



•研究报告•

# 增温对东北温带次生林草本群落季节动态的影响

陈哲涵<sup>1,2</sup>, 尹进<sup>2</sup>, 叶吉<sup>2,5</sup>, 刘冬伟<sup>2,3,4,5</sup>, 毛子昆<sup>2,5</sup>, 房帅<sup>2,5</sup>, 藺菲<sup>2,5\*</sup>, 王绪高<sup>2,5</sup>

1. 辽宁大学生命科学院, 沈阳 110036; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; 3. 中国科学院清原森林生态系统观测研究站, 沈阳 110016; 4. 辽宁清原森林生态系统国家野外科学观测研究站, 沈阳 110016; 5. 辽宁省陆地生态系统碳中和重点实验室, 沈阳 110016

**摘要:** 主要由人类活动造成的气候变暖导致陆地植物多样性和群落结构发生改变, 森林草本层作为森林生态系统植物多样性的主要贡献者, 对气候变暖的响应十分显著, 而目前仍缺乏相关研究。本研究基于中国科学院清原森林生态系统观测研究站搭建的红外线模拟增温平台, 分析了表层土壤(0–10 cm)增温2℃条件下林下草本层群落在生长季受到的影响。结果表明: 增温第4–5年间, 对照和增温处理下的草本植物多样性无显著差异, 但增温处理下各季节的多样性指数均较对照处理呈现减小趋势; 对照和增温处理下的草本层群落总体盖度和多度无显著差异, 但群落组成及结构发生显著改变。不同优势种对增温的响应趋势不同。年优势种中, 山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)的响应最显著, 其重要值、多度和盖度在各季节均显著增加, 而龙头草(*Meehanian henryi*)在各季节显著减少, 白花碎米荠(*Cardamine leucantha*)和荷青花(*Hylomecon japonica*)的响应不显著; 季节优势种中, 春季优势种单花韭(*Allium monanthum*)重要值显著降低, 五福花(*Adoxa moschatellina*)重要值显著增加, 夏季优势种珠芽艾麻(*Laportea bulbifera*)无显著响应。综上, 增温对该区森林草本植物多样性无明显影响, 但可能导致某些物种物候期提前, 改变群落内物种对光等资源的竞争关系, 或者影响某些物种的功能性状, 显著改变不同季节部分优势种的重要值、多度和盖度, 导致草本层群落组成和结构发生变化。

**关键词:** 红外线增温; 群落结构; 物种组成; 优势种; 季节动态

陈哲涵, 尹进, 叶吉, 刘冬伟, 毛子昆, 房帅, 藺菲, 王绪高 (2023) 增温对东北温带次生林草本群落季节动态的影响. 生物多样性, 31, 23059. doi: 10.17520/biods.2023059.

Chen ZH, Yin J, Ye J, Liu DW, Mao ZK, Fang S, Lin F, Wang XG (2023) Effects of simulated warming on seasonal dynamics of herbaceous diversity in temperate secondary forests in Northeast China. Biodiversity Science, 31, 23059. doi: 10.17520/biods.2023059.

## Effects of simulated warming on seasonal dynamics of herbaceous diversity in temperate secondary forests in Northeast China

Zhehan Chen<sup>1,2</sup>, Jin Yin<sup>2</sup>, Ji Ye<sup>2,5</sup>, Dongwei Liu<sup>2,3,4,5</sup>, Zikun Mao<sup>2,5</sup>, Shuai Fang<sup>2,5</sup>, Fei Lin<sup>2,5\*</sup>, Xugao Wang<sup>2,5</sup>

1 School of Life Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036

2 CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences (CAS), Shenyang 110016

3 Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

4 Qingyuan Forest, National Observation and Research Station, Liaoning Province, Shenyang 110016

5 Liaoning Province Key Laboratory of Terrestrial Ecosystem Carbon Neutrality, Shenyang 110016

### ABSTRACT

**Aims:** Climate warming mainly caused by human activities has led to changes in terrestrial plant diversity and community structure. Forest herb layer, as the main contributor of plant diversity in forest ecosystem, has a significant response to climate warming, however, relevant studies are still lacking. This study explores the changes of herbaceous community in temperate forests in the context of climate warming, including diversity, community structure, and species composition, in order to provide scientific basis for the response of forest herbaceous layer to climate warming.

收稿日期: 2023-02-21; 接受日期: 2023-03-28

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF130050103)和国家自然科学基金(31670632; 32001121)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: linfei@iae.ac.cn

**Method:** This experiment was carried out in 2021 and 2022 on a simulated warming platform built by Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences, which used an infrared ray to warm the surface soil by 2°C during the growing season.

**Results:** The results showed that there was no significant change in herbaceous diversity under warming conditions, but the community diversity index of each season showed a decreasing trend. After warming, the overall coverage and abundance of the herbaceous community did not change significantly, but the composition and structure of the herbaceous community changed significantly. Specifically, the response trend of different dominant species to warming was different. Among the dominant species throughout the year, the response of *Brachybotrys paridiformis* was the most obvious, as its importance value, abundance, and coverage increased significantly, while that of *Meehanian henryi* decreased significantly. *Cardamine leucantha* and *Hylomecon japonica* had no significant response. Lastly, the importance value of *Allium monanthum*, which is the seasonal dominant species, was significantly decreased, while that of *Adoxa moschatellina* was significantly increased.

**Conclusion:** Warming has no significant effect on herbaceous diversity in the forest in this study, but it may lead to the advancement of the phenological period of some species, change the competition between species in the community for resources such as light, or affect the development of functional traits of some species. Furthermore, it may change the importance value, abundance, and coverage of dominant species in different seasons, and lead to significant changes in the composition and structure of the herbaceous community.

**Key words:** infrared warming; community structure; species composition; dominant species; seasonal dynamics

联合国气候变化政府间专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出: 2020年全球陆地表面温度比1850–1900年平均气温高1.09°C, 预计未来全球气候变暖或将超过1.5°C (IPCC, 2021)。中国是气候变化的敏感区和影响显著区, 1951–2020年地表年平均温度上升速率为0.26°C/10年, 明显高于全球同期水平(中国气象局气候变化中心, 2021)。气候变暖能够导致植物产生不同的生长反应, 改变植物间的相互作用(Elmendorf et al, 2012)。这可能增加一些植物在群落中的优势度, 降低其他植物的重要程度, 进而造成植物群落结构及物种组成的变化以及生物多样性的下降, 甚至可能引起陆地生态系统中植物物种的局部或全球灭绝(Niu & Wan, 2008)。目前已有研究表明, 增温能够导致植物多样性降低和群落结构发生变化(Walker et al, 2006; Niu & Wan, 2008; 宗宁等, 2016; 马丽等, 2020); 然而, 也有研究发现尽管增温能够改变植物群落结构, 但是对植物多样性并无显著影响(李元恒, 2014; 杨晓艳等, 2018; 徐满厚等, 2021; 徐满厚和李晓丽, 2021), 尤其在森林生态系统。此外, 部分在高海拔、高纬度地区的长期观测实验甚至表明气候变暖会增加植物多样性(Salick et al, 2019; Wang et al, 2019), 这是由于气候变暖造成了植物适宜栖息地的改变, 使得其往高海拔、高纬度地区迁移造成的。

森林是陆地生态系统的主体, 具有丰富的生物

多样性和强大的生态系统功能。草本层是森林生态系统的重要组成部分, 在北方典型温带森林生态系统中, 虽然其对森林生物量的贡献仅占0.2%, 但能提供4%的净初级生产力, 并占据80%的物种多样性(Gilliam, 2007; Spicer et al, 2022)。此外, 森林草本层植物更新周期短、适应能力强、对林下微环境变化敏感(Spicer et al, 2022), 在调节碳动态和能量流动等生态系统功能中发挥着重要作用(Gilliam, 2007; Jia et al, 2022)。草本层为森林提供了高达20%的凋落物, 且其凋落物的分解速率较林冠上层凋落物快两倍以上, 对森林生态系统的凋落物养分归还做出了很大贡献。草本植物叶片中含有较多的N、P、K、Mg等必需营养素, 其快速分解和高周转率等特点促进了森林中营养物质的有效循环(Gilliam, 2007; Landuyt et al, 2019)。

目前, 在我国高寒草甸及荒漠草原已开展了大量关于气候变暖对草本植物多样性、群落结构及功能的研究; 但在森林生态系统中, 植物对气候变暖的响应研究多集中在木本植物, 而对草本层的研究则相对匮乏(杨晓艳等, 2018; 徐满厚等, 2021; 籍烨等, 2022; Spicer et al, 2022)。本研究基于东北温带次生林红外线模拟增温平台, 通过分析土壤增温2°C条件下草本植物多样性及物种组成在不同季节的动态变化, 探讨了增温对草本层多样性及群落组成和结构的影响, 以期为森林草本层响应气候变暖的机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

本研究样地设置于中国科学院清原森林生态系统观测研究站(41°51' N, 124°54' E)。研究站位于辽宁省东部山区, 属长白山余脉龙岗山脉北麓, 温带大陆性季风气候。该研究地四季分明, 雨热同期, 植物生长季在4–9月, 积雪覆盖期为11月下旬至次年3月下旬, 降水集中发生于5–9月, 年平均降水量811 mm, 其中降雪量不足6%, 年均温3.9–5.4℃, 日平均极端低温–37.6℃, 日平均极端高温36.5℃, 年无霜期为130 d (Zhu et al, 2007)。土壤多为粘壤土, 呈中性和酸性, pH值5.5–6.5 (陈庆达, 2020<sup>①</sup>)。在过去60年中, 该地的平均气温每10年上升0.26℃ (Duan et al, 2022), 比全球地表平均上升温度(0.08℃)高出3倍以上(<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global>)。

该区森林经历了大规模的人为破坏, 再经过次生演替形成了以次生林为主、嵌于其中的落叶松(*Larix* spp.)人工林为辅的东北次生林生态系统, 是典型的温带森林生态系统(高添等, 2020)。乔木层建群种包括胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、落叶松、蒙古栎(*Quercus mongolica*); 灌木层优势种包括色木槭(*Acer mono*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、刺五加(*Acanthopanax senticosus*)等; 草本层优势种包括山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)、龙头草(*Meehanian henryi*)、荷青花(*Hylomecon japonica*)、白花碎米荠(*Cardamine leucantha*)等。

### 1.2 样地设置

2017年在辽宁省清原县山区建立开放式模拟增温平台, 设置了对照和增温2个处理, 每个处理3个重复, 每个样方大小为108 m<sup>2</sup> (16 m × 8 m)。2017年进行预实验, 2018年开始增温。每年3月下旬至12月上旬采用联排红外辐射灯阵方法进行24 h增温, 结合控温系统使0–10 cm表层土壤稳定增温2℃ (Duan et al, 2022), 采用反馈控制系统中的热电偶连续监测地表土壤温度(每5 min测量1次), 并在每个样方(土壤5 cm深处)均匀且随机安置10个土壤湿

度探头用于测量表层土壤湿度。

### 1.3 植被调查与数据采集

本研究于2021年4月、7月、8月和2022年5月、7月、8月分别进行春季、夏季、秋季的林下草本层植物调查。在每个样方内随机且均匀地选取9个1 m × 1 m的草本样方, 共计54个, 记录草本植物的物种名称、多度和盖度。

### 1.4 数据统计与分析

本研究通过以下指标来分析增温对草本群落的影响, 其中物种水平用重要值(IV)表征, 群落水平的指标包括Simpson指数(D) (Whittaker, 1972)、Shannon-Wiener指数(H') (Whittaker, 1972)、Pielou指数(E) (Pielou, 1975)等, 计算公式如下:

$$\text{重要值: } IV = \frac{RA + RC + RF}{3} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Simpson指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener指数: } H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$\text{Pielou指数: } E = \frac{H'}{\ln S} \quad (4)$$

式中, RA为相对多度, RC为相对盖度, RF为相对频度,  $P_i$ 为*i*个体数占全部物种个体数的比值, S为每个草本样方内的物种数。

在本研究中, 将重要值在春季、夏季、秋季均排名前5位的植物定义为年优势种, 在春季排名前5位的定义为春季优势种, 在夏季和秋季均排名前5位的定义为夏季优势种。以增温处理作为因变量, 对两年内各季节的多样性指数、群落多度和盖度及年优势种多度和盖度分别进行单因素方差分析。

不同处理下物种数据的统计与绘图使用Microsoft Excel 2019完成, 多样性指数和重要值计算及单因素方差分析使用R v4.1.3完成。

## 2 结果

### 2.1 增温处理后林下环境因子的变化

模拟增温显著提高了土壤表层(0–10 cm处)温度, 2021年生长季土壤温度平均升高1.96℃, 2022年平均升高1.84℃, 增温效果较为稳定(图1); 土壤湿度只在增温初期因表层积雪融化而短暂增加, 后续几乎无影响。

① 陈庆达 (2020) 野外增温对辽东山区胡桃楸幼苗生长的影响. 硕士学位论文, 沈阳农业大学, 沈阳.



## 2.2 增温对草本层物种多样性的影响

本研究两年内共调查到37种草本植物, 对照和增温样地分别调查到33种和30种(表1)。其中, 对照样地春季、夏季、秋季分别为23种、21种、17种, 增温样地分别为23种、23种、19种。Simpson指数、Shannon-Wiener指数、Pielou指数在各季节增温后均无显著变化( $P > 0.05$ ), 但总体呈现减小的趋势(图2)。增温后, 草本层植物群落各季节的盖度和多度均无显著变化( $P > 0.05$ ) (图3, 表2)。但盖度在本研究的两年内相同季节呈现了相似的变化趋势, 即春季和秋季呈现增加趋势, 夏季无显著差别。

## 2.3 增温对草本层群落组成及结构的影响

### 2.3.1 物种组成的重要值变化

根据物种在各季节的重要值排名, 本研究样地内的年优势种为白花碎米荠、荷青花、龙头草、山茄子; 春季优势种为单花韭(仅对照样地)、五福花(仅增温样地), 夏季优势种为珠芽艾麻(*Laportea bulbifera*)。增温后草本层年优势种、季节优势种和非优势种的重要值在各季节发生了不同变化。增温

后, 优势种重要值增加, 在春季由71.1%增至81.7%, 夏季由77.1%增至83.6%, 秋季由74.7%增至79.5% (表3)。山茄子的重要值在增温后明显增加, 春季由10.7%增加至26.1%, 夏季由14.5%增加至36.7%, 秋季增幅最大, 由9.4%增至37.6%; 龙头草和白花碎米荠的重要值在各季节增温后均呈现减小趋势; 仅荷青花在各季节均无明显变化。

季节性优势种的重要值对增温的响应各不相同。例如, 增温后春季五福花由非优势种变为优势种, 重要值由1.6%增至16.3%, 单花韭由优势种变为非优势种, 重要值由13.0%减少至3.2%; 夏季优势种珠芽艾麻的重要值对增温的响应不明显, 但秋季比夏季略为明显, 由27.2%减少至18.5% (表3)。

### 2.3.2 年优势种盖度和多度的变化

年优势种的盖度对增温的响应不同, 且随季节发生变化(表2, 表4)。增温后, 山茄子的盖度呈现明显的增加趋势, 在2021年春季、秋季和2022年春季、夏季达到显著水平( $P < 0.05$ ); 龙头草和白花碎米荠的盖度均呈现减小的趋势, 龙头草的盖度在2021年

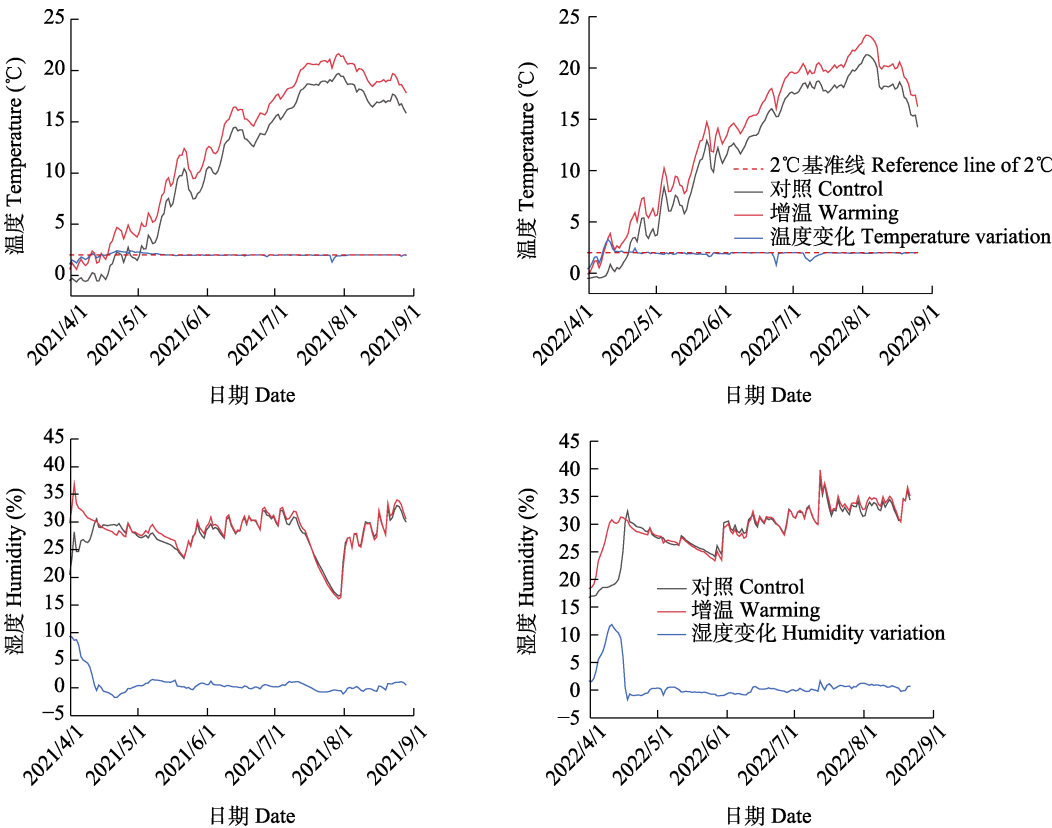


图1 2021年和2022年生长季内对照和增温处理下的土壤温度和土壤湿度

Fig. 1 Soil temperature and humidity under control and warming treatments during the growing seasons in 2021 and 2022

**表1 对照和增温处理下东北温带次生林草本层的植物物种组成**  
**Table 1 Plant species composition of herbaceous layer in temperate secondary forest in Northeast China under control and warming treatments**

物种 Species	科 Family	属 Genus	处理独有 Unique of treatment	优势种 Dominant species
白花碎米荠 <i>Cardamine leucantha</i>	十字花科 Brassicaceae	碎米荠属 <i>Cardamine</i>	对照 Control	年优势种 Annual dominant species
齿瓣延胡索 <i>Corydalis turtschaninovii</i>	罂粟科 Papaveraceae	紫堇属 <i>Corydalis</i>		非优势种 Non-dominant species
穿龙薯蓣 <i>Dioscorea nipponica</i>	薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>		非优势种 Non-dominant species
单花韭 <i>Allium monanthum</i>	百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>		春季优势种 Spring dominant species
东北百合 <i>Lilium distichum</i>	百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	对照 Control	非优势种 Non-dominant species
东北天南星 <i>Arisaema amurense</i>	天南星科 Araceae	天南星属 <i>Arisaema</i>		非优势种 Non-dominant species
东北羊角芹 <i>Aegopodium alpestre</i>	伞形科 Umbelliferae	羊角芹属 <i>Aegopodium</i>		非优势种 Non-dominant species
短果茴芹 <i>Pimpinella brachycarpa</i>	伞形科 Umbelliferae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	增温 Warming	非优势种 Non-dominant species
多被银莲花 <i>Anemone raddeana</i>	毛茛科 Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	对照 Control	非优势种 Non-dominant species
二叶舞鹤草 <i>Maianthemum bifolium</i>	百合科 Liliaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>		非优势种 Non-dominant species
孩儿参 <i>Pseudostellaria heterophylla</i>	石竹科 Caryophyllaceae	孩儿参属 <i>Pseudostellaria</i>		非优势种 Non-dominant species
和尚菜 <i>Adenocaulon himalaicum</i>	菊科 Compositae	和尚菜属 <i>Adenocaulon</i>		非优势种 Non-dominant species
荷青花 <i>Hylomecon japonica</i>	罂粟科 Papaveraceae	荷青花属 <i>Hylomecon</i>	增温 Warming	年优势种 Annual dominant species
猴腿蹄盖蕨 <i>Athyrium multidentatum</i>	蹄盖蕨科 Athyriaceae	蹄盖蕨属 <i>Athyrium</i>		非优势种 Non-dominant species
黄精 <i>Polygonatum sibiricum</i>	百合科 Liliaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>		非优势种 Non-dominant species
鸡腿堇菜 <i>Viola acuminata</i>	堇菜科 Violaceae	堇菜属 <i>Viola</i>		非优势种 Non-dominant species
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草属 <i>Geranium</i>	对照 Control	非优势种 Non-dominant species
林茜草 <i>Rubia sylvatica</i>	茜草科 Rubiaceae	茜草属 <i>Rubia</i>		非优势种 Non-dominant species
龙头草 <i>Meehania henryi</i>	唇形科 Lamiaceae	龙头草属 <i>Meehania</i>		年优势种 Annual dominant species
鹿药 <i>Smilacina japonica</i>	百合科 Liliaceae	鹿药属 <i>Smilacina</i>		非优势种 Non-dominant species
球果堇菜 <i>Viola collina</i>	堇菜科 Violaceae	堇菜属 <i>Viola</i>	增温 Warming	非优势种 Non-dominant species
全叶延胡索 <i>Corydalis repens</i>	罂粟科 Papaveraceae	紫堇属 <i>Corydalis</i>		非优势种 Non-dominant species
山花拉拉藤 <i>Galium spurium</i>	茜草科 Rubiaceae	拉拉藤属 <i>Galium</i>		非优势种 Non-dominant species
山茄子 <i>Brachybotrys paridiformis</i>	紫草科 Boraginaceae	山茄子属 <i>Brachybotrys</i>		年优势种 Annual dominant species
深山毛茛 <i>Ranunculus franchetii</i>	毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	增温 Warming	非优势种 Non-dominant species
升麻 <i>Cimicifuga foetida</i>	毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>		非优势种 Non-dominant species
水金凤 <i>Impatiens nolitangere</i>	凤仙花科 Balsaminaceae	凤仙花属 <i>Impatiens</i>		非优势种 Non-dominant species
路边青 <i>Geum aleppicum</i>	茜草科 Rubiaceae	路边青属 <i>Geum</i>		非优势种 Non-dominant species
薹草 <i>Carex</i> spp.	莎草科 Cyperaceae	薹草属 <i>Carex</i>	对照 Control	非优势种 Non-dominant species
透骨草 <i>Phryma leptostachya</i> subsp. <i>asiatica</i>	透骨草科 Hrymataceae	透骨草属 <i>Phryma</i>		非优势种 Non-dominant species
菟葵 <i>Eranthis stellata</i>	毛茛科 Ranunculaceae	菟葵属 <i>Ranunculus</i>		非优势种 Non-dominant species
乌头 <i>Aconitum carmichaeli</i>	毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>		非优势种 Non-dominant species
五福花 <i>Adoxa moschatellina</i>	五福花科 Adoxaceae	五福花属 <i>Adoxa</i>	对照 Control	春季优势种 Spring dominant species
舞鹤草 <i>Maianthemum bifolium</i>	百合科 Liliaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>		非优势种 Non-dominant species
西山堇菜 <i>Viola hancockii</i>	堇菜科 Violaceae	堇菜属 <i>Viola</i>		非优势种 Non-dominant species
野芝麻 <i>Lamium barbatum</i>	唇形科 Lamiaceae	野芝麻属 <i>Lamium</i>		非优势种 Non-dominant species
珠芽艾麻 <i>Laportea bulbifera</i>	荨麻科 Urticaceae	艾麻属 <i>Laportea</i>		夏季优势种 Summer dominant species

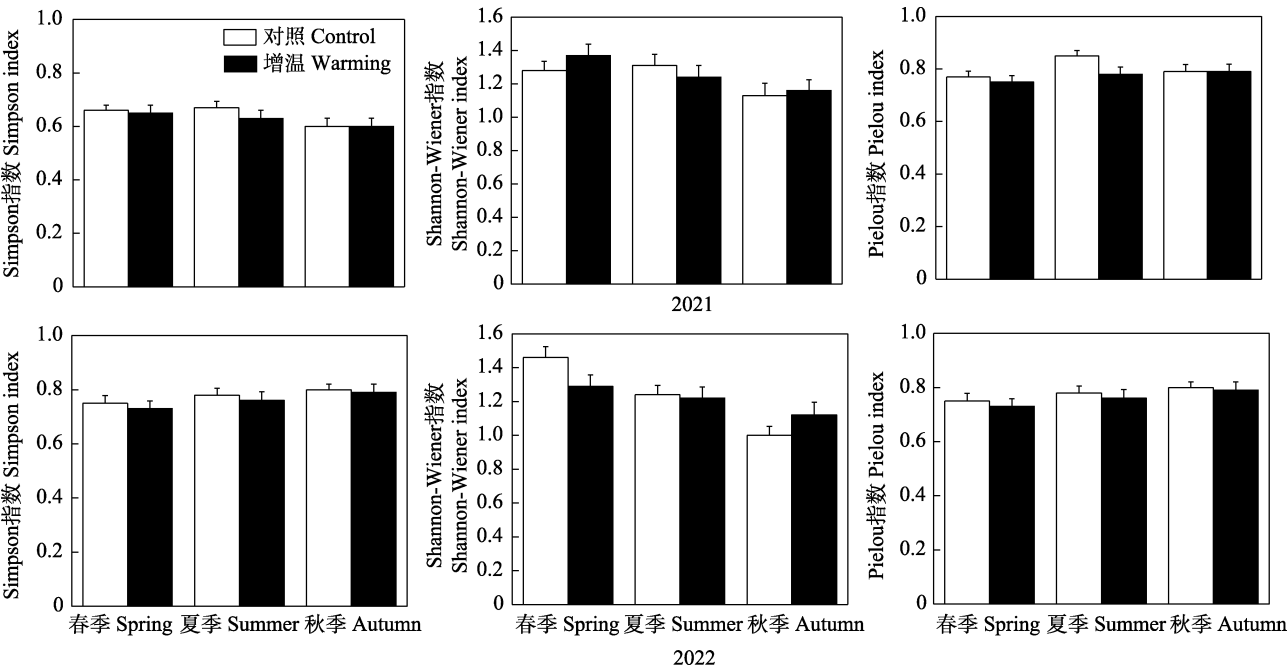


图2 2021年和2022年生长季对照和增温处理下东北温带次生林草本本层的多样性指数(平均值 ± SE)  
Fig. 2 Diversity indices of herbaceous layer in temperate secondary forest in Northeast China under control and warming treatments during growing seasons in 2021 and 2022 (mean ± SE)

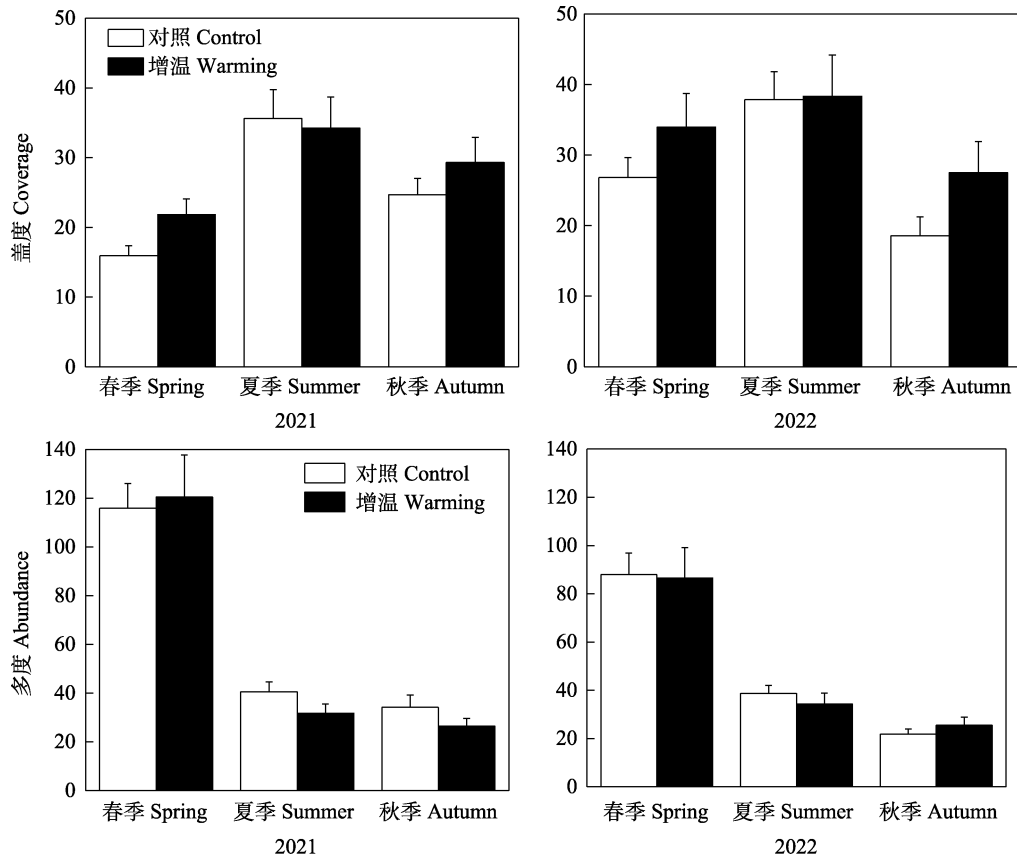


图3 2021年和2022年生长季对照和增温处理下东北温带次生林草本本层的群落盖度和多度(平均值 ± SE)  
Fig. 3 Community coverage and abundance of herbaceous layer in temperate secondary forest in Northeast China under control and warming treatments during growing seasons in 2021 and 2022 (mean ± SE)

**表2 增温对东北温带次生林草本层群落多度和盖度及4个年优势种多度和盖度影响的单因素方差分析结果**  
Table 2 Result of one-way analysis of variance on effects of warming on abundance and coverage of herbaceous layer in temperate secondary forest in Northeast China and four annual dominant species

物种 Species	季节 Season	多度 Abundance						盖度 Coverage					
		2021			2022			2021			2022		
		df	F	P	df	F	P	df	F	P	df	F	P
白花碎米荠 <i>Cardamine leucantha</i>	春季 Spring	1,41	2.862	0.099	1,42	1.563	0.219	1,41	0.793	0.395	1,42	1.138	0.292
	夏季 Summer	1,41	3.431	0.071	1,43	0.251	0.624	1,41	4.691	0.036	1,43	0.929	0.342
	秋季 Autumn	1,36	0.148	0.702	1,23	2.392	0.136	1,36	0.002	0.96	1,23	4.535	0.044
荷青花 <i>Hylomecon japonica</i>	春季 Spring	1,40	0.753	0.391	1,42	0.498	0.482	1,40	3.436	0.039	1,42	0.645	0.069
	夏季 Summer	1,20	1.459	0.241	1,30	0.321	0.575	1,20	4.624	0.044	1,30	3.165	0.478
	秋季 Autumn	–	–	–	1,15	0.801	0.386	–	–	–	1,15	0.749	0.558
龙头草 <i>Meehanian henryi</i>	春季 Spring	1,45	8.001	0.015	1,46	11.424	0.001	1,45	3.056	0.162	1,46	5.006	0.046
	夏季 Summer	1,48	9.879	0.003	1,45	5.748	0.041	1,48	5.124	0.028	1,45	6.856	0.006
	秋季 Autumn	1,48	9.272	0.004	1,33	0.571	0.456	1,48	3.58	0.065	1,33	0.002	0.968
山茄子 <i>Brachybotrys paridiformis</i>	春季 Spring	1,24	8.333	0.001	1,31	5.084	0.015	1,24	8.219	0.0001	1,31	4.709	0.038
	夏季 Summer	1,30	3.032	0.092	1,31	4.701	0.001	1,30	0.733	0.399	1,31	3.251	< 0.001
	秋季 Autumn	1,29	13.601	< 0.001	1,25	4.742	0.004	1,29	9.747	0.001	1,25	2.634	0.117
群落 Community	春季 Spring	1,52	0.054	0.729	1,52	0.009	0.836	1,52	3.006	0.071	1,52	1.668	0.459
	夏季 Summer	1,52	2.397	0.128	1,52	0.629	0.401	1,52	0.054	0.817	1,52	0.005	0.696
	秋季 Autumn	1,52	1.664	0.203	1,52	0.867	0.545	1,52	1.134	0.301	1,52	1.981	0.11

**表3 2022年生长季内对照和增温处理下东北温带次生林草本层植物的重要值**  
Table 3 Importance values of herbaceous layer plants in temperate secondary forest in Northeast China under control and warming treatments during growing season in 2022

	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	对照 Control	增温 Warming	对照 Control	增温 Warming	对照 Control	增温 Warming
白花碎米荠 <i>Cardamine leucantha</i>	10.7%	8.3%	13.0%	7.2%	12.6%	4.5%
荷青花 <i>Hylomecon japonica</i>	21.8%	19.7%	14.5%	13.3%	5.6%	8.2%
龙头草 <i>Meehanian henryi</i>	13.3%	8.2%	17.8%	10.8%	19.9%	10.7%
山茄子 <i>Brachybotrys paridiformis</i>	10.7%	26.1%	14.5%	36.7%	9.4%	37.6%
五福花 <i>Adoxa moschatellina</i>	1.6%	16.3%	–	–	–	–
单花韭 <i>Allium monanthum</i>	13.0%	3.2%	–	–	–	–
珠芽艾麻 <i>Laportea bulbifera</i>	–	–	17.3%	15.6%	27.2%	18.5%
非优势种 Non-dominant species	28.9%	18.3%	22.9%	16.4%	25.3%	20.5%

夏季和2022年春季、夏季均显著减少( $P < 0.05$ ), 而白花碎米荠盖度的变化幅度在各季节均未达到显著水平( $P > 0.05$ ); 荷青花的盖度在 2021年和2022年呈现不同的变化趋势, 2021年各季节呈现增加趋势, 且春季时达到显著水平( $P < 0.05$ ), 2022年各季节呈现减小趋势, 但并不显著( $P > 0.05$ )。

增温对年优势种多度的影响也随物种及季节变化而不同(表2, 表4), 与盖度变化趋势较为相似。

增温后, 山茄子多度显著增加, 除了2021年夏季未达到显著水平, 2022年春季达到显著水平( $P < 0.05$ ) 其余季节均极显著增加( $P < 0.01$ ); 龙头草多度显著减少, 除2022年秋季外, 其余季节均显著减少( $P < 0.01$ ); 白花碎米荠的多度在各季节均呈现减少趋势, 但未达到显著水平( $P > 0.05$ ); 荷青花多度在2021年呈现增加趋势, 2022年呈现减少趋势, 但未达到显著( $P > 0.05$ )。

**表4 2021年和2022年对照和增温处理下东北温带次生林草本层年优势种的多度和盖度**  
Table 4 Abundance and coverage of annual dominant species in the herbaceous layer of temperate secondary forest in Northeast China under control and warming treatments in 2021 and 2022

物种 Species	季节 Season	多度 Abundance				盖度 Coverage (%)			
		2021		2022		2021		2022	
		对照 Control	增温 Warming	对照 Control	增温 Warming	对照 Control	增温 Warming	对照 Control	增温 Warming
白花碎米荠 <i>Cardamine leucantha</i>	春季 Spring	21	10	8	5	3	2	4	3
	夏季 Summer	8	5	5	5	7	4	5	3
	秋季 Autumn	4	4	3	2	5	5	3	2
荷青花 <i>Hylomecon japonica</i>	春季 Spring	28	37	30	23	3	6	10	8
	夏季 Summer	2	3	12	10	2	3	10	4
	秋季 Autumn	—	—	7	5	—	—	4	3
龙头草 <i>Meehanian henryi</i>	春季 Spring	20	9	12	4	2	2	4	2
	夏季 Summer	12	6	7	4	8	4	5	2
	秋季 Autumn	11	6	5	6	8	5	4	4
山茄子 <i>Brachybotrys paridiformis</i>	春季 Spring	3	17	11	23	1	5	9	23
	夏季 Summer	9	16	9	19	17	22	16	30
	秋季 Autumn	2	15	4	16	5	20	7	20

3 讨论

3.1 增温对草本层物种多样性的影响

在本研究中, 增温对草本层群落植物丰富度和多样性指数均无显著影响, 群落多度和盖度对增温的响应也不显著, 仅在各季节的变化趋势略有不同。由于不同地区温度对植物生长限制性程度差别较大, 因此不同地区物种多样性对增温的响应具有较大差异。目前增温对草原、草甸或森林草本层植物丰富度的影响有增加、减少或无显著影响3种结果; 本研究中, 因为实验年限以及土壤中种子库的影响, 增温对草本群落的影响还不足以体现在多样性的改变上, 这一结果与马丽等(2020)在高寒草甸的研究结果一致; 而与其他高海拔和干旱地区进行的实验结果不一致(李元恒, 2014; 姜炎彬等, 2017)。以往研究表明, 增温造成的荒漠草原和高寒草甸等生态系统土壤水分下降会限制植物生长, 物种丰富度下降(Zhang et al, 2017; 刘晓迪, 2020); 除了增温造成的水分变化以外, 温度增加也会使高寒地区植物丰富度发生变化, 一些研究表明升温后使得适应物种增加(Salick et al, 2019), 这一结果是由于低海拔地区冷适应物种向高海拔地区迁移造成的, 而高海拔地区的一些冷适应种将面临灭绝(Classen et al, 2015)。温带森林草本植物通常是耐阴

种和春季短命草本植物(Govaert et al, 2021a), 它们的主要环境限制因子为光照和温度(Blondeel et al, 2020a), 在本研究中并未发现增温造成土壤水分变化而影响草本群落的多样性和多度。温度增加使植物春季物候提前(Fu et al, 2015; Piao et al, 2019; Wang et al, 2021), 这使得对温度敏感的草本植物早一步获取有效光资源。不过, 由于林下草本层植物群落早已适应春季的高光照可用性和夏季的遮阴(Valladares et al, 2016; De Pauw et al, 2021), 部分植物物候提前导致的其他植物可利用光降低也不会影响其生长。由于光照可利用性在各季节存在差异, 温带森林草本层对气候变暖的响应也随之存在差异, 即增温在春季、秋季对植物生长的影响大于夏季。

以往的增温实验多表明增温会降低多样性指数(宗宁等, 2016; 姜炎彬等, 2017; 籍烨等, 2022), 与本研究结果不同, 这主要是由于本研究中优势种间“此消彼长”的效应抵消了多样性的变化。本研究对照样地和增温样地共出现37个草本物种, 其中对照样地33种, 增温样地30种, 其中共有种26种。仅在对照样地出现的物种共7种, 多为春季短命植物和耐阴植物, 仅在增温样地出现的物种有4种(表1), 多为夏季萌发物种, 但由于它们的多度和频度都极小, 并不能说明该结果是增温导致的。



除了不同生态系统对增温响应不同以外, 增温方式不同也是导致结果不同的一个重要原因。草地生态系统广泛使用的开顶箱增温法阻挡了昆虫进入, 同时降低了风速和光照, 进而影响种子传播等, 因而在开顶箱进行的增温实验会在短期内导致物种丰富度快速下降(De Frenne et al, 2010; Yang et al, 2018; 夏露等, 2022), 而本研究使用的红外增温法往往对植物丰富度无影响或仅使其小幅度降低(Shi et al, 2015)。

### 3.2 增温对草本层群落组成及结构的影响

本研究结果表明增温对东北温带次生林草本层植物群落组成及结构的影响显著。增温条件下, 草本层群落总多度、盖度无显著变化, 但群落内各物种重要值、盖度、多度发生了不同程度的改变。增温可能改变群落内的种间竞争关系或者影响某些物种功能性状, 从而导致群落组成及结构发生变化。以往的研究表明, 群落内的优势种通常对环境变化的敏感性更高(Wasof et al, 2018), 这与本研究的结果是一致的。山茄子作为群落内的年优势种, 其对增温的响应极为显著, 增温后其重要值、盖度和多度均显著增加。山茄子是一种株高叶大的快速定植草本植物, 其种子很轻, 有利于快速传播和资源获取(Blondeel et al, 2020b), 春季增温使其物候期提前, 从而能更好地获取光资源, 成为该群落的绝对优势种。研究区域草本群落已显现出以山茄子为主、其他物种为辅的群落结构趋势。增温使部分植物物候提前, 这打破了春季草本层植物对有效光资源的竞争平衡(Govaert et al, 2021b)。本研究中, 增温后年优势种龙头草显著减少。龙头草是根状茎的矮小植物, 其营养器官十分强大(徐敏敏等, 2016), 但叶片较小, 这种植物属于古老的多年生森林慢植草本植物, 通常将更多的营养投入到其根部和种子中以促进繁殖, 这就导致其传播能力较弱(Blondeel et al, 2020b), 对环境变化的适应能力较差, 因此对增温产生负响应。而白花碎米荠和荷青花盖度和多度在各季节受增温的影响均不大, 这两种植物的叶片大小和叶形相似, 植株和叶片大小在4个年优势种中占据中间地位, 增温对于其对有效光资源的获取无较大影响。








季节优势种也对增温有不同的响应, 如增温后春季短命植物单花韭的重要值显著降低, 五福花的

重要值显著增加, 这是因为春季短命植物对增温更敏感(Wolkovich et al, 2012)。单花韭在本研究区的生长期为4月初至5月底, 增温可能使其提前结束生长期, 所以在2022年5月的重要值表现为增温后显著降低; 五福花为喜暖的矮小植物, 由于春季遮阴度较低, 因此它在春季的生长受温度的影响最大, 势必对温度的增加产生正响应。

依托清原温带次生林野外红外辐射增温平台, 本研究发现连续5年的生长季增温对林下草本多样性没有显著影响, 但已显著改变优势种的盖度、多度和重要值, 引起草本群落物种组成和结构发生显著变化。考虑到气候变暖将长期影响温带森林, 未来研究将深入探讨增温对林下草本多样性及其群落物种组成和结构的长期影响。

**致谢:** 感谢中国科学院清原森林生态系统观测研究站方晓明老师为本研究野外实验给予的所有帮助; 感谢中国科学院沈阳应用生态研究所天然林生态组的所有师生为本研究提出的建议和帮助!

### ORCID

陈哲涵  <https://orcid.org/0000-0001-7345-3623>  
尹进  <https://orcid.org/0000-0002-8786-8886>  
刘冬伟  <https://orcid.org/0000-0002-1324-5125>  
毛子昆  <https://orcid.org/0000-0002-7035-9129>  
房帅  <https://orcid.org/0000-0003-1447-1236>  
蒯菲  <https://orcid.org/0000-0001-7653-2781>  
王绪高  <http://orcid.org/0000-0003-1207-8852>

### 参考文献

- Blondeel H, Perring MP, De Lombaerde E, Depauw L, Landuyt D, Govaert S, Maes SL, Vangansbeke P, De Frenne P, Verheyen K (2020a) Individualistic responses of forest herb traits to environmental change. *Plant Biology*, 22, 601–614.
- Blondeel H, Perring MP, Depauw L, De Lombaerde E, Landuyt D, De Frenne P, Verheyen K (2020b) Light and warming drive forest understorey community development in different environments. *Global Change Biology*, 26, 1681–1696.
- Classen AT, Sundqvist MK, Henning JA, Newman GS, Moore JAM, Cregger MA, Moorhead LC, Patterson CM (2015) Direct and indirect effects of climate change on soil microbial and soil microbial–plant interactions: What lies ahead? *Ecosphere*, 6, art130.
- Climate Change Centre of China Meteorological Administration (2021) Blue Book on Climate Change in China (2021). Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国气象局气候变化中心 (2021) 中国气候变化蓝皮书(2021).

- 科学出版社, 北京.]
- De Frenne P, De Schrijver A, Graae BJ, Gruwez R, Tack W, Vandeloos F, Hermy M, Verheyen K (2010) The use of open-top chambers in forests for evaluating warming effects on herbaceous understorey plants. *Ecological Research*, 25, 163–171.
- De Pauw K, Sanczuk P, Meeussen C, Depauw L, De Lombaerde E, Govaert S, Vanneste T, Brunet J, Cousins S, Gasperini C, Hedwall PO, Iacopetti G, Lenoir J, Plue J, Selvi F, Spicher F, Uria-Diez J, Verheyen K, Vangansbeke P, De Frenne P (2021) Forest understorey communities respond strongly to light in interaction with forest structure, but not to microclimate warming. *New Phytologist*, 233, 219–235.
- Duan YH, Liu DW, Huang K, Shou WK, Zhu FF, Liu YQ, Yu HM, Gundersen P, Kang RH, Wang A, Han SJ, Wang ZM, Zhu JJ, Zhu WX, Fang YT (2022) Design and performance of an ecosystem-scale forest soil warming experiment with infrared heater arrays. *Methods in Ecology and Evolution*, 13, 2065–2077.
- Elmendorf SC, Henry GHR, Hollister RD, Björk RG, Bjorkman AD, Callaghan TV, Collier LS, Cooper EJ, Cornelissen JHC, Day TA, Fosaa AM, Gould WA, Grétarsdóttir J, Harte J, Hermanutz L, Hik DS, Hofgaard A, Jarrad F, Jónsdóttir IS, Wookey PA (2012) Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: Heterogeneity over space and time. *Ecology Letters*, 15, 164–175.
- Fu YH, Zhao HF, Piao SL, Peaucelle M, Peng SS, Zhou GY, Ciais P, Huang MT, Menzel A, Peñuelas J, Song Y, Vitasse Y, Zeng ZZ, Janssens IA (2015) Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526, 104–107.
- Gao T, Yu LZ, Yu FY, Wang XC, Yang K, Lu DL, Li XF, Yan QL, Sun YR, Liu LF, Xu S, Zhen XJ, Ni ZD, Zhang JX, Wang GF, Wei XH, Zhou XH, Zhu JJ (2020) Functions and applications of multi-tower platform of Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 695–705. (in Chinese with English abstract) [高添, 于立忠, 于丰源, 王兴昌, 杨凯, 卢德亮, 李秀芬, 闫巧玲, 孙一荣, 刘利芳, 徐爽, 甄晓杰, 倪震东, 张金鑫, 王高峰, 魏晓华, 周新华, 朱教君 (2020) 中国科学院清原森林生态系统观测研究站塔群平台的功能和应用. *应用生态学报*, 31, 695–705.]
- Gilliam FS (2007) The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems. *BioScience*, 57, 845–858.
- Govaert S, Vangansbeke P, Blondeel H, De Lombaerde E, Verheyen K, De Frenne P (2021a) Forest understorey plant responses to long-term experimental warming, light and nitrogen addition. *Plant Biology*, 23, 1051–1062.
- Govaert S, Vangansbeke P, Blondeel H, Steppe K, Verheyen K, De Frenne P (2021b) Rapid thermophilization of understorey plant communities in a 9 year-long temperate forest experiment. *Journal of Ecology*, 109, 2434–2447.
- IPCC (2021) Climate change 2021: The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B). Cambridge University Press, Cambridge.
- Ji Y, Chen SD, Xiong DC, Xu C, Liu XF, He ZM, Yang ZJ (2022) Effects of short-term warming on species diversity of understorey vegetation in subtropical evergreen broad-leaved forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 31(2), 153–162. (in Chinese with English abstract) [籍焯, 陈仕东, 熊德成, 胥超, 刘小飞, 何宗明, 杨智杰 (2022) 短期增温对亚热带常绿阔叶林林下植物多样性的影响. *热带亚热带植物学报*, 31(2), 153–162.]
- Jia SH, Wang XG, Hao ZQ, Bagchi R (2022) The effects of natural enemies on herb diversity in a temperate forest depend on species traits and neighbouring tree composition. *Journal of Ecology*, 110, 2615–2627.
- Jiang YB, Fan M, Zhang YJ (2017) Effect of short-term warming on plant community features of alpine meadow in Northern Tibet. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 616–622. (in Chinese with English abstract) [姜炎彬, 范苗, 张扬建 (2017) 短期增温对藏北高寒草甸植物群落特征的影响. *生态学杂志*, 36, 616–622.]
- Landuyt D, De Lombaerde E, Perring MP, Hertzog LR, Ampoorter E, Maes SL, De Frenne P, Ma SY, Proesmans W, Blondeel H, Sercu BK, Wang B, Wasof S, Verheyen K (2019) The functional role of temperate forest understorey vegetation in a changing world. *Global Change Biology*, 25, 3625–3641.
- Li YH (2014) Responses of Plant Community Structure and Function to Warming and Nitrogen Addition in a Desert Steppe of Inner Mongolia. PhD dissertation, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot. (in Chinese with English abstract) [李元恒 (2014) 内蒙古荒漠草原植物群落结构和功能对增温和氮素添加的响应. 博士学位论文, 内蒙古农业大学, 呼和浩特.]
- Liu XD (2020) Responses of Plant Communities to Climatic Warming and the Mechanisms in a Desert Steppe. PhD dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘晓迪 (2020) 荒漠草原植物群落对气候变暖的响应及其机制. 博士学位论文, 中国科学院植物研究所, 北京.]
- Ma L, Zhang Q, Zhang ZH, Guo J, Yang XY, Zhou BR, Deng YF, Wang F, She YD, Zhou HK (2020) Effects of gradient warming on species diversity and biomass in alpine meadows. *Acta Agrestia Sinica*, 28, 1395–1402. (in Chinese with English abstract) [马丽, 张骞, 张中华, 郭婧, 杨晓渊, 周秉荣, 邓艳芳, 王芳, 余延娣, 周华坤 (2020) 梯度增温对高寒草甸物种多样性和生物量的影响. *草地学报*, 28, 1395–1402.]
- Niu SL, Wan SQ (2008) Warming changes plant competitive hierarchy in a temperate steppe in northern China. *Journal of Plant Ecology*, 1, 103–110.
- Piao SL, Liu Q, Chen AP, Janssens IA, Fu YS, Dai JH, Liu LL, Lian X, Shen MG, Zhu XL (2019) Plant phenology and

- global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25, 1922–1940.
- Pielou EC (1975) Ecological diversity. *Limnology Oceanography*, 22, 172–174.
- Salick J, Fang ZD, Hart R (2019) Rapid changes in eastern Himalayan alpine flora with climate change. *Botany*, 106, 520–530.
- Shi Z, Sherry R, Xu X, Hararuk O, Souza L, Jiang LF, Xia JY, Liang JY, Luo YQ (2015) Evidence for long-term shift in plant community composition under decadal experimental warming. *Journal of Ecology*, 103, 1131–1140.
- Spicer ME, Radhamoni HVN, Duguid MC, Queenborough SA, Comita LS (2022) Herbaceous plant diversity in forest ecosystems: Patterns, mechanisms, and threats. *Plant Ecology*, 223, 117–129.
- Valladares F, Laanisto L, Niinemets Ü, Zavala MA (2016) Shedding light on shade: Ecological perspectives of understory plant life. *Plant Ecology & Diversity*, 9, 237–251.
- Walker MD, Wahren CH, Hollister RD, Henry GHR, Ahlquist LE, Alatalo JM, Bret MS, Calef MP, Callaghan TV, Carroll AB, Epstein HE, Jónsdóttir IS, Klein JA, Magnússon B, Molau U, Oberbauer SF, Rewa SP, Robinson CH, Shaver GR, Suding KN, Thompson CC, Tolvanen A, Totland Ø, Turner PL, Tweedie CE, Webber PJ, Wookey PA (2006) Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 103, 1342–1346.
- Wang JM, Xi ZX, He XJ, Chen SS, Rossi S, Smith NG, Liu JQ, Chen L (2021) Contrasting temporal variations in responses of leaf unfolding to daytime and nighttime warming. *Global Change Biology*, 27, 5084–5093.
- Wang Q, Zhang ZH, Du R, Wang SP, Duan JC, Iler AM, Piao SL, Luo CY, Jiang LL, Lü WW, Zhang LR, Meng FD, Ji SN, Li YM, Li BW, Liu PP, Dorji T, Wang ZZ, Li YN, Du MY, Zhou HK, Zhao XQ, Wang YF (2019) Richness of plant communities plays a larger role than climate in determining responses of species richness to climate change. *Journal of Ecology*, 107, 1944–1955.
- Wasof S, Lenoir J, Hattab T, Jamoneau A, Gallet-Moron E, Ampoorter E, Saguez R, Bennisadek L, Bertrand R, Valdès A, Verheyen K, Decocq G (2018) Dominance of individual plant species is more important than diversity in explaining plant biomass in the forest understorey. *Journal of Vegetation Science*, 29, 521–531.
- Whittaker RH (1972) Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21, 213–251.
- Wolkovich EM, Cook BI, Allen JM, Crimmins TM, Betancourt JL, Travers SE, Pau S, Regetz J, Davies TJ, Kraft NJB, Ault TR, Bolmgren K, Mazer SJ, McCabe GJ, McGill BJ, Parmesan C, Salamin N, Schwartz MD, Cleland EE (2012) Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, 485, 494–497.
- Xia L, Zhang SR, Liu PP, Lü WW, Hong H, Zhou Y, Li BW, Wang Q, A W, Jiang LL, Dorji T, Wang SP, Zhang LR (2022) Effects of climate change and N deposition on plant diversity in grassland in China. *Grassland and Turf*, 42, 158–165. (in Chinese with English abstract) [夏露, 张苏人, 刘培培, 吕汪汪, 洪欢, 周阳, 李博文, 王奇, 阿旺, 姜丽丽, 斯确多吉, 汪诗平, 张立荣 (2022) 增温和增/减水及氮沉降对中国草地植物多样性影响的研究进展. *草原与草坪*, 42, 158–165.]
- Xu MH, Du R, Yang XH, Yang XY, Yu XL (2021) Response of plants to simulated warming in under-canopy herbaceous layers on the guancen mountain. *Chinese Wild Plant Resources*, 40(10), 45–52. (in Chinese with English abstract) [徐满厚, 杜荣, 杨晓辉, 杨晓艳, 于秀立 (2021) 管汾山林下草本层植物对模拟增温的响应. *中国野生植物资源*, 40(10), 45–52.]
- Xu MH, Li XL (2021) Review of response of grassland community stability to global warming based on correlation between species biodiversity and biomass. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 41, 348–358. (in Chinese with English abstract) [徐满厚, 李晓丽 (2021) 基于物种多样性与生物量关系的草地群落稳定性对全球变暖的响应研究进展. *西北植物学报*, 41, 348–358.]
- Xu MM, Dong Q, Yu JG, Xuan ZL, Xia FC (2016) Biomass distribution research of florescence organs of *Meehanian fargesii*. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 45(2), 19–23. (in Chinese with English abstract) [徐敏敏, 董琼, 于建国, 轩志龙, 夏富才 (2016) 荨麻叶龙头草花期器官生物量分配研究. *吉林林业科技*, 45(2), 19–23.]
- Yang XY, Zhang SX, Wen J, Xu MH (2018) Spatial pattern of herbaceous plant species diversity and its changes due to simulated warming in the forest community of the Lüliang Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 6642–6654. (in Chinese with English abstract) [杨晓艳, 张世雄, 温静, 徐满厚 (2018) 吕梁山森林群落草本层植物物种多样性的空间格局及其对模拟增温的响应. *生态学报*, 38, 6642–6654.]
- Yang Y, Halbritter AH, Klanderud K, Telford RJ, Wang GX, Vandvik V (2018) Transplants, open top chambers (OTCs) and gradient studies ask different questions in climate change effects studies. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1574.
- Zhang CH, Willis CG, Klein JA, Ma Z, Li JY, Zhou HK, Zhao XQ (2017) Recovery of plant species diversity during long-term experimental warming of a species-rich alpine meadow community on the Qinghai-Tibet Plateau. *Biological Conservation*, 213, 218–224.
- Zhu JJ, Mao ZH, Hu LL, Zhang JX (2007) Plant diversity of secondary forests in response to anthropogenic disturbance levels in montane regions of northeastern China. *Journal of Forest Research*, 12, 403–416.
- Zong N, Chai X, Shi PL, Jiang J, Niu B, Zhang XZ, He YT (2016) Responses of plant community structure and species composition to warming and N addition in an alpine meadow, northern Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 3739–3748. (in Chinese with English abstract) [宗宁, 柴曦, 石培礼, 蒋婧, 牛犇, 张宪洲, 何永涛 (2016) 藏北高寒草甸群落结构与物种组成对增温与施氮的响应. *应用生态学报*, 27, 3739–3748.]

(责任编辑: 储诚进 责任编辑: 黄祥忠)