

# 基于 EES - PSR 的土地生态安全物元模型评价方法实证研究

王大海<sup>1</sup> 张荣群<sup>1</sup> 艾东<sup>2</sup> 孙玮健<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 土地生态安全是资源环境生态系统健康的基础。鉴于土地生态系统安全各项评价指标的不相容性,借助经典 EES - PSR 模型在土地生态安全评价指标体系方面的优势,采用物元模型分析方法,构建了土地生态安全评价物元模型。以黑龙江省哈尔滨市的土地生态安全评价为例,利用物元评价模型,在 GIS 技术支持下,实现了研究区土地生态安全评价与评价结果的可视化表达与分析。研究表明:2011—2015 年哈尔滨市土地生态安全水平从“不安全”向“安全”水平不断转化,2013 年后变化最为突出。造林面积、第一产业占 GDP 比例、万元 GDP 能耗标准煤、工业废水处理率、人均占有公共绿地面积连续多年处于“不安全”水平,是哈尔滨市土地生态安全水平的制约因素。2015 年哈尔滨市中部、西南部地区土地生态安全水平较差,北部、东南部地区水平较高。研究表明物元模型分析对于地区土地生态安全评价工作具有一定的理论价值。

**关键词:** 土地生态安全; EES - PSR; 物元模型; 可视化

**中图分类号:** X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0228-10

## Empirical Study on Evaluation Method of Land Ecological Security Matter-element Model Based on EES - PSR

WANG Dahai<sup>1</sup> ZHANG Rongqun<sup>1</sup> AI Dong<sup>2</sup> SUN Weijian<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Land ecological security is the foundation of resources, environment and ecosystem health. Focusing on the incompatibility of various evaluation indexes of the land ecological security system, this paper evaluated land eco-security using the theory of matter element analysis. An evaluation index system of land ecological security was established based on EES - PSR model. The land ecological security classification standard, the evaluation index and its characteristic value were regarded as matter-elements. Through the normalization of the evaluation index and the actual data to be evaluated, a comprehensive evaluation model of land ecological security was established after getting the classical domain, joint domain, weight coefficient and correlation degree of the matter element model. The evaluation model was applied to the land ecological security assessment in Heilongjiang, Harbin. With the support of GIS technology, the visual expression and analysis of the evaluation and evaluation of land ecological security in the study area were achieved. The results showed that during 2011 to 2015, the level of land ecological security in Harbin changed from “insecurity” to “security”, and the most prominent change occurred after 2013. The area of afforestation, the proportion of primary industry to GDP, the consumption of million yuan GDP energy (standard coal), the rate of industrial waste water treatment and the area of public green space per capita had been “insecurity” for many years and were the restriction factor of land ecological security level in Harbin City. In 2015, the level of land ecological security was low in the middle and southwest of Harbin, but it was higher in the northern and southeastern regions. It is concluded that matter element model analysis had certain guiding significance for regional land ecological security assessment.

**Key words:** land ecological security; EES - PSR; matter element model; visualization

收稿日期: 2017-07-10 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(20131100201)

作者简介: 王大海(1993—),男,硕士生,主要从事地理信息技术开发与应用研究, E-mail: wdh\_king@qq.com

通信作者: 张荣群(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业信息化与 3S 技术综合应用研究, E-mail: zhangrq@cau.edu.cn

## 引言

生态安全是指一个国家或地区的生态环境资源状况不受或少受来自资源和生态环境的制约与威胁的状态,其本质在于强调生态系统本身的安全及生态系统对人类生存的安全程度<sup>[1-2]</sup>,主要包括国土资源安全、生物安全、生态系统安全、环境与健康安全等<sup>[3]</sup>。

土地是人类赖以生存和发展的物质基础,是人类栖居的基地和衣食的基本来源<sup>[3]</sup>。长期以来,由于受认识水平限制和社会经济利益的驱使,人类在索求土地的生产功能和社会经济功能过程中,往往忽略了土地的生态服务功能,甚至以牺牲土地的生态服务功能为代价<sup>[4]</sup>,进而出现了水土流失、土地荒漠化、土地污染、土地沙化等一系列土地生态问题<sup>[5]</sup>。土地生态安全关系到人类生存与发展,是土地资源可持续利用的核心和基础,如今已成为众多专家学者广泛关注的研究热点课题。近年来,研究者从国家<sup>[4]</sup>、区域<sup>[3,6-7]</sup>、省域<sup>[8]</sup>、城市<sup>[9]</sup>等不同尺度上对土地生态安全评价研究进行探讨,评价方法涉及综合分析法<sup>[7-8]</sup>、层次分析法<sup>[10]</sup>、神经网络分析法<sup>[9]</sup>、模糊分析法<sup>[11]</sup>、主成分分析法<sup>[12]</sup>等,指标构建模型涉及 PSR(压力-状态-响应)模型<sup>[7,13]</sup>、EES(环境-经济-社会)模型<sup>[14-15]</sup>、DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)模型<sup>[16]</sup>等。以上研究对于土地生态安全问题的评价均取得了一些成效。

本文以哈尔滨市为研究区,采用市级尺度保障分析结果的精准性,针对综合分析法、模糊分析法等容易遗漏单个指标之间评价信息的不足,在充分考虑 EES 模型和 PSR 模型各自优势的基础上,采用物元分析法,结合研究区域的特点及实际情况构建土地生态安全评价指标体系,并在指标数据归一化处理后采用层次分析法来对各评价指标计算权值,从时间和空间两种尺度对哈尔滨市土地生态安全进行综合评价分析。

## 1 研究区概况与数据来源

哈尔滨市位处中国东北部,位于东经 125°42′~130°10′、北纬 44°04′~46°40′之间,属中温带大陆性季风气候,其行政区划如图 1 所示。哈尔滨市地域平坦、低洼,东部 10 县(市)多山及丘陵地。全市土地面积 5.31 万 km<sup>2</sup>,户籍总人口 961.4 万人,占全国土地面积的 0.55%,全国总人口的 0.7%。长期以来,哈尔滨以重工业为主,逐渐导致生态多样性减少、水土流失、地力减退、土壤污染、土地沙

化等多种生态问题的出现<sup>[8]</sup>。当地工业“三废”的排放、人类对农药化肥及地膜的过度使用,也严重破坏了当地土地生态系统自身原有的稳定性,严重影响了该地区的农业、经济社会和土地生态安全的可持续性发展。因此,选取哈尔滨市为研究区,对其自身及其他相似区域改善土地生态环境质量、促进土地生态良性循环、实现经济社会可持续健康发展具有很好的参考价值 and 指导意义。



图 1 哈尔滨市行政区划图

Fig. 1 Administrative map of Harbin municipality

生态评价指标数据主要来源于中国统计年鉴(2012—2016)、中国环境统计年鉴(2012—2016)、中国区域经济统计年鉴(2012—2016)、哈尔滨统计年鉴(2012—2016)、哈尔滨市国民经济和社会统计公报(2012—2016)及黑龙江统计年鉴(2012—2016),其中部分指标可直接从统计年鉴中查到,其余则根据已有数据计算得出。

## 2 基于 EES-PSR 的土地生态安全物元模型评价的建立方法

### 2.1 基于 EES-PSR 的土地生态安全评价指标体系的构建

#### 2.1.1 EES-PSR 模型

EES 概念协同模型创立于 20 世纪 70 年代初,被广泛运用于经济、心理、生态等许多领域和学科。区域土地生态系统具有自然特征、经济特点和社会属性,是一个环境-经济-社会(Environment-economy-society, EES)的复合系统。土地生态安全评价并非只追求某一个子系统的安全,同时单一某系统的安全也不能完整体现整个土地生态系统的安全性<sup>[14-15]</sup>。因此, EES 模型对于复杂的土地生态安全的评价具有很好的适用性,但对于土地生态系统内各影响因素之间的因果关系则很难反映。

PSR 概念模型最初由经济合作与发展组织(OECD)提出,该模型以因果关系为基础,主要用于

评价生态环境承受的压力及这种压力对生态环境原有相关属性(状态)造成的变化,和人类社会对于这些生态环境的变化所作出的响应。该模型突出了人类活动对环境造成的压力与生态环境退化以及人类做出响应三者的因果关联,而土地生态系统安全的恶化也正是由人类活动导致的<sup>[7,13]</sup>。因此,PSR模型对于土地生态安全评价同样适用,但对于土地生态系统各子系统内部的分析则有所忽略。

本研究针对EES模型和PSR模型对于土地生态安全评价所表现出的优缺点,结合研究区域的特点及实际情况,选取二者的优点并进行有机结合,最终形成EES(环境-经济-社会)-PSR(压力-状态-响应)模型来建立土地生态安全评价指标体

系,即在E(环境)、E(经济)和S(社会)3个子系统的基础上,分别从P(压力)、S(状态)、R(响应)3个层面进行生态评价指标选取。EES-PSR模型能够清晰地反映环境、经济和社会3个子系统内部在压力、状态、响应3方面的表现特征及其因果关系。

### 2.1.2 评价指标体系的构建

目前,国内外对于土地生态安全评价指标体系的构建尚未建立统一的标准。本研究尝试根据哈尔滨市土地生态安全状况及土地利用状态,本着科学性、系统性、有代表性和稳定性等原则,综合国内相关研究成果<sup>[1,6-9,13-15,18-21]</sup>,基于EES-PSR模型构建出哈尔滨市土地生态安全评价指标体系(表1)。

表1 哈尔滨市土地生态安全评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of land ecological security in Harbin

目标层	准则层	要素层	指标层	指标说明	方向
土地生态安全	环境	压力	单位面积耕地化肥使用量 $C_1/(kg \cdot hm^{-2})$	化肥施用量/耕地面积	负
			单位面积耕地农药使用量 $C_2/(kg \cdot hm^{-2})$	农药施用量/耕地面积	负
			单位面积耕地地膜使用量 $C_3/(kg \cdot hm^{-2})$	地膜使用量/耕地面积	负
		状态	森林覆盖率 $C_4/\%$	反映森林生态功能	正
			人均水资源量 $C_5/(m^3 \cdot 人^{-1})$	反映水资源状况	正
		响应	有效灌溉面积比 $C_6/\%$	有效灌溉面积/耕地面积	正
			造林面积 $C_7/万 hm^2$	反映当地生态维护力度	正
	经济	压力	人均GDP $C_8/(人 \cdot 元^{-1})$	表示经济结构压力	正
			第一产业占GDP比例 $C_9/\%$	第一产业发展水平	正
		状态	万元GDP能耗标准煤 $C_{10}/(万元 \cdot t^{-1})$	反映经济发展对煤炭资源的消耗水平	负
			农村居民人均可支配收入 $C_{11}/(人 \cdot 元^{-1})$	农村居民总可支配收入/农村居民人数	正
		响应	农村居民恩格尔系数 $C_{12}/\%$	反映人民生活水平	负
			工业废水处理率 $C_{13}/\%$	反映工业废水处理水平	正
			工业固体废物处理率 $C_{14}/\%$	反映工业固体废物处理水平	正
社会	压力	人口密度 $C_{15}/(人 \cdot km^{-2})$	总人口/土地总面积	负	
		人口增长率 $C_{16}/\%$	表示人口增长压力	负	
		人均耕地面积 $C_{17}/(hm^2 \cdot 人^{-1})$	耕地总面积/总人口	正	
	状态	城镇化水平 $C_{18}/\%$	非农业人口/总人口	正	
		人均占有公共绿地面积 $C_{19}/(m^2 \cdot 人^{-1})$	总公共绿地面积/人口数量	正	
	响应	城市生活污水处理率 $C_{20}/\%$	城市环境维护水平	正	
农业机械化水平 $C_{21}/(kW \cdot hm^{-2})$	表示维护土地生态安全的科技水平	正			

## 2.2 数据归一化处理

由于各评价指标量化值量纲与数量级不完全相同,且有的指标数值越小级别越高,而有的指标则相反。需对各评价指标及评价标准进行归一化处理<sup>[18]</sup>,计算公式如下:

$$\text{负向指标} \quad d_i = x_i/x_n \quad (1)$$

$$\text{正向指标} \quad d_i = 1 - (x_i - x_n)/x_1 \quad (2)$$

式中: $d_i$ 、 $x_i$ 、 $x_1$ 、 $x_n$ 分别为指标归一化后的标准值、未归一化的标准值、1级别和n级别的标准值;正向指标的指数值越大越安全,负向指标的指数值越小越

安全。

## 2.3 土地生态安全物元模型评价方法

为了解决不相容的复杂问题,20世纪80年代蔡文开创了物元分析理论。物元分析方法以可拓数学<sup>[2,17]</sup>为基础,适用于多因子评价,现已广泛应用在环境质量的综合评判、产品质量分级以及农业资源评价等方面。土地生态安全受自然、经济、社会等多方面评价指标因素影响,同时各评价指标因素间又交叉作用与制约,并且各指标评价结果具有不相容性,因此根据物元分析方法可构建出土地生态安全

评价物元模型。

### 2.3.1 确定物元

土地生态安全  $N$ 、土地生态安全特征  $C$  及其特征量值  $V$  共同构成土地生态安全物元。假设土地生态安全  $N$  有多个特征, 它用  $n$  个特征  $C_1, C_2, \dots, C_n$  及相应的特征量值  $V_1, V_2, \dots, V_n$  加以描述, 可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $\mathbf{R}$ —— $n$  维土地生态安全物元, 简记为  $\mathbf{R} = (N, C, V)$

### 2.3.2 确定经典域、节域

土地生态安全的经典域物元矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} N_i & C_1 & X_{i1} \\ & C_2 & X_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & C_1 & \langle a_{i1}, b_{i1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{i2}, b_{i2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{in}, b_{in} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{R}_i$  表示经典域物元,  $N_i$  表示土地生态安全评价的第  $j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 等级标准,  $X_{ik} = \langle a_{ik}, b_{ik} \rangle$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 是分级标准  $N_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 关于评价指标  $C_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的特征量值域, 称为经典域。

对于土地生态安全经典域, 构造其节域

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & X_{p1} \\ & C_2 & X_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{R}_p$  表示节域物元,  $X_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$  则为  $\mathbf{R}_p$  关于  $C_i$  的节域, 其中  $\mathbf{R}_p \supset \mathbf{R}_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

### 2.3.3 确定待评判物元

把待评对象  $N_x$  (实际待评数据) 的物元表示为

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} N_x & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.3.4 确定单项指标关联度函数及关联度

土地生态安全指标关联度函数  $K_i(X_j)$  的定义为

$$K_i(X_j) = \begin{cases} \frac{-\rho(X_j, X_{ij})}{|X_{ij}|} & (X_j \in X_{ij}) \\ \frac{\rho(X_j, X_{ij})}{\rho(X_j, X_{pj}) - \rho(X_j, X_{ij})} & (X_j \notin X_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \rho(X_j, X_{ij}) = \left| X_j - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij})$$

$$\rho(X_j, X_{pj}) = \left| X_j - \frac{1}{2}(a_{pj} + b_{pj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pj} - a_{pj})$$

$$(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$$

式中  $K_i(X_j)$ ——第  $j$  项评价指标相对应的第  $i$  等级的关联度

$\rho(X_j, X_{ij})$ ——点  $X_j$  与有限区间  $X_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$  的距

$\rho(X_j, X_{pj})$ ——点  $X_j$  与有限区间  $X_{pj} = [a_{pj}, b_{pj}]$  的距

$|X_{ij}|$ ——有限区间  $X_{ij}$  的模, 大小为  $|a_{ij} - b_{ij}|$

$X_j, X_{ij}, X_{pj}$ ——待评物元的量值、经典物元的量值区间、节域物元的量值区间

### 2.3.5 计算综合关联度并确定评价等级

关联度函数  $K(x)$  在实数轴上的大小表示待评单元符合某标准范围的隶属程度。物元模型的关联度将逻辑值从模糊数学的  $[0, 1]$  闭区间拓展到  $(-\infty, +\infty)$  实数轴后, 比模糊数学的隶属程度所代表的内涵更为丰富, 能揭示更多分异信息; 当  $K(x) \geq 1.0$  时, 表示被评价对象超过标准对象上限, 数值越大, 开发潜力越大; 当  $0 \leq K(x) < 1.0$  时, 表示被评价对象符合标准对象要求的程度, 数值越大, 越接近标准上限; 当  $-1.0 \leq K(x) < 0$  时, 表示被评价对象不符合标准对象要求, 但具备转行为标准对象的条件, 数值越大, 越容易转化; 当  $K(x) < -1.0$  时, 表示被评价对象不符合标准对象要求, 且又不具备转化为标准对象的条件。待评对象  $N_x$  关于等级  $j$  的综合关联度  $K_j(N_x)$  为  $K_j(N_x) = \sum_{i=1}^n a_{ij} K_j(X_i)$ ,  $j=1, 2, 3, \dots, m$ ; 若  $K_j = \max\{K_j(X_i)\}$ , 则待评对象  $N_x$  第  $i$  项指标属于等级  $j$ ; 若  $K_j = \max\{K_j(N_x)\}$ , 则待评对象  $N_x$  属于等级  $j$ 。

### 2.4 土地生态安全评价经典域、节域的确定

本文对土地生态安全评价标准的确定主要参照全国平均水平、国家环保总局《生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》标准值、全省平均水平、发达地区水平、国际通行标准等相关标准以及相关的历史文献<sup>[1, 6-8, 10, 12, 13, 16, 18-21]</sup>, 据此将哈尔滨市土地生态安全等级分为  $N_1, N_2, N_3$  和  $N_4$  四个级别, 即 I 级(安全)、II 级(较安全)、III 级(临界安全)、IV 级(不安全), 进而建立土地生态安全评价的经典域物元矩阵  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4$  和节域物元矩阵  $\mathbf{R}_p$ 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & \langle 0.000\ 0, 0.321\ 4 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.000\ 00, 0.007\ 6 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.000\ 0, 0.333\ 3 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.000\ 0, 0.375\ 0 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.085\ 7, 0.120\ 0 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.428\ 6, 0.500\ 0 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.000\ 0, 0.200\ 0 \rangle \\ & C_8 & \langle -0.133\ 9, 0.177\ 8 \rangle \\ & C_9 & \langle 0.000\ 0, 0.250\ 0 \rangle \\ & C_{10} & \langle 0.533\ 3, 0.566\ 7 \rangle \\ & C_{11} & \langle 0.400\ 0, 0.533\ 3 \rangle \\ & C_{12} & \langle 0.600\ 0, 0.700\ 0 \rangle \\ & C_{13} & \langle 0.920\ 0, 0.938\ 8 \rangle \\ & C_{14} & \langle 0.600\ 0, 0.631\ 6 \rangle \\ & C_{15} & \langle 0.100\ 0, 0.231\ 3 \rangle \\ & C_{16} & \langle -0.200\ 0, 0.060\ 0 \rangle \\ & C_{17} & \langle -1.192\ 0, 0.100\ 0 \rangle \\ & C_{18} & \langle 0.333\ 3, 0.416\ 7 \rangle \\ & C_{19} & \langle 0.000\ 0, 0.277\ 8 \rangle \\ & C_{20} & \langle 0.400\ 0, 0.444\ 4 \rangle \\ & C_{21} & \langle 0.000\ 0, 0.183\ 3 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & C_1 & \langle 0.321\ 4, 0.542\ 9 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.007\ 6, 0.276\ 5 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.333\ 3, 0.533\ 3 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.375\ 0, 0.500\ 0 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.120\ 0, 0.400\ 0 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.500\ 0, 0.666\ 7 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.200\ 0, 0.500\ 0 \rangle \\ & C_8 & \langle 0.177\ 8, 0.511\ 1 \rangle \\ & C_9 & \langle 0.250\ 0, 0.375\ 0 \rangle \\ & C_{10} & \langle 0.566\ 7, 0.600\ 0 \rangle \\ & C_{11} & \langle 0.533\ 3, 0.733\ 3 \rangle \\ & C_{12} & \langle 0.700\ 0, 0.760\ 0 \rangle \\ & C_{13} & \langle 0.938\ 8, 0.959\ 2 \rangle \\ & C_{14} & \langle 0.631\ 6, 0.684\ 2 \rangle \\ & C_{15} & \langle 0.231\ 3, 0.437\ 5 \rangle \\ & C_{16} & \langle 0.060\ 0, 0.200\ 0 \rangle \\ & C_{17} & \langle 0.100\ 0, 0.350\ 0 \rangle \\ & C_{18} & \langle 0.416\ 7, 0.625\ 0 \rangle \\ & C_{19} & \langle 0.277\ 8, 0.444\ 4 \rangle \\ & C_{20} & \langle 0.444\ 4, 0.500\ 0 \rangle \\ & C_{21} & \langle 0.183\ 3, 0.516\ 7 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & C_1 & \langle 0.542\ 9, 0.714\ 3 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.276\ 5, 0.823\ 5 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.533\ 3, 0.800\ 0 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.500\ 0, 0.750\ 0 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.400\ 0, 0.720\ 0 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.666\ 7, 0.833\ 3 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.500\ 0, 0.700\ 0 \rangle \\ & C_8 & \langle 0.511\ 1, 0.777\ 8 \rangle \\ & C_9 & \langle 0.375\ 0, 0.750\ 0 \rangle \\ & C_{10} & \langle 0.600\ 0, 0.666\ 7 \rangle \\ & C_{11} & \langle 0.733\ 3, 0.906\ 7 \rangle \\ & C_{12} & \langle 0.760\ 0, 0.800\ 0 \rangle \\ & C_{13} & \langle 0.959\ 2, 0.979\ 6 \rangle \\ & C_{14} & \langle 0.684\ 2, 0.789\ 5 \rangle \\ & C_{15} & \langle 0.437\ 5, 0.625\ 0 \rangle \\ & C_{16} & \langle 0.200\ 0, 0.600\ 0 \rangle \\ & C_{17} & \langle 0.350\ 0, 0.600\ 0 \rangle \\ & C_{18} & \langle 0.625\ 0, 0.833\ 3 \rangle \\ & C_{19} & \langle 0.444\ 4, 0.722\ 2 \rangle \\ & C_{20} & \langle 0.500\ 0, 0.555\ 6 \rangle \\ & C_{21} & \langle 0.516\ 7, 0.716\ 7 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & C_1 & \langle 0.714\ 3, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.823\ 5, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.800\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.750\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.720\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.833\ 3, 1.204\ 3 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.700\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_8 & \langle 0.777\ 8, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_9 & \langle 0.750\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{10} & \langle 0.666\ 7, 1.130\ 1 \rangle \\ & C_{11} & \langle 0.906\ 7, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{12} & \langle 0.800\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{13} & \langle 0.979\ 6, 1.122\ 8 \rangle \\ & C_{14} & \langle 0.789\ 5, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{15} & \langle 0.625\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{16} & \langle 0.600\ 0, 1.120\ 0 \rangle \\ & C_{17} & \langle 0.600\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{18} & \langle 0.833\ 3, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{19} & \langle 0.722\ 2, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{20} & \langle 0.555\ 6, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{21} & \langle 0.716\ 7, 1.047\ 9 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle 0.000\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.000\ 00, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.000\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.000\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.085\ 7, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.428\ 6, 1.204\ 3 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.000\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_8 & \langle -0.133\ 9, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_9 & \langle 0.000\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{10} & \langle 0.533\ 3, 1.130\ 1 \rangle \\ & C_{11} & \langle 0.400\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{12} & \langle 0.600\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{13} & \langle 0.920\ 0, 1.122\ 8 \rangle \\ & C_{14} & \langle 0.600\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{15} & \langle 0.100\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{16} & \langle -0.200\ 0, 1.120\ 0 \rangle \\ & C_{17} & \langle -1.192\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{18} & \langle 0.333\ 3, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{19} & \langle 0.000\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{20} & \langle 0.400\ 0, 1.000\ 0 \rangle \\ & C_{21} & \langle 0.000\ 0, 1.047\ 9 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_w = \begin{bmatrix} 0.043\ 6 & 0.048\ 8 & 0.045\ 6 & 0.046\ 2 \\ 0.001\ 0 & 0.024\ 9 & 0.052\ 6 & 0.046\ 2 \\ 0.045\ 2 & 0.048\ 0 & 0.051\ 1 & 0.046\ 2 \\ 0.050\ 9 & 0.045\ 0 & 0.047\ 9 & 0.046\ 2 \\ 0.016\ 3 & 0.036\ 0 & 0.046\ 0 & 0.046\ 2 \\ 0.067\ 9 & 0.060\ 0 & 0.053\ 2 & 0.055\ 7 \\ 0.027\ 1 & 0.045\ 0 & 0.044\ 7 & 0.046\ 2 \\ 0.024\ 1 & 0.046\ 0 & 0.049\ 7 & 0.046\ 2 \\ 0.033\ 9 & 0.033\ 7 & 0.047\ 9 & 0.046\ 2 \\ 0.076\ 9 & 0.054\ 0 & 0.042\ 6 & 0.052\ 3 \\ 0.072\ 4 & 0.066\ 0 & 0.057\ 9 & 0.046\ 2 \\ 0.095\ 0 & 0.068\ 4 & 0.051\ 1 & 0.046\ 2 \\ 0.127\ 4 & 0.086\ 3 & 0.062\ 5 & 0.051\ 9 \\ 0.085\ 7 & 0.061\ 6 & 0.050\ 4 & 0.046\ 2 \\ 0.031\ 4 & 0.039\ 4 & 0.039\ 9 & 0.046\ 2 \\ 0.008\ 1 & 0.018\ 0 & 0.038\ 3 & 0.051\ 8 \\ 0.013\ 6 & 0.031\ 5 & 0.038\ 3 & 0.046\ 2 \\ 0.056\ 5 & 0.056\ 2 & 0.053\ 2 & 0.046\ 2 \\ 0.037\ 7 & 0.040\ 0 & 0.046\ 1 & 0.046\ 2 \\ 0.060\ 3 & 0.045\ 0 & 0.035\ 5 & 0.046\ 2 \\ 0.024\ 9 & 0.046\ 5 & 0.045\ 8 & 0.048\ 5 \end{bmatrix}$$

2.5 权系数矩阵的确定

对于土地生态安全的安全等级  $N_i (i = 1, 2, \dots, m)$  的评价指标  $C_j$  所对应的特征值  $X_{ij} (j = 1, 2, \dots, n)$  列于表 2。

表 2 权系数计算

Tab. 2 Calculation of weight coefficients

$X_{ij}$	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$	$\sum$
$N_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1n}$	$\sum_{i=1}^n X_{1i}$
$N_2$	$X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{2n}$	$\sum_{i=1}^n X_{2i}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$N_m$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	...	$X_{mn}$	$\sum_{i=1}^n X_{mi}$

根据权系数计算公式  $a_{ij} = X_{ij} / \sum_{j=1}^n X_{ij}$ , 得到权系数矩阵<sup>[18]</sup>

2.6 土地生态安全评价待评判物元的确定

根据 2011—2015 年各评价指标的具体量值, 通过归一化处理式(1)和式(2)得到哈尔滨市土地生态安全待评判物元矩阵  $R_{2011}, R_{2012}, R_{2013}, R_{2014}, R_{2015}$ 。

$$R_{2011} = \begin{bmatrix} N_{2011} & C_1 & 0.370\ 1 \\ & C_2 & 0.480\ 2 \\ & C_3 & 0.629\ 9 \\ & C_4 & 0.240\ 0 \\ & C_5 & 0.660\ 1 \\ & C_6 & 1.193\ 8 \\ & C_7 & 0.586\ 7 \\ & C_8 & 0.228\ 1 \\ & C_9 & 0.987\ 5 \\ & C_{10} & 0.816\ 0 \\ & C_{11} & 0.987\ 7 \\ & C_{12} & 0.804\ 0 \\ & C_{13} & 0.933\ 0 \\ & C_{14} & 0.664\ 9 \\ & C_{15} & 0.234\ 0 \\ & C_{16} & 1.080\ 0 \\ & C_{17} & -0.646\ 8 \\ & C_{18} & 0.417\ 3 \\ & C_{19} & 0.722\ 2 \\ & C_{20} & 0.544\ 4 \\ & C_{21} & 1.028\ 3 \end{bmatrix}$$

$$R_{2012} = \begin{bmatrix} N_{2012} & C_1 & 0.342\ 2 \\ & C_2 & 0.469\ 1 \\ & C_3 & 0.578\ 5 \\ & C_4 & 0.240\ 0 \\ & C_5 & 0.751\ 6 \\ & C_6 & 1.204\ 3 \\ & C_7 & 0.553\ 3 \\ & C_8 & 0.159\ 8 \\ & C_9 & 0.972\ 5 \\ & C_{10} & 0.853\ 7 \\ & C_{11} & 0.902\ 1 \\ & C_{12} & 0.788\ 2 \\ & C_{13} & 1.122\ 8 \\ & C_{14} & 0.579\ 9 \\ & C_{15} & 0.234\ 3 \\ & C_{16} & -0.200\ 0 \\ & C_{17} & -0.880\ 9 \\ & C_{18} & 0.412\ 4 \\ & C_{19} & 0.722\ 2 \\ & C_{20} & 0.521\ 1 \\ & C_{21} & 1.032\ 4 \end{bmatrix}$$

$$R_{2013} = \begin{bmatrix} N_{2013} & C_1 & 0.304 & 1 \\ & C_2 & 0.428 & 9 \\ & C_3 & 0.508 & 7 \\ & C_4 & 0.231 & 0 \\ & C_5 & 0.654 & 2 \\ & C_6 & 1.177 & 7 \\ & C_7 & 0.616 & 0 \\ & C_8 & 0.055 & 6 \\ & C_9 & 0.957 & 5 \\ & C_{10} & 0.946 & 3 \\ & C_{11} & 0.813 & 1 \\ & C_{12} & 0.780 & 3 \\ & C_{13} & 0.985 & 8 \\ & C_{14} & 0.643 & 6 \\ & C_{15} & 0.234 & 4 \\ & C_{16} & 1.120 & 0 \\ & C_{17} & -1.192 & 0 \\ & C_{18} & 0.410 & 2 \\ & C_{19} & 0.694 & 4 \\ & C_{20} & 0.481 & 1 \\ & C_{21} & 1.047 & 9 \end{bmatrix} \quad R_{2014} = \begin{bmatrix} N_{2014} & C_1 & 0.403 & 4 \\ & C_2 & 0.577 & 7 \\ & C_3 & 0.694 & 5 \\ & C_4 & 0.228 & 0 \\ & C_5 & 0.324 & 9 \\ & C_6 & 0.800 & 5 \\ & C_7 & 0.749 & 7 \\ & C_8 & -0.019 & 4 \\ & C_9 & 0.957 & 5 \\ & C_{10} & 1.031 & 4 \\ & C_{11} & 0.725 & 0 \\ & C_{12} & 0.774 & 0 \\ & C_{13} & 0.928 & 2 \\ & C_{14} & 0.599 & 2 \\ & C_{15} & 0.232 & 5 \\ & C_{16} & 0.160 & 0 \\ & C_{17} & -0.657 & 2 \\ & C_{18} & 0.401 & 0 \\ & C_{19} & 0.700 & 0 \\ & C_{20} & 0.466 & 7 \\ & C_{21} & 0.995 & 6 \end{bmatrix}$$

$$R_{2015} = \begin{bmatrix} N_{2015} & C_1 & 0.384 & 4 \\ & C_2 & 0.459 & 5 \\ & C_3 & 0.725 & 1 \\ & C_4 & 0.225 & 0 \\ & C_5 & 0.553 & 3 \\ & C_6 & 0.783 & 7 \\ & C_7 & 0.930 & 7 \\ & C_8 & -0.133 & 9 \\ & C_9 & 0.957 & 5 \\ & C_{10} & 1.130 & 1 \\ & C_{11} & 0.641 & 7 \\ & C_{12} & 0.772 & 0 \\ & C_{13} & 0.966 & 0 \\ & C_{14} & 0.580 & 8 \\ & C_{15} & 0.226 & 4 \\ & C_{16} & -0.080 & 0 \\ & C_{17} & -0.706 & 4 \\ & C_{18} & 0.410 & 4 \\ & C_{19} & 0.750 & 0 \\ & C_{20} & 0.452 & 2 \\ & C_{21} & 0.986 & 5 \end{bmatrix}$$

### 3 哈尔滨市土地生态安全评价结果与分析

#### 3.1 土地生态安全物元评价分析

##### 3.1.1 综合关联度变化分析

由待评物元,根据式(7)计算出 2011—2015 年哈尔滨市土地生态安全评价各项指标关联度(表 3)。由哈尔滨市土地生态安全评价各项指标关联度量值与权系数矩阵  $R_w$ ,计算出 2011—2015 年哈尔滨市土地生态安全的安全等级(表 4)。

从表 4 看,2011、2012、2013 年哈尔滨市土地生态安全等级均为“不安全”,2014、2015 年哈尔滨市土地生态安全等级为“安全”。从 2011—2013 年的土地生态安全关联度量值可以看出,  $K_4(C_{2011}) > K_4(C_{2012})$ ,  $K_4(C_{2012}) < K_4(C_{2013})$ ,说明 2012 年土地生态安全水平较 2011 年有所下降,但在 2013 年土地生态安全水平有所回升,由于  $K_4(C_{2013}) < 0$  不在  $[0, 1]$  区间内,故该年份土地生态安全水平有向“不安全”转化的趋势;从 2014、2015 年的土地生态安全关联度量值可以看出,  $K_1(C_{2014}) < K_1(C_{2015}) < 0$ ,说明哈尔滨市土地生态安全水平正在逐年向“安全”接近,从单项指标(表 3)提供的分异信息来看,单位面积耕地农药使用量、单位面积耕地地膜使用量、森林覆盖率、有效灌溉面积比、农村居民人均可支配收入、人口密度、城镇化水平、城市生活污水处理率在 2015 年均比上一年呈现不同程度的上升趋势,说明以上指标对于哈尔滨市土地生态安全水平的提升具有积极作用,而造林面积、第一产业占 GDP 比例、万元 GDP 能耗标准煤、工业废水处理率、人均占有公共绿地面积连续多年处于“不安全”水平,是哈尔滨市土地生态安全水平进一步提升的制约因素。从以上的分析可以看出,自 2012 年之后,哈尔滨市的生态环境保护政策和措施起到了积极的作用,整体生态安全等级在不断提升,但为使哈尔滨市生态安全等级处于稳定的“安全”水平,仍需要继续稳固现有成果,针对相关土地生态安全制约因素及时合理调整相关政策措施。

##### 3.1.2 各层面要素间的变化分析

同理可计算出哈尔滨市在环境、经济、社会 3 层面的综合关联度(表 5)。

由表 5 和图 2 可知,2012 年哈尔滨市土地生态安全水平在环境、经济两个层面均低于 2011 年,只有社会压力要素略高于 2011 年;但在 2012 年后,哈尔滨市土地生态安全在环境、经济层面有了明显提高,主要表现在环境压力、环境状态、经济压力 3 种要素方面;直到 2014 年,土地生态安全在经济层面逐渐向“安全”水平转变,环境、社会两层面也有相

表 3 哈尔滨市 2011—2015 年土地生态安全指标关联度

Tab.3 Correlation degree of land ecological security index in Harbin during 2011—2015

关联度	2011 年				等级	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$		等级	等级	等级	等级
$K_j(C_1)$	-0.1163	0.2200	-0.3182	-0.4818	II 级	II 级	I 级	II 级	II 级
$K_j(C_2)$	-0.4960	-0.2979	0.3724	-0.4169	III 级	III 级	III 级	III 级	III 级
$K_j(C_3)$	-0.4448	-0.2069	0.3621	-0.3149	III 级	III 级	II 级	III 级	III 级
$K_j(C_4)$	0.3600	-0.3600	-0.5200	-0.6800	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级
$K_j(C_5)$	-0.6138	-0.4335	0.1872	-0.1498	III 级	IV 级	III 级	II 级	III 级
$K_j(C_6)$	-0.9850	-0.9804	-0.9716	0.0283	IV 级	IV 级	IV 级	III 级	III 级
$K_j(C_7)$	-0.4833	-0.1733	0.4333	-0.2152	III 级	III 级	III 级	IV 级	IV 级
$K_j(C_8)$	-0.1220	0.1509	-0.4388	-0.6029	II 级	I 级	I 级	I 级	I 级
$K_j(C_9)$	-0.9833	-0.9800	-0.9500	0.0500	IV 级	IV 级	IV 级	IV 级	IV 级
$K_j(C_{10})$	-0.4687	-0.4331	-0.3457	0.3222	IV 级	IV 级	IV 级	IV 级	IV 级
$K_j(C_{11})$	-0.9737	-0.9540	-0.8686	0.1314	IV 级	III 级	III 级	II 级	II 级
$K_j(C_{12})$	-0.3467	-0.1834	-0.0200	0.0200	IV 级	III 级	III 级	III 级	III 级
$K_j(C_{13})$	0.3059	-0.3059	-0.6674	-0.7813	I 级	IV 级	IV 级	I 级	III 级
$K_j(C_{14})$	-0.3393	0.3667	-0.2292	-0.6574	II 级	I 级	II 级	I 级	I 级
$K_j(C_{15})$	-0.0201	0.0133	-0.6030	-0.7448	II 级	II 级	II 级	II 级	I 级
$K_j(C_{16})$	-0.9623	-0.9565	-0.9231	0.0769	IV 级	I 级	IV 级	II 级	I 级
$K_j(C_{17})$	0.4220	-0.5780	-0.6464	-0.6957	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级
$K_j(C_{18})$	-0.0048	0.0032	-0.5981	-0.7488	II 级	I 级	I 级	I 级	I 级
$K_j(C_{19})$	-0.6154	-0.5000	<0.0001	<0.0001	IV 级	IV 级	III 级	III 级	IV 级
$K_j(C_{20})$	-0.4091	-0.2353	0.2000	-0.0714	III 级	III 级	II 级	II 级	II 级
$K_j(C_{21})$	-0.9774	-0.9632	-0.9410	0.0591	III 级	IV 级	IV 级	IV 级	IV 级

表 4 哈尔滨市 2011—2015 年土地生态安全比较

Tab.4 Comparison of land ecological security in Harbin during 2011—2015

综合关联度	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	等级
$K_j(C_{2011})$	-0.3384	-0.3438	-0.3636	-0.2733	向 IV 级转化
$K_j(C_{2012})$	-0.4984	-0.5227	-0.4106	-0.3263	向 IV 级转化
$K_j(C_{2013})$	-0.3340	-0.3261	-0.3644	-0.3128	向 IV 级转化
$K_j(C_{2014})$	-0.2063	-0.3352	-0.3341	-0.3973	向 I 级转化
$K_j(C_{2015})$	-0.0848	-0.4088	-0.3589	-0.4544	向 I 级转化

表 5 哈尔滨市 2011—2015 年土地生态安全在环境、经济、社会三层面的状态比较

Tab.5 Comparison of land ecological security in three aspects of environment, economy and society in Harbin during 2011—2015

	2011 年		2012 年		2013 年		2014 年		2015 年	
	关联度	状态								
环境层面	-0.0251	向 III 级转化	-0.0610	向 III 级转化	-0.0548	向 III 级转化	-0.0018	向 III 级转化	-0.0042	向 III 级转化
经济层面	-0.0727	向 IV 级转化	-0.0613	向 IV 级转化	-0.0614	向 IV 级转化	-0.0909	向 I 级转化	-0.1318	向 IV 级转化
社会层面	-0.0752	向 I 级转化	-0.0655	向 I 级转化	-0.0700	向 I 级转化	-0.0463	向 I 级转化	0.2101	I 级

应提升,在此阶段,社会经济、社会压力、经济响应要素发挥了积极作用;2015 年,虽然土地生态安全水平在经济层面有所下降,但总体正在积极向安全水平转化,尤其在社会层面已经步入安全水平,其中社会响应要素的积极作用最为突出。

### 3.2 各区县土地生态安全空间分异可视化分析

以哈尔滨市各区县为单位,选取 2015 年为典型年运用上述土地生态安全评价方法对各区县土地生

态安全评价指标进行归一化处理,得到标准值后根据权重系数矩阵  $R_w$  计算出各区县的土地生态安全综合关联度,结果如表 6 和图 3 所示。

研究表明:哈尔滨市各区县安全等级比为 6/4(安全/不安全),主要不安全地区为中部及西南部地区;哈尔滨市东北部及东部地区基本处于安全状态。整体而言,2015 年哈尔滨市土地生态安全正处在向安全转化阶段,对于中部及西南部地区在维

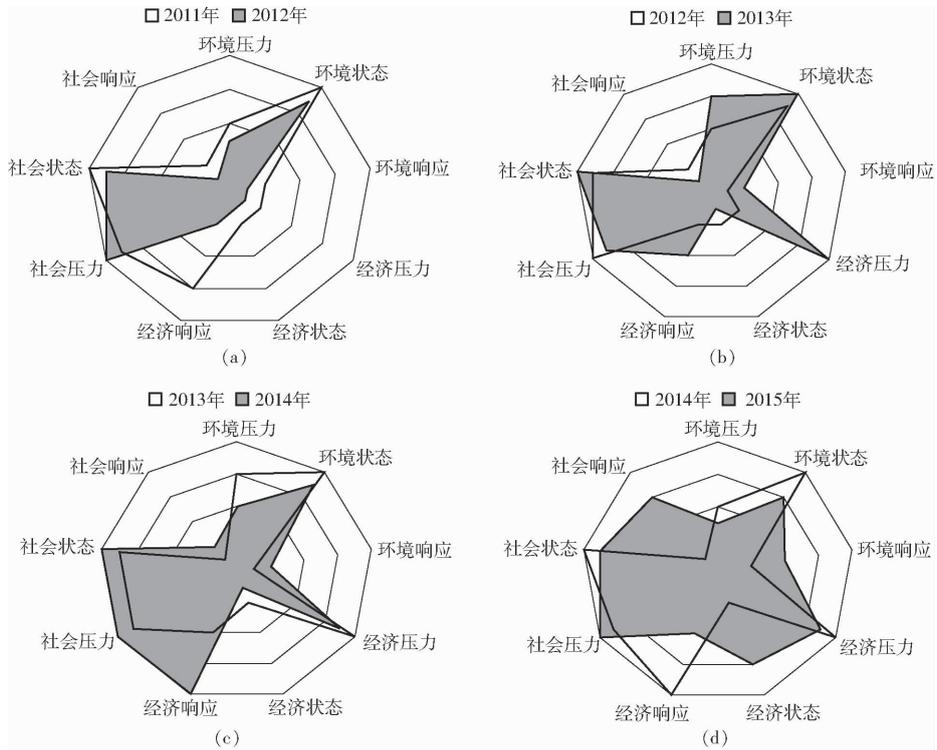


图2 哈尔滨市土地生态安全各影响要素年间比较

Fig. 2 Comparison of factors affecting land ecological security in Harbin

持经济持续健康发展的同时要加强生态文明建设,切实贯彻当地生态保护政策;对于哈尔滨市北部和东北部地区应在保持现有成果的基础上,进一步促进当地土地生态安全建设。

表6 2015年哈尔滨各县市土地生态安全综合关联度比较

Tab. 6 Comparison of comprehensive degree of land ecological security in counties and cities of Harbin in 2015

2015年	关联度				等级
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	
五常市	-0.4714	-0.3418	-0.3900	-0.1756	IV
双城区	-0.3371	-0.4647	-0.4043	-0.3155	IV
尚志市	-0.1075	-0.2749	-0.3408	-0.4322	I
巴彦县	-0.2681	-0.4431	-0.3962	-0.4016	I
宾县	-0.3520	-0.3337	-0.4313	-0.2696	IV
依兰县	-0.0960	-0.5607	-0.5216	-0.5070	I
延寿县	-0.2589	-0.2856	-0.1910	-0.3579	III
木兰县	-0.1909	-0.4058	-0.3685	-0.3536	I
通河县	-0.0888	-0.2953	-0.3509	-0.4490	I
方正县	-0.1246	-0.1760	-0.2049	-0.3654	I
市区	-0.3031	-0.4852	-0.5142	-0.2633	IV

### 4 结论

(1) 运用物元模型对哈尔滨市土地生态安全从时间尺度和空间尺度上进行评价,结果表明:2011—2013年哈尔滨市土地生态安全水平较差,其中在环境、经济两个层面中的人均水资源量、有效灌溉面积比、第一产业占GDP比例、工业废水处理率等指标



图3 2015年哈尔滨市各县市土地生态安全等级空间分布图

Fig. 3 Land ecological security grade spatial distribution in Harbin counties in 2015

对土地生态安全水平的影响最为突出,但在2012年后哈尔滨市政府的各项环境保护政策与措施发挥显著作用,土地生态安全水平逐步提升正在向安全水平转化。

(2) 土地生态安全评价指标体系中的经济压力、经济状态、社会压力、社会状态、社会响应要素即人均GDP、农村居民人均可支配收入、人口增长率、人均耕地面积、城镇化水平等指标对哈尔滨市土地生态安全水平的提升有重要的贡献,而造林面积、万元GDP能耗标准煤、工业废水处理率、人均占有公共绿地面积是哈尔滨市土地生态安全水平进一步提升的制约因素。

(3) 在空间尺度上,2015年哈尔滨市土地生态安全等级比为6/4(安全/不安全),中部及西南部地区土地生态安全水平较差,其他地区水平较高。

## 参 考 文 献

- 1 余健,房莉,仓定帮,等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报,2012,28(5): 260-266.  
YU Jian, FANG Li, CANG Dingbang, et al. Evaluation of land eco-security in Wanjiang district base on entropy weight and matter element model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 260-266. (in Chinese)
- 2 黄辉玲,罗文斌,吴次芳,等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报,2010,26(3): 316-322.  
HUANG Huiling, LUO Wenbin, WU Cifang, et al. Evaluation of land eco-security based on matter element analysis[J]. Transactions of CSAE, 2010, 26(3): 316-322. (in Chinese)
- 3 曹新向,郭志永,雒海潮. 区域土地资源持续利用的生态安全研究[J]. 水土保持学报,2004,18(2): 192-195.  
CAO Xinxiang, GUO Zhiyong, LUO Haichao. Study on ecological security of regionally sustainability utilization of land resources[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 192-195. (in Chinese)
- 4 高向军,鞠正山. 中国土地整理与生态环境保护[J]. 资源·产业,2005,7(2): 1-3.  
GAO Xiangjun, JU Zhengshan. Land consolidation and rehabilitation and eco-environment protection in China[J]. Resources & Industries, 2005, 7(2): 1-3. (in Chinese)
- 5 张虹波,刘黎明. 土地资源生态安全研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2006,25(5): 77-85.  
ZHANG Hongbo, LIU Liming. Main progress and prospects of land resource ecological security research[J]. Progress in Geography, 2006, 25(5): 77-85. (in Chinese)
- 6 刘雯波,郑华伟,刘友兆. 基于物元模型的苏南地区土地生态安全评价[J]. 水土保持通报,2013,33(6): 175-180.  
LIU Wenbo, ZHENG Huawei, LIU Youzhao. Evaluation on ecological security of land in southern Jiangsu Province based on matter-element model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6): 175-180. (in Chinese)
- 7 郭荣中,杨敏华,申海建. 长株潭地区耕地生态安全评价研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10): 193-201. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161025&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161025&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.025.  
GUO Rongzhong, YANG Minhua, SHEN Haijian. Evaluation for ecological security of cultivated land in Chang-Zhu-Tan Region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 193-201. (in Chinese)
- 8 张小虎,雷国平,袁磊,等. 黑龙江省土地生态安全评价[J]. 中国人口·资源与环境,2009,19(1): 88-93.  
ZHANG Xiaohu, LEI Guoping, YUAN Lei, et al. Evaluation on ecological security of land based on entropy weight and matter-element model: a case study of Heilongjiang Province[J]. China Population Resources and Environment, 2009, 19(1): 88-93. (in Chinese)
- 9 李明月,赖笑娟. 基于 BP 神经网络方法的城市土地生态安全评价——以广州市为例[J]. 经济地理,2011,31(2): 289-293.  
LI Mingyue, LAI Xiaojuan. Evaluation on ecological security of urban land based on BP neural network——a case study of Guangzhou[J]. Economic Geography, 2011, 31(2): 289-293. (in Chinese)
- 10 李玉平,蔡运龙. 河北省土地生态安全评价[J]. 北京大学学报:自然科学版,2007,43(6): 784-789.  
LI Yuping, CAI Yunlong. Security evaluation of land ecology in Hebei Province[J]. Acta Scientiarum Naturalism University Pekinensis, 2007, 43(6): 784-789. (in Chinese)
- 11 陈守煜,柴春岭,苏艳娜. 可变模糊集方法及其在土地适宜性评价中的应用[J]. 农业工程学报,2007,23(3): 95-97.  
CHEN Shouyu, CHAI Chunling, SU Yanna. Variable fuzzy sets methods and application on land suitability evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 95-97. (in Chinese)
- 12 孙奇奇,宋戈,齐美玲. 基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究,2012,19(1): 234-238.  
SUN Qiqi, SONG Ge, QI Meiling. Analysis of land ecological safety evaluation of Harbin City based on principal component analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 234-238. (in Chinese)
- 13 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.  
ZHANG Rui, ZHENG Huawei, LIU Youzhao. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 5090-5100. (in Chinese)
- 14 黄鹏,郭闽,兰思仁. 基于 E-E-S 模型的福建省城市生态系统安全评价术[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2015, 32(5): 72-79.  
HUANG Peng, GUO Min, LAN Siren. Evaluation on the ecological security of Fujian Province based on E-E-S model[J]. J. Chongqing Technol. Business Univ.; Nat. Sci. Ed., 2015, 32(5): 72-79. (in Chinese)
- 15 刘汉斌. 基于 EES 协同模型的广东省海洋生态系统安全评价[J]. 海洋经济,2016,6(4): 20-27.  
LIU Hanbin. Safety assessment of marine ecosystem in Guangdong Province based on the EES model[J]. Marine Economy, 2016, 6(4): 20-27. (in Chinese)
- 16 于伯华,吕昌河. 基于 DPSIR 模型的农业土地资源持续利用评价[J]. 农业工程学报,2008,24(9): 53-58.  
YU Bohua, LÜ Changhe. Assessment of sustainable use of agricultural land resources based on DPSIR Framework[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 53-58. (in Chinese)
- 17 张光宇. 土地资源优化配置的物元模型[J]. 系统工程理论与实践,1998,18(1): 109-113.  
ZHANG Guangyu. Matter-element model on optimal allocation of land resource[J]. System Engineering—Theory & Practice, 1998, 18(1): 109-113. (in Chinese)
- 18 门宝辉,梁川. 城市环境质量综合评价物元模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2003,23(3): 134-139.  
MEN Baohui, LIANG Chuan. Establishment and application of matter element model for evaluating urban environment quality [J]. System Engineering—Theory & Practice, 2003, 23(3): 134-139. (in Chinese)
- 19 刘黎,徐逸伦,江善虎,等. 基于模糊物元模型的城市活力评价[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(1): 73-77.  
LIU Li, XU Yilun, JIANG Shanhu, et al. Evaluation of urban vitality based on fuzzy matter-element model[J]. Geography and Geo-information Science, 2010, 26(1): 73-77. (in Chinese)
- 20 吴涛,任平. 基于物元模型的四川省土地生态安全评价[J]. 河南农业科学,2014,43(6): 53-58, 70.  
WU Tao, REN Ping. Evaluation of land eco-security of Sichuan Province based on matter-element model[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, 43(6): 53-58, 70. (in Chinese)
- 21 黄鹏,郭闽,兰思仁. 三明市城市生态安全评价研究[J]. 内江师范学院学报,2014,29(10): 73-78.  
HUANG Peng, GUO Min, LAN Siren. Ecological security assessment of Sanming Urban eco-system[J]. Journal of Neijiang Normal University, 2014, 29(10): 73-78. (in Chinese)