

# 基于 DPSIR-EES 模型的北回归线(云南段) 生态安全评价

叶 辉<sup>1,2,3</sup>, 王金亮<sup>1,2,3</sup>, 赵娟娟<sup>4</sup>

(1.云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500; 2.云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 昆明 650500;  
3.云南省地理空间信息技术工程技术研究中心, 昆明 650500; 4.云南省地图院, 昆明 650100)

**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。以北回归线(云南段)县级行政区域为研究单元,结合 DPSIR 模型与 EES 模型,重点引入了矿产开采活动影响因素,构建了北回归线(云南段)的区域生态安全评价指标体系,运用层次分析法与熵值法分别计算了各个指标的权重值,通过加权叠加开展了北回归线(云南段)生态安全评价研究。结果表明:(1)北回归线(云南段)总体生态安全状况为临界安全状态,局部生态安全状况较为脆弱,空间差异性较为明显,其中生态环境状况为安全和较安全的区域共占 37.87%,主要分布于人口密度小、植被覆盖较为广泛的研究区东部和西部;处于临界安全的区域占 28.87%,整个研究区均有分布;较不安全和不安全的区域共计占比 33.26%,主要分布于研究区域中部经济发展速度较快的县市。(2)通过对生态环境安全评价结果以及主要影响因素进行叠加分析发现,主要影响生态环境安全状况的因素有大规模的矿山开采活动、地质灾害频发、耕地的大面积开垦与长期耕种、植被覆盖遭到破坏以及土地利用类型等因素。

**关键词:**生态安全评价; DPSIR-EES 模型; 层次分析法; 熵值法; 北回归线(云南段)

**中图分类号:**X826; X87

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)03-0291-08

## Assessment on Ecological Security in the Tropic of Cancer (Yunnan Section) Based on DPSIR-EES Model

YE Hui<sup>1,2,3</sup>, WANG Jinliang<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Juanjuan<sup>4</sup>

(1.College of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2.Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming 650500, China; 3.Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China; 4.Map Institute of Yunnan Province, Kunming 650100, China)

**Abstract:** Ecological security is gradually becoming an important part of the national security system. Carrying out ecological security evaluation research can provide a scientific basis for national ecological environmental protection, ecological civilization construction, and sustainable development of human and nature. Taking the county-level administrative area of the Tropic of Cancer (Yunnan section) as the research unit, combining the DPSIR model and the EES model, we constructed the regional ecological security evaluation index system of the Tropic of Cancer (Yunnan section), used the analytic hierarchy process and the entropy method to calculate each indicator separately based on the weighted value, and carried out the ecological safety evaluation research of the Tropic of Cancer (Yunnan section) through weighted superposition. The results show that: (1) the overall ecological security status of the Tropic of Cancer (Yunnan section) is critically safe, the local ecological security status is relatively fragile, and the spatial differences are more

收稿日期:2020-07-04

修回日期:2020-07-23

**资助项目:**云南省基础研究基金重点项目(2019FA017);国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目(2018YFE0184300);欧盟文化执行署(EACEA)伊拉斯谟+国际高等教育能力建设项(586037-EPP-1-2017-1-HU-EPPKA2-CBHE-JP);云南省哲学社会科学重点项目(ZDZZD201506);云南师范大学研究生科研创新资助项目(ysdyjs2020057)

**第一作者:**叶辉(1992—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为资源与环境遥感。E-mail:huiye@user.ynnu.edu.cn

**通信作者:**王金亮(1963—),男,云南昆明人,博士,教授,博导,主要研究方向为资源与环境遥感应用。E-mail:jlwang@ynnu.edu.cn

obvious, among which the areas with safe and relatively safe ecological environment status account for 37.87%, and distribute in the east and west of the study area with low population density and relatively extensive vegetation coverage, and areas with critically safe ecological environment status account for 28.87%, distributed throughout the study area; less safe and unsafe areas totaled 33.26%, and mainly distribute in the cities and counties in the middle of the study area where the economy is developing rapidly; (2) through the superposition analysis of the ecological environment safety assessment results and the main influencing factors, it is found that the main factors affecting the ecological environment safety are large-scale mining activities, frequent geological disasters, large-scale reclamation of cultivated land, long-term cultivation, and factors such as damage to vegetation and types of land use.

**Keywords:** ecological security evaluation; DPSIR-EES model; analytic hierarchy process; entropy method; Tropic of Cancer (Yunnan section)

随着人类社会的进步以及科学技术的不断发展,生态系统作为满足人类日常生活与生产需要的物质载体其整体健康水平与完整程度正不断地遭受威胁,主要表现为饮水安全、空气污染、生态破坏、食物安全与环境质量等问题<sup>[1-2]</sup>。生态安全评价则正是采用一系列科学的手段与方法对当前生态系统的健康性与完整程度能否支持人类社会生活与发展需要的安全程度进行评估分析,并借此提出合理的修复对策与建议来解决这一系列的问题<sup>[3-5]</sup>。目前国内外已有许多学者开展了关于生态安全问题的研究,这一概念最早源于1989年国际应用系统分析研究所(IIASA)在对全球生态安全检测系统问题进行阐述时所提出<sup>[6]</sup>,关于生态安全的概念研究国外学者主要集中于生态环境与安全的关系、生态环境变化对政治体制的影响、深化生态安全概念的理解以及环境生态学4个方面,如Adams W M<sup>[7]</sup>、Ahette Reenberg<sup>[8-10]</sup>、Dennis等<sup>[11]</sup>学者对生态环境与安全之间的关系进行了明确的划定,就生态环境变化与政治安全的内在关系进行了深入的研究,并将其作为二十一世纪重要研究问题之一,国内如曲格平<sup>[12]</sup>、赵军<sup>[13]</sup>、黎晓亚等<sup>[14]</sup>学者对生态安全的基本概念、主要特点及其研究内容与体系进行了深入讨论。在生态安全评价模型上大多学者均采用由联合国经济合作开发署(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)建立的PSR(Press-State-Response, PSR)压力—状态—响应模型<sup>[15-16]</sup>、联合国可持续发展委员会(The United Nations Commission on Sustainable Development, UNCS D)建立的DSR(Driving force-State-Response, DSR)驱动力—状态—响应模型<sup>[17]</sup>、欧洲环境署和欧洲共同体统计局(European Environment Agency And European Statistical Office)在PSR框架基础上提出的DPSIR(Driving force-Press-State-Impact-Response, DPSIR)驱动力—压力—状态—影

响—响应模型<sup>[18]</sup>、联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)提出的DP SER(Driving forces-Pressure-State-Exposure-Response, DP SER)驱动力—压力—状态—暴露—响应模型<sup>[19]</sup>以及Peter Robert<sup>[20]</sup>通过土壤、水体、生物种群、空气温度等方面的生物化学指标建立的评价模型;研究方法主要结合区域生态、景观生态分析以及3S技术等分析方法,如张丽芳<sup>[21]</sup>、李益敏<sup>[22]</sup>、艾媛巧<sup>[23]</sup>、才永吉<sup>[24]</sup>等均结合GIS, RS技术分别对研究区域内的生态环境现状信息进行识别提取并与实际现状、规划状况等资料进行对比分析,之后采用ArcGIS平台的空间分析功能进行生态安全格局构建、生态环境监测与评价等研究;研究尺度则大多数是以行政区划的省<sup>[25]</sup>、市<sup>[26]</sup>、县<sup>[27]</sup>为单元,或者则以各大流域范围<sup>[28]</sup>、城市建设群等<sup>[29]</sup>较大一些的范围为单元。目前已有的研究虽然从概念、模型、方法以及研究尺度等不同方面上深化完善了生态安全研究体系,但是大多数的评价指标体系均是基于单一模型而构建的,无法很好的反映各单系统因子的现实状况以及相互之间的联系<sup>[2]</sup>。此外,目前大量的研究工作均是以土地资源、水资源作为研究对象,关于在生态安全评价中考虑矿山开采状况对生态环境影响的研究却不是很多,同时矿产资源在开采过程中不仅会造成大量的粉尘污染、破坏地表生态、地下水结构、毁坏大面积的林木资源,而且大多数矿山均位于深山偏僻之处,不利于开采过程中的监管。因此,结合3S技术运用多模型引入矿山开采状况因素进行生态安全评价,并探讨分析应该如何更加有效地维持矿产资源开发与生态环境之间的平衡以及矿产资源开发完毕后应该怎样进行生态恢复,以便矿政、环保部门能够更好地开展矿山生态环境保护工作,促进生态环境恢复与社会经济的可持续发展是非常有必要的。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

北回归线是一条具有特殊地理学、天文学意义的假想纬度线,研究以北回归线穿越的云南省 5 个州市 17 个县(图 1)为研究区,区位条件独特,西与缅甸相接,东与广西壮族自治区百色市相邻,南与越南、老挝相毗邻,地理坐标范围为 22°40′50″—24°10′40″N,98°48′00″—106°11′30″E,面积约 54 047.95 km<sup>2</sup>。截至 2018 年底,区内总人口数达 829 269 106 人,平均气温 19℃,年平均降雨量 1 214.73 mm,总计矿权面积 2 613.32 km<sup>2</sup>。纵观全球北回归线所到之处多为沙漠与草原地带,唯独经过中国境内气候宜人、河流湖泊纵横交错、植被林密,生态环境优良,物产富饶,水汽充沛,素有“神奇的回归绿带”之称<sup>[30]</sup>。但是由于近年来随着城市经济的不断发展以及对于非金属类资源需求的不断增加,在矿产资源的不断开采过程中,随之也带来了严重的水体污染与生态环境的急剧破坏,大量的尾矿资源以及工业三废的排放造成了不同程度的自然景观破坏,环境污染,诱发地质灾害等问题,直接威胁和破坏人居环境,加速生态环境的恶化。有必要开展生态安全评价,以为区域的可持续发展与旅游大健

康产业的发展提供科学决策依据与指导方针。

## 1.2 数据来源

研究中所用到的数据主要有遥感数据、地质数据、基础地理信息数据等多源数据,此外还采用了国民经济统计年鉴等资料,为了保证后续研究与分析过程的精度,地质数据与统计数据均通过 GIS 空间分析、地统计方法、插值分析等方法将其转化为空间分辨率为 30 m 栅格数据以用于后续的评价研究,详细数据见表 1。

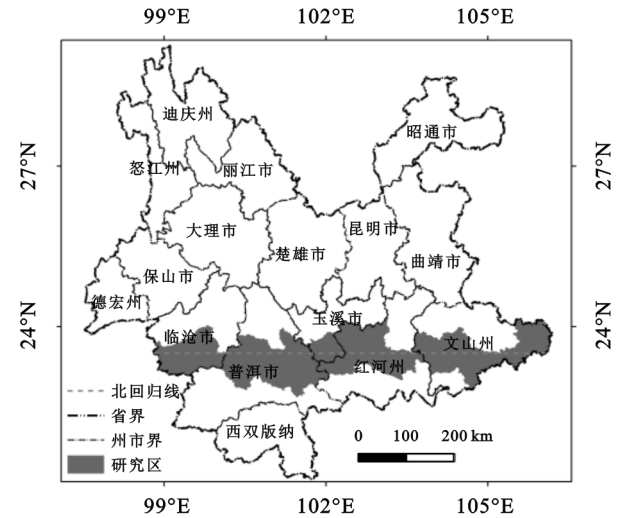


图 1 研究区域位置

表 1 研究区基本数据

类别	名称	规格	数量	数据来源
地质数据	云南省地质图	1 : 50 万	1 幅	全国地质资料馆
	云南省地质构造分布图	1 : 50 万	1 幅	
	云南省区域地貌图	1 : 400 万	1 幅	
	云南省区域地质志	1 : 100 万	1 套	
	云南省矿产资源开发状况	1 : 50 万	1 套	
遥感数据	高分一号遥感数据	空间分辨率优于 2 m	25 景	遥感解译 地理空间数据云、项目依托
	LandSat8 遥感数据	空间分辨率 30 m	3 景	
	DEM 数字高程	空间分辨率 30 m	1 景	
	坡度图	空间分辨率 30 m	1 幅	
地理数据	土地利用类型	空间分辨率 30 m	1 景	地理空间数据云
	NDVI 植被覆盖度	空间分辨率 30 m	1 景	
	云南省基础地理数据	矢量数据	1 套	
统计数据	云南省统计年鉴	2019 年发布	1 套	云南省统计局

## 1.3 研究过程与方法

采用 GIS 技术平台对遥感数据经过几何纠正、空间配准、正射校正等操作后采用人工目视解译法和面向对象的影像分类法相结合对区域内的矿山生态环境、矿业活动状况信息进行遥感调查与分析,并结合已有资料进行验证和野外查证,全面研究区域内的矿山生态环境问题、形成机理及矿产资源开发状况,进而分析矿山生态环境与各自然环境、社会经济要素的空间耦合性。

### 1.3.1 基于 DPSIR-EES 框架模型建立评价指标体系

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<sup>[2]</sup>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北回归线(云南段)生态安全评价指标体系。其中环境要素主要反映影响当前生态安全的自然状况、环境条件;经济要素则是通过研究区内各行政单元的经济发展水平、人均收入、产业支出等指标构成;社会要素反映的是当前社会不断发展对于资源的迫切需要对生态环境产生压力的相关指标。在指标的选取过程中主要依据前人的相关文献研究成果<sup>[2,31]</sup>以及 HJ651-2013《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)》和研究区域的实际客观情况。研究所选取的指标能够很直观的反映出研究区域内自然条件现状、社会经济建设与发展状况、土地利用与植被覆盖特征、人类工程活动分布以及矿产资源开采情况等,所选取的每一指标均与研究区域内的经济、环境、社会三要素密切相关,从而更好地呈现出北回归线(云南段)当前的生态安全状况特征。

1.3.2 评价指标标准化处理 由于生态安全评价指标来源于多个方面,涉及的统计口径以及量纲并不统一,相互指标之间不具备可比性。即使同一指标之间虽然可以根据实际数值的大小来判断它对生态环境影响的程度,但是依然缺失一个合理客观的参考标准来反映其实际的影响指数。因此,在进行综合评价之前需要分别对各个评价指标进行逐一分级和标准化处理,以期消除量纲的影响。对于定量描述的指标,参照 DZ/T0312-2018《非金属矿行业绿色矿山建设规范》、GB15618-2008《土壤环境质量标准(修订)》、HJ651-2013《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)》等国家标准和规范以及相关统计资料、研究文献进行分级;对于定性描述的指标则通过专家咨询法向行业内的知名专家学者进行问卷咨询以及该指标对生态环境安全的影响程度、关联性为依据进行分级<sup>[32]</sup>。

对于分级后的正向指标采用如下公式进行标准化处理:

$$X_{ij} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

对于分级后的负向指标采用如下公式进行标准化处理:

$$X_{ij} = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中: $X_{ij}$ 为指标*i*转换后的无量纲化值; $X_i$ 为指标*i*标准化前的原始值; $X_{\max}$ 为指标*i*在区域中的最大

值; $X_{\min}$ 为指标*i*在区域中的最小值。

1.3.3 评价指标权重计算 权重的赋值方法分为主观、客观两种,层次分析法是众多主观赋权法中常用的一种,通过对同一层级的指标进行两两比较构建判断矩阵,通过求出该判断矩阵的最大特征根和特征向量通过一致性检验后得到评价指标的权重;该方法的优势在于能够充分反映行业领域内相关专家的经验以及实地的客观情况,但是同时也有极大可能存在受主观因素影响而夸大或降低指标的影响作用。熵值法则是根据评价指标原始固有的信息值构建判断矩阵进行指标权重计算的客观赋权方法,可以不受外界人为因素的干扰进而很好地避免由于一些主观原因带来的不稳定结果<sup>[33]</sup>。因此本文参照前人研究成果,将层次分析法与熵值法两者相互结合以实现优势互补,取偏好系数 $\mu=0.5$ 得到评价指标的综合权重(表 2)。

1.3.4 评价模型的建立 对于解决生态安全、资源环境承载力评价研究等这种多准则问题 ArcGIS 的加权叠加工具应用较为广泛,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北回归线(云南段)生态安全评价目标层的分值,然后运用自然间断点法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。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:

$$W_i = \sum_{i=1}^n X_i \times Y_i \quad (i=1,2,3,\cdots,n)$$

式中: $W_i$ 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; $n$ 为因子项数。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态安全综合分析

根据对所有的评价指标层进行综合加权叠加得到北回归线(云南段)生态安全评价结果,在综合前人的研究成果和参考相关生态安全评价研究规范的基础上,选用自然间断点法按照 5 个等级来表示生态安全的脆弱程度,并对评价结果进行分级统计(表 3)。北回归线(云南段)生态安全程度总体呈现为临界安全状态,根据各安全等级面积占比由大到小排序依次为:临界安全>较安全>较不安全>安全>不安全,其中临界安全状态区域面积栅格像元(约 30 m×30 m)个数为 17 338 129 个,面积为 15 604.32 km<sup>2</sup>,占总面积的 28.87%;面积最小的是不安全状态区域,累计栅格像元个数 5 554 604 个,面积为 4 999.14

km<sup>2</sup>,仅占总面积的 9.25%,其余各县的具体生态安全状况面积统计情况见图 2。

表 2 北回归线(云南段)生态安全评价指标体系

目标层	准则层	要素层	指标层	指标取向	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)	环境驱动力(D <sub>1</sub> )	建设用地面积占比(D <sub>11</sub> )	—	0.0300	0.0162	0.0231
			路网密度(D <sub>12</sub> )	—	0.0306	0.0204	0.0255
		经济驱动力(D <sub>2</sub> )	人均 GDP(D <sub>21</sub> )	+	0.0261	0.0167	0.0214
			人均可支配收入(D <sub>22</sub> )	+	0.0331	0.0271	0.0301
		社会驱动力(D <sub>3</sub> )	人口密度(D <sub>31</sub> )	—	0.0289	0.0277	0.0283
			地质灾害密度(P <sub>11</sub> )	—	0.0392	0.0230	0.0311
	压力(P)	环境压力(P <sub>1</sub> )	>25°坡耕地面积(P <sub>12</sub> )	—	0.0300	0.0338	0.0319
			距开采面距离(P <sub>13</sub> )	—	0.0324	0.0300	0.0312
			固定资产投资增长速度(P <sub>21</sub> )	—	0.0249	0.0187	0.0218
		经济压力(P <sub>2</sub> )	环境容量(P <sub>22</sub> )	+	0.0372	0.0270	0.0321
			矿山开采方式(P <sub>23</sub> )	—	0.0282	0.0180	0.0231
			居民点密度(P <sub>31</sub> )	—	0.0407	0.0219	0.0313
		社会压力(P <sub>3</sub> )	矿山损坏林草地面积(P <sub>32</sub> )	—	0.0408	0.0284	0.0346
			矿权占地面积(P <sub>33</sub> )	—	0.0381	0.0287	0.0334
		环境状态(S <sub>1</sub> )	地质构造(S <sub>11</sub> )	—	0.0366	0.0244	0.0305
			岩性(S <sub>12</sub> )	—	0.0297	0.0309	0.0303
			地形坡度(S <sub>13</sub> )	—	0.0285	0.0253	0.0269
	状态(S)	土地状态(S <sub>21</sub> )	土地资源量(S <sub>21</sub> )	—	0.0362	0.0262	0.0312
			开采矿种(S <sub>22</sub> )	—	0.0220	0.0212	0.0216
		植被状态(S <sub>31</sub> )	植被覆盖指数(S <sub>31</sub> )	+	0.0388	0.0228	0.0308
			绿化覆盖率(S <sub>32</sub> )	+	0.0424	0.0260	0.0342
		社会状态(S <sub>3</sub> )	距水系距离(I <sub>11</sub> )	+	0.0423	0.0181	0.0302
			距道路距离(I <sub>12</sub> )	+	0.0330	0.0304	0.0317
	影响(I)	居民影响(I <sub>21</sub> )	居民年末存款(I <sub>21</sub> )	+	0.0263	0.0243	0.0253
			发电量(I <sub>22</sub> )	—	0.0303	0.0259	0.0281
			矿山开采规模(I <sub>23</sub> )	—	0.0375	0.0295	0.0335
		林草影响(I <sub>31</sub> )	林草面积(I <sub>31</sub> )	+	0.0386	0.0280	0.0333
			人均耕地面积(I <sub>32</sub> )	+	0.0315	0.0327	0.0321
			年降雨量(R <sub>11</sub> )	+	0.0344	0.0318	0.0331
		环境响应(R <sub>1</sub> )	年平均气温(R <sub>12</sub> )	+	0.0303	0.0248	0.0275
			土地利用类型(R <sub>13</sub> )	+	0.0329	0.0371	0.035
	响应(R)	经济响应(R <sub>2</sub> )	公共预算支出(R <sub>21</sub> )	+	0.0298	0.0198	0.0248
			矿山服务年限(R <sub>22</sub> )	—	0.0337	0.0311	0.0324
		社会响应(R <sub>3</sub> )	可利用水资源(R <sub>31</sub> )	+	0.0280	0.0292	0.0286

表 3 北回归线(云南段)生态安全等级统计状况

等级	指标值	栅格像元数量/个	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	表征状态
I	0.445~0.573	6311118	5680.01	10.51	安全
II	0.574~0.625	16433528	14790.18	27.36	较安全
III	0.626~0.671	17338129	15604.32	28.87	临界安全
IV	0.672~0.725	14415894	12974.30	24.01	较不安全
V	0.726~0.925	5554604	4999.14	9.25	不安全

空间特征上不安全区域主要分布研究区的中部和东部地区,如红河县、石屏县、麻栗坡县、富宁县、西畴县等区域,面积依次为 782.71 km<sup>2</sup>,700.98 km<sup>2</sup>,581.08 km<sup>2</sup>,535.67 km<sup>2</sup>,439.08 km<sup>2</sup>,分别占不安全区域总面积的 15.66%,14.02%,11.62%,10.72%,8.78%,主要原因在于这些城市近年来经济得到快速发展,城市不断扩张,对于矿产资源等的需求不断增大,同时这些县域的植被覆盖度较低,地质灾害频发导致林草地的面积正在不断减少;生态安全区域主要集中在砚山县、文山市、蒙自市、耿马县、建水市等县

域,面积依次为 2 144.60 km<sup>2</sup>,1 428.25 km<sup>2</sup>,671.75 km<sup>2</sup>,664.14 km<sup>2</sup>,354.38 km<sup>2</sup>,分别占安全区域总面积的 37.76%,25.15%,11.83%,11.69%,6.24%,这些县域植被覆盖较为茂盛,土地资源与可利用水资源量充沛,同时在增加公共预算支出的同时限制大量的矿产资源开采问题,并对非煤矿山进行资源整合,关闭大量的小型矿山只保留能够满足城市发展所必需的资源进行开发利用。

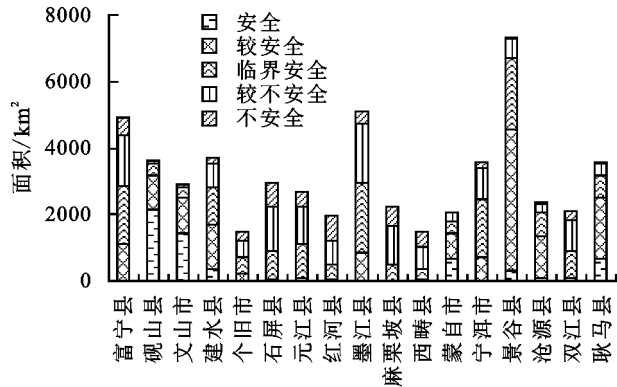


图 2 不同生态安全等级各县面积统计直方图

## 2.2 空间自相关分析

空间自相关分析近年以来被广泛的运用在生态安全评价之中,其主要目的是为了分析生态安全结果在空间上是否存在一定的相关程度。运用 GeoDa 软件对研究区 17 个县的生态安全评价结果进行空间自相关分析,得到了北回归线(云南段)生态安全评价的 Moran's *I* 散点图(图 3)。通过分析,北回归线(云南段)生态安全的 Moran's *I* 值为 0.226,值大于 0,说明空间上存在正相关性,对其进行随机化参数检验 *p* 值为 0.106,检验通过。分布在 4 个象限的 Moran 散点图通常能够很直观地反映当前区域与邻近区域之间生态安全水平的相互关系,分布在第一象限高高(HH)聚集区的双江县、墨江县、元江县、石屏县、建水县、西畴县与周边区域的生态安全水平都很高;第二象限低高(LH)聚集区的景谷县、宁洱市、砚山县、麻栗坡县自身的生态安全水平较低,但周围区域的生态安全水平较高;分布在第三象限低低(LL)聚集的沧源县、耿马县、红河县、个旧市、蒙自市、文山市自身生态安全水平与周边区域的生态安全水平均较低;而分布在第四象限高低(HL)聚集区的仅有自身生态安全水平较高的富宁县。经由上述分析发现,北回归线(云南段)生态安全主要集中分布在“高高(HH)、低低(LL)”两个聚集区,共有 12 个县,占 70.59%;仅有 5 个县分布在“高低(HL)、低高(LH)”两区,占 29.41%;说明研究区域内生态安全在空间上表现出明显的集聚特征,一定区域内生态环境的破坏势必同时会对周围区域的生态环境造成相应的影响,如非金属矿

山开采的同时一定会对地表植被覆盖以及周围区域的空气质量、地表水与地下水以及周围的人居环境等造成强烈的影响。

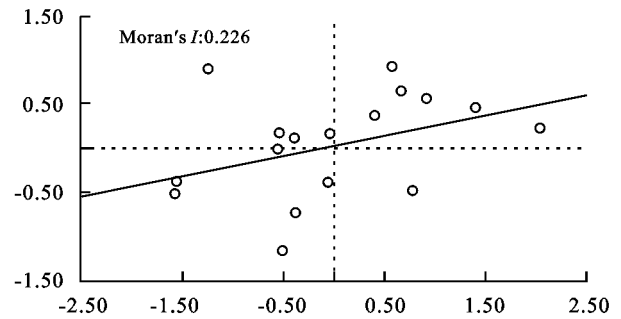


图 3 北回归线(云南段)生态安全 Moran 散点图

## 2.3 矿山开采活动对生态安全的影响分析

城市经济不断发展过程中迫使对于矿产资源的需求愈发激烈,尤其是对于非金属矿产资源的需求不断扩大,矿产资源的开发过程中不可避免地会造成对周围土地资源的开挖压占和损毁、林草牧地等植被的破坏、地下水的污染与断流等影响,从而导致周围的自然生态环境遭到破坏与干扰而失去原有的平衡。根据上述生态安全评价结果,以研究区域内的矿山开采面为中心以 1 000 m 为间距分别做 5 级缓冲区与生态安全评价结果进行叠加分析发现:距离开采面越近其不安全状态区域的面积越大,根据不安全状态区域面积大小按距离依次排序为 1 000 m>2 000 m>3 000 m>4 000 m>5 000 m,面积分别为 1 027.65 km<sup>2</sup>,909.26 km<sup>2</sup>,723.36 km<sup>2</sup>,595.72 km<sup>2</sup>,460.36 km<sup>2</sup>;当距离开采面的距离越远时其安全状态区域的面积按距离依次排序为 1 000 m<2 000 m<5 000 m<4 000 m<3 000 m,面积分别为 125.41 km<sup>2</sup>,515.41 km<sup>2</sup>,701.33 km<sup>2</sup>,743.69 km<sup>2</sup>,756.58 km<sup>2</sup>;见图 4,当距离矿山开采面超过 3 000 m 时,其安全区域的面积基本趋于持平状态,3 000 m 范围之内安全区域的面积随着距离的缩短急剧减少,不安全区域的面积则随着距离的不断增加而减少,充分说明矿山开采活动对于生态安全的影响较为巨大。

## 2.4 地质灾害与生态安全的空间关系

研究区域属于高原山地地形,同时有元江、红河两大水系纵横穿过,地质灾害频发。地质灾害的发生不仅是危害人类的生命财产安全,同时对生态环境、地形地貌、地质构造以及植被等生物都会构成及其严重的威胁。区内共有地质灾害点 2 074 处,通过将这些地质灾害点与生态安全评价结果进行空间叠加分析可以发现:在生态环境不安全和较不安全的区域内地质灾害数量最多,分别为 665 处和 605 处,占区域内地质灾害总数量的 32.06%和 29.17%;其次是位于



临界安全区和较安全区域,各有 495 处和 245 处,分别占比 23.87%,11.81%;生态环境安全区域内的地质灾害数量最少,仅有 64 处,占总数量的3.09%;由此可见,地质灾害对于生态安全环境同样具有较为强大的破坏作用和影响。

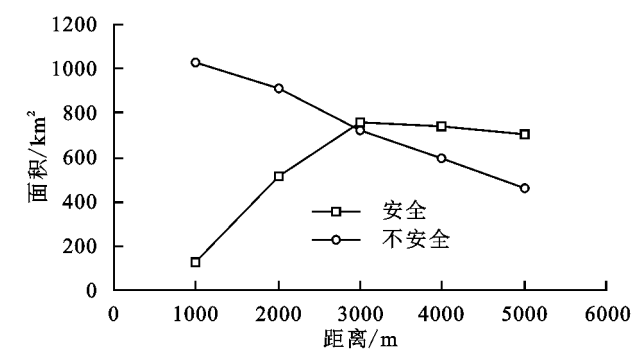


图 4 距矿山开采面不同距离安全区域与不安全区域对比折线图

### 2.5 土地利用类型与生态安全的特征分析

土地利用类型及其变化长期以来对生态环境效应的影响备受关注,将上述生态安全评价结果与研究区内的土地利用类型进行了叠置分析:北回归线(云南段)生态不安全区域面积总计 4 999.14 km<sup>2</sup>,其中面积最多的地类为耕地,共占地 1 967.86 km<sup>2</sup>,占生态不安全区域总面积的 39.36%,耕地的长期耕种以及不断开垦极易造成水土流失与土壤功能退化,同时还会破坏地表的植被覆盖进而对生态环境造成进一步的影响;生态安全区域中面积最多的地类为林地,共占地 3 213.58 km<sup>2</sup>,占生态安全区域总面积的 56.58%,充分说明了大面积的植被覆盖以及退耕还林等政策对于生态环境保护积极效益。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

在充分收集了研究区域内地质、地理、人文、社会经济以及统计资料的基础上对区域内的生态环境特征进行综合分析,结合 DPSIR 模型与 EES 模型的独特之处将准则层逐一从经济、环境、社会 3 个方面选取了 34 个指标体系,其中特别考虑了由于矿山开采给生态环境安全所产生的影响,较好地体现了生态环境内部各个子系统之间的紧密联系,并结合层次分析法与熵值法计算了各个指标体系的权重值,有效地降低因为主客观等因素带来的误差,从而提高了评价结果的精度。此外,通过对北回归线(云南段)的生态安全状况进行评价,揭示了研究区域内总体生态安全状况较为脆弱的县市区域,并对评价结果以及造成生态安全脆弱的原因进行了分析与讨论,并针对这一问题

提出了合理的对策与有效的防治建议,能够为生态环保以及国土部门在今后的环境保护工作中提供有效的指导意义。从北回归线(云南段)生态安全评价结果来看,虽然整体生态安全水平处于临界安全状态,但是局部地区生态安全水平较为脆弱,存在较大的空间差异性。矿山开采活动对于生态安全状况的影响较为显著,露天矿山在矿产资源开发的过程中会致使大量的地表植被覆盖遭到破坏和地形地貌的改变,地下开采的矿山在开采过程中会致使发生地面塌陷、地裂缝等矿山地质灾害频发以及致使地下水断流和重金属污染等,因此在城市经济建设发展与矿山开发活动的过程中更应该注重生态环境的治理与保护,尽量减少其对于生态环境的破坏。另外,生态安全研究是一个综合、复杂的联动系统,北回归线(云南段)独特的地理意义更是赋予了生态安全研究重大意义,目前该研究区域内尚未形成完整、有效、成熟且适用于本区域的生态安全研究体系,本文的研究成果将为其学者提供夯实的基础。

### 3.2 结论

(1) 北回归线(云南段)总体生态安全状况为临界安全状态,局部生态安全状况较为脆弱,其中生态环境状况为安全和较安全的区域共占 37.87%,处于临界安全的区域占 28.87%,较不安全和不安全的区域共计占比 33.26%。空间特征上生态环境不安全区域主要分布于研究区中部经济较为发达的县市,而生态环境较为良好的区域则是分布在人口密度小、植被覆盖较为广泛的西部与东部。

(2) 通过对生态环境安全评价结果以及主要影响因素进行叠加分析发现,主要影响生态环境安全状况的因素有大规模的矿山开采活动、地质灾害频发、耕地的大面积开垦与长期耕种、植被覆盖遭到破坏以及土地利用类型等因素。因此,在城市经济不断发展的过程中应注意人与自然和谐相处,积极有效的提倡与落实退耕还林、矿产资源整合开采等政策措施,对于地质灾害频发区域应预防为主,治理为辅,做到防治结合,从而减少地质灾害对人类生命财产安全以及生态环境的破坏。

### 参考文献:

[1] 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.  
[2] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,等.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.

- [3] 赵文江,徐明德,张君杰,等. BP神经网络在矿山生态安全评价中的应用[J].煤炭技术,2019,38(1):172-175.
- [4] 曹秉帅,邹长新,高吉喜,等.生态安全评价方法及其应用[J].生态与农村环境学报,2019,35(8):953-963.
- [5] Carabassa V, Ortiz O, Alcaiz J M. Restoquarry: Indicators for self-evaluation of ecological restoration in open-pit mines[J]. Ecological Indicators, 2019,102:437-445.
- [6] Wang G, Cheng G, Qian J. Several problems in ecological security assessment research[J]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao=the Journal of Applied Ecology, 2003,14(9):1551-1556.
- [7] Adams W M, Mortimore M J. Agricultural intensification and flexibility in the Nigerian Sahel[J]. the Geographical Journal, 2000,163(2):150-160.
- [8] Ahette Reenberg. Agricultural land use land use pattern dynamics in the Sudan-towards sanevent-driven framework[J]. Land Use Policy, 2001,18(2):309-319.
- [9] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability-a case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007,68(2):271-297.
- [10] Riebsame W E, Meyer W B, Turner B L. Modeling Land Use and Cover as Part of Global Environmental Change[J]. Climatic Change, 1994, 28(1):45-64.
- [11] Turner B L I, Moss R H, Skole D L. Relating land use and global land-cover change: A proposal for an IGBP-HDP core project[J]. Global Change Report(Sweden), 1993,2(1):121-133.
- [12] 曲格平.中国环境保护四十年回顾及思考[J].环境保护,2013,11(9):10-12.
- [13] 赵军,胡秀芳.区域生态安全与构筑我国世纪国家安全体系的策略[J].干旱区资源与环境,2011,18(2):1-4.
- [14] 黎晓亚,马克明,傅伯杰,等.区域生态安全格局设计原则与方法[J].生态学报,2011,24(5):1055-1062.
- [15] Hua Y E, Yan M A, Limin D. Land ecological security assessment for Bai autonomous prefecture of Dali based using PSR model-with data in 2009 as case[J]. Energy Procedia, 2011,5:2172-2177.
- [16] Herzog F, Lausch A. Supplementing land-use statistics with landscape metrics; some methodological considerations[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001,72(1):37-50.
- [17] 庞雅颂,王琳.区域生态安全评价方法综述[J].人口·资源与环境,2014,24(S1):340-344.
- [18] Singh R K, Murty H R, Gupta S K, et al. An overview of sustainability assessment methodologies[J]. Ecological Indicators, 2009,9(2):189-212.
- [19] Han S W, Mccoll E, Barton J R, et al. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development. Proceedings of the Workshop, 25-26 January 1996[R]. Land and Water Bulletin(Fao),1997.
- [20] Petter L, Robert M. On the From healthy to Degarded Aquatic Ecosystems[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2012,19(2):97-103.
- [21] 张丽芳,冉丹阳,张鑫,等.基于 GIS 的北部湾经济区生态安全格局构建与评价[J].生态科学,2019,38(4):202-208.
- [22] 李益敏,谢亚亚,刘雪斌,等.基于 GIS 的云南泸水市生态安全评价[J].人民长江,2019,50(6):56-62,187.
- [23] 艾媛巧,朱红梅,谭雪兰.基于 RS/GIS 与 GM(1,1)模型的长沙市城市生态安全评估与预测[J].江西农业学报,2019,31(7):131-137.
- [24] 才永吉.基于 RS 与 GIS 技术的江仓矿区生态环境监测与评价[D].西宁:青海大学,2016:40-50.
- [25] 许东阳,任永泰,王如意,等.基于 PSO-PPE 模型的黑龙江省水资源生态安全探析[J].中国环境监测,2019,35(4):109-114.
- [26] 吴利,柳德江.基于 GA-BP 神经网络的玉溪市耕地生态安全评价[J].云南农业大学学报:自然科学,2019,34(5):874-883.
- [27] 赵文力,刘湘辉,鲍丙飞,等.长株潭城市群县域生态安全评估研究[J].经济地理,2019,39(8):200-206.
- [28] 柳思,张军,田丰,等.2005—2014 年疏勒河流域土地生态安全评价[J].生态科学,2018,37(3):114-122.
- [29] 王媛,周长威.黔中城市群景观生态安全格局构建[J].生态与农村环境学报,2019,35(9):1111-1117.
- [30] Gillian D. Encyclopedia of World Geography[M]. Singapore:Marshall Cavendish, 2002:10-25.
- [31] 苏正国,李冠,陈莎,等.基于突变级数法的土地生态安全评价及其影响因素研究:以广西壮族自治区为例[J].水土保持通报,2018,38(4):142-149,161.
- [32] 陈勇,洪强,刘艳中,等.地下铁矿山土地生态安全评价:理论与实证检验[J].安全与环境学报,2016,16(3):366-371.
- [33] 高洁芝,夏梦蕾,孟展,等. PSR 框架下土地生态系统健康诊断[J].江苏农业科学,2017,45(11):240-243.