

气象要素对高寒针茅草原产草量的影响评价

郭连云¹,赵恒和¹,蔺尚玛²

(1 青海省海南州气象局,青海 共和 813000;2 青海省兴海县气象局,青海 兴海 813300)

【摘要】【目的】对西北针茅(*Stipa krylovii*)生育期的温度、降水、日照、积温、地温等气象要素进行综合分析,评价各气象要素对牧草产量的影响。【方法】以西北针茅牧草生育期间的逐日气象资料和草原全部牧草的产量为基础资料,运用积分回归的差分形式,计算了影响西北针茅产量的旬平均气温、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、5 cm 地温、10 cm 地温、降水量和日照时数等气象要素的影响系数,构建了影响西北针茅产量的气象要素评价模型,并进一步计算了产量影响指数,用于衡量西北针茅生育期各气候因子对最终产量的影响。【结果】各气象因素中,对高寒草地西北针茅牧草产量影响最大的是降水量,6 月中旬、7 月上旬和 8 月中旬降水量对牧草产量的影响指数达 1 150.73~1 470.66 kg/hm²,5 月中旬至 6 月上旬、6 月下旬、7 月中旬至 8 月上旬降水量对牧草产量的影响指数为 491.72~819.01 kg/hm²;其次是日照时数,4 月上中旬、5 月中下旬、8 月各旬日照时数对牧草产量的影响指数为 347.90~668.17 kg/hm²;第 3 是 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温,4 月中旬至 6 月上旬、8 月下旬 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温对牧草产量的影响指数达 207.32~486.40 kg/hm²;第 4 是旬平均气温,4 月中下旬和 7 月中旬的旬平均气温可以造成 146.22~173.76 kg/hm² 的产量波动;第 5 是地温,5 月中旬至 6 月中旬,5 和 10 cm 地温对牧草产量的影响指数分别为 42.46~62.55 kg/hm² 和 41.46~51.63 kg/hm²。【结论】降水量对高寒草地西北针茅产量的影响最大,其次是日照时数,第 3 是 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温,第 4 是旬平均气温,5 和 10 cm 地温对西北针茅产量影响较小。

【关键词】 西北针茅;气象要素;积分回归;产草量;影响指数

【中图分类号】 Q948.112

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)08-0189-08

Effects of climates on primary production of alpine *Stipa krylovii* grassland

GUO Lian-yun¹, ZHAO Heng-he¹, LI Shang-ma²

(1 Meteorological Bureau in Hainan State of Qinghai Province, Gonghe, Qinghai 813000, China;

2 Meteorological Bureau in Xinghai County of Qinghai Province, Xinghai, Qinghai 813300, China)

Abstract: 【Objective】In alpine grassland of Qinghai, *Stipa krylovii* is a dominant species and important forage. This study aims to disclose relationships between primary production of *S. krylovii* grassland and climatic factors such as temperature, precipitation, light time, accumulated temperature above 0°C , and ground temperature. 【Method】Based on everyday records of the climatic factors and primary production of *S. krylovii* grassland in growth period, a model is established to evaluate effects of these factors on primary production of *S. krylovii* grassland. 【Result】1) Precipitation is the first important factor. In middle June, early July and middle August, it affects the production by 1 150.73—1 470.66 kg/hm²; in middle May, late May, early June, late June, middle July, late July, early August and middle August, it does by 491.72—819.01 kg/hm². 2) Light time is the second factor. In early April, middle April, middle May, late May, August, it affects the production by 347.90—668.17 kg/hm². 3) Accumulated temperature is the third factor. From middle April to early June, and in late August, it affects the production by 207.32—486.40 kg/hm².

* [收稿日期] 2010-01-13

[基金项目] 青海省科技厅科技促进新农村建设项目(2009-N-503)

[作者简介] 郭连云(1969—),男,青海湟源人,工程师,主要从事气象业务管理与研究。E-mail: glycloud@126.com

4) Average air temperature of 10 days is the fourth factor. In late April, middle July and middle April, it affects the production by 146. 22—173. 76 kg/hm². 5) Ground temperature of 10 days is the 5th factor. Mid-May to mid-June, 5 and 10 cm ground temperatures to grass crop's influence index respectively are 42. 46—62. 55 kg/hm² and 41. 46—51. 63 kg/hm². 【Conclusion】 Precipitation is the strongest factor to affect primary production of *S. krylovii* grassland, light time the second, accumulated temperature the third, average temperature of 10 days the fourth, 5 and 10 cm grand temperature the weakest.

Key words: *Stipa krylovii*; meteorological element; integral regression; grass yield; effect index

高寒地区天然牧草的生长发育和产量形成与光照、温度、水分密切相关,天然牧草的整个生命过程都是在自然环境中进行的,其生长发育、产量形成在很大程度上受制于区域气候、土壤和牧草本身机能等因素,人为干扰较轻。但对固定区域而言,一定时间尺度内其土壤性质、牧草种类组成等的变化相对比较平稳,因此牧草的生长发育和产量形成与气候因素之间存在着不可分割的内在联系^[1-3]。天然草地的牧草产量与整个生育期的光、温、水分条件均有十分显著的关系^[4-8]。近年来,用统计学方法评价农业综合气象因素与牧草关系的研究越来越多^[9-11]。也有些学者用积分回归统计方法探讨牧草产量与气候因子的关系^[12-14]。在应用积分回归方法前需要提取气象产量序列,国内外通常的做法是利用多项式、线性回归、滑动平均等方法去除趋势产量后得到气象产量,但所得到的气象产量序列会随着选取的趋势产量拟合方法或产量样本数的变化而产生较大的差异,而相邻年的作物产量差异应该主要是由于气象要素的不同造成的^[15-17]。据此,本研究尝试运用积分回归方法的差分形式,对影响高寒草地西北针茅牧草产量的温度、降水、日照、积温、地温等气象要素进行综合分析,以评价西北针茅生育期各气象要素对其产量的影响。

1 研究区概况

研究区位于青海省兴海县,地处青藏高原东北部,界于东经 99°01′~100°21′,北纬 34°48′~36°14′,南北长 159 km,东西宽 119 km。全县草原面积 101. 03 万 hm², 占全县总面积的 83%, 其中可利用草地面积 93. 6 万 hm², 占草地面积的 92. 7%, 是我国北方一个以牧为主、半农半牧的典型农牧交错区域。研究区地处欧亚大陆腹地,属典型的高原大陆性气候,东南季风及西南季风较弱。由于受高海拔条件的制约,气温低,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,干湿季分明;年平均气温 1. 4 ℃,年降水量 353. 2 mm,年蒸发量 1 526. 7 mm,年日照时数 2 700

h,平均无霜期 45 d,≥0 ℃活动积温稳定通过时间在春季为 04-01,秋季为 09-26。草地畜牧业是该县国民经济的主体,在全县经济发展中占有举足轻重的地位。本试验中的西北针茅草原主要分布在滩地,其植物群落组成、生长状况等均能代表典型的高寒针茅草原。草原草层高度 20~40 cm,植被总盖度 60%以上,除西北针茅为建群种外,常见的伴生草种有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、斜茎黄芩(*Astragalus adsurgens*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等,植被分布均匀。每年 3—10 月对研究点围栏封育,牧草黄枯后适当放牧采食。

2 资料与方法

2. 1 资 料

试验样地设在兴海县子科滩镇的高寒针茅草原,位于北纬 35°35′,东经 99°59′,海拔高度 3 300. 0 m。样地面积 50 m×50 m,围栏封育,未放牧。将牧草封育场均分为 A、B、C、D 4 个小区,每小区又均分为 4 个重复进行观测。西北针茅的发育期有返青、抽穗、开花、成熟、黄枯等 5 个时期,每一小区每 4 年轮流测定 1 次,获得并记录西北针茅的观测资料。4—8 月为西北针茅生长季节,产量为 8 月末每 hm² 天然草场上净生物总量阴干后的质量(kg/hm²),为 1999—2009 年共 11 年的资料。将西北针茅全生育期(4 月上旬至 8 月下旬)按旬分成 15 个生物时段,每时段的温度、降水、日照、积温、地温等气象资料,取自距观测地段 2. 5 km 处的兴海国家基准气候站平行观测资料。

2. 2 西北针茅气象产量的计算

根据西北针茅产量影响因子的变化特点,可将其产量分解为趋势产量和波动气象产量,前者的变化主要是由社会经济因子引起的,后者则主要取决于气候因子^[15-17]。产量分解的方法很多,本研究用正交多项式方法^[18]拟合趋势产量,采用五次多项式进行趋势产量的拟合以求得各年的趋势产量 y_t ,即:

$$y_t = 63.70 + 2\,547.87t - 1\,787.58t^2 + 474.12t^3 - 50.58t^4 + 1.86t^5. \quad (1)$$

式中: t 为时间序列。设 1999 年, $t=1$; 2000 年, $t=2$; $\dots$; 2009 年, $t=11$ 。经计算, 该式的 $R^2=0.696$, $F=5.57$, $\alpha=0.04$ 。并由此按下式计算逐年气象产量:

$$y = y_t - \hat{y}_t + e. \quad (2)$$

式中: y 为西北针茅产量, y_t 为趋势产量, $\hat{y}_t$ 为气象产量; e 为随机产量, 实际计算时一般不予考虑。

高寒草甸地区受特殊地理环境因素的影响, 相当时期内土壤理化性态基本保持不变, 社会投入甚微, 牧草产量的波动变化主要受制于自然环境条件的波动。因此, 天然牧草产量主要受光、温、水这 3 个主要气候因子所制约。王建林等^[15-16] 和 杨霏云^[17] 认为, 相邻 2 年的作物产量中, 由于社会投入、技术水平等决定的趋势产量差异不大, 其产量差异的主要来源应该是作物生育阶段气象要素的差异。即有:

$$\Delta \hat{y}_i = y_i - y_{i-1}. \quad (3)$$

式中: $\Delta \hat{y}_i$ 表示相邻年的气象产量差异, y_i 为后 1 年的气象产量, y_{i-1} 为前 1 年的气象产量。也就是说, 相邻年的气象产量差异 $\Delta \hat{y}_i$ 可以表述为相邻年的温度差异 ΔT_i 、降水差异 ΔR_i 、日照时数差异 ΔS_i 等的函数, 即:

$$\Delta \hat{y}_i = F(\Delta T_i, \Delta R_i, \Delta S_i \dots). \quad (4)$$

2.3 不同气象因子对牧草产量的影响系数

为了研究某一气象要素在作物整个生育期各个阶段对作物产量形成的影响效应, 可以将作物生育期分成许多生育阶段作为自变量, 与气象产量序列建立回归方程, 从而可以得到气象要素在每个生育阶段的影响系数, 具体可以表示为如下积分回归方程:

$$\hat{y}_i = c_0 + \int_1^{\tau} a_j(t) M_{ij}(t) dt. \quad (5)$$

式中: $\hat{y}_i$ 为气象产量; c_0 表示常数项; a_j 为阶段气象要素的产量影响系数; M_{ij} 为阶段气象要素; t 为时间; i 为样本数, $i=1, 2, 3, \dots, N$; j 为生育阶段, $j=1, 2, \dots, \tau$ 。综合考虑温度、降水、日照时数的阶段影响效应, 并结合(2)、(3)式, 则可以得到积分回归方程的差分形式为:

$$\Delta \hat{y}_i = c_0 + \int_1^{\tau} [a_{ij}(t) \Delta T_{ij}(t) + a_{rj}(t) \Delta R_{ij}(t) + a_{sj}(t) \Delta S_{ij}(t)] dt. \quad (6)$$

式中: c_0 为常数项, a_{ij} 、 a_{rj} 、 a_{sj} 为各气象要素不同生

育阶段的气象产量影响系数, ΔT_{ij} 、 ΔR_{ij} 、 ΔS_{ij} 分别为温度、降水、日照等气象要素变量的年际差异序列, t 为时间。积分回归方法通常使用正交多项式函数对自变量进行降维处理, 具体计算方法详见文献[19]。

2.4 不同气象因子对牧草产量的影响指数

为了衡量西北针茅生育期间各阶段各气象要素对其最终气象产量形成的影响程度, 将产量影响指数定义为某阶段气象要素的均方差与该阶段积分回归系数乘积的绝对值^[20]。

3 结果与分析

高寒牧区牧草生育期较长, 而生长期相对较短。西北针茅牧草从返青到种子成熟, 可分为返青、抽穗(现蕾)、开花、成熟和枯黄 5 个时期。西北针茅返青期主要受温度和水分条件的制约; 日平均气温为 8~15℃ 时, 西北针茅开始抽穗; 开花期处于全年的相对高温阶段, 也是全年雨水最多的时期, 牧草营养价值较高; 8 月中下旬西北针茅进入成熟期; 9 月上中旬牧草便进入枯黄期。温度、水分和光照等气候因子影响西北针茅的整个生育期, 也影响西北针茅产量及其品质的高低。

经过 1999—2009 年共 11 年的观察发现, 青海兴海地区西北针茅牧草返青期多年平均日期为 04-10, 抽穗期为 06-20, 开花期出现在 07-13, 8 月中旬牧草种子开始成熟, 9 月上旬牧草进入枯黄期。

3.1 温度对西北针茅产量的影响

3.1.1 气 温 从图 1 可以看出, 旬平均气温对西北针茅气候产量的影响曲线呈“双峰型”, 旬平均气温与气候产量的单相关系数曲线及影响系数曲线的变化基本一致。在 4 月上旬、5 月中旬至 6 月下旬、8 月中下旬, 气温对产量的影响呈负效应, 表明这些时段的气温可以满足西北针茅生长的需求, 返青期(4 月上旬) 温度每降低 1℃, 产量可增加 51.35 kg/hm²; 在返青至抽穗后期(5 月中旬至 6 月中旬), 温度每降低 1℃, 产量增加 0.344~39.36 kg/hm²; 抽穗期前期(6 月下旬), 温度每降低 1℃ 产量增加 0.44 kg/hm²; 而在成熟期后(8 月中下旬), 温度每下降 1℃, 产量则增加 20.45~71.16 kg/hm²。影响系数曲线的第一高峰值出现在 4 月中旬至 5 月上旬, 表明西北针茅返青至抽穗阶段缺少热量, 此间温度每升高 1℃, 产量相应增加 41.21~74.77 kg/hm²; 影响系数曲线的第二高峰值出现在 7 月上旬至 8 月上旬, 此阶段为西北针茅的开花一成熟期, 此间温度每升高 1℃, 产量相应增加 23.93~47.71

kg/hm²。4 月中旬、5 月上旬、6 月上旬、8 月下旬的旬平均气温与气候产量均呈负相关,且均通过了置信度 $\alpha=0.05$ 的显著水平检验,尤其是 8 月下旬的气温,还通过了置信度 $\alpha=0.001$ 的极显著水平检验。

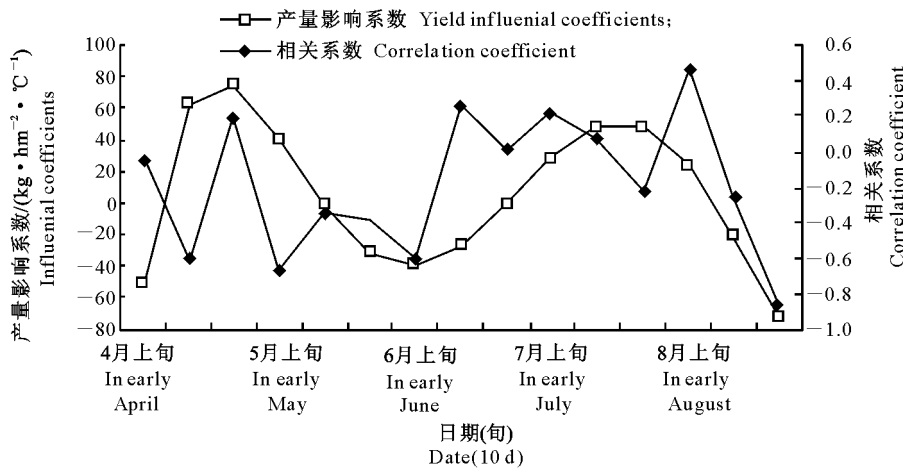


图 1 旬平均气温对西北针茅产量影响系数的影响及其相关系数分析

Fig. 1 Effects of ten-day temperature on *Stipa krylovii* pasture yield and their correlation coefficient

3.1.2 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 从图 2 可以看出,在西北针茅生长季的 4—8 月份, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温对西北针茅产量的影响系数呈正弦曲线变化。在 4 月上旬至 6 月下旬, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温对西北针茅产量的影响系数为负值,说明该时段 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温能满足西北针茅返青、抽穗、开花所需的热量条件,此时段 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,产量下降 $0.023\sim 18.33\text{ kg/hm}^2$;7 月份 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的影响系数曲线呈正效应,表明西北针茅开花期较多的积温对开花有利,温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,产量增

加 $0.37\sim 2.66\text{ kg/hm}^2$;进入 8 月份, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温对西北针茅产量的影响系数为又呈负效应,说明在西北针茅的成熟至黄枯期,热量有余,此阶段 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温每增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,产量相应下降 $0.06\sim 0.85\text{ kg/hm}^2$ 。旬 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温与西北针茅气候产量的相关系数在 4 月中旬、5 月上旬和 6 月上旬均可通过显著的负相关水平检验,而在 8 月下旬可通过极显著负相关水平检验。

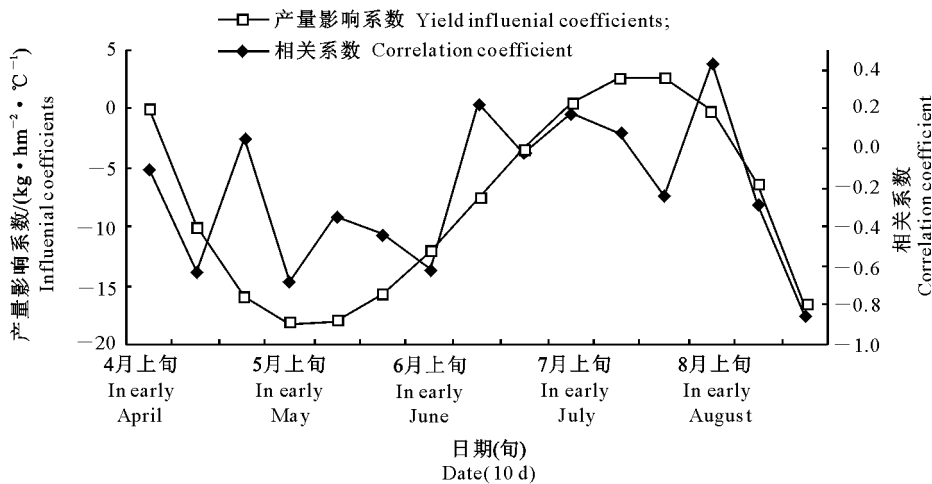


图 2 旬 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温对西北针茅产量影响系数的影响及其相关系数分析

Fig. 2 Effects of ten-day $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ cumulative temperature on *Stipa krylovii* pasture yield and their correlation coefficient

3.1.3 5 cm 地温 如图 3 所示,在西北针茅生长的 4—8 月上旬,5 cm 地温对西北针茅产量的影响系数曲线呈负效应,较高的地温有利于西北针茅的

生长发育;8 月中、下旬,5 cm 地温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,产量相应增加 $1.24\sim 16.51\text{ kg/hm}^2$,此阶段较高的地温有利于西北针茅的成熟和枯黄。通过 5 cm 地温对

西北针茅产量的影响系数曲线可以看出,从 6 月上旬开始,5 cm 地温对西北针茅气候产量的影响逐渐增大,到 8 月下旬达到最大。分析表明,5 cm 地温

与西北针茅气候产量在 4 月上旬、5 月上旬、6 月上旬呈显著负相关,其中 6 月上旬呈极显著负相关。

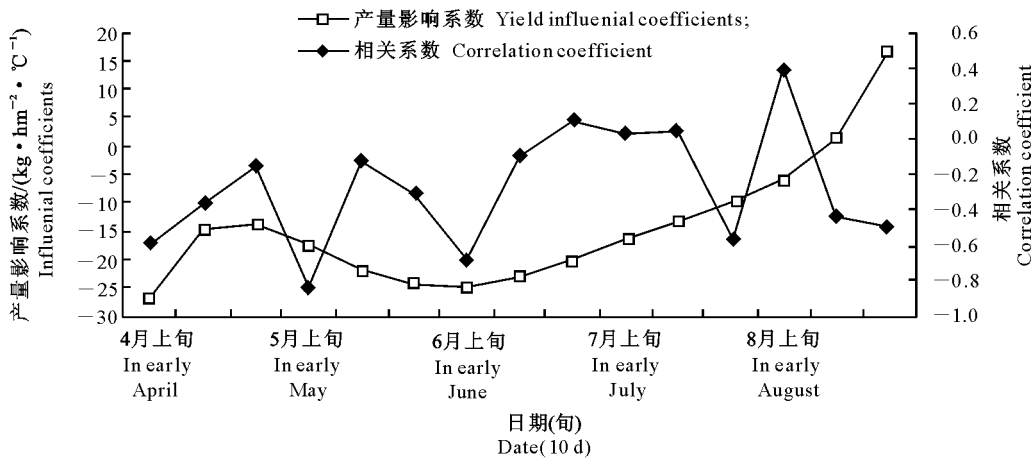


图 3 5 cm 旬平均地温对西北针茅产量影响系数的影响及其相关系数分析

Fig. 3 Effects of ten-day temperature in 0—5 cm soil on *Stipa krylovii* pasture yield and their correlation coefficient

3.1.4 10 cm 地温 由图 4 可以看出,在西北针茅生长的 4—8 月份,仅 8 月下旬的 10 cm 地温对西北针茅产量的影响呈正效应,该时段 10 cm 地温每升高 1℃,产量相应增加 0.92 kg/hm²;其他时间 10 cm 地温对西北针茅产量的影响系数均为负值,4 月上旬、5 月下旬、6 月上旬的影响系数均较低,分别为

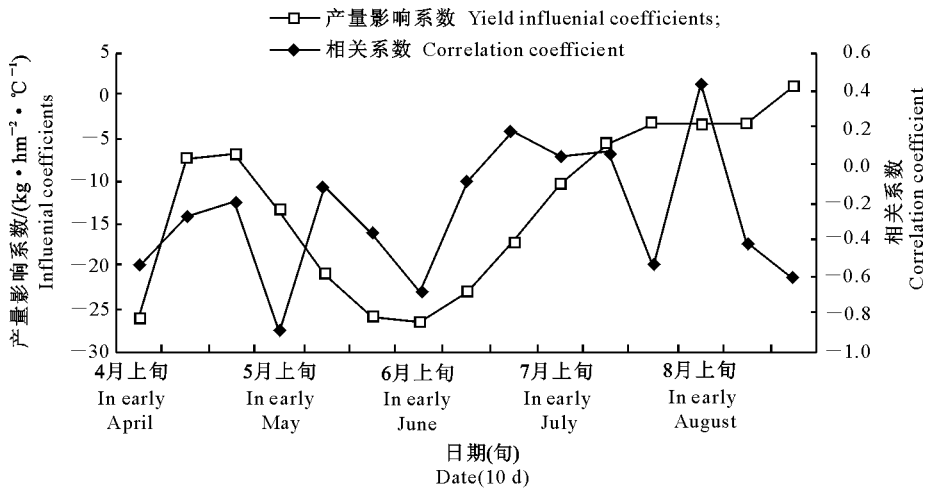


图 4 10 cm 旬平均地温对西北针茅产量影响系数的影响及其相关系数分析

Fig. 4 Effects of ten-day temperature in 0—10 cm soil on *Stipa krylovii* pasture yield and their correlation coefficient

3.2 水分对西北针茅产量的影响

由图 5 可以看出,4 月上旬的降水量对西北针茅产量具有正效应,整个生长季中 4 月上旬的正效应最大,到 5 月上旬已降为负值,表明这一时期降水偏多能显著增加当年的西北针茅产量。4 月上旬降水量每增加 1 mm,产量可增加 71.61 kg/hm²。西北针茅生长季中降水量的另一个呈正效应的时段是 8 月份,该时段降水量每增加 1 mm,产量相应增加 7.08~41.11 kg/hm²。而 4 月中旬至 7 月下旬的降水量则相反表现为负效应,其中 6 月中旬至 7 月中旬在西北针茅全生育期呈最大负效应,其变化趋势为:4 月中旬至 6 月下旬负效应逐渐增加,7 月上旬至 7 月下旬负效应逐渐减弱。

从图 5 还可以看出,降水量与西北针茅气候产

量的单相关系数曲线与影响系数曲线在 4 月下旬至 7 月中旬呈现出相反的变化趋势。4 月下旬、7 月下旬的降水量与西北针茅气候产量的相关系数均通过

了 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.001$ 水平的显著正相关检验,5 月上旬则通过了 $\alpha=0.05$ 水平的显著负相关检验。

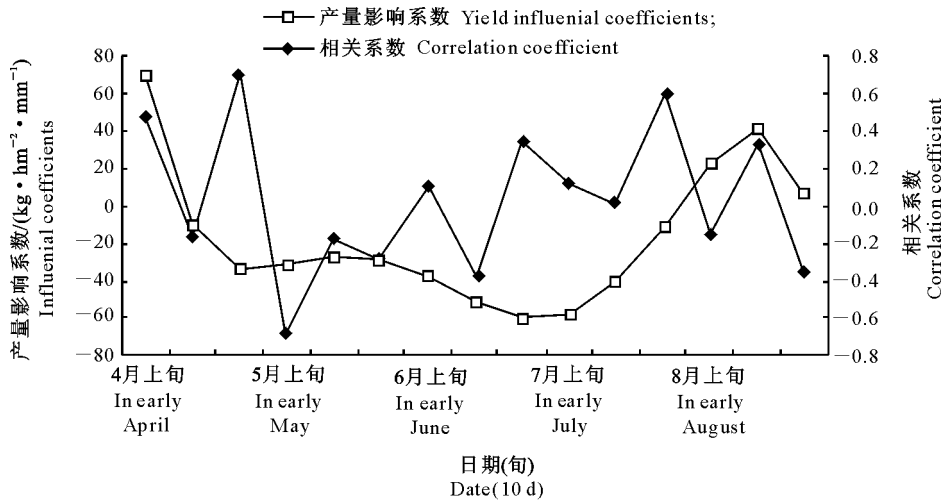


图 5 旬降水量对西北针茅产量影响系数的影响及其相关系数分析

Fig. 5 Effects of ten-day rainfall on *Stipa krylovii* pasture yield and their correlation coefficient

3.3 日照时数对西北针茅产量的影响

从图 6 可以看出,日照时数对西北针茅产量的影响与旬平均气温一样呈“双峰型”曲线,但没有旬平均气温的影响幅度大。4 月份日照时数对西北针茅产量的影响呈负效应,且负效应逐渐减弱。5 月、6 月日照时数对西北针茅产量的影响为正效应,日照时数每增加 1 h,产量增加 0.37~15.66 kg/hm²;

7 月中旬至 8 月下旬,日照时数对西北针茅产量的影响逐渐增加,于 8 月中旬达到最大,此阶段日照时数每增加 1 h,产量增加 1.92~28.23 kg/hm²。4 月中旬和 8 月上旬的日照时数与西北针茅的气候产量分别通过了置信度 $\alpha=0.01$ 水平的极显著负相关和正相关检验。

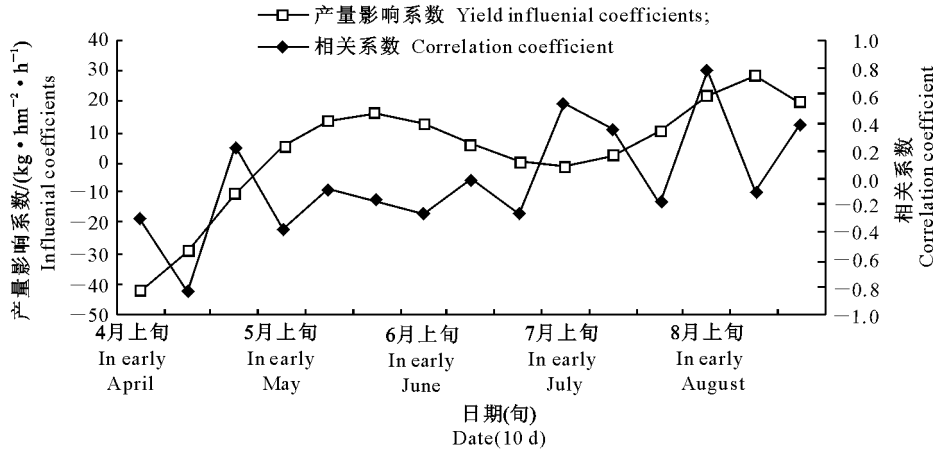


图 6 旬日照时数对西北针茅产量影响系数的影响及其相关系数分析

Fig. 6 Effects of ten-day sunlight duration on *Stipa krylovii* pasture yield and their correlation coefficient

3.4 不同气象要素对西北针茅产量的影响指数

图 7 为高寒草地不同气象要素对西北针茅产量影响指数的旬变化曲线。由图 7 可以看出,对高寒草原西北针茅产量影响最大的首先是降水量,6 月中旬、7 月上旬和 8 月中旬降水量对西北针茅产量的影响指数达到 1150.73~1 470.66 kg/hm²;5 月

中旬至 6 月上旬、6 月下旬、7 月中旬至 8 月上旬降水量对西北针茅产量的影响指数达到 491.72~819.01 kg/hm²;可见对于高寒草地,降水量是造成西北针茅产量波动的主要原因。其次是日照时数,4 月中上旬、5 月中下旬、8 月各旬日照时数对西北针茅产量的影响指数达到 347.90~668.17 kg/hm²。

第 3 是 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温,4 月中旬至 6 月上旬及 8 月下旬 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温对西北针茅产量的影响指数达 207.32~486.40 kg/hm^2 ;第 4 是旬平均气温,其对西北针茅产量的影响主要表现在 4 月中下旬和 7 月

中旬,可以造成 146.22~173.76 kg/hm^2 的产量波动;第 5 是地温,在 5 月中旬至 6 月中旬,5 和 10 cm 地温对西北针茅产量的影响指数分别为 42.46~62.55 kg/hm^2 和 41.46~51.63 kg/hm^2 。

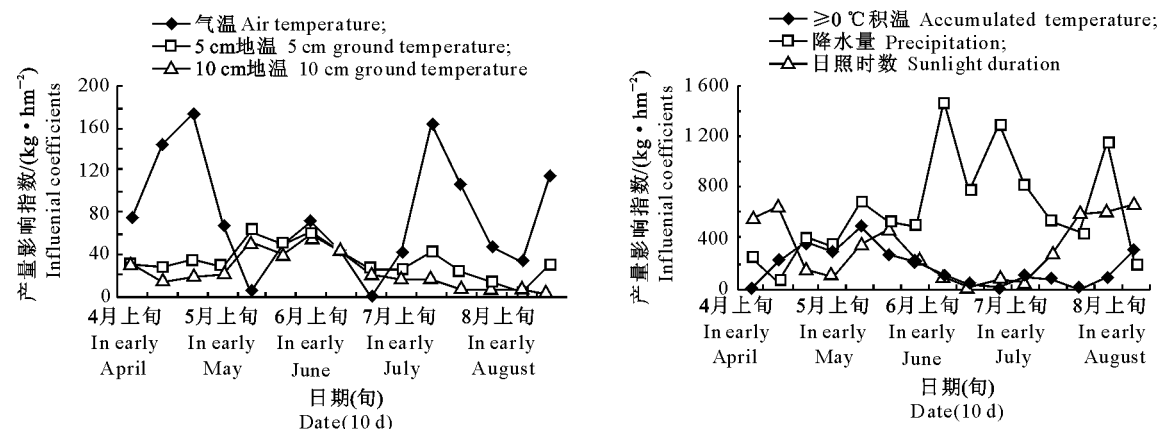


图 7 不同气象要素(温度、积温、降水、地温)对西北针茅产量的影响指数

Fig. 7 Integrated impact index of ten-day different meteorological elements (temperature,cumulative temperature, precipitation,ground temperature) on *Stipa krylovii* pasture yield

4 结论与讨论

1)在西北针茅返青期(4 月上旬),降水量对其产量的影响为正效应,旬平均气温、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、5 cm 和 10 cm 地温、日照时数的影响为负效应,说明返青期气温高,降水量偏少,不能满足西北针茅返青所需的水分条件。此阶段由于降水少、云量少,相应的日照时数偏多,在一定程度上反映了高温、干旱是制约西北针茅返青的气候条件,说明该时段西北针茅经过漫长冬季的风吹日晒和地表蒸发,草地墒情较差,西北针茅返青生长需要较多的水分供应。4 月上旬日照时数、降水量、旬平均气温对西北针茅产量的影响指数分别为 553.77,245.52 和 75.33 kg/hm^2 。

2)在西北针茅返青—抽穗期(4 月中旬至 6 月中旬),当地逐渐进入雨季,降水逐渐增多,同时温度上升较快。 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、5 cm 地温、10 cm 地温、降水量对西北针茅产量的影响系数均呈负效应;日照时数的影响系数从 5 月上旬起为正效应,旬平均气温的影响系数在 4 月中旬至 5 月上旬呈正效应,其中 4 月下旬的正效应为全生育期最大值,达 74.77 kg/hm^2 ,说明此时常有低温冷害发生,在一定程度上反映了低温、寡照是制约西北针茅产量的主要因子。6 月中旬降水量对西北针茅产量的影响指数最大,为 1470.66 kg/hm^2 ,4 月中旬日照时数及 4 月下旬旬平均气温的影响指数分别为 655.15 和

173.765 kg/hm^2 。

3)在西北针茅的抽穗—开花—成熟期(6 月下旬至 8 月中旬),旬平均气温、日照时数对其产量的影响系数呈正效应; $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在 7 月份的影响呈正效应,5 cm 和 10 cm 地温的影响为负效应;降水量在 6 月下旬至 7 月下旬的影响为负效应,进入 8 月份后呈正效应。说明此阶段该地已进入雨季,雨热同期,降水和地温均能满足西北针茅生长的需求,温度较低、日照时数减少将影响西北针茅产量的形成。由于青海兴海县地处半干旱地区,全年降水量主要集中于夏季,各季降水量变化都很大,干旱出现几率大,因此降水量是限制西北针茅产量的主要因子,其生长的快慢决定于降水的多少。6 月下旬至 7 月下旬,大多数牧草陆续孕穗、现蕾、开花,营养生长和生殖生长同时进行,此时水热同期,牧草叶面积系数大、光合作用强。6 月下旬、7 月中旬至 8 月中旬降水量对西北针茅产量的影响指数达到 491.72~819.01 kg/hm^2 ,8 月上、中旬日照时数对西北针茅产量的影响指数达 594.35 kg/hm^2 ,7 月中旬气温的影响指数达 164.83 kg/hm^2 。

4)在西北针茅的成熟—枯黄期(8 月下旬),此时牧草进入籽粒灌浆成熟期,生长缓慢,5 cm 和 10 cm 地温、降水量、日照时数对西北针茅产量的影响呈正效应,而旬平均气温和 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的影响呈负效应。说明此时温度和 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温已不再是影响西北针茅产量的主要因子,其基本能满足牧草生长的

需要,而降水量、日照时数、地温成为影响西北针茅产量的主要因子,如果此期 5 cm 和 10 cm 地温高、光照充足、降水量适宜,可增加光合积累,提高产量。8 月下旬的日照时数、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、旬平均气温、5 cm 地温对西北针茅产量的影响指数分别为 668.17、308.86、192.25、114.26 和 31.68 kg/hm²。

[参考文献]

[1] 杨恒山,曹敏建,李 华.种草养畜与内蒙古自治区农业的可持续发展[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):179-182.
Yang H S,Cao M J,Li H.Relation between cultivating forage for raising livestock and agricultural sustainable development in Inner Mongolia [J].Agricultural Research in the Arid Areas,2004,22(1):179-182.(in Chinese)

[2] 姜丽霞,王玉光,孙孟梅.黑龙江省玉米产量预报模式的研究[J].中国农业气象,2004,25(1):13-16.
Jiang L X,Wang Y G,Sun M M.A study on forecast model for maize climate yield in Heilongjiang Province [J].Chinese Journal of Agrometeorology,2004,25(1):13-16.(in Chinese)

[3] 李英年,周华坤,沈振西.高寒草甸牧草产量形成过程及与气象因子的关联分析[J].草地学报,2001,9(3):232-238.
Li Y N,Zhou H K,Shen Z X.The association analysis of herbage yield and meteorological factors in alpine meadow [J].Acta Agrestia Sinica,2001,9(3):232-238.(in Chinese)

[4] 汪青春.牧草生长发育与气象条件的关系及气候年景研究[J].中国农业气象,1998,19(3):1-7.
Wang Q C.The study between pasture growth and weather conditions [J].Chinese Journal of Agrometeorology,1998,19(3):1-7.(in Chinese)

[5] 王一博,王根绪,沈永平,等.青藏高原高寒区草地生态环境系统退化研究[J].冰川冻土,2005,27(5):633-640.
Wang Y B,Wang G X,Shen Y P,et al.Degradation of the eco-environmental system in alpine meadow on the Tibetan plateau [J].Journal of Glaciology and Geocryology,2005,27(5):633-640.(in Chinese)

[6] 刘明春,马兴祥,尹 东,等.天祝草甸、草原草场植被生物量形成的气象条件及预测模型[J].草业科学,2001,18(3):65-69.
Liu M C,Ma X X,Yin D,et al.Meteorological conditions and forecast model of grass biomass in alpine meadow grassland at Tianzhu,Gansu province,China [J].Pratacultural Science,2001,18(3):65-69.(in Chinese)

[7] 魏永林,许存平,张盛魁.气候变化对海北地区天然草地生物量及生态环境的影响[J].草业科学,2008,25(3):22-26.
Wei Y L,Xu C P,Zhang S K.Effects of climatic changes on biomass and eco-environments of natural grassland in Haibei region of Qinghai province [J].Pratacultural Science,2008,25(3):22-26.(in Chinese)

[8] 郭连云,吴 让,汪青春,等.气候变化对三江源兴海县草地气候生产潜力的影响[J].中国草地学报,2008,30(2):5-10.
Guo L Y,Wu R,Wang Q C,et al.Influence of climate change

on grassland productivity to in Xinghai county in the source regions of Yangtze river [J].Chinese Journal of Grassland,2008,30(2):5-10.(in Chinese)

[9] 文石林,徐明岗.湖南红壤区牧草生产的气候模型[J].草业科学,1998,15(6):36-41.
Wen S L,Xu M G.The climate models of pasture production in Hongrang region of Hunan Province [J].Pratacultural Science,1998,15(6):36-41.(in Chinese)

[10] 刘玉华.紫花苜蓿生长发育及产量形成与气象条件关系的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
Liu Y H.Study on the relationship between Alfalfa growth and yield formation and weather conditions [D].Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2006.(in Chinese)

[11] 穆兴民,彭祥林.牧草气候生产潜力模拟模型与初步应用[J].水土保持学报,1994,8(3):74-80.
Mu X M,Peng X L.A simulating model for pasture climate potential productibility and its primary use in loess plateau [J].Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation,1994,8(3):74-80.(in Chinese)

[12] 赵慧颖.呼伦贝尔市天然牧草生物量与气候条件的定量关系[J].内蒙古气象,2006(4):30-32.
Zhao H Y.The quantitative relation between biological yield of natural grasses and climatic conditions in the Hulunbuir city [J].Meteorology Journal of Inner Mongolia,2006(4):30-32.(in Chinese)

[13] 马 静,程 渡,彭玉梅,等.松辽草原牧草生产力模式与气象因子关系的应用研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2008,29(3):46-48.
Ma J,Cheng D,Peng Y M,et al.Applied study on the relationship between forage production model and climatic factors in Song-liao steppe [J].Journal of Inner Mongolia Agricultural University:Natural Science Edition,2008,29(3):46-48.(in Chinese)

[14] 王有丰.气候因子对天然草地牧草产量的影响[J].贵州农业科学,2009,37(6):63-65.
Wang Y F.The effect of climate factors on the grass yield of natural pasture [J].Guizhou Agricultural Sciences,2009,37(6):63-65.(in Chinese)

[15] 王建林,赵四强.全国棉花产量预报模式[J].气象,1990,16(5):26-29.
Wang J L,Zhao S Q.A cotton yield prediction model of China [J].Meteorological Monthly,1990,16(5):26-29.(in Chinese)

[16] 王建林,太华杰.中国粮食总产量结构分析与丰歉评估[J].气象,1998,24(12):7-12.
Wang J L,Tai H J.The analysis of composition and assessment of bumper or poor harvest for total grain yield in China [J].Meteorological Monthly,1998,24(12):7-12.(in Chinese)