

梯度增温对色季拉山高寒草甸植物物种多样性与生产力的影响

杨小菊^{1,2,3,4}, 孙雪婷^{1,2,3,4}, 胡旭⁵, 罗大庆^{1,2,3,4}, 扎西次仁¹, 吴虹皓¹, 屈兴乐^{1,2,3,4*}

(1. 西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室, 西藏 林芝 860000;
3. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 4. 林芝生态监测站, 西藏 林芝 860000;
5. 西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: [目的] 探究气候变暖对高寒草甸生态系统植物物种多样性与生产力的影响。[方法] 以色季拉山高寒草甸为研究对象, 采用开顶式气室(OTC)增温装置, 设置6个增温梯度进行为期1年的实验, 探究植物群落组成、生物量和物种多样性对梯度增温的响应。[结果] 1) 在增温处理下, 8月空气温度分别增加了1.96, 2.19, 2.26, 2.28和2.43℃, 土壤温度增加了0.52, 0.92, 0.96, 1.46和1.76℃, 空气、土壤湿度随温度升高呈下降趋势; 2) 群落盖度和高度在高度增温(T5)下显著降低($P < 0.05$), 物种组成随温度的升高没有显著变化, 但中度增温(T3)下 Margalef 丰富度指数显著高于对照(CK) ($P < 0.05$), T5下 Shannon-Weiner 多样性指数显著低于其他处理 ($P < 0.05$); 3) 地上生物量和总生物量在T5下显著减少 ($P < 0.05$), 生物量向地下分配的比例在T5下最大(71.12%); 4) 空气-土壤温度与物种多样性呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与群落盖度呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 土壤湿度与地上生物量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。[结论] 综上, 短期增温改变了色季拉山高寒草甸植物群落的微水热条件, 适度增温增加物种多样性和生物量积累, 而高度增温导致土壤含水量减少, 引起微气候暖干化, 抑制植物生长及生物量生产。

关键词: 增温; 高寒草甸; 物种多样性; 生产力; 微气候

中图分类号: Q948.5

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0423-10

Effects of gradient warming on plant species diversity and productivity of alpine meadows of the Sygera Mountains

YANG Xiaojun^{1,2,3,4}, SUN Xueting^{1,2,3,4}, HU Xu⁵, LUO Daqing^{1,2,3,4},
ZAXI Ciren¹, WU Honghao¹, QU Xingle^{1,2,3,4*}

(1. Institute of Plateau Ecology, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China; 2. Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Xizang, Nyingchi 860000, China; 3. Key Laboratory of Forest Ecology in Xizang Plateau, Ministry of Education, Nyingchi 860000, China; 4. Nyingchi Ecological Monitoring Station, Nyingchi 860000, China; 5. College of Resources and Environment, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China)

Abstract: [Objective] Investigate the effects of climate warming on the species diversity and productivity of plant communities in alpine meadow ecosystems. [Methods] Using the alpine meadow of the Sygera Mountain as research site, an open-top air chamber

收稿日期: 2024-11-22 录用日期: 2025-03-25

基金项目: 西藏农牧学院青年科研基金(NYQNKY2023-04); 西藏农牧学院研究生创新计划项目(YJS2023-03); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZZK1006); 西藏农牧学院林学博士点(一期)(533325001)

*通信作者: 1318266529@qq.com

引文格式: 杨小菊, 孙雪婷, 胡旭, 等. 梯度增温对色季拉山高寒草甸植物物种多样性与生产力的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 423-432.

Citation: YANG X J, SUN X T, HU X, et al. Effects of gradient warming on plant species diversity and productivity of alpine meadows of the Sygera Mountains[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 423-432. (in Chinese)



(OTC) warming device was employed. Six warming gradients (CK, T1, T2, T3, T4, T5) were randomly set up in a sample plot of 50 m×50 m for one-year experiments, to investigate the microenvironments, the responses of plant community composition, biomass, and species diversity under different warming levels. The microenvironment was continuously and dynamically monitored using temperature and humidity logger records (0–10 cm) and button type temperature and humidity sensors (0–10 cm). Plant community composition was investigated and biomass was collected in August during the peak plant growing season. Aboveground biomass was obtained by manual cutting and mowing, while below ground biomass was collected by root auger drilling at depths of 0–10 cm, >10–20 cm, and >20–30 cm. Roots were separated using an 80-mesh soil sieve, rinsed, and air-dried. Finally, both aboveground and underground samples were dried in an oven at 65 °C to a constant mass, so as to obtain the aboveground and underground biomass. [Results] 1) Under warming treatments, air temperature increased by 1.96, 2.19, 2.26, 2.28 and 2.43 °C, and soil temperature increased by 0.52, 0.92, 0.96, 1.46 and 1.76 °C during the peak growing season (August). Air-soil humidity showed a decreasing trend with increasing temperature, with the largest air humidity reduction under T5 treatment, compared to CK (7.25%), and a significant soil humidity decrease under T4 treatment compared to CK (10.24%). 2) Community cover and height were significantly reduced ($P<0.05$) under intense warming (T5). Although species composition did not change significantly with increasing temperature, the Shannon-Weiner index decreased under T5 treatment compared to CK, while the other warming treatments showed varying degrees of increase. The Margalef richness index under moderate warming (T3) was significantly higher ($P<0.05$) than that under CK, while the Shannon-Weiner index under T5 was significantly lower ($P<0.05$) than that under other treatments. 3) Under the warming treatments, the aboveground biomass and total biomass under T2 were significantly higher ($P<0.05$) than those under T5, reaching 291.28 and 598.08 g/m², respectively. Aboveground biomass and total biomass were significantly reduced ($P<0.05$) under heightened warming, and the proportion of biomass allocated to belowground parts was highest under T5 (71.12%). 4) Air-soil temperature was significantly positively correlated with species diversity ($P<0.05$), and strongly significantly negatively correlated with community coverage degree ($P<0.01$). Soil moisture was significantly negatively correlated with aboveground biomass ($P<0.05$), which may be due to the high degree of warming forcing the soil water content to decrease, inhibiting plant growth and leading to a decrease in plant community cover, reducing aboveground biomass and total biomass. [Conclusion] A one-year warming experiment in the alpine meadow of Sygera Mountain revealed that warming in the peak growing season (August) led to a small increase in air-soil temperature, a large decrease in surface soil moisture, and a warm drying of soil microenvironment. The number of species was higher under the warming treatments compared to CK, but the community height and coverage degree showed a decreasing trend. Among different warming treatments, species diversity of the T5 treatment was more sensitive to the response than that of T1–T3, suppressing the accumulation of aboveground biomass. Except for the T3 treatment, all warming treatments promoted belowground biomass production, with T5 exhibiting the highest belowground biomass allocation. In conclusion, short-term warming changed the microhydrothermal conditions of alpine meadow plant communities in the Sygera Mountain. Moderate warming (T1–T3) enhanced species diversity and biomass accumulation, while intense warming (T5) led to a decrease in soil water content, which inhibited plant growth and biomass production.

Keywords: warming; alpine meadow; species diversity; productivity; microclimate

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告指出,2011—2020年全球陆地地表温度比工业化前升高了1.59 °C,预计未来40年升温幅度将超过1.5 °C^[1].已有研究发现高海拔地区的升温速度和幅度显著高于同纬度地区^[2-3].近60年来我国青藏高原区域年平均气温每10年上升0.35 °C,是全球平均增温速率的2倍^[4-5].青藏高原作为气候变暖敏感的生态脆弱区,是研究高寒草地生态系统对气候变化的响应模式和适应机制的理想场所^[6-7].

高寒草甸是青藏高原主要的植被类型之一,主要生存在恶劣、湿润、寒冷的环境条件下,以耐寒性的多年生草本植物为主,其对气候变化最敏感^[8].因此,气

候变化可能会对高寒草甸的群落结构和生产力产生不可逆的影响.许多学者通过研究模拟气候变暖对高寒草甸植被特征及生产力的影响,发现植物群落中不同物种重要值、高度和盖度发生改变^[9-11],引起群落优势物种丰富度和稳定性发生变化,最终影响群落结构和功能的变化,但群落物种组成没有发生显著变化^[12].增温对群落生物量影响存在差异,Gugerli等^[13]和郝爱华等^[14]研究发现适度增温和短期增温可促进地上生物量积累,促进植物的生长发育;但一些研究结果与之相反^[15-16].此外,有研究表明大幅度增温和长时间增温导致高寒植被群落生物量和物种多样性下降^[17-19].可见,由于增温幅度和增温时间的不同,植物群落结构、物种多样性和生产力受到的影响

也不同,从侧面反映出高寒草甸植物群落结构、物种多样性和生物量之间的关系对气候变化的响应存在不确定性^[20-21].因此,探究高寒草甸对全球气候变暖的响应及环境变化的适应机制有着重要科学价值与实践指导意义.

近年来,关于青藏高原的藏北地区^[12]、川西北地区^[17]均有不同梯度增温实验研究,但由于区域差异和生态系统的复杂性,这些研究结果难以直接说明梯度增温对青藏高原东南部植物物种多样性与生产力的影响.因此,本研究选取位于青藏高原东南部的色季拉山高寒草甸作为研究对象,采用开顶式气室(open top chamber,OTC)方法,在色季拉山高寒草甸随机设计6个不同的增温梯度,探讨高寒草甸植物群落结构、物种多样性和生物量对不同增温幅度的响应,以期青藏高原高寒草甸应对全球气候变化提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验样地位于藏东南林芝地区色季拉山东坡高寒草甸,地理位置为 $94^{\circ}41'28.14''$ E, $29^{\circ}37'15.61''$ N,

坡度 32° ,海拔4 529 m.该区域气候属于湿润气候和半湿润气候过渡区,冬春少雨,夏秋多雨,年平均降水量1 130 mm,主要集中在6—9月;年均气温 -0.73°C ,最暖月(7月)平均气温 9.8°C ,最冷月(1月)平均气温 -13.8°C ^[22].东坡草甸群落以多年生草本为主,其中圆穗蓼(*Bistorta macrophylla*)为优势种.

1.2 实验设计

以色季拉山东坡高寒草甸为研究对象,于2023年8月1日建立一个 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的研究样地,四周搭建铁丝网围栏以防动物干扰.如图1所示,模拟增温采用OTC方法,增温气室由2块扇形透明聚氯乙烯耐力板拼接成圆形台体[图1(a)],耐力板厚1 mm,透光率达95%以上;增温装置采用随机区组设计在样地内开展[图1(b)],不同的增温装置以及对照样地间的间隔保持在2 m以上.通过保持OTC开底面积、开顶面积不变而改变高度的设计实现梯度增温.试验共设置6个处理,包括对照(CK)和增温1~5(T1~T5,增温幅度由低到高),每个处理3个重复,共计18个小区,不同梯度增温装置参数详见表1.用4个长10 cm铁钉打进样地内9 cm,并用铁丝在4个铁钉上围成 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的草地样方作为CK样地.由于色季拉山东坡风速较大,可能会影响增温装置,在每个增温装置

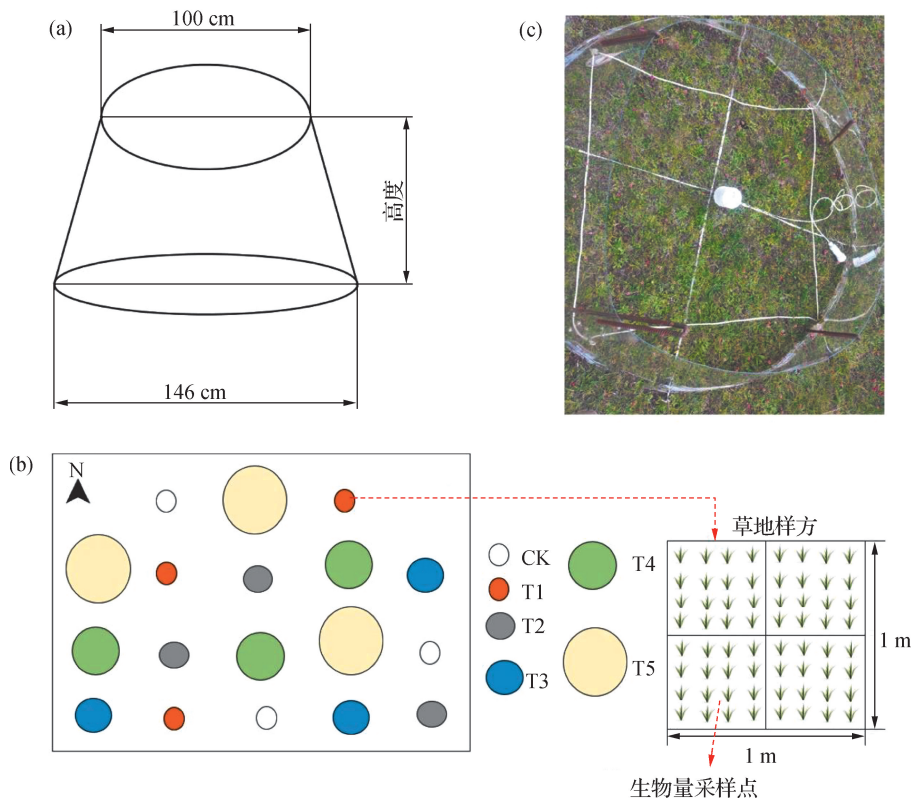


图1 OTC增温示意图(a)、试验区设计(b)和增温采样照片(c)

Fig. 1 Schematic diagram of OTC warming (a), design of test area (b) and photograph of warming samples (c)

内部 4 个方向均打入相对应高度的 4 个钢钎进行固定.

表 1 不同 OTC 增温梯度装置设计

Tab. 1 Design of different OTC warming gradient devices

| 增温处理 | 开顶直径/cm | 高度/cm | 开底直径/cm |
|------|---------|-------|---------|
| T1 | 100 | 40 | 146 |
| T2 | 100 | 60 | 146 |
| T3 | 100 | 80 | 146 |
| T4 | 100 | 100 | 146 |
| T5 | 100 | 120 | 146 |

1.3 采样与测定

模拟增温 1 年后,于 2024 年 8 月 13 日高寒草甸植物生长旺盛期进行外业调查及采样. 为避免 OTC 增温出现的边缘效应问题,用 1 m×1 m 的样方框放入 OTC 中心底部进行植被调查和生物量取样,CK 样地则在设置好的样方内进行样品采集和测定[图 1(c)]. 记录每个样方内物种数目及其名称,同时记录每个物种的个体数、频度、盖度. 采用收获法将每个样方内所调查的植物全部齐地面剪切,装入信封,用于测定群落的地上生物量. 在每个样方用直径 70 mm 的根钻分别钻取 0~10 cm, >10~20 cm 和 >20~30 cm 深度的土柱,每个样方每层各取 3 钻;取样后装入自封袋中带回实验室,用 80 目土壤筛在流动的清水中将根系与土壤分离冲洗;最后,将植物及其根系放置在 65 °C 烘箱内烘干至恒量,用精度 0.01 g 的电子天平称量,获得地上、地下生物量.

通过相对高度(H_r)、相对盖度(C_r)及相对多度(A_r)计算出物种的重要值(I),进而计算出物种多样性指数,包括 Margalef 丰富度指数(F), Shannon-Weiner 多样性指数(H), Simpson 优势度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(E_H),计算公式如下^[23]:

$$I = \frac{H_r + C_r + A_r}{3} \times 100, \quad (1)$$

$$F = \frac{S-1}{\ln N}, \quad (2)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i, \quad (3)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N}\right)^2, \quad (4)$$

$$E_H = \frac{H}{\ln S}, \quad (5)$$

式中, S 是样方中的物种数量, N 是样方中所有物种的个体总数, P_i 是样方中物种 i 的重要值, n_i 是物种 i

的个体数.

地下生物量占比(R_B)的计算公式如下:

$$R_B = \frac{M_B}{M_A + M_B}, \quad (6)$$

式中, M_A 为地上生物量, M_B 为地下(0~30 cm)生物量.

1.4 微气候监测

为监测 OTC 的增温效应,使用 HOBO Pro v2 温湿度记录仪记录 18 个处理的 0~10 cm(表层)空气温湿度. 在实验样地内共安装 3 个 DJ-6095 数据采集器,用来测定 0~10 cm(表层)的土壤温湿度. 温湿度记录仪和数据采集器每隔 15 min 自动记录 1 次空气、土壤温湿度数据,每月下载数据并进行分析.

1.5 数据处理

使用 Microsoft Office Excel 2016 软件进行原始数据整理;采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件对空气-土壤温湿度,群落盖度、高度、物种多样性及生物量进行单因素方差分析(one-way ANOVA),比较不同增温梯度形成的 6 个处理之间的差异;采用 R4.4.1 软件中“corrplot”包绘制相关性热图;其余统计图均采用 Origin2021 软件绘制.

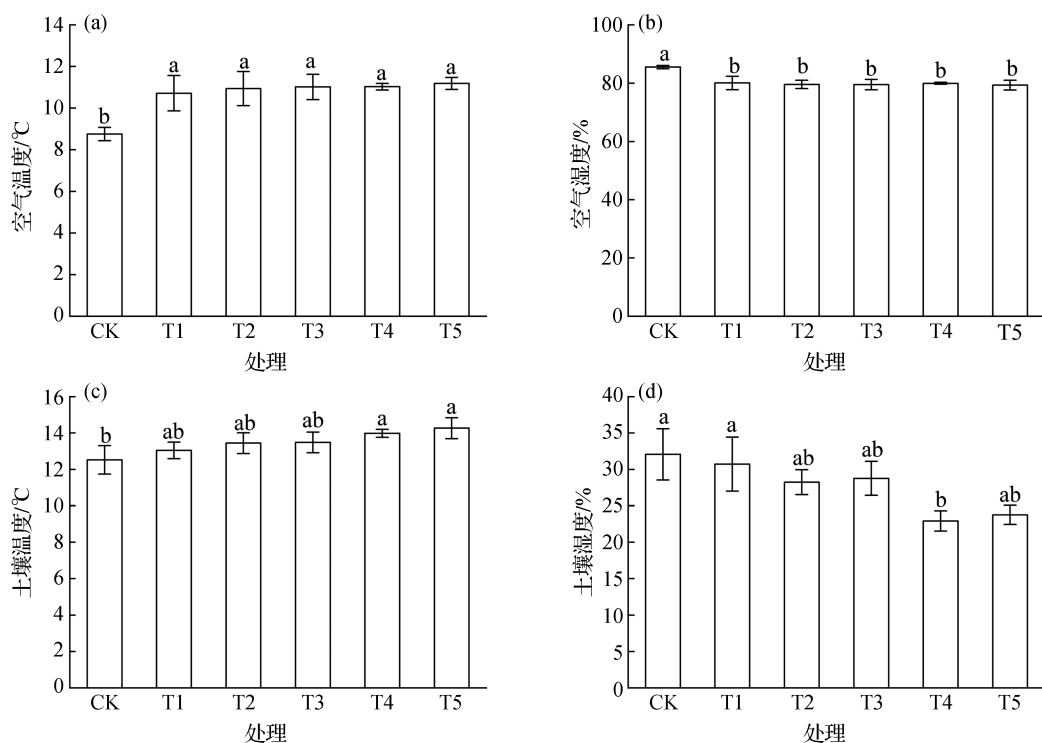
2 结果与分析

2.1 增温对空气和表层土壤温湿度的影响

对生长季旺期(8月)空气和表层土壤温湿度进行单因素方差分析. 如图 2 所示:增温处理下空气温度显著高于 CK($P < 0.05$),与 CK 相比,T1~T5 下分别增加了 1.96, 2.19, 2.26, 2.28 和 2.43 °C;空气湿度在增温处理下显著低于 CK($P < 0.05$),且 T5 下减幅最大,与 CK 相比减少了 7.25%. 表层土壤温度在 T4 和 T5 下显著高于 CK($P < 0.05$),分别增加了 1.46 和 1.76 °C;增温处理下表层土壤湿度与 CK 相比,均有不同程度减少,但仅 T4 下显著低于 CK($P < 0.05$),减少了 10.24%.

2.2 增温对群落结构和物种组成的影响

如表 2 所示:增温处理下只有少数物种出现或消失,群落物种组成变化较小;T3 下共出现 19 个物种,较 CK 和 T1 下多 3 个物种,较 T2、T4 和 T5 下多 2 个物种. 圆穗蓼、狮牙草状风毛菊、大花嵩草、尼泊尔大丁草和昌都点地梅的重要值较 CK 总体均有不同程度的降低,而高山唐松草、大萼蓝钟花和硬叶风毛菊的重要值则较 CK 总体均有不同程度的升高.



柱形上方小写字母不同表示处理组间存在显著差异($P < 0.05$),下同。

图 2 增温处理下 2024 年 8 月表层空气、土壤温湿度的变化

Fig. 2 Changes in air, superficial soil temperature and humidity in August 2024 under warming treatments

表 2 增温处理下物种组成及重要值的变化

Tab. 2 Changes in species composition and importance values under warming treatments

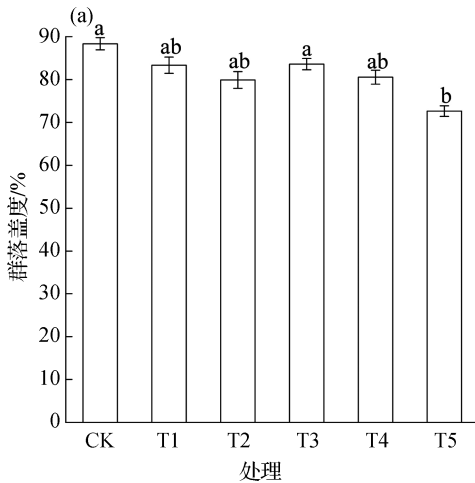
| 物种名 | 拉丁名 | 处理 | | | | | |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | CK | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 |
| 圆穗蓼 | <i>Bistorta macrophylla</i> | 31.34 | 23.57 | 27.53 | 27.88 | 23.81 | 30.64 |
| 丛生萎叶委陵菜 | <i>Potentilla coriandriifolia</i> var. <i>dumosa</i> | 6.28 | 8.96 | 5.79 | 7.90 | 6.57 | 5.41 |
| 高山嵩草 | <i>Carex parvula</i> | 6.90 | 9.72 | 7.87 | 4.89 | 5.42 | 6.25 |
| 狮牙草状风毛菊 | <i>Saussurea leontodontoides</i> | 4.62 | 4.63 | 3.21 | 3.82 | 3.83 | 4.53 |
| 高山唐松草 | <i>Thalictrum alpinum</i> | 4.43 | 5.73 | 4.87 | 8.93 | 7.39 | 8.48 |
| 倒锥花龙胆 | <i>Gentiana obconica</i> | 1.35 | 2.02 | 1.52 | 1.69 | 2.32 | 0.30 |
| 大萼蓝钟花 | <i>Cyananthus macrocalyx</i> | 1.31 | 2.22 | 2.71 | 3.11 | 2.69 | 2.31 |
| 硬叶风毛菊 | <i>Saussurea firma</i> | 0.97 | 6.90 | 12.74 | 4.74 | 10.77 | 12.52 |
| 大花嵩草 | <i>C. nudicarpa</i> | 10.73 | 6.01 | 11.86 | 5.68 | 9.01 | 8.01 |
| 阿洼早熟禾 | <i>Poa araratica</i> | 9.95 | 6.93 | 6.17 | 8.33 | — | — |
| 单蕊拂子茅 | <i>Calamagrostis emodensis</i> | 8.12 | 9.71 | 6.03 | 7.58 | 10.60 | 9.20 |
| 尼泊尔大丁草 | <i>Leibnitzia nepalensis</i> | 9.56 | 9.23 | 3.99 | 5.97 | 7.96 | 4.68 |
| 昌都点地梅 | <i>Androsace bisulca</i> | 1.96 | 1.54 | 1.72 | 3.41 | 1.61 | 0.81 |
| 矮滇芎 | <i>Physospermopsis nana</i> | 0.75 | 1.02 | — | — | — | — |
| 团花马先蒿 | <i>Pedicularis sphaerantha</i> | 0.99 | 1.06 | 0.73 | — | 2.01 | 1.45 |
| 灰毛蓝钟花 | <i>Cyananthus incanus</i> | — | 0.75 | 0.86 | 0.80 | — | — |
| 无舌小黄菊 | <i>Tanacetum tatsienense</i> var. <i>tanacetopsis</i> | — | — | 1.60 | 0.99 | 1.26 | 1.40 |

续表

| 物种名 | 拉丁名 | 处理 | | | | | |
|-------|---|------|----|------|------|------|------|
| | | CK | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 |
| 钉柱委陵菜 | <i>P. saundersiana</i> | — | — | 0.81 | — | — | — |
| 大花刺续断 | <i>Acanthocalyx nepalensis</i> subsp. <i>delavayi</i> | — | — | — | 1.16 | 1.60 | 0.77 |
| 垫状点地梅 | <i>Androsace tapete</i> | — | — | — | 0.82 | — | — |
| 尼泊尔香青 | <i>Anaphalis nepalensis</i> | — | — | — | 1.31 | 1.43 | — |
| 西藏糙苏 | <i>Phlomooides tibetica</i> | 0.74 | — | — | 1.00 | 1.72 | 1.70 |
| 手参 | <i>Gymmadenia conopsea</i> | — | — | — | — | — | 1.53 |

注:表中“—”表示没有观测到该物种.

如图 3 所示:增温处理下群落平均盖度与 CK 相比总体呈逐渐降低趋势,其中 CK 和 T5 之间有显著性差异($P < 0.05$),CK 的群落平均盖度最高(88.35%),



T5 与之相比减少了 17.77%. 不同增温处理下群落平均高度存在一定差异,其中 T3 和 T5 之间有显著差异($P < 0.05$),而与 CK 均无显著差异($P > 0.05$).

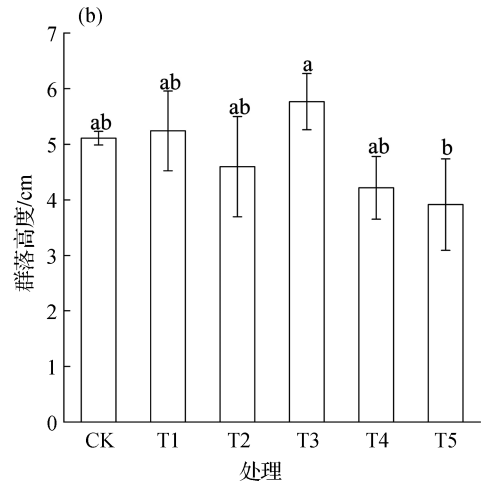


图 3 增温处理下群落盖度(a)和高度(b)的变化

Fig. 3 Changes in coverage degree (a) and height (b) of the community under warming treatments

2.3 增温对物种多样性的影响

如图 4 所示:增温处理下,T3 下的 Margalef 丰富度指数与 CK 和 T5 之间存在显著差异($P < 0.05$),与 CK 相比增加了 0.62;T5 下的 Shannon-Weiner 多样性指数显著低于其他处理($P < 0.05$);T4 与 T5 下的 Simpson 优势度指数存在显著差异($P < 0.05$);Pielou 均匀度指数则均无显著差异($P > 0.05$).

2.4 增温对生产力的影响

如表 3 所示:增温处理下,T2 下的地上生物量和总生物量显著高于 T5($P < 0.05$),分别为 291.28 和 598.08 g/m^2 ;T2、T3、T4 下的地上生物量和总生物量高于 CK,T1 和 T5 下的则低于 CK,但差异均不显著($P > 0.05$).不同增温处理下的地下生物量均高于 CK,但均无显著差异($P > 0.05$),且 T2 下的平均地下

生物量最高,比 CK 增加了 21.75%;不同增温处理下地下生物量占比与 CK 相比均无显著差异($P < 0.05$),在 T5 下平均地下生物量占比最大,达 71.12%.

2.5 物种多样性、生物量及微气候的相关性分析

如图 5 所示:物种多样性指数与地上生物量呈显著正相关关系($P < 0.05$),而与地下生物量和总生物量无显著相关关系($P > 0.05$);物种多样性指数与空气温度和表层土壤温度呈显著正相关关系($P < 0.05$),物种多样性指数与空气湿度呈显著负相关关系($P < 0.05$),而与表层土壤湿度呈极显著负相关关系($P < 0.01$).群落盖度与空气温度和表层土壤温度呈极显著负相关关系($P < 0.01$),与空气湿度呈显著正相关关系($P < 0.05$).表层土壤湿度与地上生物量呈显著负相关关系($P < 0.05$).

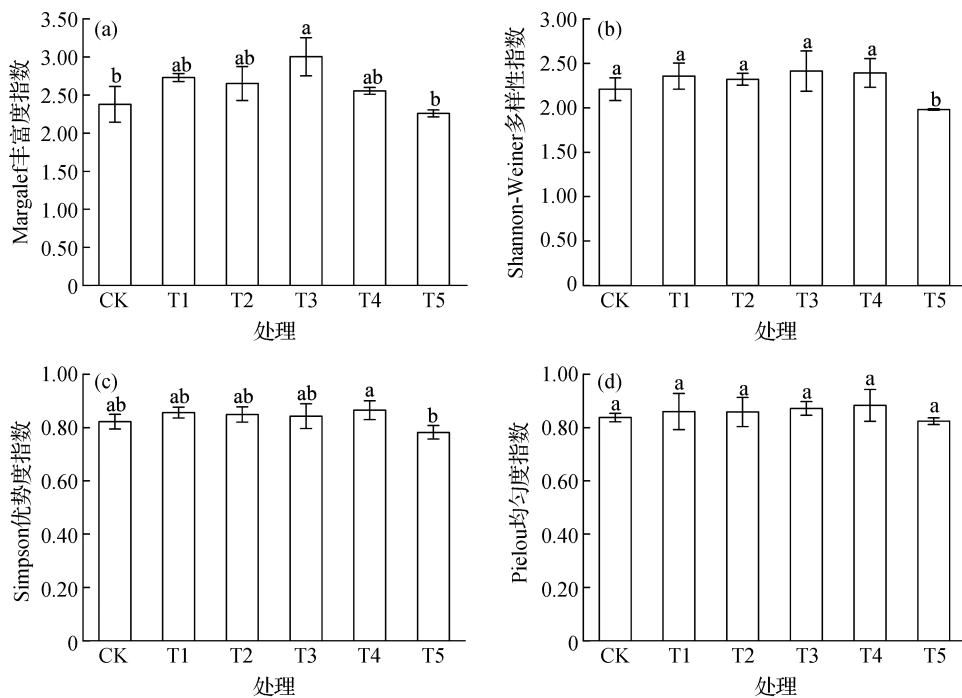


图 4 增温处理下物种多样性指数变化

Fig. 4 Changes in species diversity indices under warming treatments

表 3 增温处理下生物量的变化

Tab. 3 Changes in biomass under warming treatments

| 处理 | 地上生物量/(g · m ⁻²) | 地下生物量/(g · m ⁻²) | 总生物量/(g · m ⁻²) | 地下生物量占比/% |
|----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| CK | 170.22 ± 32.22 ^{ab} | 252.00 ± 84.63 | 422.22 ± 96.84 ^{ab} | 59.18 ± 3.67 |
| T1 | 136.08 ± 48.59 ^{ab} | 259.64 ± 97.55 | 395.64 ± 87.15 ^{ab} | 54.51 ± 4.60 |
| T2 | 291.28 ± 86.75 ^a | 306.80 ± 4.41 | 598.08 ± 97.17 ^a | 54.77 ± 10.15 |
| T3 | 200.40 ± 54.98 ^{ab} | 238.32 ± 59.06 | 438.72 ± 32.92 ^{ab} | 54.98 ± 8.59 |
| T4 | 216.14 ± 34.70 ^{ab} | 251.08 ± 61.60 | 467.22 ± 74.31 ^{ab} | 53.52 ± 2.15 |
| T5 | 101.04 ± 10.47 ^b | 253.52 ± 52.84 | 354.56 ± 42.37 ^b | 71.12 ± 6.40 |

注:同列数据后上标小写字母不同表示处理组间存在显著差异($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 空气和表层土壤温湿度对增温的响应

OTC作为一种最简单且成本较低的野外实验增温装置,普遍被学者运用于青藏高原偏远且无电力发展的地区,以此探究气候变暖对青藏高原高寒草地生态系统的作用机制^[24],且其形状和尺寸的不同会对增温幅度和效果产生差异^[25-26]。如吕广一等^[27]研究发现增温装置开口面积一定时,高度越高,OTC内温度越高。本研究发现采用不同高度的OTC增温装置导致色季拉山高寒草甸生长季旺期(8月)空气温度和表层

土壤温度呈小幅上升,与CK相比,T5下空气温度和表层土壤温度分别增加了2.43和1.76℃。相应的空气湿度呈小幅下降趋势,但T4和T5下较CK表层土壤湿度大幅下降,与Wen等^[28]研究结果一致,可能是由于温度升高,植被蒸腾作用增强,加速表层土壤水分蒸发,导致土壤湿度下降。

3.2 群落物种组成和物种多样性对增温的响应

全球气候变暖会对物种多样性产生影响。大量研究表明,短期增温会促进物种多样性的增加,但这种响应并不敏感^[29-30]。本研究发现,色季拉山高寒草甸植物群落的物种组成在不同增温下无显著变化,但群落中各物

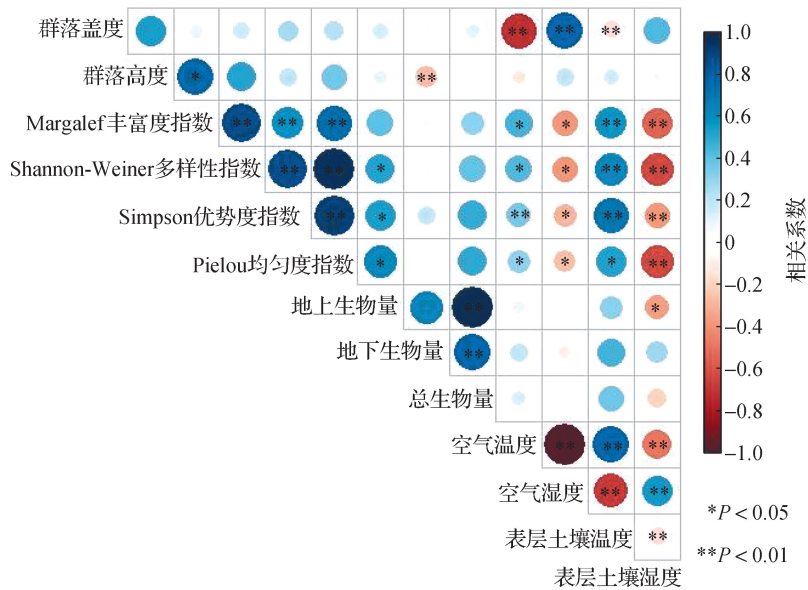


图 5 群落物种多样性指数、生物量、微环境指标的相关性分析

Fig. 5 Correlation analyses of community species diversity indices, biomass and microenvironment indicators

种和植物功能群的地位发生了变化,如增温处理下,优势种圆穗蓼及莎草科、禾本科植物与 CK 相比重要值减小,但一些多年生杂草重要值增加,这与赵艳艳^[31]和 Zhang 等^[32]的研究结果一致.也有研究表明增温对植物群落的物种多样性有正效应^[33]和负效应^[30]两类,本研究中物种多样性指数在不同增温下呈小幅上升再下降,T3 下增幅最大,T5 下物种多样性指数减幅最大.这可能是由于中度增温使低温胁迫得到缓解,为植物提供了适宜的环境,促使高寒草甸植物的物种多样性增加^[34];而高度增温改变了植物间的竞争平衡能力,导致优势种、莎草科和禾本科衰退,其余多年生杂草扩张,进而降低了物种多样性^[35].持续长时间高度增温可能导致群落中的物种组成趋于单一化^[36].

3.3 生物量对增温的响应

研究表明,短期增温可能通过改善微环境促进高寒草甸植物的水分和养分吸收,增加生物量积累^[37],但也可能因加剧呼吸作用和干旱胁迫而降低干物质积累和生产力^[26,38].因此,在高寒草甸生态系统中,增温对植物的生物量积累的影响有促进或抑制作用,且随着增温时间、方法和幅度的不同产生影响不同.本研究中,T2 下的地上生物量和总生物量显著高于 T5,T2、T3、T4 下均高于 CK,而 T1 和 T5 下低于 CK,但变化均不显著,而高度增温(T5)下生物量达到最低,与宗宁等^[39]和 Quan 等^[40]的研究结果一致.随着温度升高,OTC 内累积的热效应引起土壤水分减少,导致干旱胁迫发生,植物地上生物量积累减少,尤其在高度

度增温处理下植物生物量积累减少更为敏感.马丽等^[36]研究发现在高度增温(空气温度 1.2 °C、地表土壤温度 1.88 °C)下,地上生物量比 CK 减少了 40.70%.本研究发现 T5 下(101.04 g/m²)地上生物量比 CK (170.22 g/m²)减少了 40.64%.可见过度增温使 OTC 内土壤水分流失加快,干旱和高温胁迫加剧,导致高寒草甸植物群落为适应微环境变化而降低生产力水平^[41].此外,本研究发现生物量向地下分配比例随增温幅度的变化而不同,其中 T5 下的地下生物量占比最高(71.12%),这与地上生物量在高度增温下达到最小的结论一致,表明植物将更多资源分配给地下部分以应对高温干旱胁迫^[42].

3.4 物种多样性、生物量及微环境因素的相关性

全球气候变暖背景下,温度和水分是影响植物生长及生物量积累的重要因素^[43].本研究发现,物种多样性与地上生物量、空气温度、表层土壤温度呈显著正相关关系,而地上生物量与表层土壤湿度呈显著负相关关系,与空气湿度相关性不显著,这与 Dai 等^[44]和刘美等^[45]研究结果相似.他们的研究发现,植物在增温条件下土壤含水量与 CK 相比仅降低了 2.7%,致使土壤水分对植被生长的制约较弱,植物群落的生长主要受空气温度和表层土壤温度的影响,适度增温可以促进植被初级生产;但本研究还发现群落盖度与空气温度、表层土壤温度呈极显著负相关关系,与空气湿度呈极显著正相关关系,表明增温升高迫使土壤含水量减少,抑制植物生长,导致植物群落盖度减少,

地上生物量和总生物量减少。但本研究中 T2 和 T3 下生物量增加, T5 下则与之相反, 说明植物对温度的响应存在阈值, 适度增温对植物生长有积极影响, 而过度增温产生抑制作用, 也从侧面反映了植物对增温的响应具有非线性特征。

4 结 论

本研究在色季拉山高寒草甸进行了 1 年的增温实验, 发现生长旺季(8 月)增温下空气-土壤温度呈小幅上升, 表层土壤湿度呈大幅下降, 土壤微环境暖干化。增温处理下物种数高于 CK, 但群落高度和盖度呈下降趋势; T3 下 Margalef 丰富度指数高于其他处理, T5 下物种多样性低于其他处理; T5 下地上生物量积累受抑制; T1~T4 下生物量向地下分配量占比低于 CK, T5 下生物量向地下分配最高。由此可知: 随着温度的升高, 色季拉山高寒草甸土壤含水量减少, 适度增温会增加物种多样性和促进生物量积累; 高度增温则导致土壤含水量减少而引起微气候暖干化, 抑制植物生长及生物量生产。本研究结果可为未来气候变化下青藏高原东南部高寒草甸生态系统的响应机制和适应性管理提供科学依据。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2023. Ar6 synthesis report: longer report. Inter-governmental panel on climate change[R]. Geneva, 2023.

[2] PEPIN N, BRADLEY R S, DIAZ H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 424-430.

[3] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004, 427(6970): 145-148.

[4] 王琪, 郑佳华, 赵萌莉, 等. 增温对荒漠草原不同退化程度草地恢复初期影响的研究[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1077-1085.

[5] KUMAR R, SHARMA A K. A review of atmospheric changes amidst COVID19 pandemic in the light of IPCC Special Report 2018 and COP24 conference [J]. Uttar Pradesh Journal of Zoology, 2020, 41(14): 1-8.

[6] WANG Z R, WANG C, DONG X H, et al. Relation between species richness and biomass in alpine meadow in the upper reaches of the Shule River under the effects of environmental factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38: 1710-1717.

[7] 尹华军, 赖挺, 程新颖, 等. 增温对川西亚高山针叶林内不

同光环境下红桦和岷江冷杉幼苗生长和生理的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1072-1083.

- [8] YAO T D, THOMPSON L G, MOSBRUGGER V, et al. Third pole environment (TPE)[J]. Environmental Development, 2012, 3: 52-64.
- [9] XU M H, LIU M, XUE X, et al. Warming effects on plant biomass allocation and correlations with the soil environment in an alpine meadow, China [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(5): 773-786.
- [10] WANG S P, DUAN J C, XU G P, et al. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow [J]. Ecology, 2012, 93(11): 2365-2376.
- [11] 李晓丽, 徐满厚, 孟万忠, 等. 模拟增温对云顶山亚高山草甸水热因子及群落结构的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6885-6896.
- [12] 姜炎彬, 范苗, 张扬建. 短期增温对藏北高寒草甸植物群落特征的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 616-622.
- [13] GUGERLI F, BAUERT M R. Growth and reproduction of *Polygonum viviparum* show weak responses to experimentally increased temperature at a Swiss Alpine site [J]. Botanica Helvetica, 2001, 111: 169-180.
- [14] 郝爱华, 罗正明, 田志杰, 等. 模拟增温对五台山亚高山草甸植物群落与土壤性质的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3793-3801.
- [15] WANG Q, ZHANG Z H, DU R, 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.
- [16] 朱远忠, 黄文达, 何远政, 等. 短期增温和降水减少对半干旱沙质草地群落特征的影响[J]. 西北植物学报, 2025, 44(3): 470-478.
- [17] 赵文学, 薛国敏, 吴忌, 等. 模拟增温对川西北高寒草甸植物群落结构、生产力及土壤理化特征的影响[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 125-134.
- [18] 于秀立, 降瑞娇, 徐满厚. 黄土高原东部山地林下不同植物功能群地上生物量对模拟增温的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(10): 133-143.
- [19] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau [J]. Ecology Letters, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [20] 张相锋, 彭阿辉, 宋凤仙, 等. 基于 OTCs 模拟增温方式探讨气候变暖对青藏高原草地生态系统的影响[J]. 广西植物, 2018, 38(12): 1675-1684.
- [21] 马丽, 徐满厚, 翟大彤, 等. 高寒草甸植被-土壤系统对气候变暖响应的研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1708-1717.

- [22] 关丽雪,王伟,方江平. 色季拉山高寒草甸区大气氮沉降年内动态变化[J]. 高原农业, 2023, 7(6): 596-603.
- [23] 周宸宇,杨晓渊,邵新庆,等. 不同退化程度高寒草甸植物物种多样性与生态系统多功能性关系[J]. 草地学报, 2022, 30(12): 3410-3422.
- [24] 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.
- [25] 李军祥,张扬建,朱军涛,等. 藏北高山嵩草草甸群落特征及生产力对模拟增温幅度的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 474-485.
- [26] 刘伟,王长庭,赵建中,等. 矮嵩草草甸植物群落数量特征对模拟增温的响应[J]. 西北植物学报, 2010, 30(5): 995-1003.
- [27] 吕广一,贺梦婷,李宏宇,等. 荒漠草原植物群落特征及土壤碳氮含量对增温和增水的响应[J]. 中国草地学报, 2024, 46(3): 60-69.
- [28] WEN J, QIN R M, ZHANG S X, et al. Effects of long-term warming on the aboveground biomass and species diversity in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(2): 252-266.
- [29] GANJURJAV H, GAO Q Z, 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.
- [30] 徐满厚,刘敏,薛娟,等. 增温、刈割对高寒草甸植物多样性和地下生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2432-2439.
- [31] 赵艳艳. 高寒草甸典型植物对增温和模拟放牧的生理生态响应的研究[D]. 北京:中国科学院西北高原生物研究所, 2024.
- [32] ZHANG C H, WILLIS C G, KLEIN J A, et al. Recovery of plant species diversity during long-term experimental warming of a species-rich alpine meadow community on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Biological Conservation*, 2017, 213: 218-224.
- [33] ZHANG Y Q, WELKER J M. Tibetan alpine tundra responses to simulated changes in climate: aboveground biomass and community responses[J]. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 1996, 28(2): 203-209.
- [34] 石昊,杨彩红,夏菲,等. 短期增温对修复过程中藏北高寒退化草地生产力的初期影响[J]. 草业学报, 2024, 33(11): 30-45.
- [35] ZHU J T, ZHANG Y J, YANG X, et al. Warming alters plant phylogenetic and functional community structure [J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(6): 2406-2415.
- [36] 马丽,张骞,张中华,等. 梯度增温对高寒草甸物种多样性和生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1395-1402.
- [37] ALI A, MOLAU U, BAI Y, et al. Diversity-productivity dependent resistance of an alpine plant community to different climate change scenarios [J]. *Ecological Research*, 2016, 31(6): 935-945.
- [38] MA Z Y, LIU H Y, MI Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15378.
- [39] 宗宁,段呈,耿守保,等. 增温施氮对高寒草甸生产力及生物量分配的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 59-67.
- [40] QUAN Q, ZHANG F Y, JIANG L, et al. High-level rather than low-level warming destabilizes plant community biomass production[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 109(4): 1607-1617.
- [41] LOVETT-DOUST J. Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13(2): 294.
- [42] 刘倬彤,崔媛媛,白柳,等. 模拟降水变化对荒漠草原地上、地下生物量及其分配比例的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(6): 1632-1639.
- [43] ZHANG J, ZUO X A, ZHAO X Y, et al. Effects of rainfall manipulation and nitrogen addition on plant biomass allocation in a semiarid sandy grassland [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9026.
- [44] DAI L C, GUO X W, DU Y G, et al. Thirteen-year variation in biomass allocation under climate change in an alpine Kobresia meadow, northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Grass and Forage Science*, 2019, 74(3): 476-485.
- [45] 刘美,马志良. 青藏高原东部高寒灌丛生物量分配对模拟增温的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1421-1430.

(责任编辑:徐婷婷)