和作用,由于这些环境的变化和不确定性,导致农业水文系统越来越呈现出显著的复杂性演化特征^[47]。农业水文系统复杂性分析基础理论和资料信息的严重不足,在一定程度上限制了农业水文系统复杂性测度理论的发展^[48]。从系统论观点来看,区域农业水文系统是一个高维非线性、开放性复杂系统,其边界条件、初始条件及系统要素都十分复杂,如图 1-1 所示;从信息论观点来看,农业水文系统存在监测数据不完整等诸多的未知和不确定性问题。水文监测数据不仅蕴含了系统过去行为的信息,而且还隐藏着系统未来演化的信息。目前,农业水文系统研究主要采用半经验、概念性或随机性理论,而客观世界中的水文变化过程则是确定性与不确定性、突发性与无序性

等各种成分交织的复杂现象^[49]，从而使得简单的理论和手段已不适宜于人类活动驱动下日趋复杂化的农业水文系统的研究。复杂性科学的发展，为水文学研究领域注入了新的生机，它将在农业水文系统复杂性研究中扮演重要角色^[50]。同时，复杂性测度方法具有计算简便、对序列样本数等条件要求较低等优点，因而更具有实用价值，是水文学研究领域的新型工具^[51]。区域农业水文系统复杂性测度方法研究可以丰富完善复杂性基础理论体系，为相关领域复杂性研究提供借鉴，具有重要的学术价值。

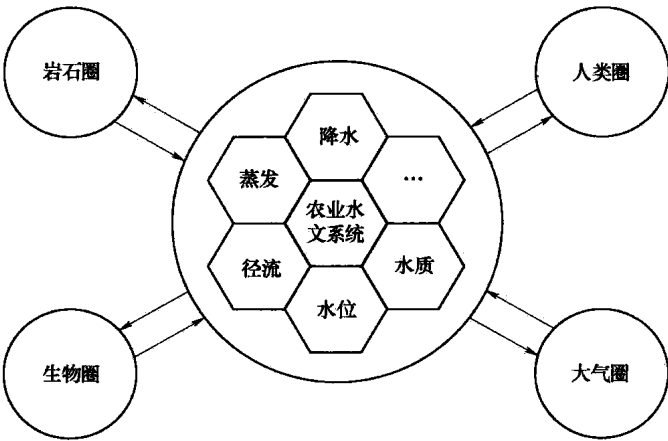


图 1-1 农业水文复杂系统示意图

三、黑龙江“千亿斤粮食产能工程”及“三江平原农业综合开发试验区”建设的需要

2008 年 12 月，黑龙江省委经济工作会议提出了着力建设“八大经济区”、实施“十大工程”的战略构想，其中包括“三江平原农业综合开发试验区”建设和“千亿斤粮食产能工程”^[52]。2009 年 11 月，国家发展和改革委员会发布了《全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划（2009～2020 年）》，提出到 2010 年，全国粮食生产能力稳定在 5000 亿 kg 以上，到 2015 年，全国粮食生产能力达到 5300 亿 kg 以上，到 2020 年，全国粮食生产能力达到 5500 亿 kg 以上^[53]。其中，东北地区为产粮核心区，承担新增粮食产能任务 150.5 亿 kg，占全国新增产能的 30.1%^[54]。

三江平原位于黑龙江省东部，为黑龙江、松花江、乌苏里江的冲积平原，地理坐标为北纬 45°01′05″～48°27′56″，东经 130°13′1″～135°05′26″^[55]，土地总面积 10.9 万 km²，其中，山丘区占 43%，平原区占 57%，耕地面积 378 万 hm²^[56]，是国家重要的商品粮基地。区内包括哈尔滨、牡丹江、佳木斯、鹤岗、双鸭山、七台河、鸡西所辖的 23 个县（市）、52 个国营农场及 8 个森林工业局^[57]。三江平原地势低平，耕地集中连片，适宜发展规模化现代农业，田间机械化率高达 80% 以上^[58]。区内土壤肥沃，水、肥、光、热资源丰富，水地资源基本平衡^[59]，适宜种植水稻、玉米、大豆、小麦等农作物。目前，三江平原粮食生产能力约为 100 亿 kg/a^[60]，约占黑龙江年粮食生产能力（2010 年为 501.3 亿 kg^[61]）的 20% 左右，商品率高达 75% 以上^[58]。因此，三江平原是东北的大粮仓，是

实现黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”及《全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划（2010～2020 年）》战略目标的关键所在。

三江平原是我国最大的淡水沼泽湿地集中分布区^[62]，2002 年被列入《湿地公约》国际重要湿地名录^[63]，在世界上有重要影响。但长期以来，在高强度农业开发的影响下，三江平原的湿地资源正面临日益严峻的挑战。新中国成立以后，在“以粮为纲”^[64]发展模式的驱动下，三江平原共经历了 1949～1954 年、1956 年和 1958 年、1969～1973 年及 20 世纪 70 年代末四次垦荒高潮^[60]，加剧了耕地开垦与湿地保护之间的冲突。对三江平原不同时间节点沼泽湿地面积与耕地面积进行统计，见表 1-2^[64,65]。

表 1-2 三江平原沼泽湿地与耕地面积变化情况

年 份	1949	1954	1976	1986	1995	2000	2005
沼泽湿地面积 (万 hm ²)	534.50	352.59	223.06	138.93	117.34	95.87	80.99
耕地面积 (万 hm ²)	78.60	171.34	358.67	452.49	494.05	556.88	600.16
时段	1949～ 1954 年	1954～ 1976 年	1976～ 1986 年	1986～ 1995 年	1995～ 2000 年	2000～ 2005 年	1949～ 2005 年
沼泽湿地面积年平均变化率 (%)	-6.81	-1.67	-3.77	-1.73	-3.66	-3.10	-1.52
耕地面积年平均变化率 (%)	23.60	4.97	2.62	1.02	2.54	1.55	11.85

注 表中负号表示面积减少。

同时，三江平原由于缺少控制性工程，长期以来，地表水利用率不高，当地产地表水利用率仅为 6%，过境水利用率仅为 24%^[66]，因此，农业灌溉主要以开发地下水为主。为了解决土壤质地黏重、排水能力差、很容易形成涝灾而减产的问题^[67]，从 20 世纪 80 年代开始，三江平原掀起了打井种稻的热潮^[68]，水田面积逐年增长，见表 1-3^[69,70]。由表 1-3 可知，1995 年，三江平原水田面积为 41.2 万 hm²，相比较 1986 年的水田面积 (57.7 万 hm²) 减少了 16.5 万 hm²，这主要是由于前期大面积垦荒、后期无力耕种而撂荒所导致的^[71]。由于水田面积的迅速增加，地下水开采量也迅速增加，根据《黑龙江省水利建设统计资料》，1986 年，井灌面积为 7.7 万 hm²，地下水开采量接近 6 亿 m³，到 2005 年，井灌面积发展到 68.6 万 hm²，地下水开采量激增到 46.1 亿 m³^[72]，几乎全部用来灌溉水稻，再加上人为浪费严重以及管理不善，使得三江平原地下水位普遍下降。《国家粮食安全中长期规划纲要（2008～2020 年）》中指出，三江平原近 10 年来地下水位平均下降 2～3m，部分区域下降 3～5m^[73]，充分说明了三江平原不合理的农业开发模式对水资源系统健康的严重影响。

表 1-3 三江平原水田面积变化情况

年 份	1981	1986	1995	2000	2005
水田面积 (万 hm ²)	7.0	57.7	41.2	116.4	150.9
时段	1981～1986 年	1986～1995 年	1995～2000 年	2000～2005 年	1981～2005 年
水田面积年平均变化率 (%)	144.9	-3.2	36.5	5.9	85.7

注 表中负号表示面积减少。

综上所述,长期以来,三江平原盲目扩展水田面积,农业灌溉以超强度开采地下水为主,加之农民在经济利益驱使下过量施用化肥、农药,旱涝灾害频繁发生,已经诱发了地下水位下降、水环境恶化、水土流失加剧、湿地生态功能退化、粮食减产等严重问题,三江平原农业水资源开发利用中的复杂性特征日益明显,受到了国内学者的普遍关注。然而以往国内学者在研究三江平原农业水资源可持续利用问题时,往往忽略了农业水文系统的复杂性,导致难以充分挖掘农业水文要素变化过程所蕴含的信息,研究成果难以真正实现区域农业水资源的可持续利用。因此,深入研究三江平原农业水文系统复杂性测度分析方法,揭示农业水文系统复杂性特征,进而分析农业水文要素发展态势并提出相应对策是非常重要的,可以为三江平原农业水资源可持续利用提供科学依据,为国内产粮核心区进行农业水文系统复杂性研究提供一种研究模式,同时,对于推动黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”、“三江平原农业综合开发试验区”建设及保障我国粮食安全具有重要理论与现实意义。

第三节 农业水文系统复杂性与发展态势研究进展

全球变化及人类活动导致了农业水资源开发利用过程中的复杂性逐渐增加^[25],农业水文要素复杂性研究正在升温。特别是粮食危机和水危机的日益加剧,作为区域经济社会发展的重要影响因子,农业水文系统复杂性与发展态势研究更是得到了国内外学者的普遍关注。复杂性科学是相对于牛顿时代的简单系统而言的,它所探讨的是复杂系统中各组成部分之间相互作用所表现出的特性^[74]。复杂性科学是“21 世纪的科学”,尽管目前它仍处在萌芽和发展阶段,但已经引起了科学界的广泛重视^[3,5]。系统复杂性往往是通过系统构成要素的复杂变化反映出来的,这就使得农业水文系统复杂性可以通过农业水文系统要素复杂性来表征^[75,76]。农业水文系统发展态势研究主要涉及地下水位、降水、蒸发等农业水文要素的时空变异规律、多时间尺度变化特征分析等内容,是区域水资源科学管理的重要依据,历来受到国内外学者的高度重视。

一、国内研究进展

(一) 水文要素复杂性研究

在水文要素复杂性研究方面,四川大学水利水电学院在全国处于领先水平,取得了一些前沿性的研究成果。李贤彬等在水文时间序列分析中引入了子波变换法,通过对水文时间序列的离散子波变换(Discrete Wavelet Transform,简称 DWT),给出了计算水文过程变化特征的信息量系数(Information Cost Function,简称 ICF)法^[77],同年,他们在水文序列的研究中又引入了 Hurst 系数的子波估计法,计算了实测年最大洪峰流量序列 Hurst 系数的子波估计值^[78];张少文等较系统地论述了分形理论在水文水资源中水系河网结构和流域地形地貌及其演变、河床表面形态、降水时空分布、洪水时空变化、径流过程及土壤水下渗等方面的应用,并探索性地指出了应用中应注意的问题^[79];王文圣等探讨了小波分维估计法的影响因素和稳定性,将基于离散小波变换的水文序列分维估计方法用于黄河三门峡站年径流和长江屏山站日平均流量的分维计算^[80],同年,他们将基于连续小波



变换的水文序列分维估计方法用于黄河流域主要水文站年径流的分维计算^[81]，还采用基于小波消噪的符号动力学方法，运用 Lempel—Ziv 算法计算了长江、黄河流域年径流的复杂度^[75]；余姝萍等采用网格法计算了岷江上游紫坪铺站、姜射坝站、桑平站的日径流过程分形维数，发现各测站间日径流过程分维数的变化趋势基本一致。她将姜射坝站日径流过程线分维数与岷江上游生态脆弱性结合进行分析，认为分维在一定程度上还可以是生态脆弱性的表征，为水文学和生态学研究提供了新思路^[82]；刘起方等运用重标极差 (R/S) 分析方法对南桠河冶勒水库月平均径流复杂的非线性特性隐藏下的有序性（持续性特性）进行了研究^[83]。另外，佟春生等采用近似熵对黄河径流序列的复杂性进行了分析，指出对黄河上游实测径流变化的研究应以洪水的变化为主，对天然径流变化的分析应以干旱（断流）为主，而对黄河下游实测及天然径流变化的研究均应以干旱（断流）为主^[84]。同年，他们采用基于遗传密码粗粒化函数的 Lempel—Ziv 算法对黄河干流上游的贵德站和兰州站的径流序列变化进行了实时跟踪和状态诊断，结果表明：自然环境、人类活动及空间距离是决定径流变化的三个基本要素，且尤以人类活动影响最为直接^[85]。他们还采用复杂度 C_1 （反映事物随机性程度）、 C_2 （反映事物混沌特征）对黄河干流上游的贵德站和兰州站、下游的花园口站的河川径流序列进行了诊断分析，结果表明：黄河干流径流序列确定、随机和混沌成分共存，以随机性为主，人类活动的影响总体使得径流变化的随机和混沌特性增大，且下游的随机成分大于上游，上游的混沌成分大于下游^[86]；邓自旺等采用符号动力学理论分析了我国降水量复杂度空间分布特征。结果表明：月降水量序列的复杂度小于季节和年降水量序列，从空间分布来看，降水量变化的复杂度为西部、北部大于南部和东部，我国东南沿海地区降水量变化的复杂度最大^[87]；郝成元等采用排列熵对云南省南部地区降水复杂性进行了分析，指出降水熵值的空间格局不仅指示了水汽来源的方向，而且反映了降水空间递变强度的区域差异^[88]；李双成等采用近似熵对全国 648 个台站 1961~1990 年日降水距平序列的复杂性进行了分析，发现降水复杂度高值区出现在海拔较高、地表起伏较大的区域，说明地形条件是塑造降水系列复杂性的重要因素^[89]；彭涛等采用非线性动力学参数样本熵方法，对东江干流龙川、河源和博罗 3 个主要控制水文站的月径流序列复杂性进行了分析。结果表明：东江干流月径流序列复杂度具有空间差异性，整体呈从上游到下游逐渐增加的趋势；径流序列复杂度动态变化较大并具有一定的周期性，反映出自然环境变化特别是人类活动影响导致了水文动力学系统结构的变化^[90]；魏一鸣等和杨思全等分别应用分形理论对九江年降水序列和新疆河冰湖突发洪水洪峰序列的关联维和混沌特性进行了研究^[91,92]；陈云浩等、柳景青、李国良等及金云翔等分别应用混沌理论对上海市旬降水序列、杭州市日用水量、时用水量及各日典型时段（9 时、2 时）用水量序列、三江平原别拉洪水文站月降水序列及泾河流域西峰镇站月降水序列的混沌特性进行了分析^[93-96]；陈引锋等和武荣等也分别应用混沌理论对黑河日径流量序列及昕水河月径流量序列的混沌特性进行了分析^[97,98]。

（二）水文要素发展态势研究

在水文要素发展态势方面，全国高校都在陆续开展研究。邹文安等、赵瑜等及王其虎等利用人工神经网络 (ANN) 技术，分别建立了吉林省农安水文站枯季径流量序列、四川省大桥水库入库月径流量序列、广州市流溪河水库 5~7 月平均径流量序列的 BP 神经

网络预测模型^[99-101]；于国荣等、郭晓亮等将混沌理论与支持向量机（Support Vector Machin, 简称 SVM）相结合，分别引入径向基核函数及模糊隶属度函数，建立了长江宜昌站、寸滩站月径流量序列的混沌支持向量机及混沌模糊支持向量机预测模型^[102,103]；师彪等对传统粒子群优化算法进行了改进，提出了动态调整粒子群优化（Dynamic Adjustment Particle Swarm Optimization, 简称 DAPSO）算法，结合霍尔特-温特斯线性季节性模型，建立了石泉水库年径流量和月径流量序列动态调整粒子群算法-霍尔特-温特斯线性季节性模型^[104]。2000 年以来，东北农业大学结合区域优势，在农业水文要素预测建模、多时间尺度分析等方面有较多的积累。付强等采用人工神经网络技术及随机理论建立了三江平原建三江分局创业农场井灌水稻区逐月地下水埋深 BP 神经网络预测模型及非平稳时间序列模型^[105,106]，采用混沌理论分析了三江平原建三江分局创业农场 2 队、10 队、17 队及洪河农场 601 号长观井地下水埋深序列的混沌特性，并建立了 4 个地下水埋深序列的基于关联度的局域加权线性回归预测模型^[107]；刘东等分别采用随机理论、小波理论、人工神经网络等方法建立了三江平原红兴隆分局 853 农场逐月地下水埋深时间序列模型、小波神经网络模型及小波随机耦合模型^[108-110]，采用小波理论、最近邻原理、随机理论等方法建立了三江平原红兴隆分局 853 农场年降水小波最近邻抽样回归耦合预测模型、小波随机耦合模型、基于小波消噪的随机预测模型及基于小波消噪的月降水季节性时序预测模型^[111-114]，采用小波理论分析了三江平原红兴隆分局 853 农场年降水序列及主汛期降水序列的多时间尺度变化特征^[115,116]；李明皓等、孟凡香等采用小波理论分别对黑龙江省乌云河流域东风站年平均径流量序列及查哈阳灌区水稻生育期（5~9 月）降水序列的多时间尺度特征进行了分析^[117,118]。另外，邵年华等利用核主成分分析（Kernel Principal Component Analysis, 简称 KPCA）提取输入数据的特征信息，并将特征信息作为最小二乘支持向量机（Least Square Support Vector Machine, 简称 LSSVM）的输入变量，建立了新疆和田县月蒸发量核主成分支持向量机预测模型^[119]；魏光辉等采用灰色关联分析方法筛选出影响水面蒸发的主要因子，建立了新疆尉犁县旬水面蒸发与主要影响因子之间的多元线性回归预测模型^[120]；买买提·阿布都拉等、赵恒和等及杨保华等分别采用小波分析方法对新疆和田市蒸发量序列、青海省共和盆地蒸发量序列及云南干热河谷地区的元谋、宾川、元江、潞江坝 4 个典型代表站的蒸发量序列进行了多时间尺度分析^[121-123]。

二、国外研究进展

（一）水文要素复杂性研究

国外的水文要素复杂性研究起步较早，取得了大量的研究成果。但和国内一样，也是以混沌和分维理论为基础来研究水文要素的复杂性。1987 年，Hense A 等首次提出降雨序列可能存在混沌，利用关联维数法分析了 Nauru 岛 1008 个月降雨量资料组成的序列，开辟了混沌分析方法应用于水文要素复杂性测度的先河^[124,125]。接下来，Jayawardena A W 等、Puente C E 等、Porporato A 等、Sivakumar B 等分别应用 Lyapunov 指数法、Kolmogorov 熵法、关联维数法、伪临近法及非线性预测法分析了中国香港地区 3 个日降雨量序列和 2 个日径流量序列、Boston 城的日降雨量序列、意大利 Po 河支流 Dora Baltea 河的日径流量序列及新加坡 6 个日降雨量序列^[126-130]，结果表明：日降雨量及日径流量序

列均存在混沌特性；Sivakumar B 等采用关联维数法对美国密西西比州 Leaf River 盆地连续双倍分辨率（6h、12h、24h、48h、96h、192h）降雨序列进行了分析，结果表明：该区域降雨转换中存在混沌特性^[131]；Gaume E 等采用关联维数法对法国巴黎周围的 5~10min 降水集权重序列进行了分析，结果表明：该区域降水不存在低维混沌特性，与很多学者的前期研究结果相矛盾，他们认为，这可能是由于数据集时间分辨率、气候条件和降水发生机制、数据集大小影响等原因导致的^[132]；Ng W W 等认为数据集中存在异常值会影响到水资源规划、运营、管理等决策过程，采用自相关函数、互信息、功率谱分析、相空间重构、关联维数、替代性检测及 Hurst 系数等混沌分析技术对加拿大安大略省的 Saugeen 河日径流量序列进行了研究。结果表明：所研究径流量序列具有类随机性波动，异常值的存在增加了序列的复杂性^[133]；Millán H 等采用 TISEAN 软件包、伪近邻法对厄瓜多尔 Pastaza 省亚马逊河流域 6 个日气象变量序列（降水量、相对湿度、蒸发量、最低气温、日照百分率、蒸降比）的演化规律进行了分析，结果表明：所研究序列的最大李雅普诺夫指数均为正值，说明这些序列均存在混沌特性^[134]。

（二）水文要素发展态势研究

国外完善的水文信息监测体系、开放的数据共享平台为学者在水文要素发展态势研究方面进行前沿性探索提供了坚实的数据基础，因而积累了大量的值得借鉴的研究成果。TRIPATHI M P 等结合印度遥感卫星（IRS-1B-LISS-II）数据，采用 GIS 技术和数字高程模型（Digital Elevation Model，简称 DEM），提取了印度比哈尔邦赫札里巴坎区 Nagwan 流域的流域面积、形状、平均坡度、干流河道斜率、土地利用结构、水文土壤群及曲线数字等资料，建立了该区的地表径流经验预测模型^[135]；Méndez M C 等建立了西班牙西北部 Xallas river 流域的月平均径流量序列博克斯-詹金斯预测模型、日径流量序列博克斯-詹金斯预测模型及 ANN 预测模型，结果表明：ANN 模型预测效果优于博克斯-詹金斯模型^[136]；Trivedi H V 等将灰色系统理论与最小二乘法（用于估计模型参数）相结合，建立了印度恰尔肯德邦 Kothuwatari 流域暴雨径流量序列灰色预测模型^[137]；Nagler T 等采用积雪量遥感数据和气象数据同化方案，对气象监测数据、数值天气预报及雪量图进行了均化处理，建立了奥地利阿尔卑斯山地区 Ötztal 流域的融雪径流预测模型^[138]；Patil J P 等采用美国农业部自然资源保护局曲线数字（Natural Resources Conservation Services Curve Number，简称 NRCS-CN）技术与 GIS 技术进行耦合分析，建立了印度恰尔肯德邦 Chotanagpur 高原 Banha 流域地表径流量序列预测模型^[139]；Remesan R 等认为模拟复杂径流量过程时，应考虑序列的类型、长度及是否需要将原始信号分解为不同频段等问题，他们将 γ 检验（用于确定输入数据的维数和长度）、小波变换（用于将输入信号分解为不同频段）及人工神经网络技术相结合，建立了英国西南部 Brue 流域的日径流量序列混合预测模型^[140]；Daliakopoulos I N 等、Nayak P C 等、Banerjee P 等及 Mohanty S 等分别采用人工神经网络（ANN）技术对希腊克里特岛美沙瑞流域逐月地下水位、印度安得拉邦东戈达瓦里区逐月地下水位、纳尔贡达区 Kurmapally 流域地下水位、印度奥里萨邦 Kathajodi River 流域典型河心滩 Bayalish Mouza 的逐周地下水位进行了预测^[141-144]；Chen Z H 等认为地下水位的变化与含水层特性、地下水补给方式、补给距离等密切相关，他们根据水平衡模型和地下水流模型，建立了加拿大马尼托巴省碳酸盐含水



层响应气候变量的地下水位经验统计模型^[145]；Moukana J A 等首先根据美国陆地卫星 5 号（Landsat 5）的 TM 影像和美国陆地卫星 7 号（Landsat 7）的 ETM+ 影像，采用线性光谱混合法分析了日本九州熊本平原土地覆被的变化，然后采用地质统计分析法识别、去除地下水位监测数据中的趋势成分，构建地下水空间插值模型，最后建立了该区地下水位多元回归预测模型，统计检验结果表明：从水田到城市地区土地覆被的变化对补给区内地下水位下降具有重要影响^[146]；Valverde Ramírez M C 等采用巴西国家空间研究所天气预报和气候研究中心运行的 ETA 模型生成的气象数据（位温、风垂直分量、比湿、气温、可降水分、相对涡度、水汽通量散度）作为网络输入，以降水数据作为网络输出，构建了巴西圣保罗州 6 个地点（瓜鲁柳斯、坎皮纳斯、包鲁、普鲁登特总统城、里贝朗普雷图 5 个城市的机场及 Astronômico e Geofísico 学院）日降水序列的人工神经网络预测模型^[147]；Salman A 等利用不同盐度、水温、气温、风速条件下的海水蒸发率实验数据，建立了带有梯度下降算法的海水蒸发率神经网络预测模型及基于神经网络和遗传算法的海水蒸发率混合预测模型，结果表明：混合预测模型精度更高^[148]；Andreo B 等采用功率谱分析、相关分析及连续小波分析技术，对伊比利亚半岛南部西班牙气象、水文站监测数据（降水、气温、泉流量）序列进行了分析，结果表明：降水与气温序列年周期特性已经延续了 100 多年，同时，降水与气温序列也存在较弱的 0.5 年、2.5 年及 5 年的周期，多年尺度的周期可能是由于气候变化或北大西洋涛动引起的^[149]。

三、国内外研究成果评析

综合上述，尽管国内外学者在水文系统复杂性及水文系统发展态势研究方面取得了大量成果，但从水文复杂巨系统^[150,151]的角度看，该方面研究存在以下问题：

（1）从水文系统复杂性研究尺度与基础数据看，侧重于流域或城市尺度的研究多，而侧重于粮食主产区尺度的少，侧重于径流量、降水量序列的多，而侧重于水文复杂巨系统最为活跃和敏感的地下水子系统^[152,153]要素——地下水埋深序列的少，导致复杂性测度理论体系存在缺陷，因此，粮食主产区尺度下农业水文系统复杂性亟待研究。

（2）从水文系统复杂性测度方法来看，采用单一方法的多，而多种方法相结合的少，导致难以充分挖掘水文要素序列所蕴含的复杂性信息，因此，水文系统复杂性耦合测度分析方法亟待研究。

（3）从水文系统发展态势分析方法来看，单独作发展态势分析的多，而将水文系统复杂性诊断与水文系统发展态势分析整合进行研究的少，导致分析结果实用性和指导性不足，因此，复杂性视角下的水文系统发展态势分析亟待研究。

第四节 本书的主要研究内容

针对上述国内外农业水文系统复杂性与发展态势研究中所存在的问题，本书以三江平原产粮核心区——黑龙江省农垦总局建三江分局（以下简称建三江分局）为例，深入研究农业水文系统中关键水文要素（地下水埋深、降水）复杂性测度方法及水文要素发展态势，进而提出相应对策。主要研究内容如下：