

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

白永飞 许志信

(内蒙古农牧学院草原科学系, 呼和浩特 010018)

摘要 根据羊草草原群落地上部生物量连续 13 a 的定位观测资料, 分析了降水量及其季节分配对群落地上部生物量年度波动的影响, 并应用积分回归模型, 计算出 1~7 月各旬降水量对群落地上部生物量的影响系数。结果表明: 降水量的年度变化及其季节分配直接导致了羊草草原群落地上部生物量的年度波动, 1~4 月及 7 月的旬降水量对群落地上部生物量均具有正效应, 是植物对水分需求的两个关键时期。其中, 1~4 月的正效应大于 7 月, 说明早期的水分条件对多年生植物的越冬、返青和生长发育极为重要; 而 5~6 月的旬降水量则相反, 表现为负效应, 这是植物同干旱环境协同进化的结果。这期间较少的降水有利于植物根系的生长和贮藏营养物质的积累, 为植物进入速生期做物质和能量的准备; 同时, 降水量对植物群落地上部生物量的影响具有放大效应。

关键词: 羊草群落 地上部生物量 降水量季节分配 积分回归模型

1 前言

羊草(*Aneurolepidium chinense*) 草原广泛分布于欧亚草原区的东部, 在我国境内其主要分布区是东北和内蒙古东部地区, 形成地带性群落类型^[1] (中国科学院内蒙古宁夏综合考察队, 1985)。羊草作为建群种具有耐寒、耐旱和耐盐碱的生态特性, 其植株叶量大, 营养价值高, 适口性好, 适于各种家畜放牧和调制干草及颗粒饲料。羊草草原是内蒙古东部地区的主要打草场和放牧场, 在畜牧业生产中占有重要的地位。

草原群落和植物种群的生物量动态是草地生态系统研究的重要组成部分。它是植物同环境相互作用的重要标志, 是群落结构和功能的综合体现。草原群落和植物种群生物量动态的研究早已为各国生态学家和草地经营学家们所重视, Old S M (1969) 研究了微气候和火对美国伊利诺斯州普利列(Prarie) 草地植物生产的影响, Sauner R H (1978) 提出了草地初级生产力动态模型^[2], Lauenroth W K (1979) 总结了北美在草地初级生产力方面的研究工作^[3], Pandey C B (1992) 研究了在降水和放牧影响下草地初级生产力的变化动态。国内学者有关草地植物群落和种群初级生产力的研究报道也比较多, 章祖同 (1962), 研究了呼伦贝尔地区的草地类型及其生产力^[4], 赵一之 (1962) 研究了呼伦贝尔羊草草原群落和建群种的地上生物量及其形成因素^[5], 祝廷成、杨殿臣等 (1964) 研究了东北羊草草原的产量动态^[7], 李月树、祝廷成 (1983) 研究了东北地区羊草种群地上部生物量的形成规律^[8], 郭继勋、祝廷成 (1994) 应用多元回归模型和周期方差分析方法进一步研究了气候因子对东北羊草草原群落地上生物量形成的影响^[9], 刘钟龄、李忠厚 (1987), 王义凤 (1989) 在内蒙古草原生态系统定位站分别研究了羊草和大针茅草原群落及主要植物种群的地上生物量及其形成规律^[10,11], 周立、王启基 (1991) 设计了高寒草甸生态系统初级生产者亚系统的模拟模型及应用程序, 冯雨峰、李德新 (1991) 研究了石生针茅荒漠草原群落初级生产力与气候变动的关系^[12], 白永飞、许志信等 (1994, 1995) 分析了内蒙古锡林郭勒盟南部羊草草原群落地上生物量形成规律及其与气候变化的关系^[13,14]。

* 作者简介: 白永飞, 男, 1966 年 10 月生, 现为内蒙古农牧学院草原科学系博士研究生。

收稿日期: 1996-10-14

在计算机技术迅速发展的今天,应用数学的方法建立环境因子对草原群落和植物种群生物量形成影响的数学模型,不仅使我们可以更加深入地研究植物与其生存环境间的相互关系,还可使我们对草地初级生产力进行预测预报,直接为畜牧生产服务。为此,作者对羊草草原群落地上部生物量进行了 13 a(1983~1995) 的定位观测,在此基础上,应用积分回归模型,分析了降水量的季节分配对群落地上部生物量形成的影响,得出了初步的研究结果。

2 试验地自然条件和研究方法

研究地区位于内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗境内,定位观测样地的地理坐标:北纬 42°27'5"、东经 116°2'54",海拔 1 420 m。根据 1960~1994 年资料统计,年平均气温 1.7℃(标准差 0.7,变异系数 0.446 7),年降水量 364.7 mm(标准差 77.8,变异系数 0.213 5),年蒸发量 1 936.5 mm,干燥系数 5.3,年大风日数 65.5 d,无霜期 110 d。样地位于缓坡中部,土壤为暗栗钙土。主要植物有:羊草、大针茅(*Stipa grandis*)、隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)和寸草苔(*Carex duriuscula*)等,其中羊草为群落的建群种。

样地面积为 250 m×40 m,地上生物量测定采用样方法,样方面积 1 m×1 m,重复 5 次,分种齐地剪割,称鲜重和风干重。测定时间为每年的 8 月 15 日,作为该年的群落地上部生物量。

3 结果与分析

3.1 羊草草原群落地上部生物量的年度变化 试验结果表明羊草草原群落地上部生物量在年度间有着显著的波动,波动范围为 98.45~323.69 g·m⁻²(表 1,图 1),波动系数达 3.29,变异系数为 31.64%。在干旱和半干旱地区,水分是群落地上部生物量年度波动的主要限制因子,这一观点已被许多学者所公认。一般年份,年降水愈多,群落地上部生物量就越高。然而,群落地上部生物量的年度波动与降水量的年度变化并不总是一致的,降水量的季节分配对群落地上部生物量的影响则更为深刻。例如,1992 年年降水量(562.8 mm) 显著地高于其它年份,而该年的群落初级生产力并不是 13 a 中的最高值。再如,1991 年的年降水量(349.5 mm) 显著地低于 1995 年的年降水量(462.6 mm),然而,由于该年的降水量季节分配合理,群落地上部生物量(323.69 g·m⁻²) 远远高于 1995 年(171.79 g·m⁻²),是 1995 年群落地上部生物量的 1.88 倍。另外,群落地上部生物量的年变异系数显著高于降水量的年变异系数(21.4%),为其 1.48 倍,这说明,降水量对植物群落地上部生物量的影响具有放大效应。

表 1 降水量和羊草草原群落地上生物量年度波动关系
Table 1 The relationship between the above-ground biomass
of *Aneurolepidium chinense* community and annual rainfall

年份 Years	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	X	S	C.V. (%)
地上生物量 Above-ground biomass(g·m ⁻²)	98.45	182.85	217.61	184.20	177.20	296.00	192.12	320.52	323.69	301.33	209.20	175.27	171.79	219.25	69.36	31.64
年降水量 (mm)	355.9	403.0	433.9	347.4	293.6	350.8	244.0	332.8	349.5	562.8	344.7	423.5	462.6	377.3	80.8	21.4
Precipitation																

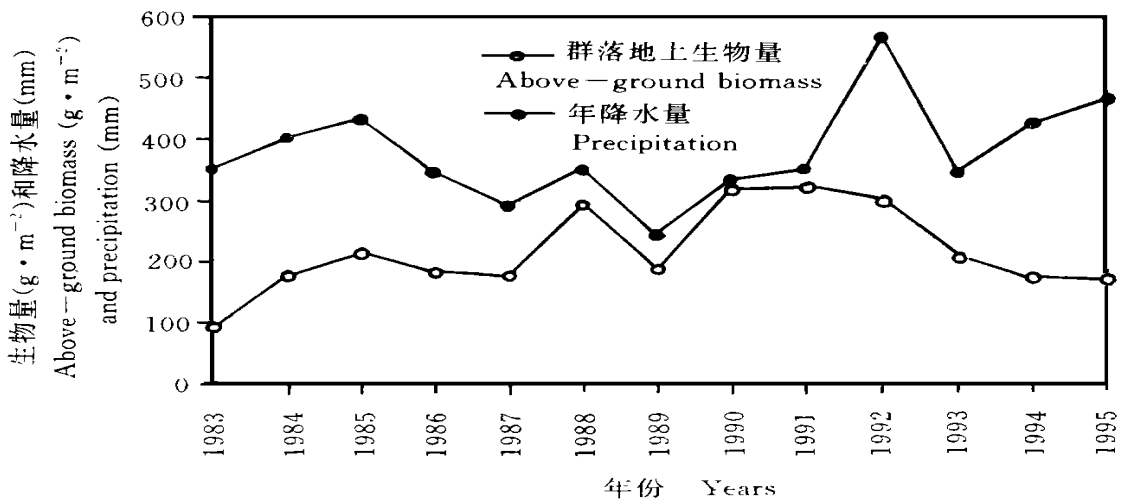


图 1 羊草群落地上部生物量与年降水量的关系

Fig. 1 The relationship between the above-ground biomass of *Aneurolepidium chinense* community and annual precipitation

3.2 降水量的季节分配对群落地上部生物量影响的积分回归模型

3.2.1 积分回归模型的一般形式: 为了进一步探索降水量的季节分配对群落地上部生物量影响的一般规律, 我们引入积分回归模型:

设: 影响羊草草原群落地上部生物量的限制因子——降水量为 $x(t)$, $x(t)$ 是随时间变化的函数。若将群落地上部生物量的形成与积累分成无穷个小的时段, 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:

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

其中 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。由于 $a(t)$ 是时间 t 的函数, 可用时间的正交多项式展开, 其展开式为:

$$a(t) = \alpha_0 \Phi_0(t) + \alpha_1 \Phi_1(t) + \dots + \alpha_p \Phi_p(t) = \sum_{k=0}^p \alpha_k \Phi_k(t) \quad (2)$$

其中 $\Phi_k(t)$ 为时间的正交多项式, α_k 为回归系数, $k=0, 1, 2, 3, \dots, p$

将 (2) 式代入 (1) 式:

$$y = c + \alpha_0 \int_0^T \Phi_0(t) x(t) dt + \alpha_1 \int_0^T \Phi_1(t) x(t) dt + \dots + \alpha_p \int_0^T \Phi_p(t) x(t) dt = c + \sum_{k=0}^p \alpha_k \int_0^T \Phi_k(t) x(t) dt \quad (3)$$

$$\text{令 } q_k = \int_0^T \Phi_k(t) x(t) dt \quad k=0, 1, 2, \dots, p$$

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

q_k 是积分变量, 当 $x(t)$ 为离散型变量 x_i 时, q_k 可化为求和的形式。若将对群落地上部生物量形成有影响的时期分成 z 个时段, 则

$$q_k = \sum_{i=1}^z \Phi_k(t) x_i \quad (5)$$

其中, x_i 为实测值, $\Phi_k(t)$ 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, 即各年的时间分布值 x_i 不同, 就会产生一组对应的 q_k 值, 则:

$$\hat{y} = c + \sum_{k=0}^p \alpha_k q_k \quad (6)$$

这实际上是一个多元回归方程, \hat{y} 为 y 的估计值, c 和 α 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。

3.2.2 模拟结果与分析: 分析群落地上部生物量的多年观测资料可以看出, 羊草群落地上部生物量的高峰值一般出现在每年的 8 月中旬左右, 考虑到群落地上部生物量对降水量的滞后效应, 将对群落地上部生物量形成有影响的时期规定为 1~7 月, 并将其分为 21 个时段, 每段为 1 个旬。

根据羊草草原群落地上部生物量和 1~7 月份旬降水量连续 13 a 的观测资料, 用计算机对上述模型求解, 得出 1~7 月份旬降水量对群落地上部生物量的影响系数 $a(t)$ 值(图 2), 并求出复相关系数 $R=0.8972$, $F=8.2536$, 经检验 $F > F_{0.01} = 7.01$, 模拟结果达到极显著水平。

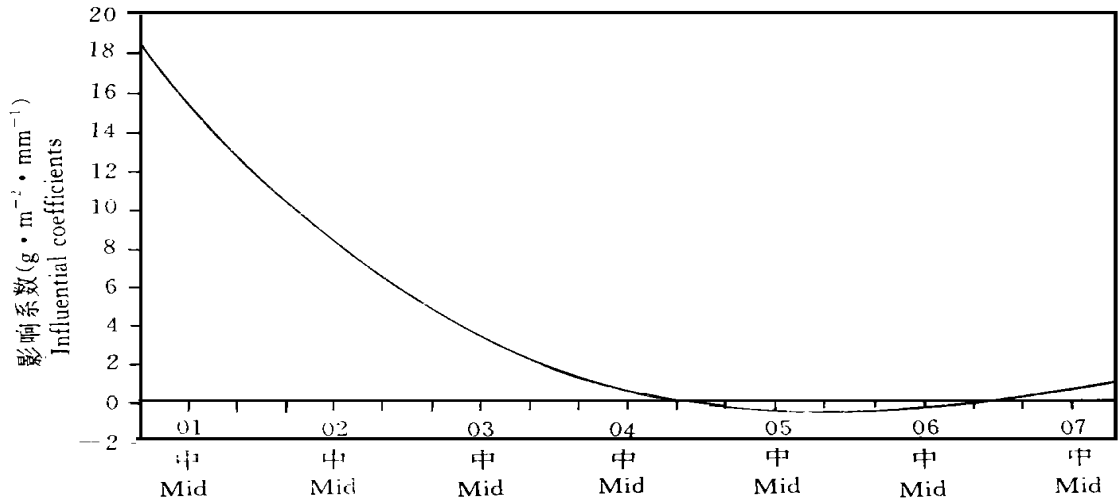


图 2 降水量对羊草草原群落地上部生物量影响函数曲线

Fig. 2 The influential function curve of precipitation on the above-ground biomass of *Aneurolepidium chinense* community

影响系数 $a(t)$ 反映了从 1 月上旬至 7 月下旬, 旬降水量每增加 1 mm 对当年群落初级生产力的影响数值。由图 2 可以看出, 1 月上旬至 4 月下旬的降水量对群落地上部生物量具有正效应。1 月上旬的正效应最大, 逐渐递减, 到 4 月下旬降为零。表明这一时期降水偏多能显著地增加群落的地上部生物量。而 5 月上旬至 6 月下旬的降水量则相反, 表现为负效应。其变化趋势是, 从 5 月上旬到 5 月下旬负效应逐渐增强, 6 月上旬到 6 月下旬负效应逐渐减弱。进入 7 月上旬以后降水对群落地上部生物量的影响又表现为正效应, 并且, 正效应逐渐增大。

1 月上旬至 4 月下旬的旬降水量对群落地上部生物量影响为正效应, 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蓄水量, 对牧草的返青和早期生长发育极为有利, 从而可显著地提高当年的群落地上部生物量; 而 5 月上旬至 6 月下旬降水量的负效应可能与植物同干旱环境的协同进化有关, 因为这一时期植物的地上部分生长缓慢, 一定程度的干旱胁迫, 有利于植物地下器官(主要是根系)的生长和贮藏足够的非结构性碳水化合物, 为植物进入速生期做准备; 7 月上旬以后降水对群落地上部生物量的影响又表现为正效应, 这是由于 7 月上旬至 7 月下旬, 旬平均气温已进入高峰期, 大部分植物开始拔节、抽穗进入生育盛期。植物的地上部生物量大量

地积累,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。

将解出的降水量影响系数 $a(t)$ 值回代模型,可计算出群落年地上部生物量的模拟值(图 3)。群落地上部生物量观测值同模拟值比较的结果表明,模拟结果较理想,该积分回归模型基本能反映出降水量的季节分配对羊草草原群落地上部生物量影响的一般规律。

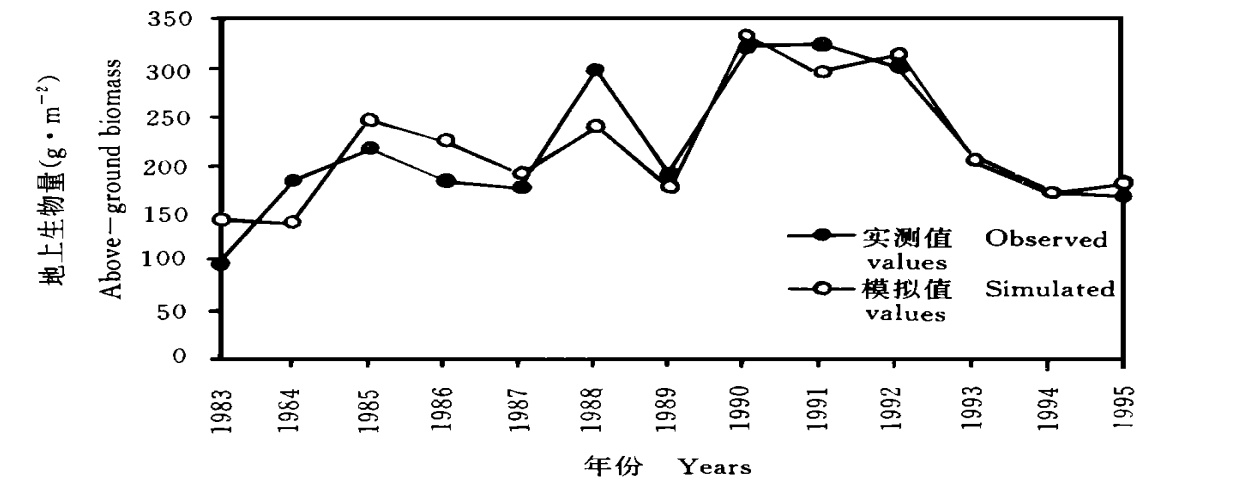


图 3 羊草草原群落地上部生物量实测值与模拟值比较

Fig. 3 The comparison of the observed above-ground biomass with simulated above-ground biomass of *Aneurolepidium chinense* community

然而,数学模型也有其本身的缺陷,上述模型是应用积分回归的方法,在对羊草草原群落地上部生物量和降水量的多年观测数据进行运算处理的基础上,得出的一般性结果,用来预报特殊年份的群落地上部生物量仍有不足之处。

4 小结

羊草草原群落地上部生物量连续 13 a 的定位观测结果表明,制约羊草草原群落地上部生物量年度波动的限制因子是水分。降水量的年度变化及其分配不仅直接导致了群落地上部生物量的年度波动,而且降水量对群落地上部生物量的作用具有放大效应。

积分回归模型能够较好地反映出降水量的季节分配对植物群落地上部生物量影响的一般规律。模型的运算结果表明:1 月 4 月及 7 月的旬降水量,对羊草草原群落初级生产力的形成均具有正效应,是植物对水分需求的两个关键时期。其中,1 月至 4 月的正效应大于 7 月。说明早期的水分条件对多年生植物的越冬、返青和生长发育极为重要;而 5 月至 6 月的降水量则相反,表现为负效应,这是植物同干旱环境协同进化的结果。这期间较少的降水有利于植物根系的生长和贮藏营养物质的积累,为植物进入速生期做物质和能量的准备。

在对各草地类型的初级生产力及其环境因子进行多年定位观测研究的基础上,应用数学的方法,建立各草地类型的初级生产力与环境因子相互关系的数学模型,并根据环境因子变化的实际观测数据,对各群落类型的初级生产力进行预测预报,为地方政府根据草原群落初级生产力的年度变化情况,合理地安排出栏和存栏牲畜数量,减少牲畜的越冬死亡率,发展生态—经济型畜牧业提供科学的依据。这是当代草地科学工作者应当肩负的重要使命之一。

参考文献

- 1 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985
- 2 Sauner R H. A simulation model for grassland primary producer phenology and biomass dynamics. In Innis, G. S. (ed.) Grassland simulation model. Ecological studies. 1978, 26: 55~88 New York: Springer-verlag.
- 3 Lauenroth W K. Grassland primary production: north American grassland in perspectives. In French, N. R. (ed.) Perspectives in grassland ecosystems. Ecological studies, 1979, 32: 3~21. New York: Springer-verlag.
- 4 Pandey C B and Singh J S. Influence of rainfall and grazing on herbage dynamics in a seasonally dry tropical savanna, Vegetatio, 1992, 102(2): 107~124
- 5 章祖同. 呼伦贝尔草原草场类型及其生产力的初步研究. 内蒙古农牧学院科学研究报告集: 草原部分, 1962
- 6 赵一之. 羊草草原产量形成因素的探讨. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1962, 2(2): 113~123
- 7 祝廷成, 杨殿臣, 景鼎五, 叶居新. 东北羊草草原草量动态的观测. 中国农业科学, 1964, 3: 49~50
- 8 李月树, 祝廷成. 羊草种群地上部生物量形成规律的探讨. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983, 7(4): 289~298
- 9 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, 36(10): 790~796
- 10 刘钟龄, 李忠厚. 内蒙古羊草+大针茅草原植被生产力的研究. 干旱区资源与环境, 1987, 1(3~4): 13~33
- 11 王义凤. 大针茅草原地上生物量形成的规律与特点. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(4): 297~308
- 12 冯雨峰, 李德新. 锦鸡儿灌丛化石生针茅荒漠草原群落初级生产力与气候变动的关系. 中国草地, 1991, 4: 1~6
- 13 白永飞, 许志信, 李德新. 羊草草原群落生物量季节动态研究. 中国草地, 1994, 3: 1~5
- 14 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

A Model of Above-ground Biomass of *Aneurolepidium chinense* Community in Response to Seasonal Precipitation

Bai Yongfei Xu Zhixin

(Department of Grassland Science, Inner Mongolia Institute of
Agriculture and Animal Husbandry, Huhhot 010018)

ABSTRACT

Based on 13-year observations, the annual response of the above-ground biomass of an *Aneurolepidium chinense* community to the seasonal changes in precipitation was analysed by establishing an integral regression model between the variable of biomass and the amount of precipitation for every 10 days from January to July. The model indicates that the annual fluctuation in above-ground biomass is highly correlated with the changes in annual precipitation and its seasonal distribution. The biomass responds positively to the amount of precipitation for the periods of January-April and July, indicating they are two critical periods in terms of water requirement of the plant. The effect of the precipitation for January-April is more significant than that for July. In contrast to this, the precipitation for May and June affects the above-ground biomass negatively, since less rainfall in this period would benefit the development of the root system and the accumulation of carbohydrate within the roots as a preparation for fast growth in the following growing phase.

Key words: *Aneurolepidium chinense* community, above-ground biomass, seasonal distribution of precipitation, integral regression model