



# 干旱气象学

张书余 等编著

气象出版社



## 内 容 简 介

本书共分9章。分别为绪论、干旱的基本特征、干旱气候变化、干旱监测、干旱气候预测强信号、干旱气象灾害及形成的物理过程、干旱气候形成原因、干旱短期气候预测方法与预测技术和干旱气候的影响及防御对策。它是一本全面系统地介绍干旱气象学方面的基本理论、基本原理、基本方法和基础知识,并具有区域特色的专业书籍。本书可作为气象科学、探测科学、地理科学、环境科学、生态科学、农林科学等相关专业的大学教材,亦可供从事相关科技研究和业务部门的专业人员以及相关政府部门的决策管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

干旱气象学/张书余等编著. —北京:气象出版社,2008.1

ISBN 978-7-5029-4450-6

I. 干… II. 张… III. 干燥气候—研究 IV. P462.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002593 号

---

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街46号

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>

电 话:总编室 010-68407112,发行部 010-68409198

责任编辑:俞卫平 隋珂珂

封面设计:王 伟

责任校对:王丽梅

印 刷 者:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/32

字 数:480千字

版 次:2008年1月第1版

印 数:1~2000

邮政编码:100081

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

终 审:纪乃晋

责任技编:都 平

印 张:18.75

印 次:2008年1月第1次印刷

定 价:58.00元

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

# 序

气候变化是当今全球共同面临的重大课题,事关国民经济和社会发展的方方面面,事关生态与环境保护、能源与水资源安全和人类健康,事关人类社会的可持续发展,已经受到各国政府的高度关注和重视。气候变化的显著特点是全球气温升高,干旱以及干旱带来的生态环境问题加剧。同时干旱区又是气候敏感带,更是生态脆弱带,干旱气候变化引起国内外学者广泛的关注。

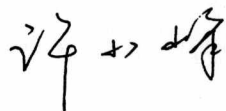
干旱气候变化是气候变化研究中的热点问题之一,干旱气候变化与人类社会的发展紧密相关。一方面人类活动在一定程度上加剧了干旱化的趋势,同时干旱气候变化又影响了人类生存和发展。适应和减缓气候变化,也需要通过人与自然的和谐发展来实现。当前,如何应对气候变化及其影响,实现人类与自然和谐相处,促进经济社会可持续协调发展,是世界各国面临的共同挑战。

中国是一个干旱频发的国家,干旱缺水已成为制约经济社会发展的重要因素,增强干旱防灾减灾能力是构建社会主义和谐社会的重要目标。干旱与其他自然灾害相比,它发生范围广、历时长,历史上发生的每一次大旱都给中华民族带来深重的灾难。干旱造成水资源供需矛盾加剧,对生态环境造成严重威胁,直接关系到社会经济的可持续发展。

我国气象科技工作者,特别是老一辈科学家,通过各种方式对于旱开展了卓有成效的研究。为推动防灾减灾、特别是减轻干旱灾害的工作,实现人与自然和谐的可持续发展,兰州区域气象中心立足西北干旱区实际,提出了构建干旱气候观测系统(ACOS)的设想,成立了省部共建的干旱气候变化与减灾重点实验室,全方位多层次地开展干旱气候变化研究,对认识和应对干旱气候变化问题做出了贡献。

兰州区域气象中心以气象学理论为指导,围绕中国干旱灾害进行了系统的调查、分析与研究,并总结成《干旱气象学》一书。这是国内第一部有关干旱气象学的专著,填补了我国在干旱气象学研究上的空白。该书基本原理与基本方法并重,系统地、全面地总结了国内外关于干旱的研究成果,详细地介绍了干旱的监测、时空特征、发生机理、预报、评估和抗旱减灾技术。它反映了我国当前干旱气象学研究的水平。

多种学科相互交叉是本书的特色之一。它提供的基础知识,为高校开设干旱气象学创造了条件。相信本书的出版,一定会得到各级政府部门、广大气象科技工作者、高校师生和从事防灾减灾工作人员的普遍欢迎。



中国气象局副局长

2007年11月

## 前言

干旱不仅是全球地球科学界研究的焦点科学问题之一,也是世界各国政府和社会公众关注的重大热点问题。干旱气候变化引起的沙漠化和生态退化及其对自然环境和人类社会产生的影响等重大科学问题已引起国际社会的高度重视及各国政府和社会公众的广泛关注。我国是一个干旱频发的国家,干旱缺水已成为制约工农业生产和城市发展的重要因素。增强干旱防灾减灾能力是构建社会主义和谐社会的重大问题。气象科技工作者,通过各种渠道对干旱的监测、规律、机理和预测,以及干旱的防治等开展了卓有成效的研究。为了推动我国减灾、特别是减轻干旱灾害工作,实现人与自然的和谐可持续发展,在中国气象局的指导和具体帮助下,兰州区域气象中心以气象学理论为指导,围绕中国干旱灾害进行了系统的调查、分析与研究,并总结成《干旱气象学》一书。

该书是一本全面系统地介绍干旱气象学方面的基本理论、基本原理、基本方法和基础知识,并具有区域特色的专业书籍。本书主题鲜明,有创新性和独到之处。不但科技含量高,涉及地域范围广,而且内容丰富完整,有较高的理论水平和学术价值。

本书共分九章。第一章绪论,阐述干旱气象学的定义、对象及任务;研究内容、方向、方法、进展以及研究综述等内容。由董安祥撰稿。第二章干旱的基本特征,阐述干旱的分类、地理分布、季节变化、强度等内容。由董安祥撰稿。第三章干旱气候变化,包含近万年干旱气候变化、干旱气候变化演变规律、干旱气候变化的突变性、干旱气候变化的响应。由张存杰、赵红岩、白虎志、刘德祥等撰稿。第四章干旱监测,包括地面监测,由杨兴国、杨小利、方德彪、王润元等撰稿;遥感监测,由郭锐、张树誉、韩晖等撰稿。第五章干旱气候预测强信号,包括青藏高原热状况(季风、加热场、积雪)由白虎志撰稿;海温(厄尔尼诺、其它海区 SST)由王遂缠撰稿;大气环流(阻塞高压、越赤道气流、季风、南亚高压、西太平洋副高、台风、梅雨)由赵庆云撰稿;大地冷涡由赵红岩撰稿。第六章干旱气象灾害及形成的物理过程,包括沙尘暴,由李耀辉撰稿;冰雹由陈乾、康凤琴撰稿;高温热浪由蒲金涌、邓振镛撰稿;干热风由邓振镛、张树誉撰稿。第七章干旱气候形成原因,包括大气环流、下垫面(陆气相互作用)、洋流(海气相互作用)以及干旱气候系统外部因子的强迫作用(太阳活动、地下热活动),由林纾、汤懋苍撰稿。第八章干旱短期气候预测方法与预测技术,包含预测方法(数理、物理、气候模式、集成预报)和预测系统(全国、区域)等内容,由张存杰、王毅荣、时兴和、汤懋苍等撰稿。第九章干旱气候的影响及防御对策,包括对水资源由冯建英撰稿;生态环境由韩永翔撰稿;林牧业由尹东撰稿;作物(冬春小麦、玉米、谷子、糜子、马铃薯、棉花、油菜、胡麻、甜菜、蚕豆 11 种)等的影响由邓振镛、张晓煜撰稿;以及防旱减灾技术由邓振镛撰稿。

本书由张书余负责组织策划、全书审稿定稿;邓振镛负责具体实施、全书修稿统稿;杨选雄、夏家保负责组织协调管理。该书由江灏、李栋梁、钱正安、王介民、汤懋苍、蓝永超、韦志刚、王式功、王刚、靳立亚、张勃、董宏儒、李守谦、兰念军、李耀辉、张存杰、陈添宇、白虎志、邓振镛、董安祥、朱炳瑗等专家审稿,气象出版社编审俞卫平负责编辑并做了繁重的文字工作。

对他们付出的辛勤劳动,作者在此一并致谢。

该书由兰州区域气象中心牵头,主要完成单位有中国气象局兰州干旱气象研究所、兰州区域气候中心、兰州中心气象台以及甘肃省气象局、陕西省气象局、青海省气象局、宁夏回族自治区气象局。主要参加单位有中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、甘肃省人工影响天气办公室。该书的出版得到中国气象局的全力支持和关心,特表感谢。本书付梓仓促,虽经再三校核,错漏在所难免,敬请不吝指正,深表感谢。

田书余

2007年11月

# 目 录

|                    |                |       |
|--------------------|----------------|-------|
| 序                  | 因原致新到户早干 章 5 第 |       |
| 前言                 | 旱干已 肅程戶大 1.7   |       |
| 第 1 章 绪 论          | 旱干已 面整不 8.5    | (1)   |
| 1.1 干旱气象学的定义、对象及任务 | 旱干已 面整不 8.5    | (1)   |
| 1.2 干旱气象学的研究内容与方向  | 旱干已 面整不 8.5    | (3)   |
| 1.3 干旱气象学的研究方法     | 旱干已 面整不 8.5    | (6)   |
| 1.4 干旱气象灾害综述       | 旱干已 面整不 8.5    | (8)   |
| 1.5 干旱气象学的研究进展     | 旱干已 面整不 8.5    | (11)  |
| 参考文献               | 旱干已 面整不 8.5    | (18)  |
| 第 2 章 干旱的基本特征      | 旱干已 面整不 8.5    | (19)  |
| 2.1 干旱的分类          | 旱干已 面整不 8.5    | (19)  |
| 2.2 干旱地理分布         | 旱干已 面整不 8.5    | (20)  |
| 2.3 干旱季节变化         | 旱干已 面整不 8.5    | (24)  |
| 2.4 干旱强度           | 旱干已 面整不 8.5    | (26)  |
| 参考文献               | 旱干已 面整不 8.5    | (27)  |
| 第 3 章 干旱气候变化       | 旱干已 面整不 8.5    | (29)  |
| 3.1 近万年干旱气候变化      | 旱干已 面整不 8.5    | (29)  |
| 3.2 干旱气候变化演变规律     | 旱干已 面整不 8.5    | (37)  |
| 3.3 干旱气候变化的突变性     | 旱干已 面整不 8.5    | (41)  |
| 3.4 干旱气候变化的响应      | 旱干已 面整不 8.5    | (46)  |
| 参考文献               | 旱干已 面整不 8.5    | (53)  |
| 第 4 章 干旱监测         | 旱干已 面整不 8.5    | (56)  |
| 4.1 干旱地面监测         | 旱干已 面整不 8.5    | (56)  |
| 4.2 干旱遥感监测         | 旱干已 面整不 8.5    | (81)  |
| 参考文献               | 旱干已 面整不 8.5    | (104) |
| 第 5 章 干旱气候预测强信号    | 旱干已 面整不 8.5    | (108) |
| 5.1 青藏高原热状况的预测强信号  | 旱干已 面整不 8.5    | (108) |
| 5.2 海温的预测强信号       | 旱干已 面整不 8.5    | (116) |
| 5.3 大气环流的预测强信号     | 旱干已 面整不 8.5    | (137) |
| 5.4 大地冷涡的预测强信号     | 旱干已 面整不 8.5    | (147) |
| 参考文献               | 旱干已 面整不 8.5    | (152) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| <b>第 6 章 干旱气象灾害及形成的物理过程</b>  | (155) |
| 6.1 干旱气候对沙尘暴形成的影响            | (155) |
| 6.2 干旱气候对冰雹发生发展的影响           | (168) |
| 6.3 干旱气候与高温热浪的关系             | (185) |
| 6.4 干旱气候对干热风形成与发生的影响         | (191) |
| 参考文献                         | (195) |
| <b>第 7 章 干旱气候形成原因</b>        | (198) |
| 7.1 大气环流与干旱                  | (198) |
| 7.2 下垫面与干旱                   | (212) |
| 7.3 洋流与干旱                    | (216) |
| 7.4 干旱气候系统外部因子强迫作用           | (218) |
| 参考文献                         | (228) |
| <b>第 8 章 干旱短期气候预测方法与预测技术</b> | (231) |
| 8.1 干旱短期气候预测方法               | (231) |
| 8.2 干旱气候预测系统                 | (240) |
| 参考文献                         | (247) |
| <b>第 9 章 干旱气候的影响及防御对策</b>    | (250) |
| 9.1 干旱气候对水资源的影响              | (250) |
| 9.2 干旱气候对生态环境的影响             | (256) |
| 9.3 干旱气候对林牧业生产的影响            | (262) |
| 9.4 干旱气候作物生态适应性              | (267) |
| 9.5 防旱减灾技术                   | (286) |
| 参考文献                         | (291) |

# 第1章 绪 论

## 1.1 干旱气象学的定义、对象及任务

对于干旱的概念,长期以来,人们就有各种不同的理解。据有关资料反映,目前国内外对干旱定义的理解,多达100多种。由于干旱是一种十分复杂的综合现象,其形成原因和所造成的影响,非常复杂,不仅与众多的自然环境因素有关,也与人类社会因素有关。

干旱是在一定地区一段时期内近地面生态系统和社会经济水分缺乏时的一种自然现象,它普遍存在于世界各地,频繁发生于各个历史时期。干旱灾害不仅是自然问题,也是社会问题。人类活动对于减轻干旱灾害可能施加正面影响,也可能施加负面影响。

### 1.1.1 干旱气象学的定义

干旱一词在气象学上有两种含义:一是干旱气候,一是干旱灾害。干旱气候是指蒸发量比降水量大得多的一种气候,是指用 H. L. 彭曼公式计算的最大可能蒸散量与年降水量的比值大于或等于 3.5 的地区<sup>[1]</sup>。干旱气候与特定的地理环境和大气环流系统相联系。我国的干旱气候区包括西北地区大部,内蒙古西部和西藏北部。这里的自然景观是极端干旱的沙漠和戈壁。与干旱气候不同,干旱灾害是指某一地理范围在某一具体时段内的降水量比多年平均降水量显著偏少,导致该地区的经济活动(尤其是农业生产)和人类生活受到较大危害的现象。它的发生地区遍布全国。

干旱气候和干旱灾害是有区别的。在有人类生产和生活的地区,干旱才可能产生灾害。属于干旱气候的新疆,当水的灌溉条件得到满足时,是不会发生干旱灾害的,相反,属于湿润气候的上海市,年降水量高达 1100 多毫米,主要种植水田作物,需水量大,遇到降水量显著偏少的年份,因水分满足不了需要也会发生干旱灾害。当然,干旱气候和干旱灾害这两者之间也存在某种联系。在干旱、半干旱气候区,由于降水量的年际变化和季节变化大,降水量显著偏少的年份和时间多,干旱灾害发生的年份往往很多;而半湿润、湿润气候则相反,干旱灾害发生的几率比较小。

不同时间尺度的干旱变化形成了不同尺度的干旱期,生物和人类对长期干旱和湿润的适应性形成了干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区的空间格局,从而形成了一些耐旱性和耐湿性的自然景观和社会系统。例如,灌溉农业和旱地农业是人类农业生产过程与干旱环境相适应的产物。由此可见,干旱地区是人们根据一定的干旱指数划分的气候类型分布区,它是长期干旱变化在近代的反映,干旱地区是一种地理范围,而干旱是一种自然现象。所以干旱与干旱地区有不同的含义。

干旱气象学简言之,是利用气象学的基本理论和方法,研究干旱的发生、发展及其变化的基本规律和机理,并探寻防旱减灾技术的一门应用学科。干旱气象学以干旱气候和干旱

灾害及其影响为研究对象。

### 1.1.2 干旱气象学的研究对象

干旱具有范围广、时间长、影响大、危害重等特点。下垫面、冷热源汇和水汽源汇对干旱形成和变化起着十分重要的作用。因此,干旱就不能简单地看成是大气的内部过程,而必须看作是由大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈及生物圈等各圈层共同组成的气候系统的产物。干旱研究的范围必须扩大到全部气候系统。干旱气象学研究涉及到气象、水文、地质、地理、化学、遥感、生物等多种学科。其影响涉及到气候、环境、生态、农业以及社会和经济等部门。

干旱气象学是气象学的一个分支学科,由于地质地理环境和大气环流的状态决定了全球和区域性干旱类型及其时空演变特征,因此,干旱气象学是以大气环流动力学和热力学为基础,是大气科学与地质学、地理学等地球科学和物理学、化学、数学、卫星遥感学以及生态学等多种学科相互交叉的一个前沿学科。

干旱气象学也是研究生态环境、社会经济,特别是农业生产与干旱的相互关系相互作用及其规律的科学。它是在气象学与其他学科以及社会经济各部门相结合的实践中产生的。它是根据生态环境和社会经济的需要,运用多门科学技术来不断揭示自然界和社会经济各部门中的干旱问题,以谋求合理利用干旱气候资源,减轻旱灾的危害,促使社会经济应用性学科。

### 1.1.3 干旱气象学的研究任务

干旱气象学的任务是对干旱进行监测并研究干旱发生规律、机理、预测和评估,及其干旱气候资源的开发利用。

干旱气象学的目的是为搞好干旱的监测、预测、评估和干旱气候资源的开发利用提供气象科技支撑,为抗旱减灾服务,为社会经济的可持续发展服务,为实现人类和自然的和谐共处做出贡献。

干旱气候是极其复杂的系统,它是干旱地理环境的重要元素和形成因子。干旱、半干旱地区占世界陆地总面积约  $1/3$ ; 占中国总面积约  $1/2$ , 并且它拥有世界总耕地面积的  $42.9\%$ 。因此,研究干旱气候对深刻认识干旱地理环境的结构和机制,合理开发利用资源,开展减消旱灾,保护干旱环境具有重要的理论和实际意义<sup>[2]</sup>。

自古以来干旱灾害就不断发生,对人类生活和社会经济发展造成了巨大损失和破坏。随着社会生产力水平的不断提高,特别是现代科技的迅速发展,人类对干旱的认识和防灾减灾能力有了很大提高,因旱灾造成的直接经济损失有所减轻,死亡人数明显减少。但是,目前全球人口增长与资源和环境的矛盾日益加剧,导致全球范围旱灾的绝对经济损失持续增长,对社会经济可持续发展带来了严重的威胁。

20 世纪 70 年代中后期,特别是进入 80 年代以来,世界范围的特大干旱经常发生。当前,中国北方干旱化形势严峻,生态环境仍在继续恶化,引起了世人的关注。因此,20 世纪后期世界范围的广大科技工作者从不同的专业角度,共同研究干旱的规律和如何减轻旱灾的损失,促进了现代干旱气象学的创立。

很多学者的研究结果表明,全球气候变暖将可能导致包括干旱在内的极端异常气候事件更加频繁发生,其危害更加严重。因此,对干旱的深入研究和有效防御是大家面临的重要任务。

## 1.2 干旱气象学的研究内容与方向

人类的历史,就是认识自然,改造自然的历史,人类社会的和自然作斗争中得到了进步和发展,也从中加深了对干旱气候和干旱灾害的认识。近 50 多年来,特别是在改革开放以后,干旱气象学的内容在深度和广度上向前发展。从目前我国开展的干旱气象学的研究内容来看,主要有以下几个方面<sup>[3]</sup>:

### 1.2.1 干旱气候变化检测、成因和预估

近百年来地球气候正经历着以全球变暖为主要特征的显著变化。这一变暖的趋势正在并将持续地对干旱生态系统和社会经济系统产生多方面、多层次的影响。在全球变暖的背景下加强干旱气候系统及其变化的检测、预估、影响评估和对策研究,是干旱气候变化工作的当务之急。当前,可从以下几个方面开展研究:

(1)揭示全球气候变化背景下中国区域干旱的响应特征。研究干旱气候的阶段性转折、突变规律和机理,增强对全球气候变化背景下干旱气候突变和极端干旱事件变化特征及其影响的理解。

(2)检测人类活动及自然因素对于干旱气候变化的影响,研究近百年来干旱气候变化中人类活动影响的信号。

(3)研究未来几十到百年尺度全球和中国气候变化趋势,分析确定干旱气候危险水平,提出适应性对策。

(4)干旱气候变化对我国的生态系统和敏感经济部门已经产生了什么影响?未来将会产生怎样的影响?如何评估关键地区的脆弱性?应该采取怎样的适应对策?

(5)干旱气候变化与我国可持续发展以及国家安全的相互关系如何?

### 1.2.2 干旱形成的物理、化学过程

#### 1.2.2.1 水分循环

水循环是联系气候系统中各大圈层的纽带,是气候系统各种物质循环中最积极、最活跃的部分,同时也是地球上各种物质循环的中心循环。水循环在气候系统中扮演着一个集成者的角色。中国地处东亚季风区,其区域水循环问题具有明显的特殊性和重要性。我国七大江河及内陆地区的水循环与复杂的陆地表层系统中各种自然要素的时空分布密切相关,机理非常复杂。其有关的重要科学问题有:

(1)我国不同区域水汽输送来源、时空特征及其关键变化过程和机理。

(2)东亚区域大气水分、地表径流、土壤水分、浅层地下水、冰川、积雪之间的水循环及其相互作用。东亚区域水循环变化的可预测性。

(3)我国生态脆弱区的水循环问题及其调控。

(4)全球变化对我国及周边区域水循环的影响。

(5)评估我国水资源对气候变化及人类活动影响的脆弱性和稳定性。

(6)深入了解空中水资源状况及变化规律,开展空中水资源转化机理及调控理论研究。

### 1.2.2.2 大气化学

大气化学是大气科学的一门新兴分支学科,也是现代科学中一门很重要的边缘学科,其研究的最终目的是要认识全球大气的化学特性及其内在变化规律,并能预测其变化趋势。近年来这一学科发展十分迅速,是大气科学乃至整个地球科学中最为活跃的一门学科。大气化学的发展和研究要以中国气象局大气成分观测与服务主体,充分发挥国家大气本底观测站网和中国气象局大气成分观测站网的作用。

针对大区域尺度和全球尺度上干旱气候变化,大气化学的关键科学问题为:

(1)在控制  $O_3$  方面,平流层—对流层交换、人类和自然界前体物排放以及现场光化学反应相应的作用是什么?它们从哪些途径、以怎样的方式对于干旱气候变化产生影响?

(2)气溶胶粒子的源、汇的分布和特性是什么?它们对于干旱气候的直接辐射强迫效应是什么?

(3)气溶胶粒子对云、降水和区域水循环的影响是什么?气溶胶的间接辐射强迫效应又如何?

(4)微量气体和气溶胶粒子排放和沉积变化怎样影响干旱气候强迫的空间分布?

(5)如何将化学模块准确而有效地加入到干旱气候预测模式之中,并检验模式的计算结果。

### 1.2.3 大气环流与干旱

影响我国大尺度天气变化的主要环流系统极其复杂。然而,直到现在,对这些环流系统(例如副热带高压)的变化的了解仍很不够,这给准确地预报气象干旱造成了很大困难。从科学研究的角度,需要深入研究的问题有:

(1)东亚季风爆发、稳定、中断的规律和机理及其与我国干旱的关系。通过重点研究,揭示东亚季风异常活动影响的物理机制,探索东亚季风异常预测理论,形成东亚季风变异及干旱灾害形成的理论体系。

(2)西太平洋副热带高压和南亚高压的季节性进退、持续性异常和中短期变化的规律和机理。

(3)中高纬度大型天气系统,特别是东亚阻塞高压的形成、崩溃和中短期变化的规律和机理。

(4)热带气旋的结构、强度、路径的突变机理及其影响的预报方法。

(5)研究海洋、陆面过程对我国干旱气候异常的影响机制,提高我国干旱短期气候预测水平和防灾减灾能力。

### 1.2.4 青藏高原与干旱<sup>[3,4]</sup>

青藏高原占我国陆地面积的  $1/4$ ,平均海拔在 4000 m 以上,是全球面积最大、海拔最高、地形最为复杂的高原,号称地球“世界屋脊”或“地球第三极”。青藏高原的隆升对于我国西北内陆干旱化的形成和发展有重要影响;青藏高原与亚洲季风气候的关系很密切;青藏高原的地—气物理过程对全球气候与东亚大气环流以及我国干旱灾害具有关键性重大作用。当前,青藏高原与干旱的主要科学问题有:

(1)以现代气候系统的观点来研究青藏高原热力和动力过程、高原地面热源强度的时空

分布和变化规律,及其对全球干旱气候变化和生态环境的影响。

(3)高原对亚洲季风建立、维持及活动的影响。

(4)高原独特作用对我国干旱灾害和干旱气候的影响机制(如高原积雪的异常天气、气候效应)。

(5)进一步分析高原近地层能量收支的变化,加深对青藏高原陆面过程和地气相互作用机理的认识。

(6)在深层次上全面研究高原天气、气候致灾系统产生的环境条件、结构特征和移动规律以及与高原加热和地形作用的关系,形成全新的概念模式和预测理论。

### 1.2.5 干旱气象灾害监测预警服务综合系统的建设<sup>[5,6]</sup>

干旱气象灾害监测预警服务综合系统(简称旱灾综合系统,以下同)工程建设的总体目标是把干旱气象学的科研新成果转化到旱灾的业务服务中,建立和完善以干旱气象灾害综合监测、信息传输、信息分析、加工处理和服务产品为主体的干旱气象灾害预警系统,全面提高干旱气象灾害综合监测预警服务能力和水平,实现对于干旱气象灾害的精细、准确和及时预报,为防灾减灾提供优质气象服务。

旱灾综合系统工程是一个庞大、复杂的系统工程,在设计和建设中应特别重视系统的整体性、结构性、层次性、阶段性、开放性等。旱灾综合系统由6个部分组成:(1)干旱气象灾害综合信息监测,(2)干旱气象灾害预报预警,(3)干旱气象灾害信息传输和服务,(4)干旱气象灾害评估,(5)干旱气象灾害应急响应,(6)干旱气象防灾减灾决策指挥。

### 1.2.6 干旱气候资源的开发利用

气候资源是人类所能开发利用的那一部分有利气候条件,它是人类赖以生存和发展的重要的再生资源。它有社会经济学意义,是一个多学科的研究领域。合理开发利用气候资源是制订国民经济和社会发展计划以及规范经济活动的一项重要基础性工作。在常规能源资源的有限性和环境压力增大的背景下,加强对气候资源的开发利用和保护,充分发挥气候资源的经济和社会价值,使气候资源真正成为战略性的经济资源,具有特别重要的意义。它关系到我国经济社会的可持续发展,关系到中华民族生存与长远发展大计。

干旱气候资源开发利用是一个十分复杂的问题。干旱气候资源具有两重性。一方面干旱缺水是制约国民经济发展,特别是农业生产的主要限制因素;另一方面干旱地区具有最大的光温生产潜力,旅游气候资源、太阳能和风能资源十分丰富。只要解决了水的问题,就可以转化为巨大的生产力。因此,干旱、半干旱地区社会经济的发展潜力很大。

在干旱气候资源的开发利用中要加强如下工作:

(1)干旱气候资源的时空分布特征、定量评估和监测诊断服务。

(2)干旱地区内陆河下游的沙漠化和半干旱与半湿润地区的干旱化研究。

(3)人类活动对于干旱气候资源的影响。

(4)干旱气候资源开发的有效性和可持续性。

近20多年来,国家连续资助了一系列与干旱气候变化有关的重大科技项目,支持开展有关气候系统与全球变化方面的研究。中国气象局国家级和省级相关科研业务单位开展了大量的科研工作,取得了一批科学研究成果。但是,干旱气候变化科学存在着大量的不确定

性,需要深入探索研究,不断提高人类对干旱气候系统及其变化的认识。

未来干旱气象学的主要发展方向是发展耦合多圈层的气候系统模式,要继续研究干旱气候系统多圈层相互作用及其全球尺度的变化机理,加强其变化过程研究。探讨影响我国干旱气候变化及全球变化的成因机理,研究地球生物化学循环及全球碳、氮循环的机理和影响,以及我国和东亚地区在全球变化背景下的区域响应和可持续发展适应对策问题。加强干旱气候脆弱性、突变及其可预报性研究。研究干旱气候变化对生态与环境、粮食安全、水资源调配、基础设施、人类健康等的影响,加强干旱气候资源(风能、太阳能)开发利用的研究。

### 1.3 干旱气象学的研究方法

干旱气象学涉及多个学科、多个领域,因此干旱气象学的研究方法也是多种多样,下面粗略地重点介绍几种常规的研究方法。

#### 1.3.1 重建长年代干旱标准序列<sup>[3,6]</sup>

建立近百年和近千年的干旱序列对于认识过去的干旱气候变化成因以及预估未来的气候变化趋势十分关键,这是一项重要的基础性工作。目前多采用树木年轮、文献记录、冰芯、花粉、湖泊沉积和冰川雪线变化等数据,获得高分辨率的近百年和近千年左右全国或区域性干湿度时间序列,以认识 20 世纪气候增暖在长期气候变化史上的地位;分析气候变化的可能原因。

#### 1.3.2 综合干旱气象观测系统<sup>[3,5,6]</sup>

干旱气象观测信息和数据是开展干旱气象学科学研究和业务服务的基础,是推动干旱气象科学发展的原动力。

干旱气象综合观测系统是一个由天基、空基和地基观测系统组成的一体化综合立体监测网。它要从人工观测过渡到自动化遥感遥测;从定性观测过渡到定量观测;从以地基观测为主过渡到以天基观测为主;从单一的大气圈观测过渡到地球各大圈层及其相互作用的综合观测;综合利用多种手段、多种技术,实现高准确度、高时空分辨率、连续、自动、一体化定量观测。

在建设一体化的综合干旱气象观测系统中应加强卫星遥感与地理信息系统技术的应用。随着卫星遥感技术的发展,利用遥感影像及通过影像信息解译技术,对开展干旱监测,尤其是为干旱气候资源、区域分布界限及早灾的时空分布规律的研究提供了有利条件,在很大程度上克服了常规站网和山区干旱资料不足的缺点,并大大提高了干旱地域规律研究的准确性。因此,使干旱气候资源和干旱灾害分布规律及干旱气候区划地域界限研究更加符合自然客观规律。地理信息系统是对地理环境有关问题进行分析和研究的重要手段。应用地理信息系统技术进行干旱气候资源、灾害、生物生态适应性、生产力等区域分布规律的研究,能够快速、准确地处理大量数据,并能同空间位置联系在一起,迅速而客观地给出我们所需要的图形。

### 1.3.3 统计方法

干旱过程的发生发展除遵循流体动力学规律外,不可避免地受到外界其他因素的影响,从而具有随机性。探讨干旱与各个气候系统之间的关联及其自身的演变规律,可以采用统计方法,在干旱气象学研究中,经典的统计分析方法有:(1)相关分析;(2)概率、频率及保证率分析;(3)方差分析;(4)回归分析;(5)聚类分析;(6)其他统计方法等。

在干旱气象学研究中,也可以通过制作干旱图,反映干旱气象要素之间及干旱气象要素与干旱对象之间的定量相互关系,如列线图、相关图、散布图、点聚图以及要素在地域分布规律的等值线图。

近年来,由于电子计算机逐渐普及,计算速度不断提高,历史资料序列的长度也不断增加,因此,统计方法也不断改进。

从20世纪80年代后期以来,人们在预测及研究分析中已经使用了几乎目前世界上广泛应用的各种方法,使干旱气象学定量化研究向前推进一步。线性代数、模糊数学、灰色系统及人工智能等方法已直接引用到干旱气象学研究工作中,近来常用的小波分析、经验正交函数(EOF)分析有很大发展,出现了转动 EOF(REOF)、复数 EOF(CEOF)等。近来又有奇异值分解(SVD),典型相关分析(CCA)等。人们通过多年的干旱气象学研究和业务实践,逐渐认识到统计方法是一种有用的工具,但也有局限性。

### 1.3.4 动力学诊断<sup>[7]</sup>

动力诊断方法是干旱气象学研究的主要手段。干旱气象学研究必须以干旱观测事实为基础,分析干旱观测事实规律和机制的有效手段是动力学诊断。它建立在动力学基础之上,它是动力学研究成果的一种应用。例如 E-P 通量剖面图。

当前,动力学诊断的主要内容有:多重平衡态、遥相关、混沌现象、大气低频振荡、季节内振荡、10~20 d 振荡和准定常行星波。

干旱过程既有必然性一面又有随机性一面,随着计算机与现代统计方法的发展和引入到干旱气象学中来,动力诊断与统计分析相结合已经成为可能,动力统计方法必将在干旱气象学中得到广泛应用和发展。

### 1.3.5 气候模式系统

气象科学技术在20世纪最后的二三十年中发生了革命性的变革。初步建立了由全球海一气耦合模式、区域气候模式、ENSO 预测模式等组成的动力气候模式系统,并且这种模式系统已成为干旱气候与干旱气候变化研究的主要手段之一。同时,引进和开发了一系列有关干旱气候变化影响与对策的评估模式,极大地改进了干旱气候变化研究手段,促进了干旱气候变化影响与对策研究的深入和业务的发展<sup>[3]</sup>。

干旱气象学应当充分利用气候模式系统开展干旱数值模拟和月、季、年的气候预测工作,搞好模式产品的动力释用,针对主要气象灾害开展科学试验。

干旱气象学研究要从观测信息和数值模拟两个方面入手,研究干旱的结构、发生、演变、移动和传播过程。要加强多学科的合作,实现传统研究方法和现代研究方法的有机结合。干旱是一个涉及面很广的复杂问题,许多学科都从本学科着手,对干旱的某一侧面做研究,

其研究成果具有明显的片面性。为了更有效地从整体上构造干旱理论框架,一则需要多学科协作攻关,从不同尺度的水分循环出发,探讨干旱的发生和发展机制,把大气、土壤和生态干旱统一到一个整体之中,实现微观研究与宏观研究的结合;二则也要从气候系统理论出发,探讨系统内各要素之间的耦合反馈机制和环境对系统的影响,以此来把握干旱变化的原因,实现环境影响研究和系统响应机制研究的结合,三则要加强新技术的研究和推广,实现干旱研究现代化<sup>[8]</sup>。

## 1.4 干旱气象灾害综述

我国疆域辽阔,各地自然条件差异大,自古以来就是一个旱灾频繁的国家。与其他自然灾害相比,旱灾发生范围广、历时长,对农业生产影响最大。旱灾的严重性主要表现在其影响的地理范围广、持续时间长、危害重,涉及到人类生活和国民经济各部门。旱灾具有明显的严重性、持续性和后延性等特点<sup>[8~12]</sup>。

### 1.4.1 严重性

#### 1.4.1.1 干旱对全球的危害

干旱是世界上广为分布的自然灾害,全世界有 120 多个国家受到不同程度的干旱威胁。干旱自古以来就是困扰着人类的重大自然灾害,不论过去还是现在,全球发生的特大干旱对人类社会所酿成的灾难是触目惊心的,它像无形的杀手,夺走了难以计数的生命;它是导致自然生态和环境恶化的罪魁祸首;它是社会经济特别是农业可持续发展的重要障碍。

自 1968 年开始,非洲西部大陆的萨赫勒和苏丹相继发生严重干旱,且持续不断、逐渐蔓延。到 1972 年,出现了世界范围的干旱。不仅西非大陆,世界其他地区,如澳大利亚、印度尼西亚、印度西北部、美洲南部、美洲中部、中国的大部分地区以及前苏联的欧洲领土等,相继发生了严重干旱。这一年,全球粮食总产量自第二次世界大战以来,第一次出现下降,总产量减少了 2%。世界气象组织(WMO)宣布,1972 年是历史上气候最恶劣的年份之一。一年之后的 1973 年,一场举世瞩目的严重的环境与社会大灾难袭击了撒哈拉南部的萨赫勒地带。干旱与荒漠化蔓延、河流断流、地下水干涸、饥荒疾病遍地,造成非洲从大西洋沿岸到红海海岸埃塞俄比亚一带 20 万人口和几百万牲畜的死亡。这场导致从 1968—1973 年长达 6 年的人畜饥荒的萨赫勒大灾难正是干旱及人类对环境的破坏造成的。

1970 年代中后期,特别是进入 1980 年代以来,世界范围的特大干旱仍经常发生。西非、东非的干旱一直不断,而且越来越严重。1982—1983 年,全球又一次爆发了大范围的严重干旱,干旱波及到非洲、大洋洲、印度、东南亚、南美、北美等地,其程度和影响又远远超过了 1972—1973 年的大干旱。

这次干旱从 1960 年代末开始,直至 1990 年代初,长达二十几年,创下了近代干旱持续时间最长、影响最大、灾情最重的记录,其严重程度已经达到了难以用言语形容的地步:地下水干涸,河水断流,面积为 2.5 万 km<sup>2</sup> 的乍得湖面积缩小了一半以上,牲畜死亡,如埃塞俄比亚的牲畜 1970 年代初损失了 90% 以上。干旱导致饥荒遍地,大批难民逃离家乡。到 1980 年代,因饥饿和疾病死亡人数已达 300 万人(UNCED, 1992),灾害造成社会动乱,内战不断。

严重的干旱对发达国家也有很大影响。事实证明,生产水平发展越高,对灾害和气候变

化的依赖性越大。仅以1980年代北美,特别是美国出现的1980年、1983年和1988年三次大旱与热浪灾害为例,每年粮食减产1/3以上,造成的损失分别为210亿、131亿和390亿美元。特别是1988年的特大干旱,导致美国许多部门产生严重的经济及环境问题,造成重大损失。干旱影响了航运、城市供水、发电、野生生物的生息,触发森林大火等。这一年,中国和前苏联也相继发生干旱。据华盛顿世界监测研究所估算,1988年底,世界谷物只有54 d的储备,低于60 d的安全线之下,比大旱的1973年的57 d还低,给世界的粮食价格带来重大影响。日本在1980年代,如1984年、1986年和1987年先后出现大旱。1988—1990年欧洲的地中海地区也发生大旱灾<sup>[18]</sup>。

#### 1.4.1.2 干旱对中国的危害

我国从公元前206年起到1949年的2155年中,全国发生较大的旱灾有1056次,平均每两年就发生一次大旱。历史上发生的每一次大旱都给中华民族带来深重的灾难。我国北方地区,自古以来就是干旱灾害多发区。20世纪以来西北地区东部的干旱呈进一步发展趋势,根据历史记载和树木年轮重建的干旱频率资料,半干旱区20世纪干旱频率比1650年至1859年增加了19%;干旱区1920年后的干旱频率比1760年至1919年增加了22%;华北地区近500年来平均每3年就有一次干旱,平均10年就有一次严重干旱。历史上的严重旱灾一旦发生,常常形成“赤地千里”、“饿殍遍野”的悲惨结局。崇祯元年至十四年黄河流域发生大旱,榆林、靖边一带“民饥者十之八九,人相食”,“河南大饥,人相食”。现在,这种悲惨局面当然不可能再发生,但也不能成为我们对北方干旱问题不引起高度重视的理由<sup>[14]</sup>。

1922—1932年,黄河出现了连续11年的枯水期,黄河流域发生了特大旱灾。灾区主要在甘肃、陕西、宁夏、内蒙古、河南、山东等省区,灾民总计高达3400万人。1928—1930年,河北、山东、陕西、河南、山西、甘肃、绥远、察哈尔、热河共死亡1000万人。1935—1937年,全国大部分地区出现不同程度的旱情,四川中、东、北部旱情突出,特别是东部地区发生了数十年所未见之旱灾。持续时间之长,受灾范围之广,灾情之严重为该省历史罕见。据统计,全省有111个县市受灾,灾民达3000余万人<sup>[14,15]</sup>。

1959—1961年三年连旱,旱灾影响10~15个省、区、市,平均受旱面积3659万 $\text{hm}^2$ ,成灾面积1533万 $\text{hm}^2$ ,减产粮食611.5亿 $\text{kg}$ 。2000年,我国出现全国性干旱,尤其是长江以北地区2—7月的春夏大旱,受旱范围广、持续时间长、旱情严重,华北、西北东部旱期长达半年之久。2000年全国受旱面积高达4054万 $\text{hm}^2$ ,为建国以来之最,其中绝收800万 $\text{hm}^2$ ,因旱灾损失粮食近600亿 $\text{kg}$ ,经济作物损失510亿元,其影响超过了1959—1961年3年自然灾害。据统计,我国年平均旱灾粮食损失大约200~250亿 $\text{kg}$ ,受灾人口200万~300万人,直接经济损失150~200亿元<sup>[16]</sup>。

干旱缺水严重制约农村经济的发展。干旱缺水每年造成上百万人饮水困难,2001年2—5月北方地区发生的严重的干旱,不仅造成2200多万 $\text{hm}^2$ 农田受旱,还造成1580万人、1140万头大牲畜发生临时饮水困难。干旱还会对水资源、生态环境、经济社会发展等产生深远的不良影响。黄河从20世纪70年代开始频繁断流,最严重的1997年,受大旱影响黄河下游的利津水文站全年断流时间长达226 d,最长断流河段超过700 km。黄河断流,对流域的人民生活和工农业生产及生态环境造成严重影响。水资源匮乏,工业生产和生活用水严重不足,导致环境恶化、土地沙化盐碱化,进一步导致沙尘暴活动加剧,森林覆盖率持续降低、草原退化日趋严重等。由于水资源缺乏,过量开采地下水,还导致地面沉降<sup>[16]</sup>。