

郭安红,李森,何亮,等,2021.近十年国家级农业气象灾害预报评估业务技术进展[J].气象,47(6):693-702. Guo A H, Li S, He L, et al, 2021. Advance in operational technology of agrometeorological disaster forecasting and assessment in China in recent 10 years[J]. Meteor Mon, 47(6):693-702(in Chinese).

## 近十年国家级农业气象灾害预报评估业务技术进展<sup>\*</sup>

郭安红 李 森 何 亮 张 蕾 王纯枝 程 路

国家气象中心,北京 100081

**提 要:**近十年来,伴随农业气象灾害监测评估理论的发展,数值模拟技术、遥感监测技术和现代信息技术的综合应用,以及智能网格气象要素预报在农业气象灾害监测预报业务中的落地,促进了农业气象灾害预报评估业务的精细化、动态化和定量化水平,为农业防灾减灾、稳产增产发挥了重要作用。介绍了近十年来定量化农业气象灾害评估技术以及动态化、精细化农业气象灾害预报技术的主要研发成果以及在业务服务中的应用,并展望未来发展,以期为农业气象灾害预报评估业务的进一步发展提供借鉴和参考。

**关键词:**农业气象灾害,预报评估,业务技术,定量化,精细化

**中图分类号:** S16, P49

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.005

## Advance in Operational Technology of Agrometeorological Disaster Forecasting and Assessment in China in Recent 10 Years

GUO Anhong LI Sen HE Liang ZHANG Lei WANG Chunzhi CHENG Lu

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In recent 10 years, the refinement level and dynamic, quantitative capacity of agrometeorological disaster forecasting and assessment have been promoted accompanied with the development of the agrometeorological disaster monitoring and assessment theory, the comprehensive use of numerical simulation technology, remote sensing monitoring technology, and modern information technology, as well as the application of intelligent grid meteorological element prediction in agrometeorological disaster monitoring and forecasting operation. All these have played an important role in agricultural disaster prevention and reduction and in yield improvement. In this paper, the main research and service achievements of dynamic, quantitative and refined agrometeorological disaster forecasting and assessment in recent 10 years are introduced, and the future development trend is looked forward to so as to provide a reference for the further development of agrometeorological disaster forecasting and assessment services.

**Key words:** agrometeorological disaster, forecasting and assessment, operational technology, quantification, refinement

## 引 言

农业是我国受气象灾害影响最严重的行业之一

(张钛仁等,2011),农业生产过程中光、温、水、气各项气象因子或两项及以上因子的时空量分配不合理,都可能直接或间接导致农业生物显著减产、品质下降或设施严重损坏,从而形成农业气象灾害。我

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2017YFC1502402)和中国气象局国内外作物产量气象预报专项共同资助

2020 年 8 月 13 日收稿; 2021 年 2 月 26 日收修定稿

第一作者:郭安红,主要从事农业气象防灾减灾研究. E-mail: guoah@cma.gov.cn

国农业气象灾害种类多、发生频率高、区域性强、季节性分明、影响对象多、致灾机理复杂(张养才等, 1991)。据统计,到 21 世纪初,中国每年由于农业气象灾害造成的农业直接经济损失高达 1 000 多亿元,约占国民生产总值的 3%~6%(王春乙等, 2005)。

近十年来,为了提升农业气象灾害监测预报评估的业务服务能力,通过将现代天气预报技术、数值模拟技术、卫星遥感技术以及多源信息融合技术进行综合应用,精细化农业气象灾害监测预报评估业务得到较大发展,农业气象灾害监测预报评估的精细化、定量化和自动化能力不断提升。干旱、霜冻、高温热害等农业气象灾害预报实现提前 10 d 逐日滚动发布,监测预报空间尺度由县级行政区域为单元发展到 5 km 格点;农业气象灾害评估的时效性、量化、精准化能力不断增强,为科学、客观、准确评判全国粮食生产形势提供了有力支撑,为农业防灾减灾、稳产增产发挥了重要作用。

## 1 国家级农业气象灾害监测预报评估业务发展概述

21 世纪开始,国家级农业气象灾害监测预报评估业务服务在农业防灾减灾中发挥着越来越重要的作用。前十年,业务技术的主要手段是对已有的农业气象灾害监测预报技术和方法(王春乙等, 2005; 王春乙, 2007; 张养才等, 1991; 王石立, 2003)进行业务适用性分析和改进,基于农业气象观测站网的地面监测信息(国家气象局, 1993),结合地理信息系统进行农业气象灾害实况的监测,并根据天气气候预测进行农业气象灾害预估(毛留喜和吕厚荃, 2010; 宋迎波等, 2006)。例如针对农业干旱,主要是围绕多种农业干旱监测指标进行业务化应用和集成改进(王密侠等, 1998; 朱自玺等, 2003; 苏永秀等, 2008; 张艳红等, 2008),开展逐旬的农业干旱综合监测预报业务服务。2007—2008 年,干热风、寒露风、高温热害等多个农业气象灾害指标(霍治国等, 2007; 2009; 王保生等, 2008; 马树庆等, 2008; 冯明等, 2008)被陆续应用到农业气象灾害监测评估业务服务工作中。2008—2009 年,针对小麦、玉米和水稻重大病虫害,研发了病虫害发生发展气象等级预报技术、业务系统并开展业务服务(张旭晖等, 2008; 何永坤等, 2008; 李轩等, 2012)。

2010 年开始,农业气象观测站网多个要素开始

实现自动化观测或者加密观测上传(张雪芬等, 2012);现代天气预报技术、数值模拟技术、卫星遥感技术以及多源信息融合技术等也逐渐应用到农业气象灾害监测评估预报业务中,国家级和省级上下一体的农业气象灾害监测预报业务流程逐步形成。进而,传统的农业气象灾害预报评估业务实时化、量化以及精细化程度不足等问题凸显出来。

在农业气象灾害评估方面,既有的农业气象灾害指标只有灾害的轻、中、重等级,相应的监测评估业务服务产品也只能给出灾害的轻、中、重等级及落区,而农业气象灾害的极端性、历史同期相似性等分析在灾害影响评估、灾害防御预案的制定以及在防灾减灾措施的实效操作中的需求十分迫切,亟需开展技术研发和形成业务服务能力。基于此,2015 年开始,通过逐步构建 16 种农业气象灾害的长序列指数集,研发基于过程、月、年的多时间尺度灾害强度评估方法,解决了农业气象灾害强度历史对比、极端性分析等关键业务技术(李森等, 2018; 郭安红等, 2018; 2020),推进了量化农业气象灾害评估业务服务的发展。此外,作物模型模拟技术以其机理性、解释性、动态性和综合性强等特点,为农业气象灾害的评估提供了有效工具(王石立和马玉平, 2008; 马玉平等, 2005; 刘布春等, 2006; 侯英雨等, 2007; 2018a; 2018b; 王鹏新等, 2003; 余卫东等, 2009)。2013 年通过推动作物模型参数敏感性分析、模型的适应性评估和业务化应用,以逐步提高农业气象灾害评估的量化、精细化水平;至 2018 年,作物模型区域化应用、业务应用平台研发以及模拟干旱、高温热害、低温霜冻等灾害对作物影响评估的业务服务等均取得了较大进展。

在农业气象灾害预报预警方面,针对实时化、动态化农业气象灾害中短期预报预警的业务需求,2014 年尝试利用精细化、数值化的 EC 模式预报资料、NWFD 预报资料和 NCEP 预报资料,初步形成了基于现代天气预报业务的农业气象灾害中短期预估技术,实现了未来 1~7 d 农业气象灾害落区和灾害程度预估的业务能力(郭安红等, 2014)。随后,伴随智能网格气象要素预报业务的实现,通过将智能网格气象要素预报与农业气象灾害指标相结合,形成了目前 5 km 格点的、逐日滚动发布的未来 1~10 d 的精细化、动态化农业气象灾害预报预警业务。此外,2015—2019 年,在已有的病虫害发生发展气象等级预报技术和业务服务工作的基础上,通过将精细化的作物发育期信息、病虫害宿主信息与

智能网格气象要素监测预报数据相结合,以及构建12种病虫害促病指数库和气象适宜度综合指数库,推进了病虫害气象等级预报及气象风险评估工作向精细化、定量化方向发展。

## 2 定量化农业气象灾害评估技术

### 2.1 农业气象灾害强度定量评估技术

针对农业干旱、高温热害、低温冷害、干热风等16种农业气象灾害,对各个灾害指标致灾的区域适用性进行再梳理(马树庆等,2015;许莹等,2020),参照相应国家标准或气象行业标准以及历年作物发育期观测数据,构建了逐日尺度的灾害达标判断、灾害强度和过程频次等农业气象灾害指数集。该指数集将灾害的逐日过程表达出来,通过对日过程定量化描述分析,实现灾害开始时间、结束时间、灾害强度计算、灾害强度历史对比、灾害强度极值等分析和判断,满足了业务服务过程中灾害强度历史极端性分析、排位以及时空对比等需求,并为进一步分析灾害强度与灾害损失之间的对应关系奠定了基础。

针对农业干旱,依据农业干旱等级国家标准(吕厚荃等,2016)计算逐日作物水分亏缺距平指数( $CWDI_a$ ,单位:%):

$$CWDI_a = \begin{cases} \frac{CWDI - \overline{CWDI}}{100 - \overline{CWDI}} \times 100\% & \overline{CWDI} > 0 \\ CWDI & \overline{CWDI} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\overline{CWDI}$ 为日水分亏缺指数30年平均值(单位:%), $CWDI$ 为日水分亏缺指数(单位:%)。同时,依据该标准进行干旱过程的评判:当某日作物水

分亏缺距平指数 $CWDI_a$ 大于阈值0.4则干旱开始,与阈值0.4之间的差值即为当日干旱指数或干旱强度,至某日 $CWDI_a$ 小于等于阈值0.4则干旱结束,根据游程理论统计时段内累计干旱强度。例如,分析2018年5月1日至8月15日辽宁的开原、彰武、康平和锦州4个站玉米逐日干旱强度的变化(图1),结果显示:4个站玉米播种期干旱开始出现,逐日干旱强度在5月上中旬达到最强,在5月下旬至6月上旬逐渐结束;7月下旬时干旱再度出现,逐日干旱强度在8月上旬达到最强,在8月中旬逐渐结束。此外,通过计算7月下旬至8月上旬干旱过程的累计干旱强度,可以将此时段的干旱强度和干旱持续时间与历史同期进行对比:辽宁开原站干旱强度为1981年以来同期第二强,持续天数为历史同期第四多;辽宁康平站干旱强度为1981年以来同期第四强,持续天数为历史同期第四多。

小麦干热风综合强度指数( $CID$ ,无量纲)计算公式如下:

$$CID = \sum_{i=1}^{30} \left[ 0.73 \times \frac{(T_i + a) - 30}{30} + 0.25 \times \frac{|(R_i + b) - 35|}{35} + 0.02 \times \frac{(V_i + c) - 1}{1} \right] \quad (2)$$

式中, $i$ 为日序(成熟前30d内,或与小麦发育期结合)。 $T_i$ 、 $R_i$ 、 $V_i$ 分别为第 $i$ 日的最高气温(单位:℃)、14时相对湿度(单位:%)、14时风速(单位: $m \cdot s^{-1}$ ); $a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别为雨后青枯型干热风要素阈值修订到高温低湿型干热风要素阈值的修订系数(李森等,2018)。当 $T_i$ 、 $R_i$ 、 $V_i$ 达到轻干热风日阈值时, $CID_i$ 成立,否则 $CID_i = 0$ 。2017年5月中下旬,华北黄淮地区出现不同程度干热风天气,其中河南部分地区干热风天气强度较强。基于 $CID$ ,对此次

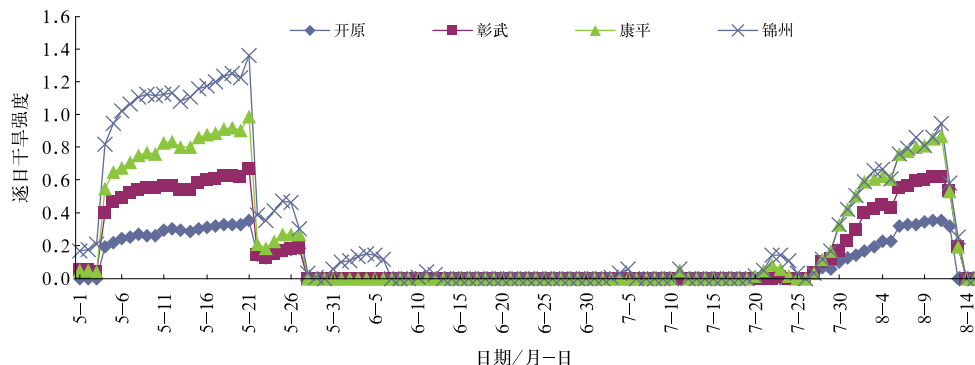


图1 2018年5月1日至8月14日辽宁省开原、彰武、康平和锦州逐日干旱指数演变

Fig. 1 Daily drought index in Kaiyuan, Zhangwu, Kangping and Jinzhou in Liaoning Province from 1 May to 14 August 2018

干热风过程的综合强度进行了评估,结果表明山东东南部 and 半岛西部、河南中大部达到轻干热风年型等级,其中河南西北部达到重年型等级(图 2)。

水稻高温热害或低温冷害强度指数( $H_d$ , 无量纲)计算公式如下:

$$H_d = \sum W_i D_i N_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中, $D_i$  为逐日达标值, $D_1$  轻度达标日为 1, $D_2$  中度达标日为 2, $D_3$  重度达标日为 3; $N_i$  为任意时段内轻度、中度和重度高温热害或低温冷害达标值的累计天数, $N_1$  为轻度达标日累计天数, $N_2$  为中度达标日累计天数, $N_3$  为重度达标日累计天数; $W_i$  为权重系数,针对轻度、中度、重度达标日  $W_i$  取值分别为 0.2、0.3 和 0.5(郭安红等, 2018)。高温热害或低温冷害强度指数考虑了特定时段内可能出现多次不同程度的高温热害或低温冷害过程及其累积效应,能够对任意时段或旬、年和过程高温热害或低温冷害进行较好的定量化时空对比分析评估。图 3 为

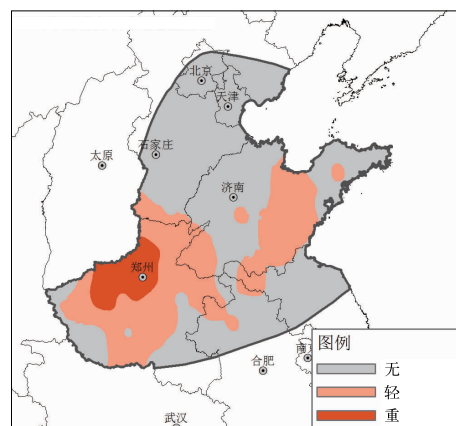


图 2 2017 年 5 月中下旬黄淮海地区干热风综合强度指数分布

Fig. 2 Distribution of comprehensive dry-hot wind intensity index in Huang-Huai-Hai Region in mid-late May 2017

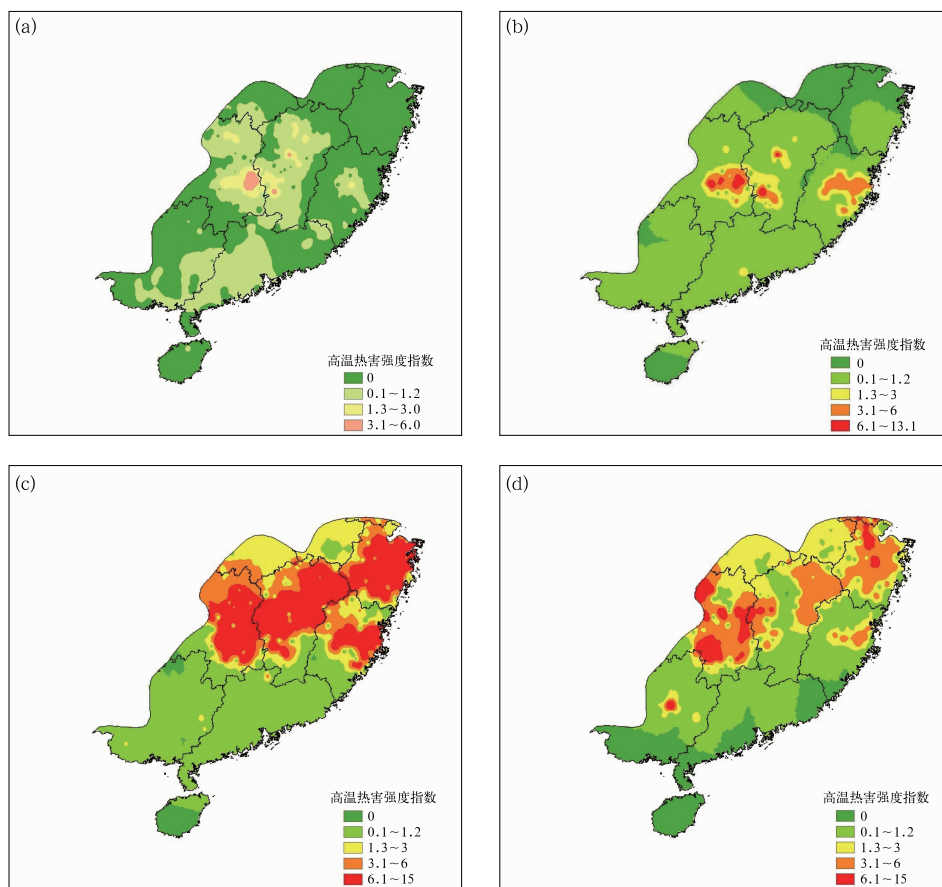


图 3 2013 年 6 月中旬至 7 月中旬江南、华南早稻高温热害强度指数空间分布  
(a) 6 月中旬, (b) 6 月下旬, (c) 7 月上旬, (d) 7 月中旬

Fig. 3 Spatial changes of heat damage intensity index of early rice in south of the Yangtze River and South China in 2013  
(a) middle June, (b) late June, (c) early July, (d) middle July



2013年6月中旬至7月中旬江南华南早稻区逐旬高温热害强度指数分布,可以十分清楚地看出高温热害的发展过程和空间分布。

## 2.2 基于作物模拟模型的灾害影响定量评估技术

目前业务上使用的作物模型主要包括 WO-FOST、ORYZA2000、WheatSM 模型,其中 WO-FOST 模型主要用来模拟冬小麦和玉米生长发育,WheatSM 主要用于模拟冬小麦生长发育,ORYZA2000 主要用于模拟水稻生长发育。利用作物模拟模型进行农业气象灾害影响评估的主要思路是将气候平均态驱动下的模拟结果与实际气象要素驱动下的模拟结果对比,通过对比两者之间的差异,确定高温热害、低温冷害等农业气象灾害对作物生长影响的程度;也可以将灾害发生年的模拟结果与正常年、典型年模拟结果进行比较,确定灾害对作物生长的影响程度(侯英雨等,2018a)。

例如,模拟高温热害对水稻生长发育的可能影响,首先确定水稻是否处于对高温敏感的发育期,也就是水稻的抽穗扬花期和灌浆期,可以根据实际气象条件驱动作物模型模拟水稻发育进程(DVS),当达到高温影响关键时期的 DVS 即可进行高温热害灾害影响评估。ORYZA2000 模型对灌浆期高温热害的响应主要体现在发育速率加快导致的灌浆期缩短和高温导致光合速率的下降,对抽穗开花期高温热害的响应则主要是通过对开花授粉的影响来模拟对最终产量的影响,计算公式如下:

$$SF2 = \frac{1}{1 + \exp[0.853(T_m - 36.6)]} \quad (4)$$

式中:SF2 为水稻颖花结实率(单位:%), $T_m$  为抽穗开花期间( $0.96 \leq DVS \leq 1.2$ )日最高温度的平均值(单位:℃),36.6℃为颖花不育的临界温度,可根据品种特性进行更改。具体模拟时,需要设计两个情景:一是预报情景驱动 ORYZA2000 模型,将高温敏感时段精细化温度气象要素预报值代入作物模型,模拟该时段高温影响下水稻穗干重或产量;二是平均态情景,即模拟时段气温要素采用近 30 年平均值,代入模型后模拟水稻穗干重或产量;然后将两个情景下模拟的水稻穗干重或产量进行对比分析。如利用 ORYZA2000 模型模拟 2016 年 6 月 22 日至 7 月 1 日高温对早稻产量的影响,可以定量模拟并分析出高温对南方早稻区以及不同早稻主产省(自治区)产量的可能影响(图 4)。

农业气象灾害机理复杂,有些灾害过程难以在

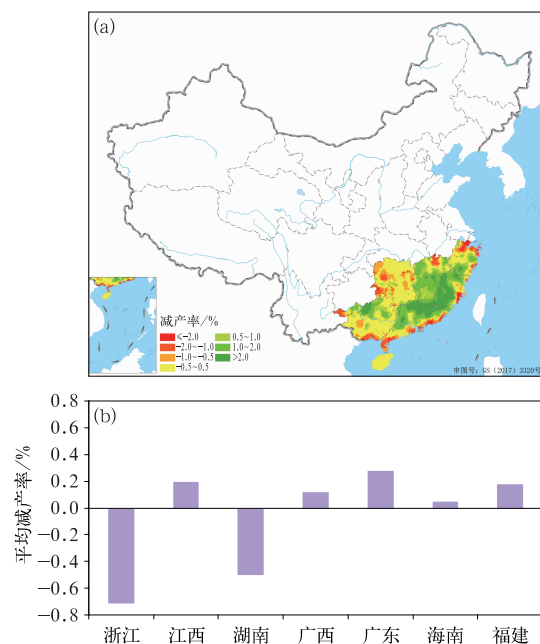


图 4 利用 ORYZA2000 作物模型模拟的 2016 年 6 月 22 日至 7 月 1 日高温热害对南方早稻产量的影响

(a)早稻受高温热害影响减产率空间分布,  
(b)早稻主产省(自治区)受高温热害影响平均减产率

Fig. 4 Simulation of heat damage from 22 June to 1 July 2016 to early rice yield in Southern China by ORYZA2000 Crop Model

(a) spatial distribution of yield reduction rate affected by high temperature heat, (b) average yield reduction rate in main yield provinces affected by high temperature heat

模型中被描述。以干旱灾害影响模拟为例,现有作物模型中多未考虑干旱对作物物候期的影响;此外,不同阶段或者不同程度的干旱对作物的影响并非全都为负作用,在某些阶段轻微干旱对作物生长是一个正效应,这在模型中难以用数量化的过程进行描述(余卫东等,2009)。再有,对于某些累积型农业气象灾害,或危害持续时间小于 1 天,甚至只有几个小时的农业气象灾害的评估,作物模型的识别或者模拟往往达不到理想效果(侯英雨等,2018a)。

## 3 动态化、精细化农业气象灾害预报技术

### 3.1 基于智能网格气象要素预报的农业气象灾害预报技术

近年来,随着智能网格气象要素预报技术的发

展,气象要素预报的时空分辨率已能够达到千米级和小时级,精细化程度不断提高,为农业气象灾害预报提供了大量精细化的基础信息。在智能网格气象要素预报的基础上,可以十分便捷地判断灾害性天气或气候异常出现和持续的时间、气象因子偏离作物正常生长发育所需的幅度,并根据农业气象灾害指标判断是否能达到致灾标准、致灾等级(郭安红等,2014)。此外,随着作物发育期预报业务技术的发展,其预报准确性、空间化能力不断提升,某一个空间格点上作物是否处在对灾害天气敏感的阶段也可以十分便捷地诊断出来,进而结合作物长势的监测判断,可以综合判断作物受灾害影响的程度。运用地理信息系统和现代信息处理技术,将上述业务流程进行梳理和实现,就能将农业气象灾害等级、区域范围进行精细化空间上的描述和表达(图 5)。

基于智能网格气象要素预报的精细化农业气象灾害预报业务包括高温热害、干热风、霜冻害、寒露风等主要农业气象灾害,实现了未来 1~10 d 发生区域、程度的逐日滚动预报和发布,空间精细化能力为 5 km 格点。例如,图 6 为 2021 年 5 月 25 日起报的未来 1~10 d 北方冬小麦区干热风精细化预报,可以十分直观地看出未来 1~10 d 逐日出现干热风的分布。

### 3.2 农业病虫害发生发展气象等级预报技术

病虫害发生发展气象等级预报已逐渐发展成为现代农业防灾减灾业务服务的一个重要组成部分。

其针对病虫害发生发展和危害的不同特点,分别建立了促病指数预报模型和气象适宜度综合指数预报模型(张旭晖等,2008;何永坤等,2008;郭安红等,2009;王纯枝等,2020)。以小麦赤霉病和水稻稻瘟病气象等级预报为例,其主要采用的是促病指数预报模型。首先分析时段内实际光、温、湿等气象条件与病原物适宜的气象条件指标的匹配程度,判断是否能够出现促病暖湿日;当达到促病暖湿日的条件时,根据促病暖湿日出现时间是否为作物对该病原物敏感的时段,以及促病暖湿日连续出现长短两个影响系数来综合计算判定促病指数;最后通过气象等级分级指标来确定小麦赤霉病和水稻稻瘟病气象等级预报的等级。

促病指数( $Z$ )预报模型如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i A_i D_i \quad (5)$$

式中: $Z$  为病害关键时段内促病暖湿日( $D_i$ )及其出现时间影响系数( $A_i$ )和连续出现时长影响系数( $C_i$ )的函数。其中, $D_i$  为判断第  $i$  日是否为促病暖湿日,若是则取  $D_i = 1$ ,否则  $D_i = 0$ ;  $A_i$  为第  $i$  个暖湿日出现时间对促病指数的影响系数,可以认为时段内每个暖湿日出现都具有相同的作用和影响,取值为 1,也可以根据暖湿日在病害危害关键时段内出现时间不同、作用和影响不同而率定影响系数(张旭晖等,2008);  $C_i$  为第  $i$  个暖湿日持续出现对促病指数的影响系数,一般情况下持续时间越长影响越大。

基于病虫害发生发展气象等级预报技术,通过

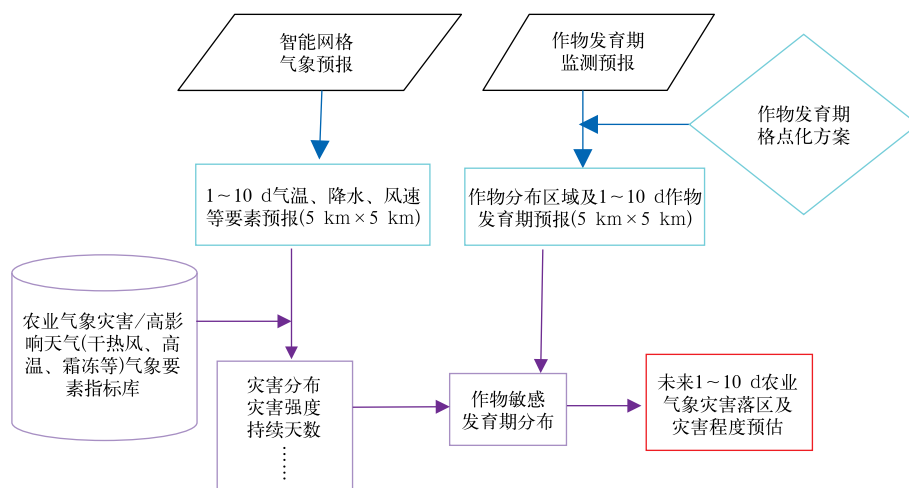


图 5 基于智能网格气象要素预报的农业气象灾害预报技术流程

Fig. 5 Flow chart of refinement agricultural meteorological disaster forecast based on intelligent grid meteorological element prediction

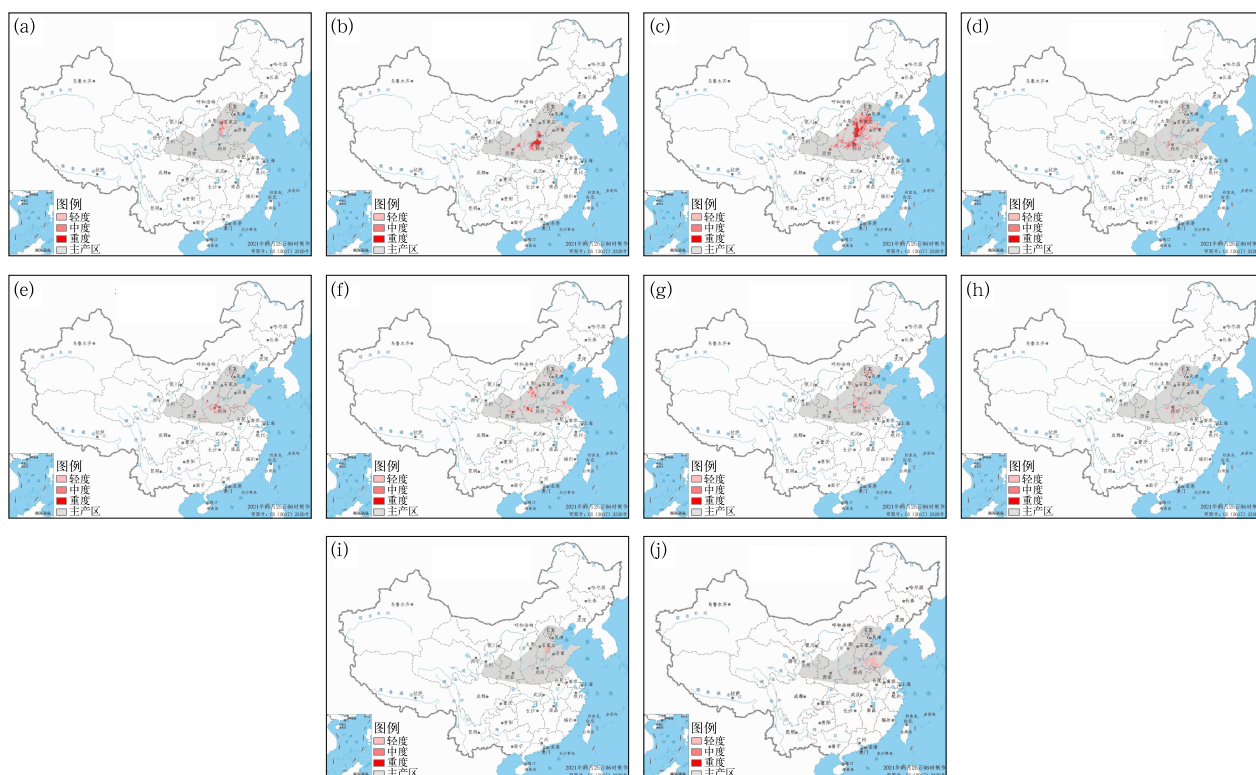


图6 2021年5月25日起报的未来1~10 d北方冬小麦区干热风精细化预报

(a) 24 h, (b) 48 h, (c) 72 h, (d) 96 h, (e) 120 h, (f) 144 h, (g) 168 h, (h) 192 h, (i) 216 h, (j) 240 h

Fig. 6 Refinement hot-dry wind forecast in winter wheat region in North China for future 1–10 d issued on May 25 2021

(a) 24 h, (b) 48 h, (c) 72 h, (d) 96 h, (e) 120 h, (f) 144 h, (g) 168 h, (h) 192 h, (i) 216 h, (j) 240 h

配套的业业务平台建设、业务流程的梳理以及产品发布平台,在病虫害防治关键期或猖獗期之前,开展病虫害发生发展气象条件预报业务服务。此外,每年4—9月,与农业部门实时会商,根据病虫情监测实况和气象条件监测预报,分析未来10 d可能大发生

或偏重发生的病虫害及其可能成灾或危害加重的区域分布,在中央电视台新闻联播的天气预报栏目联合发布农业病虫害预报预警信息(图7),提醒有关部门和农业生产者及时防控病虫害。

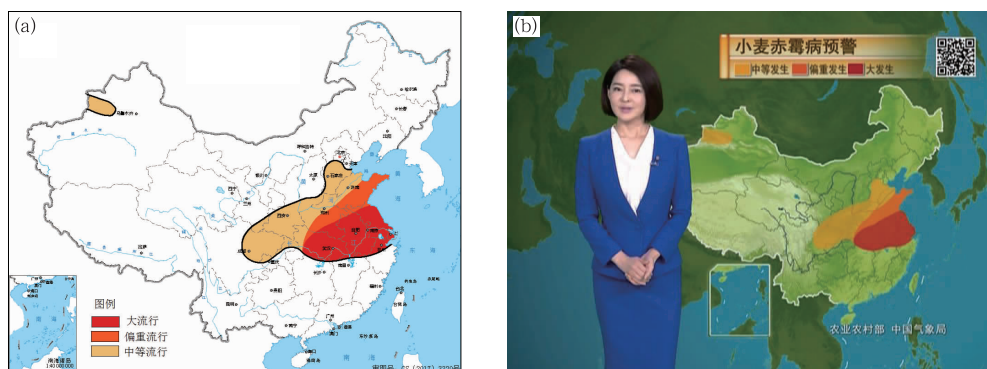


图7 2019年4月3日小麦赤霉病预警

(a) 业务产品, (b) 电视播报

Fig. 7 Wheat scab warning on 3 April 2019

(a) operational product, (b) television broadcast

## 4 未来展望

现代天气预报技术、农业气象观测技术和信息化技术的迅猛发展,给农业气象灾害监测预报评估技术的发展带来了前所未有的机遇,但是气候变化背景下农业气象灾害发生频率增加、强度增强、危害加重也给灾害预报预警带来了严峻的挑战。在保障粮食安全、防灾减灾决策层面上,需要了解一定区域内或粮食主产区农业气象灾害的现状、未来发展趋势,以便采取防灾减灾政策上或资源配置上的调整;另一方面,对于广大农村个体或者农户来说,更需要了解地块尺度上农业经济作物会不会有灾害发生、如何减免损失,所以在时间上和空间上都要求有更加精细化的农业气象灾害监测评估和预报预警信息服务。因而,面向我国粮食生产提质增效以及乡村振兴的需求,迫切需要借鉴国际先进技术,加快发展自动化观测和信息采集识别技术,获取规范、精细和准确的灾害监测信息;充分挖掘大数据应用分析评估技术,开展精细化农业气象灾害损失快速评估技术研发;利用现代天气预报技术、信息技术、数值模拟技术以及人工智能学习技术,开展短期、中长期精细化农业气象灾害影响预报与风险预警技术研发;另外,开展多时效、全覆盖农作物重大病虫害气象风险监测评估和预测预警业务服务,为保障国家粮食安全、农业高质量发展和精准、高效防灾减灾提供技术支撑。

其中,农业气象灾害风险评估是未来农业气象灾害监测预报评估业务服务亟需发展的主要内容之一(邓国等,2001;黄崇福,2005;李世奎等,2004;王春乙等,2010;2015;张继权和李宁,2007;蔡菁菁等,2013)。如何构建动态的灾害风险评估指标和模型,如何将客观的致灾因子风险与灾害风险评估中其他因子的自然属性和社会属性进行综合集成,并用精细化、量化的业务技术方法表达出来,是农业气象灾害风险动态评估业务技术需要解决的关键问题;同时,多灾种农业气象灾害风险综合评估也是亟需突破的关键业务技术问题,其中多灾种致灾因子的集成效应以及承灾体的综合脆弱性、区域防灾减灾能力的综合有效性都是需要量化描述的关键问题。需要注意的是,在气候变化背景下,农业气象灾害的风险也是有变化的,动态化农业气象灾害风险评估业务需要在充分认识这一背景的前提下,结合

农业气象灾害风险的时空新变化和新规律而开展。

## 参考文献

- 蔡菁菁,王春乙,张继权,2013. 东北地区玉米不同生长阶段干旱冷害危险性评价[J]. 气象学报,71(5):976-986. Cai J J, Wang C Y, Zhang J Q, 2013. An assessment of the drought disaster and chilling injury hazard for maize in the various growth stages in Northeast China[J]. Acta Meteor Sin, 71(5):976-986(in Chinese).
- 邓国,王昂生,李世奎,等,2001. 风险分析理论及方法在粮食生产中的应用初探[J]. 自然资源学报,16(3):221-226. Deng G, Wang A S, Li S K, et al, 2001. Risk theory and method and its initial application in grain yield[J]. J Nat Resour, 16(3):221-226(in Chinese).
- 冯明,刘安国,吴义城,等,2008. 主要农作物高温危害温度指标:GB/T 21985—2008[S]. 北京:中国标准出版社. Feng M, Liu A G, Wu Y C, et al, 2008. Temperature index of high temperature harm for main crops:GB/T 21985—2008[S]. Beijing:China Standard Press(in Chinese).
- 郭安红,程路,李森,等,2014. 基于现代天气预报业务的农业气象灾害中短期预估[J]. 天气预报,6(6):68-74. Guo A H, Cheng L, Li S, et al, 2014. Short- and medium-term estimates of agrometeorological disasters based on modern weather forecasting operations[J]. Wea For Rev, 6(6):68-74(in Chinese).
- 郭安红,何亮,韩丽娟,等,2018. 早稻高温热害强度指数构建及气候危险性评价[J]. 自然灾害学报,27(5):96-106. Guo A H, He L, Han L J, et al, 2018. Construction of heat damage intensity index of early rice and its climate risk assessment[J]. J Nat Dis, 27(5):96-106(in Chinese).
- 郭安红,李召祥,何亮,等,2020. 东北地区不同降水保证率下玉米水分亏缺和干旱强度分析[J]. 干旱地区农业研究,38(1):266-273. Guo A H, Li Z X, He L, et al, 2020. Analysis of maize water deficit and drought intensity under different precipitation guarantee rates in Northeastern China[J]. Agric Res Arid Areas, 38(1):266-273(in Chinese).
- 郭安红,王建林,王纯枝,等,2009. 内蒙古草原蝗虫发生发展气象适宜度指数构建方法[J]. 气象科技,37(1):42-47. Guo A H, Wang J L, Wang C Z, et al, 2009. Meteorological suitability index of grasshopper growth and development in inner Mongolia[J]. Meteor Sci Technol, 37(1):42-47(in Chinese).
- 国家气象局,1993. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社. National Meteorological Bureau, 1993. Agrometeorological Observation Code[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 何永坤,阳国燕,罗攀攀,2008. 稻瘟病发生发展气象条件等级业务预报技术研究[J]. 气象,34(12):110-113. He Y K, Yang Y Y, Luo Z Z, 2008. Research on operational meteorological conditions forecasting technology of the occurrence and development of rice blast[J]. Meteor Mon, 34(12):110-113(in Chinese).
- 侯英雨,何亮,靳宁,等,2018a. 中国作物生长模拟监测系统构建及应

- 用[J]. 农业工程学报, 34(21):165-175. Hou Y Y, He L, Jin N, et al, 2018a. Establishment and application of crop growth simulating and monitoring system in China[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 34(21):165-175(in Chinese).
- 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等, 2018b. 国家级现代农业气象业务技术进展[J]. 应用气象学报, 29(6):641-656. Hou Y Y, Zhang L, Wu M X, et al, 2018b. Advances of modern agrometeorological service and technology in China[J]. J Appl Meteor Sci, 29(6):641-656(in Chinese).
- 侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等, 2007. 干旱监测指数研究[J]. 生态学杂志, 26(6):892-897. Hou Y Y, He Y B, Liu Q H, et al, 2007. Research progress on drought indices[J]. Chin J Ecol, 26(6):892-897(in Chinese).
- 黄崇福, 2005. 自然灾害风险评估:理论与实践[M]. 北京:科学出版社:122-134. Huang C F, 2005. Risk Assessment of Natural Disaster: Theory & Practice[M]. Beijing: Science Press:122-134(in Chinese).
- 霍治国, 姜燕, 李世奎, 等, 2007. 小麦干热风灾害等级:QX/T 82—2007[S]. 北京:中国标准出版社. Huo Z G, Jiang Y, Li S K, et al, 2007. Disaster grade of dry-hot wind for wheat:QX/T 82—2007[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- 霍治国, 盛绍学, 贺楠, 等, 2009. 冬小麦、油菜涝渍等级:QX/T 107—2009[S]. 北京:气象出版社. Huo Z G, Sheng S X, He N, et al, 2009. Grade of waterlogging for winter wheat and rape:QX/T 107—2009[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 李森, 韩丽娟, 毛留喜, 等, 2018. 小麦干热风灾害综合强度指数研究[J]. 自然灾害学报, 27(2):174-183. Li S, Han L J, Mao L X, et al, 2018. A modified comprehensive intensity index of dry-hot wind hazard for wheat[J]. J Nat Dis, 27(2):174-183(in Chinese).
- 李世奎, 霍治国, 王素艳, 等, 2004. 农业气象灾害风险评估体系及模型研究[J]. 自然灾害学报, 13(1):77-87. Li S K, Huo Z G, Wang S Y, et al, 2004. Risk evaluation system and models of agrometeorological disasters[J]. J Nat Dis, 13(1):77-87(in Chinese).
- 李轩, 郭安红, 庄立伟, 2012. 基于GIS的主要农作物病虫害气象等级预报系统研究[J]. 国土资源遥感, 24(1):104-109. Li X, Guo A H, Zhuang L W, 2012. The main crop diseases and pests meteorology level forecast system based on GIS[J]. Remote Sens Land Res, 24(1):104-109(in Chinese).
- 刘布春, 刘文萍, 梅旭荣, 等, 2006. 我国农业气象业务引入作物生长模型的前景[J]. 气象, 32(12):10-15. Liu B C, Liu W P, Mei X R, et al, 2006. Prospects for crop growth models introduced into agrometeorology services in China[J]. Meteor Mon, 32(12):10-15(in Chinese).
- 吕厚荃, 张玉书, 李茂松, 等, 2016. 农业干旱等级:GB/T 32136—2015[S]. 北京:中国标准出版社. Lyu H Q, Zhang Y S, Li M S, et al, 2016. Grade of agricultural drought:GB/T 32136—2015[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- 马树庆, 刘铮, 刘实, 等, 2008. 作物霜冻害等级:QX/T 88—2008[S]. 北京:气象出版社. Ma S Q, Liu Z, Liu S, et al, 2008. Grade of crop frost damage:QX/T 88—2008[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 马树庆, 袁祝香, 马力文, 等, 2015. 北方水稻低温冷害指标持续适用性检验与比较[J]. 气象, 41(6):778-785. Ma S Q, Xi Z X, Ma L W, et al, 2015. Test and comparison of sustainable suitability of meteorological indicators for rice cold damages in the north of China[J]. Meteor Mon, 41(6):778-785(in Chinese).
- 马玉平, 王石立, 王馥棠, 2005. 作物模拟模型在农业气象业务应用中的研究初探[J]. 应用气象学报, 16(3):293-303. Ma Y P, Wang S L, Wang F T, 2005. A preliminary study on the application of crop simulation models in agrometeorological services[J]. J Appl Meteor Sci, 16(3):293-303(in Chinese).
- 毛留喜, 吕厚荃, 2010. 国家级农业气象业务技术综述[J]. 气象, 36(7):75-80. Mao L X, Lyu H Q, 2010. Overview of national level agrometeorological operational techniques[J]. Meteor Mon, 36(7):75-80(in Chinese).
- 宋迎波, 王建林, 杨霁云, 等, 2006. 粮食安全气象服务[M]. 北京:气象出版社:68-80. Song Y B, Wang J L, Yang F Y, et al, 2006. Meteorological Services for Food Security[M]. Beijing: China Meteorological Press:68-80(in Chinese).
- 苏永秀, 李政, 吕厚荃, 2008. 水分盈亏指数及其在农业干旱监测中的应用[J]. 气象科技, 36(5):592-595. Su Y X, Li Z, Lyu H Q, 2008. Application of water budget index in agricultural drought monitoring[J]. Meteor Sci Technol, 36(5):592-595(in Chinese).
- 王保生, 杜筱玲, 刘文英, 等, 2008. 寒露风等级:QX/T 94—2008[S]. 北京:气象出版社. Wang B S, Du X L, Liu W Y, et al, 2008. Grade of autumn low temperature:QX/T 94—2008[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 王春乙, 2007. 重大农业气象灾害研究进展[M]. 北京:气象出版社. Wang C Y, 2007. Research Progress on Major Agrometeorological Disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 王春乙, 王石立, 霍治国, 等, 2005. 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[J]. 气象学报, 63(5):659-671. Wang C Y, Wang S L, Huo Z G, et al, 2005. Progress in research of agro-meteorological disasters in China in recent decade[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):659-671(in Chinese).
- 王春乙, 张继权, 霍治国, 等, 2015. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报, 73(1):1-19. Wang C Y, Zhang J Q, Huo Z G, et al, 2015. Prospects and progresses in the research of risk assessment of agro-meteorological disasters[J]. Acta Meteor Sin, 73(1):1-19(in Chinese).
- 王春乙, 张雪芬, 赵艳霞, 2010. 农业气象灾害影响评估与风险评价[M]. 北京:气象出版社. Wang C Y, Zhang X F, Zhao Y X, 2010. Impact Evaluation and Risk Assessment of Agrometeorological Disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 王纯枝, 霍治国, 张蕾, 等, 2020. 北方地区小麦蚜虫气象适宜度预报模型构建[J]. 应用气象学报, 31(3):280-289. Wang C Z, Huo Z



- G, Zhang L, et al, 2020. Construction of forecasting model of meteorological suitability for wheat aphids in the Northern China[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3): 280-289(in Chinese).
- 王密侠, 马成军, 蔡焕杰, 1998. 农业干旱指标研究与进展[J]. 干旱地区农业研究, 16(3): 119-124. Wang M X, Ma C J, Cai H J, 1998. Research progress in agricultural drought index[J]. Agric Res Arid Areas, 16(3): 119-124(in Chinese).
- 王鹏新, Wang Z M, 龚健雅, 等, 2003. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 18(4): 527-533. Wang P X, Wang Z M, Gong J Y, et al, 2003. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products[J]. Adv Earth Sci, 18(4): 527-533(in Chinese).
- 王石立, 2003. 近年来我国农业气象灾害预报方法研究概述[J]. 应用气象学报, 14(5): 574-582. Wang S L, 2003. Review of the progress in methods of agrometeorological disaster prediction in China[J]. J Appl Meteor Sci, 14(5): 574-582(in Chinese).
- 王石立, 马玉平, 2008. 作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考[J]. 气象, 34(6): 3-10. Wang S L, Ma Y P, 2008. The progress in application of crop growth simulation models to agro-meteorological services in China[J]. Meteor Mon, 34(6): 3-10(in Chinese).
- 许莹, 王猛, 杨太明, 等, 2020. 安徽省一季稻高温热害致灾指标研究[J]. 气象, 46(6): 857-862. Xu Y, Wang M, Yang T M, et al, 2020. Research on disaster-causing index of single-season-rice heat injury in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 46(6): 857-862(in Chinese).
- 余卫东, 张弘, 刘伟昌, 2009. 我国农业气象灾害评估研究现状和发展方向[J]. 气象与环境科学, 32(3): 73-77. Yu W D, Zhang H, Liu W C, 2009. Research overview and development trend on the assessment of agrometeorological disasters in China[J]. Meteor Environ Sci, 32(3): 73-77(in Chinese).
- 张继权, 李宁, 2007. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社. Zhang J Q, Li N, 2007. Quantitative Methods and Applications of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters[M]. Beijing: Beijing Normal University Press(in Chinese).
- 张钛仁, 宋善允, 田翠英, 等, 2011. 行业气象服务效益评估方法及其研究[J]. 气象科学, 31(2): 194-199. Zhang T R, Song S Y, Tian C Y, et al, 2011. The benefit valuation method and analytical study of profession meteorological service in China[J]. J Meteor Sci, 31(2): 194-199(in Chinese).
- 张雪芬, 薛红喜, 孙涵, 等, 2012. 自动农业气象观测系统功能与设计[J]. 应用气象学报, 23(1): 105-112. Zhang X F, Xue H X, Sun H, et al, 2012. Function and designing of automatic observing system for agro-meteorology[J]. J Appl Meteor Sci, 23(1): 105-112(in Chinese).
- 张旭晖, 高苹, 居为民, 等, 2008. 小麦赤霉病气象等级预报模式研究[J]. 安徽农业科学, 36(3): 10030-10032. Zhang X H, Gao P, Ju W M, et al, 2008. Study on prediction model of meteorological grades for wheat scab[J]. J Anhui Agric Sci, 36(3): 10030-10032(in Chinese).
- 张艳红, 吕厚荃, 李森, 2008. 作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性[J]. 气象科技, 36(5): 596-600. Zhang Y H, Lyu H Q, Li S, 2008. Applicability of crop water deficit index in agricultural drought monitoring[J]. Meteor Sci Technol, 36(5): 596-600(in Chinese).
- 张养才, 何维勋, 李世奎, 1991. 中国农业气象灾害概论[M]. 北京: 气象出版社: 272-282, 348-353. Zhang Y C, He W X, Li S K, 1991. Introduction to Agricultural Meteorological Disasters in China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 272-282, 348-353(in Chinese).
- 朱自玺, 刘荣花, 方文松, 等, 2003. 华北地区冬小麦干旱评估指标研究[J]. 自然灾害学报, 12(1): 145-150. Zhu Z X, Liu R H, Fang W S, et al, 2003. Evaluation indices of drought of winter wheat in North China[J]. J Nat Dis, 12(1): 145-150(in Chinese).