汪洁，金菊良，周戎星，等. 基于连续半偏减法集对势的区域旱灾风险评估方法[J]. 灾害学，2023，38(1)：229 - 234. [WANG Jie，JIN Juliang，ZHOU Rongxing，et al. Drought Risk Assessment Method Based on A Continuous Semi - partial Subtraction Set pair potential[J]. Journal of Catastrophology，2023，38(1)：229 - 234. doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2023.01.034.]

基于连续半偏减法集对势的区域旱灾风险评估方法*

汪 洁[1,2]，金菊良[1,2]，周戎星[1,2]，崔 毅[1,2]，周 婷[3]，周亮广[1,2]

（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. 安徽农业大学水利工程系，安徽 合肥 230036）

摘 要：为更详细、准确地挖掘旱灾风险评估中评级标准与评价等级之间确定性与不确定性之间的关系信息，在五元半偏减法集对势的基础上提出连续半偏减法集对势，构建了区域旱灾风险评估的连续半偏减法集对势模型，并应用在 1999—2005 年济南市脆弱性因子的诊断和旱灾风险等级评价中。结果表明：济南市旱灾风险等级评价基本处于 2 ~ 3 级之间，处于轻中险的状态，其中 1999 年旱灾风险等级最高，达到 3 级；通过子系统联系数的计算，识别出适应性子系统得到很大的提高，敏感性子系统稳定、变化较小，危险性子系统态势较好、处于均势与同势之间。

关键词：旱灾风险评估；集对分析；联系数；连续半偏集对势；济南市

中图分类号：X43；X915.5；S423；P338　**文献标志码**：A　**文章编号**：1000 - 811X(2023)01 - 0229 - 06

doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2023.01.034

受不确定性季风气候的影响，我国干旱发生频繁、影响广泛，需要不断发展、完善旱灾风险定量评估理论和方法[1-2]。在系统工程中旱灾风险可看成一个系统[3-4]，结合区域旱灾风险的形成机理和自然灾害系统理论[5]，可形成区域干旱危险性、灾损敏感性、适应性 3 个子系统构成的旱灾风险系统[3-6]。近年来，国内外学者在旱灾风险评估方面的研究不断深入。金菊良等[7]提出用五元联系数半偏减法集对势进行蚌埠市 2001—2010 年农业旱灾脆弱性评价。刘晓冉等[3]运用 GIS 空间数据对重庆不同季节旱灾风险做了评估及区划。目前，区域干旱灾害风险评估研究仍处于不断发展阶段中，现有的旱灾风险评估方法主要有：模糊综合评价法[8]、风险矩阵法[9]、灰色聚类法[10]、集对分析法[11]等。但是如何精准评价旱灾风险等级、子系统中干旱致灾因子的敏感性、适应性和危险性等级仍有很大的发展空间，以及在旱灾风险评估结果的准确性和客观性值得进一步研究与完善[7]，且现有的减法集对势[12-13]、半偏减法集对势[7]在差异度项向确定项转换的过程中存在人为设定的修正系数。为使计算结果更具客观性，本文在半偏减法集对势[7]的基础上提出一种连续半偏减法集对势，通过两次半偏的过程将差异度项转换到确定项上，并将这种联系数的伴随函数用于旱灾风险评估中。首先以济南市 1999—2005 年区域旱灾风险评估为研究对象，构建评价指标体系；然后采用联系数方法对区域旱灾风险各子系统指标值与评价等级进行同异反动态分析；最后将五元半偏减法集对势和连续半偏减法集对势对子系统中各指标计算结果进行对比，进而分析旱灾风险系统中的脆弱性因子，以期为该地区的防旱抗旱工作提供一定参考借鉴。

1 基于连续半偏减法集对势的区域干旱灾害风险评估方法构建

基于连续半偏减法集对势的区域干旱灾害风险评估方法需要以下 4 个步骤来建立旱灾风险评估模型。

步骤 1：根据区域旱灾致灾因子，建立指标评价等级标准$\{s_{kj},\ k=1,\ 2,\ \cdots,\ n_k;\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ n_j\}$和区域干旱灾害风险评估指标体系$\{x_{ij},\ i=1,\ 2,\ \cdots,\ n_i;\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ n_j\}$，其中$x_{ij}$为旱灾风险评价指标体系中第 i 个样本的第 j 个评价指标值，n_j、n_i、n_k，分别为评价指标数目、样本数目和评价标准的等级数目[12]。本研究将区域旱灾风险等级划分为 1 级(微险)、2 级(轻险)、3 级(中险)、4 级(重险)和 5 级(特险)。

步骤 2：根据旱灾风险评价样本 i 指标 j 的样本值x_{ij}与评价等级标准s_{kj}两者间的接近程度，来计算区域的旱灾风险评价样本指标值联系数，参考文献[7]中改进的放缓指标联系数的分段函数中相邻两个等级的斜率，来计算旱灾风险评估样本 i 的指标值联系数$u_i(i=1,\ 2,\ \cdots,\ n_i)$。

(1)当正向指标满足$s_{0j}<x_{ij}\leqslant s_{1j}$，或反向指标满足$s_{0j}>x_{ij}\geqslant s_{1j}$时，计算公式为[7]：

* 收稿日期：2022 - 07 - 01　　修回日期：2022 - 11 - 24

基金项目：国家自然科学基金项目(U2240223，52109009)；安徽省自然科学基金项目(2208085US03；2108085QE254)；安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2020055)

第一作者简介：汪洁(1999 -)，女，汉族，安徽安庆人，硕士生，主要从事水资源系统工程研究. E - mail：1252617623@qq.com

通信作者：周戎星(1990 -)，女，汉族，安徽合肥人，博士生，主要从事水资源系统工程研究. E - mail：zhourx11@163.com

$$\begin{cases} u_{ij1}=1; \\ u_{ij2}=1-2(s_{1j}-x_{ij})/(s_{1j}-s_{0j}); \\ u_{ij3}=1-2(s_{2j}-x_{ij})/(s_{2j}-s_{0j}); \\ u_{ij4}=-1; \\ u_{ij5}=-1。 \end{cases} \quad (1)$$

(2)当正向指标满足 $s_{1j}<x_{ij}\leqslant s_{2j}$，或反向指标满足 $s_{1j}>x_{ij}\geqslant s_{2j}$时，计算公式为[7]：

$$\begin{cases} u_{ij1}=1-2(x_{ij}-s_{1j})/(s_{3j}-s_{1j}); \\ u_{ij2}=1; \\ u_{ij3}=1-2(s_{2j}-x_{ij})/(s_{2j}-s_{0j}); \\ u_{ij4}=1-2(s_{3j}-x_{ij})/(s_{3j}-s_{1j}); \\ u_{ij5}=-1。 \end{cases} \quad (2)$$

(3)当正向指标满足 $s_{2j}<x_{ij}\leqslant s_{3j}$，或反向指标满足 $s_{2j}>x_{ij}\geqslant s_{3j}$时，计算公式为[7]：

$$\begin{cases} u_{ij1}=1-2(x_{ij}-s_{1j})/(s_{3j}-s_{1j}); \\ u_{ij2}=1-2(x_{ij}-s_{2j})/(s_{4j}-s_{2j}); \\ u_{ij3}=1; \\ u_{ij4}=1-2(s_{3j}-x_{ij})/(s_{3j}-s_{1j}); \\ u_{ij5}=1-2(s_{4j}-x_{ij})/(s_{4j}-s_{2j})。 \end{cases} \quad (3)$$

(4)当正向指标满足 $s_{3j}<x_{ij}\leqslant s_{4j}$，或反向指标满足 $s_{3j}>x_{ij}\geqslant s_{4j}$时，计算公式为[7]：

$$\begin{cases} u_{ij1}=-1; \\ u_{ij2}=1-2(x_{ij}-s_{2j})/(s_{4j}-s_{2j}); \\ u_{ij3}=1-2(x_{ij}-s_{3j})/(s_{5j}-s_{3j}); \\ u_{ij4}=1; \\ u_{ij5}=1-2(s_{4j}-x_{ij})/(s_{4j}-s_{2j})。 \end{cases} \quad (4)$$

(5)当正向指标满足 $s_{4j}<x_{ij}\leqslant s_{5j}$，或反向指标满足 $s_{4j}>x_{ij}\geqslant s_{5j}$时，计算公式为[7]：

$$\begin{cases} u_{ij1}=-1; \\ u_{ij2}=-1; \\ u_{ij3}=1-2(x_{ij}-s_{3j})/(s_{5j}-s_{3j}); \\ u_{ij4}=1-2(x_{ij}-s_{4j})/(s_{5j}-s_{4j}); \\ u_{ij5}=1。 \end{cases} \quad (5)$$

式中：随评价标准等级 k 的增大而增大(减小)的评价指标样本值 x_{ij}称为正向指标(反向指标)；评价标准1级、2级、3级、4级和5级之间分别用 s_{1j}、s_{2j}、s_{3j}、s_{4j}作为临界值划分，用 s_{5j}、s_{0j}代表旱灾风险评价等级5级和1级评价区域另一端的阈值。可用联系数 u_{ijk}来表示评价标准等级 s_{kj}与样本值 x_{ij}两者间接近程度可变模糊关系的一种相对差异度函数，与之对应的相对隶属度 v_{ijk}^{*}为[14]：

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

于是，将式(6)归一化处理得相应的旱灾风险评估指标值联系数分量 v_{ijk}[15]：

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

联系数分量 v_{ijk}代入式(8)可得到评价指标值联系数 u_{ij}[16]：

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

从而可得到旱灾风险评估样本 i 的指标值联系数 u_i[12]：

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

步骤3：用级别特征值法[14, 17]计算评价样本 i 指标值联系数和样本值联系数所对应的风险等级值：

$$h_j(i)=\sum_{k=1}^{5}v_{ijk}k。 \quad (10)$$

步骤4：计算旱灾风险评价样本 i 各指标值联系数的连续半偏减法集对势，并加以整理识别。

文献[18]构造了五元联系数 $u=a+b_1I_1+b_2I_2+b_3I_3+cJ$ 的一种新的伴随函数——五元减法集对势[18]，计算式为：

$$s_2(u)=(a-c)(1+b_1+b_2+b_3)+(\lambda_1b_1+\lambda_2b_2+\lambda_3b_3)(b_1+b_2+b_3)。 \quad (11)$$

式中：a、b_1、b_2、b_3、c 为联系数分量，λ_1、λ_2、λ_3 分别为 b_1、b_2、b_3的系数，按经验分别取值$\lambda_1=0.5$、$\lambda_2=0$、$\lambda_3=-0.5$，

$$s_2(u)=(a-c)(1+b_1+b_2+b_3)+0.5(b_1-b_3)(b_1+b_2+b_3)。 \quad (12)$$

$s_2(u)$ 中存在人为设定的修正系数 λ_1、λ_2、λ_3，受主观因素影响较大，并且差异度 b_1、b_2、b_3 向同一度 a 和对立度 c 转换发展的趋势程度不一定是相同的。故本文在五元半偏减法集对势[7]的基础上，将 b_2通过半偏联系数的转换方式，按照 $b_1/(b_1+b_2)$、$b_3/(b_2+b_3)$的比例趋势分别分配到偏同势 b_1和偏反势 b_3上，得到：

$$s_3(u)=a+b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)-b_3-b_2b_3(b_2+b_3)-c。 \quad (13)$$

此时，可将“$b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)$”和“$b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)$”分别视为新的偏同势 b_1' 和偏反势 b_3'，再将 b_1' 和 b_3' 进行第二次半偏联系数的转换，其中 b_1' 和 b_3' 分别按照 $a/(a+b_1')$和 $c/(c+b_3')$的比例分配到 a 和 c 上，最终得到连续半偏减法集对势：

$$s_4(u)=a+b_1'a/(a+b_1')-b_3'c/(c+b_3')-c=a+a[b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)]/[a+b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)]-c[b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)]/[c+b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)]-c。 \quad (14)$$

考虑到式(14)中当“b_1+b_2”或“b_2+b_3”为零时，在进行第二次半偏中，分别偏向同一度 a 和偏向对立度 c 时的趋势都为0，此时，联系数连续半偏减法集对势可按 $a-c$ 计算。综上所述，连续半偏减法集对势的计算公式为：

$$s_4(u)=\begin{cases} a+a[b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)]/[a+b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)] \\ -c[b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)]/[c+b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)]-c, & \text{若 } b_1+b_2\neq 0 \text{ 且 } b_2+b_3\neq 0; \\ a-c[b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)]/[c+b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)]-c, & \text{若 } b_1+b_2=0 \text{ 但 } b_2+b_3\neq 0; \\ a+a[b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)]/[a+b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)]-c, & \text{若 } b_1+b_2\neq 0 \text{ 但 } b_2+b_3=0; \\ a-c, & \text{若 } b_1+b_2=0 \text{ 且 } b_2+b_3=0。 \end{cases} \quad (15)$$

显然：当同一度 $a=1$、差异和对立度都为0时，取最大值 $s_4(u)_{\max}=1$；当对立度 $c=1$、同一度和差异度都为0时，取最小值 $s_4(u)\min=-1$，由此可得 $s_4(u)\in[-1,1]$。于是可将 $s_4(u)$分为5个势级[12]：反势 $s_4(u)\in[-1,-0.6)$；偏反势 $s_4(u)\in[-0.6,-0.2)$；均势 $s_4(u)\in[-0.2,0.2]$；偏同势 $s_4(u)\in(0.2,0.6]$；同势 $s_4(u)\in(0.6,1]$。当指标 $s_4(u)$处于$[-1,-0.2)$时，认为此时的指标是造成旱灾风险等级偏高的重要因子之一，可将此指标判别为旱灾风险脆弱性指标，是需要重点加强防范和管理的主要因素。

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五元减法集对势 $s_2(u)$和本文的连续半偏减法集对势 $s_4(u)$的误差大小，计算式取[19]：

$$d=\sum_{m=1}^{M}|s_4(u_m)-s_2(u_m)|/M。 \quad (16)$$

式中：M 为随机模拟五元联系数的次数，本文分别随机模拟 10^3、10^4、10^5和 10^6次时，评价绝对误差 d 均在 3.7% 左右，两者比较接近，这间接验证了五元减法集对势计算式中 λ_1、λ_2、λ_3 经验取值具有合理性。

通过计算误差大小可得到 $s_2(u)$和 $s_4(u)$的结果差距较小，满足误差要求，说明 $s_4(u)$连续半偏减法集对势方法具有可行性和合理性，可有效反映当前指标联系数的发展趋势；由于 $s_4(u)$的计算过程中无需主观设定修正系数 λ_1、λ_2、λ_3，故计算得到的结果更具客观性和逻辑性。

2　实例分析

为便于分析、比较，下面将阐述连续半偏减法集对势方法在济南市旱灾风险评估中的应用。综合考虑济南市的自然环境、经济水平、社会情况与旱灾风险的关系，参照文献[9，20]中济南市旱灾风险等级划分的指标值和子系统中各指标的权重见表 1。

参考文献[9，20]中济南市 1999—2005 年 14 个旱灾风险因子样本值，将各指标值的数值与表 1 中的数据一同代入式(1)－式(5)中，可得到济南市 1999—2005 年 14 个样本指标值的样本值联系数 u_{ijk}；随后由式(6)－式(7)对样本值联系数进行归一化处理，通过式(8)－式(10)计算得到样本联系数对应的风险等级；再由式(11)－式(14)计算出济南市这些样本值联系数，以及将该样本联系数分别用于五元半偏减法集对势和连续半偏减法集对势这两种风险评估方法下的计算，结果见表 2。

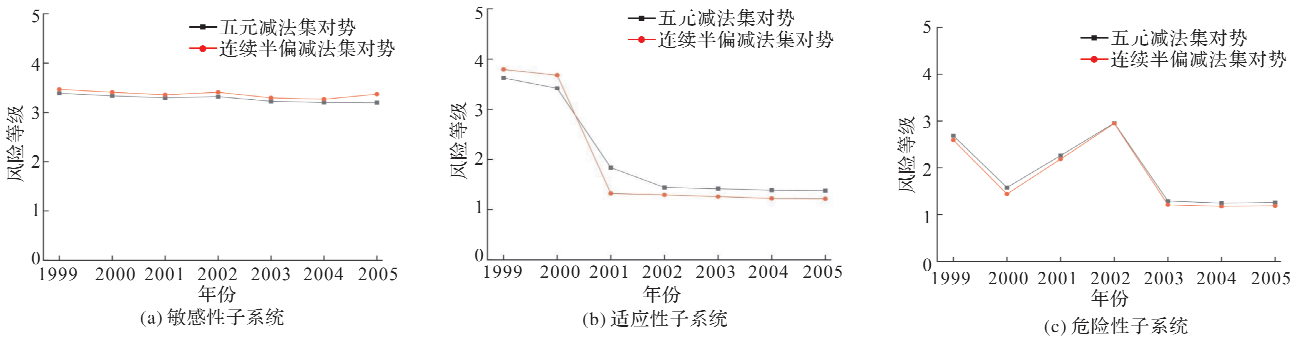
之后，再将文献[9，20]指标值代入式(1)－式(10)，得到济南市旱灾风险各子系统的风险等级评价值，将该评价结果与文献[9]中各子系统评价等级结果对比(图 1)。

表 1　济南市旱灾风险子系统、指标权重、指标和相应的等级划分区间[9，20]

子系统	指标	权重	风险等级				
			1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
敏感性	X_1人均水资源量/(m^3/人)	0.4	500～420	420～340	340～260	260～180	180～100
	X_2地下水水位/m	0.1	30～28	28～26	26～24	24～22	22～20
	X_3森林覆盖率/%	0.1	60～50	50～40	40～30	30～20	20～10
	X_4第三产业产值比率/%	0.2	80～65	65～50	50～35	35～20	20～10
	X_5城市日用水量/(10^4m^3)	0.2	10～30	30～40	40～60	60～80	80～100
适应性	X_6水库调蓄能力/(10^4m^3)	0.6	20 000～17 000	17 000～14 000	14 000～11 000	11 000～8 000	8 000～5 000
	X_7城市水资源协调能力	0.1	10～7.5	7.5～6	6～4.5	4.5～3	3～0
	X_8万元 GDP 用水量/m^3	0.1	10～80	80～180	180～280	280～350	350～400
	X_9污水达标排放率/%	0.15	100～75	75～60	60～45	45～30	30～0
	X_{10}工业用水循环利用率/%	0.05	100～80	80～60	60～40	40～20	20～0
危险性	X_{11}降雨量/mm	0.4	1 200～1 000	1 000～500	500～400	400～300	300～200
	X_{12}致灾强度	0.2	0～1.5	1.5～2.5	2.5～3.0	3.0～4.5	4.5～10.0
	X_{13}出现频率/%	0.2	50～30	30～20	20～10	10～3	3～1
	X_{14}重现期/年	0.2	2～3	3～5	5～10	10～30	30～100

表 2　济南市 1999－2005 年旱灾风险评估样本联系数、五元半偏联系数和连续半偏联系数

年份	样本联系数					五元半偏减法集对势[7]	s_2态势	连续半偏减法集对势	s_4态势	综合评价等级
	a	b_1	b_2	b_3	c					
1999	0.083	0.219	0.298	0.261	0.139	－0.111	均势	－0.092	均势	3.154
2000	0.316	0.156	0.208	0.203	0.117	0.271	偏同势	0.252	偏同势	2.649
2001	0.214	0.280	0.273	0.170	0.064	0.285	偏同势	0.239	偏同势	2.591
2002	0.189	0.221	0.278	0.224	0.087	0.162	均势	0.155	均势	2.799
2003	0.486	0.177	0.161	0.111	0.064	0.594	偏同势	0.545	偏同势	2.089
2004	0.505	0.168	0.156	0.106	0.064	0.609	同势	0.561	偏同势	2.057
2005	0.501	0.175	0.153	0.106	0.065	0.607	同势	0.559	偏同势	2.058



(a) 敏感性子系统　(b) 适应性子系统　(c) 危险性子系统

图 1　济南市旱灾风险子系统等级连续半偏减法集对势与五元减法集对势方法评估值的比较

分析表 2 和图 1 得到以下认识：

(1)应用本文方法计算所得结果与参考文献[9]的结果相一致，且两者的旱灾风险子系统中敏感性子系统、适应性子系统和危险性子系统的变化趋势一致，说明本文方法所得结果合理，符合实际。此外，表 2 中方法计算得到的结果都显示态势从均势向偏同势和同势的方向好转，故得出 1999—2005 年济南市旱灾风险等级总体是有减小和向好发展的趋势。其中，连续半偏减法集对势的计算结果比五元减法集对势的计算结果更平缓一些，主要原因是五元减法集对势在计算各联系数分量时没有使用放缓的分段函数，会使联系数分量产生较多如“0”这样较为极端的数值，而在连续半偏减法集对势的计算过程中避免了这一现象，故连续半偏减法集对势所得结果更为合理。

(2)表 2 分别用五元半偏减法集对势和连续半偏减法集对势来计算 1999—2005 年旱灾风险集对势。其中，2004 年和 2005 年用连续半偏减法集对势计算的结果是偏同势，而五元半偏减法集对势计算的结果是同势，数值差值只有 0.048，所以两种方法计算得到的结果基本相同。但是五元半偏减法集对势计算过程中没有到考虑 b_1、b_2、b_3向同一度 a 或对立度 c 转化的趋势程度是不同的，而连续半偏减法集对势在计算过程中进一步细化并区分了 b_2向 b_1和 b_3的分配比例、b_1向 a 转化的比例、以及 b_3向 c 转化的比例。此外，连续半偏减法集对势的计算过程中避免了根据主观经验设定的修正系数，故该计算结果更为客观、更为合理。

(3)图 1 中济南市 1999—2005 年旱灾风险评估系统中三个子系统风险等级变化最大的是适应性子系统，从 3.6 级到 1.4 级。1999 年适应性子系统达到最大 3.6 级，是由于 1999 年济南市的基础建设不完善。随着之后水利工程不断的发展和越来越高效的管理，济南市的适应能力逐渐增强，以致后面的 7 年旱灾风险评估中适应性子系统风险等级逐年降低。危险性子系统波动较大，但没有明显的变化趋势，有可能是受到降雨量等随机性指标的影响，历年降雨量不确定性较大且不易调控，经查询山东省统计年鉴可知，2002 年济南市降雨量较少，是 2002 年危险性子系统达到 7 年内最大风险等级 3 级的主要原因。敏感性子系统波动较小，在 3.2～3.4 级之间变化，可能是因为济南市这 7 年中某些相关因素和生态环境变化处于较小的范围，尽管敏感性风险等级有略微下降的趋势，但总体等级还是处于较高水平。除此之外，旱灾风险的综合评价等级有逐年减小的趋势，从 1999 年的 3.2 级降低到 2005 年的 2.1 级，这与旱灾风险三个子系统的变化状态相一致。其中 1999 年与 2000 年旱灾风险综合评价等级在 2.5 级以上，主要是适应性子系统的风险等级较高，达到 3.5 级左右；2002 年旱灾风险综合评价等级有上升变化，主要是 2002 年危险性子系统的风险等级较高，达到 3 级，这说明旱灾风险等级是各子系统综合影响的结果，故全面考虑各子系统的关系并综合优化管理可以更好的降低旱灾风险。

基于对以上旱灾风险系统的结果，识别脆弱性指标需进一步分析旱灾风险子系统中各项指标联系数值的变化。将数据代入式(1)－式(9)中得到各指标项的联系数，再代入式(15)中，计算整理得到济南市 1999—2005 年各子系统中指标项的态势和发展变化(图 2)。

通过对图 2 数据分析可得：

(1)对于敏感性子系统由图 2a 可知：1999—2005 年这 7 年中联系数大于 0 的指标从 x_2地下水水位和 x_4第三产业产值比率这两个增加到 x_2地下水水位，x_3森林覆盖率，x_4第三产业产值比率三个，且这三个指标联系数都在不断增加。其中，x_3森林覆盖率从偏反势转变为偏同势，说明这 7 年中济南市森林植被恢复较好，生态环境不断好转，是敏感性子系统的集对势呈略微上升的重要原因。x_5城市日用水量指标长期处于偏反势的状态，且有不断下降的趋势，说明随着济南市社会经济的迅速发展，人们的日常生活质量的逐渐提高，济南市日用水量不断增。x_1人均水资源量基本没有变动，且长期处于偏反势状态，这说明济南市长期处于人口压力较大的状态。

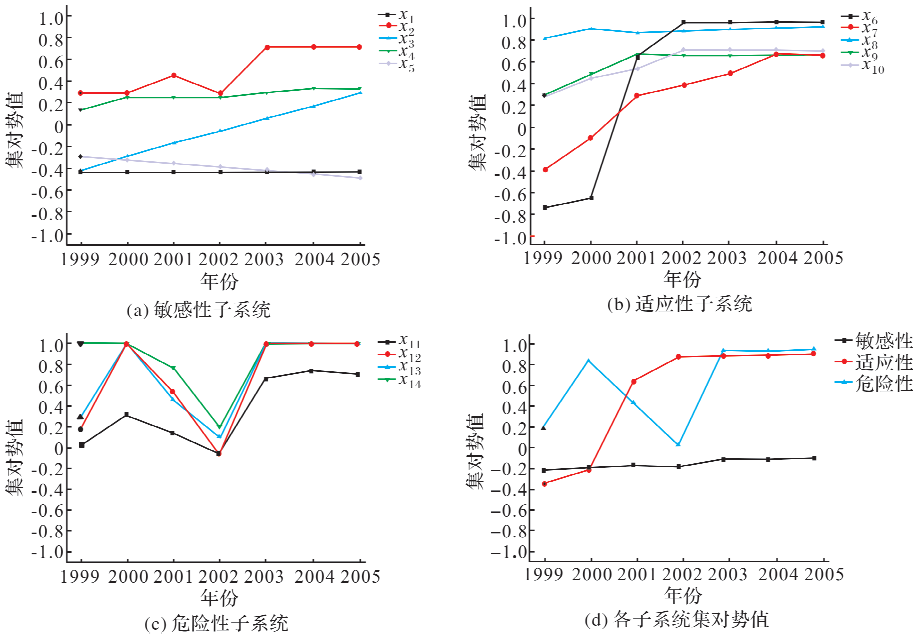


图 2 济南市旱灾风险子系统各评价指标历年的连续半偏减法集对势值

(2)对于适应性子系统由图 2b 可知：x_7城市水资源协调能力、x_6水库调蓄能力指标改善幅度大，其中，x_6水库调蓄能力指标在 2001 年数值变化幅度达到 1 以上，这与济南市水利工程设施的建设和完善有着密不可分的联系，同时也说明 x_7城市水资源协调能力、x_6水库调蓄能力指标两个指标的增加，是济南市旱灾风险适应性增强的主要因子。

(3)对于危险性子系统由图 2c 可知：在 2002 年，x_{11}降雨量、x_{12}致灾强度、x_{13}出现频率、x_{14}重现期四个指标值同时降低，这是 2002 年济南市危险性增加的主要原因。济南市危险性子系统旱灾风险波动较大，但总体在均势及以上的状态，这与济南市的自然地理有关，使得危险性子系统中的指标变化幅度大。

(4)对于各子系统的变化趋势由图 2d 可知：济南市 1999—2005 年期间，敏感性子系统几乎无变化；危险性子系统变化幅度较大、无固定变化趋向；适应性子系统改善趋势显著，从偏反势逐渐转向同势。

3　结论

(1)在五元半偏减法集对势的基础上提出连续半偏减法集对势，结合半偏联系数具有联系分量转换作用的思想，将五元联系数中不确定性分量 b_1、b_2、b_3通过两次连续的半偏联系数的转换作用，把这些不确定性分量分配到确定性分量同一度 a 和对立度 c 上。通过误差计算，两种方法所得结果非常接近，并且将计算结果与文献[9]内计算结果相比较，旱灾风险评估等级接近，且各子系统具有相同的变化趋势。此外，连续半偏减法集对势中无需主观确定修正系数 λ_1、λ_3，b_1、b_2、b_3向同一度 a 和对立度 c 分配是通过半偏联系数逐步转换得到的，计算结果更为客观，对不确定性分量的分配更为合理。

(2)连续半偏减法集对势在济南市 1999—2005 年旱灾风险评估中的应用结果可得出：基于联系数的结果，济南市多年旱灾风险等级在 2 级与 3 级左右，1999 年风险等级最大，达到 3.15 级，是风险较大的年份；2005 年风险等级最小，为 2.06 级，且这 7 年中旱灾风险等级不断减小。通过对旱灾风险系统各子系统评价指标联系数的计算，结合各联系数趋势图的变化，识别出导致 1999 年济南市旱灾风险等级较高的主要因子有：x_1人均水资源量、x_3森林覆盖率、x_5城市日用水量、x_6水库调蓄能力、x_7城市水资源协调能力；导致 2002 年济南市旱灾风险等级有上升趋势的原因是 2002 年旱灾风险系统中危险性子系统联系数减法集对势降低较多，且 x_1人均水资源量和 x_5城市日用水量仍处于偏反势状态，故在此年风险等级有所上升。

(3)通过济南市旱灾风险等级中敏感性子系统、适用性子系统和危险性子系统的发展趋势分析可得出，在旱灾风险评估中，危险性子系统一直在均势到同势之间变化，说明济南市干旱致灾因子危险性较脆弱；敏感性子系统变化微弱，一直处于均势状态，说明济南市该子系统变换稳定；适应性子系统从偏反势转为同势，且在 2001 年跳跃性的转向同势状态，说明济南市对旱灾的应对能力大幅度提高，从而降低了旱灾风险等级。

参考文献：

[1] 金菊良，马强，崔毅，等. 基于三元链式传递结构的区域旱灾实际风险综合防范机制分析[J]. 灾害学，2022，37(1)：6－12.

[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] 刘晓冉，康俊，王颖，等. 基于 GIS 的重庆地区不同季节干旱灾害风险评估与区划[J]. 自然灾害学报，2019，28(2)：92－100.

[4] KEYANTASH J A，DRACUP J A. An aggregate drought index：assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage[J]. Water Resources Research，2004，40(9)：1－13.

[5] SHARAFI L，ZARAFSHANI K，KESHAVARZ M，et al. Drought risk assessment：towards drought early warning system and sustainable environment in western Iran[J]. Ecological Indicators，2020，114：106276.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 董涛，王振龙，金菊良，等. 基于风险矩阵和五元减法集对势的区域旱灾风险链式传递诊断评估方法[J]. 灾害学，2020，35(4)：222－227.

[10] 叶莉莉. 面板数据下灰色关联聚类模型及其应用研究[D]. 郑州：华北水利水电大学，2019.

[11] 杜雪芳，李彦彬，张修宇. 黄河下游生态型引黄灌区水资源承载力研究[J]. 水利水运工程学报，2020(2)：22－29.

[12] 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.

[13] 金菊良，李征，陈梦璐，等. 基于五元减法集对势的山东省旱情动态评价[J]. 人民黄河，2021，43(3)：63－68，83.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 金菊良，陈鹏飞，陈梦璐，等. 水文水资源学家陈守煜先生学术研究的知识图谱分析[J]. 水利学报，2019，50(10)：1282－1290.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 桑国庆. 区域干旱风险管理研究[D]. 济南：山东大学，2006.

Drought Risk Assessment Method Based on A Continuous Semi – partial Subtraction Set Pair Potential

WANG Jie[1,2], JIN Juliang[1,2], ZHOU Rongxing[1,2], CUI Yi[1,2], ZHOU Ting[3], ZHOU Liangguang[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*; 3. *Department of Water Resources Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei* 230036, *China*)

Abstract: In order to explore the information of the relationship between certainty and uncertainty between rating criteria and evaluation levels in the assessment of drought risk in a more detailed and accurate way, we proposed the continuous semipartial set pair potential based on the five-element semipartial set pair potential, and constructed the continuous semipartial set pair potential model for regional drought risk evaluation, and applied it in the diagnosis of vulnerability factors and evaluation of drought risk levels in Jinan City from 1999 to 2005. The results show that The results show that the drought risk level evaluation of Jinan City is basically between level 2 and level 3, which is in a light to medium risk status, among which the highest drought risk level is level 3 in 1999; through the calculation of subsystem linkage, it can be identified that the adaptive subsystem has been greatly improved, the sensitive subsystem is stable and less changeable, and the hazard subsystem is in a good posture between the mean potential and the same potential.

Keywords: drought risk assessment; set pair analysis; connection number; continuous semipartial set pair potential; Jinan City

《灾害学》被《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告(2022)》收录

近日，由中国科学技术信息研究所等机构联合研制的期刊评价报告《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告(2022)》(简称：WJCI 报告)发布。《灾害学》从第一届起连续 3 年被《WJCI 报告》收录。

《WJCI 报告》由中国科学技术信息研究所、《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、清华大学图书馆、万方数据有限公司、中国高校科技期刊研究会、中国科学技术期刊编辑学会联合研制，是一份对全球科技期刊的评价报告。



该报告依据世界各国 R&D 投入、科研论文产出、科研人员数量、期刊规模和水平确定各国入编来源期刊。经过严格遴选，从全球正在出版的 6 万余种科技学术期刊中精选了最具地区代表性、学科代表性、行业代表性的优秀期刊 15022 种为《世界引文库》来源刊，其中多语种及非英文期刊共 3079 种，中国期刊 1634 种，按三级学科分为 291 个学科领域。《WJCI 报告》旨在建立一个全新的期刊评价体系，是一份体现世界期刊同台竞技结果的期刊评价报告，入选期刊均被认为是具有地区代表性和学科代表性的优秀期刊。

《灾害学》目前已被北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览(2020 版)》《中国科学引文数据库(CSCD)核心库(2021－2022)》《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告(2022)》等核心期刊收录。

《灾害学》编辑部