

内蒙古草原大针茅群落地上生物量与降水量的关系

蔡学彩^{1,2}, 李镇清^{1*}, 陈佐忠¹, 王义凤¹, 汪诗平^{1,3}, 王艳芬¹

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008)

摘要: 根据中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站在大针茅样地(面积 500m×500m, 地理坐标 43°32'20"~43°32'40"N, 116°33'00"~116°33'30"E)的地上生物量与气候观测资料, 利用 SPSS 分别进行大针茅群落地上生物量与年降水量、月降水量、关键时期(4~6 月份与 6~8 月份)降水量以及 1~7 月份总降水量的相关分析; 对年降水量接近的 1982、1983 和 1989 年(分别为 283.2mm, 289.9mm, 287.2mm)的地上生物量进行方差分析; 运用积分回归模型模拟了降水的季节分配对群落生物量的影响。结果表明: (1) 群落生物量的年际变化与年降水、月降水、关键时期降水(4~6 月份和 6~8 月份)以及 1~7 月份降水量的变化没有显著的相关性($p>0.1$); (2) 在年降水量接近的年份, 群落的地上生物量之间存在显著差异。降水量季节分配的变化对地上生物量的影响还有待于进一步研究。

关键词: 内蒙古; 大针茅草原; 降水; 地上生物量

文章编号: 1000-0933(2005)07-1657-06 中图分类号: Q948 文献标识码: A

The relationship between aboveground biomass and precipitation on *Stipa grandis* steppe in Inner Mongolia

CAI Xue-Cai^{1,2}, LI Zhen-Qing^{1*}, CHEN Zuo-Zhong¹, WANG Yi-Feng¹, WANG Shi-Ping^{1,3}, WANG Yan-Fen¹

(1. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1657~1662.

Abstract: Data of precipitation and aboveground biomass in sampling plots of 500 m×500 m were obtained from the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station of the Chinese Academy of Sciences, located at 43°32'20"N ~ 43°32'40"N, 116°33'00"E ~ 116°33'30"E. From this database, we analyzed the relationship between aboveground biomass and precipitation, either annually, monthly, from April-June, June-August, or January-July, using correlation of SPSS software. In addition, differences between the aboveground biomass (5 replicates) in three years with highly similar precipitation (1982, 1983 and 1989, 283.2 mm, 289.9 mm, 287.2 mm, respectively) were analyzed with one-way ANOVA. Finally, based on 17 years of observations, we established an integral regression model with two variables: the aboveground biomass of the community and the precipitation for every 10-day-period from January to August. This model was used to analyze the influence of the seasonal allocation of precipitation on aboveground productivity. Results indicated that (1) there were no significant correlations ($p>0.1$) between aboveground biomass and the annual, monthly, April-June, June-August, or January-July precipitation; (2) in years with similar precipitation, aboveground biomass was still significant different. The relationship between annual

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KSCX2-SW-107; KSCX-1-08)。

收稿日期: 2005-01-19; **修订日期:** 2005-04-20

作者简介: 蔡学彩(1978~), 女, 山东人, 硕士生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: xccai@ibcas.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lizq@ibcas.ac.cn

致谢: 感谢杨宗贵, 姜恕, 黄德华, 戚秋慧, 李永宏等在大针茅样地的长期观测和数据采集所做的贡献

Foundation item: The Knowledge Innovative Engineering, Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-SW-107; KSCX-1-08)

Received date: 2005-01-19; **Accepted date:** 2005-04-20

Biography: CAI Xue-Cai, Master candidate, mainly engaged in theoretical ecology. E-mail: xccai@ibcas.ac.cn

Acknowledgements: We thank Prof. YANG Zong-Gui, JIANG Shu, HUANG De-Hua, QI Qiu-Hui and LI Yong-Hong for their contribution to long term observation and data collection of *Stipa grandis* steppe sample

fluctuation of aboveground biomass and seasonal allocation of precipitation should be further investigated.

Key words: Inner Mongolia; *Stipa grandis* steppe; precipitation; aboveground biomass

植被生物量动态是生态系统研究的重要组成部分,植被生物量动态的研究早已为各国生态学家所重视。在空间尺度上,降水被认为是影响生物量变化的主要因素^[1,2]。但是,在时间尺度上,有关植物群落生物量的年际变化与降水变化相关性的研究却存在不同结论。一些学者认为二者之间没有显著的相关性。Lauenroth 与 Sala 指出,在美国科罗拉多草原地区,区域尺度上草原地上净初级生产力与降水量的直线斜率和相关性均比时间序列上矮草草原地上净初级生产力与降水量直线斜率和相关性大^[3]。Knapp 与 Smith 对北美 11 个生态观测地点,12a 观测数据的分析表明,在大陆尺度上,植物群落地上净初级生产力的年际波动与降水年际变化之间没有显著的相关性^[4]。Briggs 等对美国东部高草原及其邻近的落叶森林 5~7 a 的观测资料的分析表明,该草原 NPP 与降水无显著的相关性,而森林净初级生产力则与降水成负相关^[5]。

与此相反,一些研究表明草原净初级生产力与降水量紧密相关,并且,降水与地上净初级生产力之间成正相关,相反,与地下净初级生产力成负相关。同时,地上净初级生产力与地下净初级生产力对气温的变化却不大敏感,这表明降水是否为草原区群落生产力波动的主要影响因子还有待深入研究^[3,6,7]。Borchert^[8]认为由大尺度大气环流模式变化引起的干旱会影响整个草原区域,所以草原的初级生产量主要受水分的影响^[1]。Walker 等^[9]用孔径系数的方法分析了科罗拉多州阿尔卑斯山地区 5 种群落植被的地上生物量对于气候年际变化的响应。结果表明在科罗拉多的干旱草原,生物量的年际变化不仅与当年的降水有关,也与上一年的降水有关。Oosterheld 等^[10]利用科罗拉多草原 52a 的资料,指出生物量与降水之间具有正相关关系,而且还与前一年的生产力变化有关。方精云等^[11]通过对遥感数据和气象资料进行分析后指出,中国陆地生态系统生产力的年际变化与降水的年际波动间有密切关系:一般情况下,年降水愈多,群落初级生产力就越高。

在我国典型草原区,许多研究大都是针对羊草(*Aneurolepidium*)草原群落的,群落初级生产力的年度波动与降水量的年度变化并不总是一致,降水量季节分配对群落初级生产力的影响则更为深刻^[12~15]。陈佐忠等^[16]对地下生物量与降水量的关系进行了分析,发现无论是羊草草原还是大针茅草原,两者之间均呈直线回归关系,但羊草草原地下生物量随单位数量降水量的增加速度要比大针茅草原的快。不同的植物种有不同的生态适应对策,不同的植物群落对降水变化可能有不同的响应和适应对策。目前,有关大针茅群落生物量与降水之间的关系研究还很少^[16,17]。大针茅草原群落地上生物量动态与年降水、月降水、关键时期降水的关系如何?降水的季节分配对大针茅群落地上生物量的变化是否有影响?降水的年际变化是否为内蒙古大针茅草原地上生物量年际波动的主要原因?本文针对以上几个问题,根据中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站在大针茅样地地上生物量与降水的长期观测资料,通过统计分析和计算机模拟研究年降水量、月降水量、关键时期(4~6 和 6~8 月份)降水量以及 1~7 月份总降水量以及降水的季节分配对大针茅群落地上生物量的影响。

1 样地介绍

本实验点设在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的大针茅样地中。大针茅样地建于 1980 年,面积 500m×500m,其地理坐标是 43°32′20″~43°32′40″N,116°33′00″~116°33′30″E。该样地位于锡林河南岸的 1 级玄武岩台地上。该地区地面平坦而开阔,海拔 1130m 左右;局部有 1m 左右的火山喷出物堆积的山丘;地表有基岩出露;土壤为典型栗钙土。植物群落由 52 种植物组成,建群种是大针茅(*Stipa grandis*),优势种有变蒿(*Artemisia pubescens*)、羊草(*Aneurolepidium chinense*),其中伴生种有冰草(*Agropyron cristatum*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等。草群高度 50cm 左右,盖度变化很大。据多年资料统计,年均温在 -0.3~2.6℃ 之间,1 月份气温为 -19~-27.3℃,7 月份气温为 17.4~21.0℃,年均温和日均温变化较大。无霜期为 102~136d。牧草生长期由 4 月下旬至 10 月中旬,约 5~5.5 个月。年降水量变幅剧烈,平均为 350mm 左右,早年只有 200mm 左右,丰雨年接近 500mm,相差 1 倍多。雨水集中在 6、7、8 三个月,占全年的 70%。年总蒸发量为 1700mm,大于降水量的 5 倍。所观察的草原是用围栏封闭的天然群落,除有少量啮齿类和昆虫活动之外,没有放牧和其他人为影响。

2 研究方法

2.1 取样方法

研究所用的数据来自中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站 1982~1998 年共 17a 的气象观测资料和大针茅样地的生物量监测资料。生物量的监测采用收获法进行的。在植物生长期(5 月上旬~10 月上旬),每隔 15d 左右测定 1 次地上现存生物量。在大针茅样地内,每期随机取 5 个 1m×1m 的样方进行取样。首先按植物种分别测定其生长高度、覆盖度、密度和物候相。再分别按种齐地面剪下,带至实验室内,从速将每种植物的绿色部分和立枯部分区分开来。最后将样品置于鼓风干燥箱内,于 65℃ 下烘干后,称干重。取每年 8 月 15 日左右的各种群地上生物量的总和为每年大针茅群落的地上生物量。

2.2 统计分析

应用 SPSS10.0(Statistics Package for Social Science, SPSS Inc., 1999)中的 Correlate 分别进行地上生物量与年度降水、

生长关键期(6~8月份以及4~6月份)的总降水量、各月份降水量以及1~7月份的总降水量之间的相关分析。选择年降水量接近的1982、1983和1989年(分别为283.2mm, 289.9mm, 287.2mm),运用SPSS中的One-Way ANOVA以地上生物量为因变量,年降水量为固定因素的自变量进行方差分析。运用Matlab 6.5(The Math Works. Inc., 2003)、VC++6.0(Visual C Plus Plus, Microsoft Corporation, 1998)建立群落地上生物量关于降水量季节分配的积分回归,分析了大针茅地上生物量与1~8月份的各旬降水量之间的关系。

3 结果

3.1 大针茅群落地上生物量与年际降水、月降水和关键时期降水之间的关系

大针茅草原17a的气象资料以及生物量资料表明,大针茅草原群落地上生物量的年际波动明显。波动范围为69.69~173.96g/mm²,变异系数为25.3%。降水变化范围为283.2~507mm,变异系数达19.9%(图1)。大针茅草原地上生物量与年度降水、月降水和关键时期降水之间的相关分析结果表明,年度降水变化、月降水和关键时期降水的变化与群落生物量之间没有显著的相关性(表1)。

3.2 在年降水相差不大的情况下,地上生物量之间的差异

由于年度降水量的变化与地上生物量的变化相关性不显著,考虑可能在大针茅草原,在年降水变化不大的情况下,群落生物量之间差异是否显著。如表2,结果表明差异显著,说明即使在年降水不变的情况下,群落的地上生物量仍有显著差异。

3.3 降水量的季节分配对大针茅草原地上生物量的影响

3.3.1 积分回归模型 设影响大针茅草原群落地上生物量的限制因子——降水量为 $x(t)$, $x(t)$ 是随时间变化的函数。若将地上生物量的形成与积累分成无穷多个小的时段,则群落初级生产力 y 对 $x(t)$ 的多元线性回归方程可用积分回归形式表示:

$$y = c + \int_0^t a(t)x(t)dt \quad (1)$$

式中, t 是时间, $x(t)$ 为 t 时刻的降水量值, $a(t)$ 为 t 时刻的影响函数, c 为积分常数。 $a(t)$ 是时间 t 的函数,可用时间的正交多项式展开。其展开式为:

$$a(t) = \alpha_0\varphi_0(t) + \alpha_1\varphi_1(t) + \cdots + \alpha_p\varphi_p(t) = \sum_{k=0}^p \alpha_k\varphi_k \quad (2)$$

表2 降水量相近年份(1982、1983和1989年,283.2mm,289.9mm,287.2mm)大针茅群落地上生物量的单因素方差分析

Table 2 One-way ANOVA of the aboveground biomass in three years with highly similar precipitation (1982, 1983 and 1989, 283.2 mm, 289.9 mm, 287.2 mm, respectively)

变差来源 Source of variation	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F值 F	显著性 Sig
组间 Between Groups	16469.902	2	8234.951	34.437	0.000
组内 Within Groups	2869.589	12	239.132		
总和 Total	19339.492	14			

式中, $\varphi_k(t)$ 为时间的正交多项式, α_k 为回归系数, $k=1,2,3,\cdots,p$ 将(2)式代入(1)式:

表1 大针茅群落地上生物量与逐月降水、年降水、关键时期降水以及1~7月份总降水的相关分析*

Table 1 The Correlation Analysis between the aboveground biomass and the monthly precipitation, annual precipitation, the special period precipitation and the total precipitation from January to July

项目 Item	皮尔逊相关系数 Pearson correlation	显著性检验 Sig. (2-tailed)
1月 January	-0.418	0.571
2月 February	-0.226	0.384
3月 March	-0.051	0.844
4月 April	0.238	0.358
5月 May	-0.195	0.453
6月 June	0.29	0.258
7月 July	0.077	0.768
8月 August	-0.294	0.252
9月 September	-0.002	0.994
10月 October	-0.019	0.942
11月 November	-0.025	0.926
12月 December	0.088	0.737
全年降水 Yearly precipitation	0.005	0.985
4~6月份的降水①	0.116	0.657
6~8月份的降水②	0.045	0.863
1~7月份的降水③	0.111	0.672

* 样本数 Sample number $N=17$, ①The total precipitation from April to June, ②The total precipitation From June to August, ③The total precipitation from January to July

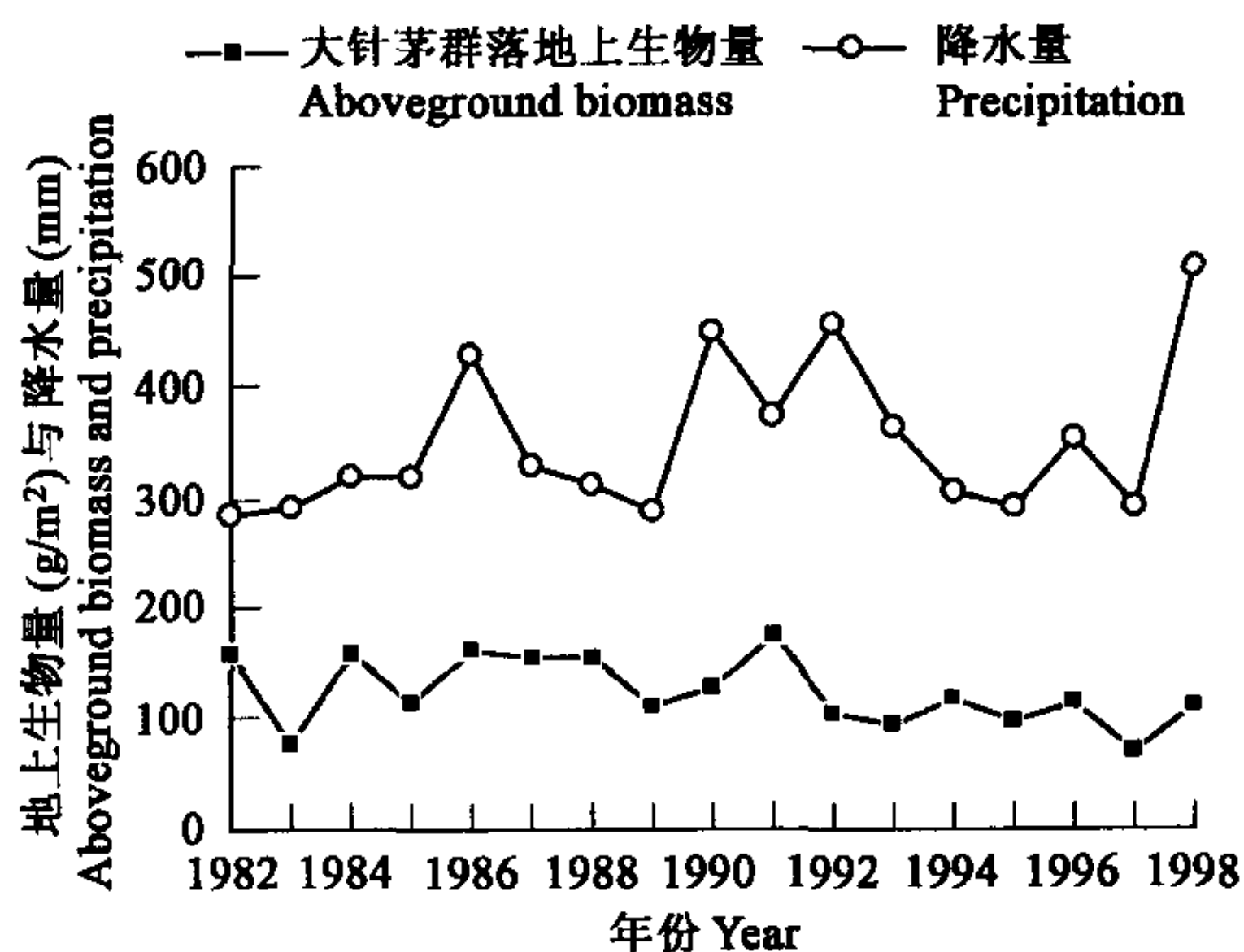


图1 1982~1998年大针茅草原地上生物量各降水量

Fig. 1 The aboveground biomass of the *Stipa grandis* community and annual precipitation from 1982 to 1998

$$y = c + \alpha_0 \int_0^t \varphi_0(t)x(t)d(t) + \alpha_1 \int_0^t \varphi_1(t)x(t)d(t) + \cdots + \alpha_p \int_0^t \varphi_p(t)x(t)d(t)$$

$$= c + \sum_{k=0}^p \alpha_k \int_0^t \varphi_k(t)x(t)d(t) \quad k = 0, 1, 2, \cdots, p \tag{3}$$

$$y = c + \sum_{k=0}^p \alpha_k q_k \tag{4}$$

式中, q_k 是积分变量,当 $x(t)$ 为离散型变量 $x(t)$ 时, q_k 可化为求和得形式。若将大针茅群落地上生物量形成有显著影响得时期分成 Z 个时段,则

$$q_k = \sum_{t=1}^z \varphi_k(t)x_t \tag{5}$$

式中, x_t 为实测值, $\varphi_k(t)$ 可查正交多项式表得到,从而可算出 q_k 值。由于不同年份降水量的分配状况不同,即各年得时间分布值 x_t 不同,就会产生一组对应得 q_k 值,则:

$$Y' = c + \sum_{k=0}^p \alpha_k p_k \tag{6}$$

这实际上是一个多元回归方程, Y' 为 Y 的估计值, c 和 α_k 为回归系数,可通过最小二乘法求得。这样,就把一元积分回归中求解 $a(t)$ 的问题转化为多元线性回归求解系数的问题。

3.3.2 模拟结果 根据大针茅草原群落地上生物量以及 1~8 月旬降水量连续 17a 的观测资料,在 Matlab 6.5(The Math Works. Inc., 2003)平台上,用 VC++6.0(Visual C Plus Plus, Microsoft Corporation, 1998)编程,对积分回归模型求解。得出 1~8 月份旬降水量对群落初级生产力影响的系数 $a(t)$ (图 2),其中群落生物量观测值与理论值的模拟图(图 3):

$$a(t) = -2.4298 \times 10^{-5}(x - 8) - 0.0008(x - 8)^4$$

$$- 0.0096(x - 8)^3 + 0.0198(x - 8)^2 + 0.3556(x - 8) - 1.3005$$

影响系数 $a(t)$ 反映了从 1 月上旬到 8 月下旬,旬降水量每增加 1mm 对当年群落地上生物量的影响数值。1 月份具有正效应,可能是由于这一时期降水偏多能够增加地表积雪厚度,使地温升高,减少了植物越冬对其贮藏营养物质的消耗,降低了休眠芽的越冬死亡率,同时,雪融后又增加了土壤的含水量,对牧草的返青和早期生长发育极为有利,从而可显著提高当年的群落初级生产力。而 2 月上旬到 4 月下旬为负效应,说明一定程度的干旱胁迫,有利于提高地温和植物地下器官(主要是根系)的生长,并贮藏足够的非结构性碳水化合物,为植物地上部分进入生长发育期做准备。而进入 5 月份以后正效应逐渐增加,主要由于这一阶段气温逐渐升高,植物开始返青,大部分植物进入生育期,植物生长对水分的需求也逐渐进入了高峰期,因此充足的降水是生物量大量积累的必要条件。进入 8 月份,多年生植物开始将同化产物向地下器官转移,降水对群落地上生物量表现为负效应。

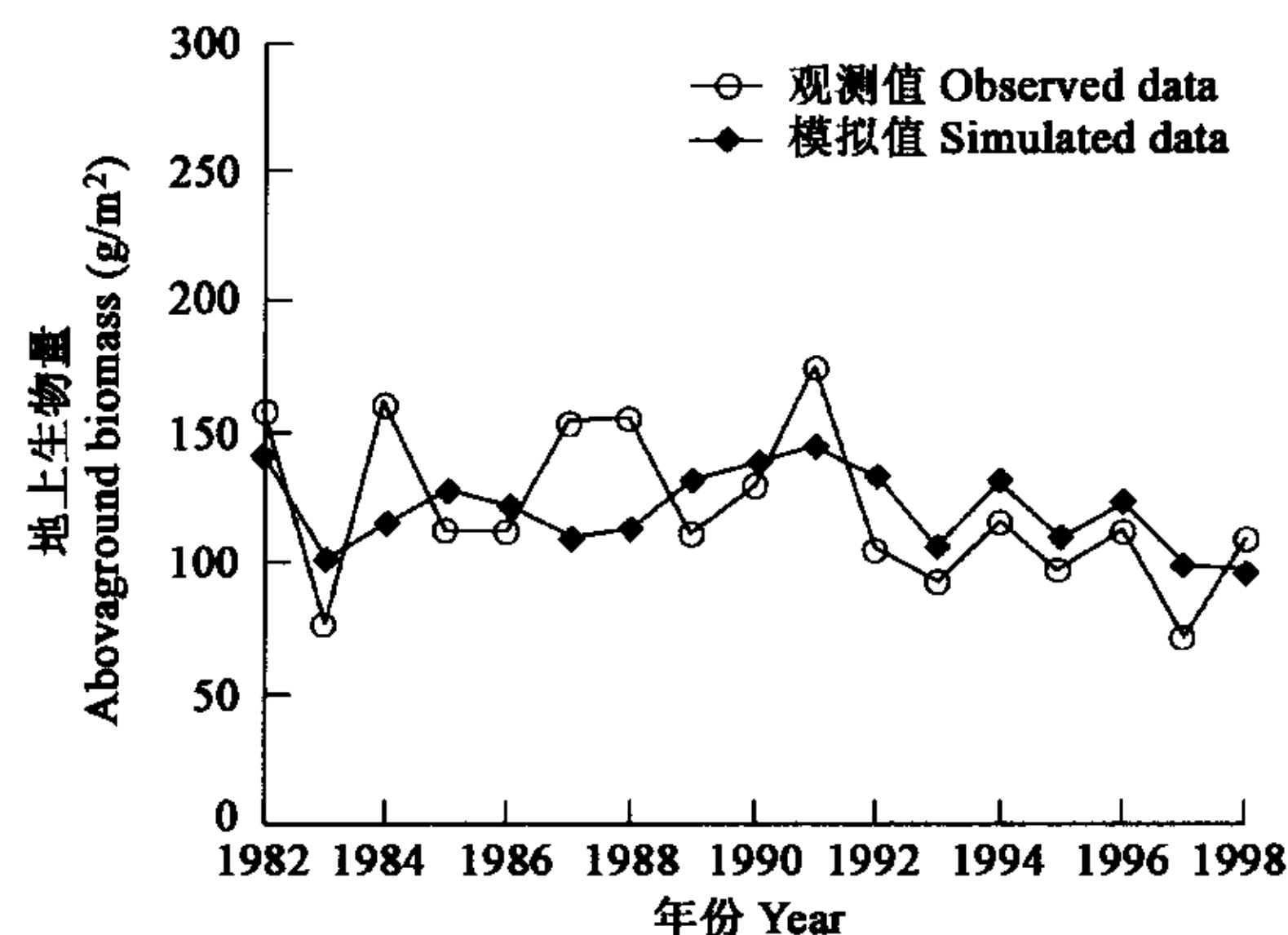
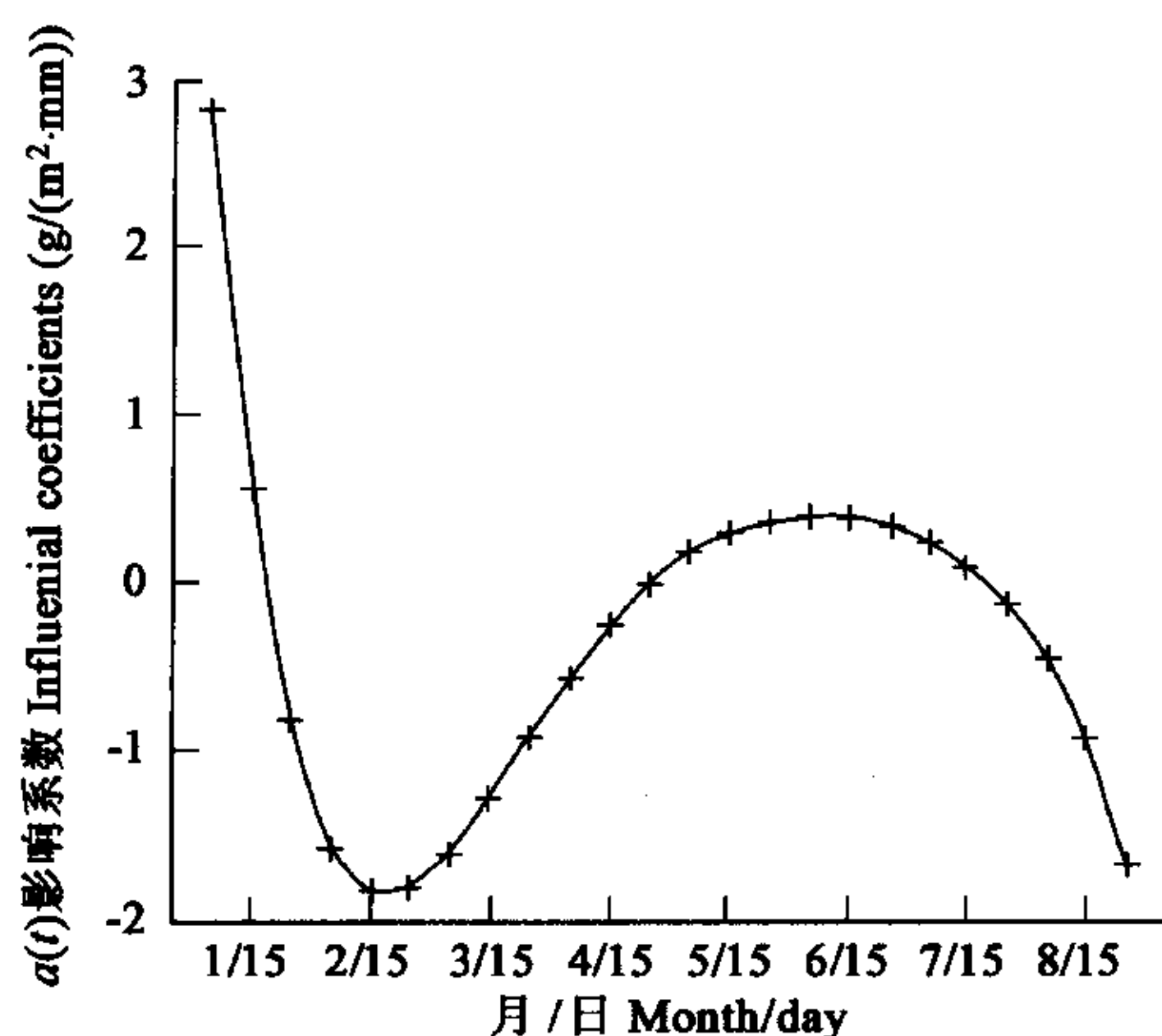


图 2 降水量对大针茅群落地上生物量的影响函数曲线

Fig. 2 The influential function curve of precipitation on the aboveground biomass of *Stipa grandis* community

图 3 大针茅群落地上生物量实测值与模拟值比较

Fig. 3 The comparison of the observed and simulated value of the aboveground biomass of *Stipa grandis* community

由图 3 大针茅群落地上生物量实测值与模拟值比较的趋势图可以看出,从 1990 年以后模拟趋势基本一致,而 1986~1989 年模拟不大吻合,这可能与生物量数值是野外获得,而且从图 2 可以看出,不管是正效应还是负效应其影响系数比较小,降水的季节分配对群落生物量的影响如何,还需要通过室内控制试验进行。

4 讨论

以上研究结果表明,大针茅群落地上生物量的变化对年际降水的变化以及每个月降水的变化反映不是很敏感,可以认为在这 17 年中,降水量的年际变化、月变化不足以引起其生物量的变化。但是资料表明,年度群落生物量变异系数还是比较大,这可能是由其它原因引起的,有待于进一步研究。

在干旱半干旱的草原区,由于降水量小于蒸发量,并且具有季节性的淋溶现象,所以土壤水体内都有不同程度的钙积化,大针茅草原土壤属于典型的栗钙土,由于钙积层致密而且出现的部位较高,降低了土壤的有效厚度,削弱了土壤对植物水资源的缓冲作用。另外,钙积层内黏粒比例的上升也降低了水分的有效性^[18]。土壤水分是生产力主要的制约因素,水分状况受到天然降水及土壤性状的影响,水分有效性主要取决于土壤含水量以及释水量。地形、母质、地表状况、质地及剖面特征决定了水分空间变异情况,长期低水平的水分循环是栗钙土生产力不高、不稳的主要因素^[19]。

牛建明^[20]认为草原对温度的升高以及人为干扰都更为敏感。由于内蒙古草原生态系统定位研究站所在地区有变暖的趋势,冬季增温尤为明显,第一性生产力自 1993 年有明显的下降趋势。冬季增温使该地区春季干旱进一步加剧,并使典型草原的生产力下降,说明气温的升高对生物量也有所影响^[21]。Breemen 等^[22]研究表明,随温度的升高,N 的矿化程度加快,生长季加长,树木生长加速,NPP 增高,然而 N 流失的增加却对 NPP 不利;另外也有实验表明,温度升高引起的 N 释放的增加,虽然在短期内刺激了植物生长和 NPP 的积累,长期来看却对 NPP 不利,因为它将引起低产的杂草和非本地物种的入侵和繁茂,这些物种固 C 能力低,分解快(因组织中含 N 多),对土壤有机物的贡献小,导致土壤贫瘠和养分的流失^[23]。在 1982 年,1983 年,1989 年降水变化不大,分别为 283.2mm, 289.9mm, 287.2mm 的情况下,地上生物量分别为 156.57g, 75.7g, 110.15g,其中 12 月份的积温为分别为 -573.5℃, -479.516℃, -516℃,而 1983 年的地上生物量较低可能与 12 月份的积温较高有关。

NPP 对降水的时滞也是不容忽视的,因为正是它造成了在 NPP 研究中时空互代法应用的限制。造成时滞的原因是不同的植被类型在环境变化条件下结构调整的时间不同,或者说抗干扰的能力不同,因此反应有快慢之分^[3,5,7,24]。

以上实验可以看出地上生物量的变化并非与降水量的变化完全一致,如 1986 年,1990 年,1992 年和 1998 年,其降水量分别达 430.10mm, 450.30mm, 455.00mm 和 507.00mm,相应的地上生物量分别只有 118.466g/m², 133.35g/m², 88.74g/m² 和 94.74g/m²,甚至低于平均水平。这主要与草原植被的生态适宜度有关^[25],即当植物生长季降水量超过草原植物生长需要时,水分不再是第一限制性因子,而光照和积温则成为限制植物生长的第一限制性因子,此时光照的不足将降低水分的利用效率。因此降水量特别是生长季内的降水量及水热的相对平衡可能是影响草原植物生长的最关键因子。

降水量的年度变化及其分配直接导致了羊草种群地上生物量的年度波动,降水量对种群地上生物量的影响具有放大效应^[12~14],而大针茅群落地上生物量的变化对年际降水的变化以及每个月降水的变化反映不是很敏感,可能是因为羊草和大针茅不同的生理生态特性。羊草草原的优势种羊草属于广旱生植物,其对水分反映较敏感,水分的多寡决定群落生物量的变化。而大针茅草原的优势种大针茅属于旱生丛生禾草,对水分的变化反映不敏感;土壤干旱时,大针茅光强系数有所增加(而羊草降低),光合的土壤水分系数和土壤水分补偿点均较羊草低,空气湿度系数下,光合适宜湿度小降幅度小^[26]。因此,大针茅群落耐旱能力高于羊草群落,但是环境条件好时它的增产潜力不如羊草群落高^[18]。虽然羊草草原和大针茅草原平均降水量相近,但温度、热量差异较大,年蒸发力不同,并影响到天然降水及土壤水分,可能是导致其群落结构与生长动态差异的主要原因^[26]。

在大针茅草原,年降水量、月降水量与群落生物量之间没有显著的相关性,但降水季节分配可能会影响大针茅群落的地上生物量。这有待于结合野外长期观测,设计控制试验,对其进行更深入的研究。

References:

- [1] Lauenroth W. Grassland primary production: North American grasslands in perspective. *Perspectives in Grassland Ecology*, New York, NY:Springer-Verlag, 1979. 3~24.
- [2] McNaughton S J. Ecology of Grazing Ecosystem: The Serengeti. *Ecological Monograph*, 1985, **55**: 259~294.
- [3] Lauenroth W K, Sala O E. Long-term forage production of North American short grass Steppe. *Ecological Applications*, 1992, **2**: 397~403.
- [4] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 2001, **291**: 481~481.
- [5] Briggs J M, Seastedt T R, Gibson D J. Comparative analysis of temporal and spatial variability in aboveground production in a deciduous forest and prairie. *Holarctic Ecology*, 1989, **12**: 130~136.
- [6] Sims P L, Singh J S, Lauenroth W K. The structure and function of ten Western North American grasslands. III. Net primary production, turnover and efficiencies of energy capture and water use. *Journal of Ecology*, 1976, **66**: 573~597.
- [7] Abrams M D, Knapp A K, Hulbert L C. A ten year record of aboveground biomass in a Kansas tall grass prairie: effects of fire and

- topographic position. *American Journal Botany*, 1986, **73**: 1509~1515.
- [8] Borchert J R. The climate of the central North American grassland. *Annals of the Association of American Geographers*, 1950, **40**: 1~39.
- [9] Walker M D, Webber P J, Arnold E H, *et al.* Effects of inter annual climate variation on aboveground phytomass in Alpine vegetation. *Ecology*, 1994, **75**(2): 393~408.
- [10] Oesterheld M, Loreti J, Semmartin M, *et al.* Inter-annual variation in primary production of a semi-arid grassland related to previous-year production. *Journal of Vegetation Science*, 2001, **12**: 137~142.
- [11] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y. Inter-annual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, **293**: 1723~1724.
- [12] Guo J X, Zhu Y C. Effect of climatic factors on the yield of *Aneurolepidium Chinensis*(TRIN)KENG community. *Acta Botanica Sinica*, 1994, **36**(10): 790~796.
- [13] Bai Y F, Xu Z X. Studies on dynamics of primary production for *Leymus Chinensis* Steppe community. *Acta Agrestia Sinica*, 1995, **3**(1): 57~64.
- [14] Bai Y F, Xu Z X. A Model of above-ground biomass of *Aneurolepidium* Chinese community in response to seasonal precipitation. *Acta Prataculturae Sinica*, 1997, **6**(2): 1~6.
- [15] Li D X, Bai Y F. A simulation model for influence of seasonal distribution of precipitation on above ground biomass of *Aneurolepidium* Chinensis population. *Grassland of China*, 1996, **6**(45): 1~5.
- [16] Chen Z Z, Huang D H, Zhang H F. A Study on the model of interrelation between underground biomass and precipitation of *Aneurolepidium* Chinensis and *Stipa grandis* grassland in Inner Mongolia Region. *Research on grassland ecosystem*. Beijing: Science Press, 1988. 20~25.
- [17] Bai Y F, Han X G, Wu J G, *et al.* Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, **431**: 181~184.
- [18] Chen Z Z, Wang S P. *Chinese Typical Steppe Ecosystem*, Beijing: Science Press, 2000. 55~117.
- [19] Li S L, Chen Y J. Study on the soil water dynamic and physical characteristic of chestnut soil in Xilin River Basin. *Grassland of China*, 1999, **9**(3): 71~76.
- [20] Niu J M. Impacts prediction of climatic change on distribution and production of grassland in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, **9**(4): 277~282.
- [21] Li Z Q, Liu Z G, Chen Z Z, *et al.* The effects of changes on the productivity in the Inner Mongolia steppe of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, **12**(19): 4~10.
- [22] Breemen N V, Jenkins A, Wright R F. Impacts of elevated carbon dioxide and temperature on a boreal forest ecosystem (CLIMEX Project). *Ecosystems*, 1998, **1**: 345~351.
- [23] Kaiser. Environment: green grass cool climate. *Science*, 1996, **1274**(5293): 1610~1611.
- [24] Overpeck J T, Rind D, Goldberg R. Climate induced changes in forest disturbance and vegetation. *Nature*, 1990, **343**(4): 51~53.
- [25] Li Z Q, Ren J Z. The models of suitability degree of grassland organism and their application. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, **13**(2): 71~75.
- [26] Jia Z B, Yang C, Hong Y, Han X H. A comparative study on structure characteristics of community of *Stipa grandis*+*Leymus chinensis* in Moderate-temperate Steppe and Warm-temperate Steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(10): 1774~1780.

参考文献:

- [12] 郭继勋, 祝廷成. 气候因子对东北羊草草原羊草群落产量影响的分析. *植物学报*, 1994, **3**(10): 790~796.
- [13] 白永飞, 许志信. 羊草草原群落初级生产力动态研究. *草地学报*, 1995, **3**(1): 57~64.
- [14] 白永飞, 许志信. 降水量的季节分配对羊草草原群落地上部生物量影响的数学模型. *草业学报*, 1997, **6**(2): 1~6.
- [15] 李德新, 白永飞. 降水量的季节分配对羊草种群地上生物量影响的数学模型. *中国草地*, 1996, **6**(45): 1~5.
- [16] 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下生物量与降水量关系模型. *草原生态系统研究*. 北京: 科学出版社, 1988. 20~25.
- [18] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000. 55~117.
- [19] 李绍良, 陈有君. 锡林河流域栗钙土及其物理性状与水分动态的研究. *中国草地*, 1999, **9**(3): 71~76.
- [20] 牛建明. 气候变化对内蒙古草原分布和生产力影响的预测研究. *草地学报*, 2001, **9**(4): 277~288.
- [21] 李镇清, 刘振国, 等. 中国典型草原区气候变化及其对生产力的影响. *草业学报*, 2003, **12**(1): 4~10.
- [25] 李镇清, 任继周. 草原生物适宜度模型及其应用. *生态学杂志*, 1997, **16**(3): 71~75.
- [26] 贾志斌, 洪洋, 等. 中温型草原和暖温型草原大针茅+羊草群落结构特征的比较. *生态学报*, 2002, **22**(10): 1774~1780.