

# 基于PSR-TOPSIS模型的山东省土地生态安全评价

周迎雪<sup>1</sup>, 李贻学<sup>1\*</sup>, 孙仪阳<sup>1</sup>, 李进涛<sup>2</sup>, 高贵芳<sup>3</sup>, 苏超<sup>3</sup>

(1.山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2.北京师范大学资源学院, 北京 100875; 3.临沂市国土资源局土地整理中心, 山东 临沂, 276000)

**摘要:**为山东省土地生态安全保护工作的开展提供科学依据, 论文基于PSR模型, 从压力、状态、响应3个方面构建山东省土地生态安全评价指标体系; 运用基于熵权改进的TOPSIS法对2013年山东省各地市间的土地生态安全状况进行空间差异性研究。结果表明: (1)山东省土地生态安全评价等级包括“较安全”、“临界安全”和“较不安全”, 空间差异明显, 呈现从东部沿海向西部内陆逐渐递减的规律; (2)影响山东省土地生态安全空间差异的主要因素为人均耕地面积、人均水资源量、土地产出率、单位播种面积粮食产量、经济密度、环保投资占GDP比重、农业机械化水平等, 是今后工作的重点。

**关键词:**土地生态安全; PSR; TOPSIS; 山东省

中图分类号: X826

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2016)04-0320-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0270

引用格式:

周迎雪, 李贻学, 孙仪阳, 等. 基于PSR-TOPSIS模型的山东省土地生态安全评价[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 320-326.

ZHOU Ying-xue, LI Yi-xue, SUN Yi-yang, et al. Evaluation of Land Ecological Security in Shandong Province Based on PSR-TOPSIS Model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4): 320-326.

## Evaluation of Land Ecological Security in Shandong Province Based on PSR-TOPSIS Model

ZHOU Ying-xue<sup>1</sup>, LI Yi-xue<sup>1\*</sup>, SUN Yi-yang<sup>1</sup>, LI Jin-tao<sup>2</sup>, GAO Gui-fang<sup>3</sup>, SU Chao<sup>3</sup>

(1.College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2.College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.Land Consolidation Center of Land Resources Bureau of Linyi City, Linyi 276000, China)

**Abstract:** To research the evaluation of land ecological security in Shandong Province, and provide reference for the protection of land ecological security in Shandong, this paper, based on the PSR model, built a land ecological security assessment index system of Shandong Province from three aspects: pressure, state and response. The entropy weight method and improved TOPSIS were employed in the study on the spatial difference of land ecological security among cities in Shandong in 2013. The results showed that: (1) The grade of the land ecological security evaluation in Shandong Province included "relatively safety", "critical safety" and "less safety". The spatial differences were obviously, with the grade gradually decreased from the east coast to the west inland; (2) The main factors influencing the spatial difference of land ecological security in Shandong were the per capita cultivated land, per capita water resources, land output rate, grain yield per unit area, economic density, environmental investment accounted for GDP, agricultural mechanization level. These were the focus of land ecological security regulation in the future. The evaluation index system based on PSR model can reflect the relationship among the factors of land ecological system, and the TOPSIS can reveal the gap between the land ecological security and its ideal state. So, the results reflect the land ecological security situation of the study area comparatively accurate.

**Keywords:** land ecological security; PSR; TOPSIS; Shandong Province

土地资源是一切资源和环境的载体, 土地资源只有处在一种生态安全状态, 才能维持与人类的协调发

展, 才能实现自然、经济和社会的可持续发展<sup>[1]</sup>。但是, 随着社会经济的快速发展, 人们对土地资源的需求不断增加, 土地资源遭到了严重破坏, 人地矛盾日益突出, 土地生态安全问题越来越严峻, 因此对土地生态安全的研究具有重要意义。近年来, 国内外不少研究学者已经从评价模型、评价方法、决策分析等方面对土地生态安全展开了全方位、多层次的研究。在评价

收稿日期: 2015-11-12

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费(200911014)

作者简介: 周迎雪(1991—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事土地生态与土地利用规划研究。E-mail: 18853818657@163.com

\*通信作者: 李贻学 E-mail: lyxland@163.com

指标模型上,有PSR模型<sup>[2]</sup>、CLUE-S模型<sup>[3]</sup>、“自然-经济-社会”模型<sup>[4]</sup>等;在评价方法上主要包括层次分析法<sup>[5]</sup>、物元模型法<sup>[6]</sup>、BP神经网络法<sup>[7]</sup>等;在决策分析上有综合指数法<sup>[8]</sup>、TOPSIS法<sup>[9]</sup>等。

土地生态系统是一个多因素相互影响、相互作用的复杂的巨系统,涉及的要素很多,合理的评价指标体系和方法均对其评价结果产生重要影响<sup>[10]</sup>。TOPSIS法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)即理想解法,是一种多目标决策方法,被广泛应用于工程项目选址<sup>[11]</sup>、道路安全性能评估<sup>[12]</sup>、行业绩效综合评估<sup>[13]</sup>等领域,利用TOPSIS法进行土地生态安全评价,能够系统分析土地生态安全与理想状态的差距,明确地区土地生态安全状态。山东省是我国东部沿海重要的经济发展地区,自改革开放以来,山东各城市迅速向城市化、工业化方向发展,使得经济发展与生态环境保护间的矛盾日益突出,同时,对土地资源的不合理开发利用造成了耕地面积减少,土地污染严重,土壤肥力下降等土地生态问题。因此,科学评价山东省土地生态安全状况,准确掌握各城市土地生态安全状态,对地区社会经济可持续发展和生态环境保护具有重要意义。而目前针对山东省土地生态安全状况的分析鲜有研究,鉴于此,本文运用PSR框架模型并结合基于熵权改进的TOPSIS法,对山东省土地生态安全状况进行科学评估,了解各城市间土地生态安全情况,并据此提出针对性建议,以期为地区土地资源的合理利用及土地生态安全保护工作的开展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山东省地处中国东部沿海、黄河下游,2014年常住人口达到9 789.43万人,人口自然增长率7.39‰,是我国人口密集的省份之一。全省土地总面积15.71万km<sup>2</sup>,约占全国总面积的1.63%,土地利用类型多样,垦殖率高,后备资源少,受到生物、气候、地域等因素的影响,土壤呈现多样化。自改革开放以后,山东省经济发展迅速,至2013年,省内实现GDP 54 684.3亿元,位列全国第三,与广东、江苏一起被评为中国最具综合竞争力省区。山东属暖温带季风气候,年均气温11~14℃,春秋温和,冬寒夏热,年降水量550~950mm,由东南向西北逐渐递减,且多集中于夏季。2014年,可吸入颗粒物(PM10)、细颗粒物(PM2.5)、二氧化氮和二氧化硫平均浓度分别比2013年下降了

11.3%、16.3%、4.2%和16.9%,生态环境得到改善。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 评价指标体系的建立

RSR模型是20世纪80年代末联合国经济合作开发署(Organization for Economic Cooperation and Development,简称OECD)提出的对生态安全进行定量测度的一种概念模型。它从人类与环境系统的相互作用与影响出发,对环境指标进行组织分类,具有较强的系统性<sup>[2]</sup>。因此,本文借鉴PSR模型框架(图1):人口增长、经济社会发展对土地生态安全带来巨大的压力(P);人类不断地开发土地资源,通过社会经济活动向土地生态系统排放污染,改变了土地生态系统结构与功能状态(S);压力之下,土地生态系统在原有状态基础上做出反应,同时反馈于社会经济的发展过程,人类对土地生态系统的反馈进一步做出响应(R),采取政策调整、环境保护等措施,来改善土地生态系统状态<sup>[14]</sup>。基于此框架,并参考相关研究成果<sup>[15]</sup>,根据指标选择的科学性、动态性、全面性、针对性、可操作性等原则,结合山东省土地生态实际情况及数据的可获取性,从土地生态安全压力、状态和响应3方面选取了20个评价指标,构建了山东省土地生态安全评价指标体系(表1)。

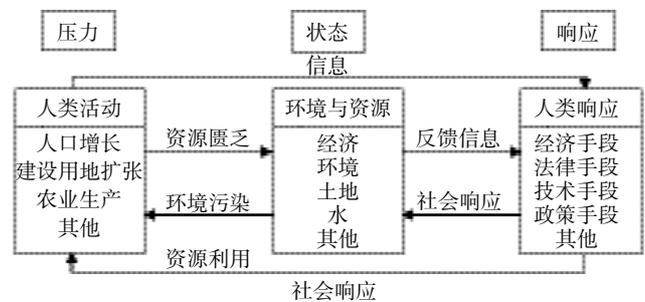


图1 土地生态安全评价的PSR模型框架

Figure 1 PSR framework for evaluation on land ecological security

#### 1.2.2 改进的TOPSIS法

改进的TOPSIS法相对于传统的TOPSIS法,根据土地生态安全的复杂性主要改进了各评价对象与正、负理想解的公式<sup>[9]</sup>,其具体计算步骤如下:

(1)指标数据标准化。评价指标通过极值标准化来消除量纲影响,其中,

$$\text{正指标公式: } y_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (1)$$

$$\text{负指标公式: } y_{ij} = (\min x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \quad (2)$$

式中: $x_{ij}$ 为第*j*个指标的实际值, $\min x_j$ 和 $\max x_j$ 分别为第*j*个指标数据中的最小值和最大值。

(2)确定指标权重。计算权重的方法有 AHP、Delphi、变异系数法、主成分分析法、熵权法等,其中 AHP、Delphi 主观性较强,影响了评价结果的客观性<sup>[16-17]</sup>,而熵权法是根据评价对象的指标值构成的判断矩阵来确定指标权重的一种方法,排除了容易受主观因素影响的成分,具有较强的客观性<sup>[18]</sup>,为了使评价结果更加科学合理,本文采用熵权法确定指标权重(表 1),其具体公式为:

$m$  个评价对象及  $n$  个评价指标的熵为:

$$H_i = - \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} / \ln m \quad (3)$$

式中: $f_{ij} = y_{ij} / \sum_{j=1}^m y_{ij}$ , 假设  $f_{ij} = 0$  时,  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ ;

各评价指标的权重:

$$W_i = (1 - H_i) / \left( n - \sum_{i=1}^n H_i \right) \quad (4)$$

(3)构建加权决策矩阵  $Z$ 。

$$Z = |Z_{ij}|_{m \times n} = |W_j \times Y_{ij}|_{m \times n} \quad (5)$$

式中: $Y_{ij}$  为指标标准化后的矩阵。

(4)确定正理想解、负理想解。正理想解为各属性值达到最优的解,负理想解为各属性值达到的最劣解;分别以加权规范化决策矩阵  $Z$  中的最大值和最小值来代表正理想解和负理想解,即:

$$\text{正理想解: } Z^+ = [\max z_{ij}], (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

$$\text{负理想解: } Z^- = [\min z_{ij}], (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

(5)计算各评价对象到正理想解及负理想解的距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z^+)^2} \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z^-)^2} \quad (9)$$

式中: $D^+$ 越小,说明评价对象越接近正理想解,土地生态状况越安全; $D^-$ 越小,说明评价对象越接近负理想解,土地生态状况越不安全<sup>[10]</sup>。

(6)计算贴近度  $C$ 。贴近度  $C$  表示各评价对象与理想解的接近程度。

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (10)$$

式中: $C_i$  介于 0 到 1 之间,能够综合反映出  $D^+$  和  $D^-$  2 个距离指标所反映的评价对象安全状态,  $C_i$  值越大,

表 1 山东省土地生态安全评价指标体系

Table 1 The evaluation index system of land ecological security in Shandong Province

目标层	准则层	指标层	指标解释	指标性质	权重
土地生态安全评价	压力	$X_1$ 人口密度/人·km <sup>-2</sup>	总人口与土地面积的比值,表征人口压力	-	0.046
		$X_2$ 人口自然增长率/%	本年度比上年人口数量的变化,表征人口压力	-	0.047
		$X_3$ 人均耕地面积/hm <sup>2</sup>	耕地面积与人口总数的比值,反映耕地的人均占有水平,表征自然压力	+	0.057
		$X_4$ 城市化水平/%	非农业人口与人口总数的比值,反映城市化对土地生态系统的影响,表征社会经济压力	+	0.045
	状态	$X_5$ 化肥施用强度/kg·hm <sup>-2</sup>	化肥施用总量与区域耕地总面积的比值,表征耕地环境压力	-	0.025
		$X_6$ 农药施用强度/kg·hm <sup>-2</sup>	农药施用总量与区域耕地总面积的比值,表征耕地环境压力	-	0.028
		$X_7$ 单位耕地地膜使用量/kg·hm <sup>-2</sup>	地膜使用总量与区域总面积的比值,表征耕地环境压力	-	0.038
		$X_8$ 人均水资源量/m <sup>3</sup>	水资源总量与人口数的比值,表征水资源状态	+	0.065
		$X_9$ 年降水量/mm	表征区域的雨量充沛概况	+	0.050
	响应	$X_{10}$ 土地产出率/元·km <sup>2</sup>	GDP 与土地面积之比,反映农业生产水平,表征社会经济状态	+	0.066
		$X_{11}$ 城市人均公园绿地面积/m <sup>2</sup>	城市公共绿地面积与城市非农业人口的比值,表征绿地覆盖状况	+	0.047
		$X_{12}$ 耕地旱涝保收率/%	旱涝保收面积与耕地面积之比,表征自然状态	+	0.031
		$X_{13}$ 单位土地面积农业总产值/万元·km <sup>-2</sup>	农业总产值与区域总面积之比,表征社会经济状态	+	0.043
$X_{14}$ 单位播种面积粮食产量/kg·hm <sup>-2</sup>		粮食总产量与粮食播种总面积之比,反映土地利用的产出效益	+	0.073	
$X_{15}$ 第三产业增加值比重/%		第三产业增加值与地区 GDP 之比,表示维护土地生态的经济水平	+	0.033	
$X_{16}$ 经济密度/万元·km <sup>-2</sup>		地区 GDP 总量与区域总面积之比,表示维护土地生态的经济水平	+	0.070	
	$X_{17}$ 工业固体废弃物综合利用率/%	工业固废综合利用量与其产生量(包含往年贮存量)之比,表征人类对土地生态压力的对策响应	+	0.024	
	$X_{18}$ 环保投资占 GDP 比重/%	表示维护土地生态的经济水平	+	0.096	
	$X_{19}$ 农民人均纯收入/元	农民总收入与农业人口总数之比,表示维护土地生态的经济水平	+	0.049	
	$X_{20}$ 农业机械化水平/kW·hm <sup>-2</sup>	农业机械总动力与耕地总面积之比,表示维护土地生态的科学技术水平	+	0.068	

表明评价对象越接近理想解,土地生态状况越安全。

### 1.2.3 土地生态安全标准与等级的划分

区域土地生态安全评价标准和等级的确定是生态安全评价中的关键环节,标准和等级设置是否科学合理,直接影响到评价结果的正确与否<sup>[19]</sup>。目前,土地生态安全评价标准与安全等级的划分尚处于探索阶段,本研究参考相关学者的研究成果<sup>[20]</sup>,结合山东省实际,根据贴近度  $C$  以非等间距的方式将山东省土地生态安全评价标准分为 5 个等级,见表 2。

### 1.2.4 数据来源

本研究的原始数据主要是通过查询《山东统计年鉴 2014》<sup>[21]</sup>、《中国城市统计年鉴 2014》<sup>[22]</sup>及 2013 年山东省土地利用现状调查数据中的年末耕地面积获得,基于 PSR 模型分别从压力、状态、响应 3 个方面收集人口自然增长率、耕地面积、旱涝保收面积、农业机械

总动力等 20 项指标源数据,结合相应的数据运算方法获得土地生态安全评价的指标数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土地生态安全子系统分析

土地生态安全评价结果见表 3。由表 3 可知:

(1)在压力系统方面,山东省青岛市、东营市、烟台市、威海市等城市  $D^+$  较小,趋于正理想解; $D^-$  较大,偏离负理想解,土地生态安全压力较小,贴近度均大于 0.50,尤其东营市及威海市贴近度超过了 0.60。相反,枣庄市、济宁市、菏泽市等城市  $D^+$  偏大, $D^-$  较小,土地生态安全压力大,贴近度在 0.2~0.4 之间,处于较不安全状态。主要原因在于:第一,内陆地区农村计划生育政策影响较晚,人口密度( $X_1$ )、人口自然增长率( $X_2$ )较大(如枣庄、菏泽等地区人口自然增长率分别

表 2 土地生态安全评价标准与安全等级

Table 2 Land ecological security standard and safety level

安全状况	贴近度( $C$ )	土地生态系统特征
不安全	(0~0.2)	土地生态系统退化严重,生态系统结构极不合理,系统功能丧失,抗外界干扰能力极差,生态恢复与重建很困难。
较不安全	(0.2~0.4)	土地生态系统受到较大破坏,生态系统及结构很不合理,系统功能退化,抗外界干扰能力很差。
临界安全	(0.4~0.5)	土地生态系统受到中度破坏,生态系统结构较不合理,但系统尚可维持基本功能,抵抗部分外界干扰。
较安全	(0.5~0.8)	土地生态系统受到轻微破坏,生态系统结构比较合理,系统自身功能和自我恢复能力较强。
安全	(0.8~1.0)	土地生态系统基本未受干扰破坏,生态系统结构合理、稳定,系统自身功能和自我恢复能力强。

表 3 山东省各地市土地生态安全评价结果

Table 3 The evaluation results of land ecological security in Shandong Province

地市	压力系统			状态系统			响应系统			土地生态安全系统			安全等级
	$D_F^+$	$D_F^-$	$C_P$	$D_S^+$	$D_S^-$	$C_S$	$D_R^+$	$D_R^-$	$C_R$	$D^+$	$D^-$	$C$	
济南市	0.07	0.07	0.50	0.08	0.08	0.49	0.11	0.08	0.42	0.15	0.13	0.46	临界安全
青岛市	0.06	0.07	0.54	0.08	0.10	0.56	0.05	0.13	0.72	0.13	0.17	0.58	较安全
淄博市	0.07	0.06	0.47	0.08	0.08	0.50	0.10	0.08	0.43	0.15	0.13	0.46	临界安全
枣庄市	0.09	0.04	0.30	0.08	0.07	0.47	0.12	0.04	0.26	0.17	0.09	0.35	较不安全
东营市	0.05	0.09	0.64	0.07	0.09	0.56	0.07	0.08	0.53	0.12	0.16	0.57	较安全
烟台市	0.06	0.06	0.51	0.08	0.09	0.53	0.11	0.07	0.39	0.13	0.14	0.52	较安全
潍坊市	0.06	0.06	0.51	0.08	0.10	0.56	0.11	0.06	0.34	0.14	0.13	0.47	临界安全
济宁市	0.08	0.04	0.37	0.10	0.07	0.39	0.11	0.04	0.29	0.17	0.09	0.35	较不安全
泰安市	0.07	0.06	0.46	0.09	0.07	0.42	0.13	0.04	0.26	0.17	0.13	0.43	临界安全
威海市	0.05	0.08	0.61	0.09	0.08	0.47	0.07	0.10	0.58	0.13	0.15	0.54	较安全
日照市	0.06	0.06	0.49	0.09	0.08	0.46	0.09	0.07	0.43	0.15	0.12	0.46	临界安全
莱芜市	0.07	0.06	0.45	0.10	0.07	0.39	0.12	0.04	0.26	0.15	0.10	0.40	临界安全
临沂市	0.07	0.05	0.40	0.11	0.06	0.37	0.13	0.06	0.46	0.13	0.09	0.41	临界安全
德州市	0.05	0.06	0.53	0.12	0.04	0.26	0.1	0.06	0.38	0.16	0.09	0.37	较不安全
聊城市	0.07	0.05	0.42	0.1	0.06	0.39	0.12	0.04	0.23	0.17	0.09	0.34	较不安全
滨州市	0.05	0.04	0.44	0.09	0.07	0.46	0.13	0.03	0.19	0.16	0.12	0.42	临界安全
菏泽市	0.08	0.05	0.38	0.14	0.01	0.09	0.12	0.04	0.24	0.20	0.07	0.24	较不安全



1 898 kg·hm<sup>-2</sup>[21],导致土地承载压力过重。另一方面,山东省东部沿海地区具有极其有利的区位优势以及丰富的土地资源、自然资源等,其中烟台市人均水资源量达到 611.05 m<sup>3</sup>[21],这些比较优势促成了黄河三角洲生态经济区及山东半岛蓝色经济区的建立,使该区域的土地生态安全发展上升为国家战略,土地生态的保护得到高度重视,从而使其生态安全等级较高。

运用 PSR-TOPSIS 模型对山东省各地市 2013 年的土地生态安全状况进行评价,得出的评价结果与前人的相关研究结果[23]基本一致,较为准确地反映了山东省土地生态安全实际情况,证明该研究方法可行。

### 3 结论

(1)山东省土地生态安全评价结果包括了“较安全”、“临界安全”、“较不安全”3个等级,空间差异明显,呈现出从东部沿海向西部内陆逐渐递减的规律。

(2)影响山东省土地生态安全空间差异的主要因素为人均耕地面积、人均水资源量、土地产出率、单位播种面积粮食产量、经济密度、环保投资占 GDP 比重、农业机械化水平等。山东省各地市应结合自身实际情况,做到合理开发利用土地,增加耕地面积,并科学施用化肥、农药,鼓励农民回收废弃地膜,提高土壤肥力;采取以沿海地区带动内陆地区发展的手段,鼓励将工业、农业向第三产业转变,以减轻经济产值承载力;加大环保投资力度,严格控制工业排污,减轻土地污染,协调好社会经济发展及土地生态环境保护间的关系,实现整体区域可持续发展。

(3)评价指标体系及评价方法的选取直接影响着土地生态安全评价结果的合理性,针对不同的土地生态系统也需要不同的评价指标及方法,因此,对指标及评价方法的确定仍是值得探究的问题;另外,本文仅在空间尺度上对山东省各地市的土地生态安全状况进行了评价,未涉及时间尺度的研究,因此,今后我们将对该地区的时空变化情况开展进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 刘勇,刘友兆,徐萍.区域土地资源生态安全评价——以浙江嘉兴市为例[J].资源科学,2004,26(3):69-74.  
LIU Yong, LIU You-zhao, XU Ping. Evaluation on ecological security of regional land resources: A case study of Jiaxing City, Zhejiang Province [J]. *Resources Science*, 2004, 26(3): 69-74. (in Chinese)

[2] 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 Hua-wei, LIU You-zhao. Evaluation on cultivat-

ed land ecological security based on the PSR model and matter element analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16):5090-5100. (in Chinese)

[3] 张丁轩,付梅臣,陶金,等.基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J].农业工程学报,2013,29(12):246-256,294.  
ZHANG Ding-xuan, FU Mei-chen, TAO Jin, et al. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12): 246-256, 294. (in Chinese)

[4] 孙奇奇,宋戈,齐美玲,等.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 Qi-qi, SONG Ge, QI Mei-ling, et al. 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)

[5] Tran L T, Knight C G, O'Neill R V, et al. Fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the mid-Atlantic region[J]. *Environmental Management*, 2002, 29(6):845-859.

[6] 余敦,陈文波.基于物元模型的鄱阳湖生态经济区土地生态安全评价[J].应用生态学报,2011,22(10):2681-2685.  
YU Dun, CHEN Wen-bo. Land ecological safety in Poyang Lake eco-economic zone: An evaluation based on matter-element model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2681-2685. (in Chinese)

[7] 李明月,赖笑娟.基于 BP 神经网络方法的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 Ming-yue, LAI Xiao-juan. 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)

[8] 李春燕,南灵.陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J].中国土地科学,2015,29(4):72-81.  
LI Chun-yan, NAN Ling. Dynamic evaluation and diagnosis of obstacle factors on land eco-security in Shanxi Province[J]. *China Land Sciences*, 2015, 29(4):72-81. (in Chinese)

[9] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断——以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.  
LU Chun-yang, WEN Feng, YANG Qing-yuan, et al. An evaluation of urban land use performance based on the improved TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators: A case study of Chongqing[J]. *Resources Science*, 2011, 33(3):535-541. (in Chinese)

[10] 徐美,朱翔,李静芝.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的湖南省土地生态安全评价[J].冰川冻土,2012,34(5):1265-1272.  
XU Mei, ZHU Xiang, LI Jing-zhi. Evaluation of land ecological security in Hunan Province based on DPSIR-TOPSIS model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5):1265-1272. (in Chinese)

[11] Önit S, Soner S. Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment[J]. *Waste Management*, 2008, 28(9):1552-1559.

[12] Bao Q, Ruan D, Shen Y, et al. Improved hierarchical fuzzy TOPSIS for road safety performance evaluation[J]. *Knowledge-Based Systems*,

- 2012, 32(8):84-90.
- [13] Sun C C. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(12):7745-7754.
- [14] 高 珊, 黄贤金. 基于 PSR 框架的 1953—2008 年中国生态建设成效评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2):341-350.  
GAO Shan, HUANG Xian-jin. Performance evaluation of eco-construction based on PSR model in China from 1953 to 2008[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2):341-350. (in Chinese)
- [15] 徐 美, 朱 翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警[J]. 地理学报, 2012, 67(10):1411-1422.  
XU Mei, ZHU Xiang, LIU Chuan-la. Early-warning of land ecological security in Hunan Province based on RBF[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10):1411-1422. (in Chinese)
- [16] 张 倩, 蒋 栋, 谷庆宝, 等. 基于 AHP 和 TOPSIS 的污染场地修复技术筛选方法研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(6):1088-1094.  
ZHANG Qian, JIANG Dong, GU Qing-bao, et al. Selection of remediation techniques for contaminated sites using AHP and TOPSIS[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6):1088-1094. (in Chinese)
- [17] 姜鹏远, 赵夫来, 刘松林, 等. 基于 AHP 和群体决策的土地定级因素权重的确定[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 26(1):72-75.  
JIANG Peng-yuan, ZHAO Fu-lai, LIU Song-lin, et al. A method of measuring the factors weight of land gradation based on AHP and group decision [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2014, 26(1):72-75. (in Chinese)
- [18] 贾艳红, 赵 军, 南忠仁, 等. 基于熵权法的草原生态安全评价——以甘肃牧区为例[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8):1003-1008.  
JIA Yan-hong, ZHAO Jun, NAN Zhong-ren, et al. Ecological safety assessment of grassland based on entropy-right method: A case study of Gansu pastoral area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8):1003-1008. (in Chinese)
- [19] 陈西蕊, 张蓉珍. 基于 P-S-R 模型的陕西省土地资源生态安全动态评价[J]. 南方农业学报, 2011, 42(2):224-228.  
CHEN Xi-rui, ZHANG Rong-zhen. Dynamic evaluation of ecological security of land resources in Shaanxi Province based on pressure-state-response model[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2011, 42(2):224-228. (in Chinese)
- [20] 左 伟, 王 桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1):67-71.  
ZUO Wei, WANG Qiao, WANG Wen-jie, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2002, 18(1):67-71. (in Chinese)
- [21] 山东统计局. 山东统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.  
Shandong Bureau of Statistics. Shandong statistical yearbook 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014. (in Chinese)
- [22] 国家统计局. 中国城市统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China city statistical yearbook 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014. (in Chinese)
- [23] 李进涛, 李贻学, 巩玉玲, 等. 基于 IDRISI 的山东省土地生态安全评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11):190-193.  
LI Jin-tao, LI Yi-xue, GONG Yu-ling, et al. Study on land ecological security evaluation based on IDRISI in Shandong[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(11):190-193. (in Chinese)