

基于多框架模型的不同自然带生态安全评价及动态预警研究

成 钊^{1,2}, 王金亮^{1,2*}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南师范大学资源与环境遥感实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2023年3月30日; 录用日期: 2023年6月9日; 发布日期: 2023年6月20日

摘 要

生态安全正逐渐成为国家安全体系的重要组成部分, 开展生态安全评价研究, 可为国家生态环境保护、生态文明建设以及人与自然永续发展提供科学依据。本文以温度带作为划分依据, 选取了云南省内分布于各温度带的7个典型区县作为研究对象, 结合DPSIR模型与EES模型, 构建了云南省不同温度带典型研究区具有特色的生态安全评价体系, 通过对研究区2000~2005年生态安全的动态评价, 基于该实验结果, 了解了其安全演变过程、安全现状、与自然带之间的联系等, 并针对其存在的安全问题进行了对策探讨, 主要研究结论如下: 1) 2000~2005年, 云南省7个温度带的代表区域, 其生态安全评价综合值整体上逐年提高, 从云南省温度带分布的角度看, 呈现出从北亚热带向南亚热带增加的趋势。2) 位于滇中地区的北亚热带和中亚热带代表区域生态安全等级整体上居于良好级以上。

关键词

生态安全, DPSIR模型, EES模型, 综合权重

Research on Ecological Security Evaluation and Dynamic Early Warning of Different Natural Zones Based on Multi-Frame Model

Zhao Cheng^{1,2}, Jinliang Wang^{1,2*}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Remote Sensing Laboratory of Resources and Environment, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Mar. 30th, 2023; accepted: Jun. 9th, 2023; published: Jun. 20th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 成钊, 王金亮. 基于多框架模型的不同自然带生态安全评价及动态预警研究[J]. 地理科学研究, 2023, 12(3): 351-361. DOI: 10.12677/gser.2023.123033

Abstract

Ecological security is gradually becoming an important component of the national security system, and conducting ecological security evaluation research can provide a scientific basis for national ecological environment protection, ecological civilization construction, and sustainable development of humans and nature. Based on the division of temperature zones, this paper selected seven typical districts and counties distributed in each temperature zone in Yunnan Province as the research object, combined with the DPSIR model and the EES model, and constructed a characteristic ecological security evaluation system for typical research areas in different temperature zones in Yunnan Province. Through the dynamic evaluation of ecological security in the research area from 2000 to 2005, based on the experimental results, the safety evolution process, its safety status quo, and the connection between it and the natural zone were understood, and the countermeasures are discussed in view of the existing safety problems. The main research conclusions are as follows: 1) From 2000 to 2005, the comprehensive ecological safety evaluation values of the seven representative temperature zones in Yunnan Province have increased year by year. From the perspective of the distribution of temperature zones in Yunnan Province, there is a trend of increasing from the north subtropical to the south subtropical. 2) The ecological security level of the representative regions of the northern and central subtropics located in the central Yunnan region is generally above the good level.

Keywords

Ecological Security, DPSIR Model, EES Model, Comprehensive Weight

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入 21 世纪, 很多学者对生态安全评价开展了研究。2002 年, 左伟等[1]指出生态安全关乎国家安全, 生态安全评价就是用生态指标体系评价生态环境系统服务功能对人类需要的满足程度; 2005 年, 左伟等[2]又系统分析了生态安全评价模型, 并以重庆市忠县为例构建了生态安全评价指标体系, 根据评价结果为该地区划分了生态安全等级。2006 年, 高长波等[3]用生态安全评价指标体系和熵权模糊评价量化模型评估了城市生态安全, 其结果为城市建设规划提供了数据参考。解雪峰等[4]运用压力(Pressure)-状态(State)-响应(Response)模型(以下简称 PSR 模型), 综合分析研究了东阳江流域的生态环境状况。针对云南省内的生态安全评价研究, 很多学者选取小范围区域作为研究对象。2005 年, 齐清文等[5]对云南边境地带的生态安全进行评价, 其结果为边境复杂多样的环境监管提供了可行思路; 2008 年, 张向晖等[6]为云南省纵向岭谷区建立了生态安全评价体系, 发现该区域存在土地资源利用不合理的问题; 2015 年, 董云仙等[7] (pp. 185-191)对九大高原湖泊区的演变进行了研究, 并对不同水平的湖泊划分了相应等级后提出了治理方法; 2017 年, 付伟等[8]利用 PSR 模型构建了昆明市饮用水源区的生态安全评价体系, 为制定不同时段水源区的规划方案提供了参考。

2021 年 3 月, “十四五”规划指出要构建和优化国土空间开发和保护格局、推动绿色低碳发展、推进清洁生产和加强污染治理, 在发展中解决生态问题。生态安全是指生态系统的健康和完整情况, 是人类在生产、生活和健康等方面不受生态破坏与环境污染等影响的保障程度。生态安全水平可通过反映生

态因子及其综合体系质量的指标进行定量评价[9], 在综合考虑了自然环境与人类之间相关性的前提下[10][11], 评价结果展示了其变化过程及其空间分布状况, 为促进区域经济和生态均衡发展[12]、区域生态文明建设决策、生态管理提供指导信息。

本研究针对云南省复杂多样的生态环境, 按照温度带重点选取了省内具有代表性的州市, 结合“十四五”规划中关于生态文明建设的主要绿色目标: 能耗标准、空气质量、水利设施、乡村建设等运用 DPSIR 模型和 EES 模型[13][14], 构建了生态安全评价体系, 以此进一步分析云南省生态安全水平变化趋势及波动原因与自然带之间的关系, 根据数据结果为云南省建设生态监管平台、实现生态安全实时监测、制定生态环保政策提供依据。

2. 研究区与数据来源

2.1. 研究区概况

云南省地处祖国西南陆域, 位于北纬 $21^{\circ}8'32''\sim 29^{\circ}15'8''$ 和东经 $97^{\circ}31'39''\sim 106^{\circ}11'47''$, 北回归线横贯本省南部。整体高原地貌地势由西北向东南梯级递降。全境以哀牢山为界分为东部高原残存面, 西部高山区两大地形地貌单元, 深受季风气候影响, 形成独特的自然地理环境空间格局。气候带表示热量丰富的程度, 《中国气候区划》主要以日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、最冷月平均气温、极端最低气温作为划分气候带的指标, 根据以上划分云南气候带的温度指标, 从南到北云南出现北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、南温带、中温带、北温带(高原气候区域)等 7 种气候带类型, 本文以热量带为参考, 从每个气候带中选取了一个典型城市, 共计 7 个区县作为研究区(见图 1)。

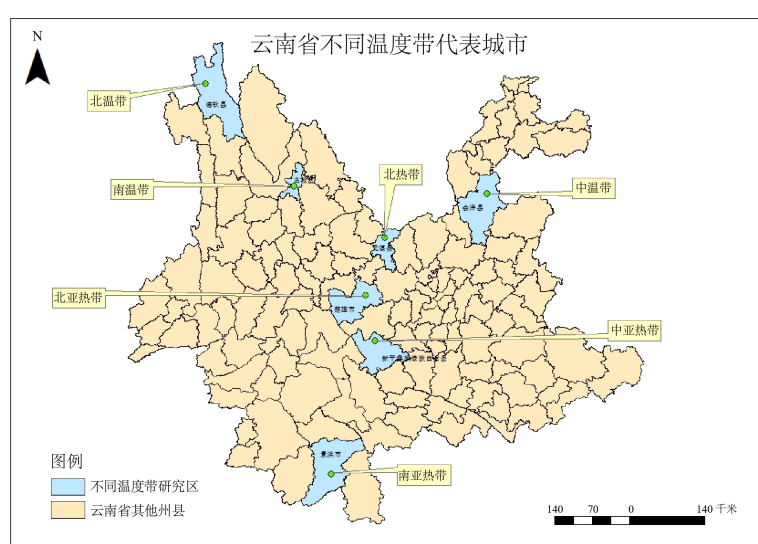


Figure 1. Representative city map of different temperature zones in Yunnan Province

图 1. 云南省不同温度带代表城市图

2.2. 数据来源

本文所使用的数据主要包括 2000~2005 年云南省各气候带 7 个典型城市 42 个县(市、区)级行政单元的社会经济、基础设施、资源环境等基础数据。社会经济和基础设施数据主要来源于 2000~2005 年《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》《云南省统计年鉴》以及各县(市、区)统计年鉴和公报, 空气质

量数据来源于各市生态环境局; 资源环境数据主要来源于地理空间数据云平台的遥感数据。

3. 研究方法

3.1. 层次分析法

层次分析法是将一个复杂的问题划分为几个与此相关的因子, 按照各因子之间的相关性和隶属关系相互聚合, 构成一种层次结构, 并在此基础上对不同层次的不同因子赋予不一样的权重值, 从而将复杂事物简单化。自从美国学者 Tavarov 等提出了层次分析法[15], 层次分析法在生态敏感性评价中得到了广泛的应用, 如 2004 年沈钢在城市生态敏感性分析调查中就使用了层次分析法。陶星名在杭州市 2007 年的生态敏感性评价中也运用了层次分析法。对评价指标赋予权重是本研究的核心, 需要按照相对重要性比例的标准执行(见表 1), 本研究选取了影响滇中地区城市群生态韧性度的 20 余个因子, 建立科学合理的评价指标体系, 按照层次分析法确定各因素的权重, 其基本步骤包括:

Table 1. Relative importance ratio criteria

表 1. 相对重要性比例标准

标度	表示的意义
1	两个因素比较, 具有相同的重要性
3	两个因素比较, 前一个因素比后一个因素稍微重要
5	两个因素比较, 前一个因素比后一个因素明显重要
7	两个因素比较, 前一个因素比后一个因素强烈重要
9	两个因素比较, 前一个因素比后一个因素极端重要
2、4、6、8	两相邻因素判断的中间值
上述值的倒数	两因素反过来比较是原来比较值的倒数

1) 建立层次分析模型

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & a_{ij} & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

矩阵中的 a_{ij} 表示相对 A_j 、 A_i 的重要程度, 要是前者更为重要, 那么 $a_{ij} > 1$, 要是两者同样重要, 则 $a_{ij} = 1$ 。

2) 矩阵元素重要性判断

3) 计算指标的权重向量

向量积正规化法的步骤:

第一借助正规化处置矩阵, 利用以下公式:

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{ik} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

第二将矩阵当中的元素相加:

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

第三对于上式中的 \bar{w}_i , 实施正规化处置:

$$w_i = w_i / \sum_{i=1}^n \bar{w}_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

一致性检验, 对于前面得到的向量, 还有特征值, 进行一致性检测, 若能通过检测, 意味着判断矩阵是合理的, 即存在解释价值。

假定 CI 代表一致性指标, 以下为运算方法(参见表 2):

$$CI = \frac{r - n}{n - 1} \quad (4)$$

Table 2. Stochastic consistency index RI

表 2. 随机一致性指标 RI

<i>N</i>	RI
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49
11	1.51

通过 *n* 值, 能够获取 RI 值, 如此获取一致性比率, 即 $CR = CI/RI$ 。

当 $CR < 0.1$ 时, 则检测达到要求。

3.2. 熵值法赋权

在进行评价之前, 需要先对数据进行无量纲化, 然后再对指标进行赋权。为了能得到较为客观的权重, 在本文的研究中, 指标的客观权重采用熵值法进行计算, 熵值法的计算原理如下:

Step 1: 每个指标的量纲和单位是不同的, 无法直接比较、计算, 所以在各指标权重计算前, 需将其标准化处理。

当指标为正向指标时, 其标准化公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (5)$$

当指标为负向指标时, 其标准化公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (6)$$

Step 2: 一些指标数值进行标准化处理后, 可能会出现数值较小或负值的情况, 为了计算的统一与方

便, 将标准化后的数值进行平移处理, 从而消除上述情况。

$$x_{ij}'' = H + x_{ij}' \quad (7)$$

其中, H 为指标平移的幅度, 一般取 1。

Step 3: 利用比重法对数据进行无量纲化:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}''}{\sum_{i=1}^n x_{ij}''} \quad (8)$$

Step 4: 计算第 j 个指标的熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \quad (9)$$

Step 5: 第 j 个指标的差异系数为:

$$g_j = 1 - e_j \quad (10)$$

其中, $j=1, 2, \dots, p$ 。

Step 6: 第 j 个指标的权重为:

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^p g_j} \quad (11)$$

其中, $j=1, 2, \dots, p$ 。

3.3. 组合赋权法

主观赋权方法会导致权重结果具有较大的主观性, 而客观赋权法虽能消除权重的主观随意性, 但其结果有时又会与实际情况相悖。为了避免上述两种情况, 本研究采用主客观组合赋权法, 即将层次分析法与熵值法相结合, 公式如下:

$$W_i = 0.5 * (W_{ai} + W_{bi}) \quad (12)$$

式中, W_i 表示 i 指标的综合权重, W_{ai} 表示层次分析法确定的 i 指标的权重, W_{bi} 表示熵值法确定的 i 指标的权重。

3.4. 指标体系构建及权重确定

DPSIR 概念模型的优点是可以很好地表达整个生态系统各因素之间的相互因果关系, 但是却无法很好地反映除因果关系之外的其他内部联系; EES (Environment-Economic-Society) 概念模型是包含了环境、经济、社会多要素属性的系统综合模型, 但是无法反映生态系统各因素之间的因果关系。因此, 本研究参照吕广斌等[13]学者的研究成果, 将 DPSIR 概念模型和 EES 概念模型的长处进行结合形成 DPSIR-EES 组合的概念模型, 在此概念模型基础之上引入矿山开采状况因素将生态安全评价作为总目标层, 并将其分解为驱动力、压力、状态、影响、生态响应 5 个准则层, 每个准则层从环境、经济、社会 3 个要素层面结合研究区实际客观情况以及前人的相关研究文献选取相应的指标层最终形成云南省各温度带代表城市研究区的生态安全评价指标体系[14]。研究选取的土地生态安全评价指标能较好地反映区域自然环境、社会经济发展和土地利用状态等情况, 特别是围绕以环境、经济和社会要素所选取的评价指标在综合作用下, 能够反映土地生态安全各子系统的要素关系, 从而有效反映区域的土地生态安全状况。基于相关

研究, 综合考虑滇中地区特点和数据的可获得性, 在 GIS 和 RS 等理论体系与技术支持下, 根据研究区 2000~2005 年的多源数据, 选取了重要指标如 NPP、碳排放量、NDVI、植被干旱指数等 23 个指标, 通过层次分析法和熵值法分别从主观和客观方面为各指标赋予权重并得出各指标的综合权重(见表 3), 最后基于权重结果和生态安全评价模型, 得出实验结论, 并根据实验结果, 提出了针对性的改善措施。

Table 3. Safety evaluation index system and weight of the study area

表 3. 研究区安全评价指标体系及权重

目标层	准则层	要素层	指标层	趋势	熵值法 权重	层次分析 法权重	综合 权重	
生态 安全 评价 指标 体系	驱动力(D)	经济驱动力(D1)	第三产业产值(D11)	+	0.0318	0.0231	0.02745	
			GDP 年增长率(D12)	+	0.0254	0.0321	0.02875	
			地区生产总值(D13)	+	0.0235	0.0823	0.0529	
		社会驱动力(D2)	城镇化率(D21)	+	0.0262	0.0298	0.028	
		环境驱动力(D3)	建设用地面积占比(D31)	-	0.0421	0.0168	0.02945	
		压力(P)	经济压力(P1)	人均 GDP(P11)	+	0.265	0.0169	0.14095
	社会压力(P2)			人口密度(P21)	-	0.0289	0.0277	0.0283
				人口自然增长率(P22)	-	0.0243	0.0223	0.0233
	环境压力(P3)		碳排放(P31)	-	0.0369	0.0547	0.0458	
			未利用土地面积占比(P32)	-	0.0572	0.0396	0.0484	
			状态(S)	经济状态(S1)	固定资产投资增长速度(S11)	+	0.0258	0.0199
	社会状态(S2)	人均耕地面积(S21)		+	0.0318	0.0336	0.0327	
		NDVI(S31)		+	0.0424	0.026	0.0342	
	环境状态(S3)	植被干旱指数(S32)		-	0.0326	0.0453	0.03895	
		PM2.5 浓度(S33)		+	0.0335	0.0363	0.0349	
	影响(I)	经济影响(I1)	农村居民人均纯收入(I11)	+	0.0331	0.0275	0.0303	
		社会影响(I2)	林草地面积(I21)	+	0.0389	0.029	0.03395	
		环境影响(I3)	植树造林总面积(I31)	+	0.0388	0.0228	0.0308	
	响应(R)	经济响应(R1)	环境投入占 GDP 比重(R11)	+	0.0491	0.0536	0.05135	
			社会响应(R2)	污水处理率(R21)	+	0.0231	0.0658	0.04445
		环境响应(R3)	年平均气温(R31)	+	0.0303	0.0248	0.02755	
			年降水量(R32)	+	0.0344	0.0318	0.0331	
			生活垃圾处理率(R33)	+	0.2387	0.3254	0.28205	
空气质量优良率(R34)			+	0.1324	0.0324	0.0824		

3.5. 生态安全评价模型

生态安全评价模型作为评价城市生态环境状况和发展趋势的重要理论依据, 将生态安全评价目标层定义为问题, 各指标层分解为子模型, 采用线性加权求和函数法将所有指标乘以各自的权重之后进行加和叠加得到云南省各温度带代表区域的生态安全评价目标层的分值, 然后采用非等间距法对自然分类结

果进行调整对评价结果进行分级, 分值越低, 生态安全状况越好, 分值越高, 生态状况越不安全(见表 4)。所得结果科学客观, 评价过程有效易操作, 能够充分反映出各项指标与生态安全之间的密切联系, 有利于评价结果的分析与讨论。计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^n X_i * Y_i \quad (13)$$

式中, W 表示目标层的指标值, X_i 表示各指标层的权重, Y_i 表示指标层的评价指标因子。

Table 4. Representative regional ecological safety evaluation level standard of each temperature zone in Yunnan Province
表 4. 云南省各温度带代表区域生态安全评价等级标准

生态状况	生态安全等级	指标值	生态安全特征
危险级	V	[0~0.586)	区域土地生态环境受到极其严重破坏, 土地生态环境非常危险, 土地生态系统极不稳定, 生态自我修复难度大
敏感级	IV	[0.586~0.645)	区域土地生态环境受到较大程度破坏, 土地生态环境比较危险, 土地生态系统不稳定, 生态自我修复较困难
临界级	III	[0.645~0.712)	区域土地生态环境受到中等程度破坏, 土地生态环境较差, 土地生态系统比较稳定, 受外界干扰后, 生态自我修复较弱
良好级	II	[0.712~0.747)	区域土地生态环境受到小范围破坏, 土地生态环境较好, 土地生态系统稳定, 受外界干扰后, 一般能实现生态自我修复
安全级	I	[0.747~843)	区域土地生态环境未受破坏, 土地生态环境好, 土地生态系统非常稳定, 能实现生态自我修复

4. 结果与分析

生态安全综合分析

从图 2 中可以看出, 2000 年, 位于云南省滇西北海拔在 2800 m 以上的北温带区域的得钦县, 生态安全等级为危险级(V); 位于曲靖北部海拔在 2000~2800 m 的中温带区域的会泽县, 生态安全等级为敏感级(IV); 位于丽江海拔在 2000~2400 m 的南温带区域的丽江古城, 生态安全等级为良好安全级(I); 位于滇中区域的海拔在 1700~2100 m 之间的北亚热带的楚雄市, 生态安全等级为良好级(II); 位于滇中东南部海拔在 1200~1450 m 之间的中亚热带的新平县, 生态安全等级为临界级(III); 位于云南省南部边缘的海拔在 1000 m 以下的景洪市, 生态安全等级为良好级(II); 位于北纬 25~26°之间的北热带的元谋县, 生态安全等级为敏感级(II)。

从图 3 中可以看出, 2005 年, 位于云南省滇西北海拔在 2800 m 以上的北温带区域的得钦县, 生态安全等级仍然为危险级(V); 位于曲靖北部海拔在 2000~2800 m 的中温带区域的会泽县, 生态安全等级由敏感级(IV)变为了临界级(III); 位于丽江海拔在 2000~2400 m 的南温带区域的丽江古城, 生态安全等级由安全级(I)变为了良好级(II); 位于滇中区域的海拔在 1700~2100 m 之间的北亚热带的楚雄市, 生态安全等级由良好级(II)变为了安全级(I); 位于滇中东南部海拔在 1200~1450 m 之间的中亚热带的新平县, 生态安全等级由临界级(III)变为良好级(II); 位于云南省南部边缘的海拔在 1000 m 以下的景洪市, 生态安全等级由良好级(II)变为了临界级(III); 位于北纬 25~26°之间的北热带的元谋县, 生态安全等级由敏感级(IV)变为临界级(III)。

从图 4 中可以看出, 从时间上看, 2005 年较 2000 年的生态安全综合值有小幅度提升, 尤其是位于滇中区域的海拔在 1700~2100 m 之间的北亚热带的楚雄市, 生态安全等级有明显提升。从空间上看, 2000~2005 年, 云南省北温带代表地区德钦县的生态安全等级为危险级(V), 景洪市、新平县和楚雄市的

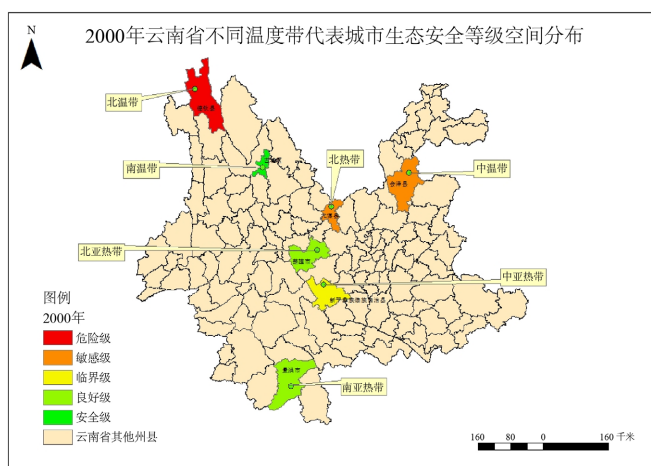


Figure 2. Spatial distribution of ecological safety levels of representative city of different temperature zones in Yunnan Province in 2000
图 2. 2000 年云南省不同温度带代表城市生态安全等级空间分布

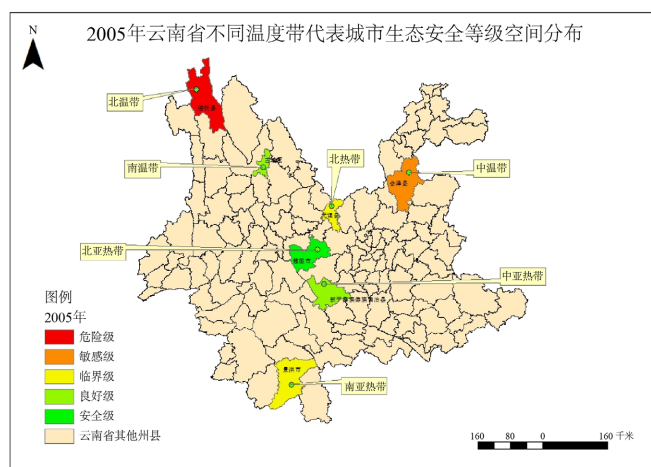


Figure 3. Spatial distribution of ecological safety levels of representative city of different temperature zones in Yunnan Province in 2005
图 3. 2005 年云南省不同温度带代表城市生态安全等级空间分布

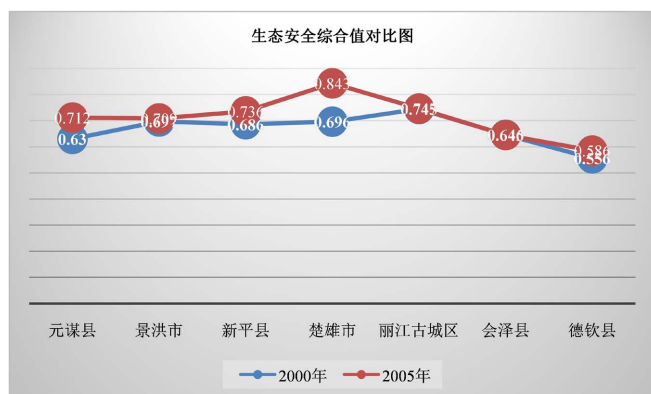


Figure 4. Comparison map of the comprehensive ecological security values of representative city of different temperature zones in Yunnan Province
图 4. 云南省不同温度带代表城市生态安全综合值对比图

生态安全等级呈现出从北亚热带向南亚热带增加的趋势, 而丽江古城区、会泽县和德钦县的生态安全等级呈现出从南温带向北温带减少的趋势。

5. 结论与讨论

本文基于 2000~2005 年云南省 7 个温度带代表区域的统计数据 and 遥感数据等, 构建了 DPSIR-EES 模型, 在数据标准化与赋权的基础上, 计算各县域的生态安全综合值, 通过分析得出如下结论:

1) 2000~2005 年, 云南省 7 个温度带的代表区域, 其生态安全评价综合值整体上逐年提高, 从云南省温度带分布的角度看, 呈现出从北亚热带向南亚热带增加的趋势。

2) 位于滇中地区的北亚热带和中亚热带代表区域生态安全等级整体上居于良好级以上。

从南到北, 云南省出现北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、南温带、中温带、北温带(高原气候区域)等 7 种气候带类型, 云南气候带种类之多在全国各个省、市、自治区中是绝无仅有的。由于地形复杂, 以上各个气候带常呈交叉分布。云南省南北之间纬度相差约 9 度, 但却分布着我国从海南岛到东北水平距离达数千公里的气候带类型。这丰富多彩的气候带也是云南成为“植物王国”、“动物王国”的主要原因之一。因此, 从温度带分布的角度去探讨地区生态安全评价等级, 是一个很好的研究方向。土地是自然、经济、社会的综合体, 从温度带分布的角度去对云南省土地生态安全进行评价, 在了解各县域土地生态安全状况的同时, 得出区域土地生态安全的影响因素, 可为区域人地资源协调发展、土地资源管理和可持续利用等提供理论及数据支撑。研究的不足之处: 时间序列还不够长, 在时空演变的角度上分析实验结果的效果还不是特别好, 在后续研究中会延长时间序列; 在演变部分, 可以运用灰色预测等模型去预测, 在时序足够长的基础上, 补充实验结果会更准确些。

基金项目

国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目(2018YFE0184300); 云南基础研究重点项目(2019FA017); 国家自然科学基金项目(41561048); 云南师范大学研究生科研创新基金项目“利用遥感和 GIS 技术实现滇中地区生态安全评估与多情景模拟”(YJSJJ22-B101); 云南省高校科技创新团队资助。

参考文献

- [1] 左伟, 王桥, 王文杰, 刘建军, 杨一鹏. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 67-71.
- [2] 左伟, 王桥, 王文杰, 吴秀芹, 杨一鹏, 杨丽静, 朱晓华. 区域生态安全综合评价模型分析[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 209-214.
- [3] 高长波, 陈新庚, 韦朝海, 彭晓春. 熵权模糊综合评价法在城市生态安全评价中的应用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1923-1927.
- [4] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 蒋国俊, 边华菁, 马勇, 陈建华. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1702-1711.
- [5] 齐清文, 何大明, 邹秀萍, 姜莉莉, 李晋. 云南沿边境地带生态环境 3S 监测、评价与调控研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2): 1-12+131.
- [6] 张向晖, 高吉喜, 董伟, 宋存义. 云南纵向岭谷区生态安全评价及影响因素分析[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(1): 1-6.
- [7] 董云仙, 赵磊, 陈异晖, 余艳红, 赵润, 杨广萍. 云南九大高原湖泊的演变与生态安全调控[J]. 生态经济, 2015, 31(1): 185-191.
- [8] 付伟, 王见, 刘畅, 杨芳. 基于 PSR 模型的昆明市城市饮用水源区生态安全问题研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 83-86.
- [9] 苗刚松, 王卫. 环保大数据平台的建设与思考[J]. 科技创新与应用, 2020(20): 56-57.
- [10] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 叶尔羌河平原绿洲耕地生态安全评价及预警分析[J]. 中国农业资源与

- 区划, 2019, 40(7): 135-144.
- [11] Seidel, M., Li, F., Langheinrich, U., Gersberg, R.M. and Lüderitz, V. (2021) Self-Dynamics as a Driver for Restoration Success in a Lowland Stream Reach. *Limnologica*, **88**, Article ID: 125873. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2021.125873>
- [12] 冯斌, 李迪强, 张于光, 薛亚东, 曾鹏. 基于 METT 的自然保护区管理有效性分析[J]. 西部林业科学, 2017, 46(6): 15-19+25.
- [13] 吕广斌, 廖铁军, 姚秋昇, 邓薇. 基于 DPSIR-EES-TOPSIS 模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 249-258+266.
- [14] 叶辉, 王金亮, 赵娟娟. 基于 DPSIR-EES 模型的北回归线(云南段)生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 291-298.
- [15] Tavarov, S.Sh., Sidorov, A.I., Valeev, R.G. and Zykina, E.V. (2021) Estimation Method of the State of 6-10 kV Distribution Network. *European Journal of Electrical Engineering*, **23**, 95-101. <https://doi.org/10.18280/ejee.230202>