

金菊良, 张浩宇, 陈梦璐, 等. 基于灰色关联度和联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 1-7. [JIN Juliang, ZHANG Haoyu, CHEN Menglu, et al. Evaluation and diagnosis of agricultural Drought vulnerability based on grey correlation and connection number coupling[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 1-7. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.001.]

## 基于灰色关联度和联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断研究\*

金菊良<sup>1,2</sup>, 张浩宇<sup>1,2</sup>, 陈梦璐<sup>1,2</sup>, 崔毅<sup>3</sup>, 宁少尉<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009; 3. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 农业旱灾脆弱性评价和诊断是科学防范农业旱灾风险的关键, 在区域农业旱灾风险调控实践中具有重要作用。为定量评价区域农业旱灾脆弱性强弱程度、识别影响其强度变化的主要指标, 通过改进差异度系数的计算方法, 建立了基于灰色关联度和联系数耦合的区域农业旱灾脆弱性评价模型, 对区域农业旱灾脆弱性进行动态评估, 并根据此模型提出了基于五元减法集对势的区域农业旱灾脆弱性诊断方法, 用以识别影响脆弱性的主要指标。在蚌埠市的应用结果表明: 蚌埠市农业旱灾脆弱性评价等级从2001-2003年的超3级水平改善到2004-2010年的3级水平, 农业旱灾脆弱性呈减弱趋势, 农业系统对干旱灾害的承受能力呈逐年提升趋势; 通过诊断模型识别出影响蚌埠市农业旱灾脆弱性的主要指标有农民人均GDP、单位耕地面积农机动力、农业万元GDP用水量和单位农业增加值耗水量, 其中单位农业增加值耗水量与农业旱灾脆弱性的相关性最大。这些结果可为区域农业旱灾风险调控提供科学依据, 对促进农业旱灾风险定量研究具有重要意义。

**关键词:** 农业旱灾风险; 旱灾脆弱性; 差异度系数; 灰色关联度; 联系数; 五元减法集对势; 评价; 诊断

**中图分类号:** X43; S423; TP181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0001-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.001

干旱是指某一地理区域的降水、径流或土壤含水量等水循环过程中天然水源持续低于长期平均值, 导致河流、湖泊、土壤或地下含水层缺水的自然现象<sup>[1]</sup>。干旱发展到一定程度后造成供水水源匮乏, 并对作物和植被正常生长、人类正常生活生产、生态环境正常功能造成不利影响的事件称为干旱灾害(旱灾)<sup>[2]</sup>。农业是中国国民经济的重要基础, 然而, 因其自身的弱质性、高风险性及应对自然灾害能力的有限性<sup>[3]</sup>, 使其成为受干旱影响最为严重的一类承灾体。农业旱灾是指在作物生长过程中, 由于得不到适时或适量的水分供应而造成作物水分亏缺, 并最终导致作物减产甚至绝收的现象<sup>[4]</sup>。根据自然灾害风险系统理论, 农业旱灾风险系统是由孕灾环境差异性、致灾因子危险性、承灾体脆弱性和防灾减灾能力四个子系统相作用构成的典型复杂系统<sup>[1,5]</sup>, 其中农业旱灾脆弱性是指农业生产敏感于或易于遭受干旱威胁并形成损失的性质和状态<sup>[6]</sup>, 可反映承灾

体的承灾能力, 脆弱性与承灾能力呈负相关关系。Wilhite<sup>[7]</sup>在《农业旱灾影响与脆弱性评估指南》中指出, 在整个干旱灾害周期中通过科学合理的手段降低承灾体脆弱性对减少灾损意义重大。因此, 开展农业旱灾脆弱性研究对推动区域农业旱灾风险定量评估和调控具有重要意义。

1990年以来, 国内外学者对农业旱灾脆弱性展开了大量研究<sup>[8-10]</sup>。目前, 农业旱灾脆弱性的评价方法主要有模糊综合评价<sup>[11]</sup>、集对分析<sup>[12]</sup>、云相似度<sup>[13]</sup>、主成分分析<sup>[14]</sup>和信息扩散<sup>[15]</sup>等。其中, 在运用集对分析进行综合评价时, 差异度系数 $I$ 的计算方法是影响其处理不确定性问题的关键。李陶等<sup>[16]</sup>利用灰色系统理论中灰色关联度的理念计算 $I$ , 但是在实际计算过程<sup>[16-18]</sup>中发现用灰色关联方法计算得到的 $I$ 可能导致最终的评价结果出现相反的情况, 为此本文耦合灰色关联度和联系数进一步研究改进的差异度系数计算方法。此外, 当前农业旱灾脆弱性诊断取得了许多有价

\* 收稿日期: 2018-08-21 修回日期: 2018-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502405); 国家自然科学基金项目(51579059, 51709071); 山东省重点研发计划项目(项目编号2017GSF20101)

第一作者简介: 金菊良(1966-), 男, 江苏吴江人, 博士, 教授, 从事水资源系统工程研究. E-mail: JINJL66@126.com

值的研究成果,代表性的研究包括:王静爱等<sup>[19]</sup>构建了农业旱灾承灾体脆弱性诊断指标体系,商彦蕊等<sup>[20]</sup>运用农业旱灾脆弱性与灾害风险相结合的方法分析了影响农业旱灾脆弱性的主要因素,提供了一种脆弱性诊断的思路,阿拉腾图娅等<sup>[21]</sup>采用数理统计、GIS空间叠加分析方法对旱灾风险类型与等级开展了诊断性评价。从当前研究成果看,运用单一评价方法对农业旱灾脆弱性的评价存在明显不足,应用多种智能方法对旱灾脆弱性进行耦合评价已成为一种重要趋势。同时,针对农业旱灾脆弱性开展诊断识别的定量研究方法仍不够成熟,亟需深入探索。为此,本文基于灰色关联度和联系数耦合的方法,建立区域农业旱灾脆弱性评价模型,提出基于五元减法集对势的脆弱性诊断模型,识别出对区域农业旱灾脆弱性影响较大的指标,并在安徽省蚌埠市进行实证研究,为实现区域农业旱灾风险定量评估与调控奠定基础,为制定有效的区域农业旱灾风险调控措施提供科学依据。

## 1 区域农业旱灾脆弱性评价和诊断模型的建立

### 1.1 评价与诊断指标体系的建立及权重的计算

在对农业旱灾脆弱性评价与诊断的内涵进行综合分析的基础上,依据全面性、层次性、适用性及可操作性原则<sup>[22-23]</sup>,按照与区域农业旱灾脆弱性相关的影响因素,将区域农业旱灾脆弱性评价系统分解为承灾体的暴露子系统( $E$ )、灾损敏感性子系统( $V$ )、防灾减灾能力子系统( $A$ )3个子系统以及属于这些子系统下多项指标的区域农业旱灾脆弱性评价与诊断指标体系。由这3个子系统及其评价指标构成的区域农业旱灾脆弱性评价指标体系,可描述为 $\{x(k, j) | k=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, n_k\}$ ,其中 $x(k, j)$ 为某一被评价年份旱灾脆弱性第 $k$ 个子系统中的第 $j$ 个评价指标, $n_k$ 为第 $k$ 个子系统中的指标数量, $k=1, 2, 3$ 分别表示承灾体的暴露、灾损敏感性和防灾减灾能力子系统,评价系统指标总数 $n=n_1+n_2+n_3$ 。运用基于加速遗传算法的层次分析法(AGA-AHP)<sup>[24]</sup>求各子系统及各项指标的权重 $\{w_j | j=1, 2, \dots, n\}$ ,其中 $w_j$ 为第 $j$ 个指标的权重,根据计算的权重值确定评价指标体系。

### 1.2 确定评价等级标准

在考虑区域自然条件、经济和社会等复杂因素对区域农业旱灾脆弱性影响,同时参考现有评价指标体系<sup>[13,25]</sup>和咨询专家意见的基础上,构建区域农业旱灾脆弱性评价等级标准 $\{s_{gj} | g=1, 2, \dots, G; j=1, 2, \dots, n\}$ ,将评价指标样本数据记

为 $\{x_{ij} | i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, n\}$ ,其中 $G, N$ 分别为评价标准的等级数、评价样本的数量。为了简便又不失一般性,这里取弱、较弱、中等、较强和强5个评价标准等级,并约定区域农业旱灾脆弱性评价标准等级中,1级为“弱”, $G$ 级为“强”,余类推,见表1。

### 1.3 构建基于灰色关联度和联系数耦合的区域农业旱灾脆弱性综合评价方法

构建基于灰色关联度和联系数耦合的评价方法,主要包括以下4个步骤。

步骤1:构造评价样本联系数。计算被评价年份 $i$ 的旱灾脆弱性第 $k$ 个子系统中第 $j$ 个评价指标样本值 $\{x(k, i, j) | k=1, 2, 3; i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, n_k\}$ 中属于评价等级标准 $\{s_{gj} | g=1, 2, 3, 4, 5; j=1, 2, \dots, n_k\}$ 的所有指标的权重之和 $\{z_g = \sum_{k=1}^{m_g} w_k | g=1, 2, 3, 4, 5; k=1, 2, \dots, m_g\}$ ,其中 $m_g, z_g$ 分别表示属于评价等级 $g$ 中所有指标的数量、权重之和,且 $m_1+m_2+m_3+m_4+m_5=n$ 。用集对分析方法将被评价年份 $i$ 与旱灾脆弱性评价等级之间进行集对,得到联系数 $\{u(i, g) | i=1, 2, \dots, N; g=1, 2, \dots, G\}$ ,以年份 $i$ 与等级1进行集对为例,该集对的联系数表达式为<sup>[26]</sup>:

$$u(i, 1) = a(i, 1) + b(i, 1)I + c(i, 1)J; \quad (1)$$

$$a(i, 1) = \sum_{k=1}^{m_1} w_k; b(i, 1) = \sum_{k=1}^{m_2} w_k; c(i, 1) = \sum_{k=1}^{m_3+m_4+m_5} w_k. \quad (2)$$

式中:同一度 $a$ 定义为属于此集对等级的所有指标权重加和,差异度 $b$ 定义为属于此集对等级的相邻等级的所有指标权重加和,对立度 $c$ 定义为属于此集对等级的相隔等级的所有指标权重加和<sup>[17]</sup>。 $I$ 为差异度系数<sup>[26]</sup>, $J$ 为对立度系数,一般取 $J=-1$ <sup>[26]</sup>。

步骤2:计算灰色关联度<sup>[27]</sup> $r_{ba}, r_{bc}$ 。计算灰色关联度首先要确定参考数列与比较数列,根据式(1)和式(2)得到同一度 $a$ 、差异度 $b$ 与对立度 $c$ 。将差异度 $b$ 作为参考数列 $X_b(i, g)$ ,同一度 $a$ 、对立度 $c$ 分别作为比较数列 $X_a(i, g), X_c(i, g)$ ,其中 $X_a(i, g), X_b(i, g), X_c(i, g)$ 为评价年份 $i$ 与等级 $g$ 对应联系数的 $a, b, c$ 值。记 $X_b(i, g)$ 与 $X_a(i, g)$ 的灰色关联系数为 $\xi_{ba}(i, g)$ 、绝对差值为 $\Delta_{ba}(i, g)$ ,其计算式为<sup>[16]</sup>:

$$\xi_{ba}(i, g) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{ba}(i, g) + \xi \Delta_{\max}}. \quad (3)$$

式中: $\Delta_{ba}(i, g) = |X_b(i, g) - X_a(i, g)|$ ,  $\Delta_{\min} = \min_i \min_g |X_b(i, g) - X_a(i, g)|$ ,  $\Delta_{\max} = \max_i \max_g |X_b(i, g) - X_a(i, g)|$ ,  $\xi (0 < \xi < 1)$ 为分辨系数,若 $\xi$ 越小,关联系数间差异越大,区分能力越强,一般取 $\xi=0.5$ <sup>[27-28]</sup>。于是得 $X_b(i, g)$ 与 $X_a(i, g)$ 之间

的关联度  $r_{ba}$ :

表 1 农业旱灾脆弱性评价指标、权重与等级标准

子系统		指标	等级划分					
名称	权重	名称	权重	弱	较弱	中	较强	强
暴露子系统(E)	0.283	农业人口密度(E1)/(万人/km <sup>2</sup> )	0.101	0~0.02	0.02~0.04	0.04~0.06	0.06~0.08	>0.08
		耕地率(E2)/%	0.138	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	>0.4
		水田面积率(E3)/%	0.113	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
		水稻种植率(E4)/%	0.109	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
		复种指数(E5)	0.106	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~2.5	>2.5
		农业 GDP 所占比例(E6)/%	0.098	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	>0.4
		单位面积农业 GDP(E7) /(万元/km <sup>2</sup> )	0.100	0~50	50~100	100~150	150~200	>200
		湿润度指数(E8)	0.112	>4	4~3	3~2	2~1	<1
		单位耕地面积水资源量(E9) /(万 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	0.123	>60000	60000~45000	45000~30000	30000~15000	<15000
灾损敏感性子系统(V)	0.400	人均耕地面积(V1)/(hm <sup>2</sup> /人)	0.139	<0.05	0.05~0.1	0.1~0.15	0.15~0.2	>0.2
		农业万元 GDP 用水量(V2) /(m <sup>3</sup> /万元)	0.164	<600	600~1200	1200~1800	1800~2400	>2400
		农业灌溉亩均用水量(V3) /(m <sup>3</sup> /亩)	0.200	<120	120~240	240~360	360~480	>480
		单位耕地耗水量(V4) /(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	0.190	<1100	1100~2100	2100~3100	3100~4100	>4100
		单位农业增加值耗水量(V5) /(m <sup>3</sup> /万元)	0.165	<700	700~1300	1300~1900	1900~2500	>2500
		土地的质量(V6)/(kg/hm <sup>2</sup> )	0.142	>6000	6000~5500	5500~5000	5000~4500	<4500
防灾减灾能力子系统(A)	0.317	农民人均 GDP(A1)/(元/人)	0.100	>5000	5000~4000	4000~3000	3000~2000	<2000
		单位面积库容(A2) /(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	0.149	>28	28~21	21~14	14~7	<7
		有效灌溉面积率(A3)/%	0.144	>0.5	0.5~0.4	0.4~0.3	0.3~0.2	<0.2
		保灌面积率(A4)/%	0.132	>0.5	0.5~0.4	0.4~0.3	0.3~0.2	<0.2
		节水灌溉率(A5)/%	0.138	>0.56	0.56~0.42	0.42~0.28	0.28~0.14	<0.14
		人均旱涝保收面积(A6) /km <sup>2</sup>	0.113	>0.08	0.08~0.06	0.06~0.04	0.04~0.02	<0.02
		单位耕地面积农机动力(A7) /(kW/km <sup>2</sup> )	0.107	>16	16~12	12~8	8~4	4~0
		单位耕地面积灌溉动力(A8) /(kW/km <sup>2</sup> )	0.117	>0.5	0.5~0.4	0.4~0.3	0.3~0.2	<0.2

$$r_{ba} = \frac{1}{N} \frac{1}{G} \sum_{i=1, g=1}^{i=N, g=G} \xi_{ba}(i, g) \quad (4)$$

式中:  $r_{ba}$  为比较数列  $X_a(i, g)$  与参考数列  $X_b(i, g)$  之间的关联度, 是所有关联度系数  $\xi_{ba}(i, g)$  的算数平均值。同理, 按照式(1)~式(4)可计算  $X_b(i, g)$  与  $X_c(i, g)$  之间的关联度  $r_{bc}$ 。

步骤 3: 确定差异度系数  $I$  的取值。将步骤 2 得到的灰色关联度  $r_{ba}$ 、 $r_{bc}$  归一化处理, 得到  $r'_{ba}$ 、 $r'_{bc}$ , 将  $b(i, g)I$  按照比例分为  $r'_{ba} \times b(i, g)$  与  $-r'_{bc} \times b(i, g)$  两个部分<sup>[29]</sup>, 以此来计算评价对象的联系度:

$$u(i, g) = a(i, g) + b(i, g)(r'_{ba} - r'_{bc}) + c(i, g)J \quad (5)$$

目前一般通过计算差异度  $b$  与同一度  $a$  之间的灰色关联度  $r_{ba}$ 、差异度  $b$  与对立度  $c$  之间的灰色关联度  $r_{bc}$ , 比较  $r_{ba}$  和  $r_{bc}$  的大小以确定差异度系数  $I$  的

值<sup>[16-18]</sup>: 若  $r_{ba} > r_{bc}$ , 则  $I = r_{ba}$ ; 若  $r_{ba} < r_{bc}$ , 则  $I = -r_{bc}$ 。这种差异度系数  $I$  取值方法存在局限性: 当  $r_{ba}$  和  $r_{bc}$  的数值相差很小时, 直接把  $r_{ba}$  或  $-r_{bc}$  作为差异度系数  $I$  的值, 易丢失重要信息, 有可能导致评价结果整体趋向于相反的方向。这里采用式(5)对差异度系数  $I$  的处理方式, 将  $b(i, g)I$  按照比例分为同反两个部分  $r'_{ba} \times b(i, g)$  与  $-r'_{bc} \times b(i, g)$ , 以减少差异度系数  $I$  取值上的局限性, 同时, 式(5)依据灰色关联信息分配差异度系数  $I$ , 信息利用更充分些, 有别于差异度系数的比率取值法<sup>[26]</sup>。

步骤 4: 确定农业旱灾脆弱性评价等级。将式(5)计算的联系度值按大小排序, 评价等级判定为联系度值最大的那个等级。为提高旱灾脆弱性评判结果的可靠性, 可采用属性识别理论<sup>[30]</sup>进行评判。样本  $i$  隶属于模糊集“标准等级  $g$ ”的相对隶属度  $v^*(i, g)$  和评价样本  $i$  的联系数  $v(i, g)$  可分别表示为<sup>[31]</sup>:

表2 灰色关联度计算结果

年份与等级集	联系式	$a$	$b$	$c$	$\Delta_{ba}$	$\Delta_{bc}$	$\xi_{ba}$	$\xi_{bc}$
2010 年与等级 1	$0.0876 + 0.3371i + 0.5753j$	0.0876	0.3371	0.5753	0.2495	0.2382	0.4790	0.5997
2010 年与等级 2	$0.3030 + 0.3662i + 0.3308j$	0.3030	0.3662	0.3308	0.0632	0.0354	0.7976	0.9166
2010 年与等级 3	$0.2786 + 0.4689i + 0.2525j$	0.2786	0.4689	0.2525	0.1903	0.2164	0.5486	0.6229
2010 年与等级 4	$0.1318 + 0.4434i + 0.4248j$	0.1318	0.4434	0.4248	0.3116	0.0186	0.4227	0.9586
2010 年与等级 5	$0.1648 + 0.1318i + 0.7034j$	0.1648	0.1318	0.7034	0.0330	0.5716	0.8940	0.3824
2008 年与等级 1	$0.0876 + 0.2755i + 0.6369j$	0.0876	0.2755	0.6369	0.1879	0.3614	0.5519	0.4956
2008 年与等级 2	$0.2755 + 0.4601i + 0.2644j$	0.2755	0.4601	0.2644	0.1846	0.1957	0.5564	0.6466
2008 年与等级 3	$0.3725 + 0.3790i + 0.2485j$	0.3725	0.3790	0.2485	0.0065	0.1305	1.0000	0.7346
2008 年与等级 4	$0.1035 + 0.5373i + 0.3592j$	0.1035	0.5373	0.3592	0.4338	0.1781	0.3433	0.6682
2008 年与等级 5	$0.1648 + 0.1035i + 0.7317j$	0.1648	0.1035	0.7317	0.0613	0.6282	0.8030	0.3602
2006 年与等级 1	$0.0308 + 0.4032i + 0.5660j$	0.0308	0.4032	0.5660	0.3724	0.1628	0.3791	0.6882
2006 年与等级 2	$0.4032 + 0.2967i + 0.3001j$	0.4032	0.2967	0.3001	0.1065	0.0034	0.6908	1.0000
2006 年与等级 3	$0.2659 + 0.5384i + 0.1957j$	0.2659	0.5384	0.1957	0.2725	0.3427	0.4565	0.5090
2006 年与等级 4	$0.1352 + 0.4307i + 0.4341j$	0.1352	0.4307	0.4341	0.2955	0.0034	0.4360	1.0000
2006 年与等级 5	$0.1648 + 0.1352i + 0.7000j$	0.1648	0.1352	0.7000	0.0296	0.5648	0.9063	0.3852
2004 年与等级 1	$0.0308 + 0.4172i + 0.5520j$	0.0308	0.4172	0.5520	0.3864	0.1348	0.3703	0.7281
2004 年与等级 2	$0.4172 + 0.2167i + 0.3661j$	0.4172	0.2167	0.3661	0.2005	0.1494	0.5352	0.7067
2004 年与等级 3	$0.1859 + 0.5863i + 0.2278j$	0.1859	0.5863	0.2278	0.4004	0.3585	0.3619	0.4977
2004 年与等级 4	$0.1691 + 0.3824i + 0.4485j$	0.1691	0.3824	0.4485	0.2133	0.0661	0.5193	0.8487
2004 年与等级 5	$0.1965 + 0.1691i + 0.6344j$	0.1965	0.1691	0.6344	0.0274	0.4653	0.9144	0.4323
2002 年与等级 1	$0.0308 + 0.1362i + 0.8330j$	0.0308	0.1362	0.8330	0.1054	0.6968	0.6931	0.3366
2002 年与等级 2	$0.1362 + 0.3752i + 0.4886j$	0.1362	0.3752	0.4886	0.2390	0.1134	0.4900	0.7618
2002 年与等级 3	$0.3444 + 0.4281i + 0.2275j$	0.3444	0.4281	0.2275	0.0837	0.2006	0.7432	0.6408
2002 年与等级 4	$0.2919 + 0.5394i + 0.1687j$	0.2919	0.5394	0.1687	0.2475	0.3707	0.4811	0.4892
2002 年与等级 5	$0.1950 + 0.2919i + 0.5131j$	0.1950	0.2919	0.5131	0.0969	0.2212	0.7119	0.6176

$$v^*(i, g) = 0.5 + 0.5u(i, g). \quad (6)$$

$$v(i, g) = v^*(i, g) / \sum_{g=1}^G v^*(i, g). \quad (7)$$

按照置信度准则识别和比较样本  $i$  的评价等级<sup>[30]</sup>:

$$h_i = \min_{g^*} \left\{ g^* \mid \sum_{g=1}^{g^*} v(i, g) > \lambda \right\}. \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为置信度, 一般在  $[0.5, 0.7]$  内取值,  $\lambda$  越大则评价结果越趋于稳妥<sup>[30]</sup>.

同时, 这里引入级别特征值<sup>[32]</sup>  $H_i$  对式(7)从另一个角度评判样本  $i$  与评价等级  $g$  之间的关系:

$$H_i = \sum_{g=1}^G v(i, g)g. \quad (9)$$

通过属性识别理论、级别特征值两种方法对区域农业旱灾脆弱性进行评价, 可间接分析步骤3对于改进的差异度系数  $I$  的取值方式是否合理。如果两者计算的结果基本一致, 即表明对于差异度系数  $I$  的取值方式合理; 反之, 则说明取值不合理。

#### 1.4 基于 $n$ 元减法集对势的区域农业旱灾脆弱性诊断方法

由文献[31]的方法计算被评价年份  $i$  的第  $k$  子系统第  $j$  个评价指标样本值  $\{x(k, i, j) \mid k=1, 2,$

$3; i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, n_k\}$  与评价等级标准  $\{s(g, j) \mid g=1, 2, 3, 4, 5; j=1, 2, \dots, n_k\}$  之间的评价指标值联系数  $\{u(k, i, j) \mid k=1, 2, 3; i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, n_k\}$ 。按照集对分析理论, 集对势函数  $s_f(u)$  是式(1)系数的伴随函数, 它实质上所描述的是研究对象在当前宏观期望层次上所处的相对确定性状态和发展趋势<sup>[26]</sup>。可将金菊良等<sup>[33-34]</sup>提出的三元减法集对势进一步推广为  $n$  元减法集对势函数  $s_f(u)$ :

$$s_f(u) = (a-c)(1+b_1+b_2+\dots+b_{n-2}). \quad (10)$$

根据“均分原则”<sup>[26]</sup> 把  $n$  元减法集对势  $s_f(u)$  分为 5 个势级<sup>[33]</sup>: 反势  $s_f(u) \in [-1.0, -0.6)$ , 偏反势  $s_f(u) \in [-0.6, -0.2)$ , 均势  $s_f(u) \in [-0.2, 0.2]$ , 偏同势  $s_f(u) \in (0.2, 0.6]$ , 同势  $s_f(u) \in (0.6, 1.0]$ 。其中, 处于反势和偏反势的指标可被诊断为是引起区域农业旱灾系统较为脆弱的主要因素<sup>[33-34]</sup>, 也是农业旱灾脆弱性调控的主要方向。

#### 1.5 区域农业旱灾脆弱性评价和诊断过程

根据“评价-诊断”的研究思路, 用 1.3 节建立的综合评价模型, 对各年份的区域农业旱灾脆弱性评价指标样本系列进行综合评价, 用文献

[31]的方法计算区域农业旱灾脆弱性单个指标的联系数、用式(10)计算评价指标值联系数的五元减法集对势, 识别诊断导致区域农业旱灾脆弱性增强(减弱)的主要指标, 然后针对这些指标提出相应的调控措施。

## 2 在蚌埠市农业旱灾脆弱性评价和诊断中的应用分析

蚌埠市农业旱灾系统脆弱性评价指标体系及相应指标权重, 如表 1 所示<sup>[13,25]</sup>。

搜集整理蚌埠市 2001 - 2010 年的统计数据<sup>[35]</sup>, 为便于说明、以偶数年为例进行部分结果展示, 由式(1)~式(3)计算  $\xi_{ba}$ 、 $\xi_{bc}$ , 结果如表 2 所示。

将表 2 与式(4)相结合计算  $r_{ba}$ 、 $r_{bc}$ , 归一化后得  $r'_{ba} = 0.4849$ 、 $r'_{bc} = 0.5151$ , 由式(5)得相应各年份评价样本与等级之间的联系数值, 如表 3 所示。

表 3 各年份评价样本与等级间的联系数值

等级	2002	2004	2006	2008	2010
1	-0.8063	-0.5338	-0.5474	-0.5576	-0.4979
2	-0.3637	0.0446	0.0941	-0.0028	-0.0389
3	0.1040	-0.0596	0.0539	0.1126	0.0119
4	0.1069	-0.2909	-0.3119	-0.2719	-0.3064
5	-0.3269	-0.4430	-0.5393	-0.5700	-0.5426

将表 3 与式(6)~式(7)结合计算归一化后的各年份评价样本与脆弱性等级间的联系数, 如表 4 所示。

表 4 归一化后各年份评价样本与等级间的联系数值

等级	2002	2004	2006	2008	2010
1	0.0521	0.1255	0.1207	0.1192	0.1385
2	0.1713	0.2809	0.2918	0.2688	0.2651
3	0.2973	0.2529	0.2811	0.2999	0.2790
4	0.2981	0.1908	0.1835	0.1962	0.1913
5	0.1812	0.1499	0.1229	0.1159	0.1261

取置信度  $\lambda$  为  $0.6^{[36]}$ , 由式(8)可得: 2010 年时

$$\sum_{g=1}^3 v(2010, g) = 0.6826, 2008 \text{ 年时 } \sum_{g=1}^3 v(2008, g)$$

$$= 0.6879, 2006 \text{ 年时 } \sum_{g=1}^3 v(2006, g) = 0.6936, 2004$$

$$\text{年时 } \sum_{g=1}^3 v(2004, g) = 0.6593, 2002 \text{ 年时 } \sum_{g=1}^4 v(2002,$$

$$g) = 0.8188. \text{ 由式(9)计算偶数年份的级别特征值, 同理按照式(1)~式(9)计算奇数年份评价等级, 最后将本文计算得到的 2001 - 2010 年蚌埠市农业旱灾脆弱性级别与模糊综合评价、云相似度}^{[13]}$$

结果进行综合比较分析, 如表 5 所示。

由表 5 的计算结果可看出: 基于灰色关联度和联系数耦合的属性识别评价方法计算 2001 - 2003 年

蚌埠市农业旱灾脆弱性的级别为 4 级, 2004 - 2010 年的级别为 3 级, 总体趋于平稳状态; 用级别特征值法计算得到的蚌埠市农业旱灾脆弱性等级与用属性识别法计算得到的结果基本一致, 2001 - 2003 年评价级别明显超过 3 级, 2004 - 2010 年评价级别在 3 级左右轻微波动。同时, 模糊综合评价与云相似度法计算 2001 - 2010 年蚌埠市农业旱灾脆弱性的结果与本文两种方法计算结果差别较小。

表 5 4 种评价方法的评价结果

年份	本文评价方法		模糊综合评价	云相似度法 <sup>[13]</sup>
	$h_i$	$H_i$		
2001	4	3.372	3.461	3.280
2002	4	3.385	3.417	3.290
2003	4	3.344	3.330	3.301
2004	3	2.959	3.062	2.885
2005	3	2.851	2.904	2.686
2006	3	2.896	2.998	2.794
2007	3	2.793	2.802	2.665
2008	3	2.921	3.010	2.856
2009	3	3.144	3.042	2.887
2010	3	2.901	2.961	2.822

为进一步诊断蚌埠市农业旱灾脆弱性程度变弱的主要原因, 对 2001 - 2010 年的具体指标进行分析, 诊断识别出影响蚌埠市农业旱灾脆弱性变弱的主要指标。由文献[31]、式(10)计算 2001 - 2010 年各指标联系数的五元减法集对势, 通过五元减法集对势诊断识别出影响蚌埠市农业旱灾脆弱性的主要指标, 选取联系数的五元减法集对势 2001 - 2010 年中变化较大的指标, 具体结果如图 1 所示, 而联系数的五元减法集对势在 2001 - 2010 年中都在一个较小范围内波动的指标, 因其参考价值不大, 未被一一列出。

从图 1 可看出: 这 4 项指标的整体趋势都是往减法集对势增加的方向、也就是降低脆弱性的方向发展, 这与蚌埠市农业旱灾脆弱性评价的区域整体改善结果是一致的, 说明这 4 项指标与蚌埠市农业旱灾脆弱性有较强的相关性。A1 指标“农民人均 GDP”在 2001 - 2003 年处于反势, 2004 年之后逐渐变为偏反势最终处在均势的状态, 其诊断结果呈逐年向好趋势, 在时间尺度上, 农民人均 GDP 向着有利于降低蚌埠市农业旱灾脆弱性的方向发展; V2 指标“农业万元 GDP 用水量”在 2001 - 2003 年处于均势, 之后在偏同势与均势之间波动, 说明该指标同时受节水水平和天然来水的影响, 对于蚌埠市农业旱灾脆弱性的影响具有波动性; V5 指标“单位农业增加值耗水量”在 2001 - 2003 年处于反势, 2003 年之后逐渐处于均势, 并有往偏同势发展的趋势, 评价等级由 2001 - 2003 年的超 3 级状态变为 2004 年的 3 级, 且评价等级呈逐年缓慢改善的趋势, 说明此指标是引起蚌埠市农业

旱灾脆弱性评价结果向好的主要因素；A7 指标“单位耕地面积农机动力”在 2004 年之前都是均势，2008 年之后逐渐变为同势，与蚌埠市农业旱灾脆弱性评价结果变化趋势有较好的一致性。

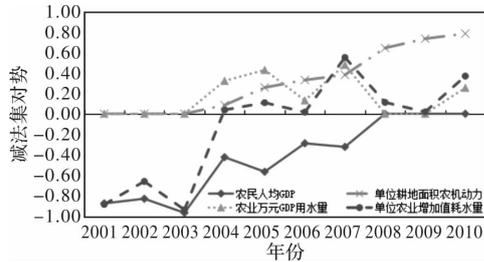


图1 2001—2010年4项指标动态诊断分析结果

根据上述诊断识别出主要的影响指标，提出相应的蚌埠市农业旱灾脆弱性调控措施有：①提高“农民人均 GDP”可以采取增加就业、扩大农民收入渠道的措施，增强农民抵御农业旱灾的能力，进而减轻旱灾的影响程度。②提高“单位耕地面积农机动力”可以采取提高农业大型机械的使用频率、增加田间劳作效率的措施，加快农民对于干旱的应对速度，快速实施减灾措施，尽可能地降低旱灾的影响范围与程度。③降低“单位农业增加值耗水量”可以采取推广大范围节水灌溉措施、进行田间喷灌与滴灌，取代传统大水漫灌方式。④降低“农业万元 GDP 用水量”可以采取种植耗水较少的高产值经济作物的方式，改变传统的种植方式与农作物品种，提高农业用水经济效益。

### 3 结论

本文采用“评价—诊断”的研究思路构建了基于灰色关联度和联系数耦合的区域农业旱灾脆弱性评价和诊断模型，并在蚌埠市开展实证研究，分析出蚌埠市农业旱灾脆弱性的现状及发展趋势，识别出导致蚌埠市农业旱灾脆弱性程度较强的主要指标。结果表明：①属性识别理论与级别特征值两种方法计算的评价结果相一致，与实际情况也比较吻合，基于灰色关联度和联系数耦合的方法对于改进差异度系数  $I$  的取值方式合理可靠。②将灰色关联度和联系数耦合的方法运用到蚌埠市农业旱灾脆弱性评价中是可行有效的，得到评价结果为蚌埠市农业旱灾脆弱性 2001—2003 年的评价级别介于 3 级与 4 级之间，评价结果表明旱灾脆弱性程度较强；2004—2010 年评价级别在 3 级左右轻微波动，评价结果表明旱灾脆弱性程度中等，旱灾脆弱性程度趋于平稳，总体来说 2001—2010 年旱灾脆弱性的程度没有很大变化，在一个小范围内波动。③基于评价指标联系数的五元减法集对势诊断分析结果说明，影响蚌埠市农业旱灾脆弱性的指标主要包括农民人均 GDP、单位耕地面

积农机动力、农业万元 GDP 用水量和单位农业增加值耗水量，这 4 项指标中“单位农业增加值耗水量”与蚌埠市农业旱灾脆弱性的相关性最大，单位农业增加值耗电量的波动性与不确定性是导致蚌埠市农业旱灾脆弱性程度在时间尺度上呈现一定波动性与不确定性的最主要因素。④基于灰色关联度与联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断方法合理可靠、适用性强，可为区域农业旱灾脆弱性定量评价和诊断提供重要的方法参考，为实施区域旱灾脆弱性调控提供技术支持。

### 参考文献：

- [1] 金菊良, 郦建强, 周玉良, 等. 旱灾风险评估的初步理论框架[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 1-10.
- [2] 金菊良, 宋占智, 崔毅, 等. 旱灾风险评估与调控关键技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 398-412.
- [3] 李梦娜, 钱会, 乔亮. 关中地区农业干旱脆弱性评价[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 166-174.
- [4] 尹树斌, 巢礼义, 冯发林. 湖南省农业干旱旱灾特征与水资源高效利用模式[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2005, 28(4): 80-84.
- [5] 史培军. 综合风险防范: 科学、技术与示范[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] 刘兰芳, 刘盛和. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分析定量评价[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 78-83.
- [7] Wilhite D A. A methodology for drought preparedness [J]. Natural Hazards, 1996, 13(3): 229-252.
- [8] HAO L, ZHANG X, LIU S. Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit [J]. Natural Hazards, 2012, 61(2): 785-801.
- [9] Lestari D R, Pigawati B. Drought disaster vulnerability mapping of agricultural sector in Bringin District, Semarang Regency [C]// 2018: 012031.
- [10] 苏筠, 吕红峰, 黄术根. 农业旱灾承灾体脆弱性评价—以湖南鼎城区为例[J]. 灾害学, 2005, 20(4): 1-7.
- [11] ZHANG D, WANG G, ZHOU H. Assessment on agricultural drought risk based on variable fuzzy sets model [J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(2): 167-175.
- [12] 杜云. 淮河流域农业干旱灾害风险评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [13] 宋占智, 蒋尚明, 金菊良, 等. 蚌埠市农业旱灾脆弱性综合评价[J]. 水利水电工程学报, 2017, 39(3): 56-63.
- [14] 王莺, 王静, 姚玉璧, 等. 基于主成分分析的中国南方干旱脆弱性评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1897-1904.
- [15] 王积全, 李维德. 基于信息扩散理论的干旱区农业旱灾风险分析—以甘肃省民勤县为例[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 826-830.
- [16] 李陶, 付强, 丁红. 基于灰色关联度的集对分析差异系数研究[J]. 黑龙江大学学报, 2010, 37(1): 97-99.
- [17] 陈骥, 邹树梁, 唐德文, 等. 基于灰色关联度的集对分析方法在高层建筑火灾危险性评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(5): 136-141.
- [18] 谭星宇, 谢贤平, 唐绍辉. 基于灰色关联度与集对分析的尾矿库溃坝风险评价[J]. 黄金, 2014, 35(9): 70-73.
- [19] 王静爱, 商彦蕊, 苏筠, 等. 中国农业旱灾承灾体脆弱性诊断与区域可持续发展[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2005, 50(3): 130-137.
- [20] 商彦蕊. 农业旱灾风险与脆弱性评估及其相关关系的建立[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 1999, 23(3): 420-428.
- [21] 阿拉腾图娅, 金阿丽, 包玉海, 等. 内蒙古旱灾系统风险诊断性评价研究[C]// 中国灾害防御协会风险分析专业委员会年会, 2010.

- [22] 邵立周, 白春杰. 系统综合评价指标体系构建方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(3): 48-52.
- [23] 邵强, 李友俊, 田庆旺. 综合评价指标体系构建方法[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(3): 74-76.
- [24] 金菊良, 吴开亚, 李如忠, 等. 信息熵与改进模糊层次分析法耦合的区域水安全评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 61-66.
- [25] 费振宇. 区域农业旱灾风险评估研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [26] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000.
- [27] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [28] 马小凡, 苏海华, 任建峰, 等. 白城市生态农业经济系统灰色关联分析[J]. 吉林大学学报(理学版), 2003, 41(4): 551-555.
- [29] 张文. 基于灰色关联分析与集对分析的区域水资源承载力评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [30] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 12-20.
- [31] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409.
- [32] ZOU Q, ZHOU J, ZHOU C, et al. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis - variable fuzzy sets model and fuzzy AHP [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2013, 27(2): 525-546.
- [33] 金菊良, 沈时兴, 酃建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9.
- [34] CUI Y, FENG P, JIN J L, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method [J]. Entropy, 2018, 20(5): 359.
- [35] 安徽省统计局, 国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴(2002版-2011版)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2013.
- [36] 吴博, 赵法锁, 段钊, 等. 基于熵权的属性识别模型在陕西土质滑坡危险度评价中的应用[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 140-145.

## Evaluation and Diagnosis of Agricultural Drought Vulnerability Based on Grey Correlation and Connection Number Coupling

JIN Juliang<sup>1,2</sup>, ZHANG Haoyu<sup>1,2</sup>, CHEN Menglu<sup>1,2</sup>, CUI Yi<sup>3</sup> and NING Shaowei<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The assessment and diagnosis of agricultural drought vulnerability is the key to control of regional agricultural drought risk scientifically. Meanwhile, it plays an important role in the practices of regional agricultural drought risk control. To quantitatively evaluate the regional agricultural drought vulnerability and identify the main indicators which affect the vulnerability changes, a regional agricultural drought vulnerability evaluation model based on grey correlation and connection number is established by improving the calculation method of the difference coefficient I. Furthermore, a method for regional agricultural drought vulnerability diagnosis based on five-variables set pair potential is proposed to identify the main influence factors. The results show that the evaluation grade of regional agricultural drought vulnerability in Bengbu City had been improved from the grades which is greater than 3 to the grade 3, it reflected that the ability of agricultural system to carry drought disaster had been improved from 2001 to 2010. The main indicators which affect the agricultural drought vulnerability in Bengbu City were per capita income of farmers, agricultural machinery power per unit cultivated area, water consumption of per ten thousand yuan GDP and unit added value of agricultural water consumption. Moreover, the relationship between the unit added value of agricultural water consumption and the agricultural drought vulnerability in Bengbu City was the most significant. These results can provide a scientific foundation for the control of regional agricultural drought risk and promote the quantitative study of agricultural drought risk.

**Key words:** agricultural drought risk; drought vulnerability; difference coefficient; grey correlation; connection number; five-variables set pair potential based on subtraction; evaluation; diagnosis