

郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 620-630.  
doi:10.11898/1001-7313.20160510

# 农业气象灾害监测预测技术研究进展

郭建平<sup>1)2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 南京 210044)

## 摘 要

农业气象灾害的监测预测是灾害评估和防控的基础和前提,因此,农业气象灾害的监测预测研究长期以来一直是农业气象研究工作的重点领域。该文系统回顾了我国农业气象灾害的指标、监测技术和预测预警技术等方面的相关进展和成果,提出当前存在的主要问题:农业气象灾害的基础性研究仍然十分薄弱,农业气象灾害指标对致灾因子的概括性尚不足,农业气象灾害监测的精细化程度有待进一步提高,临近预警技术缺乏,气候变化背景下农业气象灾害的新规律揭示不够。该文同时指出未来应加强农业气象灾害综合指标的研究,强化农业气象灾害的预测预报研究,构建农业气象灾害实时预警技术体系,构建农业气象灾害立体、动态监测体系,关注气候变化背景下农业气象灾害风险变化评估研究,加强气象或气候预测信息在农业气象灾害预测中的应用技术研究。

**关键词:** 农业气象灾害; 监测预测; 研究进展

## 引 言

农业气象灾害是指农业生产过程中导致作物显著减产的不利天气或气候异常的总称<sup>[1]</sup>,是影响农作物产量稳定的主要自然灾害之一。受季风气候的影响,我国是世界上农业气象灾害最为严重的国家之一,灾害种类多、分布地域广、发生频率高、造成损失重。其中 70% 的自然灾害为气象灾害,同时,由于我国农业生产基础设施薄弱,抗灾能力差,靠天吃饭的局面没有根本改变,致使我国每年因各种农业气象灾害造成的农作物受灾面积达  $50 \times 10^4 \text{ km}^2$  以上、影响人口达 4 亿人次、经济损失达 2000 多亿元<sup>[2]</sup>。在农业生产实际中,影响较为严重的有干旱、低温冷害、高温热害、寒害、霜冻、冰雹、暴雨、台风、大风等,对农业生产造成了极为不利的影 响。随着气候变化的日趋明显,农业气象灾害的发生频率增加、强度增强、危害加重,对国家粮食安全和农业可

持续发展已构成严重威胁。农业气象灾害的监测预测是灾害评估和防控的基础和前提,只有做到灾害的准确监测和及时预测,才有可能对农业气象灾害进行有效防控,从而使灾害的损失降到最低程度。因此,农业气象灾害的监测预测研究长期以来一直是农业气象研究工作的重点领域,也受到国家各个层面的高度关注。“九五”和“十五”期间,国家科技部分别设立了“农业气象灾害防御技术研究”和“农业重大病虫害和农业气象灾害的预警及控制技术研究”的国家科技攻关项目,在“十一五”和“十二五”国家科技支撑计划项目中,又分别设置了“农业重大气象灾害监测预警与调控技术研究”<sup>[3]</sup>、“农林气象灾害监测预警与防控关键技术研究”<sup>[4]</sup>和“重大突发性自然灾害预警与防控技术研究与应用”等重大项目。在这些国家重大项目中,农业气象灾害的监测预测技术研究始终是重点任务之一,各项目的研究成果也在各级政府防灾减灾及救灾决策中起到了积极的作用。

2016-05-11 收到, 2016-07-04 收到再改稿。

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-2, GYHY201506001-3)

\* email: gjp@camsma.cn

## 1 农业气象灾害指标研究

农业气象灾害指标是灾害监测和预测的基础。目前对各类农业气象灾害的指标均有一定的研究,但在农业干旱、低温冷害和寒害等灾害方面的指标相对比较完善。

### 1.1 干旱指标

干旱指标是表示干旱程度的特征量,是旱情描述的数值表达,在干旱分析中起着度量、对比和综合重要作用,是干旱监测的核心与基础。干旱本身成因比较复杂,受地理位置、下垫面情况以及人类活动等众多因素影响,因此,很难找到一种普遍适用的干旱指标,目前各种在用的干旱指标至少有 50 多种。应用比较广泛的干旱指标主要包括:标准化降水指数(SPI)、降水距平百分率、降水 Z 指数、相对湿润度指数、Palmer 指数、CI 指数以及 K 指数等。

标准化降水指数(SPI)是单纯依赖于降水量的干旱指数<sup>[5]</sup>,SPI 作为 WMO 重点推荐的干旱指标,在世界各地广泛应用。该指数是通过概率密度函数求解累积概率,再将累积概率标准化,SPI 可反映不同时间尺度的干旱。研究表明,SPI 在我国西北地区具有较好的适用性<sup>[6-8]</sup>。但也有研究指出,该指数因未考虑气温、蒸发等影响干旱发生的主导因素,从而在研究干旱区域的干旱时,存在无法识别降水与气候平均状况时的干旱<sup>[9-12]</sup>的情况。也有学者指出该指数仅考虑了当时的降水量,而忽略了前期干旱持续时间对后期干旱程度的影响,因而在实际应用中还存在局限性<sup>[13]</sup>。

降水距平百分率反映了某一时段降水与同期平均状态的偏离程度,物理意义明确,计算简单,所需资料易获取,但该指标对干旱响应慢,不能很好地反映干旱形成机理<sup>[14]</sup>。

Palmer 干旱指数(PDSI)是基于水分平衡原理提出的干旱指数,该指数综合考虑了前期降水、水分供给和水分需求等要素。自 PDSI 建立以来,就被广泛应用于各个领域以评估和监测较长时期的干旱<sup>[15-16]</sup>。范嘉泉等<sup>[17]</sup>介绍了 PDSI 的原理、优点及计算方法。通过对 PDSI 在甘肃省平凉地区的业务适用性分析发现该指数对降水的反映并不敏感<sup>[18]</sup>,但在西北地区对轻旱的反映比较敏感<sup>[19]</sup>,而在蒸发较大的地区描述干旱强度更准确<sup>[20]</sup>。PDSI 对干旱区的干旱监测效果好,对高原地区和半干旱、半湿润

地区的干旱监测有一定的局限<sup>[21]</sup>。黄妙芬<sup>[22]</sup>应用 PDSI 的基本原理,建立了黄土高原西北部的 PDSI。

Kite<sup>[23]</sup>认为某一时段内的降水量服从泊松 III 分布,对降水量进行 Z 坐标转换,从而得到了 Z 指数。通过对 Z 指数的旱涝等级标准进行重新确定,修正后的 Z 指数更适合于中国西北地区单站旱涝时段的划分<sup>[24-25]</sup>。

相对湿润度指数(MI)是降水量与可能蒸散量的相对比值,该指数反映了水分的实际供应量与最大需要量间的平衡关系,是一个具有时空变化意义的干旱评价指标。在此基础上,建立了一种以标准化降水指数(SPI)、相对湿润度指数(MI)为基础的干旱综合指数(CI),该指数考虑因子较全面(同时考虑了降水和蒸发能力因子),综合考虑了前期的天气状况,具有较好的时空比较性,与单纯利用降水量的干旱指数相比具有较大的优越性,蒸发能力的计算也比较简便<sup>[26]</sup>。对 CI 在我国不同地区的适用性分析发现,该指数能有效监测干旱起止及持续时间,适合于逐日的干旱监测<sup>[27-29]</sup>。但 CI 在干旱监测中存在对季节以上旱情反映偏轻以及空间和时间存在不连续等缺陷<sup>[30]</sup>。经过长期的业务试验后,引入了标准化权重降水指数,将 CI 进行改进,确立了一个新的气象干旱综合监测指标(MCI),并分不同的季节和气候区域对参数进行了相应的调整。

王芝兰等<sup>[31]</sup>基于广义极值分布理论构建了新的干旱指数(GEVI),该指数在衡量西北地区干旱程度和干旱范围方面具有和 SPI 的一致性和可替代性。干旱指数 K 是降水相对变率和蒸发相对变率的比值,相当于对干旱指数进行了标准化,消除了量纲不同的影响,使得干旱标准便于统一<sup>[21]</sup>。研究表明,干旱指数 K 对西北地区的春季干旱有较好的监测能力<sup>[32]</sup>。但也有研究认为,K 指数对干旱的监测存在对频率的放大以及对等级偏重或偏轻等不足之处<sup>[29-30,33]</sup>。

遥感技术的发展为干旱监测提供了新的可能,其优势在于能够实时、准确地获取大尺度的下垫面综合信息,且空间分辨率高、数据获取周期短,用于监测土壤供水和作物需水状况可以弥补传统地基监测方法的很多不足。直接反演土壤水分常用的方法有热惯量法<sup>[34]</sup>和利用高光谱数据寻找敏感波段的反演方法<sup>[35]</sup>。基于地表能量平衡可推导出土壤水分的热惯量模型<sup>[36]</sup>,但许多研究<sup>[37-39]</sup>表明,热惯量法反演土壤水分只适用于裸露土壤或植被覆盖度很

低的下垫面,因而存在很大局限性。而 Jackson 等<sup>[40]</sup>建立的适用于完全植被覆盖下垫面的作物水分胁迫指数(crop water stress index, CWSI),利用遥感观测的冠层温度与气温的差值以及其他大气状况和边界层参量定量表示农田生态系统的水分亏缺,但这种方法对于植被覆盖度较低的情况并不适用。利用光谱反射率监测植被水分状况的研究很多,如利用 1600 nm 和 820 nm 两个波段反射率的比值建立了温度胁迫指数(moisture stress index, MSI)<sup>[41]</sup>,该指数可以很好地反映植被等效水层厚度(EWT)。利用 900 nm 和 970 nm 两个近红外波段反射率之比进行植被水分监测的水分指数(water index, WI)<sup>[42]</sup>,利用 860 nm 和 1240 nm 波段反射率提出了归一化差异水分指数(normalized difference water index, NDWI)<sup>[43]</sup>。将当年植被的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与往年同期的状况进行比较,用偏差大小表示受干旱胁迫的相对程度提出了距平植被指数(anomaly vegetation index, AVI)<sup>[44]</sup>和植被条件指数(vegetation condition index, VCI)<sup>[45]</sup>,此类方法可反映当地气候条件下水分亏缺、极端天气等对植被长势造成的影响,但在不同区域之间难以进行比较。

## 1.2 低温冷害指标

低温冷害是由于在农作物生长发育过程中热量不足使农作物的生长发育受到不利影响的一种自然灾害,一般采用温度距平或积温距平表示。

在生长季温度距平指标的研究方面,东北地区一般采用 5—9 月的月平均温度和距平值( $\Delta T_{5-9}$ )作为低温冷害等级指标,以  $\Delta T_{5-9} \leq -1.3^\circ\text{C}$  和  $\Delta T_{5-9} < -3.3^\circ\text{C}$  分别作为一般低温冷害和严重低温冷害的指标<sup>[46-47]</sup>。后续研究发现,吉林省粮豆产量与 5—9 月气温呈线性关系,根据冷害的发生与生育期总温度条件的关系进一步分析低温年减产程度与生长季月平均温度和距平值之间的关系,整个东北地区粮豆产量与 5—9 月平均温度总和也呈高度正相关,从而建立了一套低温冷害等级指标<sup>[48-49]</sup>。孙玉亭等<sup>[50]</sup>进一步分析认为东北各地都可以利用 5—9 月平均温度和的负距平作为冷害年指标来诊断某一年里某地是否发生冷害及危害程度。

在生长季积温指标的研究方面,元来福<sup>[51]</sup>通过对东北低温冷害的研究,指出粮食产量与积温密切相关,作物生长期间的积温是影响东北地区粮食产量的主要气象因素。王书裕<sup>[52]</sup>定义了积温差值比

较小的指标,将大于等于  $10^\circ\text{C}$  的活动积温较常年少  $50^\circ\text{C} \cdot \text{d}$  作为一般低温冷害年,较常年少  $100^\circ\text{C} \cdot \text{d}$  以上作为严重低温冷害年。而潘铁夫等<sup>[53]</sup>则将作物生育期的总积温比历年平均值少  $100^\circ\text{C} \cdot \text{d}$  定义为一般低温冷害,比历年平均值少  $200^\circ\text{C} \cdot \text{d}$  定义为严重低温冷害。此外,许多学者根据不同地区、不同时段的气候情况,研究制定了不同的积温指标进行低温冷害的监测预报和影响评价<sup>[54-55]</sup>。

由于上述指标未结合不同农作物不同生育阶段对温度的响应关系,缺乏生物学意义。为此,郭建平等<sup>[56-62]</sup>结合东北玉米不同生育阶段的三基点温度提出了热量指数的概念,并将该指数应用到东北玉米和新疆棉花低温冷害的监测和预测中,同样方法建立了北方寒地水稻低温冷害的热量指数指标<sup>[63]</sup>。此外,就农作物延迟型冷害而言,除了环境条件的热量不足外,还体现在作物生长发育的延迟,从而研究提出了积温距平和发育期延迟的东北玉米和新疆棉花低温冷害复合指标体系<sup>[64]</sup>。

## 1.3 寒害指标

寒害通常是指我国华南地区冬季出现的低温灾害,承灾体主要是热带亚热带经济林果、蔬菜和渔业养殖。冯颖竹等<sup>[65]</sup>利用广东省 22 个代表站 1957—2001 年冬季逐日平均气温和最低气温资料,以广东省亚热带作物的生物学下限温度为依据,从这些作物受寒害的起点温度(环境温度小于等于  $5.0^\circ\text{C}$ )出发,提出了寒害过程的概念和明确的定义,并用寒害过程低温的强度(日最低气温)、持续时间(日数)及其综合作用的物理量(负积温)描述寒害的强度,研究了广东历年冬季寒害的变化。植石群等<sup>[66]</sup>通过对广东冬季寒害发生的类型出发,以过程降温幅度和同时出现的过程最低气温两个因素确定了广东香蕉寒害的等级指标。黄朝荣<sup>[67-68]</sup>通过对历史资料的分析,提出了广西香蕉寒害的温度指标,并分析了气象条件与香蕉产量的关系。张蕾等<sup>[69]</sup>基于自然灾害风险分析原理,利用海南省 18 个市县历年逐日气象要素、瓜菜产量、面积、寒害灾情和 DEM 等资料,构建了基于瓜菜生物学特性的寒害致灾等级指标。李娜等<sup>[70]</sup>基于华南地区(广东、广西、福建)224 个气象站 1951—2006 年气候资料和香蕉、荔枝历史灾情资料,采用日最低气温小于等于  $5.0^\circ\text{C}$ 、持续日数不少于 3 d 寒害过程的积寒和表征香蕉、荔枝年度寒害的气候致灾风险信息,构建了基于气候变化背景下的寒害综合气候风险指标,并编制了香蕉、荔

枝寒害等级风险概率地理分布图和气候风险区划图。王春乙等<sup>[3]</sup>根据田间试验和历史资料反演等方法,并依据不同作物对温度的响应规律,分别建立了香蕉、荔枝、龙眼、西红柿和辣椒的寒害等级指标。

## 2 农业气象灾害监测技术研究

农业气象灾害监测是灾害防控和影响评估的基础。近年来,农业气象灾害的监测研究已经从单一指标和单一方法逐步提升到从地面到空中的多指标、多方法的立体监测体系,构成了地-空三维监测网。建立和完善了卫星遥感监测系统,开展干旱、洪涝、冷害等灾害的动态监测,并基于 3S 技术和地面监测相结合,构建了农业气象灾害动态监测系统,从宏观和微观角度来全面监测农业气象灾害的发生发展过程。

### 2.1 农业气象灾害地面监测

地面监测是农业气象灾害监测的基础,由于其实时性强,准确性高,一直是其他高新技术不断发展的保障,但其不足之处是监测点离散,且耗时费力。

在我国农业气象业务中,通常是通过实时观测的土壤湿度和温度等气象条件,并依据灾害指标开展农业气象灾害的监测服务,但这方面的文献报道相对很少。

农田蒸散量是干旱监测的主要参数,也可直接用于农田干旱的监测。因此,国内外对农田蒸散的研究十分重视。蒸散量模型研究始于 20 世纪 60 年代初,各国学者先后提出了诸多理论或经验模型。Bouchet<sup>[71]</sup>较早就提出了互补相关理论,通过常规气象资料直接估算实际蒸散量,Brutsaert 等<sup>[72]</sup>提出了平流-干旱模型(简称为 AA 模型),Granger 等<sup>[73-74]</sup>提出了 Granger 模型。郑有飞等<sup>[75]</sup>通过引进、修正并验证一个简单的线性双层经验蒸散方程,在验证模型准确性的基础上,利用模型计算得到的蒸散干旱指数(EDI)对中国华北地区一次干旱事件进行了监测。在后期的研究中,许多研究人员对前期提出的蒸散量模型进行了有效的改进和校正。例如,基于土壤水分回归方程和相似站点的测量工作确定的值对 P-T 模型进行了大幅度改进<sup>[76]</sup>;对影响 P-M 精度的主要因素进行了分析评估,并提出了改进的净长波辐射计算方法<sup>[77]</sup>。在国内,提出了基于神经网络的蒸散量预报模型<sup>[78-79]</sup>,基于 Penman-Monteith 方程的蒸散量模型<sup>[80]</sup>,利用 SEBS (the

surface energy balance system)模型进行了蒸散量研究<sup>[81]</sup>等。也有研究对不同蒸散量模型在我国的适用性做了分析,如蒸散量模型在湖南的适用性<sup>[82]</sup>,平流-干旱模型、Granger 模型与 P-M-Katerji 模型在我国的适用性<sup>[83]</sup>等。在针对蒸散量模型进行修正的研究方面,如对我国不同气候区域 Hargreaves 模型的修正<sup>[84]</sup>;P-T 模型参数的各种修正方法及适用条件分析<sup>[85]</sup>;在估算川中丘陵区参考作物蒸散量时对 Hargreaves 模型进行了改进<sup>[86]</sup>等。

地理信息系统(GIS)技术和气候学模型的快速发展为农业气象灾害的精细化监测提供了便利条件,融合土地利用、海拔高度、坡度、坡向等地理信息,对平均气温、最低气温资料进行较高空间分辨率的地理订正,结合广东冬季经济林果的生长发育状况和受害指标,实现了对寒害发生发展及其强度、范围的实时动态监测<sup>[87]</sup>。

农作物模拟模式的发展也为农业气象灾害的监测提供了新技术。马玉平等<sup>[88]</sup>利用东北玉米生长模型(NEC\_MaGM)结合历史冷害数据分析了东北玉米灌浆期低温和初霜冻的发生规律,探讨了两者对玉米生长发育过程的影响与实际冷害年份之间的对应关系。灌浆期低温和初霜冻出现时间以及由此导致玉米贮存器官干重的损失程度可作为基于作物生长模型进行玉米冷害监测预测的重要指标。在此基础上,进一步遴选了 8 个单项指标组合成东北玉米低温冷害综合指标,基于 NEC\_MaGM 和冷害综合指标实现单点冷害监测<sup>[89]</sup>。

物联网(the internet of things, IOT)技术的发展为农业气象灾害的实时监测提供了新的手段。黎贞发等<sup>[90]</sup>利用物联网技术,集成开发了一套包括日光温室小气候与生态环境监测网络、数据实时采集与无线传输、低温灾害监测与预警发布、远程加温控制于一体的技术方法,在天津实施农业气象服务中发挥了积极作用。由于小麦生长周期长,很容易遭遇多种气象灾害如干热风、低温霜冻、旱涝灾害等的影响,为提高灾害监测预警和诊断管理能力,基于物联网关键技术,设计并实现了针对小麦气象灾害的远程监控和动态诊断系统<sup>[91]</sup>。

### 2.2 农业气象灾害遥感监测

卫星遥感技术的发展为农业气象灾害的监测提供了有效工具。目前遥感灾害监测技术在干旱、洪涝、冻害、寒害等农业气象灾害的监测中已得到广泛应用<sup>[92-94]</sup>。

卫星遥感技术在干旱监测中的应用最广泛。我国目前较为常用的遥感监测干旱的方法为热惯量法和作物缺水指数法<sup>[95-96]</sup>。另有采用雷达监测土壤水分,通过发射雷达波束,接受回波信号,然后根据所得到的向后散射系数与目标物的形态及物理特性的关系反演土壤水分进行干旱监测<sup>[97]</sup>。温度植被干旱指数(TVDI)、温差植被干旱指数(DTVDI)和表观热惯量植被干旱指数(AVDI)3个干旱指标可评价全国干旱分布,并利用实测土壤湿度对3个指标进行检验评价<sup>[98]</sup>。王鹏新等<sup>[99]</sup>提出条件植被温度指数(VTCI),以陕西省关中平原和渭北旱塬为研究区域,应用1999—2005年每年5月上旬的AVHRR卫星遥感数据,对比分析了条件植被指数(VCI)、条件温度指数(TCI)、距平植被指数(AVI)和条件植被温度指数(VTCI)等。但上述模型需要研究区气象条件、地表覆盖类型、土壤属性、水系分布和灌溉状况以及作物栽培等相关背景数据。同时,构建LST-NDVI特征空间时,需要通过重采样处理统一NDVI和LST的空间分辨率,损失了可见光、近红外波段的一些信息;但陆地表面温度反演方法较复杂,包含一定误差,加大了旱情估算的不确定性<sup>[96]</sup>。

2005年以来,利用可见光-近红外、热红外和微波遥感相结合进行农业干旱遥感监测的研究较多<sup>[100-105]</sup>。其中美国地质勘探局和美国国家干旱减灾中心等合作开发的植被干旱响应指数(VegDRI)作为一种新的干旱监测指数,在干旱业务中得到了很好的应用。VegDRI是一种融合传统气候干旱指标和其他生物物理信息的干旱综合监测工具,它利用历史长时间序列的NDVI,Palmer干旱强度指数(PDSI)和标准降水指数(SPI)的气候数据,结合土地覆盖/土地利用类型、土壤特性、生态环境卫星观测等其他生物物理信息,采用新的数据挖掘技术识别历史上与干旱相关的气候-植被之间的关系,建立历史气候与植被的关系确定干旱状况;应用气候资料、土地利用等其他信息,剔除洪水、病虫害、火灾等其他环境因素对NDVI信息的影响,并与气候干旱监测建立定量关系模型,所生成的VegDRI地图提供连续的、地理覆盖范围大、1 km分辨率的干旱监测图,比其他常用的干旱指标空间分辨率获得提高<sup>[106]</sup>。

遥感技术在低温灾害监测中也有一定应用。如利用遥感反演地面温度法对宁夏水稻低温冷害进行了监测研究<sup>[107]</sup>。利用空间分辨率较低的NOAA

数据的光谱资料合成绿度图,对比不同时相的绿度差异评价了1987年江苏的冬小麦冻害状况<sup>[108]</sup>。利用同系列的NOAA数据的植被指数,结合气象资料对山东冬小麦晚冻害的遥感监测研究<sup>[109]</sup>。对宁夏春小麦、夏玉米冻害进行了遥感监测研究<sup>[110]</sup>。利用ETM影像提取植被指数和冠层温度差异作为冷害指标,对新疆棉花冷害进行遥感监测<sup>[111]</sup>。

21世纪以来,已有基于数值模拟和3S技术实现面向农作物全生育期灾害实时综合监测的文献报道。如用Terra/MODIS数据对多时相的EVI进行小波变换,实现了日本水稻生育期的大面积反演,误差为10 d左右<sup>[112]</sup>;利用Terra/MODIS和Aqua/MODIS联合获取的EVI可进一步提高水稻生育期的反演精度<sup>[113]</sup>。用MODIS的NDVI数据实现了对连续多年水稻生育期的监测<sup>[114]</sup>。

农业气象灾害的立体监测是近年来重点发展的技术之一。赵艳霞等<sup>[115]</sup>使用气象监测指标、遥感监测指标和作物模式监测指标,建立了从站点到区域、从逐日到阶段、时空全覆盖的南方水稻低温冷害立体监测体系;同时根据西南山地干旱的复杂性,研制了大气降水、作物水分亏缺、土壤湿度和遥感指标相结合的西南干旱立体监测技术体系。

### 3 农业气象灾害预测预警技术研究

及时、准确的农业气象灾害预测预警有助于农业生产部门及时采取有效措施,减轻灾害损失,保证农业生产持续稳定发展。农业气象灾害预测预警技术已经实现从静态和单一方法向动态-多方法集成的转变,使预测时效和精度都得到了显著提高。

#### 3.1 数理统计预报方法

农业气象灾害的数理统计预报方法仍然是目前使用较多的方法,该类方法是在灾害指标的基础上,应用时间序列分析、多元回归分析、韵律、相似等数理统计方法,建立预报模型。

时间序列分析方法的理论依据是农业气象灾害在发生的时间方面具有一定的周期性或规律性,从而可以利用时间序列分析方法推测未来发生的可能性。通常将农业气象灾害时间序列生成均生函数,按EOF,REOF展开并筛选主要均生函数后建立以周期为自变量的回归预测模型<sup>[116-118]</sup>。有研究以历年农业气象灾害受灾面积数据为样本,建立GM(1,1)模型群,求出响应函数来预测未来灾变趋势<sup>[119]</sup>。

还有研究引进能够描述气象灾害的非线性和突变性的门限回归模型,并采用基于加速遗传算法的简便通用方案,使预测性能稳定,精度提高<sup>[120]</sup>。

多元回归分析方法的应用非常普遍,该方法的理论依据认为灾害的发生与某些要素的前期表现存在密切的相关性,因此,可以利用这些相关要素的前期变化情况推测未来灾害发生的可能性。预报因子大多为大气环流特征量、海温等宏观因子和地面气象要素,采用相关、聚类、判别等方法建立预测模型<sup>[121,56]</sup>。

除了经验统计预报模型外,还有研究采用物理统计方法,综合考虑大气环流背景、影响天气系统及演变转折的天气气候学特征,揭示灾害的前兆信号,建立预测模型。利用 EOF, SVD 技术分析东北夏季低温冷害与海温异常的可能联系和影响机理,确定灾害发生的前期强信号,通过前期信号可以预测未来冷害发生情况<sup>[122]</sup>。也有通过对气候成因、环流场特征变化与前期天气形势关系的分析建立农业干旱预测模型<sup>[123]</sup>。另有研究采用信噪比方法识别特别干旱年 500 hPa 高度异常变化及黑潮、暖池、Niño4 区东部附近海温异常变化,得到华北农业干旱的前兆强信号<sup>[124]</sup>。朱兰娟等<sup>[125]</sup>基于天气预报等数据,以农业气象灾害指标为判断依据,对作物致灾因子等作预报。

农业气象灾害的动态预测是当前研究重点之一。郭建平等<sup>[58-62]</sup>分别利用灰色 GM(1,1)模型、模糊均生函数和逐步回归等方法分别建立了东北地区玉米和新疆棉花低温冷害的逐月动态预测模型,使低温冷害预测的时效和精度得到了进一步提高。马玉平等<sup>[89]</sup>依据东北玉米与温度的关系建立的 NEC-MaGM 模型,可根据前期天气实况加上区域气候模式预测的气象要素数据,再结合预报时效之后的多年平均气候数据,可在格点尺度实现对东北玉米低温冷害的动态预测。

### 3.2 农业气象模式与气候(天气)模式结合

依据农田水分平衡方程,根据气象要素的逐日预报值预测 1 m 深土层的土壤含水量,进而预报干旱出现日期和灌溉量<sup>[126]</sup>,该方法对天气预报结果的时效和精度有较高的要求。考虑作物生长和发育对水分的不同需求和敏感性,利用冬小麦发育模式,建立了冬小麦干旱识别和预测模型<sup>[127]</sup>。该模型将气候模式的逐旬气象要素预报结果输入土壤水分模式,模拟土壤水分和水分供需比的变化,以此为指

标,按 4 个干旱等级进行干旱识别和预测。根据田间试验,确定冬小麦光合作用速率对水分胁迫的响应曲线,建立包括光合、蒸腾、干旱胁迫等子模式的小麦生长模型,提出以相对蒸腾比的累积值表示的农业干旱胁迫指数及以相对蒸腾比的累积值表示的农业干旱预警指数的概念<sup>[128]</sup>。考虑到东北玉米冷害主要是由于生育期内热量不足,发育延迟,造成减产的原因,建立了以日最高气温、日最低气温为因子的修正热量单位发育模型,并对发育参数进行区域划分,确定了以抽雄期延迟日数为低温冷害发生及等级的指标,发展了东北区域玉米动力生长模式。模拟了典型冷害年  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  网格密度的玉米生长发育过程及低温冷害的空间分布,并利用区域气候模式输出结果开展冷害预报试验<sup>[129]</sup>。在冬小麦模拟优化决策系统基础上研制了考虑渍水及持续时间对冬小麦光合作用速率、干物质分配、叶片衰老等影响的冬小麦渍害模型。与区域气候模式嵌套,分别运行基于冬小麦渍害模型和未考虑渍害影响的模型,比较二者模拟产量,得到过量土壤水影响冬小麦产量的程度,做出渍害预警<sup>[130]</sup>。王雪娇等<sup>[131]</sup>利用 COMIS 模型输出的气象要素以及多年平均的气候数据来驱动作物生长模型,对棉花冷害发生、程度和范围等预测。

## 4 存在问题与发展趋势

### 4.1 主要问题

①农业气象灾害的基础性研究仍然十分薄弱。农业气象灾害的形成可以分为上游、中游和下游 3 个阶段。上游是指孕灾环境,可以理解为致灾的天气气候条件与承灾体的结合,只有当天气气候条件达到一定程度时,承灾体才能受到不利影响并形成灾害;而中游是指当致灾因子达到灾害形成的阈值指标,这些因子是如何影响到作物的生理活动,从而使作物的生长发育受到不利影响;下游通常是指当作物的生理活动受到不利影响后对作物后续生长发育,直至产量形成的不利影响。就目前来说,对农业气象灾害中游阶段的研究尚很薄弱,农业气象灾害的形成机理尚不清楚。

②农业气象灾害指标对致灾因子的概括性尚不足。农业气象灾害的形成通常情况下都是多种因素综合影响的结果,用单一要素指标一般很难准确描述灾害的程度。如农业干旱指标目前通常使用与水

分有关的要素构建指标,但事实上辐射和温度对干旱影响有加重或减轻的作用;低温冷害指标通常使用与温度有关的指标,但降水和辐射对冷害也有加重或减轻的作用。

③农业气象灾害监测的精细化程度有待进一步提高。通常情况下农业气象灾害的监测使用地面观测资料监测和卫星遥感资料监测两种方法。地面观测资料监测具有精度高的优点,但观测点离散,难以进行区域层面上的监测;而遥感技术虽能进行区域层面的监测,但监测精度往往还不能满足服务要求。目前虽然已将两者进行了有效结合,但在结果的融合方面还很不足,精度有待提高。

④临近预警技术缺乏。农业气象灾害的中长期预测技术研究目前比较成熟,特别是在干旱、低温冷害的中长期预测方面。但在短期预警技术方面相对比较薄弱,目前的短期预警一般是依据天气预报产品结合农业气象灾害指标进行,对天气预报的依赖较强;特别是对于一些突发性的农业气象灾害的预警基本上依靠天气预报。因此,农业气象预报技术还没有从根本上取得突破。

⑤气候变化背景下农业气象灾害的新规律揭示不够。气候变化使得原有的气候规律发生了显著变化,使农业气象灾害的发生频率、发生强度以及灾害的区域分布都在一定程度上发生了变化。同时,由于当前我国农业生产布局也发生了显著变化,使原有的研究成果在许多区域适用性受到限制。但目前对于气候变化背景下农业气象灾害的变化规律以及未来演变趋势的研究仍十分缺乏。

#### 4.2 未来研究方向

①农业气象灾害综合指标的研究。农业气象灾害的形成及影响程度(灾害等级)往往是多要素综合作用的结果,如干旱除了与土壤水分状况有关外,还与空气温度和湿度等因素有关,后者在一定程度上改变了作物蒸腾和土壤蒸发,也与作物的覆盖度(生育期)有关。相同温度条件下,辐射条件的好坏也会导致作物的响应差异。因此,如何在主导指标的基础上,增加辅助指标,对农业气象灾害的指标完善有十分重要的意义。

②强化农业气象灾害的预测预报研究。关注农业气象灾害链的形成过程,重视灾害发生的机理和规律研究,加强早期识别、预测预报、风险评估等方面的科技支撑能力建设。

③构建农业气象灾害实时预警技术体系。研制

基于作物生长模型、区域气候模式、3S技术和数值天气预报产品的短、中、长期相结合的农业气象灾害实时无缝隙预警技术体系。

④构建农业气象灾害立体、动态监测体系。加强基于天基、空基和地基多元信息的农业气象灾害立体监测技术研发,研制基于地面观测、卫星遥感和作物模型相结合的危害立体、动态监测技术体系。

⑤关注气候变化背景下农业气象灾害风险变化评估研究。以增暖为主要特征的全球气候变化已对农业气象灾害的发生与灾变规律产生了显著影响。气候变暖不仅影响农业气象灾害致灾因子变化以及灾害形成的各个环节,还影响形成农业气象灾害风险的孕灾环境、致灾因子、承灾体和防灾减灾能力等多个因素。应对气候变化背景下农业气象灾害风险的变化已成为农业气象灾害监测、预测预警和灾害管理的新方向。

⑥气象或气候预测信息在农业气象灾害预测中的应用技术研究。气象或气候预测是气象部门主要的业务产品,但目前在农业气象灾害的监测和预测中一般很少直接使用,这一方面取决于气象和气候预测信息的可靠性,另一方面反映了气象、气候与农业气象的脱节。如何加强不同专业方向的有机结合,提高气象和气候预测信息在农业气象专业领域的应用程度是今后亟待解决的关键科学问题。

#### 参考文献

- [1] 程纯枢. 中国的气候与农业. 北京:气象出版社, 1991.
- [2] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展. 北京:气象出版社, 2007.
- [3] 王春乙. 中国重大农业气象灾害研究. 北京:气象出版社, 2010.
- [4] 王春乙. 农林气象灾害监测预警与防控关键技术研究. 北京:科学出版社, 2015.
- [5] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales//Proceedings of Vulnerability. Cambridge:Cambridge University Press, 1993.
- [6] 翟禄新, 冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847-857.
- [7] 王莺, 李耀辉, 胡田田. 基于 SPI 指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析. 中国沙漠, 2014, 34(1): 244-253.
- [8] 任余龙, 石彦军, 王劲松, 等. 干旱指标的理论分析与研究展望. 冰川冻土, 2013, 35(4): 938-948.
- [9] 张龙, 赵福年, 李国昌, 等. 2 种标准化干旱指标在甘肃武威干旱监测中的对比. 干旱气象, 2013, 31(2): 412-418.
- [10] 姚瑶, 张鑫, 马全, 等. 青海省东部农业区作物生长期不同气象干旱指标应用研究. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 177-184.

- [11] 黄中艳,钟楚,张明达,等.若干干旱指标在云南干旱农业干旱监测评估中的适用性分析. *中国农业气象*,2013,34(2):221-228.
- [12] 韩继伟,孔凡哲,赵磊,等.两种干旱指标的应用比较研究. *中国农村水利水电*,2012(1):85-88.
- [13] 曹云,宋迎波,郑昌玲,等.2011年春季气候对农业生产的影响. *中国农业气象*,2011,32(3):479-480.
- [14] 韩海涛,胡文超,陈学君,等.三种气象干旱指标的应用比较研究. *干旱地区农业研究*,2009,27(1):237-241.
- [15] Szinell C S,Bussay A T. Drought tendencies in Hungary. *International Journal of Climatology*,1998,18:1479-1491.
- [16] 袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望. *地球科学进展*,2004,19(6):982-991.
- [17] 范嘉泉,郑剑非.帕尔默气象干旱研究方法介绍. *气象科技*,1984,12(1):63-71.
- [18] 杨小利,王丽娜.4种干旱指标在甘肃平凉地区的业务适应性分析. *干旱气象*,2013,31(2):419-424.
- [19] 唐红玉,王志伟,史津梅,等.PDSI和Z指数在西北干旱监测应用中差异性分析. *干旱地区农业研究*,2009,27(5):6-11.
- [20] 卫捷,马柱国. Palmer干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较. *地理学报*,2003,58(增刊I):117-124.
- [21] 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.
- [22] 黄妙芬.黄土高原西北部地区的旱度模式. *气象*,1990,17(1):23-28.
- [23] Kite G W. Frequency and Risk Analysis in Hydrology. Water Colorado:Resources Publication,1977.
- [24] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等.西北地区旱涝指标的研究. *高原气象*,1998,17(4):381-389.
- [25] 杨小利.西北地区气象干旱监测指数的研究和应用. *气象*,2007,33(8):90-96.
- [26] 张强,邹旭恺,肖风劲,等.气象干旱等级.中华人民共和国国家标准,北京:中国标准出版社,2006.
- [27] 张调风,张勃,王小敏,等.基于综合气象干旱指数(CI)的干旱时空动态格局分析——甘肃黄土高原区为例. *生态环境学报*,2012,21(1):13-20.
- [28] 段莹,王文,蔡晓军. SPEI及CI指数在2010,2011年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析. *高原气象*,2013,32(4):1126-1139.
- [29] 王素艳,郑广芬,杨洁,等.几种干旱评估指标在宁夏的应用对比分析. *中国沙漠*,2012,32(2):517-524.
- [30] 赵海燕,高歌,张培群,等.综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性. *应用气象学报*,2011,22(6):698-705.
- [31] 王芝兰,王劲松,李耀辉,等.标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析. *高原气象*,2013,32(3):839-847.
- [32] 王劲松,任余龙,宋秀玲. k干旱指数在甘肃省的应用. *干旱气象*,2008,26(4):75-79.
- [33] 王劲松,李亿萍,任余龙,等.多种干旱指标在黄河流域应用的比较. *自然资源学报*,2013,28(8):1337-1349.
- [34] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia. *Remote Sens Environ*,1985,18(1):59-73.
- [35] 魏娜.土壤含水量高光谱遥感监测方法研究.北京:中国农业科学院,2009.
- [36] 张仁华.土壤含水量的热惯量模型及其应用. *科学通报*,1991,36(12):924-927.
- [37] Verhoef A. Remote estimation of thermal inertia and soil heat flux for bare soil. *Agricultural & Forest Meteorology*,2004,123(3-4):221-236.
- [38] 杨树聪,沈彦俊,郭英,等.基于表观热惯量的土壤水分监测. *中国生态农业学报*,2011,19(5):1157-1161.
- [39] 吴黎,张有智,解文欢,等.改进的表观热惯量法反演土壤含水量. *国土资源遥感*,2013,25(1):44-49.
- [40] Jackson R D,Idso S B. Canopy temperature as a cropwater stress indicator. *Water Resources Research*,1981,17:1133-1138.
- [41] Hunt E R,Rock B N,Nobel P S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sens Environ*,1987,22(3):429-435.
- [42] Peñuelas J,Pinol J,Ogaya R,et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *Int J Remote Sens*,1997,18(13):2869-2875.
- [43] Gao B C. NDVI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens Environ*,1996,58(3):257-266.
- [44] 陈维英,肖乾广.距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用. *环境遥感*,1994,9(2):106-112.
- [45] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *Int J Remote Sens*,1990,11(8):1405-1419.
- [46] 丁士晟.东北低温冷害和粮食产量. *气象*,1980,6(5):1-3.
- [47] 丁士晟.东北地区夏季低温的气候分析及其对农业生产的影响. *气象学报*,1980,38(3):234-242.
- [48] 王书裕.东北区作物冷害区划. *气象*,1982,8(6):26-28.
- [49] 王书裕.我国作物冷害研究的进展. *气象科技*,1984,12(4):75-79.
- [50] 孙玉亭,王书裕,杨永岐.东北地区作物冷害的研究. *气象学报*,1983,41(3):313-321.
- [51] 亓来福.东北低温冷害的分析研究. *气象科技*,1979,7(3):25-28.
- [52] 王书裕.作物冷害的研究.北京:气象出版社,1995.
- [53] 潘铁夫,方展森,赵洪凯,等.农作物低温冷害及其防御.北京:农业出版社,1983.
- [54] 薛桂莉,唐文俊,刘治权,等.低温冷害对农作物的危害及防护措施. *农业与科技*,2004,24(1):85-86;92.
- [55] 朱桂香,贾艳梅,朴承国.延边地区的低温冷害及其预报经验总结. *吉林气象*,1999(增刊I):39-40.
- [56] 郭建平,田志会,张涓涓.东北地区玉米热量指数的预测模型研究. *应用气象学报*,2003,14(5):526-533.
- [57] 郭建平,庄立伟,陈玥煜.东北玉米热量指数预测方法研究(I). *灾害学*,2009,24(4):6-10.



- [58] 郭建平,庄立伟,陈玥煜.东北玉米热量指数预测方法研究(II).灾害学,2009,24(4):11-14.
- [59] 郭建平,陈玥煜,庄立伟.东北玉米热量指数预测方法研究(III).灾害学,2010,25(1):23-26.
- [60] 郭建平,陈玥煜,庄立伟.东北玉米热量指数预测方法研究(IV).灾害学,2010,25(1):27-34.
- [61] 郭建平,陈玥煜,赵俊芳.新疆棉花热量指数的灰色预测方法.干旱区地理,2010,33(5):710-715.
- [62] 郭建平,陈玥煜.新疆棉花热量指数的均生函数预测模型.干旱区资源与环境,2010,24(8):175-179.
- [63] 郭建平,田志会,左旭.东北地区水稻热量指数预测模型.自然灾害学报,2004,13(3):138-145.
- [64] 郭建平.农作物低温冷害监测预测理论与实践.北京:气象出版社,2009.
- [65] 冯颖竹,梁红,黄璜.广东冬季寒害指标研究.自然灾害学报,2005,14(1):59-65.
- [66] 植石群,刘锦鑫,杜尧东.广东省香蕉寒害风险分析.自然灾害学报,2003,12(2):113-116.
- [67] 黄朝荣.南宁市香蕉冷害指标及防御措施探讨.广西农业科学,1991(3):106-109.
- [68] 黄朝荣.气象条件对香蕉生长和产量影响初步分析.中国农业气象,1993,14(2):7-10.
- [69] 张蕾,霍治国,黄大鹏,等.海南冬季主要瓜菜寒害风险区划.中国生态农业学报,2014,22(10):1240-1251.
- [70] 李娜,霍治国,贺楠,等.华南地区香蕉、荔枝寒害的气候风险区划.应用生态学报,2010,21(5):1244-1251.
- [71] Bouchet R. Evapotranspiration reelle at potentielle, signification climatique. *Int Assoc Sei Hydro Pub*,1963,62:134-142.
- [72] Brutsaert W, Stricker H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resources Research*,1979,15(2):443-450.
- [73] Granger R J. A complementary relationship approach for evaporation from non saturated surfaces. *J Hydrol*,1989,111:31-38.
- [74] Granger R J, Gray D M. Evaporation from natural non saturated surfaces. *Journal of Hydrology*,1989,111:21-29.
- [75] 郑有飞,蒋飞燕,吴荣军.修正型指数化蒸散模型对中国华北地区干旱监测应用.湖北农业科学,2014,53(4):771-787.
- [76] Fisher J B. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem J. *Environ Mod & Software*,2005,6:783-796.
- [77] Bekelel T. Comparing net radiation estimation methods: CIMIS versus Penman-Monteith. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,2007,133(3):265-271.
- [78] 徐俊增.基于气象预报的参考作物蒸发蒸腾量的神经网络预测模型.水利学报,2003,37(3):376-379.
- [79] 郑重,马富裕,李江全,等.基于BP神经网络的农田蒸散量预报模型.水利学报,2008,39(2):230-234.
- [80] 丁加丽,彭世彰,徐俊增,等.基于Penman-Monteith方程的节水灌溉稻田蒸散量模型.农业工程学报,2010,26(4):31-35.
- [81] Zhou Ga, La Ba, Pubu Ciren, et al. Study on daily surface evapotranspiration with SEBS in Tibet Autonomous Region. *Journal of Geographical Sciences*,2014,24(1):113-128.
- [82] 朱海涛,刘寿东,汪扩军,等.几种计算参考作物蒸散量的模型在湖南的适用性研究.安徽农业科学,2009,37(12):5332-5334.
- [83] 韩松俊,胡和平,田富强.三种通过常规气象变量估算实际蒸散量模型的适用性比较.水利学报,2009,40(1):75-81.
- [84] 张本兴,潘云,李小娟.中国不同气候区域 Hargreaves 模型的修正.地理与地理信息科学,2012,28(1):51-54.
- [85] 李菲菲,饶良懿,吕琨珑,等. Priestley Taylor 模型参数修正及在蒸散发估算中的应用.浙江农林大学学报,2013,13(5):748-754.
- [86] 李晨,崔宁博,魏新平,等.改进 Hargreaves 模型估算川中丘陵区参考作物蒸散量.农业工程学报,2015,31(11):129-134.
- [87] 石春林,金之庆.基于 WCSODS 的小麦渍害模型及其在长江中下游平原气象预警上的应用.应用气象学报,2003,14(4):462-468.
- [88] 马玉平,王石立,李维京.基于作物生长模型的玉米生殖期冷害致灾因子研究.作物学报,2011,37(9):1642-1649.
- [89] 马玉平,王石立,李维京.基于作物生长模型的东北玉米冷害监测预测.作物学报,2011,37(10):1868-1878.
- [90] 黎贞发,王铁,宫志宏,等.基于物联网的日光温室低温灾害监测预警技术及应用.农业工程学报,2013,29(4):229-236.
- [91] 夏于,杜克明,孙忠富,等.基于物联网的小麦气象灾害监测诊断系统应用研究.中国农学通报,2013,29(23):129-134.
- [92] 李剑萍.3S技术在灾害监测预测中的应用及展望.灾害学,2004,19(增刊I):83-87.
- [93] 邢素丽,张广禄.我国农业遥感的应用现状与展望.农业工程学报,2003,19(6):174-178.
- [94] 郑立中,承继成.空间技术在资源、环境及重大自然灾害监测中的应用.遥感信息,1995(4):12-15.
- [95] 张佳华,侯英雨,毛飞,等.基于遥感的华北地区作物干旱时空监测研究.自然灾害学报,2003,12(2):255-259.
- [96] 王鹏新, Wan Zhengming, 龚健雅, 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.
- [97] 赵艳霞,张佳华,王春乙.遥感监测干旱的主要方法及最新研究进展.自然灾害学报,2003,12(2):266-270.
- [98] 齐述华.干旱遥感监测模型和中国干旱时空分析.北京:中国科学院,2004.
- [99] 王鹏新,孙威.基于植被指数和地表温度的干旱监测方法的对比分析.北京师范大学学报:自然科学版,2007,43(3):319-323.
- [100] Gilles B, Bernard M, Tarik B A. An evaporation test based on Thermal InfraRed remote sensing to select appropriate soil hydraulic properties. *J Hydrol*,2009,376(3-4):589-598.
- [101] Sarah A L, Peter R R, Bruce E F, et al. Using hyperspectral imagery to predict post wild fire soil water repellency. *Geomorphology*,2008,95(3-4):192-205.
- [102] Yilmaz M T, Hunt-Jr E R, Jackson T J, et al. Remotesensing of vegetation water content from equivalent water thickness

- using satellite imager. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5):2514-2522.
- [103] Dematte J A, Antonio A S, Marcelo C A, et al. Retrieval of Leaf Area Index(LAI) and Soil Water Content(WC) using Hyperspectral remote sensing under controlled glass house conditions for Spring Barley and Sugar Beet. *Remote Sensing*, 2009, 2(7):1702-1721.
- [104] Stancalie G, Marica A, Toullos L. Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, 35(1-2):25-30.
- [105] Duchemin B, Hadria R, Erraki S, et al. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco; On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(1):1-27.
- [106] 郭锐, 王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇. *干旱气象*, 2015, 33(1):1-18.
- [107] 王连喜, 秦其明, 张晓煜. 水稻低温冷害遥感监测技术与方法进展. *气象*, 2003, 29(10):3-7.
- [108] 汤志成, 孙涵. 用 NOAA 卫星资料作冬小麦冻害分析. *遥感信息*, 1989(4):39.
- [109] 杨邦杰, 王茂新, 裴志远. 冬小麦遥感监测. *农业工程学报*, 2002, 18(2):136-140.
- [110] 张晓煜, 陈豫英, 苏占胜, 等. 宁夏主要农作物霜冻害遥感监测研究. *遥感技术与研究*, 2001, 16(1):32-36.
- [111] 林海荣, 李章成, 周清波, 等. 基于 ETM 植被指数和冠层温度差异遥感监测棉花冷害. *棉花学报*, 2009, 21(4):284-289.
- [112] Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3-4):366-374.
- [113] Motohka T, Nasahara K N, Miyata A, et al. Evaluation of optical satellite remote sensing for rice paddy phenology in monsoon Asia using a continuous in situ dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(17):4343-4357.
- [114] Boschetti M, Stroppiana D, Brivio P A, et al. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *Int J Remote Sens*, 2009, 30(18):4643-4662.
- [115] 赵艳霞, 郭建平. 重大农业气象灾害立体监测与动态评估技术研究. 北京:气象出版社, 2016.
- [116] 那家凤. 基于均生函数水稻扬花低温冷害程度的 EOF 预测模型. *中国农业气象*, 1998, 19(4):50-52.
- [117] 许炳南, 张宇发, 罗纲等. 用带周期分量的多元回归模型预测贵州气象灾害变化趋势. *贵州气象*, 1999, 23(3):29-33.
- [118] 江勇, 叶燕华. 甘肃东部春播期干旱指数变化特征及预测. *中国农业气象*, 2004, 25(1):35-37.
- [119] 王玮明. 甘肃农业气象灾害拓扑预测模型. *甘肃农业大学学报*, 1998, 33(3):276-282.
- [120] 杨晓华, 金菊良, 魏一鸣. 预测低温冷害的门限回归模型. *灾害学*, 2002, 17(1):10-14.
- [121] 周立宏, 刘新安, 周育慧. 东北地区低温冷害年的环流特征及预测. *沈阳农业大学学报*, 2001, 32(1):22-25.
- [122] 郑维忠, 倪允祺. 热带和中纬太平洋海温异常对东北夏季低温冷害影响的诊断分析研究. *应用气象学报*, 1999, 10(4):394-401.
- [123] 杨先荣, 何玉春, 孙玉莲. 临夏州农业干旱研究及其防御措施. *甘肃农业科技*, 2001(10):27-28.
- [124] 魏凤英, 张京江. 华北地区干旱的气候背景及其前兆强信号. *气象学报*, 2003, 61(3):354-363.
- [125] 朱兰娟, 蔡海航, 姜纪红, 等. 农业气象灾害预警系统的开发与应用. *科技通报*, 2008, 24(6):758-761.
- [126] 张光智, 徐祥德, 毛飞, 等. 气候模式-农业气象模式集成系统的小麦灌溉管理新途径. *应用气象学报*, 2001, 12(3):307-316.
- [127] 赵艳霞, 王馥棠, 裴国旺. 冬小麦干旱识别和预测模型研究. *应用气象学报*, 2001, 12(2):235-241.
- [128] 刘建栋, 王馥棠, 于强, 等. 华北地区冬小麦干旱预测模型及其应用研究. *应用气象学报*, 2003, 14(5):593-604.
- [129] 刘布春, 王石立, 庄立伟, 等. 基于东北玉米区域动力模型的低温冷害预报研究. *应用气象学报*, 2003, 14(5):616-625.
- [130] 王春林, 刘金鑫, 周国逸, 等. 基于 GIS 的广东荔枝寒害监测预警研究. *应用气象学报*, 2003, 14(4):487-495.
- [131] 王雪姣, 潘学标. 基于 COSIM 模型的棉花冷害预测研究. *棉花学报*, 2012, 24(1):52-61.

## Research Progress on Agricultural Meteorological Disaster Monitoring and Forecasting

Guo Jianping<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (*State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>2)</sup> (*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

### Abstract

Agricultural meteorological disaster is one of the main natural disasters affecting crop yield stability in the world. Impacted by monsoon climate, China is one of the most seriously affected countries by agricultural meteorological disaster in the world. China's great disaster variety, high strength, high frequency, wide influence range, and severe yield losses have great impacts on sustainable development of agricultural production. Agricultural meteorological disaster monitoring and forecasting is the basis and premise of disaster assessment and prevention. Accurate monitoring and timely forecast of disasters is possible for effective prevention of agricultural meteorological disasters, and makes yield losses decrease to a minimum extent. Therefore, corresponding research has long been a key fields of agrometeorological research.

Based on a systematic review on the research progress and achievements of agricultural meteorological disaster monitoring and prediction technology, some problems are found to be quite vital: The fundamental research of agricultural meteorological disaster is still insufficient, commonly-used agricultural meteorological disaster index doesn't fully consider hazard-formative factors, agricultural meteorological disaster monitoring isn't fine enough, early warning technology is short, and the new pattern of agricultural disaster under climate change are not revealed enough. Therefore, some efforts should be strengthened in the future, i. e. , a more comprehensive disaster index, advanced forecasting technology, real-time warning system, three-dimensional and dynamic monitoring system, the evaluation of disaster risk under climate change, and the application technology of meteorological and climate forecast information in the prediction of agricultural meteorological disasters.

**Key words:** agricultural meteorological disaster; monitoring and forecasting; research progress