

DOI:10.11686/cyxb2025159

http://cyxb.magtech.com.cn

金磊, 王彦平, 那日苏, 等. 日尺度下水热因子变化对呼伦贝尔草甸草原生产力的影响特征. 草业学报, 2026, 35(3): 1-12.

JIN Lei, WANG Yan-ping, Narisu, et al. Impacts of daily-scale hydrothermal factor variations on productivity of Hulun Buir meadow steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(3): 1-12.

# 日尺度下水热因子变化对呼伦贝尔草甸草原生产力的影响特征

金磊<sup>1</sup>, 王彦平<sup>1</sup>, 那日苏<sup>2\*</sup>, 包永生<sup>1</sup>, 张敬超<sup>1</sup>

(1. 呼伦贝尔市气象局, 内蒙古 呼伦贝尔 021008; 2. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

**摘要:**为了探讨草原生态系统生产力对水热因子的响应机制,以呼伦贝尔草甸草原为研究对象,利用1990—2023年日尺度气温、降水数据与草地生产力观测数据,采用窗口设置,量化不同时间尺度水热波动特征,结合偏最小二乘回归(PLSR)模型,并通过逐步回归解析草地地上净初级生产力对水热因子的响应机制。结果表明:1)1990—2023年间,研究区年均气温与降水量分别以 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1.05\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度上升,但草地地上净初级生产力(ANPP)显著下降( $2.17\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ),相同窗口期降水比气温对ANPP的综合解释能力更强,表明暖干化导致水热失衡是生产力衰减的主因。2)识别出7月10—29日( $R^2=0.308$ )、9月12—21日( $R^2=0.206$ )降水关键期与9月10日—10月7日( $R^2=0.273$ )、6月30日—7月19日( $R^2=0.280$ )、4月23日—5月4日( $R^2=0.202$ )气温关键期,交互作用可解释79.5%的ANPP年际变异( $P<0.001$ )。3)冬季气温升高对ANPP产生微弱正效应(标准化回归系数 $\beta=0.0039\sim 0.0057$ ),但夏季降水主导机制更为显著。4)研究区域对短期水分波动的敏感性高于温度,水热因子在重叠期(如7月10—19日)虽存在协同效应,但无显著交互作用(方差膨胀因子,  $\text{VIF}>10$ )。本研究量化了日尺度水热因子的动态响应过程,为半干旱区草地恢复提供了高分辨率管理窗口。

**关键词:**日尺度水热因子;草甸草原;地上净初级生产力;偏最小二乘回归;关键窗口期

## Impacts of daily-scale hydrothermal factor variations on productivity of Hulun Buir meadow steppe

JIN Lei<sup>1</sup>, WANG Yan-ping<sup>1</sup>, Narisu<sup>2\*</sup>, BAO Yong-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Jing-chao<sup>1</sup>

1. Hulun Buir Meteorological Bureau, Hulun Buir 021008, China; 2. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

**Abstract:** This study investigated the response mechanism of grassland ecosystem productivity to hydrothermal factors in the Hulun Buir meadow steppe. Using daily-scale air temperature and precipitation data and grassland productivity observation data from 1990 to 2023, the characteristics of water and heat fluctuations across different time scales were quantified through the application of a time-window approach. We utilized a partial least squares regression (PLSR) model and analyzed the response mechanisms of grassland aboveground net primary productivity (ANPP) to water and heat factors using stepwise regression. The results indicate that: 1) Although the average annual air temperature and precipitation in the study area increased at rates of  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}$  and  $1.05\text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ , respectively, ANPP showed a significant decline ( $2.17\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) during 1990—2023. Compared to air

收稿日期:2025-04-24;改回日期:2025-06-04

基金项目:国家自然科学基金(42461007)和内蒙古自治区自然科学基金(2024LHMS04012,2023QN04013)资助。

作者简介:金磊(1981—),男,内蒙古呼伦贝尔人,高级工程师,本科。E-mail: kinghlr@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: nars2022@163.com

temperature, precipitation within the same temporal window has a stronger explanatory relationship with *ANPP*, indicating that the water-heat imbalance induced by warming and drying is the principal factor contributing to the decline in productivity. 2) Critical periods were identified for both precipitation (July 10–29,  $R^2=0.308$ ; September 12–21,  $R^2=0.206$ ) and temperature (September 10–October 7,  $R^2=0.273$ ; June 30–July 19,  $R^2=0.280$ ; April 23–May 4,  $R^2=0.202$ ). The interaction between these hydrothermal factors accounted for 79.5% of the interannual variability in *ANPP* ( $P<0.001$ ). 3) Although winter warming has a weak effect on *ANPP* (standardized regression coefficients,  $\beta=0.0039-0.0057$ ), summer precipitation plays a more decisive role in driving productivity dynamics. 4) Short-term variations in water availability have a stronger influence on the study area than temperature fluctuations. While a synergistic response to hydrothermal factors is present during the overlapping period (such as July 10–19), no significant interaction between them was detected (variance inflation factor,  $VIF>10$ ). This study quantitatively analyzes the dynamic responses of hydrothermal factors on a daily scale, providing a high-resolution management framework to support grassland restoration in semi-arid regions.

**Key words:** daily-scale hydrothermal factors; meadow steppe; aboveground net primary productivity; partial least squares regression; critical temporal windows

全球气候变化已成为21世纪最严峻的环境挑战之一,显著影响着陆地生态系统的结构与功能<sup>[1]</sup>。草原作为陆地生态系统的重要组成部分,约占全球陆地面积的40%,其生产力动态对气候变化尤为敏感<sup>[2-3]</sup>。水热因子(气温与降水)作为气候变化的直接驱动要素,通过调节植物光合作用、呼吸代谢及养分循环等过程,深刻影响着草原生态系统的碳汇能力与稳定性<sup>[4-6]</sup>。然而,现有研究多聚焦于年、季节或月尺度的气候效应分析<sup>[7-8]</sup>,对日尺度下水热因子的动态响应机制仍缺乏系统认知,尤其是半干旱区草甸草原这类生态脆弱区。呼伦贝尔草甸草原地处中蒙俄交界带,是欧亚草原带东缘的典型代表,兼具重要的生态屏障功能与畜牧业经济价值<sup>[9-10]</sup>。近年来,该区域气候暖干化趋势加剧,草地退化问题日益突出<sup>[11-12]</sup>,亟需厘清日尺度水热波动对草地生产力的影响特征,为区域生态恢复与适应性管理提供科学依据。

在气候变化背景下,气温与降水的协同或拮抗效应显著影响草地生产力。研究表明,青藏高原高寒草原生长季早期升温可促进植被返青,但持续高温可能加剧水分胁迫,抑制生物量积累<sup>[13-14]</sup>。黄土高原的研究则发现,降水量的增加对半干旱草地生产力的提升具有决定性作用,但其效应受降水分配均匀度的调节<sup>[15-16]</sup>。然而,这些结论多基于月或季节尺度的统计分析,难以揭示短时间尺度(如日)水热波动对植物生理过程的即时影响。例如,单日极端高温对种子萌发产生阻碍作用,而连续多日降水则可通过改善土壤水分条件促进根系吸收<sup>[17-18]</sup>。此外,不同时间窗口的水热因子对生产力的累积效应存在显著差异,已有研究多采用固定窗口(如30 d)进行分析<sup>[19-21]</sup>,缺乏多窗口动态比较,限制了关键期的精准识别。

呼伦贝尔草甸草原属中温带大陆性气候,冬季严寒漫长,夏季短暂湿润,年际水热变异显著<sup>[22-24]</sup>。已有研究表明,该区域草地生产力与生长季降水量呈正相关,但与年均温的关系存在争议<sup>[25-26]</sup>。这些研究多基于年际数据,未能解析日尺度水热波动对不同季节草地生产力的影响机制。例如,春季融雪期气温骤升可能加速土壤解冻,促进早期生长,但若伴随降水不足,则可能加剧春季干旱胁迫<sup>[27]</sup>。此外,夏季极端降水事件可能通过改变土壤渗透性影响根系发育,其效应取决于降水强度与持续时间<sup>[28]</sup>。因此,系统化不同时间窗口下水热因子的相对贡献,是揭示该区域草地生产力响应机制的关键。

本研究以呼伦贝尔草甸草原为对象,基于1990–2023年日尺度气象数据与草地生产力观测数据,采用滑动窗口与偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)相结合的方法,旨在:1)揭示气温与降水在日尺度上的动态变化特征;2)识别影响草地生产力的水热关键期及其时间窗口效应;3)解析水热因子的协同作用机制。研究结果可为优化草地适应性管理策略,提升气候变化背景下草原生态系统的韧性提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究试验场地位于内蒙古呼伦贝尔市鄂温克国家农业气象试验站野外观测场(中心坐标:119°25′17″ E, 49°00′07″ N;海拔 748.8 m),属中温带大陆性气候区。区域气候特征如下(1990—2023 年平均值):年平均气温  $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1 月均温  $-25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (极端最低温  $-43.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),7 月均温  $21.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (极端最高温  $40.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ );年均降水量 332.1 mm,降水年际变率的变异系数(coefficient of variation, CV)为 27.7%;年均日照时数 2855.0 h,年均风速  $2.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,无霜期 141 d。观测区地形以浑圆丘陵为主,平均坡度  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,成土母质为第四纪沉积物,土壤类型以黑钙土(chernozem)和暗栗钙土(dark kastanozem)占主导。植被为典型草甸草原,建群种包括羊草(*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*),伴生种为冷蒿(*Artemisia frigida*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)等<sup>[29]</sup>。

### 1.2 试验设计及野外观测

草地地上净初级生产力(aboveground net primary productivity, ANPP)数据通过野外样方法获取<sup>[30]</sup>。观测时间为 1990—2023 年每年 8 月末(植被生长高峰期),观测地段选在天然刈割草场,所处地形、地势、土壤及牧草的种类和生产水平等能代表该地区草原类型,植物分布均匀(图 1)。地段与大气候观测场的地形和其他环境因素基本相同,具有平行观测条件,周围无其他因素影响。为防止家畜采食破坏,用铁丝网围成正方形,面积  $10000\text{ m}^2$  ( $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ )。秋季观测结束后,为了保持观测地段的代表性,将围栏内的牧草进行放牧采食,保持植物多样性和利用率与围栏外一致。

将围住的观测地段划分为 4 个观测区(A、B、C、D)作为 4 个重复(图 1)。每个观测区又分为 4 个观测小区(1、2、3、4),一年用 1 个观测小区( $25\text{ m}\times 25\text{ m}$ ),循环周期为 4 年。观测具体流程为:在观测样地内,事先做一个内面积为  $1\text{ m}^2$  的方框( $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ ),观测时将方框平整、垂直放在测点上,使方框两侧的整株草隔开,齐地面刈割样方内地上生物量,编号放入布袋后称重(精度  $0.1\text{ g}$ )。鲜草称重在  $0.5\text{ h}$  内进行,后  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干称重,以此计算该观测小区单位面积地上部分最大干物质质量,4 个重复取平均值(保留一位小数),作为该草地 ANPP( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。

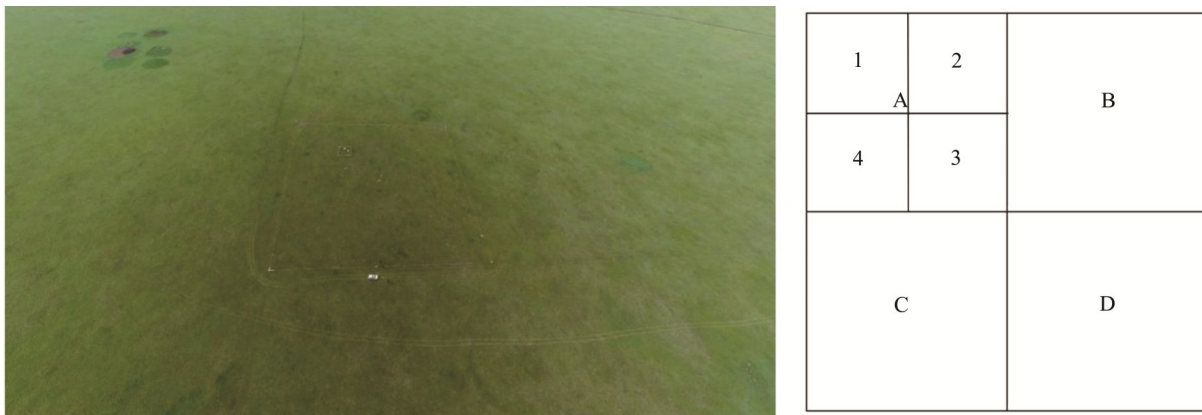


图 1 野外观测场地航拍及观测区划分

Fig. 1 Aerial image of the field observation site and observation zone division

### 1.3 气象数据来源及方法

本研究采用 1990—2023 年气象观测数据(日平均气温与降水量)及草地生产力数据,数据源为鄂温克族自治旗国家基本气象站和国家级农业气象试验站。气象数据预处理方法如下<sup>[31]</sup>:

气温数据:采用简单移动平均(simple moving average, SMA)平滑日尺度波动,窗口设置为 1(当日, T-0)、5(T-5)、10(T-10)、20(T-20)、30(T-30)和 45 d(T-45),计算公式为:

$$SMA_t = \frac{X_t + X_{t-1} + \dots + X_{t-n+1}}{n} \quad (1)$$

式中:  $X_t$  为时间点  $t$  的气温值,  $n$  为窗口天数。

降水数据: 采用滑动窗口求和 (sliding window sum, SWS) 累积日降水量, 窗口设置同气温 (P-0、P-5、P-10、P-20、P-30、P-45), 计算公式为:

$$SWS_t = X_t + X_{t-1} + \dots + X_{t-n+1} \quad (2)$$

式中:  $X_t$  为时间点  $t$  的降水量,  $n$  为窗口天数。

数据分析采用偏最小二乘回归 (PLSR), 以生物量采收的前一年 9 月 1 日至当年 8 月 31 日 (365 d), 日尺度气温 ( $SMA_n$ ) 和降水 ( $SWS_n$ ) 为自变量, ANPP 为因变量。PLSR 通过提取潜在变量 (latent variables) 构建回归模型, 适用于高维共线性数据<sup>[32-34]</sup>, 关键输出指标包括: 变量重要性投影值 (variable importance in projection, VIP): 量化自变量对 ANPP 方差的解释贡献, 设定阈值  $VIP > 0.8$  以筛选关键变量<sup>[35]</sup>; 标准化回归系数 (standardized regression coefficients,  $\beta$ ): 反映消除量纲后自变量的相对影响强度, 正负值分别表示正/负向关联。

#### 1.4 数据处理

采用逐步回归法 (stepwise regression) 进一步解析水热因子的共同效应, 评价指标为: 显著性水平 ( $P < 0.05$ )、均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、多重共线性检验采用方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF), 所有变量的 VIF 均  $< 10$ 。采用 SPSS 25.0 对试验数据进行统计分析, 用 Origin 2021 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 气温、降水和 ANPP 的年际变化趋势

基于 1990—2023 年气象与生产力观测数据的趋势分析, 研究区年平均气温呈微弱上升趋势, 平均增幅为  $0.03 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $P=0.06$ ), 年降水量亦呈非显著增加趋势, 平均增幅为  $1.05 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $P=0.54$ ), 而 ANPP 表现为显著下降趋势 ( $P < 0.05$ ), 下降幅度为  $2.17 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。年际波动特征显示: 年平均气温为  $-1.9 \text{ } ^\circ\text{C}$  (2012 年)  $\sim 1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$  (2007 年), 年降水量为  $210.5 \text{ mm}$  (2007 年)  $\sim 591.2 \text{ mm}$  (2013 年), ANPP 为  $95.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (2017 年)  $\sim 321.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (1991 年)。值得注意的是, 2007 年作为气温峰值年 ( $1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) 与降水最低年 ( $210.5 \text{ mm}$ ), 其 ANPP 值为  $113.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 位列观测期内第 3 低位 (图 2)。

### 2.2 ANPP 对温度变化的响应

不同日尺度气温与 ANPP 的 PLSR 分析表明 (图 3), 随着气温窗口期增大对 ANPP 的综合解释能力有所下降 (表 1)。T-0 的  $VIP > 0.8$  的天数占全年总天数的 43% (157 d/365 d), 其中连续最长时段为 14 d (9 月 11—24 日)。10—12 月上旬 T-0 与 ANPP 正相关,  $VIP > 0.8$  的天数占该时段总天数的 84% (31 d/37 d), 而 6—8 月 T-0 与 ANPP 呈负相关,  $VIP > 0.8$  的天数占比为 92% (49 d/53 d)。T-5 标准化回归系数绝对值前 5 位的日期为 5 月 3 日 ( $\beta = -0.0230$ )、7 月 12 日 ( $\beta = -0.0228$ )、6 月 19 日 ( $\beta = -0.0223$ )、7 月 11 日

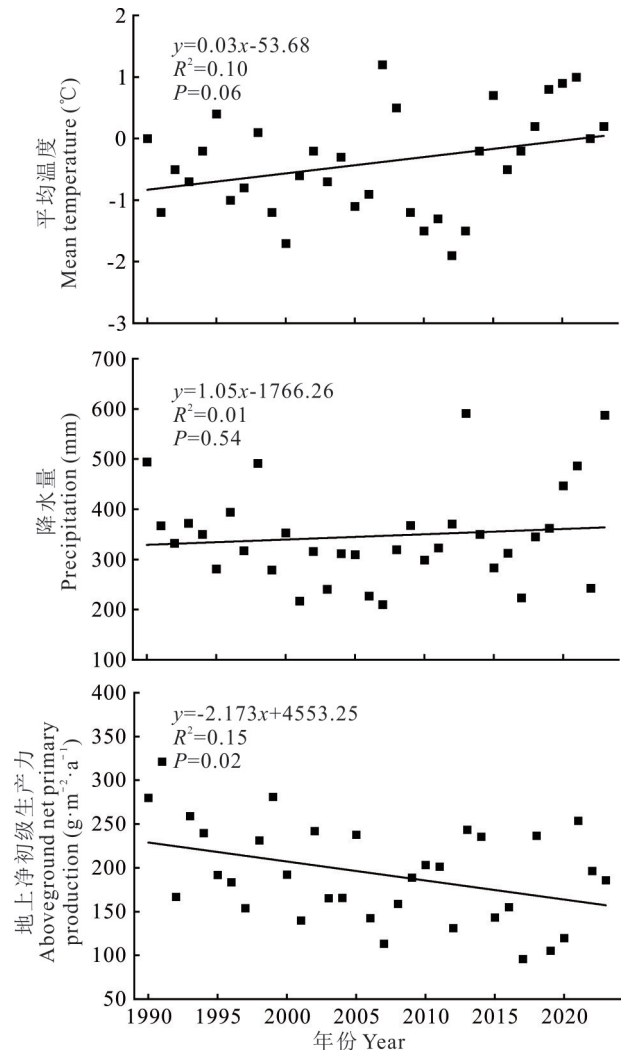


图 2 1990—2023 年研究区年平均气温、年降水量和地上净初级生产力年际变化

Fig. 2 Interannual variability of mean annual temperature, annual precipitation, and aboveground net primary productivity (ANPP) in the study area, 1990—2023

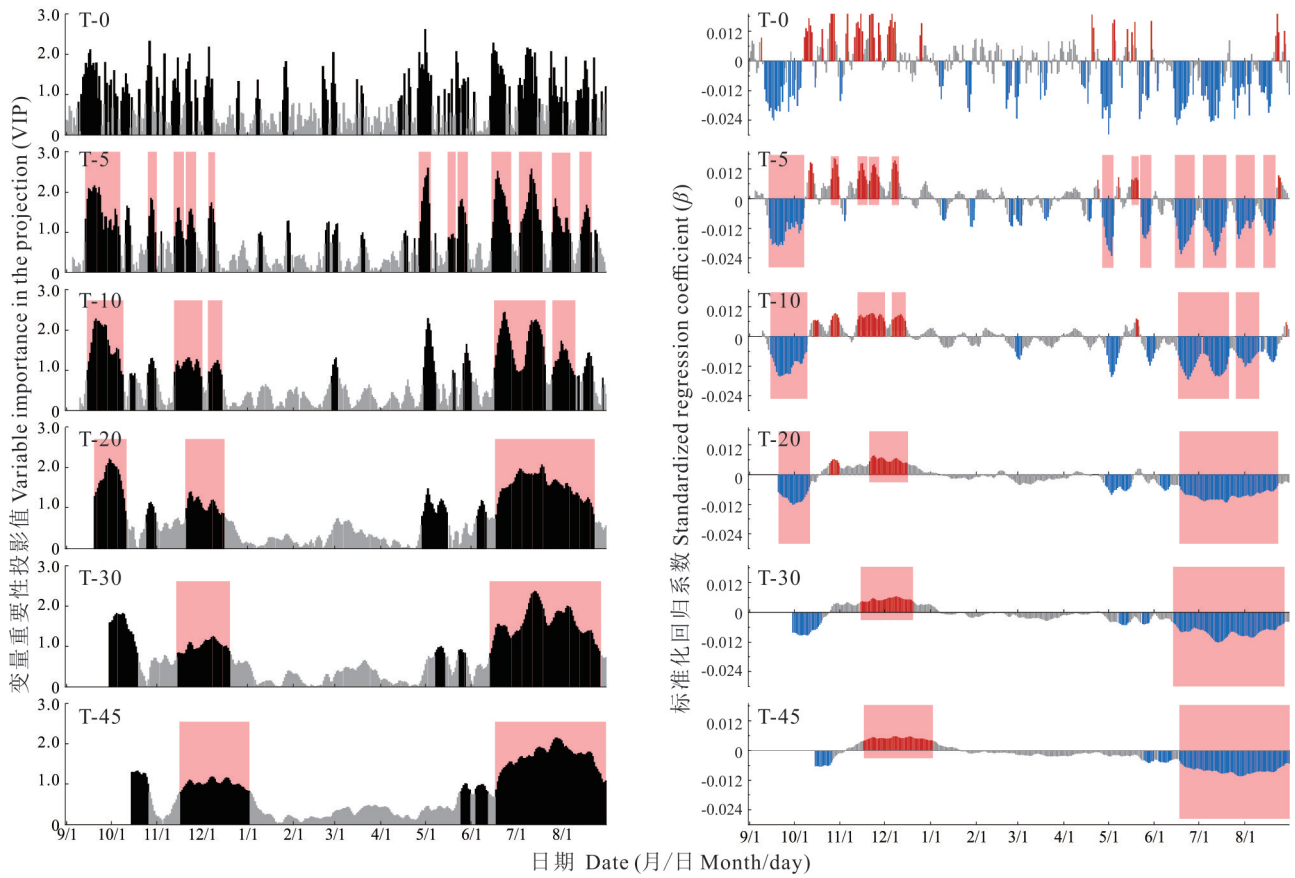


图3 1990–2023年研究区地上净初级生产力与不同日尺度平均气温的偏最小二乘回归分析

Fig. 3 Partial least squares regression (PLSR) between aboveground net primary productivity (ANPP) and multi-temporal daily air temperature averages in the study area, 1990–2023

图中黑色标记部分表示变量重要性投影值(VIP)>0.8;蓝色表示回归系数为负;红色表示回归系数为正;灰色表示VIP≤0.8;粉色方框内表示VIP>0.8且连续日数≥时间窗口长度的时段,省略当日(T-0或P-0)。下同。In the figure, the black markers indicate variable importance in projection (VIP)>0.8; the blue markers represent negative regression coefficients; the red markers denote positive regression coefficients; the gray markers signify VIP≤0.8; the pink boxes highlight periods where VIP>0.8 and the consecutive days are equal to or exceed the time window length, excluding the current day (T-0 or P-0). The same below.

( $\beta = -0.0215$ )、5月2日( $\beta = -0.0213$ ),均与ANPP呈负相关(VIP>0.8)关系。T-10标准化回归系数绝对值前5位的日期为6月24日( $\beta = -0.0174$ )、6月23日( $\beta = -0.0172$ )、5月3日( $\beta = -0.0163$ )、9月21日( $\beta = -0.0162$ )、6月25日( $\beta = -0.0161$ ),均与ANPP呈负相关(VIP>0.8)关系。

从季节(连续≥n的VIP>0.8的时段)气温效果分析(T-30~T-45),冬季(前一年11月~次年3月)气温与ANPP的相关性逐渐集中在正相关,且系数较低(T-45时段 $\beta = 0.0039 \sim 0.0057$ ),夏季(6~8月)气温与ANPP的负相关系数较高(T-45时段 $|\beta| = 0.0041 \sim 0.0103$ )。前一年秋季(9~10月)气温与ANPP负相关关系在1~20 d窗口期之间(T-20时段 $|\beta| = 0.0050 \sim 0.0120$ ),春季(4~5月)气温

表1 不同日尺度气温与地上净初级生产力偏最小二乘回归综合解释能力

Table 1 Overall explanatory power of partial least squares regression (PLSR) between aboveground net primary productivity (ANPP) and temperature across daily temporal scales

气温窗口 Temperature windows	$R^2$	均方根误差 Root mean square error (RMSE)	平均绝对误差 Mean absolute error (MAE)	样本量 Sample size (n)
T-0	0.821	23.113	19.196	34
T-5	0.697	30.044	24.517	
T-10	0.588	35.046	28.209	
T-20	0.475	39.556	31.754	
T-30	0.460	40.098	31.976	
T-45	0.426	41.338	32.956	

与ANPP相关关系在1~5 d窗口期,且T-5分析中出现3段连续 $\geq 5$  d的时段,1段为正相关(T-5时段 $\beta=0.0073\sim 0.0085$ ),2段为负相关(T-5时段 $|\beta|=0.0074\sim 0.0230$ ),表明气温与ANPP的关联方向和强度存在季节性差异。

### 2.3 ANPP对降水变化的响应

分析降水量与ANPP的关系结果显示(图4),随着降水窗口期增大对ANPP综合解释能力有所下降,相同窗口期降水比气温的拟合精度好(表1和表2)。P-0的VIP $> 0.8$ 的天数占全年总天数的46%(168 d/365 d),其中连续最长时段为9 d(9月10—18日)。根据标准化回归系数,降水与ANPP呈显著负相关(VIP $> 0.8$ )的时段在全年分布较分散,而6—8月P-0与ANPP呈显著正相关(VIP $> 0.8$ )的天数占比为73%(54 d/74 d)。P-5标准化回归系数绝对值前5位的日期为9月20日( $\beta=0.0378$ )、7月18日( $\beta=0.0317$ )、6月17日( $\beta=0.0317$ )、9月19日( $\beta=0.0308$ )、7月16日( $\beta=0.0302$ ),均与ANPP呈正相关(VIP $> 0.8$ )关系。P-10标准化回归系数绝对值前5位的日期为7月24日( $\beta=0.0308$ )、7月27日( $\beta=0.0285$ )、7月23日( $\beta=0.0284$ )、7月25日( $\beta=0.0281$ )、7月26日( $\beta=0.0271$ ),均与ANPP呈正相关(VIP $> 0.8$ )关系。

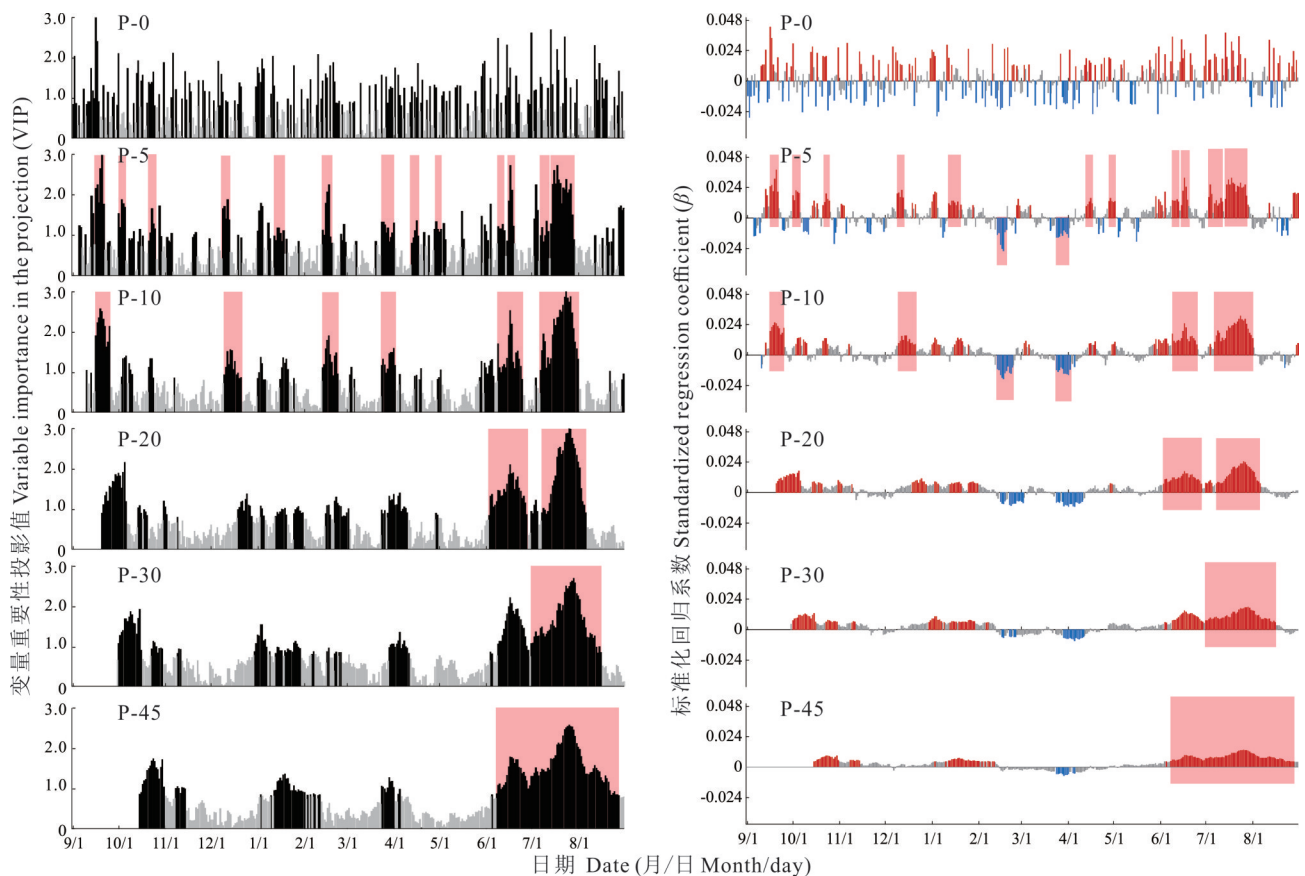


图4 1990–2023年研究区地上净初级生产力与不同日尺度降水量的偏最小二乘回归分析

Fig. 4 Partial least squares regression (PLSR) between aboveground net primary productivity (ANPP) and multi-temporal daily precipitation in the study area, 1990–2023

降水对ANPP的负相关关系出现在2—3月,且在0~10 d窗口期之间,相关系数较低(P-10时段 $|\beta|=0.0090\sim 0.0189$ ),其他月份降水与ANPP呈正相关关系。前一年秋季降水与ANPP正相关关系在1~10 d窗口期之间(P-10时段 $\beta=0.0161\sim 0.0254$ ),春季降水与ANPP正相关关系在1~5 d窗口期之间(P-5时段 $\beta=0.0094\sim 0.0158$ ),20~45 d窗口期中均是降水与ANPP的正相关,VIP $> 0.8$ 的连续时段逐渐集中于夏季,相同窗口下与ANPP的正相关系数较高(P-10时段 $\beta=0.0097\sim 0.0308$ )。

2.4 影响 ANPP 的温度和降水关键期分析

基于 PLSR 筛选标准 [ 变量重要性投影值 (VIP) > 0.8 且连续日数 ≥ 时间窗口长度 ], 本研究共识别出气温相关关键期 24 段 (图 3 粉色方框)、降水相关关键期 23 段 (图 4 粉色方框)。通过线性回归分析发现 (图 5), 12 段气温关键期与 ANPP 呈显著相关 ( $P < 0.05$ ) 关系, 其中 9 月 10 日 - 10 月 7 日 ( $R^2 = 0.273, P < 0.01$ ) 和 6 月 30 日 - 7 月 19 日 ( $R^2 = 0.280, P < 0.01$ ) 的回归模型解释力较高。降水关键期中, 8 个时段与 ANPP 显著相关 ( $P < 0.05$ ), 其中 7 月 10 - 29 日 ( $R^2 = 0.306, P < 0.01$ ) 和 9 月 12 - 21 日 ( $R^2 = 0.206, P < 0.01$ ) 的回归模型显著性较强。回归系数表明, 夏秋两季气温关键期与 ANPP 呈显著负相关关系 ( $\beta = -0.529 \sim -0.360, P < 0.05$ ), 而降水关键期与 ANPP 呈显著正相关 ( $\beta = 0.345 \sim 0.572, P < 0.05$ ) 关系。夏季气温关键期对 ANPP 的负向效应更为明显, 并导致 ANPP 出现极低值的范围较大, 而夏秋两季降水关键期的促进效应导致 ANPP 出现极高值的范围较大 (图 6)。

表 2 不同日尺度降水与地上净初级生产力偏最小二乘回归综合解释能力

Table 2 Overall explanatory power of partial least squares regression (PLSR) between aboveground net primary productivity (ANPP) and precipitation across daily temporal scales

降水窗口 Precipitation windows	$R^2$	均方根误差 Root mean square error (RMSE)	平均绝对误差 Mean absolute error (MAE)	样本量 Sample size (n)
P-0	0.891	18.044	14.815	34
P-5	0.742	27.715	22.172	
P-10	0.690	30.369	24.039	
P-20	0.597	34.627	27.532	
P-30	0.507	38.300	31.136	
P-45	0.407	42.012	34.520	

变量 Variable	开始日期 Start date (月/日/month/day)	结束日期 End date (月/日/month/day)	持续时间 Duration (d)	线性关系 Linear relationship	9月 September	10月 October	11月 November	12月 December	1月 January	2月 February	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August
T-5	9/10	10/7	28	$y = 340.271 - 17.008x$ $R^2 = 0.273$ $F = 12.008^{**}$	■											
	4/23	5/4	12	$y = 286.361 - 13.032x$ $R^2 = 0.202$ $F = 8.119^{**}$								■				
	6/11	6/28	18	$y = 459.764 - 13.648x$ $R^2 = 0.196$ $F = 7.796^{**}$											■	
	6/30	7/19	20	$y = 676.528 - 22.909x$ $R^2 = 0.280$ $F = 12.429^{**}$											■	
	7/22	8/7	17	$y = 534.933 - 16.582x$ $R^2 = 0.148$ $F = 5.556^*$											■	■
T-10	9/6	10/9	34	$y = 341.996 - 16.733x$ $R^2 = 0.203$ $F = 8.172^{**}$	■	■										
	6/8	7/21	44	$y = 660.420 - 23.221x$ $R^2 = 0.269$ $F = 11.747^{**}$											■	■
	7/17	8/10	25	$y = 560.564 - 17.786x$ $R^2 = 0.129$ $F = 4.775^*$											■	■
T-20	9/1	10/11	41	$y = 348.977 - 16.666x$ $R^2 = 0.147$ $F = 5.506^*$	■	■										
	5/30	8/23	86	$y = 690.997 - 25.560x$ $R^2 = 0.225$ $F = 9.283^{**}$												
T-30	5/16	8/27	104	$y = 789.808 - 32.071x$ $R^2 = 0.262$ $F = 11.352^{**}$												
T-45	5/5	8/31	119	$y = 793.440 - 33.822x$ $R^2 = 0.230$ $F = 9.535^{**}$												
P-5	9/12	9/21	10	$y = 172.008 + 1.673x$ $R^2 = 0.206$ $F = 8.306^{**}$	■											
	12/5	12/13	9	$y = 170.012 + 13.551x$ $R^2 = 0.125$ $F = 4.561^*$				■								
	7/10	7/29	20	$y = 139.189 + 0.910x$ $R^2 = 0.306$ $F = 15.535^{**}$											■	■
P-10	5/31	6/25	26	$y = 164.103 + 0.719x$ $R^2 = 0.119$ $F = 4.340^*$											■	■
	6/28	8/1	35	$y = 133.592 + 0.582x$ $R^2 = 0.262$ $F = 11.378^{**}$											■	■
P-20	6/19	8/6	49	$y = 149.124 + 0.306x$ $R^2 = 0.119$ $F = 4.311^*$											■	■
P-30	6/2	8/16	76	$y = 137.387 + 0.283x$ $R^2 = 0.152$ $F = 5.722^*$											■	■
P-45	4/26	8/28	125	$y = 131.424 + 0.244x$ $R^2 = 0.141$ $F = 5.272^*$											■	■

图 5 地上净初级生产力与不同日尺度平均气温和降水量关键期的线性回归分析

Fig. 5 Linear regression analysis between aboveground net primary productivity (ANPP) and critical periods of multi-temporal daily air temperature averages and precipitation

图中黑色标记部分表示两个主要平均气温和降水关键期时长; 灰色表示剩余平均气温和降水关键期时长; \*\*表示在 0.01 水平显著, \*表示在 0.05 水平显著。In the figure, the black markers indicate the duration of the two primary critical periods for mean temperature and precipitation; the gray markers represent the remaining critical periods for mean temperature and precipitation; \*\* denotes significance at the 0.01 level, and \* indicates significance at the 0.05 level.

2.5 温度和降水关键期的共同作用分析

为解析气温与降水对草地生产力的共同作用, 本研究采用逐步回归方法, 从 12 段气温关键期和 8 段降水关键期 (均与 ANPP 显著相关,  $P < 0.05$ ) 中筛选变量 (图 5)。最终模型保留 3 段气温变量和 2 段降水变量, 回归模型解

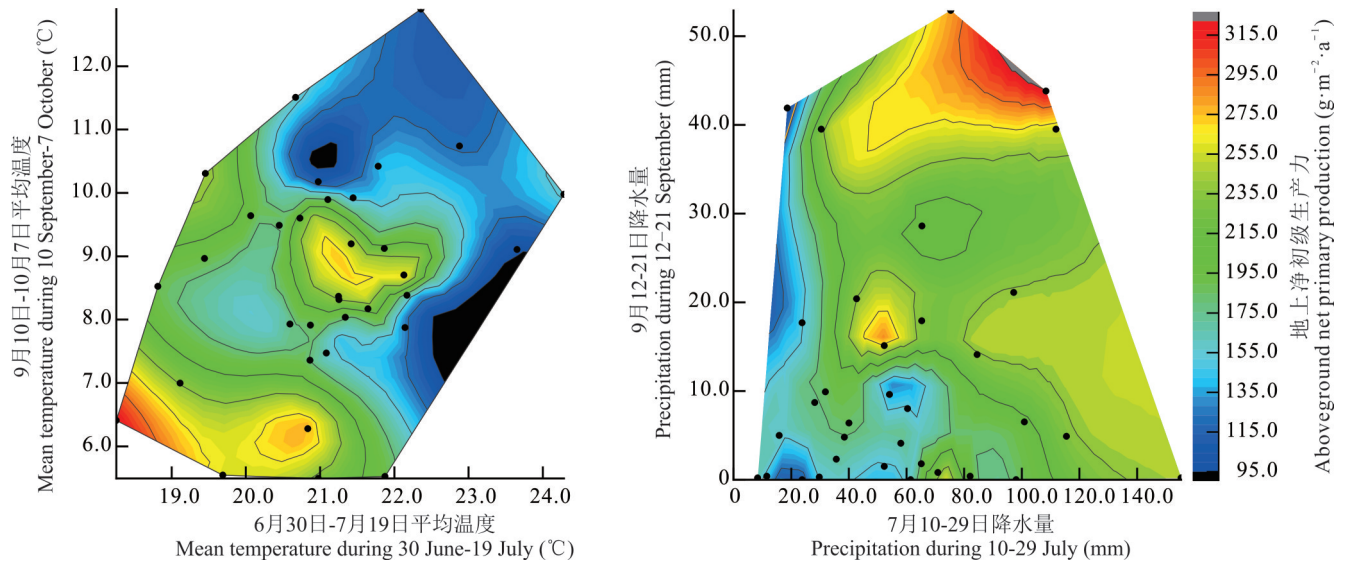


图6 地上净初级生产力对不同关键期平均气温和降水量的响应

Fig. 6 Responses of aboveground net primary productivity (ANPP) to critical periods of mean air temperature and precipitation

释力极显著 ( $R^2=0.795$ ,  $P<0.001$ ,  $RMSE=24.68$ ,  $MAE=19.008$ , 图7)。标准化回归系数绝对值排序为: 7月10-29日降水总量 ( $\beta=0.385$ ) > 9月12-21日降水总量 ( $\beta=0.345$ ) > 9月10日-10月7日气温 ( $\beta=-0.335$ ) > 4月23日-5月4日气温 ( $\beta=-0.289$ ) > 6月30日-7月19日气温 ( $\beta=-0.216$ )。气温与降水关键期存在两段重叠时段(9月12-21日、7月10-19日)(图5黑色标记), 其中气温 ( $R^2=0.163\sim 0.253$ ) 与ANPP呈显著负相关 ( $P<0.01$ ) 关系, 而降水量 ( $R^2=0.181\sim 0.190$ ) 与ANPP呈显著正相关 ( $P<0.01$ ) 关系。然而, 将重叠时段的气温与降水变量同时纳入模型时, 二者均被逐步回归舍弃[方差膨胀因子(VIF)>10], 提示多重共线性可能掩盖独立效应, 表明二者在重叠期内对ANPP的统计关联具有协同性, 但无显著交互作用。这一结果支持前人关于7月降水量对ANPP贡献最大的结论<sup>[26]</sup>, 进一步验证半干旱区水分主导的生产力调控机制。

### 3 讨论

#### 3.1 水热因子驱动机制的空间分异特征

本研究揭示草地生产力对水热因子的响应存在显著的地理异质性<sup>[36]</sup>。在干旱梯度上, 控制因子呈规律性转变, 这一规律在跨区域对比中表现显著。极端干旱区: 新疆草地净初级生产力(net primary productivity, NPP) 73.6%的变异由夏秋季降解释释( $r=0.50$ ), 温度影响未达显著水平( $r=0.07$ )<sup>[37]</sup>, 印证水分绝对控制理论; 半干旱草原: 本研究的降水和ANPP正相关( $r=0.61$ )与锡林郭勒草原情况高度一致<sup>[38]</sup>, 但呼伦贝尔ANPP对增温的负响应( $r=-0.53$ )与青海湖草甸正响应( $r=0.57$ )形成鲜明对比<sup>[35]</sup>, 可能与海拔梯度导致的积温有效性差异(749 m vs. 3140 m)密切相关。

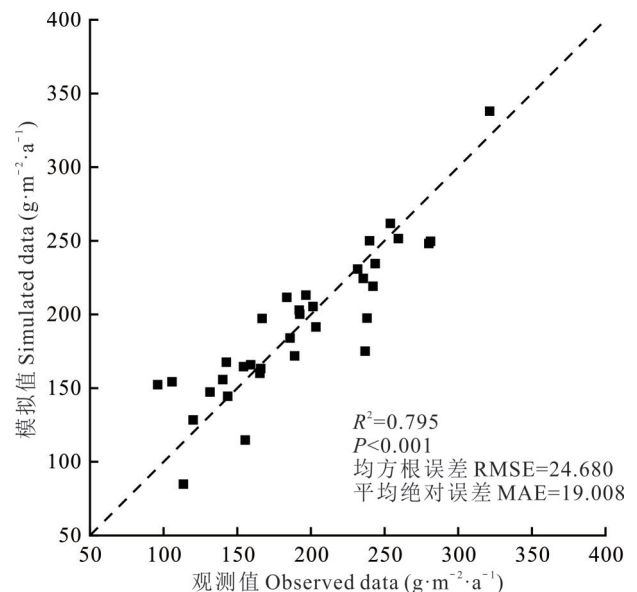


图7 气温和降水关键期模拟地上净初级生产力逐步回归精度检验

Fig. 7 Accuracy validation of stepwise regression for modeled aboveground net primary productivity (ANPP) using critical period air temperature and precipitation

### 3.2 生态系统类型对水热响应的调节作用

不同生态系统通过特定途径调控水热效应。温带草甸草原:内蒙古草原总初级生产力(gross primary productivity, GPP)年际变异中,生长季初期土壤湿度解释率达 68.3%<sup>[39]</sup>,中俄蒙边境草地地表高温( $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下使归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)减少了 36%。土壤湿度在持续热点区域有更强烈的影响<sup>[40]</sup>,表明水热效应通过土壤墒情介导的间接作用强于直接气候效应;高寒草甸系统:青海省高寒草地系统存在明确的水热阈值响应,当年均温超过( $5.5\pm 0.8$ ) $^{\circ}\text{C}$ 或降水低于( $387.0\pm 45.6$ )mm 时,NPP 的敏感性增大<sup>[41]</sup>。海北高寒草甸年降水与 ANPP 相关系数达 0.906,而与年均温无显著相关性( $P>0.1$ )<sup>[42]</sup>,本研究关键期降水主导模式( $R^2=79.5\%$ )与其形成互补证据链;农耕交错带:东北三省气候“暖湿化”(升温  $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ +降水增加  $10\%\sim 20\%$ )使蒸散生产力提升  $8.3\%\sim 16.5\%$ ,而“冷干化”导致等量下降<sup>[43]</sup>,凸显水热协同的非线性特征<sup>[44]</sup>。

### 3.3 区域对比的生态学意义

基于上述发现,草地生产力对气候变化的响应存在显著的地理格局<sup>[45]</sup>,在干旱指数(aridity index, AI) $<0.5$  的区域,降水始终是首要控制因子,而湿润区(AI $>0.65$ )则转为温度主导<sup>[46]</sup>。这为建立基于干湿分区的草地适应性管理策略提供了理论依据,特别是在气候变化背景下,呼伦贝尔等半干旱草原的水分调控应成为生态恢复的核心靶点。

## 4 结论

本研究揭示了呼伦贝尔草甸草原生产力对日尺度水热因子动态响应的关键特征:

1)气候变化与生产力趋势。1990—2023 年,研究区年平均气温与降水量呈微弱上升趋势(增温  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ , 增雨  $1.05\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ),但 ANPP 显著下降( $2.17\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $P<0.05$ ),表明暖干化气候背景下水热失衡是生产力衰减的重要诱因。

2)时间窗口效应与季节分异。当日及前 5 d 尺度的水热因子对 ANPP 解释力较强,季节响应差异显著:夏季(6—8 月)高温抑制 ANPP(VIP $>0.8$ ,  $\beta=-0.335$ ),而同期降水增加显著促进生产力( $\beta=0.385$ );冬季气温升高通过积雪消融改善土壤水分,对 ANPP 产生微弱的正效应。关键期分析表明,7 月 10—29 日( $R^2=0.308$ )、9 月 12—21 日( $R^2=0.206$ )降水关键期与 9 月 10 日—10 月 7 日( $R^2=0.273$ )、6 月 30 日—7 月 19 日( $R^2=0.280$ )、4 月 23 日—5 月 4 日( $R^2=0.202$ )气温关键期,共同作用可解释 79.5% 的年际变异( $P<0.001$ )。

3)水热协同作用机制。夏季降水通过改善土壤墒情驱动生产力提升,而秋季气温升高通过降低土壤底墒抑制第 2 年的 ANPP,反映水热因子的时间窗口效应具有显著季节性特点。水热协同分析显示,夏季降水主导生产力变化,而气温与降水在重叠期的交互效应不显著(VIF $>10$ ),表明半干旱草原对短期水分波动的敏感性高于温度。

本研究量化了日尺度水热因子的动态响应过程,为半干旱区草地恢复提供了高分辨率管理窗口。本研究存在未量化极端气候事件的影响权重、土壤微生物等生物因子未被纳入模型等局限性。建议后续研究构建包含极端指数的水热响应模型,开展多营养级效应试验。

## 参考文献 References:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: The physical science basis. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.
- [2] Yan H, Xie G, Niu Z, *et al.* Impact of human activities and climate change on grassland productivity in Xilingol League. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(5): 1134—1146.
- [3] Zhou X F, Peng B B, Zhou Y, *et al.* Quantifying the influence of climate change and anthropogenic activities on the net primary productivity of China's grasslands. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4844.
- [4] Huang Y, Song H Q, Wu H, *et al.* Spatiotemporal dynamics of vegetation carbon use efficiency and its relationship with hydrothermal factors in Inner Mongolia Autonomous Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(5): 358—368.  
皇彦, 宋海清, 吴昊, 等. 内蒙古自治区植被碳利用效率时空动态及其与水热因子的关系. *水土保持通报*, 2024, 44(5):

358—368.

- [5] Luo S H, Liu X Y, Meng B P, *et al.* A study of functional group diversity and productivity of alpine grassland in Qilian Mountain National Park. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 14—26.  
罗顺华, 刘新宇, 孟宝平, 等. 祁连山国家公园高寒草地功能群多样性与生产力研究. *草业学报*, 2025, 34(6): 14—26.
- [6] Chen C, Jing C Q, Zhao W K, *et al.* Grassland quality response to climate change in Xinjiang and predicted future trends. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(12): 1—16.  
陈宸, 井长青, 赵苇康, 等. 新疆草地质量对气候变化的响应及其变化趋势. *草业学报*, 2022, 31(12): 1—16.
- [7] Kuang M M, Zhou G S, Zhou M Z. Environmental driving mechanism of species diversity and productivity in Tibetan alpine grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(14): 6254—6264.  
匡苗苗, 周广胜, 周梦子. 西藏高寒草地物种多样性和生产力的环境驱动机制. *生态学报*, 2024, 44(14): 6254—6264.
- [8] Tu H Y, Guli Jiapaer, Yu T, *et al.* Analysis of spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of net primary productivity in terrestrial ecosystems of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1219—1233.  
涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 等. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素. *生态学报*, 2023, 43(3): 1219—1233.
- [9] Huang L, Li J H, Zhang H Y, *et al.* Accounting and assessment of grassland ecological values. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 47—63.  
黄麟, 李佳慧, 张海燕, 等. 草原生态价值的内涵、核算及评估. *草业学报*, 2024, 33(6): 47—63.
- [10] Yao L J, Zhang J N, Zhang H R, *et al.* Sustainable utilization of natural resources in Inner Mongolia based on ecological footprint. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(8): 1525—1536.  
姚林杰, 张佳宁, 张恒瑞, 等. 基于生态足迹的内蒙古自然资源可持续利用分析. *生态环境学报*, 2023, 32(8): 1525—1536.
- [11] Li Z Y, Yang Q, Ma Z G, *et al.* Responses of vegetation to climate change and human activities in the arid and semiarid regions of northern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(3): 859—874.  
李卓忆, 杨庆, 马柱国, 等. 中国北方干旱半干旱区植被对气候变化和人类活动的响应. *大气科学*, 2024, 48(3): 859—874.
- [12] Wang Y, Wang J S, Zhang Q. Drought risk status of grassland in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(8): 1—12.  
王莺, 王健顺, 张强. 中国草原干旱灾害风险特征研究. *草业学报*, 2022, 31(8): 1—12.
- [13] Yang C Y, Ding Y, Ma F L, *et al.* Climate change affects plant aboveground biomass by regulating the growth periods in alpine grasslands of the Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(5): 1260—1268.  
杨聪颖, 丁颖, 马扶林, 等. 气候变化通过调控青藏高原高寒草原植物生育期影响地上生物量积累. *应用生态学报*, 2024, 35(5): 1260—1268.
- [14] Geng X D, Xu R. Ecosystem carbon exchange of an alpine meadow under simulated gradient warming in the Tibetan Plateau, China. *Pratacultural Science*, 2017, 34(12): 2407—2415.  
耿晓东, 旭日. 梯度增温对青藏高原高寒草甸生态系统碳交换的影响. *草业科学*, 2017, 34(12): 2407—2415.
- [15] Wang J T, Yang Y C, Yang M H. Spatial and temporal variation and driving forces of NPP on the Loess Plateau based on geodetector. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2023, 39(1): 12—20.  
王江涛, 杨永崇, 杨梅焕. 基于地理探测器的黄土高原NPP时空变化及驱动力研究. *西安理工大学学报*, 2023, 39(1): 12—20.
- [16] Yang Y, Zhou D C, Gong Z N, *et al.* Ecological vulnerability and its drivers of the Loess Plateau based on vegetation productivity. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(10): 1951—1958.  
杨艳, 周德成, 宫兆宁, 等. 基于植被生产力的黄土高原地区生态脆弱性及其控制因子分析. *生态环境学报*, 2022, 31(10): 1951—1958.
- [17] Zhao X X, Wang G X, Yang K, *et al.* Research on seed germination, seedling survival, and establishment of alpine plants in response to climate change: A review. *Pratacultural Science*, 2020, 37(2): 213—225.  
赵小祥, 王根绪, 杨凯, 等. 高山植物种子萌发、幼苗存活和定居对气候变化的响应. *草业科学*, 2020, 37(2): 213—225.
- [18] Yuan Y M, Liu J Y, Gao X L, *et al.* Root traits of seven *Stipa* species and their relations with environmental factors in temperate grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8784—8794.  
袁野梅, 柳隽瑶, 高秀丽, 等. 温带草原7种针茅植物根系特征及其对环境因子变化的适应. *生态学报*, 2022, 42(21): 8784—8794.

- [19] Xu L L, Niu B, Zhang X Z, *et al.* Climate responses of carbon fluxes in two adjacent alpine grasslands in northern Tibet. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 1–16.  
徐玲玲, 牛犇, 张宪洲, 等. 藏北两个临近不同高寒草地碳通量对气候条件的响应. *草业学报*, 2024, 33(6): 1–16.
- [20] Lin X D, Chang L, Feng D. Remote-sensing estimation of vegetation gross primary productivity and its spatiotemporal changes in Qinghai Province from 2000 to 2019. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(6): 16–27.  
林小丁, 常乐, 冯丹. 2000–2019年青海地区植被总初级生产力遥感估算及时空变化分析. *草业学报*, 2021, 30(6): 16–27.
- [21] Qiao L, Xia H. The impact of drought time scales and characteristics on gross primary productivity in China from 2001 to 2020. *Geo-spatial Information Science*, 2025, 28(1): 284–302.
- [22] Yu Z W, Liu Q, Zhang Y Y, *et al.* Changes of NDVI and driving factors in different grasslands in the Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22): 10068–10082.  
余志巍, 刘强, 张宇阳, 等. 内蒙古不同草地NDVI变化及其驱动要素. *生态学报*, 2024, 44(22): 10068–10082.
- [23] Su R H, Guo E L, Wang Y F, *et al.* Extreme climate changes in the Inner Mongolia and their impacts on vegetation dynamics during 1982–2020. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 419–431.  
苏日罕, 郭恩亮, 王永芳, 等. 1982–2020年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响. *生态学报*, 2023, 43(1): 419–431.
- [24] Xiao F, Sang J, Wang H M. Effects of climate change on typical grassland plant phenology in Ewenki, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2784–2792.  
肖芳, 桑婧, 王海梅. 气候变化对内蒙古鄂温克旗典型草原植物物候的影响. *生态学报*, 2020, 40(8): 2784–2792.
- [25] Zheng H J, Yang X F, Song C Q, *et al.* Distinct environmental controls on above- and below-ground net primary productivity in northern China's grasslands. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112717.
- [26] Qu X B, Li D, Tian Y, *et al.* Distribution of net ecosystem productivity in the Hulunbuir region from 2001 to 2021 and its relationship with temperature and precipitation. *Journal of Meteorology and Environment*, 2024, 40(4): 100–106.  
曲学斌, 李丹, 田野, 等. 2001–2021年呼伦贝尔地区净生态系统生产力分布及其与气温和降水的关系. *气象与环境学报*, 2024, 40(4): 100–106.
- [27] Wang Z X, Hu G Z, Shui H W, *et al.* Effect of seasonal timing of drought on carbon exchange in the alpine meadow ecosystem of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(4): 24–33.  
王子欣, 胡国铮, 水宏伟, 等. 不同时期干旱对青藏高原高寒草甸生态系统碳交换的影响. *草业学报*, 2021, 30(4): 24–33.
- [28] Zhang W, Wang L C, Xiang F F, *et al.* Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105892.
- [29] Yang Z G, Zhang J G, Li J R, *et al.* Spatiotemporal dynamic variation of temperate grassland classes in Inner Mongolia in the last 20 years. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(9): 1–16.  
杨志贵, 张建国, 李锦荣, 等. 内蒙古温性草原草地类型近20年时空动态变化研究. *草业学报*, 2023, 32(9): 1–16.
- [30] Jin L, Wang Y F. The impact of drought on biomass of forage grass in Hulunbuir grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(5): 80–90.  
金磊, 王永芳. 干旱对呼伦贝尔草原牧草生物量的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(5): 80–90.
- [31] Ye S Y, Hu X X, Si X S, *et al.* Reliability assessment method for complex systems using sliding window and Kriging interpolation algorithm. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(4): 171–179.  
叶爽怡, 扈晓翔, 司小胜, 等. 采用滑动窗口与克里金插值算法的复杂系统可靠性评估方法. *西安交通大学学报*, 2023, 57(4): 171–179.
- [32] Zhong Z Q, He B, Wang Y P, *et al.* Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity. *Science Advances*, 2023, 9(32): eadf3166.
- [33] Li P H, Zhang R Q, Xu L P. Three-dimensional ecological footprint based on ecosystem service value and their drivers: a case study of Urumqi. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108117.
- [34] Wang L, Yu H Y, Zhang Q, *et al.* Responses of aboveground biomass of alpine grasslands to climate changes on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(12): 1953–1964.
- [35] Ma F L, Liu X W, Duo Y, *et al.* Effects of daily variation of hydro-thermal factors on alpine grassland productivity on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3719–3728.

- 马扶林, 刘小伟, 朵莹, 等. 日尺度下水热因子变化对青藏高原高寒草原生产力的影响特征. *生态学报*, 2023, 43(9): 3719–3728.
- [36] Cui B C, Zheng J H, Tuerxun•Hasimu, *et al.* Spatio-temporal characteristics of grassland net primary productivity (NPP) in the Tarim River basin. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(6): 1–13.  
崔博超, 郑江华, 吐尔逊·哈斯木, 等. 塔里木河流域草地净初级生产力时空分异特征研究. *草业学报*, 2020, 29(6): 1–13.
- [37] Zhang R P, Guo J, Zhang Y L. Spatial distribution pattern of NPP of Xinjiang grassland and its response to climatic changes. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5318–5326.  
张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(15): 5318–5326.
- [38] Sun B, Wang Y, Guo Y, *et al.* The spatiotemporal dynamics and influencing factors of vegetation cover in the Xilin Gol grassland (2000–2020). *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(11): 11–22.  
孙斌, 王燕, 郭晔, 等. 2000–2020年锡林郭勒草原植被覆盖时空动态变化及影响因素分析. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 11–22.
- [39] Chang Y R, Zhang C, Wei J C, *et al.* Impacts of climate change and human activities on the net primary productivity of vegetation in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(11): 3444–3452.  
常屹冉, 张弛, 魏嘉诚, 等. 气候变化和人类活动对内蒙古植被净初级生产力的影响. *草地学报*, 2023, 31(11): 3444–3452.
- [40] Wang Z F, Wang J Y, Wang W L, *et al.* An explanation of the differences in grassland NDVI change in the eastern route of the China-Mongolia-Russia economic corridor. *Remote Sensing*, 2025, 17(5): 867.
- [41] Zhang T K, Wang J B, Ye H, *et al.* Vulnerability of alpine ecosystems and its response to climate change and human activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(1): 154–170.  
张庭康, 王军邦, 叶辉, 等. 高寒生态系统脆弱性及其对气候变化和人类活动的响应. *生态学报*, 2024, 44(1): 154–170.
- [42] Geng Y B, Wang S, Hu X D. Responses of aboveground net primary productivity of the alpine meadow steppe to climate change: simulations based on the CENTURY model. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(1): 1–13.  
耿元波, 王松, 胡雪菡. 高寒草甸草原净初级生产力对气候变化响应的模拟. *草业学报*, 2018, 27(1): 1–13.
- [43] Chen B, Li L G, Chen Z J. Spatio-temporal variation of climate productivity of vegetation and its responses to climate change in three provinces of northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12): 3339–3348.  
陈博, 李丽光, 陈振举. 东北三省植被气候生产力的时空变化及对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2024, 35(12): 3339–3348.
- [44] He Y J, Kong Z, Hu X, *et al.* Water and heat conditions separately controlled inter-annual variation and growth trend of NDVI in the temperate grasslands in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 766–777.  
何玉杰, 孔泽, 户晓, 等. 水热条件分别控制了温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势. *生态学报*, 2022, 42(2): 766–777.
- [45] Lin H L, Fan D, Feng Q S, *et al.* New focus for the study of the comprehensive sequential classification system for grassland: A review from 2008 to 2020 and prospects for future research. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(10): 201–213.  
林慧龙, 范迪, 冯琦胜, 等. 草地综合顺序分类法研究新热点: 2008–2020年回顾与展望. *草业学报*, 2021, 30(10): 201–213.
- [46] Zhang T L, Jiang L L, Liu B, *et al.* Quantitative analysis of vegetation sensitivity to climate change in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(5): 2412–2423.  
张韬略, 姜亮亮, 刘冰, 等. 中国植被对气候变化的敏感性定量分析. *生态学报*, 2025, 45(5): 2412–2423.