

基于遥感生态指数的元谋干热河谷生态环境动态监测及其驱动力分析

梁巧玲¹, 史正涛¹, 陈越豪¹, 何光熊^{1,2}, 史亮涛^{2,3}, 李 婕¹

(1.云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500; 2.云南省农业科学院

热区生态农业研究所, 云南 元谋 651300; 3.元谋干热河谷植物园, 云南 元谋 651300)

摘 要: [目的] 探究元谋干热河谷 2000—2020 年生态环境变化现状, 对该区域生态进行动态监测及其驱动力分析, 为干热河谷的生态环境保护和可持续发展提供理论依据。[方法] 选取 3 期 Landsat TM/OIL 影像数据计算绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)、热度(LST)4 个指标来构建遥感生态指数(RSEI)评价体系, 并通过地理探测器对影响区域的生态环境因素进行量化分析。[结果] ①2000, 2010 和 2020 年元谋干热河谷的 RSEI 均值分别为 0.628, 0.609 和 0.684, 呈先降后升的变化趋势。②在 2000—2020 年这 20 a 间, 区域内生态环境改善面积占 29.58%, 主要分布河谷两侧; 生态恶化面积占 21.45%, 主要散布在农耕区和居民区周围。③对影响元谋干热河谷 RSEI 的 10 个因子进行驱动力分析发现, 绿度指标和土地利用对 RSEI 的空间分异特征解释力最强。[结论] 多因子交互结果显示, 元谋干热河谷的生态环境现状是多重因素共同作用的结果, 所有因子在交互作用下均有协同增强的作用; 绿度指标和土地利用是研究区生态环境质量的主要驱动因子。因此, 在探究元谋干热河谷生态环境恢复与保护, 应合理规划利用土地资源, 落实植被保护及修复政策及措施。

关键词: 遥感生态指数; 生态环境质量; 元谋干热河谷; 主成分分析; 地理探测器

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)06-0146-09

中图分类号: P964, X821

文献参数: 梁巧玲, 史正涛, 陈越豪, 等. 基于遥感生态指数的元谋干热河谷生态环境动态监测及其驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 146-154. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220929.002; Liang Qiaoling, Shi Zhengtao, Chen Yuehao, et al. Ecological environmental dynamic monitoring and driving force analysis of Yuanmou dry-hot valley based on remote sensing ecological index [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 146-154.

Ecological Environmental Dynamic Monitoring and Driving Force Analysis of Yuanmou Dry-hot Valley Based on Remote Sensing Ecological Index

Liang Qiaoling¹, Shi Zhengtao¹, Chen Yuehao¹, He Guangxiong^{1,2}, Shi Liangtao^{2,3}, Li Jie¹

(1.Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

2.Institute of Thermal Eco-agriculture, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou,

Yunnan 651300, China; 3.Yuanmou Dry Hot Valley Botanical Garden, Yuanmou, Yunnan 651300, China)

Abstract: [Objective] The current level of ecological environmental change in the Yuanmou dry-hot valley from 2000 to 2020 was determined, and the dynamic monitoring and driving force of the regional ecology were analyzed in order to provide a theoretical basis for ecological environmental protection and sustainable development of the dry-hot valley. [Methods] Three Landsat TM/OIL image datasets were selected to calculate the greenness (NDVI), humidity (WET), dryness (NDBSI), and heat (LST) indexes to construct the

收稿日期: 2022-07-08

修回日期: 2022-08-08

资助项目: 云南省科技基础研究计划项目“基于核素比率的金沙江云南段干热河谷区土壤侵蚀与谷底生态建设研究”(202001AS070070); 云南省自然生态监测网络监测项目(2022-YN-18); 云南省教育厅科学研究基金项目(2022J0126)

第一作者: 梁巧玲(1995—), 女(汉族), 广东省信宜人, 硕士研究生, 研究方向为生态保护与修复。Email: 1427950961@qq.com。

通讯作者: 史正涛(1964—), 男(汉族), 甘肃省宁县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事山地灾害与生态资产评估方面的研究。Email: shizhengtao@163.com。

remote sensing ecological index (RSEI) evaluation system. The ecological environmental factors affecting the region were quantified and analyzed by geographic detector. [Results] ① The mean values of RSEI in the Yuanmou dry-hot valley in 2000, 2010 and 2020 were 0.628, 0.609, and 0.684, respectively, showing a trend of initially decreasing and then increasing. ② During the 20-year study period, the area of ecological environmental improvement accounted for 29.58% of the total area, mainly located on both sides of the river valley. The area of ecological deterioration accounted for 21.45% of the total area, and was mainly scattered around agricultural areas and residential areas. ③ The driving force analysis of 10 factors affecting RSEI in the Yuanmou dry-hot valley showed that NDVI and land use had the strongest explanatory power for the spatial differentiation characteristics of RSEI. [Conclusion] The interaction results of multiple factors showed that the ecological environment of the Yuanmou dry-hot valley was the result of multiple factors, and all factors produced synergistic enhancement effects under the interaction. NDVI and land use were the main driving factors of eco-environmental quality in the study area. Therefore, in the exploration of Yuanmou ecological environmental restoration and protection, we should rationally plan and use land resources, and implement vegetation protection and restoration policies and measures.

Keywords: remote sensing ecological index; ecological environmental quality; Yuanmou dry-hot valley; principal component analysis; geographic detector

干热河谷是中国西南地区特殊的地理单元,热量高、降水量少以及蒸发强的独特自然环境条件,孕育高原特色现代农业^[1]。而随着人类活动加剧,对生态环境产生明显影响。近年来干热河谷的生态环境现状和未来发展备受国家高度重视,从构建西南生态安全屏障到生态系统保护和修复重大工程规划,关于生态环境尤其是生态环境脆弱区的研究及评估成为研究热点^[2]。20 世纪 60 年代国外学者开展对生态环境质量评价的研究。伴随遥感技术的发展,利用 RS 和 GIS 获取地面信息,再结合数学方法进行环境综合评价,使生态环境质量研究得到较大飞跃^[3]。其中以 Charles 等人对河口地区开展的生态监测和评价最具代表性^[4]。而在 2006 年国家环境保护局提出生态环境状况指数(EI),用于评价一个地区的生态环境质量状况。鉴于该指数存在指标权重人为设定,且获取难度大等缺点。2013 年徐涵秋基于遥感影像提出了遥感生态指数(RSEI),用于定量评价区域的生态环境质量^[5]。相较 EI 指数,RSEI 指数的构建不依赖于地面调查数据,在确保空间上的连续性的同时减少了人为干预,从而保证评价结果的客观合理性^[6]。此后该指数被广泛应用于区域地理生态研究中。周萌等人利用遥感生态指数对东江源区 2000—2019 年的生态环境质量进行了时空变化分析以及动态监测^[7]。Wang^[8]通过改进遥感生态指数(ARSEI)耦合了绿度、盐度、湿度、热量和土地退化指数,对于旱区生态环境质量进行了监测和评价。但在解剖生态环境变化的驱动力研究尚有不足。因此,本文引入地理探测器作为探索空间分异的统计学方法^[9],用于解释影响

生态环境质量的空间异质性和揭示其背后的驱动力。

元谋干热河谷作为中国西南干旱河谷的典型代表,干热的气候与人为活动影响下,出现植被—土壤协同退化的自然现象,使该区成为较为典型的生态脆弱区^[10]。本文以 Landsat 遥感影像作为数据源,通过构建遥感生态指数模型,采用主成分分析和地理探测器等方法,探究 2000—2020 年期间元谋干热河谷生态环境质量时空变化特征^[11],进一步分析其生态环境变化的驱动因素,为治理干热河谷区域的生态环境保护和可持续发展提供借鉴和参考依据。

1 研究区概况

元谋干热河谷主要集中分布于元谋干热河谷境内(101°35′—102°06′E,25°23′—26°06′),地处滇中高原北缘,属楚雄彝族自治州。地势呈四周高,中间低,由南向北倾斜的“筲箕凹”形,属于南亚热带干热河谷气候^[9],年均降雨量 657.5 mm,全年基本无霜,年平均气温 21.4 ℃。干热河谷的典型植被类型为稀树灌木草丛^[12]。独特的气候环境,快速发展农业经济,给元谋干热河谷带来发展机遇的同时也给河谷的生态环境带来了挑战。随着森林覆盖率减小、土地退化、水土流失严重,该区已成为中国较为典型的生态脆弱分布区^[13]。

2 数据与分析

2.1 数据来源及处理

本文所获取的 Landsat 遥感影像来自美国地质勘查局 USGS(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),时

间为 2000 年 12 月 25 日、2010 年 12 月 23 日的 Landsat 7 ETM 和 2020 年 12 月 26 日 Landsat 8 OLI 遥感影像数据。元谋干热河谷旱季干旱少雨少云,在此统一选取 12 月(云量<8%)遥感影像作为研究数据源。借助 ENVI5.3 平台对影像数据进行预处理,如辐射定标、大气校正、重采样、裁剪等。而其他辅助数据:DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>, 30 m×30 m);土地利用通过人机交互监督分类法对 3 期 Landsat 影像进行分类。参照国家标准《土地利用现状分类(GB/T21010-2007)》,结合研究区的土地利用现状,采用土地利用 3 级分类系统将元谋干热河谷的土地利用类型划分为林地、灌草丛、耕地、建筑用地、水体及其他 6 类。对完成分类的土地利用数据进行精度评价:总体精度大于 85%,kappa 系数在 80%以上^[14];人口及经济数据集源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),而气温和降水数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);空间分辨率均为 1 km×1 km^[15],需进一步重采样到 30 m×30 m,使各个因子结果适用于评价指标的计算。最后通过利用 ArcGIS 将遥感生态指数、DEM 和社会经济等数据格网化并分级赋值,进行地理探测器分析。

2.2 研究方法

2.2.1 RSEI 计算 元谋干热河谷的生态环境特征主要表现为森林覆盖率低,土壤贫瘠,水土流失严重,生态环境脆弱。基于区域自然环境特性,本文选取

$$IBI = \frac{2T_{swirl}/(T_{swirl} + T_{nir}) - [T_{nir}/(T_{nir} + T_{red}) + T_{green}/(T_{green} + T_{swirl})]}{2T_{swirl}/(T_{swirl} + T_{nir}) + [T_{nir}/(T_{nir} + T_{red}) + T_{green}/(T_{green} + T_{swirl})]} \quad (5)$$

$$NDBSI = \frac{(IBI + SI)}{2} \quad (6)$$

式中: T_{blue} , T_{green} , T_{red} , T_{nir} , T_{swirl} 分别为蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外 1。

(4) 热度指标。热度指标用地表温度(LST)经比辐射率校正的温度来表示。通过利用 Landsat 数据的热红外波段,计算亮度温度 $L\lambda$,并进行比辐射率 ϵ 校正,计算公式:

$$L\lambda = gain \times DN + bias \quad (7)$$

$$B(T_s) = [L\lambda - L\uparrow - \tau(1 - \epsilon)L\downarrow] / \tau\epsilon \quad (8)$$

$$LST = K_2 / \ln \left[\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right] \quad (9)$$

式中:gain, bias 分别为热红外波段的增益值与偏置值;DN 为像灰度值; $B(T_s)$ 为黑体辐射亮度; $L\uparrow$ 和 $L\downarrow$ 为大气向上和向下的辐射亮度; T 为大气热红外波段透过率; ϵ 为地表比辐射率。对于 Landsat

NDVI, WET, NDBSI 和 LST 这 4 个指标,拟构建元谋干热河谷的遥感生态指数,利用主成分分析方法对指标赋予权重。

(1) 绿度指标。NDVI 应用于检测植被生长状态和植被覆盖度^[16]。

$$NDVI = \frac{T_{nir} - T_{red}}{T_{nir} + T_{red}} \quad (1)$$

式中:NDVI 为归一化植被指数; T_{nir} , T_{red} 分别为 ETM, OLI 数据中红、近红外波段的反射率。

(2) 湿度指标。Wet 主要反映了水体和土壤、植被的湿度,广泛应用在生态环境监测和评价。利用遥感缨帽变换获取的湿度分量与土壤湿度有关^[17],计算如下:

$$Wet_{TM} = h_1 \times 0.0315 + h_2 \times 0.2021 + h_3 \times 0.3102 + h_4 \times 0.1594 - h_5 \times 0.6806 - h_6 \times 0.6109 \quad (2)$$

$$Wet_{OLI} = h_1 \times 0.1511 + h_2 \times 0.1973 + h_3 \times 0.3283 + h_4 \times 0.3407 - h_5 \times 0.7117 - h_6 \times 0.4559 \quad (3)$$

式中: h_1-h_6 分别代表蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、中红外波段 1, 中红外波段 2。

(3) 干度指标。建筑物和裸土会造成土地干化,严重影响河谷流域的生态环境问题,本文采用建筑物指数 IBI 和裸土指数

SI 的平均值来构建干度指标 NDBSI^[18-20]:

$$SI = \frac{(T_{swirl} + T_{red}) - (T_{nir} + T_{blue})}{(T_{swirl} + T_{red}) + (T_{nir} + T_{blue})} \quad (4)$$

7 影像来说, $K_1 = 666.09$; $K_2 = 1282.71$; 而 Landsat 8 影像 $K_1 = 774.89$; $K_2 = 1321.08$ ^[21-23]。

通过上述公式计算出生态环境质量 4 个评价指标,再经归一化处理,最后合成一幅新的影像,构建一个函数^[24],表达式为:

$$RSEI = [f(NDVI, Wet, NDBSI, LST)] \quad (10)$$

式中:NDVI 为归一化植被指数;Wet 是湿度分量;NDBSI 是由建筑指数与裸土指数线性合成得到;LST 是地表温度指数。

(5) 4 个指标归一化处理。为了便于后续计算,需对研究区生态环境质量评价的 4 个指标进行标准化处理,使其数值介于[0,1]之间,从而有助于对各指标进行比较^[25-26]。归一化公式为:

$$A_i = \frac{B_i - B_{min}}{B_{max} - B_{min}} \quad (11)$$

式中: A_i 为第 i 个指标标准化处理值; B_i 为第 i 个原指标值; B_{\max} 为第 i 个指标最大值; B_{\min} 第 i 个指标最小值。

为了使湿度指标能更好反映地面湿度,本研究采用归一化水体指数(MNDWI)实现对水体信息的掩膜,从而避免大面积水体影响 PCA 的荷载分布^[27]。其计算公式为:

$$MNDWI=(P_{\text{green}}-P_{\text{nir}})/(P_{\text{green}}+P_{\text{nir}}) \quad (12)$$

式中: P_{green} 为绿光波段; P_{nir} 为中红外波段。

(6) 遥感生态指数构建。RSEI 指数由上述 4 个指标经归一化后转换后的第一主成分(PC₁)所构成,通过主成分分析方法计算得到 4 个指标,基于 4 个指标数值范围不一^[28-29],经归一化处理,其具体公式为: $RSEI_0=1-PC_1[f(NDVI,Wet,NDBSI,LST)]$ (13)

$$RSEI=(RSEI_0-RSEI_{0-\min})/(RSEI_{0-\max}-RSEI_{0-\min}) \quad (14)$$

式中: $RSEI_0$ 生态指数的初始值; $RSEI_{0-\min}$, $RSEI_{0-\max}$ 为初始值的最小和最大值; $RSEI$ 则是遥感生态指数,其数值越接近 1,表明生态环境越好,越接近 0 表明生态环境越差。

2.2.2 地理探测器模型 由王劲峰等人提出地理探测器主要用于分析空间分异性的影响因素及各因子间的交互探测^[30]。将 RSEI 等级作为因变量,将湿度、湿度、干度、热度、降雨量、气温、高程、经济和人口密度及土地利用 10 个评价指标作为自变量,导入地理探测器进行运算。利用地理探测器中的因子探测和交互探测,分析影响元谋干热河谷生态环境质量的驱动力^[31]。根据因子探测器所得结果中的 q 值和 p 值得出各指标对元谋干热河谷生态环境的影响力及。 q 值越大,说明指标对生态环境的影响力越大。因子探测器计算公式为:

$$q=1-\frac{1}{N\delta^2}\sum_{h=1}^L N_h\delta_h^2 \quad (15)$$

式中: q 为某影响因子对元谋干热河谷生态环境质量指数的影响力,即解释力强度; $h=1,\cdots,L$; L 为因变量 RSEI 和自变量因子的分类数; N_h , N 分别为不同分级的区域和全区域内的样本数; δ_h^2 , δ^2 分别为不同分级的区域和全区域内 RSEI 的方差^[11]。

而交互探测器主要用于探测多因子交互作用后对生态环境质量的影响力,即影响因子相互作用后是否会强化或弱化对区域生态环境的影响,或者这些因子对生态环境的影响是相互独立的^[32]。该方法是首先分别计算两种因子对生态环境质量的 q 值 $q(X_1)$, $q(X_2)$,交互后的 q 值 $q(X_1 \cap X_2)$ 然后对 $q(X_1)$, $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较,主要类型详见表 1。

表 1 多因子交互探测类型^[33]

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双线性增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	相互独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 生态环境质量评价结果

由表 2 可知,2000,2010 和 2020 年生态环境质量指标第一主成分的特征值分别为 0.312,0.265,0.333;贡献率分别为 78.75%,72.85%,81.69%。这 3 期影像的 PC₁ 的贡献率都超过 70%,涵盖上述 4 个指标的大部分特征信息。而 PC₄ 的贡献率较小,可忽略不计。基于 PC₁ 累积贡献率超过 70%,因此,构建 RSEI 生态指数模型能全面反映研究区的生态环境综合状况,对评价生态质量具有较好的适普性。

表 2 计算各主成分特征值、贡献率和累计贡献率

年份	指 标	主成分			
		PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
2000	特征值 λ	0.312	0.075	0.007	0.002
	贡献率/%	78.75	18.93	1.78	0.54
	累计贡献率/%	78.75	97.68	99.46	100
2010	特征值 λ	0.265	0.088	0.008	0.002
	贡献率/%	72.85	24.27	2.25	0.63
	累计贡献率/%	72.85	97.12	99.37	100
2020	特征值 λ	0.333	0.059	0.013	0.003
	贡献率/%	81.69	14.48	3.13	0.70
	累计贡献率/%	81.69	96.17	99.30	100

由表 3 中的 4 个指标均值变化来看,2000—2020 年绿度和湿度指标的均值呈现先降后升的变化趋势,说明这 20 a 元谋干热河谷采取生态修复政策措施取得一定成效;而 LST 呈现前 10 a 微增后 10 a 有微减变化。而干度指标呈现小幅度增长变化的趋势,表明元谋干热河谷在 2010 年的城镇化速度有所加快,不透水表面和裸土面积有所增加。从各指标均值变化来看 NDVI, NDSI 和 LST 指标在这 20 a 间的变化幅度较大,说明 2 个指标对元谋干热河谷 RSEI 变化起着至关重要作用。从 RSEI 均值变化幅度上看,2000 年元谋干热河谷 RSEI 值为 0.628,到 2010 年 RSEI 降低到 0.609,说明 2010 年的生态环境质量较差。而到 2020 年,随着研究区的生态环境恢复和治理, RSEI 值上升到 0.684,生态环境质量变好。在 2000—2010 年, RSEI 值减少 0.02,减少幅度为 3.01%;而在 2010—2020 年 RSEI 值增加 0.075,增幅为

12.31%；从总体来看,在 2000—2020 年 RSEI 值变化幅度约为 8.91%,RSEI 值呈现先降后升的变化趋势。后 10 a 生态环境改善的效果明显优于前 10 a 改善的效果。

表 3 元谋干热河谷 2000—2020 年 4 个指标和 RSEI 的变化统计

年份	指标	NDVI	Wet	NDBSI	LST	RSEI
2000	最大值	1.000	0.280	0.236	38.609	1.000
	最小值	−1.000	−0.600	−0.904	6.208	0.000
	均值	0.220	−0.053	−0.095	10.748	0.628
	标准差	0.254	0.070	0.128	11.363	0.239
2010	最大值	1.000	0.337	0.707	37.654	1.000
	最小值	−1.000	−0.534	−0.960	6.175	0.000
	均值	0.174	−0.057	−0.076	10.828	0.609
	标准差	0.213	0.047	0.140	11.601	0.201
2020	最大值	1.000	0.373	0.238	38.784	1.000
	最小值	−1.000	−0.490	−0.741	6.179	0.000
	均值	0.262	−0.014	0.0854	10.429	0.684
	标准差	0.313	0.037	0.084	11.156	0.284

3.2 RSEI 空间变化分析

3.2.1 RSEI 整体性分析 根据《生态环境评价技术规范》的分级标准,以 0.2 为间隔,将元谋干热河谷生态指数划分成 5 个等级:差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)一般(0.4~0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1.0)^[7];通过

分级统计得到 RSEI 空间分布状况(图 2,表 4)。

由图 1 可知,在 2000—2020 年元谋干热河谷的生态环境质量等级以良好、一般为主。从遥感生态环境指数的空间分布来看(图 1),环境质量等级较低区域主要集中在元谋干热河谷坝区和流域两侧,受干热气候条件及人类活动影响,生态环境质量较差。较高质量等级则分布在元谋干热河谷东南部高海拔地区,随着水分条件改善,植被覆盖度高,生态环境较好。从整体上看,元谋干热河谷生态环境质量指数年均值在 0.609~0.684 间,呈现先“先降后升”变化的趋势,多年 RSEI 平均值为 0.640,研究区生态环境质量一般。

由表 4 可知,在 2000—2010 年元谋干热河谷生态环境为优和良好的区域面积由原来的 42.83%下降到 2010 年 34.63%;而等级为差和较差的区域面积比例由 2000 年的 18.63%上升到 2010 年的 31.48%,整体生态环境质量较差。而这个时期元谋干热河谷城镇化建设加快导致生态环境恶化。但在 2010—2020 年元谋干热河谷的生态环境质量出现好转,表现在生态级差和较差的面积减少,由 2010 年 636.71 km²降到 2020 年的 508.82 km²。生态等级为良和优的面积比例由 2010 年的 34.63%增加到 2020 年的 40.04%,后期元谋干热河谷实行的生态恢复工程 and 政策的积极响应,使得该区近 10 a 的生态环境明显改善。

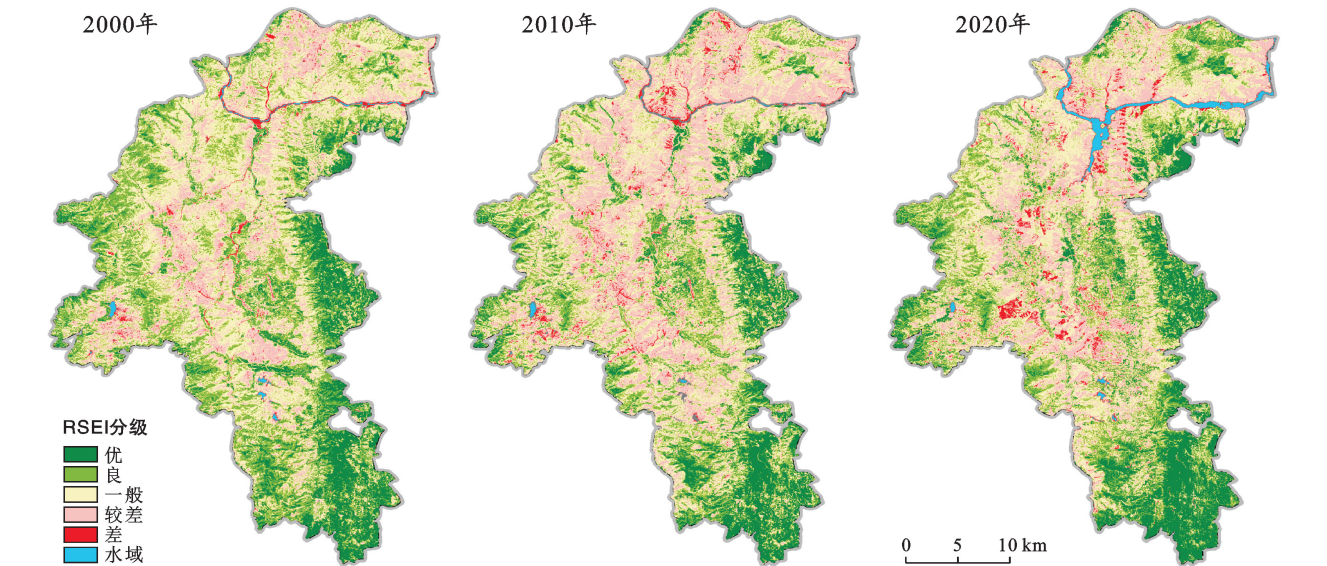


图 1 元谋干热河谷 2000—2020 年遥感生态指数的等级分布

3.2.2 RSEI 区域性分析 为进一步探究元谋干热河谷 RSEI 变化情况,本文通过对元谋干热河谷管辖的 10 个乡镇 20 a RSEI 研究,结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,新华乡、姜驿乡的 RSEI 均值低于全县的 RSEI 平均值,表明这两个乡镇生态环境状况较差;而物茂乡、老城乡以及元马镇 RSEI 较高,表明该区域的生态环境状况相对较好,而这些区域多

属于农、林业种植区,人口密度相较主城区低,拥有较好的自然区位条件。2000—2020 年姜驿乡、黄瓜园镇、物茂乡、元马镇的 RSEI 处于上升;而江边乡处于下降趋势,说明水库修建对该区生态环境造成一定影响;而其他乡镇的 RSEI 均值相对稳定。这也进一步说明元谋干热河谷实施生态保护取得一定成效,辖区生态环境得到改善。

表 4 元谋干热河谷 2000—2020 年生态等级及面积变化

RSEI 等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
优	287.10	14.23	280.37	13.86	348.53	17.46
良	577.13	28.60	420.16	20.77	450.65	22.58
一般	777.71	38.54	685.60	33.89	688.06	34.47
较差	350.20	17.36	599.33	29.63	460.39	23.06
差	25.62	1.27	37.38	1.85	48.43	2.43

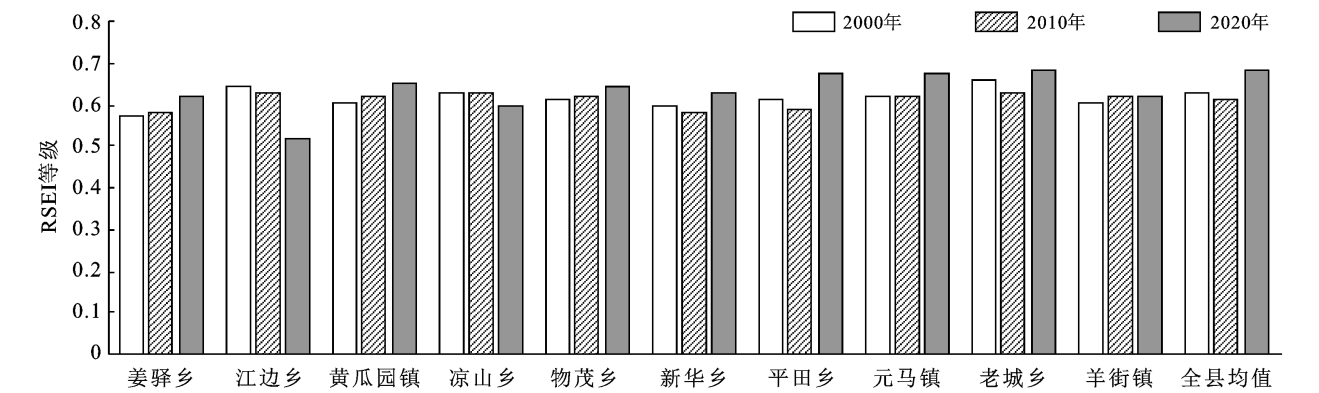


图 2 元谋干热河谷辖区各乡镇不同时期 RSEI 等级

3.3 RSEI 动态变化分析

依据研究区实际情况,采用指数分级法将生态环境指数等级变化分为 5 类间隔为 0.3,分别表现为:恶化(RSEI 指数值<-0.6),变差(-0.3<RSEI 指数值<-0.6),不变(0<RSEI 指数值<-0.3),变好(0.3<RSEI 指数值<0)和优化(RSEI 指数值>0.3) [11]。以获取 RSEI 为基础,分别对元谋干热河谷 2000—2020 年的生态环境质量进行分级面积变化统计和分析。通过图 3 和表 5 可知,2000—2010 年期间,元谋干热河谷生态环境质量不变的面积占总体的 60% 以上;生态环境质量转好的面积占元谋干热河谷总面积的 19.95%;而生态环境变差的面积占研究区域面积的 18.8%。生态好转与恶化的面积基本相当。

变化类型	2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
恶化	4.72	0.23	12.00	0.61	12.40	0.62
变差	374.56	18.57	358.50	17.97	415.32	20.83
不变	1 235.45	61.24	1 117.47	56.01	976.23	48.97
变好	397.45	19.70	498.73	25.0	581.15	29.15
优化	5.13	0.25	8.22	0.41	8.58	0.43

在 2010—2020 年期间元谋干热河谷生态环境质量变好等级面积占总面积的 25.41% 远高于生态变差的面积。而生态环境转好集中在河谷两侧,主要受退耕还林还草政策以及水库修生态移民等政策的影响,

使得河谷两侧的生态环境得到改善。生态环境变差集中在元谋干热河谷居民区和耕作区周围,而不合理的人类活动在一定程度上影响了当地生态环境。总体来,前 10 a 元谋干热河谷生态环境较差,后 10 a 元谋干热河谷生态环境出现转好。这进一步说了元谋干热河谷生态修复工程和措施初步显现成效,部分区域的生态环境质量明显改善。

3.4 驱动力因素分析

区域生态环境质量受人为和自然等多重因素驱动,而干热河谷生态环境状况差异分明且环境条件复杂。因此本文选取 NDVI, Wet, NDBSI 和 LST 这 4 个基础指标,再结合当地独特干热气候条件及人类活动对生态环境影响,筛选出降水、气温、高程(DEM)、经济密度(GDP)、人口密度(POP)、土地利用等指标作为自变量 X,以研究区 RSEI 模型第 1 主成分 PC₁ 作为因变量 Y。利用 ArcGIS 采用自然断点法对自变量进行分级,创建 500 m×500 m 的格网进行均匀分布采样,去除异常点,共 7 770 个样本点。然后将数据导入到基于 Excel 的地理探测器软件中进行因子探测,探究各驱动因子对 RSEI 空间分异特征的解释力(图 4)。由表 6 可知,2000—2020 年期间对 10 个因子探测结果显示: $p=0$,表明所选 10 个因子对元谋干热河谷生态环境解释力都很充足。 q 值是指对 RSEI 的影响强度,也是对空间分异特征的解释力 [11]。从时间序列来看,2000 年 q 值大小依次为:土地利用>绿度指标>干度指标>湿度指标>温度

指标>气温>海拔>降水>人口密度>经济密度,其中土地利用($q=0.589$)是影响 2000 年研究区生态环境的主导因子。2010 年影响因子解释力大小为:绿度指标>土地利用>干度指标>湿度指标>热度指标>气温>海拔>降水>经济密度>人口密度。而绿度指标的 $q=0.583$,是 2010 年元谋干热河谷生态环境变化的主要影响因素;2020 年影响强度大小为:

绿度指标>土地利用>热度指标>气温>湿度指标>海拔>降水>经济密度>干度指标>人口密度。然而,绿度和土地利用的 q 值均大于 0.5,是生态环境变化的主导因素。总体来看,这 20 a 研究区的绿度指标 q 值都大于 0.5,是影响元谋干热河谷生态环境变化的重要因素。其他因子也在不同程度上影响着生态环境的变化。

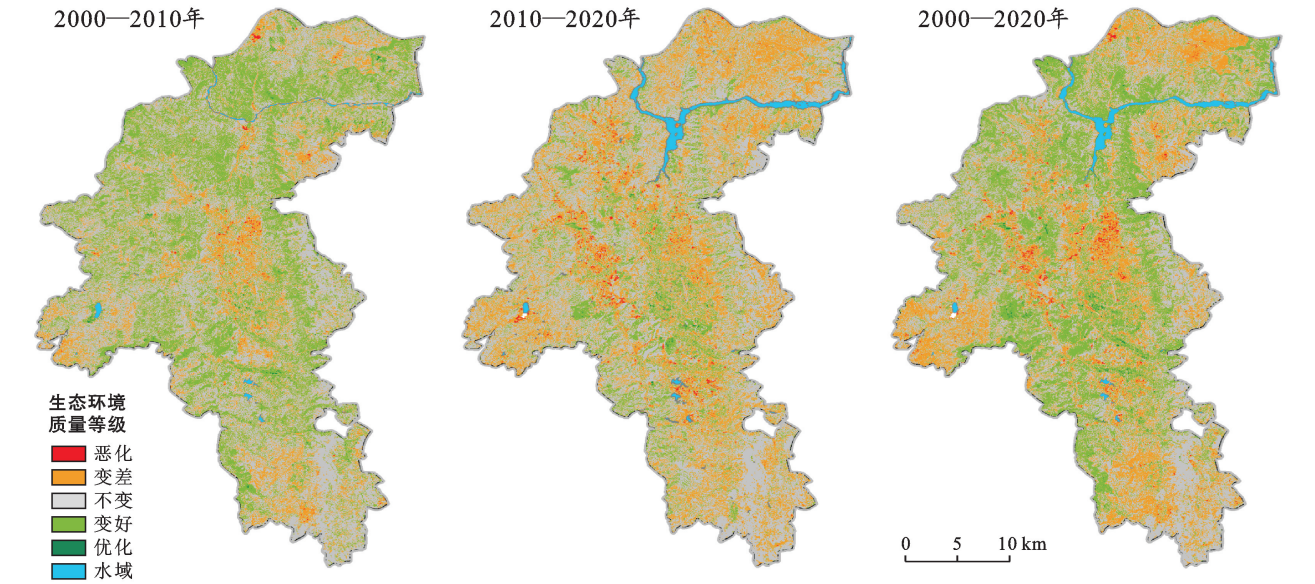


图 3 元谋干热河谷 2000—2020 年生态环境质量等级变化

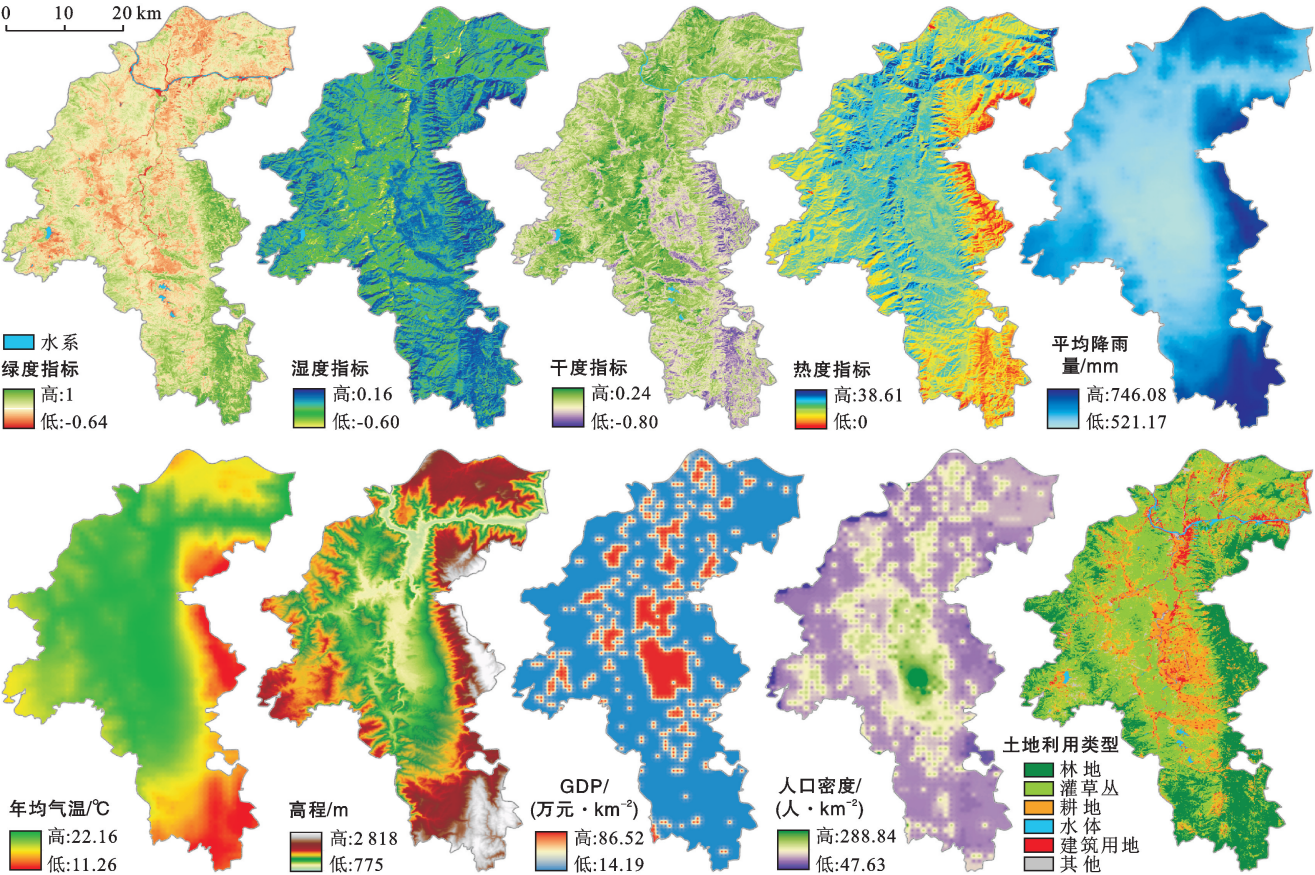


图 4 元谋干热河谷探测因子空间分布

表 6 元谋干热河谷生态环境变化单因子探测结果

探测因子	2000 年			2010 年			2020 年		
	q 值	p 值	q 排序	q 值	p 值	q 排序	q 值	p 值	q 排序
NDVI	0.531	0	2	0.583	0	1	0.650	0	1
Wet	0.241	0	4	0.207	0	4	0.266	0	5
NDBSI	0.475	0	3	0.355	0	3	0.026	0	9
LST	0.220	0	5	0.204	0	5	0.340	0	3
降水	0.164	0	8	0.125	0	8	0.253	0	7
气温	0.199	0	6	0.150	0	6	0.285	0	4
DEM	0.175	0	7	0.142	0	7	0.258	0	6
GDP	0.041	0	10	0.067	0	9	0.075	0	8
POP	0.048	0	9	0.063	0	10	0.016	0	10
土地利用	0.589	0	1	0.379	0	2	0.508	0	2

由图 5 可知,探究 2000—2020 年影响元谋干热河谷生态环境变化的 10 因子间两两交互探测共产生 36 项交互结果。相较单因子,双因子的交互作用对元谋干热河谷生态环境的影响更为显著。主要表现在 20 a 间绿度、干度、湿度和热度指标、气温、降水、海拔、GDP 值、人口密度、土地利用这 10 个因子,任意两因子的交互作用对元谋干热河谷生态环境质量的影响力均大于单因子的影响,且都显示为双因子增强。其中 2000 年影响 RSEI 最大的是土地利用∩绿度指标的交互作用 $q=0.712$,是所有因子中对元谋干热河谷生态环境质量空间分异性有最强的解释力。而在 2010 年 NDVI∩NDBSI 交互作用 q 值在 0.7 以上,其影响最大。2020 年 NDVI∩LST 的交互作用对元谋干热河谷的 RSEI 影响最强。从 2000—2020 年所有因子交互探测结果显示:绿度指标、土地利用和干度指标这 3 个因子对元谋干热河谷生态环境变化的影响最为显著。这 20 a 期间,绿度因素的影响作用逐渐增大,而植被覆盖度的提高对研究区生态环境恢复和治理中起着关键性的作用。而干度和土地利用的变化主要受土壤和城市扩张影响,导致地表裸露、干化严重。因此在恢复和保护当地生态环境,要注重合理开发利用土地资源和保护植被。

4 结论

(1) 利用 RSEI 模型并采用主成分分析方法来研究元谋干热河谷的生态环境质量变化情况。从时间上看,2000—2020 年元谋干热河谷的 RSEI 均值从 0.628 增至 0.684,增长率为 8.92%,生态环境正在逐步改善;而空间上看,元谋干热河谷生态环境较好区域集中分布在元谋干热河谷高海拔植被覆盖度较高的地区;生态较差等级分布在金沙江和龙川江流域河谷两侧低海拔区域内,整体呈现出“中部低、四周高”分布特征。

(2) 从生态环境空间变化分析中可知,元谋干热河谷生态环境质量改善集中在中部与西部区域,而东部乡镇变化不大;从时间变化上看,2000 年元谋干热河谷生态环境质量等级差的面积占研究区面积的 18.63%,到 2010 年增长到 31.48%。而随着生态环境改善,2020 年生态等级较差的面积降至 25.49%。这说明元谋干热河谷实施生态修复工程取得一定成效。

(3) 分析影响元谋干热河谷生态环境驱动力的结果显示:绿度指标和土地利用对生态环境质量的影响较为显著;2000—2020 年各指标 q 的平均值排序大小为:NDVI>土地利用>NDBSI>LST>WET>气温>高程>降水>经济密度>人口密度。再对比 3 期影响生态环境质量的因子发现, q 值存在不同程度的变化,侧面说明在这 20 a 期间所选 10 个因子对元谋干热河谷生态环境质量的时空分布影响存在波动性。而两两因子交互后的 q 值均大于单因子的影响。其中绿度指标与其他因子交互后 q 值均大于 0.5,而土地利用与其他因子相交的 q 值也显著大于其他交互结果。这进一步说明绿度和土地利用对元谋干热河谷的生态环境变化起着关键性作用。任意两因子间交互的影响力都要大于单因子的影响,说明元谋干热河谷的生态环境现状是自然和人为因素共同作用的结果,而气温、降水、人口及 GDP 等因素是其具体的表现。

因此,在发展元谋干热河谷社会经济的同时,应合理配置和利用土地资源,继续落实生态保护和修复工作,促进生态环境和谐发展。由于特定区域的绿度、湿度、干度和热量等指标的变化存在一定随机性,为了使本文的生态环境评价结果更加科学合理,在后续的研究中更详细结合元谋干热河谷的区域特征,建立更加完善的生态环境评价体系,为生态治理提供更加准确的方向。

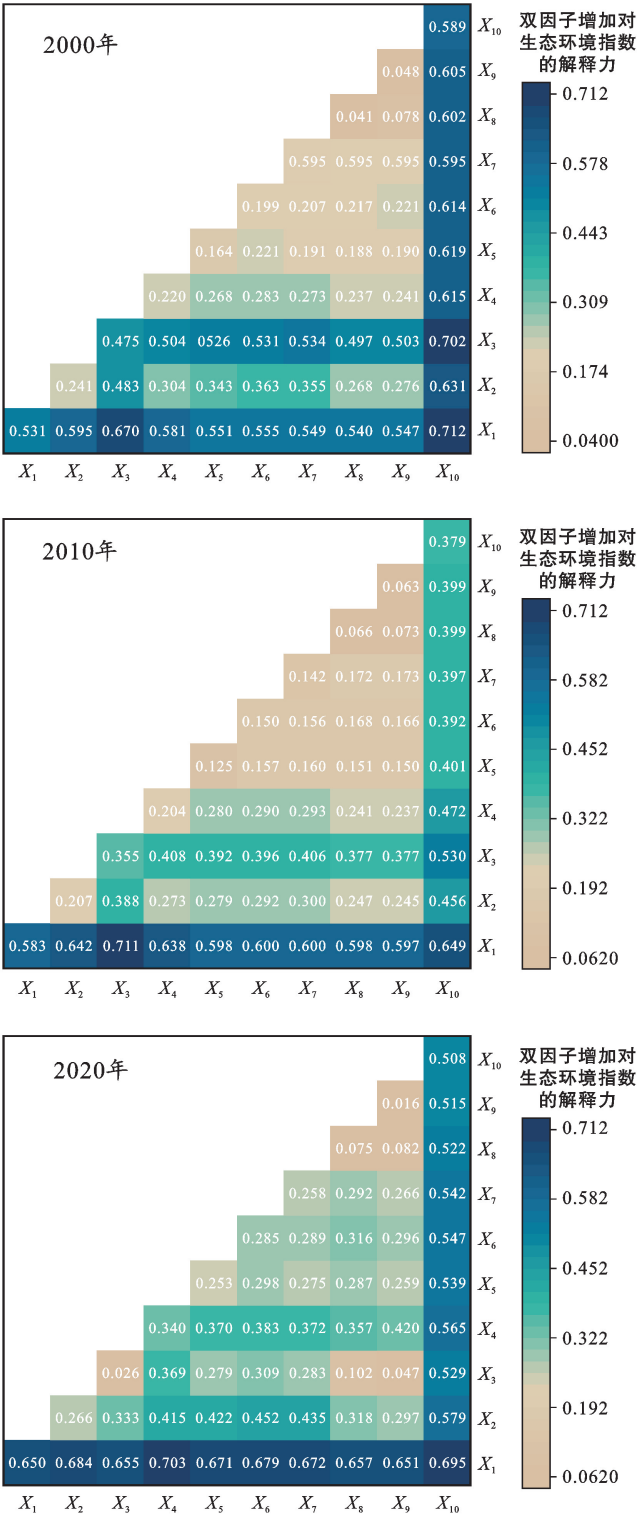


图 5 研究区 2000—2020 年各因子交互探测器结果

[参 考 文 献]

[1] 李勇.少数民族地区特色县域经济发展探析:云南元谋县域经济发展战略研究[D].北京:中央民族大学,2004.

[2] 喻锋,张丽君.遵循生态文明理念,加强国土空间规划[J].国土资源情报,2013(2):2-4.

[3] 朱贞榕.基于遥感生态指数(RSEI)的南昌市生态环境质量评价[D].江西 南昌:东华理工大学,2017.

[4] Buffum H W, Benyi S J, Paul J F. Environmental Monitoring and Assessment Program: Current Status of Virginian Province (US) Estuaries [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1999, 56(1): 1-25.

[5] 梁齐云,苏涛,张灿,等.基于改进遥感生态指数的黄山市生态质量评价研究[J].地球物理学进展,2022,37(04): 1448-1456.

[6] 赵管乐,彭培好.基 RSEI 的典例于热河谷区:四川省攀枝花市生态环境变化分析[J].山地学报,2021,39(6): 842-854.

[7] 周萌,刘友存,孟丽红,等.基于遥感生态指数的东江源区 2000—2019 年生态环境质量评价[J].水土保持通报, 2021,41(4):231-240.

[8] Wang Jie, Ma Jiali, Xie Feifei, et al. Improvement of remote sensing ecological index in arid regions: Taking Ulan Buh Desert as an example [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(11):3795-3804.

[9] 董悦,付梅臣,陈乃鸽,等.近 30 年唐山市生态服务价值空间分异及地理探测研究[J/OL].农业资源与环境学报:1-16[2022-09-28].DOI:10.1 3254/j.jare.2021.0617.

[10] 潘志贤,彭辉,方海东,等.元谋干热河谷旱坡地发展草地农业的前景[J].山地农业生物学报,2012,31(1): 53-56.

[11] 排日海·合力力,咎梅,阿里木江·卡斯木.乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析[J].干旱区研究, 2021,38(5):1484-1496.

[12] 刘伦辉.横断山区干旱河谷植被类型[J].山地学报, 1989,7(3):175-182.

[13] 钟祥浩.干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径 [J].长江流域资源与环境,2000,9(3):376-383.

[14] 陈越豪,何光熊,史亮涛,等.干热河谷典型区元谋县土地利用变化与动态预测[J].科学技术与工程,2021,21 (20):8366-8375.

[15] 刘芳,闫慧敏,刘纪远,等.21 世纪初中国土地利用强度的空间分布格局[J].地理学报,2016,71(7):1130-1143.

[16] Rouse Jr J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation [R]. NaSa/Gsfct Type Final Report, 1973.

[17] 王建,赵牡丹,李健波,等.基 MODIS 时序数据的秦巴山区生态环境质量动态监测及驱动力分析[J].山地学报,2021,39(6):830-841.

[18] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. Remote Sensing Letters, 2014,5(5):423-431.

[19] Xu Hanqiu. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. International journal of remote sensing, 2008,29(14):4269-4276.

[参 考 文 献]

[1] 朱海,胡顺军,刘翔,等.不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征[J].生态学报,2017,37(3):860-867.

[2] 赵姚阳,刘文兆,濮励杰.梯田玉米土壤水分动态研究[J].水土保持通报,2005,25(6):1-4.

[3] 刘发民,张应华,仵彦卿,等.黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2002,19(1):27-31.

[4] 格日乐,高润红,徐利岗.库布齐沙漠人工梭梭林地土壤储水量动态变化及其水分平衡分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2010,31(3):125-129.

[5] 张克海,胡广录,张钰佳,等.黑河中游荒漠绿洲过渡带梭梭根区土壤含水量分布特征及影响因素[J].西北林学院学报,2019,34(4):16-25.

[6] Schlesinger W H, Ward T J, Anderson J. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in Southern New Mexico (I): Rainfall simulation experiments [J]. Biogeochemistry, 1999,45(1):21-34.

[7] 郭泉水,王春玲,郭志华,等.我国现存梭梭荒漠植被地理分布及其斑块特征[J].林业科学,2005,41(5):2-7,219.

[8] 杨艳凤,周宏飞,徐利岗,古尔班通古特沙漠原生梭梭根区土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1711-1716.

[9] 朴起亨.几种不同材料机械沙障防风效应研究[D].北京:北京林业大学,2010.

[10] 苏永德,马瑞,马彦军.生态垫和覆袋沙障对梭梭林冠下土壤含水量的影响[J].中国农学通报,2016,32(18):130-135.

[11] 安富博,张锦春,纪永福.民勤防沙治沙新技术和新材料试验研究[J].湖北农业科学,2013,52(3):548-552.

[12] 刘江,吕涛,张吉树.窄条纱网沙障和保水凝水剂对梭梭造林成效的影响[J].内蒙古林业科技,2020,46(2):28-32.

[13] 郭守平.不同固沙模式下土壤水分动态变化及预测研究[D].北京:中国农业科学院,2006.

[14] 高承兵,李永兵,聂雪花,等.民勤流沙治理中机械沙障的防风固沙效益分析[J].甘肃林业科技,2010,35(3):36-43.

[15] 马述宏,李积山.不同沙障的作用及对周围治沙的影响:以民勤县青土湖重点风沙口为例[J].安徽农业科技,2011,39(17):10415-10416,10541.

[16] 刘娇.沙漠公路防护林咸水滴灌下土壤水分特征及植物响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[17] 陈宏祥,胡广录,赵晨宇.黑河中游荒漠绿洲过渡带固沙植被土壤水分的分布特征[J].西北林学院学报,2017,32(6):67-73.

[18] 陈玲.民勤近年气温和降水对梭梭物候期的影响[J].农业与技术,2017,37(18):228-229.

(上接第 154 页)

[20] 唐燕文.基于遥感生态指数的东江源流域生态环境质量评价[D].江西 赣州:江西理工大学,2021.

[21] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM⁺, and EO-1 ALI sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.

[22] 郭燕滨.典型热岛城市热环境效应的遥感动态监测与分析[D].福建 福州:福州大学,2015.

[23] 王琳,徐涵秋.快速城市化下福州市的热环境变迁[J].同济大学学报:自然科学版,2017,45(9):1336-1344.

[24] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.

[25] 钟欣呈,许泉立.基于 RSEI 模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J].水土保持研究,2021,28(4):350-357.

[26] 张娟,文广超,王恩营,等.基于遥感生态指数的焦作市生态环境动态监测与评价[J].水土保持通报,2020,40(6):107-114.

[27] 张立伟,张运,黄晨.皖江城市带近 20 a 生态环境变化遥感指数分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(5):1061-1070.

[28] 代云豪,管瑶,刘孟琴,等.1990—2020 年阿拉尔垦区生态环境质量动态监测与评价[J].水土保持通报,2022,42(2):122-128.

[29] 任晨阳.长三角地区生态环境质量与城市化时空耦合协调特征分析[D].上海:上海师范大学,2021.

[30] 郭方圆.湘潭县“三生”功能空间分异特征及影响因素分析[D].湖南 长沙:湖南师范大学,2021.

[31] 高焕霖,张廷龙,樊华烨,等.基于地理探测器的杨凌示范区生态环境质量影响因素定量分析[J].西北林学院学报,2020,35(5):185-194.

[32] 刘佳茹.2005—2018 年祁连山生态脆弱性遥感评价研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2021.

[33] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.