

崔亚婷,李媛,郑龙啸,等.基于RSEI的黄河上游流域生态环境质量变化分析[J].中国沙漠,2023,43(3):107-118.

基于RSEI的黄河上游流域生态环境 质量变化分析

崔亚婷^a,李媛^{ab},郑龙啸^a,吴孟泉^a

(鲁东大学 a.资源与环境工程学院, b.商学院, 山东 烟台 264025)

摘要:黄河上游流域作为黄河的水源地是中国重要的生态功能区,分析黄河上游流域的生态环境质量变化对于黄河流域的生态保护和高质量发展具有重要意义。本文基于 Google Earth Engine 平台,通过遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)对2000—2021年黄河上游流域的生态环境质量进行动态分析。结果表明:(1)黄河上游流域RSEI呈提升态势,并且具有阶段性的特点,2000—2005年为生态环境质量恶化阶段,2006—2021年为生态环境质量改善阶段。生态环境质量总体处于较差和中等水平,占区域总面积的64.78%。(2)不同河段生态环境质量存在显著的空间异质性,其中河源段的生态环境质量最好,冲积平原段的生态环境质量最差。(3)黄河上游流域生态环境质量空间集聚特征显著,高-高集聚区稳定分布于河源段附近,低-低集聚区分布在人类活动强度较大的峡谷段和冲积平原段。(4)绿色、湿度、热度和干度均对黄河上游地区生态环境质量产生显著影响,其中绿色为主导驱动因子,干度为次要驱动因子。植被覆盖度的增加、气候调节和人类活动对黄河上游流域生态环境改善有明显的促进作用。

关键词:黄河上游流域; Google Earth Engine; 遥感生态指数; 地理探测器; Mann-Kendall 趋势分析

文章编号: 1000-694X(2023)03-107-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00148

中图分类号: X171

文献标志码: A

0 引言

黄河流域是中国重要的生态功能区,在中国经济社会发展和生态保护中占有重要地位^[1]。2021年中共中央、国务院印发了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,将黄河流域生态保护和高质量发展确定为重大国家战略^[2]。黄河上游流域面积占黄河集水面积的51.30%,输沙量占14.90%,是整个黄河主要的清水来源^[3]。长期以来黄河上游流域生态环境脆弱,再加之大规模开发、工业污染、资源浪费等情况的出现,造成了当地环境严重的破坏。从黄河流域生态环境保护角度出发,对黄河上游流域生态环境质量进行动态监测有利于加强流域防护与治理,为上游地区可持续发展提供理论支持,推动黄河流域生态环境保护与高质量协调发展。

遥感技术具有探测范围广、数据采集快的特点^[4],具有传统研究方法不具备的优势,已经在生态环境领域得到了广泛应用。目前利用遥感数据研究生态环境大多通过归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[5-6]、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)^[7]、土地利用类型^[8-9]、地表温度(Land Surface Temperature, LST)^[10]和标准降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)^[11]等单一指标来量化生态环境质量。然而,由于影响因素的复杂性和多样性,仅采用一个生态指标来评估生态环境质量是不够的。基于这一问题,徐涵秋^[12]基于遥感技术提出了一个完全依靠自然因子的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)。该方法通过主成分分析法将代表绿色的NDVI、代表干度的归一化建筑土壤指数(Normalized Differ-

收稿日期:2022-09-30; 改回日期:2022-11-20

资助项目:高分辨率对地观测系统国家科技重大专项(79-Y50-G18-9001-22/23); 国家自然科学基金项目(42071385); 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD089); 山东省海上航天装备技术创新中心基金项目(MAETIC2021-12); 烟台市科技创新发展计划重点研发类基金项目(2022MSGY062)

作者简介:崔亚婷(1997—),女,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为区域发展与产业规划。E-mail: cytld123@163.com

通信作者:李媛(E-mail: lihuan8008@126.com)

ence Build-up Soil Index, *NDBSI*)、代表湿度的湿润度(*Wetness*, *WET*)和代表温度的*LST*等4个指标形成一个综合指数来对区域的生态环境质量进行定量评估。因此,*RSEI*可以反映人类活动、环境变化和气候变化对环境造成的影响,有利于定量评价区域生态环境质量变化^[13-14],已经被广泛应用于城市^[15]、湿地^[16-17]、岛屿^[18]等生态系统的环境质量监测。

由于*RSEI*选择的指标范围广泛,涉及到不同的卫星产品和计算模型,对于长时间序列和大空间范围的生态环境质量评价可能会存在数据量大、数据处理流程复杂的问题。*Google Earth Engine*(*GEE*)平台的出现则很好地解决了这个问题。*GEE*是由*Google's Cloud Infrastructure*支持的一个多源遥感影像云计算平台^[19]。通过编写*JavaScript*代码,*GEE*平台可以自动对大量卫星影像进行在线可视化分析处理。*GEE*平台改变了传统的遥感影像处理方式,已在农作物研究^[20]、水体提取^[21]等方面得到广泛应用,但在黄河上游流域的生态环境质量评估方面*GEE*还未得到大范围应用。基于上述问题,本研究基于*GEE*平台利用*RSEI*对黄河上游流域2000—2021年的生态环境质量进行了长时间序列的动态分析,通过*Mann-Kendall*趋势分析、空间自相关分析和地理探测器对黄河上游流域生态环境质量的空间异质性和驱动因子进行了定量化分析,

以为黄河流域的生态环境保护 and 高质量发展提供理论依据和技术支撑。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

黄河源于青藏高原巴颜喀拉山北麓,自河源至内蒙古自治区托克托县河口镇为其上游区域。经纬度位于32.47°—41.84°N、95.98°—111.10°E,处于干旱半干旱区,地势总体上表现为西高东低,年降水量200~500 mm。上游流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古5个省区,河道长3 472 km,可分为河源段、峡谷段和冲积平原段;流域面积42.80万km²,约占黄河流域总面积的51.30%,是维护国家生态安全和能源资源的重要战略区域(图1)。

1.2 数据源和数据处理

本文使用的卫星数据是由*GEE*平台提供的2000—2012年*Landsat 7 ETM+*(*GEEID*:*LANDSAT/LE07/C01/T1_SR*)和2013—2021年*Landsat 8 OLI*(*GEEID*:*LANDSAT/LC08/C01/T1_SR*)影像数据。选取2000—2021年6—10月的无云或少云影像进行分析,通过均值合成获得每年6—10月的时相数据。对于数据条带缺失的*Landsat 7 ETM+*影像采用同时期的*Landsat 5 TM*和*USGS*提供的*Landsat*填补

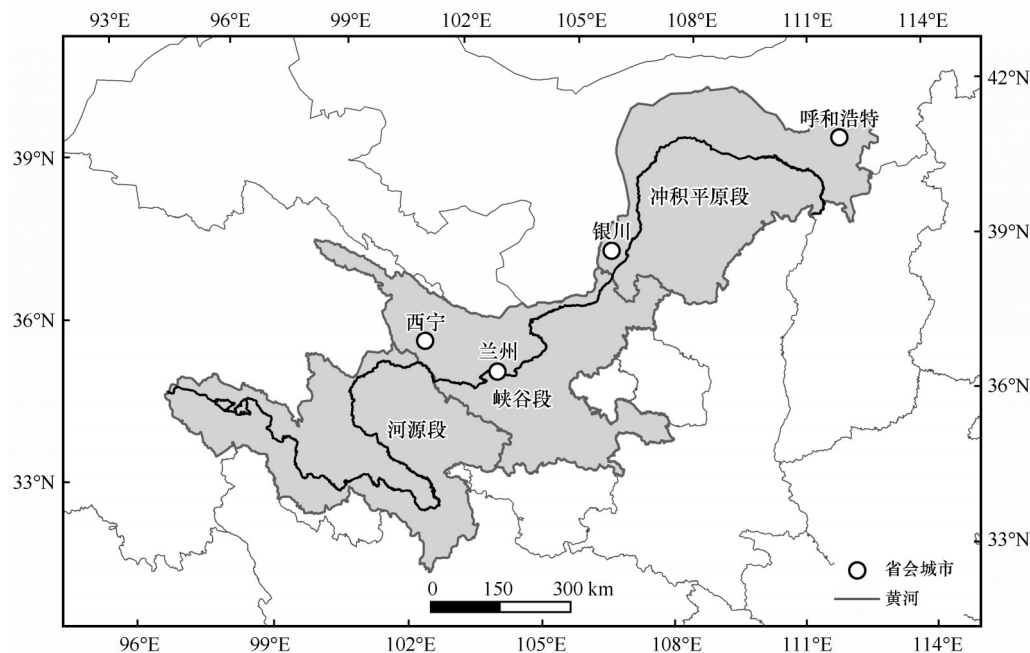


图1 黄河上游流域位置

Fig.1 Location of the upper Yellow River basin

方法进行填充^[22]。

GEE提供的SR数据集是经几何校正和大气校正后的地表反射率,没有进行云掩膜处理^[4]。由于云层具有较高的反射率,会严重影响指标的计算,因此需要我们对影像进行去云计算。对于Landsat影像我们采用GEE平台提供的Simple Cloud Score算法进行去云处理,通过亮度、温度和归一化雪被指数(Normalized Difference Snow Index, *NDSI*)来计算像元在 $[0, 100]$ 范围内存在云的可能性,最后通过动态阈值法选择合适的阈值来掩膜云层。

由于遥感生态指数主要应用在以陆地为主的地区,不适宜大面积的水域地区。因此我们在GEE平台中通过公式(1)计算了归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, *NDWI*)来对黄河上游流域的水体进行掩膜处理^[23]。

$$NDWI = (B_{\text{green}} - B_{\text{nir}}) / (B_{\text{green}} + B_{\text{nir}}) \quad (1)$$

式中: B_{green} 和 B_{nir} 分别代表Landsat 7 TM和Landsat 8 OLI在绿光和近红外波段的反射率。

树冠和非树冠植被覆盖度数据来自MOD44B.006 Terra Vegetation Continuous Fields Yearly Global 250 m数据集(GEEID:MODIS/006/MOD44B);城市和建筑用地、裸地数据来自MCD12Q1.006 MODIS Land Cover Type Yearly Global 500 m数据集(GEE-

ID:MODIS/006/MCD12Q1);地表温度数据来自Collection-6 (C6) MODIS Land Surface Temperature数据集(GEEID:MODIS/006/MOD11A1);年降水量数据来自CHIRPS Daily Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data (Version 2.0 Final)数据集(GEEID:UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY)。

1.3 遥感生态指数构建

*RSEI*是基于遥感技术,利用自然因子来评估区域生态状况的综合生态指数^[12]。该指数通过*NDVI*、*WET*、*NDBSI*和*LST*^[24]来反映区域生态环境质量,指标的计算方法如表1所示。在*RSEI*中,*NDVI*和指标可以反映人类活动对生态质量的影响,*LST*和*WET*反映了自然环境变化对生态环境的影响^[25]。由于*NDVI*、*NDBSI*和*WET*的值通常处于 $[-1, 1]$,而*LST*的值通常要大得多,指标之间的量纲并不统一。因此在计算*RSEI*之前需要根据公式(2)对指标进行归一化处理^[16]。

$$ND_i = (D_i - D_{\min}) / (D_{\max} - D_{\min}) \quad (2)$$

式中: ND_i 为归一化处理后的指标值; D_i 为指标值; D_{\max} 为指标的最大值; D_{\min} 为指标的最小值。

表1 指标计算方法

Table 1 Calculation methods of indicators

指标	计算方法
<i>NDVI</i>	$NDVI = (B_{\text{nir}} - B_{\text{red}}) / (B_{\text{nir}} + B_{\text{red}})$
<i>WET</i>	$WET_{\text{TM}} = 0.0315B_{\text{blue}} + 0.2021B_{\text{green}} + 0.3102B_{\text{red}} + 0.1594B_{\text{nir}} - 0.6806B_{\text{swir1}} - 0.6109B_{\text{swir2}}$ $WET_{\text{OLI}} = 0.1511B_{\text{blue}} + 0.1973B_{\text{green}} + 0.3283B_{\text{red}} + 0.3407B_{\text{nir}} - 0.7117B_{\text{swir1}} - 0.4559B_{\text{swir2}}$
<i>NDBSI</i>	$IBI = \frac{\frac{2B_{\text{swir1}}}{B_{\text{swir1}} + B_{\text{nir}}} - \left(\frac{B_{\text{nir}}}{B_{\text{nir}} + B_{\text{red}}} + \frac{B_{\text{green}}}{B_{\text{green}} + B_{\text{swir1}}} \right)}{\frac{2B_{\text{swir1}}}{B_{\text{swir1}} + B_{\text{nir}}} + \left(\frac{B_{\text{nir}}}{B_{\text{nir}} + B_{\text{red}}} + \frac{B_{\text{green}}}{B_{\text{green}} + B_{\text{swir1}}} \right)}$ $SI = \frac{(B_{\text{swir1}} + B_{\text{red}}) - (B_{\text{nir}} + B_{\text{blue}})}{(B_{\text{swir1}} + B_{\text{red}}) + (B_{\text{nir}} + B_{\text{blue}})}$ $NDBSI = (SI + IBI) / 2$
<i>LST</i>	$LST = \gamma \times \left[\frac{1}{\varepsilon} \times (\psi_1 \times L_{\text{sen}} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta$

B_{blue} 、 B_{green} 、 B_{red} 、 B_{nir} 、 B_{swir1} 和 B_{swir2} 分别代表Landsat 7 TM和Landsat 8 OLI在蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外1和短波红外2的反射率,其余参数来自参考文献[23]。*LST*的计算方法详见参考文献[24]。

将4个指标归一化处理后在GEE中对其进行主成分分析。按照等距分割的原则选择了4个特定年

份进行说明,由表2可知,4个指标在第一主成分(PC1)上最高贡献率为79.11%,最低贡献率为

表2 主成分分析结果

Table 2 Results of principal component analysis

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2000	WET	0.109	0.142	0.318	0.930
	NDVI	0.670	0.670	0.292	0.124
	NDBSI	-0.437	-0.011	-0.833	-0.338
	LST	-0.589	-0.727	-0.345	-0.062
	特征值	0.045	0.009	0.003	0.001
	贡献率/%	78.07	16.27	5.49	0.17
2007	WET	0.117	0.115	0.341	0.925
	NDVI	0.651	0.616	0.416	0.148
	NDBSI	-0.501	-0.086	-0.789	-0.344
	LST	-0.557	-0.773	-0.294	-0.059
	特征值	0.042	0.008	0.004	0.001
	贡献率/%	76.31	15.77	7.70	0.22
2014	WET	0.152	0.335	0.316	0.874
	NDVI	0.687	0.708	0.019	0.158
	NDBSI	-0.466	-0.332	-0.681	-0.455
	LST	-0.535	-0.524	-0.659	-0.055
	特征值	0.046	0.015	0.005	0.002
	贡献率/%	79.11	13.15	7.43	0.30
2021	WET	0.146	0.229	0.359	0.892
	NDVI	0.690	0.646	0.280	0.165
	NDBSI	-0.504	-0.106	-0.751	-0.412
	LST	-0.498	-0.720	-0.477	-0.074
	特征值	0.062	0.012	0.005	0.002
	贡献率/%	77.81	15.43	6.54	0.22

76.31%,平均贡献率为77.83%。这说明PC1可以表明各项指标76%以上的特征信息,从而证明了在黄河上游流域通过PC1来计算RSEI的可行性。同时在PC1中,NDVI和WET的特征向量为正值,说明它们对生态系统起正面的贡献,而LST和NDBSI的特征向量则呈负值,这与实际情况相符。最后通过公式(3)和公式(4)计算初始遥感生态指数($RSEI_0$)和归一化后的遥感生态指数(RSEI)。由于进行了归一化处理,RSEI的值域为[0,1],RSEI越接近1表明生态环境质量越好。最后我们将RSEI按照0.2的增量划分为5个等级:差[0,0.2],较差(0.2,0.4],中等(0.4,0.6],良(0.6,0.8],优(0.8,1]。

$$RSEI_0 = 1 - PC1([f(NDVI, WET, NDBSI, LST)]) \quad (3)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0min}) / (RSEI_{0max} - RSEI_{0min}) \quad (4)$$

式中: $RSEI_0$ 代表初始遥感生态指数;PC1代表第一

主成分; $RSEI$ 代表归一化处理后的遥感生态指数; $RSEI_{0max}$ 和 $RSEI_{0min}$ 分别代表初始遥感生态指数的最大值和最小值。

1.4 Mann-Kendall趋势分析

Mann-Kendall趋势分析是一种使用广泛的非参数统计方法,其样本无需遵循特定的分布,且不受异常值干扰,已经在气候变化、降水规律、温度变化和干旱频次检测等方面得到了广泛应用^[26]。具体方法如下^[27]:

对于某一时间序列变量 X ,假设其含有 n 个样本量,对其构造秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^n a_{ij}, k = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j, 1 \leq i \leq j \\ 0, & x_i \leq x_j, 1 \leq i \leq j \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_i 是第 i 时刻的数据值; x_j 是第 j 时刻的数据值; S_k 是第 i 时刻数据值大于第 j 时刻数据值的个数的累计总数。假设时间序列随机分布且独立,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: $UF_1=0$; $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 分别是 S_k 的均值和方差。最后根据时间序列 X 的逆序,按上述相同过程求出 UB_k 。

在Mann-Kendall趋势分析中,定义的统计量 UF_k 服从标准正态分布。若 $UF_k > 0$,则说明数据呈增加趋势,否则说明数据呈下降趋势。根据给定的显著性水平 α 查询正态分布表 Z 值,若 $|UF_k| > U\alpha$,则表明数据存在显著的趋势变化,本研究选择的显著性水平为95%。 UF_k 和 UB_k 的交点是突变点,交点对应的时刻是突变开始的时间^[28]。

1.5 空间自相关分析

空间自相关是检验要素是否与其相邻空间要素相关及其相关程度的重要指标^[29]。生态环境质量的空间相关性分析可以用来描述研究区内生态环境质量的空间异质性分布^[30]。其中全局空间自相关分析(全局Moran's I 指数)可以反映整个研究区内所有空间单元属性值的相关性。全局Moran's I 指数的值域位于[-1,1],小于0表示负相关,大于0表示正相关。若全局Moran's I 指数接近1,则表明

研究对象的某种属性在空间上具有显著的集聚效应；全局 Moran's I 指数接近-1，则表明研究对象的某种属性在空间上具有显著的趋异效应^[31]。其数学表达式如下^[32]：

$$I = \frac{m \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij} (D_i - \bar{D})(D_j - \bar{D})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij} (D_i - \bar{D})^2} \quad (8)$$

式中： I 表示全局 Moran's I 指数； m 为元素总数； D_i 代表第 i 个元素的属性值； \bar{D} 代表研究区域内所有元素的平均属性值； W_{ij} 为空间权重。

局部空间自相关分析可以有效地反映研究区域内每个空间单元的属性值之间的相关性^[33]。根据要素之间的相关性，可以把空间要素分为5种局部空间聚集类型，即高-高(H-H)、低-低(L-L)、低-高(L-H)、高-低(H-L)和无显著差异。H-H表示所选区域和空间相邻区域的属性值较高，L-L表示所选区域和空间相邻区域的属性值较低，L-H表示所选区域的属性值较低，但相邻区域的属性值较高，H-L表示选定区域的属性值较高，但相邻区域的属性值较低^[16]。其数学表达式如下：

$$I' = \frac{m(D_i - \bar{D}) \times \sum_{j=1}^m W_{ij} (D_j - \bar{D})}{\sum_{j=1}^m (D_j - \bar{D})^2} \quad (9)$$

式中： I' 表示局部 Moran's I 指数，其余参数与全局 Moran's I 指数相同。

1.6 地理探测器

地理探测器为探测空间分异性以及揭示背后驱动力的一种统计学方法^[34]。本文利用地理探测器中的因子探测，选取 $NDVI$ 、 $NDBSI$ 、 WET 、 LST 作为指标，以探究2000—2021年黄河上游流域生态环境质量变化的主导因素。其数学表达式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (10)$$

式中： q 表示指标对黄河上游流域生态环境质量的影响力， q 的值域为 $[0, 1]$ ， q 值越大，说明指标对黄河上游流域生态环境质量的影响越大； N 和 N_h 分别为全部样本数和分类样本数； σ^2 和 σ_h^2 分别为全部样本方差和分类样本方差； L 为选取的指标数量。

2 结果与分析

2.1 黄河上游流域生态环境质量总体分析

黄河上游流域的平均 $RSEI$ 从2000年的0.425增长到2021年的0.433，表明上游地区生态环境质量整体有所改善提升。 $RSEI$ 最低值出现在2003年(0.39)，最高值出现在2019年(0.486)。从图2可以看出，近22 a黄河上游流域的 $RSEI$ 变化具有阶段性的特点。2000—2005年黄河上游流域 $RSEI$ 呈降低趋势；2006—2021年 $RSEI$ 呈增加趋势，其中 UF_k 和 UB_k 第一次相交于2010年，说明此时 $RSEI$ 发生了突变，2012年之后 $RSEI$ 呈显著上升趋势 ($|Z| > 2.58$)，生态环境质量持续改善。

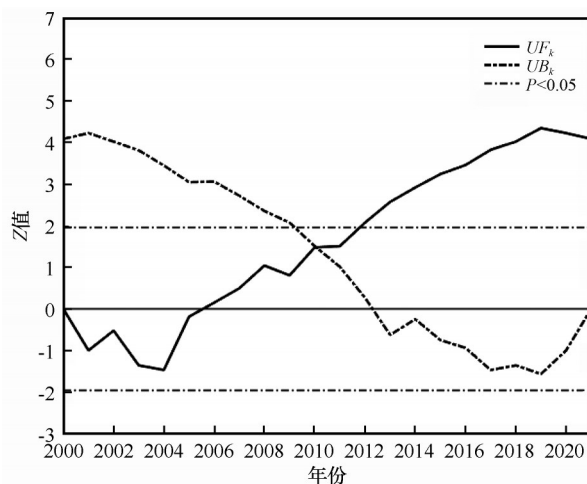


图2 基于Mann-Kendall检验的黄河上游流域 $RSEI$ 变化
Fig.2 Analysis of $RSEI$ changes in the upper Yellow River basin based on Mann-Kendall test

从空间上看，黄河上游流域生态环境质量等级以较差和中等等级为主，分别占区域总面积的37.87%和29.91%(图3A)。生态环境质量等级为较差的区域主要是毛乌素沙地、前套平原、河套平原北部、鄂尔多斯高原和黄土高原。生态环境质量等级为中等的区域主要是河套平原、贺兰山、六盘山和果洛藏族自治州。从变化趋势来看，黄河上游流域生态环境质量变化存在明显的空间异质性，秦岭西北部山脉、西套平原、西宁市、黄南藏族自治州和前套平原地区生态环境质量有所改善(图3B)。除原有沙漠和沙地外，兰州市和银川市之间的部分地区、鄂尔多斯高原和河源段的部分地区生态环境质量有所退化。

为了深入探究黄河上游流域 $RSEI$ 的空间差异，将黄河上游流域划分为河源段、峡谷段和冲积平原

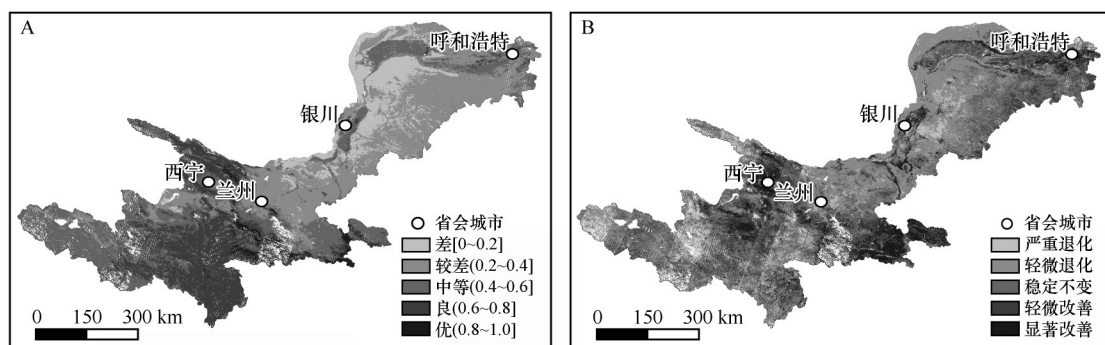


图3 黄河上游流域生态环境质量2021年空间分布(A)及2000—2021年变化(B)

Fig. 3 Spatial distribution and change of ecological environmental quality in the upper Yellow River basin from 2000 to 2021

段(图1、图4)。河源段的生态环境质量最好,平均 $RSEI$ 为 0.530(标准差:0.049)。其次是峡谷段,平均 $RSEI$ 为 0.438(标准差:0.039)。冲积平原段的生态环境质量最差,平均 $RSEI$ 为 0.344(标准差:0.025)。从动态变化上看,不同河段的生态环境质量变化存

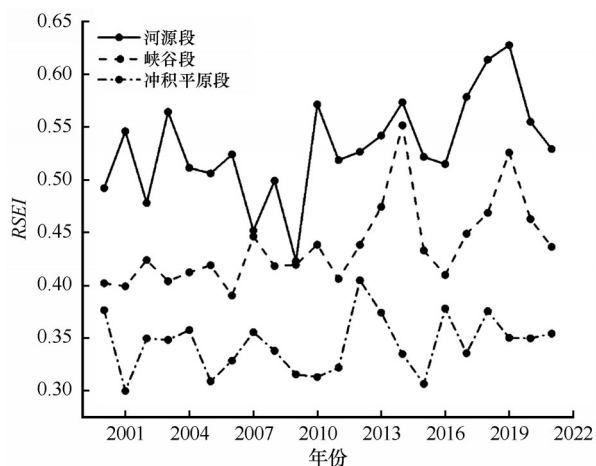


图4 2000—2021年黄河上游流域不同河段生态环境质量

Fig. 4 Ecological environmental quality of different river sections in the upper Yellow River basin from 2000 to 2021

在差异(图5)。河源段的 $RSEI$ 在 2000—2011 年呈波动变化的状态,平均 $RSEI$ 为 0.507(标准差:0.042);2012—2021 年 $RSEI$ 呈上升趋势,其中 UF_k 和 UB_k 第一次相交于 2013 年,说明此时 $RSEI$ 发生了突变;2017 年 $RSEI$ 达到显著上升的趋势($|Z| > 2.58$)。峡谷段的 $RSEI$ 在 2000—2002 年呈下降趋势,在 2003—2021 年 $RSEI$ 呈上升趋势,其中 UF_k 和 UB_k 第一次相交于 2009 年,说明此时 $RSEI$ 发生了突变;2012 年 $RSEI$ 达到显著上升的趋势($|Z| > 2.58$)。冲积平原段的 $RSEI$ 在 2000—2011 年呈上升趋势,在 2012—2021 年 $RSEI$ 呈波动变化状态,平均 $RSEI$ 为 0.353(标准差:0.027);与 2000—2011 年相比(平均 $RSEI$: 0.335),冲积平原段在 2012—2021 年生态环境质量有所改善。

2.2 黄河上游流域生态环境质量空间自相关分析

为进一步研究黄河上游流域生态环境质量的空间关联性及其分布特征,利用全局空间自相关和局部空间自相关对黄河上游流域的 $RSEI$ 进行了分析,结果如表3和图6所示。2000—2021 年的全局

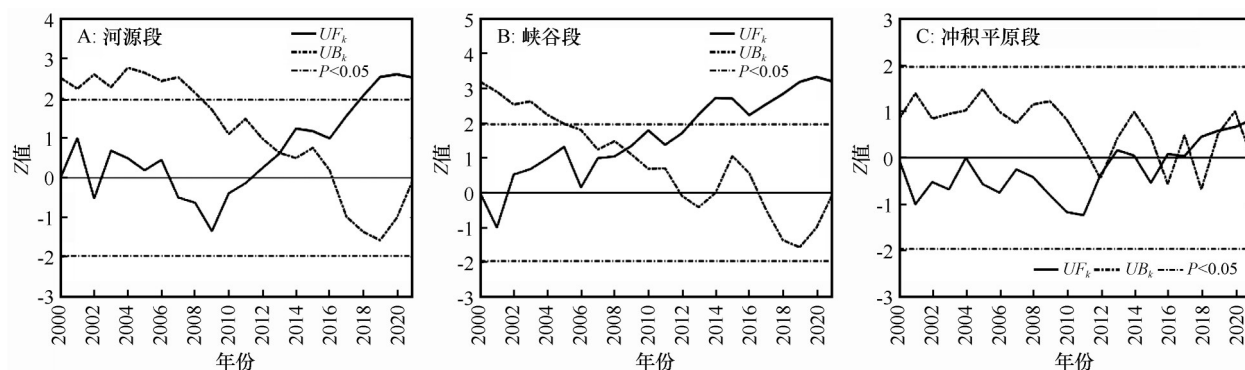


图5 基于 Mann-Kendall 检验的黄河上游流域不同河段 $RSEI$ 变化

Fig. 5 Analysis of $RSEI$ changes in the river source section (A), canyon section (B) and alluvial plain section (C) of the upper Yellow River basin based on the Mann-Kendall test

表 3 黄河上游流域 2000—2021 年全局空间自相关分析
Table 3 Global spatial autocorrelation analysis of the upper Yellow River basin from 2000 to 2021

年份	全局 Moran' <i>I</i> 指数	方差	Z 值	<i>P</i> 值
2000	0.481	0.000034	82.62	0.0000
2007	0.486	0.000038	78.94	0.0000
2014	0.515	0.000041	80.11	0.0000
2021	0.581	0.000038	94.63	0.0000

Moran' *I* 指数均大于 0, 计算结果通过显著性检验 ($P \leq 0.01$ 且 $Z \geq 2.58$), 表明研究期内黄河上游流域生态环境质量存在正向空间关联, 在空间上具有显著的聚集特征。黄河上游流域 *RSEI* 的全局 Moran's *I* 指数值不断上升, 由 2000 年的 0.481 提升至 2021 年的 0.581, 空间集聚程度逐年增强。由图 6 可知, H-H 集聚类型和 L-L 集聚类型空间分布较为显著。H-H 集聚区稳定分布于黄河河源段附近, 包括阿坝藏族羌族自治州、甘南藏族自治州、黄南藏族自治州、海北藏族自治州、西宁市、海东市西北部、定西市南部、天水市东南部和平凉市南部地区, 拥有高质量生态环境的地区之间存在显著的空间联系, 且集聚效应逐渐加强, H-H 集聚区覆盖面积由 2000 年

的 81 696.21 km² 增加至 2021 年的 108 741.15 km², 表明生态环境质量在不断提升。L-L 集聚区分布范围同样较广, 主要在鄂尔多斯市、包头市、河套平原北部、吴忠市、中卫市、白银市、兰州市、海南藏族自治州东北部, 这些地区普遍人类活动强度高, 特别是在一些经济较为发达的中心城市周边, 受其影响生态环境恶化。但随着时间的推移, L-L 集聚区面积由 2000 年的 225 657.32 km² 缩减至 2021 年的 190 671.21 km², 进一步说明了上游地区的生态环境质量在整体上有所改善。

2.3 黄河上游流域生态环境质量变化主导因素

由表 4 可知, *NDVI*、*WET*、*LST* 和 *NDBSI* 的 *P* 值小于 0.01, *q* 值通过了显著性检验, 具有统计学意义。从各年 *q* 均值来看, *NDVI*、*WET*、*LST* 和 *NDBSI* 的 *q* 值分别为 0.823、0.643、0.731 和 0.799, 对黄河上游生态环境影响的解释力均超过 50%, 说明绿度、湿度、热度和干度对生态环境质量起到重要影响作用。其中 *NDVI* 的 *q* 值最大, 解释力超过 80.00%, 是影响生态环境质量的主导因子。*NDVI* 作为首要驱动因子, 对黄河上游流域生态环境质量的影响最

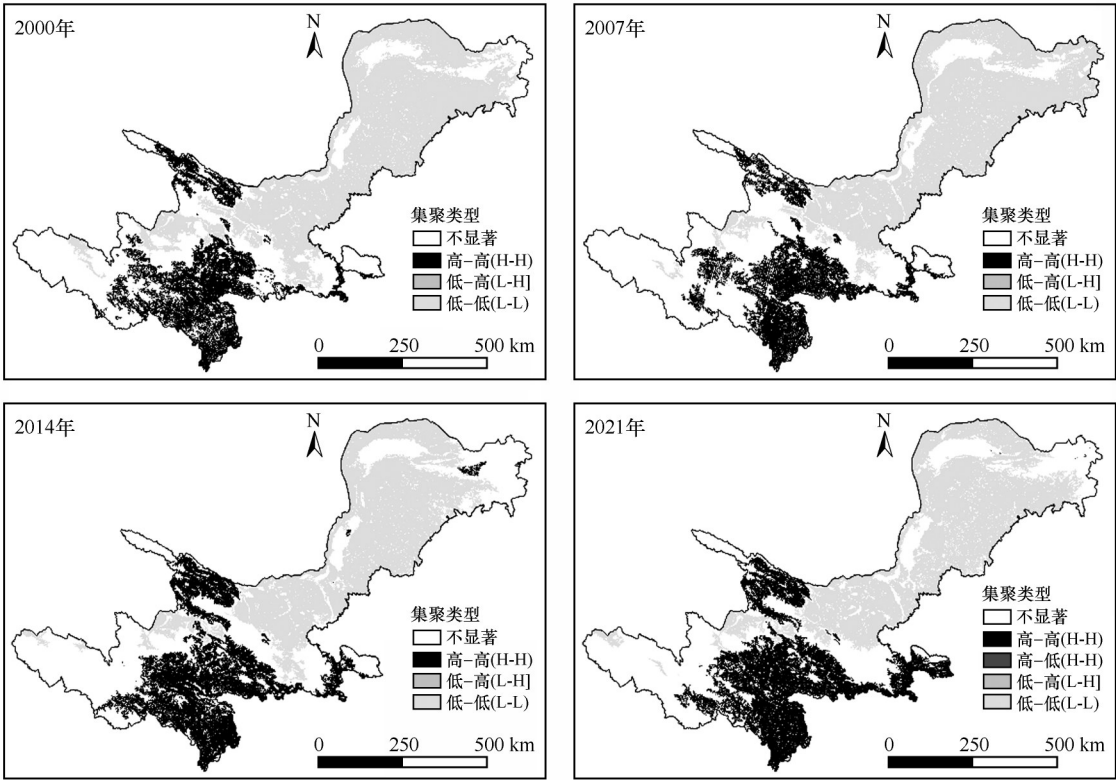


图 6 黄河上游流域 2000—2021 年局部空间自相关分析
Fig. 6 Local spatial autocorrelation analysis of the upper Yellow River basin from 2000 to 2021

表 4 黄河上游生态环境质量影响因子探测结果

Table 4 Detection results of ecological environmental quality impact factors in the upper Yellow River basin

影响因子	2000年		2007年		2014年		2021年		q 平均值
	q 值	P 值	q 值	P 值	q 值	P 值	q 值	P 值	
<i>NDVI</i>	0.825	0.000	0.817	0.000	0.822	0.000	0.830	0.000	0.823
<i>WET</i>	0.688	0.000	0.623	0.000	0.604	0.000	0.658	0.000	0.643
<i>LST</i>	0.725	0.000	0.768	0.000	0.725	0.000	0.707	0.000	0.731
<i>NDBSI</i>	0.801	0.000	0.791	0.000	0.798	0.000	0.807	0.000	0.799

大。地表植被覆盖可以有效调节地表水分、能量和生态系统的平衡,从而减少水土流失、荒漠化等环境问题的发生^[35-36]。*NDBSI*解释力在 75.00% 以上,是次要驱动因子,说明推进新型城市化和治理干化、荒漠化地表同样是改善生态环境的关键。*LST*和 *WET*对黄河上游生态环境影响的解释力分别为 73.10% 和 64.30%,主要是通过影响植被生长的方式来影响生态环境质量。

2.4 黄河上游流域人类活动和自然环境因素变化

根据上文分析的结果,我们从 *NDVI*、*NDBSI*、*LST*和 *WET*的角度探究黄河上游流域生态环境质量影响因素的变化趋势(图 7、图 8)。从 *NDVI*的角度看,黄河上游流域的植被覆盖度呈现增加趋势。其中多年平均树冠覆盖度为 5.020% (标准差: 1.019),年平均增长 0.104%。从阶段性变化来看,

树冠覆盖度在 2000—2003 年呈下降趋势,2004—2020 年呈增加趋势,其中 2012 年以后达到显著上升趋势 ($|Z| > 2.58$)。多年平均非树冠植被覆盖度为 48.534% (标准差: 1.637),年平均增长 0.273%。2000—2020 年,非树冠植被覆盖度呈现持续上升的趋势,在 2008 年以后达到了显著上升趋势 ($|Z| > 2.58$)。这主要受中国在黄河上游流域开展的国家级植被保护工程的影响,包括 1978 年在甘肃中东部、青海东部和宁夏南部等区域开展的三北防护林建设项目,1998 年在黄河上中游实施的天然林保护和退耕还林、还草计划等^[37]。这些生态保护项目促使黄河上游流域的植被覆盖度大大提升,使黄河上游流域生态环境得到很大改善。河源段的 *RSEI* 显著高于其他区域,这也在很大程度上受到国家战略和局部气候的影响。特别是在 2000 年开展了三江源自然保护区生态保护和建设项目、2001 年提出了

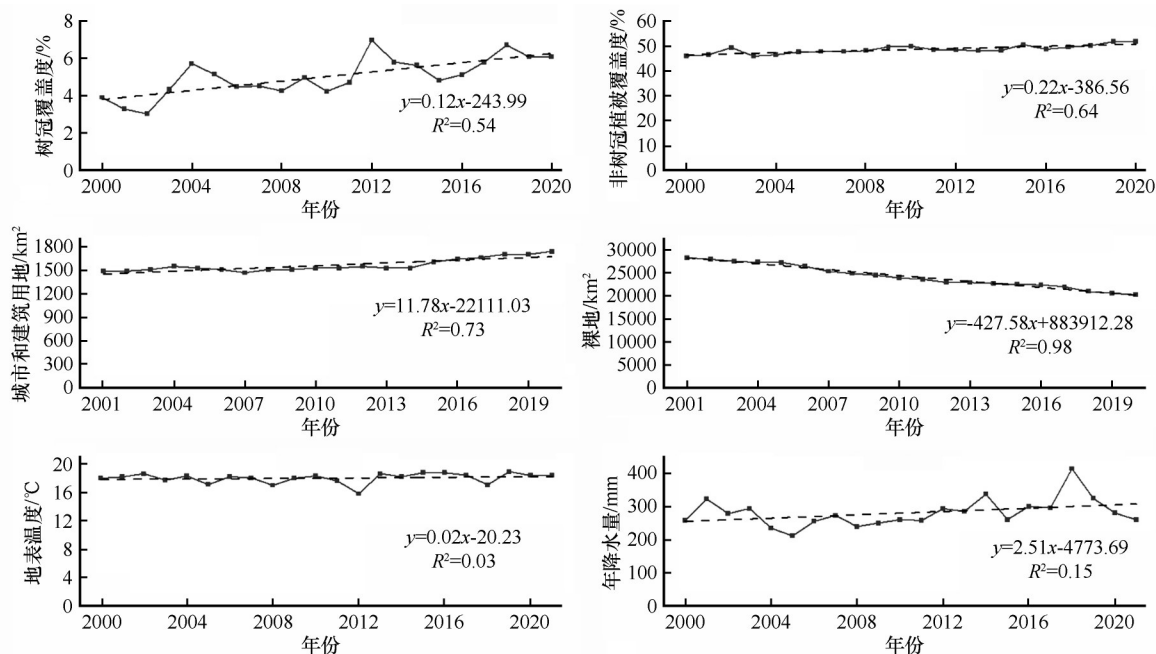


图 7 黄河上游流域人类活动和自然环境变化

Fig. 7 Human activities and natural environmental changes in the upper Yellow River basin

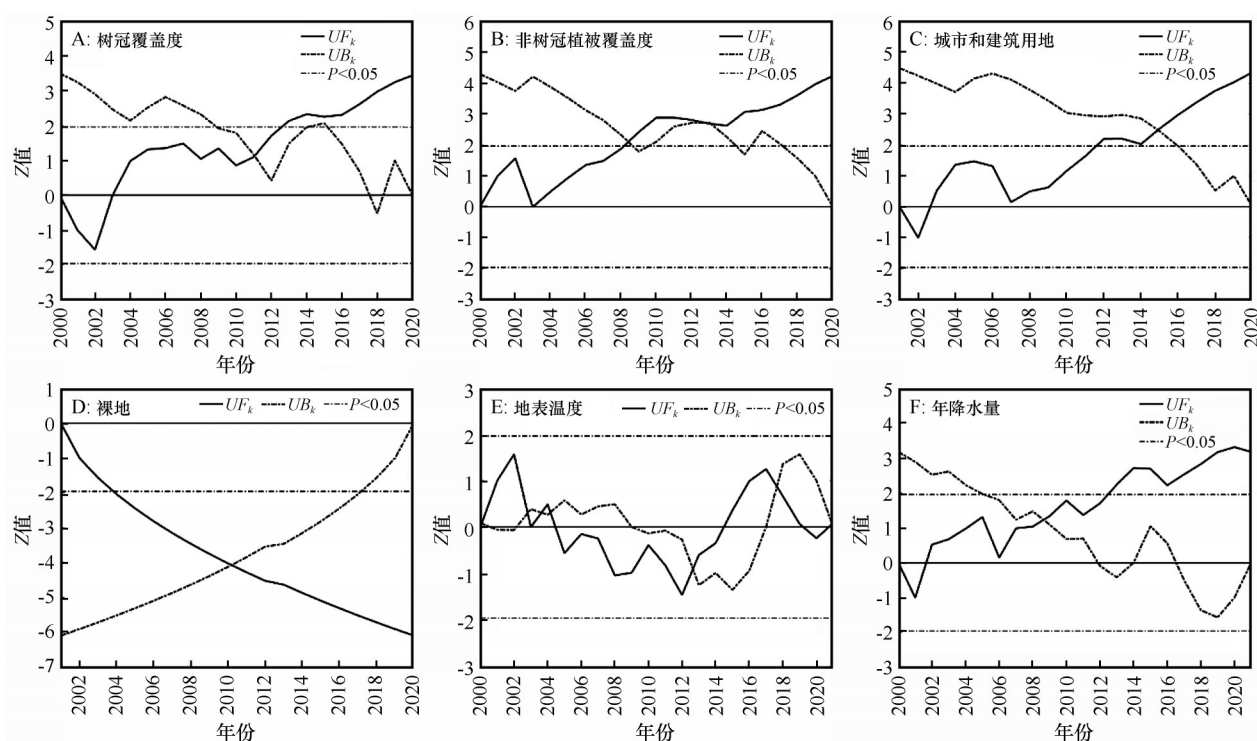


图8 基于 Mann-Kendall 检验的黄河上游流域生态环境质量影响因素变化趋势

Fig. 8 The trends of factors influencing ecological environmental quality in the upper Yellow River basin based on the Mann-Kendall test

黄河源区水土流失预防保护监督工程和2005年进行了三江源区生态保护和建设等大批生态保护项目。另外,青藏高原东南部属于中国的半湿润地区,年降水量400~800 mm,空气湿润,蒸发量低。在自然条件基础上,在河源段开展的这些生态保护工程在很大程度上促进了河源段植被质量的提升,同时也降低了河源段的人类活动强度,最终使得河源段的生态环境质量显著高于其他区域。峡谷段也有部分地区属于半湿润地区,主要位于秦岭的西端,使得该区域生态环境质量处于较高水平。

从NDBSI的角度看,黄河上游流域的土地利用方式变化较大。多年平均城市和建筑用地面积为1 562.460 km²(标准差:79.929),年平均增长12.657 km²。城市和建筑用地还具有阶段性的变化特征,在2001—2002年呈下降趋势,2003—2020年呈增加趋势,其中2012年以后达到了显著增加趋势(|Z|>2.58)。这说明随着城市化的进行,黄河上游流域建设用地持续扩张。另外,由于政府的移民安置项目,一些农田、草地和湿地转变为建设用地。这种情况在峡谷段、冲积平原段等人类活动密集的地区更为严重,这也是这些区域生态环境质量较低的原因。因此在黄河上游流域城市化的进程中应该注

重对建设用地的集约利用,缓解因城市扩张带来的生态问题^[38-39]。裸地具有与城市和建筑用地完全不同的变化趋势。2001—2020年黄河上游流域的裸地面积呈持续下降趋势,在2005年以后达到了显著下降趋势(|Z|>2.58)。多年平均面积24 259.156 km²,年平均减少403.528 km²。除了受到城市建设用地扩张的影响外,大部分的裸地通过植树造林、退耕还林、还草和宜林荒山荒地造林等生态保护项目被转换成植被等生态用地。2000—2021年经过不断治理,黄河流域水土流失面积减少至26.420万 km²,新增林草治理面积6.160万 km²^[40-42],这在很大程度上促进了黄河上游流域生态环境质量的提高。

从LST和WET的角度看,黄河上游流域的自然环境在整体上变化不大,但对生态环境质量具有明显影响。2000—2004年,黄河上游流域的地表温度呈上升的趋势,多年平均温度为18.158℃(标准差:0.305)。与此同时,2000—2005年黄河上游流域的RSEI呈下降趋势,两者具有明显的负相关关系。这主要是因为气温上升会导致黄河上游流域的部分地区干旱程度进一步加剧,也会使土壤沙化严重,影响植被的生长状态,从而不利于生态环境质量的改善^[43-44]。特别是峡谷段的北部和冲积平原段,该

区域属于干旱和半干旱区域,降水少、蒸发量大。而在2005—2014年,黄河上游流域地表温度呈下降趋势,多年平均温度为17.685℃(标准差:0.799)。2006—2012年黄河上游流域的*RSEI*呈上升趋势,同时植被覆盖度在此期间也呈现增加的趋势。这说明地表温度的变化会通过影响地面蒸散发、地表干燥度和植被生长状况等方式来影响区域生态环境质量。降水是影响植被生长和区域生态环境的另一个重要因素。2000—2002年,黄河上游流域的年降水量呈下降趋势,2000—2005年黄河上游流域的*RSEI*也呈下降趋势。2003—2021年,黄河上游流域的年降水量呈增加的趋势,2006—2021年黄河上游流域的*RSEI*也呈增加趋势,二者都在2012年以后达到了显著增加趋势($|Z|>2.58$)。这说明黄河上游流域生态环境质量和年降水量呈正相关关系。由于黄河上游流域的大部分区域位于干旱和半干旱区域,年降水量较少,干旱频发。这在很大程度上影响了植被的生长,从而制约区域生态环境质量的改善。

3 结论

2000—2021年黄河上游流域生态环境质量整体有所提升,平均*RSEI*由0.425增加至0.433。2000—2005年为生态环境质量恶化阶段,2006—2021年为生态环境质量改善阶段。生态环境质量以较差级别和中等级别为主,共占区域总面积的64.78%。

黄河上游流域不同河段生态环境质量存在显著差异,并且具有阶段性的特点。其中河源段的生态环境质量最好,冲积平原段的生态环境质量最差。从动态变化上看,河源段的*RSEI*在2000—2011年呈波动变化的状态,2012—2021年*RSEI*呈上升趋势。峡谷段的*RSEI*在2000—2002年呈下降趋势,在2003—2021年*RSEI*呈上升趋势。冲积平原段的*RSEI*在2000—2011年呈上升趋势,在2012—2021年*RSEI*呈波动变化状态。

黄河上游流域*RSEI*的全局Moran's *I*指数值不断上升,空间集聚程度逐年增强。高-高集聚区稳定分布于黄河河源段附近,覆盖面积由2000年的81 696.21 km²增加至2021年的108 741.15 km²。低-低集聚区主要分布在人类活动密集的峡谷段和冲积平原段,面积由2000年的225 657.32 km²缩减至2021年的190 671.21 km²。

地理探测器探测结果显示,*NDVI*、*WET*、*LST*和*NDBSI*对黄河上游生态环境影响的解释力均超过50%,说明绿度、湿度、热度和干度对生态环境质量起到重要影响作用。其中,*NDVI*为主导驱动因子,*NDBSI*为次要驱动因子。从影响因素看,植被覆盖度的增加、气候调节和人类活动对黄河上游流域生态环境改善有明显的促进作用。

参考文献:

- [1] 杨泽康,田佳,李万源,等.黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J].生态学报,2021,41(19):7627-7636.
- [2] 中共中央国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》[J].中华人民共和国国务院公报,2021(30):15-35.
- [3] 马佳宁,高艳红.近50年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J].高原气象,2019,38(1):124-135.
- [4] Zheng L X, Wu M Q, Cui Y T, et al. What causes the great green tide disaster in the South Yellow Sea of China in 2021? [J]. Ecological Indicators, 2022, 140: 108988.
- [5] Schell J. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[J]. Nasa Special Publication, 1973, 351: 309.
- [6] Zheng L X, Wu M Q, Zhou M, et al. Spatiotemporal distribution and influencing factors of *Ulva prolifera* and *Sargassum* and their coexistence in the South Yellow Sea, China[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2021, 40(7): 1070-1084.
- [7] Jiapaer G, Liang S L, Yi Q, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 64-76.
- [8] 璩路路,刘彦随,周扬,等.罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应:以井冈山为例[J].生态学报,2019,39(10):3468-3481.
- [9] 陈相标,丁文荣.滇中高原湖泊流域土地利用变化及生态系统服务功能[J].水土保持研究,2022,29(3):205-212.
- [10] Willis K S. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas[J]. Biological Conservation, 2015, 182: 233-242.
- [11] Zarch M A A, Malekinezhad H, Mobin, M H, et al. Drought monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran [J]. Water Resources Management, 2011, 25(13): 3485-3504.
- [12] 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.
- [13] Shan W, Jin X B, Ren J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118126.
- [14] 杭鑫,罗晓春,曹云,等.基于*RSEI*模型的生态质量评估及城镇化影响:以南京市为例[J].应用生态学报,2020,31(1): 219-229.
- [15] Huang H P, 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.
- [16] 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.
- [17] Qureshi S, Alavipanah S K, Konyushkova M, et al. A remotely sensed assessment of surface ecological change over the Gomishan Wetland, Iran [J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): 2989.
- [18] Liu C, Yang M H, Hou Y T, et al. Spatiotemporal evolution of island ecological quality under different urban densities: a comparative analysis of Xiamen and Kinmen Islands, southeast China [J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107438.
- [19] 郝斌飞, 杨洪, 马明国, 等. 基于 Google Earth Engine 的三峡库区土地利用与陆表参数变化研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1343–1355.
- [20] Yin Q, Liu M L, Cheng J Y, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern China Using spatiotemporal data fusion and phenology-based method [J]. Remote Sensing, 2019, 11(14): 1699.
- [21] Nguyen U, Pham L, Dang D. Correction to: an automatic water detection approach using Landsat 8 OLI and Google earth engine cloud computing to map lakes and reservoirs in New Zealand [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(9): 616.
- [22] 侯伟, 马金辉, 白晓. 一种采用 Landsat TM 对 ETM+SLC-off 影像缝隙修补的方法 [J]. 遥感信息, 2013, 28(6): 72–77.
- [23] 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 [J]. 遥感学报, 2005(5): 589–595.
- [24] Jimenez-Munoz J, Cristobal J, Sobrino J, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1): 339–349.
- [25] Yang X Y, Meng F, Fu P J, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality in the Yangtze River Basin from 2001 to 2019 [J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108214.
- [26] 都军, 高军凯. 1961–2014 年张掖市降水变化趋势 [J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 770–774.
- [27] Hamed K. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3/4): 350–363.
- [28] 董春媛, 乔荣荣, 王傲洁, 等. 大兴安岭森林区植被物候的纬度地带性 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(12): 2306–2316.
- [29] Martin D. An assessment of surface and zonal models of population [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1996, 10(8): 973–989.
- [30] Xiong Y, Xu W H, Lu N, et al. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107518.
- [31] 万鲁河, 王绍巍, 陈晓红. 基于 GeoDA 的哈大齐工业走廊 GDP 空间关联性 [J]. 地理研究, 2011, 30(6): 977–984.
- [32] Griffith D. Spatial Autocorrelation: A Primer [M]. Washington DC, USA: Association of American Geographers, 1987.
- [33] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J]. Geographical Analysis, 2010, 27(2): 93–115.
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134.
- [35] 崔文全, 徐明德, 李艳春, 等. 生态系统服务功能重要性研究 [J]. 安全与环境工程, 2014, 21(2): 5–9.
- [36] Zhang Y S, Lu X, Liu B Y, et al. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: a case study in the Yellow River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2021, 766: 142480.
- [37] 杜高奇, 李自强, 赵勇, 等. 基于 RSEI 的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析 [J/OL]. 水利水电技术 (中英文), 2022: 1–14.
- [38] 何慧娟, 王钊, 董金芳, 等. 陕西黄河流域植被变化与城镇化协同权衡关系研究: 基于卫星遥感数据 [J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3536–3545.
- [39] 逯承鹏, 纪薇, 刘志良, 等. 黄河流域甘肃段县域“三生”功能空间时空格局及影响因素识别 [J]. 地理科学, 2022, 42(4): 579–588.
- [40] 高云飞, 张栋, 赵帮元, 等. 1990–2019 年黄河流域水土流失动态变化分析 [J]. 中国水土保持, 2020(10): 64–67.
- [41] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000–2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 [J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7798–7806.
- [42] 高健翎, 高燕, 马红斌, 等. 黄土高原近 70a 水土流失治理特征研究 [J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 65–69.
- [43] Jänicke C, Okujeni A, Cooper S, et al. Brightness gradient-corrected hyperspectral image mosaics for fractional vegetation cover mapping in northern California [J]. Remote Sensing Letters, 2019, 11(1): 1–10.
- [44] Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1601–1609.

Study of ecological environmental quality changes in the upper Yellow River basin based on remote sensing ecological index

Cui Yating^a, Li Huan^{ab}, Zheng Longxiao^a, Wu Mengquan^a

(a.School of Resources and Environmental Engineering / b.School of Business, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China)

Abstract: As the water source of the Yellow River, the upper Yellow River basin is an important ecological function area in China. Analysis of ecological environmental quality changes in the upper Yellow River basin is important for ecological protection and high-quality economic development of the Yellow River basin. Based on Google Earth Engine platform, this paper analyzes the change of ecological environment quality in the upper Yellow River basin from 2000 to 2021 through remote sensing ecological index (*RSEI*). The results show that: (1) The *RSEI* of the upper Yellow River basin is elevated. At the same time, it has the characteristics of stages. 2000–2005 is the stage of deterioration of ecological environment quality, and 2006–2021 is the stage of improvement of ecological environment quality. It is poor and moderate, accounting for 64.78% of the total area of the region. (2) The ecological quality of different river sections is different significantly, with the best ecological quality in the river source section and the worst ecological quality in the alluvial plain section. (3) The spatial clustering characteristics of ecological environment quality in the upper Yellow River basin are obvious, where high-high clustering areas are stably distributed near the river source section and low-low clustering areas are distributed in the canyon section and alluvial plain section where the intensity of human activities is higher. (4) Greenness, humidity, heat and dryness all have significant effects on the ecological quality of the upper Yellow River basin, with greenness as the dominant driver and dryness as the secondary driver. The increase of vegetation cover, climate regulation and soil and water conservation have significantly contributed to the ecological improvement of the upper Yellow River basin.

Key words: upper Yellow River basin; Google Earth Engine; remote sensing ecological index; geographical detectors; Mann-Kendall trend test