



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.009

胡惠兰, 周亮广. 淮河流域水资源短缺风险评估与时空分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 59-65.
HU H L, ZHOU L G. The risk assessment and space time analysis of water resources shortage in Huaihe River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 59-65. (in Chinese)

淮河流域水资源短缺风险评估与时空分析

胡惠兰^{1,2}, 周亮广¹

(1. 滁州学院 地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000; 2. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 根据 2003-2013 年淮河流域五省的降水量、径流系数、人均水资源量、人均 GDP、人口密度等相关数据, 构建水资源短缺风险评价体系, 用熵权法对指标赋值, 运用可变模糊模型对淮河流域及各省的水资源短缺风险进行评估和时空差异分析。结果表明: 2003-2013 年间淮河流域水资源短缺风险值总体较高, 且呈缓慢的增长趋势, 2004 年降水较少, 风险值达到最高; 十年间河南省风险增加最为明显, 而山东省较为稳定, 风险增加也最低; 在淮河流域五个区域中, 河南省的风险程度最高, 达到 3.52; 江苏省、山东省次之; 安徽省和湖北省相对较低, 达到 2.86 和 2.51。水资源短缺风险二级指标分析发现, 危险性最强的是河南省, 安徽省最小; 水资源短缺易损性最强的是山东省, 湖北省最小; 水资源短缺暴露性最强的是江苏省, 山东省最小; 水资源短缺可恢复性最好的是湖北省, 河南省最差。同时, 所有评价指标中人口密度、人均 GDP、降水量对水资源短缺风险的影响较大。

关键词: 水资源风险; 熵权法; 可变模糊模型; 淮河流域

中图分类号: TV 211 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)06-0059-07

The risk assessment and space-time analysis of water resources shortage in Huaihe River Basin

HU Huilan^{1,2}, ZHOU Lianguang¹

(1. Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 2. Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Based on the statistical data of precipitation, runoff coefficient, per capita water resources, GDP per capita, and population density from 2003 to 2013 in the 5 provinces of Huaihe River Basin, we conducted a comprehensive risk assessment of the water resources shortage in Huaihe River Basin and each province by building a risk assessment system and using the variable fuzzy model and entropy weight method. The results showed that the overall risk of water shortage in the Huaihe River Basin during 2003-2013 was relatively high and showed a trend of slow growth. The risk reached the highest in 2004 when the precipitation was little. During the ten years, the increase of risk in Henan province was the most pronounced, whereas Shandong province was relatively stable with the smallest increase of risk. Henan province had the highest degree of risk among the five regions in the Huaihe River Basin, reaching 3.52. It was followed by Jiangsu province and Shandong province, while Anhui and Hubei provinces had relatively low risks, which were 2.86 and 2.51 respectively. The analysis of the secondary indicators of water shortage risk revealed that Henan province faced the highest threat while Anhui province faced the lowest. Shandong province was the most vulnerable to water shortage while Hubei province was the least vulnerable. Jiangsu province was the most exposed to water shortage while Shandong province was the least exposed. Hubei province had the best restorability from water shortage while Henan province had the worst restorability. Moreover, population density, GDP per capita, and precipitation had a great impact on water shortage risk.

Key words: water resources risk; entropy weight method; variable fuzzy model; Huaihe River Basin

收稿日期: 2016-12-04 修回日期: 2016-12-21 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1025.015.html>

基金项目: 安徽高校人文社科重点研究基地项目(SK2015A176); 滁州学院科技创新团队支持计划项目(CXTD201105)

Funds: Anhui University Humanities and Social Science Key Research Base Project(SK2015A176); Chuzhou University Science and Technology Innovation Team Support Plan Project(CXTD201105)

作者简介: 胡惠兰(1993-), 女, 安徽黄山人, 主要从事地理科学方面研究。E-mail: huhuilan820@126.com

通讯作者: 周亮广(1981-), 男, 山东桓台人, 副教授, 主要从事水文水资源与 GIS 方面研究。E-mail: zhoulianguang@126.com

中国是世界贫水国之一,淡水资源只占世界总量的 8%,人均占有水资源量仅 2 200 m³,约为世界人均值的 1/4,相当于美国人均占有量的 1/6,巴西的 1/9。从我国社会经济发展来看,水资源已迅速接近承载力的上限,水资源短缺问题将越来越成为我国农业和社会经济发展的制约因素^[1]。

随着社会经济的发展,水资源短缺问题引起了越来越多人的关注,对水资源系统进行风险管理已成为水资源可持续发展的必然趋势,风险评估作为水资源短缺风险管理的基础已被广泛采用,并取得了研究成果^[2]。国外 Nazar^[3]较早定义了水资源风险表征的量化指标。Hashimoto^[4]提出了可靠性、可恢复性、脆弱性 3 个评价指标,从数学意义上给出了定义。Martín Carrasco^[5]对西班牙埃布罗河流域的水资源状况进行研究,筛选了需水保障率、需水保障可靠性、水资源利用率、供水能力随保障率变化率等 4 个指标,评估干旱因素驱动的水资源短缺风险。

国内许多学者对我国各地区、流域的水资源进行研究,王富强、黄明聪、于澜等都选取多个指标,构建评价体系,采用灰色模型理论、可变模糊模型、熵权法、层次分析法等方法分析区域的水资源风险状况,进而分析水资源状况并提出相应的对策^[6-9]。刘荆^[10]采用相关分析法对淮河流域暴雨灾害进行风险评估。门宝辉、徐珊分别用主成分分析法和生态足迹法各自对我国北方的宁夏和新疆地区、南方广东省的水资源可持续利用进行了研究^[11-12]。淮河流域水资源研究也较多,刘泳杰、郭鹏、刘俊阁等研究了淮河流域各省的水资源及其利用状况,就各省水资源短缺的现状提出相对的意见,为各省保护水资源提供了参考^[13-20]。

但淮河流域水资源的研究多是对水资源承载力、水环境、水污染、水生态等的研究,少有通过对淮河流域整体及其分省水资源短缺状况进行风险评估的研究。通过建立评价指标体系、构建可变模糊模型对淮河流域进行水资源短缺风险评估与时空分析,可为淮河流域的水资源短缺解决方案提供一定参考。

1 数据来源与技术方法

1.1 数据来源

数据主要来源于 2003—2013 年《淮河片水资源公报》,指标有降水量、径流系数、人均水资源量、水资源开发利用率、人口密度、农田灌溉亩均用水量、万元工业增加值用水量、生态环境用水量。地图数

据为淮河流域区划图。

1.2 研究方法

1.2.1 滑动平均法

为了对各指标数据进行分级,得到指标隶属度分级标准,将已有数值序列进行滑动平均,计算出数值序列的滑动平均值,作为一个新的序列,再计算其均值和均方差,建立指标值的分级标准如下。

$$\text{平均值: } x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\text{方差: } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (2)$$

表 1 指标值分级标准

Tab. 1 The classification standard of indicator values

状态	级别	分级标准
1	\bar{N}	$x < x - s$
2	$\hat{0}$	$x - s \leq x < x - 0.5s$
3	$\hat{0}$	$x - 0.5s \leq x < x + 0.5s$
4	$\hat{0}$	$x + 0.5s \leq x < x + s$
5	$\hat{0}$	$x \geq x + s$

1.2.2 熵权法

(1) 建立原始数据矩阵。

现有评价对象 $A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5)$ 即淮河流域的五个区湖北省、河南省、安徽省、江苏省、山东省,评价指标 $B = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10})$ 即降水量、缺水率、人均 GDP、人均用水量等,被评价对象 A_i 对指标 B_j 的值记为 X_{ij} :

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n} \quad (3)$$

(2) 对原始矩阵进行无量纲化处理。

越大越优型指标: $V_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (4)$

越小越优型指标: $V_{ij} = \frac{\max(X_j) - X_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (5)$

(3) 计算第 j 项指标下,第 i 个对象的特征比重 P_{ij} 。

$$P_{ij} = V_{ij} / \sum_{i=1}^m V_{ij} \quad (0 \leq P_{ij} \leq 1) \quad (6)$$

(4) 计算第 j 项指标的熵值 e_j 。

$$e_j = -1/\ln(m) \sum_{i=1}^m P_{ij} \cdot \ln P_{ij} \quad (7)$$

(5) 确定各指标的熵权。

$$W_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (8)$$

1.2.3 模糊综合评价法

模糊综合评价法,是一种应用模糊变换原理分

析和评价模糊系统的方法,普遍用于资源与环境条件评价、生态评价等各个方面。

由上文熵权法得到各一级权重为: $A = [a_1, a_2, a_3, a_4]$; 二级权重为: $A_1 = [a_{11}, a_{12}]$; $A_2 = [a_{21}, a_{22}]$; $A_3 = [a_{31}, a_{32}, a_{33}, a_{34}]$; $A_4 = [a_4]$ 。根据分级标准判断各省各指标值位于哪个等级,得到如下矩阵:

$$R_{\text{危险性}} = (1_{ij})_{2 \times 5} = \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & r_{113} & r_{114} & r_{115} \\ r_{121} & r_{122} & r_{123} & r_{124} & r_{125} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_{\text{易损性}} = (2_{ij})_{2 \times 5} = \begin{bmatrix} r_{211} & r_{212} & r_{213} & r_{214} & r_{215} \\ r_{221} & r_{222} & r_{223} & r_{224} & r_{225} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_{\text{暴露性}} = (3_{ij})_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} r_{311} & r_{312} & r_{313} & r_{314} & r_{315} \\ r_{321} & r_{322} & r_{323} & r_{324} & r_{325} \\ r_{331} & r_{332} & r_{333} & r_{334} & r_{335} \\ r_{341} & r_{342} & r_{343} & r_{344} & r_{345} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_{\text{可恢复性}} = (4_{ij})_{1 \times 5} = [r_{411} \ r_{412} \ r_{413} \ r_{414} \ r_{415}] \quad (12)$$

经合成运算可得到:

$$B_i = A_i \times R_i = [b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5}] \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (13)$$

基于单要素模糊综合评价结果,可得到综合评价决策矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \end{bmatrix} \quad (14)$$

最后得出水资源风险的模糊综合评价结果:

$$B = A \times R = [a_1, a_2, a_3, a_4] \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = [b_1, b_2, b_3, b_4, b_5] \quad (15)$$

2 指标体系构建与权重计算

2.1 评价指标体系

根据国内外指标体系构建的方法以及已有数据特点构建了风险评估指标体系(表 2)。总体分为四个一级指标,危险性、易损性、暴露性以及可恢复性,各一级指标由二级指标组成,危险性包括降水量和径流系数,易损性包括人均水资源量和水资源开发利用率,暴露性包括人均 GDP、人口密度、农田灌溉亩均用水量 and 万元工业增加值用水量,可恢复性由生态环境用水量来代表。

表 2 淮河流域水资源短缺风险评估评价指标体系

Tab. 2 The indicator system for water shortage risk assessment of Hwaihe River Basin

一级指标	危险性		易损性		暴露性			可恢复性	
二级指标	降水量	径流系数	人均水资源量	水资源开发利用率	人均 GDP	人口密度	农田灌溉亩均用水量	万元工业增加值用水量	生态环境用水量

2.2 评价标准

采用滑动平均的方法,根据不同指标的多年平均标准将隶属度分为 5 级。这些指标中有越大越优型,也有越小越优型。其中降水量、径流系数、人均

水资源量与人均 GDP 为越大越优型,水资源开发利用率、人口密度、农田灌溉亩均用水量、万元工业增加值用水量、生态环境用水量为越小越优型。

各项指标隶属度的分级标准见表 3。

表 3 指标隶属度分级标准

Tab. 3 The classification standard for membership degrees of indicators

一级指标	二级指标	\bar{N}	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
危险性	降水量	≥ 325	260~ 325	205~ 260	150~ 205	< 150
	径流系数	≥ 0.32	0.29~ 0.32	0.27~ 0.29	0.24~ 0.27	< 0.24
易损性	人均水资源量	≥ 1145	935~ 1145	725~ 935	515~ 725	< 515
	水资源开发利用率	< 0.45	0.45~ 0.6	0.6~ 0.75	0.75~ 0.9	≥ 0.9
暴露性	人均 GDP	≥ 2.5	2~ 2.5	1.5~ 2	1~ 1.5	< 1
	人口密度	< 450	450~ 540	540~ 630	630~ 720	≥ 720
	农田灌溉亩均用水量	< 240	240~ 300	300~ 360	360~ 420	≥ 420
	万元工业增加值用水量	< 70	70~ 125	125~ 180	180~ 235	≥ 235
可恢复性	生态环境用水量	< 0.5	0.5~ 1.5	1.5~ 2.5	2.5~ 3.5	≥ 3.5

2.3 指标权重

由熵权法得到各一级指标与二级指标的权重(表 4),在一级指标中,暴露性指标所占的权重最

大,为 50%。二级指标中,危险性指标中径流系数所占比重最大,为 64%;易损性指标中人均水资源量所占比重最大,为 70%;暴露性指标中人口密度

所占比重最大,为 35%,人均 GDP、农田灌溉亩均用水量、万元工业增加值用水量所占比重分别为 25%、26%、14%。可见人口密度、人均 GDP、降水量对水资源短缺风险的影响较大,而万元工业增加值用水量、生态环境用水量影响相对较小。

3 淮河流域水资源短缺风险时空分析

3.1 淮河流域水资源短缺风险时间变化分析

采用模糊评价法,结合各指标隶属度分级标准得到淮河流域五个区域每一年的风险评价价值(表 5),结合滑动平均法得到水资源风险综合评价价值分级标准(表 6),由此得到淮河流域水资源短缺风险变化趋势(图 1)及淮河流域各省水资源短缺风险变

化趋势图(图 2)。

表 4 指标综合权重

Tab. 4 The comprehensive weights of indicators

	U1	U2	U3	U4
C1	0.36			
C2	0.64	0.18		
C3		0.7		
C4		0.3	0.22	
C5			0.25	
C6			0.35	
C7			0.26	0.5
C8			0.14	
C9				1 0.1

表 5 淮河流域水资源风险综合评价价值

Tab. 5 The comprehensive assessment values of water resources risk in Huaihe River Basin

年份	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
河南省	2.5	3.44	2.88	3.37	2.68	3.34	3.52	2.98	3.47	3.78	3.68
安徽省	2.46	3.71	2.51	2.95	2.34	3.02	3	2.75	2.92	3.17	3.17
江苏省	2.59	4.32	2.77	3.12	2.51	3.31	3.56	3.18	2.8	3.18	3.81
山东省	2.81	3.02	2.82	3.32	2.52	2.86	3.04	3.04	3.08	3.4	3.34
湖北省	2.15	2.41	2.28	3.24	2.22	2.41	3.24	2.15	3.23	3.26	2.97
淮河片	2.82	3.72	2.98	3.31	2.48	2.89	3.17	2.99	2.99	3.17	3.23

表 6 水资源风险综合评价价值分级标准

Tab. 6 The classification standard of the comprehensive assessment values of water

风险等级	低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
风险值	≤2.50	2.50~3.00	3.00~3.50	3.50~4.00	≥4.00

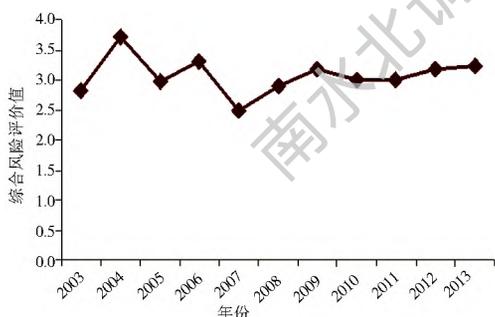


图 1 淮河流域水资源短缺风险变化趋势

Fig. 1 The water shortage risk variation trend in Huaihe River Basin

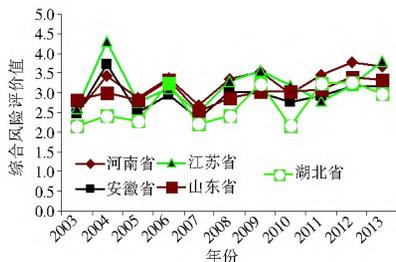


图 2 淮河流域各省水资源短缺风险变化趋势

Fig. 2 The water shortage risk variation trend in Huaihe River Basin provinces

慢的波动上升的趋势。2003 年到 2008 年波动较大,2008 年之后趋势较平稳,成缓慢上升的趋势,到 2013 年水资源短缺风险值达到 3.23,比 2003 年上升了 0.42,由较低风险值上升为中等风险。

整个淮河流域 2004 年为风险最高年,为较高风险,风险评价价值达到 3.72,其次是 2006 年的 3.31,2007 年达到最低值,为 2.48。2004 年的降水量较少,大约 780.0 mm,而 2007 年受持续性强降雨影响,降水量为 978.2 mm,所以降水是导致风险值波动的最主要原因。

2003 年到 2010 年淮河流域各省水资源短缺风险波动变化,湖北省波动相对较大。2003 年到 2013 年江苏省和河南省水资源风险增加较多,上升了 1.22 和 1.77,达到较高风险等级。其次是湖北省和安徽省,分别上升了 0.82 和 0.71,山东较稳定,上升了 0.53。从整体上看,2010 年之后五个区域的水资源短缺风险值呈缓慢的波动上升趋势。

3.2 淮河流域水资源短缺风险空间分析

3.2.1 淮河流域水资源短缺风险二级指标评价分析

采用模糊评价法结合 GIS 软件分别得到淮河流域水资源危险性、易损性、暴露性、可恢复性等级

从整体上看,淮河流域水资源短缺风险值呈缓

分布图(图3-图6)。

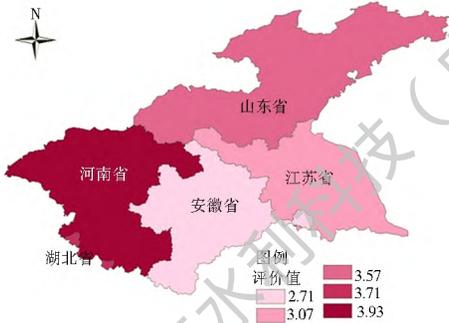


图3 淮河流域水资源危险性等级分布

Fig. 3 The threat grades of water resources in Huaihe River Basin



图4 淮河流域水资源易损性等级分布

Fig. 4 The vulnerability grades of water resources in Huaihe River Basin

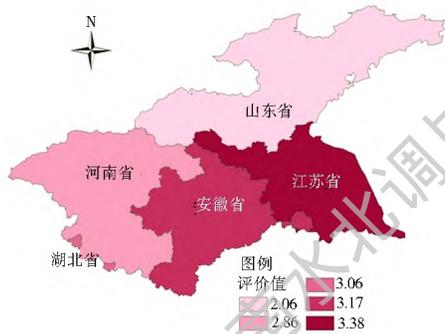


图5 淮河流域水资源暴露性等级分布

Fig. 5 The exposure grades of water resources in Huaihe River Basin

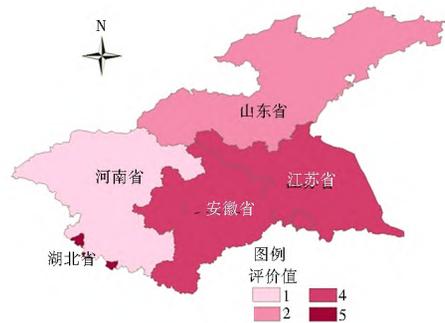


图6 淮河流域水资源可恢复性等级分布

Fig. 6 The restorability grades of water resources in Huaihe River Basin

(1)在危险性等级分布图中可以看出,河南省、湖北省及山东省都属于高风险等级,其中河南省危险性最高达到3.93,江苏省为中等风险等级,安徽

省为较低风险等级,风险值为2.71。淮河流域属于季风气候区,降水丰富,而安徽省降水较多,径流系数大,危险性最低。河南省、湖南省地处内陆,降水少,径流系数小,危险性高。从整体上可以看出,水资源短缺危险程度由南向北,由东向西增加。

(2)易损性等级分布图中水资源易损程度呈西南向东北增加的状况。山东省、河南省及江苏省易损性都达到高风险等级,其中山东省风险值最高达到了4.4,安徽省为中等风险等级,湖北省易损性处于低风险等级,风险值为1。山东省经济发达,用水量大,水资源开发利用率高,易损性最高。河南省人口密度大,人均水资源量小,易损性较高。人口的多少直接决定一个地区生活生产各方面用水的多少,用水紧张程度以及水资源开发利用程度,是水资源短缺的主要影响因素之一。湖北省该区域人口密度小,且用水较少,所以易损程度低。

(3)暴露性等级分布图中水资源暴露程度自西北向东南增加。江苏省、安徽省、河南省为中等风险等级,江苏省暴露性达到较高风险等级,风险值达到了3.38,山东省易损性处于低风险等级,风险值为2.06。淮河流域是我国重要的粮食生产基地,农业是水资源的用水大户。农业灌溉需要大量的水资源,不合理灌溉是造成水资源短缺的主要原因。随着经济发展,淮河流域的工业得到了快速的发展,带来了巨大的用水量,同时工业废水污染的不合理处理或是直接排放势必会造成水资源短缺。在淮河流域各区中,江苏省的农田灌溉亩均用水量最多,而安徽省的工业用水量最多,所以暴露程度较高。

(4)可恢复程度为高等级的有湖北省、安徽省和江苏省,其中湖北省可恢复性最高达到了5,恢复性低等级的是河南省为1。五个省中湖北省的生态环境用水量最少,可恢复性最高,相反,河南生态环境用水量最多,可恢复性最小。

3.2.2 淮河流域水资源短缺风险等级评价

采用模糊评价法结合二级指标综合评价价值可得到淮河流域水资源短缺风险等级分布(图7)。从图中可以看出河南省的水资源短缺为较高风险等级,风险值达到了3.52,江苏省和山东省为中等风险等级,安徽省和湖北省为中等风险等级,其中湖北省最低,风险值为2.51。从东西方向上看,沿海地区的水资源风险较内陆低,从南北方向上看,南方地区的风险值较北方低。安徽省近亚热带季风气候,降水较丰富,而山东接近温带季风气候,降水较亚热带少,河南地处内陆,降水较少,人口密度最高所以风险值最高。江苏地处沿海,但经济较发达,工业、农

业用水量大,人口密度也较大,所以水资源短缺风险值较高。

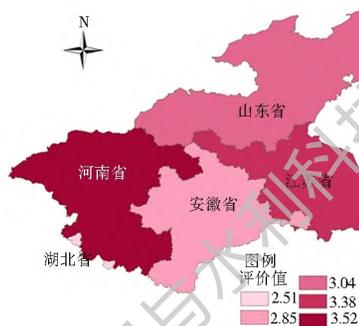


图7 淮河流域水资源风险等级分布

Fig.7 The risk grades of water resources in Huaihe River Basin

4 结论

(1) 淮河流域水资源短缺风险评价指标体系中人口密度、人均GDP、降水量是影响水资源短缺风险较大的因素,而万元工业增加值用水量、生态环境用水量影响较小。

(2) 2003-2010年淮河流域水资源短缺风险程度,波动较大,2010年之后变化较小,整体上呈缓慢增长的趋势。2004年降水较少,风险值达到高风险等级;十年间河南省风险增加最为明显,由低风险等级上升为高风险等级,而山东省较为稳定,风险增加也最低。

(3) 淮河流域水资源短缺风险评估发现,河南省的风险程度最高,为高风险等级,江苏省为较高风险等级,山东省和安徽省为中等风险等级,湖北省为低风险等级。

(4) 淮河流域水资源短缺二级指标风险评估分析发现河南省水资源短缺危险性风险等级最高,湖北省、山东省、江苏省次之,安徽省最低;水资源短缺易损性风险等级最高的是山东省,江苏省、河南省、安徽省次之,湖北省最低;水资源短缺暴露性风险等级最高的是江苏省,安徽省、湖北省、河南省次之,山东省最小;水资源短缺可恢复性风险等级最高的是湖北省,安徽省与江苏省齐平,山东省次之,河南省最低。

参考文献(References):

[1] 张丽萍. 四川省水资源短缺程度及缺水类型综合研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2004. (ZHANG L P. Comprehensive study on water shortage degree and water shortage types of Sichuan Province[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University. 2004. (in Chinese))

[2] 罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1092-1097, 1104.

(LUO J G, XIE J C, RUAN B Q. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2008, 39(9): 1092-1097, 1104. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2008.09.006.

[3] NAZAR A M, HALL W A, ALBERTSON M L. Risk avoidance objective in water resources [J]. Water Resources Plan Mgmt Div, ASCE, 1981, 107(1): 20-209.

[4] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.

[5] MARTIN-CARRASCO F J, GARROTE L. Drought induced Water Scarcity in Water Resources Systems [J]. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, 2007, 78(4): 301-311.

[6] 王富强, 韩宇平, 汪党献, 等. 区域水资源短缺风险的 SPA-VFS 评价模型 [J]. 水电能源科学, 2009(4): 31-33, 225. (WANG F Q, HAN Y P, WANG D X, et al. Set pair analysis variable fuzzy set model for evaluation of regional water resources shortage risk [J]. Water Resources and Power, 2009(4): 31-33, 225. (in Chinese))

[7] 黄明聪, 解建仓, 阮本清, 等. 基于支持向量机的水资源短缺风险评价模型及应用 [J]. 水利学报, 2007, 38(3): 255-259. (HUANG M C, XIE J C, RUAN B Q, et al. Model for assessing water shortage risk based on support vector machine [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007 38(3): 255-259. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2007.03.001.

[8] 于澜, 宋南川, 齐亮, 等. 基于风险因子设计的水资源短缺风险评估及预测 [J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2011, 12(4): 139-142. (YU L, SONG N C, QI L, et al. Research and implementation of university storage network based on IP SAN [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 12(4): 139-142. (in Chinese))

[9] 王琛茜, 张玉虎, 沈涛. 我国水资源短缺风险评估及空间分析 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 81-87. (WANG C Q, ZHANG Y H, SHEN T. Risk assessment and spatial analysis of water shortage in China [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2015, 36(1): 81-87. (in Chinese))

[10] 刘荆, 蒋卫国, 杜培军, 等. 基于相关分析的淮河流域暴雨灾害风险评估 [J]. 中国矿业大学学报, 2009(5): 735-740. (LIU J, JIANG W G, DU P J, et al. Rainstorm risk assessment of Huaihe River based on correlation analysis [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009(5): 735-740. (in Chinese))

[11] 门宝辉, 赵燮京, 梁川. 我国北方地区水资源可持续利用状况评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(4): 24-27. (MEN B H, ZHAO X J, LIANG C. Evaluation on Sustainable Development of Water Resources in North China [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2003, 1(4): 24-27. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2003.04.008.

- [12] 徐珊,夏丽华,陈智斌,等.基于生态足迹法的广东省水资源可持续利用分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(5):11-15. 98. (XU S, XIA L H, CHEN Z B, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in Guangdong Province based on ecological footprint theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 11-15, 98. (in Chinese))
- [13] 郑泳杰,张强,张生,等.基于信息熵的淮河流域降水时空变异特征研究[J].水电能源科学,2016(1):1-5. (ZHENG Y J, ZHANG Q, ZHANG S, et al. Entropy-based investigation on variability of precipitation in Huaihe River Basin[J]. Water Resources and Power, 2016(1): 1-5. (in Chinese))
- [14] 郭鹏,邹春辉,王旭.淮河流域水资源与水环境问题及对策研究[J].气象与环境科学,2011(S1):96-99. (GUO P, ZHOU C H, WANG X. Study on the problems and solutions of water resources and water environment in the Huaihe Basin[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2011(S1): 96-99. (in Chinese)) DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2011.s1.012.
- [15] 王振龙.淮河流域水资源问题与建议[J].水利水电技术,2011(8):78-81. (WANG Z L. Issues of water resources in Huaihe River Basin and relevant suggestions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011(8): 78-81. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.08.009.
- [16] 刘友春,何庆平,闫芳阶,等.山东省淮河流域洪水资源利用思路探讨[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):25-28,40. (LIU Y C, HE Q P P, YAN F J, et al. Discussion on flood resources utilization in Huaihe River Basin of Shandong Province based on network construction[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 25-28, 40. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2014.02.006.
- [17] 王翔.淮河流域及山东半岛水资源综合规划概要[J].中国水利,2011(23):112-114. (WANG X. Summary of Huaihe River Basin and Shandong peninsula integrated water resource plan[J]. China Water Resources, 2011(23): 112-114. (in Chinese))
- [18] 许应石,李长安,张中旺,等.湖北省水资源短缺风险评估及对策[J].长江科学院院报,2012(11):5-10. (XU Y S, LI C A, ZHANG Z W, et al. Risk assessment of water shortage of Han River Drainage in Hubei Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012(11): 5-10. (in Chinese))
- [19] 田华,杨明华.河南省浅层地下水动态演变分析[J].人民黄河,2012(3):45-46,51. (TIAN H, YANG M H. Analysis of development of shallow groundwater trend in Henan Province[J]. Yellow River, 2012(3): 45-46, 51. (in Chinese))
- [20] 刘俊阁,张金萍.河南省2008年水足迹分析[J].人民黄河,2011(9):62-64. (LIU J G, ZHANG J P. Analysis of water footprint of Henan Province in 2008[J]. Yellow River, 2011(9): 62-64. (in Chinese))

(上接第16页)

- [23] 金菊良,宋占智,蒋尚明,等.基于云模型的淮北平原参考作物蒸散量时空分布[J].南水北调与水利科技,2017(1):1-8. (JIN J L, SONG Z Z, JIANG S M, et al. Characteristics analysis of temporal-spatial potential evapotranspiration distribution in Huaibei plain based on cloud model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017(1): 1-8. (in Chinese))
- [24] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等.海河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J].资源科学,2009,31(9):1470-1476. (LIU X M, ZHENG H X, LIU C M, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1470-1476. (in Chinese))
- [25] HARGREAVES G H. Moisture availability and crop production[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers ASAE, 1975, 18(5): 980-984.
- [26] BLANEY H F, CRIDDLE W D. Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data[M]. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech, 1950, 96: 48.
- [27] ROHWER C. Evaporation from free water surface[R]. US Department of Agriculture, Economic Research Service, 1931.
- [28] 邹磊,夏军,马细霞,等.潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析[J].水文,2014,34(3):17-23. (ZOU L, XIA J, MA X X, et al. Applicability of potential evapotranspiration methods in Henan province[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3): 17-23. (in Chinese))