

玛曲草原气候资源利用与牧草生产力的研究

李国军,张胜智,吉哲君,宁和平

(甘肃省甘南藏族自治州气象局,甘肃 合作 747000)

摘要:用3阶多项式生长曲线数学模型拟合牧草产量各状况年的牧草生产力,与实际值吻合较好。模拟结果表明,最大生长率 $70.2 \text{ kg/hm}^2 \cdot \text{d}$,最小生长率 $1.6 \text{ kg/hm}^2 \cdot \text{d}$;月最大产量 $2\ 042.5 \text{ kg/hm}^2$,月最小产量 57.6 kg/hm^2 。生长季5~9月,旬 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的累积积温每增加 1°C ,最高状况年比最低状况年每旬增加干物重 2.54 kg/hm^2 ;旬累积降水量每增加 1 mm ,最高状况年比最低状况年每旬增加干物重 7.33 kg/hm^2 ;旬累积日照时数每增加 1 h ,最高状况年比最低状况年每旬增加干物重 3.83 kg/hm^2 。考虑到倾向率变化的不同,旬累积降水量引起的产量变化是主要原因,旬累积积温次之,旬累积日照时数影响弱。高产年气候资源利用率高,低产年气候资源利用率低。

关键词:玛曲草原;气候资源利用;牧草生产力;生长数学模型

中图分类号:S162.5

文献标识码:A

引言

甘肃省玛曲县位于青藏高原东部,海拔在 $3\ 300 \sim 4\ 806 \text{ m}$ 之间,气候高寒阴湿,属半湿润过渡地带的草原区,拥有 $85.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 亚洲最优质的天然草场^[1]。黄河在甘肃玛曲县境内形成长 433 km “U”字形的河道,沿途流域拥有大面积亚高山草甸类草场和沼泽湿地^[2],为甘南州畜牧特色产业^[3]提供了良好的初级生产力发展基地。牧草初级生产力是能量转换的结果,是气候生态环境适应性综合作用所形成的^[4],既受当前气候条件的影响,也受前期气候累积效应的影响。姚玉璧等分析了气候变化对牧草生育期的影响以及不同生育期气候条件对牧草产量的正负反馈效应,对气候变化影响牧草生长的本质作了深入的研究^[5]。本文从气候变化和气候资源利用的角度分析牧草生产力的变化规律。不同年型气候变化不同,牧草生长对气候资源利用不同,干物质生长曲线有差异,最大生产率,月最大产量及其出现时间也不同。探讨不同年型亚高山草甸类草场净初级生产量^[6]动态变化规律及其与气候累积效应的相互关系,对研究不同年型气候生态环境下,牧草生长对气候资源利用,从短时间尺度波动认识气候变化对牧草生产力的影响有重要的意义。

1 资料和研究方法

1.1 资料

选取玛曲县气象站 1994~2005 年的牧草观测资料及相应的积温、降水、日照资料。每年5~9月底测定鲜重,风干以后测取干重,年总干物重取8月或9月测定的干物重。对于玛曲天然亚高山草甸类草场,气候生态环境是主要影响因子,牧草干物重受气象、气候条件影响明显,气候条件及光热水配置决定了牧草产量的高低^[7-8],同时牧草产量的高低也反映了气候的变化特征和气候资源利用率。本文选取了有代表意义的年份来研究牧草的生产力。12 a 牧草平均干物重 $3\ 052.3 \text{ kg/hm}^2$,而 1995 年牧草干物重 $3\ 075 \text{ kg/hm}^2$,最接近牧草产量的平均值,代表平均状况年,1997 年牧草干物重 $1\ 757 \text{ kg/hm}^2$ 为历史最低值,代表最低状况年,2003 年牧草干物重 $1\ 901 \text{ kg/hm}^2$ 为历史次低值,代表次低状况年,1999 年牧草干物重 $5\ 686 \text{ kg/hm}^2$ 为历史最高值,代表最高状况年,1998 年牧草干物重 $4\ 960 \text{ kg/hm}^2$ 为历史次高值,代表次高状况年(图 1)。以下均同此。

1.2 分析方法

牧草生长曲线数学模型用多项式表示,即

$$w = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \dots + a_k t^k$$

收稿日期:2009-05-25;改回日期:2009-07-27

作者简介:李国军(1964-),男,甘肃灵台人,工程师,主要从事天气预报及决策气象服务工作。E-mail:ligj378@yahoo.com.cn

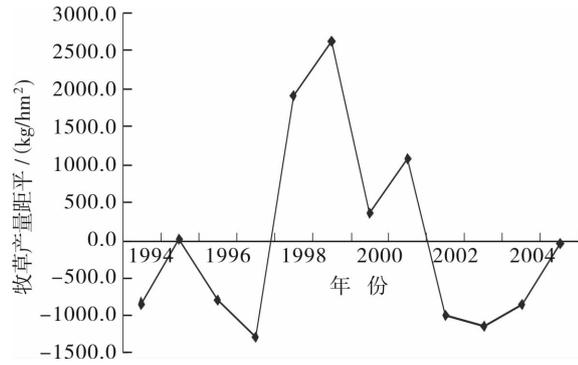


图1 玛曲1994~2005年牧草产量距平值年际变化

Fig. 1 The annual change of pasture's yield departure in Maqu grassland during 1994-2005

式中 $a_0, a_1, a_2, a_3 \dots a_k$ 为系数, t 为天数。采用时间等间距测定 w , 用多项式模拟可以进一步分析计算牧草生长率 CGR, 积分求解时段的最大生产力。用3阶多项式拟合牧草生产力, 与实际情况吻合较好, 达到相关性显著检验。其它方法: 线性回归^[9], 趋势倾向率。

2 牧草生育期

牧草生长返青期到黄枯期天数在 127 ~ 182 d 之间, 平均 170 d。返青期平均出现在 4 月 11 日, 最早出现在 4 月 1 日(2002 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 22.1 $^\circ\text{C}$, 最晚出现在 5 月 29 日(1997 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 234.3 $^\circ\text{C}$ 。分蘖期平均出现日期在 5 月 21 日, 最早出现在 5 月 6 日(2004 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 累积积温 175.8 $^\circ\text{C}$, 最晚出现在 7 月 18 日(1997 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 378.8 $^\circ\text{C}$ 。抽穗期平均出现在 7 月 9 日, 最早出现在 6 月 29 日(1998 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 703.6 $^\circ\text{C}$, 最晚出现在 8 月 16 日(1997 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 729.4 $^\circ\text{C}$ 。开花期平均出现在 7 月 21 日, 最早出现在 7 月 14 日(1998 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 878.3 $^\circ\text{C}$, 最晚出现在 8 月 22 日(1997 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 772.5 $^\circ\text{C}$ 。成熟期平均出现在 8 月 19 日, 最早出现在 8 月 7 日(2004 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 1 040.4 $^\circ\text{C}$, 最晚出现在 9 月 6 日(1997 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 932.0 $^\circ\text{C}$ 。黄枯期平均出现在 9 月 27 日, 最早出现在 9 月 18 日(1999 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 1 438.5 $^\circ\text{C}$, 最晚出现在 10 月 5 日(1994 年), $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 1 650.4 $^\circ\text{C}$ 。1997 年与 1998 年牧草开花期天数相差 39 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温差值 $< -100^\circ\text{C}$; 1997 年与 2004 年牧草成熟期天数相差 30 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温差值 $< -100^\circ\text{C}$ (表 1), 表明 1997 年发育期推迟, 热量

不足, 积累滞后, 牧草产量为历史最低值^[6]。统计分析, 抽穗期到开花期相差 11 ~ 19 d, 牧草总产量相对较高, 2 者的相关系数达到 0.617, 通过相关系数检验。

表1 玛曲草原牧草各生育期出现日期及其 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温差值和相差的天数

Tab. 1 The occurring date of pasture's each growing phase in Maqu grassland

生育期	平均出现日期	最早出现日期	最晚出现日期	最晚比最早 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温差值/ $^\circ\text{C}$	最晚比最早相差天数/d
返青期	4月11日	4月1日 (2002年)	5月29日 (1997年)	212.2	58
分蘖期	5月21日	5月6日 (2004年)	7月18日 (1997年)	203.3	73
抽穗期	7月9日	6月29日 (1998年)	8月16日 (1997年)	25.8	48
开花期	7月21日	7月14日 (1998年)	8月22日 (1997年)	-105.8	39
成熟期	8月19日	8月7日 (2004年)	9月6日 (1997年)	-108.4	30
黄枯期	9月27日	9月18日 (1999年)	10月5日 (1994年)	211.9	17

3 牧草生产力

用3阶多项式对表2实测值拟合, 得到牧草干物重各状况年的生长曲线方程, 用生长曲线方程计算得到表2计算值, 实测值与计算值拟合结果均通过相关系数显著性检验。各状况年的生长曲线方程见图2至图6。

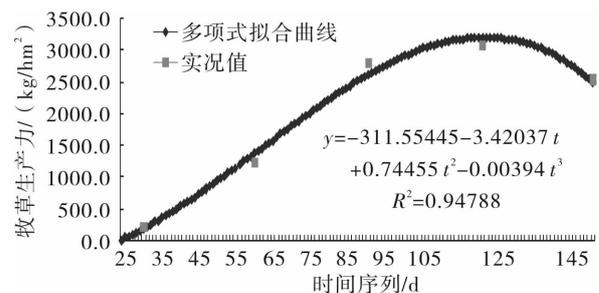


图2 平均状况年牧草干物重生长曲线

Fig. 2 The pasture's dry matter yield change in 1995 in Maqu grassland

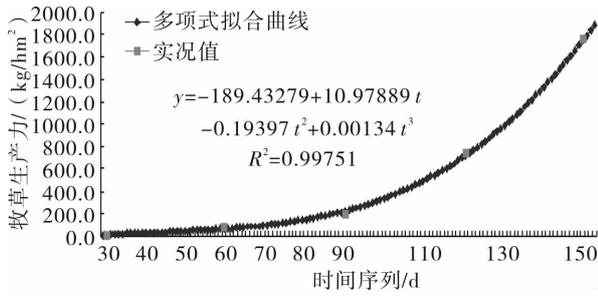


图3 最低状况年牧草干物重生长曲线
Fig.3 The pasture's dry matter yield change in 1997 in Maqu grassland

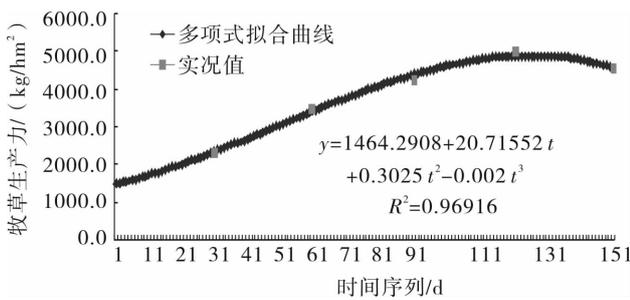


图4 次高状况年牧草干物重生长曲线
Fig.4 The pasture's dry matter yield change in 1998 in Maqu grassland

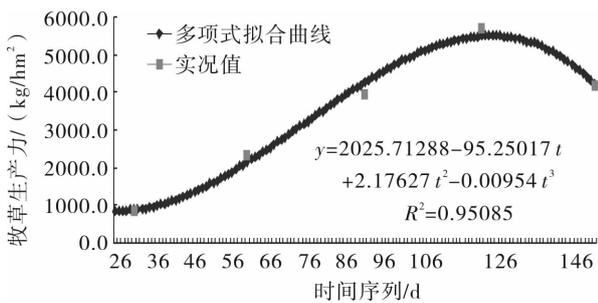


图5 最高状况年牧草干物重生长曲线
Fig.5 The pasture's dry matter yield change in 1999 in Maqu grassland

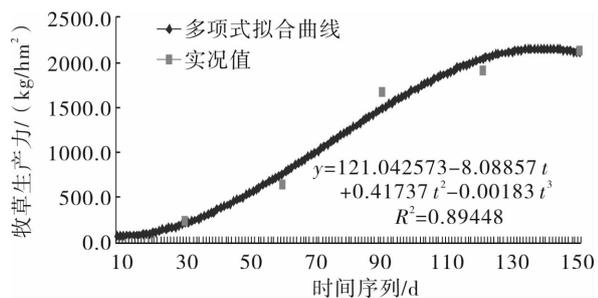


图6 次低状况年牧草干物重生长曲线
Fig.6 The pasture's dry matter yield change in 2003 in Maqu grassland

对各状况年的生长曲线方程求一阶导数,可得到牧草生长率表达式,表3是各状况年产量测定日的生长率。对方程再求一阶导数,求解极值点,并可求得相应的生长率最大值或生长率最小值。对包含的区间作滑动积分,则可求得最大生产力时段及该时段的总干物重(表4)。最大生产力时段是形成产量的重要阶段,也是受外界因素影响比较敏感的时期,对总产量的形成有重要意义。

表2 各状况年牧草干物重生长曲线计算值(单位:kg/hm²)

Tab.2 The observed and caculated values of the pasture's dry matter yield in different growing period in representative years in Maqu grassland

测定日期	5月31日	6月30日	7月31日	8月31日	9月30日	
时间序列/d	31	61	92	123	153	
1995年	实测值	215	1 224	2 808	3 075	2 532
	计算值	181	1 356	2 608	3 075	2 483
1997年	实测值	0.0*	81	199	744	1 757
	计算值	4.4	63	222	720	1 749
1998年	实测值	2 315	3 488	4 245	4 960	4 539
	计算值	2 338	3 400	4 373	4 867	4 552
1999年	实测值	829	2 347	3 962	5 686	4 188
	计算值	880	2 148	4 254	5 482	4 229
2003年	实测值	250	636	1 673	1 901	2 122
	计算值	217	765	1 485	2 035	2 099

注:加*号为返青期出现较迟,没有测定产量,以0.0代替进行产量分析。

表3 牧草各状况年产量测定日的生长率 CGR 计算值(单位:kg/hm²·d)

Tab.3 The caculation values of the pasture's growth rate in different representative years (Units:kg/hm²·d)

时间序列/d	31	61	92	123	153
1995年	31.4	43.4	33.5	0.9	-52.3
1997年	2.8	2.3	9.3	24.1	45.7
1998年	33.7	35.3	25.6	4.4	-27.2
1999年	12.2	63.8	62.9	7.1	-99.3
2003年	12.5	22.4	22.2	11.5	-8.9

注:负值为停止生长,消耗营养。

表4 牧草各状况年的最大(最小)生产率
(单位:kg/hm²·d)及月最大产量(单位:kg/hm²)

	1995年	1997年	1998年	1999年	2003年
最大(小)生产率	43.5	1.6*	36.0	70.2	23.6
出现时间	7月2日	6月18日*	6月20日	7月16日	7月16日
月最大(小)产量	1 277.7	57.6*	1 065.5	2 042.5	696.9
出现时段	6月18日 ~7月17日	6月3日 ~7月2日*	6月5日 ~7月4日	7月1日 ~7月30日	7月1日 ~7月30日

注:加*号的为最小生产力及出现时间和时段。

从以上图表可分析得出,平均状况年6~7月产量最大为1 584 kg/hm²,其生长量占总产量的52%,生长率方程模拟计算的最大生长率43.5 kg/hm²·d,出现在7月2日,月(6月18日~7月17日)最大产量1 277.7 kg/hm²,低于实际值。最低状况年5~9月生长率逐月递增,8~9月产量最大为1 013 kg/hm²,其生长量占总产量的58%,5~6月生长率最小为81 kg/hm²,生长率方程模拟计算的最小生长率1.6 kg/hm²·d,出现在6月18日,月(6月3日~7月2日)最小产量57.6 kg/hm²,低于实际值。次低状况年6~7月产量最大为1 037 kg/hm²,其生长量占总产量的55%,生长率方程模拟计算的最大生长率23.6 kg/hm²·d,出现在7月16日,月(7月1日~7月30日)最大产量696.9 kg/hm²,低于实际值。最高状况年7~8月产量最大为1 724 kg/hm²,其生长量占总产量的30%,生长率方程模拟计算的最大生长率70.2 kg/hm²·d,出现在7月16日,月(7月1日~7月30日)最大产量2 042.5 kg/hm²,高于实际值。次高状况年5~9月生长率逐月递减,5~6月产量最大为1 173 kg/hm²,其生长量占总产量的24%,生长率方程模拟计算的最大生长率36.0 kg/hm²·d,出现在6月20日,月(6月5日~7月4日)最大产量1 065.5 kg/hm²,低于实际值。

3 气候变化与生产力

3.1 积温与生产力

各状况年5月上旬至9月下旬≥0℃积温变化呈线性增加趋势,平均状况年每旬增加102℃,最低

状况年每旬增加99.3℃,次低状况年每旬增加105.4℃,最高状况年每旬增加102.8℃,次高状况年每旬增加106.1℃。旬≥0℃积温与各状况年旬干物重计算值建立线性回归方程,线性回归拟合结果均通过信度的F检验(表5)。得出旬≥0℃积温每增加1℃,平均状况年干物重旬增加2.34 kg/hm²,最低状况年增加1.22 kg/hm²,次低状况年增加1.66 kg/hm²,最高状况年增加3.76 kg/hm²,次高状况年增加2.25 kg/hm²。

表5 各状况年旬≥0℃积温与旬干物重模拟值的相关系数及回归方程和F检验值

	回归方程	相关系数	F检验值
平均状况年(1995年)	$\hat{y} = -8.89131 + 2.33594x$	0.9007	47.32
最低状况年(1997年)	$\hat{y} = -560.489 + 1.2223x$	0.8759	36.26
最高状况年(1999年)	$\hat{y} = 68.9052 + 3.7565x$	0.9227	63.02
次低状况年(2003年)	$\hat{y} = -292.459 + 1.6626x$	0.9910	713.81
次高状况年(1998年)	$\hat{y} = 1589.503 + 2.24647x$	0.9526	127.55

3.2 降水量与生产力

各状况年5月上旬至9月下旬累积降水量变化呈线性增加趋势,平均状况年累积降水量每旬增加36.2 mm,最低状况年增加34.6 mm,次低状况年增加46.3 mm,最高状况年增加38.4 mm,次高状况年增加38.3 mm。用旬累积降水量与各状况年生长曲线方程旬计算值建立线性回归方程,线性回归拟合结果均通过信度的F检验(表6)。得出旬累积降水量每增加1 mm,平均状况年干物重旬增加6.37 kg/hm²,最低状况年增加3.20 kg/hm²,次低状况年增加3.72 kg/hm²,最高状况年增加10.53 kg/hm²,次高状况年增加6.08 kg/hm²。

3.3 日照与生产力

各状况年5月上旬至9月下旬累积日照时数变化呈线性增加趋势,平均状况年累积日照时数每旬增加73.3 h,最低状况年增加82.5 h,次低状况年增加67.5 h,最高状况年增加68.4 h,次高状况年增加75.6 h。用旬累积日照时数与各状况年生长曲线方程旬计算值建立线性回归方程,线性回归拟合结果均通过信度的F检验(表7),得出旬累积日照时数

每增加 1 h, 平均状况年干物重旬增加 3.30 kg/hm², 最低状况年增加 1.55 kg/hm², 次低状况年增加 2.58 kg/hm², 最高状况年增加 5.38 kg/hm², 次高状况年增加 3.15 kg/hm²。

表 6 各状况年旬降水量与旬干物重模拟值的相关系数及回归方程和 F 检验值
Tab. 6 The correlation of coefficient between precipitation and the calculation values of pasture's dry matter yield in every ten days and their regression equations in different years

	回归方程	相关系数	F 检验值
平均状况年(1995 年)	$\hat{y} = 20.4954 + 6.3683 x$	0.8870	40.61
最低状况年(1997 年)	$\hat{y} = -549.419 + 3.2021 x$	0.8047	20.21
最高状况年(1999 年)	$\hat{y} = -210.623 + 10.5327 x$	0.9551	114.44
次低状况年(2003 年)	$\hat{y} = -96.4103 + 3.7173 x$	0.9833	380.07
次高状况年(1998 年)	$\hat{y} = 1601.478 + 6.0819 x$	0.9351	90.47

表 7 各状况年旬日照时数与旬干物重模拟值的相关系数及回归方程和 F 检验值
Tab. 7 The correlation coefficient between sunshine hours and the calculation values of pasture's dry matter yield in every ten days and their regression equations in different years

	回归方程	相关系数	F 检验值
平均状况年(1995 年)	$\hat{y} = -1545.5 + 3.3008 x$	0.8980	45.83
最低状况年(1997 年)	$\hat{y} = -1364.56 + 1.5544 x$	0.9010	47.45
最高状况年(1999 年)	$\hat{y} = -1998.05 + 5.3770 x$	0.8753	36.04
次低状况年(2003 年)	$\hat{y} = -1547.79 + 2.5804 x$	0.9847	414.67
次高状况年(1998 年)	$\hat{y} = 22.8995 + 3.1542 x$	0.9537	130.60

4 气候资源利用

把生长季各月干物重增长量与总干物重的百分比定义为月贡献率, 贡献率为正值干物重增加, 贡献率为负值干物重营养消耗; 把生长季总干物重与 ≥ 0 °C 积温的比值定义为积温利用系数; 把生长季总干物重与累积降水量的比值定义为降水量利用系数; 把生长季总干物重与累积日照时数的比值定义为日照利用系数。从图 7 看出, 受气候变化影响, 各状况年牧草月贡献率各异; 从表 8 看出, 系数越大, 气候资源利用率越高。最高状况年月正贡献率呈平稳增加 26.7% ~ 30.3%, 负贡献率绝对值与正贡献率最

低值相当, 积温、降水量、日照利用系数大, 气候资源利用率高; 最低状况年月正贡献率呈曲线递增状态, 贡献率由 4.6% 递增至 57.7%, 变化大, 生长季无负贡献率, 表明气候资源的累积效应滞后, 积温、降水量、日照利用系数小, 气候资源利用率低; 平均状况年 7 月正贡献率为峰值, 9 月负贡献率为 -17.7%, 积温、降水量、日照利用系数比最高状况年和最低状况年的平均值略偏低, 气候资源利用率基本呈平均状况; 次高状况年月正贡献率呈平稳减少 23.6% ~ 14.4%, 负贡献率绝对值低于正贡献率最低值, 积温、降水量、日照利用系数较大, 气候资源利用率较高; 次低状况年与平均状况年的贡献率曲线相似, 7 月正贡献率为峰值, 生长季无负贡献率, 表明气候资源的累积效应滞后, 积温、降水量利用系数比最低状况年略低、日照利用系数比最低状况年略高, 气候资源利用率低。次低状况年与最低状况年整个生长季平均贡献率相当, 次低状况年光合潜力比最低状况年略好, 总干物重比最低状况年略高。

表 8 各状况年积温、降水量、日照利用系数
Tab. 8 The accumulated temperature, precipitation and sunshine usage coefficients in different years

	积温 利用系数	降水量 利用系数	日照 利用系数
平均状况年(1995 年)	2.1	5.9	2.0
最低状况年(1997 年)	1.3	3.6	1.1
最高状况年(1999 年)	3.7	10.4	3.8
次低状况年(2003 年)	1.2	2.9	1.2
次高状况年(1998 年)	3.0	8.2	2.9

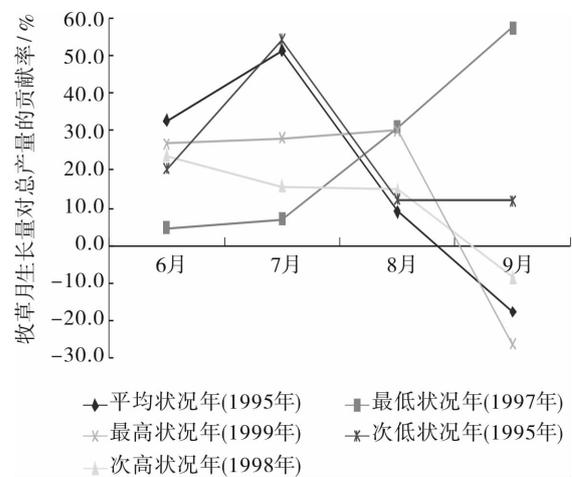


图 7 各状况年牧草月生长量对总产量的贡献率
Fig. 7 The contribution rate of pasture's monthly production to total yield in different representative year

5 小 结

(1)抽穗期到开花期相差 11 ~ 19 d,牧草产量相对较高。

(2)低产年月最大产量占总产量的 50% 以上,高产年月最大产量占总产量的 24% ~ 30%。

(3)最高状况年与最低状况年旬 ≥ 0 °C 积温的倾向率差 3.5 °C,旬降水量的倾向率差 3.8 mm,旬日照时数的倾向率差 -14.1 h,降水累积效应对产量的形成起主要作用,积温次之,日照弱。

(4)高产年月正贡献率平稳变化,黄枯期负贡献率绝对值低于正贡献率的最小值,气候累积效应有利于干物质的积累,气候资源利用率高;低产年整个生长季为正贡献率,波动大,气候累积效应滞后,不利于干物质的积累,气候资源利用率低。

(5)牧草生产力最低值出现在 1997 年突变年^[10],气候突变引起各生长发育期推迟,热量不足,气候累积效应滞后,造成生产力最低。

参考文献:

- [1] 孙国武,李耀辉. 关于环境蠕变问题的研究[J]. 干旱气象, 2007, 25(2): 10.
- [2] 姚玉璧,王润元,邓振镛,等. 黄河首曲流域草原气候变化特征及其对牲畜生存的影响[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(1): 27 - 32.
- [3] 李巍,师守祥. 甘南生态经济建设支撑体系研究(四)[J]. 草业科学, 2003, 20(5): 67 - 69.
- [4] 邓振镛. 干旱地区农业气象研究[M]. 北京:气象出版社. 1999. 287 - 291.
- [5] 姚玉璧,张秀云,段永良. 气候变化对亚高山草甸类草地牧草生长发育的影响[J]. 资源科学, 2008, 12.
- [6] 李博主编. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社. 2000. 208.
- [7] 李国军,张胜智,汪治桂,等. 近 40 a 来玛曲草原气候生态特征[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 34.
- [8] 李国军,张胜智,吉哲君. 玛曲草原气候生态环境变化及牧草产量灰色预测[J]. 干旱气象, 2009, 27(1): 63.
- [9] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社, 2004. 19 - 22.

Analysis on Climate Resource Utilization and Pasture's Productivity in Maqu Grassland

LI Guojun, ZHANG Shengzhi, JI Zhejun, NING Heping

(Gannan Meteorological Bureau of Gansu Province, Hezuo 747000, China)

Abstract: The pasture's productivity simulated by the third-order polynomial growth curve mathematical model in different years in Maqu grassland coincided with the actual value. The simulation results show that the maximum growth rate is 70.2 kg/hm² · d and the minimum is 1.6 kg/hm² · d. The monthly maximum yield is 2 042.5 kg/hm² and the minimum is 57.6 kg/hm². From May to September, the 10 days accumulated temperature which is above 0 °C increased 1 °C, the pasture's dry matter increased 2.54 kg/hm², and the amount of the precipitation increased every 1 mm in every 10 days, the dry matter increased 7.33 kg/hm², as well as the sunshine duration increased every one hour in every 10 days, the dry matter increased 3.83 kg/hm². Considering the difference of the climate tendency for different factors, the ten days precipitation is the main factor which influences the pasture's yield, and the accumulated temperature in every 10 days plays the second role. The climate resources utilization rate in high production year is higher than that in the low production year.

Key words: Maqu grassland; climate resource utilization; pasture's productivity; growth mathematic model