

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

何 斌¹, 王全九¹, 吴 迪², 苏李君¹, 单鱼洋¹

(1. 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;

2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100044)

摘要: 农业干旱灾害发生机理复杂, 评价指标众多, 为确定合理的干旱风险评估指标, 以陕西省为研究对象, 提出基于主成分分析和层次分析法(AHP)相结合的农业干旱风险评估指标体系和评估方法。运用主成分分析, 结合陕西省干旱成因及特点, 基于风险四要素(危险性、暴露性、脆弱性和抗旱能力)筛选并构建了农业干旱风险评估指标体系, 采用 AHP 评估了陕西省农业干旱风险。结果表明, 在考虑地区抗旱能力情况下, 陕西省农业干旱风险从北向南, 从东向西均呈现出递减趋势, 北部榆林地区和东部渭南、商洛地区, 农业干旱风险较高。通过主成分分析和 AHP 相结合的评价体系, 可以合理选取评价指标, 缩减指标个数; 准确评估干旱风险, 指出风险要素来源, 为抗旱部门有效识别致灾因子, 提出相应的抗旱减灾方法。

关键词: 农业干旱; 风险评估; 主成分分析; 层次分析法; 陕西省

中图分类号: S423 **文献标志码:** A

Agricultural drought risk assessment in Shaanxi province using principal component analysis and AHP

HE Bin¹, WANG Quan-jiu¹, WU Di², SU Li-jun¹, SHAN Yu-yang¹

(1. 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;

2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100044, China)

Abstract: Agricultural drought disaster mechanism is complex, and its evaluation index is numerous. With the aim of developing reasonable evaluation index and evaluation of drought risk, this study took Shaanxi province as the research object, based on principal component analysis and AHP with the combination of agricultural drought risk assessment index system and evaluation method. The results showed that under the condition of considering regional drought resistance ability, drought risk showed a decreasing trend from north to south and from east to west of Shaanxi. For Yulin region of northern and eastern Weinan, Shangluo prefecture, agricultural drought risk is higher. By combining principal component analysis and AHP evaluation system, we can select evaluation index, reduce index number, and accurately assess the drought risk.

Keywords: agricultural drought; risk assessment; principal component analysis; analytic hierarchy process(AHP); Shaanxi province

在所有自然灾害中, 干旱灾害是全球最为常见的自然灾害。政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告^[1]指出, 未来干旱风险有不断增加趋势。由于特殊的地理位置和气候条件, 我国局部性、区域性干旱灾害连年发生, 干旱受灾和成灾面积呈双线性

上升趋势^[2]。陕西省处于我国生态环境脆弱带上, 加上地形地貌复杂, 气候悬殊, 干旱成为陕西最大的气象灾害^[3]。刘璐^[4]研究表明, 1961—2006 年陕西年受旱面积百分比平均为 48.7%, 2001 年更是达到了 91.9%, 且总体呈上升趋势。

收稿日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51239009; 51409212; 51409213); 陕西省水利科技计划项目“陕西省农业干旱风险评估与区划研究”(2014slkj-1010)

作者简介: 何 斌(1990—), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事农业干旱风险评估与区划研究。E-mail: 415001193@qq.com。

通信作者: 王全九(1964—), 男, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土壤物理与溶质运移。E-mail: wquanjiu@163.com。

为科学评估区域干旱时空变异特性,科研人员建立了许多不同形式的干旱指标,例如李莉等^[5]在研究广西秋旱灾害风险时,选取降水量、少雨日数、地形高程、河网密度、人口密度、GDP 等评价指标。贾建英等^[6]在评价西南地区玉米干旱风险时,选取玉米产量和播种面积等指标。可见干旱风险评价指标之多且不具有同一性。张宝庆^[7]、史晓楠^[8]等认为,在干旱评价工作中,指标的选取往往是最重要的环节之一。而由于指标的选择通常是不确定的,没有完整的规范可参考,也没有理论依据可寻,以往都是根据经验和借鉴已有研究事例进行指标选择。往往忽视了指标间的相关性或个别指标的重要性,而个别指标由于数据离差过大,对评价结果的影响程度更大。所以在评价之前需要对评价指标进行分析处理,选出准确代表研究区域干旱灾害影响因素的评价指标。吴景社、康绍忠等^[9]利用主成分分析对全国节水灌溉分区指标进行降维处理,简化了计算。此外,当前我国农业干旱管理面临着巨大的挑战,急需发展基于机理过程的区域农业干旱风险评价方法^[10]。分析旱灾发生机理,可以找到致灾因子,根据致灾因子提出相应的减灾办法。秦越等^[11]运用 AHP 评价了河北省承德市农业干旱灾害风险,并识别了旱灾主要影响因素。因此,建立一套基于主成分分析的指标选取和 AHP 相结合的农业干旱风险评价体系,对于区域内干旱灾害评估具有重要意义。本文对 27 个农业干旱评价常用指标标准化后建立数据矩阵进行主成分分析,通过分析前 4 个主成分的特征向量,确定陕西省农业干旱指标。将通过主成分分析得出的指标按 4 个风险要素(致灾因子的危险性,承灾体的暴露性,环境的脆弱性和地区的抗旱能力)分组。采用层次分析法将每组指标建立判断矩阵,得出干旱指标权重并对判断矩阵进行一致性检验。另外,对每个指标进行归一化处理。每个指标的权重与其对应归一化处理后的值相乘得到 4 个风险要素的分项综合指标。最终通过综合 4 个风险组成要素,得到反映区域农业干旱风险的综合指标。

1 研究区概况与评价指标

1.1 研究区概况

陕西省地处我国内陆腹地,是连接我国东部和西部、西南的主要通道,欧亚大陆桥的纽带,位于东经 105°29′~115°15′,北纬 31°42′~39°35′。地域南北跨度大,地貌类型复杂多样,地势总的特点是南北高中间低。全省山地面积(含黄土高原)占总面积的

61.8%;平原盆地占 18.8%;沙地荒漠占 19.4%。水资源区域分布总趋势是从南到北逐步递减,陕南水资源相对丰富,关中和陕北的水资源贫乏,南北相差悬殊^[12]。1950—1989 年 40 年间,全省受旱面积累计为 3 778 万 hm^2 ,约占耕地面积的 25.1%;1990—2007 年 18 年间,全省受旱面积累计为 3 071 万 hm^2 ,约占耕地面积的 45.1%,总体上看,农业旱情及早灾损失呈加剧趋势。陕西省下辖十市一区,分别是榆林、延安、铜川、渭南、西安、咸阳、宝鸡、商洛、汉中、安康和杨凌示范区。由于杨凌示范区常用耕地面积小,本文中不予考虑。研究区行政区划及高程如图 1 所示。

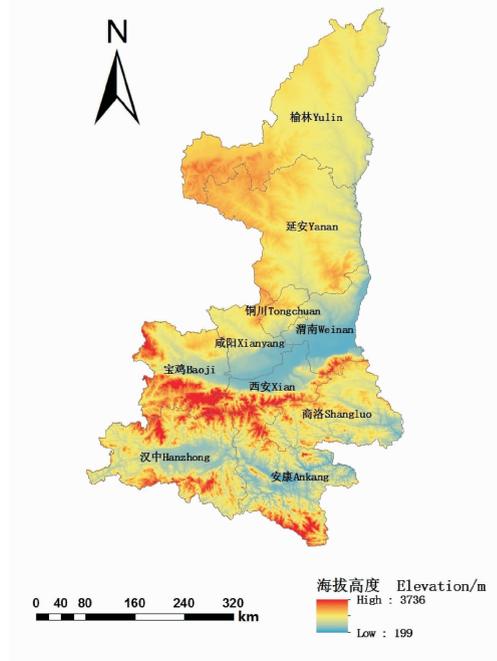


图 1 陕西省行政区划及高程

Fig. 1 Administrative divisions and digital elevation model (DEM) of Shaanxi

1.2 评价指标与数据来源

农业干旱的发生有着十分复杂的机理,在受到自然因素如降水、蒸发、温度、地形等影响的同时,也受到社会因素的影响^[13]。因此,必然衍生出众多分析评价农业干旱的指标,如降水距平百分率、干燥度指数、耕地面积、粮食作物播种面积、有效灌溉面积、生产总值等。在风险研究中,通常认为自然灾害风险是由致灾因子的危险性,承灾体的暴露性和脆弱性 3 个要素以及由此导致的灾情共同组成的宏观结构^[14-15]。此外,受灾地区的抗旱能力也对灾害损失程度产生影响,这个主观性要素称为地区的抗旱能力^[16]。综合考虑干旱灾害发生的自然和社会影响因素,结合陕西省农业干旱特点,列出 27 个研究

干旱风险评价常用指标,其中,气象指标:干燥度指数、平均相对湿度、多年平均降水量、单位面积降水量、多年平均蒸散量、多年平均无降水天数、地下水资源量;土地指标:土地面积、耕地面积、耕地面积与土地面积比、总播种面积、粮食作物播种面积、粮食作物播种面积与土地面积比、人均耕地面积;作物管理指标:主要作物(冬小麦、玉米、棉花和水稻)需水量、农灌用水量占总用水量的比、有效灌溉面积比、雨养农业占耕地面积比、节水灌溉面积比;社会经济指标:人口密度、生产总值、单位播种面积农业生产总值、人均生产总值、农民人均纯收入、粮食作物单位面积产量、粮食总产在全省所占比重、普通中学在校人数占常住人口比。

1.2.1 危险性指标与数据来源 危险性(H, hazard)是指干旱灾害发生的强度和发生的频率导致可能造成的危害剧烈程度。根据陕西省气象局 23 个气象站 1953—2013 年的逐日气象资料,计算得出多年平均降水量、多年平均无降水天数、平均相对湿度和利用彭曼公式计算得出的多年平均蒸散量以及干燥度指数(蒸散量/降雨量)等危险性指标。这些指标均能影响水量平衡,是导致干旱发生的根本原因。其中多年平均降水量指标值越大,危险性越小,其他指标值越大,危险性越大。

1.2.2 暴露性指标与数据来源 暴露性(E, exposure)是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的播种面积和干旱灾害对经济的影响上。土地面积、耕地面积、总播种面积、粮食作物播种面积来源于 1994—2013 年陕西统计年鉴^[17],单位播种面积农业生产总值、耕地面积比、人均耕地面积、粮食作物单位面积产量等指标由以上数据计算得到。此外,根据王翌^[18]2012 年对陕西关中地区粮食生产状况的研究结果,列出了粮食总产在全省所占比重指标。这些指标反映了农作物播种面积和地区农业经济基本状况信息,代表承灾体与致灾因子的接触程度,指标值越大,地区的暴露性越大。

1.2.3 脆弱性指标与数据来源 脆弱性(V, vulnerability)是指承灾体抵御干旱灾害能力的大小。地下水资源量来源于陕西省水资源公报^[19];农灌用水量占总用水量的比、有效灌溉面积比、节水灌溉面积比、雨养农业占耕地面积比、人口密度等指标由 1994—2013 年陕西统计年鉴^[17]中数据计算得到。其中雨养农业占耕地面积比越高,承灾体抵御干旱能力越差,干旱风险越高。人口密度是单位面积土地上居住的人口数,它反映了某一地区人口密集程

度,人口密度与干旱脆弱性成正相关,人口密度大对资源环境的压力大,直接影响生态环境质量与安全。其余指标值越大,抵御干旱灾害能力越强,脆弱性越小。

1.2.4 抗旱能力指标与数据来源 抗旱能力(RE, resistance)是指受灾区通过抗旱行动减少灾害损失的能力。一般认为抗旱能力与某一地区的经济水平有关,经济水平越高,抗旱能力越强。普通中学在校人数占常住人口比、生产总值、人均生产总值、农民人均纯收入指标由 1994—2013 年陕西统计年鉴^[17]中数据计算得到。其中普通中学在校人数占常住人口比,它是反映某一地区平均文化素质的高低,而文化素质高低可以反映经济水平和科学技术水平以及农民的抗旱技术和抗旱意识,直接与本地区的抗旱能力相关。所有指标值越大,抗旱能力越强。

2 研究方法

总体思路:首先运用主成分分析筛选所列出的 27 个干旱风险评价常用指标,并结合陕西农业干旱成因和特点选取陕西省农业干旱风险评价指标;将筛选的指标按风险 4 个要素(危险性、暴露性、脆弱性和抗旱能力)分组,构建陕西省农业干旱风险评价指标体系;采用层次分析法得出指标权重,最后通过计算指标权重与归一化后的指标值相乘相加得到 4 个要素的分项综合指标和农业干旱风险综合指标。

2.1 指标筛选方法

主成分这个概念由 Karl Pearson 在 1901 年提出^[20]。主成分分析是通过找出几个综合因子(主成分)来代表原先众多的变量,这些综合因子能携带大部分原先变量的信息,并且这些综合因子彼此不相关,从而达到降维的目的。

对于农业干旱风险评价,假设某次旱灾强度用 p 个指标来反映,收集到 n 个不同地区的指标数据,每个地区 p 个指标的值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 。新指标(主成分)用 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m (m \leq p)$ 表示。则可将 $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$ 的 p 个指标综合成 m 个新指标,新的指标可以由原来的指标 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 线性表示,即:

$$\begin{cases} y_1 = \mu_{11}x_1 + \mu_{12}x_2 + \dots + \mu_{1p}x_p \\ y_2 = \mu_{21}x_1 + \mu_{22}x_2 + \dots + \mu_{2p}x_p \\ \dots \\ y_m = \mu_{m1}x_1 + \mu_{m2}x_2 + \dots + \mu_{mp}x_p \end{cases} \quad (1)$$

式中,系数 μ_{ij} 是主成分荷载 ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p$),即分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 的相关矩阵的 m

个较大的特征值所对应的特征向量。

为了求得相关矩阵的特征值和特征向量,建立相关矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{pmatrix} \quad (2)$$

在上式中, $r_{ij} (i, j = 1, 2, 3, \dots, p)$ 为原来指标值 x_i 和 x_j 的相关系数,其计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (3)$$

式中, \bar{x}_i, \bar{x}_j 分别是第 i 个指标和第 j 个指标的平均值。

特征值被看成是主成分影响力度的指标,特征向量即各主成分的荷载,它的分量值越大,说明主成分更多地反映了对应的指标信息。

主成分的方差贡献率表示主成分的方差在总样本方差中的比重。这个值越大,表明主成分携带的原始变量的信息量越多,其计算公式为:

$$a_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^p \lambda_i$$

累计贡献率的大小表示前 m 个主成分累计提取了多少原始信息,其计算公式为: $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i$, 其中 λ 表示相关矩阵的特征值。

一般来说,如果该指标达到 85%, 表明这些主成分包含了全部测量指标所具有的主要信息,这样既减少了变量的个数,又便于对实际问题的分析和研究。

求解(2)式相关矩阵,可得 p 个非负的特征值 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p \geq 0$, 及对应的特征向量 $\mu_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 。

通过主成分分析,把所选取的指标按 4 个风险要素(危险性、暴露性、脆弱性和抗旱能力)分组,用层次分析法计算每个指标在对应的 4 个风险要素中的权重。

2.2 风险评价方法

美国运筹学家 Saaty T L 于 20 世纪 70 年代提出^[21]层次分析法(The analytic hierarchy process, AHP),是一种定性与定量相结合的决策分析方法。AHP 法首先把问题层次化,然后构造比较判断矩阵,最后计算各指标权重并检验矩阵的一致性。

为了使判断矩阵定量化,对比两两指标间的重要性,采用 1~9 标度打分,对不同情况的评比给出

如表 1 的数量标度。

表 1 不同情况评比的数量标度

Table 1	The number of different situations appraisal scale
标度 b_{ij}	定义与说明 Define and illustrate
1	两个元素对某个属性具有同样重要性 Two elements have the same importance of an attribute
3	两个元素比较,一元素比另一元素稍微重要 One element is more important than the other slightly
5	两个元素比较,一元素比另一元素明显重要 One element is more important than the other obviously
7	两个元素比较,一元素比另一元素重要得多 One element is more important than the other mostly
9	两个元素比较,一元素比另一元素极端重要 One element is more important than the other extremely
2,4,6,8	表示需要在上述两个标准之间折衷时的标度 Need to compromise between the above two standard scale
$1/b_{ij}$	两个元素的反比较 The comparison of two elements

依据专家意见为两两指标对比打分后建立四项风险要素判断矩阵。使用 Excel 软件求解指标权重和检验矩阵一致性步骤如下:首先将判断矩阵的每一行元素相乘,即 $M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}$, 其中 a_{ij} 是两两指标相比的重要度。然后,对 M_i 开 n 次方得 $w_i = \sqrt[n]{M_i}$ 。其次,将向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n) - 1$ 用公式: $\omega_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i$ 归一化处理,得到各指标的权重 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^{-1}$ 。再次,计算判断矩阵最大特征值 λ_{\max} $= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{AW_i}{\omega_i}$, 其中 $AW_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}\omega_j$ 。最后,检验矩阵一致性。

为了检验矩阵一致性,需要计算判断矩阵的综合一致性指标(CI)^[22]和一致性比例(CR),

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (4)$$

$$CR = CI / RI$$

以上各式中, i, j 分别为判断矩阵第 i 行,第 j 列, n 为指标的个数, RI 为随机一致性指标,表 2 给出了 1~10 阶矩阵与 RI 的对应关系。当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵一致性满足要求。

2.3 指标归一化

由于风险要素指标间的量纲不同,为了使评价具有统一性和可比性,需要对各指标进行归一化处理^[23]。

当指标 x_i 增大时,该指标反映的风险要素也增大,称为正向指标,例如多年平均蒸散量等指标。用

表 2 随机一致性指标(RI)

Table 2 Value of RI index

矩阵阶数 The matrix order(<i>n</i>)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
随机一致性指标 Random Index(RI)	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46	1.49

下式归一化处理:

$$y_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (5)$$

式中, x_{\min} , x_{\max} 分别为指标 x_i 理论上的最小值和最大值, 在计算前确定。

当指标 x_i 增大时, 该指标反映的风险要素减小, 称为负向指标, 例如有效灌溉面积比等指标。用下式归一化处理:

$$y_i = (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (6)$$

2.4 区域干旱风险评估方法

通过判断矩阵可以得到指标的权重 ω_i , 将各指标归一化处理后的值 y_i 与权重 ω_i 相乘相加, 得到分项综合指标 X 。

$$X = \sum_{i=1}^n \omega_i y_i \quad (7)$$

式中, X 为 4 个风险要素(危险性、暴露性、脆弱性和抗旱能力)的分项综合指标。

根据旱灾发生机理, 农业干旱风险由四项要素构成, 其中致灾因子的危险性、承灾体的暴露性和环境的脆弱性加强了旱灾风险, 而地区的抗旱能力对旱灾发生的机理与前三项要素相反, 即降低了旱灾风险。于是得出考虑抗旱能力干旱风险综合指标 Y 和不考虑抗旱能力干旱风险综合指标 Y^* 两种情形。同时在此基础上乘以 100, 使综合指标介于 0 ~ 100 之间。

考虑抗旱能力干旱风险综合指标:

$$Y = \frac{100 \times H \times E \times V}{RE} \quad (8)$$

不考虑抗旱能力干旱风险综合指标:

$$Y^* = 100 \times H \times E \times V \quad (9)$$

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; RE 为地区的抗旱能力。因此可以通过比较不同地区综合指标的大小, 来评价本地区农业干旱风险的高低。

3 结果与分析

3.1 陕西省干旱风险评估指标的确定

将所选 27 个常用指标进行主成分分析得出各主成分的特征值、特征向量以及方差贡献率和累计贡献率。通过主成分分析得出的指标, 并结合陕西省农业干旱成因及特点, 最终确定陕西省农业干旱

评价指标体系。

3.1.1 主成分分析 27 个常用指标通过主成分分析得出五大主成分, 每个主成分对应的特征值、方差贡献率和累计贡献率如表 3 所示。

表 3 主成分特征值及贡献率

Table 3 Principal component characteristic value and contribution

项目 Item	主成分 Component				
	1	2	3	4	5
特征值 Eigen value	10.418	7.053	4.926	2.390	1.162
方差贡献率/% Variance contribution	38.583	26.121	18.243	8.852	4.305
累计贡献率/% Cumulative variance contribution	38.583	64.704	82.948	91.800	96.105

特征值被看成是主成分影响力度的指标, 代表引入该主成分后可以解释平均多少个原始变量的信息。从表 3 可以看出, 第一主成分的特征值是 10.418, 代表引入第一主成分后可以解释平均至少 10 个指标的信息。同理, 第二、第三和第四主成分分别可以解释平均至少 7 个、4 个和 2 个指标的信息。前四个主成分累计贡献率为 91.80% (大于 85%), 表明前四个主成分包含了全部测量指标所具有的主要信息。

3.1.2 主成分的特征向量 指标在主成分中的特征向量分量值越大, 说明主成分更多地反映了该指标的信息, 史晓楠^[8]在研究新疆节水灌溉分区时, 运行主成分分析筛选指标, 认为当特征向量分量值大于 0.1 时能够较全面地反映指标信息。根据对前四个主成分的特征向量分析, 选取特征向量分量值大于 0.2 的指标。得到反映 4 个主成分的指标有: 耕地面积、总播种面积、粮食作物播种面积、粮食总产在全省所占比重、单位播种面积农业生产总值、耕地面积与土地面积比、粮食作物播种面积与土地面积比、有效灌溉面积比、节水灌溉面积比、普通中学在校人数占常住人口比、粮食作物单位面积产量、多年平均蒸散量、生产总值、人均生产总值、农民人均纯收入、地下水资源量、人口密度、干旱指数和多年平均无降水天数。

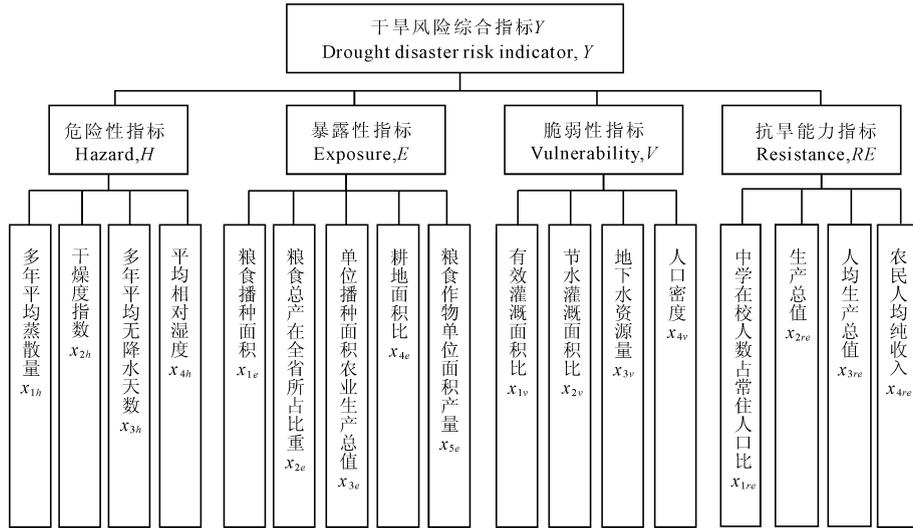
从主成分分析得出的指标可以看出, 该方法过多地采集了耕地面积和播种面积等指标信息, 这是由于主成分分析虽然从量上可以完全概括指标的

息,但它是依据数据结构的变差系数大小采集的信息,并不要求各主成分都具有实际意义。有研究表明^[9],空气中的水分状况,也影响农作物的光合速率,于是把主成分分析中得出的耕地面积、总播种面积和粮食作物播种面积与土地面积比三个反映土地面积的指标剔除,加入平均相对湿度指标,最终构成

陕西省农业干旱风险评价指标体系。

3.2 陕西省农业干旱风险评价

3.2.1 农业干旱风险指标体系 把主成分分析得到的结果,根据不同指标归属的风险要素,建立陕西省农业干旱风险评价指标体系,详见图 2。



注 Note: x_{1h} —annual mean evapotranspiration; x_{2h} —arid index; x_{3h} —average annual no rain days; x_{4h} —the average relative humidity; x_{1e} —grain size; x_{2e} —the total output of grain percentage in the whole province; x_{3e} —agricultural production value per unit area; x_{4e} —arable land ratio; x_{5e} —crop yield per unit area; x_{1v} —the effective irrigation area ratio; x_{2v} —water-saving irrigation area ratio; x_{3v} —groundwater resources; x_{4v} —density of population; x_{1re} —the rate of middle school students; x_{2re} —GDP; x_{3re} —GDP per capita; x_{4re} —rural per capita net income.

图 2 陕西省农业干旱风险评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of agricultural drought risk in Shanxi

3.2.2 判断矩阵与一致性检验 为定量描述陕西省 10 个地市的农业干旱风险,依据专家意见为两两指标对比打分,分别建立 4 个干旱风险要素的判断矩阵并检验它的一致性。如危险性指标中,干燥度指数是作物潜在蒸散量与降水量的比值,它同时考虑了作物耗水和自然降水两大因素,所以在危险性风险要素中最重要;而陕西省的关中和陕北属于干旱半干旱地区,多年平均相对湿度介于 65% ~ 75%

之间,相差不大,所以在危险性风险要素中最不重要;多年平均蒸散量和多年平均无降水天数的重要性介于最重要和最不重要之间,考虑多年平均蒸散量直接反映农作物需水情况,因此重要性比多年平均无降水天数稍微重要。由这 4 个指标两两相比的重要性,依据表 1 的数量标度,得出危险性(H)指标判断矩阵(如表 4 所示)。

表 4 危险性(H)指标判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of hazard (H) indicator

重要度 Importance degree(a_{ij})	多年平均蒸散量 Annual mean evapotranspiration	干燥度指数 Arid index	多年平均无降水天数 Average annual no rain days	平均相对湿度 The average relative humidity
多年平均蒸散量 Annual mean evapotranspiration	1	1/2	3	5
干燥度指数 Arid index	2	1	5	7
多年平均无降水天数 Average annual no rain days	1/3	1/5	1	3
平均相对湿度 The average relative humidity	1/5	1/7	1/3	1

为检验矩阵一致性,采用(4)式计算一致性比例 CR,当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵一致性满足要

求。危险性指标判断矩阵一致性比例 $CR = 0.0253 < 0.1$,满足要求。经计算其他三项风险要素判断矩

阵一致性比例 CR 分别是 0.09、0.017 和 0.0355, 均满足要求, 故依据判断矩阵求得的指标权重结果有效。

3.2.3 指标权重 由层次分析法计算得到 4 个干

旱风险要素分项指标权重, 表 5 列出了危险性 (H) 分项指标权重, 可以看出干燥度指数指标权重最大, 这是因为干燥度指数结合了降水量和参考作物潜在蒸散量的影响因素, 直接反映了作物水分亏缺状况。

表 5 危险性 (H) 分项指标权重

Table 5 Weights of hazard (H) sub-indicators

指标 Indicator	多年平均蒸散量 Annual mean evapotranspiration	干燥度指数 Arid index	多年平均无降雨天数 Average annual no rain days	平均相对湿度 The average relative humidity
权重 Weight	0.2993	0.5232	0.1210	0.0565

3.3 指标归一化

为了使评价具有可比性, 将风险要素分项指标

进行归一化处理, 危险性 (H) 分项指标处理结果如表 6 所示。

表 6 陕西省下辖十市农业干旱风险危险性 (H) 分项指标处理

Table 6 Sub-indicators calculation of hazard (H) of agriculture drought risk in the ten cities of Shaanxi

区市 City	多年平均蒸散量 (+) Annual mean evapotranspiration		干燥度指数 (+) Arid index		多年平均无降水天数 (+) Average annual no rain days		平均相对湿度 (-) The average relative humidity	
	初始值/mm Initial value	归一化 Normalization	初始值 Initial value	归一化 Normalization	初始值/d Initial value	归一化 Normalization	初始值/% Initial value	归一化 Normalization
	榆林 Yunlin	1023.793	0.5119	2.546	0.5091	303.00	0.8301	68.596
延安 Yanan	779.600	0.3898	1.504	0.3008	288.37	0.7900	66.396	0.3360
铜川 Tongchuan	750.782	0.3754	1.333	0.2665	292.20	0.8006	74.259	0.2574
渭南 Weinan	764.362	0.3822	1.130	0.2260	269.46	0.7382	62.907	0.3709
西安 Xi'an	712.574	0.3563	1.298	0.2596	282.21	0.7732	76.022	0.2398
咸阳 Xianyang	919.646	0.4598	1.748	0.3497	283.50	0.7767	63.295	0.3671
宝鸡 Baoji	634.272	0.3171	0.984	0.1967	270.03	0.7398	72.746	0.2725
商洛 Shangluo	768.053	0.3840	1.138	0.2276	266.21	0.7294	68.426	0.3157
汉中 Hanzhong	555.483	0.2777	0.684	0.1367	251.41	0.6888	82.039	0.1796
安康 Ankang	645.457	0.3227	0.802	0.1604	256.16	0.7018	79.495	0.2051

注: 分项指标的正负性在括号内标出, (+) 表示正向指标, (-) 表示负向指标; 分别用式 (5) 和式 (6) 处理。

Note: The positive or negative characteristics of sub-indicators were marked in brackets, (+) means positive indicators and (-) means negative indicators; positive indicators were calculated according to equation (5) and negative indicators were calculated according to equation (6).

3.4 综合指标

先将单项指标与其对应权重相乘相加, 得到四项风险要素分项综合指标, 再将这四项分项综合指

标按照考虑抗旱能力和不考虑抗旱能力两种情形, 分别用式 (8) 和式 (9) 计算得到陕西省农业干旱风险综合指标, 结果如表 7 所示。

表 7 陕西省各市农业干旱风险综合指标

Table 7 Comprehensive indicator of agriculture drought disaster risk in Shaanxi

区市 City	危险性 Hazard (H)	暴露性 Exposure (E)	脆弱性 Vulnerability (V)	抗旱能力 Resistance (RE)	考虑抗旱能力综合指标 Resistance considered	不考虑抗旱能力综合指标 Resistance not considered
榆林 Yulin	0.54	0.29	0.63	0.34	28.76	9.81
延安 Yanan	0.39	0.16	0.76	0.23	20.89	4.71
铜川 Chongchuan	0.36	0.07	0.66	0.16	10.45	1.63
渭南 Weinan	0.34	0.49	0.34	0.20	29.14	5.80
西安 Xian	0.35	0.39	0.32	0.42	10.32	4.35
咸阳 Xianyang	0.44	0.43	0.37	0.24	28.76	6.86
宝鸡 Baoji	0.30	0.30	0.47	0.22	18.87	4.20
商洛 Shangluo	0.34	0.15	0.75	0.14	27.42	3.72
汉中 Hanzhong	0.25	0.20	0.51	0.16	15.64	2.48
安康 Ankang	0.28	0.18	0.73	0.14	25.44	3.61

根据旱灾发生机理,四项风险要素中,危险性、暴露性和脆弱性与旱灾风险呈正相关,而与抗旱能力呈负相关。分析四项风险要素,可以识别陕西省旱灾主要影响因素,从表 7 可以看出,不同地市,风险要素高低不同。危险性风险要素榆林市最高,汉中市最低;暴露性风险要素渭南市最高,铜川市最低;脆弱性风险要素延安市最高,西安市最低;抗旱能力风险要素西安市最低,商洛市和安康市最高。

为更加直观地分析陕西省农业干旱风险,采用 ArcGIS10.1 将表 7 中干旱风险综合指标按自然断点法绘制成图,得到陕西省农业干旱风险综合指标区划图(图 3 和图 4)。

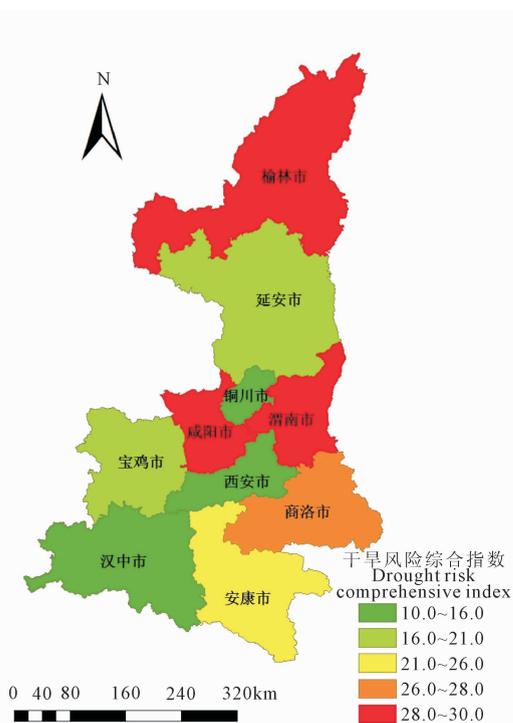


图 3 陕西省农业干旱风险区划图

(考虑抗旱能力)

Fig. 3 Distribution of agriculture drought risk indicators in Shaanxi (resistance considered)

当考虑地区的抗旱能力时(图 3),陕西省农业干旱风险从北向南,从东向西呈现递减趋势,北部榆林地区和东部渭南、商洛地区农业干旱风险较高,这与刘小艳^[24]对陕西省干旱灾害风险评估的结果基本一致。结合表 7 可以发现,榆林市干旱风险较高的原因是危险性风险要素高,这是由于榆林市地处陕西省北部,多年平均降水量低(1956—2000 年多年平均降水量为 393.9 mm),而蒸发量高(为 1 000 ~ 1 400 mm);渭南市干旱风险较高,是因为暴露性风险要素高,主要是因为渭南是陕西省粮食主产区之

一,粮食播种面积在 50 万 hm^2 以上,耕地面积比为 0.395,致使承灾体与致灾因子接触大,导致暴露性风险要素高。关中中部的咸阳市干旱风险要素也较高,原因是咸阳市的多年平均降水量相对较低(1956—2000 年多年平均降水量为 574 mm),耕地面积比较大(为 0.348),近年来,咸阳市果园面积达到了 277 322 hm^2 ,占土地面积的 27.07%,成为陕西省果园面积最大的地市。导致了危险性和暴露性风险要素均较高。

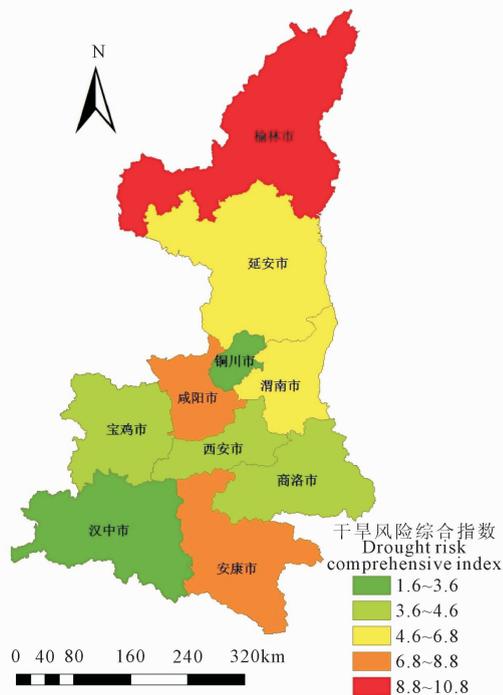


图 4 陕西省农业干旱风险区划图

(不考虑抗旱能力)

Fig. 4 Distribution of agriculture drought risk indicators in Shaanxi (resistance not considered)

当不考虑地区的抗旱能力时(图 4),陕西省农业干旱风险从北向南亦呈现递减趋势。对比图 3 和图 4 可以看出,商洛市的干旱风险有所降低,这是由于干旱风险和抗旱能力呈负相关关系,说明商洛市的抗旱能力不足,主要是因为商洛市位于陕西省南部,陕南秦巴山区,耕地面积少,人均收入较低,经济相对较为弱后。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文运用主成分分析筛选 27 个干旱评价常用指标,并将筛选出的指标用来评价陕西省农业干旱风险,得出的评价结果与刘小艳^[22]对陕西省干旱灾

害风险评估的结果基本一致;说明通过主成分分析筛选出的指标可以准确评价农业干旱风险,并且大大缩减了评价指标的个数。然而,从主成分分析得出的指标结果可以看出,该方法出现过多的采集相似指标的信息,例如在本文研究中,出现过多采集了耕地面积和播种面积指标的信息。这是由于主成分分析虽然从量上可以完全概括指标的信息,但它是依据数据结构的变差系数大小采集的信息,并不要求各主成分都具有实际意义。因此,在运用此法选取评价指标时,需将主成分分析结果与评价区域实际干旱情况结合考虑。

另外,农业干旱风险评价体系最终结果用干旱综合指数和分项综合指数体现,综合指数大小直接反映了不同地区农业干旱风险的高低;分项综合指数大小揭示了发生干旱灾害的主要影响因素,从机理上解释了干旱灾害的产生,对抗旱减灾具有指导作用。例如榆林市的危险性风险要素较高,是因为多年平均降水量小,蒸发量大的原因,那么可以加强气象水文预报工作,做好旱灾前期风险评估。商洛市的暴露性风险要素较高,是因为粮食播种面积相对大,干旱灾害可能造成的经济损失较大,那么需要重视大面积作物的灌溉,保证作物需水量。然而,评价体系中,层次分析法的结果受人为因素影响,使得此方法在使用中受到了限制。因此,在使用过程中,应结合专家对指标重要性的评比和实地考察后,确定指标的权重。

4.2 结 论

本文构建了基于主成分分析和 AHP 相结合的农业干旱风险评价体系,运用主成分分析选取了评价指标;计算了陕西省下辖十市的农业干旱风险综合指数,得出以下结论:① 主成分分析可以合理地选取评价指标,缩减指标个数。② 此方法评价陕西省农业干旱风险结果表明,在考虑抗旱能力情况下,陕西省农业干旱风险从北向南,从东向西呈现递减趋势,北部榆林地区和东部渭南、商洛地区,农业干旱风险较高。③ 应用此评价方法,抗旱部门可以识别致灾因子,提出相应的抗旱减灾方法。

参 考 文 献:

[1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of WG I to the IPCC AR4[C]//IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. 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]. 北京: 中国人民

共和国水利部, 2010.

[3] 雷治平. 陕西省农业干旱灾害评估及影响因子分析研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.

[4] 刘 璐. 陕西省干旱气象灾害易损性分析与区划[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.

[5] 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.

[6] 贾建英, 贺 楠, 韩兰英, 等. 基于自然灾害风险理论和 ArcGIS 的西南地区玉米干旱风险分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 152-159.

[7] 张宝庆. 黄土高原干旱时空变异及雨水资源潜力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

[8] 史晓楠. 新疆节水灌溉分区与工程优化设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.

[9] 吴景社, 康绍忠, 王景雷, 等. 基于主成分分析和模糊聚类方法的全国节水灌溉分区研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 64-68.

[10] 何 斌, 武建军, 吕爱锋. 农业干旱风险研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 557-564.

[11] 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.

[12] 关帅朋, 赵先贵, 梁 娜. 陕西省农业水资源安全阈值研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 241-245.

[13] 吴 迪. 基于多情景分层叠加的黄河流域农业干旱风险评估与区划研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.

[14] Undro. Mitigating natural disasters, phenomena, effects and options. A manual for policy makers and planners[M]. New York, UNDRO, 1991.

[15] Meckler R. Natural Disaster Risk Management and Financing Disaster Losses in Developing Countries [M]. Karlsruhe: Verlag Versicherungswirtschaft GmbH, 2004.

[16] 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.

[17] 陕西省统计局, 国家统计局陕西调查总队. 陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1994—2013.

[18] 王 翌. 陕西关中地区粮食生产现状、趋势与潜力评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.

[19] 陕西省水利厅. 2013 年水资源公报[EB/OL]. (2014-12-15) [2015-08-24]. <http://www.sxm-wr.gov.cn/fw-zxfw-szyb-1-160-175>

[20] 张文彤, 董 伟. spss 统计分析高级教程[M]. (第二版)北京: 高等教育出版社, 2012: 213-215.

[21] Saaty T L. The Analytic Hierachy Process[M]. New York: McGraw Hill, 1980.

[22] 彭 锟, 强茂山. 模糊层次分析法在 Duber Khwar 项目风险评估和投标决策中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 44-50.

[23] 邵薇薇, 杨大文. 水贫乏指数的概念及其在中国主要流域的初步应用[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 866-872.

[24] 刘小艳. 陕西省干旱灾害风险评估及区划[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.