

白龙江流域生态环境质量动态监测与评价

曹源, 武江民

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 分析1990—2020年白龙江流域生态环境变化及驱动因素, 为流域可持续发展提供科学依据和决策支持。[方法] 逐年筛选植被生长季6—9月的Landsat TM/OLI影像数据, 计算绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)、干度(NDSI)4个生态指标, 采用主成分分析法(PCA)构建遥感生态指数(RSEI), 对白龙江流域生态环境进行评价。[结果] 1990—2020年白龙江流域RSEI均值从0.531上升至0.675, 生态环境质量总体好转; 生态环境质量改善区域主要位于舟曲—武都段的白龙江两岸、宕昌县西北及岷江东岸, 改善面积达8 393.97 km², 占总面积45.55%; 各生态指标对于生态环境质量影响程度在1990年干度>湿度>热度>绿度; 2006年干度>绿度>湿度>热度; 2020年绿度>湿度>干度>热度。[结论] 利用GEE平台实现RSEI模型扩展了在大范围尺度、长时间序列下对区域生态环境质量监测与评价, 近年来白龙江流域生态环境质量整体呈改善态势, 对于流域的保护治理工作仍需继续。

关键词: Google Earth Engine; 遥感生态指数; 生态环境; 白龙江流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)03-0105-08

中图分类号: X821, X87

文献参数: 曹源, 武江民. 白龙江流域生态环境质量动态监测与评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 105-112, 122. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.014; Cao Yuan, Wu Jiangmin. Dynamic monitoring and evaluation of ecological environmental quality in Bailong River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 105-112, 122.

Dynamic Monitoring and Evaluation of Ecological Environmental Quality in Bailong River Basin

Cao Yuan, Wu Jiangmin

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The driving factors of ecological environmental changes in the Bailong River basin from 1990 to 2020 were determined in order to provide a scientific basis and decision support for the sustainable development of the Bailong River basin. [Methods] Landsat TM/OLI image data from the vegetation growing season (June to September) were obtained from the Google Earth Engine (GEE) platform and screened year by year. From these data, the four ecological indicators of greenness (NDVI), humidity (WET), heat (LST), and dryness (NDSI) were calculated. Principal component analysis (PCA) was used to construct the remote sensing ecological index (RSEI), and the ecological environment of the Bailong River basin was evaluated. [Results] From 1990 to 2020, the mean RSEI value in the Bailong River basin increased from 0.531 to 0.675, indicating that the ecological and environmental quality had generally improved. The area of ecological and environmental quality improvement was mainly located along the two banks of the Bailong River in the Zhouqu-Wudu section, Northwest Tanchang County, and the east bank of the Minjiang River, with an area of 8 393.97 km², comprising 45.55% of the total area. The influence degree of each ecological index on the ecological environmental quality followed the order of NDSI>WET>LST>NDVI in 1990; NDSI>NDVI>WET>LST in 2006; NDVI>WET>NDSI>LST in 2020. [Conclusion] Using the GEE platform to implement the RSEI model expanded the ability to monitor and evaluate the regional ecological environmental quality

收稿日期: 2022-09-29

修回日期: 2022-11-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“房屋空置空间识别与空间分异机制研究”(42071216); 甘肃省自然科学基金资助项目“基于多源数据的甘肃省潜在植被NPP与潜在生态承载力空间模拟及其空间分布研究”(21JR7RA145)

第一作者: 曹源(1999—), 男(汉族), 江苏省连云港市人, 硕士研究生, 研究方向为资源与环境遥感。Email: 824044399@qq.com。

通信作者: 武江民(1976—), 男(汉族), 甘肃省白银市人, 硕士, 副教授, 主要从事地图学与GIS应用。Email: 281707154@qq.com。

over a large area and for a long time period. In recent years, the ecological environmental quality of the Bailong River basin has generally improved, but protection and management of the basin will need to continue.

Keywords: Google Earth Engine; remote sensing ecological index; ecological environment; Bailong River basin

白龙江流域地处中国第一二级阶梯交界处,海拔落差大,地势自西北向东南倾伏,地形复杂,降水具有历时短、强度大的特点,是中国滑坡、泥石流等自然灾害四大高发区之一,为典型的生态环境脆弱区。2010年舟曲县发生重大泥石流灾害,导致多人死亡和失踪;2013年武都区公路总段西北侧坡体发生崩塌,崩塌方量约 200 m³;2016年附近又发生滑坡,滑坡方量约 400 m³。频发的自然灾害加剧了区域生态脆弱性,严重威胁着区域的可持续发展^[1]。

国家环境保护总局于 2006 年发布了《生态环境状况评价技术规范(试行)》^[2],生态环境状况指数(ecological index, EI)首次被提出,该模型现已广泛用于评价区域生态环境质量^[3],但普遍存在模型构建受到人为因素的影响、指标提取困难、数据空间精度较低和数据更新慢等问题,对生态环境的监测和评价的精度有一定影响^[4-5]。

近年来,遥感技术已经成为区域监测的重要手段,其具有覆盖面积大、数据容易获取、光谱信息丰富等诸多优点^[6],在环境监测方面多应用于土地利用/覆被变化^[7-8]、植被变化^[9-10]、热岛监测等^[11-12]研究。但这些研究通过提取单一指标来评价区域生态环境状况,对生态环境中的多因素综合作用难以解释。在评价区域生态环境状况上,徐涵秋^[13-14]提出的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),为生态环境质量研究提供了新的探索方向。该模型综合绿度、湿度、热度、干度 4 个指标,指标获取较为容易,各指标权重通过主成分分析法确定,消除了人为主观因素的影响,可实现快速、全面、客观的表征。农兰萍等^[15]、魏雨涵等^[16]分别将 RSEI 模型应用于昆明市和漓江流域的动态监测与评价,这些研究都是小范围内、短时间序列进行的,但如果在大范围尺度、长时间序列下应用 RSEI 模型,将面临着一些问题,譬如:数据量庞大及由此带来的数据预处理、指数计算太繁杂的问题。

为解决以上问题,本文将 RSEI 模型部署在 Google Earth Engine(GEE)平台,GEE 平台是全球尺度的遥感云计算平台,依托于 Google 云服务器的强大计算能力,解决了在大范围尺度下一些非常重要的社会、环境问题^[17-18]。平台上集成了海量遥感影像数据,用户可以在线进行编程,实时预览、输出结果。相较于传统的需下载影像后再进行数据预处理等,工作效率大大提高。因此本文基于 GEE 平台实现 RSEI

模型,以白龙江流域作为研究区域,利用 Landsat TM/OLI 影像数据,计算出 1990—2020 年 RSEI 指数,对白龙江流域生态环境质量进行动态监测与评价,在理论和技术层面上为流域实现可持续发展与改善生态环境质量具有重要的现实意义。

1 研究区概况

甘肃省白龙江流域(东经 102°56′—105°26′,北纬 32°36′—34°23′)位于青藏高原和四川盆地过渡区,属长江支流嘉陵江的支流,发源于川甘交界处的郎木寺,主要流经甘南州的迭部县和舟曲县,陇南市的宕昌县、武都区和文县等,全长约 475 km,流域面积达 1.84×10⁴ km²,呈西北—东南向的狭长梭形。全域海拔 581~4 521 m,以河谷、山地及黄土地貌为主。属山地气候,年均气温 7℃,年均降水量 400~850 mm,温度和降水由东南向西北逐渐减少,汛期多降雨且多为暴雨^[19],是滑坡、泥石流等地质灾害发生最频繁的地区。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

遥感数据来源于在 Google Earth Engine 遥感云平台(<https://earthengine.google.com/>)上集成的 Landsat 卫星影像数据,空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d,影像为均已经完成辐射校正和大气校正的地表反射率产品。在 GEE 平台上使用 JavaScript 语言进行在线编程,逐年筛选 1990—2020 年植被生长最为茂盛的 6—9 月,少云的 Landsat TM/OLI 影像,共计 107 景。因研究区域较大且数据时间分辨率较低,部分年份存在云量过多导致的影像质量较差无法使用的情况,故使用目标年份前后一年同时间段影像进行填补。

2.2 研究方法

2.2.1 数据处理 在 GEE 平台上,对输入的满足空间和时间范围的影像数据集,使用官方 Landsat 云掩膜算法去除有云像元。为使得地面的湿度状况能够以湿度指标进行真实表征,防止主成分分析的结果被大片水域所影响,因此使用改进归一化插值水体指数(MNDWI)对水体信息进行掩膜处理^[20]。

2.2.2 指标计算

(1) 绿度指标。区域生态质量的优劣,较大程度由植被的好坏反映。绿度指标采用归一化植被指数

(NDVI)^[21],它能够反映植被密度分布、植物生长及植被覆盖度状况。

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

式中: ρ_{NIR} , ρ_R 分别为近红外、红波段反射率。

(2) 湿度指标。湿度指标使用的缨帽变换中的湿度分量进行替代,它能够对土壤湿度及植被状况予以表征,因而被广泛应用到生态环境质量评价中^[22]。对于不同的传感器,计算中所涉及的参数会有所差异^[23],Landsat TM/OLI 影像数据的公式分别为:

$$WET_{TM} = 0.031 5 \rho_B + 0.202 1 \rho_G + 0.310 2 \rho_R + 0.159 4 \rho_{NIR} - 0.680 6 \rho_{SWIR1} - 0.610 9 \rho_{SWIR2} \quad (2)$$

$$WET_{OLI} = 0.151 1 \rho_B + 0.197 2 \rho_G + 0.328 3 \rho_R + 0.340 7 \rho_{NIR} - 0.711 7 \rho_{SWIR1} - 0.455 9 \rho_{SWIR2} \quad (3)$$

式中: ρ_B , ρ_G , ρ_R , ρ_{NIR} , ρ_{SWIR1} , ρ_{SWIR2} 分别为蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段反射率。

$$IBI = \frac{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_R) + \rho_G/(\rho_G + \rho_{SWIR1})]\}}{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_R) + \rho_G/(\rho_G + \rho_{SWIR1})]\}} \quad (7)$$

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

$$NDSI = (IBI + SI) / 2 \quad (9)$$

2.2.3 指数构建 计算出绿度、湿度、热度、干度 4 个指标后,因以上指标之间不具有统一的量纲,故在对指标开展主成分分析前,需要先进行正向归一化(MMS)处理,实现向[0,1]区间的映射,表达式为:

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

式中: I 为某指标具体数值; I_{max} 为某指标最大值; I_{min} 为某指标最小值。

对各指标进行正向归一化处理,再合并各指标图层,然后利用主成分分析脚本来计算未归一化的初始 RSEI₀,其表达式为:

$$RSEI_0 = PC_1 [f(NDVI, WET, LST, NDSI)] \quad (11)$$

式中: PC_1 为第一主成分; f 为正向归一化处理过程。

对初始 RSEI₀ 进行正向归一化处理得到 RSEI 值,RSEI 值的范围在 0~1 之间,值越小表明生态环境越差,值越大表明生态环境质量越好。为了直观反映研究区生态环境质量变化,将 RSEI 值以 0.2 相等间隔,划分为差、较差、一般、良、优 5 个生态环境质量等级。

本文使用地理探测器对各指标进行因子探测研究,以期寻得引起生态环境质量变化的因素^[29]。具体操作步骤包括:选取 1990,2006,2020 年三期数据,

(3) 热度指标。通过对影像热红外波段进行计算的方式实现对地表温度的遥感反演。在地表温度反演过程中,运用 Landsat 用户手册模型和修订参数实现^[24-25],其表达式为:

$$LST = T_b / \{1 + [(\lambda T_b) / \rho] \epsilon\} - 273.15 \quad (4)$$

$$T_b = K_2 / (K_1 / L_6 + 1) \quad (5)$$

$$L_6 = gain \times DN + bias \quad (6)$$

式中: ϵ 为发射率,通过设置 NDVI 阈值获取; λ 为影像热红外波段中心波长,Landsat 5/8 数据分别取 11.5 μm ,10.9 μm , $\rho = 1.438 \times 10^{-2}$ mk, T_b 为亮度式;式中: K_1 , K_2 为影像源数据参数; L_6 为 TM/TIRS 传感器热红外波段辐射值;式中:gain,bias 分别为波段的增益值和偏置值;DN 为数据像元的灰度值。

干度指标。地面土壤干化是大多由于建筑用地增加及缺少植被的裸土所导致的,会对生态环境产生一定的影响。故采用建筑指数 (IBI)^[26] 和裸土指数 (SI)^[27] 以两者均值来计算得出代表土壤干化程度的干度指标 (NDSI)^[28],其表达式分别为:

以 RSEI 为因变量 Y,以 NDVI,WET,LST,NDSI 为自变量 X,通过自然断裂法重分类为 5 类,在流域范围内构建 1 km \times 1 km 的渔网均匀生成 18 476 个点,将 X,Y 与采样点进行匹配进行因子探测分析。结果中各指标可能对于 RSEI 具有不同的影响力和解释力。其中,影响力值 q 表示指标对 RSEI 的影响力大小,越大则该指标对 RSEI 的影响力越大;因子解释力值 p 则表示指标对 RSEI 的解释力大小,越小则该指标对 RSEI 的解释力越高。

3 结果与分析

3.1 遥感生态指数主成分分析

选取白龙江流域 1990,2000,2010 及 2020 年 4 期遥感生态指数结果进行主成分分析(表 1)。由表 1 可知,对于 4 个指标的 PC_1 特征分量,NDVI,WET 的特征分量各期均为正值,说明其在改善流域生态环境质量过程中起到积极作用,LST,NDSI 的特征分量各期均为负值,说明其对流域的生态环境质量起到负面作用。各期 PC_1 特征值分别为 0.247,0.273,0.269,0.125,均处于一个较高水平,表明在 PC_1 中,已经对 NDVI,WET,LST,NDSI 这 4 个指标的特征信息进行整合,能够集中指标的大部分信息;各期的 PC_1 特征值贡献率分别为 76.02%,81.02%,82.33%,

75.85%，对于各期的 RSEI 的特征值贡献率均超过 75%，进而说明以 PC_1 的指标信息反映白龙江流域的生态环境质量是合理的。

表 1 各指标 PC_1 特征分量分析结果

Table 1 PC_1 characteristic component analysis results of each indicator

年份	指标	PC_1	特征值	贡献率/%
1990	NDVI	0.480	0.247	76.02
	WET	0.496		
	LST	-0.471		
	NDSI	-0.550		
2000	NDVI	0.525	0.273	81.02
	WET	0.482		
	LST	-0.430		
	NDSI	-0.555		
2010	NDVI	0.524	0.269	82.33
	WET	0.473		
	LST	-0.444		
	NDSI	-0.552		
2020	NDVI	0.516	0.125	75.85
	WET	0.527		
	LST	-0.335		
	NDSI	-0.587		

3.2 生态环境质量变化分析

3.2.1 均值变化 利用 GEE 可统计出 1990—2020 年逐年遥感生态指数均值变化情况(图 1)，由图 1 可知，1990—2020 年白龙江流域 RSEI 均值上升了 0.144，增长速率为 $4.80 \times 10^{-3}/a$ ，流域的生态环境总体上有所改善。1990—2020 年白龙江流域的 RSEI 均值为 0.597，最小值出现在 1990 年，为 0.531，最大值出现在 2020 年，为 0.675。1990—2020 年白龙江流域 RSEI 总体呈现出“上升—下降—上升”的趋势($p < 0.01$)，其中 1990—1996 年 RSEI 表现为增长

($p < 0.01$)，原因可能是国家持续推进流域防护林体系建设等生态保护工程，在一定程度上增加了流域的植被覆盖率，提高了流域生态环境质量。1996—2006 年 RSEI 表现为下降($p < 0.05$)，原因可能是多次出现干旱气候，降水偏少导致流域生态环境退化。2006—2020 年 RSEI 呈快速增长趋势($p < 0.01$)，主要是贯彻国家退耕还林政策，以及人工造林、天然林的不断恢复，使得植被覆盖率增加，从而改善了生态环境质量。本文根据不同阶段地 RSEI 增长速率的差异，为了更加明显的表征 RSEI 的变化情况，划分 1990—2006 年的为缓慢增长期，其增长速率为 $1.50 \times 10^{-3}/a$ ，2006—2020 年为快速增长期，其增长速率为 $7.90 \times 10^{-3}/a$ 。

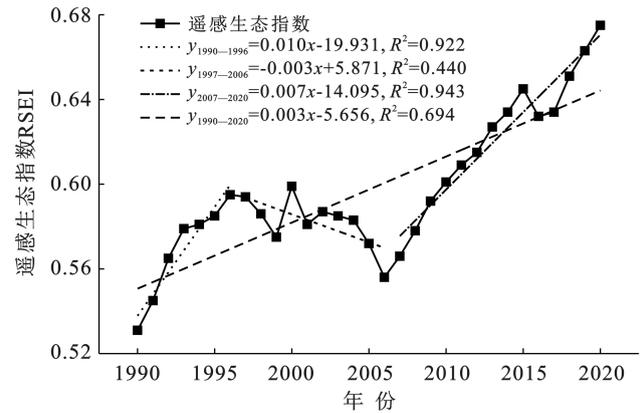


图 1 1990—2020 年白龙江流域 RSEI 均值逐年变化

Fig.1 Annual changes in mean RSEI of Bailong River Basin from 1990 to 2020

3.2.2 空间变化 依据本文对 RSEI 值所划分的 5 个等级，使用 ArcGIS 10.8 软件绘制得到 1990—2020 年白龙江流域逐年生态环境等级分布特征(图 2)，选择 1990、2000、2010 及 2020 年进行空间面积统计分析(表 2)。

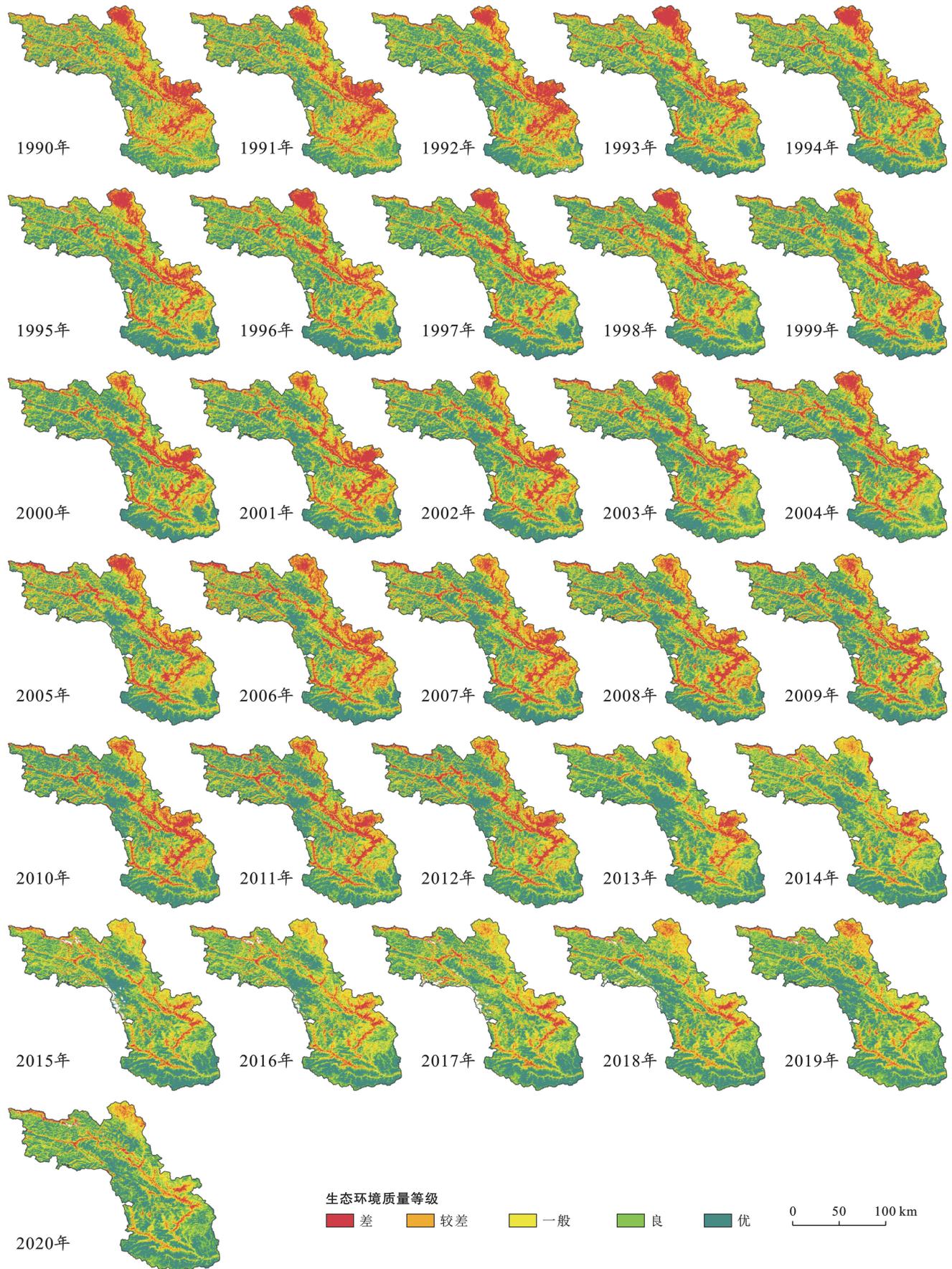
表 2 白龙江流域各生态环境质量等级面积

Table 2 Area of various ecological environment quality levels in Bailong River basin

RSEI 等级	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%						
差	3 405.09	19.00	2 828.06	15.75	2 812.05	15.66	1 044.28	5.84
较差	2 784.68	15.54	2 222.68	12.38	2 136.37	11.90	1 313.82	7.34
一般	3 060.71	17.08	2 808.45	15.64	2 605.78	14.51	2 554.97	14.28
良	3 553.53	19.83	3 614.46	20.13	3 567.69	19.87	5 103.17	28.52
优	5 113.76	28.54	6 482.96	36.10	6 832.39	38.05	7 877.53	44.02

在空间上，生态环境等级主要为优、良，各期两者面积比例均高于 48%。2020 年等级为优的面积所占比例最多，为 44.02%；1990 年等级为优面积所占比例最少，为 28.54%；其变化趋势与整体变化趋势相一致，表现为“缓慢改善—快速改善”的趋势。

2020 年等级为良的面积所占比例最多，为 28.52%；1990 年等级为良的面积所占比例最少，为 19.83%。生态环境质量等级为差的面积各期比例均低于 20%，在 1990 年达到最大值，为 19%，在 2020 年达到最小值，为 5.84%。



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)1822 号标准地图制作。下同。

图 2 1990—2020 年白龙江流域 RSEI 等级分布

Fig.2 Distribution of RSEI in Bailong River basin from 1990 to 2020

由图 2 可知,在空间上,白龙江流域生态质量为优的地区主要分布在迭部—舟曲段白龙江流域、文县白水江流域及武都东南部山区,生态质量为差的地区主要集中在舟曲—武都段的白龙江两岸、宕昌县西北及岷江东岸。总的来说,1990—2020 年白龙江流域的生态环境不断改善,尤其宕昌县西北部生态环境得到了极大的改善,但地区局部的差异性依旧显著。

3.2.3 时空变化 根据白龙江流域 RSEI 增长速率差异,通过上文划分为 1990—2006 年及 2006—2020 年两个阶段进行生态环境质量等级转移研究,分析了 1990—2020 年白龙江流域的生态环境质量时空差异,得到生态环境等级变化划分及统计结果(表 3)并使用 Origin 2021 绘制等级转移矩阵桑基图(图 3)。由表 3 根据不同生态环境质量等级变化级差,划分 5 种生态变化类型,分别为明显改善、轻度改善、不变、轻度恶化、明显恶化并进行变化统计。1990—2006 年白龙江流域生态环境质量不变的面积为 9 804 km²,占流域总面积的 53.03%;改善面积为 4 699.13 km²,占流域总面积的 25.42%;恶化面积为 3 983.93 km²,占流域总面积的 21.55%;其中轻度改善面积为 4 336.76 km²,轻度恶化面积为 3 640.09 km²。改善的面积比恶化的面积仅多出 696.67 km²,可见在这个时期白龙江流域生态环境质量正处于一个缓慢变好的阶段。2006—2020 年白龙江流域生态环境质量不变的面积为 7 914.09 km²,占流域总面积的 42.87%;改善面积为 7 786.42 km²,占流域总面积的 42.87%;恶化面积为 2 759.67 km²,占流域总面积的 14.95%;其中轻度改善面积为 6 479.62 km²,轻度恶化面积为 2 726.58 km²。改善的面积比恶化的面积多出 5 026.75 km²,说明在这个时期白龙江流域生态环境质量快速变好,主要原因是良转优面积为 1 971.39 km²,

较差转良面积为 1 173.75 km² 及较差转一般面积为 1 035.08 km² 贡献最大,占总改善面积的 53.69%。整体来说,1990—2020 年白龙江流域的生态环境质量改善面积为 8 393.97 km²,占 45.55%;生态环境质量恶化面积为 2 768.13 km²,占 15.02%;生态环境质量不变面积为 7 265.49 km²,占 39.43%。

从生态环境质量变化空间分布来看(图 4),1990—2006 年白龙江流域生态环境质量明显恶化主要在迭部地区,轻度恶化区域主要分布白龙江的上游地区。2006—2020 年白龙江流域南部的白水江流域存在生态环境质量轻度恶化,迭部地区及流域东部的生态环境质量轻度改善。1990—2020 年白龙江生态环境质量以变好为主,明显改善的区域主要分布在舟曲—武都段的白龙江两岸、宕昌县西北及岷江东岸。

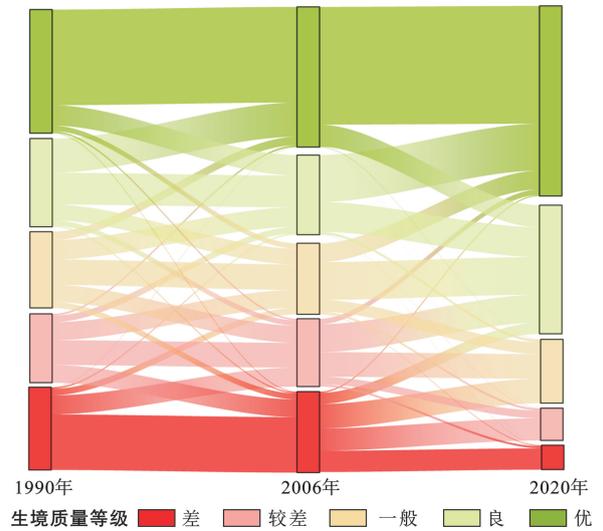


图 3 白龙江流域生态环境质量转移桑基图

Fig.3 Sangji map of transfer matrix of ecological environment quality in Bailong River basin

表 3 白龙江流域生态环境质量等级变化划分及面积统计

Table 3 Classification of grade changes and area statistics of ecological environment quality in the Bailong River basin

变化级差	类别	1990—2006 年		2006—2020 年		1990—2020 年	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
+4	明显改善						
+3		362.37	1.96	1 306.80	7.08	1 713.91	9.30
+2	轻度改善						
+1		4 336.76	23.46	6 479.62	35.10	6 680.06	36.25
0	不变	9 804	53.03	7 914.09	42.87	7 265.49	39.43
-1	轻度恶化						
-2		3 640.09	19.69	2 726.58	14.77	2 680.92	14.55
-3	明显恶化						
-4		343.84	1.86	33.09	0.18	87.21	0.47

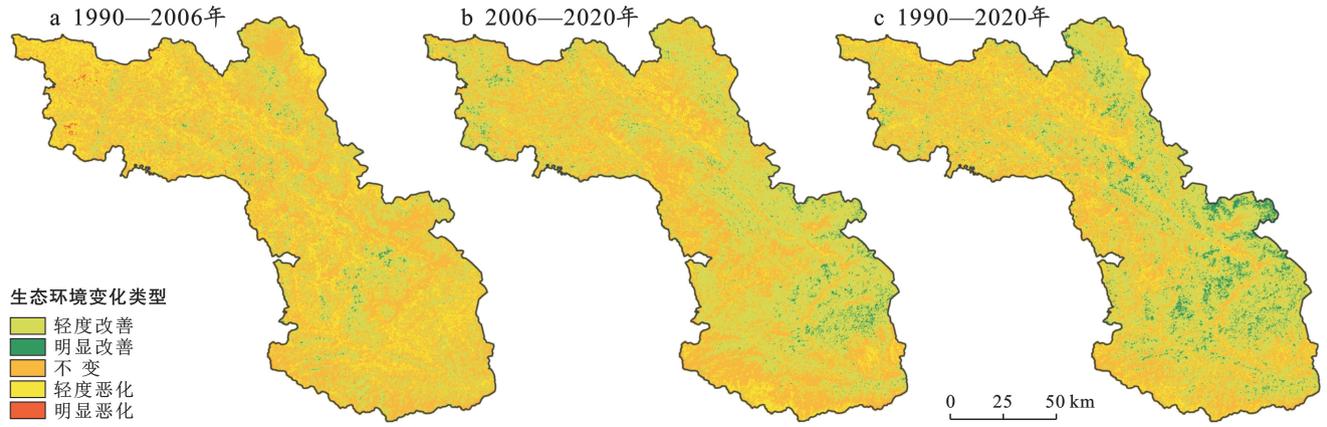


图 4 白龙江流域生态环境质量转化分布

Fig.4 Distribution of ecological environment quality changes in Bailong River basin

3.3 驱动因素分析

为了深入研究影响白龙江流域生态环境质量变化的自然因素,引入地理探测器对 4 个指标进行分析(表 4)。各年份的 p 值均为 0,说明选取的 4 个指标可以充分解释白龙江流域的生态环境质量。 q 值各年份均有不同程度的变化,1990 年与 2006 年干度是影响 RSEI 最大的因素,而 2020 年则是湿度;2006 年与 1990 年相比,各指标的 q 值差距不大,干度的 q 值轻微下降,绿度的 q 值有所增加,表明 1990—2006 年白龙江流域生态环境质量缓慢改善的原因可能是受

到植被覆盖率提高的影响;2020 年与 2006 年相比, q 值增加的是绿度和湿度, q 值减少的是热度和干度,说明植被覆盖率增大和降水的增加会促进白龙江流域生态环境质量改善。1990—2020 年白龙江流域年平均气温和累计降水量均呈现上升趋势(图 5)。因此,在水、热组合的综合作用下,使得白龙江流域植被生长状态受到有利影响,从而提高植被覆盖率,进而改善流域的生态环境质量。但对流域生态环境的改变是否存在人为因素的影响无法判断,需要在后续的研究中结合其他相关影响因子进行分析。

表 4 白龙江流域 4 个影响因子探测结果

Table 4 Detection results of four impact factors in Bailong River basin

项目	1990 年			2006 年			2020 年		
	q	p	q 排序	q	p	q 排序	q	p	q 排序
NDVI	0.669	0	4	0.791	0	2	0.852	0	1
WET	0.746	0	2	0.747	0	3	0.843	0	2
LST	0.682	0	3	0.576	0	4	0.395	0	4
NDSI	0.873	0	1	0.868	0	1	0.619	0	3

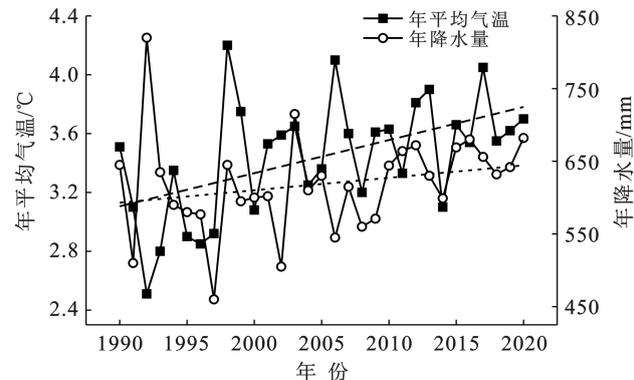


图 5 白龙江流域年均降水量和气温变化

Fig.5 Annual average precipitation and temperature changes in Bailong River basin

4 讨论与结论

本文基于 GEE 遥感云平台,计算出 NDVI, WET, LST 和 NDSI 这 4 个生态指标进而利用主成分分析构建出白龙江流域的遥感生态指数 RSEI,对流域生态环境质量进行了长时间序列监测,并引入地理探测器对可能引起生态环境变化的自然因素进行分析。但 RSEI 难以充分表征区域中人为因素对于生态环境质量影响,在未来研究中可以考虑增加人类活动、社会经济等评价指标。本研究结果表明,白龙江流域生态环境整体处于改善的态势,且具有局部的差异性,这与谢余初等^[30]和齐姗姗等^[31]使用其他模型对该流域研究评价结论相近,研究结果对流域生态

环境的治理和改善有的一定实践和应用价值。

(1) NDVI, WET 在改善白龙江流域生态环境质量过程中起到积极作用, LST, NDSI 起到消极作用, 各指标在 PC_1 中的年均特征值贡献率均高于 75%, 大部分指标信息已集中在 PC_1 中, 表明在白龙江流域依据 PC_1 的信息来构建 RSEI 是可行的。

(2) 1990—2020 年白龙江流域 RSEI 总体呈增长的趋势, RSEI 均值上升了 0.144, 其增长速率为 $4.80 \times 10^{-3}/a$, 多年平均 RSEI 为 0.597。1990—2006 年为缓慢增长期, 其增长速率为 $1.50 \times 10^{-3}/a$, 2006—2020 年为快速增长期, 其增长速率为 $7.90 \times 10^{-3}/a$, 生态环境质量呈现“上升—下降—上升”的趋势。

(3) 白龙江流域生态环境质量以优和良为主, 各期优、良面积之和占比均超过 48%, 空间上, 生态环境质量表现为南部优于北部, 西部优于东部。

(4) 1990—2020 年白龙江流域的生态环境质量改善面积为 $8\,393.97 \text{ km}^2$, 占 45.55%, 生态环境质量恶化面积为 $2\,768.13 \text{ km}^2$, 占 15.02%, 舟曲—武都段的白龙江两岸、宕昌县西北及岷江东岸的生态环境质量明显改善。

(5) 从成因分析来看, 选取的 4 个生态指标对白龙江流域的生态环境质量存在一定的影响。各生态指标对于生态环境质量影响程度在 1990 年, 干度 > 湿度 > 热度 > 绿度; 在 2006 年, 干度 > 绿度 > 湿度 > 热度; 在 2020 年, 绿度 > 湿度 > 干度 > 热度。

[参 考 文 献]

- [1] 王高峰, 杨强, 陈宗良, 等. 白龙江流域甘家沟泥石流风险评估研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(4): 66-73.
- [2] 国家环保局. 生态环境状况评价技术规范(试行): HJ/T192-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [3] 岳昂, 张赞. 基于 EI 值的生态状况变化分析研究[J]. 绿色科技, 2018(14): 182.
- [4] Leveau L M, Isla F I. Predicting bird species presence in urban areas with NDVI: An assessment within and between cities [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 63: 127199.
- [5] Guo Beibei, Fang Yelin, Jin Xiaobin, et al. Monitoring the effects of land consolidation on the ecological environmental quality based on remote sensing: A case study of Chaohu Lake basin, China [J]. Land Use Policy, 2020, 95: 104569.
- [6] 高吉喜, 赵少华, 侯鹏. 中国生态环境遥感四十年[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 705-719.
- [7] 王甜, 闫金凤, 乔海燕. 马来西亚吉隆坡市土地利用变化特征分析与预测[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 268-275.
- [8] 刘硕, 李小光, 宋建伟, 等. 长山沟露天矿集中区土地利用时空变化的遥感监测与分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 121-127.
- [9] 陈桃, 包安明, 何大明. 基于 MODIS NDVI 的攀枝花市植被覆盖变化及其驱动力[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1847-1857.
- [10] 熊巧利, 何云玲, 李同艳, 等. 西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 259-266.
- [11] Sagris V, Sepp M. Landsat-8 TIRS data for assessing urban heat island effect and its impact on human health [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(12): 2385-2389.
- [12] Singh P, Kikon N, Verma P. Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow City, Central India. A remote sensing based estimate [J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 32: 100-114.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 魏雨涵, 钱建平, 范伟伟, 等. 基于 RSEI 的漓江流域生态环境质量动态监测[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(1): 122-131.
- [17] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [18] 张华, 宋金岳, 李明, 等. 基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1883-1894.
- [19] 周侃. 白龙江[J]. 甘肃水利水电技术, 2014, 50(4): 60-65.
- [20] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [21] Goward S N, Xue Yongkang, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 225-242.
- [22] 梁治华. 基于时空融合算法的缨帽变换分量时序数据集构建方法研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2015.
- [23] Crist E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3): 301-306.
- [24] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(5): 613-621.

- ring and evaluation of the effects of grain for green project in the upper and middle reaches of China's Yangtze River [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8):2463-2469.
- [13] 刘祖英, 王兵, 赵雨森, 等. 长江中上游地区退耕还林成效监测与评价[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8):2463-2469.
- [14] 汪芳甜, 安萍莉, 蔡璐佳, 等. 基于 RS 与 GIS 的内蒙古武川县退耕还林生态成效监测[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11):269-277.
- [15] 孙智辉, 雷延鹏, 卓静, 等. 延安北部丘陵沟壑区退耕还林(草)成效的遥感监测[J]. *生态学报*, 2010, 30(23):6555-6562.
- [16] U. S. Geological Survey. *Landsat Surface Reflectance Climate Data Records* [R] Reston, VA, USA: U. S. Geological Survey, 2014.
- [17] U. S. Geological Survey. *Landsat Surface Reflectance Climate Data Records* [R] Reston, VA, USA: U. S. Geological Survey, 2019.
- [18] 辽宁省统计局. *辽宁统计年鉴* [M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2017.
- [19] Malthouse E C, Mulhern F J. Book review: *Handbook of data mining and knowledge discovery* [J]. *Journal of Marketing Research*, 2003, 40(3):372-374.
- [20] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5):589-595.
- [21] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, SMC-3(6):610-621.
- [22] Deng Chengbin, Wu Changshan. BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127:247-259.
- [23] Rouse J W, Haas R H, Deering D W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation [R]. *Nasa/gsfct Type Final Report*, 1973.
- [24] 侯西勇, 邸向红, 侯婉, 等. 中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(10):1478-1488.
- [25] 盛辉, 万红, 崔建勇, 等. 基于 TM 影像的城市热岛效应监测与预测分析[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1):8-14.
- [26] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1980—2018 年祁连山南坡土地利用变化及其驱动力[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8):2699-2709.
- [27] 马彩虹, 任志远, 李小燕. 黄土台塬区土地利用转移流及空间集聚特征分析[J]. *地理学报*, 2013, 68(2):257-267.
- [28] 于泽民, 郭建英. 我国的退耕还林研究进展[J]. *内蒙古环境科学*, 2009, 21(S1):119-123.
- [29] 王丹, 夏建新, 郭砾, 等. 基于 RS 和 GIS 的黔东南地区退耕还林工程成效监测[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(S1):30-40.
- [30] 郑雪, 姚顺波, 鲁亚楠. 退耕还林工程对粮食生产的影响: 以山西省为例[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2):239-246, 254.
- [31] 杨亮彦, 黎雅楠, 范鸿建. 榆林市土地利用/覆被时空格局变化及退耕还林工程对其的效应[J/OL]. *自然资源情报*, 2022, (9):37-44.

(上接第 112 页)

- [25] 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.
- [26] Xu H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14):4269-4276.
- [27] Rikimaru A, Roy P, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. *Tropical Ecology*, 2002, 43:39-47.
- [28] Hu Xisheng, Xu Hanqiu. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89:11-21.
- [29] 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.
- [30] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. *地理科学*, 2015, 35(6):790-797.
- [31] 齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 等. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1):224-228.