

基于 P—S—R 模型的城市生态安全模糊物元评价 ——以吉林省四平市为例

张松男¹, 雷国平¹, 李秀霞², 姜超¹, 王诗雨¹, 金一峰¹

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000)

摘要: 利用 P—S—R 模型构建指标体系, 采用熵权法求取权重, 基于吉林省四平市模糊物元模分析方法, 利用 1991 年、2001 年和 2007 年的 3 期 TM 遥感影像, 结合野外调查数据及社会经济数据等, 分析处理提取生态安全评价指标, 对四平市的生态安全进行评价。结果表明: (1) 四平市 1991—2007 年城市生态安全状况是不稳定的, 经历了由“不安全”向“临界安全”转化的过程; (2) 影响四平市城市生态安全的因素并不协调统一, 其中, 城市化率、人均 GDP、万元 GDP 能耗、恩格尔系数等指标为安全状态, 而人均道路面积、建设区紧凑度、每万人拥有公共交通工具、建设区绿化覆盖率等指标为不安全状态; (3) 四平市在今后的发展中, 要继续提高环境保护意识, 转变经济增长方式, 加大科技投入, 优化产业结构, 增加人均公共绿地面积和公共交通工具, 提高土地利用效率, 从而实现经济效益、环境效益和社会效益的协调统一。

关键词: 模糊物元分析方法; 熵权法; P—S—R 模型; 城市生态安全评价

中图分类号: F323.8

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)02-0170-06

Assessment of Urban Eco-security Based on P—S—R Model and Fuzzy Matter Element Analysis —A Case Study of Siping City, Jilin Province

ZHANG Song-nan¹, LEI Guo-ping¹, LI Xiu-xia², JIANG Chao¹, WANG Shi-yu¹, JIN Yi-feng¹

(1. College of Resources and Environment of Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. College of Tourism and Geography Science, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China)

Abstract: According to P—S—R model and entropy weight method, an index system was constructed and the weight was obtained. By using the RS images in 1991, 2001 and 2007, the social, economic and field survey data and fuzzy matter element analysis method, the urban eco-security of Siping city was evaluated. The result showed that: (1) the eco-security situation was unstable, and had a transformation from insecurity to critical security from 1991 to 2007; (2) the urbanization rate, per capita GDP, energy consumption amount per 10⁴ Yuan GDP, etc. had security status to urban eco-security, while these indices, such as per capita road area, the compactness degree of construction area, public transit vehicle amount per 10⁴ people and the green coverage rate of construction area had the state of insecurity; (3) in order to continue to improve the environmental protection consciousness, change the economic growth way, increase investment in science and technology, optimize industrial structure, increase the per capita public green land area and public transportation vehicles, raise land utilization rate, so as to realize the collaborative unity of economic benefits, environmental benefits and social benefits is the main development direction.

Key words: fuzzy matter element analysis; entropy weight method; P—S—R model; urban eco-security assessment

伴随着经济的发展和城市化进程的加快, 环境污染与生态破坏日益严重, 不断威胁着人类的生存和发

展, 生态安全逐渐成为相关学科研究的前沿和热点^[1-2]。城市生态安全是一个国家或区域生态安全的

基础和核心^[3],是指维护城市发展所需的生态环境能满足城市当前和未来发展需要的一种城市发展状况^[4]。随着对城市生态安全研究的进一步深入,其评价方法也得到了长足的发展,常用的评价方法可归纳为生态模型法、数学模型法、数字地面模型法和景观生态模型法 4 种^[5]。具体应用的方法有:熵权模糊综合评价法^[6],生态足迹分析法^[7],物元评判模型方法^[8],主成分分析法、模糊综合评价法、物元可拓综合评价法和灰色关联度法四种方法的应用比较^[9]。

在城市生态安全的定量评价中,由于城市生态安全的复杂性与认识上的局限性,导致城市生态安全评价基础的指标体系与研究方法仍未统一^[5-10],亟待深入研究和探讨。P—S—R 模型从社会经济与环境有机统一观点出发,能精确地反映生态系统自然、经济和社会因素之间的关系,为生态安全指标的构建提供了一种逻辑基础^[11]。

鉴于城市生态安全评价指标的多维性、复杂性,及单项指标的不相容性,选择模糊物元分析方法采解决这一复杂问题,可以克服多因素识别评价中的主观

片面性,适合于多因子评价。因此,本文以“压力—状态—响应”(P—S—R)概念模型为基础,构建城市生态安全评价指标体系,利用熵权法求取权重,采用模糊物元模分析方法对四平市生态安全进行评价,探讨其存在的问题,提出相应的解决对策,以期对相关决策部门提供参考依据。

1 P—S—R 概念模型

1.1 指标筛选

P—S—R 模型,即压力 (pressure)—状态 (state)—响应 (response) 模型,是在 20 世纪 80 年代末由经济合作和开发组织 (OECD) 与联合国环境规划署 (UNEP) 共同提出的,在 P—S—R 框架中,某一类环境问题可以由 3 个不同但又相互联系的指标类型来表达:压力指标表示人类活动对环境造成的负荷;状态指标表征环境质量、自然资源与生态系统的支持能力;响应指标表征人类面临问题所采取的对策。利用 P—S—R 模型对环境指标进行组织与分类,具有较强的系统性^[12-13]。

表 1 城市生态安全评价指标体系及其权重

目标层	项目层	因素层	指标层	权重
城市生态安全综合指数 (A)	生态系统压力 (B ₁)	人口压力 (C ₁)	人口密度 (人/km ²)	0.0242
			人口自然增长率 (%)	0.0236
			城市化率 (%)	0.0244
		资源压力 (C ₂)	人均道路面积 (m ² /人)	0.0299
			人均居住面积 (m ² /人)	0.0246
			万元 GDP 能耗 (t)	0.0224
	环境压力 (C ₃)	万元 GDP 二氧化硫排放量 (kg)	0.0251	
		万元 GDP 工业废水排放量 (t)	0.0240	
		万元 GDP 工业固体废物产生量 (t)	0.0353	
	生态系统状态 (B ₂)	经济状态 (C ₄)	人均 GDP (万元)	0.0229
			全社会固定资产投资 (亿元)	0.0652
			恩格尔系数 (%)	0.0593
		资源状态 (C ₅)	人均耕地面积 (m ² /人)	0.0284
			人均生活用水量 (t/人)	0.0228
			建成区紧凑度	0.0308
	环境状态 (C ₆)	工业废水排放达标率 (%)	0.0471	
		工业固体废物综合利用率 (%)	0.0523	
		人均公共绿地面积 (m ² /人)	0.0237	
生态系统响应 (B ₃)	资源状态 (C ₇)	科技投入占 GDP 比重 (%)	0.0375	
		第三产业对 GDP 的贡献率 (%)	0.0228	
		每万人拥有公共交通工具 (台)	0.0654	
	环境响应 (C ₈)	污水处理率 (%)	0.0588	
		建设区绿化覆盖率 (%)	0.0779	
		生活垃圾简易处理能力 (t/d)	0.0785	
社会响应 (C ₉)	计划生育率 (%)	0.0276		
	万人拥有高等、中等专业在校学生数 (人/万人)	0.0226		
		万人拥有医院床位数 (张/万人)	0.0228	

本研究根据 P—S—R 模型,借鉴相关研究^[3-4,6-13],确定城市生态安全评价指标,采用综合指数法对城市生态安全状况进行评判。本指标包含 4 个层次:第一个层次是目标层,即城市生态安全综合评价指数;第二层为项目层,包括资源环境压力、资源环境状态、人文环境响应;第三层为因素层,主要为决定评价准则的因素;第四层为指标层,是评价因素的表达,具体内容见表 1。

1.2 权重的确定

目前确定指标权重的方法主要有层次分析法、主成分分析法、特尔菲法、熵权法^[14-18]等,本文采用熵权法计算各指标的权重,其原理为:如果评价指标的信息熵越小,该评价指标提供的信息量越大,在综合评价中所起作用理当越大,权重就应该越高;反之,权重越小。根据熵的定义, m 个评价对象 n 个评价指标,确定评价指标的熵值为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}$$

式中: $f_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^m b_{ij}$, $i=1,2,3,\dots,n; j=1,2,3,\dots,n; 0 \leq H_i \leq 1$ 。

评价指标的熵权和权重计算公式如下:

$$W = (\omega_i)_{1 \times n}, \quad \omega_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}$$

式中: $i=1,2,3,\dots,n$,且满足 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

首先对数据进行标准化处理,然后运用熵权法计算权重,具体结果如表 1 所示。

2 城市生态安全评价模糊物元分析方法

2.1 构建模糊物元

物元分析中所描述的对象 Y 及其特征向量 C 和特征量值 V 共同构成城市生态安全物元 $R = (Y, C, V)$ 。如果特征量值 V 具有模糊性,则称之为模糊物元。若城市生态安全 Y 有 n 个特征向量 C_1, C_2, \dots, C_n ,与相应的特征量值 V_1, V_2, \dots, V_n ,则称 R 为 n 维模糊物元;若 m 个对象的 n 维物元在一起便构成 m 个对象的 n 维复合模糊物元,即:

$$R_{mm} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{21} & \cdots & R_{m1} \\ R_{12} & R_{22} & \cdots & R_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{1n} & R_{2n} & \cdots & R_{mn} \end{bmatrix}$$

2.2 确定经典域及节域物元矩阵

城市生态安全的经典域物元矩阵可表示为 $R_{oj} = (Y_{oj}, C_i, V_{oji})$,式中, R_{oj} 为经典域物元, Y_{oj} 为所划分城市生态安全的第 j 个评价等级, C_i 代表特征向量(i

$= 1, 2, 3, \dots, n$), V_{oji} 为第 i 特征向量对应等级 j 的量值范围(a_{oji}, b_{oji}),即经典域。城市生态安全的经典域复合物元矩阵可表示为:

$$R_{oj} = \begin{bmatrix} Y_{oj} & C_1 & (a_{oj1}, b_{oj1}) \\ & C_2 & (a_{oj2}, b_{oj2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{ojn}, b_{ojn}) \end{bmatrix}$$

城市生态安全的节域物元矩阵表示为 $R_p = (Y_p, C_i, V_{pj})$,式中, R_p 为节域物元, C_i 为特征向量($i=1, 2, 3, \dots, n$), p 为城市生态水平全体等级, V_{pj} 为节域物元关于特征 C_i 的量值范围(a_{pi}, b_{pi})。城市生态安全的节域物元矩阵表示为:

$$R_p = \begin{bmatrix} Y_p & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix}$$

2.3 关联函数及关联度

城市生态安全的关联函数表示为:

$$K(X_{oi}) = \begin{cases} \frac{-\rho(X_{oi}, X_{oji})}{|X_{oji}|} & X_{oi} \in X_{oji} \\ \frac{\rho(X_{oi}, X_{oji})}{\rho(X_{oi}, X_{pi}) - \rho(X_{oi}, X_{oji})} & X_{oi} \notin X_{oji} \end{cases}$$

其中:

$$\rho(X_{oi}, X_{oji}) = |X_{oi} - \frac{1}{2}(a_{oji} + b_{oji})| - \frac{1}{2}(b_{oji} - a_{oji})$$

$$\rho(X_{oi}, X_{pi}) = |X_{oi} - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi})| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi})$$

式中: $\rho(X_{oi}, X_{oji})$ 表示点 X_{oi} 与有限区间 $X_{oji} = \{a_{oji}, b_{oji}\}$ 的距离; $\rho(X_{oi}, X_{pi})$ 表示点 X_{oi} 与有限区间 $X_{pi} = \{a_{pi}, b_{pi}\}$ 的距离; $|X_{oji}| = |b_{oji} - a_{oji}|$, X_{oi}, X_{oji}, X_{pi} 分别表示待评城市生态安全物元的量值、经典域物元的量值范围和节域物元的量值范围。

2.4 计算综合关联度并确定评价等级

城市生态安全的综合关联度表示为:

$$K_j(Y_x) = \sum_{i=1}^n a_i k_j(x_i)$$

式中: $K_j(Y_x)$ ——待评对象 Y_x 关于等级 j 的综合关联度; $k_j(x_i)$ ——待评价对象第 i 指标关于等级 j 的单指标关联度; a_i ——各评价指标的权重。

若 $K_{ij} = \max\{k_j(x_i)\}$,则待评价对象第 i 指标属于城市生态安全状况 j 级;若 $K_{jx} = \max\{K_j(Y_x)\}$,则待评对象 Y_x 属于生态安全标准等级 j 级。综合关联度 K_{jx} 的大小表示了评价对象属于城市生态安全状况某一标准级别的程度,当 $K_{jx} \geq 1$ 时,表示评价对象超过标准级别上限,数值愈大,潜力愈大;当 $0 \leq K_{jx} < 1$ 时,表示评价对象符合标准级别的程度,数值愈

大,愈稳定;当 $-1 \leq K_{jx} < 0$ 时,表示评价对象不符合标准对象要求,但具备转化为标准级别的条件,数值愈大,愈容易转化;当 $K_{jx} < -1$ 时,表示评价对象既不符合标准级别要求,也不具备转化为标准级别的条件。

3 实例分析

3.1 研究区概况

四平市位于松辽平原中部,吉林省西南部,辽、吉、蒙三省(区)交界处,位于 $125^{\circ}05' - 123^{\circ}25' E$, $42^{\circ}56' - 44^{\circ}05' N$ 。地势呈东南—西北向倾斜,土地资源较为丰富,地貌类型多样,其中山地占6%,丘陵占15%,平原占79%。属于大陆性季风气候,四季分明,土质肥沃,是我国重点商品粮基地之一,素有“松辽平原黄金玉米带”之称。辖铁西、铁东两个区,伊通县、梨树县以及辽河农垦管理区,代管公主岭、双辽两个县级市。全市总面积 $14\,323\text{ km}^2$,其中市区面积 741 km^2 ,总人口340万人,市区人口62.4万人,本文选择市区为研究区。

3.2 数据来源与指标提取

以四平市1991年、2001年和2007年的3期TM 742遥感影像为基本信息源,并以四平市1:5万地形图为基准,结合四平市土地利用实际,对各期影像进行几何精校正。采用Erdas 8.7平台进行遥感图像处理,并在ArcGIS 10.0中进行影像解译,提取城市边界形态的紧凑度等指标。通过对四平市河网图、交通网图、野外调查数据及社会经济数据等进行分析处理,提取其他生态安全评价指标。对原始数据中量纲不统一的指标,采用极差标准化方法进行无量纲化处理。

3.3 城市生态安全综合评价

3.3.1 确定经典域、节域和待评物元

(1) 经典域、节域物元。本文依据城市生态安全评价的可拓性,将其划分为4个等级(表2),确定为城市生态安全评价经典域,即 $Y_{o1} \rightarrow Y_{o4}$,定性描述为:安全 \rightarrow 较安全 \rightarrow 临界安全 \rightarrow 不安全。经典域的确定主要参照国外城市现状值、国家环保总局《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》标准值、国际通行标。

表2 城市生态安全评价经典域、节域物元取值范围

指标层	安全	较安全	临界安全	不安全
人口密度(人/ km^2)	500~1500	1500~2500	2500~3500	3500~5000
人口自然增长率(‰)	0.7~2.35	2.35~4	4~6	6~10
城市化率(%)	90~70	70~50	50~30	30~10
人均道路面积(m^2 /人)	30~25	25~20	20~15	15~2.5
人均居住面积(m^2 /人)	30~25	25~20	20~15	15~5
万元GDP能耗(t)	0.1~0.5	0.5~1	1~2	2~5
万元GDP二氧化硫排放量(kg)	10~20	20~30	30~40	40~60
万元GDP工业废水排放量(t)	5~20	20~30	30~40	40~60
万元GDP工业固体废物产生量(t)	0.1~0.7	0.7~1.5	1.5~3.3	3.3~5
人均GDP(万元)	10~6.5	6.5~3.5	3.5~1	1~0.1
全社会固定资产投资(亿元)	800~600	600~400	400~200	200~0
恩格尔系数(%)	20~30	30~40	40~50	50~100
人均耕地面积(m^2 /人)	666.7~533	533~333	333~200	200~75
人均生活用水量(t/人)	5~15	15~25	25~40	40~60
建成区紧凑度	1~0.7	0.7~0.5	0.5~0.3	0.3~0.1
工业废水排放达标率(%)	100~80	80~60	60~40	40~15
工业固体废物综合利用率(%)	100~80	80~60	60~40	40~15
人均公共绿地面积(m^2 /人)	20~15	15~10	10~5	5~0
科技投入占GDP比重(%)	6~4	4~2	2~1	1~0
第三产业对GDP的贡献率(%)	80~60	60~40	40~20	20~5
每万人拥有公共交通工具(台)	30~20	20~10	10~5	5~1
污水处理率(%)	100~80	80~60	60~40	40~10
建设区绿化覆盖率(%)	40~35	35~30	30~25	25~5
生活垃圾简易处理能力(t/d)	800~600	600~400	400~200	200~50
计划生育率(%)	100~95	95~91	91~85	85~80
万人拥有高等、中等专业在校学生数(人/万人)	1000~800	800~600	600~400	400~200
万人拥有医院床位数(张/万人)	100~70	70~50	50~30	30~10

(2) 待评物元。根据 1991 年、2001 年和 2007 年各项指标的具体量值,确定四平市生态安全待评物元矩阵 R_x 。

3.3.2 综合关联度计算 将待评物元矩阵 R_x 的数据输入模糊物元模型,即可计算城市生态安全评价指标关联度和综合关联度,结果如表 3 所示。

表 3 四平市 1991 年、2001 年和 2007 年城市生态安全评价指标综合关联度

年份	综合关联度				状态
	Y_{01}	Y_{02}	Y_{03}	Y_{04}	
1991	-0.649	-0.590	-0.376	0.003	不安全
2001	-0.529	-0.456	-0.320	-0.082	不安全
2007	-0.375	-0.214	-0.195	-0.297	临界安全

由表 3 可知,1991 年、2001 年四平市城市生态安全级别为“不安全”,2007 年为“临界安全”。虽然 1991 年和 2001 年四平市城市生态安全等级均为“不安全”,但 1991 年对应的 Y_{04} 在 $[0, 1]$ 区间内,而 2001 年对应的 Y_{04} 在 $[-1, 0]$ 区间内,即 1991 年四平市城市生态安全处于稳定的“不安全”状态,而 2001 年则处于不稳定的“不安全”状态;2007 年四平市城市生态安全状态为“临界安全”状态,由于 $0 > K_1(Y_{2007})$,说明 2007 年四平市不完全符合“临界安全”的标准,但具备转化为“临界安全”的条件,为不稳定状态的“临界安全”。总体而言,四平市城市生态安全状况经历了由“不安全”向“临界安全”转化的过程。其原因因为:

1978—1991 年,四平市伴随着改革开放的快速推进,处于经济快速发展时期,农村人口大量向城市集聚,各种基础设施逐渐完善,城市规模不断扩张,1979—1991 年 12 a 间城区共扩展了 28.510 km²,年均扩展 2.376 km²;但其工业仍然以重工业为主,尤其以四平联合收割机制造厂、四平汽车改修厂、四平线路器材厂、四平客车装配厂等为代表的行走机械工业和以四平联合化厂、四平油漆厂和四平油脂化工厂等化学工业成为四平市的的主导产业,具有一定的规模,发挥了举足轻重的作用,但这些产业基本上都具有资源消耗高、运输量大和污染严重等特征,消耗和浪费了大量资源,造成水土流失、生态环境恶化等,城市大气、水体、烟尘、粉尘污染严重,而这方面的治理投入却严重不足。因而,1991 年四平市由于城市生态压力加大,人文环境响应机制不完善,导致其处于稳定的“不安全”状态。

1991—2001 年,伴随着市场需求的变化及股份制改革,四平市产业经济开始由重工业向轻工业转型,科技投入加大,资源需求减少,城市扩展的需求有

所降低,1991—2001 年 10 a 间建成区共增加了 6.042 km²,年均扩展 0.604 2 km²,但由于体制和机制上的双重障碍,导致四平市产业结构调整缓慢,企业包袱沉重,工业经济效益下滑,虽然对城市环境资源的压力有所减少,但由于环境治理经费不足,使其在 2001 年仍然处于“不安全”状态,但具备转化为“不安全”的条件,“不安全”状态不稳定。

2001—2007 年,四平市以振兴东北老工业基地为契机,经济发展迅速,城市扩展速度也相应加快,2001—2007 年 6 a 间建成区共增加了 12.447 km²,年均扩展 2.074 5 km²。这一期间,四平市加大了招商引资的力度,增加了技术改造的投入,优化了产业结构,逐渐形成了包括农副产品加工、医药、化工、建材、汽车零部件、行走机械、换热器生产和物流加工业在内的工业体系,且分期分批对旧城进行了改造,在居民居住条件、道路建设、城市公共设施、城市环境等方面都有较好的成效,导致 2007 年四平城市生态安全状态为“临界安全”,但“临界安全”状态不稳定。

从单个指标提供的信息来看,城市化率、人均 GDP、万元 GDP 能耗、恩格尔系数等指标出现不同等级的上升趋势,已处于安全状态;但人均道路面积、建设区紧凑度、每万人拥有公共交通工具、建设区绿化覆盖率等指标还处于不安全状态;而人均 GDP、科技投入占 GDP 比重、第三产业对 GDP 的贡献率、生活垃圾简易处理能力等指标处于临界安全状态。说明四平市今后还需继续提高环境保护意识,转变经济增长方式,加大科技投入,优化产业结构,增加城市绿化覆盖率和公共交通工具,提高土地利用效率。

4 结论与讨论

本文依据 P—S—R 模型,从压力、状态、响应三方面构建了城市生态安全评价指标,运用熵权法求取权重,利用模糊物元模型,对 1991 年、2001 年和 2007 年四平市城市生态安全进行了评价。结果表明:

(1) 四平市 1991—2007 年城市生态安全状况是不稳定的,经历了由“不安全”向“临界安全”转化的过程。其中,1991 年由于城市生态压力加大,而人文环境响应机制不完善,使其处于稳定的“不安全”状态;尽管在 2001 年对城市环境资源压力相对减少,但由于环境治理经费不足,使其仍然处于“不安全”状态;2007 年四平市通过优化产业结构,减少了对资源环境的压力,增加了人文环境响应机制,使其处于“临界安全”状态。

(2) 影响四平市城市生态安全的因素并不协调统一,其中,城市化率、人均 GDP、万元 GDP 能耗、恩

格尔系数等指标为安全状态,而人均道路面积、建设区紧凑度、每万人拥有公共交通工具、建设区绿化覆盖率等指标为不安全状态。

(3) 四平市在今后的发展中,要继续提高环境保护意识,转变经济增长方式,加大科技投入,优化产业结构,增加人均公共绿地面积和公共交通工具,提高土地利用效率,从而实现经济效益、环境效益和社会效益协调统一。

P—S—R模型指标体系具有较强的系统性和可操作性,而模糊物元分析方法不仅能够得出评价指标的综合关联度,还能得出每个评价指标的关联度,并揭示每个评价指标的水平状态和变化趋势等信息。将P—S—R模型和模糊物元分析方法有机结合,能科学系统地反映出该区域城市生态安全水平,评价结果与实际相符,较为客观合理,评价方法具有一定的推广价值。

参考文献:

- [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.
- [2] Kullenberg G. Regional co-development and security: a comprehensive approach[J]. *Ocean and Coastal Management*,2002,45(11/12):761-776.
- [3] 高长波,陈新庚,韦朝海,等.珠江三角洲城市生态安全水平对比研究[J].环境科学与技术,2006,29(5):65-66,74.
- [4] 施晓清,欧阳志云.城市生态安全及其动态评价方法[J].生态学报,2005,25(12):3237-3243.
- [5] 刘红,王慧,刘康.我国生态安全评价方法研究述评[J].环境保护,2005,33(8):34-37.
- [6] 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.
- [7] 徐玉霞.基于生态足迹的城市生态安全评价:以宝鸡市为例[J].中国农学通报,2010,26(21):286-290.
- [8] 谢花林,张新时.城市生态安全水平的物元评价模型研究[J].地理与地理信息科学,2004,20(3):87-90.
- [9] 吕洪德.城市生态安全指标体系研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2005.
- [10] Alcamo J, Endejan M B, Kaspar F, et al. The glass molel: a strategy for quantifying global environmental security[J]. *Environ. Science & Policy*,2001,4(1):1-12.
- [11] 杨京平.生态安全的系统分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [12] 全川.环境指标研究进展与分析[J].环境科学研究,2000,13(4):53-55.
- [13] Allen H. Environmental Indicators: A Systematic Approach To Measuring And Reporting On Environmental Policy Performance In The Context Of Sustainable Development[R]. Washington D C, USA: World Resource Institute, 1995.
- [14] 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,2007,2(3):1-6.
- [15] 杜忠潮,韩申山.基于主成分分析的土地生态安全评价实证研究:以陕西省10个省辖市为例[J].水土保持通报,2009,29(6):198-207.
- [16] 李斌.层次分析法和特尔菲法的赋权精度与定权[J].系统工程理论与实践,1998(12):74-79.
- [17] 罗军刚,解建仓,阮本清.基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J].水利学报,2008,39(9):1092-1097.
- [18] 倪九派,李萍,魏朝富,等.基于AHP和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J].农业工程学报,2009,25(5):202-209.