

doi:10.6046/zrzyyg.2023128

引用格式: 陈宜欣, 宁晓刚, 张翰超, 等. 遥感生态指数(RSEI)模型及应用综述[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(3): 28-40. (Chen Y X, Ning X G, Zhang H C, et al. Remote sensing ecological index (RSEI) model and its applications: A review[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(3): 28-40.)

遥感生态指数(RSEI)模型及应用综述

陈宜欣^{1,2}, 宁晓刚^{1,2}, 张翰超^{1,2}, 兰小强^{1,3}, 常中兵^{1,4}

(1. 自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室, 广州 510670; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100036; 3. 自然资源部信息中心, 北京 100036; 4. 广东省国土资源测绘院, 广州 510500)

摘要: 在“双碳”背景下, 开展遥感生态评价与监测分析对于及时掌握生态状况、制定科学合理的生态保护政策具有重要作用。早期遥感生态评价指标单一、过程复杂。遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)实现了生态评价效率的提高, 得到广泛应用。为深入理解 RSEI, 文章阐述了该指数的产生背景, 介绍了 RSEI 的计算方法及研究现状, 归纳了指数存在的问题及区域适应性调整措施, 并对 RSEI 主要应用方向, 即区域生态评价和区域生态变化监测进一步分析, 最后指出, 未来 RSEI 虽有广阔发展空间, 却仍需围绕影像时空尺度、存储和批处理能力、模型自适应、智能化等方面进行研究。

关键词: RSEI; 模型改进; 应用分析; 区域生态评价; 区域生态变化监测

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)03-0028-13

0 引言

自2020年提出“碳达峰、碳中和”目标以来, 我国积极推进生态结构绿色转型, 助推高质量发展。在“双碳”背景下, 高效开展遥感生态评价与分析对及时掌握生态状况、制定科学合理的生态保护政策具有重要作用。

目前, 中国在轨遥感卫星已达200余颗^[1], 海量的遥感数据为生态评价提供了多样的选择, 为改进生态评价方式、提升评价效率提供了客观条件。早期的生态评价往往基于单一遥感指标, 但由于生态环境各要素既相互制约又有所区别, 单一指标并不能对生态环境的整体状况进行客观的衡量, 之后出现的各综合指数又存在数据获取困难、计算繁琐等弊端, 导致应用效率较低。为解决上述问题, 徐涵秋^[2]在2013年提出了遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI), 将生态系统的各部分集成为整体指标, 实现了仅以影像为数据源进行量化的生态评价, 从而简化评价过程、提高评价效率。10年间, 学者们在发挥其生态评价优势的同时将其应用于变化检测领域, 取得了显著成果。

为了解 RSEI 模型、系统获知模型当前的应用状况, 进而更好地将其应用于生态评价过程, 本文基于 RSEI 相关文献, 阐述其产生背景和计算方法; 总结 RSEI 模型在生态指标维度压缩和区域适应性调整方面的问题及改进方向; 通过对研究现状的了解, 归纳 RSEI 模型在区域生态评价和区域生态变化监测方面的应用、发展趋势和局限性; 最后分析了近年来制约 RSEI 发展的重要因素以及当前采取的措施, 并展望了未来的重点研究方向, 以为后续研究提供思路。

1 RSEI 提出背景

近年来, 我国进行了全面的生态文明体制改革, 将生态安全纳入国家安全体系中, 并将其作为其他安全的载体和基础。进行生态评价和生态变化状况的监测是保护国家生态安全的重要举措之一^[3], 遥感技术的进步实现了由人工结合影像与地理信息进行分析到智能化检测的转变^[4], 促进了生态分析方式的进步。然而, 如何简化、优化生态评价和变化监测过程仍是值得思考的问题。

遥感指数是通过现有遥感技术, 将卫星多光谱

收稿日期: 2023-05-09; 修订日期: 2023-09-19

基金项目: 自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室开放基金课题“基于先验知识的耕地至园林草地的变化检测”(编号: 2022NRMZ01)资助。

第一作者: 陈宜欣(2000-), 女, 研究生, 主要研究方向为自然资源遥感监测。Email: chenyx0326@163.com。

通信作者: 宁晓刚(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事自然资源遥感监测、生态遥感、城市地理国情监测方向的研究。Email: ningxg@casm.ac.cn。

影像的可见光及红外波段进行组合,构建并强化地物光谱特性,从而有效评价具体地物特征的一种手段^[5]。相比于以往的定性评价,遥感指数的出现使生态环境的优劣性有了一个定量的评价标准,但其中的单一遥感指数只能反映城市生态系统中的某一个问 题,如用植被指数和植被覆盖度代表城市绿化程度^[6]、用不透水地表盖度代表城市生态状况^[7]、以地表温度反映城市热岛效应^[8]等等,忽略了生态要素间的相关性、复杂性^[9],这样的评价方式仍是片面的。

近年来,生态学和遥感领域的结合愈加紧密。

表 1 RSEI 提出之前的几种综合评价指数
Tab. 1 Several comprehensive evaluation indices before RSEI proposed

名称	提出时间	提出国家/组织	单一指数个数	评价指数/方面
环境质量指数 (environmental quality index, EQI)	1993 年	美国环境保护署	20	水、土地、建筑、社会人口环境等 ^[12]
省域生态环境质量指数(provincial environmental quality index, PEQI)	2000 年	中国	13	地形起伏度、土壤侵蚀模数、物种丰富度、水/耕地/植被资源指数等 ^[13]
环境综合指数 (environmental performance index, EPI)	2006 年	美国耶鲁大学和哥伦比亚大学	40	生物群落保护、草地损失、环境卫生、温室气体排放量、土地覆盖等 ^[14]
生态环境状况指数(ecological index, EI)	2006 年	中国国家环境保护总局	6	生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地胁迫、污染负荷和环境限制指数 ^[15]

与前述综合指数类似,RSEI 由 4 个单一指数复合构成,但不同之处在于构成 RSEI 的绿度、湿度、热度、干度指标中的原始信息均可以由遥感影像直接获得^[16]。相比之下,RSEI 模型更易于获得^[17-21],更便于对生态状况做出快速的判断。提出至今十余年间,经过不断论证和调整,RSEI 已成为一种普遍使用的生态评价方法。此外,研究者通过计算两期或多期影像的 RSEI 差值即可直接检测生态变化状况,证明其在生态变化监测领域同样具有研究价值。

当前,遥感技术的进步、影像获取频率和质量的不断提高为 RSEI 提供了更广阔的应用空间,RSEI 应用于区域生态评价和区域生态变化监测的方式也更为多样,对生态内因,即生态格局成因和驱动力的研究逐渐兴起^[22-25],生态研究呈现逐渐精细化的特点。但是大范围、长时序、密集时间间隔的监测趋势^[26]也对影像时间序列稳定性、空间尺度一致性、存储和批处理能力等方面提出了严峻考验,众多问题亟待解决。

2 RSEI 原理与研究现状

RSEI 是一个用以评价区域生态质量的综合指标,由 4 个人类能直观感觉生态条件优劣的单一指标以主成分分析 (principal components analysis,

一方面,多样的遥感监测手段可以为生态学提供具有生态价值的参数;另一方面,生态学也可以为遥感监测提供理论指导,从而帮助建立起更适用于生态系统的遥感监测模型和方法^[10]。同时,生态遥感学的发展也使生态系统的整体性理论^[11]得到重视,研究者们开始探寻更综合的生态评价方式以求客观评估区域生态环境质量,综合评价指数应运而生,区别于单一指数,综合评价指数对生态环境进行了多方面的综合考量,更具概括性和科学性。表 1 是 RSEI 模型提出前的几种常用综合评价指数。

PCA) 的方式集成^[16]。单一指标包括绿度、湿度、干度和热度。绿度即比值植被指数,用于度量生态环境的植被覆盖程度和植被类型;湿度包括降水量、蒸散发量、土壤水分等因素,反映生态环境的含水程度;干度代表生态系统的干旱程度和水分利用效率;热度代表环境温度状况^[27]。上述指数度量了生态环境固碳能力和参与水循环能力,是生态环境优劣性的重要参考。PCA 是一种对多变量进行信息综合的常用数学方法,分析后的第一主分量 (PC₁)集中了大部分的特征,可以很好地代表各指标的信息^[2],因此,RSEI 采用 PCA 方法来集成各单一指标。

2.1 RSEI 计算方法

1)绿度。通常由归一化植被指数 (normalized difference vegetation index,NDVI)表示,公式为:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad , \quad (1)$$

式中 NIR 和 R 分别为近红外和红光波段的反射率。

2)湿度。为了有效减少数据冗余,进而更加精确地反演出土壤湿度,常采用缨帽变换的湿度分量表征^[28]。TM 和 ETM+传感器的湿度指标分别为:

$$Wet_{TM} = 0.031\ 5p_1 + 0.202\ 1p_2 + 0.310\ 2p_3 + 0.159\ 4p_4 - 0.680\ 6p_5 - 0.610\ 9p_7 \quad , \quad (2)$$

$$Wet_{ETM+} = 0.150\ 9\rho_1 + 0.197\ 3\rho_2 + 0.327\ 9\rho_3 + 0.340\ 6\rho_4 - 0.711\ 2\rho_5 - 0.457\ 2\rho_7, \quad (3)$$

式中 ρ_i ($i = 1, \dots, 5, 7$) 为 TM/ETM+传感器的第 1, 2, 3, 4, 5 和 7 波段经大气校正后的反射率。

OLI 传感器的湿度指标公式为:

$$Wet_{OLI} = 0.151\ 1\rho_2 + 0.197\ 3\rho_3 + 0.328\ 3\rho_4 + 0.340\ 7\rho_5 - 0.711\ 7\rho_6 - 0.455\ 9\rho_7, \quad (4)$$

式中 ρ_i ($i = 2, 3, \dots, 7$) 为 Landsat8 卫星 OLI 传感器的第 2, 3, 4, 5, 6, 7 波段经大气校正后的反射率。

3) 干度。干度由裸土指数 (soil index, SI) 和建筑指数 (index-based built-up index, IBI) 合成, 计算方法为:

$$NDBSI = (SI + IBI) / 2, \quad (5)$$

$$SI = [(\rho_5 + \rho_3) - (\rho_4 + \rho_1)] / [(\rho_5 + \rho_3) + (\rho_4 + \rho_1)], \quad (6)$$

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_5}{(\rho_5 + \rho_4)} - [\frac{\rho_4}{(\rho_4 + \rho_3)} + \frac{\rho_2}{\rho_2 + \rho_5}]}{\frac{2\rho_5}{(\rho_5 + \rho_4)} + [\frac{\rho_4}{(\rho_4 + \rho_3)} + \frac{\rho_2}{(\rho_2 + \rho_5)}]}, \quad (7)$$

式中 $\rho_1 \sim \rho_5$ 分别为蓝、绿、红、近红外、中红外波段的反射率。

4) 热度。热度指标由地表温度 (land surface temperature, LST) 来代表, 计算公式为:

$$L_6 = gain \times DN + bias, \quad (8)$$

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_6 + 1), \quad (9)$$

式中: L_6 为 ETM+第 6 波段像元在传感器处的辐射值; T 为传感器处温度值; K_1 和 K_2 均为定标参数; $gain$ 和 $bias$ 为增益和偏置值。经式(9)计算之后的温度还需要进行比辐射率的纠正才能成为 LST, 即

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon], \quad (10)$$

式中: λ 为 ETM+第 6 波段的中心波长 ($11.5\ \mu\text{m}$); $\rho = 1.438 \times 10^{-2}\ \text{m} \cdot \text{K}$; ε 为比辐射率。

5) 计算 RSEI。在正规化^[2]和 PCA 后取 PC_1 , 经简单数学处理即可获得初始生态指数 $RSEI_0$:

$$RSEI_0 = 1 - \{PC_1[f(NDVI, Wet, LST, NDBSI)]\}. \quad (11)$$

再经过正规化得到 $RSEI$, $RSEI$ 是一个 0~1 之间的无单位值, 值越大代表区域生态质量越好, 公式为:

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0_{\min}}}{RSEI_{0_{\max}} - RSEI_{0_{\min}}}, \quad (12)$$

式中 $RSEI_{0_{\min}}$ 和 $RSEI_{0_{\max}}$ 分别为 $RSEI_0$ 的最小值和最大值。

2.2 RSEI 研究现状

RSEI 提出后, 因其具有数据来源简单、对生态状况模拟效果好等优点而得到广泛认同, 为更全面了解 RSEI 指数在生态监测与评价领域的研究与应用价值, 对 2013—2022 年 10 a 间 RSEI 的相关文献进行分析。经统计, 截止到 2022 年, 中国知网 (CNKI) 可查询到与 RSEI 有关文献共 510 篇 (中文 415 篇, 英文 95 篇), Web of Science (WOS) 共计 129 篇。图 1 是 RSEI 自提出到目前为止 CNKI 及 WOS 发文量的折线-簇状柱形统计图, 从图中可以看出, 近 5 a 来与 RSEI 有关的研究呈快速上升趋势。

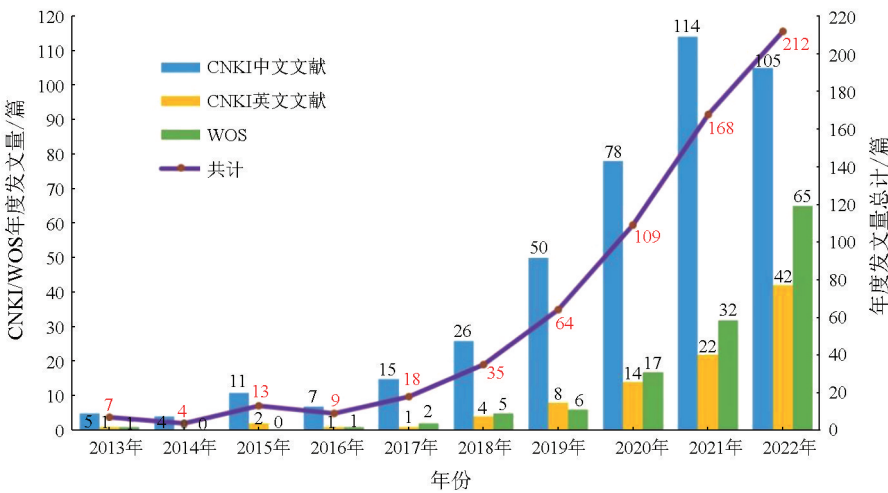


图 1 RSEI 发文量统计

Fig. 1 Statistics of RSEI document quantity

以主题和关键词进行文献计量分析,图 2 是用有关 RSEI 文献生成的关键词图谱。以生态环境、RSEI 指数为中心词,生态(环境)质量(评价)、时空变化等关键词在图中占据了很大比例,说明有关 RSEI 研究主要聚焦于上述问题。以数量而言,在已

统计的中英文文献中,关键词和主题频次最高的为生态环境质量/生态环境评价,其次为生态(环境)变化/时空变化/变化监测,而动态监测/时空演变/变化分析紧随其后,土地利用/生态环境/检测与评价等相关词也占到较高频次^[29-30]。

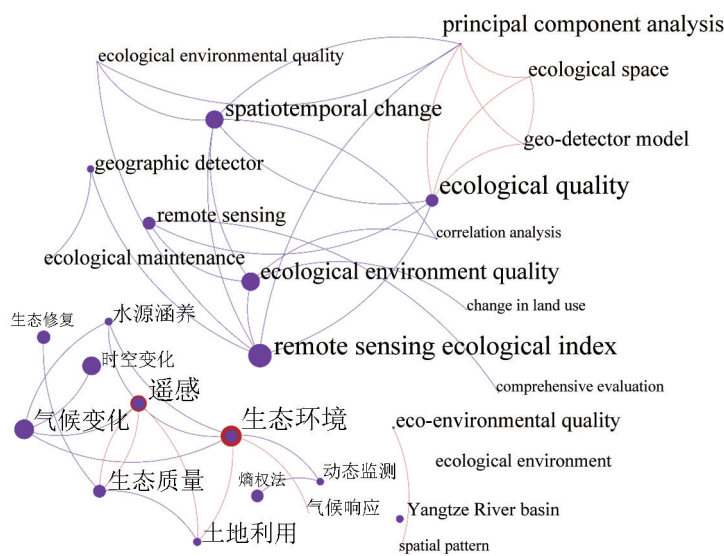


图 2 RSEI 关键词图谱
Fig. 2 RSEI keyword graph

综合上述图表内容,从发文数量的统计图反映出 RSEI 在 10 a 间研究热度呈稳步提升的趋势,尤其是近 5 a 的增幅较大。关键词图谱呈现的文献类型大部分为应用型,说明 RSEI 模型的应用难度不高,能够推广至实际工作中;文献主题集中于生态质量的评价与生态变化状况的监测,说明上述 2 方面是 RSEI 的主要应用领域。

3 RSEI 存在问题及改进

3.1 生态指标维度压缩

实现单一指标高效集成是 RSEI 模型构建的一大难题,原有单一指标分别反映了区域生态不同方

面的特征,而指标集成的实质是各指标生态信息的集成和数据维度的压缩。RSEI 采用 PCA 来集成各单一指标,此方法有 2 个显著优点:① PCA 生成的荷载值客观确定各指标权重,实现了非人为主观定权^[31];② 通过旋转坐标轴可将多维特征空间中的数据集中于少数几个特征分量,从而在保留大部分信息的基础上实现去相关性、降维和数据压缩。然而,部分学者认为 PCA 存在一定局限性,会影响 RSEI 的计算结果,需通过修改 RSEI 模型或替换 PCA 来规避这一影响,有关 PCA 是否适用于单一指标集成的问题也引发了学界的持续讨论,具体如表 2 所示。

表 2 PCA 是否适用于单一指标集成的讨论
Tab. 2 Discussion on whether PCA is suitable for single index integration

问题	观点/讨论	修改方式	局限性
是否仅用第一主成分(PC ₁)构建 RSEI ₀	仅用 PC ₁ 信息利用不充分 ^[32]	以 PC ₁ , PC ₂ , PC ₃ 的贡献率为权重 ω _i 构建 MRSEI, 即: $MRSEI = \sum_{i=1}^3 \omega_i PC_i$	PC ₂ , PC ₃ 无生态学意义 ^[33]
	批驳: PC ₂ 和 PC ₃ 会干扰原有生态信息,不能忽略主分量包含的遥感信息而仅考虑增加信息量 ^[34]		
PCA 高值的生态意义不定	PC ₁ 不能保证较高的贡献率,PCA 变换后高值部分代表的生态优劣势不定 ^[35]	权重计算采用熵权法,之后采用指数和法计算 RSEI	比 RSEI 更复杂
PCA 评价、权重确定方法的合理性	除利用 PCA 构建 RSEI 外,结合其他方式综合评价的可靠性更高 ^[36] 大面积建立 RSEI 指标权重的方法(基于数值的权重评估法)不利于计算和决策认知 ^[37]	以层次分析法、熵值法结合博弈论思想确定组合权重 建立基于知识粒化熵的 RSEI 确定方法	模型构建复杂 指标变异性大小计算较为复杂

(续表)

问题	观点/讨论	修改方式	局限性
特征向量方向存在不确定性	①特征向量及其方向决定 RSEI 结果及空间分布,空间分布的随机性导致无法批量计算 RSEI; ②特征向量方向不影响特征值贡献率,也不影响同一分量中各指标的绝对值; ③NDVI 和 Wet 的方向、LST 与 NDSI 的方向在 PC ₁ 中相同 ^[38]	人工修改 PC ₁ 的特征向量方向,取 NDVI 和 Wet 的特征向量的绝对值和 NDSI 和 LST 的相反绝对值,使用 PC ₁ 代替 1-PC ₁ 计算生态环境质量指数	需人工修改特征向量方向
是否适用 PCA 模型	构成 RSEI 的 4 个指标间可能存在弱线性或非线性关系 ^[39-40]	利用核主成分分析构建非线性遥感生态指数 nRSEI	算法论证不充分、精度验证不合理 ^[31]
	批驳: 指标间呈强相关关系且改进后的 nRSEI 还会出现过拟合、数据爆炸等问题,核主成分分析的应用不合理 ^[31]		

由上表可知,用 PCA 算法进行指标集成在生态信息保留、模型计算结果稳定性方面存在争议。然而,为了使集成后的 RSEI 能有效评价生态状况,改进的算法也必须满足以下条件:第一,计算后的综合指数是原有单一指标生态信息的有机整合,须兼顾信息完整性和真实性;第二,简单易行,具有鲁棒性;第三,指标权重计算合理,保留单一指标间呈现出的相互关系。10 a 间,虽然针对 PCA 指标集成的改进算法众多,但都因存在扭曲生态信息^[32-34]、模型计算复杂^[35-37]、存在人为干预^[38]或错误评估指标相关关系^[39-40]等问题而未得到学界公认,因此,目前采用 PCA 算法集成单一指数仍是主流。未来,将会有更多用于单一指标集成的方法被提出,但只有在满足改进条件、遵循遥感基础知识的前提下实现最大化保留生态信息、保证计算结果的稳定性的算法才可能成为替代 PCA 的更优算法。另外,除指标集成过程,集成前后的正规化和遥感建模共线性、模型普适性等方面也将是生态指标维度压缩问题的研究重点。

3.2 模型区域适应性调整

虽然 RSEI 单一指标的选取标准为适用于陆地生态系统,但随着模型逐渐推广,当 RSEI 的应用扩展至森林、草原、湿地等不同类型的研究区时,生态结构的差异会导致 RSEI 的应用效果无法在所有研究区达到最佳,为了能有所侧重地进行生态评价,大量研究采用替换或增加指标的方式调整 RSEI 指数,例如为解决半干旱或干旱地区城区和绿洲面积少、干度指标失去代表性的问题构建的 SA-RSEI^[41],ARSEI^[42],ORSEI^[43],DRSEI^[44],以及为适应流域特征构建的改进 RSEI^[45]、考虑到大气污染和空气颗粒物的影响构建的 ARSEI^[46]和 RSEI_{new}^[47]、为体现人类活动强度构建的 IRSEI^[48]、为消除水体和水生植被影响构建的 WRSEI^[49]等,对于有明显特征的研究区,如沙漠、流域、有严重污染和密集人口

的城市等,在契合模型构建原理和遥感基础知识的前提下,添加指数能更好地反映研究区生态状况,提升模型应用灵活性和评价准确性。

上述改进指数以适应特定土地类型为目的,具有较强的针对性,然而,对于不同土地类型研究区都呈现出的通用性局限,也需要进行相应模型调整。例如,尺度是影响区域生态评估结果的重要因素之一,尺度差异巨大指标合成后的 RSEI 影像质量显著低于同尺度指标合成影像,同时,不同尺度范围内各生态要素相互作用还会使生态系统呈现不同的功能和结构,RSEI 使用行政边界划分区域^[50]是相对不准确的。为减小尺度影响,Zhu 等^[51]通过构建 MW-RSEI 将 RSEI 的结果区域化;Jiang 等^[52]通过滑动窗口进行索引优化并与标准化、翻转和映射方法相结合,以适应大规模监测需求。除尺度外,影像获取时间的差异^[53]、传感器的不一致^[54]、大规模噪声的影响^[55]等也会影响 RSEI 计算结果,基于通用性局限进行的适应性调整对于不同研究区同样适用,这些改进模型经验证后可发展为通用性模型以提升评估准确性。

4 RSEI 应用状况分析

4.1 区域生态状况评价

评价研究区生态环境质量是 RSEI 指数解决的实际问题之一,也是 RSEI 模型与其他遥感监测过程结合的出发点。生态环境的评价主要包含 2 部分内容:界定某一区域生态“优”或“劣”以及获得区域生态“优”或“劣”的分布。

生态质量评估的定量基础为 RSEI 指数的数值大小,之后形成 RSEI 生态评价模型,将生态质量分为差、较差、中等、良好、优 5 个等级,各等级范围及意义如表 3 所示。

表 3 RSEI 对应生态等级及意义

Tab.3 RSEI corresponding ecological level and significance

RSEI 范围	生态等级	生态系统	生物多样性	生态服务功能
(0.8,1.0]	优	稳定	丰富	完好
(0.6,0.8]	良好	基本稳定	较丰富	良好
(0.4,0.6]	中等	较脆弱	较贫乏	受影响
(0.2,0.4]	较差	不稳定	极其贫乏	受损严重
[0.0,0.2]	差	崩溃	基本消失	彻底丧失

生态等级是评估的直接依据,如李红星等^[56]计算武汉 RSEI 等级中等以上面积占 80%左右;吴峰等^[57]计算信江流域 RSEI 值在 0.6 以上,表明研究区生态良好;Liao^[58]统计东盟地区 RSEI 高于 0.6 的地区中贫困区占比超 80%,得出生态质量与发展水平相关。生态评价模型统一了生态优劣的评价标准,提升了评估的合理性。

根据生态质量等级制图即可得到生态环境“优”或“劣”的空间分布,了解生态环境的区域特征,如柯丽娜等^[59]分析辽东湾北部 1995—2021 年的 5 期影像并制图,图上呈现内陆区生态优于滨海区的特征;刘恺恺等^[60]发现围垦会导致生态环境剧烈退化,制图结果表明研究区生态高低质量的分布重心在西北—东南方向上摆动;Zhang 等^[61]构建长江中游 RSEI 后制图探究长江生态格局,发现研究区中、东部生态退化明显;Li 等^[62]结合 RSEI 与 PCA-AHP-TOPSIS 模型评估京杭大运河沿线生态状况,发现大运河中、南段的生态更好,北段的生态格局独特等。生态等级制图是为了实现整体—区域—整体的过程,整体生态是由区域生态构成的,了解区域生态状况有助于探究整体生态格局的成因。

由上述文献可知,基于 RSEI 模型的生态环境评价是利用影像光谱信息,关注研究区在影像上呈现的“静态”特点和空间特征,生态评价模型为生态等级制图提供依据,制图后研究区生态质量呈现出的空间特征又可辅助研究者明确生态格局,重点关注脆弱区的生态安全并进行后续研究。然而,RSEI 的区域生态评价也由一定局限性,比如 RSEI 指数是针对陆地生态系统开发的,在应用过程中必须去除水元素的信息,此外还有 RSEI 数值在极端生态环境中的不稳定现象^[63]、RSEI 模型的通用性较差、计算结果具有随机性^[64]等等。在区域生态评价过程中,对于固有“弊端”如缺乏水元素信息的问题,仅能结合别的评价方式实现区域生态的“全要素”评价而不能盲目增加水指标,计算结果不稳定和模型缺乏通用性等问题则可以通过改进算法来解决。

4.2 区域生态变化监测

生态环境的变化监测,实质是评估生态环境随时间的变化,而生态变化监测的本质是以下 3 个问

题:是否发生变化、发生了什么类型的变化以及变化趋势^[65],3 个问题间的逻辑关系层层递进。

RSEI 指数的差异直接代表生态状况发生变化,采用双时相或多时相影像计算 RSEI 在待检测年份间的差值即可直接判断研究区生态环境是否发生变化,如董敏等^[66]、罗春等^[67]分别用 2 期、3 期影像评估合肥市生态变化和常宁市水土流失情况。此外,RSEI 还可与其他软件、算法结合进行变化监测,如王东升等^[68]结合 RSEI 和 ENVI 评估阜新市生态变化;Gou 等^[69]结合 PCA 与随机森林算法评估 2014—2020 年北京市生态变化。

发生了什么类型的变化,实质是检测土地利用类型的转变,通常将 RSEI 与分类方法及已有地学资料相结合,如朱明水^[70]将 RSEI 结合支持向量机、随机森林、梯度提升树的分类结果,发现 2000—2020 年研究区林、耕地转化为建设用地;Tang 等^[71]将 RSEI 结合最大似然分类法分析铜陵矿区林地转为建成和采矿区带来的生态扰动;蒋超亮等^[72]发现当古尔班通古特沙漠 RSEI 增大时,沙漠变为植被覆盖和灌木区;石运杰^[73]对珠峰自然保护区的研究表明,1988—2018 年间农业种植地、道路和居民点增加、湿地面积减少,湿地面积与牲畜承载力显著相关。土地利用类型一定程度上反映了人类活动与生态的关系,监测土地利用类型变化有利于调整生产秩序,平衡人与自然的

关系。变化分布的趋势即生态环境质量变好、变坏或基本保持的状态,一般采用常规分析结合预测模型得出。例如 Wu 等^[74]采用衬垫回归和波动分析法研究 RSEI 变化趋势并应用 Hurst 指数评估非洲萨赫勒地区未来生态环境质量;王丽霞等^[75]计算延河流域 18 a 间 4 期影像的 RSEI,用 CA-Markov 模型模拟 2022 年并预测 2028 年的生态环境;Xu 等^[76]利用特征反演和改进的 RSEI 对雄安新区土地覆被类型进行研究并开发统计模型预测人口和相关不透水面(imperious surface,IS)增加的生态效应;陈孟^[77]利用混合像元分解技术提取地表覆盖信息并构建多元回归方程,预测 2035 年成都市生态状况。了解变化趋势的意义在于其对未来的“预见性”,目的是掌握生态的潜在风险以便及时干预,是大量与 RSEI 变化检测有关文献的研究焦点。

综上所述,基于 RSEI 的变化检测不仅需要利用影像光谱信息建立模型,还需要在生态评价的基础上加入“时间”这一评价维度,关注生态环境的时间特征和动态趋势,在对已知的生态波动情况进行分析得出生态变化规律的同时加入预测模型,掌握未来生态环境发展的可能状况。但是,基于 RSEI

的区域生态变化监测同样有其局限性,由于 RSEI 计算结果完全依赖于影像固有信息,前后时相影像的传感器、采集时间等差异都会导致伪变化。此外,在长时序变化监测中,时间序列的不稳定^[78]和图像采集时间跨度的不一致^[79]会严重影响 RSEI 变化监测结果,因此还需采取优化归一化过程、合成新的时序影像等措施减弱其影响。

4.3 RSEI 发展展望

众所周知,生态系统的稳定性是关乎国家前途命运的百年大计,守住自然生态安全边界是必须长期坚持的底线^[80],进行生态评价与生态变化监测与当前国家发展紧密联系在一起。近几年,作为一个简单易用的生态综合评价指数,RSEI 不仅在国内得到了广泛应用,在国际上的影响力也在逐步扩大。未来,RSEI 仍有广阔的发展空间,同时也有以下几个问题亟待解决:

1)在模型算法改进方面,虽然目前已有不少学者对指标集成、归一化过程提出改进,却仍无更为简单、鲁棒的算法能替代原有方法;在区域适应性调整方面,目前的调整可分为适应土地类型的调整和适应尺度差异等其他因素的调整,但两种调整过程中都掺杂着人为的主观判断或先验知识,难以应对更加复杂多变的监测需求。因此,如何提升模型通用性和模型自适应性将成为日后的研究重点。

2)遥感影像获取能力的提升使得影像分辨率逐渐提高、监测周期不断缩短,为大范围、长时序、密集时间间隔的生态监测提供了便利,基于时间维度的动态分析和空间维度的异质性分析成为新的研究热点,但由于 RSEI 完全来源于影像,影像时间序列的不稳定和空间尺度的不一致成为了制约该领域发展的重要因素^[81]。对于这一问题,当前部分研究采用时间序列谐波分析^[79]、数据重构^[81]、连续变化检测和分类(continuous change detection and classification ,CCDC)^[79]、时空预测^[82]等算法对评价过程进行优化以减弱时间序列不稳定影响,采用区域尺度优化^[55]等方式减弱空间尺度不一致的影响,然而上述方法的处理效果尚未达到能忽略甚至解决该问题的程度,今后还需进行大量研究。

3)影像数量的大幅增加为生态评价提供了丰富的数据源,但也形成了对影像存储、处理和利用能力的严峻考验。目前,对云平台的应用很好地缓解了这一压力,云平台存储了丰富的历史影像和地理空间数据库^[83],拥有大尺度的地理空间分析和批量处理数据能力,有助于克服遥感数据缺失、色差、时空不一致等问题^[53],大大提高影像处理效率,因而在对各城市群和自然保护区^[84-89]进行生态监测的

过程中发挥了极大的优势。但是,云平台虽具有优秀的影像存储和批处理能力,却对每批数据的承载量仍有一定限制且无法实现对影像的自主处理。近年,人工智能领域的兴起也给生态评价与生态变化监测领域带来了发展机遇,未来若能实现 RSEI 模型与深度学习的紧密结合,无疑将会大大提升生态评价的智能化程度。

4)过去的 RSEI 研究实现了对已经呈现出的生态状况进行评价和已有的生态变化进行监测,却忽略了对驱使该生态格局形成的原因进行探究。近几年,大量研究者意识到了这一点,开始结合地理探测器^[90-93]进行生态格局成因探究及生态驱动力分析,这有助于我们深入理解生态系统的运行机制、预测和应对生态变化,是一种由“表”及“里”的转变。然而,目前该进行研究的手段尚且单一,探究层次并不够深入,未来如何实现以多元化的方式、全方位深层次地进行生态格局成因探究和生态驱动力分析也是一个值得思考的问题。

5 总 结

“碳达峰”与“碳中和”是着力解决资源环境约束突出问题、维护国家生态安全、实现中华民族永续发展的必然选择^[94]。利用 RSEI 进行的遥感生态评价和生态变化监测有助于及时掌握生态环境状况、分析生态发展趋势,对推动实现“碳达峰”与“碳中和”具有重要意义。通过回顾 RSEI 的产生背景和计算方法,分析 RSEI 的研究现状,不难发现相比于其他生态评价指数,RSEI 具有综合性强、客观、简单易用等优点,现已广泛应用于区域生态评价和区域生态变化监测等领域。但是,RSEI 的应用仍存在不少挑战,例如:

1)在生态指标维度压缩方面仍存在问题,在区域生态的适应性调整过程中还存在通用性差、主观性强的缺点。

2)目前基于 RSEI 的生态评价尚无法实现“全要素”、尚无法实现智能化处理。

3)在大范围、长时序、密集时间间隔的生态监测趋势下,影像存储和批处理能力的落后、影像时间序列的不稳定、空间尺度的不一致等问题都成为了制约 RSEI 生态环境评价和生态变化监测发展的重要因素。

4)基于 RSEI 的新兴研究方向——生态格局成因探究和生态驱动力分析还存在分析手段单一、分析层次不深入的问题。

结合近年来人工智能领域兴起、影像获取能力

提升、计算机存储和处理能力提升等趋势,未来,如何利用深度学习等方法、结合数理统计等多方面的知识对模型进行更严密的论证,如何从改进算法、提升算力等方向解决上述问题、提升 RSEI 应用的智能化将成为研究重点。

通过本文的总结,希望能帮助读者了解遥感生态指数 RSEI 的产生背景、计算方法以及研究现状,同时引起对 RSEI 现有问题进行深入探究的兴趣,以便于更好地实现对生态状况的评价和监测,理解国家“双碳”战略对于维护生态安全和可持续发展的重大意义。

参考文献(References):

[1] 央视网. 200 余颗遥感卫星守护“美丽中国”我国遥感应用迈入新历史阶段[EB/OL]. [2023-4-23]. <https://news.cctv.com/2023/04/22/ARTILG3LFyxmDBTp6d3k7Ot0230422.shtml>. CNTV. More than 200 remote sensing satellites are guarding “Beautiful China”. China’s remote sensing applications have entered a new historical stage [EB/OL] [2023-4-23] <https://news.cctv.com/2023/04/22/ARTILG3LFyxmDBTp6d3k7Ot0230422.shtml>.

[2] 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.

Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.

[3] 王力, 黄妮, 牛铮, 等. 山水林田湖草生态保护修复项目遥感监测及辅助绩效评价[J]. 遥感学报, 2022, 26(8): 1547-1561.

Wang L, Huang N, Niu Z, et al. Remote sensing technology for monitoring and auxiliary performance evaluation of ecological protection and restoration projects for mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(8): 1547-1561.

[4] 黄姗, 李新涛, 李雁, 等. 基于“面向对象+深度学习”的遥感信息智能化提取技术[C]//第八届高分辨率对地观测学术年会论文集. 2022: 910-922.

Huang S, Li X T, Li Y, et al. Intelligent extraction technology of remote sensing information based on “object oriented+deep learning” [C] //Proceedings of the 8 China High Resolution Earth Observation Conference. Organizing Committee of China High Resolution Earth Observation Conference, 2022: 910-922.

[5] 刘子源, 周德成, 郝璐, 等. 基于多源遥感指数监测山区植被动态及其驱动因子的不确定性分析——以尼泊尔地区为例[J]. 环境生态学, 2023, 5(8): 15-24.

Liu Z Y, Zhou D C, Hao L, et al. Uncertainty analysis of monitoring vegetation dynamics and driving factors in mountains based on multiple remote sensing indices: A case study of Nepal[J]. Environmental Ecology, 2023, 5(8): 15-24.

[6] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.

Li M M. The method of vegetation fraction estimation by remote sensing[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications), 2003.

[7] 卢楠楠. 基于遥感的不透水面监测及其对生态环境质量的影响——以郑州开封地区为例[D]. 开封: 河南大学, 2022.

Lu N N. Monitoring of impervious surface based on remote sensing and its impact on ecological environment quality [D]. Kaifeng: Henan University, 2022.

[8] 吉宗伟. 基于 TM 影像的绍兴市土地利用监测和热岛效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.

Ji Z W. Researches on the land use classification and the heat island effect of Shaoxing based on TM images[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007.

[9] 施智勇, 胡晓婷, 谢慧黎, 等. 基于 RSEI 的生态环境质量评价及驱动力分析——以闽江流域(福州段)为例[J]. 测绘通报, 2023(2): 28-33.

Shi Z Y, Hu X T, Xie H L, et al. Eco-environmental quality assessment and driving force analysis based on RSEI: A case study of the Minjiang River basin (Fuzhou section)[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(2): 28-33.

[10] 高心雨. 遥感在生态学领域的应用[EB/OL]. (2020-03-22) [2023-04-23]. <https://sges.sysu.edu.cn/article/480>.

Gao X Y. The Application of remote sensing in the field of ecology [EB/OL]. (2020-03-22) [2023-04-23]. <https://sges.sysu.edu.cn/Article/480>.

[11] 雷毅. 环境整体主义的生态学基础[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2006, 21(4): 132-137.

Lei Y. Ecological basis for environmental holism[J]. Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences), 2006, 21(4): 132-137.

[12] Silva L T, Mendes J F G. City noise-air: An environmental quality index for cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2012, 4: 1-11.

[13] 叶亚平, 刘鲁君. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(3): 33-36.

Ye Y P, Liu L J. A preliminary study on assessment indicator system of provincial eco-environmental quality in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(3): 33-36.

[14] Environmental Performance Index. EPI Framework [EB/OL]. [2023-04-23]. <https://epi.yale.edu/>.

[15] 姚尧, 王世新, 周艺, 等. 生态环境状况指数模型在全国生态环境质量评价中的应用[J]. 遥感信息, 2012, 27(3): 93-98.

Yao Y, Wang S X, Zhou Y, et al. The application of ecological environment index model on the national evaluation of ecological environment quality[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(3): 93-98.

[16] 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 H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.

[17] 李妮娅, 唐瑶, 杨丽, 等. 基于遥感技术的白水河流域生态环境质量现状研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013, 47(1): 103-107.

Li N Y, Tang Y, Yang L, et al. Ecological environment quality of Baishui River basin based on remote sensing technology[J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences), 2013, 47(1): 103-107.

[18] 林琳, 缪丽娜, 吴惠英, 等. 应用遥感技术对湖州生态环境质量状况分析 [C]//2012 中国环境科学学会学术年会论文集 (第二卷). 南宁, 2012: 328-332.

Lin L, Miao L N, Wu H Y, et al. Analysis of ecological environment quality in Huzhou using remote sensing technology [C]//Proceedings of the 2012 academic annual meeting of the Chinese Association of Environmental Sciences (Volume 2). Nanning, 2012: 328-332.

[19] 方斌, 杨叶, 郑前进, 等. 耕地易地补充经济补偿的生态价值——以江阴市和兴化市为例 [J]. 生态学报, 2010, 30 (23): 6478-6486.

Fang B, Yang Y, Zheng Q J, et al. Evaluation of ecological value compensation using exchange of farmland: A case study with data from Jiangyin and Xinghua, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (23): 6478-6486.

[20] 陈晓辉, 曾晓莹, 赵超超, 等. 基于遥感生态指数的道路网络生态效应分析——以福州市为例 [J]. 生态学报, 2021, 41 (12): 4732-4745.

Chen X H, Zeng X Y, Zhao C C, et al. The ecological effect of road network based on remote sensing ecological index: A case study of Fuzhou City, Fujian Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (12): 4732-4745.

[21] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价 [J]. 生态学报, 2019, 39 (8): 2963-2972.

Wang L C, Jiao L, Lai F B, et al. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake wetland, Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (8): 2963-2972.

[22] Zhang N, Xiong K, Xiao H, et al. Ecological environment dynamic monitoring and driving force analysis of Karst world heritage sites based on remote-sensing: A case study of Shibing Karst [J]. Land, 2023, 12 (1): 184.

[23] 董鑫, 陈效锐, 李艳忠, 等. 基于地理探测器的四川省大熊猫国家公园生态环境时空变化及其归因分析 [J]. 生态学杂志, 2023, 42 (4): 946-955.

Dong X, Chen X R, Li Y Z, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of ecological environment of Giant Panda National Park in Sichuan Province based on geographical detector [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42 (4): 946-955.

[24] Wang W, Li X, Lv H, et al. What are the correlations between human disturbance, the spatial pattern of the urban landscape, and eco-environmental quality? [J]. Sustainability, 2023, 15 (2): 1171.

[25] 颜金凤, 赵军, 卿苗, 等. 基于 IRSEI 的石羊河流域生态环境质量时空变化及驱动力分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37 (5): 104-111.

Xie J F, Zhao J, Qing M, et al. Changes in spatial-temporal patterns of ecological environment quality in Shiyang River and driving forces: An analysis based on improved remote sensing ecological index [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37 (5): 104-111.

[26] Li N, Wang J. Comprehensive eco-environment quality index model with spatiotemporal characteristics [J]. Sensors, 2022, 22 (24): 9635.

[27] Liu J, Ouyang Z, Pimm S L, et al. Biodiversity conservation in China: Advances and challenges [J]. Science, 347 (6219): 1270-1271.

[28] 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 Z C, Xu H Q, Li L, 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.

[29] 中国知网. RSEI [EB/OL]. [2023-04-17]. <https://kns.cnki.net>.

CNKI. RSEI [EB/OL]. [2023-04-17]. <https://kns.cnki.net>.

[30] Web of science. RSEI [EB/OL]. [2023-04-20]. <https://access.clarivate.com>.

[31] 徐涵秋, 李春强, 林梦婧. RSEI 应使用主成分分析或核主成分分析? [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2023, 48 (4): 506-513.

Xu H Q, Li C Q, Lin M J. Should RSEI use PCA or kPCA? [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48 (4): 506-513.

[32] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价 [J]. 干旱区研究, 2019, 36 (6): 1521-1527.

Song M J, Luo Y Y, Duan L M. Evaluation of ecological environment in the Xilin Gol Steppe based on modified remote sensing ecological index model [J]. Arid Zone Research, 2019, 36 (6): 1521-1527.

[33] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI 指数的合理性分析及其与 RSEI 指数的区别 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37 (1): 1-7.

Xu H Q, Deng W H. Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37 (1): 1-7.

[34] Xu H Q, Duan W F, Deng W H, et al. RSEI or MRSEI? Comment on Jia et al. Evaluation of eco-environmental quality in Qaidam Basin based on the ecological index (MRSEI) and GEE. Remote Sens. 2021, 13, 4543 [J]. Remote Sensing, 2022, 14 (21): 5307.

[35] 程琳琳, 王振威, 田素锋, 等. 基于改进的遥感生态指数的北京市门头沟区生态环境质量评价 [J]. 生态学杂志, 2021, 40 (4): 1177-1185.

Cheng L L, Wang Z W, Tian S F, et al. Evaluation of eco-environmental quality in Mentougou District of Beijing based on improved remote sensing ecological index [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40 (4): 1177-1185.

[36] 冯尚荣. 基于改进 TOPSIS-RBF 的呼和浩特市土地生态安全评价与预测 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020.

Feng S R. Evaluation and prediction of land ecological security based on improve TOPSIS-RBF in Hohhot City [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.

[37] Liao W, Jiang W. Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. Remote Sensing, 2020, 12 (15): 2462.

[38] Li N, Wang J, Qin F. The improvement of ecological environment index model RSEI [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13 (11): 403.

[39] 刘英,党超亚,岳辉,等.改进型遥感生态指数与RSEI的对比分析[J].遥感学报,2022,26(4):683-697.

Liu Y,Dang C Y,Yue H,et al. Comparison between modified remote sensing ecological index and RSEI[J]. National Remote Sensing Bulletin,2022,26(4):683-697.

[40] Yang W,Zhou Y,Li C. Assessment of ecological environment quality in rare earth mining areas based on improved RSEI[J]. Sustainability,2023,15(4):2964.

[41] 第五涪渭,梅家龙,余翰名,等.半干旱地区遥感生态指数的构建及应用[J].环境监测管理与技术,2022,34(4):21-26.

Diwu J W,Mei J L,Yu H M,et al. Construction and application of remote sensing ecological index in semi-arid region[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring,2022,34(4):21-26.

[42] 王杰,马佳丽,解斐斐,等.干旱地区遥感生态指数的改进——以乌兰布和沙漠为例[J].应用生态学报,2020,31(11):3795-3804.

Wang J,Ma J L,Xie F F,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.

[43] 刘尚钦,张福浩,赵习枝,等.干旱区绿洲遥感生态指数的改进[J].测绘科学,2022,47(6):143-151,203.

Liu S Q,Zhang F H,Zhao X Z,et al. Improvement of remote sensing ecological index in oasis in arid area[J]. Science of Surveying and Mapping,2022,47(6):143-151,203.

[44] 罗镭基,王宏涛,王成.基于改进遥感生态指数的甘肃省古浪县生态质量评价[J].干旱区地理,2023,46(4):539-549.

Luo R J,Wang H T,Wang C. Ecological quality evaluation of Gulang County in Gansu Province based on improved remote sensing ecological index[J]. Arid Land Geography,2023,46(4):539-549.

[45] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J].生态学报,2023,43(5):2114-2127.

Zhang J,Yang L P,Gong E J,et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(5):2114-2127.

[46] 李冠稳,肖能文,李俊生.基于理想参照系-关键指标的赤水河流域生态系统质量变化趋势分析[J].生态学报,2021,41(18):7114-7124.

Li G W,Xiao N W,Li J S. Analysis the trend of ecosystem quality based on ideal reference and key parameters in the Chishui River basin,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(18):7114-7124.

[47] 万虹麟,霍飞,牛玉芬,等.顾及PM2.5浓度遥感生态指数模型的沧州市区生态环境质量动态监测分析[J].地球物理学进展,2021,36(3):953-960.

Wan H L,Huo F,Niu Y F,et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment change in Cangzhou City based on RSEI model considering PM2.5 concentration[J]. Progress in Geophysics,2021,36(3):953-960.

[48] 杨羽佳,张怡,匡天琪,等.利用改进城市遥感生态指数的苏州市生态分析[J].测绘科学技术学报,2021,38(3):323-330.

Yang Y J,Zhang Y,Kuang T Q,et al. Ecological analysis of Suzhou City using improved urban remote sensing ecological index[J]. Journal of Geomatics Science and Technology,2021,38(3):323-330.

[49] 蒋明明,刘佳,侯伟,等.一种改进的遥感生态指数构建及湿地监测应用[J].测绘科学,2022,47(7):85-92.

Jiang M M,Liu J,Hou W,et al. An improved remote sensing-based ecological index and its application in wetland environment monitoring[J]. Science of Surveying and Mapping,2022,47(7):85-92.

[50] Castilla-Gómez J,Herrera-Herbert J. Environmental analysis of mining operations:Dynamic tools for impact assessment[J]. Minerals Engineering,2015,76:87-96.

[51] Zhu D,Chen T,Zhen N,et al. Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2020,27(13):15716-15728.

[52] Jiang F,Zhang Y,Li J,et al. Research on remote sensing ecological environmental assessment method optimized by regional scale[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2021,28(48):68174-68187.

[53] Wang S,Zhang M,Xi X. Ecological environment evaluation based on remote sensing ecological index:A case study in East China over the past 20 years[J]. Sustainability,2022,14(23):15771.

[54] 骆泓鉴,明冬萍,徐录.基于GEE的遥感生态指数时序计算[J].自然资源遥感,2022,34(2):271-277. doi: 10. 6046/zrzyyg. 2021150.

Luo H J,Ming D P,Xu L. Time series calculation of remote sensing ecological index based on GEE[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(2):271-277. doi: 10. 6046/zrzyyg. 2021150.

[55] Yang Z,Sun C,Ye J,et al. Spatio-temporal heterogeneity of ecological quality in Hangzhou greater bay area (HGBA) of China and response to land use and cover change[J]. Remote Sensing,2022,14(21):5613.

[56] 李红星,黄解军,梁友嘉,等.基于遥感生态指数的武汉市生态环境质量评估[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(1):81-90.

Li H X,Huang J J,Liang Y J,et al. Evaluating the quality of ecological environment in Wuhan based on remote sensing ecological index[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),2020,42(1):81-90.

[57] 吴峰,李沛鸿,熊凡,等.基于遥感生态指数的信江流域生态环境质量评价[J].长江信息通信,2022,35(11):29-33.

Wu F,Li P H,Xiong F,et al. Evaluation of ecological environment quality in Xinjiang River basin based on remote sensing ecological index[J]. Changjiang Information & Communications,2022,35(11):29-33.

[58] Liao W. Temporal and spatial variations of eco-environment in association of Southeast Asian Nations from 2000 to 2021 based on information granulation[J]. Journal of Cleaner Production,2022,373:133890.

[59] 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 L N,Xu J H,Wang N,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.

[60] 刘恺恺,冯秀丽,张 驰. 基于 RSEI 模型的滨海围垦区生态环境动态变化分析——以杭州湾南岸为例[J]. 上海国土资源,2022,43(2):60-65.

Liu K K,Feng X L,Zhang C. Dynamic change analysis of ecological environment in coastal reclamation area based on RSEI model: A case study of southern bank of Hangzhou Bay [J]. Shanghai Land & Resources,2022,43(2):60-65.

[61] Zhang S,Yang P,Xia J,et al. Research and analysis of ecological environment quality in the middle reaches of the Yangtze River basin between 2000 and 2019[J]. Remote Sensing,2021,13(21):4475.

[62] Li Y,Wu L,Han Q,et al. Estimation of remote sensing based ecological index along the Grand Canal based on PCA-AHP-TOPSIS methodology[J]. Ecological Indicators,2021,122:107214.

[63] Karimi F M,Fatholouloumi S,Kiavarz M,et al. Land surface ecological status composition index (LSESCI): A novel remote sensing-based technique for modeling land surface ecological status[J]. Ecological Indicators,2021,123:107375.

[64] Wang Z,Chen T,Zhu D,et al. RSEIFE: A new remote sensing ecological index for simulating the land surface eco-environment[J]. Journal of Environmental Management,2023,326:116851.

[65] 张祖勋,姜慧伟,庞世燕,等. 多时相遥感影像的变化检测研究现状与展望[J]. 测绘学报,2022,51(7):1091-1107.

Zhang Z X,Jiang H W,Pang S Y,et al. Review and prospect in change detection of multi-temporal remote sensing images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(7):1091-1107.

[66] 董 敏,明彦利. 基于 RSEI 指数的合肥市城市生态变化[J]. 能源与环境,2021(4):13-15.

Dong M,Ming Y L. Urban ecological change in Hefei based on RSEI index[J]. Energy and Environment,2021(4):13-15.

[67] 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. doi:10.6046/gtzyyg.2014.04.23.

Luo C,Liu H,Qi L Y. Ecological changes assessment based on remote sensing indices: A case study of Changning City[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2014,26(4):145-150. doi:10.6046/gtzyyg.2014.04.23.

[68] 王东升,王小磊,雷泽勇. 基于遥感生态指数的阜新市生态质量评估[J]. 生态科学,2020,39(3):88-94.

Wang D S,Wang X L,Lei Z Y. Ecological change assessment of Fuxin based on remote sensing ecological index[J]. Ecological Science,2020,39(3):88-94.

[69] Gou R,Zhao J. Eco-environmental quality monitoring in Beijing, China, using an RSEI-based approach combined with random forest algorithms[J]. IEEE Access,2020,8:196657-196666.

[70] 朱明水. 基于 GEE 的黄河下游地区土地利用变化及其生态效应研究[D]. 济南:山东建筑大学,2022.

Zhu M S. Analysis of land use change and ecological effects in the lower reaches of the yellow river based on google earth engine[D]. Jinan:Shandong Jianzhu University,2022.

[71] Tang H,Fang J,Xie R,et al. Impact of land cover change on a typical mining region and its ecological environment quality evaluation using remote sensing based ecological index (RSEI) [J]. Sustainability,2022,14(19):12694.

[72] 蒋超亮,吴 玲,刘 丹,等. 干旱荒漠区生态环境质量遥感动态监测——以古尔班通古特沙漠为例[J]. 应用生态学报,2019,30(3):877-883.

Jiang C L,Wu L,Liu D,et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in arid desert area by remote sensing: Taking the Gurbantunggut Desert China as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(3):877-883.

[73] 石运杰. 珠穆朗玛峰国家级自然保护区湿地生态环境质量对社区土地利用变化响应研究[D]. 昆明:云南大学,2020.

Shi Y J. Study on the response of wetland ecological environment quality to community land use change in Qomolangma National Nature Reserve[D]. Kunming:Yunnan University,2020.

[74] Wu S,Gao X,Lei J,et al. Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index[J]. Journal of Arid Land,2022,14(1):14-33.

[75] 王丽霞,赵 蕊,刘 招,等. 基于 RSEI 的延河流域生态环境质量监测与预估[J]. 干旱区研究,2022,39(3):943-954.

Wang L X,Zhao R,Liu Z,et al. Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River basin based on the remote sensing ecological index [J]. Arid Zone Research,2022,39(3):943-954.

[76] Xu H,Wang M,Shi T,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.

[77] 陈 孟. 基于遥感技术的成都市中心城区环境质量评价及预测 [D]. 昆明:昆明理工大学,2020.

Chen M. Evaluation and prediction of environmental quality in downtown Chengdu based on remote sensing technology[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2020.

[78] Yang X,Meng F,Fu P,et al. Instability of remote sensing ecological index and its optimisation for time frequency and scale[J]. Ecological Informatics,2022,72:101870.

[79] Sun C,Li J,Liu Y,et al. Ecological quality assessment and monitoring using a time-series remote sensing-based ecological index (ts-RSEI) [J]. GIScience & Remote Sensing,2022,59(1):1793-1816.

[80] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2023-04-23]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

Xinhua News Agency. 14th Five Year Plan for national economic and social development of the People's Republic of China and outline of long range objectives for 2035[EB/OL]. 2021(2021-03-13) [2023-04-23] http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

[81] Yang X,Meng F,Fu P,et al. Time-frequency optimization of RSEI: A case study of Yangtze River basin[J]. Ecological Indicators,2022,141:109080.

[82] Yao J, Mo F, Zhai H, et al. A spatio-temporal prediction model theory based on deep learning to evaluate the ecological changes of the largest reservoir in North China from 1985 to 2021[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109618.

[83] 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.

Zhang H, Song J Y, Li M, et al. Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1883-1894.

[84] 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 Y, Zhao Y H, Wu J S. Dynamic monitoring of long time series of ecological quality in urban agglomerations using 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.

[85] 郑子豪, 吴志峰, 陈颖彪, 等. 基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 717-729.

Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, et al. Analyzing the ecological environment and urbanization characteristics of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration based on Google Earth Engine[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 717-729.

[86] 吴小波, 范晓雨, 刘晓敬, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J]. 生态学杂志, 2023, 42(3): 759-768.

Wu X B, Fan X Y, Liu X J, et al. Temporal and spatial variations of ecological quality of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on Google Earth Engine cloud platform[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(3): 759-768.

[87] Huang H, Chen W, Zhang Y, et al. Analysis of ecological quality in Lhasa Metropolitan Area during 1990—2017 based on remote sensing and Google Earth Engine platform[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(2): 265-280.

[88] 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 W, Huang H P, Tian Y C, 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.

[89] Luo M, Zhang S, Huang L, et al. Temporal and spatial changes of ecological environment quality based on RSEI: A case study in ulan Mulun River Basin, China[J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13232.

[90] Ling C, Zhang G, Deng X, et al. A study on the drivers of remote sensing ecological index of Aksu oasis from the perspective of spatial differentiation[J]. Water, 2022, 14(24): 4052.

[91] 王 滢, 李代伟, 张 帆, 等. 基于 Google Earth Engine 的巢湖流域生态环境质量时空动态变化及影响因素分析[J]. 测绘通报, 2023(7): 7-13.

Wang Y, Li D W, Zhang F, et al. Spatial and temporal dynamic change and influencing factors of ecological environment quality in Chaohu Lake Basin based on GEE[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(7): 7-13.

[92] 程 诺, 高文晶, 杨鸿飞, 等. 闽江流域生态环境质量动态变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 310-318, 329.

Cheng N, Gao W J, Yang H F, et al. Dynamic change and driving factors of ecological environment quality in Minjiang River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 310-318, 329.

[93] 赵嘉丽, 李 兴, 孙冰. 基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1598-1614.

Zhao J L, Li X, Sun B. Spatial-temporal evolution and driving factors analysis of ecological environment quality in Daihai basin based on AWRSEI[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1598-1614.

[94] 新华社. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. 2021; [2023-08-24]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.

Xinhua News Agency. Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on completely, accurately, and comprehensively implementing the new development concept and doing a good job of Carbon Peak and Carbon Neutrality[EB/OL]. 2021; [2023-08-24] https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.

Remote sensing ecological index (RSEI) model and its applications: A review

CHEN Yixin^{1,2}, NING Xiaogang^{1,2}, ZHANG Hanchao^{1,2}, LAN Xiaoqiang^{1,3}, CHANG Zhongbing^{1,4}
(1. Key Laboratory of Natural Resources Monitoring in Tropical and Subtropical Area of South China, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510670, China; 2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China; 3. Information Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100036, China; 4. Institute of Land Resource Surveying and Mapping of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China)

Abstract: In the context of achieving peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality, conducting a remote sensing-based ecological assessment and monitoring analysis is greatly significant for ascertaining the ecological

condition in time and formulating scientific and reasonable ecological protection policies. The early remote sensing-based ecological assessment indices, simple and involving complex processes, are difficult to find wide applications. In contrast, the remote sensing ecological index (RSEI), contributing to elevated assessment efficiency, has been extensively used. To gain a deeper understanding of RSEI, this study describes its background, calculation method, and research status and provides a summary of the current issues and regional adjustments. Furthermore, it analyzes the main application directions of RSEI, namely the in-depth analyses of regional ecological assessment and change monitoring. Finally, the study proposes that despite a broad space for RSEI development, it is necessary to conduct research into the spatiotemporal scales of images, storage and batch processing capabilities, model adaption, and intelligentization.

Keywords: RSEI; model improvement; application analysis; regional ecological assessment; regional ecological change monitoring

(责任编辑: 张 仙)