



王一山, 刘龙浩, 魏宸博, 梁洁, 鞠正山, 徐艳. 典型干旱区区域生态环境质量时空特征分析: 以塔里木河流域“四源一干”区域为例[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(02): 242-254.

WANG Yishan, LIU Longhao, WEI Chenbo, LIANG Jie, JU Zhengshan, XU Yan. Temporal and spatial characteristics of the ecological environment quality in the typical arid zone: A case study on the “Four sources and one stem” region of the Tarim River Basin[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(02): 242-254.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.02.21

典型干旱区区域生态环境质量时空特征分析: 以塔里木河流域 “四源一干”区域为例

王一山¹ 刘龙浩¹ 魏宸博¹ 梁洁^{1,2} 鞠正山³ 徐艳^{1*}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193;

2. 内蒙古自治区自然资源厅, 呼和浩特 010110;

3. 自然资源部 国土整治中心, 北京 100035)

摘要 为挖掘干旱区典型区域生态环境质量时空演化的时空特征, 剖析该区域生态环境演化的驱动机制, 研究以塔里木河“四源一干”(阿克苏河, 叶尔羌河, 开—孔河, 和田河及塔里木河干流区域)区域为研究对象, 以GEE平台(Google Earth Engine, GEE)为载体, 利用遥感生态质量指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)模型对“四源一干”区域2000—2020年生态环境质量开展综合评估, 运用地理探测器模型探究气温、降水、灯光、人口等关键控制因子的驱动机制。结果表明: 1) 2000—2020年, “四源一干”区域生态环境质量总体呈现出波动缓慢上升趋势, 空间分布总体呈现出西高东低的分布格局, 生态环境显著改善的区域集中在塔里木河干流区域; 2) RSEI分级评价结果发现“四源一干”区域生态环境质量等级为差与较差的面积之和常年>50%, 呈现出典型的干旱区特征, 生态环境质量改善的等级主要集中在较好和中等2个等级区域, 这2个区域河流支流较多, 土地利用类型多为耕地与林地, 植被覆盖较高, 湿度高, 先天生态环境本底条件较好; 3) 地理探测器的结果显示年均气温和DEM是对该区域生态环境质量影响最大的自然因素, 人为因素对区域生态环境质量变化的总体影响并不显著, “四源一干”区域的生态环境质量变化受自然影响更为深刻。本研究可为干旱区生态环境保护策略制定及可持续发展规划提供科学依据。

关键词 干旱区; 遥感; 生态环境质量; 驱动机制分析; 塔里木河

中图分类号 F301.2; X87

文章编号 1007-4333(2025)02-0242-13

文献标志码 A

Temporal and spatial characteristics of the ecological environment quality in the typical arid zone: A case study on the “Four sources and one stem” region of the Tarim River Basin

WANG Yishan¹, LIU Longhao¹, WEI Chenbo¹, LIANG Jie^{1,2}, JU Zhengshan³, XU Yan^{1*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Department of Natural Resources, Hohhot 010110, China;

3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0200)

第一作者: 王一山(ORCID: 0009-0001-6845-7395), 博士研究生, E-mail: wangishan639@163.com

通讯作者: 徐艳(ORCID: 0000-0003-4573-270X), 副教授, 主要从事土地可持续利用研究, E-mail: xyan@cau.edu.cn

Abstract To explore the typical characteristics of the spatial and temporal evolution of the ecological environment quality in typical arid zone areas, and to analyze the driving mechanism of the ecological environment evolution in this region, the study takes the four sources and one trunk of the Tarim River (the Aksu River, the Yarkant River, the Kaidu-Peacock River, the Hoten River and the mainstream of the Tarim River) as the research object, and uses the RSEI (Remote Sensing Ecological Index, RSEI) model as basic methods. Google Earth Engine platform (GEE) is used as the carrier to carry out a comprehensive assessment of the ecological quality of the ‘Four sources and one stem’ area from 2000 to 2020 by using the RSEI model. The geographical detectors model is adopted to explore the driving mechanisms of key control factors such as temperature, precipitation, light, and population. The results show that: 1) From 2000 to 2020, the ecological quality of the ‘Four sources and one stem’ region generally shows a fluctuating and slowly increasing trend, and the spatial distribution shows a distribution pattern of high in the west and low in the east, and the areas with significant improvement in the ecological environment are centered in the mainstream of the Tarim River. 2) The results of RSEI evaluation discovered that the area of the ecological environment quality poor and poorer grades in the ‘Four sources and one stem’ region are more than 50% all year round, which shows the typical characteristics of arid zones. The grades of ecological environment quality improvement are mainly concentrated in the areas of better and medium grades, which have more river tributaries, and the land use types are mostly cropland and forest land types are mostly arable land and forest land, with higher vegetation cover, high humidity, and better innate ecological environment local conditions. 3) The results of the geographical detector show that the average annual temperature and DEM are the natural factors that have the greatest influence on the ecological quality of the region. The overall influence of anthropogenic factors on the changes in the regional ecological quality is non-significant, and the changes in the ecological quality of the four sources and one dry region are more profoundly influenced by nature. This study can provide scientific support for the policy formulation of ecological environmental protection strategies and sustainable development planning in the typical arid zone.

Keywords arid zone; remote sensing; ecological environment quality; driving mechanism analysis; Tarim River basin

干旱区具有生态资源贫瘠、生态条件恶劣、生态环境脆弱等基本特征,然而,有超过30%的世界总人口生活在干旱区域,特别是聚集在干旱地区中狭窄、零星的绿洲地带^[1]。工业革命以来,人口数量的急速增长和人类活动的持续加剧,促使干旱区面临的生态环境压力愈发严峻,由此引发的生态风险和人道主义灾难严重制约了人类社会的可持续发展^[2]。因此,开展对干旱区生态环境质量变化的动态监测及归因探索尤为重要。

近年来,随着遥感信息技术的发展,借助遥感反演实现生态环境演化的动态监测已经越来越普遍,遥感技术能够突破传统地面调查实施难度大,获取数据周期长,完整性有限等诸多限制,实现高质量、长时序的动态监测^[3-5]。同时伴随对光谱特征、图像机理研究的不断深入,一系列遥感模型被构造出来反演生态环境要素的变化,比如归一化差异不透水面指数(Normalized Difference Impervious

Surface Index, NDISI)^[6];增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)^[7];归一化差异湿度指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)^[8];土壤调整植被指数(Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI)^[9]等。其中,最为经典的便是由徐涵秋^[10]提出的遥感生态指数模型(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)。RSEI模型具有权重客观、结果可视的突出特点,该模型利用绿度、干旱度、热度、湿度这4个环境指标构建综合指数,通过主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)确定各指标权重,能够有效规避生态环境评估过程中的主观性,提高生态环境评估过程的效率和质量,得到了广泛应用^[11-12]。特别是RSEI与谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)联动使用后,能够快速、批量、实时地开展遥感生态指数的动态监测,克服了以往遥感生态指数评估中的尺度、影像质量、工作量巨大等局

限性,在生态环境监测领域得到广泛应用^[13]。宗慧琳等^[14]利用 GEE 与 RSEI 模型完成了对小江流域生态环境质量时空演化的趋势分析;余慧婕等^[15]基于遥感生态指数和 GEE 平台对淮河流域 2002~2022 年的生态质量时空变化进行评价;张静等^[16]基于 GEE 和改进的 RSEI 模型对西安市生态环境质量开展了动态监测;傅楷翔等^[17]基于改进遥感生态指数开展了新疆吐哈盆地生态环境质量及驱动机制分析。“四源一干”区域属于干旱区典型内陆河流“塔里木河”的核心子流域,地处塔里木盆地生态核心带,承载区域重要生态功能,在维持生境、保育物种多样性等方面发挥关键作用^[19-20]。该区域也是人类活动密集强烈,人地矛盾极为严峻区域,区域生态环境质量变化与自然环境相互作用,深刻影响着该区域的可持续发展以及区域环境、经济政策的谋划和制定。然而,现有研究针对塔里木河流域“四源一干”区域的研究主要集中在环境效益评价^[21]、水资源承载^[22]、流域综合治理^[23]等领域,还没有建立快速、直接地对生态环境质量变化实现动态监测和有效判断的体系。因此,为挖掘干旱区典型区域生态环境质量时空演化的规律,剖析该区域生态环境演化的驱动机制,研究以塔里木河“四源一干”区域为研究对象,以 GEE 平台(Google Earth Engine, GEE)为载体,利用遥感生态指数模型对

“四源一干”区域 2000—2020 年生态环境质量开展综合评估,并运用地理探测器模型探究气温、降水、灯光、人口等关键控制因子的驱动机制,以期实现为该区域生态环境保护策略制定及可持续发展规划提供科学支持,并验证 RSEI 模型监测该区域生态环境质量变化的效果,为后续该区域构建生态环境监测技术方案提供案例支持。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

塔里木河流域位于干旱区半干旱区的典型区域新疆南部,干流区域及与其关联的 4 条河流(阿克苏河,叶尔羌河,开一孔河,和田河)共同形成了“四源一干”的空间格局(71°39′~93°45′E,34°20′~43°39′N),面积 23.62 万 km²。“四源一干”区域属于典型温带沙漠性气候,极端干旱、降水稀少且不均匀,蒸发量大,地下水位较低,其生态环境质量对整个流域自然环境起着决定性影响^[20]。截至 2020 年,“四源一干”区域人口总量已超过 1 132 万人,在狭长的荒漠—绿洲过渡地带存在密集的人类活动,持续扩大的农业生产规模,长期过载的能源消耗以及高强度的水资源利用,带来了一系列环境问题,严重制约着该区域“社会—生态”系统的可持续发展。

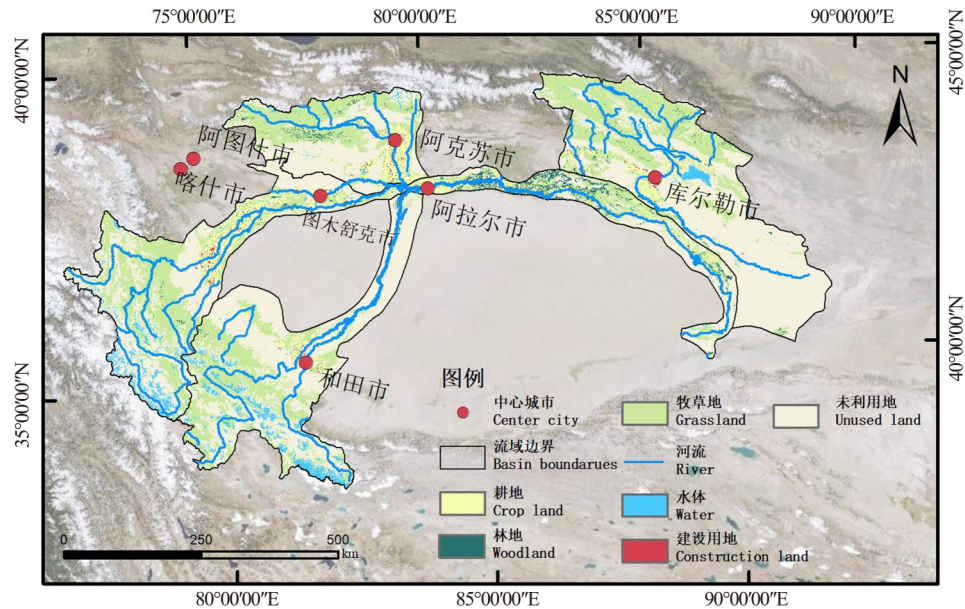


图 1 研究区概况图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据及其预处理

利用 GEE 平台根据研究区的范围生成 2000—2020 年 6—9 月（生长季）经过去云处理的 MOD13A1、MOD11A2 和 MOD09A1 数据，将数据统一分辨率及坐标系后，通过归一化水体指数（MNDWI）进行水体掩膜以规避水域对于

RSEI 主成分分析中湿度指标的干扰，最后再进行遥感生态指数（RSEI）的构建。

除此之外，以 10 年为时间节点确定时间间隔，收集了 2000、2010、2020 年 3 个年份的土地利用数据、灯光数据、高程等相关数据，详见表 1。

表 1 数据来源
Table 1 General status of data

数据名称 Data name	分辨率 Resolution	来源 Source
土地利用数据 Land use data	30 m	REDGP (http://www.resdc.cn)
降水数据 Precipitation data	1 km	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
夜间灯光数据 Nighttime light data	1 km	NASA (http://reverb.echo.nasa.gov)
气温数据 Temperature data	1 km	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
路网数据 Road network data	1 km	OSM (http://www.openstreetmap.org)
人口密度数据 Population density data	1 km	ORNL (https://www.satpalda.com)
净初级生产力数据 Net primary productivity data	1 km	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
国家行政边界数据 State administrative boundary data	1:1 000 000	NGCC (https://www.tianditu.gov.cn)

考虑到基础数据的特点和可计算性，结合研究区域的实际情况，对所有数据进行重新采样并转换成 1 km×1 km 的栅格。

2 研究方法

2.1 遥感生态指数模型的构建

2.1.1 遥感生态指数计算

遥感生态指数（RSEI）由人类感知最为直接的四个环境因子构造而成，分别是绿度、湿度、干旱度、热度，由遥感反演指数 NDVI（归一化植被指数）、WET（湿度指数）、NDBSI（归一化裸土指数）、LST（陆地地表温度）表征，指数反演的具体公式可见参考文献[5]和[10]。具体计算公式如下：

$RSEI = f(NDVI, WET, NDBSI, LST)$ (1)

该方法通过指标自身对 RSEI 的贡献度和数据

自身信息熵值确定指标权重，能够有效规避人为划定权重的主观干扰，得到了广泛应用^[25]。

2.1.2 主成分分析

主成分分析是用来解决多元共线性问题的一种经典统计学分析方法，能够通过正交变换将一组可能存在关联的变量进行降维处理，从而消除变量间的多元共线性^[26]。在 RSEI 模型构建中，研究利用 GEE 平台对 RSEI 涉及的 4 类遥感指数进行了主成分分析，得到各主成分参数^[10]。在第一主成分（PC1）的基础上，构建指数权重。具体计算公式如下：

$RSEI_0 = 1 - PC1$ (2)

式中：RSEI₀ 为初始遥感生态指数；PC1 为第一主成分分量^[14,16]。为了实现 RSEI 的综合比较，对 RSEI₀ 进行归一化处理，使其值域为 [0, 1]，计算得到

RSEI。其中：RSEI值越高，表征生态环境质量越好；RSEI值越低，表征生态环境质量越差。

2.1.3 Mann-Kendall趋势检验和 Sen’s斜率估计

Mann-Kendall(M-K)检验是一种用来识别时间序列数据趋势的非参数统计检验方法^[27]。当使用M-K检验来评估遥感生态指数(RSEI)变化趋势的时候,分别在置信水平 $P=0.01$ 和 $P=0.05$ 下,判断RSEI的显著性,同时借助Sen’s斜率对趋势性大小及方向进行判断,具体计算方式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times V_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n V_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (3)$$

式中:Slope为回归方程的斜率; n 为研究时间段年数; V_i 为第 i 年RSEI像元值。当 $\text{Slope}>0$,则表示研究期内RSEI值增加; $\text{Slope}<0$,则表示研究期内RSEI值减少。其中,Slope越大,则RSEI值在研究时段内变化越大,反之表示变化越小^[17]。综合斜率和置信区间将RSEI趋势变化结果分为5类,详见表2。

2.2 RSEI变化的驱动机制分析

结合研究区的环境特质和已有研究结果^[17-18],本研究选取年均气温、年均降水、NPP、DEM、坡度5个自然因子,人口密度、土地利用/覆被、灯光亮度3个人为因子,采用地理探测器模型进行驱动机制分析。

表2 回归方程的斜率变化分类

Table 2 Classification of the change in slope of the regression equation

划分范围 Scope of delimitation	等级 Level
Slope<0, $P\leq 0.01$	极显著减少
Slope<0, $0.01<P\leq 0.05$	显著减少
Slope<0, $P>0.05$ 或Slope>0, $P>0.05$	稳定不变
Slope>0, $0.01<P\leq 0.05$	显著增加
Slope>0, $P\leq 0.01$	极显著增加

2.2.1 单因子探测

地理探测器中的因子探测模块,表征单一控制因子对遥感生态指数(RSEI)的影响作用大小^[28]。具体计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2 \quad (4)$$

式中: q 为某因子对RSEI的影响作用大小,值域为 $[0,1]$; L 为变量或因子的分类层数; N_h 和 N 分别为分类层和整个研究区域评价单元数; δ_h^2 和 δ^2 分别为分类层和整个研究区因变量的方差。

2.2.2 交互因子探测

地理探测器同样能够识别不同因素之间的交互影响作用大小^[28]。通过计算 $q(x_1 \cap x_2)$ 识别因子 x_1 和 x_2 联合作用对因变量 Y 的作用关系及其相互独立性,具体判别依据如表3所示:

表3 交互作用探测

Table 3 Interaction detection

判断依据 Basis of judgement	交互作用 Interaction
$q(x_1 \cap x_2) < \min[q(x_1), q(x_2)]$	非线性减弱
$\min[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < \max[q(x_1), q(x_2)]$	单因子非线性减弱
$q(x_1 \cap x_2) > \max[q(x_1), q(x_2)]$	双因子增强
$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$	独立
$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$	非线性增强

2.2.3 风险因子探测

地理探测器的风险探测用于检验不同子区域

间的属性均值是否存在显著差异性^[28],通过 t 统计量进行检验。

3 结果与分析

3.1 各评价指标反演结果

3.1.1 RSEI的时空演化

2000—2020年共21个年度的塔里木河流域“四源一干”区域RSEI均值分布如图2所示。可见研究期内,2002年RSEI均值最低,2013年RSEI均值最高,“四源一干”区域的生态环境质量呈现波动缓慢上升趋势。选取其中2000年、2010年和2020年作为关

键时间节点来比较“四源一干”区域的生态环境质量的空间分异,结果如图3所示。可见“四源一干”区域RSEI的高值区域主要分布在流域的边缘,聚集在山体附近,RSEI低值区域主要分布在中部和东南部的塔里木河干流区域。这是由于边缘山地区域海拔较高,气候相对湿润,分布着较为广泛的森林草地,受人类干扰活动作用弱。相反,干流区域位于沙漠腹地,气候干燥,同时绿洲沿河流紧密环绕,植被覆盖稀疏,同时聚集着大量人口,人为干扰作用较强。

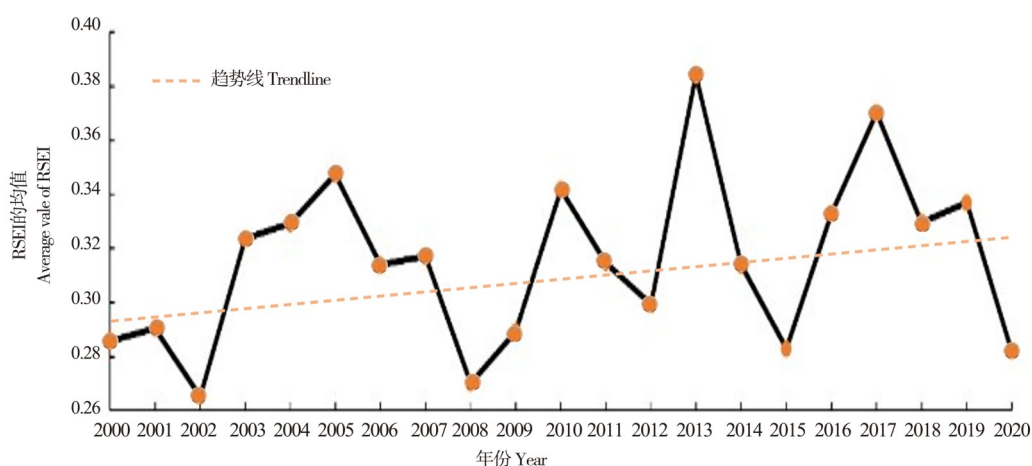


图2 2000—2020年“四源一干”区域RSEI的时序变化

Fig. 2 Temporal changes in RSEI in the ‘Four sources and one stem’ region from 2000 to 2020

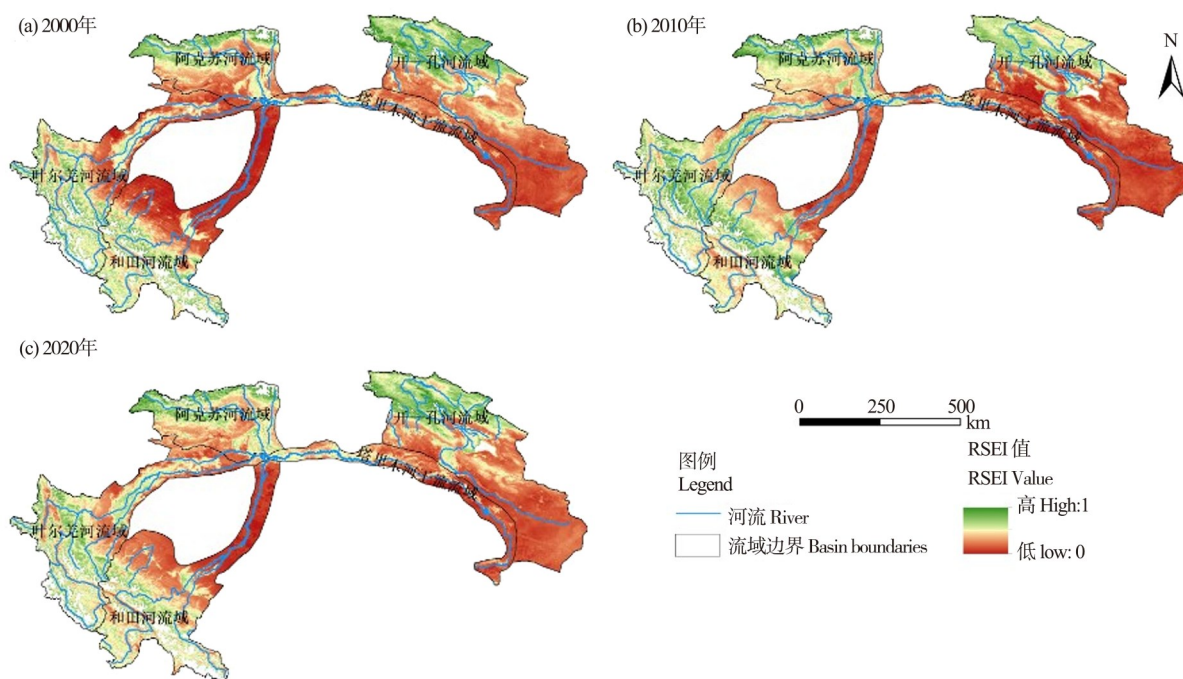


图3 2000、2010以及2020年“四源一干”区域RSEI的空间分异比较

Fig. 3 Comparison of spatial variability of RSEI in the ‘Four sources and one stem’ region in 2000, 2010 and 2020

3.1.2 主成分分析

对“四源一干”区域2000年、2010年和2020年的NDVI、LST、Wet和NDBSI进行主成分分析,得到各主成分分量、特征值和贡献率如表4所示。可知,2000年,2010年和2020年的第一主成分PC1特征贡献率分别为62.52%、57.88%和61.9%,已最

大限度集合4个指标的信息。在3个关键时间节点上,代表环境质量好的绿度(NDVI)、湿度(Wet)对应的特征向量均为正值,而代表环境质量差的干度(NDBSI)、热度(LST)对应的特征向量则为负值,说明绿度和湿度对生态环境起着促进作用,干度、热度对生态环境起着抑制作用。

表4 2000、2010以及2020年各主成分的特征量的贡献率比较

Table 4 Comparison of the contribution of eigenvalues of each principal component in 2000, 2010 and 2020					
年份 Year	指标 Indicator	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4
2000	NDVI	0.221 094 277	−0.972 956 124	0.035 303 289	−0.056 810 029
	LST	−0.938 174 758	−0.198 854 114	0.272 995 257	−0.075 886 454
	WET	0.255 088 575	0.11 653 313	0.825 254 277	−0.49 020 937
	NDBSI	−0.076 650 261	0.015 279 132	−0.493 135 524	−0.866 434 441
	特征值 Eigenvalue	0.026 290 484	0.010 248 909	0.004 840 309	0.000669 107
	贡献率/% Contribution rate	62.52	24.37	11.51	1.59
2010	NDVI	0.376 903 117	−0.898 721 466	−0.178 466 535	0.135 622 499
	LST	−0.8 758 682	−0.408 761 893	0.250 488 467	0.054 992 172
	WET	0.228 876 434	0.045 889 831	0.73 556 423	0.635 967 739
	NDBSI	−0.195 996 211	0.152 011 725	−0.603 614 518	0.757 711 973
	特征值 Eigenvalue	0.03 344 969	0.0179 156	0.005 751 673	0.000 677 543
	贡献率/% Contribution rate	57.88	31.00	9.95	1.17
2020	NDVI	0.349 226 411	−0.93 061 541	0.104 453 395	−0.032 944 818
	LST	−0.876 870 749	−0.363 598 845	−0.313 871 582	−0.01 944 736
	WET	0.328 932 148	0.022 064 191	−0.937 717 683	−0.109 555 282
	NDBSI	−0.030 696 009	0.035 552 932	0.106 111 567	−0.993 244 219
	特征值 Eigenvalue	0.017 472 002	0.007 821 599	0.002 894 276	0.000 038 498
	贡献率/% Contribution rate	61.90	27.71	10.25	0.14

3.1.3 Mann-Kendall 趋势检验及 Sen’s 斜率估计

利用M-K趋势检验和Sen’s斜率估计分析塔里木河流域“四源一干”区域的RSEI变化情况,结果如图4所示。在2000—2020年,极显著改善的区域面积为11 912.14 km²,占研究区总面积的3.84%,主要分布在塔里木河干流区域;显著改善的区域面积为12 740.51 km²,占研究区总面积的4.11%,主要分布在塔里木河干流区域及阿克苏河

流域中部和开—孔河流域南部;显著退化和极显著退化区域的面积都较少,都未超过300 km²,所占比例也均<0.1%。由此可以看出整个研究区的RSEI呈现出改善趋势,一方面可能是因为气候条件发生了一定变化,同时伴随近年来该地区人类对生态环境的重视和保护,一系列生态保护措施得到实施,有效增加了局部区域植被覆盖,对生态环境持续向好发挥了积极作用。

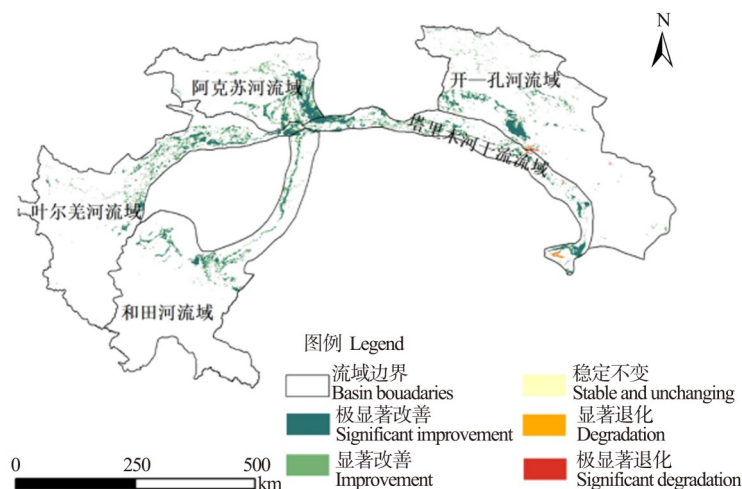


图4 2000—2020年“四源一干”区域RSEI变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of trends in RSEI in the ‘Four sources and one stem’ region from 2000 to 2020

3.2 “四源一干”区域生态环境质量动态变化

3.2.1 生态质量等级变化

为了定量评估“四源一干”区域生态环境质量变化,利用自然断点法对RSEI进行等级划分,将“四源一干”区域生态环境质量划分为差、较差、中等、较好和好后共5个等级,结果如图5所示。可知:“四源一干”

区域生态环境质量的分布整体呈现出西高东低的空间格局,等级为差和较差的区域主要分布在和田河流域、塔里木河干流流域和开—孔河流域,这些区域由于靠近库木塔格沙漠和塔克拉玛干沙漠,多为稀疏植被和沙漠,生态环境质量较差;等级为较好与好的区域大多分布在叶尔羌河流域和阿克苏河流域东部地

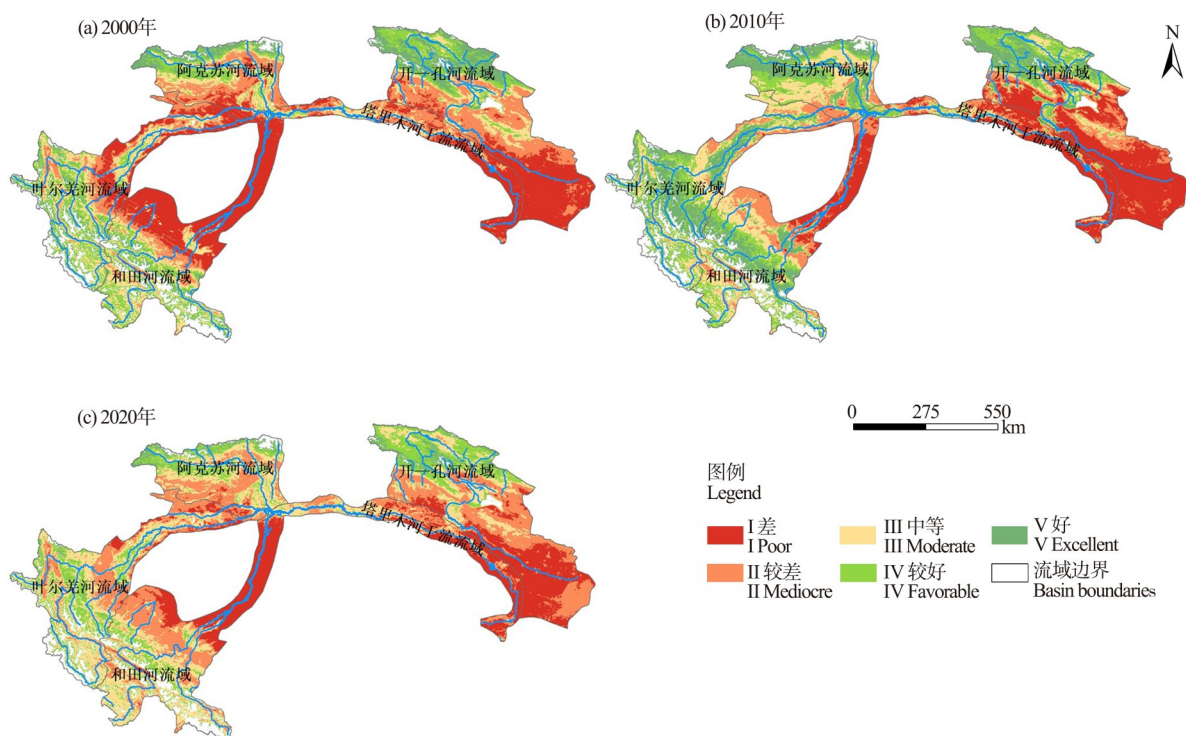


图5 2000、2010以及2020年“四源一干”区域生态环境质量级别分布图

Fig. 5 Distribution of ecological and environmental quality levels in the ‘Four sources and one stem’ region in 2000, 2010 and 2020

区,这些区域由于河流支流较多,土地利用类型多为耕地与林地,植被覆盖较高,湿度高,生态环境质量较好。

“四源一干”区域各年份不同生态环境质量等级面积统计如表5所示。可知“四源一干”区域质量为差与较差的面积之和常年均>50%,整体质量水平一般。其中:质量等级为好的区域面积所占比例呈现先增后减的趋势,其中2010年所占比例达到19.27%,超过同年质量为较差的面积,到2020年却减少到了2.84%,变化剧烈;质量为较好的面积也呈现出先增后减的趋势,但是其变化幅度没有质量为好的剧烈;质量为中等的面积超过20%,且其面积所占比例由

21.22%增加到2020年的29.32%;质量为较差和差在3个年份面积所占比例均较高,其中质量为较差的面积先减少后增加,且2020年的面积所占比例远高于2000年,达到了31.75%。质量为差的面积呈现逐渐减少趋势,从2000年的28.91%减少到2020年的20.17%。整个研究时段“四源一干”区域生态环境质量表现为先好转再恶化的趋势,这可能是由于2000年后塔里木河流域降水逐渐增多促进了研究区的湿度提高,各项生态修复工程措施的实施使得绿度变高,从而改善了生态环境。2010年以后人类活动强度增加等行为造成研究区域的绿度的降低和干度的提高,从而导致研究区的生态环境退化。

表5 “四源一干”区域生态环境不同质量级别面积变化和所占比例的比较

Table 5 Comparison of changes in the area and proportion of different qualities of the ecosystem in the ‘Four sources and one stem’ region

年份 Year	I级 差 I Poor		II级 较差 II Mediocre		III级 中等 III Moderate		IV级 较好 IV Favorable		V级 好 V Excellent	
	面积/km ² Area	所占比例/% Percentage	面积/km ² Area	所占比例/% Percentage	面积/km ² Area	所占比例/% Percentage	面积/km ² Area	所占比例/% Percentage	面积/km ² Area	所占比例/% Percentage
2000年	89 780.70	28.91%	75 092.36	24.18%	65 909.37	21.22%	51 855.03	16.70%	27 956.22	9.00%
	—18 577.80		—25 183.70		—2 707.88		14 564.42		31 904.97	
2010年	71 202.90	22.92%	49 908.64	16.07%	63 201.49	20.35%	66 419.45	21.38%	59 861.19	19.27%
	—8 541.96		48 717.76		28 499.35		—17 649.70		—51 025.50	
2020年	62 660.94	20.17%	98 626.40	31.75%	91 700.85	29.52%	48 769.79	15.70%	8 835.70	2.84%
总变化 Total change	—27 119.80		23 534.04		25 791.48		—3 085.24		—19 120.5	

3.2.2 不同子流域RSEI的比较分析

“四源一干”区域2000年、2010年、2020年各流域的RSEI平均值如图6所示。可知:阿克苏流域和叶尔羌河流域的生态环境质量整体较好,在2020年分别达到了0.351和0.319;和田河流域、塔里木河干流流域和开—孔河流域的生态环境质量整体较差,在2020年分别为0.252、0.281和0.272。阿克苏流域、和田河流域和叶尔羌河流域的平均RESI表现为先增加后减少的波动变化趋势,表明其三者的生态环境质量呈现出先好转后恶化的趋势,主要是由于近些年来各项生态修复工程措施的实施促进区域植被覆盖度变高,绿度变高,但同时人类活动的持续加剧导致大量牧草地转换为耕地,引起RSEI的变化。而塔里木河干流流域和开—孔河流

域的RSEI平均值表现较为稳定,主要是由于这2个流域紧邻库木塔格沙漠和塔克拉玛干沙漠,植被稀疏,沙漠和裸地较多,植被覆盖度低,先天自然禀赋条件较差,人为干扰弱。

3.3 RSEI变化的驱动机制

利用地理探测器计算的“四源一干”区域的驱动因子 q 值,结果如表6所示。可知,在所有驱动因子中,年均气温和DEM的多年 q 值均高于其他因子。其中:在2000年,年均气温对RSEI变化的驱动力最大,排序为1;在2010年和2020年,DEM的 q 值排序第一,对RSEI变化的驱动力最大,年均气温的 q 值排序第二,对RSEI的变化的驱动力较大。人为因子中,人口密度、土地利用变化和夜间灯光强度的多年 q 值排序分别为6、7和8,说明人口密度、土地利用变化和夜间灯

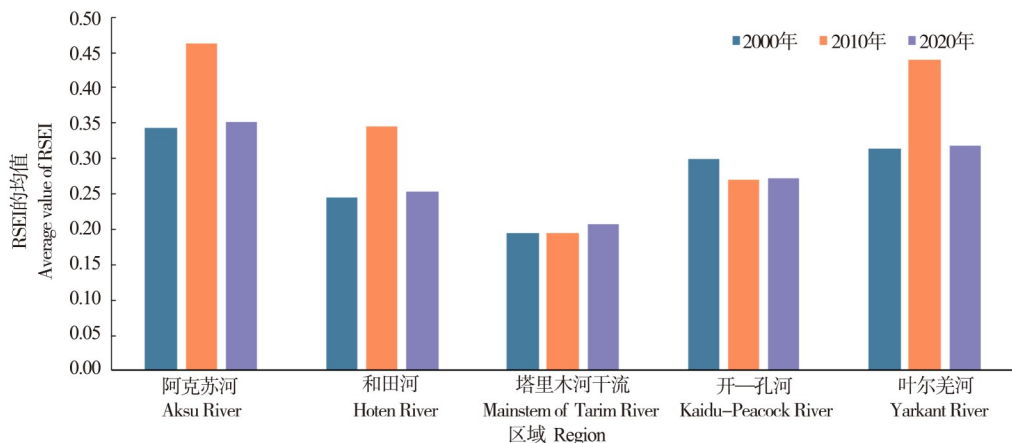


图 6 “四源一干”各子流域生态环境质量平均值

Fig. 6 Ecological and environmental quality of sub-basins of the ‘Four sources and one stem’ and averages value of RSEI.

表 6 驱动因子的 q 值及排序Table 6 q -values and ranking of drivers

驱动因子 Driver	2000 年		2010 年		2020 年	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
	q -value	Rank	q -value	Rank	q -value	Rank
年均气温 Temperatures	0.671 249	1	0.241 099	2	0.24 105	2
净初级生产力 NPP	0.434 293	3	0.117 529	3	0.132 909	3
高程 DEM	0.589 385	2	0.377 449	1	0.378 496	1
土地利用/覆被 LUCC	0.220 224	7	0.061 918	7	0.062 344	7
夜间灯光 Nighttime light	0.003 347	8	0.004 979	8	0.004 972	8
人口密度 Population	0.233 035	6	0.095 505	6	0.098 035	6
年均降水 Precipitation	0.300 787	5	0.150 202	5	0.14 911	5
坡度 Slope	0.317 669	4	0.171 239	4	0.17 242	4

光强度对“四源一干”区域的 RSEI 变化驱动力不够。在 3 个典型年份中大多数驱动因子的驱动力作用排序保持不变,只有年均气温和 DEM 的驱动力排序发生了细微变化。由此可以看出,20 年间,“四源一干”区域的 RSEI 变化受当地自然因素的影响高于人为因素,这是由于“四源一干”区域位于干旱半干旱地区,植被稀疏,人类活动对生态环境的扰动影响较弱,生态环境质量主要由当地的气候条件和地形条件决定。

RSEI 的交互探测结果表明:所有交互探测结果

都是双因子或非线性增强 2 种交互作用类型,与单因子相比,双因子作用对研究区的 RSEI 变化具有更强的影响。3 个典型年份中交互作用最强的驱动力分别是:年均气温 $\cap$ DEM (2000 年, 0.736 9)、DEM $\cap$ 土地利用变化 (2010 年, 0.454 9; 2020 年, 0.450 4)。总体而言,研究区生态环境质量的驱动因子并非独立作用或者简单堆叠,而且是由多个因子交互作用。DEM $\cap$ 土地利用变化在 3 个典型年份中均呈现出非线性增强的协同作用,表明以 DEM

为代表的地形条件在不同的人为活动背景下,尤其是在不同土地利用方式下,对RSEI变化的驱动力更为明显。

RSEI的风险区探测结果表明:极显著改善的区域主要位于塔里木河干流区域,就自然因子而言,主要分布在高程范围为818~3 628 m,坡度范围为 $0\sim 7.22^\circ$,气温范围为 $11.60\sim 13.65^\circ\text{C}$,降水范围为 $13.10\sim 80.16\text{ mm}$ 的区域。就人为因子而言,极显著改善的区域主要分布在人口密度范围在 $0\sim 2\,611\text{ 人}/\text{km}^2$,夜间灯光亮度范围为 $0\sim 51$,土地利用方式多为林地的区域。由此可以发现,RSEI极显著改善的区域,即生态环境质量逐渐改善的区域,主要分布在地形部位良好,气候条件适宜,人为扰动较弱的地方。RSEI极显著退化的区域主要位于开—孔河流域南部,就自然因子而言,主要分布在高程范围为 $787\sim 5\,865\text{ m}$,坡度范围为 $0\sim 61.83^\circ$,气温范围为 $-8.69\sim 14.36^\circ\text{C}$,降水量范围为 $7.10\sim 391.26\text{ mm}$ 的区域。就人为因子而言,RSEI极显著退化的区域主要分布在人口密度范围在 $0\sim 5\,391\text{ 人}/\text{km}^2$,夜间灯光亮度范围为 $0\sim 150$,土地利用方式多为耕地的区域。通过比较可见,RSEI极显著退化的区域,即生态环境质量逐渐恶化的区域,主要分布在地形条件较差,气候条件变化剧烈,人为扰动较强的区域。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究基于GEE平台和RSEI指数模型,实现了完全依赖于遥感信息的生态环境质量监测,与傅楷翔^[17]、周玄德等^[18]的研究形成了相互印证。从时间尺度上看,得益于该区域稳定的气候环境,宏观上生态环境质量的变化并不显著,人类活动对环境的干扰尚处于可控阶段,尽管过去该地区密集的农业活动对植被覆盖造成了一定的损害,但伴随一系列生态环境治理工程的实施,生态环境的恶化得到了有效遏制,生态环境改善的区域达到总体的7.95%,这有效提升了该地区后续资源环境和开发利用的信心,也为后续开发利用活动明确了范围;从空间尺度上看,深入到局部区域,干流核心区域的生态环境质量呈现一定下降趋势,人口聚集区的环境变化相对明显,潜在的生态风险仍然存在。因此,在制定未来开发利用具体策略时,需要持续强

化对重点生态脆弱地区的保护,特别是干流区域发挥重要生态功能的生态林保护,以期实现生态环境质量的继续向好。

基于遥感反演的RSEI模型能够有效弥补传统统计调查的缺陷,实现低成本、高质量、全覆盖的全天候生态环境动态监测^[24,29]。值得关注的是,相较于传统的遥感监测方法,RSEI在应对不同地理环境生态监测时灵活的权重分配机制能够客观、科学地反映指标影响,具有极强的鲁棒性优势^[31],特别是与GEE平台的结合,能够快速高效地调用历史数据并开展分析,并依据区域环境特征的差异快速调整适配^[32],在干旱区具备广阔的应用前景。但基于遥感信息反演的生态环境评估也存在一定的局限,一是RSEI所有的遥感信息特征仅能反映地表情况,无法反演研究区的地下水资源和大气环境特征,二是在对半干旱或干旱地区实施生态监测时,由于干旱区绿洲与城区分布相对零散,干度指标的代表性受到一定削弱,往往需要添加其他指数进行辅助判断^[30]。因此,在未来生态环境监测体系搭建时,应当结合研究区环境地理特征,增加具有代表性特征的环境指标纳入模型构建体系参与辅助决策,以实现更为科学精准的评价结果。

4.2 结论

研究通过GEE平台和RSEI指数模型,对2000—2020年塔里木河“四源—干”区域生态环境质量变化实现了动态监测,并利用地理探测器模型剖析了影响该区域生态环境质量变化的驱动机制,得出结论如下:

1)塔里木河流域“四源—干”区域生态环境质量呈现缓慢上升的变化趋势,质量等级较高的区域围绕河流逐渐向四周扩散,质量等级为差与较差的面积之和和常年 $>50\%$,生态环境质量改善的区域主要集中分布于林地和湿地的核心区域,呈现出典型的干旱区特点;

2)年均气温和DEM是对该区域生态环境质量影响最大的自然因素,人为因素对区域生态环境质量变化的总体影响并不显著,研究区的生态环境质量变化呈现出非线性增强的协同作用,多因素交互作用的影响更为显著;

3)RSEI模型在该区域具备良好的适用性,能够快速、准确地实现对生态环境质量的动态监测,特别是与GEE平台的结合,为后续该地区构建生态环

境监测技术方案提供了有力的技术支持,具有广阔应用前景。

参考文献 References

- [1] Schlaepfer D R, Bradford J B, Lauenroth W K, Munson S M, Tietjen B, Hall S A, Wilson S D, Duniway M C, Jia G S, Pyke D A, Lkhagva A, Jamiyansharav K. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14196
- [2] 于晓晶, 张丽霞, 周天军, 张星. 干旱事件对全球干旱区生态系统胁迫作用的长期变化[J]. *中国科学:地球科学*, 2023, 53(1): 151-166
- Yu X, Zhang L, Zhou T, Zhang X. Long-term changes in the role of drought events in stressing ecosystems in the global dry zone[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(1): 151-166 (in Chinese)
- [3] 宫鹏. 对遥感科学应用的一点看法[J]. *遥感学报*, 2019, 23(4): 567-569
- Gong P. A little view on the application of remote sensing science[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2019, 23(4): 567-569 (in Chinese)
- [4] 付东杰, 肖寒, 苏奋振, 周成虎, 董金玮, 曾也鲁, 闫凯, 李世卫, 吴进, 吴文周, 颜凤芹. 遥感云计算平台发展及地球科学应用[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 220-230
- Fu D J, Xiao H, Su F Z, Zhou C H, Dong J W, Zeng Y L, Yan K, Li S W, Wu J, Wu W Z, Yan F Q. Development of remote sensing cloud computing platform and its application in earth science[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 220-230 (in Chinese)
- [5] 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]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 889-897 (in Chinese)
- [6] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2008, 33(11): 1150-1153
- Xu H Q. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(11): 1150-1153 (in Chinese)
- [7] 王正兴, 刘闯, 陈文波, 林昕. MODIS增强型植被指数EVI与NDVI初步比较[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(5): 407-410, 427
- Wang Z X, Liu C, Chen W B, Lin X. Preliminary comparison of MODIS enhanced vegetation index EVI and NDVI[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5): 407-410, 427 (in Chinese)
- [8] 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, 9(5): 589-595
- Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2005, 9(5): 589-595 (in Chinese)
- [9] 徐涵秋. 基于谱间特征和归一化指数分析的城市建筑用地信息提取[J]. *地理研究*, 2005, 24(2): 311-320
- Xu H Q. Fast information extraction of urban built-up land based on the analysis of spectral signature and normalized difference index[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(2): 311-320 (in Chinese)
- [10] 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 Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862 (in Chinese)
- [11] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 张乃明. 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
- Wang L C, Jiao L, Lai F B, Zhang N M. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake wetland, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2963-2972 (in Chinese)
- [12] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI指数的合理性分析及其与RSEI指数的区别[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(1): 1-7
- Xu H Q, Deng W H. Rationality analysis of MRSEI index and its difference with RSEI index[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(1): 1-7 (in Chinese)
- [13] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 杜云艳. 基于Google Earth Engine平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1382-1391
- Chen W, Huang H P, Tian Y C, Du Y Y. Monitoring and assessment of the eco-environment quality in the Sanjiangyuan region based on Google Earth Engine[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1382-1391 (in Chinese)
- [14] 宗慧琳, 张晓伦, 袁希平, 吕杰, 杨明龙, 甘淑. 利用GEE进行1990—2022年小江流域生态环境质量时空格局与演变趋势分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(7): 4122-4136
- Zong H L, Zhang X L, Yuan X P, Lu J, Yang M L, Gan S. Xiaojiang river basin ecological environmental quality spatio-temporal pattern and evolutionary trend analysis using GEE from 1990 to 2022[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4122-4136 (in Chinese)
- [15] 余慧婕, 张方敏, 马赫, 卢燕宇. 基于遥感生态指数的淮河流域生态环境质量时空演化及其驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(7): 4112-4121
- Yu H J, Zhang F M, Ma H, Lu Y Y. Spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in the Huaihe River Basin based on RSEI[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4112-4121 (in Chinese)
- [16] 张静, 杨丽萍, 贡恩军, 王宇, 任杰, 刘曼. 基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 2114-2127
- Zhang J, Yang L P, Gong E J, Wang Y, Ren J, Liu M. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 2114-2127 (in Chinese)
- [17] 傅翔翔, 贾国栋, 余新晓, 陈立欣. 基于改进遥感生态指数的吐鲁番-哈密地区生态环境质量评价及驱动机制分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3911-3923
- Fu K X, Jia G D, Yu X X, Chen L X. Evaluation of ecological environment quality and analysis of driving mechanism in Tulufan-Hami region based on improved remote sensing ecological indices[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9): 3911-3923 (in Chinese)
- [18] 周玄德, 郭华东, 孜比布拉·司马义, 邓祖涛, 梁滨. 干旱区绿洲城市遥感生态指数变化监测[J]. *资源科学*, 2019, 41(5): 1002-1012
- Zhou X D, Guo H D, Zibibula Simayi, Deng Z T, Liang B. Change of remote sensing ecological index of an oasis city in the arid area[J]. *Resources Science*, 2019, 41(5): 1002-1012 (in Chinese)
- [19] 魏光辉, 周海鹰, 徐继红. 塔里木河流域生态廊道治理与修复对策[J]. *中国水利*, 2023(6): 19-23
- Wei G H, Zhou H Y, Xu J H. Countermeasures for ecological corridor governance and restoration in the Tarim River Basin[J]. *China Water Resources*, 2023(6): 19-23
- [20] 魏光辉, 桂东伟, 赵新风. 不同水平年塔里木河流域“四源一干”可承载灌溉面积研究[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(2): 230-237
- Wei G H, Gui D W, Zhao X F. Irrigation area carrying capacity in Tarim River Basin in different years[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(2): 230-237 (in Chinese)

- [21] 艾克热木·阿布拉, 徐俏. 塔里木河流域“四源一干”环境承载力对比分析[J]. 黑龙江水利科技, 2017, 45(12): 48-51
Ekjemu A, Xu Q. Comparative analysis of environmental carrying capacity of "four sources and one trunk" in Tarim River Basin [J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2017, 45(12): 48-51 (in Chinese)
- [22] 王光焰, 徐生武, 谢志勇. 塔里木河流域可调生态水量研究[J]. 水利规划与设计, 2021(3): 29-33, 61
Wang G Y, Xu S W, Xie Z Y. Study on adjustable ecological water quantity in Tarim River basin [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2021(3): 29-33, 61 (in Chinese)
- [23] 伍法权, 国连杰, 覃新闻, 黄小宁. 塔里木河流域综合治理若干问题的思考[J]. 矿产勘查, 2002(12): 18-19
WU F Q, Guo L J, Qin X W, Huang X N. Thoughts on some problems of comprehensive management of Tarim River basin [J]. *Mineral Exploration*, 2002(12): 18-19 (in Chinese)
- [24] 王兴丹, 刘普幸, 耿梦蝶, 王苗, 谯娟. 土地利用时空变化的关键驱动因子及其影响趋势: 以武威市为例[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6583-6591
Wang X D, Liu P X, Geng M D, Wang M, Lu J. The key driving factors of land use patio-temporal change and its influence trend: A case study of Wuwei [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(12): 6583-6591 (in Chinese)
- [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[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3913-3919
Song H M, Xue L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment quality in Weinan City based on remote sensing ecological index model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3913-3919 (in Chinese)
- [26] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. 统计研究, 2013, 30(8): 25-31
Lin H M, Du Z F. Some problems in comprehensive evaluation in the principal component analysis [J]. *Statistical Research*, 2013, 30(8): 25-31 (in Chinese)
- [27] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1585-1591
Yu Y S, Chen X W. Study on the percentage of trend component in a hydrological time series based on Mann-Kendall method [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1585-1591 (in Chinese)
- [28] 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
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134 (in Chinese)
- [29] 朝力格尔, 兴安, 阿如早, 孙紫英, 孙晓涵. 基于改进型遥感生态指数的干旱区生态环境评价: 以阴山北麓内蒙古武川县为例[J]. 应用生态学报, 2024, 35(7): 1907-1914
Chao L, Xing A, A R H, Sun Z Y, Sun X H. Assessment of ecological environment in arid region based on the improved remote sensing ecological index: A case study of Wuchuan County, Inner Mongolia at the northern foot of Yin Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(7): 1907-1914 (in Chinese)
- [30] 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 阿布都瓦斯提·吾拉木. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1948-1966
He B Z, Ding J L, Zhang Z, Abduwasit Ghulam. Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional vegetation cover in Xinjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1948-1966 (in Chinese)
- [31] Xu, H Q, Lin M J, Wang Y F, Guan H D, Tang, F. Quantitatively exploring the influence of geographical conditions on ecological quality using a novel remote sensing model: A comparison between two geographical disparity regions in China [J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2024: 1-18
- [32] 徐涵秋, 李春强, 林梦婧. RSEI 应使用主成分分析或核主成分分析? [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2023, 48(4): 506-513
Xu H Q, Lin C Q, Lin M J. Should RSEI use principal component analysis or Kernel principal component analysis? [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(4): 506-513 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 王一山, 博士研究生, 现就读于中国农业大学土地科学与技术学院土地科学与技术专业。硕士毕业于新疆大学, 期间获得新疆维吾尔自治区政府奖学金。近 5 年以第一作者在 *Remote Sensing*、*Land* 等期刊发表学术论文 5 篇。



通讯作者简介: 徐艳, 博士, 副教授, 中国农业大学土地科学与技术学院博士生导师。现任中国土地学会学术工作委员会副秘书长、中国土地学会国土整治与生态修复分会副秘书长。主要从事土地利用与评价、土地整治等研究。主持国家自然科学基金项目、国家社会科学基金项目、农业农村部软科学项目等研究课题 15 项。在 *Water Resources Management*、*Land*、*Ecological Indicator* 等期刊发表学术论文 40 余篇, 出版学术专著 2 部, 获得省部级奖项 4 项。