

引用格式: 闫戈丁, 景海涛, 何湜, 李慧, 郭桓超. 太行山区生态环境质量时空变化与演变趋势[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 335-347.

YAN Geding, JING Haitao, HE Shi, LI Hui, GUO Huanchao. Spatial-temporal variation and evolutionary trends of eco-environment quality in the Taihang Mountains, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 335-347.

太行山区生态环境质量时空变化与演变趋势

闫戈丁, 景海涛*, 何湜, 李慧, 郭桓超

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 人类活动不可避免地会对区域生态系统造成一定程度影响。客观评价生态环境质量, 是有效控制改善生态环境质量, 实现可持续发展的前提。生态环境质量变化是多因素共同作用结果, 相比于其他研究方法, 利用遥感数据评估生态环境的遥感生态指数(RSEI)可以快速、全面、高效地监测生态环境状态。太行山脉是华北平原与黄土高原的分界线, 受到自然环境变化以及人类活动影响, 植被一度大幅减少, 水土流失严重。本研究以 2001—2021 年 Landsat 遥感影像为数据源, 采用 RSEI 为计算指标, 结合 Mann-Kendall 趋势分析与 Moran's I 指数, 基于 GEE 云平台开展太行山生态环境质量的时空格局以及变化趋势研究。研究结果表明: (1) 2001—2021 年 RSEI 均值为 0.519, 时间上呈现先下降后增加趋势, 空间上呈中间高四周低的分布特征; (2) 太行山地区生态环境质量有明显的空间自相关性, 生态环境质量高-高聚类多集中于山区的林地、草地, 而低-低聚类多集中于平原的人造地表以及耕地; (3) 研究区域生态环境质量改善地区多位于西部, 而东部地区存在持续性退化区域。整体上, 未来生态变化趋势主要以改善提升为主, 但仍有 21.49% 的区域存在退化趋势。本研究可为区域生态环境动态监测治理与可持续发展提供科学参考。

关键词: 遥感生态指数; 生态环境质量; Mann-Kendall 趋势分析; 时空变化; 太行山

中图分类号: X87; X821

文献标志码: A

人类活动一定程度影响区域生态系统。客观评价生态环境质量, 识别影响生态环境质量的关键因素, 是有效控制改善生态环境质量, 实现可持续发展的前提^[1-3]。

2006 年, 国家环境部提出生态环境指数(Ecological Index, EI), 该指标通过生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地胁迫、污染负荷指数, 从多个因素综合衡量生态环境质量^[4]。但由于该指标涉及的数据种类繁多, 数据更新速度较慢, 在实际应用中会面临许多困难。目前, 生态环境质量评价模型多基于单一生态因子或几种因子相互作用, 如: 使用归

一化植被指数和增强植被指数评估植被生长^[5-6]; 通过热红外数据反演地表温度来监测城市热岛效应和评估城市环境质量^[7]; 通过土壤含水量的时空分布特征优化土壤水资源的合理利用^[8]。但是, 生态系统是一个复杂的系统, 单一几种指标无法全面地评价生态环境。

遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)是基于绿度、湿度、热度、干度四个指标进行主成分分析而得到的综合指标^[9]。这四个因子取自同源的遥感影像, 每个指标影响 RSEI 的程度由该指标数据的本质特性决定, 不依赖于人工设

收稿日期(Received date): 2022-12-15; 改回日期(Accepted date): 2023-06-02

基金项目(Foundation item): 河南省高等学校重点科研项目(23A170016)。[Key Scientific Research Project of Henan Higher Education Institutions (23A170016)]

作者简介(Biography): 闫戈丁(1999-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 生态环境遥感。[YAN Geding (1999-), male, born in Luoyang, Henan province, M. Sc. candidate, research on remote sensing of ecological environment] E-mail: 212104020020@home.hpu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 景海涛(1967-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 遥感生态监测。[JING Haitao (1967-), male, Ph. D., professor, research on remote sensing ecological monitoring] E-mail: jht@hpu.edu.cn

定,且指标易于获取,因此 RSEI 一定程度上可以客观准确地反映区域生态环境质量^[10-14]。使用传统的遥感数据处理平台,如 ENVI (Environment for Visualizing Images)、ERDAS (ERDAS IMAGINE) 等计算 RSEI,不仅在遥感影像获取以及筛选影像时间、云量等方面十分繁琐,而且需要耗费大量的计算时间^[15-16]。Google Earth Engine (GEE) 平台可对大尺度的遥感数据进行在线处理及分析^[17],为大范围长时序研究提供了解决方案。平台中包含大量数据集如 Landsat 系列,均已经过预处理转换为地表反射率数据,无需再进行大气校正,相比于传统遥感影像处理软件,GEE 更适用于大范围 RSEI 的构建和分析^[18-21]。

太行山脉是华北平原与黄土高原的分界线,受到自然环境变化以及人类活动影响,植被一度大幅减少,水土流失严重。虽然一些学者以太行山为对象开展了调研,例如,太行山区土地利用景观格局变化^[22]、生态系统碳储量时空分异^[23]、植物多样性分布格局^[24]以及不同植被条件下土壤水分动态变化^[25]等,但在太行山地区进行长时序、大范围的生态环境质量监测方面研究不足。本文以太行山区为研究区域,选取 Landsat 遥感影像,基于 GEE 云平台进行预处理,计算 RSEI,分析 2001—2021 年太行山区生态环境质量时空变化,并通过趋势检验分析确定太行山生态环境质量改善或恶化的区域位置以及变化趋势。研究结果有助于推进生态文明建设,将为太行山生态环境监管治理提供理论依据与技术支持,可为相关环保部门提供合理的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太行山脉(35°15'~41°00'E, 110°14'~116°35'N, 如图 1)跨越北京、山西、河南、河北 4 省(市),东部与华北平原相接地势落差大,西部连接黄土高原较为平缓,沿东北西南呈阶梯状分布,平均海拔为 1200~1500 m。太行山冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。研究区域内的植被具有较高多样性,主要为暖温带落叶阔叶林。

1.2 数据源及预处理

本研究使用的 Landsat5 (TM) 和 Landsat8 (OLI) 影像由 GEE 平台提供,已完成几何校正、大气校正

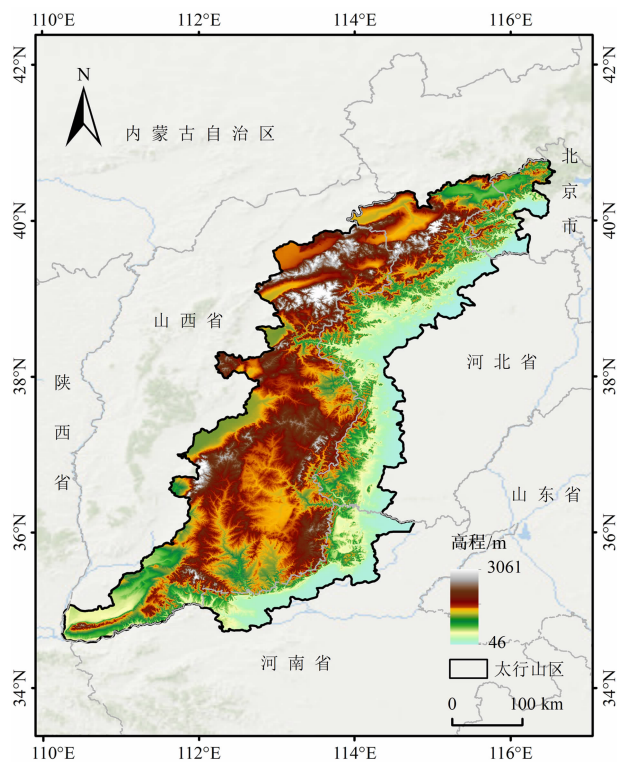


图 1 太行山区概况图

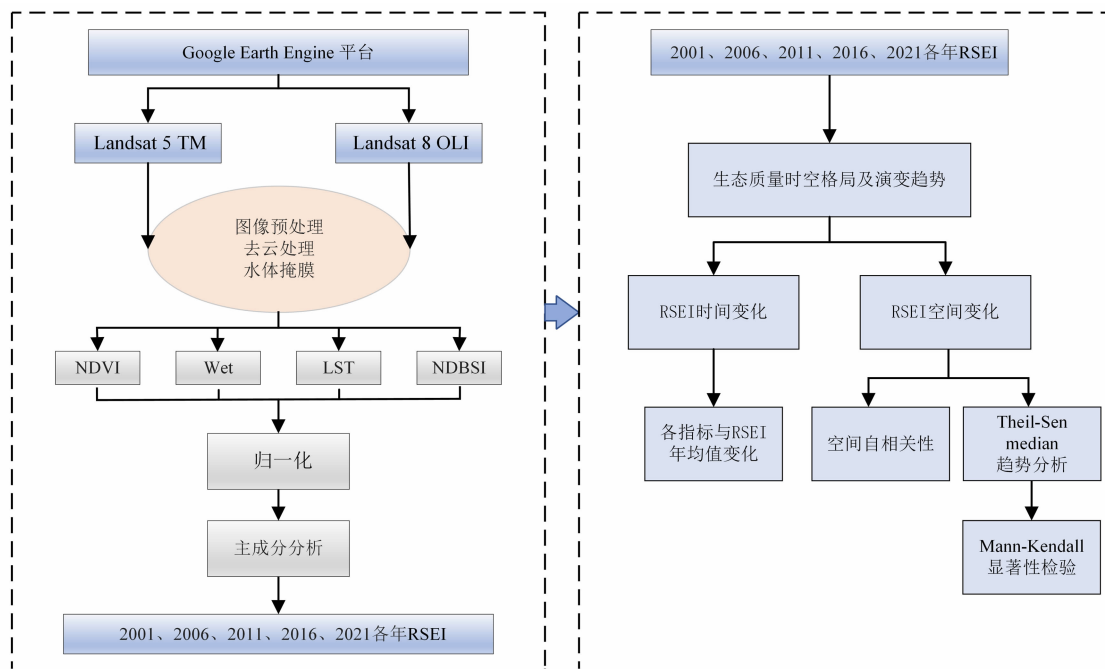
Fig. 1 Location map of the Taihang Mountains, China

和辐射校正,空间分辨率为 30 m。通过 GEE 平台在线选取云量小于 20% 数据,编写代码计算 RSEI 值。研究区图像分别取自 2001、2006、2011、2016、2021 年,为避免季节差异以及植被生长周期影响,图像选取 6—9 月植被生长茂盛时期。为确保 RSEI 中湿度分量的真实性,避免大范围水体对主成分的影响,选择使用归一化差异水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 将水体进行掩膜。本文研究流程如图 2 所示。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数计算

本文采用主成分分析法构建 RSEI,其中归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、湿度 (Wet)、地表温度 (Land Surface Temperature, LST)^[26]、归一化差异裸土指数 (Normalized Difference Bare Soil Index, NDBSI)^[27] 分别代表绿度、湿度、热度和干度四个分量(计算公式见表 1)。在 GEE 平台使用主成分分析法耦合四个指标,根据各指标对第一主成分 PC1 的贡献度计算初始生态指数 $RSEI_0$ (式 1),进而对 $RSEI_0$ 标准化处理后得到 $RSEI$ (式 2)。该指数越大,代表生态环境



NDVI 为绿度指数;Wet 为湿度指数;NDBSI 为干度指数;LST 为热度指数。

图2 研究流程图

Fig. 2 Research flow chart

表1 各分量计算方法

Tab. 1 Calculation methods for each component

指标	计算公式
NDVI	$NDVI = (B_{NIR} - B_{Red}) / (B_{NIR} + B_{Red})$
LST	$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] - 273.15$
Wet	$Wet = a * B_{Blue} + b * B_{Green} + c * B_{Red} + d * B_{NIR} + e * B_{SWIR1} + f * B_{SWIR2}$
NDBSI	$NDBSI = (SI + IBI) / 2$ $SI = [(B_{SWIR1} + B_{Red}) - (B_{NIR} + B_{Blue})] / [(B_{SWIR1} + B_{Red}) + (B_{NIR} + B_{Blue})]$ $IBI = \frac{2B_{SWIR1} / (B_{SWIR1} + B_{NIR}) - [B_{NIR} / (B_{Red} + B_{NIR}) + B_{Green} / (B_{SWIR1} + B_{Green})]}{2B_{SWIR1} / (B_{SWIR1} + B_{NIR}) + [B_{NIR} / (B_{Red} + B_{NIR}) + B_{Green} / (B_{SWIR1} + B_{Green})]}$

注: B_{Blue} 、 B_{Green} 、 B_{Red} 、 B_{NIR} 、 B_{SWIR1} 、 B_{SWIR2} 分别为 TM 与 OLI 数据的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率数据; T 为亮面温度; λ 为热红外波段中心波长; ρ 为常数; ε 为地表辐射率; $a \sim f$ 在 TM 传感器下分别为 0.0315、0.2021、0.3012、0.1594、-0.6806、-0.6109, 在 OLI 传感器下分别为 0.1511、0.1973、0.3283、0.3407、-0.7117、-0.4559; SI 为裸土指数; IBI 为建筑指数。表中所有公式及参数取值参考文献[28]。

质量越好。

$$RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI, Wet, LST, NDBSI)] \quad (1)$$

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{\min}}{RSEI_{\max} - RSEI_{\min}} \quad (2)$$

式中, f 为 GEE 平台执行主成分分析的函数; $RSEI_{\max}$ 与 $RSEI_{\min}$ 为 $RSEI_0$ 的最大值与最小值。

1.3.2 空间自相关分析

空间自相关是一种分析空间对象之间相互关联程度的方法,常用指标为 Moran's I 指数^[29]。Moran's I 指数又分为全局 Moran's I 指数与局部 Moran's I 指数,分别表示整个研究区域空间存在聚集效应的强弱与局部区域的空间异质性。计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$I_{\text{local}} = \frac{(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n W_{ij}(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中, I 为全局 Moran's I 指数; I_{local} 为局部 Moran's I 指数; n 为空间单元的总数; W_{ij} 为空间权重矩阵; y_i 和 y_j 分别为第 i 个空间单元和第 j 个空间单元的值。 I 的范围为 $[0, 1]$, 值越大表明集聚效应越显著。 LISA 聚类图中存在 5 种关系, 即高-高、低-低、低-高、高-低和不显著^[30-31]。 高-高表示 RSEI 高值的集聚, 低-低表示低值的集聚, 低-高表示计算点为低值周围为高, 高-低表示计算点为高值周围为低。

1.3.3 Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计方法, 适用于长期序列数据的趋势分析, 并且对测量误差和异常值不敏感^[32-33]。 趋势计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \frac{x_a - x_b}{a - b} \quad (5)$$

式中, β 为 RSEI 变化趋势。 根据研究区 RSEI 分布情况, $\beta > 0.05$ 表明环境呈变好趋势, $\beta < -0.05$ 呈恶化趋势, $|\beta| < 0.05$ 表明趋势稳定; median 是取中值函数; x_a 和 x_b 是 RSEI 时间序列数据; a 和 b 是两个不同数据点的索引。

1.3.4 Mann-Kendall 显著性检验

Theil-Sen 趋势分析的统计显著性由 Mann-Kendall 检验中的 Z 值确定。 当 $|Z| > 1.96$, 表示变化趋势通过 95% 置信水平的显著性检验, Z 值的计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$S = \sum_{p=q+1}^{k-1} \text{sign}(x_p - x_q) \quad (8)$$

式中, Z 为 RSEI 的显著性统计量, $|Z|$ 大于 1.96 说明变化趋势显著; Var 代表方差。

2 结果与分析

2.1 RSEI 指数评估

主成分分析结果显示(表 2), 2001—2021 年 RSEI 对第一主成分(PC1)的贡献率为 79.43% ~ 85.84%, 平均贡献率为 83.22%, 这表明 PC1 能够涵盖四个指标的大部分特征。 具体而言, NDVI 与 Wet 的载荷呈正相关, 表明绿度与湿度指标对 RSEI 具有正向影响; LST 与 NDBSI 的载荷则呈负相关, 表明热度与干度指标对 RSEI 具有负向影响。 此外, 绿度载荷均值为 0.626, 表明 NDVI 与 RSEI 之间具有较强的正相关关系, 这说明影响太行山区生态环境质量的主要因素为绿度, 符合太行山地区的地理环境。

2.2 太行山区域 RSEI 时空格局

根据图 3 可知, 2001—2021 年太行山区域 RSEI 年均值呈现先下降后缓慢上升的趋势, 最小值为 0.481, 最大值为 0.564, 均值为 0.519。 进一步分析各分量指标发现, 绿度稳定上升, 而干度则显著下降。

将 RSEI 值划分为差、较差、中等、良、优五个等级。 由图 4 可知, 2001—2021 年研究区 RSEI 为差等级的面积比例稳定, 较差等级比例下降, 生态环境呈现出逐步改善的趋势。 2006 年差等级和较差等

表 2 主成分分析结果

Tab. 2 Results of PCA

年份	第一主成分 PC1				特征值	贡献率/%
	Wet	NDVI	NDBSI	LST		
2001	0.360	0.668	-0.479	-0.441	0.062	85.770
2006	0.301	0.672	-0.530	-0.421	0.070	85.840
2011	0.321	0.672	-0.292	-0.599	0.046	83.360
2016	0.329	0.537	-0.487	-0.605	0.043	79.430
2021	0.275	0.582	-0.669	-0.373	0.066	81.710
均值	0.317	0.626	-0.491	-0.488	0.057	83.222

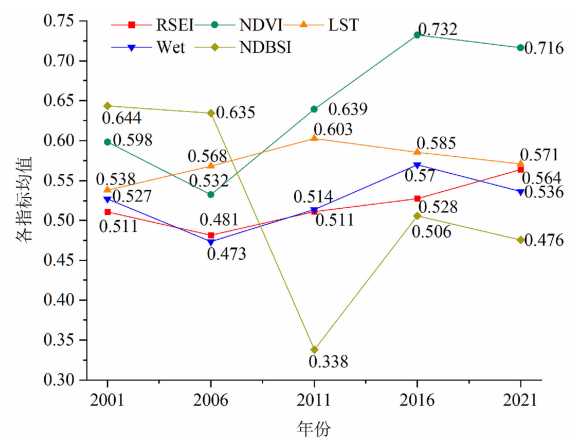


图3 2001—2021年RSEI年均值及各分量变化图
Fig. 3 Annual average change and component of RSEI from 2001 to 2021

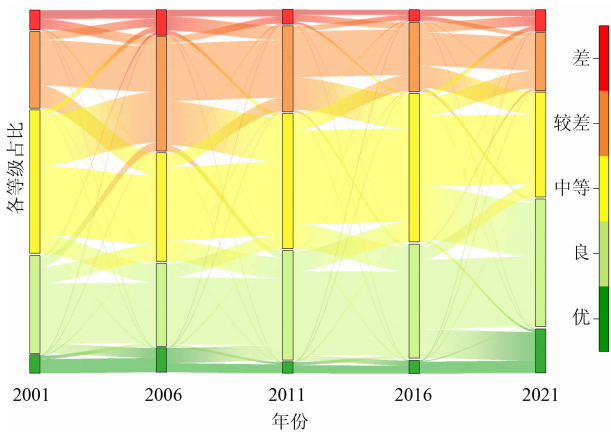


图4 生态环境质量等级的面积转移桑基图
Fig. 4 Sankey diagram of area transfer of ecological environment quality classes

级占比最高,达到 39%。到 2021 年,生态环境质量最佳,优等级占比达到 12%,差等级和较差等级占比最低,仅为 22%。就空间分布情况而言(图 5),根据太行山脉所在省份的划分,研究区可分为西太行(山西省境内)、南太行(河南省境内)和北太行(河北省境内)。2001—2006 年,西太行山区生态环境质量明显恶化。主要由于过度开采矿产,严重破

坏了生态环境,导致地表沉陷、水资源污染和植被破坏等问题,并且西太行北部地区是半干旱土石山区,土壤缺水、贫瘠,同时由于农民的不合理开发和放牧,导致该植被逐渐演替为次生植被甚至裸地,植被覆盖率显著降低。2006—2021 年,中国实施绿色矿山建设战略和太行山绿化工程,加强了监督检查,使矿区得以转型为“绿水青山”,生态环境质量得到显

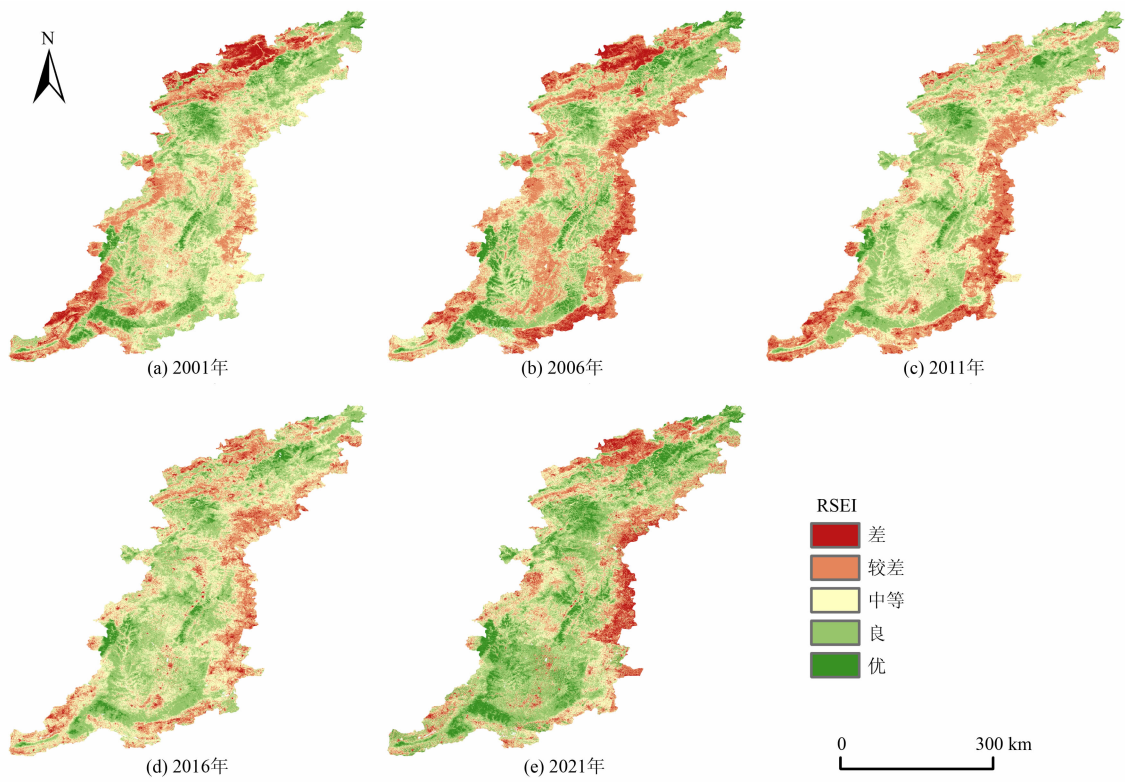


图5 太行山 RSEI 等级图
Fig. 5 RSEI grade in the Taihang Mountains

著改善。然而,北太行整体生态环境质量依然较低,主要原因是该地区位于平原地带,城市扩张导致林地和草地减少,生态环境质量逐步下降。总体来看,太行山区域的生态环境质量等级分布呈现四周低、中间高的特点。

2.3 生态环境质量空间自相关分析

为了探究太行生态环境质量的空间异质性^[34],使用 500 m × 500 m 的网格对图像进行重采样,得到了 546 205 个样本点。由图 6 可知,散点主要集中在一、三象限说明样本点存在明显的正相关与负相关。2001、2006、2011、2016、2021 年的 Moran's I 指数分别为 0.797、0.827、0.823、0.719、0.695,表明太行山区域 RESI 的聚类程度明显下降,生态环境质量的层次趋于碎片化。

由图 7 可知,高-高区域始终分布在研究区中心的山地地区,低-低区域则分布边缘平原区域。从土地类型来看,高-高区域多集中于林地和草地,低-低区域主要分布于人造地表和耕地。2001—2021 年太行山西部边缘的低-低聚类呈现明显的消减趋势,表明该地区的城市生态建设有显著成效。东部边缘地区低-低聚集在 2011 年前逐渐增加,表明该地区的生态环境质量较差。高-高聚类在 2011 年前保持

稳定无明显变化,在 2011 年后有明显增加趋势,说明处于高生态质量区域的聚集程度正在逐步加大。

2.4 太行山 RSEI 演变趋势

多期静态 RSEI 的对比不足以反映生态环境质量长期的变化趋势。因此,引入 Theil-Sen-MK 方法计算太行山区域生态环境质量的趋势变化。通过对 Theil-Sen Median 方法计算的趋势 进行 MK 显著性检验得出统计量 Z 值,结合 β 值与 Z 值得出趋势等级。统计原理如表 3 所示。

表 3 2001—2021 年 RSEI 变化趋势统计表
Tab.3 Trend of RSEI changes from 2001 to 2021

β	Z	趋势特征	百分比/%
$\beta > 0.05$	$Z \geq 1.96$	显著改善	5.18
	$1.96 > Z \geq -1.96$	轻微改善	51.14
$-0.05 < \beta < 0.05$	$1.96 \geq Z \geq -1.96$	稳定不变	22.19
$\beta < -0.05$	$1.96 \geq Z > -1.96$	轻微退化	20.55
	$Z \leq -1.96$	显著退化	0.94

生态环境质量变化趋势有显著的空间差异(图 8):仅有 22.19% 的区域处于稳定状态;51.14% 的区域轻微改善,5.18% 的区域得到显著改

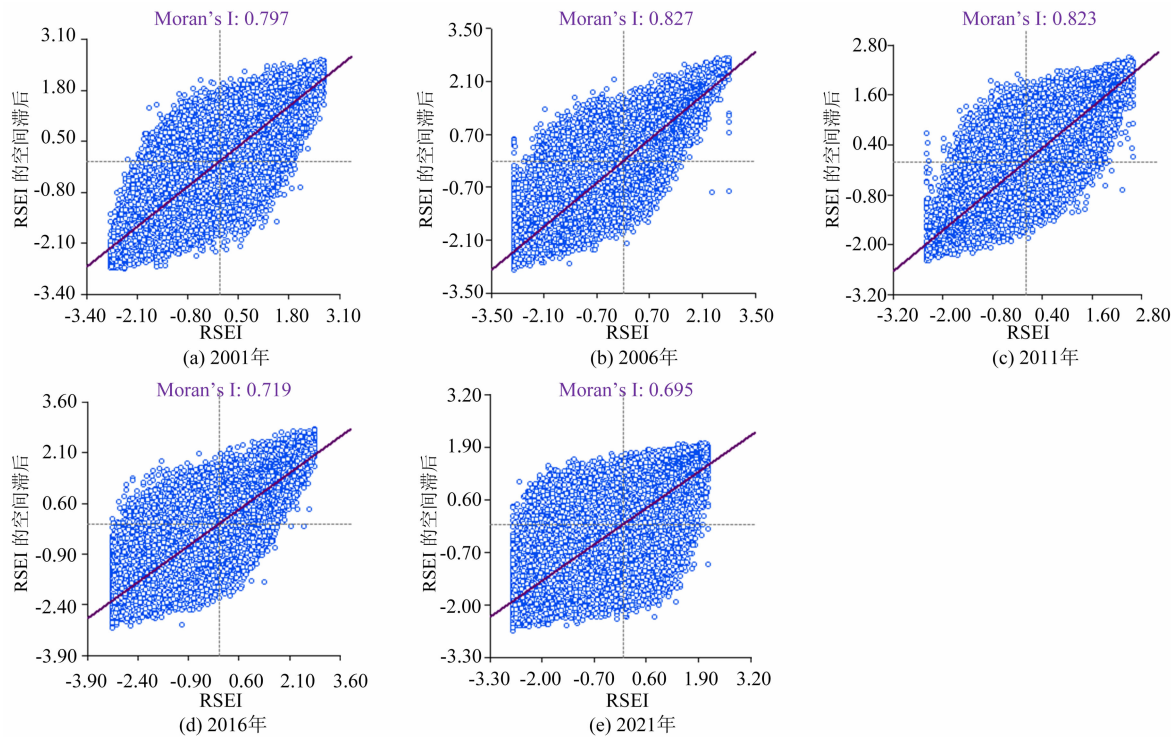


图 6 RSEI 的 Moran's I 散点图
Fig. 6 Moran's I scatter plot for RSEI

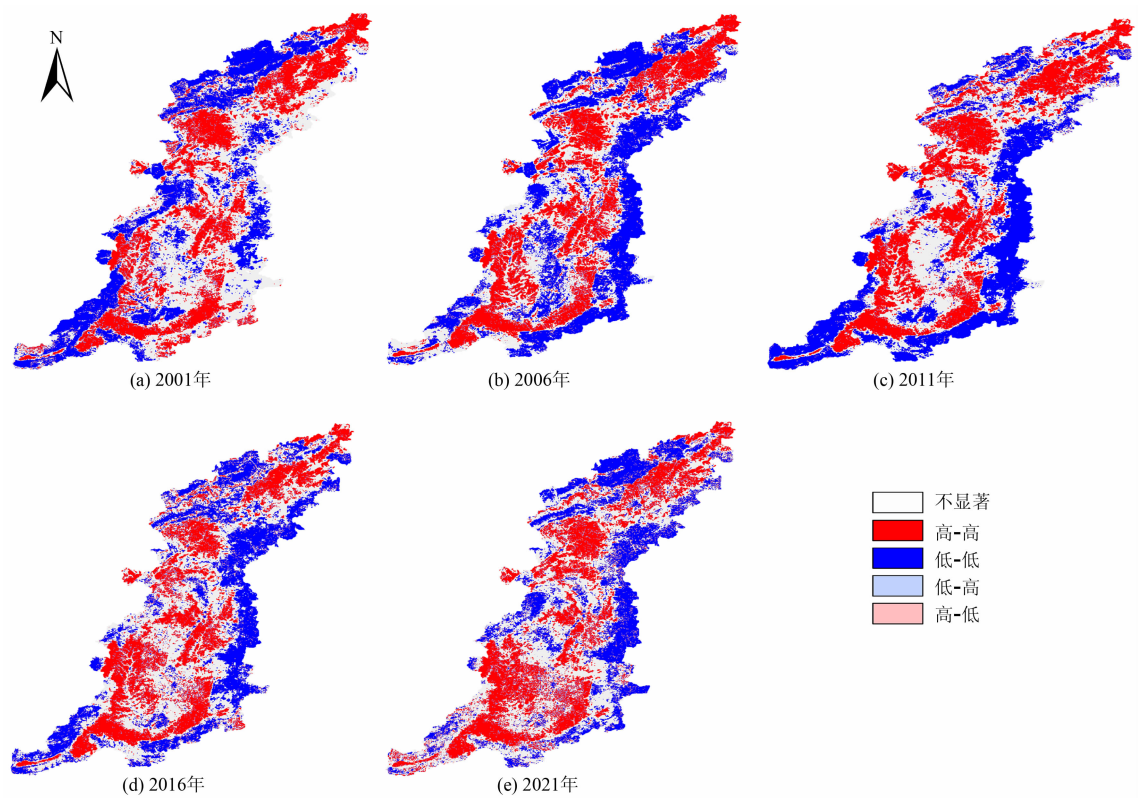


图7 太行山 RSEI 聚类图

Fig. 7 RSEI clustering map in the Taihang Mountains

善;20.55%的区域出现轻微退化,0.94%的区域显著退化。有改善的区域主要集中在西太行地区,表明太行绿化工程的实施取得显著成效。生态环境质量退化区域多分布于北太行地区,而南太行地区的城市发展与生态保护相对平衡,整体上生态环境质量保持稳定。

3 讨论

太行山是黄河流域重要的生态保护屏障,在水资源保护、生态平衡保持和生物多样性维护方面发挥着至关重要的作用。本研究基于 RSEI 模型,对太行山地区生态环境质量进行时空变化分析和趋势分析,填补了太行山地区使用遥感手段进行长时序、大范围的生态环境质量监测研究的空白。研究结果表明,2001—2021 年,太行山地区的生态环境质量总体呈现逐渐变好的趋势,但仍然存在局部地区生态环境质量出现衰退的现象。

人类活动是导致生态环境质量变化的主要原因之一。2001—2011 年,太行山西部与南部地区生态

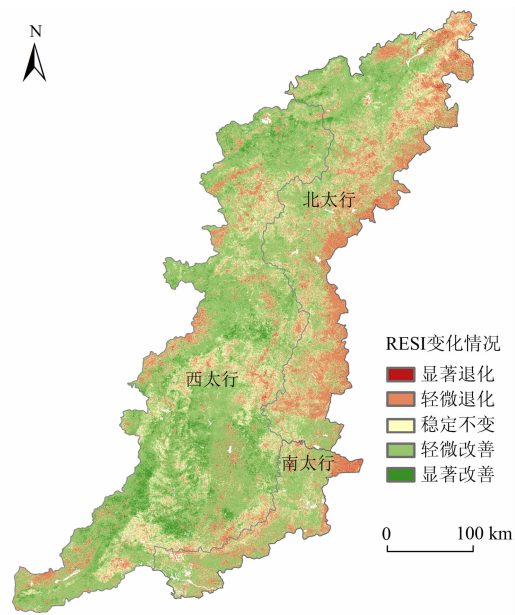


图8 太行山 RSEI 趋势图

Fig. 8 Trend of RSEI in the Taihang Mountains

环境质量处于较差等级,包括大同市、长治市、阳泉市、晋城市、焦作市、鹤壁市等地,这些地区存在大量矿区,矿山开采导致大量的土方工程,改变了地形地

貌,破坏了自然景观。此外,还产生大量废弃物和污染物,对水土质量造成了严重影响,进而对生态环境带来严重的损害^[35-38]。然而,通过本文研究可以看出,2011—2021 年西太行与南太行地区的生态环境逐步得到改善。许多资源型城市在初期发展阶段依赖资源开发和利用来实现经济快速增长,但为实现可持续发展目标,政府进行转型升级,建立绿色低碳的经济体系和生态体系。在此过程中,国家和地方政府采取了一系列措施,如太行山绿化工程、退耕还林还草工程以及推进生态移民工程等,加大了对生态修复和保护的投入和支持^[39-41],从而推动了西太行地区生态环境的改善。从土地利用变化情况发现^[42](图 9、表 4),2000—2020 年耕地面积明显减少,林地和建设用地则有显著增加趋势。这种变化与本研究发现的生态环境质量变化趋势基本一致。在太行山东侧平原地区,城市扩张导致大量耕地转变为建设用地,这也使得当地的生态环境持续恶化。相反,在太行山西侧山区,由于太行山绿化工程的持续推进,林地面积逐步增加,从而促进生态环境质量的持续改善。

除人类活动因素外,自然因素也是影响太行山生态环境质量演变的重要因素之一。相关研究表明^[43],太行山区域降水量呈波动下降趋势,气温则呈现出显著上升趋势,这也导致干旱频率和强度增加。在太行山东侧,极端天气出现次数明显多于西侧,气候快速变化还可能导致西太行地区的农业生产受影响,引发干旱、洪涝等自然灾害,造成土地沙

漠化和水资源短缺等问题,进一步加剧生态环境恶化。在本研究中,NDVI 被认为是引起 RSEI 变化的主要变量之一。植物的根系可以起到巩固稳定土壤的作用,从而涵养水源并预防水土流失的发生。有相关研究表明^[44],太行山区域整体的 NDVI 呈现出上升趋势,这一结论也与本研究结果一致。

相较于传统的遥感图像处理平台如 ENVI,本研究采用 GEE 平台进行大范围 RESI 快速计算,具有明显的优势^[45-47]。RSEI 模型是一种综合考虑多个生态环境指标的评价模型,适用于不同地区和时期的生态环境评价与监测,并具有广泛应用价值^[48-50]。尽管本文通过综合绿度、湿度、干度和热度四个指标,运用 RSEI 模型评价了太行山区域生态环境质量的时空变化和演变趋势,但生态环境质量受到多种因素的影响,包括自然因素、社会经济因素以及生态系统内部物质循环等。因此,后续研究可引入人口、GDP、资源开采、污染物排放、碳储量等指标,构建更加合理的生态环境质量评价体系。

表 4 土地利用类型所占比例

Tab. 4 Proportion of land use type (单位:%)

年份	草地	耕地	林地	水体	裸地	建设用地
2000 年	17.06	42.88	35.55	0.52	0.04	3.95
2020 年	16.25	36.23	39.27	0.70	0.07	7.48

4 结论

本研究基于 GEE 云平台,利用 Landsat 卫星计

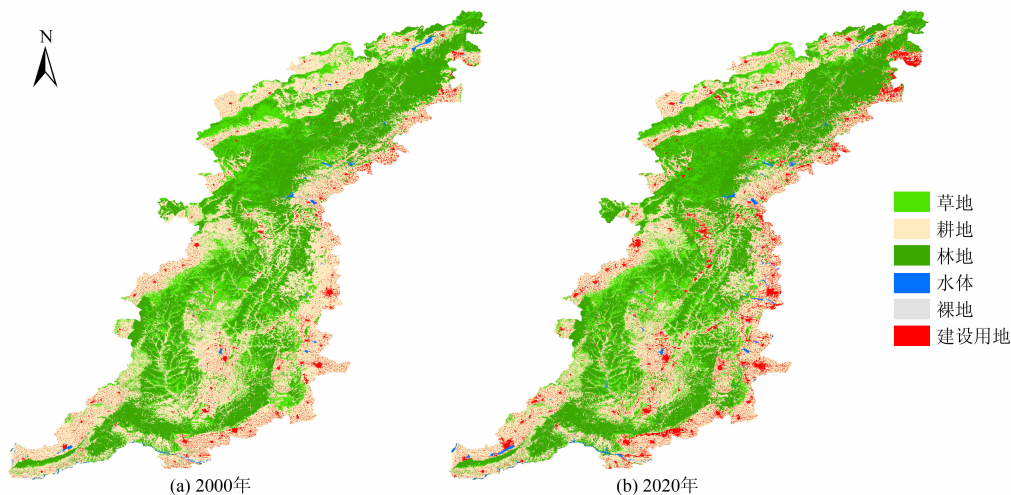


图 9 土地利用变化图

Fig. 9 Land use change maps

算 2001—2021 年太行山区域的 RSEI, 分析研究区生态环境质量时空变化特征以及演变趋势, 得到以下结论:

(1) 2001—2021 年太行山区域生态环境质量呈现先降低后增加的趋势, 生态环境质量等级处于优与良的区域主要位于中部山地地区, 面积由 2006 年的 31% 提升到 2021 年的 48%; 生态环境质量等级处于较差与差的区域主要位于北部以及东南部平原地区; 整体生态环境质量在空间上呈现中间高四周低的分布特征。

(2) 太行山生态环境质量存在明显的空间自相关性。Moran's I 指数与 LISA 聚类图表明, 2006 年后处于中部地区的低-低聚类逐渐被高-高聚类替代, 太行绿化工程效果显著生态环境质量逐渐转好。

(3) 太行山地区的生态环境质量在过去 20 年间呈改善趋势。55.14% 的区域表现出轻微改善, 5.18% 的区域得到显著改善, 20.55% 的地区经历轻微退化, 而 0.94% 的地区则出现显著退化情况。尽管中部山地地区的生态环境改善趋势明显, 但一些东部平原地区的生态环境却呈现进一步恶化趋势。因此, 相关环保部门需高度重视保护生态环境, 以实现高质量发展。

参考文献 (References)

- [1] 刘一良, 张景, 王丝丝, 等. “全球生态环境遥感监测年度报告”回顾: 2012—2021 [J]. 遥感学报, 2022, **26**(10): 2106—2120. [LIU Yiliang, ZHANG Jing, WANG Sisi, et al. Global ecosystems and environment observation: Annual report from China (GEOARC): 2012—2021 [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, **26**(10): 2106—2120] DOI: 10.11834/jrs.20222339
- [2] 孙金龙, 黄润秋. 以习近平生态文明思想为指引推动生态文明建设实现新进步 [J]. 环境保护, 2021, **49**(15): 8—10. [SUN Jinlong, HUANG Runqiu. Taking Xi Jinping's ecological civilization thought as a guide to promote the construction of ecological civilization and realize new progress [J]. Environmental Protection, 2021, **49**(15): 8—10]
- [3] 于淑会, 闫秋宇, 邓伟, 等. 基于生态补偿分析的山区“造血式”补偿模式探讨——以太行山河北段为例 [J]. 山地学报, 2021, **39**(6): 879—890. [YU Shuhui, YAN Qiuyu, DENG Wei, et al. A “hematopietic ecological compensation” mode applicable to the Hebei sections of the Taihang Mountain area, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(6): 879—890] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000646
- [4] 孙彩霞, 杨帆, 胡晋. 基于遥感数据的新生态环境指数评价 [J]. 测绘通报, 2021(11): 12—15. [SUN Caixia, YANG Fan, HU Jin. New ecological index evaluation based on remote sensing data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(11): 12—15] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.330
- [5] 宗加权, 白淑英, 冯朝阳, 等. 基于连续时间序列 NDVI 数据的中国生态状况时空变化特征 [J]. 水土保持研究, 2021, **28**(1): 132—138. [ZONG Jiaquan, BAI Shuying, FENG Chaoyang, et al. Spatiotemporal variation characteristics of ecological status in China based on continuous time series NDVI data [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(1): 132—138] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.01.017
- [6] 廖成浩, 曾艳, 姚昆, 等. 江西植被 EVI 时空动态监测及驱动因素分析 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, **44**(5): 981—989. [LIAO Chenghao, ZENG Yan, YAO Kun, et al. Spatio-temporal dynamic monitoring and driving factor analysis of vegetation EVI in Jiangxi province [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, **44**(5): 981—989] DOI: 10.7540/j.ynu.20210547
- [7] 江斯达, 古文凤, 杨俊, 等. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展 [J]. 地理学报, 2020, **75**(9): 1860—1878. [JIANG Sida, ZHAN Wenfeng, YANG Jun, et al. Urban heat island studies based on local climate zones: A systematic overview [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(9): 1860—1878] DOI: 10.11821/dlxb202009004
- [8] 郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 1948—2021 年河南省土壤含水量时空分布特征及其影响因素研究 [J]. 自然资源遥感, 2023: 1—13. [GUO Yi, GAN Fuping, YAN Baikun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture and its influencing factors in Henan province in 1948—2021 [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023: 1—13] DOI: 10.6046/zrzyyg.2022200
- [9] 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. [XU Hanchu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(5): 889—897]
- [10] 杜高奇, 李自强, 赵勇, 等. 基于 RSEI 的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, **53**(12): 81—93. [DU Gaoqi, LI Ziqiang, ZHAO Yong, et al. RSEI - based analysis on eco - environment quality monitoring and driving factors of Yellow River basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, **53**(12): 81—93] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.12.009
- [11] 柯丽娜, 徐佳慧, 王楠, 等. 基于遥感生态指数的滨海湿地生态质量变化评价——以辽东湾北部区为例 [J]. 生态环境学报, 2022, **31**(7): 1417—1424. [KE Lina, XU Jiahui, WANG Nan, et al. Evaluation of ecological quality of coastal wetland based on remote sensing ecological index: A case study of northern Liaodong Bay [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(7): 1417—1424] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.07.014

- [12] 褚馨德, 贾伟, 张峻豪, 等. 基于 RSEI 模型的祁连山自然保护区生态环境质量评价[J]. 环境监测管理与技术, 2022, **34**(1): 38–42. [CHU Xinde, JIA Wei, ZHANG Junhao, et al. Ecological environment quality evaluation of Qilian Mountain nature reserve based on RSEI model [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2022, **34**(1): 38–42] DOI: 10.19501/j.cnki.1006-2009.2022.01.005
- [13] 郭城, 陈颖彪, 郑子豪, 等. 顾及时空背景的遥感生态指数适用性分析——以粤港澳大湾区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2021, **37**(5): 23–30. [GUO Cheng, CHEN Yingbiao, ZHENG Zihao, et al. Applicability analysis of RSEI considering spatio-temporal background: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, **37**(5): 23–30] DOI: 10.3969/j.issn.1627-0504.2021.05.004
- [14] 宋珂, 王玉军, 李胤. 1999—2020 年长江经济带(江苏段)生态环境变化监测及人类活动驱动分析[J]. 测绘通报, 2021(2): 7–12. [SONG Ke, WANG Yujun, LI Yin. Monitoring of ecological environment changes in the Yangtze River Economic Belt (Jiangsu province) from 1999 to 2020 and analysis of the driving forces of human activities [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(2): 7–12] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0034
- [15] XU Hanguo, WANG Meiya, SHI Tingting, et al. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI) [J]. Ecological Indicators, 2018, **93**: 730–740. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.05.055
- [16] 赵忠明, 高连如, 陈东, 等. 卫星遥感及图像处理平台发展[J]. 中国图象图形学报, 2019, **24**(12): 2098–2110. [ZHAO Zhongming, GAO Lianru, CHEN Dong, et al. Development of satellite remote sensing and image processing platform [J]. Journal of Image and Graphics, 2019, **24**(12): 2098–2110] DOI: 10.11834/jig.190450
- [17] MUTANGA O, KUMAR L. Google Earth Engine applications [J]. Remote Sensing, 2019, **11**(5): 591. DOI: 10.3390/rs11050591
- [18] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 等. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4804–4811. [GUO Yongqiang, WANG Naijiang, CHU Xiaosheng, et al. Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(11): 4804–4811] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0560
- [19] 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. [CHEN Wei, HUANG Huiping, TIAN Yichen, et al. Monitoring and assessment of the eco-environment quality in the Sanjiangyuan region based on Google Earth Engine [J]. Journal of Geo-information Science, 2019, **21**(9): 1382–1391] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.190095
- [20] 张滔, 唐宏. 基于 Google Earth Engine 的京津冀 2001—2015 年植被覆盖变化与城镇扩张研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, **33**(4): 593–599. [ZHANG Tao, TANG Hong. Vegetation cover change and urban expansion in Beijing-Tianjin-Hebei during 2001–2015 based on Google Earth Engine [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, **33**(4): 593–599] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2018.4.0593
- [21] 郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 等. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2018, **33**(4): 600–611. [HAO Binfei, HAN Xujun, MA Mingguo, et al. Research progress on the application of Google Earth Engine in geoscience and environmental sciences [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, **33**(4): 600–611] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2018.4.0600
- [22] 魏静, 刘丽丽, 王红云, 等. 1990—2020 年太行山区土地利用景观格局时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, **30**(7): 1123–1133. [WEI Jing, LIU Lili, WANG Hongyun, et al. Spatiotemporal patterns of land-use change in the Taihang Mountain (1990–2020) [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, **30**(7): 1123–1133] DOI: 10.12357/cjea.20210870
- [23] 王成武, 罗俊杰, 唐鸿湖. 基于 InVEST 模型的太行山沿线地区生态系统碳储量时空分异驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2023, **32**(2): 215–225. [WANG Chengwu, LUO Junjie, TANG Honghu. Analysis on the driving force of spatial and temporal differentiation of carbon storage in the Taihang Mountains based on InVEST model [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, **32**(2): 215–225] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.02.001
- [24] 梁红柱, 刘丽丽, 高会, 等. 太行山东坡中段植物多样性垂直分布格局及其驱动因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, **30**(7): 1091–1100. [LIANG Hongzhu, LIU Lili, GAO Hui, et al. Altitudinal distribution pattern and its driving factors of plant diversity in the middle section of the eastern slope of the Taihang Mountain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, **30**(7): 1091–1100] DOI: 10.12357/cjea.20210863
- [25] 司梦可, 曹建生, 阳辉, 等. 太行山区不同植被条件下土壤水分动态变化特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, **28**(11): 1766–1777. [SI Mengke, CAO Jiansheng, YANG Hui, et al. Soil water variation of different vegetation community in Taihang Mountain area [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, **28**(11): 1766–1777] DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200172
- [26] MALAKAR N K, HULLEY G C, HOOK S J, et al. An operational land surface temperature product for landsat thermal data: Methodology and validation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, **56**(10): 5717–5735. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2824828

- [27] LIU Ying, MENG Qingyan, ZHANG Linlin, et al. NDBSI: A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas [J]. *Catena*, 2022, **214**: 106265. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106265
- [28] GAO Wenlong, ZHANG Shengwei, RAO Xinyu, et al. Landsat TM/OLI-based ecological and environmental quality survey of Yellow River Basin, Inner Mongolia Section [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(21): 4477. DOI: 10.3390/rs13214477
- [29] ZHANG Chaosheng, LUO Lin, XU Weilin, et al. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1–3): 212–221. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.03.011
- [30] 黎江韵. 技术创新与区域经济发展时空格局演化分析——基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据[J]. *地域研究与开发*, 2022, **41**(3): 1–5. [LI Jiangyun. Analysis on evolution of technology innovation and regional economic development spatio-temporal pattern: Based on NPP/VIIRS night light data [J]. *Areal Research and Development*, 2022, **41**(3): 1–5] DOI: 10.3969/j.issn.1003–2363.2022.03.001
- [31] ANSELIN L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, **27**(2): 93–115.
- [32] YANG Yujie, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, et al. Factors affecting long-term trends in Global NDVI [J]. *Forests*, 2019, **10**(5): 372. DOI: 10.3390/f10050372
- [33] MUDELSEE M. Trend analysis of climate time series: A review of methods [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, **190**: 310–322. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.12.005
- [34] ZHOU Weiqi, PICKETT S T A, CADENASSO M L. Shifting concepts of urban spatial heterogeneity and their implications for sustainability [J]. *Landscape Ecology*, 2017, **32**(1): 15–30. DOI: 10.1007/s10980–016–0432–4
- [35] 王德利, 李玉倩, 寇婷, 等. 首都周边地区矿山地质环境治理与生态修复思路[J]. *城市地质*, 2017, **12**(4): 24–29. [WANG Deli, LI Yuqian, KOU Ting, et al. The mine geological environment management and ecological restoration in areas around the Beijing Capital [J]. *Urban Geology*, 2017, **12**(4): 24–29] DOI: 10.3969/j.issn.1007–1903.2017.04.004
- [36] 李龙飞. 基于 GIS 的大同矿区土地利用变化及可持续利用研究[D]. 太原: 山西大学, 2013: 31–34. [LI Longfei. The land use change and sustainable utilization research of Da Tong mining area based on GIS [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013: 31–34]
- [37] 蒋毓琪, 杨怡康, 朱少英. 黄河流域山西矿区自然资本占用动态评估及驱动机制[J]. *环境工程技术学报*, 2022, **12**(4): 1264–1271. [JIANG Yuqi, YANG Yikang, ZHU Shaoying. Dynamic evaluation and driving mechanism of natural capital occupation in Shanxi mining areas of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(4): 1264–1271] DOI: 10.12153/j.issn.1674–991X.20210327
- [38] 贾志安. 山西省典型矿区植被覆盖度时空变化特征及驱动因素研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2018: 19–45. [JIA Zhian. Temporal and spatial characteristics and driving forces of vegetation coverage in typical mining areas in Shanxi province [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2018: 19–45]
- [39] 郭慧, 董士伟, 辛学兵, 等. 多尺度遥感产品在太行山绿化工程中的适用性分析[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(11): 159–165. [GUO Hui, DONG Shiwei, XIN Xuebing, et al. Suitability analysis of multi-scale remote sensing products in Taihang Mountain afforestation project [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(11): 159–165] DOI: 10.11975/j.issn.1002–6819.2020.11.018
- [40] 胡耀升, 翟洪波, 田野. 太行山绿化工程建设可持续性分析[J]. *林业经济*, 2017, **39**(9): 48–52. [HU Yaosheng, ZHAI Hongbo, TIAN Ye. Analysis on sustainability of Taihang Mountain greening program construction [J]. *Forestry Economics*, 2017, **39**(9): 48–52] DOI: 10.13843/j.cnki.lyjj.2017.09.009
- [41] 李月丛, 许清海, 王泽民. 浅谈河北太行山区的生态恢复[J]. *中国水土保持*, 2004(11): 14–15. [LI Yuecong, XU Qinghai, WANG Zemin. Ecological restoration in the Taihang Mountains of Hebei [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004(11): 14–15] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2004.11.005
- [42] JUN Chen, BAN Yifang, LI Songnian. Open access to earth land-cover map [J]. *Nature*, 2014, **514**(7523): 434–434. DOI: 10.1038/514434c
- [43] 何雪莉, 李亚男, 石天宇, 等. 1961—2018 年太行山东西侧降水变化[J]. *山地学报*, 2022, **40**(1): 43–55. [HE Xueli, LI Yanan, SHI Tianyu, et al. Precipitation changes to the eastern and western sides of the Taihang Mountains from 1961 to 2018 [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(1): 43–55] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000654
- [44] 范晨雨, 景海涛, 王莉, 等. 太行山区气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(3): 146–152. [FAN Chenyu, JING Haitao, WANG Li, et al. Spatial-temporal change of climate and its relationship with vegetation coverage in Taihang mountainous areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(3): 146–152] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.022
- [45] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(12): 3913–3919. [SONG Huimin, XUE Liang. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan city, northwest China based on RSEI model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(12): 3913–3919] DOI: 10.13287/j.1001–9332.201612.024
- [46] 刘智才, 徐涵秋, 李乐, 等. 基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, **23**(4): 728–739. [LIU Zhicai, XU Hanqiu, LI Le, et al. Ecological

- change in the Hangzhou area using the remote sensing based ecological index [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, **23**(4): 728–739] DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2015.04.008
- [47] 罗春, 刘辉, 戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估——以常宁市为例[J]. *国土资源遥感*, 2014, **26**(4): 145–150. [LUO Chun, LIU Hui, QI Luyue. Ecological changes assessment based on remote sensing indices: A case of Changning city [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, **26**(4): 145–150] DOI: 10.6046/gtzyyg.2014.04.23
- [48] 王渊, 赵宇豪, 吴健生. 基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测——以粤港澳大湾区为例[J]. *生态学报*, 2020, **40**(23): 8461–8473. [WANG Yuan, ZHAO Yuhao, WU Jiansheng. Dynamic monitoring of long time series of ecological quality in urban agglomerations based on Google Earth Engine cloud computing: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(23): 8461–8473] DOI: 10.5846/stxb202006251650
- [49] 赵少华, 刘思含, 刘芹芹, 等. 中国城镇生态环境遥感监测现状及发展趋势[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(6): 1261–1271. [ZHAO Shaohua, LIU Sihan, LIU Qinqin, et al. Progress of urban ecological environment monitoring by remote sensing in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(6): 1261–1271] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.06.023
- [50] 赵管乐, 彭培好. 基于 RSEI 的典例干热河谷区——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. [ZHAO Guanle, PENG Peihao. RSEI-based evaluation on ecological environment changes in typical dry hot valley: Panzhihua city, Sichuan, China [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(6): 842–854] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000643

Spatial-Temporal Variation and Evolutionary Trends of Eco-Environment Quality in the Taihang Mountains, China

YAN Geding, JING Haitao*, HE Shi, LI Hui, GUO Huanchao

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Human activities will inevitably have some negative impact on regional ecosystems. Changes in eco-environment quality are a result of joint action of multiple factors. Objective evaluation of ecological environment quality is the premise of effective control and improvement of ecological environment quality and sustainable development. The change in the quality of the ecological environment is the result of multiple factors, and compared with other research methods, the use of remote sensing data to evaluate the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) can rapidly, comprehensively, and efficiently monitor the ecological environment status.

The Taihang Mountains is the dividing line between the North China Plain and the Loess Plateau. It plays an important ecological role in northern China. Partly affected by human activities, the vegetation in Taihang was once greatly deteriorated with serious soil erosion.

In this study, it took Landsat remote sensing images of 2001 to 2021 in the Taihang Mountains as data source. Remote Sensing Ecological Index (RSEI) was introduced as assessment index to sketch out the spatial-temporal pattern of eco-environment quality and change trend, based on GEE (Google Earth Engine) cloud platform and a combination of Mann-Kendall trend analysis with Moran's I index.

It found that (1) The mean value of RSEI for the period of 2001–2021 was 0.519, revealing a trend of first decreasing and then increasing over time, and a distribution of high in the middle and low all around. (2) The ecological quality in Taihang had obvious spatial autocorrelation; the high-high aggregations of high eco-environment quality clustered in forest and grassland in the mountain, whereas the low-low aggregations were mostly concentrated in artificial surfaces and cultivated land in the plains. (3) The areas of interests with an evidence of ecological quality improvement lied in the western but there were lasting deteriorated zones in the

eastern. Overall, it is expected that the ecological change in future in the Taihang Mountains should be improved, while still 21.49% of the area would suffer a trend of degradation.

Well understanding of spatial-temporal changes and trends of ecological quality in the Taihang Mountains can provide scientific reference for dynamic monitoring and management of the regional ecological environment and sustainable development.

Key words: Remote Sensing Ecological Index (RSEI); eco-environment quality; Mann-kendall trend analysis; spatial-temporal variation; the Taihang Mountains

(责任编辑 钟雨倩)