

引用格式:刘唐,江涛,郭连杰. 基于 MODIS 的三江源地区不同类型草地草产量的遥感监测[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(5):18-26.

LIU Tang, JIANG Tao, GUO Lianjie. MODIS-based remote sensing monitoring of different types of grassland in three-river headwater region[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(5): 18-26.

基于 MODIS 的三江源地区不同类型草地草产量的遥感监测

刘 唐¹,江 涛¹,郭连杰²

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590; 2. 国家海洋信息中心,天津 300171)

摘要:面对大面积草原草场牧草估产,遥感监测已成为最普遍、最快速的先进手段。针对三江源地区草地,基于改进的 CASA 模型,利用 2000—2010 年 MODIS 的 MOD13A1(净初级生产力 NPP)遥感数据和每年 4—9 月的降水和温度数据,运用 ArcGIS 软件建立了三江源地区不同类型天然草地牧草产量卫星遥感估产模型,得出三江源草场亩产量结果:湖盆河滩草甸 160~180 kg,整体趋势略有上升;山地草原 48~56 kg,高原宽谷荒漠 39~45 kg,山地荒漠 40~50 kg,整体分布趋势很稳定;高山草甸 110~130 kg,高原宽谷草原 70~80 kg,整体趋势相对稳定;山地稀疏森林草场 130~160 kg,整体趋势略有下降;山地灌丛草场 128~160 kg。空间上因东南地区降水较多,湿润度高,地势相对平坦,因此草产量呈现出从东南—西北逐渐递减的规律,其中高山草甸草场和高原宽谷草原草场占绝大部分,为三江源地区进行草地生物量研究、草场资源的可持续利用和畜牧业的发展提供指导。

关键词:草场估产;改进的 CASA 模型;遥感监测;三江源草场;MODIS 数据

中图分类号:S812

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)05-0018-09

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.05.003

MODIS-based Remote Sensing Monitoring of Different Types of Grassland in Three-river Headwater Region

LIU Tang¹, JIANG Tao¹, GUO Lianjie²

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. National Marine Information Center, Tianjin 300171, China)

Abstract: Remote sensing monitoring has become the most popular and fastest advanced method of grass yield estimation in pastoral areas. Based on the modified CASA model and the MODIS MOD13A1(Net Primary Productivity, NPP) remote sensing data during 2000—2010 and the precipitation and temperature data from April to September each year, the satellite remote sensing model of grass yield estimation of different types of grassland in the three-river headwater region were established by using ArcGIS software. The results show that with a yield of 160-180 kg per mu, the overall trend of grassland yield in lake basin and river shoal is slightly increased; with a yield of 48-

收稿日期:2017-02-26

作者简介:刘 唐(1994—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事遥感图像处理研究. E-mail:sddpltwanqiu@163.com

江 涛(1961—),男,山东济南人,教授,博士生导师,主要从事遥感图像处理、资源与环境遥感研究.

E-mail:tjiang@126.com

郭连杰(1991—),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事遥感图像处理研究,本文通信作者.

E-mail:171498986@qq.com

56 kg per mu in mountain grassland, 39–45 kg per mu in plateau valley and desert grassland, and 40–50 kg per mu in mountain wilderness grassland, the overall distribution trend is very stable; with a yield of 110–130 kg per mu in alpine meadow, and 70–80 kg per mu in plateau wide valley grassland, the overall trend is relatively stable; with a yield of 130–160 kg per mu in mountain sparse forest grassland, the overall trend is on slight decline; and the yield of mountain shrub pasture is 128–160 kg per mu. Due to the great amount of rainfall, the high degree of moisture, and the relatively flat terrain of the southeastern region, the grass yield shows a pattern that gradually decreases from southeast to northwest. The study of alpine meadows and plateau grasslands, which occupy the vast majority of the grasslands, can provide some guidance for grassland biomass research, the sustainable utilization of grassland resources and the sustainable development of animal husbandry.

Key words: grass yield estimation; improved CASA model; remote sensing monitoring; three-river headwater region; MODIS satellite data

草地不仅是畜牧业经济的饲料来源,也是大部分野生动物生活的场所,对于全球碳循环和气候调节具有重要作用,是重要的国土资源^[1]。三江源自然保护区是青藏高原腹地,是我国生态环境保护和可持续发展的重要保证,三江源强大的生态功能是其生物多样性以及植被丰富度的重要保证^[2]。

我国对草地的遥感研究始于 20 世纪 80 年代初,至今已取得了多方面研究成果。周鑫等^[3]针对新疆伊犁地区的植被指数建立了回归模型,分析了地上生物量的空间分布;赵强^[4]基于遥感技术反演了呼伦贝尔草原草产量;董建军^[5]以内蒙古锡林河流域的典型草原草场为对象,通过建模与比较,探讨了多源遥感数据在典型草原植被估产方面的潜力;方金^[6]利用回归分析模拟出甘南草地生草场物量遥感模型,反演出甘南地区的草地生物量;Kawamura 等^[7]研究了中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)归一化植被指数与内蒙古草地生物量之间的关系,发现二者存在显著的相关性;Field 等^[8]利用卡内基艾姆斯坦福方法(Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA)模型估算出全球陆地年均净初级生产力(net primary productivity, NPP)值为 56.4 Pg/a,其中草地占 4.3%;Nayak 等^[9]通过 CASA 模型估算印度的草地 NPP 为 267 gC/m²·a,占总 NPP 的 1.2%;Peterson 等^[10]利用 Landsat/TM 数据区别道格拉斯草地类型,得出 7 月遥感数据的评价精度高达 81.8%。以上模型大都应用 SPSS 等软件进行实测数据和遥感数据回归分析,利用最优模型反演研究区草地生物量,泛化性较差,同时没有对海拔高、高差大的草原地区草产量遥感估算研究。因此,本文利用三江源地区 2000—2010 年 MODIS 数据,借助气象、太阳辐射数据和数字高程模型数据,基于改进的 CASA 模型反演草地亩产量,为高海拔、高差大的三江源地区草地生物量遥感监测、草场资源的可持续利用和畜牧业发展等相关研究提供借鉴。

1 研究基础

1.1 研究区概况

三江源自然保护区位于我国西北部,平均海拔在 4 800 m 左右。地理位置为 31°39'~36°12'N,89°45'~102°23'E^[11]。属于大陆性气候,由于海拔高,地形复杂,气候变化多样,年际温差小,降雨年际变化大,太阳辐射强,造成三江源地区东西植被分布差别大。三江源地区是世界上海拔最高,分布植被类型最多的典型高寒地带,是我国的高寒生物自然种质资源库^[12]。三江源地区的代表草种类型有草甸、草原、沼泽及水生草地、垫状和稀疏草地等。三江源地区草地草场生长期集中在每年 4—9 月份,因此,本文选择 4—9 月为草场生物量累积时间。

1.2 数据源获取

采用遥感数据和非遥感数据相结合的方法获取数据,然后将反演结果与平台提供数据进行验证(表 1、表 2)。

表 1 数据列表

Tab. 1 Data list

数据名称	数据格式	分辨率/m	坐标系
MOD13A1	HDF	500	GCS_WGS_1984
气象数据	Txt		
GDEM	Image	90	GCS_WGS_1984
三江源地区矢量范围	Shape		GCS_WGS_1984
西藏草场属性数据	Excel		

表 2 西藏草场属性数据
Tab. 2 Tibetan pasture property data

草场类型	覆盖度/%	分布及优势草种	海拔/m
高山草甸草场	70~90	主要分布在青藏高原中部的山原、宽谷和湖盆地区,以蒿草属占优势	5 000~5 500
湖盆河滩草甸草场	80~90	主要分布于低湿的湖盆河滩地区	4 300~4 850
高原宽谷草原草场	30~50	主要分布于羌塘高原中南部和藏南高原湖盆区,多为多年生禾本科	3 800~5 000
山地草原草场	5~20	分布于雅鲁藏布江及三江中游河谷两侧山地,以白草、固沙草和狼牙齿为主	4 600~4 800
高原宽谷荒漠草场	1~3	主要分布于羌塘高原北部,牧草以垫状驼绒藜为主	>5 500
山地稀疏森林草场	80~90	主要分布于藏东南林区,以禾草和莎草为主	4 850~5 000
山地荒漠草场	3~5	主要分布于阿里西部山原深谷地区,分布稀疏,以驼绒藜为主	4 000~4 800
山地灌丛草场	80~90	主要分布于林区边缘的山地和谷坡,禾草占优势	>5 000

注:西藏草场属性数据参考自国家地球系统科学数据共享平台

1.2.1 MODIS 净初级生产力数据——MOD13A1

MOD13A1 遥感影像是 MODIS 数据的 L3 级产品,数据类型为栅格,其中包括归一化植被指数(normalized differential, NDVI)和增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI),提供时间分辨率为 16 天、几何分辨率为 500 m 的 3 级产品。

1.2.2 气象数据

气象数据主要包括青海省 SOL(太阳总净辐射量, total net radiation of solar), 2000—2010 年 4—9 月份平均温度和降雨量数据。根据 CASA 模型需要, 提取植被最适宜温度和水分胁迫因子。三江源地区温度和降雨分布成反比, 海拔高的地区温度偏低, 降雨偏多; 太阳辐射量分布从东到西呈逐渐增多的趋势, 与海拔呈正比。

1.2.3 高程数据

因为三江源地区以山地地形为主, 地势复杂, 数字高程模型数据显得尤为重要, 尤其在土地覆盖类型划分过程中。本文运用航天飞机雷达地形测绘使命-全球数字高程模型(shuttle radar topography mission-global digital elevation model, SRTM3-GDEM)数据, 对应的分辨率精度为 90 m。

2 NPP 模型的建立与计算

改进的 CASA 模型^[13] 中植被净第一性生产力 NPP 由牧草的光合有效辐射(APAR, absorbed photosynthetic active radiation)和实际光能利用率(ϵ)来决定, 其估算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

APAR 是指在单位时间内牧草吸收的有效辐射能量, $gC \cdot m^{-2} \cdot month^{-1}$; ϵ 表示在单位时间内实际的光能利用率, $gC \cdot MJ^{-1}$ 。

2.1 光和有效辐射 APAR 的估算

牧草的太阳有效辐射和对光合有效辐射的吸收系数决定 APAR 的大小, 进而决定着 NPP 的变化。

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

其中, SOL 表示牧草的太阳总辐射量, $gC \cdot m^{-2} \cdot month^{-1}$; FPAR(fraction of absorbed photosynthetically active radiation, 光合有效辐射系数)表示牧草对入射光合有效辐射的吸收比例, 式中的 0.5 表示这一类型牧草所能利用的太阳有效辐射占太阳在这一区域总辐射的比例。

2.2 光合有效辐射系数 FPAR 的估算

光合有效辐射系数的变化和植被归一化指数 NDVI 之间存在如下关系:

$$FPAR(x, t) = \frac{NDVI(x, t) - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min}, \quad (3)$$

其中, $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别为三江源内不同草场类型的 $NDVI$ 最大值和最小值。

光合有效辐射系数($FPAR$)和比值植被指数(simple ratio index, SR)也存在着一定关系:

$$FPAR(x, t) = \frac{SR(x, t) - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min}, \quad (4)$$

其中, $FPAR_{\max}$ 和 $FPAR_{\min}$ 为常数, 与草场类型无关, 分别为 0.001 和 0.95^[14]; SR_{\max} 和 SR_{\min} 分别对应三江源地区牧草的 $NDVI$ 的 95% 和 5% 下侧百分位数, SR 可以通过 $NDVI$ 得到:

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)}, \quad (5)$$

因为 $NDVI$ 和 SR 对牧草的 $FPAR$ 估算均有其优缺点, 为了弥补两种指数的不足, 取其加权平均值作为 $FPAR$ 的估算值:

$$FPAR(x, t) = \alpha FPAR_{NDVI} + (1 - \alpha) FPAR_{SR}. \quad (6)$$

一般取 α 为 0.5^[14]。

2.3 光能利用率 ϵ 的估算

光能利用率是指在单位时间单位面积上生产的生物量与单位时间内照到该面积上的光合有效辐射能量的比值。

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon 1}(x, t) \times T_{\epsilon 2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max}, \quad (7)$$

其中, $T_{\epsilon 1}$ 和 $T_{\epsilon 2}$ 为温度胁迫系数, 表示温度变化对光能利用率的影响; W_{ϵ} 为水分胁迫系数, 表示环境的湿度变化对光能利用率的影响; ϵ_{\max} 是牧草生长最适宜条件下的最大光能利用率。

2.4 温度胁迫因子的估算

$T_{\epsilon 1}$ 的估算: 只有在适宜温度下植被才能最大化进行光合作用, 而温度过高或者过低都会抑制光合作用的进行, 温度胁迫因子 $T_{\epsilon 1}$ 的估算:

$$T_{\epsilon 1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}}(x) - 0.0005 \times [T_{\text{opt}}(x)]^2, \quad (8)$$

其中, T_{opt} 是三江源草地牧草生长的最适宜温度, 是指一年内 $NDVI$ 达到最高时月份的平均气温。温度胁迫因子 $T_{\epsilon 2}$ 的估算: 表示牧草在温度变化的影响, 温度向过高或者过低变化, 光能利用率都会下降, 因此对偏离最适宜温度的影响因素进行估算:

$$T_{\epsilon 2}(x, t) = \frac{1.184 \times \{1 + \exp[0.3 \times (-T_{\text{opt}}(x) - 10 + T(x, t))]\}}{\{1 + \exp[0.2 \times (T_{\text{opt}}(x) - 10 - T(x, t))]\}}. \quad (9)$$

当某一月平均温度 $T(x, t)$ 比最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 高 10 °C 或低 13 °C 时, 该月的 $T_{\epsilon 2}(x, t)$ 值等于月平均温度 $T(x, t)$ 为最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 时 $T_{\epsilon 2}(x, t)$ 值的一半。

2.5 水分胁迫因子的估算

水分胁迫系数 W_{ϵ} 表示周围环境湿度变化对牧草生长的影响, 进而对光能利用率的影响, 取值范围为 0.5~1, 0.5 代表最干旱的情况, 1 为最湿润的情况。

用全年降水量 P 和 >0 °C 年积温 $\sum \theta$ 之比表示湿润度指标 K ,

$$K = \frac{P}{0.1 \times \sum \theta}. \quad (10)$$

为适应改进的 CASA 模型, 保证牧草反演的精度, 采用月降雨量和 >0 °C 月积温之比估算湿润度指标 K ,

$$L(K) = K + 0.906(-\sqrt{K}) + 0.22. \quad (11)$$

根据上面式子计算水分胁迫因子 $W(x, t)$:

$$W(x, t) = 0.5 + 0.5 \times \frac{(0.29\sqrt{K} + 0.6)(K \times L(K) + 0.469\sqrt{K} + 9.33 \times 1/\sum \theta)}{(K + 0.469\sqrt{K} + 9.666)(L(K) + 0.933/K)}. \quad (12)$$

2.6 CASA 模型的优化

最大光能利用率 ϵ_{\max} 定义为 0.389 gC · MJ⁻¹^[15], 取值受到温度、水分、土壤和植物个体发育等因素的显著影响, 将其作为一个常数在全球范围内使用会引起很大的误差, ϵ_{\max} 还和草场类型有关, 不同草场的优势草

种也不同。

三江源地区植被光能利用率与植被分布和地形有关,其分布特征具有明显地带性,呈由西北向东南逐渐递增的规律,随季节变化明显,本次研究基于三江源气象因素(温度、降水、太阳辐射等数据)和地形因素,同时参考卫亚星等^[16]对三江源地区草场植被的研究,利用加权平均值计算平均最大光能利用率为 $0.096 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。

根据得到的全年 NPP 和三江源植被覆盖类型计算每种类型草场的亩产量分布图,与国家地球系统科学数据共享平台提供的牧草亩产量数据进行精度验证,并做进一步分析。

3 NPP 时空分析

基于改进的 CASA 模型,应用 MOD13A1 遥感影像和气象数据计算得到 2000—2010 年三江源地区 NPP 分布,从 11 年 NPP 分布可以看出,中南部玉树藏族自治州、果洛藏族自治州和黄南藏族自治州等地 NPP 值普遍在 150 gC/m^2 以上,西部海西蒙古藏族自治州等地区普遍在 50 gC/m^2 。图 1 为 2008 年 NPP 平均值分布图。

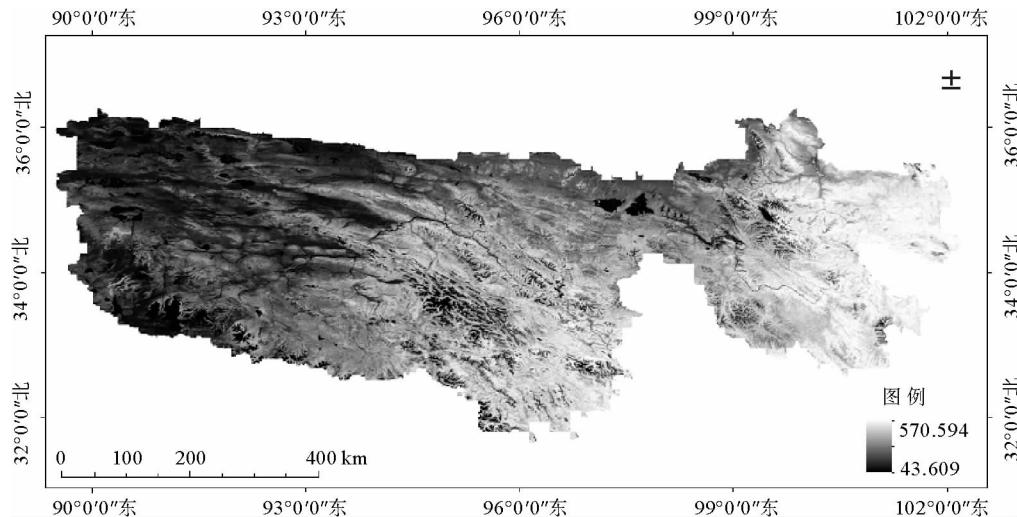


图 1 2008 年 NPP 平均值分布图

Fig. 1 NPP annual average distribution map of 2008

3.1 NPP 均值空间分布

三江源地区草地草场 NPP 平均值空间变化呈东南—西北递减规律,高寒牧草地 NPP 值较低,河密集、海拔较低的林地 NPP 值相对较高。其中,研究区西部地区 NPP 值偏低,如治多县和格尔木市等地区, NPP 值 $50\sim70 \text{ gC/m}^2$;研究区中部 $70\sim120 \text{ gC/m}^2$;研究区东南部的囊谦县、玉树县,以及东部的达日县、甘德县、久治县等地区 NPP 值大于 150 gC/m^2 。从空间分布特征得出,NPP 分布与地形、海拔、河流及植被类型等自然因素相一致。

3.2 NPP 均值时间分布

图 2 展示了三江源地区 NPP 年平均值变化,2000—2010 年的变化区间为 $133.03\sim191.91 \text{ gC/m}^2$,整体趋势为逐年增加,尤其在 2007—2010 年,增加速度很快。从 2000—2001 年三江源地区 NPP 增速较快,约为 18 gC/m^2 ;从 2001—2007 年相对较稳定,为 $140\sim150 \text{ gC/m}^2$;从 2007—2010 年增速大幅上升,尤其在 2009—2010 年,增速达 40 gC/m^2 。这种改善得益于三江源地区在 2000 年之后实施的各种生态工程项目,尤其在 2007 年之后效果明显。

3.3 NPP 均值变化趋势

根据 NPP 均值年际变化折线图回归分析,分别得到线性、二次多项式和三次多项式模型(表 3),其中线

性和二次多项式误差较大,其 R^2 分别为 0.44 和 0.58,三次多项式模型很好地模拟出变化趋势, R^2 达 0.91。可以看出,从 2010 年往后的趋势为持续增加。

3.4 草场类型划分

三江源草地草场划分主要依据国家科技资源共享服务平台数据实体草场植被覆盖度^[17]要素和每种草场优势草种的生长海拔两个基本条件,结合优势草种生长的温度和降雨要素,利用决策树对三江源草地进行分类,得到图 3 三江源草地草场分布图。

亩产量最高的湖盆河滩草甸草场分布在中南部和东部地区;山地稀疏森林草场、高原宽谷草原草场和山地灌丛草场亩产量中等分布在中部地区;高山草甸草场亩产量中等偏少,分布在西南地区;高原宽谷荒漠草场、山地荒漠草场和山地草原草场亩产量最低,分布在西部地区。

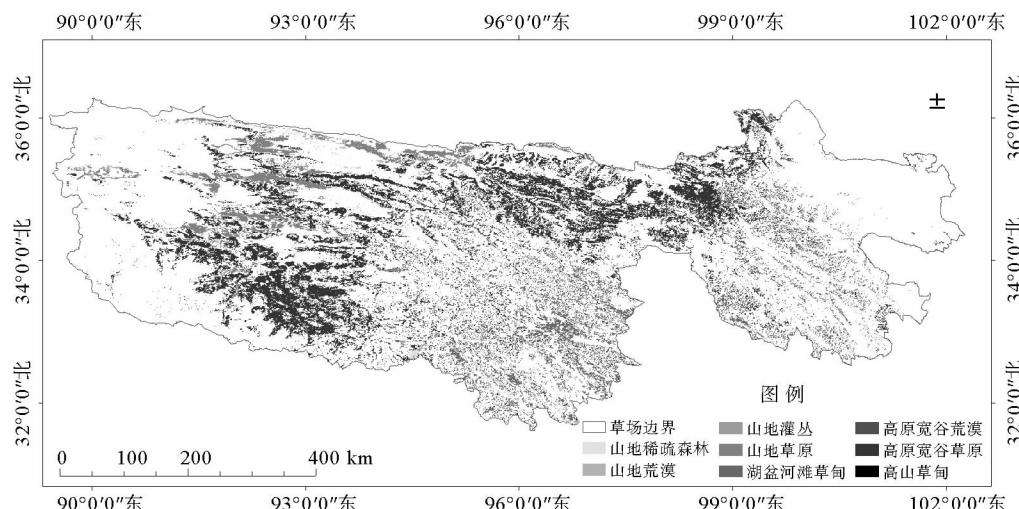


图 3 三江源地区草场类型分布图

Fig. 3 Distribution map of grassland types in the three-river headwater region

3.5 草地亩产量验证与分析

如图 4 所示,分别显示了 8 种草场 2000—2010 年亩产量的变化,可以看出各类草场的亩产量相对稳定,变化不大。

表 4 显示了遥感反演亩产量与国家生态系统观测平台的实际监测亩产量数据,从表 4 反演准确性看,反演亩产量与实际亩产量相比:高山草甸草场、山地稀疏森林草场和山地灌丛草场非常吻合;山地草原草场基本吻合;湖盆河滩草甸草场产量偏低,原因是 NDVI 对于植被覆盖度太高的牧草产生了过饱和现象,对湖盆河滩草甸草场亩产量造成过低估计;高原宽谷荒漠草场和山地荒漠草场产量偏高,原因是 NDVI 对于低覆盖植被出现过高估计现象。

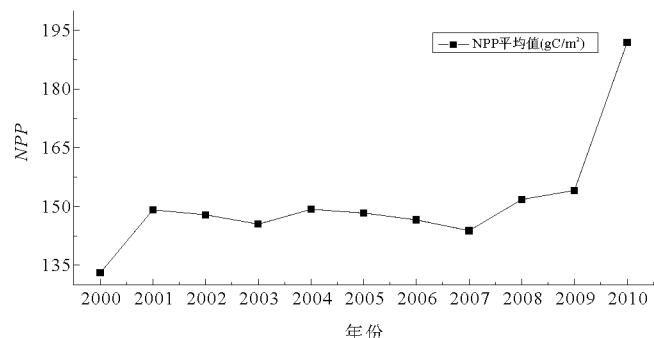


图 2 2000—2010 年 NPP 均值变化图

Fig. 2 NPP mean change chart during 2000—2010

表 3 2000—2010 年 NPP 均值变化回归模型

Tab. 3 NPP mean change regression model during 2000—2010

	模型	R^2
线性模型	$Y = 2.91X + 133.57$	0.44
二次多项式模型	$Y = 0.6X^2 - 4.25X + 149.08$	0.58
三次多项式模型	$Y = 0.335X^3 - 5.44X^2 + 25.99X + 112.47$	0.91

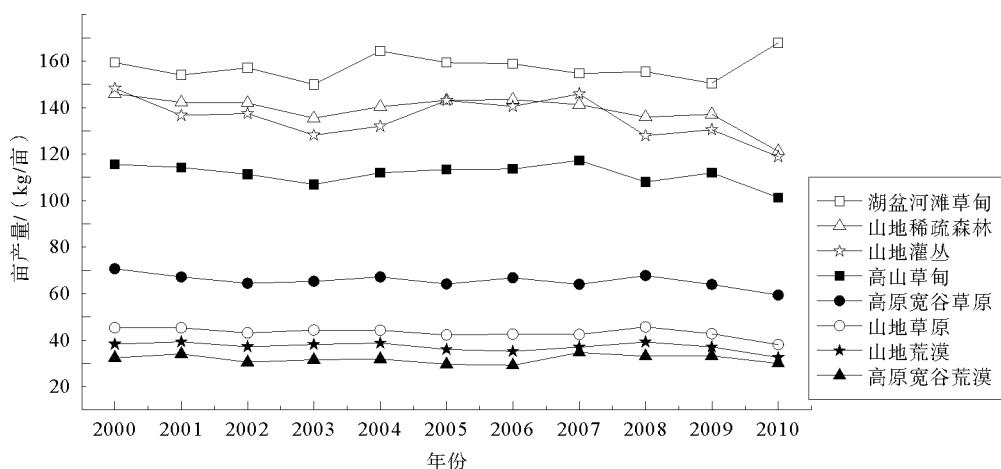


图 4 2000—2010 年三江源草地亩产量变化图

Fig. 4 Yield variation of grassland in the three-river headwater region during 2000—2010

表 4 2000—2010 年三江源草地亩产量验证

Tab. 4 Yield verification of grassland in the three-river headwater region during 2000—2010

草场类型	反演亩产量/kg	实际亩产量/kg	吻合程度	变化趋势
高山草甸草场	110~130	35~125	非常吻合	相对稳定
湖盆河滩草甸草场	160~180	200~300	产量偏低	略有上升
高原宽谷草原草场	70~80			相对稳定
山地草原草场	48~56	5~50	基本吻合	很稳定
高原宽谷荒漠草场	39~45	10	产量偏高	很稳定
山地稀疏森林草场	130~160	>125	非常吻合	略有下降
山地荒漠草场	40~50	20	产量偏高	很稳定
山地灌丛草场	128~160	>125	非常吻合	略有下降

注：实际亩产量数据参考自国家地球系统科学数据共享平台

从亩产量变化趋势上看,山地草原草场、山地荒漠草场和高原宽谷荒漠草场等低产量草场亩产量很稳定;高山草甸草场和高原宽谷草原草场属中等产量草场相对稳定;湖盆河滩草甸草场亩产量逐年增加;山地稀疏森林草场和山地灌丛草场略有下降。

由图 5 可以看出,从 2000—2007 年三江源草地总产量先增加后稳定又下降,从 2007—2010 年快速增长,这一改善与三江源地区管理部门对三江源保护区的治理密不可分。自从三江源草地出现草地退化现象,管理部门就开始大力投资退牧换草、围栏放牧等措施,2007 年开始效果逐步体现。

4 结论

基于改进的 CASA 模型,利用 2000—2010 年三江源地区 MOD13A1 植被指数 3 级数据以及对应的气象数据,计算得到三江源地区不同类型草场的亩产量分布,得出以下结论:

1) 空间上,草场亩产量分布特征呈东南—西北逐渐降低,西部地区亩产量偏低,40~60 kg/亩,中部地区 60~120 kg/亩,东部地区亩产量一般大于 120 kg/亩。高值出现在东南地区海拔偏低、地势平坦的湿润

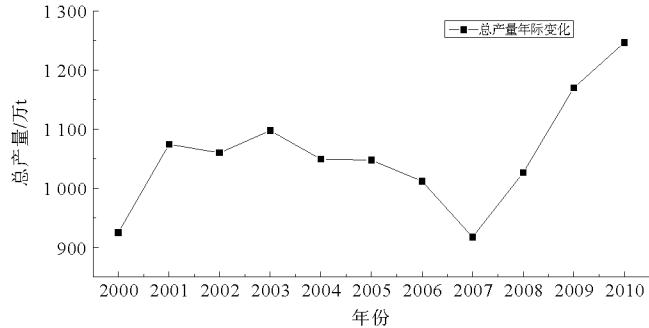


图 5 2000—2010 年三江源草地总产量变化图

Fig. 5 Total yield variation of grassland in the three-river headwater region during 2000—2010

地区,低值一般出现在西北地区海拔高的干旱高寒地区。进一步说明了三江源地区 NPP 的分布东西差异大,受海拔、地势及环境湿润程度影响大。

2) 时间上,不同类型草地亩产量整体变化不大,高产量草场亩产量一般在 120~180 kg/亩,低产量草场亩产量一般在 40~60 kg/亩,2000—2010 年草场整体状况比较稳定,草场总产量整体呈上升趋势,说明对草场的保护措施明显改善。

3) 三江源草场草产量变化的主要驱动力是人类活动,管理部门采取退牧换草、围栏放牧等措施大大提高了草产量,改善了三江源草场生态环境。

4) 基于改进的 CASA 模型对三江源地区 2000—2010 年草地亩产量的遥感反演结果非常理想,不同类型草场的亩产量基本在给定的实测范围内,有望在以后代替落后人工实测,节省大量的人力、物力和财力,实现快速有效的产量评估。

参考文献:

- [1] 除多,德吉央宗,普布次仁,等.藏北草地地上生物量及遥感监测模型研究[J].自然资源学报,2013,28(11):2000-2011.
CHU Duo, DEJI Yangzong, PUBU Ciren, et al. Aboveground biomass in the North Tibet and estimate model using remote sensing data[J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(11): 2000-2011.
- [2] 王苗苗.三江源区高寒草甸草产量遥感监测及植物碳汇动态研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- [3] 周鑫,盛建东,张文太,等.基于 MODIS 数据的伊犁地区草地地上生物量反演[J].草地学报,2015,23(1):27-33.
ZHOU Xin, SHENG Jiandong, ZHANG Wentai, et al. Aboveground biomass inversion of grassland in Ili area using MODIS data[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(1): 27-33.
- [4] 赵强.基于 RS/GIS 的草产量估算方法研究及生产潜力评价[D].青岛:山东科技大学,2014.
- [5] 董建军.基于多源卫星数据的典型草原遥感估产研究:以锡林河流域为例[D].呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [6] 方金.基于多源遥感数据的甘南牧区草地生物量遥感监测研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [7] KAWAMURA K, AKIYAMA T, YOKOTA H O, et al. Quantifying grazing intensities using geographic information systems and satellite remote sensing in the Xilinggol steppe region, Inner Mongolia, China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 107(1):83-93.
- [8] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998, 281(5374):237-240.
- [9] NAYAK R K, PATEL N R, DADHWAL V K. Estimation and analysis of terrestrial net primary productivity over India by remote-sensing-driven terrestrial biosphere model[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2010, 170(1-4):195-213.
- [10] PETERSON D L, PRICE K P, MARTINCO E A. Discriminating between cool season and warm season grassland cover types in northeastern Kansas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23):5015-5030.
- [11] 赵芳.三江源区草地 MODIS 植被指数时空变异及驱动因子分析[D].西宁:青海大学,2012.
- [12] 张宗化.三江源地区不同草地类型草地群落特征的垂直分布规律[J].黑龙江畜牧兽医,2012,15:91-94.
ZHANG Zonghua. Vertical distribution law of community characteristics of different grassland types in the three-river headwater region[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2012, 15: 91-94.
- [13] 张美玲,蒋文兰,陈全功,等.基于 CSCS 改进 CASA 模型的中国草地净初级生产力模拟[J].中国沙漠,2014,34(4):1150-1160.
ZHANG Meiling, JIANG Wenlan, CHEN Quangong, et al. Estimation of grassland net primary production in China with improved CASA model based on the CSCS[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(4):1150-1160.
- [14] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
ZHU Wenquan, PAN Yaohong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424.
- [15] 朱文泉,潘耀忠,何浩,等.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学通报,2006,51(6):700-706.
ZHU Wenquan, PAN Yaohong, HE Hao, et al. Simulation of maximum light use efficiency of typical vegetation in China [J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 51(6): 700-706.
- [16] 卫亚星,王莉雯.青海省植被光能利用率模拟研究[J].生态学报,2010,30(19):5209-5216.
WEI Yaxing, WANG Liwen. The study on simulating light use efficiency of vegetation in Qinghai Province[J]. Acta Eco-

logica Sinica, 2010, 30(19): 5209-5216.

[17] 朱学山, 江涛, 魏显虎, 等. 基于遥感卫星的肯尼亚 2000—2013 年植被覆盖度研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 24-29.

ZHU Xueshan, JIANG Tao, WEI Xianhu, et al. Study of vegetation coverage during 2000—2013 in Kenya based on remote sensing satellite[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(6): 24-29.

(责任编辑:高丽华)

(上接第 10 页)

[9] CHEN J, CHEN J, LIAO A, et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2015, 103: 7-27.

[10] BROVELLI M A, MOLINARI M, HUSSEIN E, et al. The first comprehensive accuracy assessment of GlobeLand30 at a national level: Methodology and results[J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 4191-4212.

[11] MANAKOS I, PETROU Z I, FILCHEV L, et al. Globalland30 mapping capacity of land surface water in Thessaly, Greece [J]. Land, 2014, 4(1): 1-18.

[12] 孟雯, 童小华, 谢欢, 等. 基于空间抽样的区域地表覆盖遥感制图产品精度评估: 以中国陕西省为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(6): 742-749.

MENG Wen, TONG Xiaohua, XIE Huan, et al. Accuracy assessment for regional land cover remote sensing mapping product based on spatial sampling: A case study of Shaanxi Province, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(6): 742-749.

[13] 廖安平, 彭舒, 武昊, 等. 30 m 全球地表覆盖遥感制图生产体系与实践[J]. 测绘通报, 2015(10): 4-8.

LIAO Anping, PENG Shu, WU Hao, et al. The production system of 30 m global land cover mapping and its application [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(10): 4-8.

[14] 曹雪, 柯长青. 基于对象级的高分辨率遥感影像分类研究[J]. 遥感信息, 2006(5): 27-30.

CAO Xue, KE Changqing. Classification of high-resolution remote sensing images using object-oriented method[J]. Remote Sensing Information, 2006(5): 27-30.

[15] 曹明, 张友静, 郑淑倩, 等. MODIS 土地覆盖数据产品精度分析: 以黄河源区为例[J]. 遥感信息, 2012, 27(4): 22-27.

CAO Ming, ZHANG Youjing, ZHENG Shuqian, et al. Accuracy analysis of MODIS land cover data product: A case study of Yellow River source region[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(4): 22-27.

[16] 马京振, 孙群, 肖强, 等. 河南省 GlobeLand30 数据精度评价及对比分析[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(11): 1563-1572.

MA Jingzhen, SUN Qun, XIAO Qiang, et al. Accuracy assessment and comparative analysis of GlobeLand30 data set in Henan Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(11): 1563-1572.

[17] FOODY G M. Status of land cover classification accuracy assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 185-201.

[18] HEROLD M, MAYAUX P, WOODCOCK C E, et al. Some challenges in global land cover mapping: An assessment of agreement and accuracy in existing 1 km datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2538-2556.

[19] 冉有华, 李新, 卢玲. 四种常用的全球 1 km 土地覆盖数据中国区域的精度评价[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 490-500.

RAN Youhua, LI Xin, LU Ling. Accuracy evaluation of the four remote sensing based land cover products over China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 490-500.

[20] CLARK M L, AIDE T M, GRAU H R, et al. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2816-2832.

[21] 杨永可, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 大尺度土地覆盖数据集在中国及周边区域的精度评价[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 453-475.

YANG Yongke, XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi, et al. Comparison and assessment of large-scale land cover datasets in China and adjacent regions[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(2): 453-475.

[22] 刘吉羽, 彭舒, 陈军, 等. 基于知识的 GlobeLand30 耕地数据质量检查方法与工程实践[J]. 测绘通报, 2015(4): 42-48.

LIU Jiwy, PENG Shu, CHEN Jun, et al. Knowledge based quality checking method and engineering practice of GlobeLand30 cropland data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(4): 42-48.

(责任编辑:高丽华)