

DOI:10.11686/cyxb2025087

http://cyxb.magtech.com.cn

王喆, 王镜, 颀耀文, 等. 三江源地区草地地上生物量时空变化及其对气候变化的响应. 草业学报, 2026, 35(1): 1-12.

WANG Zhe, WANG Jing, XIE Yao-wen, et al. Spatio-temporal variation of grassland above-ground biomass and its response to climate change in the Three-River Source region. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 1-12.

三江源地区草地地上生物量时空变化及其对气候变化的响应

王喆^{1,2,3,4}, 王镜^{2,5*}, 颀耀文^{3,4}, 赵慧芳^{1,2}, 校瑞香^{1,2}, 宗萨才文求藏⁶

(1. 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室, 青海 西宁 810001; 3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州大学寒旱区生态环境遥感研究中心, 甘肃 兰州 730000; 5. 西宁市气象局, 青海 西宁 810001; 6. 称多县气象局, 青海 玉树 815100)

摘要:为深入了解三江源地区草地地上生物量的时空变化及其对气候变化的响应,本研究基于2003—2022年青海省15个生态气象监测站的地面观测数据及遥感反演的草地地上生物量数据,系统分析了草地地上生物量的空间分布、年际变化趋势及其对生长季气温和降水变化的响应规律。研究表明:1)生态站数据显示,各站点多年平均草地地上生物量为606.4~7545.8 kg·hm⁻²,东部和南部站点草地地上生物量较高,西北部较低;2003—2022年,大多数站点草地地上生物量呈增加趋势,其中囊谦站增幅最显著。2)遥感结果显示,研究区草地地上生物量整体呈东南高、西北低的空间格局,高生物量区域主要位于东部,低生物量区域集中在北部和西南部;近20年来草地地上生物量整体呈微弱增加趋势,其中超过80%的区域变化不显著,6.84%的区域呈显著增加趋势,主要分布于东部和南部地区。3)偏相关分析结果表明,研究区草地地上生物量与生长季气温、生长季降水均呈正相关关系,与降水的相关性为0.24,与气温的相关性为0.10,生长季降水为研究区草地地上生物量增加的主要因素,且草地地上生物量与气温显著正相关区域主要分布于东部,与降水显著正相关区域集中于西部和北部。研究结果可为三江源地区草地生态保护、资源管理及应对气候变化提供重要科学依据与决策支持。

关键词:草地地上生物量;气候变化;时空变化;三江源地区

Spatio-temporal variation of grassland above-ground biomass and its response to climate change in the Three-River Source region

WANG Zhe^{1,2,3,4}, WANG Jing^{2,5*}, XIE Yao-wen^{3,4}, ZHAO Hui-fang^{1,2}, XIAO Rui-xiang^{1,2}, ZONGSA Cai-wen-qiu-zang⁶

1. Institute of Qinghai Meteorological Science Research, Xining 810001, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Qinghai Province, Xining 810001, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. Center for Remote Sensing of Ecological Environments in Cold and Arid Regions, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 5. Xining Meteorological Bureau, Xining 810001, China; 6. Chindu County Meteorological Bureau, Yushu 815100, China

Abstract: The aim of this research was to better understand the spatio-temporal dynamics of grassland above-ground biomass (AGB) and its response to climate change in the Three-River Source region. We integrated ground-based observations from 15 ecological and meteorological stations in Qinghai Province with remotely sensed AGB estimates

收稿日期:2025-03-20;改回日期:2025-04-21

基金项目:青海省气象局面上项目(QXMS2024-43)和青海省科技计划项目(2023-ZJ-733)资助。

作者简介:王喆(1990—),女,陕西韩城人,硕士。E-mail: wangzh19@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wang_jing1216@126.com

from 2003 to 2022. We then systematically analyzed the spatial distribution, interannual trends, and the response of AGB to variations in growing-season temperature and precipitation. It was found that: 1) According to station observations, the multi-year average AGB ranged from 606.4 to 7545.8 kg·ha⁻¹, with higher values at eastern and southern sites and lower values in the northwest. From 2003 to 2022, most stations exhibited an increasing trend in AGB, with the most significant increase observed at Nangqên station. 2) The remotely sensed results revealed a distinct spatial pattern of AGB characterized by higher values in the southeast and lower values in the northwest. High-biomass areas were mainly concentrated in the eastern part of the study region, whereas low-biomass areas were distributed in the north and southwest, with the lowest levels in the western alpine steppe. Over the past two decades, the regional AGB showed a weak increasing trend, with no significant change in more than 80% of the area, and a significantly increasing trend in 6.84% of the area—mainly in the east and south. 3) Partial correlation analysis showed that grassland AGB in the study area exhibited positive correlations with growing-season temperature and precipitation. Specifically, the correlation coefficient between AGB and growing-season precipitation (0.24) was higher than that between AGB and temperature (0.10), indicating that precipitation was the primary factor driving the increase in AGB in this region. Areas with significantly positive correlations between grassland AGB and temperature were mainly distributed in the eastern parts of the study area, whereas regions with significantly positive correlations between AGB and precipitation were concentrated in the western and northern areas. These findings provide a scientific basis and decision-making support for grassland conservation, resource management, and climate adaptation strategies in the Three-River Source region.

Key words: above-ground biomass of grassland; climate change; spatio-temporal variation; Three-River Source region

草地生态系统是世界上分布面积最广、最重要的陆地生态系统之一,覆盖了约40%的陆地面积^[1]。我国草地生态系统面积十分广阔,约占国土面积的1/3,主要分布在西北干旱、半干旱区以及青藏高原高寒气候区^[2],是我国陆地生态系统重要的绿色屏障,对维持物质循环和温室气体平衡有着至关重要的作用^[3]。地上生物量(above-ground biomass, AGB)是一定时间内单位面积的植被地上部分的总物质量或干物质量^[4]。其不仅是反映草地生长状况和生态环境评估的一项重要指标^[5],同时也是评价草原生态系统功能的重要参数,准确地估算草地植被的地上生物量,对草地管理、草畜平衡、草地生长状况评估和合理利用草地资源具有非常重要的科学意义^[6-8]。

随着星载遥感技术的发展和时空分辨率的提高,以及基于遥感技术监测草地资源省时、省力且快速客观评估的特点,遥感反演技术正日益成为草地生态系统大范围监测的最佳选择^[9],在当前的研究中,研究人员使用遥感技术构建的估算草地地上生物量的模型主要包括草地生长模型和统计模型^[10]。无论是通过遥感技术估算或是使用模型模拟方法进行区域或全国草地地上生物量的估算,都离不开地面实测生物量数据的支撑,特别是长时间序列的地面实测数据对于使用遥感方法估算生物量的地面验证^[11],以及使用模型数据融合方法进行模型参数调优而言,均具有重要价值^[12]。青海省气象局共有20个生态监测站,草地类型涵盖高寒草甸、高寒草原、温性草原等,从2003年起在典型区域选择具有代表性的草地样地,于每年返青期到枯黄期在草地样地中进行样方调查与采样^[13],积累了具有特色的长时序、连续性地上生物量地面观测数据。

三江源地区位于青藏高原腹地,植被类型以高寒草地为主,孕育了长江、黄河、澜沧江等多条重要河流,被誉为“中华水塔”,也是东亚甚至全球气候变化的“敏感区”和“启动区”,生态系统极为脆弱,作为全球气候变化的敏感区和生态系统的脆弱区^[14],该地区的植被生长状况不仅影响当地的生态环境和畜牧业生产,还对中国的生态可持续发展具有重要影响^[15]。然而,过去60年,三江源地区呈现出显著的气候变暖趋势,其平均增温速率达到0.37 °C·10 a⁻¹,这一数值不仅超过全球平均增温速率(0.16 °C·10 a⁻¹)的2倍以上,同时也显著高于同纬度地区(0.19 °C·10 a⁻¹)和中国区域(0.28 °C·10 a⁻¹)的平均水平。受全球气候变化影响,三江源地区的草地生态系统已

发生了显著变化^[16]。尽管已有研究证实了气候变化对三江源地区草地生态系统的影响及其显著的时空异质性,并探讨了相关驱动因素,但多数研究聚焦于年尺度气温和降水与植被之间的关系^[17-19],较少从生长季尺度分析关键气候因子(如生长季气温和降水)对植被生长的直接影响。此外,多数研究侧重于遥感估算结果,缺乏与生态站点实测数据的对比分析。

基于此,本研究以三江源地区为研究区域,从生态监测站实测数据和遥感估算数据两个角度出发,探讨了草地上生物量对生长季气温和降水的响应特征,力求从不同数据来源视角揭示三江源地区草地上生物量的变化规律和主导气候因子,加深对该区域高寒草地生态系统气候响应机制的理解,为应对气候变化和生态环境保护建设、实施差异化草地管理及高寒草地生态系统的保护与修复提供科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海三江源地区(31°39′-36°12′ N, 89°45′-102°23′ E)位于青藏高原腹地,总面积约为 $30.25 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔 3500~4800 m,行政区域主要包括玉树州、果洛州、海南州、黄南州全部行政区和格尔木市属的唐古拉山镇。整体呈西北高、东南低的地势^[15],长江、黄河、澜沧江、湄公河均发源于此,且沼泽湿地、湖泊水体密布,是中国乃至东亚江河的重要水源涵养区,被誉为“江河源”“中华水塔”和“亚洲水塔”。该地区是典型的高原大陆性气候,冷热两季交替、干湿两季分明、年温差小、日温差大、日照时间长、辐射强烈、四季区分小,年平均气温为 $-5.6 \sim 3.8 \text{ }^\circ\text{C}$,年降水量较少且分布不均,多集中在 6-9 月,季节性较强^[20]。下垫面类型主要包括高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠、山地草甸、沼泽化草甸和温性草原等^[21],是重要的生态屏障和生态调节区(图 1)。

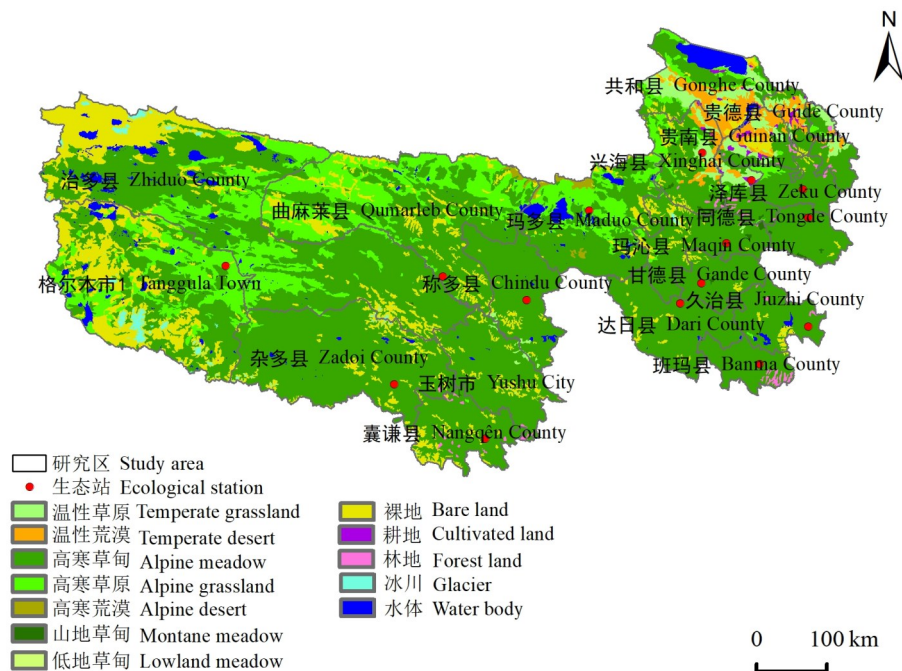


图 1 三江源地区覆盖类型分布

Fig. 1 Distribution of coverage types in the Three-River Source region

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1822 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map No. GS(2019)1822 of the standard map service website of the Ministry of Natural Resources, the base drawing boundary has not been modified.

1.2 观测数据

1.2.1 地面实测数据 本研究使用的地面实测数据来源于青海省气象局设立在三江源地区的 15 个生态监测站(图 1,表 1)的 2003-2022 年草地监测数据,每个生态监测站选定了一个牧草观测地段和一个牧草观测场,开展

牧草发育期、高度、地上生物量的观测,牧草观测地段为在生态监测站所在县选择的具有代表性的10 km×10 km的草地(以下简称“围栏外”),牧草观测场为在10 km×10 km的观测地段内选择的地势平缓、植物分布均匀的50 m×50 m的围栏草地,且牧草观测场在牧草生长期禁止采食(以下简称“围栏内”)。具体观测时间为每年6—8月的最后1~2 d^[22],在固定的草地样地内,选取4个随机样方,样方大小为1 m×1 m,齐地剪取地上生物量,并记录各样方测量时间、经纬度、海拔、草地盖度、草层高度、鲜重,最终取4个样方的平均值作为样本地上生物量^[13]。

1.2.2 遥感数据 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为反映草地生长状况的重要遥感参数,对草地地上生物量的变化较为敏感^[23],在草地生产力遥感估算模型中应用甚广。本研究选用2003—2022年每年8月的MODIS-NDVI(MOD13Q1)合成产品(<https://search.earthdata.nasa.gov>),空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d。对覆盖青海省区域的遥感影像(包括轨道号为h25v05和h26v05的影像)进行几何校正、质量控制、影像拼接和投影转换等预处理。此外,为了消除云层、大气气溶胶等因素对遥感数据的影响,采用最大值合成法(maximum value composite, MVC),合成研究区2003—2022年8月逐月的最大NDVI影像,获得研究时段内高质量的植被指数数据,以便后续建立草地地上生物量估算模型。

1.2.3 气象数据 气象数据来源于中国气象局综合气象信息共享平台(China Integrated Meteorological Information Service System, CIMISS; <http://10.181.89.55/cimissapiweb/>)2003年1月1日至2022年12月31日青海省50个气象站的逐日观测数据,包括日平均气温和日降水量数据,该数据经过严格的质量控制,准确性及完整性满足科学研究需求。采用澳大利亚国立大学开发的ANUSPLIN插值软件,利用薄板样条函数法(thin plate spline)^[19]将站点气温与降水数据插值至250 m×250 m空间分辨率的格点。插值过程中综合考虑了站点经纬度、海拔等因素对气候变量空间分布的影响,并引入250 m空间分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据作为辅助变量。已有研究表明,ANUSPLIN方法插值的数据可分别解释94%的气温和77%的降水空间变异,明显优于其他通用插值方法^[24],具有良好的适用性与稳定性,广泛应用于生态学领域^[25]。

1.3 研究方法

1.3.1 草地地上生物量遥感估算模型方法 采用赵慧芳等^[13]结合实测资料和NDVI之间关系建立的青海省各草地类型地上生物量遥感估算模型,估算研究区草地地上生物量,各草地类型的地上生物量遥感估算模型相关系数均在0.75以上,且均达到了0.01的极显著水平(表2),且模型经地面生态监测站点实测数据验证,平均相对误差(mean relative error, MRE)和均方根误差(root mean squared error, RMSE)分别为0.053和1039.6 kg·hm⁻²,具有较高的估算精度和可靠性。

1.3.2 趋势分析 本研究采用Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验结合的方法分析研究区草地地上生物量在2003—2022年的年际变化趋势。Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验结合分析可以很好地减少噪声干扰,是一种稳健的非参数统计趋势计算方法,在长时间序列趋势分析中具有很大优势,已被广泛

表1 三江源地区生态监测站点的草地类型分类

Table 1 Classification of grassland types at the ecological monitoring stations in the Three-River Source region

草地类型 Grassland type	生态监测站点 Ecological monitoring stations
高寒草甸 Alpine meadow	称多 Chindu
	甘德 Gande
	曲麻莱 Qumarleb
	玛沁 Maqin
	河南 Henan
	玛多 Maduo
	泽库 Zeku
	囊谦 Nangqen
	杂多 Zadoi
	班玛 Banma
高寒草原 Alpine steppe	久治 Jiuzhi
	达日 Dari
	同德 Tongde
温性草原 Temperate steppe	沱沱河 Tuotuo River
	兴海 Xinghai

表 2 不同草地类型地上生物量遥感监测模型

Table 2 Remote sensing monitoring model for above-ground biomass (AGB) of various grassland types

草地类型 Grassland type	草地地上生物量遥感监测模型 Remote sensing monitoring model for AGB	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance
高寒草甸 Alpine meadow	$Y=13.37e^{4.75X}$	0.825**	0.000
高寒草原 Alpine steppe	$Y=28.31e^{2.71X}$	0.778**	0.000
温性草原 Temperate steppe	$Y=7.49e^{4.61X}$	0.763**	0.000

Y 为草地地上生物量 (鲜重), X 为获取的 3×3 个像元平均 NDVI。Y represents the above-ground biomass of the grassland (fresh weight), and X represents the average NDVI derived from a 3×3 pixel matrix.

应用于植被长时间序列研究中^[26]。在本研究检验中 Z 的绝对值大于 1.65、1.96 和 2.58 时,表示趋势通过的信度 α 分别为 90%、95% 和 99%。根据显著性检验结果将变化趋势分为如下 5 个等级^[27]:显著减少 ($\text{Sen} < -5, \alpha > 95\%$),不显著减少 ($\text{Sen} < -5, \alpha \leq 95\%$),基本不变 ($-5 \leq \text{Sen} \leq 5$),显著增加 ($\text{Sen} > 5, \alpha > 95\%$),不显著增加 ($\text{Sen} > 5, \alpha \leq 95\%$),单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

1.3.3 偏相关分析 通过偏相关系数^[28]分析草地地上生物量与气温和降水量之间的关系,探讨气温(降水量)对草地地上生物量的影响,并排除降水量(气温)的干扰,计算公式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xy}^2)(1 - R_{yz}^2)}}$$

式中: $R_{xy,z}$ 表示气温不变,草地地上生物量和降水量的偏相关系数,在分析草地地上生物量和降水量的相关性中排除了气温的影响; R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别表示草地地上生物量和降水量、草地地上生物量和气温、气温和降水量的相关系数;最后采用 T 检验进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 草地地上生物量的时空分布及演变

2.1.1 草地地上生物量分布特征 1)基于生态监测站草地地上生物量分布特征。对 2003—2022 年生长季(6—8 月)各生态监测站围栏内、外草地地上生物量进行平均,表征该生态站的平均草地地上生物量,结果表明 2003—2022 年各生态站草地地上生物量多年平均值为 $606.4 \sim 7545.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中最高为班玛站($7545.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),最低为玛多站($606.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),整体表现为东南部生态站明显高于西北部生态站(图 2)。该分布格局可能受到气候、海拔、土壤条件以及人类活动等因素的综合影响^[17]。

2)基于遥感反演的草地地上生物量分布特征。2003—2022 年三江源地区遥感模型估算的草地地上生物量呈东多西少,自东南向西北逐渐减少的空间分布特征(图 3)。高生物量区域(VII 级和 VIII 级)占研究区草地总面积

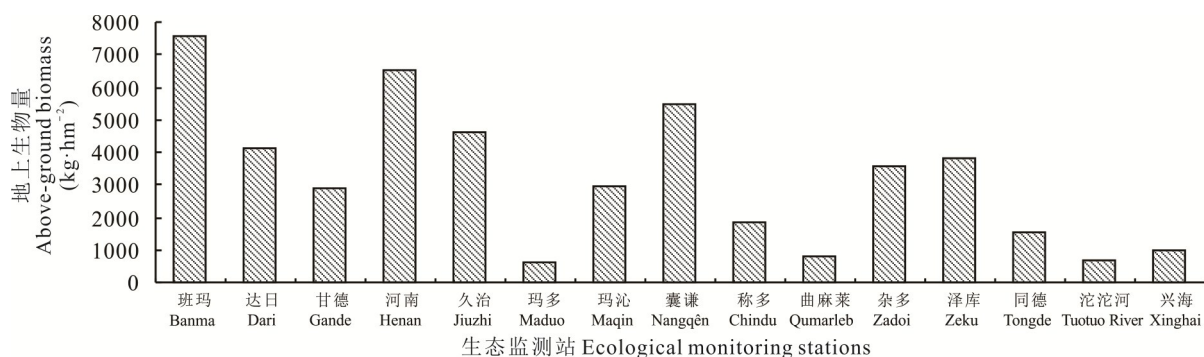


图 2 2003—2022 年生长季三江源地区生态监测站草地地上生物量分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of grassland above-ground biomass at ecological monitoring stations in the Three-River Source region during the growing seasons from 2003 to 2022

的 14.41%，主要分布在研究区东部，低生物量区域（Ⅱ级和Ⅲ级）占研究区草地总面积的 40.65%，主要分布在研究区北部和西南部。此外，为了验证引用的遥感模型在三江源地区的精度，利用 2020—2022 年三江源地区生态监测站 8 月的实际地上生物量与模型估算结果进行验证分析，结果表明，监测站点实测草地地上生物量与模型估算地上生物量相关系数达 0.69，平均相对误差 (MRE) 和均方根误差 (RMSE) 分别为 0.86 和 3188.4 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 4)，表明该模型在三江源地区的适用性良好，能客观反映草地地上生物量的时空变化特征。从县域尺度看，唐古拉山镇年均草地地上生物量最小 ($1185.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)，河南县年均草地地上生物量最大 ($9536.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。这可能是唐古拉山镇位于三江源的西北部，海拔较高，寒冷环境导致草地地上生物量较低，而河南县地势相对较低，气候温暖，草地生长条件较好，草地地上生物量较高^[4]。

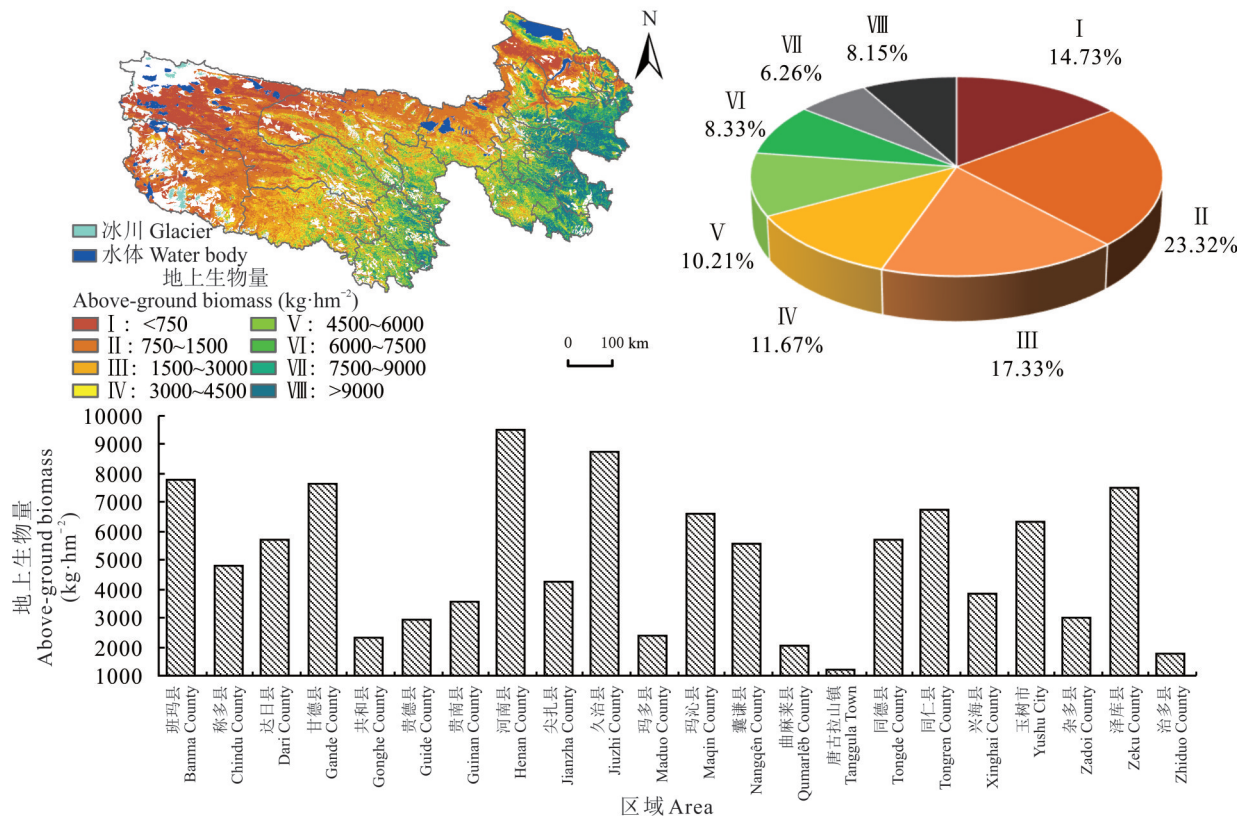


图3 基于遥感反演的 2003—2022 年三江源地区草地地上生物量分布

Fig. 3 Spatial distribution of grassland above-ground biomass in the Three-River Source region from 2003 to 2022 driven from remote sensing

2.1.2 草地地上生物量的年际变化特征 1) 基于生态监测站草地地上生物量年际变化特征。2003—2022 年生长季三江源地区生态监测站草地地上生物量年际变化的分布结果表明：近 20 年来，兴海、玛沁、甘德、称多、囊谦、同德、河南的草地地上生物量呈增加趋势，增加速率为 $3.97\sim 118.41 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，其余生态站的草地地上生物量呈下降趋势，减少速率为 $6.87\sim 115.20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图 5)。

2) 基于遥感反演的草地地上生物量年际变化特征。2003—2022 年三江源地区草地地上生物量变化趋势空间异质性显著，变化率为 $-525.70\sim 445.94 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，平均变化率为 $16.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。约 87.08% 的区域变化不显著，6.84% 的区域显著增加，0.48% 的区域显著减少；显著增加区域主要分布在东部和南部；显著减少区域零星分布在三江源地区南部 (图 6)；从县域尺度看，各县草地地上生物量均呈增加趋势，其中，泽库县平均变化率最大 ($71.86 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)，唐古拉山镇最小 ($5.46 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)；泽库县呈增加趋势的区域面积占比最大 (46.27%)，唐古拉山镇最小 (0.04%)；甘德县呈减少趋势的区域面积占比最大 (2.99%)，其余县均较小。

2.2 草地地上生物量对气候变化的响应

2.2.1 基于生态监测站草地地上生物量对气候变化的响应 三江源地区各生态监测站草地地上生物量与同期气温和降水量之间存在一定的相关关系(图 7),各生态监测站草地地上生物量与气温的相关系数在 $-0.26\sim 0.33$,与降水量的相关系数在 $-0.37\sim 0.56$,其中,大部分生态站点的草地地上生物量与气温和降水量均呈正相关关系,且与降水量的相关性普遍高于与气温的相关性,表明降水对该地区草地地上生物量的调控作用相对更为显著。

2.2.2 基于遥感的草地地上生物量对气候变化的响应 偏相关分析结果显示,三江源地区草地地上生物量与同期气温的偏相关系数为 $-0.85\sim 0.91$,平均值为 0.10 (图 8a)。其中,66.24% 的区域呈正相关关系,14.42% 的区域达到显著水平($P\leq 0.1$),主要分布

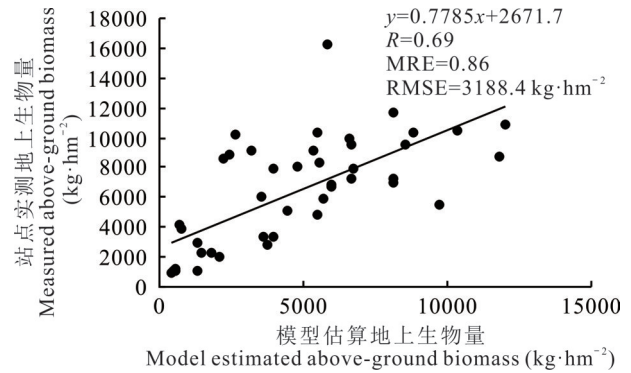


图 4 2020–2022 年监测站点实测草地地上生物量与模型估算地上生物量的关系

Fig. 4 Relationship between the measured above-ground biomass and the model estimated above-ground biomass at ecological monitoring stations from 2020 to 2022

MRE: 平均相对误差 Mean relative error; RMSE: 均方根误差 Root mean squared error.

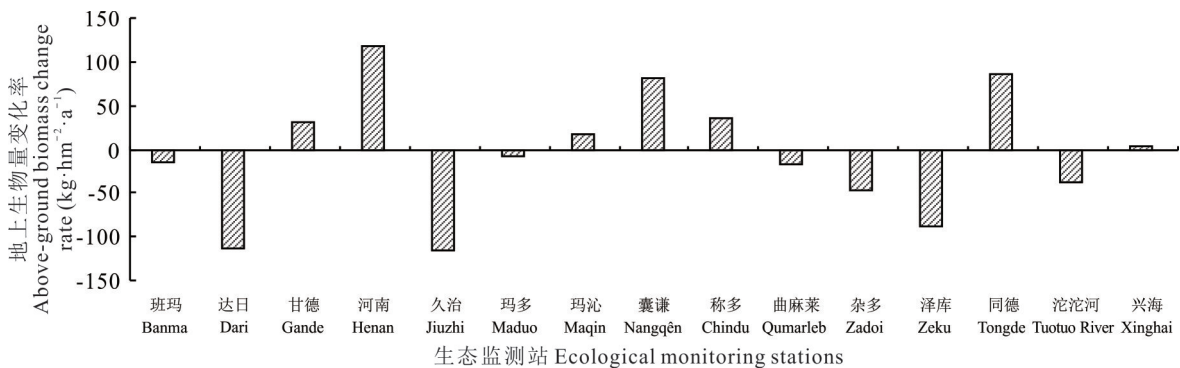


图 5 2003–2022 年生长季三江源地区生态监测站草地地上生物量年际变化分布特征

Fig. 5 Interannual variation of grassland above-ground biomass at ecological monitoring stations in the Three-River Source region during the growing seasons from 2003 to 2022

于东部及唐古拉山一带,表明气温升高在这些区域会显著促进草地地上生物量增长;33.76% 的区域草地地上生物量与气温呈负相关,显著负相关区域占比为 3.72%,主要集中于西北部(图 8b)。草地地上生物量与同期降水的偏相关系数为 $-0.83\sim 0.92$,平均值为 0.24 (图 8c)。其中,83.27% 的区域呈正相关关系,30.20% 的区域达到显著水平($P\leq 0.1$),主要分布在三江源西部和北部,表明降水是影响该区域草地地上生物量变化的主要因子;16.73% 的区域呈负相关,其中显著负相关区域占比为 0.91%,分布范围较小(图 8d)。

从县域尺度看,除治多县外,其余各县草地地上生物量与同期气温均呈正相关,其中尖扎县、河南县、贵德县和泽库县正相关区域面积占比均超过 90%,表明气温对该县草地地上生物量具有较强的促进作用;各县草地地上生物量与同期降水普遍呈正相关,尤其在唐古拉山镇、兴海县、曲麻莱县和玛多县,偏相关系数均值大于 0.30,正相关区域面积占比均超过 90%。

3 讨论

3.1 草地地上生物量的变化趋势

三江源地区草地地上生物量呈西北低、东南高的空间分布格局,与已有研究结果相一致^[29–31],该格局主要由气候因子和地形条件共同决定。东南部地区海拔相对于西北部地区较低,也是高寒草甸广泛分布的区域,此

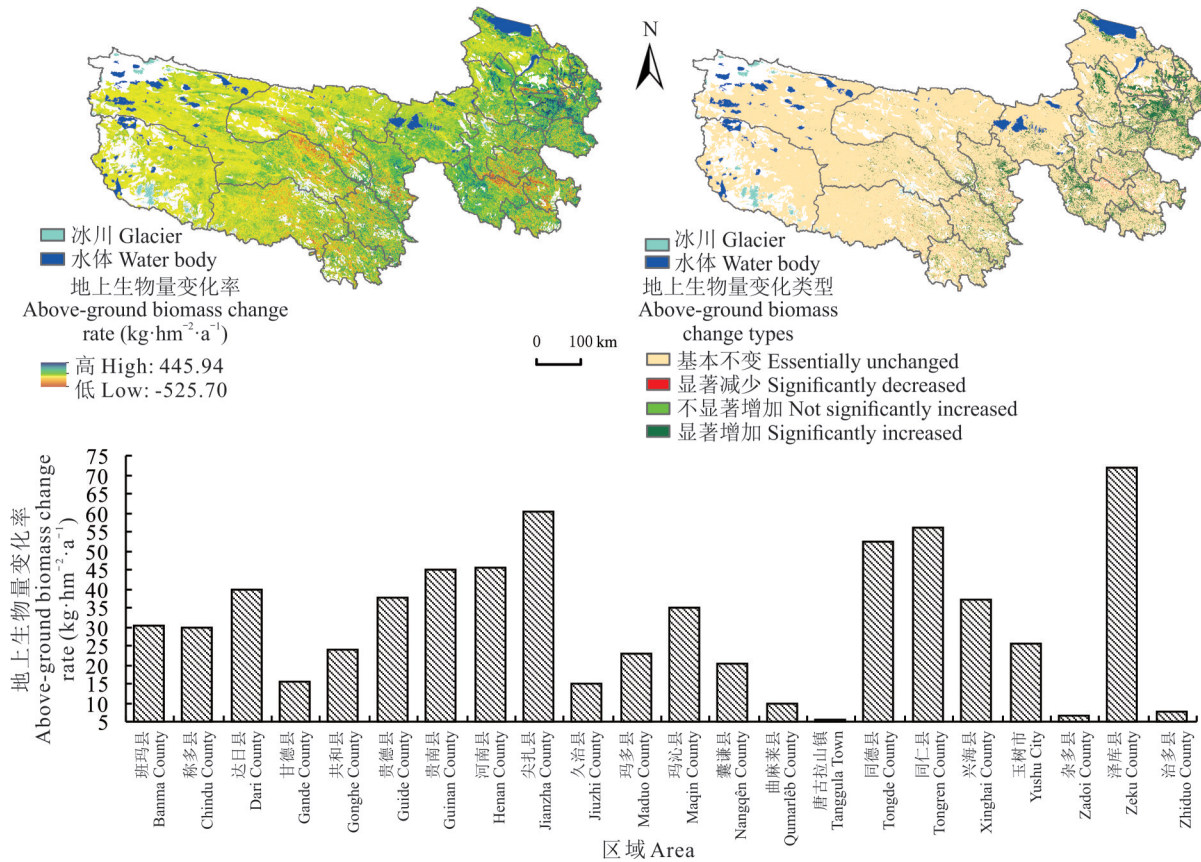


图6 基于遥感反演的2003–2022年三江源地区草地地上生物量变化率及变化类型

Fig. 6 Rate and pattern of change in grassland above-ground biomass in the Three-River Source region from 2003 to 2022 driven from remote sensing

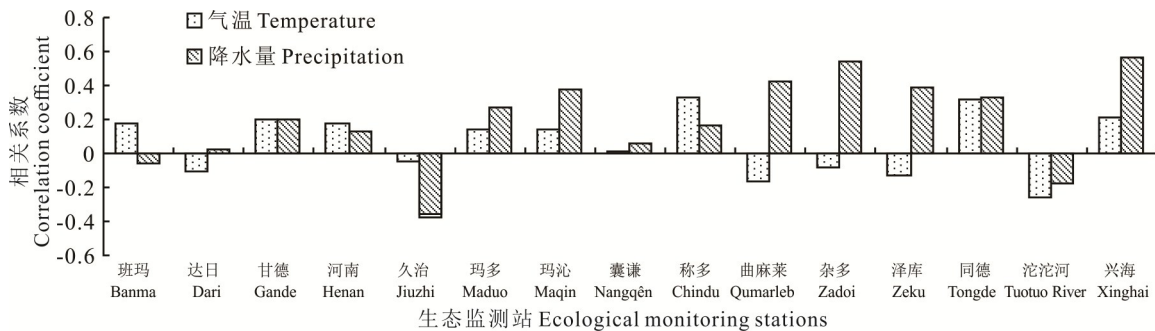


图7 2003–2022年生长季三江源地区生态监测站草地地上生物量与同期气温和降水的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients between grassland above-ground biomass and concurrent temperature and precipitation at ecological monitoring stations in the Three-River Source region during the growing seasons from 2003 to 2022

外,高寒草甸比其他草地变暖变湿速率要快^[32],较好的水热条件,利于草地植被生长,因此草地地上生物量整体高;而西北部地区海拔较高,主要为高寒荒漠类草地,受水热条件限制,气候干旱,气温过低,低温不利于草地光合作用,因此草地地上生物量偏低。

近20年研究区草地地上生物量整体呈增加趋势,这与Gao等^[33]、Zeng等^[34]、Zhang等^[35]对三江源地区的研究结果基本一致,显著增加区域主要集中在东部和南部地区,一方面,与研究区气候呈暖湿化趋势密切相关^[36],另一方面可能与2005年启动的三江源生态环境保护与建设工程有关,这些生态修复措施有效改善了草地生态环境,提高了植被生产力;显著减少区域零星分布在南部,可能是过度放牧、虫草采挖和道路建设等人类活动,对草地造成一定程度的破坏,导致草地生产力下降,徐新良等^[37]的研究也表明三江源地区西部出现了新的草地退化现象,

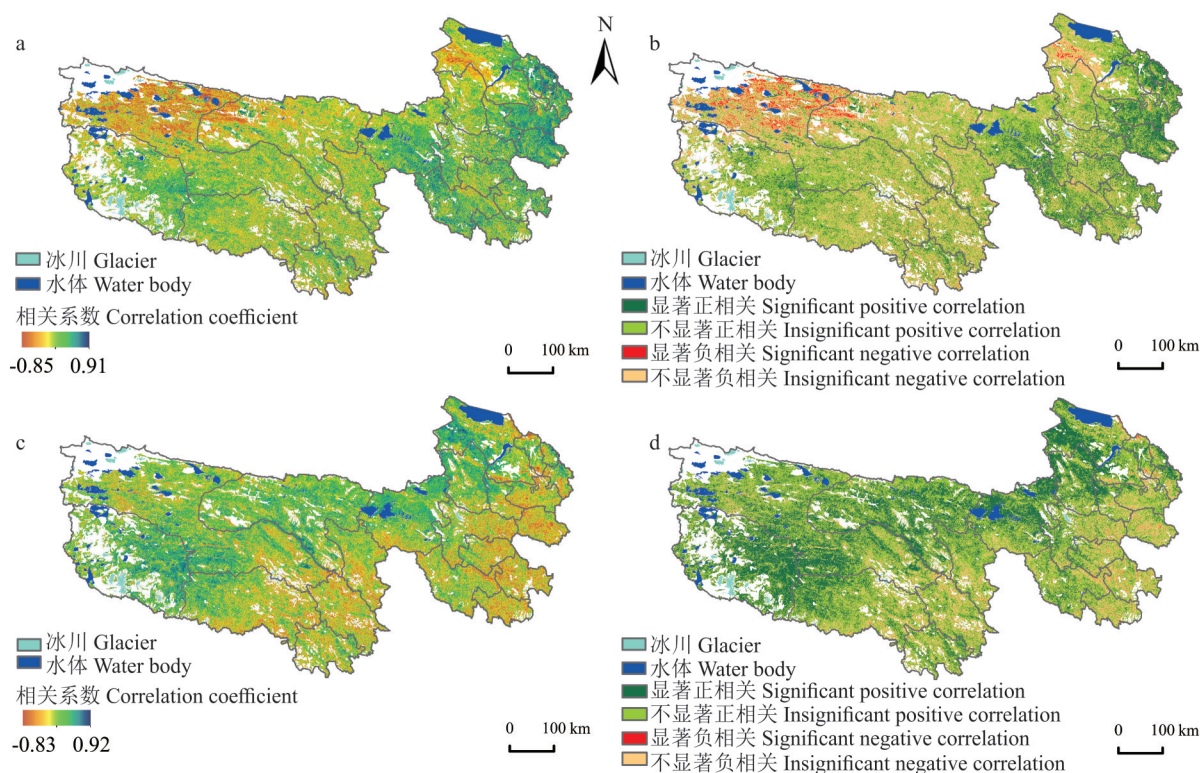


图 8 2003–2022 年三江源地区草地 AGB 与生长季气温 (a、b)、降水量 (c、d) 的偏相关系数及显著性分布

Fig. 8 Partial correlation coefficients and significance levels between grassland above-ground biomass and growing season temperature (a, b) and precipitation (c, d) in the Three-River Source region from 2003 to 2022

进一步降低了草地生产力。总体而言,三江源草地上生物量在生态恢复与气候变化双重驱动下表现出积极趋势,但区域间差异性 & 局地退化风险亦不容忽视,未来需结合空间异质性开展分区保护管理。

3.2 气候变化对草地地上生物量的影响

偏相关分析结果表明,三江源地区草地地上生物量与生长季气温和降水均呈正相关,其中与降水的相关性 ($r=0.24$) 高于气温 ($r=0.10$),表明生长季降水对草地地上生物量的影响大于气温,这一结果与已有研究结论一致^[38–39]。从空间格局看,草地上生物量与生长季气温正相关区域主要分布于东部,说明在水热条件相对协调的区域,温度升高能增强光合作用、延长生长期,从而促进草地地上生物量积累^[40]。而在西北部高海拔区域,草地上生物量与气温呈显著负相关,可能由于高温加剧蒸散损耗、造成水分亏缺,反而抑制植被生长^[41]。草地上生物量与降水显著正相关区域覆盖范围广,表明降水是影响三江源地区草地生长的关键气候因子,这是因为生长代谢速率与需水量呈正相关^[42],此外,由于该地区属于典型的高原大陆性气候,年降水量少且时空分布不均,降水的增加往往意味着更充足的土壤水分储备,可缓解干旱对于植被生长的胁迫作用,促进植被生长。

3.3 研究局限与未来展望

尽管本研究所采用的遥感估算模型在精度验证上表现良好,能够较为客观地反映三江源地区草地地上生物量的时空分布特征,但仍存在一定的局限性。一方面,受限于生态气象监测站点数量少、分布不均,样本的空间代表性不足,可能无法充分反映研究区的空间异质性。另一方面,研究主要聚焦于生长季气温与降水等气候因子的影响,未考虑放牧强度、土地利用变化等人类活动因素。未来考虑增加样点数量,特别是在生态差异显著区域布设代表性样地;引入高分辨率遥感数据,提升局地估算精度;整合管理措施等人类活动数据,构建气候与人为因子共同作用的驱动模型,为研究区草地资源的可持续管理提供更为科学的依据。

4 结论

2003–2022 年三江源地区草地地上生物量呈明显的空间分异特征,东南部生态站点的草地地上生物量显著

高于西北部。过去20年间,大多数生态站点草地地上生物量呈增加趋势,但仍有部分站点表现为下降趋势。遥感估算结果显示,研究区草地地上生物量整体分布格局为东南高、西北低,20年间呈整体微弱增加的变化特征(平均变化率为 $16.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),其中东部和南部地区增长最为显著。从气候因子影响看,生长季气温和降水总体均有助于草地植被生长,其中降水的促进作用普遍强于气温(与降水的相关性为0.24,与气温的相关性为0.10)。空间响应特征表明,东部地区草地地上生物量对气温变化更为敏感,而西部及北部地区则主要受降水驱动。

参考文献 References:

- [1] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, *et al.* Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. *Nature*, 1990, 348(6303): 711–714.
- [2] Zhou W, Gang C C, Li J L, *et al.* Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982–2010. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 15–30.
周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982–2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 15–30.
- [3] Scurlock J M O, Asner G P, Gower S T. Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932–2000. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 2002, 77(4): 554–556.
- [4] Yang S X, Feng Q S, Meng B P, *et al.* Temporal and spatial dynamics of alpine grassland biomass in the Three-River Headwater region. *Pratacultural Science*, 2018, 35(5): 956–968.
杨淑霞, 冯琦胜, 孟宝平, 等. 三江源地区高寒草地地上生物量时空动态变化. *草业科学*, 2018, 35(5): 956–968.
- [5] Akiyama T, Kawamura K. Grassland degradation in China: Methods of monitoring, management and restoration. *Grassland Science*, 2007, 53(1): 1–17.
- [6] Zhao F, Xu B, Yang X C, *et al.* Remote sensing estimates of grassland aboveground biomass based on MODIS net primary productivity (NPP): A case study in the Xilingol grassland of Northern China. *Remote Sensing*, 2014, 6(6): 5368–5386.
- [7] Xu D, Guo X L. Some insights on grassland health assessment based on remote sensing. *Sensors*, 2015, 15(2): 3070–3089.
- [8] Xu B, Yang X C, Tao W G, *et al.* MODIS-based remote-sensing monitoring of the spatiotemporal patterns of China's grassland vegetation growth. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(11): 3867–3878.
- [9] Claverie M, Demarez V, Duchemin B, *et al.* Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 844–857.
- [10] Lai Z M, Lai R W, Xue X, *et al.* Estimation of aboveground biomass of different degraded alpine grassland based on vegetation coverage and height. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(5): 127–134.
赖炽敏, 赖日文, 薛娴, 等. 基于植被盖度和高度的不同退化程度高寒草地地上生物量估算. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 127–134.
- [11] Liu Y H, Cai Z L, Bao N S, *et al.* Research of grassland vegetation coverage and biomass estimation method based on major quadrat from UAV photogrammetry. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(11): 2023–2032.
刘艳慧, 蔡宗磊, 包妮沙, 等. 基于无人机大样方草地植被覆盖度及生物量估算方法研究. *生态环境学报*, 2018, 27(11): 2023–2032.
- [12] He H L, Ge R, Ren X L, *et al.* Reference carbon cycle dataset for typical Chinese forests via collocated observations and data assimilation. *Scientific Data*, 2021, 8: 42.
- [13] Zhao H F, Li X D, Zhang D, *et al.* Aboveground biomass in grasslands in Qinghai Province estimated from MODIS data and its influencing factors. *Acta Pratacultural Sinica*, 2020, 29(12): 5–16.
赵慧芳, 李晓东, 张东, 等. 基于MODIS数据的青海省草地地上生物量估算及影响因素研究. *草业学报*, 2020, 29(12): 5–16.
- [14] Yao T D, Liu X D, Wang N L. The magnitude of climate change in the Tibetan Plateau region. *Science Bulletin*, 2000(1): 98–106.
姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题. *科学通报*, 2000(1): 98–106.
- [15] Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters Region in Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 364–376.
刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征. *地理学报*, 2008, 63(4): 364–376.

- [16] Zhou W, Yang H, Huang L, *et al.* Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 303–313.
- [17] Rao P Z, Wang Y C, Wang F. Analysis on the NDVI change and influence factors of vegetation cover in the Three-River Headwaters region. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(3): 572–582.
饶品增, 王义成, 王芳. 三江源植被覆盖区 NDVI 变化及影响因素分析. *草地学报*, 2021, 29(3): 572–582.
- [18] Ning X C, Yang M X, Cao W Q, *et al.* Spatio-temporal pattern of vegetation coverage and its climate driving mechanism in the Three Rivers Headwaters region from 2000–2022. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(12): 70–76.
宁晓春, 杨明新, 曹文强, 等. 2000–2022年三江源植被覆盖度时空变化格局及其气候驱动机制. *测绘通报*, 2024(12): 70–76.
- [19] Zuo C, Wang J B, Zhang X J, *et al.* Changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in the Sanjiangyuan National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5559–5573.
左婵, 王军邦, 张秀娟, 等. 三江源国家公园植被净初级生产力变化趋势及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(14): 5559–5573.
- [20] Zhao H F, Cao X Y. Vegetation cover changes and its climate driving in Three-River-Source National Park. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(2): 328–337.
赵慧芳, 曹晓云. 三江源国家公园植被覆盖时空变化及其气候驱动因素. *高原气象*, 2022, 41(2): 328–337.
- [21] Han B H, Zhou B R, Zhao H H, *et al.* Analysis of spatiotemporal variation of grassland vegetation and its impact factors over Three-River Resource region. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 77–85.
韩炳宏, 周秉荣, 赵恒和, 等. 三江源区草地植被时空变化及其影响因子分析. *中国草地学报*, 2020, 42(3): 77–85.
- [22] Liang T G, Yang S X, Feng Q S, *et al.* Multi-factor modeling of above-ground biomass in alpine grassland: A case study in the Three-River Headwaters region, China. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 164–172.
- [23] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, *et al.* Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 184–190.
- [24] Wang J B, Wang J W, Ye H, *et al.* An interpolated temperature and precipitation dataset at 1-km grid resolution in China (2000–2012). *China Scientific Data*, 2017, 2(1): 73–80, 205–212.
王军邦, 王居午, 叶辉, 等. 2000–2012年全国气温和降水1 km网格空间插值数据集. *中国科学数据*, 2017, 2(1): 73–80, 205–212.
- [25] Dong T F, Liu J G, Shang J L, *et al.* Assessing the impact of climate variability on cropland productivity in the Canadian Prairies using time series MODIS FAPAR. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 281.
- [26] Li X, Liu X M, Sun B, *et al.* Machine learning-based assessment of grassland aboveground biomass in Gansu Province. *Pratacultural Science*, 2024, 41(2): 297–307.
李霞, 刘兴明, 孙斌, 等. 基于机器学习算法的甘肃省草原地上生物量. *草业科学*, 2024, 41(2): 297–307.
- [27] Cao X Y, Zhu C X, Chen G Q, *et al.* Surface greenness change and topographic differentiation over Qaidam Basin from 2000 to 2021. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(6): 1080–1090.
曹晓云, 祝存兄, 陈国茜, 等. 2000–2021年柴达木盆地地表绿度变化及地形分异研究. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1080–1090.
- [28] Xu J H. *Mathematical methods in contemporary geography (third edition)*. Beijing: Higher Education Press, 2017: 133–138.
徐建华. *现代地理学中的数学方法(第3版)*. 北京: 高等教育出版社, 2017: 133–138.
- [29] Liu J, Ji Y H, Zhou G S, *et al.* Temporal and spatial variations of net primary productivity (NPP) and its climate driving effect in the Qinghai-Tibet Plateau, China from 2000 to 2020. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1533–1538.
刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 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.
- [30] Shao Q Q, Fan J W, Liu J Y, *et al.* Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 3–20.
邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3–20.
- [31] Zhang Y X, Fan J W, Cao W, *et al.* Spatial and temporal dynamics of grassland yield and its response to precipitation in the Three River Headwater region from 2006 to 2013. *Acta Pratacultural Sinica*, 2017, 26(10): 10–19.
张雅娴, 樊江文, 曹巍, 等. 2006–2013年三江源草地产草量的时空动态变化及其对降水的响应. *草业学报*, 2017, 26(10): 10–19.

- [32] Liang D L, Tang H P. Analysis of vegetation changes and water temperature driving factors in two alpine grasslands on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 287–300.
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.
- [33] Gao X X, Dong S K, Li S, *et al.* Using the random forest model and validated MODIS with the field spectrometer measurement promote the accuracy of estimating aboveground biomass and coverage of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106114.
- [34] Zeng N, Ren X L, He H L, *et al.* Estimating grassland aboveground biomass on the Tibetan Plateau using a random forest algorithm. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 479–487.
- [35] Zhang X C, Jin X M. Vegetation dynamics and responses to climate change and anthropogenic activities in the Three-River Headwaters Region, China. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108223.
- [36] Chen F H, Xie T T, Yang Y J, *et al.* Discussion of the “warming and wetting” trend and its future variation in the drylands of Northwest China under global warming. *Scientia Sinica Terrae*, 2023, 53(6): 1246–1262.
陈发虎, 谢亭亭, 杨钰杰, 等. 我国西北干旱区“暖湿化”问题及其未来趋势讨论. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(6): 1246–1262.
- [37] Xu X L, Wang L, Li J, *et al.* Analysis of the grassland restoration trend and degradation situation in the “Three-River Headwaters” region since the implementation of the ecological project. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(1): 50–58.
徐新良, 王靓, 李静, 等. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析. *地球信息科学学报*, 2017, 19(1): 50–58.
- [38] Xie Q L, Yang X, Hao L N. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its driving factors in Three-River Headwaters region during 2001–2020. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 202–212.
谢绮丽, 杨鑫, 郝利娜. 2001–2020年三江源区植被覆盖时空变化特征及其影响因素. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 202–212.
- [39] Gao S Q, Dong G T, Jiang X H, *et al.* Analysis of vegetation coverage changes and natural driving factors in the Three-River Headwaters region based on geographical detector. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 336–343.
高思琦, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 基于地理探测器的三江源植被变化及自然驱动因子分析. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 336–343.
- [40] Dong G Y, Fan L, Fensholt R, *et al.* Asymmetric response of primary productivity to precipitation anomalies in Southwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 331: 109350.
- [41] Zeng N, Ren X L, He H L, *et al.* Spatial-temporal dynamics of the grassland aboveground biomass and its association with climate changes in the Three River Source National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1175–1184.
曾纳, 任小丽, 何洪林, 等. 三江源国家公园草地上生物量时空动态及其气候影响. *生态学报*, 2023, 43(3): 1175–1184.
- [42] Cong N, Shen M G, Yang W, *et al.* Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(8): 1433–1444.