

QIHOU BIANHUA BEIJING XIA
NONGYE QIXIANG ZAIHAI
DUI WOGUO NONGYE SHENGCHAN
YINGXIANG PINGGU JISHU

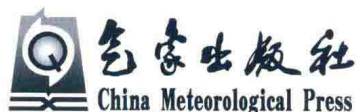
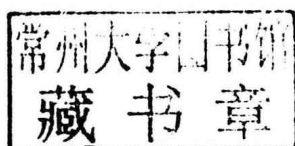
气候变化背景下农业气象灾害 对我国农业生产影响评估技术

宋艳玲 王建林 等◎著



气候变化背景下农业气象灾害 对我国农业生产影响评估技术

宋艳玲 王建林 等 著



内 容 简 介

本书收集整理了主要农业气象灾害指标和逐日气象资料,建立农业气象灾害数值化反演数据库;研究近几十年来主要农业气象灾害时空变化规律;在收集市(县)级主要作物产量资料的基础上,研究主要农业气象灾害对其产量的影响,建立农业气象灾害与粮食产量损失的定量评估模型;将气候情景数据内插到我国农业区的站点上,并对情景数据进行订正,建立未来情景数据库;研究未来我国主要农业气象灾害可能的时空演变及其对农业生产的影响。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化背景下农业气象灾害对我国农业生产影响评估技术 / 宋艳玲等著. --北京:气象出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-5029-5777-3

I. ①气… II. ①宋… III. ①农业气象灾害-影响-农业生产-评估-研究-中国 IV. ①F325.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 217699 号

气候变化背景下农业气象灾害对我国农业生产影响评估技术

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:张 媛 崔晓军

终 审:吴晓鹏

责任校对:王丽梅

责任技编:赵相宁

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:17.5

字 数:448 千字

版 次:2017 年 8 月第 1 版

印 次:2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价:75.00 元

编 委 会

主 编：宋艳玲 王建林

编写人员(以姓氏拼音字母为序)：

白月明	蔡雯悦	陈慧华	陈 潇	段海来
范 莉	冯喜媛	高 苹	官秀珠	何永坤
胡洛林	李文科	刘 玲	刘 实	刘 贞
罗蒋梅	罗孳孳	钱永兰	石 英	宋迎波
谭方颖	唐力生	唐余学	涂 钢	王春林
王 胜	王 喆	吴洪颜	项 璞	谢小萍
谢志清	徐玲玲	颜亮东	杨霏云	杨 旭
俞剑蔚	张建平	张 佩	郑昌玲	郑秋红
钟海玲				

前 言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,相对于1850年到1900年的50年间,1880—2012年全球海陆表面平均温度升高了 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$)。受全球气候变暖的影响,近几十年来我国农业气象灾害频发,已成为影响我国粮食产量稳定的主要因素。例如,2003年,干旱、洪涝、低温寡照以及夏季气温偏低、日照偏少和江南、华南盛夏 35°C 以上的高温天气偏多等一系列不利气候因素和各种气象灾害造成我国粮食减产达695万吨,减幅为1.5%,占总减少量的25.8%。2007年,东北地区春季出现低温天气、夏季发生严重的夏伏旱,造成大豆产量损失154.8万吨,减产10.3%;同年,华北大部出现春夏连旱,江汉、淮河流域夏季先后出现区域性持续暴雨或大暴雨灾害,造成玉米产量损失336.1万吨,减产2.2%。

2007年我国发布的《气候变化国家评估报告》指出,气候变化将对中国自然生态系统和社会经济系统产生重要影响,尤其对农牧业生产、水资源供需等的影响更为显著,而且这些影响以负面为主,其中某些影响具有不可逆性。如果不采取有效的应对措施,气候变化将严重影响中国未来的粮食安全。因此,开展全球气候变暖背景下,我国农业气象灾害时空变化规律及其对农业生产,特别是对粮食产量影响的评估技术研究,对我国农业防灾减灾和粮食安全都具有非常重要的战略意义。

2011年,国家财政部公益性行业(气象)科研专项经费项目批准设立了“气候变化背景下农业气象灾害对我国农业生产影响的评估技术(GYHY201106021)”项目,该项目针对我国玉米干旱和低温冷害、水稻高温和低温冷害、冬小麦干旱和低温冷害等农业气象灾害分布特点及其对农作物产量的影响开展了研究,取得了我国主要农业气象灾害的时空变化规律、典型农区主要农业气象灾害与粮食产量损失的定量评估模型、未来气候变化背景下我国主要农业气象灾害可能的时空变化规律及对农业生产的可能影响等一系列科技成果。以此为基础,我们编写了《气候变化背景下农业气象灾害对我国农业生产影响评估技术》,以供相关管理人员、科技人员和高等院校师生等参考。

本书共分8章。其中第1章“农业气象灾害指标的规范化研究及重大灾害事例”由杨霏云、郑秋红、罗蒋梅、李文科、王喆执笔;第2章“气候变化背景下华北农业气象灾害对农业生产影响评估技术”由王建林、谭方颖、郑昌玲、徐玲玲、

钱永兰、宋迎波执笔；第3章“气候变化背景下东北农业气象灾害对农业生产影响评估技术”由涂钢、刘实、冯喜媛、杨旭执笔；第4章“气候变化背景下西北农业气象灾害对农业生产影响评估技术”由白月明、颜亮东、刘玲执笔；第5章“气候变化背景下华东农业气象灾害对农业生产影响评估技术”由高苹、吴洪颜、谢志清、张佩、俞剑蔚、项瑛、谢小萍、胡洛林执笔；第6章“气候变化背景下西南农业气象灾害对农业生产影响评估技术”由何永坤、唐余学、范莉、张建平、罗孳孳执笔；第7章“气候变化背景下华南农业气象灾害对农业生产影响评估技术”由王春林、陈慧华、唐力生、段海来执笔；第8章“气候变化背景下未来农业气象灾害预估”由宋艳玲、石英、蔡雯悦、陈潇、钟海玲、王胜、刘贞执笔。全书由宋艳玲和王建林统稿。

著者

2017年1月

目 录

前言

第 1 章 农业气象灾害指标的规范化研究及重大灾害事例·····	(1)
1.1 农业气象灾害指标的规范化研究·····	(1)
1.1.1 农业气象干旱指标的规范·····	(1)
1.1.2 东北低温冷害指标·····	(7)
1.2 重大农业气象灾害事例·····	(15)
1.2.1 重大干旱事例·····	(15)
1.2.2 重大低温冷害事例·····	(17)
1.2.3 重大高温热害事例·····	(19)
1.2.4 重大湿渍害事例·····	(20)
1.2.5 重大暴雨事例·····	(21)
参考文献·····	(22)
第 2 章 气候变化背景下华北农业气象灾害对农业生产影响评估技术·····	(25)
2.1 华北冬小麦干旱、低温冷害及玉米干旱数值化历史数据集的建立·····	(25)
2.1.1 冬小麦干旱数值化历史数据集的建立·····	(26)
2.1.2 冬小麦低温灾害历史数据集的建立·····	(30)
2.1.3 玉米干旱数值化历史数据集的建立·····	(33)
2.2 华北冬小麦干旱、低温灾害及玉米干旱时空演变规律的分析·····	(36)
2.2.1 华北冬小麦干旱时空变化规律·····	(36)
2.2.2 华北冬小麦低温冷害时空变化规律·····	(40)
2.2.3 华北玉米干旱时空变化规律·····	(44)
2.3 华北冬小麦干旱、低温冷害产量损失评估模型与玉米干旱产量损失评估模型的建立·····	(48)
2.3.1 华北冬小麦干旱产量损失评估模型·····	(48)
2.3.2 华北冬小麦低温冷害产量损失评估模型·····	(51)
2.3.3 华北冬小麦干旱低温冷害综合产量损失评估模型·····	(53)
2.3.4 华北玉米干旱产量损失评估模型·····	(55)
第 3 章 气候变化背景下东北农业气象灾害对农业生产影响评估技术·····	(58)
3.1 反演东北主要农业气象灾害(水稻、玉米低温冷害及玉米干旱)数值化历史数据集·····	(59)

3.1.1	水稻冷害数值化历史数据集的建立	(59)
3.1.2	玉米冷害数值化历史数据集的建立	(64)
3.1.3	建立东北玉米干旱数值化历史数据集	(66)
3.2	东北水稻低温冷害、玉米低温冷害、玉米干旱时空演变规律	(70)
3.2.1	水稻低温冷害时空演变规律	(70)
3.2.2	东北玉米低温冷害时空演变规律	(72)
3.2.3	东北玉米干旱时空演变规律	(74)
3.3	东北三省玉米干旱、水稻低温冷害产量损失评估模型的建立	(76)
3.3.1	水稻低温冷害产量损失评估模型的建立	(76)
3.3.2	玉米低温冷害产量损失评估模型建立	(78)
3.3.3	建立玉米干旱产量损失评估模型	(81)
第 4 章	气候变化背景下西北农业气象灾害对农业生产影响评估技术	(84)
4.1	西北地区玉米干旱、低温冷害(霜冻)指标	(84)
4.1.1	西北春玉米干旱、低温冷害(霜冻)数值化	(84)
4.1.2	西北春玉米的分布和研究站点	(85)
4.1.3	干旱、低温冷害(霜冻)灾害反演指标	(86)
4.2	西北玉米干旱、低温冷害(霜冻)时空变化规律及影响	(87)
4.2.1	近几十年来西北玉米干旱时空变化规律	(87)
4.2.2	近几十年来西北玉米低温冷害(霜冻)时空变化规律及影响	(90)
4.3	分析气象灾害对春玉米产量的影响,建立灾损评估模型	(96)
4.3.1	干旱	(96)
4.3.2	低温冷害(霜冻)	(98)
参考文献		(98)
第 5 章	气候变化背景下华东农业气象灾害对农业生产影响评估技术	(99)
5.1	资料来源	(99)
5.2	华东主要农业气象灾害数值化历史数据集	(99)
5.2.1	水稻高温热害数值化历史数据集	(99)
5.2.2	小麦湿渍害数值化历史数据集	(107)
5.2.3	华东冬小麦冻害数值化历史数据集的建立	(116)
5.3	水稻高温热害、小麦湿渍害和低温冷害的时空演变规律的分析	(118)
5.3.1	华东水稻高温热害时空变化规律	(118)
5.3.2	长江中下游春季湿渍害时空分布特征	(124)
5.3.3	长江中下游冬小麦春霜冻害时空变化特征	(131)
5.4	华东水稻高温热害、小麦湿渍害和低温冷害的产量损失模型的建立	(135)
5.4.1	华东单季稻种植区产量损失评估模型	(135)
5.4.2	模型总体检验	(136)
5.4.3	华东早稻种植区产量损失评估模型	(136)

5.4.4	华东早稻种植区产量损失评估模型检验	(138)
5.4.5	江淮流域单季稻高温热害灾损变化及应对策略	(139)
5.4.6	长江中下游地区冬小麦春季湿渍害分区评估研究	(147)
5.4.7	华东冬小麦种植区冻害产量损失评估模型	(152)
第6章 气候变化背景下西南农业气象灾害对农业生产影响评估技术		(158)
6.1	西南玉米干旱、水稻高温热害数值化历史数据集	(158)
6.1.1	玉米干旱数值化历史数据集	(160)
6.1.2	水稻高温热害历史数据集	(169)
6.2	西南玉米干旱、水稻高温热害时空演变规律	(175)
6.2.1	玉米全生育期干旱的时空分布特征	(175)
6.2.2	西南水稻高温热害时空变化规律	(184)
6.3	西南玉米干旱产量损失评估模型与水稻高温热害产量损失评估模型	(189)
6.3.1	西南玉米干旱产量损失评估模型	(189)
6.3.2	西南水稻高温热害产量损失评估模型	(194)
第7章 气候变化背景下华南农业气象灾害对农业生产影响评估技术		(197)
7.1	资料	(198)
7.1.1	研究区域	(198)
7.1.2	华南水稻产量资料	(198)
7.1.3	华南水稻生育期数据集的建立	(198)
7.2	灾害指标	(199)
7.2.1	建立物理意义清楚的气象旱涝指标	(201)
7.2.2	DI 指标适用性特征分析	(201)
7.2.3	华南水稻暴雨和干旱数值化	(203)
7.3	华南水稻暴雨和干旱时空演变规律分析	(204)
7.3.1	近 50 年华南气象干旱时空特征	(204)
7.3.2	华南早稻干旱灾害时空变化规律	(204)
7.3.3	华南晚稻干旱灾害时空变化规律	(211)
7.3.4	华南早稻暴雨灾害时空变化规律	(217)
7.3.5	华南晚稻暴雨灾害时空变化规律	(222)
7.4	华南水稻暴雨和干旱产量损失评估模型的建立	(224)
7.4.1	华南早稻干旱产量损失评估模型	(226)
7.4.2	华南晚稻干旱产量损失评估模型	(226)
7.4.3	华南早稻暴雨产量损失评估模型	(227)
7.4.4	华南晚稻暴雨产量损失评估模型	(227)
参考文献		(227)
第8章 气候变化背景下未来农业气象灾害预估		(229)
8.1	未来情景数据的订正方法	(230)

8.1.1 气温	(230)
8.1.2 降水	(238)
8.2 未来华北农业气象灾害及影响	(248)
8.2.1 华北农业气象灾害及影响	(248)
8.2.2 东北农业气象灾害及影响	(251)
8.2.3 西北农业气象灾害及影响	(253)
8.2.4 华东农业气象灾害及影响	(255)
8.2.5 华南农业气象灾害及影响	(262)
8.2.6 西南农业气象灾害及影响	(264)
参考文献	(267)

第1章 农业气象灾害指标的规范化研究及重大灾害事例

1.1 农业气象灾害指标的规范化研究

1.1.1 农业气象干旱指标的规范

干旱是导致农业减产或农产品质量下降的最主要自然灾害之一,农业气象干旱不仅存在于干旱和半干旱地区,在湿润和半湿润地区也广泛存在(张叶等,2006)。科学的评价指标和评估方法是准确研究农业干旱的关键。目前,各国应用的干旱指标已达五六十种之多(WMO,1975)。根据其计算所采用的指标,可分为以降水和温度等气象因子为基础的指数、以土壤含水量为基础的指数、以遥感监测为基础的指数和综合农业干旱指数四类。其中,以气象因子为基础的指标由于资料容易获得且意义简单明了,成为当前农业干旱监测与评估中广泛应用的主流指标(吴东丽等,2009)。本节主要对农业气象干旱监测与评估中常用的几个以气象因子为基础的指标:降水距平百分率、帕尔默干旱强度指数(PDSI)、综合气象干旱指数(CI)和作物水分亏缺指数进行介绍,包括各指标的基本原理、优缺点及其在实际应用中的修订进展。为读者在充分理解各指标原理及适用范围的基础上,了解更准确使用这些指标进行农业干旱监测评估的思路。

1.1.1.1 降水距平百分率

(1)基本原理及优缺点

降水距平百分率表示某时段的降水量与当地常年同期气候平均降水量的偏离程度,用降水量与常年同期气候平均降水量之差占常年同期气候平均降水量的百分率表示。它是最常用的气象干旱指标之一。某时段降水距平百分率按下列公式计算:

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\%$$

式中, P_a 为降水距平百分率(单位:%); P 为某时段降水量(单位:mm); $\bar{P}$ 为对应时段多年平均降水量(单位:mm),一般计算30a的平均值。

降水距平百分率虽然单纯描述降水异常引起的干旱,但由于其所用资料简单且容易获取,物理意义明确,在农业气象研究中亦得到了广泛应用。但气象干旱并不等同于农业干旱,实际农业生产中,单纯从降水角度描述农业干旱,有时会比较片面,因为作物的生长需水主要依赖

于土壤水分,不同发育阶段的干旱对产量的影响也不同(刘晓静等,2012)。降水距平百分率指标适合于无土壤湿度观测、无水源供给的农业区和主要牧区天然草场的作物生长季(吕厚荃等,2008)。

(2)对降水距平百分率的修订——作物气候干旱指标

为弥补降水距平百分率指标描述作物干旱的不足,吴东丽等(2009)构建了作物气候干旱指数距平百分率,将冬小麦不同发育阶段的水分产量反应系数应用到降水距平百分率干旱指数中,同时量化底墒对冬小麦生长发育过程中起到的重要作用,作者通过对河南省卢氏县冬小麦历年干旱和减产率的计算,结果表明作物气候干旱指标负距平百分率和减产率的相关性明显高于降水负距平百分率和减产率的相关性。此后,作者又利用该指标建立了华北地区小麦干旱等级指标体系和干旱时空演变特征(吴东丽等,2011,2012)。

作物气候干旱指数距平百分率具体表达式为:

$$A = \frac{Z_i - \bar{Z}}{\bar{Z}} \times 100\%$$

其中:

$$Z_i = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{C_0 + C_1 + \dots + C_n} R_i$$

式中, A 为作物气候干旱指标距平百分率(单位:%); Z_i 为第 i 年作物气候干旱指标值(单位:mm); $\bar{Z}$ 为多年平均作物气候干旱指标值(单位:mm); C_0 为底墒阶段的水分产量反应系数, $C_1, C_2, \dots, C_n$ 为作物不同发育阶段的水分产量反应系数; R_0 为底墒和播种前期的降水量(单位:mm), $R_1, R_2, \dots, R_i$ 为作物不同发育阶段的降水量(单位:mm)。

1.1.1.2 帕尔默干旱指数

(1)基本原理及优缺点

帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)由美国学者帕尔默于1965年提出(Palmer, 1965)。他通过对美国中西部地区(堪萨斯州西部和艾奥瓦州中部)多年气象资料的分析研究,提出了“对当前情况气候适宜降水”(CAFEC)的概念,实际降水与CAFEC的差值,在某种程度上反映了大气中水分因素与正常情况时的偏差大小,同时考虑前期天气条件对后期的影响,从而推导出一套完整的确定干旱持续时间和干旱程度变化的方法。PDSI具体计算分两步:①用水分平衡方法计算出气候适宜降水量($\hat{P}$);②求出本月的水分距平指数(Z),并综合考虑持续时间因子。计算如下:

$$\hat{P} = E\hat{T} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L}$$

$$Z = K \times d$$

$$d = P - \hat{P}$$

式中, $\hat{P}$ 为气候适宜降水量(单位:mm); $E\hat{T}$ 为气候适宜蒸散量(单位:mm); $\hat{R}$ 为气候适宜土壤补水量(单位:mm); $\hat{RO}$ 为气候适宜径流量(单位:mm); $\hat{L}$ 为气候适宜土壤失水量(单位:mm); P 为月实际降水量(单位:mm); K 为权重因子,取决于平均水分供给($\hat{P} + \hat{L}$)和平均水分需要($E\hat{T} + \hat{R} + \hat{RO}$),并与 d 的绝对值平均($\bar{D}$)有关。

美国利用9个地区的资料求得:

$$K_i = \frac{17.67}{\sum_{j=1}^{12} (\overline{D_j} K'_j)} K'_i$$

$$K'_i = 1.5 \lg \left[\left(\frac{\overline{PE}_i + \overline{R}_i + \overline{RO}_i}{\overline{P}_i + \overline{L}_i} + 2.8 \right) / \overline{D}_i \right] + 0.5$$

式中, $\sum_{j=1}^{12} (\overline{D_j} K'_j)$ 为多年平均年绝对水分异常; K_i 为气候特征系数或权重因子; K'_i 为气候特征系数的第二近似值; $\overline{PE}$ 为月可能蒸散量多年平均值(单位: mm); $\overline{R}$ 为月实际土壤补水量多年平均值(单位: mm); $\overline{RO}$ 为月实际径流量多年平均值(单位: mm); $\overline{P}$ 为月实际降水量多年平均值(单位: mm); $\overline{L}$ 为月实际土壤失水量多年平均值(单位: mm)。

根据堪萨斯州和艾奥瓦州两个地区的资料求出干旱指数:

$$x_i = Z_i/3 + 0.897x_{i-1}$$

式中, x_i 和 x_{i-1} 分别为该月和前一个月的干旱指数值; Z_i 为该月水分距平指数值。

需要指出的是, 帕尔默干旱指数中提出的气候适宜降水量和水分短缺是相对的, 提供数据的堪萨斯州和艾奥瓦州虽然同属于大陆性气候, 但艾奥瓦州明显湿润一些, 帕尔默干旱指数实质上是一个适用于不同气候的干旱指标。该指数不但可以表示干旱, 也可以表示湿期。当指标达到 -0.5 时, 就认为干旱开始了, 当指标值一回到 -0.5 ~ 0.5, 则干旱结束, 在湿期中, Z 值为正。帕默尔干旱指标的突出优点在于综合反映了水分亏缺量和持续时间对干旱程度的影响, 物理意义明确。帕尔默干旱指数计算程序虽然较复杂, 但程序确定后, 在计算机上计算是很方便的。在美国商业部和农业部联合发布的《天气和作物周报》中, 作物干旱监测, 发布全国作物生长季节期间的帕尔默干旱指数分布(安顺清等, 1986)。

帕尔默干旱指数的局限性在于, 它是专门为研究半湿润半干旱地区的干旱设计的, 任何超过这个范围的外推, 都可能得出不切实际的结果, 且该指标计算过程会用到许多经验结果, 在其他地区的使用需要验证和修正。其次, 该指标时间步长为 1 个月, 不能反映短期农作物的水分状况。

(2) 我国对 PDSI 的引入和修订

帕尔默干旱指数提出后被广为应用并得到进一步修正。1984 年, 北京农业大学的范嘉泉和郑剑非发表《帕尔默气象干旱研究方法介绍》一文, 系统介绍了帕尔默干旱指标的计算方法和计算过程, 认为对于我国干旱问题的研究以及农业的长远规划等, 应用帕尔默方法预期可以得到较好的效果(范嘉泉等, 1984)。此后, 经过我国学者对该指标的一系列修订, 该指标已在我国的农业干旱监测、评估中得到了广泛的应用。

① 计算过程和参数的本地化

1986 年, 安顺清等用济南(1919—1980 年)和郑州(1951—1980 年)两站的逐月气温和降水资料计算水分平衡各项及其平均值和各项气候系数, 并利用北京、青岛、西安等 14 个站的数据对权重因子进行修正, 得到针对我国的修正的帕尔默模式(安顺清等, 1986)。考虑到这次修正选取的站点较少, 且其中可能蒸散的计算采用的是原指标计算中采用的美国的桑斯维特方法, 在我国的应用偏差较大等问题, 刘巍巍等(2004)又利用济南、郑州和太原 3 个站的逐年逐月气温和降水资料, 以及哈尔滨、佳木斯、呼和浩特等 21 个站的数据对权重因子进行修正。在计算可能蒸散时改用了联合国粮食及农业组织(FAO)1988 年提出的彭曼-蒙蒂思(Penman-Monteith)公式计算, 土壤田间持水量根据我国测定的土壤特性资料确定, 对帕尔默旱度模式

进行了进一步修正。修正后的上述 PDSI 各分量计算公式如下：

$$K_i = \frac{581.391}{\sum_{j=1}^{12} (\overline{D_j} K_j')} K_i'$$

$$K_i' = 1.2815 \lg \left[\frac{\overline{PE_i} + \overline{R_i} + \overline{RO_i}}{(\overline{P_i} + \overline{L_i}) \overline{D_i}} \right] + 3.3027$$

$$x_i = Z_i / 125.99 + 0.9331 x_{i-1}$$

作者利用该指标计算了我国北方地区 139 个站的干旱指数值,结果表明,计算的干旱指数与一些文献记载的旱涝灾情是较一致的。

除上述安顺清等(1986)针对我国北方大范围区域的对帕尔默干旱模式的系列修正外,还有一些研究者针对特定的研究区对帕尔默模式进行修正,例如:赵惠媛等(1996)针对松嫩平原西部地区的修正,马延庆等(1998)针对渭北旱塬区的修正,王佳津等(2012)针对云南省的修正,王文等(2012)针对淮河流域的修正。

在气象干旱等级标准中,公布的帕尔默指数计算公式(张强等,2006)为:

$$x_i = Z_i / 1.63 + 0.755 x_{i-1}$$

② 针对时间步长的修正

上述的月旱度模式在交替性干旱发生时不能立即得到 PDSI 的当前值,一般适用于干旱气候分析和评价。为了使帕尔默旱度指数适用于实时大范围旱情监测,杨扬等(2007)采用刘巍巍等类同的方法,利用嫩江、哈尔滨、西宁等 24 个站的逐日气象资料,研制了帕尔默旱度指数日模式:

$$x_i = Z_i / 157.4625 + 0.9979 x_{i-1}$$

式中, x_i 为当日的 PDSI 值; x_{i-1} 为前一日的 PDSI 值; Z_i 为当日水分距平指数。利用该公式,作者经过对全国 556 个气象站的参数调试,建立了全国范围帕尔默旱度模式实时业务系统。

此外,叶建刚等(2009)利用山东省 23 个站的逐日气象资料建立了逐旬帕尔默旱度指数模式,并通过在计算蒸散的过程中引入作物系数、计算土壤上层水分散失时引入土壤水分胁迫系数,并且认为土壤上层水分和下层水分同时散失,使修正后的 PDSI 指数更适用于农业干旱监测。

③ 针对土壤失水量计算过程的改进

在对帕尔默旱度模式计算过程改进方面,当前应用中,除了将可能蒸散计算中原来采用的桑斯维特法改用 Penman-Monteith 公式外,较为系统的改进是对其中土壤失水量分量计算。

2008 年,郭安红等(2008)在上述刘巍巍等(2004)修订的基础上,为了使帕尔默旱度模式更适用于我国北方干旱、半干旱区,专门对模式中土壤失水量 $\hat{L}$ 的计算方法进行了改进。在原计算模式中,将土壤分为上下两层,计算土壤失水量时假定蒸散在表层土壤中是以可能速率发生的,直到其全部有效水分耗尽,水分才开始从下层土壤中散失,同时假定在上层土壤达到田间持水量之前,下层土壤得不到补水。这种情况与很多地区的实际情况不符。在我国北方干旱、半干旱地区的大量土壤水分观测事实证明,0~20 cm 土层各月最低土壤含水量一般都大于相应的凋萎湿度,即还有少部分的土壤有效含水量未被蒸散掉。因此郭安红等在计算上层土壤失水时,将这部分水量从上层土壤失水中扣除,根据文献中干旱、半干旱地区各站 0~20 cm 土层实测多年各月最低土壤含水量(经换算约为田间持水量的 5%)作为临界的土壤含水量值。并在建模时,在刘巍巍等 2004 年所用济南、郑州和太原 3 个站数据的基础上,增加了

齐齐哈尔和宁夏海原2个站,在修正权重因子中,计算站点数量由原来的21个增加到25个。作者将修订后的Palmer指数值与2003年计算结果及一些文献记载的实际旱涝灾情对照表明,该模式能较好地评估旱涝情况(郭安红等,2008)。

2011年,辽宁师范大学生命科学学院的张伟东和石霖(2011)在修订帕尔默旱度模型中,将作物—土壤库按各层次间水循环和对作物生长所起作用分为活动层和稳定层,并在计算中考虑了山区水土流失对水分平衡的影响。假定水土流失使山区表层土壤损失,稳定层的一部分转化为活动层,稳定层变薄。活动层有效库容取25 mm,平原区稳定层有效库容为田间持水量—25 mm,山区稳定层有效库容为上一年有效库容与一年中因水土流失损失库容之差值(张伟东等,2011)。

1.1.1.3 综合气象干旱指数

(1) 基本原理及优缺点

中国气象局在全国气象干旱监测业务中推荐的综合气象干旱指数CI是利用近30 d(相当月尺度)和近90 d(相当季尺度)标准化降水指数,以及近30 d相对湿润度指数进行综合而得,该指标既反映短时间尺度(月)和长时间尺度(季)降水量异常情况,又反映短时间尺度(影响农作物)水分亏缺情况,是一个具有时间、空间可比性的适用于表述干旱发生、发展和结束过程的动态监测指标,且具有资料相对易获取等优点,在国内农业干旱监测和评估业务工作中已得到广泛应用。指标具体计算方法如下:

$$CI = a \times SPI_{30} + b \times SPI_{90} + c \times M_{30}$$

$$M = \frac{P - ET}{ET}$$

式中, SPI_{30} 和 SPI_{90} 分别为近30 d和近90 d标准化降水指数; M 为相对湿润度指数; P 为某时段的降水量(单位:mm); ET 为某时段的可能蒸散量(单位:mm),可采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式计算; M_{30} 为近30 d相对湿润度指数; a 为 Z_{30} 系数,由达轻旱以上级别 Z_{30} 的平均值除以历史出现最小 Z_{30} 值,平均取0.4; b 为 Z_{90} 系数,由达轻旱以上级别 Z_{90} 的平均值除以历史出现最小 Z_{90} 值,平均取0.4; c 为 M_{30} 系数,由达轻旱以上级别 M_{30} 的平均值除以历史出现最小 M_{30} 值,平均取0.8。

虽然CI指数对远近期降水与作物需水量的匹配程度进行了综合考量,但由于近20 a来我国的农田灌溉事业不断发展,灌溉已经成为补充土壤水分的一个重要来源,CI指数在考虑降水与实际土壤水分状况之间差异对作物生长发育的影响方面则略显不足。

(2) 对CI指数的修订

① 针对土壤墒情的修订

为了弥补CI指数反映实际土壤水分的差异,谭方颖等(2013)利用土壤墒情对CI指数加以修订,建立了修订的华北冬小麦干旱CI指标。

首先,由于土壤墒情是每隔5 d(或10 d)观测一次,需要先将相邻观测时间不连续的部分进行线性内插,从而得到各站逐日土壤墒情资料序列。

其次,对冬小麦发育期内低于干旱土壤墒情指标时的逐日土壤墒情资料和相应的CI指数进行相关分析,建立两者间的回归方程,将既定的冬小麦各生育阶段干旱土壤墒情指标值代入方程,得到研究区冬小麦各生育阶段的修订的CI干旱指标。

在冬小麦某生育阶段内,如果 CI 值连续 5 d 及以上低于该生育阶段修订的 CI 干旱指标,则认为发生干旱,将冬小麦不同生育阶段内发生干旱时所有 CI 值累加即为冬小麦干旱指数。

研究结果表明,订正后的冬小麦干旱指标(CI 值)均与原 CI 值存在较明显差异,且不同研究区指标大小也不同,冬小麦干旱累积标准指数与干旱产量损失具有显著的相关性。

② 针对干旱过程的修订

一般而言,合理的干旱指标应该能够描述干旱的强度、范围和起止时间。在没有降水或降水持续偏少情况下,干旱程度应该是渐进加剧的,不应该突然加剧。然而在近几年特别在 2010 年西南干旱气象服务过程中,发现 CI 存在“旱情突然加剧”问题。王春林等(2011)针对这一现象,提出改进的综合气象干旱指数 CI_{new} ,并分析其适用性特点。

CI 指数导致“旱情突然加剧”的原因在于 CI 计算中,本质上是对过去 30 d 或 90 d 的逐日降水量、可能蒸散量等权累加而成的,对 SPI_{30} 和 MI_{30} 而言,29 d 前的降水量和当天的降水量对当日 CI 的贡献是等同的,同理,对 SPI_{90} 而言,89 d 前的降水对当日的 CI 贡献也是等同的。在王春林等提出的 CI_{new} 指数中,对降水和蒸散进行了不等权累计处理:

$$CI_{new} = a \times SPI_{90new} + c \times M_{90new}$$

式中, SPI_{90new} 为考虑降水不等权累计的最近 90 d 的 SPI 分量,代替原 CI 中的 SPI_{30} 和 SPI_{90} ; M_{90new} 为考虑降水、可能蒸散不等权累计的近 90 d 相对湿度,与 SPI 的时间尺度一致;为了使 CI_{new} 数值范围和 CI 接近,权重系数 a, c 均取值 0.8。式中的 SPI_{90new} 和 M_{90new} 按照线性递减权重方案计算,即假定当日的降水量/可能蒸散对当日的干旱指数影响最大,赋予权重为 1,计算窗口移出 90 d 时,权重递减到 0。作者通过对广州的实例计算分析认为, CI_{new} 解决了 CI 的“旱情突然加剧/下降”问题。

1.1.1.4 作物水分亏缺指数

作物水分亏缺指数(CWDI)是表征作物水分亏缺程度的指标之一,是指外界水分不能满足作物需水量的部分占作物需水量的比值,以百分率(%)表示。其基本表达式如下:

$$CWDI = \begin{cases} \left(1 - \frac{P+I}{ET_c}\right) \times 100\% & ET_c \geq P+I \\ 0 & ET_c < P+I \end{cases}$$

$$ET_c = k_c \times ET_0$$

式中, P 为某 10 d 累计降水量(单位:mm); I 为某 10 d 的累计灌溉量(单位:mm); ET_c 为某 10 d 的潜在蒸散量(单位:mm); ET_0 为某 10 d 的作物可能蒸散量(单位:mm),可采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式计算; k_c 为某 10 d 某种作物所处发育阶段的作物系数或多种作物的平均作物系数,有条件的地区可以根据实验数据来确定本地的作物系数,无条件地区可以直接采用 FAO 的数值或国内邻近地区通过试验确定的数值。作物水分亏缺指数适用范围为气象要素(日最高气温、日最低气温、风速、水汽压、日照、降水量)观测齐备的农区。

由于在不同季节、不同气候区域,作物种类不同,蒸散差别较大,作物水分亏缺指数难于以统一的标准表达各区域水分亏缺程度,因此,在《农业干旱等级》标准中选用作物水分亏缺指数距平以消除区域与季节差异。作物水分亏缺指数距平可按下式计算:

$$CWDI_a = \frac{CWDI - \overline{CWDI}}{\overline{CWDI}} \times 100\%$$

式中, $CWDI_a$ 为某时段作物水分亏缺指数距平(单位: %); $CWDI$ 为某时段作物水分亏缺指数(单位: %); $\overline{CWDI}$ 为计算时段历史同期平均作物水分亏缺指数(单位: %), 一般计算 30 a 的平均值。

$$CWDI = a \times CWDI_j + b \times CWDI_{j-1} + c \times CWDI_{j-2} + d \times CWDI_{j-3} + e \times CWDI_{j-4}$$

式中, $CWDI_j, CWDI_{j-1}, CWDI_{j-2}, CWDI_{j-3}, CWDI_{j-4}$ 分别为第 $j, j-1, j-2, j-3$ 和 $j-4$ 时间单位的水分亏缺指数(单位: %); a, b, c, d, e 为权重系数, 分别取值 0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1, 各地可根据当地实际情况确定相应系数值。

1.1.1.5 小结

降水距平百分率、帕尔默干旱指数、作物水分亏缺指数和 CI 指数都是目前农业气象干旱研究中常用的指标, 各指标都具有明确的物理意义, 所需因子较易获取。其中, 降水距平百分率以降水量相对于多年平均的偏少程度表征干旱程度, 帕尔默干旱指数基于水分平衡原理计算“对当前情况气候适宜降水”, 并以实际降水与之的差值表示干旱, CI 指数综合考虑了近 30 d 和近 90 d 标准化降水指数, 以及近 30 d 相对湿润度指数的影响。

实践表明, 每个干旱指标都是在一定程度上描述干旱, 存在很多局限性, 要获得一个普适的指标是不可能的。但上述对降水距平百分率用水分产量反应系数的修订, 对帕尔默干旱指数的参数本地化和对时间步长、土壤失水计算过程的修订, 以及 CI 指数计算过程和用土壤墒情的修订研究表明, 在实际应用中, 可以在现有指标的基础上加以修订改进, 使之更准确描述研究条件下的干旱情况, 或者扩展指标的适用范围。

需要说明的是, 表征农业气象干旱的指标尚有很多, 例如《农业干旱等级》标准中介绍的土壤相对湿度、连续无有效降水日数、水田连续断水日数、农田与作物干旱形态指数、旱田综合农业干旱指数、水田综合农业干旱指数、区域性农业干旱指标等, 每种指标均有自己的基本原理和适用范围, 在此不一一评价。

1.1.2 东北低温冷害指标

东北地区有时夏季副高偏弱, 冷空气活动较强, 气温低于水稻、玉米生长发育所需的温度条件, 发生低温冷害, 水稻、玉米受冷害的影响会出现生长发育延迟或开花结实受阻的现象, 最终减产。我国目前关于低温冷害指标的研究成果主要有六大类, 它们是生长季温度距平指标、生长季积温指标、生长发育关键期冷积温指标、作物发育期距平指标、热量指数指标和低温冷害综合指标。借鉴过去的研究成果, 本课题规范并重新构建了新的冷害指标。

1.1.2.1 以前的东北低温冷害指标研究成果

(1) 生长季温度距平指标

5—9 月的月平均气温和 (T_{5-9}) 的距平 (ΔT_{5-9}) 可以表征作物生长季的每年的气候差异, 被广泛用于东北作物的延迟型冷害的判断, 这个指标的意义被普遍认可。

王春乙、毛飞研究发现, 地域的差异对玉米低温冷害指标的影响有一定的函数关系, 各地的低温冷害临界指标值与当地的纬度和海拔高度存在如下关系: