

# 高寒草甸不同植被功能群盖度 对模拟气候变化的初期响应

张法伟<sup>1,2,3</sup>, 李跃清<sup>1</sup>, 李英年<sup>2,3</sup>, 李以康<sup>2,3</sup>, 林丽<sup>2,3</sup>, 曹广民<sup>2,3</sup>, 杜明远<sup>4</sup>, 王勤学<sup>5</sup>  
(1. 成都高原气象所, 四川 成都 610071; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001;  
3. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001; 4. 日本农林环境技术研究所,  
日本 筑波 3058604; 5. 日本国立环境研究所, 日本 筑波 3050053)

**摘要:** 为进一步研究高寒生态系统植被群落对气候变化响应方式和适应机理, 我们在青藏高原东北祁连山南坡, 沿海拔梯度对高草(*Kobresia bellardii*)草甸、灌丛草甸、杂草草甸和稀疏植被 4种植被类型进行双向移栽实验, 以期获得高寒草甸植被群落较为详尽而真实的响应特征。4个功能群(莎草类、禾本类、豆科类和杂草类)绝对盖度的方差分析结果表明: 高寒草甸生态系统植被群落对气候变化较为敏感。莎草类植被盖度与土壤含水量线性负相关, 在 3600 m 处最大。禾本类和豆科类分别与土壤含水量和气温线性正相关, 两者在 3200 m 处最为适宜。海拔与杂草类盖度的二次方程可解释其 63% 的变异。莎草类与禾本类、豆科类植被盖度存在较弱的补偿作用, 而禾本类与豆科类之间具有显著的补充作用。对比 80 年代的植被盖度, 高草草甸优势种对模拟降温的响应暗示其稳定性较高。

**关键词:** 双向移栽实验; 植被绝对盖度; 功能群; 高寒生态系统

中图分类号: Q142, Q948

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2010)06-0768-06

## Initial Response of Plant Functional Groups Abundance to Simulated Climatic Change in Alpine Meadow Ecosystems

ZHANG Fa wei<sup>1,2,3</sup>, LI Yue qing<sup>1</sup>, LI Ying-nian<sup>2,3</sup>, LI Yi kang<sup>2,3</sup>, LIN Li<sup>2,3</sup>,  
CAO Guang-min<sup>2,3</sup>, DU Ming-yuan<sup>4</sup>, WANG Qi-rxue<sup>5</sup>

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu, Sichuan Province 610071, China;

2. Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining, Qinghai Province 810001, China; 3. Key Laboratory of Adaptation

and Evolution of Plateau Biota, CAS, Xining, Qinghai Province 810001, China; 4. National Institute of Agro-environmental

Sciences, Tsukuba 3058604, Japan; 5. National Institute of Environmental Studies, Tsukuba 3050053, Japan)

**Abstract:** For further understanding the response and adaptation of alpine plant community to climate change, we manipulated the reciprocal translocated experiment along elevation gradients on the south slope of Qili Mountains, in the northeast of Qinghai-Tibetan Plateau. The experiment included 4 vegetation types, *Kobresia bellardii* meadow, shrub meadow, forbs meadow and sparse vegetation. Plant absolute cover was measured by 0.5 m × 0.5 m Cross-Hair Point Frame (100 points). 4 functional groups were classified as sedges, graminoids, legumes and forbs. ANOVA results showed that plant absolute cover of 4 functional groups was relative sensitive to climate change. Sedge cover correlated negative linearly with soil water content, and its peak abundance appeared in 3600 m. Graminoid and legume cover was linearly related to soil water content and temperature, respectively, and both of them behaved significantly better in 3200 m. The quadratic regression equations between forbs and elevation accounted for 63% variances. There was weak cover compensation effects between sedge and graminoid and legume while strong abundance complementary effects between graminoid and legume. The comparison between dominate plant cover change induced by simulated cooling with survey during 1980s in the similar temperature, indicated that the *Kobresia bellardii* meadow was stable.

**Key words:** Reciprocal translocated experiment; Plant absolute cover; Functional groups; Alpine ecosystem

收稿日期: 2010-02-03; 修回日期: 2010-10-18

基金项目: 成都高原气象开放实验室基金课题(LPM 2008011); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2XB2-06-01); 中国科学院创新工程重要方向项目(KJCX2-YW-432-1h和KSCX2-YW-Z-1020)资助

作者简介: 张法伟(1981-), 男, 河南义马人, 硕士, 工程师, 主要从事高寒草甸对气候变化的响应研究, E-mail: flingzhang@gmail.com

全球气候变化深刻影响着陆地生态系统结构和功能,尤其在高原高海拔地区表现剧烈<sup>[1-4]</sup>。植物群落的结构和组成是陆地生态系统的基础特征,其对气候变化的响应方式和适应机制是当今生态学研究的关键问题之一<sup>[5-7]</sup>。具有丰富的物种组成和“群落带谱”(Community spectrum),而且其气候变化速度是世界平均水平的2倍左右,所以高寒生态系统是研究植物群落对气候变化响应的“理想区”<sup>[8-10]</sup>。然而有关研究的结论因研究区域、模拟方法或植被类型等不同而存在明显差异甚至相互矛盾,难以为模型的构建、管理措施的制定和生态环境的保护提供理论依据<sup>[11]</sup>,因此需要对其进行深入而细致的研究。

众多相关研究发现物种多样性下降或不变、优势种转变和灌丛扩张或萎缩等不同现象,但多基于“开顶温室”(Open top chamber)或模型模拟<sup>[10,12-16]</sup>。然而“开顶温室”底面积较小,降水、辐射等因素发生难以预测的改变,模型则存在生态系统简化失真等问题,难以获取生态系统对气候变化响应的真实而全面的信息。移栽实验由于其对生态系统扰动较少,是研究气候变化影响的较好方法<sup>[17,18]</sup>。在2007年4月底沿青藏高原东北祁连山南坡的自然海拔梯度,对当地的4种植被类型(嵩草(*Kobresia bellardii*)草甸、灌丛草甸、杂草草甸和稀

疏植被)进行了双向移栽实验,以期获得高寒草甸植被群落较为详尽而真实的响应特征。

植物功能群(Plant functional groups)通常作为植物群落试验响应的研究对象<sup>[6,19]</sup>。参照Hector<sup>[20]</sup>的划分标准,同时考虑到莎草类作为建群种,将其划分为4个功能群:莎草类、禾本类、豆科类和杂草类<sup>[2]</sup>。由于高寒生态系统对气候变化的初期和后期响应差别较大<sup>[10,21]</sup>,本文通过研究3200 m嵩草草甸和3800 m稀疏植被对模拟降温(低海拔移至高海拔)和增温(高海拔移至低海拔)的响应特征,探讨不同植被功能群和植被类型的初期适应方式。另外,通过模拟降温对嵩草草甸植被盖度的影响,对比相同温度年代的植被盖度调查结果,从植被优势种的变化来理解高寒生态系统的稳定性。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

移栽实验设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统研究站(海北站,101°19'E,37°35'N,3200 m)附近。海北站位于青藏高原东北隅,其年均气温和年总降水量分别为-1.7℃和580 mm。土壤富含有机质但缺乏可利用的氮。

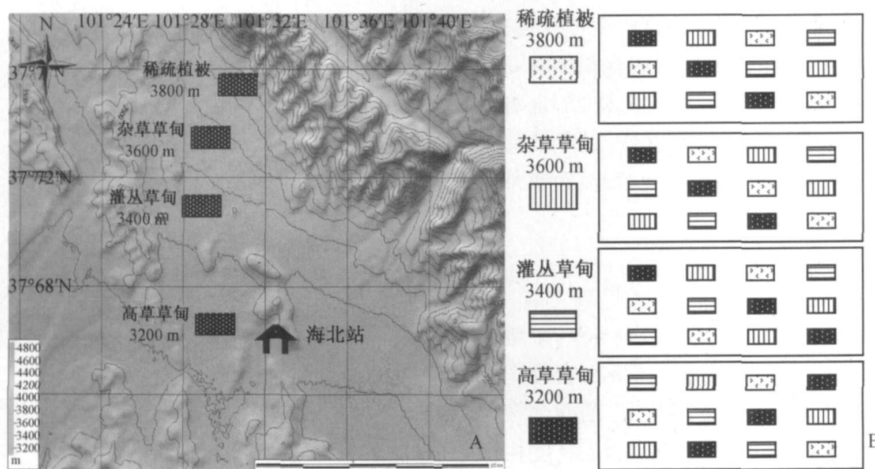


图1 移栽样地的等高地形图(A)和移栽示意图(B)

Fig. 1 Topographic and contour map of reciprocal translocation region and experiment diagram

移栽实验基于祁连山南坡的自然海拔梯度(图1A)。该区共包含4种植被类型,分别为3200 m的嵩草草甸、3400 m的灌丛草甸、3600 m的杂草草甸和3800 m的稀疏植被。嵩草草甸中,矮嵩草(*Kobresia humilis*)为其建群种,垂穗披碱草(*Elymus*

*nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等为其优势种;灌丛草甸具有灌木、草本两层结构,灌木层由金露梅(*Potentilla fruticosa*)构成,草本层主要包含垂穗披碱草、异针茅和柔软紫菀(*As-*

*ter f laccidus*) 等; 杂草类草甸物种较少, 西伯利亚蓼 (*Polygonum sibiricum*)、篷子菜 (*Galium verum*)、高山唐松草 (*Thalictrum alpinum*) 和青藏苔草 (*Carex moorcroftii*) 等为其常见种; 稀疏植被没有明显的优势种, 多为矮火绒草 (*Leontopodium nanum*)、篷子菜和紫堇 (*Corydalis echinocarpa*) 等, 其地表裸露面积高达 80%<sup>[22]</sup>。

## 1.2 移栽过程

此次移栽实验完成于 2007 年 5 月上旬。当时植物大都处于休眠期, 因此能在较大程度上减少移栽对植被的扰动。首先, 在 4 种植被类型上选择同质平坦的 9 m × 7 m 样地 (图 1B)。其次, 把样地划分为 3 行 × 4 列的 12 个 1 m × 1 m 样方, 相邻样方之间的距离均为 1 m。每行的 4 个样方分别移至 4 个不同的海拔 (图 1B)。在移栽的过程中, 首先将移栽样方均分为 4 块, 并依次标记方位, 然后运输至受体样方组装复位, 样方内部的缝隙采用移栽样方的原状土填充。移栽样方的深度约为 40 cm (此层基本无植物根系, 在 3600 m 和 3800 m 处土层较浅, 深度约为 30 cm), 然后用塑料薄膜将其四周包裹 (可降低样方和周围环境之间营养元素和根系的横向交换和入侵), 和另一海拔相应的移栽样方进行位置对调。针对供体样方高度与受体样方深度不同, 采取移栽样方原状土填充 (供体高度 < 受体深度) 或加深受体 (供体高度 > 受体深度) 来确保供体和受体处在同一水平面。移栽至同一海拔的样方, 也将其挖出, 用塑料薄膜包裹, 然后放回原处, 以降低移栽的扰动效应。最后, 用铁丝网将样地围起 (距离外围样方 1 m), 消除放牧的影响。

## 1.3 环境、植被调查

环境因子主要监测空气温度 (1.5 m)、土壤温度 (0.05 m) 和土壤容积含水量 (0.10 m), 自动记录其 30 min 的均值。3200 m 和 3400 m 的观测仪器隶属于涡度相关系统, 分别采用空气温湿度探头 (HMP45C, Vaisala, Finland), 地温铜镍热电偶 (105T, Campbell, USA) 和土壤湿度时域反射计 (CS-615, Campbell, USA)。3600 m 和 3800 m 则通过建设简易的 H OBO 自动气象站 (Onset, USA) 进行观测。土壤温湿度分别由温度探头 (S-TMB-M006, Onset, USA) 和土壤湿度探测仪 (S-SMA-M005, Onset, USA) 监控。由于非生长季的最低温度小于 -30℃, 数据采集器难以正常工作致使数

据缺失较多, 因此在环境因子的统计分析上, 仅采用生长季 (6-9 月) 数据。

植被盖度以 0.5 m × 0.5 m 样方框 (100 交叉点) 采用针刺法获取, 物种盖度则采用 Walker<sup>[23]</sup> 推荐的绝对盖度表示 (样方框内某物种针刺数 / 100)。两年的群落调查结果表明研究区共有 51 个种。莎草类、豆科类、禾本类植物种类较少, 但盖度较大。杂草类植物物种较多, 种盖度较小, 但总盖度大。

## 1.4 数据统计

不同功能群植被盖度之间进行单因素方差分析和 LSD 多重比较, 和环境因子的相关分析采用 Stepwise 的线性回归, 功能群之间的竞争效应则采用 Pearson 相关系数分析<sup>[7]</sup>。所有统计分析均在 SPSS 13.0 (SPSS Inc, USA) 中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子的变化

两年生长季气候因子的年际变化不大 (图 2)。在植被生长季中, 气温呈现出随海拔升高而降低的变化, 其递减率为 0.98℃/200 m ( $R^2 = 0.91$ ,  $P < 0.01$ )。5 cm 土壤温度在 3400 m 处最大 (2 年平均为 10.6℃), 而后随海拔升高而降低。嵩草草甸 2007 年生长季的平均气温和 5 cm 地温分别为 9.79℃ 和 8.95℃, 比第 2 年高 0.80℃ 和 2.24℃, 其余海拔处两年气温和地温差别较小。10 cm 土壤容积含水量随海拔升高而降低, 在 3600 m 处出现最小值 (两年平均为 0.09 cm<sup>3</sup> · cm<sup>-3</sup>), 在 3800 m 处略有升高。

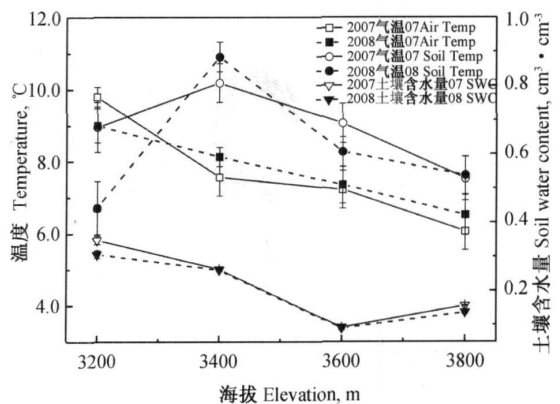


图 2 移栽样地环境因子的变化

Fig. 2 Variations of environmental factors in the translocated plots during 2007 and 2008

### 2.2 高草草甸不同功能群植被盖度的响应

高草草甸对模拟降温的响应较为明显。莎草类植被盖度在 3600 m 处最大, 2 年平均为 43% ± 0.04 (平均值 ± SE, 下同), 极显著高于其它 3 海拔处 ( $P < 0.01$ ), 3400 m 处盖度最小, 3200 m 和 3800 m 处差异不显著 ( $N = 6, P = 0.36$ ), 表明莎草类植被分布的最适温度范围较小。禾本类和豆科类植被在原生海拔 3200 m 处生长最好 (66% ± 0.09 和 22% ± 0.03), 极显著高于其余 3 海拔处 ( $N = 6, P < 0.01$ ), 而三者之间无显著差异 ( $P = 0.06$  和  $P = 0.19$ ), 均对降温表现为一定的负反馈。杂草类盖度在 3400 m 处最大 (128% ± 0.08), 3200 m 和 3600 m 的盖度居中, 两者无显著差别 ( $N = 6, P = 0.96$ ), 3800 m 处显著最小。其对模拟降温反应较为复杂, 呈现出在中间温度处盖度较大。

### 2.3 稀疏植被不同功能群植被盖度的响应

稀疏植被对模拟增温的响应较为复杂。莎草类两年平均盖度在 3600 m 处最大 (43% ± 0.09), 极显著高于其它 3 处海拔。3400 m 处显著最小, 3200 m 和 3800 m 盖度居中, 二者无显著差别 ( $N = 6, P = 0.36$ )。禾本类植被盖度在 3200 m 处最大 (39% ± 0.05), 后三者之间仅 3600 m 的盖度显著小于 3800 m 处 ( $N = 6, P < 0.05$ )。豆科类植被盖度的响应和禾本类相似, 但表现更为简单。其仅在 3200 m 处显著最大 (14% ± 0.03), 后三者无差异 ( $N = 6, P = 0.14$ )。杂草类盖度则呈现出随海拔升高而降低的趋势。其在 3200 m 和 3400 m 处无显著差异 ( $N = 6, P = 0.18$ ), 但两者显著高于 3600 m 和 3800 m。

### 2.4 不同功能群植被盖度对环境因子的响应和功能群的竞争效应

4 个功能群植被盖度变化和环境因子显著相关 (表 1)。莎草类、禾本类盖度和土壤含水量相关性最大, 但前者负相关, 后者正相关。气温因子与莎草

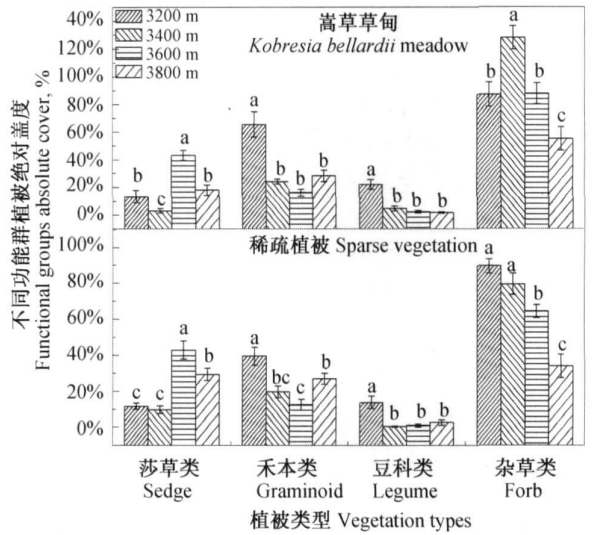


图 3 高草草甸和稀疏植被不同功能群植被盖度对移栽实验的响应  
Fig. 3 Response of functional groups absolute cover to reciprocal translocation in *Kobresia* meadow and sparse vegetation

类盖度变化正相关, 可解释 12% 的变异程度。豆科类植被盖度则与气温显著正相关。而海拔是杂草类盖度变异的主要因素, 其线性方程解释其变异的 40%, 而二次方程 ( $Y = -0.0000029x_4^2 + 0.020x_4 - 32.14, N = 48, P < 0.001$ ) 则可以解释其 63% 的变异。在区分植被类型的基础上, 高草草甸的莎草类植被与地温线性负相关 ( $N = 24, R^2 = 0.61, P < 0.01$ ), 而稀疏植被的则与土壤含水量负相关 ( $N = 24, R^2 = 0.85, P < 0.01$ )。其它 3 种功能群的主控因子则与表 1 的结果相同。

莎草类植被盖度与禾本类、豆科类、杂草类存在一定程度的负相关, 其中与禾本类 ( $P = 0.051$ )、豆科类 ( $P = 0.074$ ) 相关程度接近显著水平, 暗示高寒草甸在功能群的水平上存在一定的补偿效应 (Compensatory effect)。禾本类和豆科类植被盖度极显著正相关, 而且相关系数高达 0.92, 表明两者之间有很强的补充作用 (Complementary effect)。

表 1 功能群植被盖度和环境因子的回归分析及功能群之间的 Person 关联分析

Table 1 Regression between plant functional groups absolute cover and environment factors and Person correlation analysis among plant function groups

因变量 Dependent	回归方程 Regression equation	Pearson 相关系数 / Person correlation coefficients			
		莎草类 Sedge	禾本类 Graminoid	豆科类 Legume	杂草类 Forbs
莎草类 Sedges	$Y = -1.30x_4 + 0.48 (R^2 = 0.70, P < 0.001)$ $Y = -2.08x_4 + 0.78x_2 + 0.04 (R^2 = 0.82, P < 0.001)$	1.0			
禾本类 Graminoids	$Y = 1.26x_4 + 0.03 (R^2 = 0.48, P < 0.01)$	-0.50 ( $P = 0.051$ )	1.0		
豆科类 Legumes	$Y = 0.053x_2 - 0.35 (R^2 = 0.64, P < 0.001)$	-0.46 ( $P = 0.074$ )	0.92 ( $P < 0.001$ )	1.0	
杂草类 Forbs	$Y = -0.001x_1 + 3.56 (R^2 = 0.44, P < 0.01)$	-0.33 ( $P = 0.21$ )	0.078 ( $P = 0.77$ )	0.26 ( $P = 0.33$ )	1.0

注:  $x_1, x_2, x_3, x_4$  和 Y 分别代表海拔、气温、地温、土壤含水量和功能群植被盖度

Note:  $x_1, x_2, x_3, x_4$  was for elevation, air temperature, soil temperature, and SWC, respectively

### 3 讨论

为和其他增温实验作对比,将植被盖度与温度单一因子做线性回归,结果表明莎草类与其呈现一定的负相关,禾本类和豆科类则与之呈正相关,这和大部分高寒生态系统的研究结果相似,即高大的禾本类和豆科类植被对温度表现为正响应,而较矮的莎草类盖度将下降<sup>[8,10,14]</sup>,即气候温暖化将不利于莎草类但有利于禾本类和豆科类植被<sup>[18]</sup>。这可能由于高寒草甸是营养限制的生态系统<sup>[8,9]</sup>,土壤营养,尤其是速效N是高寒生态系统响应的主要控制因子<sup>[16]</sup>。增温可以提高土壤矿化速率,而禾本类和豆科类植被具有AM(Arbuscular mycorrhizal)菌根共生体和根瘤菌,可以相对高效的获取营养资源,但莎草类植被则很少或无菌根共生体,在早期的增温实验中较难获益<sup>[10,24]</sup>。和同一地区的“开顶式温室”的结果有所不同,莎草类植被对温度表现为正响应<sup>[25]</sup>。这可能与其仅用一年的数据有关<sup>[10]</sup>或者研究对象的起始群落特征存在一定的差异<sup>[8]</sup>。

植物物种的分布随着其气候变化所引起的其生态位变化而改变<sup>[4]</sup>,进而影响到优势物种的改变和转化<sup>[3]</sup>。3600 m处的生长季平均温度为7.2±0.5℃,接近于1983-1986年的生长季平均气温7.3℃。1985年的嵩草草甸调查结果表明莎草类植被盖度约2倍多于禾本类植被<sup>[26]</sup>,嵩草草甸主要由矮嵩草、异针茅和垂穗披碱草构成。嵩草草甸被移至3600 m处后,莎草类平均盖度为43%,而禾本类为16%,而物种构成也以矮嵩草和异针茅为主。对比表明嵩草草甸虽然对气候变化响应敏感,但生态系统的原优势种恢复较快,可以说其本身具有较大的稳定性,和其他高寒生态系统类似<sup>[3,13]</sup>。这和对地上净初级生产力、气温和降水等历史资料进行周期解析<sup>[27]</sup>和稳定性分析<sup>[28]</sup>的结果一致。

### 4 结论

通过两年的移栽试验,高寒草甸功能群对模拟气候的植被盖度变化结果表明高寒草甸对气候变化较为敏感,具有功能群响应特征。莎草类植被盖度与土壤含水量( $Y = -1.30x + 0.48, R^2 = 0.70$ )、温度( $Y = -0.059x + 0.67, R^2 = 0.21$ )线性负相关。在3600 m处其植被盖度显著高于其余3海拔处,表明莎草类植被分布的最适温度范围较小。禾本科类和豆科类分别与土壤含水量( $Y = 1.26x + 0.03, R^2 = 0.48$ )和气温( $Y = 0.053x - 0.35, R^2 = 0.64$ )呈线

性正相关,两者在3200 m处最为适宜,均对升温(降温)表现为正(负)反馈。气候温暖化将不利于莎草类但有利于禾本类和豆科类植被,将对高寒草甸的管理和利用有较大影响。海拔与杂草类盖度的二次方程可解释其63%的变异( $Y = -0.0000029x^2 + 0.020x - 32.14$ )。莎草类与禾本类、豆科类植被盖度存在较弱的补偿作用,禾本类和豆科类植被之间存在极显著的互补效应。对比80年代植被盖度的调查结果和嵩草草甸优势种对模拟降温的响应可以发现,生态系统对气候变化较为敏感但其原优势种恢复较快,说明其稳定性较高。

### 参考文献

- [1] Walther G, Post E, Convey P, *et al.* Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395
- [2] Walker M D, Wahren C H, Hollister R D, *et al.* Plant community responses to experimental warming across the tundra biome[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(5): 1342-1346
- [3] Harte J, Shaw R. Shifting dominance within a montane vegetation community: Results of a climate warming experiment[J]. *Science*, 1995, 267(5199): 876-880
- [4] Alsos I G, Eidesen P B, Ehrich D, *et al.* Frequent long distance plant colonization in the changing Arctic[J]. *Science*, 2007, 316(5831): 1606-1609
- [5] IPCC. Climate Change 2007-The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [6] 赵玉晶,白云鹏,韩大勇,等. 松嫩平原环境破碎化后羊草斑块植物组成多样性的空间变化[J]. *草地学报*, 2008, 16(2): 158-163
- [7] Bai Y, Han X, Wu J, *et al.* Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland[J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184
- [8] Ågerbrand A K, Alatalo J M, Chrimes D, *et al.* Plant community responses to 5 years of simulated climate change in meadow and heath ecosystems at a subarctic alpine site[J]. *Oecologia*, 2009, 161(3): 601-610
- [9] Körner C. Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems[M]. Berlin & Heidelberg: Springer Verlag, 1999
- [10] Wookey P A, Aerts R, Bardgett R D, *et al.* Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(5): 1153-1172
- [11] 吴建国,吕佳佳. 气候变化对青藏高原高寒草甸适宜气候分布范围的潜在影响[J]. *草地学报*, 2009, 17(6): 699-705
- [12] Cross M S, Harte J. Compensatory responses to loss of warming sensitive plant species[J]. *Ecology*, 2007, 88(3): 740-748
- [13] Jónsdóttir I S, Magnússon B, Gudmundsson J, *et al.* Variable sensitivity of plant communities in Iceland to experimental warming[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(4): 553-563
- [14] Kländrud K. Species specific responses of an alpine plant community under simulated environmental change[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(3): 363-372

(下转 779 页)

- 用光响应曲线的新方法[J]. 植物学报, 1999, 16(6): 712-718
- [6] Sharp R E, Matthews M A, Boyer J S. Kok effect and the quantum yield of photosynthesis [J]. Plant Physiology, 1984, 75: 95-101
- [7] 张中峰, 黄玉清, 莫凌, 等. 岩溶植物光合光响应曲线的两种拟合模型比较[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(3): 340-344
- [8] Andrea Mojzes, Tibor Kalapos. Leaf gas exchange responses to abrupt changes in light intensity for two invasive and two non-invasive C<sub>4</sub> grass species [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64: 232-238
- [9] 徐炳成, 山仑, 黄占斌, 等. 黄土丘陵区柳枝稷与白羊草光合生理生态特征的比较[J]. 中国草地, 2003, 25(1): 1-4
- [10] 程林梅, 李占林, 高洪文. 水分胁迫对白羊草光合生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2004, 20(6): 231-233
- [11] Evans J G, Jakobsen I, Ögren E. Photosynthetic light response curves. 2: Gradients of light absorption and photosynthetic capacity [J]. Planta, 1993, 189: 191-200
- [12] 韩永伟, 拓学森, 高馨婷, 等. 阿拉善荒漠草原梭梭与白刺光合特征比较研究[J]. 草地学报, 2010, 18(3): 314-319
- [13] Leakey A D B, Uribelarrea M, Ainsworth E A, et al. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open air elevation of CO<sub>2</sub> concentration in the absence of drought [J]. Plant Physiology, 2006, 140: 779-790
- [14] 陆佩玲, 罗毅, 刘建栋, 等. 华北地区冬小麦光合作用的光响应曲线的特征参数[J]. 应用气象学报, 2000, 11(2): 236-241
- [15] 陈根云, 俞冠路, 陈悦, 等. 光合作用对光和二氧化碳响应的观测方法探讨[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(6): 691-696
- [16] Ye Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. Photosynthetica, 2007, 45: 637-640
- [17] 钱莲文, 张新时, 杨智杰, 等. 几种光合作用光响应典型模型比较研究[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(2): 197-203
- [18] 张弥, 吴家兵, 关德新, 等. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1575-1578
- [19] 代微然, 任健, 毕玉芬. 干旱对假俭草光响应曲线的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(3): 251-254
- [20] Farquhar G D, Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic (CO<sub>2</sub>) assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species [J]. Planta, 1980, 149: 8-90
- [21] Shanguan Z P, Shao M A, Dyckmans J. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat [J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44: 141-149
- [22] Loustau D, Brahim M B, Gaudillère J, et al. Photosynthetic responses to phosphorus nutrition in two year old maritime pine seedlings [J]. Tree Physiology, 1999, 19: 707-715
- [23] Olsson T, Leverenz J W. Non-uniform stomata closure and the apparent convexity of the photosynthetic photon flux density response curve [J]. Plant, Cell & Environment, 1994, 17: 701-710
- [24] 余叔文. 植物生理学和分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 236-243
- [25] Wu F Z, Bao W K, Li L F, et al. Effects of water stress and nitrogen supply on leaf gas exchange and fluorescence parameters of *Sophora davidii* seedlings [J]. Photosynthetica, 2008, 46: 40-48
- [26] 黄成林, 赵昌恒, 傅松玲, 等. 安徽休宁倭竹光合生理特性的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(2): 187-191
- [27] Larcher W (李博译). 植物生态生理学[M]. 第5版. 北京: 中国农业大学出版社, 1997. 78-80
- [28] 李扬, 黄建辉. 库布齐沙漠中甘草对不同水分和养分供应的光合生理响应[J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1112-1124

(责任编辑 李美娟)

(上接 772 页)

- [15] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan Plateau [J]. Ecological Applications, 2007, 17(2): 541-557
- [16] 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
- [17] Hart S C. Potential impacts of climate change on nitrogen transformations and greenhouse gas fluxes in forests: a soil transfer study [J]. Global Change Biology, 2006, 12: 1032-1046
- [18] Bruehlheide H. Translocation of a montane meadow to simulate the potential impact of climate change [J]. Applied Vegetation Science, 2003, 6(1): 23-34
- [19] 江小雷, 张卫国, 杨振宇. 黑土滩恢复演替过程中植物功能群及牧草品质的变化[J]. 草地学报, 2008, 16(6): 619-623
- [20] Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, et al. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands [J]. Science, 1999, 286(5442): 1123-1127
- [21] Hollister R D, Webber P J, Tweedie C E. The response of Alaskan arctic tundra to experimental warming: differences between short- and long-term responses [J]. Global Change Biology, 2005, 11(4): 525-536
- [22] 周兴民, 吴珍兰. 植被与植物检索表: 中国科学院海北高寒草甸生态系统研究站[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2006
- [23] Walker M D. Community baseline measurements for ITEX studies [C]. Copenhagen: Danish Polar Centre, 1996
- [24] Read D J, Leake J R, Perez Moreno J. Mycorrhizal fungi as drivers of ecosystem processes in heathland and boreal forest biomes [J]. Canadian Journal of Botany, 2004, 82(8): 1243-1263
- [25] 周华坤, 周兴民, 赵新全. 模拟增温效应对矮蒿草甸影响的初步研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 533-547
- [26] 张堰青, 周兴民. 海北高寒草甸植物群落数量分类和排序[J]. 植物生态学与地植物学报, 1992, 16(1): 36-42
- [27] 张法伟, 李红琴, 李英年, 等. 青藏高原高寒草甸温度、降水和地上生产力变化特征的周期特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 525-530
- [28] 周华坤, 周立, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究[J]. 科学通报, 2006, 51(3): 320-327

(责任编辑 蔚 瑛)