

Land Ecological Security Evaluation and Trend Forecast of Hunan Province Based on P-S-R Model*

Wumei Zhang, Zhengdong Zhang[#], Nannan Tian, Shenfeng Wu, Chunhong Yang

School of Geography, South China Normal University, Guangzhou
Email: [#]zhangzdedu@163.com

Received: Mar. 5th, 2012; revised: Mar. 23rd, 2012; accepted: Apr. 2nd, 2012

Abstract: According to the characteristics of land ecological environment of Hunan, to refer many scholars' research, the paper constructed land ecological security index system of Hunan province based on P-S-R model. AHP (analytic hierarchy process) and expert scoring method are used to determine the weight, and the integrated index method is used to analyze and evaluate the dynamic state of land ecological environment in Hunan province. The result show that the land ecological environment of Hunan is rising, but it just kept in sensitive level during the past ten years. Using GM(1,1) model predicted the dynamic changes of land ecological security in 2010-2019. The prediction shows: the land ecological security of Hunan province showed a rising trend (0.47 - 0.86) from 2010 to 2019. The land ecological environment will be in good state in 2015, and is expected to be safe level in 2019. According to this paper, some corresponding measures and solutions can be put forward to solve the problem and improve the environment.

Keywords: Ecological Security; Evaluation; P-S-R Model; Hunan

基于 P-S-R 模型的湖南省土地生态安全评价与趋势预测*

张五美, 张正栋[#], 田楠楠, 吴申凤, 杨春红

华南师范大学地理科学学院, 广州
Email: [#]zhangzdedu@163.com

收稿日期: 2012 年 3 月 5 日; 修回日期: 2012 年 3 月 23 日; 录用日期: 2012 年 4 月 2 日

摘要: 根据湖南省土地生态环境的现状和特点, 基于 P-S-R 模型构建了湖南省土地生态安全评价指标体系, 应用 AHP 层次分析法和专家打分法确定权重, 采用综合指数法对湖南省 2000~2009 年的土地生态安全状况进行了评价。结果表明: 湖南省土地生态环境安全级别较低, 生态环境质量处于敏感状态, 但土地生态环境质量总体呈现上升的趋势。运用 GM(1,1)模型预测了 2010~2019 年湖南省土地生态安全综合指数的动态变化, 预测显示: 从 2010~2019 年湖南省土地生态安全综合指数呈现上升趋势(0.47~0.86), 2015 年土地生态环境状态进入良好级别, 2019 年达到安全级别。该研究可为湖南省土地生态安全及其未来生态环境质量改善和生态安全规划管理提供依据。

关键词: 生态安全; 评价; P-S-R 模型; 湖南省

*资助信息: 广东省自然科学基金项目(9151063101000046)、广东省软科学项目(2009B70300115)和华南师范大学学术骨干与团队培养专项(G21053)资助。

[#]通讯作者。

1. 引言

土地资源生态安全主要是指地球表面由各种有机物和无机物构成的土地生态系统处于一种健康的发展、循环状态。学术界关于土地利用与生态安全的研究主要集中在作用机理研究、影响评价与安全格局构建 3 个方面,土地生态安全评价和预测是土地生态安全研究的一个重要方向^[1]。土地生态安全评价和预测对于避免规划造成的环境影响和维护区域生态安全有着重要的意义。在实施《湖南国民经济和社会发展规划十二五规划纲要》和全面推进“四化两型”建设的过程中,湖南省土地生态环境将面临越来越大的压力,土地生态环境质量将会受到更大的威胁。该研究以 P-S-R 模型为理论指导构建湖南省土地生态安全评价指标体系,应用 AHP 层次分析法和专家打分法确定各指标的权重,并采用综合指数法对湖南省 2000~2009 年的土地生态安全状况进行了评价。根据所得出的评价结果,在 DPS 中,运用灰色系统方法中的 GM(1,1)模型对湖南省 2010~2019 年土地生态安全综合值进行预测。评价及预测结果可以为生态环境质量改善和生态安全规划管理提供重要的依据。

2. 研究区与研究方法

2.1. 研究区概况

湖南省位于长江以南,北纬 24°39'~30°08'、东经 108°47'~114°15'之间,为中低纬度地区,全省辖域面积 211,829 km²,境内湘江贯穿南北,大部分地区位于洞庭湖以南。以山地、丘陵为主,大陆性亚热带季风湿润气候,光、热、水资源丰富。改革开放以来,湖

南省工业化、城镇化水平快速提高,经济社会得到了长足发展。2010 年地区生产总值 15902.12 亿元,增长 14.5%,比上年提高 0.8 个百分点。其中,第一产业增加值 2339.44 亿元,增长 4.3%;第二产业增加值 7313.56 亿元,增长 20.2%;第三产业增加值 6249.12 亿元,增长 11.5%。第一、二、三次产业对经济增长的贡献率分别为 3.5%、62.3%和 34.2%。三次产业结构为 14.7:46.0:39.3。

2.2. 研究方法

采用 P-S-R 模型与层次分析法、综合指数评价法相结合的方法评价研究区土地生态安全,运用灰色系统 GM(1,1)模型对研究区的土地生态安全状况进行趋势预测。

1) P-S-R 模型,即“压力-状态-响应”模型(P-S-R, Pressure-State-Response)(图 1)是环境质量评价学科中生态系统健康评价子学科中常用的一种评价模型,最初是由加拿大统计学家 David J. Rapport 和 Tony Friend(1979)提出,后由经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)于 20 世纪八九十年代共同发展起来的用于研究环境问题的框架体系。P-S-R 模型体现了人类与环境之间的相互作用关系。人类通过各种活动从自然环境中获取其生存与发展所必需的资源 and 物质,同时又向环境排放废弃物,从而改变了自然资源储量与环境质量,而自然和环境状态的变化又反过来影响人类的社会经济活动,进而社会通过环境、经济等方面的政策,以及通过意识和行为的变化对这些变化做出反应。如此循环往复,构成了人类与环境之间的压力-状态-响应关系^[2]。

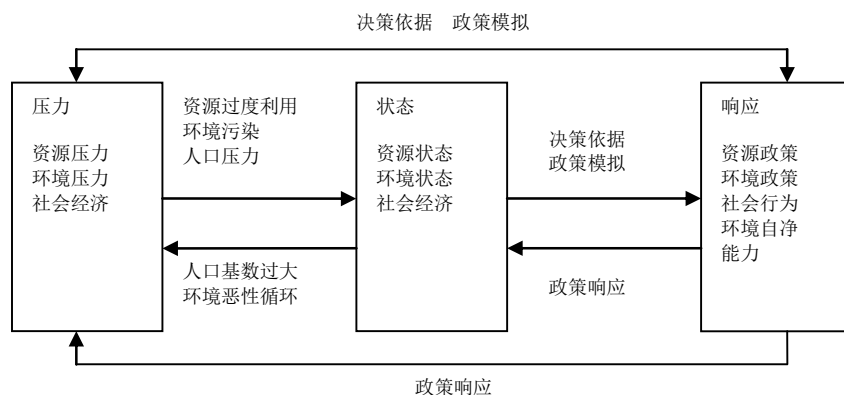


Figure 1. P-S-R model framework of ecological security evaluation index system (ref [3])
图 1. 生态安全评价指标体系 P-S-R 模型框架(据文献[3])

该模型区分 3 类指标, 即压力指标、状态指标和响应指标。其中, 压力指标表征人类的经济和社会活动对环境的作用; 状态指标表征特定时间阶段的环境状态和环境变化情况, 包括生态系统与自然环境现状, 人类的生活质量和健康状况等; 响应指标指社会和个人如何用行动来减轻、阻止、恢复和预防人类活动对环境的负面影响, 以及对已经发生的不利于人类生存发展的生态环境变化进行补救的措施。

2) 层次分析法(AHP)。AHP 是一种定性与定量相结合的决策分析方法。应用这种方法, 决策者通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素, 在各因素之间进行简单的比较和计算, 就可以得出不同方案的权重, 为最佳方案的选择提供依据。本文中各指标权重的最终确定和计算都是通过 AHP 方法结合专家打分得出。

3) 综合指数法。它是指在确定一套合理的指标体系的基础上, 将一组相同或不同指数值通过统计学处理, 使不同计量单位、性质的指标值标准化, 最后转化成成一个综合指数, 以准确地评价工作的综合水平。本文指标体系的处理和最后综合值的计算就是运用综合指数法。

其中单项指标安全值计算的模型为: $S_i = Y_i \times W_i$, 式中 Y_i 为各指标的标准化值, W_i 是各指标的权重。

土地生态安全综合值计算的数学模型为:

$$T = \sum_{i=1}^n (Y_i \times W_i)$$

式中, T 为土地生态安全综合值或系统压力、状态、响应安全指数值; Y_i 为第 i 个指标的安全值; W_i 为准则层指标的权重; n 为指标总数。

4) GM(1,1)模型。灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授于 20 世纪 70 年代末, 80 年代初创立并发展的一套解决灰色系统的理论和方法。其主要研究对象为“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本, 贫信息”不确定性系统。灰色数列预测是灰色系统理论的研究内容之一, 是指利用动态 GM 模型, 对系统的时间序列进行数量大小的预测, 即对系统的主行为特征量或某项指标, 发展变化到未来特定时刻出现的数值进行预测。GM(1,1)模型是灰色系统理论中单序列一阶微分模型。

2.3. 数据来源

研究主要以《湖南省统计年鉴》(2001~2010)、《中国环境统计年鉴》(2001~2010), 湖南省统计信息网 (<http://www.hntj.gov.cn>)、中华人民共和国国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn>) 为主要数据来源, 对湖南省进行土地生态安全评价和预测。

3. 湖南省土地生态安全评价

3.1. 指标体系的构建

在 P-S-R 模型基础上, 参考众多学者所构建的指标体系^[2-7], 结合湖南省土地生态环境现状和对土地生态环境有重要影响的自然、社会、经济各方面的因素以及数据的可获得性, 构建了 3 个层次(目标层、准则层、指标层)的指标体系, 共 22 个指标(表 1)。

评价指标作为影响湖南省土地生态安全水平的因素, 可分为正向指标和逆向指标, 其中正向指标的值越大, 说明土地生态安全的状况越好, 维护和改善土地生态系统安全的能力越强; 逆向指标的值越大, 说明土地资源及其在利用过程中的冲突越大, 土地生态系统安全的状况越差。其中, “城市化水平”与“未成林造林面积比重”为逆向指标。在城市化的不同阶段, 城市化的发展与推进对土地生态系统具有不同的影响。相关研究表明, 近 40 年来, 湖南长沙在城市化过程中, 长沙市土地覆被格局发生了明显变化。具体而言, 建设用地比例逐年上升且变化幅度最大, 非林植被比例却逐年下降; 与此同时, 林地和水体的变化幅度较小, 但在此过程中, 也曾呈现出“先增加后下降”的趋势^[8]。由此可推测, 湖南省近十年以来, 城市化的发展对土地生态系统而言是一种较大的压力。根据湖南省统计年鉴(2001~2010), 数据显示近十年来, “未成林造林面积的比重”与“灌木、有林地面积比重”存在一定的负相关关系, 且未成林造林地的生态环境非常脆弱, 由此可知, “未成林造林面积比重”对土地生态系统而言是一个逆向指标。

3.2. 指标权重的确定及一致性检验

采用 AHP 层次分析法和专家打分相结合的方法确定各因素的权重。运用这种方法, 决策者通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素, 各个因素之间进行简单的比较和计算, 就可以得出不同因素的重要性

Table 1. Land ecological security evaluation index system of Hunan Province
表 1. 湖南省土地生态安全评价指标体系

目标层 Destination layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	单位 Unit	指标性质 Index properties	
湖南省土地生态安全评价(A)	系统压力(B ₁)	人口密度(C ₁)	人/km ²	-	
		人口增长率(C ₂)	%	-	
		城市化水平(C ₃)	%	-	
		人均耕地面积(C ₄)	hm ² /人	+	
		单位耕地面积化肥负荷(C ₅)	Kg/hm ²	-	
		工业固体废物排放量(C ₆)	万吨/年	-	
		SO ₂ 排放强度(C ₇)	万吨/年	-	
		废水排放量(C ₈)	万吨/年	-	
		农业成灾面积占受灾面积比重(C ₉)	%	-	
	系统状态(B ₂)	耕地面积比重(C ₁₀)	%	+	
		有效灌溉面积比重(C ₁₁)	%	+	
		未成林造林面积比重(C ₁₂)	%	-	
		森林覆盖率(C ₁₃)	亿立方米/人	+	
		人均水资源拥有量(C ₁₄)	万元/km ²	+	
		地均 GDP(C ₁₅)	%	+	
		GDP 增长率(C ₁₆)	%	+	
		环保投资占 GDP 的比重(C ₁₇)	%	+	
		系统响应(B ₃)	工业固体废物处置率(C ₁₈)	%	+
			工业废水排放达标率(C ₁₉)	%	+
			SO ₂ 排放达标率(C ₂₀)	%	+
			第三产业产值占 GDP 的比重(C ₂₁)	%	+
			自然保护区占国土面积的比重(C ₂₂)	%	+

程度，由此得出相应的权重，如表 2 所示。

计算每一个判断矩阵的最大特征值和对应特征向量，并作一致性检验，若一致性检验通过，则对应于最大特征值的特征向量(归一化后)可作为权系数。按公式 $Rc = Ic/IR$ 进行一致性检验。若 $Rc < 0.10$ ，则一致性检验通过，计算所得特征向量可作为权向量，否则要重新调整判断矩阵，直到满足要求为止。经计算得出，准则层中 $Rc = 0 < 0.1$ ；指标层中，系统压力指标 $Rc = 0.0003 < 0.1$ 、系统状态指标 $Rc = 0.0016 < 0.1$ 、系统响应指标 $Rc = 0.0046 < 0.1$ ，所以，各指标均通过一致性检验，可以作为决策使用。

3.3. 数据标准化

由于各指标的单位不同，量纲不同，数量级也不同，各指标之间就缺乏可比性。因此，为统一标准，首先要对所有评价指标进行标准化处理，以消除量纲，将其转化成无量纲、无数量级差别的标准分，然后在进行分析评价。本文采用的是极差变换法。其公

式为：

当指标越大越好时：

$$Y_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

当指标越小越好时：

$$Y_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中： Y_i 为参评因子的标准化赋值； X_i 为实测值； X_{\max} 为实测最大值； X_{\min} 为实测最小值。 Y 值大则表示该因子对环境的影响大，反之则小。

评价指标经标准化处理后，其数值介于 0~1。其中，0 表示选定的时间序列内某一年的某一指标和其他年份的同一指标相比处于最差的状态；1 表示时间序列内某一年的某一指标和其他年份的同一指标相比处于最佳的状态。

3.4. 土地生态安全等级的确定

在参考相关文献[2,4,9-13]的基础上，针对湖南省

Table 2. The indexes weights of land ecological security evaluation of Hunan Province
表 2. 湖南省土地生态安全评价指标权重

指标代码 Index code	B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
权重 Weight	0.4018	0.0685	0.0471	0.0590	0.0520	0.0471	0.0395	0.0448	0.0437
指标代码 Index code	B ₂	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
权重 Weight	0.2693	0.0261	0.0379	0.0379	0.0327	0.0475	0.0254	0.0399	0.0219
指标代码 Index code	B ₃	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂		
权重 Weight	0.3289	0.0728	0.0472	0.0558	0.0596	0.0413	0.0522		

土地生态环境的实际情况，采用等间距法划分安全指数，对应将土地生态环境安全水平划分为 5 级(表 3)。

$$T = \sum_{i=1}^n (Y_i \times W_i)$$

式中， Y_i 为第 i 个指标的安全指数值； W_i 为准则层指标的权重； n 为指标总数。

4. 评价结果分析与预测

4.1. 评价结果与分析

4.1.1. 评价结果

评价结果采用综合指数法计算得出。其中单项指标安全指数值计算的模型为：

$$S_i = Y_i \times W_i$$

式中 S_i 为单项指标安全指数值， Y_i 为各指标的标准化值， W_i 是各指标的权重。

土地生态安全压力、状态、响应三个系统安全指数值及土地生态安全综合值计算的模型为：

根据以上方法计算得出湖南省 2000~2009 年土地生态系统压力安全指数，状态安全指数，响应安全指数及土地生态安全综合指数值，如表 4 和图 2 所示。系统压力安全指数反映系统所承受压力的大小，指数越小，压力越大；系统状态安全指数反映系统生态安全状态，指数越大，状态越好；系统响应安全指数反映社会和人类活动不利于人类生存发展的生态环境变化进行补救和改进所取得的效果，指数越大越安全。安全综合指数表示整个土地生态系统的安全情况，指数越大越安全。

Table 3. The chart of land ecological security rating of Hunan Province
表 3. 湖南省土地生态安全评价等级

安全指数区间 Segment	评价等级 Degree	土地系统特征 Characteristic
(0, 0.2]	恶劣级	土地生态环境严重退化，不能满足基本的服务功能，生态环境恶化，抵抗外界干扰能力极差，生态恢复和重建困难。
(0.2, 0.4]	风险级	土地生态系统受到较大的破坏，生态环境较恶劣，服务功能和生态结构有所退化，抵抗外界干扰的能力较差，受干扰后容易发生生态灾害。
(0.4, 0.6]	敏感级	土地生态系统受到一定的破坏，服务功能和生态结构尚能维持，抵抗干扰的能力下降，受干扰后比较容易发生生态灾害。
(0.6, 0.8]	良好级	土地生态系统受到轻微的破坏，但服务功能和结构尚好，受干扰后的自我修复能力较强，发生灾害的可能性较小。
(0.8, 1)	安全级	土地生态系统未受到明显的人类干扰，服务功能正常，生态结构完整，土壤肥沃，基本无污染，很少发生灾害，无明显的生态问题。

Table 4. The results of land ecological security evaluation of Hunan from 2000 to 2009
表 4. 2000~2009 年湖南省土地生态安全评价结果

年份 Year	压力安全指数 Pressure index	状态安全指数 Pressure index	响应安全指数 Pressure index	安全综合指数 Comprehensive index
2000	0.3682	0.1109	0.0157	0.4948
2001	0.3005	0.0973	0.0692	0.467
2002	0.2842	0.0940	0.1000	0.4784
2003	0.2137	0.0797	0.1588	0.4522
2004	0.1533	0.0922	0.1635	0.409
2005	0.1891	0.1041	0.2262	0.5193
2006	0.1531	0.1253	0.2312	0.5096
2007	0.1311	0.1221	0.2295	0.4828
2008	0.1374	0.1602	0.2152	0.5128
2009	0.0845	0.1696	0.2845	0.5386

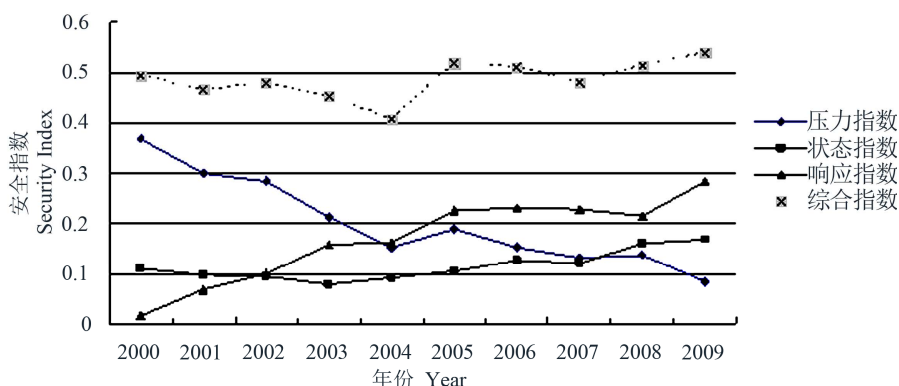


Figure 2. The trend of land ecological security value in Hunan from 2000 to 2009
图 2. 2000~2009 年湖南省土地生态安全值变化趋势

4.1.2. 结果分析

由表 3、表 4、图 2 可知，湖南省土地生态安全级别较低，近 10 年来一直处于敏感级别。主要原因是：人口多，人口密度大，人口增长快，城市化水平迅速发展，人均耕地面积逐年减少，人多地少矛盾越来越突出。在城市化和工业化过程中，出现各种不合理的人类活动，对土地生态环境造成了越来越大的压力。

1) 从准则层分析，土地生态系统的压力安全值一直处于下降趋势，这说明在近十年内，湖南省土地生态环境系统所承受的压力在不断增大。自 2005 年以后压力安全值的下降趋势相对前五年有所好转，下降的速度在减小。这主要是由于 2005 年之后的人口密度相对前几年有所下降，人均耕地面积减少的速度不及前五年大。各种污染物的排放强度及单位耕地面积的化肥负荷等增加量相对前五年都有所减少。

土地生态系统的响应安全值不断上升，这说明湖南省各地区各部门积极采取措施和政策对生态环境污染进行治理和改善。主要体现在政府部门对环保卫生事业的投资力度不断加大，对各种污染物的处理不断加强，对生态自然区保护的重视度提高，以及积极发展对土地生态环境影响较小、经济效益较高的第三产业等。

土地生态系统的状态安全值稳定上升，主要原因是森林覆盖率的增大，生态环境质量有所提升。地均 GDP 的不断增大，间接的减缓了对土地的压力。虽然各地区各部门积极采取措施及政策治理和改善湖南的土地生态环境，但是由于 2000 年~2004 年，生态环境所承受的压力过大，土地生态环境本身状态表现也

不是很乐观。响应安全值和压力安全值互相抵消之后，综合安全值还是出现略微的下降，土地生态环境稍有退化。而在 2005 年之后，由于系统所受压力和人为响应的变化，综合安全值波动上升，生态环境不断好转。总体而言，土地生态系统在承受较大系统压力的条件下，综合安全值没有较大幅度的变动，主要原因是系统的响应起到重要作用。

2) 从指标层面分析，2004 年人口密度为 319.2 人/km²，是 10 年内的最大值。2004 年人口增长率相对 2000 年~2003 年以及 2005 年较大，单位面积化肥负荷较前几年也出现明显的增加，而环保投资占 GDP 的比重、第三产业产值占 GDP 的比重却较低。因此 2004 年土地生态环境系统所承受的压力明显增大，表现为压力安全值降低，系统响应变化并不明显，响应安全值几乎没有变化，最终使得综合安全值是 10 年内的最低值。

2007 年生态安全值为后五年的最低值，主要是由于单位耕地面积化肥负荷以及成灾面积占受灾面积的比重是 10 年内最大的，2007 年农业干旱受灾面积为 12,600 km²，成灾面积为 9440 km²，几乎是 2006 年的 4~5 倍，虽然受灾面积并非 10 年内的最大值，但成灾面积占受灾面积的比重是 10 年内的最大值，且明显高于前 10 年。且在 2007 年人口增长率也较大。

4.2. 生态安全评价预测

利用以上研究计算得到的 2000~2009 年湖南省土地生态安全综合指数作为原始数据，在 DPS 中，运用灰色系统方法中的 GM(1,1)模型对湖南省 2010~2019 年土地生态安全综合值进行预测。GM(1,1)模型的

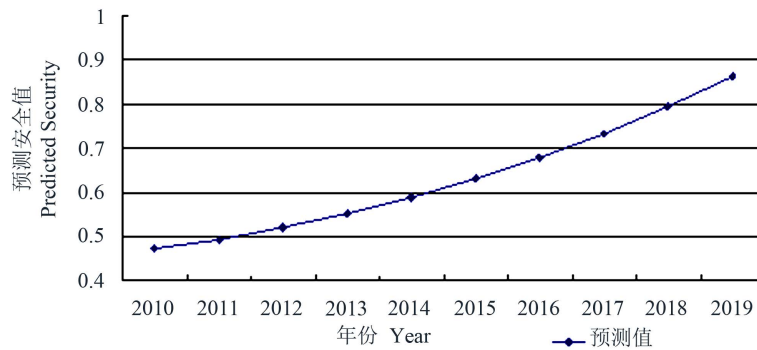


Figure 3. The trends of land ecological security in Hunan from 2010 to 2019
图 3. 2010~2019 年湖南省土地生态安全变化趋势

基本形式为 $x_0(k) + az_1(k) = b^{[14]}$ ，其中，

$$z_1(k) = \frac{1}{2}(x_1(k) + x_1(k-1)), \quad x_1(k) \text{ 为 } x_0(k) \text{ 的一次累}$$

加序列， z_1 为 x_1 的紧邻均值生成序列。根据已知序列可计算得出 $x_0(k)$ 的时间响应序列

$$x_1(k+1) = \left(x_0(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}^{[14]}。 \text{ 根据 GM}(1,1)\text{ 模型}$$

预测可得出湖南省土地生态安全值序列

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(10)) \\ = (0.4948, 0.467, 0.4784, \dots, 0.5386)$$

的预测公式为： $x(t+1) = -0.58164e^{-0.058973t} + 0.61375$ ，精确度检验值为 $C = 0.4992$ 好； $p = 0.8889$ 好。结果显示 2010~2019 年湖南省土地生态安全综合指数仍呈现上升趋势(图 3)。

由图 3 可知，虽然目前湖南省土地生态环境安全级别较低，生态环境质量处于敏感状态，但从预测可以看出具有较大的发展潜力。若湖南省各地区各政府部门继续努力减少生态环境所承受的各种压力，积极应对和预防生态环境问题，对生态环境可能出现的问题采取“预防为主，防治结合”的方针，在生态环境承载力范围之内努力发展经济，提高人们的生活水平。在环境承载力范围之内实现“减少生态环境压力，提高生态环境防治，积极发展社会经济”同步进行，那么，在未来近 10 年，湖南省土地生态环境就会进入良好甚至安全级别，继而形成土地生态环境的良性循环。

5. 结论

本文运用 P-S-R 模型研究了 2000~2009 年湖南省土地生态安全状况，并在此基础上进行了分析和预

测。结果表明，近 10 年来，湖南省土地生态安全处于敏感级别。响应指标在生态环境的恢复和重建方面起主要作用，尽管政策响应越来越强，但生态环境压力强度仍然较大，且有增强趋势，使土地生态安全状态呈现出波动状态。虽然当前湖南省的土地生态安全性处于较低状态，但未来 10 年具有较大的发展潜力。

参考文献 (References)

- [1] 史永龙, 贾宪威, 蔡昕等. 省域土地生态安全研究——以江苏省为例[J]. 安徽农业学报, 2011, 39(4): 2365-2368.
- [2] 范瑞锭, 陈松林, 戴菲等. 福建省土地利用生态安全评价[J]. 福建师范大学报(自然科学版), 2010, 9(5): 97-108.
- [3] 梁留科. 土地生态利用理论与案例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 130.
- [4] 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.
- [5] 吕洪德. 城市生态安全评价指标体系研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005: 6-11.
- [6] 杨志, 赵冬至, 林元烧. 基于 PSR 模型的河口生态安全评价指标体系研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 2(1): 139-142.
- [7] 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(6): 1-6.
- [8] 董明辉, 魏晓, 邹滨. 城市化过程对土地覆被空间格局的影响研究——以湖南省长沙市为例[J]. 经济地理, 2009, 29(12): 2001-2005.
- [9] 曾翠萍, 邱慧珍, 张文明等. 基于 PSR 模型的庆阳市生态安全评价[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 67-72.
- [10] 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.
- [11] 王军广, 赵志忠, 赵广孺等. 海南岛土地生态安全评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 4215-4218.
- [12] 张秀梅, 张征, 王举位等. 基于 PSR 模型的煤炭资源型城市生态安全评价研究——以鄂尔多斯市为例[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 1040-1042.
- [13] 杜艳春, 姜畔, 毛建素. 基于 P-S-R 模型的焦作市生态安全评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S1): 280-285.
- [14] 张雅波. 灰色预测的 GM(1,1)模型[J]. 吉林建筑工程学院学报, 1999, 4: 56-60.