

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.037

基于五元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价

金菊良^{1,2} 孔令茹^{1,2} 崔毅^{1,2} 周戎星^{1,2} 陈梦璐^{1,2} 宁少尉^{1,2}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 合肥 230009)

摘要: 农业旱灾脆弱性动态评价对保障区域农业可持续发展具有重要意义。为分析农业旱灾脆弱性评价子系统及指标的发展趋势,识别影响区域农业旱灾脆弱性变化的主要因素,提出了一种联系数伴随函数——五元半偏减法集对势,据此建立了区域农业旱灾脆弱性动态评价方法,在蚌埠市应用结果表明:蚌埠市农业旱灾脆弱性评价系统中的暴露子系统2001—2010年总体由均势转向偏反势,向着集对势降低的方向发展,农业旱灾脆弱性呈增强趋势,其中,对蚌埠市农业旱灾脆弱性变化影响较大的指标为复种指数,且复种指数存在向反势发展的趋势;灾损敏感性子系统发展趋势波动较大,2001—2010年逐渐由偏反势发展到偏同势,评估结果呈现逐年向好趋势,其中,单位农业增加值耗水量的减少使得蚌埠市农业旱灾脆弱性有较为明显的改善;防灾减灾能力子系统在2001—2009年处于偏反势,2009年之后逐渐稳定为均势,脆弱性状况呈缓慢改善趋势,其中,影响脆弱性的主要指标有节水灌溉率、农民人均GDP。本研究可为改善区域农业旱灾脆弱性状况提供科学的决策依据,也可为解决复杂系统多等级问题提供新的有效途径。

关键词: 农业旱灾; 风险防控; 脆弱性评价; 五元半偏减法集对势

中图分类号: S423; X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)01-0340-09

OSID:



Assessment of Regional Agricultural Drought Vulnerability Based on Five-element Semipartial Subtraction Set Pair Potential

JIN Juliang^{1,2} KONG Lingru^{1,2} CUI Yi^{1,2} ZHOU Rongxing^{1,2} CHEN Menglu^{1,2} NING Shaowei^{1,2}

(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)

Abstract: The agricultural drought vulnerability dynamic assessment is of great significance for the sustainable development of regional agriculture. In order to analyze the development trend of agricultural drought vulnerability evaluation subsystem and indexes, and identify the main indexes that affect the change of regional agricultural drought vulnerability, an adjoint function of connection number, which was the five-element semipartial subtraction set pair potential was constructed. Then, a dynamic evaluation model of regional agricultural drought vulnerability was established, application results of Bengbu City showed that, in the agricultural drought vulnerability evaluation system of Bengbu City, the overall trend of exposure subsystem from 2001 to 2010 was fluctuated between the symmetrical potential and the partial inverse potential, and it was developed towards the reduction of set pair potential. The agricultural drought vulnerability showed an increasing trend, the main index that had a great impact on the vulnerability in Bengbu City was multiple cropping, and it displayed a trend to the inverse potential. Furthermore, the development of damage sensitivity subsystem was fluctuated greatly, from 2001 to 2010, it was gradually developed from the partial inverse potential to the partial identical potential, and the evaluation results showed a positive trend. The decrease of unit added value for agricultural water consumption made an obvious improvement of agricultural drought vulnerability in Bengbu City. Moreover, in 2001—2009, the disaster prevention ability subsystem was in the partial inverse potential.

收稿日期: 2020-12-30 修回日期: 2021-03-15

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(52109009、51579060)、安徽省自然科学基金项目(2108085QE254、2008085ME158)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(JZ2020HGQA0202)

作者简介: 金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究,E-mail: JINJL66@126.com

通信作者: 崔毅(1990—),男,讲师,博士,主要从事水资源系统工程研究,E-mail: cuiyi9007@163.com

After 2009, it was gradually changed to the symmetrical potential. Meanwhile, the vulnerability showed a slow improvement trend, and the primary influence factors were water-saving irrigation rate and per capita income of farmers. The research provided a scientific decision basis for improving the regional agricultural drought disasters vulnerability, and also provided an effective way to deal with the multi-level problems of complex systems.

Key words: agriculture drought; prevention and control of risk; assessment of vulnerability; five-element semipartial subtraction set pair potential

0 引言

在全球气候剧烈变化和经济社会高速发展的背景下,干旱事件频发,旱灾损失巨大,亟需开展基于物理成因的旱灾风险防控理论与实践研究^[1-3]。其中旱灾风险评估是旱灾风险防控的基础,特别是承灾体脆弱性是将干旱事件危险性转换为旱灾损失风险的核心环节^[4],准确评估承灾体脆弱性对实现旱灾风险防控十分关键^[5-7]。农业系统是干旱事件最直接的承灾体,旱灾造成的损失常凸显于农业系统之中。据《中国水旱灾害公报》统计,2000 年以来,我国年均因旱粮食损失 190.2 亿 kg、因旱经济作物损失 251.6 亿元^[8]。农业旱灾问题已严重威胁我国粮食安全和脱贫攻坚^[9-11]。因此,定量评价农业旱灾脆弱性、准确识别影响农业旱灾脆弱性的关键要素及其发展趋势对调整农业种植结构、优选抗旱减灾适应性策略,充分保障区域农业可持续发展具有重要科学意义^[5,12]。

近年来,国内外学者对区域农业旱灾脆弱性开展了大量研究。曹永强等^[13]利用 DPS 中的投影寻踪综合评价法,对衡阳市 7 个县域的农业旱灾脆弱性进行了评价。李艳^[14]在对河南省旱情评价的研究中,构建了基于集对分析理论的旱情评价模型。REIS 等^[15]提出了 iSECA 模型,通过 MCDM 技术计算脆弱性指数,GIS 软件用于分类及绘制旱灾脆弱性分布示意图,并将其应用于圣保罗及塞阿拉州的福塔雷萨的旱灾脆弱性研究中。AHMADALIPOUR 等^[16]通过采集 1960—2015 年社会经济统计数据,计算了 46 个非洲国家的旱灾脆弱性指数,并预测了 2020—2100 年的旱灾脆弱性。JIANG 等^[17]利用扩展灰色关联分析法对 2009 年中国 31 个省市的农业旱灾脆弱性进行了评估。金菊良等^[18]采用灰色关联度和联系数耦合的方法对蚌埠市农业旱灾脆弱性进行了评价和诊断研究。其中,集对分析法可从同异反 3 方面深入探讨评价样本、评价子系统、评价指标值与评价标准等级之间的模糊不确定性关系,在处理确定性和不确定性问题中具有独特优势,方法客观、计算方便,分析问题全面,在具有不确定性和复杂性的典型旱灾脆弱性评估问题中较为适用。

目前针对农业旱灾脆弱性研究成果中多是对旱灾脆弱性进行静态评价,对区域农业旱灾脆弱性发展趋势的动态评价分析研究较少,尚缺乏有效识别诊断农业旱灾脆弱性影响因素的方法,且现有的三元半偏减法集对势^[19]不适应复杂系统多等级问题。为有效评价区域农业旱灾脆弱性动态发展趋势、准确识别脆弱性系统中具有较大影响的指标,本文综合考虑五元联系数的结构形式,在三元半偏减法集对势^[19]的基础上,推导提出五元联系数的伴随函数——五元半偏减法集对势,并将该伴随函数应用于区域农业旱灾脆弱性趋势分析中,以蚌埠市 2001—2010 年农业旱灾脆弱性评价为研究对象,建立评价指标体系,采用联系数对农业旱灾脆弱性进行动态评价,再利用五元半偏减法集对势诊断影响脆弱性的子系统及关键因素。

1 评价模型构建

基于五元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价模型的建立包括 4 个步骤:

步骤 1:在综合分析农业旱灾脆弱性评价与诊断内涵的基础上,结合农业旱灾脆弱性已有研究^[5,18,20],构建区域农业旱灾脆弱性评价指标体系 $\{x_j | j = 1, 2, \dots, n_j\}$ 和评价标准等级 $\{s_{kj} | k = 1, 2, \dots, n_k; j = 1, 2, \dots, n_j\}$, 相应的评价指标样本数据记为 $\{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, n_j\}$ 。其中, x_j 为区域农业旱灾脆弱性评价指标体系中的第 j 个评价指标, n_k, n_i, n_j 分别表示评价标准等级个数、评价样本个数和评价指标个数; s_{kj} 为区域农业旱灾脆弱性评价指标体系中指标 j 的第 k 个评价标准等级, x_{ij} 为评价样本 i 指标 j 的样本值。为使评价等级适用于五元联系数的计算,本文将脆弱性评价指标标准等级取为弱、较弱、中等、较强和强 5 个级别,1 级为“弱”,5 级为“强”,其余类推,即 $n_k = 5$ 。其中,农业旱灾脆弱性越强,说明其抵御干旱威胁的能力越低。

步骤 2:在根据已有评价样本 i 指标 j 的样本值 x_{ij} 与评价样本标准等级 s_{kj} 之间接近程度计算区域农业旱灾脆弱性评价样本的指标值联系数 $u_{ijk} (i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, n_j; k = 1, 2, \dots, 5)$ ^[21-23]分段函

数的基础上,作进一步改进。其中, u_{ijk} 为样本*i*中指标*j*的值与第*k*个评价指标的指标值联系数。现有指标值联系数的分段函数^[21-23]与改进后的指标值联系数分段函数计算示意图(以正向指标为例)如图1所示,图1a~1e为现有指标值联系数的分段函数^[21-23],图1a为样本值 x_{ij} 与评价样本标准等级 s_{1j} 处于同一等级,图1e为样本值 x_{ij} 与评价样本标准等级 s_{5j} 处于同一等级,其余类推。其中, s_{0j} 为指标*j*等级1级的一端点临界值, s_{1j} 为评价指标*j*等级1级与2级的临界值, s_{2j} 为评价指标*j*等级2级与3级的临

界值, s_{3j} 为评价指标*j*等级3级与4级的临界值, s_{4j} 为评价指标*j*等级4级与5级的临界值, s_{5j} 为指标*j*等级5级的一端点临界值。图1a~1e中,评价样本*i*指标*j*的样本值 x_{ij} 与评价样本标准等级 s_{kj} 若处于同一等级中则该指标值联系数 u_{ijk} 为1;若处于相隔等级中则 u_{ijk} 为-1;若处于相邻的等级中则 $u_{ijk} \in [-1, 1]$, x_{ij} 越接近于等级 s_{kj} 则 u_{ijk} 越趋近于1, x_{ij} 越接近于与等级 s_{kj} 相隔的等级则 u_{ijk} 越趋近于-1^[23]。图1f~1j为对应的改进后的指标值联系数的分段函数。

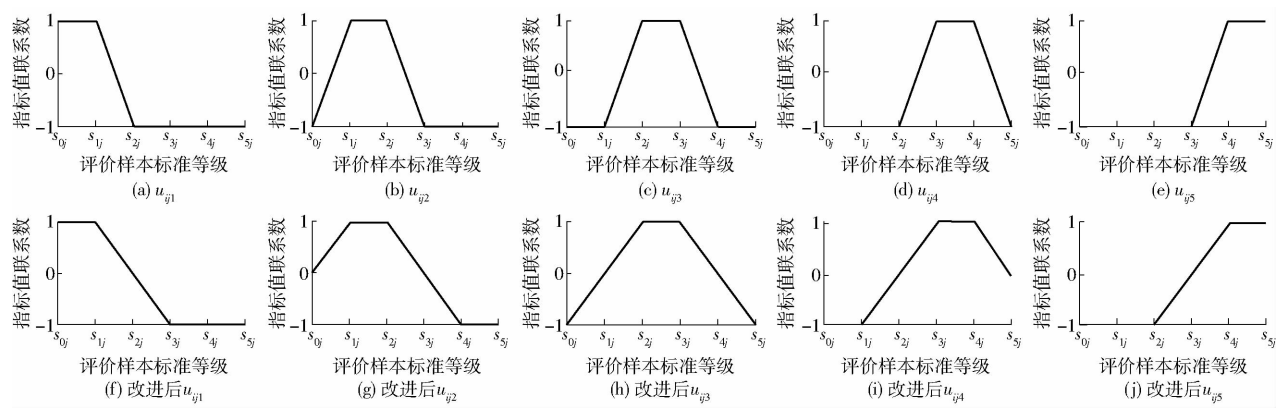


图1 现有和改进后指标值联系数的分段函数示意图(以正向指标为例)

Fig.1 Schematics of existing index connection number piecewise function and improved piecewise function (positive index)

为避免在计算指标值五元联系数时出现多个零的问题,本研究通过放缓现有指标值联系数的分段函数中相邻两个等级的斜率(比较图1a~1e),缩短联系数对立度区间,丰富样本值与评价标准等级之间单指标联系数的物理意义。在改进后的分段函数(图1f~1j)中:若处在同一等级中则 $u_{ijk}=1$;若处在相隔两个或以上等级中则 $u_{ijk}=-1$;若处于相邻的两个等级中则 $u_{ijk} \in [-1, 1]$, x_{ij} 越接近于等级 s_{kj} 则 u_{ijk} 越趋近于1, x_{ij} 越接近于与等级 s_{kj} 相隔的等级则 u_{ijk} 越趋近于-1。其中,图1f为样本值 x_{ij} 与评价样本标准等级 s_{1j} 处于同一等级,图1j为样本值 x_{ij} 与评价样本标准等级 s_{5j} 处于同一等级,其余类推。综合考虑五元联系数的结构特性,计算公式为

$$u_{ij1} = \begin{cases} 1 & (\text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \text{或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j}) \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{1j}) / (s_{3j} - s_{1j}) & (\text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{3j}, \text{或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{3j}) \\ -1 & (\text{正向指标 } x_{ij} > s_{3j}, \text{或反向指标 } x_{ij} < s_{3j}) \end{cases} \quad (1)$$

$$u_{ij2} = \begin{cases} 1 - 2(s_{1j} - x_{ij}) / (s_{1j} - s_{0j}) & (\text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \text{或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j}) \\ 1 & (\text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j}, \text{或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j}) \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{2j}) / (s_{4j} - s_{2j}) & (\text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{4j}, \text{或反向指标 } s_{2j} > x_{ij} \geq s_{4j}) \\ -1 & (\text{正向指标 } x_{ij} > s_{4j}, \text{或反向指标 } x_{ij} < s_{4j}) \end{cases} \quad (2)$$

$$u_{ij3} = \begin{cases} 1 - 2(s_{2j} - x_{ij}) / (s_{2j} - s_{0j}) & (\text{正向指标 } s_{0j} < x_{ij} \leq s_{2j}, \text{或反向指标 } s_{0j} > x_{ij} \geq s_{2j}) \\ 1 & (\text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j}, \text{或反向指标 } s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j}) \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{3j}) / (s_{5j} - s_{3j}) & (\text{正向指标 } s_{3j} < x_{ij} \leq s_{5j}, \text{或反向指标 } s_{3j} > x_{ij} \geq s_{5j}) \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{ij4} = \begin{cases} -1 & (\text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \text{或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j}) \\ 1 - 2(s_{3j} - x_{ij}) / (s_{3j} - s_{1j}) & (\text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{3j}, \text{或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{3j}) \\ 1 & (\text{正向指标 } s_{3j} < x_{ij} \leq s_{4j}, \text{或反向指标 } s_{3j} > x_{ij} \geq s_{4j}) \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{4j}) / (s_{5j} - s_{4j}) & (\text{正向指标 } s_{4j} < x_{ij} \leq s_{5j}, \text{或反向指标 } s_{4j} > x_{ij} \geq s_{5j}) \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{ij5} = \begin{cases} -1 & (\text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{2j}, \text{或反向指标 } x_{ij} \geq s_{2j}) \\ 1 - 2(s_{4j} - x_{ij}) / (s_{4j} - s_{2j}) & (\text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{4j}, \text{或反向指标 } s_{2j} > x_{ij} \geq s_{4j}) \\ 1 & (\text{正向指标 } s_{4j} < x_{ij} \leq s_{5j}, \text{或反向指标 } s_{4j} > x_{ij} \geq s_{5j}) \end{cases} \quad (5)$$

正向(反向)指标为样本值随 k 的增大而增大(减小)的评价指标。显然,指标值联系数 u_{ijk} 可作为评价指标样本值 x_{ij} 与评价标准等级 s_{kj} 之间接近程度可变模糊集的一种相对差异度函数,相应的相对隶属度 $v_{ijk}^{* [24]}$ 为

$$v_{ijk}^{*} = 0.5 + 0.5u_{ijk} \quad (i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, n_j; k = 1, 2, \dots, 5) \quad (6)$$

归一化式(6)可得农业旱灾脆弱性评价指标值联系数分量^[22-23]

$$v_{ijk} = v_{ijk}^{*} / \sum_{k=1}^5 v_{ijk}^{*} \quad (7)$$

式中 v_{ijk} ——样本 i 的指标 j 与第 k 个等级的指标值联系数分量

由指标值联系数分量 v_{ijk} 可得评价指标值五元联系数 $u_{ij}^{[21-23]}$ 为

$$u_{ij} = v_{ij1} + v_{ij2}I_1 + v_{ij3}I_2 + v_{ij4}I_3 + v_{ij5}J \quad (8)$$

式中 $I_1、I_2、I_3$ ——差异度系数
 J ——对立度系数

由式(8)可得农业旱灾脆弱性评价样本 i 的指标值联系数 $u_i^{[22]}$ 为

$$u_i = v_{i1} + v_{i2}I_1 + v_{i3}I_2 + v_{i4}I_3 + v_{i5}J = \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij1} + \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij2}I_1 + \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij3}I_2 + \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij4}I_3 + \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij5}J \quad (9)$$

式中 v_{ik} ——评价样本 i 与第 k 个等级的指标值联系数分量, $k = 1, 2, 3, 4, 5$

w_j ——指标 j 的权重

步骤 3: 确定区域农业旱灾脆弱性评价等级。采用级别特征值法^[24]计算指标值联系数对应样本的区域农业旱灾脆弱性评价等级值,计算评价指标值联系数对应样本 i 的农业旱灾脆弱性评价等级值 $h(i)$ 及样本 i 第 j 个指标的农业旱灾脆弱性评价等级值 $h(i, j)^{[19,23]}$, 计算式为

$$h(i) = \sum_{k=1}^5 v_{ik}k \quad (10)$$

$$h(i, j) = \sum_{k=1}^5 v_{ijk}k \quad (11)$$

步骤 4: 构建、计算区域农业旱灾脆弱性评价样本联系数的五元半偏减法集对势,判别区域农业旱灾脆弱性的发展趋势,识别影响区域农业旱灾脆弱性的关键指标^[22]。

文献[19]在集对分析理论研究的基础上,对集

对势、偏联系数^[25-26]这两种主要的联系数伴随函数方法比较分析,构造了三元联系数 $u = a + bI + cJ$ (其中, I 为差异度系数)的一种新的伴随函数——三元半偏减法集对势^[19], 计算式为

$$s_1(u) = a + \frac{ba}{a+b} - \left(c + \frac{bc}{b+c} \right) \quad (12)$$

式中 a ——同一度 b ——差异度
 c ——对立度

本研究在三元半偏减法集对势的基础上,考虑五元联系数 $u = a + b_1I_1 + b_2I_2 + b_3I_3 + cJ$ 的结构形式及其同一度 a 、对立度 c 以及偏同差异度 b_1 、不确定性差异度 b_2 、偏反差异度 b_3 对集对系统联系数发展趋势的影响,综合考虑五元联系数各个分量的具体内涵及相互作用,通过五元、三元联系数结构类比的方式,提出五元联系数的半偏减法集对势公式为

$$s_2(u) = a - c + \frac{a(b_1 + b_2 + b_3)}{a + b_1 + b_2 + b_3} + \frac{\lambda_1 b_1 (b_1 + b_2 + b_3)}{a + b_1 + b_2 + b_3} + \frac{\lambda_2 b_3 (b_1 + b_2 + b_3)}{c + b_1 + b_2 + b_3} - \frac{c(b_1 + b_2 + b_3)}{c + b_1 + b_2 + b_3} \quad (13)$$

式中 $\lambda_1、\lambda_2$ ——系数

为了处理复杂系统多等级问题,将三元联系数半偏减法集对势推广到五元联系数^[21]: 将三元联系数 $u = a + bI + cJ$ 中的差异度 b 进一步细化为偏同差异度 b_1 、不确定性差异度 b_2 、偏反差异度 b_3 ; 五元联系数 $u = a + b_1I_1 + b_2I_2 + b_3I_3 + cJ$ 中各分量对集对系统的发展趋势具有不同的影响程度,同一度 a 与对立度 c 是完全对立的确定性关系,对集对系统发展趋势影响最大;差异度 $b_1、b_2、b_3$ 中 b_1 与 b_3 之间的对立强度稍弱于 a 与 c , 并且 $b_1、b_3$ 对系统发展趋势的影响程度也较 $a、c$ 弱,而 b_2 对系统发展趋势影响具有较大的不确定性,对集对系统发展趋势的影响较 $b_1、b_3$ 相对中立。

依据文献[25-26]中偏联系数的观点,同一度 a 可认为是从 $a、b_1、b_2、b_3$ 正向发展而来,故要将 $b_1、b_2、b_3$ 中的同一部分发展到 a 上,可将差异度 $b_1 + b_2 + b_3$ 作为一个整体,并将其按照 $a / (a + b_1 + b_2 + b_3)$ 的比例分配到同一度方向上,同理,偏同差异度 b_1 可看作是同一性稍弱的 a ,也可认为是从 $a、b_1、b_2、b_3$ 正向发展而来,可将 $b_1 + b_2 + b_3$ 作为一个整体,按照 $\lambda_1 b_1 / (a + b_1 + b_2 + b_3)$ 的比例分配到同一度方向上;类似地,对立度 c 可认为是从 $b_1、b_2、b_3、c$ 负向发展而来,故应将 $b_1、b_2、b_3、c$ 中的对

立部分发展到 c 上,可将差异度 $b_1 + b_2 + b_3$ 作为一个整体,并将其按照 $c/(c + b_1 + b_2 + b_3)$ 的比例分配到对立度方向上,同理,偏反差异度 b_3 可看作是对立性稍弱的 c ,也可认为是从 $b_1、b_2、b_3、c$ 负向发展而来,故应将 $b_1、b_2、b_3$ 中的对立部分发展到 b_3 上,可将 $b_1 + b_2 + b_3$ 作为一个整体,按照 $\lambda_2 b_3/(c + b_1 + b_2 + b_3)$ 的比例分配到对立度方向上去。其中, $\lambda_1 \in [0, 1], \lambda_2 \in [-1, 0]$ 。考虑到差异度 $b_1、b_2、b_3$ 中 $b_1、b_3$ 对集对系统整体发展趋势的影响程度稍弱于 $a、c$,本研究参照文献[27]按照平均情况取 $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = -0.5$ 。另外,当 $b_1 + b_2 + b_3 = 0$ 时显然有 $s_2(u) = a - c$ 。因此,可推导出上述五元半偏减法集对势计算公式。综上所述,提出的五元半偏减法集对势可进一步表示为

$$s_2(u) = \begin{cases} \left[a + (a + 0.5b_1) \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a + b_1 + b_2 + b_3 + c} \right] - \\ \left[c + (c + 0.5b_3) \frac{b_1 + b_2 + b_3}{c + b_1 + b_2 + b_3 + c} \right] & (b_1 + b_2 + b_3 \neq 0) \\ a - c & (b_1 + b_2 + b_3 = 0) \end{cases} \quad (14)$$

其中, $a、b_1、b_2、b_3、c$ 分别对应式(1)~(5)中的 $u_{ij1}、u_{ij2}、u_{ij3}、u_{ij4}、u_{ij5}$ 。推导可知 $s_2(u) \in [-1, 1]$,依据“均分原则”^[21-23]可将 $s_2(u)$ 取值区间划分为5个集对势级:反势($s_2(u) \in [-1, -0.6)$)、偏反势($s_2(u) \in [-0.6, -0.2)$)、均势($s_2(u) \in [-0.2, 0.2]$)、偏同势($s_2(u) \in (0.2, 0.6]$)、同势($s_2(u) \in (0.6, 1]$)。当评价指标的半偏减法集对势处于反势或者偏反势时,认为该指标是导致区域农业旱灾脆弱性等级较差的主要因素,该指标所代表的方向是今后脆弱性发展过程中应重点关注的调控方面^[18,27]。式(14)是依据三元半偏减法集对势类推出的一种新的联系数伴随函数,为进一步验证其合理性,本文比较了五元半偏减法集对势与五元减法集对势 $s_3(u)$ ^[27]在数值上的接近程度,二者的平均绝对误差 d 为

$$d = \sum_{m=1}^M |s_2(u_m) - s_3(u_m)| / M \quad (15)$$
$$\begin{cases} s_3(u) = a + (a + 0.5b_1) \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a + b_1 + b_2 + b_3 + c} - \\ \left[c + (c + 0.5b_3) \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a + b_1 + b_2 + b_3 + c} \right] \\ a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中 u_m ——随机模拟五元联系数
 M ——随机模拟五元联系数 u_m 的个数

经大量随机模拟实验可得,当 M 分别取 $10^3、10^4、10^5$ 和 10^6 时, d 分别为 0.015 9、0.015 9、0.016 0、0.016 1。这说明式(14)的五元半偏减法集对势在数值上非常接近式(16)的五元减法集对势,二者皆可用于判断宏观确定性层次上集对系统的总体发展趋势^[19,22,27]。根据文献[18-19,27]可知,针对联系数的关系结构特征^[28],构造五元减法集对势的基本思想就是合理地把兼有确定性及不确定性变化趋势信息的五元联系数转换为确定性的总体发展趋势,即将差异度 $b_1 + b_2 + b_3$ 按照 $a/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)、c/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 的比例分别分配到同一度 a 和对立度 c 中;将差异度 $b_1 + b_2 + b_3$ 按照 $b_1/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)、b_3/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 的比例分别分配到偏同差异度 b_1 和偏反差异度 b_3 中。从偏联系数的思想看,要把 $b_1、b_2、b_3$ 中的同一部分发展到 a 上,可知原来的 a 是从 $a、b_1、b_2、b_3$ 正向发展而来的,不包括对立度 c ,所以 $b_1 + b_2 + b_3$ 这一部分发展到 a 上的比例取 $a/(a + b_1 + b_2 + b_3)$ 比取 $a/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 更为合理;同理,要把 $b_1、b_2、b_3$ 中的对立部分发展到 c 上,可知原来的 c 是从 $b_1、b_2、b_3、c$ 负向发展而来的,不包括同一度 a ,所以 $b_1 + b_2 + b_3$ 这一部分发展到 c 上的比例取 $c/(b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 比取 $c/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 更为合理。同样,从偏联系数的思想看,要把 $b_1、b_2、b_3$ 中的弱同一部分发展到 b_1 上,可知原来的 b_1 是从 $a、b_1、b_2、b_3$ 正向发展而来的,不包括对立度 c ,所以 $b_1 + b_2 + b_3$ 这一部分发展到 b_1 上的比例取 $\lambda_1 b_1/(a + b_1 + b_2 + b_3)$ 比取 $\lambda_1 b_1/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 更为合理;同理,要把 $b_1、b_2、b_3、c$ 的弱对立部分发展到 b_3 上,可知原来的 b_3 是从 $b_1、b_2、b_3、c$ 负向发展而来的,不包括同一度 a ,所以 $b_1 + b_2 + b_3$ 这一部分发展到 b_3 上的比例取 $\lambda_2 b_3/(b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 比取 $\lambda_2 b_3/(a + b_1 + b_2 + b_3 + c)$ 更为合理。这里提出的五元半偏减法集对势整体上利用减法集对势的思路把差异度不确定性项转换为确定性的同一度项和对立度项,同时结合偏联系数的思路实现这种转换,其解释性更强、识别结果更可靠,能够灵敏反映评价样本指标值联系数的变化、定量判别宏观层面上集对系统的相对确定性程度及其趋势变化,在处理复杂系统多等级评价问题中具有更为广泛的应用前景。

2 实例分析

根据文献[18]中蚌埠市农业旱灾脆弱性评价指标体系、评价指标权重和相应标准等级,整理2001—2010年的《安徽省统计年鉴》资料获得安徽省蚌埠市2001—2010年的评价样本数据,采用

式(1)~(5)计算 23 个指标的五元联系数分量,可得蚌埠市 2001—2010 年农业旱灾脆弱性评价样本各子系统的联系数分量,再由式(6)~(11)计算得到这些联系数所对应的脆弱性评价等级,并由式(14)计算脆弱性评价样本各子系统的五元半偏减法集对势,见表 1。

表 1 蚌埠市农业旱灾脆弱性各子系统联系数分量、评价等级及五元半偏减法集对势

Tab.1 Connection number components, evaluation grades and five-element semipartial subtraction set pair potential for each subsystem of agricultural drought vulnerability in Bengbu City

子系统	年份	联系数					评价等级	五元半偏减法集对势	
		a	b_1	b_2	b_3	c		集对势值	态势
暴露子系统	2001	0.143	0.201	0.221	0.225	0.210	3.16	-0.111	均势
	2002	0.134	0.194	0.240	0.238	0.194	3.16	-0.111	均势
	2003	0.161	0.218	0.245	0.215	0.161	3.00	0.002	均势
	2004	0.115	0.187	0.232	0.247	0.219	3.27	-0.184	均势
	2005	0.123	0.199	0.256	0.242	0.180	3.16	-0.107	均势
	2006	0.114	0.188	0.251	0.251	0.196	3.23	-0.154	均势
	2007	0.118	0.195	0.258	0.248	0.181	3.18	-0.120	均势
	2008	0.110	0.197	0.258	0.249	0.186	3.20	-0.142	均势
	2009	0.108	0.192	0.253	0.251	0.196	3.23	-0.161	均势
	2010	0.103	0.179	0.246	0.258	0.214	3.30	-0.204	偏反势
灾损敏感性子系统	2001	0.066	0.180	0.279	0.282	0.193	3.36	-0.249	偏反势
	2002	0.075	0.195	0.311	0.270	0.149	3.22	-0.156	均势
	2003	0.095	0.198	0.256	0.251	0.200	3.26	-0.188	均势
	2004	0.181	0.313	0.307	0.165	0.034	2.56	0.311	偏同势
	2005	0.258	0.355	0.279	0.103	0.005	2.24	0.519	偏同势
	2006	0.198	0.333	0.309	0.148	0.012	2.44	0.393	偏同势
	2007	0.287	0.362	0.263	0.083	0.005	2.16	0.568	偏同势
	2008	0.174	0.310	0.310	0.172	0.034	2.58	0.294	偏同势
	2009	0.171	0.301	0.307	0.182	0.039	2.62	0.271	偏同势
	2010	0.205	0.315	0.292	0.157	0.031	2.49	0.354	偏同势
防灾减灾能力子系统	2001	0.062	0.151	0.244	0.287	0.256	3.52	-0.359	偏反势
	2002	0.056	0.146	0.249	0.293	0.256	3.55	-0.374	偏反势
	2003	0.053	0.143	0.245	0.296	0.263	3.57	-0.390	偏反势
	2004	0.075	0.172	0.254	0.275	0.224	3.40	-0.279	偏反势
	2005	0.064	0.152	0.250	0.289	0.245	3.50	-0.341	偏反势
	2006	0.076	0.172	0.255	0.275	0.222	3.40	-0.273	偏反势
	2007	0.080	0.176	0.255	0.271	0.218	3.37	-0.257	偏反势
	2008	0.088	0.187	0.256	0.263	0.206	3.31	-0.218	偏反势
	2009	0.088	0.186	0.255	0.263	0.208	3.32	-0.222	偏反势
	2010	0.108	0.205	0.254	0.245	0.188	3.20	-0.141	均势

由表 1 可知,在蚌埠市农业旱灾脆弱性评价系统中,暴露子系统等级波动较小,2001—2009 年处于均势状态,2010 年处于偏反势,评价等级在 3.00~3.30 之间,2007 年之后暴露程度呈缓慢增大的趋势。灾损敏感性子系统整体趋势向半偏减法集对势值增加的方向发展,其发展与蚌埠市农业旱灾脆弱性整体改善的情况一致。整体趋势波动较大,2001 年处于偏反势,2002—2003 年处于均势,而 2004 年之后逐渐变为偏同势,评价等级在 2.16~3.36 之间,其评价等级呈下降趋势,评估结果呈现逐年向好趋势。防灾减灾能力子系统趋势沿降低脆弱性方向发展,整体上升趋势较为平缓,在 2001—2009 年处于偏反势,2010 年处于均势状态,评价等级在 3.20~3.57 之间,说明与农业旱灾相关的防灾减灾措施发展仍有较大的发展空间,积极推进相关措施的实施对降低农业旱灾脆弱性可以起到较大的促进作用。由上述暴露、灾损敏感性和防灾减灾能力子系统评价结果进行加权和综合得到的蚌埠市 2001—2010 年农业旱灾脆弱性评价等级,与文献[18]给出的灰色关联度和联系数耦合的脆弱性评价模型、模糊综合评价方法的评价等级计算值一致,见图 2。

由图 2 可知,2001—2010 年蚌埠市农业旱灾脆弱性整体呈降低趋势,农业系统对干旱威胁的抵御

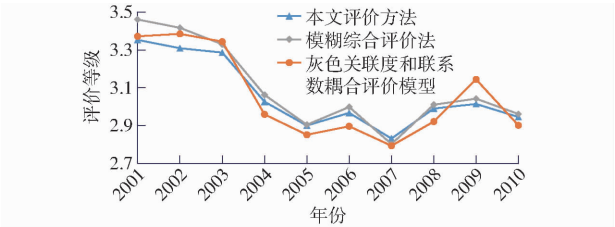


图2 不同方法的蚌埠市农业旱灾脆弱性评价结果对比

Fig.2 Comparison of different evaluation methods for agricultural drought vulnerability assessment results in Bengbu City

能力逐渐增强。本文评价方法较模糊综合评价法所计算得到的评价等级整体上略微偏小。模糊综合评价法利用最大隶属度原则对旱灾脆弱性等级进行判断,而对于综合隶属度相差不大、旱灾脆弱性等级不明确的年份,利用最大隶属度原则可能存在评价等级偏大问题,故本文评价方法更为合理。由于本研究提出放缓现有指标值联系系数的分段函数中相邻两个等级的斜率,缩短了联系数对立度区间,使得本文评价方法计算所得的旱灾脆弱性评价结果较灰色关联度和联系数耦合评价模型更加平稳。具体来说本文评价方法与灰色关联度和联系数耦合评价模型所得2001—2003年脆弱性等级均大于3级,但程度逐渐减弱,蚌埠市农业系统抵御旱灾的能力逐渐增强。五元半偏减法集对势计算所得脆弱性等级变化整体低于灰色关联度和联系数耦合评价模型(图2)。两种方法所得2004—2010年脆弱性等级均小于或等于3级,但五元半偏减法集对势计算所得的等级变化整体高于灰色关联度和联系数耦合评价模型(图2)。灰色关联度和联系数耦合评价模型计算的2009年蚌埠市农业旱灾脆弱性评价等级为3.144,与其整体评价等级变化趋势不一致。因此,本文方

法所得区域农业旱灾脆弱性评价结果更加稳定合理、可靠度更高。

为进一步分析蚌埠市农业抵御干旱威胁的能力变强的主要原因,由式(14)计算23个评价指标2001—2010年的五元半偏减法集对势值,据此识别诊断对蚌埠市农业旱灾脆弱性变化程度有较大影响的主要指标。选取2001—2010年五元半偏减法集对势变化较大的评价指标进行分析,结果如图3所示。

由图3可知,农业旱灾脆弱性诊断的4个主要指标的五元半偏减法集对势的计算值与五元减法集对势的计算结果非常接近。从图3a可看出,复种指数在2001年处于均势,2002—2010年一直处于偏反势,并有向反势发展的趋势。从时间上看,复种指数总体向着半偏减法集对势值减小的方向,即脆弱性增大的方向发展,抵御干旱威胁的能力逐渐减弱。结果表明,复种指数越高,同样面积耕地上的年内农作物种植量越大,需水量越大,使得承灾体暴露程度显著增加,农业旱灾脆弱性越高。因此,为降低区域农业旱灾脆弱性,应合理规划农作物种植期及种植范围,提升农业科学技术水平,提高当地农作物产出效率。由图3b可知,单位农业增加值耗水量在2001—2003年一直处于反势,此时段内的发展态势较为稳定,从2004年开始至2007年,态势由偏同势发展到同势,在2008—2010年处于偏同势。结果表明,单位农业增加值耗水量减少,是使得蚌埠市农业旱灾脆弱性呈改善趋势、抵御干旱能力增强的主要因素。因此,应大力改进推广节水灌溉新技术,增加农田灌溉水有效利用率,取代传统粗放式的灌溉方式。从图3c可看出,农民人均GDP呈逐年改善的趋势,在2001—2003年处于反势,2004年之后逐渐

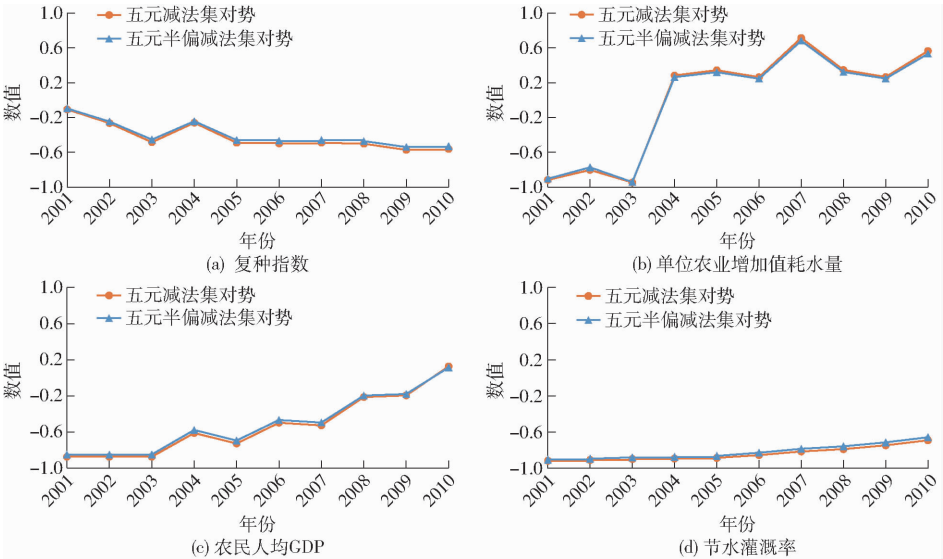


图3 2001—2010年蚌埠市农业旱灾脆弱性主要评价指标动态诊断分析结果

Fig.3 Agricultural drought vulnerability dynamic diagnosis and analysis results of main indicators from 2001 to 2010 in Bengbu City

由偏反势转变为均势,农民人均 GDP 增加,其变化趋势与农业旱灾脆弱性状况有所改善的发展一致,说明蚌埠市农民收入有了缓慢的提升,农业产值增加。因此,增加农民人均 GDP 可向推进农业的规模化、提高农业现代化水平方向发展,从而降低区域农业旱灾脆弱性程度、增强农业系统抵御旱灾的能力。由图 3d 可知,节水灌溉率在 2001—2010 年一直处于反势,总体向着降低旱灾脆弱性的方向缓慢发展。结果表明,节水灌溉率越高,农业系统对于旱威胁的恢复能力越强,农业旱灾脆弱性越低。因此,应采取更为有效的方式提高节水灌溉率,改善节水措施,加大节水宣传教育力度,提升节水意识,大力推进农业节水改造,加强节水监督管理。

3 结论

(1)五元半偏减法集对势作为在三元半偏减法集对势基础上改进、拓展的一种应用范围更广的集对势方法,细化了评价指标所处的趋势强度,可更精确地反映出指标的变化趋势,蚌埠市农业旱灾脆弱性评价实证结果与实际情况较为接近。五元半偏减法集对势对于任何五元联系数均普遍适用,它充分考虑了多元联系数中差异度子项对集对系统发展趋势的影响,有效补充了半偏减法集对势在多元联系

数中的应用,为处理复杂系统多等级定量评价与诊断问题提供了新的有效途径。

(2)进一步改进了用以计算评价指标样本值与评价标准等级之间联系数的分段函数,并将其应用于蚌埠市农业旱灾脆弱性的动态评价与诊断之中。应用结果表明,改进后的分段函数有效改善了五元联系数在计算时出现多个零值的问题,使得五元联系数的运算更加合理。

(3)蚌埠市农业旱灾脆弱性状况总体上呈缓慢改善的趋势。暴露子系统在 2001—2009 年处于均势,最终处于偏反势。灾损敏感性子系统发展趋势波动较大,在 2001 年处于偏反势,2002 年之后由均势逐渐变为偏同势,其评估结果呈现逐年向好趋势。防灾减灾能力子系统在 2001—2009 年处于偏反势,2009 年之后逐渐变为均势最终处于均势,评价等级皆大于 3 级。节水灌溉率、复种指数、农民人均 GDP、单位农业增加值耗水量 4 个指标是影响蚌埠市农业旱灾脆弱性的最主要因素。这 4 个指标中,单位农业增加值耗电量的减少对蚌埠市农业旱灾脆弱性发展趋势的改善具有积极影响,而复种指数则存在着向反势态势发展的趋势,需采取合理有效的调控措施,可适当减少农作物的耕作(种植)面积,提高农作物产出效率。

参 考 文 献

[1] 王鹏新,冯明悦,孙辉涛,等. 基于主成分分析和 Copula 函数的干旱影响评估研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 334-340.
WANG Pengxin, FENG Mingyue, SUN Huitao, et al. Drought impact assessment based on principal component analysis and Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 334-340. (in Chinese)

[2] 张继权,严登华,王春乙,等. 辽西北地区农业干旱灾害风险评价与风险区划研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(3): 300-306.
ZHANG Jiquan, YAN Denghua, WANG Chunyi, et al. A study on risk assessment and risk regionalization of agricultural drought disaster in northwestern regions of Liaoning Province[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(3): 300-306. (in Chinese)

[3] 史晓亮,吴梦月,丁皓. SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 184-192.
SHI Xiaoliang, WU Mengyue, DING Hao. Difference analysis of SPEI and vegetation remote sensing information in drought monitoring in Southwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 184-192. (in Chinese)

[4] 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.
JIN Juliang, SONG Zhanzhi, CUI Yi, et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 398-412. (in Chinese)

[5] 别得进,朱秀芳,赵安周,等. 农业旱灾脆弱性研究综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(增刊 1): 62-69.
BIE Dejin, ZHU Xiufang, ZHAO Anzhou, et al. Assessment of agricultural drought vulnerability: a review[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2015, 51(Supp. 1): 62-69. (in Chinese)

[6] CHENG Jing, TAO Jianping. Fuzzy comprehensive evaluation of drought vulnerability based on the analytic hierarchy process: an empirical study from Xiaogan City in Hubei Province[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2010, 1: 126-135.

[7] MURTHY C S, YADAV M, AHAMED J M, et al. A study on agricultural drought vulnerability at disaggregated level in a highly irrigated and intensely cropped state of India[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(3): 1-14.

[8] 金菊良,张浩宇,陈梦璐,等. 动态联系数与全偏确定度相耦合的区域农业旱灾脆弱性评价方法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 724-730.
JIN Juliang, ZHANG Haoyu, CHEN Menglu, et al. Evaluation of regional agricultural drought vulnerability coupled with dynamic connection number and full partial certainty[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(6): 724-730. (in Chinese)

[9] 田苗,王鹏新,韩萍,等. 基于 SARIMA 模型和条件植被温度指数的干旱预测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 109-116.

TIAN Miao, WANG Pengxin, HAN Ping, et al. Drought forecasts based on SARIMA models and vegetation temperature condition index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 109 – 116. (in Chinese)

[10] 韩兰英. 气候变暖背景下中国农业干旱灾害致灾因子、风险性特征及其影响机制研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
HAN Lanying. The agricultural drought disaster hazard factor, risk characteristic and mechanisms in China under climate warming[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)

[11] 刘冀, 张特, 魏榕, 等. 基于随机森林偏差校正的农业干旱遥感监测模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 170 – 177.
LIU Ji, ZHANG Te, WEI Rong, et al. Development of agricultural drought monitoring model using remote sensing based on bias-correcting random forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 170 – 177. (in Chinese)

[12] 许朗, 张维诚. 区域农业旱灾脆弱性评价及其影响因素[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 14 – 19, 43.
XU Lang, ZHANG Weicheng. Assessment of regional agricultural drought vulnerability and main influencing factors[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 14 – 19, 43. (in Chinese)

[13] 曹永强, 伊吉美, 游海林, 等. 投影寻踪技术在农业旱灾脆弱性评价中的应用[J]. 人民黄河, 2010, 32(2): 12 – 13.
CAO Yongqiang, YI Jimei, YOU Hailin, et al. Application of the projection pursuit technique in assessment of agricultural drought vulnerability[J]. Yellow River, 2010, 32(2): 12 – 13. (in Chinese)

[14] 李艳. 河南省干旱承险脆弱性综合评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
LI Yan. Research on comprehensive assessment of drought bearing risk vulnerability in Henan Province[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. (in Chinese)

[15] REIS G A, FILHO F A S, NELSON D R, et al. Development of a drought vulnerability index using MCDM and GIS: study case in São Paulo and Ceará, Brazil[J]. Natural Hazards, 2020, 104(2): 1781 – 1799.

[16] AHMADALIPOUR A, MORADKHANI H. Multi-dimensional assessment of drought vulnerability in Africa: 1960—2100[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 520 – 535.

[17] JIANG Guiqin, YU Fuliang, ZHAO Yong. An analysis of vulnerability to agricultural drought in China using the expand grey relation analysis method[J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 670 – 676.

[18] 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. (in Chinese)

[19] 何飘. 基于联系数的区域水资源承载力动态分析评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
HE Piao. Dynamic analysis and evaluation of regional water resources carrying capacity based on connection number[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)

[20] 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林, 等. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分析 with 定量评价[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 78 – 83.
LIU Lanfang, LIU Shenghe, LIU Peilin, et al. Synthetic analysis and quantitative estimation of the agricultural vulnerability to drought disaster in Hunan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 78 – 83. (in Chinese)

[21] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000.

[22] 金菊良, 沈时兴, 郦建强, 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.
JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science), 2018, 39(1): 1 – 9. (in Chinese)

[23] 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.
JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401 – 409. (in Chinese)

[24] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.

[25] 金菊良, 张浩宇, 宁少尉, 等. 效应全偏联系数及其在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 1 – 8.
JIN Juliang, ZHANG Haoyu, NING Shaowei, et al. Effect full partial connection number and its application in evaluation of regional water resources carrying capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science), 2019, 40(1): 1 – 8. (in Chinese)

[26] 杨红梅, 赵克勤. 偏联系数的计算与应用研究[J]. 智能系统学报, 2019, 14(5): 865 – 876.
YANG Hongmei, ZHAO Keqin. The calculation and application of partial connection numbers[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(5): 865 – 876. (in Chinese)

[27] 金菊良, 陈鹏飞, 张浩宇, 等. 五元减法集对势及其在水资源承载力趋势分析中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 30 – 35, 42.
JIN Juliang, CHEN Pengfei, ZHANG Haoyu, et al. Five-variable subtraction set pair potential and its application in trend analysis of water resources carrying capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 30 – 35, 42. (in Chinese)

[28] 金菊良, 周戎星, 崔毅, 等. 结构水资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 7 – 19.
JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al. Introduction to structural water resources science[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 7 – 19. (in Chinese)