

# 模拟增温引发的早春冻害:以岷江冷杉为例

徐振锋<sup>1,2</sup>, 胡庭兴<sup>1,\*</sup>, 张远彬<sup>2</sup>, 鲜骏仁<sup>1</sup>, 王开运<sup>3</sup>

(1. 四川农业大学林学院, 四川雅安 625014; 2. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041;

3. 华东师范大学上海市城市化生态过程和生态恢复重点实验室, 上海 200062)

**摘要:**以全球变暖为主要特征的全球气候变化已经并正在改变着陆地生态系统的结构和功能。现存植被与环境间的关系是经过漫长自然选择而形成的, 因此植物物候变化可能会影响物种与环境间的相互关系。采用开顶式生长室 (Open-top chamber, OTC) 和移地试验 (transposing of surface soil with vegetation, TSSV) 模拟增温的方法, 研究了川西亚高山岷江冷杉幼苗物候和冻害对模拟增温的短期响应。结果表明, 生长季中 OTC 内日平均气温较对照增加 2.2 °C, 高海拔 (3 200 m) 比低海拔 (2 600 m) 日平均温度低 2.5 °C。在两种研究方法下, 温度升高都使岷江冷杉芽开放提前, 休眠期推迟, 生长季延长。温度升高使岷江冷杉幼苗新生芽遭受严重的冻害。结果表明, 在未来全球气候变化的背景下, 高海拔物种遭受早春冻害的可能性大。

**关键词:** 林线交错带; 岷江冷杉; 开顶式生长室; 冻害; 移地实验

文章编号: 1000-0933(2009)11-6275-06 中图分类号: Q948 文献标识码: A

## Freezing damage in early spring induced by simulated global warming: a case study in *Abies faxoniana*

XU Zhen-Feng<sup>1,2</sup>, HU Ting-Xing<sup>1,\*</sup>, ZHANG Yuan-Bin<sup>2</sup>, XIAN Jun-Ren<sup>1</sup>, WANG Kai-Yun<sup>3</sup>

1 Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China

2 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 Shanghai Key laboratory of urbanization processes and ecological restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6275 ~ 6280.

**Abstract:** Global climate change mainly characterized by global warming had changed and been changing the structure and function of terrestrial ecosystem. The relationships between current vegetations and environments are formed through hundreds of thousands of years' evolution, thus changes in plant phenology may influence these subtle relationships. In this study, the short-term responses of leaf phenology, freezing damage of *Abies faxoniana* to simulated global warming were investigated using the open-top chamber (OTC) and transposing of surface soil with vegetation (TSSV) methods. The results were shown as follows: In Muyangchang, mean air temperature in the OTC raised by 2.2 °C at 1.0 m above the ground in the OTC during the growing season. Moreover, mean air temperature was 2.5 °C lower in timberline ecotone (3200 m) than versus in Muyangchang (2600 m). *A. faxoniana* seedlings in warming treatments showed earlier bud break, later bud dormancy and longer growing season. Unfortunately, severe freezing damage in current buds was detected in warming treatments. The results obtained in this study indicate that frost damage probably poses strong impact on the alpine species under future warming conditions.

**Key Words:** ecotone in timberline; *Abies faxoniana*; open-top chamber; freezing damage; transposing of surface soil with

**基金项目:** 国家自然科学基金重大资助项目 (90511008, 90202010); 四川省科技攻关资助项目 (05SG023-009); 上海市城市化生态过程和生态恢复重点实验室开放基金资助项目 (20070010)

收稿日期: 2008-12-17; 修订日期: 2009-02-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hutx001@yahoo.com.cn

vegetation

全球气候变化已经成为不容置疑的事实<sup>[1]</sup>。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告预测,到本世纪末,全球平均气温将升高 1.8~4.0℃<sup>[2]</sup>。科学家普遍认为高纬度和高海拔生态系统对温度升高的响应可能更为敏感而迅速<sup>[3,4]</sup>。

温度控制着生态系统中许多生物化学反应速率,且几乎影响所有生物学过程。低温是高山生态系统一个主要的限制因子。植物物候是对气候变化敏感且易观测的指示剂,其变化直接影响到生态系统碳收支。同时,植物物候过程在众多方面(生物间的相互作用,植被对大气界面层的反馈作用,碳、氮、水等主要生态系统过程及物种的迁移与适应)都扮演着重要的角色<sup>[5~8]</sup>。因此植物物候的变化可能引起一系列生态学响应,最终对生态系统结构和功能造成某些不确定的影响。目前研究发现增温一般能延长生长季、促进植物生长发育<sup>[9~13]</sup>,这将可能有助于北半球植被净初级生产力的增加,并对目前由大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高引起的全球变暖形成一个负反馈,但全球气候变化导致的植被及其它生理过程的变化有可能减弱或抵消此正效应,目前对此方面的研究仍存在极大的不确定性<sup>[14]</sup>。

物种与物种及物种与环境之间的关系是经过长时间自然选择而形成的,由于它们对气候变化的敏感度不同,所以响应的速率也有差异,因此植物物候变化可能会影响物种与物种或物种与环境间的相互关系,可能的后果包括:其一,植物提前展叶或开花,加大植物叶或花遭受春季霜冻的可能性;其二,植物成熟时间和秋季霜冻时间重叠,那么可能导致物种生殖失败;其三,物种间物候变化不同步,可能导致物种间相互作用的脱节,比如,植物和它们的授粉者之间或者鸟类和它们的植物及昆虫食物供给之间等;其四,各物种物候变化的差异,可能加大种间竞争,致使某些物种淘汰灭亡<sup>[14,15]</sup>;

川西亚高山植被生态系统地处高山峡谷,是全球变化的敏感地带。相对简单的植物群落、及林线附近的边缘效应等为研究亚高山植被生态系统对全球变化的响应提供了天然平台。实验样地设置在四川省平武县王朗国家级自然保护区大窝凼外侧坡林线交错带和牧场。以岷江冷杉(*Abies faxoniana* Rehd. et Wild)幼苗为研究对象,分别通过开顶式生长室和移地试验模拟增温效应对植被影响的研究方法,探讨岷江冷杉物候和早春冻害对模拟增温的短期响应。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

王朗国家级自然保护区位于四川省绵阳市平武县, 103°55′~104°10′ E, 32°49′~33°02′ N, 地处青藏高原东缘的高山峡谷地带, 海拔范围 2 300~4 980 m, 地貌为典型的高山深谷地貌类型。区域气候属丹巴-松潘半湿润气候, 年降雨量约为 801~825 mm。区域内年均温为 1.5~2.9℃, 绝对最高和最低温度分别为 26.2℃和 -17.8℃。

### 1.2 样地设置

#### 1.2.1 OTC 控制实验

研究样地设在王朗国家级自然保护区牧场, 地理位置为 104°08′ E, 32°93′ N, 海拔 2 600 m。2005 年 9 月, 参照国际冻原计划(ITEEX)模拟增温效应对植被影响的研究方法, 建立 4 套 OTC, OTC 的底面积为 1.5 m×1.5 m, 高 2.6 m, 顶部开口面积 1.2 m×1.2 m, 材料为 PC 板(透光率 85%)。同时在 OTC 附近随机设立 4 个对照小样方(control), 其面积同样为 1.5 m×1.5 m。10 月份, 从牧场附近移栽大小相当的目标物种到 OTC 及对照内。岷江冷杉年龄大约为 12~15 a, 株高约 50~60 cm。每个物种在各 OTC 及对照内均种植 5 株, 即中间 1 株, 4 个拐角各 1 株, 拐角的幼苗距 OTC 两边的距离均为 30 cm。2006 年, 定期对 OTC 及对照内物种浇水, 大约每半月 1 次, 以维持土壤湿度, 确保物种存活。

#### 1.2.2 移地实验

2005 年 10 月, 在植物进入休眠期后, 选择生长良好、大小相当的岷江冷杉幼苗连同其原状土(50 cm×

40 cm, 深 30 cm) 一起装入木箱(每箱 1 株), 从王朗国家级自然保护区大窝凼外侧坡林线交错带(104°01' E, 32°59' N, 海拔 3 200 m) 移置到自然保护区牧羊场(104°08' E, 32°93' N, 海拔 2 600 m), 总共移置 24 箱原状土壤。同时在线交错带标记 20 株岷江冷杉。移植的岷江冷杉幼苗年龄约 11 ~ 13 a, 株高约 30 ~ 40 cm。利用海拔高差以模拟全球变暖造成的影响, 实验估计两个海拔点温差为 3.0 ~ 3.6 °C 左右  $[(3200 \sim 2600) \times 0.5 \text{ °C} / (3200 \sim 2600) \times 0.6 \text{ °C}]$ 。

### 1.3 环境因子测定

为了量化牧羊场 OTC 和对照内及林线交错带的空气温度, 分别在林线交错带和牧羊场各安装 1 套全自动小气候观测系统(measurement engineering australia PTY LTD)。从 2006 年 5 月起, 牧羊场 OTC 和对照内及林线的空气温度(1.0 m)用小气候观测系统监测。小气候观测系统配有温度传感器(6507A、 $\pm 0.1 \text{ °C}$ 、Finland)。传感器用导线与控制器连接, 实行 24 h 连续监测。系统数据扫描间隔为 10 s, 存储数据间隔为 15 min, 每隔半月用电脑下载 1 次数据。

### 1.4 物候观测

2007 年 4 月, 在目标植物芽尚未萌动前, 应用随机取样法<sup>[16]</sup>, 在每个植株上选取 3 ~ 5 个标准枝, 用标记卡标记。根据生长特点, 不定期记录每个枝条上芽的情况。在植物物候活动关键期(爆芽、休眠), 每 3 d 观测一次, 其后约每周一次。寒潮过后, 当植株上的芽失绿即变成土黄色, 即记录为被冻伤的芽。冻害百分比为每个植株上被冻伤的芽数量与植株上芽生产总数量之比。

### 1.5 数据分析

所有数据均采用 SPSS 10.0 进行统计分析。处理间的差异显著性采用秩和检验(Mann-Whitney U-test)进行检验。

## 2 结果

### 2.1 OTC 与移地试验的增温效应

2007 年, 5 ~ 8 月份阴雨天明显比往年频繁。在整个生长季节里, OTC 使气温(1 m)增加 2.2 °C(图 1)。日最高气温 OTC 比对照升高 2.9 ~ 4.5 °C。5、6、7 月和 8 月份 OTC 内最低气温分别比 CK 高出 1.3 °C、2.3 °C、2.6 °C 和 2.7 °C。同时, 牧羊场(海拔 2 600 m)日平均气温比林线交错带(海拔 3 200 m)日平均气温高 2.5 °C(图 1)。

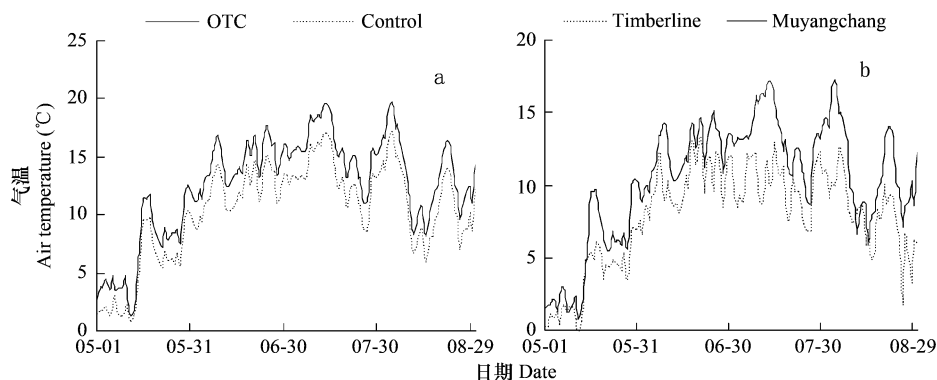


图 1 各样地内 5 月 1 日 ~ 8 月 31 日, 日平均气温变化

Fig. 1 Air temperature transitions of daily mean at different plots from May 1th to August 31th

### 2.2 物候响应

研究结果表明, 两种增温效应对岷江冷杉生长发育具有明显的影响(表 1)。在牧羊场 OTC 模拟试验中, OTC 内岷江冷杉芽开放时间比对照的显著提前( $p < 0.01$ ), 休眠期推迟( $p < 0.01$ ), 生长季明显延长( $p < 0.01$ )。另外, 利用海拔高差模拟增温效应对岷江冷杉叶物候有着类似的影响趋势, 但影响的强度更为强烈。

表 1 不同样地岷江冷杉叶物候的观测数据

Table 1 Data on leaf phenology of *A. faxoniana* in different plots

| 项目 Items        | 芽开放 Bud break (d) | 芽休眠 Bud dormancy (d) | 生长季 Growing season (d) |
|-----------------|-------------------|----------------------|------------------------|
| OTC             | 126.4 ± 5.4       | 263.6 ± 6.4          | 137.2 ± 6.8            |
| Control         | 136.7 ± 6.4       | 258.2 ± 4.7          | 121.5 ± 5.3            |
| <i>p</i> -level | * *               | * *                  | * *                    |
| Timberline      | 158.3 ± 6.3       | 226.8 ± 6.6          | 68.5 ± 5.7             |
| Muyangchang     | 130.1 ± 4.7       | 236.4 ± 5.9          | 106.3 ± 6.1            |
| <i>p</i>        | * *               | * *                  | * *                    |

“\* \*”:表示差异极显著,数值 = 均值 ± 标准差,描述叶物候的时间是由 2007 年 1 月 1 日起的天数来表示; OTC, Control, Timberline 和 Muyangchang 的样本数量分别为 18, 20, 20 和 23 “\* \*” means to be the most significant difference ( $p < 0.01$ ); Value = Mean ± SD, The timing for leaf phenology is indicated by the days since Jan 1 2007; The sample sizes of OTC, Control, Timberline and Muyangchang are 18, 20, 20 and 23, respectively

### 2.3 冻害

牧羊场 OTC 控制试验中,OTC 内岷江冷杉芽发生冻害的百分比对照的高出 752.5% (图 2 a)。移地实验中,牧羊场移栽的岷江冷杉幼苗芽遭受严重的冻害,而位于林线交错带的幼苗未发现冻害现象(图 2 b)。

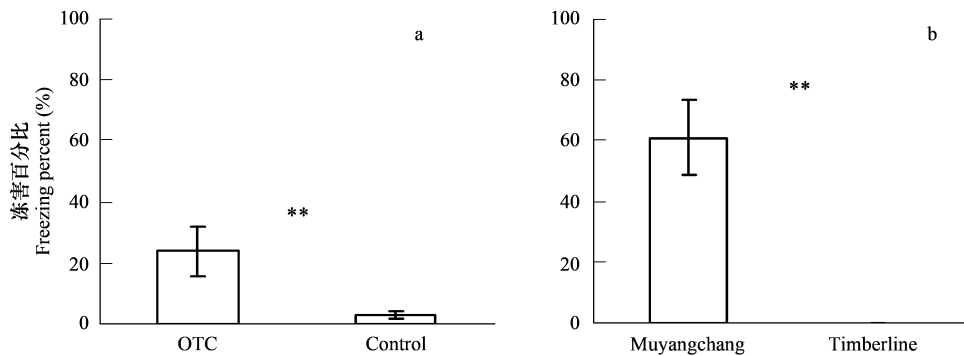


图 2 不同处理下岷江冷杉芽冻害百分比

Fig. 2 Freezing percent of *A. faxoniana* in different treatments

\* \*  $p < 0.01$

### 3 讨论

OTC 能有效提高环境温度并能最小限度减少其它因子变化,是一种较为理想的升温装置,被广泛用于有关模拟增温的控制实验<sup>[17, 18]</sup>。本研究发现,整个生长季里,OTC 内日平均气温比对照增加 2.2 °C,显著延长生长季长度。但由于 OTC 形状、大小差异及纬度不同引起太阳辐射时数差异,使得 OTC 增温幅度在不同控制试验中相差甚远。移地实验也是一种被普遍用于模拟增温的研究方法<sup>[19]</sup>。根据海拔与温度的关系,牧羊场气温应该比林线交错带升高 3.0 ~ 3.6 °C [(3200 ~ 2600) × 0.5 °C、(3200 ~ 2600) × 0.6 °C],但实际观测的结果并非如此,牧羊场日平均气温比林线交错带的仅高出 2.5 °C。杨永辉等<sup>[20]</sup>的研究也有类似的趋势。这说明小环境(风、雨、云等)因子对近地表大气温度具有强烈的修饰作用。

增温效应使岷江冷杉芽开放显著提前,这与对花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)<sup>[21]</sup>和哥伦比亚云杉(*Picea sitchensis*)<sup>[22]</sup>的研究结果类似。早出叶可能有利于物种资源利用,因为随着叶片展开,通常净光合速率随之增加,直到叶子完全展开,光合速率能力达到最高峰<sup>[23]</sup>。其次,物种与环境之间的关系是经过长时间自然选择而形成的,因此植物提前展叶或开花,会加大植物叶或花遭受春季霜冻的可能性<sup>[24]</sup>,本研究发现两种控制实验中,增温效应均使岷江冷杉幼苗芽遭受严重的冻害。牧羊场模拟试验,5 月中旬左右,夜晚气温在零度以下。而 OTC 内岷江冷杉幼苗在一周前左右芽就开始开放,因此冻害严重。虽然对照岷江冷杉幼苗也发现一定程度的冻害,但因为对照内岷江冷杉幼苗在冻害天气内开放的芽数量有限,因此冻害不是很严重。移地

实验,冻害情况更为严重。牧羊场岷江冷杉芽开放时间比林线交错带的早了近 1 个月,冻害期其芽基本上全部开放,因此冻害十分严重。而林线交错带岷江冷杉幼苗芽开放到 6 月初,那时林线气温已经比较高,也比较稳定,因此未发现冻害现象。

芽的数量和质量是决定枝叶生长发育的基础。在此次实验中发现,岷江冷杉幼苗芽在遭受冻害后,似乎表现出一种补偿机制。因为在两种研究方法下,增温处理的幼苗,即发生冻害的幼苗,其芽发育形成的当年生枝条比对照的更长更粗。OTC 内岷江冷杉幼苗当年生枝条长度是对照的 1~3 倍,移地实验的增幅更大。从中看出,在植株水平上,芽的数量和而后芽发育形成的新生枝条的生长情况似乎存在着一种权衡关系。

综上所述,岷江冷杉幼苗对两种模拟增温的短期响应是敏感而迅速的。特别是移地实验,岷江冷杉芽开放提前近一个月,大大延长其在林线的生长季长度,这对其生长无疑是有利的。但早春冻害使其付出沉重的代价。在未来全球气候变化的大背景下,植被,特别是高纬度,高海拔植被可能面临同样的恶果。但需要说明的是,本研究仅调查了一个生长季情况。这种结论是不是仅仅是气候波动的一次偶然现象,无法推测。因此,开展该领域的深入研究十分必要。

#### References:

- [ 1 ] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. *Science*, 2004, 306: 1686
- [ 2 ] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: The physical science Basis. The Fourth Assessment Report of Working Group. <http://www.ipcc.ch/>. Cited 14 May 2007
- [ 3 ] Chapin F S, Jefferies R L, Reynolds J F, *et al.* Arctic plant physiological ecology in an ecosystem context. In: Chapin F S, Jefferies R L, Reynolds J F. Arctic ecosystems in a changing climate: An ecophysiological perspective. San Diego: Academic Press, 1992. 441—452.
- [ 4 ] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects of mountain plants. *Nature*, 1994, 369: 448—450.
- [ 5 ] Traidl-Hoffmann C, Kasche A, Menzel A, *et al.* Impact of pollen on human health; more than allergen carriers? *International Archives of Allergy and Immunology*, 2003, 131: 1—13.
- [ 6 ] Schwartz M D, Crawford T M. Detecting energy balance modifications at the onset of spring. *Physical Geography*, 2001, 22: 394—409.
- [ 7 ] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements. *Nature*, 1996, 382: 146—149.
- [ 8 ] Isabelle C, Elisabet G B. Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecology Letters*, 2001, 4: 500—510.
- [ 9 ] Chapin F S, Shaver G R. Individualistic growth response of tundra plant species to environmental manipulations in the field. *Ecology*, 1985, 66: 564—576.
- [ 10 ] Wookey P A, Parsons A N, Welker J M, *et al.* Comparative responses of phenology and reproductive development to simulated environmental change in sub-arctic and high arctic plants. *Oikos*, 1993, 67: 490—502.
- [ 11 ] Havstrom M, Callaghan T V, Jonasson S. Differential growth responses of *Cassiope tetragona*, an arctic dwarf-shrub, to environmental perturbations among three contrasting high and sub-arctic sites. *Oikos*, 1993, 66: 389—402.
- [ 12 ] Chapin F S III, Shaver G R. Physiological and growth responses of arctic plants to a field experiment simulating climate change. *Ecology*, 1996, 77: 822—840.
- [ 13 ] Suzuki S, Kudo G. Short-term effects of simulated environmental change on phenology, leaf traits, and shoot growth of alpine on a temperate mountain, northern Japan. *Global Change Biology*, 1997, 3 (Suppl. 1): 108—118.
- [ 14 ] Xu Z F, Hu T X, Zhang Y B, *et al.* Review on responses of plant phenology to simulated elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008, 14(5): 716—720.
- [ 15 ] Harrington R M, Woidwod L, Sparks T. Climate change and trophic interactions. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, 14 (4): 146—150.
- [ 16 ] Maillate L. Structure dynamics of silver birch, the fate of bud. *Journal of Applied Ecology*, 1982, 19: 203—218.
- [ 17 ] Marion G M, Henry G H R, Freckman D W, *et al.* Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems. *Global Change Biology*, 1997, 3(suppl. 1): 20—32.
- [ 18 ] Niu S L, Han S G, Ma K P, *et al.* Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 31: 262—271.
- [ 19 ] Ineson P, Benham D G, Poskitt J, *et al.* Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soils. 2. A soil warming study. *Global Change Biology*, 1998, 4: 153—161.

- [20] Yang Y H, Wang Z P, Sakura Y, *et al.* Effects of global warming on productivity and soil moisture in Taihang Mountain: A transplant study. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 13(6): 667—671.
- [21] Olszyk D, Wise C, VanEss M, *et al.* Phenology and growth of shoots, needles, and buds of Douglas-fir seedlings with elevated CO<sub>2</sub> and (or) temperature. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76: 1991—2001.
- [22] Murray M B, Smith R I, Leith I D. Effects of elevated CO<sub>2</sub>, nutrition and climatic warming on bud phenology in Sitka spruce (*Picea sitchensis*) and their impact on the risk of frost damage. *Tree Physiology*, 1994, 14: 691—706.
- [23] Gower S T, Reich P B, Son Y. Canopy dynamics and aboveground production of five tree species with different leaf longevities. *Tree Physiology*, 1993, 12: 327—345.
- [24] Hänninen H. Does climate warming increase the risk of frost damage in northern trees? *Plan Cell and Environment*, 1991, 14: 449—454.

参考文献:

- [14] 徐振锋, 胡庭兴, 张远彬, 等. 植物物候对模拟 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高的响应研究进展. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(5): 716~720.
- [18] 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. *植物生态学报*, 2007, 31: 262~271.
- [20] 杨永辉, 王智平, 佐仓保夫, 等. 全球变暖对太行山植被生产力及土壤水分的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(6): 234~241.