

# 基于信息扩散理论的河南省区域干旱等级模糊综合评价

张成才, 陈继祖, 叶伟, 周勇

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 在综合分析河南干旱发生的多种影响因素的基础上, 选择降雨量、产流模数、受旱面积比以及综合缺水指数4个要素作为干旱评价指标, 并应用信息扩散方法建立了各单个评价指标旱情等级划分标准。通过将模糊识别理论模型引入区域干旱等级评价中, 建立综合的干旱评价指标体系, 并对干旱等级进行定量评价, 该模型应用于河南省的干旱评价中, 所得结果能较好的反应各市的综合干旱情况, 对指导抗旱工作具有重要意义。

**关键词:** 区域干旱; 模糊综合评价; 信息扩散

**中图分类号:** P426.616 **文献标识码:** A

## 0 引言

从不同的出发点和关注角度, 干旱可以划分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种干旱类型。目前, 国内外多侧重气象和农业的干旱研究, 常用的气象干旱指标有降雨量标准差指标、Z指标、Bhalme - Mooley 干旱指标、降水温度均一化指标、标准化降水指标、PDSI 指标、综合旱涝指数CI等<sup>[1]</sup>; 农业干旱主要从农业气象、土壤-植物-大气关系、温度等来构建评价指标<sup>[2]</sup>; 水文干旱研究相对较少, 常用的水文干旱指标有地表径流量、地表径流量距平百分率、地下水埋深等; 社会经济干旱的指标研究更少, 比较有代表性的是 Ohlsson 提出的社会缺水指数(SW-SI), 用于反映社会所面临的干旱胁迫程度, 胁迫程度越大越干旱<sup>[3]</sup>。近年来一些学者在前人研究的基础上, 也尝试使用多种因素的综合干旱指数来对区域干旱程度和趋势做出评估<sup>[4]</sup>。

综合4类干旱, 用区域干旱来反映一个地区各部门的综合干旱程度。区域干旱是区域内由于降雨量或区域外部水源补给量的急剧减少, 水资源收支或供求不平衡引起的水资源短缺现象及其在各个领域的综合反映。区域干旱可能包括气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。

目前要准确评定区域综合干旱程度, 有3个

需要亟待解决的问题:(1)单指标不能反映区域综合干旱程度;(2)各类评价指标在优劣和等级的划分上都具有模糊性, 且以往的干旱等级划分标准多是人为划定, 具有较大的随意性;(3)大多数地区历史干旱资料系列比较短, 代表性不强。为了解决上述的3个问题, 将模糊数学的方法引入到干旱评价, 运用模糊综合评判的方法综合考虑区域干旱的多种影响因素, 并利用信息扩散理论, 根据超越概率建立各评价指标的等级划分标准, 进而评价区域干旱等级, 可以获得较为全面合理的评价结果。

## 1 评价指标选取及早情分级标准的建立

### 1.1 确定评价指标体系

区域干旱涉及区域内的气象、水文、土壤、农业、经济社会等诸多因素, 通过综合考虑干旱灾害影响的各个行业和部门, 最终选取气象干旱指标中的降雨距平百分率, 水文干旱指标中的产流模数距平百分率, 农业干旱指标中的农业受旱面积比以及社会经济指标中的综合缺水程度4种单因素评价指标。综合缺水程度L按下式进行计算:

$$L = 1 - \alpha \times WS / WD \quad (1)$$

式中:L为区域综合缺水程度; $\alpha$ 为水资源综合利用系数;WS表示研究区域水资源的供给量;WD表示研究区域水资源的需求量; $L > 0$ 表示出现社

收稿日期:2010-02-29;修订日期:2010-04-30

基金项目:河南省教育厅自然科学研究计划资助项目(2009A610014)

作者简介:张成才(1964-), 男, 河南郸城人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事水文信息技术方面的研究, E-mail:.

会经济干旱,且越大表示缺水越严重。

## 1.2 评价指标旱情分级标准的确定

用干旱指标评述干旱程度时,为了标准一致,需要构造等级模糊子集,即干旱等级,根据全国抗旱规划大纲,将干旱划分为5个等级,即 $V = \{\text{无旱,轻旱,中旱,重旱,特旱}\}$ 。为了克服干旱指标旱情等级的划分的任意性,降雨量距平百分率、产流模数距平百分率采用基于信息扩散理论的分级方法进行划分;受旱面积比采用 $P - \text{III}$ 型曲线进行频率分析方法确定划分标准;综合缺水程度采用1997年联合国所属的10个国际组织在“世界淡水资源综合评价”中提出的划分标准进行划分。

用信息扩散方法制定干旱分级标准时,首先利用实测资料计算出各评价指标值,然后用信息扩散方法,计算各评价指标的超越概率,通过与实测的旱灾资料对比分析,以下列原则作为各评价指标的分级标准:当超越概率 $\leq 5\%$ 时,为特旱;当超越概率 $\leq 10\%$ 时,为重旱;当超越概率 $\leq 25\%$ 时,为中旱;当超越概率 $\leq 40\%$ 时,为轻旱。信息扩散方法的计算步骤<sup>[5-6]</sup>如下:

设评价的指标论域为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ,评价指标的一个单值观测样本 $y_j$ 以如下隶属函数 $f_j$ 将其所携带的信息扩散给论域 $U$ 中的每一个取值。

$$f_j(u_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times h} \times \exp\left[-\frac{(y_j - u_i)^2}{2h^2}\right] \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m) \quad (2)$$

式中: $h$ 为扩散系数, $m$ 为样本个数。扩散系数可按下式进行计算

$$h = \begin{cases} 1.4230(b-a)/(m-1), & m < 10 \\ 1.4208(b-a)/(m-1), & m \geq 10 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $b$ 为最大样本值, $a$ 为最小样本值。

$$\text{令 } C_j = \sum_{i=1}^n f_j(u_i) \quad (4)$$

相应的模糊子集的隶属度函数为

$$g_j(u_i) = f_j(u_i)/C_j \quad (5)$$

把 $g_j(u_i)$ 称为样本 $y_j$ 的归一化分布。对所有样本按上式进行处理,计算经信息扩散后推断出的论域值为 $u_i$ 的样本个数 $q(u_i)$ 及各 $u_i$ 点上的样本数的总和 $Q$ 。

$$q(u_i) = \sum_{j=1}^m g_j(u_i) \quad (6)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n q(u_i) \quad (7)$$

样本落在 $u_i$ 处的频率为: $p(u_i) \approx q(u_i)/Q$ ,指标超越 $u_i$ 的超越概率为:

$$P(u \geq u_i) = \sum_{k=i}^i p(u_k) \quad (8)$$

根据前述的旱情等级的超越概率的分级标准,当某 $u_i$ 值处的 $P(u_i)$ 值达到某等级旱情规定的数值时,该 $u_i$ 值即为对应旱情等级的临界值,利用公式(2)~(8),计算各评价指标在对应于5%,10%,25%,40%时的 $u_i$ 值,据此得到的各评价指标的临界值即组成旱情等级分级标准。

## 2 区域干旱等级模糊综合评价模型

### 2.1 模糊综合评价方法

模糊综合评价方法是通过构造等级模糊子集把对象的模糊指标进行量化(即确定隶属度),然后利用模糊变换原理对各指标综合评价计算时先给出单个因素对评价结果影响程度的隶属函数,并得出其隶属度向量,再将各因素的隶属度向量组合成模糊关系矩阵,最后将此矩阵与权重分配向量进行复合运算,可得最终的综合评价结果,计算步骤见文献[4]。

### 2.2 模糊综合评价模型的构建

#### 2.2.1 构造隶属度函数关系矩阵

隶属度由隶属函数计算而得,目前应用较多的隶属度函数的形式有三角函数和梯形函数,可根据评价对象取不同的函数形式,笔者采用三角函数作为隶属函数<sup>[5]</sup>。图1中的 $m_1, m_2, m_3, m_4$ 是相应超越概率所对应的临界值 $u_i$ 。根据相关指标的隶属度向量图,可以得到其隶属度函数,如下(9)~(13)所示。

正常:

$$U_{v1}(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i < m_1) \\ 0 & (x_i \geq m_1) \end{cases} \quad (9)$$

轻度干旱:

$$U_{v2}(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i < m_1) \\ \frac{m_2 - x_i}{m_2 - m_1} & (m_1 < x_i \leq m_2) \\ 0 & (x_i \geq m_2) \end{cases} \quad (10)$$

中度干旱:

$$U_{v3}(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i \leq m) \\ \frac{x_i - m_1}{m_2 - m_1} & (m_2 < x_i \leq m_2) \\ \frac{m_3 - x_i}{m_3 - m_2} & (m_2 < x_i \leq m_3) \\ 0 & (x_i < m_3) \end{cases} \quad (11)$$

严重干旱:

$$U_{04}(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i \leq m_2) \\ \frac{x_i - m_2}{m_3 - m_2} & (m_2 < x_i \leq m_3) \\ \frac{m_4 - x_i}{m_4 - m_3} & (m_3 < x_i \leq m_4) \\ 0 & (x_i > m_4) \end{cases} \quad (12)$$

特大干旱:

$$U_{05}(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i < m_3) \\ \frac{x_i - m_3}{m_4 - m_3} & (m_3 < x_i \leq m_4) \\ 1 & (x_i > m_4) \end{cases} \quad (13)$$

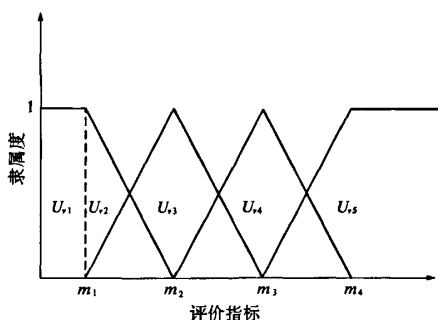


图1 干旱评估隶属度函数示意图

Fig.1 The drought evaluation subjection function

### 2.2.2 模糊综合评价

模糊综合评价是在单因素评价的基础上,确定干旱综合评价指标向量。根据评价指标值和隶属度函数,可分别得到该年度降雨量距平百分率、产水模数距平百分率、受旱面积比距平百分率和综合缺水程度隶属于某干旱等级的隶属度数值,从而可以建立综合指标隶属度矩阵。

$$R = \{r_{ij}\} \quad (14)$$

式中: $r_{ij}$  隶属度数值, $i$  表示第  $i$  个指标, $i = 1 \sim 4$ ; $j$  表示第  $j$  个干旱等级  $j = 1 \sim 5$ 。

利用一定的数学分析方法如层次分析法或相对隶属度法等,确定评价指标的权重集。得到的权重集  $\omega$  乘以综合指标隶属度矩阵  $R$  即可得到干旱综合评价指标向量  $W$ 。

$$W = \omega \times R \quad (15)$$

对模糊综合评价的结果向量  $W$  按最大隶属度原则给出评价对象的综合评定结果。

## 3 区域干旱等级模糊综合评价的应用

以 2001 年为例,对河南省(以郑州市作为详细说明)区域干旱程度进行综合评价,并将评价

结果与实际历史资料进行比较。

### 3.1 郑州市旱情分级标准的确定

数据来源:降雨量、水资源量来自水资源公报<sup>[7]</sup>,受旱面积和播种面积来自水利统计年鉴,需水量通过定额法预测得到,可供水量是根据当时的水利工程情况以及当年的实际需水情况计算得到。

根据郑州 1998—2007 年(除 2001)的系列资料,运用信息扩散方法,建立旱情等级划分标准,以降雨量为例进行说明。首先计算降雨的距平百分率,然后取降雨量距平百分率的论域为  $V = \{-0.6, -0.58, \dots, 0.58, 0.6\}$ ,论域的取值个数为 60 个,扩散系数  $h = 0.14$ ,然后根据式(2)~(8)计算得到超越概率分别为 5%,10%,20%,40% 时的  $u_i$ ,如表 1 所示, $u_i$  即是对应于干旱等级的降雨量距平百分率的临界值。郑州多年平均降雨量为 644.8 mm,以此即可确定降雨量的干旱等级的划分标准,同理可得到产流模数距平的干旱等级划分标准。用  $P - III$  型频率曲线对郑州受旱面积率进行频率分析,得到频率为 5%,10%,20%,40% 所对应的受旱面积率,即可得到受旱面积率的干旱等级划分标准。郑州市的各评价指标的干旱划分标准如表 2 所示。

表1 郑州干旱评价指标各超越概率(频率)对应的临界值  
Tab.1 The critical value corresponding to the exceeding probabilities (frequencies) of drought

| assessment indexes in Zhengzhou |      |      |      | %     |
|---------------------------------|------|------|------|-------|
| 超越概率/Hz                         | 5    | 10   | 20   | 40    |
| 降雨量距平百分率                        | 25.9 | 19.9 | 13.2 | 4.8   |
| 产流模数距平百分率                       | 35.2 | 20.4 | 13.7 | 5     |
| 受旱面积率                           | 45   | 30.1 | 21.3 | 12.16 |

表2 郑州各评价指标干旱等级划分标准

Tab.2 Drought level standards of each assessment index in Zhengzhou

| 干旱等级 | 降雨量/<br>mm | 产流模数/<br>( $10^4 \text{ m}^3 \cdot (\text{km})^{-2}$ ) | 受旱面积<br>率/% | 综合缺水程度    |
|------|------------|--|-------------|-----------|
| 不旱   | >614       | >15.89   | <12.1       | <0.05     |
| 轻旱   | 560~614    | 14.5~15.89   | 12.1~21.3   | 0.05~0.15 |
| 中旱   | 516~560    | 13.34~14.5   | 21.3~30.1   | 0.15~0.3  |
| 重旱   | 478~516    | 12.36~13.34  | 30.1~45     | 0.3~0.4   |
| 特旱   | ≤478       | ≤12.36   | ≥45         | >0.4      |

### 3.2 综合指标隶属度矩阵的计算

郑州市 2001 年的各干旱指标数据如表 3 所示。根据郑州市 2001 年的各旱情评价指标,利用公式(9)~(13)所述隶属函数公式,建立各单个

因素评价指标的模糊隶属度矩阵,计算得到隶属度矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.21 & 0.79 \\ 0 & 0 & 0 & 0.07 \\ 0 & 0 & 0 & 0.88 \end{bmatrix}$$

表 3 郑州市 2001 年的各干旱指标数据

Tab. 3 The values of assessment index in Zhengzhou, 2001

| 地市 | 降雨量<br>/mm | 产水模数<br>/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·(km) <sup>-2</sup> ) | 受旱面积<br>比/% | 可供水量<br>/亿 m <sup>3</sup> | 总需水量<br>/亿 m <sup>3</sup> | 综合缺水指数 |
|----|------------|--|-------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| 郑州 | 464.4      | 12.03  | 43          | 15.168                    | 19.8                      | 0.31   |

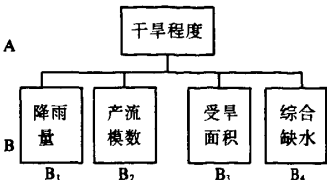


图 2 干旱程度与评价指标的层次模型  
Fig. 2 The hierarchical model for drought degree and evaluation index

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 2 \\ 0.2 & 1 & 2 & 0.33 \\ 0.14 & 0.5 & 1 & 0.2 \\ 0.5 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

其中,  $CR = \frac{CI}{RI} = 0.07 < 0.1$ , 判断矩阵具有较好的一致性, 结合专家经验最终确定指标权重为  $\omega = [0.5 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.3]$ .

3.4 计算结果及分析

根据式(15)可得

$$W = \omega \times R = (0.5 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.3) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.21 & 0.79 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.07 & 0.93 \\ 0 & 0 & 0 & 0.88 & 0.12 \end{bmatrix}$$
$$= (0 \ 0 \ 0.02 \ 0.7 \ 0.28)$$

根据最大隶属度原则, 郑州 2001 年的干旱等级是重旱, 隶属度为 0.7。同理, 可分别计算并判定其它地市 2001 年的干旱等级。具体结果如表 4, 然后制作得到河南省干旱等级分布图, 见图 3。从表 4 和图 3 可以看出, 2001 年河南发生特旱的市 6 个, 分别为信阳、南阳、驻马店、洛阳、濮阳以及济源, 其余各市均为重旱。发生干旱的区域分布在豫南、豫西以及豫北的濮阳, 其中信阳、南阳、驻马店三市特旱的隶属度都在 0.7 以上, 说明豫南在

3.3 权重的确定

建立层次模型, 评价指标按支配关系分组形成递阶层次结构, 划分为 A 层、B 层二层次 (如图 2 所示)。经过对各指标两两之间相对重要程度的对比分析, 得到如下判断矩阵 P, 此矩阵能较好的反映四种评价指标对干旱的影响程度。

表 4 2001 年河南省行政区划干旱等级隶属度

Tab. 4 The subjection value of drought level for administrative divisions of Henan province in 2001

| 地市   | 干旱等级隶属度 |      |      |      |      | 干旱等级 |
|------|---------|------|------|------|------|------|
|      | 无旱      | 轻旱   | 中旱   | 重旱   | 特旱   |      |
| 郑州市  | 0       | 0    | 0.02 | 0.7  | 0.28 | 重旱   |
| 开封市  | 0       | 0    | 0.06 | 0.7  | 0.24 | 重旱   |
| 洛阳市  | 0       | 0    | 0.01 | 0.48 | 0.51 | 特旱   |
| 平顶山市 | 0       | 0.09 | 0.11 | 0.54 | 0.26 | 重旱   |
| 安阳市  | 0       | 0    | 0.01 | 0.6  | 0.4  | 重旱   |
| 鹤壁市  | 0       | 0.06 | 0.15 | 0.45 | 0.34 | 重旱   |
| 新乡市  | 0       | 0    | 0.06 | 0.64 | 0.3  | 重旱   |
| 焦作市  | 0       | 0    | 0.19 | 0.71 | 0.1  | 重旱   |
| 濮阳市  | 0       | 0    | 0.12 | 0.14 | 0.74 | 特旱   |
| 许昌市  | 0       | 0.05 | 0.24 | 0.41 | 0.31 | 重旱   |
| 漯河市  | 0       | 0.02 | 0.16 | 0.58 | 0.24 | 重旱   |
| 三门峡市 | 0       | 0    | 0.14 | 0.48 | 0.38 | 重旱   |
| 南阳市  | 0       | 0    | 0    | 0.3  | 0.7  | 特旱   |
| 商丘市  | 0       | 0    | 0.03 | 0.49 | 0.48 | 重旱   |
| 信阳市  | 0       | 0    | 0    | 0.01 | 0.84 | 特旱   |
| 周口市  | 0       | 0    | 0.11 | 0.55 | 0.34 | 重旱   |
| 驻马店市 | 0       | 0    | 0    | 0.27 | 0.73 | 特旱   |
| 济源市  | 0       | 0.05 | 0.2  | 0.26 | 0.5  | 特旱   |

2001 年发生了历史罕见的特大干旱。

2001 年河南总的气候特点是全年大部分时间持续干旱、高温, 旱情严重, 尤其是信阳市整个汛期降水量仅为 196.1 mm, 为建国以来汛期降雨最少的年份, 当年河南遭受自建国以来最严重的旱灾, 有临时饮水困难人口 150.11 万人, 农作物受灾面积 4876.51 hm<sup>2</sup>, 成灾面积 3520.22 hm<sup>2</sup>, 绝收面积 485.78 hm<sup>2</sup>。通过信息扩散和超越概率的计算, 结果表明: 2001 年全省年农作物受灾面积、成灾面积和绝收面积的超越概率分别为 9.8%、6.5% 和 8.6%, 其超越概率均在 10% 以下, 属重旱和特旱等级。可见, 2001 年河南大多数

地区发生重旱,豫南等地发生特旱的评价结果与实际是一致的.因此,将此评估模型应用到实际的抗旱工作中,对启动抗旱应急响应,制定抗旱应急方案和措施具有重要的意义.

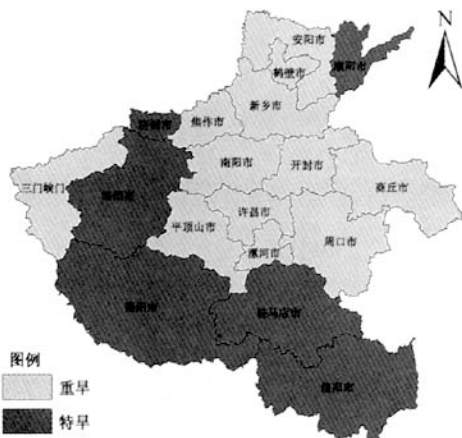


图3 2001年河南区域干旱等级分布图  
Fig.3 Regional drought level distribution in Henan in 2001

#### 4 结论

在利用信息扩散理论根据超越概率建立各评价指标的等级划分标准的条件下,运用模糊关系合

成原理将降雨量、产流模数、受旱面积比和综合缺水程度等几种相互影响、不易量化的因素进行定量化综合评价,充分考虑了评价因素的指标值、权重和评价因素之间的交互作用对于旱发生的共同影响,评价模型较好的解决了当前面临的3个主要问题,所得结果能综合反映出区域干旱发生的严重程度.

#### 参考文献:

- [1] PALMER W C. Meteorological drought US [J]. Weather Bureau Research Paper, 1965.
- [2] 石培华. 相对蒸散发用于冬小麦水分亏缺诊断及灌溉决策初步探讨[J]. 中国农业气象, 1995, 16(3): 102-105.
- [3] OHLSSON. Water conflict and social resource scarcity [J]. Physics and Chemistry of The Earth ( B ), 2000, 25(3): 213-220.
- [4] 刘薇, 曹升乐, 任立立. 模糊综合模型在干旱等级评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2008, 26(12): 100-103.
- [5] 张顺谦, 侯美亭, 王素艳. 基于信息扩散和模糊评价方法的四川盆地气候干旱综合评价[J]. 自然资源学报, 2008, 23(4): 713-723.
- [6] 冯利华. 基于信息扩散理论的气象要素风险分析[J]. 气象科技, 2000, (1): 27-29.
- [7] 河南省水利厅. 河南省水资源公报[R]. 1998-2007.

### Assessment of Regional Drought Level Based on Information Diffusion and the Fuzzy Comprehensive Evaluation in Henan Province

ZHANG Cheng-cai, CHEN Ji-zu, YE Wei, ZHOU Yong

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In terms of a variety of impact factors for the drought in Henan province, We select four elements as drought evaluation index, including rainfall, runoff modulus, drought area ratio as well as integrated water storage index. The drought level standard for each single evaluation index is established through the application of Information Diffusion Method. The Fuzzy Pattern Recognition Model is introduced into the regional drought level evaluation for the integrated system of arid index evaluation, which carries out quantitative evaluation of drought levels. Meanwhile, the model is applied to drought level evaluation in Henan province, which can reflect the comprehensive drought conditions better in the each city, playing a significant role in guiding the work of drought control.

**Key words:** regional drought; fuzzy comprehensive evaluation; information diffusion