

模拟增温效应对黑褐苔草 (*Carex alrof usca*) 生长特征的影响

赵建中^{1,2}, 刘伟¹, 周华坤¹, 刘汉武^{1,2}, 许庆民^{1,2}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100001)

摘要: 在典型矮蒿草甸上, 按大小梯度设置温棚(由小到大依次为 A、B、C、D、E)进行模拟增温效应对黑褐苔草 (*Carex alrof usca*) 的分蘖数、叶片数和高度影响的研究。结果表明: 温度(地表温度和地温)随温室的减小而升高, 其中, 温室 A 内地表温度和地温最高, 比对照分别提高了 2.35 和 2.13。温室 D 的分蘖数增幅最大, 温室 D 与温室 A 间分蘖数变异达到显著水平 ($P < 0.05$), 温室 A 至 D 中黑褐苔草的分蘖数变异随温度的升高而降低, 并与温度呈负相关关系 ($P_{\text{地表}} < 0.05$; $P_{\text{地温}} < 0.01$); 叶片数的变化趋势与分蘖数基本一致; 黑褐苔草平均高度随温度的增加而升高, 温室 A 与对照间达到极显著水平 ($P < 0.01$), 各处理黑褐苔草高度与温度呈正相关且达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

关键词: 黑褐苔草; 增温效应; 生长特征

中图分类号: S 812

文献标识码: A

文章编号: 1003-4315(2007)02-0084-07

Influence of simulated warming effect on growth characteristic of *Carex alrof usca*

ZHAO Jian-zhong^{1,2}, LIU Wei¹, ZHOU Hua-Kun¹, LIU Han-wu^{1,2}, XU Qing-Min^{1,2}

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810001, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100001, China)

Abstract: Based on the International Tundra Experiment (ITEX) method, the authors established greenhouses with different sizes, and examined the responses of *Carex alrof usca* in growth characteristics to the artificial simulated warming effect. The variation in several growth indexes, such as the number of tillers, leaves and mean height of the plants, to temperature increasing was analyzed. The results showed that the temperature (ground surface and underground temperature) was increased with the greenhouse size diminishing. Compared the greenhouse A with the control, the ground surface and underground temperatures increased by 2.35 and 2.13 respectively. The numbers of increased tillers in the greenhouse D were the most, and the variation between greenhouse D and greenhouse A in the numbers of increased tillers was significant ($P < 0.05$). From greenhouse A to D, the numbers of tillers showed negative correlation to the temperature (surface temperature: $P < 0.05$; underground temperature: $P < 0.01$). The variation in leaf numbers was similar to the tillers. The mean height of the plants increased with the temperature increasing and the difference between the greenhouse A and the control in the mean height of the plants was significant ($P < 0.01$). The mean height displayed positive correlation to the temperature ($P < 0.01$).

作者简介: 赵建中(1980-), 男, 青海乐都人, 在读硕士, 主要从事植物生态学方面的研究。

通讯作者: 刘伟, 男, 副研究员, 主要从事草地生态学方面的研究。

资助基金: 国家“十五”重大科技攻关项目(2001BA606A-02)。

收稿日期: 2006-10-12

Key words: *Carex alrof usca*;warming effect ;growth characteristic

全球变化与陆地生态系统(GCTE)是全球变化研究的重要内容,而气候变化对陆地生态系统的影响及其反馈是 GCTE 研究的热点^[1].根据大气环流模型(GCMs)的预测,21 世纪全球温度将升高 1.5~4.5^[2],这必将影响到植物的生理生态特征,进而对植物个体、群落、生态系统乃至整个生物圈产生巨大影响^[3].大量证据表明,全球变暖将影响到植被净第一生产力(NPP)及其分布格局^[4~5],地表生态系统的结构和功能也会随之发生变化^[6].目前有关植物对全球变暖响应的研究,大多数是通过研究植物群落对全球变暖的响应进而探讨对植物的影响,而对植物进行定株定量的研究相对较少,尤其对高寒草甸植物种在全球变暖方面的定株定量研究尚未见报道.

有“中华水塔”之称的青藏高原属于气候变化的敏感区和生态脆弱带^[7],是研究陆地生态系统对气候变化响应机制的理想场所.从 1982~1999 年 18 a 的气象数据来看,青藏高原生长季温度平均每年增加 0.071^{°C},高于全国的 0.046^[8].冻土退化的研究结果也证实了青藏高原气温转暖的事实^[9].与全国一致,近 20 a 青藏高原的气温也在逐渐变暖,且升温幅度较大.有关研究表明青藏高原草地植被活动在增强,并且植被活动的变化与气候变化(尤其是温度上升)密切相关^[10].在高原和高山极端环境下的高寒草甸生态系统极其脆弱,对人类的干扰和由于温室效应引起的全球气候变化极其敏感,对这些干扰和变化的响应具有超前性.因此,近年来气候变化对高寒草甸植被的影响,已引起众多科学工作者的广泛关注^[11~13].已有的研究表明,生态系统动态变化常常与气候变化密不可分,并以优势物种的变化为特征^[14].

黑褐苔草(*Carex alrof usca*)作为青藏高原高寒草甸矮嵩草草甸的主要伴生种之一,其生长特性的变化将会对矮嵩草草甸的群落结构和功能产生重要的影响.目前对黑褐苔草的研究相对较少,且主要集中在黑褐苔草的体外消化率、抗寒性物质等方面^[15~16],而将温度变化作为干扰因子,对黑褐苔草个体影响的研究尚未见报道.为此,本文通过温度梯度处理,对黑褐苔草进行定株定量观测,试图揭示矮

嵩草草甸主要建群种对气候变暖的响应规律.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在青海省果洛藏族自治州玛沁县大武乡格多牧委会进行.地理位置为 N 34°17′~34°25′,E 100°26′~100°43′,平均海拔 4 120 m.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.温度年较差小而日差悬殊,太阳辐射强烈.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^[17].

矮嵩草草甸(*Kobresia humilis*)是由典型的寒冷中生植物矮嵩草为建群种所组成的植物群落,常见的伴生种有:黑褐苔草(*Carex alrof usca*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、二柱头薹草(*Scirpus distigmaticus*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa* spp.)、异针茅(*Stipa aliena*)、短穗兔耳草(*Lagotis brachystachya*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、兰石草(*Lancea tibetica*)、美丽凤毛菊(*Saussurea superba*)、三裂叶碱毛茛(*Halerpestes tricuspis*)等^[17].

黑褐苔草属多年生草本,生长于海拔 2 600~5 000 m,根状茎匍匐,秆高 20~30 cm,三棱形,基部具淡褐色的老叶鞘.叶短于秆,宽 2~3 mm,扁平.生于山坡草甸、河漫滩或灌丛草甸^[18].

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在典型的矮嵩草草甸上建立增温试验样地,并用围栏封闭.在试验样地内设置开顶式温室(图 1),使用材料为聚氯乙烯塑料,圆台型框架用细钢筋制作.按大小梯度设置 5 个开顶式温棚(A、B、C、D、E),温室底部直径与顶部直径分别为 0.85 m,0.40 m(A);1.15 m,0.70 m(B);1.45 m,1.00 m(C);1.75 m,1.30 m(D);2.05 m,1.60 m(E),圆台高度 0.4 m.在样地内随机设置温室,每个处理重复 4 次.将未做任何处理的温室外样地作为对照.

1.2.2 定株观测 分别在各处理中标定黑褐苔草(*Carex alrof usca*),考虑到降雨量等的影响,标定

植物应尽可能从温棚中央位置进行选取.从5月植物返青起,每月进行分蘖数、叶片数和高度等指标的观测与记录,至9月植物干枯为止.

1.2.3 温度测定 用 HOBO - H84 通道温湿度数据采集器(6套)记录地表(在地表上 10 cm 处设置探头)和地下(在地面下 10cm 处设置探头)温度.从5月份起每隔 2 h 自动记录 1 次,到9月份植物干枯为止.

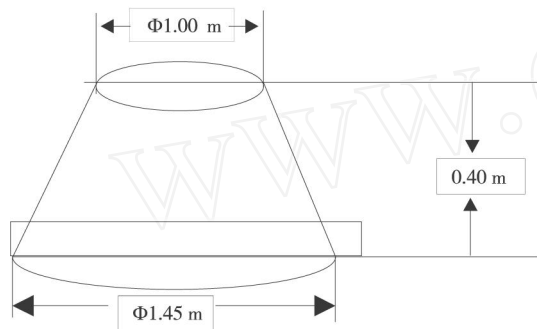


图1 圆台形开顶式温棚示意图

Fig. 1 The sketch map of open top chamber

1.2.4 数据处理 分蘖数、叶片数和高度均以在其生长期中增加的平均值计算(即变异数).

试验数据用 Excel 和 DPS 统计软件进行处理.

重要值 = (平均高度 + 平均盖度 + 平均生物量) / 3 × 100 %.

2 结果与分析

2.1 温棚温度变化

模拟增温结果表明:温室内的地表温度和地下温度随温室的减小而明显升高,与对照相比,2004、2005年温棚 A 的地表温度分别比温室外样地升高了 2.551、2.153,地温比温室外样地分别升高了 2.153、2.110 (图 2、3).相对于地温而言,地表温度波动较大,这是由于对地表温度干扰的气象因子比较多而且受到的都是直接干扰.由图 4、5 可以看出,各温棚月间增温不一致,呈现一定的季节性变化规律,地表和地下温度均在 5、6 月低,8 月最大,9 月又开始降低.4~5 月间,土壤处于冻结状态,解冻需要吸收大量热量,而且这期间风速较大,因而温度较低.9 月之后进入秋季,天气逐渐变冷,风速也随之增加,因而温度又开始降低.

本模拟增温试验导致的增温量,在大气环流模

型(GCMs)预测的 21 世纪全球温度将升高 1.5~4.5 范围内^[2],而且各温棚的温度变化和温棚大小显著相关.2004 年: $r_{地表} = 0.913$, $P = 0.031$; $r_{地温} = 0.942$, $P = 0.017$; 2005 年: $r_{地表} = 0.945$, $P = 0.015$; $r_{地温} = 0.989$, $P = 0.001$.说明各处理间的模拟增温效应是比较理想的.

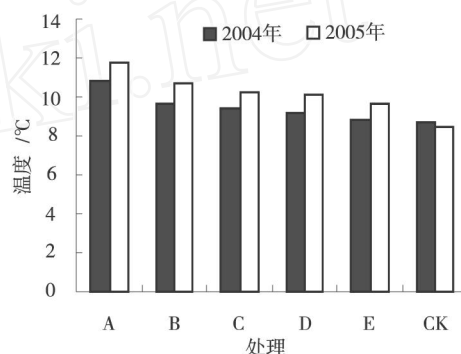


图2 各处理平均地表温度变化

Fig. 2 The variation of the average ground surface temperature

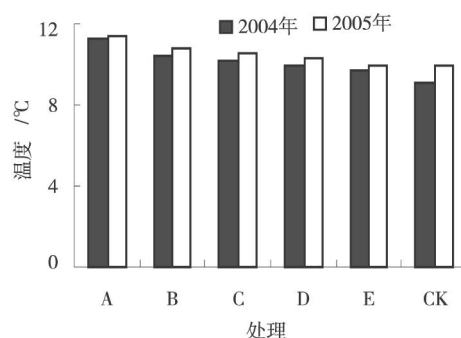


图3 各处理平均地温变化

Fig. 3 The variation of the average underground temperature

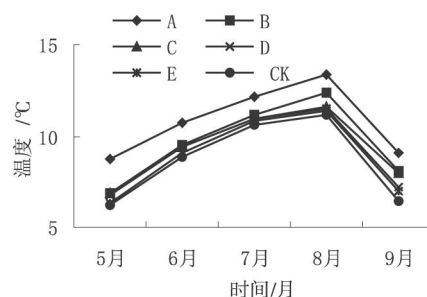


图4 月间平均地表温度变化

Fig. 4 The monthly variation of the average ground surface temperature

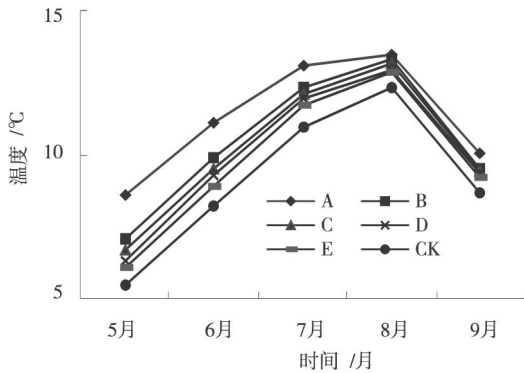


图 5 月间平均地温变化

Fig. 5 The monthly variation of the average underground temperature

2.2 黑褐苔草的生长特征

2.2.1 分蘖数变化 2 年的研究表明,黑褐苔草的分蘖数随温度的升高先增多后减少,在温棚 D 中分蘖数变异(即 1a 中增加的分蘖枝)最大(0.9 株),温棚 A 分蘖数变异最小(0.2 株),而且黑褐苔草分蘖数 2a 的变化规律基本一致(图 6). 2004 年分蘖数 Duncan 多重比较结果显示(表 1):温室 D 与温室 A 分蘖数变异达到极显著水平 ($P < 0.01$). 从温室 A 至 D 分蘖数的变异随温度的升高而减少,且呈显著负相关 ($r_{地表} = -0.978, P = 0.02; r_{地温} = -0.990, P = 0.01$),而从温室 D 至对照呈正相关,但不显著. 2005 年分蘖数 Duncan 多重比较结果则显示:温室 D 的分蘖数变异分别与其它温室和对照达到显著水平 ($P < 0.05$);从温室 A 至温室 D 分蘖数变异与温度(平均地表温度和平均地温)呈负相关,从温室 D 至对照,分蘖数变异与温度呈正相关.

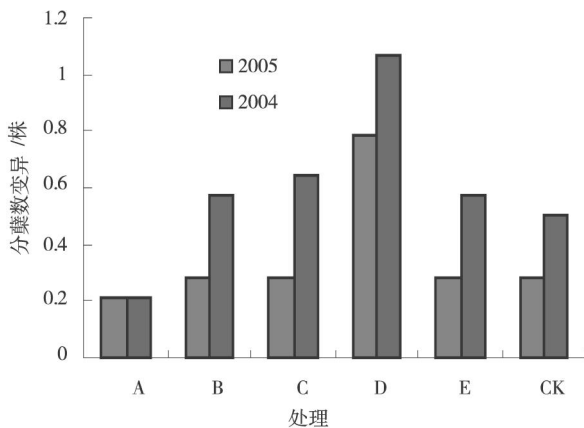


图 6 处理间分蘖数变异

Fig. 6 The tiller number difference in different treatments

表 1 2004、2005 年分蘖数变异多重比较

Tab. 1 The correlation of the temperature to the size of chamber

时间	处理	平均值	时间	处理	平均值
	温棚 D	1.071 ^{aA}		温棚 D	0.786 ^{aA}
	温棚 C	0.643 ^{abAB}		温棚 B	0.286 ^{ba}
	温棚 B	0.571 ^{abAB}		温棚 C	0.286 ^{ba}
2004 年	温棚 E	0.571 ^{abAB}	2005 年	温棚 E	0.214 ^{bb}
	对照(CK)	0.5000 ^{abAB}		对照(CK)	0.286 ^{ba}
	温棚 A	0.214 ^{bb}		温棚 A	0.214 ^{ba}

2.2.2 叶片数变化 叶片数的变化和分蘖数的变化趋势基本一致(图 7),在温室 D 中叶片数变异最大(7.0 片),在温室中 A 叶片数变异最小(2.9 片). Duncan 多重比较结果显示,2004 年叶片数变异与分蘖数变异一致(表 1, 2),温室 D 与温室 A 间达到显著水平 ($P < 0.05$). 而 2005 年叶片数变化与分蘖数变化有所差异,温室 D 分别与温室 A 和对照的叶片数变异达到极显著水平 ($P < 0.01$). 2004 年,从温室 A 到温室 D,叶片数变异与平均温度呈显著负相关 ($r_{地表} = -0.977, P = 0.02; r_{地温} = -0.991, P = 0.009$),而 2005 年,分蘖数变异与地温的相关性达到显著水平 ($r_{地温} = -0.966, P = 0.03$),与地表温度的相关性不显著. 2 a 中,从温室 D 到对照间叶片数变异与平均温度均呈正相关关系,但不显著.

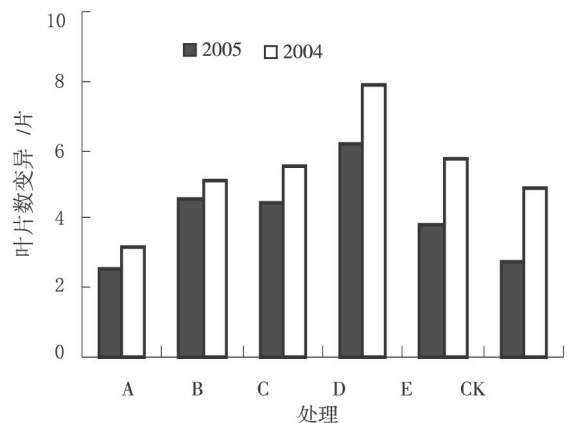


图 7 处理间叶片数变异

Fig. 7 The leaf number difference in different treatments

表 2 2004、2005 年叶片数变异多重比较

Tab. 2 The multiple comparisons of leaf s number difference in 2004, 2005

时间	处理	平均值/个	时间	处理	平均值/个
2004 年	温棚 D	7.857 ^{aA}	2005 年	温棚 D	6.214 ^{aA}
	温棚 E	5.786 ^{abAB}		温棚 B	4.571 ^{abAB}
	温棚 C	5.500 ^{abAB}		温棚 C	4.429 ^{abAB}
	温棚 B	5.071 ^{abAB}		温棚 E	3.786 ^{bAB}
	对照(CK)	4.857 ^{abAB}		对照(CK)	2.714 ^{bB}
	温棚 A	3.143 ^{bA}		温棚 A	2.571 ^{bB}

2.2.3 高度变化 黑褐苔草平均高度随温度的升高而增高,温棚 A 的平均高度变异最大(3.5 cm),温棚 E 的平均高度变异最小(1.6 cm)(图 8). Duncan 多重比较结果表明:2004 年,温棚 A 的黑褐苔草高度比对照组极显著增高($P < 0.01$);2005 年,温棚 A 的黑褐苔草高度比温棚 D、E 和对照极显著增高($P < 0.01$)(表 3). 黑褐苔草的平均高度与温度(地表温度和地温)呈显著正相关(2004 年: $r_{\text{地表}} = 0.968$, $P = 0.002$; $r_{\text{地温}} = 0.959$, $P = 0.003$; 2005 年: $r_{\text{地表}} = 0.906$, $P = 0.01$; $r_{\text{地温}} = 0.937$, $P = 0.006$).

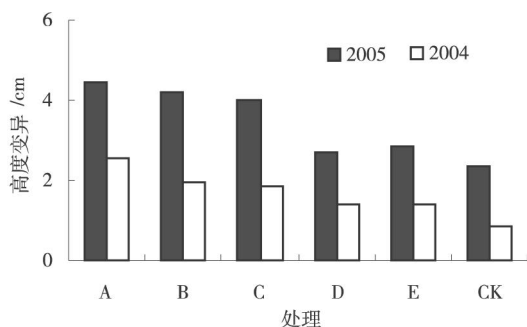


图 8 处理间高度变异

Fig. 8 The height difference in treatments

表 3 2004、2005 年处理间高度多重比较

Tab. 3 The multiple comparisons of height difference in 2004, 2005

时间	处理	平均值	时间	处理	平均值
2004 年	温棚 A	2.539 ^{aA}	2005 年	温棚 A	4.455 ^{aA}
	温棚 B	1.968 ^{abAB}		温棚 B	4.193 ^{abAB}
	温棚 C	1.856 ^{abcAB}		温棚 C	3.980 ^{abcAB}
	温棚 D	1.405 ^{bcAB}		温棚 D	2.851 ^{bcB}
	温棚 E	1.398 ^{bcAB}		温棚 E	2.690 ^{bcB}
	对照(CK)	0.871 ^{dB}		对照(CK)	2.333 ^{bB}

3 讨论

以分蘖数增加为主的无性繁殖是黑褐苔草的主要繁殖方式之一. 本研究结果表明,在温棚 D 中黑褐苔草的分蘖数增加最多,有利于黑褐苔草的无性繁殖,而温度继续增高或者降低,都会导致分蘖数减小,黑褐苔草的无性繁殖因此而受到抑止,不利于黑褐苔草的生长发育. 在相同条件下对矮嵩草的研究则发现,分蘖数在温棚 E 中达最多,即温棚 E 的温度最有利于矮嵩草的生长和发育^[19]. 由此预测,如果全球温度继续增高,以矮嵩草、黑褐苔草为建群种的矮嵩草草甸将会向高海拔地区移动. 而且对森林和南极苔原植被的研究也已证明了植物群落随着气候变暖沿海拔梯度迁移的事实^[20]. 李英年等^[13]通过 5a 模拟增温试验的研究发现:增温使原生适应寒冷、湿中生境的矮嵩草为主的草甸植被类型逐渐退化,有些物种甚至消失,被以旱生为主的植被类型所替代^[13]. 周勤等^[6]对内蒙古羊草草原建群种羊草(*Leymus chinensis*)和大针茅(*Stipa grandis*)的研究结果表明:最优建群种羊草的重要值和地上初级生产力随着最低温度的升高有明显的下降趋势,次优建群种大针茅的重要值和地上初级生产力则略有升高,若这种趋势继续下去,大针茅有可能代替羊草,成为群落的最优建群种^[5]. Webb^[21]研究认为,2 万多年前南极的植物群落物种组成发生改变,是对气候变化的一种反应^[21]. 相关研究也表明,随着退化程度的加剧,草地的群落物种组成、结构和群落多样性发生了重大的改变^[22],因此,在未来全球增温的趋势下,在海拔相对较低地区的矮嵩草草甸的优势种将会发生改变,优势种矮嵩草有可能被其他植物所代替,使得群落的结构和功能发生改变.

地温变化往往是通过影响植物根温来影响植物的生长和发育,有关研究发现,地温变化 1 就能引起植物生长和养分吸收的明显变化^[23],而叶片生长对根温的反应则最为明显^[24]. 本试验结果也表明,叶片数的变化与温度变化关系极为密切. 各处理间黑褐苔草叶片数随温度的升高而减少,即随温度的升高叶片数的生长受到抑止. Brouwer (1964) 以菜豆为材料,发现 30 根温下叶片生长最快,5 根温下几乎不长. Watt 得出限制叶片扩展的 3 个因素:1) 当根温低于 5 时受水分胁迫;2) 根与叶片

生长区间的温度梯度;3) 温度对根代谢的直接效应^[24]。而黑褐苔草 5 月份返青后处于营养生长期,各温棚温度都较低(平均 6.83℃),地面刚开始解冻,所以土壤湿度较大,温棚内温度越高,土壤湿度相对减小,叶片生长主要受水分胁迫。而且相关研究也表明,温度可能通过降低呼吸、减少生长所需的能量供给、减少生长区的激素产生和利用和减少碳水化合物向生长区的运输等来抑止叶片生长^[24]。到 7 月份之后,黑褐苔草进入繁殖生长期,在这期间叶片数的变化主要随分蘖数的变化而变化。因此,黑褐苔草的叶片数变化和分蘖数变化趋势虽然基本一致,但仍有所差异。

温度的变化将改变群落小环境,而特殊小生境将影响植物冠层高度^[25]、光合速率^[26]、养分的吸收^[27]和生长率^[28]等。周华坤等^[12]研究表明,随着温度的变化,矮嵩草草甸的成层结构未发生太大变化,仍为 2 层,上层以禾草为主,下层以莎草科和杂类草为主^[12]。在不同温度梯度上进行的模拟增温研究结果显示,随着温棚的减小,即随温度的升高,形成明显的群落层片结构,而在同一处理内群落成层结构与周华坤等^[12]的研究结果一致。禾草占据上层空间形成郁闭环境,因此下层植物黑褐苔草等为了争取更多的阳光和生存空间,种间竞争作用增强,植物高度整体增加。

本文仅讨论了温度的变化情况,而对设置温棚后棚内更多的微气象因素,包括光照、CO₂ 通量、水分等的变化未进行研究。

4 结论

在不同温度梯度上通过对黑褐苔草生长特征的研究,得出以下结论:

- 1) 分蘖数和叶片数的变化趋势基本一致,即随温度的升高而减少。
- 2) 平均高度随温度的升高而增加,而且在不同处理间高度变化差异显著。
- 3) 在未来全球气候变暖的趋势下,低海拔地区的矮嵩草草甸,将会向高海拔地区迁移,原有的矮嵩草草甸群落结构将会发生演替。

参考文献

[1] IPCC. Climate change, impact, adaptation, and vulnera-

bility[M]. London: Cambridge University Press, 2001

- [2] IPCC. Climate change radiative forcing of climate change intergovernment panel on climate change[M]. London: Cambridge University Press, 1994
- [3] 刘建国. CO₂ 浓度的升高和全球变暖对六种生物层次的影响[C]// 刘建国. 当代生态学博论. 北京: 科学出版社, 1992: 369-380
- [4] 周广胜, 郑元润, 陈四清, 等. 自然植被净第一性生产力模型及其应用[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 2-11
- [5] 胥 晓. 四川植被净第一性生产力(NPP)对全球气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 19-24
- [6] 周 勤, 刘钦普, 林振山. 气候变暖对内蒙古羊草草原建群种的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 24-28
- [7] 孙鸿烈, 郑 度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 1998
- [8] Piao S L, Fang J Y, Yi W, et al. Variation in a satellitebased vegetation index in relation to climate in China[J]. Journal of Vegetation Science, 2004, 15(3): 219-226
- [9] 南卓铜, 高泽深, 李述训, 等. 近 30 年来青藏高原西大滩多年冻土变化[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 817-823
- [10] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草甸植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8
- [11] Zhang X H. The classified system of vegetation climate on global change [J]. Fourth Research, 1993, (2): 157-169
- [12] 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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 547-553
- [13] 李英年, 赵 亮, 赵新全, 等. 五年模拟增温后矮嵩草草甸群落结构及生产量的变化[J]. 草地学报, 2004, 12(3): 236-239
- [14] Gosz J R, Sharpe P J H. Broad-scale concepts for interactions of climate, topography, and biota at biome transitions[J]. Landscape Ecol, 1989, (3): 229-243
- [15] 滕中华, 韩 发, 师生波, 等. 青藏高原黑褐苔草的抗寒性物质季节变化动态研究[J]. 中国草地, 2003, 25(4): 36-40
- [16] 徐世晓, 赵新全, 孙 平, 等. 青藏高原不同海拔梯度 2 种莎草科牧模拟体外消化率研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(5): 1191-1196
- [17] 刘 伟, 周华坤, 周 立. 不同程度退化草地生物量的分布模式[J]. 中国草地, 2005, 27(2): 9-15
- [18] 刘尚武, 卢生莲. 青海植物志[M]. 西宁: 青海人民出

- 版社,1999
- [19] 赵建中,刘伟,周华坤,等. 模拟增温效应对矮蒿草生长特征的影响[J]. 西北植物学报,2006,26(12): 2533-2539
- [20] Grabherr G M, Cottfried H Pauli. Climate effects on mountain plants[J]. Nature,1994,369:448-450
- [21] Webb T. The past 11,000 years of vegetational change in eastern North America[J]. Bio-Science, 1982,31:501-506
- [22] 祁彪,张德罡,丁玲玲,等. 退化高寒干旱草地植物群落多样性特征[J]. 甘肃农业大学学报,2005,40(5):626-631
- [23] Walker J M. One degree increment in soil temperature affects maize seeding behavior[J]. Pro Soc Soil Sci Am,1969,33,729-736
- [24] 冯玉龙,刘恩举,孙国斌. 根系温度对植物的影响[J]. 东北林业大学学报,1995,23(3):63-69
- [25] Billings W D, Mooney H A. The ecology of arctic and alpine plants[J]. Biological Reviews, 1968,43:481-529
- [26] Tieszen L L. Photosynthesis in the principal Barrow, Alaska, species: a summary of field and laboratory responses[C]// In: Tieszen L L. Vegetation and production ecology of an Alaskan arctic tundra. New Jersey, USA,1978:241-268
- [27] Chapin F S, Tryon P R. Phosphate absorption and root respiration of different plant growth forms from northern Alaska[J]. Holarctic Ecology, 1982,(5): 164-171
- [28] Johnson D A, Tieszen L L. Aboveground biomass allocation, leaf growth, and photosynthesis patterns in tundra plant forms in arctic Alaska[J]. Oecologia (Berlin),1976,24:159-173