

基于遥感黄河流域内蒙古段十大孔兑 生态环境质量监测评价

滑永春¹, 孙小添², 白 澳¹, 裴志永²

(1.内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010019; 2.内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 呼和浩特 00018)

摘 要:黄河流域生态环境质量的及时、准确监测评价,是对其生态环境保护和建设的重要基础。因此以黄河流域内蒙古段十大孔兑为研究对象,利用 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 数据,基于生态遥感指数对研究区 2000—2020 年生态环境健康度的分布格局及变化趋势进行了分析。结果表明:(1) 2000 年、2010 年和 2020 年,十大孔兑的遥感生态指数均值分别为 0.31、0.33、0.57,生态环境质量正在不断改善。(2) 研究期间,十大孔兑的生态环境质量等级以差到一般为主,差、较差及一般的面积之和占区域总面积的比例依次为 79.45%、76.54%、70.16%,面积在不断减少,向良好和优秀等级转移的面积达 1 004 km²。(3) 在空间分布上,下游平原区的生态环境质量最优,上游丘陵区与中游风沙区相对较差。整体来看,研究区的生态环境治理虽取得了一定的成效,但仍有很大的改善空间。

关键词:十大孔兑; 遥感生态指数; 生态环境; 监测评价

中图分类号:S157; X835

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0199-07

Monitoring and Evaluation of Ten Kongdui Eco-environmental Quality Changes in Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin Based on Remote Sensing

HUA Yongchun¹, SUN Xiaotian², BAI Ao¹, PEI Zhiyong²

(1.College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2.College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The timely and accurate monitoring and evaluation of eco-environmental quality in the Yellow River Basin is the basis of its eco-environmental protection and construction. We took the ten sections of the Yellow River in Inner Mongolia as the research objects, taking the top Ten Kongdi in Inner Mongolia of the Yellow River Basin as the research objects, we used Landsat5 TM and Landsat8 OLI data, to analyze the distribution pattern and change trend of eco-environmental health in the study area from 2000 to 2020 based on ecological remote sensing index. The results showed that: (1) in 2000, 2010 and 2020, the average values of remote sensing ecological index of the Ten Kongdui were 0.31, 0.33 and 0.57, respectively, and the ecological environment quality improved continuously; (2) during the study period, the eco-environmental quality grades of the ten kongdui were mainly from poor to general, and the sum of poor, relatively poor and general areas accounted for 79.45%, 76.54% and 70.16% of the whole study area; the area was constantly decreasing, and the area transferred to good and excellent grade reached to 1 004 km²; (3) in terms of spatial distribution, the eco-environmental quality of lower plain was the best, followed by the upstream hilly area and sandy area of middle reaches. On the whole, although the ecological environment governance in the study area has achieved some results, there is still much room for improvement.

收稿日期:2021-08-02

修回日期:2021-08-25

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0009);国家自然科学基金地区科学基金(52069018);内蒙古农业大学高层次人才引进项目(170014);“双一流”建设项目(206045)

第一作者:滑永春(1981—),男,山西大同人,讲师,主要从事荒漠化植被遥感研究。E-mail:398721962@qq.com。

通信作者:裴志永(1979—),男,内蒙赤峰人,教授,主要从事灌木林资源开发与环境。E-mail:peizhiyong@imau.edu.cn

Keywords:ten kongdui; ecological index of remote sensing; ecological environment; monitoring and evaluation

流域是一种结构复杂的地理区域,隶属于生态、经济及社会多个系统,具有生产、生活、生态及文化等多种功能。流域的生态环境是流域经济可持续发展的必要条件,对流域进行环境质量评估,对流域经济的可持续发展及生态文明建设具有非常重要的意义和参考价值^[1]。

国内外的学者从不同的角度对区域的环境质量评估展开了大量研究,提出了很多的评价方法。Sfriso 等学者利用水生植被质量指数 MaQI (the Macrophyte Quality Index),从生态安全的角度对意大利海洋过度的生态环境进行了评价^[2]。Kim 等学者利用生理水平生物标志物和生物指示剂建立了城市溪流的生态健康评估方法^[3]。Hu 等基于压力—状态—响应模型 PSR (Pressure-State-Response model) 框架的遥感生态指数对中国东南部福建省福州市的区域生态变化进行了评估^[4]。宋善海等同时从生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地胁迫、污染负荷 5 个方面通过生态环境指数 EI (Ecological environment index) 对贵州省生态环境状况进行综合评价^[5]。郭鹏程等依据生态环境状况评价指标体系,选取了生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地胁迫指数、污染负荷指数 5 个分指数和一个环境限制指数,对庆阳市蒲河流域生态系统的质量进行评价和分析^[6]。

遥感生态指数 RESI (Remote sensing ecological index) 耦合了湿度指数 (WET)、归一化植被指数 NDVI (Normalized vegetation index)、干度指数 NDBSI (Normalized Difference Built-up and Bareness Index) 和地表温度 LST (Land surface temperature), 可实现大区域生态环境质量的监测和评价。该指数既避免了人为的因素造成权重不均,同时又避免了传统的 EI 指数的缺点,能快速、客观、定量的对区域的生态环境进行评价^[7-8]。RESI 已经在武汉^[1]、渭南市^[9]、郑州市^[10]、福州市^[11]、长沙市等^[12]城市以及漓江流域^[13]、疏勒河流域^[14]、滇中湖泊流域^[15]、丹江流域^[16]、石羊河流域^[17]、甬江流域^[18]、艾比湖^[19]和玛纳斯湖等^[20]流域的生态质量监测中广泛应用。目前关于十大孔兑生态环境评价的研究较少,因此,本文利用遥感生态指数对黄河流域十大孔兑多年的生态环境质量进行评估,研究期间黄河流域十大孔兑生态质量状况及其时空变化,为黄河流域十大孔兑区域的生态建设和环境保护提供参考。

1 研究区概况

十大孔兑(孔兑为蒙古语,意为河流)坐标为 39°50′—40°30′N,108°06′—111°E(图 1),境内有十个一级支流,是黄河内蒙古段主要支流^[21]。十大孔兑所在行政区包括鄂尔多斯市达拉特旗全部,东胜区、杭锦旗和准格尔旗的小部分地区,面积共 1.08 万 km²。研究区域属于典型大陆性气候,平均气温 7℃ 左右;年平均降雨在 200~400 mm,蒸发量在 2 200 mm 左右。研究区根据地貌特点可划分为 3 个区,分别为南部上游丘陵区、中部中游风沙区、北部下游平原区^[22]。

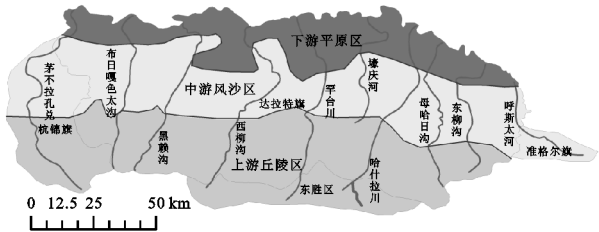


图 1 黄河流域十大孔兑位置

2 数据与研究方法

2.1 数据获取及预处理

(1) 遥感数据。本文研究选用的遥感影像来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。获取了 2000 年、2010 年、2020 年共 12 景覆盖十大孔兑的 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 无云遥感数据。影像的预处理包括大气辐射校正、几何校正、图像的拼接和剪切等。

(2) ERA5 气象数据。本文选用的气象再分析资料为 ECMWF 公开的 ERA5 数据 (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>), ERA5 是迄今最强大的全球气候监测数据集,与之前的 ERA-Interim 产品相比,ERA5 具有更高的时空分辨率,时间分辨率为逐小时,空间分辨率高达 0.125°。本文选用覆盖内蒙古黄河流域 1982—2020 年 1—12 月 0.125°的 ECMWF-ERA5 气象模式 2 m 温度、降水数据。使用 Matlab 对数据进行格式转换、年度合成、图像裁剪、Albers 等面积投影转换等处理。

2.2 研究方法

遥感生态指数 (RSEI) 是基于遥感技术、耦合了与生态环境质量优劣有直接关系的湿度、绿度、干度和热度 4 大生态要素^[23-24]。对各个分量指标进行标准化处理,以此来消除各个指标量纲上的差异,再用主成分分析法来确定各指标的权重,从而建 RSEI 评价模型,公式如下:

$$RSEI=f(WET,NDVI,LST,NBDSI) \quad (1)$$

式中:WET 代表湿度指数;NDVI 代表植被指数;LST 代表地表温度;NBDSI 代表建筑物—裸土指数。

(1) 湿度指标(WET)。缨帽变换的湿度分量指标可以反映土壤和植被的湿度,已经广泛运用在生态环境监测中^[25]。本文湿度指标以 WET 分量表示,由于 landsat5 TM 影像和 Landsat8 OLI 影像的传感器不同,其湿度指标的提取公式各不相同,分别如下:

TM 数据:

$$WET=0.0315 \rho_{blue}+0.2021 \rho_{green}+0.3102 \rho_{red}+0.1594 \rho_{nir}-0.6806 \rho_{swir1}-0.6109 \rho_{swir2} \quad (2)$$

OLI 数据:

$$WET=0.1511 \rho_{blue}+0.1973 \rho_{green}+0.3283 \rho_{red}+0.3407 \rho_{nir}-0.7171 \rho_{swir1}-0.4559 \rho_{swir2} \quad (3)$$

式中: ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{red} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{swir1} 和 ρ_{swir2} 分别代表着 TM 和 OLI 影像蓝色、绿色、红色、近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段的反射率。

(2) 绿度指标(NDVI)。归一化植被指数(NDVI)是反应植物生长变化状态以及植被分布密度最明显、有效的度量^[26],因此本文选用 NDVI 来代表绿度指标,其公式如下:

$$NDVI=\frac{\rho_{nir}-\rho_{red}}{\rho_{nir}+\rho_{red}} \quad (4)$$

式中: ρ_{nir} 代表 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 影像数据中的近红外波段的反射率; ρ_{red} 代表 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 影像数据中的红色波段反射率。

(3) 热度指标(LST)。地表温度(LST)可作为热度指标反应地表的生态环境状况。本文采用大气校正法对研究区域的地表温度进行反演,提取公式如下:

$$L_{\lambda}=Gain \times DN+Bias \quad (5)$$

$$B(T_s)=\frac{[L_{\lambda}-L_{\downarrow}-\tau(1-\epsilon)L_{\uparrow}]}{\tau\epsilon} \quad (6)$$

式中:Gain, Bias 分别代表遥感影像的增益和偏置; L_{λ} 为传感器辐射亮度; $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度; τ 为大气热红外波段透射率; L_{\uparrow} 为大气向上辐射量度、 L_{\downarrow} 为大气向下辐射量度,通过美国国家航空航天局(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)查询获取。再利用普朗克公式对地表温度 T_s 进行求解:

$$T_s=\frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_s)}+1\right)} \quad (7)$$

式中: T_s 表示地表真实温度(K); K_1 、 K_2 为定标参数; ϵ 为地表比辐射率,利用 NDVI 进行估算,将地表

分为水体、自然表面和城镇区域。本文设水体像元的地表比辐射率为 0.995,自然表面和城镇区域像元的地表比辐射率计算公式如下所示:

$$\epsilon=0.9625+0.614 F_v-0.0461 F_v^2 \quad (8)$$

式中: F_v 为植被覆盖度,采用混合像元分解法由 NDVI 值计算得到。

(4) 干度指标(NBDSI)。干度指标可以由裸土指数(SI)和建筑物指数(IBI)组合成归一化建筑物—裸土指数表示,在组合的过程中通常是直接对 SI 和 IBI 进行算术平均,取二者的平均值,最后得到 NDBSI 指数。

裸土指数:

$$SI=\frac{[(\rho_{swir1}+\rho_{red})-(\rho_{blue}+\rho_{nir})]}{[(\rho_{swir1}+\rho_{red})+(\rho_{blue}+\rho_{nir})]} \quad (9)$$

建筑物指数:

$$IBI=\frac{\frac{2 \rho_{swir2}}{(\rho_{swir1}+\rho_{nir})}-\left[\frac{\rho_{nir}}{(\rho_{red}+\rho_{nir})}+\frac{\rho_{green}}{(\rho_{swir1}+\rho_{green})}\right]}{\frac{2 \rho_{swir2}}{(\rho_{swir1}+\rho_{nir})}+\left[\frac{\rho_{nir}}{(\rho_{red}+\rho_{nir})}+\frac{\rho_{green}}{(\rho_{swir1}+\rho_{green})}\right]} \quad (10)$$

干度指标(NBDSI):

$$NBDSI=\frac{SI+IBI}{2} \quad (11)$$

式中: ρ_{green} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{red} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{swir1} 及 ρ_{swir2} 分别代表 TM 和 OLI 影像绿色、蓝色、红色、近红外、中红外 1、中红外 2 波段的反射率。

2.3 遥感生态指数评价模型的构建

遥感生态指数(RSEI)是基于湿度、绿度、热度和干度 4 个分量指标的综合性生态环境评价指标,由于各分量指标在数值单位和大小上的差异,在综合之前需要进行标准化处理,消除量纲上的差异,公式为:

$$N=\frac{(I-I_{\min})}{(I_{\max}-I_{\min})} \quad (12)$$

式中: N 是标准化后的指标值; I 代表这个指标数值的大小; I_{\min} 代表这个分量指标的最小值; I_{\max} 代表这个分量指标的最大值。对各个分量指标进行标准化处理后,将 4 个分量指标转换为遥感生态指数,公式为:

$$RSEI=\sum_{i=1}^m a_i PC_i=\sum_{j=1}^n w_j I_j \quad (13)$$

式中: m 代表主成分的个数; n 代表分量指标的个数; a_i 代表主成分的方法贡献度; PC_i 代表各个分量指标的主成分; w_j 代表分量指标的权重,通过主成分分析法得到各个主成分的方差贡献率,作为各分量指标的权重; I_j 代表分量指标标准化处理后的值。将原始的遥感生态指数进行标准归一化处理,取值区间

0~1,RSEI 值越接近于 1,则代表着研究区域的环境质量越好。本文结合十大孔兑的生态环境实际情况并参考了一些文献^[24-27],将研究区遥感生态指数划分为 5 个等级,见表 1。

表 1 遥感生态指数等级划分

等级划分	特征描述
差(0 < RSEI≤0.2)	植被覆盖率低,所在区域干旱少雨,地表有裸土,土壤干化,不适合人类居住
较差(0.2 < RSEI≤0.4)	植被覆盖率较低,所在区域旱少雨,生物多样性较低,不太适合人类居住
一般(0.4 < RSEI≤0.6)	植被覆盖率适中,降雨量适中,土壤较肥沃,比较适宜人类居住
良好(0.6 < RSEI≤0.8)	植被覆盖率较高,生物多样性比较丰富,土壤比较肥沃,适合人类居住
优秀(0.8 < RSEI≤1.0)	植被覆盖率高,生物多样性丰富,土壤肥沃,气候湿润,生态环境稳定,非常适合人类居住

3 结果与分析

3.1 分量指标主成分分析

通过十大孔兑 2000 年、2010 年和 2020 年 4 个分量指标的主成分分析结果可以看出(表 2),第 1 主成分特征值贡献度分别为 68%,72.83%,74.58%,代表各指标的大部分信息。利用合成的第 1 主成分即 PC1 来代替绿度、湿度、干度和热度 4 个分量指标。然后建立遥感生态指数(RSEI)综合评价模型,对黄河流域十大孔兑的环境质量进行评价。

由表 2 可见,PC1 对应的 4 个变量主成分载荷系数,绿度和湿度指标各年均为正值,说明绿度和湿度指标对区域的环境质量有着积极的正向作用。区域的绿度指标和湿度指标越大,则代表该区域的植被覆盖率^[28]高,土壤具有充足的水分,环境质量越高^[28]。湿度指标主成分载荷系数 2000 年、2010 年大于绿度指标,而在 2020 年绿度指标载荷系数超过了湿度指标。导致这个现象的原因是归一化绿度(NDVI)数值 2000 年、2010 年、2020 年大小分别是 0.25,0.28,0.43,植被覆盖度在 2000—2010 年呈现缓慢的上升,2010—2020 年植被覆盖度快速升高;而归一化湿度(WET)数值 2000 年、2010 年、2020 年大小分别是 0.33,0.37,0.35,湿度指标在 2010 年达到最大,但各年份湿度差别不大。结合表 2 绿度和湿度主成分载荷系数和归一化绿度、湿度指标可以看出,主成分载荷系数的变化和对应的归一化绿度、湿度指标数值变化有着密切的关系,2010 年前湿度数值相对绿度数值要大,对应的湿度主成分载荷系数也大,但 2010 年后随着研究区植被覆盖度的快速上升,绿度指标的载荷系数也相应变大,成为了主导绿度和湿度指标载荷系数相对变动的主要因素。干度指标和热度指标越高,则代表区域地表植被覆盖率低、地表出现裸土、土壤遭受沙化、风化等问题,地表硬化问题严重,环境质量越差^[28]。热度指标和干度指标各年均有负值,说明它对区域的环境质量有负面影响。由表 2 可知热度指标主成分载荷系数绝对值在各年份都大于干度

指标系数。归一化热度(LST)2000 年、2010 年、2020 年大小分别是 0.34,0.36,0.29,意味着研究区的地表温度也是先升高后下降。归一化干度(NDBSI)2000 年、2010 年、2020 年大小分别是 0.31,0.27,0.21,呈现一直下降的趋势。由此可见各年度归一化干度数值低于热度数值,导致热度指标系数绝对值大于干度指标系数。总体上来看,绿度、湿度、干度和热度 4 个分量指标的 PC1 值是随着研究区的生态环境在不断地变化,2000—2010 年,起正向作用的湿度指数贡献率是大于绿度指数,但 2010 年后随着研究区植被覆盖度的快速提升,绿度指标贡献率在不断地变大;而起负向作用的热度指数贡献率高于干度指数。

表 2 各指标主成分分析结果

年份	参量	第一主成分(PC1)	第二主成分(PC2)	第三主成分(PC3)	第四主成分(PC4)
2000	绿度(NDVI)	0.34	0.56	0.51	0.56
	湿度(WET))	0.45	0.61	-0.53	-0.39
	干度(NDBSI)	-0.38	-0.18	-0.66	0.72
	热度(LST)	-0.40	-0.54	0.140	-0.09
	特征值	0.27	0.09	0.06	0.01
	贡献率/%	68.00	19.27	11.57	1.16
	绿度(NDVI)	0.23	0.61	-0.54	-0.52
2010	湿度(WET)	0.85	0.43	-0.10	0.27
	干度(NDBSI)	-0.40	-0.43	0.06	-0.76
	热度(LST)	-0.45	-0.49	-0.83	0.25
	特征值	0.38	0.12	0.01	0.01
	贡献率	72.83	22.71	2.28	2.18
	绿度(NDVI)	0.51	0.22	0.40	0.72
	湿度(WET)	0.45	-0.49	-0.70	0.22
2020	干度(NDBSI)	-0.30	-0.70	0.29	0.41
	热度(LST)	-0.38	0~0.46	0.50	-0.50
	特征值	0.25	0.09	0.02	0.01
	贡献率	74.58	18.88	3.65	2.89

3.2 十大孔兑生态环境质量时空变化

从图 2—3 可以看出,2000 年、2010 年、2020 年黄河流域十大孔兑遥感生态指数(RSEI)均值分别为 0.31,0.33,0.57,十大孔兑的环境正在缓慢改善。其中,2000—2010 年除库布齐沙漠区 RSEI 指数有明显上升,其他两个区的 RSEI 指数还略有下降。到 2020

年各区的 RSEI 指数值呈现大幅度上升,各区的生态环境得到了明显的改善。

由表 3 可知,研究期间,2000 年生态环境等级为差的占比最高,达到 32.08%;生态环境等级为优秀的占比最少,只占研究区的 5.45%;较差和一般等级的面积相差不大,比例分别占 21.99%和 25.38%。2010 年,生态环境等级面积占比最高的仍然是差,但是相比 2000 年占比下降 1.98%,面积为 3 247 km²;优秀等级的面积占比最少,占比 6.16%。2020 年,生态环境等级为差的区域占比最高,为 28.03%,面积达

3 027 km²;生态环境等级为优秀的区域占比最低,为 8.40%。从整体上来看,十大孔兑的生态环境质量等级以差到一般为主,差、较差及一般等级的面积之和占区域总面积的比例依次为 79.45%,76.54%,70.16%;良好和优秀等级的面积之和占区域总面积的比例依次为 20.55%,23.46%,29.84%。2000—2020 年生态等级为差的面积减少了 438 km²,较差的面积减少了 392 km²;一般的面积减少了 174 km²,良好的面积增加了 685 km²,优秀的面积增加了 319 km²。表明黄河流域十大孔兑的环境质量在逐步缓慢改善。

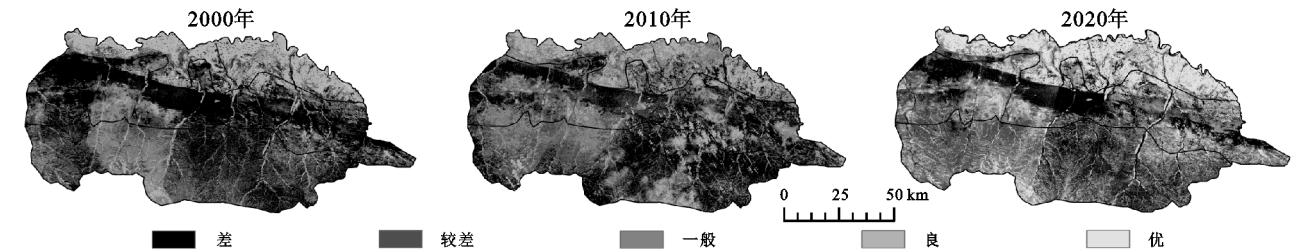


图 2 2000—2020 年研究区生态环境质量分级

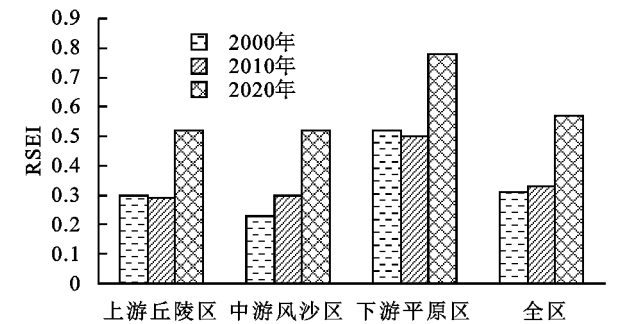


图 3 2000—2020 年各区 RSEI 指数均值

生态等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差	3465	32.08	3247	30.10	3027	28.03
较差	2375	21.99	2294	21.24	1983	18.36
一般	2741	25.38	2721	25.20	2567	23.77
良好	1630	15.10	1820	16.85	2315	21.44
优秀	589	5.45	718	6.61	908	8.40
总计	10800	100.00	10800	100.00	10800	100.00

4 讨论与结论

4.1 讨论

气候是生态环境形成与演变的重要推动力之一,研究气候变化对了解区域生态环境变化具有十分重要的意义^[29]。十大孔兑地区处于干旱半干旱地带,干旱少雨,年平均降水量不足 400 mm,生态环境较为脆弱。徐康等在 2020 年利用中国区域 7 个 IGS 站实测气象数据评估 ERA5 数据的精度,发现 ERA5 数据精度优于早先的 ERA-Interim 数据,ERA5 数

据能够更好地满足中国区域内气候建模的需求。因此,本文利用 ERA5 气象数据统计研究区年降水量和年均气温^[30]。由图 4 可知,近 21 a 来研究区年降水量有一定的波动增加趋势,但趋势不太明显(0.09 mm/10 a),远低于西北地区整体降水趋势(4.87 mm/10 a)^[31]。由此可知 2000—2020 年略微增加的降水促进了研究区生态环境质量的改善,但其不是诱导变化的主因。图 5 为可以看出近 21 a 来研究区的年均气温是呈显著上升趋势(0.37℃/10 a),高于西北干旱半干旱区增温速率(0.34℃/10 a)^[32]。气温的上升和本研究地表温度的上升有一定的关系,随着气温上升,土壤水分的蒸发和植被的蒸腾作用加强,给本就干旱的研究区植被生长带来不利的因素。综上可见,研究区气候的变化对生态环境质量的改善有有利的一面,也有不利的一面,气候的变化影响着区域生态环境的变化,但构不成区域环境不断改善的主因。

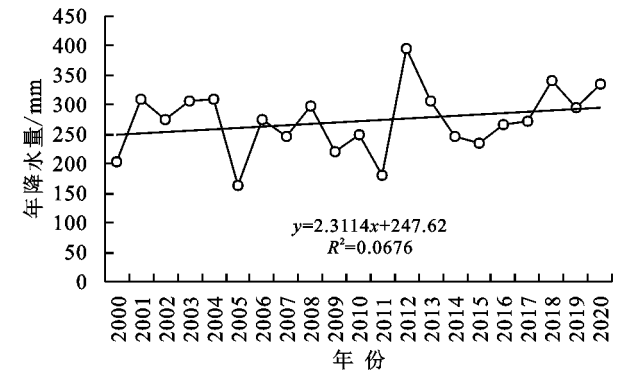


图 4 研究区 2000—2020 年降水量变化

土地利用/土地覆盖变化是陆地表层环境对人类活动和气候变化的具体反映,是气候变化和环境变化

研究关注的主要内容^[33]。本研究利用中科院资源环境科学数据云平台下载的空间分辨率为 1 km 的土地利用数据来分析十大孔兑 2000—2020 年土地利用变化情况。由表 4 可知研究期间,耕地、林地、草地面积分别增加了-84 km²,92 km²,128 km²,植被面积的变化主要得益于研究区 1999 年开始实施的退耕还林还草工程、天然林保护工程、水土保持综合治理工程、重点小流域以及沙棘造林等一系列工程^[34]。同时未利用地面积减少了 384 km²,建筑用地增加了 247 km²。越来越多的未利用地被开发利用为建设用地,地表裸土、土壤沙化、风化等问题得以控制,土地利用率在不断提高^[35]。综上,生态用地面积的增加,未利用裸土地得到有效的利用,促进了研究区生

态环境质量的改善。该结论与马海良等^[36]对该区域生态环境的研究结论基本一致,同时也说明了各种人类工程的实施是导致研究区生态环境改善的主因。

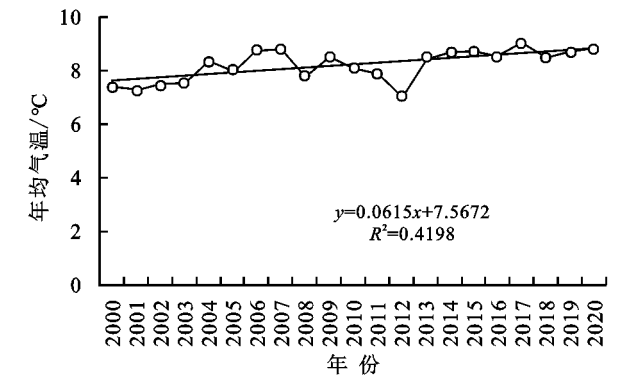


图 5 研究区 2000—2020 年气温变化

表 4 研究区 2000—2020 年土地利用面积 km²

年份	区域	耕地	林地	草地	水体	建筑用地	未利用地
2000	中游风沙区	334	263	1700	133	62	1712
	上游丘陵区	467	56	2960	214	62	454
	下游平原区	565	94	435	228	198	456
	全区	1366	413	5095	575	322	2622
2010	中游风沙区	363	264	1727	135	62	1653
	上游丘陵区	455	82	2955	204	69	448
	下游平原区	611	92	467	215	203	388
	全区	1429	438	5149	554	334	2489
2020	中游风沙区	357	281	1787	134	143	1502
	上游丘陵区	491	71	2971	213	169	348
	下游平原区	634	153	465	229	257	388
	全区	1282	505	5223	576	569	2238

本文采用绿度 NDVI、湿度 Wet、热度 LST 和干度 NDSI4 个指标构建的 RSEI 来评价研究区的生态环境质量,虽能较好地反映出研究区生态环境变化趋势。但很多学者将不同的指标引入遥感生态指数,如李洋等加入人类活动指数和坡度两个指标,第一主成分的贡献率达到 70% 以上^[37]。十大孔兑位于黄土高原和鄂尔多斯高原交错地带,境内地形地貌复杂多样,丘陵区、风沙区、平原区 3 种不同的地貌类型在此交汇,导致境内地形起伏度较大。同时人类活动对该区域的生态环境的影响比较大。未来研究中可以考虑增加海拔、坡度、土地利用、土壤等因子对生态环境质量变化的影响。

4.2 结论

(1) 研究期间,2000 年、2010 年和 2020 年,十大孔兑年遥感生态指数均值分别为 0.31,0.33,0.57,生态环境质量在不断改善。

(2) 2000—2020 年,十大孔兑的生态环境质量等级以差到一般为主,差、较差及一般等级的面积之和占区域总面积的比例依次为 79.45%,76.54%,70.16%。生态

等级差到一般的面积减少了 1 004 km²,转化为优良和良好等级。研究区的生态环境质量在逐步地改善。

(3) 在空间分布上,下游平原区的生态环境质量最优,上游丘陵区和中游风沙区较差。研究区域生态环境的治理取得了一定的成效。环境质量在研究期间有了较大程度的改善。

参考文献:

[1] 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.

[2] Sfriso A, Facca C, Ghetti P F. Validation of the Macrophyte Quality Index(MaQI)set up to assess the ecological status of Italian marine transitional environments[J]. Hydrobiologia, 2009,617(1):117-141.

[3] Kim J, Kang S, Seo B, et al. Estimating fractional green vegetation cover of mongolian grasslands using digital camera images and MODIS satellite vegetation indices [J]. Giscience & Remote Sensing, 2020,57(1):49-59.

[4] Hu X S, Xu, H Q. A new remote sensing index based on the pressure-state-response framework to assess

- regional ecological change [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5381-5393.
- [5] 宋善海,王堃,陈艳,等.县域夜光遥感指数与生态环境状况指数相关性研究:以贵州省为例[J]. *贵州科学*, 2019, 37(1): 38-45, 76.
- [6] 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.
- [7] Gao Y, Huang J, Li S, et al. Spatial pattern of non-stationarity and scale-dependent relationships between NDVI and climatic factors-A case study in Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 170-176.
- [8] 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.
- [9] Zhai H M, Xie W Q, Li S Q, et al. Evaluation of urban ecological environment based on remote sensing based ecological index model [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2021, 30(3): 2527-2535.
- [10] Zhu D Y, 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*, 2020, 37(13): 15716-15728.
- [11] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 11-21.
- [12] 茹克亚·萨吾提,阿不都艾尼·阿不里,李虎,等.基于遥感生态指数模型的阜康市生态环境动态变化监测与评价[J]. *水土保持研究*, 2020, 138(1): 283-289, 297.
- [13] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等.基于 RSEI 的漓江流域生态环境质量动态监测[J]. *中国水土保持科学*, 2021, 19(1): 122-131.
- [14] 陈丽红,刘普幸,花亚萍.基于 RSEI 的疏勒河流域生态环境质量综合评价及其成因分析[J]. *土壤通报*, 2021, 52(1): 25-33.
- [15] 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.
- [16] 王勇,王世东.基于 RSEI 的生态质量动态变化分析:以丹江流域(河南段)为例[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(3): 57-65.
- [17] 任媛.基于 RSEI 指数的石羊河流域生态环境质量评价研究[D].兰州:西北师范大学,2019.
- [18] 缪鑫辉,梁勤欧.基于遥感生态指数的甬江流域生态环境变化分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(2): 427-438.
- [19] Jing Y Q, Zhang F, He Y F, et al. Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105874.
- [20] Wang Y G. Evaluation of Lake Wetland ecotourism resources based on remote sensing ecological index [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(7): 1-8.
- [21] 王平,田勇,侯素珍,等.黄河内蒙古段孔兑水沙特点分析[J]. *人民黄河*, 2012, 34(11): 39-42.
- [22] 刘璐,郭月峰,姚云峰,等.十大孔兑上游土壤侵蚀空间分布及动态变化[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 34-41, 47.
- [23] 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.
- [24] 聂单南光,程朋根,熊秋林.基于 RSEI 指数的深圳市生态环境遥感评价[J]. *江西科学*, 2020, 38(5): 673-679, 715.
- [25] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. *Remote sensing of Environment*, 1985, 17(3): 301-306.
- [26] 王志超,何新华.基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(4): 492-500.
- [27] 李晓印.济南市南部山区生态环境遥感监测与分析评价[D].北京:中国矿业大学,2009.
- [28] 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[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3811-3817.
- [29] 李磊.达拉特旗土地利用动态变化及驱动机制研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- [30] Xu K, Deng X S, Xing C B. Accuracy assessment of zenith tropospheric delay calculated from ERA5 data over China[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2020, 9(6): 27-33.
- [31] 商沙沙,廉丽姝,马婷,等.近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 68-76.
- [32] 陈少勇,郭江勇,郭忠祥,等.中国西北干旱半干旱区年平均气温的时空变化规律分析[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(3): 364-372.
- [33] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.
- [34] 姚海芳,师长兴,顾珍遼.气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(3): 472-479.
- [35] 许炯心.黄河内蒙古段支流"十大孔兑"侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1641-1649.
- [36] 马海良,徐龙.黄河流域的研究现状与发展趋势:基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. *华北水利水电大学学报:社会科学版*, 2021, 37(3): 7-15.
- [37] 李洋.基于多要素的海岛型城市生态状况评价:以平潭综合试验区为例[D].福州:福州大学,2017.