

余晓玲, 宋慷慷, 林珍铭. 工业城市土地生态安全评价及其障碍因子分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 271–275.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.11.061

# 工业城市土地生态安全评价及其障碍因子分析

余晓玲<sup>1</sup>, 宋慷慷<sup>2</sup>, 林珍铭<sup>2</sup>

(1. 广西科技大学鹿山学院, 广西柳州 545616; 2. 桂林理工大学, 广西桂林 541004)

**摘要:**基于“自然-经济-社会”模型构建土地生态安全评价指标体系,采用层次分析法和熵值法相结合的主客观综合赋权法,通过综合指数法和障碍度模型,对区域土地生态安全状态及对应的障碍因子进行评价和分析。研究表明,(1)2004—2015 年期间广西柳州市土地生态安全水平有所提升,但土地生态安全综合值整体偏低,土地生态系统面临的问题并未得到根本性改变。(2)从单项指标来看,单位耕地农药施用量、单位耕地化肥施用量这 2 个指标正在对柳州市土地生态系统产生长久而持续的影响;酸雨频率是柳州市土地生态安全潜在的威胁;人均国内生产总值(GDP)、农村居民人均纯收入、城市化水平、农业机械化水平、人均工业废水排放量等因素也在威胁着土地生态安全。(3)由于柳州市曾长期以发展工业为优先,在发展经济的过程中对自然环境造成的破坏较为严重,土地生态系统相对较为脆弱,不容忽视。

**关键词:**土地生态安全;层次分析法;熵值法;障碍度;障碍因子;柳州市

**中图分类号:** X24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)11-0271-05

党的十九大报告中指出:“必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,坚持节约资源和保护环境的基本国策,像对待生命一样对待生态环境。”建设美丽中国既是建设中国特色社会主义的基本方略,也是人民群众自身的要求。自 20 世纪 90 年代我国开始提出生态安全(ecological security)问题以来,生态环境的保护和建设便受到人们的高度重视,现在生态安全已成为国家安全和区域安全的重要组成部分<sup>[1]</sup>。生态安全有广义和狭义之分,一般而言应包含生态系统的可持续发展能力以及对人类提供完整生态服务或人类生存安全的能力<sup>[2]</sup>。随着人们对生态安全的重视,土地生态系统作为一切资源与环境的载体<sup>[3]</sup>,土地生态安全也随之成为当前研究的热点。土地生态安全一般指地球陆地表层岩土部分内,由各种有机物和无机物构成的生态系统的结构不受破坏,同时该生态系统为人类提供服务的质量和数量能够持续满足人类生存和发展的需要,重点在于土地生态系统自身的安全性及其为人类所提供生态服务的可持续性<sup>[4]</sup>。由于当前人类对土地的利用强度不断增加,人地矛盾日益突出,土地生态安全问题已逐渐成为制约经济社会可持续发展的重要因素<sup>[5-6]</sup>。

当前对土地生态安全的研究集中于土地生态安全评价<sup>[7]</sup>。土地生态安全评价是土地生态安全研究中的重要内容,能够将抽象的生态系统安全情况直观、量化地展示出来,为土地的管理和决策提供科学的依据<sup>[8]</sup>。目前,土地生态安全评价主要围绕土地生态安全评价的基础理论研究、评价指

标体系的构建、合理的评价方法探索、科学的评判标准划定以及合理的评价尺度等方面展开<sup>[9]</sup>。但是这些研究大多集中于国家级和省级的宏观尺度,市、县一级的研究较少。由于生态研究尺度具有不可推绎性的特点,在土地生态安全研究中,研究尺度的差异将影响结果的科学性<sup>[10]</sup>,如何科学合理地选择研究尺度使研究结果更具代表性还有待进一步研究<sup>[11]</sup>。

柳州市地处广西壮族自治区中北部,属于喀斯特岩溶地貌地区,是土地生态环境变化敏感区域。但是在过去,柳州市经济长期以工业为主导,曾引发严重的“酸雨”问题,对土地生态平衡破坏极为严重。无论是地理位置还是城市属性,柳州市均具有一定的特殊性。但有关柳州市土地生态安全的相关研究<sup>[12-13]</sup>主要集中在土地可持续利用领域,有关土地生态安全评价的研究相对较少。鉴于此,笔者以柳州市作为研究对象,从土地生态系统的结构和功能出发,基于“自然-经济-社会”模型构建土地生态安全评价指标体系,采用层次分析法和熵值法相结合的主客观综合赋权法,对柳州市土地生态安全状况进行综合评价。并在对 2004—2015 年柳州市土地生态安全动态评价的基础上,通过对障碍因子进行诊断和分析,以期为提高柳州市土地生态安全提供科学依据和合理建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

柳州市位于 23°54′~26°03′N, 108°32′~110°28′E。全市土地面积为 1.86 万 km<sup>2</sup>,市区面积为 1 016.75 km<sup>2</sup>,市内土壤大多数厚度适中,质地较好,适合开垦耕作,但土壤中有机质含量低,肥力较低。2015 年末,全市户籍总人口为 381.62 万人,人口自然增长率为 10.49‰,地区生产总值为 2 298.62 亿元,三次产业结构由 2004 年的 13.5:53.5:33 调整到 2015 年的 7.2:56.6:36,工业始终占据主导地位,是广西最大的工业基地。

收稿日期:2018-04-26

基金项目:广西壮族自治区教育厅高校科研项目(编号:YB2014620);广西高校科学技术研究项目(编号:KY2015LX124);国家自然科学基金(编号:41761112)。

作者简介:余晓玲(1980—),女,广西柳州人,博士,讲师,主要从事资源与可持续发展研究。E-mail:61529045@qq.com。

通信作者:林珍铭,博士,讲师,主要从事旅游资源开发与城市发展研究。E-mail:linzhenm@163.com。

1.2 数据来源

主要统计数据来源于 2005—2016 年的《柳州统计年鉴》和《广西统计年鉴》,以及 2004—2015 年的《柳州环境质量通报》。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系的构建 构建土地生态安全评价指标体系是开展土地生态安全评价的第一步。由于土地生态系统

是自然、经济、社会过程相互联系和作用的统一体,讨论土地生态安全问题,不能仅就土地生态而论,而应着眼于土地利用系统,将土地生态安全状况视为自然要素、经济要素、社会要素综合作用的结果<sup>[14-15]</sup>。基于此,依据科学性、系统性、相对独立性、可获取性、可比性等指标体系建立原则,结合柳州市实际情况,在自然、经济和社会 3 个层面上选取 22 个指标,构建柳州市土地生态安全评价指标体系(表 1)。

表 1 柳州市土地生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标权重	趋向性	标准值	标准值来源
A:柳州市土地生态安全评价	B <sub>1</sub> :自然因素子系统	C <sub>1</sub> :人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	0.179 1	+	0.08	国际公认值
		C <sub>2</sub> :森林覆盖率(%)	0.103 3	+	54.00	广西生态建设指标
		C <sub>3</sub> :酸雨频率(%)	0.525 4	-	10.00	国内公认值
		C <sub>4</sub> :旱涝保收面积比重(%)	0.058 7	+	60.00	国内公认值
		C <sub>5</sub> :建成区绿化覆盖率(%)	0.077 3	+	36.00	国内公认值
		C <sub>6</sub> :人均公共绿地面积(m <sup>2</sup> )	0.056 5	+	12.00	生态市指标
	B <sub>2</sub> :经济因素子系统	C <sub>7</sub> :经济密度(万元/km <sup>2</sup> )	0.087 3	+	715.30	全国平均值
		C <sub>8</sub> :第三产业产值比重(%)	0.149 7	+	40.00	国家标准
		C <sub>9</sub> :人均国内生产总值(GDP)(元/人)	0.1064	+	50 251.00	全国平均值
		C <sub>10</sub> :农村居民人均纯收入(元/人)	0.105 8	+	11 422.00	全国平均值
		C <sub>11</sub> :环保支出占 GDP 的比重(%)	0.243 4	+	1.50	广西生态建设指标
		C <sub>12</sub> :全社会固定资产投资增长率(%)	0.109 7	+	17.20	广西平均值
	B <sub>3</sub> :社会因素子系统	C <sub>13</sub> :单位耕地农药施用量(kg/hm <sup>2</sup> )	0.101 9	-	0.13	国际公认值
		C <sub>14</sub> :单位耕地化肥施用量(kg/hm <sup>2</sup> )	0.095 9	-	255.00	国际公认值
		C <sub>15</sub> :人口密度(人/km <sup>2</sup> )	0.049 0	-	128.78	国际公认值
		C <sub>16</sub> :人口自然增长率(‰)	0.165 0	-	5.00	国际公认值
		C <sub>17</sub> :城市化水平(%)	0.047 1	+	60.00	国际公认值
		C <sub>18</sub> :农业机械化水平(kW/hm <sup>2</sup> )	0.038 3	+	20.00	国际公认值
		C <sub>19</sub> :人均工业废水排放量(t/人)	0.372 2	-	15.00	国际公认值
		C <sub>20</sub> :工业废水排放达标率(%)	0.094 0	+	100.00	国际公认值
		C <sub>21</sub> :工业固体废物产生量(10 <sup>4</sup> t)	0.134 3	-	1.46	广西平均值
		C <sub>22</sub> :工业固体废物综合利用率(%)	0.100 3	+	100.00	国际公认值

1.3.2 评价指标安全指数模型 土地生态安全标准值的确定是土地生态安全评价的重要环节。从柳州市土地生态环境特点出发,通过参考已有的国际标准或国家标准、国际公认值、国际平均值以及省际平均值等,综合确定了柳州土地生态安全标准值(表 1)。在此基础上,通过评价指标安全指数模型,计算各参评评价指标的安全指数(表 2)。

表 2 评价指标安全指数模型

指标趋向性	标准值 Y	实际值 X 与 Y 的关系	安全指数 P <sub>i</sub>
正	安全值	X ≥ Y	1
		X < Y	X/Y
	警戒值	X > Y	1 - Y/X
负	安全值	X ≤ Y	0
		X > Y	Y/X
	警戒值	X ≥ Y	0
		X < Y	1 - X/Y

1.3.3 指标权重的确定 指标权重的确定主要通过主观赋权法和客观赋权法 2 种,主观赋权法以层次分析法为代表,客观赋权法则以主成分分析法和熵权法为主。本研究通过将层次分析法与熵权法结合,对柳州市土地生态安全评价指标进行赋权,确定指标的综合权重。

1.3.3.1 层次分析法 层次分析法采用专家咨询评分的定

性方法确定权重,然后对无量纲的数据进行综合,可以把对策的提出过程进行模型化与数量化。层次分析法的主要过程包括以下几个方面:(1)建立层次结构模型;(2)专家评分;(3)构造判断矩阵;(4)依次进行层次单排序及其一致性检验、层次总排序及其一致性检验;(5)得到总排序权值。对于矩阵的计算主要借助 MATLAB 软件进行。

1.3.3.2 熵权法 信息熵(Information Entropy)是香农(Shannon CE)在 1948 年提出来的概念,用来反映系统的无序程度,定量判断系统的演化方向,能尽量消除各指标权重计算的人为干扰,使评价结果更符合实际。步骤如下:

$$Q_i = (1 - E_i)/(n - E_i); \tag{1}$$

$$E_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m \frac{q_{ij}}{q_i} \ln \frac{q_{ij}}{q_i}; \tag{2}$$

$$E_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{q_{ij}}{q_i} \ln \frac{q_{ij}}{q_i}。 \tag{3}$$

式中:Q<sub>i</sub>为指标熵权;E<sub>i</sub>为指标信息熵;n为指标数量;m为统计的年份;q<sub>ij</sub>为指标原始数据的标准化值;q<sub>j</sub>为第 i 项指标所有年份标准化值的和,即  $q_i = \sum_{j=1}^m q_{ij} (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m)$ 。

1.3.3.3 确定指标的综合权重 在通过层次分析法和熵权法获得各指标的权重后,取平均值确定指标的综合权重(表 1)。

1.3.4 土地生态安全状态评价计算

1.3.4.1 土地生态安全状态评价 本研究利用综合指数法来测度土地生态安全性,公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i。$$

式中: $S$  为土地生态安全综合值; $n$  为指标总数; $W_i$  为指标  $i$  的权重; $P_i$  为指标  $i$  的安全指数。

1.3.4.2 土地生态安全状态分级标准 笔者在参考相关研究<sup>[3,7-9]</sup>的基础上,结合柳州市实际情况,设置了柳州市土地生态安全水平综合评判标准(表3)。

表 3 柳州市土地生态安全状态分级标准

安全值区间	等级	安全程度	指标特征
0~0.4	I	恶劣级	土地生态环境受到严重破坏,生态系统结构与服务功能近乎崩溃,生态环境恢复与重建非常困难,生态灾害频繁
>0.4~0.6	II	风险级	土地生态环境受到较大破坏,生态系统结构与功能严重退化,生态环境恢复与重建困难,生态灾害较多
>0.6~0.7	III	敏感级	土地生态环境受到一定破坏,生态系统结构与功能已有退化,生态环境恢复与重建有一定困难,生态问题较多,生态灾害时有发生
>0.7~0.9	IV	良好级	土地生态环境破坏较小,生态系统结构与功能较完善,生态环境恢复与重建容易,生态问题不显著,生态灾害不常发生
>0.9~1.0	V	理想级	土地生态环境基本未受干扰,生态系统结构与功能基本完整,生态环境恢复再生能力强,生态问题不明显,生态灾害少有出现

1.3.5 土地生态安全障碍度 通过建立土地生态安全障碍度模型,找出各年度主要的障碍因子,从而分析土地生态安全发生变化的主要影响因素。为此,引入“指标偏离度”的概念,以此为基础计算各指标对区域土地生态安全的障碍度。

从标准差的概念可以看出,标准差是从平均意义上反映每个指标与均值的偏差或者说离散程度。因此,在确定了土地生态安全指数后,通过下述公式计算指标与土地生态安全标准值的差距,即指标偏离度:

$$N_i = 1 - P_i。$$

式中: $N_i$  是为单项指标的指标偏离度; $P_i$  为单项指标的土地生态安全指数。

障碍度是单项指标对土地生态安全水平的影响度:

$$A_i = \frac{N_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n N_i \times W_i} \times 100%。$$

式中: $A_i$  是为单项指标的障碍度; $W_i$  为单项指标的权重。

2 结果与分析

2.1 土地生态安全状态的动态变化

根据土地生态安全状态评价模型计算得到 2004—2015 年柳州市土地生态安全综合值(表4)。

2004—2015 年间,土地生态安全值从 0.451 7 上升至 0.657 8,总体而言土地生态安全状态是上升趋势。但是也要看到,一方面土地生态安全综合值整体偏低,即使在最好的年份 2012 年土地生态安全综合值也仅仅是刚刚达到良好级,其他年份都是在风险级或敏感级,另一方面土地生态安全综合值的上升幅度很小,年均变化率只有 3.5%,说明区域土地生态系统面临的问题虽然有所改变,却并未得到根本性改变,土地生态系统承受的压力依然很大。从土地生态安全分级标准中关于敏感级的说明来看,长期处于这个级别的土地生态系统,其结构和功能必然受到很大影响,需要针对突出问题制定相应的调控措施,才能对土地生态环境进行有效的保护和恢复,切实降低土地生态安全风险。

从土地生态安全综合值变化的细节来看,2004—2012 年,

表 4 2004—2015 年柳州市土地生态安全综合值

年份	自然因素 子系统	经济因素 子系统	社会因素 子系统	土地生态 安全综合值	等级
2004	0.503 9	0.385 0	0.466 3	0.451 7	风险
2005	0.506 8	0.501 3	0.487 9	0.498 7	风险
2006	0.502 2	0.372 6	0.531 2	0.468 7	风险
2007	0.544 1	0.383 9	0.577 3	0.501 8	敏感
2008	0.572 2	0.420 8	0.522 6	0.505 2	敏感
2009	0.707 3	0.431 7	0.529 5	0.556 2	敏感
2010	0.765 9	0.461 0	0.460 8	0.562 6	敏感
2011	0.763 7	0.519 2	0.644 1	0.642 4	敏感
2012	0.939 6	0.536 4	0.654 5	0.710 1	良好
2013	0.607 7	0.418 9	0.673 4	0.566 6	敏感
2014	0.642 5	0.553 7	0.662 0	0.619 4	敏感
2015	0.702 1	0.556 6	0.714 8	0.657 8	敏感

虽然在 2006 年出现小幅度下滑,但是整体而言是平稳上升趋势,且在 2012 年达到了良好级。然而 2013 年土地生态安全综合值急剧下滑,下降幅度达到 20%,土地生态系统再次回到了敏感级,且得分还小于 2011 年。从自然—经济—社会 3 个子系统安全综合值的变化情况来看,是自然因素子系统和经济因素子系统安全综合值均出现了大幅度下滑,从而造成了这种局面。其中自然因素子系统的下滑幅度达到了 35%,经济因素子系统的下滑幅度也达到 22%。由此可见,作为老牌工业城市,在工业发展的长期影响下,柳州市的自然环境相对较为脆弱,一旦有所疏忽就会产生严重的后果。随着生态环境治理和保护投入的增加,社会经济对生态环境的正向作用增强,当经济发展出现下滑趋势时,土地生态安全得不到保障,也随之下降。

2.2 土地生态安全障碍因子分析

根据障碍度模型计算得到柳州市 2004—2015 年土地生态安全各评价指标的障碍度,从计算结果及柳州市的实际情况出发,以障碍度大于 8% 的标准将各年度的障碍因子按大小进行排序(表5),各障碍因子出现的频率见表6。

2.2.1 时间维度 从表5可以看出,从时间维度来看,柳州

表 5 2004—2015 年柳州市土地生态安全评价指标障碍度

2004 年		2005 年		2006 年		2007 年		2008 年		2009 年		2010 年		2011 年		2012 年		2013 年		2014 年		2015 年	
障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度
C <sub>2</sub>	58.6	C <sub>2</sub>	33.1	C <sub>1</sub>	30.1	C <sub>20</sub>	23.1	C <sub>6</sub>	12.7	C <sub>6</sub>	10.8	C <sub>16</sub>	14.7	C <sub>8</sub>	12.4	C <sub>8</sub>	11.4	C <sub>12</sub>	80.6	C <sub>16</sub>	16.5	C <sub>16</sub>	12.4
C <sub>1</sub>	27.9	C <sub>1</sub>	28.5	C <sub>5</sub>	21.3	C <sub>6</sub>	20.6	C <sub>9</sub>	12.3	C <sub>19</sub>	10.8	C <sub>8</sub>	12.5	C <sub>21</sub>	10.1	C <sub>21</sub>	10.5	C <sub>8</sub>	11.6	C <sub>21</sub>	10.8	C <sub>12</sub>	10.2
C <sub>7</sub>	23.9	C <sub>7</sub>	22.0	C <sub>22</sub>	19.7	C <sub>5</sub>	18.3	C <sub>22</sub>	11.9	C <sub>9</sub>	10.5	C <sub>19</sub>	10.8	C <sub>17</sub>	9.4	C <sub>17</sub>	9.4	C <sub>21</sub>	10.8	C <sub>3</sub>	9.1	C <sub>11</sub>	9.0
C <sub>20</sub>	23.6	C <sub>9</sub>	17.1	C <sub>7</sub>	19.0	C <sub>7</sub>	15.5	C <sub>7</sub>	11.4	C <sub>8</sub>	9.7	C <sub>21</sub>	9.9	C <sub>15</sub>	8.6	C <sub>15</sub>	8.5	C <sub>3</sub>	10	C <sub>15</sub>	8.7	C <sub>21</sub>	8.9
C <sub>6</sub>	22.1	C <sub>5</sub>	16.8	C <sub>6</sub>	16.1	C <sub>9</sub>	14.0	C <sub>20</sub>	10.9	C <sub>21</sub>	9.7	C <sub>6</sub>	9.5	C <sub>18</sub>	8.3	C <sub>13</sub>	8.3	C <sub>17</sub>	9.4	C <sub>11</sub>	8.5	C <sub>15</sub>	8.9
C <sub>22</sub>	19.0	C <sub>22</sub>	15.6	C <sub>9</sub>	15.7	C <sub>1</sub>	13.5	C <sub>5</sub>	10.7	C <sub>10</sub>	9.5	C <sub>17</sub>	9.3	C <sub>13</sub>	8.3	C <sub>14</sub>	8.3	C <sub>11</sub>	8.9	C <sub>13</sub>	8.3	C <sub>13</sub>	8.3
C <sub>5</sub>	18.3	C <sub>20</sub>	14.0	C <sub>20</sub>	13.7	C <sub>10</sub>	10.7	C <sub>3</sub>	10.3	C <sub>11</sub>	9.2	C <sub>11</sub>	9.2	C <sub>14</sub>	8.3	C <sub>18</sub>	8.2	C <sub>15</sub>	8.5	C <sub>14</sub>	8.3	C <sub>14</sub>	8.3
C <sub>9</sub>	18.0	C <sub>10</sub>	12.0	C <sub>10</sub>	11.5	C <sub>3</sub>	10.3	C <sub>19</sub>	10.2	C <sub>17</sub>	9.1	C <sub>10</sub>	8.7			C <sub>11</sub>	8.0	C <sub>13</sub>	8.3				
C <sub>10</sub>	12.3	C <sub>16</sub>	11.2	C <sub>16</sub>	11.2	C <sub>19</sub>	9.9	C <sub>10</sub>	10.0	C <sub>5</sub>	9.1	C <sub>18</sub>	8.7					C <sub>14</sub>	8.3				
C <sub>16</sub>	11.9	C <sub>19</sub>	11.2	C <sub>3</sub>	10.9	C <sub>11</sub>	9.6	C <sub>8</sub>	9.7	C <sub>18</sub>	8.7	C <sub>15</sub>	8.5					C <sub>18</sub>	8.0				
C <sub>19</sub>	11.9	C <sub>3</sub>	11.1	C <sub>11</sub>	9.3	C <sub>17</sub>	9.0	C <sub>21</sub>	9.4	C <sub>13</sub>	8.3	C <sub>13</sub>	8.3										
C <sub>3</sub>	10.6	C <sub>17</sub>	9.0	C <sub>17</sub>	9.0	C <sub>18</sub>	8.7	C <sub>17</sub>	8.8	C <sub>15</sub>	8.3	C <sub>14</sub>	8.2										
C <sub>17</sub>	9.0	C <sub>14</sub>	8.5	C <sub>19</sub>	8.9	C <sub>22</sub>	8.6	C <sub>11</sub>	8.8	C <sub>14</sub>	8.2												
C <sub>18</sub>	8.5	C <sub>18</sub>	8.5	C <sub>14</sub>	8.6	C <sub>14</sub>	8.4	C <sub>18</sub>	8.8														
C <sub>14</sub>	8.4	C <sub>13</sub>	8.3	C <sub>18</sub>	8.3	C <sub>8</sub>	8.4	C <sub>13</sub>	8.3														
C <sub>13</sub>	8.3			C <sub>13</sub>	8.3	C <sub>13</sub>	8.3	C <sub>14</sub>	8.3														
C <sub>11</sub>	8.1			C <sub>2</sub>	8.3	C <sub>15</sub>	8.1	C <sub>15</sub>	8.2														
				C <sub>15</sub>	8.0																		

表 6 2004—2015 年柳州市土地生态安全主要障碍因子出现频率

2004—2009 年			2010—2015 年			2004—2015 年		
主要障碍因子	出现次数	出现频率(%)	主要障碍因子	出现次数	出现频率(%)	主要障碍因子	出现次数	出现频率(%)
C <sub>5</sub>	6	100.0	C <sub>13</sub>	6	100.0	C <sub>13</sub>	12	100.0
C <sub>9</sub>	6	100.0	C <sub>14</sub>	6	100.0	C <sub>14</sub>	12	100.0
C <sub>10</sub>	6	100.0	C <sub>15</sub>	6	100.0	C <sub>11</sub>	10	83.3
C <sub>13</sub>	6	100.0	C <sub>21</sub>	6	100.0	C <sub>15</sub>	10	83.3
C <sub>14</sub>	6	100.0	C <sub>11</sub>	5	83.3	C <sub>17</sub>	10	83.3
C <sub>17</sub>	6	100.0				C <sub>18</sub>	10	83.3
C <sub>18</sub>	6	100.0				C <sub>21</sub>	8	66.7
C <sub>19</sub>	6	100.0				C <sub>3</sub>	7	58.3
C <sub>3</sub>	5	83.3				C <sub>8</sub>	7	58.3
C <sub>6</sub>	5	83.3				C <sub>10</sub>	7	58.3
C <sub>7</sub>	5	83.3				C <sub>19</sub>	7	58.3
C <sub>11</sub>	5	83.3				C <sub>5</sub>	6	50.0
C <sub>20</sub>	5	83.3				C <sub>6</sub>	6	50.0
C <sub>22</sub>	5	83.3				C <sub>9</sub>	6	50.0
						C <sub>16</sub>	6	50.0

市土地生态安全水平的障碍因子并不是静态的,各年份出现的障碍因子及其障碍度、排序等均处于动态变化中。

对柳州市土地生态系统产生影响的障碍因素从 2010 年开始明显减少,因此以 2010 年为界按时间分为 2 个阶段。

第 1 个阶段是 2004—2009 年,这段时期障碍度最高的指标是森林覆盖率(C<sub>2</sub>),最高值达到了 58.6%,其次是人均耕地面积(C<sub>1</sub>)和人均公共绿地面积(C<sub>6</sub>),其障碍度在不同年度排名第一。建成区绿化覆盖率(C<sub>5</sub>)的出现频率达到 100%,酸雨频率(C<sub>3</sub>)的出现频率也达到了 83.3%。也就是说,从整体而言在这个阶段自然因素对土地生态系统造成的影响最大。但是这些障碍因子除酸雨频率之外在 2010 年后就逐渐消失,也就是说,随着环境保护意识的加强和环境保护制度的完善,柳州市整体生态环境都在好转中,这些因素对土地生态

环境的影响也就随之而削弱。

第 2 个阶段是 2010—2015 年,这段时期障碍度最高的指标是全社会固定资产投资增长率(C<sub>12</sub>),达到了 80.6%。从原始数据来看,2013 年全社会固定资产投资是下降的,也就是负增长,因此出现了障碍度的峰值,但从出现次数和频率来看,这个指标并不能构成主要障碍因素。主要障碍因素包括第三产业产值比重(C<sub>8</sub>)和人口自然增长率(C<sub>16</sub>),这 2 个因子交替占据多个年份的障碍度第一,而单位耕地农药施用量(C<sub>13</sub>)、单位耕地化肥施用量(C<sub>14</sub>)、人口密度(C<sub>15</sub>)、人均工业固体废物产生量(C<sub>21</sub>)这几个指标的障碍度虽然没有那么高,但是出现频率均达到了 100.0%,同样也是这一阶段的主要影响因素。由此可见,这一阶段社会经济发展对柳州市土地生态安全的影响较大。

2.2.2 主要障碍因子 2004—2015 年出现次数最多的障碍因子是单位耕地农药施用量 ( $C_{13}$ )、单位耕地化肥施用量 ( $C_{14}$ )，出现频率都达到了 100%，也就是每年都会对柳州市的土地生态安全产生影响。化肥和农药的施用虽然在短期内可以促进粮食增产，但是从长期来看将对土壤和水环境造成持续的污染，对区域土地生态系统的安全带来威胁。尽管从数值来看，这 2 个指标落到每个年份的障碍度均不算太高，但是积少成多，这 2 个障碍因子对柳州市土地生态环境的影响不容忽视。

酸雨频率 ( $C_3$ ) 指标虽然无论在障碍度数值还是障碍因子出现的次数和频率上均不占据优势，但是必须要看到其中的几个问题：(1) 2004—2008 年，酸雨频率的障碍度排序逐年上升；(2) 酸雨频率在 2 个阶段均有出现，是自然因素子系统在第二阶段出现的重要障碍因子；(3) 2013 年再次出现，结合 2013 年自然因素子系统出现综合值严重下滑的情况，可以看出酸雨频率指标在其中产生了重要的影响。说明酸雨仍然是柳州土地生态环境的重要影响因素。

2.2.3 其他障碍因子 其他障碍因子如人均 GDP ( $C_9$ )、农村居民人均纯收入 ( $C_{10}$ )、城市化水平 ( $C_{17}$ )、农业机械化水平 ( $C_{18}$ )、人均工业废水排放量 ( $C_{19}$ ) 虽然障碍度排序靠后，但是在 2004—2009 年期间的出现频率均达到了 100%，也是需要注意的影响因素。这 4 个指标对土地生态安全的影响主要体现在：(1) 随着城市化水平的加快，城市周边土地迅速转变成成为城市建设用地，土地生态环境受到冲击，土地生态安全也随之受到影响；(2) 经济发展水平不断提升，促进了农业投入的增加，农业现代化水平又对土地生态安全产生了正向作用；(3) 工业城市发展经济带来的负面影响如工业“三废”排放量增加将对土地生态系统造成破坏，从而影响土地生态安全水平。

### 3 结论与讨论

鉴于土地生态安全的特性，本研究采用层次分析法和熵值法相结合的主客观综合赋权法，基于“自然—经济—社会”模型构建土地生态安全评价体系，通过综合指数法和障碍度模型，较好地解释了区域土地生态安全状态及对应的障碍因子。

2004—2015 年期间柳州市土地生态安全水平有所提升，但土地生态安全综合值整体偏低，土地生态系统面临的问题并未得到根本性改变。从时间维度来看，2004—2009 年间，自然因素对柳州市土地生态安全水平造成的影响最大，至 2010—2015 年间则转变为以经济、社会发展为主要影响因素。从单项指标来看，(1) 单位耕地农药施用量、单位耕地化肥施用量这 2 个指标正在对柳州市土地生态系统产生长久而持续的影响；(2) 酸雨频率是柳州市土地生态安全潜在的威胁；(3) 人均 GDP、农村居民人均纯收入、城市化水平、农业机械化水平、人均工业废水排放量也是需要注意的指标。整体而言，由于近年来环境保护意识的加强和环境保护制度的完善，柳州市整体生态环境都在好转，自然因素对土地生态环境

的影响相应地随之而削弱，但人类社会经济活动仍然是土地生态安全的主要影响因素。柳州市曾长期以发展工业为优先，在发展经济过程中对自然环境造成的破坏较为严重，土地生态系统相对较为脆弱，一旦有所疏忽就会产生严重的后果。需要针对突出问题制定相应的调控措施，才能对土地生态环境进行有效的保护和恢复，切实降低土地生态安全风险。

土地生态安全评价具有相对性和针对性，不同的土地生态系统，应根据存在的土地生态问题选取不同的评价指标，如研究柳州市的土地生态系统必须关注酸雨频率这一指标。但也正因为土地生态安全涉及的因素较多，其动态特性和长期趋势难以评估，评价体系和评价方法还需要在实践中进一步完善。

### 参考文献：

- [1] 张虹波, 刘黎明. 土地资源生态安全研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 77–85.
- [2] 陈 星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8–20.
- [3] 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, 43(6): 784–789.
- [4] 李智国, 杨子生. 中国土地生态安全研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(12): 5–12.
- [5] 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]. 环境保护, 2005(2): 57–59.
- [6] 周迎雪, 李贻学, 孙仪阳, 等. 基于不同评价模型的土地生态安全评价——以山东半岛蓝色经济区为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(增刊2): 207–210.
- [7] 汪 磊, 张觉文. 基于主成分聚类分析的山东省土地生态安全评价及其影响因素分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 246–250.
- [8] 李 衍, 李巧云, 关 欣. 贵州省土地生态安全评价[J]. 湖南农业科学, 2014(11): 50–53.
- [9] 严 超, 张安明, 石仁蓉, 等. 重庆市黔江区土地生态安全评价及时空变化分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 262–268.
- [10] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2096–2105.
- [11] 李 昊, 李世平, 银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 50–56.
- [12] 黎良财, 邓 利, 吴 锐. 城市土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以柳州市为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 102–106.
- [13] 李小玲, 刘湘源, 陈 瑛. 土地利用协调度压力—状态—响应评价模型[J]. 广西科学院学报, 2014, 30(1): 27–31.
- [14] 李迎迎, 杨朝现, 信桂新, 等. 重庆市土地生态安全动态变化研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(11): 189–195.
- [15] 张英佳, 韩会庆, 郇红娟, 等. 遵义市生态系统服务价值与土地生态安全协调度分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2017, 37(5): 141–146.