

NONGYE HANQING PINGGU MOXING JIQI YINGYONG

农业旱情评估模型及其应用

王斌 王贵作 黄金柏 张展羽 付强 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



农业旱情评估模型及其应用

王斌 王贵作 黄金柏 张展羽 付强 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分9章,内容分别是:研究背景、相关研究进展及研究框架;土壤水分预测的时间序列模型及应用;栅格土壤水分模拟模型及应用;参考作物蒸发蒸腾量预测模型及应用;Hargreaves公式的修正改进及应用;逐日降水的随机模拟模型及应用;时段降水的随机模拟模型及应用;旱作区作物最高产量计算及实际产量预测模型;农业旱情多指标综合评估模型及应用。

本书可供农业、水土资源及相关行业的科技人员、大中专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

农业旱情评估模型及其应用 / 王斌等著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2011.7
ISBN 978-7-5084-8871-4

I. ①农… II. ①王… III. ①农业—旱情—评价模型
IV. ①S423

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第154862号

书 名	农业旱情评估模型及其应用
作 者	王斌 王贵作 黄金柏 张展羽 付强 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 226千字
版 次	2011年7月第1版 2011年7月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	36.00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

我国水土资源的区域组合并不平衡,干旱缺水已成为许多地区的一种经常性自然灾害,严重影响着农业和其他行业的可持续发展。据国家防汛抗旱总指挥部办公室统计,在1950~1990年的41年间,我国有11年发生了特大干旱,发生频次为26.8%;在1991~2008年的18年间,我国有7年发生了特大干旱,发生频次提高到39.9%。自20世纪90年代以来,干旱造成的粮食损失平均每年达2757万t,因干旱造成的粮食损失占各种自然灾害造成的粮食损失总量60%以上。近10多年来,干旱灾害造成经济作物平均每年损失300多亿元,造成工业产值平均每年减少2300多亿元。一般干旱年份的旱灾造成的直接经济损失约占我国GDP的1.1%,而严重干旱年份的旱灾造成的直接经济损失可占我国GDP的2.5%~3.5%。

目前,我国的抗旱体系并不完善。从实际的抗旱工作来看,由于旱情监测系统建设严重滞后,很多地方评判旱情的标准主要还是凭经验,难以对旱情的发展趋势进行科学评估,抗旱活动存在一定程度的盲目性。全国各地还没有建立比较规范的干旱评估体系,难以将干旱对农业、工业及城乡居民生活造成的影响和损失以及抗旱效益进行准确评价,旱情的预测、模拟及评估不能满足全面抗旱工作的实际需要。

基于上述研究背景,本书以我国重要的商品粮生产基地黑龙江省为平台,以三江平原和松嫩平原的建三江分局、红旗岭流域、甘南县等为试点,以农业旱情为主线,引入多种方法完成了农业旱情的预测、模拟及评估模型建模及模型应用工作,初步探讨了农业旱情涉及的一些问题,以期为解决农业抗旱问题、保障农业发展、维持和改善农业生态环境提供科学依据。

全书共分9章。第1章介绍了研究背景、相关研究进展及研究框架。第2章基于土壤含水量的周期性和随机性的变化特点,建立了预测土壤水分的时间序列加法模型,应用该模型预测的土壤含水量数据可以预先评估农业旱情。第3章构建了栅格型分布式水文模型,应用该模型可以反演土壤蓄水量在流域内的时空分布情况,从而模拟多时空尺度下的土壤水分状态,进而在多尺度下评估旱情。农业干旱会直接影响作物蒸发蒸腾量,第4章采用时间序列分析

和偏最小二乘回归两种方法建立了预测逐旬、逐月及逐日的参考作物蒸发蒸腾量预测模型,可为确定不同作物的蒸发蒸腾量提供基础数据。第5章探讨了不同时间步长的 Hargreaves 公式修正式的适用性,并引入了自由搜索算法,改进了日、旬、月3种时间步长的 Hargreaves 公式。第6章验证了联合应用马尔科夫链和伽玛分布函数模拟黑龙江省逐日降水的随机模型的有效性,并应用模拟的长系列降水序列、作物缺水率指标、降水距平百分比指标分析了黑龙江省主要作物在生育期的各时段遭受不同程度旱情的概率。由于种种原因,在实际的科研及工作中,有时仅能收集到时段降水量数据,针对这种情况,第7章介绍了时段降水过程的随机模拟模型,并探讨了应用模拟的时段降水数据确定指定频率降水量的方法。第8章介绍了农业生态地区法,利用该方法计算了处于黑龙江省旱作区的甘南县玉米最高产量,应用玉米最高产量和实际产量数据计算了因旱造成的减产率;为了秋后测产以及评估气象、降水量等对旱作区玉米实际产量的影响,建立了预测甘南县玉米实际产量的最小二乘支持向量机模型。第9章应用投影寻踪方法建立了农业旱情多指标综合评估模型,引入自由搜索作为求解投影寻踪模型参数的优化算法,为在较大空间尺度内利用多指标评估农业旱情提供了一种通用的方法。

在本书的撰写过程中,参阅和借鉴了大量学术论文及相关学科的专业书籍,在此向各位作者表示诚挚的谢意。本书撰写工作的顺利完成还得到了东北农业大学水利与建筑学院领导及同事、黑龙江省水利工程建设局宋族鑫、哈尔滨市气象台雷呈瑞等人员的大力协助,在此表示衷心感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51009026)、黑龙江省博士后资助基金项目(LRB10-173),东北农业大学博士科研启动基金项目(2010RCB66)的联合资助,在此对国家自然科学基金委员会、黑龙江省人民政府、东北农业大学给予的支持一并表示感谢。

农业干旱问题涉及气象学、水文学、生态学、社会学、经济学等多门学科的知识,需要研究的内容很多。由于作者的科研水平和科研能力有限,本书仅对农业旱情的预测、模拟和评估工作进行了一些探索,书中所提的观点、研究思路和研究内容中的不足之处在所难免,恳请同行专家和读者多提宝贵意见,我们将在今后的科研工作中加以改进。

作者

2011年5月

术 语 表

干旱 (Drought): 是指一定时空尺度下的水资源相对亏缺 (如水量不足、水质污染等), 从而导致工农业生产和城乡居民生活遭受影响, 生态环境受到破坏的自然现象。

旱情 (Drought signs): 是干旱的表现形式和发生发展过程, 包括干旱历时、影响范围、受旱程度和发展趋势等。

旱灾 (Drought disaster): 是指干旱对工农业生产、城乡经济、居民生活和生态环境造成的损害。干旱与旱情不同, 干旱也不等于旱灾, 只有对人类造成损失和危害的干旱才称为旱灾。但一般说来, 达到标准的干旱都可能给人类带来损害和危害, 因此, 有时对干旱和旱灾并不做严格区分。应该指出的是, 水分短缺或降水量少不一定会引起干旱, 干旱主要取决于水分亏缺量 (如降水量) 异常偏少的不稳定程度。

土壤水 (Soil Moisture): 是指吸附于土壤颗粒上和存在于土壤孔隙中的水, 主要为液态水, 少数为寒冷季节冻结的固态水和以水汽形式存在的气态水。土壤水是水文循环中的一部分, 也是植物需水的基本来源。

土壤含水量 (Soil Moisture Content): 是指土壤中所含水分的数量, 又称土壤含水率, 是土壤的重要物理指标之一, 也是分析土壤水力学特性和土壤水、盐运动不可缺少的参数。

墒情: 《现代汉语词典》对“墒”的解释为“土壤适合种子发芽和作物生长的湿度”, 如抢墒、保墒、跑墒等均为此含义; “墒情”为土壤湿度的情况。《中国水利百科全书》中的“墒情”专指农田耕层土壤所含水分的多寡情况。农田耕作层是指经耕种熟化的表土层, 在现有的耕作措施下一般不会超过 50cm, 通常为 20~30cm, 该层也是土壤水分变化相对剧烈的部分。因此, 如果按“农田土壤”或“农田耕层土壤”理解墒情, 则墒情应专指与农作物生产相关的、一定深度 (不是很深) 土层的土壤含水量。

根据不同深度的土壤中根系生长发育状况与土壤水分的关系, 墒情又有表墒、底墒、基墒和深墒之分。其中, 表墒是指地表以下 0~20cm 深度的土壤水分, 底墒是指 20~50cm 深度的土壤水分, 基墒是指 50~100cm 深度的土壤水分, 深墒是指 100~200cm 深度的土壤水分。《土壤墒情监测规范》(SL 364—2006) 中将“墒情”译为“Soil Moisture (土壤水分)”, 并大量使用“土壤含水量”一词, 建议的监测深度一般在 110cm 以内, 以实验和研究为目的土壤含水量观测可超过 200cm。

综上所述, 如果从描述土层深度的角度看, 墒情不仅可以用来描述较浅深度土层 (如农田耕层) 的土壤含水量, 也可以用于描述 1m 甚至更深土层的土壤含水量。即便如此, 土壤含水量的含义仍然更广, 墒情仍为土壤含水量的特例。因此, 为了有所区别, 本书中的“墒情”主要指墒情监测站点连续监测的、不同深度处的土壤含水量。

作物需水量 (Crop Water Requirement, 简称 CWR): 是指作物在土壤水分适宜、生

长正常、产量水平较高条件下的棵间土壤（或水面）蒸发量与植株蒸腾量以及组成植株体与消耗于光合作用等生理过程中所需的水量之和。由于组成植物体与消耗于光合作用所需水量很少（不到1%），故将此部分忽略。

作物耗水量（Crop Consumptive Use，简称CCU）：是指在任意土壤水分条件下（包括土壤水分过多、过少）作物农田水分消耗。可见，作物需水量是作物耗水量的特例，是最优条件下的作物农田水分消耗。

参考作物蒸发蒸腾量（Reference Crop Evapotranspiration，符号为 ET_0 ）：是一种假想的参考作物的蒸发蒸腾速率，非常类似于表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面且不缺水的绿色草地的蒸发蒸腾量，见图1。

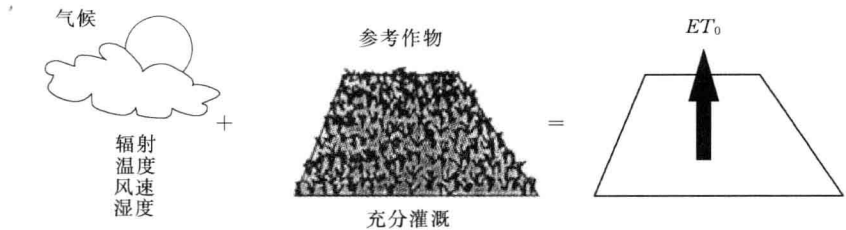


图1 参考作物蒸发蒸腾量示意图

与 ET_0 相关的概念是标准状况下的作物蒸发蒸腾量（Crop Evapotranspiration under standard conditions，符号为 ET_c ）和非标准状况下的作物蒸发蒸腾量（Crop Evapotranspiration under non-standard conditions，符号为 $ET_{c adj}$ ），见图2和图3。从图2和图3可以看出，“标准状况下的作物蒸发蒸腾量”与我国文献中常见的“作物需水量”、“作物最大蒸发蒸腾量”概念相近，而“非标准状况下的作物蒸发蒸腾量”则与我国文献中常见的“作物耗水量”及“作物实际蒸发蒸腾量”的概念相近。

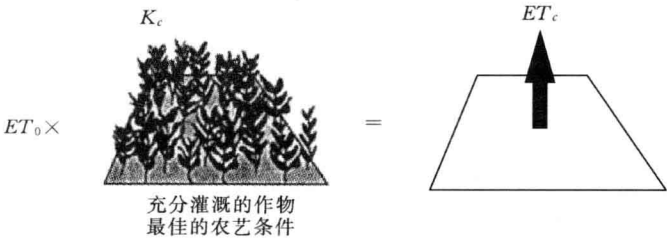


图2 标准状况下的作物蒸发蒸腾量示意图（ ET_c ）

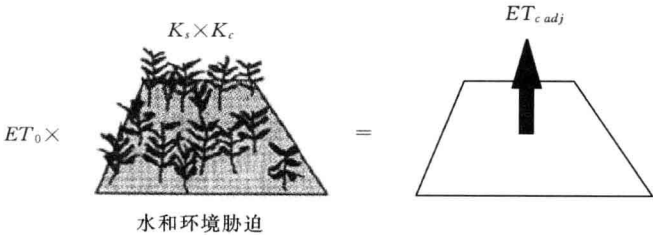


图3 非标准状况下的作物蒸发蒸腾量示意图（ $ET_{c adj}$ ）

预测、预警、预报：“预测”为“预先推测或测定”，“预警”为“预先警告”，“预报”为“预先报告（动词）”或“预先的报告（名词）”。可见，即使仅从字义上比较，3个词语也是完全不同的。就专业方面的应用而言，预测（Prediction）、预报（Forecast）、预警（Early Warning）之间虽然只有一字之差，但每个词语均有其各自的特征和通用领域，相互之间有本质区别，不能随意替代。

“预测”是对尚未发生的或目前还不明确的事物进行预先的估计和推测，是在一定的理论指导下，以事物发展的历史和现状为出发点，以调查研究资料 and 统计数据为依据，在对事物发展过程进行深刻的定性分析和严密的定量计量基础上，研究并认识事物的发展变化规律，进而对事物发展的未来变化预先作出科学的推测。“预警”是在预测的基础上发展而来的，是更高层次的预测，但与预测又有很大的区别。“预报”一般可理解为政府或有关部门将预测或预警的结果通告给社会公众，如天气预报等。

预测和预警在研究的对象及内涵、强调的重点、数据要求、预报的结果、表现功能等方面的区别如下：①预测的对象比较广泛，而预警的对象必须是反映系统运动态势的重大现象；②预警的内涵比预测广，它既包括对预警对象现状的评价，也包括对预警对象未来状况的预测；③预测强调时序的预见性，而预警则强调调控的超前性；④预警使用的数据必须能够描述系统现象的实际情况，而预测应用的数据则可以是人为估计和预计的；⑤预警的预报结果一般都给出相应的对策性建议，而预测的预报结果一般不给出对策；⑥预测一般不从价值意义上评价预测变量变化趋势的好坏，而预警则针对预测值给出一个在价值意义上的好坏评价区间。

本书中的“预测”与工业过程等领域的“预测”概念也有所不同。在工业过程领域，预测控制是20世纪70年代后期产生的一类新的基于预测模型的计算机控制算法。预测模型的功能是根据对象的历史信息和未来输入预测其未来输出，具有展示系统未来动态行为的功能，可以任意地给出未来的控制策略，观察对象在不同控制策略下的输出变化，从而为比较这些控制策略的优劣提供基础。影响农业生产的因素复杂，不可控制的因子多，实践中很难做到对其未来状态进行较精准地控制。目前，农业范畴（包括农业干旱）涉及的“预测”概念更偏重于对研究对象的未来状态“预测”出一种结果，针对这种结果采取相应的措施；建立“预测模型”的主要目的也是为了得到这种预测结果，而不是根据预测模型得到的预测结果进行“控制”。

模拟、仿真：单纯从字面上解释，“模拟”与“仿真”两个词语都有“模仿”含义，似乎没有什么区别，因而两个词语混用和相互替代的现象已很常见。国际标准化组织（ISO）编辑出版的《数据处理词汇》对“模拟”和“仿真”二词的解释为：“模拟”（Simulation）即选取一个物理或抽象的系统的某些行为特征，用另一个系统的行为来表示；“仿真”（Emulation）即用一个数据处理系统，主要用硬件来全部或部分地模仿某一数据处理系统，使得模仿的系统能像被模仿的系统一样接收同样的数据，执行同样的程序，并且得到同样的结果。我国电子学会电子计算机学会主编的《英汉计算机词典》对“模拟”和“仿真”两词的解释比较明确，与ISO的意思基本上是相同的。其中，“模拟”（Simulate）是指用一个系统表示另一系统的功能，而“Simulation”是指进行模拟的过程。例如通过在一台计算机上执行程序来模拟另一台计算机，用一台计算机和一个程序来模拟一个物理系统（如生

产过程、自动控制系统等），用一个实验模型来模拟一个系统。“仿真”（Emulation）是指利用程序设计技术和某些特殊的机器特点，使一个计算机系统能执行另一个计算机系统的程序的方法或过程。Della Thompson 主编的《牛津现代英汉双解词典》中“Simulate”的释义之一为“制作电脑模拟（某过程）的计算机模型”，与 ISO 和《英汉计算机词典》的解释相近。可见，在工程术语中，“模拟”和“仿真”应是两个不同的概念，彼此不能相互替代。

旱情监测、预测、模拟及评估：旱情监测是指利用各种旱情监测设备在旱情监测站点（网）定期对旱情信息（气象、水文、墒情、水质、遥感、农情等）进行监测。作为抗旱减灾的重要基础工作，旱情监测的主要目的是为了满足不同抗旱工作的实际需要。

旱情预测是指对于干旱可能的发展趋势所作出的推测，这种推测意见带有探讨性和多解性，允许讨论和学术争论；旱情预警是指对正在发生的干旱（一般较严重）的现状和未来进行推测，评价干旱的时空范围和危害程度，提出干旱防范措施；旱情预报是指政府或有关部门将旱情预测（警）结果通告给社会公众，这种通告一旦发出即不能更改，带有一定的强制性，并要求政府和有关部门做好相应的抗旱准备。

旱情模拟是指综合考虑影响干旱的各种因素，基于水资源供需机制和水量平衡原理，利用计算机技术对单项（或多项）影响干旱的因素的动态过程进行模拟计算，较完整地描述了干旱的发生、发展及缓解全过程，从而得到一系列针对不同时段（例如：作物生育阶段、月、旬等）的干旱信息，利用这些信息可以分析干旱的成因、评定旱情等级、了解干旱发生发展过程和时空分布规律等。

旱情评估是对干旱的发生发展过程所作的定性或定量的初步描述，其评估的过程及结果主要建立在旱情监测、预测及模拟（数据）的基础之上。与干旱评估工作相比，旱情评估的内涵和工作内容均较小，但旱情评估并非简单地等同于旱情等级识别，也应具备一定的评估体系。

目 录

前言

术语表

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 干旱的定义及农业干旱指标	4
1.3 农业旱情预测模拟及评估研究进展	8
1.4 研究基点及取得的主要进展	12
参考文献	17
2 土壤水分预测的时间序列模型及应用	22
2.1 时间序列分析方法	22
2.2 时间序列加法模型	23
2.3 模型应用实例	26
参考文献	32
3 栅格土壤水分模拟模型及应用	33
3.1 土壤水分监测模拟现状及发展动态	33
3.2 栅格型分布式水文模型构建	37
3.3 基础资料及模型参数率定方法	41
3.4 模型应用实例	45
参考文献	50
4 参考作物蒸发蒸腾量预测模型及应用	55
4.1 参考作物蒸发蒸腾量计算	55
4.2 逐旬(月) ET_0 预测的时间序列模型	61
4.3 逐日 ET_0 预测的偏最小二乘回归模型	63
参考文献	71
5 Hargreaves 公式的修正改进及应用	73
5.1 不同时间步长的 Hargreaves 公式的修正及应用	73
5.2 不同时间步长的 Hargreaves 公式的改进及应用	77
参考文献	80

6 逐日降水的随机模拟模型及应用 82

6.1 逐日降水过程的随机模拟 82

6.2 逐日降水随机模拟模型验证 86

6.3 逐日降水数据的随机模拟及应用 95

参考文献 104

7 时段降水的随机模拟模型及应用 106

7.1 时段降水过程的随机模拟 106

7.2 时段降水随机模拟模型验证 109

7.3 模型应用实例 113

参考文献 119

8 旱作区作物最高产量计算及实际产量预测模型 120

8.1 作物最高产量计算及应用 120

8.2 作物实际产量预测模型及应用 127

参考文献 134

9 农业旱情多指标综合评估模型及应用 135

9.1 农业旱情评估的投影寻踪模型 135

9.2 实例应用 137

参考文献 140

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

干旱是近几十年来频繁发生的世界性重大自然灾害现象,它已严重影响了人类社会、经济的可持续发展,并且威胁着人类赖以生存的自然环境。据测算,每年因干旱造成的全球经济损失高达 60 亿~80 亿美元,远远超过了其他自然灾害^[1]。从全球干旱地区的分布情况来看,世界干旱地区(包括干燥的半湿润地区、半干旱地区、干旱地区、极端干旱地区)的总面积约 61.50 亿 hm^2 ,占世界陆地面积的 41%。在这些干旱地区中,除 9.78 亿 hm^2 的极端干旱地区是不毛的荒漠地带以外,其余 51.72 亿 hm^2 的干燥半湿润地区、半干旱地区、干旱地区占世界陆地面积的 34.4%,这些地区虽然干旱,但土壤和气候基本可以从事农牧业生产,是人类的聚居区^[2]。从全球耕地和水资源短缺方面来看,干旱缺水是一个世界性的问题,全球半干旱和干旱地区的耕地面积约占耕地总面积的 43%,约有 80 个国家、40% 的人口面临缺水问题^[3]。随着全球人口的增加,粮食和水资源短缺的加剧,干旱这一世界性问题必将受到世界各国更多的关注和重视。

特殊的自然和人为等因素决定了我国是一个干旱灾害频发的国家。从自然因素看,我国大部分地区受东南和西南季风的影响,自然形成东南多雨,西北干旱的基本特征。由于不同年份冬、夏季风的进退时间、强度和影响范围以及台风登陆次数的不同,致使降水量在年内和年际间的时空分布差异很大,这是我国干旱灾害频发的主要原因^[4]。干旱灾害的发生也与我国地理气候背景条件下的水资源量密切相关,我国水资源的人均占有量和地均占有量都明显低于全球平均水平,其中人均水资源量只相当于全球平均水平的 1/4;地均水资源量相当于全球平均水平的 3/5^[5]。从人为因素看,导致干旱及早灾形成及加剧的原因也有很多,如由于人口增长、经济和社会发展、人民生活水平提高等从数量、质量、供给保证率等方面对水的需求越来越高等,也有因过度开发利用、污染和水资源浪费等造成的一些河网枯竭、湿地消失、地下水位下降、水生态环境恶化等。

在灌溉设施很少的古代,干旱意味着作物减产、绝收、饥荒甚至战乱,历史上发生的特大旱灾,往往给中华民族带来深重的灾难。据记载,从公元前 206 年到 1949 年的 2155 年间,我国发生的较大旱灾有 1056 次,几乎每 2 年就会发生一次较大的干旱灾害。据《明史稿》记载,1483~1485 年,“京畿、河南、河北、山东、山西、陕西、湖广俱大旱,赤地千里,井邑空虚,尸骸枕藉,流亡日多,连岁不雨,民食树皮、蒺藜、麻糝尽,有食人肉者”。500 多年后的今天,干旱对我们的威胁及影响丝毫没有因为文明的进步而有所减弱。据统计,1950~1995 年,我国平均每年的农田干旱面积达 2000 万 hm^2 ,成灾面积为 860 万 hm^2 ,因旱灾每年粮食减产达 1000 万 t。1997 年,我国北方地区发生了百年一

遇的大旱灾,波及全国 23 个省(自治区、直辖市),受灾农田约为 3333.3 万 hm^2 ,粮食减产达到 4760 万 t。按目前的统计方法估算,我国每年干旱灾害损失约为 2000 亿元,由于旱灾造成的水污染损失约为 600 亿元^[6]。

我国旱灾的特点是发生频繁、涉及面广、历时长,这不仅直接影响着人民的生产生活,对经济、政治、社会及生态环境影响也很大。在农业方面,我国干旱灾害对粮食所造成的影响和损失通常约占自然灾害总损失的 60%~70%左右,干旱还往往造成大量的临时性人畜饮水困难。据统计,新中国成立至 20 世纪末,全国因干旱造成的年均粮食损失由 20 世纪 50 年代的 529 万 t 增加至 90 年代的 2565 万 t,进入 21 世纪后,全国因干旱造成的年均粮食损失约为 3000 万 t,且各年代因干旱造成的年均粮食损失有明显增加的趋势。在工业方面,目前我国地级以上干旱缺水城市达 70 多个,年均缺水量为 25 亿 m^3 ,影响人口 1640 万人;县级缺水城市 80 余个,年均缺水量为 6 亿 m^3 ,影响人口 376 万人。在生态环境方面,目前全国沙化、荒漠化的土地面积已占国土总面积的 45.5%;因干旱缺水,全国地下水超采区已发展到 164 个,超采区面积达 19 万 km^2 。我国整体的生态环境仍存在因干旱而恶化的趋势。由于干旱,许多江河来水不足,再加上工业、生活废污水处理不到位等原因,我国水生态环境严重恶化^[4]。

2008 年入冬开始至 2009 年 2 月初,一场新中国成立以来少见的干旱灾害席卷了近半个中国,北方广大地区遭受了数十年未遇的严重干旱。在这场干旱中,相继有河南、河北、山西、山东等 15 个省(自治区、直辖市)遭受了不同程度的旱灾。其中,北方冬麦区的灾情最为严重,主要表现为众多冬小麦受旱和大量人畜因旱临时饮水困难。国家防汛抗旱总指挥部办公室通报的截至 2009 年 2 月 7 日的旱情统计数据显示,全国耕地受旱面积为 2.99 亿亩,比常年同期多 1.10 亿亩,其中农作物受旱面积为 1.53 亿亩(受旱高峰时为 1.61 亿亩),重旱 4996 万亩(受旱高峰时为 5539 万亩),干枯 394 万亩,有 442 万人、222 万头大牲畜因旱发生临时饮水困难。旱灾严重的河南、河北、山西、山东、陕西、甘肃、江苏、安徽等 8 省冬麦区受旱面积总计 1.52 亿亩(受旱高峰时为 1.54 亿亩),占全国农作物受旱面积的 95%,其中重旱 4879 万亩(受旱高峰时为 5422 万亩)。2009 年 2 月 6 日以来,全国最高投入抗旱人数 1451 万人、开动机电井 154.2 万眼、泵站 2.33 万处、抗旱机动设备 233.6 万台(套),出动机动运水车辆 27.6 万辆,累计投入抗旱资金 40.95 亿元,完成抗旱浇灌面积 1.53 亿亩,临时解决了 181 万人、57 万头大牲畜的因旱饮水困难。

黑龙江省是我国重要的商品粮生产基地,粮食商品率在 60%以上,每年向国家交售征购粮和专储粮达 7500 万 t^[7]。黑龙江省耕地面积约为 1000 万 hm^2 (其中旱田占 80%以上),占全国耕地总面积的 9%以上,是全国拥有耕地面积最多的省份^[7~10]。可见,黑龙江省是我国的农业大省和产粮大省,旱田在黑龙江省耕地中所占比例很大,旱作农业是黑龙江省农业生产的主体。黑龙江省有近 80%的耕地分布在西部的松嫩平原和东部的三江平原,这两大平原土质肥沃,是我国重要的粮食生产基地,对我国的粮食安全具有举足轻重的作用。然而,由于黑龙江省地处高纬度地区,受季风的影响,全省降水量具有明显的季节分配特点,夏秋多,冬春少,3~5 月降水量约占全年总降水量的 10%~20%,松嫩平原等地甚至不足 10%,而且年际间变动很大,时常发生干旱灾害,严重制约着黑龙江

省的粮食生产和农业健康发展。

松嫩平原位于东北地区中部,总面积约为 23.75 万 km^2 ^[11],在黑龙江省境内的面积约为 10.3 万 km^2 ,其中耕地面积和粮食总产量约占黑龙江省的 50%^[12]。黑龙江省干旱、半干旱农业区主要分布在齐齐哈尔、绥化、大庆等市,占全省耕地总面积的 38.5%,平均因旱成灾面积达 61.4 万 hm^2 ,占旱作农业区面积的 18.4%,其中重旱区主要分布在松嫩平原西部的甘南、泰来、龙江、大庆等县(市)^[13]。由于该地区春季少雨多风,农田蒸发蒸腾剧烈,表层土壤保水能力较差,素有“十年九春旱”之说;不仅如此,6 月的“卡脖子旱”,7 月、8 月出现的“伏旱”或“夏旱”也时有发生,严重时发生的“春夏连旱”对农业影响最大^[14]。三江平原总面积约为 10.9 万 km^2 ,自 20 世纪 90 年代以来,尽管水利工程施工不断改善,但该地区的水旱灾害却有不断加重的趋势。据统计,在 1975~2000 年的 26 年间,三江平原的平均受旱概率为 70%,即使在 1981 年、1991 年和 1998 年的丰水之年也存在旱情,这说明该地区几乎每年都有干旱发生,只是干旱发生的范围、季节及旱情的严重程度不同而已^[15]。该地区年降水总量不大,春季多大风且降水量小,降水量主要集中在 7 月、8 月,由于降水的年内分布不均,一般春旱和夏旱比较严重。

另据统计,黑龙江省 20 世纪 70 年代旱灾累计面积达到 1000 万 hm^2 ;到了 80 年代已上升到 1300 万 hm^2 ,增加了 30%;进入 90 年代几乎是连年干旱,1997 年春旱面积达 280 万 hm^2 ,占全省总面积的 30%左右,有些地区甚至出现了春夏连旱,100 多天仅降雨 30mm 的罕见现象^[16]。据有关统计资料表明,新中国成立以来黑龙江省旱灾面积占总成灾面积的 39.4%,尤其在西部地区干旱状况更为严重^[17]。

由此可见,旱作农业在黑龙江省农业生产中扮演着重要角色,而干旱是黑龙江省的基本农情,也是影响黑龙江省粮食生产和农业发展的主要灾害之一。在黑龙江省水资源紧张、旱田灌溉工程资金投入有限又存在冬季冻胀破坏的不利条件下,研究黑龙江省农业旱情的预测模拟及评估方法,对于发展黑龙江省的旱作农业、确保黑龙江省粮食产量的稳定增长、促进黑龙江省农业的健康可持续发展具有重要意义。

相对于地震等突发性自然灾害,干旱的发展过程缓慢、历时较长,虽然影响范围很广,但不像其他突发性自然灾害在短时间内就会给人们带来强烈的感受,因而长期以来人们对干旱研究的重视不够,远没有达到应该研究的深度和广度。直到 20 世纪 70 年代,严重的干旱事件频繁发生,干旱问题才逐渐受到各国政府和研究人员的重视。尤其对于发展中国家,充分考虑到干旱可能带来的损失和影响,提前实施抗旱策略和措施以减轻干旱灾害就显得更为重要。

旱情预测、模拟及评估是防旱抗旱工程规划和实施的基础,可以为国家及政府部门制定抗旱减灾与救灾的决策提供科学依据。目前,我国的抗旱体系还不完善,从多年的实际抗旱工作中看,由于旱情监测系统建设严重滞后,很多地方判断旱情的方法主要还是凭经验,难以对旱情发展趋势进行科学的分析和预测,抗旱活动存在一定程度的盲目性;各地还没有建立比较规范的干旱评估体系,难以将干旱对农业、工业及城乡居民生活造成的影响和损失以及抗旱效益进行准确的评价,旱情预测、模拟及评估不能满足新时期全面抗旱工作的实际需要。

农业旱情模拟、预测及评估是制定农业抗旱减灾策略的依据,也是预防农业干旱、减

轻农业旱灾损失的重要保障。本书选择三江平原腹地的建三江分局、红旗岭流域以及松嫩平原西部的甘南县等为试点,综合各学科的科研成果,研究农业旱情模拟、预测及评估方法,以期为解决我国两个重要的商品粮生产基地的农业抗旱问题、保障该地区农业的健康可持续发展。

1.2 干旱的定义及农业干旱指标

1.2.1 干旱的定义

明确干旱的定义、探讨适宜的干旱指标描述干旱是研究干旱问题的前提和基础。尽管关于干旱和干旱指标已有大量的研究,但由于干旱形成的原因比较复杂,加之研究目的和侧重点不同,还没有一个可以被普遍接受的干旱定义^[18]。Palmer 提出干旱期是“水分供应持续低于气候上所期望的水分供给的数月或数年”,干旱是“一个持续的、异常的水分缺乏现象”^[19];世界气象组织定义干旱为“在较大范围内相对长期平均水平而言降水量减少,从而导致自然生态系统和雨养农业的生产力下降”^[20];张景书认为干旱是“在一定时期内降水量显著减少,引起土壤水分亏缺,从而不能满足作物正常生长所需水分的一种气候现象”^[21];《中国水利百科全书》指出干旱为“植物耗水多于吸水,导致其体内水分过度亏缺而受害的现象”^[22];国家防汛抗旱总指挥部办公室(以下简称国家防办)组织制定的《干旱评估标准(试行)》(国汛办旱[2006]18号,以下简称《干旱评估标准》)定义干旱为“因供水不足,导致工农业生产和城乡居民生活遭受影响,生态环境受到破坏的自然现象”^[23]。虽然各种定义对于干旱的表述不尽相同,但是这些定义中都包含有干旱的核心内容,即水分缺乏。

由于对干旱的理解不同,不同行业对干旱分类也不完全相同。美国气象学会在总结各种干旱定义的基础上将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱。其中气象干旱是指由于降水和蒸发的不平衡所造成的水分短缺现象;农业干旱以土壤含水量和植物生长形态为主要特征,反映土壤含水量低于植物需水量的程度;水文干旱是指河川径流低于其正常值或含水层水位降落的现象;社会经济干旱是指自然系统和人类社会经济系统中,由于水分短缺影响生产、消费等社会经济活动的现象^[18,24]。

《中国水利百科全书》将干旱分为大气干旱、土壤干旱和生理干旱。大气干旱的主要特征是气温高,相对湿度小,有时还伴有干热风。在这种条件下植物蒸腾急剧加强,吸水速度大大低于耗水速度,造成水分代谢的极不平衡而呈现植物萎蔫。大气干旱时只要植株体温特别是叶温不超过植物所能忍受的限度,还不会引起植株死亡,但会严重抑制茎叶的生长和降低产量。土壤干旱是指由于土壤中的水分含量过低,土壤水向根系输送的阻力过大,水分供作物吸收的速度低于耗水速度,致使作物凋萎甚至死亡。生理干旱则是由于一些外界条件,如土壤溶液浓度过高(由于含可溶性盐分过多或施化肥过量),土壤温度过低和严重缺氧等,使根系吸水的正常生理过程遭到破坏,以致不能满足蒸腾的需要,而造成植物凋萎甚至死亡。在这3种干旱中,危害较普遍、损失较严重的是土壤干旱。大气干旱延续时间长时亦可导致土壤干旱^[22]。

国家防办从形式上将干旱分为农业干旱、城市干旱和生态干旱。其中农业干旱是指因水量不足,不能满足作物及牧草正常生长需求而发生的水分短缺现象。城市干旱是指城市

因遇特枯水年或连续枯水年,造成供水水源不足,实际供水量低于正常供水量,生活、生产和生态环境受到影响的现象^[23]。

目前,虽然对不同类型干旱的具体表述不尽相同^[18,25~29],但按气象、农业、水文和社会经济4种类型划分干旱的方法还是被普遍接受的。

1.2.2 农业干旱指标

描述农业干旱现象有多种定性和定量指标,大体可以分为单项指标和综合指标两类。目前,常用的单项指标主要有土壤含水量指标、作物旱情指标、降水量指标和受旱面积比率指标等;综合指标可以单独制定,也可以应用多个指标按照不同的权重系数综合而成。常用的农业干旱指标列举如下。

1.2.2.1 单项指标

(1) 土壤含水量指标。作物的水分供应主要依靠根系直接从土壤中吸取,土壤水分不足或过剩都会影响作物的正常发育及产量,当土壤水分降低到一定程度时作物即呈现出旱象。由于土壤水分对作物生长的影响随着作物各生育阶段的生理特性而发生变化,因此土壤水分指标的应用是建立在广泛的试验基础之上的,在使用这种指标之前,必须弄清作物在不同生育阶段允许的土壤水分下限^[30,31]。基于农田水量平衡原理,当已知时段初始的土壤含水量时,根据时段的作物需水量、降水量、地下水补给量等计算出各时段末的土壤含水量,再与作物在该时段适宜的土壤水分变化区间相比即可判断农业干旱是否发生。此外,在田间干旱胁迫试验设计中,也经常使用土壤水分指标划分不同程度的干旱胁迫处理。

墒情监测站测定的土壤水分是判定区域农业干旱程度的主要指标之一。由于不同类型的土壤保水性能不同,为使评价指标具有通用性和可比性,在评估农业旱情时可采用作物根系层土壤的相对含水量表示土壤水分,即根系层土壤的平均含水量与平均田间持水量的百分比:

$$\theta = \frac{W_s}{F_c} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中: θ 为土壤相对含水量,%; W_s 为根系层土壤平均含水量; F_c 为根系层土壤平均田间持水量。

(2) 作物旱情指标。作物旱情指标主要有作物形态指标和作物生理指标两类,前者利用作物的长势和长相定性判断作物是否缺水,后者根据受到干旱胁迫作物的叶水势、气孔导度、细胞汁液浓度、冠层温度的变化诊断和监测旱情^[26]。作物形态指标不能量化,为定性指标,难免带有主观性;而作物生理指标大多在田间取植株甚至叶片测定,对于不同作物、相同作物的不同品种、作物的不同生育阶段、不同的取样时间等,取样值之间往往存在着较大的差异。因此,作物指标往往更适合小尺度的作物旱情监测,要监测较大尺度的旱情必须进行大量的田间观测和取样,否则很难代表农田的水分供应状况。

(3) 降水量指标。降水量是农田水分的主要来源,也是影响干旱的主要因素之一。对于地下水埋藏较深而又无灌溉条件的旱作农业区,采用降水量指标(如降水量距平百分比、连续无雨日数等)基本能够反映出农业干旱的发生发展趋势。

降水量距平百分比为降水量距平值与同期的降水量多年平均值的百分比,其中降水量

距平值是指评估时段的降水量与同期的降水量多年平均值的差值，见式（1.2）：

$$D_p = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (1.2)$$

式中： D_p 为评估时段的降水量距平百分比，%； P 为评估时段的降水量，mm； $\bar{P}$ 为评估时段的多年平均降水量，mm。

连续无雨日数是指在作物生育期内连续无有效降雨的天数，这里的有效降雨是指春（秋）季一日雨量大于 3mm 的降水或夏季一日雨量大于 5mm 的降水^[23]。

虽然降水量指标形式多样，但其实质一般为反映某时段内的降水量与同期的多年平均降水量相对多少的定量指标，即通过比较某地某时段（年、季、月、旬、日或作物某生育阶段）内的降水量与该地区同时段内的降水量多年平均值确定干旱状态。由于降水量指标所需的资料仅为历年某时段降水量的统计数据，以及评估时段内降水量的观测值或预测值，资料比较容易获得，并且指标简单明了、直观性好，目前在农业生产实践中得到了广泛应用。虽然降水量指标能大致反映出干旱发生发展趋势，但不能直接表示出作物遭受干旱影响的程度。

（4）受旱面积比率指标。受旱面积比率指标是指受旱面积或耕地缺墒（水）面积占总耕地面积的百分比。

$$I = \frac{A_{\text{受旱}}}{A_{\text{耕地}}} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中： I 为受旱面积比率，%； $A_{\text{受旱}}$ 为根据旱情评估所得受旱作物的（含缺墒、缺水）面积； $A_{\text{耕地}}$ 为耕地面积。

1.2.2.2 综合指标

农业干旱的发生可同时受到气象、水文、土壤、作物、农业布局、农耕措施及水利设施等多种因素的综合影响，利用单项指标，如土壤含水量指标、降水量指标、作物旱情指标等虽然可以在一定程度上大致反映出农业干旱发生的趋势，但却忽视了作物本身对于干旱的响应。当单项指标不能全面反映旱情严重程度时，可采用综合指标评估农业旱情。

（1）基于水量平衡的干旱指标。农业干旱可以通过作物的水分供需状况反映。我国北方旱涝技术座谈会提供的水分平衡旱涝指标从农业水文学角度，综合考虑了降水、作物耗水量及前期土壤含水量等影响干旱的主要因素，通过计算水分平衡旱涝指标值来衡量一个地区的旱涝情况，具体用式（1.4）计算^[32]：

$$D = \frac{P - R_c + \bar{\rho}_0 / \rho_v + r_g}{W_0 + \rho_m / \rho_p} \quad (1.4)$$

式中： D 为水分平衡旱涝指标； P 为作物生育期降水量，mm； R_c 为作物生育期地表径流量和深层渗漏量，mm； $\bar{\rho}_0$ 为作物生育期开始时的土壤平均含水量，%； ρ_v 为根系分布层内 1mm 雨量所增加的土壤含水量，%； r_g 为作物生育期地下水补给量，mm； W_0 为作物生育期正常生长所需的耗水量，即土壤蒸发量和作物蒸腾量，mm； ρ_m 为作物生育期所要求的适宜土壤含水量，%； ρ_p 为作物土壤容重下，根系分布层内 1mm 雨量所增加的土壤含水量，%。

王密侠等^[26]在研制作物旱情测报系统时，基于上述旱涝指标公式提出了作物水分供