

内蒙古杭锦旗生态环境时空变化的遥感监测与评价

周玲美 王世航*

(安徽理工大学测绘学院, 安徽淮南 232001)

摘要 随着生态环境问题的日益突出和全球化,人们越来越注重环境保护,而且遥感技术在生态环境监测和评价中发挥着重要作用。本研究基于1992、2000、2008和2017年的Landsat影像数据,构建遥感生态指数(RSEI),对内蒙古杭锦旗的生态环境质量进行监测和评价,以为该区生态环境保护提供理论依据。结果表明:1992—2017年,杭锦旗的生态环境质量总体较差,其RSEI等级以差和较差为主;RSEI均值从0.31(1992年)上升到0.37(2008年),再下降至0.30(2017年),期间生态等级变化均以变化1个等级为主。在空间分布上,杭锦旗生态环境质量较差的区域主要分布在中西部的荒漠平原区,生态质量较好的区域主要分布在黄河沿岸和东南部,生态质量等级变化波动较大的区域主要分布在沙漠边缘、黄河沿岸和东部的丘陵沟壑区。研究期间,杭锦旗各生态等级的重心转移幅度较大,时空波动较明显。总之,杭锦旗生态环境脆弱、不稳定,生态建设对生态环境的改善有一定促进作用,同时也要合理地配置资源和利用土地。

关键词 遥感生态指数;生态环境质量;杭锦旗

Remote sensing monitoring and evaluation of spatial and temporal changes of ecological environment in Hangjin Banner, Inner Mongolia, China. ZHOU Ling-mei, WANG Shi-hang*
(School of Surveying and Mapping, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China).

Abstract: With the ecological environment problems being increasingly prominent and globalized, more and more attention is paid to environmental protection. Remote sensing technology is important in monitoring and evaluating ecological environment. In this study, based on the Landsat image data of 1992, 2000, 2008 and 2017, the remote sensing ecological index (RSEI) was constructed to monitor and evaluate the quality of ecological environment in Hangjin Banner, Inner Mongolia, aiming to provide a theoretical basis for local ecological environment protection. The results showed that from 1992 to 2017, the quality of ecological environment in Hangjin Banner was generally poor, with RESI grades of poor and inferior. The mean value of RESI increased from 0.31 (1992) to 0.37 (2008) and then decreased to 0.30 (2017). During the period, the change range was mainly from one grade to the next. In terms of spatial distribution, the regions with poor ecological environment quality were mainly in the desert plains of the central and western regions, that with good ecological quality mainly along the Yellow River and in the southeast, and that with large fluctuation of ecological quality grade mainly in the desert edge along the Yellow River and in the hilly and gully regions in the east. During the research period, the center of gravity of each ecological grade in Hangjin Banner substantially shifted, with spatiotemporal fluctuations. Our results suggest that ecological environment of Hangjin Banner was fragile and unstable. Ecological construction can promote the quality of ecological environment, but resources and land use should also be reasonably allocated.

Key words: remote sensing ecological index; ecological environment quality; Hangjin Banner.

生态环境保护是当今社会热门话题之一。生态环境与人类生产、生活密切相关,及时准确地认识和评价生态环境质量状况对生态环境保护具有十分重要的意义^[1]。位于内蒙古自治区的杭锦旗境内分布着库布齐沙漠和毛乌素沙地,沙漠化和潜在沙漠化面积约 137.6 万 hm^2 , 占土地总面积的 72.8%, 且草原退化、沙化、盐渍化现象非常严重, 是内蒙古中西部地区生态环境极度脆弱的地区之一。研究该区域的生态环境时空格局和演变、了解其生态环境状况, 对该区域的生态环境建设和可持续发展具有重要意义。

随着遥感技术的快速发展, 其在生态环境监测和保护中的应用越来越广泛^[2]。目前, 常用的区域生态环境监测评价的方法可分为两类: 一类是基于单一生态指标的评价方法, 如利用植被指数监测草地退化过程^[3]、利用地表温度研究城市热环境^[4]和利用温度植被干旱指数评估干旱状况^[5]等。另一类是综合多个生态指标的评价方法。该类可分为以下两种情况: 一种是完全基于遥感数据建立的多指标评价模型。如徐涵秋^[6]利用 Landsat 数据提取的植被指数、湿度分量、地表温度和干度指数构建了遥感生态指数, 分析福建长汀水土流失区生态环境变化情况; 张添佑等^[7]利用 Landsat 数据提取土壤盐度、地表反照率、植被覆盖度和土壤湿度构建了生态指数, 对玛纳斯河流域盐渍化灌区生态环境变化进行评价。另一种是结合遥感数据与其他类型数据建立的综合指标评价模型, 如李嘉力等^[8]利用全国第一次地理国情普查、高分影像和地貌数据建立了生态环境状况指数, 对 2015 年广西生态环境状况进行评价, 王思梦等^[9]利用 MODIS 影像数据和地形数据构建了生态环境评价模型, 分析评价无定河流域的自然生态环境。迄今, 针对沙漠地区的生态评价案例较少。

在生态环境状况的评价方法中, 单一指标评价方法难以对复杂的生态环境状况进行综合性评价。在综合指标评价方法中, 调查统计数据不易获取, 指标权重设置受人为因素的影响存在较大局限性。而徐涵秋^[6]于 2013 年提出的耦合绿色度、湿度、干度和热度 4 个指标的遥感生态指数 (remote sensing ecological index, RSEI) 是完全基于遥感数据反演获得, 且排除了人为因素对各指标权重的影响, 具有客观性、多指标、可视化和实用性高等优点^[10-12], 在区域生态环境状况的快速监测和评价中得到了广泛应用^[13-16]。因此, 本研究利用遥感生态指数对杭锦旗

1992—2017 年间生态环境质量变化进行综合评价分析, 以期对杭锦旗的生态环境保护和治理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

杭锦旗位于内蒙古自治区鄂尔多斯市的西北部, 横跨鄂尔多斯高原和河套平原, 地理坐标在 $39^{\circ}22'33''$ — $40^{\circ}52'14''$ N, $106^{\circ}55'16''$ — $109^{\circ}16'02''$ E 之间, 地势由南向北缓慢倾斜, 土地总面积约为 1.89 万 km^2 (图 1)。杭锦旗境内地形地貌包括黄河冲积平原、沙地沙漠、波状高平原和砒砂岩丘陵, 地带性分布规律明显, 其中, 北部为沿河平原, 中北部为库布齐沙漠, 南部为梁外丘陵区。研究区属于中温带半干旱性荒漠草原气候, 太阳辐射强, 日照丰富, 常年干旱少雨, 蒸发量大, 风大沙多。

1.2 数据来源及预处理

遥感影像数据来源于美国地质调查局 (USGS, <http://glovis.usgs.gov/>), 分别为 1992、2000 和 2008 年的 Landsat 5 TM 影像以及 2017 年的 Landsat 8 OLI 和 TIRS 影像, 为保证研究结果的精度和可比性, 选取 8—10 月影像质量较好、云量较低、季相近的数据, 具体信息见表 1。为了减少外界因素对影像的影响, 在使用数据前需对其进行预处理。首先, 利用遥感影像处理软件 ENVI 5.3 对多光谱波段和热红外波段分别进行辐射定标, 然后利用 FLAASH 大气校正工具对定标后的多光谱波段进行校正。由于研究区需要 3 景影像才能完全覆盖, 因此, 在大气校正后, 需对影像的多光谱波段和热红外波段分别进行镶嵌和裁剪等操作, 最终统一投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

1.3 研究方法

遥感生态指数是采用主成分变换来耦合绿色度、

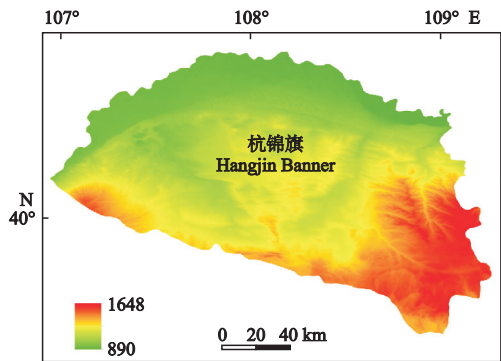


图 1 研究区地理位置示意图
Fig.1 Geographical location of the study area.

表 1 遥感影像数据信息
Table 1 Information of remote sensing images

年份 Year	条带号 Strip number	行列号 Line number	影像日期 Image date	传感器类型 Sensor type
1992	129	32	1992-09-01	TM
	128	32	1992-08-25	
	128	33	1992-08-25	
2000	129	32	2000-09-07	TM
	128	32	2000-09-16	
	128	33	2000-09-16	
2008	129	32	2008-09-29	TM
	128	32	2008-10-08	
	128	33	2008-10-08	
2017	129	32	2017-09-06	OLI/TIRS
	128	32	2017-08-30	
	128	33	2017-08-30	

湿度、热度和干度 4 个评价指标的综合评价指数,其中,绿色、湿度、热度和干度指标可分别用归一化植被指数(NDVI)、湿度分量(Wet)、地表温度(LST)和干度指数(NDSI)表示^[6]。

1) 绿色指标。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与植物生物量、叶面积指数以及植被覆盖度都密切相关,是目前应用最广泛的指数^[17]。计算公式如下:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) \quad (1)$$

式中: ρ_i 表示各对应波段的反射率。

2) 湿度指标。通过遥感缨帽变换所获得的亮度、绿色、湿度分量已被广泛应用于生态环境监测中,其中的湿度分量能较好地反映与生态密切相关的土壤和植被的湿度^[18-19]。计算公式如下:

$$Wet_{TM} = 0.0315\rho_{blue} + 0.2021\rho_{green} + 0.3102\rho_{red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

$$Wet_{OLI} = 0.1511\rho_{blue} + 0.1973\rho_{green} + 0.3283\rho_{red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad (3)$$

3) 热度指标。选用地表温度(LST)代表热度指标,计算公式^[20]如下:

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] - 273 \quad (4)$$

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L + 1) \quad (5)$$

式中: LST 为地表温度($^{\circ}\text{C}$); T 为传感器处温度值; L 为辐射定标后的热红外波段反射率,对 Landsat 5 TM 传感器, $K_1 = 607.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$; 对 Landsat 8 TIRS 传感器第 10 波段, $K_1 = 774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$; λ 为热红外波段中心波长, $\lambda_{TM} = 11.435 \mu\text{m}$; $\lambda_{l10} = 10.9$

μm ; $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$; ε 为地表比辐射率,其取值参考文献^[21]。

4) 干度指标。选用裸土指数(SI)^[22]和建筑指数(ABI)^[23]来合成代表干度指数(NDSI),计算公式如下:

$$NDSI = (SI + ABI) / 2 \quad (6)$$

$$SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{NIR})] \quad (7)$$

$$ABI = \left(\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} - \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \right) / \left(\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \right) \quad (8)$$

5) RSEI 构建。在进行主成分分析前,为了避免 4 个指标量纲不统一和不同时相影像彼此间的季相差异^[20]对计算结果造成影响,需对各指标进行正规化处理,使其值在 $[0, 1]$ 范围内,正规化公式为:

$$NI = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (9)$$

式中: NI 为指标经过正规化后的结果; I 为指标值; I_{max} 为指标中的最大值; I_{min} 为指标中的最小值。

为避免水域对主成分的载荷影响,需要将水体信息去除^[12]。在软件 ENVI 5.3 的平台下,利用改进的归一化水体指数(MNDWI)^[24]建立掩膜文件,去除水体,然后将经过正规化处理的 4 个指标合成一幅新的影像,对新影像进行主成分分析,得到第一主成分 PC1 及相关统计结果。最后利用式(9),对结果进行正规化处理获得 RSEI, RSEI 值越接近于 1,表示生态环境质量越好。

2 结果与分析

2.1 杭锦旗生态环境质量总体情况

为了能够直观地显示出遥感生态指数的空间分布特征,并进行定量化分析,根据已有的分级方法^[25],将 4 期 RSEI 结果以 0.2 为间隔划分为差(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(图 2),并分别对 4 个时期各生态等级的面积和所占比例进行统计(表 2)。

1992—2017 年,杭锦旗 RSEI 等级为差的区域大部分集中在杭锦旗的北部,即库布齐沙漠腹地,中部和西部地区生态等级较差,等级为良和优的区域主要分布在黄河沿岸的冲积平原和东南部地区。1992—2008 年, RSEI 等级为差的区域明显减少,等级为中的区域明显增加。2017 年东部和南部地区 RSEI 等级为中和良的区域较其他 3 年面积大大较少,该区域的生态环境出现退化,但较之 1992 年,中

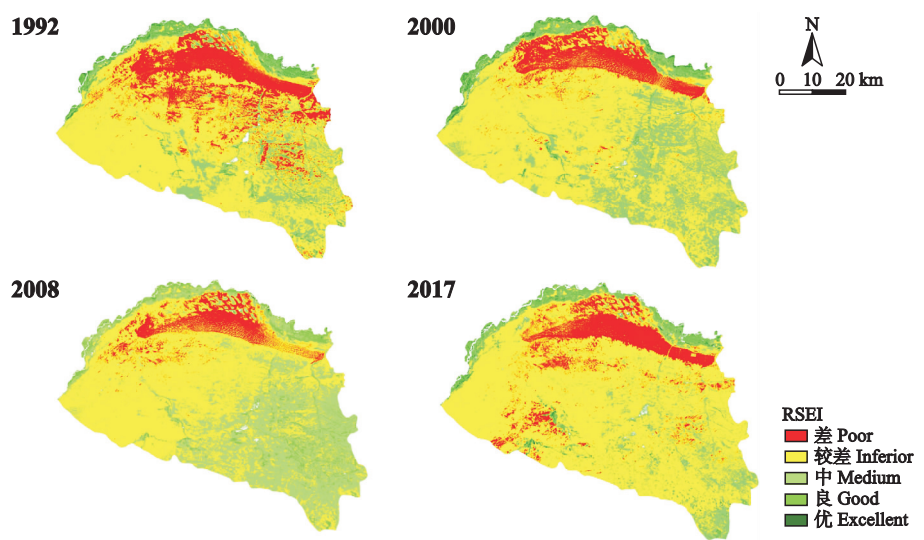


图 2 1992—2017 年杭锦旗 RSEI 等级分布图
Fig.2 Distribution of RSEI grades in Hangjin Banner from 1992 to 2017.

部地区 RSEI 为差的等级向较差等级转移,该区域生态环境较 1992 年有了很大的改善。

由表 2 可以看出,1992、2000、2008、2017 年研究区 RSEI 均值分别为 0.31、0.35、0.37、0.30,其中,2008 年的 RSEI 均值最大。1992—2008 年的 RSEI 呈增长趋势,增长了 19.0%,而 2008—2017 年的 RSEI 呈下降趋势,降低了 17.8%,说明 1992—2008 年杭锦旗的生态环境质量得到改善,而 2008—2017 年其生态环境出现退化。1992、2000、2008、2017 年,杭锦旗生态环境质量以差和较差的等级为主,各年份所占面积比重分别为 82.7%、74.6%、61.8%和 86.6%,整体生态环境质量较差;1992—2008 年,RSEI 等级为差和较差的比例减少了 20.9%,中等比例增长了 21.28%;2008—2017 年,RSEI 等级为差和较差的比例增长了 24.7%,中等比例降低了 23.8%;1992—2017 年,RSEI 等级为良和优的面积比重较小,其中,1992 年的比重最大,为 5.2%,2017 年比重最小,比 1992 年降低了 1.4%。

2.2 杭锦旗生态环境质量的时空变化

为了分析杭锦旗 1992—2017 年间的生态环境质量变化特征,对 1992、2008 和 2017 年的 RSEI 等级图分别进行差值计算,得到 1992—2008 年和 2008—2017 年间的 RSEI 等级变化情况(图 3 和表 3)。

由表 3 可以看出,在 1992—2008 年和 2008—2017 年间,杭锦旗生态环境保持不变的区域均超过总面积的 55%。1992—2008 年,生态环境变好的区域达到 35.4%,其中,以增加 1 个等级为主。2008—2017 年,生态环境变差的区域面积为 6340.91 km²,占总面积的 34.4%,其中,等级下降 1 级的面积占退化总面积的 96.4%。由此可见,1992—2008 年,除少数区域出现小幅度退化外,杭锦旗大部分区域的生态环境质量得到了很大改善;2008—2017 年,其生态环境质量等级又出现了大面积的小幅度降低。1992—2008 年生态变好面积与 2008—2017 年生态变差面积相差不大,2017 年与 1992 年生态环境总体质量相差不大。

表 2 杭锦旗不同时期的生态等级面积及比例 *
Table 2 Area and proportion of ecological grades in different periods of Hangjin Banner

RSEI 等级 RSEI grade	1992		2000		2008		2017	
	面积 Area (km ²)	%	面积 Area (km ²)	%	面积 Area (km ²)	%	面积 Area (km ²)	%
差 Poor	3333.51	18.0	1772.02	9.5	1261.71	6.8	2067.97	11.2
较差 Inferior	11964.56	64.7	12118.39	65.1	10214.43	55.0	13961.34	75.4
中 Medium	2246.07	12.1	3866.37	20.8	6202.47	33.4	1775.88	9.6
良 Good	886.91	4.8	733.12	3.9	862.55	4.7	554.54	3.0
优 Excellent	72.63	0.4	121.04	0.7	18.72	0.1	158.29	0.8
平均值 Average	0.31		0.35		0.37		0.30	

* 不包括水域面积 Excluding water area.

表 3 杭锦旗 1992—2017 年 RSEI 等级变化统计*
Table 3 Statistics of changes in RSEI grades from 1992 to 2017 in Hangjin Banner

类别 Class	级差 Grade change	1992—2008			2008—2017		
		级面积 Grade area (km ²)	类面积 Class area (km ²)	%	级面积 Grade area (km ²)	类面积 Class area (km ²)	%
变差 Worse	-3	1.14	1109.78	6.0	1.45	6340.91	34.4
	-2	46.00			225.12		
	-1	1062.64			6114.35		
不变 Unchanged	0	10796.69	10796.69	58.6	11006.67	11006.67	59.6
变好 Better	1	6175.42	6531.13	35.4	985.97	1104.28	6.0
	2	354.21			106.10		
	3	1.48			12.05		
	4	0.02			0.16		

* 不包括水域变化面积 Excluding the change area of water.

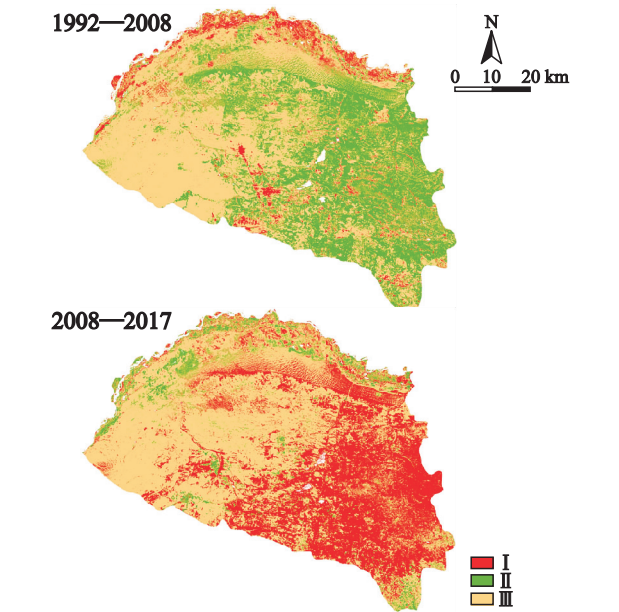


图 3 1992—2008 和 2008—2017 年杭锦旗 RSEI 变化检测
Fig.3 Detection of changes in RSEI in Hangjin Banner from 1992 to 2008 and 2008 to 2017.
I：变差 Worse；II：变好 Better；III：不变 Unchanged. 下同 The same below.

由图 3 和图 4 可以看出,1992—2008 年,杭锦旗东部、南部以及中部沙漠边缘处的生态环境得到了很大改善。根据杭锦旗的生态建设历程可知,在这段时间内杭锦旗实施了植树造林、退耕还林、还草、禁(休)牧、生态移民和日元贷款风沙治理等一系列生态建设^[26],由此可见,生态建设对生态环境的改善有一定促进作用。生态环境质量下降的区域主要分布在西部和北部的沿河地带以及南部的部分区域。这部分区域为人类活动聚集区,大多分布着农村居民点和农田耕地。有研究表明,20 世纪 80 年代到 21 世纪初,杭锦旗的居民地和耕地面积增加,导致水域面积减少,沙化和盐碱化面积增加^[27],说明人类活动范围的扩大对生态环境会造成一定

破坏。
2008—2017 年的生态环境变化与 1992—2008 年相反,1992—2008 年生态环境好转的区域在 2008—2017 年反而退化了,而 1992—2008 年生态环境变差的区域在 2008—2017 年得到了部分改善。生态退化的区域主要集中在东部和南部。其中,东部为丘陵地带,地表侵蚀、切割强烈,水土流失现象严重^[28];南部为荒漠草原,地表沙化侵蚀严重。此外,《杭锦旗土地利用总体规划(2009—2020)》^[29]中指出,杭锦旗经济社会进入快速发展时期,建设用地需求不断增大,将加大对城镇化建设的投入,而新增建设用地主要分布在生态退化的这些区域内。由此可见,城镇化建设对生态环境有一定的负面影响。

2.3 不同等级 RSEI 重心转移

为了分析 1992—2017 年不同等级的 RSEI 重心转移情况,先运用 ArcGIS 10.2 中的要素转点工具将 5 个等级的面要素转换成点要素,再分别计算 4 期的 5 个等级的重心,最后绘制重心移动路径图(图 5)。

由图 5 可以看出,1992—2000 年和 2000—2008 年生态等级中,差等级和中等等级重心转移方向大致相同,均是向西北方向转移;而良、优等级重心则是先向西北方向转移,再转向东南方向。其中,2000—2008 年的差和较差等级重心转移距离相对于其他时间段要小得多。从中可知,在 1992—2000 和 2000—2008 年间,较低等级的生态指数变化趋势大致相同,且在 2000—2008 年间的变化幅度较小。从 5 个等级的重心移动路径可以看出,除较差等级的重心移动幅度较小外,其他等级的重心移动幅度均较大。其中,优等级重心在 1992—2000 年向西北方向转移了 26.63 km,良等级重心在 2008—2017 年向西北方向的转移距离达到 37.27 km,说明 1992—2017 年,杭锦旗不同生态等级的区域变化明显,波

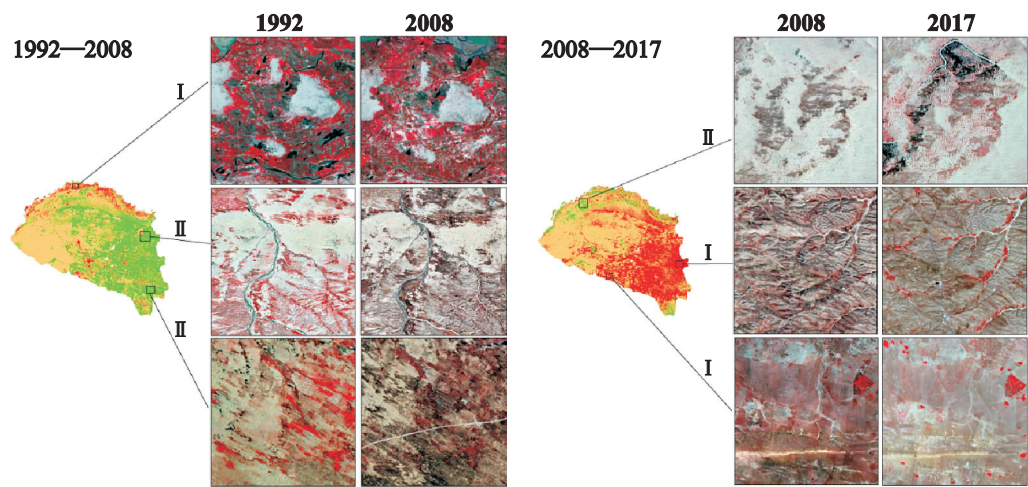


图 4 RSEI 变化区域的标准假彩色影像对比
Fig.4 Comparison of standard false color images in the change area of RSEI.

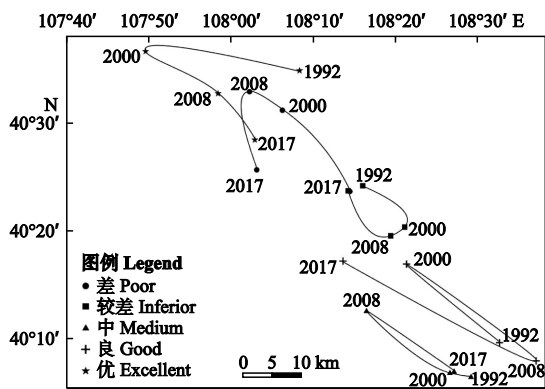


图 5 1992—2017 年杭锦旗各生态等级的重心转移
Fig.5 Shift center of gravity of various ecological grades in Hangjinqi Banner from 1992 to 2017.

动范围较大。除良等级外,其他等级的重心移动路径相似,2000 和 2008 年各等级的重心均在偏离 1992 年的重心方向上,而 2017 年各等级的重心却在向 1992 年的重心方向靠近。从中可以推断,在 1992—2008 年间,生态等级变化趋势一致,而在 2008—2017 年间,生态等级变化趋势与 1992—2008 年间相反。这与前面的生态环境质量时空变化分析结果相符。

3 结 论

本研究基于 1992、2000、2008 和 2017 年的 Landsat 遥感影像数据构建遥感生态指数,对内蒙古杭锦旗 25 年间的生态环境质量进行监测和评价。结果表明: 1) 1992—2017 年,杭锦旗的生态环境质量总体较差, RSEI 等级以差和较差为主,其面积超过了研究区总面积的 60%; 2) 1992—2008 年,杭锦旗生态环境质量呈现好转趋势,但在 2008—2017 年

间,曾经生态环境质量好转的区域出现生态退化现象,期间生态等级变化均以变化 1 个等级为主; 3) 杭锦旗生态环境质量等级较高的区域主要分布在西部和北部的沿河地带,以及东南部的丘陵区,等级较低的区域主要分布在库布齐沙漠和中西部的荒漠平原区,生态质量等级变化波动较大的区域主要分布在沙漠边缘、黄河沿岸和东部的丘陵沟壑区; 4) 1992—2017 年,杭锦旗各生态等级的重心转移幅度较大,时空波动较明显。这在一定程度上反映出该区域生态系统不稳定。

随着社会经济的快速发展,城镇化扩张的需求不断增大,杭锦旗面临着经济增长和生态修复的双重压力^[28]。作为典型的生态脆弱区,杭锦旗生态基底较差,生态环境易受人为活动的影响,生态保护政策和项目的实施对生态环境的改善会起到很大的促进作用。然而,城镇化建设对生态环境会造成一定的负面影响。因此,杭锦旗应协调好土地资源开发利用与生态环境建设,在坚持生态环境保护优先的前提下,进行合理的城镇化基础设施建设。此外,从 1992—2008 年间生态环境状况好转的区域在 2017 年出现退化现象,以及生态改善与退化现象并存中可以看出,生态保护和治理的力度还有待进一步加强,生态政策需要进一步完善,同时,应加大对生态环境改善地区的监管力度,特别是生态质量等级波动较大的区域,提高造林存活率,以巩固生态建设的成果。

本研究运用遥感生态指数评价分析杭锦旗的生态环境质量,仅依靠数据本身的性质来决定生态质量的好坏,在一定程度上避免了人为因素的影响,可

快速、客观、定量地反映出杭锦旗近 25 年来生态环境质量的变化,为杭锦旗的生态环境保护和治理提供科学依据。本研究存在的不足之处:遥感影像数据的质量与时相在一定程度上会影响评价结果。虽然本研究所选的影像数据在研究区的云量极低,但存在时相的差异,不可避免地会影响评价精度,且区域生态系统的形成和发展受人为主观因素和气候变化等多种因素的影响,导致遥感生态指数难以全面反映区域复杂的生态环境。在今后的研究中,应根据研究区的具体情况,综合考虑多方面的生态影响因素进行分析。

参考文献

- [1] 崔桂凤. 基于 GIS 的鄂尔多斯市生态环境监测与评价. 硕士论文. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2010 [Cui G-F. The Monitoring and Evaluation of Ecological Environment Quality of Ordos Based on GIS. Master Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2010]
- [2] 赵少华, 刘思含, 刘芹芹, 等. 中国城镇生态环境遥感监测现状及发展趋势. 生态环境学报, 2019, **28**(6): 1261–1271 [Zhao S-H, Liu S-H, Liu Q-Q, *et al.* Progress of urban ecological environment monitoring by remote sensing in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(6): 1261–1271]
- [3] Franke J, Keuck V, Siegert F. Assessment of grassland use intensity by remote sensing to support conservation schemes. *Journal for Nature Conservation*, 2012, **20**: 125–134
- [4] 何炳伟, 赵伟, 李爱农, 等. 基于 Landsat 8 遥感影像的新旧城区热环境特征对比研究——以成都市为例. 遥感技术与应用, 2017, **32**(6): 1141–1150 [He B-W, Zhao W, Li A-N, *et al.* Comparative study on thermal environment between old urban areas and new urban areas based on Landsat 8 remote sensing image: A case study of Chengdu City. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, **32**(6): 1141–1150]
- [5] 黄静, 张运, 汪明秀, 等. 近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素. 生态学报, 2020, **40**(3): 1077–1088 [Huang J, Zhang Y, Wang M-X, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(3): 1077–1088]
- [6] 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 [Xu H-Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 889–897]
- [7] 张添佑, 王玲, 王辉, 等. 玛纳斯河流域盐渍化灌区生态环境遥感监测研究. 生态学报, 2017, **37**(9): 3009–3018 [Zhang T-Y, Wang L, Wang H, *et al.* Assessment of soil salinization ecological environment change in the Manas river basin using remote sensing technology. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(9): 3009–3018]
- [8] 李嘉力, 姜代伟, 黎宁, 等. 多源专题数据在国家重点生态功能区生态环境状况评价中的应用. 中国环境监测, 2018, **34**(5): 75–80 [Li J-L, Jiang D-W, Li N, *et al.* Application of multi-source thematic data on eco-environment status evaluation in national key counties with ecological functions. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(5): 75–80]
- [9] 王思梦, 黄昌. 基于遥感和 GIS 的流域自然生态环境质量监测与评价——以无定河流域为例. 干旱区地理, 2018, **41**(1): 134–141 [Wang S-M, Huang C. Ecological environment quality monitoring and evaluation based on remote sensing and GIS techniques: A case of Wuding River Basin. *Arid Land Geography*, 2018, **41**(1): 134–141]
- [10] 张乃明, 陈冬花, 邢菲, 等. 基于遥感生态指数的新疆干旱区博乐市生态变化分析. 水土保持通报, 2019, **39**(1): 154–159 [Zhang N-M, Chen D-H, Xing F, *et al.* Ecological change analysis of Bole City in arid regions of Xinjiang Wei Autonomous Region based on remote sensing ecological index. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(1): 154–159]
- [11] 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. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(3): 877–883]
- [12] 张洪敏, 张艳芳, 田茂, 等. 基于主成分分析的生态变化遥感监测——以宝鸡市城区为例. 国土资源遥感, 2018, **30**(1): 203–209 [Zhang H-M, Zhang Y-F, Tian M, *et al.* Dynamic monitoring of eco-environment quality changes based on PCA: A case study of urban area of Baoji City. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, **30**(1): 203–209]
- [13] 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. 国土资源遥感, 2014, **26**(4): 145–150 [Luo C, Liu H, Qi L-Y. Ecological changes assessment based on remote sensing indices: A case study of Changning City. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, **26**(4): 145–150]
- [14] 李粉玲, 常庆瑞, 申健, 等. 黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测——以陕西省富县为例. 应用生态学报, 2015, **26**(12): 3811–3817 [Li F-L, Chang Q-R, Shen J, *et al.* Dynamic monitoring of ecological environment in Loess hilly and gully region of Loess Plateau based on remote sensing: A case study on Fuxian County in Shaanxi Province, Northwest China.

- Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(12): 3811–3817]
- [15] 孙从建, 张文强, 李新功, 等. 基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价. 农业工程学报, 2019, **35**(12): 165–172 [Sun C-J, Zhang W-Q, Li X-G, *et al.* Evaluation of ecological effect of gully region of loess plateau based on remote sensing image. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(12): 165–172]
- [16] 周玄德, 郭华东, 孜比布拉·司马义, 等. 干旱区绿洲城市遥感生态指数变化监测. 资源科学, 2019, **41**(5): 1002–1012 [Zhou X-D, Guo H-D, Zibibula·Simayi, *et al.* Change of remote sensing ecological index of an oasis city in the arid area. *Resources Science*, 2019, **41**(5): 1002–1012]
- [17] 岳辉, 刘英, 朱蓉. 基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测. 水土保持通报, 2019, **39**(2): 101–107 [Yue H, Liu Y, Zhu R. Monitoring ecological environment change based on remote sensing ecological index in Shendong mining area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(2): 101–107]
- [18] Crist EP. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **17**: 301–306
- [19] Baig MHA, Zhang L, Shuai T, *et al.* Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 2014, **5**: 423–431
- [20] Chander G, Markham BL, Helder DL. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 Ali sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 893–903
- [21] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估. 应用生态学报, 2019, **30**(1): 277–284 [Yang J-Y, Wu T, Pan X-Y, *et al.* Ecological quality assessment of Xiongan New Area based on remote sensing ecological index. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(1): 277–284]
- [22] Rikimaru A, Roy PS, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, 2002, **43**: 39–47
- [23] Xu HQ. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**: 4269–4276
- [24] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, **9**(5): 589–595 [Xu H-Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(5): 589–595]
- [25] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析. 应用生态学报, 2016, **27**(12): 3913–3919 [Song H-M, Xue L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, Northwest China based on RSEI model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(12): 3913–3919]
- [26] 丁崇明, 贾继良, 吴云峰. 鄂尔多斯林业志. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2011: 108–153 [Ding C-M, Jia J-L, Wu Y-F. *Ordos Forestry Annals*. Huhhot: Inner Mongolia People's Press, 2011: 108–153]
- [27] 李洁, 刘桂香, 李景平, 等. 内蒙古杭锦旗荒漠草原近 20 年景观动态的研究. 中国草地学报, 2007, **29**(5): 73–78 [Li J, Liu G-X, Li J-P, *et al.* Research on landscape dynamic change of desert steppe in Hangjin District Inner Mongolia during last 20 years. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, **29**(5): 73–78]
- [28] 彭建, 贾靖雷, 胡熠娜, 等. 基于地表湿润指数的农牧交错带地区生态安全格局构建——以内蒙古自治区杭锦旗为例. 应用生态学报, 2018, **29**(6): 1990–1998 [Peng J, Jia J-L, Hu Y-N, *et al.* Construction of ecological security pattern in the agro-pastoral ecotone based on surface humid index: A case study of Hangjin Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(6): 1990–1998]
- [29] 杭锦旗人民政府. 杭锦旗土地利用总体规划(2009—2020). 锡尼: 杭锦旗人民政府, 2017 [People's Government of Hangjin Banner. Overall Land Use Planning of Hangjin Banner (2009–2020). Xini: People's Government of Hangjin Banner, 2017]

作者简介 周玲美, 女, 1997 年生, 硕士研究生。主要从事资源与环境遥感方面研究。E-mail: 2459183591@qq.com

责任编辑 杨 弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

