



矮嵩草草甸不同功能群主要植物种生长特征与地表温度的相关性分析

赵建中^{1,2,3}, 彭敏^{1*}, 刘伟¹, 叶润蓉¹, 周玉碧¹

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3 青海省草原总站, 西宁 810001)

摘要:基于国际冻原计划(ITEEX)模拟增温效应对植物影响的研究方法, 设置温度梯度从物种个体水平研究各功能群主要植物种生长特征与地表温度的相关性, 以探讨全球变暖背景下, 矮嵩草草甸不同功能群植物种生长特征对地表温度升高的响应。结果显示: (1) 莎草科功能群黑褐苔草的高度与地表温度呈线性关系($P < 0.01$), 而分蘖数、叶片数与地表温度呈二次函数关系, 但不显著; 矮嵩草的分蘖数、叶片数及高度与地表温度均呈二次函数形式变化($P < 0.05$)。 (2) 多年生禾本科功能群垂穗披碱草和草地早熟禾的分蘖数、叶片数、高度均与地表温度呈线性正相关关系($P < 0.01$)。 (3) 杂类草功能群短穗兔耳草的匍匐茎数与地表温度呈不显著的二次函数关系, 而叶片数、高度均与地表温度呈线性相关关系($P < 0.01$); 鸟足毛茛的花蕾数、叶片数、高度均与地表温度呈线性相关关系($P < 0.01$)。研究表明, 不同功能群植物种对地表温度升高的响应是不一致的, 地表温度持续升高对禾本科功能群植物种的生长有利, 而对莎草科、杂类草功能群植物种均不利。

关键词:矮嵩草草甸; 功能群; 生长特征; 地表温度; 相关性

中图分类号: Q948.112⁺.2 文献标志码: A

Correlation between Growing Characters of Main Species Belonging to Different Functional Groups and Ground Temperature in *Kobresia* Meadow

ZHAO Jian-zhong^{1,2,3}, PENG Min^{1*}, LIU Wei¹, YE Run-rong¹, ZHOU Yu-bi¹

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining, Qinghai 810001, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3 Grassland Station in Qinghai Province, Xining, Qinghai 810001, China)

Abstract: Based on the International Tundra Experiment (ITEEX) method, using temperature gradient, the correlation between major plants of functional groups and ground temperature was studied in *Kobresia* meadow from the individual level. The aim is to discuss the responding for growing characters of major species of different functional groups in *Kobresia* meadow to temperature increasing in warming background. The results showed that: (1) It was line correlation between the height of *Carex alrofusca* and ground temperature ($P < 0.01$), but they were quadratic correlation not significant between the number of tillers, leaves and ground temperature; (2) They were quadratic correlation between the number of tillers, leaves and the height of *Kobresia humilis* and ground temperature ($P < 0.05$). They were line correlation between the number of tillers, leaves and the height of *Elymus nutans*, *Poa pratensis* ground temperature ($P < 0.01$).

① 收稿日期: 2011-11-11; 修改稿收到日期: 2012-02-01

基金项目: 国家 973 计划课题(2009CB421102); 国家自然科学基金面上项目(31172247); 国家自然科学基金重点项目(41030105); 中科院战略性先导科技专项子课题(XDA05070202)

作者简介: 赵建中(1980-), 男, 博士研究生, 畜牧(草原)师, 主要从事草地生态学研究。E-mail: jianzhz@163.com

* 通讯作者: 彭敏, 研究员, 主要从事草地生态学研究。E-mail: pengm@nwipb.cas.cn

(3) It was quadratic correlation not significant between the number of stolons of *Lagotis brachystachya* (Forbs functional group) and ground temperature, but they were line correlation between the number of leaves, the height of *L. brachystachya* and ground temperature; They were line correlation between the number of leaves, buds and the height of *Ranunculus brotherusii* and ground temperature ($P < 0.01$). It was declared that it was not accordance that species of different functional groups in response to ground temperature was difference. If ground temperature will continue increase in future, it will benefit to species of Gramineae functional group, but it will disadvantage for species of Cyperaceae functional group and Forbs functional group.

Key words: *Kobresia* meadow; functional group; growing character; ground temperature; correlation

气候变暖作为全球变化的主要表现之一^[1-3], 已经成为一个不争的事实。到 2100 年为止, 全球气温估计将上升大约 1.4~5.8℃^[4]。资料表明, 青藏高原近 20 年来表现为升温, 且升温幅度较大。1982~1999 年间, 青藏高原生长季温度平均每年增加 0.071℃, 高于全国的 0.046℃^[4]。冰芯记录结果显示, 青藏高原古代和现代气温的变化幅度均比低海拔地区大^[5]。同时有关研究表明, 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^[6]。而且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。

全球变暖必将影响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^[8]。许多研究人员采用基于国际冻原计划(International Tundra Experiment, ITEX)的模拟增温(open temperature chamber, OTC)方法就青藏高原植物生物量、植物生长特征、繁殖、枯枝落叶的分解、生理特征及群落结构等对增温的响应进行了大量研究^[9-14], 但从植物个体角度出发, 对不同功能群植物种与增温关系方面的研究相对较少。本研究在 2004 至 2006 年期间, 以青藏高原的矮嵩草草甸(*Kobresia humilis* meadow)为研究对象, 采用国际冻原计划 OTC 模拟增温方法对高寒草甸不同功能群主要植物种进行了研究, 探讨了不同功能群主要植物种生长特征与地表温度的相关性, 旨在揭示不同功能群植物对增温的响应, 预测在全球变暖条件下, 矮嵩草草甸植物功能群的演变趋势, 为退化草地治理和植物多样性保护提供理论依据。

1 研究区概况

研究选定青海省果洛藏族自治州玛沁县大武乡, 地理位置为 37°29'~37°45'N, 101°12'~101°33'E, 平均海拔 3 900 m。该区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, 而日差较悬殊, 太阳辐射强烈。各地历年日照平均值在 2 500 h 以上, 年总辐射量 623.8~629.9 kJ·m⁻², 冷季持续时间长达 7~8 个月; 暖季湿润长达 4~5 个月, 平均气温在 0℃以下。全年无绝对无霜期, 年降水量 420~560 mm, 多集中在 6~10 月^[13]。

2 研究方法

2.1 功能群划分

根据植物的寿命及经济类群, 将该区草地植物划分成 3 种功能群类型^[15]:

(1) 莎草科功能群: 主要包括矮嵩草、黑褐苔草(*Carex alrofusca*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、二柱头蔗草(*Scirpus distigmaticus*)等。

(2) 多年生禾本科功能群: 主要包括垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、异针茅(*Stipa aliena*)等。

(3) 杂类草功能群: 主要包括短穗兔耳草(*Lagotis brachystachya*)、鸟足毛茛(*Ranunculus brotherusii*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、兰石草(*Lancea tibetica*)、美丽凤毛菊(*Saussurea superba*)等。

2.2 样地设置

在轻度退化的矮嵩草草甸样地内, 布设面积 40 m×33 m 的增温试验样地。内置 5 个增温梯度的开顶式小室(OTC)(图 1), 从处理 A 到处理 E 温度

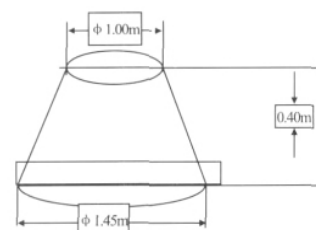


图 1 处理 C 圆台形开顶式温棚示意图

Fig. 1 The sketch of the OTCs in treatment C

逐渐降低(表 1)。随机设置 5 种处理(A~E),各处理中增温小室的底部与顶部直径分别为 0.85 m 和 0.40 m(A)、1.15 m 和 0.70 m(B)、1.45 m 和 1.00 m(C)、1.75 m 和 1.30 m(D)、2.05 m 和 1.60 m (E),小室高度均为 0.4 m,4 次重复,另设未做任何处理的对照样地(CK)。

2.3 定株观测

分别在 5 种处理和对照中选定代表各功能群的矮嵩草和黑褐苔草(莎草科)、垂穗披碱草、和草地早熟禾(禾本科)、短穗兔耳草和鸟足毛茛(杂类草)6 种植物 5 株,4 次重复,共 20 株/种。物种标定时,矮嵩草以丛为准,其它均以单株为准。2004~2006 年间的 5 月(返青期)~9 月(枯黄期),每月对标定植物定株观测记录其生长特征。禾本科和莎草科植物主要观测指标为:分蘖数(以分株计)、叶片数(以完全展开的绿叶为准)和高度;短穗兔耳草的主要观测指标为:叶片数、高度、匍匐茎数;鸟足毛茛的主要观测指标为:叶片数、花蕾数和高度。

2.4 温度测定

用 HOBO-H8 4 通道温湿度数据采集器(6 套)记录地表(10 cm)温度。从 5 月份起每隔 2 h 时自动记录一次,到 9 月份植物枯黄期为止,计算日平均地表温度。

表 1 不同处理年间地表温度变化

Table 1 Ground temperature variance of different treatments each year/°C

年份 Year	处理 Treatment					CK
	A	B	C	D	E	
2004	10.81	9.60	9.36	9.15	8.92	8.66
2005	11.73	10.71	10.22	10.17	9.67	8.52
2006	13.20	12.56	12.17	11.80	11.39	11.13
平均 Average	11.91	10.96	10.58	10.37	9.99	9.43

表 2 矮嵩草和黑褐苔草生长特征与地表温度间的相关性

Table 2 Correlation between the ground temperature and the characters of *K. humilis* and *C. alrofusca*

		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
矮嵩草 <i>K. humilis</i>	分蘖数 Tiller number X ₁	1.00						
	叶片数 Leaf number X ₂	0.96**	1.00					
	高度 Height X ₃	-0.89**	-0.75	1.00				
黑褐苔草 <i>C. alrofusca</i>	分蘖数 Tiller number X ₄	0.52	0.43	-0.53	1.00			
	叶片数 Leaf number X ₅	0.49	0.41	-0.47	1.00**	1.00		
	高度 Height X ₆	-0.84*	-0.80*	0.81*	-0.43	-0.38	1.00	
地表温度 Ground temperature X ₇		-0.87*	-0.81*	0.90**	-0.31	-0.25	0.95**	1.00

注: * 表示相关显著($P < 0.05$); ** 表示相关极显著($P < 0.01$)。

Note: * means correlation is significant at the 0.05 level; ** means correlation is highly significant at the 0.01 level.

2.5 数据分析

数据用 Excel、SPSS 软件处理。分蘖、叶片等的变异数均指 8 月份最大值与 5 月份最小值之差。

3 结果与分析

3.1 处理间温度变化

模拟增温结果表明:处理间和年间温度变化明显,从对照至 A 温棚,温度逐渐升高;从 2004 年至 2006 年温度逐年升高(表 1)。与对照相比,2004 年、2005 年和 2006 年 A 温棚地表温度分别平均升高了 2.1°C、2.4°C 和 2.1°C(表 2)。本模拟增温试验温室的增温量,在大气环流模型预测的 21 世纪全球温度将升高 1.5°C~4.5°C 的范围内(IPCC, 1994)^[2],而且各温棚间的温度随温棚减小而逐渐降低且与温棚大小相关(表 1),说明各处理间的模拟增温效应是比较理想的^[16]。

3.2 莎草科功能群植物生长特征与温度的相关性

除了黑褐苔草的高度与地表温度呈线性关系外,矮嵩草与黑褐苔草的分蘖数、叶片数、高度与地表温度均呈二次函数形式变化(图 2、图 3)。矮嵩草的分蘖数和叶片数变化与地表温度变化呈显著负相关关系(表 2),即随地表温度的升高分蘖数和叶片数逐渐减少,但分蘖数和叶片数与地表温度均呈二次函数形式变化,说明分蘖数和叶片数随地表温度的升高先减少后增加。黑褐苔草的分蘖数和叶片数与地表温度呈负相关关系但不显著(表 2)。矮嵩草和黑褐苔草的分蘖数变化与叶片数变化呈极显著正相关关系(表 2),表明分蘖数和叶片数在地表温度发生变化时关系密切且同向变化。矮嵩草的高度与地表温度呈极显著正相关关系(表 2),说明矮嵩草的高度随温度的升高先增加后减小,而黑褐苔草的高度与地表温度呈线性关系且达到极显著水平(表

2),说明黑褐苔草的高度随温度的升高而增加。因此,在一定的温度范围内,增温有利于矮嵩草与黑褐苔草的生长发育,如果增温幅度较大则不利于该功能群植物的生长发育,但持续增温却有利于黑褐苔草高度的增加。

3.3 禾本科功能群植物生长特征与温度的相关性

垂穗披碱草和草地早熟禾的分蘖数、叶片数、高度与地表温度间呈显著正线性关系(图4、图5),分蘖数、叶片数、高度及地表温度间均呈显著正相关关

系(表3),即随着温度的升高,分蘖数、叶片数、高度均增加,说明增温有利于垂穗披碱草和草地早熟禾的生长发育。

3.4 杂类草功能群植物生长特征与温度的相关性

除了短穗兔耳草的匍匐茎数与地表温度呈二次函数关系外,短穗兔耳草与鸟足毛茛的叶片数、花蕾数、高度均与地表温度呈线性关系(图6、图7),短穗兔儿草的匍匐茎数与地表温度呈负相关关系但未达到显著水平,鸟足毛茛的花蕾数与地表温度呈极显

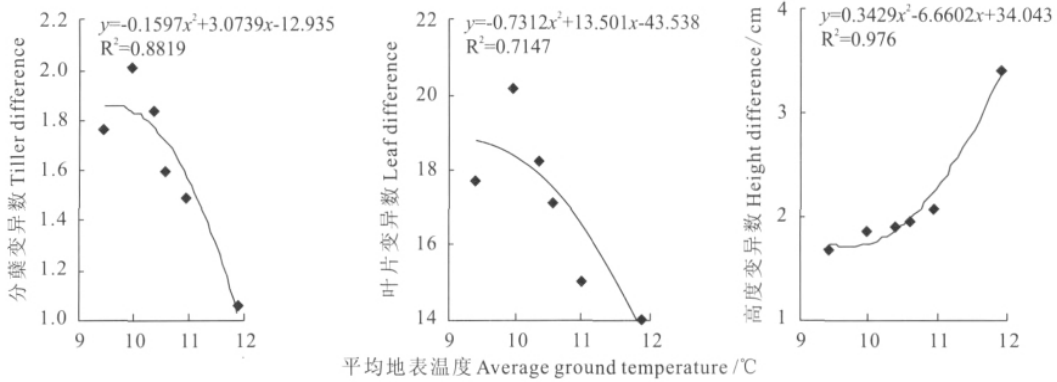


图2 矮嵩草与地表温度的拟合曲线

Fig.2 The fitting curve between *K. humilis* and ground temperature

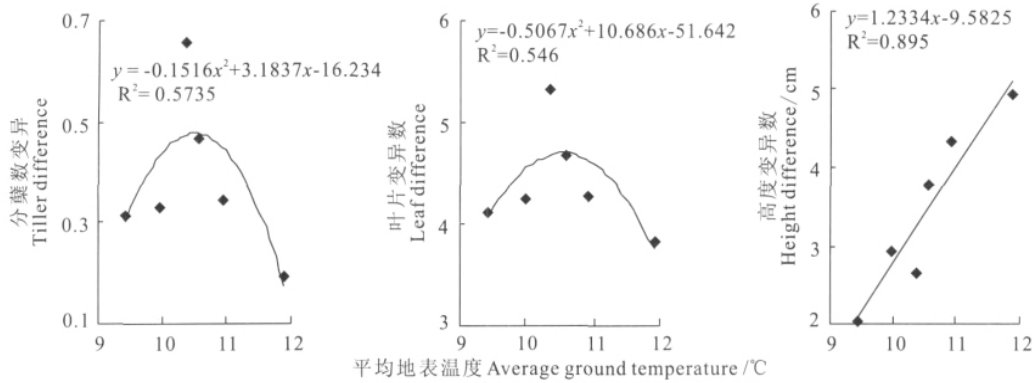


图3 黑褐苔草与地表温度的拟合曲线

Fig.3 The fitting curve between *C. alofusca* and ground temperature

表3 垂穗披碱草和草地早熟禾生长特征与地表温度间的相关性

Table 3 Correlation between the ground temperature and the characters of *E. nutans* and *P. pratensis*

		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	分蘖数 Tiller number X ₁	1						
	叶片数 Leaf number X ₂	0.97**	1					
	高度 Height X ₃	-0.80*	-0.87*	1				
草地早熟禾 <i>P. pratensis</i>	分蘖数 Tiller number X ₄	0.85*	0.91**	0.99**	1			
	叶片数 Leaf number X ₅	0.75	0.86*	0.98**	0.97**	1		
	高度 Height X ₆	0.67	0.79*	0.98**	0.96**	0.99**	1	
地表温度 Ground temperature X ₇	0.93**	0.97**	0.96**	0.98**	0.93**	0.89**	1	

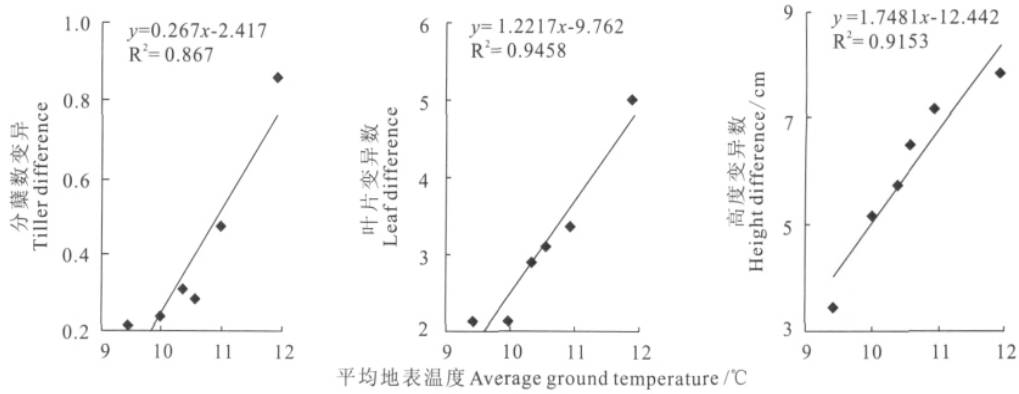


图4 垂穗披碱草与地表温度的拟合曲线

Fig. 4 The fitting curve between *E. nutans* and ground temperature

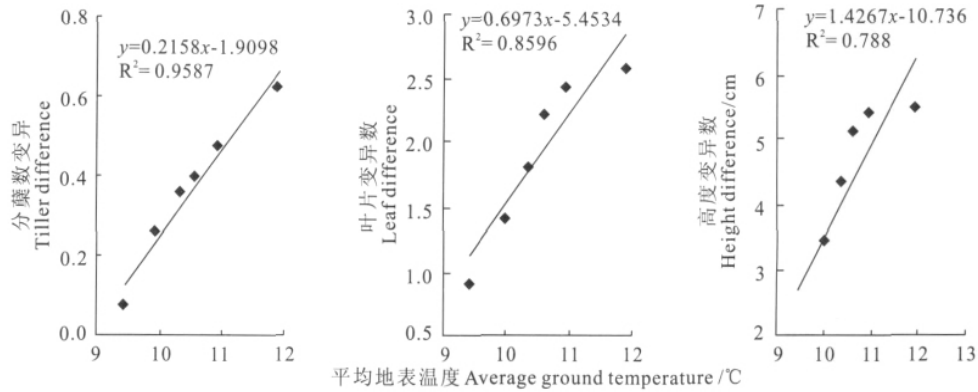


图5 草地早熟禾与地表温度的拟合曲线

Fig. 5 The fitting curve between *P. pratensis* and ground temperature

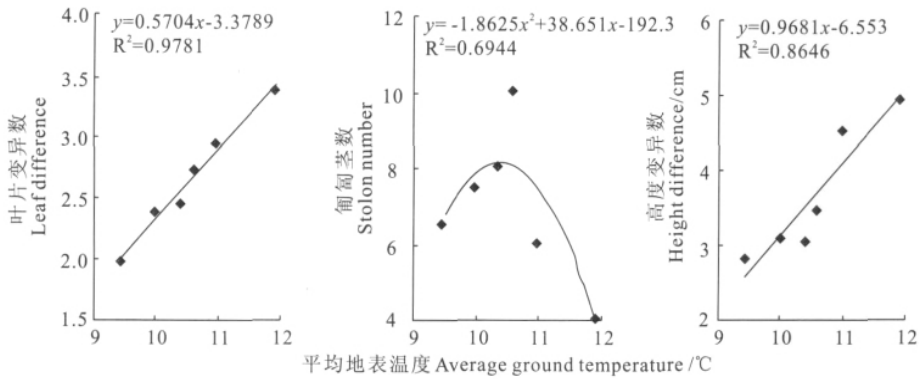


图6 短穗兔耳草与地表温度的拟合曲线

Fig. 6 The fitting curve between *L. brachystachya* and ground temperature

著负相关关系(表 4),随着地表温度的升高花蕾数均逐渐减少,匍匐茎数随温度的升高先增加后减小,即增加地表温度不利于该功能群植物的繁殖生长。短穗兔耳草和鸟足毛茛的叶片数、高度与地表温度均呈线性极显著正相关关系(表 4),说明随着地表温度的逐渐升高叶片数、高度均逐渐增加,即增加地表温度有利于该功能群植物的营养生长。

4 讨论

矮嵩草与黑褐苔草的分蘖数、叶片数与地表温度均呈二次函数形式变化,即分蘖数和叶片数随地表温度的升高先减少后增加。这是由于克隆植物的克隆习性使得个体在空间和资源利用、逃避环境风险等方面有着明显的优势^[17],克隆后代由于母体的

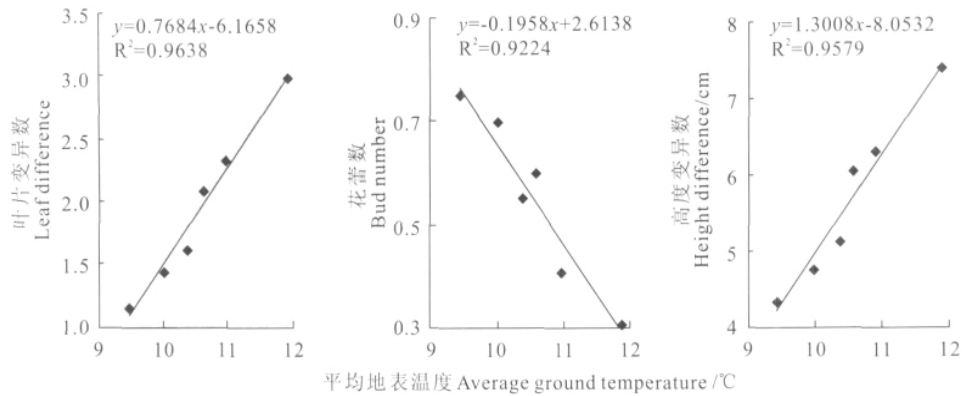


图7 鸟足毛茛与地表温度的拟合曲线

Fig. 7 The fitting curve between *R. brotherusii* and ground temperature

表4 短穗兔耳草和鸟足毛茛生长特征与地表温度间的相关性

Table 4 Correlation between the ground temperature and the characters of *L. brachystachya* and *R. brotherusii*

		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
短穗兔耳草 <i>L. brachystachya</i>	叶片数 Leaf number X ₁	1						
	匍匐茎数 Stolon number X ₂	-0.46	1					
	高度 Height X ₃	0.95**	-0.65	1				
鸟足毛茛 <i>R. brotherusii</i>	叶片数 Leaf number X ₄	0.99**	-0.48	0.95**	1			
	花蕾数 Bud number X ₅	-0.94**	0.58	-0.94**	-0.94**	1		
	高度 Height X ₆	0.99**	-0.44	0.94**	1.00**	-0.93**	1	
地表温度 Ground temperature X ₇		0.99**	-0.50	0.93**	0.98**	-0.96**	0.98**	1

供养更容易安全渡过幼龄期,实现成功定居,而且不必付出与有性繁殖相伴的代价^[18]。此外有性过程产生的种子可通过休眠机制而使植物安全地度过不利环境时期,从而克服了克隆生长的诸多不利之处,最极端的情形是一些植物在某些生境由于克隆生长而放弃了有性繁殖过程^[19]。

垂穗披碱草和草地早熟禾的分蘖数、叶片数、高度与地表温度间呈显著正线性相关关系,即禾本科功能群植物分蘖数、叶片数、高度均随温度的升高而增加,说明增温有利于该功能群植物的生长和发育;杂类草功能群植物随着温度的升高,繁殖能力明显降低,说明增温不利于杂类草功能群植物的生殖生长。这与石福孙等^[20]在四川、Zhang等^[21]在青海以及Harte等^[22]在美国落基山的研究结论相似。这是由于禾本科功能群植物具有从生理上调控资源分配模式的能力,加之较大的叶面积存在,并分布于不同的高度层,从而在增温条件下,有利于其光合速率增加和分蘖能力、种子繁殖能力增强^[23]。

短穗兔耳草的匍匐茎数与地表温度呈负相关二次函数关系,鸟足毛茛的花蕾数与地表温度呈极显著负线性相关关系,短穗兔耳草的匍匐茎数随温度

的升高先增加后减小,鸟足毛茛的花蕾数随地表温度的升高而减少,即增加地表温度不利于该功能群植物的繁殖生长。Reekie等研究认为,繁殖分配随个体大小增大而减少,或许是由于繁殖代价随个体大小增大的一个直接结果,代价的增大可以部分地解释为对繁殖支持结构的分配增加^[24]。石福孙等的研究发现根系在不同土层中的分配比例明显改变,OTC内0~10 cm土层的生物量分配比例增加,而20~30 cm土层的生物量分配比例则明显减少^[20],说明植物从根部获得的资源将逐渐减少。短穗兔耳草和鸟足毛茛的叶片数、高度与地表温度均呈线性极显著正相关关系(表4),说明随着地表温度的逐渐升高叶片数、高度均逐渐增加,即增加地表温度有利于该功能群植物的营养生长。杂类草功能群植物在群落中的最下层,属于竞争中的弱势群体,因此在资源有限的条件下,为了在竞争中能够生存,它们把相对较多的资源分配给繁殖支持结构而对生殖的营养投入降低,从而生殖生长在竞争中被抑制。

Alward等和Pauli等研究表明,在全球变暖背景下,对于任一植物群落来说,总有一些物种对增温的响应更为敏感,从而破坏种间竞争关系,引起群落

优势种和组成发生改变^[16,25]。本研究也得到了类似的结果,禾本科功能群植物对增温的响应最敏感,增温有利于禾本科功能群植物的生长发育;莎草科功能群植物次之,少量增温有利于该类植物的生长发育,但持续增温将对该类植物产生不利影响;增温有利于杂类草功能群植物的营养生长但不利于其生

殖生长。各功能群植物对增温的不同响应说明,在持续增温的背景下原有的种间关系将会被破坏,将会引起群落优势种和组成的改变,禾本科功能群植物将会成为群落的优势种而取代莎草科功能群植物的原有地位,杂类草功能群植物部分将被淘汰。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change. Impact, Adaptation, and Vulnerability[M]. London: Cambridge University Press, 2001: 65—78.
- [2] IPCC. Climate change 1994: radiant forcing of climate change inter-government panel on climate change[M]. London: Cambridge University Press, 1994: 75—90.
- [3] IPCC. Climate change 1995: the science of climate change summary for policy maker and technical summary of the working group I report [M]. London: Cambridge University Press, 1995: 56—76.
- [4] PIAO S L, FANG J Y, YI W, *et al.* Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15: 219—226.
- [5] YAO T D(姚檀栋), LIU X D(刘晓东), WANG N L(王宁练). Questions of climate change range in Tibetan Plateau[J]. *Chin. Sci. Bull.* (科学通报), 2000, 45(1): 98—106(in Chinese).
- [6] YANG Y H(杨元合), PIAO SH L(朴世龙). Variations in grassland and vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau[J]. *J. Plant Ecol.* (植物生态学报), 2006, 30(1): 1—8(in Chinese).
- [7] 孙鸿烈, 郑 度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [8] 刘建国. CO₂ 浓度的升高和全球变暖对六种生物层次的影响[M]//刘建国, 王如松. 生态学进展. 北京: 科学出版社, 1992: 369—380.
- [9] 赵新全, 曹广民, 李英年. 高寒草甸与全球变化[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1—60.
- [10] 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*, 2006, 103: 1 342—1 346.
- [11] JULIA A, JOHN H, ZHAO X Q. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan plateau[J]. *Ecological Applications*, 2007, 17: 541—557.
- [12] REN F, ZHOU H K, ZHAO X Q. Influence of simulated warming using OTC on physiological-biochemical characteristics of *Elymus nutans* in alpine meadow on Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30: 166—171.
- [13] 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): 2 533—2 539(in Chinese).
- [14] 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 Phytocool. Sin.* (植物生态学报), 2000, 24(5): 547—553(in Chinese).
- [15] 孙吉雄. 草坪学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12—35.
- [16] PAULI H, GOTTFRED M, GRBAHERR G. High summits of the Alps in a changing climate[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001: 139—149.
- [17] COOK R E. Growth and development in clonal plant population[M]. New Haven: Yale University Press, 1985: 259—296.
- [18] LOVET D L L. Population dynamics and local specialization in a clonal plant *Tanunculus repens*[J]. *Journal of Ecology*, 1981, 69: 743—755.
- [19] PHILBRICK C T, LES D H. Evolution of aquatic angiosperm reproductive systems[J]. *Bio. Science*, 1996, 46: 813—826.
- [20] SHI F S, WU N, LUO P. Effect of temperature enhancement on community structure and biomass of subalpine meadow in Northwestern Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 11: 5 286—5 293.
- [21] ZHANG X SH(张新时). The classified system of vegetation climate on global change[J]. *Fourth Res.* (第四纪研究), 1993, 2: 157—169 (in Chinese).
- [22] HARTE J, SHAW R. Shifting dominance within a montane vegetation community: results of a climate-warming experiment[J]. *Science*, 1995, 267: 876—880.
- [23] CAMPBELL B D, LAING W A, GREER D H, *et al.* Variation in grassland populations and species and the implications for community responses to elevated CO₂[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 315—322.
- [24] REEKIE E G. An explanation for size-dependent reproductive allocation in *Plantago major*[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76: 43—50.
- [25] ALWARD R D, DELTING J K, MILEHUNAS D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming[J]. *Science*, 1999, 283: 229—231.