

余琦殷,陈雅如,王龙鹤,杨彬煜,韩笑.武夷山国家公园及其周边地区生态安全时空变化研究.国家公园,2023,1(2): - .  
Yu Q Y, Chen Y R, Wang L H, Yang B Y, Han X. Spatial-temporal changes of ecological security in Wuyishan National Park and its surrounding areas. National Park, 2023, 1(2): - .

## 武夷山国家公园及其周边地区生态安全时空变化研究

余琦殷<sup>1,2</sup>, 陈雅如<sup>1,\*</sup>, 王龙鹤<sup>3</sup>, 杨彬煜<sup>4</sup>, 韩笑<sup>2</sup>

1 国家林业和草原局发展研究中心, 北京 100714  
2 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083  
3 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100193  
4 青岛农业大学经济管理学院(合作社学院), 青岛 266109

**摘要:**生态安全是一个地区可持续发展的前提,开展国家公园生态安全研究对提高生态系统服务价值,促进生态保护和社会经济高质量发展具有重要意义。基于2010年、2015年、2020年、2021年、2022年共5年社会经济统计数据、实地调查数据,采用结合了专家咨询法及熵权法的综合权重法,参考压力—状态—响应(PSR)模型,选取了生态条件、生态资源、灾害指标、人口指标、经济建设、生态维护等6个类型24个指标建立了生态安全评价指标体系,对武夷山国家公园及其所在行政区进行了生态安全评价。结果表明:(1)武夷山国家公园及其周边地区2010—2022年的平均生态安全指数为0.4616,呈逐年上升趋势;(2)武夷山国家公园生态安全指数最高,年均值达到0.5069,呈逐步上升趋势,年平均增幅达1.01%;建阳区生态安全指数最低,年均值仅为0.4283,但其增幅较为明显,年平均增幅达到1.40%;(3)武夷山国家公园、武夷山市和建阳区的生态安全指数呈显著的稳步增长的趋势,铅山县的增长未达到显著水平,光泽县和邵武市则呈现并不显著的波动下降状态。针对上述变化情况提出建议:武夷山国家公园可以通过加强区域合作,推动周边地区的生态安全提升,并根据武夷山国家公园周边地区的自身特点,针对性地制定生态发展策略,缩小周边地区的生态安全差距。

**关键词:**武夷山国家公园;PSR模型;生态安全;熵权法

## Spatial-temporal changes of ecological security in Wuyishan National Park and its surrounding areas

YU Qiyin<sup>1,2</sup>, CHEN Yaru<sup>1,\*</sup>, WANG Longhe<sup>3</sup>, YANG Binyu<sup>4</sup>, HAN Xiao<sup>2</sup>

1 Development Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China  
2 School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China  
3 School of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100193, China  
4 School of Economics and Management (Cooperative College), Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

**Abstract:** Ecological security is a prerequisite for sustainable development in a region. Conducting research on ecological security in national parks is of great significance in enhancing ecosystem services, promoting ecological protection, and achieving high-quality socio-economic development. This study is based on the social and economic statistical data and field survey data from 2010, 2015, 2020, 2021, and 2022, using the comprehensive weighting method combined with the expert consultation method and entropy weight method, and referring to the Pressure-State-Response (PSR) model. 24 indicators was selected from six categories, including ecological conditions, ecological resources, disaster indicators, population indicators, economic construction, and ecological maintenance, to establish an ecological security evaluation index system and assess the ecological security of Wuyishan National Park and its administrative areas. The results show that: (1) The

**基金项目:**国家林业和草原局预算项目“林草生态安全研究”(2130237-1905-2307)

**收稿日期:**2023-09-20; **采用日期:**2023- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenylaru09@126.com

average ecological security index of Wuyishan National Park and its surrounding areas from 2010 to 2022 is 0.4616, showing an upward trend year by year; (2) The ecological security index of Wuyishan National Park is the highest, with an annual average of 0.5069, showing a gradual upward trend and an average annual increase of 1.01%; Jianyang District has the lowest ecological security index, with an annual average of only 0.4283, but its increase rate is significant, with an average annual increase rate of 1.40%; (3) The ecological security index of Wuyishan National Park, Wuyishan City, and Jianyang District showed a significant and steady growth trend, while the growth of Yanshan County did not reach a significant level, while Guangze County and Shaowu City showed a non-significant downward fluctuation. In response to the above changes, suggestions are made that Wuyishan National Park can enhance the ecological security of surrounding areas by strengthening regional cooperation, and formulate targeted ecological development strategies based on the characteristics of the surrounding areas of Wuyishan National Park to narrow the ecological security gap in the surrounding areas.

**Key Words:** Wuyishan National Park; PSR model; ecological security; entropy weight method

生态安全可以表达区域生态系统的健康和完整性,不仅表示一种状态,更是一种动态过程的体现,是一个地区可持续发展的前提<sup>[1-3]</sup>。生态安全评价是对生态系统完整性以及各种风险下维持其健康的可持续能力的识别与研判,已成为衡量不可持续性底线的有效工具<sup>[4-5]</sup>,其评价的重点和指标的选取受到研究对象、目的和对生态安全概念理解的不同而存在差异<sup>[6]</sup>。关于生态安全的评价研究,学者们大多基于压力—状态—响应(PSR)模型、驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型、灰色预测(GM)模型等构建有关生态安全评价指标体系,并利用模糊综合评价法<sup>[7]</sup>、生态足迹法<sup>[8]</sup>、熵权法<sup>[9]</sup>等对国家、地区、省市等不同尺度范围、不同生态系统的生态安全进行综合评价<sup>[10-14]</sup>。其中,PSR模型广泛应用于生态安全评价等领域的指标体系研究,该模型通过压力—状态—响应三个指标之间的逻辑关系和结构,可以有效评价地区的生态安全状况,以往研究中曾以该模型对湖北、吉林、云南等地开展了生态安全评价,并取得了较好的评价结果<sup>[15-17]</sup>。

国家公园是保护和恢复生物多样性的关键<sup>[18]</sup>,能在小范围面积上提供广泛的生物多样性<sup>[19]</sup>。在生态可持续性、经济发展和当地社区生计保障等方面产生重要影响<sup>[20-21]</sup>,是生态安全建设的重要载体,肩负着维护国家生态安全、筑牢国家生态安全屏障的重要使命<sup>[22-23]</sup>。因此,开展国家公园生态安全研究,明确区域生态演变趋势,为构建区域生态安全格局提供了新的有效途径和发展方向,对提高生态系统服务价值、促进生态保护和社会经济高质量发展具有重要意义<sup>[24-25]</sup>。

然而,目前关于国家公园的生态安全的相关研究较为缺乏,尚未形成较为统一的研究方法与体系,难以实现新时期以国家公园为主体的自然保护地体系的生态保护与经济社会的平稳、健康、可持续发展之间的高效融合应用。武夷山国家公园所在的武夷山国家级自然保护区始建于1979年,是我国较早建设的一批自然保护区之一,也是中国第一个国家重点自然保护区,并于1999年由联合国教科文组织列入世界文化与自然双重遗产,拥有独特的生态环境和丰富的生物多样性,其生态系统的稳定性和复杂性对研究国家公园生态安全具有重要的参考价值,可以为进一步扩展到其他地区和其他类型的国家公园提供有力的研究基础和实践经验,对推动中国国家公园整体生态安全研究具有重要意义。为了弥补在国家公园生态安全方面研究的不足,本文以武夷山国家公园为研究对象,基于国家公园及其覆盖范围的武夷山市、建阳区、光泽县、邵武市、铅山县等5个行政区的数据,通过综合权重法计算得出生态安全指数,运用ArcGIS软件分析武夷山国家公园及其周边地区的生态安全状况的分布与时空变化,为武夷山国家公园及其周边地区经济社会的健康可持续发展提供依据,推动国家公园开展生态安全整体评估、模拟及预测等相关研究,为区域甚至全国的规划管理提供理论指导。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域

武夷山国家公园是我国唯一一个既是世界生物圈保护区,又是世界文化与自然双遗产的国家公园,是全

球生物多样性保护的关键地区,拥有地球同纬度保存最完整、最典型、面积最大的中亚热带原生性森林生态系统,是我国重要生态安全屏障<sup>[26]</sup>。武夷山国家公园位于闽赣交界武夷山脉北段,东至江西铅山县英将乡铜锣形、西至福建省光泽县寨里镇白石村东山、南至福建省邵武市水北镇大坑仙、北至江西省铅山县武夷山镇白石岗(图 1)。地理范围为东经 117°24'15"—117°59'33",北纬 27°31'21"—28°2'53",总面积 1279.98km<sup>2</sup>。涉及福建、江西 2 省,南平、上饶 2 市,武夷山市、建阳区、光泽县、邵武市、铅山县等 5 县(区、市)(表 1)。其中,福建省域内 1001.41km<sup>2</sup>,占总面积的 78.23%;江西省域内 278.57km<sup>2</sup>,占总面积的 21.77%。

表 1 武夷山国家公园在各行政区的分布概况

Table 1 Distribution of Wuyishan National Park in various administrative regions

片区 Region	行政区 District	面积/km <sup>2</sup> Area	占比/% Percentage
福建片区 Fujian area	武夷山市	593.45	46.36
	建阳区	129.45	10.11
	光泽县	251.96	19.69
	邵武市	26.55	2.07
江西片区 Jiangxi area	铅山县	278.57	21.77%

## 1.2 数据来源

本研究按照县域(福建 4 个县、江西 1 个县)、武夷山国家公园(国家公布的武夷山国家公园范围)两个空间尺度进行评价。为特别观察武夷山国家公园设立前后时段的生态安全变化,本文以 2016 年武夷山国家公园试点工作开始为节点,对前后 6 年的生态安全情况进行研究,在时间尺度选择了 2010 年、2015 年、2020 年、2021 年和 2022 年共 5 个年份。其中,2010 年、2015 年和 2020 年每隔 5 年的数据可以观察该地区生态安全的长期的变化趋势,选择 2021 年和 2022 年的数据可观察近期的变化趋势。县域经济数据主要来源于福建省统计年鉴、江西省统计年鉴,建阳区统计年鉴、武夷山市统计年鉴、邵武市统计年鉴、光泽县统计年鉴、铅山县统计年鉴,生态相关数据主要来源于建阳区、武夷山市、邵武市、光泽县、铅山县林业局。武夷山国家公园数据来源于武夷山国家公园管理局,由于武夷山国家公园试点工作始于 2016 年,为保障数据连续性,其中 2010、2015 年数据使用武夷山国家级自然保护区的有关数据代替。范围矢量数据来源于自然资源部及武夷山国家公园管理局。基于以上数据,课题组于 2023 年 4 月对国家公园及其周边县域进行调研并走访相关部门,对已有数据进行核实,确保其准确无误,并对缺失数据进行收集和补充。

## 2 研究方法

### 2.1 生态安全指标设置及权重确定

#### 2.1.1 指标含义和基本假设

生态安全是区域自然生态系统的完整性与可持续性的反映,健康的生态系统能够为区域的社会经济发展

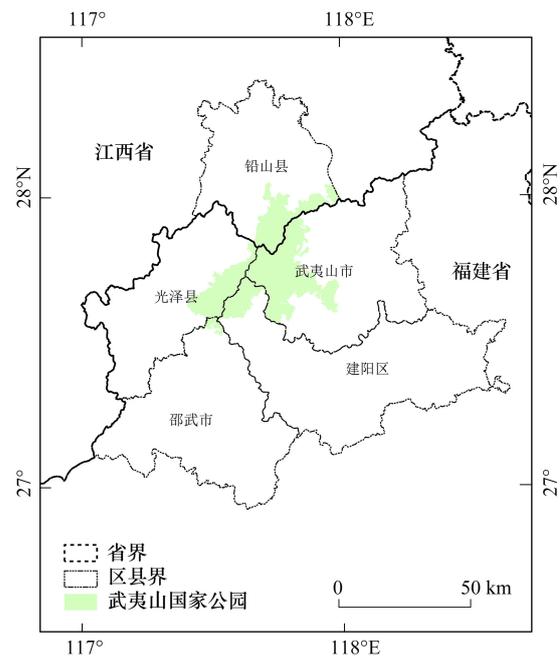


图 1 武夷山国家公园位置图

Fig.1 Location of Wuyishan National Park

发挥积极作用。随着武夷山国家公园的保护和建设,人们保护意识的增强,武夷山及其周边区域的生态环境越来越好,但仍存在生态环境脆弱、人地关系矛盾的情况,因此,明确该区域的生态安全威胁情况十分必要。本文在参考前人研究的基础上<sup>[15-16,27-28]</sup>,根据研究区实际情况,数据的可获得性,指标选取的科学性、全面性、典型性的原则,以生态安全为总目标,基于 PSR 模型,结合武夷山实际和征求武夷山管理局的管理者与监测中心等部门专家意见,共选取 6 类 24 个指标,构建武夷山国家公园及其周边地区的生态安全评价指标体系(表 2)。

### 2.1.2 专家咨询法

专家评估法的分值计算方法有多种,其中通过加权系数法对专家的分值进行计算,方法可靠性较高,应用较广泛<sup>[29-31]</sup>。其特点是对评价指标按重要程度分别给予权重,突出评价重点。

本研究邀请武夷山国家公园管理局、福建农林大学、福建师范大学、国家林草局国家公园管理中心等单位共 12 位专家,对生态安全指标体系的各项指标进行赋值打分,采用 10 分制对指标重要程度进行量化,分值越高表明指标的重要性越高。

#### (1) 专家评分分值的计算

第  $x$  名专家评分分值的计算公式为:

$$S_x = \sum_{i=1}^n J_i Q_i$$

式中, $Q_i$ 为第  $i$  项评价指标的得分; $J_i$ 为第  $i$  项评价指标加权系数。

#### (2) 最终评分分值的计算

综合评价最终评分分值的计算公式为:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n a_x S_x$$

式中, $S$ 为某项综合评价的最终得分; $S_x$ 为在某项评价中,第  $x$  名专家对该项的评分分值(专家共有  $n$  名); $a_x$ 为第  $x$  名专家的评分分值修正系数(归一化值)。

### 2.1.3 熵权法

熵权法主要是根据样本数据在各评价对象中的差异性来确定权重,是常见的一种客观赋权法,人为主观因素相对少,评价结果具有较高的可信度<sup>[32]</sup>。为降低专家打分的随机性,提高科学性,同时运用熵权法计算各评价指标的权重。

熵权法计算公式如下:

- (1) 选取样本和指标,定义为  $i$  个样本  $j$  个指标;
- (2) 指标的归一化处理:异质指标同质化得到  $X_{ij}$ ;
- (3) 计算指标的比重  $Y_{ij}$ :

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}}$$

- (4) 计算第  $j$  项指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (Y_{ij} \times \ln Y_{ij})$$

式中, $k = \frac{1}{\ln(n)} > 0$ ,满足  $e_{ij} \geq 0$ 。

- (5) 计算信息熵冗余度:

$$d_j = 1 - e_j$$

- (6) 计算各项指标的权值:

$$W_i = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_i}$$

#### 2.1.4 综合权重法

权重反映不同指标对生态安全的影响程度,直接影响评价结果的可靠性。熵是度量不确定性的衡量标准,较小的熵表示更大的信息量以及更重要的指标。为了减小主观因素与数据离散程度对权重的影响,本文利用最小信息熵原理对主客观权重进行综合<sup>[13,33-37]</sup>。具体公式如下:

$$W_j = \sqrt{W_{j,1} \times W_{j,2}} / \sum_{n=1}^n \sqrt{W_{n,1} \times W_{n,2}}$$

式中, $W_j$ 为第 $j$ 个指标的综合权重值; $W_{j,1}$ 和 $W_{j,2}$ 分别为第 $j$ 个指标的主、客观权重值; $n$ 为指标数量, $W_{n,1}$ 和 $W_{n,2}$ 分别为第 $n$ 个指标的主、客观权重值。

### 2.2 生态安全指标设置及权重确定

#### 2.2.1 数据标准化

首先将各生态安全指标标准化,指标中的正向指标表明这些指标值越大生态安全状况越好,负向指标则表明这些指标值越小生态安全状况越好。

(1) 正向指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(2) 负向指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中, $x_{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$ ,  $x_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$ ,  $m$ 为第 $j$ 个指标的样本数。

#### 2.2.2 指数计算

$$Z = \sum_{j=1}^s w_j y'_{ij}$$

式中, $Z$ 为需要计算的指数, $w_j$ 为指标权重, $y'_{ij}$ 为相应的标准化指标。

### 2.3 生态安全变化趋势预测

采用一元线性回归分析和最小二乘法,拟合近 $n$ 年间生态安全指数变化的斜率 slope,得到多年生态安全指数的变化趋势,综合分析不同地区多年生态安全指数变化方向和速率。

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

为了进一步评价生态安全变化状况,采用 $F$ 检验法其变化趋势进行显著性分析,用于表示趋势变化置信度的高低。

$$a = \text{avg}(y) - \text{slope} \times \text{avg}(x)$$

$$\tilde{y}_i = a + \text{slope} \times x_i$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2$$

$$F = U \times \frac{n-2}{Q}$$

式中,  $n$  为研究时序;  $U$  为误差平方和;  $Q$  为回归平方和;  $\hat{y}_i$  为拟合回归值;  $\bar{y}_i$  为  $n$  年平均值;  $y_i$  为第  $x_i$  年的值。

### 3 数据分析与结果

#### 3.1 权重确定

从表 2 可以看出, 主观权重的结果表明, 权重较高的指标为人口密度、森林覆盖率和资金投入强度, 分别为 0.2589、0.1812 和 0.0809, 其三项总和超过权重的 50%。其中, 人口密度是负向指标, 而森林覆盖率和资金投入强度是正向指标。此 3 项指标是影响国家公园生态安全的最主要因素。防火资金、防病虫害资金、科研监测投入资金和管理强度则权重最低, 均为 0.0032, 且均为正向指标, 对国家公园生态安全影响较小。

表 2 生态安全指标体系权重

Table 2 Weight of ecological security indicator system

类型 Type	子类型 Subtype	指标 Index	主观权重 Subjective weight	客观权重 Objective weight	综合权重 Comprehensive weight	指标类型 Direction	
状态 State	生态条件	年降水量/mm	0.0712	0.0055	0.0338	正	
		土壤有机质	0.0065	0.0046	0.0093	正	
		年平均气温/℃	0.0324	0.0219	0.0454	正	
		年日照时数/h	0.0485	0.0086	0.0349	正	
		水土流失强度	0.0065	0.0015	0.0053	负	
	生态资源	森林覆盖率	0.1812	0.0067	0.0593	正	
		单位面积标准森林蓄积量	0.0421	0.0176	0.0464	正	
		森林物种丰度指数	0.0065	0.0675	0.0357	正	
		空气质量指数	0.0065	0.0170	0.0283	正	
		农田+茶园覆盖率	0.0324	0.0971	0.0428	正	
		生物多样性指数	0.0065	0.0182	0.0185	正	
		物种特有性	0.0065	0.0275	0.0509	正	
		灾害指标	森林火灾受灾率	0.0162	0.0426	0.0283	负
			森林病虫害发生面积	0.0162	0.0034	0.0126	负
压力 Pressure	人口指标	人口密度	0.2589	0.0159	0.1094	负	
		接待游客数	0.0485	0.0104	0.0383	负	
		人类工程占地率	0.0485	0.0141	0.0447	负	
	经济建设	经济密度	0.0647	0.0276	0.0720	负	
响应 Response	生态维护	资金投入强度	0.0809	0.0554	0.1142	正	
		生态补偿(政策补偿)资金	0.0065	0.1109	0.0457	正	
		防火资金	0.0032	0.0935	0.0297	正	
		防病虫害资金	0.0032	0.1819	0.0414	正	
		科研监测投入资金	0.0032	0.0844	0.0282	正	
		管理强度	0.0032	0.0664	0.0250	正	

参考有关文献和标准中的计算方式对以下指标数据进行计算<sup>[15-16, 27, 38]</sup>: 水土流失强度 = 水土流失面积/区域面积, 森林覆盖率 = 森林面积/区域面积, 森林物种丰度指数 = (乔木林面积+灌木林面积+疏林地面积和其他林地面积)/区域面积, 空气质量指数为 PM2.5 值, 农田+茶园覆盖率 = (农田+茶园面积)/区域面积, 生物多样性指数 = 野生动物丰富度×0.2+野生维管束植物丰富度×0.2+生态系统类型多样性×0.2+物种特有性×0.2+受威胁物种的丰富度×0.1+(100-外来物种入侵度)×0.1, 物种特有性 = 目标物种数量多年均值(统计年限内目标物种数量/记年数), 森林火灾受灾率 = 森林火灾发生面积/总面积, 人口密度 = 户籍人口/区域面积, 人类工程占地率 = (非建成区建筑物占地面积+路网密度×区域面积+建成区面积)/区域面积, 经济密度 = 年 GDP/区域面积, 资金投入强度 = 投资额/区域面积, 管理强度 = 在岗人员总数/区域面积; 其余数据根据数据来源中标明的资料中直接获得。

根据客观权重的结果来看, 防病虫害资金的权重最高, 达到了 0.1819, 其次为生态补偿(政策补偿)资金和防火资金, 分别为 0.1109、0.0924。

在综合了主观与客观权重结果后,综合权重最高的是资金投入强度,权重值为 0.1267,且为正向指标。其次是人口密度和经济密度,权重值分别为 0.1080、0.0711,二者均为负向指标。此 3 项指标的权重总和超过了总权重的 30%,说明在评价中对国家公园生态安全的影响最为明显。

### 3.2 生态安全评价结果

#### 3.2.1 生态安全指数总体变化情况

从总体来看(表 3),2010—2022 年武夷山国家公园及其周边地区的生态安全指数平均值逐步上升,由 2010 年的 0.4349 增长至 2022 年的 0.4878,年平均增幅达到了 1.01%,说明该区域的生态安全状况稳中有升。其中,生态安全指数年平均增幅最快的时段为 2020—2021 年,增长了 3.09%,说明此时段这些地区的生态安全状况改善最为明显。

表 3 2010—2022 年武夷山国家公园及其周边地区生态安全评价结果

Table 3 Results of ecological security assessment of Mount Wuyi National Park and its surrounding areas from 2010 to 2022

地区 District	2010	2015	2020	2021	2022	年均值 Annual average
武夷山国家公园 Wuyishan National Park	0.4501	0.4535	0.5277	0.5456	0.5574	0.5069
光泽县 Guangze County	0.4992	0.5081	0.4917	0.4817	0.4775	0.4916
邵武市 Shaowu City	0.4752	0.4956	0.4458	0.4508	0.4792	0.4693
武夷山市 Wuyishan City	0.3986	0.4267	0.4318	0.4436	0.4723	0.4346
建阳区 Jianyang District	0.3796	0.4183	0.4328	0.4674	0.4434	0.4283
铅山县 Yanshan County	0.4070	0.4053	0.4300	0.4558	0.4970	0.4390
平均值 Average	0.4349	0.4512	0.4600	0.4742	0.4878	0.4616

#### 3.2.2 不同研究区域生态安全指数的变化情况

生态安全指数最高的区域是武夷山国家公园,且整体呈逐步上升趋势,由 2010 年的 0.4501 增长至 2022 年的 0.5574,年均值达到了 0.5069,高于其他研究区域。其中,年均增幅最快的时段为 2020—2021 年。

从空间分布来看(图 2),生态安全状况在县域上呈现为东低西高、北低南高的趋势。从时间分布来看(图 3),生态安全指数最低的区域是建阳区,年均值仅为 0.4283,其中 2010 年的指数最低,仅为 0.3796。但其增幅较为明显,年平均增幅达到了 1.40%,且增幅最快的时段为 2020—2021 年,年均增幅达到了 7.97%。其他地区中,武夷山市和铅山县的生态安全指数也有较为明显的增幅,2010—2022 年期间,年均增幅分别达到 1.54%、1.84%,且增幅最快的时段均为 2021—2022 年,年增幅分别达到了 6.82%、9.04%。同时,在所有研究区域中,仅武夷山国家公园、武夷山市和邵武市的生态安全指数未出现波动下降现象,一直稳定上升。

### 3.3 生态安全指数变化情况

从表 4 可以看出,生态安全指数的时间变化特征主要表现为:武夷山国家公园、建阳区、武夷山市均为显著的增长趋势,slope 分别为 0.010、0.006、0.005, $R^2$  分别为 0.888、0.855、0.807,均拟合良好,且经  $F$  显著性检验, $F$  值分别为 23.846、17.740、12.546,模型拟合度  $F$  检验均高于显著水平。铅山县也表现为增长趋势,slope 达到了 0.006, $R^2$  为 0.649,但经  $F$  检验未达到显著水平。

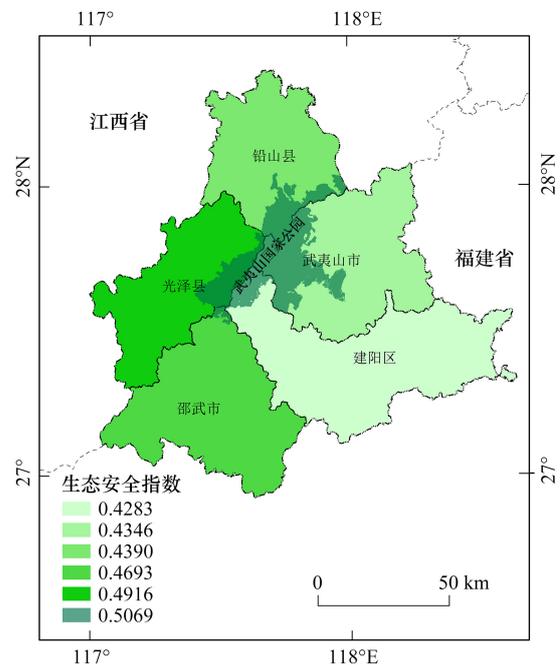


图 2 研究区域生态安全指数评价空间布局

Fig.2 Spatial layout of ecological security index results

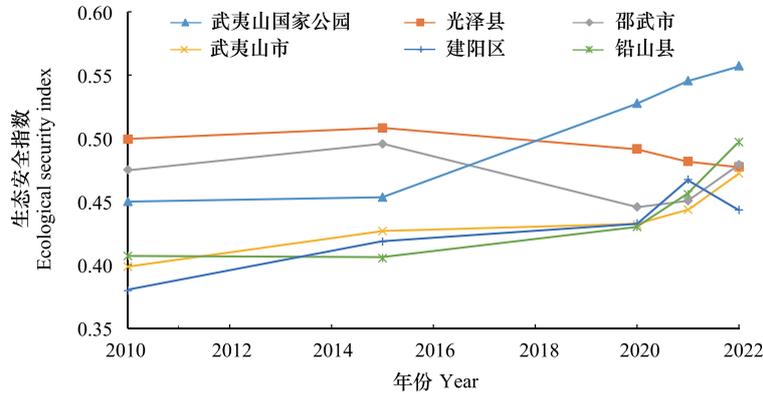


图 3 研究区域生态安全指数评价时间变化

Fig.3 Time variation of ecological security index results

邵武市和光泽县表现为极为缓慢的波动下降趋势,其 slope 均为-0.002,  $R^2$  分别为 0.205、0.606,且经  $F$  显著性检验,均未达到显著水平。说明在武夷山国家公园就其东南方向的武夷山市和建阳区,生态安全指数呈稳步增长的趋势,尽管处于国家公园北部的铅山县有所增长,但未达到显著水平,国家公园西南部的光泽县和邵武市则呈现并不显著的波动下降状态。

表 4 武夷山国家公园及周边地区生态安全指数变化趋势及  $F$  检验

Table 4 Change trend and  $F$  test of ecological security index in Wuyishan National Park and surrounding areas

指标 Indicator	武夷山国家公园 Wuyishan National Park	光泽县 Guangze County	邵武市 Shaowu City	武夷山市 Wuyishan City	建阳区 Jianyang District	铅山县 Yanshan County
$R^2$	0.888	0.606	0.205	0.807	0.855	0.649
$F$	23.846	4.621	0.774	12.546	17.740	5.542
$P$	0.016*	0.121	0.444	0.038*	0.024*	0.100
slope	0.010	-0.002	-0.002	0.005	0.006	0.006

\* 为显著(95%置信区间)

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

武夷山国家公园及其周边地区的生态安全指数整体呈现稳中有升的趋势,具体区域间存在差异,具体如下:

(1) 根据主观权重结果,人口密度、森林覆盖率和资金投入强度是影响生态安全的最主要因素。根据客观权重结果,防病虫害资金的权重最高,其次是生态补偿资金和防火资金。综合主观和客观权重后,资金投入强度、人口密度和经济密度对生态安全的影响最为明显,三者权重之和约占总权重的 30%。

(2) 武夷山国家公园及其周边地区 2010—2022 年的平均生态安全指数为 0.4616,呈逐步上升趋势。武夷山国家公园及其周边地区的生态安全存在差异,年均值从高至低分别为:武夷山国家公园、光泽县、邵武市、铅山县、武夷山市、建阳区。以国家公园的生态安全状况带动周边地区生态安全程度稳步提升,在武夷山市和建阳区得以充分体现,周边其他地区的生态安全状况表现也较为平稳。其中,武夷山国家公园、武夷山市、铅山县的生态安全指数均在 2020—2021 年的增幅最快。

(3) 武夷山国家公园为最高生态安全指数区域,年均值达到 0.5069,呈波动上升趋势。而建阳区生态安全指数最低,年均值仅为 0.4283,但其增幅较为明显,年平均增幅达到 1.40%。武夷山市和铅山县也有较为明

显的增幅。而武夷山国家公园、建阳区和武夷山市都呈现显著的增长趋势,邵武市和光泽县则呈现缓慢的波动下降趋势,铅山县的增长趋势尚未达到显著水平。武夷山国家公园周边地区生态安全指数总体呈现出东低西高、北低南高趋势,且位于其中的武夷山国家公园的生态安全指数最高。

## 4.2 讨论

(1)根据研究结果可以看出,相较于周边地区,武夷山国家公园的生态安全状况最好,可以在其基础上推动周边地区的生态安全提升。有研究表明,武夷山国家公园及周边地区“人—地”关系问题存在着复杂性、尺度效应和不确定性<sup>[39]</sup>。主管部门可以通过加强区域合作协调,共同保护和管理地区的生态环境,提高整个地区的生态安全水平。同时,也应加强生态安全指标的监测和评估工作,及时了解生态变化和影响因素,为制定有效的生态保护政策提供科学依据,并要加强对生态保护工作的监督和检查,确保各项政策的执行效果。

(2)武夷山国家公园自 2016 年开始启动体制试点以来,逐渐加大了生态保护力度,紧紧围绕国家公园的顶层设计开展体制试点相关工作,其生态安全状况有了很大的提升,其生态安全指数由 2015 年的 0.4535 增长至 2020 年的 0.5277,年均增幅达到了 0.0148,而 2010 年至 2015 年的生态安全指数年均增幅仅有 0.0007。而其周边地区生态安全指数变化由多方面因素影响,例如在铅山县在 2022—2023 年资金投入的增加是其生态安全指数增加的主要原因,而导致光泽县生态安全指数在 2020—2022 年有所下降则是由于自然气候变化导致。有研究表明,应对武夷山国家公园周边实施差异化分区管控,建设大生态一体化保护系统<sup>[40]</sup>。因此,在制定相关政策和进行决策时,需要针对不同地区考虑所有可能影响生态安全的因素,如武夷山国家公园、武夷山市、建阳区,可以通过鼓励生态保护和可持续管理,给予一定的生态补偿,以增加生态保护的积极性,对于其他地区则可以增加环境保护方面的投入,加强环境监测、治理和修复工作,确保生态环境的改善。

(3)2021 年,我国正式设立第一批国家公园,明确要求要依法依规加强国家公园保护管理,建立统一高效的工作体系,守住国家公园安全底线<sup>[41]</sup>。武夷山国家公园正式设立后,福建、江西两省于 2021 年联合启动总体规划编制工作,总结试点经验,研究分析现状及存在问题,衔接区域相关规划,开展了保护管理、监测监管、科技支撑、教育体验、和谐社区建设等一系列任务。在 2020—2021 年,武夷山及其部分周边地区均迎来了生态安全指数的快速增长,生态安全达到了新的高度,可以看出,这些措施的实施,有效地保护了武夷山的生态环境,提高了生态安全水平。

(4)我国国家公园是基于“成熟一个设立一个”的原则设立<sup>[42]</sup>,可以考虑将国家公园生态安全指数作为反映国家公园创建工作成效的标准之一。若国家公园生态安全指数在国家公园创建期间有了明显的升高,则说明其工作的成效显著,反之则说明工作仍需要进一步加强。我国国家公园的发展已经探索出了一条独具特色的道路<sup>[43]</sup>,未来可以通过统一国家公园生态安全评价指标体系,设立国家公园生态安全指标范围,并将其纳入衡量国家公园创建工作成效的指标体系中。

(5)随着在我国生态安全评价工作的开展,许多学者使用了不同方法对不同地区的生态安全状况进行研究,如针对湖北省、吉林省、云南省的县域森林生态安全状况进行评价<sup>[15-17,44]</sup>,有的研究还会更进一步分析生态安全状况的空间聚集状况<sup>[15,44]</sup>。有的研究范围更广泛,对多个省份进行了生态安全评价,并提出了将其纳入地方政府年度的统计工作的设想<sup>[28]</sup>。更有针对全国生态安全的时空格局进行了分析的研究<sup>[45-46]</sup>。本研究与他们不同的是,研究范围相对较小,且由于国家公园正式设立时间不长,缺少针对性的研究,所以可以更有针对性地为促进武夷山国家公园及其周边地区生态安全指数的提升提供依据。

## 参考文献 (References):

- [1] Hu Y X, Gong J R, Li X B, Song L Y, Zhang Z H, Zhang S Q, Zhang W Y, Dong J J, Dong X D. Ecological security assessment and ecological management zoning based on ecosystem services in the West Liao River Basin. *Ecological Engineering*, 2023, 192: 106973.
- [2] Sun M Y, Zhang L, Yang R J, Li X H, Zhang Y Y, Lu Y R. Construction of an integrated framework for assessing ecological security and its application in Southwest China. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110074.
- [3] 王丽娜,李爽,吴迪,邓红兵,吴钢. 景感生态学:生态安全研究与实践的重要途径. *生态学报*, 2020, 40(22): 8028-8033.
- [4] Liu Y, Qu Y, Cang Y D, Ding X G. Ecological security assessment for megacities in the Yangtze River Basin: applying improved emergy-ecological

- footprint and DEA-SBM model. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108481.
- [ 5 ] 王根绪,程国栋,钱鞠.生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1551-1556.
- [ 6 ] 顾艳红,张大红.省域森林生态安全评价——基于 5 省的经验数据. *生态学报*, 2017, 37(18): 6229-6239.
- [ 7 ] 米锋,潘文婧,朱宁,李华晶.模糊综合评价法在森林生态安全预警中的应用. *东北林业大学学报*, 2013, 41(6): 66-71, 75.
- [ 8 ] 朱琳,卞正富,赵华,余健.资源枯竭城市转型生态足迹分析——以徐州市贾汪区为例. *中国土地科学*, 2013, 27(5): 78-84.
- [ 9 ] 黄和平,杨宗之.基于 PSR-熵权模糊物元模型的森林生态安全动态评价——以中部 6 省为例. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(11): 42-51.
- [ 10 ] 王怡然,王雅晖,杨金霖,赵田野,寇林,张大红.黄河流域森林生态安全等级评价与时空演变分析. *生态学报*, 2022, 42(6): 2112-2121.
- [ 11 ] 冯彦,汤旭,包庆丰.基于 GWR 模型的长江三角洲森林生态安全驱动因素研究. *生态经济*, 2022, 38(6): 200-207, 216.
- [ 12 ] 李坦,陈天宇,米锋,马龙波.基于变权理论和 DPSIRM 的中国森林生态安全评价. *中国环境科学*, 2021, 41(5): 2411-2422.
- [ 13 ] 王怡然,张大红,吴宇伦.基于 DPSIR 模型的森林生态安全时空变化研究——以浙江省 79 个县区为例. *生态学报*, 2020, 40(8): 2793-2801.
- [ 14 ] 向丽,周伟,任君,黄雨晗,官炎俊.基于 DPSIRM 模型的高原城市湿地生态安全评价——以湟水流域西宁段为例. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 2064-2071.
- [ 15 ] 冯彦,郑洁,祝凌云,辛姝玉,孙博,张大红.基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变. *经济地理*, 2017, 37(2): 171-178.
- [ 16 ] 冯彦,祝凌云,郑洁,辛姝玉,张大红.基于 PSR 模型和 GIS 的吉林省县域森林生态安全评价及时空分布. *农林经济管理学报*, 2016, 15(5): 546-556.
- [ 17 ] 汤旭,郑洁,冯彦,李燕坤,王时军,张大红.云南省县域森林生态安全评价与空间分析. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(4): 684-694.
- [ 18 ] Bawa K S, Sengupta A, Chavan V, Chellam R, Ganesan R, Krishnaswamy J, Mathur V B, Nawn N, Olsson S B, Pandit N, Quader S, Rajagopal P, Ramakrishnan U, Ravikanth G, Sankaran M, Shankar D, Seidler R, Shaanker R U, Vanak A T. Securing biodiversity, securing our future: a national mission on biodiversity and human well-being for India. *Biological Conservation*, 2021, 253: 108867.
- [ 19 ] 徐卫华,赵磊,韩梅,欧阳志云.国家公园空间布局的物种保护状况评估. *国家公园*, 2023, 1(1): 11-16.
- [ 20 ] Kumar H, Pandey B W, Anand S. Analyzing the impacts of forest ecosystem services on livelihood security and sustainability: a case study of *Jim corbett National Park* in uttarakhand. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2019, 7(2): 45-55.
- [ 21 ] 李新婷,魏钰,张丛林,黄宝荣.国家公园如何平衡生态保护与社区发展:国际经研与中国探索. *国家公园*, 2023, 1(1): 44-52.
- [ 22 ] 胡西武,贾天朝.基于生态敏感性与景观连通性的三江源国家公园生态安全格局构建与优化. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8): 1724-1735.
- [ 23 ] 何雄伟,盛方富.国家级自然保护区生态预警指标体系构建与生态安全评价——以江西鄱阳湖国家级自然保护区为例. *生态经济*, 2021, 37(12): 190-195.
- [ 24 ] Zhang Y E, Zhang L Y, Yu K H, Zou Y F. Analysis of the characteristics of ecological security zoning and its dynamic change pattern; a case study of the Weibei area. *Sustainability*, 2020, 12(17): 7222.
- [ 25 ] 马娟娟,李晓兵,齐鹏,张耀全.祁连山国家公园生态安全评价. *山地学报*, 2022, 40(4): 504-515.
- [ 26 ] 陈茹,吴晨倩.武夷山国家公园:绘就人与自然和谐共生绿色画卷. *海峡通讯*, 2022(10): 67-69.
- [ 27 ] Wang Y R, Zhang D H, Wang Y H. Evaluation analysis of forest ecological security in 11 provinces (cities) of the Yangtze River economic belt. *Sustainability*, 2021, 13(9): 4845.
- [ 28 ] 杨伶,张大红,王金龙,李亚云.中国县域森林生态安全评价研究——以 5 省 15 县为例. *生态经济*, 2015, 31(12): 120-124.
- [ 29 ] 罗远洋.基于 P-S-R 模型的海螺沟国家冰川森林公园生态安全评价[D].雅安:四川农业大学, 2015.
- [ 30 ] 徐艺扬,钱敏蕾,李响,王祥荣,谢玉静.基于 DPSIR 的太平湖流域(黄山区)生态安全综合评估. *复旦学报:自然科学版*, 2015, 54(4): 407-415.
- [ 31 ] 汪朝辉.山岳型森林公园生态安全评价研究[D].长沙:中南林业科技大学, 2012.
- [ 32 ] 鲍艳磊,田冰,张瑜,渠开跃,李炜,钱金平.雄安新区河流健康评价. *生态学报*, 2021, 41(15): 5988-5997.
- [ 33 ] 刘海龙,谢亚林,贾文毓,石培基.山西省生态安全综合评价及时空演化. *经济地理*, 2018, 38(5): 161-169.
- [ 34 ] 李悦,袁若愚,刘洋,郗敏,孔范龙.基于综合权重法的青岛市湿地生态安全评价. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 847-855.
- [ 35 ] 赵文力,刘湘辉,鲍丙飞,向平安.长株潭城市群县域生态安全评估研究. *经济地理*, 2019, 39(8): 200-206.
- [ 36 ] 冯雨雪,李广东.青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析. *地理学报*, 2020, 75(7): 1386-1405.
- [ 37 ] 王争磊,刘海龙,丁娅楠,王炜桥,张丽萍,郭晓佳.山西省生态安全时空演变特征及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(18): 7470-7483.
- [ 38 ] 中国生物多样性保护与绿色发展基金会.TCGDF 00002-2020 生物多样性评估标准.(2020-06-05)[2023-10-20].[http://file.cbegdf.org/T18/O125/file/20200608/20200608163426\\_1066.pdf](http://file.cbegdf.org/T18/O125/file/20200608/20200608163426_1066.pdf)
- [ 39 ] 廖凌云.武夷山国家公园体制试点区社区规划研究[D].北京:清华大学, 2018.
- [ 40 ] 许杰玉,毛磊,郑婷婷,钟奕纯,陈国磊,张楠.环国家公园地区生态保护规划研究——以环武夷山国家公园保护发展带为例. *环境生态学*, 2022, 4(12): 31-36.
- [ 41 ] 臧振华,张多,王楠,杜傲,孔令桥,徐卫华,欧阳志云.中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 2020, 40(24): 8839-8850.
- [ 42 ] 新华社.中共中央办公厅 国务院办公厅印发《建立国家公园体制总体方案》. *中华人民共和国国务院公报*, 2017(29): 7-11.
- [ 43 ] 张玉钧,宋秉明,张欣瑶.世界国家公园:起源、演变和发展趋势. *国家公园*, 2023, 1(1): 17-26.
- [ 44 ] 姚月,张大红.县域森林生态安全评价分析研究——基于湖北省 29 个县统计数据. *林业经济*, 2017, 39(7): 51-55.
- [ 45 ] 徐会勇,赵学娇,张大红.我国省域森林生态安全评价及差异化——基于生态文明建设背景. *生态学报*, 2018, 38(17): 6235-6242.
- [ 46 ] 米锋,谭曾豪迪,顾艳红,鲁莎莎,张大红.我国森林生态安全评价及其差异化分析. *林业科学*, 2015, 51(7): 107-115.