

文章编号: 1008 - 2786 - ( 2013 ) 6 - 664 - 08

# 西藏高原中部草地地上生物量遥感估算方法

除 多<sup>1 2</sup> 普布次仁<sup>2</sup> 德吉央宗<sup>2</sup> 姬秋梅<sup>3</sup> 唐 洪<sup>2</sup>

( 1. 中国气象局成都高原气象研究所拉萨分部, 西藏 拉萨 850000; 2. 西藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨 850000;  
3. 西藏自治区畜牧科学研究所, 西藏 拉萨 850000)

**摘 要:** 为了充分利用现有 MODIS 卫星遥感数据和 NASA 等提供的相关陆地数据产品, 实现对西藏高原草地生物量量化业务监测和草地退化研究, 利用西藏高原中部 2004 年 5—9 月草地植被生长期的实测地上生物量, 结合同期的 MODIS 16 d 合成产品 MOD13Q1 *NDVI* 和 *EVI* 数据, 建立了草地生长期地上生物量遥感监测模型和方法; 同时, 从植被非生长季等不同时段遥感监测业务需求出发, 研究了以 2 个月为时间尺度的草地地上生物量量化监测和估算模型。得出的主要结论如下: 1. 基于 MODIS *NDVI* 的指数函数模型是监测和估算西藏高原中部草地生长期地上生物量大小的最优模型, 在所有模型中有最高的相关系数( 0. 778) 和 *F* 检验值( 127. 557) 。 2. 由于绿色植被所独有的光谱响应特征, 无论是 MODIS *NDVI* 还是 *EVI* 对植被生长期鲜草生物量估算的精度要好于总地上生物量。 3. 以 2 个月为时间尺度的监测结果来看, 除 1—2 月草地总地上生物量和 5—6 月的鲜草生物量与 MODIS *NDVI* 之间分别表现为乘幂函数和线性关系外, 其他都呈基于 *NDVI* 的指数函数关系, 且相关系数都大于 0. 64, 其中植被生长时期的相关系数要大于非生长季节; 对于草地总地上生物量, 最高的相关程度出现在 8—9 月, 为 0. 749, 最低出现在非生长季节 1—2 月, 为 0. 644; 对鲜草生物量估算, 基于 *NDVI* 的相关系数都 > 0. 73, 最高的 8—9 月达 0. 826。

**关键词:** 草地地上生物量; 估算方法; 西藏中部

**中图分类号:** Q948 X87

**文献标志码:** A

草地生态系统是陆地生态系统中分布面积最广的生态系统类型之一, 是草地畜牧业发展最重要的物质基础, 对全球生态环境、碳循环和气候调节起重要的作用。我国草地面积约占陆地总面积的 1/3<sup>[1]</sup>, 主要分布在东北、内蒙古、黄土高原、青藏高原及新疆等地, 其中高寒草地则主要分布在青藏高原<sup>[2]</sup>。

西藏高原是青藏高原的主体, 面积约占青藏高原的一半。草地生态系统是青藏高原分布面积最广的自然生态系统类型, 占西藏总土地面积的 71. 15%<sup>[3]</sup>, 是西藏畜牧业赖以生存和发展的物质基础, 也是高原生态安全屏障的重要组成部分。近年来, 由于全球气候变化、过度放牧、人类活动加剧, 使得西藏高原的草地退化严重<sup>[4-5]</sup>, 导致草地生物量减少和积累过程的变化, 直接降低了草地生态系统

的物质生产能力, 加重了草畜失衡的矛盾<sup>[6]</sup>。草地生物量估算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。建立草地植被生物量估算方法, 及时准确地获得区域草地产量数据, 对草地退化机理研究与治理、指导草地畜牧业生产、维护草地生态系统的持续稳定发展以及研究陆地生态系统的碳循环都具有重要的意义。

尽管传统的野外调查获得实测的生物量数据比较可靠, 单点精度很高, 但很难在整个研究区内进行大范围比较均匀地实地调查取样。由于草地生物量分布的空间异质性较大, 因此如果简单地利用有限的实地调查所获得的平均生物量数据来推算整个区域的生物量则可能产生较大误差<sup>[2]</sup>。卫星遥感技术的飞速发展和各种不同时间、空间、波谱分辨率遥

收稿日期( Received date): 2012 - 12 - 23; 改回日期( Accepted): 2013 - 03 - 15。

基金项目( Foundation item): 西藏自治区重点科技计划项目( 201015); 公益性行业( 气象) 科研专项( GYHY201206040) 。[Key Projects of Science and Technology of Tibet Autonomous Region, No. 201015; China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest, No. GY-HY201206040. ]

作者简介( Biography): 除多( 1969 - ) , 西藏白朗县人, 博士, 研究员, 主要从事环境遥感与 GIS 应用。[Chu Duo( 1969 - ) , Ph D, Professor, specialized in remote sensing and GIS applications in Tibetan Plateau. ] E-mail: chu\_d22@hotmail. com

感数据的日益增多,以及其更为宏观、动态性更强和监测范围更大的特点,卫星遥感估算方法在区域到大尺度草地生物量监测中得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。卫星遥感数据的应用在很大程度上可以弥补地面调查取样的不足,而且解决草地生物量估算中从点到区域的尺度转换问题<sup>[8]</sup>。然而,卫星遥感毕竟是通过植被指数等指标作为中间变量来间接地监测植被的,其精度有限。所以需要根据具体情况和区域特点,用常规地面调查来验证和完善遥感统计模型,从而提高区域生物量等植被参数的监测精度。

目前,西藏高原草地退化研究和业务化监测,大多以从不同时空尺度遥感信息获取的植被指数为主要信息源,直接推算草地退化程度、监测草地长势和生物量变化为主,缺少这些草地生物物理参数的定量化遥感监测模型。为此,本研究以每月 2 次较连续的地面草地生物量观测,结合同期的 MODIS MOD13Q1 植被指数产品,建立了适合西藏高原中部 5—9 月植被生长季节和不同月份草地上生物量定量化遥感监测模型和方法,旨在使这些 MODIS 遥感监测模型能够在草地植被生长和非生长季节植被监测和生物量估算中发挥作用,并用于常规的遥感监测业务中,最终为草地退化、草地生产力的季节性变化、草地资源有效管理和利用等领域提供服务。

1 材料与方法

1.1 研究区及采样点概况

草地上生物量野外采样点设置在西藏高原中部当雄县、墨竹工卡县和拉萨市周边。该地区属于

高原温带半干旱季风气候区,年平均温度 1.5 ~ 7.8℃,分布特点是南部雅鲁藏布江河谷及其支流拉萨河谷向北部逐渐降低;年平均降水在 340 ~ 594 mm,呈从东向西逐渐减少趋势。

表 1 给出了研究区 11 个草地生物量采样点的草地类型、植被类型、经纬度、高程等信息,其中的草地类型和植被类型数据源自 20 世纪 80 年代完成的西藏自治区第一次草地资源普查成果。当雄 A 和当雄 F 属于低地高寒沼泽化草甸,有围栏网保护,用于春季放牧,其中当雄 A 位于当雄县城北侧 500 m 处,当雄 F 位于当雄谷地宽阔地段。日多 B 观测点位于研究区东部墨竹工卡县境内河谷,为低地高寒沼泽化草甸,但没有围栏网保护。采样点当雄 D 和日多 A 属于高山嵩草为建群种的典型天然高寒草甸草原类型,其中当雄 D 位于当雄谷地远离公路和人类活动影响小的山坡上,而日多 A 位于其东部 170 km 处的墨竹工卡县日多乡东面宽阔平坦地段。当雄 C 观测点则位于当雄谷地青藏公路西侧,附近有青藏铁路穿过,为高寒草甸类型,但是相对于日多 A 和当雄 D 两个同类型草地相比,这里的人类活动影响较多,所以代表性较日多 A 和当雄 D 差。林周采样点位于拉萨市林周县牦牛选育场附近,也属于典型的天然高寒草甸草原。西藏自治区畜牧科学研究所于 2004-08-14、28 日和 9 月 15 日、29 日对该点草地作了每月两次的草地生物量和覆盖度等观测,本文利用了这些观测数据。当雄 B 和羊八井观测点是紫花针茅为建群种的典型天然高寒草原草地,伴有小莎草,都位于当雄谷地,两者相距近 80 km。拉木乡和拉萨观测点位于拉萨河谷南面相对平

表 1 草地生物量采样点草地类型等信息

Tabel 1 The grassland type of 11 sampling points and data sources

观测点	经度/°	纬度/°	高程/m	草地类型	植被类型	草地类型数据源
日多 A	92.292 7	29.690 8	4 418	高寒草甸	高山嵩草	西藏—两江草地类型图 <sup>[9]</sup>
日多 B	92.096 8	29.709 9	4 150	低地高寒沼泽化灌丛草甸	小叶金露梅(杜鹃)、高山嵩草	西藏—两江草地类型图 <sup>[9]</sup>
拉姆乡	91.544 4	29.804 3	3 720	温性干草原	藏白蒿、黄萼草字头姓氏、紫花针茅	西藏—两江草地类型图 <sup>[9]</sup>
拉萨	91.145 2	29.625 1	3 693	温性干草原	藏白蒿、白草	西藏—两江草地类型图 <sup>[9]</sup>
当雄 A	91.125 7	30.497 5	4 233	低地高寒沼泽化草甸	藏北嵩草	西藏自治区草地类型图 <sup>[10]</sup>
当雄 B	91.095 9	30.494 8	4 249	高寒草原	紫花针茅、小莎草	西藏自治区草地类型图 <sup>[10]</sup>
当雄 C	90.972 4	30.412 7	4 216	高寒草甸	高山嵩草、圆穗蓼	西藏自治区草地类型图 <sup>[10]</sup>
当雄 D	90.627 5	30.200 0	4 590	高寒草甸	高山嵩草	西藏自治区草地类型图 <sup>[10]</sup>
当雄 F	90.893 3	30.357 4	4 236	低地高寒沼泽化草甸	高山嵩草	西藏自治区草地类型图 <sup>[10]</sup>
林周	91.236 3	30.091 9	4 546	高寒草甸	高山嵩草	西藏—两江草地类型图 <sup>[9]</sup>
羊巴井	90.472 0	30.076 1	4 300	高寒草原	紫花针茅、小莎草	西藏自治区草地类型图 <sup>[10]</sup>

缓的山麓冲积扇上,属藏白蒿为建群种的西藏高原中部典型温性草原类型。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 地上生物量的测定

为了与 250 m 空间分辨率的 MOD13Q1 产品匹配,11 个采样点设置在地势相对平缓、草地植被空间分布比较均一具有代表性的区域。除了当雄 F 点的地面观测是 2004 年 9 月下旬开始的,林周县采样点的草地生物量观测是由西藏自治区畜牧科学研究所完成的,只有 8—9 月 4 次观测数据,对其他 9 个点于 2004 年 1 月至 12 月开展了每月 15 日和 30 日前后 3 d 内 2 次的草地地上生物量(Aboveground Biomass AGB)采样工作。采样方法采用收割样方称重法,每次采样有 50 cm × 50 cm 的 3 个小样方,同时记录了观测点的 GPS 数据、高程、土地利用类型等。AGB 观测步骤是:首先 50 cm × 50 cm 面积的正方形线圈在草地采样点随机抛出后用锋利的刀片将 3 个 50 cm × 50 cm 样方内的草地地上部分齐地面全部刈割,然后除去黏附的土壤、砾石等杂物后装入纸袋,全部带回西藏自治区畜牧科学研究所草原试验室。在试验室对所有样品的绿色鲜草和干枯(包括立枯物和凋落物)部分进行分拣,之后在 85℃ 烘箱中烘干至恒重后称重,最后 3 个样方内的重量求平均。绿色鲜草部分烘干后的重量就是草地鲜草的干物质重量(dry matter content of fresh grass),或称草地鲜草生物量,以下简称鲜重(fresh AGB);草地干枯部分烘干后的重量是干枯部分的干物质重量(dry matter content of dead material),以下简称干枯重;这两个的合计值为草地地上干物质总重,亦即草地地上生物量(AGB),或称为草地总地上生物量。最后都换算成单位面积地上干物质质量( $\text{g}/\text{m}^2$ )。

### 1.2.2 遥感数据及处理方法

由于 Terra MODIS 传感器的高时间分辨率、高光谱分辨率、适中的空间分辨率等特点,在区域到全球植被监测中得到了广泛的应用。MODIS 波幅较窄,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>[11]</sup>。因而,MODIS 植被指数可以更好地反映植被的时空变化特征,已成为开展大尺度草地植被遥感动态监测和研究的主要遥感资料。

青藏高原大气环境科学研究所从 1988 年开始接收数字化 NOAA AVHRR 卫星图像,于 2002 年建立了青藏高原上第一个 EOS/MODIS 接收站,开始

接收 EOS/MODIS 卫星图像,用于植被监测与相关应用研究。本文考虑到 2004 年每月两次的地面观测数据,无法保证或无法接收到适合植被监测的对应晴空 MODIS 图像,特别是草地植被生长最好的夏季在高原上更是多云天气为主,几乎没有晴空的图像,同时鉴于本地接收的 MODIS 图像在几何定标和大气纠正等多方因素,本研究中直接采用了从美国地质调查局(USGS)地球资源观测和科学中心(EROS) NASA MODIS 陆地产品分发中心(<https://lp-daac.usgs.gov>)下载的 2004 年 MOD13Q1 产品。MOD13Q1 产品属于 MODIS 陆地专题数据,是由 NASA MODIS 陆地产品组按照统一算法开发的 MODIS 植被指数产品,已经过了去云、辐射校正、大气校正等处理。全球的 MOD13Q1 数据是一个采用 Sinusoidal 投影方式的 3 级网格数据产品,空间分辨率为 250 m × 250 m,每隔 16 d 提供一次的植被指数数据,正好与本文每月两次的地面草地生物量观测时间对应。

MOD13Q1 图像处理过程是,首先利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件将下载的 MOD13Q1 数据从 HDF 格式转化为 TIFF 格式,其 SIN 投影系统转为 Geographic 投影系统,同时对多幅图像进行拼接,之后在 ENVI 图像处理软件中根据 11 个地面采样点的 GPS 数据,读取对应的 *NDVI* 和 *EVI* 数值,最后将存储为整型的植被指数数值转换成 -1 ~ 1 的值。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被生长季节草地地上生物量监测模型

青藏高原中部的草地生长季节一般在 5—9 月。5 月随着气温的升高,植被开始返青,出现绿色的鲜草,6—7 月由于气温的进一步升高和雨季的开始,草地植被进入生长最快的阶段,7—8 月初植被生物量中绿色鲜草比重达到年内最大值。8 月底至 9 月初气温的逐渐降低和降水量的减少,植被进入成熟阶段,生长速度开始减慢,一般在 9 月底草地植被开始停止生长。为了利用 MODIS 遥感数据实现青藏高原中部 5—9 月草地植被生长季节的总地上生物量和鲜草生物量的监测和估算,分别以地面实测的草地地上生物量和鲜草重量为因变量,MODIS 植被指数 *NDVI* 和 *EVI* 为自变量,利用植被遥感生物量监测中较为常用的一元线性和指数函数等 7 个非线性

性回归模型,建立了青藏高原中部的草地地上生物量和鲜草生物量的遥感估算模型,并对这些模型

的生物量估算效果进行了评价,筛选出了最优模型,结果见表 2。

从回归建模的结果来看,所有模型均通过了  $P < 0.01$  的显著性检验。根据相关系数和  $F$  检验值较大的回归建模原则,对研究区草地生长期地上生物量估算来讲,指数函数模型的估算效果最好,其相关系数  $R = 0.778$ ,  $F = 127.557$ , 为所有模型中最高,其次是幂函数模型、二次和三次多项模型,相关系数在  $0.72 \sim 0.76$ 。其他模型的  $R$  值在  $0.48 \sim 0.70$ , 其中,反函数模型的  $R$  和  $F$  值最小,回归模拟效果相对最差。可见,比较而言,指数函数模型对青藏高原中部 5—9 月草地植被生长期的生物量估算更为适合(图 1)。从表 2 中同样可以看出,与  $NDVI$  相比,  $MODIS\ EVI$  对研究区草地地上生物量的估算效果明显不如  $NDVI$  相比之下,在所有模型中,幂函数模型  $R(0.636)$  和  $F(56.408)$  值最大,其次是  $S$  曲线模型和指数函数模型,其他模型的相关系数都  $< 0.57$ , 其

中,反函数模型  $R$  和  $F$  检验值最小,估算效果相对最差,与前述的  $NDVI$  估算模型结果类似。

绿色鲜草的重量是在植被生长期内通过植物光合作用而产生的生物量积累部分,对其估算建模结果见表 3。从表 3 可以看出,基于  $MODIS\ NDVI$  的所有绿色鲜重生物量估算模型均通过了  $P < 0.01$  的显著性检验,相比而言,基于  $NDVI$  的指数函数模型的相关系数  $R$  和  $F$  值最大,分别为  $0.796$  和  $143.657$ , 在所有模型中最高(图 2),其次是幂函数( $R = 0.787$ )、二次多项式和三次多项式估算结果一致  $R = 0.744$ , 其他模型的相关系数都小于  $0.744$ 。在所有模型中反函数模型的回归结果最差,  $R = 0.471$ ,  $F = 23.667$ , 为 8 个模型中最小。从表 3 中还可以看出,与  $MODIS\ NDVI$  不同的是基于  $MODIS\ EVI$  的幂函数模型是估算研究区草地鲜重估算最好模型,其相关系数和  $F$  检验值分别为  $0.710$  和  $84.387$ , 其次是  $S$  模型( $R = 0.708$ )、指数函数模型( $R = 0.672$ )和三次多项方程( $R = 0.603$ ),其他 4 个剩余模型的  $R$  均小于  $0.60$ , 其中反函数模型的相关

表 2 5—9 月植被生长季节 AGB 遥感估算模型

Table 2 AGB estimate models in the central Tibet from May to September

模型	植被指数	模型方程	$R$	$R^2$	$F$
一元线性回归模型 Linear regression $Y = b_0 + b_1x$	$NDVI$	$Y = 473.528x - 89.407$	0.672	0.451	68.091*
	$EVI$	$Y = 638.040x - 53.997$	0.549	0.301	35.752*
二次多项式回归模型 Quadratic polynomial $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	$NDVI$	$Y = 987.518x^2 - 384.557x + 67.992$	0.728	0.530	46.199*
	$EVI$	$Y = 498.329x^2 + 353.928x - 19.811$	0.552	0.305	17.969*
三次多项式回归模型 Cubic polynomial $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$	$NDVI$	$Y = 101.881x^3 + 849.976x^2 - 329.842x + 61.787$	0.728	0.530	30.427*
	$EVI$	$Y = -5914.987x^3 + 6027.323x^2 - 1163.871x + 100.569$	0.560	0.314	12.336*
对数模型 Logarithmic $y = b_0 + b_1\ln(x)$	$NDVI$	$Y = 251.634 + 150.530\ln(x)$	0.585	0.342	43.165*
	$EVI$	$Y = 316.311 + 143.523\ln(x)$	0.514	0.264	29.794*
S 曲线模型 S model $y = e^{(b_0 + b_1/x)}$	$NDVI$	$Y = e^{(5.357 - 0.398/x)}$	0.696	0.484	77.937*
	$EVI$	$Y = e^{(5.438 - 0.263/x)}$	0.630	0.397	54.718*
指数函数模型 Exponent model $y = b_0e^{b_1x}$	$NDVI$	$Y = 11.950e^{(4.160x)}$	0.778	0.606	127.557*
	$EVI$	$Y = 17.164e^{(5.387x)}$	0.611	0.374	49.569*
反函数模型 Inverse model $y = b_0 + b_1/x$	$NDVI$	$Y = 209.896 - 36.405/x$	0.482	0.232	25.087*
	$EVI$	$Y = 222.958 - 25.098/x$	0.457	0.208	21.852*
幂函数模型 Power model $y = b_0(x)^{b_1}$	$NDVI$	$Y = 279.130x^{1.472}$	0.755	0.570	109.940*
	$EVI$	$Y = 480.927x^{1.346}$	0.636	0.405	56.408*

\* 表示  $P < 0.01$ ,  $N = 85$

系数和  $F$  检验均为最小,表明其对研究区鲜重估算精度在 8 个模型中最低。从 MODIS  $NDVI$  和  $EVI$  对草地鲜草生物量的估算结果可以看出, $NDVI$  对植被生长时期的鲜草生物量估算结果或模拟精度更好,是适合本研究区草地生长期鲜草生物量估算的最适宜模型。对草地地上总生物量,基于  $NDVI$  的指数函数估算模型的相关系数和  $F$  检验值分别是 0.778 和 127.557,而对草地鲜重,两者为 0.796 和 143.657。可见, $NDVI$  对植被生长期鲜草生物量的估算效果要好于对总地上生物量的估算效果,其原因是绿色植被由于光合作用而在可见光波段强吸收和在近红外波段强反射这一绿色植被所独有的光谱响应特征决定。

## 2.2 不同月生物量与植被指数之间的关系

建立统计回归模型的首要条件是有足够的样本数量。本文考虑到如果用每月两次的观测数据和对应的 MODIS 植被指数数据建立每月的回归相关模型,由于样本太少,特别是草地的生长季节变化使得在冬季、秋末和初春没有绿色鲜草存在,样本数更少,无法建立相关模型或所建立的模型很难具有代表性和保证其精度。同时,鉴于相邻 2 个月的草地长势、地上生物量大小和空间分布相对于整个植被生长期或非生长期差异较小,又易于遥感手段来以月为尺度实现对地上生物量监测和估算。因此,从 1 月开始,以 2 个月为时间尺度,建立了地面草地生物量实测值与对应 MODIS 遥感数之间的相关模型,结果见表 4~5。

以 2 个月为时间尺度建立的草地地上生物量和 MODIS 植被指数之间的相关程度来看(表 4),用

MODIS  $NDVI$  建立的相关系数都  $>0.64$ ,其中植被生长时期的相关系数要大于非生长季节,最高的相关程度出现在 8—9 月,为 0.749 0,最低的出现在非生长季节 1—2 月,为 0.644 0。草地生长季节鲜草生物量估算效果要好于总地上生物量(见表 4~5),对鲜草生物量部分估算,基于  $NDVI$  的相关系数都大于 0.730 0,最高的 8—9 月达 0.826 0。这些相关关系都通过了  $P < 0.01$  显著性检验,表明草地地上生物量与 MODIS  $NDVI$  之间存在极为显著的正相关关系。1—2 月研究区草地地上生物量与 MODIS  $NDVI$  之间的乘幂函数关系优于指数函数关系,其他所有月都表现为基于  $NDVI$  的指数函数关系;对于研究区草地生长时期的鲜草生物量估算模型,5—6 月草地鲜草生物量与  $NDVI$  关系为一次线性关系,其他月也都呈指数函数关系。

利用 MODIS  $NDVI$  来监测和估算青藏高原中部草地地上生物量是可行且非常有效。无论是草地总生物量还是其鲜草部分生物量的监测和估算,在 MODIS 两个植被指数中, $NDVI$  效果要明显好于  $EVI$ ,是适合研究区草地地上生物量的最优植被指数。

## 3 主要结论与讨论

本研究利用青藏高原中部 2004 年每月两次的草地生物量观测资料和同期的 MODIS MOD13Q1 植被指数数据,建立了 5—9 月草地植被生长期和每 2 个月为时间尺度的地上生物量量化监测模型和估算模型。得出的主要结论如下:

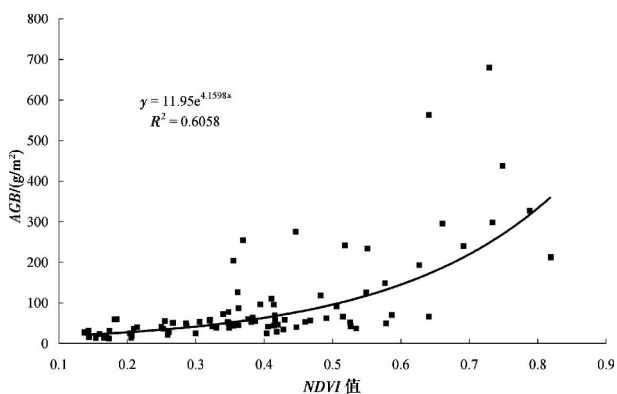


图 1 5—9 月草地植被生长期 AGB 与 MODIS  $NDVI$  之间的关系

Fig. 1 Relationship between AGB and MODIS  $NDVI$  during growing season from May to September

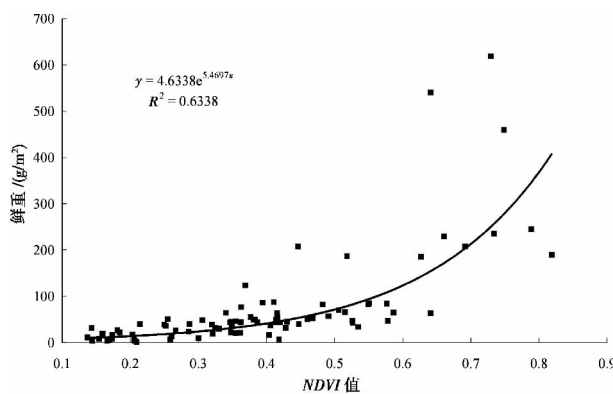


图 2 5—9 月草地植被生长期鲜草生物量与 MODIS  $NDVI$  之间的关系

Fig. 2 Relationship between fresh AGB and MODIS  $NDVI$  during growing season from May to September

表 3 5—9 月植被生长季节鲜重( Fresh AGB) 遥感估算模型

Table 3 Fresh AGB estimate models in the central Tibet from May to September

模型	植被指数	模型方程	<i>R</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>F</i>
一元线性回归模型 Linear regression $Y = b_0 + b_1x$	<i>NDVI</i>	$Y = 431.717x - 95.231$	0.676	0.457	69.763*
	<i>EVI</i>	$Y = 616.746x - 71.167$	0.586	0.343	43.322*
二次多项式回归模型 Quadratic polynomial $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	<i>NDVI</i>	$Y = 991.366x^2 - 429.711x + 62.781$	0.744	0.554	50.912*
	<i>EVI</i>	$Y = 622.979x^2 + 261.568x - 28.430$	0.592	0.350	22.067*
三次多项式回归模型 Cubic polynomial $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$	<i>NDVI</i>	$Y = -167.223x^3 + 1217.123x^2 - 519.518x + 72.965$	0.744	0.554	33.539*
	<i>EVI</i>	$Y = -6711.865x^3 + 6896.850x^2 - 1460.712x + 108.169$	0.603	0.364	15.444*
对数模型 Logarithmic $y = b_0 + b_1\ln(x)$	<i>NDVI</i>	$Y = 213.857 + 135.464\ln(x)$	0.581	0.338	42.337*
	<i>EVI</i>	$Y = 284.265 + 137.095\ln(x)$	0.542	0.294	34.535*
S 曲线模型 S model $y = e^{(b_0 + b_1/x)}$	<i>NDVI</i>	$Y = e^{(5.368 - .541/x)}$	0.735	0.540	97.282*
	<i>EVI</i>	$Y = e^{(5.595 - .379/x)}$	0.708	0.502	83.60*
指数函数模型 Exponent model $y = b_0e^{b_1x}$	<i>NDVI</i>	$Y = 4.634e^{(5.470x)}$	0.796	0.634	143.657*
	<i>EVI</i>	$Y = 6.584e^{(7.616x)}$	0.672	0.452	68.513*
反函数模型 Inverse model $y = b_0 + b_1/x$	<i>NDVI</i>	$Y = 174.650 - 32.237/x$	0.471	0.222	23.667*
	<i>EVI</i>	$Y = 193.172 - 23.595/x$	0.474	0.225	24.037*
幂函数模型 Power model $y = b_0(x)^{b_1}$	<i>NDVI</i>	$Y = 303.496x^{1.973}$	0.787	0.619	135.115*
	<i>EVI</i>	$Y = 765.315x^{1.931}$	0.710	0.504	84.387*

\* 表示  $P < 0.01$ ,  $N = 85$

表 4 不同月草地总地上生物量与 MODIS 植被指数之间的关系

Table 4 Relationships between AGB and MODIS vegetation index at bimonthly level

时间	<i>NDVI</i>				<i>EVI</i>			
	关系式	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>R</i>	样本数	关系式	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>R</i>	样本数
1—2 月	$y = 23260x^{3.5777}$	0.414 7	0.644 0*	27	$y = 1539.9x - 84.724$	0.216 2	0.465 0**	27
3—4 月	$y = 2.9647e^{13.721x}$	0.554 1	0.744 4*	34	$y = 5.0258e^{18.312x}$	0.273 4	0.522 9*	34
5—6 月	$y = 10.001e^{4.8528x}$	0.534 1	0.730 8*	34	$y = 14.733e^{5.5843x}$	0.322 8	0.568 2*	34
7—8 月	$y = 13.425e^{3.6691x}$	0.559 2	0.747 8*	34	$y = 28.215e^{3.5233x}$	0.174 8	0.418 1**	34
8—9 月	$y = 13.791e^{3.7428x}$	0.561 0	0.749 0*	34	$y = 22.796e^{4.626x}$	0.249 1	0.499 1*	34
9—10 月	$y = 16.006e^{4.0975x}$	0.425 5	0.652 3*	33	$y = 24.396e^{5.1911x}$	0.169 4	0.411 6*	33
11—12 月	$y = 3.888e^{11.211x}$	0.491 7	0.701 2*	27	$y = 1847.4x - 128.32$	0.121 4	0.348 4	27

表 5 不同月草地鲜重与 MODIS 植被指数之间的关系

Table 5 Relationships between fresh AGB and MODIS vegetation index at bimonthly level

时间	<i>NDVI</i>				<i>EVI</i>			
	关系式	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>R</i>	样本数	关系式	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>R</i>	样本数
5—6 月	$y = 242.23x - 33.296$	0.529 3	0.727 5*	34	$y = 342.28x - 25.263$	0.482 3	0.694 5*	34
7—8 月	$y = 12.557e^{3.5765x}$	0.566 8	0.752 9*	34	$y = 25.062e^{3.5491x}$	0.189 2	0.435 0**	34
8—9 月	$y = 6.9472e^{4.617x}$	0.682 3	0.826 0*	34	$y = 9.8244e^{6.7142x}$	0.4194	0.6476*	34
9—10 月	$y = 2.4821e^{6.5876x}$	0.645 2	0.803 2*	26	$y = 2.7374e^{11.758x}$	0.561 0	0.749 0*	26

\* 表示  $P < 0.01$ ; \*\* 表示  $P < 0.05$

1. 基于 MOD13Q1 *NDVI* 的指数函数、幂函数、二次和三次多项式模型可以较好地估算青藏高原中部草地生长期地上生物量的大小,其中指数函数回归模型相对而言估算效果最好;鲜草生物量作为植被生长期通过植物光合作用而产生的生物量积累部分,其最优 MODIS 遥感估算模型同样是基于 *NDVI* 的指数函数模型,在所有模型中有最高的相关系数和 *F* 检验值。

2. 对青藏高原中部的草地生物量监测,MODIS *NDVI* 优于 *EVI*; 由于绿色植被所特有的光谱响应特征,MODIS 植被指数对植被生长期鲜草生物量估算结果或模拟精度高于总地上生物量。

3. 除 1—2 月研究区草地地上生物量和 5—6 月鲜草生物量与 MODIS *NDVI* 之间分别表现为乘幂函数和线性关系之外,其他都为基于 *NDVI* 的指数函数关系。

4. 对面积广大、类型复杂的青藏高原草地生态系统来说,卫星遥感监测是定量获取区域尺度上草地生物量等植被参数唯一切实可行的手段。然而,卫星遥感是利用植被指数等中间参数来间接地实现对植被参数的监测和估算的,其精度有限,需要用更多更具代表性的地面实测数据来进一步弥补遥感监测的不足之处。

5. 本研究的地面观测仅局限于青藏高原中部和藏北南部,采样时间间隔为 15 d 左右。由于各种条件的限制,对藏西北和藏南等广大的草地分布区域未能开展采样观测,所建立的 MODIS 遥感估算模型适用于青藏高原中部。如果这些模型应用到整个高原地区,其估算精度会受到影响。因此,今后需要在高原上开展面积更大区域、更为详尽的观测调查来进一步完善这些估算模型,进而推广应用到整个青藏高原的草地生物量监测和估算。

## 参考文献(References)

- [1] Department of Animal Husbandry and Veterinary of the Ministry of Agriculture, P. R. China. Grassland resources in China [M]. Beijing: Chinese Sciences and Technology Press, 1996. [中华人民共和国农业部畜牧兽医司. 中国草地资源 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.]
- [2] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. Ecosystem Carbon Stocks and their changes in China's grasslands [J]. Sci China Life Sci, 2010, 53: 757–765, doi: 10.1007/s11427-010-4029-x. [方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化 [J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566–576]
- [3] Tibet Land Management Bureau and Tibet Animal Husbandry Bureau. Grassland resources in Tibet Autonomous Region [M]. Beijing: Science Press, 1994. [西藏自治区土地管理局, 西藏自治区畜牧局. 西藏自治区草地资源 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [4] Liu Shuzhen, Zhou Lin, Qiu Chongshan, et al. Grassland degradation and desertification in Naqu Prefecture of Tibet [M]. Lhasa: Tibet People's Press, 1999. [刘淑珍, 周麟, 仇崇善, 等. 西藏自治区那曲地区草地退化沙化研究 [M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1999.]
- [5] Gao Qingzhu, Li Yu'e, Lin Erda, et al. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in Northern Tibet [M]. Acta Geographica Sinica, 2006, 60(6): 965–973 [高 Qingzhu, 李玉娥, 林而达, 等. 藏北地区草地退化的时空分布特征 [J]. 地理学报, 2005, 60(6): 965–973]
- [6] Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 3–12 [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设 [J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3–12]
- [7] Piao Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4): 491–498 [朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491–498]
- [8] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21: doi: 10.1029/2005GB002634
- [9] Tibet Animal Husbandry Bureau, Tibet Land Management Bureau. 1:200 000 Map of Grassland Types in the Central Tibet Autonomous Region [M]. 1991. [西藏自治区畜牧局, 西藏自治区土地管理局. 1:20 万西藏自治区—江两河中部地区草地类型图 [M]. 1991.]
- [10] Tibet Land Management Bureau, Tibet Animal Husbandry Bureau. 1:2 000 000 Map of Grassland Types in Tibet Autonomous Region [M]. 1991. [西藏自治区土地管理局, 西藏自治区畜牧局. 1:200 万西藏自治区草地类型图 [M]. 1991.]
- [11] Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete A. From AVHRR – NDVI to MODIS – EVI: advances in vegetation index research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 979–986 [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]

## Aboveground Biomass Estimate Methods of Grassland in the Central Tibet

CHU Duo<sup>1 2</sup>, PUBU Ciren<sup>2</sup>, DEJI Yangzong<sup>2</sup>, JI Qiumei<sup>3</sup>, TANG Hong<sup>2</sup>

(1. Lhasa Campus of Institute of Plateau Meteorology, CMA, Lhasa 850000, China;

2. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Sciences, Lhasa 850000, China;

3. Tibet Institute of Animal Husbandry, Lhasa 850000, China)

**Abstract:** To take full advantage of MODIS remote sensing data obtained from the receiving station and existing NASA MODIS Land Products distributed from LP DAAC for grassland biomass monitoring and degradation study, the aboveground biomass (*AGB*) estimate methods of grassland in Tibet are developed at growing season from May to September and bimonthly level by integrating *AGB* data collected from 11 sites in the central Tibet from January to December in 2004 and concurrent vegetation index (*VI*) derived from MODIS MOD13Q1 products. The main results show that there are exponential relationships between *AGB* and *NDVI* during the vegetation growing season from May to September with 0.778 of correlation coefficient and 127.557 of *F* test value; at bimonthly level the exponential relationships between *AGB* and *NDVI* exist except the power relationship between *AGB* and *NDVI* from January to February and linear relationship between fresh *AGB* and *NDVI* from May to Jun; the correlation coefficients between *NDVI* and *AGB* are above 0.64 with the highest value of 0.749 0 for *AGB* estimates from August to September and the lowest value of 0.644 0 from January to February; the correlation coefficients between *NDVI* and fresh *AGB* are above 0.72 with the highest value of 0.826 0 from August to September and the lowest value of 0.727 5 from May to Jun. The results by  $P < 0.01$  test of significance indicate the highly significant positive correlation between aboveground biomass and MODIS *NDVI*. In contrast, MODIS *NDVI* is the optimum vegetation index for *AGB* and fresh *AGB* estimates in the central Tibet. The study suggests that satellite remote sensing is only practical means of monitoring grass biomass and other vegetation parameters at large scale in Tibet due to its vast area and complexity of grassland ecosystem. However, remote sensing based estimate methods of *AGB* should be further validated and improved using more ground based measurement data to compensate for its inadequacies. The *AGB* estimates developed in this study is suitable for the central Tibet and its accuracy will decrease if applied in whole Tibet plateau, which means that more detailed observation and investigation should be carried out in the future to further improve these biomass estimation models in order to be suitable for monitoring grassland *AGB* and other vegetation parameters of the entire Tibetan Plateau.

**Key words:** Aboveground biomass of Grassland; Remote sensing; Estimate method; Central Tibet