

青海海北地区高山嵩草草甸植物 群落生物量动态及能量分配

王启基 王文颖 邓自发

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要 对青海海北地区高山草甸主要植物群落小嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸、矮嵩草(*K. humilis*)草甸、藏嵩草(*K. tibetica*)沼泽化草甸地上生物量动态和能量分配的研究结果表明, 不同植物群落年地上净生产量及其年际动态和主要植物类群生物量季节动态具明显的差异, 其生物量季节动态可由如下模型表示:

$$W_i = K_i / (1 + \exp(A_i - B_i t))$$

植物群落地上、地下生物量的垂直分布呈典型的金字塔和倒金字塔模式。小嵩草草甸、矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸的地上净生产量依次为 $368.4 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $418.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $518.4 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 所固定的太阳能值依次为 $6655.16 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $7610.09 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $9488.77 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。光能利用率分别为0.1097%、0.1256%、0.1568%。

关键词 植物类群 生物量动态 能量分配 净生产量

THE DYNAMICS OF BIOMASS AND THE ALLOCATION OF ENERGY IN ALPINE KOBRESIA MEADOW COMMUNITIES, HAIBEI REGION OF QINGHAI PROVINCE

Wang Qiji, Wang Wenyang and Deng Zifa

(Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Science, Xining 810001)

Abstract This paper investigates the dynamics of biomass and the allocation of energy for main communities of *Kobresia pygmaea* meadow, *K. humilis* meadow and *K. tibetica* swamp meadow of alpine meadow ecosystem in range of Haibei Qinghai. The results are the following: The difference were obvious in annual aboveground net production and seasonal dynamics of main group biomass among the different community types. The seasonal changes were predicted by logistic equation: $W_i = K_i / (1 + \exp(A_i - B_i t))$

The vertical distribution of aboveground biomass and that of below ground biomass displayed pyramidal and reverse pyramidal model, respectively. In *K. pygmaea* meadow, *K. humilis* meadow and *K. tibetica* swamp meadow, the aboveground net production was $368.4 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 418.5

· 本文于1996-04-25收稿, 1997-03-10收到修改稿。

中国科学院重大项目“我国不同类型生态系统结构、功能及提高生物生产力途径模式的研究”课题和海北开放站基金资助。

· 本文承蒙内蒙古农牧学院富象乾教授、李德新教授指正, 特此致谢。

$g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, $518.4 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$. The solar energy storage was $6650.16 kJ \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, $7610.09 kJ \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ and $9488.77 kJ \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ respectively, in the three communities. Their utilization rates of energy were 0.1097%, 0.1256% and 0.1568%, respectively.

Key words Plant group, Dynamics of biomass, Allocation of energy, Net production

草地是宝贵的可再生资源,高山嵩草甸是高山草甸生态系统初级生产者的主要组成成分,在高原草地畜牧业生产中占有重要的地位和作用,其年净生产量和能量在时间和空间的分布格局将直接影响着高山草甸生态系统的结构与功能、能量流动和物质循环,并制约着放牧家畜和草食野生动物的数量和兴衰。因此,对高山草甸主要植物群落类型生物量动态变化规律及其空间分布的比较研究,不仅能揭示高山草甸生态系统结构、功能以及生物量形成机理和生态过程,而且为高山草甸草场的开发利用、科学管理和草地畜牧业可持续发展提供科学依据。

有关高山草甸生物生产量的研究虽有不少报道(杨福囤等,1986;1989;周立等,1991;李英年等,1996),但主要集中于矮嵩草甸,而且缺乏主要群落之间的比较研究和定量分析。

1 研究方法

本研究在中国科学院海北高山草甸生态系统开放实验站进行,有关该区的自然概况和植被已有报道(杨福囤,1982;周兴民等,1982)。

该研究以高山草甸主要植物群落矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸、小嵩草(*K. pygmaea*)草甸和藏嵩草(*K. tibetica*)沼泽化草甸为对象,选择具有代表性的地段分别设置面积为 $30m \times 30m$ 的固定样地,并用铁丝网围栏作保护。

在植物生长季每月月底分别测定其地上生物量,样方面积为 $50cm \times 50cm$,5~10次重复。并随机抽取3个样方按禾草类、莎草类、杂草类及枯枝落叶分类,称取鲜重后在80℃的恒温箱内烘干至恒重。并于1989年植物生物量的高峰期(8月底),分层测定不同植物群落地上和地下部分生物量的垂直分布特征,地上部分从地表开始每10cm为1层,到最上层为止。地下部分每10cm为1层,到50cm为止,筛出草根,冲洗干净后烘干称重。同时收集和连续测定矮嵩草甸植物群落年地上净生产量和有关的气象资料,并同步测定土壤含水量等环境因子。

2 结果与分析

2.1 高山嵩草甸地上生物量季节动态及生长模型

高山草甸植物由于低温的影响返青较晚,一般从4月21日左右,日平均气温稳定通过3℃开始萌动发芽,其地上干物质即从植物返青开始积累,并随植物生长发育节律和气温的升高,降水量的增加而逐渐增大,其峰值一般出现在8月底或9月初。在植物生长季节,不同植物群落及其主要植物类群地上生物量季节动态具明显差异(图1),其干物质积累过程不尽相同。

由图1可知,在生物量高峰期(8月底),小嵩草甸地上生物量组成依次为杂类草>莎

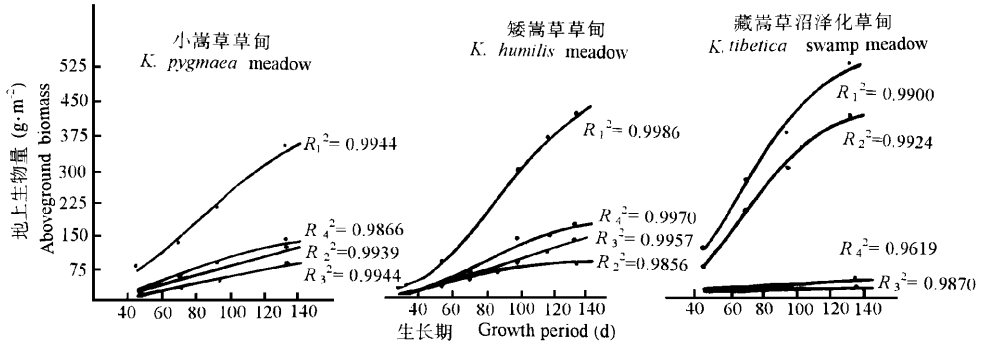


图1 高山草甸主要植物群落地上生物量季节动态

Fig 1 Seasonal dynamics of aboveground biomass of main communities in A pine meadow

草类> 禾草类> 枯枝落叶, 分别占地上总生物量的35.37%、34.38%、23.36%、6.89%; 矮嵩草草甸依次为杂类草> 禾草类> 莎草类> 枯枝落叶, 分别占地上总生物量的39.57%、31.66%、20.10%和8.67%。藏嵩草沼泽化草甸依次为莎草类> 枯枝落叶> 杂类草> 禾草类, 分别占地上总生物量的77.60%、18.09%、2.51%和1.80%。

植物群落各类群地上生物量(W)和时间(t)之间的动态关系可由 Logistic 生长模型(表1)表示, 通过相关指数的显著性检验, 差异显著($P < 0.01$), 生长模型的效果良好。

表1 高山草甸主要植物群落地上生物量季节动态的回归方程

Table 1 The regression equation of seasonal dynamics of aboveground biomass of main communities in A pine meadow

	小嵩草草甸 <i>K. pygmaea</i> meadow	矮嵩草草甸 <i>K. humilis</i> meadow	藏嵩草沼泽化草甸 <i>K. tibetica</i> swamp meadow
植物群落(1) Community	$W_1 = 448.3 / (1 + \exp(3.2081 - 0.0352t))$	$W_1 = 431.87 / (1 + \exp(3.9728 - 4.4220t))$	$W_1 = 552.63 / (1 + \exp(3.1476 - 0.0457t))$
莎草类 (2) Sedges	$W_2 = 137.3 / (1 + \exp(4.3542 - 0.0507t))$	$W_2 = 95.18 / (1 + \exp(2.9548 - 3.9132t))$	$W_2 = 418.80 / (1 + \exp(3.9679 - 0.0534t))$
禾草类 (3) Grasses	$W_3 = 96.30 / (1 + \exp(4.2316 - 0.0472t))$	$W_3 = 162.40 / (1 + \exp(4.1430 - 4.2178t))$	$W_3 = 9.92 / (1 + \exp(3.3845 - 0.0457t))$
杂草类 (4) Forbs	$W_4 = 148.1 / (1 + \exp(3.1727 - 0.0385t))$	$W_4 = 173.04 / (1 + \exp(4.5948 - 5.8148t))$	$W_4 = 13.49 / (1 + \exp(2.9829 - 0.0468t))$
枯枝落叶(5) Litter	$W_5 = 0.0054t^2 - 0.9177t + 51.5200$	$W_5 = 0.0108t^2 - 1.7413t + 76.4883$	$W_5 = 225.87 / (1 + \exp(2.3757 - 0.0152t))$

* t : 自4月21日起的天数 The number of days from 21th April

小嵩草草甸和矮嵩草草甸枯枝落叶生物量的季节动态呈“V”字形曲线, 即返青初较高, 7月底最低, 此后逐渐升高到枯黄期达到最大, 说明气温最高, 降水充足的7月份有利于土壤微生物的活动, 大部分枯枝落叶被分解, 此时枯枝落叶的分解率大于积累(王启基等, 1995a)。而藏嵩草沼泽化草甸则相反, 在生长季内枯枝落叶的生物量呈逐渐增长的趋势。这是由于藏嵩草沼泽化草甸的土壤含水量高, 冠层相对湿度大, 温度低, 不利于土壤微生物

物的活动和枯枝落叶的分解, 在生长季内枯枝落叶的积累大于分解, 这也是沼泽化草甸土壤有机质含量高, 并形成泥炭土的重要原因之一(王启基等, 1995b)。

2.2 矮嵩草草甸植物群落地上净生产量年间动态及预测预报模型

根据1980~1993年测定的结果, 高山矮嵩草草甸地上净生产量年间差异较大(表2), 其变动范围在 $260.4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ~ $430\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 平均值为 $342.0\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最高值为 $430.0\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (1983年), 最低值为 $260.4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (1982年), 前者为后者的1.6倍。据我们的观测年地上净生产量与诸气候因子的相关分析表明, 年地上净生产量与气温年较差($r=0.7387, P<0.01$)、4月降水量($r=0.5338, p<0.05$)呈显著正相关, 与5月平均气温($r=0.4876$)、年降水量($r=0.3222$)呈正相关, 而与1月平均气温($r=-0.7257, p<0.01$)呈负相关。由于封育状态下的天然草地人为干扰甚微, 并且每年测定的时间基本一致, 因此不同年间牧草地上净生产量的差异受控于气象因子的变化而波动。通过年地上净生产量与上述11个气候因子的逐步回归分析, 矮嵩草草甸年地上净生产量的预测预报模型为:

$$W = 22.0053x_5 + 1.1869x_7 + 0.3707x_8 - 293.2563$$

$$(r^2 = 0.7887 \quad P < 0.01, \quad F = 3.35 \quad p < 0.05)$$

式中: x_5 为气温年较差, x_7 为4月降水量, x_8 为7月降水量

根据实测值与预测值的比较, 误差范围在0.08%~15.95%, 平均值为4.79%。经 t 值检验($t=0.0001 \quad P>0.90$), 差异不显著, 并用1994、1995年的实测值($390.8\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $416.8\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和预测值($345.7\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $375.5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 误差分别为12.56%和9.91%, 预测效果较好, 可在生产中应用。

这是因为, 高山草甸植物年地上净生产量主要受水热条件的制约, 而且以热量和降水的季节分配尤为重要。周立(1991)的研究指出, 由于年降水变化相对较小, 在水分条件中降水分配是引起高山草甸初级生产年间变化的突出因素(周立等, 1991)。该区春旱现象较为严重, 对年净生产量影响较大。当年温差较大时, 冬季寒冷, 土壤中的水分冻结, 不易蒸发, 有利于保墒, 加之4月份降水较多有利于植物返青, 7月正是各类植物生长旺盛阶段, 此时的气温和降水将直接影响当年植物干物质的积累, 因此逐步回归分析结果与实际生产基本相符。

2.3 高山草甸主要植物群落地上、地下生物量的垂直分布

由于受青藏高原高海拔和寒冷气候的影响, 高山草甸植物群落结构简单, 层次分化不明显, 植物地上、地下生物量的分布呈典型的金字塔和倒金字塔模式(图2)。

由图2可以看出, 小嵩草草甸植物群落0~10cm冠层中的生物量约占地上总生物量的91.79%。10cm以上冠层中的生物量仅占8.21%。其中, 10~20cm及大于20cm冠层中的生物量分别占7.16%和1.05%。虽然禾本科植物的植株较高, 可达30cm, 但数量很少, 而且分布不均, 层次分化不明显。0~10cm土层中的生物量约占地下总生物量的90.43%, 10cm以下土层中仅占9.57%。其中, 10~20cm、20~30cm、30~50cm土层中的生物量分别占7.47%、1.67%和0.43%。地上生物量高峰期(8月底), 地上($368.4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、地下生物量($5604.8\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的比值为1:15.21。

矮嵩草草甸植物群落的结构较复杂, 它在重度放牧条件下层次分化不明显, 一般呈单

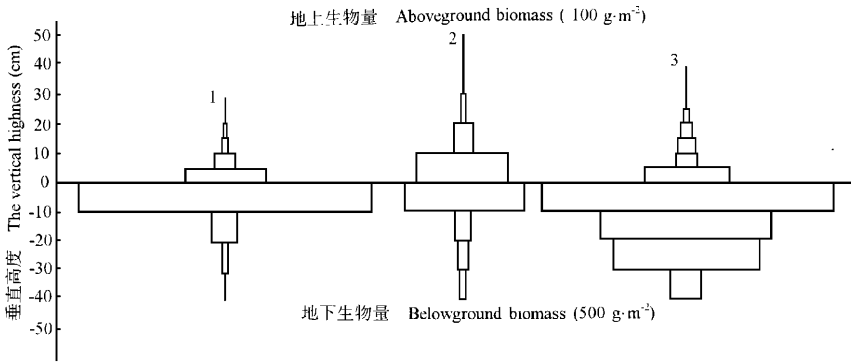


图 2 高山草甸主要植物群落地上、地下生物量垂直分布

Fig 2 The vertical distribution of above-below ground biomass of main communities in alpine meadow

1. 小嵩草草甸 *K. pygmaea* meadow 2. 矮嵩草草甸 *K. humilis* meadow
3. 藏嵩草草甸 *K. tibetica* swamp meadow

层结构; 轻度放牧或半封育(夏秋季节封育, 冬春季节放牧)条件下呈双层结构, 即以禾本科植物为上层, 莎草科和双子叶植物为下层的两层结构。0~ 10cm 冠层中的生物量约占地上总生物量的75.90%, 10cm 以上冠层中的生物量占24.10%。其中, 10~ 20cm、20~ 30cm、30~ 40cm、40~ 50cm 和大于50cm 冠层中的生物量分别占15.36%、4.07%、1.58%、2.08% 和1.01%。0~ 10cm 土层中的生物量约占地下总生物量的80.42%, 10cm 以下土层中的生物量仅占19.58%。其中, 10~ 20cm、20~ 30cm、30~ 50cm 土层中的生物量分别为8.80%、7.00%、3.78%。地上生物量高峰期为8月底, 地上($418.5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、地下生物量($2578.0\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的比值为1:7.56。

藏嵩草沼泽化草甸植物群落结构简单, 禾本科植物的最大株高可达40cm, 但数量少分布不均, 层次分化不明显。0~ 10cm 冠层中的生物量约占地上总生物量的71.70%, 10cm 以上冠层中的生物量仅占28.30%。其中, 10~ 20cm、20~ 30cm、30~ 40cm 和大于40cm 冠层中的生物量分别占20.73%、5.31%、1.78% 和0.47%。藏嵩草沼泽化草甸植物地下生物量的垂直分布有别于上述小嵩草草甸和矮嵩草草甸。由于藏嵩草具有发达的通气根, 因而根系分布较深。其中, 0~ 10cm 土层中的生物量约占地下总生物量的45.51%, 10~ 20cm、20~ 30cm 和30~ 50cm 土层中的生物量分别占26.40%、23.16% 和4.93%。地上生物量高峰期为8月底, 地上($518.4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、地下生物量($11183.2\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的比值为1:21.57。植物地上、地下生物量的这种垂直分布特征充分反映了高山草甸植物的生物-生态学特性以及对高寒环境的适应特征。

2.4 高山草甸主要植物群落的能量分配及其光能利用率

本研究是在无放牧条件下进行, 因此年地上净生产量为各类群生物量的增重和枯枝落叶年凋落量的总和。本文采用单位时间、面积上所生产的干物质和固定的太阳能值表示。为了便于不同植物群落类型的比较, 我们于1989年8月底同步测定其生物量, 热值按主要种群的热值含量加权平均。

由图3可以看出, 小嵩草草甸、矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸植物群落每年所固定

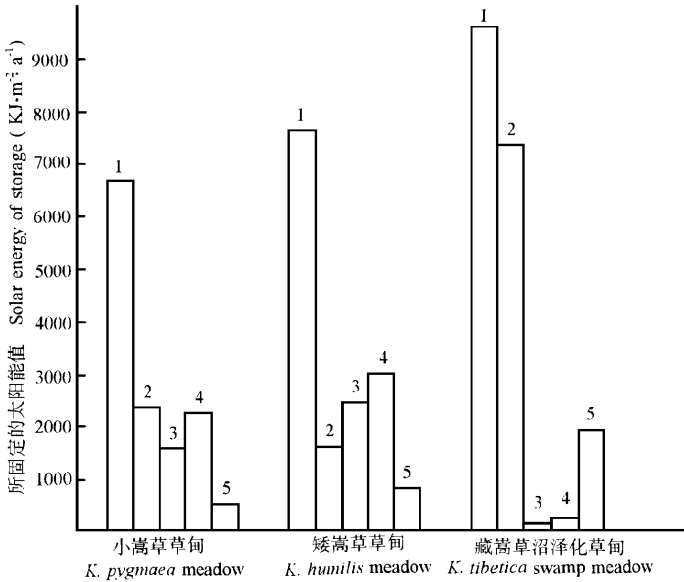


图3 高山草甸主要植物群落地上部分能量分配及光能利用率

Fig 3 The allocation of energy and utilization ratio of solar energy on main communities in alpine meadow

1. 总和 Total 2. 莎草类 Sedges 3. 杂类草 Forbs
4. 禾草 Grasses 5. 枯枝落叶 Litter

的太阳能值以及群落组成中的能量分配不尽相同。其中,藏嵩草沼泽化草甸年地上净生产量($518.4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和所固定的太阳能值最大($9488.77\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),其次为矮嵩草草甸($418.5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $7610.09\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),小嵩草草甸最小($368.4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $6650.16\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。小嵩草草甸植物地上部分的能量分配依次为莎草类(35.10%) > 杂类草(34.15%) > 禾草类(23.33%) > 枯枝落叶(7.42%);矮嵩草草甸依次为杂类草(38.84%) > 禾草类(31.57%) > 莎草类(20.31%) > 枯枝落叶(9.28%);藏嵩草沼泽化草甸依次为莎草类(76.53%) > 枯枝落叶

(19.20%) > 杂类草(2.36%) > 禾草类(1.91%)。若以该地区太阳总辐射能($60610.00\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)计,则小嵩草草甸、矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸的光能利用率分别为0.1097%、0.1256%和0.1568%。若以光合有效辐射能($24850.10\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)计,光能利用率分别为0.2679%、0.3062%和0.3819%。

2.5 高山嵩草草甸的评价及其持续利用

由于高山草甸分布地区的海拔较高,立地条件严酷,生长季节短暂,严重制约了初级生产力水平的提高。但在植物生长季内水热分布趋于同步,为牧草的生长发育创造了极为有利的条件,生产潜力很大。虽然高山嵩草草甸植物的植株矮小,产草量较低,但是优势种植物的热值含量较高(杨福国等,1989),草质柔软,营养丰富(表3),生草层较厚,而且富有弹性,耐牧性强,是高原特有种畜——藏系绵羊和牦牛的优良放牧场。其净生产量略高于分布在世界各地年降水量约500mm的温带草原的年净生产量($300\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 干物质)(Lauenroth, 1979),与甘肃天祝的高山线叶嵩草草甸的年净生产量($340.1\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 干物质)相近(胡自治等,1988),高于川西北高山嵩草草甸的年净生产量($299.8\sim 526.4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,鲜草重)(周世永等,1984)和西藏那曲地区的高山嵩草草甸的年净生产量($73.6\sim 86.7\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 鲜草重)(张普金等,1991)。目前由于粗放经营,超载过牧,鼠虫危害以及人类活动的干扰,草地退化日趋严重,生产力水平下降,优良禾本科牧草锐减,毒杂草滋生,有些甚至成为寸草不生的次生裸地——“黑土滩”。这种发展趋势不仅为青藏高原主要草地害鼠——高原鼠兔(*Ocheotona curzoniae*)和高原鼯鼠(*Myspallax baileyi*)的生存和繁衍

创造了条件, 而且对青藏高原的资源和环境造成极大的威胁。由于高山草甸主要植物群落类型之间生态环境的差异, 其群落结构、功能和能量分配不尽相同。因此, 针对不同草地类型和生产水平, 确定草地资源利用模式、适宜的载畜量和草地利用率是保护高山草甸草地资源和生态环境的关键。实现围栏划区轮牧、充分利用高山牧区夏秋季节生产潜力大、牧草品质优良的优势(表4), 开展季节畜牧业生产。大力推广生物防治草原鼠虫害的新技术, 减少环境污染, 保护天敌。加强草地资源的优化管理和开发利用, 尤其是沼泽化草地的开发利用。并在退化严重的地段进行松耙、补播、施肥等恢复与重建的综合技术措施, 使草地植被尽快得到恢复, 生态环境有所好转, 以促进高山草地畜牧业生产的持续发展。

表3 高山高草草甸主要植物群落营养成分含量

Table 3 The contents of nutrient element of main plant community in Alpine *Kobresia* meadow (%)

群落类型 Type of community	项目 Item	粗蛋白质 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	粗纤维 Crude cellulose	无氮浸出物 Extract free nitrogen	粗灰分 Crude ash	钙 Ca	磷 P
小高草草甸 <i>K. pygmaea</i> meadow	地上部分 Aboveground	11.16	4.53	19.28	56.65	8.38	1.116	0.116
	地下部分 Belowground	4.08	1.72	30.67	48.35	15.18	0.862	0.083
矮高草草甸 <i>K. humilis</i> meadow	地上部分 Aboveground	13.47	3.50	26.06	48.90	8.07	0.988	0.172
	地下部分 Belowground	6.29	2.32	29.69	51.79	9.90	1.221	0.080
藏高草草甸 <i>K. tibetica</i> swamp meadow	地上部分 Aboveground	10.09	3.48	27.24	52.65	6.14	0.877	0.110
	地下部分 Belowground	5.46	1.85	27.70	55.08	9.91	1.019	0.094

采样时间: 小高草草甸、藏高草草甸为8月31日, 矮高草草甸为8月16日

Sampling date: It is August 31 for *Kobresia pygmaea* meadow and *K. tibetica* swamp meadow.

It is August 16 for *K. humilis* meadow

表4 矮高草草甸植物群落营养成分含量季节动态

Table 4 Seasonal dynamics of nutrient element for plant community in *Kobresia humilis* meadow (%)

地上部分 Aboveground								
月/日 Month/day	粗蛋白质 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	粗纤维 Crude cellulose	无氮浸出物 Extract free nitrogen	粗灰分 Crude ash	钙 Ca	磷 P	
5/16	14.22	4.31	23.03	48.92	9.44	0.964	0.163	
7/15	14.74	3.15	25.98	47.38	8.75	0.801	0.167	
8/16	13.47	3.50	26.06	48.90	8.07	0.988	0.172	
10/16	6.50	3.81	30.27	44.18	15.24	0.936	0.044	
X	12.14	3.69	26.33	47.34	10.37	0.922	0.136	
地下部分 Belowground								
5/16	7.00	2.06	26.36	57.14	7.44	1.084	0.067	
7/15	5.81	2.13	29.51	51.89	10.66	1.122	0.077	
8/16	6.29	2.32	29.69	51.79	9.90	1.221	0.079	
10/16	6.49	2.16	25.83	50.22	15.31	0.934	0.097	
X	6.40	2.17	27.85	52.26	10.83	1.090	0.082	

参 考 文 献

- 王启基、周兴民等, 1995a: 高寒小嵩草草原化草甸植物群落结构特征及其生物量, 植物生态学报, 19(3) 225~ 235。
- 王启基、周兴民等, 1995b: 高寒藏嵩草沼泽化草甸植物群落结构及其利用, 高寒草甸生态系统, 北京: 科学出版社, (4) 91~ 100。
- 李英年、王启基、周兴民, 1996: 矮嵩草草甸年净生产量对气候条件响应的判别分析, 草地学报, 4(2) 155~ 161。
- 杨福囤, 1982: 高寒草甸生态系统定位站的自然概况, 高寒草甸生态系统, 兰州: 甘肃人民出版社, 1~ 8。
- 杨福囤、王启基等, 1986: 青藏高原植物热值含量与畜牧业生产, 自然资源, (2) 24~ 30。
- 杨福囤、王启基等, 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, 北京: 科学出版社, 64~ 71。
- 周兴民、李建华, 1982: 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, 高寒草甸生态系统, 兰州: 甘肃人民出版社, 9~ 18。
- 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应用程序, 高寒草甸生态系统研究的若干数学模拟模型(周立、王祖望主编), 北京: 科学出版社, 45~ 111。
- 周世永、胡继昌, 1984: 论川西北草原开发利用研究, 川西北草原开发利用研究, 成都: 四川民族出版社, 1~ 12。
- 张普金、陈全功等, 1991: 西藏那曲地区草地资源, 西藏那曲地区草地畜牧业资源, 兰州: 甘肃科学技术出版社, 14~ 46。
- Lauenroth W. K. , 1979: Grassland primary production: North American grassland in perspectives. In N. R. French (ed.) Perspectives in grassland ecosystem. New York: Springer Verlag, *Ecological studies* 32: 3~ 21。