

# 基于 PSR 和无偏 GM(1, 1) 模型的云南省耕地生态安全评价与预测<sup>1</sup>

韩磊，潘玉君，高庆彦，马佳伸

(云南师范大学旅游与地理科学学院，云南昆明 650500)

**【摘要】**加强耕地资源的研究与保护有利于促进人与自然的协调共生发展。因此，文章对 2000—2017 年云南省耕地数据进行标准化处理并选用熵值法确定指标权重，基于 PSR 模型以 2000—2017 年耕地数据为原始数据，应用 GM(1, 1) 预测模型和障碍度模型科学预测出 2018—2025 年云南省耕地生态安全状态，并对两个时间段的耕地生态安全状态进行了定量与定性分析。研究表明：2000—2017 年云南省耕地生态安全状态分为临界安全、一般安全、较安全和安全四种安全等级；2018—2025 年云南省耕地生态安全状态分为较安全和安全两种安全等级。在此基础上通过对影响耕地生态安全状态的障碍度测算，列出了主要的障碍因子，依据不同的障碍度和障碍因子为云南省耕地生态安全状态提出了合理化的建议与意见。

**【关键词】** PSR 模型 GM(1, 1) 模型 云南省 耕地 生态安全

**【中图分类号】** K928.5 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-4407(2019)02-148-07

## 1 引言

耕地资源作为一种不可再生资源，是人类赖以生存的基本资源和条件，是一种具有社会服务、农业生产、生态保护等多种功能的复杂系统<sup>[1]</sup>。随着农业生产水平、科技水平的不断增强，以及人类数量的不断增长，具有高产丰收作用的农药在农业生产过程中应用越来越广泛，与此同时，为了进一步满足粮食需求，人类加强了土地资源利用的广度和深度，这就直接导致了耕地资源承载力系统压力剧增、生态环境问题的凸显<sup>[2]</sup>。因此，在此背景下，如何进一步加强开展耕地生态的研究、寻求缓解与解决耕地压力问题的方法等问题受到国内外学者的广泛关注。

国外学者关于耕地的研究主要集中在耕地生态安全的评价与耕地资源的可持续利用这两个方面。其中，Rasul&Thapa<sup>[3]</sup>、Okejji 等<sup>[4]</sup>从耕地生态安全角度、可持续利用角度和综合发展角度三个层面上分析了孟加拉国和尼日利亚两个国家的耕地生态安全现状；Beesley&Ramsey<sup>[5]</sup>、Walz<sup>[6]</sup>指出，耕地的生态价值与安全价值受到农场主越来越高的关注，在农业生产过程中发挥着举足轻重的作用。21 世纪以来，进行土地生态研究的学者不断涌现，相关研究主要集中在以下四个方面。在耕地生态安全内涵研究上，张锐等<sup>[7]</sup>应用 PSR 响应模型对我国耕地生态安全进行了物元分析评价，反映了不同子系统下不同指标的内在信息关系；吴

<sup>1</sup>**基金项目：**国家自然科学基金面上项目“中国义务教育时空结构、预警与均衡发展对策研究”(4167118)；国家自然科学基金项目“云南少数民族地理：空间结构、地理观念和人地系统预警”(41261033)；云南省发展和改革委员会云南省资源环境承载能力预警研究项目(0848-1741ZC207122/A)；2018 年度云南师范大学研究生科研创新基金项目“基于 PSR 和无偏 GM(1, 1) 模型的云南省土地生态安全评价与预测”(yjs2018110)；云南省教育厅科学基金项目“云南省可持续发展功能区划下的区域经济发展研究”(2017ZZX189)

**第一作者简介：**韩磊(1992—)，男，山东临沂人，硕士，研究方向为区域经济开发与管理。E-mail:hanl1992@163.com

**通讯作者简介：**潘玉君(1965—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，教授，博士研究生导师，研究方向为资源与区域可持续发展、理论地理学。E-mail:13888346995@139.com

大放等<sup>[8]</sup>基于不同的解析尺度、时间尺度，在宏观层面上把我国生态现状分为四个等级。在耕地生态安全指标构建的研究上，郭荣中等<sup>[9]</sup>以长江流域为范围尺度、长株潭地区为解析尺度，综合应用 AHP 法和 TOPSIS 模型为长株潭地区城市的耕地良好发展构建了科学的指标体系；朱红波和张安录<sup>[10]</sup>对耕地资源系统进行了系统研究，在耕地资源的组成要素、形成机制和特征的基础上进行了耕地生态安全指标的构建。在耕地生态安全影响因素的研究上，张冰结和宋戈<sup>[11]</sup>认为社会经济发展水平、生态环境承载力水平、农业科技水平和人口数量是影响耕地生态安全的主要因素。在耕地生态安全调控对策的研究上，范胜龙等<sup>[12]</sup>在对福建省耕地生态安全评价与预测中，通过障碍度模型确定了障碍度因子，并依据不同的障碍因子，对耕地生态安全问题提出了具体的意见与建议；郑华伟等<sup>[13]</sup>应用了实证研究法，从压力和状态上剖析耕地生态安全内在的关系。

总体来看，目前我国耕地安全状态的研究还处于初步阶段。在已有的文献中，大多是定性研究，定量研究较少，且研究方法单一、评价指标多集中于自然地理要素，人文地理要素相对不足，最为重要的是已有的文献研究多是基于以往的数据进行区域上的研究，对未来耕地生态安全状况的研究较少。因此，本文以云南省为研究对象，共选取了 19 个具有代表性的指标，在 PSR 模型的基础上，应用无偏 GM (1, 1) 预测模型科学准确的预测出 2018—2025 年耕地生态安全指数，并采用障碍度模型计算出云南省未来 8 年来云南省耕地生态安全的障碍因素，为云南省经济发展、生态环境和耕地的可持续发展提供了一定的参考依据。

## 2 研究区概况、数据来源

云南省位于我国西南边陲地区，土壤类型以红壤和棕壤为主，肥沃性较差，最新数据显示，云南省耕地面积为 607.21 万公顷，占云南省面积的 15.41%<sup>[14]</sup>。人均耕地灌溉面积为 0.0379 平方千米，比全国人均耕地灌溉面积少 25%<sup>[15]</sup>。山地和高原是云南省的主要地形，占云南土地面积的 94%。其中，“坝子”地区是云南省特有的地貌类型，是云南省耕地的主要来源，面积约为 2.45 万平方千米，占云南省土地面积的 6%左右。云南省喀斯特地貌显著，集中分布于滇中和滇东南地区。

本文数据主要来源于《云南省统计年鉴 2000—2017》《中国统计年鉴 2000—2017》《中国环境统计年鉴 2000—2017》《中国农村统计年鉴 2000—2017》以及云南省统计公报（2000—2017）。

## 3 研究方法

### 3.1 婪值法

嫡值法是一种基于各种指标值变化程度的科学、准确、客观的赋权法，避免了人为因素带来的偏差，由于篇幅有限，具体操作步骤省略<sup>[16-17]</sup>。

### 3.2 多因素综合加权法

多因素综合加权法主要是通过对各种评价指标进行加权求和而获得耕地生态安全指数的一种综合计算方法<sup>[6' 9]</sup>，其计算公式如下：

$$E = \sum_{j=1}^n W_j \times P_{ij} \quad (1)$$

当评价指标为正向时，即指标值越大越安全：

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } X_i \geq S_i \text{ 时} \\ \frac{X_i}{S_i} & \text{当 } X_i \leq S_i \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

当评价指标为负向时, 即指标值越小越安全:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } X_i \leq S_i \text{ 时} \\ 2 - \frac{X_i}{S_i} & \text{当 } S_i < X_i < 2S_i \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } X_i \geq 2S_i \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

在公式 (1) ~ (3) 中:  $E$  为耕地生态安全值,  $W_j$  为指标的权重 (熵值法确定),  $P_{ij}$  为各个指标的安全指数,  $X_i$  为评价指标的实际值,  $S_i$  为评价指标的算术平均值。

### 3.3 无偏 GM (1, 1) 模型

无偏 GM (1, 1) 模型是 GM (1, 1) 模型的改进版, 是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法。该模型需要甄别不同系统要素之间发展趋势的相异程度, 继而探寻出原始数据的变动规律, 从而形成具有较强规律性的数据序列, 接着建立相应的微分方程模型, 最后预测事物未来发展的状况<sup>[18-21]</sup>。计算过程如下:

设非负离散数据序列  $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n-1), X^{(0)}(n)\}$ , 其中  $n$  为序列长度。对  $X^{(0)}$  数据序

列进行一次累加, 得到一组新的非负离散数据序列  $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), X^{(1)}(3), \dots, X^{(1)}(n-1), X^{(1)}(n)\}$ 。其中:

$$X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i) \quad (4)$$

对累加生成序列  $\{X^{(1)}(k)\}$  建立一阶微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (5)$$

式中:  $a$  称为数列发展灰数, 用来控制系统发展趋势;  $u$  称为内生控制灰数, 用来反映资料的变化关系。由最小二乘原理, 近似求解微分方程(5), 可以得到参数向量:

$$\begin{aligned}
\hat{a} &= (a, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \\
B &= \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)] & 1 & & & \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)] & & 1 & & \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(3) + X^{(1)}(4)] & & & 1 & \\ \vdots & & & & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)] & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (6) \\
Y_N &= \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)\}^T
\end{aligned}$$

将式(6)中得到的参数带入方程(5)得到预测模型:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[ X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a}, \quad k=0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

对式(4)进行一次累减, 可得到还原数据:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k) = (1 - e^a) \left[ X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak}, \quad k=0, 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

为检验无偏 GM(1, 1) 预测模型的准确性, 需要对预测值进行 C 检验(后验差检验)和 P 检验(小误差频率检验)以及平均相对误差来判定模型的预测精度, 具体评价判别标准见表 1, 计算过程如下:

现设原始数据序列  $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n-1), X^{(0)}(n)\}$ , 经由灰色模型得到

$\hat{X}^{(0)} = \{\hat{X}^{(0)}(1), \hat{X}^{(0)}(2), \hat{X}^{(0)}(3), \dots, \hat{X}^{(0)}(n-1), \hat{X}^{(0)}(n)\}$ , 其 对 应 的 残 差 序 列  $e_i = X^{(0)}(i) - \hat{X}^{(0)}(i), \quad i=1, 2, 3, \dots, n$ 。对原始数据序列和残差序列进行方差计算, 分别记为  $S_1^2, S_2^2$ , 即:

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i^{(0)} - \bar{X}^{(0)})^2 \quad (9)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 \quad (10)$$

则, 计算 C(后验差)值:

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (11)$$

计算小误差概率:

$$p = P(|e_i - \bar{e}| < 0.6745S_1) \quad (12)$$

表 1 GM(1, 1) 模型精度检验标准

模型精度值	优	合格	勉强	不合格
C	$C \leq 0.35$	$0.35 < C \leq 0.50$	$0.50 < C \leq 0.65$	$C > 0.65$
P	$P \geq 0.95$	$0.80 < P \leq 0.95$	$0.70 \leq P < 0.80$	$P < 0.70$

### 3.4 障碍度模型

通过熵值法、多因素综合加权法和灰色预测模型可以计算出云南省耕地生态的安全值, 不不仅可以了解目前状态下云南省耕地生态的状态, 还可以了解未来几年云南省耕地安全的状态, 但是不能直观地看出影响耕地生态安全的主要因素。因此, 应用障碍度模型, 通过引入因子贡献度、指标偏离度和障碍度进行障碍因子诊断, 能够对影响耕地生态安全的因子进行判别<sup>[12]</sup>, 计算公式为:

$$R_{ij} = 1 - X'_{ij} \quad (13)$$

$$A_j = \frac{R_{ij} \times W_j}{\sum_{j=1}^n R_{ij} \times W_j} \times 100\% \quad (14)$$

式中:  $R_{ij}$  为指标偏离度;  $X'_{ij}$  为单项指标的标准化值, 本文采用极差法进行标准化处理<sup>[22]</sup>;  $W_j$  为因子贡献度, 即单项指标的权重;  $A_j$  为指标障碍度。

## 4 结果与分析

### 4.1 耕地生态安全现状评价与分析

#### 4.1.1 评价指标体系的建立

PSR(压力一状态一响应)概念模型是由联合国 OECD 和 UNEP 提出的环境与生态评价指标体系确定方法, 主要功能是判断某生态系统是否可以持续发展、分析系统内部子系统是否有共生关系和因果关系<sup>[23-24]</sup>, 该概念模型在耕地生态安全与评价中得到了广泛的应用。因此, 在参考已有文献的基础上<sup>[25-26]</sup>, 遵循科学性、代表性和易取性为原则, 结合云南省耕地的实际情况, 共选取了 19 个指标, 构建了云南省耕地生态安全的指标体系, 并分为 P(压力)、S(状态)、R(响应)三个子系统, 见表 2。

#### 4.1.2 云南省耕地生态安全评价与分析

依据云南省的实际情况与结合相关文献<sup>[13]</sup>,本文将耕地生态安全分为5个等级,如表3所示。综合运用上述的研究方法,结合云南省的实际情况,计算出2000—2017年云南省耕地生态安全值以及总体发展趋势,见图1。

表2 云南省耕地生态安全评价指标体系及权重

目标层	准则层	指标层	指标属性	权重
耕地生态安全评价	压力 0.322 9	耕地面积( $P_1$ )	+	0.128 0
		化肥使用量( $P_2$ )	-	0.026 9
		农用塑料薄膜使用量( $P_3$ )		0.024 7
		农药使用量( $P_4$ )		0.027 3
		粮食产量( $P_5$ )	+	0.070 3
		有效灌溉面积( $P_6$ )	+	0.045 6
	状态 0.385 4	人口密度( $S_1$ )	+	0.032 4
		第三产业占比( $S_2$ )	+	0.034 4
		人均GDP( $S_3$ )	+	0.111 3
		城乡居民消费总量( $S_4$ )	+	0.1177
		人口自然增长率( $S_5$ )	+	0.058 2
		农业支出占公共支出比重( $S_6$ )		0.031 5
	响应 0.291 7	废水排放量( $R_1$ )	-	0.021 4
		工业固体废物排放量( $R_2$ )		0.023 6
		城镇化水平( $R_3$ )	+	0.052 6
		化石能源消费总量( $R_4$ )		0.024 4
		建成区面积( $R_5$ )	+	0.055 1
		人均公园绿地面积( $R_6$ )	+	0.059 7
		建成区绿化覆盖率( $R_7$ )	+	0.054 9

表3 耕地生态安全评价等级

安全等级	I	II	III	IV	V
安全状态	安全	较安全	一般安全	临界安全	不安全
安全值	0.9 <E≤1	0.8 <E≤0.9	0.7 <E≤0.8	0.6 <E≤0.7	E≤0.6

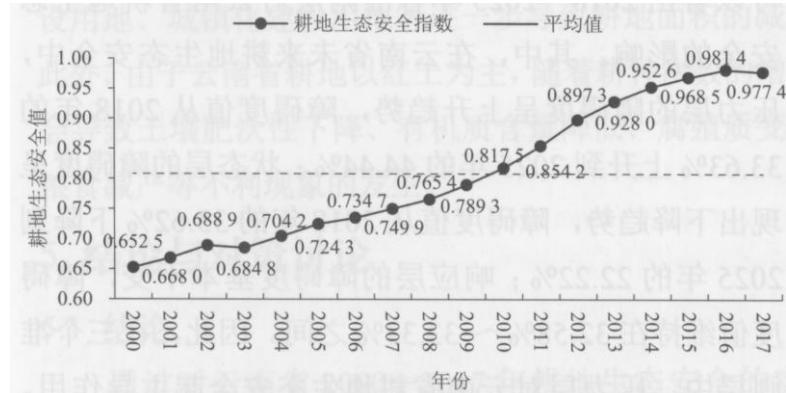


图1 云南省2000—2017年耕地生态安全值

在图 1 中可看出, 云南省 2000—2017 年耕地生态安全值总体呈现上升趋势, 耕地生态安全值在 0.6525~0.9814 之间。其中 2000—2009 年的耕地安全值小于该阶段的平均值, 2010—2017 年的耕地安全值大于该阶段的平均值, 耕地生态安全等级从临界安全提升到一般安全再到较安全最终到安全。根据安全级别, 云南省 2000—2017 年耕地生态安全状况的变化可以分为 3 个阶段, 第一阶段为 2000—2009 年, 该阶段耕地生态安全值增长较慢, 安全值的范围在 0.6~0.8 之间, 其中 2000—2004 年处于第 IV 安全等级, 2005—2009 处于第 III 安全等级; 第二阶段为 2010—2015 年, 该阶段耕地生态安全值较第一阶段有较大增长, 安全值的范围在 0.8~1.0 之间, 其中 2010—2013 处于第 II 安全等级, 2013—2015 处于第 I 安全等级; 第三阶段为 2016—2017 年, 此阶段安全值的范围也在 0.9~1.0 之间, 处于第 I 安全等级。其中 2016 年的耕地安全值达到了最大值为 0.9814, 但 2017 年的耕地安全值相对 2016 年的耕地安全值有所下降。总体来看, 2000—2017 年云南省的耕地安全等级正在逐步提高, 这从侧面反映出 21 世纪以来, 云南省在大力发展经济建设的同时, 通过制定严格的耕地保护制度和政府强有力的监管, 做到了经济发展与生态保护的协调发展。

在图 1 中, 虽然云南省 2000—2017 年的耕地生态安全值总体呈现出上升趋势, 但是 2003 年和 2017 年的耕地生态安全值却和这一趋势相悖。为探究其原因, 本文应用障碍度模型计算了 19 个指标的障碍度, 并对主要障碍因子进行了排序, 如表 4 所示。

表 4 2003—2017 年耕地生态安全的障碍因子及障碍度

年份	第一障碍因子	第二障碍因子	第三障碍因子	第四障碍因子	第五障碍因子	第六障碍因子
2003	$S_4(18.85\%)$	$S_3(17.74\%)$	$P_5(11.02\%)$	$R_6(9.14\%)$	$R_7(8.39\%)$	$R_5(8.26\%)$
2017	$S_4(16.37\%)$	$S_3(15.38\%)$	$P_1(10.86\%)$	$S_5(7.17\%)$	$R_7(6.20\%)$	$R_6(5.65\%)$

在表 4 中, 可以看出 2003 年耕地生态系统中响应层的障碍因子出现的次数最多, 分别是人均公园绿地面积( $R_6$ )、建成区绿化覆盖率( $R_7$ )、建成区面积( $R_5$ ), 三者的比重为 25.79%, 但主要障碍因子集中在状态层, 具体为城乡居民消费总量( $S_4$ )、人均 GDP( $S_3$ ), 两者比重高达 36.59%, 障碍度贡献最小的是压力层的粮食产量( $P_5$ ), 因子贡献率为 11.02%。2017 年耕地生态系统中状态层的障碍因子出现的次数最多, 分别是城乡居民消费总量( $S_4$ )、人均 GDP( $S_3$ )、人口自然增长率( $S_5$ ), 主要障碍因子也集中在状态层, 上述三者的比重高达 38.92%, 其次是响应层的建成区绿化覆盖率( $R_7$ )、人均公园绿地面积( $R_6$ ), 两者所占比例为 11.85%, 障碍度贡献最小的是压力层的耕地面积( $P_1$ ), 因子贡献率为 10.86%。

综合比较 2003 年、2017 年的障碍度值, 可以看出上述两年耕地生态安全的主要障碍因子存在差异。随着经济的发展, 对耕地生态安全产生影响的主要方面开始从外在生态环境的响应系统向人类的农业生产活动的状态层转变, 这也表明, 云南省在过去十几年的发展过程中, 人文性的生活、生产资料得到了充分的利用, 而自然性的生活、生产要素利用得相对较少。因此, 在未来的发展过程中, 云南省应该从耕地的自然属性出发, 提高土壤的肥沃性和有机质、腐殖质的含量。

#### 4.2 耕地生态安全预测评价与分析

基于 2000—2017 年云南省耕地生态安全评价与分析,

为了确保云南省耕地生态安全保持良好的状态, 继续为云南省提供充足的粮食作物、经济作物和生活与生产资料, 有必要对云南省未来耕地安全状态进行科学、准确的预测, 从而做出合理的规划。因此, 在 GM(1,1) 预测模型的基础上, 以云南省 2000—2017 年所选取的 19 项指标为初始值对 2018—2025 年的云南省耕地安全值进行预测, 为了进一步提高预测值的准确性与科学性, 本文对 2018—2025 年的云南省耕地安全值进行了 C(后验差)检验、P(小概率误差)检验和相对误差的检验。如表 5 所示。

从表 5 的模拟结果中看出, 19 个指标的预测精度等级均在合格以上, 其中有 16 个指标的精度等级是优, 并且所有指标的相对误差都小于 20%, 符合预测的要求, 如图 2 所示。

表 5 耕地生态安全指标的模拟精度值

指标	C	P	相对误差(%)	等级
耕地面积( $P_1$ )	0.412 7	1.000 0	1.642 6	优
化肥使用量( $P_2$ )	0.098 5	1.000 0	1.220 3	优
农用塑料薄膜使用量( $P_3$ )	0.1187	1.000 0	2.970 0	优
农药使用量( $P_4$ )	0.150 8	1.000 0	3.260 0	优
粮食产量( $P_5$ )	0.347 6	1.000 0	3.733 4	优
有效灌溉面积( $P_6$ )	0.194 2	1.000 0	1.238 5	优
人口密度( $S_1$ )	0.092 9	1.000 0	0.310 5	优
第三产业占比( $S_2$ )	0.357 5	0.944 4	2.231 1	合格
人均 GDP ( $S_3$ )	0.121 8	1.000 0	6.743 9	优
城乡居民消费总量( $S_4$ )	0.082 1	1.000 0	4.294 9	优
人口自然增长率( $S_5$ )	0.376 7	0.932 3	9.194 8	合格
农业支出占公共支出比重( $S_6$ )	0.472 3	0.810 0	7.857 2	合格
废水排放量( $R_1$ )	0.277 4	1.000 0	9.882 0	优
工业固体废物排放量( $R_2$ )	0.166 9	1.000 0	5.941 0	优
城镇化水平( $R_3$ )	0.147 5	1.000 0	2.099 5	优
能源消费总量( $R_4$ )	0.253 8	1.000 0	8.572 5	优
建成区面积( $R_5$ )	0.119 1	1.000 0	2.901 3	优
人均公园绿地面积( $R_6$ )	0.231 8	1.000 0	4.787 5	优
建成区绿化覆盖率( $R_7$ )	0.311 6	1.000 0	11.940 2	优



图2 云南省2000—2025年耕地生态安全值

从图2中可以看出云南省2000—2025年耕地生态安全值的变化趋势。其中，该阶段大于云南省耕地生态安全平均值的年份有14个，为2011—2024年，小于耕地生态安全值的有12个，为2000—2010年和2025年。根据现状值和预测值，可以将2000—2025年云南省耕地生态安全状态为两个阶段，第一个阶段(2000—2016年)，该阶段云南省耕地安全值呈上升的趋势，耕地安全值从2000年的0.6525上升到2016年0.9824，增幅高达50.56%，且安全级别从最初的临界安全、一般安全、较安全变为安全；第二阶段(2017—2025年)，该阶段云南省耕地生态安全值呈下降趋势，但是降幅不大，跌幅仅为15.60%。其中，第二阶段又可以分为三个时段，第一时段(2017—2021年)，耕地生态安全指数在经历了15年的持续增长后首次出现了下降的趋势，但跌幅较小；第二时段(2021—2022年)，耕地生态安全值出现了小幅增长，增幅也相对较小；第三时段为2023—2025年，耕地生态安全指数又出现了下降的趋势，并且跌幅较大，2025年的耕地生态安全值仅为0.8249，是预测值中的最低值，但耕地安全等级

仍处于较安全等级。总体来看,2017—2025年云南省耕地生态安全状况良好,安全等级均处于较安全和安全等级。因此,如果按照当前的发展趋势,虽然云南省未来8年的耕地生态安全等级仍然是安全,但是耕地生态安全值出现了持续变小的趋势。所以,为了进一步遏制这一弱化现象、进一步加强耕地的可持续发展能力,提高耕地的承载力水平,完善耕地生态服务系统,有必要对影响耕地生态安全值的障碍因素进行更深刻、全面地分析,从而提出针对性的解决措施。

应用障碍度模型,对指标体系中的19个指标进行障碍度测算,并按照不同的评价系统确定主要障碍因子。在准则层的障碍度折线图中(图3),我们可以看出2018—2025年各准则层对云南省耕地生态安全的影响。其中,在云南省未来耕地生态安全中,压力层的障碍度呈上升趋势,障碍度值从2018年的33.63%上升到2025年的44.44%;状态层的障碍度呈现出下降趋势,障碍度值从2018年的33.62%下降到2025年的22.22%;响应层的障碍度基本不变,障碍度值维持在32.58%~33.33%之间。因此,在三个准则层中,压力层对云南省耕地生态安全起主导作用。为了进一步剖析影响云南省2018—2015年耕地生态安全的转改因素,还需要对指标层的19个指标进行更精确的测算,如表6所示。

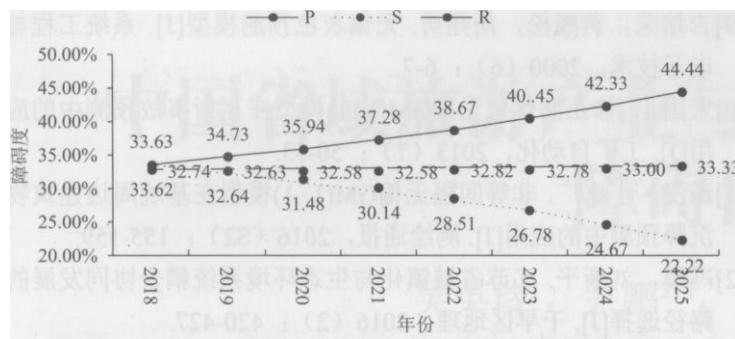


图3 云南省2018—2025年耕地生态安全准则层障碍度

表6 云南省2018—2025年耕地生态安全的障碍因子及障碍度

年份	第一障碍因子	第二障碍因子	第三障碍因子	第四障碍因子	第五障碍因子	第六障碍因子
2018	S <sub>5</sub> (8.50)	P <sub>1</sub> (8.49)	S <sub>6</sub> (6.57)	S <sub>4</sub> (6.46)	S <sub>3</sub> (6.23)	P <sub>4</sub> (6.19)
2019	S <sub>5</sub> (8.85)	P <sub>1</sub> (8.81)	S <sub>6</sub> (7.10)	P <sub>4</sub> (6.74)	P <sub>2</sub> (6.60)	P <sub>3</sub> (6.41)
2020	S <sub>5</sub> (9.20)	P <sub>1</sub> (9.14)	S <sub>6</sub> (7.66)	P <sub>4</sub> (7.33)	P <sub>2</sub> (7.20)	P <sub>3</sub> (7.02)
2021	S <sub>5</sub> (9.56)	P <sub>1</sub> (9.49)	S <sub>6</sub> (8.25)	P <sub>4</sub> (7.96)	P <sub>2</sub> (7.86)	P <sub>3</sub> (7.70)
2022	S <sub>5</sub> (9.90)	P <sub>1</sub> (9.83)	S <sub>6</sub> (8.86)	P <sub>4</sub> (8.63)	P <sub>2</sub> (8.55)	P <sub>3</sub> (8.41)
2023	S <sub>5</sub> (10.30)	P <sub>1</sub> (10.24)	S <sub>6</sub> (9.56)	P <sub>4</sub> (9.40)	P <sub>2</sub> (9.34)	P <sub>3</sub> (9.23)
2024	S <sub>5</sub> (10.69)	P <sub>1</sub> (10.66)	S <sub>6</sub> (10.30)	P <sub>4</sub> (10.21)	P <sub>2</sub> (10.18)	P <sub>3</sub> (10.12)
2025	S <sub>5</sub> (11.41)	P <sub>1</sub> (11.28)	S <sub>6</sub> (11.12)	P <sub>4</sub> (11.011)	P <sub>2</sub> (10.81)	P <sub>3</sub> (10.68)

通过对PSR模型中所选取指标障碍度的测算,在准则层中可以看出,除2018年外,2019—2025年影响云南省耕地安全值的主要集中在压力层。主要原因为:一是21世纪以来,随着城市建设用地规模的不断扩张,郊区和农村人口开始大量涌入到市区,直接导致我国城镇化率、城镇化水平的提高和农村人口的减少,这也间接造成了农业人口数量的减少和积极性下降;二是为了缓解粮食压力,提高粮食作物的单产量,农业从行人员加大了化肥、农药和农用塑料薄膜的使用量,给云南省脆弱的生态系统带来了更大的压力与挑战。在指标层中,2018—2025年云南省耕地生态安全值下降的主要障碍因素是人口自然增长率(其)、耕地面积(构)。与此同时,二胎政策的开放也是一个重要原因,这使人口自然增长率提高,直接导致了耕地生态系统面临着更大的压力与挑战。与此同时,为了提高云南省的经济发展水平,国家致力把云南省建设成为面向东亚、东南亚的中心省份,交通建设用地、基础设施建设用地、城镇化建设用地等进一步导致耕地面积的减少。此外,由于云南省耕地以红土为主,随着耕种

---

次数的增多，会导致土壤肥沃性下降、有机质含量降低、腐殖质变薄、粮食减产等不利现象的发生。

## 5 結論与对策讨论

### 5.1 結論

通过对云南省 2000—2017 年耕地生态安全的实证分析，得出云南省耕地生态安全经历了临界安全、一般安全、较安全和安全 4 种安全等级，并以 2000—2017 年耕地原始数据，应用 GM(1, 1) 预测模型，科学准确地预测出云南省 2018—2025 年耕地生态安全等级，可以分为 2 类，即较安全和安全。

对两个时间段的耕地生态安全的障碍度进行分析，可以看出在第一阶段即 2000—2017 年，主要的障碍因子出现在状态层和响应层，主要的障碍因子为城乡居民消费总量(&)、人均 GDP(S3)；在第二阶段即 2018—2025，主要的障碍因子存在于压力层与状态层，主要的障碍因子为人口自然增长率(&)、耕地面积(尺)，并且 2018—2025 年的耕地状态安全值出现了下降的趋势。不同的时间截面出现了不同的障碍度，说明云南省耕地生态安全状态之间的差异性。因此，我们应立足于不同的障碍因子，从不同的角度对云南省耕地生态安全进行诊断，从而得出有针对性的解决方案。

### 5.2 对策讨论

在第一阶段(2000—2017 年)，状态层和响应层是影响云南省耕地生态安全水平最主要原因。因此，在这个阶段，云南省仍要以经济建设为中心，大力发展与提高以旅游业为代表的第三产业的比重、转变经济发展方式、推进经济结构战略性调整和供给侧结构性改革。同时，也应加强生态环境的建设，植树造林，提高森林覆盖率与城镇绿化覆盖率。

在第二阶段(2018—2025 年)，状态层和压力层是影响云南省耕地生态安全水平的主要原因。因此，为了防止云南省耕地生态安全进一步弱化，政府有必要加强耕地利用的监管与管理，提高耕地资源市场化配置程度，形成节约利用的“倒逼机制”。同时，也应提高有效耕地的面积、加快建设耕地利用示范区、大力发展绿色农业、加快推进农业生产的技术创新，进一步普及先进的农业知识与理论，从而防止耕地生态安全等级的弱化，提高云南省耕地生态安全水平。

耕地生态安全是土地生态安全重要子系统，耕地生态安全健康是影响人类生活生产资料的重要影响因素，甚至直接决定着人们的生活质量和健康水平。此文只对云南省耕地生态安全状态的现状和未来进行了分析，今后将对云南省耕地生态安全的动因机制与机理进行进一步的讨论与研究。

### 参考文献：

- [1] 王千, 金晓斌, 周寅康, 等. 河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因[J]. 生态学报, 2011(1): 247-256.
- [2] 王千, 金晓斌, 周寅康. 河北省耕地生态安全及空间聚集格局[J]. 农业工程学报, 2011(8):338-344.
- [3] Rasul G, Thapa G B. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh [J]. World Development, 2003, 31(10): 1721-1741.
- [4] Okeji M C, Agwu K K, Idigo F U. Natural radioactivity in cultivated land in the vicinity of a phosphate fertilizer plant in Nigeria [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012, 81(12): 1823-1826.

- 
- [5] Beesley K B, Ramsey D. Agricultural land preservation [J]. International Encyclopedia of Human Geography, 2009, 25(6): 65–69.
- [6] Walz R. Development of environment indicator systems: Experiences from Germany [J]. Environmental Management, 2000, 25(6): 613–623.
- [7] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 [J]•生态学报, 2013(16):5090–5100.
- [8] 吴大放, 刘艳艳, 刘毅华, 等. 耕地生态安全评价研究展望 [J]•中国生态农业学报, 2015(3):257–267.
- [9] 郭荣中, 杨敏华, 申海建. 长株潭地区耕地生态安全评价研究 [J]. 农业机械学报, 2016(10):193–201.
- [10] 朱红波, 张安录. 我国耕地资源生态安全的时空差异分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2007(6):754–758.
- [11] 张冰洁, 宋戈. 松嫩高平原黑土区典型地域耕地生态安全评价及驱动力分析——以黑龙江省绥化市为例 [J]. 水土保持研究, 2012(3):215–220.
- [12] 范胜龙, 杨玉珍, 陈训争, 等. 基于 PSR 和无偏  $GM(1, 1)$  模型的福建省耕地生态安全评价与预测 [J]. 中国土地科学, 2016(9):19–27.
- [13] 郑华伟, 张锐, 孟展, 等. 基于 PSR 模型与集对分析的耕地生态安全诊断 [J]. 中国土地科学, 2015(12):42–50.
- [14] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [J]. 北京: 中国统计出版社, 2000—2017.
- [15] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴 [J]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [16] 钟赛香, 胡鹏, 薛熙明, 等. 基于合理权重赋值方法选择的多因素综合评价模型——以 JCR 中 70 种人文地理期刊为例 [J]. 地理学报, 2015(12):2011–2031.
- [17] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析 [J]. 地理科学, 2013(11):1323–1329.
- [18] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [19] 吉培荣, 黄巍松, 胡翔勇. 无偏灰色预测模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2000(6):6–7.
- [20] 宋国正. 修正的优化无偏  $GM(1, 1)$  模型在瓦斯事故预测中的应用 [J]. 工矿自动化, 2013(7):50–53.
- [21] 汤汉, 丁志广. 非等间隔无偏  $GM(1, 1)$  模型在基坑周边建筑物沉降预测中的应用 [J]. 测绘通报, 2016(S2):155–159.
- [22] 冯霞, 刘新平. 江苏省城镇化与生态环境系统耦合协同发展的路径选择 [J]•干旱区地理, 2016(2):420–427.
- [23] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于压力-状态-响应模型与集对分析的土地利用系统健康评价 [J]. 水土保持通报, 2014(5):146–152.

- 
- [24] 谢花林, 刘曲, 姚冠荣, 等. 基于 PSR 模型的区域土地利用可 持续性水平测度——以鄱阳湖生态经济区为例[J]. 资源科学, 2015 (3) : 449-457.
- [25] 赵宏波, 马延吉. 东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子以吉林省为例[J]. 应用生态学报, 2014 (2):515-524.
- [26] 彭文君, 舒英格. 喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过 程[J]. 生态学报, 2018 (3) : 852-865.