

# 2001 - 2008 年甘南牧区草地地上 生物量与载畜量遥感动态监测

梁天刚<sup>1\*</sup>, 崔霞<sup>2</sup>, 冯琦胜<sup>1</sup>, 王莺<sup>1</sup>, 夏文韬<sup>1</sup>

(1. 兰州大学草地农业科技学院 农业部草地农业生态系统学重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 草地上生物量监测是草地资源空间格局动态研究的重要内容,也是草畜平衡综合分析的基础。利用 2006 - 2008 年甘南牧区草地调查资料和 Terra/ MODIS 每日地表反射率产品 MOD09GA,建立了草地地上生物量遥感反演模型,模拟分析了甘南州及各县市草地资源在 2001 - 2008 年期间的各旬、月和年的生物量及理论载畜量变化动态。研究表明,MODIS 增强型植被指数 EVI 的乘幂函数可以较好地模拟甘南牧区草地地上的生物量鲜重,拟合模型平均估产精度为 76.7%,可很好地模拟牧草生长状况较好时期(5 - 10 月)的草地地上生物量变化动态。甘南牧区草地生长主要集中在 5 月上旬 - 10 月下旬期间,草地旬最大地上生物量数字图像可以较客观地反映草地植被生长发育的总体规律。但是,个别旬生物量受大范围长时间阴雨多云天气状况及放牧家畜数量有较大变动情况的严重影响。2001 - 2008 年不同草地类型的月最大生物量动态变化曲线均呈单峰抛物线形式,全州平均最大生物量均出现在 7 月,但不同年份产量达到最大值的月份有所变化,主要集中在 7 - 8 月。甘南州草地上总生物量年度之间存在较大的差异。全州 8 年平均总地上生物量为 109.31 亿 kg。2005 年全州草地植被年总生物量最高,达 129.1 亿 kg,其次为 2006、2007 和 2002 年,分别为 113.2、110.7 和 109.0 亿 kg。由于气候条件和不同县市草地面积及生长状况等存在较大差异,其理论载畜量也存在显著差别。

**关键词:** 甘南牧区;草地上生物量;载畜量;遥感监测

**中图分类号:** S127;S812 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5759(2009)06-0012-11

\* 1999 年 12 月和 2002 年 2 月发射成功的美国新一代对地观测系统(Earth Observing System, EOS)卫星 Terra 和 Aqua 均带有中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS),具有观测从太阳短波到热红外,光谱范围从 0.415 ~ 14.235  $\mu\text{m}$  的 36 个光谱波段,地面分辨率为 250, 500 和 1 000 m,可以反映陆地、云特征、生物地理、地表温度等特征信息。近年来,EOS/ MODIS 资料已广泛应用于植被生态、土地利用和土地覆盖、自然灾害等方面的监测和研究<sup>[1]</sup>。

利用 MODIS 资料开展天然草地资源的遥感动态监测,已成为当前国际草地科学研究中的前沿课题,对快速确定合理载畜量和加强草场科学管理等均具有重要的意义。植被指数是表征地表植被特征的重要指标,MODIS 植被指数可以更好地反映植被的时空变化特征,已成为当前植被及其变化动态宏观研究的主要遥感资料和热点问题。MODIS 光谱分辨率较高,波幅窄,避免了几个大气吸收带,在计算植被指数时有更严格的去云算法和比较彻底的大气校正<sup>[1,2]</sup>。MODIS - NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)是已有 20 年积累的 NOAA - NDVI 系列的延续,增强型植被指数 EVI(Enhanced Vegetation Index)利用 MODIS 辐射仪的优点,订正地表反射率以提高对高生物量区的敏感性,并通过叶冠背景信号耦合和减少大气影响来提高植被监测精度。这 2 个植被指数可以在研究全球植被、提高植被变化的检测和提取叶冠生物物理参数方面相互补充<sup>[3]</sup>。使用 MODIS 资料已进行的相关研究有草地植被指数的空间变化规律分析<sup>[4-7]</sup>、草地地上部分生物量及初级生产力反演<sup>[8-17]</sup>、草地退化状况、草地植被盖度、草地利用强度、土地覆盖变化监测等<sup>[18-23]</sup>。但是,在现有的草地上生物量建模方面,还存在选用哪种植被指数及地面实测草地样方同 MODIS 植被指数产品在时间尺度上难以匹配,导致监测模

\* 收稿日期:2008-12-22;改回日期:2009-01-05

基金项目:“863”计划:国家高技术研究发展专项经费(2007AA10Z232)资助。

作者简介:梁天刚(1967-),男,甘肃崇信人,教授。

\* 通讯作者。E-mail: tgliang@lzu.edu.cn

型精度及稳定性较差等问题。

针对以上问题,本研究的目标包括 2 个方面:1)利用高时间分辨率的 Terra/ MODIS 的每日地表反射率产品 MOD09GA,通过建立甘南州 2001 - 2008 年的日、旬、月和年 NDVI 和 EVI 数据库,改进草地地上生物量遥感动态监测模型及其精度;2)模拟分析 2001 - 2008 年草地植被的地上生物量和载畜量时空变化特征,为甘南牧区草地资源监测和草畜动态平衡研究及决策提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

甘南牧区位于甘肃省西南部,青藏高原东北缘,地处黄河、长江源头,是甘肃省重要的畜牧业生产基地,也是全国主要的少数民族集聚的草原牧区之一。地理坐标为 33°06' ~ 35°44' N, 100°46' ~ 104°44' E, 平均海拔 3 000 m。气候属典型的高原大陆性气候,高寒阴湿,多年平均降水量 400 ~ 800 mm,年均温仅 1 ~ 3 °C, 10 °C 积温持续期仅有 2 个多月,全年平均日照时数 2 200 ~ 2 400 h。据 1982 年草地资源详查的结果<sup>[12]</sup>,甘南州主要草地类型有高寒灌丛草甸、高寒草甸、温性草甸草原、温性草原、低平地草甸、暖性草丛和沼泽。全州天然草地面积 260.25 万 hm<sup>2</sup>,占全州土地总面积的 67.64%,其中可利用草地 249.50 万 hm<sup>2</sup>,占草地总面积的 95.86%<sup>[24,25]</sup>。

自 20 世纪 80 年代以来,甘南州生态环境不断恶化,草地退化严重,草地产草量下降了 25% ~ 45%,90% 的天然草地存在不同程度的退化,中度以上的退化草地占全州天然草地面积的 80%,沼泽面积由 1982 年的 8 万 hm<sup>2</sup> 减少到 2 万 hm<sup>2</sup>,黄河补充水量减少 15% 左右。由于长期依赖于牧业生产的牧民占全州总人口的 82.65%,牧区草地超载、低投入和缺乏科学管理等原因,甘南草地资源的退化问题愈演愈烈,面积不断扩大,已成为制约草地畜牧业及社会经济可持续发展的重要因素<sup>[26-30]</sup>。

### 1.2 草地外业调查

外业调查主要集中在 2006 - 2008 年草地生长季期间。根据草地类型的空间分布特点和面积大小,对甘南地区不同类型的草地设计了不同数目的样地。在 2006 - 2007 年 7 - 8 月期间,主要对分布面积较大的高寒灌丛草甸和高寒草甸进行了调查。2006 年设置样地 46 个,包括 66 个样方;2007 年设置样地 47 个,包括 133 个样方。2008 年进一步扩大了草地调查的范围和类型,设置样地 43 个,调查样方 172 个。

样地设置主要选择在草地植被空间分布比较均一,可以代表较大范围的典型地段。在植被群落一致性较好的样地内设置 1 或 2 个 0.5 m × 0.5 m 的样方,在植被比较复杂、分布不均匀的区域设置 3 或 4 个 1.0 m × 1.0 m 的样方。样地基本特征调查主要记录样地所隶属行政区、草地类型、地形、坡度、坡向、土壤质地、地表特征、季节利用方式、利用状况等。利用 GPS 测定样方的经纬度和海拔,同时在样方内采用常规植被调查法测定植被盖度、草层平均高度、植物种数、群落组成及优势物种名称、不可食牧草种数、总产草量和可食产草量等指标。

### 1.3 每日 Terra/ MODIS 地表反射率数据

MODIS 数据来自 NASA MODIS 陆地产品组开发的 Terra 卫星的每日地面反射率产品 MOD09GA。该产品包含 MODIS 地面分辨率为 500 m 和 1 km 的 1 ~ 7 通道每日地表反射率观测数据和地学定位统计数据,已对大气、气溶胶及薄卷云的影响进行了校正。本研究使用了空间分辨率为 500 m 且空间位置在全球正弦投影系统中编号为 h26v05 的数字图像,数据格式为 EOS - HDF,时间序列为 2005 - 2007 年 1 - 12 月、2001 - 2004 年和 2008 年 4 - 10 月的每日数据,数字图像值域范围为 - 100 ~ 16 000。

### 1.4 MODIS 植被指数合成数据

MODIS 归一化差值植被指数 NDVI 的计算公式为:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

式中,NIR 和 Red 分别为红外波段和红光波段经过大气校正的地面反射率。

MODIS 增强型植被指数 EVI 是对 AVHRR - NDVI 的继承和改进,具体计算公式为:

$$EVI = 2.5(NIR - Red) / (NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L) \quad (2)$$

式中,NIR、Red 和 Blue 分别为经过大气校正的近红外、红光和蓝光通道的反射值;L = 1,为土壤调节参数,参数 C1 和 C2 分别为 6.0 和 7.5。

每日 Terra/MODIS 植被指数 NDVI 和 EVI 的具体计算方法如下:1) 图像投影坐标转换。使用 MRT(MODIS Reprojection Tools) 软件,将下载的 MOD09GA 产品 500 m 分辨率的 1~7 通道地表反射率数据的地图投影 SIN 转换为 WGS84/Albers 地图投影系统,把 HDF 格式转化为 Tiff 格式;2) 图像数据格式转换。利用 ArcGIS 软件,将 1~7 通道地表反射率数据的 Tiff 格式转换为 ArcGIS 的 grid 格式;3) 每日植被指数图像的合成。利用 ArcGIS 的 GRID 模块及公式(1)和(2),分别计算每日 Terra 卫星的 NDVI 和 EVI 数字图像;4) 多日 MODIS 最大植被指数图像的合成。采用最大值合成方法(MVC: Maximum Value Composite),生成研究区 2005 - 2007 年 1 - 12 月和 2001 - 2004 年及 2008 年 4 - 10 月的 NDVI 和 EVI 旬、月、年最大植被指数合成数字图像。

### 1.5 草地植被地上生物量遥感动态监测模型

在建立草地植被地上生物量遥感动态监测模型时,为了减少气象条件(如降水、阴天多云等)对植被指数的影响,并且使地面实测样方资料同多日 MODIS 合成数据在时间尺度上能够更好地相匹配,本研究对数据进行了如下处理:1) 基础数据库的建立。利用 ArcGIS 9.1 软件,建立了甘南地区 2006 - 2008 年地面调查样点空间分布、行政分区、草地资源类型等数据库。2) 每日地面反射率值的提取。利用 ArcGIS 软件和 2006 - 2008 年地面调查样方点数据库,分别提取各样方点在 7 - 8 月的每日地面反射率值;3) 样方点 10 日最大植被指数的计算。利用 MS Excel 统计分析软件,计算各样方点每日植被指数 NDVI 和 EVI 值。依据各样方点外业具体观测日期及其之前的 9 d 的植被指数数据,合成 10 日最大植被指数 NDVI 和 EVI 值。4) 遥感监测模型的建立。利用 SPSS 统计分析软件、各样方点实测的草地鲜草产量数据及相应的 10 日最大植被指数 NDVI 和 EVI 值,建立 NDVI 和 EVI 与草地地上生物量遥感监测模型,比较分析和选择最优模型。5) 模型精度评价。利用误差统计公式[式(3)],对遥感监测模型的精度进行综合评价。

$$P = 100 \times |L_{\text{实测值}} - L_{\text{反演值}}| / L_{\text{实测值}} \quad (3)$$

式中, $P$  为平均估产误差(%), $L_{\text{实测值}}$  和  $L_{\text{反演值}}$  分别代表地面实测的草地鲜草产量和遥感监测模型反演的数值。

### 1.6 草地地上生物量与载畜量变化动态

利用研究区草地生物量遥感动态监测模型及 ArcGIS 软件空间建模等分析模块,主要研究:1) 甘南全州及各县市不同草地类型在 2001 - 2008 年冷季(1 - 4 月、11 - 12 月)和牧草主要生长期(5 - 10 月)的旬、月和年最大生物量及生物量密度变化动态;2) 利用 5 - 10 月期间甘南及各县市草地月最大地上生物量鲜重平均值,结合各类草地的面积、可利用草地面积系数、可食牧草系数、草地放牧利用系数数据,对比分析 2001 - 2008 年期间可食产草量和理论载畜量的变化特点。

在全年放牧条件下,理论载畜量的计算公式如下:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times y_i \times k_{i,1} \times k_{i,2} \times k_{i,3})}{I \times D} \quad (4)$$

式中, $C$  为某区域内各类型草地总载畜量(SHU,标准羊单位); $A_i$  为第  $i$  类草地面积( $\text{hm}^2$ ), $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , 代表不同的草地类型; $y_i$  为第  $i$  类草地的牧草单产( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $k_{i,1}$ 、 $k_{i,2}$  和  $k_{i,3}$  分别为第  $i$  类草地的可利用面积系数、可食牧草系数和草地放牧利用率; $I$  为 1 只标准成年绵羊日采食量( $\text{kg}/\text{D}$ ),本研究按 5 kg 鲜草计算; $D$  为草地放牧利用的天数,按 365 d 计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地地上生物量遥感监测模型

地上生物量是草地资源动态监测的重要指标之一。根据各样方的牧草生物量和其对应的 NDVI、EVI 等植被指数值,通过 SPSS 11.0 统计软件,采用一元线性回归模型、等比级数曲线模型(Growth 生长曲线模型)、指数函数、对数函数、乘幂函数和多项式函数模拟分析植被指数同牧草生物量之间的相关关系,研究结果表明,乘幂函数可以较好地模拟 MODIS/NDVI、EVI 与草地鲜重之间的相关关系。EVI 与草地鲜重的相关性大于 NDVI 与草地鲜重的相关性,相关系数达 0.797(表 1、图 1)。

表 1 甘南牧区草地植被指数与地上部分生物量鲜重回归模型  
Table 1 Regression models between vegetation index and aboveground biomass  
in Gannan pastoral area ( P < 0.001 , N = 199 )

回归模型 Model	植被指数 VI	模拟方程 Equation	R <sup>2</sup>	F
1、线性模型 Linear model $y = ax + b$	EVI	$y = 15\ 860x - 3\ 361$	0.584	276.37
	NDVI	$y = 17\ 470x - 7\ 202$	0.308	87.55
2、指数模型 Exponential model $y = ae^{bx}$	EVI	$y = 953.7e^{2.94x}$	0.631	337.21
	NDVI	$y = 421.6e^{3.38x}$	0.361	111.27
3、生长模型 Growth model $y = e^{(a+bx)}$	EVI	$y = e^{(6.86+2.94x)}$	0.631	337.21
	NDVI	$y = e^{(6.04+3.38x)}$	0.361	111.27
4、对数模型 Logarithm model $y = a + b \ln x$	EVI	$y = 10\ 880 + 8\ 835 \ln x$	0.571	261.72
	NDVI	$y = 9\ 637 + 12\ 660 \ln x$	0.303	85.65
5、乘幂模型 Power model $y = ax^b$	EVI	$y = 13\ 583x^{1.665}$	0.636	344.64
	NDVI	$y = 10\ 996x^{2.469}$	0.362	111.90
6、多项式模型 Polynomial model $y = a + bx + cx^2$	EVI	$y = -3\ 943 + 16\ 330x - 400.6x^2$	0.584	137.49
	NDVI	$y = 37.7 - 2\ 390x + 13\ 440x^2$	0.309	43.89

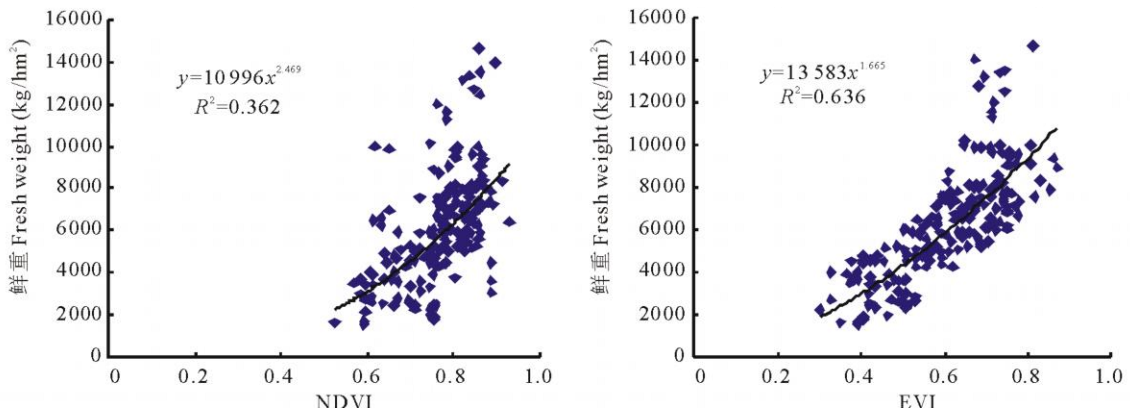


图 1 甘南牧区草地地上生物量与 NDVI 和 EVI 回归模型比较

Fig. 1 Comparison of the regression models between grassland aboveground biomass, NDVI and EVI in Gannan pastoral area

从回归分析的结果可以看出(表 1),基于 MODIS - EVI 的草地植被地上生物量鲜重最优拟合模型为:

$$y = 13\ 583x^{1.665} \quad (R^2 = 0.636, P < 0.001, N = 199) \quad (5)$$

式中,y 为草地鲜重(kg/hm<sup>2</sup>),x 为 MODIS 的 EVI 值。

统计分析的结果表明,式(5)平均估产精度为 76.7%,平均高估误差(负向误差)大于低估误差(正向误差)约 10%。当 EVI 大于 0.4 时,估产精度可达 70.2%~82.5%,但 EVI 小于 0.4 时估产精度较低(表 2)。由此可见,反演模型可很好地模拟牧草生长状况较好时期(5 - 10 月)的地上生物量变化动态。对该时期生物量的准确估算,是进行全年草地理论载畜量、草畜平衡动态研究的关键。

### 2.2 甘南州草地地上生物量旬变化动态

草地生物量是衡量草地生产力大小的标准之一,也是衡量植物生长发育的一个重要指标。对 2001 - 2008 年甘南州旬草地最大地上总生物量的分析表明,近 8 年草地旬生物量具有如下变化规律:从 4 月下旬草地植被开始生长,4 月下旬 - 8 月上旬生物量逐渐增大,7 月上旬 - 8 月上旬达到产量高峰值;8 月中旬 - 11 月下旬生物量逐渐减小;12 月上旬 - 次年 1 - 4 月中旬,草地植被基本停止生长(图 2)。可见,甘南牧区草地生长主要集中在 5 月上旬 - 10 月下旬,草地旬最大地上生物量数字图像可以客观地反映草地植被生长发育的总体规律。但是,在草地

表 2 草地上生物量鲜重最优拟合模型精度评价

Table 2 Accuracy evaluation for the optimum simulated model of grassland aboveground biomass (y)

EVI 值	样本数	EVI 均值	EVI 标准差	y 均值	y 标准差	平均精度	平均误差	正误差(低估误差)	负误差(高估误差)
EVI value	No. sites	Mean	Std. error	Mean y	Std. error	Mean accuracy	Mean error	Positive error	Negative error
<0.4	14	0.367	0.031	2 965.5	1 099.0	58.9	41.1	28.7	- 68.9
0.4~0.5	25	0.443	0.030	3 503.5	1 030.7	70.2	29.8	20.8	- 38.2
0.5~0.6	63	0.545	0.032	4 983.2	1 488.0	74.6	25.4	16.0	- 35.6
0.6~0.7	57	0.652	0.028	7 317.4	2 007.6	82.5	17.5	17.7	- 17.3
0.7~0.8	31	0.739	0.022	8 342.7	2 008.6	81.1	18.9	16.5	- 21.0
>0.8	5	0.831	0.026	9 470.0	2 235.8	80.4	19.6	19.8	- 19.6
0~0.1	199	0.603	0.126	6 200.6	2 608.1	76.7	23.3	18.4	- 28.6

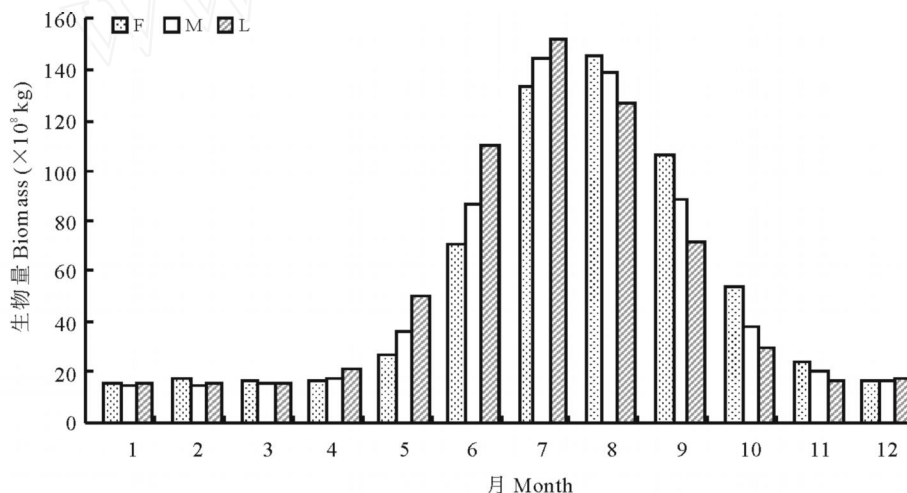


图 2 甘南州 2001 - 2008 年草地植被平均旬生物量变化动态

Fig. 2 Average 10 d dynamics of grassland vegetation biomass during 2001 - 2008 in Gannan Prefecture

F: 上旬 First third of the month; M: 中旬 Middle third of the month; L: 下旬 Last third of the month

植被主要生长期间的个别旬生物量(如 2002 年 9 月中旬、2007 年 10 月中旬)出现较低的异常现象(图 3)。在冷季期间(1 月上旬 - 4 月中旬及 11 月上旬 - 12 月下旬),生物量旬变化也出现中旬比下旬小的异常情况(如 2005 年 1 - 2 月和 12 月、2006 年 1 - 3 月和 12 月、2007 年 1 - 3 月)。研究表明,出现这种情况的主要原因是部分旬最大植被指数图像受大范围长时间阴天多云天气状况的严重干扰,其次是因为在部分旬期间放牧家畜数量的较大变动(如集中出栏等)引起采食量较大幅度的减小。因此,利用草地植被主要生长期(5 月上旬 - 10 月下旬)各月内的旬最大生物量值(或月最大生物量值),可以避免个别旬生物量的异常数值,计算该区全年草地资源生物量的空间分布动态,为草畜动态平衡和草地资源的综合评价提供科学依据。

2.3 甘南州草地生物量月度变化动态

虽然草地旬最大地上生物量数字图像的时间分辨率高(上旬和中旬为 10 d、下旬为 8~11 d),但旬生物量反演结果受天气状况的较大干扰,因此研究甘南牧区月度生物量变化动态具有重要意义。对 2001 - 2008 年草地的月最大生物量及其密度的统计分析表明,不同草地类型 8 年 1 - 12 月的生物量均值的月度动态变化均呈单峰抛物线形式,8 年平均最大生物量均出现在 7 月,其平均最大生物量密度达 6 370.96 kg/hm<sup>2</sup>,但不同年份产量达到最大值的月份有所变化,主要集中在 7 - 8 月。不同草地类型的生物量在冷季(1 - 4 月及 11 - 12 月)和生长季节的暖季时期(5 - 10 月)具有显著差异。在草地植被生长季期间,平均生物量密度最高的为沼泽类,达 4 885.26 kg/hm<sup>2</sup>,其次分别为高寒灌丛草甸类、高寒草甸类、温性草甸草原类、低平地草甸类、暖性草丛类和温性草原类。

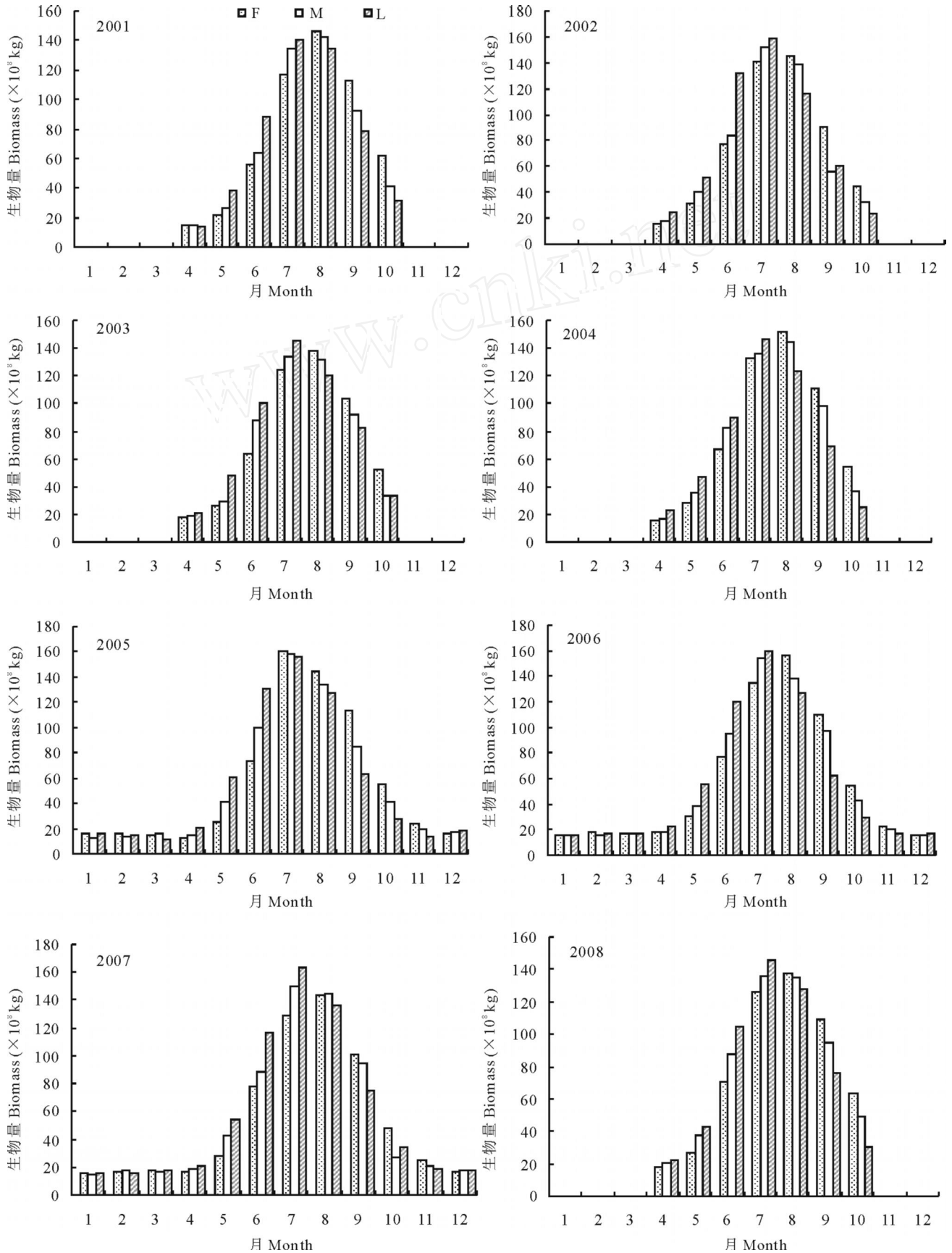


图 3 甘南州 2001 - 2008 年草地植被旬生物量变化动态

Fig. 3 The 10 d dynamics of grassland vegetation biomass from 2001 to 2008 in Gannan Prefecture

F: 上旬 First third of the month; M: 中旬 Middle third of the month; L: 下旬 Last third of the month

在草地植被几乎停止生长的冷季时期,沼泽类的平均地上生物量密度仍然最高,达 894.57 kg/hm<sup>2</sup>,其次分别为高寒灌丛草甸类、高寒草甸类、暖性草丛类、温性草甸草原类、低平地草甸类和温性草原类(表 3)。

#### 2.4 甘南州草地地上生物量年度变化动态

对比分析甘南州草地地上生物量 2001 - 2008 年度的动态变化特征,可以发现,2005 年各县及全州的草地植被年总生物量最高,全州达 129.13 亿 kg,其次为 2006,2007 和 2002 年,分别为 113.17,110.66 和 109.00 亿 kg。全州 8 年平均总地上生物量为 109.31 亿 kg(表 4)。分析甘南州 8 个气象台站 2001 - 2007 年的降水量等气象数据、地上生物量和畜牧业统计资料表明,不同年度间的降水量存在较大差异是引起草地上生物量年度变异的主要原因。

#### 2.5 甘南州草地理论载畜量变化动态

表 5 和 6 是 2001 - 2008 年甘南州及各县市草地主要生长期间的月最大理论载畜量和年最大理论载畜量统计分析结果。在全年放牧条件下,不同县市因草地面积、产量等存在较大差异,其载畜量在不同月份的差别也较大(表 5)。玛曲、碌曲和夏河 3 县在 5 - 10 月的平均载畜量分别占全州相同月份总载畜量的 37.3%,16.7%和 19.3%。由于气候条件和草地生长状况的较大差异,同一地区在不同年度之间的理论载畜量也存在明显的差异。例如,在 2001 - 2008 年,各县市的载畜量在 2005 年均达到最大值,全州达 395.32 万 SHU,超过 8 年平均载畜量约 18.9%(表 6)。此外,甘南牧区具有比较明确的冬春场和夏秋场,因此除计算出全年不分季节的载畜量外,还

表 3 甘南州 2001 - 2008 年草地月平均最大地上生物量密度统计结果

Table 3 Result of the monthly maximum grassland aboveground biomass density during

2001 - 2008 in Gannan Prefecture

kg/hm<sup>2</sup>

项目 Item	低平地草甸 Lowland meadow	暖性草丛 Warm-temperate herbosa	沼泽 Marsh	温性草原 Temperate steppe	温性草甸草原 Temperate meadow steppe	高寒灌丛草甸 Alpine brush meadow	高寒草甸 Alpine meadow	平均值 Average value
1 月 Jan.	553.51	490.17	750.23	472.69	526.47	669.91	627.78	662.99
2 月 Feb.	537.40	539.21	754.11	491.99	558.41	706.02	652.91	697.67
3 月 Mar.	505.56	631.80	757.71	495.45	540.82	711.09	651.01	702.19
4 月 Apr.	624.49	1 128.15	1 025.67	566.85	719.93	843.69	793.94	837.42
5 月 May	1 408.63	2 531.24	2 642.29	1 407.15	2 383.64	1 946.96	1 863.10	1 940.72
6 月 Jun.	3 106.22	3 601.47	5 658.17	3 089.31	4 797.93	4 462.38	4 468.47	4 455.25
7 月 Jul.	4 920.01	3 896.35	7 294.27	4 219.68	5 410.40	6 398.72	6 400.20	6 370.96
8 月 Aug.	4 391.90	3 313.02	6 603.86	3 367.80	4 252.39	5 957.76	5 808.60	5 905.97
9 月 Sep.	3 417.86	2 686.82	4 708.31	2 474.36	2 877.08	4 262.89	4 049.79	4 215.04
10 月 Oct.	1 942.52	1 643.62	2 404.68	1 384.95	1 630.19	2 128.65	1 975.21	2 102.78
11 月 Nov.	785.75	938.97	1 115.13	628.98	795.18	941.78	889.36	934.18
12 月 Dec.	610.15	580.25	819.29	501.49	587.06	709.98	677.57	704.51
5 - 10 月均值 Mean of May to Oct.	3 197.86	2 945.42	4 885.26	2 657.21	3 558.60	4 192.89	4 094.23	4 165.12
1 - 4 月均值 Mean of Jan. to Apr.	555.24	697.33	821.93	506.74	586.41	732.68	681.41	725.06
11 - 12 月均值 Mean of Nov. to Dec.	697.95	759.61	967.21	565.23	691.12	825.88	783.46	819.34
冷季均值 Mean of cold season	626.59	728.47	894.57	535.99	638.76	779.28	732.44	772.20

1 - 3 月和 11 - 12 月的数据为 2005 - 2007 年的均值,其余数据均为 2001 - 2008 年 8 年的平均值。The data in January, February, March, November and December are the average values during 2005 - 2007, and the rest data are the average values during 2001 - 2008.

应分别计算冷季(1 - 4 月和 11 - 12 月)草场和暖季(5 - 10 月)草场的载畜量,这将是今后工作的重点研究内容之一。

表 4 2001 - 2008 年甘南州年地上生物量鲜重统计结果

Table 4 Yearly fresh weight of aboveground biomass during 2001 - 2008 in Gannan Prefecture

×10<sup>8</sup> kg

项目 Item	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	8 年平均 Mean
玛曲县 Maqu	38.64	41.21	37.92	39.54	47.71	42.53	41.53	37.78	40.86
碌曲县 Luqu	17.33	18.73	16.85	17.67	20.88	19.35	18.66	17.38	18.36
夏河县 Xiahe	18.58	20.45	19.74	20.54	25.41	22.02	22.12	20.86	21.21
合作市 Hezuo	6.35	6.79	6.43	6.77	8.26	7.02	6.93	6.77	6.91
临潭县 Lintan	1.84	2.12	1.98	1.94	2.38	2.09	2.04	2.12	2.07
卓尼县 Zhuoni	11.96	12.71	11.86	11.89	15.56	13.00	12.38	12.42	12.72
舟曲县 Zhouqu	2.13	1.97	2.14	2.01	2.60	2.18	2.14	2.24	2.18
迭部县 Diebu	4.87	5.02	4.71	4.56	6.34	4.97	4.87	4.68	5.00
全州 Total	101.70	109.00	101.64	104.92	129.13	113.17	110.66	104.25	109.31

草地主要生长期(5 - 10 月)各月最大地上生物量鲜重平均值。The data are the average values of the monthly maximum aboveground biomass during the major growing period of grassland(from May to October).

表 5 甘南州 2001 - 2008 年草地生长期(5 - 10 月)的月平均载畜量变化动态

Table 5 Dynamics of monthly carrying capacity in grassland growing period (from May to October)

during 2001 - 2008 in Gannan Prefecture

×10<sup>4</sup> SHU

月份 Month	玛曲县 Maqu	碌曲县 Luqu	夏河县 Xiahe	合作市 Hezuo	临潭县 Lintan	卓尼县 Zhuoni	舟曲县 Zhouqu	迭部县 Diebu	全州 Total
5	54.18	24.06	28.83	9.59	3.62	19.18	5.37	8.87	153.69
6	126.27	58.61	68.79	22.92	7.73	44.30	8.00	17.99	354.61
7	189.23	84.68	99.81	32.53	9.81	60.35	9.28	22.92	508.62
8	180.04	80.30	91.65	29.95	8.46	53.97	8.03	19.80	472.19
9	129.88	57.14	64.56	20.80	5.56	37.94	6.14	14.86	336.88
10	64.32	27.83	31.37	10.27	2.91	18.93	3.59	8.43	167.66
5 - 10 月均值 Average	123.99	55.44	64.17	21.01	6.35	39.11	6.74	15.48	332.27

表 6 甘南州 2001 - 2008 年草地生长季(5 - 10 月)年载畜量统计结果

Table 6 Dynamics of yearly carrying capacity in grassland growing period (from May to October)

during 2001 - 2008 in Gannan Prefecture

×10<sup>4</sup> SHU

项目 Item	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	8 年平均 Mean
玛曲县 Maqu	109.15	126.23	116.16	121.09	146.04	130.28	127.20	115.72	123.99
碌曲县 Luqu	50.95	56.77	51.07	53.54	63.28	58.65	56.55	52.68	55.44
夏河县 Xiahe	53.30	62.23	60.07	62.51	77.37	67.00	67.32	63.55	64.17
合作市 Hezuo	18.22	20.77	19.68	20.71	25.27	21.47	21.22	20.72	21.01
临潭县 Lintan	5.50	6.55	6.12	6.00	7.34	6.46	6.30	6.53	6.35
卓尼县 Zhuoni	34.03	39.46	36.83	36.92	48.30	40.36	38.43	38.55	39.11
舟曲县 Zhouqu	6.58	6.10	6.63	6.23	8.04	6.76	6.61	6.94	6.74
迭部县 Diebu	14.77	15.57	14.63	14.15	19.67	15.43	15.10	14.53	15.48
全州 Total	292.50	333.69	311.18	321.15	395.32	346.42	338.74	319.21	332.27



### 3 结论

1) MODIS 增强型植被指数 EVI 的乘幂函数可以较好地模拟甘南牧区草地地上生物量鲜重与 EVI 之间的相关关系,拟合模型为  $y = 13\ 583 x^{1.665}$  ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。该模型平均估产精度为 76.7%,可很好地模拟牧草生长状况较好时期(5-10月)的草地地上生物量变化动态。

2) 甘南牧区草地生长主要集中在 5 月上旬-10 月下旬期间,草地旬最大地上生物量数字图像可以较客观地反映草地植被生长发育的总体规律。但是,草地植被旬生物量受大范围长时间阴天多云天气状况及放牧家畜数量有较大变动时期的严重影响。

3) 不同草地类型的生物量在冷季和暖季时期具有显著差异。2001-2008 年不同草地类型的平均月最大生物量动态变化曲线均呈单峰抛物线形式,不同年份产量达到最大值的月份有所变化,主要集中在 7-8 月。

4) 在全年放牧条件下,甘南州不同县市因气候条件和草地类型、面积、生长状况等存在较大差异,其草地地上总生物量及载畜量在不同年度之间也存在明显的差别。研究多年草地植被生物量和载畜量变化动态,是草畜动态平衡研究和草地资源综合评价的基础。

### 参考文献:

- [1] 王正兴,刘闯, Huete A. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-986.
- [2] 王正兴,刘闯,陈文波,等. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. 武汉大学学报, 2006, 31(5): 407-427.
- [3] Huete A, Didan K, Miura T, *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 195-213.
- [4] 卢丽萍,赵成义. 基于 MODIS 数据不同荒漠植被指数的空间变化研究——以新疆三工河流域为例[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 381-385.
- [5] 邢旗,刘爱军,刘永志. 应用 MODIS-NDVI 对草原植被变化检测研究[J]. 草地学报, 2005, 13(增刊): 15-19.
- [6] 赵冰茹,刘闯,王晶杰,等. 锡林郭勒草地 MODIS 植被指数时空变化研究[J]. 中国草地, 2004, 26(1): 1-8.
- [7] 毕晓丽,王辉,葛剑平. 植被归一化指数(NDVI)及气候因子相关起伏型时间序列变化分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 284-288.
- [8] 王正兴,刘闯,赵冰茹,等. 利用 MODIS 增强型植被指数反演草地地上生物量[J]. 兰州大学学报, 2005, 41(2): 10-15.
- [9] 徐斌,杨秀春,陶伟国,等. 中国草原产草量遥感监测[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 405-413.
- [10] Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, *et al.* Aboveground biomass in Tibetan grasslands[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73: 91-95.
- [11] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, *et al.* Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95: 164-176.
- [12] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, *et al.* Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102: 282-292.
- [13] Li Z G, Yu G R, Xiao X M, *et al.* Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107: 510-519.
- [14] Yang F, Ichii K, White M A, *et al.* Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110: 109-122.
- [15] Sims D A, Rahman A F, Cordova V D, *et al.* A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 1633-1646.
- [16] Chasmer L, Barr A, Hopkinson C, *et al.* Scaling and assessment of GPP from MODIS using a combination of airborne lidar and eddy covariance measurements over jack pine forests[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 82-93.

- [17] Prieto B A, North P R, Barnsley M J, *et al.* Satellite-driven modelling of Net Primary Productivity (NPP): Theoretical analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 137-147.
- [18] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯. 基于单时相 MODIS 数据的草地退化遥感监测研究[J]. *中国草地学报*, 2007, 29(7): 39-43.
- [19] 韩爱惠. 用 MODIS 植被指数的时间序列分析提取荒漠化敏感区域的方法[J]. *林业资源管理*, 2004, (1): 57-60.
- [20] 刘勇洪, 牛铮. 基于 MODIS 遥感数据的宏观土地覆盖特征分类方法与精度分析研究[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(4): 217-224.
- [21] 刘爱军, 韩建国. 利用遥感技术监测锡林郭勒天然草原利用强度方法初探[J]. *中国草地学报*, 2007, 29(2): 70-74.
- [22] 宋小宁, 赵英时. 应用 MODIS 卫星数据提取植被 - 温度 - 水分综合指数的研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(2): 13-17.
- [23] Cleugh H A, Leuning R, Mu Q Z, *et al.* Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 285-304.
- [24] 甘肃省草原总站. 甘肃草地资源[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1999.
- [25] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司全国畜牧兽医总站. 中国草地资源[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1996.
- [26] 陈建华. 环境恶化:甘南州如何拉生态建设一把[J]. *执政决策*, 2005, (2): 18-19.
- [27] 洛桑·灵智多杰. 青藏高原甘南生态经济示范区研究[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 2005.
- [28] 王兮之, 杜国祯, 梁天刚, 等. 基于 RS 和 GIS 的甘南草地生产力估测模型构建及其降水量空间分布模式的确立[J]. *草业学报*, 2001, 10(2): 95-102.
- [29] 赵雪雁. 高寒牧区草地退化的人文因素研究——以甘南牧区玛曲县为例[J]. *草业学报*, 2007, 16(6): 113-120.
- [30] 仁青吉, 罗燕江, 王海洋, 等. 青藏高原典型高寒草甸退化草地的恢复——施肥刈割对草地质量的影响[J]. *草业学报*, 2004, 13(2): 43-49.

**Remotely sensed dynamics monitoring of grassland aboveground biomass and carrying capacity during 2001 - 2008 in Gannan pastoral area**

LIANG Tian-gang<sup>1</sup>, CUI Xia<sup>2</sup>, FENG Qi-sheng<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, XIA Wen-tao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Grassland Agro-ecology System, Ministry of Agriculture; College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract :** Monitoring grassland aboveground biomass (GAB) is not only an important content for the research of spatial patterns of grassland resources, but is also a basis for the integration analysis of the balance between grassland forage supply and livestock demand. Grassland investigation data from 2006 - 2008 and Terra/MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) daily surface reflectance product of MOD09GA in Gannan pastoral area, were used to establish both a monitoring model of GAB, and the 10-day, monthly and yearly dynamics of biomass and theoretical livestock carrying capacity during 2001 - 2008 in Gannan Prefecture. And each county was simulated and analyzed. Results suggested that the power function of MODIS - EVI (Enhanced Vegetation Index) can best simulate the green yield of GAB in Gannan pastoral area. The mean precision of the monitoring model was 76.7%, which might simulate the GAB dynamics in the period from May to October when the grassland was at a good growing stage. It mainly concentrated in the period from the first 10-days of May to the third 10-days of October during the grassland growth time. During this period digital images of the maximum GAB in a 10-day period may objectively reflect the general rule of grassland growth, but a few of the digital images of the maximum GAB were severely affected by rainy or cloudy weather condition which lasted a long time and covered a large scale, with a considerable change in the quantity of grazing livestock. The dynamic curve of the monthly maximum GAB for each grassland type during 2001 - 2008 was characterized by a unimodal parabola form. The average maximum GAB appeared in July, but the month that the GAB reached the maximum value varied from year to year, mainly in the period from July to August. There were great differences in the overall biomasses in different years in the Gannan pastoral area. The average overall biomass during those years in the overall Prefecture was  $109.31 \times 10^8$  kg. The highest value appeared in 2005 ( $129.1 \times 10^8$  kg), followed by 2006 and 2007, which reached  $113.2 \times 10^8$ ,  $110.7 \times 10^8$ , and  $109.0 \times 10^8$  kg, respectively. Due to the differences of weather condition, grassland area and growth situation, there was a significant difference for the theoretical livestock carrying capacity in each county.

**Key words :** Gannan pastoral area; grassland aboveground biomass; grassland carrying capacity; remotely sensed monitoring