

DOI: 10.20103/j.stxb.202301110075

吴丽媛, 神祥金, 刘奕雯, 马蓉, 张佳琦, 丁辰, 吕宪国, 姜明. 青藏高原草本沼泽植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2024, 44(5): 2115-2126.

Wu L Y, Shen X J, Liu Y W, Ma R, Zhang J Q, Ding C, Lü X G, Jiang M. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its response to climate change in herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2115-2126.

青藏高原草本沼泽植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应

吴丽媛^{1,2}, 神祥金^{1,*}, 刘奕雯^{1,2}, 马 蓉¹, 张佳琦¹, 丁 辰^{1,2}, 吕宪国¹, 姜 明¹

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 青藏高原是我国重要的草本沼泽分布区, 该地区草本沼泽对于东亚生态安全及碳循环具有重要的意义。植被净初级生产力(NPP)是反映生态系统固碳能力的重要指标, 气候变化能够显著影响植被 NPP。在全球气候变化背景下, 青藏高原草本沼泽植被 NPP 的时空变化及对气候响应机理尚不明确。利用 2000—2020 年 NPP 数据和气象数据, 对青藏高原草本沼泽植被 NPP 的时空变化及其对气候变化的响应进行分析。研究表明: 青藏高原草本沼泽植被 NPP 多年平均值为 122.80 g C/m², 在 2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被年 NPP 总体呈现显著增加趋势(0.79 g C m⁻² a⁻¹), 其中增加趋势最为显著的地区集中于研究区北部。研究发现青藏高原草本沼泽植被 NPP 主要受年均气温影响, 年均降水对青藏高原草本沼泽植被 NPP 的影响并不显著。在不同季节, 夏季和秋季升温均能够显著增加沼泽植被 NPP, 其中夏季夜晚最低温升高对青藏高原草本沼泽植被生长的促进作用比白天最高温升高更显著。在全球昼夜不对称增温背景下, 未来模拟青藏高原草本沼泽植被 NPP 时, 需重点关注白天和夜晚温度变化对草本沼泽植被生长的不同影响。研究结果有助于评估青藏高原草本沼泽植被固碳潜力, 并为青藏高原沼泽生态保护提供科学依据。

关键词: 草本沼泽; 植被; 净初级生产力; 气候变化; 青藏高原

Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its response to climate change in herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau

WU Liyuan^{1,2}, SHEN Xiangjin^{1,*}, LIU Yiwen^{1,2}, MA Rong¹, ZHANG Jiaqi¹, DING Chen^{1,2}, LÜ Xianguo¹, JIANG Ming¹

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Herbaceous marshes have a faster rate of carbon sequestration than other types of marshes and play an essential role in regulating the regional carbon cycle and climate change. As a sensitive region to climate change, the Qinghai-Tibetan Plateau has large areas of herbaceous marshes, which are important for ecological security and carbon cycle in East Asia. Vegetation net primary productivity (NPP) is an important indicator of the carbon sequestration capacity of marsh ecosystems. Climate change can significantly affect the NPP of marsh ecosystems. Under the background of global climate change, the change of NPP in herbaceous marshes vegetation and its response mechanism to climate change on the Qinghai-Tibet Plateau are not clear. In this study, NPP data and meteorological data from 2000 to 2020 were used to analyze the temporal and spatial variation of the NPP in herbaceous marshes vegetation and its response to climate change on the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971065, 4237012146); 吉林省自然科学基金项目(20210101104JC); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(ZDBS-LY-7019)

收稿日期: 2023-01-11; **网络出版日期:** 2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shenxiangjin@iga.ac.cn

Qinghai-Tibet Plateau. The results showed that the annual average NPP of herbaceous marshes vegetation was 122.80 g C/m^2 . The annual NPP of herbaceous marshes vegetation presented a significant increase trend ($0.79 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) from 2000 to 2020, and the most significant increase was mainly concentrated in the northern part of the study area. The NPP of herbaceous marshes vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau was mainly affected by the average annual temperature, and the effect of average annual precipitation on the NPP of herbaceous marshes vegetation was not significant. In different seasons, summer and autumn warming could significantly increase marsh NPP, and the increase of nighttime minimum temperature in summer had a larger positive effect on the NPP of herbaceous marshes than the daytime maximum temperature in summer. By contrast, the increase of daytime maximum temperature in autumn had a larger positive effect on the NPP of herbaceous marshes than the nighttime minimum temperature in autumn. This study highlights the different effects of seasonal climate changes on the NPP of herbaceous marshes in the Qinghai-Tibetan Plateau. Under the background of global diurnal asymmetric warming (faster warming trend during the night than during the day), when simulating the NPP of herbaceous marshes in the future, we should also focus on the different effects of day and night temperature changes on the vegetation growth of herbaceous marshes. The results are helpful to evaluate the carbon sequestration potential of herbaceous marshes and provide theoretical guidance for the ecological conservation of herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau.

Key Words: herbaceous marshes; vegetation; Net Primary Productivity; climate change; Qinghai-Tibet Plateau

湿地是世界三大生态系统之一, 尽管只占全球面积的 4%—6%, 但其碳储量却占世界陆地碳储量的 12%—24%^[1]。沼泽是湿地的一种重要类型, 在保持生态平衡、保护生物多样性、调节碳循环等方面具有重要作用^[1]。植被作为沼泽湿地的重要组成部分, 在涵养水源、净化水质、保护沼泽生态系统环境和促进地表能量交换等方面至关重要^[2-4]。植被净初级生产力 (NPP) 是反映生态系统功能和固碳能力的重要指标^[5-7]。气候变化能够对沼泽湿地植被 NPP 产生重要影响, 从而影响区域碳循环^[8]。目前, 许多研究分析了气候变化对陆地生态系统植被 NPP 的影响, 但这些研究大多集中于草原和森林生态系统植被 NPP, 而对于沼泽植被 NPP 的研究较少^[1, 9-10]。在植被对气候变化的响应方面, 沼泽湿地与其他陆地生态系统可能存在不同。明确沼泽湿地植被 NPP 的时空变化及其对气候的响应机理, 对于进一步了解生态系统植被与气候变化相互关系, 以及准确估算和预测区域碳储量具有重要的意义。

作为对全球气候变化敏感的区域, 青藏高原存在大面积的草本沼泽^[1, 11]。草本沼泽较其他类型沼泽类型具有更快的固碳速率^[12], 其在调节区域碳循环和气候变化方面发挥着重要的作用^[1]。许多学者对青藏高原植被 NPP 变化及对气候的响应进行了研究, 例如, Liu 等^[13]基于实验数据和荟萃分析探究了气候变化对青藏高原植被 NPP 的影响, 结果表明气候变暖和降水减少并不会改变青藏高原地区生态系统的 NPP; 梁大林等^[14]发现高寒草甸植被 NPP 主要受温度调节, 高寒草原植被 NPP 受降水和温度的双重调控; 戴黎聪等^[15]认为温度对小嵩草草甸地上 NPP 无显著影响, 并且年均温和年降水对小嵩草草甸地下 NPP 也无显著影响。然而, 以往研究多侧重于对青藏高原草地生态系统植被 NPP 的研究, 而对青藏高原沼泽湿地生态系统植被 NPP 研究较少。沼泽生态系统和草地生态系统的植被生长环境不同, 这导致沼泽生态系统植被 NPP 对气候变化存在不同的响应^[16]。为了进一步探究揭示青藏高原地区植被动态变化并准确评估其碳储量, 有必要进一步分析青藏高原沼泽植被 NPP 的时空变化及其对气候变化的响应规律。已有部分研究分析了青藏高原沼泽植被 NPP 变化及对气候的响应, 例如郭斌等^[17]发现影响青藏高原若尔盖沼泽湿地植被 NPP 变化的主导气象因子是降水; 李妍妍^[18]认为月平均气温、降水、相对湿度促进麦地卡湿地植被 NPP 的增加, 地表温度会限制麦地卡湿地植被 NPP 的增加。然而, 这些研究多侧重于对青藏高原局部地区沼泽湿地植被 NPP 的研究, 而对于整个青藏高原沼泽植被 NPP 研究较少。已有研究表明, 不同地区沼泽湿地的不同物种对不同季节或月份气候变化的响应存在差异^[1], 为了更加全面的揭示气候变化对青藏高原地区沼泽湿地生态系统的影响, 有必要分析整个青藏高原草本沼泽植被 NPP 的时空变化及对气候变化的响应。此外, 有研究发现, 白天和夜晚温度对松嫩平原草本沼泽植被产生不对称的影响, 白天气温升高不利于松嫩平原地区草本沼泽植被的生长, 而夜间气温升高能够促进该地区草本沼泽植被的生长^[4]。相较于气候温暖干燥的松嫩平原, 青藏高原地区气

候寒冷湿润,白天和夜晚温度变化对该地区草本沼泽植被是否存在不对称影响亟需揭示。

本文基于 2000—2020 年 NPP 数据和气象数据,分析了青藏高原草本沼泽植被 NPP 的时空变化特征及其对气候的响应规律。明确青藏高原草本沼泽植被 NPP 的变化及其对气候变化的响应规律,能为评估青藏高原沼泽湿地固碳潜力,揭示草本沼泽植被对气候变化响应机理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域

青藏高原位于中国西南部,范围在东经 73°—105°、北纬 26°—40°,包括中国的青海、甘肃、西藏、新疆等 6 个省区,总面积为 261.5 万 km²^[19]。青藏高原平均海拔 4000 m 以上,总体上呈现出西北高、东南低的分布规律^[20]。青藏高原空气相对干燥稀薄,高原腹地年均气温低于 0℃,昼夜温差大,年均降水量也呈现较大差异,年均降水量由西北向东南逐渐增加,降水季节性差异显著^[20]。青藏高原草本沼泽湿地面积约为 14552.7 km²,主要分布于青藏高原的西南部和东北部^[11]。该地区草本沼泽多为水生和沼生草本植物,优势种主要有藏北嵩草(*Kobresia littledalei*)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)、芦苇(*Phragmites australis*)等^[11]。

1.2 研究数据

本研究使用由美国国家航空航天局(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)提供的覆盖研究区域的逐年 NPP (MOD17A3) 数据集,时间范围为 2000—2020 年,空间分辨率为 500 m × 500 m, NPP 数据已经过质量检测^[1]。本文中使用的沼泽分布数据是由中国湿地生态与环境数据中心提供的 2010—2015 年青藏高原草本沼泽矢量分布数据集(<http://wdrre.data.ac.cn/>),该数据集已通过野外准确性验证^[16, 21]。本研究中的气象数据是由国家气象中心提供的时间范围为 2000—2020 年的青藏高原地区气象站的逐月降水、平均温、平均最高温和平均最低温数据(<http://data.cma.cn/en>),数据已经过严格的质量检验^[19, 22]。

1.3 研究方法

本研究将从气象站获取的气候数据通过普通克里格法进行空间插值,使其投影坐标和空间分辨率与 NPP 数据统一。以逐月气候资料为基础,本文计算了研究区域内所有草本沼泽植被像元的算数平均值,得到区域平均降水量、平均温、最高温和最低温。为了进一步探究不同季节气候变化对草本沼泽植被 NPP 的影响,本文还利用月气象数据计算了春季(3、4、5 月)、夏季(6、7、8 月)、秋季(9、10、11 月)和冬季(12、1、2 月)的气象因子的平均值。本文利用趋势分析法对草本沼泽植被 NPP 及气象因子的变化趋势进行计算,计算公式如下^[19]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{(n \times \sum_{i=1}^n i \times X_i) - (\sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中, n 为研究的时间序列长度即为 21 年; i 为年序号; X_i 为第 i 年的 NPP 或气象因子值; θ_{slope} 为各个像元 NPP 或气象因子的变化趋势,若 θ_{slope} 为正值,则表示该像元 NPP 或气象因子的变化呈上升趋势,相反则为下降趋势。

本文利用 Pearson 相关分析方法分析 NPP 与各气象因子之间是否存在显著的相关关系^[19],计算公式如下^[19]:

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

式中, R_{xy} 为相关系数, R_{xy} 值介于 +1 与 -1 之间,正(负)代表 NPP 与气象因子之间为正(负)相关,0 代表两个因子之间无明显相关性; n 为研究的时间段累计年数即为 21 年; x_i 为研究时间段内某年份的某气象因子的平均数值, $\bar{x}$ 为 21 年的某气象因子的平均值; y_i 为研究时间段内某年份的 NPP 值; $\bar{y}$ 为 21 年的 NPP 平均值。显著性检验采用双尾检验,当显著性 P 值 ≤ 0.01 时,两个因子之间存在极显著相关;当 P 值 ≤ 0.05 时,两个因子之间存在显著相关;当 P 值 > 0.05 时,两个因子之间无明显相关性^[19]。

2 结果

2.1 青藏高原草本沼泽植被 NPP 的时空变化特征

2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 多年平均值为 122.80 g C/m^2 , 草本沼泽植被年 NPP 较大值集中分布于研究区南部, 较小值分布于研究区西部和东部(图 1)。青藏高原草本沼泽植被 NPP 在 2000—2020 年总体呈现显著($P < 0.05$)上升趋势, 上升趋势为 $0.79 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 2)。在空间上, 2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 呈现增加趋势的像元占总像元的 80.29%(图 1), 其中增加趋势最为显著的地区分布于研究区北部, 减少趋势最为显著的地区分布于研究区西南部(图 1)。

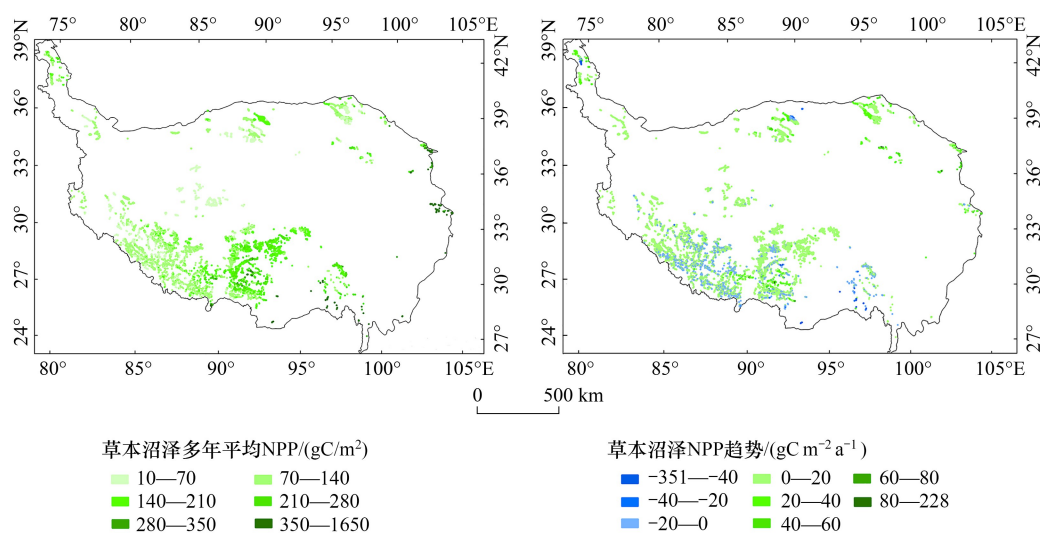


图 1 2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被多年平均 NPP 及 NPP 趋势

Fig.1 Annual average NPP and NPP trends of herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity

2.2 气象因子变化趋势

本文对 2000—2020 年青藏高原草本沼泽分布区的气温及降水变化趋势进行了计算。年平均温、年最高温和年最低温均呈上升趋势, 其中年平均温和年最低温呈极显著增加趋势($P < 0.01$)(表 1)。研究区春季最低温呈显著增加趋势($P < 0.05$), 夏季、秋季平均温和最低温、秋季最高温呈显著增加趋势($P < 0.05$), 其中夏季和秋季最低温增加趋势达到极显著水平($P < 0.01$)(表 1)。此外, 8 月、9 月平均温、最低温和 9 月最高温均呈现出极显著增长趋势($P < 0.01$), 8 月最高温呈显著增长趋势($P < 0.05$)(表 1)。

空间上, 8 月、10 月降水除了在青藏高原草本沼泽分布区南部和西南部呈减少趋势外, 在其他大部分区域均呈现增加趋势, 9 月降水在研究区西南部和东北部呈减少趋势, 在其他区域呈增加趋势(图 3—图 5)。8 月、10 月平均温、最高温和最低温在研究区西北部呈减少趋势(图 3—图 5), 在其他区域呈增加趋势, 9 月平均温、最高温和最低温在研究区整体上呈现增加趋势。

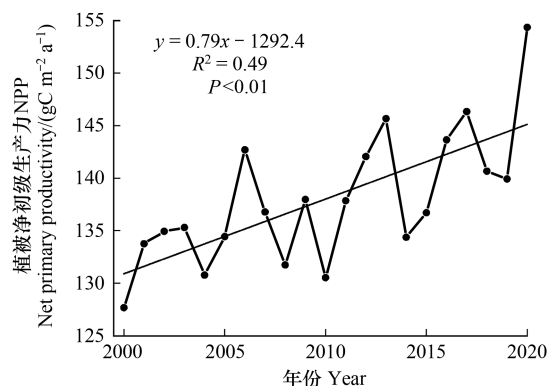


图 2 2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 变化

Fig.2 Variation of vegetation NPP in herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

表 1 2000—2020 年青藏高原草本沼泽气象因子的变化趋势

Table 1 Variation trends of climatic factors of herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

时间 Time	降水/(mm/a) Precipitation	平均温/(℃/a) Mean temperature	最高温/(℃/a) Maximum temperature	最低温/(℃/a) Minimum temperature
年均 Annual	-0.046	0.554 **	0.260	0.653 **
春季 Spring	-0.166	0.316	0.155	0.533 *
夏季 Summer	0.009	0.494 *	0.366	0.589 **
秋季 Autumn	-0.218	0.512 *	0.445 *	0.563 **
冬季 Winter	0.406	0.365	-0.053	0.177
1 月 January	0.297	0.302	-0.213	-0.078
2 月 February	0.231	0.128	0.099	0.165
3 月 March	0.181	0.228	0.153	0.319
4 月 April	0.045	0.346	0.190	0.551 **
5 月 May	-0.347	0.061	-0.036	0.203
6 月 June	-0.196	0.350	0.232	0.440 *
7 月 July	0.179	0.209	0.113	0.344
8 月 August	-0.051	0.568 **	0.452 *	0.597 **
9 月 September	-0.159	0.584 **	0.562 **	0.635 **
10 月 October	0.100	0.332	0.279	0.394
11 月 November	-0.197	0.336	0.171	0.401
12 月 December	0.227	0.119	0.008	0.140

** 在 0.01 水平上极显著, * 在 0.05 水平上显著

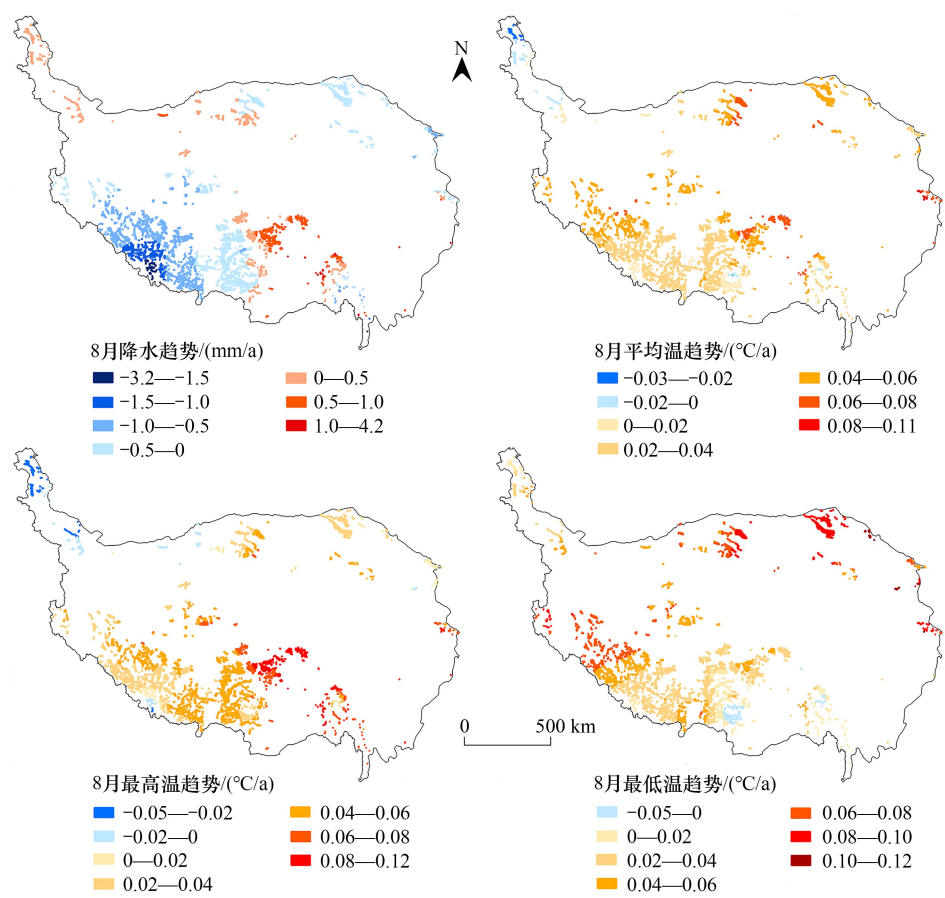


图 3 2000—2020 年青藏高原草本沼泽地区 8 月降水 (mm/a)、平均温 (℃/a)、最高温 (℃/a)、最低温 (℃/a) 变化趋势

Fig.3 Variation trends of precipitation (mm/a), average temperature (℃/a), maximum temperature (℃/a), and minimum temperature (℃/a) in August in the herbaceous marshes of the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

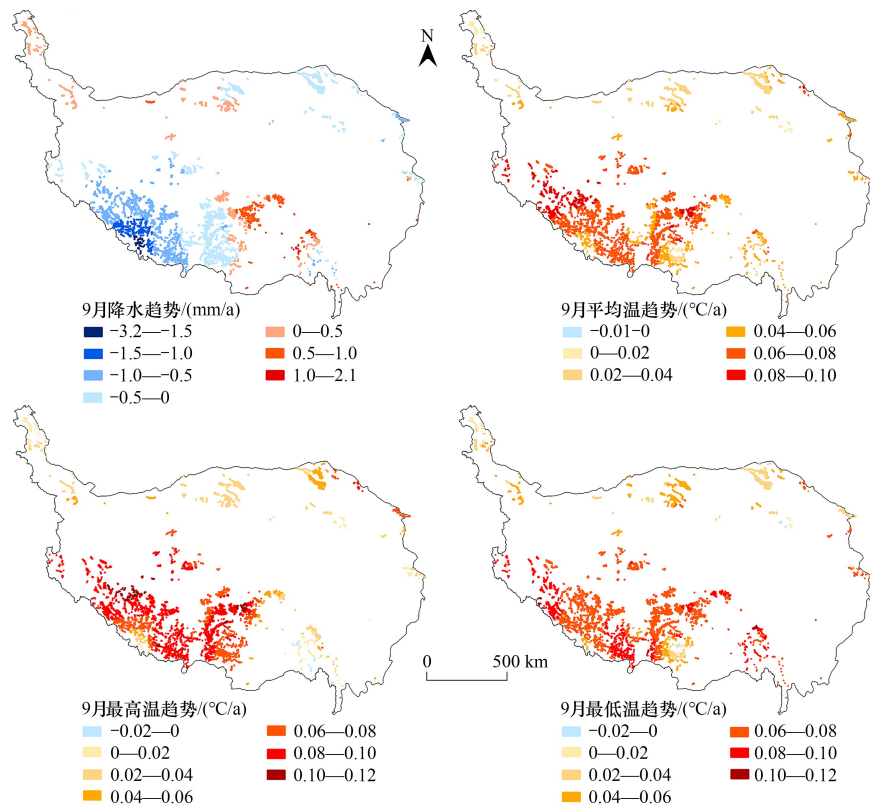


图 4 2000—2020 年青藏高原草本沼泽地区 9 月降水 (mm/a)、平均温 (°C/a)、最高温 (°C/a)、最低温 (°C/a) 变化趋势
Fig.4 Variation trends of precipitation (mm/a), average temperature (°C/a), maximum temperature (°C/a) and minimum temperature (°C/a) in September in the herbaceous marshes of the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

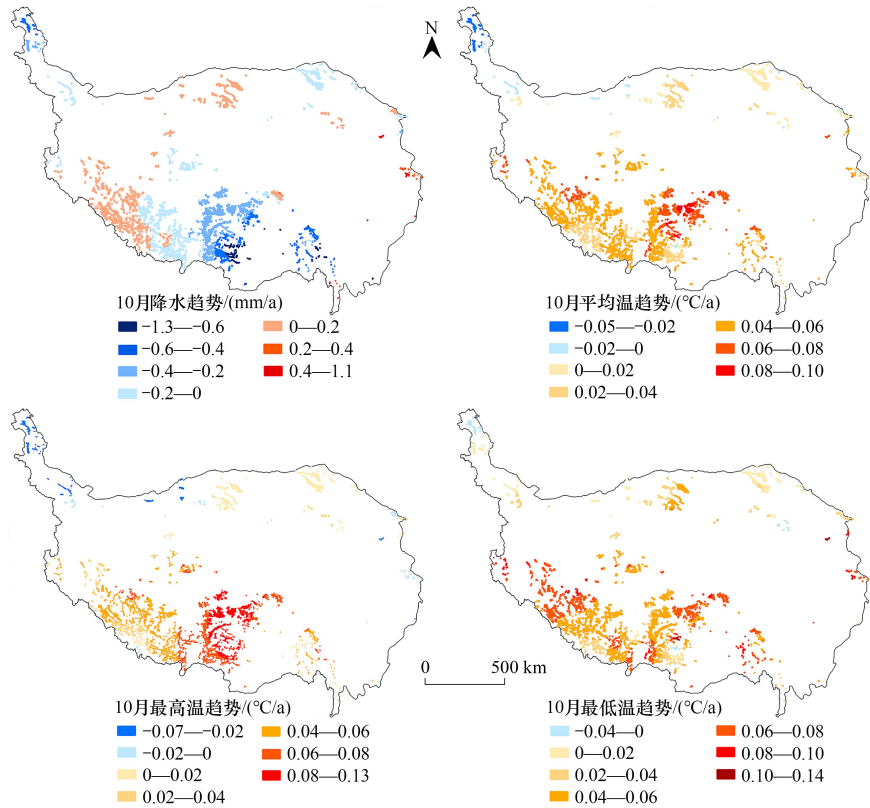


图 5 2000—2020 年青藏高原草本沼泽地区 10 月降水 (mm/a)、平均温 (°C/a)、最高温 (°C/a)、最低温 (°C/a) 变化趋势
Fig.5 Variation trends of precipitation (mm/a), average temperature (°C/a), maximum temperature (°C/a) and minimum temperature (°C/a) in October in the herbaceous marshes of the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

2.3 青藏高原草本沼泽植被 NPP 与气象因子的相关性

为了探究气候变化对青藏高原草本沼泽植被 NPP 的影响,分析了气象因子和青藏高原草本沼泽植被 NPP 的相关性。研究表明:2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 与年均降水呈弱负相关,而与年均温度呈正相关,其中 NPP 与年均最低温正相关程度达到显著水平($P<0.05$)(表 2)。在不同季节降水影响方面,青藏高原草本沼泽植被 NPP 与春季和冬季降水呈现弱正相关,与夏季和秋季降水呈现弱负相关。此外,青藏高原草本沼泽植被 NPP 与 8 月降水呈现显著负相关($P<0.05$)(表 2)。在不同季节温度影响方面,研究发现青藏高原草本沼泽植被 NPP 与夏季温度(平均温、最高温和最低温)和秋季平均温、最高温呈显著正相关(表 2)。与此同时,青藏高原草本沼泽植被 NPP 分别与 8 月、9 月和 10 月平均温、8 月和 9 月最低温以及 10 月最高温呈显著正相关($P<0.05$),其中青藏高原草本沼泽植被 NPP 与平均温 and 最高温的相关性在 8 月和 9 月达到极显著水平($P<0.01$)(表 2)。

表 2 2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 与气象因子的相关性
Table 2 Correlation between NPP and climatic factors in herbaceous marshes of the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

时间 Time	降水 Precipitation	平均温 Mean temperature	最高温 Maximum temperature	最低温 Minimum temperature
年均 Annual	-0.246	0.342	0.258	0.546 *
春季 Spring	0.181	-0.001	-0.146	0.242
夏季 Summer	-0.208	0.508 *	0.465 *	0.529 *
秋季 Autumn	-0.389	0.435 *	0.453 *	0.340
冬季 Winter	0.280	0.209	0.123	0.357
1 月 January	0.309	0.040	-0.159	-0.126
2 月 February	0.150	0.381	0.389	0.378
3 月 March	0.224	0.020	-0.052	0.143
4 月 April	0.329	0.064	-0.073	0.283
5 月 May	-0.074	-0.112	-0.220	0.054
6 月 June	-0.074	0.298	0.165	0.415
7 月 July	0.009	0.209	0.106	0.337
8 月 August	-0.440 *	0.644 **	0.623 **	0.498 *
9 月 September	-0.346	0.566 **	0.588 **	0.465 *
10 月 October	-0.112	0.490 *	0.533 *	0.351
11 月 November	-0.079	0.028	-0.097	0.073
12 月 December	-0.067	0.264	0.043	0.252

** 在 0.01 水平上极显著, * 在 0.05 水平上显著;NPP:净初级生产力 Net primary productivity

考虑到 8 月、9 月和 10 月气象因子变化对青藏高原草本沼泽植被 NPP 的显著影响,进一步分析了青藏高原草本沼泽植被 NPP 与 8 月、9 月和 10 月气象因子相关性的空间分布。研究发现青藏高原草本沼泽植被 NPP 与 8 月、9 月、10 月降水的相关性的空间分布规律基本一致,与降水呈负相关的区域主要分布于研究区的南部和西南部,与降水呈正相关的区域主要分布于研究区的北部(图 6—图 8)。除此之外,青藏高原草本沼泽植被 NPP 与 8 月、9 月、10 月的平均温、最高温、最低温相关性的空间分布基本一致,与平均温、最高温、最低温呈正相关的区域为研究区南部和北部,呈负相关的区域主要在研究区的西南部(图 6—图 8)。

3 讨论

3.1 青藏高原草本沼泽植被 NPP 变化

2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 多年平均值为 122.80 g C/m²,该结果小于 Shen 等^[1]分析 2000—2020 年青藏高原沼泽植被 NPP 的结果(184.37 g C/m²)。分析其原因是因为 Shen 等的研究对象为所有沼泽植被,其中包含生物量较大的灌丛沼泽植被。而本文研究对象仅为生物量较小的草本沼泽植被,属于

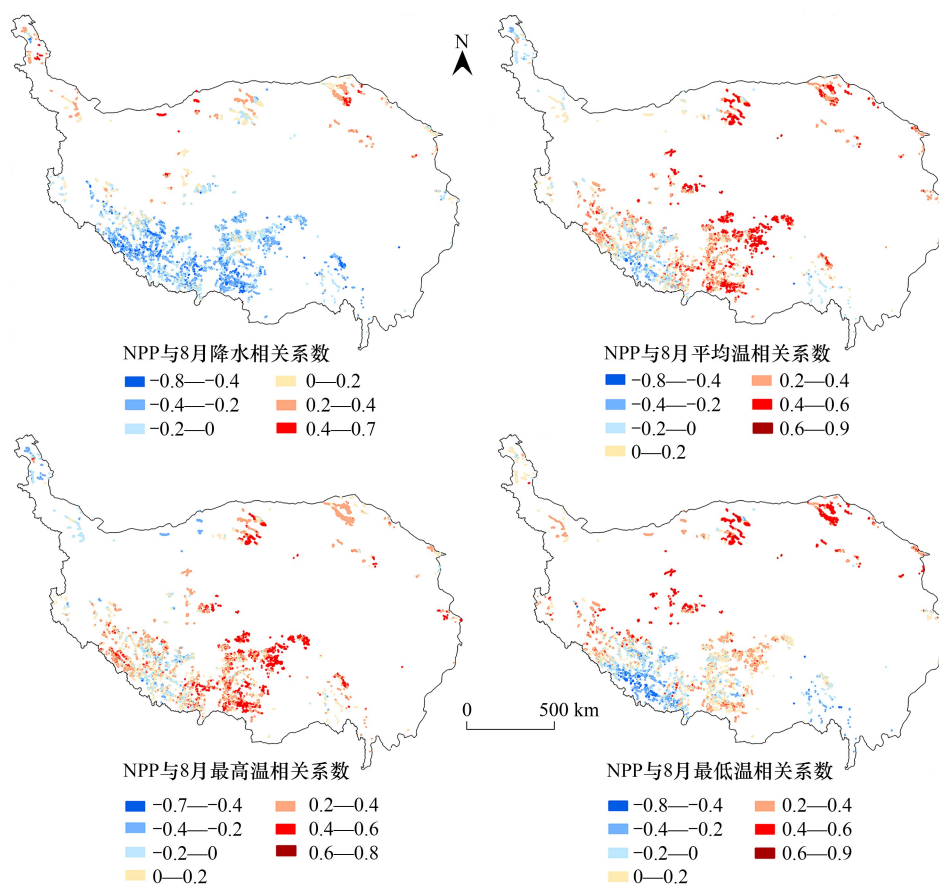


图 6 2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 与 8 月气象因子相关系数空间分布

Fig.6 Spatial patterns of correlation coefficients between NPP and climatic factors in August in herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

沼泽植被的一种类型,因此导致了本文与 Shen 等研究结果的差异。在 NPP 变化方面,青藏高原草本沼泽植被 NPP 以 $0.79 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的趋势增加。Shen 等^[23]和李红英等^[24]通过对近 20 年青藏高原植被覆盖度分析,发现青藏高原植被总体生长状况在不断改善,本文通过对草本沼泽植被的分析,进一步发现该地区草本沼泽植被生长状况正在明显改善。

3.2 青藏高原草本沼泽植被 NPP 对气象因子的响应

本文分析了气候变化对青藏高原草本沼泽植被的影响(表 2),研究发现 2000—2020 年青藏高原草本沼泽植被 NPP 与年均最低温呈显著正相关(表 2),表明年均最低温的升高可以促进植被 NPP 的增加。这是因为青藏高原是高海拔地区,气候寒冷,温度是影响青藏高原草本沼泽植被生长的主要因子^[1],因此最低温度的升高能够减少霜冻等灾害的发生,进而促进草本沼泽植被 NPP 的增加。青藏高原草本沼泽植被 NPP 受不同季节气候变化的影响程度不同。青藏高原草本沼泽植被 NPP 与夏季温度(平均温、最高温和最低温)呈显著正相关(表 2),表明夏季温度升高可以促进植被生长,进而引起 NPP 的升高。本文进一步发现夏季最高温和最低温的升高对青藏高原草本沼泽植被的生长存在不对称影响,夜晚最低温升高对沼泽植被 NPP 的促进作用更显著(表 2)。夏季是沼泽植被生长最旺盛的时期,夏季白天温度的升高通过促进酶的活性,来促进光合作用的增加^[1, 25],进而促进青藏高原草本沼泽植被的生长。夏季夜晚最低温度的升高虽然能促进植被在夜间进行呼吸作用,消耗一定量的有机物^[26],然而植被可以通过补偿效应促进第二天光合作用产生更多有机物^[1, 27]。以往研究表明,湿地具有充裕的水分和养分是发生补偿效应的最佳场所^[1],因此夏季最低温能显著促进青藏高原草本沼泽植被的生长,且促进作用比白天最高温更显著。此外,本文发现夏季温度和秋季温度

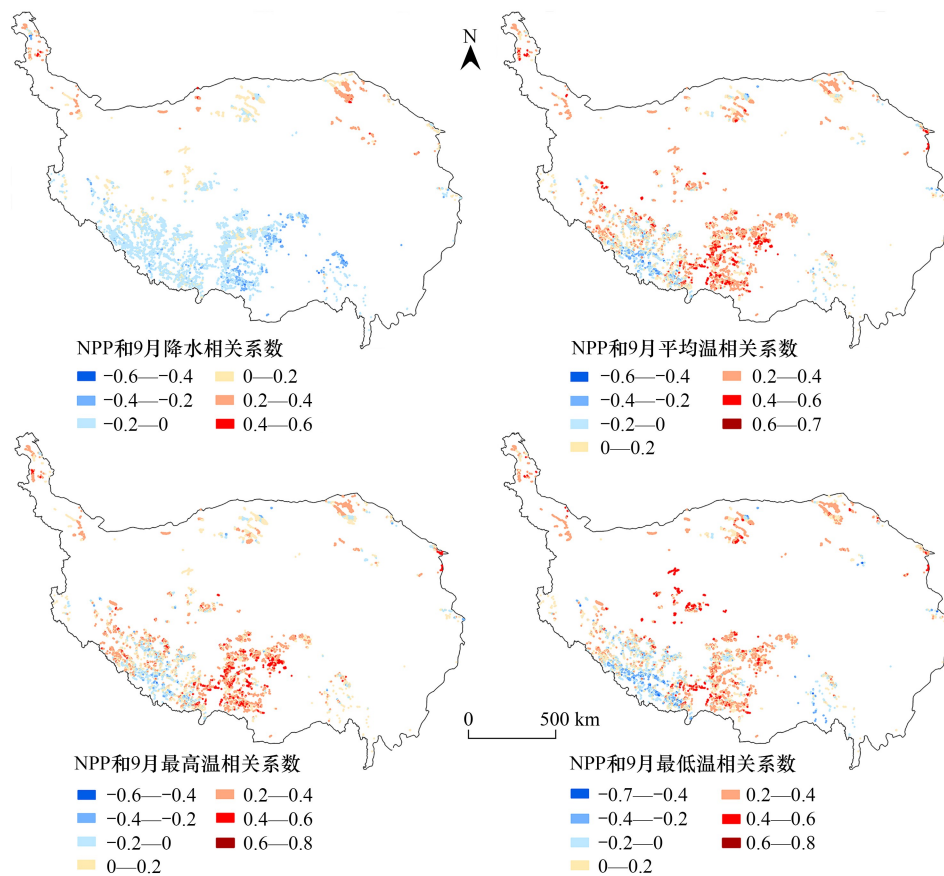


图7 2000—2020年青藏高原草本沼泽植被NPP与9月气象因子相关系数空间分布

Fig.7 Spatial patterns of correlation coefficients between NPP and climatic factors in September in herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

对青藏高原草本沼泽植被生长的影响也存在不对称,夏季最低温对沼泽植被生长的促进作用更显著,而秋季最高温对沼泽植被生长的促进作用更显著(表2)。秋季温度的升高能够导致青藏高原草本沼泽植被NPP的增加,其原因是由于秋季温度的升高会导致植被叶片变黄或衰老的时间延迟,从而导致植被生长季节延长^[28],促进沼泽植被NPP的增加。

为了进一步探讨气候变化对青藏高原草本沼泽植被NPP的影响,分析了不同月份的气象因子与青藏高原草本沼泽植被NPP的相关性,研究结果表明6月和7月夜晚最低温的升高能在一定程度上促进青藏高原草本沼泽植被的生长(表2)。由于青藏高原草本沼泽植被NPP与6月和7月最低温的相关系数远大于与最高温的相关系数,所以尽管草本沼泽植被NPP与8月最高温的相关系数要高于与8月最低温的相关系数,也使得草本沼泽植被NPP与夏季最高温的相关系数要低于与夏季最低温的相关系数。这就在一定程度上解释了夏季最低温的升高对青藏高原草本沼泽植被生长的促进作用比白天最高温更显著的原因。青藏高原草本沼泽植被NPP与8月降水呈现显著负相关(表2),由于8月时该地区处于雨季,该地区草本沼泽水分条件充裕,水分因素不是植被生长的限制因子。而降水的增多可能会伴随云量的增加和辐射减少,影响植被的光合作用^[29—30],不利于植被的生长,从而使得植被NPP降低。青藏高原草本沼泽植被NPP与8月和9月最低温呈显著正相关,与8月最低温的相关系数高于与9月最低温的相关系数(表2),最低温的升高可能通过减少霜冻,降低最低温对植被组织器官生理机能的损害^[7],从而提高植被NPP。青藏高原8月水热充足,草本沼泽植被夜间补偿作用显著,9月降水减少,草本沼泽植被夜间补偿作用减弱,这解释了9月最低温相关系数低于8月最低温相关系数的原因。青藏高原草本沼泽植被NPP与9月最高温呈极显著正相关($P<0.01$),与10

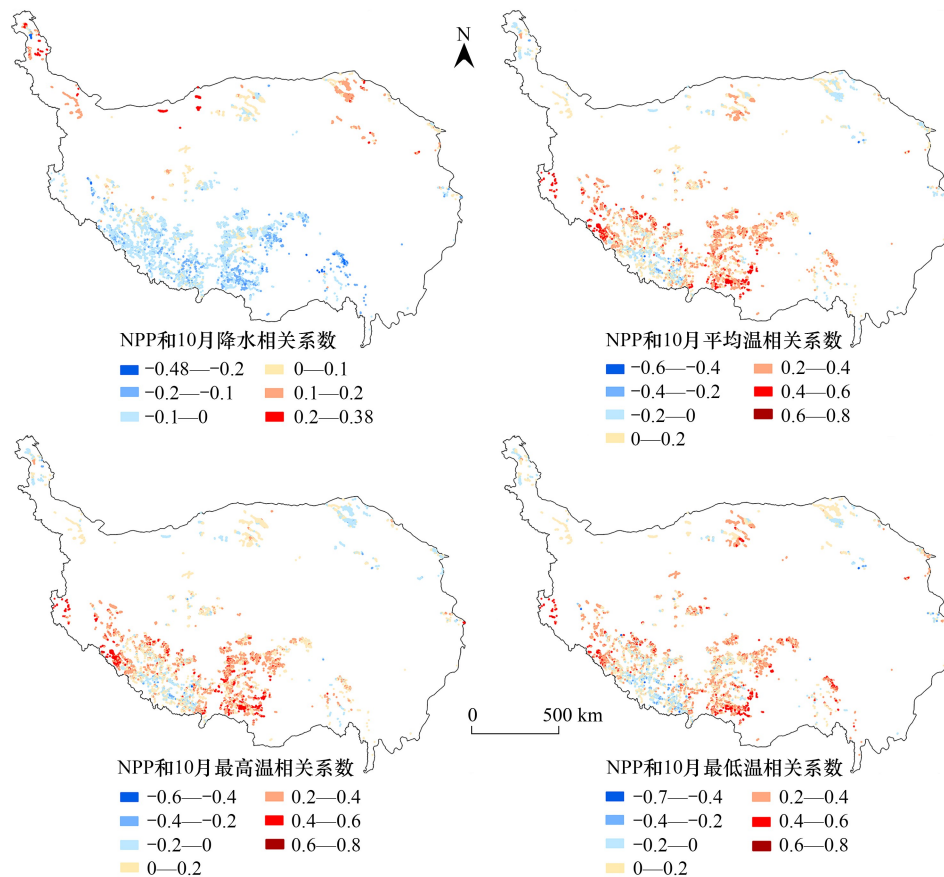


图8 2000—2020年青藏高原草本沼泽植被NPP与10月气象因子相关系数空间分布

Fig.8 Spatial patterns of correlation coefficients between NPP and climatic factors in October in herbaceous marshes on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

月最高温呈显著正相关(表2)。其原因是随着白天温度的升高,能够促进光合作用^[1, 25]以及延缓植被衰老^[28],从而增加了植被NPP^[31]。青藏高原草本沼泽植被NPP与10月最低温相关性并不显著(表2),是因为降水减少植被夜晚补偿作用减弱,呼吸作用大于补偿作用从而导致植被NPP减少,与此同时夜晚最低温的升高会减少霜冻^[32],导致植被NPP增加,彼此之间相互抵消^[33],因此解释了草本沼泽植被NPP与10月最低温的相关系数较小的原因。研究发现青藏高原西南部区域草本沼泽植被NPP与8、9、10月最高温呈现负相关,表明这三个月最高温的升高对该地区沼泽植被的生长不利。其原因是青藏高原西南部地区较为干旱^[34],水分条件是该地区草本沼泽植被生长的限制因子,最高温的升高能够导致蒸散量增加和土壤含水量降低^[35],从而对沼泽植被生长不利,进而导致沼泽植被NPP下降^[16, 36]。

2000—2020年,青藏高原草本沼泽分布区年均、夏季、秋季、8月和9月温度(平均温、最高温、最低温)在总体上呈现出上升趋势(表1),根据气象因子与NPP之间的相关性,可以得出夏、秋季(尤其8月和9月)温度的上升是导致草本沼泽植被NPP增加的主要原因。从空间上分析,2000—2020年青藏高原草本沼泽植被NPP在研究区南部、东部和北部呈增加趋势(图1),该地区8—9月温度呈现上升趋势,8月降水呈现出减少趋势。由于青藏高原草本沼泽植被NPP与8—9月温度呈正相关与8月降水呈负相关性(表2),因此8—9月温度的升高和8月降水的减少(图3、图4)部分解释了研究区南部、东部和北部草本沼泽植被NPP的增长。2000—2020年青藏高原西南部草本沼泽植被NPP呈减少趋势,8—10月温度和8月降水均呈现出增加趋势,由于青藏高原草本沼泽植被NPP与8—10月温度和8月降水均呈负相关性(图6、7、8),因此8—10月温度的升高和8月降水的增加(图3—图5)是该区域草本沼泽植被NPP减少的原因。

3.3 不足与展望

本文目前可能还存在一些不确定性。首先,NPP 数据空间分辨率为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$,NPP 数值可能无法代表其范围内所有草本沼泽植被的 NPP 数值,此外气象站点的分布不均也可能对研究结果产生一定影响,未来还需利用更高分辨率的 NPP 及气象数据进行分析 and 验证。其次,草本沼泽湿地分布数据可能存在不确定性,未来应利用更多的沼泽分布资料进一步分析及验证本文的研究结果。此外,本文只分析了青藏高原草本沼泽植被年 NPP 变化以及气温和降水对 NPP 的影响,但不同季节植被 NPP 变化存在明显差异,且太阳辐射、相对湿度、人类活动等其他的因素也可能对草本沼泽植被 NPP 产生影响。为了更准确地揭示青藏高原草本沼泽植被变化及其机理,未来研究需加强对不同季节植被 NPP 变化以及其他气象要素和人类活动等对青藏高原草本沼泽植被 NPP 影响的分析。

4 结论

青藏高原草本沼泽植被 NPP 多年平均值为 122.80 g C/m^2 ,并在 2000—2020 年呈现显著上升趋势($0.79\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$),增加趋势最显著的区域分布于研究区北部。青藏高原草本沼泽植被生长主要受年均气温的影响,年降水对青藏高原草本沼泽植被 NPP 的影响并不显著。研究发现夏季和秋季升温均能够显著增加青藏高原草本沼泽植被 NPP,其中白天和夜晚温度对草本沼泽植被的生长存在不对称影响:夏季夜晚最低温升高对青藏高原草本沼泽植被的生长促进作用比夏季白天最高温升高更显著,而秋季白天最高温升高对沼泽植被生长的促进作用更显著。在全球不对称增温背景下,未来模拟青藏高原草本沼泽植被 NPP 时,还应重点关注白天和夜晚温度对草本沼泽植被的不对称影响。本文研究结果有助于预测青藏高原草本沼泽植被的变化,并为准确评估青藏高原沼泽湿地固碳潜力提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Shen X J, Liu Y W, Zhang J Q, Wang Y J, Ma R, Liu B H, Lu X G, Jiang M. Asymmetric impacts of diurnal warming on vegetation carbon sequestration of marshes in the Qinghai Tibet Plateau. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(7): 007396.
- [2] Turner R K, van den Bergh J C J M, Söderqvist T, Barendregt A, van der Straaten J, Maltby E, van Ierland E C. Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy. *Ecological Economics*, 2000, 35(1): 7-23.
- [3] 刘奕雯, 张佳琦, 王延吉, 神祥金, 吕宪国, 姜明. 三江平原沼泽湿地归一化植被指数分布特征及其变化分析. *湿地科学*, 2022, 20(5): 728-732.
- [4] Shen X J, Liu B H, Jiang M, Wang Y J, Wang L, Zhang J Q, Lu X G. Spatiotemporal change of marsh vegetation and its response to climate change in China from 2000 to 2019. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(2): 006154.
- [5] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [6] Ma R, Xia C L, Liu Y W, Wang Y J, Zhang J Q, Shen X J, Lu X G, Jiang M. Spatiotemporal change of net primary productivity and its response to climate change in temperate grasslands of China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 899800.
- [7] 神祥金, 姜明, 吕宪国, 刘兴土, 刘波, 张佳琦, 王宪伟, 佟守正, 雷光春, 王升忠, 仝川, 范航清, 田昆, 王晓龙, 胡远满, 谢永宏, 马牧源, 张树文, 曹春香, 王志臣. 中国草本沼泽植被地上生物量及其空间分布格局. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(08):1306-1316.
- [8] Wang Y J, Shen X J, Jiang M, Tong S Z, Lu X G. Spatiotemporal change of aboveground biomass and its response to climate change in marshes of the Tibetan Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102385.
- [9] Hirota M, Kawada K, Hu Q W, Kato T, Tang Y H, Mo W H, Cao G M, Mariko S. Net primary productivity and spatial distribution of vegetation in an alpine wetland, Qinghai-Tibetan Plateau. *Limnology*, 2007, 8(2): 161-170.
- [10] Mao D H, Luo L, Wang Z M, Zhang C H, Ren C Y. Variations in net primary productivity and its relationships with warming climate in the permafrost zone of the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(8): 967-977.
- [11] Zheng Z T, Zhu W Q, Zhang Y J. Seasonally and spatially varied controls of climatic factors on net primary productivity in alpine grasslands on the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: 00814.
- [12] Piao S L, Fang J Y, He J S. Variations in vegetation net primary production in the qinghai-xizang plateau, China, from 1982 to 1999. *Climatic Change*, 2006, 74(1): 253-267.

- [13] Liu H Y, Mi Z R, Lin L, Wang Y H, Zhang Z H, Zhang F W, Wang H, Liu L L, Zhu B A, Cao G M, Zhao X Q, Sanders N J, Classen A T, Reich P B, He J S. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4051-4056.
- [14] 梁大林, 唐海萍. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析. *生态学报*, 2022, 42(1): 287-300.
- [15] 戴黎聪, 郭小伟, 张法伟, 柯浔, 曹莹芳, 李以康, 李茜, 林丽, 朋措吉, 舒锴, 曹广民, 杜岩功. 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. *生态学报*, 2019, 39(14): 5241-5251.
- [16] Wang Y J, Shen X J, Jiang M, Tong S Z, Lu X G. Daytime and nighttime temperatures exert different effects on vegetation net primary productivity of marshes in the western Songnen Plain. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108789.
- [17] 郭斌, 王珊, 张菡, 王明田. 若尔盖湿地天然牧草生育期变化特征及其对气候变化的响应. *高原山地气象研究*, 2018, 38(2): 49-57.
- [18] 李妍妍. 基于遥感技术的麦地卡湿地植被净初级生产力研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
- [19] 神祥金, 张佳琦, 吕宪国. 青藏高原沼泽湿地植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(18): 6259-6268.
- [20] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 周莉, 吕晓敏, 周梦子. 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. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1533-1538.
- [21] Mao D H, Wang Z M, Du B J, Li L, Tian Y L, Jia M M, Zeng Y, Song K S, Jiang M, Wang Y Q. National wetland mapping in China: a new product resulting from object-based and hierarchical classification of Landsat 8 OLI images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 164: 11-25.
- [22] Shen X J, Xue Z S, Jiang M, Lu X G. Spatiotemporal change of vegetation coverage and its relationship with climate change in freshwater marshes of northeast China. *Wetlands*, 2019, 39(3): 429-439.
- [23] Shen M G, Piao S L, Jeong S J, Zhou L M, Zeng Z Z, Ciais P, Chen D L, Huang M T, Jin C, Li L, Li Y, Myneni R, Kun Y, Zhang G X, Zhang Y J, Yao T D. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(30): 9299-9304.
- [24] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 马伟东, 刘峰贵, 陈琼, 周强, 夏兴生, 牛百成. 近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应. *生态学报*, 2022, 42(12): 4770-4783.
- [25] 邢红爽, 乌佳美, 陈健, 史作民. 植物光合作用限制因素与植被生产力研究进展. *生态学报*, 2023, 43(12): 5186-5199.
- [26] Shen X J, Jiang M D, Lu X G. Diverse impacts of day and night temperature on spring phenology in freshwater marshes of the Tibetan Plateau. *Limnology and Oceanography Letters*, 2023, 8(2): 323-329.
- [27] 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.
- [28] Shen M G, Wang S P, Jiang N, Sun J P, Cao R Y, Ling X F, Fang B, Zhang L, Zhang L H, Xu X Y, Lv W W, Li B L, Sun Q L, Meng F D, Jiang Y H, Dorji T, Fu Y S, Iler A, Vitasse Y, Steltzer H, Ji Z M, Zhao W W, Piao S L, Fu B J. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 633-651.
- [29] 张佳华, 符淙斌, 延晓冬, Seita Emori, Hiroshi Kanzawa. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 631-637, 754.
- [30] 刘慧丽, 陈浩, 董廷旭, 马丽, 诸鑫, 黄天志. 川渝地区 NDVI 动态特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2023, (16): 1-15.
- [31] Hickler T, Smith B, Prentice I C, Mjöfors K, Miller P, Arneth A, Sykes M T. CO₂ fertilization in temperate FACE experiments not representative of boreal and tropical forests. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1531-1542.
- [32] 黄雪松, 陈燕丽, 莫伟华, 范航清, 刘文爱, 孙明, 谢敏, 徐圣璇. 近 60 年广西北部湾红树林生态区气候变化及其影响因素. *生态学报*, 2021, 41(12): 5026-5033.
- [33] Liu Y W, Shen X J, Wang Y J, Zhang J Q, Ma R, Lu X G, Jiang M D. Spatiotemporal variation in aboveground biomass and its response to climate change in the marsh of Sanjiang plain. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 920086.
- [34] 涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 李旭, 陈柏建. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素. *生态学报*, 2023, 43(3): 1219-1233.
- [35] 张梦迪, 张立锋, 陈之光, 张翔, 赵亮, 李奇, 唐艳鸿, 古松. 土壤蒸发和植被蒸腾对三江源退化高寒草甸蒸散的影响. *生态学报*, 2021, 41(18): 7138-7152.
- [36] 张一然, 文小航, 罗斯琼, 李茂善. 近 20 年若尔盖湿地植被覆盖变化与气候因子关系研究. *高原气象*, 2022, 41(2): 317-327.