

引用格式: 宋扎磋, 王腊梅, 张莉, 陆徐伟, 陈程浩, 杨燕, 索南吉. 川西高山-亚高山草地群落特征及稳定性对增温的响应[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 348-360.

SONG Zhacuo, WANG Lamei, ZHANG Li, LU Xuwei, CHEN Chenghao, YANG Yan, SUO Nanji. Response of community characteristics and stability of alpine-subalpine grassland to warming in Western Sichuan of China [J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 348-360.

川西高山-亚高山草地群落特征及稳定性对增温的响应

宋扎磋¹, 王腊梅², 张莉³, 陆徐伟¹, 陈程浩¹, 杨燕⁴, 索南吉^{1,5*}

(1. 青海师范大学 生命科学学院, 西宁 810016; 2. 甘孜藏族自治州林业和草原局, 四川 甘孜 626001;

3. 广元市朝天区应急管理局, 四川 广元 628021; 4. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

5. 青海师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016)

摘 要: 川西高山-亚高山区域作为中国长江、黄河上游的重要生态屏障, 拥有丰富的生物多样性。川西高山-亚高山草地生态系统对增温变化敏感, 但对其草地生态系统群落及其稳定性对增温的响应研究仍存在不足。由于指标选取单一、研究尺度小等研究方法问题, 已有研究结论的代表性不足。为了深入了解这一生态系统在不同海拔高度上对气候变暖的响应特征, 本研究在贡嘎山东北坡雅家埂峡谷地带, 沿海拔 3000~4130 m 设置 4 个高山-亚高山草地样地, 采用两种常用的模拟增温模式 (OTC 增温和带草皮下移增温) 模拟环境温度升高, 研究 2012—2017 年期间, 不同海拔梯度上草地物种丰富度、群落高度和盖度、地上净初级生产力对增温的响应特征, 以及这些特征变化与群落生物量时间稳定性的关系。结果表明: (1) OTC 增温仅在高海拔寒冷样地降低了物种丰富度, 不影响中低海拔样地的物种丰富度; 下移增温增加了高海拔寒冷样地的物种丰富度, 却降低了低海拔温暖样地的物种丰富度; (2) OTC 增温仅增加了高海拔寒冷样地的群落高度, 下移增温显著增加了所有海拔梯度上的植被高度; (3) 在两个中间海拔梯度样地, 两种增温模式都降低了杂草类植物盖度, 却增加了莎草与禾草的盖度; (4) 仅有下移增温显著增加了高海拔寒冷样地的地上净初级生产力, 各功能群地上净初级生产力的变化存在海拔差异; (5) 位于灌草交错带 3850 m 样地的群落生物量时间稳定性最高, 而位于 4130 m 的高海拔寒冷样地的群落生物量时间稳定性最弱。研究表明, 高海拔寒冷生境的草地群落组成结构和地上净初级生产力易受到气候变暖的影响, 趋于不稳定。本研究可为川西高山草地生态系统应对未来气候变暖的生态保护管理与政策制定提供科学依据。

关键词: 高山-亚高山草地; 增温; 物种丰富度; 地上净初级生产力; 群落生物量时间稳定性

中图分类号: Q14

文献标志码: A

高山生态系统对气候变暖敏感^[1-2], 高山植被在形态、发育等方面均受温度的调控, 植被分布具有海拔梯度分异规律。川西高山-亚高山区域作为中国长江、黄河上游的重要生态屏障, 拥有丰富的生物

多样性, 是一些特有物种的保存地段^[3]。随着全球温度持续上升, 川西地区正以 0.15 °C/10a 的速率增温^[4], 当地植被的覆盖度、物候期、生产力以及物种多样性等受增温影响显著^[5-6]。川西贡嘎山地区

收稿日期 (Received date): 2023-02-17; **改回日期** (Accepted date): 2023-06-06

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (32160285); 四川省科技计划智成果示范推广项目 (2022ZHYZ0005); 青海省科技厅自然科学基金青年项目 (2020-ZJ-952Q); [National Natural Science Foundation of China (32160285); Sichuan Science and Technology Program (2022ZHYZ0005); Natural Science Foundation of Science and Technology Department of Qinghai Province (2020-ZJ-952Q)]

作者简介 (Biography): 宋扎磋 (1999-), 女, 四川松潘人, 硕士研究生, 主要研究方向: 高山植物对全球变暖的响应。[SONG Zhacuo (1999-), female, born in Songpan, Sichuan province, M.Sc. candidate, research on response of alpine plants to climate warming] E-mail: songzhacuo1225@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 索南吉 (1986-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 全球变化生态学。[SUO Nanji (1986-), female, Ph.D., professor, research on global change ecology] E-mail: sonamkyi@163.com

发育有典型高山生态系统^[7],研究气候变暖对其山地植被影响过程,有助于深入认识川西高山生态系统对气候变暖的响应过程及其内在机制,并为大尺度的区域植被变化研究提供样地尺度的基础数据。

关于川西高山-亚高山生态系统响应全球变暖方面的研究主要存在以下两方面的不足。其一,响应气候变化的指标选取较为单一,缺乏对多群落指标的整合研究。例如,已有研究大多从物种丰富度、叶片功能性状、群落结构等中选取单一指标分析草地群落对增温的响应机制^[8-12]。其二,大多从植物种群变化分析增温的影响过程及其内在机制,而关于植物群落特征对增温的响应变化研究仍不充分。例如,针对川西岷江上游地区乔木(冷杉、云杉和杜松属植物)、灌丛(陇蜀杜鹃)以及红花绿绒蒿的潜在分布特征研究^[13-17],从种群分布与生理层面分析了川西高山-亚高山生态系统响应全球变暖的机制,但由于选择指标较为单一、研究尺度过小,难以代表整个群落的响应趋势,需从多个群落指标、大尺度进行分析,才能全面多层次地解析川西高山-亚高山生态系统应对全球变暖的过程与趋势,并为区域生态环境应对提供科学依据。

本文以川西地区贡嘎山东北坡雅家埂峡谷的高山-亚高山草地为研究对象,选择群落物种丰富度、群落高度、盖度、生产力等群落特征以及群落生物量稳定性作为重要指标分析对增温的响应趋势;设置不同海拔梯度上的 OTC 增温和下移增温同步模拟试验,综合揭示增温对高寒草地群落组成结构和生产力的共性特征,拟回答以下科学问题:(1)增温对不同海拔梯度草地物种丰富度、群落结构和地上净初级生产力产生何种影响?(2)增温对不同海拔梯

度群落生物量时间稳定性的影响? 本文旨在明确气候变暖背景下川西地区高山-亚高山草地是否符合传统的环境压力梯度假说,从而为该区域脆弱生态系统响应未来气候变化可持续发展提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本文研究区域位于四川省西部青藏高原东南缘,横断山区大雪山脉贡嘎山区域(29.33°~30.33°N, 101.50°~102.25°E),该区域东临大渡河,西靠雅砻江,其主峰海拔高度达7556 m,年均温约为4℃,年均降水量约为1100 mm。一年中干湿季明显,5—10月作为雨季其降水量超过全年降水量的80%,11月至次年4月为旱季。为观测川西高山草地群落对气候变暖的响应特征,团队于2012年6月沿贡嘎山东坡雅家埂3000~4130 m海拔梯度(具体为海拔4130 m、海拔3850 m、海拔3500 m和海拔3000 m的区域),选择4个面积为20 m×20 m的高山草地作为研究对象。选择的4个样地代表不同海拔和气候条件下的典型草地,在植被结构、植物群落组成、坡度、坡面等方面尽可能相似,且为满足试验样地的可达性,尽可能安排在公路附近,相邻样地间距约为300 m。选择样地内25 cm×25 cm群落调查样方时,避开样地内的洼地和凹陷区,以及可能影响小气候、光照条件的岩石等。基于2012—2016年HOBO气象站获取的气象数据,4个样地的经纬度、生长季(6—8月)均温、年均气温(地上2 m的温度)、年均土壤湿度(地下5 cm)、优势种分别如表1所示^[18]。

表1 研究样地的背景介绍

Tab. 1 Background introduction for the study site

海拔/m	经纬度	生长季 均温/℃	年均 气温/℃	年均土壤湿度/ (m ³ ·m ⁻³)	年降雨量/ mm	植被类型	土壤类型	优势种
4130	29.91°N;102.01°E	6.70	0.90	0.36	797	灌丛草甸	花岗岩 山地暗棕壤	线叶嵩草、狭叶委陵 菜、康定风毛菊
3850	29.89°N;102.02°E	8.40	1.80	0.38	821	高寒草甸	花岗岩 山地暗棕壤	珠芽拳参、银叶委陵 菜、黑褐穗苔草
3500	29.86°N;102.04°E	9.90	3.10	0.46	775	亚高山草甸	花岗岩 山地暗棕壤	糙野青茅、箭竹、椭 圆叶花锚
3000	29.84°N;102.03°E	12.00	4.30	0.38	784	亚高山草甸	花岗岩 山地暗棕壤	黑褐穗苔草、银叶委 陵菜、白车轴草

1.2 试验设计

本研究采用被动的开顶式增温小室 (OTCs, Open Top Chambers) 模拟原位增温, 高海拔向低海拔移动的下移增温 (Thansplanting warming) 模拟环境温度升高。其中, OTC 被动增温装置高度可达 40 cm, 上下开口为正六边形, 顶部边长为 60 cm, 底部面积约为 98 cm², 地面与斜边的倾斜角为 60°。根据 2017 年生长季 6—8 月的气象数据, OTC 增温装置对样地海拔由高到低的增温幅度为 0.45 °C、1.58 °C、1.23 °C、2.13 °C (图 1)。下移增温则采用带土移栽的方式, 具体做法为将带土的草皮 (面积 25 cm × 25 cm, 深度 20 cm) 作为移栽样方从高海拔较寒冷的样地下移至低海拔更温暖的样地 (图 2)。在 4 个面积为 20 m × 20 m 的海拔梯度样地中, 随机布设 7 个小区 (面积约为 3 m × 3 m), 每个小区包括 4 个小样方: 分别是 OTC 对照、OTC 增温、下移对照 (原位移动, 去除扰动的影响)、下移增温。海拔 4130 m 样地在试验运行第三年, 部分样方被野生动物破坏, 故小区数量是 5。研究样地的试

验布置于 2012 年 9 月初步完成, 试验样地持续围栏封育防止动物与人为干扰。

1.3 数据采集

1.3.1 气象数据采集

每个样地内部所设置的微型气象站 (HOBO, Onset, Boston, USA) 能够给出关于该样地的所有气象要素数据, 如降雨量、空气温湿度、土壤表面以及土壤各深层温湿度、风速等; 同时, OTC 装置内外布设气象数据采集传感器 (MG-EM 50, Decagon, pullman, USA), 监测增温箱与空白对照的空气和土壤温湿度等气象数据, 每 10 min 采集一次数据。

1.3.2 群落调查

本研究的群落调查于 2017 年 8 月进行, 增温年限为 5 年, 8 月正值该区域生长季高峰期, 所采集的初级生产力数据为当年峰值。利用 25 个小方格组成的 5 cm × 5 cm 样方框, 对所有试验群落进行调查, 25 个小方格从上坡左上角开始从左至右计数 1~25, 观测每个群落内出现的物种, 记录群落高度、物种高度、群落盖度以及单个物种盖度。

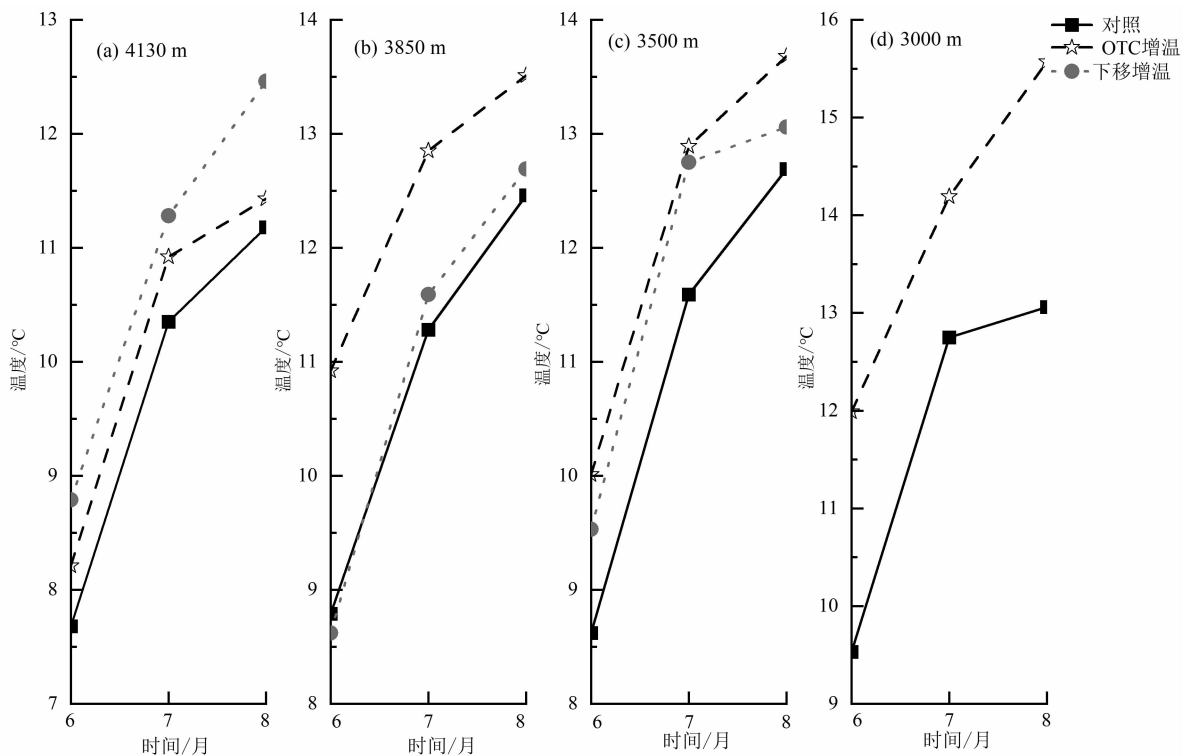


图 1 4 个海拔梯度样地生长季节 (6—8 月) 对照、OTC 和下移增温的月均气温:

(a) 4130 m 月均气温; (b) 3850 m 月均气温; (c) 3500 m 月均气温; (d) 3000 m 月均气温

Fig. 1 Monthly average air temperature in control, OTC, and down-transplant warming during growing season from June to August at four elevational gradients: (a) average monthly temperature of 4130 m; (b) average monthly temperature of 3850 m; (c) average monthly temperature of 3500 m; (d) average monthly temperature of 3000 m

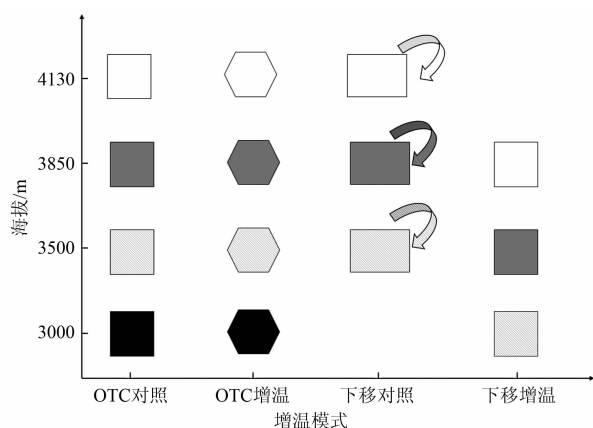


图2 样地概况及实验布置图

Fig. 2 Experimental layout in research area

注:图中不同形状代表不同的处理,不同颜色代表未经移动前所在样地的海拔。

1.3.3 地上净初级生产力测定

非破坏性取样法是获取地上净初级生产力 (ANPP) 时, 为避免试验样地造成人为干扰且最大程度保证其自然状态所采用的方法^[19]。本研究于 2017 年 8 月, 生长季达到旺盛期且完成样方调查工作后, 利用非破坏性取样法获取当年 ANPP。具体步骤如下, 首先, 利用 25 cm × 25 cm 的样方框在 4 个样地围栏内非试验区域分别选取 40 个样方, 随后对 40 个样方内出现的物种分别测量高度、盖度占比, 并齐地面收割分物种装入信封带回实验室, 于 60 °C 恒温箱内烘干至恒重, 放置万分之一电子分析天平称量作为其地上净初级生产力。最后通过物种平均高度、盖度占比和 ANPP 之间的关系建立回归方程如下:

$$Y = aX_1 + bX_2 + c \quad (1)$$

式中, Y 为所计算的物种地上净初级生产力; X_1 为物种平均高度; X_2 为物种分盖度; c 为调整系数。通过每个物种所建立的方程即可利用高度与盖度占比求出该物种 ANPP, 群落总 ANPP 为所有物种 ANPP 之和。本研究参考已有研究^[20]所建立的贡嘎山植物名录及 ANPP 回归方程作为地上净初级生产力计算公式。

1.3.4 群落生物量时间稳定性的计算

群落生物量时间稳定性表征了生态系统在波动环境中维持其功能的能力^[21], 在本文中利用 α 稳定性计算公式^[22]比较不同海拔与处理间的群落生物量对增温的耐受能力, 群落生物量时间稳定性值越

高说明该群落在外界环境的干扰下维持其能力的程度越大。计算公式为:

$$\alpha \text{ stability} = \frac{\sum_{i,k} \mu_{i,k}}{\sum_k \sqrt{\sum_{i,j} v_{ij,kk}}} \quad (2)$$

式中, $\mu_{i,k}$ 为物种 i 在群落 K 中的生物量时间均值 (temporal mean of the biomass); $v_{ij,kk}$ 为同一物种增温前后 i, j 间的方差。

2 研究结果

2.1 增温对物种丰富度的影响

在 4130 m 的高海拔寒冷样地, OTC 增温降低了物种丰富度, 下移增温增加了物种丰富度, 其他海拔高度样地 OTC 增温没有改变物种丰富度, 下移增温降低了 3500 m 中间海拔温暖样地的物种丰富度。对于杂草类, 在 4130 m 的高海拔寒冷样地受增温的影响最大, 即 OTC 增温降低其物种丰富度, 下移增温增加其物种丰富度, 在温暖的中间海拔与低海拔样地, OTC 增温反而增加其物种丰富度, 下移增温降低其物种丰富度; 对于莎草科植物, 4 个海拔高度增温都不改变其物种丰富度; 对于禾草类植物, 仅 OTC 增温降低了 3000 m 低海拔温暖样地的物种丰富度, 其他海拔高度样地也不受增温影响 (图 3, $p < 0.05$)。本研究还发现, 4 个海拔梯度物种丰富度的变化主要是由杂草类物种数量改变引起。

2.2 增温对群落盖度的影响

下移增温显著增加了 4130 m 高海拔寒冷样地的群落盖度, 其他海拔高度样地群落盖度均未受增温的影响。杂草类植物盖度在 3850 m 和 3500 m 样地均受增温而降低; 在 4 个海拔高度样地中, 莎草类植物的盖度仅随下移增温而增加; 禾草类植物盖度在中间海拔与低海拔温暖样地受增温影响, 即在 3500 m 中间海拔温暖样地下移增温增加其盖度, 3000 m 低海拔温暖样地 OTC 增温降低其盖度。总体而言, 在两个中间海拔梯度样地, 杂草类植物随下移增温盖度降低, 而莎草类与禾草类则上升 (图 4, $p < 0.05$)。

2.3 增温对群落高度的影响

增温均显著增加 4130 m 高海拔寒冷样地草地群落的高度。在其他海拔高度样地中, OTC 增温对

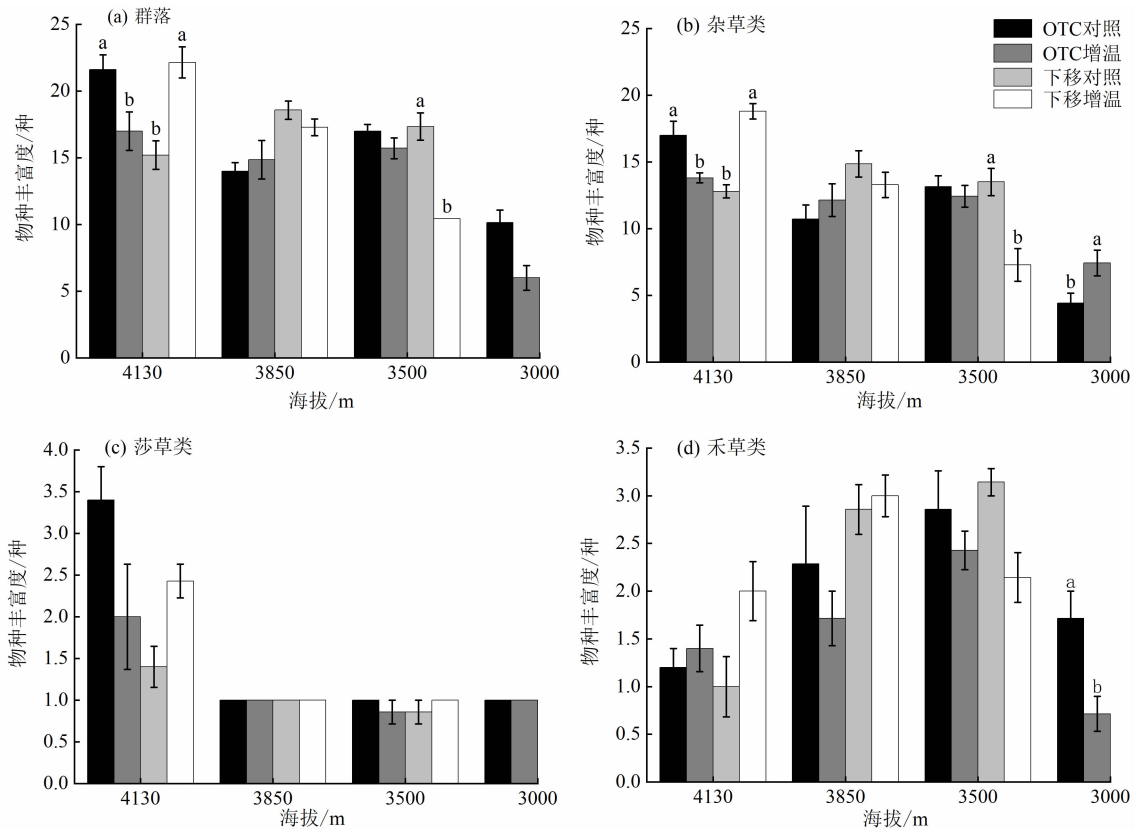


图 3 群落及功能群物种丰富度对模拟增温的响应:

(a) 群落物种丰富度; (b) 杂草类物种丰富度; (c) 莎草类物种丰富度; (d) 禾草类物种丰富度

Fig. 3 Responses of community and functional group species richness to experimental warming:

(a) species richness of community; (b) species richness of forb; (c) species richness of sedge; (d) graminoid species richness

注: 不同字母表示对照与增温处理间差异显著 ($p < 0.05$), 数值为平均值 \pm 标准误差 SE。

群落高度无影响, 而下移增温显著增加群落高度, 尤其在 3500 m, 下移增温的群落植被高度是对照群落的 3 倍 (图 5, $p < 0.05$)。

2.4 增温对地上净初级生产力的影响

下移增温显著增加了 4130 m 高海拔寒冷样地草地上净初级生产力, 其他海拔高度样地均没有受到增温的影响。在高海拔寒冷样地, 下移增温显著提高了杂草类的地上净初级生产力。其他海拔高度样地, OTC 增温主要降低了禾草类和杂草类的地上净初级生产力, 下移增温主要是增加了禾草类和莎草类的地上净初级生产力 (图 6, $p < 0.05$)。

2.5 增温对群落生物量时间稳定性的影响

群落生物量时间稳定性结果显示, 2 种增温模式, 4130 m 高海拔寒冷样地群落生物量时间稳定性最差, 下移增温模式下尤其显著, 且受增温模式的影响最大, 3500 m 中间海拔样地次之, 3850 m 较高海

拔样地群落生物量时间稳定性最强且受增温模式的影响最小 (图 7)。

3 讨论

3.1 增温对物种丰富度与群落结构的影响

两种增温模式对位于 4130 m 的高海拔寒冷样地植物物种丰富度有显著影响。OTC 模拟增温减少了群落的物种丰富度, 而下移增温反而使 4130 m 样地群落与杂草类物种丰富度上升。3500 m 中间海拔样地的物种丰富度随着下移增温显著下降。

在 4130 m 样地, OTC 模拟增温减少了群落的物种丰富度, 这与北极苔原地区和青藏高原其他地区的 OTC 增温结果一致^[9, 23, 24-27]。这可能是由于升温引起的温度与水分胁迫, 对温度敏感性极强的高海拔嗜冷物种造成生存威胁^[19, 27]; 其次, 在有限的空间内环境胁迫引起种间竞争排除原则使竞争力弱

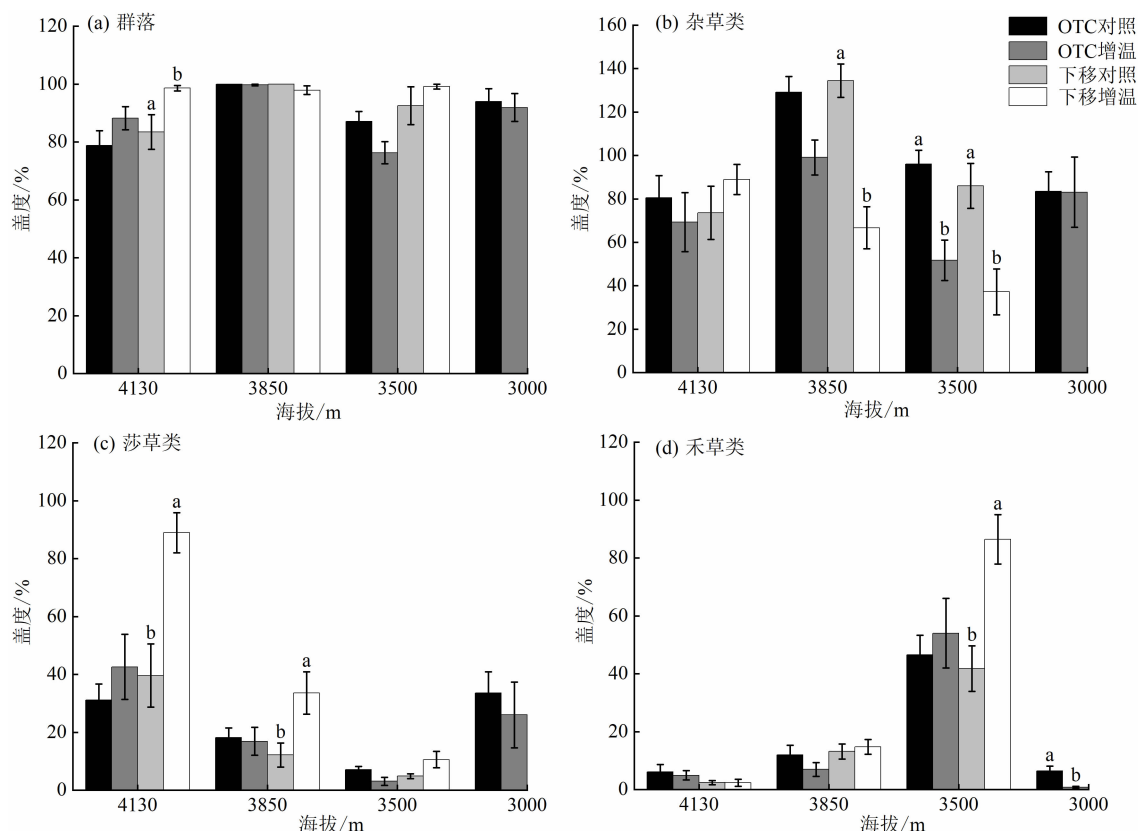


图4 群落及功能群盖度对模拟增温的响应:

(a) 群落盖度; (b) 杂草类盖度; (c) 莎草类盖度; (d) 禾草类盖度

Fig. 4 Responses of community and functional group coverage to experimental warming:

(a) community cover ; (b) forb cover; (c) sedge cover; (d) graminoid cover

注: 不同字母表示对照与增温处理间差异显著 ($p < 0.05$), 数值为平均值 \pm 标准误差 SE。

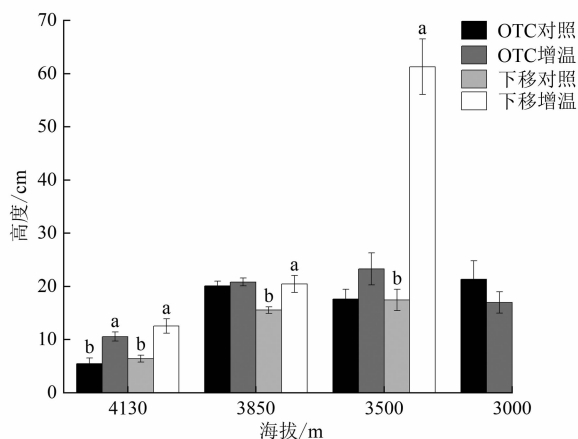


图5 植被高度对模拟增温的响应

Fig. 5 Responses of vegetation height to experimental warming

注: 不同字母表示对照与增温处理间差异显著 ($p < 0.05$),

数值为平均值 \pm 标准误差 SE。

的物种被竞争力强、耐高温的物种移出群落^[28], 此外, OTC 设备自身的缺点使箱内形成与外界不同的

微气候, 阻止箱内植物进行传粉繁殖进而降低了物种丰富度^[29]。下移增温反而使 4130 m 样地群落与杂草类物种丰富度上升, 这与青藏高原海北站带土移栽试验以及欧洲阿尔卑斯山等山地的长期观测与整合分析结果一致^[29-30], 表明高山植被容易受到低海拔植物的入侵, 证实了更高海拔的生态系统在变暖的条件下为来自低海拔嗜热的物种扩大了生存空间, 且从低海拔物种入侵的速率快于嗜冷物种丢失的速率, 导致当地的物种丰富度越来越大^[31-32]。此外, 在 4130 m, 下移对照群落的物种丰富度显著低于 OTC 对照群落物种丰富度。这表明, 对土壤层的扰动将造成群落物种丰富度下降, 同时也印证了 4130 m 高海拔寒冷样地的高度敏感性及脆弱性。从 3500 m 下移至 3000 m 的群落物种丰富度显著下降, 这可能是由于较长的下移距离产生较高的温度增加, 导致下移的群落在短时间内未能适应较大的温度以及其他环境的落差而造成。研究还发现 4 个

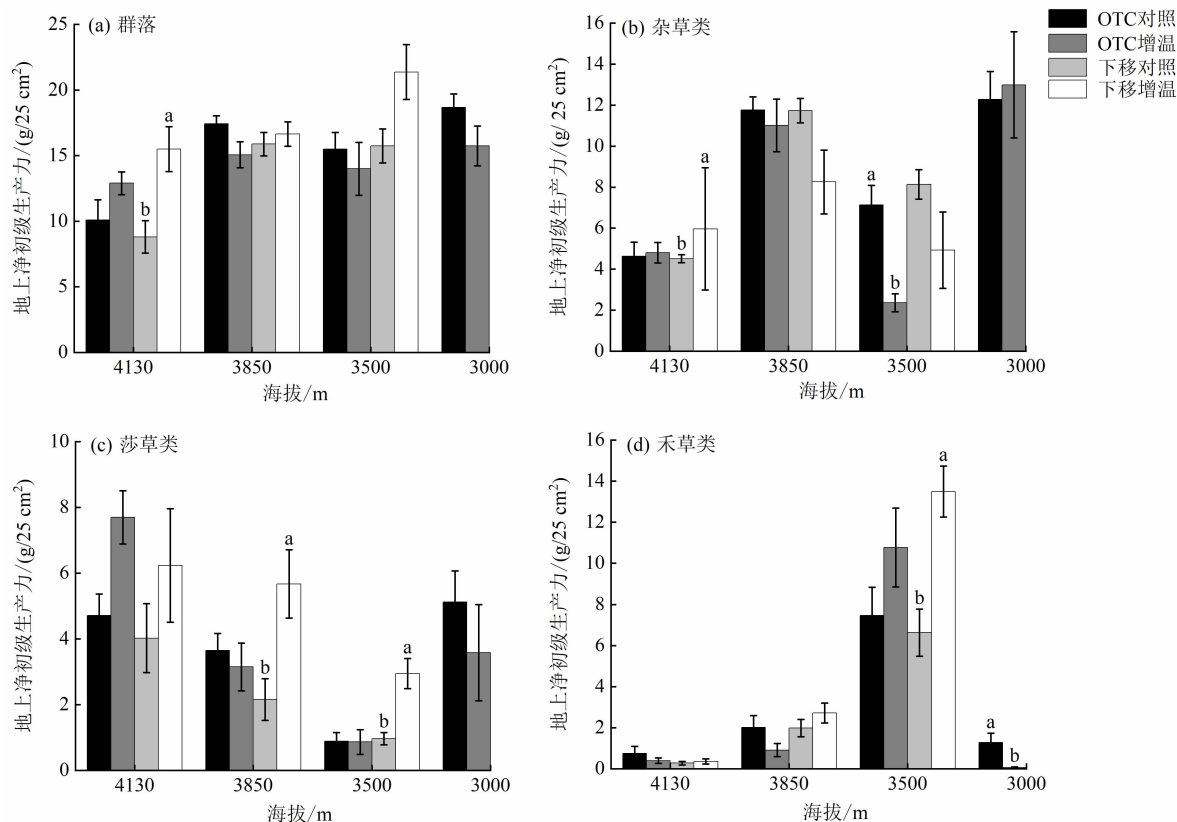


图6 群落及功能群地上净初级生产力对模拟增温的响应：

(a) 群落地上净初级生产力；(b) 杂草类地上净初级生产力；(c) 莎草类地上净初级生产力；(d) 禾草类地上净初级生产力

Fig. 6 Responses of community and functional group to experimental warming:

(a) community ANPP; (b) forb ANPP; (c) sedge ANPP; (d) graminoid ANPP

注：不同字母表示对照与增温处理间差异显著 ($p < 0.05$)，数值为平均值 \pm 标准误差 SE。

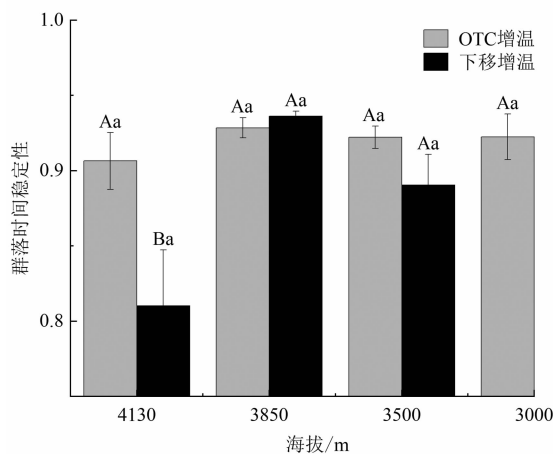


图7 群落生物量时间稳定性

Fig. 7 Temporal stability of community biomass

注：大写字母表示组间差异，小写字母表示组内差异，同一字母表示差异不显著，不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)，数值为平均值 \pm 标准误差 SE。

海拔梯度物种丰富度的变化主要由杂草类物种数量改变引起(图3),这可能因为杂草类作为高山植物中分布狭窄热量带范围内的物种,一般最先受到环境影响所导致^[33]。

4130 m 高海拔寒冷样地,仅有莎草类植物盖度在下移增温下显著提高,而在两个中间海拔高度样地,由于莎草类与禾草类盖度随着下移增温而增大,杂草类盖度降低增温未对群落盖度产生显著影响。同一群落中不同的物种或功能群对环境变化的敏感性以及响应程度不同^[34],在4130 m 高海拔寒冷样地,仅有莎草类植物盖度在下移增温下显著提高,进而提高群落总盖度。根据苔原生态系统的研究结果,群落高度与盖度虽然具有地方特异性,但普遍随温度升高而增大^[25]。而在两个中间海拔高度样地,由于莎草类与禾草类盖度随着下移增温而增大,而杂草类盖度降低,增温未对群落盖度产生显著影响,

这与青藏高原的一些研究结果相似,即莎草类与禾草类在模拟增温后其在群落中所占比例均以不同程度增加^[35-36]。这可能是由于莎草类与禾草类为浅根系植物,相较其他植物资源利用率较高,增温使其能够更好地获取土壤浅层的水分与养分^[37-38],而莎草类与禾草类植物冠层高度较高,在草地群落中占据生态位上层,获取光资源能力较强,但由于群落内部的种间相互作用,上层植物高度的增加会显著影响群落内部有效光照辐射的分配比例,降低下层植物即杂类草的光合作用能力^[39]。

研究发现,增温均显著增加高海拔寒冷样地草地群落高度,而在中低海拔高度样地,群落高度对 OTC 增温无显著响应,下移增温则显著增加群落高度,尤其在 3500 m,下移增温的植被高度是对照群落的 3 倍。首先,增温均显著增加高海拔寒冷样地草地群落高度,这符合北极、青藏高原等苔原生态系统中的普遍结果,即 3~6 个生长季的短期增温促进群落高度^[24-25, 40],而已有研究在高北极区域对草甸、常绿灌木与落叶灌木 3 种不同植被类型进行长达 18 年的长期增温后,却得出增温对 3 种生态系统植物冠层高度无显著促进的结果^[41]。因此,植物冠层高度可能受增温时长的影响。植物高度可以反映植物对光能资源的获取能力^[42],说明在高海拔寒冷的生态系统,增温可以提高植物对光能的捕获能力。其次,在中低海拔高度样地,群落高度对 OTC 增温无显著响应,这与上述短期增温下得到的普遍结果不一致^[25-26, 40],可能是因为在中低海拔高山生态系统中由于温度因子对植物生长不占支配地位,温度升高反而促进蒸发和土壤干旱程度,进一步限制了植物的生长^[43]。在 3500 m 样地,下移增温群落由于禾本科植物高度的显著增加,提高了群落植被高度,根据土壤湿度及前人 4 年前的土壤养分含量数据分析发现^[44],3000 m 样地的水分含量低于 3500 m 中间海拔样地,但土壤中的速效 N 含量高于 3500 m 样地。速效 N 是植物根系最易吸收且主要的氮素来源^[45],能够促进植物生长。禾本科功能群作为浅根系植物,能够在深层土壤水分缺乏的环境中获利,并吸收土壤中的速效 N,从而促进个体的生长形成正反馈。

总的来说,增温显著改变了高海拔寒冷样地的物种丰富度、盖度和高度,说明该生境极其敏感脆弱,极易受到环境温度升高的影响。下移增温普遍

使物种丰富度上升,而 OTC 增温反而导致物种丰富度下降,但两种增温模式都一致促进群落高度的增加。

3.2 增温对地上净初级生产力的影响

在本试验中,下移增温增加高海拔寒冷样地的群落地上净初级生产力以及中间海拔样地禾草类与莎草类的地上净初级生产力,而 OTC 增温对所有海拔高度样地并无显著影响。

群落地上净初级生产力会通过群落组成与结构变化而间接受到影响,在本研究中只有下移增温在高海拔寒冷样地增加了群落以及杂草类的地上净初级生产力,这与前人的已有结果吻合^[46-47]。整合分析不同的增温模式对高纬度、高海拔地区所得的试验结果同样表明增温促进地上净初级生产力^[48]。过去几十年,阿拉斯加和加拿大西北部温度增加 1.8 °C,植被光合作用和净初级生产力也有增长的趋势^[49],证实了高海拔植物群落对增温极强的敏感性。这可能是由于光合过程是由酶所催化的化学反应,而温度直接影响酶的活性。在低温中,酶促反应下降,故限制了光合作用的进行^[50]。因此,在高寒生态系统,增温可能缓解了低温对光合作用的限制作用^[51],且通过延长植物的生长季节、升高土壤温度、提高土壤酶活性以促进植物更好地吸收外界水分和养分,加快植物生长发育^[52],进而提升生产力。此外,在 3850 m 与 3500 m 两个中间海拔高度样地,下移增温主要增加了禾草类和莎草类的地上净初级生产力,禾草类与莎草类同为浅根系植被,对土壤表层的养分利用率极高,并且分布于群落上层,充分提高光合作用效率,这可能是群落地上净初级生产力增加的主要原因^[36-37]。OTC 增温对所有海拔梯度样地的群落净初级生产力均无显著影响,这与普遍所得的增温结果不一致^[46-48],可能是因为上述研究被动增温时间多为 1~3 a,相较本研究 6 a 的增温时间而言较短,长时间的 OTC 增温使植株蒸腾作用增加,因此植株通常需要降低高度,减小叶面积等特征以缓解高温引起的蒸腾作用^[53-54],从而抵消了增温促进其生产力的潜在趋势。总之,在不同的海拔梯度,草地群落及功能群对不同增温模式的响应趋势不同,海拔 4130 m 草地群落对增温最为敏感。

3.3 增温对群落生物量时间稳定性的影响

分析发现 4130 m 高海拔寒冷样地稳定性最差且受增温模式的影响大,而 3850 m 的较高海拔灌丛

交错区稳定性最强且受增温模式的影响最小。

两种增温模式下,4130 m 高海拔寒冷样地的稳定性均最差,在下移增温模式下尤为显著且受增温模式的影响大,这可能是由于高山生态系统的植物在形态建成、繁殖发育以及栖息地分布范围等方面均受低温限制,对气候变暖十分敏感^[1]。有研究利用高空间分辨率整合裸露面积、恢复力与敏感性量化陆地生态系统对短期变暖的脆弱性,同样发现高度敏感的区域位于高海拔区域^[2]。该样地群落生物量时间稳定性受增温模式的影响,高山植物群落在未来的气候变化模式下,来自低海拔的物种作为跟踪气候变化迁移至高海拔,并与原栖息地物种发生互作,这对高山植物群落响应气候变化尤为重要^[55],但 OTC 增温模式因箱体的阻碍作用,限制箱内植物与外环境物种进行传粉繁殖、物种交换^[19, 29]。因此,OTC 增温模式在响应增温对植物群落的影响时,由于缺乏对新物种相互作用的考虑,可能低估增温对群落的影响^[55];而下移增温却在短时间内将植物群落与目标环境完全融合,同时改变非生物环境和生物环境,因此可以检验气候变暖的直接和间接影响的净效应^[55],可能夸大试验结果。本研究显示,3850 m 较高海拔样地无论在何种增温模式下,其稳定性较其他海拔样地最高,并且不受增温模式的影响。这可能是由于该样地处于灌丛草甸与森林生态系统交错带,作为两种生态系统过渡区具有边缘效应,包含丰富的生物多样性^[56-57],这有利于对变化环境差异性反应的物种或者功能群通过补偿转换,来增强其所在群落抵抗外界干扰的能力,因此物种及功能群越多,群落稳定性越强^[58-59]。

4 结 论

本研究选取川西地区贡嘎山东北坡雅家埂峡谷的高山-亚高山草地为研究对象,选择群落物种丰富度、群落高度、盖度、生产力等群落特征以及群落生物量稳定性作为重要指标分析对增温的响应趋势。设置不同海拔梯度上的 OTC 增温和下移增温同步模拟试验,得到主要结论如下:

(1)在高海拔寒冷样地,两种增温模式均增加群落植被高度、盖度、地上净初级生产力,下移增温显著增加物种丰富度,而 OTC 则降低物种丰富度。因此,为了更好地预测植物群落对未来气候变暖的

响应,建议将多种增温模式整合到同一地点同时开展模拟试验。

(2)高海拔寒冷样地的物种丰富度、群落结构以及地上净初级生产力易受增温的负面影响,群落生物量时间稳定性最低。

(3)灌草交错带植物群落受增温的影响最小,稳定性最高。

以上结论可为川西高山-亚高山生态系统应对未来气候变暖的生态保护和民族地区经济发展提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] HECTOR A, SCHMID B, BEIERKUHNLEIN C, et al. Plant diversity and productivity experiments in Europe grasslands [J]. *Science*, 1999, **286** (5442): 1123 - 1127. DOI: 10.1126/science.286.5442.1123
- [2] LI Delong, WU Shuyao, LIU Laibao, et al. Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(9): 4095 - 4106. DOI: 10.1111/gcb.14327
- [3] 李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区 1960—2008 年气温和降水时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2010, **65**(5): 563 - 579. [LI Zongxing, HE Yuanqing, XIN Huijuan, et al. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Mts. Hengduan region during 1960—2008 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(5): 563 - 579]
- [4] 郭剑英, 王根绪. 贡嘎山风景名胜区的的变化特征及其对旅游业的影响 [J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(1): 214 - 219. [GUO Jianying, WANG Genxu. Climate change on the Mt. Gongga and its impact on tourism [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(1): 214 - 219]
- [5] 钟鼎杰, 杨存建. 2001—2020 年川西高原植被 EVI 时空变化特征及气候因子驱动力分析 [J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(4): 223 - 230. [ZHONG Dingjie, YANG Cunjian. Spatiotemporal variation characteristics of vegetation EVI and driving forces of climate factors in western Sichuan Plateau from 2001 to 2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(4): 223 - 230] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.04.006
- [6] 王叶兰, 杨鑫, 郝利娜. 川西高原植被物候及其对气候变化的响应 [J]. *长江科学院院报*, 2023, **40**(5): 77 - 84 + 93. [WANG Yelan, YANG Xin, HAO Lina. Phenology of vegetation and its response to climate change in the western Sichuan Plateau [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, **40**(5): 77 - 84 + 93] DOI: 10.11988/ckyyb.20220041
- [7] 钟祥浩. 贡嘎山高山生态系统观测试验站总体设想 [J]. *山地研究*, 1989, **7**(4): 266. [ZHONG Xianghao. Overall idea of the Gongga Mountain Alpine Ecosystem Observation and Experimental Station [J]. *Mountain Research*, 1989, **7**(4): 266]

- [8] YAN Yingjie, NIU Shuli, HE Yicheng, et al. Changing plant species composition and richness benefit soil carbon sequestration under climate warming [J]. *Functional Ecology*, 2022, **36**(12): 2906–2916. DOI: 10.1111/1365-2435.14218
- [9] YANG Yan, HALBERITTER A H, KLANDERUD K, et al. Transplants, Open Top Chambers (OTCs) and gradient studies ask different questions in climate change effects studies [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**: 1574. DOI: 10.3389/fpls.2018.01574
- [10] QUAN Quan, ZHANG Fangyue, MENG Cheng, et al. Shifting biomass allocation determines community water use efficiency under climate warming [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(9): 094041. DOI: 10.1088/1748-9326/aba472
- [11] CHEN Huai, ZHU Qian, PENG Changhui, et al. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(10): 2940–2955. DOI: 10.1111/gcb.12277
- [12] YAN Wenchao, WANG Yuanyun, CHAUDHARY P, et al. Effects of climate change and human activities on net primary production of wetlands on the Zoige Plateau from 1990 to 2015 [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, **35**: e02052. DOI: 10.1016/j.gecco.2022.e02052
- [13] SHI Ning, NAUDIYAL N, WANG Jinniu, et al. Assessing the impact of climate change on potential distribution of *Meconopsis punicea* and its influence on ecosystem services supply in the southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **12**: 830119. DOI: 10.3389/fpls.2021.830119
- [14] 何佳莉, 王金牛, 周天阳, 等. 发育阶段和海拔对岷江源区陇蜀杜鹃小枝功能性状及生物量分配的影响 [J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(12): 4027–4034. [HE Jiali, WANG Jinniu, ZHOU Tianyang, et al. Effects of growth stage and altitude on twig functional traits and biomass allocation of *Rhododendron przewalskii* in the headwater region of Minjiang River, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(12): 4027–4034] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202012.001
- [15] NAUDIYAL N, WANG Jinniu, WU Ning, et al. Potential distribution of *Abies*, *Picea*, and *Juniperus* species in the sub-alpine forest of Minjiang headwater region under current and future climate scenarios and its implications on ecosystem services supply [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **121**: 107131. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107131
- [16] 贾龙玉, 管增艳, 常瑞英, 等. 贡嘎山树线上方杜鹃灌木径向生长对气候变化的响应特征 [J]. *山地学报*, 2021, **39**(5): 646–657. [JIA Longyu, GUAN Zengyan, CHANG Ruiying, et al. Response of radial growth of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii* to climate change above treeline in the Gongga Mountain [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(5): 646–657] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000627
- [17] 刘勤, 王玉宽, 彭培好, 等. 气候变化下四川省物种的分布规律及迁移特征 [J]. *山地学报*, 2016, **34**(6): 716–723. [LIU Qin, WANG Yukuan, PENG Peihao, et al. Characteristics of distribution and migration of species in Sichuan under the climate change [J]. *Mountain Research*, 2016, **34**(6): 716–723] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000178
- [18] VANDVIK V, HALBRITTER A H, YANG Yan, et al. Plant traits and vegetation data from climate warming experiments along an 1100m elevation gradient in Gongga Mountains, China [J]. *Scientific Data*, 2020, **7**(1): 189. DOI: 10.1038/s41597-020-0529-0
- [19] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO Xinquan. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Applications*, 2007, **17**(2): 541–557. DOI: 10.1890/05-0685
- [20] 张莉. 模拟增温对贡嘎山高山草甸群落结构和功能的影响 [D]. 成都: 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 2018: 41–43. [ZHANG Li. Effects of experimental warming on community structure and function in alpine meadow, Gongga Mountain [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2018: 41–43]
- [21] LIANG Maowei, LIANG Cunzhu, HAUTIER Y, et al. Grazing-induced biodiversity loss impairs grassland ecosystem stability at multiple scales [J]. *Ecology Letters*, 2021, **24**(10): 2054–2064. DOI: 10.1111/ele.13826
- [22] WANG Shaopeng, LAMY T, HALLETT L M, et al. Stability and synchrony across ecological hierarchies in heterogeneous metacommunities: Linking theory to data [J]. *Ecography*, 2019, **42**(6): 1200–1211. DOI: 10.1111/ecog.04290
- [23] GANJURJAV H, GAO Qingzhu, GORNISH E S, et al. Differential response of alpine steppe and alpine meadow to climate warming in the central Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **223**: 233–240. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.03.017
- [24] ELMENDORF S C, HENRY G H R, HOLLISTER R D, et al. Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming [J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(6): 453–457. DOI: 10.1038/nclimate1465
- [25] HINZMAN L D, BETTEZ N D, BOLTON W R, et al. Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other Arctic regions [J]. *Climatic Change*, 2005, **72**(3): 251–298. DOI: 10.1007/s10584-005-5352-2
- [26] ZHU Juntao, ZHANG Yangjian, YANG Xian, et al. Warming alters plant phylogenetic and functional community structure [J]. *Journal of Ecology*, 2020, **108**(6): 2406–2415. DOI: 10.1111/1365-2745.13448
- [27] LIU Yinzhan, MU Junpeng, NIKLAS K J, et al. Global warming reduces plant reproductive output for temperate multi-inflorescence species on the Tibetan Plateau [J]. *New Phytologist*, 2012, **195**

- (2): 427–436. DOI: 10.1111/j.1469–8137.2012.04178.x
- [28] GRIME J P, Competitive exclusion in herbaceous vegetation [J]. *Nature*, 1973, **242**(5396): 344–347. DOI: 10.1038/242344a0
- [29] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 等. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(2): 262–271. [NIU Shuli, HAN Xingguo, MA Keping, et al. Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(2): 262–271]
- [30] GRABHERR G, GOTTFRIED M, PAULI H. Climate effects on mountain plants [J]. *Nature*, 1994, **369**(6480): 448–448. DOI: 10.1038/369448a0
- [31] WALTHER G R, BEISSNER S, BURGA C A. Trends in the upward shift of alpine plants [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2005, **16**(5): 541–548. DOI: 10.1658/1100–9233(2005)16[541: Tituso]2.0. Co;2
- [32] WANG Qi, ZHANG Zhenhua, DU Rui, et al. Richness of plant communities plays a larger role than climate in determining responses of species richness to climate change [J]. *Journal of Ecology*, 2019, **107**(4): 1944–1955. DOI: 10.1111/1365–2745.13148
- [33] SAETERSDAL M, BIRKS H J B. A comparative ecological study of Norwegian mountain plants in relation to possible future climatic change [J]. *Journal of Biogeography*, 1997, **24**(2): 127–152. DOI: 10.1046/j.1365–2699.1997.00096.x
- [34] ALWARD R D, DETLING J K, MILCHUNAS D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming [J]. *Science*, 1999, **283**(5399): 229–231. DOI: 10.1126/science.283.5399.229
- [35] 李英年, 赵亮, 赵新全, 等. 5 年模拟增温后矮嵩草草甸群落结构及生产量的变化[J]. *草地学报*, 2004, **12**(3): 236–239. [LI Yingnian, ZHAO Liang, ZHAO Xinquan, et al. Effects of a 5-years mimic temperature increase to the structure and productivity of KobresiaHumilis meadow [J]. *ActaAgrestiaSinica*, 2004, **12**(3): 236–239]
- [36] 周华坤, 周兴民, 赵新全. 模拟增温效应对矮嵩草草甸影响的初步研究[J]. *植物生态学报*, 2000, **24**(5): 547–553. [ZHOU Huakun, ZHOU Xinmin, ZHAO Xinquan. A preliminary study of the influence of simulated greenhouse effect on a KobresiaHumilis meadow [J]. *ActaPhytoecologicalSinica*, 2000, **24**(5): 547–553]
- [37] WALKER M D, WEBBER P J, ARNOLD E H, et al. Effects of interannual climate variation on aboveground phytomass in alpine vegetation [J]. *Ecology*, 1994, **75**(2): 393–408. DOI: 10.2307/1939543
- [38] 宗宁, 柴曦, 石培礼, 等. 藏北高寒草甸群落结构与物种组成对增温与施氮的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(12): 3739–3748. [ZONG Ning, CHAI Xi, SHI Peili, et al. Responses of plant community structure and species composition to warming and N addition in an alpine meadow, northern Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(12): 3739–3748] DOI: 10.13287/j.1001–9332.201612.007
- [39] 夏建阳, 鲁芮伶, 朱辰, 等. 陆地生态系统过程对气候变暖的响应与适应[J]. *植物生态学报*, 2020, **44**(5): 494–514. [XIA Jianyang, LU Ruiling, ZHU Chen, et al. Response and adaptation of terrestrial ecosystem processes to climate warming [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, **44**(5): 494–514] DOI: 10.17521/cjpe.2019.0323
- [40] WALKER M D, WAHREN C H, HOLLISTER R D, et al. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(5): 1342–1346. DOI: 10.1073/pnas.0503198103
- [41] EDWARDS M, HENRY G H R. The effects of long-term experimental warming on the structure of three High Arctic plant communities [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2016, **27**(5): 904–913. DOI: 10.1111/jvs.12417
- [42] HUDSON J M G, HENRY G H R. High Arctic plant community resists 15 years of experimental warming [J]. *Journal of Ecology*, 2010, **98**(5): 1035–1041. DOI: 10.1111/j.1365–2745.2010.01690.x
- [43] GUNDERSON C A, WULLSCHLEGER S D. Photosynthetic acclimation in trees to rising atmospheric co₂: A broader perspective [J]. *Photosynthesis Research*, 1994, **39**(3): 369–388. DOI: 10.1007/bf00014592
- [44] 崔海军. 高山草地植物群落对气候变化的响应研究[D]. 成都: 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 2016: 30–40. [CUI Haijun. Study on the response of plant community in alpine grassland to climate change [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2016: 30–40]
- [45] 沈其荣. 土壤肥科学通论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021: 168–170. [SHEN Qirong. Soil and fertilizer sciences [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2021: 168–170]
- [46] DEBOUK H, DE BELLO F, SEBASTIA M T. Functional trait changes, productivity shifts and vegetation stability in mountain grasslands during a short-term warming [J]. *Plos One*, 2015, **10**(10): e0141899. DOI: 10.1371/journal.pone.0141899
- [47] CHEN Ji, LUO Yiqi, XIA Jianyang, et al. Differential responses of ecosystem respiration components to experimental warming in a meadow grassland on the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **220**: 21–29. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.01.010
- [48] BHATTARAI P, TIMILSINA B, PARAJULI R, et al. Distinct response of high-latitude ecosystem and high-altitude alpine ecosystem to temperature and precipitation dynamics: A meta-analysis of experimental manipulation studies [J]. *Progress in Physical Geography*, 2022, **46**(6): 909–921. DOI: 10.1177/03091333221114866

- [49] KIMBALL J S, McDONALD K C, ZHAO M. Spring thaw and its effect on terrestrial vegetation productivity in the western arctic observed from satellite microwave and optical remote sensing [J]. *Earth Interactions*, 2006, **10** (21): 1 – 22. DOI: 10.1175/EI187.1
- [50] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 78 – 90. [PAN Ruichi. *Plant physiology*[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2012: 78 – 90]
- [51] ROBINSON C H, WOOKEY P A, PARSONS A N, et al. Responses of plant litter decomposition and nitrogen mineralisation to simulated environmental change in a high arctic polar semi-desert and a subarctic dwarf shrub heath [J]. *Oikos*, 1995, **74** (3): 503 – 512. DOI: 10.2307/3545996
- [52] SHAVER G R, CANADELL J, CHAPIN F S, et al. Global warming and terrestrial ecosystems: A conceptual framework for analysis [J]. *Bioscience*, 2000, **50** (10): 871 – 882. DOI: 10.1641/0006-3568(2000)050[0871: Gwatea]2.0. Co;2
- [53] SALESKA S R, HARTE J, TORN M S. The effect of experimental ecosystem warming on CO₂ fluxes in a montane meadow [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5** (2): 125 – 141. DOI: 10.1046/j.1365-2486.1999.00216.x
- [54] 龚春梅, 白娟, 梁宗锁. 植物功能性状对全球气候变化的指示作用研究进展[J]. *西北植物学报*, 2011, **31** (11): 2355 – 2363. [GONG Chunmei, BAI Juan, LIANG Zongsuo. Advance on indicating functions of plant functional traits to global climate changes [J]. *Acta Bot. Boreal. Occident. Sin*, 2011, **31** (11): 2355 – 2363]
- [55] ALEXANDER J M, DIEZ J M, LEVINE J M. Novel competitors shape species' responses to climate change [J]. *Nature*, 2015, **525** (7570): 515 – 518. DOI: 10.1038/nature14952
- [56] 王如松, 马世骏. 边缘效应及其在经济生态学中的应用[J]. *生态学杂志*, 1985(2): 38 – 42. [WANG Rusong, MA Shijun. Edge effect and its application in economic ecology [J]. *Journal of Ecology*, 1985 (2): 38 – 42]
- [57] 王巍巍, 贺达汉. 生态景观边缘效应研究进展[J]. *农业科学研究*, 2012, **33** (3): 62 – 66. [WANG Weiwei, HE Dahan. Research progress of the edge effect of ecological landscape [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2012, **33** (3): 62 – 66]
- [58] CHAPIN F S, SHAVER G R, GIBLIN A E, et al. Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate [J]. *Ecology*, 1995, **76** (3): 694 – 711. DOI: 10.2307/1939337
- [59] CHAPIN F S, SHAVER G R. Physiological and growth responses of arctic plants to a field experiment simulating climatic change [J]. *Ecology*, 1996, **77** (3): 822 – 840. DOI: 10.2307/2265504

Response of Community Characteristics and Stability of Alpine-Subalpine Grassland to Warming in Western Sichuan of China

SONG Zhacuo¹, WANG Lamei², ZHANG Li³,

LU Xuwei¹, CHEN Chenghao¹, YANG Yan⁴, SUO Nanji^{1,5*}

(1. *Life Science College, Qinghai Normal University, Xining 810016, China;*

2. *Forest and Grassland Bureau of Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Ganzi 626001, Sichuan, China;*

3. *Chaotian Emergency Management Bureau of Guangyuan City, Guangyuan 628021, Sichuan, China ;*

4. *Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources,*

Chengdu 610041, China; 5. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810016, China)

Abstract: As an important ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River and the Yellow River, the alpine-subalpine region in western Sichuan is rich in biodiversity. The alpine-subalpine grassland ecosystem in the region is sensitive to local warming changes under the circumstance of global warming, but there were insufficient studies on the response of grassland ecosystem communities and their stability to warming. This was quite possibly due to poor research methodologies, such as the improper application of single indicator in a model or small research scales extending to a large scale, inevitably making parts of research conclusions are neither comprehensive nor convincing.

To better predict the responses of alpine-subalpine grassland ecosystem to incoming climate changes at different elevations, in this study four sample plots of natural alpine-subalpine grassland were selected from 3000 m to 4130 m in the Yajiageng valley, northeast slope of the Gongga Mountain, western Sichuan, China; two common warming methods of simulating, Open Top Chambers (OTCs) warming and transplanting warming were used to simulate ambient temperature rise. The responses of five indicators, including aboveground vegetation species richness, communality height, total coverage, and Aboveground Net Primary Productivity (ANPP) at each plot in the period of 2012 – 2017 were recorded and the relationship between the indicators and the temporal stability of community biomass was analyzed.

It has the following findings: (1) OTCs warming reduced species richness only in the coldest plots at the highest altitude, but did not affected those in middle-low altitude, whereas transplanting warming increased species richness in the coldest plots at the highest altitude site, but it decreased species richness at plots in the middle-low altitude. (2) OTCs warming only increased vegetation height in the coldest plots at the highest altitude, whereas transplanting warming increased vegetation height at all plots significantly. (3) Two warming methods both decreased the forb coverage in two sample plots at middle altitude but they increased sedge and grass coverage. (4) Only transplanting warming significantly increased ANPP at the coldest sample plots with high altitude, and there were differences in ANPP at altitudes among each functional group. (5) At the 3850 m sample plot, the time stability of community biomass in the shrub-grass ecotone was the highest, while at 4130 m it was the weakest. This study suggested that the aboveground vegetation community structure and net primary productivity at high altitude were vulnerable to the climate warming and tend to unstable. This study can provide a scientific basis for ecological conservation management and policy making for alpine grassland ecosystem in western Sichuan.

Key words: alpine grassland; warming; species richness; above-ground NPP; temporal stability of community biomass

(责任编辑 李嵘)