

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.035.

徐士博, 张美玲, 宿茂鑫. 未来气候情景下青藏高原草地净初级生产力时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 190-201.

Xu Shibao, Zhang Meiling, Xiu Maoxin. Characteristics of Temporal and Spatial Evolution of Grassland Net Primary Productivity on the Qinghai-Tibet Plateau Under Future Climate Scenarios[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 190-201.

未来气候情景下青藏高原草地净初级 生产力时空演变特征

徐士博, 张美玲, 宿茂鑫

(甘肃农业大学 理学院, 兰州 730070)

摘 要: [目的]揭示 SSP126 和 SSP585 两种气候情景下,不同气候因素(气温和降水)对青藏高原草地净初级生产力的影响,阐明青藏高原地区影响草地净初级生产力时空分布特征的主控气候因素,为未来青藏高原地区植被生态系统的综合治理提供理论依据。[方法]基于青藏高原 48 个气象站点基准期(1971—2020 年)的日值气象数据、土壤类型数据以及模型所需要的站点管理数据,利用 DAILY CENTURY(DAYCENT)模型,结合文献中对应站点的 NPP 实测值和 MOD17A3 遥感数据,对模型参数进行了校准,利用均方根误差、可决系数、效率系数等统计指标对模型模拟结果进行了评价。其次单向嵌套 BCC-CSM1.1 气候模式,对未来气候 SSP126 和 SSP585 情景下的青藏高原草地净初级生产力进行预测,并对预测结果进行了时空统计分析。[结果](1) 在 SSP126 和 SSP585 情景下青藏高原草地 NPP 均呈现出由东南向西北递减的分布特征,且 NPP 值较高的区域主要位于青藏高原的东南部,NPP 值较低的区域则位于青藏高原以西的区域;(2) 在 SSP126 情景下,青藏高原草地净初级生产力总体呈现出下降趋势,波动范围最大的是长远期(2081—2100 年),减小幅度为 12.1%,;在 SSP585 情景下,NPP 总体呈现出平稳的上升趋势,其中近期(2021—2040 年)的增长速率最高为 12%;(3) 与基准期(1971—2021 年)相比,在 SSP126 和 SSP585 情景下,青藏高原 85%以上的草地 NPP 呈现下降趋势,其中 SSP126 和 SSP585 与基准期(1971—2020)相比 NPP 值分别相对减少 28%,23%。[结论]两种不同气候情景下,温度与 NPP 的相关性均高于降水。低温少雨是造成青藏高原西北地区草地 NPP 减少的主要原因。

关键词: DAYCENT 模型; 未来气候情景; 净初级生产力; 青藏高原

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0190-12

Characteristics of Temporal and Spatial Evolution of Grassland Net Primary Productivity on the Qinghai-Tibet Plateau Under Future Climate Scenarios

Xu Shibao, Zhang Meiling, Su Maoxin

(College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the effects of different climatic factors (temperature and precipitation) on the grassland Net Primary Productivity (NPP) of the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) under the two climate scenarios SSP126 and SSP585, and to clarify the main climatic factors affecting the spatial and temporal distribution characteristics of grassland NPP on the QTP, so as to provide a theoretical basis for the comprehensive management of vegetation ecosystem on the QTP in the future. [Methods] Based on the daily value meteorological data and soil type data of 48 meteorological stations on the QTP during the base period (1971—2020) and the site management data required by the model, the model parameters were calibrated by using the DAILY CENTURY(DAYCENT) model, and the measured NPP values and

收稿日期: 2022-09-01

修回日期: 2022-09-23

资助项目: 国家自然科学基金(32260353); 甘肃省重点研发计划(21YF5WA096); 科技部高端外国专家引进计划(G2022042009L); 甘肃农业大学青年导师扶持基金(GUO-QDFC-2019-03); 横向项目(GSAU-JSFW-2022-20); 甘肃省自然科学基金(1606RJZA077, 1308RJZA262)

第一作者: 徐士博(1999—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为生态统计。E-mail: 885161614@qq.com

通信作者: 张美玲(1978—), 女, 甘肃酒泉人, 博士, 副教授, 主要从事生态统计研究。E-mail: zhangml@gsau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

MOD17A3 remote sensing data of corresponding stations in the literature, and the results were evaluated by means of the root-mean-square error, determinability coefficient, efficiency coefficient and other statistical indexes. Secondly, a one-way nested BCC-CSM1.1 climate model was used to predict the NPP of grassland on the QTP under the future climate SSP126 and SSP585 scenarios, and the prediction results were statistically analyzed on spatial and temporal scales. [Results] (1) Under the SSP126 and SSP585 scenarios, the NPP of the QTP shows the decreasing distribution from southeast to northwest, and the area with higher NPP value was mainly located in the southeast of the QTP, while the area with lower NPP value will be located in the west of the QTP. (2) Under the SSP126 scenario, the NPP of grassland on the QTP generally shows the downward trend, and the largest fluctuation range will be in the long-term period (2081—2100), with a decrease rate of 12.1%. Under the SSP585 scenario, NPP generally presents a steady upward trend, with the highest growth rate of 12% in the near future (2021—2040). (3) Compared with the baseline period (1971—2021), under the SSP126 and SSP585 scenarios, the NPP of more than 85% grassland on the QTP shows the decreasing trend, and the NPP value of SSP126 and SSP585 will decrease by 28% and 23%, respectively, compared with the baseline period (1971—2020). [Conclusion] Under the two different climate scenarios, the correlation between temperature and NPP is higher than that of precipitation. Low temperature and lack of rainfall are the main reasons for the decrease of grassland NPP in the northwest of the QTP.

Keywords: DAYCENT model; future climate scenarios; net primary productivity; Qinghai-Tibet Plateau

全球变暖背景下,陆地生态系统对全球气候变化的响应已经成为全球变化研究的焦点之一^[1],而植被作为陆地生态系统的重要组成部分,对全球气候变化起着举足轻重的作用,在发生变化之后对地层气温、土壤温度以及湿润状况都会产生相应的改变,同时由植被变化造成的地表蒸散以及土壤储水能力的改变,也会使土壤含水量、地表径流等发生明显的变化^[2-3]。因此,了解和掌握植被动态对环境变化的影响,对保持生态系统平衡和草地可持续发展尤为重要。

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,在气候调节和陆地碳循环等方面扮演着重要角色^[4-5]。青藏高原草地是对全球气候变化最敏感的生态系统之一,并且草地净初级生产力在生态系统碳通量的汇集和调节气候变化中扮演着重要的角色^[6-7]。近几年来,植被生产力已经成为国内外研究的核心内容之一^[8],受到各界的广泛关注。

青藏高原是我国面积最大的高原,其中草地是青藏高原分布最广泛的植被类型,面积约占青藏高原总面积的 60%^[9],其草地的生长状况对西北乃至全国生态系统的保护都具有重要意义。青藏高原也被称为全球气候的“放大器”,在未来气候情景下,青藏高原草地碳源、碳汇功能是否会发生改变,这对未来全球气候变化的走向具有重要意义。国内外学者也对整个青藏高原草地生态系统进行了不同角度的研究,但对于未来气候响应条件下,青藏高原草地生态系统的发展状况还具有一定的不确定性。

以往对青藏高原草地净初级生产力的研究集中于对已知年份青藏高原 NPP 的估算上。例如刘丽慧等^[10]利用 Biome-BGC 模型,通过改进冻土区活动层土壤冻融水循环,估算了 2000—2018 年青藏高原草地 NPP,并对 NPP 模拟结果的时空特征进行了分析,结果表明 2000 年以来青藏高原高寒草地 NPP 多年均值的空间分布表现为由东南向西北逐渐递减,青藏高原草地生态系统质量总体上呈现良性发展的态势并且区域差异明显,但局部草地仍持续退化。汪柳皓等^[11]利用 MOD13Q1 归一化植被指数 (NDVI) 产品数据,分析了青藏高原地区 2000—2019 年 NDVI 的时空变化特征,并通过 MOD11A2 地表温度数据和 TRMM 卫星降水数据探究了植被变化与地表温度和降水之间的关系。也有学者^[12]使用 GLASS FVC 数据,利用 BFAST 方法和格局分析,探讨了 1982—2018 年我国植被覆盖变化的非线性趋势及其分布格局,结果表明青藏高原中东部等地则由原先的改善趋势变为了退化趋势。

还有学者^[13]研究探讨气候变化、物候及土壤因子和青藏高原 NPP 之间的关系,量化 NPP 变化趋势,探索了青藏高原草地 NPP 对气候变化、物候和土壤因子的响应机制。与前者不同的是,部分学者除了考虑气候变化对青藏高原植被变化的影响,还定量分析了人类活动对植被变化带来的影响,结果发现人为干预对减缓生态系统退化具有重要作用,但二者的研究只是停留在过去的一段时期,对未来气候变化和人类活动对青藏高原植被动态变化的影响却仍然未

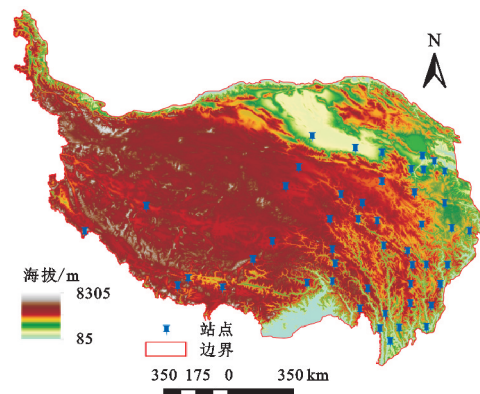
知^[14-15]。另外,以往针对未来气候情景的研究中对河流径流量、植物分布、气候地理特征的研究居多^[16-18],对未来气候条件下植被 NPP 的研究较少,特别是作为气候变化敏感区的青藏高原来说,研究其植被 NPP 动态变化,对了解青藏高原草地 NPP 生态系统健康状况和维护青藏高原国家生态安全屏障功能具有重要意义。近年来,许多学者对青藏高原 NPP 的研究有了一定的了解和深入,在关于青藏高原草地 NPP 的空间分布上,也得到了由东南向西北递减较为一致的看法,但是不同学者在利用不同模型去估算青藏高原草地 NPP,在计算精度和准确性上会存在一定的偏差。本研究采用 DAYCENT 模型,利用青藏高原站点数据,对模型进行参数初始化,提高模型估算精度,增加模型对青藏高原 NPP 估算的准确性。我们研究的目的就是探讨在未来不同气候情景下青藏高原草地 NPP 的动态变化,并且与基准期(1971—2020 年)相对比,探究未来青藏高原草地净初级生产力的发展趋势与发展前景,对青藏高原未来草地净初级生产力的管理具有一定的指导意义。

1 研究区概况

青藏高原位于我国西南部,南起喜马拉雅山脉南缘,北至昆仑山、阿尔金山脉和祁连山北部,西部为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉,是中国最大、世界海拔最高的高原,同时也是我国草地面积最大的区域,被称为“世界屋脊”^[19-20]。研究区域介于 26°00′—39°47′N, 73°19′—104°47′E,东西长约 2 800 km、南北宽 300~1 500 km,总面积约 250 万 km²。青藏高原年均气温由东南的 20℃,向西北递减至-6℃以下,高原腹地年均温

度在 0℃以下,大片地区最暖月平均温度也不足 10℃,最暖月平均气温 4~6℃^[21]。由于南部海洋暖湿气流受多重阻留,年降水量也由 2 000 mm 缩减至 50 mm 以下,年降水量 20~100 mm。日照充足,年太阳辐射总量 140~180 MJ/cm²,年日照总时数 2 500~3 200 h^[22]。由于青藏高原特殊的地理位置,导致整个高原在全球气候变化和环境保护方面具有重要意义,提前了解和掌握未来情景下青藏高原的生态动态变化,有利于我们在面对未来复杂气候条件下提出科学有效的治理方案,这也是我们研究的目的和意义。

青藏高原冻土分布广泛,植被大多数为天然草地,各类草地面积总和约 1.4 亿 hm²,占高原总面积的 53%左右。本研究选择高原上的 3 种典型草地类型,分别为高寒草甸、典型高寒草地和高寒荒漠草地,所选站点均为国家站点,共 48 个。站点位置如图 1 所示,部分站点信息见表 1。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1609 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区域地理位置及站点分布

Fig. 1 Geographical location and site distribution of the study area

表 1 部分站点的土壤参数

Table 1 Soil parameters for some sites

站点	堆积密度/ (g · cm ⁻³)	田间 持水量/mm	萎蔫点	砂粒含量/% 0.0~1.0	黏土含量/% 0.0~1.0	土壤有机碳/% 0.0~1.0	饱和导水率/ (cm · s ⁻¹)	pH 值
五道梁	1.48	0.22	0.06	0.56	0.06	0.01	0.00200	5.7
玛沁	1.28	0.28	0.10	0.35	0.20	0.03	0.00060	7.5
同仁	1.23	0.32	0.12	0.29	0.26	0.01	0.00037	8.0
当雄	1.43	0.25	0.07	0.35	0.06	0.01	0.00233	5.7
拉孜	1.30	0.27	0.10	0.46	0.20	0.01	0.00054	6.3
曲麻莱	1.28	0.28	0.10	0.35	0.20	0.03	0.00060	7.5
玉树	1.42	0.19	0.08	0.76	0.12	0.00	0.00137	8.2
清水河	1.27	0.28	0.11	0.39N	0.22	0.01	0.00047	6.6

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 气象数据 该模型驱动需要输入以日为步长

的气象数据,其中包括最高温、最低温、降雨量、太阳辐射、平均风速等。由于洛隆、理塘和左贡站点部分年份数据缺失,所以选取的气象数据范围分别为 1979—2020 年、1972—2020 年、1978—2020 年,时间

跨度分别为 42 a, 49 a, 43 a, 其余剩下的青藏高原 45 个气象站点, 用来验证模型的研究时间段均为 1971—2020 年, 跨度范围为 50 a。模型输入站点的气象数据下载于 NOAA 美国国家环境信息中心网 (<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/daily>)。

2.1.2 样地参数 样地参数数据, 主要包括研究站点的经纬度、海拔、土层深度、堆积密度、萎蔫点、砂粒含量、黏土含量、土壤 pH 值等, 还包括研究区域植被类型的选择。本研究利用 MOD17A3 下载的 NPP 遥感数据, 以及查找相关文献中的 NPP 实测数据对所选 48 个站点进行参数校正。其中站点土层深度和土壤质地数据来源于联合国粮农组织 (<https://www.fao.org/home/zh>) 和世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version), 站点高程数据和经纬度来源于空间地理数据云 (www.gscloud.cn/search)。

2.1.3 遥感数据 遥感数据来源于“美国国家航空航天局(NASA)”的戈达德航天中心(LAADS, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)。采用 2000—2020 年的 MOD17A3 下载的 NPP 遥感数据, 其空间分辨率为 $0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$, 时间分辨率为 16 d。本研究首先在 Modis Tool 中将 6 景 MOD17A3 遥感数据进行影像拼接处理, 并将其投影为 UTM (universal transversen mercator); 然后在 ArcGIS 中利用青藏高原矢量图按照掩膜提取裁剪得到青藏高原 2000—2020 年 NPP 的栅格数据。

2.1.4 CMIP6 气候模式数据 为利用全球气候模式中的数据对未来情景下 NPP 进行模拟预测, 本研究选取 CMIP6 (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz>) 提供的 BCC_CSM1.1 气候模式下的 SSP126 和 SSP585 情景数据, 其中 SSP126 为低排放情景, 是一种政府干预下的气候情景; 而 SSP585 为高排放情景, 是指在无气候变化干预时的基线情景, 特点是温室气体排放和浓度不断增加。每个情景下包括的要素有日最高温、日最低温、日降水量, 获取的时间序列是 2021—2100 年, 将该时间序列分为 4 个阶段, 分别为 2021—2040 年 (近期)、2041—2060 年 (中期)、2061—2080 年 (远期)、2081—2100 年 (长远期)。运用 NWA1-WG 统计降尺度的方法提取处理数据, 提升栅格数据的格点数目, 最后利用 ArcGIS 提取各个站点的气候数据。

2.2 研究方法

2.2.1 DAYCENT 模型 DAILY CENTURY (简称

为 DAYCENT) 模型是 CENTURY 模型的每日步长版本。CENTURY 按每月步长运行一次, 最初于 20 世纪 70 年代开发, 用于模拟土壤有机质 (SOM)、植物生产力、养分可用性和其他生态系统参数的变化, 以响应土地管理和气候的变化。CENTURY 已被广泛应用, 并被证明能够可靠地模拟全球大多数陆地生态系统的植物生长和土壤有机质变化。该模型主要分为水分和温度、植物和土壤 3 个模块。

DAYCENT 环境由土壤参数文件、计划文件、天气文件和输出文件组成。DAYCENT 模型的输入参数可以分为 4 类, 分别为天气信息、土壤信息、植物信息和管理事件, 其中包括的主要变量有: 日平均最高和最低气温、日降水量、植物体中的木质素含量以及土壤的初始含碳、氮、磷和硫含量。DAYCENT 模型在每日时间步长下运行, 该模型主要有每日参数文件 (“sch” 或 “.evt”)、每日天气文件 (“wth”) 和输入文件 (* .100, * .in, * .dat) 及输出参数文件 (.out 和 .csv) 组成。其中输入参数的文件都是可以使用文本编辑器进行编辑的文本文件。在 R 中将该模型作为外部程序运行或者使用 DOS 命令提示符下运行程序, 开始运行后, 每次模拟会将每月输出变量写入二进制文件, 并将每日输出变量写入文本文件。模拟完成后, 利用 LIST100 程序读取二进制文件并创建所选变量的 ASCII 列表^[23]。

2.2.2 模型参数化以及验证数据的获取 本研究利用“美国国家航空航天局(NASA)”下载的 MOD17A3 2000—2020 年 NPP 遥感数据作为观测值, 并结合相关文献中 NPP 的实测数据对 DAYCENT 模型参数的校正。DAYCENT 模型输出的是每日 NPP 数值, 若文献中提供的是地上生物量和地下生物量, 根据对草地生物量的相关研究, 草地地上和地下生物量的对照值通常采用 1 : 5.73, 并根据碳转化率 (0.475) 计算得出 NPP 实测值^[24]。

2.3 模型评价方法

本研究选取平均绝对误差 (MAE)、可决系数 (R)、Nash 效率系数 (NS) 和均方根误差 (RMSE) 等多个统计变量, 用于评价 DAYCENT 模型对青藏高原站点净初级生产力的模拟效果, 采用的计算公式:

(1) 均方根误差。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - m_i)^2}{n}} \quad (1)$$

均方根误差用于评价模拟值和观测值之间的偏差即模拟结果的准确性, 均方根误差越小, 表示模拟值与实测值之间的偏差越小, 模型的模拟效果越好。

(2) 平均绝对百分比误差。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{h_i - m_i}{m_i} \right| \times 100\% \quad (2)$$

平均绝对百分比误差,与 RMSE 相比,稳定性更高,因为 MAE 对每个点的误差进行了归一化。它表示预测值和观测值之间绝对误差的平均值,反映模型模拟的可信度。

(3) 可决系数。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})(m_i - \bar{m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}} \quad (3)$$

可决系数可以通过模型模拟值与观测值之间的线性回归所得,反应模拟结果吻合实测值波动的能力,其值越接近 1 表示模拟值与观测值的吻合程度越高。

(4) Nash 效率系数。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (4)$$

Nash 效率系数的取值范围为负无穷大(模拟效果差)至 1(模拟效果好)。反映模拟结果和实际观测值的吻合程度,若模拟值结果与实测值之间的方差大于实测值的方差,则其值将小于 0,越小于 0 则模拟结果的可信度越低;若模拟值与实测值之间的方差和实测值一样大,其值接近于 0,表示模拟结果接近观测值平均值水平,总体模拟结果可信,但过程模拟误差较大;若模拟值与观测值之间的方差趋于 0,则其值接近于 1,表示模型很好地模拟了实测值的变化,模型可信度高。

以上各式中: h_i, m_i 分别为模型模拟值和观测值; \bar{h}, \bar{m} 分别为模拟值和观测值均值; n 为时间序列个数。

2.4 相关性分析

相关性主要用来反映要素之间的相关性大小和方向。本研究基于皮尔逊相关系数分析和讨论青藏高原草地 NPP 与各气候因子之间的相关性和显著性水平,其计算公式如下^[25]:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$r_{xy1,y2} = \frac{r_{xy1} - r_{xy2} r_{y1y2}}{\sqrt{1 - r_{xy2}^2} \sqrt{1 - r_{y1y2}^2}} \quad (6)$$

式中: $r_{x,y}$ 为 x, y 变量的相关系数; x_i, y_i 为 x, y 变量第 i 年的值; \bar{x}, \bar{y} 为 x, y 变量的平均值; $r_{xy1,y2}$ 为将 y_2 固定后 x 与 y_1 的偏相关系数; r_{xy1} 为 x 与 y_1 的

相关系数; r_{xy2} 为 x 与 y_2 的相关系数; r_{y1y2} 为 y_1 和 y_2 的相关系数。此外,本研究采用 T 检验法来分析偏相关系数和复相关系数的显著性,公式如下:

$$T = \frac{r_{xy1,y2}}{\sqrt{1 - r_{xy1,y2}^2}} \cdot \sqrt{n - m - 1} \quad (7)$$

式中: n 为样本个数; m 为变量个数。

3 结果与分析

3.1 模型模拟结果验证

通过文献查找的 NPP 实测数据与对应 18 个气象站点的 NPP 模拟值进行对比(图 2),从图上可以看出站点模拟值与文献中的实测值非常接近,MAE 均在 10% 以内。

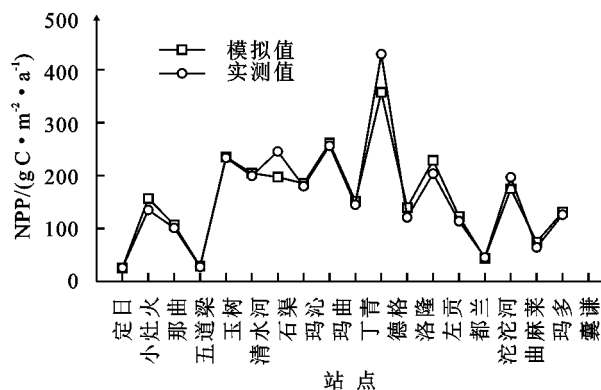


图 2 DAYCENT 模型模拟数据验证

Fig. 2 DAYCENT model simulates data validation

图 3A—B 是以清水河、曲麻莱站点为例 2000—2021 年的 DAYCENT 模型模拟值与 MOD17A3 下载的 NPP 遥感观测值对比,从图上可以看出 NPP 模拟值与观测值整体趋势保持一致。图 3C—D 是对清水河、曲麻莱站点的模拟值与观测值做线性回归,并添加 95% 的置信区间,从图上可以看出绝大多数的点均在置信区间内,线性拟合程度 R^2 分别为 0.62, 0.73, p 值均小于 0.05,通过了显著性检验。

从表 2 选取的部分站点的统计指标也可以看出,站点模拟的拟合效果均在 0.5 以上,NS 均大于 0 且接近于 1,MAE 均在 10% 以下,RMSE 也在可接受范围之内,说明模型整体模拟效果良好,DAYCENT 模型的参数合理,可以用来模拟青藏高原地区草地净初级生产力。

3.2 1978—2020 年草地 NPP 的时间动态变化

图 4 是利用校正后的 DAYCENT 模型模拟的 1978—2020 年青藏高原草地 NPP 变化趋势,从图上可以看出青藏高原草地 NPP 总体呈现出线性增加趋势,波动范围为 14 223.47~17 543.43 g C/(m² · a),年均增长速率为 82.88 g C/(m² · a) ($p < 0.05$)。

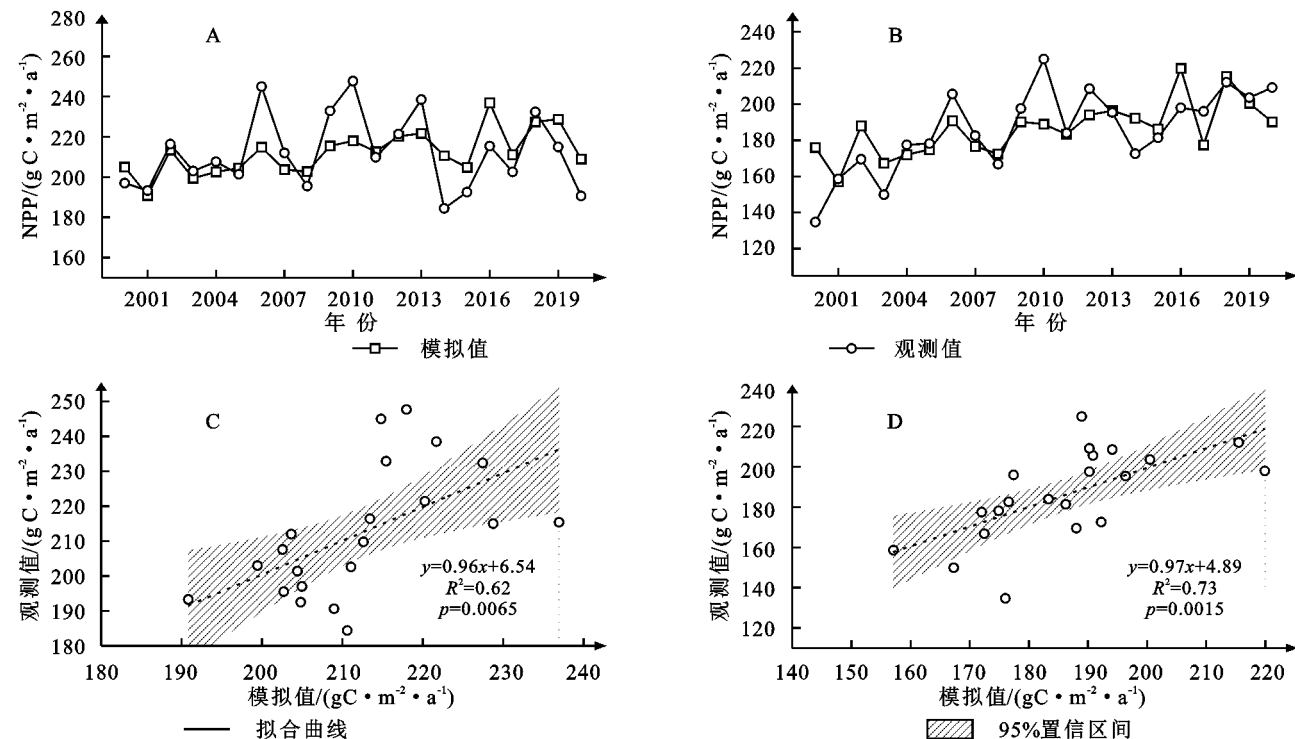


图 3 站点模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured values at the site

表 2 部分站点的模型评价指标结果

Table 2 Model evaluation metric results for some sites

站点名称	均方根	平均绝对	效率系数	可决
	误差(RMSE)	误差(MAE)	(Nash)	系数(R)
玉树	19.6	7%	0.04	0.98
曲麻莱	16.7	7%	0.40	0.44
清水河	14.7	5%	0.99	0.60
德格	32.5	8%	0.40	0.50
林芝	32.2	7%	0.38	0.50
拉孜	6.3	9%	0.26	0.60

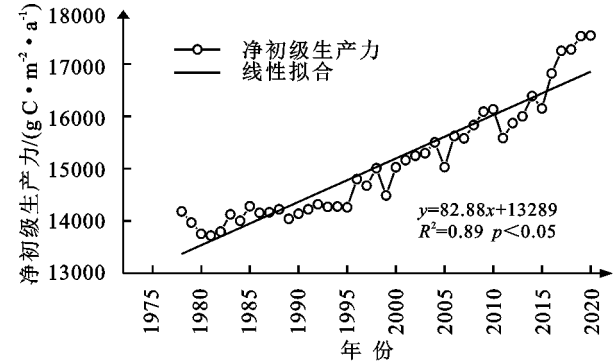


图 4 1978—2020 年青藏高原草地 NPP 动态变化

Fig 4 Dynamic changes in average NPP from 1978 to 2020

3.3 1978—2020 年草地 NPP 的空间分布

通过 DAYCENT 模型模拟青藏高原 48 个气象站点的 NPP 值,利用反权重插值法绘制青藏高原草地 NPP 的空间分布图(图 5),1978—2020 年青藏高原 NPP 年平均值为 499.83 g C/m²,从图上也可以看

出,NPP 高值区主要位于青藏高原的东南部,总体呈现出由东南向西北递减的趋势,NPP 值较高的区域位于云南省和四川省的东南部分,NPP 值较低的区域位于新疆、西藏等省份。

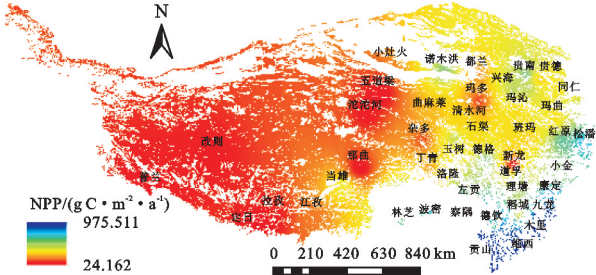


图 5 1978—2020 年均 NPP 空间分布

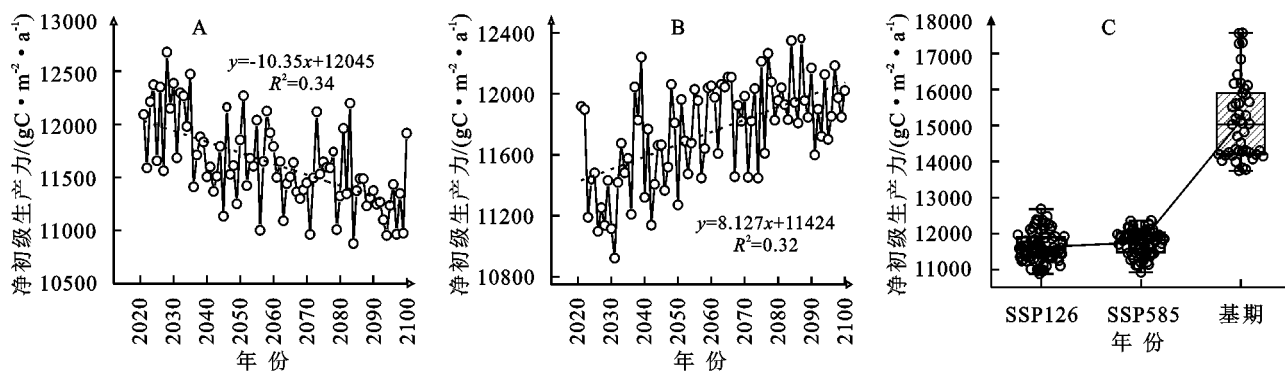
Fig. 5 Average NPP spatial distribution from 1978 to 2020

3.4 2021—2100 年不同情景下草地 NPP 的时间动态变化

采用上述站点参数初始化后的 DAYCENT 模型,单向嵌套 BCC—CSM1.1 气候模式,并将未来气候情景分为 4 个时间段,分别为 2021—2040 年(近期)、2041—2060 年(中期)、2061—2080 年(远期)、2081—2100 年(长远期)。从图 6A 可以看出,在 SSP126 情景下,青藏高原草地净初级生产力总体呈现出下降趋势,其中近期(2021—2040 年)的波动范围最小,NPP 数值波动范围为 11 599.94~12 680.29 g C/(m²·a),减小幅度为 9.3%,波动范围最大的是长远期(2081—2100 年),波动范围为 10 877.34~12 198.97 g C/(m²·a),减小幅度为 12.1%,且在整个模拟期间(2021—2100 年)NPP 数值波动范

围在10 877.34~12 680.29 g C/(m²·a),减小幅度为16.5%。从图 6B 来看,在 SSP585 情景下,NPP 总体呈现出平稳的上升趋势,其中近期(2021—2040 年)的增长速率最高为 12%,其余 3 个时期的增长速率分别为

7%,7%,6.5%。从图 6C 看,与基准期(1971—2020 年)相比,SSP126 和 SSP585 情景下 NPP 值均低于基准期水平,呈现出下降趋势,分别下降 28%,23%,其中 SSP126 下降速率略高于 SSP585。



注:A,B 分别代表 SSP126 和 SSP585 情景下模拟值的时间序列,C 表示 SSP126,SSP585 和基准期年均 NPP 的箱线图。

图 6 青藏高原草地 NPP 的时间动态变化

Fig. 6 Temporal dynamics of NPP in grassland on the Tibetan Plateau

3.5 2021—2100 年不同情景下草地 NPP 的空间分布

针对青藏高原草地净初级生产力的模拟值,利用反权重插值法绘制草地净初级生产力的空间分布图(图 7—8)。由图 7 可知,在 SSP126 低碳排放浓度背景下,4 个时段的青藏高原草地净初级生产力的年平均值分别为 505.65,516.00,515.06,510.53

g C/(m²·a),4 个时段呈现出比较平稳的小幅度的增加趋势,从空间分布来看,总体呈现出由东南向西北递减的趋势,且 NPP 值较高的区域位于西藏西南、青海南部、四川、云南等气候温暖湿润的省份,NPP 值较低的区域则位于西藏北部、新疆等严寒干燥的省份。

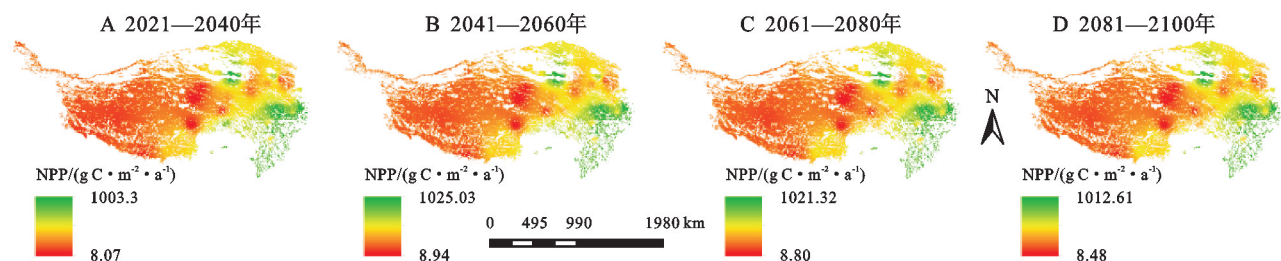


图 7 SSP126 情景下 4 个时期草地年平均 NPP 空间分布

Fig. 7 Annual average NPP spatial distribution of grassland in four periods under the SSP126 scenario

由图 8 可知,在 SSP585 高浓度碳排放背景下,4 个时段的青藏高原草地净初级生产力的年平均值分别为 502.57,521.05,535.07,539.24 g C/(m²·a),4 个时段也呈现逐期的增长趋势。相比 SSP126,除了近期(2021—2040 年)NPP 值的差别不大之外,其余 3 个时期

均呈现出不同的增长趋势,NPP 年平均值分别增加了 5.05,20.21,28.71 g C/(m²·a),增长速率分别为 0.96%,3.92%,5.6%。从空间分布来看 SSP585 与 SSP126 相比整体的分布格局没有改变,依然是东南高,西北低,呈现出由东南向西北递减的趋势。

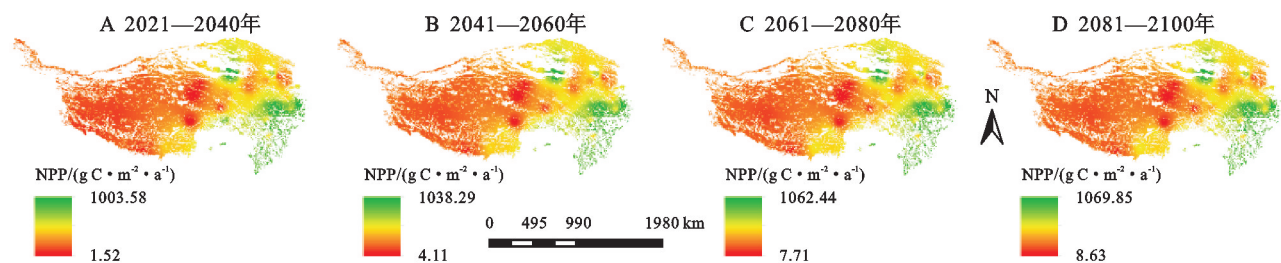


图 8 SSP585 情景下 4 个时期草地年平均 NPP 空间分布

Fig. 8 Annual average NPP spatial distribution of grassland in four periods under the SSP585 scenario

由图 9 可知,与基准期(1971—2020 年)相比,青藏高原呈现出不同的增减趋势,在 SSP126 情景下青

藏高原 85% 以上的地区出现下降趋势,主要位于藏北和新疆地区以及青海中部、甘肃的东部。NPP 出

现增加的趋势主要集中在四川西部的班玛县、甘孜县等地区,还有包括青海中部的格尔木市、都兰县、德令哈市,以及藏南地区的江孜县、仁布县、定日县等。另外,相比于近期(2021—2100 年),在 SSP126 情景下其余

的 3 个时期在西藏西部的普兰县、噶尔县、札达县等地区,年平均 NPP 值均呈现出增加的趋势,分别是基准期的 0.23,0.25,0.27 倍。说明在 SSP126 情景下,出现草地 NPP 增加的地区,呈现相似的增加趋势。

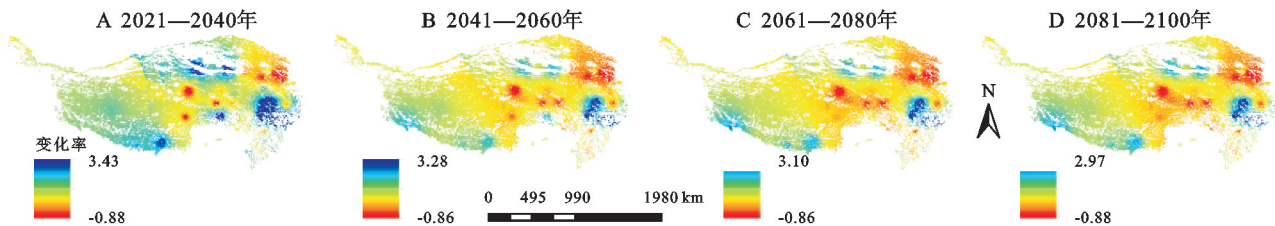


图 9 SSP126 情景下青藏高原草地 NPP 相对变化空间分布

Fig.9 Spatial distribution of NPP relative variation in grassland on the Qinghai-Tibet Plateau under the scenario of SSP126

由图 10 可知,与基准期(1971—2020 年)相比,在 SSP585 情景下,青藏高原草地 NPP 值在绝大部分地区也是呈现出下降趋势,同时与 SSP126 情景相比,SSP585 情景下的最大增长倍数都有所增加,比 SSP126 分别增加了 0.06,0.16,0.32,0.38 倍,由两种不同情景下的相同时期对比来看,青藏高原草地 NPP 的增长趋势的空间分布大致相同,其中除了西藏色尼区的草地 NPP 与 SSP126 情景下的递减趋势相反,该地区呈现出逐年增加的趋势。

3.6 气候变化对青藏高原 NPP 的影响

3.6.1 SSP126 情景下气候变化对 NPP 的影响 由图 11 可知,青藏高原年降水量表现出南高北低,中间逐渐递减的空间分布特征;年平均气温呈现出由东南向西北逐渐降低的空间分布特征。

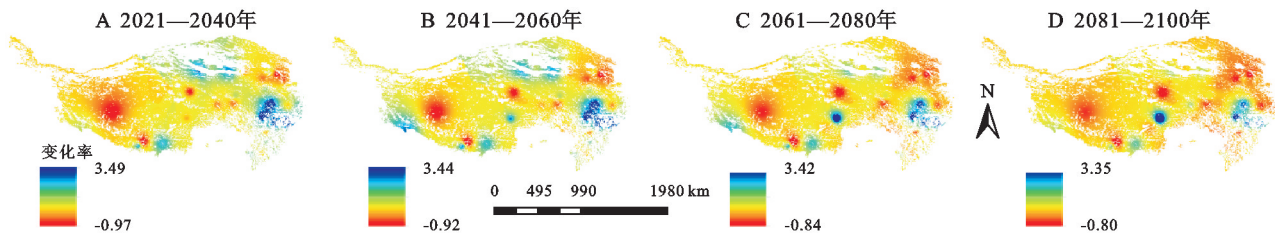


图 10 SSP585 情景下青藏高原草地 NPP 相对变化空间分布

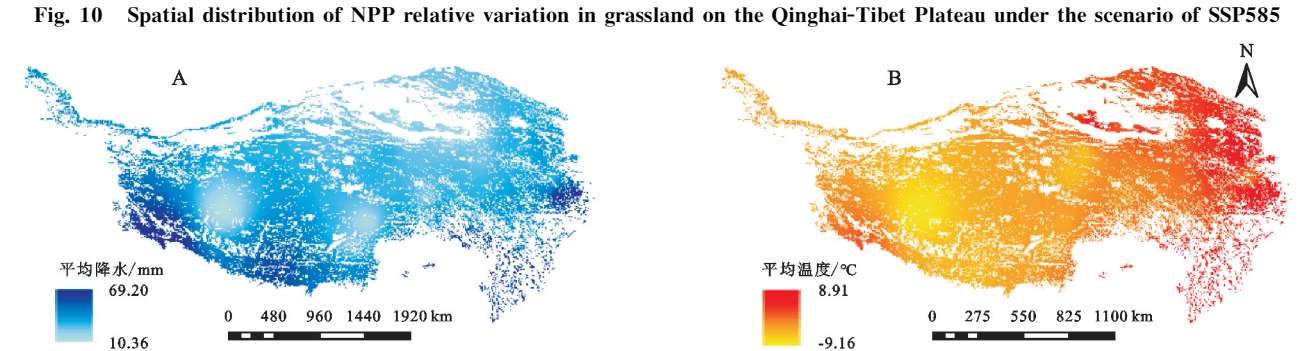


图 11 SSP126 情景下年平均降水和平均气温的空间变化

Fig. 11 Spatial variation of annual mean precipitation and annual mean temperature under the SSP126 scenario

青藏高原的最高年降水量为 69.20 mm,2100 年较 2021 年上升了 4 mm 左右(图 12A)。80 a 平均气温的最高值为 8.91℃,最低值为-9.16℃,且 80 a 来温度呈小幅度波动但总体缓慢增长的变动趋势(图 12B)。

由表 3 可知,草地 NPP 与年平均最高温、最低温呈正相关,随温度的增加而增加;与年均降水呈负相关,随降水的增加而减少,且与温度的相关性通过了显著性检验。

3.6.2 SSP585 情景下气候变化对 NPP 的影响 由图 13 可知,在 SSP585 情景下,降水呈现由东南向西

北递减的趋势,年平均最高降水为 30.68 mm。气温呈现由东南向西北递减的趋势,这与草地 NPP 的空间演变特征保持一致,且气温的增加趋势大于降水。

青藏高原的年均降水表现出波动式的上升趋势,2100 年较 2021 年降水增加了 10 mm 左右,年平均气温总体呈线性增加的趋势(图 14A),最高温为 30.16℃,最低温为-6.9℃(图 14B),两者的总体时序情况与 NPP 的趋势较为一致,其中温度的发展趋势更接近 NPP 的时序情况。说明温度是影响青藏高原草地、NPP 改变的主要原因。

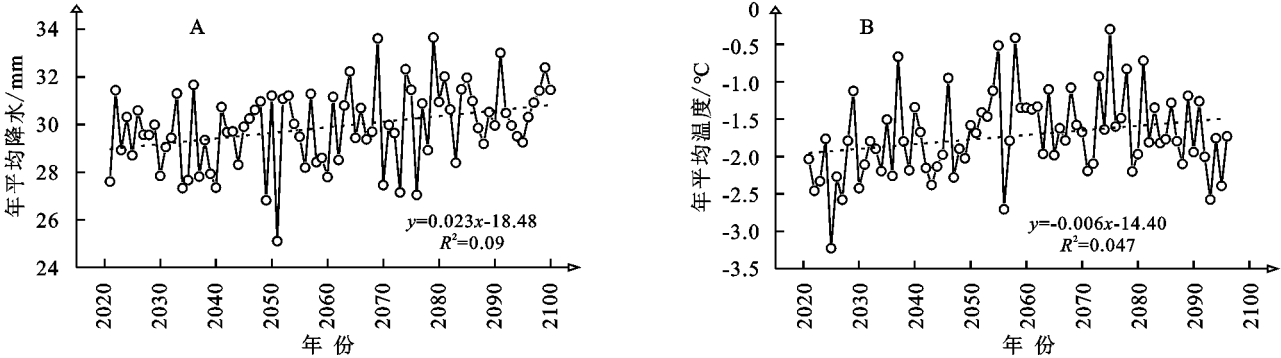


图 12 SSP126 情景下年平均降水和年平均气温的时间变化

Fig. 12 Temporal variations of annual mean precipitation and annual mean temperature under SSP126 scenario

表 3 草地 NPP 与气候因素的 person 相关系数 (SSP126)

项目	植被净初级	年平均	年平均	年平均
	生产力(NPP)	最高温	最低温	降水量
植被净初级生产力(NPP)	1.000	0.529 **	0.518 **	-0.116
年平均最高温	0.529 **	1.000	0.981 **	0.270
年平均最低温	0.518 **	0.981 **	1.000	0.148
年平均降水量	-0.116	0.027	0.148	1.000

注: ** 表示通过了 $p<0.01$ 的显著性检验,下表同。

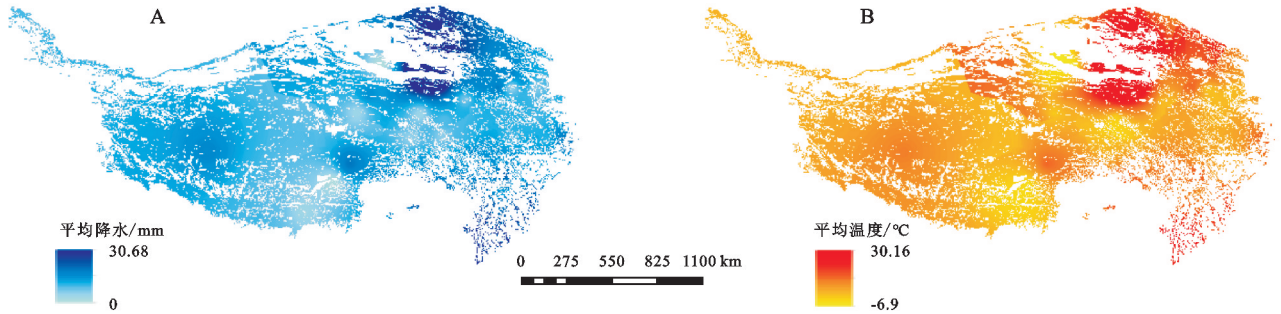


图 13 SSP585 情景下年平均降水的空间变化

Fig. 13 Spatial variation of annual mean precipitation and annual mean temperature under the SSP585 scenario

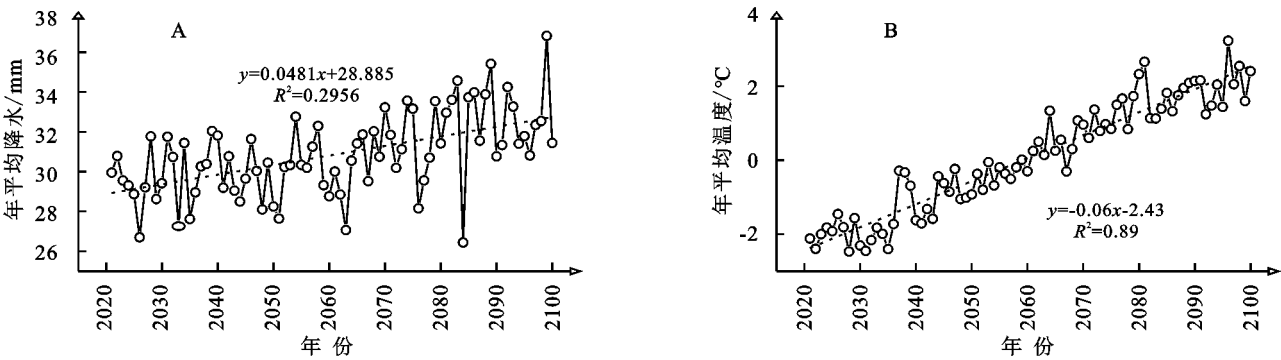


图 14 SSP585 情景下年平均降水和年平均气温的时间变化

Fig. 14 Temporal variations of annual mean precipitation and annual mean temperature under SSP585 scenario

由表 4 可知,NPP 与年均最高温、最低温和降水均呈正相关,随温度和降水的增加而增加,其中与温度的相关性高于降水,并且通过了显著性检验。从两个情景对比来看,草地 NPP 与温度降水均有一定的相关性,但与温度的相关性高于降水,而且在 SSP126 情景下,NPP 与降水呈负相关;SSP585 情景下与降水呈正相关。

4 讨论

本研究发现 CMIP6 的 SSP126 和 SSP585 情景下,青藏高原草地 NPP 分别呈现出逐年下降和逐年上升的趋势,这与韩海燕^[8]利用 Biome-BGC 模型嵌套 RCP 气候情景,低浓度路径下(RCP2.6)青藏高原草地 NPP 呈

现出下降趋势,高浓度路径下(RCP8.5)青藏高原草地 NPP 呈现出上升趋势结论相同;此外在两种不同气候情景下,青藏高原在空间上表现出由东南向西北逐渐递减的趋势,这也与李传华等^[26]的研究结果一致;从时序来看,青藏高原基准期(1971—2020 年)草地 NPP 呈现出逐年上升的趋势,并且以年平均 82.88 g C/(m² · a)的

速率显著增长,这与张帆^[27]利用 CASA 模型估算的青藏高原草地 1982—2015 年的 127.1 g C/(m² · a) 年均 NPP 结果较为一致;何楷迪等^[28]研究发现,藏北地区草地 NPP 空间分布呈水平地带性分布,由东南向西北递减,藏北地区草地 NPP 整体水平较低,这也与本研究的结论相一致。

表 4 草地 NPP 与气候因素的 person 相关系数 (SSP585)

Table 4 Person correlation coefficient between grassland NPP and climatic factors (SSP585)

项目	植被净初级 生产力(NPP)	年平均 最高温	年平均 最低温	年平均 降水量
植被净初级生产力(NPP)	1.000	0.634**	0.598**	0.182
年平均最高温	0.634**	1.000	0.984**	0.456**
年平均最低温	0.598**	0.984**	1.000	0.499**
年平均降水量	0.182	0.456**	0.499**	1.000

刘晓东等^[29]发现,在未来 2030—2049 年期间,青藏高原大部分地区平均地面气温的升幅在 1.4~2.2℃,但降水量的相对变化较小,通常不超过 5%。本研究发现未来气候情景下青藏高原草地 NPP 虽然在 SSP126 和 SSP585 两种情景中分别呈现下降和上升趋势,但与基准期(1971—2020 年)相比,两者年均 NPP 值整体水平均低于基准期,说明在未来极端气候条件下,青藏高原草地生态系统的敏感性显得尤为突出,但相比较而言,SSP126 气候情景的减少速率略高于 SSP585,造成这种现象的原因是,SSP585 与 SSP126 相比,全球气候朝着更暖、更湿的方向发展,温度和降水的减少是导致 SSP126 情景下青藏高原草地 NPP 减少速率高于 SSP585 情景的主要原因之一。

在本研究中,未来气候情景下气温和降水呈现出不同的增加速率,总体来说,SSP585 情景下的气温和降水的增加速率高于 SSP126 情景。另外,本研究发现,在 SSP126 情景下,青藏高原 NPP 与气温呈正相关,与降水呈负相关,这与边多等^[30]的研究结果一致,但在 SSP585 情景下,青藏高原 NPP 与气温和降水均呈正相关,但气温的相关性高于降水。这说明了在不同气候条件下,气温和降水对 NPP 均有一定的影响,但明显气温的影响力要显著高于降水。由此可以看出气温是影响青藏高原草地 NPP 的主要原因。

在青藏高原草地生态系统的研究中,放牧是草地生态系统估算过程中的重要一部分,研究 NPP 的演变过程与放牧因素的关系也是未来探究青藏高原草地生态系统的核心问题之一^[31],而本研究只针对未来气候情景下青藏高原草地 NPP 的时空变化特征以及与基准期时段 NPP 的演变过程进行了对比分析,没有具体讨论放牧因素对青藏高原草地 NPP 的响应,这也将是本研究后续过程中要攻克的重难点。

5 结 论

(1) 1971—2020 年,青藏高原草地 NPP 整体呈现出“东南高、西北低”的空间分布格局,NPP 值高的地方主要集中在日照充足,降水丰富的暖湿地区,而低值区主要集中在降水匮乏,日照不足的干旱地区。

(2) 在过去 50 a 来,青藏高原草地生态系统整体趋向改善,但不同气候情景下,未来草地 NPP 变化趋势有所差异。在 SSP126 情景下,未来 80 a(2021—2100 年)青藏高原草地 NPP 值出现整体下降的趋势,这与该情景下,气候朝着低温少雨的方向发展有着紧密联系,相比 SSP126 情景,SSP585 情景下,气候朝着更暖更湿的方向发展,青藏高原草地 NPP 值整体呈现上升的发展趋势。

(3) 气温和降水是造成青藏高原草地 NPP 变化的主要驱动因子,在 SSP126 和 SSP585 两种情景下,温度与 NPP 均呈正相关,且相关性高于降水。在 SSP126 情景下,降水与 NPP 呈负相关,SSP585 情景下,降水与 NPP 呈正相关。整个青藏高原草地 NPP 变化的主要驱动因子是气温。

参考文献(References):

[1] 周伟,牟风云,刚成诚,等.1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J].生态学报,2017,37(13):4335-4345.
Zhou W, Mu F Y, Gang C C, et al. Spatio-temporal dynamics of grassland net primary productivity and their relationship with climatic factors from 1982 to 2010 in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(13):4335-4345.

[2] 陈珊珊,温兆飞,马茂华,等.气候变化背景下定量解析生态工程对植被动态的影响研究方法概述[J].生态学报,2022,42(15):6439-6449.
Chen S S, Wen Z F, Ma M H, et al. Summary of research

- methods for quantitative analysis of the impact of ecological engineering on vegetation dynamics under the background of climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6439-6449.
- [3] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等. 2001—2020 年青藏高原草地 NDVI 时空变化及驱动因子分析[J]. *草地学报*, 2022, 30(7): 1873-1881.
- Ji Z X, Pei T T, Chen Y, et al. Spatial-temporal variation and driving factors of grassland NDVI in the Qinghai-Tibet Plateau from 2001 to 2020[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(7): 1873-1881.
- [4] 刘宥延. 草地生态资产与生态系统服务概念与特征[J]. *草业科学*, 2022, 39(4): 795-805.
- Liu Y Y. Differentiation and analyses of the concepts and characteristics of ecological assets and ecosystem services of grasslands[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(4): 795-805.
- [5] 刘攀, 王文颖, 周华坤, 等. 青藏高原人工草地土壤可溶性氮组分与植被生产力动态变化过程[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(5): 562-572.
- Liu P, Wang W Y, Zhou H K, et al. Dynamics of soil soluble nitrogen and plant productivity in artificial pastures on the Qingzang Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(5): 562-572.
- [6] 王瑞涇, 冯琦胜, 金哲人, 等. 青藏高原退化草地的恢复潜势研究[J]. *草业学报*, 2022, 31(6): 11-22.
- Wang R J, Feng Q S, Jin Z R, et al. A study on restoration potential of degraded grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 11-22.
- [7] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- Chen S T, Guo B, Yang F, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [8] 韩海燕. 基于 Biome-BGC 模型的青藏高原草地 NPP 估算及情景模拟[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- Han H Y. NPP Estimation and Scenario Simulation of Grassland in Qinghai-Tibet Plateau Based on Biome-BGC Model[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.
- [9] 翟颖佳, 李耀辉, 徐影. RCPs 情景下中国北方地区干旱气候变化特征[J]. *高原气象*, 2016, 35(1): 94-106.
- Zhai Y J, Li Y H, Xu Y. Aridity change characteristics over northern region of China under RCPs scenario[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(1): 94-106.
- [10] 刘丽慧, 孙皓, 李传华. 基于改进土壤冻融水循环的 Biome-BGC 模型估算青藏高原草地 NPP[J]. *地理研究*, 2021, 40(5): 1253-1264.
- Liu L H, Sun H, Li C H. Estimation of grassland NPP in the Qinghai-Tibet Plateau based on the improved Biome-BGC model considering soil freeze-thaw water cycle[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1253-1264.
- [11] 汪柳皓, 魏显虎, 张宗科, 等. 青藏高原地区植被指数变化及其与温湿度因子的关系[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(2): 141-148.
- Wang L H, Wei X H, Zhang Z K, et al. NDVI variation and its relationship with temperature and precipitation on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(2): 141-148.
- [12] 罗爽, 刘会玉, 龚海波. 1982—2018 年中国植被覆盖变化非线性趋势及其格局分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(20): 8331-8342.
- Luo S, Liu H Y, Gong H B. Nonlinear trends and spatial pattern analysis of vegetation cover change in China from 1982 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(20): 8331-8342.
- [13] Sun H Z, Chen Y B, Xiong J N, et al. Relationships between climate change, phenology, edaphic factors, and net primary productivity across the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 107: 102708.
- [14] Luo Z H, Wu W C, Yu X J, et al. Variation of net primary production and its correlation with climate change and anthropogenic activities over the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1352.
- [15] Xiong Q L, Xiao Y, Halmy M W A, et al. Monitoring the impact of climate change and human activities on grassland vegetation dynamics in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau of China during 2000—2015[J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(5): 637-651.
- [16] 唐中楠, 杨国丽, 李军, 等. 未来气候情景下兰江流域径流响应模拟[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(2): 32-35.
- Tang Z N, Yang G L, Li J, et al. Response of runoff over future period to climate in Lanjiang river basin[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(2): 32-35.
- [17] 董瑞, 楚彬, 花蕊, 等. 未来气候情景下青藏高原瑞香狼毒 (*Stellera chamaejasme*) 的地理分布预测[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(4): 10-20.
- Dong R, Chu B, Hua R, et al. Geographical distribution prediction of *Stellera chamaejasme* in the Qinghai-Tibet Plateau under future climate change scenarios[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(4): 10-20.
- [18] 齐庆华. 未来气候情景下中国东部极端降水和气温的危险性特征[J]. *气象与减灾研究*, 2020, 43(4): 256-266.

- Qi Q H. Risk characteristics of precipitation and temperature extremes over Eastern China under future climatic scenario[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2020, 43(4):256-266.
- [19] 刘洋洋,章钊颖,同琳静,等.中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2):349-363.
- Liu Y Y, Zhang Z Y, Tong L J, et al. Spatiotemporal dynamics of China's grassland NPP and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2):349-363.
- [20] 欧阳习军,董晓华,魏榕,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化及对气候因子的响应分析[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2):220-229.
- Ouyang X J, Dong X H, Wei R, et al. Analysis of spatiotemporal variation of NDVI in the vegetation growing season and responses to climatic factors in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2):220-229.
- [21] 陈发虎,王亚军,丁林,等.1949 年以前青藏高原探险和科学考察活动概况[J]. *地理学报*, 2022, 77(7):1565-1585.
- Chen F H, Wang Y J, Ding L, et al. The expedition and scientific investigation activities on the Tibetan Plateau before 1949 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7):1565-1585.
- [22] 李月皓,王晓峰,楚冰洋,等.青藏高原生态屏障生态系统时空演变及驱动机制[J]. *生态学报*, 2022, 42(21):8581-8593.
- Li Y H, Wang X F, Chu B Y, et al. Spatiotemporal ecosystem evolution and driving mechanism in the Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21):8581-8593.
- [23] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great Plains grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5):1173-1179.
- [24] 巴桑参木决,温仲明,刘洋洋,等.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*, 2022, 30(4):778-789.
- Basang C, Wen Z M, Liu Y Y, et al. Analysis of the spatial-temporal evolution patterns of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Tibet[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(4):778-789.
- [25] 刘凤,曾永年.近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(5):1528-1540.
- Liu F, Zeng Y N. Spatial-temporal change in vegetation Net Primary Productivity and its response to climate and human activities in Qinghai Plateau in the past 16 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5):1528-1540.
- [26] 李传华,孙皓,王玉涛,等.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*, 2020, 39(5):1734-1744.
- Li C H, Sun H, Wang Y T, et al. Estimation of grassland net primary productivity in permafrost of Qinghai-Tibet Plateau based on machine learning[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5):1734-1744.
- [27] 张帆.青藏高原草地净初级生产力在过去 34 年的变化及局部退化特征分析[D].兰州:兰州大学,2021.
- Zhang F. Productivity in the Qinghai-Tibet Plateau During the Past 34 Years and Analysis of Its Local Degradation Characteristics [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [28] 何楷迪,孙建,陈秋计.气候要素和土壤质地对青藏高原草地净初级生产力和降水利用率的影响[J]. *草业科学*, 2019, 36(4):1053-1065.
- He K D, Sun J, Chen Q J. Response of climate and soil texture to net primary productivity and precipitation-use efficiency in the Tibetan Plateau[J]. *Pratacul-tural Science*, 2019, 36(4):1053-1065.
- [29] 刘晓东,程志刚,张冉.青藏高原未来 30~50 年 A1B 情景下气候变化预估[J]. *高原气象*, 2009, 28(3):475-484.
- Liu X D, Cheng Z G, Zhang R. The A1B scenario projection for climate change over the Tibetan Plateau in the next 30~50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3):475-484.
- [30] 边多,杨秀海,普布次仁,等.西藏 NPP 时空格局与气候因子的关系[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(3):830-836.
- Bian D, Yang X H, Pubuciren, et al. Spatial and temporal pattern of NPP and its relationship with climate factors in Tibet, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(3):830-836.
- [31] 周夏飞,於方,曹国志,等.2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1):76-81.
- Zhou X F, Yu F, Cao G Z, et al. Spatiotemporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Qinghai-Tibet Plateau grassland ecosystem during 2001—2015 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1):76-81.