第36卷第6期 河北科技大学学报 Vol. 36, No. 6
2015年12月 Journal of Hebei University of Science and Technology Dec. 2015

文章编号:1008-1542(2015)06-0644-08 doi:10.7535/hbkd.2015yx06015

模糊综合评价法在生态安全预警评价中的应用
——以河北省围场县为例

沈洪艳[1,2],刘军伟[1,2],曹志会[1,2],赵 月[1,2],王 冰[1,2]

(1.河北科技大学环境科学与工程学院,河北石家庄 050018;2.河北省药用分子化学重点实验室,河北石家庄 050018)

摘 要:基于2003—2012年围场县的经济、水环境、土地资源、自然资源等相关数据,运用P-S-R模型从压力、状态、响应3方面构建围场县生态安全预警指标体系,采用模糊评价法并结合预警指数和警度标准对2003—2012年围场县生态安全警情状况进行分析。结果表明,2003—2012年围场县生态安全预警指数总体上呈波动上升态势,预警指数由2003年的5.278 1上升到2012年的6.809 1,处于"轻警"状态,趋于预警状态。就压力、状态、响应各子系统而言,2003—2012年围场县生态安全的压力指标、状态指标和响应指标的预警指数呈上升趋势,发展趋势良好。

关键词:环境生态学;模糊综合评价法;生态安全预警;围场县;P-S-R模型;预警指数;警度标准

中图分类号:X171.1 **文献标志码**:A

Application of fuzzy comprehensive evaluation to early-warning assessment of ecological security: A case study in Weichang County of Hebei Province

SHEN Hongyan[1,2], LIU Junwei[1,2], CAO Zhihui[1,2], ZHAO Yue[1,2], WANG Bing[1,2]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Hebei Province Key Laboratory of Medicinal Chemistry, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Based on the data from 2003 to 2012 related to economy, water environment, land and natural resources of Weichang County, pressure-state-response model is used to construct an ecological security early-warning indicator system of Weichang County from three aspects-pressure, state and response. Fuzzy evaluation method combined with early-warning index and warning degree standard are applied to analyze the ecological security alarm conditions of Weichang County from 2003 to 2012. The results show that the ecological security warning index of Weichang County generally has a fluctuating upward trend from 2003 to 2012, and the value rises from 5.278 1 in 2003 to 6.809 1 in 2012, which means the county is in the "light warning" state, tending to the warning state. In terms of pressure, state, response subsystems, the early-warning index of pressure, state and response is on the rise from 2003 to 2012, which indicates a good development trend.

收稿日期:2014-12-23;修回日期:2015-05-07;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(41373096);国家环保部公益课题(201509041-05);河北省自然科学基金(B2014208068);河北省药用分子化学实验室开放基金;河北省环保厅公益课题;河北省重点学科建设基金

作者简介:沈洪艳(1971—),女,天津人,教授,博士,主要从事污染物环境行为及效应方面的研究。

E-mail: shy0405@sina.com

沈洪艳,刘军伟,曹志会,等.模糊综合评价法在生态安全预警评价中的应用[J].河北科技大学学报,2015,36(6):644-651.

SHEN Hongyan, LIU Junwei, CAO Zhihui, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation to early-warning assessment of ecological security[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(6): 644-651.

Keywords: environmental ecology; fuzzy comprehensive evaluation; early-warning assessment of ecological security; Weichang County; pressure-state-response model(P-S-R model); early-warning index; warning degree standard

随着全球变化的不断加速，生态安全已成为国内外研究的热点[1]。生态安全预警研究随着生态安全研究的开展和深入应运而生，是生态安全研究的主要内容之一。预警一般是对危机与危险状态的一种预前信息警报或警告。狭义的生态安全预警仅指对自然资源或生态安全可能出现的衰竭或危机而建立的报警，而广义的生态安全预警则涵盖生态安全维护和减少危机的全部过程，包括发现警情、分析警兆、寻找警源、判断警度等[2]。目前，国外的相关研究主要建立在生态风险评价、生态预报的基础上，具有较为完整的概念体系和系统的操作方法[3]。中国生态安全预警研究主要集中在土地、农业、水环境、重要区域的生态安全预警等问题的探讨和研究上[4-7]。关于生态安全预警研究的模型方法较多，主要有综合指数法、模糊综合法、物元分析法、人工神经网络法，有的学者还将几种方法结合使用形成复合预警模型[8]。就重要区域的生态安全预警而言，研究内容涉及行政区域预警、自然景区生态预警等方面，但是对于还处在探索阶段的区域生态安全预警研究，总体区域生态安全预警的研究成果还比较少，因此有必要加强该领域的研究。

近年来，随着围场县人口的增长和社会经济的快速发展，生态破坏和环境污染等问题日益凸显，部分地区生态环境脆弱，局部地区植被覆盖率低、土地沙化、水土流失严重，截止到 2008 年底，围场县水土流失面积为 3 964 km^2，占全县总面积的 42.99%，水土流失造成土地生产力下降、山洪和泥石流灾害多发和淤积河床及水库等问题。围场县既是京津地区的重要沙尘源，又是京津地区重要的水源涵养区，其生态环境的好坏，直接影响着京津地区的大气环境和水源安全。因此，有必要探讨围场县生态安全预警机制，定期对其生态安全现状进行评估分析，以便进行预警报告。

1　研究区域概况

围场县是河北省最北端的塞外高原县，地理坐标为东经 116°32′～118°14′，北纬 41°35′～42°40′，总面积为 9 220 km^2，人口为 53.6 万，是京津地区水源涵养功能区的重要区域。地势西北高、东南低，地形起伏度为 1 317 m。土壤类型主要有棕壤、褐土、黑土、灰色森林土、风沙土。气候类型复杂，属寒温带—中温带，半湿润—半干旱大陆性季风气候，年均气温为－1.4～4.7 ℃，多年平均降雨量为 450～500 mm，近 60 年最大降雨量为 684 mm，最小降雨量为 237.2 mm。自 2002 年以来，围场县加快由农业大县向工业强县的跨越，2011 年实现工业总产值 39.9 亿元，较 2001 年增长 17 亿元。此外，该县生物资源多样，矿产资源丰富。研究区域范围见图 1。

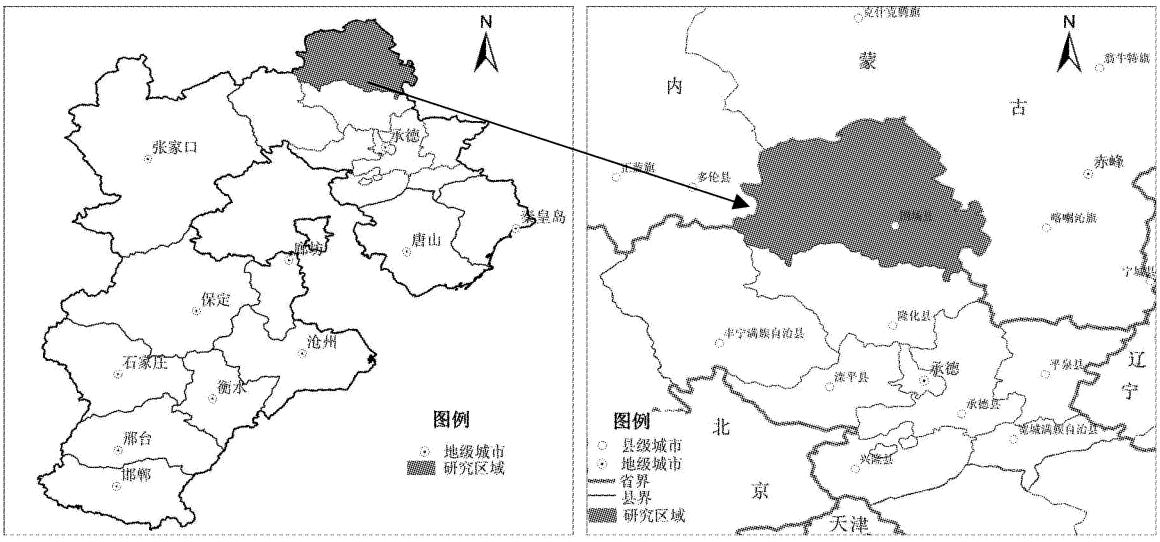

图 1　研究区域范围

Fig. 1　Scope of the study area

2 数据来源及评价方法

2.1 原始数据来源

本研究选取围场县2003—2012年共10年的经济、水环境、土地资源、自然资源等方面的相关数据进行评价。数据来源于河北经济年鉴、河北年鉴、河北水利统计年鉴、承德市统计资料、围场县年鉴、围场县国民经济和社会发展统计公报以及相关部门的调研数据。

2.2 指标体系

根据层次分析法原理和生态安全预警评价模型(P-S-R模型),依照科学性、代表性、实用性、可获取性的原则,构建围场县生态安全预警指标体系。本文将围场县生态安全预警体系划分为目标层、准则层、要素层和指标层4个层次。目标层以围场县生态安全预警指数为目标,用来判断围场县生态安全的总体水平。准则层包括压力指标、状态指标、响应指标3个复合指标,其中压力指标指的是人类活动对生态安全造成的直接压力因子,选取人口自然增长率、GDP年增长率、水资源开发利用率、农药使用强度等因素从人口压力、经济压力、资源压力、土地压力4个方面构建;状态指标反映的是环境当前的状态或趋势,选取降水量、人均水资源占有量、水土流失面积比例等因素从自然状态、资源状态、环境状态3个方面进行构建;响应指标反映的是人类为了提高生态安全水平,防止生态环境恶化而采取的一系列积极的措施,选取环保投资占GDP的比例、水土流失治理率、工业废水排放达标率等因素从社会经济响应、环境响应2方面进行构建(见表1)。

表1 围场县生态安全预警评价指标体系及分级标准

Tab.1 Eco-security assessment indicator system and grading standard for early-warning in Weichang County

目标层(A)	准则层(B)	要素层(C)	指标层(D)	预警状态				
				重警	中警	轻警	预警	无警
生态安全预警指数A [1]	压力指标 B_1 [0.25]	人口压力 C_1 [0.141 1]	* 人口密度 D_1/(人·km^{-2}) [0.500 0]	500	400	300	200	100
			* 人口自然增长率 D_2/‰ [0.500 0]	12	8	5	3	1
		经济压力 C_2 [0.141 1]	人均GDP D_3/元[0.163 4]	3 000	10 000	25 000	50 000	100 000
			* GDP年增长率 D_4/%[0.297 0]	14	11	8	5	2
			第三产业占GDP比例 D_5/%[0.539 6]	20	30	40	50	70
		资源压力 C_3 [0.445 0]	* 万元GDP用水量 D_6/(m^2·万元$^{-1}$) [0.163 4]	150	125	100	75	50
			* 万元GDP COD排放量 D_7/(kg·万元$^{-1}$) [0.297 0]	55	40	25	10	4
			* 水资源开发利用率 D_8/%[0.539 6]	50	40	30	20	10
		土地压力 C_4 [0.262 7]	* 土地垦殖指数 D_9/%[0.142 9]	30	20	10	5	3
			* 农药使用强度 D_{10}/(kg·hm^{-2})[0.428 6]	45	40	35	15	10
			* 化肥使用强度 D_{11}/(kg·hm^{-2}) [0.428 6]	900	600	450	300	200
	状态指标 B_2 [0.25]	自然状态 C_5 [0.500 0]	地形起伏度 D_{12}/m[0.166 7]	500	1 000	1 500	2 000	2 500
			降水量 D_{13}/mm[0.833 3]	350	500	650	800	1 000
		资源状态 C_6 [0.250 0]	人均水资源占有量 D_{14}/(m^2·人$^{-1}$)[0.750 0]	500	1 000	2 000	2 500	3 000
			人均耕地面积 D_{15}/(亩·人$^{-1}$)[0.250 0]	0.3	0.5	0.9	1.5	2.0
		环境状态 C_7 [0.250 0]	森林覆盖率 D_{16}/%[0.649 1]	10	20	35	50	60
			* 水土流失面积比例 D_{17}/% [0.071 9]	70	60	50	35	20
			保护区比例 D_{18}/%[0.279 0]	1	3	7	12	20
	响应指标 B_3 [0.5]	社会经济响应 C_8[0.333 3]	环保投资占GDP的比例 D_{19}/% [0.750 0]	1	1.5	2.0	2.5	3.0
			农民年人均纯收入 D_{20}/元 [0.250 0]	1 000	2 000	3 500	5 000	6 500
		环境响应 C_9[0.666 7]	水土流失治理率 D_{21}/%[0.200 0]	50	60	70	80	100
			工业废水排放达标率 D_{22}/% [0.400 0]	60	70	80	90	100
			城镇生活污水处理率 D_{23}/% [0.400 0]	40	50	60	80	100

注:中括号内数据为权重;* 号后的指标是成本型指标。

2.3 权重

层次分析法(AHP)是由美国运筹学家SAATY在20世纪70年代提出的一种定性和定量相结合的决

策分析方法。AHP 是一种将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化的方法，运用这种方法，通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素，在各因素之间进行比较和计算，可得出不同因素重要性程度的权重。AHP 法不仅适用于存在不确定性和主观信息的情况，还允许以合乎逻辑的方式运用经验、洞察力和直觉，能够比较准确地衡量评价指标的相对重要性[9-13]。本文采用 AHP 确定指标权重（见表 1），所有指标的权重值均已通过一致性检验。

2.4　分级标准

生态安全预警标准的选择，要能反映生态安全的范围和程度，本文根据围场县的实际情况，参照国际、国家、行业和地方性的标准，以及国内其他区域相关研究的划分标准[14-15]等综合制订预警评价指标分级标准（见表 1）。

2.5　基于模糊综合评价法的生态安全预警评价

利用模糊数学的概念和方法，建立围场县生态安全预警的评价标准与模型，根据所建立的生态安全预警指标体系，需按照如下步骤进行评价。

第 1 步：确定被评价对象的因子论域。

$X=\{x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n\}$，$n=1,2,3,\cdots,23$，即判定因子构成的指标体系。

第 2 步：确定评语论域。

$V=\{v_1,v_2,v_3,\cdots,v_m)$，$m=1,2,3,4,5$，该评语论域 $V=\{$重警，中警，轻警，预警，无警$\}$，它们由高到低反映了生态安全预警的程度。

第 3 步：在被评价对象的因子论域 X 与评语论域 V 之间进行单因子评价，建立模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$，即

$$\boldsymbol{R}=\begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{Bmatrix},$$

式中，r_{ij} 表示因子论域 X 中第 i 个因素对应于评语论域 V 中第 j 个等级 v_j 的相对隶属度。相对隶属度（以下简称隶属度）的计算是模糊数学方法的关键，其计算公式对效益型指标（指标值越大，生态安全程度越高）和成本型指标（指标值越大，生态安全程度越低）有所不同。

1）效益型指标隶属度的计算公式

以第 i 项指标 x_i 为例，$s_{i,j}$ 为第 i 项指标的 j 级生态安全标准，当第 i 项指标 x_i 的实际值小于其对应的第 1 级标准（重警）时，它对“重警”的隶属度为 1，而对其他预警级别的隶属度为 0，即

当 $x_i<s_{i,j}$ 时，$r_{i1}=1,r_{i2}=r_{i3}=r_{i4}=r_{i5}=0$；

当 $s_{i,j}\leqslant x_i\leqslant s_{i,j+1}$ 时，$r_{i,j+1}=\dfrac{x_i-s_{i,j}}{s_{i,j+1}-s_{i,j}}$，$r_{i,j}=1-r_{i,j+1}$。

当第 i 项指标 x_i 的实际值大于其对应的第 5 级标准（无警）时，它对“无警”的隶属度为 1，而对其他预警级别的隶属度为 0，即 $x_i>s_{i,j+1}$ 时，

$$r_{i5}=1,r_{i1}=r_{i2}=r_{i3}=r_{i4}=0\ 。$$

2）成本型指标隶属度的计算方法

同效益型指标隶属度的计算类似，以第 i 项指标 x_i 为例，$s_{i,j}$ 为第 i 项指标的 j 级生态安全标准，即

当 $x_i>s_{i,j}$ 时，$r_{i1}=1,r_{i2}=r_{i3}=r_{i4}=r_{i5}=0$；

当 $s_{i,j+1}\leqslant x_i\leqslant s_{i,j}$ 时，$r_{i,j+1}=\dfrac{s_{i,j}-x_i}{s_{i,j}-s_{i,j+1}}$，$r_{i,j}=1-r_{i,j+1}$；

而当 $x_i<s_{i,j+1}$ 时，$r_{i5}=1,r_{i1}=r_{i2}=r_{i3}=r_{i4}=0$ 。

第 4 步：模糊综合评价模型。

基于模糊数学的生态安全评价模为

$$B=W_i\cdot\boldsymbol{R}=(B_1,B_2,B_3,B_4,B_5),W_i=(W_1,W_2,W_3,\cdots,W_{23}),$$

式中，B 为生态安全水平评价结果，W_i 为最终确定的指标体系中各指标的权重值。

第 5 步：计算各级别变量特征值 H，即相应指标层中各自指标的综合指数值，计算公式为

$$H=\sum_{j=1}^{5}jB_j,$$

式中，B_j 为第4步中已确定的隶属于第 j 等级的隶属度值[16-20]。

2.6 生态安全预警等级标准

依据上述生态安全预警评价的指标体系和模型的计算结果，并结合生态领域10名专家的建议，得到生态安全预警程度级别划分标准(见表2)。

表2 河北省围场县生态安全预警等级标准

Tab. 2 Ecological security early-warning grade standard of Weichang County in Hebei Province

警度	警度区间	警度	警度区间
重警	[2,3)	预警	[7,9)
中警	[3,5)	无警	[9,10]
轻警	[5,7)		

3 结果与分析

3.1 综合安全状况预警分析

由图2和表3可以看出，2003—2012年围场县生态安全综合预警指数呈波动上升趋势，从2003年的5.278 1上升到2012年的6.809 1，警度没有变化，处于“轻警”状态，但具有向“预警”变化的趋势，表明围场县生态安全的综合水平呈好转态势。2003—2007年，预警指数处于5.400左右，2008年以来，围场县在发展社会经济的同时，注重加大生态环境保护的力度，采取了深入推进节能减排、加强水土流失重点区域治理、增加环保投资、加快调整产业结构、加强工业污染治理、推广节水技术等措施，促进了围场县生态安全水平的不断提升。但是，就当前所处的生态安全预警级别来看，围场县生态安全警度处于“轻警”状态，未达到“无警”状态，生态环境保护形势仍比较严峻，水土流失、水资源短缺以及土壤污染等问题不容忽视，需进一步加大该县生态环境保护的力度。

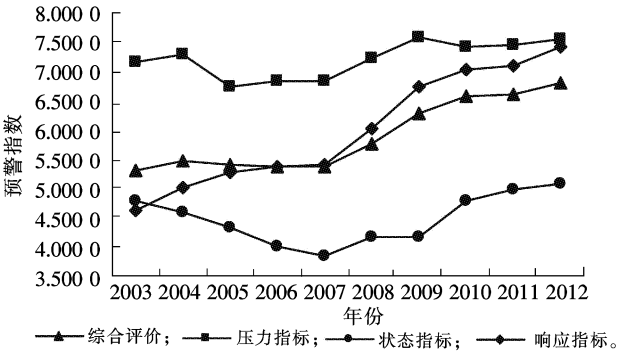

图2 围场县生态安全预警指数发展趋势

Fig. 2 Warning index development trend of ecological security in Weichang County

表3 围场县生态安全预警模糊综合评价结果

Tab. 3 Fuzzy comprehensive assessment results of Weichang's ecological security early-warning

年份	重警	中警	轻警	预警	无警	级别特征值	评价结果
2003	0.186 9	0.243 8	0.158 6	0.194 8	0.215 9	5.278 1	轻警
2004	0.138 4	0.239 8	0.205 4	0.165 1	0.251 2	5.470 9	轻警
2005	0.158 9	0.252 0	0.171 2	0.157 1	0.260 8	5.383 6	轻警
2006	0.200 1	0.156 6	0.210 2	0.219 7	0.213 3	5.371 9	轻警
2007	0.221 9	0.143 8	0.212 0	0.192 6	0.229 7	5.350 9	轻警
2008	0.100 5	0.245 8	0.138 2	0.240 9	0.274 6	5.737 7	轻警
2009	0.104 6	0.094 4	0.225 1	0.253 8	0.322 1	6.287 7	轻警
2010	0.010 2	0.165 9	0.226 8	0.199 7	0.397 3	6.552 9	轻警
2011	0.002 6	0.151 1	0.198 4	0.308 7	0.339 2	6.606 4	轻警
2012	0.014 1	0.132 3	0.181 8	0.262 2	0.409 6	6.809 1	轻警

3.2 压力、状态和响应指标分析

3.2.1 压力指标分析

由图2和表4可以看出，2003—2012年，围场县生态安全压力指标中预警指数呈缓慢波动上升趋势，其中2003—2004年指数从7.146 3上升到7.293 4，2005—2007年预警指数基本处于6.8左右，2008—2012年预警指数从7.216 4上升到7.542 4，警度经“预警”上升到“轻警”，再降到“预警”，该变化过程表明围场县所面临的生态安全压力不稳定，易出现反复起跌的状况，但整体上有所改善。人口自然增长率、土地垦殖指数、人均GDP、万元GDP用水量、农药使用强度等指标的预警等级变化幅度较大，其中人均GDP、万元GDP用水量、农药使用强度等指标在2003—2012年预警等级呈不同程度的上升趋势，表明其对围场县生态安全压力指标预警指数的上升有一定促进作用。人均GDP从2003年的3 790元提升到2012年的14 847元，表明社会经济发展水平不断提升。万元GDP用水量由2003年的189 m^3 下降到2012年的65 m^3，农药使用强

度由 2003 年的 10.01 kg/hm^2 下降到 2012 年的 5.21 kg/hm^2，表明围场县通过采取相关措施在节约水资源、改良土壤污染方面取得了一定的积极效果。人口自然增长率、土地垦殖指数等指标的预警等级在 2003—2012 年呈下降趋势，这些指标预警等级的下降在一定程度上阻碍了围场县生态安全压力预警指数的上升，因此，围场县应重视控制人口增长，并合理开发利用土地资源。

3.2.2　状态指标分析

由图 2 和表 4 可以看出，2003—2012 年，围场县生态安全状态指标中预警指数发展趋势呈缓慢波动上升趋势，呈“V”字形态势，2007 年处于最低点，仅为 3.837 6，警度处于“中警”状态。2003—2007 年为迅速下降期，这期间城市化水平不断提高，工业化发展加快，人口不断增加，导致大量耕地被占，人均耕地面积从 2003 年的 1.62 亩（约 0.108 hm^2）下降到 2012 年的 1.48 亩（约 0.099 hm^2），加上干旱少雨，降雨量预警等级下降幅度较大，成为限制围场县生态安全水平提升的主要因素。2008—2012 年为波动上升期，主要得益于人工造林、“三北”防护林建设等措施，森林覆盖率从 2008 年的 50.3%增加到 2012 年的 56.7%，水土流失治理率也逐年升高，上述措施在一定程度上改善了围场县的生态安全现状。

表 4　围场县各子系统生态安全预警评价结果

Tab.4　Ecological security early-warning assessment results of each subsystem in Weichang County

年份	准则层	警度					级别特征值	评价结果
		重警	中警	轻警	预警	无警		
2003	压力指标	0.094 8	0.041 3	0.189 2	0.092 6	0.582 1	7.146 3	预警
	状态指标	0.000 0	0.344 8	0.445 4	0.194 2	0.015 6	4.761 4	中警
	响应指标	0.305 4	0.294 6	0.000 0	0.246 1	0.153 9	4.602 3	中警
2004	压力指标	0.018 8	0.059 0	0.248 9	0.112 7	0.560 6	7.293 4	预警
	状态指标	0.001 5	0.434 8	0.340 8	0.213 5	0.009 4	4.590 2	中警
	响应指标	0.266 7	0.217 3	0.116 0	0.182 7	0.217 3	5.000 0	轻警
2005	压力指标	0.029 6	0.169 2	0.222 4	0.086 0	0.492 9	6.716 2	轻警
	状态指标	0.104 2	0.530 5	0.065 7	0.253 3	0.046 3	4.318 4	中警
	响应指标	0.250 8	0.150 8	0.198 4	0.148 0	0.252 0	5.250 0	轻警
2006	压力指标	0.016 1	0.127 7	0.252 7	0.159 0	0.444 5	6.812 7	轻警
	状态指标	0.284 4	0.350 3	0.099 8	0.264 9	0.000 6	3.978 6	中警
	响应指标	0.250 0	0.077 8	0.244 2	0.224 0	0.204 0	5.358 4	轻警
2007	压力指标	0.015 4	0.155 2	0.204 0	0.196 7	0.428 7	6.823 4	轻警
	状态指标	0.422 3	0.212 4	0.101 3	0.263 4	0.000 6	3.837 6	中警
	响应指标	0.225 0	0.103 7	0.271 3	0.155 2	0.244 8	5.407 2	轻警
2008	压力指标	0.019 3	0.163 8	0.156 8	0.231 5	0.428 7	7.216 4	预警
	状态指标	0.182 5	0.452 2	0.068 8	0.291 0	0.005 5	4.152 1	中警
	响应指标	0.105 0	0.199 7	0.163 7	0.204 4	0.327 2	6.003 3	轻警
2009	压力指标	0.006 6	0.061 0	0.226 3	0.053 4	0.652 7	7.575 9	预警
	状态指标	0.411 7	0.223 0	0.065 7	0.186 2	0.113 4	4.145 1	中警
	响应指标	0.000 0	0.049 6	0.304 4	0.384 9	0.261 1	6.714 9	轻警
2010	压力指标	0.070 8	0.103 1	0.084 2	0.072 6	0.669 2	7.403 3	预警
	状态指标	0.012 0	0.515 7	0.172 6	0.186 2	0.113 4	4.758 7	中警
	响应指标	0.000 0	0.022 4	0.325 2	0.270 0	0.382 4	7.024 8	预警
2011	压力指标	0.021 0	0.181 0	0.047 2	0.154 3	0.596 5	7.459 6	预警
	状态指标	0.010 5	0.444 4	0.245 4	0.163 5	0.136 1	4.951 2	中警
	响应指标	0.000 0	0.000 0	0.250 4	0.448 0	0.301 6	7.102 4	预警
2012	压力指标	0.050 6	0.148 4	0.050 2	0.121 0	0.629 7	7.542 4	预警
	状态指标	0.012 8	0.415 5	0.272 1	0.127 8	0.171 8	5.073 6	轻警
	响应指标	0.000 0	0.000 0	0.202 4	0.382 6	0.415 0	7.425 3	预警

3.2.3 响应指标分析

由图2和表4可以看出，2003—2012年，围场县生态安全响应指标中预警指数整体呈逐渐上升趋势，从2003年的4.602 3上升到2012年的7.425 3，警度由“中警”下降到“预警”，发展趋势良好。近年来，人们愈来愈认识到生态环境保护的重要性，面对生态环境保护的严峻形势，围场县积极应对，采取了大力发展循环经济和绿色经济、推广低碳技术、着力改善沙化土地集中地区的生态环境、加快完善生态补偿机制、严格控制污染行业等一系列举措，有效促进了全县生态安全水平的提高。农民年人均纯收入从2003年的1 508元增加到2012年的3 887元；环境保护的力度逐步加大，各类污染物的治理水平明显提升，工业废水排放达标率从2003年的87%增加到2012年的100%。这些指标中预警等级的提高，带动了全县生态安全响应指标预警指数的不断上升。

4 讨 论

1)基于P-S-R模型构建了围场县生态安全预警评价指标体系，利用模糊综合评价法对其生态安全预警状况进行了评价，得到了围场县生态安全的发展趋势，且与实际情况较为吻合，说明该方法作为生态安全预警评价的方法是有效的。

2)在基于模糊综合评判法的生态安全预警评价过程中，分级标准的建立是关键一环。在参考大量研究成果、文献的基础上，结合评价区域的实际情况制订各级指标的评价标准，难免受主观因素的影响，考虑到围场县是京津地区重要的水源涵养功能区，建立生态安全预警评价指标体系时，选取了大量反映经济、水环境和土地方面的指标，而工业污染等方面的指标选取较少；权重确定过程中，响应类指标即人对生态环境的反馈作用被赋予了较大权重，受到了一定的主观因素影响。以上问题在今后研究中有待进一步完善。

5 结 论

本文以河北省围场县为研究对象，基于模糊综合评价法，利用经济、水环境、土地、自然环境等数据定量计算并评价了围场县的生态安全预警状况，得到以下结论。

1)评价期间，围场县综合生态安全警度一直处于“轻警”状态，但预警指数总体上呈波动上升趋势，特别是2008年后增长较快，2012年已达到6.809 1，接近“预警”状态。

2)对压力、状态、响应各子系统而言，评价期间，压力指标预警指数在2005—2007这3年中均小于7，维持在6.8左右，警度处于“轻警”状态，其他年份警度处于“预警”状态；状态指标预警指数增长缓慢，2003—2011年的警度处于“中警”状态，2012年达到“预警”状态；响应指标预警指数逐年上升，警度由“中警”下降到“预警”，发展趋势良好。

参考文献/References：

[1] 崔胜辉，洪华生，黄云凤，等.生态安全研究进展[J].生态学报，2005，25(4)：861-868.
CUI Shenghui，HONG Huasheng，HUANG Yunfeng，et al. Progress of the ecological security research[J]. Acta Ecologica Sinica，2005，25(4)：861-868.

[2] 郝东恒，谢军安.关于构建河北省生态安全预警系统的思考[J].当代经济管理，2005，27(1)：59-62.
HAO Dongheng，XIE Junan. Constructing eco-security early-warning system in Hebei Province[J]. Contemporary Economic Management，2005，27(1)：59-62.

[3] 董伟，张向晖，苏德，等.生态安全预警进展研究[J].环境科学与技术，2007，30(12)：97-99.
DONG Wei，ZHANG Xianghui，SU De，et al. Progress on forewarning of ecological security[J]. Environmental Science & Technology，2007，30(12)：97-99.

[4] 黎德川，廖铁军，刘洪，等.乐山市土地生态安全预警研究[J].西南大学学报(自然科学版)，2009，31(3)：141-147.
LI Dechuan，LIAO Tiejun，LIU Hong，et al. Research on early-warning of land ecological security in Leshan City[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition)，2009，31(3)：141-147.

[5] 徐启荣，赵海强，江云，等.安徽省农田生态安全预警信息系统研究与建立[J].安徽农业科学，2007，35(30)：9615-9618.
XU Qirong，ZHAO Haiqiang，JIANG Yun，et al. Study and establishment on farmland ecological security pre-warning information system of Anhui Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Science，2007，35(30)：9615-9618.

[6] 包晔，蔡建平，沈陆娟.杭州市水环境安全评价与预警模型[J].数学的实践与认识，2014，44(20)：148-155.

BAO Ye, CAI Jianping, SHEN Lujuan. The evaluation of water environment security and early-warning model for Hangzhou[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2014,44(20):148-155.

[7] 赵莉，葛京凤，梁彦庆，等. 河北省山区生态安全预警及调控对策——以燕山东段为例[J]. 资源与产业，2012,14(3):128-133.
ZHAO Li, GE Jingfeng, LIANG Yanqing, et al. A case study on eastern Yanshan mountain: Ecological safety alarming and controls in Hebei's mountains[J]. Resources & Industries, 2012,14(3):128-133.

[8] 陶晓燕. 基于模糊物元理论的城市生态安全预警评价[J]. 资源开发与市场，2013,29(8):814-817.
TAO Xiaoyan. Assessment of urban ecological security warning based on fuzzy, matter-element theory[J]. Resource Development & Market, 2013,29(8):814-817.

[9] 崔娟敏，季文光. 基于 AHP 的土地集约利用水平模糊综合评价[J]. 水土保持研究，2011,18(4):122-125.
CUI Juanmin, JI Wenguang. AHP-based fuzzy comprehensive evaluating for land intensive use level[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(4):122-125.

[10] 唐黎，刘茜. 基于 AHP 的乡村旅游资源评价——以福建长泰山重村为例[J]. 中南林业科技大学学报，2014,34(11):155-160.
TANG Li, LIU Xi. Rural tourism resources assessment based on AHP: Taking Shanchong Village, Fujian Province as the example[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014,34(11):155-160.

[11] 马丽丽，田淑芳，王娜. 基于层次分析与模糊数学综合评判法的矿区生态环境评价[J]. 国土资源遥感，2013,25(3):165-170.
MA Lili, TIAN Shufang, WANG Na. Ecological environment evaluation of the mining areabased on AHP and fuzzy mathematics[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013,25(3):165-170.

[12] 刘仁山，孟祥宏. 基于层次分析法的信息系统安全评价研究[J]. 河北工业科技，2013,30(1):15-19.
LIU Renshan, MENG Xianghong. Evaluation of information system security based on AHP[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2013,30(1):15-19.

[13] 张豪. 基于 AHP 法的大型医疗设备配置模糊评价模型构建[J]. 河北工业科技，2015,32(1):27-31.
ZHANG Hao. Establishment of fuzzy evaluation model for large medical equipment configuration based on AHP[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2015,32(1):27-31.

[14] 葛京凤，梁彦庆，冯忠江. 山区生态安全评价、预警与调控研究——以河北山区为例[M]. 北京：科学出版社，2011.
GE Jingfeng, LIANG Yanqing, FENG Zhongjiang. Study on the Early Warning and Control of Ecological Security Evaluation: A Case Study in Hebei Province Mountainous Area[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[15] 韩晨霞，赵旭阳，刘浩杰. 河北省平山县生态安全预警评价[J]. 贵州农业科学，2012,40(12):201-205.
HAN Chenxia, ZHAO Xuyang, LIU Haojie. Early-warning assessment of ecological security in Pingshan County of Hebei Province[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012,40(12):201-205.

[16] 米锋，潘文婧，朱宁，等. 模糊综合评价法在森林生态安全预警中的应用[J]. 东北林业大学学报，2013,41(6):66-71.
MI Feng, PAN Wenjing, ZHU Ning, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation in forest ecological security warning[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013,41(6):66-71.

[17] 高长波，陈新庚，韦朝海，等. 熵权模糊综合评价法在城市生态安全评价中的应用[J]. 应用生态学报，2006,17(10):1923-1927.
GAO Changbo, CHEN Xingeng, WEI Chaohai, et al. Application of entropy weight fuzzy synthetic evaluation in urban ecological security assessment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(10):1923-1927.

[18] 宋国利，臧淑英，王雪燕，等. 基于模糊综合评价法的乐清湾湿地生态安全评价[J]. 自然灾害学报，2011,20(5):24-31.
SONG Guoli, ZANG Shuying, WANG Xueyan, et al. Ecological security assessment of wetland in Yueqing Bay based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Natural Disasters, 2011,20(5):24-31.

[19] 毛建伟. 广义模糊综合安全评价模型及其在铁路桥梁评价中的应用[J]. 河北科技大学学报，2008,29(3):246-249.
MAO Jianwei. Generalized fuzzy comprehensive safety evaluation model and its application to railway bridge[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2008,29(3):246-249.

[20] 王兴友，赵筱青. 基于模糊综合评价法的昆明市生态安全时序性评价[J]. 云南地理环境研究，2013,25(5):39-45.
WANG Xingyou, ZHAO Xiaoqing. Ecological security sequential assessment of kunming based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2013,25(5):39-45.