



福贡县生态环境质量遥感动态变化研究

杨雪 李益敏 蒋文学 计培琨 杨一铭

Study on Remote Sensing Dynamic Change of Ecological Environment Quality in Fugong County

Yang Xue, Li Yimin, Jiang Wenxue, Ji Peikun, Yang Yiming

引用本文:

杨雪, 李益敏, 蒋文学, 计培琨, 杨一铭. 福贡县生态环境质量遥感动态变化研究[J]. 西南林业大学学报, 2023, 43(2):99-108. doi: 10.11929/j.swfu.202204011

Yang Xue, Li Yimin, Jiang Wenxue, Ji Peikun, Yang Yiming. Study on Remote Sensing Dynamic Change of Ecological Environment Quality in Fugong County[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science), 2023, 43(2):99-108. doi: 10.11929/j.swfu.202204011

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202204011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1988—2018年武夷山自然保护区生境质量评价

Habitat Quality Evaluation of Wuyi Mountain National Nature Reserve in 1988-2018

西南林业大学学报. 2021, 41(4): 93-102 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004066>

基于层次分析法的广西金秀地区生态环境质量综合评价

Comprehensive Assessment of Ecological Environment Quality in Jinxiu Area Based on Analytic Hierarchy Process

西南林业大学学报. 2017, 37(3): 74-80 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.03.012>

不同海拔泸水1号核桃丰产性及坚果品质差异分析

The Difference of High Yield and Nuts Quality of *Juglans sigillata* cv. Lushui 1 at Different Elevations

西南林业大学学报. 2017, 37(6): 30-35 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.06.005>

急尖长苞冷杉叶光合特性及营养元素对海拔的响应

Response of Photosynthetic Characteristics and Nutrients of *Abies georgei* var. *smithii* Needles to Altitudes

西南林业大学学报. 2021, 41(1): 55-61 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201909051>

添加生物炭与菌肥的复合基质对元宝枫幼苗生长的影响

Effects of Adding Compound Substrates with Biochar and Bacterial Fertilizer on the Growth of *Acer truncatum* Seedlings

西南林业大学学报. 2020, 40(4): 14-22 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201912032>

基于NFI和DEM数据的浙江森林立地分类研究

Forest Site Classification Based on NFI and DEM in Zhejiang Province

西南林业大学学报. 2018, 38(3): 137-144 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.03.020>

DOI: 10.11929/j.swfu.202204011

引文格式: 杨雪, 李益敏, 蒋文学, 等. 福贡县生态环境质量遥感动态变化研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(2): 99-108.

福贡县生态环境质量遥感动态变化研究

杨雪¹ 李益敏^{1,2} 蒋文学¹ 计培琨¹ 杨一铭¹

(1. 云南大学地球科学学院, 云南昆明 650500; 2. 云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心, 云南昆明 650500)

摘要: 以怒江傈僳族自治州福贡县为研究区, 选取 2000—2020 年间 10 期遥感影像数据源, 利用主成分分析法将反演得到的绿度、湿度、热度、干度 4 个指标进行加权生成 RSEI 指数, 以小流域为评价单元, 对福贡县 2000—2020 年的生态环境质量进行评价。结果表明: 福贡县 RSEI 均值在 2000—2020 年呈曲折上升趋势, 生态环境质量在中等以上的比例总体呈上升趋势; 2000—2020 年, 生态环境质量退化、不变、改善的比例分别为 1.17%、56.57%、42.26%, 生态环境质量在总体保持稳定的基础上变好, 其生态环境质量变好区域主要集中于研究区东、西两侧; 研究区气象因素影响植物生长进而对生态环境产生影响, 海拔与坡向是影响生态环境质量的主要自然因素, 而林地、建设用地及耕地是影响生态环境质量的主要土地利用方式。

关键词: 遥感生态指数; 生态环境质量; 气象因素; 海拔; 坡度; 主成分分析

中图分类号: TP79

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2023)02-0099-10

Study on Remote Sensing Dynamic Change of Ecological Environment Quality in Fugong County

Yang Xue¹, Li Yimin^{1,2}, Jiang Wenxue¹, Ji Peikun¹, Yang Yiming¹

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan 650500, China; 2. Geological Engineering Research Center of Yunnan Provincial University for Domestic High Score Satellite Remote Sensing, Kunming Yunnan 650500, China)

Abstract: Taking Fugong County of Nujiang Lisu Autonomous Prefecture as the study area and using the 10 remote sensing images from 2000 to 2020 as data sources, the principal component analysis method is used to objectively weight the 4 indexes of greenness, humidity, heat, and dryness to generate RSEI, and the small watershed unit was taken as the evaluation unit to evaluate the eco-environmental quality of Fugong County from 2000 to 2020. The results show that the average RSEI of Fugong County shows a tortuous upward trend from 2000 to 2020. The proportion of ecological quality above the medium was generally on the rise; from 2000 to 2020, the proportion of ecological degradation, invariance, and improvement is 1.17%, 56.57%, and 42.26% respectively, the eco-environmental quality has improved based on overall stability, and the areas where the eco-environmental quality has improved are mainly concentrated on the east and west sides of the study area; in the study area, meteorological factors affect the ecological environment by affecting plant growth. Elevation and slope direction are the main natural factors that affect the quality of ecological environment, while woodland and cultivated land, as well as construction land, are the main land use ways that affect the quality of ecological environment.

Key words: RSEI; ecological environment quality; meteorological factor; altitude; slope; principal component analysis

收稿日期: 2022-04-04; 修回日期: 2022-06-07

基金项目: 云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目 (2019FY003017) 资助; 国家自然科学基金项目 (41161070) 资助。

第 1 作者: 杨雪 (1999—), 女, 硕士研究生。研究方向: 地图学与地理信息系统。Email: 1282484195@qq.com。

通信作者: 李益敏 (1965—), 女, 研究员。研究方向: 3S 技术在山地环境与地质灾害中的应用。Email: liyimin1965@163.com。

福贡县位于我国云南省西北部,地处中国第一阶梯向第二阶梯的过渡地带,既是几个气候区和生物多样性的交汇点,也是地震多发区,脆弱特征显著,是一个典型的生态脆弱带^[1],其脆弱程度主要表现为土壤侵蚀敏感性和生境格局敏感性^[2],已严重制约了当地的经济。福贡县地处国际河流怒江—萨尔温江的上游区域,其生态环境质量与安全直接影响到下游区域的经济繁荣与稳定,因此,对福贡县的生态环境质量进行动态监测与分析,可以高效、科学地反映该地区乃至怒江下游地区的生态质量状况,为生态环境治理提供十分重要的理论和现实意义。

遥感技术以其方便、及时、低成本等优势在各个领域广泛应用,尤其是生态环境领域,成为目前评价生态环境质量的主要手段。近年来,专家对于生态环境质量的评价也相继提出了多种不同的指标和方法。2006年,国家环保部发布了《生态环境状况评价技术规范(试行)》^[3],提出建立综合指数——生态环境状况指数(EI)对区域的生态环境质量进行评价^[4]。张沛等^[5]利用EI模型对比分析塔里木河综合治理前后的生态环境质量;宋善海等^[6]在构建EI指数的基础上,考虑夜光遥感与生态环境质量之间的关联,对贵州省各个县区的生态环境状况进行评价。但EI指数评价法存在许多问题,如指标权重设定的主观性和随意性、指标的易获取性以及评价结果无法空间可视化等^[7]。先前国内外也有部分研究通过遥感提取单一指标对区域生态环境质量进行评测, Li等^[8]基于土地覆被和归一化植被指数(NDVI)对Mu Us沙地的生态环境变化进行了研究; Coutts等^[9]利用热度指标(LST)来识别了城市中的高温点;郭文浩等^[10]基于Landsat 5的TM影像并利用归一化水体指数(NDWI)提取了淮南市水体信息。单一指标评价法虽避免了指标权重的设定、可获取性以及可视化问题,但由于生态系统受多种因素影响,单一指标很难对其进行准确评价。2013年徐涵秋^[11]提出遥感生态指数(RSEI)评价法,旨在选取绿度、湿度、热度和干度等指标,利用主成分分析法客观加权并构建RSEI指数对区域生态环境质量进行评价; Liao等^[12]通过改良后的熵权法构建RSEI分析了中国2000—2017年的生态环境质量时空变化情况;农丽萍等^[13]基于多元遥感数据并构建RSEI对昆明市生态环境质量进行动态监测与评价;潘洪义等^[14]基于三个时期的遥感生态指数对震后汶川的生态环

境质量及恢复情况进行分析。

遥感生态指数在属性的空间展现方式上对EI指数进行了修正,且从本质上弥补了单一指数评价法的不足^[15],利用客观权重法最大限度地降低了耦合各指标过程中的主观性,在能够对研究区生态环境质量进行定量分析的同时,还方便对其结果进行可视化;除此之外,构建RSEI的各指标均可通过遥感影像反演得到,现势性好,适用于对研究区的生态环境质量进行实时评价与分析。本研究从2000—2020年间的遥感影像中提取10个时段的生态环境指标,并利用主成分分析法构建RSEI指数,分析福贡县2000—2020年的生态环境质量动态变化情况,为区域生态环境的可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

福贡县隶属云南省怒江傈僳族自治州,地处“三江并流”世界自然遗产地腹地,位于东经98°41′~99°02′,北纬26°28′~27°32′,南北最大纵距112 km,东西最大横距23 km,国土面积约2744.69 km²,辖7个乡镇,58个村,人口主要沿江分布。境内地势北高南低,海拔介于1010~4379 m,境内以高山峡谷为主,怒江自北向南穿过福贡县,形成一条狭长的“V”字形河谷。东面是碧罗雪山保护区,西侧是高黎贡山保护区,是国家重要的生态安全屏障区,境内森林资源丰富,是云南省林业重点县之一,生物多样性保护任务艰巨。福贡县受季风影响,雨季多暴雨,湿度常年较大,山体滑坡、泥石流等自然灾害频发,危害较大^[1]。

2 材料与方法

2.1 数据源与预处理

选取2000—2020年共10期Landsat影像为数据源,分别为2000年12月17日、2002年12月7日、2006年2月1日、2009年12月10日、2010年12月29日的Landsat 5 TM影像以及2013年12月5日、2014年12月24日、2016年12月13日、2019年1月20日、2020年12月24日的Landsat 8 OLI和TIRS影像,均来自于地理空间数据云官网(www.gscloud.cn)及美国地质勘探局官网(www.usgs.gov)。10个时期影像均采用UTM投影及WGS84坐标系,时相基本一致,保证了数据的一致性与研究结果的可比性。由于各影像在地形、光照、大气等方面存在差异,需要在ENVI 5.3软

件中对各时期的遥感影像进行辐射定标和大气校正^[16]，不同时期的影像之间则进行图像配准，最后使用福贡县矢量边界对所有数据进行裁剪，得到研究区的影像数据。

2.2 遥感生态指数构建

本研究利用遥感生态指数来指示研究区的生态环境质量，运用绿度、湿度、干度、热度四个指标综合构建 RSEI。其中，采用归一化植被指数、湿度分量、地表温度、建筑指数和裸土指数的平均值，分别代表绿度、湿度、热度、干度指标。最后对各项指标进行标准化以及主成分变换处理，得到综合的遥感生态指数 RSEI^[17]。

2.2.1 分量指标计算

1) 绿度指标 (NDVI)。绿度指标与植物的叶表面指数、覆盖度和生物量相关，能够反映植物的生长状态及营养信息^[18]。在各种各样的绿度指标中，归一化植被指数 (NDVI) 应用最为广泛。因此，绿度指标可由 NDVI 来表示，公式为：

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}) \quad (1)$$

式中： ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} 分别表示各影像所对应的近红外波段和红外波段的反射率。

2) 湿度指标 (WET)。缨帽变换是由亮度、绿度和湿度 3 个缨帽分量组合而成，其中缨帽湿度对水分含量较为敏感，能够反映土壤和植被的湿度状况^[17]。因此，湿度指标可由湿度分量来表示，基于 OLI 和 TM 数据的湿度分量提取公式^[19-20]如下：

$$WET_{OLI} = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1972\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

$$WET_{TM} = 0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2} \quad (3)$$

式中： ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别为各影像所对应的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段的反射率。

3) 热度指标 (LST)。本研究中热度指标由经过反演得到的地表温度来表示，地表温度则采用大气校正法来进行反演。进行地表温度反演的计算公式如下：

$$L_\lambda = [\varepsilon B_{T_s} + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow \quad (4)$$

式中： L_λ 为热红外辐射亮度值； ε 为地表比辐射率； T_s 为地表真实温度 (K)； B_{T_s} 为黑体辐射亮度； τ 为大气在热红外波段的透过率； L_\downarrow 、 L_\uparrow 分别为大气向下，向上辐射亮度。其中， B_{T_s} 的计算公式为：

$$B_{T_s} = [L_\downarrow - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon \quad (5)$$

式中： T_s 可通过普朗克公式获取，见式 (6)。

$$T_s = K_2 / \ln \left[\frac{K_1}{B_{T_s}} + 1 \right] \quad (6)$$

式中：系数 K_1 、 K_2 可从 *_MTL.txt 文件中获取。

4) 干度指标 (NDSI)。建筑用地和裸土是造成地表“干化”的两种主要原因^[21]。因此，可以使用建筑指数 (IBI) 和裸土指数 (SI) 来构建干度指标，计算公式^[22] 如下：

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (7)$$

$$SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] \quad (8)$$

$$IBI = \{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\} / \{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\} \quad (9)$$

式中： ρ_{Red} 、 ρ_{Blue} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{NIR} 分别为各影响所对应的红、蓝、短波红外 1、绿、近红外波段的反射率。

2.2.2 综合指数的计算

拟建的生态指数由以上 4 个指标构成，因此需要将这些变量耦合成最终的单一变量进行表示。通常的方法是用指标乘上相应的比重再求和，其中求取比重的方法有熵权法、层次分析法等。为了避免比重的确定受人为因素的影响，本研究采取主成分分析法来构建 RSEI。所谓空间主成分分析是使用地理信息系统软件，以消除各指标间的关联为目的，对光谱空间的坐标轴进行变换，将所有与生态环境有关的信息都汇集到较少的一个或几个空间主成分上^[4]。

在进行主成分变换前需要对各指标进行标准化处理，以此消除各项指标在单位和数值范围上存在的差异，公式如下：

$$NI = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (10)$$

式中：NI 为处理后的标准值， I_{max} 、 I_{min} 分别为该指标的最大值和最小值， I 为该指标的数值大小。

标准化处理后，将包含所有指标的多波段文件进行主成分变换，构建出最初的生态指数 RSEI₀：

$$RSEI_0 = PCA[f(NDVI, WET, LST, NDSI)] \quad (11)$$

为增强各指标之间的可比性，需要对原始生态指数中的第一主成分 (PC1) 进行标准化，得到最终的 RSEI，其值在 [0,1]，值越高表示生态质量越好，反之则越差。

3 结果与分析

3.1 生态环境指标主成分分析

研究区 2000—2020 年 10 个时期 4 个指标主

成分分析结果见表1。由表1可知,4个主成分中,第一主成分(PC1)的特征值贡献率最大,其中2000年为75.23%,2002年为63.22%,2006年为62.73%,2009年为69.41%,2010年为79.03%,2013年为56.08%,2014年为70.02%,2016年为

69.74%,2019年为62.52%,2020年为69.95%。显然,与其他3个主成分(PC2、PC3、PC4)相比,PC1集中了各个指标的主要信息,最能反映研究区的生态环境质量。

表1 生态环境指标主成分分析

Table 1 Principal component analysis of ecological environment index

年份	PC1		PC2		PC3		PC4	
	特征值	特征值贡献率/%	特征值	特征值贡献率/%	特征值	特征值贡献率/%	特征值	特征值贡献率/%
2000	0.0613	75.23	0.0106	88.21	0.0076	97.49	0.0020	100.00
2002	0.0357	63.22	0.0121	84.70	0.0073	97.54	0.0014	100.00
2006	0.0320	62.73	0.0136	89.49	0.0035	96.44	0.0018	100.00
2009	0.0499	69.41	0.0143	89.29	0.0056	97.09	0.0021	100.00
2010	0.0616	79.03	0.0101	92.01	0.0037	96.77	0.0025	100.00
2013	0.0203	56.08	0.0121	89.58	0.0032	98.33	0.0006	100.00
2014	0.0364	70.02	0.0115	92.22	0.0027	97.33	0.0014	100.00
2016	0.0327	69.74	0.0110	93.22	0.0025	98.46	0.0007	100.00
2019	0.0271	62.52	0.0112	88.45	0.0033	96.13	0.0017	100.00
2020	0.0304	69.95	0.0097	92.33	0.0028	98.76	0.0005	100.00

3.2 生态环境质量整体分析

2000—2020年10个时期各个指标以及遥感生态指数RSEI的均值见图1。由相关文献^[4,17,21]可知,绿度指标和湿度指标与生态环境质量呈正相关,而热度指标和干度指标与生态环境质量呈负相关。由图1可知,2000—2020年间,RSEI均值呈曲折上升趋势,20年间生态环境质量有较大改善,但在2010年、2016年、2020年出现一定程度的下降;其中,绿度指标的变化趋势与RSEI相似,湿度指标呈先下降后逐渐保持低水平的态势,干度指标基本呈下降趋势,而热度指标则表现为曲折上升后下降再逐步回升。

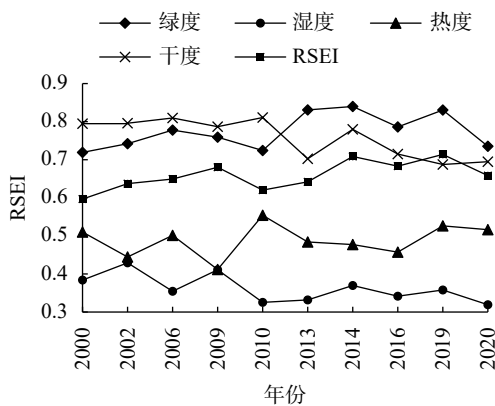


图1 2000—2020年福贡县生态指标与RSEI均值变化

Fig. 1 Changes of ecological indicators and RSEI mean values in Fugong County from 2000 to 2020

3.3 生态环境质量分级与动态变化分析

3.3.1 生态环境质量分级

为了更好地分析研究区生态环境质量的动态变化情况,本研究将各年份RSEI的数值等间距划分为5个等级^[17],分别为:“差”(0~0.2)、“较差”(0.2~0.4)、“中等”(0.4~0.6)、“良”(0.6~0.8)、“优”(0.8~1)。

目前生态环境质量评价单元大多采用栅格单元来分析,考虑到高山峡谷地区,小流域更能反映一个完整的生态环境质量单元和生态系统单元,因此,本研究以小流域为评价单元。使用ArcGIS中的水文分析模块对研究区进行小流域划分,将研究区划分为5291个小流域单元,以此作为评价单元对福贡县的生态环境质量和动态变化情况进行综合评价分析。

由表2和图2可知,2000—2020年福贡县生态环境质量以良和中等等级为主,总体处于中等偏上水平。2000年RSEI高于平均值(中等以上等级)所占比例为44.01%(2430个小流域单元),2002年为49.2%(2659个小流域单元),2006年为49.53%(2769个小流域单元),2009年为73.1%(3983个小流域单元),2010年为58.26%(3227个小流域单元),2013年为66.09%(3561个小流域单元),2014年为79.24%(4286个小流域单元),2016年为77.51%(3914个小流域单元),2019年为83.86%(4533个小流域单元),

2020 年为 70.99% (3742 个小流域单元)，总体 境质量得到改善。
呈上升趋势，说明 2000—2020 年福贡县生态环

表 2 2000—2020 年间福贡县 RSEI 等级面积及其百分比
Table 2 RSEI grade area and its percentage in Fugong County from 2000 to 2020

年份	优		良		中等		较差		差	
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
2000	137.194	4.99	1072.925	39.02	1191.227	43.32	336.718	12.25	11.736	0.43
2002	136.663	4.97	1216.308	44.23	1177.409	42.82	219.393	7.98	0.027	0.00
2006	129.616	4.71	1232.376	44.82	1343.178	48.85	44.619	1.62	0.010	0.00
2009	473.397	17.22	1536.577	55.88	692.897	25.20	46.911	1.71	0.018	0.00
2010	312.845	11.38	1289.036	46.88	881.605	32.06	263.867	9.60	2.447	0.09
2013	124.509	4.53	1692.770	61.56	921.346	33.51	11.172	0.41	0.003	0.00
2014	774.385	28.16	1404.608	51.08	524.497	19.07	46.287	1.68	0.023	0.00
2016	549.444	19.98	1582.012	57.53	559.381	20.34	52.247	1.90	6.716	0.24
2019	675.109	24.55	1630.780	59.31	418.341	15.21	25.570	0.93	0.000	0.00
2020	218.563	7.95	1733.423	63.04	770.769	28.03	27.045	0.98	0.000	0.00

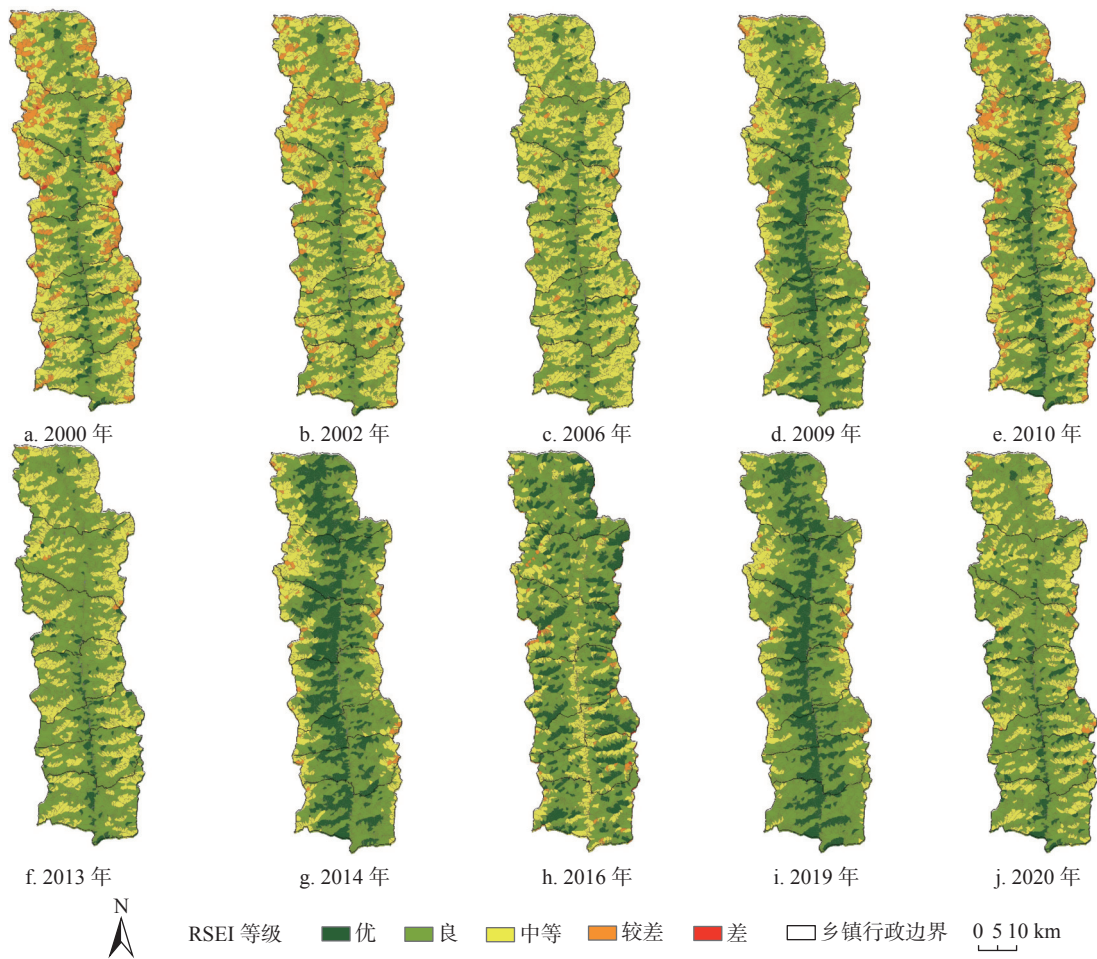


图 2 2000—2020 年福贡县 RSEI 等级对比
Fig. 2 Comparison of RSEI grades in Fugong County from 2000 to 2020

在空间上, 2000—2020年福贡县除西部和东部少量区域外, 其他区域以中等及以上等级为主。对比遥感影像, 发现各年份生态环境属于差、较差水平的地区基本上与研究区内无植被或少量植被覆盖的地区相对应, 其原因一方面是植被较少的区域绿度与湿度较低, 裸土暴露导致热度与干度较高, 另一方面可能由于水土流失、土质较差及高海拔极端气候影响, 因此RSEI值也越低。而生态质量属于中等水平的地区多为未利用地与林地的交界处, 生态质量良及优的地区多为植被覆盖度较大的林地及怒江流域(福贡县境内部分)。

由图2可知, 2000年、2002年生态环境质量相对较差, RSEI较差及差等级占比大, 主要分布在东、西部高海拔地区; 自2003年开始实行植树造林和退耕还林, 福贡县生态环境质量得到一定程度提升, 2006年东、西部较差和差等级的区域显著减少; 随着退耕还林工作的进一步推进, 2009年福贡县中部有大面积生态质量属于良等级的区域演变为优等级; 2010年遭遇百年一遇的特大旱灾, 导致生态环境质量急剧下降, 2013年灾后生态环境逐渐恢复, 2014年国家启动新一轮退耕还林还草工程, 生态环境质量显著提高; 2016年怒江州开始实行易地扶贫搬迁政策, 导致怒江流域生态环境质量出现一定程度的下降; 2018年开始新一轮的退耕还林工程, 生态环境质量得到一定恢复; 而2020年再一次遭遇严重干旱, 生态环境质量急剧下降, 加之, 2020年是扶贫工作的收官之年, 易地搬迁建成区扩大, 可能对福贡县的生态环境质量产生一定影响。

3.3.2 生态环境质量动态变化分析

在对遥感生态指数进行分级讨论的基础上, 对2000—2020年的RSEI差值变化进行分析, 进而深入研究福贡县生态环境质量的时空变化情况, 其中级差为负数、0、正数分别代表生态环境质量退化、不变和改善3类(表3)。从时间尺度上看, 对比2000年, 2020年福贡县生态退化面积为32.276 km²(约占总面积的1.17%), 不变的面积为1555.434 km²(约占总面积的56.57%), 生态改善面积为1162.089 km²(约占总面积的42.26%), 生态环境质量在基本保持稳定的同时变好。

由图3可知, 2000—2020年生态环境基本处于稳定状态, 有部分地区生态环境质量呈现变好的趋势, 生态变好的区域主要位于研究区西部及

东部两侧, 即高黎贡山和碧罗雪山保护区。生态环境质量变好主要得益于福贡县加大保护区的保护力度, 对高海拔疏林及荒山进行植树造林, 以及对耕地进行退耕还林还草。而生态环境质量变差的区域则零散分散在怒江沿岸, 主要受扶贫易地搬迁至怒江河谷导致的建设用地扩张及人口增长的影响。

表3 2000—2020年RSEI等级变化检测

Table 3 RSEI grade change detection from 2000 to 2020

类别	极差	级面积/km ²	面积/km ²	比例/%
退化	-1	32.276	32.276	1.17
不变	0	1555.434	1555.434	56.57
改善	1	1136.315	1162.089	42.26
	2	24.982		
	3	0.792		



图3 2000—2020年福贡县RSEI变化检测
Fig. 3 RSEI change detection map of Fugong County from 2000 to 2020

3.4 自然因素对生态环境变化的影响

3.4.1 气象因素

绿度、湿度、干度以及热度是影响生态环境变化的主要指标, 年平均气温和年降水量可间接

反映地表温度和湿度情况^[23]。根据云南省各年的统计年鉴，获取福贡县9年的年降水量与年平均气温（图4），年降水量2000年为1360.1 mm，2020年下降为1311.6 mm；年平均气温则由2000年的17℃上升为2020年度的17.3℃。福贡县森林资源丰富，降水量和温度影响植物生长进而对生态环境质量产生影响，特别是在个别干旱年份（如2010年、2020年），对高海拔植被退化地区的影响最为明显。

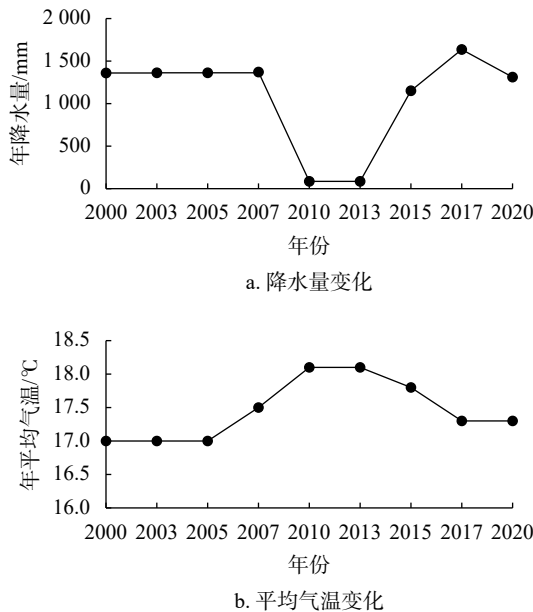


图4 福贡县气候因子变化
Fig. 4 Change of climatic factors in Fugong County

3.4.2 地形因素

为进一步分析地形因素与生态环境质量的关系，统计了2020年RSEI指数（30 m × 30 m 栅格单元评价结果）在不同海拔、坡度、坡向区间内的分布情况（图5）。利用自然间断点分级法，将研究区海拔分为6级：1002 ~ 1708 m、1708 ~ 2185 m、2185 ~ 2632 m、2632 ~ 3070 m、3070 ~ 3505 m、3505 ~ 4304 m；坡度分为6级：0° ~ 17.7°、17.7° ~ 27.5°、27.5° ~ 35.1°、35.1° ~ 42.1°、42.1° ~ 50.1°、50.1° ~ 82.6°；坡向分为2类：阳坡（67.5° ~ 247.5°）、阴坡（0° ~ 67.5°，247.5° ~ 360°）。

由图5a可知，研究区生态环境质量属于较差等级的区域分布在中、高海拔地区，较差等级区域分布在高海拔地区，其原因主要是受高海拔极端气候的影响；中海拔地区气候适宜，生物多样性丰富，人类活动也较为频繁，使得良和中等等级主要分布在该地区；优等级则主要分布在低海拔与较高海拔非极端气候地区，在中海拔地区分布较少。

从坡度上看（图5b），优等级所占面积在0° ~ 50.1°范围内随坡度的增大而增加；良、中等以及较差等级所占面积以35.1° ~ 42.1°为分界，呈先增加后减少的趋势；较差等级则主要分布在27.5° ~ 42.1°。由此可见，在研究区范围内，生态环境质量与坡度之间没有明显的对应关系，因此，坡度不是影响研究区生态环境质量的主要原因。

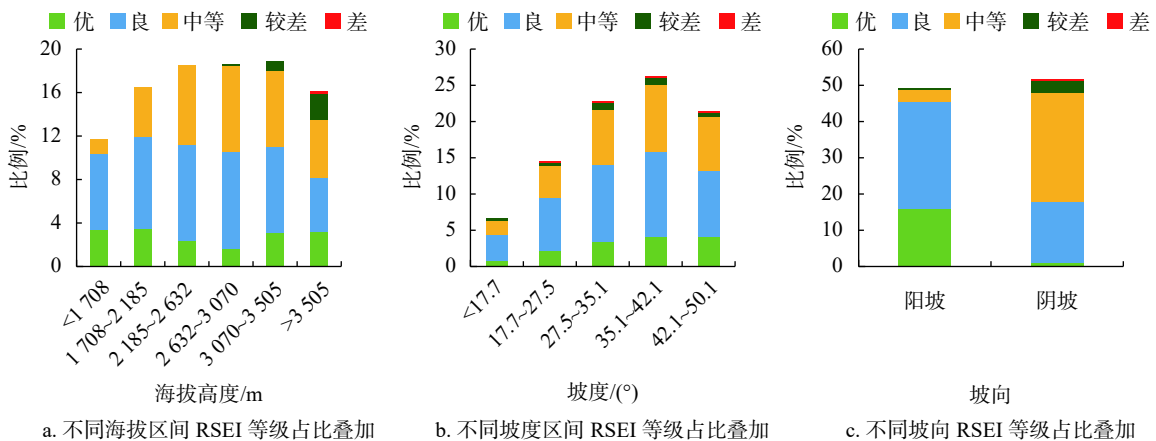


图5 RSEI指数在不同地形区间内的分布情况统计

Fig. 5 Statistics on the distribution of the RSEI over different terrain intervals

从坡向上看（图5c），生态环境质量较好（包括优和良等级）的区域主要分布在阳坡（67.5° ~ 247.5°），生态环境质量属于中等及较差、差等级的区域主要分布在阴坡（0° ~ 67.5°，247.5° ~

360°）。由于不同坡向的光照、温度、雨量、土壤等因子存在差异，会对植被生长和生态环境产生一定的影响。对于湿润地区来说，阳坡区域日照总量较大，接受的太阳辐射较多，但湿润地区

降水丰富, 太阳辐射强度不足以对其水分含量与土壤的干旱程度产生太大影响; 而阴坡区域日照总量较小, 太阳辐射少, 植被光合作用能力较弱, 因此阳坡区域的植被生长状况与覆盖度和阴坡区域相比会更好, 从而使阳坡的绿色高于阴坡, 生态环境质量也就越好。

3.5 土地利用与景观格局变化特征

3.5.1 土地利用变化特征

RSEI 指数中绿色由归一化植被指数 (NDVI) 表示, 干度由建筑用地和裸土指数表示, 因此土

地利用情况可以间接反映地表绿度和干度的变化情况。上帕镇是福贡县政府所在地, 2000—2020年, 福贡县城镇化发展相对滞后, 建设用地扩张速度较慢, 上帕镇生态环境质量基本处于稳定状态, 但建设用地的扩张是导致福贡县怒江流域生态环境变差的主要原因。2000—2020年生态环境质量变化地区主要位于研究区西部及东部两侧, 从土地利用类型转移矩阵 (表4) 来看, 2000—2020年研究区林地面积增加, 导致绿色指标上升, 以草地、耕地和未利用地的转入为主。

表4 福贡县2000—2020年土地利用类型转移矩阵
Table 4 Land use type transfer matrix of Fogong County from 2000 to 2020

时间	土地利用类型	2020年						合计
		草地	耕地	建设用地	林地	水体	未利用地	
2000年	草地	184.814	0.056	0.158	7.449	0	0.083	192.560
	耕地	1.851	110.327	1.035	10.259	0.011	0.018	123.501
	建设用地	0	0.138	14.033	0.028	0	0	14.199
	林地	0.043	0.875	0.045	2190.003	0	3.899	2194.865
	水体	0	0	0	0	56.295	0	56.295
	未利用地	0	0	0	1.303	0	173.170	174.473
	合计	186.708	111.396	15.271	2209.042	56.306	177.170	2755.893

3.5.2 景观格局变化特征

土地利用方式的变化会引起景观格局的演变, 进而对生态环境质量造成影响^[24], 在各种各样的景观格局分析方法中, 景观指数的应用最为广泛^[25]。本研究从类型水平和景观水平上分别选取斑块凝聚度 (COHESION)、景观形状指数 (LSI)、斑块密度 (PD)、景观面积比 (PLAND)、景观聚集度指数 (CONTAG)、香农多样性指数 (SHDI), 采用景观格局分析软件 Fragstats4.2 进行相关指数的计算。

在类型水平上, 选取研究区内主要土地利用类型进行相关指数趋势分析, 见图6。由图6可知, 各土地利用类型的景观指数呈现出不同的变化趋势。空间凝聚度越低则异质性程度越大, 优势景观类型对景观整体的控制作用越低^[26], 从2000—2020年的斑块凝聚度情况来看, 表明研究区内耕地的团聚程度最高, 对景观整体的控制作用较强, 对生态环境的影响程度较大, 草地的空间连通性最小, 对景观整体的控制作用较弱, 对

生态环境的影响程度较小。从景观形状指数变化趋势可知, 林地、耕地、建设用地的景观形状指数呈上升趋势, 景观形状指数的增大表明斑块越来越分散, 复杂程度增大, 不利于生态环境的可持续发展。从斑块密度数据来看, 草地和林地的斑块密度最高, 且两者呈持续上升趋势, 表明二者的景观生态过程较为活跃, 但草地的凝聚程度较低, 则林地对生态环境的影响程度较大。从景观面积比数据来看, 林地景观面积比最大, 对整体景观起到较强的控制作用, 耕地次之。在景观水平上, 20年来景观聚集度指数呈上升趋势, 说明研究区内景观聚集程度逐渐增强, 景观异质性减弱, 破碎化程度减小, 对生态环境质量起到积极促进作用。香农多样性指数呈先增加后减小的趋势, 对应研究区内景观类型所占比例的差异变化趋势。因此, 林地和耕地对研究区生态环境质量的影响程度较大, 后期应加强对于森林资源的保护, 提高其斑块凝聚度, 同时控制耕地的不合理扩张。

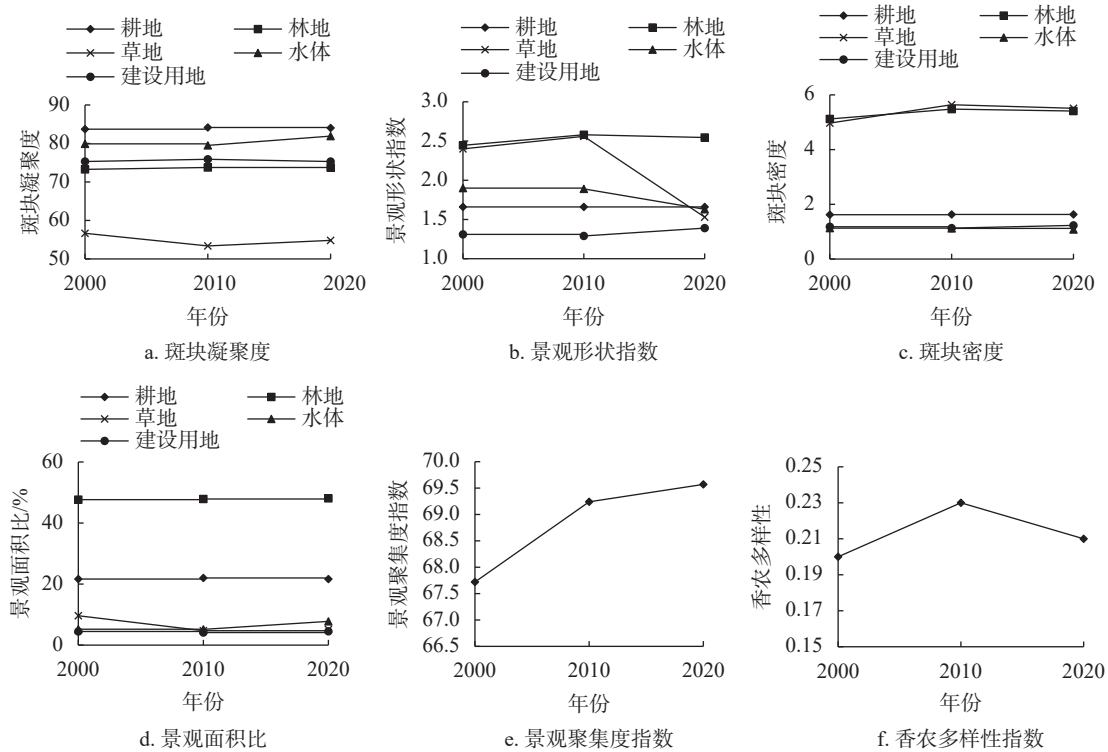


图 6 福贡县类型水平、景观水平上的景观格局指数变化特征

Fig. 6 Landscape index variation characters of Fugong County

4 结论与讨论

本研究以怒江傈僳族自治州福贡县为研究区，基于 ArcGIS 和 ENVI 软件，以 2000—2020 年 10 期遥感影像为数据源，分析 2000—2020 年福贡县生态遥感指数 RSEI 的变化过程和特征，得出以下结论：

1) 福贡县 2000—2020 年 RSEI 均值呈曲折上升趋势，RSEI 优及良等级占比总体也呈上升趋势，说明福贡县生态环境质量总体得到改善；福贡县除西部和东部少量区域外，RSEI 以中等及以上等级为主，生态环境质量总体处于中等及良水平。

2) 2000—2020 年间，福贡县生态环境质量退化、不变、改善的比例分别为 1.17%、56.57%、42.26%；总体上，2000—2020 年生态环境质量稳定中变好，得益于植树造林及退耕还林政策，其生态环境改善区域主要位于研究区东、西两侧，而怒江流域（福贡县境内）生态环境退化主要是由建设用地的扩张导致。

3) 自然因素上，降水与气温影响植物生长进而对生态环境质量产生影响，高海拔极端气候与中海拔人类活动是导致生态环境质量较差的主要原因，坡度与研究区生态环境质量无明显的对应关系，此外，阳坡区域的生态环境质量明显高于阴坡区域；在土地利用方面，林地的增加是生态

环境质量改善的主要原因，林地、建设用地及耕地对研究区生态环境质量的影响程度最大。

基于 Landsat 8 OLI 和 TIRS 及 Landsat 5 TM 影像数据，以遥感为主要手段实现对福贡县生态环境质量动态变化进行研究。目前，RSEI 指数主要应用于城市、水土流失地区及矿区的生态环境质量评价中，对高山峡谷地区开展的研究较少。本论文采用小流域单元分析福贡县生态环境质量，一定程度上突出了高山峡谷地区小流域对生态环境质量和生态系统服务的影响，对高山峡谷地区生态环境质量评价具有一定借鉴意义。本研究分析了福贡县生态环境质量整体变化特征的同时，还进一步分析了自然因素（气象因素与地形因素）、国家政策、土地利用与景观格局对生态环境变化的影响。结果表明，退耕还林、植树造林等国家政策对福贡县生态环境质量改善效果显著，产生了较好的作用；旱灾等自然灾害因素以及扶贫易地搬迁导致的建设用地和人口增长使福贡县局部地区生态环境质量下降。因此，政府需要加大对高山峡谷地区退耕还林、植树造林等政策的支持力度，控制建成区、耕地的不合理扩张，科学规划国土空间格局。

本研究仍存在不足之处：1) 从目前遥感数据源的可获取性而言，遥感影像质量不够好，且受客观条件的限制，可能导致计算结果出现偏差；

2) 本研究基于10期遥感影像数据进行分析, 平均时间跨度为2.22 a, 忽略了年份之间的细微变化, 因此, 在后续的研究工作中可以进一步缩短时间步长来更好地分析生态环境质量变化规律, 或是将相邻几个时间点的数据进行合成来代替某个时段, 以提高数据的代表性; 3) 使用了TM和OLI两种传感器获取的数据源, 其传感器系统的差异可能会对数据可比性产生一定的影响; 4) 缺乏对生态环境质量各驱动因子之间交互作用的定量分析, 后续可采用相关性分析方法对其进行研究。

【参 考 文 献】

- [1] 朱雪. 基于土地利用格局的云南省福贡县生态脆弱度研究[J]. *生态科学*, 2012, 31(6): 661-665.
- [2] 赵凯, 李晖, 朱雪. 基于生态安全格局的云南省福贡县城空间扩张研究[J]. *热带地理*, 2008, 28(6): 529-533.
- [3] 国家环境保护总局. 生态环境状况评价技术规范: HJ/T 192—2006[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [4] 王士远, 张学霞, 朱彤, 等. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(10): 1269-1278.
- [5] 张沛, 徐海量, 杜清, 等. 基于RS和GIS的塔里木河干流生态环境状况评价[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 416-422.
- [6] 宋善海, 王堃, 陈艳, 等. 县域夜光遥感指数与生态环境状况指数相关性研究: 以贵州省为例[J]. *贵州科学*, 2019, 37(1): 38-45, 76.
- [7] 王志杰, 代磊. 黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价: 以贵阳市花溪区为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3429-3440.
- [8] Li Y R, Cao Z, Long H L, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: the case of Mu Us Sandy Land, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 697-715.
- [9] Coutts A M, Harris R J, Phan T, et al. Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 637-651.
- [10] 郭文浩, 吴俐民, 左小清, 等. 基于TM影像的淮南市水体信息提取[J]. *工程勘察*, 2018, 46(3): 64-67.
- [11] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [12] Liao W H, Jiang W G. Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2462.
- [13] 农兰萍, 王金亮. 基于RSEI模型的昆明市生态环境质量动态监测[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2042-2050.
- [14] 潘洪义, 李加安, 张琴. 基于RSEI的地震区生态环境质量恢复研究: 以汶川县为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 745-757.
- [15] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2963-2972.
- [16] 郑华健. 基于多时相遥感生态指数的粤港澳大湾区生态环境变化研究[J]. *地理科学研究*, 2019, 8(3): 243-250.
- [17] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 91-97, 294.
- [18] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 图尔荪阿依·如孜, 等. 哈密绿洲生态环境质量空间格局变化[J]. *草业科学*, 2021, 38(1): 20-31.
- [19] Chen C, Fu J Q, Zhang S, et al. Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8 OLI images[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 217: 281-291.
- [20] Baig M H A, Zhang L F, Shuai T, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(5): 423-431.
- [21] 刘栩位, 周启刚, 周浪, 等. 基于RSEI的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 278-286.
- [22] 张朋兴, 袁希平, 甘淑. 基于遥感生态指数的江川区生态环境变化分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(5): 25-29.
- [23] 刘盼, 任春颖, 王宗明, 等. 南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3347-3356.
- [24] 冯朝晖, 李宣瑾, 胡健, 等. 基于景观格局的青藏高原东部典型区生态安全分析[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(6): 1188-1196.
- [25] 叶晶萍, 刘士余, 盛菲, 等. 寻乌河流域景观格局演变及其生态环境效应[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4737-4748.
- [26] 曾永年, 靳文凭, 王慧敏, 等. 青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 185-194.

(责任编辑 陆 驰)

