

区域参考作物腾发量 演变特征及预测模型研究

迟道才 王殿武 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

区域参考作物腾发量

迟道才 王殿武 著



内 容 提 要

本书根据辽宁省近 50 年的气象资料,应用 Penman-Montieth (P-M) 公式计算了逐月参考作物腾发量,对参考作物腾发量及气象要素的年际变化特征、季节变化特征、月际变化特征及趋势进行了分析,应用统计检验方法分析了影响参考作物腾发量变化的主要气象因素。利用计算的逐月 ET_0 数据,一个地区(流域)相应建立了一种或几种腾发量预测模型[随机型时间序列模型、确定型时间序列模型、基于小波消噪的随机模型、 α -加权模糊线性回归预测模型、小波消噪的偏最小二乘回归预测模型、BP 神经网络 ET_0 预测模型、RBF 神经网络 ET_0 预测模型、Elman 神经网络 ET_0 预测模型、支持向量机(support vector machine, SVM) ET_0 预测模型、基于最小二乘支持向量机的 ET_0 预测模型、动量改进 BP 神经网络 ET_0 预测模型、自适应模糊推理系统(ANFIS)神经网络 ET_0 预测模型、广义回归神经网络模型、灰色 BP 神经网络模型、灰色广义回归神经网络模型],并对模型进行了显著性检验。同时还研究了抚顺地区参考作物腾发量的分布式模型。

本书可供农田水利、水资源、水文、生态、环境等专业的生产、教学、科研、管理及决策者使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

区域参考作物腾发量演变特征及预测模型研究 / 迟道才, 王殿武著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.7

ISBN 978-7-5084-7756-5

I. ①区… II. ①迟… ②王… III. ①气候影响—作物—蒸发量—研究—辽宁省 IV. ①S162.5

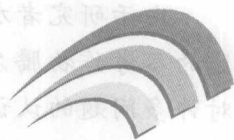
中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第149904号

书 名	区域参考作物腾发量演变特征及预测模型研究
作 者	迟道才 王殿武 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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 17.75 印张 420 千字
版 次	2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	45.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



作物需水量是水资源合理开发、利用所必需的重要资料，也是流域规划必不可少的基础数据，更是灌排工程规划、设计、管理的基本依据。作物需水量的精确计算与预测是提高农业水资源效率特别是提高农田灌溉管理的一个重要环节。而参考作物腾发量是估算与预测作物需水量的关键参数，参考作物腾发量的研究使作物需水量的计算有了统一的基础。在我国开展的第二次全国水资源综合评价中，参考作物腾发量是水资源评价关注的主要内容之一。

近几十年来气候发生明显变化，参考作物腾发量也必然会随之发生变化，其变化趋势如何将直接影响到水资源评价和水资源的供需调配。探索流域尺度参考作物腾发量的时空变化规律，可为制定流域规划、确定合理的灌溉农业规模和灌溉制度等提供参考，对缓解水资源的供需矛盾，促进水资源—生态—经济—社会—复合系统良性循环以及实现流域农业可持续发展和可持续利用具有重要科学意义。辽宁省是我国缺水比较严重的省份之一，农业用水占整个国民经济用水量的65%以上，农业用水存在用水量过大、效率低下等问题。因此研究辽宁省的参考作物腾发量演变规律等对实现辽宁省水资源可持续利用具有十分重要的意义。

本书作者根据辽宁省各个地区自然条件和气候特点的不同，进行了有针对性的研究。这既有以流域为典型的腾发量演变特征及其预测模型研究，又有以地区为单位多年腾发量变化规律及其影响因素的分析；既有传统的预测分析方法，又特别注重每个地区引入一种或几种新的预测分析方法；并对不同方法在同一个地区应用进行了比较，以寻求简捷、科学的预测新技术。本研究得到了辽宁省和水利部科技基金的大力支持。研究成果已经在《农业工程学报》、《灌溉排水学报》、《沈阳农业大学学报》、《中国农村水利水电》、《节水灌溉》、《人民长江》等中文核心期刊发表论文20余篇。

参加本课题研究的有：沈阳农业大学农业水问题研究室迟道才、夏桂敏、李禄、李帅颖、王晓瑜、于森、刘丽、孟丽丽、常秀华等，辽宁省水文水资

源勘测局王殿武。

由于研究者水平和时间及经费所限，所取得的成果仅仅是辽宁省各个地区的参考作物腾发量演变规律和影响因素及其预测模型研究中的主要方面，对许多问题的认识和研究还有待于更进一步深化，错误和不足之处亦必颇多，请同行、专家、学者批评指正。

迟道才

2009年10月30日

于沈阳

目录



前言

第1章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 国内外研究现状	1
第2章 太子河流域参考作物腾发量估算与预测模型研究	7
2.1 研究目的与意义	7
2.2 太子河流域参考作物腾发量变化趋势及影响因素分析	8
2.3 基于单一气象数据估算参考作物腾发量	24
2.4 应用时间序列方法拟合参考作物腾发量	31
2.5 结论	55
附录	57
第3章 锦州地区参考作物腾发量演变特征与预测模型研究	65
3.1 研究目的与意义	65
3.2 参考作物腾发量趋势及影响因素分析	65
3.3 α -加权模糊线性回归法在参考作物腾发量预测中的应用	85
3.4 基于小波消噪的 ET_0 系列复杂度的研究及预测模型的建立	93
3.5 结论	104
第4章 铁岭地区参考作物腾发量演变特征与预测研究	106
4.1 研究目的与意义	106
4.2 参考作物腾发量演变特征及影响因素分析	106
4.3 基于神经网络的参考作物腾发量预测	121
4.4 基于支持向量基的参考作物腾发量预测	134
4.5 结论	146
第5章 丹东市参考作物腾发量实时预报研究	148
5.1 丹东市参考作物腾发量的计算	148
5.2 人工神经网络在 ET_0 实时预报中的应用	150
5.3 结论	176

第 6 章 辽阳市参考作物腾发量实时预报研究	177
6.1 研究目的与意义	177
6.2 参考作物腾发量的计算	177
6.3 人工神经网络在 ET ₀ 实时预报中的应用	179
6.4 结论	194
第 7 章 鞍山地区参考作物腾发量计算与预测模型研究	196
7.1 研究目的与意义	196
7.2 鞍山地区气象要素变化特征	196
7.3 参考作物腾发量变化趋势及影响因素分析	213
7.4 鞍山地区适宜参考作物腾发量计算模型研究	219
7.5 参考作物腾发量预测模型研究	225
7.6 结论	232
第 8 章 基于 GIS 的抚顺地区参考作物需水量时空演变规律研究	235
8.1 研究目的与意义	235
8.2 抚顺地区参考作物需水量的计算与分析	235
8.3 气象站间参考作物需水量的变化分析	249
8.4 抚顺地区参考作物需水量分布式模型的建立	252
8.5 结论	261
参考文献	263

第1章 绪论

1.1 研究目的与意义

参考作物腾发量 (Reference Crop Evapotranspiration, ET_0) 是某种标准参照作物的潜在蒸腾蒸发量, 是指一种假想的参照作物冠层的腾发速率, 假设作物高度为 0.12m, 固定的叶面阻力为 70s/m, 反射率为 0.23, 非常类似于表面开阔, 高度一致, 生长旺盛, 完全遮盖地面而不缺水的绿色草地的蒸腾和蒸发量 (Allen 等, 1994 年)。

中国农业用水量占总用水量约 60%, 一般发达国家农业用水比例多在 50% 以下, 辽宁省农业用水占整个国民经济用水量的 65% 以上, 中国农业用水存在用水量过大、效率低下等问题。作物需水量的精确计算与预测是提高农业水资源效率特别是提高农田灌溉管理的一个重要环节。而参考作物腾发量是估算与预测作物需水量的关键参数, 参考作物腾发量的研究使作物需水量的计算有了统一的基础。在我国开展的第二次全国水资源综合评价中, 参考作物腾发量是水资源评价关注的主要内容之一。

近几十年来气候发生明显变化, 参考作物腾发量也必然会随之发生变化, 其变化趋势如何将直接影响到水资源评价和水资源的供需调配。探索流域尺度参考作物腾发量的时空变化规律, 可为制定流域规划、确定合理的灌溉农业规模和灌溉制度等提供参考, 对缓解水资源的供需矛盾, 促进水资源—生态—经济—社会—复合系统良性循环以及实现流域农业可持续发展和可持续利用具有重要科学意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 关于对参考作物腾发量变化特征及影响因素的研究

很多科技工作者都进行过参考作物腾发量随时间变化规律方面的研究, 许多研究表明中国大部分地区的参考作物腾发量呈现减少趋势, 这些研究还从气候影响因子角度探讨了参考作物腾发量减少的原因。高歌等 (2006 年) 对全国潜在蒸发量变化趋势研究后发现, 我国绝大多数流域的年的腾发量和四季的潜在蒸发量均呈现减少趋势, 日照时数和风速的减少可能是导致大多数地区潜在蒸发量减少的主要原因。倪广恒等 (2006 年) 分析了中国不同分区、不同时段 ET_0 的变化情况, 得出在干旱地区、半干旱地区和半湿润地区参考作物腾发量呈减少趋势, 认为在同纬度地区参考作物腾发量与太阳辐射 (日照时数) 最为相关的结论。张淑杰等 (2006 年) 通过对辽宁省 1981~2006 年间 18 个代表站点常规气象资料分析, 建立了不同供水条件下农田蒸发量的模拟模型, 并分析了辽宁省不同地区农田蒸发量的变化情况, 认为 20 世纪 90 年代辽宁省中部、辽东等地区农田蒸散量呈逐年



上升趋势。Peterson (1995 年), Brutsaert (1998 年), Roderick (2002 年) 等研究发现北半球蒸发皿观测的蒸发量在过去几十年中的减少趋势具有普遍性。Taichi 等 (2005 年) 通过对泰国湄南河流域蒸发皿蒸发量的时空趋势分析后, 发现蒸发皿蒸发量近十几年来呈下降趋势, 蒸发皿蒸发量与辐射有很好的相关关系。Xu Chong-yu 等 (2006 年) 对长江流域参考作物腾发量和实际腾发量作了计算和对比, 发现近年来二者都有减小的趋势, 主要是太阳净辐射和风速的明显减小所导致。白薇等 (2006 年) 通过 Visual Basic 6.0 编制程序实现计算功能, 利用 SQL Server 2000 数据库服务器存储数据, 同时利用 GIS 软件 Arcmap9.0 对山西省参考作物腾发量进行时间和空间上的分析, 指出彭曼-蒙蒂斯公式所表示的影响作用由两部分组成, 一部分受地表阻抗影响 (主要影响因素为冠层表面净辐射), 一部分受空气动力学阻抗影响 (主要影响因素为风速), 其中 ET_0 的变化主要是由第一部分的变化引起的。倪广恒等 (2006 年) 分析了中国不同分区不同时段 ET_0 的变化情况, 得出在干旱地区、半干旱地区和半湿润地区参考作物腾发量呈减少趋势, 认为在同纬度地区参考作物腾发量与太阳辐射 (日照时数) 最为相关。顾世祥等 (2007 年) 分析了纵向岭谷区参考作物腾发量变化的特点和趋势, 得出日最高温度是年内 ET_0 变化主导因素, 年际变化主要受日照时数影响, 个别站为最高气温或风速, 降水量增加, 气温升高, 蒸发和日照时数减少, 导致纵向岭谷区 80% 的站 ET_0 呈下降趋势。任玉敦等 (2007 年) 对北京昌平、开封惠北及湖北团林 3 个灌排试验站的近几十年参考作物腾发量年际变化规律及其机理探讨研究后发现, 惠北及团林站年均 ET_0 在近几十年呈现随时间而下降的趋势, 而昌平站年均 ET_0 则随时间而上升, ET_0 的变化是由于气象环境变化所引起, 其中相对湿度是最主要原因, 其次为温度及日照时数。李宝萍等 (2007 年) 根据郑州地区 1980~2000 年的气象资料, 应用 Penman-Monteith 公式计算 21a 间参考作物腾发量 ET_0 , 分析了 ET_0 的月际变化和年际变化特征。结果表明, ET_0 值呈现为逐年减少趋势, 说明气候变化对 ET_0 的影响较大; 并分析了各气象要素与 ET_0 的相关性, 在郑州地区 ET_0 与平均相对湿度相关性最好。赵秀芳 (2008 年) 等以 1972~1991 年的气象资料为依据, 利用彭曼-蒙蒂斯公式计算了额济纳绿洲 20 年的参考作物腾发量, 分析了不同月份参考作物腾发量的变化特性, 并用平均气温和水面蒸发量和 ET_0 进行回归分析。分析结果表明, 平均气温和水面蒸发量与 ET_0 有很大的相关关系, 可以用平均气温和水面蒸发量对 ET_0 进行预测。孙静 (2006 年), 佟玲 (2004 年), 胡顺军, 康绍忠 (2004 年) 等也都得出相似结论。

上述研究均对参考作物腾发量的变化趋势进行了分析, 并找出所研究地区影响 ET_0 的气象因素。从以上分析中可以看出, 除任玉敦所述的昌平站年均 ET_0 随时间而上升外, 其余各地区的 ET_0 均呈现随时间而下降的趋势; 影响因素分析则表明不同地区其影响因素也有所不同, 其中大部分地区是受太阳辐射的影响。

1.2.2 国外估算方法的研究

自 19 世纪初美、英、法、日、俄等国就开始采用简单的简测与田测法对比, 进行作物腾发量的观测。关于蒸散的研究最早可以追溯到 1802 年的道尔顿风速定律, 为近代蒸散理论的创立奠定了坚实基础。在以往 30 多年的时间里, 有关测定和估算田间作物腾发量的方法研究取得较大进展。参考作物腾发量 (ET_0) 的概念由彭曼于 1948 年首先提出。



1979年FAO(联合国粮农组织)对其进行了定义,并推荐使用修正彭曼公式。1990年联合国粮农组织在意大利罗马召开的作物需水量计算方法专题研讨会上,推荐使用Penman-Monteith公式计算参考作物蒸散量。1998年FAO推荐Penman-Monteith公式作为计算参考作物蒸发量的唯一标准方法。

参考作物蒸发量的估算方法大致可划分为蒸渗仪测定、蒸发皿估测以及利用气象观测数据通过公式计算等3种途径。利用气象数据通过公式计算参考作物蒸发量的方法又可归纳为经验公式和理论分析两类。经验公式中常采用辐射、温度、水汽压、相对湿度、风速及日照时数等气象观测数据作参数,按照某种与参考作物蒸发量的经验函数关系进行估算。如Blaney-Criddle(1950年),Ture(1961年),FAO-24 Radiation(1977年),Hargreaves(1985年),理论公式法主要有修正Penman法和Penman-Monteith方法等。Penman-Monteith方法是目前世界范围内广泛采用的计算参考作物蒸发量的方法。不少学者采用该方法对参考作物蒸发量进行了研究,Jensen(1990年),Hossein Dehghani-Sanij(2003年),Antonio Roberto Pereira(2004年)等。

国外的研究主要集中在参考作物蒸发量计算公式的创新与修正及作物系数、修正系数计算等方面。Doorenbos和Pruitt(1997年)给出转换系数用于从蒸发皿数据估测参考作物蒸发量。A. WAbdelhadi等(2000年)研究 ET_0 的月际变化趋势,并分析了降水与水汽压对 ET_0 的影响。A. Martinez-Cob等(2003年)进行了半干旱地区用Hargreaves公式估算 ET_0 的研究。Daniel Itenfisu等(2003年)对ASCE(美国土木工程师协会)标准PM方法(2000年)与ASCE-PM(1990年)方法和FAO56-PM(1998年)方法在不同气候下估算的 ET_0 结果进行了比较。David M. Summer等(2004年),对P-M公式法,Priestley-Taylor公式法,参考作物蒸发量法,蒸发皿法等估算作物实际需水量的方法进行了比较研究。Richard G. Allen等(2005年)进行过FAO-56双作物系数法估算作物蒸发量的研究。Slavisa Trajkovic(2005年)对4种基于温度的 ET_0 计算公式的计算结果与FAO56-PM计算结果的进行了比较分析。J. Berengena等(2005年)在高平流半干旱环境下实测作物蒸发量,并与几种模式 ET_0 计算结果进行了比较。在这些研究中,大部分学者都是以Penman-Monteith公式的计算结果作为标准进行比较。

1.2.3 国内估算方法的研究

在我国,早在20世纪50年代,朱岗昆、杨纫章等就做过中国各地蒸发量的初步研究。许多学者根据我国气候、地理等实际情况,提出了适合我国的Penman修正式,如80年代谢贤群曾做过一个改进的计算麦田总蒸发量的能量平衡——空气动力学阻抗模式。国内在参考作物蒸发量估算方面的研究多是基于国外的计算公式进行地区性修正或应用比较,近年来利用遥感以及神经网络等技术进行 ET_0 的估算也得到了广泛应用。国内不少学者进行过Penman-Monteith公式与其他计算参考作物蒸发量公式的对比研究,如龚元石(1995年)、刘钰(1997年)、史海滨(1997年),杜尧东(2001年)、彭世彰(2004年)、封志明(2004年)、胡顺军(2005年)、史晓楠(2006年)、刘丙军(2006年)、刘晓英(2006年)等。茆智自1980年以来开始探讨作物充分供水和水分胁迫条件下作物需水量、作物系数及土壤水分修正系数的变化规律。王健等(2002年)通过实测,分析了蒸发皿系数的变化规律,并利用蒸发皿法估算了作物农田蒸散量。周金龙等(2002年)



运用修正彭曼公式计算了天山北麓平原区的潜在蒸发量,并建立了与 20cm 蒸发器水面蒸发量间的相关方程,以此计算其他年份潜在蒸发量。李晓军等(2004 年)将 Hargreaves 公式应用于东北地区参考作物腾发量的计算,并与 Penman-Monteith 公式计算结果进行对比,认为 Hargreaves 方法适用于东北地区。李茜等(2006 年)运用零通量法估算了农田蒸发蒸腾量,并与水量平衡法、作物系数法等其他方法进行了比较。王新华等(2006 年)在西北干旱区分别应用 Hargreaves 公式和 P-M 公式计算 ET_0 ,并进行了比较分析。

地统计学的应用范围十分广泛,不仅可以研究空间分布数据的结构性和随机性、空间相关性和依赖性、空间格局与变异,还可以对空间数据进行最优无偏内插,以及模拟空间数据的离散性及波动性。地统计学由分析空间变异与结构的变异函数及其参数和空间局部估计的 Kriging 插值法两个主要部分组成,目前已在地球物理、地质、生态、土壤等领域应用。

Mansoor A (1998 年)借助 GIS 系统对美国西部科罗拉多州的 Cache la Poudre 盆地内的作物需水量进行了估算,对因空间位置的变化造成的作物需水量的估算精度误差进行了分析;Medina J L 等(1998 年)以 GIS 和 RS 为工具,对西班牙南部 1.676 万 hm^2 的灌溉土地进行了作物需水量的估算;Andrea FAIS 等(2001 年)以 GIS 为工具估算了意大利南部 0.16 万 hm^2 灌溉土地上的用水量;Jianbiao Lu 等(2003 年)对美国东南部林地考虑空间地形的变化,利用多元回归方法分析了高程变化对林地需水量估算的影响;ShujunLi 等(2003 年)利用 ARCGIS 平台,开发了计算区域作物需水量的扩展模块。

国内学者也开始运用遥感技术计算 ET_0 。谢贤群(1991 年)研究了遥感瞬时作物表面温度估算农田日蒸发量的研究。牛振国(2002 年)考虑微型地形的变化,对气压和辐射进行了修正,计算了内蒙古半干旱鄂尔多斯高原沙地区 114 km^2 的参考作物需水量,提高了参考作物需水量小区域的空间精度。佟玲,康绍忠等(2004 年)详细阐述了作物耗水量的计算方法与应用情况及 RS 和 GIS 在区域作物耗水时空分布这一研究领域的应用,并建议在今后作物耗水时空分布的进一步研究中,应对参数的空间分辨率以及遥感参数与模型参数的定量对应关系等方面加以改进,发展既有理论基础又便于应用的区域尺度多种作物组合的耗水量估算新模式。徐新良等(2004 年)应用 Penman-Monteith 公式和 GIS 的空间分析功能,通过建立区域参考作物蒸散量的空间分布模型计算了中国东北地区自 20 世纪 90 年代以来参考作物蒸散量的时空变化特征。莫兴国,薛玲等(2005 年)利用土壤-植被-大气传输激励模型(VIP 模型),以 GIS 背景数据库(土地利用图、土壤质地图、数字高程图)为支撑,在 NOAA-AVHRRNDVI 数据和气象信息的驱动下,连续模拟了 1981~2001 年华北平原冬小麦和夏玉米生育期的蒸散过程。王景雷等(2005 年)详细叙述了传统方法和遥感方法在区域作物需水量方面的应用。武夏宁(2006 年)等对水均衡中采用不同时间和空间尺度时的蒸散发估算结果进行了比较分析,以区域平均埋深和累积生长度日为变量,建立综合因子,结合参考作物腾发量建立了区域蒸散发的估算模型。

这些方法尽管考虑了复杂地形的某些因素对作物需水量的影响,严格说来得到的大多是某种作物在某一栅格内的作物需水量,如果得到整个区域的作物需水量,还必须得到土地利用情况和作物种植结构等基础数据。特别是在我国,近几年随着城市化进程的加快和



作物种植结构布局的调整,土地利用情况和作物种植结构变化很大,要想快速地获取这些资料,就必须利用遥感影像及时提取相关信息。

遥感技术的迅速发展以及与地面微气象的结合,为大面积参考作物腾发量的估算提供了新途径,是区域蒸发量研究最有前景的方法。但是这种方法在区域资料的获取中存在一定难度,在技术上也有待提高。遥感技术在区域,特别是在下垫面较复杂的区域运用精度往往达不到实际要求。

1.2.4 预测方法的研究

对参考作物腾发量的研究以往多集中在估算方法上面,近年来对 ET_0 的预测相继展开。很多学者通过研究变量的随机性质建立预测模型。Tracy 等(1992 年)和 Marino(1993 年)等各自提出一种时间序列分析模型。茆智(1994 年)分析多个站点逐日参考作物腾发量在年内的变化过程,得到一种参考作物腾发量预报的指数模型,即逐日均值修正模型。罗毅等(1997 年)用傅立叶级数的二阶分量描述了潜在腾发量的季节变化趋势,并发现潜在腾发量的多年标准差的季节变化趋势也可以用傅立叶级数的二阶分量描述。付强等(2002 年)应用时间序列法建立了气温预报模型,并建立需水量与气温的回归模型,继而建立需水量的预报模型。郭冬冬等(2004 年)运用传统时间序列法建立了月参考作物腾发量的预测模型。刘丙军,陈晓宏等(2005 年)基于小波理论对参考作物潜在腾发量进行了多时间尺度的研究,为研究区的作物需水预测提供了理论依据。蒋任飞等(2005 年)在分析影响作物蒸发蒸腾量的气象因子的基础上,以不同的气象因子组合为输入向量,以参照腾发量为输出向量,构建了气象资料不足情况下 3 种计算参数腾发量的 BP 神经网络模型,构建的模型计算精度较高,方法简便可行,能满足实际生产需要。罗玉峰等(2005 年)以傅立叶级数为基础,结合天气类型修正系数,提出了一种新的参考作物腾发量预报模型——傅立叶级数模型。刘丙军、邵东国等(2006 年)以分形理论为基础描述了参考作物腾发量时间分形特征,认为参考作物腾发量的小时间尺度和大时间尺度存在局部和整体的相似性。该研究为小时间尺度作物需水量推广至大时间尺度提供了理论依据。胡庆芳等(2006 年)引入投影寻踪方法,在投影降维的基础上实现对大量高维数据的聚类,建立了基于投影寻踪的径向基函数网络模型,研究了不同气象因子输入对参考腾发量预测精度的影响。该网络具有较强的适用性,只需使用最高温度、最低温度、日照时数和旬序数作为输入因子,就能以较高的精度预测参考腾发量。高瑞忠等(2006 年)以随机样本建立学习速率和动量因子自适应的 BP 神经网络模型估算参考作物腾发量(ET_0),该模型可以很好的反映气象因子(最高温度、最低温度、最大湿度、最小湿度、净辐射和风速)与参考作物腾发量(ET_0)的非线性函数映射关系,并且取得了良好的估算效果。

多学科交叉是现代数据分析发展的重要方向。模糊逻辑、神经网络、粗集理论、遗传算法以及支持向量机都是目前常用的融合协作算法,探讨它们之间的相互结合可以取长补短,对改进或提高系统整体性能,具有非常重要的实际意义。人工智能方法与现代数学的结合使目标变量的预测精度有了很大的提高,近几年国内外对此方面的研究逐渐深入。刘志武等(2004 年)利用 BP 神经网络建立了计算逐日潜在腾发量的经验模型,并探讨了各输入因子对模型的影响。崔远来等(2005 年)利用遗传算法的全局空间寻优功能和 BP 网络映射能力的优点,建立了以遗传算法确定最优网络结构的进化神经网络模型,用来预



测参考作物腾发量。段春青等(2006年)利用混沌算法的全局空间寻优性能和遗传程序设计结构自动寻优功能,建立了基于混沌遗传程序设计的参考作物腾发量预测模型,模型预测结果较好,为参考作物腾发量的预测提供了新的有效的方法。徐俊增等(2006年)考虑参考作物蒸发蒸腾量时间序列上的规律性,建立了基于气象预报资料的参考作物蒸发蒸腾量的神经网络预测模型,提高了模型的实用性。顾世祥等(2006年)引入基于 Zadeh 算子的模糊隶属函数,进行天气类型修正系数的模糊集运算判别,将其代入逐日 ET_0 预测模型,建立了具有模糊集运算的逐日 ET_0 预测模型,该模型对天气复杂地区的逐日 ET_0 预测精度提高有很好效果。

国外利用神经网络技术进行预测预报研究也很多。K. P. Sudheer 等(2006年)应用神经网络技术估算了有限气象数据情况下水稻实际腾发量,并与实测值进行比较,认为利用神经网络技术估算水稻实际腾发量是可靠的。M. Kumar(2002年), Slavisa Trajkovic 等(2003年)利用神经网络技术对 ET_0 进行了预测,都得到了较高精度的预测结果。迄今为止,人工神经网络的设计还没有完善的、可以遵循的理论和方法,主要根据经验,在不断试算中加以改进。

许多工作者也在尝试用其他数学方法或者编制程序进行 ET_0 的预测。Biju. George 等(2002年)研制的计算参考作物腾发量的决策支持系统,其中包括了7种估算 ET_0 的公式,可以对动态数据进行估算及预测。蔡甲冰等(2005年)根据日常免费的天气预报信息,经过分析和解析,转换成相应的计算数据,然后利用 Penman-Monteith 方法构建了一个日参照腾发量的预测系统,但预报精度依赖于当地天气预报信息的准确度。

综合来看,大部分的预测方法都是建立在对历史数据的统计分析基础上,应用数学建模预测作物腾发量。根据对数据处理的方式不同,参考作物腾发量的预测主要分为:时间序列法、结构分析法和系统方法。

(1) 时间序列法,包括趋势外推法,马尔可夫法和自回归—移动平均模型(ARMA)法,ARMA 法集时间序列模型之大成,它可对作物任何一个用水过程进行模拟,对时预测、日预测、和年预测均有效,且预测速度快、精度高。ARMA 法的缺点是无法剖析形成预测值的原因及合理的误差估计。

(2) 结构分析法,包括回归分析法、指数分析法等。

(3) 系统分析法,包括灰色预测方法、人工神经网络方法及系统动力学方法。

参考作物腾发量的计算是以时间参数为基础的,因此对其变化规律、影响因素、估算及预测方法的研究也离不开时间尺度,在预测方法的研究上更应该注重时间这一因素。



第2章 太子河流域参考作物腾发量估算与预测模型研究

2.1 研究目的与意义

太子河发源于新宾境内,流经本溪、辽阳、鞍山、海城等市,最终汇入大辽河,河长约413km,流域面积约13883km²,流域呈东西向,如图2-1-1所示。辽宁省1991~2000年年平均耗水量87.30亿m³,其中农业耗水65.05亿m³,耗水率为75%,工业耗水量11.16亿m³,耗水率为36%。太子河流域内的工业城市集中,是辽宁省重要的工业基地和商品粮产区。随着国民经济的迅猛发展,工业用水不断挤占农业用水,如何平衡研究区内农业及工业用水值得研究。太子河流域处于东北冲积平原,属大陆性季风气候,每年无霜期为160d左右,适合种植水稻。太子河90%的灌溉水用于下游水稻灌溉,总面积10万hm²,灌溉用水10亿m³。多年来,该流域水稻灌溉用水浪费十分严重。按目前水稻的产量计算,每公顷水稻的正常需水量在4200~4500m³,而该流域的每公顷水稻用水量为15000m³,有些地方高达19500~22500m³。可见,对该流域参考作物腾发量的准确计算有利于实现作物需水量的准确估算与预测,对水稻节水灌溉是十分必要的。



图2-1-1 太子河流域现状图

Fig. 2-1-1 Present status of Taizi river basin

本文通过对太子河流域1960~2005年各种气象因子及参考作物腾量的变化趋势的分析,了解该流域在过去46年的气候变化及参考作物腾发量的时空分布特征;通过比较参



考作物腾发量和各气象因子的相关关系,找出在过去46年间引起太子河流域参考作物腾发量变化的最可能原因,从而可以在一定程度上对实际腾发量的变化趋势进行判断;通过对不同参考作物计算式与标准的P-M公式计算结果的比较,建立能够利用常规气象资料简单而准确的估算 ET_0 的模型;通过对参考作物腾发量时间序列随机性质的研究,建立适合太子河流域的参考作物腾发量的预测模型,并建立预测系统。

2.2 太子河流域参考作物腾发量变化趋势及影响因素分析

2.2.1 资料搜集及处理

太子河是辽河下游左侧一大支流,横贯辽宁省中部地区。太子河发源于新宾境内,在海城境内汇入大辽河,河流全长约413km,流域面积约13883km²,其中平原区面积3112km²,流域面积约占辽宁省面积的1/10。流域呈东西向,地理位置为东经122°26'~124°53',北纬40°29'~41°39',河流由西向东流经本溪、辽阳、鞍山等市,是辽宁省重要的工业基地和商品粮产区,也是下辽河平原辽宁中部经济区最主要的水资源来源。流域内共建成大型水库3座,其中干流2座(观音阁水库、葭窝水库);支流1座(汤河水库),水利工程多以防洪、灌溉和工业供水为主以及兼顾发电的综合工程。该流域中下游农业发达,水田面积大,大型灌区多,流域(包括大辽河)共有大、中型灌区12处。太子河水90%用于下游水稻灌溉,总面积10万hm²,灌溉用水10亿m³。该流域属温带湿润大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,寒冷期长,春秋两季干旱多风,日照丰富,夏季炎热多雨,四季分明,各有特色。

本研究运用太子河流域8个气象站1960~2005年间逐日平均气温(T)、最高气温($T_{\max}$)、最低气温($T_{\min}$)、平均相对湿度(RH)、平均风速(U)、日照时数(n)、平均水汽压(e_a)等气象资料。采用直接内插法对数据资料进行必要的插补延长。由于数据资料起止年不同,为了便于比较,选择统一的起始年1960年,终止年2005年。各代表站资料见表2-2-1。

表2-2-1

代表站资料

Table 2-2-1

Weather station information

站名	经度 (东经)(°)	纬度 (北纬)(°)	海拔高度 (m)	年均 ET_0 (mm)	年系列 C_v
新宾	125.0	41.73	52.2	611.7	0.05
小市	124.12	41.30	209.9	872.2	0.07
草河口	123.90	40.88	234.9	615.1	0.06
本溪	123.78	41.32	185.2	783.9	0.06
辽阳	123.17	41.23	24.4	781.7	0.06
鞍山	123.00	41.08	77.3	915.9	0.05
海城	122.72	40.88	25.3	916.7	0.05
台安	122.43	41.38	7.4	868.6	0.07



2.2.2 ET_0 计算及分析方法

2.2.2.1 ET_0 计算公式说明

1990年3月,联合国粮农组织(FAO),在意大利罗马举行的作物蒸发蒸腾量计算方法国际研讨会上推荐使用FAO Penman-Monteith公式(P-M)计算参考作物腾发量,该公式是目前世界上最广泛使用的计算参考作物腾发量的方法。P-M公式不需要专门的地区修正函数,使用一般气象资料即可计算参考作物腾发量的值,实际应用价值和精度都较高。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (2-2-1)$$

式中 ET_0 ——参考作物腾发量, mm/d;

R_n ——冠层表面净辐射量, MJ/m²d;

G ——土壤热通量, MJ/m²d;

Δ ——饱和水汽压—温度关系曲线斜率, kPa/°C;

γ ——湿度计常数(干湿球常数), kPa/°C;

T ——2m高度处日平均气温, °C;

u_2 ——在地面以上2m高处的风速, m/s;

e_s ——空气饱和水汽压, kPa;

e_a ——空气实际水汽压, kPa。

公式(2-2-1)中相关参数及中间变量按下列各式确定

$$\gamma = \frac{C_p P}{\epsilon \lambda} = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad (2-2-2)$$

$$P = 101.3 \times \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (2-2-3)$$

$$\lambda = 2.501 - 0.002361T \quad (2-2-4)$$

式中 C_p ——恒压下的比热, 等于 1.013×10^{-3} , MJ/kg°C;

ϵ ——水蒸气与干空气分子重量之比, 等于 0.622;

P ——大气压, kPa;

Z ——海拔, m;

λ ——蒸发潜热, MJ/kg, 当 $T=20^\circ\text{C}$ 时 $\lambda=2.45$, 此时 $\gamma=0.665 \times 10^{-3}P$ 。

$$VPD = e_s - e_a \quad (2-2-5)$$

$$e_s = \frac{e_0(T_{\max}) + e_0(T_{\min})}{2} \quad (2-2-6)$$

$$e_0(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (2-2-7)$$

式中 VPD ——饱和水汽压差;

$T_{\max}$ ——最高气温, °C;

$T_{\min}$ ——最低气温, °C;

$e_0(T)$ ——饱和水汽压函数, kPa。



e_a 如无实测记录, 可间接计算而得。一种方法是根据平均相对湿度 RH 计算, 即 $e_a = e_s RH/100$, 此时 $VPD = e_s (1 - \frac{RH}{100})$ 。另一种方法根据露点温度 T_{dew} 计算, 即 $e_a = e_0(T_{dew})$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (2-2-8)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2-2-9)$$

式中 R_{ns} ——净短波辐射即太阳净辐射, $\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$;

R_{nl} ——净长波辐射, $\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$ 。

(1) R_{ns} 的计算。

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (2-2-10)$$

式中 α ——冠层反射系数, 对于假设参考作物牧草取 $\alpha = 0.23$;

R_s ——太阳辐射, $\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$, 在没有实测太阳辐射值时, 可用碧空太阳总辐射。

相对日照时数计算即

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (2-2-11)$$

式中 a, b ——回归系数, 可查阅相关资料。

当得不到 a, b 时, 可用式 (2-2-12) 计算即

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \quad (2-2-12)$$

式中 R_{so} ——天空晴朗时太阳辐射。

本研究区属温带地区, 可取 $a = 0.18, b = 0.5$, 即

$$R_{ns} = 0.77 \left(0.18 + 0.5 \frac{n}{N} \right) R_a \quad (2-2-13)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (2-2-14)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (2-2-15)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (2-2-16)$$

$$J = \text{int}(30.4M - 15) \quad (2-2-17)$$

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} \times 0.0820 \times d_r (\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\delta \sin\omega_s \cos\varphi) \quad (2-2-18)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (2-2-19)$$

式中 n ——实际日照时数, h ;

N ——最大可能日照时数, h ;

ω_s ——日落时角, rad ;

φ ——纬度, rad ;

δ ——太阳偏磁角, rad ;

J ——日序号, 从 1 月 1 日开始, $J = 1$ 到 12 月 31 日, $J = 365$ 或 366;