

高寒草甸地区牧草生长量模拟模式研究^{*}

姚德良 沈卫明 谢正桐

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

周兴民 王启基 沈振西

(中国科学院西北高原生物研究所,青海西宁 810001)

摘要: 本文讨论了土壤含水量和蒸散量对牧草生长量的影响过程,提出牧草干物质增长模式,并根据青海海北高寒草甸地区的气象条件,对牧草生长量模式进行数值模拟,同时,与实测值进行比较,模拟结果与实测值趋向一致,可为牧草产草量预报提供一定实用价值和科学依据。

关键词: 高寒草甸; 产量模式; 数值模拟

1 前言

研究高寒草甸地区牧草生长量模拟模式,能定量表示牧草气象研究中的各种关系,能汇集不同资料得出综合性概念,也能为预测牧草生产量提供科学依据。研究牧草干物质增长的动态规律及其与气象条件的关系,是建立牧草生长量模拟模式,进行产草量预报的基础。不仅在理论上具有重大意义,而且也合理利用高寒草甸资源,寻求经济效益、生态效益和社会效益的最佳统一提供有力的依据。

七十年代以来,人们对作物光合作用、物质运输和能量转化的物理和生理过程的深入研究,以及高速电子计算机的应用,在农业气象方面研究出许多仿真生物数学模式,将研究的对象—植物、土壤和大气这个复杂系统中的各种问题模型化,考虑近地大气层和土壤气候的物理规律,以及环境条件对植物群体生长、发育、生产率影响的综合结果,将产量形成的各个过程模式化,从简单地建立某一过程的数学模式发展到根据土壤、植物、大气系统内各个物理的、生理的运动机理,建立植物生长发育动力学模式。近十多年来,国外关于产量模式研究进展尤为迅速。目前,美国、加拿大和日本等国均已开始进行业务产量预报。许多研究者在农业气象模式的研究方法、建模与应用等方面做了大量工作。其中不乏在对牧草气象研究中引进农业气象模式的研究思想,建立用于目的各异的牧草气象模式。以色列的 Wallach(1976)在用 Logistic 方程引入天然牧草干物质积累的模式研究中,重点对相对生长率进行讨论。澳大利亚的 Byrne(1980)提出牧草干物质增长的模式。加拿大的 Baier(1980)根据以前的小麦—天气分析模式作适当的修改后用于预测猫尾草第一次和第二次收割的干物质产量,建立了猫尾草—天气分析模式。国内这项工作虽然开始较晚,但近年来产量预报的研究工作也取得了一定的成果。

本文讨论了土壤含水量和蒸散量对牧草产量的影响过程,提出牧草干物质增长的模拟模式,并根据海北高寒草甸地区的生态环境,对模式进行数值模拟,同时,与实测值进行比较,模

^{*} 中科院海北高寒草甸站基金资助项目

拟值符合实测值,本模式对高寒草甸地区牧草生长量预报有一定的价值。

2 材料与方法

2.1 自然概况

高寒草甸定位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,距西宁市160公里,地处北纬 $37^{\circ} 37'$,东经 $101^{\circ} 19'$,北以祁连山东段支脉冷龙岭为界,东以宁张公路为界,海拔3200米,属目前世界上海拔最高的草甸类型定位站。

草甸站的气候具有明显的高原大陆性气候特点,无四季之分,仅有冷暖二季之别,冷季漫长而寒冷,暖季短暂而气温稍高。年均气温为 -2°C ,气温日差较大(14.4°C),而年差较小(24.2°C)。年均降水量531毫米,季节分配不均匀,89.5%的降水集中于暖季,因而暖季暖而湿润,对牧草生长有利,冷季寒冷而干燥,不利牧草生长。

草甸站地处高寒,空气稀薄,能见度大,晴天多,全年日照2672.6小时,生长季节平均日照为7.2~8.5小时,日照率达60%。太阳辐射强烈,年总辐射量140~160千卡/厘米²。全年多风,年均风速为1.7米/秒,4~5月多大风,常将播后的农作物和牧草种籽从土中刮走,风蚀严重。

土壤主要是高山灌丛草甸土和高山草甸土,以后者分布最广。植被类型主要有高山灌丛草甸,其中以矮嵩草草甸分布最广。本区气候冷湿,牧草生长茂盛,地势较平,是较理想的水草丰美的天然放牧地,以藏系绵羊和牦牛为主,并产门源马。

2.2 数学模型

根据Byrne提出的着重刻划牧草的生长率与气象观察之间有着密切联系的观点,建立高寒草甸牧草干物质增长的产量模式:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{CaE_p W}{1 + aW} - bw \quad (1)$$

式中: $W(\text{kg}/\text{ha})$ 代表牧草干重, a :土壤有效含水量, $\alpha = \theta - \theta_p$, θ :土壤含水量, θ_p :蒸发等于零时的土壤含水量, E_p :蒸渗器的蒸散量,包括牧草的蒸腾量和土壤的蒸发量。 a 、 b 、 c 为牧草的特征参数,该参数因牧草品种不同而变化,其中 $a(\text{ha}/\text{kg})$ 反映牧草发育过程中从指数规律变为常数时的生长速率, $aw \gg 1$; $b(1/\text{day})$ 表示维持牧草呼吸作用的系数; $C(1/\text{mm})$ 表示总光合作用与蒸散量之间的关系。 a 、 b 、 c 均为正数。对上式稍作变换,得出相对生长率的表达式:

$$\frac{1}{W} \frac{dw}{dt} = \frac{CaE_p}{1 + aw} - b \quad (2)$$

其中 $\frac{1}{W} \frac{dw}{dt}$:相对生长率,在牧草生长阶段中, $\frac{1}{W} \frac{dw}{dt}$ 和 W 均为正值。因此,若 E_p 为常数,则 $\frac{1}{W} \frac{dw}{dt}$ 随着 W 的变化图形为一双曲线的下凹部分,即指 $W=0$ 时的最大值 $(CaE_p - b)$ 到 $W = (CaE_p - b)/ab$ 时的0值。

采用最大可能性方法(Kendall and Stuart 1973)确定常数 a 、 b 、 c ,并得到较为满意的结果。方法如下:先在方程(1)两边同乘 $(1 + 1/aw)$,并令 $1/a = A$, $c/a = C$, $b = B$,引进新参数 $D = b/a$ 来引入表达式:

$$\Sigma [dw/dt + (A/W)(dw/dt) + Bw - CaE_p + D]^2 \quad (3)$$

通过最大可能性方法,得出 A 、 B 、 C 、 D 的方程组:

$$\Sigma \frac{1}{W} \left(\frac{dw}{dt} \right)^2 + A \Sigma \left(\frac{1}{W} \frac{dw}{dt} \right)^2 + B \Sigma \frac{dw}{dt} - C \Sigma \frac{\alpha E_p dw}{W} + D \Sigma \frac{1}{W} \frac{dw}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$\Sigma W \frac{dw}{dt} + A \Sigma \frac{dw}{dt} + B \Sigma W^2 - C \Sigma W \alpha E_p + D \Sigma W = 0 \quad (5)$$

$$\Sigma \alpha E_p \frac{dw}{dt} + A \Sigma \frac{\alpha E_p dw}{W} + B \Sigma W \alpha E_p - C \Sigma (\alpha E_p)^2 + D \Sigma \alpha E_p = 0 \quad (6)$$

$$\Sigma \frac{dw}{dt} + A \Sigma \frac{1}{W} \frac{dw}{dt} + B \Sigma W + C \Sigma \alpha E_p + nD = 0 \quad (7)$$

式中 n 为观察次数, Σ 为对 n 次观察求和。

对方程(4)~(7)中的 $\frac{dw}{dt}$ 采用中心差分进行离散:

$$\left(\frac{dw}{dt} \right)_i = \frac{W_{i+1} - W_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (8)$$

$$\Sigma \frac{dw}{dt} = \Sigma_{i=1}^n \left(\frac{dw}{dt} \right)_i \quad (9)$$

最后求出 A 、 B 、 C 、和 D , 并由 $1/a = A$, $b = B$, $c/a = C$, $D = b/a$, 求出 a 、 b 、 c , 再将 a 、 b 、 c 代入方程(1), 这个方程就是所要求的牧草生长量模拟模式。

2.3 野外观测

为了检验模型和应用模型, 1995年8月对海北高寒草甸生态站进行野外考察和现场测试, 并收集1981和1989年矮嵩草甸牧草生长期间的土壤含水量, 蒸散量和牧草干物重, 以及其它的气象数据, 详见表1~4。

3 模拟结果与分析

3.1 应用上述牧草生长量模拟模式, 使用1981和1989年矮嵩草草甸牧草生长期间的土壤含水量, 蒸散量和牧草干物质重等实测数据, 对1981和1989年海北高寒草甸站地区的牧草生长

表1 1981年各月实测气象数据

Table 1 Meteorological observation data in 1981

项目 Item	月 Month												全年 Total year
	1 Jan	2 Feb	3 Mar	4 Apr	5 May	6 Jun	7 Jul	8 Aug	9 Sept	10 Oct	11 Nov	12 Dec	
降水(毫米) Precipitation (mm)	3.7	0.0	3.0	6.6	11.6	83.0	108.7	164.7	107.8	7.1	2.8	1.0	500.0
日照(小时) Sunshine(hours)	181.2	150.6	231.8	161.7	241.5	192.3	185.6	177.0	119.4	188.4	176.3	216.5	2222.3
平均气温(℃) Average air	-13.2	-10.0	-5.5	1.5	4.8	8.8	11.5	10.3	4.1	-2.1	-8.9	-14.3	-1.1
平均最高气温(℃) Average maximum air temperature(℃)	-2.4	1.0	3.6	8.6	13.6	15.8	18.5	16.2	10.7	7.3	0.6	-2.8	7.6
平均最低气温(℃) Average minimum air temperature(℃)	-21.9	-19.0	-12.8	-3.5	-0.9	3.0	6.0	5.8	0.2	-7.9	-16.3	-23.2	-7.5
平均地面温度(℃) Average ground temperature(℃)	-12.8	-10.8	-3.8	3.1	11.3	13.7	16.9	14.8	7.5	1.6	-6.3	-13.1	1.8

表2 1989年各月实测气象数据
Table 2 Meteorological observation data in 1989

项目 Item	月 Month												全年 Total year
	1 Jan	2 Feb	3 Mar	4 Apr	5 May	6 Jun	7 Jul	8 Aug	9 Sept	10 Oct	11 Nov	12 Dec	
降水(毫米) Precipitation (mm)	7.2	27.8	21.4	50.9	46.9	115.2	213.4	148.7	930.7	87.8	24.1	14.0	850.4
日照(小时) Sunshine(hours)	226.8	198.7	210.4	175.8	209.3	116.4	140.7	171.1	186.4	159.5	194.5	199.6	2557.3
平均气温 Average air	-15.9	-11.6	-6.8	-0.8	4.7	7.7	10.5	9.1	6.4	-0.6	-10.8	-13.0	-1.8
平均最高气温 Average maximum air temperature(°C)	-3.3	-1.5	2.1	5.9	11.9	14.2	17.3	16.5	13.6	7.8	-0.4	-1.5	6.9
平均最低气温 Average minimum air temperature(°C)	-24.0	-21.2	-11.0	-7.7	-3.6	-0.2	2.9	1.4	-1.7	-8.5	-14.6	-21.5	-9.1
平均地面温度 Average ground temperature(°C)	-13.9	-7.7	-0.7	4.9	9.4	12.1	16.2	14.3	10.1	2.8	-6.2	-9.3	2.7

表3 不同深度土壤含水量和最大持水量

Table 3 Observation data of soil moisture(weight)and maximal soil moisture(%)

项目 Item	深度 Depth(cm)			
	0~10	10~20	20~30	0~30
1981年土壤含水量 Soil moisture in 1981(%)	37.45	35.11	31.65	34.73
1989年土壤含水量 Soil moisture in 1989(%)	44.50	40.88	36.72	40.70
最大土壤持水量 Maximal soil moisture(%)	50.18	37.12	35.31	40.87

表4 1981年地上生物量(g/m²)结果比较

Table 4 Comparison of observed and simulated data for biomass in 1981

项目 Item	日期 Date									
	5.7	5.17	6.4	6.17	7.6	7.17	8.4	8.15	9.4	9.14
测量生物量 Observed data(g/m ²)	22.8	34.0	52.5	87.2	160.4	211.2	274.4	285.2	296.8	248.0
模拟生物量 Simulated data(g/m ²)	21.5	31.7	54.4	85.9	162.4	191.0	223.6	233.2	231.8	210.4

量进行数值模拟。图1~4为模拟结果与测量值的比较图形,虚线代表测量值,实线代表相应的模拟结果。图1、2为1981和1989年牧草生长率的模拟结果与测量值的比较。图3、4为1981和1989年牧草生长量模拟结果与测量值的比较。从图示中可以看出模拟结果与实测值比较一致,能够较好地反映当地实际情况。

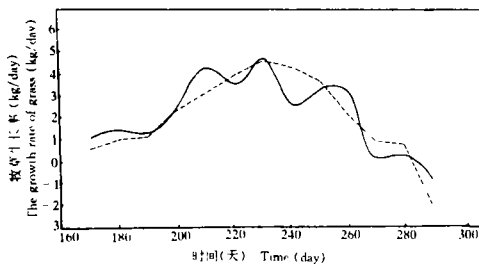


图 1 1981年牧草生长率

Fig. 1 The growth rate of grass in 1981

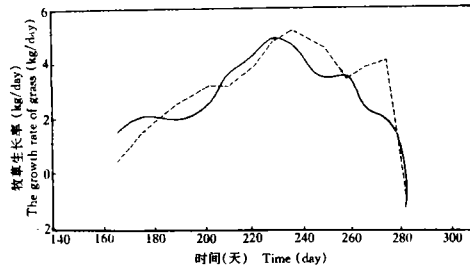


图 2 1989年牧草生长率

Fig. 2 The growth rate of grass in 1989

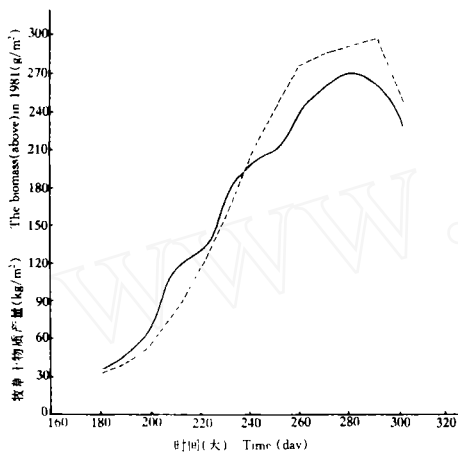


图 3 1981年牧草干物质产量

Fig. 3 The biomass yield of grass in 1981

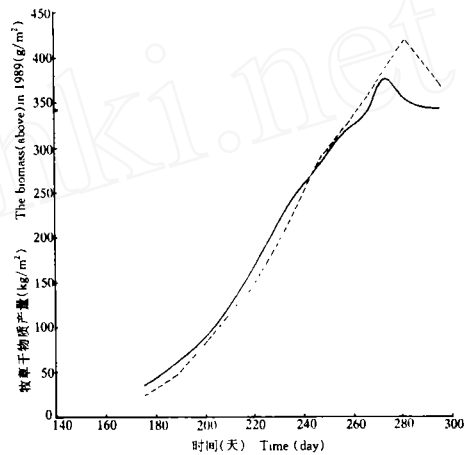


图 4 1989年牧草干物质产量

Fig. 4 The biomass yield of grass in 1989

3.2 牧草干物质增长动态与气象条件有关。牧草在返青后发育很弱，地上部的积累较少。从抽穗到初花期是牧草干物质显著增加的阶段，开花中期至末期，积累的干物质质量最大，而生长末期由于叶子和种子的大量脱落，致使地上部干物质重量下降。这是高寒区天然草甸产草量动态的一般规律，但不同地区，不同草甸类型则有所差别。海北高寒草甸地区，水热条件对牧草的生长影响很大，5月上旬当气温通过5.0℃时，牧草开始返青，随着气温的逐渐升高而迅速生长，9月底当气温稳定下降到5.0℃以下时，牧草则停止生长。牧草年生长期130~140天，大于5.0℃积温为1176.0℃。当暖季气温升高和降水较多时，牧草生长旺盛。从图3、4中牧草的干物质增长情况可以看出，自7月上旬开始牧草进入增长较快阶段，8月下旬至9月上旬增长达到最高值，9月下旬后开始下降。当地在5月至8月降水较多，气温较高，高寒地区天然草甸牧草干物质增长与下降的变动情况和趋势与上述水热条件的变化量密切相关。

3.3 从图3、4中看出，1989年牧草的产草量高于1981年。从表1~3的气象数据可以看出，牧草干物质产量与年降水量关系密切，基本上呈正相关。但是年降水的数量只能大致决定产草量的趋势，难以定量的决定其变化，因为还要受月际之间降水量分配情况的影响。高寒草甸气候具有典型大陆性，冷季气候寒冷干燥，降水量稀少，但因地表层结冻而蒸发量大为减少，故

土壤底墒较好。但是4月底正值冷暖季交替阶段,随着地表土层的解冻,强烈的太阳辐射,较低的空气相对湿度和强劲的风吹使土壤蒸发量剧增,如无降水补充,将会影响植物返青和营养生长。若暖季前降水低于历年平均降水分配,特别是5、6月降水低于中等年景降水分配时,即会呈现明显的春旱现象,势必抑制牧草的前期生长,减少全年的产草量。因此,5、6月的降水量对产量的影响很大。由于1989年降水量及5、6月的降水量都明显多于1981年,因此1989年牧草产量高于1981年。年间气温变化对牧草产量的影响并不象降水那样显著,因为高寒草甸终年气温低,这决定了高寒草甸各种植物均具有耐低温的特性,年均气温波动幅度不大,标准差仅0.7℃。高原空气干燥稀薄,生长季节强烈的太阳辐射使得冠层气温有较大的提高,一方面补偿了光合温度的不足,另一方面又缩小了气温波动引起的冠层气温相对波动的幅度。1989年的气温比1981年略低,但降水量多,所以,1989年牧草产量高于1981年。

3.4 在牧草干物质积累模式中,综合考虑土壤含水量、蒸散量以及总光合作用与蒸散量之间的关系对牧草干物质积累的影响。蒸散是水分平衡、热量平衡的组成部分,它发生于土壤、植物、大气系统内,需要水分供给和能量来源。同时受土壤含水量和潜在蒸散量的控制。土壤含水量又与降水、蒸散等有关。该模式实际涉及并考虑在牧草干物质积累中与水热条件之间的关系。因此该模式可对牧草产量进行预报,具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- 1 周立、王启基,1991,高寒草甸生态系统初级生产者亚系统模拟模型及其应用程序,高寒草甸生态系统研究的若干数学模拟模型,北京,科学出版社,45~111
- 2 Baier, w., 1980, Analysis of environmental factors affecting timely yields. *Agric. Meteo.*, 22:319~339
- 3 Brown, R. G., 1963, Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series. Prentice, New York, N. Y. 468pp
- 4 Byrne, G. F., 1980, Fitting a growth curve equation to field data. *Agric. Meteo.*, 22:1~9
- 5 Byrne, G. F., 1973, An approach to growth curve analysis. *Agric. Meteo.*, 11:161~168
- 6 Kendall, M. G. and Stuart, A., 1973. *Advanced theory of statistics*, 2., 3rd ed. Griffin, U. K. 374pp
- 7 Kimball, B. A., 1974, Smoothing data with fourier transformations. *Agron. J.*, 66:259~262
- 8 Wallach, U., 1976. Environment-dependent logistic equations applied to natural pasture growth curves. *Agric. Meteo.*, 16:389~404

Study on Growth Yield Model of Forage Grass in High Cold Meadow

Yao Deliang Shen Weiming Wa Junbiao

(Institute of Mechanics, C. A. S., Beijing 100080)

Zhou Xingmin Wang Qizi Shen Zhenxi

(Northwest Platean Institute of Biology, C. A. S., Xining 810001)

Abstract: Deal with the processes which soil moisture and evapotranspiration affect the forage grass production, in order to a numerical model is developed for simulating the dry weight of the pasture increasing. Numerical simulation is carried out according to meteorological elements of high cold meadow in the northern part of Qinghai province, and the numerical results turn out in good agreement with the experimental data. The model is of practice value for predicting forage grass production in high cold meadow region.

Key Words: High cold meadow; Yield model; Numerical simulation