

DOI: 10.20103/j.stxb.202207272156

袁沫汐, 文佐时, 何利杰, 李鑫鑫, 赵林. 中国温带草地物候对气候变化的响应及其对总初级生产力的贡献. 生态学报, 2024, 44(1): 354-376.

Yuan M X, Wen Z S, He L J, Li X X, Zhao L. Response of temperate grassland phenology to climate change and its contribution to gross primary productivity in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 354-376.

# 中国温带草地物候对气候变化的响应及其对总初级生产力的贡献

袁沫汐<sup>1,2,3,4</sup>, 文佐时<sup>1</sup>, 何利杰<sup>5</sup>, 李鑫鑫<sup>4</sup>, 赵林<sup>4,\*</sup>

1 湖南工商大学公共管理与人文地理学院, 长沙 410205

2 长沙人工智能社会实验室, 长沙 410205

3 中国地质大学(武汉)流域关键带演化湖北省重点实验室, 武汉 430074

4 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079

5 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430000

**摘要:** 气候变暖引起的植物物候变化影响了陆地生态系统功能和碳循环。目前研究着重关注温带和热带森林物候变化趋势、驱动因素, 关于干旱半干旱地区草地物候变化及其对生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)影响仍知之甚少。因此, 开展草地植物物候与生产力之间的关系研究对预测草地生态系统响应未来气候变化和区域碳循环至关重要。基于 1982—2015 年气象资料和 GIMMS NDVI3g 数据, 分析了中国温带草原植被返青期(start of the growing season, SGS)和枯黄期(end of the growing season, EGS)变化及其对气候的响应, 并借助一阶差分法量化物候对 GPP 动态变化的贡献。结果表明: (1) 季前 1—2 个月的夜间温度增温会显著提前 SGS, 而当月至季前 2 个月的白天温度对 SGS 有着微弱的促进作用; 季前 3 个月的累积降水对 SGS 提前作用最为强烈, 累积太阳辐射在各个时期对 SGS 影响相对较弱。(2) 不同季前时间尺度昼夜温度对草地 EGS 均表现出相反的作用, 短期累积降水对 EGS 起到显著延迟的区域范围最大, 太阳辐射随着季前时间的增加对草地枯黄期的延迟作用逐渐转变为提前作用。(3) EGS 对草地 GPP 年际变化趋势的相对贡献率强于返青期。研究结果有助于深化陆地生态系统与气候变化、碳循环之间相互作用的认识, 为草地适应未来气候变化和生态建设提供科学依据。

**关键词:** 植被物候; 气候变化; 总初级生产力; 响应; 温带草地

## Response of temperate grassland phenology to climate change and its contribution to gross primary productivity in China

YUAN Moxi<sup>1,2,3,4</sup>, WEN Zuoshi<sup>1</sup>, HE Lijie<sup>5</sup>, LI Xinxin<sup>4</sup>, ZHAO Lin<sup>4,\*</sup>

1 School of Public Administration and Human Geography, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

2 Changsha Social Laboratory of Artificial Intelligence, Changsha 410205, China

3 Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4 School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

5 College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430000, China

**Abstract:** Warming-induced shifts in vegetation phenology affect ecosystem functions and the hydrological cycle. However, research has so far focuses on the trends and driving factors of phenological changes in temperate and tropical forests, while

**基金项目:** 湖南省自然科学基金青年基金项目(2023JJ40226); 湖南省教育厅优秀青年项目(22B0666); 湖南省社科评审委一般项目(XSP2023GLC098); 流域关键带演化湖北省重点实验室开放基金资助(CZE2022F06)

**收稿日期:** 2022-07-27; **网络出版日期:** 2023-09-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: linzhao@whu.edu.cn

#本研究尚缺中国港澳台统计数据。

little is known about changes in grassland phenology in arid and semi-arid regions and their effects on gross primary productivity (GPP) of ecosystems. Therefore, an in-depth study of plant phenology and its relationship with productivity in grasslands under a warming context is essential to predict the response of grassland ecosystems to future climate change and the regional carbon cycle. Based on the meteorological data and GIMMS NDVI data from 1982—2015, this paper analyzed the changes in the start of the growing season (SGS) and end of the growing season (EGS) of temperate grassland vegetation in China and their responses to climate change. We also quantified the contribution of plant phenology to the dynamic change of GPP with the help of first-order difference method. The results showed that (1) in general, the increasing in nighttime temperature ( $T_{\min}$ ) in the 1—2 month pre-season phase significantly advanced SGS, however, the daytime temperature ( $T_{\max}$ ) from the current month to first two months before the SGS had a weak effect to advance the SGS. Additionally, cumulative precipitation in the first three months before the SGS had the strongest effects on the advancement of SGS. Cumulative solar radiation was found to have a relatively weak effect on SGS in all pre-season periods. (2) In terms of the EGS, the results showed that different pre-season time scales of diurnal temperature showed an opposite effect on the EGS in temperate grassland, and higher nighttime temperatures would delay the onset of EGS. Short-term cumulative precipitation had a significant effect on the delay of the EGS and reached its strongest in the first 2 months of the season. The delayed effect of cumulative solar radiation on the EGS gradually changed to an advancement effect with the increase of pre-season scale. (3) Based on the results of the relationship between phenology and GPP, both SGS and EGS contributed positively to the inter-annual variation of GPP in grassland across the region, and the relative contribution of EGS was stronger than that of the SGS. The results of the study help deepen the understanding of the interactions between terrestrial ecosystems and climate change and carbon cycle, and provide scientific basis for grassland adaptation to future climate change and ecological construction.

**Key Words:** vegetation phenology; climate change; gross primary productivity; response; temperate grassland

植被物候学是研究植被周期性的生长、发育等事件,以及这些事件与相关内源和外源动力之间相互关系的科学<sup>[1]</sup>。植被物候的动态变化不仅能直接对局地气候进行反馈,还是连接陆地生物圈碳、水和能量循环变化与气候变化的关键环节<sup>[2-3]</sup>。因此,研究植被物候的变化及其影响因素对深入理解全球未来气候变化和预测区域碳循环具有重要的意义。

草地作为陆地生态系统中分布范围最广的植被类型之一<sup>[4]</sup>,占据了全球约 36% 的陆地面积,在中国更是接近 40% 的国土面积被其覆盖<sup>[5]</sup>,它在调节温室气体循环利用、维持生态系统碳收支平衡等方面几乎发挥着与森林同等的作用<sup>[6]</sup>。中国温带草原是陆地上第三大草地分布区<sup>[7]</sup>,亦是我国草地的重要组成部分,该地区横跨不同温度带和干湿区,植被类型丰富,其生长环境对全球气候变化十分敏感<sup>[8]</sup>。目前,已有研究开展了关于该区域草地植被物候响应气候变化的相关研究<sup>[9-11]</sup>。比如,Fu 等人<sup>[12]</sup>发现春季气温和降水的上升对中国温带干旱地区草地返青期(the start of growing season, SGS)的提前起着关键作用;Ren 和 Peichl<sup>[13]</sup>研究结果表明站点尺度和区域尺度下主导内蒙古草地枯黄期(the end of growing season, EGS)延迟的气象因子分别是降水和温度;而 Ma 等人<sup>[14]</sup>则发现无论气候变暖与否,降水增加导致西藏高山草地 SGS 提前和 EGS 延后。此外,鉴于全球昼夜不对称增温对植被物候的影响可能远超过平均温度<sup>[15-16]</sup>,有研究表明,与白天温度(daytime temperature,  $T_{\max}$ )相比,青藏高原和黄河流域草地 SGS 变化与夜间温度(nighttime temperature,  $T_{\min}$ )的升高有更密切的关系<sup>[17-18]</sup>;当进一步考虑昼夜温度对 SGS 的季节性影响时,Shen 等人<sup>[19]</sup>发现,白天温度对植被返青期的影响在冬季较大,而夜间温度在春季时的影响较大;但昼夜温度对温带草地 EGS 的影响是不对称的<sup>[20]</sup>。由此可见,气候对草地植被物候的影响因地区而异<sup>[21]</sup>,而且考虑到物候和气候之间的关系在不同的植被类型中也可能有所不同,因此,需要进一步全面地分析我国温带草地不同区域不同草地植被类型的物候对气候变化的响应。

植被总初级生产力(gross primary productivity, GPP)是陆地生态系统中最大的碳通量成分,在估算碳储量等方面扮演着至关重要的角色<sup>[22]</sup>。目前众多研究试图使用统计分析的方法来调查植被物候参数与 GPP 之间的关系<sup>[23–26]</sup>,结果表明 SGS、EGS 与植被光合作用能力三个指标共同调控北美地区年际 GPP 变化<sup>[23]</sup>。然而,物候指标与 GPP 年变异性之间的关系在很大程度上取决于地理位置和植被类型<sup>[24]</sup>。比如,SGS 对年度 GPP 变异性有积极的贡献占北美地区约 87.9%,但在北美北部大平原地区,SGS 的贡献是消极的<sup>[27]</sup>。此外,由于 SGS 和 EGS 在时空上的差异性以及它们对气候变化响应的多样性,所以两个指标可能会以不同的方式改变和影响植被年度 GPP。所以,考虑到 GPP 对物候指标的反应不同,应深入调查两个关键物候指标如何调节生态系统生产力以及它们各自对 GPP 年际变化的贡献,这对草地如何应对气候变化的生物机制具有重要意义。

本文以中国温带草地作为研究区域,基于 1982—2015 年 GIMMS NDVI3g 数据,辅以气象资料,分析了研究区草地 SGS 和 EGS 的变化特征,调查了全域以及不同草地类型物候指标对气候驱动因子的响应机制,并深入探究草地物候变化与 GPP 的关系。本研究旨在(1)阐明中国温带草地植被物候的变化;(2)厘清气候驱动因子在多大程度上可以解释草地物候的变化;(3)量化草地物候对 GPP 年际变化的贡献。该研究有助于评价和预测草地生态系统如何响应未来气候变化和调控陆地生态系统碳循环,为我国温带草地的适应性管理提供科学参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

以北纬 30°以北的草地区域作为研究对象,研究区内草地分布范围广泛,横跨东西,水热条件存在明显的空间差异,根据年降水量划分,研究区内大部分地区属于干旱半干旱区(图 1)。依照《1:1000000 中国植被图集》将研究区草地类型划分为以下 7 类:温带草甸草原(TMS)、温带典型草原(TTS)、温带荒漠草原(TDS)、温带山地草甸(TMM)、温带沼泽化草甸(TSM)、温带盐生草甸(THM)、温带草丛(TGF)。

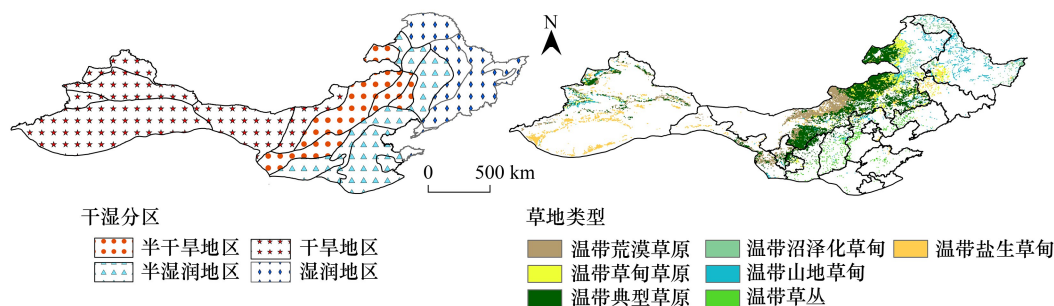


图 1 研究区概况

Fig.1 The overview of study area

### 1.2 气象数据

1961—2015 年格点日最高温度( $T_{\max}$ )、日最低温度( $T_{\min}$ )和日降水量(Pre)数据来源于中国气象数据共享网(<http://www.cma.cn/>),空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。格点日值太阳辐射(Srad)数据来源于寒区旱区科学数据中心的区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/data/7a35329c-c53f-4267-aa07e0037d913a2>),该数据的时间范围包括了 1981—2015 年,空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ <sup>[28]</sup>。

### 1.3 遥感数据

1982—2015 年 GIMMS NDVI3g V1 数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/en/data/9775f2b4-7370-4e5e-a537-3482c9a83d88/>),其空间分辨率为  $1/12^\circ$ ,时间分辨率为 15d。在使用该数据

前对其进行了一系列预处理。首先,考虑到研究区积雪覆盖会造成 NDVI 值有偏差,因此,当某个像元的日均气温连续 5d 小于 0℃ 时被视为积雪覆盖,并使用该像元 11 月到次年 3 月之间未被积雪污染的 NDVI 中值作为替代<sup>[29]</sup>。接着,在 TIMESAT 3.0 软件中利用非对称高斯拟合函数对 NDVI 时间序列进行平滑处理,得到重构后的 NDVI 数据为后续物候提取提供良好数据。

GPP 数据集由 Zheng 等<sup>[30]</sup> 基于涡度协方差 (eddy covariance, EC) 修正光能利用率模型 (light use efficiency model), 并基于改进后的 EC-LUE 模型估算得到 1982—2017 年全球 GPP。该数据时间分辨率为 8d, 空间分辨率为 0.05°, 简称 GPP<sub>ECLUE</sub> (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.8942336>)。

#### 1.4 植被类型数据

1:100 万植被类型图由中国科学院资源环境科学数据中心提供 (<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率为 1km。利用重采样方法得到空间分辨率为 1/12° 的草地植被类型栅格图。

#### 1.5 研究方法

##### 1.5.1 物候参数提取

利用动态阈值法和 logistic 曲线拟合法两种算法分别提取植被物候指标, 并取两个结果的平均值用于后续的研究以便消除估算方法带来的差异。前人研究表明 SGS 和 EGS 的阈值为 0.2 和 0.5 时, 能够精确的估算出草地区域物候信息<sup>[31—33]</sup>。因此本文也以此作为阈值, 其计算公式如下:

$$\text{NDVI}_{\text{ratio}} = \frac{\text{NDVI}_t - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (1)$$

式中,  $\text{NDVI}_t$  为一年中第  $t$  天的 NDVI 值,  $\text{NDVI}_{\max}$  和  $\text{NDVI}_{\min}$  分别为一年中 NDVI 变化的最大值与最小值。

Logistic 曲线拟合法是基于 4 个参数的植被物候提取方法, 该方法无需确定阈值, 仅根据 NDVI 的拟合曲线变化特征即可识别植被物候期, 其计算公式如下。

$$y(t) = \frac{c}{1 + e^{a+bt}} + d \quad (2)$$

式中,  $t$  表示天数,  $y(t)$  为第  $t$  天的 NDVI 值,  $a, b$  为拟合参数,  $d$  为 NDVI 背景值,  $c+d$  为 NDVI 最大值。

利用上式得到 NDVI 拟合曲线后, 计算其曲率变化率, 通过拐点得到 SGS 和 EGS。曲率变化率的计算公式如下:

$$\text{RCC} = b^3 cz \left\{ \frac{3z(1-z)(1+z)^3 [2(1+z)^3 + b^2 c^2 z]}{[(1-z)^4 + (bcz)^2]^{2.5}} - \frac{(1+z)^2 (1+2z-5z^2)}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^{1.5}} \right\} \quad (3)$$

式中,  $z = e^{a+bt}$ ,  $b$  和  $c$  的含义与式 (2) 中一致。

##### 1.5.2 相关分析

相关分析揭示了要素之间相互关系的强度, 以月为步长, 利用偏相关分析法探究不同季前时间尺度 (物候期当月-物候期前 5 个月) 的  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、累积 Pre 以及累积 Srad 与研究区草地返青期和枯黄期之间的响应特征。另外, 本研究基于皮尔逊相关分析法来调查物候与 GPP 之间的关系。

##### 1.5.3 物候对最佳季前气候因子的敏感性分析

物候事件发生前的气候要素对其发生时间起着重要的影响<sup>[34]</sup>, 针对每个像元分别求出对研究区 SGS 和 EGS 影响最大的气候要素的季前长度, 并以此作为新的气象数据探究物候对气候因子的敏感性。以  $T_{\max}$  为例, 首先, 逐像元计算 1982—2015 年平均 SGS 所在的月份, 分别计算当月、前一个月、两个月, …… , 前  $k$  个月 ( $k$  最大取值到前一年 12 月) 的平均  $T_{\max}$  与 SGS 的偏相关系数, 固定变量为对应时段的  $T_{\min}$ 、Pre 和 Srad。最后, 选择偏相关系数绝对值最大的时段作为  $T_{\max}$  对 SGS 影响最佳的季前长度。同样地, 可以计算出  $T_{\min}$ 、Pre 和 Srad 对 SGS 产生影响的最佳季前长度。同理, EGS 按照上述方法,  $k$  最大取值到当年的 5 月。

在分别识别对草地物候参数影响最佳的季前气候因子后, 分别对 1982—2015 年 SGS 和 EGS 与最佳季前气候因子 ( $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、Pre、Srad) 进行多元线性分析, 对应的回归系数表示气候敏感性 ( $S_{T_{\max}}$ 、 $S_{T_{\min}}$ 、 $S_{\text{pre}}$  和  $S_{\text{srad}}$ )。



回归系数的方向及其绝对值大小反映了最佳气候因子对物候的影响方向与程度<sup>[35]</sup>。

#### 1.5.4 量化草地物候对植被生产力的贡献

一阶差分法是分离异常变化(如,气候变化)和长期趋势(如,物种演替或人为影响)对目标变量逐年变化影响的一种常用的去趋势方法<sup>[36]</sup>。该方法被用来量化物候指标对草地 GPP 年际变化的贡献。

首先,假设影响草地 GPP 的主要物候指标包括了 SGS 和 EGS,然后计算 GPP 与物候指标的一阶差分值,并将其用于模型中,以评估 GPP 对关键物候指标的响应。模型如式下所示:

$$\Delta \text{GPP} = S_{\text{SGS}} \times \Delta \text{SGS} + S_{\text{EGS}} \times \Delta \text{EGS} + \text{int} \quad (4)$$

式中, $\Delta \text{GPP}$  表示 GPP 的一阶差分值; $\Delta \text{SGS}$ 、 $\Delta \text{EGS}$  分别表示对应时期内草地 SGS 和 EGS 的一阶差分值; $\text{int}$  表示截距; $S_{\text{SGS}}$  和  $S_{\text{EGS}}$  分别代表草地 GPP 对 SGS 和 EGS 的敏感性。

由此,仅受物候变化影响的草地植被 GPP 变化趋势可以通过式(5)来计算:

$$T_{\text{GPPPhen}} = S_{\text{SGS}} \times T_{\text{SGS}} + S_{\text{EGS}} \times T_{\text{EGS}} \quad (5)$$

式中, $T_{\text{GPPPhen}}$  代表研究区草地植被 GPP 仅在物候变化影响下的变化趋势; $T_{\text{SGS}}$  和  $T_{\text{EGS}}$  分别代表草地返青期和枯黄期在对应时间内的变化趋势,其它的参数含义与式(4)一致。

根据公式(4),在仅受物候指标的影响下,草地植被 GPP 趋势取决于 SGS 和 EGS 的影响。因此,SGS 对 GPP 的相对贡献( $RC_{\text{SGS}}$ )可以通过式(6)来计算:

$$RC_{\text{SGS}} = \frac{S_{\text{SGS}} \times T_{\text{SGS}}}{|S_{\text{SGS}} \times T_{\text{SGS}}| + |S_{\text{EGS}} \times T_{\text{EGS}}|} \times 100\% \quad (6)$$

式中,所有的参数含义都与式(4)一致。同样地,EGS 对 GPP 的相对贡献( $RC_{\text{EGS}}$ )按照同样的方式计算。正相对贡献表示当前指标的变化导致 GPP 增加;而负相对贡献则表示当前指标的变化导致 GPP 减少。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地物候反演结果验证

利用中国生态系统网络综合中心数据资源服务网站(<http://www.cnern.org.cn>)和《中国动植物物候观测年报》第 11 号提供的地面观测物候资料,对遥感反演的物候参数结果进行了精度验证。验证结果表明,基于遥感数据反演的草地 SGS 与地面观测物候数据的均方根误差为 11.1d,偏差为 1.43(图 2);遥感反演的草地 EGS 与地面观测数据的均方根误差为 8.9d,偏差为 1.85。从验证结果来看,利用遥感数据反演得到的研究区植被物候信息与地面观测得到的物候数据之间误差大多数都小于 10d。研究使用的 15d 分辨率的遥感数据,所以该误差值是在可以接受范围之内。从拟合优度( $R^2$ )来看,遥感获取的草地 SGS、EGS 与地面观测物候数据之间的  $R^2$  分别为 0.28 和 0.41,均通过了置信度 95% 的显著性检验,这说明基于 GIMMS NDVI3g 数据反演得到的中国温带草地植被物候参数结果具有一定的可靠性。

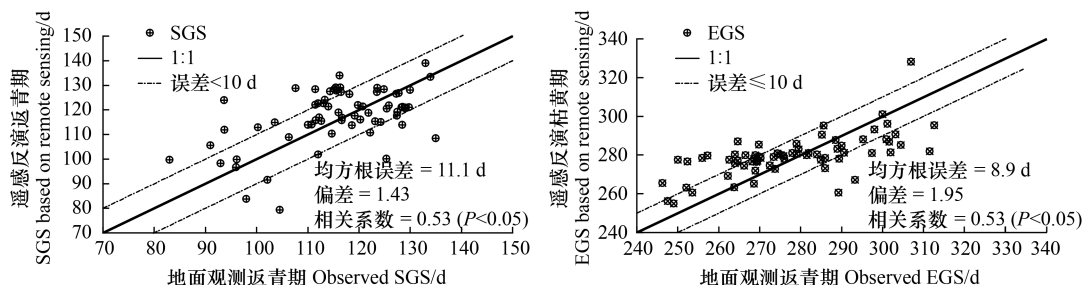


图 2 中国温带草地物候期地面观测数据与遥感反演数据结果验证

Fig.2 Validation of ground observation data and remote sensing inversion data for the phenological period of temperate grassland in China

SGS:返青期 start of growing season;EGS:枯黄期 end of growing season

## 2.2 草地物候时空格局

1982—2015 年温带草地平均 SGS 集中分布在第 110—130 天之间(即 4 月中旬到 5 月上旬),空间上呈现出西部地区返青期发生日期早于东部地区的特点(图 3)。分布在新疆北部、内蒙古中部地区的 SGS 集中在第 90—110 天。分布在东北小兴安岭和内蒙古中东部、北部以及西南部的 SGS 则集中在第 110—120 天。SGS 发生时间大于 120 天的地区则分布在新疆南部的天山山脉、内蒙古的东部以及东北的东部。多年平均 EGS 集中发生在第 270—290 天左右(即 9 月下旬到 10 月中旬),约占全域面积的 93.6%,EGS 整体呈现呈中部地区晚于西部和东部地区的特征。位于东北地区 and 新疆地区的 EGS 集中在第 270—280 天左右,约占像元总面积的 42.8%;而分布在内蒙古地区和黄土高原西部的 EGS 则多发生在第 280—290 天之间。

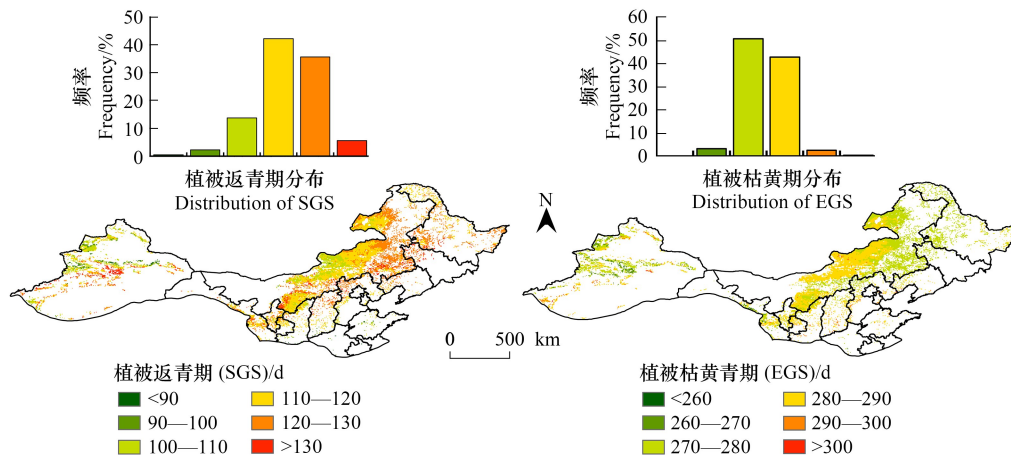


图 3 中国温带草地物候多年均值空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of multi-annual mean grassland phenology in China's temperate zone

## 2.3 草地物候对季前气候的响应

### 2.3.1 草地返青期对季前气候的响应

当月、前一个月以及前两个月的  $T_{\max}$  与 SGS 以负相关关系为主,分布在新疆、东北北部、黄土高原北部以及内蒙古中部少许地区(图 4),三个阶段负相关关系的像元占比均在 53%左右。然而,季前 3 个月的  $T_{\max}$  与 SGS 关系转变为以正相关为主,集中在内蒙古的北部和中东部地区以及黄土高原北部。这表明在该时期  $T_{\max}$  增温对 SGS 有抑制作用,可能是由于  $T_{\max}$  升高会导致土壤水分蒸发加快,造成草地水分胁迫增加。季前四个月  $T_{\max}$  与 SGS 呈显著正相关的像元占比为 5.6%,多聚集分布于内蒙古的北部,季前 5 个月时,  $T_{\max}$  升高对 SGS 起到提前作用的范围有所增加且呈现负相关关系的像元比例(57.7%)超过了正相关关系比例(42.3%)。

各个时期  $T_{\min}$  与 SGS 均以负相关关系为主,空间上主要分布在内蒙古北部、东北北部以及新疆西部等地,这说明在这些区域夜间温度的升高有助于刺激 SGS 提前。在从不同季前时间来看,SGS 与当月  $T_{\min}$  呈显著负相关关系的像元占比约为 9.8%(图 5),随着季前时间的增加,季前 1—2 个月的  $T_{\min}$  与 SGS 呈负相关关系的区域持续扩大,其中显著负相关的比例分别为 11.6%和 23.4%。然而,从季前 3—5 个月,两者呈负相关的像元比例逐渐下降。说明在冬季时期夜间温度对草地返青期的促进作用有所减弱,同时也表明春季夜间温度对温带草地返青期的影响大于冬季。

SGS 与当月、季前 1 个月累积 Pre 呈正相关关系比例略高于负相关关系比例,主要分布在内蒙古北部和中部、新疆北部以及黄土高原北部(图 6)。这表明这一时期的降水对草地返青起到了抑制作用。从季前 2 个月起,累积 Pre 与 SGS 呈以负相关关系为主,区域大多分布在内蒙古高原的东部以及新疆的南部。累积降水与 SGS 在季前 3 个月、季前 4 个月和季前 5 个月的显著负相关像元比例分别为 13.5%、10.4%和 10.6%。通过对比,可以发现草地返青期与前三个月的季前降水负相关关系比例最高,约为 62.9%,这表明冬末春初的降水

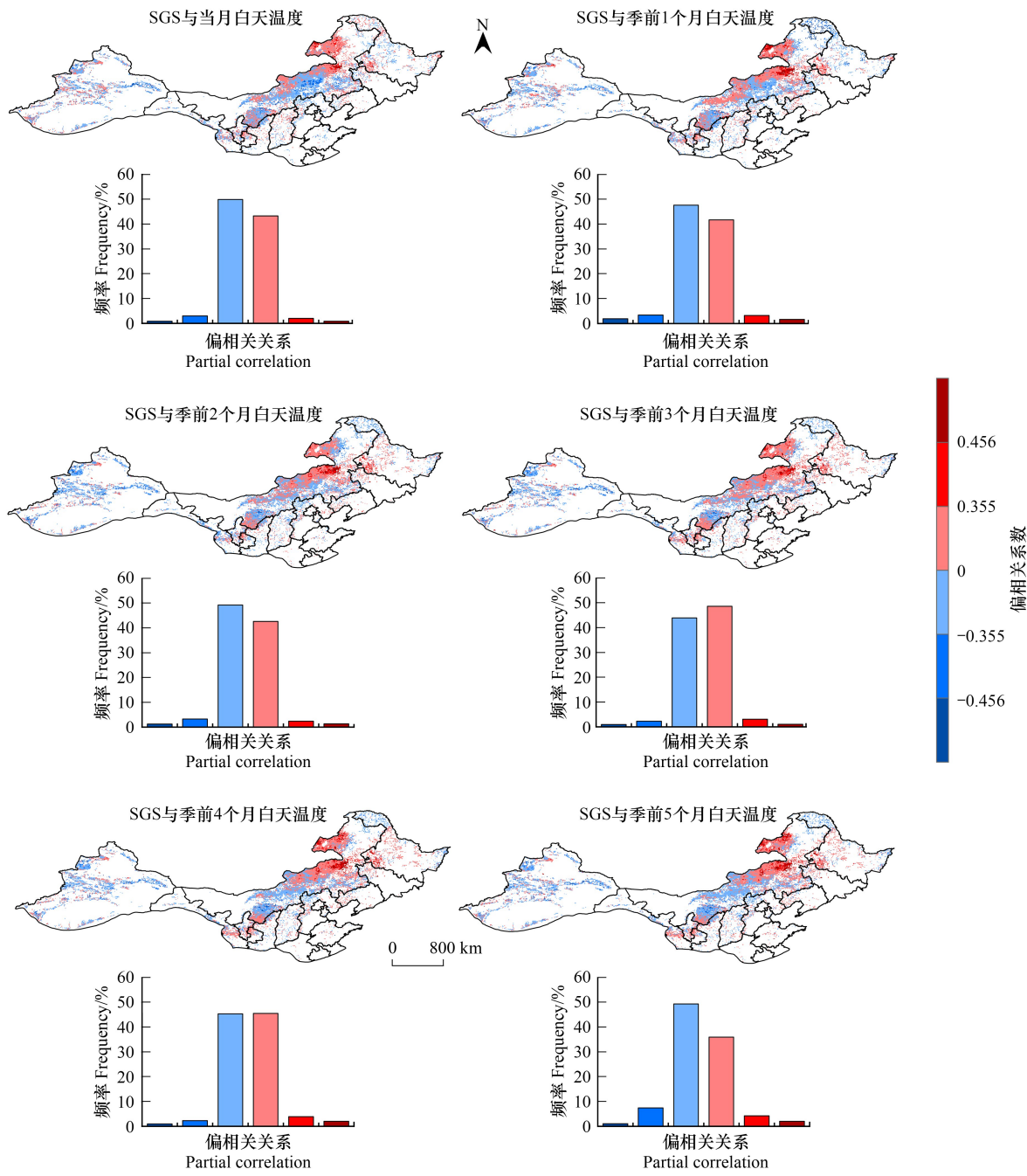


图4 中国温带草地返青期与不同季前时间尺度白天温度偏相关关系空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of partial correlation relationship between SGS of grassland and daytime temperature in different preseason time scales in China's temperate zone

对 SGS 的影响最大。

任何时期 Srad 与 SGS 的相关关系均以负相关为主(图 7),这意味着 Srad 增加对 SGS 提前起到促进作用。从不同季前尺度来看,当月 Srad 对 SGS 提前作用最小,两者之间呈正相关关系像元占比约为 46.1%,主要分布在内蒙古的北部和中部、东北的北部以及新疆东部地区。相比之下,季前 1—2 个月的累积 Srad 对草地返青期的促进作用最为强烈,两者呈负相关关系的比例分别为 60.3%和 62.0%,空间上这一负相关关系主要表现在东北的东部、内蒙古高原的东部和中西部以及新疆的西北部地区。季前 3—5 月的累积 Srad 对 SGS 的影响几乎保持一致。

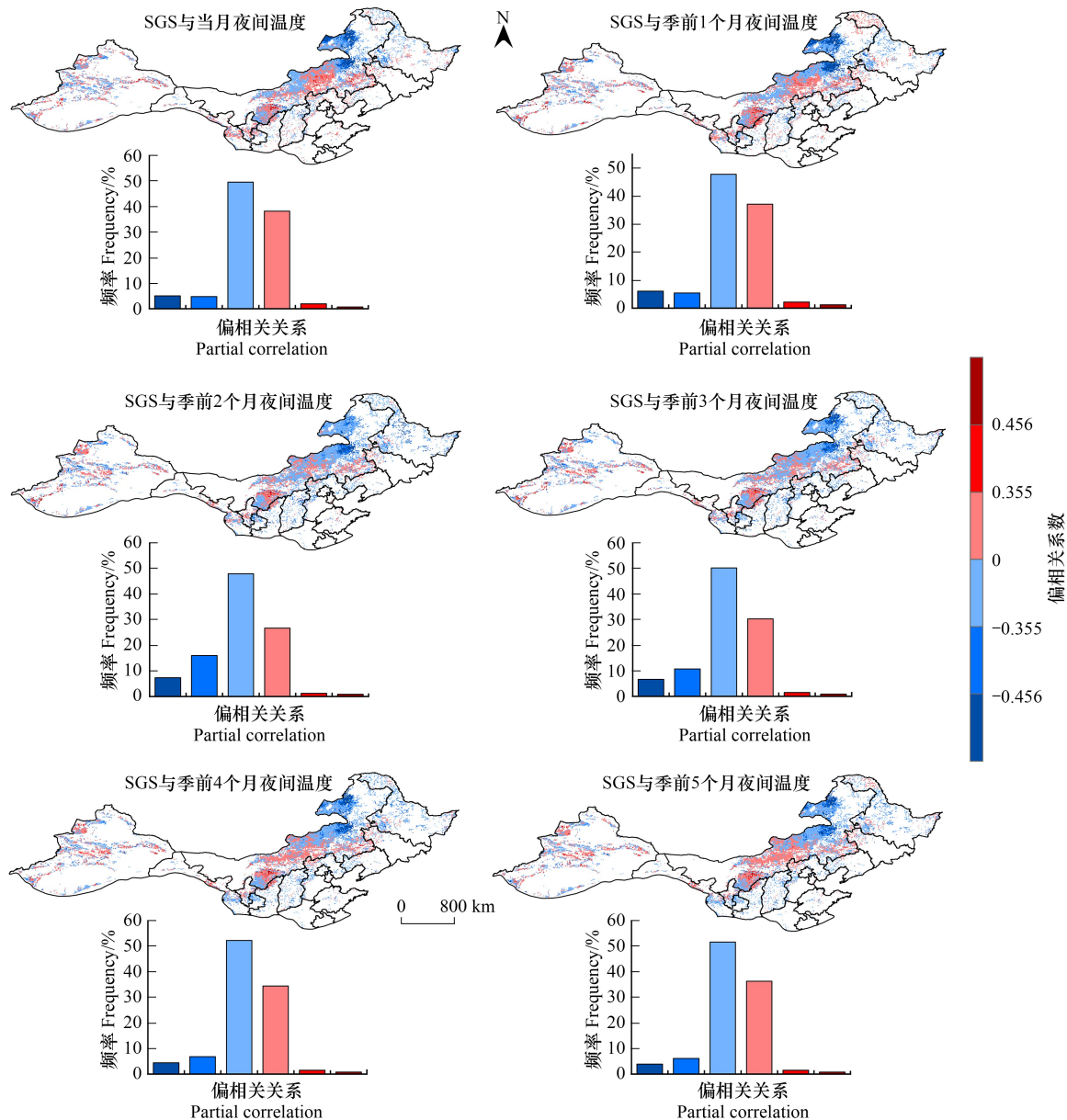


图5 中国温带草地返青期与不同季前时间尺度夜间温度偏相关关系空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of partial correlation relationship between SGS of grassland and nighttime temperature in different preseason time scales in China's temperate zone

区域尺度下各个草地类型 SGS 与不同时间尺度季前气候因子的偏相关系数,显示  $T_{\max}$  与各个草地类型 SGS 的关系存在一定差异。比如,  $T_{\max}$  与 TMS 的 SGS 在不同时期均呈正相关关系,而与 THM 的 SGS 呈负相关关系,这说明季前  $T_{\max}$  升高对 TMS 和 THM 的返青活动分别具有延迟和促进作用。此外,结果表明短期  $T_{\max}$  与 TTS、TGF 和 TMM 呈负相关,对返青发生具有促进作用,但这种促进作用随着季前时间的增加会转变为延迟;然而,长期的  $T_{\max}$  与 TDS 和 TSM 的 SGS 呈负相关(图 8)。相比之下,  $T_{\min}$  与各草地类型的相关关系差异较小,几乎所有草地类型与各时期  $T_{\min}$  均呈负相关关系,其中, TGF 和 TMM 的 SGS 与  $T_{\min}$  在季前 2 个月时的负相关性最强 ( $P < 0.05$ )。类似地,研究区不同草地类型 SGS 对季前 Pre、季前 Srad 的响应整体表现较为一致。THM 和 TMM 的 SGS 与各个时期的 Pre 均表现出负相关关系且累积降水越多对其影响越大; TGF、TMS、TDS、TSM 和 TTS 的 SGS 则与短期的累积 Pre 呈现出正相关关系,这种正相关关系随着季前时间的增加逐渐转变为负相



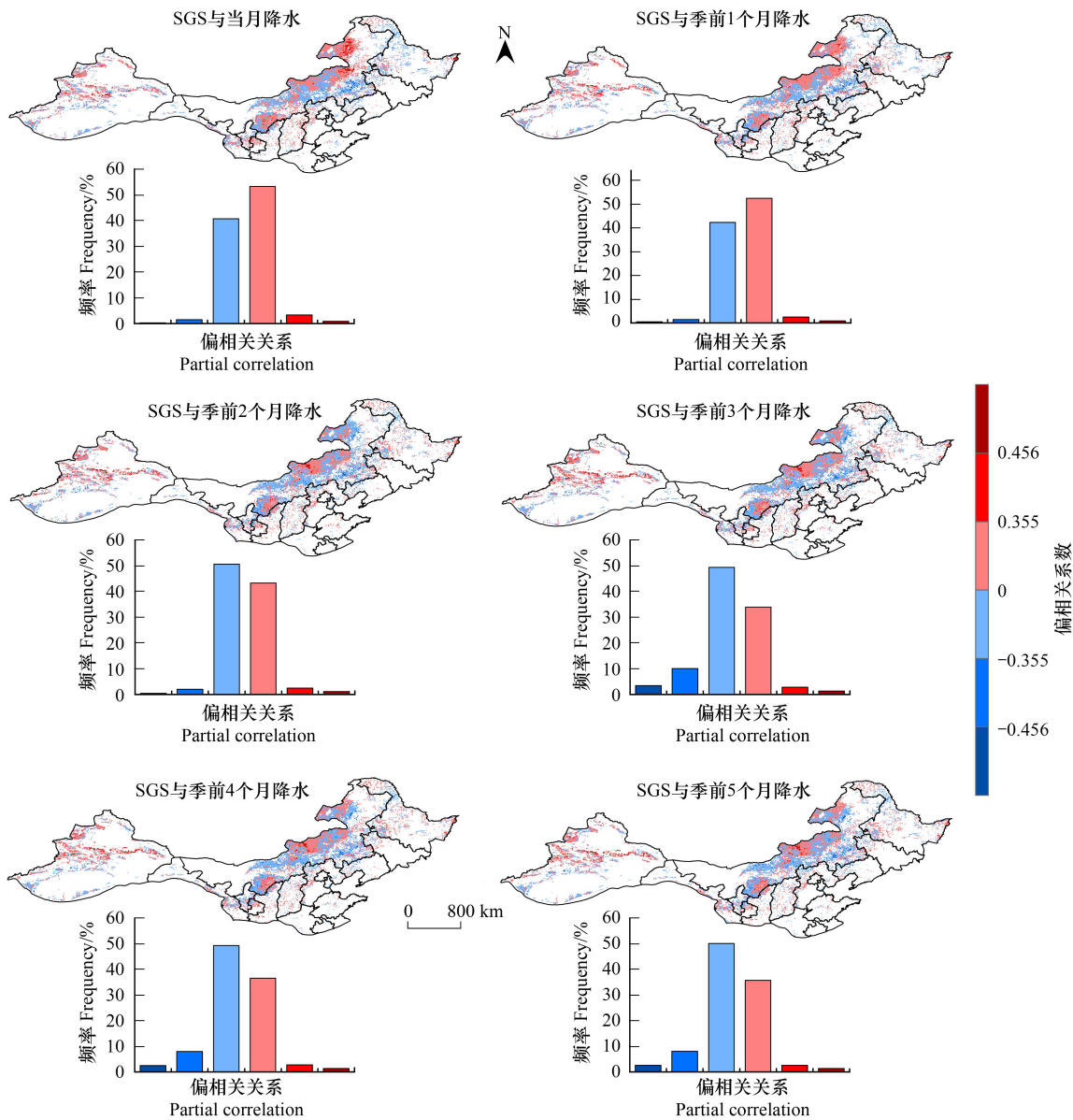


图 6 中国温带草地返青期与不同季前时间尺度累积降水偏相关关系空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of partial correlation relationship between SGS of grassland and precipitation in different preseason time scales in China's temperate zone

关系。从不同草地类型 SGS 与季前 Srad 的相关关系可以发现,除了季前 Srad 对 THM 的 SGS 却表现出了延迟作用外,其它草地类型均与不同时间尺度下的季前 Srad 表现出负相关关系,其中 TMM 的负相关性最强。

2.3.2 草地枯黄期对季前气候的响应

EGS 与当月、季前 1—2 个月的  $T_{max}$  整体上表现出了负相关关系(图 9),主要分布在内蒙古高原的中西部和新疆地区的中部地区。各时期的负相关关系面积占比分别为 60.9%、64.9%和 55.5%,其中显著负相关的像元比例分别为 12.7%、19.5%和 8.7%。从季前 3 个月开始, $T_{max}$  与 EGS 呈正相关的范围面积逐渐扩大,且季前五个月的  $T_{max}$  与 EGS 呈正相关关系的像元比例达到最大值,为 60.6%,但通过 95%显著性水平检验的像元占比仅为 6.9%。空间上,呈正相关关系的区域分布于内蒙古中部和北部、东北小兴安岭一带以及新疆草地的北部。根据上述的结果可以发现,不同时期  $T_{max}$  的增加对草地枯黄期的影响截然不同,即  $T_{max}$  在夏季时升高有助于温带草地 EGS 的延迟,而在秋季时增加则可能是造成枯黄期提前的原因之一。

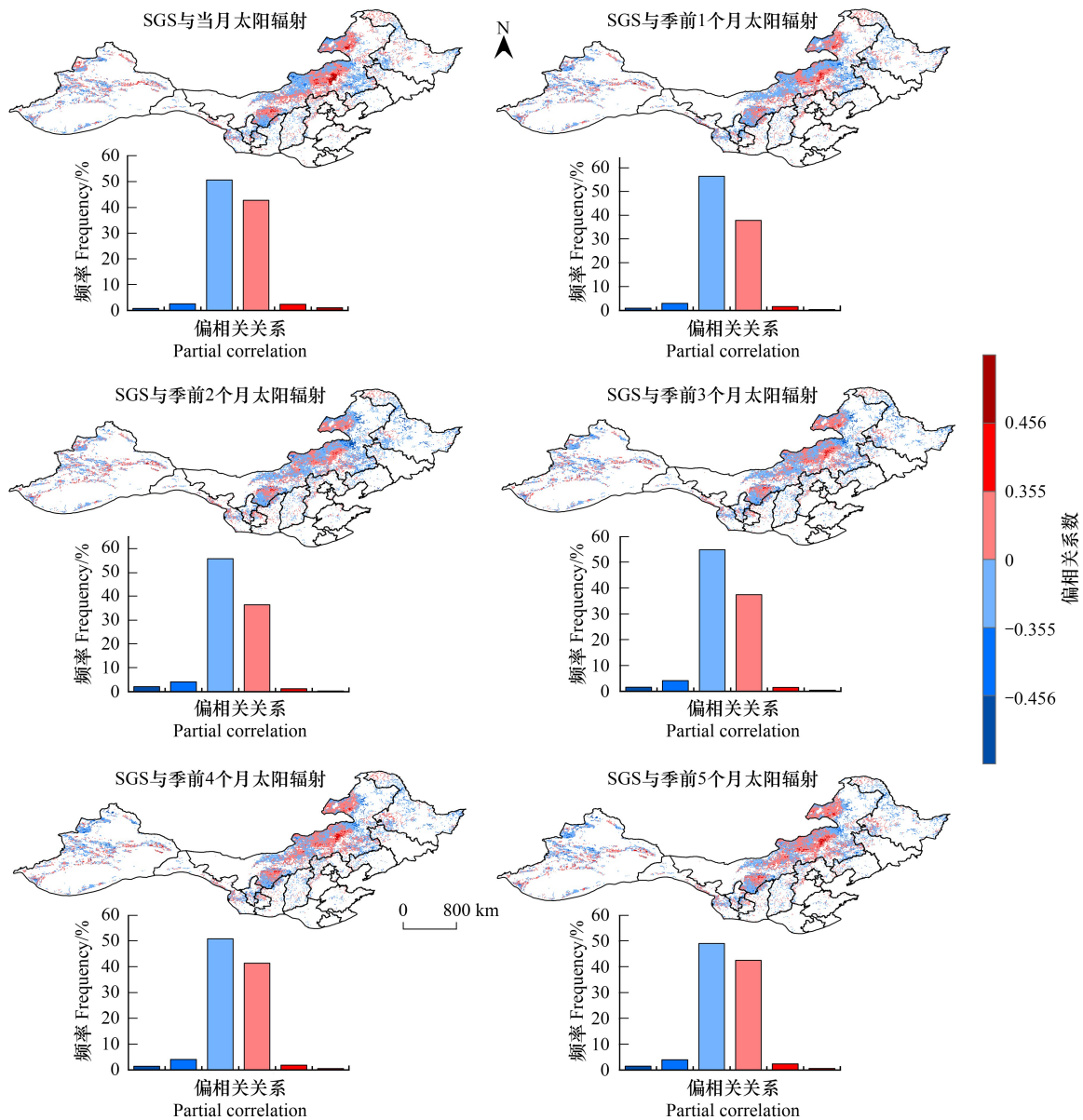


图7 中国温带草地返青期与不同季前时间尺度累积太阳辐射偏相关关系空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of partial correlation relationship between SGS of grassland and solar radiation in different pre-season time scales in China's temperate zone

与  $T_{\max}$  相反,当月、季前1—2个月的  $T_{\min}$  与 EGS 以正相关关系为主导(图10),呈显著正相关的像元占比分别为10.1%、20.4%和9.2%,空间上多分布在内蒙古北部和中西部以及新疆西北部。这表明  $T_{\min}$  升高在这些时段内有助于EGS延迟。 $T_{\min}$  与EGS的正负相关比例在季前3个月时基本持平,从此之后,季前4—5个月  $T_{\min}$  与EGS呈负相关关系的区域范围逐渐增加,并在季前五个月时达到最高,区域范围覆盖整个内蒙古高原的中部和北部地区、新疆南部以及东北地区。

不同季前时段的累积Pre与EGS普遍表现出正相关关系(图11),这表明季前Pre的增加有助于草地地区EGS延迟发生。季前时间尺度上,当月Pre与EGS呈正相关关系的像元占比为47.0%,集中在黄土高原北部,季前1个月的累积Pre与EGS的正相关比例为56.7%;随季前时间增加,累积Pre与EGS表现为正相关关系的像元比例呈先增加后减小的特征。其中,季前2个月的累积Pre与EGS呈正相关关系的像元比例达到最

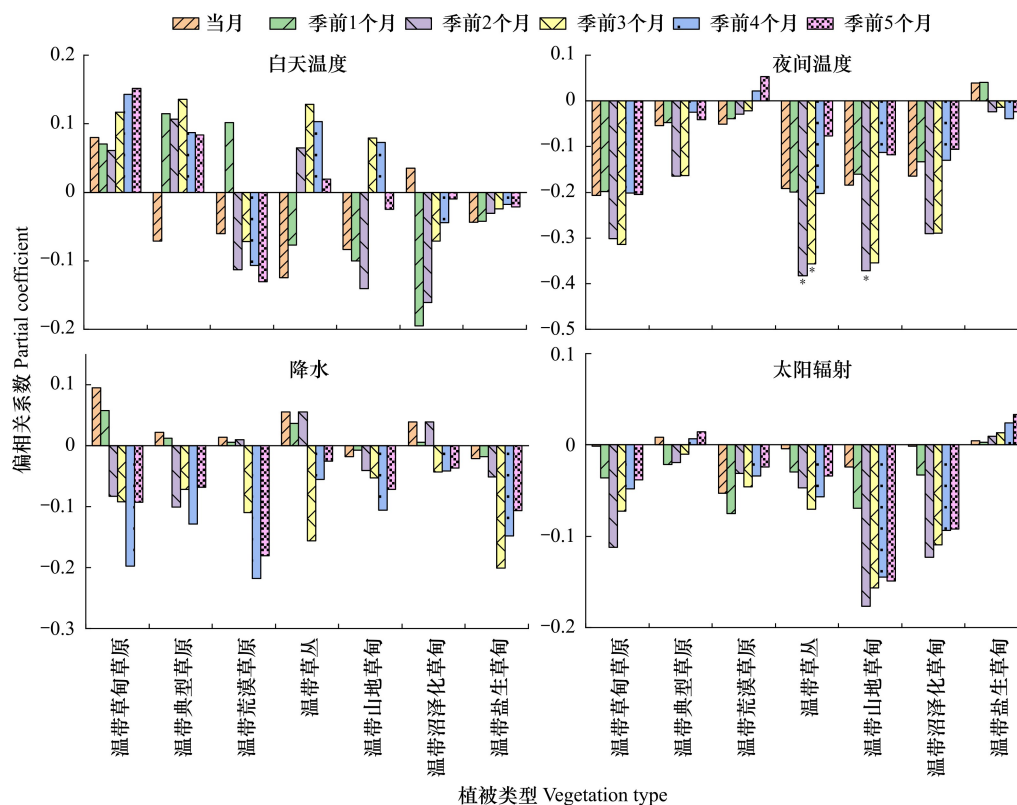


图 8 中国温带各草地类型返青期与不同季前时间尺度气候因子偏相关系数

Fig.8 Partial relationships between SGS of different grassland types and climatic factors in different preseason time scales in China's temperate zone

\*  $P < 0.05$

大值,约为 70.2%,分布在新疆北部以及内蒙古高原的中部和东部,其中呈显著正相关的像元约为 23.6%。

整体上,Srad 随着季前时间的增加与 EGS 的正相关关系逐渐转变为负相关关系为主导。具体来说,EGS 与当月以及季前 1 个月的累积 Srad 的正相关关系比例基本一致,分别为 51.8%和 50.2%,空间上集中表现在内蒙古高原北部和西部、黄土高原北部、新疆北部以及东北北部(图 12)。从季前 2 个月开始,累积 Srad 与 EGS 以负相关关系为主,这表明 Srad 累积增加可能会导致 EGS 提前。

不同草地类型 EGS 与各个季前时间尺度气候因子的偏相关关系如图 13 所示。在所有草地类型中,仅 TMM 和 TSM 的 EGS 与各时期  $T_{\max}$  均呈较强的正相关关系;短期的  $T_{\max}$  与 TDS、TGF、TTS、TMS 和 THM 的 EGS 呈负相关关系,即短时期内  $T_{\max}$  升高会对草地 EGS 产生提前作用。相比之下, $T_{\min}$  与各草地类型 EGS 以正相关为主。TMS 和 TTS 的 EGS 与季前 1 个月  $T_{\min}$  有显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),这表明  $T_{\min}$  的升高对 EGS 有延迟作用。随季前时间的增加, $T_{\min}$  升温带来的延迟作用逐渐减弱,甚至对 TTS、TDS 以及 TMM 的 EGS 出现提前作用。

与温度相比,各草地类型 EGS 对 Pre 的响应关系差异较小,大多草地类型的 EGS 与当月甚至季前 1 个月表现为负相关,在此之后转变为正相关关系。其中,季前累积 Pre 对生长在干旱地区的 TDS 和 THM 的影响比较强烈且表现为延迟作用,但这种作用在季前 3 个月之后逐渐变弱,这可能是由于在该时段之后温度是植被生长发育的主导因子。

不同季前时段累积 Srad 对各草地类型枯黄期的影响不尽相同。季前累积 Srad 对 TGF 和 TMM 的影响最为强烈,TDS 次之,但影响方向却截然不同。累积 Srad 与 TGF 的 EGS 呈负相关关系,而与 TMM 和 TDS 的 EGS 呈正相关关系。另外,季前累积 Srad 对其它草地类型 EGS 影响相对较弱,整体上,短期的累积 Srad 与

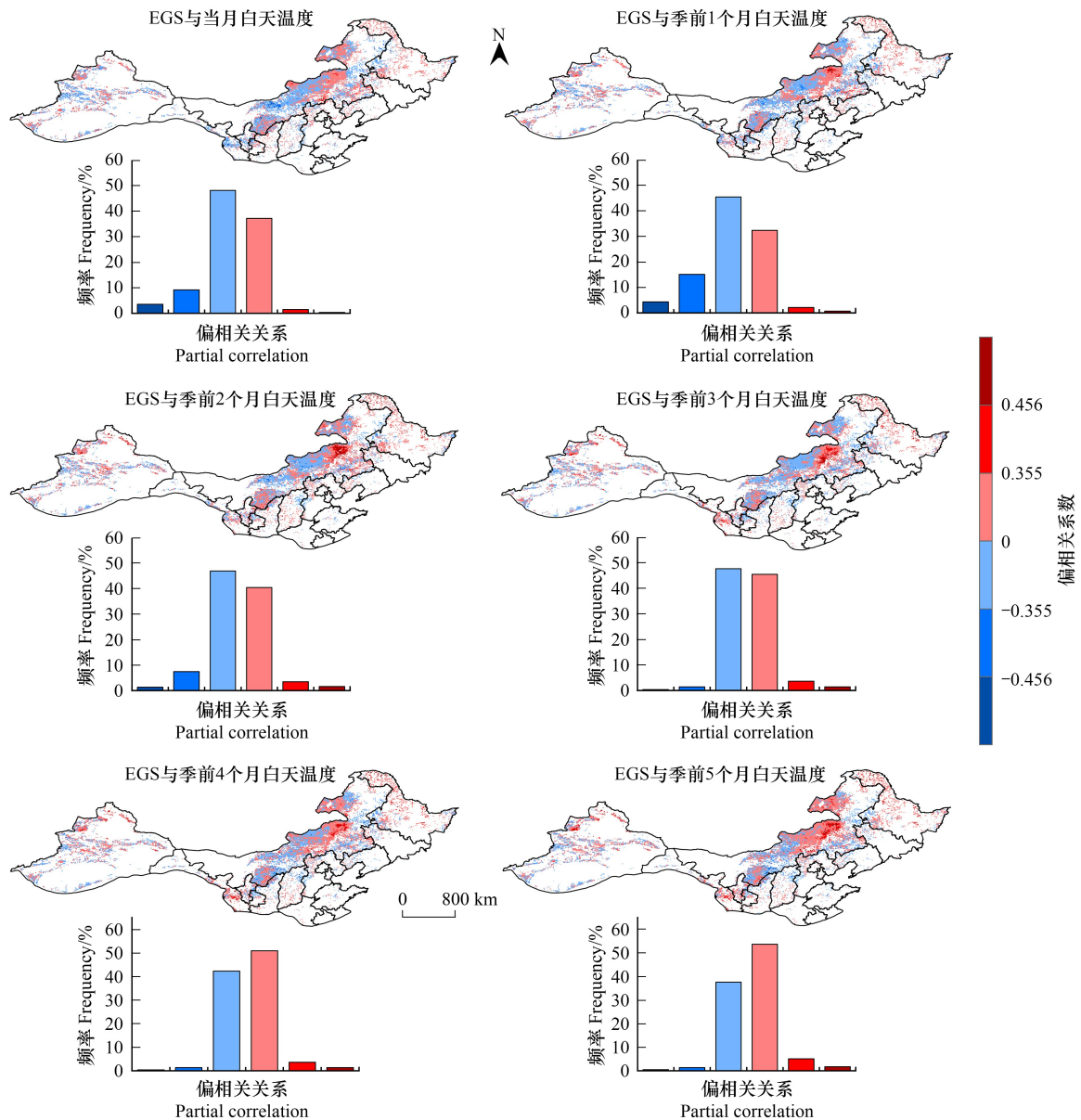


图9 中国温带草地枯黄期与不同季前时间尺度白天温度偏相关关系空间分布图

Fig.9 Spatial distribution of partial correlation relationship between EGS of grassland and daytime temperature in different pre-season time scales in China's temperate zone

EGS 有负相关关系,但这种负相关关系随着时间的推移逐渐转变为正相关关系。

## 2.4 草地物候对最佳季前气候因子的敏感性

### 2.4.1 草地返青期对最佳季前气候因子的敏感性

如表1所示,全域SGS对最佳季前 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为 $0.063\text{d}/^{\circ}\text{C}$  ( $P>0.05$ )和 $-0.727\text{d}/^{\circ}\text{C}$  ( $P<0.05$ ),意味着最佳季前 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别每升高 $1^{\circ}\text{C}$ 时,SGS延迟0.063天或提前0.727天。空间上, $S_{T_{\max}}$ 小于 $-2\text{d}/^{\circ}\text{C}$ 的像元占比为25.5%,零散地分布在内蒙古高原的西部和新疆的东部; $S_{T_{\max}}$ 大于 $2\text{d}/^{\circ}\text{C}$ 的区域占比约为29.1%,集中在内蒙古北部、中部(图14)。 $S_{T_{\min}}$ 小于 $-2\text{d}/^{\circ}\text{C}$ 的像元占比大约有41.1%,集中分布在呼伦贝尔高原西部和锡林郭勒高原。SGS对最佳季前累积降水的敏感性为 $-0.58\text{d}/10\text{mm}$  ( $P>0.05$ ),这说明最佳季前累积降水每增加10mm,研究区草地SGS会提前0.58天。像元尺度上, $S_{\text{pre}}$ 整体分布在 $-0.2$ — $0.2\text{d}/10\text{mm}$ 之间, $S_{\text{pre}}$ 为负的像元



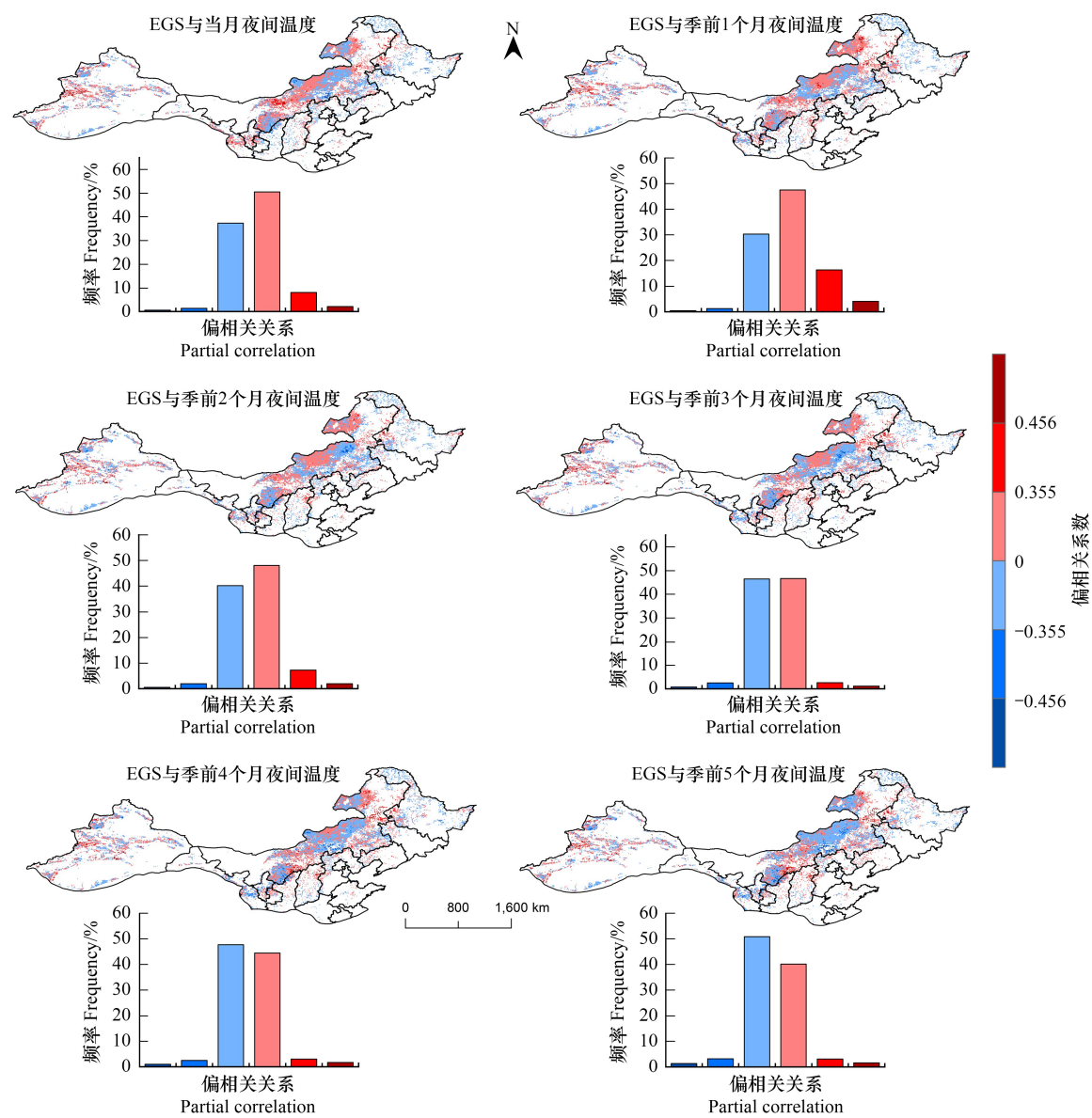


图 10 中国温带草地枯黄期与不同季前时间尺度夜间温度偏相关关系空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of partial correlation relationship between EGS of grassland and nighttime temperature in different preseason time scales in China's temperate zone

表 1 中国温带不同草地类型返青期对最佳季前气候因子敏感性

Table 1 Sensitivity of SGS of different grassland types to optimal preseason climatic factors in China's temperate zone

| 类型<br>Type                         | 白天气温<br>Daytime temperature/<br>( d/℃ ) | 夜间气温<br>Nighttime temperature/<br>( d/℃ ) | 降水<br>Precipitation/<br>( d/10mm) | 太阳辐射<br>Solar radiation/<br>( d/( W · m <sup>-2</sup> · 100 <sup>-1</sup> ) ) |
|------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 全区 All region                      | 0.063                                   | -0.727 **                                 | -0.58                             | -0.094                                                                        |
| 温带草甸草原 Temperate meadow steppe     | 0.852                                   | -1.904                                    | 0.07                              | -0.056                                                                        |
| 温带典型草原 Temperate typical steppe    | 0.324                                   | -0.715                                    | -0.66 *                           | -0.047                                                                        |
| 温带荒漠草原 Temperate desert steppe     | 0.379 *                                 | -0.747                                    | -1.75                             | -0.258                                                                        |
| 温带草丛 Temperate grassland forb      | -0.400                                  | -2.667 **                                 | -0.82                             | -0.116                                                                        |
| 温带山地草甸 Temperate mountain meadow   | -0.250                                  | -1.613 *                                  | -0.09                             | -0.175                                                                        |
| 温带沼泽化草甸 Temperate swampy meadow    | -0.068                                  | -1.380 **                                 | -0.05                             | -0.114                                                                        |
| 温带盐生草甸 Temperate halobiotic meadow | 0.486 *                                 | -0.428                                    | -2.65                             | 0.002                                                                         |

\*\* P<0.01; \* P<0.05

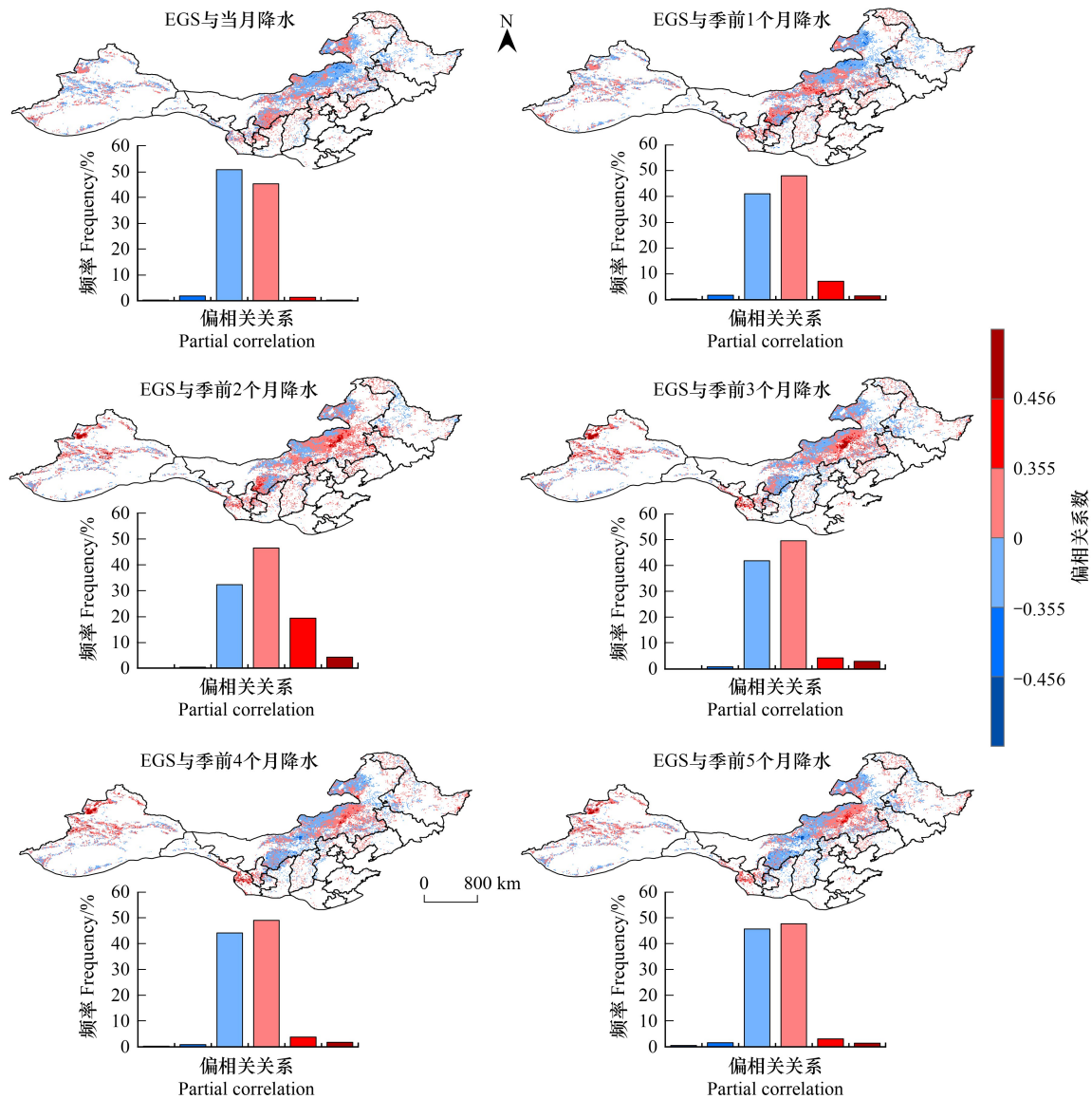


图 11 中国温带草地枯黄期与不同季前时间尺度累积降水偏相关关系空间分布图

Fig.11 Spatial distribution of partial correlation relationship between EGS of grassland and precipitation in different preseason time scales in China's temperate zone

占比约 55.6%, 分布在整個新疆地区、东北以及内蒙古的中部;  $S_{pre}$  表现为正敏感性的区域则分布于内蒙古西部。就  $S_{rad}$  而言, 全区 SGS 对最佳季前累积太阳辐射的敏感性为  $-0.094\text{d}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 100^{-1})$  ( $P > 0.05$ )。  $S_{rad}$  为负敏感性的像元占比约为 57.0%, 主要集中在内蒙古西部、东部边缘、华北平原、新疆以及东北等地。

不同草地类型 SGS 对各个最佳季前气候因子的敏感性结果表明, 只有 TGF ( $-0.4\text{d}/^{\circ}\text{C}$ )、TMM ( $-0.25\text{d}/^{\circ}\text{C}$ ) 和 TSM ( $-0.068\text{d}/^{\circ}\text{C}$ ) 的  $S_{T_{max}}$  值为负 (表 1), 其余草地类型 SGS 的  $S_{T_{max}}$  均为正。其中, TMS 的正敏感性最强, THM 次之。相比之下, 各个草地类型 SGS 对最佳季前  $T_{min}$  表现出一致的负敏感性, TGF 对  $T_{min}$  的变化最为敏感, 即最佳季前夜间温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ , TGF 的 SGS 会提前 2.667 天。此外, 研究区不同草地类型返青期的  $S_{pre}$  普遍表现出了负敏感性, TDS 和 THM 的负敏感性最强, 分别为  $-1.75\text{d}/10\text{mm}$  和  $-2.65\text{d}/10\text{mm}$ , 这表明生长在相对干燥地区的草地类型对降水十分敏感。尽管各草地类型整体对最佳季前累积  $S_{rad}$  的敏感性也表现出了负敏感性, 但不同草地类型之间的敏感性差异相对较小。

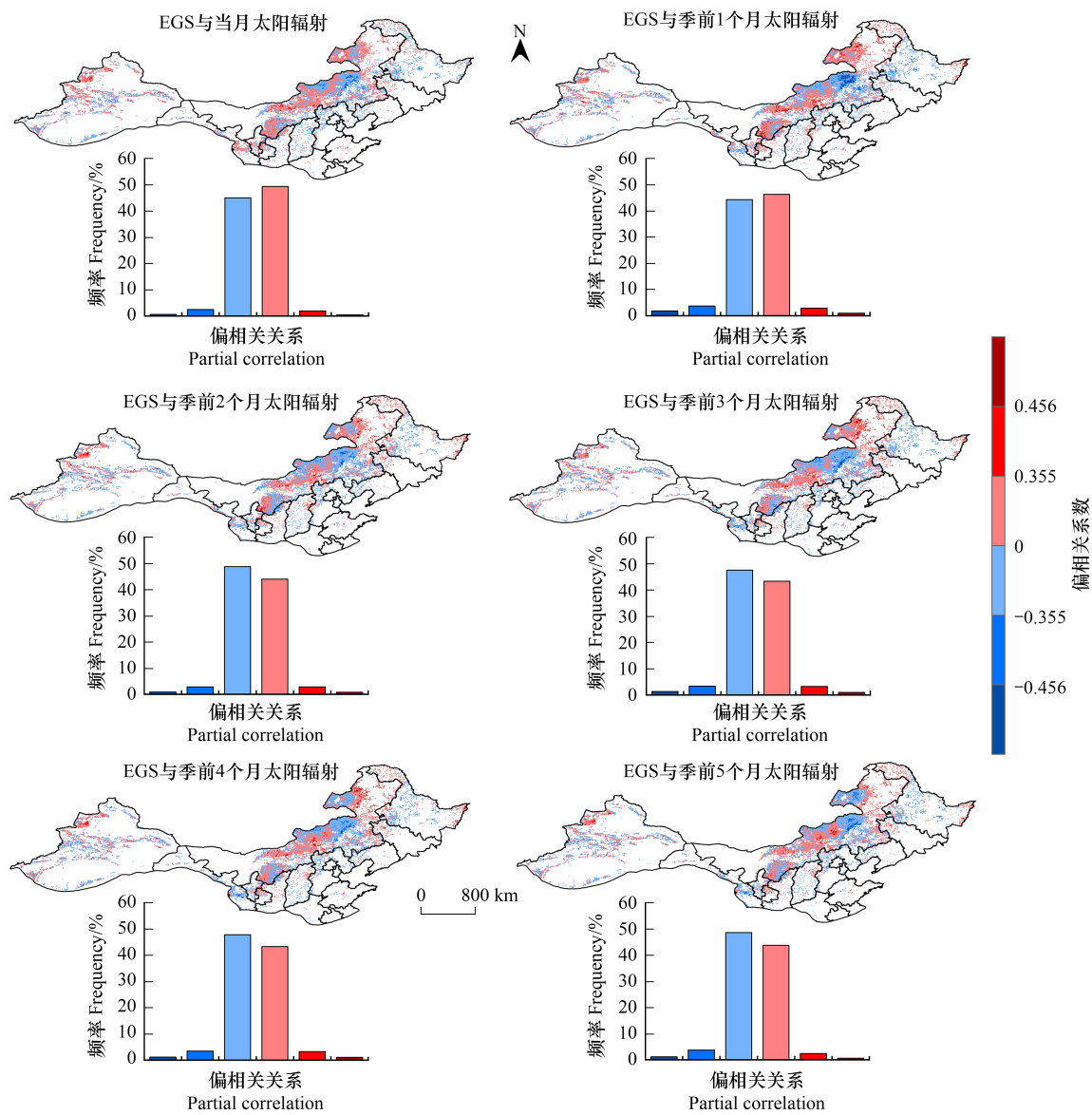


图 12 中国温带草地枯黄期与不同季前时间尺度累积太阳辐射偏相关关系空间分布图

Fig.12 Spatial distribution of partial correlation relationship between EGS of grassland and solar radiation in different pre-season time scales in China's temperate zone

2.4.2 草地枯黄期对最佳季前气候驱动的敏感性

区域尺度上,EGS 的  $S_{T_{max}}$  为  $-0.184d/^{\circ}C$  ( $P>0.05$ ),这意味着最佳季前  $T_{max}$  每升高  $1^{\circ}C$ ,EGS 会提前 0.184 天(表 2)。从空间布局来看, $S_{T_{max}}$  为负值的区域占比约为 60.5%,集中在内蒙古中西部、北部边缘以及新疆的西部(图 15)。这些区域的负敏感性幅度存在一定差异:大部分区域(38.7%)的负敏感性在  $-1$ — $-2d/^{\circ}C$ ;负敏感性超过  $-3d/^{\circ}C$  的像元占比约为 13.8%,主要分布在内蒙古的中部。与之相对的,全区 EGS 的  $S_{T_{min}}$  为  $0.365d/^{\circ}C$  ( $P>0.05$ ),空间上  $S_{T_{min}}$  普遍地呈正敏感性,其占比约为 69.6%。与温度相比,EGS 的  $S_{pre}$  和  $S_{srad}$  分别为  $0.012d/10mm$  ( $P>0.05$ ) 和  $0.027d/(W\ m^{-2}\ 100^{-1})$  ( $P>0.05$ )。空间格局上, $S_{pre}$  表现出正敏感性的区域占比为 59.8%,约有 54.3%的区域的敏感性在  $0$ — $0.2d/10mm$ ,大于  $0.2d/10mm$  的区域仅为 5.4%,大多散布于新疆草地。 $S_{pre}$  为负敏感性的区域占比为 40.2%,其中  $S_{pre}$  小于  $-0.2d/10mm$  的区域只占 6.4%,主要分布在东北草地以及内蒙古北部和中部偏北等地区。就太阳辐射而言, $S_{srad}$  为正敏感性的区域分布在内蒙古西部和北部、新疆草地北部。

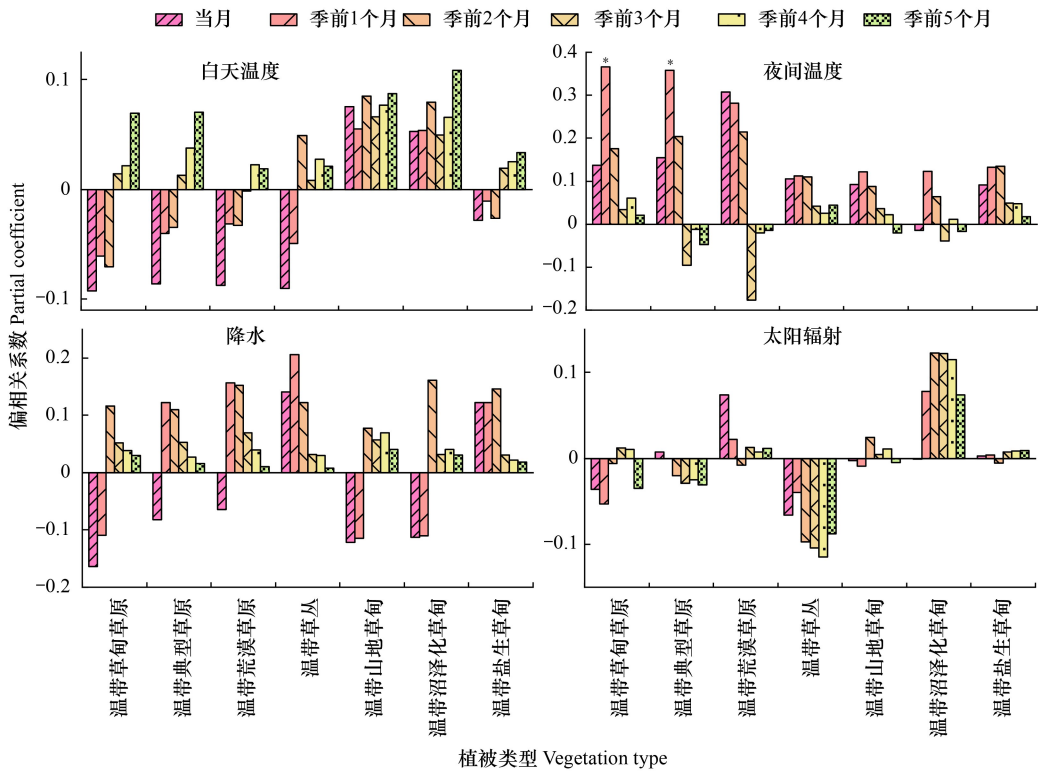


图 13 中国温带不同草地类型枯黄期与不同季前时间尺度气候因子偏相关关系

Fig.13 Partial relationships between EGS of different grassland types and climatic factors in different pre-season time scales in China's temperate zone

\*  $P<0.05$

表 2 中国温带不同草地类型枯黄期对最佳季前气候因子敏感性

Table 2 Sensitivity of EGS of different grassland types to optimal pre-season climatic factors in China's temperate zone

| 类型<br>Type                         | 白天气温<br>Daytime temperature/<br>( $d/^{\circ}C$ ) | 夜间气温<br>Nighttime temperature/<br>( $d/^{\circ}C$ ) | 降水<br>Precipitation/<br>( $d/10mm$ ) | 太阳辐射<br>Solar radiation/<br>( $d/(W \cdot m^{-2} \cdot 100^{-1})$ ) |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 全区 All region                      | -0.184                                            | 0.365                                               | 0.012                                | 0.027                                                               |
| 温带草甸草原 Temperate meadow steppe     | -0.068                                            | 0.454 *                                             | -0.140                               | -0.043                                                              |
| 温带典型草原 Temperate typical steppe    | -0.374 *                                          | 0.035                                               | 0.074 **                             | 0.024                                                               |
| 温带荒漠草原 Temperate desert steppe     | -0.541                                            | 0.204                                               | 0.284 *                              | 0.137                                                               |
| 温带草丛 Temperate grassland forb      | 0.104                                             | 0.030                                               | 0.168                                | -0.074                                                              |
| 温带山地草甸 Temperate mountain meadow   | 0.211                                             | 0.182                                               | 0.068                                | -0.019                                                              |
| 温带沼泽化草甸 Temperate swampy meadow    | -0.043                                            | 0.353                                               | 0.005                                | 0.074                                                               |
| 温带盐生草甸 Temperate halobiotic meadow | -0.664                                            | 0.739 *                                             | 0.810 *                              | 0.053                                                               |

\*\*  $P<0.01$ ; \*  $P<0.05$

就不同草地类型而言,除了 TGF 和 TMM 的 EGS 对最佳季前  $T_{max}$  表现为正敏感性外,其余草地类型 EGS 的  $S_{T_{max}}$  均为负值。其中,THM 的  $S_{T_{max}}$  负敏感性最强,为  $-0.664d/^{\circ}C$ ;TDS 次之,为  $-0.541d/^{\circ}C$ 。然而,各草地类型对最佳季前  $T_{min}$  均表现出了正敏感性,敏感性强度从  $0.030d/^{\circ}C$  到  $0.739d/^{\circ}C$  之间不等,其中 THM 正敏感性最强,TMS 次之。不同草地类型 EGS 的  $S_{pre}$  显示,分布在较为干旱地区的 TDS 和 THM 对最佳季前累积 Pre 的正敏感性相对较强,分别为  $0.284d/10mm$  ( $P<0.05$ ) 和  $0.810d/10mm$  ( $P<0.05$ )。各草地类型 EGS 对最佳季前累积  $S_{srad}$  的敏感性比较复杂但强度都相对较小。其中,TMS、TGF 以及 TMM 的  $S_{srad}$  分别为  $-0.043d/(W \cdot m^{-2} \cdot 100^{-1})$ ,



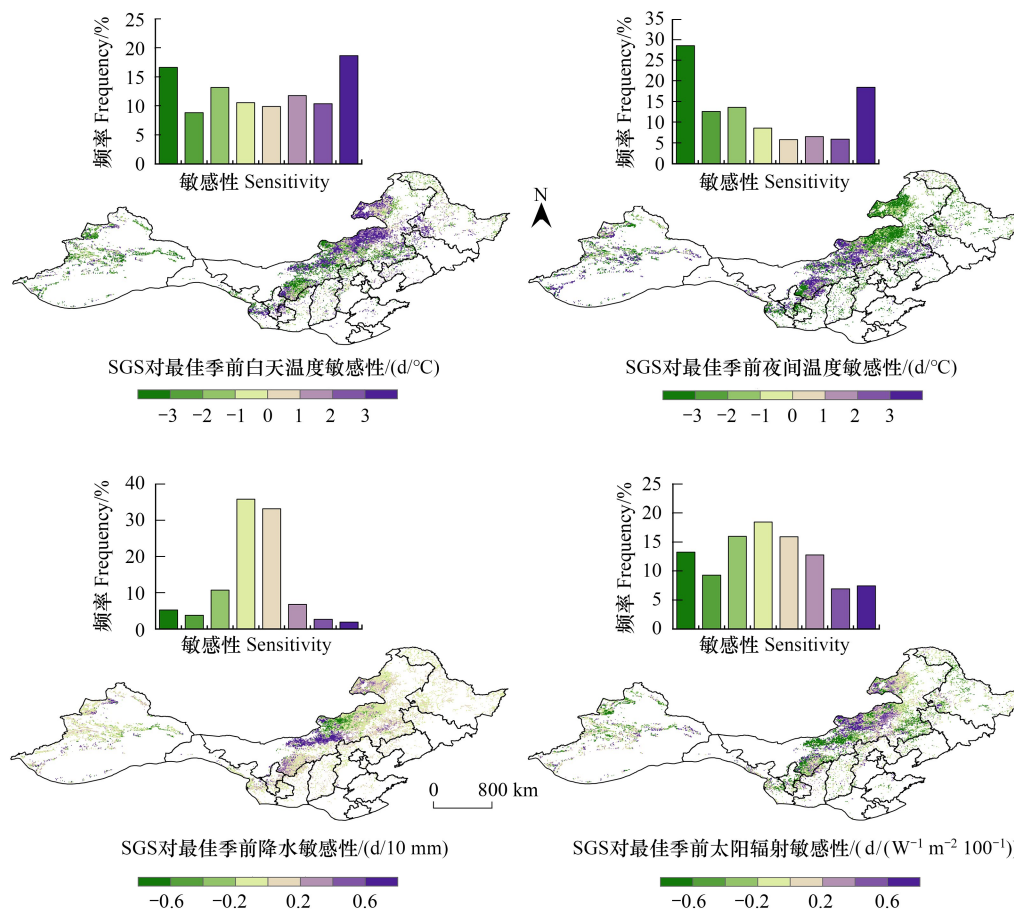


图 14 1982—2015 年中国温带草地返青期对最佳季前气候因子敏感性空间分布图

Fig.14 Spatial distribution of the sensitivity of SGS of grassland to optimal preseason climate factors in China temperate zone

$-0.074\text{d}/(\text{W m}^{-2} 100^{-1})$  和  $-0.019\text{d}/(\text{W m}^{-2} 100^{-1})$ ; 而在众多表现正敏感性的草地类型中, TDS 的敏感性最强, 为  $0.137\text{d}/(\text{W m}^{-2} 100^{-1})$ 。

## 2.5 草地植被 GPP 与物候指标的关系

### 2.5.1 草地植被 GPP 与物候的关系

由于植被 SGS 和 EGS 发生时间分别集中在春季和秋季, 所以这两个指标被认为会对春季和秋季 GPP 的变化产生一定程度的影响。此外, 考虑到春季物候的发生可能会对不同环境中每个季节的后续生态系统生产力产生滞后影响。因此, 本文分析了 SGS 与春季、夏季、秋季和全年 GPP 关系, 以及 EGS 与秋季和全年 GPP 的关系。

全区 SGS 与春季 GPP, 表现出不显著负相关关系(图 16)。不同草地类型中, 除了 TDS, 其余草地类型 SGS 与春季 GPP 都呈负相关关系。TGF、TMM、TSM 的负相关性相对比较高。另外, 全域 SGS 与夏季、秋季和全年 GPP 呈正相关关系。在草地类型层面上, TDS、THM、TMS 以及 TTS 的 SGS 与夏季、秋季和全年 GPP 表现为正相关关系。其中, TDS 和 TTS 的正相关性最强; TGF、TMM 以及 TSM 的与夏季、秋季和全年 GPP 则表现出了负相关关系。表明 SGS 的提前不仅对不受水分限制的草地类型的夏季和秋季 GPP 累积起到了积极影响, 还有助于其全年 GPP 的累积。

全区 EGS 与秋季 GPP 均表现出负相关趋势, 其相关系数为 0.023(图 17)。EGS 与秋季 GPP 有较强的正相关关系的草地类型为 TGF、TMM 和 TSM 的, 这表明 EGS 发生时间延迟有助于该类草地秋季 GPP 的累积。从全年时间尺度来看, 全区 EGS 与全年 GPP 的相关系数为  $-0.188$ , 这表明 EGS 发生时间越晚, 并不会对全年

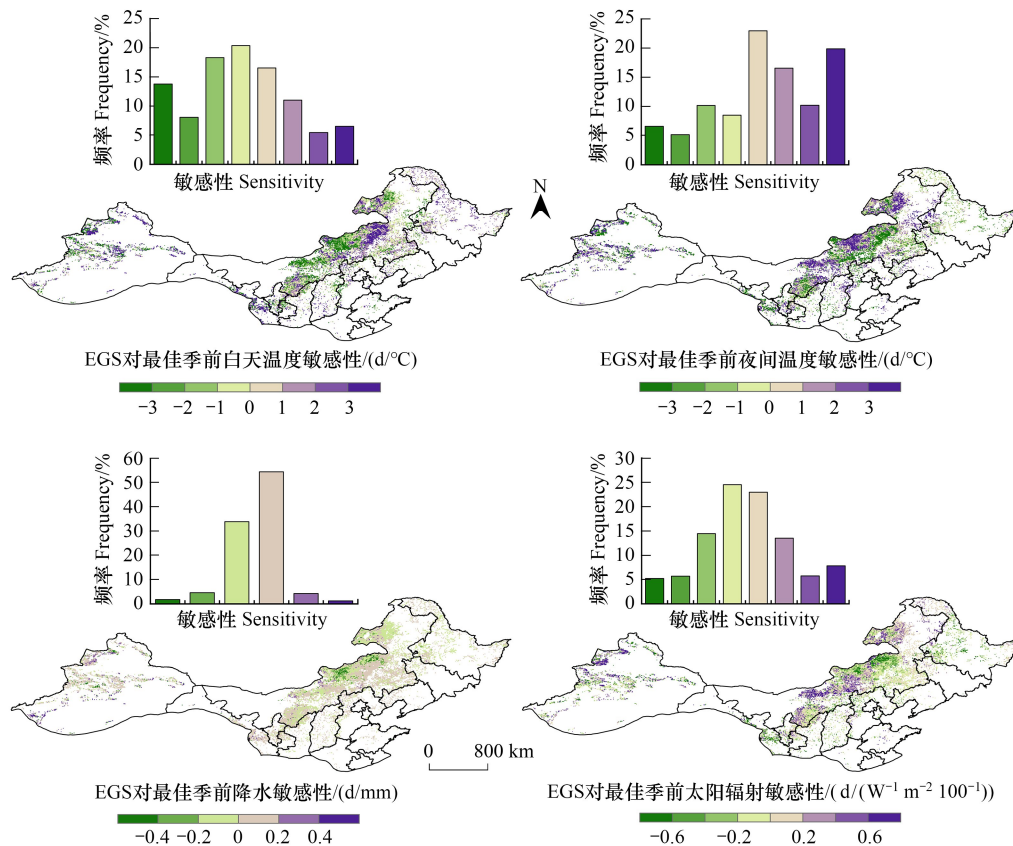


图 15 1982—2015 年中国温带草地枯黄期对最佳季前气候因子敏感性空间分布图

Fig.15 Spatial distribution of the sensitivity of EGS of grassland to optimal preseason climate factors in China temperate zone

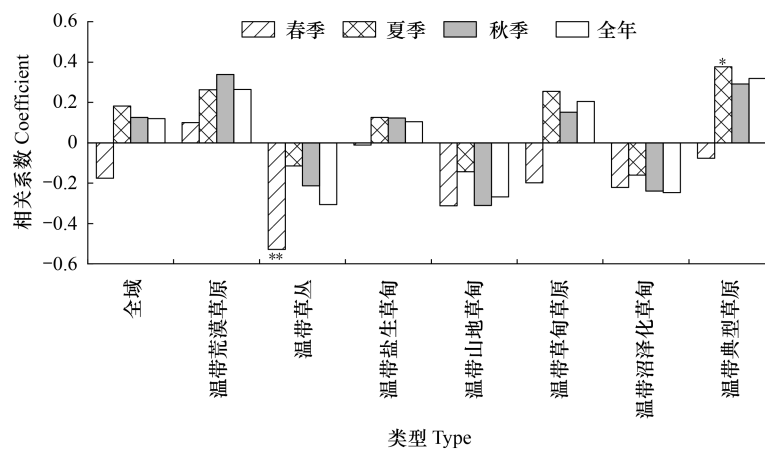


图 16 中国温带不同草地类型返青期与年/季节 GPP 相关关系

Fig.16 Correlations between SGS of different grassland types and annual/seasonal GPP in China's temperate zone

\*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ 

GPP 积累越有利。不同草地类型 EGS 与全年 GPP 的相关系数显示,全年 GPP 仅与生长在水热条件相对适宜的 TGF、TMM 的 EGS 呈正相关关系,而与 TDS 和 TTS 的 EGS 则表现出较强的负相关关系。

### 2.5.2 量化物候对草地 GPP 的贡献

整体上,SGS 和 EGS 对全域草地 GPP 年际变化起到了积极的促进作用,且 EGS 的作用整体要强于 SGS

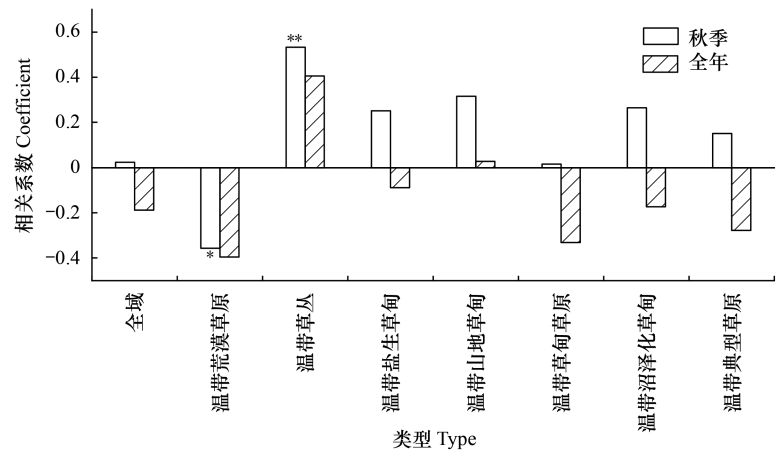


图 17 中国温带不同草地类型枯黄期与年/季节 GPP 相关关系

Fig.17 Correlations between EGS of different grassland types and annaual/seasonal GPP in China's temperate zone

\*\*  $P<0.01$ ; \*  $P<0.05$

(图 18),这说明 EGS 是主导 GPP 年际变化的驱动因子。从 SGS 和 EGS 对不同草地类型的贡献来看,两者的作用存在一定程度差异。草地 GPP 年际变化趋势以 EGS 为主导的草地类型包括了 TGF、TMS 和 TTS,其它草地类型则主要以 SGS 为主要驱动因子。

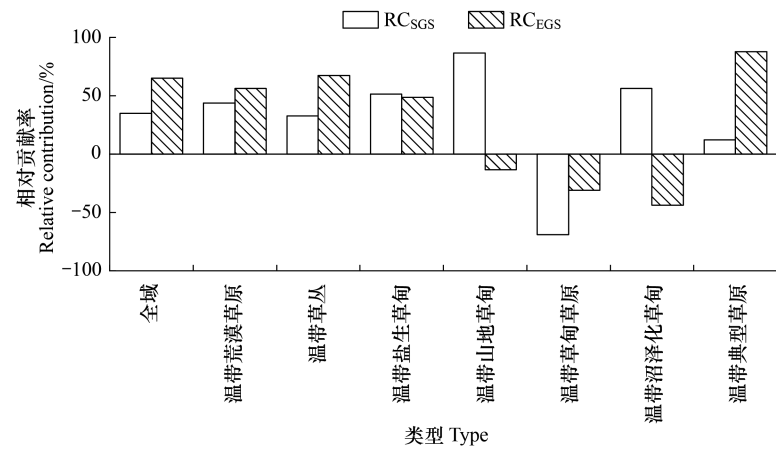


图 18 中国温带草地返青期和枯黄期对 GPP 年际变化趋势相对贡献率

Fig.18 Relative contribution of SGS and EGS of grassland to the interannual trend of GPP in China's temperate zone

$RC_{SGS}$ :SGS 对 GPP 变化相对贡献率 Relative contribution of SGS to the variations in GPP; $RC_{EGS}$ :EGS 对 GPP 变化相对贡献率 Relative contribution of EGS to the variations in GPP

像元尺度上 SGS 和 EGS 对草地 GPP 年际变化趋势的相对贡献率空间分布情况如图 19 所示。整体来说,SGS 和 EGS 对年际 GPP 的变化趋势在空间上均表现出了广泛地积极贡献。SGS 对 GPP 年际变化起到积极贡献的像元占比约为 55.2%,主要范围分布在新疆草地的南部、内蒙古西部和东部边缘以及东北草地小兴安岭一带。此外, $RC_{SGS}$  值高于 50% 的区域较为零散地分布在新疆草地的中部和南部、黄土高原北部、内蒙古东部边缘以及东北北部,其像元占比共为 27.5%。 $RC_{SGS}$  表现为负贡献的区域则分布在新疆草地北部、内蒙古的东北部和中部地区,其中  $RC_{SGS}$  超过 50% 的像元占比为 23.5%。 $RC_{EGS}$  为负的像元占比约为 42.6%,大多分布在内蒙古东北部和东北东部,其中相对贡献率为负且数值超过 50% 的像元占比为 17.1%;而  $RC_{EGS}$  表现为正的像元比例约为 57.4%,主要分布在内蒙古中西部、华北平原以及新疆草地,其  $RC_{EGS}$  值超过 50% 的像元比例

几乎是负相对贡献率的 2 倍(32.1%),大多散布在内蒙古高原中部和黄土高原西部、新疆草地的西北边缘。

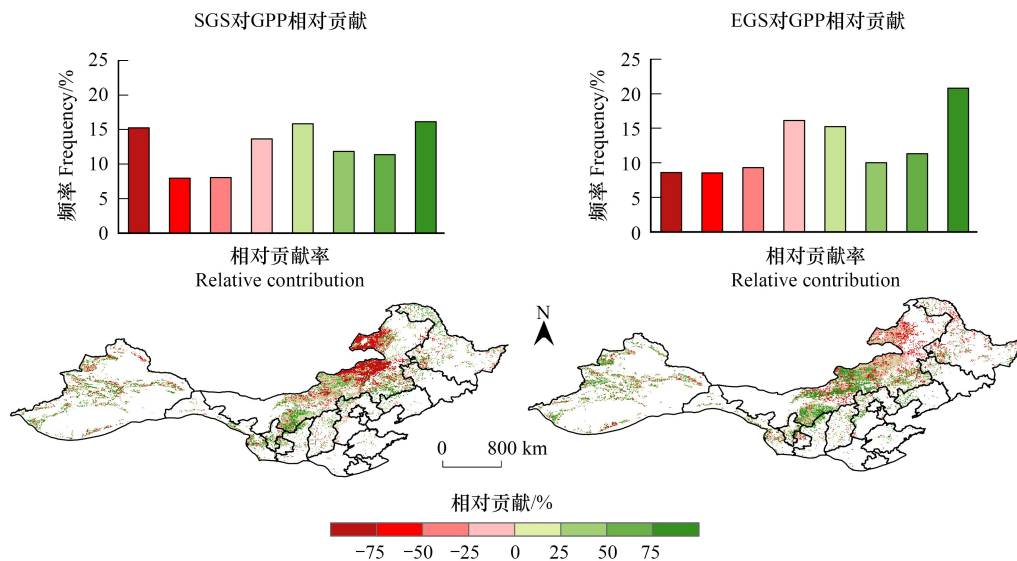


图 19 中国温带草地返青期和枯黄期对 GPP 年际变化趋势相对贡献率空间分布图

Fig.19 Spatial distribution of the relative contribution of SGS and EGS to the interannual trend of GPP in temperate grasslands of China

GPP:总初级生产力 Gross primary productivity

### 3 讨论

温度通过调节植被光合作用时酶的活性在植被生长变化过程中扮演着至关重要的角色<sup>[37]</sup>。然而,鉴于全球昼夜升温的不对称性,最近研究普遍认为仅使用日平均温度模拟植被物候可能会高估植被物候期的变化<sup>[38-39]</sup>。基于此,研究分析了不同季前时期白天温度/夜间温度对研究区草地物候期的影响。结果发现,SGS 与所有时期的季前  $T_{\min}$  均保持着广泛地负相关关系,且在春季时期这种负相关关系更加强烈。造成这一现象的原因可能是由于夜间变暖优化了植被的叶、根呼吸作用<sup>[40]</sup>,特别是在温带草原地区<sup>[41]</sup>,导致更多碳水化合物消耗,从而增强第二天白天的光合作用;夜间变暖有助于降低植被受到霜冻的风险<sup>[42]</sup>。此外,研究区大部分草地类型的重要水源主要取决于春季解冻<sup>[43]</sup>, $T_{\min}$  升高起到了缓解草地植被缺水的作用,从而促进草地发育。相比之下,不同时期季前  $T_{\max}$  对研究区草地返青的影响比较复杂。短期的(当月到季前 2 个月) $T_{\max}$  对 SGS 有微弱的促进作用,这可能是由于  $T_{\max}$  增温虽然可以刺激草地植被光合作用,但这种促进作用会因水分含量而受到限制。先前的研究也表明,在水分胁迫地区,植被的生长发育更多的依赖水分利用而非温度, $T_{\max}$  升高会加剧土壤水分的蒸散发,增加水分胁迫效应而造成植被发育延缓<sup>[44]</sup>。在季前五个月时  $T_{\max}$  对 SGS 整体表现为提前作用,出现这种现象的原因可能是由于在经历寒冷冬季的温带地区,草地植被需要一定的热条件(累计温度高于某个阈值)才能开始春季生长<sup>[45]</sup>,但在植被返青之前,夜间温度比白天温度更可能低于阈值温度,所以它对实现返青所需的热量的贡献较小<sup>[42]</sup>,该时期白天增温可以满足触发中国温带草原返青期的热量需求<sup>[19]</sup>。

EGS 对  $T_{\max}$  的响应结果显示,EGS 与当月到季前 3 个月的  $T_{\max}$  表现出负相关关系,而与同时期的  $T_{\min}$  呈正相关关系。这表明昼夜温度对研究区草地 EGS 产生了相反的影响,该结果与 Wu 等<sup>[46]</sup>研究全球枯黄期的结果保持一致。通常寒冷的夜晚和霜冻风险的增加被认为是控制植物衰老的最重要条件之一<sup>[47]</sup>,较高的季前  $T_{\min}$  可以增加无霜期<sup>[48]</sup>,从而延长 EGS。然而,同一时期白天暖化可能会减少植被的光合作用并导致 EGS 提前结束,尤其是对生长在干旱半干旱地区的草地。这主要是因为植被会通过关闭气孔减弱蒸腾作用以抵御水分过度流失<sup>[49]</sup>。此外,Wu 等<sup>[46]</sup>的研究结果表明  $T_{\max}$  的增加会加重干旱,导致 EGS 提前发生; $T_{\min}$  的升高则在



一定程度上可以缓解干旱状况,从而使 EGS 延迟。季前四个月和季前五个月的  $T_{\max}$  对 TGF、TSM、THM 的 EGS 有延迟作用,这可能是由于这些地区夏季降水多,受到的水分限制较小,所以夏季  $T_{\max}$  的增加有助于加强植被光合酶的活性。

除了温度外,季前累积 Pre 对我国温带草地物候期存在一定程度的影响。从不同季前时间来看,短期的降水(当月和季前 1 个月)对 SGS 有微弱抑制作用,这可能是由于研究区的草地多分布在干旱半干旱地区,这些区域的土壤持水力相对较差且蒸发量大,加之降水通常为瞬时降水,因此降水的可利用率相对较低<sup>[50]</sup>。随着季前时间的增加,累积 Pre 的影响逐渐转变为促进作用且在季前 3 个月时达到最大,这表明春季降水对我国温带 SGS 的影响至关重要。另外,由于前一年冬季的降水有利于当年土壤墒情<sup>[51]</sup>,因此,季前五个月的累积降水增多也会对 SGS 起到一定程度的提前作用。累积降水的促进作用对 TDS、THM 以及 TMS 的影响相对较大。就 EGS 而言,本研究发现季前累积 Pre 的增加有利于延缓 EGS。很大一部分是由于季前降水可以在一定程度上缓解水分限制,促进植被生长和光合作用并降低叶绿素降解速率,从而起到延缓植被衰老的作用。研究结果显示,季前 2 个月的累积 Pre 对 EGS 的延迟最为强烈,这表明夏季末的降水对 EGS 的发生时间有决定性作用。

相对于温度和降水,虽然季前累积 Srad 对草地物候期的影响相对较弱且表现出显著相关的区域较小,但季前累积 Srad 整体对研究区 SGS 起到了促进作用,这是由于 Srad 升高有助于有效积温的累积,而且 Srad 增加意味着光照时间延长,从而刺激植被返青<sup>[52]</sup>。同样地,研究结果发现秋季累积 Srad 对 EGS 起到了延迟作用,主要是因为白天的日照量较高可以阻止脱落酸的积累,从而减缓叶片衰老速度<sup>[53]</sup>;然而夏季过强的 Srad 会减少当地的降水量从而对 EGS 起到了抑制作用。

量化驱动草地 GPP 年际变化趋势的物候指标贡献发现,SGS 和 EGS 均对研究区草地 GPP 年际变化趋势起到了积极贡献,但 EGS 的作用略强于 SGS。出现这种情况的原因可能是由于秋季光合作用的增加大于秋季呼吸作用增加<sup>[54]</sup>。其它的自然因素,如良好的气候条件也会增加草地的丰富度和覆盖范围,从而对植被生产力年产量产生积极的贡献。同时,人为影响,如自然保护政策的实施也可能有助于当地草地生产力的积累。因此,后续深入探讨并逐个量化除物候指标之外的驱动因子对草地 GPP 的年际变化贡献十分有必要。

#### 4 结论

研究基于 GIMMS NDVI3g 数据,采用动态阈值法和 Logistic 拟合法提取 1982—2015 年中国温带草地物候数据集,探究草地物候对不同季前时间尺度气候驱动因子的响应机制以及物候指标与草地 GPP 间的关系。结果表明:(1)季前  $T_{\min}$  增温均会显著提前 SGS,季前  $T_{\max}$  增温仅在当月至季前 2 个月对 SGS 有微弱提前作用;季前 3 个月累积 Pre 和季前累积 Srad 增加对 SGS 提前有促进作用;昼夜温度对 EGS 起到相对作用;随时间推移,季前累积 Pre 对 EGS 表现出推迟作用,季前 Srad 对 EGS 的延迟作用逐渐减弱。(2)区域尺度上,SGS 和 EGS 对最佳季前  $T_{\min}$  的敏感性最强,分别为  $-0.727\text{d}/^{\circ}\text{C}$  和  $0.365\text{d}/^{\circ}\text{C}$ 。不同草地类型 SGS 而言,最佳季前  $T_{\min}$  对 TMS、TGF、TMM 和 TSM 影响最大,最佳季前 Pre 对 TDS 和 THM 影响最强;就 EGS 而言,TMS、TSM 对最佳季前  $T_{\min}$  的敏感性最强,TTS、TDS 和 TMM 对最佳季前  $T_{\max}$  敏感性最强,TGF、THM 对最佳季前 Pre 更敏感。(3)SGS 提前和 EGS 延迟分别有助于春季和秋季 GPP 的累积,但 EGS 对草地 GPP 年际变化趋势的相对贡献率强于 SGS。其中,TGF、TMS 和 TTS 草地 EGS 对 GPP 年际变化起到主导作用。研究厘清了最佳季前气候驱动因子在何种程度上解释草地 SGS 和 EGS 的变化,并在像元尺度上明晰物候指标对草地 GPP 动态变化的定量贡献。该成果对深入了解全球气候变化对陆地生态系统作用以及植被物候模型改进具有重要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] 代武君,金慧颖,张玉红,周志强,刘彤. 植物物候学研究进展. 生态学报, 2020, 40(19): 6705-6719.
- [2] 翟佳,袁凤辉,吴家兵. 植物物候变化研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3237-3243.
- [3] 崔林丽,史军,杜华强. 植被物候的遥感提取及其影响因素研究进展. 地球科学进展, 2021, 36(1): 9-16.

- [ 4 ] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [ 5 ] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 2016, 61(2): 139-154.
- [ 6 ] Suttie J M, Reynolds S G, Batello C. Grasslands of the World. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2005, 514.
- [ 7 ] Piao S, Fang J, Zhou L, Wang X, Ciais P, Liu J, Tang Y. 2006. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*. 12, 672-685.
- [ 8 ] 何玉杰, 孔泽, 户晓, 张江, 王猛, 彭长辉, 朱求安. 水热条件分别控制了中国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势. 生态学报, 2022, 42(2): 766-777.
- [ 9 ] Xu X J, Du H Q, Fan W L, Hu J G, Mao F J, Dong H. Long-term trend in vegetation gross primary production, phenology and their relationships inferred from the FLUXNET data. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 605-616.
- [ 10 ] Doussoulin-Guzmán M A, Pérez-Porras F J, Triviño-Tarradas P, Ríos-Mesa A F, García-Ferrer Porras A, Mesas-Carrascosa F J. Grassland phenology response to climate conditions in biobio, *Chile* from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 475.
- [ 11 ] Ren S L, Vitasse Y, Chen X Q, Peichl M, An S. Assessing the relative importance of sunshine, temperature, precipitation, and spring phenology in regulating leaf senescence timing of herbaceous species in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 313: 108770.
- [ 12 ] Fu Y H, Zhou X C, Li X X, Zhang Y R, Geng X J, Hao F, Zhang X, Hanninen H, Guo Y H, De Boeck H D. Decreasing control of precipitation on grassland spring phenology in temperate China. *Global Ecol. Biogeogr.* 30, 490-499.
- [ 13 ] Ren S L, Peichl M. Enhanced spatiotemporal heterogeneity and the climatic and biotic controls of autumn phenology in northern grasslands. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147806.
- [ 14 ] Ma P F, Zhao J X, Zhang H Z, Zhang L, Luo T. Increased precipitation leads to earlier green-up and later senescence in Tibetan alpine grassland regardless of warming. *Science of The Total Environment*, 2023: 162000.
- [ 15 ] Rossi S, Isabel N. Bud break responds more strongly to daytime than night-time temperature under asymmetric experimental warming. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 446-454.
- [ 16 ] 朱军涛, 郑家禾. 昼夜不对称变暖对陆地生态系统的影响. 生态学杂志, 2022, 41(4): 777-783.
- [ 17 ] Shen M G, Piao S L, Chen X Q, An S, Fu Y H, Wang S P, Cong N, Janssens I A. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3057-3066.
- [ 18 ] Yuan M X, Wang L C, Lin A W, Liu Z J, Li Q J, Qu S. Vegetation green up under the influence of daily minimum temperature and urbanization in the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105760.
- [ 19 ] Shen X J, Liu B H, Henderson M, Wang L, Wu Z F, Wu H T, Jiang M, Lu X G. Asymmetric effects of daytime and nighttime warming on spring phenology in the temperate grasslands of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 240-249.
- [ 20 ] Ma R, Shen X J, Zhang J Q, Xia C L, Liu Y W, Wu L Y, Wang Y J, Jiang M, Lu X G. Variation of vegetation autumn phenology and its climatic drivers in temperate grasslands of China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 114: 103064.
- [ 21 ] Ren S L, Yi S, Peichl M, Wang X Y. Diverse responses of vegetation phenology to climate change in different grasslands in Inner Mongolia during 2000-2016. *Remote Sens*, 2017, 10: 17.
- [ 22 ] Mekonnen Z A, Grant R F, Schwalm C. Contrasting changes in gross primary productivity of different regions of North America as affected by warming in recent decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 218/219: 50-64.
- [ 23 ] Xia J Y, Niu S L, Ciais P, Janssens I A, Chen J Q, Ammann C, Arain A, Blanken P D, Cescatti A, Bonal D, Buchmann N, Curtis P S, Chen S P, Dong J W, Flanagan L B, Frankenberg C, Georgiadis T, Gough, C M, Hui D F, Kiely G, Li J W, Lund Magnus, Magliulo V, Marcolla B, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Olesen J E, Piao S L, Raschi A, Rouspard O, Suyker A E, Urbaniak M, Vaccari F P, Varlagin A, Vesala T, Wilkenson M, Weng E S, Wohlfahrt G, Yan L M, Luo Y Q. Joint control of terrestrial gross primary productivity by plant phenology and physiology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112: 2788-2793.
- [ 24 ] Zhou S, Zhang Y, Caylor K K, Luo Y Q, Xiao X M, Ciais P, Huang Y F, Wang G Q. Explaining inter-annual variability of gross primary productivity from plant phenology and physiology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 227: 246-256.
- [ 25 ] 董晓宇, 姚华荣, 戴君虎, 朱梦瑶. 2000—2017 年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响. 地理科学进展, 2020, 39(1): 24-35.
- [ 26 ] 原媛, 母艳梅, 邓钰洁, 李鑫豪, 姜晓燕, 高圣杰, 查天山, 贾昕. 植被覆盖度和物候变化对典型黑沙蒿灌丛生态系统总初级生产力的影响. 植物生态学报, 2022, 46(2): 162-175.
- [ 27 ] Zhou S, Zhang Y, Ciais P, Xiao X M, Luo Y Q, Caylor K K, Huang Y F, Wang G Q. Dominant role of plant physiology in trend and variability of gross primary productivity in North America. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-10.
- [ 28 ] Chen Y Y, Yang K, He J, Qin J, Shi J C, Du J Y, He Q. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D20).

- [29] Shen M G, Zhang G X, Cong N, Wang S P, Kong W D, Piao S L. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 190: 71-80.
- [30] Zheng Y, Yuan W. Interactive comment on "Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation, 1982—2017". *Earth System Science Data Discussions*, 2019, 1-31.
- [31] He Z B, Du J, Zhao W Z, Yang J J, Chen L F, Zhu X, Chang X X, Liu H. Assessing temperature sensitivity of subalpine shrub phenology in semi-arid mountain regions of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 213: 42-52.
- [32] Zhou J H, Cai W T, Qin Y, Lai L M, Guan T Y, Zhang X L, Jiang L H, Du H, Yang D W, Cong Z T, Zheng Y R. Alpine vegetation phenology dynamic over 16 years and its covariation with climate in a semi-arid region of China. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 119-128.
- [33] Wang Y Q, Luo Y, Shafeeque M. Interpretation of vegetation phenology changes using daytime and night-time temperatures across the Yellow River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133553.
- [34] Güsewell S, Furrer R, Gehrig R, Pietragalla B. Changes in temperature sensitivity of spring phenology with recent climate warming in Switzerland are related to shifts of the pre-season. *Global Change Biology*, 2017, 23(12): 5189-5202.
- [35] 姚荣鹏, 张勃, 张耀文, 王立兵. 甘肃河东地区植被物候及其对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 714-723.
- [36] Jin J, Ma X, Chen H, Wan H, Kang X M, Wang X F, Wang Y, Yong B, Guo F S. Grassland production in response to changes in biological metrics over the Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment*, 2019, 666: 641-651.
- [37] 付永硕, 李昕熹, 周轩成, 耿晓君, 郭亚会, 张雅茹. 全球变化背景下的植物物候模型研究进展与展望. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(9): 1206-1218.
- [38] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Myneni R B, Chen A P, Chevallier F, Dolman A J, Janssens I A, Peñuelas J, Zhang G X, Vicca S, Wan S Q, Wang S P, Zeng H. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 2013, 501(7465): 88-92.
- [39] 周玉科. 基于遥感的中国东北植被物候不对称特征分析. *遥感技术与应用*, 2019, 34(2): 345-354.
- [40] Griffin K L, Turnbull M, Murthy R, Lin G H, Adams J, Farnsworth B, Mahato T, Bazin G, Potasnak M, Berry J A. Leaf respiration is differentially affected by leaf vs. stand-level night-time warming. *Global Change Biology*, 2002, 8(5): 479-485.
- [41] Wan S Q, Xia J Y, Liu W X, Niu S L. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration. *Ecology*, 2009, 90(10): 2700-2710.
- [42] Piao S L, Tan J G, Chen A P, Fu Y H, Ciais P, Liu Q, Janssens I A, Vicca S, Zeng Z Z, Jeong S J, Li Y, Myneni R B, Peng S S, Shen M G, Peñuelas J. Leaf onset in the Northern Hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-8.
- [43] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, Gao P, Wang F, Zhao G J. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209/210: 87-99.
- [44] Dorji T, Totland O, Moe S R, Hopping K A, Pan J B, Klein J A. Plant functional traits mediate reproductive phenology and success in response to experimental warming and snow addition in Tibet. *Global Change Biology*, 2013, 19(2): 459-472.
- [45] Shen M G, Tang Y H, Chen J, Zhu X L, Zheng Y H. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1711-1722.
- [46] Wu C Y, Wang X Y, Wang H J, Ciais P, Peñuelas J, Myneni R B, Desai A R, Gough C M, Gonsamo A, Black A T, Jassal R S, Ju W M, Yuan W P, Fu Y S, Shen M G, Li S H, Liu R G, Chen J M, Ge Q S. Contrasting responses of autumn-leaf senescence to daytime and night-time warming. *Nature Climate Change*, 2018, 8(12): 1092-1096.
- [47] Yuan M X, Zhao L, Lin A W, Li Q J, She D X, Qu S. How do climatic and non-climatic factors contribute to the dynamics of vegetation autumn phenology in the Yellow River Basin, China? *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106112.
- [48] Alward R D, Detling J K, Milchunas D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming. *Science*, 1999, 283(5399): 229-231.
- [49] Cochard H, Coll L, Le Roux X, Améglio T. Unraveling the effects of plant hydraulics on stomatal closure during water stress in walnut. *Plant Physiology*, 2002, 128(1): 282-290.
- [50] 倪璐, 吴静, 李纯斌, 秦格霞, 李政, 孔婕. 近 30 年中国天然草地物候时空变化特征分析. *草业学报*, 2020, 29(1): 1-12.
- [51] 张煦庭. 中国温带地区草地植被动态时空特征及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [52] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.
- [53] Gepstein S, Thimann K V. Changes in the abscisic acid content of oat leaves during senescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1980, 77(4): 2050-2053.
- [54] Keenan T F, Richardson A D. The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: implications for predictive models. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2634-2641.