

江淮分水岭地区旱灾风险评估

赵宗权，周亮广

(1. 滁州学院 地理信息与旅游学院，安徽 滁州 239000；
2. 滁州学院 安徽地理信息集成应用协同创新中心，安徽 滁州 239000)

摘 要：利用江淮分水岭地区气象、遥感和社会经济统计数据，从旱灾致灾因子、承灾体、孕灾环境和防灾减灾措施 4 个方面选取了 8 个指标构建旱灾风险评估体系，通过主成分分析和分层构权主成分分析对该区 2000—2010 年旱灾风险等级分布进行了评价。研究表明：由于分层构权主成分分析法进行了更为客观的赋权，因而使研究区旱灾风险等级的区分度更加明显；时间上，2000—2010 年江淮分水岭旱灾风险等级有降低的趋势，较低以上的干旱风险等级地区面积增加了约 19.8%；空间上，高风险等级主要集中在中部地区，南部地区（来安、滁州、全椒、合肥、肥西、金安、裕安等）风险等级整体上低于北部地区（凤阳、定远、淮南、寿县等）。

关键词：旱灾；风险评估；主成分分析；江淮分水岭地区

中图分类号：X423；S423 **文献标识码：**A **文章编号：**1005-3409(2017)01-0370-06

Assessment on Drought Disaster Risk in Jianghuai Watershed Region

ZHAO Zongquan, ZHOU Lianguang

(1. College of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China; 2. Anhui Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Integration and Application, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China)

Abstract: Using the data of meteorology, remote sensing and social-economy statistics of Jianghuai watershed area, we selected eight indicators to build drought risk assessment system from the aspects of hazard factors, hazard-affected body, pregnant disaster environment, disaster prevention and mitigation measures. Also, the drought risk level in 2000—2010 in the area was evaluated through the method of the principal component analysis and multi-layer weighted principal component analysis. The results showed that the multi-layer right of principal component analysis was more suitable for evaluating the risk level differentiation; the drought risk level had the decreasing tendency from 2000 to 2010, the area with low drought risk level increased in about 19.8%. The risk level in southern area (Lai'an, Chuzhou, Quanjiao and Hefei, Feixi, Jin'an, Yu'an, etc.) was substantially lower than that of northern ones (Fengyang, Dingyuan, Huainan, Shouxian, etc.) and high risk level mainly concentrated in the central area.

Keywords: drought; risk assessment; principal component analysis; Jianghuai Watershed Region

旱灾在全球普遍发生，发生频率高、范围广、持续时间长、后延影响大，得到了国内外众多学者关注和研究，产生了众多对旱灾风险等级评估的成果^[1-2]。江淮分水岭地区的干旱发生频繁、危害面积大，历史上数次对农业生产造成重大损失，是该地区对农业生产影响最大的农业气象灾害，对人们的生产、生活带来诸多不便。相关学者主要探讨了江淮分水干旱的特点、成因及其对农业的影响^[3-5]，以及从定量分析的角度分析了江淮分水岭地区干旱的等级划分及时空特征^[6-7]。但以往研究多侧重对干旱成因、特点和干旱对农业的影响进行分析，或是通过单一指标对旱涝等级进行划分，本文通过重建评价指标体系，使用分层构权主成分分析法，旨在从更加全面、客观和可定量的角度对江淮分水岭地区的旱灾风险进行评估。

江淮分水岭地区地处安徽省中部丘陵、浅山区，包括六安、合肥、淮南、滁州等 4 市 14 个县、区，约 2

万 km^2 。由于地处暖温带与亚热带的过渡带,雨量相对充沛;受冷暖空气频繁交汇影响,降水时空分布不均,年内、年际变化很大。全区以丘陵为主,既无高大山系也无大面积平原,丘陵、谷地相对高差一般不超过 200 m。土壤以水稻土、黄棕壤、黄褐土为主,通气、透气性差,下渗难,易龟裂。特殊的气候、地形和土壤条件,加上该地区人口稠密、社会经济快速发展以及城市化进程的加快都加剧了水资源短缺,这使得旱灾的影响尤为突出。通过对旱灾风险等级的分析,可为地区相关部门防旱抗旱提供借鉴。

1 数据及研究方法

1.1 基础数据

以安徽省 2000 年、2005 年、2010 年份的 TM 遥感数据为基础,利用 ENVI 软件对数据进行预处理,在 ArcGIS 软件中对数据进行处理,分别得到 3 个年份安徽省土地覆盖类型数据。选取 1:100 万中国土壤数据库,在 ArcMap 中提取出安徽省地区土壤类型数据。气象数据均来自安徽省各市、县气候资料处理部门逐月上报的《地面气象记录月报表》。农作物播种面积、有效灌溉面积和人均 GDP 等数据则来自安徽省的统计年鉴以及水资源公报等资料。

1.2 评价指标选取

旱灾是各种自然因素与社会因素综合作用的结果,在参考以往学者对旱灾评价的指标^[1,8-10]基础上,本文从系统论的角度将评价指标分为 4 个体系:

1.2.1 致灾因子 致灾因子与气象、水文、下垫面条件等自然属性因素有关。此体系主要从气温和降水方面考虑选取了温度距平百分率和降水距平百分率两个指标。降水距平百分率能表征某时段降水量异常情况,并直观反映了降水异常所引起的干旱,对于月、季、年等时段发生的干旱事件可进行评估。其计算公式为:

$$R = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为计算时段降水量; \bar{P} 为计算时段多年平均降水量,温度距平百分率计算方法同降水。

1.2.2 承灾体 承灾体与区域的社会、经济发展等社会属性因素及其生态环境因素有关,是产生旱灾的必要条件。选取了人口密度指数和 GDP 密度指数。依各行政单元的面积为单位计算其人口密度及 GDP 密度,人口、GDP 密度越大,其所受灾害影响越大。

1.2.3 孕灾环境 孕灾环境是影响致灾因子、承灾体和防灾减灾措施的自然环境和人文环境。在此选取了植被覆盖率、土壤类型、土地利用类型、农作物类型

和农作物播种面积等指标,它们反映了干旱的敏感度。

1.2.4 防灾减灾措施 防灾减灾措施是人类社会用于应对干旱不利影响所采取的方针、政策、技术、方法和行动的总称,是减轻旱灾的必要条件。这里所用的指标是有效灌溉面积,有效灌溉面积越大抗旱能力越强。

1.3 研究方法

以江淮分水岭地区 14 个行政单位为研究对象,选用 10 个评价指标。由于各指标数据量纲不一致,数据间差异很大,可能会对最终结果带来不合理的影响,故将其标准化处理后,得到了一个 14×10 阶的标准化矩阵 $x_{14 \times 10}$ 。标准化处理后,以主成分分析为基础,延伸构造分层构权主成分分析法^[11]进行江淮分水岭区旱灾风险评估,并使用 GIS 软件对各地区旱灾风险等级的空间分异差异进行描述。

1.3.1 标准化处理 为使评价结果更准确,对数据进行了无量纲化处理。本文采用焦立新^[12]所提到的方法,即将线性比例变换方法和极差变换方法结合,公式如下:

指标“越大越好”时,可使用上限效果测度:

$$C_k^i = (f_k^i - f_{k1}) / (f_{k2} - f_{k1}) \quad (2)$$

指标“越小越好”时,可使用下限效果测度:

$$C_k^i = (f_{k2} - f_k^i) / (f_{k2} - f_{k1}) \quad (3)$$

指标“适中为宜”时,可使用中心效果测度:

$$C_k^i = 1 - \frac{|f_k^i - f_0|}{|f_{k2} - f_0|} \quad (4)$$

式中: f_{k1} 为该指标在所有模式中的最小值; f_{k2} 为该指标在所有模式中的最大值; f_0 为适中值; $|f_{k2} - f_0|$ 取 $|f_{k2} - f_0|$ 和 $|f_{k1} - f_0|$ 中绝对值较大的那一个。

1.3.2 分层构权主成分分析 主成分分析的核心思想主要是对原始数据进行降维处理,按照方差贡献率大于 80%~85% 的原则选取主成分个数,并以方差贡献率为权重计算综合主成分得分,以此为依据对旱灾风险进行定量化评估。主成分分析的主要步骤为^[13-14]:

(1) 在标准化矩阵 $x_{14 \times 10}$ 的基础上,计算相关关系矩阵 $R = (r_{jk})$, 其中:

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{14} x_{ij} x_{ik}}{14 - 1} \quad (j, k = 1, 2, \dots, 8) \quad (5)$$

(2) 求 R 矩阵的特征值 λ_j , 并依据特征值大于 1

的原则 ($\sum_{i=1}^m \lambda_i > 80\%$) 确定主成分个数 m ; 以每个主成分的方差贡献率为权重,计算综合得分,得到最终评估标准。分层构权主成分分析评价法,其核心思想是

以因子分析为依据划分指标子系统,依照因子得分权重对各子系统给予重要性赋权,并对各个子系统进行主成分分析,对各子系统主成分分析结果进行加权合成。分层构权主成分分析的主要步骤为:

① 对标准化矩阵 $x_{14 \times 10}$ 进行因子分析,以方差贡献率大于 80% 为原则,选取 m 个主因子,相应划分为 m 个子系统,每个子系统中包含 p 个指标。

② 各子系统重要性赋权权重计算公式为:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^p \beta_{ij} e_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p \beta_{ij} e_i} \quad (i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,p)$$

(6)

式中: ω_i 为各子系统重要性赋权权重; j 为指标个数; β_{ij} 为各因子得分系数; e_i 为方差贡献率,通常情况下 $\sum_{i=1}^m e_i \geq 80\%$ 。

(3) 各子系统分别进行主成分分析,并根据相应的赋权权重进行加权合成。

1.3.3 等级划分 参考李清秀^[15] 的等级划分方法,对旱灾综合指数等级划分(表 1)。

表 1 旱灾综合指数风险等级划分

综合指数范围	风险等级
综合指数最小值~均值- $\frac{1}{2}$ 标准差	高
均值- $\frac{1}{2}$ 标准差~均值	较高
均值~均值+ $\frac{1}{2}$ 标准差	较低
均值+ $\frac{1}{2}$ 标准差~综合指数最大值	低

2 结果与分析

2.1 旱灾风险分析与评估

2.1.1 干旱风险评估主成分选取 数据标准化处理后,进行主成分分析。分析发现,GDP 密度指数和气

温距平百分率这两个指标与其他指标相关度较高,但划分结果却是 GDP 密度指数和植被覆盖率等指标归为一类,气温降水距平与土壤类型、人口密度指数等指标分到一组,此情况的出现并不能得到相关数据、理论的支撑,且与实际情况并不符合。统计方法虽是分析数据的有效工具,但其计算还需根据一定数学原理,其计算结果更应该考虑到实际意义,是否能得到合理解释。为此,最后决定剔除这两个指标,同时根据特征值大于 1 和特征值累计贡献率大于 80% 的原则,权衡利弊,最终选择 3 个主成分,其特征值为 2.824,2.573,1.323,对应的方差贡献率分别为 35.3%,32.2%,16.5%。主成分分析各指标得分系数矩阵见表 2。

表 2 2000 年江淮分水岭地区主成分分析得分系数矩阵

参数	参数名称	得分系数		
		主成分 1	主成分 2	主成分 3
X_1	植被覆盖率	-0.031	-0.289	0.378
X_2	有效灌溉面积	0.251	0.166	0.337
X_3	土壤类型	-0.214	0.122	0.358
X_4	土地利用类型	-0.176	0.299	0.000
X_5	人口密度指数	-0.134	0.243	0.425
X_6	农作物类型	0.310	0.066	-0.011
X_7	降水距平百分率	0.010	-0.302	0.394
X_8	农作物播种面积	0.316	0.137	0.190

2.1.2 旱灾风险评估的综合指数计算 将表 2 中指标按照方差贡献率进行加权合成,得到江淮分水岭地区旱灾风险评估的综合指数 Y_1 。经计算,每个指标的综合指数见表 3。从表 4 可看出综合指数 Y_1 的范围是 24.88 到 42.69,旱灾风险等级随着 Y_1 数值的增大而减小,综合指数 Y_1 和旱灾风险等级之间的关系见表 1。当 Y_1 为 24.88~32.08 时风险等级为高,当 Y_1 为 32.08~35.00 时风险等级较高, Y_1 为 35.00~37.93 时风险等级一般,而当 Y_1 属于 37.93~42.69 时,风险等级则较低。

表 3 2000 年江淮分水岭地区综合指数 Y_1 的指标系数

参数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Y_1	-4.137	19.771	2.291	3.404	10.114	12.882	-2.844	18.701

表 4 2000 年江淮分水岭地区综合指数 Y_1

参数	合肥市	肥东县	肥西县	长丰县	裕安区	金安区	寿县	淮南市	滁州市	来安县	明光市	凤阳县	定远县	全椒县
Y_1	42.69	39.17	34.01	42.45	37.28	35.10	31.32	25.33	39.93	35.81	32.32	29.18	24.88	40.60

2.1.3 旱灾风险等级划分 对比表 1 和表 4,江淮分水岭地区有 3 个地区旱灾风险处于高等级,风险较高的也有 3 个地区;而风险等级属于较低和低的共有 8 个地区,占比为 57%。通过 ArcGIS 软件对旱灾风险等级地区的分布情况进行了空间描述(图 1)。

由图 1 中风险等级指数 Y_1 的空间分布情况可知,风险等级分布范围整体上是南部(主要包括来安、

滁州、全椒、肥东、长丰、合肥、金安、裕安)低于北部(明光、凤阳、定远、淮南、寿县),南部地区风险等级整体上处于一个较低的水平,而其中的肥西县由于抗旱能力不足致使旱灾风险处于较高等级;北部地区风险等级除明光市、寿县外都处于高等级,其中明光市由于农作物播种面积和农作物类型两个指标比北部其他地区得分稍低故风险等级处于较高等级。

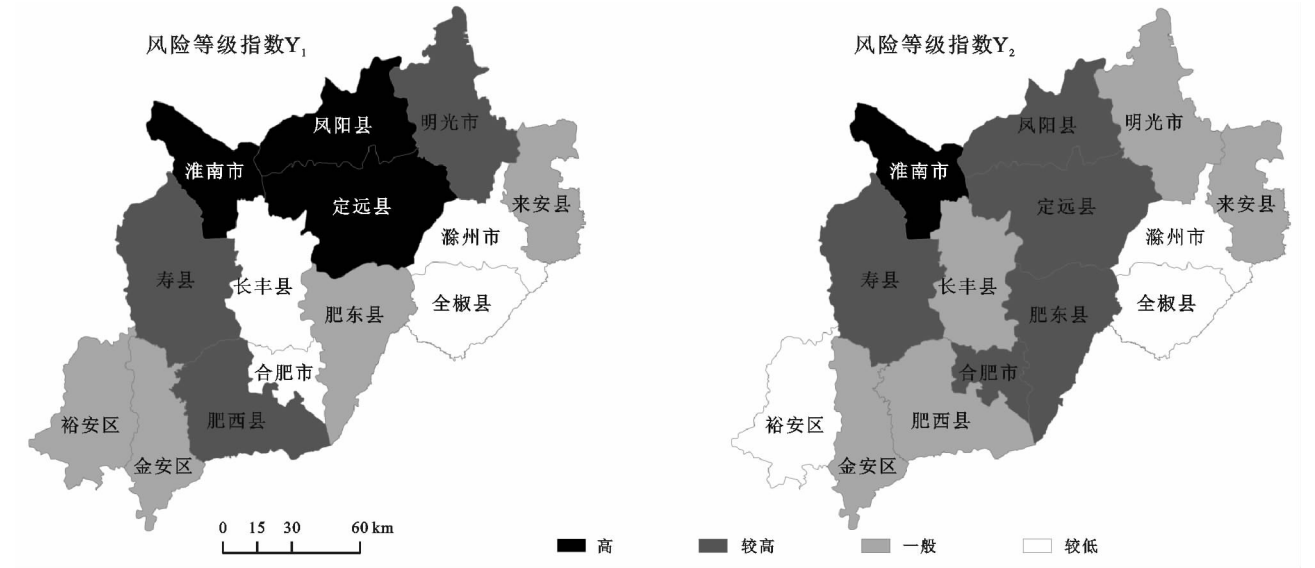


图 1 2000 年江淮分水岭地区干旱风险等级分布

2.2 分层构权主成分分析评价法

各指标对旱灾风险等级影响程度不同,主成分分析的结果存在着区分度低、与实际有差异的现象,故采用分层构权主成分分析评价法继续对 8 项指标进行分析。通过因子分析,按照累计方差贡献率大于 80%和特征值大于 1 的选取原则,选取 3 个因子,其方差贡献率分别为 34.6%,30.0%和 24.4%,为使分类更明确,使用了最大正交旋转法,其因子得分系数见表 4。根据各个指标载

荷值的高低,将其划分为 3 个子系统,根据公式(6)计算各个子系统的权重,并以此作为对子系统重要性评价的根据。经计算,子系统 1,2,3 的权重分别为 0.39,0.34,0.27。分别对 3 个子系统进行主成分分析,得到子系统 1,2,3 的方差贡献率分别为 84%,70%,87%,按照表 3 的计算方法得到表 5,然后根据各因子子系统的权重加权合成得到综合指标 Y_{21} , Y_{22} , Y_{23} 和 Y_2 的综合指标系数见表 6, Y_2 的空间分布状况见图 1。

表 5 2000 年江淮分水岭地区综合指数指标系数

参数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Y_{21}	0	29.98	0	0	0	28.39	0	33.00
Y_{22}	0	0	23.71	28.68	30.78	0	0	0
Y_{23}	46.60	0	0	0	0	0	46.60	0
Y_2	12.77	11.67	7.99	9.66	10.37	11.05	12.77	12.84

表 6 2000 年江淮分水岭地区综合指数 Y_{21} , Y_{22} , Y_{23} 和 Y_2

参数	合肥市	肥东县	肥西县	长丰县	裕安区	金安区	寿县	淮南市	滁州市	来安县	明光市	凤阳县	定远县	全椒县
Y_{21}	61.39	52.40	48.67	61.10	54.34	51.92	31.00	44.40	52.39	48.56	40.55	36.59	23.86	53.36
Y_{22}	57.88	51.74	51.74	57.81	68.75	65.01	71.49	22.13	77.51	57.00	56.99	51.89	55.83	79.04
Y_{23}	5.38	19.15	46.24	25.28	51.53	46.60	18.55	17.97	40.15	47.69	51.54	51.54	52.47	48.52
Y_2	44.86	43.07	49.04	50.18	58.43	54.87	41.23	29.66	57.50	51.17	49.10	45.84	42.47	60.69

由表 6 数据可得出:

(1) 子系统 Y_{21} (有效灌溉面积、农作物类型、农作物播种面积)中:综合指数在 23.86~40.55 范围的属于高风险等级,淮南综合指数为 44.4 风险也较高。综合指数在 53.56~61.39 范围的风险较低,其余 5 个地区则属于低风险等级。通过对比原始数据,4 个高风险地区是由于其农作物类型和农作物播种面积这 2 个指标得分较低导致旱灾风险过高,而淮南市虽然农作物类型和农作物播种面积得分高,但由于灌溉能力不足导致有效灌溉面积得分较低,故处于较高的风险等级,其余 9 个地区的风险等级则处于较低和低

水平。

(2) 子系统 Y_{22} (土壤类型、土地利用类型、人口密度指数)中只有淮南属于高风险等级,综合指数在 51.74~57.88 范围的属于较高风险等级,其中合肥市及其辖区及淮南市由于土地利用类型和人口密度指数得分较低导致风险过高,而滁州市辖区除全椒县和市区外风险较高的原因是土壤类型指标得分过低使其最终风险评级较高。金安综合指数为 65.01,风险较低,其余 5 个地区属于低风险等级。

(3) 子系统 Y_{23} (植被覆盖率、降水距平百分率)中寿县、淮南、长丰、肥东和合肥的综合指数在 5.38~

25.28范围内属于高风险等级,最大影响因素是其植被覆盖率太低导致得分过低。滁州的综合指数为 40.15 属于较低风险等级,其余 9 各地区皆处于低风险等级。

(4) 由 3 个子系统加权合成的综合指数 Y_2 可看出,一般和较低两个风险等级的地区数占比和综合指数 Y_1 的占比几乎一致,通过图 1 中的 Y_2 可看出高、较高风险等级的地区分布在向中部集中,其中较为突

出的是合肥和肥东的风险等级由较低和一般上升到较高等级,主要原因是其在子系统 2,3 中得分较低所致。寿县、淮南、金安、全椒、滁州和来安风险等级无变化,而其余县市风险等级在一个较小层级内波动。

按此评价方法继续对江淮分水岭地区 2005 年、2010 年的旱灾风险等级进行评价。其结果见表 7—8 和图 2—3 所示。

表 7 2005 年江淮分水岭地区干旱综合指数

参数	合肥市	肥东县	肥西县	长丰县	裕安区	金安区	寿县	淮南市	滁州市	来安县	明光市	凤阳县	定远县	全椒县
M_1	50.49	47.33	46.19	47.96	50.20	47.01	42.04	21.30	54.49	45.32	42.51	38.42	37.79	55.09
M_{21}	26.47	21.96	20.79	21.55	23.47	23.25	12.76	14.80	23.01	22.40	19.63	17.17	12.96	22.80
M_{22}	17.63	19.46	19.13	19.62	22.26	21.07	22.85	6.59	23.82	17.82	17.50	16.28	17.55	24.61
M_{23}	8.23	7.86	3.93	6.88	12.43	17.15	7.70	4.90	8.84	12.46	14.00	8.92	2.03	10.85
M_2	52.32	49.28	43.85	48.05	58.15	61.47	43.31	26.29	55.68	52.68	51.14	42.38	32.54	58.26

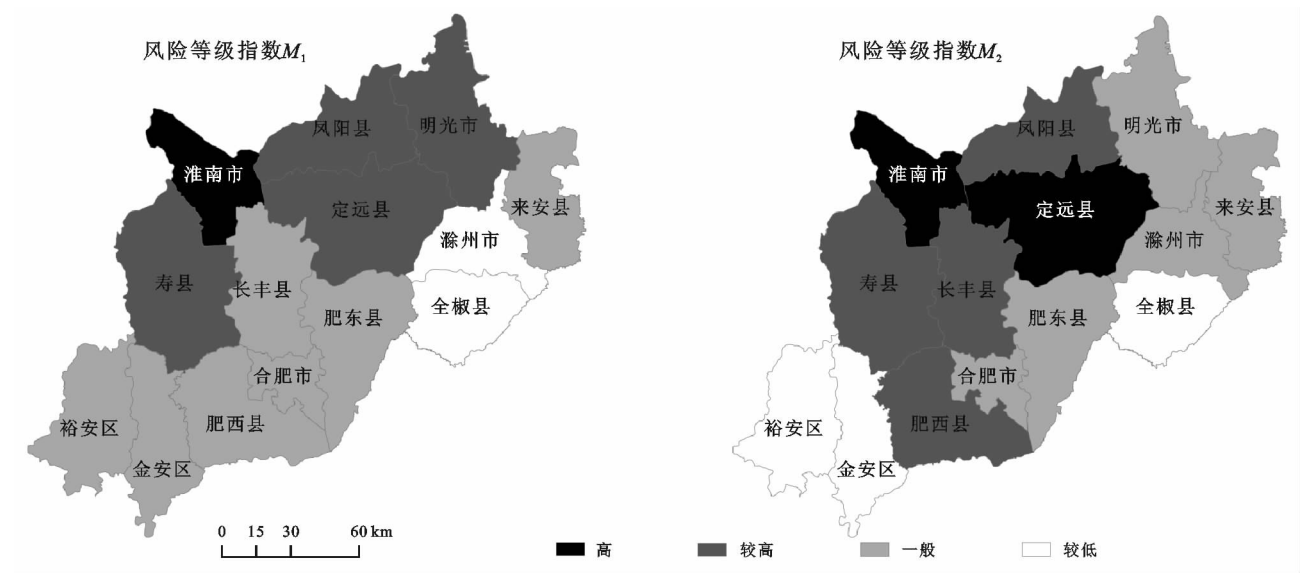


图 2 2005 年江淮分水岭地区干旱风险等级分布

由图 2 可看出,使用新评价方法前,江淮分水岭旱灾地区风险高等级主要分布在北部地区,而使用新评价方法后,定远和肥西的风险等级都提高了一个等级且明光降低一个等级,说明风险等级整体趋势为中

部高于东、西部。定远、肥西由于在子系统 3 中得分过低致使其最终风险评级升高到较高等级。明光则由于子系统 3 的评分高,故其最终风险等级降为较低水平。其余地区无明显变化。

表 8 2010 年江淮分水岭地区干旱综合指数

参数	合肥市	肥东县	肥西县	长丰县	裕安区	金安区	寿县	淮南市	滁州市	来安县	明光市	凤阳县	定远县	全椒县
N_1	49.48	51.69	47.43	53.72	43.66	41.69	36.85	37.81	52.01	46.60	41.88	38.14	38.27	51.51
N_{21}	61.62	62.26	56.96	63.03	53.96	51.47	31.20	55.98	56.93	57.95	51.78	49.10	43.23	58.95
N_{22}	44.02	57.36	53.86	57.39	66.01	62.79	69.61	22.77	71.74	57.89	54.97	45.62	49.26	74.74
N_{23}	25.46	33.00	24.55	39.03	24.12	49.69	36.39	13.71	44.67	48.59	35.86	24.79	40.66	27.17
N_2	46.60	53.36	47.91	55.17	50.82	54.97	45.85	34.03	59.07	55.63	48.98	41.91	44.70	56.64

对比图 3,江淮分水岭地区在使用新的评价方法后,其高等级旱灾风险仍然有向中部集中的趋势。其中淮南在使用新评价体系前后皆为高风险等级。而金安、裕安因为在子系统 2,3 中得分较高,故其最终评级由较高等级变为较低、一般等级。合肥在 2,3 子

系统中得分较低所以增高了其风险等级,由一般转为较高等级。由于在子系统 3 中得分较高,故明光、来安的风险评级由较高、一般各自降低一个等级。

综合比较综合指数 Y_1 , M_1 和 N_1 ,江淮分水岭地区的旱灾风险等级和覆盖面积有升高的趋势,且江

淮分水岭北部风险等级整体上要远远高于其南部地区,此外寿县、淮南、凤阳、明光和定远的风险等级一直处于高等级;对比综合指数 Y_2 , M_2 与 N_2 发

现,各县市的旱灾风险等级区分度更为显著,地区差异更加明显,而且风险等级有往中部地区集中的趋势。

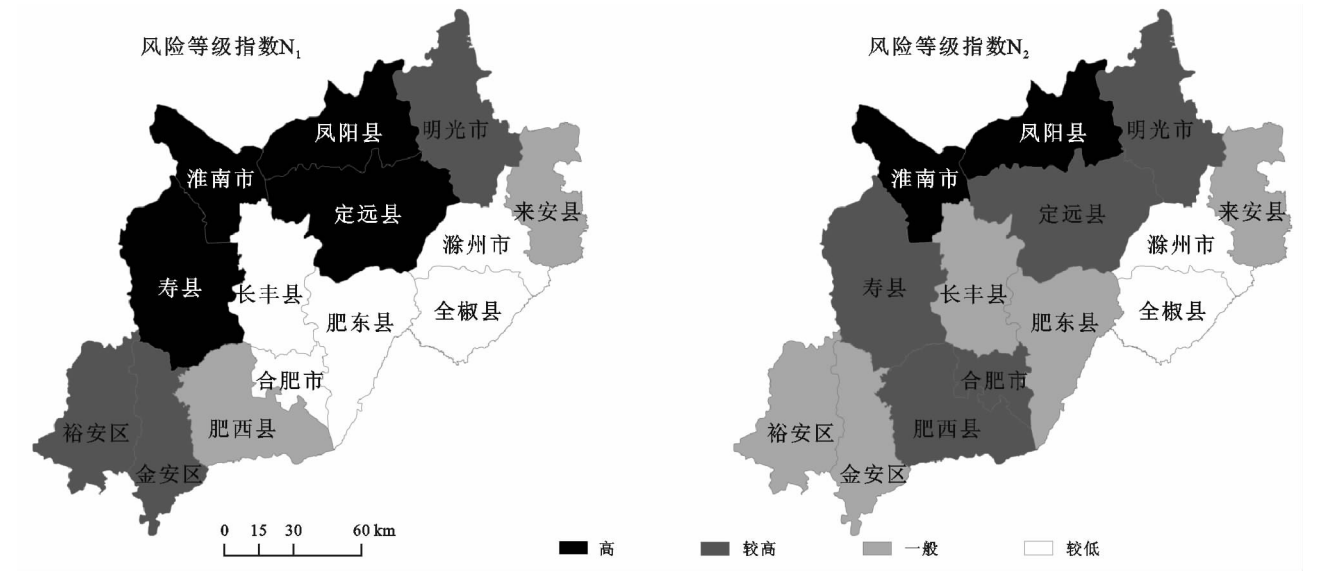


图 3 2010 年江淮分水岭地区干旱风险等级分布

3 结论

(1) 对比、分析发现,采用分层构权主成分分析划分子系统,经过加权合成分析,减少了直接主观赋权的缺陷,使得到的评价结果更具客观性和区分度。分层构权主成分分析法比单一主成分分析更能突显不同指标在旱灾风险等级评估中的权重,进而更易得出旱灾风险等级高低的主导因素。

(2) 江淮分水岭地区旱灾风险等级评价结果与实际旱情分布基本一致。时间上,凤阳、定远、寿县、淮南基本一直处于较高和高风险等级,而来安、滁州、全椒、金安、裕安等地区则基本处于较低、低风险水平。空间上,使用新评价方法前后,指标权重进行调整,某些地区风险等级变化较大(如合肥市及其辖区),评价结果与实际情况更加吻合,因而新方法的使用比单独使用主成分分析得到的评价更为准确。

(3) 旱灾的影响因素复杂,当前关于旱灾的评价指标及方法众多,但各存优劣。本文根据江淮分水岭地区实际情况,结合前人所研究成果,综合考虑可操作性 and 应用性,运用分层构权主成分分析对江淮分水岭地区的旱灾风险进行评估,可为相关部门应对旱灾以及其他区域的旱灾风险评估提供借鉴。

参考文献:

[1] 金菊良, 酆建强, 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] 周游游, 蒋忠诚, 韦珍莲. 广西中部喀斯特干旱农业区的干旱程度及干旱成因分析[J]. 中国岩溶, 2003, 22(2):

144-149.

[3] 中国气象学会安徽省分会学术年会干旱小组. 安徽省江淮丘陵地区干旱问题的探讨[J]. 地理学报, 1966(1): 37-47.

[4] 蒋跃林, 盛绍学. 江淮分水岭地区降水与干旱对农业生产的影响及其对策[J]. 安徽农业科学, 1999, 27(5): 418-420.

[5] 施六林, 王艳, 王川. 江淮分水岭地区干旱特点及发展节水农业的对策[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(36): 18186-18187.

[6] 方茸, 周后福, 屈雅. 基于江淮分水岭地区的 Z 指数修正[J]. 气象, 2010, 36(10): 110-113.

[7] 杨书运, 马成泽, 袁东海. 江淮分水岭地区干旱分析[J]. 中国农业气象, 2004, 24(4): 29-32.

[8] 关红, 张至楠, 李陇堂. 基于 GIS 的西北部中高山盆地高原区旱灾风险评估[J]. 宁夏工程技术, 2014, 13(2): 184-188.

[9] 姚玉璧, 张强, 李耀辉, 等. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1884-1897.

[10] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65.

[11] 李连香, 许迪, 程先军, 等. 基于分层构权主成分分析的皖北地下水水质评价研究[J]. 资源科学, 2015, 37(1): 61-67.

[12] 焦立新. 评价指标标准化处理方法的探讨[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 1999, 13(3): 7-10.

[13] 马细霞, 李艳, 刘磊. 基于主成分分析的农业旱灾等级区划研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2011, 32(1): 125-128.

[14] 商彦蕊. 农业旱灾风险与脆弱性评估及其相关关系的建立[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 1999, 23(3): 420-428.

[15] 李清秀. 山东黄河段沿线区域洪灾风险评价与防洪措施[D]. 河南开封: 河南大学, 2012.