

DOI: 10.5846/stxb202204221101

董春媛, 乔荣荣, 杨智程, 罗立辉, 常学礼. 基于改进遥感生态指数的宁夏沿黄平原区生态环境质量评价. 生态学报, 2023, 43(16): 6706-6715.

Dong C Y, Qiao R R, Yang Z C, Luo L H, Chang X L. Eco-environmental quality assessment of the Ningxia plain along the Yellow River based on the modified remote sensing ecological index. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6706-6715.

# 基于改进遥感生态指数的宁夏沿黄平原区生态环境质量评价

董春媛<sup>1</sup>, 乔荣荣<sup>2</sup>, 杨智程<sup>3</sup>, 罗立辉<sup>3</sup>, 常学礼<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025

<sup>2</sup> 南京大学生命科学院, 南京 210008

<sup>3</sup> 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

**摘要:** 区域生态环境质量评价是国民经济建设与可持续性发展规划的基础, 是生态学研究的主要方向之一。以土地利用/覆盖数据和 Landsat OLI 数据为基础, 分别在 ArcGIS 和 GEE 平台上进行景观多样性指数 (Landscape Diversity Index, LDI) 与归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、湿度 (Wet Index, WI)、归一化裸土和建筑指数 (Normalized Difference Building-Soil Index, NDBSI)、遥感生态指数 (Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI) 和改进遥感生态指数 (Modified Remote Sensing Ecological Index, MRSEI) 的计算。在 LDI 最佳尺度约束下分析表明, 宁夏沿黄平原区景观多样性指数具有显著尺度依赖特征 ( $P < 0.001$ ), 阈值出现在 3000 m × 3000 m。主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 解释了研究区改进遥感生态指数主要受到 NDVI 和 LDI 影响, 其中 NDVI 是 PC1 (特征值贡献率 68.98%) 的决定因子, 特征向量为 0.8901; LDI 为次要决定因子, 特征向量为 -0.4146, 该分量在 MRSEI 计算中分值较高。LDI 是 PC2 (特征值贡献率 28.76%) 的决定因子, 特征向量为 0.9100; NDVI 为次要决定因子, 特征向量为 0.4056, 该分量在 MRSEI 计算中分值较低。从 MRSEI 在应用中可信性来看, 其在分析中采用 LDI 替代 LST 有效地避免了 RSEI 分析中 NDBSI 和 LST 之间存在的生态学意义重复表达和多因子向量投影中的高度聚集。研究区空间异质性主要以“差”和“较差”级别分布在不同土地利用/覆盖类型交错区且以环绕研究区为主要特点。在“差”到“好”梯度上, 斑块密度为减少趋势由 8.3 个/km<sup>2</sup> 减少到 5.9 个/km<sup>2</sup>, 而平均斑块面积呈增加趋势由 0.120 km<sup>2</sup> 增加到 0.169 km<sup>2</sup>。综合来看宁夏沿黄平原区生态环境质量总体 MRSEI 值为 0.0117 刚好超过“较好”水平下限。

**关键词:** 改进遥感生态指数; 景观多样性指数; 主成分分析; 宁夏沿黄平原

## Eco-environmental quality assessment of the Ningxia plain along the Yellow River based on the modified remote sensing ecological index

DONG Chunyuan<sup>1</sup>, QIAO Rongrong<sup>2</sup>, YANG Zhicheng<sup>3</sup>, LUO Lihui<sup>3</sup>, CHANG Xueli<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

<sup>2</sup> School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210008, China

<sup>3</sup> Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Regional eco-environmental quality assessment is not only the basis of national economic construction and sustainable development planning, but also one of the main directions of ecological research. For an assessment of eco-environmental quality in the Ningxia Plain along the Yellow River, based on land use/cover data and Landsat OLI data, this paper calculated Landscape Diversity Index (LDI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Wet Index

**基金项目:** 宁夏回族自治区重点研发计划 (2021BEG02010); 国家自然科学基金项目 (41271193) 资助

**收稿日期:** 2022-04-22; **网络出版日期:** 2023-04-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlchang@126.com

(WI), Normalized Difference Building-Soil Index (NDBSI), Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI), and Modified RSEI (MRSEI) on ArcGIS and GEE platforms, respectively. The analysis under the best scale constraint of LDI showed that the LDI in the study area had significant scale dependence ( $P < 0.001$ ), and its threshold value occurred at 3000 m×3000 m of analysis window. Principal Component Analysis (PCA) explained that the MRSEI of the study area was mainly affected by NDVI and LDI, in which NDVI was the most important factor of PC1 (eigenvalue contribution of 68.98%) with eigenvector 0.8901 while LDI was the minor determinant with eigenvector -0.4146, which had a high value in the MRSEI calculation. LDI was the determinant of PC2 (eigenvalue contribution of 28.76%) with eigenvector 0.9100 while NDVI was the minor determinant with eigenvector 0.4056, and this component had a low score in MRSEI calculation. Regarding the application of MRSEI, its use of LDI instead of LST in the analysis effectively avoided the duplicate expression of ecological significance and high aggregation in the multi-factor vector projection between NDBSI and LST in the RSEI analysis. In terms of the MRSEI, the spatial heterogeneity was mainly distributed at the "poor" and "worse" levels in the ecotones of different land use/cover types and mainly around the study area. On the "poor" to "excellent" gradient, the patch density tended to decrease from 8.3 to 5.9 patches/km<sup>2</sup>, while the average patch area tended to increase from 0.120 to 0.169 km<sup>2</sup>. The overall MRSEI value of 0.0117 was just above the lower limit of "good" level for environmental quality in the study area.

**Key Words:** modified remote sensing ecological index; landscape diversity index; Principal Component Analysis; Ningxia Plain along Yellow River

生态环境质量是指一定时间范围和区域内对影响其社会发展与人类活动的部分或全部生态因素进行定性分析与评判的区域性生态环境优劣程度<sup>[1]</sup>。区域生态环境质量评价是国民经济建设与可持续性发展规划的基础,为此国家环境保护部在 2006 年以行业标准的形式颁布了《生态环境状况评价技术规范》<sup>[2]</sup>,其后在全国一些省、县行政单元进行了生态环境评价<sup>[3-6]</sup>。在应用中由于规范中的核心指标生态指数(Ecological Index, EI)不具备空间表达且对主观因素(权重)依赖较大,存在无法精准落实到应用规划图中的短板<sup>[7]</sup>。针对这一问题徐涵秋在 2013 年提出了一种基于遥感影像信息提取的遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI),该指数可以很好的弥补 EI 指数不能进行空间表达的缺憾,并借助遥感技术数据获取容易、计算程序化等优点迅速在诸多地区生态环境质量变化与评价中得到应用<sup>[7-10]</sup>。RSEI 是以遥感数据计算的绿度(用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)表示)、湿度(Wet Index, WI)、干度(用归一化裸土指数和建筑指数(Normalized Difference Building-Soil Index, NDBSI)平均值表示)和热度(用地表温度(Land Surface Temperature, LST)表示)四个指标为输入量,经过主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)获得分量,然后用各因子在分量轴上载荷向量值判断其代表性和对轴的影响力<sup>[11]</sup>。与 EI 相比, RSEI 具有客观、易获得和二维空间表达的优势,对后续区域发展规划和生态环境质量评价具有重要支撑意义<sup>[12-14]</sup>。但是, RSEI 评价因子 NDBSI 与 LST 之间存在的高度正相关引起导入因子(图层)生态学意义重复带来的偏差没有得到重视;同时也没有考虑基于栅格计算的 RSEI 如何概括表达相邻栅格性质差异所带来的影响,如某一栅格只与另一类栅格相邻或与多种类型栅格相邻所产生的 RSEI 不同无法表达。那么如何修正上述 RSEI 计算中的漏洞?本研究拟采用景观多样性指数(Landscape Diversity Index, LDI)替换 LST 对普遍采用的 RSEI 指数进行改进,称其为改进遥感生态指数(Modified Remote Sensing Ecological Index, MRSEI),主要依据包括:(1)与其它三个指标相比 LST 反映的是短时间尺度地表温度状态,而 LDI 因子与其他因子属性相似都是相对较长时间尺度地表属性累积状态表达;(2) LDI 计算考虑到了基本分析单元周边的组成类型数和其面积比例信息量。

在 MRSEI 应用中,若用 LDI 替代 LST 首先需要解决的问题是如何确定适合的 LDI 分析尺度,即:确定 LDI 尺度依赖特征。已有的景观尺度效应研究表明,在水域分布为特点的巢湖和南四湖分别采用 3000 m×

3000 m 和 1000 m×1000 m 分析网格(基本分析单元)进行研究获得了较为合理的计算结果<sup>[15–16]</sup>;而在山西平朔矿山复垦生态恢复区的研究则以 500 m×500 m 网格获得了较为可信的结果<sup>[17]</sup>。由此可以看出不论是在景观相似或相异区域其尺度依赖规律都存在差异<sup>[15–18]</sup>。因此识别研究区 LDI 尺度依赖特征不仅是 MRSEI 计算中首先要确定的问题,同时也是景观变化研究中恰当的分析尺度应用的基础。

宁夏沿黄平原处于干旱、半干旱交错带属于典型人工绿洲。近几十年高速的非均质化的城镇和农田扩张导致域内生态环境质量空间异质性发生了极大变化<sup>[19–20]</sup>。为了深入解析宁夏沿黄平原区生态环境质量空间分布特征,本文拟采用景观多样性指数 LDI 替代 LST 的 RSEI 计算方法对研究区生态环境质量空间分布格局进行分析。拟解决的科学问题是:(1)在干旱半干旱人工绿洲生态环境质量评价中 MRSEI 计算的合理性与生态学意义解释;(2)宁夏沿黄平原生态环境质量空间异质性与总体生态环境现状。

## 1 研究区概况

宁夏沿黄平原位于宁夏回族自治区北部,范围介于北纬 37°20′—39°20′,东经 105°0′—107°0′,面积约 10831.3 km<sup>2</sup>(图 1)。该区北起石嘴山,南止黄土高原,东到鄂尔多斯台地,西接贺兰山。宁夏沿黄平原核心区是由黄河串联起来的卫宁灌域和银川灌域组成的人工绿洲区域,绿洲所占比例 60%以上<sup>[20]</sup>。研究区内湖泊和湿地密布,人工灌渠纵横,主要有东干渠、西干渠、汉延渠、唐徕渠等。该区土壤以隐域性灌淤土和草甸土为主,天然植被以沿黄河分布的沙枣林和零散分布的灌丛湿地植被为主。主要植物种有沙枣(*Elaeagnus angustifolia* Linn.)、枸杞(*Lycium chinense* Miller)、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)和芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)等为主。该区是国家级沿黄经济区的核心地区,也是国家生态功能区划中的重点区域。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

为了获得准确的景观多样性尺度依赖特征,分析过程采用研究区多年土地利用/覆盖数据平均值进行。其中 2000 年、2010 年和 2020 年数据来源于中国向全世界免费分享的 GLOBELAND30 数据(<http://www.globallandcover.com/>)。1975 年和 1987 年由课题组下载的 Landsat MSS 和 TM 遥感数据,在遵循上述产品分类原则并参考中国科学院资源环境科学数据中心上世纪 80 年代土地利用/覆盖矢量数据,通过野外和历史访问调查在宁夏林科院专家指导下解译完成。研究区土地利用/覆盖类型为农田、乔木林地、灌木林地、草地、湿地、水体、人工地表和裸地等 8 类。在 Google Earth Engine(GEE)平台上对 2020 年 7 月 19 日和 28 日的 Landsat OLI 数据进行计算(网址:[https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/Landsat\\_LC08\\_C01\\_T1\\_SR](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/Landsat_LC08_C01_T1_SR)),研究区涉及到的轨道号分别为:129—33、129—34 和 130—34。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 景观多样性指数与阈值

在已有的研究中 RSEI 在计算流程和评价因子选择上基本固定<sup>[21–22]</sup>,在本文研究中为了避免存在评价因

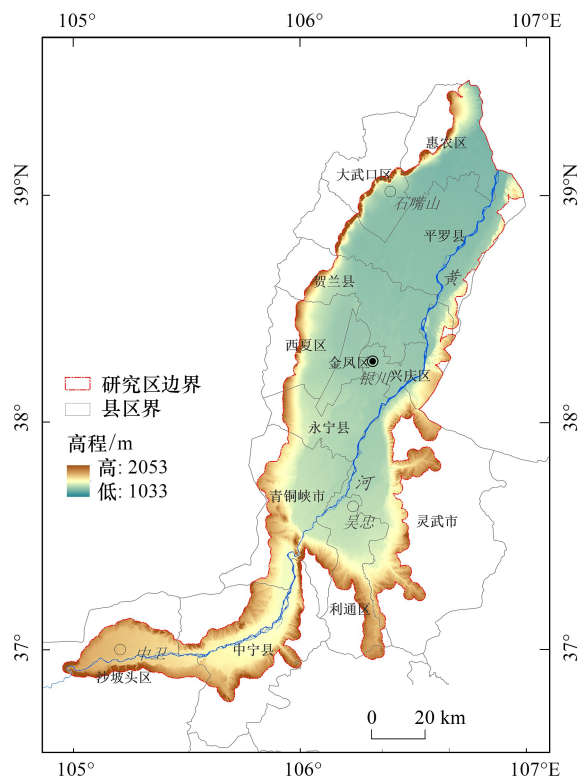


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

研究区涉及到各级行政边界来源于全国地理信息资源目录服务系统

子生态学含义重复表达的问题(NDBSI 和 LST),采用分析确定后最佳分析尺度的 LDI 替换 LST。本文的 NDVI、WI 和 NDBSI 计算与已有文献一致<sup>[7]</sup>,LDI 和 RSEI 的计算如下:

景观多样性指数(LDI):借用植物多样性中 Shannon-Weiner index 进行计算,计算过程在 ArcGIS 的邻域分析中完成。

$$LDI = - \sum_{i=1}^m P_i \times \ln P_i \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为景观中第  $i$  类土地利用类型(或类型分级)占分析单元面积比例。

由于本文采用基础土地利用数据分辨率为 30 m,而且涉及到 8 类土地利用类型,故文中不同尺度 LDI 计算从 3×3 个栅格(90 m×90 m)起始,确保最小分析尺度也有包含 8 种类型的能力。同时,为了减少计算量,分析单位按照栅格倍数逐级增大,从 90 m×90 m 起,其后依次为 300 m×300 m、600 m×600 m、900 m×900 m、1200 m×1200 m、1500 m×1500 m、3000 m×3000 m、4500 m×4500 m、6000 m×6000 m 共 9 个梯度。最终 LDI 尺度依赖性确定采用 1975 年、1987 年、2000 年、2010 年和 2020 年共 5 年的土地利用/覆盖数据计算结果平均值判定。

### 2.2.2 评价因子归一化与 MRSEI 计算

针对上述 4 个输入因子在赋值单位和数值变化幅度上存在差异,需要进行标准化处理使指标值统一到 0—1 之间。经极差归一化处理后获得输入因子图层(图 2)。

$$MRSEI = \sum_{i=1}^n PC_n(NDVI, WI, NDBSI, LDI) \times EV_i \times ET_i \quad (2)$$

式中, MRSEI 为改进遥感生态指数,MRSEI 值越大,生态环境越好;反之亦然。 $n$  表示主成分特征根累积达到 90% 以上的分量数,在 MRSEI 分析中因为输入因子为 4,故  $1 \leq n \leq 4$  ( $i$  为整数)。 $EV_i$  和  $ET_i$  分别为某个评价因子的特征值和特征向量。其它因子定义同前。全域可视化表达是建立在采用归一化差异水体指数剔除研究区内水体信息后的基础上。此外,文中 MRSEI 空间异质性分析是建立在分级基础上,分级原则采用均值标准差法<sup>[21]</sup>,将分级间距分为 4 级(表 1 中第一和第二列)。

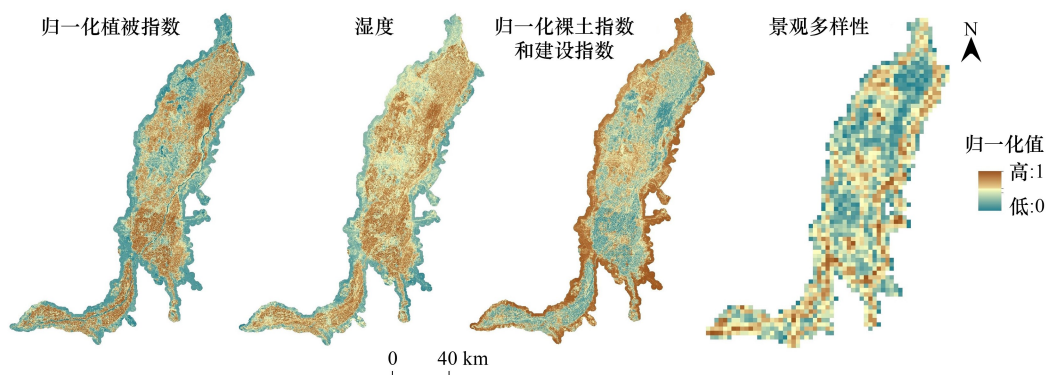


图 2 PCA 分析中的评价层

Fig.2 Evaluation layer in PCA

PCA: 主成分分析 Principal component analysis

最后,整个研究区 MRSEI 水平(评价)可通过公式(3)计算结果与表 1 中分级阈值比较确定研究区整体生态环境质量级别。

$$MRSEI = \sum_{i=1}^n M_i \times PA_i \quad (3)$$

式中,MRSEI 为时间  $t$  的遥感生态指数, $M_i$  为评价区域 MRSEI 第  $i$  类级别中值, $PA_i$  为评价区域 MRSEI 第  $i$  类级别相对面积。文中统计分析在 SPSS 和 Excel 中完成,回归方程显著性检查采用  $F$  检查( $P < 0.001$  为极显

著),关联系数显著性检查采用  $R$  显著性检查。阈值分别为  $R_{4,0.05} = 0.811$ ,  $R_{4,0.01} = 0.917$  和  $R_{4,0.001} = 0.991$ 。需要补充说明的是本文中的 MRSEI 计算考虑到了 PC 轴数目累计贡献率要超过 90%,很显然参与计算 PC 轴数大于等于 1,与其它研究在方法上存在一些不同<sup>[7-10]</sup>。

表 1 MRSEI 分级

Table 1 Classification of MRSEI

| 生态质量级别<br>Ecological quality level | 规则<br>Rule            | 阈值<br>Threshold         | 中值<br>Median |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------|
| 差 Worse                            | MRSEI ≤ 平均值-标准差       | MRSEI ≤ 0.0083          | 0.0053       |
| 较差 Poor                            | 平均值-标准差 < MRSEI ≤ 平均值 | 0.0083 < MRSEI ≤ 0.0116 | 0.0100       |
| 较好 Good                            | 平均值 < MRSEI ≤ 平均值+标准差 | 0.0116 < MRSEI ≤ 0.0149 | 0.0133       |
| 好 Excellent                        | 平均值+标准差 < MRSEI       | 0.0149 < MRSEI          | 0.0185       |

MRSEI:改进遥感生态指数 Modified remote sensing ecological index

3 结果

3.1 LDI 的尺度依赖性

从研究采用的 5 个时段以土地利用/覆盖类型为基础计算的 LDI 平均值的尺度依赖特征来看,存在显著一元二次方程变化规律( $P < 0.001$ ,  $R = 0.988$ )。在分析矩形边长 6000 m 范围内可以捕捉到 LDI 变化拐点(在 3000 m 处,图 3 中的三角点)。当分析尺度小于拐点时,LDI 增加非常陡峭,大于拐点时增加趋于平缓。因此文中 LDI 指数采用 3000 m×3000 m 的基本单元计算,计算完成后用 ArcMap 数据管理中的重采样功能,用近邻法重采样至 30 m×30 m 与其它三个因子图层在分辨率上保持一致。

3.2 MRSEI 主成分分析特征

从 PCA 输出评价因子与 MRSEI 的关联分析结果来看(表 2),在所有评价因子中 NDVI 与 MRSEI 关联程度最大为 0.7878,但仍未通过最低统计学显著性检查( $R_{4,0.05} = 0.811$ ),说明采用任何一个因子都无法获得通过统计学显著性检查的 MRSEI 状况。同时,从各评价因子与 MRSEI 的关联关系来看特点非常明显,WI 和 NDBSI 与 MRSEI 呈负相关,NDVI 和 LDI 与 MRSEI 呈正相关。此外,PCA 结果显示 PC1 轴占特征值信息的 68.98%,PC2 轴占 28.76%,二轴合计承载了特征值 97.74%。可以确定,采用此 2 轴依据公式(2)可获得所有参与评价因子绝大部分信息。从各评价因子对 PC1 轴信息集成的贡献大小(特征向量大小和正负关系)来看(表 3),PC1 主要贡献者是 NDVI,特征向量为 0.8901;其它 3 个评价因子特征向量为负值,变化在 -0.4146—-0.0317 之间。PC2 主要贡献者是 LDI,特征向量为 0.9100,其次是 NDVI 特征向量为 0.4056;WI 和 NDBSI 特征向量为负且最大不超过 -0.0200。

从 LDI 替换 LST 对 PCA 结果的影响来看(表 2),在 MRSEI 中 LDI 与 MRSEI 正相关与 RSEI 中 LST 与 RSEI 关系相反,说明 LDI 引入避免了 RSEI 中 LST 与 NDBSI 对结果的影响高度一致重复表达的不足(二者关联系数分别为 -0.9617 和 -0.9330)。同时,从统计学显著性检查结果来看,在 RSEI 中 4 个评价因子关联系数显著性都超过了 0.05 水平,说明在人工绿洲区采用任一因子单独评价区域生态环境质量也可获得具有统计学意义的结果,这明显偏离了 PCA 分析应用的主旨。而反观 MRSEI 与评价因子的关联分析结果有效的避免了这种现象发生(表 2)。此外,从 PCA 向量特征来看 RSEI 分析中的 PC1 累计贡献率就在 91% 以上,从多维投影向量合成角度来看,RSEI 分析采用的评价因子在结果贡献上具有相似作用(聚集于 PC1);而在 MRSEI

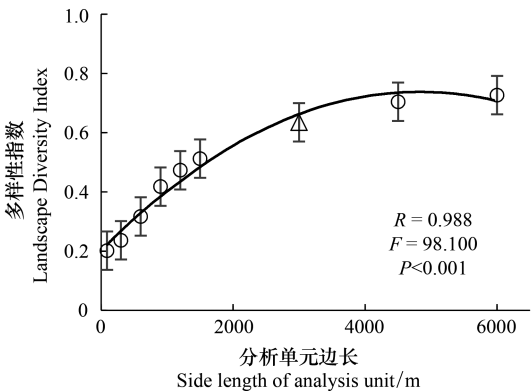


图 3 LDI 的尺度依赖特征

Fig.3 Scale dependent characteristics of LDI

中 PC1 贡献率不足 70%,引入的 LDI 因子在 PC2 中占优势并使特征向量贡献率达到了 28%以上(表 3)。这一结果从细节上辅证了 LDI 替代 LST 在人工绿洲区遥感生态环境质量评价中的合理性。

表 2 评价因子与 MRSEI 和 RSEI 的相关系数矩阵  
Table 2 Correlation coefficient matrix between evaluation factors of MRSEI and RSEI

|       |       | WI      | NDBSI   | NDVI    | LDI     | MRSEI |
|-------|-------|---------|---------|---------|---------|-------|
| MRSEI | WI    | 1       |         |         |         |       |
|       | NDBSI | 0.5203  | 1       |         |         |       |
|       | NDVI  | -0.2055 | -0.8686 | 1       |         |       |
|       | LDI   | 0.0522  | 0.2890  | -0.3221 | 1       |       |
|       | MRSEI | -0.2703 | -0.7477 | 0.7878  | 0.2955  | 1     |
|       |       | WI      | NDBSI   | NDVI    | LST     | RSEI  |
| RSEI  | WI    | 1       |         |         |         |       |
|       | NDBSI | -0.9791 | 1       |         |         |       |
|       | NDVI  | 0.8336  | -0.8297 | 1       |         |       |
|       | LST   | -0.8226 | 0.8391  | -0.6398 | 1       |       |
|       | RSEI  | 0.9229  | -0.9330 | 0.8196  | -0.9617 | 1     |

RSEI:遥感生态指数 Remote sensing based ecological index; WI:湿度 Wet index; NDBSI:归一化裸土和建筑指数 Normalized difference building-soil index; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; LDI:景观多样性指数 Landscape diversity index; LST:地表温度 Land surface temperature

表 3 不同评价因子 PCA 分析特征向量与特征值  
Table 3 Eigenvectors and eigenvalues of PCA based on different evaluation factors

| 指数类型<br>Index types | 评价指标<br>Evaluation Indicators | PC1     | PC2     | PC3    | PC4     |
|---------------------|-------------------------------|---------|---------|--------|---------|
| MRSEI               | WI                            | -0.0317 | -0.0200 | 0.8395 | -0.5420 |
|                     | NDBSI                         | -0.1865 | -0.0833 | 0.5246 | 0.8265  |
|                     | NDVI                          | 0.8901  | 0.4056  | 0.1414 | 0.1520  |
|                     | LDI                           | -0.4146 | 0.9100  | 0.0035 | -0.0041 |
|                     | 特征值                           | 0.0257  | 0.0107  | 0.0007 | 0.0001  |
|                     | 贡献率                           | 68.98%  | 97.74%  | 99.70% | 100.00% |
| RSEI                | NDVI                          | 0.834   | 0.496   | -0.24  | 0.036   |
|                     | WI                            | 0.190   | -0.003  | 0.751  | 0.633   |
|                     | NDBSI                         | -0.200  | -0.012  | -0.602 | 0.773   |
|                     | LST                           | -0.479  | 0.868   | 0.131  | -0.008  |
|                     | 特征值                           | 0.013   | 0.002   | 0.000  | 0.000   |
|                     | 贡献率                           | 91.43%  | 99.27%  | 99.94% | 100.00% |

PCA:主成分分析 Principal component analysis

从研究区总体环境质量评价角度来看,在 MRSEI 评价中由于 PC1 和 PC2 轴累积贡献率超过 90%以上,故依据表 3 中第一、二列数据采用公式(2)在 ArcMap 栅格计算器中对 PCA 输出的第一、二图层分别计算获得了图 4 中的研究区 2020 年 MRSEI 分布现状图,其中白色区域是采用归一化差异水体指数剔除的研究区内的水体信息。其后通过对 MRSEI 分布现状图的属性表进行分析获得研究区 MRSEI 平均值和标准差并依据表 1 的原则进行分类获得宁夏沿黄平原区 MRSEI 生态环境质量分级图。最后逐级进行 MRSEI 中值计算(表 1 第 4 列)。

### 3.3 MRSEI 空间异质性特征

从图 4 的 MRSEI 分布现状来看,MRSEI 低值区主要分布在研究区周边,即贺兰山东麓向宁夏沿黄平原过渡区和黄河东岸鄂尔多斯台地与黄土高原向黄河阶地过渡区。从图 4 的 MRSEI 生态环境质量分级结果来

看,“差”和“较差”级别在研究区周边呈连续分布格局,其中西侧 MRSEI 以“差”级别为主,东侧以“较差”级别为主。从不同 MRSEI 级别分布格局的数量化特征来看(表 4),在分布面积方面,以“较差”级别面积最大为 3528.7 km<sup>2</sup>,占研究区的 31.9%;其次为“较好”级别,面积为 3370.7 km<sup>2</sup>,占 31.9%;其后依次为级别“好”和“差”,面积分别为 1855.4 km<sup>2</sup>和 1804.8 km<sup>2</sup>,所占比例分别为 17.6%和 17.1%。在斑块密度方面,从“差”到“好”级别梯度上,斑块密度为减少趋势,由“差”级别的 8.3 个/km<sup>2</sup>减少到 5.9 个/km<sup>2</sup>。说明随 MRSEI 增加其分布趋向集中分布,这一点从平均斑块面积变化特点中可以得到印证,在同一梯度方向平均斑块面积由 0.120 km<sup>2</sup>增加到 0.169 km<sup>2</sup>。在同类斑块空间距离方面,“差”和“好”级别斑块间相隔相对较远,分别为 253.4 m 和 236.2 m,相互之间的连通性相对较低;“较差”和“较好”级别分别为 210.3 m 和 206.4 m。相互之间连通性相对较高。

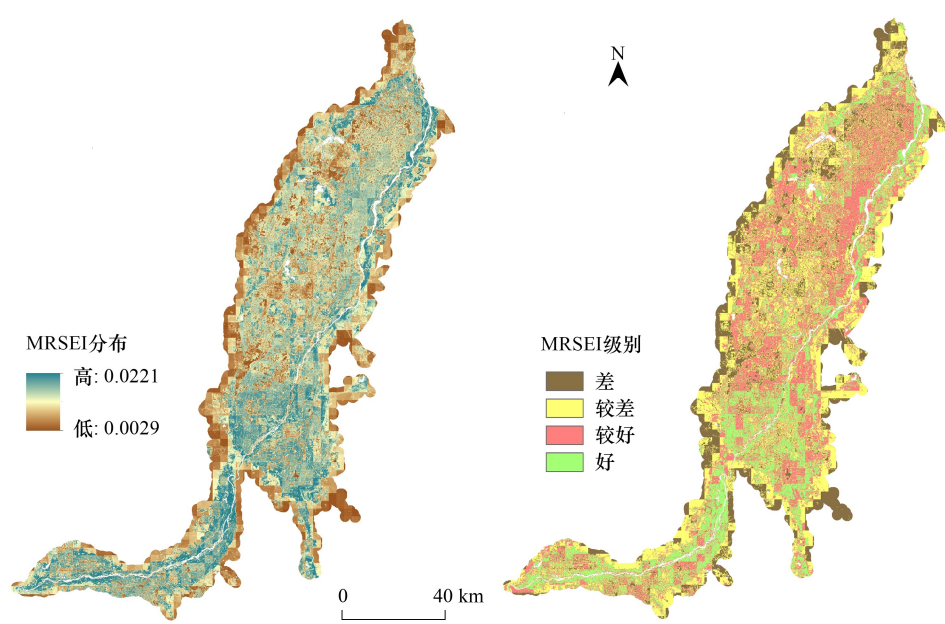


图 4 宁夏沿黄平原区 2020 年 MRSEI 分布现状与分级

Fig.4 Distribution status and classification of MRSEI of Ningxia Plain along the Yellow River in 2020

表 4 不同 MRSEI 级别空间格局数量特征

Table 4 Quantitative characteristics of spatial patterns at different levels of MRSEI

| MRSEI 级别<br>MRSEI levels | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 斑块密度/(个/km <sup>2</sup> )<br>Patch density | 平均斑块面积/km <sup>2</sup><br>Mean patch area | 平均斑块间距/m<br>Mean patch spacing |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| 差 Worse                  | 1804.8                     | 8.3                                        | 0.120                                     | 253.4                          |
| 较差 Poor                  | 3528.7                     | 6.9                                        | 0.146                                     | 210.3                          |
| 较好 Good                  | 3370.7                     | 6.0                                        | 0.165                                     | 206.4                          |
| 好 Excellent              | 1855.4                     | 5.9                                        | 0.169                                     | 236.2                          |

最后,研究区总体 MRSEI 水平可依据表 4 中第一列数据与研究区总面积比和表 1 中分级计算获取的中值采用公式(3)完成计算。研究结果表明研究区整体 MRSEI 为 0.0117,查表 1 中分级阈值可知,研究区生态环境质量刚好达到较好级别(研究区 MRSEI 值为 0.0117 大于较好级别最低阈限值 0.0116)。

4 讨论

从 2013 年 RSEI 在中国首次提出并应用于福建省长汀县生态环境质量评价以来<sup>[7]</sup>,RSEI 的计算方法被许多研究者应用来分析区域环境质量<sup>[23–28]</sup>。这些研究都延续采用 NDVI、WI、NDBSI 和 LST 四个指标,这不

仅忽视了遥感手段获取的 LST 是表征的短时间尺度地表属性量<sup>[29]</sup>,而其它三个指标是相对较长时间地表属性性累积的反映,也忽视了在许多区域类型中 NDBSI 和 LST 在生态学意义解释上高度相似的性质。因为大量遥感指数反演研究表明,地表温度与人工地表和自然裸地有极高的正关联<sup>[30-31]</sup>。此外,在 RSEI 分析中把研究基本单元(栅格)设定成相互独立状态,忽视了栅格与同类或异类或多种异类相邻在生态环境质量评价中的意义,因此用能够表达相邻栅格异质性的生态环境评价指标替代 LST 成为提高 RSEI 在生态环境评价应用中的可靠性必须面对的问题。

LDI 是景观生态学研究中使用频率最高的一个指数,它是基本分析单元(或研究区)中组成类型多样性的综合表达,其大小与组成类型数和面积比例信息均匀程度相关。LDI 在不同研究区都表现出随分析单元大小而变化的尺度依赖特征<sup>[32]</sup>。从宁夏沿黄平原 LDI 尺度依赖特征结果来看,当分析尺度(正方形边长)达到 3000 m 时 LDI 变化趋于平缓(图 3),在尺度分别增加 1.5 倍(4500 m)和 2 倍(6000 m)时,LDI 仅分别增了 0.069 和 0.092;在尺度减小 0.5 倍(1500 m)时,LDI 减少了 0.123。因此可以推断,在干旱半干旱人工绿洲区进行景观多样性研究中最佳阈值在 3000 m。此外,需要指出的是宁夏沿黄平原面积为 10831.3 km<sup>2</sup>,考虑到尺度效应不仅受分析单元的影响,而且还受研究区范围大小的影响<sup>[33]</sup>,所以其它类似地区应用时要考虑到研究区规模大小,可选择 3000 m×3000 m 左右若干梯度做简约分析获得适宜分析尺度。

从 MRSEI 评价过程中的 PCA 结果来看,用 LDI 替代 LST 计算获得各因子与 MRSEI 的关联系数都未通过统计学最低显著性检查( $R_{4, 0.05} = 0.811$ ),说明用 LDI 替代 LST 后保持了各评价因子对 MRSEI 的相互独立状态(表 2),满足 PCA 分析 n 维向量投影条件。从 PCA 结果来看,PC1 轴占特征值信息的 68.98%,其中 NDVI 具有最大向量投射(0.8901)是决定因子,是影响 PC1 最大的因子,LDI 在 PC1 轴上向量投射居第二(-0.4146)。其与 NDVI 比值为-0.4770,作用方向相反,是影响 PC1 轴性质的次要因子。因此,PC1 轴在 MRSEI 中的生态学解释是 NDVI 和 LDI 是影响生态环境质量的主要特征分量,其值越大生态环境质量越好,这种作用在 PC1 特征值中居主导作用;相反 LDI 越大生态环境质量越差,但这种作用在 PC1 特征值中居次要作用。对现状的解释为在 NDVI 高值区,LDI 往往处于低水平。其生态学意义为大面积高 NDVI 农田和乔木林地分布区对应地是 LDI 低值区,这样的区域在 MRSEI 计算中分值较高。PC2 轴占特征值信息的 28.76%,其中 LDI 具有最大向量投射(0.9100)是决定因子,LDI 是影响 PC2 最大的因子,NDVI 在 PC2 轴上向量投射居第二(0.4056)与 LDI 比值为 0.4457,作用与 LDI 方向一致是影响 PC2 轴性质的次要因子。因此,PC2 轴在 MRSEI 中的生态学解释就是 NDVI 和 LDI 是影响生态环境质量的次要特征分量,NDVI 和 LDI 越大生态环境质量越好,反之亦然。对现状的解释为在 LDI 高值区,NDVI 往往处于低水平,这样的区域在 MRSEI 计算中分值较低。其生态学意义为若任一分析单元相邻有多种土地利用/覆盖类型,其植被生产力对 MRSEI 贡献被弱化。结合研究区整体 MRSEI 水平为 0.0117 略超过“较好”级别低限(0.0116),说明在研究区中 NDVI 和 LDI 高值区重叠现象发生概率较低。从 MRSEI 空间异质性特点来看,一是以“差”和“较差”级别多分布在贺兰山东麓—宁夏平原过渡带、鄂尔多斯台地—宁夏平原过渡带和黄土高原—宁夏平原过渡带三个区域,呈环状围绕整个研究区。二是格局指数斑块密度和平均斑块面积与 MRSEI 变化具有较好的规律性,主要表现为在从“差”到“好”梯度上,斑块密度为减少趋势,而平均斑块面积呈增加趋势(表 4)。总的来看,LDI 替代 LST 进行的 MRSEI 分析首先保证了与原有三个因子(NDVI、WI 和 NDBSI)的低关联度,其中与 NDVI 最高仅为-0.3221(表 2),没有发生对 MRSEI 造成重复贡献表达的结果。同时,基于 MRSEI 分级中值阈值评价宁夏沿黄平原区生态环境质量总体上处于较好水平。从具体应用角度来看,在 ArcMap 环境中对研究区内任一指定范围(或行政区)的总体生态环境质量水平评估可通过表 2 中值阈值和选定范围内各级别相对面积用公式(3)完成计算。

在 MRSEI 分析中研究区自然特征必须予以高度重视。在大多数情况下采用 LDI 替代 LST 在评价因子属性代表性和生态学解释上是可行的,因为其有效地避免了 RSEI 分析中评价因子 NDBSI 和 LST 之间存在的生态学意义重复表达和多因子向量投影中的高度聚集。但是在特殊地理单元如青藏高原等常年冻土分布区和

不同沙丘(固定、半固定等)类型为主的地貌类型区域,LST 作为极其重要的指标是否适用需要慎重考虑。但是 LST 所反映的短时间尺度属性必须通过恰当方法(多数据统计等)改进,增强其与其它评价因子在时间尺度代表性上相对匹配。

## 5 结论

在宁夏沿黄平原区基于土地利用/覆盖分类的景观多样性指数具有显著的尺度依赖特征( $P<0.001$ ),阈值出现在  $3000\text{ m}\times 3000\text{ m}$ 。PCA 解释了研究区生态环境质量主要受到 NDVI 和 LDI 影响,其中 NDVI 是 PC1 (特征值贡献率 68.98%)的决定因子,特征向量为 0.8901;LDI 为次要决定因子,特征向量为-0.4146,该类型区在 MRSEI 计算中分值较高。LDI 是 PC2 (特征值贡献率 28.76%)的决定因子,特征向量为 0.9100;NDVI 为次要决定因子,特征向量为 0.4056。研究区空间异质性主要以“差”和“较差”级别分布在不同土地利用/覆盖类型交错区且呈环绕研究区为主要特点。在 MRSEI 由“差”到“好”梯度上,数量特征主要表现为斑块密度为减少趋势由 8.3 个/ $\text{km}^2$ 减少到 5.9 个/ $\text{km}^2$ ,而平均斑块面积呈增加趋势由  $0.120\text{ km}^2$ 增加到  $0.169\text{ km}^2$ 。综合来看宁夏沿黄平原区生态环境质量总体 MRSEI 值为 0.0117 处在较好水平。

## 参考文献 (References):

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335.
- [2] 中国环境监测总站. 生态环境状况评价技术规范(试行): 行业标准-环保, 2006: 11P.; A4.
- [3] Fan Y P, Fang C L, Zhang Q. Coupling coordinated development between social economy and ecological environment in Chinese provincial capital cities-assessment and policy implications. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 289-298.
- [4] Wang C L, Jiang Q O, Shao Y Q, Sun S Y, Xiao L, Guo J B. Ecological environment assessment based on land use simulation: A case study in the Heihe River Basin. Science of the Total Environment, 2019, 697: 133928.
- [5] 夏鑫鑫, 朱磊, 杨爱民, 靳含, 张青青. 基于山地-绿洲-荒漠系统的生态系统服务正负价值测算——以新疆玛纳斯河流域为例. 生态学报, 2020, 40(12): 3921-3934.
- [6] 王丽霞, 赵蕊, 刘招, 张双成, 孔金玲, 杨耘. 基于 RSEI 的延河流域生态环境质量监测与预估. 干旱区研究, 2022, 39(3): 943-954.
- [7] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.
- [8] Xiong Y, Xu W H, Huang S D, Wu C, Dai F, Wang L G, Lu N, Kou W L. Ecological environment quality assessment of Xishuangbanna rubber plantations expansion (1995-2018) based on multi-temporal Landsat imagery and RSEI. Geocarto International, 2022, 37(12): 3441-3468.
- [9] Xu H Q, Wang M Y, Shi T T, Guan H D, Fang C Y, Lin Z L. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). Ecological Indicators, 2018, 93: 730-740.
- [10] 郑子豪, 吴志峰, 陈颖彪, 杨智威, Francesco Marinello. 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. 生态学报, 2021, 41(2): 717-729.
- [11] 阳含熙, 卢泽愚著. 植物生态学的数量分类方法. 北京: 科学出版社, 1981.
- [12] Li N, Wang J Y, Qin F. The improvement of ecological environment index model RSEI. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(11): 403.
- [13] Yao K X, Halike A, Chen L M, Wei Q Q. Spatiotemporal changes of eco-environmental quality based on remote sensing-based ecological index in the Hotan Oasis, Xinjiang. Journal of Arid Land, 2022, 14(3): 262-283.
- [14] Maity S, Das S, Pattanayak J M, Bera B, Shit P K. Assessment of ecological environment quality in Kolkata urban agglomeration, India. Urban Ecosystems, 2022, 25(4): 1137-1154.
- [15] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 黄季夏. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素. 生态学报, 2018, 38(17): 6280-6291.
- [16] 梁佳欣, 李新举. 南四湖湿地景观格局脆弱度的时空分异特征. 应用生态学报, 2018, 29(2): 626-634.
- [17] 杨庚, 张振佳, 曹银贵, 庄亦宁, 杨凯, 白中科. 晋北大型露天矿区景观生态风险时空异质性. 生态学杂志, 2021, 40(1): 187-198.
- [18] Airiken M, Zhang F, Chan N W, Kung H T. Assessment of spatial and temporal ecological environment quality under land use change of urban agglomeration in the North Slope of Tianshan, China. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(8): 12282-12299.
- [19] 苏芝屯, 吴春燕, 何彤慧, 乔斌, 冯艳琼, 王筱平. 银川平原草甸湿地土壤养分特征与植物响应. 干旱区研究, 2019, 36(4): 816-823.
- [20] 张兴平. 宁夏平原绿洲生态经济系统的问题与调控对策. 干旱区地理, 1995, 18(1): 14-20.
- [21] Levy H. The rationale of the mean-standard deviation analysis: Comment. The American Economic Review, 1974, 64(3): 434-441.
- [22] 刘索玄, 袁艳斌, 赵峰, 李倩. 基于遥感生态指数(RSEI)的水电开发区生态环境变化分析: 以清江中下游地区为例. 生态与农村环境学

- 报, 2019, 35(11): 1361-1368.
- [23] Gao P W, Kasimu A, Zhao Y Y, Lin B, Chai J P, Ruzi T, Zhao H M. Evaluation of the temporal and spatial changes of ecological quality in the Hami oasis based on RSEI. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7716.
- [24] Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, Guo C, Marinello F. Instability of remote sensing based ecological index (RSEI) and its improvement for time series analysis. *Science of the Total Environment*, 2022, 814: 152595.
- [25] Wu S P, Gao X, Lei J Q, Zhou N, Guo Z K, Shang B J. Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(1): 14-33.
- [26] Kamara D, Yang Z H, Lahai Y A. Ecological Geospatial Monitoring and Assessment of Surface Water Environment Using Remote Sensing Ecological Index Model (RSEI) in Freetown, Sierra Leone, from 2010 to 2018. *Global Scientific Journals*, 2020, 8(12): 323-348.
- [27] 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. *生态学报*, 2020, 40(23): 8461-8473.
- [28] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 张乃明. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价. *生态学报*, 2019, 39(8): 2963-2972.
- [29] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892-905.
- [30] Schwarz N, Schlink U, Franck U, Großmann K. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators——An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*, 2012, 18: 693-704.
- [31] Qiao R R, Dong C Y, Ji S X, Chang X L. Spatial Scale Effects of the Relationship between Fractional Vegetation Coverage and Land Surface Temperature in Horqin Sandy Land, North China. *Sensors*, 2021, 21(20): 6914.
- [32] O'Neill R V, Krummel J R, Gardner R H, Sugihara G, Jackson B, DeAngelis D L, Milne B T, Turner M G, Zygmunt B, Christensen S W, Dale V H, Graham R L. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1988, 1(3): 153-162.
- [33] Levin S A. The Problem of Pattern and Scale in Ecology: The Robert H. MacArthur Award Lecture. *Ecology*, 1992, 73(6): 1943-1967.