

高寒矮嵩草草甸群落植物多样性和初级生产力对模拟降水的响应^{*}

王长庭¹, 王启基^{1*}, 沈振西¹, 景增春¹, 王文颖²

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001 2 青海师范大学, 西宁 810008)

摘要 通过野外控制实验, 研究了高寒矮嵩草草甸群落植物多样性、初级生产力对模拟降雨条件的响应。结果表明: (1) 在植物生长期(6月), 增加降雨 20%、增加降雨 40%, 植物群落物种多样性指数(H)和均匀度指数(J)分别比对照提高了 0.188 和 0.011、0.735 和 0.076, 生长期(7月)增加降雨 20% 物种 H 和 J 提高了 0.409 和 0.07; (2) 禾草类: 增加降雨 20% 处理的地上生物量与对照相比没有明显的显著性差异($P > 0.05$), 增加降雨 40% 处理的地上生物量与对照相比差异显著($P < 0.05$), 说明过多增加降雨会抑制禾草的生长发育。杂类草: 减少降雨 50% 处理的地上生物量与对照相比差异显著($P < 0.05$), 其地上生物量对减少降雨的反映比较敏感。莎草类: 其地上生物量对增加和减少降雨都没有显著变化; (3) 0~10 cm 和 0~30 cm 土层地下生物量均在增加降雨 20% 时最高, 地下生物量的总量也在增加降雨 20% 时最高; (4) 矮嵩草草甸地下生物量与地上生物量、总生物量的比值接近于生长季末时最大, 且在模拟增加降雨 20% 的水平时, 7、8、9 月份地下和地上生物量较其它处理组高。

关键词 模拟降水 矮嵩草草甸 植物多样性 初级生产力

中图分类号 Q 948.158 文献标识码 A

Response of biodiversity and productivity to simulated rainfall on an alpine *Kobresia humilis* meadow

WANG Chang-ting¹, WANG Qi-ji^{1*}, SHEN Zhen-xi¹, JING Zeng-chun¹, WANG Wen-ying²

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2 Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract Field controlled experiment was used to examine response of biodiversity and productivity to simulated rainfall changes in an alpine *Kobresia humilis* meadow. The results indicated that 1) The diversity index (H) and evenness index (J) of plant community increased by 0.188 and 0.011, 0.735 and 0.076 respectively over the control plot in the 20% and 40% rainfall supply increased plots in the growing season of plants (June), The diversity index (H) and evenness index (J) of plant community increased by 0.409 and 0.07 over the control plot in the 20% rainfall supply increased plot in the growing season of plants (July). 2) Grasses: There is no significantly different ($P > 0.05$) between 20% rainfall supply increased plots and control plot of below-ground biomasses, significantly different ($P < 0.05$) between 20% rainfall supply increased plots and control plot of above-ground biomasses, from this we can say that excessive precipitation would restrain growth of grasses. Forbs: 50% rainfall supply decreased plots and control plots of above-

* 收稿日期: 2003-01-24 修改稿收到日期: 2003-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040814); 中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-1-07); 国家“十五”科技攻关计划项目; 中国科学院海北站基金项目

作者简介: 王长庭(1969-), 男(汉族), 畜牧师, 在读硕士. E-mail: wcht6@hotmail.com

* 通讯联系人. Correspondence to WANG Qi-ji E-mail: WQJ@mail.nwipb.ac.cn

ground biomasses show significantly different ($P < 0.05$), response of above-biomasses to rainfall supply decreased is sensitive. Sedges no significantly different of Sedges biomass to rainfall supply increased or decreased. 3) The below-ground biomass of 0~10 cm, 0~30 cm soil layer and total biomass were higher at 20% simulated rainfall supply increased. The proportion of below-ground biomass and above-ground biomass was higher the ending growing season as well as total biomass, below-ground biomass and above-ground biomass were higher than other treatment plots at 20% simulated rainfall supply in July, August, September.

Key words: simulated rainfall alpine *Kobresia humilis* meadow biodiversity productivity

全球气候变化对陆地生态系统的影响,是关系到人类社会经济生活、生存环境、农牧业生产、资源的可持续利用等重大问题,愈来愈受到各国政府及有关科学家的关注。根据大气环流模型(GCMs)的预测,下一世纪全球温度将升高1.5~4.5^[1]。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雨的变化有很大的差异^[2]。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^[3]。

全球气候变化对生态系统的影响是目前生态科学研究的热点,其中植物对降水格局改变的响应机制是研究我国陆地生态系统生态安全机制的必要基础。青藏高原是全球气候变化最敏感的区域之一^[4-8]。当全球气候变化后不同地区的降水规律将如何变化,这种变化是否影响植物群落结构、物种多样性、初级生产力及植被分布规律,为了进一步了解和认识群落植物多样性对生态系统功能的作用,群落植物多样性和初级生产力之间的关系。开展模拟增加和减少降水对植物种群、群落、生态系统、初级生产力的影响研究就尤为重要。

有关高寒草甸植物群落结构特征及物种多样性研究的报道较多^[9,10],但通过野外控制实验探讨高寒草甸生态系统功能的研究报道较少。本实验在模拟降雨条件下,研究了高寒矮嵩草草甸群落植物多样性与初级生产力的变化,探讨植物多样性对生态系统功能的作用,为草地资源的合理利用与生态环境保护,以及退化草地生态系统的恢复与重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本项研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站进行,该站位于青海省海北藏族自治州门源回族自治县境内的风匣口,属门源种马场管辖,距西宁市160 km,地处北纬37°29'~37°45',东经101°12'

~101°33'。该地气候属高原大陆性气候类型,年平均气温-2.0左右,0的积温约为1100,年平均降水量578.1 mm,降水量主要分布于植物生长发育期内的5~9月,占全年降水量的79%。年蒸发量约1160.3 mm。主要植被类型有高寒草甸(Alpine meadow)、高寒灌丛(Alpine shrub)和沼泽化草甸(Swamp meadow)。土壤为高山草甸土、高山灌丛草甸土和沼泽土。选择高寒草甸典型的矮嵩草草甸为研究对象。主要优势植物为矮嵩草(*Kobresia humilis*),次优势种植物有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、麻花苳(*Gentiana straminea*)、异针茅(*Stipa aliena*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等。

1.2 样地设置

选择植被分布较均匀的矮嵩草草甸地段(50 m × 50 m),设置20个2 m × 2 m的固定样方,每个样方四周用防锈铁皮埋深30 cm,露出地表10 cm,以防止表层水分的径向流动。

内设5个模拟降水的梯度:即减少降雨50%、25%,增加雨量40%、20%和对照,每个处理重复4次。

减少降雨梯度2个,每天夜间遮雨(20:00~8:00),预计减少雨量50%左右;隔日夜间遮雨,预计减少雨量25%左右。增加降雨梯度2个,根据多年夏季平均降水量477 mm计算,在生长季内(5~9月)增加雨量20%(477 mm × 0.2)和40%(477 mm × 0.4),计算后每周人工喷洒1次。

采用长、宽、高分别为3 m、3 m、1.5 m的遮雨装置(遮雨装置为钢管结构,坡度为15°),罩在2 m × 2 m的样方上方,在自然条件下通过遮雨布来控制降雨量的减少,通过人工喷洒水量控制雨量的增加。

1.3 植物群落特征的测定

每月(6~9月)25日左右进行不同处理条件下植物群落优势植物种群生长发育特征的测定(高度、密度、盖度、生物量等),采用25 cm × 25 cm的样方,

重复 4 次.物种分盖度用目测法,禾草、莎草按株统计分蘖枝,植物高度以随机测定 20 株重复的均值计,同时计算出不同植物种的盖度比、高度比、重要值^[11].

1.4 地上、地下生物量

每月 20 日左右在减少降水、增加降水、对照各处理区齐地面剪草,样方大小 25 cm × 25 cm,重复 4 次,并按不同种群分开,80 °C 恒温箱烘干至恒重,并称量.在测定过地上生物量的样方上同步测定地下生物量分层(0~ 10 cm、10~ 20 cm、20~ 30 cm)取土,4 次重复,用细筛(1 mm)筛去土壤,再用细纱布包好不同层次的根系清水冲洗干净并剔除杂质,在 80 °C 恒温箱烘干至恒重,并称量.

1.5 数据分析

多样性指数、均匀度指数的计算参考马克平等方法^[12].

群落多样性指数的计算采用 Shannon-W iener

表 1 不同处理条件下矮嵩草草甸植物群落多样性指数(H)和均匀度指数(J)的变化

Table 1 The changes of the diversity index (H) and evenness index (J) of plant community of *Kobresia humilis* meadow in different treatment

测定时间 Observe time	A		B		C		D		E	
	H ^{ab}	J ^{cd}	H ^{ab}	J ^{cd}	H ^{ab}	J ^{cd}	H ^{ab}	J ^{cd}	H ^{ab}	J ^{cd}
June	5.881	1.668	5.927	1.726	6.068	1.746	6.615	1.832	5.880	1.735
July	6.308	1.837	6.324	1.793	6.931	1.853	6.211	1.792	6.282	1.783
August	6.812	1.873	6.981	1.880	6.252	1.773	6.838	1.908	6.580	1.749
September	5.977	1.709	6.089	1.757	6.169	1.780	7.035	1.934	5.800	1.722
Average value	6.245	1.772	6.330	1.789	6.355	1.785	6.675	1.867	6.136	1.750

注:表中 A~ E 分别表示:减少降雨 50%,减少降雨 25%,增加降雨 20%,增加降雨 40%,对照.同一列标有不同字母者为差异显著, $P < 0.05$ (H 用 a, b 表示, J 用 c, d 表示).

Notes: Simulated rainfall supply decreased by 50%, simulated rainfall supply decreased by 25%, simulated rainfall supply increased by 20%, simulated rainfall supply increased by 40%, control. Different letters in one column means significant at 0.05 probability level.

六月份增加降雨 40% 处理条件下,植物群落 H 和 J 最大,分别为(6.615)和(1.832)均与对照(5.88)和(1.746)差异显著($P < 0.05$).七月份增加降雨 20% 处理条件下,植物群落 H 和 J 最大分别为(6.931)和(1.853).在植物生长初期,随着降雨量的适当增加,植物群落 H 和 J 也逐渐增加,生境资源(水分)的互补,使多物种在同一生境下生存成为可能.这与白永飞^[14]植物物种多样性与年降雨量显著正相关的研究结果相似.但是随着自然降水的逐渐增加,过多增加降水使植物群落 H 和 J 反而减小,可能是由于水分资源过剩,抑制其他种的侵入和生长.在科尔沁沙地,从不同时期降雨量变化对物种多样性指数的影响来看,生长期降雨量对物种多样性的影响大于年降雨量^[15].

2.2 模拟降水与地上生物量的关系

指数:

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

均匀度指数的计算采用 Pielou 指数:

$$J = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

式中, P_i 为种 i 的相对重要值(相对高度+ 相对盖度+ 相对密度+ 相对频度)/4, S 为种 i 所在样方的物种总数,即丰富度指数.

2 结果与分析

2.1 群落植物多样性分析

物种多样性反映了生物群落功能的组织特征,是群落中关于丰富度和均匀度的一个函数,用多样性可以定量地分析群落的结构和功能^[13].按每月的平均值计,不同处理条件下植物群落 H 和 J 如表 1 所示.

从表 2 可以看出,增加降雨 20% 处理后禾草类地上生物量与对照相比没有明显的显著性差异($P > 0.05$),增加降雨 40% 处理禾草类地上生物量与对照相比,禾草类地上生物量比对照减少了 37.87%,差异显著($P < 0.05$).说明过多增加降雨会抑制禾草的生长发育,可能过多的水分资源反而会限制其生长.在矮嵩草草甸禾草类中,异针茅(*Stipa aliena*)和羊茅(*Festuca ovina*)等大多数禾草为 C_3 植物^[16],沈振西等^[17]认为,此类植物比较耐寒,根系比较发达,受夏季降雨减少的影响较小.减少降雨 50% 处理,杂类草地上生物量与对照相比,杂类草地上生物量比对照降低了 36.11%,差异显著($P < 0.05$).其地上生物量对减少降雨的反映比较敏感.这与沈振西^[17]等矮嵩草草甸大多数杂类草的根系比禾草类浅,且多为轴根,在致密的草毡层内很难发

育,对水分的竞争利用弱,因而易受降雨量变化的影响的结果有相似之处.莎草类地上生物量对增加和减少降雨都没有显著变化.由于以矮蒿草和双柱头草为主的莎草类植物,属寒冷中生植物,但返青快,花果形成较早,生长初期生物量增长较快,受夏季降雨减少的影响最小.

表2 不同植物类群地上生物量

Table 2 The above-ground biomass in different plant groups (g/m²)

处理 Treatments	禾草类 Grasses	莎草类 Sedges	杂类草 Forbs
A	190.77 ± 46.91 b	61.42 ± 45.42	176.21 ± 79.07 b
B	214.46 ± 33.38 b	75.91 ± 66.80	227.28 ± 81.76 a
C	289.57 ± 97.46 a	77.73 ± 60.13	226.77 ± 62.90 a
D	226.10 ± 34.67 b	73.74 ± 66.77	243.81 ± 87.94 a
E	263.97 ± 84.24 a	58.42 ± 56.96	212.32 ± 85.52 a

注:同一列标有不同字母者为差异显著, P < 0.05.

Note: Different letters in one column means significant at 0.05 probability level. A~E see table 1.

随着自然降水的增加,气温的逐步升高,植物生长进入旺盛期,对降雨量的需求相对较高,此时期的降雨量对地上生物量增长产生较大的影响.在植物生长旺盛期增加一定量的水分,这给来年牧草进入正常生长发育提供了好的土壤墒情,利于牧草营养生长阶段的水分要求,最终为牧草产量的提高奠定了基础^[18].另一方面,植物吸收水分与土壤渗透的能力是有限的,过多的降雨会形成地表径流而流失,不利于植物生长和生物量的积累^[19].

2.3 模拟降水与地下生物量的关系

从图1、2看出,无论是0~10cm或0~30cm土层其地下生物量各处理组与对照相比差异不显著

表3 不同处理条件下高寒矮蒿草甸地下生物量动态

Table 3 Dynamics of the below-ground biomass of *Kobresia humilis* meadow in different treatments (g/m²)

月份 Month	层次 Layer	A	B	C	D	E
七月份 July	0~10 cm	1330.24	1526.56	1611.68	1566.72	1117.44
八月份 August	0~10 cm	1610.24	1455.84	1984.32	1973.76	2031.68
九月份 September	0~10 cm	2969.60	3086.24	3297.92	3159.20	2953.76
平均 Average	0~10 cm	1970.03	2022.88	2297.97	2233.23	2034.29
七月份 July	0~30 cm	1470.88	1648.00	1767.52	1704.16	1246.56
八月份 August	0~30 cm	1688.16	1549.76	2110.56	2060.00	2123.36
九月份 September	0~30 cm	3202.56	3355.20	3573.92	3378.40	3185.60
平均 Average	0~30 cm	2120.53	2184.32	2484.00	2380.85	2185.17

注: A~E see table 1, 各处理间差异均不显著. Note: Among treatments no significant different.

2.4 地上生物量与地下生物量的关系

植物的每一部分是一个有机的统一整体,地上部分对地下部分的生长有很重要的影响,它不但是地下部分生长发育的能量来源,而且靠地下部分吸收生长所需要的N、P及矿物质和水分.地下生物量

(P > 0.05).但从数值上看,0~10cm和0~30cm土层地下生物量均在增加降雨20%时最高,地下生物量的平均值也在增加降雨20%时最高.适中的水分资源可能更有利于植物根系的生长和贮藏营养物质的积累,水分资源过多会对地下生物量的积累起到抑制作用.高寒矮蒿草甸的地下生物量大部分根系分布在0~10cm深的土层中(表3).

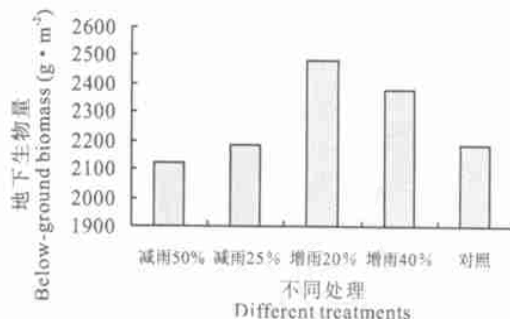


图1 0~30cm土层地下生物量的变化规律

Fig. 1 Changing regulation of below-ground biomass at 0~30 cm soil layer

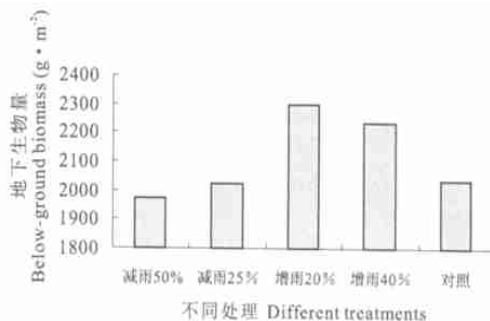


图2 0~10cm土层地下生物量的变化规律

Fig. 2 Changing regulation of below-ground biomass at 0~10 cm soil layer

与地上生物量的比值即根/茎比是生态系统的重要参数,由表4可见,随着自然降雨和模拟降雨的增加,地下、地上生物量的季节变化较大,越接近于生长季末,其比值越大,减少降雨50%为8.52,减少降雨25%为8.40,增加降雨20%为7.90,增加降雨

40% 为 8.37, 对照为 8.63. 在模拟增加降雨 20% 的水平时, 7、8、9 月份地下和地上生物量分别为 1767.52、611.18; 2110.56、884.53; 3573.92、452.21, 较其它处理组略高. 另外, 地下生物量在总生物量中所占的比例是植物地上、地下相互关系的直观反映, 它的季节变化类似于地下与地上生物量

的比值, 接近于生长季末, 比值越大. 它们之间有着相互依赖、相互制约的关系, 植物根系发育良好, 则能促进植物地上部分的生长发育. 高寒地区植物地下生物量占有很大比例, 这是高寒地区植物适应高寒生态的一个重要特征^[19].

表 4 不同处理条件下高寒矮嵩草草甸地下与地上生物量动态

Table 4 Dynamics of below-ground and above-ground biomass of *Kobresia humilis* meadow in different treatments (g/m²)

月份 Month	处理 Treatments	地下生物量 Below-ground biomass	地上生物量 Above-ground biomass	总生物量 Total biomass	地下 Below	地上 Above
July	A	1470.88	391.09	1861.97 ab	3.76	
	B	1648.00	487.92	2135.92 ab	3.38	
	C	1767.52	611.18	2378.70 b	2.89	
	D	1704.16	520.53	2224.69 ab	3.27	
	E	1246.56	586.94	1833.50 a	2.12	
August	A	1688.16	647.01	2335.17 ab	2.61	
	B	1549.76	775.86	2325.62 ab	2.00	
	C	2110.56	884.53	2995.09 b	2.39	
	D	2060.00	809.60	2869.60 ab	2.54	
	E	2123.36	804.30	2927.66 a	2.64	
September	A	3202.56	376.08	3578.64 ab	8.52	
	B	3355.20	399.68	3754.88 ab	8.40	
	C	3573.92	452.21	4026.13 b	7.90	
	D	3378.40	403.47	3781.87 ab	8.37	
	E	3185.60	369.12	3554.72 a	8.63	

注: 同一列标有不同字母者为差异显著, $P < 0.05$. Note: Different letters in one column means significant at 0.05 probability level. There is no below-ground biomass in June, no results A~E see table 1.

3 讨论

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雨的变化有很大的差异^[21]. 水分、温度是草原群落最重要的限制因子, 而且水也是土壤各种养分资源因子的载体, 水的作用一方面增加了养分的利用效率, 另一方面也带来了外源养分的补给, 同时也使养分资源的空间异质性降低, 资源比率的空间复杂性减小, 竞争激烈程度增大, 进而导致随群落生产力的增加物种多样性下降的生态后果^[22].

(1) 模拟降雨对高寒矮嵩草草甸群落 H 和 J 在增加降雨 40% 的处理条件下, 与对照相比都有不同程度的提高 ($P < 0.05$). 说明模拟增加的雨量在不构成水分胁迫的条件下, 有利于高寒矮嵩草草甸群落 H 和 J 的提高. 反之, 过多的水分造成胁迫, 高寒矮嵩草草甸群落其资源空间异质性下降, 植物间竞争排除增加, 物种多样性下降. 当然还要考虑年内自然降雨量的高低.

(2) 禾草类: 增加降雨 20% 处理的地上生物量

与对照相比没有明显的显著性差异 ($P > 0.05$), 增加降雨 40% 处理的地上生物量与对照相比差异显著 ($P < 0.05$), 说明增加水分, 高寒草甸群落禾草类植物占一定优势且有利于其生长. 杂类草: 减少降雨 50% 处理的地上生物量与对照相比差异显著 ($P < 0.05$), 其地上生物量对减少降雨的反映比较敏感. 莎草类: 其地上生物量对增加和减少降雨都没有显著变化, 说明莎草类植物对各种处理的反应不敏感, 可能是对资源波动的适应性较强. 在未来气候变暖、降水量减少的气候条件下^[2], 高寒草甸群落莎草类植物的比例较稳定, 以嵩草属 (*Kobresia*) 建群种的嵩草草甸形成的顶极群落, 其稳定性较高, 当地物种经过数千年的进化, 已适应了当地的生态-地理条件, 是一种对生物气候的综合反映. 因此, 在高寒草甸对植被的恢复要求与天然生态系统近似的物种组成, 恢复后的植被经过一定时期的演替逐渐稳定后, 在结构和功能上应该与当地天然植被相似, 这对今后进一步探讨恢复退化生态系统具有很重要的现实意义.

李英年^[20]预测了高寒草甸地区, 若降水增加较

多,加之温度升高,利于牧草生产力的提高;若降水增加减少,植被蒸散所造成的水分散失与降水补给量不平衡,导致牧草生长发育对水分的需求不满足,

成为牧草产量提高的限制因素^[21]。当然,高寒地区植被的地上、地下生物量与其它气象因子,如土温、土壤湿度等也有关系^[8]。

参考文献:

- [1] IPCC, 1994, Climate change 1994 Radiative forcing of climate change intergovernment panel on climate change[M]. London: Cambridge University Press.
- [2] IPCC, 1995, Climate change 1995: The science of climate change summary for policy maker and technical summary of the working Group I report[M]. Cambridge University Press.
- [3] LIU J G(刘建国). Impacts of the rising CO₂ concentration and global warming on six biological levels: a review [A]. Liu J G(刘建国), Wang R S(王如松), et al. Advance in modern ecology[C]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1992: 369- 380(in Chinese).
- [4] ZHANG X SH(张新时). The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (III)- an introduction of main methods and PEP program [J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), 1993, 17(2): 97- 109(in Chinese).
- [5] ZHOU G SH(周广胜), ZHANG X SH(张新时). Study on Chinese climate-vegetation relationship [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1996, 20(2): 113- 119(in Chinese).
- [6] ZHOU G SH(周广胜), ZHANG X SH(张新时). A natural vegetation NPP model [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1995, 19(3): 193- 200(in Chinese).
- [7] ZHOU G SH(周广胜), ZHANG X SH(张新时). Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1996, 20(1): 11- 19(in Chinese).
- [8] LI Y N(李英年), WANG W Y(王文颖). Analysis on response of vegetation distribution in simulated climate change-Qinghai province as an example [C]. *Acta Biologica Plateau Sinica* (高原生物学集刊), 1999, 14: 88- 95(in Chinese).
- [9] WANG Q J(王启基), ZHOU X M(周兴民), WANG W Y(王文颖). A preliminary study of species diversity of main plant communities in a pine meadow [C]. *Acta Biologica Plateau Sinica* (高原生物学集刊), 1999, 14: 77- 89(in Chinese).
- [10] ZHU ZH H(朱志红), WANG G(王刚). An approach to analyzing nature of community structure with examples of a pine meadow and a pine bushland [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1996, 20(2): 184- 192(in Chinese).
- [11] JIANG SH(姜恕), LI B(李博), WANG Q J(王启基). The research methods in grassland [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 15- 22(in Chinese).
- [12] MA K P(马克平), LI Y M(刘玉明). Measurement of biotic community diversity I: a diversity (part 2) [J]. *Chinese Biodiversity* (生物多样性), 1994, 2(4): 231- 239(in Chinese).
- [13] WANG Q J(王启基), ZHOU X M(周兴民), SHEN ZH X(沈振西), CHEN B(陈波). Analysis on the structure and diversity of plant community in degraded pasture under control strategies [C]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1995, 4: 269- 280(in Chinese).
- [14] BAI Y F(白永飞). Effect of seasonal distribution of precipitation to primary productivity in *Stipa krylovii* grassland [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1999, 23(2): 155- 160(in Chinese).
- [15] CHANG X L(常学礼), ZHAO A F(赵爱芬), LI SH G(李胜功). Responses of species diversity to precipitation change on fixed-dunes of the Namian Banner region [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, 24(2): 147- 151(in Chinese).
- [16] WANG Q J(王启基), YANG F T(杨福囤). A preliminary study on the anatomical characteristics of C₃, C₄ plants in a pine meadow [C]. *Acta Biologica Plateau Sinica* (高原生物学集刊), 1985, 4: 1- 11(in Chinese).
- [17] SHENG ZH X(沈振西), ZHOU X M(周兴民), CHEN ZH(陈佐忠), ZHOU H K(周华坤). Response of plant groups to simulated rainfall and nitrogen supply in a pine *Kobresia humilis* meadow [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, 26(3): 288- 294(in Chinese).
- [18] ZHONG H M(钟海民), YANG F T(杨福囤), LU G Q(陆国泉), SHI SH H(史顺海). The relation of aboveground biomass with meteoric factor in a pine *Kobresia humilis* meadow [J]. *Grassland of China* (中国草地), 1991, 4: 7- 11(in Chinese).
- [19] WANG Q J(王启基), ZHOU X M(周兴民), ZHANG Y Q(张堰青). Structure characteristics and biomass of *Potentilla fruticosa* shrub in Qinghai-Tibet plateau [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 1991, 11(4): 333- 340(in Chinese).
- [20] LI Y N(李英年), WANG Q J(王启基), ZHAO X Q(赵新全), SHEN ZH X(沈振西). The influence of climatic warming on the climatic potential productivity of a pine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2000, 8(1): 23- 29(in Chinese).
- [21] LI Y N(李英年), ZHOU H K(周华坤), SHEN ZH X(沈振西). The association analysis of herbage yield and meteorological factors in a pine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2001, 9(3): 232- 238(in Chinese).
- [22] YANG L M(杨利民), ZHOU G SH(周广胜), LI J D(李建东). Relationship between productivity and plant species diversity of grassland community in Songnen plain of Northeast China [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, 26(5): 589- 593(in Chinese).