

前 言

在全球气候变化日趋加剧的背景下，极端气候事件频发，干旱作为最复杂的自然灾害之一，正以前所未有的频率和强度影响着全球生态系统、农业生产、水资源安全及社会经济可持续发展。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出，干旱导致的粮食减产和生态退化已成为人类可持续发展的重大威胁。在此形势下，如何实现精准、动态、定量的干旱监测和影响评估，已成为生态环境保护、资源管理、粮食安全等领域亟须解决的关键问题。

本书立足于干旱研究前沿，以“干旱监测及影响评估理论与实践”为题，系统梳理干旱领域的核心理论与实践框架。全书共五章，内容涵盖干旱监测指标与评估方法的发展历程、典型区域干旱动态特征、干旱对农业生产和植被变化的影响机制，以及复合极端事件的耦合效应与生态适应策略。各章内容相互衔接、结构清晰，既突出理论研究的系统性，又强调实践应用的可操作性，力图为干旱灾害的监测预警、风险评估和适应管理提供理论支撑和决策参考。

本书特色在于构建监测-评估-适应的完整研究框架，主要介绍如下：

理论引领与方法创新并重：第1章综述全球干旱监测指标体系的演进脉络，揭示干旱影响评估从“单灾种、单目标”向“多灾种耦合、多模型融合”的重大范式转变。在此基础上，第2章聚焦技术方法，提出融合多源数据的综合干旱监测模型，构建基于GRACE卫星的干旱严重程度指数，实现流域尺度干旱动态的高分辨率量化，弥补传统降水指标对水文干旱响应的滞后性缺陷。

影响评估的深度交叉融合：第3章围绕水-粮食-能源纽带关系，结合华北平原的具体案例，剖析干旱胁迫对主要农作物的减产机制；第4章突破传统生态响应研究框架，集成遥感植被指数、机器学习模型和生态系统过程模型，定量揭示干旱与植被变化的复杂关系，深化对生态系统响应干旱的理解。

面向未来的复合风险应对：第5章锚定复合极端事件的耦合放大效应，系统探讨其对森林退化、粮食减产、水资源短缺的级联式破坏机制，提出基于生态系统服务韧性的适应性管理对策，引发读者对未来复杂气候挑战策略的思考。

本书由陕西师范大学刘宪锋教授撰写，博士研究生陈美珠与硕士研究生王小红、孙高鹏、梁娟、韩书辉等参与了书稿数据的整理分析等工作。

在本书出版之际，向多年支持项目研究的国家自然科学基金委员会、陕西师

范大学科学技术处，以及长期以来在学术交流、数据共享、技术支持与出版工作等方面给予帮助的各界专家学者和科研管理人员等表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 干旱监测方法	1
1.1.1 干旱监测概述	1
1.1.2 干旱监测研究进展	2
1.1.3 干旱监测主要挑战	9
1.2 干旱对作物产量的影响	13
1.2.1 干旱与粮食生产	13
1.2.2 干旱对作物产量的影响研究进展	14
1.2.3 干旱对作物产量的影响研究趋向	21
1.3 干旱对植被变化的影响	25
1.3.1 植被变化研究进展	25
1.3.2 干旱对植被变化的影响研究进展	26
1.3.3 干旱对植被变化的影响研究趋向	27
参考文献	28
第 2 章 典型区域干旱动态分析	39
2.1 华北平原干旱监测	39
2.1.1 研究区域与数据	40
2.1.2 研究方法	42
2.1.3 华北平原干旱动态分析	45
2.2 我国流域尺度干旱监测	50
2.2.1 研究区域与数据	51
2.2.2 研究方法	53
2.2.3 我国流域尺度干旱时空变化特征	55
2.3 欧亚大陆水资源动态监测	68
2.3.1 研究区域与数据	69
2.3.2 研究方法	71
2.3.3 欧亚大陆水资源及组分变化特征	72
参考文献	77

第3章 干旱对农业生产的影响	85
3.1 水-粮食-能源纽带关系	85
3.1.1 纽带关系的概念内涵	86
3.1.2 纽带关系研究进展	87
3.1.3 纽带关系研究趋向	93
3.2 干旱监测指数适用性研究	96
3.2.1 研究区域与数据	97
3.2.2 华北平原干旱监测指数对比	99
3.3 干旱对作物产量影响研究	104
3.3.1 研究区域与数据	105
3.3.2 干旱对作物产量影响	107
参考文献	117
第4章 干旱对植被变化的影响	124
4.1 干旱对黄河流域植被变化的影响	124
4.1.1 数据与方法	125
4.1.2 黄河流域植被覆盖时空变化	127
4.1.3 干旱对植被覆盖变化的影响	131
4.2 干旱对秦巴山区植被变化的影响	135
4.2.1 数据与方法	136
4.2.2 秦巴山区干旱和植被生产力时空变化	138
4.2.3 干旱对秦巴山区植被生产力的影响	140
4.3 土壤水对植被水分利用效率的影响	146
4.3.1 数据与方法	147
4.3.2 植被水分利用效率时空变化	148
4.3.3 植被水分利用效率影响因素	152
参考文献	155
第5章 复合极端事件影响及适应策略	161
5.1 复合极端事件概述	161
5.1.1 复合极端事件内涵	161
5.1.2 复合极端事件影响	162
5.2 复合干旱对植被变化的影响	164
5.2.1 数据与方法	165
5.2.2 复合干旱时空变化特征	168
5.2.3 复合干旱对植被的影响	173
5.3 复合极端事件启示与适应	180

5.3.1 复合极端事件研究启示·····	180
5.3.2 复合极端事件适应策略·····	182
参考文献·····	183

第 1 章 绪 论



本章彩图

近百年来，全球干旱不断加重，给生态系统和粮食生产造成了巨大且深远的影响。全面监测、预警与评估干旱对生态系统的影响，成为减少和应对干旱灾害损失和影响的重要途径与关键环节。本章梳理国内外农业干旱监测的研究进展，对比不同干旱监测指标的适用范围和局限性，并揭示国内外农业干旱监测研究的发展历程和进展。从田间控制实验、统计模型、作物生长机理模型和遥感反演模型四个方面系统回顾干旱对全球主要作物产量影响评估的进展，揭示当前研究呈现由单灾种向多灾种、由单目标向多目标、由统计模型向综合模型转变的特征。最后，从干旱对全球植被变绿进程的影响切入，讨论干旱对全球植被变化的影响及研究进展。

1.1 干旱监测方法

1.1.1 干旱监测概述

全球气候变化是人类迄今为止面临的最重大也是最严重的环境问题，作为 21 世纪人类面临的最复杂的挑战之一，引起了世界各国政府和公众的广泛关注^[1]。20 世纪 70 年代以来，全球气候变暖导致的干旱等极端气候事件的频率和强度均呈显著增加趋势。与气候平均态相比，极端事件的发生更具反常性、突发性和不可预见性，其对气候变化的响应更为敏感^[2]，成为陆地生态系统波动的主要风险源，已对生态系统和人类社会经济可持续发展造成了巨大且深远的影响^[3]。地球系统模式显示，21 世纪全球干旱风险将进一步增加^[4]，应对和减缓干旱及其影响已成为亟待解决的重大科学问题。在众多不利影响中，干旱对农业系统的影响最为明显也最为直接。资料显示，全球气象灾害造成的经济损失约占有所有自然灾害损失的 85%，其中干旱造成的损失占气象灾害损失的 50% 以上。应指出的是，农业生产关乎国家粮食安全和社会稳定，同时农业是受气候和天气制约最大的领域^[5]，因此农业干旱研究已成为各国政府和学者共同关注的焦点问题。

面对气候变化引起的一系列灾害风险，以往应对重大自然灾害的经验表明，风险规避比抢险救灾具有更重要的意义^[6]。第三届世界减灾大会确立的未来减灾目标与优先事项，同样强调了灾害监测预警及科学防范灾害损失的重要性与迫切

性。农业干旱监测作为减少农业灾害损失与影响的重要途径,是干旱研究的薄弱环节之一。国内外组织和学者开展了一系列卓有成效的研究工作,内容涉及农业干旱的成因、评估方法及影响等方面,其中以地球观测组织全球农业监测计划(GEOGLAM)为代表,进行了大量关于农业干旱监测的探索工作^[7]。同时,不同学者从理论和技术层面上对干旱概念、监测方法及其发展趋势进行了系统梳理和全面总结^[8-14]。值得注意的是,农业干旱涉及农业科学、气象学、水文学和植物生理学等众多学科,农业系统是一个自然系统与人工系统高度交织的领域,发展农业干旱监测,无论在理论上还是在技术手段上,均面临着较大的瓶颈^[15]。回顾已有综述研究,发现研究多从干旱指标的角度回顾农业干旱研究进展,学界对农业干旱监测领域研究的全面认识尚未完全形成,有必要对干旱特别是农业干旱监测方法与发展历程进行全面梳理。

农业是国民经济的基础,气候变化将直接影响粮食安全和可持续发展^[16]。因此,农业干旱监测无论在理论上还是技术上都需要取得突破,以应对复杂的气候变化对农业生产造成的不利影响,系统梳理和总结农业干旱监测状况是开展进一步理论和方法研究的重要基础。基于上述认识,本节将对农业干旱的概念和评估方法进行系统梳理,并通过文献统计和重要文献引用揭示国内外农业干旱监测研究的发展历程和最新进展。在此基础上,提出农业干旱监测存在的挑战与不足,进而对农业干旱监测未来发展方向进行归纳与展望,以期通过进一步归纳农业干旱监测研究理论方法与未来指向,满足政府决策部门对农业干旱事件的监测、预警及应对实践需求。

1.1.2 干旱监测研究进展

1. 干旱概念

国际上通常将干旱划分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱四种干旱类型。其中,气象干旱指降水和蒸发不平衡造成的水分亏缺现象;农业干旱指以土壤含水量和植物生长形态为特征,反映土壤含水量低于植物需水量的程度;水文干旱指河川径流量低于正常值或含水层水位下降的现象;社会经济干旱是指在自然系统和人类社会经济系统中,水分短缺影响生产、消费等社会经济活动的现象^[14]。虽然这四种类型干旱的定义有所区分,但所有类型干旱的本质内涵均是降水不足导致的水分亏缺现象,且不同类型干旱之间存在关联(图 1-1)。当降水减少时,最先发生的是气象干旱,随着水分的持续蒸发和水资源的减少,逐渐引发农业干旱和水文干旱。农业干旱是土壤水分供给无法满足作物水分需求导致的作物水分亏缺现象,通常最先表现为降水减少导致的土壤缺墒,同时伴随着作物蒸腾的不断失水,作物体内水分无法满足正常生理活动,表现为限制作物生长,

进而会出现农作物减产或绝收,且干旱对农作物不同生育期的影响存在显著差异。水文干旱表现在河流、水库水资源减少,地下水位下降等。当农业干旱和水文干旱发展到一定程度时,就会引发社会经济干旱。可将不同类型干旱简单理解为:农业干旱即气象干旱对农业系统的影响,水文干旱即气象干旱对水文系统的影响,社会经济干旱则是气象干旱对社会经济系统的影响^[11,17]。

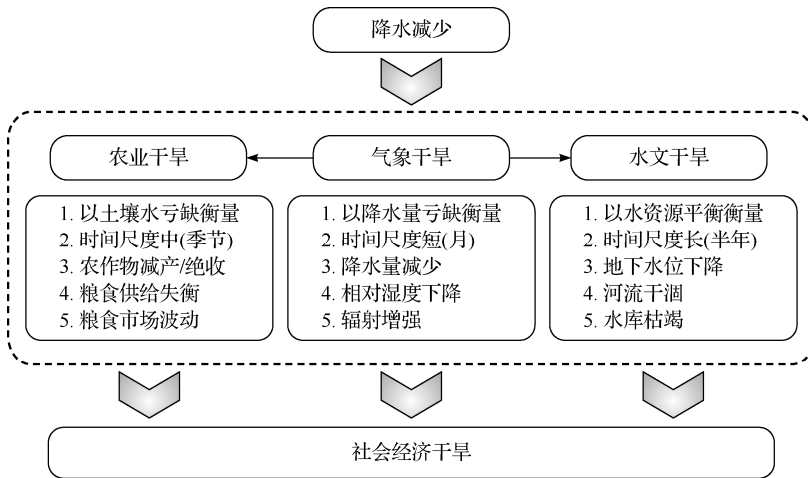


图 1-1 不同类型干旱的传递过程及相互作用

2. 干旱评估方法

干旱作为一种复杂的现象,难以直接观测其发生时间、发展过程和影响范围,因此通常采用干旱监测指标对干旱事件进行描述^[4,10,18]。对干旱情况进行表征的干旱监测指标已发展至近百种^[19]。根据观测手段的不同,可以分为基于站点观测和基于遥感监测两大类:前者主要包括标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)、帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)和作物水分指数(crop moisture index, CMI)等;后者根据地表覆盖情况,分为基于裸露地表的干旱监测指标(包括热惯量法和微波水分反演法)和基于植被覆盖的干旱监测指标两大类,其中基于植被覆盖的干旱监测指标可进一步分为作物形态指标(如条件植被指数、归一化植被指数等)、作物生理指标(如冠层温度、冠层含水量等)和作物综合指标(如植被供水指数、温度植被干旱指数等)三大类(图 1-2)。

1) 基于站点观测数据的干旱监测

20 世纪初,干旱监测研究兴起于美国,早期的干旱监测指标多数仅考虑降水量单一因素^[20-27]。直到 1965 年,Palmer^[28]提出了“对气候适宜降水”的概念,并发展干旱指数为帕尔默干旱指数,成为当时干旱监测指标的里程碑,被广泛应用于美国及世界各个地区,作为政府部门和学界普遍采用的干旱监测工具。

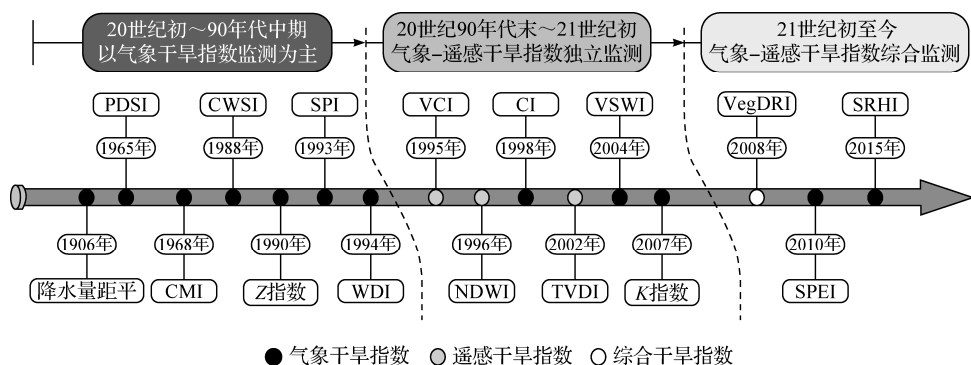


图 1-2 干旱监测指数发展历程简述

PDSI-帕尔默干旱指数; CMI-作物水分指数; CWSI-作物水分胁迫指数; SPI-标准化降水指数; WDI-水分亏缺指数; VCI-植被条件指数; NDWI-归一化差值水分指数; CI-综合指数; TVDI-温度植被干旱指数; VSWI-植被供水指数; VegDRI-植被干旱响应指数; SPEI-标准化降水蒸散指数; SRHI-标准化相对湿度指数

在此基础上,Palmer^[29]进一步考虑作物需水情况,提出了作物水分指数(CMI),在国际上被广泛应用于农业干旱监测评估。在广泛应用的同时,学者逐渐发现了PDSI的局限性^[30,31],为弥补PDSI的不足,Wells等^[32]提出了自适应PDSI,该指数的最大优点是能够根据不同区域的气候特点进行校正参数选取,提高了PDSI对不同区域干旱监测的能力,但仍未摆脱固定时间尺度的限制。在农业干旱监测方面,Shafer等^[33]和Jackson等^[34]在综合考虑地表供水和植被需水的基础上,分别提出了地表供水指数(SWSI)和作物水分胁迫指数(CWSI),取得了较好的效果。1993年,McKee等^[35]发现实测降水量的概率分布是一种偏态分布而非正态分布,继而提出用标准化降水指数(SPI)来替代PDSI。由于SPI计算简便且能够进行多尺度的干旱监测,用以表征不同的干旱类型,成为广泛应用的干旱监测指标之一。然而,该指数仅考虑单一降水因子而忽视蒸发对干旱的影响,使得SPI表征意义过于简单。为了客观表征降水和蒸发对干旱的综合作用,Vicente-Serrano等^[36]在分析PDSI和SPI优缺点的基础上提出了标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),该指数综合了SPI的多尺度优点和PDSI考虑蒸散量的优点,成为干旱监测较为理想的工具之一。随后,Vicente-Serrano等^[37]又对比了SPI、SPEI和PDSI在全球干旱监测中的表现,发现SPI和SPEI在监测水文干旱和农业干旱方面的能力要优于PDSI,并指出SPEI在监测夏季干旱方面的表现尤为突出。值得一提的是,已有研究采用相对湿度数据构建了标准化相对湿度指数(SRHI),该指数能够比SPI更早地监测出干旱事件的起始时间,是开展干旱预警的理想指标^[38]。

1990~2014年,我国学者也致力于干旱监测指标的构建工作,并尝试将多种气象指标综合,以提升干旱监测能力。张强等^[39]将标准化降水指数和标准化相对

湿度指数进行加权求和,提出综合指数(CI),该指数在干旱监测中应用广泛;与此同时,王劲松等^[40]提出了 K 指数,该指标用季节降水量相对变率与蒸发量相对变率的比值定义,较好地适用于监测气象干旱和农业干旱。可以发现,基于站点观测数据的干旱监测指数经历了漫长的发展,成为该时期干旱监测研究和实践应用的主要手段。

2) 基于遥感观测数据的干旱监测

农业干旱与土壤湿度和作物水分亏缺密切相关,对土壤和植被中的水分进行遥感监测反演,是实现大范围农业干旱监测的有效途径。在土壤湿度监测方面,通常采用同化方法估算土壤湿度^[41]。陈怀亮等^[42]建立了不同土壤质地的热惯量模型,通过引入地形和风场参数提高了水分反演的精度,此方法在实际应用中的难度在于地形和风场参数的确定。随后,张仁华等^[43]利用土壤受光面和阴影面、叶子受光面和阴影面的温差信息,将热惯量模型、热量平衡模型和温差模型结合起来,开辟了基于多角度遥感数据反演土壤湿度的新途径。此外, Bindlish 等^[44]利用改进的积分方程模型(integral equation model, IEM),得到了与实际土壤湿度相关性高达 0.95 的反演结果。值得一提的是,虽然微波遥感不受云干扰,拥有全天时和全天候观测能力,但是微波遥感过去只能反演土壤表层(2~5cm)的湿度,而作物根系通常在 10~20cm 土层,导致作物水分胁迫状况往往难以得到真实反映,且反演结果通常存在较大的不确定性^[45]。土壤湿度作为农业干旱监测的关键参数,准确估算不同土层深度的土壤湿度至关重要。将微波遥感应用于农业干旱监测具有一定的局限性,之后应加强微波遥感在农业干旱监测中的应用,并将微波观测结果与陆面模式进行耦合,同时借助野外实际观测数据,提高土壤湿度的反演精度和深度^[8]。

在作物水分亏缺方面,早期的研究根据冠层温度和空气温度差值与空气水汽压的经验关系,提出作物水分胁迫指数(CWSI)^[46]。随后, Moran 等^[47]在能量平衡双层模型的基础上建立了水分亏缺指数(WDI), Gao^[48]提出了归一化差值水分指数(NDWI)。为了消除 NDVI 空间变异,减少地理和生态系统变量的影响, Kogan^[49]提出了植被条件指数(VCI),用于干旱监测研究。2003 年,王鹏新等^[50]提出了条件植被温度指数(VTCI)。在此基础上, Kogan 等^[51]和 Boken 等^[52]将 TCI 和 VCI 进行线性组合,提出了植被健康指数(VHI),研究表明,该指数能够较好地反映农作物受旱情况^[53]。2004 年, Haboudane 等^[54]提出了植被供水指数(VSWI),该指数是一个较为简单的植被指数,即温度作物旱情综合指数。研究表明, VSWI 适用于植被覆盖度高的地区^[55],且在业务化监测中已得到广泛的应用。另外,基于地表温度(LST)和植被指数(VI)的关系, Sandholt 等^[56]提出了温度植被干旱指数(TVDI)来估算土壤表层水分状况,是通过反演土壤湿度反映农业干旱状况的重要方法。值得注意的是,利用 NDVI 和 LST 进行干旱评价时,一个重要的假设前提是二者

存在相反的变化趋势^[57]。研究表明,当水分是植被生长的限制因素时,LST 和 NDVI 呈负相关;当能量成为植被生长的限制因素时,LST 和 NDVI 却呈正相关;TVDI 对已发生旱灾的区域具有较好的解释能力,但在农业干旱监测与预警方面的能力欠佳。

3) 综合气象遥感数据的干旱监测

随着科学技术的发展,干旱监测指标逐步趋向于气象和遥感综合研究,主要表现在多源数据的引入和研究方法的革新。表 1-1 为国内外主要气象和农业干旱监测指标。国内外学者基于不同的方法和指数开展了大量的研究。例如,Hao 等^[58]对综合干旱监测指数进行了系统的梳理,指出美国干旱监测模型(USDM)是综合干旱监测模型中较为成功的案例。受到分辨率的限制,USDM 在区域尺度上的监测能力仍显不足。Brown 等^[59]综合利用气象干旱指数(SPI、PDSI)、植被指数等信息,通过分类回归树的方式,提出了植被干旱响应指数(VegDRI),该指数能够近实时提供国家尺度的干旱监测信息,成为综合干旱监测指数的典范。随后,Wu 等^[60,61]利用该方法建立了适用于我国的综合干旱监测模型,并提出了作物不同生育期的干旱监测模型。杜灵通^[62]利用热带降雨测量任务(TRMM)的降水数据、地表温度数据和植被指数数据,构建了综合干旱监测指数(SDI)并用于山东省干旱监测,取得了较好的效果。利用线性组合方式,Rhee 等^[63]综合 LST、NDVI 和 TRMM,通过加权组合的方式提出了同时适合干旱和湿润地区的干旱监测指数。Zhang 等^[64]尝试综合利用遥感获取的降水数据、AMSER-E 土壤湿度数据和 NDVI,构建了适用于气象干旱的监测指数。Mu 等^[65]综合利用地表蒸散数据和植被指数,构建了基于遥感的实时干旱监测指数(DSI),该指数有效监测出发生于 2003 年的欧洲干旱及 2005 和 2010 年的亚马孙地区干旱,并与站点尺度的 PDSI 具有很好的相关性。在系统对比不同干旱监测指标的基础上,Hao 等^[66]提出了多变量干旱监测指数(MSDI),该指数综合了降水和土壤湿度等信息,被验证为有效的干旱监测指数之一。在此基础上,AghaKouchak^[67]通过引入集合径流预报的方式对 MSDI 进行改进,用于非洲东部的干旱监测与预警研究。在多类型干旱监测方面,Rajsekhar 等^[68]提出了多变量干旱指数(MDI),该指数综合考虑降水、径流、蒸发和土壤湿度等要素,能够同时用于气象干旱、农业干旱和水文干旱的监测。另外,也有学者尝试采用历史数据与实时数据进行同化的方式构建数据驱动的近实时干旱监测指数^[69]。综上所述,学者针对综合干旱监测指标的建立进行了许多探索工作,并取得了一定的成效。值得注意的是,虽然国内外学者尝试建立了多种综合多要素的干旱监测指标,但该时期多数研究仍处于起步阶段,尚未形成适合不同区域和不同尺度的有效干旱监测模型,且不同方法均存在一定程度的缺陷。例如,线性加权方法虽综合了多种要素,但无法解释其物理含义;联合分布函数虽能得出概率分布,便于进行风险分析,但仅考虑了数据的统计特征,并未对物理过程进

行有效描述。

表 1-1 国内外主要气象和农业干旱监测指标

指数名称	提出时间	主要提出者	指标含义
降水量距平	1906 年	Henry ^[20]	任何 21d 或更长天数内发生的降水量等于或少于其间正常值的 30%
帕尔默干旱指数 (PDSI)	1965 年	Palmer ^[28]	表征一段时间内某区域实际水分供应持续少于当地气候适应水分供应的水分亏缺
作物水分指数 (CMI)	1968 年	Palmer ^[29]	利用水平衡模式分析作物干旱状况, 主要用于农业干旱监测
作物水分胁迫指数 (CWSI)	1988 年	Jackson 等 ^[34]	在水分能量平衡原理基础上, 综合考虑土壤湿度和农田蒸散的关系, 来表征作物水分亏缺状况
Z 指数	1990 年	么枕生等 ^[70]	假设降水量整体上服从 Pearson III 型分布, 通过对降水量进行正态化处理来确定干旱指数
标准化降水指数 (SPI)	1993 年	McKee 等 ^[35]	表征某时段降水量出现的概率多少的指标, 适合于月以上尺度相对当地气候状况的干旱监测
水分亏缺指数 (WDI)	1994 年	Moran 等 ^[47]	该指数考虑到作物缺水指数中多数理论参数与植被覆盖度的近线性关系, 结合地表和空气之间的温差与植被指数建立的干旱监测指标
植被条件指数 (VCI)	1995 年	Kogan ^[49]	该指数克服了距平植被指数和标准植被指数的不足, 能有效监测干旱及降水的时空分布特征
归一化差值水分指数(NDWI)	1996 年	Gao ^[48]	通过引入短波红外波段, 更有效提取植被冠层的水分含量, 在植被冠层受水分胁迫时, 能及时响应
综合指数(CI)	1998 年	张强等 ^[39]	该指数综合利用标准化降水指数和相对湿度指数, 适用于实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估
温度植被干旱指数 (TVDI)	2002 年	Sandholt 等 ^[56]	指由植被覆盖度和地表温度确定的干边和湿边方程表征作物水分胁迫状况的指标
植被供水指数 (VSWI)	2004 年	Haboudane ^[54]	该指数是综合地表温度监测指标和植被指数监测指标的一种用于农业干旱监测的综合指标
自适应帕尔默干旱指数(SC-PDSI)	2004 年	Wells 等 ^[32]	该指数是 PDSI 的修正版, 能够根据不同区域的气候特点选取模型校正参数
K 指数	2007 年	王劲松等 ^[40]	该指数用季节降水量相对变率与蒸发量相对变率的比值定义, 用于研究气象和农业干旱
植被干旱响应指数 (VegDRI)	2008 年	Brown 等 ^[59]	综合考虑植被指数、气象干旱指数和土壤有效持水量等信息, 通过信息挖掘技术进行干旱监测
标准化降水蒸散指数(SPEI)	2010 年	Vicente-Serrano 等 ^[36]	表征某时段水分亏缺出现概率多少的指标, 适合月以上尺度相对当地气候状况的干旱监测

3. 农业干旱监测研究文献回顾

为了更好地介绍农业干旱监测研究的发展阶段,在 ISI 科学引文索引数据库 (ISI web of science)中以“农业干旱”(agricultural drought)或“干旱监测”(drought monitoring)为主题进行文献检索,文献检索时间为 2015 年 6 月 26 日。统计表明,1990~2014 年农业干旱监测文献的发文数量和引文数量均呈指数式上升趋势。在中国知网(CNKI)中同样以“农业干旱”或“干旱监测”为主题进行文献检索,发现发文数量和引文数量也均呈现大幅度上升趋势。可见,农业干旱监测研究受到了国内外学者的广泛关注,2000 年之后增长尤为显著。

由于干旱涉及学科广泛,包括地理学、生态学、气候学和灾害学在内的诸多学科均对干旱进行了系统性的研究。为了探究不同学科领域的干旱研究情况,在 ISI 科学引文索引数据库中以“干旱”(drought)为主题进行检索,共搜索到 52376 篇文献(检索时段为 1990~2014 年,检索时间为 2015 年 6 月 26 日)。通过文献分析发现,不同研究方向发文数量存在较大差异,发文数量前三名的研究方向分别是植物学、农学和生态环境学,分别占全部文献数量的 26.0%、22.7%和 20.5%;排在其后的水资源学和气象学分别占 8.0%和 7.7%,地理学仅占 6.8%。这一学科分布表明,干旱对植被、农业和生态环境的影响最为直接也最为严重,并且受到国内外学者的广泛关注(图 1-3)。

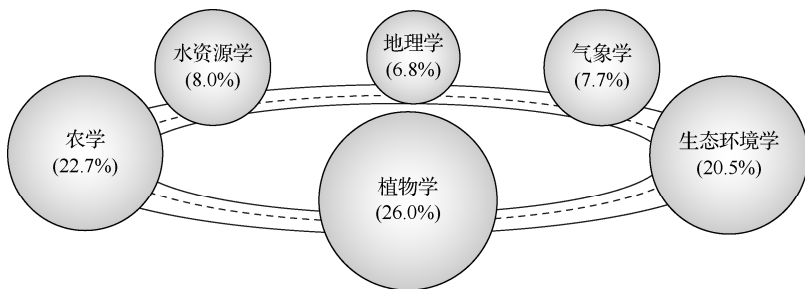


图 1-3 1990~2014 年不同学科关于干旱的发文数量占比

通过对 1990~2014 年的文献进行回顾和分析重点文献引用,总结出农业干旱监测研究呈现以下几个特点:

(1) 在学科分布上,以“干旱”为主题的文章研究重心仍集中在干旱对生态系统的影响,包括对植被长势的影响、植被生产力变化及碳储存波动等方面。农学方面主要研究干旱事件对农作物长势和产量的影响评估,政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次报告指出,亚洲的水稻、玉米和小麦产量在过去几十年呈下降趋势,主要由日益严重的干旱所致,集中表现为气温升高、厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)频率高、无雨日数增多等因素^[71]。在地理学和灾害学领域,更加注重灾害时空分布特征、灾害发生机理及防灾减灾等方面,对时空分布特征进行了较为丰

富的研究工作,在干旱发生成因方面与气象学结合进行了较为深入的探讨,但对防灾减灾具有重要作用的干旱监测研究仍处于薄弱环节^[71-75]。

(2) 在研究方法上,该时段农业干旱监测研究逐渐由传统的单一指标评价向综合性指标评价转变,采用分类回归决策树、线性加权、联合分布函数和贝叶斯网络等数据挖掘手段。例如,Brown等^[59]综合利用植被指数、气象干旱指数及辅助数据提出了植被干旱响应指数,广泛用于美国干旱监测评价;Rhee等^[63]和Zhang等^[64]分别采用降水、植被和地表温度等数据,通过线性加权的方式,探讨了不同组合方式下气象干旱和农业干旱的监测效果;Anderson等^[76]通过三重协同分析(triple collocation analysis, TCA)方法,提出了综合多种土壤湿度数据优点的干旱监测方法;Hao等^[77]通过联合分布函数构建了综合降水和土壤湿度的多变量干旱监测指数。

(3) 在数据获取手段上,传统的地面观测方式存在空间分布不均、无法反映空间分布特征的不足,逐渐转向台站观测和遥感技术相结合的数据获取方式,特别是随着传感器种类的增加和时空分辨率的提高,基于遥感手段的干旱监测逐渐成为研究热点,但仍存在数据序列较短的缺陷。应加强多源遥感数据同化研究,构建长时间序列的地表参数产品,同时还应加强基于遥感手段的干旱监测模型研究,如基于微波遥感的干旱监测模型^[78,79]。

(4) 在数据产品方面,广泛应用的产品包括Dai等^[80]2004年研制的PDSI全球监测产品,Vicente-Serrano等^[81]发布的基于SPEI全球 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的干旱监测产品,以及Mu等^[65]发布的基于遥感的全球陆地干旱监测指数产品。Hao等^[82]发布了全球综合干旱监测和预测系统,该系统包括近实时监测部分和季节预测模块,能够提供全球尺度的气象干旱和农业干旱产品。上述产品为全球干旱监测提供了有效的数据支撑。

1.1.3 干旱监测主要挑战

与气象干旱监测相比,简单的农业干旱监测指标难以表示干旱发生对农作物的影响程度,也不能反映作物受旱机理以作出预警。遥感技术的发展为农业干旱监测提供了新的机遇。2012年前后,一些研究尝试采用植被指数、地表温度和降水数据等进行组合来监测农业干旱^[62,63],取得了不错的成效。特定地域的研究结果是否可以进行时空尺度扩展尚有待论证,且作物对干旱的抵抗力及未能反映滞后效应导致结果无法进行比较,预测趋势也随选取的指标不同而不同^[17],这些问题导致评价结果仍然存在一定的偏差。虽然已有研究采用标准相对湿度指数对干旱进行预警^[38],结果显示该指数在预警提前时间上优于已有指标,但由于作物受旱及减产程度仍无法表征,此类分析依然停留在定性描述和单变量分析阶段,并未摆脱缺乏机理性的困境。

基于风险管理对农业干旱监测的迫切需求和农业干旱监测的发展趋势, 农业干旱监测理论和技术层面均需要有所突破, 具体可能有 5 个方面将成为今后农业干旱监测发展的重点方向(图 1-4)。在理论层面, 需要进一步明晰农业干旱发生机理和受旱过程; 识别农业干旱影响因素及其反馈机制, 实现农业干旱多影响因素整合与集成; 研制具备多时空尺度农业干旱监测与预警能力的模型; 耦合农业干旱宏观格局表征与微观机理模型, 推动农业干旱监测结果由定性描述阶段走向半定量或定量表达阶段。在技术层面, 应加强多源遥感数据的综合应用, 为农业干旱监测提供有力数据支撑。

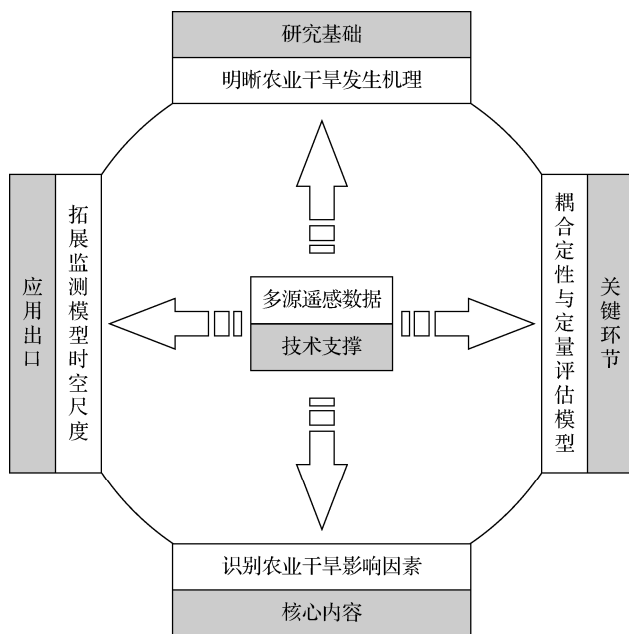


图 1-4 农业干旱监测发展重点方向

1. 明晰农业干旱发生机理

土壤水分在陆地水循环过程中扮演着极为重要的角色, 是综合气候、土壤和植被对水分平衡的响应、水分平衡对植被动态影响的关键变量。农业干旱反映了土壤含水量低于作物需水量的程度, 表现为作物因水分亏缺出现萎蔫直至减产的现象。不同区域、不同作物对土壤水分亏缺的耐受能力各不相同, 使不同作物对降水或土壤水分亏缺的响应时间存在差异, 且这种差异随着生育期不同会表现出不同的特征。同时, 伴随着水分亏缺, 蒸发量将逐渐减少, 进一步导致地表温度升高, 形成正反馈作用。忽视以上过程的降水量模型容易导致农业干旱监测难以从作物水分供需平衡机理层面得到解释。农作物对水分和温度的综合响应过程仍