DOI: 10.20103/j.stxb.202209302783

邱嘉琦,于德永.中国北方农牧交错带生态系统服务空间格局及影响因子——以内蒙古中西部地区为例.生态学报,2023,43(18):7598-7609. Qiu J Q,Yu D Y.Spatial patterns and influence factors of ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of northern China: Taking the central and western regions of the Inner Mongolia as an example. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18):7598-7609.

中国北方农牧交错带生态系统服务空间格局及影响 因子

——以内蒙古中西部地区为例

邱嘉琦,于德永*

北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

摘要:中国北方农牧交错带是我国重要的生态安全屏障之一,面临经济发展与脆弱生态环境保护间的突出矛盾。生态系统服务的定量研究是生态可持续管理的重要科学依据,也是当前的研究热点之一。以北方农牧交错带的核心区域——内蒙古中西部地区为例,结合中高分辨率遥感数据和生物物理模型准确量化了2000—2018年关键生态系统服务,基于 Getis-Ord *G**方法分析了生态系统服务的空间格局,考虑地理数据的空间自相关性选取了空间回归模型探索其影响因子。结果表明:(1)净初级生产力(NPP, Net primary productivity)、土壤水蚀控制服务(*SC*, Soil conservation)、产水量(*WY*, Water yield)及三层土壤含水量(*SM*1, Soil moisture of top layer; *SM*2, Soil moisture of middle layer; *SM*3, Soil moisture of bottom layer)在东部较高,防风固沙服务(*SF*, Sand fixation)在南部和西部较高;(2)以上生态系统服务受气候变化、景观格局、地形和土壤条件等综合影响,不同影响因素对生态系统服务的作用存在差异。NPP受森林景观格局和归一化植被指数的影响最为显著;WY、SM1、SM2、SM3及 SC 受降水量的影响较为显著;风速和表层土壤砂粒含量对 SF 影响最为显著。研究结果可以为优化景观格局和土地系统,缓解中国北方农牧交错带的社会—生态矛盾提供科学依据和案例参考。

关键词:中国北方农牧交错带;生态系统服务;空间格局;空间回归模型;气候变化;景观格局

Spatial patterns and influence factors of ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of northern China: Taking the central and western regions of the Inner Mongolia as an example

QIU Jiaqi, YU Deyong*

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The agro-pastoral ecotone of northern China is one of the important barriers for Chinese ecological security. However, the region is facing the serious contradictions between the economic development and the conservation of the fragile environment. Quantitative assessment on ecosystem services and the influence factors is the significant foundation for ecological management and sustainable development, and is also one of the hot spots for the current research. Taking the central and western Inner Mongolia as study area, which is the core area of the agro-pastoral ecotone of northern China, this study simulated the regional key ecosystem services during 2000—2018 using the remote sensing data with medium or high resolution and the biophysical models. The models included the Carnegie-Ames-Stanford Approach, the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model, the Revised Universal Soil Loss Equation, and the Revised Wind Erosion Equation. The

基金项目:国家自然科学基金项目(41971269); 青海省科学技术项目(2019-SFA12, 2021-SF-A7-1); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (41621061)

收稿日期:2022-09-30; 网络出版日期:2023-05-08

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ydy@ bnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

Getis-Ord G^* method was adopted to explore the spatial hot and cold spots of the ecosystem services. With the consideration of the spatial autocorrelation in the geographic data, the spatial regression models were selected to explore the influence factors for the spatial patterns of the ecosystem services. The results indicated that net primary productivity (NPP), soil conservation (SC), water yield (WY), soil moisture of top layer (SM1), soil moisture of middle layer (SM2), and soil moisture of bottom layer (SM3) in the eastern area were higher than those in the other areas. While sand fixation (SF) was higher in the southern and western areas, which were usually covered by sandy topsoil. Secondly, the key ecosystem services were not only influenced by changes in climatic factors and landscape patterns, but also by topographical conditions and soil texture. The influences of the factors were different for different ecosystem services. For NPP, the landscape metrics of forests and the Normalized Difference Vegetation Index had more significant effects than the other influence factors. Precipitation was one of the most significant influence factors for WY, SM1, SM2, SM3, and SC. While SF was mainly influenced by wind speed and sand percent of the topsoil. The study revealed the spatial characteristics of the key ecosystem services in the typical agro-pastoral ecotone of northern China, as well as the influence factors behind the spatial changes. The conclusions in this study were able to provide the quantitative scientific support and case reference for how to alleviate the contradictions between the economic development and the environmental conservation in the agro-pastoral ecotone of northern China and other similar areas through landscape planning and land optimization.

Key Words: the agro-pastoral ecotone of northern China; ecosystem services; spatial patterns; spatial regression models; climate changes; landscape spatial patterns

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中得到的惠益^[1],通常受气候变化、土地利用等因素的综合 作用^[2-4]。气候变化既可以直接驱动生态系统服务,又能通过改变生态系统结构和功能间接对其产生影 响^[5-9]。土地利用变化往往通过改变植被覆盖、粗糙度和反照率等理化性质影响生态系统结构、功能和过程, 进而影响生态系统服务^[10-13]。生态系统服务的定量评估及其影响因子分析对生态可持续管理和土地系统优 化具有重大意义。

Costanza 等^[1]基于价值当量法实现了对全球生物群落中17项生态系统服务价值的评估。谢高地等^[14]通 过修正中国草地生态系统服务的价值当量系数计算了全国范围的草地生态系统服务价值量。也有学者基于 野外定点观测数据实现了对生态系统服务的评估,如杨吉华等^[15]和韩凤朋等^[16]分别基于野外采样数据得到 了山东省七星台地区的灌木固碳量和黄土高原典型退耕坡地的土壤养分含量。此外,InVEST等模型常被用 于模拟多种生态系统服务的物质量。Nelson等^[17]利用 InVEST 模型计算了美国威拉米特河流域的产水服务、 固碳服务及生物多样性。傅斌等^[18]基于该模型计算了都江堰地区水源涵养服务。然而,由于对静态输入参 数的依赖性较强,上述大多研究难以实现长时间序列的、精细网格尺度的生态系统服务的准确时空表达,也难 以揭示生态系统服务背后的生态学机理。结合长时间序列的中高分辨率遥感数据与分布式水文模型等生物 物理模型是解决问题的关键^[19]。在此基础上,诸多研究对生态系统服务的影响因素进行了探索。罗盛锋 等^[3]基于逐步回归分析发现城镇化率是导致广西北部湾食物供给变化的关键因素。杨婉清等^[20]以北京市为 例,利用偏相关系数计算了景观和类型水平上景观格局变化与粮食供给、水质净化、空气净化、生境质量的关 系。Shen等^[21]基于广义加性模型分析了植被覆盖、气候变化、土壤环境、人口密度和城市发展等因素对京津 冀地区生态系统服务的影响。但是,以上经典统计方法对地理数据的空间自相关性考虑不足,故而研究结果 对政策制定和环境管理的辅助作用相对有限。

中国北方农牧交错带是是我国重要的生态安全屏障之一,对维持区域和全国生态系统功能稳定性以及人 类社会生产生活具有重要意义。该地区能够提供畜牧产品、农产品、固碳、气候调节及娱乐休闲等丰富的生态 系统服务^[22]。然而,中国北方农牧交错带生态环境脆弱,对气候变化敏感;同时由于长期人类活动的负面影 响,土地退化和沙化问题严峻^[23]。生态系统服务的定量评估及影响因素分析是解决社会发展与脆弱环境保 护间矛盾的关键。目前,针对中国北方农牧交错带的相关研究也存在精细网格尺度上长时间序列生态系统服务的准确表达不足、对影响因素等地理数据空间自相关性的忽视等问题^[24-27]。

为促进中国北方农牧交错带生态系统服务的准确量化,揭示其影响因素及背后机制,提升区域生态可持续管理和土地资源优化配置的科学性和有效性,本文以社会经济发展和生态环境保护矛盾突出、位于中国北方农牧交错带核心区域的内蒙古中西部地区为例,结合中高分辨率遥感数据和生物物理模型实现了对2000—2018年250m×250m精细网格尺度上关键生态系统服务的定量评估;从不同尺度分析了生态系统服务的空间格局;充分考虑地理数据的空间自相关性,采用空间回归模型探索了气候、景观格局、土壤性质、地形等因素对生态系统服务空间格局的影响。

1 研究区概况

内蒙古中西部地区是中国北方农牧交错带的核心区域,包括呼和浩特、包头、鄂尔多斯、乌兰察布和巴彦 淖尔5个盟市,占地面积25.06万km²(图1)。研究区国内生产总值(GDP)和常住人口占比均超过内蒙古自 治区的50%。该地区受城市扩张、过度开垦和不合理放牧等人类活动影响极大,社会发展与自然环境保护之 间矛盾在整个中国北方农牧交错带尤其突出。一方面,研究区水资源严重匮乏,年均降雨量和产水量分别为 100—500 mm 和32.70 km³。另一方面,南部和西部地区地表沙化严重,土壤侵蚀和沙尘暴频发。这些问题不 仅影响当地经济发展和人类福祉,也威胁华北地区的生态安全和可持续发展。



图 1 研究区地理位置与土地利用格局 Fig.1 Location and land use pattern of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所用数据包括:(1)2000—2018 年归一化植被指数产品(MOD13Q1)来自 NASA 网站(http://modis. gsfc.nasa.gov/);(2)2000—2018 年叶面积指数和地表反照率产品来自国家地球系统科学数据中心共享服务 平台(http://www.geodata.cn/);(3)2000、2005、2010 和 2015 年土地利用数据来自中国科学院资源环境科学 数据中心(http://www.resdc.cn/),一级分类系统为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地六类,四期数 据分别用于计算 2000—2004 年、2005—2009 年、2010—2014 年及 2015—2018 年各指标;(4)数字高程模型 数据来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/);(5)土壤质地和分类数据来自世界土壤数据库(http:// westdc.westgis.ac.cn/zh-hans/);(6)2000—2018 年气象站点数据来自中国地面气候资料日值数据集(http:// data.cma.cn/);(7)基础地理信息数据来自国家基础地理信息中心(https://gmt-china.org/blog/nationalgeographic-database/)。本文将栅格数据统一转换为 UTM 投影并重采样至 250 m * 250 m,并将研究区划分为 192 个子流域。

http://www.ecologica.cn

2.2 生态系统服务的定量评估

考虑到研究区特点及数据可获取性,本文选取了与植被退化问题相关的净初级生产力(NPP, Net primary productivity)^[22],与水资源匮乏问题相关的产水量(WY, Water yield)、表层土壤含水量(SM1, Soil moisture of top layer)、中层土壤含水量(SM2, Soil moisture of middle layer)和底层土壤含水量(SM3, Soil moisture of bottom layer)^[19],以及与土地沙化和侵蚀问题相关的土壤水蚀控制服务(SC, Soil conservation)和防风固沙服务(SF, Sand fixation)^[25],计算 2000—2018 年 250 m×250 m 像元尺度以上生态系统服务的物质量。

净初级生产力通过光能利用效率模型计算,公式如下[28]:

NPP = APAR $\times \varepsilon$

APAR = F(SOL, NDVI)

式中,NPP 为净初级生产力(g C/m²);APAR 为光合作用中植物能够吸收利用的太阳辐射能量(MJ/m²),根据太阳总辐射(SOL)(MJ/m²)和归一化植被指数(NDVI)计算,太阳总辐射基于气象站点的短波辐射数据计算,归一化植被指数来源于 MOD13Q1 产品; *ε* 为实际光能利用率(g C/MJ),根据气象站点的气温和降水数据计算。以上参数的具体计算方法参照朱文泉等的研究^[29]。

产水量为降水量与蒸散量之差,降水量由气象站点数据插值获得。蒸散量和三层土壤含水量(SM1, SM2,SM3)通过分布式水文-土壤-植被模型(DHSVM, the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)模拟^[30]。 该模型包括蒸散发、地面降雪和融雪、冠层截雪和积雪融化、不饱和土壤水运动、饱和壤中流、坡面流及河道流 量演算7个模块。三层土壤含水量主要基于不饱和土壤水运动模块的达西定律计算^[31-32]。

DHSVM 模型将流域网格化,基于对物理过程的模拟实现以上水文参数计算,能够解释变量内在的生态 学机理。所需输入数据主要包括气象站点数据(气温、短波辐射、长波辐射、降水量、相对湿度和风速)、土壤 分类数据、数字高程模型数据及土地利用数据。参考已有研究^[19],根据土地利用类型和土壤类型设置田间持 水量、萎蔫点等植被和土壤参数。在此基础上,本文将叶面积指数和地表反照率的遥感产品引入 DHSVM 模 型,提高了模拟结果精度^[19]。结果可靠性检验依赖于实测和模拟径流量的 Nash-Sutcliffe 效率系数、百分比偏 差和均方根误差^[33-34]。

土壤水蚀控制服务基于修正通用土壤流失方程计算,公式如下[35]:

 $SC = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P)$

式中, *SC* 是水蚀控制服务(t/hm²); *R*(MJ mm hm⁻² h⁻¹)是降雨侵蚀力因子,根据气象站点的降雨量计算; *K*(t h MJ⁻¹ mm⁻¹)是土壤水蚀性因子,根据土壤质地数据计算; *L*(无量纲)和*S*(无量纲)分别是坡长因子和坡度因子,均根据数字高程模型数据计算; *C*(无量纲)是植被覆盖因子,根据归一化植被指数(MOD13Q1)计算; *P*(无量纲)是土壤保护管理措施因子。以上参数的计算方法参照蔡崇法等^[36]和黄婷等^[37]的研究。

防风固沙服务基于修正土壤风蚀方程计算,公式如下^[38]:

 $Q_{\text{maxr}} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K \times \text{COG})$ $s_r = 150.71 \times (WF \times EF \times \text{SCF} \times K \times \text{COG})^{-0.3711}$ $Q_{\text{maxq}} = 109.8 \times (WF \times EF \times \text{SCF} \times K)$ $s_q = 150.71 \times (WF \times EF \times \text{SCF} \times K)^{-0.3711}$ $SF = \frac{2x}{s_q^2} \times Q_{\text{maxq}} \times \exp\left(-\left(\frac{x}{s_q}\right)^2\right) - \frac{2x}{s_r^2} \times Q_{\text{maxr}} \times \exp\left(-\left(\frac{x}{s_r}\right)^2\right)$

式中, SF 是防风固沙服务(kg/m²); Q_{maxr} 和 Q_{maxq} 分别是实际和潜在最大运输能力(kg/m); s, 和 s_q 是实际和 潜在临界场的长度(m); x 是到场地上风边缘的距离(取 50m); WF 为气候因子,根据气象站点的气温、降水 及风速等数据计算^[39]; EF 和 SCF 分别为土壤可蚀性因子和土壤结皮因子,均根据土壤质地数据计算^[40]; K 为土壤糙度因子,结合土地利用类型、土壤质地及降水量计算^[41]; COG 是结合残茬因子,根据土地利用类型和 根据 MOD13Q1 产品提供的归一化植被指数计算^[42]。

2.3 生态系统服务的空间冷热点分析

生态系统服务在流域尺度上的冷、热点由 Getis-Ord G^* 方法得出,公式如下^[43]:

$$G_{i}^{*} = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{i,j} \times x_{j} - \overline{X} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^{n} w_{i,j}^{2} - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}\right)^{2}}{n - 1}}}{\overline{X}}$$
$$\overline{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_{j}}{n}$$
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} x_{j}^{2}}{n - 1} - (\overline{X})^{2}}$$

式中, x_j 是生态系统服务 i 在第j 个单元的数据值; $w_{i,j}$ 是空间权重矩阵分量,相邻为1,不相邻为0; n 为单元 总数; S 为样本标准差; \overline{X} 为样本均值。 G_i^* 取值为正且通过显著性检验时,高值在空间上聚集成热点; G_i^* 取 值为负且通过显著性检验时,低值在空间上聚集成冷点。

2.4 生态系统服务空间格局的影响因子分析

考虑到气候条件和土地利用类型是影响生态系统服务的重要因素^[2,44],本文选取了年平均气温、降水量、 短波辐射、风速和相对湿度5个气候因子,以及归一化植被指数,耕地、林地和草地类型水平及景观水平的景 观格局指数(表1)作为影响生态系统服务空间格局的自变量。此外,考虑到研究区存在土地退化和水土流失 问题,故将表层土壤砂粒含量和坡度也作为自变量^[22,45]。在影响因子分析前,分别计算各影响因子和生态系 统服务的多年均值,并将其进行 Z-score 标准化处理。

	Table 1 Landscape indice	es in the spatial regression	on models
	景观格局指数	水平	解释
Туре	Landscape metrics	Level	Explanation
面积/密度指数 Area/Density index	景观百分比	类型	某一斑块类型面积占景观总面积的百分比
	平均斑块面积	景观/类型	某一斑块类型面积与其斑块个数之比
形状指数 Shape index	平均分维指数	景观/类型	描述斑块形状复杂度
蔓延度指数 Spreading degree index	聚合度指数	景观/类型	描述景观斑块聚集程度
多样性指数 Diversity index	香农多样性指数	景观	描述景观中各斑块类型分布是否均衡

表 1 空间回归模型中的景观格局指数

在影响因子分析中,首先基于全局莫兰指数判断生态系统服务是否具有空间自相关性。当数据具有显著 的空间自相关性时,采用空间回归模型探索各影响因子对生态系统服务空间格局的作用。空间回归方法通过 建立空间权重矩阵确定样本点空间位置和邻接关系,减弱了空间数据分析中的信息失真和有偏估计,可分为 空间滞后模型和空间误差模型。本文根据拉格朗日乘数及稳健拉格朗日乘数对空间回归模型进行选取。空 间滞后模型和空间误差模型的基本公式如下^[46]:

$$Y_{\text{lag}} = \rho \times W \times Y + \beta \times X + \varepsilon$$

$$Y_{\text{erorr}} = \rho \times W \times \theta + \beta \times X + \varepsilon$$

式中, Y_{lag} 和 Y_{erorr} 分别是空间滞后模型和空间误差模型中的 $n \times 1$ 维因变量; $X \neq k$ 个自变量构成的 $n \times k$ 数据 矩阵; θ 是误差项; W 是一阶相邻空间权重矩阵; ρ 是空间自回归系数; β 反映 X 对 Y_{lag} 和 Y_{erorr} 的影响。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务的空间格局

图 2 和图 3 表明了生态系统服务在像元和流域尺度的空间格局。NPP 的高值(>300 g C/m²)集中在东部森林,低值(≤100 g C/m²)在西北部未利用地,分别在对应子流域形成热点和冷点。SM1 在西部和南部沙地较低(≤20%),形成冷点。空间上,SM2、SM3 和 WY 从东南向西北递减,冷、热点分别集中在西北部和东南部子流域。SC 在东部高降雨的陡坡较高(≥500 t/hm²),SF 在南部沙地较高(>100 kg/m²),分别形成热点。





Fig.2 Spatial patterns of annual mean ecosystem services during 2000-2018

NPP:净初级生产力 Net primary productivity; SM1:表层土壤含水量 Soil moisture of top layer; SM2:中层土壤含水量 Soil moisture of middle layer; SM3:底层土壤含水量 Soil moisture of bottom layer; WY:产水量 Water yield; SC:土壤水蚀控制服务 Soil conservation; SF:防风固沙服务 Sand fixation

3.2 生态系统服务空间格局的影响因子

由表2可知,各生态系统服务均具有显著的空间自相关性。因此,空间回归模型能够有效解释影响因子 对生态系统服务空间格局的作用。表3表明,空间上,NPP主要随归一化植被指数和林地百分比增加,回归 系数较坡度、土壤性质及短波辐射等气候因子更大。气候因子中,降水量、相对湿度和短波辐射对 NPP 有正 向影响(回归系数>0.1),气温对 NPP 有负向影响(回归系数=-0.2331)。



图 3 2000—2018 年流域尺度平均生态系统服务冷热点分布 Fig.3 Cold and hot spot patterns of annual mean ecosystem services during 2000—2018

表 2 空间自相关性检验及空间回归模型选择

Table 2	Test of spatial	autocorrelation	and selecti	on of the	spatial	regression	models
	- cor or opene		and bereeu				

生态系统服务 Ecosystem services	莫兰指数 Moran's index	拉格朗日乘数- 滞后模型 Lagrange multiplier of lag model	稳健拉格朗日 乘数-滞后模型 Robust lagrange multiplier of lag model	拉格朗日乘数- 误差模型 Lagrange multiplier of error model	稳健拉格朗日 乘数-误差模型 Robust lagrange multiplier of lag model	所选模型 Selected model
净初级生产力 Net primary productivity	0.5131 **	19.0989 **	12.2872 **	20.6467 **	13.835 **	误差模型
表层土壤含水量 Soil moisture of top layer	0.364 **	27.2628 **	9.5549*	20.1866 **	8.4787 *	滞后模型
中层土壤含水量 Soil moisture of middle layer	0.5067 **	50.2006 **	18.5498 **	32.4818 **	0.831	滞后模型
底层土壤含水量 Soil moisture of bottom layer	0.2*	26.6757 **	5.0083 *	32.0094 **	10.342 *	误差模型
产水量 Water yield	0.8037 **	31.3829**	12.3028 *	61.607 **	32.5269 **	误差模型
土壤水蚀控制服务 Soil conservation	0.5411 **	0.9749	1.0461	5.287 *	5.3581 *	误差模型
防风固沙服务 Sand fixation	0.2122 **	16.5789 **	14.3014 **	17.6229 **	15.3454 **	误差模型

** 代表在 0.01 水平上显著;* 代表在 0.05 水平上显著

-

Table 3 Spatial	regression coef	ficients of the	ecosystem serv	vices and the ir	n fluential fact	ors	
影响因子 Influence factors	净初级 生产力 Net primary productivity	表层土壤 含水量 Soil moisture of top layer	中层土壤 含水量 Soil moisture of middle layer	底层土壤 含水量 Soil moisture of bottom layer	产水量 Water yield	土壤水蚀 控制服务 Soil conservation	防风固 沙服务 Sand fixation
气温 Temperature	-0.2331 **	_	_	_	_	-0.0043 *	_
短波辐射 Shortwave radiation	0.1005 **	-0.0872 **	-0.0989 *	-0.0714 *	-0.1601 **	-0.0089 *	_
风速 Wind speed	_	-0.1161 **	-0.0999 **	-0.0942 **	-0.1398 **	-0.0144 *	0.5236 **
降水量 Precipitation	0.2640*	0.2539 **	0.3988 **	0.3133 **	0.8931 **	0.6291 **	_
相对湿度 Relative humidity	0.1326*	0.4211 **	0.4341 **	0.4053 **	0.2664 **	0.1925 **	-0.0259 *
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.827 **	-0.1682**	-0.2439 *	-0.2012*	-0.2417 **	0.4683 **	0.1341 **
坡度 Slope	0.0379 **	_	_	_	_	0.602 **	_
表层土壤砂粒含量 Sand percent of top layer	-0.023 *	-0.4874 **	0.0513 **	0.0944 **	—	—	0.847 **
耕地平均斑块面积 Mean patch area of farmland	_	0.0939 **	0.1462 **	0.0103 **	—	0.1269 *	—
耕地平均分维指数 Mean dimensional index of farmland	—	_	—	—	—	—	-0.014 *
耕地百分比 Percent of farmland	—	_	0.1484 *	—	0.1029 **	0.1 *	-0.1636*
林地平均斑块面积 Mean patch area of forestland	—	_	—	—	—	0.0335 *	0.1065 **
林地百分比 Percent of forestland	0.1873 **	_	_	-0.2025 **	-0.2245 **	0.1854 **	—
草地聚合度指数 Aggregation index of grassland	_	0.2041 *	—	0.0188 *	-0.0889 *	—	—
草地平均斑块面积 Mean patch area of grassland	_	0.2069 **	0.1795 **	—	0.0854 *	_	_
草地平均分维指数 Mean dimensional index of grassland	—	—	—	—	—	—	0.136**
草地百分比 Percent of grassland	—	0.2008 **	0.1157 *	0.0476 **	—	—	0. 1089*
景观聚合度指数 Aggregation index of landscape	_	_	_	_	-0.1458 *	_	0.2653*
景观香农多样性指数 Shannon's diversity index of landscape	_	_	_	_	0.0168 *	_	0.1424 *

表 3 生态系统服务与影响因子的空间回归系数	
------------------------	--

* * 代表在 0.01 水平上显著; * 代表在 0.05 水平上显著; —代表不显著

对于三层土壤含水量,相对湿度的正向影响最大(回归系数>0.4),降水量次之。此外,草地和耕地景观 格局因子也对土壤含水量有正向影响(回归系数>0.01):SM1 随草地聚合度、百分比、斑块面积及耕地斑块面 积增加;SM2 随草地和耕地斑块面积及百分比增加;SM3 随草地聚合度、百分比及耕地斑块面积增加,但幅度 较小。负向因子中,归一化植被指数的影响(回归系数<-0.16)大于风速和短波辐射。林地百分比主要对 SM1 有负向影响(回归系数=-0.2025)。表层土壤砂粒含量对不同土壤含水量的作用存在差异:对 SM1 表现 为显著负向影响(回归系数=-0.4874),对 SM2 和 SM3 有轻微促进作用(表 3)。

降水量和相对湿度是对 WY 影响最大的 2 个正向因子,回归系数分别达 0.8931 和 0.2664。此外, WY 也随 耕地百分比和草地斑块面积轻微增加。负向因子中,归一化植被指数和林地百分比对 WY 的影响最明显(回 归系数<-0.22),风速、短波辐射及景观聚合度次之,草地聚合度最小。

降水和坡度能够提供潜在水蚀,对 SC 的正向影响最大(回归系数>0.6)。归一化植被指数能够缓解实际水蚀,从而促进 SC(回归系数=0.4683)。类似地,林地和耕地百分比及斑块面积的增大也会缓解实际侵蚀,进而对 SC 产生轻微促进作用。风速、气温和短波辐射等负向因子对 SC 的影响相对小于正向因子(表 3)。

http://www.ecologica.cn

风速和表层土壤砂粒含量能够提供潜在风蚀,对 SF 的正向影响最大(回归系数>0.5)。另一方面,归一 化植被指数、林地斑块面积、草地平均分维指数及百分比等景观格局因子能够改善实际风蚀,从而促进 SF (表3)。

4 讨论

内蒙古中西部地区是中国北方农牧交错带的核心区域,具有其典型的生态系统和社会发展特征。自然环境方面,研究区对气候变化敏感,生态环境脆弱,沙化土地占全区土地面积的27%以上^[47]。同时,研究区水资源严重匮乏,供给难以满足生产生活及生态用水需求^[48]。经济社会发展方面,内蒙古中西部地区在整个内蒙古地区和中国北方农牧交错带具有重要地位,拥有河套平原等农业地区、鄂尔多斯等畜牧和羊绒产业,以及全国知名的奶业生产基地,GDP和人口占比超过自治区的一半^[48]。因此,研究区社会经济发展与生态环境保护之间矛盾突出。探索关键生态系统服务的特征及气候和土地利用/景观格局对其的影响是对研究区及中国北方农牧交错带进行生态系统保护、恢复与重建的重要科学依据,也是优化土地系统,促进生态可持续管理及解决上述矛盾的关键途径^[49-50]。

本文主要从以下两个方面提升研究结果的可靠性,促进可持续管理的科学性。首先,相比当量系数法、野 外采样法及基于静态输入参数的模型^[14-17],将 250 m * 250 m 的中高分辨率遥感影像与生物物理模型结合能 够避免主观性干扰,提高像元尺度上长时间序列生态系统服务结果的可靠性。已有研究表明,以叶面积指数 和地表反照率的遥感产品代替静态参数输入 DHSVM 模型能够提升地表径流量、蒸散量及土壤含水量的模拟 精度^[19]。本文的模拟径流量与水文站实测径流量间的 Nash-Sutcliffe 效率系数、百分比偏差和均方根误差为 0.87、-8.30% 和 1.04,满足统计检验。此外,相比统计回归法^[51-52],生物物理模型能更好揭示生态系统服务 结果的内在机理。本文的净初级生产力、土壤水蚀控制服务和防风固沙服务等结果也与已有研究相符^[53-54]。 第二,考虑到所涉及的地理数据大多具有显著空间自相关性,相比基于最小二乘法的线性回归模型,采用空间 回归模型能更有效地解释生态系统服务空间格局的影响因子(表4)。

R^2	净初级生产力 Net primary productivity	表层土壤 含水量 Soil moisture of top layer	中层土壤 含水量 Soil moisture of middle layer	底层土壤 含水量 Soil moisture of bottom layer	产水量 Water yield	土壤水蚀 控制服务 Soil conservation	防风固 沙服务 Sand fixation
空间滞后模型 Spatial lag model	0.983	0.92	0.868	0.896	0.856	0.807	0.894
空间误差模型 Spatial error model	0.995	0.813	0.582	0.903	0.976	0.819	0.909
普通最小二乘回归模型 Ordinary least squares regression model	0.992	0.902	0.812	0.877	0.948	0.778	0.883

表 4 空间回归模型与普通最小二乘回归模型的拟合优度 Table 4 Fitness of the spatial regression models and the ordinary least square model

与 Huang 等^[55]的研究结论一致,内蒙古中西部地区的土壤水蚀控制服务大多集中在坡度和降水量较高的东部地区,防风固沙服务集中在风速和表层土壤砂粒含量较高的西部和南部地区(图 2、表 3)。其原因在于坡度和降水量分别通过提高修正通用土壤流失方程中与地表输沙能力相关的因子(*L* 和 *S*)和降雨侵蚀力因子(*R*)增大潜在水蚀和土壤水蚀控制服务;类似地,风速和表层土壤砂粒含量分别通过增大修正土壤风蚀方程中的气候因子(*WF*)和土壤可蚀性因子(*EF*)增大潜在风蚀和防风固沙服务。Qiao 等^[25]指出,这些因子在增大潜在侵蚀的同时也会增大实际土壤侵蚀。此外,表层土壤砂粒含量的增加往往抑制了土壤蓄水能力,降低了土壤含水量和水源涵养能力(表 3)。因此,生态可持续管理必须对以上存在水土流失风险的地区引起重视,实施一定水土保持措施,包括沙化耕地和坡耕地的退耕还林还草、沙地的植被恢复等。

归一化植被指数和森林、草地等植被景观格局因子能够通过增大植被覆盖因子(C)和结合残茬因子(COG)减小实际水蚀和实际风蚀,从而提升土壤水蚀控制服务和防风固沙服务。相关研究也指出,中国北方

农牧交错带的退耕还林还草、三北防护林等生态工程有效遏制了土地退化,改善了土壤保持服务^[22,56]。已有研究表明,研究区的净初级生产力也主要分布在归一化植被指数和森林覆盖较高的地区^[29]。其中,森林由于比热大,能够显著缓解夏季高温对植被生长的负面影响,对净初级生产力起决定性作用。然而,森林由于植被蒸腾作用强烈,耗水性较高,往往会抑制产水服务和土壤含水量(表 3),这也与已有的研究结论一致^[19]。因此,对内蒙古中西部地区,尤其是鄂尔多斯、巴彦淖尔等产水服务严重偏低地区(图 2),退耕还林还草和沙地植被恢复等生态工程必须结合半干旱区水资源匮乏的地域特征,科学引进耐旱、耐碱草本植物。巩杰等^[57]的研究表明,在水土流失严重的半干旱地区优先考虑恢复灌木、草本等先锋植物比直接种植乔木更有利于提升土壤养分含量和改善土壤质量。

土地系统优化和生态工程实施应当重视景观格局的作用。例如,研究区草地聚集度的增大促进了土壤含 水量,但抑制了产水量(表3)。Bin 等^[58]指出,其原因在于:低草地聚集度有利于减弱地表阻力对地表径流的 限制,降低蒸散速率,从而提高产水量;但同时会抑制土壤入渗速率,从而降低土壤含水量。因此,沙地植被恢 复和退耕还草工作中要设计适当的草地聚集度,既不能过大,也不能过小。此外,提高景观多样性(景观香农 指数)也能在一定程度上改善产水和防风固沙服务(表3),推动区域生态可持续发展。

需要指出的是,本文虽然量化了与研究区土壤侵蚀和水资源匮乏等关键环境问题联系紧密的生态系统服务,但食物供给、文化服务等也对当地经济发展和居民福祉存在一定影响,未来需要对这些生态系统服务进行 像元尺度上的精细化评估。生物物理模型的部分关键参数对生态系统服务结果有显著影响,未来还应补充参 数敏感性实验和参数横向对比,以进一步增强政策调控的针对性。

5 结论

本文以中国北方农牧交错带的核心区域——内蒙古中西部地区为例,结合长时间序列遥感数据与生物物 理模型实现了像元尺度上净初级生产力、土壤含水量、产水量、土壤水蚀控制服务及防风固沙服务的测量,基 于空间回归模型揭示了生态系统服务空间格局的影响因子。主要结论如下:

(1)空间上,防风固沙服务集中在南部和西部地区,净初级生产力等其余生态系统服务集中在东部地区。

(2)不同生态系统服务的影响因素及其影响力存在差异。降水量是对土壤水蚀控制服务、产水量及三层 土壤含水量影响最为显著的正向因子;风速和表层土壤沙粒含量是对防风固沙服务影响较显著的因子。归一 化植被指数和植被景观格局指数通过缓解实际侵蚀增大土壤水蚀控制服务和防风固沙服务,也能提升净初级 生产力。然而,增加林地百分比会增大植被蒸腾,降低产水量。

研究结果为中国北方农牧交错带的生态环境管理及正确处理经济发展与脆弱生态环境保护间的矛盾提供科学支撑。总体上,应继续加强对易发生水土流失的脆弱地区的保护力度,严格落实退耕还草、沙地植被修 复等政策。生态工程应提升针对性,考虑水资源匮乏的实际情况,优先引进耐旱、耐碱草本植物作为提升生态 系统服务的重要基础。同时,根据研究结果对草地聚集度等重要景观格局进行管理,有利于发挥景观功能多 样性和均衡性。

参考文献(References):

- [1] 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(6630): 253-260.
- [2] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [3] 罗盛锋, 闫文德. 广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力. 生态学报, 2018, 38(9): 3248-3259.
- [4] 王若思, 潘洪义, 刘翊涵, 唐玉萍, 张之凤, 马红菊. 基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究. 生态学报, 2022, 42(1): 76-90.
- [5] Chiang L C, Lin Y P, Huang T, Schmeller D S, Verburg P H, Liu Y L, Ding T S. Simulation of ecosystem service responses to multiple disturbances from an earthquake and several typhoons. Landscape and Urban Planning, 2014, 122: 41-55.

[6]	Xiao X, Ojima D S, Parton W J, Chen Z, Chen D. Sensitivity of Inner Mongolia grasslands to climate change. Journal of Biogeography, 1995, 22
	(4/5): 643.
[7]	冯晓玙,黄斌斌,李若男,郑华.三江源区生态系统和土壤保持服务对未来气候变化的响应特征.生态学报,2020,40(18):6351-6361.
[8]	徐雨晴,周波涛,於琍,石英,徐影.气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征.生态学报,2018,38(6):1952-1963.
[9]	Liu J J, Huang G L, Jia P, Chen L Y. Improving herdsmen's well-being through scenario planning: a case study in Xilinhot City, Inner Mongolia
	Autonomous Region. Geography and Sustainability, 2020, 1: 181-188.
[10]	Pham H V, Sperotto A, Torresan S, Acuña V, Jorda-Capdevila D, Rianna G, Marcomini A, Critto A. Coupling scenarios of climate and land-use

- change with assessments of potential ecosystem services at the river basin scale. Ecosystem Services, 2019, 40: 101045.
- [11] Tang Z L, Sun G, Zhang N N, He J, Wu N. Impacts of land-use and climate change on ecosystem service in eastern Tibetan Plateau, China. Sustainability, 2018, 10(2): 467.
- [12] 王颖慧,丁建丽,李晓航,张钧泳,马国林. 伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型. 生态学报, 2022, 42(8): 3106-3118.
- [13] 王兆峰,许静.土地利用演变对国家公园生态系统服务价值的影响——以三江源国家公园为例.生态学报,2022,42(17):6948-6958.
- [14] 谢高地,张钇锂,鲁春霞,郑度,成升魁.中国自然草地生态系统服务价值.自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [15] 杨吉华,李红云,李焕平,杨德运,李萍.4种灌木林地根系分布特征及其固持土壤效应的研究.水土保持学报,2007,21(3):48-51.
- [16] 韩凤朋,郑纪勇,张兴昌.黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响.农业工程学报,2009,25(2):50-55.
- [17] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M R. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.
- [18] 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.
- [19] Huang T, Yu D Y, Cao Q, Qiao J M. Impacts of meteorological factors and land use pattern on hydrological elements in a semi-arid basin. Science of the Total Environment, 2019, 690: 932-943.
- [20] 杨婉清,杨鹏,孙晓,韩宝龙.北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响.生态学报, 2022, 42(16): 6487-6498.
- [21] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Journal of Cleaner Production, 2021, 290: 125193.
- [22] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, Liu Y, Qiao J M, Wang X, Du J S. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. Science of the Total Environment, 2017, 579: 718-728.
- [23] 王静爱,徐霞,刘培芳.中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究.资源科学,1999,21(5):21-26+10.
- [24] Qiao J M, Yu D Y, Liu Y P. Quantifying the impacts of climatic trend and fluctuation on crop yields in northern China. Environ Monit Assess, 2017, 189(11): 532.
- [25] Qiao J M, Yu D Y, Wu J G. How do climatic and management factors affect agricultural ecosystem services? A case study in the agro-pastoral transitional zone of northern China. Science of the Total Environment, 2018, 613-614: 314-323.
- [26] 刘军会,高吉喜.北方农牧交错带生态系统服务价值测算及变化.山地学报,2008,26(2):145-153.
- [27] 张爱平,张华.北方农牧交错带土地利用变化对生态服务价值的影响——以内蒙古赤峰市为例.内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2007,(05):527-532.
- [28] 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: 811-841.
- [29] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算.植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [30] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. Water Resources Research, 1994, 30 (6): 1665-1679.
- [31] Cuo L, Beyene T K, Voisin N, Su F G, Lettenmaier D P, Alberti M, Richey J E. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound Basin, Washington. Hydrological Processes, 2011, 25(11): 1729-1753.
- [32] Safeeq M, Fares A. Hydrologic response of a Hawaiian watershed to future climate change scenarios. Hydrological Processes, 2012, 26(18): 2745-2764.
- [33] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [34] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [35] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, Porter J P. RUSLE: revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46

(1): 30-33.

- [36] 蔡崇法,丁树文,史志华,黄丽,张光远.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究.水土保持学报,2000, 14(2):19-24.
- [37] 黄婷, 于德永, 乔建民, 郝蕊芳. 内蒙古锡林郭勒盟景观格局变化对土壤保持能力的影响. 资源科学, 2018, 40(6): 1256-1266.
- [38] Fryear D W, Bilbro J D, Saleh A, Schomberg H, Stout J E, Zobeck T M. RWEQ: improved wind erosion technology. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(2): 183-189.
- [39] 迟文峰, 白文科, 刘正佳, 党晓宏, 匡文慧. 基于 RWEQ 模型的内蒙古高原土壤风蚀研究. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1024-1033.
- [40] 江凌,肖燚,饶恩明,王莉雁,欧阳志云.内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响.生态学报,2016,36(12):3734-3747.
- [41] Gong G L, Liu J Y, Shao Q Q, Zhai J. Sand-fixing function under the change of vegetation coverage in a wind erosion area in Northern China. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2): 105-114.
- [42] 张寒冰,高阳,崔艳智.基于 RWEQ 模型的典型沙区风蚀治理成效研究.北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 342-350.
- [43] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, 2010, 24(3): 189-206.
- [44] Cui F Q, Wang B J, Zhang Q, Tang H P, De Maeyer P, Hamdi R, Dai L W. Climate change versus land-use change-What affects the ecosystem services more in the forest-steppe ecotone? Science of the Total Environment, 2021, 759: 143525.
- [45] Wang H, Liu L B, Yin L, Shen J S, Li S C. Exploring the complex relationships and drivers of ecosystem services across different geomorphological types in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China (2000 - 2018). Ecological Indicators, 2021, 121: 107116.
- [46] Griffith D A, Anselin L. Spatial econometrics: methods and models. Economic Geography, 1989, 65(2): 160.
- [47] Qiu J Q, Huang T, Yu D Y. Evaluation and optimization of ecosystem services under different land use scenarios in a semiarid landscape mosaic. Ecological Indicators, 2022, 135: 108516.
- [48] Qiu J, Yu D Y, Huang T. Influential paths of ecosystem services on human well-being in the context of the sustainable development goals. Science of the Total Environment. 2022, 852; 158443.
- [49] 叶笃正,符淙斌,季劲钧,董文杰,吕建华,温刚,延晓冬. 有序人类活动与生存环境. 地球科学进展, 2001, 16(4): 453-460.
- [50] 叶笃正, 严中伟, 马柱国. 应对气候变化与可持续发展. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 332-336.
- [51] Alizadeh M J, Kavianpour M R, Chau K W, Alizadeh M J, Kavianpour M R, Danesh M, Adolf J, Shamshirband S, Chau K-W. Effect of river flow on the quality of estuarine and coastal waters using machine learning models. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2018, 12(1): 810-823.
- [52] Kouadri S, Elbeltagi A, Kateb S, Kouadri S, Elbeltagi A, Islam A R M T, Kateb S. Performance of machine learning methods in predicting water quality index based on irregular data set: application on Illizi region (Algerian southeast). Applied water science, 2021, 11(12): 190.
- [53] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, Zhang Q J, Lü Y H, Gulinck H, Poesen J. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the Loess Plateau of China. Land Degradation & Development, 2005, 16(1): 73-85.
- [54] 赵君, 刘景辉, 李明. 燕麦不同留茬高度对土壤风蚀的影响. 湖北农业科学, 2013, 52(1): 33-35.
- [55] Huang T, Yu D Y. Water-soil conservation services dynamic and its implication for landscape management in a fragile semiarid landscape. Ecological Indicators, 2021, 130: 108150.
- [56] Jiang C, Wang F, Zhang H Y, Dong X L. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000 2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration. Ecological Engineering, 2016, 97: 258-271.
- [57] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,虎陈霞,卫伟.黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究.水土保持学报,2005,19(1):93-96.
- [58] Bin L, Xu K, Xu X, Lian J, Ma C. Development of a landscape indicator to evaluate the effect of landscape pattern on surface runoff in the Haihe River Basin. Journal of Hydrology, 2018, 566: 546-557.