

# 基于能值分析的哈尔滨所辖市县土地资源生态安全评价

李玉清<sup>1,3</sup>, 宋戈<sup>1,2,3</sup>, 王越<sup>1,3</sup>, 王学伟<sup>1,3</sup>

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北大学

土地管理研究所, 沈阳 110819; 3. 东北农业大学 村镇发展研究中心, 哈尔滨 150030)

**摘 要:**科学评价城市扩张冲击下所辖市县的土地资源生态安全,对合理利用土地资源,促进城市所辖市县经济、社会、生态持续稳定健康发展具有重要意义。以哈尔滨所辖市县为研究区,运用能值分析法和“压力—状态—影响—响应(PSIR)”模型构建土地资源生态安全评价体系和土地资源生态安全可持续能值指数(EULESI),结合可持续发展能值指数(EISD)与 EULESI 进行相关性分析,从而对 2004—2011 年研究区近 8 a 土地资源生态安全状态进行评价。结果表明:(1)可持续发展能值指标(EISD)与 EULESI 二者相关性系数为 0.84,具有极强相关性,相较于 EISD 指数,EULESI 指数对土地资源生态安全评价研究更具有敏感性和代表性,同时作为评价土地资源生态安全水平指标具有科学性,可用于其他类似地区的相关研究评价指标;(2)2004—2011 年城市扩张后的研究区土地资源生态安全总体呈递减趋势,土地资源生态安全水平波动较大,处于较不稳定发展阶段,总体处于较不安全水平。具体而言,2004—2006 年研究区土地资源生态安全处于较安全水平;2007—2008 年处于较不安全水平;2009—2010 年均处于临界安全水平;2011 年数值为近 8 a 来最低值,处于较不安全水平,土地资源生态环境受到严重威胁。总而言之,能值分析法能够客观揭示各个指标自身涵义,有效避免评价过于主观性,研究结果符合研究区实际情况。

**关键词:**能值分析;土地资源生态安全;哈尔滨所辖市县

**中图分类号:**F301.24

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)03-0267-06

## Ecological Security Evaluation of Land Resources in the Cities and Counties Under the Jurisdiction of Harbin Based on Energy Analysis

LI Yu-qing<sup>1,3</sup>, SONG Ge<sup>1,2,3</sup>, WANG Yue<sup>1,3</sup>, WANG Xue-wei<sup>1,3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agriculture University, Harbin 150030,

China; 2. Institute of Land Management, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. Rural Development Research Center, Northeast Agriculture University, Harbin 150030, China)

**Abstract:**Scientific evaluation of urban expansion impact of land resource ecological security of cities and counties has a great significance of the rational use of land resources, and promoting cities and counties under the jurisdiction of the municipality in the economic, social, ecological, steady and healthy development. This paper selected cities and counties under the jurisdiction of Harbin as a study case. Based on pressure-state-impact-respose (PSIR) model and by using energy analysis method, the land resources ecological security evaluation system and enery-based urban land resource ecological security index(EULESI) were constructed, it was the analysis of correlation to energy the context of sustainable development index(EISD) and EULESI, and the variation of land resources ecological security level of the study area in 2004—2011 was evaluated. The correlation of EISD and EULESI is 0.84, which showed the strong correlation. Compared to EISD index, EULESI is more sensitive and representative to the land resource ecological security evaluation. At the same time, as the evaluation of land resource ecological security is more scientific, and it can be used for the evaluation of other similar area. The results show that the degree of land resources ecological security of the study area had been overall gradually decreasing trend from 2004 to 2011, indicating a great fluctuation and a less stable developing stage, but overall it was at a less secure. In 2004—2006, the land resource eco-

收稿日期:2013-09-03

修回日期:2013-10-08

资助项目:国家自然科学基金(41071346)

作者简介:李玉清(1987—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士生,主要研究方向土地利用。E-mail:liyuning665@sina.com

通信作者:宋戈(1969—),女,黑龙江省庆安县人,博士/博士后,教授/博导,主要研究方向为土地利用。E-mail:songgelaoshi@163.com

logical security of the study area was at the safer level, and then it was at a relatively unsafe level in 2007—2008; after two years, it was located somewhere in the level of criticality safety; the EULESI index was the lowest value for nearly 8 years, less unsafe level, and then the land resource ecological environment was being a seriously threatened. All in all, energy analysis can objectively understand the meanings of the various indices, and effectively avoiding evaluation is too subjective, the results of this study area meet with the actual situation.

**Key words:** energy analysis; land resources ecological security; cities and counties under the jurisdiction of Harbin

土地资源生态安全作为生态安全的重要组成部分,是决定区域生态安全的基础,直接关系到区域可持续发展<sup>[1]</sup>。科学评价城市周边所辖市县土地资源生态安全,对合理利用土地资源,促进城市周边所辖市县经济、社会、生态可持续稳定健康发展具有重要意义。

目前,国外对土地资源生态安全多是针对于稀缺性资源或景观<sup>[2-3]</sup>、土地资源管理方式<sup>[4]</sup>和土壤退化<sup>[5]</sup>等方面进行研究。国内研究多是从土地资源生态系统自身稳定性<sup>[6]</sup>、土地生态系统结构功能对人类社会发展提供稳定资源<sup>[7]</sup>等角度进行分析,研究区多集中在典型生态脆弱区<sup>[8-9]</sup>、沿海经济较发达地区<sup>[10-11]</sup>以及国内大中城市<sup>[12-14]</sup>。但以受到城市扩张冲击下的城市所辖市县为研究区对土地资源生态安全状况进行研究的甚少。研究方法多是主成分分析法<sup>[15]</sup>、层次分析法<sup>[16]</sup>与 PSR 模型<sup>[17-18]</sup>、物元模型<sup>[19]</sup>相结合构建评价指标体系对其进行研究。这些方法与模型相结合虽能综合自然、社会经济多方面评价指标,但没有将对生态安全测度比较重要的因素,尤其是生态影响因素考虑进来<sup>[20]</sup>,其指标权重、相关性、指标质量差异等因素的确定过于主观而失去指标本身意义,会直接影响评价结果。而能值分析法以能值为基准,引入太阳能值转换率,统一量化自然生态系统和社会经济系统中的各个指标,解决不同系统物质间统一评价的问题,有效避免评价过于主观性。本文以哈尔滨所辖市县为研究区,以城市扩张冲击下的土地资源生态安全状况为研究对象,从土地资源生态系统的物质流、能量流、信息流等生态流角度入手,运用能值分析法和“压力—状态—影响—响应”(PSIR)模型<sup>[20]</sup>构建土地资源生态安全评价指标体系及土地资源生态安全能值指数(EULESI),对 2004—2011 年哈尔滨所辖市县土地资源生态安全状况进行评价,以期全面了解及有效开展城市所辖市县的土地资源生态安全评价研究,为城市扩张中土地资源生态安全建设、土地资源利用和土地规划提供科学依据,也为其他地区开展类似研究提供参考。

## 1 研究区概况

哈尔滨市地处我国东北北部,位于黑龙江省南部,气候属中温带大陆性季风气候,冬长夏短,雨水充沛,多年平均降雨量 380.71~470.33 mm,年均日照时数 2 157.44~2 553.72 h,年太阳辐射总量 $(4.60 \sim 5.00) \times 10^9 \text{ J/m}^2$ ,地形多为山地、丘陵和平原,土壤肥沃。2004 年哈尔滨市在经济发展、城市扩张的需求下,由原来的“七区十二县(市)”变为“八区十县(市)”。哈尔滨所辖 10 县(市)包括尚志市、双城市、宾县、方正县、依兰县、巴彦县、五常市、木兰县、延寿县和通河县。2011 年哈尔滨所辖市县土地面积 4.59 万  $\text{km}^2$ ,总人口为 521.74 万人,其中农业人口占 73.79%。哈尔滨是全国农业发展的重要地区,研究区更是商品粮供应的重要区域。2011 年哈尔滨所辖市县粮食产量为  $1.38 \times 10^7 \text{ t}$ ,占全市粮食总产量的 96.73%;农林牧渔业生产总值为 678.21 亿元,占全市农林牧渔业生产总值的 76.99%。2011 年哈尔滨所辖市县工业产值为 508.66 万元,占全市工业生产的 13.03%。近年来随着研究区大力发展农业、工业,以牺牲土地资源为代价,工业“三废”、农业化肥农药以及地膜使用过度,水土流失、土地沙化等生态环境问题相继出现,破坏土地生态系统平衡性与稳定性,土地资源生态安全问题已影响到该区域的农业、经济社会可持续健康发展。

## 2 研究方法 with 数据处理

### 2.1 数据来源与处理

本研究数据源于 2005—2012 年的《哈尔滨市统计年鉴》、《黑龙江省统计年鉴》等统计年鉴数据。利用能值转换率<sup>[21]</sup>,将土地生态系统的各种物质和能量形式的投入转化为太阳能值。计算 2004—2011 年哈尔滨所辖市县土地资源生态系统能值数据,并利用能值分析<sup>[22-23]</sup>建立的能值指标,对能反映土地资源生态系统与社会经济关联的能值流指标进行计算(表 1)。

表 1 土地资源生态能值流指标 10<sup>22</sup> sej/a

指标名称	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
可更新资源能值(Em <sub>R</sub> )	2.62	2.97	3.00	2.18	2.47	3.03	3.03	2.39
不可更新资源能值(Em <sub>N</sub> )	13.80	14.02	14.84	15.23	15.68	16.90	18.45	20.13
输入能值(Em <sub>I</sub> )	1.01	1.14	1.47	1.76	2.26	2.12	3.01	2.97
总能值(Em <sub>U</sub> )	17.43	18.13	19.31	19.17	20.41	22.05	24.49	25.49
输出能值(Em <sub>O</sub> )	2.32	4.50	6.45	9.83	13.42	6.78	13.15	15.12
工业辅助能值(Em <sub>F</sub> )	0.22	0.22	0.23	0.25	0.30	0.31	0.32	0.26
土壤损耗能值(Em <sub>S</sub> )	0.012	0.013	0.017	0.014	0.019	0.019	0.021	0.023
废弃物能值(Em <sub>W</sub> )	6.80	6.07	6.95	6.00	6.22	7.48	7.95	17.22
可更新有机能值(Em <sub>T</sub> )	0.30	0.32	0.38	0.31	0.41	0.39	0.40	0.42
能值总产出(Em <sub>Y</sub> )	1.76	1.61	1.91	1.66	1.80	1.88	2.06	2.29

注:① 可更新资源能值包括太阳能、雨水势能;不可更新资源能值包括原煤、原油势能;工业辅助能值包括化肥、农药、地膜势能;土壤损耗能值指表层土壤损耗势能;废弃物能值指生活污染固体废物及工业污水势能;可更新有机能值指劳动势能及机械势能。② 总能值  $Em_U = Em_R + Em_N + Em_I$ ;③ 能值总产出( $Em_Y$ )包括粮食、豆类、油料、蔬菜、猪羊肉及水产品产量能值( $Em_{Yi}$ ,  $i=1,2,3,4,5,6$ )。

2.2 研究方法

(1) 基本原理。土地资源生态安全评价是对土地资源生态系统内安全状况的客观描述,其关键在于建立适宜的模型以及相应的指标体系。以往土地资源生态安全评价是尽可能多地选取反映生态系统特点的表征指标,确定指标权重,通过要素层权重的分配得到综合评价结果因受到人为因素影响过于主观。本文基于能值分析的土地资源生态安全评价方法,在传统的 PSR 模型框架基础上,综合考虑土地资源生态系统与人类社会经济交互作用,添加反映生态安全测度的生态影响因素层,改进为 PSIR 模型。将能值分析法与 PSIR 模型相结合,综合考虑城市土地资源生态系统内部能流、物流、人口流和货币流代谢的运行趋势及其相互作用,结合数据来源,整理分类,绘制能量流图(图 1)。

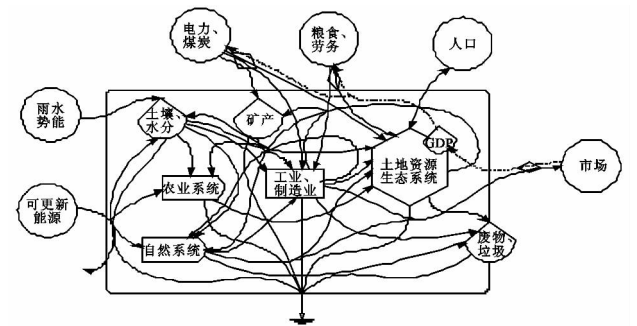


图 1 研究区土地资源生态系统能量流动图

(2) 评价指标体系的构建。根据研究区土地资源生态安全实际情况,将其分为系统压力、系统状态、系统影响、系统响应 4 方面,构建基于能值分析的压力—状态—影响—响应(PSIR)城市土地资源生态安全评价指标体系(表 2)。压力子系统,包含社会经济和人类活动对土地资源需求和对其生态系统破坏等压力;状态子系统,反映当前系统内部各种生态流与

外界交流的状况;影响子系统,表征土地资源生态安全稳定性及生产力与活力等生态安全测度情况;响应子系统,表征由影响能值指标的状态改变所导致的变化。

(3) 城市土地资源生态安全可持续能值指数的构建。在评价系统可持续发展能力综合指标中,陆宏芳等构建了评价系统可持续发展能值指标 EISD<sup>[24]</sup>,即:

$$EISD = \frac{EYR \times EER}{ELR}$$

(1)

EISD 可用以综合评价系统可持续发展程度, EISD 值越高,说明单位环境压力下的社会经济效益越高,系统可持续发展性能越好。所谓可持续发展强调“自然、经济、社会”复杂关系的整体协调,是“发展、协调、持续”的综合反映和内在统一。土地资源生态安全是为人类在生产、生活和健康等方面不受或少受土地资源生态破坏与环境污染等影响的保障程度。保障人类基本生存所需条件是土地资源生态安全的基本含义,其次是保证国家及人类社会可持续发展。所以,土地资源生态安全的本质以人类社会可持续发展为目的,是实现可持续发展的基础和必要条件,没有土地资源生态安全就没有可持续发展。土地资源生态安全作为生态安全的重要组成部分,更是实现和维护可持续发展的首要工作。

本文基于能值分析的土地资源生态安全评价指标体系,选取环境负荷率(EIR)、能值产出率(EYR)、可更新有机能值/能值比(RER)以及环境潜力(EP)分别代表压力子系统、状态子系统、影响子系统和响应子系统,构建表征土地资源生态安全水平综合指标——土地资源生态安全能值指数(Emery-based urban land resource ecological security index, EULESI)。由于土地资源生态安全与其状态、响应子系统呈正相关,与压力、影响子系统呈负相关,所以其计算

公式为：

$$EULESI = \frac{EYR \times EP}{EIR \times RER} \tag{2}$$

EULESI 值越大,表示土地资源生态安全程度越高。该安全指标可用于某一研究区土地生态安全发展趋势研究,也可用于不同区域间土地生态安全的横向比较研究。通过检验构建 EULESI 的科学合理性,

将 2004—2011 年研究区 EULESI 值与 EISD 值变化趋势进行 person 相关性比较分析,如果二者相关系数为 0.8~1.0 表明极强相关、0.6~0.8 强相关、0.4~0.6 中等相关,则说明 EULESI 指标构建具有科学性;如果二者相关系数为 0.2~0.4 表征弱相关、0.0~0.2 极弱相关或无相关,则说明 EULESI 指标构建不具有合理性。

表 2 土地资源生态安全评价指标体系

目标层	准则层	能值指标层	计算公式
土地资源生态安全评价体系	压力子系统	环境负荷率(EIR)	$EIR = (Em_N + Em_F + Em_T) / Em_R$
		废弃物/可更新能值比(WRE)	$WRE = Em_W / Em_R$
		能值货币比(EMR)	$EMR = Em_U / GDP$
		能值密度(ED)	$ED = Em_U / \text{土地面积}$
	状态子系统	能值产出率(EYR)	$EYR = Em_Y / (Em_F + Em_T)$
		人均能值用量(PE)	$PE = Em_U / \text{人口}$
		电力能值比(EPER)	$EPER = Em_{el} / Em_U$
		能值交换率(EER)	$EER = Em_I / Em_O$
	影响子系统	土壤损耗/可更新有机能比(SRE)	$SRE = Em_S / Em_T$
		系统稳定性指数(C)	$C = \sum (Em_{Yi} / Em_Y)^2$
		可更新有机能/能值比(RER)	$RER = Em_T / Em_U$
		系统生产优势度(S)	$S = - \sum [(Em_{Yi} / Em_Y) \ln(Em_{Yi} / Em_Y)]$
	响应子系统	能值自给率(ESR)	$ESR = (Em_R + Em_N) / Em_U$
		废弃物/能值比(WER)	$WER = Em_W / Em_U$
		环境潜力(EP)	$EP = Em_R / Em_U$
		环境承载力(ECC)	$EEC = Em_R / (Em_U / \text{人口})$

注:表 2 中计算公式均来源于《生态经济系统能值分析》一书。

为了准确评价土地资源生态安全程度,反映土地生态环境建设和保护程度,构建土地资源生态安全等级。由于土地资源生态安全等级划定尚未形成统一标准,借鉴国内外研究<sup>[21,25-26]</sup>,综合考虑研究区土地资源生态系统状况并将评价结果确定为不安全(<1.5)、较不安全(1.5~3.0)、临界安全(3.0~4.5)、较安全(4.5~6.0)和安全(>6.0)5 个评价等级。

3 评价结果与分析

3.1 压力分析

由图 2 可看出,2004—2011 年环境负荷率总体呈增长态势,但有所波动,在 2005 年达到最低值 4.902,随后 2006—2007 年有所增长,到 2011 年出现最高值 8.707,表明研究区综合发展对土地资源生态环境压力在逐渐增大,其原因在于对研究区不可更新资源开采量的增加;2004—2010 年废弃物/可更新能值比值总体趋于平稳,2011 年数值骤然增加,是 2010 年数值的 2.75 倍,说明研究区经济发展的效率有增加趋势,经济发展对土地资源生态环境构成严重威胁;从能值货币比指标看,2004—2011 年数值呈先增长后下降的态势,2004—2006 年数值由 3.352 一直上升,且 2006

年达到最大值 4.242,之后降至 2011 年的 3.133,表明在城市规模扩张和工业化程度的增强下,研究区经济发展、农业生产过程中,土地自然资源对其作出巨大贡献,特别是对不可更新资源的利用;2004—2011 年能值密度普遍呈上升趋势,数值由 3.791 增长至 5.543,可知研究区能值使用集约程度属于高度开发的地区,经济活动频繁,对该地区土地生态系统间接构成威胁。总体来看,是由于对矿石、燃油、燃煤的过度开采以及工业开发及污染过重对土地生态环境造成巨大压力。

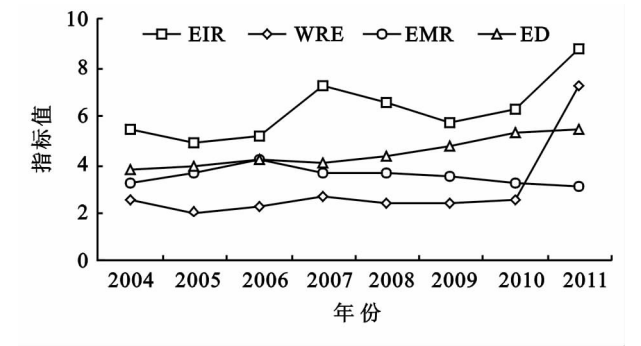


图 2 研究区压力子系统研究期间各指标变化趋势

3.2 状态分析

由图 3 可知,2004—2011 年研究区能值产出率数

值从 3.385 降至 3.368, 总体呈下降态势, 表明土地资源生态系统虽投入大量的工业辅助能和可更新有机能, 但系统产出能值的利用效率较低, 同时研究区近 8 a 来能值产出率一直大于 1, 表明土地资源生态系统整体功能性相对较好; 从人均能值使用量、电力能值比指标来看, 2004—2011 年数值均呈上升趋势, 分别从 3.340 增加至 4.885 和从 0.261 升至 0.432, 表明随着人口数量的增长, 输出能值的绝对数量增加很快, 而电能作为维持经济发展的主要能源, 虽在总利用能值中所占比重较小, 但发展空间仍较大; 从能值交换率来看, 2004—2011 年数值从 0.435 骤降至 0.196, 普遍呈下降趋势, 表明近 8 a 来研究区土地资源输入量逐渐减小, 而对经济能值产出持续增长。

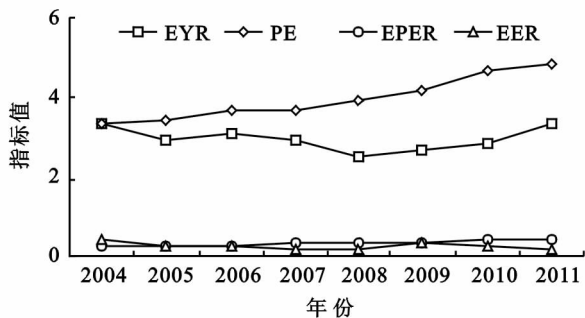


图 3 研究区状态子系统研究期间各指标变化趋势

### 3.3 影响分析

由图 4 得出, 研究区土壤损耗/可更新有机能值比数值从 2004 年的 0.040 升至 2011 年的 0.054, 总体呈上升态势, 表征土地损耗能值逐年增加, 且有继续增加趋势; 2004—2011 年系统稳定性指数数值从 0.499 降至 0.452, 且波动较大, 可知研究区土地资源生态系统各子系统物质流、能量流连接失和, 系统的自控、调节、反馈作用差, 自身稳定性较低; 从可更新有机能值/能值比来看, 2004—2011 年数值稳定不变, 但仍起伏波动, 从 2004 年的 0.017 增加至 2008 年的 0.020, 且为最大值, 之后数值逐渐下降至 2011 年的 0.017, 可以得出可更新有机能值占总能值比较小, 原因在于研究区劳动力能值较小; 2004—2011 年研究区系统生产优势度数值均接近于 1, 总体呈增加趋势, 表明研究区产业结构比例协调, 生产优势明显。

### 3.4 响应分析

从图 5 看出, 2004—2011 年能值自给率数值从 0.942 跌至 0.883, 总体呈下降趋势, 略有小幅波动, 表明研究区土地资源生态系统响应程度不高, 其经济发展对土地资源的开发利用程度较高、依赖较大。从废弃物/能值比来看, 2004—2011 年数值波动较大, 总体呈上升趋势, 从 2004 年 0.390 降至 2005 年 0.335,

2006 年略有回升, 在 2011 年达到峰值 0.676, 说明废弃物能值过大是导致数值呈上升趋势的原因, 特别是生活垃圾等固态废弃物和工业污水等液态废弃物排放量增多导致。环境潜力值与环境承载力 2004—2011 年虽均呈下降态势, 但起伏波动剧烈, 环境潜力的变化直接导致环境承载力的下降, 说明研究区实际人口数远超过自然环境所能承载的适宜人口数, 土地资源生态环境承受巨大负荷。

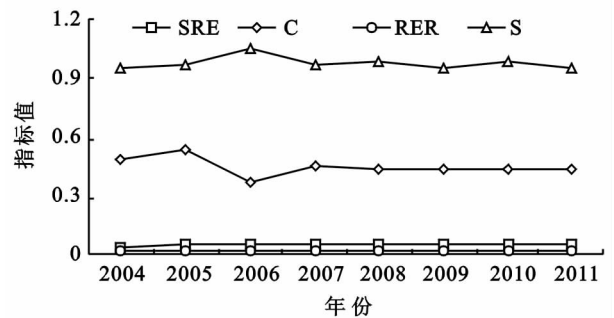


图 4 研究区影响子系统研究期间各指标变化趋势

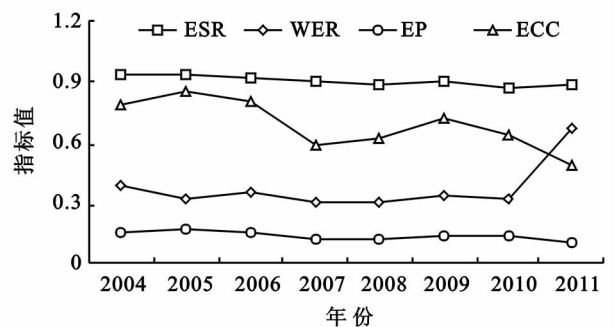


图 5 研究区响应子系统研究期间各指标变化趋势

### 3.5 土地资源生态安全能值指数分析

对 ESID 与 EULESI 指数进行 person 相关性分析, 二者相关系数为 0.84, 具有极强相关性, 且由图 2 可知, 二者变化趋势基本相同, 因此 EULESI 指数构建具有科学合理性, 可用于表征研究区土地资源生态安全水平。由表 3 可知, 2004—2011 年可持续发展能值指数 (ESID) 由 5.452 降至 2.048, 总体呈下降态势, 土地资源生态安全水平波动剧烈。具体而言, 由 2004 年最高值 5.452 降至 2006 年的 4.798, 这阶段研究区处于较安全水平。虽然近 3 a 来整体处于较安全水平, 但数值逐渐下滑, 表明城市扩张后的研究区土地资源生态系统逐渐受到外界影响, 但不十分明显。之后数值继续下滑至 2008 年的 2.295, 这段时期研究区土地资源生态安全水平为较不安全, 年平均下滑速度为 1.251 5, 表明研究区系统已受到外界严重影响, 并持续恶化。2009—2010 年数值有所回升, 在临界安全范围内波动, 环境负荷率的降低和环境潜力

的增加显示研究区土地资源生态安全水平有所改善。全水平再度严重,反弹为较不安全状态,并有继续发展但至 2011 年数值达到最低值 2.048,土地资源生态安 展趋势。

表 3 EULESI 指数评价安全等级

项目	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
可持续发展能值指数(EISD)	0.272	0.152	0.140	0.074	0.065	0.144	0.104	0.077
EULESI	5.452	5.406	4.798	2.811	2.295	3.601	3.389	2.048
安全等级	较安全	较安全	较安全	较不安全	较不安全	临界安全	临界安全	较不安全

4 结论与讨论

4.1 结 论

(1) 通过 person 相关性分析得知,EISD 与 EULESI 二者具有极强相关性,相较于 EISD 指数,EULESI 指数对土地资源生态安全评价研究更具有敏感性和代表性,同时作为评价土地资源生态安全水平指标具有科学性,可用于其他类似地区相关研究评价指标。

(2) 受到城市扩张冲击下的 2004—2011 年研究区土地资源生态安全总体呈递减趋势,土地资源生态安全水平波动较大,处于较不稳定发展阶段,总体处于较不安全水平。2004—2006 年研究区土地资源生态安全处于较安全水平;2007—2008 年处于较不安全水平;2009—2010 年均处于临界安全水平;2011 年数值处于近 8 a 来最低值,处于较不安全水平。

4.2 讨 论

本文从土地资源生态系统的物质流、能量流、信息流等生态流角度入手,综合考虑土地资源生态系统与人类社会经济交互作用,引入表征生态安全测度的生态影响要素层,运用能值分析和“压力—状态—影响—响应”(PSIR)模型构建的评价指标体系及土地资源生态安全可持续能值指数(EULESI),有效避免了选取指标过多,指标权重的确定过于主观的弊端,从而对 2004—2011 年哈尔滨所辖市县土地资源生态安全水平进行评价,得出的评价结果与实际相符。这说明本研究构建的评价指标体系及 EULESI 指数合理,评价方法科学可行,这也为其他同类地区土地资源生态安全相关研究提供参考,也为城市扩张下哈尔滨所辖市县生态安全建设、土地资源利用和土地整治提供科学依据。

参考文献:

[1] 李秀霞,张希. 基于熵权法的城市化进程中土地生态安全研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(9):13-17.

[2] Bryant C R, Russwurm L J, Mcleuan A G. The City's Countryside: Land and Its Management in the Rural-Urban Fringe[M]. Longman, London, 1982.

[3] Jogo W, Hassan R. Balancing the use of wetlands for e-

conomic well-being and ecological security: The case of the Limpopo wetland in southern Africa Original Research Article [J]. Ecological Economics,2010,69(7): 1569-1579.

[4] Mohamed A B A A, Sharifi M A, van Keulen H. An integrated agro-economic and agro-ecological methodology for land use planning and policy analysis[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2000,2(2):87-103.

[5] Ye L, Van Ranst E. Production scenarios and the effect of soil degradation on long-term food security in China [J]. Global Environmental Change,2009,11,19(4):464-481.

[6] 刘勇,刘兆友,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):69-75.

[7] 张虹波,刘黎明. 土地资源生态安全研究进展与展望 [J]. 地理科学研究进展,2006,25(5):77-83.

[8] 刘世梁,郭旭东,连纲,等. 黄土高原典型脆弱区生态安全多尺度评价[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1554-1559.

[9] 马倩,张洋,赵枫. 基于 PSR 模型的干旱区绿洲城市生态安全评价:以乌鲁木齐市为例[J]. 土壤通报,2011,10, 42(5):1225-1230.

[10] 曲福田,赵海霞,朱德明. 江苏省土地生态安全问题及对策研究[J]. 自然生态保护,2005(2):57-59.

[11] 邓爱珍,陈美球,林建平. 鄱阳湖区土地资源生态安全评价[J]. 江西农业大学学报,2006,28(5):787-792.

[12] 王文琴. 黄山市土地资源生态安全评价及安全水平预测[D]. 安徽芜湖:安徽师范大学,2010.

[13] 周飞,郭良珍,陈士银,等. 湛江市土地资源生态安全评价与限制因素[J]. 水土保持研究,2010,17(5):202-206,211.

[14] 郑敬刚,许淑娜,喻铮铮,等. 中原经济区核心区土地资源生态安全评价[J]. 水土保持研究,2013,20(3):273-277.

[15] 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.

[16] 左太安,苏维词,马景娜,等. 三峡重庆库区针对水土流失的土地资源生态安全评价[J]. 水土保持学报,2010, 24(2):74-78.

的高低依次是  $Hg > Pb > Cd > As > Cr > Zn$ 。单因子污染指数最高是豌豆尖中的  $Hg$ ，最低的是萝卜根中的  $Zn$ 。菠菜和萝卜叶综合污染指数分别为 1.118, 1.020, 属于轻污染; 葱和萝卜跟处于安全水平, 其余农作物虽然没有受到污染, 但是处于警戒线。

(4) 菠菜对  $As, Cd, Hg, Pb$  的富集系数分别为 0.27, 7.47, 2.32, 0.67, 高于其余农作物。萝卜叶对  $Cr$  和  $Zn$  的富集能力较强, 重金属  $Cr$  富集系数最低的是玉米,  $Zn$  和  $Hg$  富集系数最低的是萝卜根,  $Cd$  和  $Pb$  富集系数最低为马铃薯,  $As$  富集能力最低的为白菜。

#### 参考文献:

- [1] 吕烈武, 郭彬, 漆智平. 海南省万宁市水稻土重金属污染的初步研究[J]. 热带作物学报, 2009(7): 1023-1027.
- [2] 潘根兴, Chang A C, Page A L. 土壤—作物污染物迁移分配与食品安全的评价模型及其应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 854-858.
- [3] 于磊, 张柏. 基于 GIS 的黑土区农业地球化学环境质量综合评价研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(12): 421-424.
- [4] 董霁红, 卞正富, 王贺封, 等. 徐州矿区充填复垦场地作物重金属含量研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 180-182.
- [5] 严连香, 黄标, 邵学新, 等. 锌铬复合胁迫对水稻植株碳氮代谢的影响[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 149-152.
- [6] 梅凡民, 陈敏, 朱海波. 西安市不同灌溉类型农田土壤重金属污染状况研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 223-226.
- [7] 任晓冬, 黄明杰. 草海流域综合管理研究[J]. 生态经济, 2008, 20(5): 147-151.
- [8] 林绍霞, 张清海, 郭媛, 等. 贵州草海沉积物重金属污染特征及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报 2012,

31(11): 2236-2241.

- [9] 丁玉娟, 林昌虎, 何腾兵, 等. 贵州草海耕地土壤重金属污染特征及安全评价[J]. 贵州科学 2013, 31(2): 47-51.
- [10] 卫四涛, 林昌虎, 何腾兵, 等. 草海湖区耕地土壤 HCHs、DDTs 农药残留状况分析[J]. 贵州科学, 2013, 31(2): 52-55.
- [11] 蔡晓玲, 黄小柱, 廖德平. 草海国家级自然保护区耕地土壤化学性质分析[J]. 内蒙古农业科技, 2010(3): 60-61.
- [12] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-381.
- [13] 宋春然, 何锦林, 谭红, 等. 贵州农业土壤重金属污染的初步评价[J]. 贵州农业科学, 2005, 33(2): 13-16.
- [14] NY/T391-2000, 绿色食品: 产地环境技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [15] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [16] 丁真真. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究[J]. 水土保持研究 2007, 14(3): 19-21.
- [17] GB2762-2005, 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [18] GB18406. 1-2001, 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [19] 胡省英, 冉伟彦, 范宏瑞. 土壤—作物系统中重金属元素的地球化学行为[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 84-87.
- [20] 荆旭慧, 李恋卿, 潘根兴. 不同环境下土壤作物系统中重金属元素迁移分配特点[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 812-817.
- [21] 毛岭峰, 彭培好, 陈文德. 重庆地区主要作物重金属富集特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1117-1122.
- [22] 南忠仁, 李吉均, 张建明, 等. 白银市区土壤作物系统重金属污染分析与防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3): 170-173.

(上接第 272 页)

- [17] 余建, 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.
- [18] 杨春红, 张正栋, 田楠楠, 等. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214.
- [19] 陈西蕊, 张蓉珍. 基于 PSR 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.
- [20] 张智光. 基于生态—产业共生关系的林业生态安全测度方法构想[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1326-1336.

- [21] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [22] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [23] 陆宏芳, 蓝盛芳, 陈飞鹏, 等. 农业生态系统能量分析[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 159-162.
- [24] 陆宏芳, 叶正, 赵新峰, 等. 城市可持续发展能力的能值评价新指标[J]. 生态学报, 2003, 23(7): 1363-1368.
- [25] 高长波, 陈新庚, 韦朝海, 等. 广东省生态安全状态及趋势定量评价[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2191-2197.
- [26] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 597-606.