

中蒙阿勒泰毗邻区植被净初级生产力 时空变化及其影响因素

耿益新^{1,2,3}, 范连连^{1,2}, 马学喜^{1,2,4}, 李江月^{1,2}, 王光宇^{1,2,3}, 李耀明^{1,2,3}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 2.中国科学院中亚生态与环境研究中心, 新疆乌鲁木齐 830011; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.新疆农业大学草业学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 探究中国新疆阿勒泰地区与蒙古国西部毗邻区植被净初级生产力(NPP)的时空变化特征及其影响因素, 旨在为跨境区域生态保护和可持续发展提供参考依据。[方法] 本研究采用回归分析方法揭示对中蒙阿勒泰毗邻区植被 NPP 时空变化; 并运用相关性分析和地理探测器等方法, 深入探索中蒙跨境地区植被 NPP 的主要影响因素。[结果] ①2001—2021年, 中国新疆阿勒泰地区植被 NPP 呈微弱下降趋势[5.49 g/(m²·10 a), 以 C 计], 而蒙古国西部植被 NPP 呈显著上升趋势[27.06 g/(m²·10 a), $p < 0.05$]。②气温(0.49, $p < 0.05$)和降水(0.31, $p < 0.05$)分别是影响中国新疆阿勒泰地区和蒙古国西部植被 NPP 变化的主要因素。③气温和土地利用类型交互作用对中国新疆阿勒泰地区植被 NPP 解释力最强(0.68, $p < 0.05$), 降水和土地利用类型交互作用对蒙古国西部植被 NPP 解释力最强(0.37, $p < 0.05$)。[结论] 2001—2021年, 中国阿勒泰地区植被 NPP 整体逐年下降, 而蒙古国西部植被 NPP 整体逐年增长, 气温、降水分别和土地利用类型的交互驱动是中国阿勒泰地区和蒙古国西部植被 NPP 的主要驱动类型。

关键词: 中蒙阿勒泰毗邻区; 植被净初级生产力; 地理探测器; 影响因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0298-10

中图分类号: Q948, P467

文献参数: 耿益新, 范连连, 马学喜, 等. 中蒙阿勒泰毗邻区植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 298-307. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.031; Geng Yixin, Fan Lianlian, Ma Xuexi, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation net primary productivity changes and influencing factors in Altay adjacent area of China and Mongolia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 298-307.

Spatiotemporal Characteristics of Vegetation Net Primary Productivity Changes and Influencing Factors in Altay Adjacent Area of China and Mongolia

Geng Yixin^{1,2,3}, Fan Lianlian^{1,2}, Ma Xuexi^{1,2,4},
Li Jiangyue^{1,2}, Wang Guangyu^{1,2,3}, Li Yaoming^{1,2,3}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi,

Xinjiang 830011, China; 2. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese

Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

100049, China; 4. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation characteristics of vegetation net primary productivity (NPP) and their influencing factors were explored in Altay region of Xinjiang, China, and the adjacent area of Mongolia to provide a reference for cross-border regional ecological protection and sustainable development. [Methods] Regression analysis was used to reveal the spatiotemporal changes in vegetation NPP in Altay region adjacent to China and Mongolia, while correlation analysis and geographical detectors were applied to explore the main influencing factors of vegetation NPP in the cross-border area. [Results]

收稿日期: 2024-05-06

修回日期: 2024-09-14

资助项目: 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划)项目“蒙古国西部草地退化成因与优化管理”(2020E01015); 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0603)

第一作者: 耿益新(1997—), 女(汉族), 河南省平顶山市人, 硕士研究生, 研究方向为草地生态系统功能。Email: 15637534299@163.com。

通信作者: 李耀明(1974—), 男(汉族), 河北省保定市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事干旱区生态系统监测与变化研究。Email: lym@ms.xjba.ac.cn。

① From 2001 to 2021, the vegetation NPP in Altay region of Xinjiang, China, showed a slight decreasing trend of $5.49 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$ (calculated by carbon), while the vegetation NPP in the western part of Mongolia showed a significant increasing trend of $27.06 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$, $p < 0.05$. ② Temperature (0.49 , $p < 0.05$) and precipitation (0.31 , $p < 0.05$) were the main factors affecting vegetation NPP in Altay region of Xinjiang, China, and the western part of Mongolia, respectively. ③ The interaction between temperature and land use type had the strongest explanatory power for vegetation NPP in Altay region of Xinjiang, China (0.68 , $p < 0.05$), while the interaction between precipitation and land use type had the strongest explanatory power for vegetation NPP in the western part of Mongolia (0.37 , $p < 0.05$). [Conclusion] From 2001 to 2021, the vegetation NPP in Altay region of China had been declining yearly, while the vegetation NPP in the western part of Mongolia had been increasing yearly. The interactive drivers of temperature, precipitation, and land use types are the main influences on vegetation NPP in both the Altay region of China and the western part of Mongolia.

Keywords: Altay adjacent area of China and Mongolia; vegetation net primary productivity; geographical detector; influencing factors

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 作为评估陆地生态系统质量的重要指标,它衡量了绿色植被在光合作用过程中所固定的有机碳(以有机物形式储存)减去植物呼吸作用消耗的碳量^[1]。监测植被 NPP 的动态变化,对于维持生态系统功能、促进碳平衡和水循环等方面具有重要意义^[2-3]。以往研究中,学者们通常结合卫星遥感数据来估算大尺度区域的 NPP。例如 Liu Haixin 等^[4] 基于 MOD17A3 NPP 数据对陕甘宁地区植被 NPP 时空演变情况进行了研究; Xue Yingying 等^[5] 利用 MOD17A3HGF NPP 数据探究中国植被 NPP 对春季物候的响应。在全球变暖和“双碳”目标背景下,探讨植被 NPP 的时空变化及其影响因素,不仅可以为实现碳中和目标提供科学依据,并能为改善区域和全球生态环境质量提出建设性意见^[6]。

自然因素和人为因素是影响植被 NPP 动态变化的两个重要方面。一方面,气候因素直接影响植物的光合作用和生长状况,而地形和土壤类型也决定了植被的生长环境和水分养分的供应状况。如,茆杨等^[7] 研究表明,温度升高会抑制中国西南地区植被 NPP 的增长。而韩焕焕等^[8] 发现中国西北地区的植被 NPP 对降水响应尤为敏感。另一方面,植被 NPP 与人为活动也密切相关,如人类活动(农业开垦、城市化、工业排放、过度放牧和森林砍伐等)直接导致植被 NPP 出现显著下降^[9-14]。然而,尽管其他学者综合考虑了自然和人为因素对 NPP 的影响,但在跨境视角下对植被 NPP 及其影响因素的探讨仍然不足。

中蒙阿勒泰毗邻区位于阿尔泰山脉东南部,不仅是中国和蒙古国之间贸易往来的重要门户,也是“一带一路”倡议下推动区域经济一体化的关键枢纽。该地区位于干旱荒漠与半干旱荒漠的交界处,特殊的地

理位置和气候条件使其成为一个气候交互区,同时也是研究气候变化的重要信息库。丰富的自然景观和高度多样化的生物群落,使该区域形成了一个相对独立且复杂的地理、生态及气候环境单元^[15]。由于生态系统的脆弱性,该地区的植被 NPP 对气候变化极为敏感。如 Chen Bojian 等^[16] 发现降水是新疆阿勒泰地区草地 NPP 的主要驱动因素; Bao Gang 等^[17] 的研究则揭示了蒙古国植被 NPP 与夏季气候变化的密切相关性; Nanzad Lkhagvadorj 等^[18] 则发现不同植被类型对蒙古国干旱条件的响应存在差异。此外,赵鹏等^[19] 的研究指出,人类活动(放牧)已经导致新疆阿勒泰地区 15.22% 的区域植被 NPP 出现下降。然而,现有研究大多局限于中国或蒙古国的行政单元范围,缺乏对跨境区域植被 NPP 变化及其影响因素差异性的综合性研究。开展跨境植被 NPP 的研究,将为中蒙两国在生态环境的协同治理中提供了重要的数据支持。因此,探究中蒙阿勒泰毗邻区跨境植被 NPP 的时空变化及其影响因素,对于推动中蒙两国在生态环境方面的合作,促进生态资源的可持续利用,乃至协同应对全球气候变化,都具有重要的实践意义和政策参考价值。

为此,本研究采用回归分析、相关性分析和地理探测器等方法,深入探讨了中蒙阿勒泰毗邻区植被 NPP 对气候(气温、降水)、地形(海拔、坡度、坡向)、人类活动(年均人口数量、土地利用类型)等因素的响应。

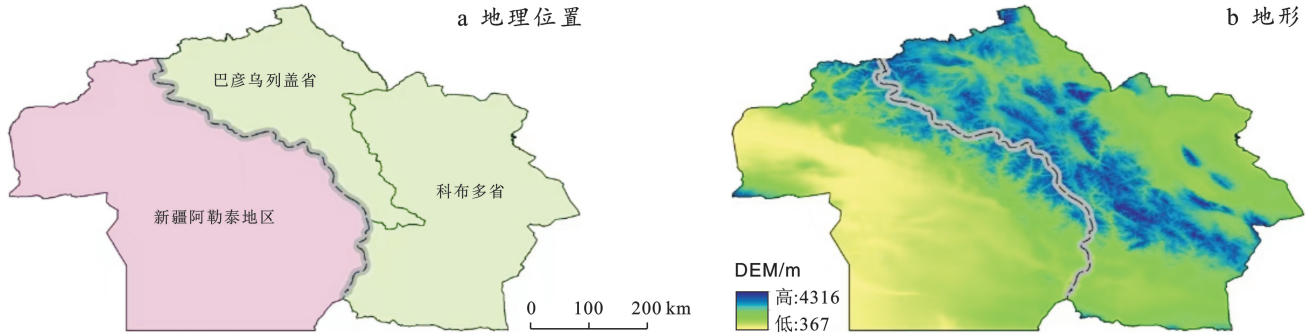
1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

中蒙阿勒泰毗邻区,指中国新疆阿勒泰地区及其毗邻区蒙古国西部的巴彦乌列盖省和科布多省(图 1)。新疆阿勒泰地区 ($45^{\circ}00' - 49^{\circ}10' \text{ N}$, $85^{\circ}31' -$

91°04'E)位于中国西北端、阿尔泰山脉中段西南麓、准噶尔盆地北部,东接蒙古国,西邻哈萨克斯坦,北与俄罗斯相交,南位于古尔班通古沙漠。该地区有 1 个县级市阿勒泰市及清河县、富蕴县、吉木乃县、福海县、哈巴河县、布尔津县 6 个县。新疆阿勒泰地区属于温带大陆性气候,夏季干旱,冬季严寒,年均温为 4.5 °C,年降水量为 200~400 mm。此外,该地区海拔高度为 367~4 297 m,起伏大,地形类型主要划分为山地、平原等,土地利用类型主要以草地为主,草地亚类多为荒漠类草地,如羊茅属、针茅属。

蒙古国西部(45°00'—50°00'N,87°50'—94°10'E),指巴彦乌列盖省、科布多省,其位于蒙古国西部、阿尔泰山脉北麓,西邻中国,北接俄罗斯。巴彦乌列盖省共有 1 个市乌列盖市及 12 个县。科布多省共有 1 个市(科布多市)及 15 个县。蒙古国西部属于温带大陆性气候,夏季干燥,冬季严寒,年均气温为 -0.54 °C,年降水量为 100~300 mm。此外,该地区海拔高度为 1 031~4 316 m,地形类型主要为山地、平原,土地利用类型主要以草地为主,草地亚类主要为荒漠类草地。



注: a 本图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4403 号的标准地图制作,底图边界无修改。

图 1 中蒙阿勒泰毗邻区位置及地形

Fig.1 Location and topography of China-Mongolia Altay adjacent area

1.2 数据来源与处理

植被 NPP 来源于 MOD17A3HGF 数据集,时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m;气温来源于 ERA5 数据集,时间分辨率为 1 月,空间分辨率为 10 km;降水来源于 TerraClimate 数据集,时间分辨率为 1 月,空间分辨率为 4 km;DEM 来源于 GDEM V2 数据集,空间分辨率为 30 m;土地利用类型来源于 MCD12Q 数据集,时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m;人口数量来源于美国橡树岭国家实验室,时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 1 km。

基于 GEE 平台调用“ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR”数据集的地表空气温度,将单位开尔文(K)转换成摄氏度(°C);调用“IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE”数据集的降水,并合成为年尺度数据。基于 Python 进行统计降尺度,使空间分辨率统一至 500 m。

1.3 研究方法

(1) 趋势分析。利于线性趋势法计算中蒙阿勒泰毗邻区 2001—2021 年每个栅格单位的植被 NPP 变化趋势,计算公式为^[20]:

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:S 为线性倾向率;n 为时间序列长度(n=21),S

为正值时,表示植被 NPP 呈增加趋势,反之则相反。

(2) 相关性分析。为分析植被 NPP 的主要影响因素,应用 ArcGIS10.2 栅格计算器逐像元计算中蒙阿勒泰毗邻区气温、降水与植被 NPP 两两之间的年际尺度相关性分析,计算公式为^[20]:

$$Y_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: Y_{xy} 是 x, y 两个变量之间的相关系数; $|Y|$ 值在 (-1, 1) 范围内,当 $Y > 0$ 表示正相关; $Y < 0$ 表示负相关关系;系数越接近 1 相关性越强;当 $|Y| = 0$ 时,表明无相关性。

偏相关系数计算公式为^[21]:

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}} \quad (3)$$

式中: $r_{12.3}$ 是将变量 3 固定后变量 1 与变量 2 的偏相关系数, r_{12}, r_{13}, r_{23} 分别表示变量 1 与变量 2,变量 1 与变量 3,变量 2 与变量 3 的简单相关系数。

用 t 检验法对偏相关系数进行显著性检验,公式为^[20]:

$$t = \frac{r}{\sqrt{(1-r^2)}} \sqrt{n-2} \quad (4)$$

式中: r 为偏相关系数, n 为时间序列长度($n=21$); $i=1, 2, \dots, n$ 。查询 t 分布表进行判断偏相关系数的显著

性,结合偏相关系数正负状况,可将其分为 5 个等级:极显著正相关($r > 0, p < 0.01$),显著正相关($r > 0, 0.01 < p < 0.05$),相关性不显著($p > 0.05$),显著负相关($r < 0, 0.01 < p < 0.05$),极显著负相关($r < 0, p < 0.01$)。

$$NPP_{潜在} = \min \left\{ \left[\frac{3\ 000}{1 + \exp(1.315 - 0.119T)} \right], 3\ 000 [1 - \exp(-0.000\ 664P)] \right\} \quad (5)$$

式中: $NPP_{潜在}$ 为潜在 NPP($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$),以 C 计; T 为年均温度($^{\circ}C$); P 为年降水量(mm)。

$$NPP_{RES} = NPP_{实际} - NPP_{潜在} \quad (6)$$

式中: NPP_{RES} 表示植被 NPP 残差, $NPP_{实际}$ 为 MODIS NPP, $NPP_{潜在}$ 表示植被 NPP 预测值。

(4) 土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵主要通过建立二维矩阵,反映区域研究期初、末阶段各土地利用类型间的转移情况,计算公式为:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mm} \end{pmatrix} \quad (7)$$

(5) 地理探测器。地理探测器是探测空间分异性,并揭示其驱动因子的一种新的统计学方法^[22]。地理探测器包括 4 个探测器。本研究运用分异及因子探测和交互作用探测 2 个探测器。

①分异及因子探测。探测 y (植被 NPP)的空间分异性;以及探测某因子 x 解释属性 y 空间分异的

程度。用 q 值度量^[22-23],公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (8)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2, SST = N \delta^2 \quad (9)$$

式中: $h = 1 \cdots L$ 为变量 y (植被 NPP)或 x 的分层,即为分类或分区; N_h 和 N 分别是层 h 和全区的单元数; δ_h^2 和 δ^2 分别是层 h 和全区的 y 值的方差。 SSW 和 SST 分别是层内方差之和及全区总方差。 q 的值域是 $[0, 1]$,值越大表示 y (植被 NPP)的空间分异性越明显;如果分层是由 x 生成的,则 q 值越大表示 x 对属性 y 的解释力越强,反之则越弱。

②交互作用探测。识别因子之间的交互作用,即为评估因子 x_1 和 x_2 共同作用时是否会增加或减弱对 y 的解释力。评估的方法是首先分别计算两种因子 x_1 和 x_2 对 y 的 q 值: $q(x_1)$ 和 $q(x_2)$,并且计算交互时的 q 值: $q(x_1 \cap x_2)$, $q(x_1)$ 与 $q(x_2)$ 进行比较。表 1 反映了两个因子之间的关系。

表 1 两个自变量交互作用的类型

Table 1 Type of interaction between two covariates

交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(x_1 \cap x_2) < \min[q(x_1), q(x_2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < \max[q(x_1), q(x_2)]$
双因子增强	$q(x_1 \cap x_2) > \max[q(x_1), q(x_2)]$
独立	$q(x_1 \cap x_2) = \max[q(x_1), q(x_2)]$
非线性增强	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 时空变化特征

图 2 显示,2001—2021 年中国新疆阿勒泰地区植被 NPP 呈轻微下降趋势 $[5.49 g/(m^2 \cdot 10 a)]$;蒙古国西部地区植被 NPP 呈显著上升趋势 $[27.06 g/(m^2 \cdot 10 a), p < 0.05]$ 。

图 3 显示,植被 NPP 空间分布不均,21 a 间中国新疆阿勒泰地区植被 NPP 年均值为 $385.22 g/(m^2 \cdot a)$;蒙古国西部植被 NPP 年均值为 $272.74 g/(m^2 \cdot a)$ 。结合土地利用类型图(图 1b),植被 NPP 高值区主要位于阿尔泰山、蒙古国西部湿地区域;研究区主要呈增加趋势,占研究区面积 67%,其中显著增加主要分布在蒙古国西部北侧区域以及阿尔泰山区。

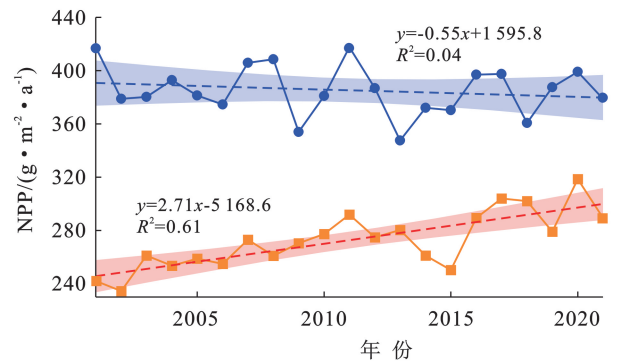


图 2 2001—2021 年中蒙阿勒泰毗邻区植被 NPP 年际变化
Fig.2 Interannual variation of NPP in Altai adjacent area of China and Mongolia from 2001 to 2021

2.2 气温、降水对植被 NPP 的影响

2001—2021 年中国新疆阿勒泰地区多年平均气温为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；蒙古国西部多年平均气温为 $-0.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究期间，中国新疆阿勒泰地区和蒙古国西部年均温均呈微弱增加的趋势，但不显著。2001—2021 年中国新疆阿勒泰地区多年平均降水量为 331.55 mm ，

最大降水量出现在 2019 年，而最小降水量出现在 2014 年；蒙古国西部 2001—2021 年的多年平均降水量为 261.14 mm ，最大降水量出现在 2013 年，最小降水量出现在 2015 年。近 21 a，中国新疆阿勒泰地区的年降水量呈微弱减小趋势，而蒙古国西部则呈增加趋势，均不显著(图 4)。

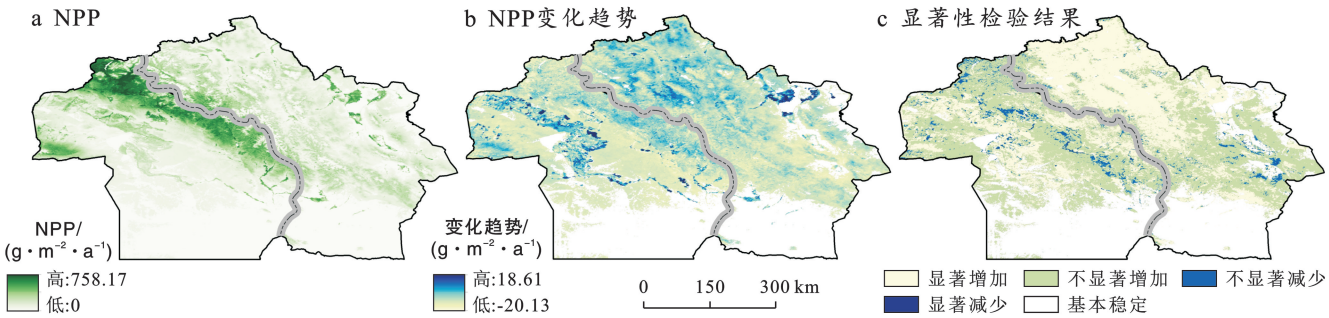


图 3 2001—2021 年中蒙阿勒泰毗邻区植被 NPP 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of NPP in Altai adjacent area of China and Mongolia from 2001 to 2021

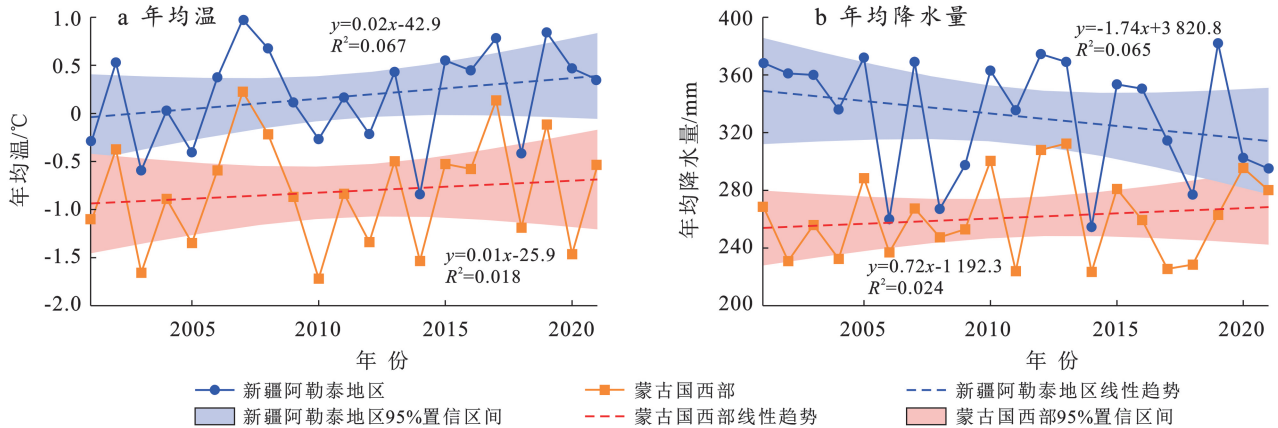


图 4 2001—2021 年中蒙阿勒泰毗邻区年均温、年均降水年际变化

Fig.4 Trend of temperature and precipitation in Altai adjacent area of China and Mongolia from 2001 to 2021

植被 NPP 不仅与降水因子具有交叉性影响，而且其与气温因子也具有交叉性影响^[22]。从空间分析气温和降水对植被 NPP 的影响(图 5)可知，研究区植被 NPP 与年均温之间的偏相关系数为 $-0.97\sim 0.95$ ，正相关主要分布在研究区北部地区以及阿尔泰山脉附近；植被 NPP 与气温显著性 T 检验结果显示，研究区域植被 NPP 与气温总体呈不显著相关，极显著正相关与显著正相关区域所占比例较少，主要分布在巴彦乌列盖省北部和阿尔泰山脉中段。

中蒙阿勒泰毗邻区植被 NPP 与年降水量之间的偏相关系数为 $-0.98\sim 0.99$ ，其中正相关区域主要为研究区北部及阿尔泰山脉附近。植被 NPP 与降水的偏相关系数进行 T 检验结果表明，研究区域植被

NPP 与降水总体呈不显著相关，极显著正相关和显著性相关区域所占比例小，主要分布在研究区北部及阿尔泰山脉附近。此外，本研究发现草地 NPP 与降水量之间呈现出极显著正相关，这说明降水在很大程度上影响草地的生长情况(图 5)。

2.3 人类活动对植被 NPP 变化的影响

由图 6a 可知，中国新疆阿勒泰地区残差 NPP 呈下降趋势，但趋势不显著 [$8.90\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$]；蒙古国西部残差 NPP 呈上升趋势，趋势也不显著 [$32.72\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$]。由图 6b 可以看出，残差 NPP 空间变化趋势，介于 $-20.76\sim 19.08\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间，中国新疆阿勒泰地区增加趋势所占面积(92%)远大于蒙古国西部(59%)。

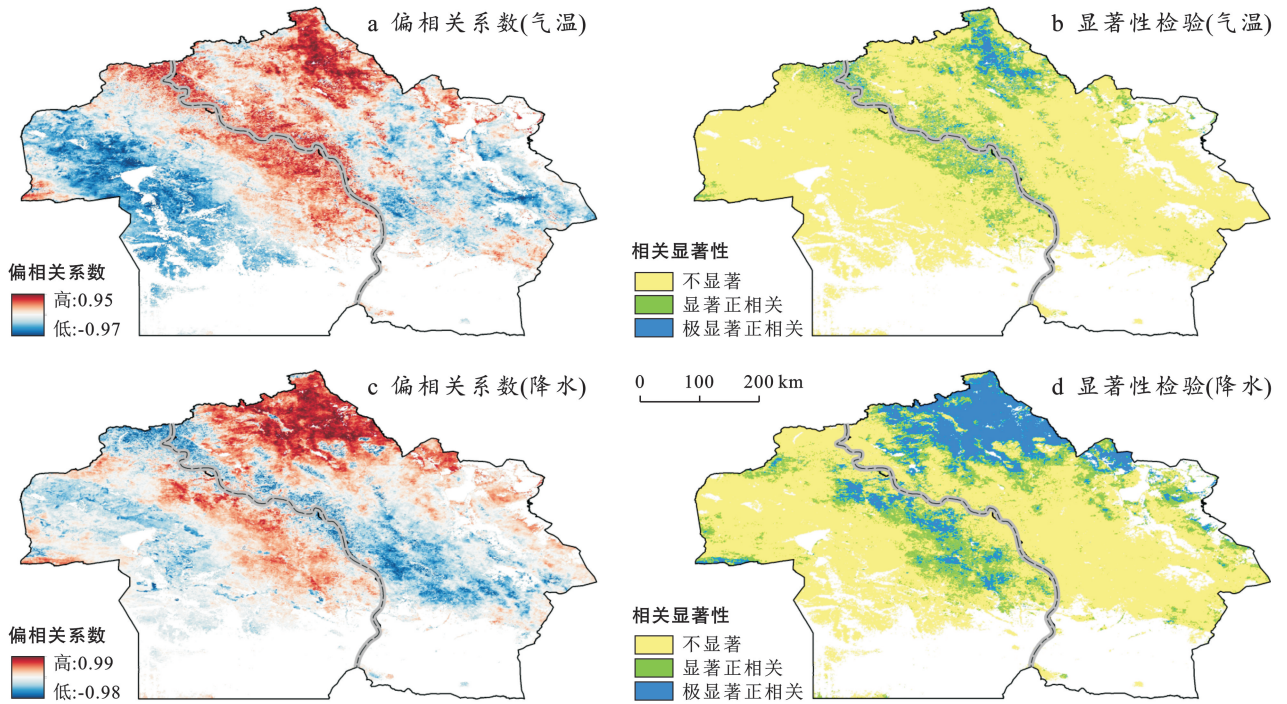


图 5 植被 NPP 与气温、降水的偏相关系数及其显著性检验

Fig.5 Correlation of vegetation NPP with temperature, and precipitation and significance test

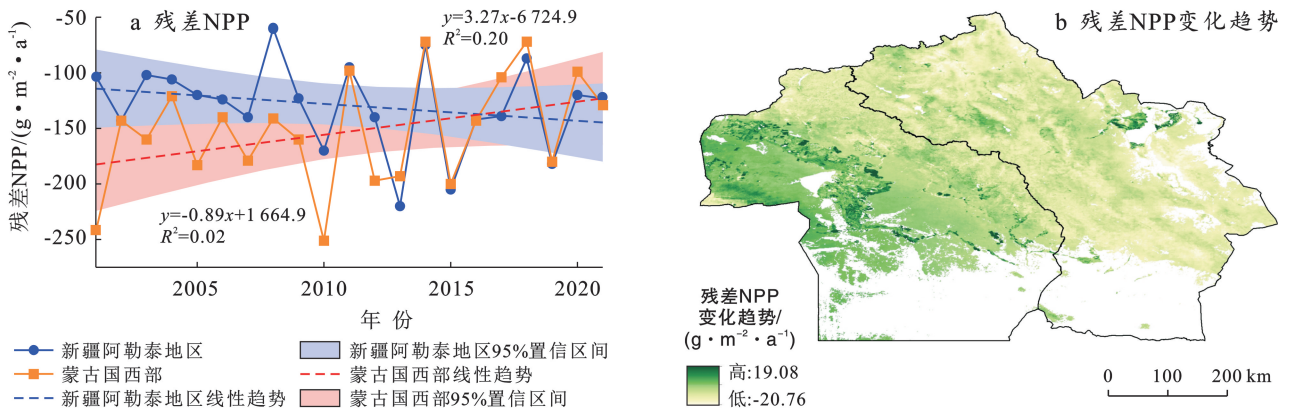


图 6 2001—2021 年中蒙阿勒泰毗邻区人类活动对植被 NPP 的影响

Fig.6 Impact of human activities on NPP in Altai adjacent area of China and Mongolia from 2001 to 2021

2001—2021 年研究区域土地利用类型在空间上发生了显著的变化(图 7)。通过运用残差法,本研究发现人类活动对中蒙阿勒泰地区植被 NPP 具有双重影响。人类活动所引起的土地利用类型的变化是影响植被 NPP 的重要因子。与新疆阿勒泰地区相比,蒙古国西部地区裸地和草地面积所占比例较大,而林地和耕地面积则相对较小。蒙古国西部地区土地利用类型转移面积顺序为:裸地转为草地(7 435.81 km²)>草地转为裸地(787.25 km²)>草地转为水域(130.25 km²)。中国新疆阿勒泰地区裸地转为草地面积最大(7 284.06 km²),其次是草地转为裸地的面积(1 995.75 km²);然后是草地转为耕地的面

积(1 581.44 km²),最后是部分草地及水域类型转为林地类型。

2.4 影响因子探测

本研究选取年均温、年降水量、海拔、坡度、坡向、土地利用类型、年均人口数量共 7 个影响因子,并运用地理探测器对研究区植被 NPP 的主导因素进行探测。结果显示(表 2),中国新疆阿勒泰地区单因子对植被 NPP 变化影响程度排序为:年均温>高程>土地利用类型>年降水量>坡度>坡向>年均人口数;蒙古国西部单因子排序为:年降水量>年均温>高程>土地利用类型>坡向>坡度>年均人口数。年均温、高程、土地利用类型是中国新疆阿勒泰地区植被

NPP 变化的主要因素,三者的解释力 30%~50%;年降水量、气温、高程是蒙古国西部植被 NPP 变化的主要因素,三者解释力为 20%~30%。

双因子交互作用分析比单因子更能反映植被 NPP 空间变化的规律,且各因子交互作用的影响相对于单因子来说更强。交互作用探测器的运行结果表明(表 3),7 个影响因子交互作用均呈现双因子增

强和非线性增强趋势。双因子之间的交互作用对中国新疆阿勒泰地区植被 NPP 变化解释力最高的 3 组为:土地利用类型 \cap 年均温(0.68) $>$ 土地利用类型 \cap 高程(0.68) $>$ 高程 \cap 年降水量(0.56);对蒙古国西部植被 NPP 变化解释力最强的 3 组为:土地利用类型 \cap 年降水量(0.37) $>$ 年降水量 \cap 高程(0.36) $>$ 坡向 \cap 年降水量(0.35)。

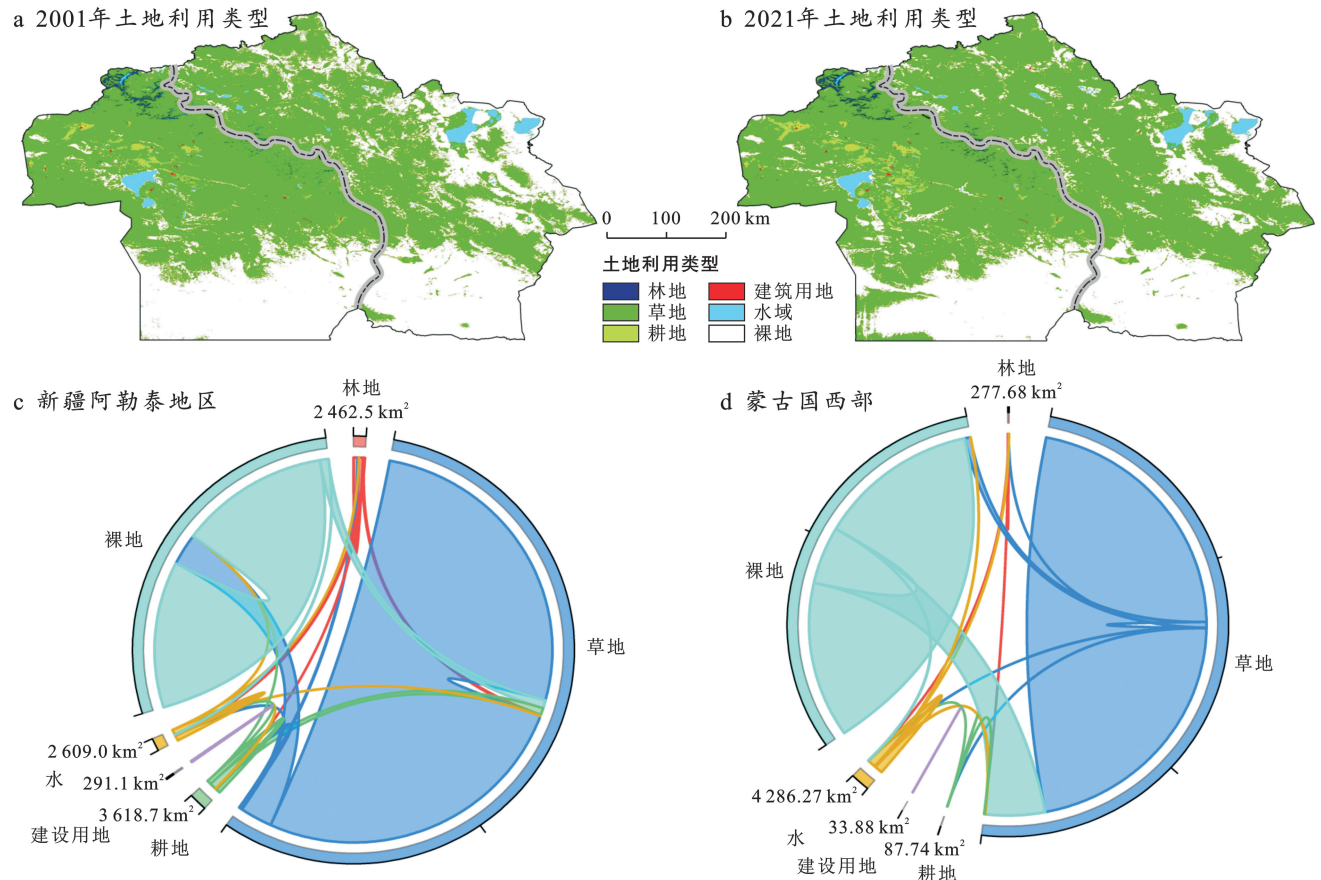


图 7 2001—2021 年中蒙阿勒泰毗邻区土地利用类型及转移和弦图

Fig.7 Land use types and chord chart of land transfer in Altai adjacent area of China and Mongolia from 2001 to 2021

表 2 中蒙阿勒泰毗邻区各因子地理探测器 q 值

Table 2 The q values of geographic detection of driving factors in Altai adjacent area of China and Mongolia from 2001 to 2021

地区	q 统计值						
	年均温	高程	土地利用类型	年降水量	坡度	坡向	年均人口数
中国新疆阿勒泰地区	0.49	0.41	0.38	0.30	0.03	0.02	0.00
蒙古国西部	0.29	0.28	0.16	0.31	0.00	0.01	0.00

3 讨论

评估跨境植被 NPP 变化趋势及其影响因素对于跨区域生态系统协同发展具有重要意义^[24]。本研究利用回归、相关性及地理探测器方法,揭示了中蒙阿勒泰跨境地区植被 NPP 时空变化规律及其影响因素。结果显示,2001—2021 年新疆阿勒泰地区植被 NPP 均值 $[385.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 明显高于蒙古国西部

地区 $[272.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ (图 3a),这与程霞等^[25]和屈冉等^[26]的研究结果相似。蒙古国西部地处温带大陆性气候,年均温低 $(-0.81 \text{ }^\circ\text{C})$,降水量少,生长期短促^[27],此外南部为大面积戈壁区,极度干旱,因此导致整个区域植被 NPP 较低。从新疆阿勒泰地区看,相比于北部的阿尔泰山区域,南部的古尔班通古特沙漠区域整体植被 NPP 较低,可能是由于该区域气温高且降水稀少,不利于植被生长,而阿尔泰山区域有充足的水热条

件,植被覆盖度高,因此植被 NPP 更高。对于蒙古国西部地区来说,位于东部湿地区域的植被 NPP 明显高于其他区域,这可能由于湿地周围水分条件充足,明显促进了植被生长^[16]。2001—2021 年新疆阿勒泰地区年均 NPP 呈微弱下降趋势 $[5.49 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$, (以 C 计)(图 2),这可能主要是由于干旱半干旱地区降水量减少,气温上升促使蒸发增加,土壤含水量下降,植被生长受限^[28]。而蒙古国西部地区年均 NPP 呈显

著上升趋势 $[27.06 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$; ($p < 0.05$) (图 2),可能是因为自 21 世纪以来,蒙古国西部气候呈暖湿化趋势,促进了该区域的植被生长。此外,蒙古国西部海拔较高($> 2\,000 \text{ m}$ 的区域占 53.2%),高海拔缓解了气候上升导致的水分蒸发^[28],且巴彦乌列盖省位于蒙古国西端的阿尔泰山脉最高处,气温升高使得冰雪融化,促进植被生长,且山区迎风坡降水增加有利于植被 NPP 增加。

表 3 中蒙阿勒泰毗邻区影响因子交互作用 q 值

Table 3 The q values of interaction between influencing factors in Altai adjacent area of China and Mongolia from 2001 to 2021

地区	指标	坡度	高程	年均温	年降水量	年均口数	坡向	土地利用类型
中国新疆阿勒泰地区	坡度	0.03						
	高程	0.42 [#]	0.41					
	年均温	0.51	0.56 [#]	0.49				
	年降水量	0.33 [*]	0.59 [#]	0.62 [#]	0.30			
	年均人口数	0.04 [*]	0.41 [*]	0.50 [*]	0.30 [*]	0.00		
	坡向	0.06 [*]	0.47 [*]	0.56 [*]	0.36 [*]	0.03 [*]	0.02	
	土地利用类型	0.41 [*]	0.68 [#]	0.68 [#]	0.54 [#]	0.38 [*]	0.39 [#]	
	坡度	0.00						
蒙古国西部	高程	0.30 [*]	0.28					
	年均温	0.30 [*]	0.35 [#]	0.29				
	年降水量	0.32 [*]	0.36 [#]	0.35 [#]	0.31			
	年均人口数	0.01 [*]	0.29 [#]	0.29 [*]	0.32 [*]	0.00		
	坡向	0.03 [*]	0.32 [*]	0.31 [*]	0.35 [*]	0.01 [*]	0.01	
	土地利用类型	0.17 [*]	0.35 [#]	0.34 [#]	0.37 [#]	0.16 [*]	0.18 [*]	0.16

注: # 为双因子增强; * 为非线性增强。

通过水热平衡、干湿变换等过程,气候因子显著影响植被 NPP^[29]。地理探测器单因子结果表明,气温和降水分别是影响新疆阿勒泰地区、蒙古国西部植被 NPP 变化主要因素,这与前人研究结果一致^[28]。有研究表明,新疆阿勒泰地区季节温差大,植被对温度波动适应能力较强且植被生长受土壤温度的直接影响,气温上升使土壤温度升高,促进植被内部反应速率,从而导致植被 NPP 增加^[30]。蒙古国西部降水量少,土壤孔隙大,水分流失快,这使得植被生长需要时间去积累生长所需的水分^[31],因此,降水是该地区是植被生长的主导因素。此外,植被 NPP 变化是多因素共同作用的结果,不同气候因子与人类活动的交互作用明显增强了单因子对植被 NPP 的作用力。尹超华等^[32]、同琳静等^[33]发现气温和土地利用类型的交互作用对新疆阿勒泰地区植被 NPP 的解释力最强,蒙古国西部主要受降水和土地利用类型交互作用的影响,这与本研究结果一致(表 3)。新疆阿勒泰地区土地利用类型复杂且人类活动频繁,土地利用类型易发生转变,这些转变直接或间接影响植被生长环境,甚至导致植被退化。特别是气温与土地利用类型

的交互作用对植被 NPP 影响更显著。蒙古国西部对降水具有高敏感性,因为降水增加使土壤湿度变大,改善土壤水分的供给,有利于植被生长。蒙古国西部土地利用类型主要是草地(65%)和裸地(33%),草地的根系结构有助于增强土壤的水分保持能力,降水能够有效利用,有助于植被生长^[34-35]。2001—2021 年区内土地利用类型在空间上有显著变化(图 7),主要是裸地转为草地(7 435.81 km²),随着土地利用类型的转化,植被覆盖度增加和土壤肥力的增加有助于降水利用效率的提高。因此人类应采用不同管理措施来应对气候变化和抵消或增强人类活动对植被生长产生的影响^[36]。

本研究揭示了中蒙阿勒泰跨境地区植被 NPP 的动态变化及其影响因素,但仍存在一些局限性。首先,本研究所使用的 Miami 模型仅以气温和降水作为模拟参数,没有对 NPP 进行全面理解。其次,实际 NPP 与潜在 NPP 之间的残差不仅反映了人类活动的影响,还可能包括其他环境和社会因素的作用,这可能导致结果的不准确性或不完整性。因此,未来的研究应当考虑更为复杂的环境变化情景,纳入更多影响

因素,采用更为精细的模型,并深入分析不同环境条件及人类活动对植被 NPP 的综合影响。

4 结论

(1) 2001—2021 年新疆阿勒泰地区植被 NPP 年均平均值为 $385.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,呈不显著下降趋势,而蒙古国西部植被 NPP 多年平均值为 $272.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,呈显著上升趋势。

(2) 降水比气温对植被 NPP 的积极影响更明显,其中蒙古国西部极显著正相关面积明显大于新疆阿勒泰地区,主要分布在蒙古国西部的北侧以及阿尔泰山脉西南麓。

(3) 气温和降水分别是影响新疆阿勒泰地区和蒙古国西部植被 NPP 的主要因素;气温和土地利用类型交互作用对新疆阿勒泰地区植被 NPP 解释力最强,降水和土地利用类型交互作用对蒙古国西部植被 NPP 解释力最强。

参考文献 (References)

- [1] Butler S M, Melillo J M, Johnson J E, et al. Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: Implications for ecosystem function and structure [J]. *Oecologia*, 2012,168(3):819-828.
- [2] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 1993,363:234-240.
- [3] 闫丰,李晨阳,鲁志雪,等.白洋淀流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J].水土保持通报,2024,44(2):345-353.
Yan Feng, Li Chenyang, Lu Zhixue, et al. Spatial and temporal succession and driving factors of vegetation net primary productivity in Baiyangdian watershed [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(2):345-353.
- [4] Liu Haixin, Zhang Anbing, Jiang Tao, et al. Response of vegetation productivity to climate change and human activities in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, China [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2018,46(7):1081-1092.
- [5] Xue Yingying, Bai Xiaoyong, Zhao Cuiwei, et al. Spring photosynthetic phenology of Chinese vegetation in response to climate change and its impact on net primary productivity [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023,342:109734.
- [6] 耿亚鑫,易桂花,张廷斌,等.青藏高原气候变化对草地碳汇/源格局的影响[J].自然资源学报,2024,39(5):1208-1221.
Geng Yaxin, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. Impacts of climate change on grassland carbon sink/source patterns in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024,39(5):1208-1221.
- [7] 茆杨,蒋勇军,张彩云,等.近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应[J].生态学报,2022,42(7):2878-2890.
Mao Yang, Jiang Yongjun, Zhang Caiyun, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in Southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(7):2878-2890.
- [8] 韩焕焕,高敏华,咎梅.中国西北半干旱区植被净初级生产力驱动力分析[J].湖北农业科学,2022,61(5):186-192.
Han Huanhuan, Gao Minhua, Zan Mei. Analysis on driving forces of net primary productivity of vegetation in semiarid region of Northwest China [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022,61(5):186-192.
- [9] Sun Wenyi, Song Xiaoyan, Mu Xingmin, et al. Spatio-temporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,209:87-99.
- [10] 刘海,姜亮亮,刘冰,等.近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响[J].生态学报,2023,43(19):7936-7949.
Liu Hai, Jiang Liangliang, Liu Bing, et al. Characteristics of drought in China and its effect on vegetation change in recent 40 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(19):7936-7949.
- [11] Zheng Kai, Wei Jianzhou, Pei Jiuying, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,660:236-244.
- [12] Du Jiaqiang, Fu Qing, Fang Shifeng, et al. Effects of rapid urbanization on vegetation cover in the metropolises of China over the last four decades [J]. *Ecological Indicators*, 2019,107:105458.
- [13] Liu Yanxu, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Correlations between urbanization and vegetation degradation across the world's metropolises using DMSP/OLS nighttime light data [J]. *Remote Sensing*, 2015,7(2):2067-2088.
- [14] 赵雪瑞,韩玲,刘明,等.基于改进 CASA 模型的陕西省植被 NPP 遥感估算[J].水土保持研究,2024,31(3):247-256.
Zhao Xuerui, Han Ling, Liu Ming, et al. Remote sensing estimation of vegetation NPP in Shaanxi Province based on improved CASA model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(3):247-256.
- [15] Fu Qi, Li Bo, Yang Linlin, et al. Ecosystem services evaluation and its spatial characteristics in central Asia's

- arid regions: A case study in Altay prefecture, China [J]. *Sustainability*, 2015, 7(7):8335-8353.
- [16] Chen Bojian, Jiapaer G, Yu Tao, et al. The role of climatic factor timing on grassland net primary productivity in Altay, Xinjiang [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111243.
- [17] Bao Gang, Tuya A, Bayarsaikhan S, et al. Variations and climate constraints of terrestrial net primary productivity over Mongolia [J]. *Quaternary International*, 2020, 537:112-125.
- [18] Nanzad L, Zhang Jiahua, Tuvdendorj B, et al. Assessment of drought impact on net primary productivity in the terrestrial ecosystems of Mongolia from 2003 to 2018 [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(13):2522.
- [19] 赵鹏,陈桃,王茜,等.气候变化和人类活动对新疆草地生态系统 NPP 影响的定量分析[J].*中国科学院大学学报*,2020,37(1):51-62.
Zhao Peng, Chen Tao, Wang Qian, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on grassland ecosystem NPP in Xinjiang [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 37(1):51-62.
- [20] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J].*地理研究*,2017,36(7):1245-1256.
Adilai Wufu, Yusufujiang Rusuli, Reyilai Kadeer, et al. Spatio-temporal distribution and evolution trend of evapotranspiration in Xinjiang based on MOD16 data [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(7):1245-1256.
- [21] 陈舒婷,郭兵,杨飞,等.2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J].*自然资源学报*,2020,35(10):2511-2527.
Chen Shuting, Guo Bing, Yang Fei, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10):2511-2527.
- [22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1)116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [23] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1):107-127.
- [24] 李登科,王钊.气候变化和人类活动对陕西省植被 NPP 影响的定量分析[J].*生态环境学报*,2022,31(6):1071-1079.
Li Dengke, Wang Zhao. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on vegetation NPP in Shaanxi Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(6):1071-1079.
- [25] 程霞,李帅,师庆东.阿勒泰地区气候生产力变化分析[J].*干旱地区农业研究*,2007,25(3):86-88.
Cheng Xia, Li Shuai, Shi Qingdong. The analysis of climate productivity change in Aletai area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(3):86-88.
- [26] 屈冉,王昌佐,高彦华,等.蒙古国与中国接壤处近 10 年植被长势遥感监测[J].*安徽农业科学*,2013,41(14):6548-6551.
Qu Ran, Wang Changzuo, Gao Yanhua, et al. Remote sensing monitoring of vegetation in the region of Mongolia adjacent to China during the past 10 years [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(14):6548-6551.
- [27] John R, Chen Jiquan, Giannico V, et al. Grassland canopy cover and aboveground biomass in Mongolia and Inner Mongolia: Spatiotemporal estimates and controlling factors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 213:34-48.
- [28] 汪美宏,赵慧,吴晓兰,等.考虑气候时间效应的额尔齐斯河流域植被动态变化与驱动力量量化[J].*生态学报*,2024,44(22)(2024-08-22).<https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20240821.1200.014>.
Wang Meihong, Zhao Hui, Wu Xiaolan, et al. Vegetation dynamics and its driving force in the Irtysh River basin considering climatic temporal effects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22)(2024-08-22).<https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20240821.1200.014>.
- [29] Wang Ying, Xia Wentao, Liang Tiangang. Research progress on spatial-temporal dynamic simulation model of net primary productivity of terrestrial ecosystems [J]. *Pratacultural Science*, 2010, 27(2):77-88.
- [30] Wang Chunyu, Wang Junbang. The impacts of climate change and human activities on cropland net primary productivity in Bangladesh, India and Myanmar [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(4):814-825.
- [31] Tong Siqin, Zhang Jiquan, Bao Yuhai, et al. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982—2013 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5):595-610.
- [32] 尹超华,罗敏,孟凡浩,等.蒙古高原植被碳水利用效率时空变化特征及其影响因素[J].*生态学杂志*,2022,41(6):1079-1089.
Yin Chaohua, Luo Min, Meng Fanhao, et al. The spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation carbon and water use efficiency in the Mongolian Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(6):1079-1089.

- Interplay of soil water repellency, soil aggregation and organic carbon. A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2016, 283:39-47.
- [19] Nath A J, Lal R. Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the North Appalachian Region, USA [J]. *Pedosphere*, 2017, 27(1):172-176.
- [20] Cates A M, Ruark M D, Hedtcke J L, et al. Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:371-380.
- [21] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. *Journal of the America Society of Agronomy*, 1936, 28(5):337-351.
- [22] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2):63-66.
Lin Qimei, Wu Yuguang, Liu Huanlong. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2):63-66.
- [23] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4):1035-1041.
Liu Enke, Zhao Binqiang, Mei Xurong, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):1035-1041.
- [24] Li Shuangyi, Gu Xin, Zhuang Jie, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:199-206.
- [25] Nie Xiaodong, Li Zhongwu, Huang Jinqian, et al. Thermal stability of organic carbon in soil aggregates as affected by soil erosion and deposition [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175:82-90.
- [26] Ghosh A, Bhattacharyya R, Meena M C, et al. Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an inceptisol [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177:134-144.
- [27] Gao Lili, Becker E, Liang Guopeng, et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon [J]. *Geoderma*, 2017, 288:97-104.
- [28] Garcia-Franco N, Albaladejo J, Almagro M, et al. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153:66-75.
- [29] Chamizo S, Rodríguez-Caballero E, Román J R, et al. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall [J]. *Catena*, 2017, 148:117-125.
- [30] Benbi D K, Brar K, Toor A S, et al. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in Northern India [J]. *Geoderma*, 2015, 237:149-158.

(上接第 307 页)

- [33] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 等. 青藏高原草地降水利用效率时空动态及对气候变化的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5):226-234.
Tong Linjing, Liu Yangyang, Wang Qian, et al. Spatial-temporal dynamics of precipitation use efficiency in grassland and its relationship with climate changes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5):226-234.
- [34] 张雨惠, 萨楚拉, 孟凡浩, 等. 蒙古高原植被返青期对气候、积雪、土壤水变化的响应特征研究[J]. *遥感技术与应用*, 2023, 38(6):1338-1349.
Zhang Yuhui, Sa Chula, Meng Fanhao, et al. Response characteristics of vegetation reforestation period to climate, snow cover and soil water in Mongolian Plateau [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, 38(6):1338-1349.
- [35] Shen Xiangjin, Jiang Ming, Lu Xianguo, et al. Aboveground biomass and its spatial distribution pattern of herbaceous marsh vegetation in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(7):1115-1125.
- [36] Tian Jie, Xiong Junnan, Zhang Yichi, et al. Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on grassland NPP in Altay Prefecture [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6):743-756.