

李成阳,黄樱宜,林千策,等.长江源区高寒草甸生长季载畜量对模拟增温的响应[J].中国沙漠,2024,44(4):165-173.

# 长江源区高寒草甸生长季载畜量 对模拟增温的响应

李成阳<sup>1</sup>,黄樱宜<sup>1</sup>,林千策<sup>1</sup>,沈琳丽<sup>1</sup>,罗诗影<sup>1</sup>,梁志辉<sup>1</sup>,  
李臻明<sup>1</sup>,彭飞<sup>2</sup>,薛娴<sup>2</sup>

(1.岭南师范学院地理科学学院,广东湛江 524048; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室,甘肃兰州 730000)

**摘要:** 青藏高原高寒草甸是中国重要畜牧业基地,也是气候变化敏感区和生态脆弱带。为探究气候变暖对长江源区高寒草甸生长季载畜量的影响,以长江源区北麓河流域典型高寒草甸为研究对象,开展了模拟增温试验。测定了高寒草甸植物地上生物量和牧草品质,确定了高寒草甸的数量载畜量和营养载畜量,以期制定合理的高寒草甸载畜量提供科学依据。结果表明:(1)增温( $150\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )增加了高寒草甸5、30 cm深土壤年均温度,降低了0~10 cm土层的年均含水量,但增加了20~40 cm土层的水分。(2)增温使2017、2018年的6月(生长季前期)群落地上生物量分别显著增加了 $78.55$ 、 $79.74\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,但对生长季后期(2017、2018年的9月)无显著影响;杂类草和禾本科植物占群落地上生物量的比重增加,但莎草科植物比重降低。(3)增温使群落和杂类草植物中的粗蛋白和粗脂肪含量降低,牧草品质下降。(4)增温处理下每公顷数量载畜量、可消化蛋白载畜量、代谢能载畜量在2017年6月分别增加了 $2.37\pm 0.22$ 、 $6.72\pm 0.41$ 、 $3.89\pm 0.32$ 羊单位,在2018年6月分别增加了 $2.41\pm 0.30$ 、 $6.29\pm 0.25$ 、 $3.95\pm 0.17$ 羊单位;但生长季后期无显著变化。根据研究区实际,在气温上升背景下,长江源区高寒草甸生长季前期以数量载畜量安排放牧为宜,生长季后期应以代谢能载畜量安排放牧为宜。

**关键词:** 青藏高原; 气候变暖; 牧草品质; 生物量; 载畜量

文章编号: 1000-694X(2024)04-165-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00009

中图分类号: S155

文献标志码: A

## 0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)特别评估报告指出,与1850—1900年相比,2006—2015年全球陆地表面平均气温上升了 $1.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,未来几十年气温上升速率可能更大<sup>[1]</sup>。高海拔地区增温幅度显著高于北半球同纬度地区<sup>[2]</sup>。青藏高原平均海拔大于4 000 m,对中国乃至整个亚洲的生态环境具有重要的意义,也是气候变化敏感区和生态脆弱带<sup>[3-4]</sup>,青藏高原高寒草地生态系统对温度升高的响应更为敏感而迅速<sup>[5]</sup>。高寒草甸作为青藏高原草地主要类型,草场面积约为 $7\times 10^5\text{ km}^2$ ,约占青藏高原可利用草地面积的50%,是中国畜牧业重要生产基地<sup>[6]</sup>。气温上升将对高寒草甸生态系统产生重要影

响,进而影响其载畜能力。因此,在气候变暖背景下,制定合理的高寒草甸载畜量是维系中国草地和畜牧业可持续发展的重要举措。

草地载畜量,是指在可持续发展的条件下,草地所能承载的最大牲畜数量<sup>[7]</sup>。草地载畜量可分为数量载畜量和营养载畜量。数量载畜量由牧草产量决定,而营养载畜量由牧草产量和品质决定并和群落组成密切相关<sup>[8]</sup>。温度升高在一定程度上增加了植物所需的热量,缓解了低温对高寒草甸的限制作用,植被生物量增加,可能导致草地数量载畜量增加<sup>[9-10]</sup>。此外,增温也可能使土壤表面蒸发加强,水分散失,进而加剧干旱作用,造成植被生物量减少,使草地数量载畜量降低<sup>[11-12]</sup>。温度升高可能会

收稿日期:2023-11-24; 改回日期:2024-01-05

资助项目:国家自然科学基金项目(42301345);岭南师范学院人才专项(ZL22031)

作者简介:李成阳(1992—),男,江西兴国人,博士,讲师,主要从事草地退化过程和机理研究。E-mail: lichengyang@lzb.ac.cn

引起青藏高原牧草营养品质发生改变,导致牧草粗蛋白和粗脂肪含量降低,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量增加,牧草消化率降低,从而不利于反刍动物对牧草的消化利用,进而降低营养载畜量<sup>[13]</sup>。可见,气候变暖可通过影响草地生物量和牧草品质,进而影响草地载畜量。

目前对高寒草地载畜量的安排主要依据牧草产量变化制定理论载畜量。王琪等<sup>[7]</sup>基于MODIS NPP产品数据估算青海湖流域的理论载畜量为 $8.11 \times 10^5$ 羊单位;王福成等<sup>[14]</sup>基于NDVI数据估算2019年玉树州高寒草甸理论载畜量为 $6.64 \times 10^6$ 羊单位;乔郭亮等<sup>[15]</sup>基于MODIS NPP产品数据估算2000—2018年天山中段高海拔草地暖季载畜量为 $2.43 \times 10^5 \sim 3.19 \times 10^5$ 羊单位。尽管这些研究对于合理规划放牧生产活动具有重要的参考价值,但仅仅根据牧草产量制定草场放牧量缺乏科学决策的严谨性。若仅考虑牧草产量而忽略品质变化对载畜量的影响,在制定气候变暖后的草场载畜量时,可能会对放牧量产生负面影响,导致过度放牧和草场退化;或因实际放牧规模过小,导致牧民的收入受到不利影响。因此,本研究在青藏高原长江源北麓河流域选择典型高寒草甸进行模拟增温控制实验,探讨模拟增温对高寒草甸土壤温湿度、地上生物量、群落组成、牧草品质和载畜量的影响,以期为长江源区高寒草甸确定适宜的草场载畜量提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原腹地长江源头一级支流北麓河流域内、风火山北麓、青藏高原北麓河冻土工程与环境综合观测研究站(简称北麓河试验站)附近( $34^{\circ}49'N$ ,  $92^{\circ}56'E$ , 海拔4 600~4 700 m)。研究区属于亚寒带半干旱气候,具有典型的内陆高原气候特征。全年仅有冷暖二季之别,年平均气温 $-3.8^{\circ}C$ ,年均降水量290 mm,超过90%的降水发生在生长季(5—9月),年平均空气相对湿度为57%<sup>[16]</sup>。年均风速大,可达 $4.3 m \cdot s^{-1}$ ,年均潜在蒸散量为1 316.9 mm,年日照时数2 600~3 000 h<sup>[16]</sup>。研究区原生高寒草甸以莎草科植物为主,试验样地常见物种主要有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、青藏藁草(*Car-*

*ex moorcroftii*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、沙生风毛菊(*Saussurea arenaria*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)等。植被高度5~10 cm。

### 1.2 试验设计

试验场地位于北麓河试验站右前方约400 m的一块开阔地上,平均坡度小于 $2^{\circ}$ ,地势起伏小且较为平整,是开展试验的理想区域。增温样地建于2010年6月,增温装置采用红外辐射加热器(MSR-2420, Kalglo Electronics Co., Inc.),加热器通过增加下行的红外辐射来模拟气候变暖。本研究采用随机区组试验设计,设置了增温和未增温2个处理,每个处理5个重复,共10个样方,每个样方面积为 $2 m \times 2 m$ 。在增温样地,红外辐射加热器被架设于样地中央1.5 m高处,每个增温样方内距地表1.5 m处悬挂1个长165 cm、宽15 cm的红外辐射器向下辐射增温,未增温样方内悬挂同形不锈钢框架用于消除不同处理之间由于灯架遮阴对样地造成的影响。红外辐射加热器的输出功率为 $150 W \cdot m^{-2}$ ,全年不分昼夜不间断工作。采用地温传感器(109, Campbell scientific Inc., 美国)测量5、30 cm深的土壤温度。10、20、40 cm深度土壤水分采用FDR水分探头(Envior SMART, 美国)测量。所有数据用数据采集仪(CR1000, Campbell scientific Inc., 美国)记录,采样频率为10 s,每30 min记录1次。

### 1.3 地上生物量

于2017、2018年的6月和9月在每个样方中央区选择 $50 cm \times 50 cm$ 的小样方进行采集。刈割完毕用毛刷将未收集的地上部分扫在一起,去除附着的土块后重新收集到样品袋中。将采集的10个样方植被的地上部分带回实验室,同一个样方的植物样品充分混合均匀,并平均分成两部分。一部分用于测定植物群落地上生物量和牧草品质,另一部分根据每个物种的生态位或功能,将所有物种分为禾本科、莎草科和杂类草,用于测定不同功能群地上生物量和牧草品质。将分好的植物放入 $75^{\circ}C$ 的烘箱中烘干至恒质量,称重。试验期间,样方内无不可食杂类草植物出现。因此,所刈割收获的地上生物量即视为产草量。

### 1.4 牧草品质

牧草品质主要测定了牧草中的粗蛋白、粗脂肪

和酸性洗涤纤维含量。所有的分析过程均在兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室完成。酸性洗涤纤维含量测定采用 Van soest 纤维分析法;粗脂肪含量测定采用索氏提取法(GB6433-94);粗蛋白含量测定采用凯氏微量定氮法(GB6432-94)<sup>[17]</sup>。

1.5 载畜量的计算方法

载畜量分为数量载畜量、可消化蛋白载畜量、代谢能载畜量<sup>[18]</sup>。

数量载畜量 =  $\frac{\text{产草量} \times \text{牲畜的牧草利用率}}{\text{放牧天数} \times \text{牲畜的日食量}}$  (1)

可消化蛋白载畜量 =  $\frac{\text{牧草粗蛋白产量} \times \text{牲畜的牧草利用率}}{\text{放牧天数} \times \text{可消化蛋白需要量}}$  (2)

代谢能载畜量 =  $\frac{\text{草地代谢能总输出量} \times \text{牲畜的代谢能利用率}}{\text{放牧天数} \times \text{代谢能需要量}}$  (3)

式中:产草量单位为 kg·m<sup>-2</sup>;可消化蛋白需要量单位为 MJ·d<sup>-1</sup>;牧草粗蛋白产量单位为 kg·m<sup>-2</sup>;草地代谢能总输出量单位为 MJ;代谢能需要量单位为 MJ·d<sup>-1</sup>。

根据《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T635—2002),每个标准羊单位按每天采食 1.8 kg 标准干草计算。根据 NRC (National research council) 标准,标准羊单位需要粗蛋白 0.0539 kg·d<sup>-1</sup>,代谢能 8.38 MJ·d<sup>-1</sup>,暖季牲畜的牧草利用率为 50%,牧草暖季和冷季粗蛋白的利用效率分别为 62.25% 和 31.64%<sup>[19]</sup>。根据研究区放牧实际,放牧天数生长季中前期为 5—7 月(92 d),生长季中后期为 8—10 月(92 d)。其中代谢能需要量需通过牦牛饲喂试验得到,在本研究中对产气量进行计算时,主要基于三江源区牦牛产气量相关研究,取其平均值作为本研究中的产气量(表 1)。代谢能需要量=0.1456×24 h 产气量+0.07675%×粗蛋白+0.1642%×粗脂肪+1.198 (R= 0.97,n=139)<sup>[8]</sup>。

1.6 数据分析

采用双因素方差法(Two-way ANOVA)分析增温和月份及其交互作用对群落和不同功能群地上生物量、酸性洗涤纤维、粗蛋白、粗脂肪和载畜量的影响,分析增温和土壤深度及其交互作用对土壤温度和土壤水分的影响。采用 SPSS23.0 软件进行方差分析,采用 Origin 2021 对图形绘制。图中误差线

表 1 三江源区草场天然牧草 24 h 体外产气量  
Table 1 24 h in vitro gas production of natural pasture in grassland of Sanjiangyuan region

作者	年份	24 h 产气量/mL	地点
孙鹏飞等 <sup>[19]</sup>	2014	42.94	称多县
郝力壮等 <sup>[8]</sup>	2013	47.26	玉树县
张胜权 <sup>[20]</sup>	2013	51.07	玉树县
郝力壮等 <sup>[21]</sup>	2018	43.52	河南蒙古族自治县
本研究	2017, 2018	46.20	治多县

均为标准误。

2 结果

2.1 模拟增温对土壤温度和水分的影

响 增温、土壤深度及二者的交互作用均对土壤温度和水分产生了显著影响(表 2)。和对照相比,增温使 5、30 cm 深土壤年均温度分别显著增加了 1.99、1.96 °C(图 1)。增温降低了 0~10 cm 深的土壤水分,但增加了 20~40 cm 深的土壤水分。增温处理下 0~10 cm 深年均土壤水分从 12.08%(v/v%)显著降低到 10.28%(v/v%),但增温处理下 20~40 cm 深的年均土壤体积含水量从 13.27% 显著增加到 14.86%。

表 2 增温(W),土壤深度(D)及二者交互作用(W×D)对土壤温度和水分的影

响(F值)  
Table 2 The effects of warming, soil depth, and their interaction on soil temperature and moisture (F-value)

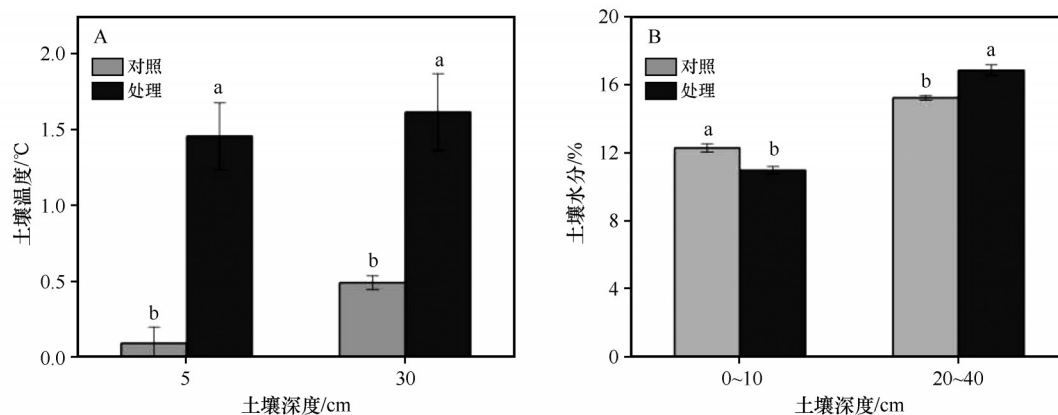
指标	处理		
	W	D	W×D
土壤温度	52.13**	25.46**	11.34**
土壤水分	82.94**	64.21**	23.56**

注:\*\*,P<0.01。

2.2 模拟增温对群落和不同功能群地上生物量的影响

增温对群落、禾草和杂草地上生物量均有显著影响(表 3)。模拟增温在生长季前期对地上生物量影响大,但在生长季后期无显著影响,增温效果随月份发生变化。和对照相比,增温处理下群落地上生物量在 2017、2018 年的 6 月分别显著增加了 78.55、79.74 g·m<sup>-2</sup>,但增温处理对群落地上生物量在 2017 年和 2018 年的 9 月无显著影响(图 2)。

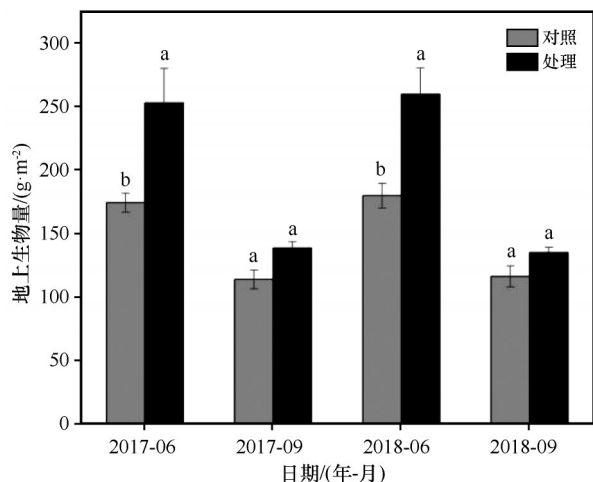




注:不同小写字母代表差异显著,  $P < 0.05$

图1 增温处理下 5 cm 和 30 cm 土壤温度,以及 0~10 cm 和 20~40 cm 土壤水分的变化

Fig.1 Changes in soil temperature at 5 cm and 30 cm depth (A), and soil moisture at 0~10 cm and 20~40 cm depth (B) under warming treatment



注:不同小写字母代表差异显著,  $P < 0.05$

图2 增温处理下群落地上生物量的变化

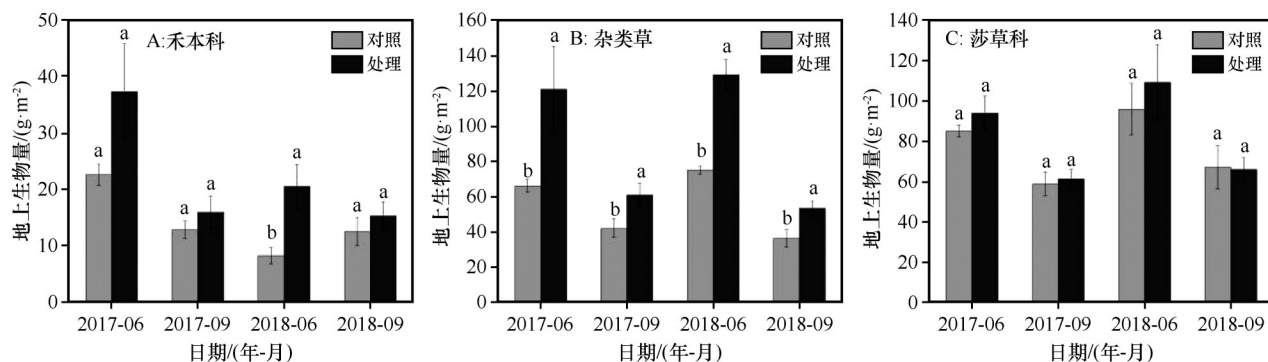
Fig.2 Changes in community aboveground biomass under warming treatment

增温处理下禾本科植物地上生物量有所增加,但只在2018年6月达到了显著水平,和对照相比,

显著增加了152%(图3),同时禾本科植物占群落地上生物量的比重增加(图4)。增温处理下杂类草地上生物量在2017年和2018年的6、9月均显著增加,分别增加了83%、45%和72%、47%,同时杂类草植物占群落地上生物量的比重增加。增温处理下莎草科植物地上生物量无显著变化,但其占群落地上生物量的比重明显降低。

### 2.3 模拟增温对群落和不同功能群牧草品质的影响

增温对酸性洗涤纤维和粗脂肪均有显著影响(表3)。和对照相比,增温处理下植物群落酸性洗涤纤维有增加趋势,但仅在2017年9月显著增加了26%(图5)。增温处理下禾本科和杂类草植物酸性洗涤纤维在6月分别显著增加了11%和11%(表4)。增温处理下植物群落粗脂肪和粗蛋白有降低趋势,但粗脂肪仅在2017年9月显著降低了32%,粗蛋白仅在2017年6月显著降低了17%。增温处



注:不同小写字母代表差异显著,  $P < 0.05$

图3 增温处理下禾本科、杂类草和莎草科植物地上生物量的变化

Fig.3 Changes in aboveground biomass of grasses, forbs, and sedges plants under warming treatment

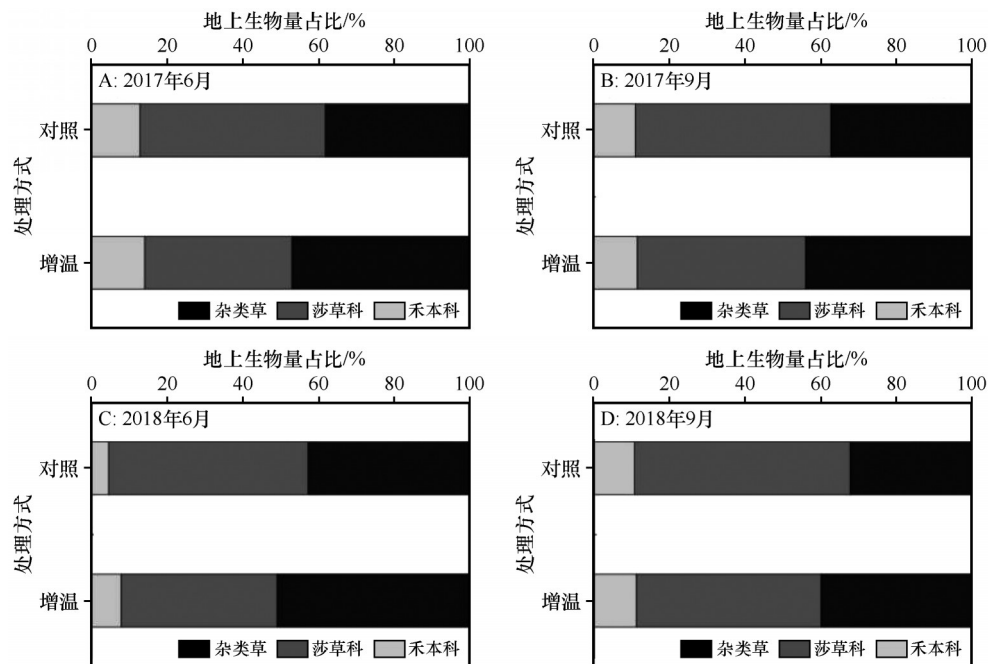


图4 增温处理下不同功能群植物地上生物量占群落地上生物量比重的变化

Fig.4 Changes in the proportion of aboveground biomass of different plant functional groups to the aboveground biomass of the community under warming treatment

表3 增温(W)、月份(M)及二者交互作用(W×M)对地上生物量(AGB)、禾草生物量(G)、莎草生物量(S)、杂类草生物量(F)、酸性洗涤纤维(ADF)、粗蛋白(CP)、粗脂肪(EE)、数量载畜量(SZ)、可消化蛋白载畜量(CPZ)和代谢能载畜量(MEZ)的影响

Table 3 Warming (W), month (M), and their interaction (W×M) on aboveground biomass (AGB), grasses biomass (G), sedges biomass (S), forbs biomass (F), acid detergent fiber (ADF), crude protein (CP), crude fat (EE), quantity carrying capacity (SZ), digestible protein carrying capacity (CPZ), and metabolic energy carrying capacity (MEZ)

处理	AGB	G	S	F	ADF	CP	EE	SZ	CPZ	MEZ
W	6.99*	3.69 <sup>†</sup>	0.97	7.99*	5.56*	0.48	5.06*	6.99*	3.70 <sup>†</sup>	5.66*
M	19.99*	11.25*	25.18*	10.45*	2.61	0.47	0.70	19.99*	9.43*	60.80*
W×M	1.90	1.57	0.29	1.88	1.56	1.13	0.37	1.90	0.81	2.97

注: <sup>†</sup>,  $P<0.1$ ; \*,  $P<0.05$ 。

理下禾本科和莎草科粗蛋白含量无显著变化,但杂类草粗蛋白含量在6月和9月分别显著降低了11%和19%。

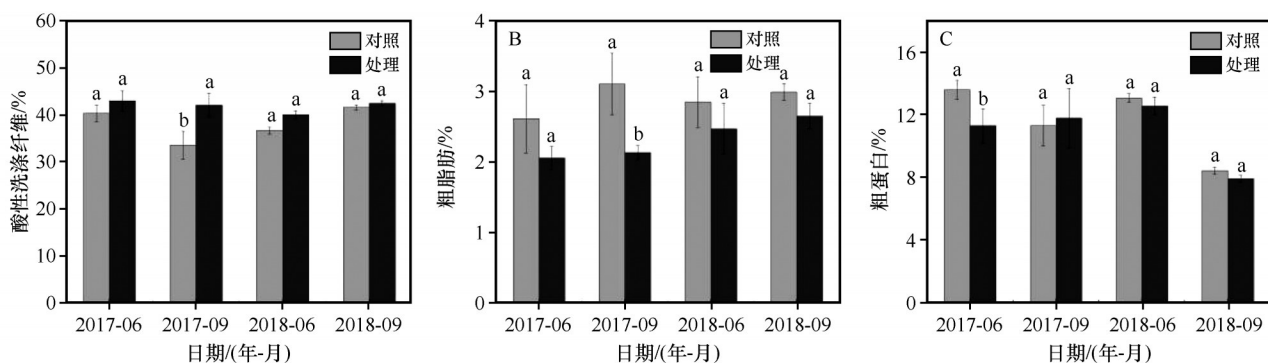
2.4 模拟增温对高寒草甸载畜量的影响

增温对数量载畜量、可消化蛋白载畜量和代谢能载畜量均有显著影响(表3)。和对照相比,增温处理下每公顷数量载畜量在2017、2018年的6月分别显著增加了2.37±0.22、2.41±0.30羊单位,但9月无显著变化(图6)。增温处理下每公顷可消化蛋白载畜量在2017、2018年的6月分别显著增加了6.72±

0.41、6.29±0.25羊单位,但9月无显著变化。增温处理下每公顷代谢能载畜量在2017、2018年的6月分别显著增加了3.89±0.32、3.95±0.17羊单位。

3 讨论

植物的生理活动和生化反应,都必须在一定的温度条件下才能进行。温度可引起环境中其他因子如湿度、降水、风、水中氧的溶解度等的变化,而环境诸因子的综合作用,又能影响植物的生长发育<sup>[22]</sup>。在高寒草甸生态系统中,低温和较短的生长



注:不同小写字母代表差异显著,  $P < 0.05$

图5 增温处理下群落酸性洗涤剂纤维、粗脂肪和粗蛋白的变化

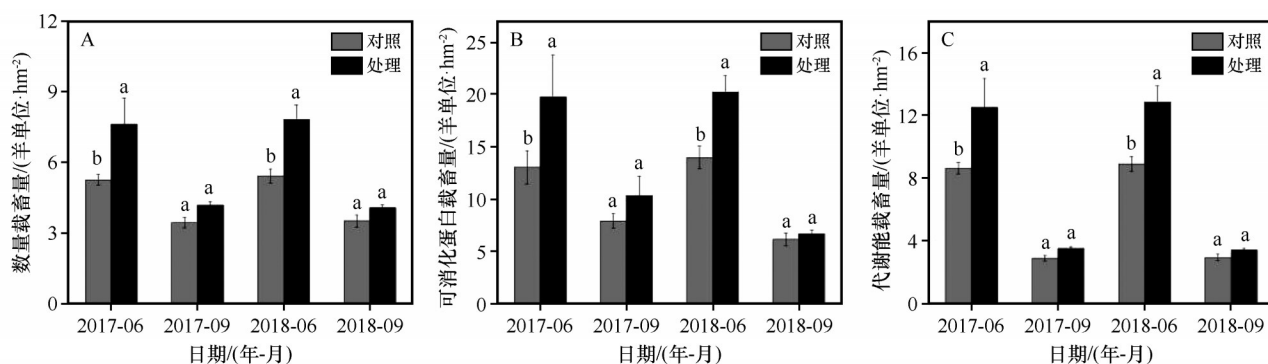
Fig.5 Changes in community acidic detergent fiber, crude fat, and crude protein under warming treatment

表4 增温处理对各功能群牧草品质的影响。

Table 4 Effects of warming treatment on forage quality of different functional groups

功能群	牧草品质	6月		9月	
		对照	处理	对照	处理
禾本科	ADF/%	39.06±0.85 <sup>b</sup>	43.31±1.08 <sup>a</sup>	45.81±1.53 <sup>a</sup>	46.78±1.42 <sup>a</sup>
	CP/%	10.93±0.43 <sup>a</sup>	10.08±0.46 <sup>a</sup>	7.23±0.42 <sup>a</sup>	6.55±0.48 <sup>a</sup>
	EE/%	2.03±0.38 <sup>a</sup>	1.88±0.41 <sup>a</sup>	1.72±0.22 <sup>a</sup>	1.63±0.27 <sup>a</sup>
莎草科	ADF/%	37.67±0.88 <sup>a</sup>	36.81±1.24 <sup>a</sup>	41.36±1.29 <sup>a</sup>	42.81±1.25 <sup>a</sup>
	CP/%	12.16±0.82 <sup>a</sup>	12.91±0.67 <sup>a</sup>	8.06±0.39 <sup>a</sup>	8.39±0.47 <sup>a</sup>
	EE/%	2.21±0.19 <sup>a</sup>	2.30±0.21 <sup>a</sup>	2.01±0.16 <sup>a</sup>	1.98±0.18 <sup>a</sup>
杂类草	ADF/%	34.18±0.86 <sup>b</sup>	37.95±1.39 <sup>a</sup>	37.56±0.84 <sup>a</sup>	37.77±0.95 <sup>a</sup>
	CP/%	16.04±0.44 <sup>a</sup>	14.29±0.35 <sup>b</sup>	9.93±1.36 <sup>a</sup>	8.04±0.86 <sup>b</sup>
	EE/%	2.83±0.32 <sup>a</sup>	2.71±0.28 <sup>a</sup>	2.65±0.24 <sup>a</sup>	2.54±0.25 <sup>a</sup>

注:ADF为酸性洗涤剂纤维,CP为粗蛋白,EE为粗脂肪;不同小写字母代表差异显著,  $P < 0.05$ 。



注:不同小写字母代表差异显著,  $P < 0.05$

图6 增温处理下数量载畜量、可消化蛋白载畜量和代谢能载畜量的变化

Fig.6 Changes in quantity carrying capacity, digestible protein carrying capacity, and metabolic energy carrying capacity under warming treatment

季通常被认为是影响植物生长最重要的限制因素<sup>[23]</sup>。温度升高在一定程度上满足了植物生长发育对热量的需求,有利于高寒草甸地上生物量的增加<sup>[24]</sup>。本研究中,模拟增温在生长季前期(6月)显

著增加了地上生物量,但在生长季后期(9月)无显著影响。这可能是因为,在生长前期,植物的生长较快,在这一时期,植物对热量的需求较大,增温满足了植物生长对热量的需求<sup>[24]</sup>,导致地上生物量显著

增加,这与在风火山地区的研究结果一致<sup>[25]</sup>。而在生长季后期,植物生长速率放缓,植物的生长周期即将完成,此时对热量的需求较小<sup>[24]</sup>,导致地上生物量无显著变化。此外,在先前的研究中发现,增温增强了冻土活性层融化过程,冻土活动层在春季提前解冻<sup>[26]</sup>,可能导致植物生长季提前,进而使地上生物量增加。多年冻土上覆活动层在春季提前解冻也可能是导致增温后深层土壤水分增加的重要因素。

在全球变暖背景下,相对于植物群落而言,不同物种对温度升高的敏感性各异,总有一些物种比另一些物种对温度升高的响应更为敏感,引起群落优势种和群落组成改变<sup>[25]</sup>。在本研究中,增温后,尽管莎草科植物地上生物量无显著变化(图3),但其群落占比降低(图4);杂类草和禾本科植物地上生物量和占群落比重增加,这与在海北高寒草甸<sup>[27]</sup>的研究结果一致。莎草科植物为浅根系植物,其根系主要分布在0~10 cm层,且呈须根系,以莎草科植物为建群种的高寒草甸通常以降低其生物量在群落中的比重来适应增温和水分胁迫的环境<sup>[28]</sup>。杂类草和禾本科植物主要是深根系,其根系相对莎草科植物较深<sup>[29]</sup>。增温后表层土壤温度显著增加(图1),加剧了土壤水分蒸发,表层逐渐干旱化,但深层土壤水分增加。杂类草和禾本科植物可利用表层和深层土壤水分和养分以满足自身的生长。此外,气候变暖可能引起土壤有机质含量增加,同时加速土壤有机质的分解速率和无机营养成分释放速率<sup>[30]</sup>。和莎草科植物相比,杂类草植物对养分获取能力强且更加灵活,如其可通过根系分泌低分子量有机酸活化土壤钙磷<sup>[31]</sup>,从而满足其对磷的需求,这也反映了杂类草在面对气候变暖的环境下具有更强的竞争能力。

从家畜营养角度出发,牧草中粗蛋白和粗脂肪含量越高,品质越好;而纤维含量越高,品质越差<sup>[32]</sup>。牧草品质在一定程度上也决定了畜产品的产量和品质,其可通过影响牲畜对牧草的利用效率、能量摄入以及养分获取,进而影响草地的载畜能力<sup>[33]</sup>。增温后,植物群落粗蛋白和粗脂肪含量有所降低,酸性洗涤纤维含量有所增加(图5),这与在海北站矮嵩草草甸<sup>[34]</sup>的研究结果一致。这意味着增温后牧草品质降低,不利于反刍动物对牧草的消化利用,这可能和杂类草和禾本科植物粗蛋白和粗脂肪含量降低有关(表4)。当产草量增加时,可能会对营养元素产生“稀释”效应,导致牧草中粗蛋白和

粗脂肪含量下降,粗纤维含量增加<sup>[33]</sup>。先前研究也表明牧草粗蛋白和粗脂肪含量和土壤温度呈负相关,而酸性洗涤纤维含量和土壤温度呈正相关<sup>[33]</sup>。本研究中土壤温度增加可能是导致植物中粗蛋白含量降低、酸性洗涤纤维含量增加的重要因素。

草地质量是由群落养分和产量所决定,主要包括牧草产量和牧草品质两个方面<sup>[29]</sup>。草地质量的高低直接决定了草地的载畜能力。通常认为,当草地的实际放牧量超过理论载畜量时,就会造成过牧。在本研究中,模拟增温在生长季前期显著增加了高寒草甸草地数量载畜量,可消化蛋白载畜量和代谢能载畜量,在生长季后期无显著影响。这主要是因为增温显著增加了高寒草甸产草量(图2),虽然群落牧草粗蛋白和粗脂肪有所降低(图5),但产草量增加的促进作用大于品质降低的抑制作用,导致草地载畜量增加。青藏高原昼夜温差大、日照强的特点也促进了牧草中有机物的积累<sup>[18]</sup>,因此生长季前期牧草中粗蛋白和能量含量较高。在生长季前期,模拟增温处理下可消化蛋白载畜量最高,代谢能载畜量次之,数量载畜量最低(图6)。当营养充足的情况下,制定草场载畜量时,牧草产量则成为了首要考虑的因素。如按照营养载畜量安排放牧,则必然会导致过牧,草地发生退化。这与称多县高寒草甸典型嵩草草地研究结果一致<sup>[19]</sup>。因此,在气温上升背景下,长江源区高寒草甸生长季前期以数量载畜量安排放牧为宜。在生长季后期,模拟增温处理下可消化蛋白载畜量最高,数量载畜量次之,代谢能载畜量最低(图6)。牧草经过长时间生长发育,营养含量逐渐降低<sup>[8]</sup>,牧草品质下降,同时牧草产量较低,因此代谢能载畜量低于数量载畜量。根据反刍家畜的消化生理特点(能氮平衡制约牲畜生长季后期对能量的利用)及生态学中营养容纳量和Liebig最小因子定律<sup>[8,35]</sup>。在气温上升背景下,长江源区高寒草甸生长季后期应以代谢能载畜量安排放牧为宜。

## 4 结论

模拟增温情景下,高寒草甸表层和深层土壤温度显著增加,表层土壤水分显著降低,深层土壤水分显著增加。增温显著增加了高寒草甸生长季前期地上生物量,群落组成由浅根系莎草科植物向耐旱深根系杂类草植物过渡。增温使群落和杂类草植物中的粗蛋白和粗脂肪含量降低,牧草品质下



降。模拟增温情景下,高寒草甸生长季前期数量载畜量、可消化蛋白载畜量和代谢能载畜量均显著增加,但生长季后期无显著变化。在气温上升背景下,长江源区高寒草甸生长季前期以数量载畜量安排放牧为宜,生长季后期应以代谢能载畜量安排放牧为宜。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Degradation Land, Sustainable Land Management, Security Food, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems [EB/OL]. [2022-11-10]. <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
- [2] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. *Nature*, 2004, 427: 145-148.
- [3] Yao T, Pu J, Lu A, et al. Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2007, 39(4): 642-650.
- [4] Harris R B. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau: a review of the evidence of its magnitude and causes[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74: 1-12.
- [5] Johnston E R, Hatt J K, He Z, et al. Responses of tundra soil microbial communities to half a decade of experimental warming at two critical depths[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116: 15096-15105.
- [6] You Q G, Xue X, Peng F, et al. Comparison of ecosystem characteristics between degraded and intact alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 133-143.
- [7] 王琪, 吴成永, 陈克龙, 等. 基于MODIS NPP数据的青海湖流域产草量与载畜量估算研究[J]. *生态科学*, 2019, 38(4): 178-185.
- [8] 郝力壮, 王万邦, 王迅, 等. 三江源区嵩草草地枯草期牧草营养价值评定及载畜量研究[J]. *草地学报*, 2013, 21(1): 56-64.
- [9] Li C, Peng F, Xue X, et al. Productivity and quality of alpine grassland vary with soil water availability under experimental warming[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1790.
- [10] Elmendorf S C, Henry G H, Hollister R D, et al. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time[J]. *Ecology Letters*, 2012, 17: 164-175.
- [11] De Boeck H J, Lemmens C M H M, Gielen B, et al. Combined effects of climate warming and plant diversity loss on above- and below-ground grassland productivity [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60: 95-104.
- [12] Ganjurjav H, Gao Q, Gornish E, et al. Differential response of alpine steppe and alpine meadow to climate warming in the Central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 223: 233-240.
- [13] 陈建国, 杨扬, 孙航. 高山植物对全球气候变暖的响应研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17: 435-446.
- [14] 王福成, 魏学红, 雷延民, 等. 基于SPOT NDVI的2010-2018年青海省草地资源动态监测研究[J]. *草原与草坪*, 2023, 43(3): 100-107.
- [15] 乔郭亮, 金晓斌, 顾铮鸣, 等. 2000-2018年天山中段高海拔草地暖季承载力[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 253-261.
- [16] 尤全刚. 高寒草甸水热过程及其对草地退化和气候变暖的响应与反馈[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [17] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002.
- [18] 郝力壮, 刘书杰, 吴克选, 等. 玛多县高山嵩草草地天然牧草营养评定与载畜量研究[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(1): 84-89.
- [19] 孙鹏飞, 崔占鸿, 刘书杰, 等. 三江源区不同季节放牧草场天然牧草营养价值评定及载畜量研究[J]. *草业学报*, 2015, 24(12): 92-101.
- [20] 张胜权. 三江源地区草甸草场13种典型牧草营养价值评定研究[D]. 西宁: 青海大学, 2013.
- [21] 郝力壮, 韩小东, 牛建章, 等. 三江源区河南县天然草场草畜营养平衡关系研究[J]. *草地学报*, 2018, 26(2): 520-524.
- [22] Ganjurjav H, Gornish E, Hu G Z, et al. Phenological changes offset the warming effects on biomass production in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Ecology*, 2021, 109(2): 1014-1025.
- [23] Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221-226.
- [24] Yu H, Luedeling E, Xu J. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107: 22151-22156.
- [25] Li N, Wang G, Yang Y, et al. Plant production, and carbon and nitrogen source pools, are strongly intensified by experimental warming in alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 942-953.
- [26] Xue X, Xu M, You Q, et al. Influence of experimental warming on heat and water fluxes of alpine meadows in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2014, 46: 441-458.
- [27] Ma L, Zhang Z H, Shi G X, et al. Warming changed the relationship between species diversity and primary productivity of alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109691.
- [28] Alward R D, Detling J K, Milehunas D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming [J]. *Science*, 1999, 283: 229-231.
- [29] Xu W, Zhu M, Zhang Z, et al. Experimentally simulating warmer and wetter climate additively improves rangeland quality on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(3): 1486-1497.



- [30] Li B, Lv W, Sun J, et al. Warming and grazing enhance litter decomposition and nutrient release independent of litter quality in an alpine meadow [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2022, 15: 977–990.
- [31] Zhou J, Li X R, Peng F, et al. Mobilization of soil phosphate after 8 years of warming is linked to plant phosphorus-acquisition strategies in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(24): 6578–6591.
- [32] Sun W, Li S W, Zhang Y J, et al. Effect of long-term experimental warming on the nutritional quality of alpine meadows in the northern Tibet [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(5): 516–524.
- [33] 石岳, 马殷雷, 马文红, 等. 中国草地的产草量和牧草品质: 格局及其与环境因子之间的关系 [J]. *科学通报*, 2013, 58(3): 226–239.
- [34] 李京蓉, 刘泽华. 高寒草甸植物对长期增温的响应 [J]. *青海草业*, 2017, 26(3): 13–18.
- [35] Hobbs N T, Swift D M. Estimates of habitat carrying capacity incorporating explicit nutritional constraints [J]. *Journal of Wildlife Management*, 1985, 49(3): 814–822.

## Response of livestock carrying capacity of alpine meadows in the source area of the Yangtze River to simulated warming during the growth season

Li Chengyang<sup>1</sup>, Huang Yingyi<sup>1</sup>, Lin Qiance<sup>1</sup>, Shen Linli<sup>1</sup>, Luo Shiyang<sup>1</sup>,  
Liang Zhihui<sup>1</sup>, Li Zhenming<sup>1</sup>, Peng Fei<sup>2</sup>, Xue Xian<sup>2</sup>

(1. Department of Geography, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, Guangdong, China; 2. Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In recent decades, global warming has become an undeniable fact. The alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau are one of the main animal husbandry bases in China, as well as climate change sensitive areas and ecologically fragile zones. To investigate the impact of climate warming on the livestock carrying capacity of alpine meadows in the source area of the Yangtze River during the growing season, a simulated warming experiment was conducted on a typical alpine meadow in the Beilu River Basin of the source area of the Yangtze River. We measured the aboveground biomass and forage quality of alpine meadows during warming and non-warming scenarios, respectively, and determined their quantity and nutrient carrying capacity of alpine meadows, as to provide scientific basis for formulating reasonable alpine meadows carrying capacity. The result showed: (1) The increase of temperature ( $150\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) increased the annual average soil temperature at depths of 5 and 30 cm in alpine meadows, and decreased the annual average soil moisture at depths of 0–10 cm, but increased the annual average soil moisture at depths of 20–40 cm. (2) Warming significantly increased the community aboveground biomass by  $78.55\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $79.74\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  in the early growth season (June 2017 and 2018), but had no significant effect on the later growth season (September 2017 and 2018); warming increased the proportion of aboveground biomass of forbs and grasses in the community, but decreased the proportion of sedge plants. (3) Warming reduces the crude protein and fat content in communities and forbs, resulting in a decrease in forage quality. (4) Under warming treatment, the quantity carrying capacity, digestible protein carrying capacity, and metabolic energy carrying capacity increased by  $2.37\pm 0.22$ ,  $6.72\pm 0.41$ , and  $3.89\pm 0.32$  sheep units per hectare in June 2017, and  $2.41\pm 0.30$ ,  $6.29\pm 0.25$ , and  $3.95\pm 0.17$  sheep units per hectare in June 2018, respectively; However, there was no significant change in the later growth season. According to the actual situation in the research area, under the background of warming, it is advisable to arrange grazing based on the quantity carrying capacity in the early growth season of the alpine meadow in the source area of the Yangtze River, and to arrange grazing based on the metabolic energy carrying capacity in the later growth season.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; climate warming; forage quality; biomass; livestock carrying capacity