

DOI: 10.20103/j.stxb.202206211756

余玉洋, 李晶. 秦巴山区生态系统服务供需与人类活动强度的时空变化及其耦合关系. 生态学报, 2024, 44(19): 8764-8773.

Yu Y Y, Li J. Spatio-temporal changes of ecosystem service supply and demand and human activity intensity in Qinling-Daba Mountains and its coupling relationship. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8764-8773.

秦巴山区生态系统服务供需与人类活动强度的时空变化及其耦合关系

余玉洋^{1,2,3}, 李晶^{3,*}

1 河南师范大学 旅游学院, 新乡 453007

2 河南省丹江口水库水域生态系统野外科学观测研究站, 南阳 474450

3 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要: 生态系统服务的供需关系人类自身福祉, 人类活动又是影响生态系统服务供需的主要因素, 将两者进行耦合性分析, 对提升区域生态环境质量提供切实可行的依据。在评估秦巴山区 2000—2018 年生态系统服务供需基础上, 构建人类活动强度指标, 并通过四象限分析模型, 将生态系统服务供需和人类活动相耦合, 来探究秦巴山区的生态环境质量状况。研究结果表明: (1) 2000—2018 年秦巴山区生态系统服务盈余量丰富, 4 种生态系统服务处于盈余状态, 并且生态系统服务的供需空间特征的差异性越来越明显。(2) 人类活动强度在空间上有明显的空间异质性, 从东向西人类活动强度逐渐减小, 高值区主要在人口集聚的城区, 低值区在高山寒冷区。(3) 秦巴山区大面积区域生态环境质量较好, 但是也有 13.64% 的像元和 20 个县是处于生态环境质量较差的水平。通过近几年的生态工程的实施, 秦巴山区的生态环境质量还是得到了很大的提升。通过生态系统供需和人类活动耦合研究, 可以为山区分区调控管理和生态环境质量的提升具有一定的借鉴意义。

关键词: 生态系统服务供需; 人类活动强度; 生态环境质量; 秦巴山区

Spatio-temporal changes of ecosystem service supply and demand and human activity intensity in Qinling-Daba Mountains and its coupling relationship

YU Yuyang^{1,2,3}, LI Jing^{3,*}

1 School of Tourism, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

2 Observation and Research Station on Water Ecosystem in Danjiangkou Reservoir of Henan Province, Nanyang 474450, China

3 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: The supply and demand of ecosystem services are related to human's own well-being and human activities are the main factors affecting the supply and demand of ecosystem services. Coupling analysis of the two can provide a practical basis for improving the quality of regional ecological environment. In this study, based on the supply and demand evaluation of ecosystem services in the Qinling-Daba Mountains from 2000 to 2018, we constructed human activity intensity indicators and coupling ecosystem service supply and demand with human activities through a four-quadrant analysis model to explore the ecological and environmental quality status of the Qinling-Daba Mountains. The results showed that: (1) The surplus of ecosystem services in the Qinling-Daba Mountain area was abundant from 2000 to 2018, four ecosystem services were in surplus, and the variability of the spatial characteristics of supply and demand of ecosystem services became more and more obvious. (2) There was obviously spatial heterogeneity in human activity intensity, with human activity intensity gradually

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071285); 河南省自然科学基金项目(242300421658); 2023 年度河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102320267)

收稿日期: 2022-06-21; **网络出版日期:** 2024-07-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijing@snnu.edu.cn

decreasing from east to west, with high value areas mainly in populated urban areas and low value areas in high mountain cold areas. (3) The ecological and environmental quality of a large area in the Qinling-Daba Mountain area was good, but 13.64% of the pixels and 20 counties were in the poor level of ecological environment quality. Through the implementation of ecological projects in recent years, the quality of the ecological environment in the Qinling-Daba Mountains has been greatly improved. Through the coupling study of ecosystem supply and demand and human activities, it can provide a certain reference for the regulation and management of mountainous areas and the improvement of ecological environment quality.

Key Words: supply and demand of ecosystem services; intensity of human activities; ecological and environmental quality; Qinling-Daba Mountains

生态系统是地球上最为复杂和多样化的系统之一,是地球上生命维持运转的基础,为人类的生存和发展提供极为重要的服务和功能^[1]。生态系统服务连接了生态系统和社会系统,为人类的生存和发展所创造和维持的环境条件和效用^[2-3]。生态系统服务供给和需求是评生态系统是否安全的重要指标^[4],连接生态系统服务从供给侧向需求侧的流动过程。随着快速工业化和城市化,城市和农村土地使用空间发生了转变,对生态系统服务的供需平衡产生了影响^[5-7],这些问题的根源在于城市化和土地利用变化对区域生态系统结构和格局的影响,导致区域生态环境问题的出现^[8]。因此,研究区域生态系统服务供需状况和人类活动强度是进行生态系统管理和资源配置的基础性工作,对区域生态资源有效管理提供科学依据^[9]。

随着人类活动的逐渐加剧,导致生态问题日益严重,促使围绕人类活动和生态系统服务的关系研究成果越来越丰富。目前对于人类活动强度的动态评估主要是基于人类活动引起的结果分析,比如土地利用格局、生态系统服务、景观类型以及人口密度等指标,多为单一的指标来揭示人类活动强度,所以针对复杂多变的人类活动强度的刻画一直是研究的重点^[10]。Sun 等将生态系统服务和人类活动强度进行耦合分析,探究青藏高原生态环境变化^[11];刘永婷等通过热点分析和四象限分析来分析区域生态系统服务价值以及生态环境质量,并且探究生态系统服务变化的驱动因素^[12]。虽然许多学者对生态系统服务和人类活动进行耦合研究,但是较少的研究将生态系统服务需求加入到相关研究过程中^[13-14]。随着人口数量的急剧增加和经济社会的快速发展,人类的物质需求呈非线性方式增长,造成人类在利用生态系统服务带来好处的同时也间接的反作用于生态系统服务,导致生态系统服务的供给能力降低,增加供需的风险^[15-16],最终导致区域生态系统服务供需不平衡,破坏区域生态环境质量^[17-19]。因此,研究人类活动对生态系统服务空间格局的影响对于区域生态安全、可持续发展和人类福祉至关重要^[20-21]。

秦巴山区作为国家重要的生物多样性和水源涵养生态功能区,区域虽然自然资源较丰富,但经济条件欠佳,导致生态系统服务供给和需求之间存在矛盾,影响到生态系统的正常运转和人类的福祉^[22-25]。因此,深入解析区域人类活动对生态系统服务供需的影响机制对于区域生态环境健康发展至关重要。基于此,本研究在生态系统服务供需评估的基础上,引入四象限分析模型,耦合分析人类活动和生态系统服务供需比,揭示人类活动强度对生态系统服务的影响,为区域生态—经济可持续发展提供科学支撑。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况与数据来源

秦巴山区地理位置优越,地形特点复杂多样(图 1)。秦巴山区是长江、黄河和淮河的交汇地,也是淮河、汉江、丹江和洛河的源头,同时复杂的气候类型,共同促使区域水资源丰富。由于区域处于南北过渡带,自然资源禀赋,生物多样性丰富度较高,再加上区域森林和草地覆盖度高,森林和湿地公园数量充足,吸引大量游客前来观光旅游。鉴于区域的特点和资源,本研究选取固碳、产水、生境质量以及景观美学服务作为区域生态系统服务研究的对象。

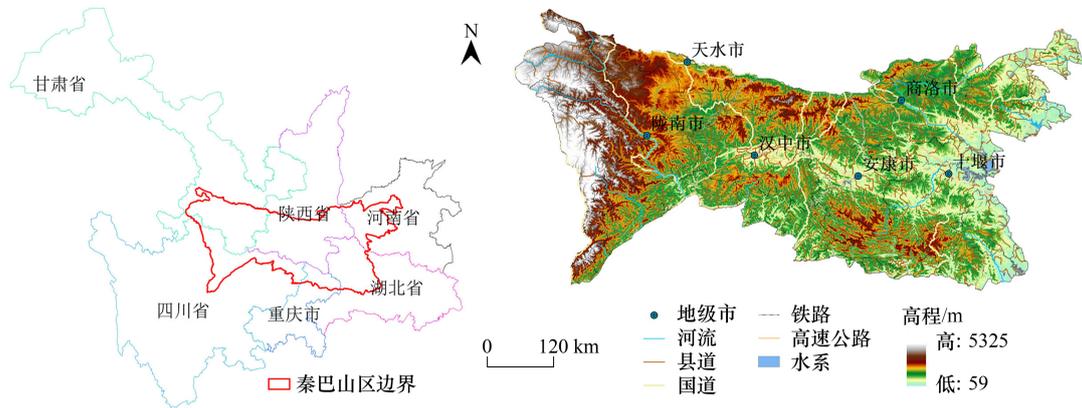


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

研究中所采用的数据包括遥感数据和非遥感数据,主要来源见表1。

表1 数据来源

Table 1 Data sources in this study

数据类型 Type of data	数据描述 Data description	数据来源 Data Sources
基础地理信息数据 Basic geographic information data	行政区划、河流、道路等	http://www.ngcc.cn/ngcc/
高程数据 Elevation data	来源于地理空间数据云,空间分辨率为30m	http://www.gscloud.cn/
土壤数据 Soil data	第二次全国土地调查南京土壤所提供的1:100万土壤数据,空间分辨率为1km×1km	https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/
土地利用数据 Lucc data	来源于GlobalLand30,全球地理信息公共产品,空间分辨率为30m	http://www.globallandcover.com/
气象数据 Meteorological data	2000—2018年逐日数据,指标包括降水、最高气温、最低气温、风速、相对湿度数据	http://data.cma.cn/
社会经济数据 Socioeconomic data	能源消耗数据、水资源消耗数据、旅游人数、GDP和常住人口数	来源于各县区统计年鉴、水资源公报
归一化植被指数 Vegetation Index	NDVI Normalized Difference	美国地质调查局(USGS)MODIS13Q1产品 https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/

1.3 研究方法

(1) 生态系统服务评估

为了更准确地评价ES,本研究根据秦巴山区的区域特征,选取产水(Water yield)、固碳(Carbon sequestration)、生境质量(Habitat quality)以及景观美学(Landscape aesthetics)服务进行供给和需求的量化与制图,表2列出了所有服务的量化方法和模型。

(2) 生态系统服务供需比

生态系统服务的供需不平衡就会造成资源的不充分利用等情况,本研究结合生态系统服务的供给和需求量,通过生态系统服务供需比(Ecosystem Service Supply and Demand Ratio, ESDR)来体现区域内4种生态系统服务的供需情况^[7,27],从而来揭示区域内生态系统服务供需是否存在矛盾。

$$ESDR = \frac{S-D}{(S_{\max} + D_{\max})/2} \quad (1)$$

式中,ESDR 是生态系统服务供需比值, S 和 D 代表着区域生态系统服务的供给量和需求量, S_{\max} 是指供给量的最大值, D_{\max} 是指需求量的最大值。

表 2 生态系统服务评估

Table 2 Ecosystem services (ESs) assessment in this study

生态系统服务类型 Types of ecosystem services	供/需 Supply/ Demand	单位 Unit	方法 Methods	评估模型 Evaluation model	指标解释 Indicator explanation
产水 Water yield	供给 需求	mm mm	基于水量平衡模型 ^[26-27] 实际用水量 ^[28]	$WY(x,t) = P(x,t) - EET(x,t)$ $WS(x,t) = \text{pop}(x,t) \times l_i + \text{ind}(x,t) \times m_i + \text{agr}(x,t) \times n_i$	$WY(x,t)$ 为产水量 (mm); $P(x,t)$ 为年降水量 (mm), $EET(x,t)$ 为区域蒸散量。 $WS(x,t)$ 为秦巴山区产水服务需求总量 (m^3), l_i 为 i 县人均生活用水量 ($\text{t}/\text{人}$), m_i 为 i 县人均万元工业产值用水量 ($\text{万元}/\text{m}^3$), n_i 为第 i 县农田平均灌溉用水量 (m^3/km^2), $\text{pop}(x,t)$ 为人口密度 ($\text{人}/\text{km}^2$), $\text{ind}(x,t)$ 表示空间分布的工业总产值公里网格 ($\text{万元}/\text{km}^2$), $\text{agr}(x,t)$ 表示农田栅格单元 (km^2)。
生境质量 Habitat quality	供给 需求	无量纲 无量纲	InVEST 模型中的生境质量模块 ^[29] 参照先前学者的方法 ^[30]	$Q_{sj} = H_j(1 - (D_{sj}^z/D_{sj}^z + k^2))$ $Q_d(x) = Q(x) \times p(x)$ $Q(x) = Q_i(x)/P(x)$ $Q_i(x) = (NPP_i/NPP_{\text{mean}} + y_i/y_{\text{mean}})/2$ $y_i = \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{\text{min}} / (\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{min}})$	Q_{sj} 为土地利用类型 y 中栅格 x 的生境质量, D_{sj} 为土地利用类型 y 中栅格 x 所受到的生境胁迫水平, k 是常数, $Q_d(x)$ 为生境质量总需求, NPP_i 、 NPP_{mean} 表示栅格 i 中植被净初级生产力和植被净初级生产力的平均值; y_i 、 y_{mean} 为栅格 i 中植被覆盖率和植被覆盖率的平均值; NDVI_{max} 与 NDVI_{min} 为研究区 NDVI 最大值与最小值; Q_i 为总的生境质量指数, P 为总人数, $Q(x)$ 为像元 x 的人均需要的生境质量, $p(x)$ 为像元 x 的人口密度。
景观美学 Landscape aesthetics	供给 需求	无量纲 无量纲	参照先前学者的方法 ^[31-32] 参照先前学者的方法 ^[33]	$VQI_{xt} = VQI_p + VQI_b + VQI_g + VQI_h + VQI_a$ $D_{VQI} = \lg(P_{\text{pop}}/S)$	VQI_{xt} 为 x 网格的总 VQI 得分, 取值范围为 [0-1]; VQI_p 为 x 网格的地形参数得分; VQI_b 为 x 网格的水源参数得分; VQI_g 为 x 网格的绿地参数得分; VQI_h 为 x 网格的人为影响参数得分; VQI_a 为景观可达性参数得分, 其中, D_{VQI} 是网格 x 的总需求得分, P_{pop} 是一年内该区域的访客数量, S 是研究区域的区域面积。
固碳 Carbon sequestration	供给 需求	t/km^2 t/km^2	使用光能利用率模型 (Carnegie Ames Stanford Approach, CASA) ^[34]	$NPP(x,t) = \text{APAR}(x,t) \times e(x,t)$ $C_e = \sum(p(x) \times f(x))$	$\text{APAR}(x,t)$ 代表的是月中像元 x 吸收的光合有效辐射, $e(x,t)$ 代表的是 t 月中像元 x 的实际光能利用率, $NPP(x,t)$ 为像元 x 在 t 月份的净初级生产力。其中, C_e 为人类碳排放; $p(x)$ 为像元 x 的人口空间密度; $f(x)$ 为像元 x 的人均碳排放; X 表示研究区的像元总数。

(3) 生态环境质量评估方法

随着学科交叉融合,四象限分析方法应用越来越广泛,该方法是将研究问题按两个维度,四个象限进行解析,从而可以更好的分析问题和制定相对应的解决策略^[12]。本研究将四象限分析方法运用于生态环境质量评估过程中,把生态系统服务的供需比和人类活动强度进行耦合,并运用自然间断法将耦合结果划分四个象限(表 3),分别代表生态环境质量优、一般、差和良好(图 2)。生态环境质量优主要表现为生态系统服务供需比值高,且人类活动强度小,对生态环境干扰低;生态环境差主要揭示区域生态系统服务供需失衡,人类活动强度大,对生态环境干扰能力强;生态环境质量良好和一般是指生态系统服务供需比值和人类活动强度都比

表 3 四象限分类阈值

Table 3 Four quadrant classification threshold

指标 Indicator	第一象限 First quadrant	第二象限 Second quadrant	第三象限 Third quadrant	第四象限 Fourth quadrant
生态系统服务供需比 Supply and demand ratio of ecosystem services	0.8350—2.4238	-2.5782—0.8349	-2.5782—0.8349	0.8350—2.4238
人类活动强度 Intensity of human activity	0.0294—0.1409	0.0294—0.1409	0.1409—0.5334	0.1409—0.5334

较小,但是随着社会经济的快速发展,生态系统服务的需求逐渐在增大,人类活动强度也在增加,会加剧区域生态环境质量退化的进程。

2 结果分析

2.1 生态系统服务供需空间格局

通过模型模拟,得到区域 4 种生态系统服务供需以及供需比率的空间分布格局(图 3),秦巴山区以山地为主,地形复杂,生态环境差异大,造成 NPP 的空间异质性。生境质量和景观美学的空间格局与 NPP 相似,高值区位于高海拔山区,高覆盖率的林地和草地明显改善了区域生境质量和景观美学服务。2000—2018 年固碳和产水需求量呈现较大的增长趋势,固碳平均需求量从 74.09 t/km² 上升到 240.7 t/km²,平均产水深度从 74.13 mm 上升到 147.16mm,高值区的分布集中在城市人口密集区。生境质量空间分布与人口密度和植被状况密切相关,年际变化不明显;2018 年秦巴山区的平均景观美学需求量为 0.534,高值区主要分布在著名的旅游胜地,吸引着国内外众多游客前来享受当地的旅游资源。综上所述,秦巴山区的生态系统服务需求量持续增长,因此需要加强生态环境保护和恢复措施。人口密集地区的环境需求量较大,应当重点保护和管理。另外,在旅游资源开发和保护方面,需要重视景观美学需求,以提升旅游体验。

在空间制图的基础上,用生态系统服务的供需比来衡量区域的供需水平。通过 ArcGIS 的自然间断法将

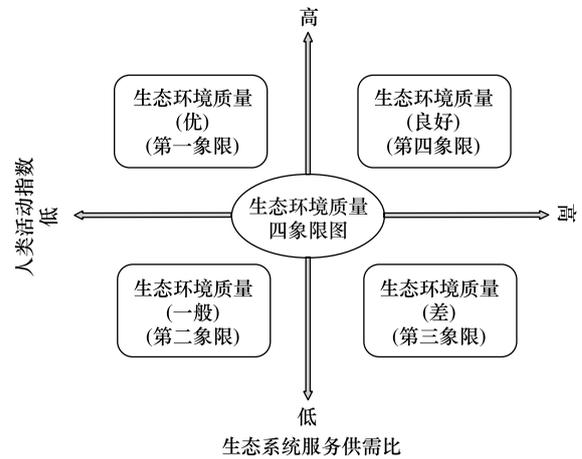


图 2 生态环境评估模型

Fig.2 Ecological environment assessment model

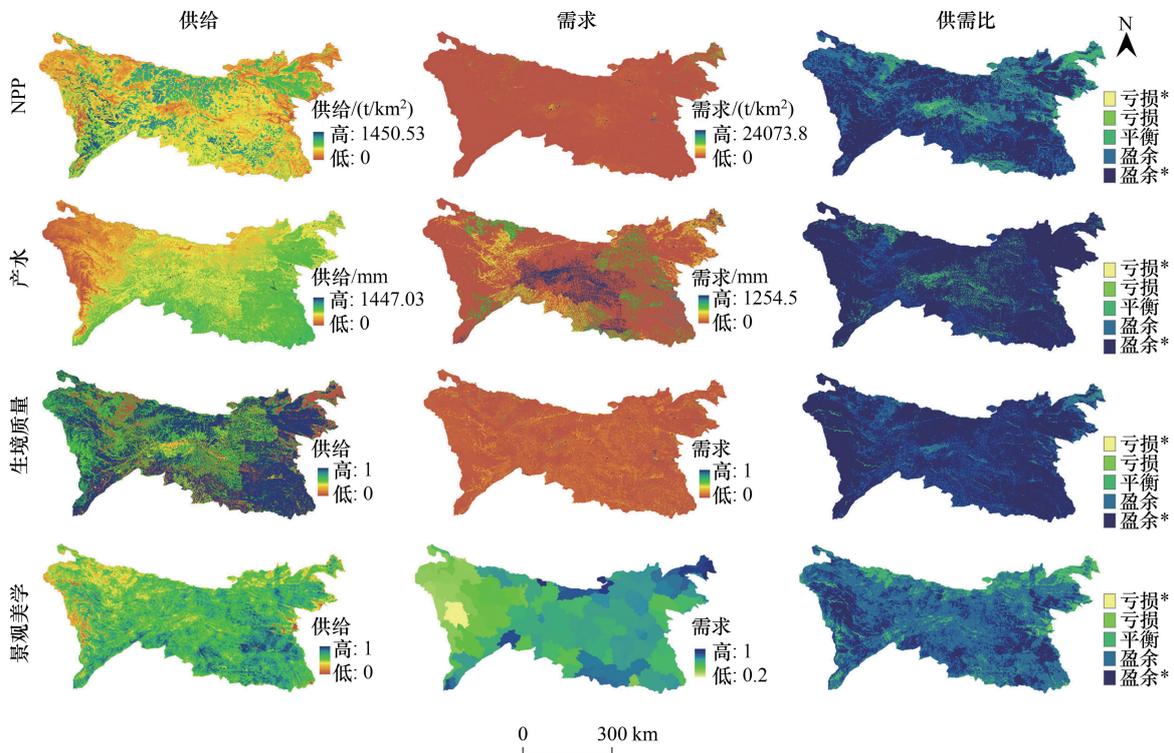


图 3 生态系统服务的供给、需求和供需比率指标的时空格局

Fig.3 Spatial and temporal patterns of supply, demand and supply-demand ratio indicators of ecosystem services

供需比分为五类:较为严重的亏损(亏损*)、亏损、平衡、盈余和盈余充足(盈余*)^[11]。2000—2018年,秦巴山区的固碳、产水和景观美学服务的供需比呈现微弱下降趋势,供需比在逐渐减小,意味着供给可以满足需求,但盈余在减小。综合来看,秦巴山区的固碳和产水服务的供给在一定程度上可以满足需求,但是供需比值在减小,意味着区域存在着供需矛盾的风险。相比之下,生境质量服务的供给不仅高于需求,而且还呈现出相对稳定的态势。

2.2 人类活动对生态系统服务供需的驱动分析

人类活动对生态系统服务的供给能力和需求量产生影响,导致供需矛盾和赤字情况。同时,人类活动的干扰会改变区域生态系统的结构和功能,影响生态系统的自我修复能力,最终会影响生态系统的供给水平^[36]。通过深入研究人类活动强度,对于恢复区域生态环境质量非常重要。目前人类活动强度分析多基于自然环境下遥感数据的反演,比如植被 NDVI、土壤指数以及地表温度等生态指数,较少考虑社会经济因素^[37]。所以本研究在前人研究的基础上^[38],构建人类活动强度指标(表4),通过自然—社会多重因子进行空间叠加,得到区域人类活动强度空间分布。通过数据分析发现 GDP 和人口密度对于揭示人类活动强度较显著,权重分别为 0.19 和 0.18,而自然因素(NDVI 和土地利用强度)等对人类活动影响较小。

表 4 人类活动指标的权重

Table 4 Human activity index weight

编号 Number	指标 Indicator	方向 Direction	权重 Weight	编号 Number	指标 Indicator	方向 Direction	权重 Weight
1	人口密度	积极	0.18150	5	道路密度	积极	0.13566
2	GDP	积极	0.19914	6	土地利用强度	积极	0.05910
3	夜间灯光指数	积极	0.14300	7	NDVI	消极	0.07850
4	居民点密度	积极	0.13592	8	距城市距离	消极	0.06718

通过人类活动指标的空间叠加,得到区域人类活动强度的时空格局变化图(图4)。在时间尺度上,人类活动强度年际间变化不明显,人类活动强度指数大面积在 0.4 以上;在空间格局上呈现西低东高的趋势,高值区域集中在东部地区,比如河南省的西部、湖北省的北部以及陕西省的南部区域,揭示出三省的人类活动强度

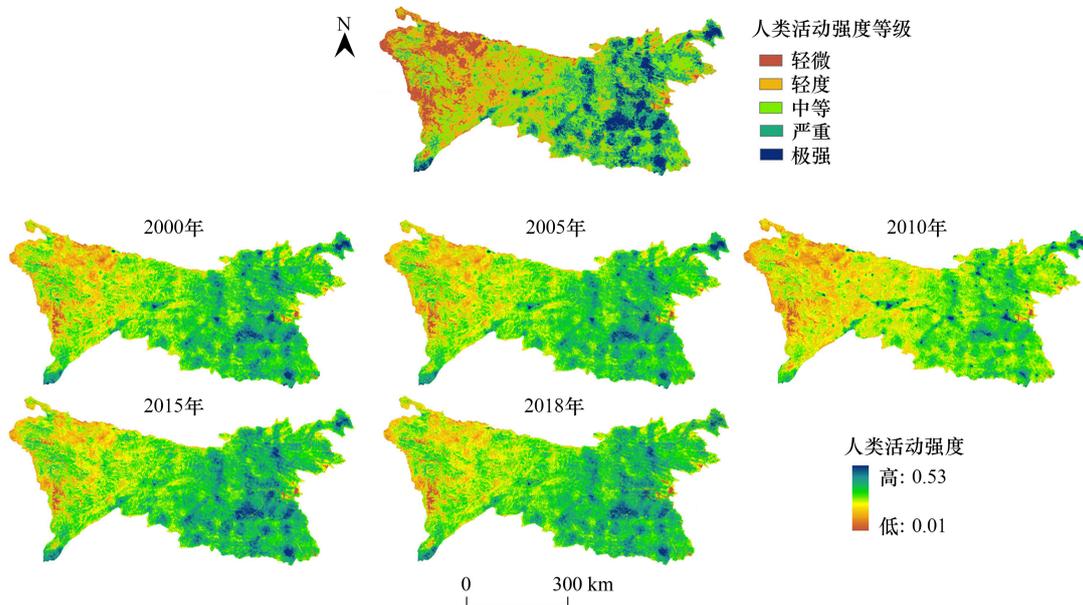


图 4 人类活动强度时空格局变化

Fig.4 Temporal and spatial pattern changes of human activity intensity

较强,对于区域生态环境干扰强度大。而低值区域主要集中在西部海拔较高的山区,人口稀少,对于区域生态环境干扰力度小,保障了区域良好的生态环境质量。本研究在人类活动强度数据的基础上详细刻画区域人类活动力度,将数据划分 5 个等级。通过不同等级的像元数量分析发现大面积(64.6%)的人类活动强度集中在中等及以下水平,并且集中在区域的中西部,显示出该部分区域人类活动强度小,人类对植被和干扰能力较弱,反映区域生态环境质量较好。

2.3 生态环境质量评价

基于四象限分析模型模拟 2000—2018 年人类活动强度和生态系统服务供需比值的耦合分布状况(图 5)。研究结果显示,环境质量等级的空间分布主要集中在第一和第四象限,环境质量较好的面积占整个区域面积的 67.6%,表明人类活动对生态系统服务供需的影响较小。第一象限主要分布在区域的中部和西部,如临夏回族自治州、绵阳市等地,区域有黄河国家文化公园,山体植被覆盖程度逐年上升,同时加上生态修复和绿化项目的支撑,促使区域生态环境质量逐年提升;第二象限主要位于天水市和陇南市,生态环境质量一般,主要是特殊的区域位置使得区域生态环境质量较差,但是随着生态修复和小流域综合治理等措施,提升了区域的植被覆盖度,促进区域生态环境质量好转。第三象限则集中在人口密集的河南省、湖北省等部分区域,人类活动对生态系统干扰力度强,影响其生态系统的供给水平,此外社会经济的发展对于生态系统的需求在逐渐增加,最终导致部分区域生态系统服务供需失衡和生态环境质量变差的恶性循环状况,要加大对该区域生态环境的综合治理,提升区域生态环境质量。第四象限主要集中在中部和东部地区,覆盖面积较广,反映整个秦巴山区的生态环境质量较优,主要是丰富的自然资源提升区域生态系统服务的供给能力,并且生态系统服务的需求有限,促使区域生态系统服务供需比值在逐渐增大,促使区域生态环境质量较优。

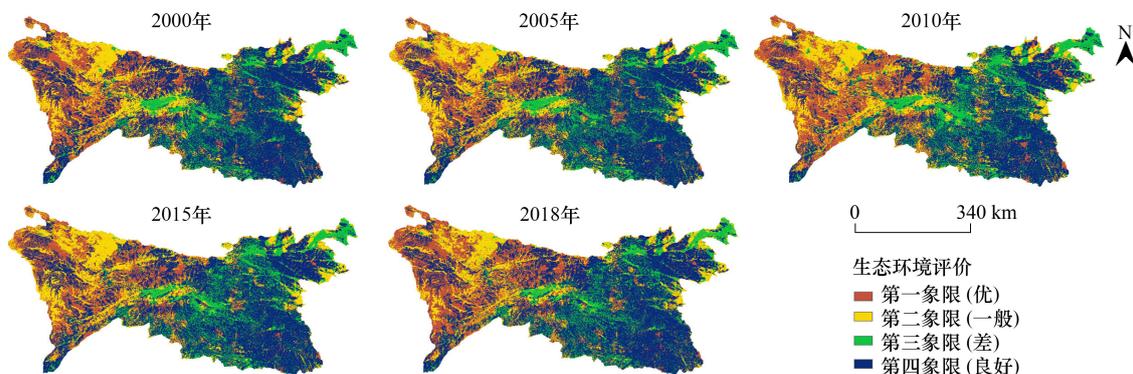


图 5 生态环境质量空间分布

Fig.5 The spatial distribution of ecological environment quality

3 讨论

为了有效建立山区生态环境指标体系,需要深入考虑山区生态环境的涵义和特点^[39-40]。影响山区生态环境的因素主要包括自然环境和人类活动两个方面,这两者相互交织影响着山区生态系统的健康发展。因此,为了更好地评估和监测山区生态环境,需要确定适合当地特色的指标体系框架^[41]。通过科学合理地设计指标体系,可以更好地保护和管理山区生态环境,实现可持续发展的目标。

本研究针对秦巴山区的生态环境质量进行评价,综合分析不同尺度下区域生态质量的变化特征。我们的研究结果发现有 69.91%的像元生态环境质量处于优良状态,仅有 13.64%像元的生态环境质量处于差的状态,表明秦巴山区的生态环境质量总体较好,这和秦巴山区处于中国生态屏障关键地位相匹配。但是仍有将近 16%的像元生态环境质量处于一般状况,比如西部的秦州区、甘谷县,东部的邓州市、老河口市等区域,区域人类活动对生态环境干扰比较小,但是区域本身生态系统服务供给能力有限,生态环境质量有待提升。四

象限模型综合反映了人类活动强度与生态系统服务供需平衡之间的相互影响和制约关系^[42]。人类活动和生态环境质量有非常密切的关系,研究中发现生态质量的变化趋势在秦巴山区上表现出明显的区域性。人类活动强度较大的区域集中在城区周围,区域内出现生态系统服务供需矛盾,生态环境质量越差。然而,改善人类活动与生态环境的关系将是一个长期的、渐进的过程^[11],对于秦巴山区上人类强度高、生态系统服务关系矛盾突出的县、市,应进一步采取可持续的生态恢复措施(表 5),健全生态补偿机制等举措。同时也要减少人类活动对生态环境的压迫,最终实现人与环境关系的和谐发展。

表 5 生态环境较差区域的生态环境管理策略

Table 5 Ecosystem management strategies for ecologically disadvantaged areas

地名 Name	管理策略 Management strategy
云阳县	应减少碳排放和汽车尾气,并进行生态保护和恢复
朝天区	政府应大力控制工业排放和城市扬尘等空气污染,并发展绿色低碳经济
石泉县	政府应强烈要求减少重度污染的工厂,减少碳排放,并要求进行碳封存
华阴市	各利益相关方应加大对农村生态建设的投入,加强对农村饮用水源的保护,减少对碳汇的需求
汉台区	利益相关方应加强对秦岭地区景区的常态化管理,丰富景观美学的供给服务
汉滨区	减少燃煤,增加林草种植面积,增加碳吸附量,减少碳需求
汉阴县	政府应加快水污染治理设施的建设,巩固秦岭生态环境整治的效果
巩义市	政府应加大污染减排力度,采取结构减排、工业减排等措施
汝州市	政府应继续改善水环境质量,控制煤炭污染,加强非点源污染控制
汝阳县	优化城郊森林树种结构,减少水土流失,提高景观美学服务功能
荥阳市	开展散煤燃烧专项治理,科学制定“一矿一策”修复方案
新密市	政府应大力推进规范化管理,禁止违法建设,增加碳吸附手段,减少对碳封存的需求
洛龙区	政府应加大大气污染治理力度,推进水系整治、造林绿化,充分发挥厚植生态的优势
宜川县	政府应严格控制煤炭的污染,实施清洁煤球的替代,改善运输结构,然后减少对碳封存的需求
禹州市	政府应重视项目减排,推进城市污水处理设施建设,增加水资源的供给
新郑市	政府应减少粉尘污染,改善空气质量,提高河水质量,确保水的供应
潼关县	政府应加大植树造林、森林资源管护、保护湿地环境等专项行动,稳步提高森林覆盖率
紫阳县	利益相关方应继续加大退耕还林和天然林保护力度,加强矿山生态修复,降低人类活动强度。
洛南县	各利益相关方应做好水、大气、固体废物污染防治和农村环境综合整治工作
登封市	政府应在山区实施一些造林的工程措施,不应盲目开采矿产资源来增加土壤保护。

虽然本研究估算了生态系统服务供需效应以及生态环境质量状况,对区域生态系统服务的优化管理提供一些参考,但是也存在一定的缺陷。本文选取 8 种人类活动指标来评价人类活动强度对生态系统服务功能的影响。但是,由于秦巴山区空间异质性较大,其他人为因素也可能影响生态环境,包括矿产资源开发、交通量、旅游、污染、水坝和生态恢复项目^[43]。因此,由于没有充分考虑这些因素,实际的人类活动强度值可能被低估。例如,一些研究表明,旅游和交通量也是对生态环境产生负面影响的重要人类影响因素,因此考虑更多的影响因素,可以提高结果的评估精度。

4 结论

本研究在生态系统服务供需的基础上,通过构建人类活动强度指标,运用四象限分析模型将生态系统服务供需和人类活动指标相结合,评估了秦巴山区 2000—2018 年生态环境质量,对区域生态-经济的和谐发展具有重要的意义。主要结论如下:

(1) 固碳和产水服务的需求量呈现逐渐增加的趋势,2018 年在秦巴山区高达 56.73×10^6 t, 平均固碳需求量为 240.7 t/km^2 ; 产水总需求量也高达 $39.34 \times 10^9 \text{ m}^3$, 平均产水需求深度为 147.163 mm ; 生境质量服务需求量在近 20 年中基本保持稳定,在 2018 年秦巴山区的平均生境质量需求量为 0.018,与人口密度和植被生长状

况相关;景观美学需求量在逐渐增加,2018 年比 2000 年增加了 27.9%,平均值为 0.534。(2)2000—2018 年,固碳、产水和景观美学服务的供需比逐渐减小,供给的盈余量在逐渐减小,供需风险在逐渐增大,而生境质量供需比率变化不大,供给大于需求。(3)环境质量等级的空间分布以第一象限和第四象限为主要象限,区域内人类活动对生态系统服务供需的影响较小,环境质量处于优良水平。

参考文献 (References):

- [1] 祝汉收,翟俊,侯鹏,王桥,陈妍,金点点,王永财. 生态系统服务权衡与协同视角下的重点生态功能区保护特征. 地理学报, 2022, 77 (5): 1275-1288.
- [2] Scholes R J, Reyers B, Biggs R, Spierenburg M J, Duriappah A. Multi-scale and cross-scale assessments of social-ecological systems and their ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 16-25.
- [3] 胡昂,吴侯思,黄莹,刘子逸,周欣颖,王一沛,刘杰,干晓宇. 高空间异质性区域生态系统服务供需与驱动力分析——以四川省为例. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1062-1076.
- [4] 杨宜男,李敬,王立,王子豪,姚晨心,王原. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1555-1571.
- [5] 申嘉澍,李双成,梁洋,王玥瑶,孙福月. 生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望. 自然资源学报, 2021, 36(8): 1909-1922.
- [6] 刘春芳,王川,刘立程. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制——以榆中县为例. 地理研究, 2018, 37(2): 419-432.
- [7] 刘立程,刘春芳,王川,李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. 地理学报, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [8] 景永才,陈利顶,孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [9] 余玉洋. 秦巴山区生态系统服务供需及其生态补偿研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
- [10] 赵雪雁,马平易,李文青,杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [11] Sun Y X, Liu S L, Shi F N, An Y, Li M Q, Liu Y X. Spatio-temporal variations and coupling of human activity intensity and ecosystem services based on the four-quadrant model on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 743: 140721.
- [12] 刘永婷,杨钊,徐光来,杨强强,刘世杰,何开玲. 基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析——以皖南国际旅游文化示范区为例. 生态学报, 2022, 42(13): 5200-5210.
- [13] 刘迪,陈海,张行,史琴琴,耿甜伟. 黄土丘陵沟壑区生态系统服务对人类福祉的影响及其群体差异. 地理研究, 2022, 41(5): 1298-1310.
- [14] 张弛,李枝坚,曾辉. 基于小波变换的生态系统服务权衡尺度效应与影响因素研究——以珠江三角洲为例. 地理研究, 2022, 41(5): 1279-1297.
- [15] Kim J H, Jobbágy E G, Jackson R B. Trade-offs in water and carbon ecosystem services with land-use changes in grasslands. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2016, 26(6): 1633-1644.
- [16] 史飞飞,周秉荣,颜亮东,祁栋林,乔斌,石明明,陈奇. 近 32 年隆宝高寒湿地时空变化特征及其气候驱动力分析. 高原气象, 2020, 39 (6): 1282-1294.
- [17] Bukvareva E, Zanolodchikov D, Kraev G, Grunewald K, Narykov A. Supplied, demanded and consumed ecosystem services: Prospects for national assessment in Russia. *Ecological Indicators*, 2017, 78: 351-360.
- [18] Mensah S, Veldtman R, Assogbadjo A E, Ham C, Glèlè Kakaï R, Seifert T. Ecosystem service importance and use vary with socio-environmental factors: A study from household-surveys in local communities of South Africa. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 1-8.
- [19] Wolff S, Schulp C J E, Kastner T, Verburg P H. Quantifying spatial variation in ecosystem services demand: A global mapping approach. *Ecological Economics*, 2017, 136: 14-29.
- [20] Schirpke U, Candiago S, Egarter Vigl L, Jäger H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tappeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651(Pt 1): 928-941.
- [21] Wu X, Liu S L, Zhao S, Hou X Y, Xu J W, Dong S K, Liu G H. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [22] 唐学军,陈晓霞. 秦巴山区跨区域生态环境治理的路径思考. 西南石油大学学报: 社会科学版, 2019, 21(5): 28-34.
- [23] 刘采,张海燕,李迁. 1980—2018 年海南岛人类活动强度时空变化特征及其驱动机制. 地理科学进展, 2020, 39(4): 567-576.
- [24] Darvill R, Lindo Z. The inclusion of stakeholders and cultural ecosystem services in land management trade-off decisions using an ecosystem services approach. *Landscape Ecology*, 2016, 31(3): 533-545.
- [25] 魏慧,赵文武,张骁,王新志. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价——以山东省德州市为例. 生态学报, 2017, 37(11):

3830-3839.

- [26] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
- [27] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 李英杰, 王鹏涛, 延军平. 区域生态系统服务供需风险时空演变特征——以陕西省产水服务为例. 生态学报, 2020, 40(6): 1887-1900.
- [28] Zhang C, Li J, Zhou Z X, Sun Y J. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2021, 120, 106974.
- [29] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 马新萍, 张城. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. 生态学报, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [30] 彭建, 吴见, 徐飞雄, 吕俭. 基于价值评估的黄山市生境质量时空演变特征分析. 生态学报, 2021, 41(2): 665-679.
- [31] Kang H J, Seely B, Wang G Y, Innes J, Zheng D X, Chen P L, Wang T L, Li Q L. Evaluating management tradeoffs between economic fiber production and other ecosystem services in a Chinese-fir dominated forest plantation in Fujian Province. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 80-90.
- [32] Dou H S, Li X B, Li S K, Dang D L. How to detect scale effect of ecosystem services supply? A comprehensive insight from Xilinhot in Inner Mongolia, China. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3654.
- [33] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, Wang B J, Dai L W. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: A case study in Hulunbuir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.
- [34] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [35] Li T, Li J, Wang Y Z. Carbon sequestration service flow in the Guanzhong-Tianshui economic region of China: How it flows, what drives it, and where could be optimized? *Ecological Indicators*, 2019, 96: 548-558.
- [36] 张羿轲, 方一平, 杨悦, 徐云. 岷江上游山区生态福祉波动的人类活动干扰研究. 山地学报, 2021, 39(2): 238-247.
- [37] 李海萍, 王娜萍, 代宇庭. 云贵高原湿地景区人类活动强度的空间分布——以云南省拉市海流域为例. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2915-2922.
- [38] 杨华, 徐勇, 王丽佳, 徐琳. 青藏高原人类活动强度时空变化与影响因素. 生态学报, 2023, 43(10): 3995-4009.
- [39] Fang C Y, Hu X J, Xu H Q, Wang M, Lin Z. Comparison of the ecological quality between different urban planning. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(8): 1097-1107.
- [40] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1172-1189.
- [41] 刘轩, 岳德鹏, 马梦超. 基于变异系数法的北京市山区小流域生态环境质量评价. 西北林学院学报, 2016, 31(2): 66-71, 294.
- [42] 李禾尧, 何思源, 王国萍, 丁陆彬, 焦雯珺, 闵庆文. 国家公园灾害风险管理研究与实践及其对中国的启示. 自然资源学报, 2021, 36(4): 906-920.
- [43] 陈泓瑾, 刘琳, 张正勇, 刘亚, 田浩, 康紫薇, 王统霞, 张雪莹. 天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性. 地理学报, 2022, 77(5): 1244-1259.