

# 基于RSEI的阿克苏河流域生态环境质量变化及驱动力分析

朱丽君<sup>1,2</sup>, 郭雪飞<sup>3</sup>, 杨志坤<sup>1,2</sup>, 杨 琦<sup>4</sup>, 苗志国<sup>5</sup>, 李志军<sup>1,6\*</sup>

<sup>1</sup>塔里木大学生命科学与技术学院, 新疆 阿拉尔

<sup>2</sup>新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室, 新疆 阿拉尔

<sup>3</sup>塔里木大学园艺与林业学院, 新疆 阿拉尔

<sup>4</sup>阿克苏市自然资源局国土空间规划发展中心, 新疆 阿克苏

<sup>5</sup>新疆维吾尔自治区国土资源综合整治中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年4月11日; 录用日期: 2025年5月10日; 发布日期: 2025年5月28日

## 摘要

阿克苏河流域是中国西北地区典型的干旱区绿洲, 是塔里木河重要源流, 生态系统相对脆弱。长期监测和评价阿克苏河流域生态环境状况为实现区域可持续发展提供重要科学依据。基于Google Earth Engine (GEE)平台的海量数据, 构建了1990~2020年的遥感生态指数(RSEI)。采用Spearman秩相关分析、确定阿克苏河流域RSEI指数的适用性。使用Sen's slope分析、Moran's I指数和地理探测器等方法, 分析1990~2020年阿克苏河流域生态环境质量的时空分布特征及变化趋势, 探讨RSEI空间异质性的自然和人为因素。结果表明: (1) 1990~2020年阿克苏河流域RSEI高值集中在北部山区, 低值集中在南部沙漠和荒漠。RSEI均值表明生态环境质量处于差和较差等级; (2) 近30年阿克苏河流域生态环境质量处于下降趋势, 但北部和中部地区生态环境质量有所改善; (3) 阿克苏河流域生态环境质量大部分保持稳定发展趋势, 尤其是近10年稳定区域占比达84%以上; (4) Moran'I值表现出正空间相关性。H-H聚集区在北部山区, L-L聚集区主要分布在南部沙漠和荒漠地区; (5) 阿克苏河流域生态环境质量受自然因素和人类活动共同影响。其中, 土地利用和覆盖变化(LUCC)是主导因子, 年均气温(Tem)、太阳辐射(Sr)、年均降水量(Pre)、国内生产总值(GDP)、人口密度(Pop)和高程(DEM)是主要驱动因素。各因子交互作用对RSEI的影响远大于单因子的作用。

## 关键词

遥感生态指数, 空间自相关, 地理探测器, 阿克苏河流域

\*通讯作者。

# Ecological Environment Quality Changes and Drivers in Aksu River Basin Basis on Remote Sensing Ecological Index

Lijun Zhu<sup>1,2</sup>, Xuefei Guo<sup>3</sup>, Zhikun Yang<sup>1,2</sup>, Qi Yang<sup>4</sup>, Zhiguo Miao<sup>5</sup>, Zhijun Li<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Life Science and Technology, Tarim University, Alar Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Production & Construction Corps Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin, Alar Xinjiang

<sup>3</sup>College of Horticulture and Forestry Sciences, Tarim University, Alar Xinjiang

<sup>4</sup>Aksu Natural Resources Bureau Land and Space Planning and Development Center, Aksu Xinjiang

<sup>5</sup>Xinjiang Uygur Autonomous Region Land Comprehensive Improvement Center, Urumqi Xinjiang

Received: Apr. 11<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 10<sup>th</sup>, 2025; published: May 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The ecosystem of the Aksu River Basin (ARB) has been adversely affected by prolonged arid climate conditions and land reclamation, leading to a decline in environmental quality. Therefore, long-term ecological monitoring and assessment of the ARB is needed to maintain the ecological sustainability of the basin. On the basis of the Landsat data of the Google Earth Engine platform, a remote sensing ecological index (RSEI) that covered the period 1990 to 2020 was constructed. Spearman rank correlation analysis was conducted to determine the applicability of RSEI to ARB. Sen's slope analysis, Moran's I index and a geodetector were used to analyse the spatiotemporal distribution characteristics and change trends of RSEI in ARB from 1990 to 2020 and explore the natural and human factors that affect RSEI spatial heterogeneity. The results show that:(1) The high values of RSEI in ARB from 1990 to 2020 were concentrated in the northern mountainous areas, and the low values were concentrated in the southern deserts and wilderness. The mean values of RSEI indicated that eco-environment quality (EEQ) was poor or fair. (2) The changes in ecological quality in ARB tended to decrease more than the area tended to increase. The northern mountainous and central areas increased. (3) Most of the EEQ values of ARB maintained a stable development trend, especially in the past 10 years, when the proportion of stable areas exceeded 84%. (4) The Moran's I values showed a spatial positive correlation. The high-high concentration area was in the northern mountainous region, and the low-low concentration area was mainly distributed in the southern desert and wilderness. (5) The EEQ of ARB was influenced by natural and human activities. Land use and cover change was the dominant factor, and annual mean temperature (Tem), solar radiation (Sr), annual mean precipitation (Pre), gross domestic product (GDP), population density (Pop) and digital elevation model (DEM) were the main driving factors. The interactive effects of various factors on RSEI are far greater than the effects of individual factors.

## Keywords

Remote Sensing Ecology Index, Spatial Autocorrelation, Geographical Detectors, Aksu River Basin

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

生态环境为人类生存提供物质基础，生态环境质量的好坏反映一定时空范围内人类生存和社会可持续发展的适宜性[1]。近年来，由于气候变化和社会经济发展，城市化进程加快，二氧化碳排放量增加，水土流失等问题日益明显，部分地区生态环境质量遭到了严重破坏。因此，合理监测生态环境质量的动态变化以及探寻其主要的影响因素尤为重要。

1972 年在瑞典召开联合国关于环境问题的第一次重大会议[2]。自此，各国相继出台一系列关于改善生态环境的计划与政策。20 世纪 80、90 年代，以 3S(遥感、全球定位系统和地理信息)技术为主的生态环境监测逐渐开始。部分研究利用多源遥感影像提取单一指标来评估生态环境质量。例如，使用 NDVI 和 FVC 反映植被空间异质性和植被生长状况[3]。此外，随着压力 - 状态 - 响应模型(PSR 模型)的出现，研究人员开始使用多个指标综合评估生态环境质量[4] [5]。如城市生态系统[6]、河流生态系统[7]和湿地生态系统[8]。PSR 模型虽然使用多个指标可以较为全面的评估生态环境状况，但数据获取难度大，指标权重的确定受人为干扰较大。由此，徐涵秋[9]基于 PSR 模型，使用主成分分析，将绿度，湿度，干度和热度四个指标建立了遥感生态指数，对区域生态环境进行评价。该模型极大地克服了人类干扰的缺点，结果全面合理，具有空间可视化等优点。并广泛应用于流域[10]、湿地[11]甚至全中国[12]等大尺度范围。目前，RSEI 被广泛应用于区域生态环境质量评估，使生态环境评价体系更加完善。

然而，仅对于生态环境质量的好坏做出评估是不够的。地理探测器是量化影响因素最常用的方法之一[13]。该模型不仅能探测单因子的解释力，还能探测不同因子的交互作用[14]。有学者使用该模型探究中国生态环境质量的驱动力，结果表明自然力是主要驱动力[15]。也有研究表明，土地覆被是主要影响黄河三角洲生态环境质量的驱动力[16]。此外，众多研究表明，RSEI 受到人类活动和自然环境变化的共同影响[17]。

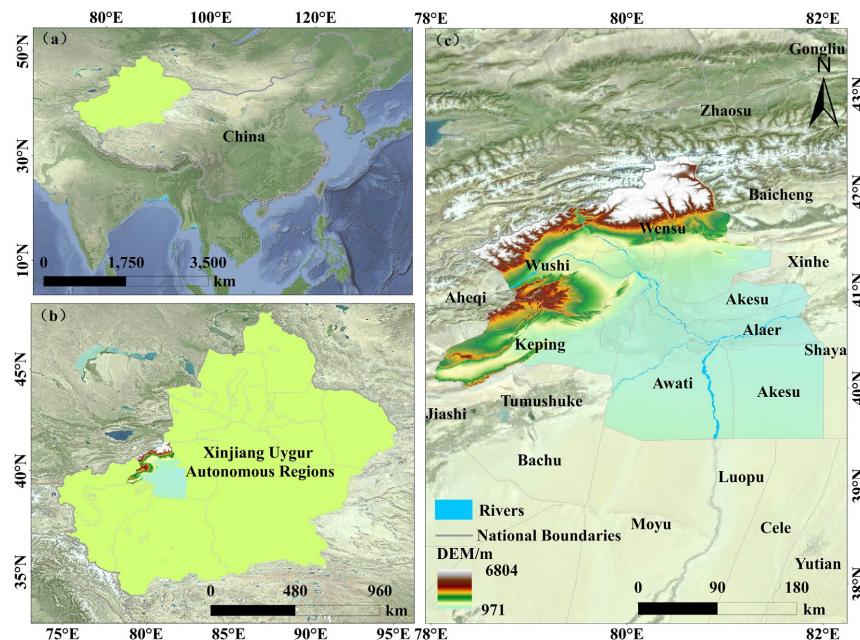
干旱半干旱地区生态环境脆弱，极易受到气候变化和人类生产活动干扰，生态环境质量下降较为明显[18]。阿克苏河流域(ARB)位于干旱半干旱地区，是塔里木河的重要水源地，对人类的生产生活具有重要影响。有研究表明阿克苏河流域生态、农业和城镇空间利用冲突已形成，有扩张趋势[19]。也有研究表明，阿克苏地区的生态系统服务功能水平较低，空间差异较大[20]。因此，加强对阿克苏河流域生态环境的研究，能够为阿克苏河流域生态环境保护与可持续发展提供重要参考。

本文主要研究阿克苏河流域生态环境质量的时空变化特征，分析影响阿克苏河流域生态环境的主要驱动力。为此，我们将重点开展三方面的工作：(1) 利用 Landsat 系列的遥感影像分析 1990~2020 年阿克苏河流域生态环境质量的时空变化特征及趋势；(2) 使用空间自相关分析阿克苏河流域生态环境质量的空间关联性；(3) 利用地理探测器模型探究阿克苏河流域生态环境质量的空间异质性及驱动因素。

## 2. 材料与研究方法

### 2.1. 研究区概况

阿克苏河流域位于新疆维吾尔自治区南部塔里木盆地的西部。该流域地势呈西北高，东南低，平均海拔 1100 m。具有温带沙漠气候的特征，夏季高温炎热，冬季少雪[21]。阿克苏河由发源于天山山脉西部的托什干河和库玛拉克河在温宿县南部汇合而成，全长 224 km，并最终流入中国最大的内陆河塔里木河中(图 1)。径流主要由冰雪融水和山区降水补给，水量丰富。但阿克苏河流域地处塔克拉玛干沙漠边缘，生态环境脆弱。此外，随着流域内人类活动增加和自然环境变化，生态环境问题也随之突显。因此，阿克苏河流域生态环境质量的监测与环境治理势在必行。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 1.** Research area overview

**图 1.** 研究区概况

## 2.2. 数据来源

遥感影像源于美国地质调查局( United States Geological Survey, USGS)，在 Google Earth Engine (GEE) 平台(<https://earthengine.google.com>)获取经辐射校正和大气校正的 Landsat 影像，空间分辨率为 30 m。筛选出 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的 Landsat 5 TM/OLI 或 Landsat 8 TM/OLI 遥感影像，绘制了 1990~2023 年阿克苏河流域 RSEI 时空分布。为减轻过多云量、季节差异和数据质量问题带来的影响，选择运量小于 15%，时间范围为 6~8 月的图像。

影响因素数据包括年均气温、年均降水量、太阳辐射、高程(DEM)、土地利用/覆盖数据、人口密度(POP)、经济生产总值(GDP)和夜间灯光亮度。其中，年均气温、年均降水量和太阳辐射是通过所收集的阿克苏市、阿瓦提县、柯坪县、阿拉尔市、乌什县、温宿县等气象站点的详细气象数据计算而成。下表包括了一些数据来源。

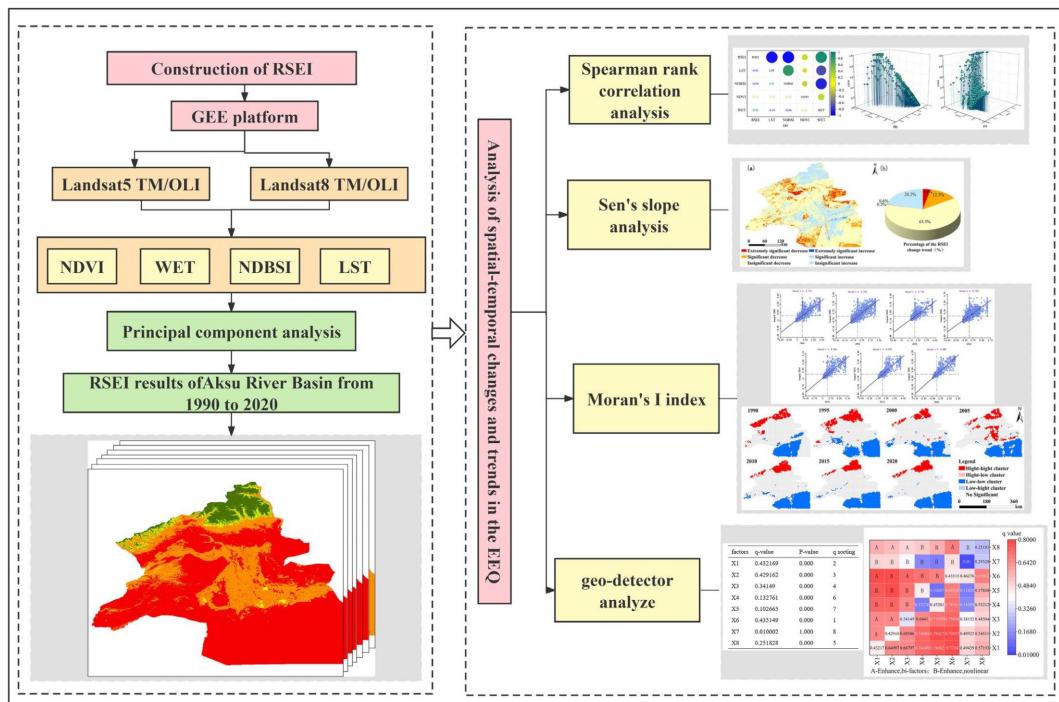
**Table 1.** Data source of influencing factors

**表 1.** 影响因子的数据来源

影响因素	编号	分辨率	来源
年平均气温(Tem)	X1	30 m	站点数据来自 <a href="http://data.cma.cn/site/index.html">http://data.cma.cn/site/index.html</a>
年平均降水(Pre)	X2	30 m	
太阳辐射(Sr)	X3	30 m	
经济生产总值(GDP) [22]~[26]	X4	1 km	<a href="http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/">http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/</a>
人口密度(Pop) [27] [28]	X5	1 km	<a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
土地利用/覆盖(LUCC) [29]	X6	30 m	<a href="http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/">http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/</a>
夜间灯光(NPP/VIIRS) [30]	X7	1 km	<a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a>
高程(DEM)	X8	90 m	<a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>

### 2.3. 研究方法

如图 2 所示。首先，我们利用 Landsat5/8 影像，结合 GEE 平台，合成 RSEI 影像。其次，利用秩相关分析确定 RSEI 的适用性。通过 Sen 斜率和 Moran's I 指数分析 RSEI 的时空分布及空间自相关分析。最后，使用地理探测器进行 RSEI 空间异质性分析。



**Figure 2.** Framework diagram for this study  
**图 2.** 研究框架

#### 2.3.1. RSEI 模型

(1) 绿度指标：绿度用归一化植被指数(Normalized Differences Vegetation Index, NDVI)来代表，该指数能够有效反映植被覆盖度和植被生物量等指标，具有检测灵敏度高的优势，能更真实地表达研究区地表空间变化规律[31]。计算公式：

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

式中： $\rho_{\text{nir}}$  代表 Landsat 影像的近红外波段的反射率， $\rho_{\text{red}}$  代表 Landsat 影像的红外波段的反射率。

(2) 湿度指标：湿度指标采用缨帽变换所得的湿度分量来表示，能够反映区域的土壤水分状况[32]。计算公式如下：

$$\text{WET}_{(\text{TM})} = 0.0315b_1 + 0.020b_2 + 0.3102b_3 + 0.1594b_4 - 0.6806b_5 - 0.6109b_7 \quad (2)$$

$$\text{WET}_{(\text{OLI})} = 0.1511b_1 + 0.1973b_2 + 0.3283b_3 + 0.3407b_4 - 0.7117b_5 - 0.4559b_7 \quad (3)$$

式中： $b_1 \sim b_5$  代表 Landsat8/OLI 影像的 2-6 波段或 Landsat5/TM 影像的 1-5 波段； $b_7$  代表 Landsat8/OLI 或 Landsat5/TM 影像的 7 波段。

(3) 热度指标：是通过使用比辐射率所校正的遥感影像热红外波段来反演地表温度(Land Surface Temperature, LST)表示[33]，计算公式如下：

$$L_\lambda = gain \times DN + bias \quad (4)$$

$$L_\lambda = gain \times DN + bias \quad (5)$$

式中： $L_\lambda$  表示 TM/OLI 热红外第 6 波段或第 10 波段的辐射值；gain 表示第 6 或第 10 波段的增益值；bias 表示第 6 或第 10 波段的偏置值； $K_1$ 、 $K_2$  分别为辐射定标参数；DN 表示像元灰度值。

$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda T / \rho) \times \ln \varepsilon} \quad (6)$$

式中： $\lambda$  为 TM/OLI 热红外第 6 或第 10 波段的中心波长； $\varepsilon$  代表地表比辐射率； $\rho = 1.438 \times 10 - 2$  mK。

(4) 干度指标：建筑指数(ICI)通常反映该地区的干旱程度。综合土壤指数(soil index, SI)和 IBI 来表示干度指标(normalized difference built-up and soil index, NDBSI) [34]，计算公式如下：

$$SI = \frac{(\rho_{SWR1} + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWR1} + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{NIR})} \quad (7)$$

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{SWR1}}{\rho_{SWR1} + \rho_{NIR}} - \left( \frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWR1}} \right)}{\frac{2\rho_{SWR1}}{\rho_{SWR1} + \rho_{NIR}} + \left( \frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWR1}} \right)} \quad (8)$$

$$NDBSI = (SI + IBI) \quad (9)$$

式中： $\rho_{SWR1}$  是短波红外 1 波段； $\rho_{red}$  和  $\rho_{NIR}$  分别为红波段和近红外波段的反射率； $\rho_{blue}$  和  $\rho_{green}$  分别是蓝波段和绿波段的反射率。

RSEI 指数的构建：RSEI 四个指标基于 Landsat 系列影像数据计算。由于 4 个指标的量纲不一致，如果直接计算各指标的主成分，可能会造成权重不一致性。因此，在计算 4 个指标前需要做归一化处理，使计算结果在[0, 1]之间。然后采用主成分分析计算 PC1。接着用 1-PC1 计算得到原始的生态指数 RSEI0 [35]。最后对 RSEI0 进行标准化就可以获得 RSEI，计算公式如下：

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (10)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0\min}) / (RSEI_{0\max} - RSEI_{0\min}) \quad (11)$$

式中：NI<sub>i</sub> 表示指标归一化结果；I<sub>i</sub> 为各指标在像元 i 处的值；I<sub>min</sub> 和 I<sub>max</sub> 代表指标的最小和最大值；RSEI<sub>0max</sub> 和 RSEI<sub>0min</sub> 表示 RSEI0 的最大和最小值。

RSEI 的值位于 0~1 之间，值越大，生态环境质量越好。参考 2015 年颁布的《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192-2015)，将 RSEI 值每 0.2 一个区间进行划分，共划分为 5 个类型：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) [36] [37]。因此，RSEI 类型反映了研究区生态环境状况。然后，采用 ArcGIS 中的 Spatial Analyst 工具，共计算 6 个时期(1990~1995、1995~2000、2005~2010、2010~2015 和 2015~2020)的 RSEI 变化，将结果分为明显改善(IO，包括+4 和+3)、轻微改善(IS，包括+2 和+1)、不变(IN，变化为 0)、轻微恶化(DS，包括-1 和-2)和明显恶化(DO，包括-3 和-4)五种类型。用于各时间段的生态环境质量进行变化监测。

### 2.3.2. 线性回归分析

线性回归分析能够分析随时间变化的变量的趋势。当 Slope > 0 时，表示像元 RSEI 为增加趋势；Slope = 0 时，表示 RSEI 基本不变；Slope < 0 时，表示该像元 RSEI 为降低趋势 [3]。其表达式为：

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times RSEI_i - \left( \sum_{i=1}^n i \right) \left( \sum_{i=1}^n RSEI_i \right)}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (12)$$

式中, Slope 为像元回归方程的斜率; RSEI<sub>i</sub> 为第 *i* 年的 RSEI 值, *n* 为研究时间长度。

### 2.3.3. 空间自相关分析

空间自相关分析是衡量各要素与相邻空间要素之间相关性以及相关程度的一个重要指标[38]。全局空间自相关分析(全局 Moran's I 指数)能够较好地反映研究区各空间要素的相关性。该指标的取值范围是 [-1, 1], 当 Moran's I > 0 时, 表示数据为空间正相关; Moran's I < 0 时, 则反之。其表达式为:

$$I = \frac{m \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij} (D_i - \bar{D})(D_j - \bar{D})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij} (D_i - \bar{D})^2} \quad (13)$$

式中: *I* 代表全局 Moran's I 指数; *m* 为要素个数; *D<sub>i</sub>* 和 *D<sub>j</sub>* 分别为第 *i* 和第 *j* 个要素的属性值; *W<sub>ij</sub>* 代表元素 *i* 和 *j* 之间的空间权重;  $\bar{D}$  为要素的平均属性值。

局部空间自相关分析能够揭示研究区内各空间要素值与周围单元属性值在空间上的差异程度。按照要素之间的相关程度, 可划分为高 - 高(H-H)、低 - 低(L-L)、高 - 低(H-L)、低 - 高(L-H)以及无显著性[35]。表达式如下:

$$LISA = \frac{m(D_i - \bar{D}) \times \sum_{j=1}^m W_{ij} (D_j - \bar{D})}{\sum_{j=1}^m (D_j - \bar{D})^2} \quad (14)$$

式中变量与式(1)相同。

### 2.3.4. 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等[13]提出的一种空间分析手段, 主要用来分析空间分异性及其驱动因素。采用地理探测器中的因子探测器和交互探测器寻找影响 RSEI 的影响因子及其交互作用[39]。其表达式为:

$$q = 1 - \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 / N \sigma^2 \quad (15)$$

式中: *q* 为自变量对因变量的影响力; *N* 表示全部的样本数; *L* 为自变量的数量; *N<sub>h</sub>* 表示分类样本数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  则表示全部样本的方差和分类样本方差。

交互作用探测能够反映两个影响因子的交互作用与单因子的解释力的不同[40]。即通过计算 *q(X1∩X2)* 值与 *q(X1)* 和 *q(X2)* 的数值进行对比, 判断依据见表 2。

**Table 2.** Type of interaction between two variables

**表 2.** 两个变量之间交互作用的类型

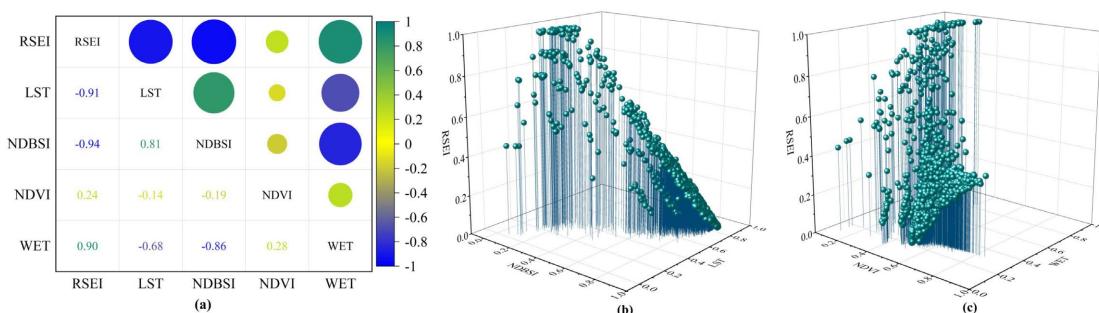
判断标准	交互作用类型
$q(x1 \cap x2) < \min[q(x1), q(x2)]$	非线性减弱
$\min[q(x1), q(x2)] < q(x1 \cap x2) < \max[q(x1), q(x2)]$	单因子非线性减弱
$q(x1 \cap x2) > \max[q(x1), q(x2)]$	双因子增强
$q(x1 \cap x2) = q(x1) + q(x2)$	独立
$q(x1 \cap x2) > q(x1) + q(x2)$	非线性增强

### 3. 研究结果

#### 3.1. RSEI 指数的验证

通过对 RSEI 与 4 个生态指标进行 Spearman 秩相关分析，确定 RSEI 是否能正确反映阿克苏河流域生态环境质量。在研究区内对 RSEI、LST、NDBSI、NDVI、WET 均匀采样，共获得 2728 个采样点，用于 RSEI 与 4 个指标代表性的评估。

如图 3 所示，各指标之间的相关系数为 0.14-0.86。RSEI 与 LST、NDBSI、NDVI、WET 的斯皮尔曼相关系数分别为 -0.91、-0.94、0.24、0.90。其中，RSEI 与 LST 和 NDBSI 具有较强的负相关，与 NDVI 和 WET 具有较强的正相关。结果表明 RSEI 与 4 个指标具有较强的相关性。因此，RSEI 比单个指标更具有代表性。

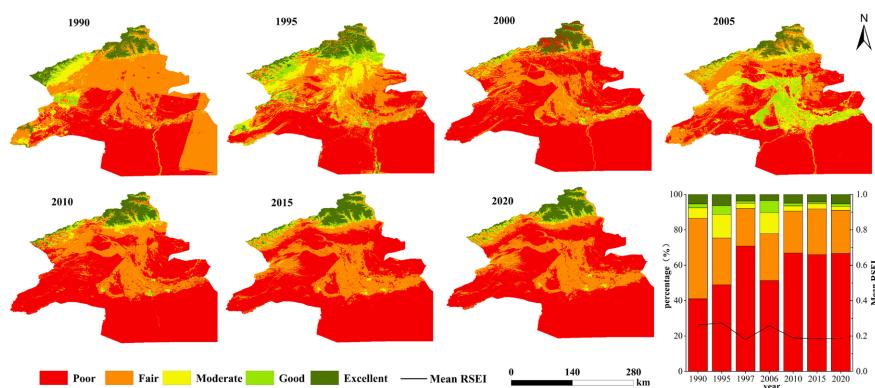


**Figure 3.** (a) Ecological environmental indicators and RSEI correlation coefficient; (b) 3D scatter plot of RSEI-NDBSI-LST; (c) 3D scatter plot of RSEI-NDVI-WET

**图 3.** (a) 各指标与 RSEI 的相关系数；(b) RSEI-NDBSI-LST 三维散点图；(c) RSEI-NDVI-WET 三维散点图

#### 3.2. 生态环境质量时空特征及趋势变化分析

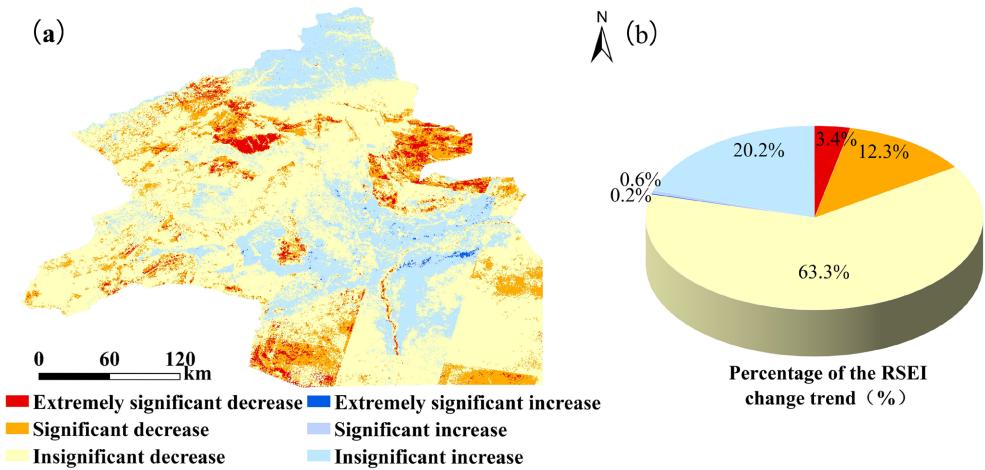
空间上，阿克苏河流域生态环境质量呈北高南低。生态环境质量较差的地区主要集中在南部海拔低，沙漠和荒漠分布的区域。生态环境质量较好的地区主要分布在北部海拔较高的山区，RSEI 由内向外逐渐升高。时间上，1990~2020 年阿克苏河流域超过 60% 的地区生态环境质量被评为差和较差等级，2020 年生态环境质量被评为优良中等级的占比从 2005 年的 22.2% 下降至 9.05%。但相比于 2015 年，2020 年阿克苏河流域生态环境质量有改善趋势(图 4)。从 RSEI 的平均值来看，1990~2020 年 RSEI 主要集中在 0.3~0.18，生态环境质量评为差和较差等级。其中，1990~2010 年 RSEI 呈波动变化，2010~2020 年 RSEI 均值保持平稳。相较于 2015 年，2020 年 RSEI 均值有所上升，表明生态环境有所改善。



**Figure 4.** Spatial distribution of ecological quality in the ARB, 1990~2020

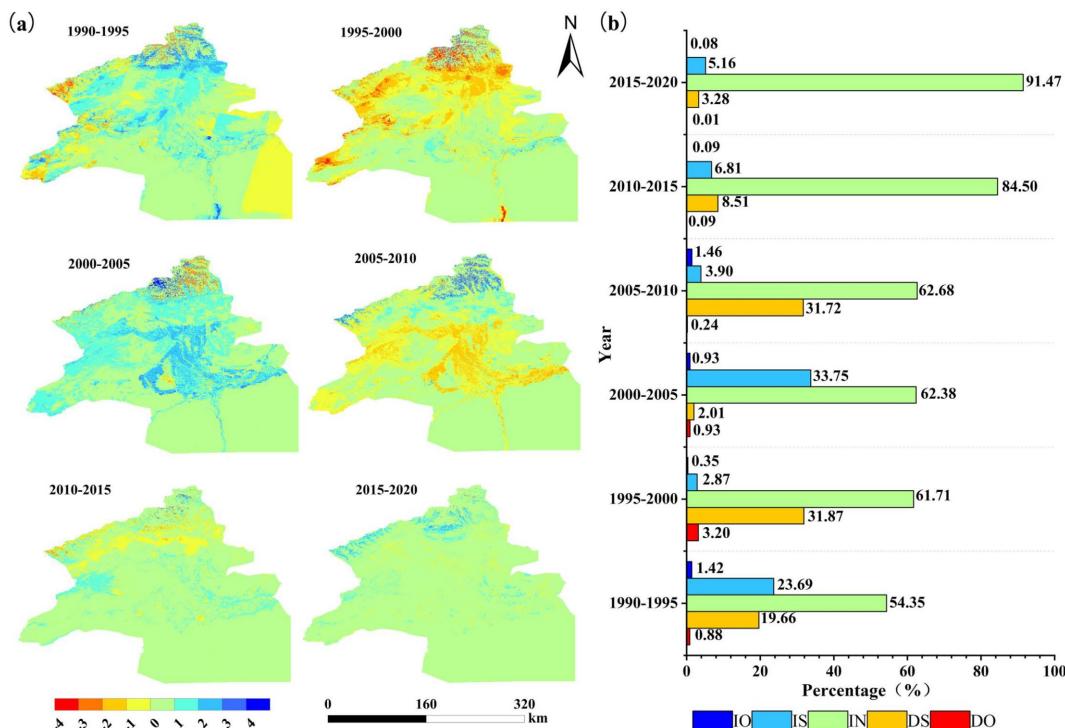
**图 4.** 1990~2020 年阿克苏河流域生态环境质量空间分布图

1990~2020年阿克苏河流域RSEI变化趋势空间分布表明(图5),RSEI呈上升趋势的面积占比为21%,呈下降趋势的面积占比为79%。其中,未显著增加的面积占20.2%,主要分布在北部山区和中东部地区,极显著增加和显著增加的面积之和占比不足1%。未显著下降的面积占63.3%。显著下降和极显著下降的面积之和为15.7%,主要分布在东部、西部和西南部。总的来说,近30年阿克苏河流域生态环境质量处于下降趋势,但北部和中部地区生态环境质量有所改善。



**Figure 5.** Spatial distribution map of ecological environment quality change trends in the Aksu River Basin from 1990 to 2020 (a), and area proportion chart (b)

**图5.** 1990~2020年阿克苏河流域生态环境质量变化趋势空间分布图(a)和面积占比图(b)



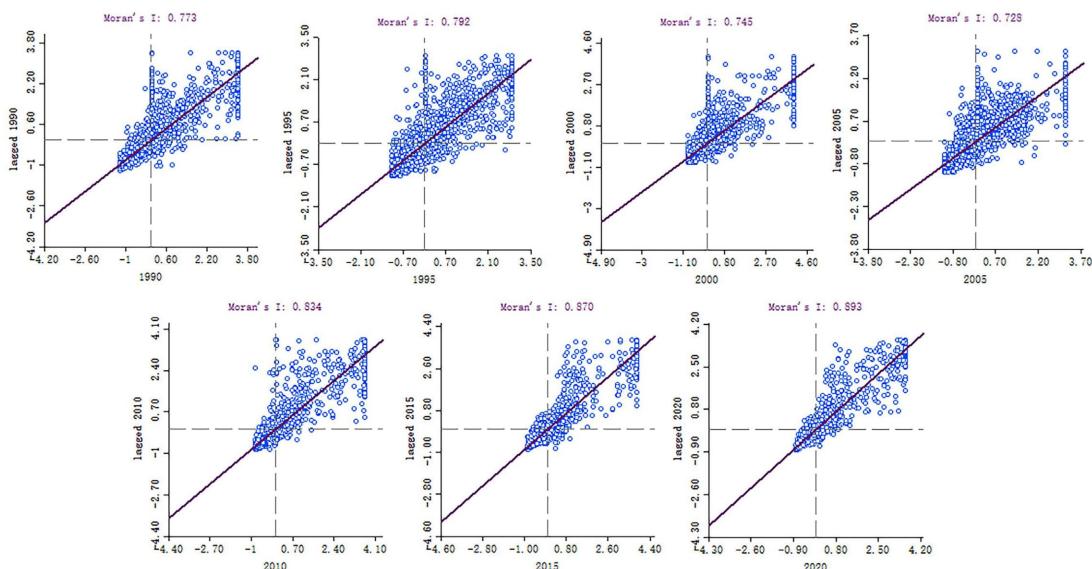
**Figure 6.** Spatial distribution map of RSEI changes in the Aksu River Basin from 1990 to 2020 (a), and area proportion chart of each change level (b)

**图6.** 阿克苏河流域1990~2020年RSEI变化空间分布图(a)和各变化等级面积占比图(b)

近 30 年来, 阿克苏河流域生态改善区 IO 所占比例小于 2%, 说明阿克苏河流域生态环境质量变化明显改善的区域较少。IS 占比呈下降 - 上升 - 下降 - 上升的趋势, 其中 2000~2005 年期间占比最大, 大都分布在中部和西部地区, 南部地区仅和田河附近少有分布。阿克苏河流域生态恶化区 DO 所占比例小于 3.5%, 说明阿克苏河流域生态环境质量变化明显恶化的区域较少, 但相比于 IO 较大。DS 呈上升 - 下降 - 上升 - 下降的趋势, 与 IS 变化趋势几乎相反。DS 在 1995~2000 年期间出现最大占比, 主要分布在山区南部, 西北及西北部地区, 南部地区几乎无分布。IN 由 1990~1995 年的 54.35% 上升到 2015~2020 年的 91.47%, 主要由南部地区向北部地区延伸, 各时期内占比最大(图 6)。总体来看, 近 30 年来, 阿克苏河流域生态环境质量大部分保持稳定发展趋势。尤其是 2010~2020 年生态环境质量保持不变的面积占比高达 84% 以上, 并且 IO 和 DO 的面积之和占比不足 1%, 人们越来越重视对生态环境的保护与治理。

### 3.3. 空间自相关分析

基于渔网划分的 2727 个样本点, 采用 Moran's I 指数和 LISA 聚类对阿克苏河流域 RSEI 进行空间自相关分析。图 7 为 Moran's I 指数散点图。Moran's I 指数均大于 0, 结果通过显著性检验( $p \leq 0.01$  且  $Z \geq 2.58$ )。每时期的散点主要集中在第一象限和第三象限, 表示阿克苏河流域的生态环境空间分布具有显著的正相关。1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的 Moran's I 指数分别为 0.773、0.792、0.745、0.728、0.834、0.870 和 0.893, RSEI 的空间分布呈正相关, 并具有一定的聚集分布特征。同时, 1990~2020 年阿克苏河流域的 Moran's I 指数呈波动上升趋势, 表明空间聚集特征有所增加。

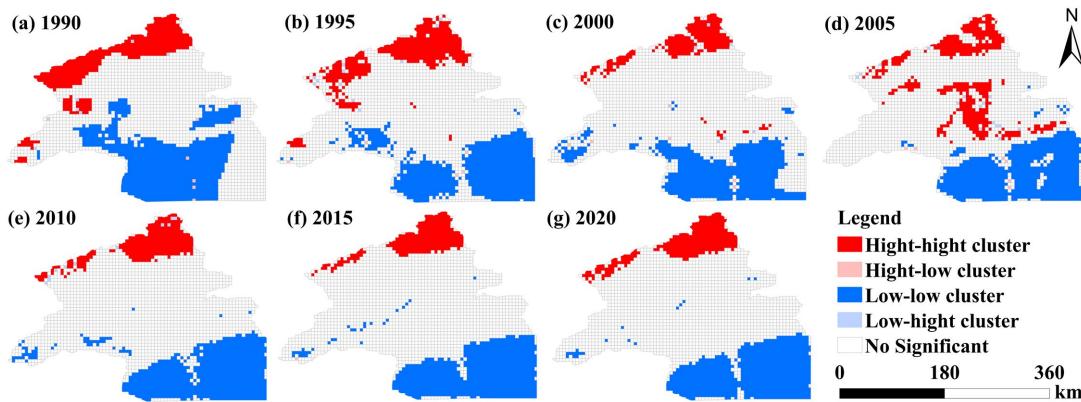


**Figure 7.** Global Moran's I scatter plot of RSEI in the Aksu River Basin from 1990 to 2020

**图 7.** 1990~2020 年阿克苏河流域 RSEI 的 Global Moran's I 散点图

图 8 为 LISA 聚类图。研究发现, RSEI 不显著聚类主要集中分布在中部地区, 北部地区呈 H-H 聚类, 南部地区呈 L-L 聚类。此外, H-L 和 L-H 聚类几乎没有分布, 表明生态环境质量没有极端。其中, L-L 聚类表示生态环境质量较差的区域, 主要在阿瓦提县和阿克苏市的沙漠地区分布, 柯坪县少有分布。H-H 聚类表示生态环境质量较好的区域, 主要分布在乌什县和温宿县海拔较高的山区。其中, 2005 年 H-H 聚类在中部地区也有分布, 斑块聚集, 表明 2005 年中部地区的生态环境质量有所改善。与 2010 年相比, 2020 年 RSEI 指数的 H-H 聚类斑块增加, L-L 聚类斑块减少, 空间聚集性增强。因此, 近十年来,

阿克苏河流域生态环境质量有望改善。



**Figure 8.** LISA clustering map of RSEI in the Aksu River Basin from 1990 to 2020  
**图 8.** 1990~2020 年阿克苏河流域 RSEI 的 LISA 聚类图

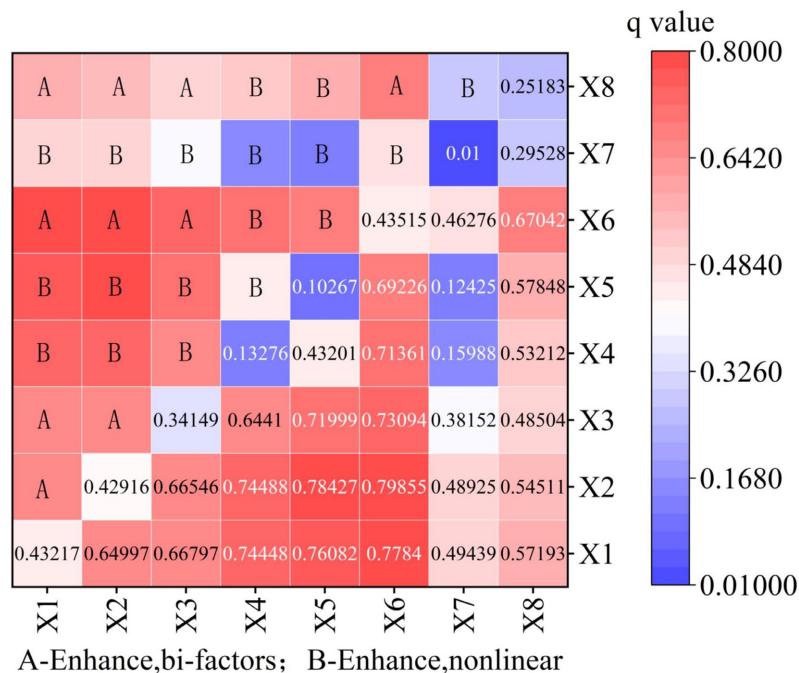
### 3.4. 空间异质性及影响因素分析

通过单因子检测计算各因子的  $q$  值，揭示各因子对 RSEI 的相对影响，结果如表 3 所示。除 NPP/VIIRS 外，其余因子对 RSEI 的影响均显著( $P < 0.05$ )。其中，LUCC 的解释力超过 43%， $q$  排名第一，被认为是阿克苏河流域生态环境质量空间异质性的主导因素。其次，TEM、PRE 和 Sr 的解释力均超过 34%，并且 GDP、Pop、DEM 解释力超过 10%，被认为是主要驱动因素；而 NPP/VIIRS 的  $p$  值过大，不显著。

交互检测能够揭示因子之间的相互作用及对 RSEI 变化的影响。结果(图 8)表明，任意两个因子之间的交互作用大于单个因子对 RSEI 的影响。其中，Tem 与 Pre、Sr、LUCC、DEM；Pre 与 Sr、LUCC、DEM；Sr 与 LUCC、DEM；LUCC 与 DEM 相互作用类型为双因素增强，其余组合交互作用类型表现为非线性增强。LUCC 与其他因子相互作用的  $q$  值最高，解释力达到 69%以上。高于 LUCC 对 RSEI 的单因子解释力。其中，LUCC 与 Pre 是交互作用最强的组合， $q$  值为 79%以上。LUCC 是影响 RSEI 变化的主导因子，LUCC 与其他因子交互作用进一步增强了对 RSEI 的影响。虽然夜间灯光单因子解释力几乎没有，但与其他因子交互作用时  $q$  值为 10%以上。尤其是与 Tem、Pre 和 LUCC 交互作用时  $q$  值高达 46%以上，极大的增强了对 RSEI 的解释力。结果表明阿克苏河流域生态环境质量是受各个因子是相互影响，而不是各个因子简单相加，没有独立作用的影响因子。

**Table 3.** System resulting data of standard experiment  
**表 3.** 因子检测结果

影响因子	q 值	p 值	P 值排序
X1	0.432169	0.000	2
X2	0.429162	0.000	3
X3	0.34149	0.000	4
X4	0.132761	0.000	6
X5	0.102665	0.000	7
X6	0.435149	0.000	1
X7	0.010002	1.000	8
X8	0.251828	0.000	5

**Figure 9.** The results of the interactive detection**图 9.** 交互检测的结果

## 4. 讨论

### 4.1. RSEI 模型适用性

我国于 2015 年发布了新修订的《生态系统状态评价技术规范》(HJ 192-2015)。表明生态环境状况指数(EI)主要由生物丰富度指数、土地胁迫指数、植被覆盖度指数、污染负荷指数、水网密度五个指数和一个环境限制指数构成[41]。其中，前三个指标能够通过遥感影像获得，其他指数较难获取，并且各评价指标权重是人为设定的。RSEI 采用主成分分析的方法确定绿度、湿度、干度和热度四个指标的权重，避免了人为干扰造成的影响。目前，RSEI 已被广泛应用于干旱区的生态环境质量评估研究。有研究通过计算 RSEI，分析柴达木盆地[42]等区域的生态环境质量的时空变化及趋势分析，证明 RSEI 可以用于干旱区的生态环境监测。

### 4.2. RSEI 时空分异特征

阿克苏河流域 RSEI 均值从 1990 年 0.26 下降到 2020 年 0.19，生态环境质量整体呈下降趋势。Ling 等[43]研究结果表明阿克苏河流域 RSEI 均值在 2000~2020 年呈上升趋势，本研究结果与其不一致。一方面与本研究所使用的数据是 Landsat 系列数据相关，Landsat 影像数据相较于 MODIS 影像数据精度更高，另一方面与研究区范围不一致有关。本文研究区覆盖较大沙漠和荒漠区域。已有研究表明沙漠和荒漠分布区的生态环境质量较低[44]。沙漠和干旱地区在维持生态环境质量方面面临挑战，这也表明可持续发展对环境保护和区域规划的重要性。

从变化趋势上看，1990~2020 年阿克苏河流域北部山区和中部人类活动区的生态环境质量呈改善趋势。1990~2010 年生态环境质量变化较大，2010~2020 年生态环境质量稳定区达 84%。其中，2015~2020 年生态改善面积大于生态恶化面积，生态环境具有向好趋势，并且生态改善区主要分布在北部和中部地区。一方面与区域气候环境密切相关，另一方面与区域生态治理措施密不可分[45]。这得益于退耕还林、

生态输水和封沙育林等工程的相继实施，促进了植被群落的繁殖和演替，从而改善了生态环境质量。

### 4.3. 生态环境质量 RSEI 驱动因子分析

结果表明 LUCC 是引起生态环境质量 RSEI 空间分布的主导因素。Ling 等[43]利用 NDVI、WET、NDBSI、LST、TEM、LUCC 和 ST(土壤类型)分析了 ARB 的 EEQ。本研究在此基础上本研究加入 Pop、DEM、Sr 和 NPP/VIIRS，更加深入地分析了阿克苏河流域生态环境质量的影响因素。已有研究表明 LUCC 会影响生态系统服务功能，例如碳储量，从而影响生态环境质量。此外，对黑河流域[46]的研究表明，土地利用类型的变化是影响 EEQ 的主要因素。例如，人类活动导致草地、耕地、林地转为建设用地或未利用地，从而导致环境质量随之恶化。研究区中部地区主要有城市分布，受人类活动影响，土地利用变化程度较大，生态环境质量变化较大。如表 3 所示，与 1990 年相比，耕地和建设用地的面积分别上升到 8527.25 km<sup>2</sup> 和 494.29 km<sup>2</sup>。其中，1990~2020 年草地转耕地和未利用地，水域转未利用地和未利用地转草地的面积较大。与 GDP、Pop 和 DEM 相比，Tem、Pre 和 Sr 对阿克苏河流域生态环境质量的影响更为明显。由于阿克苏河流域属于干旱绿洲区，沙漠广布，人口分布较为集中，地势北高南低，所以 Tem、Pre 和 Sr 对生态环境质量空间分布可能更为重要。

GDP、Pop 和 NPP/VIIRS 三个人为因素对阿克苏河流域生态环境质量的单因子解释力较低，这是由于阿克苏河流域人口分布较少，并且分布较为集中。但与其他环境因子交互作用解释力显著增加，是生态环境质量的重要影响因子。一方面，通过人工育林和封沙育林等生态工程改善生态环境质量；另一方面，城市扩张，占用耕地、林地和草地破坏了当地的生态环境。

**Table 4.** Land use area transfer in the Aksu River Basin from 1990 to 2020

**表 4.** 1990~2020 年阿克苏河流域土地利用面积转移

		1990 年						
		草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	总计
2020 年	草地	8620.94	164.56	5.94	606.68	434.42	3913.06	13745.58
	耕地	2967.33	3885.47	150.49	447.00	101.00	975.96	8527.25
	建设用地	46.64	270.20	84.02	9.86	1.33	82.24	494.29
	林地	632.99	270.34	11.12	284.67	44.24	134.08	1377.44
	水域	251.36	19.79	0.50	50.97	1078.75	145.45	1546.2
	未利用地	5672.35	47.82	3.79	170.28	1478.60	30532.84	37905.67
	总计	18191.6	4658.17	255.86	1569.46	3138.34	35783.62	63597.06

基于本研究的结果，我们对 ARB 未来的生态环境监测与可持续发展提出以下展望：(1) 建议在未来的研究中继续利用 Landsat 系列影像和高分辨率影像结合，使用 GEE 平台定期做 ARB 的 RSEI 数据，确保数据的时效性。这样可以实时掌握 ARB 的生态环境的动态变化，为及时采取相应措施提供科学依据。(2) 该研究表明，自然因素和人类活动因素对 ARB 的生态有重大影响。其中，LUCC 对生态环境质量影响最大。因此，在今后的生态环境治理中，既要考虑气候因素，人口和经济发展带来的压力，也要综合考虑土地利用类型的变化。针对土地利用类型的变化，建议对草地和林地进行生态输水或封育保护，对未利用地中的荒漠区进行防沙治沙，以促进区域生态平衡和可持续发展。(3) 针对 ARB 中生态环境质量较差的区域，特别是南部沙漠和荒漠区，建议实施生态恢复工程，如植被恢复、生态输水和荒漠化防治等。同时，加强北部山区生态环境质量较高区域的保护，防止因人类活动导致的生态退化。

## 5. 结论

本研究以阿克苏河流域为研究区，阿克苏河流域具有典型的干旱区绿洲的特征。其研究结果可为阿

克苏河流域的环境保护和区域可持续发展提供科学依据。基于 GEE 平台、Landsat 影像数据, Spearman 秩相关分析、Sen's 斜率分析、Moran's I 指数和地理探测器等方法, 确定了 RSEI 的适用性, 利用 RSEI 指数分析了 1990~2020 年阿克苏河流域生态环境状况及其变化趋势, 探讨了 RSEI 空间异质性的驱动因素。得出以下结论:

- (1) 阿克苏河流域 RSEI 高值集中在北部山区, 低值集中在南部沙漠和荒漠。从 RSEI 均值来看, 阿克苏河流域生态环境处于差和较差等级;
- (2) 阿克苏河流域生态环境质量变化趋向于减小面积大于趋向于增加面积。北部山区和中部地区是趋向于增加的区域;
- (3) 近 30 年来, 阿克苏河流域生态环境质量大部分保持稳定发展趋势。尤其是近 10 年生态环境质量保持不变的面积占比高达 84%以上;
- (4) 阿克苏河流域 RSEI 的 Moran'I 值表现出正空间相关性。H-H 聚集区在北部山区。L-L 聚集区主要分布在南部沙漠和荒漠地区;
- (5) 阿克苏河流域生态环境质量受自然因素和人类活动共同影响, 其中, LUCC 为主导因子, Tem、Pre、Sr、GDP、Pop 和 DEM 解释力超过 10%为主要驱动因素。各因子交互作用对 RSEI 的影响远大于单因子的作用。因此, 在环境保护与治理中, 应综合考虑多种因素的作用。

## 基金项目

感谢阿克苏河流域山水林田湖草沙一体化保护和修复研究(AKSSSX2022620), 新疆维吾尔自治区“天山英才”支持计划 - 科技创新团队(2023TSYCTD0019)和塔里木大学研究生科研创新计划补助金(TDGRI202304)的资助。

## 参考文献

- [1] Zhang, T., Peng, J., Liang, W., Yang, Y. and Liu, Y. (2016) Spatial-Temporal Patterns of Water Use Efficiency and Climate Controls in China's Loess Plateau during 2000-2010. *Science of The Total Environment*, **565**, 105-122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.126>
- [2] Risheng, G. (2012) Global Major Progress and Trends in the Implementation of Agenda 21. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, **10**, 3-11. <https://doi.org/10.1080/10042857.2012.10685071>
- [3] Gao, S., Dong, G., Jiang, X., Nie, T., Yin, H. and Guo, X. (2021) Quantification of Natural and Anthropogenic Driving Forces of Vegetation Changes in the Three-River Headwater Region during 1982-2015 Based on Geographical Detector Model. *Remote Sensing*, **13**, Article 4175. <https://doi.org/10.3390/rs13204175>
- [4] Chen, D., Lu, X., Liu, X. and Wang, X. (2019) Measurement of the Eco-Environmental Effects of Urban Sprawl: Theoretical Mechanism and Spatiotemporal Differentiation. *Ecological Indicators*, **105**, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.059>
- [5] Gómez, A.G., Valdor, P.F., Ondiviela, B., Díaz, J.L. and Juanes, J.A. (2019) Mapping the Environmental Risk Assessment of Marinas on Water Quality: The Atlas of the Spanish Coast. *Marine Pollution Bulletin*, **139**, 355-365. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.008>
- [6] Lu, X., Lu, J., Yang, X. and Chen, X. (2022) Assessment of Urban Mobility via a Pressure-State-Response (PSR) Model with the IVIF-AHP and FCE Methods: A Case Study of Beijing, China. *Sustainability*, **14**, Article 3112. <https://doi.org/10.3390/su14053112>
- [7] Yang, Z., Tian, J., Su, W., Wu, J., Liu, J., Liu, W., et al. (2022) Analysis of Ecological Environmental Quality Change in the Yellow River Basin Using the Remote-Sensing-Based Ecological Index. *Sustainability*, **14**, Article 10726. <https://doi.org/10.3390/su141710726>
- [8] Das, S., Pradhan, B., Shit, P.K. and Alamri, A.M. (2020) Assessment of Wetland Ecosystem Health Using the Pressure-State-Response (PSR) Model: A Case Study of Mursidabad District of West Bengal (India). *Sustainability*, **12**, Article 5932. <https://doi.org/10.3390/su12155932>
- [9] 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.
- [10] Xiong, Y., Xu, W., Lu, N., Huang, S., Wu, C., Wang, L., et al. (2021) Assessment of Spatial-Temporal Changes of

- Ecological Environment Quality Based on RSEI and GEE: A Case Study in Erhai Lake Basin, Yunnan Province, China. *Ecological Indicators*, **125**, Article 107518. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107518>
- [11] Zhang, Z., Cai, Z., Yang, J. and Guo, X. (2022) Ecological Environmental Quality Assessment of Chinese Estuarine Wetlands during 2000-2020 Based on a Remote Sensing Ecological Index. *Frontiers in Marine Science*, **9**, Article 981139. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.981139>
- [12] Li, G., He, T., Zhang, M. and Wu, C. (2022) Spatiotemporal Variations in the Eco-Health Condition of China's Long-Term Stable Cultivated Land Using Google Earth Engine from 2001 to 2019. *Applied Geography*, **149**, Article 102819. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102819>
- [13] 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.
- [14] Wu, X. and Zhang, H. (2021) Evaluation of Ecological Environmental Quality and Factor Explanatory Power Analysis in Western Chongqing, China. *Ecological Indicators*, **132**, Article 108311. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108311>
- [15] Zhang, W., Liu, Z., Qin, K., Dai, S., Lu, H., Lu, M., et al. (2024) Long-Term Dynamic Monitoring and Driving Force Analysis of Eco-Environmental Quality in China. *Remote Sensing*, **16**, Article 1028. <https://doi.org/10.3390/rs16061028>
- [16] Cai, Z., Zhang, Z., Zhao, F., Guo, X., Zhao, J., Xu, Y., et al. (2023) Assessment of Eco-Environmental Quality Changes and Spatial Heterogeneity in the Yellow River Delta Based on the Remote Sensing Ecological Index and Geo-Detector Model. *Ecological Informatics*, **77**, Article 102203. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102203>
- [17] An, M., Xie, P., He, W., Wang, B., Huang, J. and Khanal, R. (2022) Spatiotemporal Change of Ecologic Environment Quality and Human Interaction Factors in Three Gorges Ecologic Economic Corridor, Based on RSEI. *Ecological Indicators*, **141**, Article 109090. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109090>
- [18] Práválie, R. (2016) Drylands Extent and Environmental Issues. A Global Approach. *Earth-Science Reviews*, **161**, 259-278. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.003>
- [19] Jiang, Y., He, H., Zhang, H., Cao, Y., Shi, G., Feng, L., et al. (2023) Study on the Evolution and Optimization of the Spatial Structure of the Oasis in the Arid Area: A Case Study of the Aksu River Basin in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **20**, Article 4920. <https://doi.org/10.3390/ijerph20064920>
- [20] Xu, H., Yang, J., Xia, G. and Lin, T. (2022) Spatio-Temporal Differentiation of Coupling Coordination between Ecological Footprint and Ecosystem Service Functions in the Aksu Region, Xinjiang, China. *Sustainability*, **14**, Article 3483. <https://doi.org/10.3390/su14063483>
- [21] Yang, P., Zhang, S., Xia, J., Chen, Y., Zhang, Y., Cai, W., et al. (2022) Risk Assessment of Water Resource Shortages in the Aksu River Basin of Northwest China under Climate Change. *Journal of Environmental Management*, **305**, Article 114394. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114394>
- [22] 王灿, 王嘉琛. 中国历史 GDP 空间分布公里网格数据集(1990-2015) [EB/OL]. <https://doi.org/10.12078/2017121102>, 2024-04-27.
- [23] Liu, H., Jiang, D., Yang, X. and Luo, C. (2005) Spatialization Approach to 1 km Grid GDP Supported by Remote Sensing. *Geographic Information Science*, **7**, 120-123.
- [24] Yi, L., Xiong, L. and Yang, X. (2006) Method of Pixelizing GDP Data Based on the GIS. *Journal of Gansu Sciences*, **18**, 54-58.
- [25] 徐新良. 中国 GDP 空间分布公里网格数据集[EB/OL]. <https://doi.org/10.12078/2017121102>, 2024-04-27.
- [26] 黄莹, 包安明, 陈曦, 等. 基于绿洲土地利用的区域 GDP 公里格网化研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 158-165.
- [27] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[EB/OL]. <https://doi.org/10.12078/2017121101>, 2024-04-27.
- [28] 王灿, 王嘉琛. 中国历史人口空间分布公里网格数据集(1990-2015 逐年) [EB/OL]. <https://doi.org/10.12078/2017121101>
- [29] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC) [EB/OL]. <https://doi.org/10.12078/2018070201>, 2024-04-27.
- [30] 张立贤, 任浙豪, 陈斌, 宫鹏, 付昊桓, 徐冰. 中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集(1984-2020) [EB/OL]. [https://doi.org/10.11888/Socioeco\\_tpdc.271202](https://doi.org/10.11888/Socioeco_tpdc.271202)
- [31] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 等. 全国生态环境十年变化(2000-2010 年)遥感调查评估[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 462-466.
- [32] Willis, K.S. (2015) Remote Sensing Change Detection for Ecological Monitoring in United States Protected Areas. *Biological Conservation*, **182**, 233-242. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.006>

- [33] Coutts, A.M., Harris, R.J., Phan, T., Livesley, S.J., Williams, N.S.G. and Tapper, N.J. (2016) Thermal Infrared Remote Sensing of Urban Heat: Hotspots, Vegetation, and an Assessment of Techniques for Use in Urban Planning. *Remote Sensing of Environment*, **186**, 637-651. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.007>
- [34] 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[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 101-107, 114.
- [35] Yang, Y., Li, H. and Qian, C. (2023) Analysis of the Implementation Effects of Ecological Restoration Projects Based on Carbon Storage and Eco-Environmental Quality: A Case Study of the Yellow River Delta, China. *Journal of Environmental Management*, **340**, Article 117929. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117929>
- [36] Yue, H., Liu, Y., Li, Y. and Lu, Y. (2019) Eco-Environmental Quality Assessment in China's 35 Major Cities Based on Remote Sensing Ecological Index. *IEEE Access*, **7**, 51295-51311. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2911627>
- [37] Hu, X. and Xu, H. (2018) A New Remote Sensing Index for Assessing the Spatial Heterogeneity in Urban Ecological Quality: A Case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*, **89**, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.006>
- [38] Amaral, P.V. and Anselin, L. (2014) Finite Sample Properties of Moran's I Test for Spatial Autocorrelation in Tobit Models. *Papers in Regional Science*, **93**, 773-782. <https://doi.org/10.1111/pirs.12034>
- [39] Geng, J., Yu, K., Xie, Z., Zhao, G., Ai, J., Yang, L., et al. (2022) Analysis of Spatiotemporal Variation and Drivers of Ecological Quality in Fuzhou Based on RSEI. *Remote Sensing*, **14**, Article 4900. <https://doi.org/10.3390/rs14194900>
- [40] Shi, H., Shi, T., Liu, Q. and Wang, Z. (2021) Ecological Vulnerability of Tourism Scenic Spots: Based on Remote Sensing Ecological Index. *Polish Journal of Environmental Studies*, **30**, 3231-3248. <https://doi.org/10.15244/pjoes/129916>
- [41] Wang, S., Yao, Y. and Zhou, Y. (2014) Analysis of Ecological Quality of the Environment and Influencing Factors in China during 2005-2010. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **11**, 1673-1693. <https://doi.org/10.3390/ijerph110201673>
- [42] Xu, H., Duan, W., Deng, W. and Lin, M. (2022) RSEI or MRSEI? Comment on Jia Et Al. Evaluation of Eco-Environmental Quality in Qaidam Basin Based on the Ecological Index (MRSEI) and GEE. *Remote Sens.* 2021, **13**, 4543. *Remote Sensing*, **14**, Article 5307. <https://doi.org/10.3390/rs14215307>
- [43] Ling, C., Zhang, G., Deng, X., Jiao, A., Chen, C., Li, F., et al. (2022) A Study on the Drivers of Remote Sensing Ecological Index of Aksu Oasis from the Perspective of Spatial Differentiation. *Water*, **14**, Article 4052. <https://doi.org/10.3390/w14244052>
- [44] Xia, Q., Chen, Y., Zhang, X. and Ding, J. (2022) Spatiotemporal Changes in Ecological Quality and Its Associated Driving Factors in Central Asia. *Remote Sensing*, **14**, Article 3500. <https://doi.org/10.3390/rs14143500>
- [45] Gu, Z., Duan, X., Shi, Y., Li, Y. and Pan, X. (2018) Spatiotemporal Variation in Vegetation Coverage and Its Response to Climatic Factors in the Red River Basin, China. *Ecological Indicators*, **93**, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.033>
- [46] Wang, S. and Ge, Y. (2022) Ecological Quality Response to Multi-Scenario Land-Use Changes in the Heihe River Basin. *Sustainability*, **14**, Article 2716. <https://doi.org/10.3390/su14052716>