

DOI: 10.20103/j.stxb.202303230561

岳奕帆, 赵文智, 刘任涛, 李涛. 宁夏荒漠草原带生态环境质量时空变化及其驱动机制. 生态学报, 2024, 44(20): 9067-9080.

Yue Y F, Zhao W Z, Liu R T, Li T. Spatiotemporal changes and driving mechanisms of eco-environmental quality in the desert steppe zone of Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9067-9080.

宁夏荒漠草原带生态环境质量时空变化及其驱动机制

岳奕帆^{1,3}, 赵文智^{3,4,*}, 刘任涛^{2,3}, 李 涛^{3,4}

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

3 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

4 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

摘要:生态环境质量及其变化评价是生态系统管理的关键依据,也是衡量区域生态文明建设成效的重要指标。宁夏荒漠草原带人工绿洲、旱作农田、荒漠草原、流动沙地并存,加上黄河及其沿岸湿地,山水林田湖草沙景观相对完整,是研究多种生态系统耦合生态环境质量评价的典型区域。以宁夏中部荒漠草原带为例,基于 Google Earth Engine (GEE) 云平台对 2000—2020 年 Landsat 地表反射率图像进行像元间优化重构,计算了区域湿度 (WET)、绿度 (NDVI)、干度 (NDBSI)、热度 (LST) 四个分量指标,利用土地分类数据核算区域生态系统服务价值 (ESV),通过主成分分析法将上述指标加权耦合,构建改进型遥感生态指数 (IRSEI),在长时序尺度下对研究区域生态状况进行监测,并明确影响 IRSEI 的主要驱动因素。结果表明:(1)前两主轴累计贡献率为 84.66%,其中 NDVI 与 WET 是 PC1 主要贡献因子;ESV 是 PC2 的主要贡献因子。IRSEI 的评价分析中引入 ESV 减少了分量指标在 PC1 的聚集现象,将分量指标分散有效反映了 IRSEI 的多样性。(2)研究区生态系统服务价值呈现稳步增加的趋势,其中调节服务>支持服务>供给服务>文化服务,空间上呈东北高西南低的格局。(3)2000—2020 年 IRSEI 指数均值范围为 0.546—0.598,呈现单峰型波动增加趋势,增长率为 7.42%。2000—2020 年,面积变化由中等与较高级为主转变为较高与高等级为主,其中高等级面积增长率达到 84.79%。(4)降水是影响 IRSEI 分异的主要驱动因素,整体驱动因素上:降水>人口密度>温度>土地利用强度>经济生产总值。海拔则是通过影响气候因子进而间接影响了 IRSEI 指数。研究评价了 2000—2020 年宁夏荒漠草原带生态环境质量时空变化特征及驱动机制,为指导区域生态保护修复和可持续发展提供了重要决策参考。

关键词:生态环境质量;改进型遥感生态指数;生态系统服务价值;驱动机制;主成分分析

Spatiotemporal changes and driving mechanisms of eco-environmental quality in the desert steppe zone of Ningxia

YUE Yifan^{1,3}, ZHAO Wenzhi^{3,4,*}, LIU Rentao^{2,3}, LI Tao^{3,4}

1 College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Breeding Base for State Lab. Of Land Degradation and Ecological Restoration in northwest China, Yinchuan 750021, China

4 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The evaluation of ecological environment quality and its changes is the key basis for ecosystem management, and also an important indicator to measure the effectiveness of regional ecological civilization construction. The coexistence of artificial oases, dry farmland, desert grassland, and flowing inland in the desert grassland belt of Ningxia, along with the Yellow River and its coastal wetlands, presents a relatively complete landscape encompassing mountains, water bodies,

基金项目:宁夏自然科学基金创新群体项目(2023AAC01002);国家自然科学基金项目(32360318);宁夏重点研发计划项目(2021BEG03007);干旱区生态-水文宁夏科技创新团队项目(2021RXTDLX01)

收稿日期:2023-03-23; 网络出版日期:2024-07-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn

forests, fields, lakes, grasslands, and sands. This area serves as a typical location for studying the evaluation of ecological environment quality within multiple ecosystems coupling. Based on the Google Earth Engine (GEE) cloud platform, this paper optimizes the reconstruction of Landsat surface reflectance images from 2000 to 2020 for the desert steppe zone of Ningxia. It calculates four component indicators of regional wetness (WET), greenness (NDVI), dryness (NDBSI), and heat (LST), and estimates the regional ecosystem service value (ESV) using land classification data. By applying principal component analysis to weight the coupling of these indicators, an improved remote sensing-based ecological index (IRSEI) is developed, which monitors the ecological condition of the study area over a long time scale, and identifies the main driving factors influencing IRSEI. The results showed that: (1) The first two principal axes accounted for 84.66% of the total variance, with NDVI and WET being the main contributors to PC1; ESV was the main contributor to PC2. The inclusion of ESV in the evaluation analysis of IRSEI decreased the clustering of component indicators in PC1, and enhanced the diversity of IRSEI by spreading the component indicators. (2) The ESV in the study area showed a steady increasing trend, with the order of regulating service>support service>supply service>cultural service. Spatially, the value was higher in the northeast and lower in the southwest. (3) The mean value of IRSEI index ranged from 0.546 to 0.598 from 2000 to 2020, showing a unimodal fluctuating increasing trend, with a growth rate of 7.42%. In the past 20 years, the area change shifted from mainly medium and high levels to mainly very high and high levels, with the high level area increasing by 84.79%. (4) Precipitation was the main driving factor affecting the variation of IRSEI, and the overall driving factors were ranked as: precipitation>population density>temperature>land use intensity>gross domestic product. Altitude affects the IRSEI index indirectly by influencing climatic factors. This study objectively assessed the spatiotemporal patterns and drivers of regional ecological environment quality in the past 20 years, and offered valuable insights for guiding regional ecological restoration and sustainable development.

Key Words: ecological environment quality; improved remote sensing-based ecological index; ecosystem service value; driving mechanism; principal component analysis

生态环境是人与自然共同作用下的复杂系统,其保持良好的质量是人类可持续发展的基石^[1-2]。随着社会经济的快速发展,人类活动对区域环境干扰程度的日益增强,致使土地发生诸如植被退化、水土流失、土地荒漠化等一系列严重的生态环境问题^[3-5]。特别是在我国干旱、半干旱地区,区域内生态系统类型多样,水资源严重匮乏、生态环境脆弱,沙漠化与草地退化问题严峻^[6],高质量的社会经济发展需求与自然资源不合理开发利用矛盾突出,生态环境压力与日俱增。因此亟需对生态环境质量进行监测研究,客观评价区域生态环境质量的优劣,识别其时空动态特征,摸清其主要影响因素,进而提升生态环境质量和维持生态环境的可持续发展。

生态环境质量及其变化评价是生态系统管理的关键依据,也是衡量区域生态文明建设成效的重要指标。尽管已经颁布了相关的评价标准并开展了大量的评估工作,但由于相关评估并没有充分考虑自然生态系统本身的差异,所以评估结果能否很好反映区域真实生态环境质量仍值得探讨。徐涵秋^[7]提出了一种基于遥感影像信息表达的遥感生态指数(Remote Sensing-based Ecological Index, RSEI)评价区域生态环境质量,其基于图像信息的研究结果能够准确反应空间格局特征,在近十年里得到了广泛应用与改进。Wang 等^[8]引入盐分指数建立干旱 RSEI 指数监测了咸海盆地 2000—2019 年的生态环境质量状况。张静等^[1]采用气溶胶光学厚度重新构建 RSEI 评估了 2000—2020 年西安市生态环境质量变化趋势,结果发现重新构建的 RSEI 与原始 RESI 指数值域稍有差别,分级结果完全一致。Xu 等^[9]则是对分量指标中的热度指标加以改进,结合土地利用状况解析了雄安新区的生态状况。以上研究涉及的生态系统类型较为单一,因而在改进、应用时因地制宜筛选指标进行模型重构,能够更加符合当地特点。但是 RSEI 的四个分量指标中,植被覆盖度与 RSEI 的相关程度与变化趋势高度一致则表明了该指数是建立在植被覆盖优劣的基础上^[10-11]。因此在表征单一生态系统类型的时候,我们可以认为其是匀质的,能够满足评价生态环境质量的需求。但是对于多生态系统类型复合

的区域,如何修正 RSEI 所存在的不足仍然是当前研究的重点。

生态系统服务价值(Ecosystem services value, ESV)是指人类从生态系统中直接或间接获得的各种物质或非物质服务并将服务功能进行数值上的量化^[12],是联接生态系统和人类福祉的关键桥梁,也是社会绿色可持续发展的一个重要指标^[13]。生态系统服务价值能够数值量化不同生态系统类型之间的差异,且基于生态系统价值量能够很好地集合多种生态系统服务,可以更加全面的阐明区域生态系统服务功能。因此,本研究在传统 RSEI 模型构建的基础上,引入 ESV 作为一个新的分量指标,再通过 PCA 分析耦合构建 RSEI,称其为改进型遥感生态指数(Improved Remote Sensing-based Ecological Index, IRSEI)。基于 IRSEI 模型,本研究以宁夏中部荒漠草原带为例,评价区域生态环境质量时空演变特征,分析其主要影响因素和驱动机制,旨在:(1)为生态环境质量评价提供新的思路与方法;(2)为区域生态保护修复和可持续发展提供决策参考。

1 研究区概况

研究区包含在盐池、同心、红寺堡以及海原四个县区内,面积约有 18000 km²,位于宁夏回族自治区中部(105°41'45"—107°39'24"E,36°7'13"—38°9'43"N),北接宁夏沿黄平原灌溉区,南靠宁南黄土丘陵山区,东临毛乌素沙地,西接腾格里沙漠^[14](图 1)。区域海拔范围 1240—2955 m,属于典型的温带大陆性气候。降水量在 230—300 mm 之间,年际变动率大,蒸发量高,多集中在夏秋两季^[15]。研究区由西北向东南景观类型主要表现为荒漠、草原、山地,不同景观类型之间相互交杂。主要植被类型表现为典型草原、荒漠草原、沙地植被、旱作农田、人工绿洲。有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等草本、灌木、半灌木植物。在水资源匮乏的限制条件下,区域以节水作物种植为主,是典型的雨养农业区^[6]。区域总人口约 109.55 万人,多为农村劳动人口。人均总产值为 8350 元(2020 年),占全区的 14.24%,是全省较贫困地区。区域干旱少雨,作物受气候影响强烈,土地承载能力弱,是多项生态治理项目的重点实施区域。

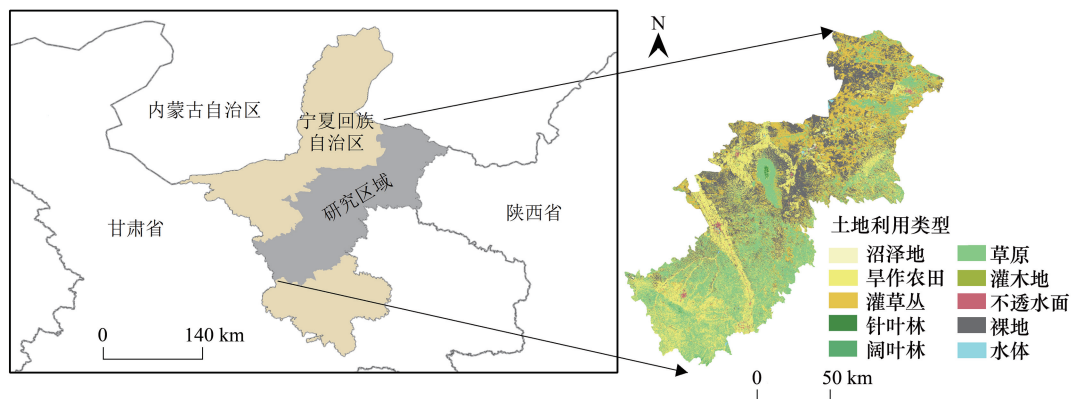


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 数据处理

以 Landsat 5 与 Landsat 8 系列遥感图像为数据源(数据来自 Google Earth Engine, <https://earthengine.google.com>)。数据集已经经过了几何校正、大气校正等预处理工作。在进行信息提取前,选择全年云量较少的 6—9 月影像,将影像集合并进行中值合成。土地利用分类数据来自于中国科学院开发的具有精细分类系统的全球 30 m 土地覆盖动态监测产品(GLC_FCS30, <https://data.casearth.cn>),通过专家判定,目视解译后进行重分类,将研究区域土地利用类型划分为旱作农田、针叶林、阔叶林、灌木地、草原、灌草丛(植被覆盖

度<0.15)、湿地、不透水面、裸地以及水体 10 类(表 1)。全国粮食产量数据来源于国家统计局,研究区域粮食产量与种植面积来源于宁夏数据(<https://nxdata.com.cn>),宁夏回族自治区粮食收购价格来源于宁夏回族自治区粮食和物资储备局。其余气象与社会经济数据见表 2。

表 1 不同土地利用类型面积及占比
Table 1 Area and proportion of different land use types

土地利用类型 Land use type	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km ² Area	占比/% Proportion	面积/km ² Area	占比/% Proportion	面积/km ² Area	占比/% Proportion	面积/km ² Area	占比/% Proportion	面积/km ² Area	占比/% Proportion
旱作农田 Rainfed cropland	4198.70	22.44	4261.16	22.78	4438.73	23.73	4824.72	25.79	5055.38	27.02
针叶林 Coniferous forests	9.23	0.05	9.30	0.05	9.37	0.05	9.44	0.05	9.50	0.05
阔叶林 Broadleaved forests	15.73	0.08	16.28	0.09	16.21	0.09	16.52	0.09	16.75	0.09
灌木地 Shrubland	28.19	0.15	30.78	0.16	33.49	0.18	36.93	0.20	40.23	0.22
草原 Grassland	5087.14	27.19	5526.12	29.54	5160.65	27.58	5821.16	31.12	5420.11	28.97
灌草丛 Shrub grassland	3672.64	19.63	3959.22	21.16	3696.82	19.76	3886.12	20.77	3937.16	21.05
湿地 Wetlands	21.77	0.12	25.71	0.14	27.94	0.15	33.05	0.18	43.15	0.23
不透水面 Impervious surfaces	16.92	0.09	24.11	0.13	32.81	0.18	49.35	0.26	78.77	0.42
裸地 Bare areas	5648.85	30.19	4843.80	25.89	5277.36	28.21	4012.35	21.45	4081.72	21.82
水体 Water body	9.12	0.05	11.81	0.06	14.91	0.08	18.65	0.10	25.50	0.14

表 2 数据名称与来源
Table 2 Data name and source

数据名称 Data name	分辨率 Resolution	数据来源 Data source
高程 DEM	30m	https://www.gscloud.cn/
年总降水量 Annual total precipitation	1km	https://data.tpdc.ac.cn
年均温度 Annual average temperature	1km	https://data.tpdc.ac.cn
人口密度 Population density	1km	https://hub.worldpop.org
经济生产总值 Gross domestic product	1km	https://github.com/thestarlab/ChinaGDP

DEM:数字高程模型 Digital elevation model

2.2 生态系统服务价值核算方法

在 Costanza 等^[16]提出的生态系统服务功能分类的基础上,谢高地等人^[17]在对多位生态学者进行调查问卷后,构建了中国陆地生态系统服务价值当量表。考虑到不同区域以及不同年份粮食价格的差异性,针对研究区域的社会发展情况,对区域生态系统服务价值采用以农田为基准的修订方法进行修订^[18-19],粮食价格采用 2020 年数据。

$$VC = \frac{1}{7}m \times H \times CF \times F \tag{1}$$

式中,VC 表示生态系统服务价值系数,m 为研究区域粮食单位面积产量(kg/hm²),H 为粮食收购价格(元/kg),CF 为区域修正系数,F 为不同地类生态系统服务价值当量(元/hm²)。得到修正系数为 0.94。研究区域 1 个当量因子的生态系统服务价值经济量为 2068.67 元/hm²。将各土地利用类型与生态系统服务价值当量表一一对应,其中不透水面(建设用地)的当量因子在生态系统服务价值当量表并没有统计且各项研究说法不一,因此本研究将其设为 0,进而得到研究区域单位面积生态系统服务价值系数(表 3)。

表 3 生态系统服务价值系数/(元/hm²)
Table 3 Ecosystem service value coefficient

土地利用类型 Land use type	供给服务 Provisioning service			调节服务 Regulating service			支持服务 Supporting service			文化服务 Cultural service	
	食物生产 Food production	原料生产 Raw materials	水资源供给 Water resources supply	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	净化环境 Purify the environment	水文调节 Hydrological regulation	土壤保持 Soil conservation	维持养分循环 Maintain nutrient cycling	生物多样性 Biodiversity	美学景观 Aesthetic landscape
旱作农田 Rainfed cropland	1652.87	777.82	38.89	1302.85	700.04	194.45	525.03	2002.89	233.35	252.79	116.67
针叶林 Coniferous forests	427.80	1011.17	525.03	3305.73	9858.87	2897.38	6494.80	4005.77	311.13	3655.75	1594.53
阔叶林 Broadleaved forests	563.92	1283.40	661.15	4219.67	12639.57	3752.98	9217.17	5153.06	388.91	4686.37	2061.22
灌木地 Shrubland	369.46	836.16	427.80	2741.82	8225.45	2489.02	6514.24	3344.63	252.79	3052.94	1341.74
草原 Grassland	194.45	272.24	155.56	991.72	2605.70	855.60	1905.66	1205.62	97.23	1088.95	486.14
灌草丛 shrub grassland	738.93	1088.95	602.81	3830.76	10131.10	3344.63	7428.18	4666.92	350.02	4239.12	1866.77
湿地 Wetlands	991.72	972.27	5036.38	3694.64	7000.38	7000.38	47116.44	4491.91	350.02	15303.61	9197.72
不透水面 Impervious surfaces	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
裸地 Bare areas	0	0	0	0	0	194.45	58.34	38.89	0.00	38.89	19.45
水体 Water body	1555.64	447.25	16120.32	1497.30	4453.02	10792.25	198810.77	1808.43	136.12	4958.60	3675.20

生态系统服务价值的测算公式为:

$$ESV = \sum_{k=1}^k A_k \times VC_k \quad (2)$$

式中, ESV 为生态系统服务价值, A_k 表示第 k 种土地利用类型, VC_k 表示第 k 种土地利用类型生态系统服务价值系数。

生态系统服务价值单元小区的划分是空间可视化与建立 $IRSEI$ 的重要前提, 借鉴景观生态学中对景观样本的要求与前人研究, 样本面积应为平均斑块面积的 2—5 倍^[20-21], 结合研究区情况与数据处理量, 将研究区以 3 km×3 km 的正方形格网进行划分, 最终得到 2306 个单元小区。计算每个单元小区的生态系统服务价值, 并将该值作为中心点值。

2.3 评价指标与 $IRSEI$ 的计算

在传统 $RESI$ 模型的基础上, 本研究加以改进引入生态系统服务价值, 公式如下:

$$IRSEI = f(WET, NDVI, NDBSI, LST, ESV) \quad (4)$$

式中, $IRSEI$ 表示改进型遥感生态指数, WET 表示湿度^[22], $NDVI$ 表示植被绿度^[23], $NDBSI$ 表示干度^[24], LST 表示热度^[25-26], 计算方法与前人方法一致, ESV 表示生态系统服务价值。

2.4 构建遥感生态指数

在对分量指标合成进行主成分分析之前, 由于 $NDVI$ 、 LST 、 WET 、 $NDBSI$ 以及 ESV 的量纲不统一, 直接进行主成分分析会导致权重失衡, 需要将其归一化, 使量纲统一在 $[0, 1]$ 之间^[27], 各分量归一化公式为:

$$NI = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (5)$$

式中, I 表示分量指标值, $I_{\max}$ 与 $I_{\min}$ 分别为分量指标的最大、最小值。

利用主成分分析方法对归一化后的各分量指标进行分析运算, 为了确保主成分集成了图像的大部分信息 (累计贡献率 > 80%), 因此 $IRSEI$ 在主成分分析过程相比于传统的 $RSEI$ 有所差异。

$$IRSEI = \sum_i^n \left(\left(\frac{Per_{PCi}}{Per_{PCi} + Per_{PCi-1}} \right) \times PC_i \right) \quad (6)$$

式中, n 表示主成分特征累积达到 80% 以上的分量, Per_{PCi} 表示 PC_i 轴的累计贡献率, PC_i 表示 PC_i 轴上的因子值。

2.5 结构方程模型

在本研究中, 通过 R 4.3.2 来实施结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM) 的构建。该模型依托研究者先前的知识基础, 预先确定各变量间的相互作用, 从而评估它们之间的关联程度。此方法能够确定自变量对因变量的直接、间接以及综合影响, 并允许对整体模型进行拟合与评估^[28]。基于此, 本文运用 SEM 模型来分析地理、气候和人为因素对宁夏荒漠草原带生态环境质量的直接和间接影响, 并通过整体模型的拟合度检验和个体参数的显著性检验 (P 值) 等来评价模型的有效性。

3 结果与分析

3.1 $IRSEI$ 主成分特征

利用 R 4.3.2 进行逐像元相关系数计算与显著性检验, 从各分量指标在 PCA 的分析结果中来看 (图 2、表 4), 各分量指标无论是在 $RSEI$ 还是 $IRSEI$ 中, 均与之表现显著相关的关系 ($P < 0.01$)。 $IRSEI$ 相关性结果与 $RSEI$ 中各分量指标的表现结果相似。引入 ESV 之后, $IRSEI$ 分量指标之间原有的关系与关联程度并没有发生改变。 $PC1$ 中载荷向量为正, 表现为区域生态环境质量改善的驱动因素, $PC1$ 为负, 是生态环境质量恶化的驱动因素。虽然 ESV 与其他分量指标的相关性较低, 2000—2020 年相关系数 (绝对值) 的最大值不超过 0.40, 但是 ESV 的加入增加了生态环境质量评价的纬度, 使得结果更加贴合多生态系统类型区域特点, 不再是由 $PC1$ 占据主要贡献比。此外, 从 PCA 向量特征分析来看 (表 5), 在 $IRSEI$ 中, $PC1$ 的累计贡献率不超过 70%, 引入 ESV 后, ESV 在 $PC2$ 中占据优势且载荷向量远大于其他分量指标且使 $PC2$ 的累计贡献率达到 15%

以上,PC1 与 PC2 之和在不同年份均在 80%以上,表明涵盖了 IRSEI 绝大部分特征。这一结果佐证了引入 ESV 对生态环境质量评价的合理性。

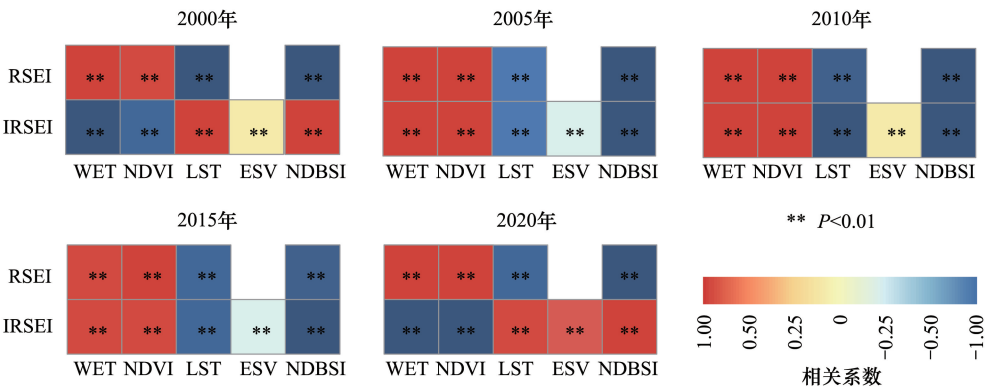


图 2 各指标与 IRSEI、RSEI 的相关系数及显著性检验

Fig.2 Correlation coefficient and significance test of each index with IRSEI and RSEI

IRSEI:改进型遥感生态指数 Improved remote sensing-based ecological index;RSEI:遥感生态指数 Remote sensing-based ecological index;WET:湿度 Wet;NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index;LST:地表温度 Land surface temperature;ESV:生态系统服务价值 Ecosystem service value;NDBSI:归一化建筑物-裸土指数 Normalized difference built-up and soil index;

表 4 不同分量指标间的相关性

Table 4 Correlation between different component indexes

指标 Index	2000 年					2005 年					2010 年				
	湿度	绿色度	温度	干度	生态系统 服务价值	湿度	绿色度	温度	干度	生态系统 服务价值	湿度	绿色度	温度	干度	生态系统 服务价值
湿度 WET	1	0.65	-0.58	-0.79	-0.22	1	0.68	-0.51	-0.75	-0.11	1	0.78	-0.64	-0.84	0.05
绿色度 NDVI		1	-0.52	-0.85	-0.16		1	-0.49	-0.82	-0.12		1	-0.67	-0.89	-0.08
热度 LST			1	0.52	0.36			1	0.58	0.40			1	0.62	0.10
干度 NDBSI				1	0.20				1	0.23				1	0.11
生态系统服务 价值 ESV					1					1					1

指标 Index	2015 年					2020 年				
	湿度	绿色度	温度	干度	生态系统 服务价值	湿度	绿色度	温度	干度	生态系统 服务价值
湿度 WET	1	0.85	-0.72	-0.91	-0.15	1	0.81	-0.66	-0.91	-0.22
绿色度 NDVI		1	-0.71	-0.92	-0.16		1	-0.59	-0.90	-0.28
热度 LST			1	0.71	0.40			1	0.61	0.28
干度 NDBSI				1	0.22				1	0.25
生态系统服务 价值 ESV					1					1

WET:湿度 Wet;NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index;LST:地表温度 Land surface temperature;ESV:生态系统服务价值 Ecosystem service value;NDBSI:归一化建筑物-裸土指数 Normalized difference built-up and soil index

3.2 生态系统服务价值及其时空变化特征

研究区域 2000—2020 年期间生态系统服务价值总量分别为 26.01×10⁹、27.71×10⁹、26.72×10⁹、28.75×10⁹、29.16×10⁹元,整体呈增加趋势,2000—2020 年增长率为 12.11%(图 3)。供给服务、调节服务、支持服务、文化服务 4 个一级生态系统服务价值分别提升 0.46×10⁹、1.95×10⁹、0.62×10⁹、0.11×10⁹元。区域最突出的一级生态系统服务是调节服务,占价值总量的 61%以上;其次是支持服务,占价值总量的 22%以上,最后才是供给服务与文化服务。

以 2000 年生态系统服务价值为基准,采用自然间断点法将其分为 5 个等级(图 4)。空间分布呈现北高南低—西低东高的空间分布格局。整个区域以较低、中等两个价值区间为主,面积占比在 50% 以上。高价值区间 2000—2020 年提升幅度较高,增速为 6.08%/10a。Ⅰ、Ⅱ 价值区间主要分布在研究区域边界、中部零散区域以及南部的海原县。Ⅲ 价值区间主要集中在红寺堡与同心县。Ⅳ、Ⅴ 价值区间主要集中在盐池县。

表 5 主成分分析中不同分量指标特征向量与特征值

Table 5 Eigenvectors and eigenvalues of different component Indexes in PCA

指数类型 Type of index	分量指标 Evaluation index	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3	第四主成分 PC4	第五主成分 PC5
改进型遥感生态指数 IRSEI	WET	-0.52	0.19	-0.11	0.70	-0.43
	NDVI	-0.50	0.11	-0.32	-0.69	-0.38
	LST	0.44	0.12	-0.87	0.13	-0.05
	NDBSI	0.48	-0.16	0.26	-0.06	-0.82
	ESV	0.19	0.95	0.22	-0.08	-0.0004
	特征值	0.08	0.020	0.013	0.0048	0.0013
	累计贡献率	68.66%	84.60%	95.06%	98.90%	100%
遥感生态指数 RSEI	WET	0.58	-0.23	0.62	-0.48	
	NDVI	0.56	0.19	-0.72	-0.36	
	LST	-0.09	0.95	0.30	0.04	
	NDBSI	-0.59	0.1	-0.03	-0.8	
	特征值	0.07	0.01	0.006	0.0008	
	累计贡献率	79.28%	92.21%	99.13%	100%	

IRSEI:改进型遥感生态指数 Improved Remote Sensing-based Ecological Index;RSEI:遥感生态指数 Remote Sensing-based Ecological Index;PC1:第一主成分 First principal component;PC2:第二主成分 Second principal component;PC3:第三主成分 Third principal component;PC4:第四主成分 Fourth principal component;PC5:第五主成分 Fifth principal component

3.3 生态环境质量的时空演变特征

在时间尺度上(图 5),过去 20 年研究区域 IRSEI 呈波动升高的变化趋势,面积变化趋势逐渐由中等—较高值域区间转变为较高—高值域区间。2020 年 IRSEI 较高及以上面积占比达到了 50% 以上,这其中面积增长最明显的为高等级,增长了 2373.70 km²。

从空间尺度上分析(图 5),低值区域(低、较低)主要分布在罗山毗邻区、海原县域与同心县的交汇地带以及南部区域,剩余零散分布于整个研究区内。中等值区域主要分布在研究区东南边界呈现连续分布格局并向西南不断延伸。高值(较高、高)区域主要分布在盐池县域以及红寺堡区内,在同心县也有分布但面积不多。

在生态环境质量等级面积变化的时空分异上(图 6),2000—2020 年宁夏荒漠草原带的生态环境质量均值由 0.546 提升至 0.587,最大值出现在 2015 年为 0.598。在时间尺度上,2000 年 IRSEI 指数的面积分布以中等和较高等级所占面积较大,2000—2020 年这两个层级发生了较大的转变。其中,中等等级的 IRSEI 主要流向了较高等级与高等级,流转的面积分别占中等等级总面积的 27.21%与 21.80%;也有向低等级流转,但是面积占比不大,仅有 3.11%。较高等级主要流转的

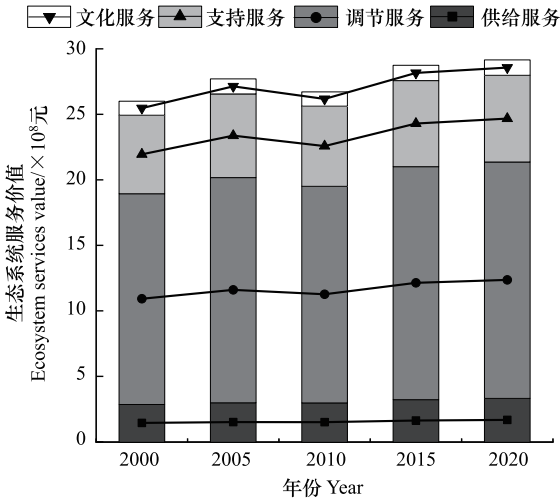


图 3 2000—2020 年一类生态系统服务价值变化趋势

Fig.3 Change trend of primary ecosystem service value in study area from 2000 to 2020

WET:湿度 Wet

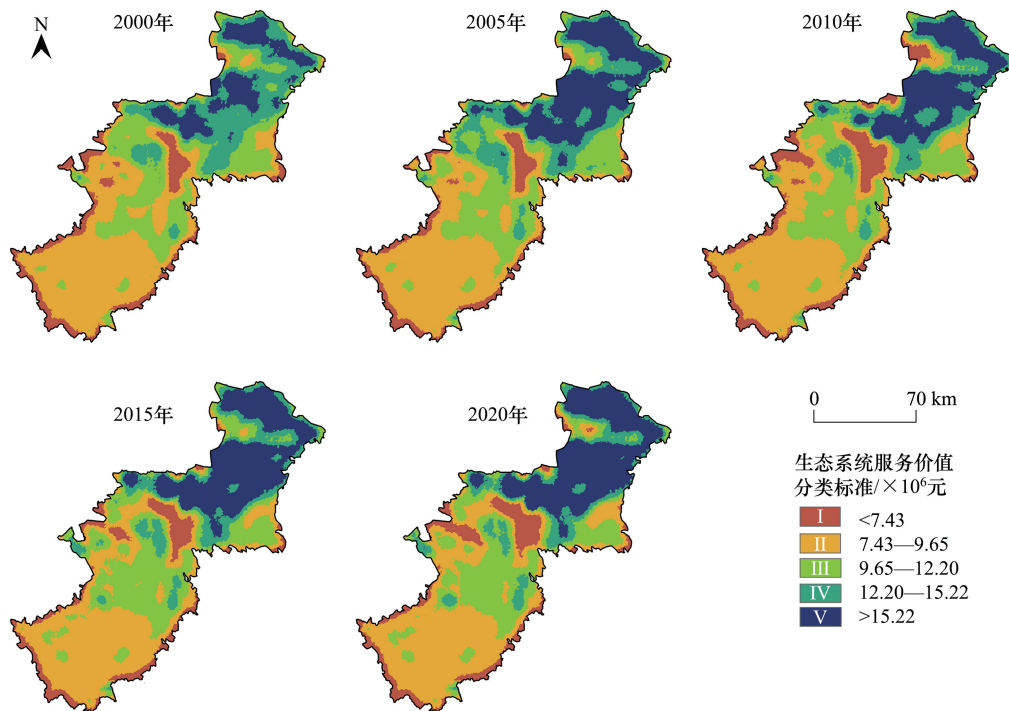


图4 生态系统服务价值的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecosystem service value

方向为高等级,流转面积占比为 35.11%。从各 IRSEI 指数等级之间面积所转化的方向可以看出,不同 IRSEI 之间是以等级递增为主包含多层级流转的方式做转化,在自身 IRSEI 等级的基础上向上转移一个层级。虽然面积转移是相互的,但是向低 IRSEI 等级转移的远没有向高 IRSEI 层级转移的面积多,生态环境质量表现向好的趋势。在空间尺度上,IRSEI 提升的区域主要位于盐池县境内。区域南部地区相对表现较为稳定。

3.4 生态环境质量的驱动因素分析

图 7 结果表明:方程的显著性概率 P 值为 0.08, Fisher's C 为 25.16,表明该模型的优化和拟合良好。气候与人为因子解释了 IRSEI 指数 63%的信息($R^2=0.63$);不同驱动因子对于宁夏荒漠草原带生态环境质量的解释力具有明显差异,按照解释力排序为:降雨>人口密度>温度>土地利用强度>经济生产总值。在气候因子中,降雨对 IRSEI 是正效应,温度为负效应;在人为因子中,土地利用强度与经济生产总值对 IRSEI 指数表现为正效应,而人口密度为负效应。海拔对于气候因子达到了较高解释率(77%),因此其是通过影响气候因子间接影响了 IRSEI 指数。

4 讨论

宁夏中部作为干旱地区典型的荒漠草原带,生态系统类型复杂多样,区域生态环境脆弱。该地区生态环境质量不仅受区域生态背景所决定,也受农牧交错生产生活方式的影响,所以生态环境质量的评价具有特殊性。GEE 平台凭借庞大资源与快捷的处理过程成为目前世界上使用频率最高的云计算平台^[29—30]。借助 GEE 平台进行数据的预处理,本研究通过引入 ESV 修正 RSEI 的方法,构建 IRSEI 生态环境质量评价模型,这一方法可以对多生态系统类型复合区域整体评价更为客观,因为 ESV 是以经济价值对多生态系统类型差异进行了量化,可以使生态环境质量的评价结果更加可信。

RSEI 作为近 10 年来被广泛应用评价区域生态环境质量的遥感指数,很好的解释了区域中的生态状况^[31—32]。前人的研究表明,RSEI 指数与 NDVI 指数在结果趋势上表现着高度的一致性^[2,10—11],该结果

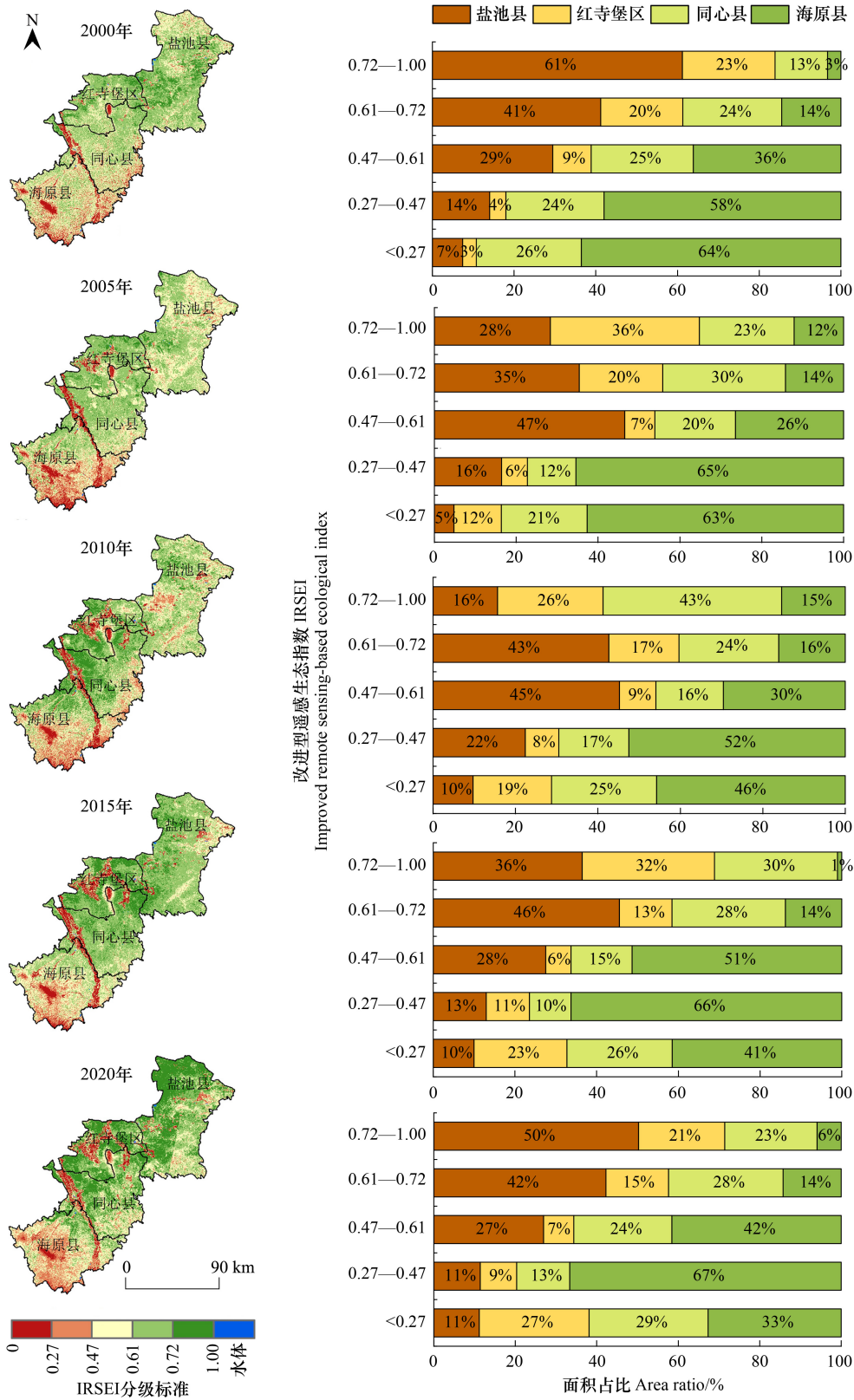


图 5 2000—2020 年 IRSEI 时空分布特征
Fig.5 Temporal and spatial distribution characteristics of IRSEI from 2000 to 2020

说明 NDVI 指数解释了绝大部分 RSEI 指数的信息。那么假设一个区域以某一种单一生态系统类型为主,则评价中可以认为该区域是匀质的,利用 NDVI 等表征植被生长优劣的植被指数来对区域进行总体评价是合理

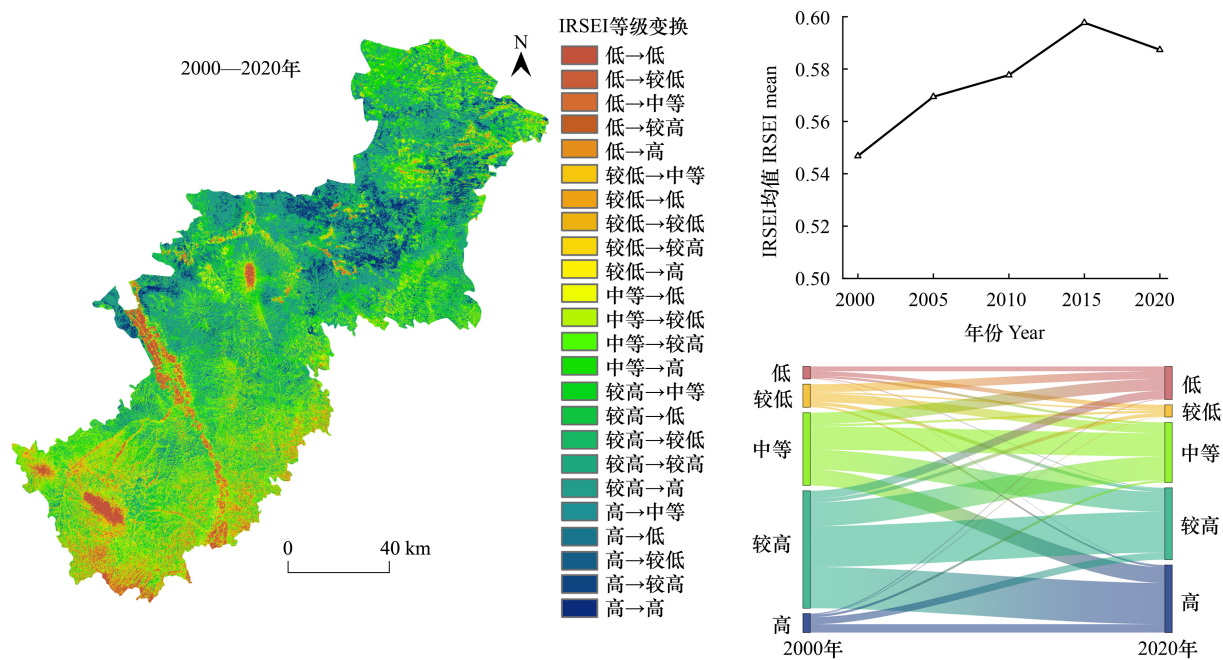


图 6 IRSEI 等级时空流转分异及趋势变化特征

Fig.6 Characteristics of spatiotemporal flow and change trend of IRSEI grade

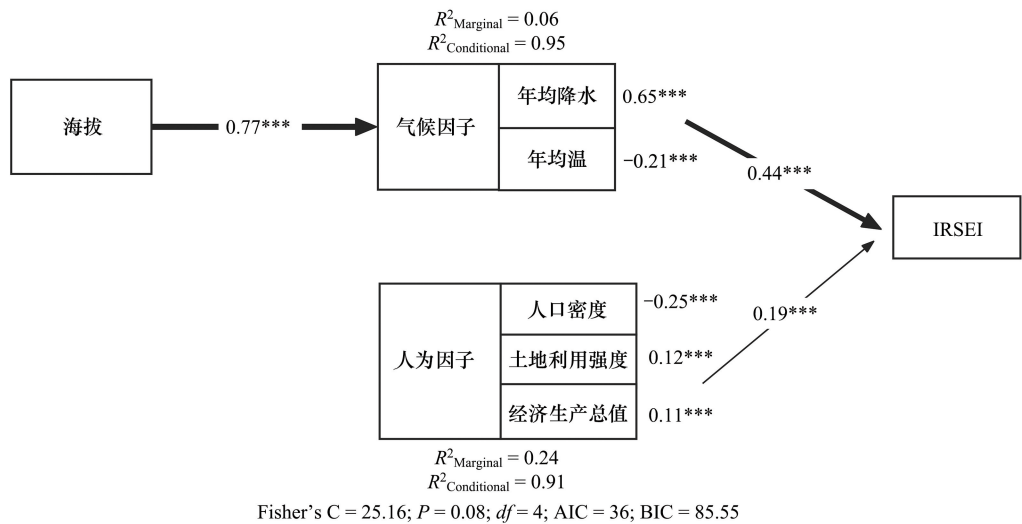


图 7 IRSEI 与驱动力间的关系模型

Fig.7 Relationship model between IRSEI and driving factors

Fisher's C: 费希尔变换统计量; df : 自由度; AIC: 赤池信息准则; BIC: 贝叶斯信息准则; R^2_{marginal} : 固定效应方差; $R^2_{\text{conditional}}$: 固定效应和随机效应方差; *** $P < 0.001$

的。但是对于生态系统类型复杂多样的区域,不同生态系统类型差异明显,光依靠四个分量指标进行评价就显得不够客观。例如,荒漠生态系统由于其本身土壤资源较差、水分稀缺、植被生长条件恶劣,但是其中蕴藏着大量珍稀的野生动植物基因资源,并且在防风固沙等方面发挥着重要的生态服务功能,同时在碳汇和生物地球化学循环方面也发挥着不可替代的作用^[33]。因此若将森林生态系统与荒漠生态系统放在一起比较生态环境质量,在依赖植被指数的评价体系下,必然会致使荒漠生态系统的生态环境质量十分低。ESV 可以通过

土地利用类型的不同,数值量化不同生态系统类型之间的差异,并且涵盖了多种生态系统服务功能,故将 ESV 纳入 RSEI 评价体系是合理的。

从 IRSEI 评价过程中 PCA 结果来看,PC1 轴中特征向量信息为 68.66%,ESV 的加入,很好的减少了 75% 以上特征值聚集在 PC1 的现象^[9,34],同时,IRSEI 将多指标分散到各维度(累计贡献率>80%),表现了 IRSEI 的复杂与多样性,这种结果与董春媛等^[35]引入景观形状指数(LDI)替换 LST 构建 RSEI 的结果相似。PCA 的分析结果中 RSEI 与原有分量指标之间的关联性并没有因引入 ESV 后差异变大,各分量指标间均保持其原有的关联度,但是在 PC1 轴上向量投射的方向发生了改变,主要因为 ESV 的价值构成是由生态系统服务功能对人类福祉的影响大小而决定,其价值大小是由土地利用面积与生态系统服务价值系数共同决定。ESV 通过耦合土地利用类型与价值大小的差异,进而改变了单一指标对 RSEI 的影响。前人的研究结果表明,土地利用类型的面积与 RSEI 有着高度的相关关系^[9,34,36]。在剔除水体对湿度的影响后,本研究区域所有土地利用类型的生态系统服务价值系数依次为湿地>阔叶林>灌草丛>针叶林>灌木地>草原>旱作农田>裸地>不透水面。许多研究均表明^[37-39],林地的 NDVI 值在不同的土地利用类型中都是最高的。林地尽管 NDVI 值很高,但是在本研究区域所占面积极低,仅占研究区域总面积 0.2%,对总体 IRSEI 影响微小。草原与旱作农田面积占比较大,但是生态系统服务价值系数不高且 NDVI 值也较低;灌草丛虽然植被覆盖度不高(植被覆盖度<0.15),但是生态系统服务价值系数位居前列,且所占面积在不同年份均在区域总面积的 19% 以上,提供了较高的生态系统服务价值,进而影响了 IRSEI 的值域区间。在宁夏区域,李南^[40]通过利用地表蒸散量替换 WET 进而评价区域生态环境质量,王倩^[41]则结合气象数据与夜间灯光数据评价宁夏区域的生态环境质量,并解析了长时序尺度下的区域生态环境质量变化趋势。IRSEI 与上述前人研究结果在指标的值域区间上存在差异,但是空间分布特征结果表现一致。以上内容进一步表明引入 ESV 评价宁夏荒漠草原带生态环境质量的合理性。

根据结构方程的驱动力分析可知,气候因子是驱动宁夏荒漠草原带生态环境 IRSEI 指数空间分异的主要因子,该结果与前人研究一致^[41]。其中,降雨相较于温度,对生态环境的产生的影响更大。降水与植被生长、水土保持和生物群落丰富度等自然现象密切相关^[42],对于干旱与半干旱区而言,降雨条件是限制植被生长的主导因素^[43],降雨条件的缺少会进而影响区域生态环境质量。人为因子中人口密度是影响宁夏荒漠草原带生态环境质量空间分异的次要因子,有研究指出人口密度能够直观反映区域人类的聚集程度,由于人类聚集而发生一系列生产经济活动,必然会引起区域生态环境质量的变化^[44]。其次,土地利用强度会直接改变地表状况,进而引起生态环境质量变化。在整个研究区域中,生态环境质量提升最为明显的是位于北部的盐池县,有研究指出盐池县多年来通过持续推进防治沙害、造林种草、封山育林等生态建设工程,极大地改善了区域植被结构^[45]。这与本研究盐池县的生态环境质量表现改善趋势的变化相一致。

5 结论

(1) 引入 ESV 构建 IRSEI 模型从研究区生态系统类型多样的特点出发,考虑到不同生态系统类型间的服务功能差异的同时,削减了 RSEI 指数与 NDVI 指数的高度一致性。引入 ESV 后,降低了特征值在 PC1 轴上的聚集性且没有改变原有指标之间的关联性,能更加客观说明当前多生态系统类型符合区域的生态状况。

(2) 20 年间区域生态系统服务价值整体呈现稳步的增加趋势,增长率为 12.11%。其中调节服务占据主导地位,占价值总量的 61% 以上。空间分布南北差异明显,整个区域主要以较低、中等两个价值区间为主。

(3) 从时间尺度上来看,2000—2020 年宁夏荒漠草原带 IRSEI 指数呈波动升高的变化趋势,20 年总体均值为 0.576,并在 2020 年上升至 0.587。2020 年 IRSEI 指数较高及以上等级面积占比达到了 50% 以上,其中面积增长最明显的为高等级,增长了 2373.70 km²。从空间分布来看,宁夏荒漠草原带北部盐池县 IRSEI 增长明显,低值区域(低、较低)则主要分布在罗山毗邻区、海原县域与同心县的交汇地带以及南部区域,剩余零散分布在整个研究区内。

(4) 气候与人为因子解释了 IRSEI 指数 63% 的信息($R^2=0.63$)。其中,降雨是影响宁夏荒漠草原带的主

要驱动因素。海拔是通过直接影响气候因子的方式进而间接影响区域生态环境质量。

参考文献(References):

- [1] 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. 生态学报, 2023, 43(5): 2114-2127.
- [2] 岳奕帆, 陈国鹏, 王立, 杨钧, 杨克彤. 基于 Google Earth Engine 云平台的甘肃舟曲县生态环境质量动态监测与评价. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1608-1614.
- [3] Luo P P, Mu Y, Wang S T, Zhu W, Mishra B K, Huo A D, Zhou M M, Lyu J Q, Hu M C, Duan W L, He B, Nover D. Exploring sustainable solutions for the water environment in Chinese and Southeast Asian cities. *Ambio*, 2022, 51(5): 1199-1218.
- [4] Mu D R, Luo P P, Lyu J Q, Zhou M M, Huo A D, Duan W L, Nover D, He B, Zhao X L. Impact of temporal rainfall patterns on flash floods in Hue City, Vietnam. *Journal of Flood Risk Management*, 2021, 14(1): e12668.
- [5] Wang S T, Cao Z, Luo P P, Zhu W. Spatiotemporal variations and climatological trends in precipitation indices in Shaanxi Province, China. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 744.
- [6] 李媛. 宁夏中部干旱带碳平衡特征研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [7] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.
- [8] Wang J, Liu D W, Ma J L, Cheng Y N, Wang L X. Development of a large-scale remote sensing ecological index in arid areas and its application in the Aral Sea Basin. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(1): 40-55.
- [9] Xu H Q, Wang M Y, Shi T T, Guan H D, Fang C Y, Lin Z L. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). *Ecological Indicators*, 2018, 93: 730-740.
- [10] 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞, 李新庆, 王芳. 西北典型生态脆弱区植被覆盖度时空变化及其生态安全评价:以宁夏贺兰山为例. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 599-608.
- [11] 陈勉为, 冯丹, 张仕凯, 江雨, 张新兰. 基于 RSEI 和 ANN-CA-Markov 模型的伊宁市生态环境质量动态监测及预测研究. 干旱区地理, 2023, 46(6): 911-921.
- [12] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [13] Xu Y Q, Xiao F J, Liao Y M. Assessment of grassland ecosystem service value in response to climate change in China. *Diversity*, 2022, 14(3): 160.
- [14] 程淑杰, 朱志玲, 白林波. 基于 GIS 的人居环境生态适宜性评价——以宁夏中部干旱带为例. 干旱区研究, 2015, 32(1): 176-183.
- [15] 孟明, 古君龙, 杨新国, 杨东东, 苗翻, 田娜. 形态退化对中间锦鸡儿冠层茎流的影响. 水土保持研究, 2019, 26(5): 202-209.
- [16] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [17] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [18] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例. 地理研究, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [19] Zhang X M, Xie H L, Shi J Y, Lv T G, Zhou C H, Liu W D. Assessing changes in ecosystem service values in response to land cover dynamics in Jiangxi Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(9): 3018.
- [20] Rangel-Buitrago N, Neal W J, de Jonge V N. Risk assessment as tool for coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 186: 105099.
- [21] 田鹏, 李加林, 史小丽, 王丽佳, 刘瑞清. 浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2697-2706.
- [22] Ali Baig M H, Zhang L F, Shuai T, Tong Q X. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(5): 423-431.
- [23] 罗春, 刘辉, 戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估——以常宁市为例. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 145-150.
- [24] 朱贞榕. 基于遥感生态指数(RSEI)的南昌市生态环境质量评价[D]. 抚州: 东华理工大学, 2017.
- [25] Yu X L, Guo X L, Wu Z C. Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS—comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9829-9852.
- [26] Sekertekin A, Bonafoni S. Land surface temperature retrieval from landsat 5, 7, and 8 over rural areas: assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 294.
- [27] 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. 生态学报, 2019, 39(8): 2963-2972.

- [28] Qin G X, Meng Z Y, Fu Y. Drought and water-use efficiency are dominant environmental factors affecting greenness in the Yellow River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 834:155479.
- [29] Wang L, Diao C Y, Xian G, Yin D M, Lu Y, Zou S Y, Erickson T A. A summary of the special issue on remote sensing of land change science with Google earth engine. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 112002.
- [30] 杨泽康, 田佳, 李万源, 苏文瑞, 郭睿妍, 刘文娟. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势. *生态学报*, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [31] Geng J W, Yu K Y, Xie Z, Zhao G J, Ai J W, Yang L Q, Yang H H, Liu J. Analysis of spatiotemporal variation and drivers of ecological quality in Fuzhou based on RSEI. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4900.
- [32] Gao P W, Kasimu A, Zhao Y Y, Lin B, Chai J P, Ruzi T, Zhao H M. Evaluation of the temporal and spatial changes of ecological quality in the Hami oasis based on RSEI. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7716.
- [33] 程磊磊, 郭浩, 卢琦. 荒漠生态系统服务价值评估研究进展. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 281-287.
- [34] Yuan B D, Fu L N, Zou Y A, Zhang S Q, Chen X S, Li F, Deng Z M, Xie Y H. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 302: 126995.
- [35] 董春媛, 乔荣荣, 杨智程, 罗立辉, 常学礼. 基于改进遥感生态指数的宁夏沿黄平原区生态环境质量评价. *生态学报*, 2023, 43(16): 6706-6715.
- [36] 刘明, 刘淳, 王克林. 洞庭湖流域生态安全状态变化及其驱动力分析. *生态学杂志*, 2007, 26(8): 1271-1276.
- [37] 贾丹阳, 熊祯祯, 高岩, 张杰华, 王姝怡, 赵元杰. 近 30a 台特玛湖地区土地利用/土地覆被变化及其影响因素. *干旱区地理*, 2021, 44(4): 1022-1031.
- [38] 李述. 干旱、半干旱区土地利用/覆盖变化与荒漠化的遥感综合研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [39] 马海云, 张林林, 魏学琼, 施婷婷, 陈铁喜. 2000—2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 618-628.
- [40] 李南. 宁夏遥感生态指数构建及变化特征分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [41] 王倩. 宁夏生态环境质量演变及驱动力分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [42] 孙桂丽, 陆海燕, 郑佳翔, 刘燕燕, 冉亚军. 新疆生态脆弱性时空演变及驱动力分析. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 258-269.
- [43] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [44] 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 陈立欣. 基于改进遥感生态指数的新疆吐(鲁番)-哈(密)地区生态环境质量评价及驱动机制分析. *生态学报*, 2024, 44(9): 1-15.
- [45] 袁洪艺, 杜灵通, 乔成龙, 王玉霞, 薛斌, 魏采用, 周峰, 李明涛. 宁夏盐池县荒漠草原区人工灌丛 GPP 和 ET 对气候变化的响应模拟. *生态学报*, 2024, 44(8): 1-11.