

云雾山天然草地植物生长规律

王丽学¹, 程积民^{2,*}, 万惠娥², 周梦华¹, 赵凌平¹, 李维军³, 石绘陆³

(1. 西北农林科技大学 动物科技学院 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 西北农林科技大学水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;

3. 宁夏固原云雾山草原自然保护区管理处 宁夏 固原 756000)

摘要: 试验以云雾山优势种本氏针茅 (*Stipa bungeana*)、大针茅 (*Stipa grandis*) 与伴生种百里香 (*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、厚穗冰草 (*Agropyron dasystachys*)、二裂萎陵菜 (*Potentilla bifurca*) 和阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*) 为研究对象, 对每一植物选择典型植株进行标记, 重点从植株高和地上单株生物量两个方面对其生长动态, 进行一个生长周期 (返青期-枯黄期) 的观察测量, 结果表明: (1) 植物生长在株高和地上单株生物量达到最大值之前, 均基本符合 Logistic 生长模型; (2) 在植物整个生长过程中, 地上单株生物量月变化与株高存在动态分形关系: $\ln B = D \times \ln H + \ln C$; (3) 植物生长除受其生物学特性支配外还受外界环境因子的限制, 在干旱半干旱地区, 降雨量显得尤为重要, 在本次试验中, 植物株高增长和地上单株生物量月变化均与降雨量累积存在着极显著的对数相关性: $y = a \times \ln x + b$ 。

关键词: 天然草地; 株高; 地上单株生物量; Logistic 模型; 动态分形; 降雨量

文章编号: 1000-0933(2008)07-3168-08 **中图分类号:** Q948.12+1; Q145+.1; S812 **文献标识码:** A

The plant growth patterns in the natural grassland of Yunwu Mountain

WANG Li-Xue¹, CHENG Ji-Min^{2,*}, WAN Hui-E², ZHOU Meng-Hua¹, ZHAO Ling-Ping¹, LI Wei-Jun³, SHI Hui-Lu³

1 College of Animal Science and Technology, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources; Institute of Soil and Water Conservation of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China

3 Grassland Management Bureau, Yunwu Mountain Natural Protecting Area, Guyuan, Ningxia 756000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3168 ~ 3175.

Abstract: The study was conducted by selecting the typical plant of the following dominant species of *Stipa bungeana*, *S. grandis* and companion species including *Thymus mongolicus*, *Artemisia sacrorum*, *Agropyron dasystachys*, *Potentilla bifurca*, *Heteropappus altaicus*, and by tagging selected plants in the Yunwu Mountain. The growth dynamic of the plants from plant height and individual aboveground biomass during its growth cycle (from recovering to withering stage) were observed and measured. The results showed that: (1) The growth of the plants is basically coincident with Logistic models before the height and individual aboveground biomass reaches to the maximum; (2) There is a dynamic fractal relationship between plant individual aboveground biomass and plant height. The function as follows: $\ln B = D \times \ln H + \ln C$; (3) The growth of the plants was not only affected by their biological characteristics, but also by environmental factors, in which

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 资助项目 (2007CB106803); 国家科技支撑课题资助项目 (2006BAD09B08)

收稿日期: 2007-11-24; **修订日期:** 2008-04-22

作者简介: 王丽学 (1983 ~), 女, 内蒙古人, 硕士生, 主要从事草地生态研究. E-mail: lixuewang0066@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gyzejm@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Key Program for Developing Basic Sciences (No. 2007CB106803) and by National Science and Technology Project (No. 2006BAD09B08)

Received date: 2007-11-24; **Accepted date:** 2008-04-22

Biography: WANG Li-Xue, Master candidate, mainly engaged in grassland ecology. E-mail: lixuewang0066@126.com

precipitation is more important in arid and semi-arid region. In this experiment both the growth of plant height and the monthly variation of individual aboveground biomass have a significantly logarithm correlation with precipitation accumulation as the function of $y = a \times \ln x + b$.

Key Words: nature grassland; plant height; individual aboveground biomass; Logistic model; dynamic fraction; precipitation

目前采用数学模型模拟植物生长规律,是生态系统研究中一种重要的分析方法和手段。用数学方程表示植物生长动态不但可以预测生长趋势,而且便于对生长过程进行分析,揭示植物生长的内在规律及其与环境的关系。由种群生态学可知,在有限的环境条件制约下,种群变化呈非线性阻滞增长,即 Logistic 生长曲线(“S”形曲线)^[1]。目前,应用“S”形曲线模拟种群及个体生长动态的研究较多,但对于草原植物个体生长动态研究较少。

株高和生物量是生态系统最基本的数量特征,株高是描述植物生长状况,反映产量高低较为理想的一个特征量;而研究生物量可以了解植物生物量积累动态,为整个系统的物质循环和能量流动提供基本资料,并为草地合理利用提供重要依据^[2]。对大多数草原植物来说,生物量积累与株高增长正相关^[3],有研究^[4]表明植物在整个生长过程中地上生物量与株高存在着动态分形关系,主要反映统计意义上同一个体在不同株高阶段生物量的空间增长规律,这实际上是用空间参量(株高)代替时间参量对植物生长过程进行描述。本试验从株高和生物量这两个指标对云雾山天然草地植物的生长过程进行研究。

1 试验区概况与研究方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏固原市云雾山自然保护区,地理位置: E106°24' ~ 106°28', N36°13' ~ 36°19', 海拔 1800 ~ 2100m, 土壤有黑垆土和山地灰褐土两种,年平均气温 6 ~ 7℃,年平均降水量 400 ~ 450mm,属半干旱类型,7 ~ 9 月占年降水量的 65% ~ 75%, ≥10℃ 积温 2100 ~ 3200℃,干燥度 1.5 ~ 2.0。植被属典型草原,建群植物为本氏针茅(*Stipa bungeana*)、大针茅(*Stipa grandis*),主要的伴生种为铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 物候期观察

在试验区选取本氏针茅、大针茅、百里香、铁杆蒿、厚穗冰草(*Agropyron dasystachys*)、二裂萎陵菜(*Potentilla bifurca*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)7种植物为观察对象,每7d观察1次,记录其物候期和分枝(分蘖)数。

1.2.2 株高测定

对上述7种植物各选取有代表性的8株,定株观测(2007年5月至10月),每7d进行1次株高测定,即从植株基部到茎顶端的拉直高度^[3,5],分别对所选的同种植物同一阶段的株高数据取平均值,进行分析。

1.2.3 地上生物量测定

2007年5月至10月,按月在试验区随机取20个1m×1m样方,分别记录样方内上述7种植物的密度,然后分种齐地刈割,用烘干法(于80℃ 24h烘干至恒重)测其干重,最后根据密度和各植物总干重计算其各自的单株生物量(干重),进行分析。

1.2.4 降雨量

由当地气象站提供。

1.2.5 数据处理

用 Excel2003 和 SPSS13.0 对数据进行处理和分析。

预处理:由于不同植物植株大小不同,其株高和生物量所测数据区间差异性很大,为了能更直观地观察其整体变化趋势,使不同植物种在一个生长季中的生长趋势能在同一区间内显示,对各物种因区间而异的同类数据进行预处理,使之归一化^[6],此处采用最大值标准化,即各期数据均除以该期同类数据的最大值^[7],然后再作图(图1、图2)。

动态分形分析:动态分形关系主要反映的是植物生长过程中的一种自相似特征,即植物生长后期的较大植株是生长初期的较小植株在生长过程中的放大形式^[8],亦即植物经过茎的伸长生长和展叶生长直至完全成熟的一种生物量积累过程^[4]。一般说来,对生物量(B)和株高(H)测度的野外原始数据进行拟合,如果存在如下指数关系:

$$B = CH^D \quad (C, D \text{ 为常数})$$

则 D 为分形维数,对其进行对数变换得:

$$\ln B = \ln C + D \times \ln H$$

可见,生物量(B)与株高(H)在双对数坐标下存在着一种线性关系, D 为该直线的斜率,因此,求算分形维数的方法是在双对数坐标下对生物量(B)与株高(H)的一系列值进行线性回归,所得拟合直线的斜率即为分形维数值^[9~11]。

2 结果与分析

2.1 植物株高增长和生物量月变化

2.1.1 物候期

云雾山植物一般于4月中旬返青,并随各植物的生长节律不同而表现出各自不同的物候变化,所观察的7种植物物候期和分枝(分蘖)数见表1。

表1 7种植物的物候期和分枝(分蘖)数
Table 1 Phenophase of 7 plant species and the number of bifurcation (tiller)

植物 Plant species	物候期(月-日) Phenophase (month-day)					分枝(分蘖)数 Number of bifurcation (tiller)
	返青期 Recovering	拔节期 Jointing	孕穗期 (现蕾期) Booting (Squaring)	抽穗期 (开花期) Heading (Blooming)	成熟期 Mature	
本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i>	04-20	05-22	07-10	07-24	08-7	1~70
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	04-15	6-12	07-24	08-14	09-4	1~40
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	04-20	—	07-24	08-14	08-28	匍匐型
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	04-15	—	07-10	08-07	08-28	1~12
厚穗冰草 <i>Agropyron dasystachys</i>	04-15	06-12	07-17	08-07	09-04	1~5
二裂萎陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	04-20	—	07-10	07-24	08-07	单生
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	04-15	—	07-31	08-21	09-04	1~10

2.1.2 植物株高增长及生物量月变化动态

由图1可以看出,植物平均株高的增长动态基本呈现出“缓慢增长-快速增长-缓慢增长”的趋势,与各自物候期(表1)相对照,禾本科植物的快速增长出现在拔节期和抽穗期,其他科则出现在现蕾期前后,随后出现生长缓慢或者停滞现象,但是大针茅生长后期表现出株高明显下降的趋势,其主要原因可能是成熟期的大针茅,种子脱落同时伴随植株顶端茎秆干枯折断的现象,厚穗冰草也略有此趋势。

由图2可知,大针茅、百里香、厚穗冰草、二裂萎陵菜和阿尔泰狗娃花均于10月份各自单株生物量达到最大,本氏针茅和铁杆蒿则是9月份,而10月份有下降趋势,尤其铁杆蒿下降幅度较大,其可能的原因是铁杆蒿属于半灌木,地上生物量(现存量)主要集中在茎秆部分,10月份其茎秆已大部分接近干枯,导致其生物量大幅度下降,而本氏针茅可能是由于部分已经完成生育期的植株种子脱落,在适宜条件下又开始新一轮的生长,植株相对较小,导致单株生物量略有下降。

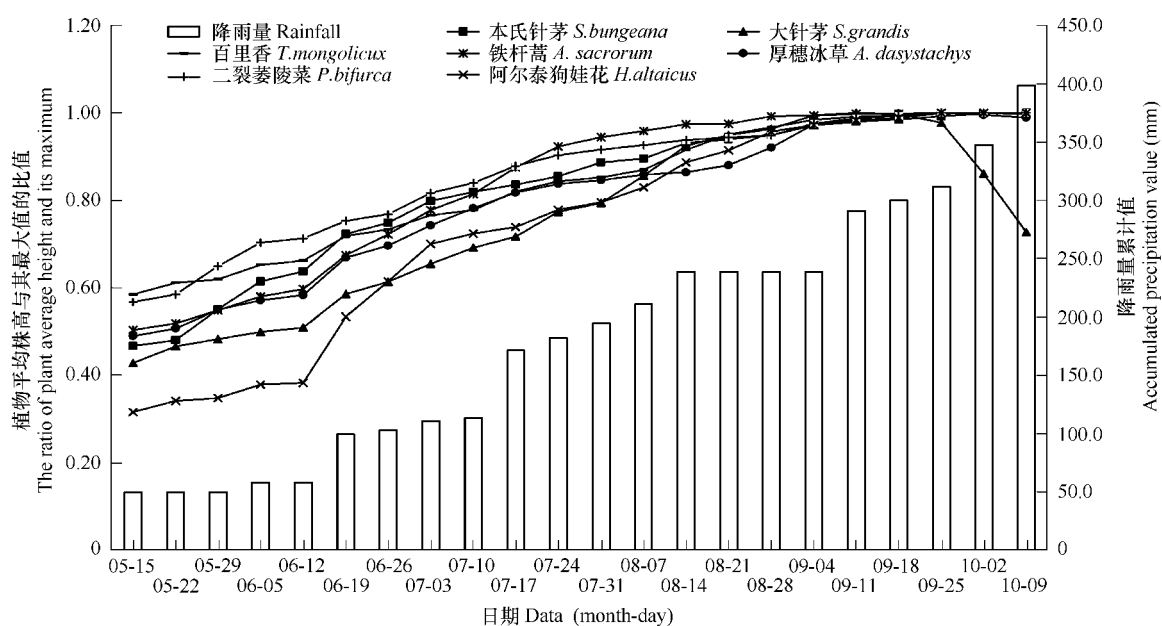


图1 植物平均株高增长和降雨量累计

Fig. 1 The growth of plant average height and the accumulated precipitation

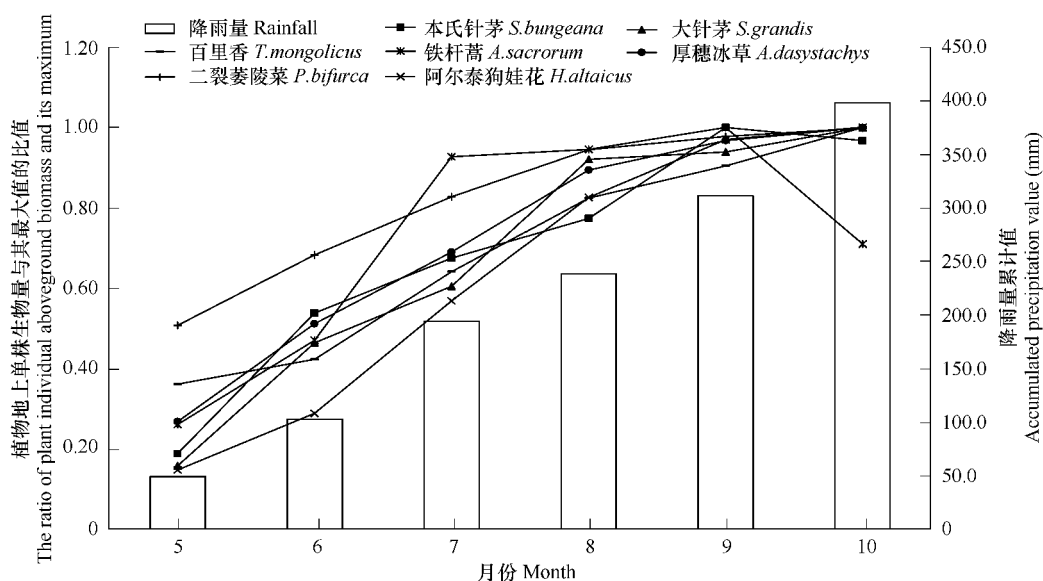


图2 植物地上单株生物量月变化和降雨量累计

Fig. 2 Monthly variation in plants individual aboveground biomass and the accumulated precipitation

2.1.3 植物生长的 Logistic 模拟

由图 1 和图 2 可以看出,植物株高和地上单株生物量在达到最大值之前变化动态基本一致,均体现出 Logistic 生长趋势,用 SPSS13.0 分别拟合 7 种植物株高增长和地上生物量月变化的 Logistic 方程(表 2),经 F 检验,拟合结果除铁杆蒿的地上生物量月变化方程为显著水平外其他均达到极显著水平,说明植物株高和地上单株生物量月变化在其达到最大值之前符合 Logistic 生长模型。

比较 7 种植物的平均株高增长和地上单株生物量月变化的 Logistic 方程,可以看出,其株高增长饱和值与地上单株生物量饱和值并不同步,这应该与各植物的生长型和生活型有关。对于禾本科丛生型牧草而言,起

主导作用的可能是各自的分蘖数(表 1),分蘖多,在样方内占据的空间大,即使密度小,也有较高的单株生物量(如本氏针茅),所以本氏针茅株高虽低于大针茅和厚穗冰草,但却具有较高的单株生物量;百里香是匍匐状丛生型植物,在样方内占据的空间相对较大,铁杆蒿和阿尔泰狗娃花分枝数相对较多(表 1),且铁杆蒿属半灌木,木质化程度较高,所以这三种植物在较小的密度下也会有较高的单株生物量,故其株高虽较厚穗冰草低,但仍有比存穗冰草高的单株生物量;而二裂萎陵菜为单生型植物,在样方内占据空间小,且在 7 种植物中株高增长饱和值最低,所以地上单株生物量饱和值也最低。

表 2 植物平均株高增长和地上生物量月变化的 Logistic 方程

Table 2 Logistic functions of the growth of plant average height and the monthly variation of individual aboveground biomass

植物 Plant species	方程 Logistic Function	
	平均株高增长 The growth of plant average height	地上单株生物量月变化 Monthly variation of individual aboveground biomass
本氏针茅 <i>S. bungeana</i>	$H = \frac{15.000}{1 + 1.200 \times \exp(-0.025t)}$ $R^2 = 0.995 \quad F = 3703.837 > F_{0.01}$	$B = \frac{6.500}{1 + 143.593 \times \exp(-0.768t)}$ $R^2 = 0.908 \quad F = 39.558 > F_{0.01}$
大针茅 <i>S. grandis</i>	$H = \frac{67.000}{1 + 2.345 \times \exp(-0.034t)}$ $R^2 = 0.922 \quad F = 189.396 > F_{0.01}$	$B = \frac{5.000}{1 + 449.930 \times \exp(-0.942t)}$ $R^2 = 0.963 \quad F = 103.761 > F_{0.01}$
百里香 <i>T. mongolicus</i>	$H = \frac{15.000}{1 + 1.035 \times \exp(-0.020t)}$ $R^2 = 0.981 \quad F = 916.216 > F_{0.01}$	$B = \frac{1.550}{1 + 123.886 \times \exp(-0.777t)}$ $R^2 = 0.970 \quad F = 128.136 > F_{0.01}$
铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i>	$H = \frac{26.000}{1 + 1.430 \times \exp(-0.032t)}$ $R^2 = 0.981 \quad F = 804.570 > F_{0.01}$	$B = \frac{2.500}{1 + 340.995 \times \exp(-0.981t)}$ $R^2 = 0.911 \quad F = 30.609 > F_{0.05}$
厚穗冰草 <i>A. dasystachys</i>	$H = \frac{58.000}{1 + 1.508 \times \exp(-0.028t)}$ $R^2 = 0.924 \quad F = 206.840 > F_{0.01}$	$B = \frac{0.500}{1 + 59.561 \times \exp(-0.633t)}$ $R^2 = 0.963 \quad F = 104.163 > F_{0.01}$
二裂萎陵菜 <i>P. bifurca</i>	$H = \frac{5.000}{1 + 0.850 \times \exp(-0.029t)}$ $R^2 = 0.984 \quad F = 627.891 > F_{0.01}$	$B = \frac{0.120}{1 + 13.751 \times \exp(-0.528t)}$ $R^2 = 0.965 \quad F = 111.907 > F_{0.01}$
阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	$H = \frac{11.000}{1 + 1.970 \times \exp(-0.031t)}$ $R^2 = 0.978 \quad F = 653.205 > F_{0.01}$	$B = \frac{0.600}{1 + 343.635 \times \exp(-0.814t)}$ $R^2 = 0.974 \quad F = 147.726 > F_{0.01}$

H 为植物平均株高(cm), B 为植物地上单株生物量(g), t 为时间(d) H is the plant average height(cm), B is the plant individual aboveground biomass(g), t is the time(d)

2.1.4 植物地上生物量与株高的动态分形关系

地上生物量在不同高度情况下,其自身的空间积累具有分形特征,不同高度的植株地上生物量空间分布格局具有自相似性,即同一时刻不同高度的植株其物质积累在各器官中的分布具有相同的规律,而刻画这一规律的就是 $\ln B$ 和 $\ln H$ 良好线性关系的斜率 D ,即分形维数^[12]。

由表 3 可以看出,本氏针茅、大针茅、百里香、铁杆蒿、厚穗冰草、二裂萎陵菜和阿尔泰狗娃花在整个生长过程中生物量与株高的双对数呈明显的线性关系,经 F 检验,拟合达极显著水平,由此可知,在整个生长季生物量空间积累与株高增长具有良好的分形特性,其分维数值分别为 2.105、2.261、2.115、2.060、2.140、1.522 和 1.831,表明生物量的空间积累是以株高的分维数值次幂的形式进行,分维数值越大,其生物量在空间积累越多,展布空间越大,反之生物量在空间积累的越少,占据空间也越小^[4,12]。相比较而言,大针茅地上单株生物量空间积累最多,其次是厚穗冰草和百里香,二裂萎陵菜最少。

2.2 植物株高增长和地上单株生物量月变化与降雨量的关系

植物生长规律除决定于其自身生物学特性外,还受外界环境因子影响^[13],如 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温、土壤湿度、降雨量等,有研究表明, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温和土壤湿度影响天然草地牧草返青^[14],植物单株生物量积累与降雨量积累和 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温均呈显著的正相关关系,但降雨量较温度表现出极显著的相关关系^[6],降雨量在植物生长季的各个阶段都是重要的影响因子^[15],这些均与降水已成为干旱半干旱地区生产力的限制因子^[3]的结论一致。所以

本文着重讨论了植物株高增长和地上单株生物量月变化与降雨量的关系。

表 3 植物地上单株生物量与平均株高双对数的线性回归

Table 3 Linear regression of double logarithmic between plants individual aboveground biomass and average height

植物 Plant species	方程 Equation	R^2	F	$F_{0.01}$	分形维数 Fractal dimension
本氏针茅 <i>S. bungeana</i>	$\ln B = 2.105 \ln H - 4.103$	0.940 **	62.235	21.20	2.105
大针茅 <i>S. grandis</i>	$\ln B = 2.261 \ln H - 7.869$	0.928 **	38.685	34.12	2.261
百里香 <i>T. mongolicus</i>	$\ln B = 2.115 \ln H - 5.260$	0.966 **	114.443	21.20	2.115
铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i>	$\ln B = 2.060 \ln H - 5.868$	0.935 **	57.587	21.20	2.060
厚穗冰草 <i>A. dasystachys</i>	$\ln B = 2.140 \ln H - 9.462$	0.988 **	322.091	21.20	2.140
二裂萎陵菜 <i>P. bifurca</i>	$\ln B = 1.522 \ln H - 4.679$	0.988 **	329.340	21.20	1.522
阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	$\ln B = 1.83 \ln H - 5.046$	0.967 **	117.881	21.20	1.831

** 表示拟合结果在 0.01 水平显著, H 为植物平均株高 (cm), B 为植物地上单株生物量 (g) ** the fitted result is significant at 0.01 level, H is the plant average height (cm), B is the plant individual aboveground biomass (g)

据图 1 可知植物平均株高在成熟期前与降雨量累积有相近的变化趋势(随降雨量累积株高增加),而成熟期因植物由营养生长转变为生殖生长,所以其株高增长趋于平缓甚至有所下降(如大针茅和厚穗冰草)。植物返青以后,由于生长发育阶段对环境的适应,生长速度逐渐加快,但 6 月 12 日以前云雾山地区久旱无雨,株高增长缓慢;6 月 12 日以后,随着雨热同期的到来,株高增长速度逐渐加快,但因各植物处于不同生长发育阶段和对环境条件的适应不同,而表现出不同的生长速度(图中表现为折线斜率上的差异)。

据图 2 可知,植物生物量 9 月份(铁杆蒿是 8 月份)之前均有随降雨量累积而显著增加的趋势,而 9 月份到 10 月份之间增加相对缓慢甚至有降低的趋势(如本氏针茅和铁杆蒿),这主要是受其生物学特性支配,在植物生长末期,营养生长转变为生殖生长,导致植物伸长和展叶生长受阻,所以即使降雨量累积再多,生物量也不再大幅度增加,甚至会下降。

用 SPSS13.0 分别拟合各植物株高增长和各自地上单株生物量月变化与降雨量的关系见表 4,经 F 检验,拟合结果达极显著水平,说明在植物成熟期以前,其株高增长和生物量月变化与降雨量累积呈对数增长趋势。

表 4 植物平均株高和地上单株生物量与降雨量关系的数学模型

Table 4 Mathematical model of relationship between plant average height, individual aboveground biomass and precipitation

植物 Plant species	植物平均株高与降雨量 Plant average height and precipitation	植物地上单株生物量与降雨量 Plant individual aboveground biomass and precipitation
本氏针茅 <i>S. bungeana</i>	$H = 3.866 \ln P - 7.283$ $R^2 = 0.912 \quad F = 103.647 > F_{0.01}$	$B = 2.312 \ln P - 7.774$ $R^2 = 0.964 \quad F = 105.824 > F_{0.01}$
大针茅 <i>S. grandis</i>	$H = 15.245 \ln P - 29.357$ $R^2 = 0.963 \quad F = 262.616 > F_{0.01}$	$B = 2.001 \ln P - 7.080$ $R^2 = 0.950 \quad F = 76.033 > F_{0.01}$
百里香 <i>T. mongolicus</i>	$H = 2.442 \ln P - 0.973$ $R^2 = 0.975 \quad F = 393.116 > F_{0.01}$	$B = 0.485 \ln P - 1.470$ $R^2 = 0.923 \quad F = 48.233 > F_{0.01}$
铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i>	$H = 7.417 \ln P - 15.806$ $R^2 = 0.971 \quad F = 333.444 > F_{0.01}$	$B = 1.031 \ln P - 3.475$ $R^2 = 0.958 \quad F = 69.208 > F_{0.01}$
厚穗冰草 <i>A. dasystachys</i>	$H = 13.912 \ln P - 24.317$ $R^2 = 0.962 \quad F = 256.408 > F_{0.01}$	$B = 0.161 \ln P - 0.517$ $R^2 = 0.975 \quad F = 155.942 > F_{0.01}$
二裂萎陵菜 <i>P. bifurca</i>	$H = 1.086 \ln P - 1.074$ $R^2 = 0.916 \quad F = 109.581 > F_{0.01}$	$B = 0.027 \ln P - 0.051$ $R^2 = 0.981 \quad F = 206.013 > F_{0.01}$
阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	$H = 3.686 \ln P - 10.815$ $R^2 = 0.947 \quad F = 179.007 > F_{0.01}$	$B = 0.234 \ln P - 0.879$ $R^2 = 0.938 \quad F = 60.770 > F_{0.01}$

** 表示拟合结果在 0.01 水平显著, P 为降雨量累计值 (mm), H 为植物平均株高 (cm), B 为植物地上单株生物量 (g) ** the fitted result is significant at 0.01 level, P is the accumulated precipitation (mm), H is the plant average height (cm), B is the plant individual aboveground biomass (g)

3 讨论与结论

(1) 植物株高(高频度观察)和地上单株生物量(月动态),在达到最大值之前均基本符合 Logistic 生长曲

线: $y = \frac{u}{1 + v \times \exp(-kt)}$ ($u, v, k > 0$), 但是在二者达到最大值后的衰老过程(成熟期)则不能用 Logistic 曲线来准确描述, 这与张彩琴^[1]、Jesse^[16]、Jun Kato^[17]等研究结果基本一致。综合二者的 Logistic 方程, 可以看出 7 种植物的株高增长饱和值大小与地上单株生物量月变化的饱和值并不同步, 这应该与各植物的生长型和生活型有关。

(2) 植物地上生物量与株高在整个生长过程中存在着动态分形关系: $\ln B = D \times \ln H + C$ (D 为分维数, C 为常数)^[9~11], 即地上生物量与株高的双对数线性相关, 说明植物的生长存在一种自相似规律, 也就是说, 整体是局部的放大, 局部是整体的缩影^[18]。这一结果与类似的相关研究^[4,8,19]一致。试验研究结果表明云雾山 7 种植物的分形维数由大到小(即生物量空间积累由多到少)顺序为: 大针茅、厚穗冰草、百里香、本氏针茅、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花、二裂萎陵菜。对于植物地上生物量的空间分布及积累规律的深入研究, 将有利于估测草地产量, 为草地的持续利用提供科学的理论基础^[19]。

(3) 植物生长除受其自身生物学特性支配外, 还受外界环境因子的影响, 在半干旱地区, 降雨量是植物整个生长过程中的主要限制因子。试验研究结果表明: 株高和生物量均与降雨量累积存在着极显著的对数关系: $y = a \times \ln x + b$ (a, b 为常数)。这与张彩琴^[6]、胡宏友^[20]等人研究中认为“生物量与降雨量线性正相关”的结论不同, 可能是由于年份情况、地域差异和气候条件不同导致结论不同。

References:

- [1] Zhang C Q, Yang C. Simulation of growth dynamics of four plants in the typical steppe of Inner Mongolia in growing season. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3618—3629.
- [2] Zhu Z C, Jia D L. A preliminary study on the biomass of *Calamagrostis pseudophragmites* community. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(1): 40—49.
- [3] Bai Y F, Xu Z X. Study on the growth and development patterns of nine varieties of herbage in the steppe region. *Grassland of China*, 1994(6): 21—27.
- [4] Ma K M, Zu Y G. Fractal relationship between aboveground biomass and plant height of *Aneurolepidium chinense* population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(4): 417—420.
- [5] Marcelo Sternberg, Baxim Shoshany. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: Comparison of a semiarid and an arid site in Israel. *Ecological Research*, 2001(16): 335—345.
- [6] Zhang C Q, Yang C. Comparison of Growth Dynamic of Several Plants in Different Life Forms in Steppe. *Journal of Inner Mongolia University*, 2007, 38(9): 557—564.
- [7] Zhang J T. Data processing. In: Zhang J T ed. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press, 2003, 34—35
- [8] Wang J, Cheng J M. Fractal Relations between Aboveground Biomass and Plant Height of *Aneurolepidium dasystachys*. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2005, 25(8): 1623—1627.
- [9] He C Q, Zhao K Y. Fractal relationship between aboveground biomass and plant length or sheath height of *Carex lasiocarpa* population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 640—642.
- [10] Claude Bellehumeur, Pierre Legendre. Multiscale sources of variation in ecological variables: modeling spatial dispersion, elaborating sampling designs. *Landscape Ecology*, 1998(13): 15—25.
- [11] Bharat Man Shrestha, Bal Ram Singh. Soil and vegetation carbon pools in a mountainous watershed of Nepal. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007.
- [12] Sun Zh G, Liu J Sh. The Fractal characteristics of spatial structure of aboveground biomass in typical *Calamagrostis angustifolia* population in Sanjiang Plain. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 775—780.
- [13] Xu Zh X, Qu Y Q, Bai F. Study on dynamics of growing of 12 species herbage and aboveground biomass of plant community in meadow grassland. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2001, 22(2): 28—32.
- [14] Wei Y R, Pan X B, Ao Q E. Application research of grass phenophase models in grassland—A case study from Xilin Gol grassland. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 117—121.
- [15] Huang F X, Gao Q, Fu D S. Relation between climate variables and the aboveground biomass of *Thymus mongolicus*-*Stipa bungeana* community in steppe of Ordos Plateau, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8): 1339—1346.

- [16] Jesse C. Vermaire, Irene Gregory-Eaves. Reconstructing changes in macrophyte cover in lakes across the northeastern United States based on sedimentary diatom assemblages. *Journal of Paleolimnology*, 2007.
- [17] Jun Kato, Ichirku Hayshi. Quantitative analysis of a stand of *Pinus densiflora* undergoing succession to *Quercus mongolica* ssp. *crispula*: 1. A 31-year record of growth and population dynamics of the canopy trees. *Ecol Res*, 2006(21):503—509.
- [18] Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of vegetation pattern. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 111—117.
- [19] Li L F, Wang P. The spatial distributing pattern of aboveground biomass of *Elymusibiricus* population. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1208—1211.
- [20] Hu H Y, Lin P, Yang Z W. Biomass and growth analysis of *Paspalum wettsteinii* community in South Fujian, China. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2002, 17(4): 226—230.

参考文献:

- [1] 张彩琴,杨持. 内蒙古典型草原生长季内不同植物生长动态的模拟. *生态学报*, 2007, 27(9):3618~3629.
- [2] 朱志诚,贾东林. 假苇拂子茅群落生物量初步研究. *生态学报*, 1996, 16(1):40~49.
- [3] 白永飞,徐志信. 典型草原9种牧草生长发育规律的研究. *中国草地*, 1994(6):21~27.
- [4] 马克明,祖元刚. 羊草种群地上部生物量与株高的分形关系. *应用生态学报*, 1997, 8(4): 417~420.
- [6] 张彩琴,杨持. 几种不同生活型草原植物生长动态的比较研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2007, 38(9):557~564.
- [7] 张金屯. 数据的处理. 见:张金屯主编. *数量生态学*. 北京:科学出版社, 2003. 34~35.
- [8] 王静,程积民,等. 厚穗冰草地上部生物量与株高的分形关系. *西北植物学报*, 2005, 25(8):1623~1627.
- [9] 何池全,赵魁义. 毛茛苔草种群地上生物量与株高或鞘高分形特征. *应用生态学报*, 2003. 14(4): 640~642.
- [12] 孙志高,刘景双,等. 三江平原典型小叶章种群地上生物量的空间结构分形特征. *生态环境*, 2006, 15(4):775~780.
- [13] 许志信,曲永全,白飞. 草甸草原12种牧草生长发育规律和草群地上生物量变化动态研究. *内蒙古农业大学学报*, 2001, 22(2):28~32.
- [14] 魏玉蓉,潘学标,敖其尔. 草地牧草物候发育模型的应用研究——以锡林郭勒草原为例. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1): 117~121.
- [15] 黄富祥,高琼,傅德山. 内蒙古鄂尔多斯高原典型草原百里香-本氏针茅草地地上生物量对气候响应动态回归分析. *生态学报*, 2001, 21(8):1339~1346.
- [18] 马克明,祖元刚. 植被格局的分形特征. *植物生态学报*, 2000, 24(1):111~117.
- [19] 李连芳,王培等. 老芒麦(*Elymusibiricus*)种群地上生物量空间分布格局研究. *生态学报*, 2001, 21(7):1208~1211.
- [20] 胡宏友,林鹏,杨志伟. 宽叶雀稗群落生物量和生长规律的研究. *福建农业学报*, 2002, 17(4):226~230.