

基于遥感生态指数的陕西省东庄水库流域生态环境变化监测与评价

权文婷^{1,2}, 张树誉³, 刘艳⁴, 王卫东²

(1.西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2.陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 陕西 西安 710016; 3.陕西省气象局, 陕西 西安 710014; 4.咸阳市气象局, 陕西 咸阳 712000)

摘要: [目的] 对陕西省东庄水库流域生态环境开展实时准确的监测, 为流域开发与保护、城镇经济发展提供数据和理论支撑。[方法] 选取 2000, 2010, 2020 年 Landsat 遥感影像, 基于谷歌地球引擎(GEE)平台构建湿度、绿度、干度、热度 4 个指标, 通过主成分分析法计算遥感生态指数, 对东庄水库流域 20 a 间生态环境变化进行监测与评价, 基于 IDRISI 软件的 CA-Markov 模型对 2030 年东庄水库流域生态环境情况进行模拟。[结果] ① 20 a 间东庄水库流域生态环境整体维持在一个水平, RSEI 均值由 0.499 上升到 0.500, 生态环境状况略微有上升; ② 从 RSEI 各等级变化来看, 20 a 间东庄水库流域生态环境状况较为复杂, 生态环境的改善与恶化长期持续并存, 渭北地区 1999 年以来实施的退耕还林政策对流域生态环境改善起到正向作用, 且效用开始凸显。[结论] 东庄水库生态环境恶化的区域主要集中在城镇及其周边区域, 改善的区域主要集中在林区和丘陵地区。今后仍需继续关注经济高速发展与生态环境治理二者间的平衡问题。

关键词: 遥感生态指数; 东庄水库; GEE 平台; CA-Markov 模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)05-0096-09

中图分类号: S127, TP79

文献参数: 权文婷, 张树誉, 刘艳, 等. 基于遥感生态指数的陕西省东庄水库流域生态环境变化监测与评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 96-104. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.013; Quan Wenting, Zhang Shuyu, Liu Yan, et al. Monitoring and evaluation of ecological environment changes in Dongzhuang reservoir basin in Shaanxi Province based on remote sensing ecological index [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 96-104.

Monitoring and Evaluation of Ecological Environment Changes in Dongzhuang Reservoir Basin in Shaanxi Province Based on Remote Sensing Ecological Index

Quan Wenting^{1,2}, Zhang Shuyu³, Liu Yan⁴, Wang Weidong²

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural

Remote Sensing and Economic Crop, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 3. Shaanxi Provincial Meteorological

Bureau, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 4. Xianyang Meteorological Bureau, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: [Objective] Real-time and accurate monitoring of the ecological environment of the Dongzhuang reservoir basin in Shaanxi Province was carried out to provide data and theoretical support for the development and protection of the watershed and urban economic development. [Methods] Landsat remote sensing images in 2000, 2010, and 2020 were selected, and four indexes (humidity, greenness, dryness, and heat) were constructed based on the Google Earth Engine (GEE) platform. The remote sensing ecological index (RSEI) was calculated by the principal component analysis method, and the ecological environment changes in the Dongzhuang reservoir basin over the past 20 years were monitored and evaluated. The CA-Markov model based on IDRISI software was used to simulate the ecological environment of the Dongzhuang reservoir basin in 2030. [Results] ① During the past 20 years, the ecological environment of the Dongzhuang reservoir basin has been maintained at the same level, and average RSEI increased from 0.499 to 0.500, indicating a slight

收稿日期: 2022-03-24

修回日期: 2022-04-06

资助项目: 陕西省重点产业链项目“黄河流域(陕西段)河湖生态安全遥感监测与预警关键技术研究”(2022ZDLSF06-09); 国家重点研发计划项目“空间辐射基准传递定标及地基验证技术”(2018YFB0504800); 咸阳市重大科技专项计划项目“东庄水库区域生态环境变化与种植布局调整气象分析研究”(2020k01-33)

第一作者: 权文婷(1985年—), 女(汉族), 陕西省扶风县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业遥感监测与生态环境监测研究。Email: quanwenting@163.com.

increase in the ecological environment. ② According to changes in RSEI values, the ecological environment of the Dongzhuang reservoir basin over the past 20 years was relatively complex, and both improvement and deterioration of the ecological environment continued to coexist for a long time. The policy of returning farmland to forest instituted in 1999 in the Weibei region played a positive role in the improvement of the ecological environment, and its effect has begun to be prominent. [Conclusion] The ecological environment of the Dongzhuang reservoir basin has deteriorated mainly in the towns and their surrounding areas, while the improved areas have mainly occurred in the forest and hilly areas. It is still necessary to give more attention to the balance between rapid economic development and ecological environment management.

Keywords: RSEI; Dongzhuang reservoir basin; Google Earth Engine (GEE); CA-Markov model

东庄水库坝址位于黄河二级支流泾河下游峡谷末端,属于陕西省咸阳市礼泉县东庄乡。东庄水库属于黄河流域渭河水系,是渭河防洪减淤体系的重要控制性工程,同时也是黄河水沙调控体系的重要支流水库,在渭河甚至黄河综合治理开发中都具有十分重要的作用^[1-2]。作为国家级重大节水供水工程,东庄水库水利枢纽工程于 2018 年开工,建设工期 8 a,建成后将成为陕西省最大水库,可发挥防洪减淤、供水、发电、生态改善等多种经济和社会效益。近些年来,随着城镇人口数量增加、规模扩大,社会经济发展带来的问题影响着东庄水库流域生态环境质量,流域生态脆弱性问题引发关注,流域生态环境的改善面临挑战。基于此,对东庄水库流域生态环境开展实时准确的监测,可为流域开发与保护、城镇经济发展提供数据和理论支撑。

卫星遥感技术具备大面积同步观测、时效性强的优点,可以客观且连续反映地表状态变化,近年来已成为生态系统监测评估的重要手段之一。遥感生态指数(remote sensing based ecological index, RSEI)是徐涵秋在国家生态环境推出的生态环境状况指数(ecological index, EI)的基础上,建立的基于遥感技术对区域生态环境质量状况进行评估的指数^[3]。RSEI整合了绿度、湿度、干度、热度 4 个指标,基于主成分分析后的第一主成分综合指征区域内生态环境质量。相较于 EI 评价指标不易获取,且无法对生态环境状况的空间分布进行表征的问题,RSEI 完全基于遥感技术,具有快速、客观、可视化的优势,是当前区域生态环境质量监测评估研究的热点^[4-6]。缪新辉等^[7]基于 Landsat 遥感影像构建 RSEI,对甬江流域 17 年来生态环境变化进行监测分析;薛陈利等^[8]选取 1999—2019 年遥感影像计算 RSEI,定量分析中老铁路经济廊带生态质量的时空演变规律;钟欣呈等^[9]利用 2005—2020 年的 Landsat 影像,构建 RSEI 模型,对玉溪市 16 a 的生态环境质量进行监测与评价。上述研究表明采用 RSEI 对区域内生态环境状况进行定量表征,可以揭示生态环境的时空演变规律,为

区域生态环境治理提供思路。

谷歌云计算的 Google Earth Engine(GEE)平台具备海量的历史影像数据,利用其出色的并行运算能力,可实现海量多源数据的访问、操作和结果可视化展示^[10-11]。近年来,GEE 平台已被广泛应用于作物种植面积提取^[12-14]、土地利用/覆盖监测^[15]、沿海潮滩变化监测^[16]、城市扩张分析^[17]等多个领域研究。

本文基于 GEE 平台可进行大量遥感数据快速处理的优点,以东庄水库流域为研究区,对 2000—2020 年 Landsat 卫星遥感数据进行指标运算,通过主成分分析法分别建立每个年份的 RSEI,揭示 20 a 间东庄水库流域生态环境状况时空变化规律,利用 CA-Markov 模型预测研究区 2030 年 RSEI 空间分布,以期对东庄水库流域生态环境治理提供参考依据。

1 研究区和数据来源

1.1 研究区概况

东庄水库水利枢纽坝址位于泾河的峡谷(34°43'N, 108°29'E)河段,泾河为黄河的二级支流,是黄河洪水、泥沙的主要来源地之一^[1]。东庄水库坝址流域面积为 4.31×10^4 km²,占泾河流域面积的 95%,水库总库容为 3.06×10^9 m³,基本控制了泾河的全部洪水泥沙^[18-19]。水库库区位于黄土高原沟壑区和丘陵沟壑区^[20],属于典型的生态环境脆弱区。库区高程 353.7~2 520 m,河道宽度仅为 40~200 m,水库河道形态蜿蜒曲直,属于典型的侵蚀型峡谷河道,水库两侧高原地表相对平坦,高程约为 1 000~1 300 m,大部为黄土覆盖^[1,20]。

1.2 数据来源及预处理

影像数据来源于美国地质调查局(USGS)发布的 2000—2020 Landsat 影像数据,多光谱通道空间分辨率为 30 m,对地观测重访周期为 16 d。分别选用 2000,2010 年的 Landsat 5 TM 影像和 2020 年的 Landsat 8 OLI 影像,采用 USGS 于 2020 年发布的 Collection 2 Level 2 数据集(该数据集在几何校正和辐射定标方面较 Collection 1 数据集有所提高),经过

大气校正处理。为保证影像时相上覆盖植被生长季,选取每年 6—9 月数据。

流域范围数据基于 ArcGIS 10.8 的水文分析模块生成,采用 DEM 数据结合东庄水库坝址和全国河流水系数据,得到东庄水库流域范围。预处理包括滤波、地表温度预处理、中值合成。在 GEE 平台上使用官方提供的 Landsat 云掩膜算法,对选定时间和空间范围的数据集进行滤波处理,对无云像元进行中值合成操作。分别将 3 个年份的影像根据东庄水库流域

范围进行裁剪,得到的影像数据云量少且季相相同,保证运算结果的可比性(图 1),同时为避免水域对主分量载荷的影响,采用 MNDWI 水体指数结合阈值法对影像的水体进行掩膜处理^[21]。根据官方提供的算法对数据集的热红外波段进行处理,得到每年的地表温度数据,公式为:

$$LST = (0.00341802 \times B_{TIRS} + 149.0) - 273.15 \quad (1)$$

式中: LST 为地表温度数据($^{\circ}C$); B_{TIRS} 为 Landsat 5 和 Landsat 8 的热红外波段。

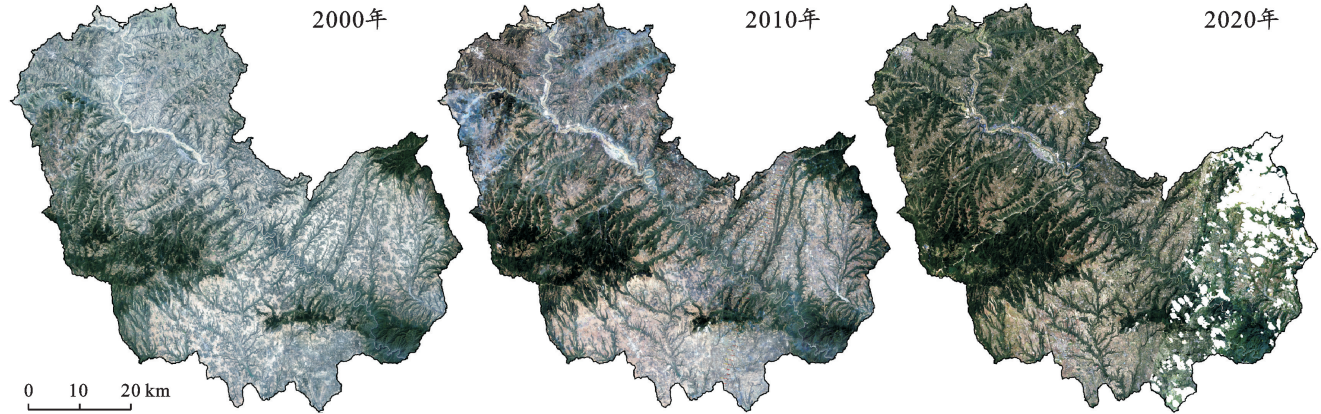


图 1 2000、2010 年和 2020 年东庄水库流域真彩色合成遥感影像

土地利用/覆盖数据为 GlobeLand 30 数据集,为自然资源部发布的 30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据(<http://globeland30.org/home.html?type=data>)。GlobeLand 30 数据包括 10 个一级类型,分别为:林地、草地、耕地、灌木林、水体、湿地、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪。本文采用土地利用/覆盖数据为参考单元,对生态环境时空变化情况进行分析。

2 研究方法

徐涵秋在构建 RSEI 的指标选取上,在诸多反映区域生态质量的自然因素中,综合考虑与人类生存关系密切且评价指标的可获取性,选取了绿色、湿度、干度、热度作为构建 RSEI 的重要指标^[4],这 4 个指标均可以通过遥感影像提取得到。通过缨帽变换(Kauth-Thomas transformation, KT)后的湿度分量(WET)表征湿度指标,归一化植被指数(NDVI)表征绿色度指标,建筑—土壤指数(NDBSI)表征干度指标,地表温度(LST)表征热度指标,RSEI 可以表达为上述 4 个指标的函数^[22],表达为:

$$RSEI = f(NDVI, Wet, LST, NDBSI) \quad (2)$$

2.1 指标构建

2.1.1 绿色指标 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是反映植被生长状况的经典植被指数^[23],与植被覆盖度、生物量、叶

面积指数等参数都有密切关联,可以用作 RSEI 中的绿色度指标,公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (3)$$

式中: ρ_{NIR} 、 ρ_R 分别为 Landsat 数据的近红外和红光反射率。

2.1.2 湿度指标 缨帽变换(Kauth-Thomas transformation, KT)可以在保存有用信息的前提下压缩数据量,经缨帽变换后得到的若干分量均与陆表物理量存在密切关联,包括亮度、绿色、湿度等^[24]。缨帽变换被广泛应用于植被监测和土地利用/覆盖监测,缨帽变换后第三个分量为湿度(WET),对土壤和植被的水分比较敏感^[25],与生态环境状况存在关联,可以用来表示 RSEI 中的湿度指标,表达为:

$$Wet_{Landsat5-TM} = 0.0315\rho_B + 0.2021\rho_G + 0.3102\rho_R + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2} \quad (4)$$

$$Wet_{Landsat8-OLI} = 0.1511\rho_B + 0.1973\rho_G + 0.3283\rho_R + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad (5)$$

式中: $Wet_{Landsat5-TM}$ 和 $Wet_{Landsat8-OLI}$ 分别表示 TM 和 OLI 影像的湿度分量; ρ_B 、 ρ_G 、 ρ_R 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别为 TM 和 OLI 影像的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段的光谱反射率。

2.1.3 干度指标 区域内的不透水面如建筑屋顶、水

泥路等阻挡了陆表与地下水的联系,加上未利用地、裸地等的存在,导致陆表干化;采用建筑指数^[26](IBI)和土壤指数^[27](SI)分别表示研究区地表建筑和裸土信息,取 IBI 和 SI 的均值作为 RSEI 指数的干度指标(NDBSI),公式为:

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

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_R) - (\rho_{NIR} + \rho_B)}{(\rho_{SWIR1} + \rho_R) + (\rho_{NIR} + \rho_B)} \quad (7)$$

$$IBI = \frac{\left(\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} - \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR1}} \right)}{\left(\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR1}} \right)} \quad (8)$$

2.1.4 热度指标 地表温度(land surface temperature, LST)的变化与城市化进程、人类活动等密切相关,而城市化进程与生态环境相互影响和制约,因此地表温度与区域内生态环境也关系密切,采用地表温度表征热度指标,处理方法在本文指标构建部分已做详尽叙述。

2.2 遥感生态指数(RSEI)构建

采用主成分分析(principal component analysis, PCA)法将得到的 4 个指标进行耦合。PCA 基于线性变换,通过剔除冗余数据将参与分析的多个变量的信息转化到 1~2 个波段中,进而实现数据的高效压缩^[24]。PCA 可以避免人为主观因素干扰对结果带来的偏差,同时最大程度保留了参与分析所需的主要信息。PCA 集成了各指标的权重,根据各主分量的贡献度来客观确定^[3, 28]。在做 PCA 之前,为使 4 个指标具有统一的量纲,分别进行了归一化处理和剔除异常值^[29]。为使 PC₁ 数值与生态环境结果呈正向关系,对 PCA 变换后的第一主成分 PC₁ 再次进行归一化处理,最终得到遥感生态指数 RSEI,公式为:

$$RSEI_0 = 1 - \{PC_1 [f(NDVI, WET, LST, NDBSI)]\} \quad (9)$$

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{\min}}{RSEI_{\max} - RSEI_{\min}} \quad (10)$$

式中:PC₁ 为主成分分析后的第一主成分; RSEI₀ 为遥感生态指数的初始值; RSEI_{min} 和 RSEI_{max} 分别为 RSEI₀ 的最小值和最大值, RSEI 的值越大越趋近于 1,表明区域生态环境越优,反之生态环境越恶劣。

2.3 生态环境质量动态变化分析方法

为更直观地分析东庄水库生态环境质量的空间分布及变化情况,本文基于已有研究成果^[4],将 RSEI 以 0.2 为步长,等间距划分为差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1.0)这 5 个等级,通过分析 2000,2010,2020 年 3 个年份各生态等级下 4 个指标的变化情况。为进一步分析 2000—2020 年间东庄水库流域生态环境变化情况,

在 RSEI 等级划分基础上,参考《生态环境状况评价技术规范》中对生态环境状况变化的分级标准,结合研究区实际情况,对各年份 RSEI 指数两两作差,将结果分为 0, ±1, ±2, ±3, ±4 共 9 级,其中 0 表示生态环境基本不变,正值表示生态环境变好,根据绝对值大小细分为略微变好和明显变好;负值表示生态环境变差,根据绝对值大小细分为略微变差和明显变差。

2.4 CA-Markov 模型

元胞自动机(cellular automata, CA)是一种在时间、空间、状态 3 个维度均离散的动力学模型,可以模拟复杂的时空演变过程^[30]。马尔科夫(Markov)模型本质是对研究对象在指定时刻发生的概率进行预测^[31]。CA-Markov 模型将 CA 模型与 Markov 模型二者融合,具备了 CA 模型复杂空间系统的动态演化能力和 Markov 模型时间动态预测能力,提升了预测概率的准确性,使模拟结果更为合理^[32]。

3 结果与分析

3.1 各指标时空变化分析

基于 GEE 平台处理得到 2000,2010,2020 年 RSEI 的 4 个指标(NDVI, WET, NDBSI, LST),从图 2 可以看出,东庄水库流域 NDVI 整体水平较高,NDVI 在林区和丘陵区较高,在城镇和农田区相对较低;WET 的空间分布规律与 NDVI 相近,在林区和丘陵区值较高,表明林区植被覆盖高的区域湿度较大,在不透水面多的城镇区湿度较低;NDBSI 与 LST 在空间分布上与 NDVI 和 WET 呈相反的规律,在林区值较低,在城镇区域值较高。

3.2 主成分结果分析

对处理后的 4 个分量进行主成分分析,由表 1 可知,2000,2010,2020 年 3 个年份中 4 个指标对第一主成分(PC₁)均有一定载荷,PC₁ 中绿度指标(NDVI)与湿度指标(WET)的特征向量均为正,干度指标(NDBSI)和热度指标(LST)的特征向量均为负,表明绿度和湿度对研究区生态环境起到正面影响,干度和热度起到负面影响,与实际情况相符。而 PC₂—PC₄ 中各指标的正负与大小没有规律,且 3 个年份 PC₁ 的特征值贡献率分别为 85.71%,85.29%和 82.15%,均超过 80%,由此表明 PC₁ 集成了 4 个指标的绝大部分特征,可以真实合理反应东庄水库流域生态环境状况。3 个年份的 PC₁ 中 NDVI 和 NDBSI 的特征值均高于 WET 和 LST,表明 NDVI 和 NDBSI 对区域生态环境的影响更大。2000—2020 年 RSEI 均值从 2000 年的 0.499,上升到 2020 年的 0.500,表明 20 a 间东庄水库流域生态环境呈略微上升趋势,但总体维持在一个水平(表 2)。

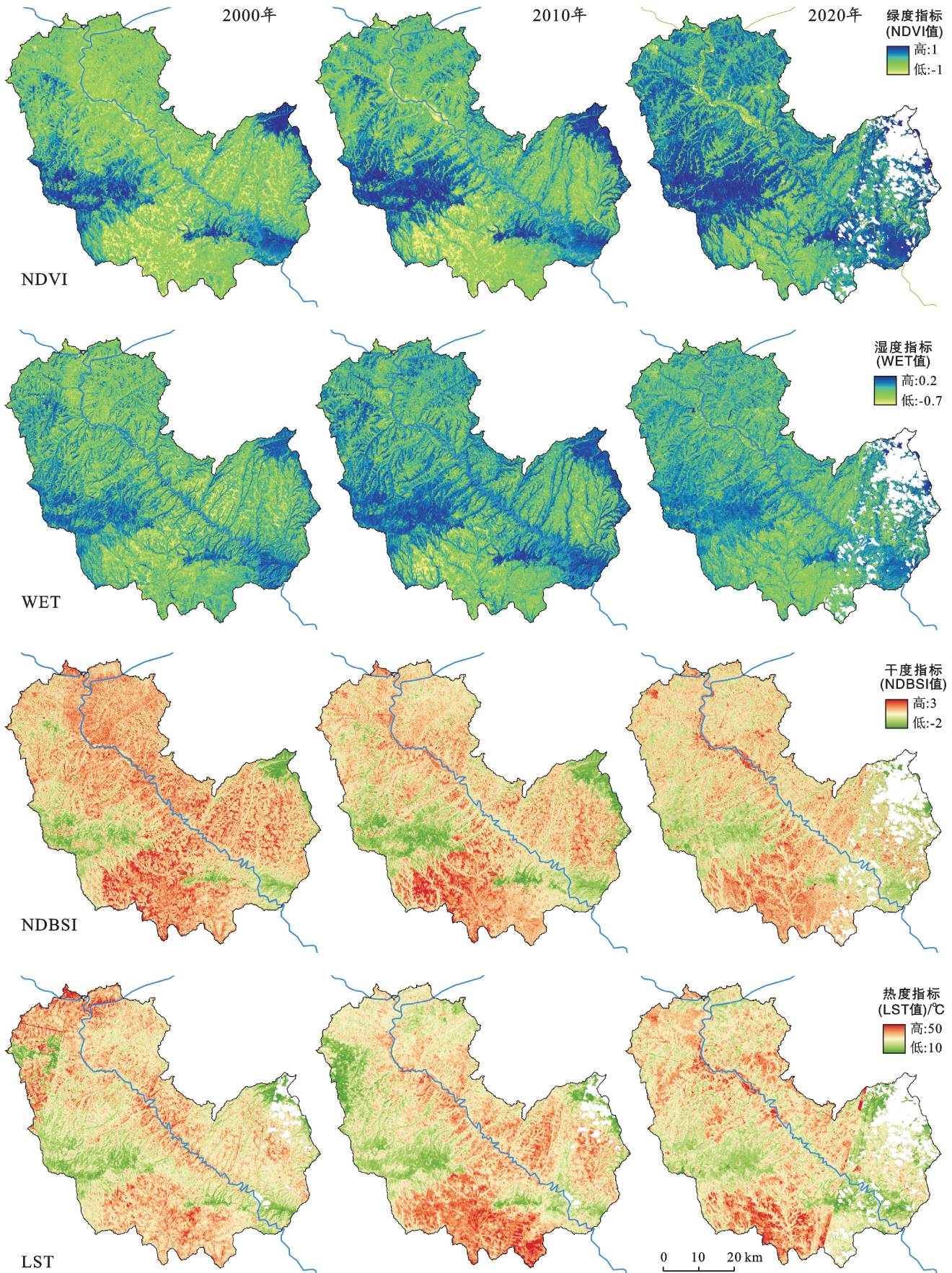


图 2 2000—2020 年东庄水库流域生态遥感指数 (RSEI) 各指标空间分布

表 1 2000—2020 年东庄水库流域生态环境变化评价主成分分析指标

指标	2000 年				2010 年				2020 年			
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
NDVI	0.507	0.412	0.553	0.515	0.511	0.307	0.619	-0.509	0.521	-0.216	0.728	-0.387
WET	0.496	0.136	-0.812	0.274	0.496	0.245	-0.777	-0.298	0.492	-0.347	-0.678	-0.419
NDBSI	-0.518	-0.257	-0.087	0.81	-0.521	-0.257	-0.104	-0.806	-0.495	0.284	0.001	-0.82
LST	-0.476	0.862	-0.162	-0.048	-0.469	0.882	-0.03	0.025	-0.489	-0.866	0.091	-0.004
特征值	0.087	0.009	0.004	0.000	0.088	0.01	0.004	0.000	0.078	0.011	0.005	0.000
贡献率/%	85.71	9.19	4.24	0.86	85.29	9.77	4.09	0.84	82.15	11.6	5.57	0.63

注:PC₁—PC₄ 为 4 个主成分; NDVI 为绿色; WET 为温度; NDBSI 为干度; LST 为热度。下同。

进一步分析不同 RSEI 等级的变化情况,并考察 RSEI 的合理性。从表 3 可以看出,3 个年份中 NDVI 和 WET 的均值均表现为随 RSEI 等级的升高而升高,而 NDBSI 和 LST 的均值随着 RSEI 等级的升高而降低,4 个指标的均值都随 RSEI 级别的变化而表现出和实际相符的变化规律,表明 RSEI 可以综合表征东庄水库流域生态环境变化情况。

表 2 2000—2020 年东庄水库流域的生态环境变化评价各指标归一化后均值

指标	2000 年	2010 年	2020 年
NDVI	0.604	0.606	0.803
WET	0.461	0.814	0.737
NDBSI	0.684	0.533	0.350
LST	0.444	0.521	0.561
RSEI	0.499	0.499	0.500

表 3 2000—2020 年东庄水库流域生态环境变化评价各年份 RSEI 等级及对应的 4 个指标归一化后均值

序号	2000 年				2010 年				2020 年			
	NDVI	WET	NDBSI	LST	NDVI	WET	NDBSI	LST	NDVI	WET	NDBSI	LST
1	0.373	0.259	0.910	0.593	0.344	0.740	0.797	0.700	0.636	0.657	0.354	0.698
2	0.467	0.351	0.823	0.520	0.456	0.781	0.677	0.619	0.718	0.704	0.353	0.636
3	0.599	0.469	0.695	0.453	0.605	0.818	0.547	0.528	0.809	0.739	0.353	0.566
4	0.740	0.568	0.554	0.367	0.762	0.850	0.388	0.421	0.889	0.776	0.352	0.488
5	0.880	0.626	0.405	0.279	0.870	0.869	0.240	0.323	0.926	0.810	0.351	0.406

3.3 庄水库流域生态环境质量时空分布

以 2000,2010,2020 年 3 个年份的土地利用数据为参考,分析 2000—2020 年东庄水库流域 RSEI 空间分布(图 3),3 个年份 RSEI 等级分布具有一定规律,浅绿和深绿表征的生态环境状况良和优的区域主要集中在张家山、瓦庙山、槐家山等山区和丘陵沟壑区,这些区域地表覆盖以天然林为主,属于典型的冷岛区,湿度和绿色度指标较高,而热度指标较低;红色代表

的生态状况差的区域主要分布在城镇,植被覆盖低且属于典型的热岛区,绿色度指标低而干度指和热度指标较高。2000 年 RSEI 等级差的区域与城镇区基本吻合,2010 年随着城镇扩张及制造业、矿业等工业发展,RSEI 等级差的区域范围有所扩大,2020 年随着城镇区工业化发展,RSEI 差的区域进一步扩大,等级差与较差的区域大多分布在城镇及其外围地带,东庄水库流域西部 RSEI 等级为优的林区大部分区域等级下降为良。

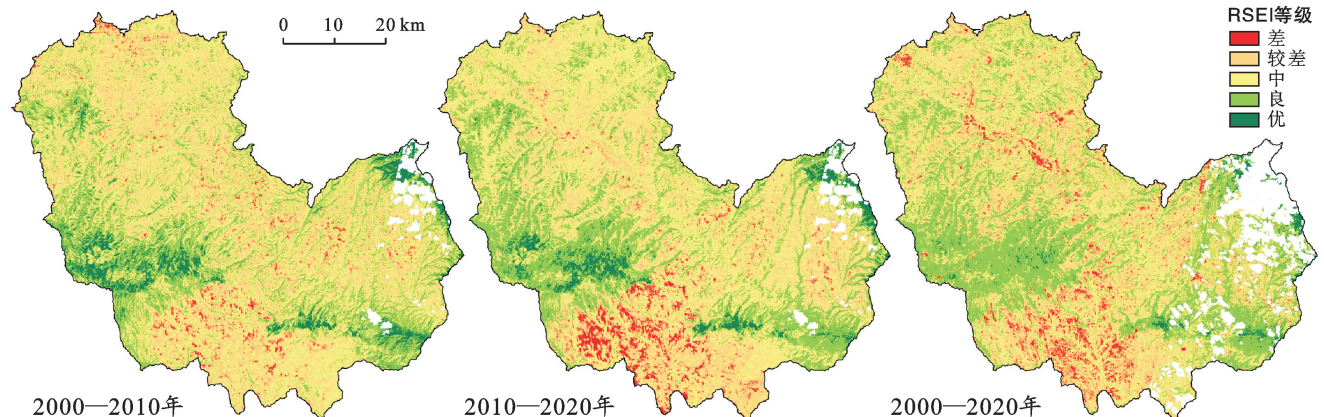


图 3 2000—2020 年东庄水库流域生态遥感指数(RSEI)等级空间分布特征

3.4 东庄水库生态环境质量动态监测

从表 4 可以看出,2000—2020 年东庄水库流域的生态环境状况以基本不变为主,占 49.34%,变好和变差的面积相当,其中变好的面积略高,二者分别占 25.95%和 24.71%。分时间段来看,2000—2010 年该流域 61.44%的区域生态环境状况为基本不变,变好和变差的面积相当,其中变差的面积略高,二者面积

分别为 762.428 km² 和 783.853 km²。2010—2020 年生态环境状况仍以基本不变为主,所占比例为 59.95%,变好的面积大于变差,分别为 768.434 km² 和 738.991 km²,分别占 20.41%和 19.63%。以上表明 20 a 间东庄水库流域的生态环境状况整体较为复杂,生态环境的改善与恶化的状况长期以来持续并存。

表 4 2000—2020 年东庄水库流域各年份生态遥感指数 (RSEI) 等级差值统计

年份	类别	细分类别	级差	细 分		大 类		
				面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
2000—2010	变差	明显变差	-4	0.008	0.00	783.853	19.55	
			-3	1.925	0.05			
		略微变差	-2	47.560	1.19			
			-1	734.360	18.31			
	不变	基本不变	0	2 463.687	61.44	989.420	24.67	
			变好	1	732.453			18.27
				2	28.784			0.72
			3	1.190	0.03			
4	0.001	0.00						
2010—2020	变差	明显变差	-4	0.024	0.00	738.991	19.63	
			-3	2.623	0.07			
		略微变差	-2	45.667	1.21			
			-1	690.678	18.35			
	不变	基本不变	0	2 256.781	59.95	825.193	21.92	
			变好	1	698.264			18.55
				2	64.286			1.71
			3	5.804	0.15			
4	0.080	0.00						
2000—2020	变差	明显变差	-4	0.251	0.01	930.225	24.71	
			-3	10.323	0.27			
		略微变差	-2	108.813	2.89			
			-1	810.838	21.54			
	不变	基本不变	0	1 857.229	49.34	716.027	19.02	
			变好	1	870.864			23.14
				2	100.672			2.67
			3	5.164	0.14			
4	0.044	0.00						

从空间看(图 4),2000—2020 年东庄水库流域生态环境以略微变差、基本不变和略微变好为主,明显变差和明显变好的区域较少。20 a 间该流域生态环境恶化区域主要分布在流域北部以彬州市为中心的城区及其外围区域,呈带状分布,以及流域南部以蒿店乡、峰阳镇、常宁镇等为中心的城镇及其周边区域。生态改善的区域主要分布在部分山区和丘陵沟壑区,表明城市扩张、工业和经济发展导致生态环境恶化。

2000—2010 年生态环境改善的区域主要分布在流域北部的山区和南部的丘陵地区,生态环境恶化的区域主要为城镇及其外围耕地和草地区域。2010—2020 年有所改变,在流域北部前 10 a 生态环境改善的山区,部分地区出现生态环境恶化,而前 10 a 生态环境恶化的城镇及其外围耕地区域,生态环境得到改善,表明渭北地区 1999 年以来实施退耕还林政策,经过近 10 a 的发展对生态环境的改善起到了正面作用。

20 a 间东庄水库流域整体的生态环境变化情况较为复杂,不能笼统地归为生态环境改善还是恶化,原本

生态环境好的区域存在恶化现象,但同时原本生态质量差的区域也得到了改善。

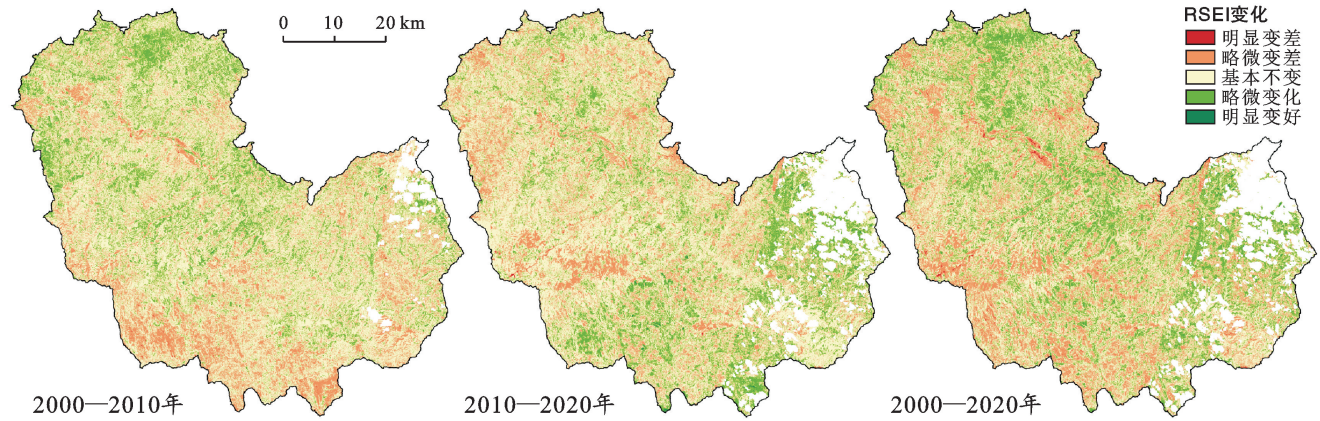


图 4 2000—2020 年东庄水库流域生态遥感指数 (RSEI) 变化监测

3.5 生态环境预测

利用 IDRISI 软件的 CA-Markov 模型进行东庄水库流域 2030 年 RSEI 空间分布演变模拟,以 2020 年 RSEI 结果为基期数据,设定 5×5 元胞滤波器,模拟 2030 年 RSEI 空间分布,并对 RSEI 各等级面积和比例进行统计(图 5,表 5)。由表 5 可知,2030 年东庄水库流域 RSEI 各等级面积所占比例趋势和 2020 年相似,与 2020 年相比,2030 年 RSEI 差、良、优等级面积有所增加,分别增加了 17.955, 26.251, 3.674 km^2 ;较差和中等面积有所下降,分别下降了 5.732 km^2 和 43.605 km^2 。从空间上来看,2030 年东庄水库流域 RSEI 各等级空间分布规律与 2020 年基本一致,2020 年生态环境差的城镇及其周边区域,生态环境恶化面积有所扩大,表明以当下的社会发展规律为前提,随着城镇规模化发展,增大了干度指标中建筑因

素的影响,并且随着城镇发展带来的城市热岛效应增大了热度指标的影响,同时建筑用地侵占了林地、耕地和草地空间,抑制了绿度和湿度指标,因此 RSEI 有所降低。根据预测结果,2030 年部分林区和丘陵地区 RSEI 为良的区域有所扩大,表明随着退耕还林政策的对生态环境改善的正面影响仍会持续。

表 5 2020—2030 年东庄水库流域生态遥感指数 RSEI 各等级面积和比例

序号	2020 年		2030 年	
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
1	156.746	4.16	174.702	4.64
2	914.754	24.30	909.022	24.15
3	1 530.871	40.67	1 487.266	39.51
4	1 096.407	29.13	1 122.658	29.82
5	65.435	1.74	69.109	1.84

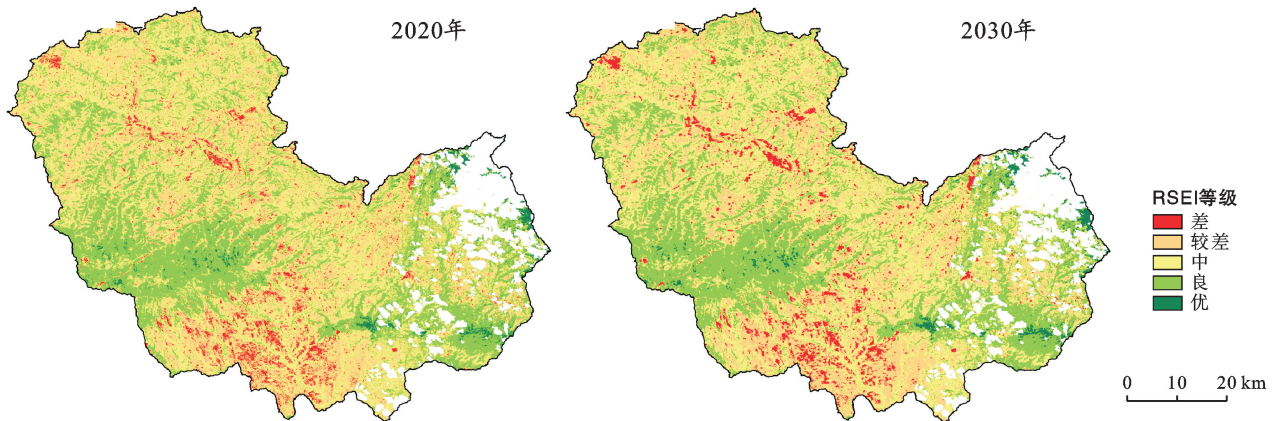


图 5 东庄水库流域 2020 年与 2030 年生态遥感指数 (RSEI) 对比

4 结论

本文基于 2000, 2010, 2020 年的 Landsat 系列卫

星数据,采用遥感生态指数 RSEI 对东庄水库流域不同时期的生态环境质量时空变化状况进行定量分析研究,通过 CA-Markov 模型对该流域 2030 年生态环

境状况进行预测。

(1) 东庄水库流域生态环境优的区域主要分布在林区和丘陵地区,生态质量差的区域主要分布在城镇区及以城镇区为中心的周边区域。RSEI 等级为优的面积下降了 69.98%,差的面积增加了 129.31%,但生态环境质量良和较差的区域分别呈增加和减少趋势。

(2) 2000—2020 年,东庄水库流域生态环境总体维持在一个水平,RSEI 均值从 0.499 上升到 0.500,呈微弱上升趋势。基本不变区域占整个流域面积的 49.34%,变好和变差的面积分别占 25.95%和 24.71%。生态环境改善的区域主要分布在部分山区和丘陵沟壑区,恶化的区域主要集中在城镇区及周边,监测结果表明退耕还林政策对流域生态环境起正面影响效用。20 a 间东庄水库流域整体的生态环境变化情况较为复杂,长期以来该流域生态环境的改善与恶化同时存在。

(3) CA-Markov 模型对东庄水库流域 2030 年 RSEI 空间分布模拟结果显示,RSEI 差、良、优等级面积有所增加,较差和中等等级面积有所下降。生态环境恶化的区域主要集中在城镇及其周边地区,改善的区域主要集中在林区和丘陵地区。表明以当前社会经济与生态环境发展规律模拟,东庄水库流域城镇及其周边区域的生态环境会持续恶化,城镇化发展与生态环境间耦合协调发展是亟须解决的现实问题。

(4) 2000—2020 年东庄水库流域的生态环境虽在局部地区得到改善,但整体来看改善效果并不明显,同时一些城镇化高速发展的地区生态环境仍在持续恶化。本文在预测时,未动态考虑东庄水库水利枢纽工程建成后带来的变化。水库建成后对泾河下游不断流以及泾渭湿地不萎缩、不退化将产生保护作用,同时对鱼类繁殖期河道生态环境和下游汛期河道生态环境进行正向调节。今后可在退耕还林和东庄水库水利枢纽工程双重影响下,流域内生态环境变化评估等方面进行深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 李彬,张金良,白玉川.基于 Landsat8 影像的泾河峡谷段高含沙河流信息提取方法[J].人民黄河,2022,44(1):75-79.
- [2] 张金良.泾河东庄水利枢纽工程双泥沙侵蚀基准面排沙研究[J].人民黄河,2021,43(10):35-39.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 李晓明,孙从建,孙九林,等.基于遥感信息的黄土高原主要灌溉农业分布区生态安全特征[J].应用生态学报,2021,32(9):3177-3184.
- [6] 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.
- [7] 缪鑫辉,梁勤欧.基于遥感生态指数的甬江流域生态环境变化分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):427-438.
- [8] 薛陈利,张会琼,邹滔,等.中老铁路经济廊带生态质量及其与人类活动的关系[J].应用生态学报,2021,32(2):638-648.
- [9] 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.
- [10] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,等.基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1382-1391.
- [11] 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.
- [12] Dong Jinwei, Xiao Xiangming, Menarguez M A, et al. Mapping paddy rice planting area in Northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2016,185:142-154.
- [13] Shelestov A, Lavreniuk M, Kussul N, et al. Exploring google earth engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping [J]. Frontiers in Earth Science, 2017, 5:17.
- [14] Teluguntla P, Thenkabail P S, Oliphant A, et al. A 30-m landsat-derived cropland extent product of Australia and China using random forest machine learning algorithm on Google Earth Engine cloud computing platform [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018,144:325-340.
- [15] Souza C M Jr, Shimbo J Z, Rosa M R, et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine [J]. Remote Sensing, 2020,12(17):2735.
- [16] Wang Xinxin, Xiao Xiangming, Zou Zhenhua, et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986—2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2020,238:110987.
- [17] Goldblatt R, You Wei, Hanson G, et al. Detecting the boundaries of urban areas in India: A dataset for pixel-based image classification in google earth engine [J]. Remote Sensing, 2016,8(8):634.

- [19] 徐岚,赵羿.利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J].应用生态学报,1993,4(3):272-277.
- [20] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):83-89.
- [21] Turner M. Landscape ecology: The effect of pattern on process [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1989,20(1):171-197.
- [22] Riitters K H, O'Neill R V, Hunsaker C T, et al. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics [J]. Landscape Ecology, 1995,10(1):23-39.
- [23] Fan Feifei, Liu Yanxu, Chen Jixing, et al. Scenario-based ecological security patterns to indicate landscape sustainability: A case study on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Landscape Ecology, 2021,36(7):2175-2188.
- [24] Zhang Min, Wang Xuejie, Liu Yun. Modeling and analysis of ecological urban landscape pattern evolution based on multisource remote sensing data [J]. Complexity, 2021,2021:8158158.
- [25] Wang Jia, Li Long, Zhang Ting, et al. Optimal grain size based landscape pattern analysis for Shanghai using landsat images from 1998 to 2017 [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021,30(3):2799-2813.
- [26] Wu Jianguo. Landscape sustainability science (II); Core questions and key approaches [J]. Landscape Ecology, 2021,36(8):2453-2485.
- [27] 孙丽蓉,周冬梅,岑国璋,等.基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J].干旱区地理,2021,44(5):1384-1395.
- [28] 杜军,赵胜朝,邱士可,等.2000—2015年豫西黄土丘陵区土地利用变化及景观生态风险评价[J].水土保持研究,2021,28(1):279-284.
- [29] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.
- [30] 高宾,李小玉,李志刚,等.基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J].生态学报,2011,31(12):3441-3450.
- [31] 韩振华,李建东,殷红,等.基于景观格局的辽河三角洲湿地生态安全分析[J].生态环境学报,2010,19(3):701-705.
- [32] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报,2021,37(4):265-274.
- [33] 肖东洋,牛海鹏,闫弘轩,等.1990—2018年黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变[J].农业工程学报,2020,36(15):271-281.

(上接第 104 页)

- [18] 周伟东,黄海真,田惠娟,等.东庄水库工程对泾渭湿地生态影响浅析[J].环境生态学,2020,2(10):50-54.
- [19] 雷春荣,宋宪琳,王泉伟.泾河东庄水库地下水环境影响效应研究[J].人民黄河,2018,40(12):97-99.
- [20] 李鹏峰.东庄水库水环境数值模拟及水质评价研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2020.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Gao Bocai. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. Remote Sensing of Environment, 1996,58(3):257-266.
- [24] 刘玉琴.基于 RS 和 GIS 的哈尔滨市生态环境质量评价与分析[D].黑龙江 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2021.
- [25] Jin Suming, Sader S A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances [J]. Remote Sensing of Environment, 2005,94(3):364-372.
- [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] Roy P, Rikimaru A, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. Tropical Ecology, 2002,43(1):39-47.
- [28] 傅湘,纪昌明.区域水资源承载力综合评价:主成分分析法的应用[J].长江流域资源与环境,1999,8(2):168-173.
- [29] 吴可人,高祺,王让会,等.基于 RSEI 模型的石家庄生态环境质量评价[J].地球物理学进展,2021,36(3):968-976.
- [30] 朱增云,阿里木江·卡斯木.基于 CA-Markov 模型的呼图壁县土地利用景观格局预测研究[J].生态科学,2020,39(1):136-145.
- [31] 王丽霞,张珈玮,孟妮娜,等.基于 CA-Markov 的渭河流域 NDVI 时空变化模拟及预测[J].水土保持研究,2020,27(4):206-212.
- [32] 成超男,胡杨,冯尧,等.基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究:以晋中主城区为例[J].生态学报,2020,40(4):1455-1462.