

# 川西亚高山采伐迹地草坡群落对 模拟增温的短期响应

徐振锋<sup>1,3</sup>, 胡庭兴<sup>1,\*</sup>, 李小艳<sup>2,3</sup>, 张远彬<sup>3</sup>, 鲜骏仁<sup>1</sup>, 王开运<sup>3,4</sup>

(1. 四川农业大学林学院园艺学院, 四川雅安 625014; 2. 西华师范大学生命科学院, 四川南充 637002;  
3. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 4. 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:** 采用开顶式生长室 (open-top chamber, OTC), 研究了川西亚高山采伐迹地草坡群落物候、群落结构和地上生物量对模拟增温的初期响应。生长季中 OTC 内日平均气温较对照 (CK) 增加 2.2 °C, 5 cm 土壤温度增加 0.8 °C。和 CK 相比, 建群种牛尾蒿和糙野青茅萌动期、花蕾期和花期均显著提前, 而枯黄期显著推迟。群落各种群高度、密度和重要值增加、减少或无影响, 生物多样性指数有所下降, 群落结构发生一定变化。OTC 内糙野青茅和牛尾蒿地上生物量较 CK 分别增加 46.3% 和 42.0%。中华羊茅和其它草类植物地上生物量有所下降, 但差异不显著。地上总生物量增加 34.0%。

**关键词:** 群落结构; 生物多样性指数; 开顶式生长室; 地上生物量; 物候

文章编号: 1000-0933 (2009)06-2899-07 中图分类号: Q142, Q948, S812 文献标识码: A

## Short-term responses of grass community in clear-cutting land of sub-alpine regions to simulated global warming, Western Sichuan

XU Zhen-Feng<sup>1,3</sup>, HU Ting-Xing<sup>1,\*</sup>, LI Xiao-Yan<sup>2,3</sup>, ZHANG Yuan-Bin<sup>3</sup>, XIAN Jun-Ren<sup>1</sup>, WANG Kai-Yun<sup>3,4</sup>

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

2 Life Science College of China West Normal University, Nanchong Sichuan 637002, China

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

4 Shanghai Key Laboratory of Urbanization Processes and Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2899 ~ 2905.

**Abstract:** The responses of phenology, community structure and above-ground biomass of grass community in clear-cutting land of sub-alpine regions in Western Sichuan to simulated global warming were studied by using the open-top chamber (OTC) method. The results were shown as follows: mean air temperature was 2.2 °C higher in the OTC than in the control plot (CK) throughout the growing season and there was 0.8 °C difference in daily mean soil temperature at 5 cm below the soil surface between the OTC and the CK. Compared with those in the CK, constructive species (*Artemisia subdigitata* and *Deyeuxia scabrescens*) in the OTC showed earlier sprouting, pre-flowering bud, and florescence. However, they had later withering in the OTC than in the CK. Height, density and important value of each plant population responded differently (increase, decrease or no effects) to warming. The biodiversity index was slightly lower in the OTC than in the CK. Some changes in the community structure were observed. The above-ground biomass of *Deyeuxia scabrescens* and *Artemisia subdigitata* in the OTC increased by 46.3% and 42.3%, respectively. However, the above-ground biomass of *Festuca sinensis* and the other herbs in the OTC decreased, but not significant. Compared with those under ambient temperature, total above-ground biomass increased by 34.0% under elevated temperature.

**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 (05SC023-009); 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: 2008-06-13; 修订日期: 2008-11-28

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

**Key Words:** community structure; biodiversity index; open-top chamber; above-ground biomass; phenology

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过程的速率,且影响几乎所有生物学过程。低温和短的生长季是高山生态系统两个主要的限制因子。因此温度升高及延长的生长季可能在很大程度上刺激高山植物生长发育,进而改变群落的组成和结构。

20 世纪末,国际冻原计划(international tundra experiment, ITEX)使用统一的开顶式生长室(open top chamber, OTC)模拟增温对植被影响的实验方法研究了高纬度苔原生态对模拟气候变化的响应,取得了许多重要成果。结果表明,温度升高对植物物候、生长、生殖、生理、物种组成及群落结构均有着显著的影响<sup>[5-9]</sup>。而有关中纬度高山生态系统响应模拟增温的研究还很不够<sup>[10,11]</sup>。控制实验目前仍然是研究全球变化最重要的信息来源。研究采伐迹地草坡群落结构和生长对模拟气候变化的响应对于理解群落响应温度升高的内部机制,及预测其在未来气候变化的背景下的动态有着重要的作用和意义。

川西亚高山植被生态系统地处高山峡谷区,是全球变化的敏感地带。作为我国五大林区之一,在 20 世纪 50 至 90 年代末之间,大规模的木材采伐致使当地植被格局发生很大的变化,出现了大面积的以草本为主要物种的采伐迹地。本实验样地设置在四川省平武县王朗国家级自然保护区牧羊场。以采伐迹地的草坡群落为研究对象,通过 OTC 模拟增温效应对植被影响的研究方法,揭示群落结构和生产量对模拟增温的初期响应。为未来气候变化背景下该区域植被恢复重建提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地设置

研究样地设在王朗国家级自然保护区牧羊场草坡,地理位置为 E 104°08', N 32°93', 海拔 2650 m。研究区域自然概况见前人的报道<sup>[12]</sup>。2005 年 9 月,参照国际冻原计划(ITEX)模拟增温效应对植被影响的研究方法,建立 4 个 OTCs,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 附近设立 4 个对照小样方(control plot, CK),其面积同样为 1.5 m × 1.5 m。

### 1.2 环境因子测定

从 2006 年 5 月起,OTC 和 CK 内的空气温度(1 m)、土壤温度(-5 cm)、太阳辐射(1.5 m)、降水(1.5 m)等环境因子用全自动小气候观测系统监测,小气候观测系统配有温度传感器(6507A、±0.1℃、Finland)、太阳总辐射传感器(SK01-D、±3%、Australia)。所有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一次数据。

### 1.3 物候观测

2007 年 4 月,在 OTC 和 CK 内选取建群种牛尾蒿和糙野青茅 15~20 株,用标记卡标记。物候观测频率约 2~3 d 一次。以 20% 的该种植物样株的物候变化比率划分每一物候期的开始时间。

### 1.4 群落结构

在物种生长旺盛期(2007 年 8 月中旬)分别在 OTC 和 CK 内随机选取样方 12 个(30 cm × 30 cm),对各种群高度、密度和频度进行统计调查。物种重要值和综合优势比采用如下公式: $IV = (RF + RH + RD) \times 100/3$ ,其中  $IV$  为重要值, $RF$  为相对频度, $RH$  为相对高度, $RD$  为相对密度; $SDR3 = (\text{高度比} + \text{频度比} + \text{密度比})/3 \times 100\%$ , $SDR3$  为三因素的综合优势比。

### 1.5 地上生物量

2007 年物种生长末期,随机选取样方 8 个(30 cm × 30 cm),每个 OTC 及对照各取两个样方,齐地面刈割,按不同物种分开,70℃下烘干至恒重,并称重、归类。同时,为了避免 OTC 的边沿效应和降水的可能影响,我们只在 OTC 的中心区域(1.2 m × 1.2 m)内取样。

### 1.6 多样性测定

本研究选取 5 种指数测定物种多样性。(1)物种丰富度指数  $S$  = 出现在样地上的物种数;(2)Shannon-Wiener 指数  $H' = - \sum Pi \ln Pi$ ;(3)Hill 指数  $N_2 = 1/\lambda$ ;(4)Alatalo 均匀度指数  $E_2 = [(1/\lambda) - 1] (e^{H'} - 1)$ ;(5)Pielou 均匀度指数  $E_1 = H' / \ln(s)$ 。其中,  $Pi$  为物种  $i$  的多度比例,  $\lambda$  为辛普森指数。

## 2 结果

### 2.1 OTC 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 a)。日最高气温 OTC 比 CK 升高 2.9~4.5 °C。5、6、7 月和 8 月份 OTC 内日最低气温分别比 CK 高出 1.3、2.3、2.6 °C 和 2.7 °C。-5 cm 土壤温度同样也明显升高(图 1 b),但小于气温的增幅程度,仅为 0.8 °C(5 月份 +0.7 °C;6 月份 +1.1 °C;7 月份 +0.9 °C 及 8 月份 +0.4 °C)。

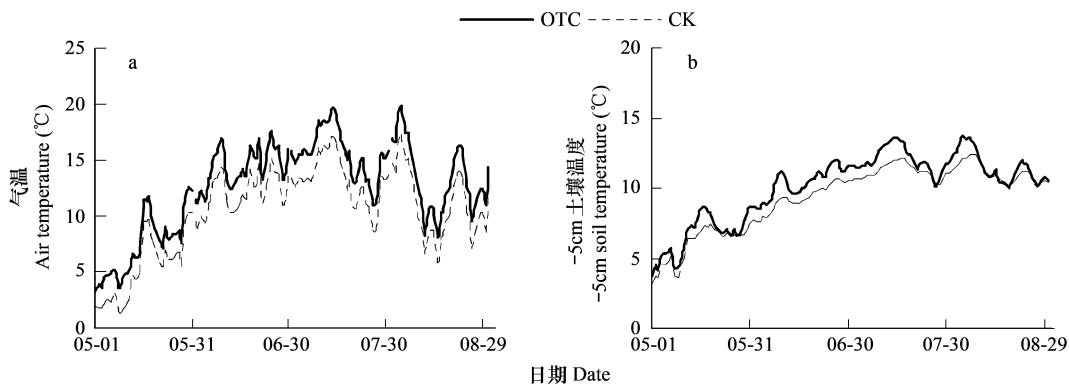


图1 OTC 及 CK 内 5 月 1 日~8 月 31 日,日平均气温和 -5 cm 土壤温度变化

Fig. 1 Seasonal transition of daily mean air temperature at vegetation height and daily mean soil temperature at the depth of -5 cm in the OTC and in the CK

### 2.2 物候响应

模拟增温对两个建群种生长发育具有明显的影响(表 1)。和 CK 相比,OTC 内牛尾蒿萌动期、花蕾期和花期均极显著提前( $p < 0.01$ ),而枯黄期却极显著推迟( $p < 0.01$ )。糙野青茅物候期对温度升高的响应有着类似的趋势。

表 1 牛尾蒿和糙野青茅物候观测数据

Table 1 Data on phenology of *Artemisia subdigitata* and *Deyeuxia scabrescens*

| 物种 Species                       | 萌动期 Sprouting | 花蕾期 Pre-flowering bud | 花期 Florescence | 枯黄期 Withering |
|----------------------------------|---------------|-----------------------|----------------|---------------|
| 牛尾蒿 <i>Artemisia subdigitata</i> | +7.6 **       | +4.6 **               | +10.3 **       | -8.8 **       |
| 糙野青茅 <i>Deyeuxia scabrescens</i> | +15.3 **      | +3.2 **               | +5.6 **        | -11.2 **      |

“+”表示提前天数 “+” means to be advanced, “-” 表示推迟天数 “-” means to be delayed, “\*\*” 表示差异极显著,“\*\*” means to be the most significant difference( $p < 0.01$ )

### 2.2 群落结构响应

模拟增温加速了植物的生长发育,对群落结构产生一定的影响(表 2)。由表 2 看出,植物高度基本上表现为增加趋势,特别是处于上层的两个建群种牛尾蒿和糙野青茅,二者高度对温度升高表现的更为敏感。而增温效应对牛尾蒿和糙野青茅密度造成一定程度的负效应。物种重要值和综合优势比是度量群落水平反应的综合数量指标,由表 2 看出,大多数物种的重要值和综合优势比有不同程度的上升。

### 2.3 物种多样性响应

表 3 为增温效应对物种多样性指数的影响。从群落物种丰富指数来看,CK > OTC,其中 OTC 的物种丰富

度指数为 CK 的 70.3%, 即温度升高使群落的物种丰富度指数明显降低。OTC 的物种多样性 ( $H'$  和  $N_2$ ) 明显低于 CK 的物种多样性,  $H'$  和  $N_2$  多样性指数变化程度不同, 这主要是由于多样性指数综合反映着群落的丰富度和分布的均匀性, 而不同的多样性指数对这两个方面的侧重有所不同,  $H'$  偏重于物种的丰富度而  $N_2$  则偏重于均匀度。OTC 内均匀度指数 ( $E_1$  和  $E_2$ ) 均略低于 CK 内均匀度指数。

表 2 模拟增温对群落主要物种组成和各特征值的影响

Table 2 Effects of simulated warming on main species composition and their characters

| 物种 Species                             | 高度 Height (cm) |      | 密度 Density (n/900cm <sup>2</sup> ) |      | 频度 Frequency |      | 重要值 Important value |       | 综合优势比 Summed dominated rate (%) |       |
|--|----------------|------|------------------------------------|------|--------------|------|---------------------|-------|---------------------------------|-------|
|  | OTC            | CK   | OTC                                | CK   | OTC          | CK   | OTC                 | CK    | OTC                             | CK    |
| 牛尾蒿 <i>Artemisia subdigitata</i>       | 133.2          | 99.3 | 8.7                                | 9.5  | 1            | 1    | 13.23               | 10.64 | 77.10                           | 76.82 |
| 糙野青茅 <i>Deyeuxia scabrescens</i>       | 118.0          | 90.4 | 27.8                               | 31.2 | 1            | 1    | 19.93               | 17.98 | 96.20                           | 97.01 |
| 中华羊茅 <i>Festuca sinensis</i>           | 76.6           | 74.9 | 18.8                               | 19.5 | 1            | 1    | 14.68               | 13.25 | 75.04                           | 79.31 |
| 酸模 <i>Rumex acetosa</i>                | 63.4           | 66.7 | 0.63                               | 0.75 | 0.25         | 0.41 | 4.01                | 4.23  | 24.95                           | 36.86 |
| 糙苏 <i>Phlomis umbrosa</i>              | 53.3           | 51.8 | 3.5                                | 4.2  | 0.5          | 0.66 | 5.72                | 5.77  | 34.20                           | 43.88 |
| 圆叶小堇菜 <i>Viola rockiana</i>            | 20.9           | 22.0 | 3.2                                | 3.4  | 0.41         | 0.5  | 3.83                | 3.80  | 22.73                           | 27.68 |
| 穗花荆芥 <i>Nepeta laevis</i>              | 33.8           | 31.8 | 1.8                                | 2.1  | 0.41         | 0.41 | 3.85                | 3.39  | 24.28                           | 26.58 |
| 广布野豌豆 <i>Vicia cracca</i>              | 44.8           | 39.7 | 4.2                                | 3.8  | 0.75         | 0.75 | 6.65                | 5.49  | 41.25                           | 42.39 |
| 猪殃殃 <i>Galium aparine</i>              | 54.9           | 46.2 | 3.8                                | 3.4  | 0.75         | 0.75 | 6.94                | 5.59  | 43.30                           | 44.14 |
| 川甘蒲公英 <i>Taraxacum lugubre</i>         | 24.7           | 26.4 | 1.3                                | 1.5  | 0.41         | 0.5  | 3.26                | 3.29  | 21.41                           | 27.13 |
| 丝叶苔草 <i>Carex capilliformis</i>        | 57.8           | 52.6 | 9.3                                | 8.8  | 0.91         | 1    | 9.84                | 8.63  | 55.95                           | 60.39 |
| 牛繁缕 <i>Malachium aquaticum</i>         | 43.6           | 50.2 | 3.1                                | 5.3  | 0.5          | 0.75 | 5.14                | 6.42  | 31.29                           | 47.51 |
| 碎米荠 <i>Cardamine hirsuta</i>           | —              | 77.0 | —                                  | 0.1  | —            | 0.16 | —                   | 3.51  | —                               | 31.29 |
| 粗茎梭子芹 <i>Pleurospermum crassicaule</i> | —              | 35.5 | —                                  | 0.1  | —            | 0.16 | —                   | 1.94  | —                               | 17.36 |
| 甘青老鹳草 <i>Geranium pylzowianum</i>      | —              | 65.0 | —                                  | 0.1  | —            | 0.16 | —                   | 3.06  | —                               | 27.26 |
| 葱状灯心草 <i>Juncus concinnus</i>          | 48.6           | 51.7 | 0.4                                | 0.5  | 0.16         | 0.25 | 2.91                | 3.01  | 17.98                           | 26.22 |

### 3.4 地上生物量响应

温度是影响植物生长、发育和功能的重要环境因子。模拟增温对群落地上生物量产生显著影响 (图 2)。增温效应下, 建群种糙野青茅和牛尾蒿地上生物量均显著增加, OTC 内糙野青茅和牛尾蒿地上生物量较 CK 分别增加 46.3% 和 42.0%。模拟增温使伴生种中华羊茅地上生物量有所减少, 但差异未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。其它草类植物地上生物量也有类似的趋势。地上总生物量增加 34.0%。

## 4 结论与讨论

### (1) OTC 增温效应

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>[13,14]</sup>。本研究发现, 整个生长季里, OTC 内日平均气温比 CK 增加 2.2 °C, 5cm 土壤温度仅增加 0.8 °C。两者显著延长生长季长度。在北极<sup>[11,15]</sup>、亚北极<sup>[10,11,16]</sup>和中纬度高山<sup>[17,13,18]</sup>地区 OTC 增温效应分别为 2.3 ~ 5.6 °C、2.7 ~ 4.0 °C 和 1.3 ~ 1.8 °C。与本研究区域结果相当或偏小。这可能是由于 OTC 形状、大小差异所造成的, 此外纬度不同引起太阳辐射时数差异可能对此有一定影响。

### (2) 物候响应

大气温度是影响植物物候进程的一个重要因素。温度升高一般能加快物候进程, 使植物春季物候期提

表 3 模拟增温对物种多样性指数的影响

Table 3 Effects of simulated warming on species biodiversity index

| 指数 Index |       | OTC  | CK   |
|----------|-------|------|------|
| 丰富度指数    | $S$   | 8.3  | 11.8 |
| 物种多样性指数  | $H'$  | 1.85 | 2.09 |
|          | $N_2$ | 5.12 | 6.61 |
| 均匀度指数    | $E_1$ | 0.82 | 0.84 |
|          | $E_2$ | 0.65 | 0.79 |

前、秋季物候期推迟<sup>[8]</sup>。OTC 内气温和 -5 cm 土壤温度均显著提高,二者显著延长生长季长度。由于 OTC 的增温效应,两个建群种(牛尾巴蒿和糙野青茅)的萌动期、花蕾期和花期均极显著提前,而枯黄期都极显著推迟。这与 Stenstrom 在北极地区对苔草 *Carex bigelowii* 的研究结果一致<sup>[19]</sup>;而不同于 Totland 的研究<sup>[20,21]</sup>,其结果表明温度升高对两种毛茛 *Ranunculus acris* 和 *Ranunculus glacialis* 物候期没有显著影响。周华坤采用 OTC 模拟增温的研究方法研究青藏高原矮嵩草草甸对模拟增温的影响,发现其建群种和主要伴生种物候进程加快,但强度却不及本研究两个物种。因为不同类型物种对温度升高的响应存在差异,且响应还存在区域间的差异。

### (3) 群落结构响应

OTC 改善了植物群落的小气候环境,一定程度上满足了植物对热量的需求,有利于植物的生长和发育,进而改变群落结构。温度升高条件下,大多种群高度增加,而部分物种密度却有下降趋势;大多数物种的重要值和综合优势比有不同程度的上升,这表明群落结构发生一定的变化。这和周华坤等的研究结果有一定的差异,他们研究发现,在增温效应下,矮嵩草草甸大多物种高度和密度均有不同程度增加<sup>[17]</sup>。这主要是因为两个群落的成层结构不同,矮嵩草草甸高度低,增温能对整个群落生长发育产生一定的效应;而本研究的群落成层结构较复杂,牛尾巴蒿和糙野青茅两个建群种占领上层,增温效应下,两者生长发育显著加快,高度、叶面积和叶数量都明显增加。这不利于下层物种对光照,热量等因子的摄取。另外,二者密度均有一定程度下降,说明在温度升高条件下,为了争夺空间和资源,出现了自梳现象。Chapin 研究发现,高纬度苔原群落结构对模拟增温不太敏感,短期内环境温度升高对群落结构没有明显的影响<sup>[22]</sup>。说明高纬度苔原群落和中纬度高山草本群落对温度升高的响应存在差异,这可能和植物群落物种类型及区域环境有关。随着群落结构变化,模拟增温使物种多样性指数下降,而对均匀度指数影响不明显。

### (4) 地上生物量响应

生物量是生态系统重要的特征,也是衡量物种竞争的重要指标<sup>[23]</sup>。大气温度升高可能促进植物细胞分裂,增加土壤养分有效性及延长生长季,从而可以增加生物量。已有研究表明,模拟增温使亚极地矮灌丛和地衣<sup>[24]</sup>、阿拉斯加 Toolik 湖苔原<sup>[22]</sup>、青藏高原矮嵩草草甸<sup>[17,11]</sup>及英格兰北部草原<sup>[27]</sup>生物量显著增加。且发现生物量对模拟增温的影响在不同物种间存在一定的差异<sup>[17,26]</sup>。模拟增温使糙野青茅和牛尾巴蒿地上生物量均显著增加(46.3%和42.0%),而对中华羊茅和其他草类地上生物量影响不大,地上总生物量增加了34.0%。各物种生物学特性及其对资源利用方式不同,因此对温度升高效应的敏感程度也就不同。本研究中群落地上生物量的增加主要来自建群种糙野青茅和牛尾巴蒿,表明温度升高对群落上层影响更为敏感而迅速,两物种在未来气候变暖的条件下可能具有更强的竞争力。

综上所述,川西亚高山采伐迹地草坡群落生长和结构对短期模拟增温(2a)的响应是敏感而迅速的。但需要说明的是,本研究仅揭示该群落对增温效应的短期响应。这种结论可能不是该群落对模拟增温最终表现。因为物候、生长及生物量对模拟增温的响应可能存在年际间的差异<sup>[9,13,27]</sup>,因此,进一步研究是十分必要的。

### References:

[1] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. Science, 2004, 306: 1686.

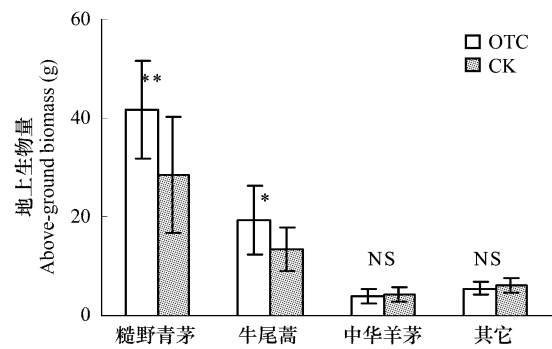


图2 生长季节末地上生物量 “\*\*”表示差异极显著,“\*”表示差异显著,“NS”表示差异不显著

Fig. 2 The above-ground biomass at the end of growing season “\*\*” means to be the most significant difference ( $p < 0.01$ ), “\*” means to be significant difference ( $p < 0.05$ ), “NS” means to be no significant difference

- [ 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 FS, Jefferies RL, Reynolds JF. 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 ] Chapin F S, Shaver G R. Individualistic growth response of tundra plant species to environmental manipulations in the field. *Ecology*, 1985, 66: 564—576.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Havström 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.
- [ 8 ] Arft A M, Walker M D, Gurevitch J, *et al.* Responses of tundra plants to experimental warming: Meta-analysis of the International Tundra Experiment. *Ecological Monographs*, 1999, 69: 491—511.
- [ 9 ] Henry G H R, Molau U. Tundra plants and climate change: the international Tundra Experiment (ITEX). *Global Change Biology*, 1997, 3: 1—9.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Zhang Y, Welker J M. Tibetan tundra responses to simulated changes in climate; aboveground biomass and community responses. *Arctic and Alpine Research*, 1996, 28: 203—209.
- [ 12 ] Xian J R, Hu T X, Wang K Y, *et al.* Characteristics of gap in sub-alpine coniferous forest in western Sichuan. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23: 6—10.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Zhou H K, Zhou X M, Zhou X Q. A preliminary study of the influence of simulated greenhouse effect on a *Kobresia humilis* meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 547—553.
- [ 18 ] Wada N, Shimoni M, Miyamoto M, *et al.* Warming effects on shoot development growth and biomass production in sympatric evergreen alpine dwarf shrubs *Empetrum nigrum* and *Loiseleuria procumbens*. *Ecological Research*, 2002, 17: 125—132.
- [ 19 ] Stenstrom A, Jonsdottir I S. Responses of the clonal sedge, *Carex bigelowii*, to two seasons of simulated climate change. *Global Change Biology*, 1997, 3: 89—96.
- [ 20 ] Totland Ø. Effects of temperature on performance and phenotypic selection on plant traits in alpine *Ranunculus acris*. *Oecologia*, 1999, 120: 242—251.
- [ 21 ] Totland, Alatalo J M. Effects of temperature and date of snowmelt on growth, reproduction, and flowering phenology in the arctic/alpine herb, *Ranunculus glacialis*. *Oecologia*, 2002, 133: 168—175.
- [ 22 ] Chapin F S III, Shaver G R, Giblin A E, *et al.* Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate. *Ecology*, 1995, 76: 694—711.
- [ 23 ] Li B. Plant competition-experiments on interaction between crop and grass. Beijing: higher education press, Heidelberg: Springer Press, 2001. 15—27.
- [ 24 ] Press M C, Potter J A, Burke M J W, *et al.* Responses of a sub-arctic dwarf shrub heath community to simulated environmental change. *Journal of Ecology*, 1998, 86: 315—327.
- [ 25 ] Yang Y H, Harrison A F, Ineson P. Biomass responses to a simulated global warming by changing of elevation and fertilizer addition in upland

grassland. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(3): 234–241.

- [26] Naoya W, Masaki S, Michiru M, *et al.* Warming effects on shoot developmental growth and biomass production in sympatric evergreen alpine dwarf shrubs *Empetrum nigrum* and *Loiseleuria procumbens*. *Ecological Research*, 2002, 17: 125–132.
- [27] Li Y N, Zhao L, Zhao X Q, *et al.* Effects of a 5-year mimic temperature increase to the structure and productivity of *Kobresia humilis* meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(3): 236–239.

#### 参考文献:

- [12] 鲜骏仁, 胡庭兴, 王开运, 等. 川西亚高山针叶林林窗特征. *生态学杂志*, 2004, 23: 6–10.
- [17] 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. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 547–553.
- [14] 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.
- [23] 李博. 植物竞争-作物与杂草之间相互作用实验. 北京: 高等教育出版社; 海德堡: 施普林格出版社, 2001, 15–27.
- [25] 杨永辉, 拖尼 哈里森, 费尔 安纳逊. 山地草原生物量的垂直变化及其与气候变暖和施肥的关系. *植物生态学报*, 1997, 21(3): 234–241.
- [27] 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. *草地学报*, 2004, 12(3): 236–239.