

# 矮嵩草草甸植物群落数量特征 对模拟增温的响应

刘 伟, 王长庭, 赵建中, 许庆民, 周 立

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

**摘 要:** 在 5 个(A~E)直径不同的开顶式增温小室(OTCs)环境条件下, 通过连续 5 年(2002~2006)的野外试验, 分析了植物生长季矮嵩草草甸植物群落地上部分生物量、平均高度、盖度对模拟增温的响应。结果表明: (1) 开顶式增温小室能够有效改变微气候环境, 室内气温比室外增加 0.24~3.41℃, 其增温幅度与温室面积大小呈显著负相关( $r = -0.993 1^*$ )。 (2) 随着试验时间的持续, 各温室植物群落地上部分生物量均逐渐升高, 第 1 年以温室 B 略高(202.01 g/m<sup>2</sup>), 而第 5 年以温室 A 最高(414.56 g/m<sup>2</sup>)且显著高于其它处理和对照( $P < 0.05$ )。 (3) 植物群落平均高度在同一温室呈逐年增加的趋势, 第 5 年显著高于其它年份( $P < 0.05$ ); 而不同温室间的植物群落平均高度随着室内温度的增高而逐渐显著增加。 (4) 植物群落总盖度呈逐年上升的趋势, 至第 5 年已接近或达到 100%; 各温室间分盖度之和无显著差异( $P > 0.05$ ), 而其年际间变化差异极显著( $P < 0.001$ ), 2004~2006 年分盖度之和均极显著高于 2002 和 2003 年, 而 2003 年又显著高于 2002 年。可见, 随着温室气温的逐渐增加, 矮嵩草草甸植物群落地上部分生物量、平均高度、盖度均表现为逐渐上升的趋势。

**关键词:** 矮嵩草草甸; 植物群落; 模拟增温; 响应

中图分类号: Q948.11 文献标识码: A

## Responses of Quantity Characteristics of Plant Community to Simulating Warming in Alpine *Kobresia humilis* Meadow Ecosystem

LIU Wei, WANG Chang-ting, ZHAO Jian-zhong, XU Qing-min, ZHOU Li

(Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

**Abstract:** We analyzed biomass, average height, coverage of the plant community of *Kobresia humilis* meadow during plant growing season to simulate environmental temperature change during 5 years by using different sizes open topped chambers (OTCs). The major research result showed that: OTCs could effectively change micro-climate environment, with an obvious temperature rising ranging from 0.24 to 3.41 °C. In the 1st year, the greatest aboveground biomass was in chamber B (202.01 g/m<sup>2</sup>), the biomass of chamber A was the greatest one (414.56 g/m<sup>2</sup>) in the 5th year, and the analysis showed that the biomasses were obviously greater than those of other treatments ( $P < 0.05$ ). The change of average community height was comparatively more obvious, and it showed an annually rising trends in the same chamber; The result showed that the average plant community heights in 2006 were significantly greater than that of other years ( $P < 0.05$ ). Total community coverage showed an annually increasing trends too, and in the last year of the experiments, the total coverage approached or reached 100%. The sum of total species coverage in different treatment chambers have not obvious differences ( $P > 0.05$ ), while the differences of the sum of total spe-

①收稿日期: 2009-04-23; 修改稿收到日期: 2010-04-02

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关计划项目(2001BA606A-02); 国家自然科学基金重点项目(30730069)

作者简介: 刘 伟(1965-), 男(汉族), 博士, 副研究员, 主要从事草地生态学的研究。E-mail: liuwei@nwipb.ac.cn

cies coverage between different years are significantly different ( $P < 0.001$ ); Duncan's new multiple range test reveals that: the sum of partial coverage of 2004 to 2006 are significantly greater than those of 2002 and 2003. Moreover, that of 2003 are significantly greater than that of 2002. These results revealed that quantity characteristics of plant community may be increased with temperature rising.

**Key words:** *Kobresia humilis* meadow; plant community; simulating warming; response

随着工业气体的排放和温室效应的加剧,全球变化(Globe change)日益成为国际社会关注的重大问题.大气环流模型(General Circulation Models, GCMs)预测结果显示:由于CO<sub>2</sub>浓度的增加,全球平均表面温度将增加1.5~4.5℃<sup>[1]</sup>,远高于过去的气候波动<sup>[2]</sup>,这种变化将会对生物产生巨大的选择压力<sup>[3-5]</sup>.在全球气候变暖的趋势下,降水格局也将发生变化,而且就某一地区而言,降水的变化有很大的差异.这必将影响植物的生理生态特征,进而对植物的种群、群落、生态系统乃至整个生物圈产生巨大影响<sup>[2]</sup>.

在过去的20多年,关于植物群落及种对气候变化的响应进行了大量的环境控制试验.这些试验主要集中在气候变化比较敏感的北极地区,多采用国际冻原计划(ITEEX)所属站点的资料,不仅探讨了微管植物个体增长<sup>[3]</sup>、植物物候期<sup>[4]</sup>及灌丛个体和群落<sup>[5-7]</sup>对温度、降水和施肥的不同反应,而且研究了植物凋落物分解作用<sup>[8]</sup>及土壤中营养元素的矿化作用<sup>[9]</sup>,提出并验证了诸多假设.

青藏高原位于中国西南部,是黄河、长江和澜沧江的发源地.植被类型主要为高寒草甸,生态系统较为脆弱.由于地处高海拔地区,因而生态系统对气候变化较为敏感<sup>[10]</sup>,中国对青藏高原生态系统在全球变暖方面的研究始于20世纪90年代初期,大部分研究是利用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)或数学模拟的方法来模拟全球变暖对生态系统所带来的可能影响<sup>[11]</sup>,而缺乏野外实验证据和人工控制试验.

矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸广泛分布于青藏高原,是高寒草甸主要植被类型之一.在高原和高山极端环境影响下所形成的高寒草甸生态系统极其脆弱,对人类干扰和由于温室效应引起的全球气候变化极其敏感,因而成为理想的研究对象.已有研究表明,试验增温会引起矮嵩草草甸物种多样性的丧失<sup>[12]</sup>、物候期始期提前、末期推迟及不同植物类群地上生物量以及矮嵩草个体生长特征的变化<sup>[13,14]</sup>,但对于矮嵩草植物群落数量特征的变化缺乏系统的分析.本研究采用国际冻原计划(ITEEX)

模拟增温的方法,建立不同梯度大小的开顶式温棚(open topped chambers, OTCs)<sup>[15]</sup>来模拟气候逐渐升温的过程,通过测定矮嵩草植物群落特征的变化,分析矮嵩草草甸植物群落对增温效应的响应,旨在检验如下假设:在气候寒冷的青藏高原,矮嵩草草甸植物群落地上部分生物量随着温度增加而增加;随着温度增加,植物群落结构将发生改变并主要表现为群落平均高度和盖度随着温室温度的增加而增加.

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地区自然概况

研究地区为青海省果洛藏族自治州玛沁县大武乡格多牧委会,地理位置为34°17'~34°25'N、100°26'~100°41'E,平均海拔3980m,年降水量513.02mm,5~9月降水437.10mm,占年降水量的85.20%.该地区气候具有典型的高原大陆性气候特点,无四季之分,仅有冷暖季之别,冷季漫长、干燥而寒冷,暖季短暂、湿润而凉爽.温度年差较小而日差较大.太阳辐射强烈,牧草生长期为110~130d.土壤为高山草甸土和高山灌丛草甸土,土壤表层和亚表层中的有机质含量丰富.

矮嵩草草甸为该地区主要植被类型之一,主要分布在地阳坡和滩地,群落结构简单,仅草本层一层.常见的伴生种类有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa* spp)、黑褐苔草(*Carex moorcroftii*)、二柱头蔗草(*Scirpus distigmaticus*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、丁柱萎陵菜(*Potentilla saundersiana*)、唐古特毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、弱小火绒草(*Leontopodium pusillum*)、短穗兔耳草(*Lagotis bechystachya*)等.

### 1.2 试验设计和方法

试验样地设立在轻度退化的矮嵩草草甸上,样地面积为50m×50m,用围栏封闭,以防止放牧动物进入.采用国际冻原计划(ITEEX)模拟增温效应对植被影响作用的方法,在样地内建立圆台型开顶式增温小室(图1)20个,分为5个处理,依次为A、B、C、D和E,其温棚顶部直径依次为0.40、0.70、

1. 00、1. 30、1. 60 m, 相应底部直径依次为 0. 85、1. 15、1. 45、1. 75、2. 05 m, 周围采用聚氯乙烯薄膜包裹并在底部固定于土壤中, 以样地内温室外草地作为对照。

试验始于 2002 年 4 月, 结束于 2006 年 9 月, 在每年植物生长季节进行. 试验期间, 在每次降雨后, 根据降雨量的大小, 对每个温室补充一定量的(依次为降雨量的 77. 85%, 62. 95%, 52. 44%, 44. 82%, 39. 08%) 水分, 并记录各增温小室内离地面高度 10 cm 处空气温度和湿度、地下 10 cm 深处土壤温度和湿度等环境参数的变化. 其中, 空气温度和土壤温度采用 HOBO 数据采集器记录, 1 次/2 h; 空气湿度采用湿度读数表人工记录, 1 次/2 h, 每月 10 d; 土壤湿度利用 FDR 测定, 10 次重复, 每天 1 次, 期间间隔 2 d, 每月 10 d. 利用手持式风速仪测定温室内外瞬时风速, 内外各测定 10 次, 连续测定 3 d.

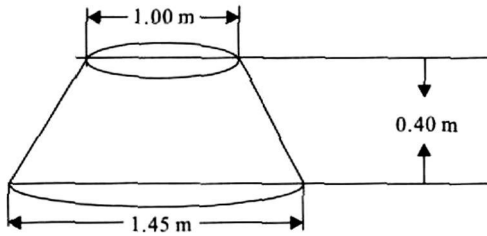


图 1 开顶式增温小室示意图

Fig. 1 Open top chamber sketch map

植物群落特征测定于每年 8 月下旬采用样方法进行, 样方大小为 25 cm × 25 cm, 每处理重复 6 次, 主要测定群落总盖度、植物种的盖度、平均高度和地上部分生物量. 其中, 盖度采用目测法, 高度为植株顶端到地面的垂直距离, 每种测量 10 株, 然后, 齐地面分种剪草, 在 70℃ 烘箱烘 24 h, 测定干重.

为了植物在翌年有利于生长发育, 在每年 9 月底试验结束时对不同温室处理植物进行刈割, 留茬高度 10 cm.

### 1. 3 数据分析

所有采集数据录入 Microsoft 产品 DPSS 11.0 电子表格中进行分析. 不同试验阶段和温度梯度间差异分析采用方差分析检验(ANOVA), 多重比较采用 Duncan 法.

## 2 结果与分析

### 2. 1 温室内微气候变化特征

2. 1. 1 气温和土壤温度 温室建立后, 不同增温小室微气候要素发生了明显变化. 其中, 不同温室 5 年

间平均气温呈现一定的季节变化规律, 即 5 月份平均气温较低, 7、8 月份气温较高, 9 月份最低(图 2); 同时, 不同温室均平均气温表现出一定的增温幅度(0. 04℃~ 3. 06℃), 增温幅度不仅与季节变化密切相关(在 5 月差异较大, 6 月次之, 7~ 9 月差异较小), 也与温室面积大小呈显著负相关关系( $r = -0. 993 1, df = 3, P < 0. 05$ ). 土壤温度变化呈现明显的季节变化, 相对于气温而言, 土壤 0~ 10 cm 温度增加幅度较小, 大约在 0. 12℃~ 1. 75℃之间(图 2).

2. 1. 2 空气和土壤湿度 温室内平均土壤湿度和平均空气相对湿度与温室温度、降雨量的大小、降雨时间间隔等环境因素有着密切关系, 反映的是一个多因素共同作用的结果, 难以进行简单分析. 从实验结果来看, 温室内土壤湿度 9 月份稍高于其它月份, 空气相对湿度 5 月较低, 6、7 月份稍高, 但处理间无明显变化规律(图 3).

2. 1. 3 风速 自然状态下, 研究地区风速的变化复杂, 由于条件限制, 不同温室处理风速的测定没有同

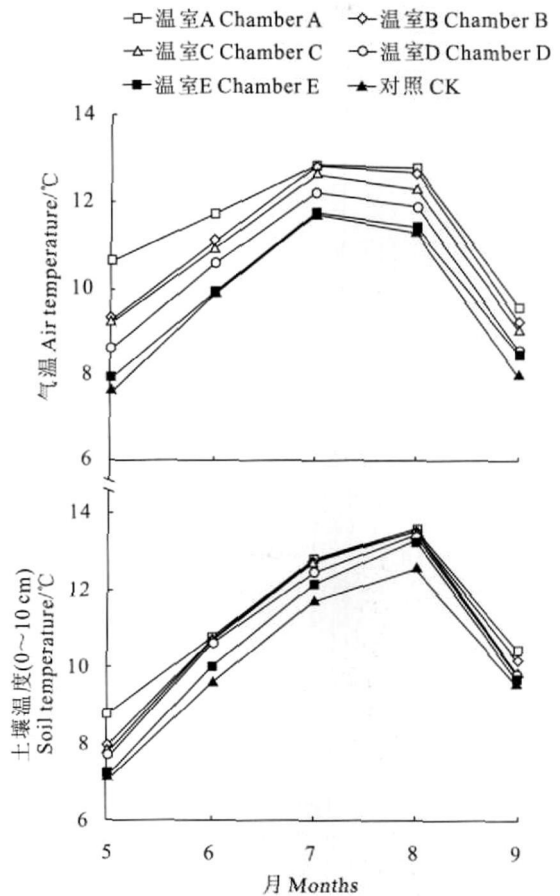


图 2 不同温室处理平均气温和土壤温度的季节变化

Fig. 2 The seasonally variety of average air temperature and soil temperature in different open topped chambers

时进行,仅同时测定了温室内外风速,因此,处理之间风速没有可比性.测定结果(图4)表明,温室的建立,大大降低了温室内的风速,温室内风速极显著低于温室外的风速( $P < 0.01$ ).

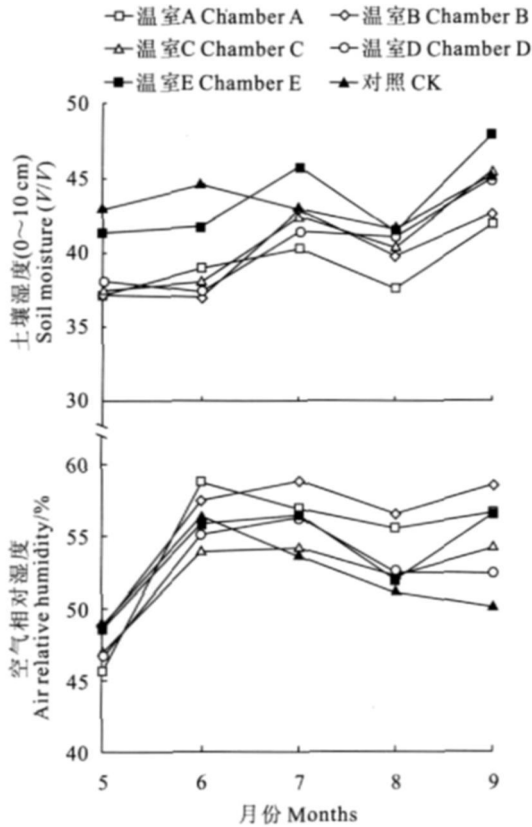


图3 不同温室平均土壤湿度和空气相对湿度变化  
Fig. 3 The average soil moisture and average air relative humidity in different chambers

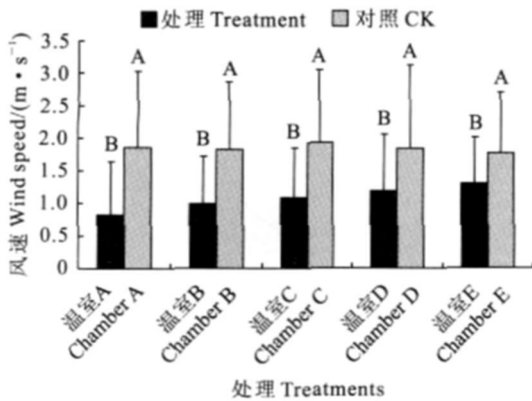


图4 温室内外风速比较  
柱状图上不同大写字母表示对照和处理  
风速在0.01水平差异显著  
Fig. 4 Comparison of wind speed between chambers outside and inside  
Bars that have different capital letters are significantly different at 0.01 level

## 2.2 增温对植物群落地上部分生物量的影响

不同温室植物群落地上部分生物量对增温的反应不尽相同(图5). 试验初期,不同温室生物量均较低,随着增温时间的持续,各温室生物量均逐渐上升,至2006年达到最高,表现出了相同的上升趋势.其中,同一处理温室内2006年生物量显著高于其余年份( $P < 0.05$ ),而对对照组在年际间则差异不显著;不同处理温室生物量增加的幅度存在着明显差别,以温室A增加较多,温室B次之,C、D、E依次减小.方差分析结果表明:不同温室处理之间生物量在2002年和2006年均存在着显著的差异( $P < 0.05$ ).在2002年表现为温室B生物量显著高于温室A、E和对照(19.00%~30.04%),2006年则是温室A生物量显著高于其它处理和对照(18.43%~37.84%),2003~2005年生物量随着温室温度上升呈现上升的趋势,但变化不显著.

## 2.3 增温对植物群落高度的影响

植物群落结构一方面决定于植物的生物学、生态学特性,另一方面也受群落生存环境的影响,温室植物群落生长环境受到一定的限制,水平结构变化较小,因此,群落结构主要表现为垂直高度的变化.本试验结果表明,增温后的植物群落垂直结构发生了明显的变化(图6).其中,同一处理中,2006年植物群落平均高度均显著高于其它年份( $P < 0.05$ );不同处理比较而言,2002年群落平均高度以温室B最高,对照最低;2003年至2006年则均表现为温室A植物群落高度最高,对照最低,且群落多分为2层.方差分析结果显示,在2002~2006年间,不同处理间植物群落平均高度存在显著差异.其中,在2002年,温室B植物群落平均高度显著高于其它温室处理( $P < 0.05$ ),各温室处理均显著均高于对照;2003年,温室A植物群落平均高度增加显著,显著高于温室C、D、E处理和对照( $P < 0.05$ );2004年,温室A、B显著高于E处理和对照( $P < 0.05$ );2005年,温室A显著高于温室E和对照( $P < 0.05$ );2006年,温室A显著高于温室D、E和对照( $P < 0.05$ ).

## 2.4 增温对植物群落盖度的影响

盖度是衡量地上植物覆盖地表程度的一个重要指标,也是反应群落利用空间的一个重要参数.5年试验结果表明,各温室群落总盖度呈现逐年上升的趋势,试验最后一年的总盖度接近或达到100%(图7, A).方差分析结果表明,同年份不同处理间总盖度均没有显著的差异( $F = 1.2673, df = 5, P > 0.05$ );而同一处理总盖度在年际间变化差异极显著

( $F = 27.0620, df = 4, P < 0.001$ ), 新复极差检验显示, 各处理内 2006 和 2005 年的群落总盖度极显著高于 2002~2004 年, 而 2003 和 2004 年群落总盖度又极显著高于 2002 年。

群落分盖度之和反映了群落各个种对空间的利用程度, 分盖度之和越高, 说明群落种的密度较高, 对地表的覆盖和利用空间资源能力增强。试验结果表明(图 7, B), 同一温室处理和对照的分盖度之和呈现逐年上升的趋势, 最高可达达 143% (温室 B,

2006 年); 不同温室处理间相比, 其群落分盖度之和在 2002 和 2003 年呈现无规律的变化, 在 2004~2006 年则随着温室温度的增加而呈现上升的趋势。方差分析结果显示, 同处理群落分盖度之和在年间变化差异极显著( $F = 33.6921, df = 4, P < 0.001$ ), 温室 A~C 处理在 2004~2006 年在分盖度之和均极显著高于其 2002 和 2003 年的, 而温室 D、温室 E 和对照在 2004~2006 年的分盖度之和均显著高于 2002 年。

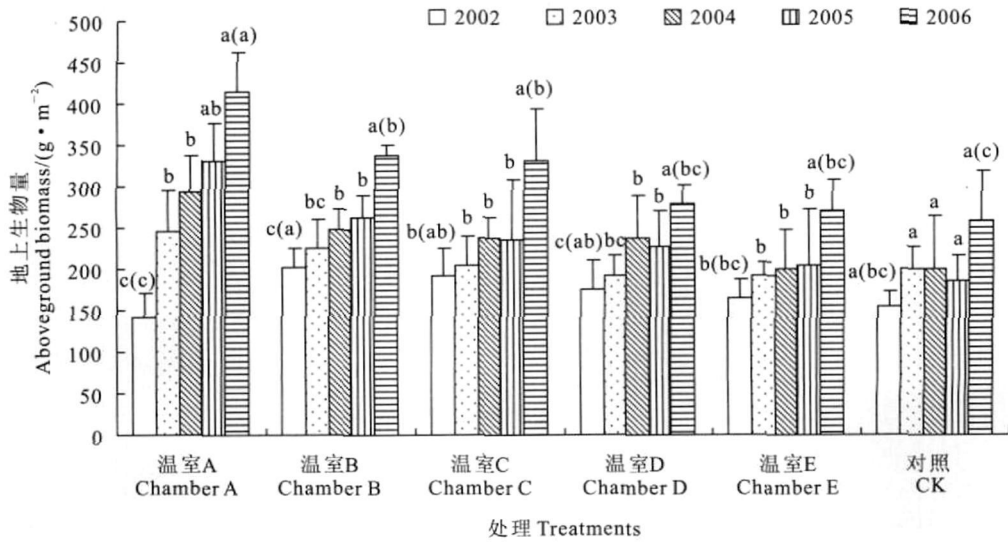


图 5 不同温室处理生物量年际间变化

括号内不同字母表示同年处理间在 0.05 水平差异显著, 括号外不同字母表示相同处理年际间在 0.05 水平差异显著; 下同

Fig. 5 Comparison of aboveground biomass in different chambers yearly

Different normal letters in parenthesis indicate statistical difference among treatments in the same year at 0.05 level, while the different normal letters out of parenthesis indicate statistical difference among years in the same treatment. The same as below

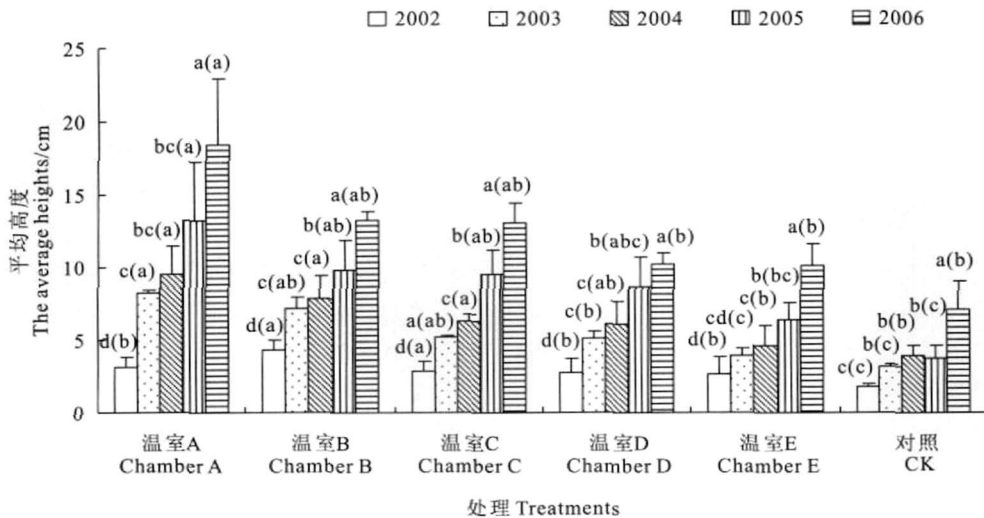


图 6 不同温室植物群落平均高度变化

Fig. 6 Variations of plant community average heights in different chambers

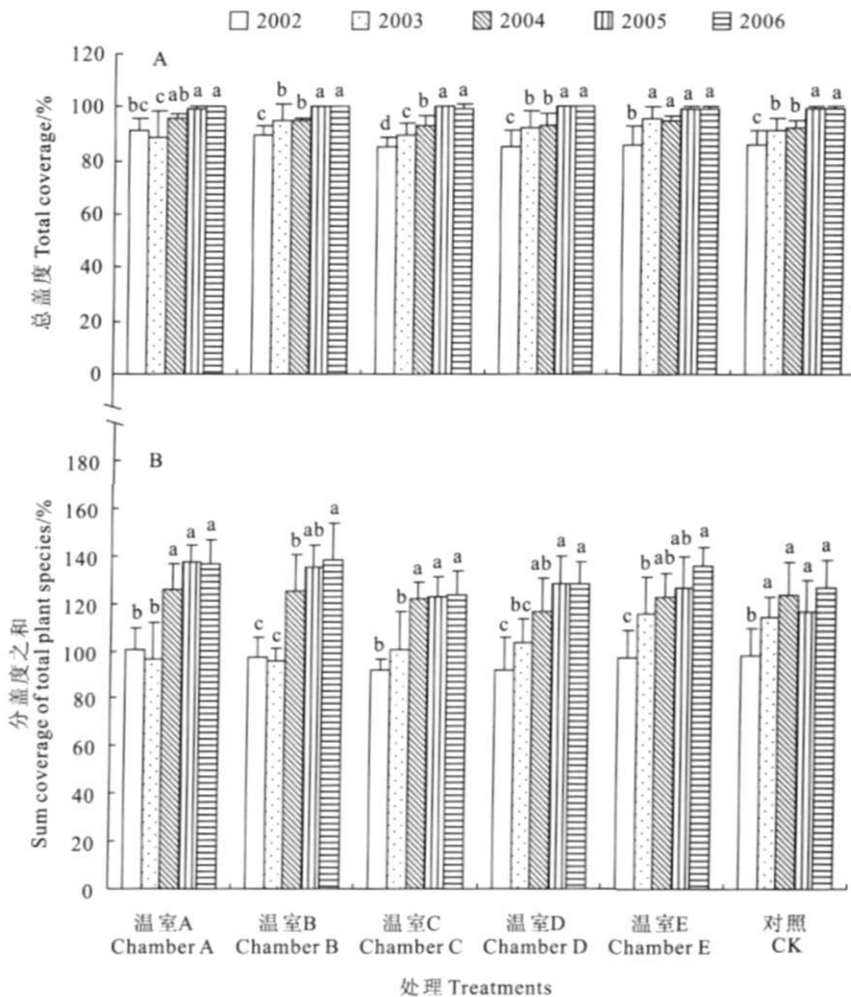


图7 不同温室处理植物群落总盖度(A)和分盖度之和(B)变化

Fig. 7 The total coverage of plant community(A) and sum coverage of total plant species(B) in different chambers

### 3 讨论

#### 3.1 温室微气候变化特征

利用开顶式温棚(OTCs)通过增加空气温度到达模拟气候变化已经在高纬度和高海拔地区被广泛的应用<sup>[3, 5, 6, 16-20]</sup>.已有的野外试验表明,采用OTCs可以明显增加温室的空气温度,但不同地区增温幅度有所区别<sup>[3, 21]</sup>.在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站的研究结果显示,温室内空气温度高于对照4℃,土壤含水量和空气相对湿度没有明显的差异<sup>[12, 22]</sup>.本试验设计了5种不同直径梯度的OTCs,尽管由于不同增温处理植物高度和盖度的不同可能对增温效果,特别是土壤温度及蒸发散不同而引起的土壤含水量有一定的影响,但就不同处理增温效果而言,空气温度和土壤温度增加范围分别在0.24~3.4℃和0.12~1.75℃之间,就青藏高原近30年来平均增温幅度而言<sup>[23]</sup>,温室增温幅度在以后10~140年间,增温效果明显.

其它微气候因子中,温室内外风速变化最为明显,且随着温室减小温室内外风速差加大,空气湍流减弱,对流减小,其结果表现为温室空气温度随着温室减小而升高;温室建立后,由于聚乙烯塑料薄膜的遮挡,温室内光照强度受到了一定程度的影响,然而,随着气候变化,温度升高,云量将会伴随着增加及光辐射的减少,因而,光照减少可能是一种合理的模拟<sup>[24]</sup>.不同处理空气相对湿度及土壤含水量变化差异较小,这是因为在生长季节研究区域降雨量丰富,水分不断得到补充,同时植物群落盖度的变化也对土壤水分产生影响,随着盖度增大,土壤湿度在波动中下降<sup>[25]</sup>,这种微气候变化结果在高纬度的北极地区研究中也得到证实<sup>[3, 26-29]</sup>.综合分析微气候变化说明,在众多的环境因子中,温度变化是主要的影响因子,这达到了本试验设计预期的目的.

#### 3.2 增温与植物群落生物量关系

本试验结果表明不同处理植物群落地上部分生物量发生了明显的改变,在没有水分和营养补充的

条件下,生物量呈现了逐渐上升的趋势,至试验结束当年生物量不仅没有减小,反而仍在继续增加,并且随着温室温度的增加其生物量相应增加;同时,温室内植物群落生物量均高于对照,尽管在试验第一年生物量最高出现在温室 B,而不是温室 A,但随着试验的继续进行,不同温室处理间生物量差异至第 5 年达到显著水平,从而验证了我们的第一个假设。但在青海省海北地区的研究与本实验的结果不同,则表现为温室内植物群落生物量在当年高于对照,随着试验时间延长至第 5 年,对照中植物群落生物量反而高于温室内<sup>[30]</sup>,产生这种差异的原因可能是由于海北地区的温室在冬季仍然保留,整个冬季温室内温度较高,降低了土壤含水量,不利于翌年植物的生长。

众多的研究表明,对于高寒草甸生态系统,不同施肥量和施肥时间均对其植物群落生产力、群落物种组成及多样性指数产生明显的影响<sup>[31-34]</sup>;在其它地区的研究显示,施肥<sup>[35-37]</sup>、家畜的尸体和排泄物<sup>[38,39]</sup>、人类活动<sup>[40]</sup>均有利于落叶灌丛和禾草植物对营养元素的利用,表明了植物生长受到养分,特别是氮元素的限制。高寒草甸土壤有机质含量丰富<sup>[41]</sup>,但由于气候寒冷,死亡根系的分解归还作用速度缓慢,使得本就贫乏的土壤养分成为有机态存贮于土壤,土壤表现出全量养分丰富,而速效养分贫乏的特点<sup>[42]</sup>。温室的建立不仅提高了空气温度,而且地温也随之增加,在本试验里尽管没有测定土壤有机质的矿化作用及植物凋落物的分解作用,但前人研究结果已表明,随着温度的升高,凋落物组成和质量发生改变,分解作用增强,土壤中营养可利用性增加<sup>[26,43,44]</sup>。

温度是蒸散过程中能量供给条件的主要影响因素之一,在其它环境条件不变的情况下,温度升高,潜在的蒸散量增加,引起土壤水分降低<sup>[45,46]</sup>,对植物生长产生胁迫作用,降低植物群落生产力。本实验测定结果也表明,随着室内温度的升高,土壤水分含量有所下降,但没有明显的差异,这不仅与生长季节内降雨量较大,土壤水分能够不断得到补充有关,同时可能是温室面积较小,温室外土壤水分较高并可以通过地下土壤孔隙渗透扩散而得到补充。因本试验未测定植物群落地下部分生物量的变化,因此,难

以全面估计群落净生产力对模拟增温的响应,这有待于进一步分析研究。

### 3.3 增温与植物群落结构关系

本研究中不同温室处理的植物群落结构均发生了明显改变,主要表现在植物群落的平均高度随着温度升高而增加,并且随着试验时间的持续而不断增高,这验证了我们提出的第二个假设。已有的研究表明,封育对高寒草甸植物群落生物量、盖度、植物功能群、多样性指数等特征有不同程度的影响,表现为地上生物量增加、禾草比例增加,盖度升高、平均高度增加以及多样性指数增加等方面<sup>[47-50]</sup>,植物群落变化朝着气候顶极方向演替。在自然放牧条件下,矮嵩草草甸植物群落由于放牧动物的采食,特别是对禾本科植物的采食,植物群落结构表现为单层,平均高度较低;而在封育条件下,放牧动物停止采食,禾草植物得以恢复,占据上层空间,植物群落平均高度提高<sup>[51]</sup>。本试验是在完全封育的条件下进行的,对照中植物群落的平均高度逐年增加,但层次分化不明显,至 2006 年有了显著提高,显示了多年封育有利于群落高度的增加;就不同温室而言,则表现为室内温度愈高,群落平均高度亦愈高,且增加明显,试验第 2 年温室植物群落均分为上下二层,其上层为禾本科植物,下层为莎草科和其它类群的植物,这说明了在增温条件下,植物群落不同种对空间和光资源的竞争增强,其结果是有利于禾本科植物的生长,提高了群落的平均高度。

植物群落盖度的变化反映了群落对空间资源特别是光资源的竞争程度,本研究结果表明,不同温度处理的植物群落总盖度和分盖度之和均呈现逐年上升趋势,处理间无明显差异而年间差异显著,这种变化趋势与封育的结果较为类似<sup>[52]</sup>。这一结果说明增温对植物群落盖度变化影响较小,盖度的变化主要是植物群落种间竞争的结果,它是植物群落对增温的间接响应。

综上所述,5 年的模拟增温试验结果表明,在全球气候变暖的背景下,温度升高将有利于矮嵩草草甸植物群落地上部分生物量的增加,植物群落的结构会发生明显的变化,主要表现在植物群落平均高度逐年显著增加,植物群落总盖度随温度增加呈现上升的趋势,群落分盖度之和也明显上升。

### 参考文献:

- [1] MITCHELL J F B, MANABE S, MELESHKO V, TOKIOKA T. Equilibrium climate change [A]. In: Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J (eds) Climate change, the IPCC scientific assessment [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1990, 131-172.

- [2] 刘建国, 王如松. 当代生态学博论[C]. 北京: 科学出版社, 1992. 369– 380.
- [3] CHAPIN F S III, SHAVER G R. Individualistic growth responses of tundra plant species to environmental manipulations in the field[J]. *Ecology*, 1985, 66: 564– 576.
- [4] WOOKEY P A, PARSONS A N, WELKER J M, *et al.* Comparative responses of phenology and reproductive development to simulated environmental change in subarctic and high arctic plants[J]. *Oikos*, 1993, 67: 490– 502.
- [5] HAVSTRÖM M, CALLAGHAN T V, JONASSON S. Differential growth responses of *Cassiope teagana*, an arctic dwarf shrub, to environmental perturbations among three contrasting high and subarctic sites[J]. *Oikos*, 1993, 66: 389– 402.
- [6] PARSONS A N, WELKER J M, WOOKEY P A, PRESS M C, CALLAGHAN T V, LEE J A. Growth responses of four subarctic dwarf shrub to simulated environmental change[J]. *Ecology*, 1994, 82: 307– 318.
- [7] PRESS M C, POTTER J A, BURKE M J W, CALLAGHAN T V, LEE J A. Responses of a subarctic dwarf shrub heath community to simulated environmental change[J]. *Ecology*, 1998, 86: 315– 327.
- [8] RODINSON C H, WOODEY P A, PARSONS A N, *et al.* Responses of plant litter decomposition and nitrogen mineralization to simulated environmental change in a high arctic polar semi desert and a subarctic dwarf shrub heath[J]. *Oikos*, 1995, 74: 503– 512.
- [9] JONASSON S, HAVSTRÖM M, JENSEN M, TERRY V C. *In situ* mineralization of nitrogen and phosphorus of arctic soils after perturbations simulating climate change[J]. *Oecologia*, 1993, 95: 179– 186.
- [10] KORNER C H. Response of alpine vegetation to global climate change[A]. In: International Conference on Landscape Ecological Impact of Climate Change[C]. Lunteren, The Netherlands, Catena verlag, Supplement, 1992, 22: 85– 96.
- [11] 张新时, 刘春迎. 全球变化与生态系统[M]. 上海: 上海科技出版社, 1994: 17– 26.
- [12] JULIA A K, JOHN H, ZHAO X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan plateau[J]. *Ecology Letters*, 2004, 7: 1170– 1179.
- [13] ZHOU H K(周华坤), ZHOU X M(周兴民), ZHAO X Q(赵新全). A preliminary study of the influence of simulated greenhouse effect on a *Kobresia humilis* meadow[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, 24(5): 547– 553(in Chinese).
- [14] ZHAO J ZH(赵建中), LIU W(刘伟), ZHOU H K(周华坤), *et al.* Effects of simulated greenhouse effect on growth characteristics of *Kobresia humilis*[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2006, 26(12): 2533– 2539(in Chinese).
- [15] DRAKE B G, LEADLY P W, ARP W J. An open chamber for field studies of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on salt marsh vegetation[J]. *Functional Ecology*, 1989, 3: 363– 371.
- [16] GRAGLIA E, JONASSON S, MICHELSEN A, SCHMIDT I K. Effects of shading, nutrient application and warming on leaf growth and shoot densities of dwarf shrubs in two arctic alpine plant communities[J]. *Ecoscience*, 1997, 4: 191– 198.
- [17] HOBBISS, CHAPIN F S III. The response of tundra plant biomass, aboveground production, nitrogen, and CO<sub>2</sub> flux to experimental warming[J]. *Ecology*, 1998, 79: 1526– 1544.
- [18] MOLAU U. Tundra plant responses to experimental and natural temperature changes[J]. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, 2001, 54: 445– 466.
- [19] RUSTAD L E, CAMPBELL J L, MARION G M, *et al.* Meta analysis of the responses of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126: 543– 562.
- [20] CALLAGHAN T V, JONASSON S. Implications for changes in arctic plant biodiversity from environmental manipulation experiments[J]. *Ecological Studies*, 1995, 113: 151– 166.
- [21] KUDO G, SUZUKI S. Warming effects on growth, production, and vegetation structure of alpine shrubs: a five year experiment in north Japan[J]. *Oecologia*, 2003, 35: 280– 287.
- [22] ZHOU H K(周华坤), SHI Y(师燕), ZHOU X M(周兴民), *et al.* The influence of establishing open top chamber microclimate in *Kobresia humilis* meadow[J]. *Qinghai Prataculture*(青海草业), 2001, 10(3): 1– 5(in Chinese).
- [23] WU SH H(吴绍洪), YIN Y H(尹云鹤), ZHENG D(郑度), YANG Q Y(杨勤业). Climate changes in Tibet Plateau during the last three decades[J]. *Acta Geographica Sinica*(地理学报), 2005, 60(1): 3– 11(in Chinese).
- [24] MAXWELL B. Arctic climate: potential for change under global warming[M]. In: Chapin F S III, Jefferies R L, Reynolds J F, Shaver G R, Svoboda J. Arctic ecosystems in a changing climate: an ecophysiological perspective[C]. Academic Press, San Diego, California, USA, 1992: 11– 34.
- [25] LI Y N(李英年), ZHANG F W(张法伟), LIU A H(刘安花) *et al.* Responses of soil temperature and humidity to changes of vegetation coverage in alpine *Kobresia tibetica* meadow[J]. *Chinese Journal of Agronomy*(中国农业气象), 2006, 27(4): 265– 268(in Chinese).
- [26] CHAPIN F S III. Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate[J]. *Ecology*, 1995, 76(3): 694– 741.
- [27] CHAPIN F S III, FETCHER N, KIELLAND K, EVERETT K R, LINKINGS A E. Productivity and nutrient cycling of Alaskan tundra: Enhancement by following soil water[J]. *Ecology*, 1988, 69: 693– 702.
- [28] GRU LKE N E, RIECHERS G H, OECHEL W C, HJELM U, JAEGERR C. Carbon balance in tussock tundra under ambient and elevated



- atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Oecologia*, 1990, 83: 485– 494.
- [29] OECHEL W C, RIECHERS G, LAWRENCE W T, *et al.* "CO<sub>2</sub>LT" an automated, null balance system for studying the effects of elevated CO<sub>2</sub> and global climate change on unmanaged ecosystem[J]. *Funct. Ecol.*, 1992, 6: 86– 100.
- [30] LI Y N(李英年), ZHAO L(赵亮), ZHAO X Q(赵新全), ZHOU H K(周华坤). Effects of a 5-years mimic temperature increase to the structure and productivity of *Kobresia humilis* meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*(草地学报), 2004, 12(3): 236– 239(in Chinese).
- [31] CHEN Y M(陈亚明), LI Z ZH(李自珍), DU G ZH(杜国祯). Effects of fertilization on plant diversity and economic herbage groups in alpine meadow[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, 24(3): 424– 429 (in Chinese).
- [32] QIU B(邱波), LU O Y J(罗燕江), DU G ZH(杜国祯). The effect of fertilizer gradients on vegetation characteristic in alpine meadow[J]. *Acta Prataculturae Sinica*(草业学报), 2004, 13(6): 65– 68(in Chinese).
- [33] QIU B(邱波), LU O Y J(罗燕江). Effects of fertilizer gradients on productivity and species diversity in a degraded alpine meadow[J]. *Journal of Lanzhou University*(兰州大学学报), 2004, 40(3): 56– 59(in Chinese).
- [34] MA Y SH(马玉寿), LANG B N(朗百宁), LI Q Y(李青云), *et al.* Effect of fertilizing nitrogen rate and time on *Kobresia pygmaea* meadow grassland[J]. *Pratacultural Science*(草业科学), 2003, 20(3): 47– 50(in Chinese).
- [35] MCKENDRICK J D, OTT V J, MITCHELL G A. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on carbohydrate and nutrient levels in *DuPontia fisheri* and *Arctagrostis latifolia*[A]. In: Tieszen L L. Vegetation and production ecology of an Alaska arctic tundra[C]. Springer-Verlag, New York, USA. 1978, 509– 537.
- [36] SHAVER G R, CHAPIN F S III. Responses to fertilization by various plant growth forms in an Alaskan tundra: nutrient accumulation and growth[J]. *Ecology*, 1980, 61: 662– 675.
- [37] JONASSON S. Plant responses to fertilization and species removal in tundra related to community structure and clonality[J]. *Oikos*, 1992, 63: 420– 429.
- [38] BATZLI G O, WHITE R G, MACLEAN S F JR, PITELKA F A, COLLIER B D. The herbivore based trophic system[A]. In Brown J, Miller P C, Tieszen L L, Bunnell F L. editors, An arctic ecosystem: the coastal tundra at Barrow, Alaska[C]. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pennsylvania, USA, 1980: 335– 410.
- [39] MCKENDRICK J D, BATZLI G O, EVERETT K R, SWANSON J C. Some effects of mammalian herbivores and fertilization on tundra soils and vegetation[J]. *Arctic and Alpine Research*, 1980, 12: 565– 578.
- [40] CHAPIN F S III, SHAVER G R. Individualistic growth responses of tundra plant species to environmental manipulations in the field[J]. *Ecology*, 1985, 66: 564– 576.
- [41] LIU Y H(刘育红), PEI H K(裴海昆). Study on composition and characteristics of soil humus under alpine arctic meadow vegetation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*(土壤通报), 2004, 35(5): 562– 565(in Chinese).
- [42] CAO G M(曹广民), WU Q(吴琴), LI D(李东), *et al.* Effects of nitrogen supply and demand status of soil and herbage system on vegetation succession and grassland degradation in alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2004, 23(6): 25– 28(in Chinese).
- [43] WANG Q B(王其兵), LI L H(李凌浩), BAI Y F(白永飞), *et al.* Field experimental studies on the effects of climate change on nitrogen mineralization of meadow steppe soil[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2000, 24(6): 687– 692(in Chinese).
- [44] WANG Q B(王其兵), LI L H(李凌浩), BAI Y F(白永飞), XING X R(邢雪荣). Effects of simulated climate change on the decomposition of mixed litter in three steppe communities[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2000, 24(6): 674– 679(in Chinese).
- [45] LI L(李林), ZHANG G SH(张国胜), WANG Q CH(汪青春), SHI X H(时兴合). Study on evapotranspiration and its impact factors over yellow river upper stream area[J]. *Advance in Earth Science*(地球科学进展), 2000, 15(3): 256– 259(in Chinese).
- [46] 施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响[M]. 济南: 山东科学出版社, 1995: 275– 277.
- [47] SHEN J L(沈景林), TAN G(谭刚), QIAO H L(乔海龙), ZHANG J H(张娟华), MENG Y(孟杨). Study on effect of grassland improvement on alpine degraded grassland vegetation[J]. *Grassland of China*(中国草地), 2000, 5: 49– 54(in Chinese).
- [48] SANG Y Y(桑永燕), NING H C(宁洪才), QU H L(屈海林). Surveying biomass of degraded grassland for forbidden grazing and enclosure after three years[J]. *Qinghai Prataculture*(青海草业), 2006, 15(3): 7– 9(in Chinese).
- [49] SHEN J L(沈景林), MENG Y(孟杨), HU W L(胡文良), LIAN D W(连大伟). Experimental study of degenerated grassland improvement in plateau area[J]. *Pratacultural Science*(草业科学), 1999, 16(3): 4– 7(in Chinese).
- [50] ZHOU G Y(周国英), CHEN G CH(陈桂琛), ZHAO Y L(赵以莲), *et al.* Comparative research on the influence of chemical fertilizer application and enclosure on alpine steppes in the Qinghai Lake area I Structure and species diversity of the plant community[J]. *Acta Prataculturae Sinica*(草业学报), 2004, 13(1): 26– 31(in Chinese).
- [51] ZHOU H K(周华坤), ZHOU L(周立), LIU W(刘伟), *et al.* The influence of fencing on degraded *Kobresia humilis* meadows and non degraded[J]. *Grassland of China*(中国草地), 2003, 25(5): 15– 22(in Chinese).
- [52] LI Q Y(李青云), DONG Q M(董全民). Effect of enclosure on degenerated vegetation in alpine meadow[J]. *Qinghai Prataculture*(青海草业), 2002, 11(3): 1– 5(in Chinese).