第9卷 第3期 草 地 学 报 2001年 9月
Vol. 9 No. 3 ACTA AGRESTIA SINICA Sept. 2001

文章编号：1007-0435(2001)03-0232-07

高寒草甸牧草产量形成过程及与气象因子的关联分析*

李英年，周华坤，沈振西
（中国科学院西北高原生物研究所，西宁 810001）

摘要：高寒草甸牧草产量的形成过程与生物量的积累过程和自然界各种生物种群消长规律一样，可用逻辑斯谛生长函数来描述。随着季节的进程，依环境条件的周期变化表现为有缓慢积累—快速增加—相对稳定—折损减少等4个阶段。

对气象因子影响高寒草甸牧草产量灰色关联分析结果表明，高寒草甸地区降水量可基本满足牧草生长发育的需求，而温度因子则成为主要的限制因子。其气象因子影响程度大小的序次为：1月平均气温>5～8月平均气温>5～8月日照时数>5～8月水热综合配合（降水量与气温的比值）>5～8月降水量>上年度末9～11月的降水量。在分辨系数取0.5的条件下，以上各因子所对应的关联度排列为：0.835>0.791>0.771>0.754>0.743>0.638。

将上述各气象因子进行主成分处理后，建立评估或预报高寒草甸牧草产量的模拟模型方程：$GW=a+a_i\Sigma X_i$。其拟合及试报效果很好，可作高寒草甸牧草产量的评估或预测预报工具。

关键词：高寒草甸；生长过程；气象因子；牧草产量；关联分析
中图分类号：S812.1 **文献标识码**：A

The Association Analysis of Herbage Yield and Meteorological Factors in Alpine Meadow

LI Ying-nian, ZHOU Hua-kun, SHEN Zhen-xi
(Northwest Plateau Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining Qinghai 810001, China)

Abstract: In this paper, accumulation of above-biomass could be described by logistic equation as same as process of growth and decline in other biological populations during the growing season of alpine meadow. The accumulation had four stages, gradually increasing, stupid increasing, stability and decreasing during seasonal process with changes in environmental factors.

We employed the method of gray association analysis. The results showed that factors influence herbage production in the alpine meadow suggest that the precipitation in alpine meadow is enough to the water requirement of herbage growth on the whole and the air temperature is the main limiting factor. The ordination of its influence is given below.

The average air temperature in January>the average air temperature from May to August>the sunshine time from May to August>the comprehensive cooperation of heat and water (the ratio of the precipitation and average air temperature) from May to August>the precipitation from May to August>the precipitation from September to November (when it is) in the late time of last year. If resolving coefficient is 0.5, the ordination of association degree associated with the given factors above is: 0.8348>0.7913>0.7713>0.7540>0.7430>0.6384.

收稿日期：2000-08-17；**修回日期**：2001-05-25
*国家和基础研究规划项目（1998040800），中国科学院知识创新工程（KSCX2-07）及中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站基金项目资助
作者简介：李英年（1962-），男，高级工程师，主要从事生物气候研究工作

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Modeling equation of evaluating and predicting herbage yield alpine meadow was predicted by $GW=a+b_i\Sigma X_i$ after main composition analysis on each meteorological factor discussed above. The equation can be looked as the tool for evaluating and predicting herbage yield in alpine meadow because of its good forecast effect.

Key words: Alpine meadow; Growing process; Meteorological factor; Herbage yield; The association of analysis

影响植物群落产量的气象因子是多方面的。在天然高寒放牧草地,由于土壤理化生态一定时期内基本保持均衡状态,草原建设水平及调控策略措施改变(投入)不大,因而认为高寒草甸植物群落的产量颇大程度上取决于气象因子的制约,土壤因子显得次要。为此,本文根据中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)对高寒草甸植被群落连续16年产草量及平行气象资料定位观测的结果,在分析牧草从萌动发芽到枯黄全生长发育阶段有关季节变化特征外,利用灰色关联分析对影响高寒草甸产草量的气象因子进行主次关联程度分析,以便深入了解影响高寒草甸地域对草地生产力的主、次要气象因子及其限制因子。

1　材料与方法

1.1　自然概况

海北站地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷,37°37′N、37°37′E,海拔3200m。年均气温－1.7℃,最热月(7月)和最冷月(1月)平均气温为9.8℃和－15.2℃;年均降水量582mm,主要分布于5～9月,占年总水量的79%。无明显四季之分,只有冷暖两季之别,相对无霜期仅20d左右,年湿润系数1.34(依Penman法计算)。表现出冷季干燥少雨、寒冷,暖季湿润多雨、凉爽。

在特殊的气候条件下,形成以矮嵩草(*Kobresia humilis*)为建群种的高寒草甸植物,草场植物群落结构简单,种类组成较少,植株低矮,产草量低[1]。土壤属亚高山草甸土,具有发育年青,薄层性和粗骨性强,有机质含量丰富,土壤潜在肥力高等基本特点[2]。

1.2　资料

本文所指的牧草产量是1980－1995年地上生物量(以下简称生物量)在年内达最高时期的地上部产量。定位观测点设在海北站综合实验地,属冬春草场,牧草萌动发芽时将牲畜迁出,至11月牧草枯黄后牲畜方可迁入。牧草生物量及年产量测定方法详见文献[3]。多年观测表明,生物量最高时期在9月中上旬,因而,文中各年牧草产量为9月15日前后5天内测定值的烘干重(g/m²,下同)。气象站在该综合实验场,观测按中央气象局[4]有关规范要求进行,资料为1980到1995年的实际测定值。

1.3　方法

首先利用积温与生物量的关系对高寒草甸植物群落的生长过程进行描述,尔后采用关联分析对诸气象因子影响牧草产量程度的大小进行排序,最后根据有关气象因子,采用主成分分析法,建立预报牧草产量的回归方程。

1.3.1　高寒草甸植物群落生长过程描述

生物量积累过程和自然界生物种群消长规律一样,可用逻辑斯谛生长函数描述。

$$\Delta GW=GW_0/[1+\exp(a+bt)] \qquad (1)$$

式中 ΔGW 为生物量;GW_0 为生物量最终可能达到的最大值;a、b 是与参量 t 选择有关的两个回归系数,它与植物生长地区生态条件及生物学特征有关。本文对自变量取日均气温稳定≥0℃开始时,随牧草生长的活动积温(ΣT)。即有

$$\Delta GW=GW_0/[1+\exp(a+b\Sigma t)] \qquad (2)$$

如果采用生物量相对增长量(W)和相对积温(k),作规一化处理,即

$$W=\Delta GW/GW_0 \qquad k=\Sigma T/\Sigma T_0$$

式中 ΣT_0 为牧草生长期的可能总积温。则有

$$W=1//[1+\exp(a+bk)] \qquad (3)$$

对方程(3)求一阶、二阶、三阶导数分别有

$$dW/dk=-b\exp(a+bk)/W^2 \qquad (4)$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$d^2W/dk^2=-dW/dk\cdot[\exp(a+bk)-1]\cdot b/W \quad (5)$$

$$d^3W/dk^3=-dW/dk\cdot[\exp2(a+bk)-4\exp(a+bk)-1]\cdot b^2/W^2 \quad (6)$$

dW/dk 指生物量随积温变化的相对生长率，生物量极大相对生长率即 dW/dk 的极大值，可由 $d^2W/dk^2=0$ 求得，生物量极大相对生长率所对应的相对积温，最大相对生长时段的起止相对积温和该期间平均相对生长生长率等有关参数。

相对生长率(CGR)

$$CGR=dGW/d\Sigma t \quad (7)$$

极大相对生长率(CGR_0)

$$CGR_0=-b/4 \quad (8)$$

极大相对生长率出现时期的相对积温(k_0)

$$k_0=-a/b \quad (9)$$

最大相对生长时段的初始相对积温(k_1)

$$k_1=[\ln(2+\sqrt{3})-a]/b \quad (10)$$

最大相对生长时段的终止相对积温(k_2)

$$k_2=[\ln(2-\sqrt{3})-a]/b \quad (11)$$

生物量积累最快时段的相对增长率(CGR)

$$CGR=\int CGRdk/(k_2-k_1)=1/[\sqrt{3}(k_2-k_1)] \quad (12)$$

根据上述参量描述高寒草甸植被生物量积累的有关特征与过程。

1.3.2 关联分析

关联分析[5]是确定时间序列与比较时间序列之间随着时间变化的动态发展趋势是否接近的有效方法。它在推断解释系统间的关系，揭示其内部联系规律有着非常重要的作用。探讨植被生产力与气象因子间的关联程度，解释各气象因子影响植被生产力的主次成分。关联分析实质上是曲线间几何形状分布的比较，它包括关联系数、关联序及关联程度等的求算。为了便于运算，既消除量的影响，又可使数值缩小，对序列数值进行均值化处理。设有产草量时间序列($X_0(t_k)$)和比较气象因子的时间序列($X_j(t_k)$)分别为

$$X_0(t_k)=\{X_0(t_1),X_0(t_2),\cdots,X_0(t_n)\}$$

$$X_j(t_k)=\{X_j(t_1),X_j(t_2),\cdots,X_j(t_n)\}$$

$j=1,2,\cdots,m$ 为比较时间序列的因子数，n 为样本容量，t_k 表示第 k 时刻产草量与比较气象因子时间序列的采样点。记 X_0 对 X_j 的关联系数为 $L_{ij}(t_k)$。则有

$$L_{ij}(t_k)=[\Delta min+\eta\cdot max]/[\Delta_{0j}()+\eta\cdot\Delta max] \quad (13)$$

式中，Δmin 为各时刻所有比较序列的最小绝对差，即

$$\Delta min=min\cdot min|X_0(t_k)-X_j(t_k)|$$

Δmax 为各时刻所有比较序列的最大绝对差，即

$$\Delta max=max\cdot max|X_0(t_k)-X_j(t_k)|$$

$\Delta_{0j}(tk)$为 k 时刻 x_0 与 x_j 的绝对差值，即

$$\Delta_{0j}(t_k)=|X_0(t_k)-X_j(t_k)|$$

η 为常数，即分辨系数。由于当 $\Delta_{0j}(t_k)=\Delta min$ 时，关联系数达上界，有 $L_{0j}(t_k)=1$；当 $\Delta_{0j}(t_k)=\Delta max$ 时，关联系数达最小下界，即：$L_{0j}^m=\eta/(1+\eta)$，可见关联系数取值越小，分辨率越高，更能体现人们对最大差值的重视程度，η 的取值范围为 $0.1\leqslant\eta\leqslant0.5$ 为宜。

得出关联系数后，可求出产量序列 X_0 与比较序列间的关联程度—关联度。关联度是表征序列间关联程度大小的一种关系，用他们的时间平均计算，即：

$$r_{0j}=1/n\cdot[\Sigma L_{0j}(t_k)] \quad (14)$$

通过灰色关联分析，找出影响高寒草甸产草量的主要、次要及其限制因子的气象因子。

在进行高寒草甸产草量的评估模式时，考虑到比较序列的正交性。先对气象因子序列利用主成分分析进行正交化处理，再建立多元回归评估模式，同时也简单地利用当年前期气象因子，建立直接回归方程，为及时种植冬春补饲青干草提供依据。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸生物量积累的基本规律

生物量积累过程的季节测定值表明，当日平均气温稳定≥0℃开始时，季节冻土自上而下开始消融(底层也有融化现象，但较微弱)，受季风影响，海北站地区降水也逐渐增多，牧草便进入萌动发芽。直至

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

日平均气温稳定≤0℃开始,牧草完全枯黄,完成整个生长发育阶段。生物量在牧草萌动发芽初期最低,以后随着雨季的来临和气温升高,生物量逐渐积累,到 9 月上旬达最高。9 月中旬以后随着环境条件的变坏,生物量缓慢下降,一年内呈现单峰式的曲线变化。由于观测时间、观测频数等在年际间不一致,为了说明问题,文中采用 1981、1984 和 1985 年生物量测定资料及同步气象观测数据。其中生物量为 5 月 15 日到 9 月 30 日每半月一次的测定平均值,活动积温(ΣT)为对应年份日平均气温稳定≥0℃开始时累计值的平均积温(见表 1)。

表 1　海北高寒草甸地上生物量及对应积温

Table 1　The above-ground biomass and corresponding accumulated temperature in alpine meadow in Haibei

日期(日/月)	15/5	30/5	15/6	30/6	15/7	30/7	15/8	30/8	15/9	30/9
GW(g/m²)	26.8	47.9	74.5	132.4	186.7	248.1	296.7	311.4	314.7	290.3
ΣT(℃)	85.0	155.4	253.9	385.9	576.1	672.1	829.6	944.1	1029.1	1067.6

2.1.1　在建立标准曲线回归方程时,生物量最终达到的最高值(GW_0),选择历年气候年景尚好,产草量最高的年份,用下列算式计算。

$$GW_0=[2GW_1\cdot GW_2\cdot GW_3-GW_2^2(GW_1+GW_3)]/[GW_1\cdot GW_3-GW_2^2] \quad (15)$$

式中 GW_1、GW_2、GW_3 分别为任意 3 个等距自变量(取测定时间长度)所对应的生物量。经普查,以 1983 年为准,并得出 $GW_0=438.5\ g/m^2$。同样也采用类似办法计算得出年度最大积温(ΣT_0)为 1154.2℃。

通过对生物量与积温之间季节动态关系的分析,其标准曲线方程:

$$W=1/[1+\exp(2.6072-4.4410k)] \quad (16)$$

生物量积累过程的动态模拟方程为

$$\Delta GW=438.5061/[1+\exp(2.6072-0.0038\Sigma T)] \quad (17)$$

方程的回归相关系数为 0.9764,达极显著检验水平($n=9$,$P<0.01$)。其模拟状况与实测值的比较见图 1。

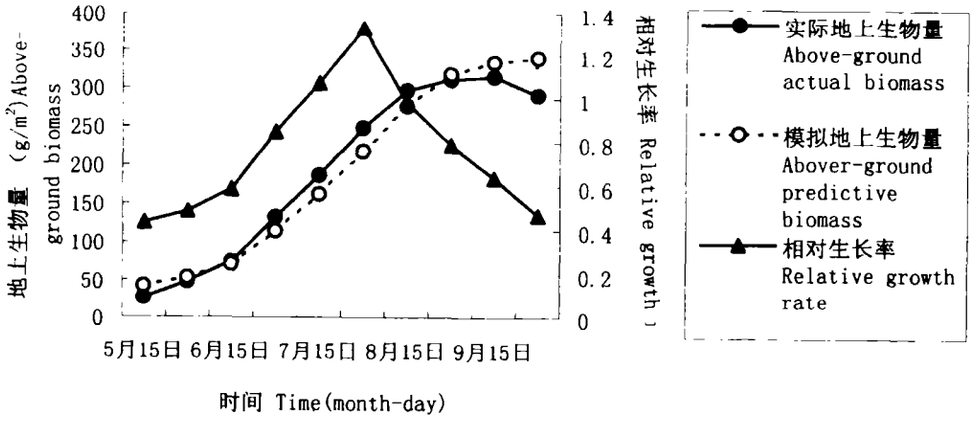

图 1　海北高寒草甸地上生物量实际值与模拟值的比较

Fig. 1　The comparison of plant biomass for reality value and simulated value

计算有关参数 CGR_0、k_0、k_1、k_2 和 CGR 分别为 1.1103、0.5871、0.2905、0.8836 和 0.9734。由 k_0、k_1、k_2 及积温关系推算,约在 8 月 1 日前后,积温达 678℃,其相对生长率 CGR_0 达极大值约在 6 月 24 日到 9 月 13 日间,积温在 335 到 1020℃期间,牧草相对生长率最大,在这 80 多天时间,生物量积累最为迅速,积累的干物质占整个生物量的 2/3,而时间只占全生长期的 1/2,表明该期是产草量形成的关键期。上述特征表明,高寒草甸生物量积累过程表现为缓慢积累-快速增加-相对稳定-折损减少等

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4个阶段。

2.1.2 自4月下旬日均气温稳定≥0℃开始，到6月中下旬日均气温稳定≥5℃初期，气温低，冷空气活动频敏，降水仍相对较少，牧草萌发，生物量积累缓慢。6月下旬到8月中旬，日均气温稳定≥5℃，太阳辐射强烈，气温高，降水丰富，有利的水热条件，促使牧草旺盛生长，干物质积累最快。8月下旬到9月上中旬，植物成熟，气温开始降低，降水减少，地表有时出现短时冻结现象，部分牧草出现枯黄，生物量不再积累，并相对稳定一段时间。进入9月中下旬，日均气温稳定<5℃，大部分牧草停止生长。降水急剧减少，日最低气温可降至－7℃以下，随着严冬的来到，牧草生物量在恶劣环境的影响下逐渐减少。

2.2 气象因子影响高寒草甸牧草产量主次的关联程度分析

2.2.1 气象因子选择

确定对产草量影响较深刻的主要气象因子，同时考虑冬春以及上年度气象因素延伸滞后影响的可能，对气象因子经普查筛选出以下几个物理意义较明显的主要生态气象因子：

X_1：5～8月平均气温；X_2：5～8月降水量；X_3：5～8月降水量与平均气温的比值；X_4：5～8月日照时间；X_5：1月平均气温；X_6：上年度9～11月降水量。

取上述气象因子的生物意义是：5～8月正是牧草返青至成熟的全生育期。在高寒草甸地区，牧草于4月下旬进入萌发阶段，此时日均气温刚刚稳定通过≥0℃。自5月上旬牧草返青，到8月下旬，进入成熟阶段，部分牧草已形成草籽，少部分已开始停止生长。9月中旬牧草生物量达最高值，9月中旬开始，正值日均气温稳定地进入<5℃，日最低气温降至－7℃以上，大部分牧草已停止生长，部分枯黄。因此，X_1、X_2、X_3、X_4取为5～8月的平均气温、降水量、降水量与平均气温的比值，及其日照时间。其中降水量与平均气温比值表示水热因素的综合水热指数。1月平均气温表征冬季冷暖的程度，反映土壤冻结时，土壤冰晶水以及其它土壤水分留存于土壤中的含量，即与土壤墒情有很大的直接或间接关系。另外，考虑到当年牧草的生长与前期降水相关，本文综合考虑以上年度9～11月的降水量为主。而寒冷的12月至翌年2月，降水量极为稀少，土壤表面存在干土层，且降水后迅速蒸发，因此，未予选择。

2.2.2 气象因子影响高寒草甸产草量的关联度

对已均值化处理的气象因子与产草量资料(略)进行相对差计算得出：$\Delta min = 0.0004$，$\Delta max = 0.8630$。本文取分辨系数为0.5，先计算各气象因子与牧草产量在各年的关联系数(表略)。最后得出牧草产量与各气象因子之间的关联度见表2，关联度用r_{0j}表示，j为气象因子序列。

表2 高寒草甸产草量与气象因子的关联度

Table 2 The association Degree between every meteorological factor and herbage yield in alpine meadow

	r_{01}	r_{02}	r_{03}	r_{04}	r_{05}	r_{06}
关联度 Association degree	0.7913	0.7434	0.7540	0.7711	0.8348	0.6384

注：Notes：r_{0j} 关联度 Association degree

2.3 高寒草甸牧草产量综合评估及预报模式的建立

主成分分析既能使较多的因子降低维数，又不损失或减少因子信息，不是简单地把多个相关因子予以合并，而是利用因子间正交性特点，排除因子间平行关系，将较多因子的信息集中反映在较少因子的数目上。通过主成分分析后的气象因子物理意义一般较为明确，利用较少的因子再进行多元回归分析，效果会显得更好。通过对高寒草甸地区主要气象因子的主成分分析，及建立草甸产草量的估测模式：

$$GW = 349.82 - 22.5756z_1 + 7.6321z_2 + 19.9415z_3 - 16.1837$$

其中：

$$z_1 = 0.5234X'_1 + 0.1881X'_2 + 0.0365X'_3 + 0.6619X'_4 - 0.3571X'_5 + 0.3516X'_6$$

$$z_2 = 0.0403X'_1 + 0.6729X'_2 + 0.6693X'_3 - 0.0307X'_4 + 0.2654X'_5 - 0.1621X'_6$$

$$z_3 = 0.5330X'_1 - 0.0547X'_2 - 0.2293X'_3 - 0.1048X'_4 + 0.7697X'_5 + 0.2385X'_6$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$z_4=0.5482X'_1-0.0093X'_2+0.1600X'_3+0.1155X'_4+0.1981X'_5+0.7882X'_6$$

其中 X'_1、X'_2、X'_3、X'_4、X'_5、X'_6 分别为象气因子 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6 的标准化变量。

所建立的牧草产量多元回归估测模式复相关系数为 0.7398,经显著性检验,达显著性检验水平($P<0.05$)。进行模拟处理后,其拟合率较高,说明利用上述气象因子能综合反映高寒草甸植物群落的产量情况,以此评估年牧草产量具有一定的准确性。

作为预报,笔者以 1980—1994 年的资料,采用前期气象因子,可建立气象因子影响高寒草甸牧草产量的简单回归模式:

$$GW=21.9874-20.0341T_1+0.2204R_{9\sim11}$$

式中:GW 为高寒草甸产草量预报值,T_1 为当年 1 月平均气温,$R_{9\sim11}$ 为上年度 9～11 月降水量合计。预报回归方程具有极显著的相关性水平($R=0.7410$,$P<0.01$)。对 1980—1994 年牧草产量模拟与实际观测情况的比较结果见图 2。对 1995 年牧草产量进行试报,实际产量为 415.8 g/m²,而预报产量为 387.9 g/m²,其相对误差仅为 6.71%,说明预报准确率较高,表明用前期气象因子 T_1 和 $R_{9\sim11}$ 可作为高寒草甸牧草产量的预报因子,从而在年初,可作为当年牧草产量的高低,以及时指导生产。

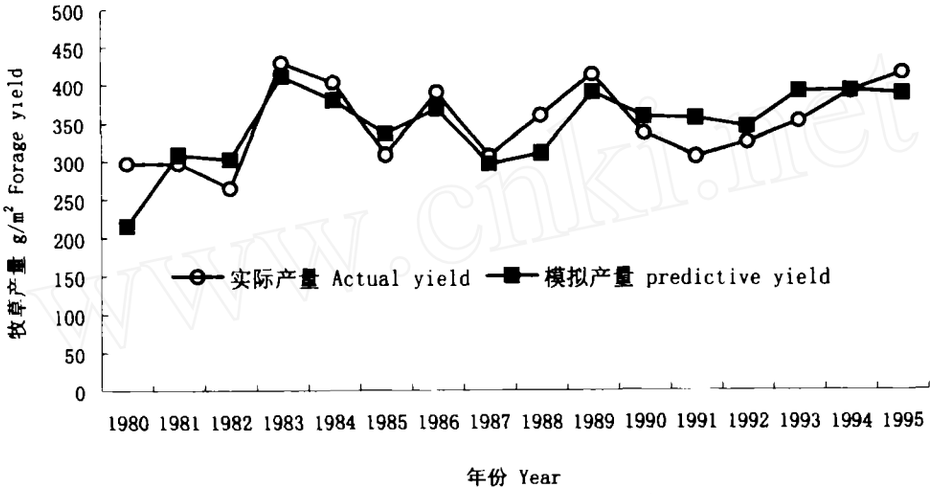

图 2　牧草产量实际值与模拟值的比较

Fig. 2　Comparison of annual dynamics of reality value and predict value for herbage yield

3　讨论与结论

3.1　通过计算有关参数表明,高寒草甸牧草地上生物量积累过程表现出:缓慢积累—快速增加—相对稳定—折损减少等 4 个阶段。从 4 月下旬日均气温稳定≥0℃开始,到 6 月中下旬日均气温稳定≥5℃开始期间,气温低,冷空气活动频繁,降水仍然较少,牧草萌动发芽,生物量积累缓慢;6 月下旬到 8 月中旬,日均气温稳定≥5℃,太阳辐射强烈,气温高,降水最为丰富,有利的水热条件,促使植物生长旺盛,干物质积累最快;8 月下旬到 9 月上中旬,植物成熟,气温开始降低,降水减少,地表有时出现短时冻结现象,部分牧草出现枯黄,生物量不再积累,并相对稳定一段时间;进入 9 月中下旬,从日均气温稳定<5℃开始,大部分牧草停止生长,降水急剧减少,日最低气温可降至 −7℃以下,随着严冬的来到,牧草地上生物量在恶劣环境的影响下逐渐减少。由 k_0、k_1、k_2 及积温关系推算可知,约在 8 月 1 日前后相对生长率达极大,约在 6 月 24 日到 9 月 13 日,在这 80 多天的时间,生物量积累最为迅速,所积累的干物质要占整个生物量的 2/3,而时间只占全生长期的 1/2,说明该期是牧草产量形成的关键期。

3.2　长期以来,对于影响高寒草甸牧草生长及年产量形成的气象因子,其主次成分难以定论,也困扰着人们对此深入的认识。通过关联分析表明,关联度:$r_{05}>r_{01}>r_{04}>r_{03}>r_{02}>r_{06}$,结果证明高寒草甸地区牧草生长发育、年产草量的提高与气温关系密切。这

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

与内蒙古干旱草原有明显不同，内蒙古干旱草原热量充足，降水则成为限制因子。在高寒草甸地区，降水丰富，一般每年在400～800 mm之间，平均在500 mm左右。牧草返青开始至成熟的5～9月间，降水量占年总量的75%以上，基本能满足植物耗水量(约362 mm)的需求[6]。虽然在牧草萌动发芽到返青前后的降水量较少，正置我国北方普遍干旱时期，但该时期冻土仍然维持于20～180 mm深层，地表0～20 cm地温上升至0～3℃以上，地温的梯度较大，冻土层冰晶水以及其他土壤水分受热力条件影响不断地迁移补充给地表面，而且草皮表层因根系发达，盘根错节，有较强的持水和滞水能力，1991、1992、1993年观测表明，0～60 cm土层，土壤湿度达干土重的38%以上[7]，0～20 cm可达50%，表明土壤水分含量较高，年内保持较长时间的水分湿润状况，一般不出现干旱现象，致使牧草在整个生长发育期水分是适宜的。同时高寒草甸植物属湿冷性植物，在适宜的水分条件下可忍耐短时－8℃的低气温环境。但受高海拔条件的制约，在牧草生长季节气温较低，最热月平均气温＜10℃，5～8月平均仅为7.1℃，日均气温≥0℃的积温只有1100℃，因而热量显得不足，成为产草量提高的主要限制因子。从牧草生长季(5～8月)来看，影响产草量形成的主次气象因子，依次为平均气温，日照时间，水热综合协调的配合，最后为降水量的多少，可见降水量并非牧草产量形成的限制因子，年际间基本满足牧草生长发育的水分需求。

3.3 最冷的1月平均气温与高寒草甸牧草产量关联度最大，为0.8348，同时方差分析结果表明，1月平均气温与牧草产量呈显著负相关($P<0.01$)，$r=-0.7123$，$n=16$，表现出1月平均气温越低，则当年牧草产量越高，这是因为1月气温低，土壤冻结厚而坚实，土壤内部有大量的水分贮存。在牧草旺盛生长的6～8月，水分条件由于降水的供给而充足，但早春牧草发芽阶段，我国北方正值“干旱”，较高的土壤水分可弥补短时“干旱”胁迫的危害，使牧草初期生长阶段有水分的补给[8]。虽然寒冬可冻死冻伤植物的根茎，但与土壤水分贮存量的作用相比则显得次要。

3.4 通过高寒草甸地区主要气象因子主成分分析，可建立草甸产草量的综合评估模式。同时还可以直接采用前期气象因子建立简单的影响高寒草甸牧草产量的回归模式。该模式的建立，不仅揭示了牧草产量在气象因子变化过程中的内部联系规律，同时也为该地区草场经营管理，合理安排冬春补饲青干草的种植，抗灾保畜，持续发展畜牧业生产提供可靠的依据。也表明合理利用土壤水分资源，充分发挥秋雨春用的作用，对提高产草量是有利的。因而可以认为，在高寒草甸地区若条件许可，冷季进行适量灌溉，则可提高翌年牧草产量。

参考文献

[1] 周兴民，李建华. 海北高寒草甸生态系统定位站的主要植被类型及地理分布规律[A]. 见：高寒草甸生态系统[C]. 兰州：甘肃人民出版社，1982. 9～10

[2] 乐炎舟，左克成，张金霞等. 海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及基本特点[A]. 见：高寒草甸生态系统[C]. 兰州：甘肃人民出版社，1982. 19～33

[3] 杨福囤，王启基，史顺海. 短嵩草草甸生物量季节动态与年间动态[A]. 见：高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集[C]. 北京：科学出版社，1985. 61～72

[4] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京：气象出版社，1978. 95～126

[5] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉：华中工学院出版社. 1985

[6] 李英年，曹广民，鲍新奎. 高寒草甸植被生育期耗水量和耗水规律的分析[J]. 中国农业气象，1996，17(1)：40～43

[7] 鲍新奎，李英年. 寒毡土的水分动态变化[A]. 见：中国土壤系统分类进展[C]. 北京：科学出版社，1993. 344～352

[8] 李英年，张景华. 祁连山海北冬春气温变化对草地生产力的影响[J]. 高寒气象，1998，17(4)：443～446

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net