

# 新郑市耕地生态安全动态预警研究

张秋霞<sup>1</sup>, 张合兵<sup>1</sup>, 刘文锴<sup>2</sup>, 刘怡真<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 3. 河南省地图院, 郑州 450008)

**摘 要:**耕地生态安全预警对改善耕地生态安全水平,保障粮食安全具有重要的意义。以河南省粮食主产区新郑市为研究对象,基于压力、状态、响应(P-S-R)和生态、环境、经济、社会(E-E-E-S)框架模型,构建了耕地生态安全预警指标体系。引入变权理论确定指标权重,运用改进物元可拓模型确定新郑市 2001—2010 年耕地生态安全预警等级,并采用障碍度模型分析耕地生态安全障碍因子。结果表明:2001—2010 年新郑市耕地生态安全水平总体呈现上升趋势,预警等级由Ⅲ级(预警)上升为Ⅳ级(较安全);2009—2010 年预警等级虽处于较安全(Ⅳ级),但有下降趋势。制约新郑市耕地生态安全水平的主要障碍因子是地均化肥使用强度、耕地复种指数、人均粮食产量、城市化水平、耕地垦殖率、人口自然增长率、人均水资源量、地均地膜使用强度、第三产业占 GDP 比重、农业经济比重、未利用土地比重等,这些因子应是今后改善新郑市耕地生态安全的重点。

**关键词:**耕地生态安全;障碍度;变权物元可拓模型;新郑市

**中图分类号:**F323.22

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)01-0256-09

## Study on Early-warning of Cultivated Land Ecological Security in Xinzheng City

ZHANG Qiuxia<sup>1</sup>, ZHANG Hebing<sup>1</sup>, LIU Wenkai<sup>2</sup>, LIU Yizhen<sup>3</sup>

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, He'nan Polytechnic

University, Jiaozuo, He'nan 454000, China; 2. North China University of Water Resources

and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Map Institute of He'nan Province Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** Early warning of cultivated land ecological security is greatly helpful for the cultivated land ecological security situation and food security. Taking the major grain-producing area of Xinzheng City in He'nan Province as the research object, we constructed an evaluation index system of cultivated land ecological security early-warning by employing the Pressure-State-Response (P-S-R) conceptual framework model and Ecological-Environment-Economy-Society (E-E-E-S) framework model. Introducing variable weight theory to determine the weights of all rating indices, the early-warning level of cultivated land ecological from 2001 to 2010 in Xinzheng City of He'nan Province was calculated based on improved matter-element extension model, and concluded main obstruction factors which were relevant with cultivated land ecological security by using disorder degree model. The results indicated that the overall level of cultivated land ecological security presented an upward trend from 'early warning' to 'relative security' in Xinzheng City from 2001 to 2010. The early-warning values of cultivated land ecological security was appeared to the downward trend from 2009 to 2010 although level characterized as 'relative security'. The key obstacles for further improvement of cultivated land ecological security of Xinzheng City included fertilizer load per unit of cultivated land, the multiple cropping index of cultivated land, per capita output of grain, urbanization, land reclamation rate, population growth rate, per capita possession of water resources, mulch load per unit of cultivated land, the proportion of the tertiary industry in the gross domestic product, the proportion of the agricultural economy, the proportion of unused land. These factors are the focus to be improved in terms of cultivated land ecological security of Xinzheng City in the future.

**Keywords:** cultivated land ecological security; obstacle degree; matter-element extension model; Xinzheng City

耕地资源作为最宝贵的土地资源,是粮食生产中最重要的生产要素,是国家生存安全的重要保障,是构

建生态良好的土地利用格局的重要组成<sup>[1]</sup>。近年来,随着社会经济的不断发展和城镇化水平的不断提高,

农田环境污染不断加剧,耕地生态环境状况急剧恶化,耕地生态安全问题日益凸显。因此,研究耕地生态安全,保护现有耕地资源免受重复污染与破坏,成为目前需要关注和解决的科学问题,尤其是粮食主产区的耕地生态安全对国家粮食安全的战略意义更为重要。

目前对耕地生态安全预警研究方法主要使用较为成熟的层次分析法<sup>[2]</sup>、熵值法<sup>[3]</sup>、PSR 模型<sup>[4-5]</sup>、可拓模型<sup>[6]</sup>、生态足迹模型<sup>[7]</sup>、TOPSIS 模型与马尔可夫链模型<sup>[8]</sup>等。PSR 模型与 EEES 框架模型相结合,更能体现生态、环境、经济、社会之间的相互作用关系;物元可拓模型是一种解决评价对象模糊性、多样性、不相容性的评价方法<sup>[9]</sup>,能够综合各种指标的全部信息,并揭示更多的分异信息,但也存在不完善之处,进而将对物元可拓模型进行改进,同时引入能反映生态安全预警及时性与动态性的变权理论确定指标权重。鉴于此,尝试将 PSR-EEES 模型和改进变权物元可拓模型相结合,通过 PSR-EEES 模型构建耕地生态安全预警指标体系,引入变权理论确定指标权重,改进物元可拓模型构建新郑市耕地生态安全预警模型,研究新郑市耕地生态安全预警等级,运用障碍度模型诊断新郑市耕地生态安全预警的主要障碍因子。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

新郑市位于河南省中部,处于华北平原、豫西山地向豫东平原过渡地带,是中原经济区的核心地带,隶属于郑州市,地处北纬  $34^{\circ}16'$ — $34^{\circ}39'$ ,东经  $113^{\circ}30'$ — $113^{\circ}54'$ ,北靠郑州市,东邻中牟、尉氏,南连长葛、禹州市,西与新密市接壤,囊接郑州市建设航空港区的重要经济发展区域,郑州市规划建设中的三大物流中心之一,即首个国家级航空港试验区——郑州航空港经济综合试验区。属暖温带大陆性季风气候,气温适中,四季分明。年均气温  $14.2^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $766.1\text{ mm}$ ,年均日照时数  $2\,114.2\text{ h}$ ,全年无霜期  $208\text{ d}$ 。多年平均水资源总量为  $1.473\,3\text{ 亿 m}^3$ ,人均占有水资源量  $236\text{ m}^3$ 。

新郑市属粮食主产区,全年粮食总产量  $27.31\text{ 万 t}$ ,土地总面积  $886.721\,7\text{ km}^2$ ,辖 12 乡镇,耕地占全市土地面积的  $60.51\%$ ,达到  $536.545\,4\text{ km}^2$ ,土壤类型多样,主要以褐土、潮土与风砂土土类为主,境内主要为平原高效区、低山丘陵区 and 沙地区三个不同生态类型区,是中原经济区的典型区域,素有“河南缩影”之称。根据新郑市 2014 年国民经济和社会发展统计公报显示,年末总人口  $64.61\text{ 万人}$ ,全年地区生产总值  $525.3\text{ 亿元}$ ,一、二、三产业增加值占地区生产总值的比重分别为  $3.4\%$ 、 $69\%$  和  $27.6\%$ 。当前,河南省正处于推进“三化协调,科学发展”的关键时期,随着新郑市经济社会发展进程的加快,以及航空港经济区的

快速发展,耕地生态安全将面临着较大挑战。

### 1.2 数据来源

原始经济数据均来源于《新郑市统计年鉴》(2001—2010 年)和《河南省统计年鉴》(2001—2010 年),耕地面积相关数据均来源于河南省土地利用现状数据集(2001—2010 年)。

### 1.3 指标体系构建

评价指标体系是耕地生态安全预警的基础和关键,直接影响到预警评价结果的科学性和可靠性。耕地生态安全系统是一个受人口、资源、环境、经济和社会等多方面因素共同作用的复合系统,预警指标的选取不仅要反映人类活动和经济社会发展对生态环境的影响,同时也需要体现出生态环境对人类活动和社会发展的反馈作用。结合新郑市耕地生态安全的特征,采用经济合作与开发组织(OECD)与联合国环境规署(UNEP)共同提出的用于研究环境问题的 PSR 框架体系模型[即压力(Pressure)—状态(State)—响应(Response)],依据指标体系构建的科学性、全面性、代表性和可操作性原则,结合 EEES 框架模型[即生态(Ecological)—环境(Environment)—经济(Economy)—社会(Society)],从压力、状态、响应三个方面,遴选和构建 3 个准则层 12 个因素层 31 个指标的耕地生态安全预警指标体系,见表 1。

### 1.4 物元可拓模型的改进

物元可拓模型以物元理论和可拓集合论作为理论框架,通过建立经典域、节域和评价等级,根据实测值计算待评物元关于评级等级的关联度,以此来确定待评对象的等级<sup>[10]</sup>。

模型的改进克服传统物元可拓模型的局限性,有效解决评价指标实测值超出节域等问题,使评价结果更准确,更真实反映指标对待评物元的正向影响和逆向影响。首先对经典域、节域和待评物元作归一化处理,即每个经典域和待评物元的实测值都除以节域右节点的数值。其次耕地生态安全预警是一个多指标定量综合研究的过程,确定合理的预警指标权重具有举足轻重的地位,大多数研究中权重的确定采用常权权重方法<sup>[11]</sup>,不能反映生态安全预警的及时性与动态性。运用变权理论,采用归一化处理后的数值确定各预警指标的权重,则有助于解决常权方法中的缺陷,减少确定评价指标权重时的主观性,体现预警对象在耕地生态安全预警等级确定中的主动参与,使耕地生态安全预警指标权重的确定更加具有科学性。最后是改进物元可拓模型中计算待评物元等级时引入非对称贴近度公式和等级变量特征值确定预警对象等级,克服模糊关联度法在某些情况下不能反映待评物元自身界限的模糊性、容易损失信息,从而易导致评定结果偏差的问题。

表 1 新郑市耕地生态安全预警指标体系

目标层	准则层	因素层	指标层	指标说明	指标内涵	安全趋向
耕地生态安全压力(P)	生态	人均水资源量 $v_1$ (m <sup>3</sup> )	水资源总量/用水人口	反映水资源充沛程度	反映水资源充沛程度	+
		人均日生活用水量 $v_2$ (L)	日生活用水量/用水人口	反映水资源的利用程度	反映水资源的利用程度	-
		农村劳动力人均耕地面积 $v_3$ (hm <sup>2</sup> /人)	耕地面积/农村劳动力总数	反映耕地资源稀缺程度	反映耕地资源稀缺程度	+
	环境	地均化肥使用强度 $v_4$ (kg/hm <sup>2</sup> )	化肥施用总量/耕地总面积	反映化肥对耕地污染程度	反映化肥对耕地污染程度	-
		地均农药使用强度 $v_5$ (kg/hm <sup>2</sup> )	农药施用总量/耕地总面积	反映农药对耕地污染程度	反映农药对耕地污染程度	-
		地均地膜使用强度 $v_6$ (kg/hm <sup>2</sup> )	地膜使用量/耕地总面积	反映地膜对耕地污染程度	反映地膜对耕地污染程度	-
	经济	GDP 增长率 $v_7$ (%)	(当年 GDP-上年 GDP)/上年 GDP	反映经济增长速度对耕地生态安全的威胁	反映经济增长速度对耕地生态安全的威胁	-
		农业经济比重 $v_8$ (%)	第一产业/GDP	反映农业发展对耕地生态安全的影响	反映农业发展对耕地生态安全的影响	-
		经济密度 $v_9$ (10 <sup>4</sup> 元/km <sup>2</sup> )	GDP/耕地总面积	反映区域经济的发达程度对耕地生态安全的压力	反映区域经济的发达程度对耕地生态安全的压力	+
	社会	土地承载力 $v_{10}$ (人/km <sup>2</sup> )	人口总数/土地面积	反映单位土地面积的人口数量	反映单位土地面积的人口数量	-
		城市化水平 $v_{11}$ (%)	城镇人口/人口总数	反映城市化发展程度对耕地生态安全建设的影响	反映城市化发展程度对耕地生态安全建设的影响	+
		人口自然增长率 $v_{12}$ (‰)	一定时期内人口自然增长数/平均人口	反映人口增长速度与趋势对耕地生态安全的威胁	反映人口增长速度与趋势对耕地生态安全的威胁	-
	生态	土地垦殖率 $v_{13}$ (%)	耕地总面积/土地总面积	反映耕地数量	反映耕地数量	+
		水土协调度 $v_{14}$ (%)	水资源量/耕地面积	反映水资源的丰沛程度对耕地生产能力的影晌	反映水资源的丰沛程度对耕地生产能力的影晌	+
耕地生态安全预警状态(S)	环境	灌溉保证率 $v_{15}$ (%)	农田有效灌溉面积/耕地面积	反映耕地基础设施建设质量及其配套完善性	反映耕地基础设施建设质量及其配套完善性	+
		耕地复种指数 $v_{16}$ (%)	农作物播种面积/耕地总面积	反映耕地的利用情况	反映耕地的利用情况	+
		未利用土地比重 $v_{17}$ (%)	未利用土地面积/土地总面积	反映补充耕地的潜力	反映补充耕地的潜力	-
	经济	单位耕地面积农业机械化水平 $v_{18}$ (kw/hm <sup>2</sup> )	农业机械总动力/耕地总面积	反映机械化水平	反映机械化水平	+
		农电集约度 $v_{19}$ (kW·h/hm <sup>2</sup> )	农村用电量/耕地总面积	反映经济发展水平对耕地生态安全的影响	反映经济发展水平对耕地生态安全的影响	+
	社会	粮食单产 $v_{20}$ (kg/hm <sup>2</sup> )	粮食总产量/耕地总面积	反映耕地的生产能力	反映耕地的生产能力	+
		人均粮食产量 $v_{21}$ (kg/人)	粮食总产量/人口总数	反映耕地的生产能力	反映耕地的生产能力	+
		建设用地增加率 $v_{22}$ (%)	(当年建设用地面积-基准年建设用地面积)/基准年建设用地面积×100%	反映建设用地集约水平对耕地生态安全的影响	反映建设用地集约水平对耕地生态安全的影响	-
	生态	人均公园绿地面积 $v_{23}$ (m <sup>2</sup> )	公园绿地面积/常住人口	反映城市整体生态环境水平	反映城市整体生态环境水平	+
		建成区绿地覆盖率 $v_{24}$ (%)	建成区绿地面积/建成区土地面积	反映城市生态建设水平	反映城市生态建设水平	+
	环境	污水治理率 $v_{25}$ (%)	污水治理量/污水排放量	反映污水排放对耕地生态安全的影响	反映污水排放对耕地生态安全的影响	+
		生活垃圾无公害处理率 $v_{26}$ (%)	生活垃圾无公害处理量/生活垃圾清运量	反映生活垃圾对耕地生态安全的影响	反映生活垃圾对耕地生态安全的影响	+
	经济	人均 GDP $v_{27}$ (10 <sup>4</sup> 元/人)	GDP/常住人口	反映耕地生态环境建设的投入能力及重视程度	反映耕地生态环境建设的投入能力及重视程度	+
		农民人均年纯收入 $v_{28}$ (元/人)	农村年纯收入/农村人口	反映农民在耕地生态安全建设中的产出能力	反映农民在耕地生态安全建设中的产出能力	+
		第三产业占 GDP 比重 $v_{29}$ (%)	第三产业/GDP	反映第三产业的发展对耕地生态安全的影响	反映第三产业的发展对耕地生态安全的影响	+
	社会	机械化程度 $v_{30}$ (%)	机耕面积/耕地总面积	反映农业产业化水平和生产经营条件	反映农业产业化水平和生产经营条件	+
		第一产业从业人员比重 $v_{31}$ (%)	第一产业从业人员/常住人口	反映从事农业的人员现状	反映从事农业的人员现状	+

注：+表示正向指标,指标值越大,生态安全状况越好,警度越小;-表示逆向指标,情况则相反。

改进的变权物元可拓模型的基本思想是:首先将预警对象分为  $j$  个等级,结合国家、地方有关标准和相关文献资料确定各预警指标等级的范围和预警等级的划分;其次,对经典域、节域和预警对象进行归一化处理,并运用变权理论确定各预警指标的权重;然后运用归一化数值和权重值计算贴近度和等级变量特征值,确定预警对象的等级。

改进变权物元可拓模型的耕地生态安全预警等级计算步骤为:

(1) 确定耕地生态安全物元  $R$ ,由耕地生态安全等级  $P$ ,耕地生态安全预警指标  $c$  和特征量值  $v$  共同构成,模型中具有  $n$  个指标, $m$  个预警等级。即:

$$R = (P, c, v) = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 确定耕地生态安全的经典域  $\nu_{ij}$ 、节域  $\nu_{pi}$  和预警对象  $R_0$ 。

$$R_j = (P_j, c_i, v_{ij}) = \begin{bmatrix} P_j & c_1 & v_{1j} \\ & c_2 & v_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j & c_1 & (a_{1j}, b_{1j}) \\ & c_2 & (a_{2j}, b_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{nj}, b_{nj}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $P_j$  为第  $j$  个预警等级; $c_1, c_2, \dots, c_n$  为  $P_j$  的  $n$  个不同特征; $\nu_{1j}, \nu_{2j}, \dots, \nu_{nj}$  分别是  $P_j$  对应于  $c_1, c_2, \dots, c_n$  的取值范围,即经典域; $a_{ij}$  和  $b_{ij}$  为  $v_{ij}$  的取值边界。

$$R_p = (N, c_i, v_{pi}) = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $P$  为预警对象等级的全体; $\nu_{p1}, \nu_{p2}, \dots, \nu_{pn}$  分别是  $P$  对应于  $c_1, c_2, \dots, c_n$  的取值范围,即节域。

综合物元矩阵、经典域矩阵与节域矩阵,确定耕地生态安全预警对象的矩阵,即:

$$R_0 = (P_0, c_i, v_i) = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $R_0$  为预警对象; $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$  分别是  $P_0$  关于  $c_1, c_2, \dots, c_n$  的实测数据。

(3) 对预警对象、经典域、节域做归一化处理。由于预警指标特征值量纲不一,取值范围不同,需要对物元可拓模型进行改进,在进行变权和贴近度函数计算之前需对预警对象、经典域和节域做归一化处理。

$$R'_j = (P_j, c_i, v'_{ij}) = \begin{bmatrix} P_j & c_1 & \left( \frac{\alpha_{1j}}{b_{p1}}, \frac{b_{1j}}{b_{p1}} \right) \\ & c_2 & \left( \frac{\alpha_{2j}}{b_{p2}}, \frac{b_{2j}}{b_{p2}} \right) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \left( \frac{\alpha_{nj}}{b_{pn}}, \frac{b_{nj}}{b_{pn}} \right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R'_0 = (P_0, c_i, v'_i) = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & \frac{v_1}{b_{p1}} \\ & c_2 & \frac{v_2}{b_{p2}} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \frac{v_n}{b_{pn}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $v'_{ij}, v'_i$  为经典域和预警对象中实测值的归一化处理数据。

(4) 运用变权公式确定权重。基于变权理论的指标权重计算,首先运用步骤(3)的公式(5),(6)对因素常权变量做归一化处理,即各指标的常权变量相等,由预警指标实测值的归一化处理数据和其对应节域来确定变权向量。 $\omega_i(x)$  的计算公式为:

$$\omega_i(x) = \frac{\exp[\alpha(d_{imax} - d_{imin})]}{\sum_{i=1}^n \exp[\alpha(d_{imax} - d_{imin})]} \quad (7)$$

式中: $d_{imax} = \max \{ |v'_i - a'_{pi}|, |b'_{pi} - v'_i| \}$ ;  $d_{imin} = \min \{ |v'_i - a'_{pi}|, |b'_{pi} - v'_i| \}$ ;  $\alpha$  为变权因子。 $\alpha > 0$  时为激励型,表明对因素均衡性的要求不是很高; $\alpha < 0$  时为惩罚型,表明各因素有一定的均衡性要求; $\alpha = 0$  时为常权型。为体现各预警指标的平等均衡性,取值  $\alpha = -1$ 。

(5) 计算等级变量特征值,确定预警等级。通过对贴近度准则代替最大隶属度准则的分析<sup>[12]</sup>,提出非对称贴近度公式:

$$N = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D\omega_i \quad (8)$$

式中: $N$  为贴近度; $D$  为距离; $\omega_i$  为权重。

将公式(8)应用到可拓评价模型中,可得

$$N(P_0) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D_j(v'_i) \omega_i(x) \quad (9)$$

式中: $D_j(V'_i) = \left| v' - \frac{(\alpha'_{ij} + b'_{ij})}{2} \right| - \frac{(b'_{ij} - \alpha'_{ij})}{2}$  为待预警对象  $R_0$  与经典域  $V_{ij}$  距离; $n$  为预警指标个数。

由贴近度  $N_j(P_0) = \{ \max N_j(P_0) \}$ ,可以确定预警对象  $R_0$  的等级。

$$\begin{aligned} \text{令 } N'_j(P_0) &= \frac{N_j(P_0) - \min_j N_j(P_0)}{\max_j N_j(P_0) - \min_j N_j(P_0)}, \text{ 可得} \\ j^* &= \frac{\sum_{i=1}^m j N'_j(P_0)}{\sum_{j=1}^m N'_j(P_0)} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $j^*$  为待预警对象  $R_0$  的等级变量特征值,通过

$j^*$  可以判断待预警对象  $R_0$  偏向相邻等级的程度, 确定预警对象的等级。

1.5 障碍度模型

为了进一步了解耕地生态安全预警指标对预警等级的影响, 有针对地提高耕地生态安全预警等级, 寻找耕地生态安全预警等级障碍因子至关重要。根据障碍度模型, 引入因子贡献度  $\omega_j$ 、指标偏离度  $p_{ij}$  和障碍度  $A_j$ , 共 3 个指标对预警指标障碍度进行诊断, 即:

$$A_j = \frac{p_{ij} \times \omega_j}{\sum_{j=1}^n (p_{ij} \cdot \omega_j)} \times 100\%$$

(11)

式中:  $p_{ij} = 1 - \nu'_{ij}$ ,  $\nu'_{ij}$  为单项指标的规格化值;  $\omega_j$  为评价指标的权重。

2 结果与分析

2.1 预警结果与分析

2.1.1 评价标准的确定 耕地生态安全预警评价标

准的制定是耕地生态安全预警的关键环节, 耕地生态安全预警等级的评价标准不仅复杂, 而且需要因地制宜, 由于现阶段我国耕地生态安全预警尚处于探索阶段, 还未有统一的评价标准, 参照国家生态安全评估体系研究成果<sup>[13]</sup> 以及相关研究<sup>[14-15]</sup>, 依据耕地生态安全的可拓性, 将耕地生态安全等级划分为五级即 I, II, III, IV, V, 按照警度由劣到优, 分别为危险—脆弱—预警—较安全—安全。

2.1.2 经典域和节域的确定 经典域的确定是物元评价模型的基础, 在确定生态安全预警指标体系和安全等级基础上, 参考国家、行业及国际相关标准, 研究区域背景值、类比标准和相关研究<sup>[16]</sup> 等, 通过对新郑市历年数据的统计分析并结合新郑市区域特点, 确定新郑市各预警指标对应的各生态安全级别的阈值, 即经典域; 节域为其对应指标经典域之和, 见表 2。

表 2 耕地生态安全预警指标经典域和节域值

指标层	经典域					节域
	危险 I	脆弱 II	预警 III	较安全 IV	安全 V	
$v_1$	100~200	200~300	300~350	350~400	400~1000	100~1000
$v_2$	125~150	120~125	110~120	105~110	100~105	100~150
$v_3$	0~0.053	0.053~0.095	0.095~0.115	0.115~0.15	0.15~0.2	0~0.2
$v_4$	0.9~1.5	0.6~0.9	0.45~0.6	0.25~0.45	0~0.25	0~1.5
$v_5$	1.5~2	1~1.5	0.05~1	0.03~0.05	0~0.03	0~2
$v_6$	30~40	20~30	10~20	5~10	0~5	0~40
$v_7$	15~20	10~15	5~10	3~5	0~3	0~20
$v_8$	8~10	5~8	3~5	2~3	0~2	0~10
$v_9$	100~200	200~300	300~500	500~1000	1000~2500	100~2500
$v_{10}$	600~900	500~600	300~500	150~300	100~150	100~900
$v_{11}$	10~15	15~20	20~35	35~50	50~80	10~80
$v_{12}$	10~20	8~10	5.5~8	3.5~5.5	0~3.5	0~20
$v_{13}$	5~12	12~23	23~33	33~45	45~100	5~100
$v_{14}$	1~15	15~30	30~45	45~60	60~85	1~85
$v_{15}$	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100	50~100
$v_{16}$	0~0.8	0.8~1	1~1.5	1.5~1.7	1.7~3	0~3
$v_{17}$	9~10	8~9	7~8	5~7	0~5	0~10
$v_{18}$	0~6	6~10	10~15	15~20	20~30	0~30
$v_{19}$	0~0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~1	0~1
$v_{20}$	1000~1500	1500~2500	2500~3500	3500~5500	5500~8000	1000~8000
$v_{21}$	100~200	200~350	350~400	400~450	450~1000	200~1000
$v_{22}$	25~40	15~25	10~15	5~10	1~5	1~40
$v_{23}$	3~5	5~8	8~10	10~15	15~20	3~20
$v_{24}$	1~10	10~20	20~30	30~40	40~60	10~60
$v_{25}$	10~35	35~55	55~65	65~80	80~100	10~100
$v_{26}$	20~40	40~50	50~60	60~80	80~100	20~100
$v_{27}$	0.1~0.5	0.5~1	1~2	2~3	3~8	0.1~8
$v_{28}$	0~0.15	0.1~0.25	0.25~0.4	0.4~0.6	0.6~1.5	0~1.5
$v_{29}$	10~15	15~25	25~35	35~40	40~55	10~35
$v_{30}$	0~30	30~50	50~65	65~75	75~100	0~100
$v_{31}$	0~20	20~25	25~30	30~35	35~40	0~40

2.1.3 预警等级确定 通过对预警对象实测数据,经典域和节域的归一化处理,采用变权公式计算预警指标的权重,运用非对称贴近度模型和可拓模型,计算 2001—2010 年新郑市耕地生态安全预警指标准则层(即耕地生态安全压力指标 P、耕地生态安全状态指标 S 和

耕地生态安全响应指标 R)预警等级的贴近度和等级变量特征值,以及 2001—2010 年新郑市耕地生态安全预警等级的贴近度和等级变量特征值(表 3),最后,根据等级变量特征值判断待预警对象  $R_0$ 。偏向相邻等级的程度,确定预警对象  $R_0$  所在的等级。

表 3 新郑市耕地生态安全预警等级变量特征值及等级评定

年份	准则层指标预警等级						耕地生态安全	
	P		S		R		预警等级	
	等级变量 特征值( $j^*$ )	等级 评定	等级变量 特征值( $j^*$ )	等级 评定	等级变量 特征值( $j^*$ )	等级 评定	等级变量 特征值( $j^*$ )	等级 评定
2001	3.348404994	Ⅲ	3.400812503	Ⅲ	3.419745226	Ⅲ	3.38638	Ⅲ
2002	3.388788586	Ⅲ	3.365306538	Ⅲ	3.442303494	Ⅲ	3.39766	Ⅲ
2003	3.336394402	Ⅲ	3.412447369	Ⅲ	3.52035653	Ⅳ	3.42176	Ⅲ
2004	3.425356122	Ⅲ	3.477548836	Ⅲ	3.511817799	Ⅳ	3.46422	Ⅲ
2005	3.458035565	Ⅲ	3.484111999	Ⅲ	3.613370766	Ⅳ	3.50657	Ⅳ
2006	3.550986168	Ⅳ	3.565609756	Ⅳ	3.572218029	Ⅳ	3.56191	Ⅳ
2007	3.58360628	Ⅳ	3.664749067	Ⅳ	3.808811392	Ⅳ	3.67944	Ⅳ
2008	3.58489788	Ⅳ	3.688908167	Ⅳ	3.813045224	Ⅳ	3.686932	Ⅳ
2009	3.568073773	Ⅳ	3.726029976	Ⅳ	3.763203609	Ⅳ	3.678037	Ⅳ
2010	3.522568481	Ⅳ	3.747197112	Ⅳ	3.833465415	Ⅳ	3.68604	Ⅳ

2.1.4 预警结果与分析 由表 3 可知,2001—2010 年新郑市耕地生态安全预警等级总体上呈现不同等级的上升趋势,表明新郑市耕地生态安全水平不断提高,等级变量特征值从 2001 年的 3.386 增加到 2010 年的 3.686,耕地生态安全预警等级从Ⅲ级(预警)上升Ⅳ级(较安全),其中在 2009 年下降为 3.678,2010 年上升为 3.686,与 2008 年基本持平,说明虽然新郑市的耕地生态安全整体上向较安全发展,但近两年仍然出现了不同程度的波动,这与新郑市近年来经济快速发展以及航空港经济区建设有关。

新郑市耕地生态安全预警等级的不断上升,耕地生态安全预警指标的等级及其变化的影响起到至关重要的作用。

(1) 由表 3 可知,2001—2010 年,新郑市耕地生态安全压力指标预警等级总体呈现上升趋势,从Ⅲ级(预警)上升为Ⅳ级(较安全),等级变量特征值由 2001 年的 3.348 到 2010 年的 3.523。其中 2003 年在 2001—2002 年上升后出现了下降,甚至低于 2001 年,主要是由于人均日生活用水量在 2002 年减少到 120.74 L,之后 2003 年突然增加到 129 L,几乎与 2001 年持平,人均耕地面积 2003 年出现减少,GDP 增长率 2003 年增长到 13%,农业经济比重在 2003 年出现大幅度下降,人口自然增长率在 2002 年降低后出现小幅上涨;2004—2008 年逐渐上升为较安全(Ⅳ级),而 2009—2010 年虽然仍处于较安全(Ⅳ级),但出现了下降趋势,

主要是由于单位面积的化肥使用强度逐渐增加,单位面积地膜使用强度 2008 年开始下降后在 2010 年增加到 6.371 kg/hm<sup>2</sup>。表明新郑市耕地生态安全面临的生态压力、环境压力、经济压力和社会压力仍有不断增大的趋势,主要是农药、化肥和地膜的使用强度对耕地的污染,GDP 增长率的不稳定,农业经济结构的调整,以及近两年人口自然增长率的增加等对耕地生态安全所面临的压力有一定的制约作用。

(2) 2001—2010 年耕地生态安全状态指标预警等级总体呈现上升趋势,从Ⅲ级(预警)上升为Ⅳ级(较安全),等级变量特征值逐渐由 2001 年的 3.40 上升至 2010 年的 3.747,表明耕地生态安全状态在不断得到改善,但是近两年耕地垦殖率的降低,人均粮食产量的减少,建设用地面积的增加都应该加强重视,预防耕地生态安全的恶化。

(3) 2001—2010 年耕地生态安全响应指标预警等级整体呈现上升趋势,从预警(Ⅲ级)上升为较安全(Ⅳ级),等级变量特征值逐渐由 2001 年的 3.419 上升至 2010 年的 3.833。其中 2004 年、2006 年、2009 年的等级变量特征值相比上年都有微弱下降,主要是由于建成区绿地覆盖率和第三产业占 GDP 的比重在 2004 年、2006 年、2009 年都出现了不同程度的下降,表明耕地生态安全响应指标的生态安全水平处于逐渐提高的趋势,2003 年以来对农业投入的重视和农业机械化技术的提高,人均绿地面积、污水处理等指标的逐渐重

视,使得人均 GDP、农民人均年纯收入得到不断增加,对耕地生态安全的改善起到了很大的作用。

综上所述,2001—2010 年,新郑市耕地生态安全压力指标、状态指标和响应指标均由Ⅲ级(预警)上升为Ⅳ级(较安全),新郑市耕地生态安全预警等级也由Ⅲ级(预警)上升为Ⅳ级(较安全);耕地生态安全响应指标在 2003 年已经为Ⅳ级(较安全),说明在 2003 年开始新郑逐渐重视耕地生态安全,但随着耕地生态安全面临压力的不断增加,新郑市耕地生态安全开始上升缓慢,甚至在 2009 年出现小幅下降趋势。因此,在加快新郑市“三化协调”发展的过程中,应该重视新郑

市耕地生态安全面临的压力,如人均日生活用水量的减少、人均耕地面积、农业经济比重、人口自然增长率以及农药化肥地膜的污染等等,将来可能会影响并阻碍新郑市耕地生态安全的提高,甚至造成耕地生态安全预警等级的下降。与此同时,还应该加强耕地质量,合理调整土地利用结构,优化资源配置,提高农村经济社会发展,实现农业现代化的同时保证耕地生态安全。

2.2 障碍因子诊断

运用障碍度模型,计算出新郑市耕地生态安全预警指标层障碍度(表 4)和准则层障碍度(表 5),并排序得出新郑市耕地生态安全预警的主要障碍因子(表 6)。

表 4 新郑市耕地生态安全预警指标层主要障碍因子障碍度及排序

年份	位序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2001	预警指标	$v_4$	$v_{24}$	$v_{19}$	$v_{16}$	$v_{21}$	$v_{22}$	$v_{28}$	$v_{11}$	$v_{13}$	$v_{12}$	$v_1$	$v_{27}$	$v_9$	$v_{29}$	$v_6$
	障碍度	4.80	4.70	4.54	4.42	4.31	4.30	4.29	4.28	4.24	4.20	4.13	4.11	4.05	4.04	4.00
2002	预警指标	$v_4$	$v_{19}$	$v_{16}$	$v_{22}$	$v_{25}$	$v_{28}$	$v_{11}$	$v_{21}$	$v_{13}$	$v_9$	$v_{27}$	$v_1$	$v_6$	$v_{29}$	$v_{23}$
	障碍度	4.74	4.57	4.45	4.36	4.32	4.28	4.23	4.22	4.17	4.12	4.10	4.06	4.03	3.98	3.96
2003	预警指标	$v_4$	$v_{19}$	$v_{22}$	$v_{28}$	$v_{16}$	$v_{13}$	$v_{11}$	$v_9$	$v_{21}$	$v_{27}$	$v_{12}$	$v_1$	$v_{23}$	$v_6$	$v_{29}$
	障碍度	4.75	4.65	4.37	4.31	4.27	4.26	4.21	4.19	4.18	4.16	4.05	4.03	4.01	4.01	3.96
2004	预警指标	$v_4$	$v_{22}$	$v_{28}$	$v_9$	$v_{12}$	$v_{27}$	$v_{13}$	$v_{16}$	$v_{21}$	$v_{11}$	$v_{19}$	$v_1$	$v_6$	$v_{23}$	$v_{29}$
	障碍度	4.62	4.47	4.29	4.21	4.19	4.15	4.15	4.11	4.10	4.09	4.02	3.90	3.88	3.85	3.84
2005	预警指标	$v_4$	$v_{22}$	$v_{28}$	$v_9$	$v_{27}$	$v_{21}$	$v_{16}$	$v_{11}$	$v_{13}$	$v_{12}$	$v_1$	$v_6$	$v_{23}$	$v_{29}$	$v_{18}$
	障碍度	4.82	4.70	4.58	4.51	4.48	4.30	4.26	4.25	4.16	4.12	4.04	4.04	4.01	4.00	3.90
2006	预警指标	$v_4$	$v_{28}$	$v_{27}$	$v_9$	$v_8$	$v_{25}$	$v_{21}$	$v_{12}$	$v_{16}$	$v_{11}$	$v_{22}$	$v_6$	$v_{13}$	$v_{23}$	$v_1$
	障碍度	4.70	4.60	4.58	4.51	4.32	4.24	4.21	4.16	4.15	4.14	4.08	4.06	4.05	3.94	3.93
2007	预警指标	$v_4$	$v_8$	$v_{28}$	$v_{27}$	$v_{21}$	$v_{12}$	$v_6$	$v_{11}$	$v_{13}$	$v_{17}$	$v_{29}$	$v_1$	$v_{18}$	$v_{16}$	$v_{23}$
	障碍度	5.13	5.13	5.12	5.04	4.62	4.56	4.55	4.50	4.45	4.43	4.28	4.27	4.20	4.16	4.15
2008	预警指标	$v_8$	$v_4$	$v_{28}$	$v_{21}$	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{17}$	$v_{11}$	$v_6$	$v_{16}$	$v_{29}$	$v_1$	$v_{18}$	$v_{23}$	$v_{24}$
	障碍度	5.24	4.89	4.84	4.74	4.70	4.58	4.57	4.49	4.43	4.37	4.36	4.36	4.27	4.23	4.22
2009	预警指标	$v_{17}$	$v_8$	$v_{13}$	$v_{21}$	$v_{12}$	$v_4$	$v_6$	$v_{23}$	$v_{24}$	$v_{11}$	$v_1$	$v_{29}$	$v_{18}$	$v_{28}$	$v_{16}$
	障碍度	5.11	5.11	4.62	4.61	4.61	4.53	4.32	4.31	4.26	4.24	4.23	4.22	4.10	4.09	3.92
2010	预警指标	$v_{17}$	$v_8$	$v_{13}$	$v_{31}$	$v_{12}$	$v_{21}$	$v_4$	$v_6$	$v_{23}$	$v_{29}$	$v_1$	$v_{11}$	$v_{16}$	$v_5$	$v_{18}$
	障碍度	5.54	5.53	5.10	5.09	5.05	4.89	4.84	4.71	4.70	4.59	4.57	4.32	4.16	4.11	3.95

表 5 新郑市耕地生态安全预警的准则层指标障碍度

年份	压力				环境				响应				$P$	$S$	$R$
	生态	环境	经济	社会	生态	环境	经济	社会	生态	环境	经济	社会			
2001	7.42	12.38	9.09	9.93	6.93	8.06	8.31	11.68	8.62	2.96	12.44	2.18	38.82	34.98	26.20
2002	7.75	12.32	9.26	9.42	6.77	8.14	8.30	12.02	6.68	4.32	12.36	2.65	38.75	35.24	26.01
2003	7.24	12.29	8.73	9.54	6.71	9.60	8.47	12.21	7.22	2.93	12.43	2.64	37.81	36.98	25.21
2004	8.20	11.92	9.49	9.66	6.46	9.67	7.76	11.47	7.30	3.53	12.29	2.27	39.27	35.35	25.39
2005	8.28	12.43	7.38	9.79	6.61	10.21	7.39	11.87	7.44	3.66	13.07	1.87	37.88	36.08	26.04
2006	8.27	12.25	9.76	9.67	5.52	10.02	6.31	10.80	7.19	4.24	13.10	2.88	39.95	32.64	27.41
2007	8.73	13.49	9.55	10.54	5.97	11.33	5.20	9.52	7.17	0.79	14.44	3.28	42.30	32.03	25.67
2008	8.94	13.20	9.64	10.65	6.16	11.67	5.24	9.08	8.46	0.81	12.14	4.01	42.43	32.15	25.42
2009	8.88	12.63	10.63	10.24	5.99	11.65	4.72	8.44	8.57	3.80	10.92	3.53	42.38	30.79	26.83
2010	9.52	13.66	9.50	10.03	6.47	12.44	4.59	8.34	8.22	0.67	9.96	6.59	42.71	31.84	25.45

表 6 2001—2010 年新郑市耕地生态安全预警主要障碍因子出现的频率

项目	障碍因子																
	$v_4$	$v_{16}$	$v_{21}$	$v_{11}$	$v_{13}$	$v_{12}$	$v_1$	$v_6$	$v_{29}$	$v_{28}$	$v_{27}$	$v_9$	$v_{22}$	$v_8$	$v_{17}$	$v_{19}$	$v_{24}$
出现次数	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	7	6	6	5	4	4	3
出现频率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	70	60	60	50	40	40	30

2.2.1 准则层障碍因子诊断 由表 5 可知,准则层指标对新郑市耕地生态安全预警的障碍度及变化趋势各不相同。从总体上看,耕地生态安全压力指标障碍度总体呈现上升趋势,耕地生态安全状态指标障碍度总体呈现下降的趋势,耕地生态安全响应指标障碍度基本稳定,但也存在不同程度的上升或下降。其中因素层中生态压力、环境压力、环境状态、社会响应均呈现上升趋势;经济状态、社会状态、经济响应均呈现下降趋势;生态状态呈现先下降后上升的趋势。从障碍度数值上看,准则层中耕地生态安全压力指标是最大的障碍度;因素层中环境压力、经济响应始终是新郑市耕地生态安全的最大障碍度。因此,要提高新郑耕地生态安全,需要缓解环境污染对耕地的压力,才能加快农业产业化的进程,实现农业现代化建设。

2.2.2 指标层障碍因子诊断 由表 4 和表 6 可知,2001—2010 年新郑市耕地生态安全预警指标主要障碍因子是地均化肥使用强度  $v_4$ ,耕地复种指数  $v_{16}$ ,人均粮食产量  $v_{21}$ ,城市化水平  $v_{11}$ ,耕地垦殖率  $v_{13}$ ,人口自然增长率  $v_{12}$ ,人均水资源量  $v_1$ ,地均地膜使用强度  $v_6$ ,第三产业占 GDP 比重  $v_{29}$ ,农民人均年纯收入  $v_{28}$ ,人均 GDP  $v_{27}$ ,经济密度  $v_9$ ,建设用地增加率  $v_{22}$ ,农业经济比重  $v_8$ ,未利用土地比重  $v_{17}$ ,农电集约度  $v_{19}$ ,建成区绿地覆盖率  $v_{24}$ 。

2001—2007 年地均化肥使用强度  $v_4$  是新郑市耕地生态安全最大的障碍因子,耕地复种指数  $v_{16}$ ,人均粮食产量  $v_{21}$ ,城市化水平  $v_{11}$ ,耕地垦殖率  $v_{13}$ ,人口自然增长率  $v_{12}$ ,人均水资源量  $v_1$ ,地均地膜使用强度  $v_6$ ,第三产业占 GDP 比重  $v_{29}$ ,农民人均年纯收入  $v_{28}$ ,人均 GDP  $v_{27}$  和地均化肥使用强度  $v_4$  出现的频率相同。除了农民人均年纯收入  $v_{28}$ ,人均 GDP  $v_{27}$  外,2008—2010 年耕地复种指数  $v_{16}$ ,人均粮食产量  $v_{21}$ ,城市化水平  $v_{11}$ ,耕地垦殖率  $v_{13}$ ,人口自然增长率  $v_{12}$ ,人均水资源量  $v_1$ ,地均地膜使用强度  $v_6$ ,第三产业占 GDP 比重  $v_{29}$  和地均化肥使用强度  $v_4$  仍然是主要的障碍因子,表明随着城镇化进程的加快,作为粮食主产区新郑市的粮食产量、人口增长、产业结构的合理布局以及造成的环境污染和水资源大幅度下降都成为新郑市耕地生态安全的主要影响因素。

2008 年农业经济比重  $v_8$  成为新郑市耕地生态安全最大的障碍因子,到 2009 年和 2010 年未利用土

地比重  $v_{17}$  和农业经济比重  $v_8$  成为新郑市耕地生态安全主要的障碍因子。表明 2008—2010 年,新郑市的未利用地比重和农业经济比重逐渐成为新郑市耕地生态安全的主要障碍因子,因此,调整优化土地利用结构和产业结构,不断提高粮食综合生产能力成为目前“三化协调”发展的主要调控对象。

综上所述,制约新郑市耕地生态安全的主要障碍因子是地均化肥使用强度、耕地复种指数、人均粮食产量、城市化水平、耕地垦殖率、人口自然增长率、人均水资源量、地均地膜使用强度、第三产业占 GDP 比重、农业经济比重、未利用土地比重。

3 结论与讨论

利用建立的 PSR-EEES 预警指标体系和改进变权物元可拓模型,对新郑市 2001—2010 年耕地生态安全预警进行分析,得到 2001—2010 年新郑市耕地生态安全预警等级呈现上升趋势,从Ⅲ级(预警)上升为Ⅳ级(较安全);新郑市耕地生态安全压力指标、状态指标和响应指标均由Ⅲ级(预警)上升为Ⅳ级(较安全)。等级变量特征值从 2001 年的 3.386 增加到 2010 年的 3.686,耕地生态安全水平不断提高,但是 2009—2010 年耕地生态安全压力指标的下降使得预警等级的增速变缓,表明耕地生态安全仍面临威胁,仍需加强预防和保护力度,减轻耕地生态压力,防范进一步恶化的风险,保证耕地生态安全水平。

通过对障碍因子的诊断可知,准则层中新郑市耕地生态安全压力指标是最大的障碍度;因素层中环境压力、经济响应始终是新郑市耕地生态安全的最大障碍度。新郑市耕地生态安全预警指标中主要障碍因子是地均化肥使用强度、耕地复种指数、人均粮食产量、城市化水平、耕地垦殖率、人口自然增长率、人均水资源量、地均地膜使用强度、第三产业占 GDP 比重、农业经济比重、未利用土地比重。因此,目前在“三化”协调发展的同时,仍需要节约和集约利用土地为核心,科学用地,提高土地利用的效率和效益,转变土地利用方式,优化土地利用布局,提高耕地质量和产能;深化结构调整,引导和促进经济增长方式的转变,优化资源配置,控制水资源总量的用量和污染,加强对耕地退化、耕地污染的防范与治理,改善耕地生态环境,提高耕地生态环境质量,保证耕地生态安全。



通过变权理论和物元可拓模型的改进构建耕地生态安全预警模型,动态分析了新郑市耕地生态安全预警等级和预警指标的预警等级,提出主要障碍因子对耕地生态安全预警未来发展的影响。但是在构建指标体系时,由于数据的难以获取和局限性,在指标的选取方面仍存在不足和缺陷;经典域目前没有统一的标准,在制定的过程中必定会存在一定的主观性,而这些不足都会导致预警结果的偏差,因此需要进一步研究并改善。文章仅从时间上对新郑市耕地生态安全预警进行研究,空间上的研究以及预警系统的建立将是今后进一步研究和探讨的方向。

#### 参考文献:

- [1] 张利,陈影,王树涛,等. 滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警:以曹妃甸新区为例[J]. 应用生态学报,2015,26(8):2445-2454.
  - [2] Tian J, Gang G. Research on regional ecological security assessment[J]. Energy Procedia, 2012,16:1180-1186.
  - [3] Han B, Liu H, Wang R. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing—Tianjin—Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods[J]. Ecological Modelling, 2015,318:217-225.
  - [4] Liang P, Liming D, Guijie Y. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2:832-841.
  - [5] Hua Y E, Yan M A, Limin D. Land ecological security assessment for Bai autonomous prefecture of Dali based using PSR model-with data in 2009 as case[J]. Energy Procedia, 2011,5:2172-2177.
  - [6] 赵文晖,杨伟州,王利香,等. 基于可拓优度评价模型的耕地生态安全评价:以保定市为例[J]. 河南农业科学, 2015,44(2):60-65.
  - [7] Li X, Tian M, Wang H, et al. Development of an ecological security evaluation method based on the ecological footprint and application to a typical steppe region in China[J]. Ecological Indicators, 2014,39:153-159.
  - [8] 蔡银莺,罗成. 江汉平原耕地资源生态安全状况及空间集聚格局[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2015(5):110-120.
  - [9] 蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,1997:202-209.
  - [10] 李泓泽,郭森,唐辉,等. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价[J]. 电网技术,2013(03):653-659.
  - [11] Wu G C, Niu X. Application of an evaluation model based on Punishing variable weight for early warning of land ecological security[J]. Resources Science, 2010, 32(5):992-999.
  - [12] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报:理学版,2004,39(2):25-29.
  - [13] 王金南,吴舜泽. 环境安全管理:评估与预警[M]. 北京:科学出版社,2007.
  - [14] 荣联伟,师学义,高奇,等. 黄土高原山丘区土地生态安全动态评价及预测[J]. 水土保持研究,2015,22(3): 210-216.
  - [15] 周彬,钟林生,陈田,等. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警[J]. 应用生态学报,2015,26(6):1854-1862.
  - [16] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报,2013,33(16):5090-5100.
- ~~~~~
- (上接第 255 页)
- [18] Qin Z H, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(18):3719-3746.
  - [19] 徐涵秋,陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J]. 遥感技术与应用,2003, 18(3):129-133.
  - [20] 董妍,李星敏,杨艳超,等. 西安城市热岛的时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(8):107-112.
  - [21] 刘宇峰,原志华,孔伟,等. 1993—2012 年西安城区城市热岛效应强度变化趋势及影响因素分析[J]. 自然资源学报,2015,30(6):974-985.