

内蒙古临河风沙区生态环境质量时空演变

于靖明^{1,2}, 杨光^{1*}, 吴际¹, 李庆和³, 温雅琴⁴

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古自治区水利事业发展中心, 内蒙古 呼和浩特 010020; 4. 呼和浩特市水资源与河湖保护中心, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:客观评价内蒙古风沙区生态环境质量,可辅助区域生态环境治理与高质量发展。以内蒙古风沙区腹地临河区为研究对象,选取1989、2000、2010、2021年4期Landsat系列遥感影像,采用主成分分析法(PCA)构建遥感生态指数模型(RSEI),从时间、空间2个尺度对临河区32 a间生态环境质量演变特征进行分析,针对RSEI模型不适用于大面积水域的情况,采用支持向量机(SVM)与转移矩阵分析水体演变同生态环境质量间的相关关系。结果表明,1989、2000、2010、2021年生态环境质量较差等级面积分别占研究区总面积的99.82%、90.97%、60.23%、93.66%,RSEI均值以2010年为转折点呈先增长后下降趋势,整体降幅13.90%;空间分布上,生态环境质量优、良、中等等级区域主要位于林木覆盖区及黄河沿岸湿地;差等级区域主要位于城市、乡镇扩建区及工业园区;生态环境质量各等级空间重心迁移幅度较大;从时间尺度分析,93.58%的区域生态环境质量呈稳定发展态势,恶化区域较改善区域面积占比6.06%;研究区水体总面积锐减50.65 km²,水体演变面积达101.87 km²,整体对生态环境质量呈负面影响。RSEI高效、真实地刻画1989—2021年临河区生态环境质量演变进程,对于践行区域生态环境同城市化建设的协同高质量发展具有重要借鉴价值。

关键词:生态环境质量;RSEI;主成分分析;内蒙古临河风沙区

中图分类号:S771.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2023)05-0204-09

Spatial Temporal Evolution of Eco-environment Quality in the Linhe Wind-Sand Area of Inner Mongolia

YU Jing-ming^{1,2}, YANG Guang^{1*}, WU Ji¹, LI Qing-he³, WEN Ya-qing⁴

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration National Administration, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Water Resources Development Center of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 4. Hohhot Water Resources and River and Lake Protection Center, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: The eco-environmental conditions of the Inner Mongolia wind-sand area are closely related to the ecological security in the Beijing-Tianjin-Hebei region and even that around nationwide. An objective evaluation of the eco-environment quality of the Inner Mongolia Wind-Sand Area can assist regional eco-environmental governance and high-quality development. This study took the Linhe district, which is in the hinterland of the Inner Mongolia Wind-Sand Area as the research object and selected four periods Landsat series remote sensing images in 1989, 2000, 2010 and 2021, respectively to construct the remote sensing ecological index model (RSEI) adopting the principal component analysis (PCA). The evolution characteristics of

收稿日期:2020-07-01 修回日期:2022-09-16

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(2021GG0070)。

第一作者:于靖明。研究方向:荒漠化遥感监测。E-mail:534563136@qq.com

*通信作者:杨光,博士后,教授。研究方向:荒漠化遥感监测。E-mail:yg331@126.com

eco-environment quality in the Linhe area in the past 32 years were analyzed from two scales of time and space. In response to the RSEI model not applicable for large-scale waters analysis, the support vector machine (SVM) as well as transfer matrix were used to evaluate the relationship between water body evolution with eco-environment quality. The results showed that the area of poor eco-environment quality grade accounted for 99.82%, 90.97%, 60.23% and 93.66% of the total area of the study area in 1989, 2000, 2010 and 2021, respectively. The average RSEI showed a trend of first increasing and then decreasing with 2010 as the turning point, with an overall decrease of 13.90%. In terms of spatial distribution, excellent, good and medium grades eco-environmental quality areas were mainly located in the forest covered region and the wetland along the Yellow River; poor grade area were mainly located in the cities and township expansion areas and industrial parks. The spatial barycentre of each grade had shifted greatly. From the time scale perspective 93.58% of the regional eco-environmental quality showed a stable development trend, and the areas of deteriorated area accounted for 6.06% more than that of improved area. The total area of water in the study district decreased by 50.65 km² and the area of water evolution reached 101.87 km², which had a negative effect on the entirety eco-environment quality. RSEI effectively, accurately and truly depicts the evolution process of eco-environmental quality in Linhe district from 1989 to 2021, RSEI efficiently and truly depicts the evolution process of the ecological environment quality in Linhe District from 1989 to 2021, which has important reference value for practicing the synergism high-quality progress of the regional ecological environment and urbanization construction.

Key words: eco-environment quality; RSEI; principal component analysis; Linhe Wind-Sand Area of Inner Mongolia

生态环境质量综合评价以生态学理论为基础,选取具有代表性和客观性的评价指标及模型,在特定的时间尺度和空间范围内,定性、定量地对生态环境优劣状况加以判别与分析^[1-2]。遥感技术(RS, remote sensing)因具备多尺度、短周期、长时序等优势,结合地理信息系统(GIS, geographic information system)强大的空间数据统计解析能力,广泛运用于区域生态环境质量评测中^[3-4]。生态环境质量评价自20世纪60年代以来,国际上相继涌现出众多学者选取不同地域、不同指标、不同方法对生态环境质量实施评测, Franke等^[5]运用植被指数对草地动态演变进行分析; Badreldin等^[6]采用土壤调整植被指数(SAVI)进行荒漠化动态监测; Coutts等^[7]选用地表温度对城市热岛效应进行评测; 80年代起,学者们开始从单一角度、单一因子向多角度、多因素的生态环境质量评测方向进行探究^[4,8]。目前,基于各区域尺度生态环境质量复合指数的评价方法与模型众多,主要包括层次分析法(AHP)^[9]、综合评价指数法^[10]、灰色关联度法^[11]、“压力-状态-响应”(PSR)模型^[12]等,却并未形成一套系统化、正规化的生态环境质量评价体系。2006年我国生态环境部颁布《生态环境状况评价技术规范》,该规程耦合土壤、植被、水、生物、环境等关键生态指标,构建生态环境状况指数(EI, ecological index),并逐步对该指数进行完善^[13-14]。生态环境状况指数被广泛应用于县级-区域生态环境质量评价

中,可EI指数法存在权重设定依赖专家先验知识、数据获取难度较大、信息更新周期长等弊端^[15]。2013年,徐涵秋^[16]提出完全以遥感信息为基底,集纳多因子指标的遥感生态指数模型(RSEI, remote sensing ecological index),有效避免了人为干预权重的设定和单一指标表征的片面性。目前RSEI模型已广泛应用于城市群^[17]、水系流域^[18]、水土流失区^[19]、沙漠地区^[20]等多种气候、不同区域尺度。采用文献分析法对基于RSEI构建的生态环境质量评价文章进行研究,发现多数研究者未将水体演变对生态环境质量的影响纳入评价系统,水体在城市化进程与生态环境建设中发挥着至关重要的作用,探究水体变化对其所产生的影响效应,进而健全区域生态环境质量评价体系。

本研究基于遥感生态指数(RSEI)模型对内蒙古临河风沙区生态环境质量实施多时相、多指标监测评价,从时间、空间2个维度,演变面积、演变方向、演变幅度3个方面,全面分析研究区1989—2021年间生态环境质量演变进程,同时,考虑到RSEI模型评价成果易受大面积水域影响,对临河区水体实施掩膜处理,单独分析水体演变对生态环境质量的影响效应,以期为内蒙古风沙区综合治理、生态恢复及高质量发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

位于内蒙古风沙区腹地的临河区,地处107°6′—

107°44'E, 40°34'—44°17'N, 区域面积 2 333 km², 北靠狼山山脉, 东处河套平原, 近半数区界同沙漠相连, 南与库布奇沙漠依河而划, 西接乌兰布和沙漠, 且同腾格里、巴丹吉林沙漠相望; 典型地带性土壤为棕钙土、灰棕荒漠土、风沙土等, 植被覆盖度低, 存在较严重的风力侵蚀; 典型气候为温带大陆性季风气候, 年均降水量仅 138.8 mm, 而蒸发量达 2 236.7 mm, 春秋两季, 河套平原是西伯利亚冷空气途径蒙古国、南下我国的必经之地, 大风过境极易形成沙尘天气, 据统计, 临河区年均受沙尘袭击天数达 20 d, 所酿成的财产损失每年高达数亿元人民币^[21-22]。



图 1 研究区区位

Fig. 1 Location map of the study district

1.2 数据源

采用的 8 景遥感影像数据均源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>), 分别为 1989、2000、2010 年 Landsat 5 TM 影像和 2021 年 Landsat 8 OLI 影像, 行列号为 129/031 及 129/032。选取 6—8 月影像质量良好、云量偏小、季相一致的数据, 以提升研究结果的精准性。

基于 ENVI 5.3 软件对各期遥感影像实施预处理, 减少不同影像间鉴于大气、云量、地形差异所造成的辐射误差。参考 Chander 等^[23]和 Chavez^[24]的模型参数对多光谱波段及热红外波段分别进行辐射定标; 利用 FLAASH 模型实施大气校正; 运用最邻近像元法进行几何校正, 使得配准的均方根误差 (RMSE) 小于 1/2 单位像元; 实施影像镶嵌裁剪。

1.3 研究方法

1.3.1 指标构建 RSEI 模型耦合绿度、干度、湿度、热度 4 个能够直观映射生态环境优劣状况的关键指标, 采用多元统计方法中的主成分分析法 (PCA), 通过垂直旋转坐标轴的方式将多维信息汇集到几个特征分量上^[25-26], 可有效规避权重设定的主观意识性, 进而客观、精准地评测研究区生态环境质量。

1.3.2 模型指标

1.3.2.1 绿度指标 选取被广泛运用的归一化植被指数 (normalized difference vegetation index,

NDVI) 代表绿度, 可以快速反映地表植被的整体状况, 且与植被覆盖度 FVC 存在极为凸显的线性关联^[27]。

$$N_{DVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

式中: ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 为近红外和红波段的反射率。

1.3.2.2 湿度指标 选取缨帽变换后的湿度分量来表征湿度指标 (WET), 经缨帽变换后获得的湿度分量, 有效消除了冗余数据, 可较好地反映植被及土壤的湿度状况^[28-29]。基于不同传感器的 Landsat 8 OLI 和 Landsat 5 TM 影像, 湿度分量的转换系数不同。

$$W_{ET_{TM}} = 0.031 5 \rho_{Blue} + 0.202 1 \rho_{Green} + 0.310 2 \rho_{Red} + 0.159 4 \rho_{NIR} - 0.680 6 \rho_{SWIR1} - 0.610 9 \rho_{SWIR2} \quad (2)$$

$$W_{ET_{TM}} = 0.151 1 \rho_{Blue} + 0.197 3 \rho_{Green} + 0.328 3 \rho_{Red} + 0.340 7 \rho_{NIR} - 0.711 7 \rho_{SWIR1} - 0.455 9 \rho_{SWIR2} \quad (3)$$

式中: ρ_{SWIR2} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Blue} 为短波红外 2、短波红外 1、近红外、红、绿、蓝波段的反射率。

1.3.2.3 干度指标 造成研究区地表“干化”的主导成因为裸土地和建筑用地, 采用建筑指数 (I_{BI}) 和裸土指数 (S_1) 的平均值表征干度指标 (NDSI)。

$$I_{BI} = \frac{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right]}{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right]} \quad (4)$$

$$S_1 = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})} \quad (5)$$

$$N_{DSI} = \frac{(I_{BI} + S_1)}{2} \quad (6)$$

式中: ρ_{SWIR1} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Blue} 分别表示短波红外 1、近红外、红、绿、蓝波段的反射率。

1.3.2.4 热度指标 选用辐射传输方程法反演地表温度来表征热度指标 (L_{ST})^[30]。参考覃志豪等^[31]提出的地表比辐射率方程式, 将影像大致分为水体、自然表面和城镇用地 3 种类型, 分类运算地表比辐射率。

$$\text{水体: } \epsilon_{water} = 0.995 \quad (7)$$

$$\text{自然表面: } \epsilon_{surface} = 0.962 5 + 0.061 4 F_{VC} - 0.046 1 F_{VC}^2 \quad (8)$$

$$\text{城镇用地: } \epsilon_{building} = 0.958 9 + 0.086 F_{VC} - 0.067 1 F_{VC}^2 \quad (9)$$

通过普朗克定律反函数获取地表温度 (T_s)。

$$B(T_s) = \frac{[L - L_{up} - \tau(1 - \epsilon)L_{down}]}{\tau\epsilon} \quad (10)$$

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1\right)} - 273 \quad (11)$$

式中: T_s 为地表温度($^{\circ}\text{C}$); $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度; ϵ 为地表比辐射率; F_{VC} 为植被覆盖度; L_{up} 、 L_{down} 和 τ 分别为大气上行辐射、大气下行辐射和大气在热红外波段的透射率。该数据获取于美国国家航空航天局(NASA)网站(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>)^[29]; K_1 和 K_2 为定量参数,在 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 影像中,分别为 $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 、 $K_2 = 1\,260.56 \text{ K}$ 和 $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 、 $K_2 = 1\,321.08 \text{ K}$; L 分别为 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 影像中热红外 6 波段和热红外 10 波段处的辐射亮度值。

1.3.3 RSEI 模型构建 运用极差变换法对上述各指标进行归一化处理,消除由于量纲不统一所造成的权重失衡,使其数值映射到 $[0,1]$ 区间^[16]。继而运用主成分分析法(PCA)集成以上 4 个指标,获得的初始遥感生态指数(R_{SEI_0})经正负转置、归一化处理,更加精准、定量的展现区域生态环境总体质量。

$$N_{1_i} = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (12)$$

$$R_{\text{SEI}_0} = 1 - \{P_{C_1} [f(N_{\text{DVI}}, W_{\text{ET}}, N_{\text{DSI}}, L_{\text{ST}})]\} \quad (13)$$

$$R_{\text{SEI}} = \frac{R_{\text{SEI}_0} - R_{\text{SEI}_{\min}}}{R_{\text{SEI}_{\max}} - R_{\text{SEI}_{\min}}} \quad (14)$$

式中: N_{1_i} 为指标归一化后的像元值; I_i 为像元 i 的指标值; I_{\max} 、 I_{\min} 分别为指标的最大值与最小值; P_{C_1} 为第 1 主成分分量; $R_{\text{SEI}_{\max}}$ 、 $R_{\text{SEI}_{\min}}$ 为 R_{SEI_0} 的最大值与最小值。

值域介于 $[0,1]$ 的遥感生态指数(R_{SEI}),其数值越接近于 1,生态环境质量状况越优,反之亦然。为便于遥感生态指数空间格局的定量化展示,本研究将各年份 R_{SEI} 值以 0.2 为间距,划分为:差 $[0, 0.2]$ 、较差 $[0.2, 0.4]$ 、中 $[0.4, 0.6]$ 、良 $[0.6, 0.8]$ 、优 $[0.8, 1]$ 5 个等级。

1.3.4 水体提取及掩膜 选用改进的归一化差异水体指数(MNDWI, modified normalized difference water index),对各期 NDVI、WET、NDSI、LST 指标在归一化前进行水体掩膜,减少大面积水域对主成分分析产生的荷载影响,精准反映区域生态环境质量状况^[3]。

$$M_{\text{NDWI}} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}} \quad (15)$$

式中: ρ_{Green} 、 ρ_{SWIR1} 为绿波段和短波红外 1 波段处的反射率。

验证发现,仅依据 MNDWI 指数进行水体掩膜,会造成大量建设用地被掩盖及水体区域大幅增

加。因此,采用支持向量机模型(SVM, support vector machine)、MNDWI 指数和人工目视解译相结合的方法,对研究区水体单独进行时空演变分析。联系实际需求,将临河区土地利用类型重分类为水体、植被、建设用地和未利用地 4 类,对划分结果进行各类别精度、生产精度、总精度检验,各精度验证均 $>95\%$,满足分析需求^[3]。结合土地利用转移矩阵(式 16),分析 1989—2021 年水体与各土地利用类型及各等级生态环境质量之间的相互转换关系,完善区域生态环境质量监督评测体系。

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{24} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{41} & S_{42} & \cdots & S_{44} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: S 为土地利用面积; i 、 j 为研究初期和末期土地利用类型。

2 结果与分析

2.1 临河区生态环境质量总体状况

分析各年份 RSEI、NDVI、WET、NDSI、LST 均值图(图 2)。1989—2021 年临河区生态环境质量以 2010 年为节点呈“先增长后下降”趋势, RSEI 均值总体由 0.295 降至 0.254,降幅 13.90%。至 2021 年,对生态环境起正面效应的绿色指标总体下降 50.19%,与实际情况相符;与生态环境起负面效应的 LST 指标总体增长 16.25%,反映 1989—2021 年临河区在城市化进程中,涌现出植被持续减少、地表硬化、气温增高等多种生态环境恶化问题。

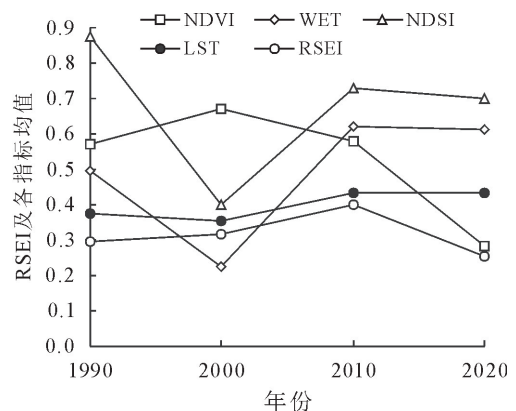


图 2 研究区 1989—2021 年 RSEI、NDVI、WET、NDSI、LST 均值

Fig. 2 Mean values of RSEI, NDVI, WET, NDSI and LST in the study area from 1989 to 2021

对研究区 RSEI 空间分布格局进行可视化分析(图 3),1989—2021 年临河区生态环境质量总体呈现较差等级。1989 年差等级区域在研究区北部呈斑点状分布;2000 年生态环境质量等级为差的地域

在中部沙地及城镇化周边呈斑面状分布,中等级地域呈条带状分布于北部、中南部及黄河沿岸地区;2010 年临河区全力落实林草目标任务,良等级生态环境质量在临河区西北部的农田、林木覆盖区首次呈现面状分布;经 10 a 的城乡高速发展、工业园区开发、油田矿产资源采伐等,至 2021 年临河区生态环境质量明显恶化,差等级区域在北部良田整改区、中部沙地、南部建成区及周边地区呈现面状分布。

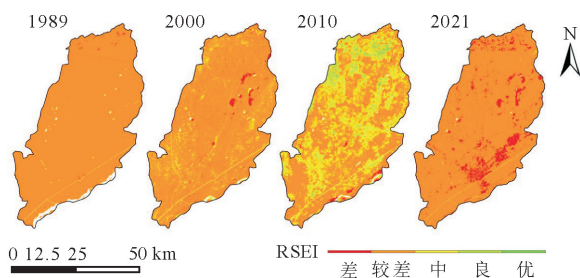


图 3 研究区 1989—2021 年生态环境质量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of eco-environmental quality in the study district from 1989 to 2021

2.2 空间演变

生态环境质量空间演变分析包括对各等级 RSEI 空间面积转变分析和重心迁移状况分析。本研究从演变面积、演变方向、演变幅度三方面对研究区生态环境质量空间演变进行阐述。

2.2.1 面积转变 将各年份、各等级生态环境质量面积变化状况进行量化与汇总(表 1)。整体来看,临河区生态环境质量以较差等级为主导,1989、2000、2010、2021 年较差等级面积分别占研究区总面积的 99.82%、90.97%、60.23%、93.66%。研究期间等级为差的区域面积,呈“波浪式”起伏,从 1989—2000 年上升 35.94 km²,至 2010 年减少为 11.76 km²,而 2021 年骤增为 146.48 km²,对照 1989 年,差等级地域面积总体增多 142.97 km²;中等级区域面积以 2010 年为节点呈“先增长后降低”趋势,2010 年中等级区域约占全区总面积的 1/3 以上,至 2021 年仅存 1.35 km²,主导成因为建成区的迅速扩张和人类对自然资源的频繁活动所致;优、良等级区域面积在 2010 年达历史最高值,分别为 1.81 km² 与 153.59 km²。

总体而言,1989—2021 年临河区生态环境质量呈下降趋势,差等级区域面积整体增幅 6.13%,而中、良、优等级面积占比变化均<1%,警示临河区在城乡扩建进程中,应积极推进高质量生态体系建筑工程。

2.2.2 重心迁移 为更加直观、清晰地展现 1989—2021 年 RSEI 各等级空间格局变化,绘制重心迁移轨迹图(图 4),结合表 2 分析得知,迁移距离可映射出

各等级空间分布密集状况,迁移方向可反映出各等级区域面积变化方向。

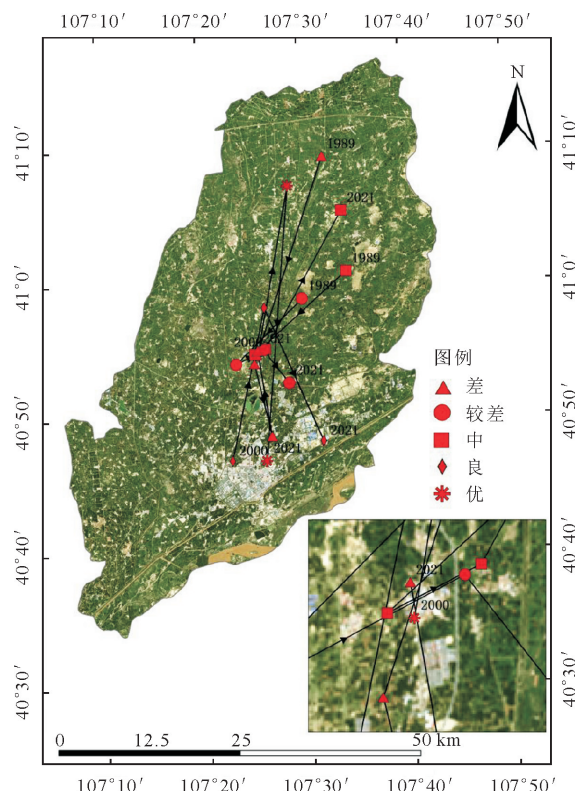


图 4 1989—2021 年临河区 RSEI 各等级重心迁移

Fig. 4 Center of gravity migration of all grades of RSEI in the Linhe District from 1989 to 2021

差等级 RSEI 空间重心迁移轨迹较长、面积变化显著,1989、2000、2000—2010 年差等级空间重心分别向南迁移 30.16 km 和 11.96 km,主导原因为南部建成区的扩张和黄河沿岸硬化改造工程的实施,而 2010—2021 年间重心又向北部折返 11.96 km,这是由于中部、北部城镇化扩建迅速、高标准良田整改及狼山脉金属矿业的采伐所致;较差等级区域在研究区空间布局广泛,面积变化幅度较小,因而迁移重心始终分布于研究区中心位置,总体来看,较差等级空间重心 32 a 间共向南迁移 11.77 km;中等级 RSEI 重心先向西南迁移 17.11 km,后向北偏东折返 21.84 km,这与研究区南部中等级生态环境质量先增长后下降的特征相一致;优、良等级重心迁移方向基本一致,均先向北偏东,后向南偏东迁移,分别共迁移 41.64 km 和 61.73 km,这与 2010—2021 年北部优良等级区域面积大幅度缩减及南部黄河国家湿地公园的建立息息相关。

RSEI 各等级空间重心分布状况在 2000—2010 年由南向北呈自低到高规律分布,与 1989、2021 年空间重心分布状况截然相反;从重心迁移轨迹来看,差、较差、良、优等级总体向南迁移,中等级向北迁移;从迁移距离而言,优、良、差等级相比较差、中等

级迁移距离更远。综上所述得知,各等级空间分布越密集且面积变化率越大,重心迁移距离则越长。

2.3 时间演变

从纵向维度对临河区生态环境质量实施动态监测,将各时段遥感生态指数(RSEI)差值分析结果划

分为 9 个等级差,揭示生态环境质量变化显著程度,正级差表征生态环境质量得以改善,0 表示稳定未变化,负级差表征生态环境质量正遭受恶化^[22]。各研究阶段生态环境质量时间演变结果及面积统计信息见表 3、图 5。

表 1 研究区 1989—2021 年 RSEI 各等级信息统计

Table 1 Information statistics of all levels of RSEI in the study area from 1989 to 2021

等级	1989 年		2000 年		2010 年		2021 年	
	面积/km ²	占比(%)	面积/km ²	占比(%)	面积/km ²	占比(%)	面积/km ²	占比(%)
差	3.51	0.15	39.45	1.69	11.76	0.50	146.48	6.28
较差	2 328.56	99.82	2 125.05	90.97	1 405.71	60.23	2 185.10	93.66
中	0.49	0.02	167.42	7.17	760.87	32.60	1.35	0.06
良	0	0	4.01	0.17	153.59	6.58	0.01	0
优	0	0	0.06	0	1.81	0	0.01	0

表 2 1989—2021 年重心迁移距离

Table 2 Center of barycentre migration distance from 1989—2021

等级	1989—2000 年 距离/km	2000—2010 年 距离/km	2010—2021 年 距离/km
差	30.16	10.27	11.96
较差	12.91	4.32	5.73
中	17.11	1.67	21.84
良	0.00	21.58	20.06
优	0.00	23.70	38.03

1989—2000 年临河区生态环境质量演变以稳定为主线,以改善为趋势,呈现恶化状况区域均以恶化 1 个级差为主,并未出现跨级恶化现象。1989—2000 年生态环境质量呈稳定等级的区域占临河区总面积的 91.16%,达历年占比最大值,167.51 km² 的区域表现为改善状况,其中 97.95% 的区域改善 1 个级差,主要位于研究区西南部、中部以东和北部的种植区及防护林区,1978 年以来我国开展的“三北”

表 3 各研究阶段生态环境质量演变信息统计

Table 3 Information statistics of eco-environmental quality evolution in each research phase

等级变化	级差	1989—2000 年			2000—2010 年			2010—2021 年			1989—2021 年		
		类面积/ km ²	级面积/ km ²	占比 (%)	类面积/ km ²	级面积/ km ²	占比 (%)	类面积/ km ²	级面积/ km ²	占比 (%)	类面积/ km ²	级面积/ km ²	占比 (%)
恶化	—4	0	38.68	1.66	0	106.19	4.55	0.08	1 042.85	44.70	0	145.46	6.24
	—3	0			0.31			5.92			0		
	—2	0			2.48			180.17			0.06		
	—1	38.68			103.40			856.68			145.40		
稳定	0	2 126.80	2 126.80	91.16	1 346.43	1 346.43	57.71	1 272.60	1 272.60	54.55	2 183.30	2 183.30	93.58
改善	1	164.08	167.51	7.18	726.43	880.46	37.74	8.48	17.58	0.75	4.17	4.19	0.18
	2	3.35			151.01			9.09			0.01		
	3	0.08			2.99			0			0		
	4	0			0.02			0			0		

防护林体系建设工程及广大人民群众拓荒开田等工作成效显著,使临河区生态环境质量逐步得以改观。呈现恶化等级的区域仅占 1.68%,呈斑块状分布于研究区中北部,城乡扩建、矿产资源采伐、连年干旱少雨是生态环境质量恶化的主要成因。

2000—2010 年临河区生态环境质量改善状况最为显著,改善面积达 880.46 km²,农田、林木覆盖区为主要改善地,17.50% 的区域呈现跨级差改善,2006 年临河区下发《关于实施户植千棵树工程》,为全区新增 400 km² 的造林面积,区域生态环境效益得以显著提升。呈现恶化等级的生态环境质量区域

占比 4.57%,其中 97.37% 的区域恶化 1 个级差,南部黄河沿岸硬化改造工程的实施及中部、西北部城镇化的迅速扩建是区域生态环境质量恶化的主要成因。全区 1/2 以上的区域生态环境质量呈稳定等级。1989—2000、2000—2010 年生态环境质量改善区域与恶化区域面积比分别为 4.33 和 8.29,表明临河区生态环境质量改善速度同等在提升。

2010—2021 年临河区生态环境质量呈稳定状态的区域面积为 1 283.12 km²;44.70% 的区域表征为恶化状况,其中跨级恶化涵盖 186.17 km²,仅有 17.58 km² 的区域呈现改善状况,其中 51.75%

的区域表现为跨级改善。2010—2021 年临河区生态环境质量总体呈稳定-恶化演变趋势,稳定区域占据主导优势,可恶化面积增幅显著,建成区扩张、矿产资源采伐和高标准良田的整改是致使区域生态环境质量恶化的关键因素,生态环境质量跨级改善,得益于政府对湿地资源的精准保护。

整体分析临河区 32 a 间生态环境质量演变进程,从变化幅度分析(表 3),呈恶化等级的生态环境质量区域为 145.53 km²,其中 99.96% 的区域表征为恶化 1 个级差;生态环境质量呈改善状况的区域为 4.19 km²,改善 1 个级差的区域占比 99.63%;临河区生态环境质量整体展现稳定发展局势。从空间分布来看(图 5),研究区北部的防护林及商品林带为主要的生态环境质量改善区,规范化的营林机制和对林草业严格保护制度的实施,是临河区生态环境质量得以改善的主导因素;呈现恶化状况的生态环境质量区域主要位于城乡建设区和矿产采伐区周边。警示临河区应秉持生态与保护优先的生态-经济发展理念。

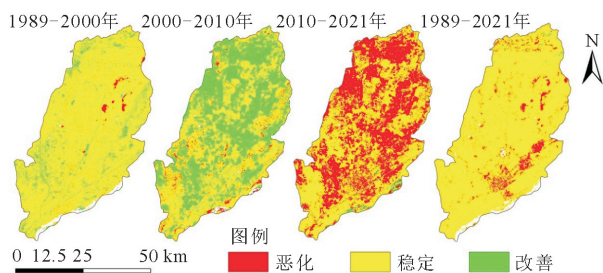


图 5 1989—2021 年时间尺度生态环境质量演变

Fig. 5 Evolution of eco-environmental quality on a time scale from 1989 to 2021

总时段与 1989—2000、2000—2010、2010—2021 年各研究阶段稳定等级面积占比分别为 93.58%、91.16%、57.71%、54.55%,1989—2000、2000—2010 年生态环境质量呈大面积小幅度改善态势,而 2010—2021 年生态环境质量呈小级差大范围恶化态势,生态环境质量演变整体展现稳定发展形势。

2.4 水体演变

分析 1989—2021 年土地利用转移矩阵及空间布局(表 4、图 6),明晰研究区内水体同各土地利用类型之间的结构特征转变和方向转移。总体而言,1989—2021 年临河区各类型、各区域水体演变差异显著,水域面积缩减 50.65 km²,仅有 18.78% 的前期水体保留至今。

1989—2021 年水体演变为各类型土地利用面积 76.26 km²,41.38% 的水体转变为建设用地,占比最大。演变后各用地类型多数位于较差、差的生态环境

质量区,结合图 6 可以看出,城市、城镇化的迅速扩建和黄河沿岸硬化改造工程的实施,使研究区中部、南部的坑塘、湖泊及黄河水域面积大幅缩减。

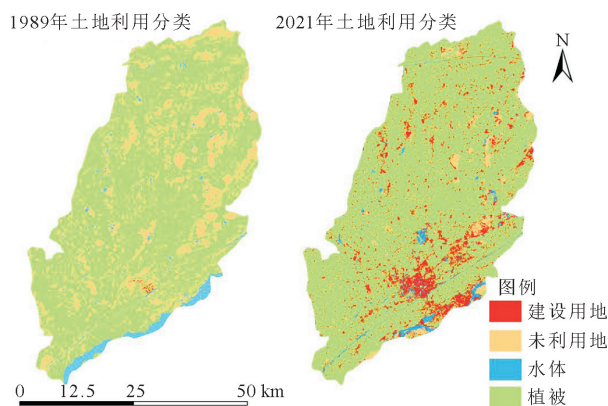


图 6 临河区 1989 年、2021 年土地利用类型空间布局

Fig. 6 Spatial layout of land use types in Linhe region in 1989 and 2021

表 4 1989 年—2021 年临河区土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transfer matrix in the Linhe region,

		1989—2021			
		km ²			
年份	土地利用类型	1989 年			
		建设用地	水体	未利用地	植被
2021 年	建设用地	22.03	38.85	485.63	198.54
	水体	1.03	17.63	16.38	8.20
	未利用地	0.51	6.12	35.81	8.04
	植被	9.15	31.29	606.89	864.91

1989—2021 年临河区各地类演变为水体的区域占演变总面积的 1.87%,2.38% 的建设用地演变为水体,占比最小。演变至水体的各地类均源于生态环境质量等级为中和较差区域,分析原因得出,城乡周边小型观赏湖泊的建造、水产养殖业的迅速发展及黄河国家湿地公园的建立,是水体扩充的主要源头。

整体来看,32 a 间临河区水体演变类型、演变区域差异显著,水体演变为各地类及各地类演变为水体的面积分别为 76.26、25.61 km²,其中,转化为水体的各地类均源于 RSEI 等级为中、较差的区域,经水体演变形成的各地类均位于 RSEI 等级为差、较差区域。综上分析得知,水体演变对生态环境质量起负面效应。

3 结论

1989—2021 年,研究区 RSEI 均值以 2010 年为转折点呈“先增长后下降”趋势,由 0.295 降至 0.254,整体降幅 13.90%。32 a 间各研究阶段生态环境质量较差等级面积分别占研究区总面积的 99.82%、

90.97%、60.23%、93.66%,差等级区域总体增幅6.13%,中、良、优等级面积占比变化均小于1%。

空间分布而言,中、良等级生态环境质量区域主要布局于北部的林木覆盖区和南部黄河沿岸,中部和西南地区各年间出现不同位置的零星分布;城乡建设区、良田整改区、资源采伐地生态环境质量等级呈现为差。

空间演变方向分析,RSEI各等级空间重心分布状况在2000—2010年由南向北呈自低到高规律分布,与1989、2021年空间重心分布状况截然相反;重心迁移轨迹分析,差、较差、良、优等级总体向南迁移,中等级向北迁移;迁移距离分析,差、良、优等级相比中、较差等级迁移距离更远。

时间演变尺度分析,总时段与各阶段稳定等级区域面积占比分别为93.58%、91.16%、57.71%、54.55%,表明研究区生态环境质量总体以较差等级为主,经定量化、可视化分析得知恶化区域较改善区域面积占比6.06%,城镇区扩建、工业园区开发、矿产资源采伐同生态环境质量间呈负相关关系,因此,在推动新型“城乡建设”实施模式中,应统筹协调土地资源开发同生态环境建设之间的和谐关系。

水体演变与生态环境质量,1989—2021年研究区水体总面积锐减50.65 km²,各类型、各区域水体演变面积达101.87 km²,经水体演变形成的各地类均位于RSEI等级为差、较差区域,演变为水体的各地类均源于RSEI等级为中、较差区域,水体演变对生态环境质量起负面影响。

参考文献:

- [1] 刘盼,任春颖,王宗明,等.南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价[J].应用生态学报,2018,29(10):3347-3356.
LIU P,REN C,WANG Z M,*et al.* Assessment of the eco-environmental quality in the Nanweng River nature reserve,north-east China by remote sensing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(10):3347-3356. (in Chinese)
- [2] 李恺.层次分析法在生态环境综合评价中的应用[J].环境科学与技术,2009,32(2):183-185.
- [3] 张仙,陈理,马燕妮,等.基于GIS和RS的银川市城市生态环境质量动态监测与评价[J].安全与环境学报,2021,21(6):2854-2864.
ZHANG X,CHEN L,MA Y N,*et al.* Monitoring and evaluation of ecology and environment quality of Yinchuan City based on GIS and RS[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(6):2854-2864. (in Chinese)
- [4] 孙琦,陈宇灿,鲁峻铭,等.京津冀地区城市绿色空间与生态环境质量时空演变规律探讨[J].太原理工大学学报,2023,54(2):341-349.
SUN Q,CHEN Y C,LU J M,*et al.* Spatiotemporal evolution of urban green space and ecological quality in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2023,54(2):341-349. (in Chinese)
- [5] FRANKE J,KEUCK V,SIEGERT F. Assessment of grassland use intensity by remote sensing to support conservation schemes[J]. Journal for Nature Conservation,2012,20(3):125-134.
- [6] BADRELDIN N,GOOSSENS R. A satellite-based disturbance index algorithm for monitoring mitigation strategies effects on desertification change in an arid environment[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change,201,20(2):263-276.
- [7] COUTTS A M,HARRIS R J,PHAN T,*et al.* Thermal infrared remote sensing of urban heat:hotspots,vegetation,and an assessment of techniques for use in urban planning[J]. Remote Sensing of Environment,2016,186:637-651.
- [8] 曹辰,杨国林,锁旭宏,等.基于遥感生态指数的阜新市生态环境变化分析[J].西北林学院学报,2022,37(2):200-207.
CAO C,YANG G L,SUO X H,*et al.* An analysis of ecological environment change in Fuxin City based on remote sensing ecological index[J]. Journal of Northwest Forestry University,2022,37(2):200-207. (in Chinese)
- [9] 李帅,魏虹,倪细炉,等.基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J].应用生态学报,2014,25(9):2700-2708.
LI S,WEI H,NI X L,*et al.* Evaluation of urban human settlement quality in Ningxia based on AHP and the entropy method[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(9):2700-2708. (in Chinese)
- [10] 厉彦玲,朱宝林,王亮,等.基于综合指数法的生态环境质量综合评价系统的设计与应用[J].测绘科学,2005(1):89-91,111-112.
LI Y L,ZHU B L,WANG L,*et al.* Designing and application of comprehensive index method based ecological environment quality comprehensive evaluation system[J]. Surveying and Mapping Science,2005(1):89-91,111-112. (in Chinese)
- [11] 贾艳艳,于东明,王明杰,等.泰安市景观格局和生境质量时空演变及其关联分析[J].西北林学院学报,2022,37(2):229-237.
JIA Y Y,YU D M,WANG M J,*et al.* Spatial-temporal evolution and correlation analysis of landscape pattern and habitat quality in Taian City[J]. Journal of Northwest Forestry University,2022,37(2):229-237. (in Chinese)
- [12] 邱微,赵庆良,李崧,等.基于“压力-状态-响应”模型的黑龙江省生态安全评价研究[J].环境科学,2008,29(4):1148-1152.
QIU W,ZHAO Q L,LI S,*et al.* Ecological security evaluation of Heilongjiang Province with pressure-state-response model[J]. Environmental Science,2008,29(4):1148-1152. (in Chinese)
- [13] 何念鹏,徐丽,何洪林.生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标[J].生态学报,2020,40(6):1877-1886.
HE N P,XU L,HE H L. The methods of evaluation ecosystem quality:ideal reference and key parameters[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(6):1877-1886. (in Chinese)
- [14] 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 eco-

- logical environment index model on the national evaluation of ecological environment quality[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(3): 93-98. (in Chinese)
- [15] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 农牧交错区生态环境质量遥感动态监测——以宁夏盐池为例[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1070-1078.
- ZHANG X D, LIU X N, ZHAO Z P, *et al.* Dynamic monitoring of ecology and environment in the agro-pastoral ecotone based on remote sensing: a case of Yanchi County in Ningxia hui autonomous region[J]. Arid Region Geography, 2017, 40(5): 1070-1078. (in Chinese)
- [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]. Chinese Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897. (in Chinese)
- [17] 张洁, 杨燕琼. 珠江三角洲城市群生态状况变化遥感评价[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 184-191.
- ZHANG J, YANG Y Q. Remote sensing evaluation on the change of ecological status of Pearl River delta urban agglomeration[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 184-191. (in Chinese)
- [18] 朱泓, 王金亮, 程峰, 等. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1289-1297.
- ZHU H, WANG J L, CHENG F, *et al.* Monitoring and evaluation of eco-environmental quality of lake basin in central Yunnan[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1289-1297. (in Chinese)
- [19] 李冠稳, 高晓奇, 肖能文. 基于关键指标的黄河流域近 20 年生态系统质量的时空变化[J]. 环境科学研究, 2021, 34(12): 2945-2953.
- LI G W, GAO X Q, XIAO N W. Spatial and temporal changes of ecosystem quality based on key Indicators in Yellow River basin from 2000 to 2018 [J]. Environmental Science Research, 2021, 34(12): 2945-2953. (in Chinese)
- [20] 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. (in Chinese)
- [21] 仇巧玲. 临河区沙尘天气变化特征统计分析[J]. 山西农经, 2019(3): 163.
- [22] 马燕, 王毛英, 郭玉华. 巴彦淖尔市土地沙漠化现状及其防治措施初探[J]. 内蒙古环境科学, 2007(1): 16-18.
- MA Y, WANG M Y, GUO Y H. The preliminary discussion on current situation and measures of present and control of land desertification of Bayannaoer City [J]. Environmental Science of Inner Mongolia, 2007(1): 16-18. (in Chinese)
- [23] CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [24] CHAVEZ P S. Image based atmospheric corrections-revisited and revised[J]. Scientific Research, 1996, 62(9): 1025-1036.
- [25] 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 Ecology Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862. (in Chinese)
- [26] 闫国东, 左雪漫, 陈瑾, 等. 基于多特征优选的 Sentinel-2 遥感影像林分类型分类[J]. 森林工程, 2023, 39(3): 12-20.
- YAN G D, ZUO X M, CHEN J, *et al.* Classification of forest stand types in sentinel-2 remote sensing images based on multi-feature optimization[J]. Forest Engineering, 2023, 39(3): 12-20. (in Chinese)
- [27] 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 G L, PENG P H. RSEI-based evaluation on ecological environment changes in typical dry hot valley-Panzhihua City, Sichuan, China[J]. Journal of Mountainous Regions, 2021, 39(6): 842-854. (in Chinese)
- [28] 周家香, 朱建军, 左廷英. IKONOS 图像的缨帽变换方法[J]. 矿山测量, 2006(1): 13-14, 50, 4.
- ZHOU J X, ZHU J J, ZUO T Y. IKONOS image tasseled cap transformation method[J]. Mine Survey, 2006(1): 13-14, 50, 4. (in Chinese)
- [29] 李滨, 刘可宁. 基于无人机光学遥感的森林生物量估算研究[J]. 森林工程, 2022, 38(5): 83-92.
- LI B, LIU K N. Forest biomass estimation based on UAV optical remote sensing[J]. Forest Engineering, 2022, 38(5): 83-92. (in Chinese)
- [30] 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. (in Chinese)
- [31] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004(3): 28-32, 36-41, 74.
- QIN Z H, LI W J, XU B, *et al.* The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6[J]. Land and resources remote sensing, 2004(3): 28-32, 36-41, 74. (in Chinese)