

金菊良, 陈浩, 崔毅, 等. 基于修正四元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评估[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 34–42.  
[JIN Juliang, CHEN Hao, CUI Yi, et al. Regional Agricultural Drought Vulnerability Evaluation Based on the Modified Quaternary Semi – Partial Subtraction [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38 ( 3 ): 34 – 42. doi: 10.3969/j. issn. 1000 – 811X. 2023. 03. 006. ]

## 基于修正四元半偏减法集对势的区域 农业旱灾脆弱性评估\*

金菊良<sup>1,2</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 崔毅<sup>1,2</sup>, 刘凌<sup>1</sup>, 周玉良<sup>1,2</sup>, 吴成国<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)

**摘要:**为增强旱灾脆弱性评估结果的可靠性和合理性,从微观层次挖掘联系系数系统结构中各分量之间的迁移运动信息,根据半偏联系数思想构建了四元联系系数的迁移率矩阵,以此实现了联系系数系统内相邻、相隔分量的转化,将修正后的联系系数分量代入四元半偏减法集对势中,得到修正后的四元半偏减法集对势,并将其应用于蚌埠市农业旱灾脆弱性评估中。结果表明:修正前后的四元半偏减法集对势值对蚌埠市农业旱灾脆弱性及其子系统的评估结果是一致的;修正后的四元半偏减法集对势值变化范围更小、敏感度更高,结果更为稳健,对脆弱性评估集对系统变化趋势的反映更加准确可靠,具有推广应用前景。

**关键词:**农业旱灾;脆弱性评估;四元半偏减法集对势;联系系数分量;迁移率矩阵

**中图分类号:**X43;X915.5;S423 **文献标志码:**A **文章编号:**1000–811X(2023)03–0034–09

doi: 10.3969/j. issn. 1000 – 811X. 2023. 03. 006

旱灾在我国影响广泛、发生频繁且持续时间长,造成了很大经济损失。据统计,从公元前206年到1949年的2155年期间,我国共经历了1056次较大旱灾,约每2年发生一次大旱,在1949年后的70多年间,每年平均受旱面积达到2217万 $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。我国的农业发展在旱灾的影响下受到很大制约,1950—2020年间,年均粮食产量因旱损失达到81.8亿kg,2006—2020年期间,年均农业因旱直接经济损失达到851.6亿元<sup>[2]</sup>。根据自然灾害风险系统理论,区域农业旱灾风险系统是由干旱危险性、承灾体脆弱性、孕灾环境孕险性、防灾减灾能力综合作用形成的,承灾体脆弱性在农业旱灾风险形成过程中起着将干旱危险性传递转换为农业旱灾损失风险的关键作用<sup>[3]</sup>。旱灾风险防控的关键是能够准确地对承灾体的脆弱性进行定量评估<sup>[4–6]</sup>。可见,准确判断农业旱灾脆弱性及其子系统的发展趋势、识别农业旱灾脆弱性的关键影响因子对制定科学的旱灾防御策略、调整种植结构和保障农业可持续发展具有重要意义<sup>[7]</sup>。

目前许多学者对农业旱灾脆弱性展开了研究。陈佳等<sup>[8]</sup>采用熵权法、加权综合评分法计算出中国各省农业旱灾脆弱性程度,再用K均值聚类法依据中国1978—2018年的农业旱灾脆弱性程度大小进行脆弱性区划。曹永强等<sup>[9]</sup>利用投影寻踪技

术计算出最优投影方向,根据最优投影方向算出七个县域的投影值,根据投影值评价各县农业旱灾脆弱性的强弱。屈艳萍等<sup>[10]</sup>采用基于区域灾害系统论的模糊综合评估方法对全国层面的农业旱灾风险进行了定量计算和定性评估。上述方法都是从定性或定量两方面静态评估区域农业旱灾脆弱性强弱的,尚较少有动态定量评估农业旱灾脆弱性在时间和空间中的强弱变化方面的研究。为此,金菊良等<sup>[11]</sup>提出采用五元半偏减法集对势对蚌埠市2001—2010年农业旱灾脆弱性进行了动态评估,对比五元半偏减法集对势,本文根据文献<sup>[12]</sup>采用四元半偏减法集对势进行区域农业旱灾脆弱性评估。为进一步验证、提高四元半偏减法集对势评估农业旱灾脆弱性的稳健性,根据矛盾的普遍性、运动的绝对性原理可知,联系系数系统结构内各分量是在不断迁移转化的,为充分挖掘相邻、不相邻联系系数分量之间的迁移转化信息,增强联系系数分量计算的可靠性,本文根据半偏联系数思想构造四元联系系数的迁移率矩阵,以此来修正各联系系数分量,将修正后的联系系数分量代入四元半偏减法集对势中,得到修正后的四元半偏减法集对势并将其应用于蚌埠市农业旱灾脆弱性评估中。

\* 收稿日期: 2022–12–15 修回日期: 2023–03–22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109009, U2240223); 安徽省自然科学基金项目(2208085US03, 2108085QE254)

第一作者简介: 金菊良(1966–), 男, 汉族, 江苏吴江人, 教授, 主要从事结构水资资源学、水资资源系统风险防御研究。

E-mail: JINJL66@126.com

通信作者: 崔毅(1990–), 男, 汉族, 安徽铜陵人, 讲师, 主要从事水资资源系统工程研究。E-mail: ycui@hfut.edu.cn

## 1 基于修正四元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱评估方法构建

基于修正四元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱评估方法的构建包括以下四个步骤。

步骤 1: 在综合分析区域农业旱灾脆弱性的基础上, 运用遗传层次分析法筛选出所需评价指标, 根据农业旱灾脆弱性相关成果<sup>[13-14]</sup>, 构建区域农业旱灾脆弱性评价指标体系  $\{x_j | j=1, 2, \dots, n_j\}$ 、评价等级标准  $\{s_{kj} | k=1, 2, \dots, n_k; j=1, 2, \dots, n_j\}$ 、评价指标样本集  $\{x_{ij} | i=1, 2, \dots, n_i; j=1,$

$2, \dots, n_j\}$ 。其中:  $x_j$  为区域农业旱灾脆弱性评价指标体系中的第  $j$  个评价指标值,  $s_{kj}$  为指标  $j$  的第  $k$  个评价等级标准,  $x_{ij}$  为第  $i$  个样本第  $j$  个评价指标值;  $n_i$ 、 $n_j$ 、 $n_k$  分别为区域农业旱灾脆弱性评价样本、评价指标、评价等级的数量。为使评价等级适用于四元联系数的计算, 本文将区域农业旱灾脆弱性划分为 1 级、2 级、3 级、4 级, 分别对应区域农业旱灾脆弱性处于“弱”“较弱”“较强”“强”状态, 脆弱性等级越高, 区域抵御旱灾的能力越弱。

步骤 2: 计算区域农业旱灾脆弱性评价样本指标值联系数  $u_{ijk}$ <sup>[15]</sup>:

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

$$u_{ij2} = \begin{cases} 1-2(s_{1j}-x_{ij})/(s_{1j}-s_{0j}), & \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \text{ 或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j}; \\ 1, & \text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j}, \text{ 或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j}; \\ 1-2(x_{ij}-s_{2j})/(s_{3j}-s_{2j}), & \text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j}, \text{ 或反向指标 } s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j}; \\ -1, & \text{正向指标 } x_{ij} > s_{3j}, \text{ 或反向指标 } x_{ij} < s_{3j}. \end{cases} \quad (2)$$

$$u_{ij3} = \begin{cases} -1, & \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \text{ 或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j}; \\ 1-2(s_{2j}-x_{ij})/(s_{2j}-s_{1j}), & \text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j}, \text{ 或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j}; \\ 1, & \text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j}, \text{ 或反向指标 } s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j}; \\ 1-2(x_{ij}-s_{3j})/(s_{4j}-s_{3j}), & \text{正向指标 } s_{3j} < x_{ij} \leq s_{4j}, \text{ 或反向指标 } s_{3j} > x_{ij} \geq s_{4j}. \end{cases} \quad (3)$$

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

式中:  $s_{1j}$ 、 $s_{2j}$ 、 $s_{3j}$  分别为 1 级与 2 级、2 级与 3 级、3 级与 4 级之间的指标临界阈值,  $s_{0j}$ 、 $s_{4j}$  分别为 1、4 级另一临界阈值。计算联系数  $u_{ijk}$  的相对隶属度<sup>[16]</sup>:

$$v_{ijk}^* = 0.5 + 0.5u_{ijk} \quad (i=1, 2, \dots, n_i; j=1, 2, \dots, n_j; k=1, 2, \dots, 4). \quad (5)$$

归一化处理式(5)得相应的农业旱灾脆弱性评价指标联系数分量  $v_{ijk}$ <sup>[17]</sup>:

$$v_{ijk} = v_{ijk}^* / \sum_{k=1}^4 v_{ijk}^* \quad (6)$$

联系数分量  $v_{ijk}$  代入式(7)可得评价指标值四元联系数  $u_{ij}$ <sup>[18]</sup>:

$$u_{ij} = v_{ij1}I_1 + v_{ij2}I_2 + v_{ij3}J \quad (7)$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$  分别为偏同、偏反差异度系数, 一般  $I_1$  在  $[0, 1]$  上取值,  $I_2$  在  $[-1, 0]$  上取值,  $J = -1$ 。

步骤 3: 构建迁移率矩阵, 修正评价样本指标值联系数。样本单指标值联系数分量  $v_{ij1}$ 、 $v_{ij2}$ 、 $v_{ij3}$ 、 $v_{ij4}$  从宏观层面反映农业旱灾脆弱性状态的同、偏同异、偏反异、反关系程度的数值, 而从农业旱灾脆弱性评估这一实际问题来看,  $v_{ij1}$ 、 $v_{ij2}$ 、 $v_{ij3}$ 、 $v_{ij4}$  表示了系统中评价指标值与评价等级间的符合程度。现有研究大多将求得的联系数分量直接代入集对势中, 以此构建评价模型应用于实际问题中, 而根据矛盾的普遍性、运动的绝对性原理<sup>[16, 18-19]</sup>和集对分析理论可知, 联系数系统结构内各分量并不是相互独立的, 各联系数分量间存

在一定的迁移转化<sup>[18]</sup>。为定量刻画描述这种动态演化, 本文依据文献[19]并结合偏联系数的物理内涵, 基于半偏联系数思想构建了四元联系数的迁移率矩阵, 以此修正四元联系数分量。四元联系数  $u = a + b_1i_1 + b_2i_2 + cj$  的一阶偏正联系数为<sup>[19-20]</sup>:

$$\begin{aligned} \partial^+ \mu &= \partial^+ a + \partial^+ b_1i_1^+ + \partial^+ b_2i_2^+ \\ &= \frac{a}{a+b_1} + \frac{b_1}{b_1+b_2}i_1^+ + \frac{b_2}{b_2+c}i_2^+ \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\partial^+ a$  代表当前  $a$  原本处在  $b_1$  层次, 是从  $b_1$  层次朝正向迁移而来,  $\partial^+ b_1$  代表当前  $b_1$  原本处在  $b_2$  层次, 是从  $b_2$  层次朝正向迁移而来,  $\partial^+ b_2$  代表当前  $b_2$  原本处在  $c$  层次, 是从  $c$  层次朝正向迁移而来, 它们实际上都是半偏联系数<sup>[11, 20-22]</sup>。

由辩证思维中的对立统一规律可知, 任何事物均具有正反两个方面, 因此可根据四元联系数的一阶偏正联系数的计算思路来推导得到一阶偏负联系数<sup>[20]</sup>, 其表达式为:

$$\begin{aligned} \partial^- \mu &= \partial^- b_1i_1^- + \partial^- b_2i_2^- + \partial^- cj \\ &= \frac{b_1}{a+b_1}i_1^- + \frac{b_2}{b_1+b_2}i_2^- + \frac{c}{b_2+c}j^- \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\partial^- b_1$ 、 $\partial^- b_2$ 、 $\partial^- c$  的含义与  $\partial^+ a$ 、 $\partial^+ b_1$ 、 $\partial^+ b_2$  类似, 只是迁移方向不同, 它们都是半偏联系数<sup>[11, 20-22]</sup>。上述半偏联系数都是相邻联系数分量之间的迁移转化, 进一步考虑不相邻联系数分量之间的迁移转化<sup>[19]</sup>, 构造四元联系数的迁移率矩阵  $X$  为:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \partial^- b_1 & \partial^- b_1 \partial^- b_2 & \partial^- b_1 \partial^- b_2 \partial^- c \\ \partial^+ a & 1 & \partial^- b_2 & \partial^- b_2 \partial^- c \\ \partial^+ b_1 \partial^+ a & \partial^+ b_1 & 1 & \partial^- c \\ \partial^+ b_2 \partial^+ b_1 \partial^+ a & \partial^+ b_2 \partial^+ b_1 & \partial^+ b_2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{b_1}{a+b_1} & \frac{b_1}{a+b_1} \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} & \frac{b_1}{a+b_1} \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} \cdot \frac{c}{b_2+c} \\ \frac{a}{a+b_1} & 1 & \frac{b_2}{b_1+b_2} & \frac{b_2}{b_1+b_2} \cdot \frac{c}{b_2+c} \\ \frac{b_1}{b_1+b_2} \cdot \frac{a}{a+b_1} & \frac{b_1}{b_1+b_2} & 1 & \frac{c}{b_2+c} \\ \frac{b_2}{b_2+c} \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2} \cdot \frac{a}{a+b_1} & \frac{b_2}{b_2+c} \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2} & \frac{b_2}{b_2+c} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于联系数分量  $a$  来说, 存在着由分量  $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c$  向  $a$  的微观动态运动, 分量  $a$  向自身迁移的可能性为 1, 分量  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c$  都可能存在向分量  $a$  的迁移运动。 $\partial^+ a$  反映了分量  $b_1$  向  $a$  的迁移率,  $b_1 \cdot \partial^+ a$  即为分量  $b_1$  向  $a$  迁移的数值;  $\partial^+ b_1 \cdot \partial^+ a$  反映了分量  $b_2$  经  $b_1$  向  $a$  的迁移率, 分量  $b_1$  充当了分量  $b_2$  和分量  $a$  之间的桥梁,  $b_2 \cdot \partial^+ b_1 \cdot \partial^+ a$  为分量  $b_2$  向  $a$  迁移转化的数值; 同理,  $\partial^+ b_2 \cdot$

$\partial^+ b_1 \cdot \partial^+ a$  反映了分量  $c$  经  $b_2$ 、 $b_1$  向  $a$  的迁移率, 分量  $b_2$ 、 $b_1$  充当分量  $c$  和分量  $a$  之间的桥梁,  $c \cdot \partial^+ b_2 \cdot \partial^+ b_1 \cdot \partial^+ a$  为分量  $c$  向分量  $a$  迁移转化的数值。其余联系数分量迁移转化过程与此相似。对照文献[19], 原样本单指标值四元联系数分量矩阵  $U = [a, b_1, b_2, c]$ , 经迁移率矩阵转化修正后得到新的联系数分量矩阵  $R$  为:

$$R = U \cdot X = [a \ b_1 \ b_2 \ c] \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{b_1}{a+b_1} & \frac{b_1}{a+b_1} \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} & \frac{b_1}{a+b_1} \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} \cdot \frac{c}{b_2+c} \\ \frac{a}{a+b_1} & 1 & \frac{b_2}{b_1+b_2} & \frac{b_2}{b_1+b_2} \cdot \frac{c}{b_2+c} \\ \frac{b_1}{b_1+b_2} \cdot \frac{a}{a+b_1} & \frac{b_1}{b_1+b_2} & 1 & \frac{c}{b_2+c} \\ \frac{b_2}{b_2+c} \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2} \cdot \frac{a}{a+b_1} & \frac{b_2}{b_2+c} \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2} & \frac{b_2}{b_2+c} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将用式(7)计算的单指标联系数分量  $v_{ij1}$ 、 $v_{ij2}$ 、 $v_{ij3}$ 、 $v_{ij4}$  代入式(11)进行修正, 再经式(6)归一化, 得修正后的样本单指标值联系数分量  $v'_{ij1}$ 、 $v'_{ij2}$ 、 $v'_{ij3}$ 、 $v'_{ij4}$  及其联系数  $u'_{ij}$  为:

$$u'_{ij} = v'_{ij1} + v'_{ij2} I_1 + v'_{ij3} I_2 + v'_{ij4} J \quad (12)$$

由式(12)可得样本  $i$  的联系数  $u'_i$  [21]:

$$u'_i = v'_{i1} + v'_{i2} I_1 + v'_{i3} I_2 + v'_{i4} J = \sum_{j=1}^{n_j} w_j v'_{ij1} + \sum_{j=1}^{n_j} w_j v'_{ij2} I_1 + \sum_{j=1}^{n_j} w_j v'_{ij3} I_2 + \sum_{j=1}^{n_j} w_j v'_{ij4} J \quad (13)$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$  均为差异度系数, 其中  $I_1$  在  $[0, 1]$  上取值,  $I_2$  在  $[-1, 0]$  上取值,  $J = -1$ ;  $w_j$  代表评价指标  $j$  的权重。

步骤 4: 将转化修正后的指标值联系数分量代

$$s_1(u) = \begin{cases} 1, & \text{当 } a=1 \text{ 时;} \\ -1, & \text{当 } c=1 \text{ 时;} \\ \left[ a + (a+0.33b_1) \frac{(b_1+b_2)}{a+b_1+b_2} \right] - \left[ c + (c+0.33b_2) \frac{(b_1+b_2)}{c+b_1+b_2} \right], & \text{当 } a \neq 1, c \neq 1 \text{ 时。} \end{cases} \quad (14)$$

式中: 当  $a=1$  时,  $s_1(u)$  取最大值 1, 当  $c=1$  时,  $s_1(u)$  取最小值 -1;  $s_1(u) \in [-1, 1]$ 。

修正后的四元半偏减法集对势  $s_2(u)$  为:

$$s_2(u) = \begin{cases} 1, & \text{当 } a'=1 \text{ 时;} \\ -1, & \text{当 } c'=1 \text{ 时;} \\ \left[ a' + (a'+0.33b'_1) \frac{(b'_1+b'_2)}{a'+b'_1+b'_2} \right] - \left[ c' + (c'+0.33b'_2) \frac{(b'_1+b'_2)}{c'+b'_1+b'_2} \right], & \text{当 } a' \neq 1, c' \neq 1 \text{ 时。} \end{cases} \quad (15)$$

式中:

$$a' = a + b_1 \cdot \frac{a}{a+b_1} + b_2 \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2} \cdot \frac{a}{a+b_1} + c \cdot \frac{b_2}{b_2+c} \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2} \cdot \frac{a}{a+b_1}, \quad b'_1 = a \cdot \frac{b_1}{a+b_1} + b_1 + b_2 \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2} + c \cdot \frac{b_2}{b_2+c} \cdot \frac{b_1}{b_1+b_2}, \quad b'_2 = a \cdot \frac{b_1}{a+b_1} \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} + b_1 \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} + b_2 + c \cdot \frac{b_2}{b_2+c}, \quad c' = a \cdot \frac{b_1}{a+b_1} \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} \cdot \frac{c}{b_2+c} + b_1 \cdot \frac{b_2}{b_1+b_2} \cdot \frac{c}{b_2+c} + b_2 \cdot \frac{c}{b_2+c} + c, \quad \text{这些联系数分量再经式(6)归一化处理; } s_2(u) \in [-1, 1]。$$

入四元半偏减法集对势<sup>[12]</sup>  $s_1(u)$  中, 得到转化修正后的四元半偏减法集对势, 记为  $s_2(u)$ 。传统的四元半偏减法集对势<sup>[12]</sup>  $s_1(u)$  为:

按照均分原则将  $s_2(u)$  分为 5 个势级: 反势  $s_2(u) \in [-1.0, -0.6]$ , 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  $s_2(u) \in (0.6, 1.0]$  [21]。当评价指标的  $s_2(u)$  处于  $[-1.0, -0.2)$  时, 认为此时的指标是造成区域农业旱灾脆弱性等级偏高的重要因子, 应针对此指标进行调控从而改善农业旱灾脆弱性状况。

为进一步验证式(15)的合理性, 通过求平均绝对误差的方法来计算四元半偏减法集对势  $s_1(u)$  和本文的修正后的四元半偏减法集对势  $s_2(u)$  的误差大小, 计算式取<sup>[22]</sup>:

$$d = \sum_{m=1}^M |s_1(u_m) - s_2(u_m)| / M. \quad (16)$$

式中:  $M$  为随机模拟四元联系数的次数, 本文分别随机模拟  $10^4$ 、 $10^5$  和  $10^6$  次时, 平均绝对误差  $d$  在 0.002 左右。式(16)利用  $s_2(u)$  来检验四元半偏减法集对势计算式  $s_1(u)$  的稳定性, 通过上述计算可知  $s_1(u)$  和  $s_2(u)$  之间差距较小, 也间接验证了利用迁移率矩阵转化修正单指标联系数分量的合理性<sup>[19]</sup>, 利用半偏联系数实现了相邻、不相邻联系数分量之间的转化, 使半偏减法集对势的形式和计算结果更趋于稳健、合理。

## 2 实例应用

现以蚌埠市农业旱灾脆弱性评估为例, 进一步阐述基于修正四元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱评估方法的应用过程。蚌埠市位于安徽省东北部, 其属于北亚热带湿润季风气候区与温带半湿润季风气候区的过渡带, 干旱灾害频发,

严重影响了农业生产, 对蚌埠市农业旱灾脆弱性进行评估有助于防御农业旱灾。在农业旱灾脆弱性评估的含义和目标综合考虑分析的基础上, 依据全面性、层次性、适用性、可操作性原则<sup>[23-25]</sup>, 将旱灾脆弱性分为暴露性、灾损敏感性、防灾减灾能力三个子系统, 三个子系统中各指标及其等级标准参照文献[13], 各指标权重通过基于加速遗传算法的层次分析法<sup>[26]</sup>求得, 具体结果见表1<sup>[13]</sup>。

将 2001—2010 年的评价指标样本值和表 1 中的数据代入式(1) - 式(4), 计算得蚌埠市 2001—2010 年 23 个指标的样本指标值联系数  $u_{ijk}$ , 由式(5) - 式(6)求各样本指标值联系数的相对隶属度并归一化, 再由式(13)计算得样本  $i$  的联系数  $u_i$ , 得到各联系数分量后代入式(14)计算四元半偏减法集对势值, 并判断其态势, 具体结果见表 2。

利用式(11)转化修正式(7)计算得联系数分量, 代入式(6)归一化, 再代入式(13)得到修正后的联系数分量, 最后将修正后的联系数分量代入式(15), 得到修正后的四元半偏减法集对势值, 并判断其态势, 具体结果见表 3。

表 1 农业旱灾脆弱性评价指标、等级标准和权重<sup>[13]</sup>

子系统	权重	指标层	评价标准				权重
			弱(1级)	较弱(2级)	较强(3级)	强	
暴露性	0.283	农业人口密度/(万人/km <sup>2</sup> )	≤0.02	0.02~0.05	0.05~0.08	≥0.08	0.029
		耕地率/%	≤0.1	0.1~0.25	0.25~0.4	≥0.4	0.039
		水田面积率/%	≤0.2	0.2~0.5	0.5~0.8	≥0.8	0.032
		水稻种植率/%	≤0.2	0.2~0.5	0.5~0.8	≥0.8	0.031
		复种指数	≤1	1~1.75	1.75~2.5	≥2.5	0.030
		农业 GDP 所占比例/%	≤0.1	0.1~0.25	0.25~0.4	≥0.4	0.028
		单位面积农业 GDP/(万元/km <sup>2</sup> )	≤50	50~125	125~200	≥200	0.028
		湿润度指数	≥4	4~2.5	2.5~1	≤1	0.032
		单位耕地面积水资源量/(万 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	≥60 000	60 000~37 500	37 500~15 000	≤15 000	0.035
灾损敏感性	0.400	人均耕地面积/(hm <sup>2</sup> /人)	≤0.05	0.05~0.125	0.125~0.2	≥0.2	0.056
		农业万元 GDP 用水量/(m <sup>3</sup> /万元)	≤600	600~1 500	1 500~2 400	≥2 400	0.066
		农业灌溉公顷均用水量/(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	≤1 800	1 800~4 500	4 500~7 200	≥7 200	0.080
		单位耕地耗水量/(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	≤1 100	1 100~2 600	2 600~4 100	≥4 100	0.076
		单位农业增加值耗水量/(m <sup>3</sup> /万元)	≤700	700~1 600	1 600~2 500	≥2 500	0.066
		土地的质量/(kg/hm <sup>2</sup> )	≥6 000	6 000~5 250	5 250~4 500	≤4 500	0.057
防灾减灾能力	0.317	农民人均 GDP/(元/人)	≥5 000	3 500~5 000	2 000~3 500	≤2 000	0.032
		单位面积库容/(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	≥28	17.5~28	7~17.5	≤7	0.047
		有效灌溉面积率/%	≥0.5	0.35~0.5	0.2~0.35	≤0.2	0.046
		保灌面积率/%	≥0.5	0.35~0.5	0.2~0.35	≤0.2	0.042
		节水灌溉率/%	≥0.56	0.35~0.56	0.14~0.35	≤0.14	0.044
		人均旱涝保收面积/km <sup>2</sup>	≥0.08	0.05~0.08	0.02~0.05	≤0.02	0.036
		单位耕地面积农机动力/(kW/km <sup>2</sup> )	≥16	10~16	4~10	≤4	0.034
		单位耕地面积灌溉动力/(kW/km <sup>2</sup> )	≥0.5	0.35~0.5	0.2~0.35	≤0.2	0.037

表 2 蚌埠市农业旱灾脆弱性、子系统联系数分量及其半偏减法集对势

评价对象	年份	联系数分量				半偏减法集对势	
		$a$	$b_1$	$b_2$	$c$	集对势值	态势
暴露性子系统	2001	0.160	0.294	0.248	0.299	-0.186	均势
	2002	0.153	0.284	0.335	0.229	-0.125	均势
	2003	0.197	0.303	0.314	0.186	0.014	均势
	2004	0.122	0.287	0.306	0.285	-0.243	偏反势
	2005	0.139	0.291	0.354	0.216	-0.134	均势
	2006	0.122	0.283	0.364	0.232	-0.187	均势
	2007	0.130	0.291	0.370	0.208	-0.140	均势
	2008	0.120	0.305	0.354	0.222	-0.169	均势
	2009	0.118	0.294	0.349	0.239	-0.197	均势
	2010	0.118	0.267	0.345	0.269	-0.243	偏反势
灾损敏感性子系统	2001	0.041	0.319	0.456	0.184	-0.274	偏反势
	2002	0.059	0.336	0.441	0.164	-0.202	偏反势
	2003	0.096	0.314	0.399	0.190	-0.173	均势
	2004	0.201	0.472	0.299	0.028	0.334	偏同势
	2005	0.305	0.500	0.195	0.000	0.567	偏同势
	2006	0.210	0.500	0.290	0.000	0.411	偏同势
	2007	0.343	0.500	0.157	0.000	0.624	同势
	2008	0.176	0.481	0.324	0.019	0.309	偏同势
	2009	0.160	0.476	0.340	0.024	0.270	偏同势
	2010	0.207	0.483	0.294	0.016	0.369	偏同势
防灾减灾能力子系统	2001	0.049	0.257	0.397	0.297	-0.418	偏反势
	2002	0.046	0.246	0.414	0.294	-0.427	偏反势
	2003	0.047	0.237	0.400	0.315	-0.451	偏反势
	2004	0.072	0.280	0.410	0.238	-0.294	偏反势
	2005	0.067	0.248	0.421	0.264	-0.351	偏反势
	2006	0.081	0.277	0.413	0.229	-0.267	偏反势
	2007	0.086	0.284	0.409	0.221	-0.244	偏反势
	2008	0.094	0.304	0.403	0.199	-0.192	均势
	2009	0.094	0.303	0.400	0.202	-0.196	均势
	2010	0.113	0.325	0.382	0.180	-0.120	均势
农业旱灾脆弱性	2001	0.077	0.292	0.378	0.252	-0.293	偏反势
	2002	0.082	0.293	0.402	0.223	-0.252	偏反势
	2003	0.109	0.287	0.376	0.229	-0.207	偏反势
	2004	0.138	0.359	0.336	0.167	-0.040	均势
	2005	0.182	0.361	0.312	0.145	0.071	均势
	2006	0.144	0.368	0.350	0.138	0.015	均势
	2007	0.201	0.373	0.297	0.129	0.131	均势
	2008	0.134	0.375	0.358	0.133	0.006	均势
	2009	0.127	0.370	0.362	0.141	-0.020	均势
	2010	0.152	0.372	0.336	0.140	0.030	均势

表 3 修正后的蚌埠市农业旱灾脆弱性、子系统联系数分量及其半偏减法集对势

评价对象	年份	修正后的联系数分量			修正后的半偏减法集对势		
		$a'$	$b'_1$	$b'_2$	$c'$	集对势值	态势
暴露性子系统	2001	0.165	0.297	0.277	0.262	-0.135	均势
	2002	0.160	0.292	0.330	0.218	-0.097	均势
	2003	0.194	0.308	0.313	0.185	0.011	均势
	2004	0.134	0.291	0.317	0.258	-0.189	均势
	2005	0.149	0.297	0.343	0.211	-0.106	均势
	2006	0.135	0.290	0.351	0.224	-0.150	均势
	2007	0.143	0.298	0.354	0.206	-0.112	均势
	2008	0.133	0.305	0.346	0.217	-0.138	均势
	2009	0.132	0.297	0.343	0.229	-0.158	均势
	2010	0.131	0.278	0.341	0.249	-0.191	均势
灾损敏感性子系统	2001	0.056	0.319	0.425	0.200	-0.262	偏反势
	2002	0.077	0.332	0.411	0.180	-0.189	均势
	2003	0.113	0.313	0.377	0.197	-0.147	均势
	2004	0.217	0.439	0.304	0.040	0.324	偏同势
	2005	0.310	0.470	0.220	0.000	0.558	偏同势
	2006	0.233	0.469	0.298	0.000	0.432	偏同势
	2007	0.341	0.472	0.187	0.000	0.607	同势
	2008	0.198	0.450	0.325	0.028	0.317	偏同势
	2009	0.184	0.445	0.337	0.034	0.278	偏同势
	2010	0.225	0.451	0.300	0.024	0.368	偏同势
防灾减灾能力子系统	2001	0.065	0.269	0.386	0.281	-0.362	偏反势
	2002	0.062	0.261	0.397	0.280	-0.371	偏反势
	2003	0.063	0.254	0.389	0.294	-0.387	偏反势
	2004	0.090	0.288	0.387	0.236	-0.252	偏反势
	2005	0.085	0.264	0.395	0.256	-0.297	偏反势
	2006	0.099	0.286	0.387	0.227	-0.225	偏反势
	2007	0.104	0.292	0.384	0.221	-0.206	偏反势
	2008	0.112	0.306	0.379	0.204	-0.163	均势
	2009	0.111	0.305	0.377	0.206	-0.166	均势
	2010	0.129	0.321	0.363	0.187	-0.101	均势
农业旱灾脆弱性	2001	0.094	0.295	0.368	0.244	-0.249	偏反势
	2002	0.099	0.297	0.381	0.223	-0.215	偏反势
	2003	0.124	0.293	0.360	0.223	-0.168	均势
	2004	0.150	0.343	0.333	0.175	-0.037	均势
	2005	0.186	0.346	0.313	0.155	0.056	均势
	2006	0.157	0.352	0.340	0.151	0.012	均势
	2007	0.201	0.355	0.302	0.142	0.105	均势
	2008	0.149	0.357	0.347	0.148	0.003	均势
	2009	0.143	0.353	0.350	0.155	-0.019	均势
	2010	0.163	0.354	0.331	0.152	0.023	均势

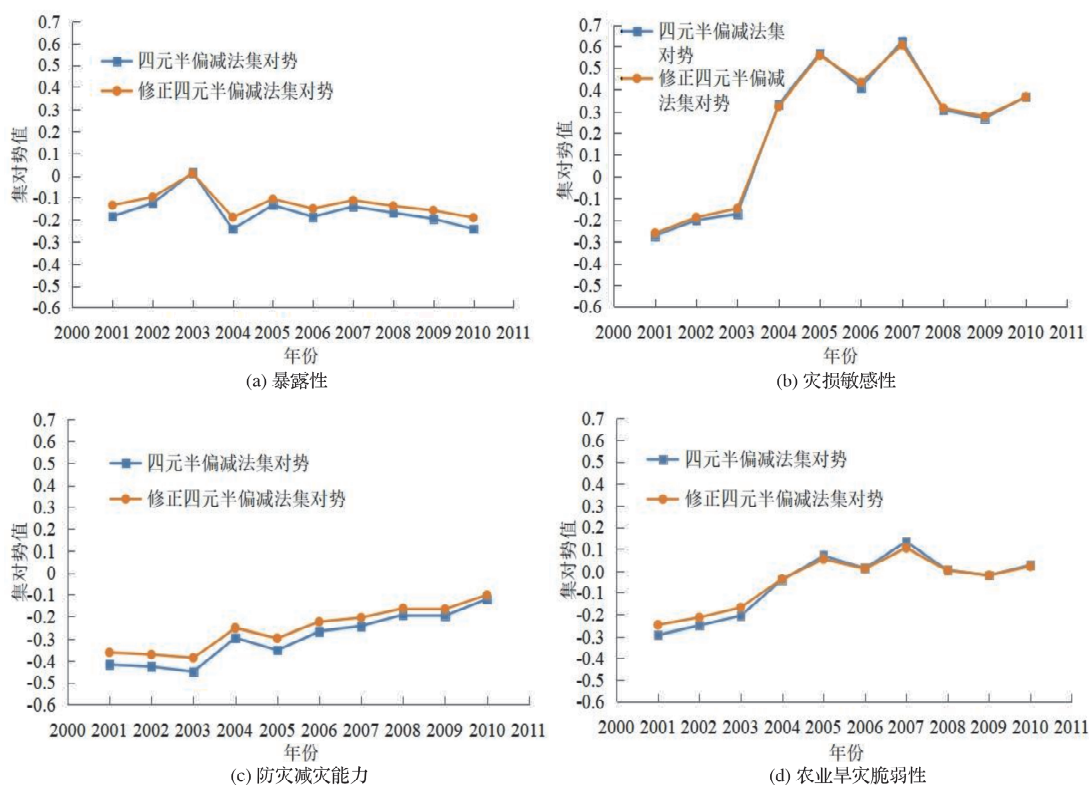


图1 农业旱灾脆弱性及其子系统评价结果趋势图

根据表2和表3中农业旱灾脆弱性样本综合指标联系数分量和它的三个子系统联系数分量,计算四元半偏减法集对势值和转化修正后的四元半偏减法集对势值,并分析比较两种方法所得评价结果的发展趋势。

由图1可看出,两种方法对蚌埠市农业旱灾脆弱性及其三个子系统的评价结果值变化趋势一致,所得评价结果相差较小,这也验证了利用半偏联系数转化修正半偏减法集对势的合理性。对比表2和表3可看出,利用半偏减法集对势对2003年农业旱灾脆弱性评价的结果为偏反势,而利用修正后半偏减法集对势的评价结果为均势,但其评价结果值只相差0.039,同样两种方法对2004年和2010年的暴露性子系统和2002年的灾损敏感性子系统计算所得态势略微不同,而两种方法计算的半偏减法集对势结果值相差不大。传统的四元半偏减法集对势直接将所求的联系数分量值代入,计算集对势值对实际问题进行综合评价,而根据运动的绝对性原理可知,联系数系统内各分量不是相互独立的,而是可迁移转化的,因此依据半偏联系数思想构造的四元联系数迁移率矩阵可从微观上进一步刻画联系数系统内分量间的动态迁移运动,更深刻地反映出系统结构的本质特征,因此利用转化修正后的联系数分量计算四元半偏减法集对势更稳健、更合理可靠。

由表2、表3和图1a可看出两种方法计算得到的2001—2010年暴露性子系统评价结果值波动较小,基本上处于均势状态,说明暴露性子系统内的样本指标变化趋于稳定,而2003—2004年两

种方法计算所得的脆弱性评价结果值下降比较明显,说明2003—2004年暴露性子系统内某些指标因素可能有恶化的趋势。暴露性子系统减法集对势值呈缓慢降低,说明蚌埠市农业旱灾承灾体的暴露性在略微增大。

由表2、表3和图1b可看出两种方法计算得到的2001—2010年灾损敏感性子系统评价结果值比较吻合,整体趋势从偏反势向偏同势发展,说明灾损敏感性在这期间已一定程度上适应了蚌埠市的自然环境条件,此外灾损敏感性子系统评价结果值变化趋势与农业旱灾脆弱性评价结果值变化趋势一致,可看出灾损敏感性子系统对蚌埠市农业旱灾脆弱性影响较大。

由表2、表3和图1c可看出两种方法计算得到的防灾减灾能力子系统由偏反势向均势发展,评价结果呈现大体上逐年向好的方向发展趋势,说明需要继续加强防灾减灾措施,有效降低农业旱灾脆弱性。此外还可看出,2001—2010年两种方法计算所得评价结果值整体上越来越接近,这是因为2001—2010年修正前后的联系数分量中同一度 $a$ 和对立度 $c$ 之间越来越接近,而同一度 $a$ 和对立度 $c$ 在对集对事件趋势的影响中占主导地位,导致两种方法脆弱性评价结果值都趋向于0,反映集对事件向临界状态发展,因此两种方法所得的评价结果值越来越接近。

由表2、表3和图1d可看出2001—2010年农业旱灾脆弱性从偏反势向均势发展,表明这期间蚌埠市农业旱灾脆弱性总体在变弱,抵御旱灾的能力逐渐增强。由表2和表3中2001—2010年农



业旱灾脆弱性及其三个子系统的联系数分量可看出,经半偏联系数转化修正后各联系数分量值之间的差距变小,由此计算得到的修正后的半偏减法集对势值更趋于稳定,由图1可看出,与传统的四元半偏减法集对势相比,修正后的四元半偏减法集对势值变化范围更小,评价结果值更加稳定可靠。

### 3 结论

(1)传统的四元半偏减法集对势计算式直接将计算得到的联系数分量代入,未考虑各联系数分量间的迁移转化,根据运动的绝对性、矛盾的普遍性原理,可知联系数系统内各分量是在不断迁移转化的。为从微观层次上更准确清晰地刻画这种联系数分量间的动态演化,依据半偏联系数思想构建了四元联系数的迁移率矩阵,以此修正四元联系数分量,代入四元半偏减法集对势计算式中,得到修正后的四元半偏减法集对势,修正前后的四元半偏减法集对势值误差较小,验证了利用迁移率矩阵修正四元联系数分量的合理性。

(2)采用修正前后两种四元半偏减法集对势计算方法对蚌埠市农业旱灾脆弱性及其三个子系统进行评价的结果值十分接近。2001—2010年农业旱灾脆弱性从偏反势向均势发展,农业旱灾脆弱性整体呈降低、改善趋势;2001—2010年暴露性子系统基本上处于均势状态,并且两种方法计算所得评价结果值波动较小,说明暴露性子系统内部指标因素比较稳定;2001—2010年灾损敏感性子系统整体从偏反势向同势方向发展,且其评价结果值变化趋势与农业旱灾脆弱性一致,说明灾损敏感性子系统对蚌埠市农业旱灾脆弱性影响较大;2001—2010年防灾减灾能力子系统从偏反势向均势方向发展,说明了进一步加强防灾减灾措施很必要。

(3)经过四元联系数的迁移率矩阵修正后的四元联系数分量之间差距变小,代入半偏减法集对势后计算所得的评价结果值变化范围更小,评价敏感度更高,结果更加趋于稳定、合理,因此利用修正后的四元半偏减法集对势可更准确更合理地刻画集对系统的发展趋势。

(4)半偏联系数是实现联系数系统结构内各分量间转化修正的重要方法,基于半偏联系数构建的迁移率矩阵定量刻画了各联系数分量间的迁移转化运动,为各联系数分量的准确合理修正提供了有效途径。因此,在今后的研究中,需要更加注重联系数系统结构中各联系数分量间的转化作用,进一步探索各联系数分量间的动态演化机制。

### 参考文献:

[1] 程静. 农业旱灾脆弱性及其风险管理研究:以湖北省孝感市

- 为例[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.
- [2] 王亚许, 吕娟, 左惠强, 等. 东北三省春玉米旱灾动态风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 228-237.
- [3] 金菊良, 郇建强, 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.
- [4] 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(S1): 62-69.
- [5] 金菊良, 周亮广, 蒋尚明, 等. 基于链式传递结构的旱灾实际风险定量评估方法与应用模式[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 1-6.
- [6] MURTHY C S, YADAV M, MOHAMMED AHAMED J, et al. A study on agricultural drought vulnerability at disaggregated level in a highly irrigated and intensely cropped state of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(3): 140.
- [7] 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.
- [8] 陈佳. 中国农业旱灾脆弱性评价及影响因素研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [9] 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.
- [10] 屈艳萍, 高辉, 吕娟, 等. 基于区域灾害系统论的中国农业旱灾风险评估[J]. 水利学报, 2015, 46(8): 908-917.
- [11] 金菊良, 孔令茹, 崔毅, 等. 基于五元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 340-348.
- [12] 王建宇. 四元联系数方法在区域水资源承载力评价分析中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [13] 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.
- [14] 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林, 等. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分析评价[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 78-83.
- [15] 王建宇, 金菊良, 郭涵, 等. 区域水资源承载力评价的四元联系数减法集对势方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 39-44.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [19] 李征, 金菊良, 崔毅, 等. 基于半偏联系数和动态减法集对势的区域水资源承载力评价方法[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1656-1669.
- [20] 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.
- [21] 金菊良, 沈时兴, 郇建强, 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.
- [22] 金菊良, 赵行玥, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 36-44.
- [23] 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.
- [24] 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, 105.
- [25] ZHANG F, CHEN Y N, ZHANG J Q, et al. Dynamic drought risk assessment for maize based on crop simulation model and multi-source drought indices[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 100-114.
- [26] 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, 110.



## Regional Agricultural Drought Vulnerability Evaluation Based on the Modified Quaternary Semi – Partial Subtraction

JIN Juliang<sup>1,2</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, CUI Yi<sup>1,2</sup>, LIU Ling<sup>1</sup>, ZHOU Yuliang<sup>1,2</sup>, WU Chengguo<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)

**Abstract:** In order to enhance the reliability and rationality of drought vulnerability evaluation results, the migration motion information among various components in the contact number system structure is mined from the micro level, and the mobility matrix of quaternary contact number is constructed according to the semi – partial contact number idea. In this way, the transformation of adjacent and separated contact number components in the system is realized. Furthermore, the corrected contact number components are substituted into the quaternary semi – partial subtraction set pair potential, and the revised quaternary semi – partial subtraction set pair potential is obtained. In addition, this method is applied to the agricultural drought vulnerability assessment in Bengbu City. The results show that the quaternary semi – partial subtraction method set pair potential values before and after correction are consistent with the evaluation results of agricultural drought vulnerability and its subsystems in Bengbu City. Moreover, the variation range of corrected subtraction set pair potential is smaller, the sensitivity is higher, and the results are more robust. Therefore, the change trend of set pair system vulnerability assessment is more accurate and reliable reflected by the method proposed in this study, and it has the prospect of application.

**Keywords:** agricultural drought; vulnerability assessment; quaternary semi – partial subtraction set pair potential; contact number component; mobility matrix

(上接第 6 页)

## Based on the Combination of Game Theory and Weighted Matter – Element Extension Model Study on Waterlogging Resilience Assessment of Metro Stations

ZHU Lianbo<sup>1</sup>, WANG Shidi<sup>1</sup>, LIN Lingna<sup>1</sup>, XU Xiaojin<sup>2</sup>, SHI Zhenqun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Yangzhou Transportation Industry Group, Yangzhou 225000, China;

3. Hangzhou Water Engineering Construction Co., Ltd., Hangzhou 311400, China)

**Abstract:** With the rapid development of construction of city subway in our country, the problem of waterlogging is more and more serious in subway station. Although domestic and foreign scholars have conducted a large number of studies on the subway waterlogging problem, there are few studies on the waterlogging resistance level of subway stations from the perspective of toughness. According to the research status and research results at home and abroad, the evaluation index system of flood resistance toughness of subway stations is established. The system includes three first – level indexes of personnel management, materials and equipment, and environment, and 18 corresponding second – level indexes. The toughness index weights are determined based on the game theory combination weighting method which combines the sequential relation analysis method and entropy weight method. By means of extension evaluation method, the evaluation object is matter – element, and the evaluation model of flood resistance toughness of subway station based on the game theory combination weight matter – element extension model is established. According to the evaluation results, the flood resistance grade of subway station is determined. Taking Xintang Station of Guangzhou Metro Line 13 as an example, the evaluation results show that the flood resistance toughness of this station is level IV, which is basically consistent with the actual situation, proving the applicability and scientificity of the evaluation model.

**Keywords:** metro stations; game theory combination weighting; matter – element extension model; assessment of waterlogging resilience