

SANJIANG PINGYUAN
NONGYE SHUITU ZIYUAN XITONG
FUZAXING CEDU LILUN YU FANGFA
——SHANG FENXING HUNDUN



三江平原 农业水土资源系统 复杂性测度理论与方法 ——熵、分形、混沌

刘东 王大伟 王俊 付强 李天霄 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

三江平原 农业水土资源系统 复杂性测度理论与方法 ——熵、分形、混沌

刘东 王大伟 王俊 付强 李天霄 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书运用熵理论、分形理论、混沌理论三大理论,以揭示区域农业水土资源系统复杂性特征为出发点,以国家粮食生产核心区——黑龙江省三江平原为研究平台,系统分析了黑龙江省农垦建三江管理局农业水土资源复杂性。本书共分六章,介绍了系统复杂性以及水土资源优化配置研究进展;对熵理论、分形理论、混沌理论等系统复杂性测度基本理论进行了详细的介绍;应用熵理论、分形理论、混沌理论对区域关键农业水文要素(地下水位、降水)复杂性和土地资源系统要素(粮豆作物、农药施用量、化肥施用量)复杂性进行了测度分析,综合分析了农业水土资源复合系统复杂性特征;采用粒子群优化算法、协同进化遗传算法和多目标规划模型构建了区域农业水土资源优化配置模型,为当地水土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先进复杂性测度算法进行了详细的介绍,对于推动复杂性科学的农业应用及解决区域农业水土资源问题具有较强的理论价值与实际意义,可供从事农业水土工程、水文学及水资源、环境科学与工程、地理学、系统科学、管理科学与工程及其他相关专业的教学、科研人员借鉴与参考。

图书在版编目(CIP)数据

三江平原农业水土资源系统复杂性测度理论与方法 :
熵、分形、混沌 / 刘东等著. — 北京 : 中国水利水电
出版社, 2016.5
ISBN 978-7-5170-4327-0

I. ①三… II. ①刘… III. ①三江平原—农业资源—
水资源管理②三江平原—农业用地—土地资源—资源管理
IV. ①S279.2②F323.211

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第103244号

书 名	三江平原农业水土资源系统复杂性测度理论与方法——熵、分形、混沌
作 者	刘东 王大伟 王俊 付强 李天霄 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.25印张 314千字
版 次	2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷
定 价	56.00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

QianYan>>>

复杂系统是由大量相互作用的不同单元组成的自适应系统，具有层次性、鲁棒性、奇异性特点，它强调系统整体与部分之间不再是线性关系。处理与解决复杂系统问题需要从整体上考虑并解决问题，打破原有线性、均衡、简单还原的思维范式。农业水土资源系统复杂性研究不是单一的研究水资源与土地资源，而是以水资源系统、土地资源系统为子系统，探究更高层次的水土资源系统所具有的复杂性特征，对于区域农业水土资源可持续开发利用具有重大的理论与实践意义。

复杂性科学是“21 世纪的科学”，熵、分形、混沌三种理论是复杂性科学理论框架的重要组成部分。熵具有测度方法简单、运算快速、抗干扰能力强等优点，可以用来描述复杂的、随机的、动态的、不可逆的自然过程，是衡量系统不确定性程度、状态混乱程度或无序程度的度量，已在医学、环境学、管理学、经济学、建筑学、信息科学、物理学、工程与地质学、天文学等诸多领域得到了广泛应用。因此，将熵理论应用于水土资源复合系统复杂性研究中具有重要的理论与实践意义。随着科学技术研究的不断进步和发展，人们越来越多地发现了大自然中许多彼此不存在任何线性关系的无序的、不稳定的和随机的现象，这些现象用传统的数学工具已无法描述，而分形学可以直接从纷繁复杂的系统本身入手，打破传统研究模式，为事物从极端有序到真正混沌都提供了一种定量描述的可能，也使得人们可以从混沌模糊的现象中准确把握复杂现象背后的本质和规律。水文现象和土壤系统本身具有典型的分形特性，将分形理论引入到水土资源系统研究中，既可以准确刻画系统复杂性演化特征，也可以充分展示分形理论在非线性系统分析中的优势。混沌是确定性非线性系统中变量之间相互作用产生的貌似随机的行为（内在随机性），即所谓确定系统的随机性，主要讨论系统对初始条件的极端敏感性、遍历性、拓扑传递性、周期点的稠密性等。众多研究表明，系统复杂性问题的本身源于混沌边缘现象，混沌序列的基本特征量在一定程度上可以很好地定性定量描述系统的复杂性及其复杂性程度。混沌理论在水土资源相关研究中

已经得到了初步应用，并取得了较好的成果。在考虑复杂性影响的基础上，混沌理论方法可以准确预测水土资源序列短时期内的波动变化，为进一步合理调配水土资源提供科学依据。

区域农业水土资源系统是典型的复杂系统。三江平原位于黑龙江省东北部，年粮食生产能力超过 150 亿 kg，商品粮率高达 80% 以上，是黑龙江省粮食生产核心区与国家重点湿地生态功能区。首先，三江平原由于工程调蓄能力弱，地表水利用率不高，农业灌溉主要以开发地下水为主，井灌水田比例高达 80% 以上；其次，三江平原水利配套设施不完善，设计标准低，中低产田比例达到 60% 左右；同时，三江平原长期大面积开垦沼泽湿地、林地和草地，盲目开发、“重垦轻治”；另外，为了追求增产，三江平原农民长期过量、不合理地施用化肥、农药。在三江平原高强度农业开发的影响下，已经诱发了地下水位下降、水环境恶化、水土流失加剧、湿地生态功能退化等严重问题，三江平原农业水土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。此种背景下，调整农业种植结构、缓解农业水土资源压力，是实现三江平原农业可持续发展的必然选择。因此，深入研究三江平原农业水土资源复合系统复杂性诊断方法、地域变化特征，进而进行农业水土资源优化配置是非常重要的，可以为三江平原农业水土资源可持续利用提供科学依据，同时，对于推动黑龙江省“千亿斤粮食产能巩固提高工程”“三江平原现代农业综合配套改革试验区”“黑龙江、松花江、乌苏里江三江连通工程”建设及保障区域粮食安全、资源安全与生态安全具有重要理论与现实意义。

著者期望本书提出的农业水土资源系统复杂性测度分析方法，可以丰富完善系统复杂性应用基础理论体系，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视角下的区域农业水土资源优化配置模型可以为国内粮食生产核心区进行农业水土资源可持续利用研究提供一种研究模式。

全书共分六章，第一章介绍了复杂性科学的发展与复杂系统的内涵、基于熵理论、分形理论、混沌理论的水土资源系统复杂性研究进展、水土资源优化配置研究进展，由刘东、付强负责撰写；第二章介绍了目前较为先进适用的熵理论、分形理论、混沌理论等系统复杂性测度理论的基本原理与方法，由刘东、李天霄、赵丹负责撰写；第三章运用熵理论体系中的近似熵、样本熵、小波熵等方法对建三江管理局关键农业水資源系统要素（地下水埋深、降水）复杂性和土地资源系统复杂性进行了综合测度分析，由刘东、王大伟

负责撰写；第四章用分形理论体系中的时间序列分维、半方差分维、G-P 算法等方法对建三江管理局关键农业水资源系统要素（地下水埋深、降水）复杂性和土地资源系统复杂性进行了综合测度分析，由刘东、王俊负责撰写；第五章运用混沌理论体系中的最大 Lyapunov 指数法、Kolmogorov 熵等方法对建三江管理局关键农业水文系统要素（地下水埋深、降水）复杂性和土地资源系统复杂性进行了综合测度分析，由刘东、李天霄、赵丹负责撰写；第六章构建了基于粒子群算法、协同进化遗传算法等智能优化算法的复杂性视角下建三江管理局水土资源优化配置模型，由王大伟、王俊负责撰写。

在本书编写过程中，著者参阅、借鉴了许多有关于水土资源系统复杂性与优化配置研究的学术论文及专著，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东北农业大学刘萌、于苗、于新伟等同志的大力协助，在此表示真诚的谢意。

由于本书是对三江平原建三江管理局水土资源系统复杂性测度及其应用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，著者将在今后的研究工作中加以改进。

注：本书得到国家自然科学基金(No. 51579044、No. 41071053、No. 51479032)、“十二五”农村领域国家科技支撑计划课题子专题 (No. 2013BAD20B04-S3)、水利部公益性行业科研专项经费项目 (No. 201301096)、哈尔滨市创新人才研究专项资金 (优秀学科带头人) (No. 2013RFXXJ001)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目 (No. 12531012)、黑龙江省水利科技项目 (No. 201319、No. 201501、No. 201503)、东北农业大学研究生科技创新基金 (No. yjscx14069) 的联合资助。

著者

2016年3月



目 录

MuLu>>>

前言

第一章 系统复杂性研究进展	1
第一节 复杂性科学与复杂系统	1
第二节 基于熵理论的水土资源系统复杂性研究进展	3
第三节 基于分形理论的水土资源系统复杂性研究进展	4
第四节 基于混沌理论的水土资源系统复杂性研究进展	6
第五节 水土资源优化配置研究进展	8
参考文献	10
第二章 系统复杂性测度基本理论	16
第一节 熵理论	16
第二节 分形理论	23
第三节 混沌理论	30
参考文献	35
第三章 基于熵理论的区域农业水土资源系统复杂性特征分析	41
第一节 熵理论在农业水资源系统复杂性测度中的应用	41
第二节 熵理论在土地资源系统复杂性测度中的应用	73
第三节 农业水土资源复合系统复杂性特征综合分析	90
参考文献	94
第四章 基于分形理论的区域农业水土资源系统复杂性特征分析	96
第一节 分形理论在农业水资源系统复杂性测度中的应用	96
第二节 分形理论在土地资源系统复杂性测度中的应用	125
第三节 农业水土资源复合系统分形特征综合分析	135
参考文献	137
第五章 基于混沌理论的区域农业水土资源系统复杂性特征分析	140
第一节 混沌理论在农业水资源系统复杂性测度中的应用	140
第二节 混沌理论在土地资源系统复杂性测度中的应用	149
第三节 农业水土资源复合系统混沌特征综合分析	161
参考文献	167

第六章 区域复杂农业水土资源优化配置研究..... 169

第一节 基于粒子群优化算法的区域农业水土资源优化配置模型 169

第二节 基于协同进化遗传算法的区域农业水土资源优化配置模型 177

第三节 基于多目标规划模型的区域农业水土资源优化配置模型 187

参考文献..... 202

第一节 复杂性科学与复杂系统

一、复杂性科学的发展

复杂性科学 (Complexity Science) 主要是指以复杂系统和复杂性为研究对象, 专门研究自然界、社会经济以及组织、管理、思维、认知等各种复杂现象的共性^[1]。复杂性科学研究的主要任务为揭示和解释复杂系统运行规律, 以超越还原论、经验论为方法论特征, 主要目的为提高人们认识世界、探究世界和改造世界的能力^[2], 正在吸收系统论、理性论和人文精神而发展成的一门新学科。

对复杂性科学的探索起源于国外, 1948 年左右, 沃伦·韦弗尔 (Warren Weaver) 发表了一篇名为《科学和复杂性》(Science and Complexity) 的重要论文^[1], 开启了复杂性研究的大门。复杂性科学研究的三个主要发展阶段分别为埃德加·莫兰 (Edgar Morin) 的学说、普利高津 (Prigogine) 的布鲁塞尔学派和圣塔菲研究所 (Santa Fe Institute, SFI) 的理论。

1. 埃德加·莫兰的学说

埃德加·莫兰是把“复杂性研究”以课题形式提出的第一人。1973 年, 莫兰在他出版的《迷失的范式: 人性研究》一书中正式提出“复杂性方法”。核心为“来自噪声的有序”原则, 可作如下表述: 将一些小的带有磁性的立方体混乱地放在一个盒子中, 随意晃动盒子, 最后发现这些小的立方体连成了一个有序的结构。随意晃动盒子表现为无序, 小立方体具有磁性, 是产生有序性的潜能。在这里, 无序性是必要不充分条件, 无序性必须和原有存在的有序性因子相配合才能产生有序性。这个原理打破了关于有序性与无序性是相互对立与排斥的传统理论, 表明了它们在一定的条件下是可以相互为用的, 是可以一同促进系统组织复杂性的增加的。

2. 普利高津的布鲁塞尔学派

1979 年, 普利高津定义了“复杂性科学”。他认为, 在经典物理学中, 不可逆性和随机性正逐渐占据统治地位, 所以, 物理科学正在从传统的决定论的可逆过程走向随机和不可逆过程。事实上, 普利高津没有明确定义“复杂性”, 他的复杂性理论主要是揭示了这样一个理论——物质进化过程的理化机制的不可逆过程, 也就是耗散结构理论。



3. SFI 的理论

1984 年 5 月, 美国的几位物理学和经济学等领域的专家, 马瑞·盖尔曼 (Murray Gell-Mann)、肯尼思·阿诺 (Kenneth Arrow) 和菲利普·安德森 (Philip Anderson) 在认识到复杂系统的重要意义后, 聚集了一批相关研究人员, 在美国新墨西哥州的首府 Santa Fe 成立了著名的圣塔菲研究所, 并将研究复杂系统的这一学科称为复杂性科学^[2], 此举宣告了复杂性科学的正式诞生, 并奠定了复杂性科学的发展基石。SFI 提出了分析复杂系统的一套方法, 如自动机网络法 (Automata Network, AN) 和遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)。在一般系统论、控制论和自组织系统理论的启发下, SFI 创办了全球独一无二的学术刊物——《复杂性》。盖尔曼认为复杂性科学研究的中心不是环境的或客体的复杂性, 而是主体的复杂性, 即主体复杂的应变能力及其相应的复杂结构。圣塔菲研究所几乎每年都要召开国际学术交流会、学术讨论会或讲习班。如 1998 年 3 月在俄勒冈州的 Wilsonville 举行了来自 5 个国家 125 位知名学者参加的学术研讨会、2000 年 8 月召开了以“复杂系统仿真在中国”为题的学术研讨会^[3]。

在我国, 科学家钱学森最早明确地提出探索复杂性方法论。20 世纪 80 年代, 首次兴起复杂性研究时, 他就敏锐地意识到复杂系统的重要意义并提出要探索复杂性科学的方法论, 分别于 1980 年、1987 年、1989 年提出了巨系统^[4]、复杂巨系统^[5]、开放的复杂巨系统^[6]的概念, 1992 年, 又针对复杂系统的研究方法, 提出了“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”的设想, 同时, 戴汝为教授和于景元教授也致力于此^[2], 他们的工作使复杂性科学在国内逐渐发展起来。

由于在许多学科领域中都广泛地存在着复杂现象, 如物理、化学、经济学、医学、信息科学、管理科学和社会科学等领域, 因而复杂性科学成了一门近 20 几年发展起来的新兴交叉学科, 它与其他学科相互渗透, 有力地促进和推动着自身及其他学科的发展^[7]。著名的英国物理学家霍金曾称“21 世纪将是复杂性科学的世纪”, 处于发展之中的复杂性科学, 不仅引发了自然科学界的变革, 而且也日益渗透到其他科学领域, 复杂性科学正以迅速而稳健的步伐前进着。

二、复杂系统的界定

所有事物存在的形式都是系统, 所以事物都能够用系统的观点来考察和用系统的方法来表述。一般而言, 系统有以下特征^[8]: ①适应。每个系统都生存于物质环境之中, 必须要适应外界环境的改化; ②层次性。既有大系统又有小系统, 一个大系统通常拥有子系统, 而本身则是一个更庞大系统的子系统; ③整体性。系统不是各系统要素简单相加, 而是由不同要素的相互联系与作用组成的有机的整体; ④相关性。系统内的各要素之间是相互联系和作用的, 在这些不同要素之间具有相互依赖的特殊关系; ⑤目的性。系统常常是有目的性的, 要达到这个目的, 系统一般是有有一定的概念的; ⑥集合性。系统肯定是一个集合, 是两个及两个以上不同性质的系统要素构成的。可见, 系统复杂性研究对于推进人类认识真实世界, 揭示复杂行为本质并掌握其控制机制具有重大意义。

新英格兰复杂系统研究所的科学家们认为, 复杂系统是指系统整体行为不能从组成单元的行为加以推断的系统。Michael R Lissack 指出, 复杂系统拥有以下特征: 服从涌现、



非线性、递归性、对原始状态的敏感性及依赖性、分形性。吴彤认为,具有混沌、分形、随机性、非线性、紧致、涨落与突变、组织性、动态性、适应性等特性的系统是复杂系统^[9]。钱学森认为系统是由一些相互关联、相互作用、相互制约的组成部分构成的具有某种功能的整体^[10]。他依据系统中不同子系统的性质,将系统划分成简单系统与巨系统两种类型。如果子系统的种类较多,同时,它们相互之间的关系又比较复杂,而且具有多种不同的层次结构,显然这样的系统是复杂巨系统。如社会系统、人体系统、生物系统和经济系统等,这些系统不仅在功能、行为、结构和演化方面都比较复杂,而且是开放的,那它们就被称为开放的复杂巨系统。

三、水土资源系统复杂性

水土资源系统是一个复杂的巨系统,是一个动态的非线性复合系统。其中,系统要素种类繁多并具有复杂的层次结构与关联关系,同时具有开放的性质,系统与系统要素之间、各系统要素之间、系统及系统要素与外部环境之间都在不断地进行着物质、能量和信息的传递与交流^[11]。当系统要素的复杂性经过量的积累增加到一定程度时,就会产生质的变化,使系统变成复杂系统。可见,系统的复杂性是由系统要素的复杂性产生的,所以,复杂系统的复杂性要通过系统要素的复杂性来体现^[12]。

第二节 基于熵理论的水土资源系统复杂性研究进展

一、熵理论在水资源系统复杂性研究中的应用

王栋以黄河花园口站为研究基点,以其年径流序列、月径流序列和年最大洪峰序列为研究对象,针对其隐含的周期特性,讨论了 MEM1 谱分析在当中的应用^[13];何玲等基于 POME 提出了一种新的水环境质量评价模型,并通过实例与灰色聚类法的评价结果进行了对比分析^[14];张先起等将熵值理论与模糊物元模型相结合并应用于水质综合评价中,而且验证了该模型的合理性与实用性^[15];佟春生、黄强等在给出人类活动影响程度的基础上,运用近似熵分析了黄河径流序列的复杂性,结果表明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为主,对黄河下游实测径流变化和天然径流的研究均应以干旱为重点^[16];周亮广等以贵阳市为例,通过主成分分析法从 15 个指标中选取影响喀斯特地区水资源承载力动态变化的 3 个主成分,用熵值法对其赋权,计算了 1998—2003 年贵阳市水资源承载力的综合得分^[17];刘政等建立了基于熵权和灰色关联度的水质综合评价模型,对邯郸的地下水水质进行了评价^[18];王艳芳提出了基于熵权的物元可拓综合评价模型,并用实例进行了验证^[19];孟宪萌等建立了基于熵权的集对分析水质综合评价模型,通过与其他方法进行比较后,得出了熵权的集对分析模型的评价结果合理客观的结论^[20];焦峰等运用基于熵权的属性识别模型对延河流域不同退耕年限的土壤水分进行了综合评价,得到了较好的结果^[21];邢军等将信息熵理论引入到模糊综合评价中,评价了石家庄地区的地下水水质^[22]。



二、熵理论在土地资源系统复杂性研究中的应用

陈清硕根据耗散结构理论提出了表征土壤肥力的土壤系统熵的概念,并讨论了它的实际应用,之后,又探讨了土壤信息熵和热力学熵的联系及其肥力意义^[23-24];朱启疆等提出了土壤侵蚀信息熵的概念,并把侵蚀过程分为降雨因子和下垫面因子来研究,得出了侵蚀熵可以反映土壤侵蚀下垫面可侵蚀性的综合信息^[25];谭永忠等对全国及东中西部、浙江省及各地市、杭州市所属的5个县市的土地结构的信息熵进行了计算分析,结果表明土地利用结构的信息熵可以用来反映区域土地利用系统的有序程度^[26];赵晶等分析了近50年来上海市中心城区土地利用结构的信息熵和均衡度,研究表明该区域的信息熵和均衡度均出现逐渐增大的趋势,城市用地结构正向均衡状态发展^[27];陈志凡等建立了基于熵权的农用地土壤健康评价模糊物元模型,并研究了上海市各区县农用地土壤的健康状况^[28];杨芳等将基于熵权的属性识别模型应用于了土壤重金属污染评价中,并对乌鲁木齐市主要蔬菜基地的土壤环境质量进行了评价^[29];王倩采用熵权法和综合评价法相结合的方法对兰州市耕地整理潜力进行了评价,取得了较好结果^[30];周艳梅等以广西为例利用熵值法分析了2002—2006年广西及各市耕地集约利用水平的变化情况,并评价了其总体空间分布情况^[31];曾毅等对西藏山南地区1998—2005年及所辖12县的土地利用结构熵分别进行了计算与分析,得到了山南地区土地利用结构熵值变化的直接动因主要是土地利用结构变化和地方政策因素的结论^[32];秦成等以广西的14个地级市为研究对象,采用熵值法对城市紧凑度进行了综合测度,得出了城市用地状况是影响和制约当前广西城市紧凑发展的最大因素的结论^[33];于永建等基于熵值法分析了兰州市城市土地集约度及其变化,探讨了城市土地集约度与土地利用结构之间的相关性与定量关系^[34];周杜辉等应用熵值函数模型和灰色关联分析,对阆中市土地利用结构变化的响应机理做了定量分析,得出了政府行为和社会经济因素是影响其土地利用结构变化的两个主要驱动因子的结论^[35];焦峰等运用基于熵权的属性识别模型对延河流域影响土壤肥力的7项不同指标进行了综合评价,取得了良好结果^[36];林坤等通过对黄土丘陵区贺庄沟流域土壤水分各影响因子在不同土层深度下的权重分析,描述了各影响因子对土壤水分的影响程度,并进行了排序与分析^[37]。

第三节 基于分形理论的水土资源系统复杂性研究进展

一、分形理论的发展历程

分形理论是1970年兴起并迅速发展起来的新兴学科之一。它与混沌、孤波共同构成了非线性科学研究的主要内容和前沿问题,自创立以来不断发展壮大。1981年,分形理论迎来了它发展的辉煌时期,美国科学家T. A. Witten和L. M. Sander在《物理评论快报》发表了关于扩散置限凝聚模型(DLA)的论文,开创了研究“分形生长”的热潮,促进了数学、物理、化学、生物、材料科学和地质等学科对“分形”的研究,使分形学科不断向深度及广度方向发展^[38]。



1988 年至今,“分形”进入了深入研究与开拓发展并举的阶段^[39],在这个阶段里,分形得到不断发展和应用,研究对象也开始逐步细化。从分子 DNA 特性^[40]、蛋白质三维结构的复杂性^[41]到地震地磁特征^[42],从金融证券市场的经济波动^[43]到企业系统的管理^[44]都留下了分形的身影。此外,吴越从分形的概念开始,论述了分形与混沌的关系,初步探讨了城市规划领域中区域规划、城市功能结构规划、城市生活空间形态的分形特征,提出了运用分形理论思考城市规划发展问题的新思路^[45];任光明采用基于分形的直接递归算法模拟植物生长过程^[46]。方文清利用变维分形分布模型,对我国的航空货物运输量进行预测^[47],这些都极大地扩展了分形理论的应用范畴。

随着分形几何不断发展,分形理论的研究使得一些难于前进的老学科有了新的希望。分形思想在赋予人们新的创造性思维和创新源泉的同时,也急需人们对已有的微积分理论做出根本性的改变,创立分数阶的微积分理论,以满足当代自然科学前沿课题的理论要求^[48]。到目前为止,分形的理论基础还没有形成正式的思想体系,对于理论的应用还主要集中于分维图形的分维统计、Hausdorff 维数、关联维数等相关的维数计算上;相关的分形测度、分形插值、分形布朗运动等方向的研究成果很少;更为深入的多重分形谱的计算及分形动力学研究更是少之又少;对于统计分形和随机分形的理论和应用研究将是非常值得探究的方向^[49]。

二、水文分形理论研究进展

分形理论作为研究非线性系统的重要工具,不断取得研究的突破性进展。近年来,随着分形理论向各个学科的深入,其在水文及水资源研究领域中有诸多成果问世。常福宣等经过系统研究提出水文水资源领域应用分形理论的几个主要方面:降水量时空分布;暴雨、洪水不同时空变化;流域地形地貌演变与河网水系关联;径流过程分形特征;河床表面特征;土壤中水分下渗等^[50-51]。

1932 年, Horton 对河网级次划分的研究,应用 Horton 定律^[52]证明流域的河网是具有自相似特征的分形集。这也是将分形理论应用于水系河网和地形地貌特征研究的最早案例。这项研究为近二三十年来运用分形理论对流域河网结构和流域地貌特征展开研究奠定了坚实的理论基础^[53-54]。Rodriguez-Iturbe 等,把最优河道网络与天然流域的 DEM 进行对比研究,发现水系河网结构和流域地貌具有分形特征^[55]。

金德生对黄河下游及长江中下游深泓纵剖面进行了分形粗视化研究,发现其具有分形特征,分维与河床纵坡降和能量有关,并利用分维刻画河流纵剖面发育的复杂程度^[56]。针对河道的表面形态的分形特征, Murray 应用元胞自动机模型及自组织临界性解释河流演变过程的分形特征^[57]。

在研究降雨时空分布的过程中,水文学家主要对其进行分形分析,计算其分形维数或多重分形谱;在洪水随历时变化规律的研究方面,常福宣等关于洪水空间分布的研究作了开创性的工作,获得了有意义的结果并建立了洪水强度历时公式^[50]。

关于径流过程时间分配的研究,相关学者不但计算过径流过程的分形维数,而且从时间序列的角度建立了时间序列模型。1999 年,丁晶和刘国东用盒子数法计算了汛期日流量过程线的分形维数^[58]。常福宣利用金沙江屏山站和岷江紫坪铺站日径流资料,全面分



析了日径流过程的分形特性,提出必须应用多重分形法来研究径流过程特征^[50]。

应用分形分析土壤水和下渗过程是目前研究的一个热点,Tchigurinskaia 等曾分析了湿地地形的各种分形性质,提出多种模拟方案^[59]。此外,人们对土壤水、下渗和地下水的尺度,即对产汇流过程的影响也进行了深入研究^[60]。

三、土地利用分形理论研究

近年来,分形理论在土壤科学研究中运用较多,尤其是对土壤结构性质及土壤水分运动参数的研究日渐成熟^[61]。大量的研究成果证实:土壤孔隙度,粒径分布,孔隙连通状况等能够反映土壤结构状况的主要参量,都具有很好的分形特征^[62]。

地质沉积物颗粒数量与每一沉积物颗粒半径之间呈现典型的分形分布特征,Turcotte 等根据这一土壤组成的粒径分布关系仔细研究了 21 种质地差异很大的土壤样本,并发现了土壤粒径累计分布所呈现的幂指数关系^[63],结合 1965 年 Gardner 从 200 多种土样的颗粒直径分布拟合关系中得到结果,明确指出指数 D 即为颗粒直径分布的分维值^[64]。杨培岭等以北京为例,选取区域内四种不同土壤为研究对象,通过对不同土壤的颗粒直径分形分布特征进行研究发现,土壤中的黏粒比重以及不同粒级颗粒的分布情况会严重影响 D 值大小,也就是说,此时再利用单一维数就不能全面地反映土壤的质地情况了^[65-66]。

通过对土壤结构的不断研究,人们逐渐发现土壤的孔隙结构也可以用分形很好地进行解释^[67-68]。Anderson 等将分形思想应用于土壤孔隙研究,由此表明土块或土壤团粒的结构可以用分形维数进行定量表征^[69]。Horgan 在 $10^{-9} \sim 10^{-1} \text{m}$ 的尺度内,通过图像分析方法对土壤进行切片分析,发现粉砂质土壤无论在质量还是表面积方面都表现出明显的分形特征^[70]。Y. Zeng 等通过 CT 技术证明了孔隙度的分形特征的存在性^[71]。Young 和 Crawford 等采用图像分析方法研究了 6 种土壤的孔隙度与孔隙大小之间的分形关系,发现在不同耕作时期,分形维数大小有所差异,但整体上 D_m 的值介于 $2.75 \sim 2.39$ ^[72]。通过大量的实验研究结果表明:土壤孔隙度和土壤表面积具有的分形特征与土壤粒径的分形特征是一致的^[73]。另外,研究土地资源复杂性方面,吴次芳、陈美球等运用复杂性科学理论,阐述了土地生态系统的多种复杂性特征,如高维性、多层次性、各子系统关联性等,这其中既包括了功能与结构的不确定性,动态性,自组织性和自适应性等相关复杂性特征,也深入探讨了人工神经网络、混沌及分形理论在研究土地—生态系统的复杂性特征中的应用^[74]。将复杂性研究思路运用到土地—生态系统的研究中,既有利于帮助人们认识土地生态系统和正确处理人地关系,也对实现土地资源的可持续利用具有重大现实意义。

第四节 基于混沌理论的水土资源系统复杂性研究进展

一直以来,对基于混沌理论的水土资源方面的研究主要为时间序列的混沌特性识别及混沌预测,且主要是集中于对地下水位、降水、径流、水质等水文要素方面的研究,在土地资源方面的研究则较少。

王海鹏等^[75]以武汉、宜昌为例,在对其 60 年来的月降水量时间序列进行相空间重构的基础上,采用小数据量和 G-P 算法,对序列的最大 Lyapunov 指数和关联维数等特征



量进行了计算,结果表明月降水量时间序列存在混沌和分形特征,指出其可能是非线性混沌动力系统演化的结果;权先璋等^[76]针对河川径流非线性动力学混沌过程,以葛洲坝水库为例,对其日径流进行了预报,获取了满意结果;陈超君等^[77]以攀西地区4个站点近47年来的月降水时间序列为例,采用G-P算法讨论了其关联维数及Kolmogorov熵,结果表明月降水时间序列存在一定的非线性混沌特征;迟东璇等^[78]将混沌时间序列的Lyapunov指数预报分析方法应用于了气象预报中,并结合实例对Lyapunov指数预测方法进行了验证;黄国如等^[79]回顾了近10年来的相空间重构、混沌识别和混沌预测方法,并探讨了将混沌理论应用于降雨径流时间序列的限制条件;李国良等^[80]着重介绍了混沌时间序列在水文水资源系统中的应用领域、研究中比较常用的方法和结论,并提出了应用中存在的一些问题;牟丽琴等^[81]以汀江流域上杭水文站为例,研究了月尺度下降雨径流时间序列,计算了其饱和关联维数及最大Lyapunov指数值,分析结果表明月尺度降雨径流的饱和关联维数均具有明显的混沌特性;王志良等^[82]基于相空间重构技术对昆明1951—2010年的降水序列进行了分析,计算得到了其饱和关联维,结果表明年降水时间序列的混沌现象是存在的;曹蕾等^[83]采用关联积分法,以长江宜昌站1940—1980年日流量观测序列为例,计算得到了流量序列的嵌入滞时和嵌入维数;李彦彬等^[84]基于混沌理论及其在径流系统应用的适应性分析,提出了径流序列的混沌分析方法,并以黄河为例对月径流序列进行了混沌特征识别和分析,指出径流时间序列越长,其混沌特征越明显;计亚丽等^[85]以克鲁伦河为研究对象,基于相空间重构理论对其月径流的饱和关联维数和Lyapunov指数进行了计算,结果表明月径流时间序列具有混沌特征;丁晶等^[86]利用多点相似方法对屏山站的洪水现象进行了加权平均的局域相空间预测,表明该方法的模拟精度较高;梁婕等^[87]基于相空间重构思想,采用最大Lyapunov指数法确定了洞庭湖区岳阳水文站近30年来的月降水序列具有明显的混沌特性,同时研究还表明混沌径向基函数神经网络模型的预测精度远低于时间序列分解模型,并表现出高度的无规律性;刘新侠等^[88]以相空间重构为基础,定性定量判定了降雨时序具有明显的混沌特性,并在此基础上构建了基于最小二乘支持向量机的降噪、预测一体化模型;胡增运等^[89]运用功率谱分析、最大Lyapunov指数计算,分别从定性和定量的角度证明了开都河日径流序列存在混沌特性,并采用二阶Volterra自适应一步模型对其进行了模拟;邓建强等^[90]对土壤墒情时间序列进行了混沌特性分析,并在相空间重构的基础上运用神经网络对其重构相空间中相点的演化过程进行了学习、训练及预测。

国外对于将混沌理论引入到水土资源系统方面相对研究较早,且已经取得了大量的研究成果。Hense等^[91]最早把混沌分析方法应用于水文领域,开辟了混沌理论在水文学中应用的先河,他计算分析了瑙鲁的月降水量的饱和关联维数,指出降水量时间序列可能存在混沌特性;Puente等^[92]利用伪临近法、关联维数法、Kolmogorov熵法以及Lyapunov指数法分析了Boston城的日降水量序列,其均得出日降水量序列存在混沌特征;Liu等^[93]对美洲大陆的径流量序列进行了分析,研究结果表明在某些尺度上径流量序列混沌现象的存在;Sharifi等^[94]利用饱和关联维计算得到日降水量时间序列的关联维数均较低,从而认为日降水量序列可能是混沌的;Jayawardena等^[95]运用关联维数法、Kolmogorov熵法及Lyapunov指数法对香港地区水文观测站的径流量序列进行了混沌研究,指出该区



域的径流序列可能存在着混沌特征；Wang 等^[96]对于径流量序列中是否存在确定的混沌现象进行了深入的探讨，指出以往的计算方法将关联维数低估了；Young 和 Grawford 等^[97]采用图像分析方法对 6 种自然土壤孔隙度和孔隙的大小之间的分形关系进行了研究，结果表明不同耕作历史条件下，分形维数 D_m 的值为 2.75~2.39，孔隙度、表面积上表现出的分形特征与土壤粒径分布分形特征是一致的。

第五节 水土资源优化配置研究进展

水土资源是生态系统结构与功能的重要组成部分，是维持生态系统良性循环的基础物质，是不可替代的自然资源。两者具有自然、社会、经济和生态属性，在时间和空间上相互依赖、相互影响、相互制约，在人类不同的使用过程中发挥着不同的属性^[98]。土地资源是保障水资源发挥最大优势的前提，是否合理利用了水资源，将直接影响到土地资源的生产效率，而水资源的利用也被土地资源的利用程度制约着，较高的土地资源利用效率，可为合理开发利用水资源创造条件，水资源与土地资源的分析研究是紧密联系的^[99]。因此，必须将水资源和土地资源有效地结合起来进行科学而合理的优化配置研究，才能够有效地节约现有资源，创造最大效益，并积极促进环境保护和生态可持续发展。

一、水土资源优化配置的概念

资源配置（资源布局或资源分配），指的是以特定的自然、社会与经济条件为前提，为达到人类社会和经济的需要，对资源在一定时期、区域、用途和数量的安排，时间、地点、用途和数量构成了资源配置的四种基本要素^[100]。资源的配置强调了资源的经济属性、多宜性与稀缺性，水资源与土地资源这两者均具有上述三重特性，因此，需要对区域进行水土资源优化配置来实现区域的综合效益^[99]。

水土资源优化配置是在一定条件下，根据可持续发展与因地制宜的原则，通过调整农业布局与内部结构，制定科学的水土资源开发计划，并用各种先进的技术手段做辅助，对区域内有限的水资源及土地资源进行时空上的设计、安排和组合，以此来提高水土资源的利用效率，保持区域内生态系统的稳定和平衡，实现区域内水土资源的可持续利用，配置的结果最终要实现社会效益、经济效益与生态环境效益目标的协调和统一^[101]。

二、水土资源优化配置的研究方法

水土资源优化配置研究一直都是配置研究的重点内容之一，大多数是以建立数学模型求解相对最优的资源供需配置为基本方法，常用的主要方法和数学模型有多种，包括线性规划、动态规划、多目标规划、系统动力学等方法^[102]。

1. 线性规划

线性规划模型是目前应用最早、最广泛、最成熟的一种优化决策模型。它主要研究在线性约束条件下线性目标函数求取最大值或最小值问题，有一般线性规划方法和灰色线性规划方法^[103]。沈允武利用线性规划和动态规划相结合的方法，解决了尼罗河流域灌溉系统在缺水状态下各种作物之间水资源的优化配置问题^[104]；刘春平等在咸淡水地区种植结



构优化模型研究中利用线性规划方法构建了特定地区种植结构优化模型^[105]；Afzal 等针对 Pakistan 某个地区的灌溉系统建立了线性规划模型，对劣质地下水和有限运河水的使用问题进行了优化^[106]；张正栋以榆中县灌溉型水土资源利用系统为例，基于线性规划理论以水土资源利用系统取得最大经济效益为目标函数建立了农业内部结构优化模型^[107]；Feiring B R 等运用随机规划数学模型规划了农业灌溉用水量^[108]；Juan R 等根据水边际效益最大化原则，在缺水灌溉系统水资源优化配置模型的研究中建立了整个流域、灌溉地区、作物系统等不同层次的水资源优化配置模型^[109]；姚华荣以土地利用现状分析和土地资源评价为基础，以水资源和社会经济需求等条件为约束，计算和分析了各土地利用类型适宜性等级，利用灰色线性规划模型对区域水土资源进行了优化配置，最后给出了相应的配置方案^[110]。

2. 动态规划

动态规划是一种数学方法，主要是用来解决多阶段规划决策问题的。对水土资源进行优化配置，要考虑生态保护、经济发展、社会的综合效益等多种因素，为了达到最优化的目的，常常会出现不可避免的矛盾，就需要采用多目标决策模型进行区域水土资源优化配置。应用动态规划进行水土资源优化配置，主要是要综合考虑水土资源的优化配置和其他因素，可取得的最满意结果，但是，实际操作比较困难^[103]。动态规划多用于确定单一作物和多种作物的最优灌溉制度。Dudley N^[111]与 Bras R L^[112]分别将动态规划模型应用到了单一作物和多种作物最优灌溉制度的确定中；马金珠等以水量分配和经济效益为决策目标，建立了多种作物间灌溉水资源最优化分配的双层动态规划模型^[113]；崔远来针对水稻灌区的特点，建立了两层分解协调模型，第一层用 SDP 模型求解了在非充分灌溉条件下单一作物的最优灌溉制度，第二层用 DP 模型将有限水土资源在多种作物之间进行了最优分配^[114]。

3. 多目标规划

多目标规划模型是在单目标决策的基础上发展起来的最优化决策技术，以解决资源管理中经常出现的对多个相互冲突目标进行权衡选择的复杂问题为目的^[115]。主要有多目标规划、目的规划、均衡规划和替代价值权衡法等方法。Elizabeth M Evans 利用多目标综合规划模型，对埃尔安赫尔流域的灌溉优化进行了研究，建立了厄瓜多尔塞拉利昂地区灌溉水资源优化配置方案^[116]；王昕等以区域经济净效益最大为主目标，以可耕地面积、总可利用水量、资金等为约束条件，以黄泛平原中低产田水土资源利用为例，采用多目标线性规划进行了水土资源的优化分析^[117]；田冰等采用多目标规划模型，研究了河北省栾城县的区域农业水土资源优化问题^[118]。

4. 系统动力学

系统动力学是一门以系统论、信息论、反馈理论为基础，借助计算机仿真技术，以模拟经济、社会、生态系统动态行为为目的，用于现代科学决策和预测的有效工具。主要针对的模型为水土资源承载力系统动力学模型。何洪林等将水土资源开发利用系统分为人口、粮食、水土资源开发利用、环境等子系统，以吐鲁番水土资源开发利用动态分析的研究为例，建立了仿真实验系统动力学模型^[119]；任望兵等在对哈密地区水资源系统、供需各要素的相互关系及其反馈信息分析的基础上，通过建立水土资源协调开发的系统动力学