

董涛, 金菊良, 王振龙, 等. 基于风险矩阵的区域农业旱灾风险链式传递评估方法[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 227–234. [DONG Tao, JIN Juliang, WANG Zhenlong, et al. Chain transfer assessment method of regional agricultural drought risk based on risk matrix [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 227–234. doi: 10. 3969/j. issn. 1000–811X. 2019. 03. 041.]

基于风险矩阵的区域农业旱灾风险链式传递 评估方法^{*}

董涛¹, 金菊良^{2,3}, 王振龙¹, 崔毅⁴, 宁少尉^{2,3}, 陈梦璐^{2,3}

(1 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 合肥 233088;
2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009; 4. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:为综合评估农业旱灾风险, 依据危险性、灾损敏感性、暴露性、抗旱能力4个子系统相互作用关系选取指标, 用遗传模糊层次分析法确定权重, 用集对分析与灰色关联对农业旱灾风险各子系统进行评价, 用风险矩阵合成各子系统的评价结果, 构建了基于风险矩阵的区域农业旱灾风险链式传递评估方法。该评估方法用于安徽省淮河流域的结果表明: 亳州农业旱灾风险为重险, 淮北、宿州、阜阳、蚌埠、滁州淮河流域为中险, 合肥淮河流域为轻险, 淮南、六安淮河流域为微险, 结果与实际情况相符。上述改进的集对分析与风险矩阵耦合的旱灾风险链式传递评估方法科学合理, 为区域农业旱灾风险评估提供了新途径, 在实际自然灾害风险评估中具有推广应用价值。

关键词: 农业旱灾; 风险评估; 集对分析; 风险矩阵; 灰色关联; 链式传递; 安徽省淮河流域

中图分类号: TV213; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2019)03–0227–08

doi: 10. 3969/j. issn. 1000–811X. 2019. 03. 041

干旱是由于水分收支或供需不平衡形成的水分持续短缺现象^[1–2], 当干旱发展到一定程度后导致水资源匮乏, 对农业生产、生态环境产生不利影响, 就发生旱灾^[3–5]。农业旱灾是农作物受到干旱影响导致减产或绝收的现象, 是重大自然灾害之一^[6–7]。受变化环境影响, 目前中国旱灾发生频率和灾害损失程度呈增加趋势^[8–10], 农业旱灾受灾面积约占各种气象灾害受灾面积的56.2%^[11], 科学评估农业旱灾风险对抵抗干旱、减少灾损具有重要的指导作用。孙才志等^[12]建立了旱灾风险评价的模糊风险计算模型。李杨等^[13]运用GIS技术与数理统计相结合的方法, 对洞庭湖流域农业旱灾风险进行综合评价。屈艳萍等^[14]采用基于灾害系统论的模糊综合评估方法对全国农业旱灾风险进行了定量计算和定性评估。龙鑫^[15]等根据自然灾害风险评估的理论框架, 建立了1 km 栅格精度的泾河流域农业旱灾风险空间评估模型。Kamruzzaman 等^[16]采用马尔可夫链分析方法, 从社会经济指标和物理指标两方面计算干旱指数和干旱危害指数评估孟加拉国西部地区在1960–2011年

期间全球气候变化背景下农业干旱风险状况。本文基于农业旱灾风险评估的不确定性及其风险链式传递性, 运用集对分析方法充分考虑评价样本与评价标准这两个集合的确定性和不确定性关系, 应用灰色关联度分配系数中的差异项 bI 、改进差异度系数 I 的取值方法, 综合考虑农业旱灾风险系统中危险性、暴露性、灾损敏感性、抗旱能力4个子系统之间的作用关系来确定风险矩阵元素值, 构建基于集对分析和风险矩阵的区域农业旱灾风险链式传递评估模型(Chain Transfer Assessment Model of Regional Agricultural Drought Risk based on Set Pair Analysis and Risk Matrix, CTA–SPARM), 并应用于安徽省淮河流域。

1 基于灰色关联度的集对分析方法

1.1 联系数

集对分析是利用关系结构式的联系数描述和处理系统确定性不确定性问题的一类智能计算的

^{*} 收稿日期: 2019–01–30 修回日期: 2019–04–10

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

第一作者简介: 董涛(1993–), 男, 安徽安庆人, 硕士, 助理工程师, 从事水资源系统工程研究. E-mail: dtown2@126.com

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

新理论和新方法^[17]，在处理不确定性问题方面具有独特的显著特点，开始被广泛应用于水利、农业、环境、灾害等许多学科领域^[17-19]。集对分析的核心思想^[20]是：将两个有关联的集合 A 和集合 B 构成集对 H 系统，对集对 H 做同一性、差异性、对立性分析，用联系数定量描述集对系统的确定性和不确定性，总共得到 N 个特性，其中集合 A 和集合 B 共有的特性有 S 个，比值 S/N 为集合 A 和集合 B 的同一度，简记为 a ；集合 A 和集合 B 相互对立的特性有 P 个，比值 P/N 为集合 A 和集合 B 的对立度，简记为 c ；其余的 $F = N - S - P$ 个特性上既不对立，也不同意，比值 F/N 为集合 A 和集合 B 的差异度，简记为 b 。在不考虑各特性权重的联系数时，集对 $H = (A, B)$ 的联系数为^[20]：

$$\mu = a + bI + cJ。$$

(1)

式中： I 为差异度的符号，其取值区间为 $[-1, 1]$ ，当差异度中的特性越接近所属评价的等级时， I 越接近于 1，当差异度中的特性越偏离所属评价的等级时， I 越接近于 -1 ； J 为对立度标记符号，规定其取值为 -1 。由定义知 a 、 b 、 c 满足 $a + b + c = 1$ 。如果考虑各特性的权重，则联系数为^[20]：

$$\mu_i = \sum_{k=1}^S w_k + (\sum_{k=S+1}^{S+F} w_k)I + (\sum_{k=S+F+1}^N w_k)J。$$

(2)

式中： μ_i 为第 i 个评价对象的联系数 (i 为评价对象， $i = 1, 2, \dots, m$)； w_k 为第 k 个指标的权重； I 为差异度系数， $I \in [-1, 1]$ ， I 也可仅起标记作用； J 为对立度系数，一般取 $J = -1$ ， J 同样也可仅起标记作用。

1.2 灰色关联度

灰色关联分析法以样本数据为模型计算的基础依据，用计算得出的灰色关联度来描述各因素之间关系的密切程度。若各因子在系统发展过程中大小、方向、速度等的变化趋势具有相似性或一致性，因素间的关联度高，反之，因素间的关联度就相对较低。灰色关联分析方法被广泛应用于许多学科领域^[21-23]。分析灰色关联度首先要制定参考序列，一般设参考序列为 $X_0(k)$ 、比较序列为 $X_i(k)$ ，则参考序列与比较序列的灰色关联系数 $\xi_{0i}(k)$ 为^[21]：

$$\xi_{0i} = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \xi \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \xi \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}。$$

(3)

式中： $\xi (0 < \xi < 1)$ 为分辨系数，若 ξ 越小，灰色关联系数间差异越大，区分能力越强，一般取 $\xi = 0.5$ 。

1.3 基于集对分析和风险矩阵的旱灾风险链式传递的评估模型构建

第一步：计算联系数。分析集对中多种特性的同一度 a 、差异度 b 和对立度 c 。

第二步：计算绝对关联度。将求得的一组

a 、 b 、 c 分为 b 、 a 和 b 、 c 两组，计算差异度 b 与同一度 a 、差异度 b 与对立度 c 之间的绝对关联度 ξ_{ba} 、 ξ_{bc} ^[24-25]。

第三步：计算联系数并确定子系统等级。将上述计算的灰色关联度 ξ_{ba} 、 ξ_{bc} 进行归一化处理，得到 ξ'_{ba} 、 ξ'_{bc} ，将联系数的差异度项 bI 按照比例分为 $\xi'_{ba} \times b$ 与 $\xi'_{bc} \times b$ 两个部分^[24-25]，以此来计算评价对象的联系数的确定值：

$$\mu = a + \xi'_{ba} \times b - \xi'_{bc} \times b - c。$$

(4)

将联系数 μ 值转成相对隶属度 $0.5 + 0.5\mu$ 并归一化，再用属性识别法^[26] 判别等级，置信参数取 0.6。

第四步：构造农业旱灾风险评估的风险矩阵。首先，合成灾损敏感性等级与抗旱能力等级，得到灾损敏感性 - 抗旱能力等级 (表 1)；然后，合成暴露性等级与抗旱能力等级，得到暴露性 - 抗旱能力等级 (表 2)；再合成灾损敏感性 - 抗旱能力等级与暴露性 - 抗旱能力等级，得到脆弱性等级 (表 3)；最后合成脆弱性等级与危险性等级，得到农业旱灾风险等级 (表 4)。

灾损敏感性等级与抗旱能力等级合成如表 1 所示，其风险矩阵的合成规则如下：当灾损敏感性为 1 级 (微险) 时，合成等级均为 1 级 (微险)；当灾损敏感性为 2 级时，抗旱能力等级为 1 级 (强) 时合成等级为 1 级 (微险)，抗旱能力为 2、3、4 级时合成等级为 2 级 (轻险)；当灾损敏感性为 3 级时，抗旱能力等级为 1、2 级时合成等级为 2 级 (中险)，抗旱能力等级为 3、4 级时合成等级为 3 级 (中险)；当灾损敏感性为 4 级 (重险) 时，抗旱能力等级为 1、2、3 级时合成等级为 3 级 (中险)，抗旱能力等级为 4 级时合成等级为 4 级 (重险)。建立灾损敏感性与抗旱能力等级合成矩阵的理论基础是：灾损敏感性是暴露在孕灾环境中的不同承灾体对干旱影响的损失响应，抗旱能力是农业旱灾风险的重要调控变量^[5]。抗旱能力可降低承灾体受干旱影响的敏感程度，从而可降低灾损敏感性子系统的风险等级。

表 1 灾损敏感性 - 抗旱能力合成的风险矩阵

抗旱能力等级	灾损敏感性等级			
	1 (微险)	2 (轻险)	3 (中险)	4 (重险)
1 (强)	1	1	2	3
2 (较强)	1	2	2	3
3 (中)	1	2	3	3
4 (弱)	1	2	3	4

暴露性等级与抗旱能力等级合成如表 2 所示，其风险矩阵的合成规则如下：当暴露性为 1 级 (微险) 时，合成等级均为 1 级 (微险)；当暴露性为 2 级时，抗旱能力等级为 1 级 (强) 时合成等级为 1 级 (微险)，抗旱能力为 2、3、4 级时合成等级为 2 级 (轻险)；当暴露性为 3 级时，抗旱能力等级为

1、2级时合成等级为2级(中险),抗旱能力等级为3、4级时合成等级为3级(中险);当暴露性为4级(重险)时,抗旱能力等级为1、2、3级时合成等级为3级(中险),抗旱能力等级为4级时合成等级为4级(重险)。建立暴露性与抗旱能力等级合成矩阵的理论基础是:暴露性是承灾体与致灾因子在孕灾环境中的某种时空上的重合、接触,抗旱能力是农业旱灾风险的重要调控变量^[5]。当农业干旱发生时,抗旱能力发挥调控作用,相关部门根据旱灾应急预案,通过灾民安置、应急送水等措施降低承灾体的暴露程度,从而可降低暴露性子系统的风险等级。

表2 暴露性-抗旱能力合成的风险矩阵

抗旱能力等级	暴露性等级			
	(微险)	2(轻险)	3(中险)	4(重险)
1(强)	1	1	2	3
2(较强)	1	2	2	3
3(中)	1	2	3	3
4(弱)	1	2	3	4

灾损敏感性-抗旱能力等级与暴露性-抗旱能力等级合成脆弱性等级如表3所示。灾损敏感性、暴露性和抗旱能力综合反映了承灾体在旱灾风险发生发展过程中的作用,这三个特性统称为承灾体的脆弱性^[5],其中灾损敏感性、暴露性组成承灾体的易损性^[5]。采用风险矩阵合成时,风险矩阵的合成规则如下:当灾损敏感性-抗旱能力等级为1级(微险)时,暴露性-抗旱能力等级为1、2级时合成等级为1级(微险),暴露性-抗旱能力等级为3、4级时合成等级为2级(轻险);当灾损敏感性-抗旱能力等级为2级时,暴露性-抗旱能力等级为1级时合成等级为1级(微险),暴露性等级为2、3级时合成等级为2级(轻险),暴露性-抗旱能力等级为4级时合成等级为3级(中险);当灾损敏感性-抗旱能力等级为3级时,暴露性-抗旱能力为1级时合成等级为2级,暴露性-抗旱能力等级为2、3级时合成等级为3级,暴露性-抗旱能力等级为4级时合成等级为4级;当灾损敏感性-抗旱能力等级为4级时,暴露性-抗旱能力等级为1、2级时合成等级为3级,暴露性-抗旱能力等级为3、4级时合成等级为4级。

表3 灾损敏感性-抗旱能力与暴露性-抗旱能力合成脆弱性的风险矩阵

暴露性-抗旱能力等级	灾损敏感性-抗旱能力等级			
	1(微险)	2(轻险)	3(中险)	4(重险)
1(微险)	1	1	2	3
2(轻险)	1	2	3	3
3(中险)	2	2	3	4
4(重险)	2	3	4	4

脆弱性等级与危险性等级合成如表4所示,考虑到脆弱性与危险性的重要性相当,风险矩阵的合成规则如下:当危险性为1级时,脆弱性等级为1、2级时合成等级为1级,脆弱性等级为3、4级时合成等级为2级;当危险性为2级时,脆弱性等级为1级时合成等级为1级,脆弱性等级为2级时合成等级为2级,脆弱性等级为3、4级时合成等级为3级;当危险性为3级时,脆弱性等级为1级时合成等级为2级,脆弱性等级为2、3级时合成等级为3级,脆弱性等级为4级时合成等级为4级;当危险性为4级时,脆弱性等级为1级时合成等级为2级,脆弱性等级为2级时合成等级为3级,脆弱性等级为3、4级时合成等级为4级。建立脆弱性与危险性等级合成矩阵的理论基础是:危险性指的是干旱发生的频度、规模和强度,危险性在一定的孕灾环境下经脆弱性的链式传递作用转换为承载体的旱灾损失风险^[5],表4建立的脆弱性-危险性合成矩阵即为这种转换关系,最终得到农业旱灾风险等级。

表4 脆弱性与危险性合成的风险矩阵

危险性等级	脆弱性等级			
	1(微险)	2(轻险)	3(中险)	4(重险)
1(微险)	1	1	2	2
2(轻险)	1	2	3	3
3(中险)	2	3	3	4
4(重险)	2	3	4	4

农业旱灾系统是以承灾体为主体,以孕灾环境中承灾体价值性损失与致灾因子破坏之间复杂的作用和响应关系为作用机制,具有链式传递关系的复杂系统,而旱灾损失(灾情)则为该作用机制下的演化结果,其中的链式传递是^[5]:农业旱灾风险是由孕灾环境差异性A中致灾因子危险性B,经承灾体暴露性C、灾损敏感性D和抗旱能力E(C、D组成易损性,C、D、E组成脆弱性)传递作用后,产生承灾体损失风险F。抗旱能力在系统中发挥着调控的作用,主要修正承载体暴露性风险、灾害损敏感性等级,从而降低或规避农业旱灾风险,这种调控过程是链式传递的重要环节,该环节通过建立基于区域农业旱灾风险物理成因的风险矩阵实现。上述采用灰色关联法改进的集对分析方法评估区域农业旱灾子系统的风险等级,再根据建立的风险矩阵依据风险链式传递的路径进行层层合成,完成农业旱灾风险各系统的危险性“输入”、经脆弱性“转换”得到损失风险“输出”,最终得到区域农业旱灾风险等级,从而建立了基于风险链式传递机理和农业旱灾风险物理成因、由危险性经脆弱性向损失风险传递的农业旱灾风险链式传递评估方法。该评估方法的流程见图1。

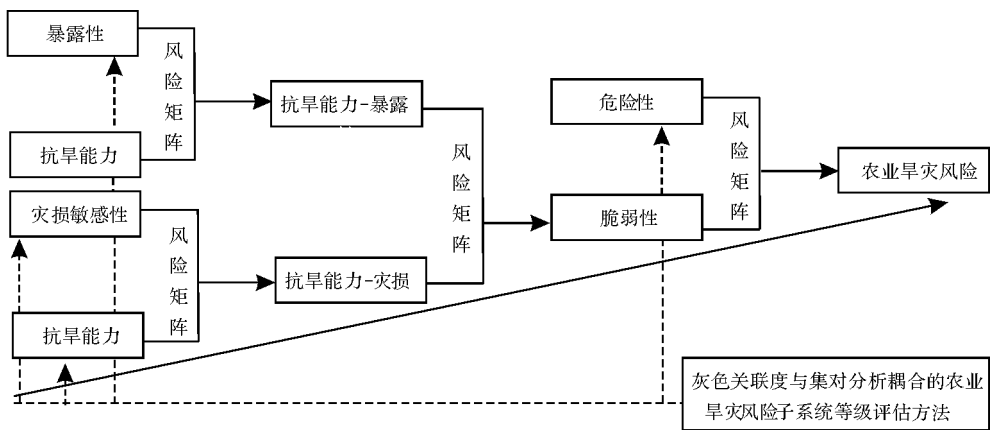


图1 基于风险矩阵的区域农业旱灾风险链式传递评估流程

表5 农业旱灾风险评估指标标准^[7]

评估子系统	评估指标	权重	风险等级			
			1(微险/强)	2(轻险/较强)	3(中险/中)	4(重险/弱)
危险性子系统	降雨负距平百分率($x_{1,1}$)/%	0.0692	0 ~ -10	-10 ~ -20	-20 ~ -30	-30 ~ -40
	年均降雨量($x_{1,2}$)/mm	0.0572	1200 ~ 900	900 ~ 800	800 ~ 700	700 ~ 600
	相对湿度指数($x_{1,3}$)/%	0.0493	0 ~ -0.05	-0.05 ~ -0.18	-0.18 ~ -0.31	-0.31 ~ -0.44
	单位面积水资源量占有量($x_{1,4}$)/(m ³ /hm ²)	0.0569	7500 ~ 6000	6000 ~ 4500	4500 ~ 3000	3000 ~ 1500
	土壤类型($x_{1,5}$)	0.0442	0 ~ 1	1 ~ 2.5	2.5 ~ 3	3 ~ 4
	土壤相对湿度($x_{1,6}$)/%	0.0522	78 ~ 75	75 ~ 72	72 ~ 69	69 ~ 64
暴露性子系统	人口密度($x_{2,1}$)/(人/km ²)	0.0468	200 ~ 400	400 ~ 600	600 ~ 800	800 ~ 1000
	耕地率($x_{2,2}$)/%	0.0555	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60
	复种指数($x_{2,3}$)/%	0.0426	170 ~ 180	180 ~ 190	190 ~ 200	200 ~ 250
	农业占地区生产总值比例($x_{2,4}$)/%	0.0461	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
灾损敏感性子系统	农业人口比例($x_{3,1}$)/%	0.0598	40 ~ 55	55 ~ 70	70 ~ 85	85 ~ 100
	水田面积比($x_{3,2}$)/%	0.0678	0 ~ 10	10 ~ 35	35 ~ 60	60 ~ 85
	万元GDP用水量($x_{3,3}$)/(m ³ /万元)	0.0616	100 ~ 500	500 ~ 650	650 ~ 800	800 ~ 2000
	森林覆盖率($x_{3,4}$)/%	0.0518	35 ~ 20	20 ~ 15	15 ~ 10	10 ~ 0
抗旱能力子系统	人均GDP($x_{4,1}$)/(元/人)	0.0305	6000 ~ 5000	5000 ~ 4000	4000 ~ 3000	3000 ~ 2000
	水库调蓄率($x_{4,2}$)/%	0.0533	60 ~ 30	30 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 0
	单位面积现状供水能力($x_{4,3}$)/(万m ³ /hm ²)	0.0381	10000 ~ 4000	4000 ~ 2000	2000 ~ 1200	1200 ~ 0
	灌溉指数($x_{4,4}$)	0.0457	1.3 ~ 0.9	0.9 ~ 0.8	0.8 ~ 0.7	0.7 ~ 0.5
	单位面积应急浇水能力($x_{4,5}$)/(万m ³ /km ²)	0.0278	13000 ~ 9000	9000 ~ 6000	6000 ~ 3000	3000 ~ 0
	监测预警能力($x_{4,6}$)	0.0250	3.5 ~ 4.5	3.5 ~ 2.5	2.5 ~ 1.5	1.5 ~ 0
	节水灌溉率($x_{4,7}$)/%	0.0187	70 ~ 40	40 ~ 30	30 ~ 20	20 ~ 0

注：风险等级中的强、较强、中、弱只对应抗旱能力子系统。

2 实例分析

2.1 安徽省淮河流域农业旱灾风险评估指标体系及其权重

指标体系的建立是农业旱灾风险评估过程中

的关键环节，与评价结果可信度有关。为科学准确地反映区域农业旱灾风险的本质特征，这里借鉴已有研究经验^[7-8]，在指标选取时，遵循资料选取的系统性、代表性、可获得性等原则，从危险性、灾损敏感性、暴露性和抗旱能力4个旱灾风险评估子系统选择指标建立安徽省淮河流域农业旱

灾风险评估的指标体系,并根据指标值大小确定评估指标标准(表5)^[7]。指标数据为历年平均值,主要来源于《安徽省统计年鉴》(1990~2010)、《安徽省抗旱规划》、《安徽省水利统计年鉴》、《淮河流域水系图》以及《安徽省地形图》等数据。

根据安徽省淮河流域评估指标量化数据,采用遗传模糊层次分析法^[7-8]计算各子系统及其指标的权重,见表5^[7]。

2.2 安徽省淮河流域农业旱灾风险评估

将各指标与风险等级分别建立集对,考虑到各个指标的权重对综合评价的影响,采用小节1.1的公式进行计算,考虑到有4个等级,若指标值属于所考评等级范围内,则认为属于同一度 a ,若指

标值属于相邻的所考评等级范围内,则认为属于差异度 b ,若指标值属于相隔的所考评等级范围内,则认为属于对立度 c 。根据小节1.3步骤二计算出绝对关联度,再通过式(4)计算联系数,以危险性子系统为例,计算结果见表6。

根据表6计算得到的灰色关联度,由式(4)计算评价对象与各风险等级的联系数,结果如表7所示,采用属性识别方法^[26]得到危险性子系统等级(图2),同理可得安徽省淮河流域各地市农业旱灾风险的暴露性、灾损敏感性和抗旱能力子系统的风险等级分布图,见图3~图5,由暴露性、灾损敏感性和抗旱能力合成的脆弱性等级分布图见图6。

表6 危险性子系统绝对关联度计算结果

危险性	a	b	c	Δba	Δbc	ξ_{ba}	ξ_{bc}	ξ_{ba}	ξ_{bc}
淮北与1级	0.1729	0.1739	0.6532	0.0009	0.4793	0.9981	0.5106	0.6616	0.3384
淮北与2级	0.1739	0.5331	0.2930	0.3592	0.2401	0.5819	0.6756	0.4628	0.5372
淮北与3级	0.3602	0.4669	0.1729	0.1067	0.2939	0.8241	0.6298	0.5668	0.4332
淮北与4级	0.2930	0.3602	0.3468	0.0672	0.0133	0.8816	0.9741	0.4751	0.5249
亳州与1级	0.0000	0.1739	0.8261	0.1739	0.6522	0.7420	0.4339	0.6310	0.3690
亳州与2级	0.1739	0.3228	0.5033	0.1489	0.1806	0.7706	0.7347	0.5119	0.4881
亳州与3级	0.3228	0.6772	0.0000	0.3545	0.6772	0.5852	0.4247	0.5794	0.4206
亳州与4级	0.5033	0.3228	0.1739	0.1806	0.1489	0.7347	0.7706	0.4881	0.5119
宿州与1级	0.1587	0.1739	0.6674	0.0152	0.4935	0.9706	0.5033	0.6585	0.3415
宿州与2级	0.1739	0.6918	0.1343	0.5179	0.5576	0.4912	0.4728	0.5095	0.4905
宿州与3级	0.5331	0.3082	0.1587	0.2249	0.1494	0.6897	0.7699	0.4725	0.5275
宿州与4级	0.1343	0.5331	0.3326	0.3988	0.2005	0.5563	0.7138	0.4380	0.5620
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表7 危险性子系统评估区域与风险等级的隶属度

风险等级	淮北	亳州	宿州	蚌埠	阜阳	淮南	六安淮河流域	合肥淮河流域	滁州淮河流域
1	0.1602	0.0601	0.1480	0.2064	0.1887	0.3756	0.2609	0.2721	0.2614
2	0.2340	0.1858	0.2851	0.3717	0.2893	0.4268	0.3849	0.4515	0.3856
3	0.3476	0.3919	0.3676	0.2802	0.2917	0.1976	0.2665	0.2171	0.2061
4	0.2582	0.3621	0.1992	0.1416	0.2303	0.0000	0.0877	0.0594	0.1470
等级	3	3	3	2	3	2	2	2	2

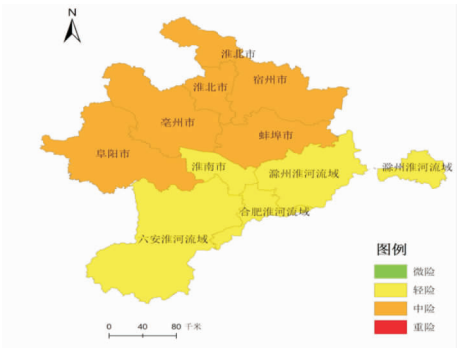


图2 安徽省淮河流域农业旱灾危险性等级分布

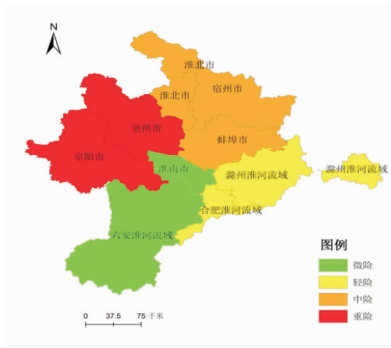


图3 安徽省淮河流域农业旱灾暴露性等级分布

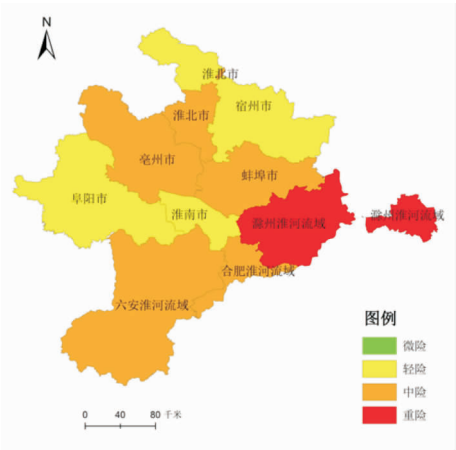


图 4 安徽省淮河流域农业旱灾灾损敏感性等级分布

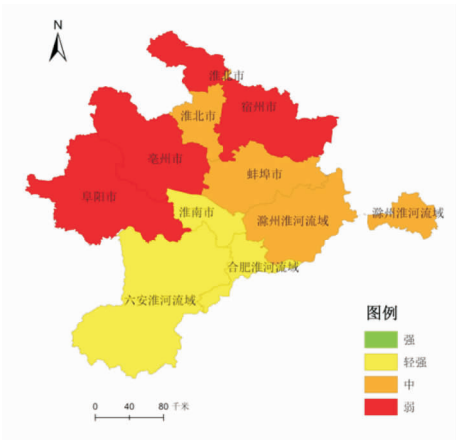


图 5 安徽省淮河流域农业旱灾抗旱能力等级分布

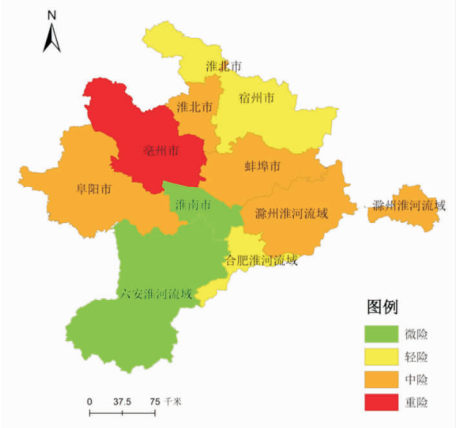


图 6 安徽省淮河流域农业旱灾脆弱性等级分布

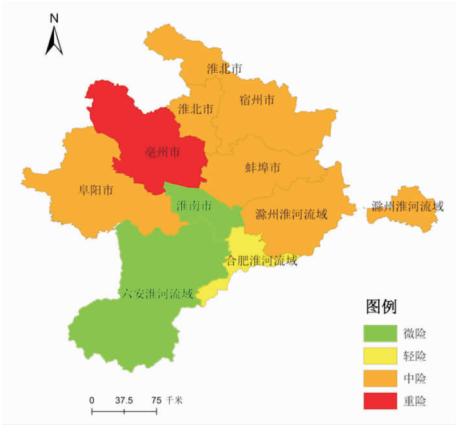


图 7 安徽省淮河流域农业旱灾风险等级分布

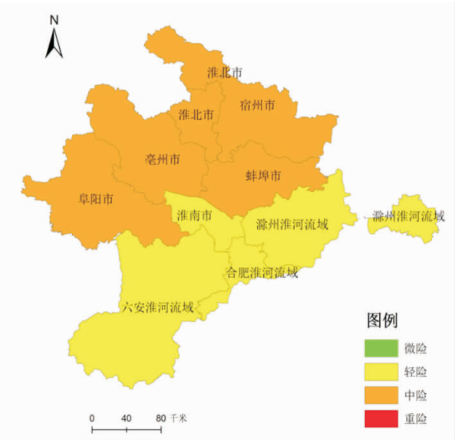


图 8 基于云模型的安徽省淮河流域农业旱灾风险等级分布

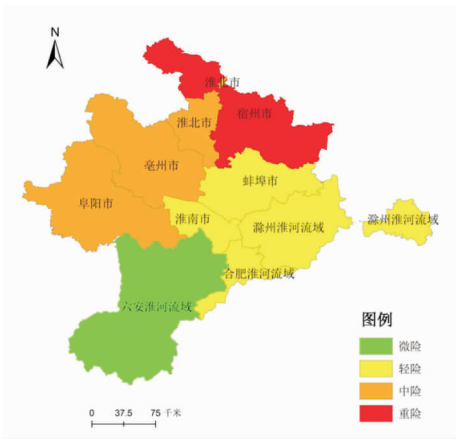


图 9 基于集对分析的安徽省淮河流域农业旱灾风险等级分布

将 4 个子系统的等级值使用表 1 至表 4 的风险矩阵合成，得到安徽省淮河流域的农业旱灾风险等级如图 7 所示。

由图 7 可知：重险区域为亳州市，原因是该市危险性和灾损敏感性处于中险，暴露性、抗旱能力处于重险等级；中险主要分布于淮北平原，原因是淮北平原地处南北气候过渡带，降水变率较大，区域土壤主要为砂姜黑土，不易耕作，且易旱易涝；轻险区域为合肥淮河流域，原因是该区

域危险性和脆弱性均处于轻险；微险区域则为淮南市和六安淮河流域，原因是这些区域农业用水保证率较高，节水灌溉力度较大，抗旱能力强。

从空间分布看，安徽省淮河流域北部区域比南部区域危险性级别高一级到两级，其主要原因是年均降雨量和降水负距平百分率的差异，北部区域危险性级别高，重险的亳州、中险区域的淮北、宿州和阜阳地区的年均降水量小于 1 000mm，降水负距平百分率均小于 -20%，而轻险区域的淮南、

六安淮河流域均大于 1 000mm, 降水负距平百分率均大于 -20%, 自然因素的影响对旱灾风险等级分布影响较大。从暴露性子系统来看, 阜阳市的人口密度为 919 人/km², 复种指数为 50.65, 农业占地区生产总值比例为 41.73%, 亳州的耕地率为 56.98%, 农业占地区生产总值比例为 40.54%, 两个区域的农业旱灾承灾体(人口和农作物)较多, 导致暴露性风险级别高, 淮北、宿州和蚌埠的耕地率和复种指数较大, 因此暴露性为中险, 其余区域的农业占地区生产总值比例和复种指数低于中险区域。从灾损敏感性子系统来看, 重险区域的滁州淮河流域的人口密度、水田面积比和万元农业 GDP 用水量较大, 风险级别高, 轻险及以下级别的区域水田面积比、万元农业 GDP 用水量较低, 风险等级较低。安徽省淮河流域北部区域抗旱能力弱, 主要由于水库调蓄率低, 单位面积现状供水能力不足, 淮北、亳州和宿州的水库调蓄率分别为 1.793%、0.149% 和 1.759%, 低于淮南、六安淮河流域、合肥淮河流域和滁州淮河流域的 3.748%、55.9%、10.5% 和 26.6%, 单位面积现状供水能力也低于微险和轻险, 区域应加强水资源调度管理^[27], 增加调蓄库容, 提高抗旱能力。

为了对比, 图 8 是用云模型得到的安徽省淮河流域农业旱灾风险等级评估结果^[8]、图 9 是用集对分析方法得到的安徽省淮河流域农业旱灾风险等级评估结果^[7]。将基于风险矩阵的链式传递得到的结果(图 7)与云模型方法的结果^[8](图 8)进行对比, 两种模型结果在南北趋势上基本一致, 基于风险矩阵的链式传递的评估结果的识别度高, 更细致地反映了安徽省淮河流域的农业旱灾风险等级的空间分布信息。

将本文结果与集对分析的结果^[7](图 9)对比, 宿州市为 3 级(中险)、比集对分析结果轻 1 级, 蚌埠市为 3 级、比集对分析结果重 1 级, 淮南市为 1 级、比集对分析结果轻 1 级, 滁州淮河流域为 3 级、比集对分析结果重一级。集对分析方法^[7]得到宿州市的危险性、暴露性、灾损敏感性和抗旱能力的等级分别为 3 级(中险)、3 级(中险)、2 级(微险)、4 级(重险), 最终得到宿州市农业旱灾风险为 4 级, 可看出宿州市农业旱灾风险的子系统除了抗旱能力不足以外, 其他子系统风险等级低于重险, 尤其灾损敏感性子系统为 2 级(轻险), 再结合抗旱能力(它不会增强风险程度)系统的权重 0.239, 而灾损敏感性子系统、危险性子系统权重分别为 0.241、0.329, 均大于抗旱能力子系统的权重, 最终评估结果为 4 级有失合理性, 采用风险矩阵方法综合 4 个子系统的等级结果, 可避免类似的情况, 得到最后结果为 3 级、中险, 使得评估结果更符合实际情况。

从上述三种方法得到的结果可以看出, 中险

区域主要为淮北平原, 轻险和微险区域主要为江淮丘陵区 and 皖南山区, 这与淮北平原和江淮丘陵区的水资源、气候、土壤等情况相符。总的来看, CTA-SPARM 在评估农业旱灾风险时, 考虑了系统内部的危险性、灾损敏感性、暴露性和抗旱能力子系统的联系, 利用风险矩阵构建合成矩阵, 既考虑了子系统的权重关系, 又根据评价区域实际情况合理确定合成等级, 其评估更为全面、合理。

3 结论

(1) 农业旱灾风险系统是一个涉及诸多影响因素的复杂系统, 致灾因子不确定性和孕灾环境复杂性使农业旱灾风险系统具有诸多不确定性。本文将灰色关联方法与集对分析耦合, 运用集对分析定性与定量结合的优点, 同时利用灰色关联信息确定了差异度系数, 充分考虑不确定性, 建立灾损敏感性与抗旱能力合成风险矩阵、暴露性与抗旱能力合成风险矩阵、灾损敏感性-抗旱能力与暴露性-抗旱能力合成风险矩阵、脆弱性与危险性合成风险矩阵, 进行逐个子系统链式传递评估, 构建了基于风险矩阵的区域农业旱灾风险链式传递的评估方法 CTA-SPARM。

(2) CTA-SPARM 方法应用于安徽省淮河流域的结果表明, 亳州、淮北、宿州、阜阳、蚌埠、滁州淮河流域旱灾风险较高, 为中险或以上, 而淮南、合肥淮河流域、六安淮河流域的旱灾风险相对较低, 为轻险或以下, 这些评估结果符合实际情况, 可为安徽省淮河流域农业旱灾管理部门决策提供参考。

(3) 灰色关联方法与集对分析耦合的评估方法优势互补, 风险矩阵方法进一步考虑了旱灾风险子系统之间的作用关系, 将农业旱灾风险物理成因与风险链式传递机理科学融合, 对子系统等级进行链式合成, CTA-SPARM 评估方法为区域农业旱灾风险评估提供了新思路, 在其他自然灾害风险评估中具有推广应用价值。

参考文献:

- [1] 姜伟平, 陈海燕, 吴睿. 基于灰色-模糊理论的农业旱灾风险分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 90-94.
- [2] Dracup J A, Lee K S, Paulson E G. On the definition of droughts[J]. Water Resources Research, 1980, 16(2): 297-303.
- [3] Spinoni J, Antofie T, Barbosa P, et al. An overview of drought events in the Carpathian Region in 1961-2010[J]. Advances in Science & Research, 2013, 10(5): 21-32.
- [4] 金菊良, 杨齐祺, 周玉良, 等. 干旱分析技术研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 1-15.
- [5] 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.

- [6] Wilhite D A, Hayes M J, Knutson C, et al. Planning for drought: moving from crisis to risk management [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(4): 697–710.
- [7] 杜云. 淮河流域农业干旱灾害风险评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [8] 董涛, 陈志鹏, 金菊良, 等. 安徽省淮河流域农业旱灾风险正态云模型评估[J]. *东北农业大学学报*, 2017, 48(1): 42–48.
- [9] 王芝兰, 王静, 王劲松. 基于风险价值方法的甘肃省农业旱灾风险评估[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(3): 331–337.
- [10] WANG Qian, LIU Yangyang, TONG Linjing, et al. Rescaled statistics and wavelet analysis on agricultural drought disaster periodic fluctuations in China from 1950 to 2016 [J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3257–3268.
- [11] 王春乙, 姜秀荣, 王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(5): 37–43.
- [12] 孙才志, 张翔. 基于信息扩散技术的辽宁省农业旱灾风险评价[J]. *土壤与作物*, 2008, 24(4): 507–510.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 龙鑫. 泾河流域农业旱灾风险综合评估研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [16] Kamruzzaman M, Kabir M E, Rahman A T M S, et al. Modeling of agricultural drought risk pattern using Markov chain and GIS in the western part of Bangladesh [J]. *Environment Development & Sustainability*, 2018, 20(2): 1–20.
- [17] 金菊良, 沈时兴, 潘争伟, 等. 水资源集对分析理论与应用研究进展[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(4): 54–66.
- [18] 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.
- [19] 潘争伟, 周戎星, 戚晓明, 等. 水资源环境系统脆弱性分析及评价方法研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(4): 72–78.
- [20] 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, 2007.
- [21] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- [22] 罗党, 张曼曼. 灰信息下干旱灾害风险影响因素的灰色关联分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(5): 82–87.
- [23] 卢亚丽, 杨筱. 郑州航空港与区域经济发展的灰色关联度分析[J]. *华北水利水电大学学报(社会科学版)*, 2017, 33(3): 20–24.
- [24] 张文. 基于灰色关联分析与集对分析的区域水资源承载力评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [25] 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.
- [26] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 1997, 33(1): 12–20.
- [27] 王思琪, 王贺龙. 城市供水干旱预警与应急调度研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(5): 88–94.

Chain Transfer Assessment Method of Regional Agricultural Drought Risk Based on Risk Matrix

DONG Tao¹, JIN Juliang^{2,3}, WANG Zhenlong¹, CUI Yi⁴, NING Shaowei^{2,3}, CHEN Menglu^{2,3}

(1. *Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Hefei 233088, China;*

2. *School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*

3. *Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;* 4. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)*

Abstract: In order to make a comprehensive assessment of the risk of agricultural drought, model considered indices of four assessment subsystems and their interaction relations to analysis regional risk level, namely, hazard subsystem, the exposure subsystem, vulnerability subsystem and drought resistance subsystem. And the weights were determined by the genetic fuzzy analytic hierarchy process. The each subsystem of agricultural drought was evaluated by set pair analysis and grey correlation. And the evaluation result of the four subsystems was integrated by risk matrix. Finally, the chain transfer assessment model of regional agricultural drought risk based on set pair analysis and risk matrix (CTA-SPARM) was established. The results of applying CTA-SPARM to Huaihe River Basin in Anhui Province of China show that Bozhou was at high risk, Huaibei, Suzhou, Bengbu, Fuyang and Huaihe River Basin in Chuzhou were at medium risk, the Huaihe River Basin in Hefei was at weak risk, Huainan and Huaihe River Basin in Lu'an were at micro risk. The above result was consistent with the actual situation, chain compound assessment model based on the improved set pair analysis and risk matrix was scientific and reasonable, which can provide a new idea for regional agricultural drought risk assessment, and have application value in risk assessment of the actual natural disasters.

Key words: agricultural drought disaster; risk assessment; set pair analysis; risk matrix; gray correlation; chain transfer; Huaihe River Basin of Anhui Province