

赵齐雅, 金菊良, 崔毅, 等. 区域旱灾风险评估与诊断的动态差异度系数模糊数随机模拟方法[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 195–201. [ZHAO Qiya, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Stochastic Simulation Method of Fuzzy Number of Dynamic Difference Coefficient for Regional Drought Risk Assessment and Diagnosis [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 195–201. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2024.01.030.]

# 区域旱灾风险评估与诊断的动态差异度系数模糊数随机模拟方法\*

赵齐雅<sup>1</sup>, 金菊良<sup>1,2</sup>, 崔毅<sup>1,2</sup>, 汪洁<sup>1</sup>, 张诗琪<sup>1</sup>, 周乐<sup>1</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:** 为更准确、稳健地进行旱灾风险动态评估、关键障碍因子的定量识别, 构建了差异度系数随评价指标样本值动态变化的三角模糊数与随机模拟耦合方法, 并用于宿州市 2007—2017 年旱灾风险评估与诊断研究中, 得到宿州市置信概率为 95% 的旱灾风险评价价值区间, 结果表明: 旱灾风险评价结果呈“先增加, 后减小, 最后趋于稳定”的变化趋势, 旱灾风险综合评价结果为“轻险”; 危险性、暴露性、抗旱能力三个子系统是影响研究区域旱灾风险综合评价结果趋势变化的主因; 耕地率、水库调蓄率、农业人口比例评价指标被诊断为中阻碍型因子, 是需要重点调控的对象; 置信概率区间增加了风险评价结果的可靠性信息, 可反映受多种不确定影响因素综合作用下的实际旱灾风险情况, 充分体现了联系数所表征的“不确定性”这一信息。

**关键词:** 区域; 旱灾风险; 评估与诊断; 动态差异度系数; 三角模糊数; 随机模拟; 安徽宿州

**中图分类号:** X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2024)01-0195-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2024.01.030

干旱灾害是一种频繁出现、遍布广泛、影响深远的重大自然灾害, 它是干旱发展到一定程度后导致自然水源供水匮乏, 并对作物和植被正常生长、人类正常生活和生产、生态环境正常功能造成不利影响、产生危害的事件, 是多种自然因素与社会因素综合作用的结果<sup>[1]</sup>。在全球约有 120 个国家和地区遭遇过较严重的旱灾影响<sup>[2]</sup>。近年来, 我国平均每隔 2~3 年会遇到一次较大干旱<sup>[3]</sup>。旱灾所导致的后果不仅影响农业、畜牧业等产业, 严重的旱灾还可能危及人类生产、生活, 造成无法估量的后果。可见, 定量评价区域旱灾风险等级、定性定量诊断旱灾关键障碍因子的旱灾风险评估与诊断研究是一项非常重要的、关乎民生的重点工作, 得到了较广泛关注和研究。例如, 金菊良等<sup>[4]</sup>提出用半偏减法集势方法, 动态评估了宿州市旱灾风险等级并诊断出脆弱性因子; 周戎星等<sup>[5]</sup>提出把三元减法集对势视作一个服从正态分布的随机变量, 随机模拟所得的评价结果用置信概率区间表示, 增加了评价结果可靠性方面的信息; 董涛等<sup>[6]</sup>提出风险矩阵与五元减法集对势耦合的链式传递模型, 对济南市旱灾风险进行评估与诊断; 李杨等<sup>[7]</sup>提出 GIS 方法与数理统计耦合模型, 运用于洞庭湖流域旱灾风险综合评价中。为准确且合理地进行旱灾风险动态评估、定量识

别关键障碍因子, 本文应用三角模糊数随机模拟方法<sup>[8]</sup>, 构建差异度系数随评价指标样本值动态变化的三角模糊数与随机模拟耦合方法, 其计算结果用 95% 置信概率下的实数区间表示, 可反映旱灾风险评估系统的随机性和模糊性对评价结果的综合影响。将该方法运用于宿州市 2007—2017 年旱灾风险评估与诊断研究中, 以验证耦合方法的旱灾风险评价结果的合理性, 并用于诊断旱灾风险关键障碍因子。

## 1 动态差异度系数模糊数随机模拟方法的建立

建立该模拟方法包括如下 8 个步骤。

步骤 1: 结合对研究区域的实践调研、咨询专家、年鉴参考等<sup>[9]</sup>, 确定评价指标体系为  $\{x_j | j = 1, 2, \dots, n\}$ , 评价指标样本值为  $\{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ , 评价等级阈值为  $\{S_{gij} | g = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。运用 AGA-FAHP<sup>[10]</sup> 确定指标权重  $\{w_j | j = 1, 2, \dots, n\}$ 。其中,  $x_{ij}$  为评价样本  $i$  评价指标  $j$  的样本值,  $m$  为评价样本数,  $n$  为评价指标数,  $g = 1, 2, 3$  依次表示研究区域的旱灾风险等级处于 1、2、3 级。

\* 收稿日期: 2023-05-22 修改日期: 2023-07-18

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, 2208085QE179); 安徽省高等科研计划重点项目 (2022AH051105)

第一作者简介: 赵齐雅(2000-), 女, 汉族, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: 1175637468@qq.com

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

步骤2: 联系数是刻画一个集对中两个集合确定性与不确定性关系及其相互作用的数学方法<sup>[11]</sup>, 常用的三元联系数  $u$  表达式为:

$$u = a + bI + cJ. \quad (1)$$

式中:  $a + b + c = 1$ ;  $I$  是差异度系数, 取值为  $[-1, 1]$ ;

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

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

$$u_{3ij} = \begin{cases} -1, & (\text{正向指标 } S_{0j} \leq x_{ij} \leq S_{1j}, \text{ 或反向指标 } S_{0j} \geq x_{ij} \geq S_{1j}); \\ 1 - 2(S_{2j} - x_{ij}) / (S_{2j} - S_{1j}), & (\text{正向指标 } S_{1j} < x_{ij} \leq S_{2j}, \text{ 或反向指标 } S_{1j} > x_{ij} \geq S_{2j}); \\ 1, & (\text{正向指标 } S_{2j} < x_{ij} \leq S_{3j}, \text{ 或反向指标 } S_{2j} > x_{ij} \geq S_{3j}). \end{cases} \quad (4)$$

式(2)~式(4)中, 正向(反向)指标为评价指标样本值越大则等级越高(越低)的评价指标。旱灾风险等级随评价等级  $g = 1, 2, 3$  的升高而升高,  $S_{0j}, S_{1j}, S_{2j}, S_{3j}$  分别为评价指标的等级阈值。分段函数  $u_{gij}$  的取值原则为<sup>[9]</sup>: 评价指标样本值  $x_{ij}$  若落在评价等级  $g$  的相同区间, 则  $u_{gij}$  取值 1; 若落在评价等级  $g$  的相邻区间, 则  $u_{gij}$  取  $[-1, 1]$  内的值; 若落在评价等级  $g$  的相隔区间, 则  $u_{gij}$  取值 -1。

经式(2)~式(4)得出三元联系数初始分量  $u_{gij}$  后, 计算评价指标样本值  $x_{ij}$  与标准等级  $g$  两集合的相对隶属度<sup>[14-15]</sup>:

$$v_{gij}^* = 0.5 + 0.5u_{gij}, (g = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

将式(5)归一化, 得对应的指标值联系数各分量  $V_{gij}$ :

$$V_{gij} = V_{gij}^* / \sum_{g=1}^3 V_{gij}^* \quad (6)$$

将式(2)~式(6)所得结果代入式(1), 得到指标值联系数  $U_{ij}$ :

$$U_{ij} = V_{1ij} + V_{2ij}I_{ij} + V_{3ij}J_{ij} \quad (7)$$

式中:  $I_{ij}$  为差异度系数,  $V_{gij}$  为联系数分量,  $J$  取值

$$I = \begin{cases} a_1 + \sqrt{u(a_2 - a_1)(a_3 - a_1)}, & u \leq (a_2 - a_1) / (a_3 - a_1); \\ a_3 - \sqrt{[(1 - u)(a_3 - a_2)(a_3 - a_1)]}, & u > (a_2 - a_1) / (a_3 - a_1). \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $u$  为  $[0, 1]$  上的均匀分布随机数。

步骤5: 截取显著性水平为  $\alpha$  的置信概率区间<sup>[18]</sup>。由式(9)计算得评价样本的  $N$  个随机模拟变量  $I$  值, 把对应的  $N$  个随机模拟变量  $I$  值代入式(8), 得到  $N$  个样本联系数值后, 再降序排列, 根据随机变量的经验累积频率的数学期望公式(10)<sup>[18-19]</sup>和公式(11)计算出在显著性水平  $\alpha$  下样本联系数的置信区间:

$$P_l = l / (N + 1); \quad (10)$$

$$[u_{\text{INT}[(1 - 0.5\alpha)(N + 1)]}, u_{\text{INT}[0.5\alpha(N + 1)]}] \quad (11)$$

式中:  $P_l$  为  $N$  组联系数值降序排列、排序第  $l$  位的经验累积频率<sup>[19]</sup>;  $u_{\text{INT}}$  为取整某序号所对应的联系数值。

步骤6: 为与本文旱灾风险评价等级结果进行比较, 同时采用级别特征值法<sup>[20]</sup>计算评价等级:

$$h(i) = \sum_{g=1}^3 V_{ig} = \sum_{j=1}^n W_j V_{1ij} + 2 \sum_{j=1}^n W_j V_{2ij} + 3 \sum_{j=1}^n W_j V_{3ij}. \quad (12)$$

步骤7: 计算评价等级区间。以级别特征值法取值原则为依据, 利用线性内插法把联系数值  $U_i$  转换为评价等级  $y_i$ <sup>[21]</sup>:

$J$  是对立度系数, 取值 -1。根据评价指标样本值与评价等级标准值两个集合接近程度这一可变模糊集<sup>[12-13]</sup>, 可以计算出区域旱灾风险评价指标样本值  $x_{ij}$  与评价等级标准值  $S_{gj}$  两个集合所构的“可变模糊集”的三元联系数的初始分量  $u_{gij}$  为<sup>[9]</sup>:

$$-1. \text{ 于是, 可得评价样本值联系数 } U_i: \quad (2)$$

$$U_i = \sum_{j=1}^n W_j V_{1ij} + \sum_{j=1}^n W_j V_{2ij} I_{ij} + \sum_{j=1}^n W_j V_{3ij} J_{ij} \quad (8)$$

式中:  $W_j$  为评价指标权重, 由 AGA - FAHP<sup>[10]</sup> 计算权重方法确定。

步骤3: 构造动态差异度系数模糊数。将三元联系数中差异度系数  $I (I \in [-1, 1])$  按照标准等级  $g$  三等分: 若评价指标样本值处于 1 级值域内, 则  $I_1$  取值范围为  $[1/3, 1]$ ; 若评价指标样本值处于 2 级值域内, 则  $I_2$  取值范围为  $[-1/3, 1/3]$ ; 若评价指标样本值处于 3 级值域内, 则  $I_3$  取值范围为  $[-1, -1/3]$ <sup>[9]</sup>。文献[9]把差异度系数与评价指标样本值的动态变化视为线性变化, 而本文将  $I_1, I_2, I_3$  分别取为  $I_1 = (1/3, 2/3, 1), I_2 = (-1/3, 0, 1/3), I_3 = (-1, -2/3, -1/3)$  三角模糊数形式。

步骤4: 对差异度系数模糊数进行随机模拟<sup>[16]</sup>。若差异度系数模糊数为  $I = (a_1, a_2, a_3)$ ,  $a_1 \leq a_2 \leq a_3$ , 使用式(9)随机模拟三角模糊数公式<sup>[17]</sup>, 随机模拟  $N$  次后, 得到一组差异度系数的可能值  $I$ :

$$y_i = \begin{cases} -2U_i + 1, & U_i \in [-1, -0.75]; \\ -2U_i/3 + 2, & U_i \in (-0.75, 0.75); \\ -2U_i + 3, & U_i \in [0.75, 1]. \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $U_i$  为联系数值;  $y_i$  为评价等级。当  $y_i \in [1, 1.5)$  时, 旱灾风险处于“微险”; 当  $y_i \in [1.5, 2.5)$  时, 旱灾风险处于“轻险”; 当  $y_i \in [2.5, 3]$  时, 旱灾风险处于“重险”<sup>[5]</sup>。

步骤8: 利用单指标联系数区间期望值  $u$  诊断区域旱灾风险关键障碍因子。将联系数  $u \in [-1, 1]$  按照均分原则, 把评价指标分为强阻碍型  $u \in [-1, -0.6]$ 、中阻碍型  $u \in (-0.6, -0.2)$ 、弱阻碍型  $u \in [-0.2, 0.2]$ 、弱提升型  $u \in (0.2, 0.6]$ 、强提升型  $u \in (0.6, 1]$  这 5 个类型<sup>[9]</sup>。其中, 强阻碍型和中阻碍型指标是严重影响区域旱灾风险等级的关键障碍因子, 是区域旱灾风险诊断的重点研究对象。

## 2 实例分析

将本文模型应用于安徽省宿州市 2007—2017 年旱灾风险评估与诊断中, 使用文献[4]中宿州市旱灾风险评价指标层、评价标准及权重等数据(表 1)。

表1 宿州市旱灾风险评估指标体系及等级标准<sup>[4]</sup>

子系统	指标层	评价标准			指标权重	子系统权重
		1 级	2 级	3 级		
危险性子系统	$x_{1,1}$ 降雨负距平百分比/%	$\leq 15$	15 ~ 20	> 25	0.069 2	0.329 0
	$x_{1,2}$ 年均降雨量/mm	$\geq 950$	950 ~ 850	< 850	0.057 4	
	$x_{1,3}$ 相对湿度指数/%	$\geq -0.11$	-0.11 ~ -0.24	< -0.24	0.049 3	
	$x_{1,4}$ 单位面积水资源量占有量/(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	$\geq 52.5$	52.5 ~ 37.5	< 37.5	0.057 0	
	$x_{1,5}$ 土壤相对湿度/%	$\geq 73$	73 ~ 70	< 70	0.044 1	
	$x_{1,6}$ 土壤类型	$\geq 0.6$	0.6 ~ 0.4	< 0.4	0.052 4	
暴露性子系统	$x_{2,1}$ 人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	$\leq 500$	500 ~ 700	> 700	0.046 8	0.192 0
	$x_{2,2}$ 耕地率/%	$\leq 35$	35 ~ 45	> 45	0.055 5	
	$x_{2,3}$ 复种指数/%	$\leq 185$	185 ~ 195	> 195	0.042 6	
	$x_{2,4}$ 农业 GDP 占地区生产总值比例/%	$\leq 25$	25 ~ 35	> 35	0.046 0	
灾损敏感性子系统	$x_{3,1}$ 农业人口比例/%	$\leq 62$	62 ~ 77	> 77	0.059 8	0.241 0
	$x_{3,2}$ 水田面积比/%	$\leq 22$	22 ~ 47	> 47	0.067 8	
	$x_{3,3}$ 万元 GDP 用水量/(m <sup>3</sup> /万元)	$\leq 575$	575 ~ 725	> 725	0.061 7	
	$x_{3,4}$ 森林覆盖率/%	$\geq 17$	17 ~ 12	< 12	0.051 4	
抗旱能力子系统	$x_{4,1}$ 人均 GDP/(元/人)	$\geq 4\ 500$	4 500 ~ 3 500	< 3 500	0.030 3	0.238 0
	$x_{4,2}$ 水库调蓄率/%	$\geq 25$	25 ~ 15	< 15	0.053 2	
	$x_{4,3}$ 单位面积现状供水能力/(亿 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	$\geq 20$	20 ~ 14.5	< 14.5	0.037 8	
	$x_{4,4}$ 灌溉指数	$\geq 0.85$	0.85 ~ 0.75	< 0.75	0.045 6	
	$x_{4,5}$ 单位面积应急浇水能力/(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	$\geq 7\ 500$	7 500 ~ 4 500	< 4 500	0.027 7	
	$x_{4,6}$ 监测预警能力/(个/100km <sup>2</sup> )	$\geq 0.6$	0.6 ~ 0.4	< 0.4	0.018 8	
	$x_{4,7}$ 节水灌溉率/%	$\geq 35$	35 ~ 25	< 25	0.025 1	

表2 宿州市 2007—2017 年旱灾风险评估样本联系数值、评价等级、减法集对势值<sup>[22]</sup>及半偏减法集对势值<sup>[23]</sup>

年份	本文方法 联系数值	动态差异度 系数方法 联系数值 <sup>[9]</sup>	正态分布 随机模拟方法 联系数值 <sup>[5]</sup>	减法集 对势值	半偏减法集 对势值	本文方法 评价等级	级别 特征值
2007	[-0.214, -0.025]	-0.092	(-0.170, 0.001)	-0.085	-0.080	[2.017, 2.143]	2.061
2008	[-0.313, -0.113]	-0.201	(-0.293, -0.101)	-0.196	-0.186	[2.075, 2.209]	2.140
2009	[-0.384, -0.177]	-0.249	(-0.342, -0.135)	-0.238	-0.226	[2.118, 2.256]	2.169
2010	[-0.420, -0.242]	-0.300	(-0.419, -0.226)	-0.322	-0.307	[2.161, 2.280]	2.231
2011	[-0.364, -0.161]	-0.233	(-0.320, -0.118)	-0.221	-0.209	[2.108, 2.243]	2.157
2012	[-0.356, -0.152]	-0.215	(-0.303, -0.100)	-0.201	-0.190	[2.101, 2.237]	2.143
2013	[-0.332, -0.113]	-0.208	(-0.226, -0.026)	-0.199	-0.190	[2.075, 2.221]	2.141
2014	[-0.284, -0.072]	-0.160	(-0.270, -0.054)	-0.162	-0.154	[2.048, 2.190]	2.114
2015	[-0.275, -0.064]	-0.159	(-0.265, -0.049)	-0.155	-0.148	[2.043, 2.184]	2.109
2016	[-0.146, 0.062]	-0.037	(-0.136, -0.078)	-0.029	-0.027	[1.959, 2.097]	2.019
2017	[-0.145, 0.064]	-0.036	(-0.138, 0.077)	-0.031	-0.029	[1.957, 2.097]	2.021

根据《安徽省统计年鉴》等资料查取宿州市 2007—2017 年各评价指标数据值,根据上文计算出显著性水平为  $\alpha = 0.05$  下的联系数区间、评价等级区间,将本文方法与动态差异度系数方法<sup>[9]</sup>、正态分布随机模拟方法<sup>[5]</sup>对比分析,其结果如表 2 所示。

由表 2 得:①本文方法与正态分布随机模拟方法<sup>[5]</sup>所得的宿州市 2007—2017 年旱灾风险评估样本联系数都是以 95% 置信区间形式表示。本文方法的样本联系数区间范围在 0.2 左右,联系数区间期望值与减法集对势值的误差为 0.025,样本联系数区间均包含减法集对势值、半偏减法集对势值,

而正态分布随机模拟方法<sup>[5]</sup>样本联系数区间在 2016 年未包含减法集对势值、半偏减法集对势值。②对于相同研究区域,本文方法中 95% 置信区间均包含利用动态差异度系数方法<sup>[9]</sup>计算得的旱灾风险评价结果。

为更清晰地展示三种评价方法的优劣,进行结果讨论与分析。由图 1 得:①本文方法的置信区间的两条界线趋势平行,区间范围稳定在 0.2 左右,与减法集对势趋势变化一致。正态分布随机模拟方法<sup>[5]</sup>的置信区间的一条界线与减法集对势趋势变化相差较大,且评价结果范围波动较大、评价结果不够稳定。分析此现象的原因:差异度系数具有模糊

不确定性, 本文把差异度系数取为三角模糊数形式, 将三角模糊数转化为一组随机数后进行随机模拟, 计算得的样本联系数区间稳健、合理, 与减法集对势趋势变化一致; 正态分布随机模拟方法<sup>[5]</sup>假设减法集对势值满足中心极限定理的条件, 将减法集对势值视为服从正态分布的随机变量进行随机模拟, 但该假设不一定合理, 评价结果可能与实际情况不一致。以上对比充分说明在同时满足  $\alpha = 0.05$  的情况下, 本文方法的评价结果更具稳定性与精确性, 其结果可更准确地表示旱灾风险所处的级别状态。

②本文方法的置信区间均包含利用动态差异度系数方法<sup>[9]</sup>计算所得的联系数评价结果, 两种方法的评价结果趋势变化一致。分析此现象的原因: 两种方法的差异度系数均随评价指标样本值动态取值, 动态差异度系数法<sup>[9]</sup>把差异度系数与评价指标样本值视为线性关系, 将差异度系数在  $[-1, 1]$  内按标准等级数目均分为 3 个区间。本文将差异度系数均分

为 3 个区间, 与文献<sup>[9]</sup>有所不同是本文将差异度系数作为三角模糊数处理, 随机模拟后最终评价结果为 95% 置信区间, 充分体现了联系数所蕴含的“不确定性”这一信息。由图 2 得: 本文方法说明了宿州市旱灾风险等级有 95% 的可能性由 2007 年  $[2.017, 2.143]$  持续增加至 2010 年  $[2.161, 2.280]$ , 又减小至 2017 年的  $[1.957, 2.097]$ , 整体上呈现“先增加, 后减小, 最后趋于稳定”的趋势, 旱灾风险综合评价结果为“轻险”<sup>[5]</sup>。

为更加深入判断旱灾风险系统综合评价结果与各子系统的关系, 对各子系统评价结果进行分析说明。如图 3 所示, 灾损敏感性子系统趋势基本保持稳定状态, 说明灾损敏感性子系统不是影响宿州市旱灾风险综合评价结果趋势变化的主因, 危险性、暴露性、抗旱能力三个子系统是影响宿州市综合评价结果趋势变化的主因, 下面分别对这三个子系统作进一步分析。

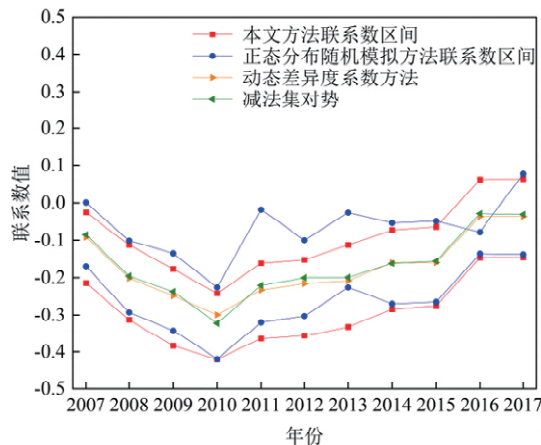


图1 联系数值对比

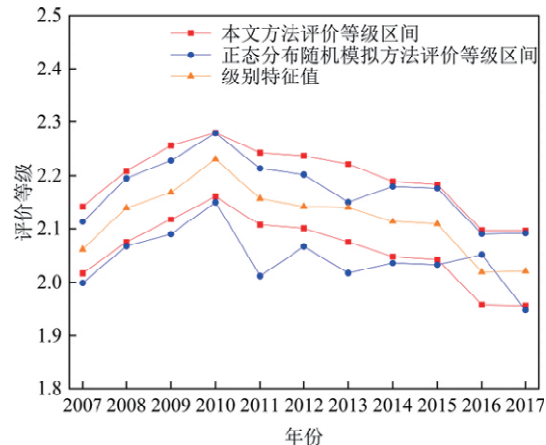


图2 评价等级对比

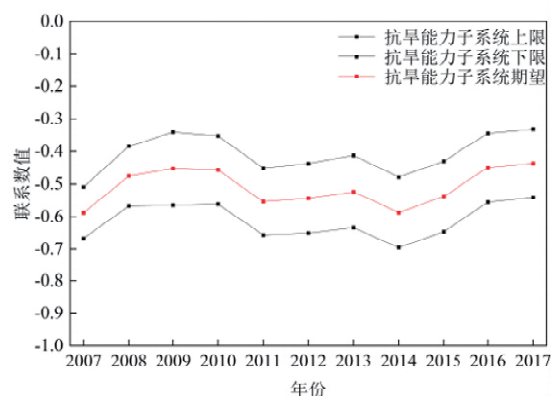
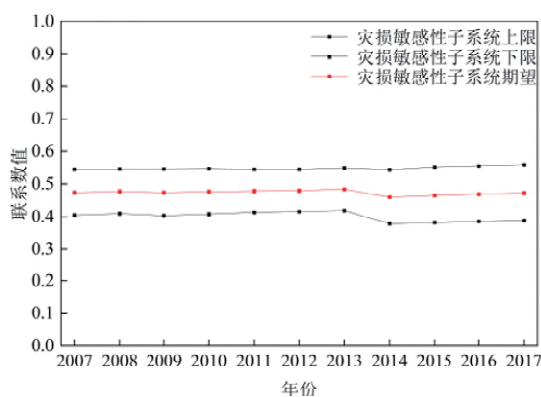
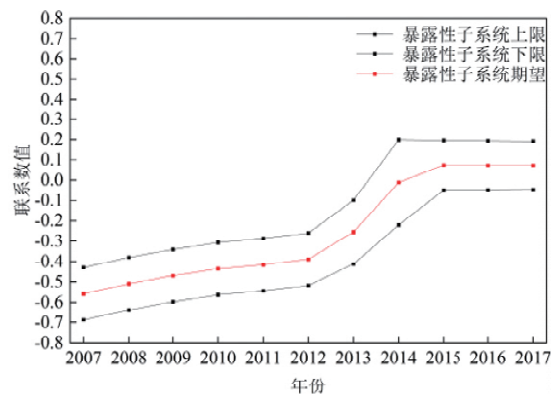
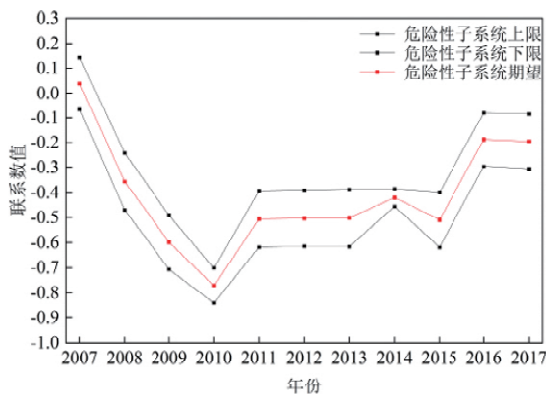


图3 各子系统联系数区间及期望

图4、图5、图6分别为危险性、暴露性、抗旱能力三个子系统中单指标评价结果, 可以看出:  $x_{1,1}$ 、 $x_{1,2}$ 、 $x_{1,3}$ 、 $x_{1,4}$ 是影响危险性子系统评价结果趋势变化的关键指标;  $x_{2,3}$ 、 $x_{2,4}$ 是影响暴露性子系统评价结果趋势变化的关键指标;  $x_{4,4}$ 、 $x_{4,6}$ 、 $x_{4,7}$ 是影响抗旱能力子系统评价结果趋势变化的关键指标。根据模型步骤八中障碍性因子、提升性因子<sup>[9]</sup>区间, 定量诊断宿州市旱灾风险的关键障碍因子: 耕地率  $x_{2,2}$ 、水库调蓄率  $x_{4,2}$ 、农业人口比例  $x_{3,1}$ 三个评价指标为中阻碍型因子, 水田面积比例  $x_{3,2}$ 、万元GDP用水量  $x_{3,3}$ 为弱提升型因子, 其余评价指标均为弱阻碍型因子(表3)。因此, 耕地率  $x_{2,2}$ 、水库调蓄率  $x_{4,2}$ 、农业人口比例  $x_{3,1}$ 三个中阻碍型因子为宿州市旱灾风险关键障碍因子, 需要研究区域重点调控。

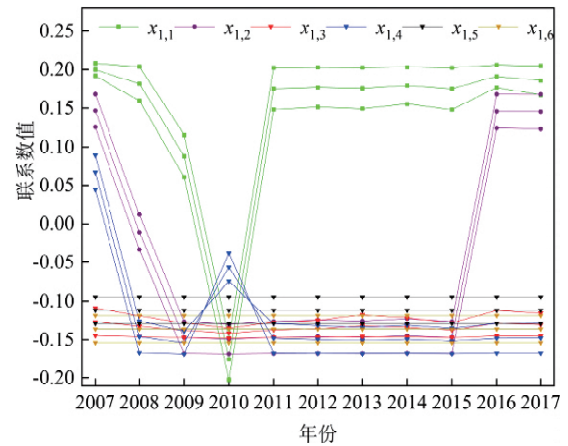


图4 危险性子系统中各指标系数区间及期望

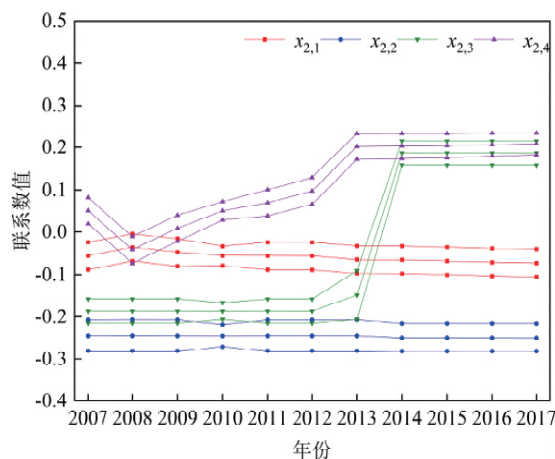


图6 抗旱能力子系统中各指标系数区间及期望

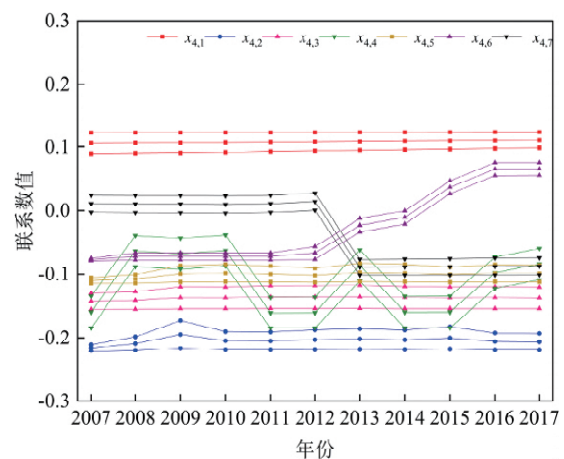


图5 暴露性子系统中各指标系数区间及期望

表3 宿州市2007—2017年旱灾风险单指标系数区间期望值

指标	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
$x_{1,1}$	0.200	0.182	0.088	-0.175	0.175	0.177	0.176	0.179	0.175	0.191	0.186
$x_{1,2}$	0.147	-0.011	-0.147	-0.149	-0.147	-0.146	-0.147	-0.145	-0.147	0.146	0.145
$x_{1,3}$	-0.127	-0.133	-0.138	-0.141	-0.137	-0.136	-0.132	-0.134	-0.137	-0.129	-0.130
$x_{1,4}$	0.067	-0.146	-0.154	-0.056	-0.148	-0.150	-0.151	-0.149	-0.152	-0.148	-0.148
$x_{1,5}$	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112
$x_{1,6}$	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136	-0.136
$x_{2,1}$	-0.023	-0.036	-0.048	-0.056	-0.056	-0.057	-0.065	-0.065	-0.068	-0.071	-0.072
$x_{2,2}$	-0.244	-0.244	-0.244	-0.244	-0.244	-0.244	-0.244	-0.249	-0.249	-0.249	-0.249
$x_{2,3}$	-0.186	-0.186	-0.186	-0.186	-0.186	-0.186	-0.148	0.187	0.186	0.186	0.186
$x_{2,4}$	-0.103	-0.042	0.009	0.051	0.070	0.098	0.202	0.203	0.204	0.206	0.208
$x_{3,1}$	-0.218	-0.218	-0.217	-0.217	-0.219	-0.219	-0.216	-0.217	-0.212	-0.210	-0.208
$x_{3,2}$	0.273	0.275	0.275	0.275	0.276	0.276	0.276	0.252	0.252	0.252	0.252
$x_{3,3}$	0.238	0.239	0.235	0.238	0.240	0.241	0.242	0.244	0.246	0.246	0.247
$x_{3,4}$	0.182	0.182	0.182	0.181	0.182	0.182	0.182	0.181	0.181	0.182	0.183
$x_{4,1}$	0.106	0.107	0.107	0.107	0.108	0.109	0.109	0.110	0.110	0.110	0.111
$x_{4,2}$	-0.216	-0.209	-0.195	-0.204	-0.205	-0.203	-0.202	-0.203	-0.200	-0.206	-0.206
$x_{4,3}$	-0.143	-0.141	-0.137	-0.137	-0.136	-0.136	-0.136	-0.137	-0.137	-0.137	-0.137
$x_{4,4}$	-0.159	-0.063	-0.067	-0.062	-0.161	-0.160	-0.086	-0.160	-0.159	-0.098	-0.084
$x_{4,5}$	-0.110	-0.107	-0.100	-0.098	-0.100	-0.102	-0.097	-0.098	-0.100	-0.099	-0.099
$x_{4,6}$	-0.077	-0.072	-0.072	-0.072	-0.072	-0.066	-0.023	-0.011	0.037	0.066	0.066
$x_{4,7}$	0.011	0.010	0.010	0.010	0.011	0.014	-0.089	-0.089	-0.088	-0.088	-0.087



### 3 结论

1) 为准确且合理地评估旱灾风险状态、定量识别关键风险因子,应用三角模糊数随机模拟方法,构建了差异度系数随评价指标样本值动态变化的三角模糊数与随机模拟耦合方法,进行区域旱灾风险评估以及关键障碍因子定量识别,该方法计算得的置信区间能更好地反映评价问题的实际情况,评价结果更稳健、合理。

2) 通过本文方法在宿州市 2007–2017 年旱灾风险评估与诊断中的应用,表明宿州市旱灾风险综合评价结果为“轻险”,整体上呈现“先增加,后减小,最后趋于稳定”的趋势;危险性、暴露性、抗旱能力三个子系统是影响研究区域旱灾风险综合评价结果趋势变化的主因;耕地率、水库调蓄率、农业人口比例三个评价指标是中阻碍型因子,是需要重点调控的对象,水田面积比、万元 GDP 用水量是弱提升型因子,其余评价指标均为弱阻碍型因子。

3) 结果表明,本文动态差异度系数模糊数随机模拟方法与正态分布随机模拟方法<sup>[5]</sup>、动态差异度系数方法<sup>[9]</sup>相比,本文方法在满足可靠性的同时也满足准确度,其结果可以更好地表示旱灾风险所处的级别状态,能为系统风险评估问题提供更多可靠性方面的信息。

### 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] 程亮, 金菊良, 郦建强, 等. 干旱频率分析研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 296–302.
- [3] 刘颖秋. 干旱灾害对我国社会经济影响研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [4] 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.
- [5] 周戎星, 金菊良, 崔毅, 等. 基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 73–78, 92.

- [6] 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.
- [7] 李杨, 王玉萍, 欧朝敏. 洞庭湖流域农业旱灾风险评价[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 52–57.
- [8] 汪哲荪, 金菊良, 魏一鸣, 等. 三角模糊数随机模拟的防洪工程联系数风险评价模型[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1173–1178.
- [9] 崔毅, 唐慧彦, 金菊良, 等. 基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断[J/OL]. 水资源保护: 2023: 1–13. [2023–07–17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20230302.1828.016.html>.
- [10] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 65–70.
- [11] 赵克勤. 联系数及其应用[J]. 吉林师范学院学报, 1996, 17(8): 50–53.
- [12] 陈守煜. 可变模糊集合理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(18): 146–153.
- [13] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 431–435.
- [14] 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.
- [15] FANG Y H, ZHENG X L, PENG H, et al. A new method of the relative membership degree calculation in variable fuzzy sets for water quality assessment[J]. Ecological indicators, 2019, 98: 515–522.
- [16] 赵伟, 王平, 金菊良, 等. 水资源承载力评价的三元减法集对势模糊数随机模拟方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 26–33.
- [17] 金菊良, 吴开亚, 李如忠. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1257–1261, 1266.
- [18] 金菊良, 刘丽, 汪明武, 等. 基于三角模糊数随机模拟的地下水环境系统综合风险评价模型[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 143–147.
- [19] 金菊良, 洪天求, 王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 22–28.
- [20] ZHOU R X, JIN J L, CUI Y, et al. Spatial equilibrium evaluation of regional water resources carrying capacity based on dynamic weight method and Gagul gini coefficient[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 9: 790349.
- [21] 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.
- [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.
- [23] 金菊良, 张浩宇, 崔毅, 等. 联系数伴随函数的若干问题探讨[J]. 黑龙江大学工程学报, 2020, 11(2): 1–10.

## Stochastic Simulation Method of Fuzzy Number of Dynamic Difference Coefficient for Regional Drought Risk Assessment and Diagnosis

ZHAO Qiya<sup>1</sup>, JIN Juliang<sup>1,2</sup>, CUI Yi<sup>1,2</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Shiqi<sup>1</sup>, ZHOU Le<sup>1</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 carry out the dynamic assessment of drought risk and the quantitative identification of key obstacle factors more accurately and robustly, a triangular fuzzy number and stochastic simulation coupling method with the dynamic change of the difference coefficient with the sample value of the evaluation index is constructed, and it is then used in the drought risk assessment and diagnosis study of Suzhou City from 2007 to 2017, and the drought risk evaluation value interval with a confidence probability of 95% in Suzhou City is obtained, and the results show that the drought risk assessment results shows a trend of “first increasing, then decreasing, and fi-

nally stabilizing". The comprehensive assessment of drought risk is "light risk"; The three subsystems of risk, exposure and drought resistance are the main reasons affecting the trend change of the comprehensive assessment results of drought risk in the study area. The evaluation indicators of cultivated land rate, reservoir transfer and storage rate, and agricultural population ratio are diagnosed as medium hindrance factors, which are the objects that needed to be regulated. The confidence probability interval increases the reliability information of the risk assessment results, which can reflect the actual drought risk situation under the combined effect of various uncertain factors, and fully reflects the information of "uncertainty" represented by the number of linkages.

**Keywords:** regional; drought risk; assessment and diagnosis; dynamic differentiation coefficient; triangular fuzzy number; stochastic simulation; Suzhou, Anhui

(上接第 176 页)

- [23] 王秉. 安全 4.0 时代的重大安全科学问题展望[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 6-11.
- [24] 王秉, 史志勇, 朱菁菁, 等. 面向三元空间的安全态势感知路径[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 15-21.
- [25] 王秉, 史志勇, 徐方廷. 安全信息视域下的三元空间安全事件链防控[J]. 情报杂志, 2023, 42(6): 119-123, 169.
- [26] 刘纪坤, 王佳茹, 王翠霞. 改进组合赋权-云模型下的地铁站突发事件应急能力评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1398-1406.
- [27] 张渺. G1-EW 组合赋权云模型下地铁运营安全风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 163-170.
- [28] 刘敬严, 赵莉琴, 田静. 城市轨道交通项目安全风险二维云模型评价[J]. 防灾科技学院学报, 2022, 24(3): 50-56.
- [29] 马天行, 林允, 周晓斌, 等. 煤层底板突水危险性预测的熵权-正态云模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(S1): 171-177.
- [30] 刘敬严, 陈佳, 田静, 等. 韧性理念下地铁火灾灾害风险二维云模型预警[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 43-47, 74.
- [31] 程方明, 王琛琛, 袁晓芳. 安全发展视角下城市应急管理能力评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 158-167.
- [32] 张忠义, 庄越. 试论我国城市应急软能力提升路径: 基于 2016 年武汉洪涝灾害的理性思考[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(3): 119-123.

## Evaluation of Rainstorm Water – logging Emergency Response Capability of Subway Station for Trio Spaces

LIU Jingyan<sup>1,2</sup>, ZHENG Wenwen<sup>1</sup>, CHEN Jia<sup>1</sup>, ZHAO Liqin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;

2. Hebei Technology Innovation Center for Multi – Hazard Resilience and Emergency Response of Engineering Structures, Sanhe 065201, China; 3. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, 050043, China)

**Abstract:** In order to scientifically evaluate the emergency response capacity of rainstorm water – logging of subway stations and reduce the accidents of rainstorm water – logging, the entropy weight cloud model is established to evaluate the emergency response capacity of rainstorm water – logging in subway stations based on the concept of three – dimensional space. Firstly, the analysis framework of the emergency response capability of subway stations for rainstorm water – logging is constructed. The analysis framework including the physical, social and information spaces and the emergency prevention, preparation, response and recovery capabilities. An evaluation index system for the emergency response capacity of rainstorm water – logging in subway stations is established by referring to the references related to subway water – logging disasters. The entropy weight cloud model for emergency evaluation of rainstorm water – logging in subway stations is established. The emergency response capability cloud digital characteristics, including standard cloud and assessment cloud, are calculated by using the cloud generator MATLAB. cloud droplets and cloud maps are generated. The determination of level needs to compare standard cloud and assessment cloud and combined with the pasting progress. Through the calculation of the obstacle degree model, the fire emergency response capability obstacle factor is found. Finally, a case analysis is carried out. It is found that the obstacles to subway emergency response capability are mainly in social space and information space. The corresponding improvement suggestions are put forward accordingly.

**Keywords:** subway station; disaster; emergency response capacity; rainstorm water – logging; trio spaces; cloud model