

高寒草甸不同功能群植被盖度对模拟气候变化的短期响应

张法伟^{1,2,3*}, 李跃清¹, 李英年^{2,3}, 李以康^{2,3}, 林丽^{2,3},
曹广民^{2,3}, 杜明远⁴, 王勤学⁵

(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:为研究高寒生态系统植被群落对气候变化的响应,于2007年5月沿青藏高原东北祁连山南坡对海拔3 200 m的嵩草草甸、3 400 m的灌丛草甸、3 600 m的杂草草甸和3 800 m的稀疏植被进行双向移栽试验。功能群(莎草类、禾本类、豆科类和杂类草)植被绝对盖度的方差分析表明高寒草甸植被群落对气候变化较为敏感。莎草类盖度与土壤含水量呈负线性相关,禾本类和豆科类分别与土壤含水量和气温呈正线性相关。海拔与杂类草盖度的二次方程可解释其61%的变异。非度量多维排序(non-metric multi-dimensional scaling, NMDS)暗示功能群对气候变化的响应具有特殊性。豆科类和杂类草、莎草类和禾本类存在较弱的盖度补偿效应。对比早期和模拟降温下的嵩草草甸群落组成,印证其具有较高的稳定性。

关键词:双向移栽试验;植被绝对盖度;功能群;NMDS;高寒生态系统

中图分类号:Q142;Q948 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2010)06-0072-07

全球气候变化深刻影响着陆地生态系统的结构和功能^[1-3]。植物群落的结构和组成是陆地生态系统的基础,其对气候变化的响应方式和适应机制是当今生态学研究热点之一^[4,5]。高寒生态系统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,所以是研究植物群落对气候变化响应的“理想区”^[6-9]。然而,相关研究的结论常因研究区域、模拟方法等不同而存在明显差异。移栽试验由于其对生态系统扰动较少,是模拟气候变化的较好方法^[10]。于2007年5月沿青藏高原东北祁连山南坡,对不同海拔梯度的4种植被类型进行了双向移栽试验,通过研究不同植被类型功能群(莎草类、禾本类、豆科类和杂类草)对气候变化的响应特征^[11],以期获得高寒植被群落的响应特征。同时高寒生态系统对气候变化的长期和短期响应差别较大^[6,12],本研究通过2年的试验结果探讨高寒草甸对气候变化的早期响应特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区设在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站,101°19'E, 37°35'N, 海拔3 200 m)附近。其年均气温和年降水量分别为-1.7℃和580 mm。土壤富含有机质但缺乏可利用的氮^[13]。

移栽试验基于祁连山南坡的海拔梯度(图1左),该区共包含4种植被类型,分别为3 200 m的嵩草草甸、3 400 m的灌丛草甸、3 600 m的杂草草甸和3 800 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 dissilctum*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等为其优势种;灌丛草甸具有灌木、草本2层结构,灌木层由金露梅(*Potentilla fruticosa*)构成,草本层包含垂穗披碱草、异针茅和柔软紫菀(*Aster flaccidus*)等;杂类草草甸物种较少,西伯利亚蓼(*Polygonum viviparum*)、蓬子菜(*Galium verum*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)和苔草(*Carex pachyr-*

收稿日期:2010-01-08;改回日期:2010-07-12

基金项目:成都高原气象开放实验室基金课题(LPM2008011),中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-06-01)和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,工程师,硕士。

* 通讯作者。E-mail:flingzhang@gmail.com

rhiza) 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*)、蓬子菜和紫堇 (*Corydalis melanochlora*) 等, 其裸露地表面积高达 80%^[13]。

1.2 移栽过程

此次移栽试验完成于 2007 年 5 月上旬。当时植被多处于休眠期, 能在一定程度上减少移栽对群落的扰动。首先, 在 4 种植被类型上选择同质平坦的 9 m×7 m 样地(图 1 左)。其次, 把样地均分为 3 行×4 列的 12 个 1 m×1 m 样方, 相邻样方距离为 1 m。每行的 4 个样方分别与 4 种植被类型的样方进行位置对调(图 1 右)。在移栽的过程中, 将移栽样方按照 1.0 m×1.0 m×0.4 m(3 600 和 3 800 m 处土层较浅, 深度约为 0.3 m)挖出, 然后用塑料薄膜将其四周包裹(其作用可降低样方和周围环境之间营养元素的横向交换和植物根系入侵), 和另一海拔相应的移栽样方进行位置对调。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。最后, 用铁丝网将样地围起, 消除放牧的影响。

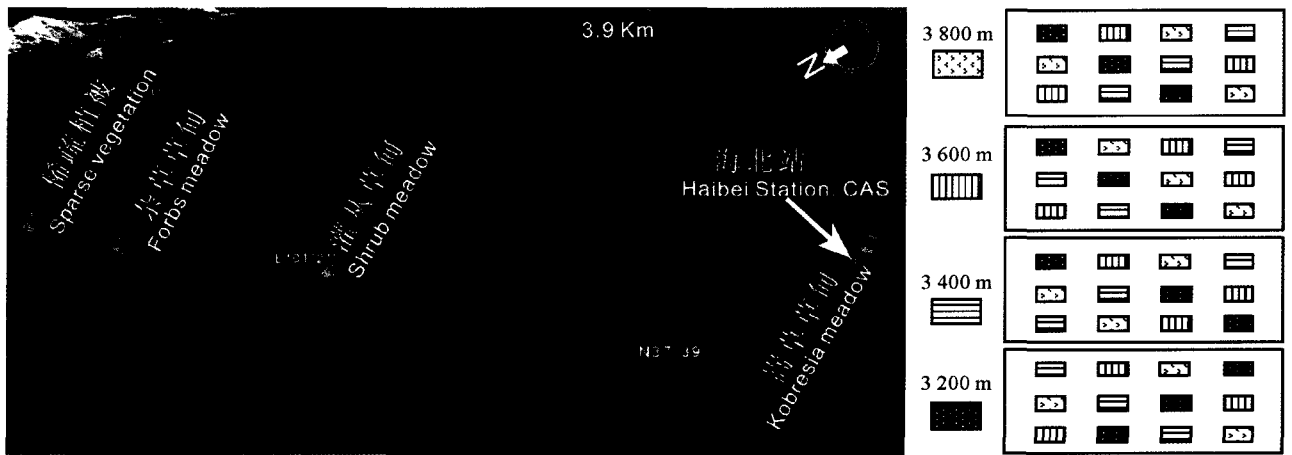


图 1 移栽样地的 Google earth 遥感图(左)和移栽示意图(右)

Fig. 1 Map of translocation region from Google earth (left) and experiment diagram (right)

1.3 气候、土壤、植被调查方法

气候因子主要监测空气温度(1.5 m)、土壤温度(5.0 cm)和土壤容积含水量(10.0 cm)。观测探头采样频率为 1 min, 采集器自动计算并存储其 30 min 的平均值。由于非生长季的最低温度小于 -40℃, 数据缺失较多, 因此仅采用生长季(6—9 月)的数据进行统计分析。土壤分析主要包括土壤有机质和全氮。2007 年 7 月底采用内径 7 cm 的土钻按照 0~10, 10~20 和 20~40 cm 的深度在不同海拔进行 5 次重复取样。2008 年相同时间则采用内径 3 cm 的土钻按照同样层次在每个移栽样方内进行取样。土壤营养元素采用深度的均值进行相关分析。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^[14]推荐的绝对盖度表示(样方框内某物种针刺数/100)。

1.4 统计方法

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逐步线性回归, 在 SPSS 13.0 中进行。同时, 采用 PC-ORD 4.2 对功能群盖度进行非度量多维排序(non-metric multi-dimensional scaling, NMDS)排序分析。

2 结果与分析

2.1 气候、土壤因子的变化

2 年的生长季气候因子变化不是很大(图 2)。空气温度随海拔升高递减, 其递减率为 0.98℃/200 m ($R^2 = 0.91, P < 0.01$)。土壤温度在 3 400 m 处最大, 而后随海拔升高而降低。土壤容积含水量随海拔升高而降低, 在 3 600 m 处出现最小值而后略有升高。2007 年土壤有机质和全氮表现出相似的变化, 在 3 600 m 处最大, 而后降低。2008 年, 由于按照样方所处海拔进行统计, 所以变化较大。土壤有机质随海拔升高而增大, 而土壤全氮则呈

“V”型变化,在 3 600 m 处最小。

2.2 莎草类和禾本类植被盖度的响应特征

2 年的群落调查结果表明研究区共有 51 个种。莎草类、禾本类、豆科类植物种类较少,但盖度较大。杂类草植物种类较多,分盖度较小,但总盖度大。4 种植被类型莎草类的响应特征表明,莎草类植被在 3 600 m 处生长最好,3 800 m 次之,低海拔(3 200 和 3 400 m)最差,三者之间差异显著($P < 0.05$)(图 3 左)。禾本类植被盖度的响应特征表明其在 3 200 m 处盖度最大($48\% \pm 5\%$, $n=24$),其余 3 个海拔处差异较小(图 3 右)。

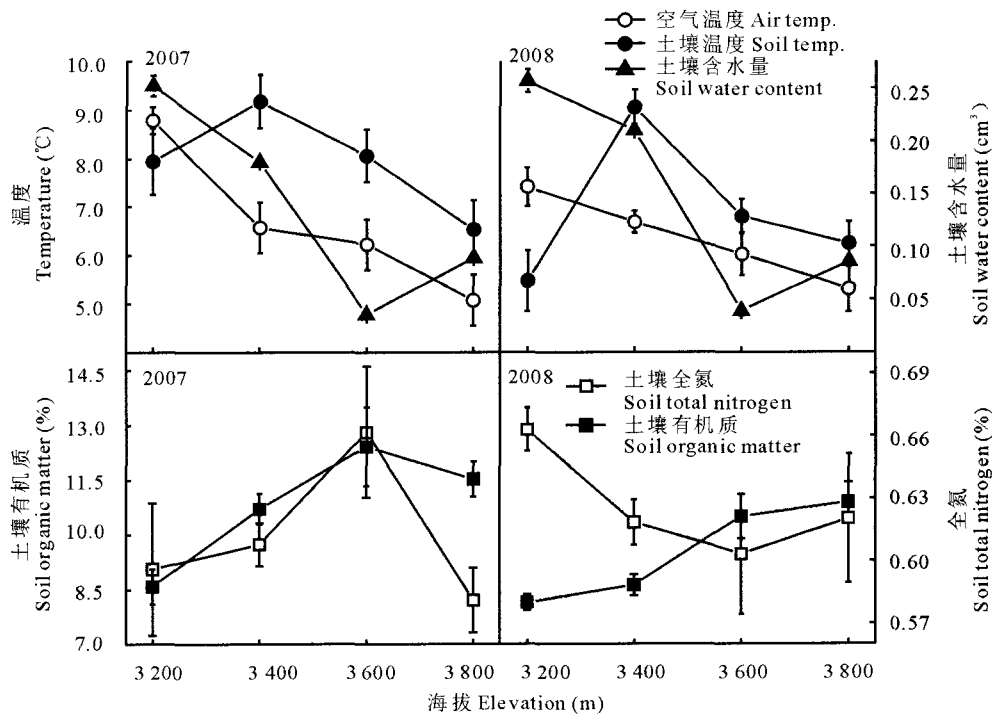


图 2 移栽样地环境因子的变化

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

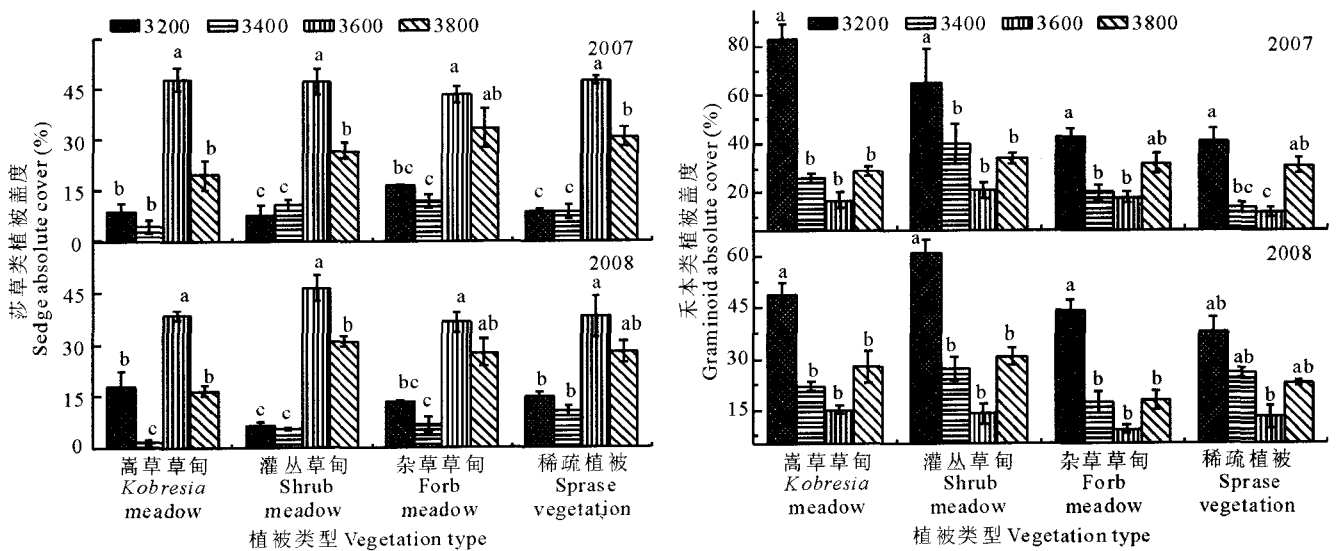


图 3 莎草类(左图)和禾本类(右图)植被盖度的响应特征

Fig. 3 Response of sedge (left) and graminoid (right) absolute cover

不同字母代表差异显著($P < 0.05$),下同 Different letter differed significantly, the below same

2.3 豆科类和杂类草植被盖度的响应特征

豆科类盖度的变化和禾本类相似,但表现的更为明显(图 4)。其在 3 200 m 处的植被盖度最大,显著高于其他海拔处。杂类草盖度在 3 400 m 处最大,显著高于其他 3 个海拔处($n=72$)。

2.4 环境因子对植被盖度的影响

莎草类和禾本类盖度分别与土壤含水量呈负相关和正相关(表 1)。莎草类植被盖度与温度的 2 个因子(气温和地温)分别呈正负相关,这可能仅是统计现象,而且其解释程度仅为 12%。豆科类植被盖度则与气温显著正相关。海拔、地温和土壤含水量对杂类草盖度影响较大,而海拔的二次方程($-0.000\ 002\ 9x^2+0.019x-31.55$, $P<0.001$)则可以解释杂类草 61%的变异。

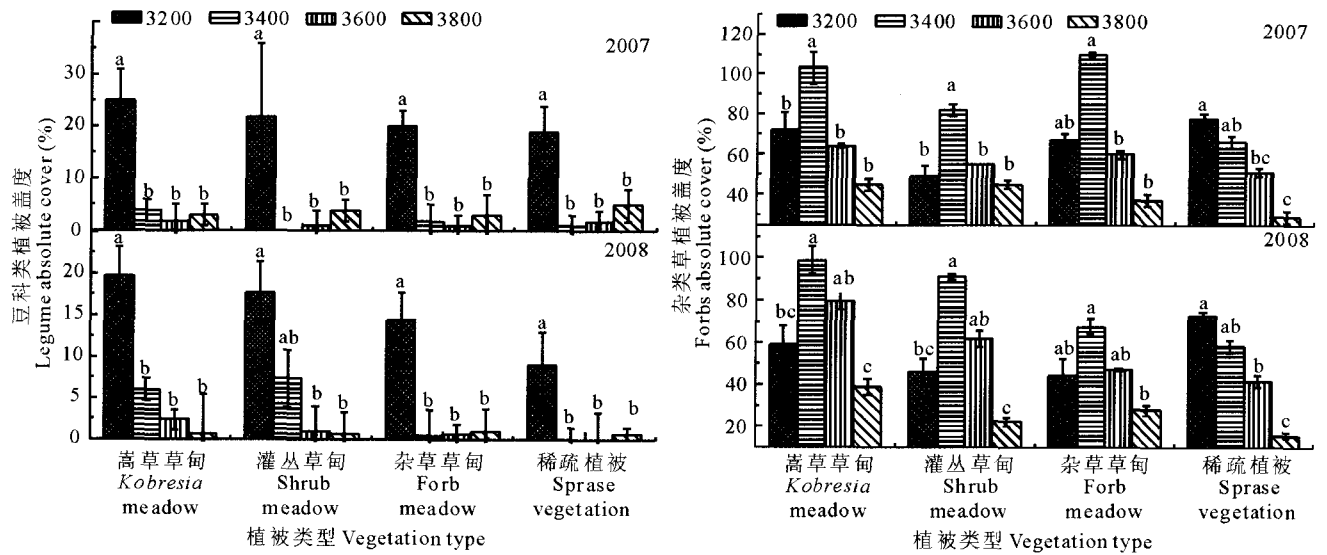


图 4 豆科类(左图)和杂类草(右图)植被盖度的响应特征

Fig. 4 Response of legume (left) and forbs (right) absolute cover

表 1 4 个功能群植被盖度和环境因子的回归方程

Table 1 Regression between plant absolute cover of 4 function groups and environment factors

因变量 Dependent	回归方程 Regression equation	相关系数 R^2	P
莎草类 Sedge	$Y = -1.35x_6 + 5.02$	0.75	$P < 0.001$
	$Y = -1.98x_6 + 0.063x_4 + 0.14$	0.84	$P < 0.001$
	$Y = -1.17x_6 + 0.046x_4 - 0.022x_5 + 0.38$	0.87	$P < 0.001$
禾本类 Graminoid	$Y = 1.25x_6 + 0.040$	0.51	$P < 0.001$
	$Y = 1.68x_6 - 0.047x_5 + 0.34$	0.65	$P < 0.001$
豆科类 Legume	$Y = 0.054x_4 - 0.36$	0.68	$P < 0.001$
杂类草 Forbs	$Y = -0.001x_3 + 3.27$	0.40	$P < 0.001$
	$Y = -0.001x_3 + 0.059x_5 + 2.30$	0.53	$P < 0.001$
	$Y = -0.001x_3 + 0.090x_5 - 1.78x_6 + 4.40$	0.62	$P < 0.001$

注: x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 和 x_6 分别代表土壤有机质、全氮、海拔、气温、地温和土壤含水量。

Note: $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ were soil organic matter, total N, elevation, air temperature, soil temperature, and soil water content, respectively.

3 讨论

植被盖度与气温的“Enter”线性回归表明莎草类与其呈一定的负相关($R^2 = 0.29, P < 0.001$),禾本类($R^2 = 0.39, P < 0.001$)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,而低矮的莎草类盖度将下降^[8,11,15]。这多归因于光和土壤营养资源的竞争。气候变化导致立枯增多,低矮植物较难获取充足的光照^[8,11]。禾本类和豆科类植被具有丛枝菌根(*Arbuscular mycorrhizal*, AM)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^[6,16,17]。但相关分析(表 1)没有体现出土壤营养对植被盖度变化的贡献,可能由于此次试验仅测定土壤全量含量而没有测定速效含量。

在区分功能群和调查年份的基础上,以原生海拔为行,以移栽海拔为列,构成 32×4 的矩阵进行 NMDS 排序(图 5)。其最终胁迫系数为 8.00,稳定度为 0.000 01,表明排序结果良好^[18]。第一、二轴的贡献率分别为 79.8% 和 14.7%,但其正交率较低(42.3%)。4 个功能群被划分为 4 组,但莎草类、禾本类和杂类草相距较近。豆科类和杂类草、莎草类和禾本类处于相对的象限区域,表明其对气候的响应呈一定的“补偿效应”^[19]。说明功能群之间存在一定的交互作用,用于缓和气候变化对其的影响^[20]。

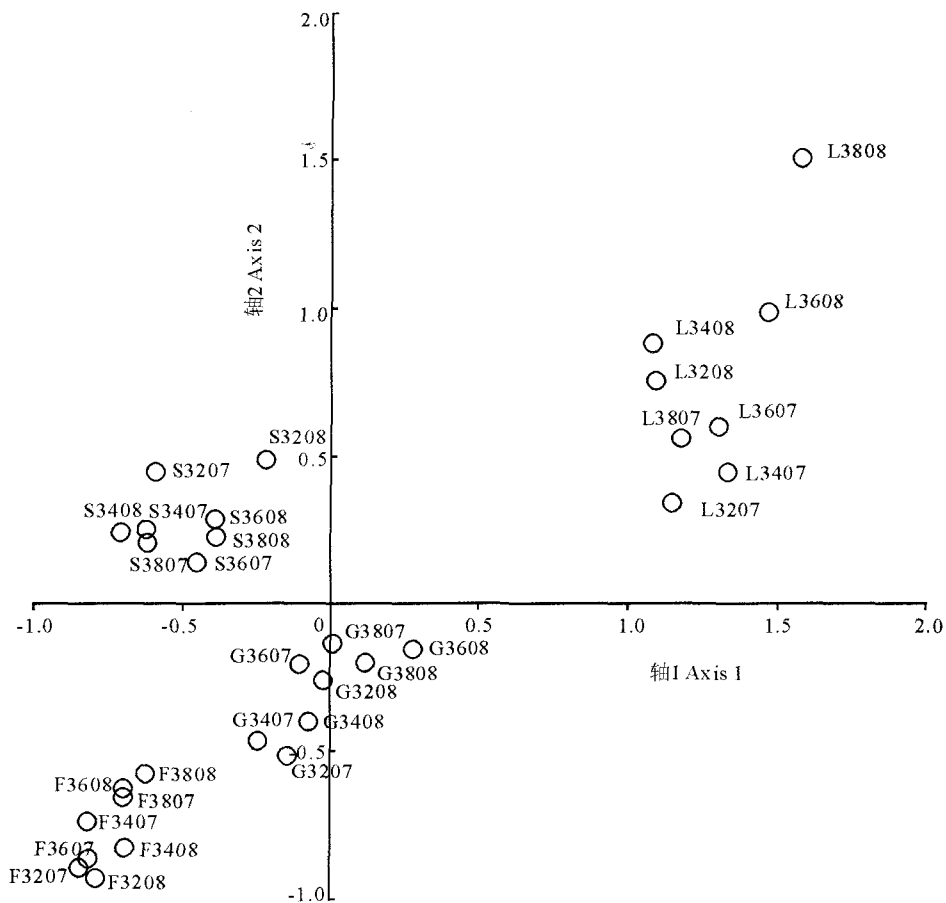


图 5 4 个功能群植被盖度的 NMDS 排序

Fig. 5 NMDS graph of the response of 4 functional group plant cover

S: 莎草类; G: 禾本类; L: 豆科类; F: 杂类草; 前 2 个和后 2 个数字分别表示功能群原生海拔和调查年份 S: Sedge; G: Graminoid; L: Legume; F: Forbs. The first and second number were the abbreviation of donor elevation and survey year

植物物种的分布随着气候变化所引起的生态位变化而改变^[2],进而影响到优势物种的转变^[1]。3 600 m 处的生长季平均温度接近于 1983—1986 年。1985 年的嵩草草甸调查结果表明其由莎草类和禾本科构成,前者植被盖度约比后者高 2 倍^[21]。嵩草草甸被移至 3 600 m 处后,莎草类平均盖度为 43%,禾本科为 16%,而物种构成也以矮嵩草和异针茅为主。其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,暗示其本身具有较大的稳定性,和其他高寒生态系统类似^[1,22]。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^[23]和稳定性分析的结果一致^[24]。

致谢:感谢北京大学贺金生教授和匿名审稿者对本文提出宝贵的修改意见。

参考文献:

- [1] Harte J, Shaw R. Shifting dominance within a montane vegetation community: Results of a climate-warming experiment[J]. *Science*, 1995, 267: 876-880.
- [2] Alsos I G, Eidesen P B, Ehrlich D, *et al.* Frequent long-distance plant colonization in the changing arctic[J]. *Science*, 2007, 316: 1606-1609.
- [3] Walther G R, Post E, Convey P, *et al.* Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416: 389-395.
- [4] IPCC. Climate change 2007—The physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] 公延明, 胡玉昆, 阿德里·麦地, 等. 高寒草原对气候生产力模型的适用性分析[J]. *草业学报*, 2010, 19(2): 7-13.
- [6] 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.
- [7] Körner C. Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Montian Ecosystems[M]. Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [8] Jägerbrand 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] 李东, 黄耀, 吴琴, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统土壤有机碳动态模拟研究[J]. *草业学报*, 2010, 19(2): 160-168.
- [10] 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(6): 1032-1046.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Walker M D. Community baseline measurements for ITEX studies[A]. *International Tundra Experiment (ITEX) Manual*[M]. Danish Polar Centre: Copenhagen, 1996.
- [15] Klanderud K. Species-specific responses of an alpine plant community under simulated environmental change[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(3): 363-372.
- [16] 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.
- [17] 张俊忠, 陈秀蓉, 杨成德, 等. 东祁连山高寒草地土壤可培养真菌多样性分析[J]. *草业学报*, 2010, 19(2): 124-132.
- [18] Clarke K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure[J]. *Australian Journal of Ecology*, 1993, 18(1): 117-143.
- [19] Cross M S, Harte J. Compensatory responses to loss of warming-sensitive plant species[J]. *Ecology*, 2007, 88(3): 740-748.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.

**Short-term response of functional plant groups abundance to simulated
climate change in alpine meadow ecosystems**

ZHANG Fa-wei^{1,2,3}, LI Yue-qing¹, LI Ying-nian^{2,3}, LI Yi-kang^{2,3}, LIN Li^{2,3},
CAO Guang-min^{2,3}, DU Ming-yuan⁴, WANG Qin-xue⁵

- (1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071, China; 2. Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 810001, China; 3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, CAS, Xining 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 of alpine plant communities to climate change, we manipulated a reciprocal translocation experiment along the elevation gradients on the south slope of the Qilian Mountains, in the northeast Qinghai—Tibetan Plateau in May 2007. The translocated vegetation comprised 3 200 m of *Kobresia* meadow, 3 400 m of shrub meadow, 3 600 m of forbs meadow, and 3 800 m of sparse vegetation. Four functional groups (FG) were classified as sedge, graminoid, legume and forbs. An ANOVA of FG abundance showed that alpine plant communities were sensitive to climate change. Sedge cover correlated negatively and linearly with soil water content. Graminoid and legume abundance were linearly related to soil water content and temperature, respectively. The Quadratic equations between forbs and elevation accounted for 61% of variation. NMDS (non-metric multidimensional scaling) indicated that FG responded specially. There was a weak abundance compensation effect between legumes and forbs, sedges, and graminoids. The comparison between the plant community in *Kobresia* meadow under simulated cooling and historical survey, confirmed it was stable.

Key words: reciprocal translocation experiment; plant absolute abundance; function group; NMDS; Qinghai—Tibetan Plateau