引文格式：乔瑞通,孙奇,武梦垚,等. 黄河源高寒湿地生态环境遥感监测与评价[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 96-101. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.019

黄河源高寒湿地生态环境遥感监测与评价

乔瑞通[1]，孙　奇[1,2,3,4*]，武梦垚[1]，王文慧[1]，胡思雨[1]，焦全军[2]，王　珍[1,3,4]
（1. 商丘师范学院 河南省黄河故道生态保护与治理工程技术研究中心，河南 商丘 476000；2. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室，北京 100094；3. 商丘师范学院 河南省农业遥感大数据发展创新实验室，河南 商丘 476000；
4. 商丘师范学院 遥感大数据与智慧农业工程技术研究中心，河南 商丘 476000）

摘　要：为推动黄河流域生态保护和高质量发展战略，以黄河源园区的高寒湿地为研究对象，基于2000—2021年22期Landsat遥感数据，利用云计算平台自动处理和提取遥感生态指数（RSEI），并分析其时空变化特征，以全面监测和评价研究区湿地生态环境质量。结果表明，RSEI均值呈先升后降再升的波动趋势，说明研究区生态环境经历了由恶化到改善的转变。从气候变化和人类活动的角度，对研究区生态变化进行定性和定量的描述与分析，为全面了解湿地生态现状并制定科学合理的保护与修复策略提供了坚实的科学基础。

关键词：黄河源；高寒湿地；生态环境质量；RSEI；主成分分析
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0096-06

Remote Sensing Monitoring and Evaluation of Ecological Environment in the Yellow River Source Alpine Wetlands

QIAO Ruitong[1], SUN Qi[1,2,3,4], WU Mengyao[1], WANG Wenhui[1], HU Siyu[1], JIAO Quanjun[2], WANG Zhen[1,3,4]
(1. Henan Engineering Technology Research Center of Ecological Protection and Management of the Old Course of Yellow River, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China;
2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
3. Henan Agricultural Remote Sensing Big Data Development and Innovation Laboratory, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China;
4. Engineering Technology Research Center of Remote Sensing Big Data and Smart Agriculture, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

Abstract: In order to advance the ecological conservation and high-quality development strategy of the Yellow River basin, taking the alpine wetlands in the Yellow River source as the research objects, based on 22 Landsat remote sensing datasets from 2000 to 2021, we used the cloud computing platform to automatically process and extract remote sensing ecological index (RSEI), and analyzed the spatio-temporal change characteristics of RSEI, to comprehensively monitor and evaluate the ecological environment quality within the region. The results show that the average RSEI value exhibits a fluctuating pattern with an initial increase, followed by a decrease, and subsequently another increase, which reflects a change in the ecological environment quality of study area over the past two decades, transitioning from degradation to improvement. Moreover, we comprehensively explained and examined the ecological changes in the study area, considering both climate change and human activity, which could provide a robust scientific foundation for understanding the wetland ecological current state and developing evidence-based and rational strategies for its protection and restoration.

Key words: the Yellow River source, alpine wetland, ecological environment quality, RSEI, principal component analysis

高寒生态系统作为地球上最重要的生态功能区之一，拥有丰富的生物多样性和生态系统服务功能，为人类提供了水源供给、气候调节、土壤保持等生态服务。高寒生态系统是全球气候变化的敏感指示器，也是评估全球气候变化的关键依据[1]。黄河源园区内的扎陵湖、鄂陵湖是黄河源头最大的淡水湖泊，是保护黄河源水质和上游生物多样性的重要湿地分区。生态环境质量受全球气候变化、自然环境演变、生物活动等自然因素以及城市化、土地资源配置不合理、水污染等人为社会因素影响[2]。准确把握生态环境质量总

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42071330）；河南省高校改革发展资金资助项目（2021KYFZ06）；河南省高等学校重点科研计划资助项目（22B420005）。
第一作者简介：乔瑞通（2004—），本科在读，研究方向为农业遥感、环境遥感，E-mail：Qiaoruitong2022@163.com。
通信作者：孙奇（1991—），博士，讲师，研究方向为植被定量遥感、农业遥感、环境遥感等，E-mail：sunqi@sqnu.edu.cn。

体状况，监测生态环境变化趋势，对提高生态环境管理能力，解决全球变化带来的绿色发展问题等具有重要意义。遥感数据因其便利性、不同尺度的广泛连续覆盖、实时可用性和快速提取地表物理特征等优点，成为监测区域生态的有效工具[3-4]。部分学者将单因素方法应用于生态环境遥感评价中[5-9]，可快速评价生态完整性，但难以综合评价地表特征的复杂性和多样性。为使生态环境质量评价更加全面，生态指数[10]（*EI*）、遥感生态指数[11]（RSEI）、生态综合评价指数[12]（CEEI）等综合性评价方法应运而生，并得到广泛应用。RSEI由徐涵秋[13]提出，能反映生态系统内部各要素之间的相互作用和关系。与EI相比，RSEI具有可伸缩性、可比性和可视化等特点，涉及的绿度、湿度、干度、热度指标便于计算，且具有相同的数值范围。此外，指标权重和阈值设置不受人为干预影响，确保了评估结果的客观性。Wang[14]、Boori等[15]通过RSEI评估了青海省格尔木和俄罗斯萨马拉地区的生态环境质量，取得了较好的效果。目前在云计算平台通过算法库处理遥感信息的方法得到广泛应用[16-18]。大多数现有研究[19-20]主要集中在分析城市扩张引起的土地覆盖变化对社会经济地位的影响，而对于利用云计算技术评估高寒地区湿地生态系统变化的研究较少。云平台的开源数据集为遥感信息的自动处理和提取提供了先决条件，其分析方式避免了基于本地软件处理大规模长时间序列的遥感影像时面对的海量数据下载和管理、计算时间长、负担大、计算速度慢等问题[21]。

1　研究区概况

黄河源园区位于青藏高原腹地（34°10′~35°65′ N、96°80′~100°15′ E），地处青海省三江源国家级自然保护区[22]。园区平均海拔为4 294 m，北部和南部均为高海拔山地地形，中部为西北—东南走向的低海拔谷地。黄河从巴颜喀拉山北麓的卡日曲和约古宗列曲发源后，经星宿海和玛曲河注入扎陵湖；自扎陵湖流出后，在巴颜郎玛山南面进入河谷，从西南方向流经诸多小湖泊，最终汇入鄂陵湖[23]。园区每年10月至次年4月的平均气温均在0℃以下，年均气温为-3.6℃。当地气候条件和气候变化特征基本一致，为典型的大陆性高原气候，年降水量为200~400 mm，属于偏干旱地区。

2　研究方法

本文依托于Earth Engine云计算服务平台提供的算法库和大量影像数据集，开展遥感信息自动处理与提取，最终获取长时间序列的研究区RSEI数据集。研究方法框架由遥感数据获取、数据预处理、云计算构建RSEI模型3个部分组成，均从云端分析完成。相较于本地遥感数据处理软件，该方法更便捷、不受存储和资源限制，适用于长时间序列的影像处理和分析。

2.1　数据获取与预处理

本文采用的2000—2012年Landsat7数据、2013—2021年Landsat8数据、MODIS地表温度反演数据集、JRC年度水分类数据集（表1）均可从云计算平台上直接调用，大大提升了运算效率。为避免季节差异和云层覆盖对数据的影响，本文选取季节和分辨率相同、云量较少、成像质量好的Landsat系列影像，并在云计算前进行云层和水体掩膜等预处理。部分人口、经济数据来源于青海省统计年鉴（http://www.stats.gov.cn/），气温、降水等数据来源于国家青藏高原资料中心（http://data.tpdc.ac.cn/）。

表1　遥感数据来源

数据类型	Earth Engine云平台数据来源	时间、空间分辨率
Landsat7 TM影像	美国地质勘探局（https://earthexplorer.usgs.gov/）	1 d、30 m
Landsat8 OLI影像	美国地质勘探局	16 d、30 m
MOD11A1-LST数据集	美国国家航空航天局（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/）	30 d、1 km
JRC年度水分类数据集	欧盟委员会联合研究中心（https://commission.europa.eu/）	1 a、30 m
Sentinel-2土地覆盖产品	ESRI & Impact Observatory（https://livingatlas.arcgis.com/）	1 a、10 m

2.2　RSEI

RSEI将绿度、湿度、干度和热度4个与生态环境质量密切相关的指标进行耦合，从而直观反映生态环境质量。RSEI主要基于自然因子的影响[24]，不仅克服了单一指标评价的局限性，而且使得各分指标的权重分配更科学合理。采用植被指数（NDVI）、湿度分量（Wet）、土壤指数（NDBSI）和地表温度（LST）作为绿度、湿度、干度和热度指标的代理变量[25-26]。

1）绿度指标与植物的叶面积指数、覆盖度和生物量密切相关，是表明植物生长状态的最佳指示因子[26]。Earth Engine云平台通过调用API集成的Normalized Difference来计算NDVI，能自动处理数据缺失值和无效值，避免了四则运算精度低等问题。

2）湿度指标。针对不同的Landsat传感器，Wet的计算公式为：

$$\mathrm{Wet(TM)} = 0.031\,5B_{\mathrm{b}} + 0.202\,1B_{\mathrm{g}} + 0.310\,2B_{\mathrm{r}} + 0.159\,4B_{\mathrm{n}} - 0.680\,6B_{\mathrm{S1}} - 0.610\,9B_{\mathrm{S2}} \quad (1)$$

$$\mathrm{Wet(OLI)} = 0.151\,1B_{\mathrm{b}} + 0.197\,3B_{\mathrm{g}} + 0.328\,3B_{\mathrm{r}} + 0.340\,7B_{\mathrm{n}} - 0.711\,7B_{\mathrm{S1}} - 0.455\,9B_{\mathrm{S2}} \quad (2)$$

式中，B_b、B_g、B_r、B_n、B_{S1}、B_{S2}分别为TM和OLI数据的蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外1、短波红外2波段。

3）干度指标是土壤干化的表现。土壤干化会破坏湿地生态系统的均衡。干度指标（NDBSI）由裸土指数（SI）和建筑物指数（IBI）通过设定合适的权重（α、β）加权计算得到的，以减小两个指数差异对干度指标的影响。

$$SI=\frac{[(B_{SI}+B_r)-(B_n+B_b)]}{[(B_{SI}+B_r)+(B_n+B_b)]} \tag{3}$$

$$IBI=\frac{\left\{\frac{2B_{S1}}{B_{S1}+B_n}-\left[\frac{B_n}{B_n+B_r}+\frac{B_g}{B_g+B_{S1}}\right]\right\}}{\left\{\frac{2B_{S1}}{B_{S1}+B_n}+\left[\frac{B_n}{B_n+B_r}+\frac{B_g}{B_g+B_{S1}}\right]\right\}} \tag{4}$$

4）热度指标。温室效应导致LST上升，对植被覆盖度、地表水循环等产生了严重影响。本文基于云计算平台提供的MOD11A1-LST数据集计算热度指标。通过MODIS对地观测的7个波段来反演日间和夜间的LST，且可选择每日、每8天、每月等不同时间尺度的高精度合成数据，以实现对研究区热度指标的最佳匹配。

2.3 RSEI模型构建

本文采用主成分分析法构建RSEI模型，将绿度、湿度、干度、热度中的主要信息综合到第一主成分上，使其能以单一指标的形式出现，避免人为选取指标权重对RSEI的影响。将归一化后的各指标值通过云平台中的波段组合算法合成一景新影像，再进行主成分变换，得到PC1~PC4的统计结果。由于PC1综合了各指标的主要信息，因此仅需对其进行标准化处理，使RSEI更加直观。

2.4 Pearson相关系数

Pearson相关系数被广泛应用于不同遥感数据之间的时序特征变化分析，是确定数据有效性和可靠性的重要方法[27]。云平台内置了Reducer Pearsons Correlation函数，可通过双输入归约器计算各指标之间的相关系数和相关性，表达式为：

$$r=\frac{\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})^2\sum(y_i-\bar{y})^2}} \tag{5}$$

式中，x_i、y_i为两个变量的观测值；$\bar{x}$、$\bar{y}$为两个变量的均值。

3 研究结果与分析

3.1 RSEI模型结果

由2000—2021年22期数据的主成分分析结果可知（表2、3），PC1的贡献率均超过了65%，能代表4个指标中的主要信息；各年PC1中的NDVI和Wet呈正值、NDBSI和LST呈负值，这与植被和水分在生态系统中发挥正向作用，地表干度和温度产生负面作用相吻合。Wet和NDVI越高，则土壤含水量越高、植被覆盖越好；而LST和NDBSI越高，则土壤荒漠化程度加剧，裸地面积增加、地表温度升高，土壤环境质量下降。PC2~PC4中指标值大小、正负均无明显规律，难以合理解释研究区的生态问题，因此本文采用PC1构建RSEI模型。

表2 2000—2012年各指标PC1分析结果

指标参量	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
NDVI	0.41	0.27	0.38	0.28	0.32	0.29	0.33	0.55	0.34	0.41	0.36	0.39	0.21
LST	−0.48	−0.32	−0.64	−0.34	−0.34	−0.42	−0.43	−0.73	−0.25	−0.34	−0.53	−0.43	−0.56
Wet	0.65	0.76	0.67	0.86	0.87	0.75	0.73	0.29	0.79	0.82	0.52	0.79	−0.75
NDBSI	−0.41	−0.47	−0.03	−0.22	−0.08	−0.39	−0.40	−0.17	−0.41	−0.17	−0.05	−0.17	−0.14
贡献率	79.90	80.54	65.73	74.82	71.78	79.36	74.98	69.64	84.45	78.48	64.11	76.69	76.86

表3 2013—2021年各指标PC1分析结果

指标参量	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
NDVI	0.29	0.32	0.43	0.41	0.33	0.38	0.37	0.42	0.36
LST	−0.38	−0.51	−0.38	−0.39	−0.42	−0.45	−0.33	−0.37	−0.29
Wet	0.59	0.77	0.71	0.70	0.71	0.62	0.75	0.62	0.81
NDBSI	−0.64	−0.19	−0.41	−0.42	−0.46	−0.52	−0.42	−0.54	−0.24
贡献率	91.32	76.74	71.17	68.69	85.01	80.99	85.58	72.90	70.24

本文以5 a为间隔，计算了同期4个指标与RSEI的Pearson相关系数，结果见图1，RSEI与NDVI和Wet呈正相关，系数绝对值较大，与NDBSI和LST呈负相关，系数绝对值较小，研究期间各指标与RSEI的相关系数在1%水平下均显著。各指标的平均相关程度为RSEI > NDVI > NDBSI > LST > Wet。通过Pearson相关系数检验，进一步验证了本文中RSEI模型的有效性和可靠性，且其代表性大于任意的单一指标。

3.2 黄河源高寒湿地生态质量时空变化分析

统计2000—2021年RSEI均值发现，RSEI均值呈先升高、后降低、再回升的波动趋势，说明研究区生态环境在近20年间经历了由恶化到改善的转变：均值

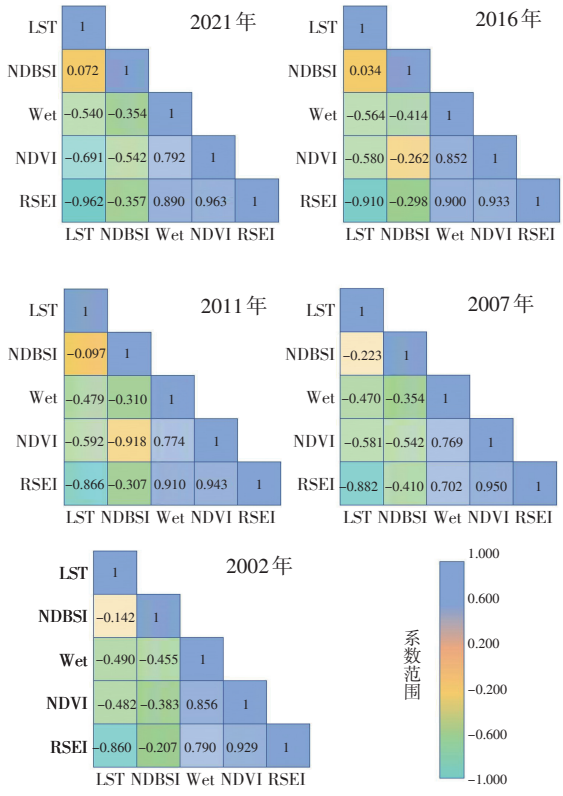


图1　各指标与RSEI的相关性

由2000年的0.335升至2009年的0.509，达到10年间的最大值；又降至2015年的0.254，下降了50%；再升至2021年的0.421，增幅高达65.7%，说明园区生态环境有所好转；总体来看，黄河源园区生态环境状况仍在中等偏下水平。

根据《生态环境评价技术规范》中生态环境分级标准[28]，本文对研究区RSEI变化进行可视化分析，以0.2为间隔，将22期RSEI划分为差、较差、中、良、优5个等级，结果表明（图2），近20年来黄河源高寒湿地生态环境变化具有显著的空间异质性，其中生态等级以差级为主的年份占比为22.7%，RSEI均值低于0.4的年份占比高达63.6%。2013—2021年RSEI影像图与2000—2012年相比，中级及以上生态等级面积占比明显上升，影像图以黄色、浅绿色为主，而红色、橙黄色主要分布在扎陵湖、鄂陵湖的湖滨湿地附近。其原因在于，黄河源园区的主要地类为稀疏牧场，占比超过80%，而研究区中部地势较平坦，植被覆盖度较低的牧场易受土壤侵蚀和水土流失的共同影响，生态质量较差；研究区东南部集中分布着少量作物用地和湿地植被，加之黄河流经，水资源丰富，RSEI明显增加，并逐步向玛曲河流域扩散。

3.3　黄河源高寒湿地生态质量评价

为进一步可视化分析黄河源高寒湿地生态环境变化，对研究区2000—2021年RSEI进行动态监测和差

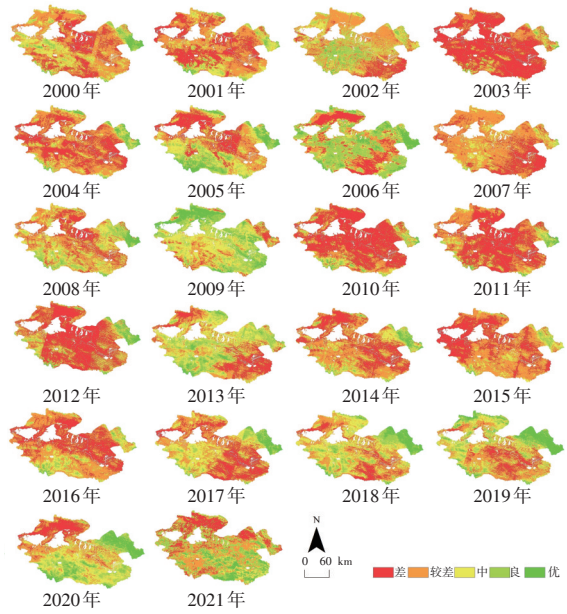


图2　黄河源湿地2000—2021年RSEI影像图

审图号：GS(2019)3333

值分析（图3），结果表明，生态环境无明显变化区域面积最大，为9 675.3 km²，占比为53.91%；其次为生态变好区域，面积为5 293.3 km²，占比为29.20%；生态变差区域面积为3 031.1 km²，占比为16.89%。具体而言，生态变差区域主要集中在研究区西北、东北部，由研究区DEM可知，该区域以山地地形为主，存在大面积的斑块状裸地，河流、沼泽分布较少，生态环境易受温度和干度的共同影响；生态变好区域主要集中在鄂陵湖东部和研究区西南方向，该区域拥有密集的沼泽和水源，植被以高海拔沼泽化草甸为主[29]，对土壤水分的保持能力较强，提升了区域内的水汽含量，湿度对RSEI的贡献最显著，对改善湿地生态环境具有积极作用。

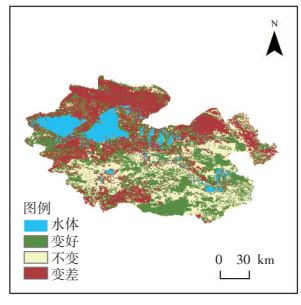
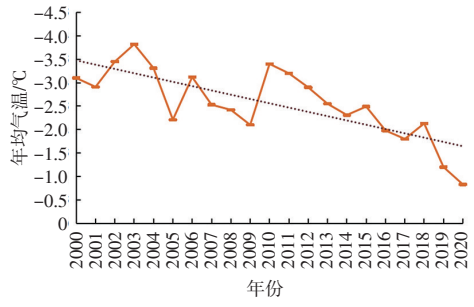


图3　2000—2021年RSEI变化监测

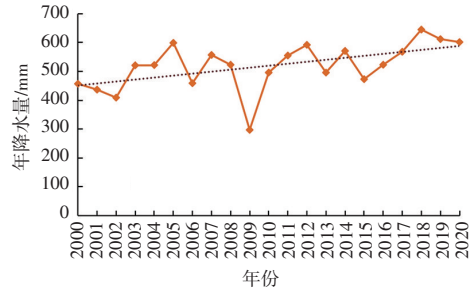
审图号：GS(2019)3333

3.4　自然原因对研究区生态质量的影响

绿度、湿度、干度、热度指标经主成分分析后构建的RSEI模型能很好地反映黄河源高寒湿地的生态环境状况。黄河源园区年均气温和年降水量的变化见图4，在青藏高原地区气候向暖湿化方向发展的背景下[30]，园区湿地年降水量和年均气温均有明显上升，



a 年均气温



b 年降水量

图4 黄河源园区湿地年均气温和年降水量变化统计

气温上升和降水量增加有利于植物生长，从而促进植被的扩张和密度增加，对当地生态系统的稳定性和物种多样性具有积极影响。由表2、3可知，绿度和干度对RSEI的贡献率最高；湿度对生态状况的正向贡献最显著，而温度对生态状况的负面效应最显著，这些与20年间高寒地区气候由暖干转向暖湿的趋势相吻合。

3.5 人为原因对研究区生态质量的影响

位于黄河源园区的玛多县，平均海拔高达4 200 m，总面积为25 253 km^2，而总人口不到2万人，以从事农牧业的藏族为主。由图5可知，区内人口由1.24万人增至1.61万人，GDP由2 876万元增至38 150万元，二者均有明显变化。过去园区牧民的过度放牧和矿石开采使得玛多县湖滨草甸大面积退化，沼泽、湿地对水源的涵养能力下降，进而导致黄河源园区生态系统修复能力减弱，影响生态平衡，与2000—2014年当地生态环境恶化密切相关。在国家和当地政府不断出台黄河源生态保护政策的背景下（表4），园区越来越注重湿地环境科学研究和水资源管理优化，裸地面积明显减少，湿地植被覆盖显著提升，随着黄河流域生态修复工程的不断推动，这一系列的综合性措施使得2015—2021年园区生态质量有所改善。

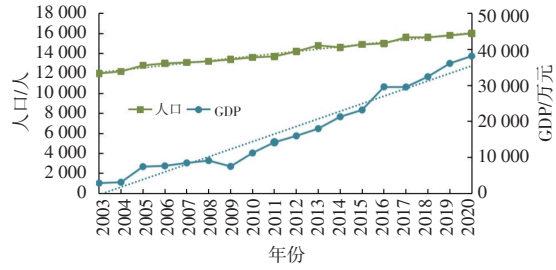


图5 黄河源园区人口和GDP变化统计

表4 国家和地方政府有关黄河源园区生态保护的相关政策与效果

相关政策、工程	实施时间	效果	数据来源
水土保持	2000年	黄河源区的土壤侵蚀率降低35%，上游河流水质显著改善，总悬浮物浓度降低40%	水利部http://www.mwr.gov.cn/
禁牧、限牧	2005年	减少牲畜数量，放牧强度降低30%，禁牧区的植被覆盖率10年内提高了25%	青海省农业农村厅http://nynct.qinghai.gov.cn/
湿地修复	2010年	通过播撒草籽和人工种草，湿地面积增加500 hm^2，水鸟种类和数量显著增加	青海省林业和草原局https://lcj.qinghai.gov.cn/
三江源国家公园总体规划	2017年	限制人类活动，使区域内野生动物数量显著增加，特别是雪豹、藏羚羊等保护物种的数量明显恢复	三江源国家公园管理局https://sjy.qinghai.gov.cn/
生态补偿机制	2021年	财政部通过设立专项资金，使黄河源区的草地保护面积增加30%，水土流失面积减少25%	国家发展和改革委员会https://www.ndrc.gov.cn/

4 结 语

面对长时间序列下的大量遥感影像数据，本文提出的基于云计算的分析框架展现了其在大范围、多时相生态环境质量监测与评价中的应用潜力。本文利用云计算平台自动化处理与提取RSEI的方法对黄河源高寒湿地生态环境变化进行了多维度综合评估。结果表明，近20年RSEI均值呈先升、后降、再升的波动趋势，说明研究区生态环境在20年间经历了由恶化到改善的转变。尽管园区生态状况等级以较差为主，但近年来的气候暖湿化趋势使得生态状况略有提升。黄河源园区湿地作为黄河上游最重要的水源涵养区和补给区，是阻止西北沙漠化向东蔓延的天然屏障，对整个黄河流域的生态平衡和环境保护具有重要意义。在黄河上游经济发展提速的同时，应践行黄河流域生态保护和高质量发展战略，共同营造园区湿地美丽的生态环境。

参考文献

[1] Zhong L, Ma Y, Xue Y, et al. Climate Change Trends and

Impacts on Vegetation Greening over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2019,124(14): 7 540-7 552

[2] Ostwald M,Chen D. Land-use Change: Impacts of Climate Variations and Policies Among Small-scale Farmers in the Loess Plateau, China[J]. Land Use Policy, 2006, 23(4): 361-371

[3] Wang N,Guo Y,Wei X,et al. UAV-based Remote Sensing Using Visible and Multispectral Indices for the Estimation of Vegetation Cover in an Oasis of a Desert[J]. Ecological Indicators,2022,141:109 155

[4] 李益敏,邓选伦,杨一铭,等. 基于GIS的怒江州建设用地生态适宜性评价[J]. 地理空间信息,2023,21(9):27-30

[5] Liu C,Wu X,Wang L. Analysis on Land Ecological Security Change and Affect Factors Using RS and GWR in the Danjiangkou Reservoir Area,China[J]. Applied Geography, 2019,105:1-14

[6] Shan W,Jin X,Ren J,et al. Ecological Environment Quality Assessment Based on Remote Sensing Data for Land Consolidation[J]. Journal of Cleaner Production,2019,239: 118 126

[7] 卢辉雄,聂振龙,王金哲,等. 基于时序NDVI的石羊河流域植被时空变化规律研究[J]. 地理空间信息,2020,18(5): 54-60

[8] Piedallu C, Cheret V, Denux J P, et al. Soil and Climate Differently Impact NDVI Patterns According to the Season and the Stand Type[J]. Science of the Total Environment, 2019,651:2 874-2 885

[9] 陈春辉,马苗苗. 基于多源遥感数据的城市热岛特征与机理研究[J]. 地理空间信息,2023,21(1):119-122

[10] Ji J W, Tang Z Z, Jiang L L, et al. Study on Regional Eco-environmental Quality Evaluation Considering Land Surface and Season Differences: A Case Study of Zhaotong City[J]. Remote Sensing,2023,15(3):657

[11] Zhang S Q, Yang P, Xia J, et al. Research and Analysis of Ecological Environment Quality in the Middle Reaches of the Yangtze River Basin Between 2000 and 2019[J]. Remote Sensing,2021,13(21):4 475

[12] Li N, Wang J. Comprehensive Eco-environment Quality Index Model with Spatio-temporal Characteristics[J]. Sensors,2022,22(24):9 635

[13] 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):7 853-7 862

[14] Wang D C,Chen X,Sun Z C,et al. Monitoring of Changes in the Ecological Index of Long-time Sequence Remote Sensing in Golmud,Qinghai Province[J]. ACTA Ecological Sinica,2022,42(14):5 922-5 933

[15] Boori M S,Choudhary K,Paringer R,et al. Spatio-temporal Ecological Vulnerability Analysis with Statistical Correlation Based on Satellite Remote Sensing in Samara, Russia[J]. Journal of Environmental Management,2021,285:112 138

[16] Zhu D,Zhou C,Zhu Y,et al. Monitoring of Supraglacial Lake Distribution and Full-year Changes Using Multisource Time-series Satellite Imagery[J]. Remote Sensing,2023, 15(24):5 726

[17] 李永帅,齐修东. 基于Google Earth Engine三江平原水田提取研究[J]. 地理空间信息,2021,19(12):77-80

[18] Wang M, Lu H, Chen B, et al. Fine-scale Analysis of the Long-term Urban Thermal Environment in Shanghai Using Google Earth Engine[J]. Remote Sensing, 2023, 15(15): 3 732

[19] Yang P,Zhang X X, Hua L Z. Analysis of Urban Ecological Quality Spatial Patterns and Influencing Factors Based on Remote Sensing Ecological Indices nd Multi-scale Geographically Weighted Regression[J]. Sustainability , 2023, 15(9):7 216

[20] Sun C,Li J,Liu Y,et al. Ecological Quality Assessment and Monitoring Using a Time-series Remote Sensing-based Ecological Index (TS-RSEI) [J]. GIScience and Remote Sensing,2022,59(1):1 793-1 816

[21] 卫鸿飞,张唯,吉宸佳,等. 基于GEE的阿拉善左旗植被时空变化特征及驱动因子分析[J]. 地理空间信息,2024,22(2): 55-60

[22] 薛在坡,李希来,张红林,等. 黄河源玛多县3种类型湿地面积动态研究[J]. 青海大学学报(自然科学版),2015,33(3):45-51

[23] Ma W,Bai L,Ma W,et al. Interannual and Monthly Variability of Typical Inland Lakes on the Tibetan Plateau Located in Three Different Climatic Zones[J]. Remote Sensing , 2022, 14(19):5 015

[24] 杨应增,周来丰,夏伟,等. 基于遥感生态指数的贵安新区生态质量变化分析[J]. 地理空间信息,2023,21(7):65-70

[25] An M,Xie P,He W,et al. Spatio-temporal Change of Ecologic Environment Quality and Human Interaction Factors in Three Gorges Ecologic Economic Corridor, Based on RSEI[J]. Ecological Indicators,2022,141:109 090

[26] 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):2 963-2 972

[27] Zhang K L,Feng R R,Zheng Z C,et al. Exploring the Driving Factors of Remote Sensing Ecological Index Changes from the Perspective of Geospatial Differentiation: A Case Study of the Weihe River Basin, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(17):10 930

[28] 生态环境状况评价技术规范(试行):HJ/T 192-2006[S].

[29] Ashok A,Rani H P,Jayakumar K V. Monitoring of Dynamic Wetland Changes Using NDVI and NDWI Based Landsat Imagery[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment,2021,23:100 547

[30] 闾利,张廷斌,易桂花,等. 2000年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系[J]. 湖泊科学,2019,31(2): 573-589