

# 安徽省农业干旱综合监测技术及其业务试用

马晓群 刘惠敏 吴文玉

(安徽省气象科学研究所、安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥 230031)

**提 要:** 针对安徽省农业干旱业务服务需求,利用已业务应用的农业干旱指标:土壤墒情、累积湿润指数、植被供水指数,配合阶段降水量和降水日数,进行农业干旱综合监测指标和方法研究。综合指标中各因子权重的确定采用层次分析法。根据安徽省气候过渡区下垫面地表特征差异和云天状况,分别确定了湿润区、半湿润区的晴空和云覆盖4种状态下的各因子权重序列,均通过了一致性检验;建立了相应的农业干旱综合监测模型;确定了4要素和5要素农业干旱监测等级标准。综合模型概括了各单指标主体监测结果,有利于对农业旱情的综合判断,监测模型检验效果良好,可业务应用。

**关键词:** 土壤墒情 累积湿润指数 植被供水指数 农业干旱 综合监测

## The Agricultural Drought Composite Monitoring Technique and Its Operational Application in Anhui Province

Ma Xiaoqun Liu Huimin Wu Wenyu

(Anhui Meteorological Institute, Key Laboratory of Atmospheric  
Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031)

**Abstract:** Aiming at the operation and service demands of agricultural drought in Anhui province, indices and methods of agricultural drought composite monitoring were studied by using agricultural drought indices that were applied for operation. These indices are soil moisture, accumulated humidity index, vegetation supply water index, period precipitation and precipitation days etc. The Analytic Hierarchy Price method was used to decide the weight of each factor in the composite index. Four sequences of multi-factor weight were determined for clear sky and cloudy sky in the humid zone and semi-humid zone, and coincidence test were passed, corresponding composite models were established. The grades of drought indices of four factors and five factors were confirmed.

资助项目: 中国气象局 2007 年多轨道业务建设项目“中国农业气象灾害监测预警系统建设”, 中国气象局科研项目 (CMATG2008S06) 资助

收稿日期: 2008 年 1 月 3 日; 修定稿日期: 2008 年 2 月 28 日

The composite models generally reflected monitoring results of each factor, which can give a synthetic judgment of drought situation and can be applied in the operational monitoring.

**Key Words:** soil moisture accumulated humidity index vegetation supply water index agricultural drought composite monitoring

## 引 言

干旱是我国最主要的气象灾害,约占所有气候异常的 50%<sup>[1]</sup>,干旱发生的频率高、持续时间长、波及范围大,对国民经济尤其是农业生产影响巨大<sup>[2-4]</sup>,是气象灾害研究的重点和难点。干旱指标是干旱研究的基础。气候上定义的干旱指标主要与降水有关,而农业干旱还与农作物生长发育和产量有关。农业干旱的形成有一个逐步累积、前效影响的过程,其严重程度与作物的生长发育阶段密切相关。因此农业干旱指标一般以农作物需水量、实际亏缺量以及对产量的影响程度来衡量。农业干旱指标已有土壤水分、作物旱情、作物需水量等很多评价指标<sup>[5]</sup>和供水植被指数、热惯量指数、能量指数等遥感监测指标<sup>[6-7]</sup>,近年来随着作物模型的发展和应用,提出了一些与作物生理过程相联系的农业干旱指标<sup>[8-10]</sup>,但是能够在业务上应用的农业干旱气象指标还不多见。

近年来,随着对农业干旱研究的不断深入,综合识别技术越来越被人们所重视。农业干旱综合识别的指标和方法研究十分活跃<sup>[11-13]</sup>。但是总体来说,农业干旱综合识别技术尚处在起步阶段,在综合识别指标的选择、权重和累积时段长度的确定等方面还不够完善,离业务应用还有一些距离,而且由于干旱自身的复杂特性和对社会影响的广泛性,农业干旱指标都是建立在特定的地域和时间范围内。因此在对农业干旱监测指标方法已有研究的基础上,以安徽省为研究对象,选择已应用的农业干旱监测指标,进行适合

于江淮地区的农业干旱综合监测技术研究。并将研究成果业务化,对该区的农业干旱监测业务服务十分必要。

## 1 农业干旱综合监测指标确定

采用安徽省目前已业务应用的农业干旱监测指标:土壤湿度、累积湿润指数、供水植被指数作为综合监测的主要指标,用时段降水距平和降水日数百分比作为辅助指标。指标选择的原则考虑有农业意义且易于获取。

### 1.1 土壤墒情

土壤墒情监测是农业干旱监测最早采用的也是最主要的指标。该指标的优点是,直接基于田间实测,客观反映农业旱情。不足之处是:其一,本省长序列的土壤墒情观测站点少,仅集中在沿淮淮北,其余站点都是近几年建立起来的,监测质量还有待检验、提高。其二,土壤墒情每旬监测两次,受监测当时天气状况影响较大,有时难以反映整个旬的土壤湿度状况。比如在持续干旱情况下,7日或8日有 20mm 以上的降水,8日的土壤墒情监测就反映不出该旬前期的旱情。

### 1.2 累积湿润指数

针对农业干旱监测预警业务服务的需要,提出了一个可用于业务的农业干旱气象指标——累积湿润指数<sup>[14]</sup>,该指标以相对湿润度指数为基础,以作物潜在蒸散量取代指标中的参考作物蒸散量,建立能够反映降水与作物潜在蒸散量(即作物需水量)二者平衡关系的相对湿润度指数。计算公式为:

$$M_i = \frac{P - ET_m}{ET_m}$$

式中:  $M_i$  为计算时段内的相对湿润度指数,  $P$  为相应时段的降水量,  $ET_m$  为相应时段的作物潜在蒸散量。

$$ET_m = K_c \cdot ET_0$$

式中,  $ET_0$  为相应时段的参考作物蒸散量。  $K_c$  为相应时段的作物系数。经  $K_c$  订正后, 得到的  $ET_m$  是某作物某阶段的需水量, 相应的相对湿润度指数具有农业意义。

根据地理、气候差异和作物布局特点将安徽省划分为淮北、沿淮、江淮、沿江和皖南农业区, 求算各区域各主栽作物与发育期相对应的作物系数 ( $K_c$ ) 月值, 大田条件下区域农田潜在蒸散量应是各作物面积权重潜在蒸散量的总和。

以逐旬相对湿润度指数为基础, 构造反映旱涝渐变的累积湿润指数经验公式。该公式包括当旬和前期湿润指数两个分量。引入可反映水分供需关系的气候特征变量  $\alpha$  作为该旬分量的权重系数, 前期的则为  $(1 - \alpha)$ 。由于农田蒸散主要受温度的影响, 因此  $\alpha$  为旬平均气温的函数。用试错法得到旬平均气温和  $\alpha$  的关系。在前期影响分量中考虑了不同季节给予不同前效影响时间长度和离本旬远近的旬对本旬旱涝作用的差异。

累积湿润指数表达式为:

$$M_\alpha = \alpha M_0 + (1 - \alpha) \left[ \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^{\frac{n+1-i}{n} \times M_i} \times M_j \right) \right]$$

式中  $M_\alpha$  为累积湿润指数;  $\alpha$  为权重系数;  $M_0$  为本旬湿润度指数;  $M_i$  为前  $i$  旬的湿润度指数;  $n$  为向前滚动的旬数, 因季节而异, 冬季为 5 旬, 春秋为 4 旬, 夏季为 3 旬。

该指标的优点是水分供需角度反映一旬的农业干旱。但是由于表达式中作物发育

期和需水量用的是多年平均值, 而不同年型作物发育期和需水量是不同的, 因此该式在实际应用时尚存在一定的误差。

### 1.3 植被供水指数

MODIS 遥感监测指标——植被供水指数 (VSWI), 是以归一化植被指数 (NDVI) 和遥感监测到的地面温度 ( $T_s$ , Land Surface Temperature) 为基础的比值表达式:

$$VSWI = K \times NDVI / T_s$$

其中:  $K$  为常数,  $T_s$  为遥感监测到的地面温度,  $NDVI$  是归一化植被指数。

对于地表有植被的区域, 遥感监测到的地表温度  $T_s$  (MODIS CH31 或 CH32 通道的亮温值) 为植被冠层温度。当旱情发生时, 作物通过关闭部分气孔以减少蒸腾量, 避免过多的水分散失, 而蒸腾减少会导致作物冠层温度升高, 因此, 作物冠层温度可作为表征作物供水状况的指标。同时, 遥感归一化植被指数  $NDVI$  ( $NDVI = (CH_2 - CH_1) / (CH_2 + CH_1)$ ) 是表征植被生长状况的常用指标,  $CH_2$  和  $CH_1$  分别是 MODIS 第 2 通道和第 1 通道的反射率值。当作物受旱后, 叶绿素的色质会发生变化, 特别是当叶片凋萎时, 植被指数显著下降, 故  $NDVI$  也是表征作物干旱的有效指标。根据以上分析, 作为二者比值的  $VSWI$ , 数值越小, 旱情越严重。

遥感对干旱的监测的优点是宏观、快速, 但是监测结果受天气条件、植被状况影响很大。

### 1.4 时段降水指标

时段降水距平和降水日数百分比, 反映一定时期内水分供应状况, 作为辅助指标参与农业干旱综合识别。其计算时段长度为夏季 1 个月、春秋为 2 个月、冬季 3 个月\*。

\* www.jqwater.net/newstxt/干旱评估标准.doc 231K 2006-7-25

## 2 农业干旱综合监测模型

### 2.1 指标的处理和权重确定

#### 2.1.1 指标的标准化

为了使不同量纲的数据具有可比性,需要对所有指标数据进行标准化处理,使各类数据具有相同量级。

土壤墒情为逢 8 取土的 10cm 和 20cm 土层土壤相对湿度的平均值(取 2 位小数)。

累积湿润指数表达式即为相对值,取实际计算值,由于是监测干旱,当  $M_a > 0$  时,取 0。

植被供水指数选取一句中晴空条件下最接近取土日期的时次。像元分辨率为 250m,采样为站点周围  $3 \times 3$  个像元,取其平均值。用该句历年资料(2005—2007 年)为参照对当前数值进行标准化处理:

$$VSWI_r = \frac{VSWI_i - VSWI_{\min}}{VSWI_{\max} - VSWI_{\min}}$$

时段降水距平为各季节当前时段总降水量与 30 年(1971—2000 年)相应时段降水量的相对距平值。

时段降水日数为各季节当前时段总降水日数与时段总日数之比。

经处理后的各指标数据均为相对值,具有相同的量级( $-1 \sim 0$ 、 $0 \sim 1$ )。各指标大小方向相同,均为越小越早。

#### 2.1.2 各指标权重的确定

各指标权重采用层次分析方法(AHP, The Analytic Hierarchy Pricess)<sup>[13]</sup>确定。该方法的主要优点是定性 with 定量分析相结合,将人的经验判断用数量形式表达出来并进行科学处理,能较准确地反映复杂决策问题的相互关系。其分析步骤为:首先,通过指标间两两重要性的比较,建立表示各指标相对重要

性标度值的判断矩阵( $C = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{nm} \end{pmatrix}$ )。考虑

到专家对各指标直接评价权重的困难,AHP 法引入了九分位相对重要性的比率标度法。如指标  $i$  与  $j$  比较,取标度值  $C_{ij}$ ,  $C_{ij}$  越大,表明指标  $i$  的重要性越强。指标  $j$  与  $i$  相比,其标度值为  $C_{ij} = 1/C_{ji}$ 。向量运算采用方根法,计算步骤为,计算判断矩阵每一行系数的乘积  $P_i$ ; 求出  $P_i$  的  $n$  次方根  $W'_i$ ; 对向量  $W'$  进行归一化运算,得出权重向量  $W$ 。各元素  $W'_i / \sum_{i=1}^n W'_i$  为所求各指标权重系数。

第二步,进行一致性检验。计算判断矩阵  $C$  的最大特征根  $\lambda_{\max}$  ( $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(C \times W)_i}{n \times W_i}$ ), 一致性指标  $CI$  ( $CI = \lambda_{\max} - n / (n - 1)$ ) 以及一致性比率  $CR$  ( $CR = CI / RI$ ),  $RI$  为随机一致性指标,由表 1 查出。当  $CR \leq 0.1$ , 则认为判断矩阵具有满意的一致性。

表 1 随机一致性指标

矩阵阶数	3	4	5	6	7	8	9
RI 值	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

深入分析问题、找出影响因素及其相互关系,准确构造递阶层次结构是层次分析法的关键。安徽省属于南北气候过渡区,地表类型自北向南为平原、丘陵、山区,考虑到不同气候区指标适用性的差异,需要分别构造半湿润区和湿润区两个指标权重系数序列(5 要素),建立相应的监测模型;又考虑到遥感资料受云影响很大,在云覆盖情况下难以获得遥感资料,同样需要分别构造两区域 4 要素权重系数序列,建立相应的 4 要素监测模型。

半湿润区 5 要素指标权重的计算如下:

#### ① 指标的重要性分析和构造判断矩阵

令土壤墒情、累积湿润指数、供水植被指数、时段降水距平和时段降水日数百分比 5 个指标分别为  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  和  $C_5$ , 其中  $C_1 \sim C_3$  已业务应用,在农业干旱中的重要性大于  $C_4$  和  $C_5$ 。在  $C_1 \sim C_3$  中,根据第二节对各指标的讨论,在反映一句平均干旱程度方面

$C_2$  较好,而且气象要素连续、准确,因此最重要, $C_1$  是实测数据,排第二, $C_3$  是大面积监测数据,排第三。作为辅助指标的  $C_4$  和  $C_5$  对农业干旱来说,其重要性在半湿润区前者大于后者,在湿润区二者相当。

根据以上分析,建立表示各指标相对重要性标度值的判断矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 3 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 4 & 5 & 6 \\ 0.33 & 0.25 & 1 & 5 & 6 \\ 0.20 & 0.20 & 0.2 & 1 & 1 \\ 0.17 & 0.17 & 0.17 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

② 权重系数确定和一致性检验

通过方根法向量运算和归一化处理,得到指标权重系数。然后计算判断矩阵  $C$  的最大特征根  $\lambda_{max}$ 、一致性指标  $CI$  及一致性比率  $CR$ 。

经运算, $\lambda_{max}=5.06, CI=0.016, CR=0.014 < 0.1$  通过一致性检验。

半湿润区 4 要素以及湿润区 5 要素和 4 要素的权重系数以上述方法得到。在湿润区权重序列的构造中考虑受地表状况和植被的影响,土壤墒情和遥感指标的作用要小于半湿润区,因此累积湿润指数和时段降水等气象指标的作用有所强化。各指标权重序列均通过一致性检验。4 个指标权重系数序列见表 2。

表 2 综合干旱模型中各指标的权重系数

		土壤湿度	累积湿润指数	降水距平	降水日数百分比	供水植被指数
半湿润区	晴空	0.31	0.42	0.06	0.04	0.17
	云覆盖	0.34	0.48	0.11	0.07	
湿润区	晴空	0.27	0.42	0.08	0.08	0.15
	云覆盖	0.29	0.51	0.10	0.10	

2.2 农业干旱综合监测模型和等级确定

在确定了指标权重的基础上,建立农业干旱多指标综合监测模型:

$$DRG = \sum_{i=1}^n f_i \times w_i$$

其中  $DRG$  为干旱程度量值, $f_1, f_2 \dots f_n$  为各干旱指标, $w_1, w_2 \dots w_n$  为各指标权重值。并根据  $DRG$  值划分干旱等级标准(表 3)。

表 3 综合干旱模型的干旱等级标准

	4 要素模型	5 要素模型
轻旱	$-0.12 \geq DRG > -2$	$-0.04 \geq DRG > -0.12$
中旱	$-0.2 \geq DRG > -0.28$	$-0.12 \geq DRG > -0.20$
重旱	$-0.28 \geq DRG > -0.36$	$-0.20 \geq DRG > -0.28$
极旱	$DRG < -0.36$	$DRG < -0.28$

3 农业干旱综合监测模型的检验与应用

将以上综合指标用 2006 年秋旱个例进行了检验,并与单要素监测结果进行了对比

分析。在 2007 年春旱时进行了试应用。

2006 年 11 月上旬安徽省秋旱严重。各单项干旱监测指标的监测结果(图 1)较为一致的是,淮北旱情较重,其次是沿淮、江淮东部和皖南大部,不一致的地方是土壤墒情监测出沿江江北西部有一片中至重旱区,但其它指标均没有反映。实际上除了 11 月下旬全省均无降水外,沿江西部地区在 10 月中下旬降水是偏多的,土壤墒情表现出来的旱情主要是由于个别台站监测数据过小造成(监测质量问题)。5 要素和 4 要素综合指标监测结果(图 2)与各单要素监测主体结果相符,个别单要素不一致的区域没有反映。综合指标所反映的受旱范围、干旱程度与当时干旱实况较为吻合。同时也可看出,4 要素和 5 要素在对干旱的监测的区域和程度上基本一致。在没有遥感数据的情况下,4 要素综合旱情监测能反映干旱总体状况,而遥感

数据增加了综合监测结果对农业干旱宏观尺度的把握,提高了对旱情监测的准确性。综

合指标在 2007 年春旱中试应用(图 3),监测到的受旱区域,受旱程度与实况基本相符。

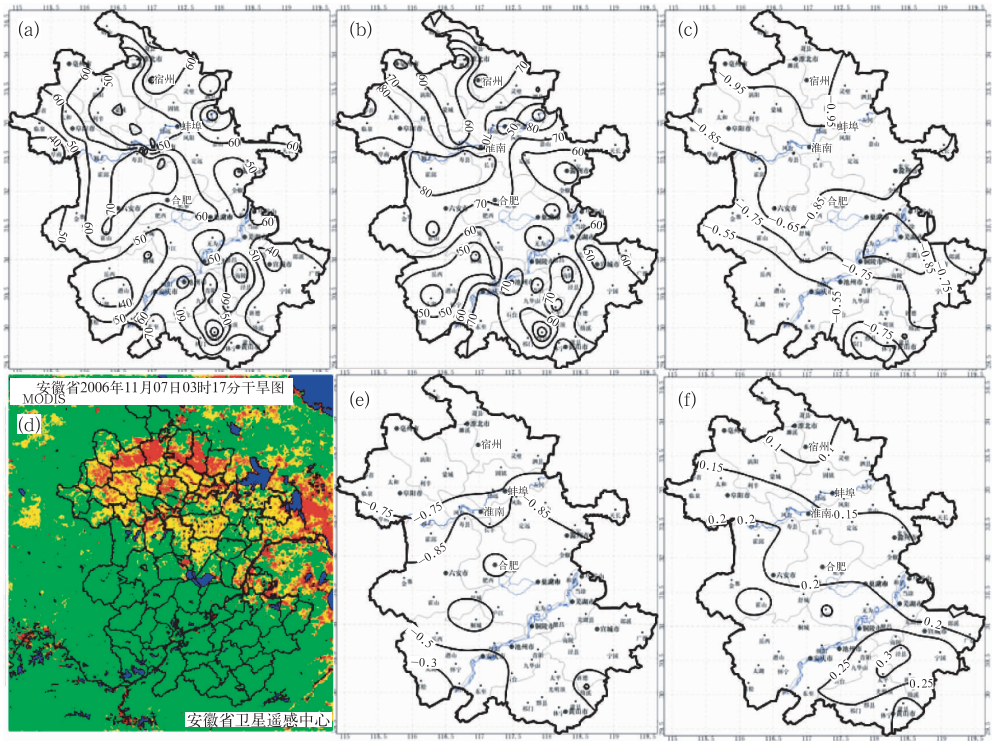


图 1 安徽省 2006 年 11 月上旬 10cm(a) 20cm(b)土壤墒情、累积湿润指数(c)、供水植被指数(d)降水距平(e)和降水日数比例(f)等单项指标干旱监测分布图

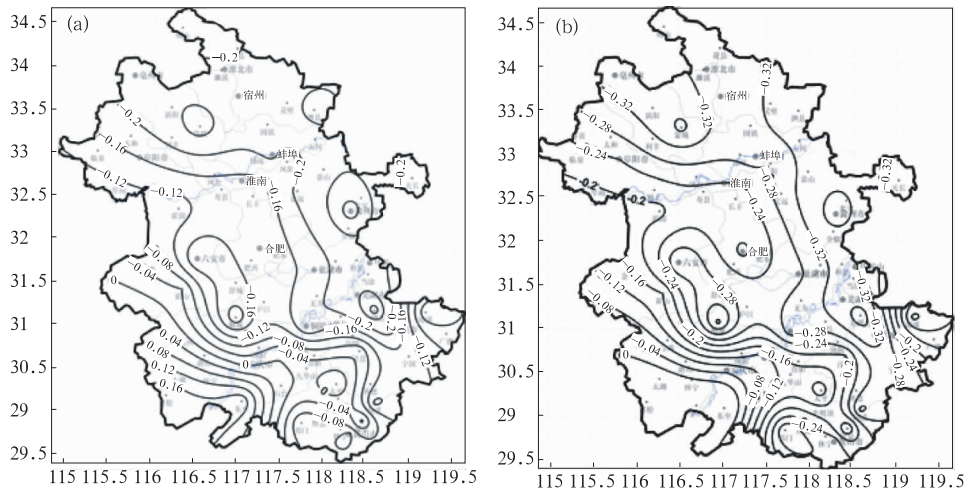


图 2 安徽省 2006 年 11 月上旬 5 要素(a)和 4 要素(b)综合干旱监测分布图



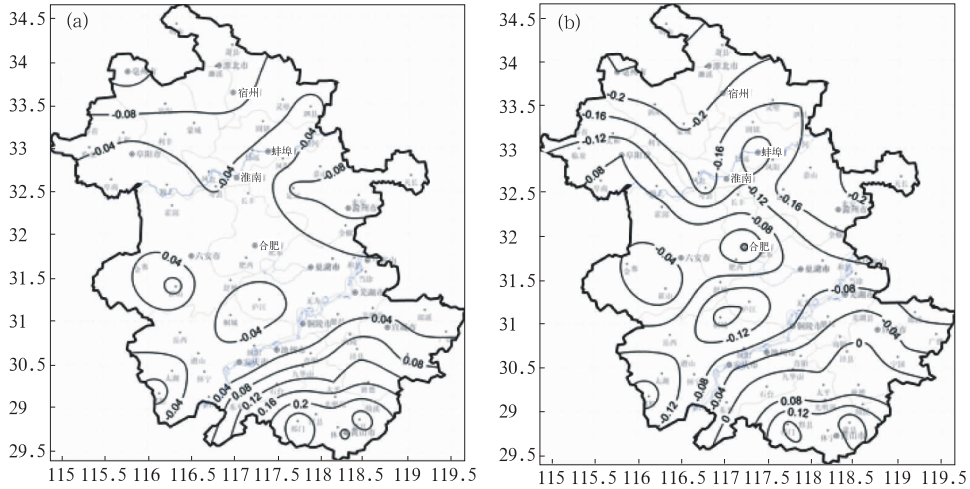


图 3 安徽省 2007 年 5 月上旬 5 要素(a)和 4 要素(b)综合干旱监测分布图

### 4 结 语

(1) 利用安徽省已业务应用的多源农业干旱指标进行农业干旱综合监测研究。采用层次分析法进行各指标权重分析,根据各指标的特点、安徽省气候过渡区的特征和云天状况,分别建立了安徽省半湿润区、湿润区晴空和云覆盖状况下 4 个指标权重序列和相应的综合监测模型,并确定了 4 要素和 5 要素的干旱等级标准。

(2) 利用层次分析法进行农业干旱综合监测的研究,其优点是定性和定量相结合,通过各指标相对重要性的比较,科学确定权重,达到优势互补的目的。建立的农业干旱综合监测指标和模型克服了多个监测指标各自为阵的缺陷,有利于对农业旱情的综合判断。不过更科学、更客观的指标权重系数和干旱分级标准还有赖于对大量样本的数据分析。因此将在继续业务应用的基础上,进行指标的验证和修正,使该干旱综合监测方法在业务上更好地发挥作用。

### 参考文献

[1] 钱正安,吴统文,宋敏红. 干旱灾害和我国西北地区干旱气候的研究进展及问题[J]. 地球科学进展.

2001,16(1):28-38.  
 [2] 张强. 华北地区干旱指数的确定和应用[J]. 灾害学, 1998,13(4),34-38.  
 [3] 王静爱,孙恒,徐伟,等. 近 50 年中国旱灾的时空变化[J]. 自然灾害学报,2002,11(2):1-6.  
 [4] 符淙斌,温刚. 中国北方干旱化的几个问题[J]. 气候与环境研究. 2002. 7(1):21-23.  
 [5] 袁文平,周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展,2004,19(6):982-991.  
 [6] 张春桂,李文. 福建省干旱灾害卫星遥感监测应用研究[J]. 气象,2004,30(3):22-25.  
 [7] 李星敏,王钊,刘安麟. 陕西省干旱遥感监测业务化及应注意的问题[J]. 气象,2005,31(12):72-76.  
 [8] 赵艳霞,王馥棠,裘国旺. 冬小麦干旱识别和预测模型研究[J]. 应用气象学报,2001,12(2):235-241.  
 [9] 刘建栋,王馥棠,于强,等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J]. 应用气象学报,2003,14(5):593-604.  
 [10] 景毅刚,杜继稳. 张树誉. 陕西省干旱综合评价预警研究[J]. 灾害学,2006,21(4):46-49.  
 [11] 唐巍,覃志豪,秦晓敏. 农业干旱遥感监测业务化运行方法研究[J]. 遥感应用,2007,2:37-42.  
 [12] 刘静楠,顾颖. 判别分析法在农业旱情识别中的应用[J]. 水文,2007,27(2):60-67.  
 [13] 荣丰涛. 对农业旱情实时评价指标体系中两个问题的意见[J]. 山西水利科技,2007,1:8-10.  
 [14] 马晓群,吴文玉,张辉. 利用累积湿润指数分析江淮地区农业旱涝时空变化[J]. 资源科学. 2008, 30(3):371-377