

I. 生态系统的研究

非生命亚系统

矮嵩草草甸地上生物量与气候因子的 关系及其预报模式的建立*

李英年 王启基 周兴民

(中国科学院西北高原生物研究所)

摘 要

本文通过对中国科学院海北定位站 10 多年的气象观测资料与矮嵩草草甸地上生物量的实测数据进行综合分析,探讨矮嵩草草甸地上生物量与气候之间的相互关系,并根据矮嵩草草甸地上生物量的季节动态和净生产量建立动态模拟和预报模式。结果表明:高寒矮嵩草草甸地上生物量季节变化、年际动态及产量的高低均受气候因素的制约和影响。采用前期气象因子建立的年牧草产量预报模式,实测值与预报值比较,相对误差率很低,预报效果较好。

关键词: 矮嵩草草甸; 地上生物量; 气候因子; 预报模式

高寒草甸是青藏高原及其周围山地特有的植被类型,是重要的天然放牧草场。高寒草甸草场生物量季节动态及地上净生产量的高低在很大程度上受气候诸多因素的制约。分析高寒草甸地上生物量与气象因子之间的相互关系,掌握其变化规律,对深入研究高寒草甸生态系统的结构、功能、能量分配、物质循环规律以及天然草场的合理利用和科学管理均具有重要的意义。

有关草地地上生物量与气象因子相互关系的报道不少(王义风, 1985; 毛学诗等, 1983; 杨持等, 1983),但涉及高寒草甸的报道尚不多见。本文通过高寒草甸地上生物量与气象因子之间的动态分析,建立地上生物量的动态模拟,并利用前期气象因子建立了

* “八五”国家攀登计划资助项目。

高寒草甸地上净生产量的预报模式。

研究方法和内容

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站地区进行。该站地处东经 $101^{\circ}12'$ — $101^{\circ}23'$ 、北纬 $37^{\circ}29'$ — $37^{\circ}45'$ ，祁连山北支冷龙岭东段南麓，海拔 3200 米。

以该地区高寒草甸的矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸为研究对象。草场具有植物群落结构简单、植株低矮、产草量低等为基本特点 (王启基等, 1989; 周兴民等, 1987)，以寒冷中生多年生草本植物矮嵩草为建群种，主要伴生种有异针茅 (*Stipa aliena*)、羊茅 (*Festuca ovina.*)、早熟禾 (*Poa spp.*)、珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*) 等。

气象资料取自该站 1980—1993 年的气象观测资料。地上生物量从 1980 年开始，每年 5 月牧草返青后的月中 (16 日) 及月初 (1 日) 进行测定。植物地上净生产量为每半月测定 1 次的地上生物量的最高值，测定方法见杨福国等 (1989)。讨论植物生物量季节动态变化时，仅采用 1981 年的地上生物量测定值及同期气象数据。

生物量季节动态模型采用多元回归法建立一元三次、二元二次曲线模拟方程 (林纪曾, 1981)。牧草地上净生产量年际动态模型的建立采用多年产量平均值作为相对稳定的产量值 (C)，分离出气候波动影响下的波动产量 (W_w)，进行波动产量与气象因子的多元回归分析 (吴元中, 1982)。同时采用二次型二级定性判别，对年牧草产量给予分型判别 (施能, 1992)。最后利用单相关较好的前期气象因子建立多元回归预报模式。

结果与分析

1. 实验区的气候特征

该地区属典型的高原大陆性气候，东南季风影响微弱 (叶笃正等, 1977)，地形影响明显，一年无四季之分，仅有冷暖二季之别。从 1980 年到 1993 年 14 年的气象观测资料表明，气温年较差 24.9°C ，平均日较差 15.7°C ；日均气温稳定通过的 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 出现时间分别与植物开始萌动发芽、返青、生长期基本一致；年均气温 -1.7°C ，最热月平均气温 9.8°C ，最冷月平均气温 -15.1°C ；年极端最高气温 23.7°C (1986—07—26)，年极端最低气温 -36.0°C (1991—12—26)；年内日最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的天数高达 280 天以上，在最热的 7 月份仍出现日最低气温 $< -2^{\circ}\text{C}$ 的天气。年均降水量 589.0 毫米，各年间降水量的月际分配极不均匀，有单峰也有双峰式的分布，但降水量主要集中于暖季的 5—9 月，占全年降水量的 79%；冷季 10 月至翌年 4 月长达 7 个月时间，降水量仅占年降水量的 21%，特别是冷季的 11 月到次年的 2 月，降水量极为稀少，不到年降水量的 5%。其气象要素的季节动态和年际动态列表 1 和表 2。

2. 地上生物量季节动态

生物生长具有一定的规律。一般情况下，海北定位站日均气温稳定 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 与地表面的日均温度稳定 $\leq 3^{\circ}\text{C}$ 相一致，此时地下冻土维持，而表层土在春秋二季可出现日消夜

表 1 气候要素季节动态

Table 1 Seasonal dynamics of climate factor

日期(日/月) Date(day/month)	15/5	30/5	15/6	30/6	15/7	30/7	15/8	30/8	15/9	30/9	15/10	30/10
Σn	24	29	55	70	85	100	116	131	147	162	177	192
ΣT	23.8	38.4	64.3	91.0	123.0	159.9	195.9	221.8	238.9	247.1	246.4	235.3
ΣR	6.6	18.2	33.6	101.2	180.2	219.9	265.5	384.6	468.6	492.4	499.5	499.5

Σn : 日均气温 $\geq 0^\circ\text{C}$ 日数累积(天)

Daily mean air temperature $\geq 0^\circ\text{C}$ accumulation days

ΣT : 候均气温 $\geq 0^\circ\text{C}$ 累积($^\circ\text{C}$)

Accumulate of pentad mean air tem. $\geq 0^\circ\text{C}$

ΣR : 20/4—30/10 降水累积(mm)

Accumulate of precipitation from Apr. 20 to Oct. 30

冻。由于受低气温的影响,此时牧草处于休眠状态。当日均气温稳定在 $\geq 0^\circ\text{C}$ 开始时,冻土消融,降水量也逐渐增多,气温增高,植物才开始萌动发芽,直至完成整个生长发育阶段。统计海北站日均气温稳定在 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的日数(Σn)与植物生物量季节动态(JW)之间的关系为:

$$JW = 98.29242 - 5.33975 \Sigma n + 0.10434 \Sigma n^2 - 0.00040 \Sigma n^3$$

$$(r = 0.9921 \quad F = 168.2402 \quad n = 12 \quad P < 0.001)$$

对方程求天数一阶、二阶导数:

$$\frac{d(JW)}{d(\Sigma n)} = -5.33975 + 0.20868 \Sigma n - 0.00120 \Sigma n^2$$

$$\frac{d^2(JW)}{d(\Sigma n)^2} = 0.20868 - 0.00240 \Sigma n$$

$\frac{d(JW)}{d(\Sigma n)}$ 表示植物地上生物量在随时间进程中的增长速率,令其等于零,即 $\frac{d(JW)}{d(\Sigma n)} = 0$,

则能表述生物量积累最高值所出现的时间。经计算,1981年植物生长生物量出现最高时间是在日均气温稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 后的第143天,约在9月10日。其生物量值为298.7克/米³。

$\frac{d^2(JW)}{d(\Sigma n)^2}$ 表示植物生物量积累过程中的加速度,当 $\frac{d^2(JW)}{d(\Sigma n)^2} = 0$ 时,为生物量增长率极

大值出现的时间,有 $\Sigma n = 87$,即牧草生物量增长的极大速率出现在日均气温稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 后的第87天,对应7月17日,其极大速率为3.0929克/米²·日。

植物生物量积累与外界环境因素的变化关系密切,其中以水热资源最为重要。分析候均气温稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 至10月份最后一候的候均气温累积(ΣT),从4月份的第4候至10月份的最后一候降水量累积(ΣR)与植物生物量之间的季节动态(JW)二次型关系为:

表 2 气候因子年际动态

Table 2 Annual dynamics of climate factor

年份 Year	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	全年 Whole year
1月平均气温(°C) Mean air tem. of Jan.	-14.3	-13.2	-12.5	-14.2	-16.7	-14.8	-15.2	-13.2	-13.7	-15.9	-14.5	-15.7	-15.7	-17.1	-15.1
5月平均气温(°C) Mean air tem. of May	4.3	4.8	3.5	5.1	3.9	4.8	5.5	3.1	4.4	4.7	3.7	3.8	3.7	3.6	4.2
7月平均气温(°C) Mean air tem. of July	9.1	11.5	9.5	9.0	9.4	9.1	9.8	9.6	10.3	10.5	9.7	10.9	8.9	9.8	9.8
年平均气温(°C) Mean air tem. of yearly	-2.0	-1.1	-2.3	-2.5	-2.0	-1.6	-1.9	-0.9	-1.1	-1.8	-1.5	-1.8	-2.0	-1.5	1.7
气温年较差(°C) Air tem. annual range	23.9	24.7	22.0	27.2	26.4	23.9	25.0	22.8	24.0	26.4	24.2	26.2	24.6	26.9	24.9
1月降水量(毫米) Precipitation of Jan. (mm)	2.7	3.7	3.6	5.9	1.1	3.4	1.5	0.0	5.0	7.2	4.1	5.4	0.9	2.4	3.4
4月降水量(毫米) Precipitation of April (mm)	39.9	6.6	6.7	41.9	59.1	36.8	74.9	60.6	18.7	50.9	42.8	28.2	30.2	15.2	36.6
7月降水量(毫米) Precipitation of July (mm)	95.9	108.7	166.7	129.1	94.1	156.9	87.4	98.0	123.5	213.4	115.7	75.4	86.8	130.4	120.1
4-7月降水量(毫米) Precipitation of Apr. - July (mm)	360.7	209.9	221.9	290.4	316.5	420.9	373.2	418.9	350.4	426.4	327.3	290.4	307.0	277.0	307.9
年降水量(毫米) Precipitation of yearly (mm)	529.3	500.0	455.7	529.8	486.3	824.5	674.2	619.3	773.1	840.4	520.2	425.3	562.7	506.4	589.0
4月份20厘米的平均地温(°C) Earth tem. of April at soil depth 20cm	0.1	0.2	0.0	-0.6	-0.2	0.5	-0.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0.4	1.2	0.8	0.2

$$JW = -46.5134 + 4.2047 \sum T - 0.0533 \sum T^2 - 2.0683 \sum R$$

$$+ 0.0175 \sum R^2 + 0.0637 \sum T \cdot \sum R$$

($r = 0.9693$ $F = 18.6886$ $n = 12$ $P < 0.005$)

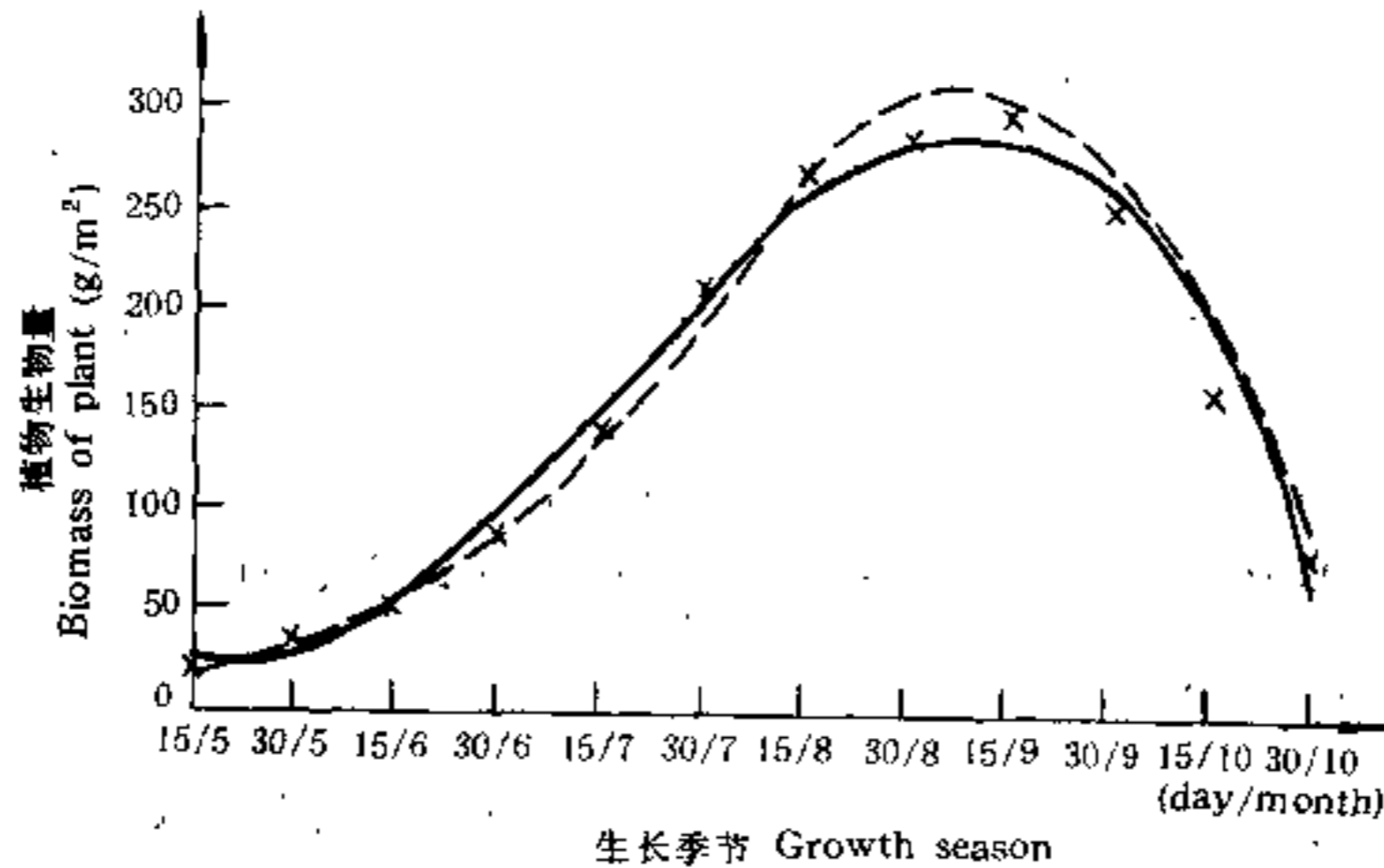


图1 植物生物量实测值与模拟值季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of plant biomass for reality value and simulated value

× 实测值 Reality value

--- 积温、降水与生物量模拟曲线 The simulated curve of accumulative temperature, Precipitation and biomass.

— 日均气温 $\geq 0^\circ\text{C}$ 天数与生物量的模拟曲线 The simulated curve of daily mean air Tem. $\geq 0^\circ\text{C}$ accumulative days and biomass.

图1 绘出了植物生物量实测值与模拟值季节动态比较。

由图1看出，高寒草甸植物生物量自萌动发芽开始至枯黄的整个过程中，表现出缓慢积累—快速增加—相对稳定—折损减少的4个不同阶段。

四月下旬当日均气温稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 到6月中旬的日均气温 $< 5^\circ\text{C}$ 期间，冷空气仍活动频繁，日最低气温常达 -7°C 左右。此时降水量不多，地表30厘米以下冻土维持，地温较低。植物生长受到“春旱”或“春寒”的威胁，加之牧草叶面积很小，对太阳光合有效辐射利用率极低。这时植物处于返青阶段，生长缓慢，限制了生物量的快速积累。

6月下旬到8月中旬，日均气温稳定 $\geq 5^\circ\text{C}$ 以上，此时太阳高度角大，太阳辐射在年内最为强烈。气温高，7月平均为 9.8°C ，7月下旬到8月上旬初可出现几天日均气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的天气。随着气温上升，这段时期的降水量也增加，旬均达87.4毫米，占年总量的53%。此时的植物叶面积最大，蒸腾蒸散强烈，光合有效辐射利用率最高。有利的水热

条件,促使植物生长旺盛,干物质积累迅速。

8月底到9月初,植物成熟,气温开始降低,降水逐渐减少,土壤表层冻融又交替出现。因受低气温、少降水的影响,植物开始枯黄。生物量不再积累,并相对稳定一段时间。

9月下旬开始,日均气温稳定 $<5^{\circ}\text{C}$,随时间推移,气温降至 0°C 以下。当日最低气温 $<-7^{\circ}\text{C}$ 以下时,植物完全停止生长,地上生物量随环境条件的改变逐渐减少。

在寒冷的11月至翌年2月,气温极低,月平均气温达 -10°C 以下,20厘米深处的地温月平均为 -1.2°C 以下,地下100厘米以内完全冻结。加之降水(雪)量很少,仅占全年降水量的5%。此段时间,蒸发量(水面蒸发量为240.6毫米)大于降水量,蒸发速率远超过于降水渗漏土壤的速率。有时虽有降雪,但降雪在寒冷的季节对植物生长影响微小,故本文未作讨论。

生物量的变化过程证实了充足的降水,较高的气温是促使植物生长发育及干物质积累的重要条件和指标。特别是在高气温条件下,降水量的适时分配,对植物生长影响极为明显。在牧草拔节期间,降水高而集中尤为重要。在牧草生长的其它时段,降水量只要保持多年的平均状况,气温高低将决定着植物生物量的最终积累。

3. 牧草产量的年际动态

由于天然草场生产方式单一,其牧草产量随气候的波动而有很大的年间差异,这种差异形成的产量,我们可以称为气候波动产量(W_w),而其相对稳定的产量(C)可采用多年牧草产量的平均值来代替,即为一恒值。因此年牧草产量(W)的表达式为: $W = W_w + C$ 。

从而气候波动产量为: $W_w = W - C$

气象要素在不同时期的振动将直接或间接地影响植物的生长发育及产量的形成和高低。海北站地区的年均日照时间为2429.2小时,暖季时仍有6.5小时的日均日照,能满足植物所需的光照时间。因此通过温度、降水等气象因子普查与比较分析,气候波动产量(W_w)与气象因子之间存在下列的关系:

$$W_w = -788.4753 + 25.8892A + 0.2557R_1 + 14.6438T_5$$

$$(r = 0.8699 \quad F = 10.3703 \quad n = 14 \quad P < 0.005)$$

式中: A 为当年气温年较差; R_1 为4—7月降水量; T_5 为5月的月平均气温。图2绘出了气候波动产量与模拟值的年间动态。

虽然在自然条件下,牧草产量随气候波动而变化,但进行草地生产水平的改变后,产草量亦会得到提高(王启基等,1995)。1980—1983年草场被网围栏封育,同时进行消灭虫鼠危害(周兴民等,1986),植被得到保护,牧草群落结构发生变化,产量相应提高20—25%。1984年以后,所发生的植物群落演替过程达到一定阶段,组成新的植物群落结构相对稳定,产草量相对平稳,只是随气候变化牧草产量有所增减。

草甸草场的水热条件协调良好时,牧草产量提高,反之将会抑制牧草产量。在降水量高而均匀、气温又较高的年份产草量高,如1988、1989年的4—8月降水量较同期多年平均高29%,气温偏高 0.6°C ,牧草产量则较同期平均提高8%以上;相反,在降水和

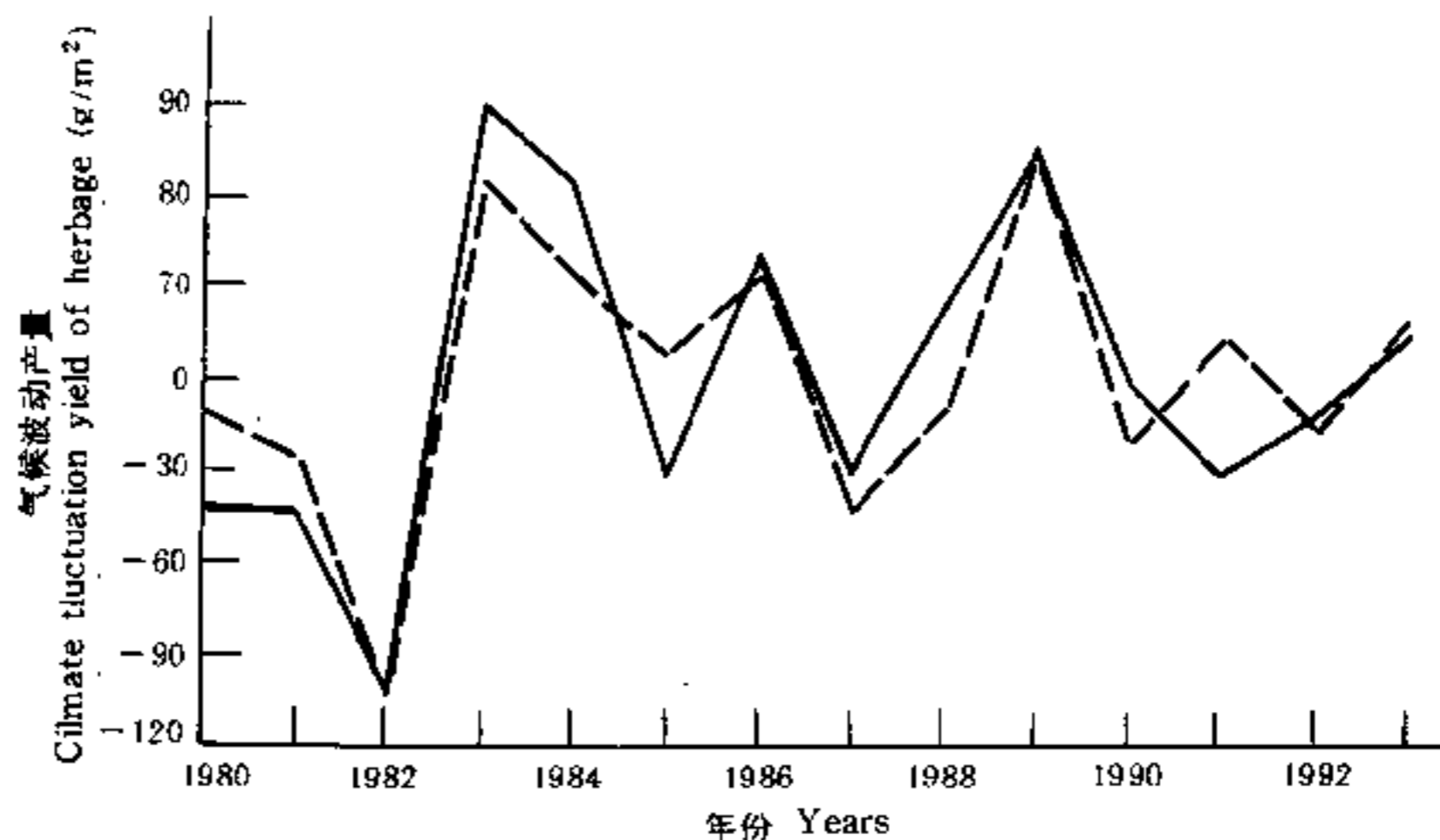


图2 牧草气候波动产量与模拟值年间动态

Fig. 2 Annual dynamics of climate fluctuation yield and simulated yield of herbage

—气候波动产量 Climate fluctuation yield

---模拟产量 Simulated yield

气温不协调的年份，牧草产量低，如1985年的4—8月降水量虽比同期多年平均偏高38%，而气温确偏低0.1℃，1991年降水量偏低29%，而气温又偏高0.4℃，牧草产量分别减少10%和12%；降水明显偏少，气温又低的年份，产草量就更低，如1980年4—8月的降水量比同期多年平均偏少17%，平均气温偏低0.6℃，牧草产量则减少14%。

水热因素的这种协调性与牧草产量的关系，可用二次型二级定性判别函数方程来表述。

$$W = 10.359T^2 - 0.441R \cdot T + 0.005R^2 - 81.373T + 1.608R + 332.006$$

式中：W为年牧草产量定性判别值；R、T分别为4—8月的平均降水量和平均气温。根据错分次最小原则，取临界值 $W_c = 165.75$ 。当 $W < W_c$ 时，年牧草产量高于320克/米²，为平年或丰收年(B)；当 $W > W_c$ 时，年牧草产量低于320克/米²，为欠收年(A)。通过回代，其分辨率达79%，效果很好(表3)。

4. 牧草产量预报模式的建立

建立预报牧草产量的模式，对于统筹规划畜牧业生产结构，种植冬春补饲的青干草，防灾保畜等均具有重要意义。

通过对前期气候因子的普查和相关分析表明，按当年1月份的平均气温(AT)、4月份土壤20厘米的平均地温(ET)、4月份的降水量(RF)三项指标均与牧草产量关系密切。以这三项因子建立的1980—1990年11年多元回归方程，即预报牧草产量(W)的模式方程：

表 3: 二級判別檢驗

Table 3 The examine of 2 grades discrimination

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
二年份(Years)														
4-8月平均气温 Mean air Temp. of Apr. - Aug.	5.48	7.38	5.42	5.58	5.66	6.32	6.00	5.94	6.46	6.24	5.52	6.40	5.94	5.68
4-8月均降水量 Mean precipitation of Apr. - Aug.	78.04	74.92	60.72	81.52	75.84	114.26	103.38	100.76	97.56	115.02	78.18	71.38	82.20	84.10
实际产量分級 Grade of reality yield	A	A	A	B	B	A	B	A	B	B	B	A	B	B
判別值 Distinguish value	164.51	200.38	166.21	164.20	164.70	162.04	162.82	162.99	165.17	162.18	164.43	172.32	164.79	163.95
判別分級 Distinguish grade	B	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	A	B	B
檢驗 Test	no	yes	yes	yes	yes	no	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes	yes

Handwritten notes in Chinese characters, including the characters "檢驗" (Test) and "判別" (Distinguish), are present in the right margin of the page.

$$W = -16.0505 - 22.5112AT - 24.1551ET + 0.7171RF$$

$$(r = 0.8707 \quad F = 7.3197 \quad n = 11 \quad P < 0.025)$$

模式具有显著的正相关。经 t 检验，预报值与实测值差异性不显著 ($P > 0.6$)。以该模式试报 1991、1992、1993 年的牧草产量值分别为 347.9、330.0、360.5 克/米²，与实测值 305.0、324.4、352.0 克/米² 相比较，相对误差分别为 14%、2%、2%。说明预报模式效果较好，可在生产中应用 (图 3)。

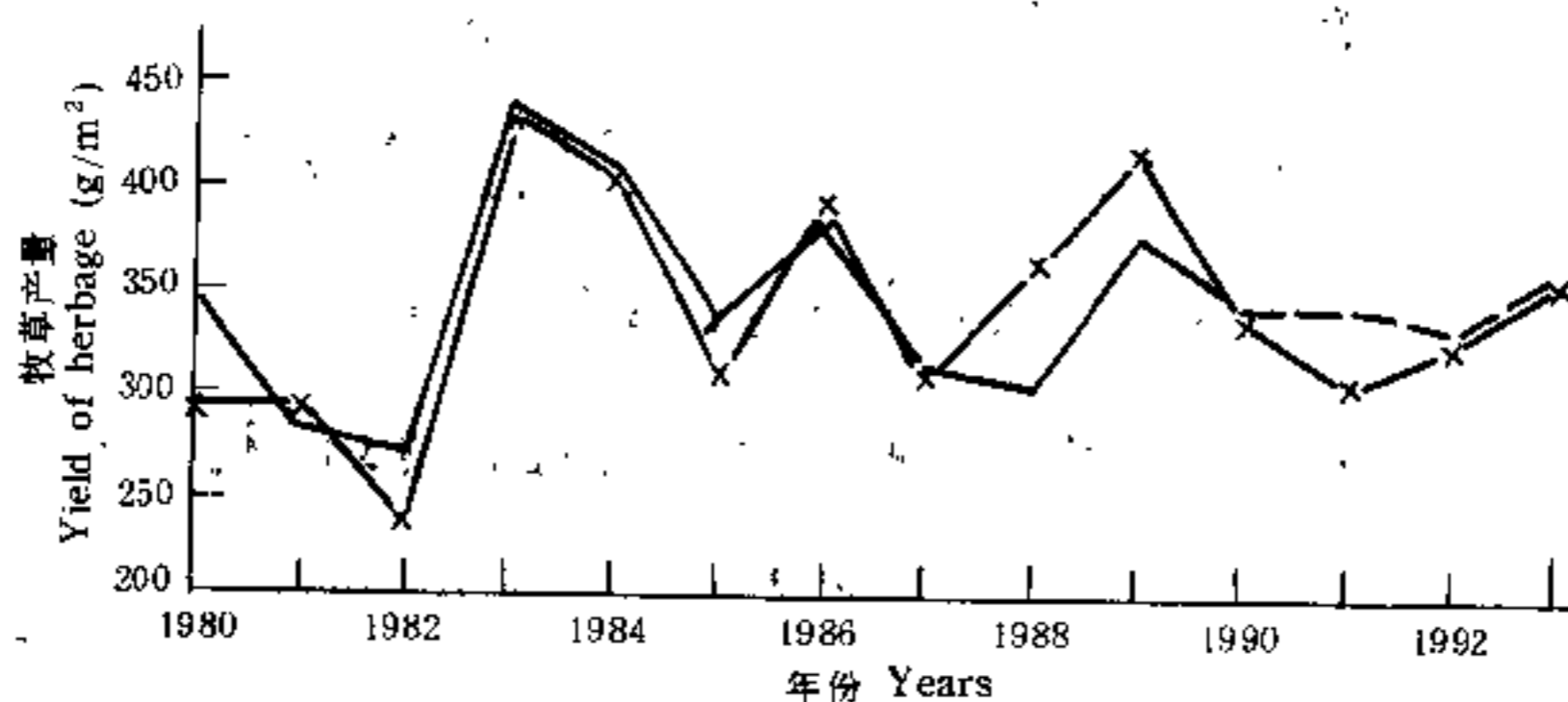


图 3 牧草产量实测值与预报值年间动态比较

Fig. 3 Comparison of annual dynamics of reality value and predict value for herbage yield

×—× 牧草年实际产量 Reality value of herbage

—— 牧草预报模拟产量 Predict simulated yield of herbage

--- 牧草预报产量 Predict yield of herbage

参 考 文 献

- 王义风, 1985, 内蒙古地区大针茅草原中主要种群生物量季节动态的初步观测. 草原生态系统研究 (1): 64—73, 科学出版社.
- 王启基、杨福国、史顺海, 1989, 高寒矮嵩草草甸再生草生长规律的初步研究. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集. 83—94, 科学出版社.
- 王启基、周兴民、沈振西、陈波, 1995, 不同调控策略下退化草地恢复与重建的效益分析, 高寒草甸生态系统第 4 集. 科学出版社.
- 毛学诗、朱庆斌, 1983, 天然牧草产量与气象条件的关系, 中国草原 (4): 46—50.
- 叶笃正、高由禧、陈乾, 1977, 青藏高原及其邻近地区夏季环流的若干特征. 大气科学 (4), 科学出版社.
- 吴元中, 1982, 产量预报中资料处理方法的探讨. 农业气象 (2).
- 杨持、李永宏、燕玲, 1983, 羊草草原主要群落地上生物量与水热条件定量关系初探. 草原生态系统研究 (1): 48—62. 科学出版社.
- 杨福国、王启基、史顺海, 1989, 矮嵩草草甸生物量季节动态与年间动态. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集. 61—72, 科学出版社.
- 周兴民、王质彬、杜庆, 1987, 青海植被, 青海人民出版社.
- 周兴民、张松林, 1986, 矮嵩草草甸在封育条件下群落结构和生物量变化的初步观察. 高原生物学集刊 (5): 1—6,

科学出版社。

林纪曾, 1981, 观测数据的数学处理, 162—166, 地震出版社。

施能, 1992, 气象统计预报中的多元分析方法, 267—337, 气象出版社。

THE RELATIONSHIP BETWEEN ABOVEGROUND BIOMASS OF *KOBRESIA HUMILIS* MEADOW AND CLIMATE FACTORS AND ITS PREDICATION MODEL

Li Yingnian Wang Qiji Zhou Xingmin

(Northwest Plateau Institute of Biology,
The Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The climatic observation information of 1980—1993 year and reality determined data of above ground biomass in *Kobresia humilis* meadow from 1991, 1992 and 1993 had been analysed. The predication model of herbage production were set up according to the change of precipitation and air temperature of yearly, and the seasonal dynamics of above ground biomass in *Kobresia humilis* meadow.

Results showed that the change of net production of aboveground biomass were strongly influenced by climate factors, especially a precipitation and air temperature.

Using the predication model, trial predication the herbage production of 1991, 1992, 1993 were 347.9g/m², 330.0g/m², 360.5g/m² respectively. Comparison to the reality determined value were 305.0g/m², 324.4g/m², 352.0g/m² respectively. Its error were only 14%, 2%, 2%. The effect of this predication model was more precision.

Key words: *Kobresia humilis* meadow; Aboveground biomass; Climatic factors; Predication model