

# 基于模糊聚类循环迭代模型的陕西省 农业干旱风险评估与区划

吴迪<sup>1</sup>,张海涛<sup>2</sup>,何斌<sup>3</sup>,王全九<sup>3</sup>,周蓓蓓<sup>3</sup>

(1.中国灌溉排水发展中心,北京 100054;2.水利部发展研究中心,北京 100038;

3.西安理工大学水利水电学院/西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,陕西 西安 710048)

**摘要:**为了加强陕西省农业干旱风险评估和应急管理的能力,以10个地级市为研究对象,选择表征农业干旱风险的危害性、暴露性、脆弱性和抗旱能力等方面的17个代表性指标,建立了具有区域适用性的农业干旱风险评估指标体系;基于模糊聚类循环迭代方法构建了农业干旱风险评估模型,并结合GIS技术,对陕西省农业干旱风险进行评估和区划研究。结果表明:全省农业干旱风险具有明显的区域差异性和规律性,极严重-严重干旱风险区主要分布在榆林、渭南、商洛地区;中度干旱风险区主要分布在延安、宝鸡和咸阳地区;一般-轻度干旱风险区主要分布在铜川、安康、西安和汉中地区,农业干旱风险总体呈北部地区大于南部地区,关中东部地区高于西部地区的特点。依据研究结果,为管理部门决策制定提出了不同风险区抗旱减灾措施建议。

**关键词:**农业干旱;风险区划;地理信息系统;模糊聚类循环迭代模型;陕西省

**中图分类号:**S162.5 **文献标志码:**A

## Assessment and zoning of agriculture drought risk based on fuzzy clustering iterative model in Shaanxi

WU Di<sup>1</sup>, ZHANG Hai-tao<sup>2</sup>, HE Bin<sup>3</sup>, WANG Quan-jiu<sup>3</sup>, ZHOU Bei-bei<sup>3</sup>

(1. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China; 2. Development Research Centre of Ministry of Water Resources China, Beijing 100038, China; 3. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** Agricultural drought risk of 10 cities were investigated to strengthen agricultural drought risk assessment and emergency management capacity in Shaanxi by a fuzzy clustering iterative model. The assessing system was constructed by selected 17 representative indexes (including hazard, exposure, vulnerability and resilience) of agricultural drought risk. Further more, GIS technology was used in agricultural drought risk zoning. The results showed that difference and regularity was obvious among the spatial distribution of agricultural drought risk in different regions. The regions exhibiting high to very high risk, were mainly distributed throughout Yulin in Northern Shaanxi, Weinan and Shangluo. The regions exhibiting moderate risk were mainly distributed throughout Yanan, Baoji and Xianyang. The regions exhibiting slight to low risk were mainly distributed in Tongchuan, Ankang, Xi'an and Hangzhong. Agricultural drought risk in northern Shaanxi was relatively stronger than that in the Southern, while drought risk in the eastern Guanzhong was higher than in the western. Finally, adaptive measures and suggestions were proposed according to the respective characteristics of drought risk regions. The findings could provide a reference for administrative department to make a decision on drought mitigation.

**Keywords:** agricultural drought, risk zoning, geographical information system (GIS), fuzzy clustering iterative model, Shaanxi Province

在全球气候变暖背景下,洪水、干旱、高温、台风、雨雪冰冻等极端天气/气候事件加剧,特别是20世纪80年代以来,极端天气/气候事件频繁发生,给社会经济和人民生活造成严重影响和损失<sup>[1,2]</sup>。2011年11月,在乌干达坎帕拉召开的政府间气候变化专门委员会(IPCC)会议上,第一工作组(WG I)和第二工作组(WG II)联合发布了《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》。报告认为:极端事件影响的严重性不仅取决于极端事件本身,还取决于承灾体的暴露度和脆弱性,两者是灾害风险的主要决定因素<sup>[3]</sup>。因此,在目前对致灾因子风险性认识不足并难以调控的情况下,采取有效措施减少干旱的暴露度和脆弱性,并提高对各种潜在极端气候不利影响的应变能力,是达到防旱减灾目的的主要途径。

根据对自然灾害的认识过程,早期Maskrey<sup>[4]</sup>提出自然灾害风险度可通过易损性与危险性之和来评价,Smith<sup>[5]</sup>提出风险度是概率和损失的乘积,随后Okada等<sup>[6]</sup>认为自然灾害风险是由致灾因子危险性、承灾体暴露性和脆弱性这3项因素共同作用形成的。近年来,国内学者在干旱风险概念模型及定量研究方面也开展了大量工作,并将原有理论和方法进行丰富<sup>[7]</sup>,认为自然灾害风险除了包括危险性、暴露性、脆弱性要素外,还应包括抗旱减灾能力要素<sup>[8,9]</sup>,由于该方法综合考虑了干旱影响因素的所有过程,因此在自然灾害风险评估中应用广泛。常用方法有层次分析法(AHP)<sup>[10-12]</sup>、模糊综合评价法<sup>[13]</sup>、熵权法和德尔菲法(专家经验法)<sup>[14]</sup>,还有基于信息扩散理论<sup>[15]</sup>、马尔柯夫链模型<sup>[16]</sup>等其它评价方法。综合目前已有研究成果,干旱风险研究还存在以下不足:1)干旱风险概念框架还不明晰,缺乏准确统一的概念界定,因此,尚未建立统一的干旱风险评价指标体系;2)农业干旱风险形成机理复杂,影响因素多、不确定性大,传统层次分析法等虽简单实用,但在指标权重确定上还存在一定的主观性和片面性,同时评价指标较多时,判断矩阵也不易构建;3)多数研究以单一作物或特定空间尺度及某一时间截面展开,评估时段多为一年,干旱风险单元空间分布格局与特征研究较多。但在时间维度上,年际间变化研究较少;4)缺乏对社会经济因素的考虑,尤其是抗旱能力方面相关指标考虑不足。

针对上述问题,本文以陕西省10个地级市为评价单元,建立能反映干旱风险危害性、暴露性、脆弱性和抗旱能力方面的陕西农业干旱风险评价指标

体系;构建基于多层次、多指标模糊聚类循环迭代方法的区域农业干旱风险评估模型,并结合GIS技术对全省农业干旱风险进行评估和区划。研究中尝试将循环迭代算法与模糊综合评判法相结合,通过设定目标函数,得到满足计算精度要求的最优指标权重向量,拓展了干旱风险的定量评估方法。研究成果可为陕西省抗旱减灾决策制定和干旱风险管理提供参考。

## 1 研究区概况

如图1所示,陕西地处我国内陆腹地,地域南北跨度大,总面积20.56万km<sup>2</sup>。全省下辖10市1区,包括榆林、延安、铜川、渭南、西安、咸阳、宝鸡、商洛、汉中、安康和杨凌示范区。陕西属典型的大陆季风气候,南北气候差异明显。降水分布特点是南部大于北部,山区大于平原、河谷地带,关中平原、陕南地区的西部大于东部;而温度分布自南向北、自东向西呈逐渐降低趋势。陕西地貌类型复杂多样,地势总体特点南北高中间低,并以秦岭、北山为界,形成北部陕北黄土高原、中部关中平原和南部秦巴山区三大自然区域。

陕西自然灾害频繁,干旱是对全省国民经济(尤其是农业生产)危害最大的自然灾害之一,并具

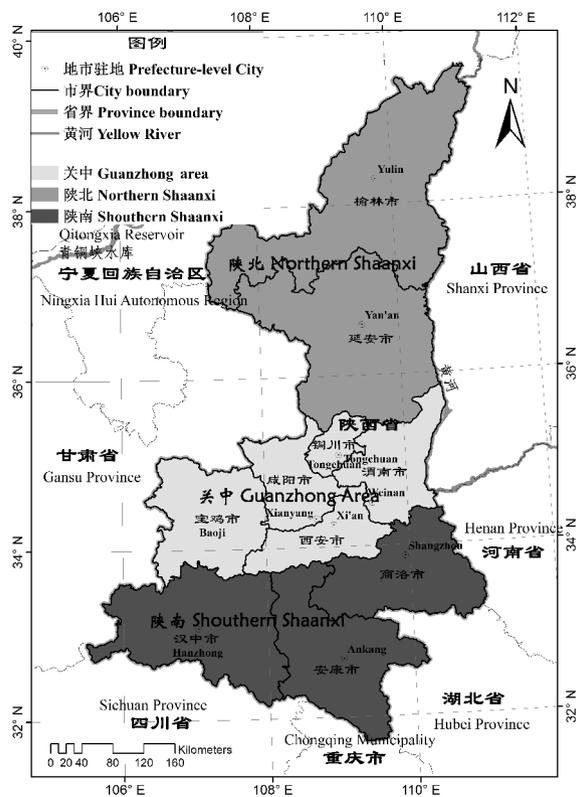


图1 陕西省地理位置

Fig.1 Geographical location of Shaanxi Province

有频率高、范围广、时间长、危害大的特点<sup>[17]</sup>。1950-2011年,全省每年都有不同程度的旱情,62年间全省累计发生旱灾56年次,可谓“十年九旱”。2008-2011年,全省年均受旱面积约占耕地面积的

40.6%。图2为2006-2014年陕西省因旱受灾面积统计<sup>[18]</sup>。总体上看,近年来在极端天气/气候事件频率和强度增加态势下,全省旱情及早灾损失呈加重趋势,给抗旱管理带来严峻挑战。

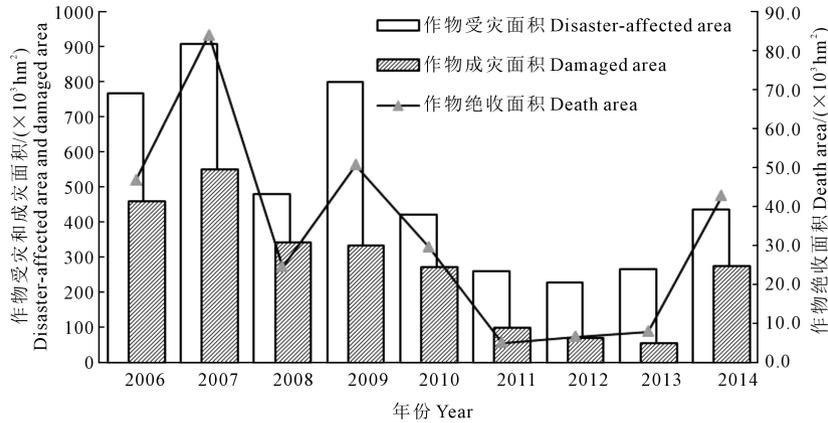


图2 2006-2014年陕西省因旱受灾面积统计

Fig.2 Statistics of affected area by drought from 2006 to 2014 in Shaanxi

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源

本文选择陕西省10个地级市作为评价单元,由于杨凌示范区耕地面积较小,研究中将其纳入咸阳市一并讨论。气象数据来源于陕西省气象局,包括1957-2013年全省23个气象站逐日降水、最高气温和最低气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数等;社会经济数据来源于2010-2014年《陕西统计年鉴》;水资源数据来源于2009-2013年《陕西省水资源公报》和《陕西省水资源调查评价》,具体详见表1。

### 2.2 研究方法

通常认为,农业干旱风险由危险性、暴露性、脆弱性和抗旱能力四项要素构成<sup>[19]</sup>,其中致灾因子危险性、承灾体暴露性和环境脆弱性增强了干旱风险,而区域抗旱能力对干旱发生起到抑制作用,降低了旱灾风险。基于上述原理,通过构建农业干旱风险综合指数ADRCI(Agricultural Drought Risk Comprehensive Index)来度量区域农业干旱风险程度;同时在此基础上乘以100,使综合指数介于0~100之间。其表达式为:

$$ADRCI = (100 \times H \times E \times V) / R \quad (1)$$

式中, $H$ 为致灾因子的危险性, $E$ 为承灾体的暴露性, $V$ 为环境的脆弱性, $R$ 为区域的抗旱能力。乘以100是把综合指数值放大,使结果更加直观。 $ADRCI$ 为农业干旱风险综合指数,其大小可以表示区域发生干旱风险的高低,指标值越大,风险越高。

2.2.1 农业干旱风险评价指标 借鉴相关研究成

果,并结合对研究区农业干旱成因分析,研究提出了能反映陕西农业干旱风险的危险性、暴露性、脆弱性和抗旱能力方面的17个代表性指标(表1),具体分述如下:

(1)危险性(hazard,  $Ha$ )指由于旱灾发生的强度和频率导致可能造成的危害剧烈程度。由于冬小麦是陕西主要粮食作物,以及冬小麦休闲期的土壤含水量和需水关键期的降水量对冬小麦产量的形成影响很大,因此选取了冬小麦休闲期前期降水指数( $API$ )和需水关键期水分亏缺指数( $CWDI$ )作为危险性评价的2个指标;鉴于玉米、水稻等其它季节作物生长期的需水要求,以及在气候暖干化条件下会加剧农业干旱的发生和降水距平百分率在陕西具有较好适用性<sup>[20,21]</sup>,还选取全年干燥度指数( $AI$ )和降水距平百分率( $D_p$ ),一并构成了危险性评价的主要指标。

前期降水指数( $Ha1$ )<sup>[22]</sup>反映了作物生育前期降水对土壤水分的补给情况,其大小直接影响作物的苗期生长,其值越大,危险性越小。冬小麦休闲期的前期降水指数计算公式如下:

$$API(i) = \sum_{d=0}^{\infty} k^d \cdot P(i-d) \quad (2)$$

式中, $API(i)$ 为休闲期共 $i$ 天的降水指数; $i$ 为休闲期的天数,陕西冬小麦休闲期一般在6月中旬至9月中旬,即 $i=93$ d; $d$ 为距休闲期最后一天的日数,大小从0到 $i-1$ ; $k$ 为衰减系数, $k$ 值越小,衰减越快,本文 $k$ 取经验值0.955,袁文平等<sup>[23]</sup>研究中的 $k$ 取0.9, $k$ 取值较大时相对降低了 $API$ 对当前降水的敏

感性,可以避免API由于较小降水过程而出现频繁波动; $P$ 为降水量(mm)。

水分亏缺指数( $Ha2$ )<sup>[24]</sup>是表征作物水分亏缺程度的指标,其值为作物需水量与实际供水量之差。研究表明<sup>[25]</sup>能否保证冬小麦需水关键期的供水量,直接影响到它的最终产量,水分亏缺指数越大,危险性越大。分别计算各地级市冬小麦需水关键期50d内的水分亏缺指数,计算公式如下:

$$CWDI = a \times CWDI_i + b \times CWDI_{i-1} + c \times CWDI_{i-2} + d \times CWDI_{i-3} + e \times CWDI_{i-4} \quad (3)$$

式中, $CWDI$ 为生育期按旬时段计算的累计水分亏缺指数,由于作物干旱主要体现为累积效应,水分亏缺指数一般计算连续5旬的作物亏缺指数; $CWDI_i, CWDI_{i-1}, CWDI_{i-2}, CWDI_{i-3}, CWDI_{i-4}$ 分别为该旬及前4旬水分亏缺指数; $a, b, c, d, e$ 为对应的累计权重系数,一般情况下, $a$ 取值0.3、 $b$ 取值0.25、 $c$ 取值0.2、 $d$ 取值0.15、 $e$ 取值0.1<sup>[24, 26]</sup>。第*i*旬的水分亏缺指数计算公式如下:

$$CWDI_i = \begin{cases} (ET_c - P_i) / ET_c \times 100\% & ET_c \geq P_i \\ 0 & ET_c < P_i \end{cases} \quad (4)$$

式中, $CWDI_i$ 是第*i*旬作物水分亏缺指数(%); $ET_c$ 是该旬作物需水量(mm); $P_i$ 是第*i*旬降水量(mm)。

$$ET_c = k_c \times ET_0 \quad (5)$$

式中, $k_c$ 为冬小麦需水关键期平均作物系数,陕北、关中、陕南地区分别取0.971、1.207和1.092<sup>[27]</sup>;  $ET_0$ 为参考作物潜在蒸散量,采用FAO推荐的 $ET_0$  Calculator软件计算。

干燥度指数( $Ha3$ )<sup>[28]</sup>是表征一个地区干湿程度的指标,用某一地区水分收支与热量平衡来表示。在陕西气候暖干化背景下<sup>[29]</sup>,温度升高,干燥度指数加大,导致农作物耗水量增加,加剧农业干旱的危害,计算公式如下:

$$AI = \frac{ET_0}{P} \quad (6)$$

式中, $AI$ 为干燥度指数; $ET_0$ 为参考作物潜在蒸散量(mm); $P$ 为降水量(mm)。

降水距平百分率( $Ha4$ )<sup>[30]</sup>反映了一段时期内,水文要素值偏离同期多年平均值的程度。降水是农业生产的主要水源,其值越大,危险性越小,计算公式如下:

$$D_p = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $D_p$ 为降水距平百分率(%); $P$ 为计算时段内降水量(mm); $\bar{P}$ 为多年同期平均降水量(mm)。

(2) 暴露性(exposure,  $Ex$ )指在干旱灾害发生过程中承灾体与致灾因子的接触程度。农业干旱方面主要反映在农作物播种面积上,考虑到陕西粮食、水果典型作物播种面积以及耕地灌溉条件,选取复种指数、粮食作物播种面积比、果园面积占土地面积百分率和雨养农业占耕地面积的比例作为暴露性评价的指标。复种指数( $Ex1$ )指耕地上全年作物总播种面积与耕地面积之比,是反映耕地利用程度的指标;粮食作物播种面积比( $Ex2$ )指粮食作物播种面积与总播种面积之比;果园面积占土地面积百分率( $Ex3$ )反映了区域水果种植面积的大小,近年来随着果园面积不断增加,干旱暴露性风险也在不断加大;雨养农业占耕地面积的比例( $Ex4$ )指非灌溉耕地面积占耕地面积的比例。以上4个指标值越大,暴露性越高。

(3) 脆弱性(vulnerability,  $Vu$ )指承灾体抵御干旱灾害能力的大小,主要体现在农灌用水量、水资源可利用量和生态环境优劣上。农业用水是各行业用水中最大的部分,保证它的供给是确保粮食丰收的前提;引汉济渭工程投入运行后,关中地下水取水工程和已经封存的地下水工程将作为抗旱应急备用水源;产水模数指水资源总量与区域面积之比,它反映区域地表水和地下水的资源总量情况;水土流失会导致生态环境恶化,是陕北、陕南普遍的自然灾害。因此,选取农灌用水比( $Vu1$ )、单位面积地下水可利用量( $Vu2$ )、产水模数( $Vu3$ )和水土流失面积比( $Vu4$ )作为脆弱性评价的指标。其中, $Vu1, Vu2, Vu3$ 越大,脆弱性越低, $Vu4$ 越大,脆弱性越高。

(4) 抗旱能力(resistance,  $Re$ )指受灾区通过抗旱行动减少灾害损失的能力。一般认为,农用机械化水平越高,可以保证在干旱发生前作物得到及时收获,降低旱灾损失;农田水利设施和水源工程是灌溉农业的基础,旱灾发生时,通过引水灌溉可有效缓解农业旱情;抗旱资金投入和农民的抗旱意识在灾后恢复中能起到指导抗旱、减少损失的作用。因此,选取了单位耕地面积上农业机械总动力( $Re1$ )、单位耕地面积上人均生产总值( $Re2$ )、灌溉水利用系数( $Re3$ )、单位耕地面积上水源工程供水能力( $Re4$ )和普通中学在校人数比( $Re5$ )作为抗旱能力评

价的指标。以上指标值越大,抗旱能力越强。

表 1 陕西省农业干旱风险评价指标

Table 1 Evaluating indicators of agricultural drought risk in Shaanxi

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	数据来源 Data sources
干旱风险综合指数 Drought risk comprehensive index	危险性 Hazard	前期降水指数 API ( $Ha1$ )	陕西气象局
		冬小麦水分亏缺指数 CWDI ( $Ha2$ )	陕西气象局
		干燥度指数 AI ( $Ha3$ )	陕西气象局
		降水距平百分率 $D_p$ ( $Ha4$ )	陕西气象局
	暴露性 Exposure	复种指数 ( $Ex1$ )	统计年鉴
		粮食作物播种面积比 ( $Ex2$ )	统计年鉴
		果园面积占土地面积百分率 ( $Ex3$ )	统计年鉴
	脆弱性 Vulnerability	雨养农业占耕地面积的比例 ( $Ex4$ )	统计年鉴
		农灌用水比 ( $Vu1$ )	统计年鉴
		单位面积地下水可利用量 ( $Vu2$ )	陕西省水资源调查评价
		产水模数 ( $Vu3$ )	水资源公报
		水土流失面积比 ( $Vu4$ )	科技期刊 <sup>[31]</sup>
	抗旱能力 Resilience	单位耕地上农用机械总动力 ( $Re1$ )	统计年鉴
		单位耕地上人均生产总值 ( $Re2$ )	统计年鉴
		灌溉水利用系数 ( $Re3$ )	政府文件 <sup>[32]</sup>
单位耕地上水源工程供水能力 ( $Re4$ )		水资源公报	
普通中学在校学生人数比 ( $Re5$ )		统计年鉴	

注 Note:  $Ha1$ —antecedent precipitation index;  $Ha2$ —water deficit index of winter wheat;  $Ha3$ —aridity index;  $Ha4$ —percentage of precipitation anomaly;  $Ex1$ —multiple cropping index;  $Ex2$ —rate of grain crops sown area to total sown area;  $Ex3$ —rate of orchard area to land area;  $Ex4$ —rate of rain-fed agriculture area to cultivated land area;  $Vu1$ —rate of farmland irrigation water to total water use;  $Vu2$ —rate of reliable ground water quantity to regional area;  $Vu3$ —water production module;  $Vu4$ —rate of soil and water loss area to land area;  $Re1$ —agricultural machinery power to cultivated land area;  $Re2$ —rate of gross domestic product per capita to cultivated land area;  $Re3$ —effective utilization coefficient of irrigated water use;  $Re4$ —water supply capacity to cultivated land area;  $Re5$ —rate of regular secondary schools enrollment to usual residents by city.

2.2.2 模糊聚类循环迭代模型 模糊综合评判法是一种基于模糊数学的综合评价方法。该方法应用模糊变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评价事物相关的各个因素,对其所作的综合评判与决策。当事物影响因素较多,又具有很强的模糊性时,具有明显优势<sup>[33]</sup>;同时结合循环迭代算法,通过设定目标函数,可得到满足计算精度要求的最优指标权向量。

在干旱风险评价中,依据一定的评价标准分  $c$  级对由  $n$  个评价样本的  $m$  个指标进行评价。 $n$  个样本组成评价指标集  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,用  $m$  个指标特征值向量  $x_j = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}$  对样本进行聚类,则有指标特征值矩阵  $X = (x_{ij})$ ,  $x_{ij}$  为样本  $j$  指标的特征值;  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

标准样本集特征矩阵  $Y = (y_{ih})_{m \times c}$ ,  $Y_{ih}$  为标准样本对应指标  $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$  的标准限值。由于  $m$  个指标特征值量纲不同,为增加评价样本特征指标值之间的可比性,需对指标特征值进行  $[0, 1]$  规格化处理,得到指标特征值规格化矩阵  $R = (r_{ij})$ ,  $r_{ij}$  指标特征值规格化数;  $0 \leq r_{ij} \leq 1; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $r_{ij}$  为第  $j (j = 1, 2, \dots, n)$  个评价样本关于指标  $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$  的模糊特征值,且满足如下条件:评价样本指标特征量值越大越优型

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} \quad (9)$$

评价样本指标特征量值越小越优型

$$r_{ij} = \frac{x_{i1} - y_{ij}}{y_{i1} - y_{ic}} \quad (10)$$

评价样本指标特征量值越靠近中间某值越优型

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{x_{ij} - y_{imid}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{imid} < x_{ij} < y_{i1} \\ 1 - \frac{y_{imid} - x_{ij}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{ic} < x_{ij} < y_{imid} \end{cases} \quad (11)$$

式(9) - (11)即为评价样本指标特征值规格化处理公式。

设  $n$  个样本依据  $m$  个指标特征值按  $c$  个类别进行聚类,其模糊聚类矩阵为  $U = (u_{hj})$ ,  $u_{hj}$  为样本  $j$  隶属于类别  $h$  的相对隶属度;  $h = 1, 2, \dots, c; j = 1,$

2, …, n。满足条件:

$$\sum_{h=1}^c u_{hj} = 1, \quad \sum_{j=1}^n u_{hj} > 0, 0 \leq u_{hj} \leq 1 \quad (12)$$

设类别  $h$  的  $m$  个指标特征值规格化数为  $h$  类的聚类中心,则  $c$  个类别的聚类中心可用  $m \times c$  阶模糊聚类中心矩阵:

$$S = (s_{ih}) \quad (13)$$

$s_{ih}$  为类别  $h$  指标  $i$  的聚类中心规格化数;  $0 \leq s_{ih} \leq 1; i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c$ 。

样本  $j$  的  $m$  个指标特征值规格化数用向量表示为:

$$r_j = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj})^T \quad (14)$$

类别  $h$  的聚类中心规格化数用向量表示为:

$$s_h = (s_{1h}, s_{2h}, \dots, s_{mh})^T \quad (15)$$

$$s = \left( 1, \frac{c-2}{c-1}, \frac{c-3}{c-1}, \dots, \frac{1}{c-1}, 0 \right) \quad (16)$$

考虑不同指标对聚类的影响不同,引入指标权向量:

$$\omega_i = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

满足:

$$\sum_{i=1}^m \omega_i = 1, \quad 0 \leq \omega_i \leq 1 \quad (18)$$

样本  $j$  与类别  $h$  之间的差异,用广义欧氏权距离

$$D_{hj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m [\omega_i (r_{ij} - s_{ih})]^2} \quad (19)$$

表示。

样本  $j$  隶属于类别  $h$  的相对隶属度为  $u_{hj}$ ,为求解样本  $j$  隶属于类别  $h$  的最优相对隶属度,建立目标函数:

$$\min \{ F(u_{hj}) = \sum_{h=1}^c u_{hj}^2 D_{hj}^2 \} \quad (20)$$

样本  $j$  与  $c$  个类别的差异的综合权衡量可以表示为:

$$f_j(u_j, s, \omega) = \sum_{h=1}^c \left\{ u_{hj}^2 \left[ \sum_{i=1}^m \omega_i (r_{ij} - s_{ih}) \right]^2 \right\} \quad (21)$$

建立目标函数:

$$\min \{ f(u, s, \omega) = [f_1(u_1, s, \omega), f_2(u_2, s, \omega), \dots, f_n(u_n, s, \omega)] \} \quad (22)$$

由于样本没有偏好关系,目标函数式可用等权重的线性加权平均法集结为单目标优化问题,构造拉格朗日函数并计算后得到:

$$\omega_i = \sum_{k=1}^m \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{kj} - s_{kh})]^2} \right]^{-1};$$

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, D_{hj} = 0, & k \neq h \\ \left\{ \sum_{k=1}^c \left[ \frac{\sum_{i=1}^m [\omega_i (r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{i=1}^m [\omega_i (r_{kj} - s_{ik})]^2} \right] \right\}^{-1}, & D_{hj} \neq 0 \\ 1, & D_{hj} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

模糊聚类循环迭代模型的求解步骤如下:

- 1) 给定聚类数  $c$  及迭代计算精度  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ;
- 2) 设初始权向量  $(\omega_i^l)$ , 初始模糊聚类矩阵  $(\omega_{hj}^l), l = 0$ ,
- 3) 分别计算  $(\omega_i^{l+1}), (\omega_{hj}^{l+1})$ ;
- 4) 如满足:  $\max | \omega_i^{l+1} - \omega_i^l | \leq \varepsilon_1, \max | u_{hj}^{l+1} - u_{hj}^l | \leq \varepsilon_2$ , 则迭代结束,  $(\omega_i^{l+1}), (\omega_{hj}^{l+1})$  可作为满足计算精度要求的最优指标权向量  $(\omega_i^*)$ 、最优模糊聚类矩阵  $(\omega_{hj}^*)$ , 否则  $l = l + 1$ , 继续进行迭代计算。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 评价指标权重确定

采用 2009–2013 年各地级市评价指标的 5 年平均值,利用构建的干旱风险评估模型对现状陕西省农业干旱风险进行评价,并用 MATLAB 软件编制模型计算程序,经过 23 次迭代运算,得到满足  $\max | \omega_i^{23} - \omega_i^{22} | \leq 0.0001, \max | u_{hj}^{23} - u_{hj}^{22} | \leq 0.0001$  条件的指标权重向量  $\omega$ 。

$$\omega = (0.080, 0.053, 0.087, 0.057, 0.038, 0.059, 0.045, 0.058, 0.061, 0.049, 0.062, 0.0561, 0.091, 0.053, 0.047, 0.068, 0.036)$$

由表 2 可见,在农业干旱风险危险性因子中,干燥度指数对危险性因子影响最大,其次是前期降水指数,而降水距百分率和冬小麦水分亏缺指数对危险性因子影响相对较小,说明在水资源短缺的陕西降水量偏少是决定干旱严重程度的主要因素;在干旱风险暴露性因子中,粮食作物播种面积和雨养农业占耕地面积的比例对暴露性因子影响相对较大,其次是果园面积占土地面积百分率,而复种指数对暴露性因子影响相对较小,说明以传统粮食生产为主的雨养农业,其灌溉得不到有效保证,容易发生干旱;在干旱风险脆弱性因子中,产水模数和农灌用水比对脆弱性因子影响相对较大,其次是

水土流失面积比,而单位面积地下水可利用量对脆弱性因子影响相对较小,说明区域水资源禀赋和农业灌溉条件越好,供水能力强,干旱就不容易发生;在干旱风险抗旱能力因子中,单位耕地面积上农用机械总动力对抗旱能力因子影响最大,其次是单位耕地面积上水源工程供水能力,再次是单位耕地面积上人均生产总值和灌溉水利用系数,而普通中学在校学生人数比对抗旱能力因子影响相对较小,说明对农业的投入和重视程度越高,越有利于农业干旱发生之后的恢复。总体上看,通过模糊聚类循环迭代模型计算的各指标权重值大小基本能够反映陕西农业干旱形成的主要自然和社会因素,具有一定的代表性。

表 2 陕西省农业干旱风险评价指标权重值

Table 2 Evaluating indicators weights of agricultural drought risk in Shaanxi

风险因子 Risk factor	评价指标 Assessment index	权重 Weight
危险性 Hazard	前期降水指数 API ( <i>Ha1</i> )	0.080
	冬小麦水分亏缺指数 CWDI ( <i>Ha2</i> )	0.053
	干燥度指数 AI ( <i>Ha3</i> )	0.087
	降水距平百分率 $D_p$ ( <i>Ha4</i> )	0.057
暴露性 Exposure	复种指数 ( <i>Ex1</i> )	0.038
	粮食作物播种面积比 ( <i>Ex2</i> )	0.059
	果园面积占土地面积百分率 ( <i>Ex3</i> )	0.045
	雨养农业占耕地面积的比例 ( <i>Ex4</i> )	0.058
脆弱性 Vulnerability	农灌用水比 ( <i>Vu1</i> )	0.061
	单位面积地下水可利用量 ( <i>Vu2</i> )	0.049
	产水模数 ( <i>Vu3</i> )	0.062
	水土流失面积比 ( <i>Vu4</i> )	0.056
抗旱能力 Resilience	单位耕地面积上农用机械总动力 ( <i>Re1</i> )	0.091
	单元耕地面积上人均生产总值 ( <i>Re2</i> )	0.053
	灌溉水利用系数 ( <i>Re3</i> )	0.047
	单位耕地面积上水源工程供水能力 ( <i>Re4</i> )	0.068
	普通中学在校学生人数比 ( <i>Re5</i> )	0.036

注 Note: *Ha1*—antecedent precipitation index; *Ha2*—water deficit index of winter wheat; *Ha3*—aridity index; *Ha4*—percentage of precipitation anomaly; *Ex1*—multiple cropping index; *Ex2*—rate of grain crops sown area to total sown area; *Ex3*—rate of orchard area to land area; *Ex4*—rate of rain-fed agriculture area to cultivated land area; *Vu1*—rate of farmland irrigation water to total water use; *Vu2*—rate of reliable groundwater quantity to regional area; *Vu3*—water production module; *Vu4*—rate of soil and water loss area to land area; *Re1*—agricultural machinery power to cultivated land area; *Re2*—rate of gross domestic product per capita to cultivated land area; *Re3*—effective utilization coefficient of irrigated water use; *Re4*—water supply capacity to cultivated land area; *Re5*—rate of regular secondary schools enrollment to usual residents by city.

### 3.2 干旱风险因子空间特征

不同干旱风险因子采用相应的指数来表示,其大小等于该因子所涉及的各项评价指标的归一化值与其权重乘积之和。各因子空间分布特征分述如下:

从图 3a 可以看出,极严重危害区位于陕北榆林地区,其危害性指数最大,达到了 99.2;严重区分布

在延安、渭南和西安,其危害性指数分别达到了 71.3、71.0 和 68.2;轻度区分布在汉中和安康地区,其危害性指数相对较小,仅为 8.0 和 0.9。总体上看,危害性指数空间分布大致呈由北向南、由东向西逐渐递减趋势,这与全省降水分布特点基本一致。

从图 3b 可以看出,极严重-严重暴露区分布在陕北的延安、榆林地区,其暴露性指数最大,分别达到了 99.8 和 87.6,可能是由于陕北大部分是雨养农业,粮食作物、经济林果种植面积较大所致;中度暴露区分布在铜川、商洛和安康地区,其暴露性指数分别为 80.6、77.1 和 73.6,主要是该区复种指数相对较高,农作物播种面积较大;一般暴露区分布在宝鸡、汉中地区,其暴露性指数相对较低,分别为 31.6 和 19.3,主要是该区粮食作物播种面积比例相对较小所致;轻度暴露区分布在渭南、咸阳和西安地区,其暴露性指数最低,仅为 12.4、10.7 和 0.2,主要是该区为全省主要灌溉农业区,大、中型灌区集中,灌溉条件优越。总体上看,暴露性指数空间分布大致呈南北高、中间低的特点,这与全省的地形地貌、作物种植结构和农业灌溉特点较为一致。

从图 3c 可以看出,极严重脆弱区分布在汉中、渭南地区,其脆弱性指数相对较大,分别为 99.4 和 77.7,主要是该区经济发展相对滞后,地表水源工程蓄水少,地下水可利用量有限;严重脆弱区集中在榆林、安康、咸阳和宝鸡地区,其脆弱性指数分别达到了 69.3、65.9、62.9 和 60.9,主要是该区雨季降水集中,沟壑纵横,土质疏松,植被稀少,水土流失面积较大,生态环境较为脆弱;同时灌溉基础设施薄弱,抗御干旱能力较差;中度脆弱区分布在商洛和西安地区,脆弱性指数分别为 37.2 和 23.9;轻度脆弱区主要分布在延安和铜川,脆弱性指数仅为 7.6 和 0.5,其值相对较小。

从图 3d 可以看出,抗旱能力较强的区域分布在关中地区的西安、宝鸡和咸阳,主要是该区大、中型灌区较为集中,通过近年的灌区续建配套与节水改造,农业生产和灌溉基础条件得到较大改善;其次是陕北的延安、榆林、铜川、渭南,该区天然降水少,但重视抗旱水源工程建设,农民抗旱积极性较高,农业节水技术推广力度大,因此抗御干旱能力较强;汉中和安康地区抗旱能力相对较弱,主要是该区降水量较大,水资源相对丰沛,但灌溉基础设施薄弱,除河谷盆地外耕地面积相对较少,相比陕北地区抗旱能力略显不足。总体上看,抗旱能力指数空间分布特征与降水空间变化趋势相反,与灌溉工程 and 经济发展水平分布特点具有较好一致性。

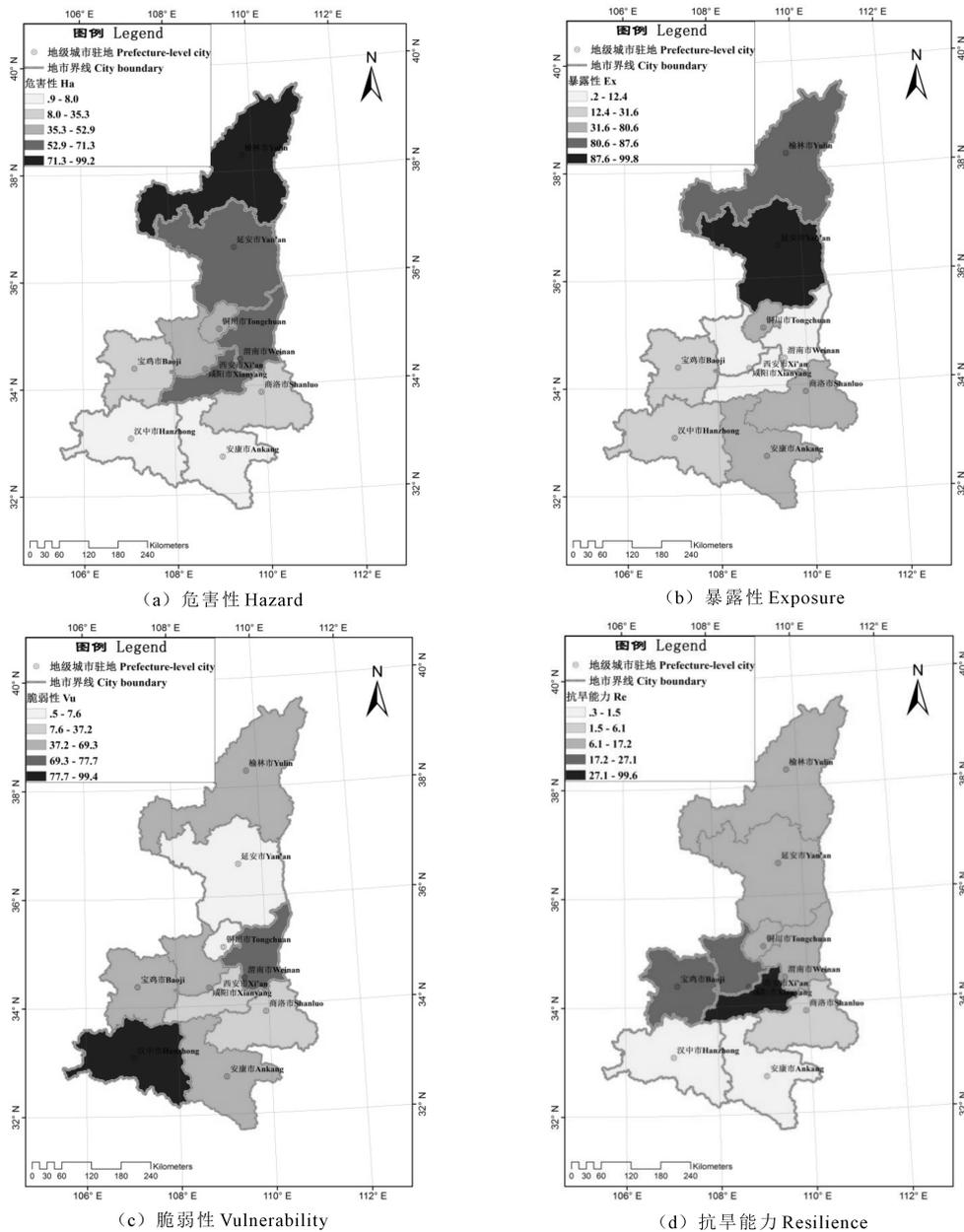


图 3 陕西省农业干旱风险因子空间分布

Fig.3 Spatial distribution of agricultural drought risk factors in Shaanxi

### 3.3 农业干旱风险评估和区划

如图 4 所示,由全省 10 个地级市农业干旱风险评估结果可知,榆林市农业干旱风险综合指数最大,达到了 73.1;其次是渭南市,综合指数达到了 58.8,而汉中市的综合指数最小,仅为 35.9。全省农业干旱风险变化存在明显的区域差异性,总体表现为北部地区农业干旱风险大于南部地区,关中地区东部干旱风险高于西部的特点,这主要是由于不同区域的气候条件、地形地貌、水资源开发利用程度、种植结构、社会经济发展和农业生产力水平等的差异所致。

风险区划研究中指标分级对评估结果至关重

要,参照《旱情等级标准》和《旱情风险评价导则》,将陕西省农业干旱风险区分为极严重风险区(Ⅰ)、严重风险区(Ⅱ)、中度风险区(Ⅲ)、一般风险区(Ⅳ)、轻度风险区(Ⅴ)五个等级。针对研究区实际情况,以及对各指标的综合分析,确定了综合指数和要素指数的边界值,采用 ArcGIS10.1 中的自然断点法,对综合指数和要素指数区间进行划分。脆弱性综合指数和要素指数区间划分结果见表 3。

如图 5 所示:(1)陕西省农业干旱风险极严重区主要分布在陕北的榆林地区,该区降水偏少,蒸发大,土壤类型主要为风沙土,土壤储水和持水能力较差,植被覆盖率较低,是生态农业最脆弱的地

区;(2)严重干旱风险区主要分布在渭南、商洛地区,主要是由于该区气候的干旱化和大陆性气候的增强,使得降水变率加大,更易形成旱涝灾害,同时渭南也是关中平原东部的旱灾频发区<sup>[34,35]</sup>; (3)中度干旱风险区主要分布在延安、宝鸡和咸阳地区,该区主要位于黄土高原和渭北塬区,沟壑密布、干旱少雨但暴雨集中,水土流失严重,生态环境脆弱;由于该区光热资源较丰富,塬面开阔平坦,耕地相对集中连片,土层深厚,土壤类型以黑垆土、黄绵土为主,质地优良,是中国的苹果主产区;(4)一般干旱风险区主要分布在铜川和安康地区,该区主要是

丘陵山区,降水丰沛,水资源开发潜力大,但耕地面积相对较小,主要分布在河谷盆地和低山丘陵;5)轻度干旱风险区主要分布在西安和汉中地区,该区农业发展历史悠久,土质肥沃,灌区分布集中,灌溉设施完善,农业生产和灌溉条件较好,农业综合生产力水平较高。总体上看,干旱风险区划成果与陕西省抗旱规划中的旱灾易发县分布(图 6)基本一致<sup>[36]</sup>,研究成果较好地反映了陕西农业干旱风险程度和分布特点,可为管理部门抗旱减灾决策提供参考。

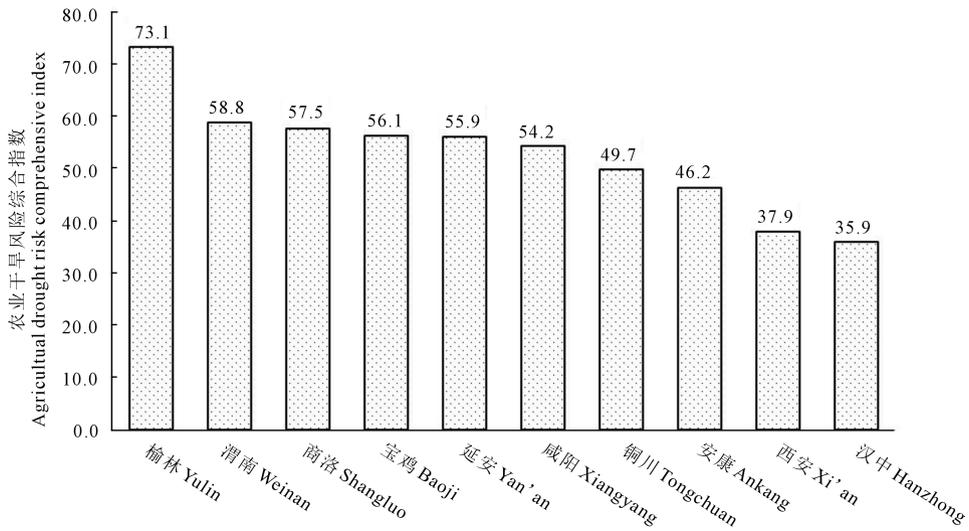


图 4 陕西省各地级市农业干旱风险综合指数

Fig.4 Agricultural drought comprehensive index in various cities of Shaanxi

表 3 农业干旱风险综合指数和要素指数区间划分

Table 3 Grading standard of agricultural drought risk comprehensive index and its components

等级 Classification	等级区划 Classification regionalization	农业干旱风险综合指数范围 Range of agricultural drought risk comprehensive index( $Dr$ )	要素指数范围 Range of factor index
I	极严重区 Very high region	$58.8 \leq Dr < 73.1$	$71.3 \leq Ha < 99.2$ $87.6 \leq Ex < 99.8$ $77.7 \leq Vu < 99.4$ $27.1 \leq Re < 99.6$
II	严重区 High region	$56.1 \leq Dr < 58.8$	$52.9 \leq Ha < 71.3$ $80.6 \leq Ex < 87.6$ $69.3 \leq Vu < 77.7$ $17.2 \leq Re < 27.1$
III	中度区 Moderate region	$49.7 \leq Dr < 56.1$	$35.3 \leq Ha < 52.9$ $31.6 \leq Ex < 80.6$ $37.2 \leq Vu < 69.3$ $6.1 \leq Re < 17.2$
IV	一般区 Slight region	$37.9 \leq Dr < 49.7$	$8.0 \leq Ha < 35.3$ $12.4 \leq Ex < 31.6$ $7.6 \leq Vu < 37.2$ $1.5 \leq Re < 6.1$
V	轻度区 Low region	$Dr < 37.9$	$Ha < 8.0$ $Ex < 12.4$ $Vu < 7.6$ $Re < 1.5$

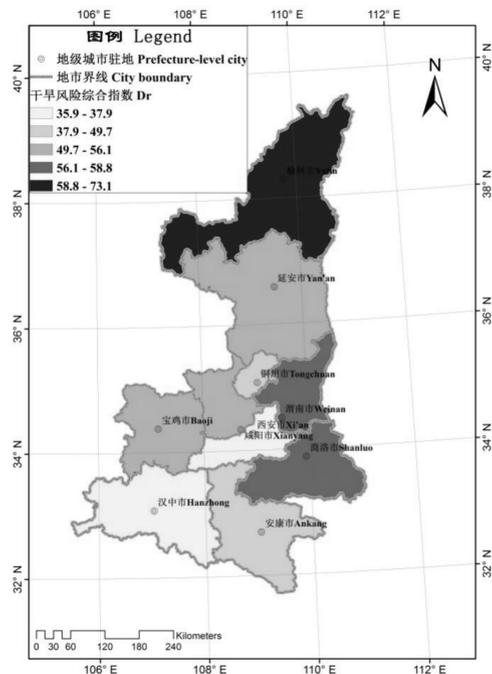


图 5 陕西省农业干旱风险综合指数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of comprehensive index of agricultural drought risk in Shaanxi

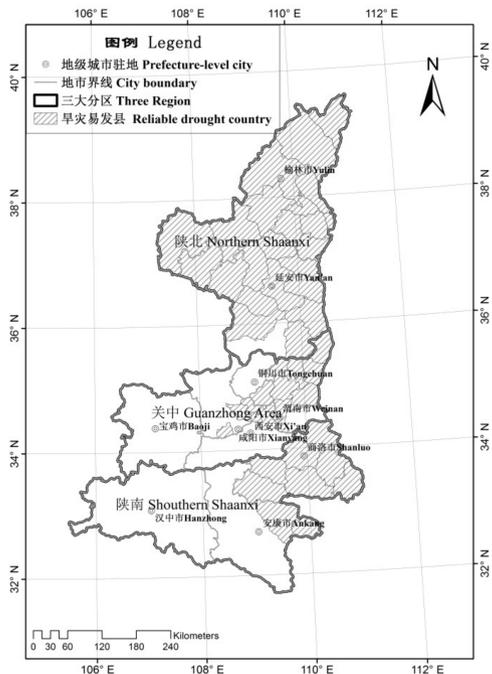


图 6 陕西省易旱县分布

Fig.6 Distribution of reliable drought country in Shaanxi

## 4 结 论

### 4.1 主要结论

以陕西省 10 个地级市为研究对象,通过构建农业干旱风险评价指标和评估模型,对研究区农业干旱风险进行定量评估,并采用 GIS 技术进行了干旱风险区划研究,初步得到以下结论:

- (1)极严重干旱风险区主要分布在陕北的榆林地区;严重干旱风险区主要分布在渭南和商洛地区;中度干旱风险区主要分布在延安、宝鸡和咸阳地区,该区大部分位于黄土高原沟壑区和渭北旱塬区;一般-轻度干旱风险区主要分布在铜川、安康、西安和汉中地区,该区大部分位于关中平原地区,大中型灌区集中,灌溉条件较好。

- (2)全省农业干旱风险因子具有明显空间分布规律。危害性指数大致呈由北向南、由东向西逐渐递减的趋势,这与全省降水分布特征基本一致;暴露性指数空间分布呈显南北高、中间低的特点,这与灌溉和雨养农业分布格局较为一致,与实际情况吻合;抗旱能力指数分布与降水空间分布趋势相反,与全省灌区分布大体一致。因此,在抗旱管理中,应充分考虑区域危害性、暴露性、脆弱性和抗旱

能力空间分布特点,以此为依据制定有针对性的抗旱减灾对策措施。

- (3)针对干旱风险评估的模糊性、不确定性等特点,采用多层次、多指标模糊聚类循环迭代法进行农业干旱风险研究。其特点是模糊综合评判法能较好地消除权重赋值时的主观随意性,而结合循环迭代算法,通过设定目标函数,得到满足计算精度要求的最优指标权向量。该方法可为涉及多因素的干旱风险定量评估提供一种新思路。

- (4)由于农业干旱形成过程复杂,以有限的资料和技术手段精确表达干旱的孕育、发生和演变过程,达到全面准确地分析评价干旱风险仍有一定难度。建议今后应加强遥感、地理信息系统等技术,以及农田水循环、作物生长等机理性模型在农业干旱风险评价、监测和预警中的应用。

### 4.2 对策建议

- (1)对于严重干旱风险区,要在北部风沙摊区以及延河、无定河、北洛河等沿线阶地重点建设地下水取水工程,解决关键需水期农作物灌溉问题;井灌区可考虑管道输水结合喷、微灌和膜上灌,以减少输水和田间无效蒸发,提高灌溉用水效率和效益;加快种植业由传统“粮食-经济作物”为主的二

元结构向“粮食-经济-饲料”协调发展、农牧结合、产供销一体化的三元结构转变;加强以灌草结合为主的生态环境保护措施,防风固沙,涵养水源,改善局地小气候。

(2)严重干旱风险区,因地制宜加强中、小型水源工程建设,增加汛期蓄水能力,并配套完善已有农田水利设施,提高灌溉供水保证率;积极发展耗水少、产量高、效益好的特色农业,提高农民收入水平;科学选育节水抗旱作物品种,推广覆盖保墒农业节水技术,大力发展“管道输水+喷微灌”、“管道输水+小畦灌”等节水灌溉方式;加大抗旱投入力度,扩大农机具补贴范围,鼓励群众购置抗旱设备,增强自我抗旱救灾能力。

(3)中度干旱风险区,积极开展以水窖等雨水集蓄利用工程、低坝引水工程为主的小(微)型抗旱水源工程建设,修复老化水利工程设施,保证农业适时灌溉;加强水土保持综合治理,加快坡改梯和坝地建设,改善农业生产条件,提高抗旱能力;大力发展微灌、地下渗灌等节水灌溉技术和秸秆覆盖、地膜覆盖等农艺节水措施;利用区位优势,发展水土保持型生态农业、特色农业,重点培育具有区域优势的林果业及其精深加工业,提高区域经济水平和增加农民收入,增强灾后恢复能力。

(4)一般-轻度干旱风险区,加强应急水源工程和节水灌溉工程建设资金投入,完善灌溉工程配套设施,大力发展管道输水,推行“大改小、长改短、宽改窄”的标准畦田建设,提高水资源的利用效率和效益,结合小农水重点县和新增粮食产能项目的大中型灌区末级渠系配套改造工程,有效解决“最后一公里”问题;大力推广节水型耕作栽培技术、田间节水灌溉技术和蓄水保墒技术,如推广非充分灌溉、调亏灌溉以及喷微灌等农业节水新技术,以及秸秆覆盖、薄膜覆盖等;加强土壤墒情监测和农业干旱预警,建立和完善干旱应急响应制度和机制;积极探索水价综合改革和水权交易,合理的水价,实行按方收费,利用经济杠杆激发农民节水积极性;加强水情、水量、抗旱预案与对策措施的宣传报道,增强农民抗旱节水意识。

#### 参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the IPCC AR4[C]//Solomon S, Qin D, Man-

ning M, et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007

- [2] 全国抗旱规划编制工作组.全国抗旱规划[R],2010.
- [3] IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[C]//Field C B, V Barros, T F Stocker, et al. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
- [4] Maskrey A. Disaster Mitigation: A Community Based Approach [M].Oxford: Oxfam, 1989.
- [5] Smith K. Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster[M].New York: Routledge, 1996.
- [6] Okada N, TatanoH, HagiharaY, et al. Integrated research on methodological development of urban diagnosis for disaster risk and its applications[J]. Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University, 2004, 47(C): 1-8.
- [7] 史培军.三论灾害研究的理论与实践[J].自然灾害学报,2002, 11(3):1-9.
- [8] 陈香.福建省台风灾害风险评估与区划[J].生态学杂志,2007, 26(6):961-966.
- [9] 张继权,李宁.主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用[M].北京:北京师范大学出版社,2007.
- [10] 秦越,徐翔宇,许凯,等.农业干旱灾害风险模糊评价体系及其应用[J].农业工程学报,2013,29(10):83-91.
- [11] 何斌,王全九,吴迪,等.基于主成分分析和层次分析法相结合的陕西省农业干旱风险评估[J].干旱地区农业研究, 2017,35(1):219-227.
- [12] 李莉,匡昭敏,莫建飞,等.基于 AHP 和 GIS 的广西秋旱灾害风险等级评估[J].农业工程学报,2013,29(19):193-201.
- [13] 张丹.区域旱情中长期预报及农业干旱风险综合评价[D].大连:大连理工大学,2011.
- [14] 孙仲益,张继权,王春乙,等.基于网格 GIS 的安徽省旱涝组合风险区划[J].灾害学,2013,28(1):74-87.
- [15] 陈家金,王加义,林晶.基于信息扩散理论的东南沿海三省农业干旱风险评估[J].干旱地区农业研究,2010,28(6): 248-252.
- [16] 韩宇平,阮本清,周杰.马尔柯夫链模型在区域干旱风险研究中的应用[J].内蒙古师范大学学报(自然科学版),2003,32(1):65-70.
- [17] 翟大明.陕西省抗旱规划实施方案编制的主要做法[J].中国水利,2013,16:16-18.
- [18] 国家防汛抗旱总指挥部,中华人民共和国水利部.中国水旱灾害公报[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [19] 徐新创,葛全胜,郑景云,等.农业干旱风险评估研究综述[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):263-270.
- [20] 刘彦平,蔡焕杰.三种干旱指标在泾惠渠灌区的适用性分析[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):236-241.
- [21] 乔丽,杜继稳,薛春芳,等.干旱指标在陕西省适用性研究[J].

- 干旱地区农业研究,2010,28(2):1-6.
- [22] 王春林,陈慧华,唐力生,等.基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J].气象变化研究进展,2012,8(3):157-163.
- [23] 袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望[J].地球科学进展,2004,19(6):982-988.
- [24] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等.基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J].农业工程学报,2009,25(8):28-34.
- [25] 杜军,张勇,索朗欧珠.西藏冬小麦需水关键期的降水变化趋势分析[J].中国农业气象,2004,25(2):47-50.
- [26] 张艳红,吕厚荃,李森.作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性[J].气象科技,2008,36(5):596-600.
- [27] 陕西省水利水土保持厅,西北农业大学.陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [28] 王亚平,黄耀,张稳.中国东北三省1960-2005年地表干燥度变化趋势[J].地球科学进展,2008,23(6):619-627.
- [29] 彭维英,殷淑燕,鲍小娟.陕西渭北旱塬气候暖干化及干旱灾害趋势判断[J].农业现代化研究,2012,33(1):121-124.
- [30] 王富强,王雷.基于降水距平百分率的河南省干旱特征分析[J].中国农村水利水电,2014,(12):84-88.
- [31] 万红莲.试论陕西水土流失问题[J].陕西农业科学,2008,(6):65-67.
- [32] 陕西省人民政府办公厅.陕西省实行最严格水资源管理制度考核办法[Z].2013-09-23.
- [33] 陈守煜.复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M].吉林:吉林大学出版社,2002.
- [34] 张允,赵景波.近200年来关中地区干旱灾害时空变化研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(7):94-98.
- [35] 李俊霖,延军平,孙虎,等.关中平原东、中、西部气候干旱化程度比较分析[J].干旱区资源与环境,2005,19(1):131-134.
- [36] 陕西省抗旱规划[R].西安:陕西省水利厅,2010.

(上接第229页)

- [11] 刘德祥,董安祥,邓振镛.中国西北地区气候变暖对农业的影响[J].自然资源学报,2005,(1):119-125.
- [12] 刘德祥,董安祥,陆登荣.中国西北地区近43年气候变化及其对农业生产的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):195-201.
- [13] 罗静,张镱锂,刘峰贵,等.青藏高原东北部河湟谷地1726年耕地格局重建[J].地理研究,2014,(7):1285-1296.
- [14] 伏洋,张国胜,颜亮东.气候变化对青海省种植业的影响及适应对策[J].中国农业气象,2004,(3):11-14.
- [15] 王启明.青海省大通县冬小麦复种蔬菜技术研究[J].现代农业科技,2013,15:91-92.
- [16] 青海省统计局.青海统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1993~2011.
- [17] 青海省统计局.青海经济统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1991~1992.
- [18] 赵燕宁,时兴合,王式功,等.青海河湟谷地气候及干旱变化研究[J].中国沙漠,2006,(1):54-59.
- [19] 刘德祥,董安祥,梁东升,等.气候变暖对西北干旱区农作物种植结构的影响[J].中国沙漠,2007,(5):831-836.
- [20] 祁小丽.一种改进的快速聚类算法及并行化研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [21] 徐建英,何旭宏.数据统计分析与SPSS应用[M].北京:人民邮电出版社,2003:253-276.
- [22] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法(第二版)[M].北京:气象出版社,2000:188-198.
- [23] Dong J W, Liu J Y, Tao F L, et al. Spatio-temporal changes in annual accumulated temperature in China and the effects on croppingsystems 1980s to 2000[J].Climate Research,2009,40:37-48.
- [24] 肖国举,仇正跻,张峰举,等.增温对西北半干旱区马铃薯产量和品质的影响[J].生态学报,2015,(3):830-836.
- [25] 徐成忠,董兴玉,杨洪宾,等.积温变迁对夏玉米冬小麦两熟制播期的影响[J].山东农业科学,2009,(2):34-37.
- [26] 刘少华,严登华,翁白莎,等.近50a中国 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空演变[J].干旱区研究,2013,(4):689-696.
- [27] 于东平.气候变化对青海省东部地区农业的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [28] 邓振镛,王强.中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J].生态学报,2010,(22):6278-6288.