浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(X): 1−10 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250501

引用格式: 周健华, 君珊, 白凯, 等. 呼伦贝尔草原净初级生产力时空格局及其与干旱的响应关系[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(X): 1−10. ZHOU Jianhua, JUN Shan, BAI Kai, *et al*. Spatial-temporal patterns of net primary productivity and its response to drought in Hulunbuir Grassland[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(X): 1−10.

呼伦贝尔草原净初级生产力时空格局及其与干旱的响应关系

周健华[1]，君　珊[1]，白　凯[1]，乌尼图[2]

（1. 内蒙古自治区环境监测总站呼伦贝尔分站，内蒙古 呼伦贝尔 021113；2. 内蒙古农业大学 草业学院，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘要：【目的】呼伦贝尔草原是中国重要的生态安全屏障和畜牧业生产基地，其植被净初级生产力 (NPP) 变化对区域生态系统稳定性和可持续发展具有重要影响。**【方法】**基于 MODIS NPP 产品，结合 NOAA 归一化植被指数 (NDVI)、降水、气温、太阳辐射和海拔等多源数据，构建多元线性回归模型，重构 1981—2024 年呼伦贝尔草原 NPP 时间序列数据，并采用 Sen's 斜率、Mann-Kendall 检验、变异系数和 12 个月尺度标准化降水蒸散指数 (SPEI-12) 分析其时空变化特征及对干旱变化的响应关系。**【结果】**重构模型具有较高精度，基于 AVHRR NDVI 和 VIIRS NDVI 构建的模型决定系数 (R^2) 分别达 0.92 和 0.93。1981—2024 年，呼伦贝尔草原多年平均 NPP 为 377.45 g·m^{-2}·a^{-1}，空间上总体呈由西向东递增的分布格局，其中山地草甸最高 (440.79 g·m^{-2}·a^{-1})，温性草原最低 (284.62 g·m^{-2}·a^{-1})。研究期间，NPP 总体呈下降趋势，年均下降速率为 0.81 g·m^{-2}·a^{-1}；Mann-Kendall 检验显示 50.32% 的区域呈显著下降趋势 (P<0.05)，主要分布于中西部温性草原区。2000 年以后，研究区 SPEI-12 总体降低，表明区域干旱程度有所增强。相关性分析表明：NPP 与上一年 SPEI-12 总体呈正相关关系，温性草原、温性草甸草原、山地草甸和沼泽草甸中显著正相关区域面积占比分别为 52.82%、64.23%、60.08% 和 70.52% (P<0.05)。**【结论】**过去 40 余年，呼伦贝尔草原 NPP 整体呈下降趋势，且与区域干旱化过程具有较强关联；不同草地类型对水分变化的响应存在明显差异，在草原保护与管理过程中应充分考虑其空间异质性特征。图 5 表 2 参 35

关键词：遥感；干旱指数；草原；呼伦贝尔；净初级生产力

中图分类号：S812　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2026)00-0001-10

Spatial-temporal patterns of net primary productivity and its response to drought in Hulunbuir Grassland

ZHOU Jianhua[1]，JUN Shan[1]，BAI Kai[1]，WU Nitu[2]

（1. Hulunbuir Branch, Inner Mongolia Environmental Monitoring Station, Hulunbuir 021113, Inner Mongolia, China; 2. College of Grassland, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China）

Abstract: ［**Objective**］ Hulunbuir Grassland is one of the most important ecological barriers and pastoral production bases in China, and changes in its net primary productivity (NPP) have important implications for ecosystem stability and sustainable development. ［**Method**］ A long-term NPP dataset for Hulunbuir Grassland from 1981 to 2024 was reconstructed using a multiple linear regression model based on the MODIS NPP product and multi-source datasets, including NOAA normalized difference vegetation index (NDVI), precipitation, air temperature, solar radiation, and elevation. Sen's slope estimator, Mann-Kendall test, coefficient of variation, and standardized precipitation evapotranspiration index at a 12-month timescale (SPEI-12) were employed to investigate the spatiotemporal dynamics of NPP and its response to drought. ［**Result**］ The reconstructed models had high accuracy, with coefficients of determination (R^2) of 0.92 and 0.93 for

收稿日期：2025-09-16；修回日期：2026-06-15

基金项目：内蒙古自治区重点研发与成果转化计划项目 (2023YFSW0007)

作者简介：周健华 (ORCID: 0000-0001-8724-7521)，高级工程师，从事草地生态研究。E-mail: 906864081@qq.com

AVHRR-NDVI- and VIIRS-NDVI-based models, respectively. During 1981–2024, mean annual NPP of Hulunbuir Grassland was 377.45 g·m^{-2}·a^{-1} and exhibited a spatial pattern of increasing values from west to east. Among different grassland types, mountain meadow had the highest NPP (440.79 g·m^{-2}·a^{-1}), whereas temperate steppe had the lowest (284.62 g·m^{-2}·a^{-1}). NPP showed an overall declining trend, with an average decreasing rate of 0.81 g·m^{-2}·a^{-1}. Mann-Kendall test indicated that 50.32% of the study area experienced a significant decline (P< 0.05), mainly distributed in the central and western temperate steppe regions. Since 2000, SPEI-12 values have generally decreased, indicating an increase in drought severity across the region. Correlation analysis revealed a predominantly positive relationship between NPP and the previous year's SPEI-12. The proportions of significantly positive correlations (P< 0.05) reached 52.82%, 64.23%, 60.08%, and 70.52% in temperate steppe, temperate meadow steppe, mountain meadow, and marsh meadow, respectively. [**Conclusion**] These findings suggest that NPP in Hulunbuir Grassland has generally declined over the past 4 decades and is closely associated with regional drought variation. Moreover, different grassland types exhibit distinct responses to changes in water availability, highlighting the need for grassland management strategies that consider spatial heterogeneity. [Ch, 5 fig. 2 tab. 35 ref.]

Key words: remote sensing; drought index; grassland; Hulunbuir; net primary productivity

草原生态系统是全球最重要的陆地生态系统之一，在维护生物多样性、提供生态产品、调节气候以及支撑区域社会经济可持续发展等方面发挥着不可替代的作用[1−2]。作为中国温带草原类型最为丰富的区域之一，呼伦贝尔草原不仅是国家生态安全屏障的重要组成部分，也是畜牧业发展的核心基地[3−4]。然而，在全球气候变化加剧及人类活动强度持续增大的背景下，呼伦贝尔草原退化问题日益凸显，生态系统的稳定性与可持续发展面临严峻挑战[4−6]。

植被净初级生产力 (NPP) 是表征生态系统碳汇能力与生态过程健康状况的关键指标，对气温、降水、辐射等气候要素变化极为敏感[7−8]。NPP 的时序变化不仅能够反映草原生态系统对气候变化的响应，还可作为识别草原退化与恢复趋势、评估生态系统服务功能的重要依据[9−10]。因此，在长时间尺度上系统分析 NPP 的变化特征及其气候驱动机制，对于理解草原生态系统的演变规律，以及科学制定生态保护与管理策略具有重要的理论与实践意义[10−12]。

随着遥感技术的发展，基于卫星遥感数据开展大尺度 NPP 监测已成为研究生态系统结构与功能变化的重要手段。MOD17 产品、CASA 模型和 GLO-PEM 模型等已广泛应用于区域及全球尺度 NPP 估算研究[13−15]。在中国北方草原地区，已有研究利用 AVHRR、MODIS 和 VIIRS 等多源遥感数据开展长期监测，揭示了草原生产力对降水、温度及干旱变化的敏感响应特征[3, 16−17]。总体而言，现有研究加深了对草原 NPP 时空变化规律的认识，但仍存在一些不足：一是受遥感产品时间跨度限制，相关研究多集中于 2000 年以后，缺乏覆盖 20 世纪 80 年代以来的长时间序列 NPP 数据，不利于全面揭示草原生态系统长期演变过程[18]；二是现有研究主要关注 NPP 与降水、温度等气候因子的关系，对干旱胁迫条件下 NPP 变化的滞后响应特征及其空间差异关注不足[19]。此外，针对呼伦贝尔草原这一气候梯度明显、生态过程复杂区域的长期 NPP 变化及其干旱响应机制研究仍有待深入。

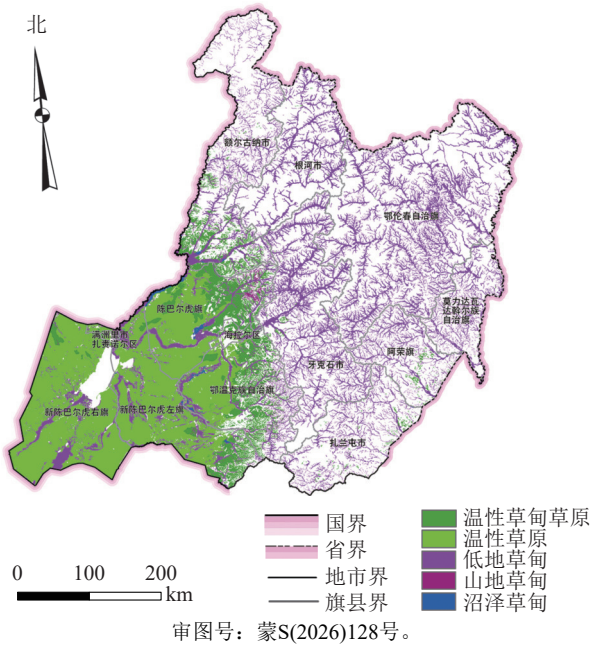
基于此，本研究以呼伦贝尔草原为研究对象，以 MODIS NPP 产品为基准，结合 NOAA 系列卫星归一化植被指数 (NDVI)、降水、气温、太阳辐射和海拔等数据，构建多元线性回归模型，重构 1981—2024 年研究区草原 NPP 时空数据集。在此基础上，分析过去 40 余年呼伦贝尔草原 NPP 的时空变化特征，并结合 1980—2023 年标准化降水蒸散指数 (SPEI) 数据探讨 NPP 对干旱变化的响应关系，以期为区域草原退化防控、生态修复与可持续利用提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

呼伦贝尔草原位于内蒙古自治区东北部 (47°05′~53°20′N，115°13′~126°04′E)，总面积为 9.94 万 km^2，

是中国面积最大、草原类型最为丰富的温带草原区域之一 (图 1)。地势总体自西南向东北倾斜，海拔为 500~1 500 m，地形以丘陵和平原为主，地势开阔，水资源较为丰富[3]。该区属典型的温带大陆性气候，冬季寒冷漫长，夏季温暖湿润，年平均气温为−5~1 ℃，年降水量为 300~500 mm，降水时空分布不均，主要集中在每年 6—8 月的生长季[3, 16, 20]。呼伦贝尔草原植被类型多样，主要分布有温性草甸草原、温性草原、低地草甸、山地草甸和沼泽草甸，是以针茅属 *Stipa* 等耐旱多年生草本植物为优势种群的草原生态系统。该地区不仅能为区域畜牧业提供优质牧草资源，还是维护中国北方生态安全的重要生态屏障。



审图号：蒙S(2026)128号。

图 1　研究区草地类型示意图

Figure 1　Grassland types in study area

1.2　数据来源与处理

1.2.1　MODIS-NPP　采用 MOD17A3HGF V6.1 产品作为呼伦贝尔草原植被净初级生产力的实际值，空间分辨率为 500 m。该产品对全年所有 8 天合成的净光合作用 (PSN) 数据进行累加，获得年度 NPP。MOD17 NPP 产品已通过与全球 FLUXNET 通量数据的多轮验证，适合作为趋势监测与模型对比的参考依据[13]。因此，选取 2010 年和 2020 年 2 个年度的年合成 NPP 数据，为历史时期呼伦贝尔草原 NPP 的时空重构提供参考。

1.2.2　NOAA-NDVI　采用 NOAA-NDVI 产品表征呼伦贝尔草原的植被覆盖状况，时间跨度为 1981—2024 年，空间分辨率为 0.05°。该产品具有时间跨度长、空间覆盖广和数据标准化等优势，能够有效支撑区域植被生产力变化的时空分析。其中，1981—2013 年数据基于 NOAA-AVHRR 传感器，通过 AVHRR 地表反射率产品生成[21]，2014—2024 年数据基于 NOAA-VIIRS 传感器，通过 VIIRS 地表反射率产品生成[22]。

1.2.3　*气象数据*　采用 ERA5-Land 气象再分析产品，包括降水 (P)、温度 (T)、光照 (SR) 和潜在蒸散发 (PET) 等气象数据，空间分辨率为 0.1°。ERA5-Land 由欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 基于模式模拟与全球观测数据融合生成，提供了全球尺度的时间连续且一致性较高的气候记录[23]。该产品提供日尺度气象数据，其中降水等流量型变量为日累积量，温度等非流量型变量为日平均值。根据分析所需，对日尺度数据进行了月尺度和年尺度的汇总与转换。

1.2.4　*地形数据*　采用 Copernicus 数字高程模型 (DEM) 数据，空间分辨率为 30 m。该产品基于 TanDEM-X 卫星任务获取的雷达数据生成，保留了地表建筑、植被等特征，并对水体、河流、海岸线以及特殊地物进行了优化处理，数据质量较高[24]。

1.2.5　*草地类型数据*　采用中国科学院地理科学与资源研究所发布的中国草地类型数据产品。该产品基于中国草地分类系统，将中国草地资源分为 18 个大类，其中，呼伦贝尔草原涉及温性草甸草原、温性草原、低地草甸、山地草甸和沼泽草甸等 5 个大类。

1.3　研究方法

1.3.1　*NPP 模拟方法*　以 2010 年和 2020 年的 MODIS NPP 数据为基准，分别构建适用于不同 NDVI 数据源的多元线性回归模型，重建 1981—2024 年呼伦贝尔草原 NPP 长时间序列数据。在草地分布范围内，采用随机均匀抽样方法布设 800 个样点，其中 70% 的样点用于模型训练，剩余 30% 用于模型精度验证。公式如下：

$$Y_{\mathrm{NPP}}=\beta_0+\beta_1\times X_{\mathrm{NDVI}}+\beta_2\times X_{\mathrm{P}}+\beta_3\times X_{\mathrm{T}}+\beta_4\times X_{\mathrm{SR}}+\beta_5\times X_{\mathrm{DEM}}+\epsilon。\tag{1}$$

式中，Y_{NPP}为 NPP，β_0为截距项，$\beta_1\sim\beta_5$为各因子的回归系数，ϵ为误差项，X_{NDVI}、X_{P}、X_{T}、X_{SR}和

X_{DEM}分别为 NDVI、降水、温度、光照和 DEM。为优化模型输入，在建模前对各变量与 NPP 之间的关系进行 Pearson 相关性分析，筛选影响显著的自变量。

在模型推广阶段，依据不同历史时期 NDVI 数据源 (AVHRR 与 VIIRS) 的差异，分别采用以 2010 年与 2020 年 MODIS-NPP 标定的模型参数，结合当年气象与植被观测数据，对 1981—2024 年 NPP 进行逐年模拟，最终实现呼伦贝尔草地 NPP 的连续时空重建。

1.3.2 NPP 变化趋势分析 采用 Sen's 斜率法计算草地 NPP 的变化趋势，并结合 Mann-Kendall 检验评估趋势显著性，具体公式参照文献 [25]。根据该方法，在 0.05 显著性水平下，本研究将 1981—2024 年研究区草地 NPP 变化趋势划分为 4 类，具体判定标准如表 1。

表 1 草地 NPP 趋势判定条件

Table 1 Criteria for determining grassland NPP trends

|Z|值	Sen's斜率	生态学含义
≥1.96	>0	NPP呈显著增加态势
≥1.96	<0	NPP呈显著减少态势
<1.96	>0	NPP虽有增加趋势，但统计意义不显著
<1.96	<0	NPP虽有下降趋势，但统计意义不显著

1.3.3 NPP 稳定性评估 采用变异系数量化草地 NPP 的年际波动，作为稳定性评价指标，其计算公式如下：

$$Y_{CV} = \frac{X_{\delta}}{X_{\mu}} \times 100\%。 \quad (2)$$

式中，Y_{CV}为变异系数 (%)，X_{δ}为 NPP 时间序列的标准差，表示年际波动程度，X_{μ}为 NPP 时间序列的平均值，表示多年平均水平。

变异系数反映了在单位均值下的相对变异程度，Y_{CV}越大，说明 NPP 年际波动越剧烈，生态系统稳定性越差；反之，则表明生态系统较为稳定。结合研究区实际，本研究分类标准设定为：Y_{CV}≤10% 为极稳定；10%< Y_{CV}≤20% 为稳定；20%< Y_{CV}≤30% 为中等波动；30%< Y_{CV}≤40% 为较大波动；Y_{CV}>40% 为不稳定。

1.3.4 干旱指数计算 选用 SPEI 作为干旱指标[26]。SPEI 的计算以水分盈亏量 (D) 为基础，具体公式如下：

$$D = X_P - X_{PET}。 \quad (3)$$

式中，X_P为降水量，X_{PET}为潜在蒸散发量。随后，将 D 的时间序列拟合为概率分布 (采用对数逻辑分布)，获得累积概率$F(D)$。为了便于不同时间尺度之间的干湿状况比较，将$F(D)$转换为标准正态分布值 (Z)，得到 SPEI，其标准化公式为：

$$Y_{SPEI} = \Phi^{-1}[f(x)]。 \quad (4)$$

式中，Y_{SPEI}为 SPEI 值，Φ^{-1}为标准正态分布的反函数。

通过上述标准化处理，不同时间尺度的干湿状况均可转化为统一的 Z 值，用于实现干旱等级的定量划分。SPEI 值越低，表明干旱程度越严重。综合考虑草地生态系统对季节—年度水分条件的响应，本研究采用 12 个月尺度 SPEI (SPEI-12) 作为干旱指标，并将上一年的 SPEI-12 与下一年的 NPP 进行相关性分析，以揭示 1980—2023 年干旱变化对草地 NPP 的滞后影响。此外，本研究按照 SPEI 分类体系对干湿等级进行了划分 (表 2)。这一分级标准能够将 SPEI 的连续值转化为具有生态意义的等级区间，有助于识别不同年份和区域的干湿状态特征。

表 2 SPEI 分类等级标准

Table 2 Classification criteria for SPEI

SPEI范围	干湿等级
≥2.00	极湿
1.50~<2.00	非常湿
1.00~<1.50	湿润
>−1.00~<1.00	正常
>−1.50~−1.00	轻度干旱
>−2.00~−1.50	中度干旱
≤−2.00	重度干旱

1.3.5 相关性分析 采用 Pearson 相关系数对 SPEI与 NPP 进行像元尺度的相关性分析。Pearson 相关系数用于衡量 2 个变量之间的线性关系强度与方向，相关系数的显著性通过 t 检验进行判定，确定气候干湿变化对草地 NPP 的统计关系。

2　结果分析

2.1　NPP 模拟结果验证

如图 2 所示：基于 AVHRR NDVI 和 VIIRS NDVI 的 NPP 模型的决定系数 (R^2) 分别达到 0.92 和 0.93，标准误分别为 5.61 和 5.35，表明 2 种模型均具有较好的预测能力。从模型验证的散点图来看，大部分点落在 1∶1 线附近，表明预测值与实测值的吻合程度较高。其中，基于 AVHRR NDVI 的模型在高值区域出现轻微的低估现象，而基于 VIIRS NDVI 的模型在整个预测范围内的预测误差相对均匀且较低。以上结果表明重构的 1981—2024 年历史 NPP 数据具有良好的可靠性，可为后续草原 NPP 变化分析提供可靠支撑。

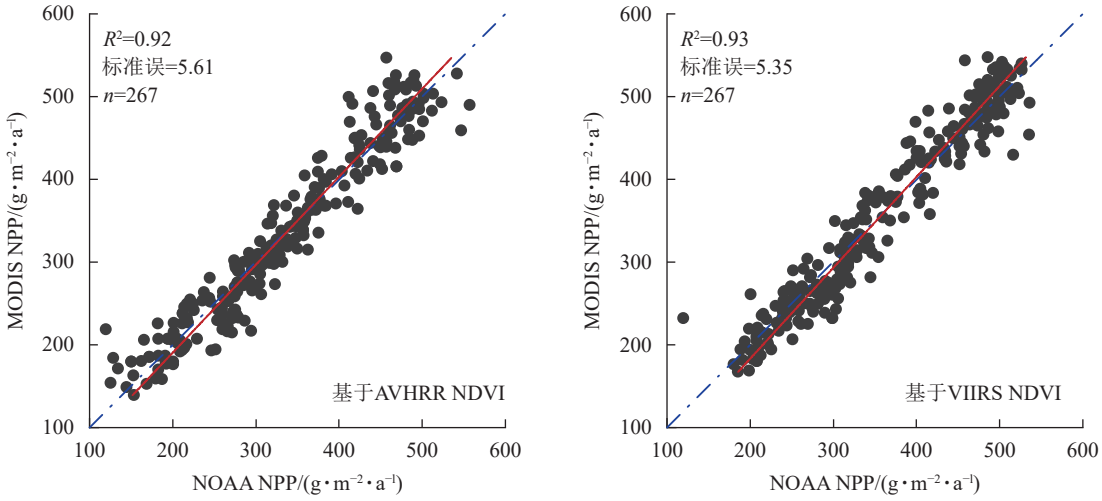


图 2　模型预测精度

Figure 2　Model prediction accuracy

2.2　呼伦贝尔草原 NPP 空间分布特征

如图 3A 所示：1981—2024 年呼伦贝尔草原 NPP 具有明显的空间分布特征，呈现由西向东递增的趋势，高值区主要分布在东部水分条件较好的隐域性草地，低值区则集中于气候干旱的温性草原地带。山地草甸年均 NPP 最高，达 440.79 g·m^{-2}·a^{-1}，其次是低地草甸，为 414.86 g·m^{-2}·a^{-1}，温性草甸草原为 403.41 g·m^{-2}·a^{-1}，沼泽草甸则略低，为 336.16 g·m^{-2}·a^{-1}，而温性草原最低，平均仅 284.62 g·m^{-2}·a^{-1}。整体上，水热条件较优越的地区，如东北部和河谷地带，表现出较高的 NPP；而西部和南部降水较少、干旱程度较高的地区，NPP 相对较低。

2.3　呼伦贝尔草原 NPP 年际变化特征

如图 3B 所示：1981—2024 年呼伦贝尔草原平均 NPP 整体呈显著下降趋势，年均下降速率为 0.81 g·m^{-2}·a^{-1}。过去 40 a 的多年平均 NPP 为 377.45 g·m^{-2}·a^{-1}，1984 年达最高 (465.47 g·m^{-2}·a^{-1})，而 2007 年最低 (267.39 g·m^{-2}·a^{-1})。总体来看，1980 年代至 1990 年代初期 NPP 较高且波动平稳，2000 年后呈持续下降态势，并在 2000 年及 2010 年前后出现 2 个明显低谷，表明草原生产力长期退化趋势显著。

空间上，呼伦贝尔草原 NPP 以显著下降为主，且具有明显的区域集中性与梯度变化特征 (图 3C)。Mann-Kendall 检验表明：约 50.32% 的区域经历了显著下降 (P＜0.05)，主要集中在中西部温性草原带，这些区域气候干旱化趋势明显，是呼伦贝尔草原生态退化最敏感的地带。相比之下，仅 0.70% 的区域呈显著上升，多位于东部湿润草甸草原及河谷地带，可能受益于水分条件改善或生态保护措施加强。其余区域中，12.59% 虽呈上升趋势但未达到显著水平，而 34.02% 为不显著下降，主要位于气候与土地利用过渡区域。总体而言，过去 40 a 呼伦贝尔草原 NPP 的下降呈现“西部强、中部次之、东部较弱”的空间格局，反映出区域性植被生产力普遍走低，生态系统功能呈持续性退化趋势。

如图 3D 所示：NPP 的年际波动强度同样具有明确的空间分异特征。其中，Y_{CV}≤10% 的极稳定区占总面积的 19.22%，主要分布在东部湿润草甸草原及丘陵林草过渡带。这些区域气候水热条件多年较为平

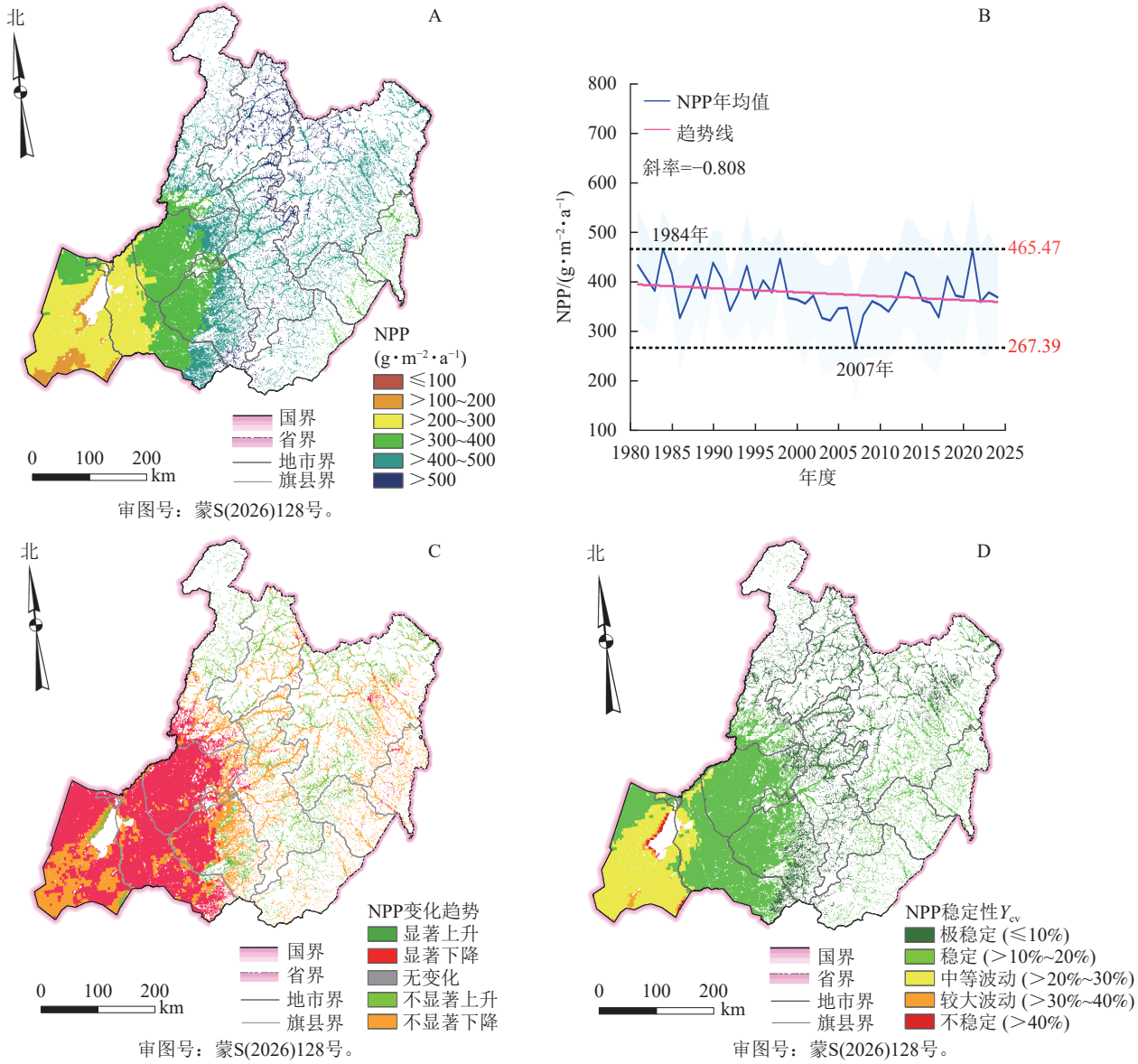


图 3 1981—2024 年呼伦贝尔草原 NPP 空间分布及其变化特征

Figure 3 Spatial distribution and change characteristics of NPP in Hulunbuir Grassland from 1981 to 2024

稳，且植被群落结构复杂、地表覆盖度高，使其具备较强的环境缓冲能力，能够有效抵御年际气候波动。稳定区 (Y_{CV} 为>10%~20%) 占 57.61%，是研究区分布最广的类型，集中在温性草原主分布带。该区域虽然整体呈 NPP 下降趋势，但年际波动幅度有限，说明植被生产力的降低更偏向于一种逐渐累积的长期退化过程，而非由极端气候事件驱动的突发性波动。中等波动区 (Y_{CV} 为>20%~30%) 占 19.73%，主要位于东中部向西部干旱草原的过渡地带，这些区域处于显著的水分梯度之中，对降水的年际差异高度敏感，导致 NPP 更容易出现阶段性升降。不稳定区 (Y_{CV}>30%) 不足 1%，零星分布于西部温性草原敏感区。该区域水热资源极度有限，植被覆盖度较低，对干旱年份响应迅速且幅度大，因而 NPP 年际波动强烈。

总体来看，呼伦贝尔草原 NPP 年际变化呈现趋势明显、波动适中的特征，即大范围的缓慢下降趋势伴随着相对稳定的年际波动。这种现象表明草原生态系统在持续受干旱胁迫下逐步退化的同时，尚保持一定的年际稳定性，没有发生剧烈的短期波动。

2.4 呼伦贝尔草原 NPP 与干旱的响应关系

如图 4 所示：1981—2024 年呼伦贝尔草原的 SPEI-12 总体表现为下降趋势，表明区域气候逐渐趋向干旱化。1980s—1990s 初期的 SPEI-12 多处于 0 附近，表明气候状况相对稳定，处于正常湿润范围。但

2000 年后，特别是 2008 年前后，SPEI-12 显著降低，部分年份甚至低于−1.0 的轻度干旱阈值，说明区域内干旱事件的发生频率和强度明显增加，气候呈现持续恶化趋势。近年来，SPEI-12 保持在负值区间，并呈现进一步下降的趋势，显示干旱状况逐渐加剧，水分盈亏状况呈持续负增长态势，干旱已成为制约区域生态环境的重要因素之一。

如图 5 所示：研究区大部分草原区域内的相关系数为正值，表明区域草原 NPP 与水分状况呈现正相关关系，即上一年的气候越湿润 (SPEI-12 高)，NPP 则越高，上一年的气候越干旱 (SPEI-12 低)，NPP 则越低。其中，温性草甸草原、山地草甸和沼泽草甸显著正相关的面积占比分别为 64.23%、60.08% 和 70.52%，显示出较强的敏感性。温性草原显著正相关面积占比为 52.82%，亦表现出较明显的干旱敏感性。而低地草甸显著相关比例较低，仅为 26.65%，未显著相关面积占比较大，为 47.37%，说明其对干旱的响应敏感度明显低于其他草地类型。这种空间差异明确显示出不同草地生态系统在面对干旱胁迫时的不同响应特征。

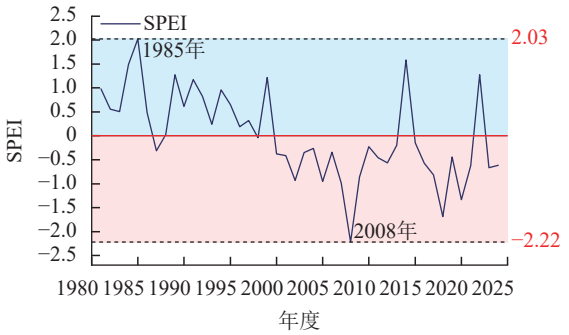


图 4　1981—2024 年呼伦贝尔草原干旱指数 (SPEI) 变化趋势

Figure 4　Change trends of the drought index (SPEI) in Hulunbuir Grassland from 1981 to 2024

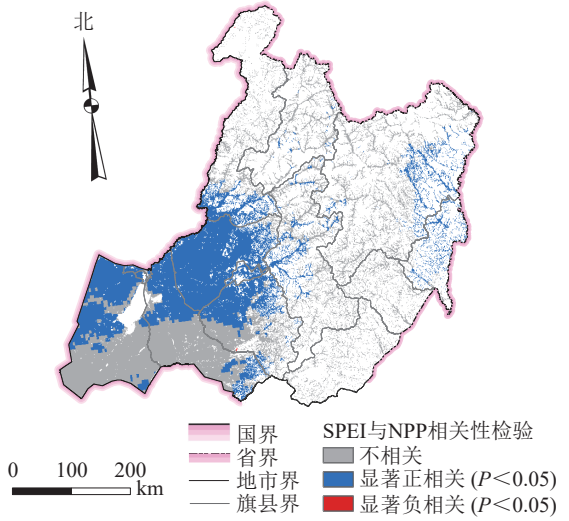


图 5　1981—2024 年呼伦贝尔草原 SPEI 与 NPP 相关性检验空间分布特征

Figure 5　Spatial distribution of the statistical significance of the correlation between SPEI and NPP in Hulunbuir Grassland from 1981 to 2024

3　讨论

3.1　呼伦贝尔草原 NPP 空间分布特征

自 20 世纪 80 年代以来，内蒙古草原的利用方式和保护政策发生了显著变化，包括草场制度改革、生态保护政策的实施以及牧民生产生活方式的转变[27]。在此背景下，草地 NPP 的长期连续观测对于评估生态系统健康状况、揭示其对气候变化和人类活动的响应机制具有重要意义[28−29]。然而，能够跨越这些关键历史阶段的时序连续性植被观测数据十分有限，制约了对草地生态系统长期演变过程的深入理解。本研究通过融合多源空间数据与多元线性回归方法，重建了 40 余年的呼伦贝尔草原 NPP 时空序列。相比仅依赖 MODIS 等短时间序列的研究[16−17, 30]，这一长序列不仅能够揭示生态系统在气候趋势变化下的慢性响应，也能捕捉极端干旱等快速扰动的影响过程，为理解从“渐进式退化”向“阈值型退化”转变的潜在机制提供了重要依据。

呼伦贝尔草原 NPP 呈现显著的东西梯度格局，这种空间异质性主要受水热组合条件调控。具体而言，东部地区受东亚季风影响降水充沛，加之河谷地形的集水效应，形成了适宜多年生草本植物生长的微环境，而西部温性草原受大陆性气候控制，降水年际变率大且蒸发强烈，导致水分成为限制 NPP 的主要因子。值得关注的是沼泽草甸 NPP (336.16 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$) 低于预期，可能与其特殊的水文条件有关，即季节性积水导致的厌氧环境抑制了根系呼吸，这与 YAN[31] 在三江平原湿地的研究发现具有相似机理。这种生态系统类型间的生产力差异，为制定差异化的草原管理策略提供了科学依据。

3.2　呼伦贝尔草原 NPP 时间变化特征

过去 44 a，呼伦贝尔草原的 NPP 总体以 0.81 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 的速率下降，且 2000 年后退化速度明显加快。空间上，约 50.32% 区域呈显著下降，其中退化热点区与历史载畜量高值区显著重叠，表明过度放牧可能放大了干旱化带来的不利影响。特别是在西部和中部温性草原，长期超载放牧导致植被矮化、优势种更替和土壤结构破碎化，从而降低植被的水分利用效率，提高其对干旱的敏感性。此类“气候—利

用复合胁迫”被认为是退化加速的重要驱动因素。尽管 NPP 总体呈下降趋势，但 57.61% 区域的变异系数保持在 10%~20%，表明系统仍具备一定的年际缓冲能力。这种“趋势下降但波动稳定”的现象可能与植被群落的补偿机制有关，例如优势物种替代、根系资源分配调整等[31−32]。然而，这一机制仅能延缓而无法逆转退化，当气候胁迫与土地利用压力叠加超过生态阈值时，系统可能发生不可逆的阶段性崩塌，这与 HOLLING[33] 所提出的韧性理论具有高度一致性。值得关注的是，在干旱草原和荒漠化敏感区，补偿机制已趋于弱化，高 CV 值区域的集中分布提示这些区域的生态系统稳定性正逼近阈值状态。

干旱化过程与 NPP 下降的高度耦合进一步证实了水分胁迫的主导作用。SPEI-12 数据显示 2000 年后干旱事件的频率和强度显著增强，并与 NPP 低谷期时序一致。空间相关性结果表明：温性草原、温性草甸草原、山地草甸和沼泽草甸内，NPP 与上一年干旱呈显著正相关的面积分别达 52.82%、64.23%、60.08% 和 70.52%，说明这些草地类型对水分变化高度敏感。而低地草甸仅有 26.65% 区域显著相关，表现出较强的抗旱能力，可能源于稳定的地下水补给和耐旱植物 (如羊草 *Leymus chinensis*) 占优势[34−35]。这种差异性反映了不同草地类型在面对气候变化时的“功能分化”，强调了制定区域草地管理策略时需充分考虑生态水文背景和植被适应能力。

总体来看，呼伦贝尔草原 NPP 的时空变化揭示了气候干旱化、历史过载放牧与生态政策干预之间的复杂耦合关系。未来应在草畜平衡政策基础上进一步强化动态调控，建立干旱—生产力耦合监测与预警机制，并根据草地类型差异实施分区管理，以提升草原生态系统的韧性和可持续性。

4 结论

本研究基于多源空间数据重构了 1981—2024 年呼伦贝尔草原 NPP 时空数据集。结果表明：基于 AVHRR 和 VIIRS 数据构建的 NPP 模型均具有较高精度 (R^2 分别为 0.92 和 0.93)。1981—2024 年，呼伦贝尔草原 NPP 总体呈由西向东递增的空间格局，其中山地草甸最高，温性草原最低；NPP 总体呈下降趋势，年均下降速率为 0.81 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，50.32% 区域表现为显著下降。同期 SPEI-12 总体呈下降趋势，2000 年以后干旱程度有所增强。NPP 与上一年 SPEI-12 总体呈正相关关系，不同草地类型对水分变化的响应存在明显差异。

5 参考文献

[1] RODAL M, LUYSSAERT S, BALZAROLO M, *et al*. A global database of net primary production of terrestrial ecosystems[J]. *Scientific Data*, 2025, **12**: 1534. DOI: 10.1038/s41597-025-05773-4.

[2] ZHENG Kai, LIU Xiang, ZOU Xiaoyu, *et al*. Impacts of climate variations and human activities on the net primary productivity of different grassland types in the Three-River Headwaters Region[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(3): 471. DOI: 10.3390/rs17030471.

[3] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2011, **66**(1): 47−58. ZHANG Geli, XU Xingliang, ZHOU Caiping, *et al*. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(1): 47−58. DOI: 10.11821/xb201101005.

[4] CONDON K V, CARROLL C J W, GRIFFIN-NOLAN R J, *et al*. Experimental drought consistently underestimates productivity responses to natural drought in four Central US grasslands[J]. *Oecologia*, 2025, **207**: 104. DOI: 10.1007/s00442-025-05746-9.

[5] POTTER C, PASS S, ULRICH R. Net primary production of ecoregions across North America in response to drought and wildfires from 2015 to 2022[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2024, **129**(4): e2023JG007750. DOI: 10.1029/2023JG007750.

[6] CHANG Shuhang, GAO Xiang, LI Qiuran, *et al*. Threshold response of net primary productivity to climate change in the Qilian Mountains (2001−2022)[J]. *Ecological Indicators*, 2025, **178**: 113900. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113900.

[7] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **51**(1): 74−88. DOI: 10.1016/0034-4257(94)00066-V.

[8] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, *et al*. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, **300**(5625): 1560−1563. DOI: 10.1126/science.1082750.

[9] GANG Chengcheng, ZHOU Wei, CHEN Yizhao, *et al*. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72**(11): 4273−4282. DOI: 10.1007/s12665-014-3322-6.

[10] ZHANG Yili, QI Wei, ZHOU Caiping, *et al*. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, **24**(2): 269−287. DOI: 10.1007/s11442-014-1087-1.

[11] REEVES M C, MORENO A L, BAGNE K E, *et al*. Estimating climate change effects on net primary production of rangelands in the United States[J]. *Climatic Change*, 2014, **126**(3/4): 429−442. DOI: 10.1007/s10584-014-1235-8.

[12] CHEN Baoxiong, ZHANG Xianzhou, TAO Jian, *et al*. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **189/190**: 11−18. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.01.002.

[13] RUNNING S W, NEMANI R R, HEINSCH F A, *et al*. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production[J]. *BioScience*, 2004, **54**(6): 547−560. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2.

[14] LI Xuejie, LI Ruren, SHA Zongyao. Modeling carbon uptake by vegetation of grassland ecosystems and its associated factors in China based on remote sensing[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, **10**: 1077885. DOI: 10.3389/feart.2022.1077885.

[15] WU Chengyong, CHEN Kelong, E Chongyi, *et al*. Improved CASA model based on satellite remote sensing data: simulating net primary productivity of Qinghai Lake basin alpine grassland[J]. *Geoscientific Model Development*, 2022, **15**(17): 6919−6933. DOI: 10.5194/gmd-15-6919-2022.

[16] 于勇, 冯朝阳, 陈艳梅, 等. 基于改进光能利用率模型呼伦贝尔植被净初级生产力时空格局[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(3): 154−159. YU Yong, FENG Chaoyang, CHEN Yanmei, *et al*. The spatial and temporal patterns of vegetation net primary productivity (NPP) in Hulunbeier based on improved light utilization model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, **27**(3): 154−159. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2013.03.029.

[17] 沈贝贝, 丁蕾, 李振旺, 等. 呼伦贝尔草原净初级生产力时空变化及气候响应分析[J]. 草业学报, 2019, **28**(5): 1−14. SHEN Beibei, DING Lei, LI Zhenwang, *et al*. Analysis of spatio-temporal changes and climate-response of net primary production in Hulunbuir grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, **28**(5): 1−14. DOI: 10.11686/cyxb2018288.

[18] CRABTREE R, POTTER C, MULLEN R, *et al*. A modeling and spatio-temporal analysis framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(7): 1486−1496. DOI: 10.1016/j.rse.2008.12.014.

[19] ZHANG Yonge, ZHAO Yang, CHEN Qingwei, *et al*. Capacity of forests and grasslands to achieve carbon neutrality in China[J]. *Forests*, 2024, **15**(6): 1060. DOI: 10.3390/f15061060.

[20] 张钦, 唐海萍, 崔凤琪, 等. 基于标准化降水蒸散指数的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2019, **39**(19): 7110−7123. ZHANG Qin, TANG Haiping, CUI Fengqi, *et al*. SPEI-based analysis of drought characteristics and trends in Hulun Buir grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(19): 7110−7123. DOI: 10.5846/stxb201807061481.

[21] TUCKER C J, PINZON J E, BROWN M E, *et al*. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(20): 4485−4498. DOI: 10.1080/01431160500168686.

[22] VARGAS M, MIURA T, SHABANOV N, *et al*. An initial assessment of Suomi NPP VIIRS vegetation index EDR[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(22): 12301−12316. DOI: 10.1002/2013JD020439.

[23] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, *et al*. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(9): 4349−4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.

[24] WESSEL B, HUBER M, WOHLFART C, *et al*. Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, **139**: 171−182. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.02.017.

[25] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, **100**: 172−182. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.014.

[26] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global

warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, **23**(7): 1696−1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

[27] ROBINSON B E, LI Ping, HOU Xiangyang. Institutional change in social-ecological systems: the evolution of grassland management in Inner Mongolia[J]. *Global Environmental Change*, 2017, **47**: 64−75. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2017.08.012.

[28] LIU Lingli, SAYER E J, DENG Meifeng, *et al*. The grassland carbon cycle: mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality[J]. *Fundamental Research*, 2023, **3**(2): 209−218. DOI: 10.1016/j.fmre.2022.09.028.

[29] CUI Linli, SHI Jun, XIAO Fengjin. Change and relationship between growing season metrics and net primary productivity in forestland and grassland in China[J]. *Carbon Balance and Management*, 2023, **18**(1): 26. DOI: 10.1186/s13021-023-00245-x.

[30] 张存厚, 王明玖, 张立, 等. 呼伦贝尔草甸草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟[J]. 草业学报, 2013, **22**(3): 41−50. ZHANG Cunhou, WANG Mingjiu, ZHANG Li, *et al*. Response of meadow steppe ANPP to climate change in Hulunbeir, Inner Mongolia−a simulation study[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, **22**(3): 41−50. DOI: 10.11686/cyxb20130306.

[31] YAN Fengqin. Effects of climate changes on net primary productivity variation in the marsh area of the Sanjiang Plain[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, **10**: 1002397. DOI: 10.3389/fevo.2022.1002397.

[32] MA Wenhong, HE Jinsheng, YANG Yuanhe, *et al*. Environmental factors covary with plant diversity−productivity relationships among Chinese grassland sites[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, **19**(2): 233−243. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2009.00508.x.

[33] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, **4**: 1−23. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.

[34] CHEN Tao, BAO Anming, JIAPAER G, *et al*. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **653**: 1311−1325. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.058.

[35] BAI Yongfei, HAN Xingguo, WU Jianguo, *et al*. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland[J]. *Nature*, 2004, **431**(7005): 181−184. DOI: 10.1038/nature02850.