

区域水资源可持续利用 管理理论与应用

邱 林 徐建新 陈南祥 马建琴 著
张占庞 王石青 田景环



黄河水利出版社

河南省高校创新人才培养工程资助项目
河南省杰出青年科学基金资助项目

区域水资源可持续利用 管理理论与应用

邱 林 除建新 陈南祥 马建琴 著
 张占庞 王石青 田景环

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书以可持续发展理论为指导,以区域水资源可持续利用为目标,从探讨区域水资源评价、预测方法开始,对目前水资源评价规划中的水文要素的可预报时间尺度、水文预测模型进行了探讨;针对区域农业用水特点,提出了区域农业水资源的评价理论及方法;以经济评价分析为手段,进行了区域水资源价值分析、水权转让中价格确定的理论分析及计算方法等方面的研究;进行了区域水资源优化配置的多目标分层优化方法的研究;进行了半结构多目标优化多层指标划分的方法探讨及应用研究;对区域干旱的风险进行了初步的理论分析和计算方法的研究,提出了相关的分析计算公式;最后,以理论研究成果及相应数学模型和计算方法为依据,开发了水资源可持续利用管理计算机应用软件系统。

本书可供从事水资源利用管理、科研和工程技术人员阅读,也可作为相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

区域水资源可持续利用管理理论与应用/邱林等著.
郑州:黄河水利出版社,2003.11
ISBN 7-80621-712-6

I. 区… II. 邱… III. ①水资源-资源利用-
可持续发展-研究 ②水资源管理-理论与应用
IV. TV213.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 068399 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:河南第二新华印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:11

字数:254 千字

印数:1—2 500

版次:2003 年 11 月第 1 版

印次:2003 年 11 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-712-6/TV·326 定价:25.00 元

前 言

水是生命之源,是人类生存和发展的命脉。由于社会经济的发展,尤其是工业化、城市化进程的加快,水资源短缺已成为全球性问题。与许多国家一样,我国在发展经济、保护人类生存环境的过程中,也面临着日益严重的水资源短缺和环境恶化。因此,解决好水的问题,已成为 21 世纪我国经济建设战略重点。

本书以可持续发展理论为指导,以区域水资源的可持续利用为目标,从探讨区域水资源评价、预测方法开始,对目前水资源评价规划中的水文要素的可预报时间尺度、水文预测模型进行了探讨;针对区域农业用水特点,提出了区域农业水资源的评价理论及方法;以经济评价分析为手段,进行了区域水资源价值分析、水权转让中价格确定的理论分析及计算方法等方面的研究;进行了区域水资源优化配置的多目标分层优化方法研究;进行了半结构多目标优化多层指标划分的方法探讨及应用研究;对区域干旱的风险进行了初步的理论分析和计算方法研究,提出了相关的分析计算公式;最后,以理论研究成果及相应数学模型和计算方法为依据,开发了水资源可持续利用管理计算机应用软件系统。

全书由邱林主持编写,徐建新、陈南祥、马建琴、张占庞、王石青、田景环参加。聂相田、王志良、黄立新、刘洪建、吕海涛、韩晓军、徐冬梅、王萍、白雪梅、屈吉鸿和俞汇等参加了资料收集分析、模型计算、程序编制及软件集成等工作。

本书是作者近年来在水资源评价规划、水资源开发利用与保护、水资源优化配置等方面部分研究成果的总结,得到了河南省高校创新人才培养工程项目和河南省杰出青年科学基金项目的资助。

由于作者学识有限,书中谬误在所难免,恳望读者不吝指正。

作 者

2003 年 7 月

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
第一节 项目选题背景及目的意义.....	(1)
第二节 主要研究内容及结构体系.....	(2)
第三节 典型区——宁陵县基本情况简介.....	(5)
第二章 区域水资源要素预测方法研究	(7)
第一节 水文要素可预报时间尺度初步研究.....	(7)
第二节 时间序列模型在水文预报中的应用研究	(13)
第三节 人工神经网络模型在水文预报中的应用研究	(16)
第四节 相空间组合预测模型在水文预报中的应用研究	(20)
第三章 水资源评价及区域农业用水量研究	(25)
第一节 传统水资源评价方法简介	(25)
第二节 地下水资源有限元计算中模型参数识别研究	(30)
第三节 区域水资源评价实例	(34)
第四节 农业用水量定义及估算方法	(38)
第五节 农业用水量主要影响因素分析	(45)
第六节 用作物田间耗水量加权平均法建立农业用水量计算公式	(49)
第七节 农业用水量估算的几点认识	(53)
第四章 区域水资源价值理论与应用研究	(55)
第一节 水资源特点与水资源价值	(55)
第二节 区域水资源价值的确定方法	(59)
第三节 区域水资源用水权问题研究	(67)
第四节 水资源价值及用水权转让理论在宁陵县水资源调配中的应用	(73)
第五节 小结	(78)
第五章 区域水资源优化配置	(79)
第一节 区域水资源优化配置大系统分解协调模型	(79)
第二节 作物非充分灌溉制度的多目标优化模型	(83)
第三节 作物间水量优化分配及作物种植结构优化模型	(89)
第四节 农业水资源优化配置应用实例分析	(93)
第五节 区域间水量的优化分配	(97)
第六章 灌溉模式选择的理论与方法研究	(99)
第一节 灌溉方式选择	(99)
第二节 配水序贯多指标系统模糊关系优选模型在宁陵县的应用.....	(102)

第三节 田间节水灌溉技术方案选择的理论及方法·····	(104)
第七章 区域干旱风险分析·····	(112)
第一节 概述·····	(112)
第二节 干旱的概念、分类及指标 ·····	(118)
第三节 区域干旱风险分析·····	(122)
第四节 区域干旱缺水分析·····	(129)
第五节 宁陵县区域干旱风险分析·····	(136)
第八章 区域水资源可持续利用管理系统软件开发·····	(141)
第一节 灌区水资源评价预测子系统·····	(142)
第二节 农业用水量计算及灌区灌排制度设计子系统·····	(150)
第三节 水资源价值分析子系统·····	(152)
第四节 区域水资源优化配置系统软件·····	(156)
第五节 区域干旱风险分析子系统·····	(162)
参考文献·····	(168)

第一章 绪 论

第一节 项目选题背景及目的意义

一、选题背景

水是人类赖以生存和发展不可代替的宝贵资源,是保障国民经济持续健康发展的重要基础。由于社会经济的发展,特别是工业化、城市化进程的加快,水资源短缺已成为全球性危机。与许多国家一样,我国在发展经济、保护人类生存环境的过程中也面临着日益严重的水资源短缺和环境恶化问题。

我国是一个水资源相对贫乏的国家,水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 ,居世界第 6 位,人均占有量约为 2 300 m^3 ,仅为世界人均占有量的 1/4,列世界第 109 位,现已被列为世界上 13 个严重贫水国家之一。我国北方尤甚,河南省位于中原,属于北方地区,全省人均地表水资源量仅为 432 m^3 ,远低于全国平均水平。近年来由于黄河上中游用水量增加,下游包括河南段连续断流,使河南、山东两省沿黄地区的工农业生产和生态环境受到严重影响。

我国一方面水资源短缺,另一方面又存在着严重的浪费现象。目前,占总用水量近 70% 的农业灌溉用水,由于灌区建设标准低,老化失修严重,灌溉设备落后,尤其是管理水平低,管理手段落后及政策不合理,使得灌区灌溉水资源有效利用系数仅为 0.43,远远低于发达国家农业灌溉水资源有效利用系数 0.8 左右的水平。城市及工业用水也存在严重浪费现象,城市工业用水重复利用率一般不超过 50%,工业万元产值耗水量相当于工业发达国家的 5~6 倍。

新中国成立以来,经过 50 年的水利建设,兴建了一大批水利工程,取得了举世瞩目的伟大成就,现在水资源开发利用量已经超过了 6 000 亿 m^3 ,达到了潜在水资源量的 21%。举世瞩目的南水北调工程,在 21 世纪将动工修建。可以说我国的水利建设为防洪和水资源的合理利用奠定了良好的基础。

水利部部长汪恕诚指出,我国水利建设应由工程水利向现代水利转变,提出了应加强水资源开发、利用、配置、节约等十六字方针,指明了我国未来水利工作的方向。

党的十五大提出了在 21 世纪要把节水灌溉作为一场革命来抓的指导思想。基于我国的国情,未来解决水资源短缺问题的主要途径,是通过建设节水灌溉工程和提高农业用水管理水平、引进先进的管理理论与技术、搞好水资源的优化配置等综合措施来加以解决,核心是提高水资源利用效率。就我国目前的农业节水工作而言,仍存在着重(工程)建设、轻(工程)管理,重单项硬件工程建设、轻软科学研究的倾向,而将工程措施、管理措施、软科学研究相结合,将理论分析与计算机软件开发及采用计算机进行控制管理的综合性

研究更少。根据此情况,项目组在组长邱林教授的带领下,在申请河南省杰出青年科学基金时提出了“区域水资源可持续利用管理及系统软件开发”的科研课题,以期为提高河南省的水资源利用管理水平做出自己的贡献。

二、项目研究的目的意义

以水资源的可持续利用支持国民经济可持续发展,是在相当长一段时间内的重要研究课题。在节水方面,国际公认:灌溉节水潜力的 50% 在于管理。可见管理工作的意义重大。

以水资源可持续利用为指导思想,进行管理理论与技术研究,进而开发系统软件,可将大批专家的宝贵经验归纳、完善、提高,并在现代化管理手段及技术支持下发挥更大的作用。

本项目研究在以往研究成果的基础上,首先针对目前该领域理论研究中的薄弱环节,进行理论分析与探讨,然后再针对理论研究成果进行相关计算及管理软件开发,并利用所开发的软件进行典型区应用研究。研究成果将为区域水资源持续利用管理提供重要的理论依据和功能强大、适用性广泛的软件系统,为我国水资源的可持续利用及提高水资源管理水平做出贡献。

第二节 主要研究内容及结构体系

一、主要研究内容

项目研究从探讨区域水资源评价、预测方法开始,对目前水资源评价规划中的水文要素可预报时间尺度、水文预测模型进行了探讨。针对区域农业用水特点,提出了区域农业水资源的评价理论及方法;以经济评价分析为手段进行了区域水资源价值分析及水权转让中价格确定的理论分析及计算方法研究;以经济效益最大为目标,进行了区域水资源优化配置多目标分层优化方法研究;进行了半结构多目标优化多层指标划分的方法探讨及应用研究;对区域水资源短缺可能造成的风险(损失)进行了理论及计算方法研究,提出了相关的分析计算公式。最后以理论研究成果及相应数学模型和计算方法为依据,开发了水资源可持续利用管理计算机应用软件系统。具体研究主要包括以下内容:

(1)用相空间理论研究水资源要素的可预报时间尺度。通过实例分析证明,水资源系统除具有随机性特点外,还存在着混沌性特征,水资源要素的可预报时间尺度是存在的。将相空间理论的数据处理组合方法应用于区域地下水动态的模拟预报研究,该方法处理非线性问题效果较好,拟合误差小,模拟预报精度高。探讨了时间序列的长历时回归模型和人工神经网络模型在水资源要素预报中的应用,并开发了相应的分析计算程序。

(2)针对地下水数学模型参数识别的难题,提出了基于人工神经网络技术的参数识别方法。典型灌区的应用结果表明:该方法便于实现参数自动识别,且识别精度高、速度快。

(3)针对当前区域农业水资源评价中存在的问题,首次提出了“区域农业水资源量”的新概念,根据水量平衡原理得出的区域农业用水量结果,在对农业用水量主要影响因素进

行系统分析的基础上,建立了农业用水量计算经验公式。并以区域农业水资源量为依据进行了灌区类型划分。

(4)根据区域水资源的特点,提出了计算水资源价值的“影子增值价格”模型,并进行了实例分析与计算。探讨了如何利用市场手段来实现水资源优化配置,在分析论证水权和水权转让理论的基础上,提出了灌溉水权及其转让理论,并给出了灌溉水权转让价格的计算方法。

(5)以大系统分解协调理论为基础并结合典型区特点,提出了作物种植结构的多目标模糊优化模型。该模型以多项指标均能达到满意结果为目标,进行灌区水资源优化配置分析,其成果可为区域可持续发展规划提供决策参考。在优化计算过程中所采用的确定指标权重的模糊定权方法,在模型中具有明晰的物理意义且计算简便。

(6)采用节水灌溉技术方案优选的多层多指标模糊优选模型,提出了用主、客观相结合的方法来确定各层各因素的指标权重,克服了权重确定的主观任意性,增强了模型的实用性。该模型对于任一层任一因素的决策优选问题均适用,且指标因素越多,其优越性体现得越明显。

(7)首次建立了水资源系统的多目标、多级优化综合管理模型。模型通过对经济、生态、社会、环境等诸多方面的协调,合理配置有限的水资源,取得了最佳的综合效益。

(8)建立了渠井灌区配水序贯多指标变权重模糊决策模型,对典型灌区的地表水和地下水进行联合调度,为灌区选择合理的灌溉方式和水资源实现联合调度创造了条件;针对区域农业系统的复杂性和多目标性,提出了灌水技术方案优选的多级模糊优选模型。

(9)对区域干旱问题进行了定量研究,首次将满足林德贝格条件的中心极限定理引入到研究中;首次提出了示性随机变量的概念,并将其应用于干旱特征指标统计特性的研究。给出了区域干旱示性变量的精确分布以及区域总缺水量的近似分布,改进和深化了 Santos 的结果。提出了确定临界水准的新方法,给出的临界水准弥补了 Correia 临界水准方法的不足。所提出的随机模拟生成系列数据方法,改进了 Correia 在降水量服从对数正态分布条件下的相应结果。将成果应用于宁陵县区域干旱风险分析,取得了令人满意的结果。

(10)以理论研究成果为基础,集成了区域水资源可持续利用管理的模型系统和相应的软件系统。该系统具有水资源评价计算、区域农业用水量估算、水资源价值及转让价格计算、灌溉水资源优化配置、灌溉模式优选以及区域干旱风险分析评价等多种功能。该软件中的各子系统均可独立进行相应的计算及结果输出、显示。其中灌溉模式选择子系统已具有智能推理功能,达到了人工智能型软件的水平。

二、研究内容结构体系

项目研究中,紧紧围绕水资源可持续利用及建立系统软件的主题,研究内容重点放在以往研究理论相对薄弱的方面,各章研究内容既保持相对独立性又相互联系,构成一个较完整的系统。在开发软件过程中,从便于应用程序处理单项问题出发,保持了子程序编制中各子模块的相对独立性,同时和相关数据库、计算程序库的建立中又考虑了数据的共享及相关数据的传输及调用。项目研究过程及研究内容结构体系见图 1-1。

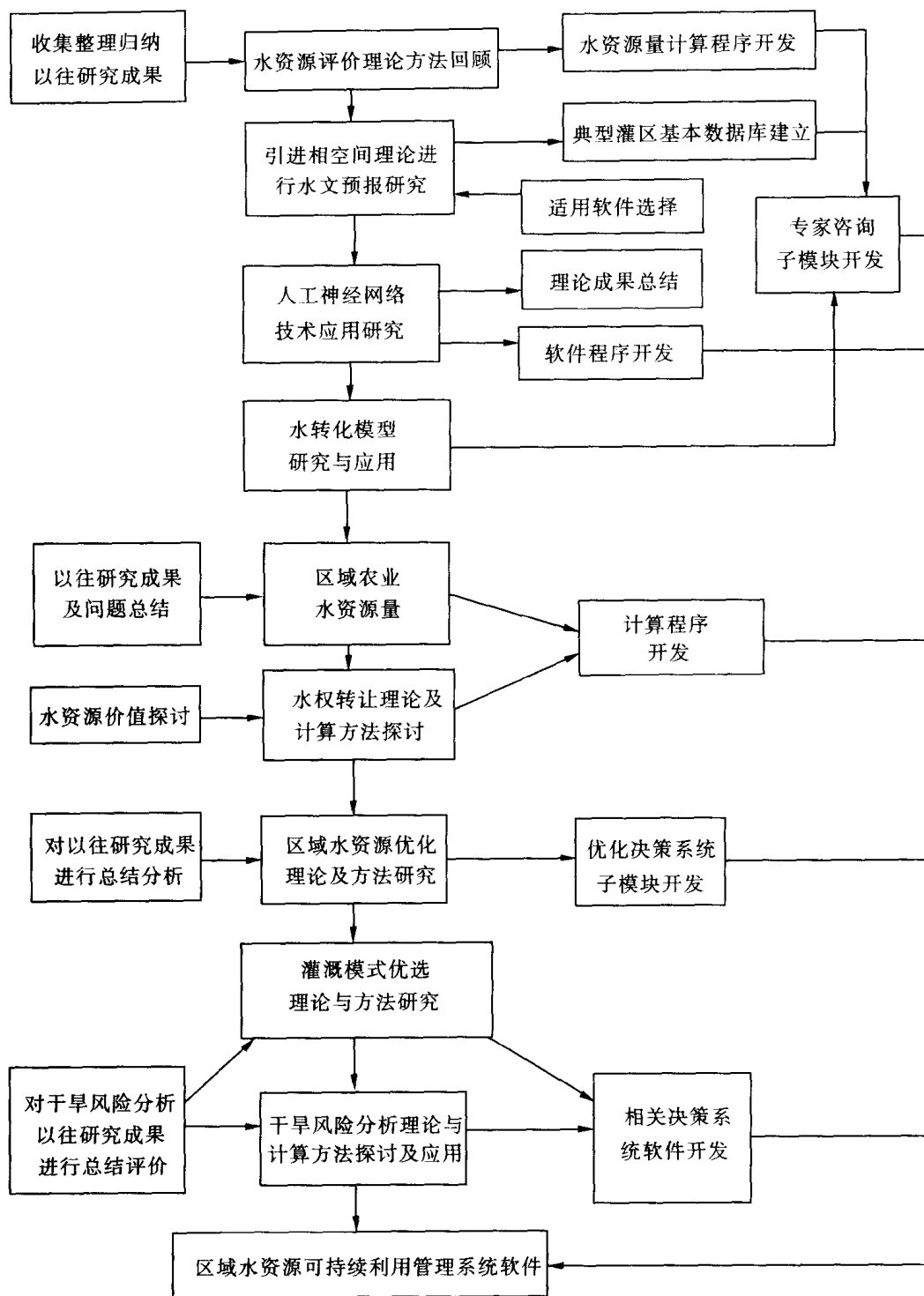


图 1-1 项目研究过程及研究内容结构体系

第三节 典型区——宁陵县基本情况简介

一、社会经济水平及农业生产状况

本次研究以宁陵县为典型区。该县地处豫东平原,位于东经 $115^{\circ}15' \sim 115^{\circ}30'$, 北纬 $34^{\circ}14' \sim 34^{\circ}37'$ 之间,南北长 37.5 km,东西宽 19.5 km。截止到 2000 年底,全县共有乡镇 15 个,行政村 1 074 个,是一个典型的农业县,总土地面积 785.5 km^2 ,农业耕地 4.52 万 hm^2 ,总人口 58.78 万,其中农业人口占 94.8%,农业人均耕地 0.077 hm^2 。

宁陵县农业经济结构以种植业为主,畜牧业为辅,社队企业、林业、渔业的生产水平较低。主要农作物有小麦、玉米和棉花。在 2000 年的农业总产值中,以粮为主的农业占 77.4%,畜牧业占 14.5%,社队企业占 7.24%,林业占 0.84%,渔业占 0.02%。种植业以粮食为主,经济作物所占比重偏低。2000 年粮食作物播种面积占 70% 以上,而经济作物播种面积仅占 28% 左右,其他作物播种面积占 2% 左右。

该县工业自新中国成立以来有很大的发展,2000 年工农业总产值为 37.85 亿元,其中工业总产值 25.85 亿元,农业总产值 12.0 亿元。现有工业企业 72 个,在整个工业结构中,轻工业所占比重较大,其中酿酒业、粮食加工业、食品工业占有重要的地位。

2000 年宁陵县职工年平均工资为 6 000 元左右,而农民人均纯收入则在 1 600 元左右。由以上指标可以看出,宁陵县农民家庭生活并不富裕,亟须进一步提高。

二、水文、气象及水资源状况

宁陵县气候属于暖温带半湿润的季风气候,具有典型的温带季风气候特征:一年四季分明,春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽晴朗,冬季寒冷少雪。多年平均降水量 662.6 mm,次降水量在本县境内差异不大,年内雨量分配极不均匀,7、8 两个月的降水量占全年降水量的 50% 左右。由于调蓄工程少,降水利用率很低;在作物生长需水量最大的 5、6 两个月,作物蒸发量高达降水量的 2.5 倍。水量分配不均且与作物需水耦合性差,对农业生产极为不利。另外,降水在年际间变化剧烈,历史最大年降水量为 1 040.1 mm (1979 年),而历史最小年降水量仅为 324.6 mm (1966 年)。

宁陵县年均降水总量为 5.2 亿 m^3 ,地下水多年平均补给量为 1.3 亿 m^3 ,地下水允许开采量为 1.12 亿 m^3 。浅层地下水分布不均,富水区面积占全县总面积的 39.3%,中等富水区面积占全县总面积的 37.4%,贫水区面积占全县总面积的 23.3%。主要河流有大沙河、古宋河、陈两河、废黄河、清水河和洮河等。

按水资源、土壤等条件相似的原则,并考虑与省、地区一致,全县的水利区划分为 4 个区:Ⅰ区为堤北高滩区,为黄河故道高滩旱地,总人口 27 978,总土地面积为 40.8 km^2 ,耕地面积为 $2 120.7 \text{ hm}^2$,土质以淤土为主,大部分属浅层富水区;Ⅱ区为堤南背河洼地区,总人口 29 802,总土地面积为 42.9 km^2 ,耕地面积为 $1 986.8 \text{ hm}^2$,由于地势低洼,地下水位较高,该区易发生盐碱灾害;Ⅲ区为大沙河河流域区,总人口 352 399,总土地面积为 510.32 km^2 ,耕地面积 $27 260.3 \text{ hm}^2$,该区地势平坦,北部和南部为中等富水区,其余地区

为贫水区;Ⅳ区为惠济河流域区,总人口 149 817,总土地面积为 191.48 km^2 ,耕地面积 $12\,023.7 \text{ hm}^2$,该区地势低洼,地下水资源较丰富,大部分地区为浅层富水区。

三、水资源利用存在的主要问题

宁陵县是一个农业大县,但由于土地、水资源以及其他社会因素的影响,农业发展受到极大限制。目前该县农业发展所面临的主要问题可以归纳为以下几个方面:

(1)该县地形平坦,土层深厚,土壤种类多且适种性较广,农作物以小麦、玉米、大豆、棉花为主,目前开发利用程度已较高,复种指数高达 1.7 以上,进一步提高复种指数已相当困难。另外,在国家加快城市化步伐的大环境下,宁陵县也在加快其城市建设,耕地面积面临日益减少的威胁。因此,挖掘农业生产的潜力只能依靠现有耕地。

(2)水资源严重不足,限制了农业的发展。全县水资源总量(均值)为 1.81 亿 m^3 ,其中地表径流为 0.50 亿 m^3 ,浅层地下水为 1.40 亿 m^3 。人均占有量为 421 m^3 ,亩^①均量为 258 m^3 。以目前保灌面积为基础,根据不同水平年的灌溉定额、种植比例、水资源利用系数等因素综合分析,农业需水量为:平水年 1.22 亿 m^3 ,75%频率干旱年 1.39 亿 m^3 ,而农业可利用的水资源量在平水年为 1.15 亿 m^3 ,75%频率干旱年为 0.80 亿 m^3 。可见,该县在平水年已出现少量缺水现象,缺水量占需水量的 25%左右,而干旱年则缺水 50%左右。

(3)抵抗自然灾害的能力弱。旱灾是该县的主要自然灾害,气象资料表明,在 1959~1981 年的 23 年中,共发生 22 次旱灾,尤其以春旱和秋旱危害最大。由于有效灌溉面积少,60%以上的耕地无灌溉保证,处于大灾大减产、小灾小减产的状况。

(4)用水缺乏管理,水资源浪费严重。灌溉中普遍采用大水漫灌方式,作物灌水定额过大,灌溉定额高达 200 m^3 ,用水效率低。地下水资源开采缺乏合理规划,个别地区超采严重,甚至造成了地下水位的持续下降,形成了降落漏斗。

(5)由于土壤内含有盐碱成分,且大多是可溶于水的,随着土壤内地下水的垂直运动,盐分亦上下移动:夏季雨多,盐压到底层,春季干旱,蒸发量大,盐分随着毛细管水上升至地表。所以在该县地下水位高的地区,春秋天气易返盐。

为妥善解决宁陵县农业生产中存在的上述问题,我们认为:应在考虑社会需求、经济效益以及环境等的前提下,提高水资源利用效率;利用非充分灌溉理论,对水资源进行优化管理,确定合理的灌溉定额,以扩大有效灌溉面积,使有限的水资源发挥更大的效益;按照自然条件和市场及社会的需要,采取因地制宜的措施,调整农业产业结构,确定各种作物的最优种植面积,并对各种作物的具体灌水方式及灌溉方式进行优化设计。最终达到节约用水、实现以水资源的可持续利用支持当地经济社会的可持续发展的目的。

① 1 亩 $\approx 0.067 \text{ hm}^2$,下同。

第二章 区域水资源要素预测方法研究

水资源要素是开发利用水资源所必需的基础资料,如河川流量、水位、地下水水位、大气降水量、蒸发量等。水资源要素的预测预报是水资源利用、防治水旱灾害的基础工作,也是合理开发利用水资源的前提。

水资源要素预测期的长短对充分合理利用水资源和防洪减灾至关重要,一般的短期预报已不能满足要求。为适应社会发展和经济建设的需要,有关科研、教学单位多年来一直在开展中长期水资源要素的预测预报研究,并已取得了一定的成果和经验。但由于水资源要素的随机性和混沌性,其中长期预报研究任重而道远。

随着计算机科学的发展,水资源要素预测理论与方法有了很大改进,应用也更为广泛。就水资源要素预测的数学模型而言,有确定性模型与随机模型、集中参数模型与分布参数模型、线性模型与非线性模型、单一模型与耦合模型等。如用于地表径流预报有:多输入-单输出线性响应模型、实时校正模型等;用于地下水动态预报的有:时间序列模型、频谱分析模型等。这些模型在一定程度上初步解决了水资源要素的预测问题,但随着水资源短缺的加剧,人们对水资源管理的目标要求越来越高,对水资源要素预测的精度和可靠性的要求也越来越高。人们一直在通过不同途径发展水资源要素预测预报的理论与方法,提高预测预报精度和可靠性。本次研究用时间序列的长自回归模型、人工神经网络模型和相空间组合预测模型对水资源要素预测进行了较深入的研究。

第一节 水文要素可预报时间尺度初步研究

目前,在水文要素预测预报实践中均回避了一个至关重要的问题,即预报的时间尺度。也就是说:一个水文系统根据目前掌握的全部信息能进行多长时间(或多少步长)的预报是可信的,超过这个时间尺度就没有意义了。本报告采用自 20 世纪 70 年代发展起来的相空间理论对此进行探讨研究。

一、相空间理论

(一)混沌和相空间

把某些确定性非线性系统由于系统内部非线性相互作用所产生的类随机现象称为“混沌”(Chaos)。混沌的发现使我们认识到客观事物的运动不是定常、周期或准周期的运动,而且还存在一种更具有普遍意义的运动形式——无序的混沌。这使人们发现,在确定论和概率论描述之间存在着由此及彼的桥梁。同时,混沌也告诉人们,像大气、海洋、水文这样的耗散系统是一个对初始条件很敏感的系统,初始条件的微小差别最终可能导致结果的很大差异,甚至使两种结果变得毫无关系。这就是所谓的非线性确定性系统的长期不可预测性。

为直观、方便地研究动力系统,把握所有可能解的特征,人们提出了抽象的相空间概念。所谓相空间,是指用状态变量支撑起的抽象的空间,从而在系统的状态和相空间的点之间建立一一对应的关系。相空间里的一个点,即相点,表示系统在某一时刻的一个状态,而相空间里相点的连线构成了点在相空间的轨道,即相轨道。相轨道表示了系统状态随时间的演变。

相空间是非现实的空间,可以是 n 维的,也可以是无穷维的。

耗散系统的任何相轨道(线)最终将被吸引到一个维数比原始空间低的极限集合——吸引子,因而对于相空间中的大多数区域而言,系统根本不返回。实质上,所谓的吸引子表征了动力系统当 $t \rightarrow \infty$ 时的渐近行为。由于动力系统总是对应着一个物理问题,因此我们可以通过建立相空间,把一个物理问题转化为一个几何问题来处理。

(二) 维数和熵

1. 分数维

分数维较严格的定义为:对于 d 维空间中的一个集合 E , 可以用一些直径为 r 的 d 维小球去覆盖它,如果完全覆盖所需的小球数目最小值为 $N(r)$,则孩子集的 Kolmogorov 容量维定义为

$$D_0 = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg(1/r)} \quad (2-1)$$

2. 熵

对任一事件,若每个可能的结果出现的概率为 p_i , Shannon 定义与该结果配合的信息量为

$$I_1 = -\sum_i p_i \lg p_i \quad (2-2)$$

I_1 就是 Shannon 信息量。很显然,如果有完全确定的结果,则 I_1 等于零。

在确定性的非线性动力系统中,混沌轨道敏感于初始条件的变化。初始条件稍有差别,最终轨道将有很大差别。若初始条件的差别是 $\pm r$, 那么,最终 r 将变大,分辨率降低。有关初始条件的信息将随着 t 的增长而逐渐丧失,最终系统将彻底“忘记”了初始条件。显然,由于此时对系统无知,系统所包含的信息量将比初始时刻的要多得多,即非线性动力系统产生了新的信息,系统成了信息源。

现在,考察在较长一段时间以后的一段时域 $[t_1, t_2]$ 里,系统轨道在误差 $\pm r$ 内的信息量 $I(t_1, t_2)$ 。显然, $I(t_1, t_2)$ 与两部分有关:① 在时刻 t_1 上的信息量;② 在 t_1 到 t_2 时刻信息流率 K_1 。所以

$$I(t_1, t_2) = I_1 + K_1(t_2 - t_1) \quad (2-3)$$

对上式取极限得

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{I(r, \Delta t)}{\Delta t} \quad (2-4)$$

式(2-4)所定义的 K_1 就是所谓的 Kolmogorov 熵,或叫 Kolmogorov-Sinai 熵。有时,也把 Kolmogorov 熵叫做系统的测度熵。

K_1 表示当精度足够小时,信息在一个足够长的时间内的平均变化率,它的单位是

bit/t。由于信息是描述系统状态不确定程度的物理量,信息量越大,其不确定程度越大。所以,对有序系统而言,由于它是完全可以预测的,其信息量不随时间发生任何变化,故 $K_1=0$;对于随机系统而言,由于其状态是完全不可精确预测的,故 $K_1 \rightarrow \infty$;对于混沌系统而言,由于初值敏感性而导致的轨线指数发散,任一微小的初始不确定性都将按某一确定的指数增长率被放大,所以 K_1 是个确定的正数。这和上面所说的混沌系统是一个关于信息量的源的说法是一致的。

由 $I_1 = -\sum_i p_i \lg p_i$ 可知,一个点处在误差为 r 间隔内的信息和 $\lg(1/r)$ 成正比,即

$$\begin{aligned} I_1 &\propto \lg(1/r) \\ I_1 &= D_1 \lg(1/r) \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$D_1 = \frac{I_1}{\lg(1/r)} = \frac{-\sum_i p_i \lg p_i}{\lg(1/r)} \quad (2-6)$$

上式所定义的 D_1 叫做信息维,或叫做吸引子的信息维。

很显然,当各种可能事件的出现概率相等,且 $p_i = 1/N$ 时

$$D_1 = \frac{-\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \lg \frac{1}{N}}{\lg \frac{1}{r}} = \frac{\lg N}{\lg \frac{1}{r}} = D_0 \quad (2-7)$$

所以,分数维 D_0 是信息维 D_1 的一个特例。

二、从单变量时间序列提取关联维数

(一)构建相空间

设一维时间序列为: $x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_i), \dots, x(t_n)$, 将其延拓成 m 维相空间的一个相型分布:

$$\begin{array}{cccccc} x(t_0) & x(t_1) & \cdots & x(t_i) & \cdots & x(t_n - (m-1)\tau) \\ x(t_0 + \tau) & x(t_1 + \tau) & \cdots & x(t_i + \tau) & \cdots & x(t_n - (m-2)\tau) \\ x(t_0 + 2\tau) & x(t_1 + 2\tau) & \cdots & x(t_i + 2\tau) & \cdots & x(t_n - (m-3)\tau) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x(t_0 + (m-1)\tau) & x(t_1 + (m-1)\tau) & \cdots & x(t_i + (m-1)\tau) & \cdots & x(t_n) \\ X(t_0) & X(t_1) & \cdots & X(t_i) & \cdots & X(t_m) \end{array}$$

这里的 $\tau = k \cdot \Delta t$ ($k=1, 2, \dots$) 为延滞时间,相型分布中的每一列构成的 m 维相空间中的一个相点,任一相点 $X(t_i)$ 有 m 个分量: $x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)$ 。上述 $(n + (m-1)\tau)$ 个相点在 m 维相空间中构成一个相型,而相点间的连线描述了系统在 m 维相空间中的演化轨迹。为保证上述各个坐标分量之间的线性独立, τ 的取值必须足够大。这样的相型分布即为用一维时间序列重新构造的 m 维相空间。

(二)关联维

考察 m 维相空间中的一个相点

$$X_m(t_i) = (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau))$$

$$X_m(t_j) = (x(t_j), x(t_j + \tau), \dots, x(t_j + (m-1)\tau))$$

设它们之间的距离,即欧氏模为 $r_{ij}(m)$,显然 $r_{ij}(m)$ 是相空间维数的函数,且

$$r_{ij}(m) = \|X_m(t_i) - X_m(t_j)\| \quad (2-8)$$

给定一临界 r (r 为一个数),检查有多少对相点 (X_i, X_j) 之间的距离小于 r ,把距离小于 r 的“点对”中所占的比例记为

$$C_2(r, m) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - \|x_i - x_j\|) \quad (2-9)$$

式中: $\theta(z)$ 是 Heaviside 函数,当 $z < 0$ 时, $\theta(z) = 0$; 当 $z \geq 0$ 时 $\theta(z) = 1$; N 是总点数。

很显然, $C_2(r, m)$ 是一个累积分布函数,刻画了相对于相空间某参考点 X_i 在内的相点聚集程度。 $C_2(r, m)$ 被称之为吸引子的关联函数。

$C_2(r, m)$ 是 r 的函数,定义关联维 $D_2(m)$ 为

$$D_2(m) = \left| \frac{\lg C_2(r, m)}{\lg r} \right| = \left| \frac{\ln C_2(r, m)}{\ln r} \right| \quad (2-10)$$

式中: m 是嵌入相空间的维数, D_2 是 m 的函数,因此一般称 $D_2(m)$ 为关联维 D_2 的估计值。

对于用实际观测资料计算吸引子的维数可采用 Grassberger 和 Proccia 提出的方法,具体步骤如下:

(1) 应用时间序列重新构造一个 m 维的相空间。

(2) 依次取若干个(比如 α 个)不同的 r 值,分别算出与 r 值所对应的 $C_2(r, m)$ 。

(3) 根据式(2-10)计算关联维数的估计值 $D_2(r, m)$ 。一般是根据所取的 α 个 r 值和与其对应的 α 个 $C_2(r, m)$ 值作出 $\ln C_2(r, m) - \ln r$ 曲线,而其直线部分的斜率就是 $D_2(r, m)$ 。

(4) 不断提高嵌入维数 m , 依次重复上述的(2)、(3)步骤,直至 m 达到某一值 m_c 时,相应的关联维数的估计值 $D_2(m)$ 不再随 m 的增长而发生有意义的变化(即保持在给定的误差范围内)为止。这在 $\ln C_2(r, m) - \ln r$ 图里表现为一些曲线的直线部分的斜率不再随 m 的变化而变化。此时

$$D_2(m_c) = D_2(m_c + 1) = D_2(m_c + 2) = \dots$$

记作: $D_2 = D_2(m_c)$ 。

D_2 就是所要求的吸引子的关联维。 m_c 被称为饱和嵌入维数,它的存在与否决定了时间序列的性质。如果 m_c 不存在,那么关联维的估计值 $D_2(m)$ 将随 m 的增长趋于无穷大,这表示吸引子不存在。从而可知,被诊断的时间序列是一随机系统。所以,对于白噪声, $D_2(m)$ 是 m 的线性函数,而对于混沌系统, $D_2(m)$ 可达到饱和。

三、可预报时间尺度

(一) 水文要素中长期预报的可行性

众所周知,数值预报的准确率随着时间的增长而下降。导致预报不准确的因素主要

有四个方面:

- (1)数学模型与实际之间存在着的差异;
- (2)计算误差;
- (3)初始条件的不准确;
- (4)系统内在的不确定性。

随着人类认识的不断发展,原则上可以越来越逼真地描述水文系统。因此,尽管外在不确定性因素客观存在,但随着人们认识的逐步深化,总可以从这些不确定性因素中分离出一部分,使其具有可预报性,从而由外在不确定性因素所决定的不可预报的比重应是越来越小。也就是说,随着我们对数学模型的不断完善,将有助于逐渐提高中长期预报的准确性。

随着科技进步,计算机容量增大和计算速度的加快,并改进有关模型求解方法,从而可以减小数值求解计算上的误差。

因此,从本质上讲水文系统中长期预报的可行性将取决于两个方面:

- (1)初始条件的准确性;
- (2)水文系统的内在特征。

相空间理论认为:可预报性指的是可能对系统的将来作出预报的精确程度。系统在奇怪吸引子上的运动不仅是各态历经的,而且是混合的。因此,对耗散非线性系统的混沌行为,可以通过引入定常的分布函数进行统计描述,如吸引子上可以定义关联函数,它随距离指数衰减。一个物理系统随时间演变的统计特性可分为“可逆性”、“非可逆性”和“反复非可逆性”三种。我们认为水文系统在有限的时间间隔内可能表现出非可逆性特征,以后则表现出可逆性特征。所以对一段较长时间的统计特征量,水文系统可能是可预报的。

综上所述,如把混沌理论和统计理论结合起来(相空间理论),用于研究水文系统的中长期预报问题将有广阔的前景。

(二)可预报时间尺度衡量指标

熵本身是关于信息量的度量,所以可以用熵来解决可预报性的定量度量问题。当吸引子覆盖均匀时

$$K_2 = K_1 \quad (2-11)$$

式中: K_2 为二价熵。

而

$$K_2 = \sum_{\substack{p \rightarrow \infty \\ r \rightarrow 0}} \frac{1}{p\tau} \ln \frac{C_2(m(r))}{C_2(m + p(r))} \approx \frac{1}{p\tau} \ln \frac{C_2(m(r))}{C_2(m + p(r))} \quad (2-12)$$

相空间理论定义的平均可预报时间尺度为:

$$\overline{T}_f = \frac{1}{K_2} \approx \frac{1}{K_1} \quad (2-13)$$

这里平均可预报时间尺度 $\overline{T}_f$ 的单位与取样间隔 Δt 的单位相同。

四、应用实例

【实例一】 黄河花园口水文站日平均径流量。