

青藏高原草地净初级生产力对气候变化的敏感性分析

宿茂鑫, 张美玲*, 徐士博

甘肃农业大学 理学院, 数量生物学研究中心, 兰州 730070

摘要: 基于气象、土壤和遥感数据, 利用 DAYCENT 模型对 1971—2020 年青藏高原草地生产力进行模拟, 并对其进行了敏感性分析。结果表明: 在模拟情境下, 草地净初级生产力 (NPP) 对各气候因子的敏感程度从大到小依次为温度、降水量和太阳辐射, 其敏感性阈值分别为 4 °C、20% 和 40%。在空间上, 受最高温影响, 草地 NPP 变化量的空间分布为东南高西北低; 在降水量影响下, 草地 NPP 变化量的空间分布为由东南向中部逐渐递减; 在太阳辐射 40% 的变动幅度下, 草地 NPP 的变化量整体呈中部低、南部和东北部高的分布趋势。除此之外, 气温和降水量共同对草地 NPP 的影响比单一因子对草地 NPP 的影响大, 表明在暖湿条件下, 青藏高原草地 NPP 对气候变化响应更明显, 即草地 NPP 对气候变化的敏感性会增强。

关键词: DAYCENT 模型; 净初级生产力; 青藏高原; 敏感性分析

Sensitivity analysis of grassland net primary productivity to climate change in Qinghai-Xizang Plateau

SU Maoxin, ZHANG Meiling*, XU Shibao

Center for Quantitative Biology, College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Background, aim, and scope Grassland ecosystem is one of the terrestrial ecosystems widely distributed on the earth. The Qinghai-Xizang Plateau, known as the “roof of the world”, accounts for a large proportion of China’s grasslands. Due to the increase of global carbon emissions, global warming has intensified, and the Qinghai-Xizang Plateau has encountered ecological problems such as the decline of grassland productivity. Only by better simulating the adaptation mechanism of the Qinghai-Xizang Plateau ecosystem to climate change, in order to accurately predict the impact of future climate change on the ecosystem of the Qinghai-Xizang Plateau. **Materials and methods** The method used in this paper is the DATCENT model. The meteorological data of this study comes from the website of the China Meteorological Data Service Center (<http://data.cma.cn/>). The meteorological data is from the soil type data provided by the World Soil Database

收稿日期: 2022-07-21; 录用日期: 2022-11-12; 网络出版: 2022-11-30

Received Date: 2022-07-21; Accepted Date: 2022-11-12; Online first: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32260353); 甘肃省重点研发计划 (21YF5WA096); 甘肃省自然科学基金项目 (1606RJZA077, 1308RJZA262)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (32260353); Key Research and Development Program of Gansu Province (21YF5WA096); Natural Science Foundation of Gansu Province (1606RJZA077, 1308RJZA262)

通信作者: 张美玲, E-mail: zhangml@gsau.edu.cn

Corresponding Author: ZHANG Meiling, E-mail: zhangml@gsau.edu.cn

引用格式: 宿茂鑫, 张美玲, 徐士博. 2025. 青藏高原草地净初级生产力对气候变化的敏感性分析 [J]. 地球环境学报, 16(2): 234–246. <https://cstr.cn/32259.14.JEE222097>.

Citation: Su M X, Zhang M L, Xu S B. 2025. Sensitivity analysis of grassland net primary productivity to climate change in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 16(2): 234–246. <https://cstr.cn/32259.14.JEE222097>.

V1.2, and the remote sensing data is from the earth observation system of NASA (<https://www.nasa.gov/>) and University of Maryland website GLCF. **Results** The NPP of grassland changes by 17.34, 8.24, 0.29 and $0.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (calculated in C) on average for each unit of change in maximum temperature, minimum temperature, precipitation and solar radiation. Under the simulation scenarios of this study, the sensitivity thresholds of maximum (minimum) temperature, precipitation and solar radiation are $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 20% and 40% respectively. Spatially, grassland NPP shows different trends under the influence of various climatic factors. In addition, the influence of both temperature and precipitation on grassland NPP is greater than that of a single factor. **Discussion** By analyzing the single-factor relationship between grassland NPP and temperature, precipitation and solar radiation, it was found that the sensitivity of grassland NPP to these climatic factors varies significantly. Among them, grassland NPP shows a relatively high sensitivity to different variations in the maximum temperature, while its sensitivity to the minimum temperature is slightly lower. In addition, under different changes in precipitation and solar radiation, grassland NPP shows a relatively low sensitivity to them. Subsequently, through the research and analysis of the relationship between grassland NPP and the two factors of temperature and precipitation, it was found that the combined influence of these two factors on grassland NPP is greater than that of a single factor, with temperature being the dominant factor. **Conclusions** According to the above analysis, the sensitivity of grassland NPP to various climatic factors is the maximum temperature, the minimum temperature, precipitation and solar radiation, with sensitivity thresholds of $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 20% and 40% respectively. Through the comprehensive analysis of these four sensitive factors, it is found that the grassland NPP is positively correlated with the maximum temperature, minimum temperature and precipitation, and negatively correlated with solar radiation. Moreover, changes in temperature and precipitation together had a greater impact on grassland NPP, and temperature was the dominant factor. **Recommendations and perspectives** The analysis shows that if the climate continues to develop towards warm and humid in the future, the sensitivity of grassland NPP on the Qinghai-Xizang Plateau will continue to increase, which provides a direction for the adaptive management of grassland on the Qinghai-Xizang Plateau in the future. However, only three climate factors have been studied in this paper, and other climate factors may also have an impact on grassland NPP, so corresponding research can be continued in this direction.

Key words: DAYCENT model; net primary productivity; Qinghai-Xizang Plateau; sensitivity analysis

草地具有涵养水源、防风固沙、净化空气等重要生态功能, 草地生态系统是地球上分布较为广泛的陆地生态系统之一, 在全球碳循环和气候调节中发挥重要作用 (刘洋洋等, 2021; 杨倩等, 2021; 鄢玲艳等, 2022)。中国草地面积约占陆地表面的 41.7%, 在陆地生态系统中所占面积最大 (沈海花等, 2016; 张晓宁等, 2022)。具有“世界屋脊”之称的青藏高原是欧亚大陆草地的重要组成部分, 也是中国的草地畜牧业基地, 其在维护高原生态屏障功能中扮演着重要角色 (Bao et al., 2015; 陈发虎等, 2021; 王瑞涇等, 2022; 张琛悦等, 2022)。

净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 指在单位时间内植被先通过光合作用吸收一部分碳, 这部分碳去除植被自身呼吸消耗的碳损

耗后最终剩余的部分, 在陆地碳循环中具有重要地位 (巴桑参木决等, 2022; Sun et al., 2022)。目前, 国内外采用不同方法对草地 NPP 进行估算, 并分析草地 NPP 的时空特征以及对气候变化的响应。当前常用的模型有基于过程的新型全球动态植被模型 (Agro-IBIS)、DNDC 模型、CASA 模型以及 DAYCENT 模型, 其中 DAYCENT 模型由 CENTURY 模型发展而来, 能够较好地模拟土壤有机碳和全氮, 改进原模型中温度、植物生长等模块并细化土壤模块 (Parton et al., 1998; Del Grosso et al., 2005), 由于其模拟出的植物 NPP 与实测值有良好的一致性, 因此该模型广泛用于 NPP 的估算。

分析青藏高原草地 NPP 对气候变化的敏感性, 对评价草地生态系统的环境质量、调节生态过程

有重要意义。近年来, 通过不同模型系统分析青藏高原草地 NPP 对历史气温与降水变化的响应规律, 发现虽然温度和降水都会对草地 NPP 产生影响, 但温度是限制草地 NPP 的主要因子 (Zhang et al., 2014; 戴黎聪等, 2019; 许洁等, 2020; 黄小涛等, 2021; Liu et al., 2021a; 梁大林和唐海萍, 2022; 刘杰等, 2022); 同时, 针对植被类型差异研究不同类型 NPP 对气候因素的敏感性, 发现气温对高寒草甸植被生产力水平的影响占主导地位, 降水量对高寒草原植被生产力水平的影响较大 (杨柏娟等, 2015; 沈振西等, 2018; Azhdari et al., 2020)。还有利用不同方法模拟草地 NPP 对未来气候变化的响应, 比如设置对照实验、增温增水实验进行草地 NPP 的分析, 基于各种模型研究气候因子的变化幅度对草地 NPP 的影响, 发现草地 NPP 会随着温度的上升而增加, 但增加降水并不会显著提升草地 NPP (沈振西等, 2018; 严文超等, 2018; 李传华等, 2019)。随着对青藏高原研究的逐渐深入, 在气候变化的基础上, 又与人类活动结合进一步探究两者对植被 NPP 的影响, 发现气候变化和人类活动在青藏高原植被 NPP 变化过程中的相对作用在空间上呈现“四线-五区”的格局, 存在显著的时空差异 (陈舒婷等, 2020; Guo et al., 2020)。虽然众多学者分析了多种模型的输入参数对模型输出结果的敏感性, 但已有气候因子以及其他因子变化对 NPP 影响的研究未取得较为统一的结论, 这与实验条件、变化幅度的影响效应不同有关。并且目前仍缺乏对青藏高原较长时间尺度和较大空间尺度上草地 NPP 的敏感性分析的研究。因此, 本研究基于 DATCENT 模型, 使用气象、土壤以及遥感数据对 1971—2020 年青藏高原草地 NPP 进行模拟, 并探讨草地 NPP 对气候因子的敏感性。本研究较好地模拟青藏高原生态系统对气候变化适应机理的过程, 并准确地预测未来气候变化可能会对青藏高原生态系统造成的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原 (26°00'12"—39°46'50"N、73°18'52"—104°46'59"E) 位于中国西南部, 西起帕米尔高原, 向东延伸至横断山脉, 东西长度约 2945 km; 南至喜马拉雅山脉南缘, 北至昆仑山-祁连山北侧, 南北宽度约 1532 km (图 1)。面积约为 $2.57 \times$

10^6 km^2 , 约占中国陆地总面积的 26.8% (张镱锂等, 2002)。青藏高原海拔在 3—5 km, 空气稀薄, 高原腹地的年均气温在 0 °C 以下, 并且随着海拔的升高而降低, 年平均降水也在空间上显示出较大差异, 年平均降水量从高原腹地的 50 mm 以下增加到东南部的 2000 mm (陈舒婷等, 2020)。受全球气候变化影响, 青藏高原的植被类型在逐年发生变化, 但仍以森林和草地为主, 草地面积占青藏高原总面积的 46.7%。

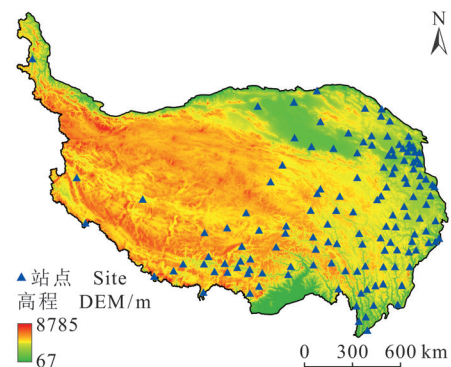


图 1 气象站点分布图

Fig. 1 Distribution map of meteorological stations

1.2 数据与处理

1.2.1 气象数据

在国家气象科学数据中心网站 (<http://data.cma.cn/>) 获取全国气象站点, 在 ArcGIS 10.8 利用青藏高原矢量边界裁剪出青藏高原区域的气象站点。另外还从此网站获取 1971—2020 年青藏高原区域气象站点的逐日最高气温、最低气温、平均降水、太阳辐射、相对湿度和风速数据。

1.2.2 土壤数据

利用世界土壤数据库 V1.2 提供的土壤类型数据, 根据各气象站点的经纬度, 利用 ArcGIS 10.8 软件对土壤类型数据中土壤沙和黏土比例、pH 值等数据进行提取, 并在 Excel 2016 中进行整理。

1.2.3 遥感数据

遥感数据选用美国马里兰大学网站 GLCF 提供的 1971—2000 年 AVHRR 数据和美国国家航天局 (NASA) 地球观测系统 (<https://www.nasa.gov/>) 提供的 2000—2020 年 MOD17A3HGF 数据产品; 将下载的遥感数据使用 Modis reprojection tools (MRT) 对其进行格式转换和拼接等处理, 在 ArcGIS 10.8 软件中利用青藏高原矢量边界对拼

接好的 NPP 遥感数据进行掩膜提取, 从中获得青藏高原各站点的 NPP 数值。

1.3 研究方法

1.3.1 DAYCENT 模型

采用 DAYCENT 模型模拟青藏高原草地 NPP, 该模型是基于植被—土壤营养循环的生物地球化学模型, 在 CENTURY 模型基础上不断发展、改进而来, 最初以“年”为步长模拟大气、植被和土壤中 C、N 的动态, 后来发展到以“月”为步长, 最后发展到以“日”为步长进行模拟 (Parton et al., 1987)。由于 DAYCENT 模型步长单位较小, 可以模拟较短时间内 N、P、S 等的流动、有机质的分解以及土壤湿度和温度变化, 也可精确模拟 CO₂、CH₄、N₂O 等痕量气体的排放 (Del Grosso et al., 2015)。模型的主要模块有植物产量子模块、土壤水分平衡和温度子模块、土壤有机质子模块以及痕量气体通量子模块, 由 1 个主运行程序 (Daycent)、2 个输入文件程序 (Event100、File100)、1 个输出文件程序 (List100) 组成整个运行结构。

DAYCENT 模型的输入参数文件主要有站点文件、天气文件、土壤文件、植被参数。将整理好的数据输入到模型中, 先假设自然状态下, 青藏高原中所有变量仅受自然因素影响, 模型首先运行 4 ka 至平衡态, 使生态系统中各变量达到平稳状态; 然后将此平稳状态作为初始条件, 利用输入的参数文件运转模型, 对比模型的输出结果与实测结果, 最后根据对比结果对站点的相关参数进行调整, 使模拟值与实测值尽可能接近。

1.3.2 DAYCENT 模型验证

将模型得到的 2005 年 NPP 模拟值与获取的该年份实测值按站点进行比较。此外, 利用一元线性回归分析对 NPP 模拟值与 NPP 遥感数据进行相关性分析, 使用 *P* 值和可决系数 (*R*²) 评价模型的拟合程度。

1.3.3 敏感性分析

为分析青藏高原草地 NPP 对气候变化响应的敏感性, 设计不同模拟情景 (表 1), 其中影响因子的变化幅度根据相关研究结果设定 (李栋梁等, 2005; Su et al., 2017; 杨耀先等, 2022)。

表 1 敏感性分析情景设计
Tab. 1 Sensitivity analysis scenario design

| 最高温情景 Maximum temperature | 变化幅度 Change range /°C | 最低温情景 Minimum temperature | 变化幅度 Change range /°C | 降水量情景 Precipitation | 变化幅度 Change range /% | 太阳辐射情景 Solar radiation | 变化幅度 Change range /% |
|---|-----------------------------|---|-----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|
| T ₁ P ₀ S ₀ | +1 | T ₁ P ₀ S ₀ | +1 | T ₀ P ₅ S ₀ | +5 | T ₀ P ₀ S ₁₀ | +10 |
| T ₂ P ₀ S ₀ | +2 | T ₂ P ₀ S ₀ | +2 | T ₀ P ₁₀ S ₀ | +10 | T ₀ P ₀ S ₂₀ | +20 |
| T ₃ P ₀ S ₀ | +3 | T ₃ P ₀ S ₀ | +3 | T ₀ P ₁₅ S ₀ | +15 | T ₀ P ₀ S ₃₀ | +30 |
| T ₄ P ₀ S ₀ | +4 | T ₄ P ₀ S ₀ | +4 | T ₀ P ₂₀ S ₀ | +20 | T ₀ P ₀ S ₄₀ | +40 |
| T ₋₁ P ₀ S ₀ | -1 | T ₋₁ P ₀ S ₀ | -1 | T ₀ P ₋₅ S ₀ | -5 | T ₀ P ₀ S ₋₁₀ | -10 |
| T ₋₂ P ₀ S ₀ | -2 | T ₋₂ P ₀ S ₀ | -2 | T ₀ P ₋₁₀ S ₀ | -10 | T ₀ P ₀ S ₋₂₀ | -20 |
| T ₋₃ P ₀ S ₀ | -3 | T ₋₃ P ₀ S ₀ | -3 | T ₀ P ₋₁₅ S ₀ | -15 | T ₀ P ₀ S ₋₃₀ | -30 |
| T ₋₄ P ₀ S ₀ | -4 | T ₋₄ P ₀ S ₀ | -4 | T ₀ P ₋₂₀ S ₀ | -20 | T ₀ P ₀ S ₋₄₀ | -40 |

“+、-”表示相应变量的增减。“+、-” indicate the increase or decrease of the corresponding variables.

1.3.4 敏感性因子变化图

分析青藏高原草地 NPP 对气温和降水变化的响应之后, 进一步构建敏感性因子变化图, 旨在同时对气温和降水这两个敏感性因子进行比较, 从而观察气温和降水变化一定幅度时, 草地 NPP 对它们的敏感性。青藏高原草地 NPP 对气温和降水的敏感性可用以下公式进行计算:

$$A = (N' - N) \div N \times 100\% \quad (1)$$

式中: *N* 是青藏高原草地 NPP, *N'* 是在气温或者

降水变化一定幅度时模拟得到的 NPP 结果, *A* 是在气温或者降水变化一定幅度时 NPP 相对初始值的变化率, 即对气候因子的敏感性。

1.3.5 草地 NPP 影响因子的敏感性分析矩阵

使用 Python 软件对草地 NPP 影响因子即气温和降水构建敏感性分析矩阵, 用以分析气温和降水同时变化一定幅度或不同幅度, 草地 NPP 对它们的敏感性, 从而综合分析青藏高原草地 NPP 对气候变化的响应。在敏感性分析矩阵中使用均方根

误差度量青藏高原草地 NPP 对气候变化的响应。

2 结果与分析

2.1 DAYCENT 模型的精度验证

首先利用获取的 2005 年实测数据 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>) 对模拟结果进行验证, 由图 2 可知: 除个别站点的 NPP 值与模拟值 (以碳计, 余同) 有一定差距, 绝大部分站点的实测值与模拟值一致, 说明 DAYCENT 模型模拟的青藏高原草地 NPP 准确性较高。

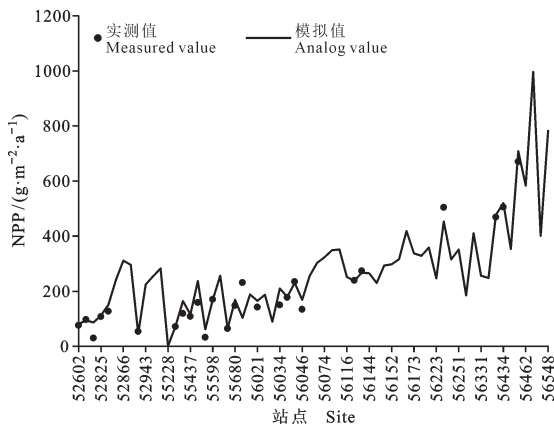


图 2 DAYCENT 模型结果验证

Fig. 2 Verification of DAYCENT model results

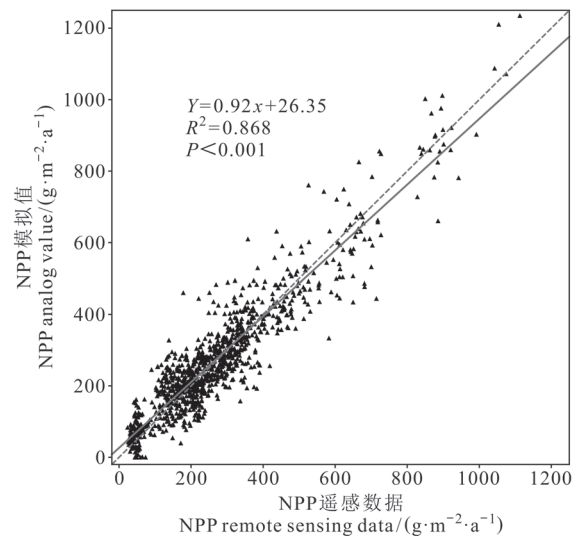
其次, 利用 NPP 遥感数据与模拟值进行一元线性回归分析, 进一步验证模型的精度 (图 3)。从图 3 可知回归系数为 0.92, 回归系数越接近于 1, 说明 NPP 模拟值与遥感数据越接近, 模型的精度越高。除此之外, 计算得出的 NPP 遥感数据与模拟值之间的均方误差和归一化均方误差分别为 76.27、27.57%, 两者的误差较小, 并且由 $P < 0.001$ 、 $R^2 = 0.868$ 可知一元线性回归的拟合优度较高并且模拟值与遥感数据之间具有显著相关性, 进而也表明 DAYCENT 模型的精度较高, 其模拟的草地 NPP 准确性较高。

2.2 青藏高原草地 NPP 的单因子敏感性分析

2.2.1 草地 NPP 与气候因子的线性分析

1971—2020 年在最高温和最低温变化 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、降水量变化 20%、太阳辐射变化 40% 后青藏高原草地 NPP 的变化趋势如图 4 所示。当最高温增加 (或减少) $1\text{—}4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 青藏高原草地 NPP 都持续增加 (或减少), 在最高温增减幅度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$

时, 草地 NPP 最大值达 $348.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小值为 $209.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。与最高温具有相同变化趋势的还有最低温和降水量, 在两者的影响下, 草地 NPP 都分别呈明显上升趋势, 但降水量影响下的草地 NPP 的线性趋势更加强烈。当最低温增减幅度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 草地 NPP 的最大值和最小值分别为 $311.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $245.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 当降水量增减幅度为 20% 时, 草地 NPP 的最大值和最小值分别为 $282.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $271.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。与最高温、最低温、降水量 3 个气候因子不同的是, 青藏高原草地 NPP 在太阳辐射的影响下呈线性下降趋势, 其最大值为 $287.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小值为 $266.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 表明过强的太阳辐射并不会对草地 NPP 产生促进作用, 这是因为较强的太阳辐射会使表层土壤干旱, 不利于植被生长, 进而草地 NPP 持续下降 (Li et al., 2018; Hao et al., 2021)。除此之外, 草地 NPP 对不同气候因子的敏感程度也有较大差异, 草地 NPP 对各气候因子的敏感程度从大到小依次为最高温、最低温、降水量和太阳辐射。对于最高温、最低温和降水量, 平均每增加 1 个单位, 草地 NPP 分别增加 17.34、8.24 和 $0.29\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 而对于太阳辐射, 平均每增加 1 个单位, 草地 NPP 将减少 $0.26\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

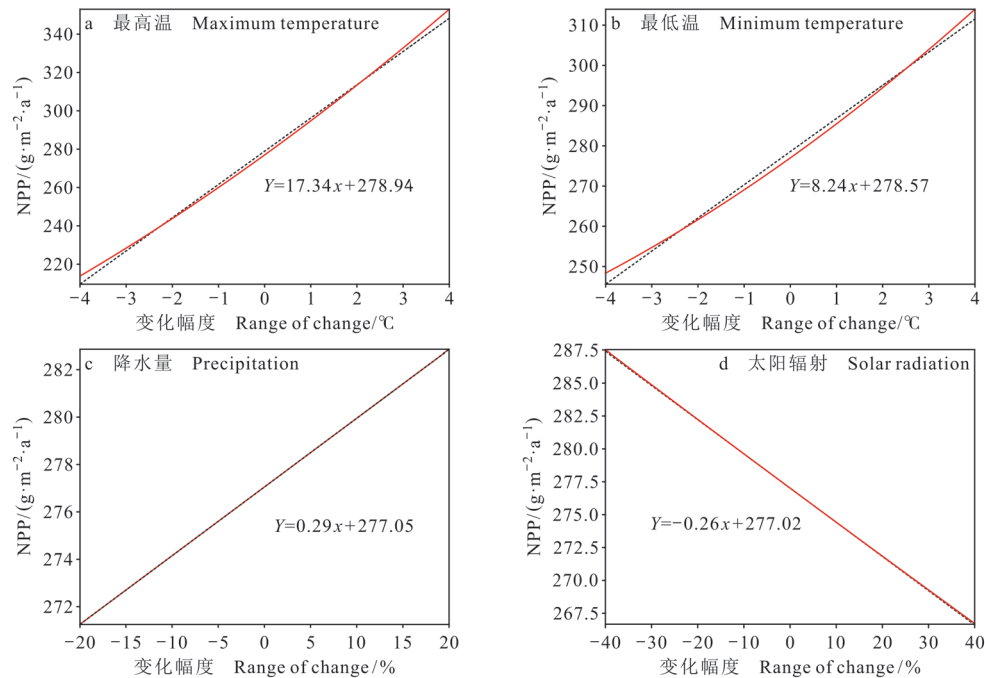


虚线表示对角线 (1:1 线); 实线表示相关性分析的拟合线。

Dotted line indicates diagonal line (1:1 line); the solid line represents the fitting line of correlation analysis.

图 3 草地 NPP 的遥感数据与模拟值的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between remote sensing data and simulated values of grassland NPP



虚线表示草地 NPP 与气候因子的线性拟合线; 实线表示草地 NPP 与气候因子的变化趋势线。

The dotted line represents the linear fitting line of grassland NPP and climatic factors; the solid line represents the trend line of grassland NPP and climate factors.

图 4 草地 NPP 与气候因子的线性分析

Fig. 4 Linear analysis of grassland NPP and climatic factors

2.2.2 最高温变化下草地 NPP 的空间分布

图 5 为 1971—2020 年随着最高温变化 4 °C 青藏高原草地 NPP 变化量的空间分布。整体上青藏高原草地 NPP 的变化量大致呈现由东南向西北逐渐递减的趋势, 中部地区草地 NPP 变化量较大, 最大可达 $240 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从图 5a、5e 可知: 最高温变化 1 °C, 草地 NPP 在整个青藏高原的变化不大。随着温度变化幅度的增大, 青藏高原中部和东部地区的草地 NPP 在不断增加或减小, 但其西北部地区的变化趋势不是很明显 (图 5a—5c、5e—5g)。这是因为青藏高原中部和东部地区海拔适中, 此外最高温升高会促进植物的光合作用, 进而导致这部分地区的草地 NPP 变化量较大。同样地, 青藏高原西北部由于海拔较高, 不利于植物生长, 所以尽管最高温升高有利于植物的光合作用, 但其草地 NPP 只呈现微弱变化。除此之外, 高温升高导致草地 NPP 发生变化的范围要比高温降低导致草地 NPP 发生变化的范围大 (图 5d、5h)。

2.2.3 最低温变化下草地 NPP 的空间分布

图 6 为 1971—2020 年, 最低温变化 4 °C 后青

藏高原草地 NPP 变化量的空间分布。由图 6 可知: 在最低温升高 (降低) 的影响下, 青藏高原草地 NPP 的变化量最大可达 $175 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从图 6d、6h 可知: 与最高温一样, 青藏高原草地 NPP 变化量也呈现由东南向西北递减的趋势, 并且均随着最低温的升高或降低, 青藏高原中部和东部草地 NPP 的变化量逐渐增大。与最高温不同的是, 在最低温升高或降低 1 °C 和 2 °C 时, 草地 NPP 的变化幅度相比最高温较小 (图 6a、6b、6e、6f)。从整体上看, 在最低温的影响下, 青藏高原草地 NPP 变化量在空间分布上变化程度小, 即草地 NPP 对最低温的敏感性较弱。

2.2.4 降水量变化下草地 NPP 的空间分布

图 7 为 1971—2020 年, 降水量变化 20% 后青藏高原草地 NPP 变化量的空间分布。整体上看, 无论降水量增加或减少, 青藏高原草地 NPP 的变化量最大可达 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 并且草地 NPP 变化量都呈现由东南向西部地区减少的趋势 (图 7c、7g), 这是因为东南部地区常年降水量较多, 使得水资源在植被生长中发挥重要作用, 降水量的改变会对草地 NPP 产生影响, 而西部地区降水量不

充沛，在植被的生长中不占主导作用，因此降水量的改变对草地 NPP 影响不大。除此之外，从图 7a 和 7e 还可知：当降水量增加（减少）5% 时，青藏高原整个区域草地 NPP 没有发生改变；当降水量增加（减少）10% 时，青藏高原东南部的草地 NPP 才开始出现变化（图 7b、7f），并且降水

量减少导致草地 NPP 变化的区域要比增加导致草地 NPP 变化的区域大；直到降水量变化 20% 时，青藏高原的东部和中部大部分地区的草地 NPP 才发生明显的增加或减少（图 7d、7h）。因此，与温度相比，青藏高原草地 NPP 对降水量的敏感性较低。

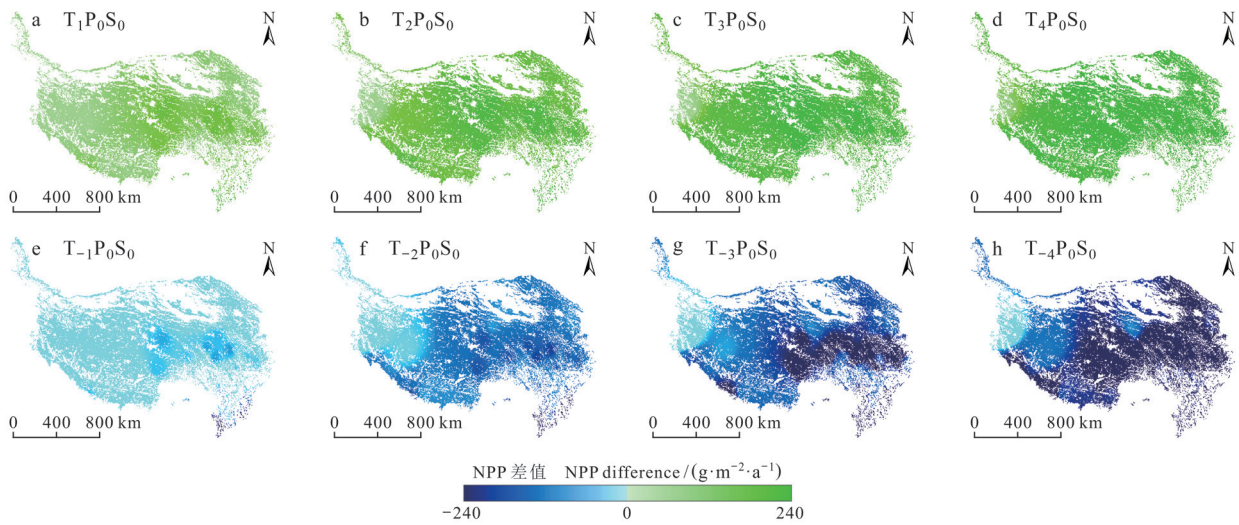


图 5 最高温变化下的 NPP 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of NPP at the maximum temperature change

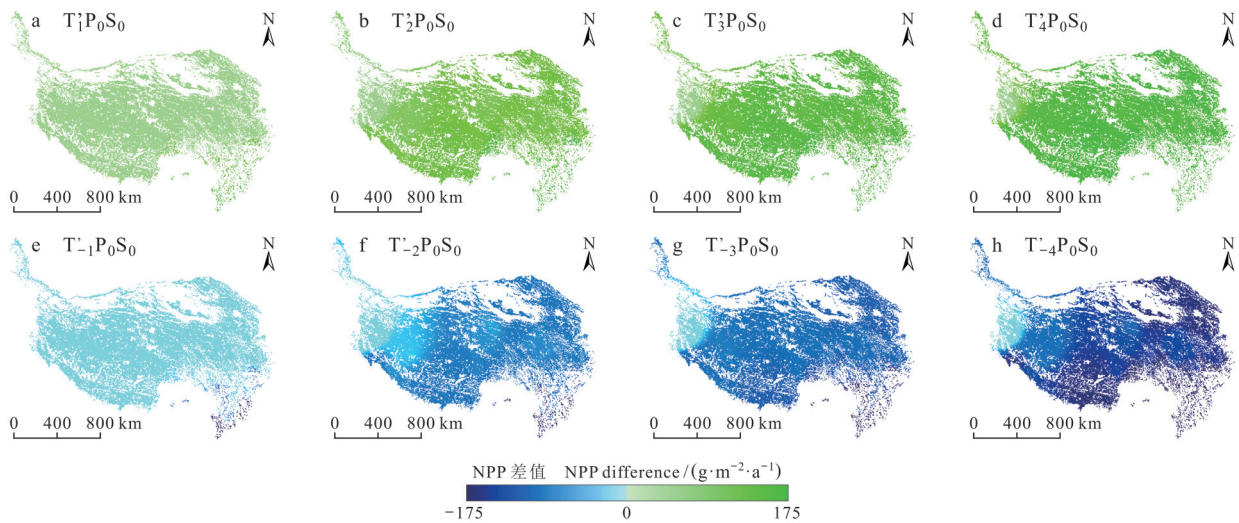


图 6 最低温变化下的 NPP 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of NPP at the minimum temperature change

2.2.5 太阳辐射变化下草地 NPP 的空间分布

1971—2020 年，在太阳辐射变化 10%—40% 后青藏高原草地 NPP 变化量的空间分布如图 8 所示。在太阳辐射影响下，青藏高原草地 NPP 的增

加（减少）量最大可达 $23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与其他气候因子不同，在太阳辐射 40% 的变动幅度下，草地 NPP 变化量整体呈中部低、南部和东北部高的分布趋势，这是因为青藏高原南部和东北部有众多山

脉, 空气稀薄、太阳辐射强, 使得太阳辐射在植被生长中发挥重要作用, 所以太阳辐射变化会对草地 NPP 产生影响。从图 8a、8e 和 8b、8f 可知: 当太阳辐射变化 10% 和 20% 时, 青藏高原草地 NPP 变化量的空间分布没有明显变化, 直到变动幅度达到

30% 时, 青藏高原草地 NPP 变化量明显的区域扩大到西部和东南部地区 (图 8c、8g)。而当太阳辐射变化幅度达到 40% 时, 青藏高原中部地区的草地 NPP 才发生明显变化 (图 8d、8h), 由此可知青藏高原草地 NPP 对太阳辐射的敏感性较低。

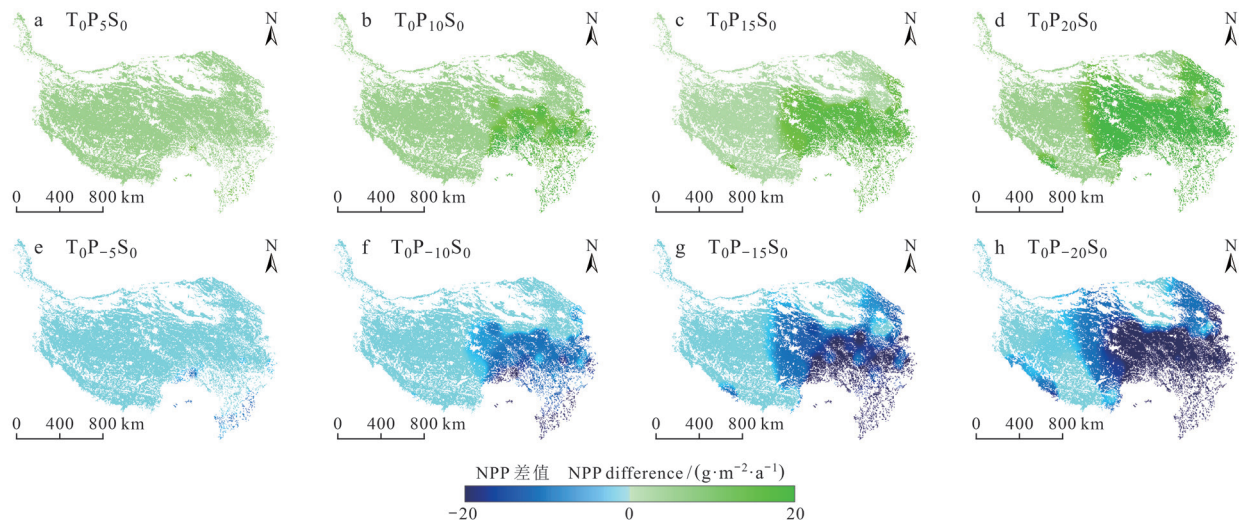


图 7 降水量变化下的 NPP 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of NPP at the precipitation change

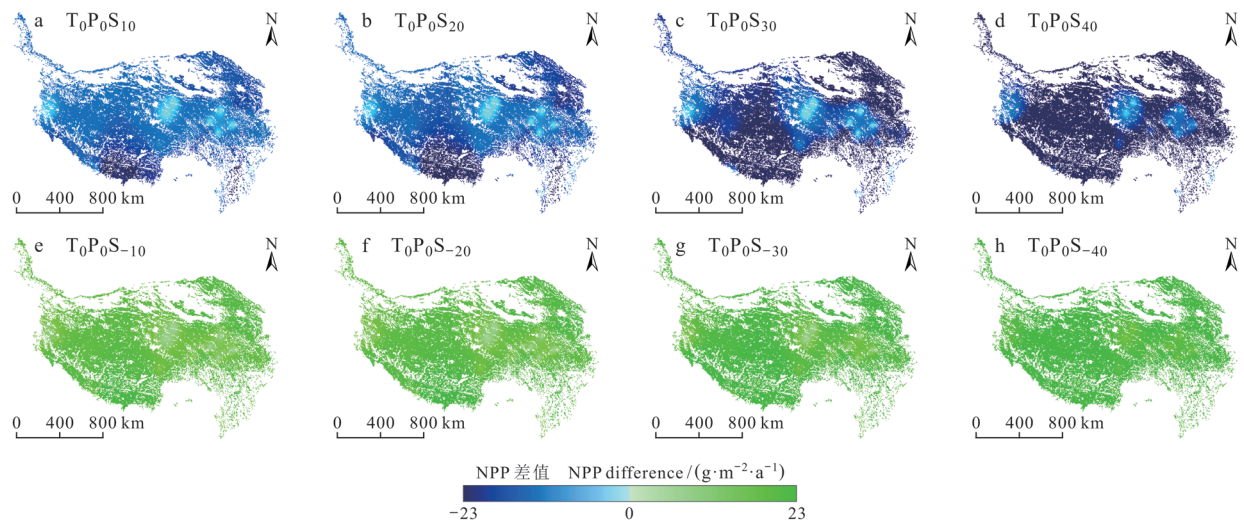


图 8 太阳辐射变化下的 NPP 空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of NPP at the solar radiation change

2.3 青藏高原草地 NPP 影响因子的综合敏感性分析

以上分别是青藏高原草地 NPP 对高温、低温、降水量和太阳辐射的敏感性分析, 在此基础上对比分析草地 NPP 对这些敏感性因子的响应

(图 9)。从图 9 可知: 草地 NPP 与高温、低温和降水量都呈正相关关系, 与太阳辐射呈负相关关系。在降水量和太阳辐射变化的影响下, 变化量都在 10% 以内, 可知草地 NPP 对这两个气候因

子的敏感性较弱。而在最高温增加的影响下，变化量急剧增加，最大达 30%，表明草地 NPP 对高温的敏感性较强，这可能因为青藏高原区域日照时间长，植被生长对高温的依赖性强，高温升高会促进植被的光合作用，进而导致碳的积累，最终使 NPP 增加。与之不同的是，在最高温和最低温减小的影响下，变化量都小于 30%，由此可知温度升高会对青藏高原产生较大影响。

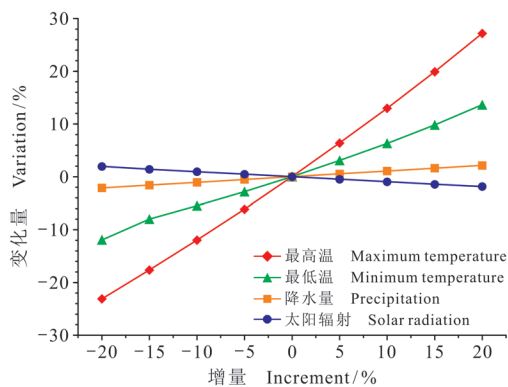


图 9 青藏高原草地 NPP 敏感性因子变化
Fig. 9 Variation of NPP sensitivity factors in grassland of Qinghai-Xizang Plateau

在对比分析青藏高原草地 NPP 对单个影响因子的敏感性后，综合分析草地 NPP 对于气候变化的响应，即按草地 NPP 对气候因子的敏感程度大小，选取气温和降水量来探究草地 NPP 对这两个气候因子变化的响应。由于降水量的变化幅度对草地 NPP 的影响不大，所以在此矩阵中将其变化幅度进行提高，如图 10 所示。除此之外，在此矩阵中使用均方误差 (RMSE) 来衡量草地 NPP 对气候变化的响应。从图 10 可知：当温度变化到某一度时，RMSE 随降水量的增加 (减小) 而增加 (减小)，但其变化幅度不大，每当降水量变化 5%，草地 NPP 的变化量都小于 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ；当降水量变化到某一度时，RMSE 随着温度的增加 (减小) 而增加 (减小)，与降水量不同的是，每当温度变化 $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，草地 NPP 的变化幅度都较大，导致 RMSE 增大。此外，气温上升对草地 NPP 的影响大于气温下降的影响，由此可见，草地 NPP 对气温的敏感性较强。当气温和降水量同时变化一定幅度时，草地 NPP 的变化也较明显，并且两者增加较两者减小对草地 NPP 的影响要大。

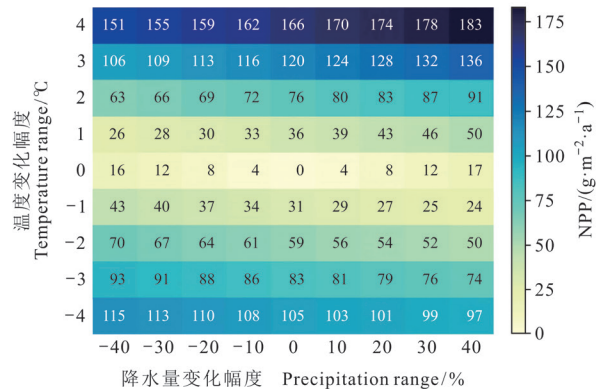


图 10 青藏高原草地 NPP 敏感性分析矩阵
Fig. 10 NPP sensitivity analysis matrix of grassland in Qinghai-Xizang Plateau

3 讨论

通过对青藏高原草地 NPP 与温度、降水、太阳辐射的单因子研究分析，发现草地 NPP 对最高温、最低温、降水量以及太阳辐射的敏感性有显著差异。在最高温不同的变动幅度下，草地 NPP 对其敏感性较大，其最大值为 $348.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，在空间上呈现东部和中部高、西北低的差异；与最高温相比，在最低温的影响下，草地 NPP 的最大值为 $311.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，在空间上波动程度也较小。总体来说，草地 NPP 对温度的敏感性较大，温度变化是 NPP 变化的主导因素 (Cuo et al., 2021; 刘杰等, 2022)。本研究结果不仅证实草地 NPP 对温度的敏感性较大，还证明温度升高 (降低) 会导致草地 NPP 显著增加 (减少)，与一些研究认为草地 NPP 随温度增加而增加的结论相符合 (王常顺等, 2013; 刘刚等, 2017; 严文超等, 2018; Xu et al., 2020)。这与研究的植被类型为高寒草甸有关，受自身特点影响，高寒草甸 NPP 与温度成正相关关系。草地 NPP 变化量在空间上呈现较大差异可能是因为青藏高原中部和东部温度较低，抑制了植被的光合作用，但随温度的升高及较大的气温日较差，光合作用逐渐增强，进而有利于植被碳的积累，最终导致草地 NPP 增加 (杨潇等, 2019; 刘杰等, 2022)。

与温度不同的是，草地 NPP 对降水量和太阳辐射的敏感性较小，降水量和太阳辐射平均每增加 1 个单位，草地 NPP 分别增加和减少 0.29 、 $0.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，表明降水量不是青藏高原草地 NPP 的主导因子，降水增加并不能显著提高植被的光

合作用 (Zhang et al., 2014; 沈振西等, 2018; Zhang et al., 2020; Zeng et al., 2022)。但有研究发现草地 NPP 对降水更敏感, 与降水量呈负相关关系 (Liu et al., 2019; Liu et al., 2021b; Zha et al., 2022)。这可能由于研究时段和研究区面积不同, 导致研究结果的差异, 并且不同植被类型的 NPP 对降水的响应也不同 (Liu et al., 2021a)。在空间分布上, 草地 NPP 的变化量在太阳辐射影响下呈现出中部低、南部和东北部高的分布趋势, 这与张乐乐等 (2019) 发现青藏高原太阳总辐射空间特征相同。当降水量增减的幅度达到 10% 时, 青藏高原的东南部才开始呈现变化并且其变化的区域较小, 这与李传华等 (2020) 利用生物地球化学模型得出的青藏高原东南部降水比较充足的区域, NPP 有增加趋势的结论相一致。

通过对青藏高原草地 NPP 与温度、降水的双因子研究分析, 发现气温和降水单因子变化对草地 NPP 的影响要比双因子变化对草地 NPP 的影响小, 且其中气温是主导因子, 一些关于 NPP 对气候变化的响应研究也证实了草地 NPP 更受温度调控 (戴黎聪等, 2019; Zhang et al., 2021a)。但也有研究表明降水对草地 NPP 变化控制大, NPP 对降水比对温度更敏感 (Liu et al., 2021b; Zhang et al., 2021b), 与本研究结论有差异, 这是由于外界环境对不同植被的影响复杂, 不同类型的植被 NPP 对温度和降水的响应不同。除此之外, 当气温和降水同时增加时, 草地 NPP 的变化幅度要比同时减小时大, 表明若气候继续变暖变湿, 草地 NPP 的敏感性会逐渐增强, 这是因为在暖湿条件下草地的光能利用效率更高 (周紫鹃等, 2017; 沈振西等, 2018), 进而导致草地 NPP 增加。

4 结论

基于 DAYCENT 模型研究 1971—2020 年青藏高原草地 NPP 对气候变化的敏感性和阈值。结果表明模型可以较好地模拟青藏高原草地 NPP, 草地 NPP 对于高温的敏感性最大, 最高温每增加 1 °C, 草地 NPP 平均增加 $17.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其变化量在空间上呈现东南高西北低的趋势。草地 NPP 对低温的敏感性较大, 最低温每增加 1 °C, 草地 NPP 平均增加 $8.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 在空间上, 当低温变化 1 °C 和 2 °C 时, 草地 NPP 变化量的分布不明显, 当低温变化幅度增大时, 在青藏高原的大部分地区

才呈现显著变化。而草地 NPP 对降水量的敏感性较小, 当降水量变化 20% 时, 草地 NPP 的最大值为 $282.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其变化量在空间上呈现由东南部向西部地区减小的趋势。对青藏高原影响最小的气候因子是太阳辐射, 太阳辐射每增加 1 个单位, 草地 NPP 平均减少 $0.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 在空间上只有当太阳辐射变化 30% 时, 草地 NPP 变化量明显的区域才逐步扩大。除此之外, 在最高温、最低温、降水量及太阳辐射这 4 个气候因子变动幅度内, 草地 NPP 的最大值分别为 348.3、311.5、282.9 和 $287.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在本研究模拟情景下, 最高 (低) 温、降水量和太阳辐射的敏感性阈值分别为 4 °C、20% 和 40%。对这 4 个敏感性因子进行综合分析, 发现草地 NPP 与最高温、最低温和降水量都呈正相关关系, 与太阳辐射呈负相关关系, 气温和降水量同时变化要比单因子变化对草地 NPP 的影响大, 气温仍是主导因子, 表明若气候继续朝着暖湿方向发展, 青藏高原草地 NPP 对其敏感性会继续增强。

参考文献

- 巴桑参木决, 温仲明, 刘洋洋, 等. 2022. 西藏草地净初级生产力的时空格局演变及其驱动机制分析 [J]. *草地学报*, 30(4): 778–789. [Basang Canmujue, Wen Z M, Liu Y Y, et al. 2022. Analysis of the spatial-temporal evolution patterns of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Tibet [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 30(4): 778–789.]
- 陈发虎, 汪亚峰, 甄晓林, 等. 2021. 全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究 [J]. *中国藏学*, (4): 21–28. [Chen F H, Wang Y F, Zhen X L, et al. 2021. Research on the environment impact of the Qinghai-Tibet Plateau under global change and the countermeasures [J]. *China Tibetology*, (4): 21–28.]
- 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2020. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应 [J]. *自然资源学报*, 35(10): 2511–2527. [Chen S T, Guo B, Yang F, et al. 2020. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 35(10): 2511–2527.]
- 戴黎聪, 郭小伟, 张法伟, 等. 2019. 青藏高原两种植被类型净初级生产力与气候因素的关系及周转值分析 [J]. *生态学报*, 39(14): 5241–5251. [Dai L C, Guo X W, Zhang

- F W, et al. 2019. The response of net primary productivity of two different vegetation types to climatic factors and root turnover analysis on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(14): 5241–5251.]
- 黄小涛, 姚步青, 马真, 等. 2021. 青海高原草地净初级生产力和降水利用效率时空特征 [J]. *草地学报*, 29(S1): 19–26. [Huang X T, Yao B Q, Ma Z, et al. 2021. Temporal characteristics of grassland net primary productivity and precipitation use efficiency in Qinghai Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 29(S1): 19–26.]
- 李传华, 韩海燕, 范也平, 等. 2019. 基于 Biome-BGC 模型的青藏高原五道梁地区 NPP 变化及情景模拟 [J]. *地理科学*, 39(8): 1330–1339. [Li C H, Han H Y, Fan Y P, et al. 2019. NPP change and scenario simulation in Wudaoliang area of the Tibetan Plateau based on Biome-BGC model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 39(8): 1330–1339.]
- 李传华, 孙皓, 王玉涛, 等. 2020. 基于机器学习估算青藏高原多年冻土区草地净初级生产力 [J]. *生态学杂志*, 39(5): 1734–1744. [Li C H, Sun H, Wang Y T, et al. 2020. Estimation of grassland net primary productivity in permafrost of Qinghai-Tibet Plateau based on machine learning [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 39(5): 1734–1744.]
- 李栋梁, 钟海玲, 吴青柏, 等. 2005. 青藏高原地表温度的变化分析 [J]. *高原气象*, 24(3): 291–298. [Li D L, Zhong H L, Wu Q B, et al. 2005. Analyses on changes of surface temperature over Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 24(3): 291–298.]
- 梁大林, 唐海萍. 2022. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析 [J]. *生态学报*, 42(1): 287–300. [Liang D L, Tang H P. 2022. Analysis of vegetation changes and water temperature driving factors in two alpine grasslands on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(1): 287–300.]
- 刘刚, 孙睿, 肖志强, 等. 2017. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系 [J]. *生态学报*, 37(15): 4936–4945. [Liu G, Sun R, Xiao Z Q, et al. 2017. Analysis of spatial and temporal variation of net primary productivity and climate controls in China from 2001 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(15): 4936–4945.]
- 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 2022. 2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用 [J]. *应用生态学报*, 33(6): 1533–1538. [Liu J, Ji Y H, Zhou G S, et al. 2022. Temporal and spatial variations of net primary productivity (NPP) and its climate driving effect in the Qinghai-Tibet Plateau, China from 2000 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33(6): 1533–1538.]
- 刘洋洋, 任涵玉, 周荣磊, 等. 2021. 中国草地生态系统服务价值估算及其动态分析 [J]. *草地学报*, 29(7): 1522–1532. [Liu Y Y, Ren H Y, Zhou R L, et al. 2021. Estimation and dynamic analysis of the service value of grassland ecosystem in China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 29(7): 1522–1532.]
- 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 2016. 中国草地资源的现状分析 [J]. *科学通报*, 61(2): 139–154. [Shen H H, Zhu Y K, Zhao X, et al. 2016. Analysis of current grassland resources in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 61(2): 139–154.]
- 沈振西, 张豪睿, 孙维, 等. 2018. 藏北高原高寒草甸光能利用效率对增温增水的响应 [J]. *生态环境学报*, 27(6): 1000–1004. [Shen Z X, Zhang H R, Sun W, et al. 2018. Effect of experimental warming and increased precipitation on light use efficiency of an alpine meadow in the northern Tibetan Plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(6): 1000–1004.]
- 王常顺, 孟凡栋, 李新娥, 等. 2013. 青藏高原草地生态系统对气候变化的响应 [J]. *生态学杂志*, 32(6): 1587–1595. [Wang C S, Meng F D, Li X E, et al. 2013. Responses of alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau to climate change: a mini review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 32(6): 1587–1595.]
- 王瑞涇, 冯琦胜, 金哲人, 等. 2022. 青藏高原退化草地的恢复潜势研究 [J]. *草业学报*, 31(6): 11–22. [Wang R J, Feng Q S, Jin Z R, et al. 2022. A study on restoration potential of degraded grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 31(6): 11–22.]
- 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 等. 2020. 2000—2014 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应 [J]. *干旱区地理*, 43(3): 592–601. [Xu J, Chen H L, Shang S S, et al. 2020. Response of net primary productivity of Tibetan Plateau vegetation to climate change based on CEVSA model [J]. *Arid Land Geography*, 43(3): 592–601.]
- 鄯玲艳, 孔令桥, 张路, 等. 2022. 草地生态系统承载力概念、方法及关键问题 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 30(8): 1228–1237. [Yan L Y, Kong L Q, Zhang L, et al. 2022. The definition, methods and key issues of grassland

- ecosystem carrying capacity [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 30(8): 1228–1237.]
- 严文超, 孙庚, 张春波, 等. 2018. 模拟增温和中度放牧对青藏高原东部高寒草甸生态系统净碳交换及组分的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 24(1): 132–139. [Yan W C, Sun G, Zhang C B, et al. 2018. Impacts of experimental warming and moderate grazing on ecosystem carbon exchange and its compositions in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 24(1): 132–139.]
- 杨柏娟, 王思远, 常清, 等. 2015. 青藏高原植被净初级生产力对物候变化的响应 [J]. *地理与地理信息科学*, 31(5): 115–120. [Yang B J, Wang S Y, Chang Q, et al. 2015. Response of NPP to phenology changes in the Tibet Plateau [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 31(5): 115–120.]
- 杨倩, 孟广涛, 谷丽萍, 等. 2021. 草地生态系统服务价值评估研究综述 [J]. *生态科学*, 40(2): 210–217. [Yang Q, Meng G T, Gu L P, et al. 2021. A review on the methods of assessment for the service of grassland ecosystem [J]. *Ecological Science*, 40(2): 210–217.]
- 杨潇, 郭兵, 韩保民, 等. 2019. 青藏高原 NPP 时空演变格局及其驱动机制分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 28(12): 3038–3050. [Yang X, Guo B, Han B M, et al. 2019. Analysis of the spatial-temporal evolution patterns of NPP and its driving mechanisms in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28(12): 3038–3050.]
- 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 2022. 青藏高原近 60 年来气候变化及其环境影响研究进展 [J]. *高原气象*, 41(1): 1–10. [Yang Y X, Hu Z Y, Lu F Q, et al. 2022. Progress of recent 60 years' climate change and its environmental impacts on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 41(1): 1–10.]
- 张琛悦, 赵霞, 辛玉春, 等. 2022. 青海省草地生态系统碳储量及其分布特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 58(2): 286–292. [Zhang C Y, Zhao X, Xin Y C, et al. 2022. Carbon storage and distribution of grassland ecosystems in Qinghai Province [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 58(2): 286–292.]
- 张乐乐, 高黎明, 赵林, 等. 2019. 基于 ITPCAS 数据的青藏高原太阳总辐射时空变化特征 [J]. *太阳能学报*, 40(9): 2521–2529. [Zhang L L, Gao L M, Zhao L, et al. 2019. Spatial and temporal characteristics of global solar radiation over Qinghai-Tibetan Plateau based on ITPCAS dataset [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 40(9): 2521–2529.]
- 张晓宁, 李晓丹, 年丽丽, 等. 2022. 基于文献计量的草地生态系统水源涵养功能研究现状 [J]. *草业学报*, 31(6): 35–49. [Zhang X N, Li X D, Nian L L, et al. 2022. A bibliometric evaluation of the status of the water conservation function of grassland ecosystems [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 31(6): 35–49.]
- 张懿铨, 李炳元, 郑度. 2002. 论青藏高原范围与面积 [J]. *地理研究*, 21(1): 1–8. [Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. 2002. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. *Geographical Research*, 21(1): 1–8.]
- 周紫鹃, 苏培玺, 侍瑞, 等. 2017. 不同高寒生态系统植物光能利用效率及其环境影响 [J]. *生态学杂志*, 36(6): 1570–1577. [Zhou Z J, Su P X, Shi R, et al. 2017. Light use efficiency of plants and the environmental impact factors in different alpine ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 36(6): 1570–1577.]
- Azhdari Z, Rafeie Sardooi E, Bazrafshan O, et al. 2020. Impact of climate change on net primary production (NPP) in south Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6): 409. DOI: 10.1007/s10661-020-08389-w.
- Bao W K, Gao Q Z, Wang J S, et al. 2015. Ecological change on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 60(32): 3048–3056.
- Cuo L, Zhang Y X, Xu R, et al. 2021. Decadal change and inter-annual variability of net primary productivity on the Tibetan Plateau [J]. *Climate Dynamics*, 56(5): 1837–1857.
- Del Grosso S J, Gollany H T, Reyes-Fox M. 2015. Simulating soil organic carbon stock changes in agroecosystems using CQESTR, DayCent, and IPCC Tier 1 methods [M]// Del Grosso S J, Ahuja L R, Parton W J. Synthesis and modeling of greenhouse gas emissions and carbon storage in agricultural and forest systems to guide mitigation and adaptation. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America: 89–110.
- Del Grosso S J, Mosier A R, Parton W J, et al. 2005. DAYCENT model analysis of past and contemporary soil N₂O and net greenhouse gas flux for major crops in the USA [J]. *Soil and Tillage Research*, 83(1): 9–24.
- Guo B, Han B M, Yang F, et al. 2020. Determining the

- contributions of climate change and human activities to the vegetation NPP dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau, China, from 2000 to 2015 [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(10): 663. DOI: 10.1007/s10661-020-08606-6.
- Hao A H, Duan H C, Wang X F, et al. 2021. Different response of alpine meadow and alpine steppe to climatic and anthropogenic disturbance on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Global Ecology and Conservation*, 27: e01512. DOI: 10.1016/j.gecco.2021.e01512.
- Li L H, Zhang Y L, Liu L S, et al. 2018. Current challenges in distinguishing climatic and anthropogenic contributions to alpine grassland variation on the Tibetan Plateau [J]. *Ecology and Evolution*, 8(11): 5949–5963.
- Liu H Y, Jia J H, Lin Z S, et al. 2021a. Relationship between net primary production and climate change in different vegetation zones based on EEMD detrending: a case study of Northwest China [J]. *Ecological Indicators*, 122: 107276. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107276.
- Liu Y Y, Yang P Z, Zhang Z X, et al. 2021b. Diverse responses of grassland dynamics to climatic and anthropogenic factors across the different time scale in China [J]. *Ecological Indicators*, 132: 108341. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108341.
- Liu Y Y, Yang Y, Wang Q, et al. 2019. Assessing the dynamics of grassland net primary productivity in response to climate change at the global scale [J]. *Chinese Geographical Science*, 29(5): 725–740.
- Liu Y Y, Zhou R L, Ren H Y, et al. 2021. Evaluating the dynamics of grassland net primary productivity in response to climate change in China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 28: e01574. DOI: 10.1016/j.gecco.2021b.e01574.
- Parton W J, Hartman M, Ojima D, et al. 1998. DAYCENT and its land surface submodel: description and testing [J]. *Global and Planetary Change*, 19(1/2/3/4): 35–48.
- Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5): 1173–1179.
- Su J Y, Duan A M, Xu H M. 2017. Quantitative analysis of surface warming amplification over the Tibetan Plateau after the late 1990s using surface energy balance equation [J]. *Atmospheric Science Letters*, 18(3): 112–117.
- Sun H Z, Chen Y B, Xiong J N, et al. 2022. Relationships between climate change, phenology, edaphic factors, and net primary productivity across the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107: 102708. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102708.
- Xu H J, Zhao C Y, Wang X P. 2020. Elevational differences in the net primary productivity response to climate constraints in a dryland mountain ecosystem of northwestern China [J]. *Land Degradation & Development*, 31(15): 2087–2103.
- Zeng X, Hu Z M, Chen A P, et al. 2022. The global decline in the sensitivity of vegetation productivity to precipitation from 2001 to 2018 [J]. *Global Change Biology*, 28(22): 6823–6833.
- Zha X J, Niu B, Li M, et al. 2022. Increasing impact of precipitation on alpine-grassland productivity over last two decades on the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 14(14): 3430. DOI: 10.3390/rs14143430.
- Zhang J J, Hao X M, Hao H C, et al. 2021b. Climate change decreased net ecosystem productivity in the arid region of Central Asia [J]. *Remote Sensing*, 13(21): 4449. DOI: 10.3390/rs13214449.
- Zhang X K, Du X D, Zhu Z M. 2020. Effects of precipitation and temperature on precipitation use efficiency of alpine grassland in northern Tibet, China [J]. *Scientific Reports*, 10(1): 20309. DOI: 10.1038/s41598-020-77208-6.
- Zhang Y L, Qi W, Zhou C P, et al. 2014. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2): 269–287.
- Zhang Y, Hu Q W, Zou F L. 2021a. Spatio-temporal changes of vegetation net primary productivity and its driving factors on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2017 [J]. *Remote Sensing*, 13: 1566. DOI: 10.3390/RS13081566.