

农业干旱监测研究进展与展望

刘宪锋^{1,2}, 朱秀芳^{1,2}, 潘耀忠^{1,2}, 李双双^{1,3}, 刘焱序⁴

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 3. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

4. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 本文全面分析了农业干旱的概念内涵及其与其他干旱类型之间的关系, 进而从基于站点监测和基于遥感监测两个方面, 系统梳理了国内外农业干旱监测的现今进展, 对比了不同干旱监测指标的适用范围和局限性; 同时, 通过文献统计和重要文献引用揭示了国内外农业干旱监测研究的发展历程和最新进展, 即农业干旱监测指标从传统的单一气象监测指标逐渐向气象与遥感相结合的综合监测指标转变。最后, 在分析农业干旱监测现有挑战和困境的基础上, 将农业干旱监测未来发展趋向归纳为5点展望, 即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相互作用关系、构建多时空尺度农业干旱监测模型、耦合农业干旱定性表征与定量评估模型以及提高农业干旱监测模型中遥感数据的应用水平。

关键词: 农业干旱; 干旱监测; 研究进展; 研究展望

DOI: 10.11821/dlxb201511012

1 引言

全球气候变化是人类迄今为止面临的最重大也是最为严重的全球环境问题, 并作为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, 其对气候变化响应也更为敏感^[2], 成为陆地生态系统波动的主要风险源, 并已对生态系统和人类社会经济可持续发展造成了巨大而深远的影响^[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], 因而如何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所有自然灾害损失的85%, 其中干旱所造成的损失占气象灾害的50%以上。应指出, 农业关乎国家粮食安全和社会稳定, 同时农业又是受气候和天气制约最大的领域^[5], 因此农业干旱研究成为各国政府和学者共同关注的焦点问题。

面对气候变化引致的一系列灾害风险, 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中

收稿日期: 2015-07-07; 修订日期: 2015-08-16

基金项目: 国家“高分辨率对地观测系统”重大专项资助项目 [Foundation: Major Project of High-resolution Earth Observation System]

作者简介: 刘宪锋(1986-), 男, 黑龙江鹤岗人, 博士, 主要从事资源环境遥感、灾害遥感研究。

E-mail: liuxianfeng7987@163.com

通讯作者: 潘耀忠(1965-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境遥感、统计遥感和灾害遥感研究。E-mail: pyz@bnu.edu.cn

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轻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。目前,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、评估方法以及影响等方面,其中以地球观测组织全球农业监测计划(GEO-GLAM)为代表的国际计划组织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,也对干旱概念、监测方法及发展趋向开展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、气象、水文以及植物生理等众多学科,同时农业系统又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]。在回顾已有综述研究中发现,当前研究多以干旱指标的角度回顾农业干旱研究进展,而目前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。

中国作为农业大国,农业是国民经济的基础,气候变化将直接影响到粮食安全和可持续发展^[16]。因此,当前中国农业干旱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给农业生产造成的不利影响,而系统梳理和总结当前农业干旱监测现状是开展进一步理论和方法研究的重要基础。基于上述认识,本文将从农业干旱的概念内涵、评估指标进行系统梳理,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,提出目前农业干旱监测研究存在的挑战与不足,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。

2 农业干旱与监测

2.1 农业干旱概念

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4种干旱类型,其中气象干旱指由降水和蒸发不平衡所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;社会经济干旱是指在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^[14]。虽然上述4种干旱类型的定义有所区分,但所有干旱类型的本质内涵均是由于降水不足而导致的水分亏缺现象,且不同类型干旱之间存在关联(图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,进而逐渐引发农业干旱和水文干旱。由于农业干旱是土壤水分供给无法满足作物水分需求而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,最终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。水文干旱则表现在河流、水库水资源减少,地下水位下降等。而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。因此可将不同干旱类型简单理解为: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,而社会经济干旱则是气象干旱对社会经济系统的影响^[11, 17]。

2.2 农业干旱评估方法

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,因而通常采用干旱指标对干旱事件进行描述^[4, 10, 18]。目前对干旱情况进行表征的干旱指数已发展

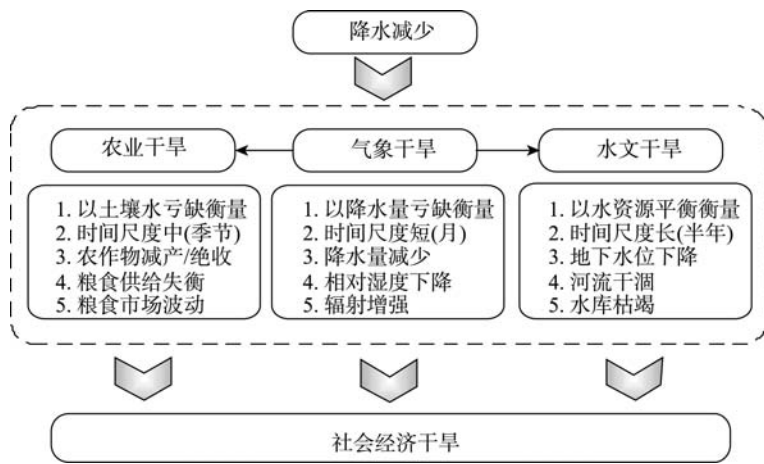


图1 干旱的传递过程及其相互作用
Fig. 1 Drought transfer processes and interactions

至近百种^[19]。根据观测手段的不同，可以分为基于站点观测指标和基于遥感监测指标两大类，前者主要包括标准降水指数（SPI）、帕尔默干旱指数（PDSI）及作物湿度指数（CMI）等；后者则根据地表覆盖情况，分为基于裸露地表的干旱监测指数（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数两大类，其中基于植被覆盖的干旱监测指数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2）。

2.2.1 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提出“对当前气候适宜降水”的概念^[28]，并发展了干旱指数模式（PDSI），成为当时干旱监测指标的里程碑，被广泛应用在美国及全世界各个地区，并作为政府部门和学者们普遍采用的干旱监测工具。在此基础上，Palmer进一步考虑作物需水情况，提出了作物水分指数（CMI），被国际上广泛应用于农业干旱的监测评估^[29]。值得注意的是，在被广泛应用的同时，学者们也逐渐发现了PDSI指数的局限性^[30-31]，因而为克服PDSI的不足，Wells提出自适应PDSI指数，该指数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

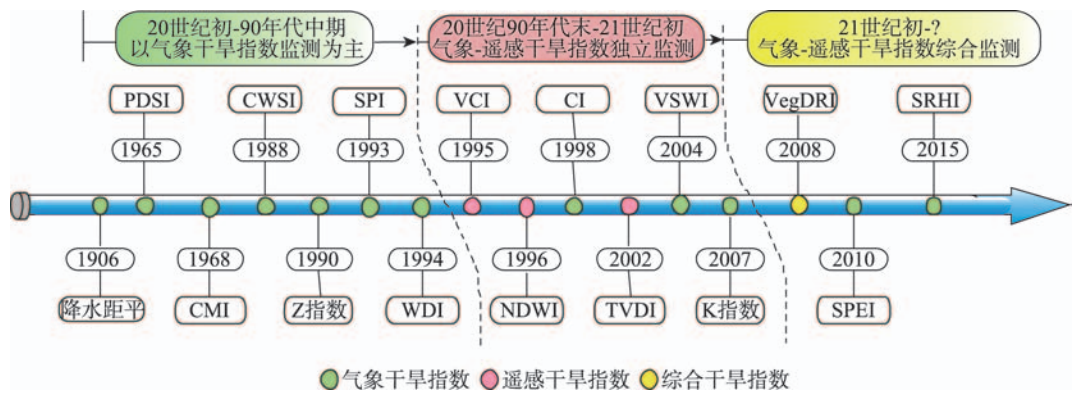


图2 干旱监测指数发展历程简述
Fig. 2 Development process of drought monitor indexes

对不同区域干旱监测的能力^[32],然而PDSI仍未摆脱固定时间尺度的限制。在农业干旱监测方面,Shafer^[33]和Jackson^[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)和作物缺水指数(CWSI),取得了较好的效果。1993年,McKee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量指数(SPI)来替代PDSI^[35]。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,成为目前广泛应用的干旱监测指数之一。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。因此,为客观表征降水和蒸发对干旱的综合作用,Vicente-Serrano等在分析PDSI和SPI优缺点的基础上提出了标准降水蒸散指数(SPEI)^[36],该指数综合考虑SPI的多尺度优点和PDSI考虑蒸散发的优点,成为干旱监测较为理想的工具之一。随后,Vicente-Serrano等又对比了SPI、SPEI和PDSI在全球干旱监测中的表现,发现SPI和SPEI指数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在监测夏季干旱的表现尤为突出^[37]。值得一提的是,已有研究采用相对湿度数据构建了标准化湿度指数(SRHI),该指数能够比SPI更早地检测出干旱事件的起始时间,是开展干旱预警的理想指标^[38]。

在国内,中国学者也一直致力于干旱监测指标的构建工作,并尝试将多种气象指标进行综合,以提升干旱监测能力,其中张强等^[39]将标准化降水指数和相对湿润度指数进行加权求和,提出综合指数(CI),该指数在中国各级气象部门干旱监测业务中应用极广;与此同时,王劲峰等提出了K指数,该指标是用季节降水量相对变率与蒸发量相对变率的比值定义,也较好的适用于监测气象干旱和农业干旱^[40]。通过上述分析可以发现,基于站点观测数据的干旱监测指数经历了漫长的发展,成为当今干旱监测研究和实践应用的主要手段。在数据源上,基于站点监测指数主要基于国家标准气象站观测数据,然而当前国家气象监测站点布设存在空间分布不均和站点迁移导致的观测数据时间一致性差等问题。尽管目前已通过增设自动气象站等方式提高站网观测密度,同时发展数据均一化方法修正非气候因素导致的气候序列异常,但仍存在新增站点时间序列较短、农业生态系统等关键生态区内监测站点缺乏等问题。

2.2.2 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,通过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水分^[41],其中陈怀亮等建立的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^[42],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^[43],开辟了基于多角度遥感数据反演土壤湿度新途径。此外,Rajat Bindlish利用改进的IEM模型,得到了与实际土壤湿度相关性高达0.95的反演结果^[44]。值得一提的是,虽然微波遥感具有不受云干扰,拥有全天时和全天候观测能力,但是当前微波遥感通常只能反演土壤表层(2~5 cm)的湿度,而作物根系通常都在10~20 cm以下,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]。然而,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。因此,尽管当前微波遥感应用于农业干旱监测具有一定的局限性,今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与空气温度的差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等在能量平衡双层模型的基

基础上建立了水分亏缺指数(WDI)^[47];而Gao等则提出归一化差值水分指数(NDWI)^[48]。为消除NDVI空间变异,减少地理和生态系统变量影响,Kogan提出了条件植被指数(VCI)用于干旱监测研究^[49];进而王鹏新等^[50]在2003年提出了条件植被温度指数(VTCI)。在此基础上,Kogan将TCI和VCI进行线性组合提出了植被健康指数(VHI)^[51-52],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提出植被供水指数(VSWI),该指数是一个较为简单的植被指数—温度作物旱情综合指数^[54]。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提出了温度植被干旱指数(TVDI)来估算土壤表层水分状况^[56],该指数是通过反演土壤湿度来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]。然而研究表明,当水分是植被生长的限制因素时,LST和NDVI呈负相关;而当能量成为植被生长的限制因素时,LST和NDVI却呈正相关,且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表现欠佳。

2.2.3 综合气象遥感数据的干旱监测 随着科学技术的发展,干旱监测指数正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)。Hao等对近年来发展的综合干旱监测指数进行了系统的梳理,并指出美国干旱监测(USDM)模型是综合干旱监测模型中较为成功的案例^[58]。然而受到分辨率的限制,USDM在区域尺度上的监测能力仍显不足。此外,Brown等综合利用气象干旱指数(SPI、PDSI)、植被指数以及地形等信息,通过分类回归树的方式,提出了植被干旱响应指数(VegDRI)^[59],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等利用该方法建立了适用于中国区域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^[60-61]。同时,杜等利用TRMM降水数据、地表温度数据以及植被指数数据,通过该方法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^[62]。利用线性组合方式,Rhee等综合利用LST、NDVI和TRMM数据,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^[63];而Zhang等则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数据构建了适用于气象干旱的监测指数^[64]。另外,Mu等综合利用地表蒸散数据和植被指数数据,构建了基于遥感的实时干旱监测指数(DSI),该指数有效检测出发生在2003年的欧洲干旱以及2005和2010年的亚马逊干旱,并与站点尺度的PDSI具有很好的相关性^[65]。在系统对比不同干旱监测指标的基础上,Hao等提出多变量干旱监测指标(MSDI),该指标综合了降水和土壤水分等信息,被验证为有效的干旱监测指标^[66]。在此基础上,AghaKouchak通过引入集合径流预报的方式对MSDI进行改进,并用于非洲东部的干旱监测与预警研究^[67]。在多类型干旱监测方面,Deepthi等提出多变量干旱指数(MDI),该指数综合考虑降水、径流、蒸发以及土壤湿度等要素,能够同时用于气象干旱、农业干旱和水文干旱的监测^[68]。另外,近年来也有学者尝试通过将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,近年来学者们针对综合干旱监测指标的建立进行了卓有成效的探索工作,并取得了一定的成效。值得注意的是,虽然近年来国内外学者尝试建立了多种综合多要素的干旱监测指数,然而目前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,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;而联合分布函数虽能得出概率分布,便于进行风险分析,但其仅考虑了数据的统计特征,并未对其物理过程进行有效描述。

表 1 国内外主要气象和农业干旱监测指数

Tab. 1 Main meteorological and agricultural drought monitoring indexes in the world

指标名称	提出时间	主要作者	指标含义
降水距平	1906	Henry ^[20]	任何 21 天或更长天数期间发生的降水等于或少于此间正常值的 30%。
Palmer 干旱指数 (PDSI)	1965	Palmer ^[28]	表征一段时间内, 某区域实际水分供应持续地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	Palmer ^[29]	该指数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。
作物缺水指数 (CWSI)	1988	Jackson ^[34]	在水分能量平衡原理基础上, 综合考虑土壤水分和农田蒸散的关系, 来表征作物水分亏缺状况。
Z 指数	1990	幺枕生 ^[70]	该指数假设降水量整体上服从 Person III 型分布, 通过对降水量进行正态化处理来确定干旱指数。
标准降水指数 (SPI)	1993	McKee ^[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	Moran ^[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而建立的干旱监测指标。
植被条件指数 (VCI)	1995	Kogan ^[71]	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	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, 能及时地相应。
CI 指数	1998	张强 ^[39]	该指数综合利用标准降水指数和相对湿度指数, 适合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	Sandholt ^[56]	指由植被覆盖度和地表温度所确定的干边和湿边方程, 来表征作物水分胁迫状况的指标。
植被供水指数 (VSWI)	2004	Haboudane	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	Wells ^[32]	该指数是 PDSI 的修正版, 能够根据不同区域的气候特点进行选取模型校正参数。
K 指数	2007	王劲松 ^[40]	该指数用季节降水量的相对变率与蒸发量的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	Brown ^[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。
标准降水蒸散指数 (SPEI)	2010	Vicente-Serrano ^[36]	表征某时段水分亏缺出现的概率多少的指标, 适合月以上尺度相对当地气候状况的干旱监测。

2.3 农业干旱监测研究文献回顾

为了更好地诠释农业干旱监测研究的发展阶段, 在 ISI Web of Science 中以“agricultural drought” or “drought monitor”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, 近 20 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 (图 3)。同时, 在 CNKI 中同样以“农业干旱”或“干旱监测”为主题进行文献检索, 发现近年来发文数量和引文数量也均呈现大幅度上升趋势。可见, 近年来农业干旱监测研究受到了国内外学者的广泛关注, 并以 2000 年之后增长尤为显著。

由于干旱涉及学科广泛, 包括地理学者、生态学者、气候学者以及灾害领域学者在内的诸多学科均对干旱进行了系统性的研究。为探究不同学科领域干旱研究情况, 在 ISI Web of Science 中以“Drought”为主题进行检索, 共搜索到 52376 篇文献 (检索时段为 1990-2014, 检索时间为 2015 年 6 月 26 日)。通过文献分析, 我们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、农学和环境生态学, 分别占全部文献数量的 25.97%、22.68% 和 20.48%; 排在其后的水资源和气象学分别占

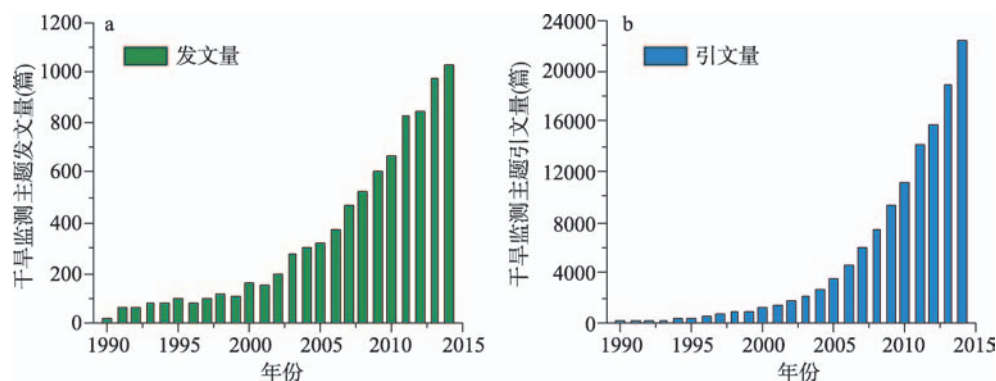


图3 1990-2014年农业干旱监测发文量与引文数量统计

Fig. 3 Statistics of issued and cited literatures in agricultural drought monitor during 1990-2014

7.98% 和 7.72% ; 而地理学仅占 6.82%。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, 并受到了国内外学者的广泛关注 (图4)。

通过文献回顾和重点文献引用, 发现目前农业干旱监测研究呈现以下特点: ① 在学科分布上, 目前以“干旱”为主题的文章研究重心仍集

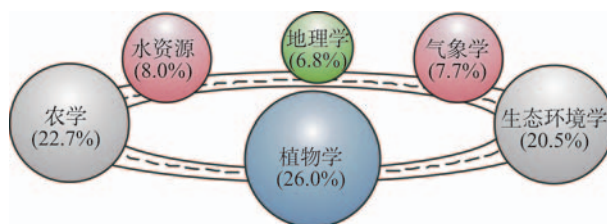


图4 不同学科中关于干旱文献发文数量统计

Fig. 4 Statistics of issued literature relevant to drought in different subjects

中在干旱对生态系统的影响, 包括对植被长势的影响、植被生产力变化以及碳储存波动等方面; 其次是农学方面, 主要研究干旱事件对农作物长势以及产量的影响评估上, 其中IPCC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, 并集中表现为气温升高、ENSO频率高, 无雨日数增多等因素^[72]。而在地理学和灾害学领域, 更加注重灾害时空分布特征、灾害发生机理以及防灾减灾等方面, 目前关于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也与气象学结合进行了较为深入的探讨, 然而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^[73-76]。② 在研究方法上, 当前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, 并采用分类回归树、线性加权、联合分布函数以及贝叶斯网络等数据挖掘手段, 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; 而Rhee等^[63]和Zhang等^[64]则分别采用降水、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等通过Triple Collocation Analysis方法, 提出综合多种土壤湿度数据优点的干旱监测方法^[77]; Hao等则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^[78]。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, 目前逐渐转向台站观测和遥感技术的相结合的数据获取方式, 特别是随着传感器种类的增加以及时空分辨率的提高, 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, 因此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^[79-80]。④ 在数据产品方面, 目前广泛应用的产品包括Dai等人在2004年研制的PDSI指数全球监测产品^[81], Vicente-Serrano等基于SPEI发布

的全球 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 分辨率的干旱监测产品^[82],以及Mu等发布的基于遥感的全球陆地干旱监测指数产品^[65]。最近,Hao等公布了全球综合干旱监测和预测系统,该系统包括了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^[83]。上述产品为全球干旱监测提供了有效的数据支撑。

3 农业干旱监测研究的挑战与展望

与气象干旱监测相比,简单的农业干旱监测指数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做出预警。近年来,遥感技术的发展为农业干旱监测提供了新的机遇。当前,一些研究尝试采用植被指数、地表温度以及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。然而特定地域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以及滞后效应未能反映导致结果无法进行比较,预测趋势也随指数选取的不同而不同^[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],结果显示该指标在预警提前时间上优于现有指标,然而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。

基于现阶段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个方面将成为农业干旱监测今后发展的重点方向(图5)。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模型;以及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。

3.1 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、土壤及植被对水分平衡的响应和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而出现萎蔫直至减产的现象。然而,不同区域不同作物对土壤水分亏缺的耐受能力各不相同,导致不同作物对降水或土壤水分亏缺的响应时间存在差异,且这种差异随着不同生育期阶段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。目前,关于农作物对水分和温度的综合响应过程仍不明确,需要加强农作物受旱机

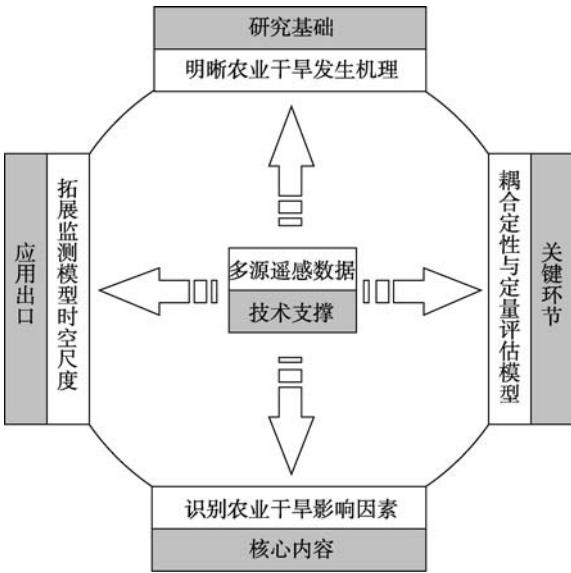


图5 农业干旱监测未来重点研究方向
Fig. 5 Key research directions of agricultural drought monitor in future

理研究,并发挥农作物对水分亏缺的时滞性在干旱预警中的重要作用。

另外,农学参数是描述农作物生长状况的基本参量,是开展农业干旱机理研究的重要方面。作物反射光谱曲线受农学参数影响显著,其中与叶绿素含量密切相关的红边是最重要的参数之一。当作物受到水分胁迫情况下,相应的农学参数会发生改变,进而表现为红边的位移。因此,利用高光谱遥感研究农作物光谱信息的变化特征为研究农业干旱受旱机理提供了新的视角。值得一提的是,当前监测模型难以确定农业干旱发生和结束时间,而农业干旱机理研究是最有可能成为解决上述难题的关键环节。通过机理认识及时捕捉作物干旱起始时间,并构建基于生理—生态机理特征的农业干旱遥感监测模型,可以有助于及时采取应对措施,减少灾害损失。

3.2 识别农业干旱影响因素

农业干旱是由大气降水异常减少所引起的,并同时受地表温度、蒸散发、土壤性质以及作物自身生理生态特性等综合因素的影响。在未来应着力研究与农业干旱密切相关的各影响因素,厘清农业干旱与各影响因素的相互作用机制,从而筛选出能够有效表征农业干旱变化特征的关键指示因子,建立具有多地理要素特征的农业干旱监测模型。在技术层面上,空间卫星遥感技术能够及时、准确地获得大范围的地表时空信息,在农业干旱监测中有着极其广泛的应用。遥感技术不仅提供了地表环境变量信息,还提供了农作物的长势信息,如植被指数、地表温度、降水数据,是农业干旱监测的理想数据。以遥感图像为基础数据源,结合区域的土壤特征、地形特征,可以使农业干旱监测模型中同时具有环境与作物长势信息,实现农业干旱监测模型的多要素整合与集成。

当前,一些国家或地区已经具备了国家或区域尺度的农业干旱监测系统,且基于遥感监测地表参量的综合干旱监测模型初见端倪^[59]。但是农业干旱监测与地面气象观测数据的结合仍未得到很好的解决。应指出,虽然遥感具有大范围、高频次观测的特点,成为气象观测数据的有效补充,但仍不能完全替代地面气象观测数据。虽然地面观测数据存在监测站点稀少且分布不均的问题,但其具有时间序列长、观测精度高等特点,依然是遥感数据进行地面验证的最有力的数据源。因此,建立遥感监测模型与气象观测模型之间的纽带,综合利用二者的优势,成为未来农业干旱多因素综合与集成的重要发展方向。为实现这个目标,必要的技术与方法支持需要不断完善,如建立完备的地面观测网络、研究完善的耦合方案以及建立统一的农业干旱影响因素框架等。

3.3 拓展农业干旱监测模型时空尺度

尺度这一概念在许多学科研究中被广泛提及,主要包括时间尺度和空间尺度两大类。就农业干旱监测而言,不同时空尺度的监测结果往往会存在本质的区别,如不同月份监测结果和不同年份监测结果存在差异,或是在不同空间尺度监测中由于输入数据的不同导致监测结果存在差异等。当前已有学者尝试建立不同时空尺度上的农业干旱监测模型,并在区域尺度上得到了较好的验证结果^[63, 76];然而多数研究成果局限于特定区域或特定时间尺度上,限制了模型在时空尺度上的进一步扩展。因此,如何将不同尺度的现有农业干旱监测模型进行综合与集成,以及如何开发新的多尺度农业干旱监测模型将成为未来搭建多时空尺度农业干旱监测平台的重要环节。

就全球而言,农业干旱监测在全球范围内提供了农作物长势及产量信息,为全球农作物产量预测提供参考。然而不同国家及区域因发展阶段、技术水平及防灾能力等方面存在差异,对农业干旱监测信息的需求往往存在差异。因此,搭建具有多时空尺度监测能力的农业干旱监测平台不仅能够满足不同国家对农业干旱监测的需求,同时也是全球各国及区域减缓干旱影响、提高应对能力的重要途径。具体而言,①在时间尺度上,监测模型在常规条件下应具有旬、月、季节、年际以及年代际监测预警能力;而在应急条

件下，应具备实时提供农业干旱监测预警信息的能力；② 在空间尺度上，应满足全球、洲际、国家及区域尺度对农业干旱监测的需求。多时空尺度监测平台如何从构想走向实践是今后农业干旱监测研究中亟待解决的关键问题。

3.4 耦合农业干旱定性与定量评估模型

现有农业干旱监测结果多以定性描述为主，缺乏定量监测与预警评估结果，阻碍了监测结果与实际损失评估过程的衔接。虽然农业干旱监测在技术手段上得到长足进步，然而关于对监测结果定量评估的方法层面却缺乏应有的关注。随着数值模拟技术的快速发展以及对农作物受灾机理理论认识的进一步深入，作物生长模型在农业气象灾害定量评估方面已经取得了较大进展，被认为是最有可能推动农业干旱监测从定性描述走向定量评估取得突破的核心环节。作物生长模型在农业气象灾害评估中的优势在于机理性强，可以较好地反映出作物生育进程、产量与各生育阶段温度、降水量以及土壤水分动态的关系。因此，未来在构建农业干旱监测模型过程中应考虑如何将农作物长势监测机理模型进行耦合研究。

在技术层面上，通过尺度推绎算法和尺度转换技术将空间点上得出的农作物脆弱性曲线扩展到空间上从而获得脆弱性曲面的方式，为作物生长模型与农业干旱宏观监测模型耦合提供了关联途径，将会成为未来农业干旱监测领域的核心内容和关键指向。在充分利用空间信息，特别是遥感技术的优势的基础上，加强作物生理、形态指标与土壤湿度指标的整合，实现农业干旱监测宏观格局表征与微观机理过程模型的耦合，建立具有明确物理机制并能够实现多要素、多尺度、多过程的农业干旱遥感监测平台，是达成最大程度减轻农业灾害损失最终目标的理想途径。

3.5 提高遥感数据应用水平

遥感数据是开展农业干旱监测的重要数据源。随着不同用途卫星的相继发射，海量的遥感数据为学者研究地表过程提供了丰富的数据支撑。与地面观测数据相比，遥感数据当前面临的最大挑战是时间序列较短，难以在长时间尺度上探究干旱的时间变化特征。同时，不同来源遥感数据时空尺度的不一致限制了其综合应用，虽然目前已发展多种尺度转换技术进行数据同化，然而仍未完全实现多源遥感数据的综合应用，尤其是微波遥感在研究干旱对地表植被影响中的应用更为缺乏^[84]，今后应挖掘更多可表征干旱特征的地表参量，提高遥感监测干旱的水平^[85]。另外，遥感数据的不确定性问题也是阻碍其在农业干旱监测中进一步应用的关键问题，如传感器更换所造成数据一致性差等问题。因此，发展数据同化技术、提高多源遥感数据综合利用水平、定量评价遥感数据的不确定性等问题是今后农业干旱监测研究中的一个发展方向（图6）。最后，随着全球土壤湿度监测卫星（SMAP）等一系列新兴卫星的相继发射，为农业干旱监测提供了新

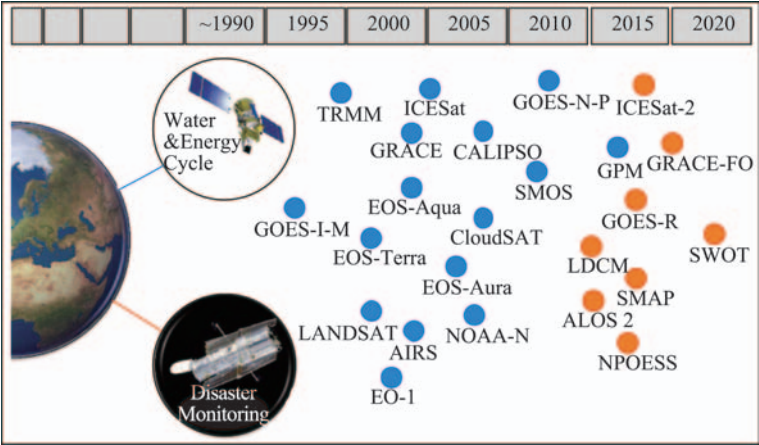


图6 当前和未来干旱监测卫星计划(引自文献[8])
Fig. 6 Current and future satellite missions relevant to drought monitoring

的发展机遇, 而遥感数据在农业干旱监测中的作用将得到进一步提升。

参考文献(References)

- [1] Ye Duzheng. Prediction of Global Change in China. Beijing: China Meteorological Press, 1992. [叶笃正. 中国的全球变化预测研究. 北京: 气象出版社, 1992.]
- [2] Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. The spatiotemporal changes of cold surge in Inner Mongolia during recent 53 years. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 1013-1024. [刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 近 53 年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素. *地理学报*, 2014, 69(7): 1013-1024.]
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Dai A. Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, 2(1): 45-65.
- [5] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2012, 3(1): 52-58.
- [6] Wu Shaohong, Zhao Yan, Tang QiuHong, et al. Land surface pattern study under the framework of Future Earth. *Progress in Geography*, 2015, 34(1): 10-17. [吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 等. 面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 10-17.]
- [7] Fan Jinlong, Zhang Mingwei. Global drought monitoring initiative with satellite data. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2014(5): 54-57. [范锦龙, 张明伟. 全球干旱卫星监测计划. *气象科技进展*, 2014(5): 54-57.]
- [8] AghaKouchak A, Farahmand A, Melton F S, et al. Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53: 452-480.
- [9] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [10] Heim R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1149.
- [11] Zhang Qiang, Han Lanying, Zhang Liyang, et al. Analysis on the character and management strategy of drought disaster and risk under the climatic warming. *Advances in Earth Sciences*, 2014(1): 80-91. [张强, 韩兰英, 张立阳, 等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. *地球科学进展*, 2014(1): 80-91.]
- [12] Zhang Qiang, Zhang Liang, Cui Xiancheng, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring. *Advances in Earth Sciences*, 2011(7): 763-778. [张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. *地球科学进展*, 2011(7): 763-778.]
- [13] Wang Chunyi, Wang Shili, Huo Zhiguo, et al. Progress in research of agro-meteorological disasters in China in recent decade. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005(5): 659-671. [王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展. *气象学报*, 2005(5): 659-671.]
- [14] Chen Huailiang. Agricultural drought monitoring, forecasting and loss assessment in China. *Technology Review*, 2009 (11): 82-92. [陈怀亮. 中国农业干旱的监测、预警和灾损评估. *科技导报*, 2009(11): 82-92.]
- [15] Li Hailiang, Dai Shengpei. Status and prospects of agricultural drought monitoring. *China Rural Technology*, 2012(5): 46-48. [李海亮, 戴声佩. 农业干旱监测研究现状与展望. *中国农村科技*, 2012(5): 46-48.]
- [16] Zhao Junfang. Advances in research of impacts of climate change on agriculture. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010(2): 200-205. [赵俊芳. 气候变化对农业影响研究综述. *中国农业气象*, 2010(2): 200-205.]
- [17] Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [18] *Climate Change 2007: The Physical Science Basis/Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat*, 2007.
- [19] Heim Jr R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1149-1165.
- [20] Henry A J. The Climatology of the United States//Washington D C: Weather Bureau Bulletin Q, 1906: 51-58.
- [21] Munger T T. Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Monthly Weather Review*, 1916, 44 (11): 642-643.
- [22] Kincer J B. The seasonal distribution of precipitation and its frequency and intensity in the United States. *Monthly Weather Review*, 1919, 47(9): 624-631.
- [23] Marcovitch S. The measure of droughtiness. *Monthly Weather Review*, 1930, 58(3): 113-113.
- [24] McQuigg J. A simple index of drought conditions. *Weatherwise*, 1954, 7(3): 64-67.
- [25] McGuire J K. The 1957 drought in the eastern United States. *Monthly Weather Review*, 1957, 85(9): 305-314.

- [26] Van Rooy M P. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*, 1965, 14: 43-48.
- [27] Gibbs W J. Rainfall deciles as drought indicators. 1967.
- [28] Palmer W C. Meteorological drought//US Department of Commerce, Weather Bureau Washington, DC, USA, 1965.
- [29] Palmer W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index, 1968.
- [30] Heddinghaus T R, Sabol P. A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here//Proceedings of the seventh conference on applied climatology. Bos-ton, MA: American Meteorological Society, 1991, 246.
- [31] Alley W M. The Palmer drought severity index. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(7): 1100-1109.
- [32] Wells N, Goddard S. A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2335-2351.
- [33] Shafer B A, Dezman L E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Proceedings of the Western Snow Conference*, 1982, 164-175.
- [34] Jackson R D, Kustas W P. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 1988, 9(4): 309-317.
- [35] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology: American Meteorological Society Boston, MA*, 1993, 179-183.
- [36] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [37] Vicente-Serrano S M, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 2012, 16(10): 1-27.
- [38] Farahmand A, AghaKouchak A. A vantage from space can detect earlier drought onset. *Scientific Reports*, 2015, 5.
- [39] Zhang Qiang. Comparison of three drought indices to determine and the new index. *Meteorological Science and Technology*, 1998(2): 49-53. [张强. 三种干旱指标的比较和新指标的确定. *气象科技*, 1998(2): 49-53.]
- [40] Wang Jinsong, Guo Jiangyong, Qing Jizu. Application of a kind of K Drought Index in the Spring Drought Analysis in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 709-171. [王劲松, 郭江勇, 倾继祖. 一种K干旱指数在西北地区春旱分析中的应用. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 709-717.]
- [41] Kumar S V, Peters-Lidard C D, Mocko D, et al. Assimilation of remotely sensed soil moisture and snow depth retrievals for drought estimation. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(6): 2446-2469.
- [42] Chen Huailiang, Feng Dingyuan. Estimate the deep soil moisture methods and models by using remote sensing data. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10(2): 232-237. [陈怀亮, 冯定原. 用遥感资料估算深层土壤水分的方法和模型. *应用气象学报*, 1999, 10(2): 232-237.]
- [43] Zhang Renhua, Sun Xiaomin. Regional differentiation of quantitative estimate crop transpiration and soil water use efficiency by using remote sensing. *Science in China: Series D*, 2001, 31(11): 959-968. [张仁华, 孙晓敏. 定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异. *中国科学: D辑*, 2001, 31(11): 959-968.]
- [44] Bindlish R, Jackson T J, Gasiewski A J, et al. Soil moisture mapping and AMSR-E validation using the PSR in SMEX02. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(2): 127-139.
- [45] Chen Shulin, Liu Yuanbo. Satellite retrieved of soil moisture: An overview. *Advances in Earth Science*, 2012(11): 1192-1203. [陈书林, 刘元波. 卫星遥感反演土壤水分研究综述. *地球科学进展*, 2012(11): 1192-1203.]
- [46] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24: 45-55.
- [47] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote sensing of environment*, 1994, 49(3): 246-263.
- [48] Gao B C. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [49] Kogan F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(5): 655-668.
- [50] Wang Pengxin, Gong Jianya, Li Xiaowen, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 527-533. [王鹏新, 龚健雅, 李小文, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527-533.]
- [51] Kogan F, Adamenko T, Guo W. Global and regional drought dynamics in the climate warming era. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(4): 364-372.
- [52] Boken V K, Hoogenboom G, Kogan F N, et al. Potential of using NOAA-AVHRR data for estimating irrigated area to help solve an inter-state water dispute. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2277-2286.
- [53] Mu Lingli, Wu Bingfang, Yan Nana, et al. Validation of Agricultural Drought Indices and Their Uncertainty Analysis.

- Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2): 119-122. [牟伶俐, 吴炳方, 闫娜娜, 等. 农业旱情遥感指数验证与不确定性分析. 水土保持通报, 2007, 27(2): 119-122.]
- [54] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3): 337-352.
- [55] Liu Li, Zhou Ying. Drought monitoring based on vegetation supply water index in Guizhou Province. *Guizhou Meteorology*, 1998, 22(6): 17-21. [刘丽, 周颖. 用遥感植被供水指数监测贵州干旱. 贵州气象, 1998, 22(6): 17-21.]
- [56] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [57] Karnieli A, Agam N, Pinker R T, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of Climate*, 2010, 23(3): 618-633.
- [58] Hao Z. Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 668-678.
- [59] Brown J F, Wardlaw B D, Tadesse T, et al. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. *GIScience & Remote Sensing*, 2008, 45(1): 16-46.
- [60] Wu J. Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 397-410.
- [61] Wu J, Zhou L, Mo X, et al. Drought monitoring and analysis in China based on the Integrated Surface Drought Index (ISDI). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 41: 23-33.
- [62] Du Lingtong. Drought monitoring model based on multi-source spatial information and its application. Nanjing: Nanjing University, 2013. [杜灵通. 基于多源空间信息的干旱监测模型构建及其应用研究. 南京: 南京大学, 2013.]
- [63] Rhee J, Im J, Carbone G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2875-2887.
- [64] Zhang A, Jia G. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 12-23.
- [65] Mu Q, Zhao M, Kimball J S, et al. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(1): 83-98.
- [66] Hao Z, AghaKouchak A. A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(1): 89-101.
- [67] AghaKouchak A. A multivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010-2011 East Africa drought. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 127-135.
- [68] Rajsekhar D, Singh V P, Mishra A K. Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 164-182.
- [69] Shah R D, Mishra V. Development of an experimental near-real-time drought monitor for India. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 327-345.
- [70] Me Zhensheng, Ding Yuguo. *Climate Statistics*, 1963. Beijing: Science Press, 1990. [么枕生, 丁裕国. 气候统计, 1963年. 北京: 科学出版社, 1990.]
- [71] Liu W T, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(14): 2761-2782.
- [72] Change I P O C. Climate change 2007: The physical science basis. *Agenda*, 2007, 6(7): 333.
- [73] Mishra A K, Singh V P, Desai V R. Drought characterization: A probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009, 23(1): 41-55.
- [74] Mishra A K, Desai V R. Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India. *International Journal of River Basin Management*, 2005, 3(1): 31-41.
- [75] Mishra A K, Singh V P. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2009, 114(D6).
- [76] Du L, Tian Q, Yu T, et al. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 245-253.
- [77] Anderson W B, Zaitchik B F, Hain C R, et al. Towards an integrated soil moisture drought monitor for East Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2893-2913.
- [78] Hao Z, AghaKouchak A. Multivariate standardized drought index. *Advances in Water Resources*, 2013, 57: 12-18.
- [79] Rott H, Yueh S H, Cline D W, et al. Cold regions hydrology high-resolution observatory for snow and cold land processes. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 752-765.

- [80] Kongoli C, Romanov P, Ferraro R. Snow cover monitoring from remote sensing satellites//Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches. CRC Press, 2012: 359-386.
- [81] Dai A, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(6): 1117-1130.
- [82] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A new global 0.5 gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [83] Hao Z, AghaKouchak A. Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific Data*, 2014.
- [84] Andela N, Liu Y Y, van Dijk A, et al. Global changes in dryland vegetation dynamics (1988-2008) assessed by satellite remote sensing. *Biogeosciences*, 2013, 10(10): 6657.
- [85] Rodell M. Satellite gravimetry applied to drought monitoring//Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches/CRC Press, 2012: 261-277.

Agricultural drought monitor: Progress, challenges and prospect

LIU Xianfeng^{1,2}, ZHU Xiufang^{1,2}, PAN Yaozhong^{1,2}, LI Shuangshuang^{1,3}, LIU Yanxu⁴

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In this paper, we compared the concept of agricultural drought and its relationship with other types of drought, and discussed research progress in agricultural drought monitoring from the site-based and remote sensing aspects, respectively. The applicability and limitations of different drought monitoring indexes were also compared. Results showed that the site-based drought index has experienced a long development history and become the main way of monitoring drought. Meanwhile, the remote sensing based drought index was mainly established from two aspects, soil water and crop water, and has achieved good results in agricultural drought monitoring. In addition, through mathematical statistics and document comparison, the development and latest progress of agricultural drought monitoring has been revealed, suggesting a transformation of agricultural drought monitoring from traditional single meteorological monitoring indicators to integrated meteorology and remote sensing monitoring indicators, mainly reflected in the introduction of multisource data and the innovation of research methods. The applicability and limitations of comprehensive drought monitoring indexes established in recent years were also discussed. Finally, through the analysis of current challenges in agricultural drought monitoring, future research prospects in agricultural drought monitoring are proposed, including further investigating the mechanism of agricultural drought, identifying the influences of agricultural drought, developing a multi spatiotemporal scale agricultural drought monitoring model, coupling the qualitative and quantitative agricultural drought evaluation models, and improving the application level of remote sensing data in agricultural drought monitoring.

Keywords: agricultural drought; drought monitor; research progress; research prospect