

doi: 10.6046/zrzyg.2021446

引用格式: 戚翌,谭炳香,曹晓明,等. 乌兰布和沙漠东北缘生态承载力时空动态分析[J]. 自然资源遥感,2023,35(1):222-230. (Qi Z, Tan B X, Cao X M, et al. Spatial-temporal dynamics of ecological carrying capacity of the northeastern margin of the Ulan Buh Desert[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1):222-230.)

乌兰布和沙漠东北缘生态承载力时空动态分析

戚 翌^{1,2}, 谭炳香^{1,2}, 曹晓明³, 于 航^{1,2}, 沈明潭^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 国家林业和草原局林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091; 3. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: 生态承载力是衡量生态系统稳定性的重要指标之一,其时空变化分析有助于了解地区生态环境变化趋势,对生态环境的治理与恢复评价、环境整体的可持续发展研究以及国土资源优化也具有全面的参考价值。以乌兰布和沙漠东北缘的干旱半干旱地区为研究区,以 Landsat 系列遥感数据为数据源,基于地区的实际生态状况,构建生态承载力综合指标评价体系,进而获得地区生态承载力时空分布及演变格局,并从降雨、温度以及土地利用变化的角度对生态承载力的变化进行驱动分析。结果表明,1990—2020 年乌兰布和沙漠东北缘区域的生态承载力整体呈现先减少后增加的趋势,其中黄河以北的灌区向西南方向的荒漠化区域不断扩张,较高生态承载力的面积占比大幅度增加,高生态承载力面积降低,受土地开发利用的影响较大,其次是温度和降雨,而黄河以南的荒漠化区域以中生态承载力为主,在 2010 年之前大面积转为较低生态承载力,到 2020 年又恢复到中生态承载力,受温度影响较大,其次是降雨和灌草植被覆盖状况的变化。

关键词: 干旱半干旱地区; 生态承载力; 综合评价指标; 驱动分析

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0222-09

0 引言

干旱半干旱地区是荒漠化问题最为严重的区域,长时间、大范围荒漠化事件的持续发展会对地区土壤植被的恢复治理、生态系统的良性循环以及社会经济的可持续发展都有着不可逆的影响。生态承载力作为评估生态环境状况常用的指示因子之一,是一种反映自然环境与人类活动关系的评价指标,可以概括为生态系统为人类经济社会良性可持续发展提供资源与环境条件的能力^[1-3],且随着遥感行业的快速发展,生态承载力评价由最初的单一因素分析发展到整体综合分析,并广泛用于各类地区的生态环境评价^[4-6]。

乌兰布和沙漠东北缘区域紧挨着乌兰布和灌区,是内蒙古河套灌区的主要组成之一^[7],属于干旱半干旱地区,是我国荒漠化治理的重要领域,同时对国家粮食安全有着重要保障作用^[8]。本研究拟对乌兰布和沙漠东北缘近 30 a 的生态承载力进行评价分析,以往对于该区域生态承载力的研究多是

采用生态足迹法,杨超^[9]通过生态足迹法对该区域生态承载力进行分析,进而评价当地的荒漠化产业状况;张景波等^[10]采用生态足迹法对该区域的生态承载力进行动态研究,确定土地结构的最优化配置;刘明虎等^[11]采用生态足迹法通过对该地区水资源生态承载力进行研究,但该方法具有一定局限性,反映的土地功能是单一性的,参数因子的选取不具有真实性。本文拟基于优化后的综合评价模型进行生态承载力评价,并针对其干旱半干旱和灌区特性进行驱动机制研究。

1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北缘,包括河套灌区和黄河两岸的荒漠化区域,涉及阿拉善左旗、磴口县、乌拉特后旗、杭锦后旗、临河区、乌拉特中旗、五原县、乌拉特前旗、杭锦旗、鄂托克旗和海勃湾区共 11 个行政区域,如图 1 所示,地理位置在 N39°40′~41°00′,E106°00′~107°20′之间^[12],北靠狼山,西邻乌兰布和沙漠,东接河套平原^[13],总体处于半干旱

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于功能性植被指数的荒漠植被时空分异格局及机理研究”(编号: 41971398)资助。

第一作者: 戚 翌(1996-),女,硕士研究生,研究方向为林业遥感应用。Email: qizhao1104@163.com。

通信作者: 谭炳香(1966-),女,研究员,研究方向为林业遥感技术与应用。Email: tan@ifrit.ac.cn。

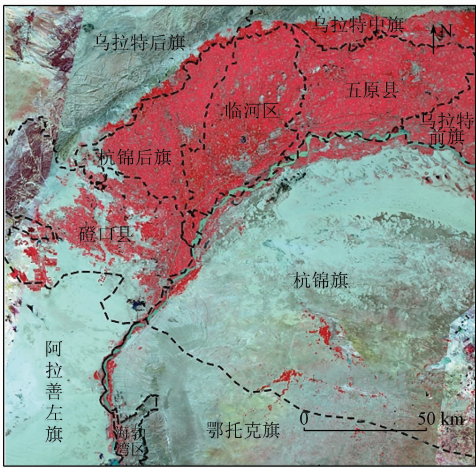


图1 研究区 2020 年影像以及地理位置分布
(B3(R), B2(G), B1(B)波段合成影像)
Fig.1 Image in 2020 and geographical location
distribution of the study area

区向干旱区过渡地带,面积约 3.68 km²,平均海拔在 1 041 m 左右,全年盛行西北风,瞬时风速最高可达

3.7 m/s^[14],昼夜温差较大,年平均气温在 7.8 ℃ 左右,降雨量较少,年均降雨量为 140 mm 左右,年均蒸发量为 2 096.4 mm^[15]。研究区的植被主要是以灌木、半灌木为主,包括梭梭、白刺和盐爪爪等旱生植物,地区水源供给以黄河为主^[16],黄河以西耕地较多,黄河以东则为大面积荒漠化区域,是荒漠化治理的重点区域之一。

2 数据源及预处理

2.1 数据源

覆盖研究区 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个时期的 Landsat 遥感影像数据是通过欧空局官网下载,均为 7—9 月份时期的影像。净初级生产力与潜在蒸散发一部分来自于 MODIS 数据,一部分来自于国家地球系统科学数据中心,降雨和温度数据均来自于国家地球系统科学数据中心,土地利用数据基于 Landsat 影像采用监督分类方法获得(表 1)。

表 1 各数据类型的获取来源以及信息
Tab.1 Source and information for each data type

数据类型	单位	数据来源
净初级生产力	g · C/m ²	1990 年的数据来自于“国家地球系统科学数据中心”提供的全球 5 km 8 d 总、净初级生产力产品;2000 年、2010 年和 2020 年的数据来自于 MOD17A3 数据,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a
潜在蒸散发	0.1 mm	1990 年、2000 年和 2010 年的数据来自于“国家地球系统科学数据中心”提供的中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集;2020 年的数据来自于 MOD16A2 数据,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d
温度	0.1 ℃	1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年的数据均来自于“国家地球系统科学数据中心”提供的中国 1 km 逐月平均气温数据集
降雨	0.1 mm	1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年的数据均来自于“国家地球系统科学数据中心”提供的中国 1 km 逐月降水量数据集
土地利用数据	—	1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用数据均基于 Landsat 遥感影像数据采用监督分类的方法获取

2.2 数据处理

研究区遥感影像都是通过多幅影像镶嵌和裁剪获得,其中部分影像有云雾遮挡,用同时期间隔不超过一个月的影像做替换,最终获得质量较好的 4 期影像,图 1 底图即为 2020 年的研究区影像。净初级生产力、潜在蒸散发、温度和降雨在 4 个时期的时间分辨率和空间分辨率不一致,先通过镶嵌、投影、重采样和裁剪获得覆盖研究区的 30 m 空间分辨率数

据,然后再通过加权求和获得时间分辨率为 1 a 的数据,而改进型土壤调整植被指数(modified soil adjusted vegetation index,MSAVI)、归一化水体指数(normalized difference water index,NDWI)、地表反照率(Albedo)、表土粒度指数(topsoil grain size index,TGSI)均基于 Landsat 遥感影像数据提取获得,具体计算公式分别为^[17-19]:

$$MSAVI = \frac{(2\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)}}{2},$$

(1)

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}},$$

(2)

$$Albedo = 0.356 \rho_{Blue} + 0.130 \rho_{Red} + 0.373 \rho_{NIR} + 0.085 \rho_{SWIR1} + 0.072 \rho_{SWIR2} - 0.0018,$$

(3)

$$TGSI = \frac{\rho_{Red} - \rho_{Blue}}{\rho_{Red} + \rho_{Blue} + \rho_{Green}},$$

(4)

式中 ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Blue} 、 ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别为近红外、红光、绿光、蓝光、短波红外 1 和短波红外 2 波段的地表反射率。最终 4 个时期所有的指标均以

30 m × 30 m 空间分辨率的网格呈现,空间参考坐标格式为 WGS_84_UTM_Zone_48N。

3 研究方法

3.1 生态承载力计算

生态承载力是通过定量的数值来直观反映,这个整个评价过程既离不开数据的支撑,也需要评价者的参与^[20],关键步骤在于指标选取和权重确定。

3.1.1 指标选取与处理

研究区位于乌兰布和沙漠东北缘,包含灌区,其主要生态问题是土地荒漠化,水是其主要影响因素,地区气候干旱雨水并不充沛,黄河是主要的水资源供给来源,而植被和土壤也是反映地区荒漠化程度的重要因素,因此确定了 NDWI、潜在蒸散发、MSA-VI、净初级生产力、Albedo 和 TGSi 这 6 种评价指标。不同指标类型,其单位和量纲不同,数值差异性可能很大^[21],本研究采用极差标准化法对不同的指标数据进行无量纲化处理,将所有数据转换为[0,1]之间的数值,具体计算方法为^[22]:

$$x_{ij} = \frac{x'_{ij} - \min_i \{x'_{ij}\}}{\max_i \{x'_{ij}\} - \min_i \{x'_{ij}\}}, \quad (5)$$

式中: x'_{ij} 为第 i 个指标的第 j 个数据; x_{ij} 为第 i 个指标的第 j 个数据标准化后的值; $\max_i \{x'_{ij}\}$ 为第 i 个指标中的最大值; $\min_i \{x'_{ij}\}$ 为第 i 个指标中的最小值。

3.1.2 指标权重确定

指标权重对于生态承载力值是否具有科学性有着至关重要的作用,目前国内外指标体系研究中权重系数确定主要可分为主观赋权和客观赋权^[23-24],本研究拟采用层次分析法和主成分分析

$$ECC = 0.225 X_1 + 0.238 X_2 + 0.134 X_3 + 0.180 X_4 + 0.062 X_5 + 0.161 X_6, \quad (9)$$

式中: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 分别为 MSAVI、净初级生产力、潜在蒸散发、NDWI、TGSi 和 Albedo 这 6 个归一化处理之后的指标; ECC 为生态承载力。

3.1.3 生态承载力等级划分

为更好地呈现出各个时期生态承载力在空间上的差异,将原生态承载力值进行归一化处理,使其值域范围在[0,1]之间,并按照表 2 进行等级划分。

表 2 生态承载力等级划分标准
Tab.2 Equivalent classification criteria
of ecological carrying capacity

等级编号	等级名称	生态承载力取值范围
1	低生态承载力	[0,0.2)
2	较低生态承载力	[0.2,0.4)
3	中生态承载力	[0.4,0.6)
4	较高生态承载力	[0.6,0.8)
5	高生态承载力	[0.8,1.0]

法联合赋权的方法来弥补单一赋权的不足。
层次分析法需建立一个判断矩阵,计算其最大特征值及其对应的特征向量,得到一致性比 C_R ,若小于 0.1,说明属性权重是一致的;否则,重构判断矩,最终获取各指标因素的权重,值越高影响越大^[25-28],计算公式为:

$$C_R = C_i / R_i, \quad (6)$$

$$C_i = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (7)$$

式中: C_i 为一致性指标的值; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; n 为指标个数; R_i 为平均随机一致性指标,通过查询一致性指标表得到。当 $C_R < 0.1$ 时,判断矩阵满足一致性检验^[29],否则应该对判断矩阵进行适当调整之后再次进行分析。

主成分分析法是一种建立在统计分析基础上对多个指标进行重要程度衡量的方法,可以如实反映实际情况,保证评价客观性与科学性,当累计贡献率超过 80%,则说明这些主成分可以代替原始指标的所有信息,然后通过每个主成分中各指标的贡献率得到最终每个指标的权重^[30-32]。

主、客观赋权的方法各有其优势,将 2 类方法得到的权重系数进行组合得到的联合系数更科学全面,假设层次分析法和主成分分析法计算的权重分别为 $w = w_1, w_2, \dots, w_n$; $w' = w'_1, w'_2, \dots, w'_n$ ^[33],则联合权重 W 可表示为:

$$W = aw_i + (1 - a)w'_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

式中 a 为方程的系数,表示单个权重对组合权重的贡献。其中 w, w' 和 W 的方差平方和越小越好,故选择 $a = 0.5$ 时,方差平方和最小。

根据层次分析法和主成分分析法得到的各指标权重,带入公式(8)得到最终的生态承载力计算公式,即

3.2 生态承载力变化趋势分析

在一定时间范围内,生态承载力存在某种变化趋势,但受各种不确定性因素的影响,可能存在部分异常值,如果用线性回归的方式来拟合,对精度会有影响^[34],而 Theil - Sen Median 趋势分析和 Mann - Kendall 检验属于非参数类统计方法,应用较多,且对于数据的分布特征没有要求,不受异常值的影响^[35],因此可以采取将相关性分析和残差趋势分析相结合的方式对生态承载力变化趋势进行驱动因素分析。

3.2.1 Theil - Sen Median 趋势分析

Theil - Sen Median 趋势分析也被称为 Sen's 斜率估计,是将某一时间组序列的斜率中值作为该时间段的平均变化率和变化趋势^[36],计算公式为^[37]:

$$S_{sen} = \text{Median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right), i < j \text{ 且 } i, j = 1, \dots, M, \quad (10)$$

$$M = \frac{m(m - 1)}{2}, m = 1, 2, 3, 4, \quad (11)$$

式中： M 为各年份数据组合个数； m 为时间序列数据的数量； X_i 和 X_j 分别为在第 i 年和第 j 年($j > i$)的观测数据； S_{sen} 为趋势度,当 $S_{sen} > 0$ 时,反映数据呈现增长趋势,反之则呈现减小的趋势。

3.2.2 Mann - Kendall 检验

Mann - Kendall 检验可以看作是某时间序列动态变化趋势的非参数型显著性检验,对于趋势变化是否为线性变化并无要求,且无需样本服从一定的分布^[38 - 39]。当 $m < 10$ 时,直接用统计变量 S 进行趋势检验,而检验统计量 S 的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \text{sgn}(X_j - X_i), i, j = 1, 2 \cdots, m, \quad (12)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

在给定置信区间水平 α 的情况下,如果 $|S| > S_{1-\alpha/2}$,则研究序列在 α 水平上存在显著变化;相反

则变化不显著。检验值为正数时,表示呈现上升趋势;为负数时表示呈现下降趋势。本研究中 α 取 0.05,即 $S_{1-\alpha/2}$ 为 1.96^[40]。

3.2.3 驱动因素分析

研究区生态承载力变化趋势分别与降雨、温度 2 个气候因素进行相关性分析,2 个变量的样本集分别为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ ^[41],再结合回归残差分析对其他可能驱动力因素进行承载力分析。相关性计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^Z (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^Z (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^Z (y_i - \bar{y})^2}}, i = 1, 2, \dots, Z, \quad (14)$$

式中： r_{xy} 为变量 X 和 Y 的 Pearson 系数； Z 为因素选取的样本数； $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 2 个变量的样本均值。 r_{xy} 的取值范围在 $[-1, 1]$ 之间, $r_{xy} < 0$ 代表负相关, $r_{xy} > 0$ 代表正相关, $|r_{xy}| < 0.5$ 时表示 2 个变量不显著相关, $0.5 \leq |r_{xy}| < 0.7$ 时表示 2 个变量显著相关, $|r_{xy}| \geq 0.7$ 时表示 2 个变量高度相关,越接近于 1,相关性越高^[42]。研究区驱动因素分析的详细流程如图 2 所示。

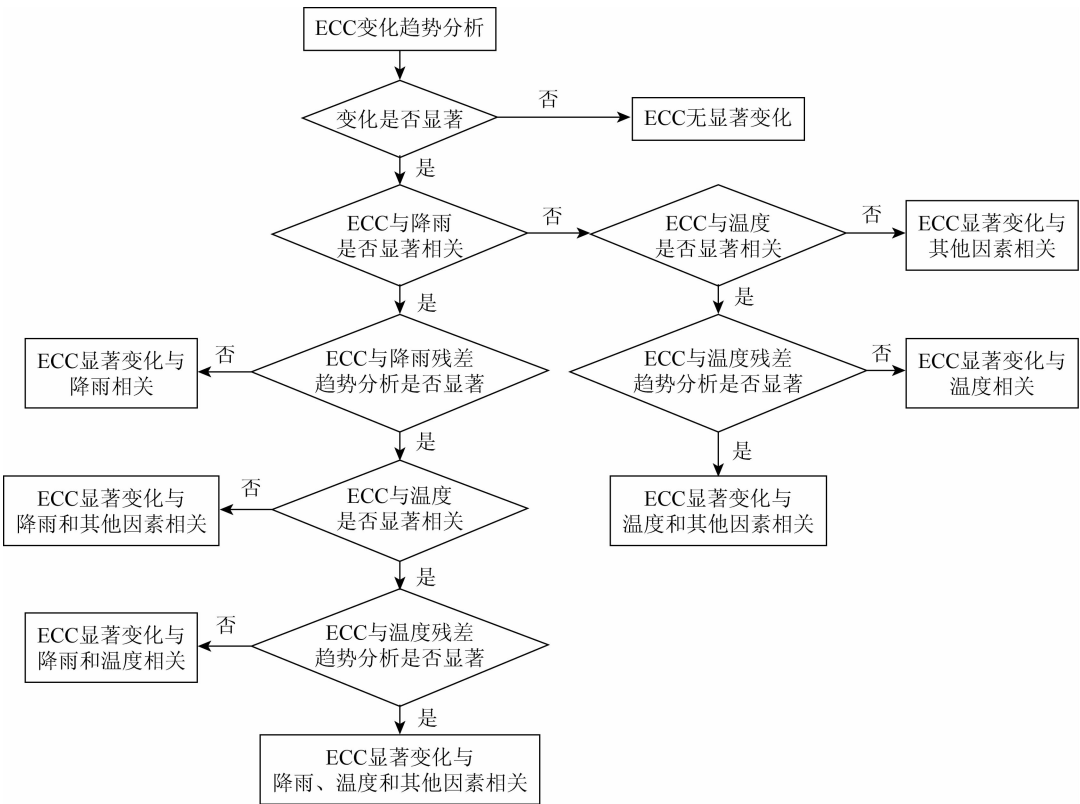


图 2 长时间序列生态承载力驱动因素分析框架

Fig. 2 Analysis framework of driving factors of long - term ecological carrying capacity

4 结果分析与讨论

4.1 生态承载力评价

将 4 个时期标准化的 6 个指标数据带入公式 (9) 得到 4 个时期生态承载力空间分布,并按照表 2

进行划分,得到各生态承载力等级分布及统计结果,如图 3—4 所示。可以看出,灌区内部的生态承载力最高,其中在 1990 年高生态承载力面积最多,占总面积的 4.28%,之后开始逐渐减少至不足 1%,而较高生态承载力的面积逐渐增加,由 1990 年的 9.72% 上升到 2020 年的 20.02%。周围的荒漠化区域大

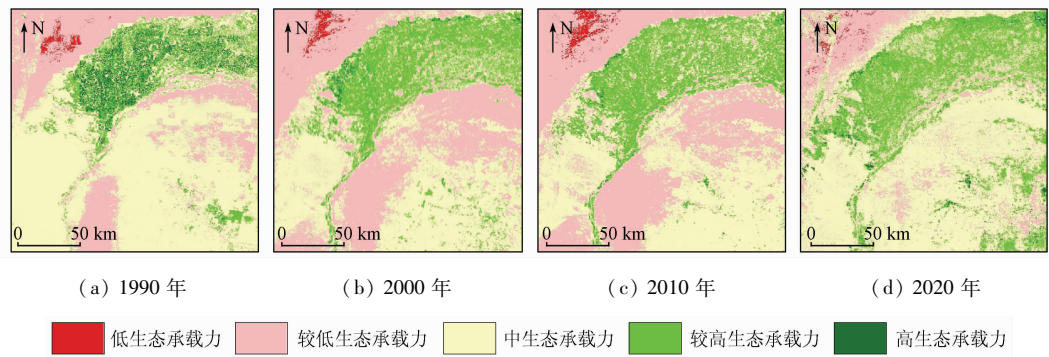


图 3 研究区 4 个时期生态承载力各等级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ecological carrying capacity in four periods in the study area

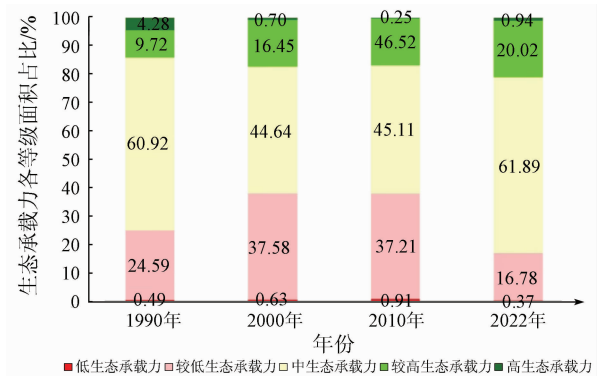


图 4 4 个时期具有不同级别生态承载力的区域百分比

Fig. 4 Percentage of regions with different levels of ecological carrying capacity in four periods

部分处于中生态承载力状态,1990 年面积占比为 60.92%,到 2000 年和 2010 年降低到 45% 左右,2020 年又恢复到 61.89%,少部分区域处于较低生态承载力,其中在 1990 年面积占比为 24.59%,到了 2000 年和 2010 年上升到 37% 左右,2020 年又下降到 16.78%。低生态承载力在 4 个时期内面积占比均很小,不足 1%,所以总的来说,生态承载力总体处于先下降又上升的趋势,2000—2010 年变化不大,灌区面积不断扩张,进一步导致较高生态承载力面积占比不断增加,而周围的荒漠化区域中生态承载力面积在 2000 年之后逐渐增多,较低生态承载力不断减少。

4.2 生态承载力变化趋势分析

为了更好地反映区域变化趋势,将斜率大于 0.05 的区域划分为上升区域,小于 -0.05 的区域划分为下降区域,而值在 $[-0.05, 0.05]$ 区间的区域

划分为稳定区域,最终形成 5 个变化类型:显著上升、不显著上升、稳定不变、不显著下降、显著下降,如图 5 所示,并计算各类变化趋势所占面积比,最终得到的结果如表 3 所示。

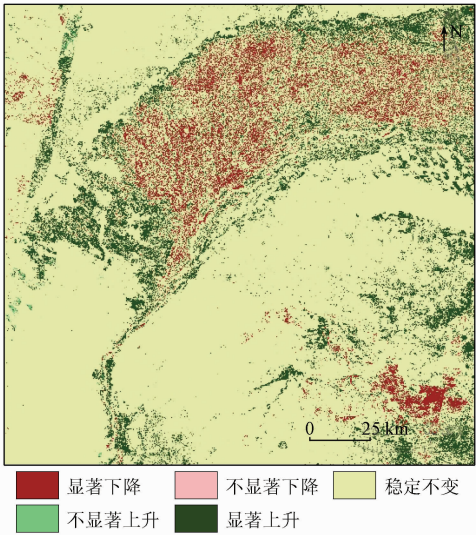


图 5 研究区生态承载力变化趋势

Fig. 5 Change trend of ecological carrying capacity in the study area

表 3 研究区不同变化趋势的面积占比
Tab. 3 Area proportion of the study area with different change trends (%)

变化趋势类型	显著下降	不显著下降	稳定不变	不显著上升	显著上升
面积占比	7.09	0.02	81.89	0.19	10.81

研究区在 1990—2020 年近 30 a 期间,研究区总体生态承载力 81.89% 的面积处于稳定不变的状态,上升的面积大于下降的面积,其中显著上升的面

积较多,占 10.81%,主要分布在黄河两岸、灌区边缘及乌兰布和沙漠东北缘与灌区接壤区域,这部分土地的灌草木面积逐渐增加,有一部分耕地被用于种植牧草,来驱动地区畜牧业的发展,在 2 个沙漠区域,特别是接近黄河两岸的区域大面积种植灌草木,用以改进地区的荒漠化程度。研究区显著下降的区域占 7.09%,主要分布在灌区中部,该区域是耕地开发的主要区域,以及工厂的建设也聚集于此,总体受人为干扰较大。

4.3 生态承载力驱动因素分析

为更好地分析空间区域上生态承载力变化与气候和土地利用变化的关系,按照图 2 的流程得到的最终生态承载力驱动因素空间分布以及各驱动因素面积占比,如图 6 和表 4 所示,并结合 1990 年和 2020 年的土地利用数据进行分析。

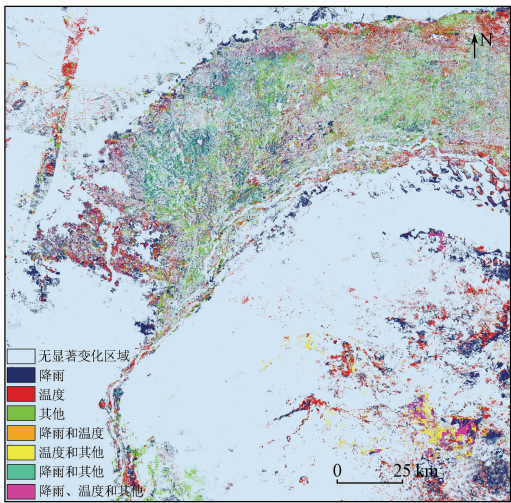


图 6 生态承载力驱动因素空间分布

Fig.6 Spatial distribution of driving factors of ecological carrying capacity

表 4 各种驱动因素面积统计

Tab.4 Area statistics of various driving factors (%)

驱动因素组合	无显著变化区域	降雨	温度	其他	降雨和温度	降雨和其他	温度和其他	降雨、温度和其他
面积占比	81.89	7.61	4.61	2.77	0.31	0.99	1.07	0.75

由表 4 可以看出,在生态承载力变化显著的区域内,降雨单方面因素的影响面积是最大的,占研究区总面积的 7.61%,主要作用于研究区库布齐沙漠的东南区域、与黄河的接壤区域、乌兰布和沙漠东北缘和灌区接壤的区域,这些区域受黄河水资源的影响明显,而黄河受降雨的影响较大。其次是温度单方面因素的影响,占研究区总面积的 4.61%,主要作用于研究区东南方向的库布齐沙漠东北方向部分、乌兰布和沙漠东北缘与灌区的

接壤区域,这些区域的特点是灌草木较多。土地利用类型变化的单方面影响主要作用于灌区中部偏东方向,结合土地利用类型变化可以发现,该区域的耕地面积前期大面积增加,灌草木分布不稳定。降雨和温度双重影响的面积积极少,仅占总面积的 0.31%,分布也较为离散。降雨和其他因素的双重作用占总面积的 0.99%,主要分布在灌区的中部偏西方向,该区域耕地面积先增加又减少,转为种植牧草,灌草木也缓慢增加。温度和其他因素的双重作用占总面积的 1.07%,主要分布在库布齐沙漠的东南角,该区域主要是植被,但极不稳定。降雨、温度和其他因素的综合影响的面积占总面积的 0.75%,在灌区周围的分布离散,还有部分在库布齐沙漠的东南角,这些区域的地物类型不稳定,变化较大。

5 结论

本研究构建适合乌兰布和沙漠东北缘的生态承载力综合评价模型,获得研究区各个时期的生态承载力分布和时空差异分析,并从气候因素和土地利用类型变化 2 个方面进行驱动因素分析,最终得到以下几点结论:

1)研究区近 30 a 生态承载力在 1990—2000 年有明显的下降,2000—2010 年的变化不大,而到 2020 年又有明显的上升,处于一个改善的状态。黄河以北的灌区中部及偏东部地区的生态承载力明显减少,受土地利用类型变化的影响为主,其次是降雨和温度;乌兰布和沙漠东北缘与灌区的接壤区域以及灌区周围的生态承载力明显增加,受温度、降雨的影响为主;而在黄河以南的荒漠区域中,偏东南方向的生态承载力明显增加,受温度和降雨影响为主,其次是土地利用类型的变化。

2)研究区应减少耕地开发对生态环境造成的负载,而当地遵循适地适树原则,有规划地种植耐旱耐高温的灌草木,大力发展畜牧业,并利用其光能优势,促进光伏产业的发展,间歇种植灌草木,实现生态效益最大化,这一系列相关政策的执行对于干旱半干旱地区荒漠化治理是十分有效的,应继续实施以保障地区可持续发展。

但是,仅利用一些生态指标作为生态承载力的评价指标有些单一,今后可以添加一些社会经济类指标,尝试空间化信息和非空间化信息的结合,进一步提高其评价精度;另外,关于如何验证生态承载力的评价结果也是未来需要深入探究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 曲修齐, 刘 森, 李春林, 等. 生态承载力评估方法研究进展[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 113–119.
Qu X Q, Liu M, Li C L, et al. Research progress in ecological carrying capacity assessment methods[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(4): 113–119.
- [2] Du W P, Yan H M, Yang Y Z, et al. Evaluation methods and research trends for ecological carrying capacity[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(2): 115–124.
- [3] He Y F, Xie H L. Exploring the spatiotemporal changes of ecological carrying capacity for regional sustainable development based on GIS: A case study of Nanchang City[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 148(c): 119720.
- [4] Frank J W, Ottfried D, Gunnar L, et al. Evaluation of spatio-temporal patterns of remotely sensed evapotranspiration to infer information about hydrological behaviour in a data-scarce region[J]. Water, 2017, 9(5): 333–358.
- [5] Tang X G, Ma M G, Ding Z, et al. Remotely monitoring ecosystem water use efficiency of grassland and cropland in China's arid and semi-arid regions with MODIS data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 616–633.
- [6] 曹 智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1–11.
Cao Z, Min Q W, Liu M C, et al. Ecological carrying capacity based on ecosystem services: Concept, connotation, evaluation model and application[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 1–11.
- [7] 王民哲. 内蒙古河套灌区盐碱化耕地改良措施及建议[J]. 中国水利, 2019, 15: 40–41.
Wang M Z. Measures and suggestions for improving salinized cultivated land in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. China Water Resources, 2019, 15: 40–41.
- [8] 闫晋阳, 马向阳, 王晨霞. 河套灌区国管水利工程保护与管理问题分析及对策建议[J]. 中国水利, 2021, 15: 58–59.
Yan J Y, Ma X Y, Wang C X. Problems of protection and management of state-managed water conservancy projects in Hetao Irrigation District and countermeasures[J]. China Water Resources, 2021, 15: 58–59.
- [9] 杨 超. 磴口县荒漠化治理产业业态及地区承载力研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
Yang C. Research on desertification control industry forms and regional carrying capacity in Dengkou County[D]. Hehot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [10] 张景波, 郝玉光, 刘明虎, 等. 干旱农牧区内蒙古磴口县生态足迹及生态承载力动态变化[J]. 中国农学通报, 2011, 27(32): 168–174.
Zhang J B, Hao Y G, Liu M H, et al. Dynamic changes of ecological footprint and ecological carrying capacity in Dengkou County, Inner Mongolia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(32): 168–174.
- [11] 刘明虎, 张景波, 张 瑞, 等. 磴口县 2007 年水资源生态承载力分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(17): 255–259.
Liu M H, Zhang J B, Zhang R, et al. Ecological carrying capacity of water resources in Dengkou County in 2007[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(17): 255–259.
- [12] Yang H F, Mu S J, Li J L. Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China[J]. Catena, 2014, 115: 85–95.
- [13] 张启斌. 乌兰布和沙漠东北缘生态网络构建与优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Zhang Q B. Construction and optimization of ecological network in the northeastern edge of Ulan Buh Desert[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [14] 边 凯, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘绿洲防护林体系防风阻沙能力研究[J]. 首都师范大学学报, 2021, 42(1): 48–53.
Bian K, Gao J L, Xin Z M, et al. Research on wind and sand resistance ability of oasis shelterbelt system in the northeastern edge of Ulan Buh Desert[J]. Journal of Capital Normal University, 2021, 42(1): 48–53.
- [15] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘防护林内外沙尘暴低空结构特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 1032–1040.
Luo F M, Gao J L, Xin Z M, et al. Low-altitude structure characteristics of sandstorms inside and outside the shelterbelt in the northeastern edge of Ulan Buh Desert[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 1032–1040.
- [16] 黄雅茹, 马迎宾, 郝玉光, 等. 乌兰布和沙漠东北缘白刺群落与油蒿群落土壤养分特征分析[J]. 山东农业大学学报, 2019, 50(4): 559–565.
Huang Y R, Ma Y B, Hao Y G, et al. Analysis of soil nutrient characteristics of Nitraria community and Artemisia ordosica community in the northeastern edge of Ulan Buh Desert[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2019, 50(4): 559–565.
- [17] Zhen Z J, Chen S B, Yin T G, et al. Using the negative soil adjustment factor of soil adjusted vegetation index (SAVI) to resist saturation effects and estimate leaf area index (LAI) in dense vegetation areas[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(6): 2115.
- [18] Wu Z H, Lei S G, Bian Z F, et al. Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(6): 232.
- [19] Liu Q S, Liu G H, Huan C. Monitoring desertification processes in Mongolian Plateau using MODIS tasseled cap transformation and TGSi time series[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(1): 12–26.
- [20] 赖声裕. 四川省城市人力资源产业的综合评价研究——基于主成分分析和聚类分析[J]. 武汉职业技术学院学报, 2017, 16(5): 65–70.
Lai S Y Z. Study on the comprehensive evaluation of urban human resources industry in Sichuan Province: Based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Journal of Wuhan Polytechnic, 2017, 16(5): 65–70.
- [21] 俞立平, 宋夏云, 王作功. 评价型指标标准化与评价方法对学术评价影响研究——以 TOPSIS 评价方法为例[J]. 情报理论与实践, 2020, 43(2): 15–20.

Yu L P, Song X Y, Wang Z G. Research on the impact of evaluation index standardization and evaluation methods on academic evaluation; Taking TOPSIS evaluation method as an example[J]. Information Theory and Practice, 2020, 43(2): 15–20.

[22] 俞立平. 指标标准化方法对科技评价的影响机制研究——以学术期刊评价为例[J]. 情报理论与实践, 2020, 43(12): 54–62.

Yu L P. Study on the impact mechanism of index standardization method on science and technology evaluation; Taking the evaluation of academic journals as an example[J]. Information Theory and Practice, 2020, 43(12): 54–62.

[23] 李佩武, 李贵才, 张金花, 等. 城市生态安全的多种评价模型及应用[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 293–302.

Li P W, Li G C, Zhang J H, et al. Several assessment models and application analysis of urban ecological security[J]. Geographical Research, 2009, 28(2): 293–302.

[24] Tang W, Chen A Z, Li D M, et al. The application of combination weighting approach in multiple attribute decision making[J]. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2009, 5: 2724–2728.

[25] Karayalcin I I. The analytic hierarchy process; Planning, priority setting, resource allocation[J]. North–Holland, 1982, 9(1): 97–98.

[26] 楚存坤, 孙思琴, 韩丰谈. 基于层次分析法的高校图书馆学科服务评价模式[J]. 大学图书馆学报, 2014, 32(6): 86–90.

Chu C K, Sun S Q, Han F T. The subject service evaluation model of academic libraries based on the analytic hierarchy process[J]. Journal of Academic Libraries, 2014, 32(6): 86–90.

[27] 林秀春, 刘 睿. 莆田市近海海域生态环境承载力评价[J]. 莆田学院学报, 2019, 26(2): 94–99.

Lin X C, Liu R. Evaluation of the carrying capacity of the ecological environment in the coastal waters of Putian City[J]. Journal of Putian University, 2019, 26(2): 94–99.

[28] Wu X L, Hu F. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106243.

[29] Wang Z F, He X Q, Zhang C, et al. Evaluation of geological and ecological bearing capacity and spatial pattern along Du–wen road based on the analytic hierarchy process (AHP) and the technique for order of preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method[J]. ISPRS International Journal of Geo–Information, 2020, 9(4): 237.

[30] 张 鹏. 基于主成分分析的综合评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

Zhang P. Research on comprehensive evaluation based on principal component analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.

[31] 李 奇, 胡世雄, 王争磊. 基于主成分分析的山西省各城市经济综合实力评价[J]. 对外经贸, 2021(4): 80–83.

Li Q, Hu S X, Wang Z L. Evaluation of comprehensive economic strength of cities in Shanxi Province based on principal component analysis[J]. Foreign Economics and Trade, 2021(4): 80–83.

[32] 杨 宇. 多指标综合评价中赋权方法评析[J]. 统计与决策, 2006(13): 17–19.

Yang Y. Review and analysis of weighting methods in multi–index comprehensive evaluation[J]. Statistics and Decision, 2006(13): 17–19.

[33] Wu X L, Hu F. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106243.

[34] 陈水蓉. 趋势分析在水质管理中的应用研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2012.

Chen S R. Research on the application of trend analysis in water quality management[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2012.

[35] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(7): 1820–1832.

Sun Y J, Liu X F, Ren Z Y, et al. Multi–scale drought characteristics and influencing factors of the Loess Plateau from 1960 to 2016[J]. Geographical Research, 2019, 38(7): 1820–1832.

[36] 汪 攀, 刘毅敏. Sen’s 斜率估计与 Mann–Kendall 法在设备运行趋势分析中的应用[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(6): 454–457, 472.

Wang P, Liu Y M. Sen’s slope estimation and Mann–Kendall method in equipment operation trend analysis application[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(6): 454–457, 472.

[37] Heike H, Hilary B. Trends in extreme precipitation events in the indus river basin and flooding in Pakistan[J]. Atmosphere–Ocean, 2014, 52(1): 77–91.

[38] 汪 攀. 时间序列趋势分析及其在预防性维修中的应用[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.

Wang P. Time series trend analysis and its application in preventive maintenance[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.

[39] Tali P A, Bhat M M, Lone F A. Seasonal spatio–temporal variability in temperature over North Kashmir Himalayas using Sen Slope and Mann–Kendall test[J]. Journal of Climatology and Weather Forecasting, 2021, 9(5): 288–298.

[40] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生. 1952—2008 年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 49–53.

Qiu L J, Zheng F L, Yin R S. Analysis of the change trend of precipitation and runoff in the Yanhe River Basin from 1952 to 2008[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 49–53.

[41] 介科伟. 基于 Pearson 相关性分析的高校学生恋爱模型[J]. 首都师范大学学报, 2017, 38(6): 8–13.

Jie K W. College student love model based on pearson correlation analysis[J]. Journal of Capital Normal University, 2017, 38(6): 8–13.

[42] 樊敏伟, 宋 崎, 王 冰. 采用数字序列相关性分析法研究灯盏花素的不同含量测定方法[J]. 中国实验方剂学杂志, 2008(8): 10–12.

Fan M W, Song Q, Wang B. Determination of breviscapine by digital sequence correlation analysis[J]. Chinese Journal of Experimental Formulae, 2008(8): 10–12.

Spatial – temporal dynamics of ecological carrying capacity
of the northeastern margin of the Ulan Buh Desert

QI Zhao^{1,2}, TAN Bingxiang^{1,2}, CAO Xiaoming³, YU Hang^{1,2}, SHEN Mingtan^{1,2}

- (1. Research Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
- 2. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, NFGA, Beijing 100091, China;
- 3. Research Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Ecological carrying capacity is an important indicator used to measure the stability of an ecosystem. The spatial – temporal change analysis of the ecological carrying capacity can help understand the changing trend of a regional ecological environment and serve as a comprehensive reference for the evaluation of ecological management and restoration, research on the overall sustainable development of an environment, and the optimization of land resources. Targeting the arid and semi – arid regions at the northeastern margin of the Ulan Buh Desert, this study constructed a comprehensive index evaluation system of ecological carrying capacity based on the actual ecological conditions of the regions and Landsat remote sensing images as the data source. Then, this study determined the spatial – temporal distribution and evolution pattern of regional ecological carrying capacity and made a driver analysis of the change in the ecological carrying capacity from the angles of rainfall, temperature, and land use changes. The results show that the ecological carrying capacity of the northeastern margin of the Ulan Buh Desert showed a first decreasing and then increasing trend from 1990 to 2020. The irrigated areas north of the Yellow River continued to expand to the desertification areas in the southwest. As a result, the percentage of the area with relatively high ecological carrying capacity increased greatly, while the area with high ecological carrying capacity decreased. The change in the ecological carrying capacity of the irrigated areas was mainly affected by land development and utilization, followed by temperature and rainfall. In contrast, the ecological carrying capacity of the desertification areas south of the Yellow River was mainly at a moderate level, which was shifted to a low level in large areas before 2010 and was restored to a moderate level in 2020. The change in the ecological carrying capacity of the desertification areas was greatly affected by temperature, followed by rainfall and changes in shrub and grass vegetation cover.

Keywords: arid and semi – arid region; ecological carrying capacity; comprehensive evaluation index; driver analysis

(责任编辑: 陈 理)