

内蒙古人类活动强度与生态系统服务价值的时空关联性分析

郭朝勒格日

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2024年1月11日; 录用日期: 2024年2月24日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

生态系统为人类日常生活提供了许多基本生态系统服务, 揭示人类活动强度与生态系统服务价值的关系对内蒙古不同区域协调人地关系、生态系统的改善以及地区可持续发展都具有十分重要的指导意义。本研究以内蒙古为研究区域, 结合2000~2021年遥感数据和社会经济统计数据, 以夜间灯光、人口密度和土地利用数据等作为数据源表征人类活动强度, 用修正后的陆地生态系统服务单位面积价值当量表, 来对生态系统服务的价值进行量化, 并采用双变量空间自相关与地理加权回归模型, 来研究人类活动强度与生态系统服务价值间的时空关联性。结果表明: (1) 2000~2021年内蒙古人类活动强度呈缓慢增强趋势, 中部最高、西部最低及东部较高的空间分布特征; (2) 2000~2021年内蒙古的生态系统服务总价值从14140.86亿元上升到14215.87亿元, 变化量为75.01亿元; 内蒙古生态系统服务价值的空间异质性显著, 呈由东到西递减的空间分布特征; (3) 内蒙古人类活动强度与整体生态系统服务价值呈现正相关性, 在东部草原森林生态良好区与中部草原生态均衡区两者呈现正相关性, 在西部沙漠生态环境脆弱区两者呈现负相关性; 研究发现内蒙古人类活动强度与生态服务价值在不同区域的背景下具有较大差异, 不同地域类型中两者的关系呈现不同的关联性。

关键词

人类活动, 生态系统服务价值, 地理加权回归, 内蒙古

Temporal and Spatial Correlation Analysis of Human Activity Intensity and Ecosystem Service Value in Inner Mongolia

Chaolegeri Guo

School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Jan. 11th, 2024; accepted: Feb. 24th, 2024; published: Feb. 29th, 2024

Abstract

Ecosystem provides many basic ecosystem services for human daily life. Revealing the relationship between the human activity intensity and the value of ecosystem services is of great guiding significance for the coordination of human-land relationship, the improvement of ecosystem and the sustainable development of different regions in Inner Mongolia. Revealing the relationship between human activity intensity and ecosystem service value is of great guiding significance for coordinating human-land relationship, and improving ecosystem and regional sustainable development in different regions of Inner Mongolia. This study selected Inner Mongolia as the research object, combined with remote sensing data and socio-economic statistical data from 2000 to 2021, used night light, population density and land use data as data sources to calculate the human activity intensity, and used the revised land ecosystem service unit area value as a scale to quantify the ecosystem service value. In addition, bivariate spatial autocorrelation and geographical weighted regression model were used to study the temporal and spatial correlation between human activity intensity and ecosystem service value. The results showed that: (1) The human activity intensity in Inner Mongolia increased slowly from 2000 to 2021; The spatial distribution characteristics were highest in the middle, lowest in the west and higher in the east. (2) From 2000 to 2021, the total ecosystem service value in Inner Mongolia increased from 1,414.086 billion yuan to 1421.587 billion yuan, with a change of 7.501 billion yuan; The spatial distribution is decreasing from east to west. (3) There was a positive correlation between the human activity intensity and the overall ecosystem service value in Inner Mongolia, a positive correlation between the eastern grassland forest ecological good area and the central grassland ecological balance area, and a negative correlation between the western desert ecological fragile area; It is found that human activity intensity and ecological service value in Inner Mongolia have great differences in different regional backgrounds, and the relationship between the two shows different correlation in different regional types.

Keywords

Human Activity, Ecosystem Service Value, Geographic Weighted Regression, Inner Mongolia

Copyright © 2024 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

人类在利用生态系统服务带来的惠益同时，人类活动也对生态系统服务价值产生着深刻、多样化的影响[1] [2] [3]。千年生态系统评估(MA)报告[4] [5]认为生态系统功能变化的最主要原因是受到人类活动的干扰[6] [7]。生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)是用于量化生态系统服务的最常用指标，它直接反映了生态系统对人类的价值[8]。在1997年，Costanza [9]等人首次采用当量因子法将生态系统服务货币化，谢高地[10] [11] [12]等(2003, 2008, 2015)基于此提出适合我国的评估方法[13]。人类活动强度(Human Activity Intensity, HAI)客观反映人类对陆地表层的利用、改造和开发程度[14]，是评估人类活动对生态环境影响的重要参数，通过定量表达可以准确地评估和比较不同区域人类活动对生态系统的影响程度[15]。通过揭示人类活动与生态系统服务的关系可以促进人类社会与生态系统的“双赢”。

近年来，国内外学者有关人类活动与生态系统服务间关系普遍采用双变量空间自相关模型、LISA 聚

类分析法[16]、耦合协调度模型[17]、地理探测器模型[18]、多尺度地理加权回归模型[19]、四象限模型[20]等方法对人类活动与生态系统时空关联、人类活动对生态服务的影响等方面进行研究。多数研究中引入了人类活动强度指数[16] [17] [21]，如南箔等(2018) [21]运用双变量空间自相关模型对长江中游华阳湖湖群地区生态系统服务价值和人类活动强度间时空关联特征进行了分析，李理等(2020) [16]运用 LISA 聚类分析对淇河流域人类活动与生态系统服务价值的空间关联性进行了分析，郭琛等(2023) [17]采用耦合协调度模型、地理探测器模型对黄河流域生态系统服务与人类活动强度耦合协调的时空动态及影响因素进行了分析。此外，有些研究中选择了特色指标表示人类活动强度。如赵忠旭等(2020) [22]应用 Slope 模型、一元线性回归方程，用西藏居民点用地和夜间灯光表征人类活动强度分析了其对生态系统服务的影响，张翔等(2022) [23]用双变量空间自相关模型，以常州市人口密度表征人类活动强度来分析了其于生态系统服务间时空关联性。人类活动与生态系统服务间的关系因区域而异，可能正相关，也可能负相关。如朱琳娜等(2023) [24]研究西安都市圈的人类活动强度与生态系统服务价值间关系发现存在负相关关系。丁菊等(2023) [25]选取宁夏黄河流域粮食供给、固碳服务、产水服务研究其与人类活动的关系，发现呈正相关。然而，目前研究多以城市或流域等地区为研究对象，土地利用视角下内蒙古生态系统服务价值与人类活动间关系的研究仍不足。

党的二十大报告强调，以高品质生态环境支撑高质量发展，突出了生态文明建设的战略地位。内蒙古作为中国北方的生态安全屏障，是我国生态安全战略不可或缺的重要组成部分。基于此，本研究结合 2000~2021 年土地利用数据量化生态系统服务价值以及人类活动强度，运用双变量空间自相关与地理加权回归模型探讨内蒙古人类活动强度与生态系统服务价值的时空关联性，这可为内蒙古不同区域因地制宜提出生态系统管理措施、调整人类活动提供有效参考，对于内蒙古协调人地关系、生态系统的改善及地区绿色可持续发展都具有十分重要的指导意义。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

内蒙古地区位于中国正北方地区，其范围在北纬 37°24′至 53°23′之间，东经 97°12′至 126°04′之间，东西直线距离约 2400 km，南北跨距约 1700 km，面积为 $118.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国总面积的 12.3%。地势较高，平均海拔高度约 1000 m，内蒙古高原占全区的三分之二，气候以温带大陆性季风气候为主。土地利用类型主要是草地、林地和未利用地，2021 年分别占总面积的 47.92%、15.82%和 23.34%。据统计，2021 年内蒙古年末总人口达到 2400 万人，人口密度较高、城市化水平较高地区集中分布在内蒙古中部地区。复杂多样的地貌地形及土地利用类型造就了内蒙古复杂多样的生态系统。内蒙古地区为响应习近平主席的“绿水青山就是金山银山”理念，自 2000 至 2021 年在生态建设方面取得了重大进步。在此背景下探讨内蒙古 HAI 与 ESV 间时空关联性，以期内蒙古不同区域提出适合的生态系统管理措施及调整人类活动提供有效参考。

2.2. 数据来源

本研究以 5 年时间为分段，收集整理了内蒙古 2000~2021 年社会经济统计数据 and 遥感数据。(1) 行政边界矢量数据来源于国家基础地理信息系统(<http://www.Ngcc.cn/>)；(2) 土地利用数据源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)，空间分辨率为 30 m × 30 m，依据中国科学院生态遥感监测土地利用/覆盖分类体系，将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等六类，并基于该数据计算生态系统服务价值[26]；(3) 粮食产量相关数据来源于《国家统计局关于粮食产量的公告》《统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》，其中缺失数据由插值法补齐，利用该数据

对当量因子进行修正；(4) 夜间灯光、人口密度数据用作表征人类活动强度，来源于吴以珍等[27]的研究成果及中国科学院资源与环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)。

2.3. 研究方法

2.3.1. 人类活动强度表征

人口密度既能表示人类活动的基本空间格局，又能反映人类活动的动态演变；土地利用类型的变化是人类对地表影响过程及结果的直观表现，同时也是当前定量表征人类活动强度(HAI)的重要因素之一[28]；夜间灯光数据在反映城市灯光甚至小规模居民地方面具有重要作用[29]，可用于细化建设用和耕地等土地利用类型内部人类活动的等级和空间分异。因此，夜间灯光数据被广泛应用于建设用地提取[30]和城市发展[31]研究中。因此本研究基于陈泓瑾[32]等的研究方法，利用夜间灯光数据、人口分布数据、土地利用数据来共同表征人类活动强度(HAI)，公式如下：

$$HAI = aN + bP + cL \quad (1)$$

式(1)中 HAI 代表人类活动强度，而 N 、 P 、 L 分别代表归一化处理后的夜间灯光亮度、人口密度和土地利用； a 、 b 、 c 分别是夜间灯光亮度、人口密度和土地利用的权重， a 、 b 、 c 分别为 0.3、0.3 和 0.4；其中，各土地利用的权重依次是耕地为 0.3，林地、草地和水域为 0.05，未利用地为 0，建设用地为 0.55 [32]；HAI 取值为[0, 1]，值越大表明人类活动越强，反之越弱。

2.3.2. 生态系统服务价值估算

根据谢高地(2015)等人对生态系统服务价值当量表的改进，建设用地对生态环境的影响具有积累效应，因此难以准确量化其生态系统服务价值。因此，在本研究中，建设用地的生态系统服务价值取值被设定为零。为使研究结果更具区域特征，利用研究区粮食产量数据来对当量因子进行修正[33]，计算得出研究区单个生态系统服务当量因子的经济价值。用该值与各生态服务价值当量相乘，根据表 1 中给出的生态系统功能服务价值系数，将其与各类土地利用面积相乘，最终得出内蒙古各类生态系统服务的总价值。计算公式如下：

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (2)$$

$$ESV_i = \sum A_i \times VC_i \quad (3)$$

$$ESV = \sum_i ESV_i \quad (4)$$

式(2)为修正公式， E_a 是单位面积农田生态系统提供粮食生产服务的经济价值(元/公顷)； i 为农作物种类； p_i 为 i 种农作物某年的全国平均价格(元/吨)； q_i 为 i 种农作物单位面积产量(吨/公顷)； m_i 为 i 种农作物种植面积(公顷)； M 为所有农作物种植面积(公顷)。通过计算得出 E_a 等于 1261.41 元/公顷。式(3)、(4)中 ESV_i 表示第 i 种生态系统服务的价值， ESV 表示总生态系统服务的价值； A_i 是第 i 种土地利用类型的面积， VC_i 是第 i 种生态系统服务的价值系数，各生态系统服务系数见表 1。

2.3.3. 双变量空间自相关模型

本研究使用双变量空间自相关方法来衡量人类活动强度与生态系统服务价值两者的空间关联性，公式如下：

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式(5)中 x_i 和 x_j 是观测值, \bar{x} 表示 x_i 的平均值。 W_{ij} 是空间单元 i 与 j 的空间权重邻接矩阵($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$), Moran's I 取值为 $[-1, 1]$ [19]。根据计算结果, H-H、L-L、H-L、L-H 依次代表高人类活动强度和高生态系统服务价值类型区、低人类活动强度和低生态系统服务价值类型区、高人类活动强度和低生态系统服务价值类型区、低人类活动强度和高生态系统服务价值类型区[34]。

Table 1. Ecosystem service value in Inner Mongolia
表 1. 内蒙古生态系统服务价值当量表

生态系统服务 Ecosystem services		耕地 Plowland	林地 Forest land	草地 Meadow	水域 Waters	未利用地 Unutilized
供给服务 Supply service	食物生产 Food production	1072.20	290.12	290.12	826.22	12.61
	原料生产 Raw material production	504.56	681.16	428.88	460.41	37.84
调节服务 Regulating service	水资源供给 Water resources supply	25.23	353.19	239.67	6862.07	25.23
	气体调节 Gas regulation	845.14	2220.08	1526.31	1683.98	138.76
	气候调节 Climate regulation	454.11	6647.63	4023.90	3714.85	126.14
	净化环境 Clean the environment	126.14	1980.41	1324.48	5770.95	391.04
支持服务 Support service	水文调节 Hydrologic regulation	340.58	4805.97	2951.70	79765.26	264.90
	土壤保持 Soil conservation	1299.25	2699.42	1854.27	2043.48	163.98
	维持养分循环 Maintain nutrient circulation	151.37	201.83	138.76	157.68	12.61
文化服务 Cultural service	生物多样性 biodiversity	163.98	2459.75	1690.29	6571.95	151.37
	美学景观 Aesthetic landscape	75.68	1084.81	744.23	4175.27	63.07

2.3.4. 地理加权回归模型(GWR)

本研究引入地理加权回归模型, 在将内蒙古划定 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 的格网的基础上, 以生态系统服务价值和人类活动强度为解释因子, 利用 MGWR2.2 软件进行空间分布的拟合。地理加权回归模型的公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式(6)中 y_i 表示被解释变量; β_k 为截距; $\beta_k(u_i, v_i)$ 是第 k 个解释变量在 i 处的拟合系数; x_{ik} 表示样本 i 的第 k 个解释变量; (u_i, v_i) 是 i 的经纬度; $\varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 是随机误差。

3. 结果与分析

3.1. 人类活动强度时空特征分析

3.1.1. 人类活动强度时序变化分析

2000~2021 年内蒙古人口密度呈下降趋势, 而人类活动强度整体呈现增强趋势, 根据人类活动强度

变化可将其分为三个阶段(图 1)。2000~2007 年人口密度呈现大幅下降趋势, 年均变化量为-0.07, 同时期耕地与水域面积也处于下降阶段; 2007~2014 年内蒙古人口密度呈现阶梯式上升趋势, 同时期耕地、水域与建设用地面积也呈现增加趋势(图 2), 这是由于呼包鄂地区经济、工业、能源发展带来的人口“虹吸效应”, 导致这期间人口密度增长、人类活动强度增强; 2014~2021 年内蒙古人类活动强度总体呈现下降趋势, 且耕地与水域面积也呈下降趋势(表 2); 在 21 年间内蒙古林地与建设用地二者的面积直线上升, 未利用地面积下降, 如表 2, 可见内蒙古人类活动强度受人口密度、耕地面积与水域面积变化等的影响较大, 而受其他地类的影响较小。

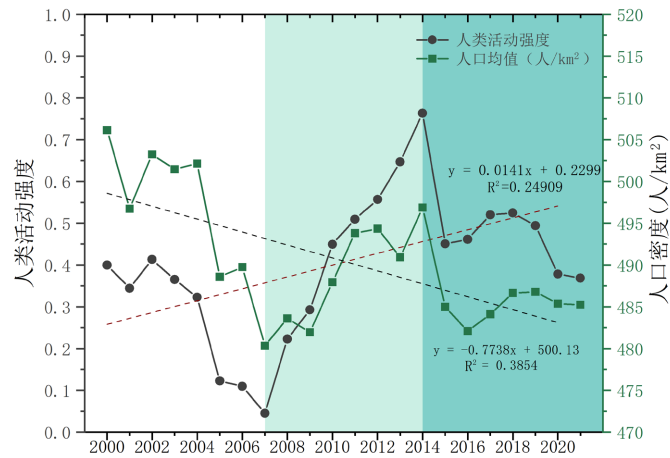


Figure 1. Annual average human activity intensity in Inner Mongolia from 2000 to 2021
图 1. 2000~2021 年内蒙古年均人类活动强度

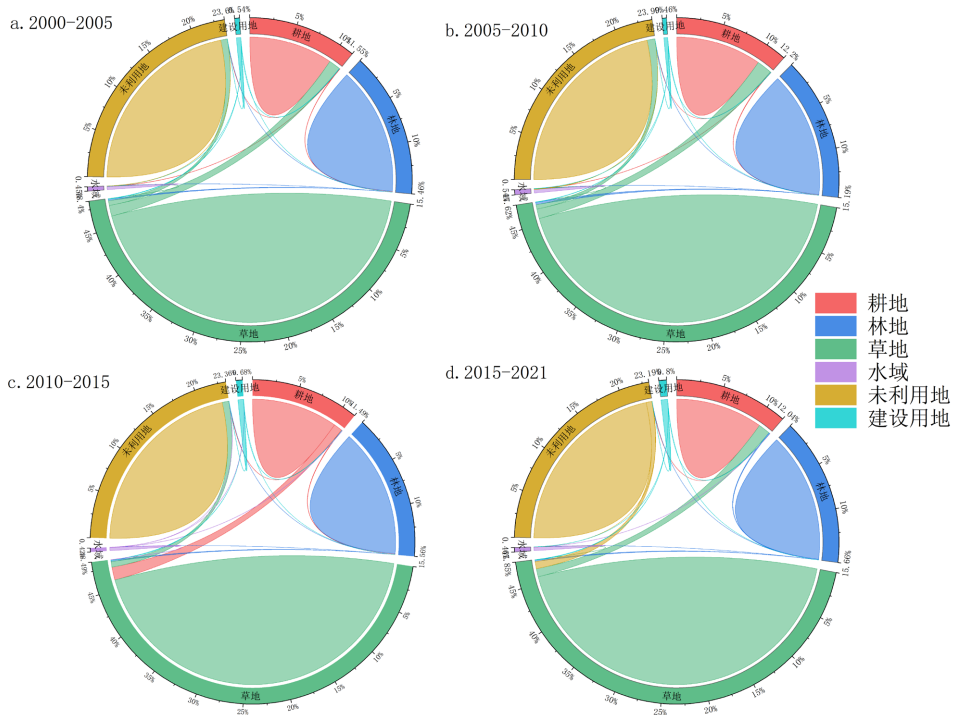


Figure 2. Area change of land use types in Inner Mongolia from 2000 to 2021
图 2. 2000~2021 年内蒙古土地利用类型面积变化

Table 2. Land use transfer Matrix (ha)
表 2. 土地利用转移矩阵(公顷)

土地利用类型 Land use type	2000~2005 年	2005~2010 年	2010~2015 年	2015~2021 年
耕地 Plowland	13982076.63	13238372.34	13159731.87	13791842.73
林地 Forest land	17398444.23	17710203.51	17832334.23	17936240.85
草地 Meadow	54560474.10	55447963.65	55558182.33	54823405.77
水域 Waters	615059.10	512089.38	477139.41	525874.95
未利用地 Unutilized land	27483532.65	27040475.70	26761965.66	26572044.87
建设用 Construction land	531592.92	622075.05	781826.13	921770.46

3.1.2. 人类活动强度空间特征分析

本研究利用土地利用、夜间灯光和人口密度分布数据等为数据源表征了人类活动强度，通过划定 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 的格网，运用 ArcGIS10.6 将人类活动强度及总体变化量的空间分布进行了可视化处理(图 3)，并将人类活动强度按自然断点法分为 5 类：高强度($0.4 < \text{HAI} \leq 1$)、较高强度($0.3 < \text{HAI} \leq 0.4$)、中强度($0.2 < \text{HAI} \leq 0.3$)、较低强度($0.1 < \text{HAI} \leq 0.2$)和低强度($0 < \text{HAI} \leq 0.1$)。

内蒙古人类活动强度总体上呈中部最高、西部最低及东部较高的空间分布特征，以低强度和中强度为主；2000~2010 年内蒙古中部地区人类活动强度较高区范围呈扩张趋势，东部地区低强度区范围呈现缩小趋势；2010~2015 年变化趋势与前十年相反；2015~2021 年内蒙古中部及东部地区人类活动强度显著增强，低强度地区范围有所收缩；从人类活动强度变化量来看，在研究时间段内，内蒙古人类活动强度未出现负值，说明整体上呈现增强趋势，在东部地区及中西部地区人类活动呈增强趋势。

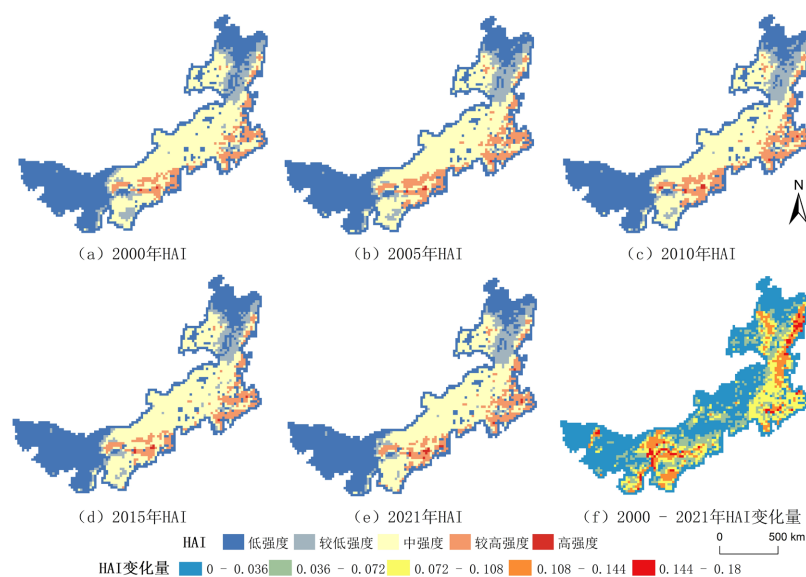


Figure 3. Intensity and change of human activities from 2000 to 2021

图 3. 2000~2021 年人类活动强度及变化量

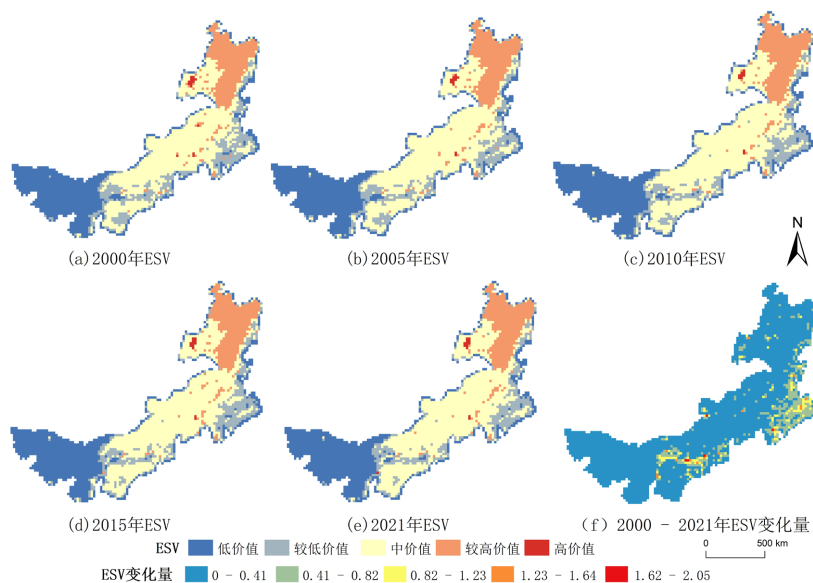


Figure 4. Value and change of ecosystem services from 2000 to 2021
图 4. 2000~2021 年生态系统服务价值及变化量

3.2. 生态系统服务价值时空特征分析

3.2.1. 生态系统服务价值时序变化分析

基于前人研究[35] [36], 本研究将内蒙古生态系统服务划分为食物生产、气候调节、净化环境、水文调节、原料生产、水资源供给、气体调节、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观等 11 项功能[34]。通过计算, 获得了内蒙古各类生态系统服务价值。在 2000~2021 年的时间段内, 内蒙古生态系统服务价值发生了明显的变化, 生态系统服务总价值从 14140.86 亿元上升到 14215.87 亿元, 变化量为 75.01 亿元。这是由于退耕还林还草的实施, 内蒙古林地面积逐年增加, 及城市化进程中生态环境保护, 使得生态系统服务价值有所上升。

从各类生态系统服务价值的角度来看, 如表 3, 调节服务具有最高的生态系统服务价值, 其次是支持服务、供给服务和文化服务。其中, 供给服务的生态系统服务价值呈下降趋势, 主要是由于耕地面积减少导致供给服务能力下降的结果。调节服务是内蒙古最重要的生态系统服务功能, 其占据了总生态系统服务功能价值量的 55%, 其中由于水域面积下降导致水文调节服务价值明显下降。2000~2021 年期间, 调节服务的生态系统服务价值总体上呈上升趋势, 上升了 37.08 亿元, 这与林地面积增加密切相关。自 1998 年起实施的退耕还林工程, 大量的耕地、草地转变为林地, 这导致内蒙古的生态系统服务价值整体上显著提升[19]。

Table 3. Each ESV (billion yuan) in Inner Mongolia from 2000 to 2021 and its changes
表 3. 2000-2021 年内蒙古各项 ESV (亿元)及其变化

生态系统服务 Ecosystem services		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2021 年	变化量/变化率 Amount/rate of change
供给服务 Supply service	食物生产 Food production	367.23	361.83	361.34	366.67	361.38	-5.86/-0.16
	原料生产 Raw Material production	436.29	437.83	438.47	439.37	438.15	1.86/0.43

续表

	水资源供给 Water resources supply	244.88	240.74	238.95	241.01	241.13	-3.75/-1.53
调节服务 Regulating service	气体调节 Gas regulation	1385.68	1397.51	1400.27	1397.26	1397.89	12.21/0.88
	气候调节 Climate regulation	3473.05	3521.73	3532.27	3514.06	3526.78	53.73/1.55
	净化环境 Clean the environment	1227.81	1237.12	1237.80	1232.99	1237.09	9.28/0.76
	水文调 Hydrologic regulation	3057.65	3012.99	2993.23	3017.06	3019.51	-38.14/-1.25
支持服务 Support service	土壤保持 Soil conservation	1720.66	1733.03	1736.18	1734.26	1733.50	12.84/0.75
	维持养分循环 Maintain nutrient circulation	136.42	136.94	137.13	137.33	136.97	0.55/0.4
	生物多样性 Biodiversity	1442.79	1469.15	1471.17	1465.26	1469.85	27.06/1.88
文化服务 Cultural service	美学景观 Aesthetic landscape	648.39	653.24	653.69	651.74	653.62	5.23/0.81
总价值 Total value		14140.86	14202.12	14200.50	14197.00	14215.87	75.01/0.53

3.2.2. 生态系统服务价值空间特征分析

通过划分 20 km × 20 km 网格, 利用 ArcGIS10.6 将五个时间段的生态系统服务价值按统一阈值划分成低价值、较低价值、中价值、较高价值和高价值等五类[34]。根据可视化结果(图 4), 可以看出内蒙古的 ESV 存在着显著的空间异质性, ESV 呈由东到西递减的空间分布特征, 主要以低价值、中价值和较高价值为主, 较低价值和较高价值相对较少。根据结果可将内蒙古大致分为三个不同生态环境背景区域: I. 东部草原森林生态良好区, 主要土地利用类型为林地、草地, 该区草地和森林分布广、草地资源优渥, 生态系统服务价值较高, 面积约占全区 30%; II. 中部草原生态均衡区, 主要土地利用类型为建设用地和草地, 该区发展最好、人口聚集最多, 生态系统服务价值以中价值为主; III. 西部沙漠生态环境脆弱区, 主要土地利用类型为未利用地, 该区广泛分布沙漠, 是导致该地区生态系统服务价值低的主要原因之一, 面积约占全区 38%; 生态系统服务价值较低价值零散分布在内蒙古中部地区, 这是由于中部地区人类活动强度较大; 而高价值区分布在水域。此外, 从五期生态系统服务价值时空分布数量来看, 低价值和较高价值区变化不大, 较低价值在 21 年间范围有所减少, 中价值区在内蒙古西部范围相对扩大(图 4)。

3.3. 人类活动强度与生态系统服务价值时空关联性分析

3.3.1. 人类活动强度与生态系统服务价值相关性分析

为验证人类活动和生态系统服务价值的相关性, 本研究通过 GeoDa 软件, 建立空间权重矩阵并得出两者的双变量空间自相关指数(图 5)。由图中结果可知五个年份的两者的莫兰指数分别是 0.391、0.410、0.423、0.401、0.414, 表明内蒙古人类活动强度和生态系统服务价值呈现正相关性, 且随着时间的推进呈现增强趋势。以各生态系统服务价值和人类活动强度的相关性来看(图 6), 各生态系统服务间协同关系占 61%; 食物生产、原料生产和养分维持循环与人类活动强度间协同关系显著; 土壤保持、水资源供给和人文调节与人类活动强度呈微弱协同关系; 气候调节、气体调节与人类活动强度表现微弱权衡关系;

净化环境、生物多样性和美学景观与人类活动强度间权衡关系显著；总体来看，各生态系统服务价值与人类活动强度间协同关系约占 55%，这使得内蒙古人类活动强度和整体生态系统服务价值呈正相关性。从现实情况来看，多数服务呈协同关系的主要原因是内蒙古草地面积约占全区面积 50%，草地具有多功能性，包括生产、旅游观光和生境支持。

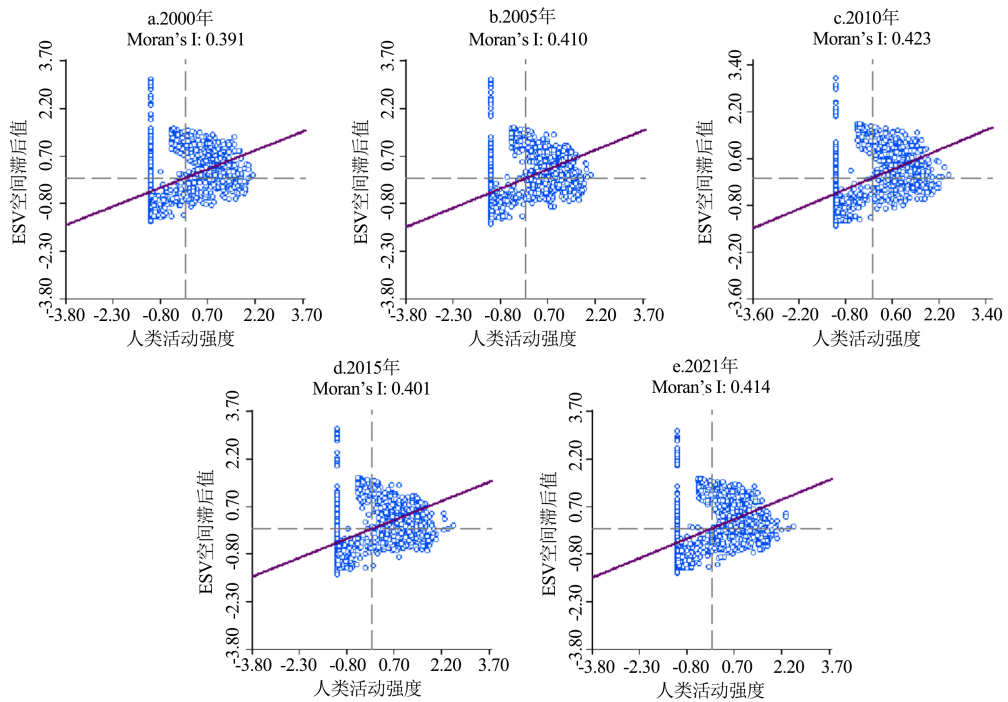


Figure 5. Moran scatter plot of ESV and human activity intensity in Inner Mongolia
图 5. 内蒙古 ESV 与人类活动强度 Moran 散点图

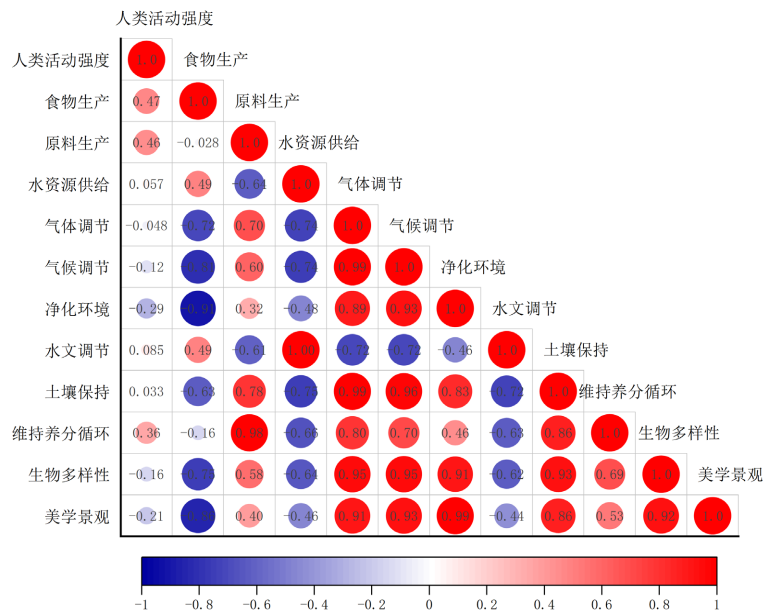


Figure 6. Correlation between human activity intensity and various ecosystem services in Inner Mongolia
图 6. 内蒙古人类活动强度与各类生态系统服务相关性

3.3.2. 人类活动强度与生态系统服务价值空间聚类分析

本研究利用 LISA 聚类分析对 Moran's 散点图进行空间分异的可视化[16], 得出 LISA 聚类图(图 7)。内蒙古地区人类活动强度与生态系统服务双变量空间相关关系显著性在大部分地区不明显, 但高-高、低-高、低-低呈现聚集态势[21], 高-高、低-高分布在东部草原森林生态良好区, 低-低则分布在西部沙漠生态环境脆弱区, 2021 年分别占比 7.3%、10.7%和 27.1%, 2021 年不显著和高-低聚类分别占 53.9%和 1%; 2000 年到 2021 年高-高、高-低、低-高集聚分布面积基本不变; 不显著集聚分布面积呈减少趋势, 占比从 54.2%减少到 53.9%; 低-低集聚分布面积呈增加趋势, 但增幅并不明显, 占比从 26.8%变为 27.1%。东部草原森林生态良好区人口密度小, 但草地资源丰富, 因此形成了低-高集聚分布形态。

从 LISA 聚类分析显著性水平可知在中部原生态均衡区大部分区域不显著, 高-高聚集区表现出较高的显著性水平, 显著性水平达到 0.01 和 0.05 的区域交错分布在东部草原森林生态良好区, 而显著性水平达到 0.001 区域分布于西部沙漠生态环境脆弱区。2000~2021 年显著性水平为 0.01 的分布面积最少, 表明了空间差异呈增加态势, 显著性水平为 0.001 的分布面积增加, 表明了空间差异呈现缩小态势[16]。

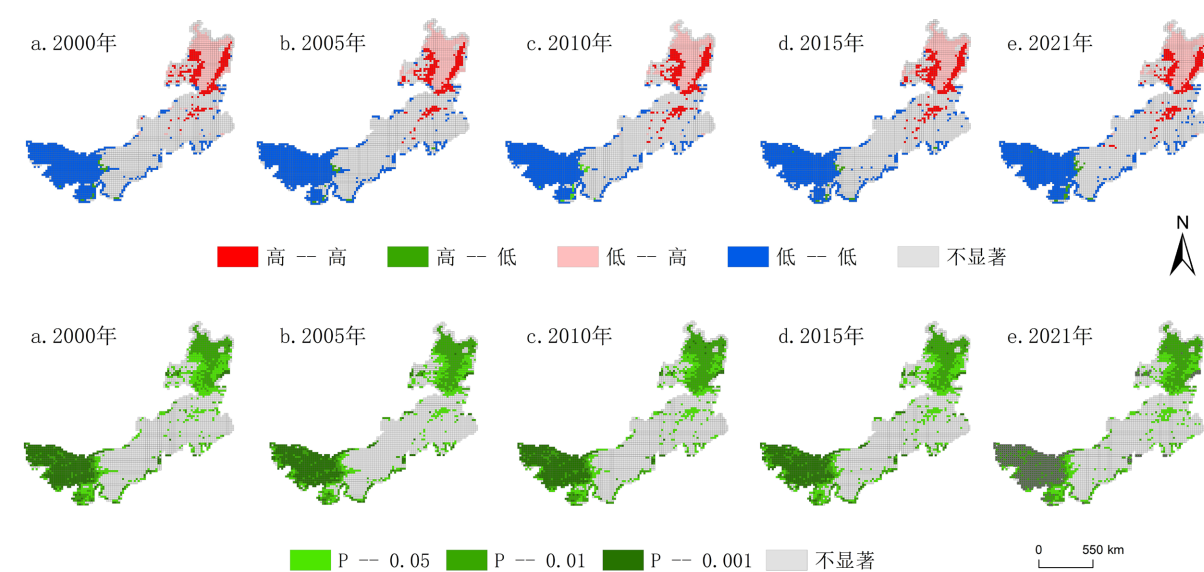


Figure 7. LISA cluster analysis and significance level of ESV and human activity intensity in Inner Mongolia

图 7. 内蒙古 ESV 与人类活动强度 LISA 聚类分析及显著性水平

3.3.3. 人类活动强度与生态系统服务价值关联

根据 GWR 结果(图 8), 可以得知人类活动在不同区域对生态系统服务价值产生不同的影响。总体上, 2000 年呈现负相关面积约为 47%, 2021 年面积增加为 48%, 集中于西部沙漠生态环境脆弱区, 这是由于该地区沙漠面积大, 沙漠地区生态系统服务价值低, 因此在该区域人类活动与生态系统服务价值呈负相关; 中部草原生态均衡区人类活动强度与生态系统服务价值呈正相关性, 但相关性较弱; 在东部草原森林生态良好区人类活动强度与生态系统服务价值呈现显著正相关, 2000 年显著正相关面积约为 16%, 这是由于该地区耕地多、林地、草地资源丰富, 虽然城市化进程加快, 但秉承环境保护的基本国策, 内蒙古“十五”以来在环境治理方面取得了巨大成效、环境质量方面得到了改善, 因此随着人类活动强度增强, 生态系统服务价值也增加。

2000~2021 年整体回归系数随着时间的推进不断下降, 表明有显著的负向效应, 但总体绝对值增加, 表明影响程度不断增加[19], 这也间接表明内蒙古在生态治理方面的成就逐年增加, 退耕还林、草原生态

补奖政策、禁牧及生态治理相关政策的实施也使得生态环境质量明显提高，环境问题得到了有效改善。在 2021 年，城镇化发展已经达到相对稳定的阶段，并且各种生态环境治理方法的有效实施，使得人类活动强度对生态系统服务价值的影响逐渐增大。

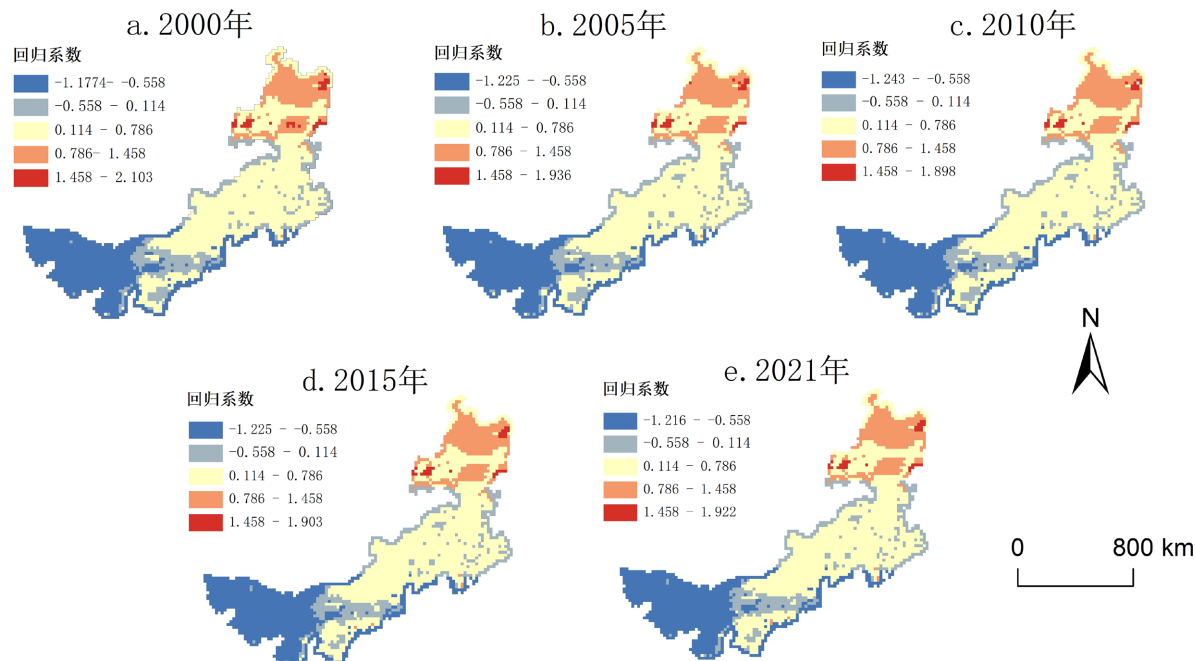


Figure 8. Spatial differentiation pattern of human activity intensity and ESV in Inner Mongolia

图 8. 内蒙古人类活动强度与 ESV 空间分异格局

4. 结论

本研究以内蒙古为例，探讨了内蒙古人类活动与生态系统服务价值时空关联性。主要结论如下：

(1) 2000~2021 年内蒙古人类活动强度呈增强趋势；内蒙古人类活动强度总体上呈中部最高、西部最低及东部较高的空间分布特征，全区以低强度和中强度为主。

(2) 2000~2021 年内蒙古生态系统服务价值总价值由 14140.86 亿元上升到 14215.87 亿元；内蒙古的 ESV 存在着显著的空间异质性，ESV 呈由东到西递减的空间分布特征。根据结果可将内蒙古大致分为三个不同生态环境背景区域：I. 东部草原森林生态良好区，该区草地和森林分布广，生态系统服务价值较高，面积约占全区 30%；II. 中部草原生态均衡区，该区人口聚集最多，生态系统服务价值以中价值为主；III. 西部沙漠生态环境脆弱区，该区广泛分布沙漠，生态系统服务价值低，面积约占全区 38%。

(3) 以内蒙古人类活动强度与整体生态系统服务价值的时空关联性来看，内蒙古人类活动强度与整体生态系统服务价值呈现正相关关系；但人类活动对生态服务价值的影响在不同区域的背景下具有较大差异，在东部草原森林生态良好区两者呈现显著正相关性，在中部草原生态均衡区两者呈现较弱的正相关性，在西部沙漠生态环境脆弱区两者呈现负相关性。

5. 讨论

作为中国北方的绿色生态屏障，内蒙古的良好生态系统对该地区人类社会和生态系统都至关重要。当量因子法作为最普遍的方法之一，广泛运用于量化生态系统服务价值。因此，利用土地利用数据，通

过结合内蒙古粮食相关数据对内蒙古价值当量系数进行修正,可以使结果更贴近内蒙古实际情况。生态系统服务价值的增减不仅取决于许多不同生态系统服务叠加的结果,还取决于研究区土地利用类型,内蒙古草地占比较高,因此内蒙古 ESV 呈增加趋势。本研究探讨了内蒙古人类活动强度与生态系统服务价值间时空关系,发现人类活动强度与生态系统服务价值间为正相关关系,这与郭琛等[17]的研究结果相一致。通过研究发展了混合耕地和牧区的内蒙古地区人类活动强度与生态系统服务价值间关联的研究。

然而,目前研究中仍存在不足之处,由于双变量空间自相关模型忽略了人类活动与生态系统间复杂的相互关系,将两者的非线性关系简化成线性关系,因此,生态系统服务价值与人类活动强度间的线性关系仍存在不确定性。虽然近年来提出了许多可以研究两者关系的新方法,这些方法能够更好地揭示互相关系,但双变量自相关模型及地理加权回归模型以其容易操作和获取数据而受广泛使用。因此,本研究中混合使用两种方法分析关联性可以使结果更可靠,而未来内蒙古人类活动强度与生态系统服务价值关系的研究仍亟待拓展和深入。

参考文献

- [1] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 人类活动对生态系统服务功能的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 118-126.
- [2] 沈建国, 白美兰, 李云鹏. 气候变化和人类活动对内蒙古生态环境的影响[J]. 自然灾害学报, 2006(6): 84-91.
- [3] 潘桂行, 申涛, 马雄德, 等. 人类活动和自然因素对海流兔河流域生态环境影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 67-72.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-Being*. Island Press, Washington DC.
- [5] 刘慧敏, 刘绿怡, 丁圣彦. 人类活动对生态系统服务流的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3232-3242.
- [6] Reid, W.V., Mooney, H.A., Cropper, A., et al. (2005) *Ecosystems and Human Well-Being-Synthesis: A Report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, Washington DC.
- [7] 杨光梅, 李文华, 闵庆文, 等. 对我国生态系统服务研究局限性的思考及建议[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(1): 85-91.
- [8] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化[J]. 资源科学, 2008, 30(1): 93-99.
- [9] Costanza, R., de Groot, R., Farber, S., et al. (1998) The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Ecological Economics*, 25, 3-15. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00020-2)
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [11] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [12] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [13] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [14] Xu, Y., Xu, X.R. and Tang, Q. (2016) Human Activity Intensity of Land Surface: Concept, Methods and Application in China. *Journal of Geographical Sciences*, 26, 1349-1361. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1331-y>
- [15] Liu, S., Liu, L., Wu, X., et al. (2018) Quantitative Evaluation of Human Activity Intensity on the Regional Ecological Impact Studies. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 6797-6809. <https://doi.org/10.5846/stxb201711172048>
- [16] 李理, 朱连奇, 朱文博, 等. 生态系统服务价值与人类活动强度关联性分析及权衡——以淇河流域为例[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 365-374.
- [17] 郭琛, 何贞铭, 刘华东. 黄河流域生态系统服务与人类活动强度耦合协调的时空动态及影响因素[J]. 中国农村水利水电, 2023(4): 82-89.
- [18] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 等. 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[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5200-5210.
- [19] 武燕, 吴映梅, 高彬斌, 等. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 173-182.
- [20] Sun, Y.X., Liu, S.L., Shi, F.N., et al. (2020) 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*, **743**, Article ID: 140721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140721>
- [21] 南箔, 杨子寒, 毕旭, 等. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3531-3541.
- [22] 赵忠旭, 张燕杰, 潘影, 等. 夜间灯光数据支持下西藏人类活动强度变化对生态系统调节服务的影响[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(7): 1544-1554.
- [23] 张翔, 陈德超, 范金鼎, 等. 生态系统服务价值变化及其与人类活动关联性研究——以常州市为例[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2124-2131.
- [24] 朱琳娜, 赵牡丹, 李云绯, 等. 西安都市圈生态系统服务价值与人类活动强度的时空关系[J/OL]. 生态与农村环境学报: 1-14. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.1078>, 2023-05-24.
- [25] 丁菊, 柳西波, 何凯. 宁夏黄河流域生态系统服务权衡协同及其与人类活动强度的关联性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 171-182.
- [26] 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 275-284.
- [27] Wu, Y., Shi, K., Chen, Z., et al. (2021) Developing Improved Time-Series DMSP-OLS-Like Data (1992-2019) in China by Integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **60**, Article No. 4407714. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3135333>
- [28] 王璐晨, 韩海辉, 张俊, 等. 塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J/OL]. 中国地质: 1-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230515.1716.006.html>, 2023-05-24.
- [29] He, C., Shi, P., Li, J., et al. (2006) Restoring Urbanization Process in China in the 1990s by Using Non-Radiance-Calibrated DMSP/OLS Nighttime Light Imagery and Statistical Data. *Chinese Science Bulletin*, **51**, 1614-1620. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2006-3>
- [30] Wang, H., Zheng, X.Q. and Yuan, T. (2012) Overview of Researches Based on DMSP/OLS Nighttime Light Data. *Progress in Geography*, **31**, 11-19.
- [31] Liu, Z., He, C., Zhang, Q., Huang, Q.X. and Yang, Y. (2012) Extracting the Dynamics of Urban Expansion in China Using DMSP-OLS Nighttime Light Data from 1992 to 2008. *Landscape and Urban Planning*, **106**, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.013>
- [32] 陈泓瑾, 刘琳, 张正勇, 等. 天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1244-1259.
- [33] 周升强, 孙鹏飞, 苏宁, 等. 人类活动对资源型城市生态系统服务价值的影响——以鄂尔多斯为例[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6543-6553.
- [34] 赵海兰. 生态系统服务分类与价值评估研究进展[J]. 生态经济, 2015, 31(8): 27-33.
- [35] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2236-2244.
- [36] 李超, 许策, 何玲, 等. 滨海陆地生态系统净化功能与价值评估——以黄骅市为例[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 506-513.