

基于“压力-状态-响应”模型的黑龙省生态安全评价研究

邱微^{1,2}, 赵庆良^{1,2*}, 李崧², 张建祺^{2,3}

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, Baltimore County 21042, USA)

摘要:采用“压力-状态-响应”模型,选取 27 项指标,构建黑龙省生态安全评价指标体系.利用层次分析法确定各指标的权重,运用生态安全度计算模型,对 2000~2005 年黑龙省生态安全状况进行分级评价;应用灰色动态模型,预测黑龙省 2006~2010 年生态安全的发展趋势.计算结果表明,2000 年黑龙省处于生态安全 V 级;2005 年黑龙省处于生态安全 III 级,生态安全有所提高.预测得到,2006 年黑龙省为生态安全 III 级,2007~2009 年均为生态安全 II 级,2010 年达到生态安全 I 级,即理想安全.由此可见,黑龙省生态安全呈现上升的发展趋势;自 2000 年黑龙省开展生态省建设以来,生态环境质量得到了明显改善.通过推动生态省建设等有效手段,可以最终实现黑龙省生态安全持续和健康发展.

关键词:压力-状态-响应模型;生态安全度;层次分析法;指标权重;预测;黑龙省

中图分类号:X826 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)04-1148-05

Ecological Security Evaluation of Heilongjiang Province with Pressure-State-Response Model

QIU Wei^{1,2}, ZHAO Qing-liang^{1,2}, LI Song², CHANG Chein-chi^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment (SKLUWE), Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, Baltimore County 21042, USA)

Abstract: The ecological security index (ESI) system including 27 indices for Heilongjiang Province was built up with the pressure-state-response (P-S-R) model. The weights of the indices were determined by analytical hierarchy process (AHP) and the ecological security status classification was evaluated by the ESI model for the years of 2000-2005. Then the development trend of ecological security from 2006 to 2010 was forecasted with the grey dynamic model. The results showed that the ecological security ranked the V grade in 2000 and the III grade in 2005, indicating the increase of ecological security. The forecasting results show that the ecological security will be the III grade for 2006, the II grade for 2007-2009, and the I grade for 2010 (ideal security). Thus it can be seen that the ecological security is ascending year by year, and the ecological environment quality is obviously improved with the implementation of eco-province construction since 2000. Through the effective facilitation of eco-province construction etc., the sustainable and healthy development of ecological security will be finally realized in Heilongjiang Province.

Key words: pressure-state-response (P-S-R) model; ecological security index (ESI); analytical hierarchy process (AHP); index weight; forecast; Heilongjiang Province

随着近代科学技术的飞速发展,人类征服自然和改造自然的能力空前增强,但也使全球环境遭受史无前例的严重破坏,直接导致经济损失和人类生存环境恶化,生态安全问题日益凸现.生态安全是指一个国家或地区生存和发展的生态环境处于不受或少受破坏与威胁的状态,与经济安全、军事安全同样都是国家安全的重要组成部分,在一定程度上制约着社会经济的可持续发展^[1].从 1989 年由国际应用系统分析研究所提出生态安全至今,大约已有近 20 年的历史.目前,国内外许多学者都从不同角度对生态安全开展了研究^[2~5].

由于生态安全提出的时间不长,国内外目前的

研究多集中在概念的辨析、理念的形成及其对国家、民族发展的重要意义等范畴,主要从生态安全的角度研究国家和社会安全^[6,7].近年来陆续有学者开始结合区域可持续发展,对生态安全进行深入研究.如研究水环境的安全评价问题^[8]、区域生存安全问题^[9],同时景观生态安全评价^[10]、区域生态安全评价也有相应报道^[11].国内部分学者还重点以城市

收稿日期:2007-05-07;修订日期:2007-07-13

基金项目:教育部“长江学者与创新团队发展计划”项目

作者简介:邱微(1980~),女,博士研究生,主要研究方向为生态安全、生态省建设、生态环境综合评价, E-mail: qwxnh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhql1962@163.com

为研究对象,提出对城市生态安全的理解^[12],建立城市生态安全评价指标体系^[13~15],并分析生态安全现状.还有学者将地理信息系统与综合评价方法结合,评价流域生态安全状况^[16],收到很好的效果.

从目前国内外生态安全评价研究来看,还尚未形成公认的评价指标体系,生态安全定量评价、动态研究仍处于探索阶段,以省域为对象,结合生态省建设开展生态安全评价的报道还不多见.本研究以黑龙江省为对象,采用“压力-状态-响应”模型结合定量评价方法,评价了黑龙江省生态安全现状,进一步阐述和论证了黑龙江省开展生态省建设取得的阶段性成果和发展趋势.

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

黑龙江省资源相对富集,生态环境良好,生态系统类型多样,地缘优势独特,农业基础雄厚,工业基础较好,水资源比较丰富,拥有独特的植被景观,整体生态环境稳定.黑龙江省作为资源大省和重工业基地,为支援国家建设和满足自身发展的需要,长期过度采伐森林、开垦湿地和草原,过量的耗费能源,超标排放污染物,造成自然资源枯竭、生态功能衰退.

自2000年黑龙江省确定建设生态省以来,全省围绕生态省建设的奋斗目标,不断加大生态环境保护与建设力度,生态环境质量得到了改善,维护了区域生态安全,促进了经济-社会-环境复合生态系统的可持续发展.

1.2 “压力-状态-响应”模型确定生态安全指标体系

20世纪80年代末,经济合作和开发组织(OECD)与联合国环境规划署(UNEP)共同提出了环境指标的P-S-R概念模型,即压力(pressure)-状态(state)-响应(response)模型^[17].在P-S-R框架内,环境问题可以表述为3个不同但又相互联系的指标类型:压力指标反映人类活动给环境造成的负荷;状态指标表征环境质量、自然资源与生态系统的状况;响应指标表征人类面临环境问题所采取的对策与措施.P-S-R概念模型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,见图1.

构建完善的指标体系是客观准确评价的基础,评价指标的选择遵循科学性、代表性、可操作性的原则,充分考虑系统的动态变化,综合反映研究区域的

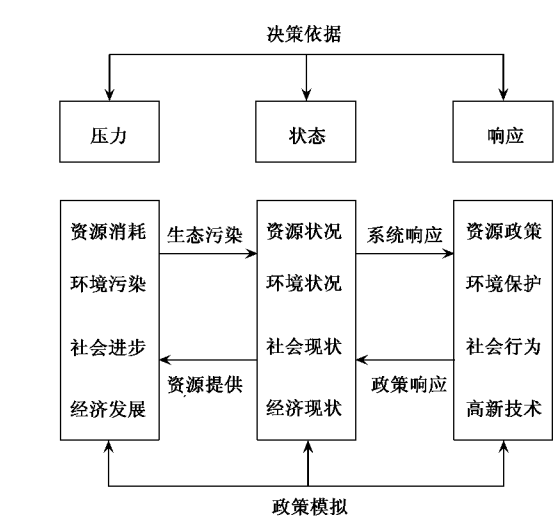


图1 生态安全评价的“压力-状态-响应”模型框架
Fig.1 Pressure-state-response model framework for evaluating ecological security

现状特点和发展趋势,以便于对系统的发展做出长期预测与管理.选取指标体系是对生态安全进行准确评价、科学规划、定量考核的依据.借鉴国内外的指标,结合本省实际,因地制宜地确定指标体系.建立黑龙江省“压力-状态-响应”模式下的生态安全评价指标体系,共筛选指标27项.以生态安全为总目标,分别以压力、状态、响应为系统层,以“压力-状态-响应”模型中的具体指标为指标层.利用这些指标,确定并描述黑龙江省生态安全的状态与水平,丰富生态安全评价模型和方法.

所选择的指标,是在阅研大量国内外相关研究的基础上,采用频度统计法、理论分析法和专家咨询法,综合研究区域实际情况共同确定的,满足指标选择的完备性和针对性原则.指标体系具有较好的代表性,能够科学、合理地反映出生态安全的阶段现状,从而客观、系统地分析生态安全的现状与水平,并以此作为今后政府决策的科学依据.

1.3 层次分析法确定指标体系权重

层次分析法是由美国运筹学家 Saaty 于20世纪70年代中期提出的一种多层次权重分析决策方法,具有系统性、灵活性和实用性等特点,现已被广泛地应用于环境、社会、经济等系统的决策分析之中^[18~20].该方法的基本原理是:将一个复杂问题看成一个系统,根据系统内部因素之间的隶属关系,将复杂问题的各种要素转化为有条理的有序层次,并以同一层次的各种要素按照上一层要素为准则,构造判断矩阵,进行两两判断比较,计算出各要素的权重.根据综合权重,按最大权重原则确定最优方案,

进而得到方案或目标相对重要性的定量化描述.它是在简单加性加权法的基础上推导得出的^[21].Aupetita 等^[22]在 Saaty 的研究基础上,进一步明确了
对判断矩阵进行一致性检验的问题.

1.3.1 构造判断矩阵

在每一层次上,对该层指标进行逐对比较,按照规定的 9 标度方法,写出数值判断矩阵.本研究中采取专家调查问卷的形式,请 15 位专家在构造判断矩阵前对层次结构中各个指标进行重要性的单排序,以便于减小误差,一次性通过一致性检验.利用方根法计算判断矩阵的最大特征值和特征向量.

1.3.2 层次单排序的一致性检验

根据专家构造的判断矩阵,计算对于上一层某因子而言,本层次与之有联系的所有因素的权重.

(1)为度量判断矩阵偏离一致性的程度,引入判断矩阵最大特征值以外的其余特征根的负平均值 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

当判断矩阵具有完全一致性时,CI = 0. CI 愈大,矩阵的一致性愈差.

(2)为度量不同判断矩阵是否有满意的一致性,引进平均随机一致性指标 RI. RI 值见表 1. 计算随机一致性比率 CR = CI/RI,当 CR < 0.10 时,矩阵具有满意的一致性,否则应重新构造判断矩阵,直到具有满意的一致性为止.

表 1 平均随机一致性指标 RI

Table 1 Average random index (RI)

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

1.3.3 层次总排序的一致性检验

层次总排序即利用同一层次中所有层次单排序的结果,以及上层次所有元素的权重,来计算针对总目标而言本层次所有因素权重值的过程.

层次总排序一致性比率为:

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^m a_i CI_i}{\sum_{i=1}^m a_i RI_i} \tag{1}$$

当 CR < 0.10 时,层次总排序结果是满意的.

2 结果与讨论

基于上述步骤,采用 MATLAB6.5 软件编程计算指标数据权重,如表 2 所示.经检验,总的一致性排

序结果 CR = 0.034 3 < 0.1,满足一致性要求.

2.1 功效系数评分法计算指标数据无量纲化

表 2 黑龙江省生态安全评价指标的权重

Table 2 Weight of ecological security assessment index system in Heilongjiang Province

系统层		指标层	
指标	权重	指标	权重
压力	0.163 4	人口自然增长率/‰	0.206 8
		年末总人口 × 10 ⁴ /人	0.158 7
		人均国内生产总值/元·人 ⁻¹	0.035 2
		人均水资源总量 × 10 ⁴ /m ³ ·人 ⁻¹	0.039 1
		千人拥有医生数/人	0.103 6
		城镇人均住房建筑面积/m ²	0.069 4
		人均占有耕地/hm ² ·人 ⁻¹	0.042 2
		人均林木蓄积量/m ³ ·人 ⁻¹	0.036 0
		工业废水排放量 × 10 ⁴ /t	0.036 0
		工业废气排放量 × 10 ⁸ /m ³	0.088 6
		工业固体废物产生量 × 10 ⁴ /t	0.086 7
		化肥施用量(折纯)/kg·hm ⁻²	0.046 3
		单位 GDP 能耗/t·(万元) ⁻¹	0.104 4
状态	0.297 0	单位 GDP 水耗/m ³ ·(万元) ⁻¹	0.104 4
		集中式水源满足功能区要求率/%	0.084 7
		城市环境空气质量二级标准达标率/%	0.219 7
		森林覆盖率/%	0.211 9
		城市人均公共绿地面积/m ²	0.165 8
		自然保护区占全省面积比例/%	0.052 2
		恩格尔系数	0.056 9
		环保投资占 GDP 的比例/%	0.258 7
		教育支出相当于 GDP 比例/%	0.167 1
		研究与发展经费占 GDP/%	0.252 5
响应	0.539 6	第三产业占 GDP 比重/%	0.115 2
		每万人口在校大学生数/人	0.060 0
		工业固体废弃物综合利用率/%	0.073 2
		工业废水排放达标率/%	0.073 2

收集到的统计数据^[23,24]一般都具有自身的量纲和分布区间,无法直接进行比较和运算,必须对数据进行标准化处理.采用功效系数评分法^[25,26]对各指标进行无量纲化变换处理,得到各指标的功效系数,功效系数再乘以 100 作为指标的标准化值.

(1)正效应指标 设共确定评价指标 *m* 个,当前 *p* 个指标呈正效应时,记第 *i* 个评价对象第 *j* 项指标原始值为 *X_{ij}*,则第 *i* 个评价对象第 *j* 项指标的标准化值为:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \times 100 \tag{2}$$

$$(i = 1, 2, \cdots, p; j = 1, 2, \cdots, p)$$

(2)负效应指标 对于后(*m* - *p*)个负效应指标,其第 *i* 个评价对象第 *j* 项指标的标准化值为:

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \times 100 \tag{3}$$

($i = p + 1, p + 2, \cdots, m; j = p + 1, p + 2, \cdots, m$)

式(2)、(3)中, X'_{ij} 为该指标的标准化值;
 $\max(X_{ij})$ 为该指标的最大值; $\min(X_{ij})$ 为该指标的最小值; p 为正效应评价指标个数; m 为总评价指标个数.

当 $X'_{ij} = 1$ 时, 指标代表的项目达到最佳状态;
相反, 当 $X'_{ij} = 0$ 时, 达到最差状态.

2.2 生态安全度模型的构建

生态安全度(ecological security index, ESI)是 1 个衡量生态安全程度的指标,它是介于 0~1 之间的数,根据生态安全评估指标数据,可以判断区域的生态安全状况.

(1)各子系统生态安全度计算模型:

$$ESI_i = \sum_{j=1}^m X'_{ij} W_j \tag{4}$$

式中, ESI_i 表示各子系统的生态安全度; X'_{ij} 为该指标的标准化值; W_j 为指标 j 的权重.

(2)系统的生态安全度计算模型:

$$ESI = \sum_{i=1}^n ESI_i W_i \tag{5}$$

式中, ESI 表示总系统的生态安全度, W_i 为各子系统的权重.

2.3 黑龙江省生态安全评价结果

参考相关研究^[27]设计了一个 5 级生态安全量度标准,并给出了相应的程度描述,见表 3. 根据数据资料,按上述模型可计算出黑龙江省 2000~2005 年生态安全评价及分级结果,见图 2.

表 3 生态安全水平量度标准

Table 3 Criterion of ecological security classification in Heilongjiang Province

生态安全分级	分级标准	生态安全程度
V 级	$ESI \leq 0.20$	很不安全
IV 级	$0.20 < ESI \leq 0.35$	不安全
III 级	$0.35 < ESI \leq 0.50$	临界安全
II 级	$0.50 < ESI \leq 0.70$	较安全
I 级	$ESI > 0.70$	理想安全

由计算结果可以看出,黑龙江省近 6 年的生态安全程度均不是很高,基本处于临界安全及以下的状态,生态安全的总体情况逐渐向更高等级发展. 2000 年黑龙江省生态安全度为 0.108 2,为生态安全 V 级,即很不安全;2005 年生态安全度为 0.360 6,为生态安全 III 级,即临界安全.

2.4 黑龙江省生态安全预测评价

预测生态安全的发展趋势,为黑龙江省生态省

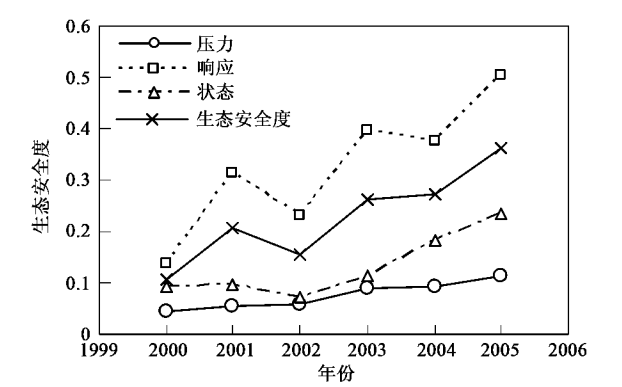


图 2 2000~2005 年黑龙江省生态安全分级结果

Fig.2 Ecological security classification of Heilongjiang Province from 2000 to 2005

建设、生态环境改善等提供科学依据.在建立预测模型时,若数据量太少,不宜建立传统的回归分析或其它时间序列模型.灰色动态模型(grey dynamic model, GM)经常用于短期预测,所需的数据量少,且可以达到满意的预测精度.采用灰色 GM(1,1)建模,应用 MATLAB6.5 软件编写灰色预测模型 GM(1,1)的计算程序,求解原始数据的模型值,经过残差、后残差等精度检验,检验合格后,预测得到黑龙江省 2006~2010 年生态安全度,从而推断生态安全等级,见表 4.

表 4 2006~2010 年黑龙江省生态安全预测结果

Table 4 Result of forecasting ecological security classification for Heilongjiang Province from 2006 to 2010

年份	压力	状态	响应	生态安全度	生态安全等级
2006	0.138 9	0.304 6	0.560 3	0.415 5	III (临界安全)
2007	0.167 9	0.411 8	0.653 0	0.502 1	II (较安全)
2008	0.202 8	0.536 7	0.701 1	0.570 9	II (较安全)
2009	0.245 0	0.662 7	0.787 0	0.661 5	II (较安全)
2010	0.289 0	0.877 6	0.879 6	0.782 5	I (理想安全)

预测结果表明,黑龙江省生态安全向好的方向发展.2000 年国家环境保护总局批准黑龙江省开展生态省试点建设,2000~2005 年为黑龙江省生态省建设启动阶段,2006~2015 年为黑龙江省生态省建设推进阶段.在黑龙江省生态省建设规划纲要的指导下,通过采取科学合理的措施,提供相应的政策保障,逐步实现环境、经济、社会的共赢.通过生态安全计算结果,印证了黑龙江省生态省建设已取得的显著阶段性成果,生态环境质量正在逐步得到改善.

综上,黑龙江省在深入认识过去以牺牲环境、破坏资源为代价的传统发展观念的弊端的基础上,走集约型内涵式的发展道路,积极推进省域经济结构

调整和产业升级,促进资源的持续利用,提高省域生态安全等级,使生态环境质量得到提高,实现经济发展与生态环境的良性互动,增强经济社会发展的综合竞争力。

3 结论

(1)黑龙江省生态安全定量评价结果表明,2000年生态安全度为0.108 2,处于生态安全Ⅴ级,即很不安全;2005年黑龙江省生态安全度为0.360 6,处于生态安全Ⅲ级,即临界安全,生态安全基本呈现良好的发展趋势。

(2)黑龙江省生态安全预测结果表明,2006年生态安全度为0.415 5,处于生态安全Ⅲ级;2007~2009年均均为生态安全Ⅱ级,2010年生态安全度为0.782 5,达到生态安全Ⅰ级,即理想安全。黑龙江省生态安全呈上升的发展趋势。

(3)研究结果论证了黑龙江省开展生态省建设已取得显著阶段性成果,生态环境质量正在逐步得到改善。今后要积极推进省域经济结构调整和产业升级,提高省域生态安全等级,促进省域复合生态系统可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈国阶.论生态安全[J].重庆环境科学,2002,24(3):1-3.
- [2] Robert B, Aleksander Z, Ivo Š. Sustainable development and global security [J]. Energy, 2007,32(6):883-890.
- [3] Zhao Y Z, Zou X Y, Cheng H, *et al.* Assessing the ecological security of the Tibetan plateau: Methodology and a case study for Lhaze County [J]. Journal of Environmental Management, 2006,80(2):120-131.
- [4] Eickhout B, van Meijl H, Tabeau A, *et al.* Economic and ecological consequences of four European land use scenarios [J]. Land Use Policy, 2007,24(3):562-575.
- [5] Michael C F. Environmental consequences of social security reform: a second best threat to public conservation [J]. Ecological Economics, 2005,53(2):191-209.
- [6] Sydelko P J, Hlohowskyj I, Majerus K, *et al.* An object-oriented framework for dynamic ecosystem modeling: application for integrated risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2001,274(1-3):271-281.
- [7] Rasul G, Thapa G. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh [J]. World Development, 2003,31(10):1721-1741.
- [8] Luijten J C, Knapp E B, Jones J W. A tool for community-based assessment of the implications of development on water security in hillside watersheds [J]. Agricultural Systems, 2001,70(2,3):603-622.
- [9] Bhandari B S, Grant M. Analysis of livelihood security: A case study in the Kali-Khola watershed of Nepal [J]. Journal of Environmental Management, 2007,85(1):17-26.
- [10] 张艳芳,任志远.区域生态安全定量评价与阈值确定的方法探讨[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):11-16.
- [11] 王振祥,朱晓东,石磊,等.安徽省沿淮地区生态安全评价模型和指标体系[J].应用生态学报,2006,17(12):2431-2435.
- [12] 郭秀锐,杨居荣,毛显强.城市生态系统健康评价初探[J].中国环境科学,2002,22(6):525-529.
- [13] 谢花林,李波.城市生态安全评价指标体系与评价方法研究[J].北京师范大学学报,2004,40(5):705-710.
- [14] 杜锁军,谢东俊,殷益敏.城市生态环境安全评价研究[J].干旱环境监测,2006,20(4):211-214.
- [15] 董金玮,郑新奇.基于改进PSR模型的济南市生态安全评价研究[J].资源开发与市场,2007,23(1):1-4.
- [16] 高清竹,许红梅,康慕谊,等.黄河中游砒砂岩地区生态安全综合评价——以内蒙古长川流域为例[J].资源科学,2006,28(2):132-139.
- [17] Tong C. Review on environmental indicator research [J]. Research on Environmental Science, 2000,13(4):53-55.
- [18] Simon U, Bruggemann R, Pudenz S. Aspects of decision support in water management-example Berlin and Potsdam (Germany) I-spatially differentiated evaluation [J]. Water Research, 2004,38(7):1809-1816.
- [19] Caroline S K, Suzanne J M H H, Teunis L. Comparing uncertain alternatives for a possible airport island location in the North Sea [J]. Ocean & Coastal Management, 2003,46(11,12):1031-1047.
- [20] 李崧,邱微,赵庆良,等.层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究[J].环境科学,2006,27(5):1031-1034.
- [21] 喻良,伊武军.层次分析法在城市生态环境质量评价中的应用[J].四川环境,2002,21(4):38-40.
- [22] Aupetit B, Genest C. On some useful properties of the perron eigenvalue of a positive reciprocal matrix in the context of the Analytical Hierarchy Process [J]. European Journal of Operational Research, 1993,70(2):263-268.
- [23] 黑龙江省统计局.黑龙江统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1999-2006.
- [24] 黑龙江省人民政府.黑龙江年鉴[M].哈尔滨:黑龙江年鉴社,1999-2006.
- [25] 秦寿康.综合评价原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2003.23-24.
- [26] 龚建周,夏北成.城市生态安全评价及部分城市生态安全态势比较[J].安全与环境学报,2006,6(3):116-119.
- [27] 顾康康,刘景双.基于P-S-R模型的辽中城市群生态安全分析与评价[A].见:东北老工业基地环境污染形成机理与污染控制学术研讨会论文集[C].大连:2006.457-461.