

# 多变量干旱监测评估 方法与应用

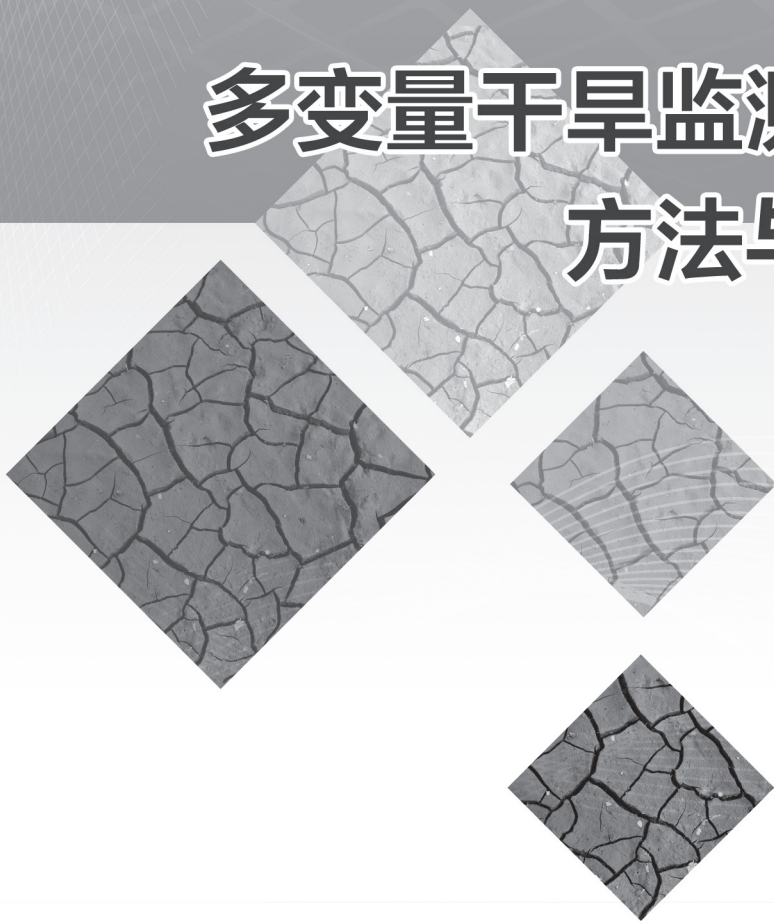
马明卫 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 多变量干旱监测评估 方法与应用

马明卫 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

干旱监测评估正从单一观测手段(单变量或因子)向多源信息融合(多变量综合)发展和转变。本书在系统梳理国内外干旱监测评估相关研究现状及进展的基础上,重点介绍了采用多变量理论与方法改进和拓展帕尔默干旱指标的典型研究成果,以及相关实例应用情况。核心内容包括:采用标准化指数策略和 Copula 函数方法构建两种新的改进型帕尔默干旱指标,即标准化帕尔默干旱指数(SPDI)和帕尔默联合水分亏缺指数(SPDI-JDI);气候模式、分布式水文模型和改进型帕尔默干旱指标(SPDI、SPDI-JDI)在多变量干旱监测评估中的耦合应用等。书中研究成果改善和拓展了传统帕尔默旱度指标的应用范围,丰富了干旱监测与综合评估方法。

本书适合作为水灾害管理、水文统计、气象科学、环境科学等相关领域教学、科研与工程技术人员的参考书,也可供相关专业的高年级本科生、研究生和教师阅读使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

多变量干旱监测评估方法与应用 / 马明卫著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2019. 10  
ISBN 978-7-5170-8033-6

I. ①多... II. ①马... III. ①多变量—干旱—监测—评估方法—研究 IV. ①P426.615

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第203168号

书 名	<b>多变量干旱监测评估方法与应用</b> DUOBIANLIANG GANHAN JIANCE PINGGU FANGFA YU YINGYONG
作 者	马明卫 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、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	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10.25印张 201千字
版 次	2019年10月第1版 2019年10月第1次印刷
定 价	<b>48.00元</b>

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

自然界的水循环过程有其内在的确定性规律和随机性波动。前者作为水文现象必然性的一种动态表征，暗含着降水、蒸散发、下渗、土壤水运动、河川径流和地下水蓄泻等主要水分迁移过程所形成的复杂稳定关系；后者则是对水文现象偶然性的一种随机表征，偶然性的来源多种多样，相应随机成分的加入极大丰富了水文循环的内涵。然而实际中，水文循环过程（如降水）的随机波动却可能给水资源利用带来极为不利的影晌。长期来看，一个地区的水分供给与需求将在不断调整中达到某种动态平衡，即水文循环的确定性成分起决定作用；但短时期内，水分供给大于需求（涝）或水分供给小于需求（旱）的现象却非常普遍，这便与水文循环过程的异常波动不无关系。换言之，若水文循环的随机波动超出一定范围，就可能引发洪涝和干旱等各类自然灾害及次生灾害事件。

干旱作为一种生态与环境灾害，受到了气象、水文、生态、环境、农业、地质等学科的共同关注。近几十年，全球大范围持续干旱事件层出不穷，干旱缺水影响的广度、深度及造成的损失也空前高涨。干旱影响范围之广，跨越了众多经济社会部门，其影响甚至远远超出干旱自身的覆盖范围。在应对干旱发生、缓解旱灾不利影晌的过程中，人们对于干旱现象及其伴生灾害的认知能力和研究水平也在逐步提高。目前，干旱监测与评估的手段正处于由单一地面站点观测向遥感技术、气候模式、水文模型、陆面模式等多源信息融合与数据同化过渡的阶段。用于监测和评估干旱状态的因子或变量，也由最初的单一变量（如降水量）向多变量综合的方向发展（如同时考虑降水、径流、蒸散发和土壤含水量等）。干旱指标（指数）是干旱定量化的重要工具，如何充分利用多源信息干旱监测数据，开发能够融合多种气象、水文变量的多维干旱指标框架与体系，用以

综合评判不同时空尺度与精度的旱涝监测结果，无疑也成为当前干旱研究的一个热点问题。干旱监测能够提供大量有关水分收支及其异常变化的原始资料，而干旱指标则是对相关干旱监测信息进行综合与再处理之后的产品。借助合理的干旱指标体系，可以适时地发布干旱早期预警及应急响应，并对未来一段时期的干旱风险进行预测或预估，有利于指导人们有意识地防旱、抗旱，规避干旱风险，从根本上提高社会应对干旱的能力并降低面对旱灾的脆弱性，实现由旱时危机管理向平时风险管理的转变。

本书首先系统梳理了干旱监测评估相关理论方法的研究现状与进展，并指出了当前研究中存在的某些问题及可能的发展趋势。随后，对作者采用多变量方法改进和拓展传统帕尔默干旱指标的典型研究成果进行了重点介绍，并展示了一系列实例应用成果。全书共分5章：第1章综述了目前国内外相关领域的研究进展，以及本书的研究框架；第2章详细介绍了采用标准化指数策略构建标准化帕尔默干旱指数（SPDI）的理论和方法，并在全球12个具有代表性的气象站进行了验证应用；第3章介绍了基于Copula函数融合不同时间尺度SPDI，构建帕尔默联合水分亏缺指数（SPDI-JDI）的理论和方法，并将其应用于全球代表性站点的历史干旱序列重建与分析；第4章介绍了基于分布式水文模拟的改进型帕尔默干旱指标（SPDI、SPDI-JDI）在黄河流域干旱监测与评估中的应用，并对气候模式模拟未来情景的干旱情势进行了预估；第5章简要归纳了本书的主要研究结论，并对研究过程中发现的问题做了展望。

本书的出版，得到了国家自然科学基金项目——变化环境下干旱非一致性机理与评估方法研究（41701022）、华北水利水电大学水利工程优势学科、水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心、河南省水环境模拟与治理重点实验室等经费资助和支持，中国水利水电出版社也对本书的出版给予了大量帮助，作者在此致以诚挚的谢意。

本书写作过程中，参考了大量国内外学者的研究成果和相关文献，大部分已在书后参考文献中列出；但由于资料庞杂，疏漏之处

在所难免，在此一并致谢。由于作者水平有限，书中难免存在诸多不足之处，恳请有关专家学者和读者批评指正。

**作者**

2019年6月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究进展 .....	3
1.2.1 干旱研究现状与焦点 .....	3
1.2.2 干旱指标（指数）研究综述 .....	8
1.2.3 水文模型和气候模式在干旱研究中的应用 .....	16
1.2.4 研究中存在的问题 .....	17
1.3 本书的研究框架 .....	18
1.3.1 研究内容 .....	18
1.3.2 技术路线 .....	20
<b>第 2 章 标准化帕尔默干旱指数构建与应用</b> .....	21
2.1 概述 .....	21
2.1.1 传统帕尔默干旱指标 .....	22
2.1.2 标准化降水蒸散指数 .....	23
2.2 研究对象与数据 .....	23
2.3 SPEI、PDSI 水分异常对降水和气温的敏感性 .....	24
2.3.1 月尺度序列分析 .....	24
2.3.2 多时间尺度累积序列分析 .....	32
2.3.3 SPEI 可能的区域适用性局限 .....	34
2.4 SPDI 对 PDSI 的替代标准化改进 .....	35
2.4.1 季节性影响的处理 .....	35
2.4.2 理论概率分布优选 .....	35
2.4.3 近似标准正态化过程 .....	41
2.5 结果验证与分析 .....	42
2.5.1 历史干旱序列多指数对比分析 .....	42
2.5.2 SPDI 对气候条件变化的敏感性 .....	47
2.5.3 讨论 .....	49

2.6	本章小结	49
<b>第3章</b>	<b>帕尔默联合水分亏缺指数构建与应用</b>	<b>51</b>
3.1	概述	51
3.2	Copula 函数理论	52
3.2.1	Copula 函数的定义	53
3.2.2	Copula 函数的性质	53
3.2.3	Copula 函数的分类	54
3.2.4	Copula 函数参数估计方法	54
3.3	帕尔默联合水分亏缺指数	54
3.3.1	经验 Copula 方法	55
3.3.2	参数 Copula 方法	55
3.3.3	Kendall 分布函数	57
3.3.4	SPDI - JDI 标准正态化	57
3.4	全球代表站点干旱分析	58
3.4.1	数据说明	58
3.4.2	PDSI 和 SPDI 时空特征对比分析	58
3.4.3	经验与参数 Copula 方法对比分析	59
3.4.4	多时间尺度干旱信息融合	63
3.4.5	SPDI - JDI 指数评估	67
3.5	本章小结	70
<b>第4章</b>	<b>分布式水文模型与帕尔默干旱指标耦合应用</b>	<b>72</b>
4.1	概述	72
4.2	基于分布式水文模拟的帕尔默干旱指标	74
4.2.1	VIC 水文过程分布式模拟	74
4.2.2	帕尔默水量平衡各分量计算	75
4.3	研究区与数据	77
4.4	VIC 水文模拟和帕尔默干旱指标结果分析	79
4.4.1	水文模拟结果评估	79
4.4.2	PDSI 和 SPDI 对比分析	82
4.4.3	SPDI 和 SPDI - JDI 对比分析	90
4.4.4	SPDI 和 SPDI - JDI 可靠性分析	96
4.4.5	SPDI - JDI 干旱监测结果评估	105
4.5	黄河流域历史干旱时空变化特征分析	106
4.5.1	干旱识别	107

4.5.2	干旱频次和总历时 .....	108
4.5.3	干旱历时和干旱烈度 .....	109
4.5.4	全年和分季节干旱 .....	112
4.6	气候变化条件下黄河流域未来干旱情景预估 .....	116
4.6.1	降水量和气温 .....	116
4.6.2	干旱事件多特征属性 .....	122
4.7	本章小结 .....	135
<b>第5章</b>	<b>研究结论与展望</b> .....	<b>137</b>
5.1	研究结论 .....	137
5.2	问题与展望 .....	138
	<b>参考文献</b> .....	<b>141</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景与意义

干旱作为一种生态与环境灾害，受到了气象、水文、生态、环境、农业、地质等学科研究人员的共同关注。事实上，不同的气候区不论降水多少，都可能发生干旱，并且和一段时间内（月、季节、年）降水量的减少程度有关。干燥是一个限定在少雨地区的永久性气候、水文特征（预期内）；与之不同，干旱则是一种暂时性的失常（超出预期）。由于人口增长、工农业扩张、能源需求增加，过去几十年人类对水的需求成倍上涨，有的地区甚至每年都缺水，气候变化和水质污染也加剧了世界各地的水分短缺。洪水、干旱猛于虎，水文极端事件似乎变得越来越频繁。干旱通过影响地表和地下水资源，可能导致水资源供给不足、水质恶化、粮食减产、生产力降低、发电量减少，还会干扰河岸栖息地并影响大量的社会经济活动。干旱还可能改变区域水文特性，通过影响径流改变水体中泥沙、有机质、营养盐等的运移与分配，从根本上影响江河湖库中的水质<sup>[1]</sup>。

近几十年，全球大范围持续干旱事件层出不穷，干旱缺水影响的广度、深度及造成的损失也不断升高。干旱影响了众多经济社会部门，其影响范围甚至远远超出干旱自身的覆盖范围。有研究表明，地球一半以上的陆地区域都易遭受干旱影响，可见其分布广泛<sup>[2]</sup>。更重要的是，这些受干旱影响的地区大多还是全球重要的粮食生产地。统计资料显示，干旱已成为 20 世纪最具有破坏力的自然灾害类型。近些年，各洲大陆均监测到密集的大尺度干旱，欧洲、非洲、亚洲、大洋洲、南美洲、中美和北美地区均不同程度受到持续干旱的影响。例如，过去 20 年美国的干旱发生次数和强度均有显著的增加，干旱造成的损失约占所有气象灾害总损失的 41.2%。过去 30 年，欧洲许多地区的干旱也愈演愈烈，平均每年导致欧洲经济损失超过 53 亿欧元。持续达十余年之久的“千禧年”干旱席卷了澳大利亚全境，引发了热浪、河流干涸、极端缺水和森林火灾等一系列严重后果，对该地区社会经济和生态环境造成的破坏不可估量且将长期存在。人口、经济和政治等原因造成亚洲很多国家和地区的缺水压力倍增，受持续的多年性干旱影响，2000 年以来亚洲中部和西南地区超过



6000 万人口都不同程度陷入粮食和生存危机的泥淖，而不得不接受联合国人道主义援助。非洲西部的严重干旱事件也曾引发大规模的饥荒和人口迁移，并间接促成了联合国防治荒漠化和干旱公约的制定。干旱造成的高昂经济成本和巨大社会代价往往超出我们的想象，因此其关注度也在急剧上升。

干旱缺水对我国农业生产非常不利，旱情已经成为影响粮食和农业生产的常态<sup>[3]</sup>。据统计，近 10 年来全国平均每年旱灾发生面积大约为 4 亿亩，是 20 世纪 50 年代的两倍以上，平均每年因旱成灾面积 2 亿多亩，因旱损失粮食（减产或绝收）超过 600 亿斤，其影响居各类自然灾害之首。从 20 世纪 50 年代开始，在全球气候变暖和人类活动等众多因素影响下，地球生态环境急剧恶化且遭到不同程度破坏，导致各类自然灾害频发；20 世纪 90 年代以来，我国旱灾呈现频率越来越高、范围越来越广、持续时间越来越长、程度和灾害损失越来越重等特征。例如，1927—1997 年，黄河干流共有 20 年出现断流情况，自 20 世纪 90 年代开始黄河断流起始时间提前、持续时间延长、出现频率明显增加。1997 年的北方干旱导致黄河持续 226 日无流量，是有记录以来最长的断流期。再如，1997 年、1999—2002 年发生在中国北方大部区域的干旱造成了巨大的经济和社会损失。而且，我国干旱发生的范围也在不断扩大。历史上干旱缺水的北方，特别是西北地区一直是旱灾较为集中和高发的区域；但近些年来，我国南方和东部半湿润乃至湿润地区的旱情也呈现出扩展和加重的态势。其中具有代表性的包括：2010 年前后西南五省（自治区、直辖市）遭遇超百年一遇的特大旱灾，给当地群众的生活、生产和社会经济发展造成前所未有的威胁，最终导致巨大的人力和经济损失；近年来频繁出现的长江中下游大面积干旱（如春旱和伏旱）也引起广泛关注。可以说，目前旱灾发生的范围已遍及全国。同时，除农业外，干旱的影响也迅速向工业、城市、生态环境等领域扩展和蔓延，使工农业争水、城乡争水和国民经济挤占生态用水等现象愈演愈烈<sup>[4]</sup>。此外，干旱可能进一步加剧由于水分失衡而导致的土地沙漠化和沙尘暴等生态环境恶化问题。积极应对严峻的干旱形势、最大程度地缓解干旱不利影响、保障国家全面可持续发展，是我国当前亟待解决的重大经济社会问题和重大科学技术难题。目前，干旱防治问题已被提升至国家战略高度。2011 年中央一号文件明确提出“到 2020 年，基本建成全国防洪抗旱减灾体系，重点城市和防洪保护区防洪能力明显提高，抗旱能力显著增强”的水利改革发展的目标任务，并要求突出加强“提高防汛抗旱应急能力”建设。然而，由于干旱研究基础十分薄弱，缺乏对旱灾形成机理和演变规律的系统性认识，目前干旱管理和防旱抗旱工作与实际脱节比较严重，各级职能部门制定的抗旱规划和应急预案整体上缺乏科学性、针对性和有效性。因此，对干旱的深入研究，特别是针对干旱监测、预测和综合评估指标的研究具有重要的理论意义和实际价值。



在应对干旱发生、缓解旱灾不利影响的过程中，人们对干旱现象及其伴生灾害的认知能力和研究水平也在逐步提高。目前，干旱监测与评估的手段正处于由单一地面站点观测向遥感技术、气候模式、水文模型、陆面模式等多源信息融合与数据同化过渡的阶段。用于监测和评估干旱状态的因子或变量，也由最初的单一变量（如降水量）向多变量综合的方向发展（如同时考虑降水、径流、蒸散发和土壤含水量等）。干旱指标（指数）是干旱定量化的重要工具，因此如何充分利用多源信息干旱监测数据，开发能够融合多种气象、水文变量的多维干旱指标框架与体系，用以综合评判不同时空尺度与精度的旱涝监测结果，无疑也成为当前干旱研究的一个热点问题。干旱监测能够提供大量有关水分收支及其异常变化的原始资料，而干旱指标则是对相关干旱监测信息进行综合与再处理之后的产品。借助合理的干旱指标体系，可以适时地发布干旱早期预警及应急响应，并对未来一段时期的干旱风险进行预测或预估，有利于指导人们有意识地防旱、抗旱，规避干旱风险，从根本上提高社会应对干旱的能力并降低面对旱灾的脆弱性，最终达到由旱时危机管理向平时风险管理的转变。

基于上述研究背景和科学依据，本书首先运用全球不同气候区 12 个 WMO 气象站的历史观测气象资料，建立适用于不同气候条件的改进型帕尔默干旱评估通用指标：标准化帕尔默干旱指数（SPDI）和帕尔默联合水分亏缺指数（SPDI-JDI）。然后，根据中国北方黄河流域 1500 个网格的历史观测水文气象数据，驱动并率定大尺度可变下渗能力（VIC）水文模型，建立基于 VIC 分布式水文过程模拟的帕尔默干旱指标体系（PDSI、SPDI 和 SPDI-JDI 等），并将经过处理的气候模式模拟气象数据作为 VIC 水文模型的输入，通过计算的 SPDI-JDI 指数预估黄河流域未来气候变化情景下的干旱情势。研究旨在进一步修正和拓展传统帕尔默旱度指标的应用范围，丰富干旱监测与综合评估方法，为建立区域干旱监测、预警系统和做出防旱抗旱决策提供科学依据与技术支持。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 干旱研究现状与焦点

干旱发生的原因很复杂，一方面取决于大气因素；另一方面还依赖影响水汽的水文过程。一旦水文条件偏干，干旱的正反馈调节机制就开始形成，即：蒸散发速率随着上层土壤水分的消耗而减小，进而大气相对湿度减小，相对湿度越低，在相同低压天气系统下降雨的可能性就越小。除非干旱区外有足够的输入，形成足够的降雨才能结束干旱<sup>[5]</sup>。因此，干旱与其他自然灾害存在不同之处：首先，干旱的起止时间难以准确地界定，通常一场干旱的影响在一



段时间内是缓慢累积的，并且在干旱结束以后还可能蔓延数年；其次，人类活动可以直接诱发干旱，比如过度放牧、过度灌溉、乱砍滥伐、过度开采水资源、水土流失（导致土壤蓄水能力下降）等。

### 1.2.1.1 干旱定义与分类

对于不同的领域和研究目的而言，目前仍然缺乏能够被一致接受的干旱定义。人们最初从气象学角度来定义干旱<sup>[6-8]</sup>，即认为降水的缺乏或持续偏少是干旱的主要特征。随着研究的深入，由于降水不足而逐步导致的系统性水分供需失衡及其各方面的影响均被用来定义不同类型的干旱<sup>[9-15]</sup>。精确定义干旱的困难主要在于水文气象变量和社会经济因子的差异，以及不同研究区域需水的随机性。20世纪60年代 Yevjevich 就指出，对于干旱定义的分歧是研究干旱的首要障碍<sup>[16]</sup>。在定义干旱时有必要区分概念性定义和操作性定义<sup>[17]</sup>。概念性定义，譬如干旱是一段持续时间长的干燥期，是相对操作性定义而言的，而后者试图识别干旱的起止时间、严重程度。一般化的操作性定义可以用来分析干旱的频率、严重程度以及历时等特征属性<sup>[18]</sup>。因此，干旱的定义非常多，取决于描述干旱所采用的不同变量，且与所研究干旱的类型密切相关。目前，被广为接受的干旱分类包括<sup>[14,17,19]</sup>：气象干旱<sup>[20-23]</sup>、水文干旱<sup>[24-28]</sup>、农业干旱<sup>[29-32]</sup>和社会经济干旱<sup>[33-35]</sup>。大多数研究都主要讨论以上4类干旱，而地下水干旱则可能成为一种新的干旱类型，其时间尺度一般为数月至数年<sup>[36,37]</sup>。从根源上看，地下水干旱也是由降水亏缺导致的，降水不足导致土壤水减少，进而影响地下水补给；同时，人为过度开采还可能直接诱发地下水干旱<sup>[38]</sup>。

### 1.2.1.2 干旱定量化识别

干旱的影响是非结构化的，而且其影响范围非常广。较之洪水、飓风、地震和龙卷风，干旱并不破坏水体结构，而是在水资源结构方面影响水体。正因如此，干旱影响的识别和定量化研究相对比较困难<sup>[39]</sup>。目前研究通过对观测水文、气象要素（如降水、径流、水库水位、土壤湿度、地下水水位等）时间序列直接进行分析<sup>[36,40]</sup>，或对根据各类观测变量构建并计算的干旱评估指标时间序列进行分析<sup>[41,42]</sup>，提取不同干旱事件的历时、烈度、强度、影响面积等特征属性。游程理论是当前干旱分析中一种最基本也是最重要的方法。Yevjevich 最早将游程分析用于识别和分析水文干旱事件的历时、严重程度和强度等特征变量<sup>[16]</sup>。游程分析最基本的元素就是截取水平或阈值（常数或时间函数），其基本原理为：以某一段代表旱涝状况的时间序列（观测变量或计算指标）定义一种机制，其中所有的值要么高于、要么低于设定的截取水平，相应地称为正游程或负游程。一般采用负游程表示识别的干旱事件，通过游程的各种特征，可以确定相应干旱事件的开始时刻、结束时刻、历时、烈度和平



均强度等特征变量，从而进行其他定量化分析。例如，观测变量或计算指标连续低于截取水平的负游程长可以作为干旱历时，而相应时段内的累积亏缺量（负游程和）即被定义为干旱烈度。在进行游程分析时，阈值的选取将直接影响干旱变量（历时和烈度等）的提取结果；同时，截取水平（阈值）也可以不止一个，多阈值方法相较于传统的单阈值方法可能更具合理性和优势<sup>[43,44]</sup>。另外，由于不同时空尺度下的降水、径流等观测变量差别很大，容易受到可比性等局限，因而由各类观测变量计算客观指标是目前干旱识别与定量化研究的重要途径，国内外各类干旱指标（指数）的研究进展将在后面进行详细分类阐述。

### 1.2.1.3 干旱模拟与频率分析

干旱模拟与频率分析主要从水文气象要素（降水、径流和土壤含水量等）或干旱指标（指数）变化的随机性着手，对干旱历时、烈度和影响面积等特征变量进行概率描述，以揭示干旱的发生频次和时空分布规律<sup>[45]</sup>。近些年来干旱频率分析研究众多、发展迅速，逐步形成了由单一站点到区域干旱频率分析的理论与方法体系，旨在更全面地表达干旱的点、面特征及其联系与发生规律。点干旱频率分析主要针对单个站点的干旱历时和烈度等特征变量，包括样本获取、样本统计规律分析、统计模型构建、根据统计模型进行推断与频率计算等方面的内容<sup>[45]</sup>。在单变量干旱频率分析中，各种常见的频率分布类型也常被用来描述干旱历时和烈度等特征变量的随机特性。同时，各种非参数方法和经验频率曲线也被用来确定干旱特征变量的频率分布，进而估算不同干旱特征值所对应的概率和重现期<sup>[28,46-49]</sup>。然而，干旱的历时、烈度、平均强度和影响面积等多个特征属性之间具有不同程度的相关性，对单个变量独立的频率分析无法全面客观地反映干旱的真实特征。近十几年，干旱多变量频率分析方法取得长足发展，其能同时考虑多个干旱特征变量，通过联合分布来描述干旱变量之间联合概率特性，能够更加全面、合理地描述干旱的随机特征。其中，Copulas 函数在构造联合分布时对边缘分布没有限制，可以描述变量间复杂的相关结构，特别是可以捕捉到非正态、非对称分布的尾部特征，是多变量干旱频率分析中目前使用最多的方法<sup>[50-52]</sup>。该方法能够较全面地描述干旱的多变量频率特征，是一种简便、通用、有效的干旱多变量频率分析方法，是目前研究的一个热点<sup>[53-59]</sup>。另一方面，干旱的影响具有显著的区域性，离散站点的频率分析不能很好地反映干旱特性在连续空间上的分布与区域特征。在点干旱频率分析的基础上，区域干旱频率分析逐渐被用于研究干旱的空间分布规律和区域特征，其主要途径包括<sup>[60-63]</sup>：①利用降水、径流等水文气象要素或者干旱指数值、干旱历时和烈度等特征变量的等值线图或基于网格的空间分布图



等,直观描述干旱在空间上的分布特征;②以区域干旱历时、强度和面积等作为区域干旱特征,将区域作为一个整体对其干旱特征进行频率分析,具有代表性的包括干旱烈度-面积-频率和干旱强度-面积-历时等区域干旱特征曲线;③将研究区划分为若干一致区,对各一致区分别进行类似于站点的频率分析,以达到在空间上反映干旱区域特征的效果。聚类分析和线性矩法常被用来划分和检验一致区,Copulas 函数则被用来构造各分区干旱历时和烈度等的联合分布,以实现区域、多变量频率分析的双重目标。区域干旱频率分析力求揭示干旱影响的空间分布和区域性,是干旱频率分析最重要的发展方向<sup>[45]</sup>。

#### 1.2.1.4 干旱监测、评估与预测

由于干旱形成的复杂性及其影响的深远性,精确地监测干旱的开始、结束和持续时间,量化地评估干旱的强度、覆盖范围及其综合影响都是十分困难的<sup>[64]</sup>。对于不同类型的干旱,判断干旱开始、结束时刻及其他评价标准也差别很大。为了监测和研究干旱及其变化,人们利用较容易获得且有长期观测记录的降水量、气温等气象要素,发展了众多干旱指数,这些客观指数的建立为干旱量化研究提供了有效工具。各类干旱指数包含了降水、气温、蒸散发、径流、土壤含水量、地下水位和积雪等多种基础资料,最终形成一系列用数字表示的指标值。对于相关领域的决策者和使用者来说,干旱指数比原始观测资料更加直观,综合性与可利用性也更强。为了积极应对干旱,许多国家的研究人员在干旱监测和评估方面做了大量工作,各种地面自动观测站网和空间遥测技术等立体化监测手段的综合运用,使得各国建立的干旱监测业务化系统中实际中发挥的作用越来越明显,例如中国气象局国家气候中心研制开发的“全国旱涝气候监测、预警系统”和美国干旱减灾中心、海洋大气局、农业部共同建立的美国干旱监测系统(USDM)等。在干旱监测和评估的基础上,对未来一段时期的干旱情势进行有意识的预测,对干旱预警、风险管理和防旱减灾等工作具有重要意义。干旱预测所依赖的输入变量和基础数据与所要预测的干旱类型有很大关系。例如,降水量是气象干旱最重要的预测因子,径流量、水库、湖泊水位与水文干旱预测密切相关,土壤含水量和作物产量则被用来预测农业干旱。根据上述观测要素和数据计算的各类干旱指数经常用于预测未来一定时期的干旱程度及干旱特征(历时、烈度和影响面积等)。目前,干旱的预测方法主要包括以下几类<sup>[65-78]</sup>:①回归分析(一元与多元、线性与非线性);②时间序列分析(各种季节与非季节随机模型);③概率预测模型(如各阶齐次与非齐次马尔科夫链及其他概率转移模型);④人工神经网络模型(多层网络非线性智能训练灰色模型);⑤混合模型(如小波变换与人工神经网络、模糊逻辑等的混合模型);⑥长期干旱预测或预估(如大尺度气候因子、大气环流模



式和天气数值模拟等)；⑦数据挖掘技术(用于有效遴选预测要素或因子)。相比干旱监测与评估，干旱预测的理论、方法和应用均很不成熟，可靠性还很低。全球范围内，真正业务化运行的干旱预测预报系统也极少。利用安置在土层内的热点传感器探测土壤湿度，或通过卫星遥感技术与反演算法的升级获取可靠度较高的大范围土壤湿度数据，通过分析土壤湿度的变化提前数月预测干旱的来临，可能是未来干旱监测和预测技术革新、准确性取得飞跃发展的重要途径<sup>[64]</sup>。

### 1.2.1.5 干旱风险评估与管理

对于干旱研究，目前最重要也最具意义的改变在于，人们更加强烈地意识到必须逐步摒弃传统的干旱危机管理，进而转向更科学、高效的干旱风险管理。过去人们往往在干旱灾害的影响出现以后，才开始采取各种行动和补救措施，以图缓解旱灾的不利影响，最终得到恢复，这是一种面对干旱危机时的被动响应过程。相反，干旱风险管理以科学研究作为基础，利用干旱监测站网、干旱早期预警及信息发布系统，并根据干旱规划与应对方案，由国家、地方各级决策部门进行指导与协调，尽可能在干旱前期甚至干旱还未形成之前，就具备降低预期干旱风险的策略和能力，这是一种主动应对干旱的过程，而针对旱灾影响的救助行动与措施仅作为干旱风险管理的补充。近年来，世界各国都在积极、主动应对干旱，在提高干旱风险评估与管理水平方面有所行动。例如，美国干旱减灾中心(NDMC)的“十步骤干旱规划”集中体现了干旱风险管理的理念，明确提出了在国家层面上如何及时采取科学的手段、方法和措施，有效规避干旱风险或应对旱灾的不利影响<sup>[79]</sup>，其中详细阐述了干旱规划的目标、应对干旱的组织管理、干旱规划制定者与潜在受益者之间的合作等方面的内容，很多理念和方法在世界范围内得到广泛的应用。澳大利亚、印度、非洲等受干旱影响严重的国家和地区，在干旱预警、制定干旱规划与政策、开展干旱风险管理的方面也进行了大量的尝试。我国干旱灾害发生频繁且旱灾损失非常严重，为了不断提高防御干旱灾害的能力，有针对性地开展防旱、抗旱工作，国内学者对干旱静态和动态风险分析与评估的研究工作也取得了一些成果<sup>[80-83]</sup>。彭贵芬等<sup>[82]</sup>根据实时旱情综合监测、干旱气候特征分析、承载体脆弱性分析、静态气候风险分析和影响时段内动态风险预估等手段，证实了我国云南大部地区在2009—2010年所面临的巨大干旱风险，以及由此带来的严重后果。金菊良等<sup>[83]</sup>根据旱灾风险的形成机制，在旱灾风险评估基本概念分析的基础上，系统地阐述了旱灾风险系统的组成、旱灾风险评估方法论与旱灾风险评估理论模式、旱灾风险评估方法体系、旱灾风险评估应用模式体系等，它们共同构成了旱灾风险评估的初步理论框架。相关成果和研究工作有利于提高



政府部门决策水平和社会应对干旱风险的能力。此外，在干旱应对策略和应急服务方面，各省（自治区、直辖市）气象部门根据相应省份实际情况建立的干旱灾害应急预案也可以作为未来干旱风险管理的前期基础工作。但从国内外实践来看，干旱风险评估与管理的研究基础仍较为薄弱，远未形成完整的体系，特别是缺乏具有可操作性的旱灾风险评估理论框架和方法、技术体系<sup>[83-85]</sup>，是未来干旱领域异常艰巨和最具挑战性的任务与研究课题。

## 1.2.2 干旱指标（指数）研究综述

过去几十年发展了多达上百种干旱指标或指数。通常干旱指数是评估干旱影响、描述不同干旱参数（强度、历时、严重程度和空间跨度等）的基础。干旱指数一般根据干旱本身的定义进行分类，如气象干旱指数、水文干旱指数和农业干旱指数等。然而近年来出现许多旨在量化干旱多方面影响的综合干旱指标（指数）。本书仅选择国内外具有代表性的干旱指数，通过其产生的原理进行归纳介绍<sup>[14]</sup>。

### 1.2.2.1 简单干旱指标

早期使用的干旱指数大多是在研究气象干旱的过程中建立的，因而降水量指标在其中占据重要地位。例如，连续无有效降水日数（如连续 15 天无有效降水）很早就被作为监测干旱的指标，不同地区对连续日数和有效降水量阈值的规定有所不同，一般认为连续无有效降水时间越长，干旱越严重。某一时段内降水量的观测值也曾被直接作为定义干旱的标准，如连续 15 天的降水量小于 1.0mm，21 天及以上的降水量少于其平均值的 1/3，月降水量和年降水量分别少于相应平均值的 60% 和 75% 等。我国也曾定义某时段降水量的百分数在 60%~80% 为轻旱，40%~60% 为中旱，小于 40% 为大旱<sup>[86]</sup>。降水量分位数，即将长时间序列的降水量按大小顺序进行排列并分组，以实际降水量在长时间序列中所占的分位数作为判定干旱发生和严重程度的指标，如降水成数或十分位 Deciles 指数<sup>[87]</sup>。降水量距平百分率是降水量距平值与多年平均同期降水量的比值，是一种非常重要的干旱指标，其负值越大，干旱越严重；降水异常指数 RAI<sup>[88]</sup>、Bhalme 和 Mooley 干旱指数 BMDI<sup>[89]</sup> 等都属于这类指数。它们的优点是计算方法较为简单、应用非常普遍。目前我国中央和地方各级气象台站还都在不同程度地使用降水量距平百分率来评价旱涝状况。然而，这类指数的缺点也很明显：其一，它们仅考虑到降水量，而未考虑蒸散发和下垫面状况，所得的旱涝情况与实际可能有出入；其二，降水量一般服从偏态分布，其多年平均值和中位数往往差别较大，且由于降水量时空分布迥异，不同地区降水量偏离正常值的程度及其出现频率很难直接进行比较<sup>[64]</sup>。Z 指数对降水量