

基于 MODIS 植被指数的甘南草地 净初级生产力时空变化研究

王莺¹, 夏文韬¹, 梁天刚^{1*}, 王超²

(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. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用甘南地区 2006—2007 年的外业实测样方草地干物质产量和 MODIS 植被指数数据,建立了草地地上部分干物质产量遥感反演模型,根据根冠比和干物质转碳率对 2006—2008 年甘南地区草地净初级生产力(NPP, net primary productivity)进行了估算,绘制了甘南草地 NPP 年累积量空间分布格局图和 NPP 月度变化动态图,对不同草地植被类型的 NPP 差异进行了评价。研究结果表明,2006—2008 年甘南草地年 NPP 分别达 637.04, 599.98 和 566.59 g C/m²,其空间分布具有自西南向东北逐渐减少的趋势;年内不同草地类型的 NPP 均在 7—8 月达到最大累积量;NPP 累积量最高的 3 种草地类型是沼泽、高寒灌丛草甸和高寒草甸,3 年中最大月 NPP 的平均值分别达到 1 137.28, 553.76 和 527.66 g C/m²;2006—2008 年甘南草地 NPP 持续下降,年草地 NPP 总量的减少速率为 1.2 Tg/a,尤其是沼泽湿地的 NPP 下降明显,年平均减少速率达到了 125.92 g C/m²。

关键词:甘南地区;MODIS 植被指数;遥感监测模型;草地净初级生产力

中图分类号:S812-05;S127 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2010)01-0201-10

* 甘南是黄河和长江的源头,黄河和白龙江两大流域重要的水源涵养地,甘肃省重要的畜牧业生产基地,也是全国主要少数民族集聚的五大草原牧区之一。全州草地面积约 260.25 万 hm²,占甘南总土地面积的 67.64%,可利用草场面积约为 249.50 万 hm²,占总草地面积的 95.86%^[1]。甘南草原主要的草地植被类型是高寒草甸,其面积占全州可利用草地面积的 11.80%,是青藏高原自然载畜能力较高、耐放牧性最强的草场,然而近年来,由于自然和人为因素的双重影响,导致甘南草地大范围严重退化、产量下降,这已经成为社会、经济以及草地畜牧业可持续发展的巨大障碍^[1-4]。甘南地区草地生态与环境具有国内其他地区无法比拟的多样性、差异性、过渡性和不稳定性特征^[5],其变化不仅直接影响着本地区社会经济的发展,而且对青藏高原以及全国的江河、气候、生态环境都有直接影响^[6]。

陆地生态系统的净初级生产力(NPP, net primary productivity)是人类赖以生存与发展的物质基础,反映了植物群落在自然条件下的生长状况和生产能力,是一个估算地球支持能力和评价陆地生态系统可持续发展的重要生态指标^[7-9],开展区域和全球尺度的净初级生产力研究有十分重要的意义^[10]。在区域和全球尺度上,人们无法直接全面地进行 NPP 的测量,利用模型模拟进行间接估测就成为了一种重要而被广泛接受的研究方法^[11-13]。在 20 世纪 70 年代初,德国学者 Leith 和 Whittaker^[14]首次估算出全球 NPP 值。30 余年来 NPP 研究经历了站点实测、统计回归及模型估算研究等阶段。而在模型估算研究中,遥感数据的引进已经成为一个重要的发展方向^[15]。到现在为止,计算 NPP 的模型有 20 多种,Ruimy 和 Sougier^[16]将这些模型概括为气候生产潜力模型、生态系统过程模型和光能利用率模型 3 种。气候生产潜力模型利用主要气候因子与 NPP 之间的相关性原理,利用大量的实测数据建立 NPP 与这些气候因子之间的简单统计回归模型^[17,18]。生态系统过程模型是通过一系列植物生理、生态学过程的模拟而得到的,目前已有的生态系统过程模型比较多,如 RHESSYS(Regional Hydro-Ecologic Simulation System)^[19]、BIOME-BGC(BioGeochemical Cycles)^[20]和 BEPS(Boreal Ecosystem Productivity

* 收稿日期:2009-01-15;改回日期:2009-03-26

基金项目:国家高技术研究发展专项经费(2007AA10Z232)资助。

作者简介:王莺(1984-),女,甘肃兰州人,在读硕士。E-mail:wangyn2007@lzu.cn

* 通讯作者。E-mail:tgliang@lzu.edu.cn

Simulator)^[21]等。光能利用率模型建立在植物光合作用过程和 Monteith^[22,23]提出的光能利用率概念上。现有的光能利用率模型有 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)^[24]、GLO-PEM(Global Production Efficiency Model)^[25]和 C-FIX^[26]等。我国于 20 世纪 70 年代末开始研究陆地生态系统生产力^[27,28]。李镇清等^[29]根据中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站近 20 年的观测资料,利用 Holdridge 生命地带系统的气候指标以及任继周等^[30,31]提出的草原综合顺序分类法的气候指标研究了我国典型草原区的气候变化及其对 NPP 的影响。曾慧卿等^[32]应用 BIOME-BGC 模型估算了 1993—2004 年红壤丘陵区湿地松林总第一性生产力(GPP, gross primary productivity)和 NPP,并分析了 GPP、NPP 年际变化对气候的响应以及未来气候变化情景下的 GPP、NPP 响应。冯险峰^[33]利用 BEPS 模型估算了我国 2001 年陆地生态系统 NPP。高清竹等^[34],张峰等^[35]都采用 CASA 模型分别对藏北地区和内蒙古典型草原草地植被 NPP 进行了分析研究。张杰等^[36]应用 GLO-PEM 和 CASA 模型,借助遥感生态反演的物理分析,初步构建起基于遥感与生态过程的干旱区使用的光能利用率模型 NPP-PEM(NPP-Production Efficiency Model),对中国西部干旱区山地—绿洲—荒漠生态系统年 NPP 进行了估算。崔林丽等^[37]利用 GLO-PEM 模型对 1981—2000 年中国陆地 NPP 的季节变化进行了研究。卢玲等^[38]利用 C-FIX 模型和高时空分辨率的遥感数据对黑河流域植被 NPP 进行了估算。但上述研究方法在小区域 NPP 的估算方面还存在精度较差的问题。同时由于目前的研究区域多集中在青藏高原和内蒙古草原^[34,35,39-42],而对于甘南这个全国最重要的五大牧场之一却没有相关研究。

基于以上原因,本研究拟通过建立干物质遥感反演模型,采用干物质转碳率来估算甘南草地净初级生产力,为遥感模型小区域 NPP 的精确估算提供参考,同时也可以为甘南地区畜牧业合理布局、草地资源的可持续利用、改善和保护草地生态环境及气候变化等相关研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘南藏族自治州位于青藏高原东北边缘区,地理坐标为 33°06′~35°44′ N,100°46′~104°44′ E,南与四川阿坝州相连,西南与青海黄南州、果洛州接壤,东部和北部与甘肃陇南、定西、临夏毗邻,处于青藏高原和黄土高原过渡地带,地势西北部高,东南部低。境内海拔 1 100~4 900 m,平均海拔 3 000 m。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,年平均温度仅 1~3℃,没有绝对无霜期,≥10℃年积温持续期仅有 2 个多月,全年平均日照时间为 2 200~2 400 h。草地类型有暖性草丛、温性草甸草原、温性草原、高寒草甸、高寒灌丛草甸、低平地草甸类和沼泽^[2,3,43,44]。

1.2 资料获取与处理

1.2.1 地面调查数据 野外调查主要集中在 2006—2007 年 6—9 月的草地生长季。根据草地类型的空间分布和面积大小,对甘南地区草地设计了不同数目的样地(图 1)。总计调查样地为 109 个,样方 217 个。其中,2006 年设置样地 64 个,包括 85 个样方;2007 年设置样地 45 个,包括 132 个样方。样地设置主要选择在草地植被空间分布比较均一,可以代表较大范围草地植被的典型区域。在植被群落一致性较好的样地内设置 1~2 个 0.5 m×0.5 m 的样方,在植被均质性较差的区域设置 2~3 个 1 m×1 m 的样方。采用常规植被调查方法对样方进行调查。主要记录样方的经纬度、海拔、草地类型、植被盖度(针刺法)、草层平均高度、不可食牧草的种类及重量、地上产草量鲜重,以及鲜草在 65℃烘箱里烘干 48 h 后测量的干物质产量。

1.2.2 卫星遥感资料 遥感数据使用 NASA/MODIS(National Aeronautics and Space Administration/Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,美国宇航局/中分辨率影像辐射度计)陆地产品组按照统一算法开发的 2006—2008 年全年最大合成的植被指数(MOD13A3),空间分辨率为 1 000 m×1 000 m,空间位置在全球正弦曲线投影 SIN(sinusoidal projection)系统中的编号为 h26v05,资料的版本为 5.0,数据格式为 EOS-HDF。该数据可以从 NASA 对地观测系统数据共享平台下载(EOS Data Gateway,网址为 <http://deleenn.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome/>)。

1.2.3 其他相关数据 甘南藏族自治州 1:50 万草地类型图、行政分区图等空间数据库。

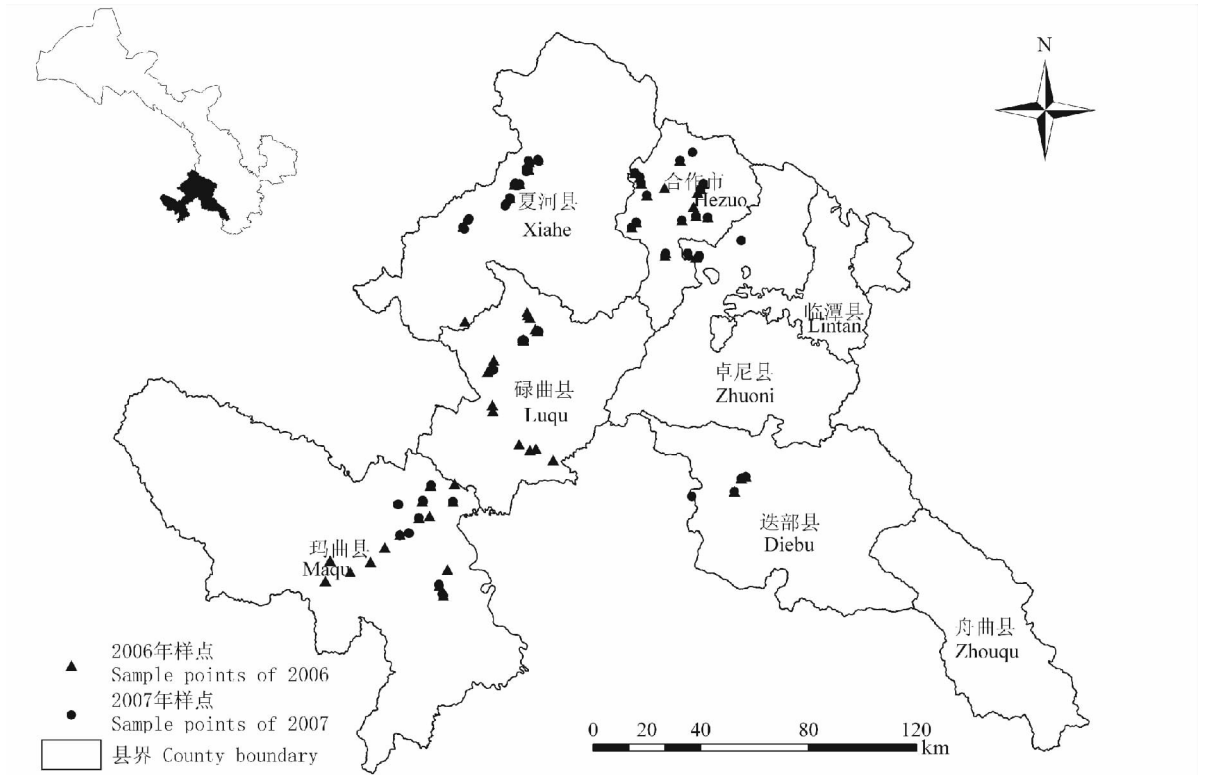


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Research location and field surveying site

1.3 试验方法

1.3.1 干物质产量遥感监测模型的建立与精度评价 地上干物质产量是估测草地 NPP 的重要指标。本研究主要通过干物质产量和 NPP 之间的相关关系进行 NPP 的反演,因此需要建立干物质产量遥感模型。

对建立的遥感模型用公式(1)和(2)进行精度评价。

$$\text{相对误差} = \frac{\text{实测值} - \text{估测值}}{\text{实测值}} \times 100\% \tag{1}$$

$$\text{平均误差} = \sum |\text{相对误差}| / N \tag{2}$$

式中,实测值为地面实测样方的干物质产量,估测值为依据建立的遥感监测模型计算出的数值, N 为样本数目。

1.3.2 甘南草地 NPP 的计算 植被净第一性生产力是指绿色植物在单位面积、单位时间内所积累的有机物数量,是由光合作用产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[5],一般单位用 $\text{g C}/\text{m}^2$ 表示^[45]。

草地 NPP 值可由地上部分干物质产量推算得到^[46]:

$$NPP = B_g \times S_{tm} \times (1 + S_{ug}) \tag{3}$$

式中, NPP 为单位面积草地净初级生产力,单位为 $\text{g C}/\text{m}^2$; B_g 为单位面积干物质产量,单位为 g/m^2 ; S_{tm} 是草地干物质产量到 NPP 的转换系数,单位为 $\text{g}/\text{g C}$,数值为 0.45^[47]; S_{ug} 为草地地下部分和地上部分生物量的比例系数。在本研究中,引用了朴世龙等^[48]确定的我国草地植被地下与地上部分生物量比例系数。甘南牧区 7 种草地植被类型的比例系数,温性草甸草原类为 5.26,温性草原类为 4.25,暖性草丛类为 4.42,低平地草甸类为 6.31,高寒灌丛草甸类和高寒草甸类为 7.92,沼泽类为 15.68。

在草地 NPP 计算中,不同草地类型的分布范围来自于甘南地区草地类型图。甘南地区月 NPP 的计算基于 MOD13A3 产品中月最大合成的植被指数。应用遥感数字图像(共计 36 幅)和干物质遥感监测模型,可以计算出 2006—2008 年的地面干物质产量,然后利用公式(3)以及不同草地类型的根冠比,可以得到甘南 7 种草地类型的 NPP。

2 结果与分析

2.1 干物质产量遥感监测模型与精度评价

2.1.1 干物质产量遥感监测模型的建立 剔除一些异常样点后,利用回归方法,统计分析了研究区 2006—2007 年实测的各样方地上部分干物质产量同 NDVI 和 EVI 值之间的相关关系(表 1)。查 F 分布表发现在置信水平 $\alpha=0.01$ 时所有模型都可以通过显著性检验。相比之下,MODIS/EVI 幂函数可更好地模拟甘南草地地上干物质产量(图 2)。甘南地区草地植被地上干物质产量遥感监测模型可表示为:

$$y=5\ 320.7x^{1.977\ 6}, R^2=0.618\ 7 \quad (4)$$

式中, y 为干物质产量(kg/hm^2), x 为 MODIS 归一化植被指数 EVI 的值。

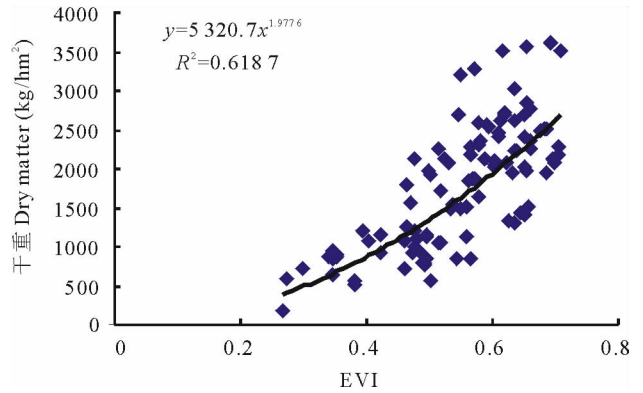


图 2 甘南地区草地地上干物质产量遥感反演模型
Fig. 2 Remote sensing inversion model for the dry matter of grassland aboveground biomass

表 1 草地干物质遥感反演模型比较

Table 1 Comparison between dry matter of grassland inversion models

函数 Function	NDVI				EVI			
	公式 Formula	拟合优度 系数 R^2	方差齐性 检验 F	显著性 Sig.	公式 Formula	拟合优度 系数 R^2	方差齐性 检验 F	显著性 Sig.
	指数函数 Exponential function	$y=49.519e^{4.576\ 8x}$	0.608 8	1 511.709 0	0.010 0	$y=170.62e^{4.033\ 4x}$	0.615 5	1 875.238 0
幂函数 Power function	$y=3\ 807.2x^{3.071\ 1}$	0.603 1	3 250.045 0	0.010 0	$y=5\ 320.7x^{1.977\ 6}$	0.618 7	7 496.405 0	0.010 0

2.1.2 遥感反演模型的精度比较与分析 遥感反演模型估测的草地地上干物质产量和 2006—2007 年实测值之间具有较高的相关性(图 3), R^2 达到 0.552 5。采用公式(1)和(2)进行精度评价的结果表明,遥感反演模型的平均误差为 28.83%,其精度达到 71.17%。

2.2 甘南草地年 NPP 空间分布及其年际变化

甘南全州分 3 个自然类型区,东南部为岷迭山区,气候比较温和,是重要林区;东部为丘陵山区,高寒阴湿,农林牧兼营;西北和西南部为广阔的草甸草原,是全省主要牧区。草地 NPP 自西南向东北呈逐渐减少的趋势(图 4)。由遥感反演模型估算的 2006—2008 年甘南草地 NPP 总量分别为 17.03, 15.87 和 14.67 Tg (注: $1\ \text{Tg}=10^{12}\ \text{g}$),单位面积草地 NPP 年平均值分别为 637.04, 599.98 和 566.59 $\text{g}\ \text{C}/\text{m}^2$, 3 年平均值为 601.20 $\text{g}\ \text{C}/\text{m}^2$ 。

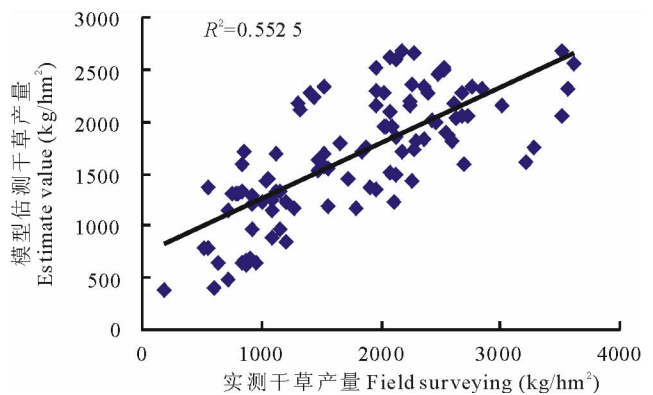


图 3 草地地上部分干物质估测值与实测值对比
Fig. 3 Comparison between field surveying and estimate value of dry matter yield grassland aboveground biomass

目前常用的 NPP 验证方法主要有模型估算值与实测数据相比较和不同 NPP 模型间的相互比较。对于草地生物量的研究,国内已有大量的文献报道,但一般仅限于地上生物量和地上部分净第一性生产力季节动态的测量和分析,很少报道对草地群落总 NPP(包括地上地下部分 NPP)的测量和季节动态研究结果。因为甘南地区还没有人做过相关的草地 NPP 研究,所以这给本研究的精度验证带来了很大困难。依据已有的文献报导,对中国西部地区高山草甸 NPP 的观测研究主要集中在甘肃农业大学天祝草原试验站($102^{\circ}26'\ \text{E}, 37^{\circ}12'\ \text{N}$)和海拔高寒草

甸生态系统定位站(101°19' E, 37°37' N)。卢玲^[49]在 1998—2002 年用 C-FIX 模型估算的天祝站所在格网上的 NPP 平均值为 1 361 g DW/(m² · a), 胡自治等^[50,51]1980—1981 年在天祝站测量的 2 种原生高山草甸群落[原生珠芽繆(*Polygonum viviparum*)草地和原生线叶蒿(*Artemisia subulata*)草地]的 NPP 平均值为 1 130 g DW/(m² · a)。杨福国等^[52]1980—1984 年在海北站测量的矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸平均 NPP 值为 969.92 g DW/(m² · a)。甘南牧区 2006—2008 年 3 年的平均 NPP 为 1 336 g DW/(m² · a) (为了统一 NPP 单位, 本研究估测结果除了 0.45 的干物质转碳率), 这个值比 C-FIX 模型估测的值低了 1.84%, 比天祝站实测值高了 18.23%, 比海北站实测值高了 37.74%。这 2 个站点都位于甘南的外围, 但它们具有相同的主要草地类型, 所以其结果具有一定的可比性。本研究估测值比实测值略高, 原因除了有年份间的差异外, 还有地域上的差别。甘南与天祝站及海北站相比, 纬度低, 降水丰富, 光照条件好, 而且甘南牧区是我国草地的高产区^[53], 所以草地 NPP 更高。

为利于直观显示 NPP 发生变化的区域及其程度, 利用 ArcGIS 软件将 2006 和 2008 年的 NPP 图像进行叠加相减, 制作了甘南草地 2006—2008 年 NPP 空间变化图(图 5)。通过统计分析可知, 甘南牧区从 2006—2008 年 3 年草地 NPP 减少的区域占草地总面积的 76.52%。就全境范围来看, 玛曲县的东南部、夏河县北部低海拔地区以及舟曲县的草地 NPP 值有所增加, 大部分地区的增加幅度都在 100 g C/m² 左右, 只有极少数地区的增长幅度达到了 200 g C/m²。而其余地区的草地 NPP 值都呈下降态势, 大部分地区的草地 NPP 值在这 3 年间的降幅达到了 100~200 g C/m², 个别地区的降幅在 350 g C/m² 以上。由此可见, 甘南州以畜牧业生产为主的玛曲县、碌曲县和夏河县的草场 NPP 减少严重。通过对甘南气象、草地畜牧业等统计资料的分析表明, 超载过牧和降水等气象因素的年季动态变化是产生上述现象的主要原因。

甘南地区面积最大的草地类型是高寒灌丛草地, 占甘南草地总面积的 87.14%(表 2), 它具有最大的 NPP 总量, 其 3 年的平均值达到 14.01 Tg/a。其次为高寒草甸, 3 年平均 NPP 值为 1.61 Tg/a。在这 7 种草地类型中, 高寒灌丛草甸、高寒草甸和沼泽的 NPP 值在逐年减少, 平均每年的减少速率分别为 1.01, 0.16 和 0.01 Tg/a。其他草地类型则保持平稳或略有增长。甘南地区年草地 NPP 总量的减少速率为 1.20 Tg/a。

2.3 甘南草地 NPP 月度动态变化特征

统计分析的结果表明, 甘南各草地类型的月 NPP 累积量在 7 和 8 月达到最大, 之后 NPP 开始逐渐降低, 到 12 月和来年的 1, 2 月达到极小值。从不同草地类型 NPP 的变化趋势看, NPP 最高的 3 种草地类型是沼泽、高寒灌丛草地和高寒草甸, 3 年中最大月 NPP 累积量的平均值分别达到 1 137.28, 553.76 和 527.66 g C/m²。

表 2 甘南牧区不同草地类型 NPP 年度变化动态

Table 2 Annual dynamics of various grassland types in Gannan pasturing area

草地类型 Grassland type	面积 Area (hm ²)	面积百分比 Area percentage (%)	2006		2007		2008	
			NPP (Tg)	百分比 Percentage (%)	NPP (Tg)	百分比 Percentage (%)	NPP (Tg)	百分比 Percentage (%)
暖性草丛①	11 000	0.41	0.021 8	0.13	0.025 2	0.16	0.024 2	0.16
温性草甸草原②	13 700	0.51	0.045 5	0.27	0.045 6	0.29	0.043 8	0.30
温性草原③	16 200	0.61	0.026 2	0.15	0.033 7	0.21	0.030 5	0.21
高寒草甸④	290 100	10.85	1.771 1	10.40	1.621 7	10.22	1.447 6	9.87
高寒灌丛草甸⑤	2 329 400	87.14	15.019 6	88.20	14.001 4	88.24	13.006 6	88.64
低平地草甸类⑥	1 500	0.06	0.002 9	0.02	0.005 4	0.03	0.004 6	0.03
沼泽⑦	11 200	0.42	0.141 5	0.83	0.134 8	0.85	0.115 7	0.79
总量 Total	2 673 100	100	17.028 7	100	15.867 6	100	14.673 1	100

① Warm-temperate herbosa; ② Temperate meadow-steppe; ③ Temperate steppe; ④ Alpine meadow; ⑤ Alpine shrub meadow; ⑥ Lowland meadow; ⑦ Marsh.

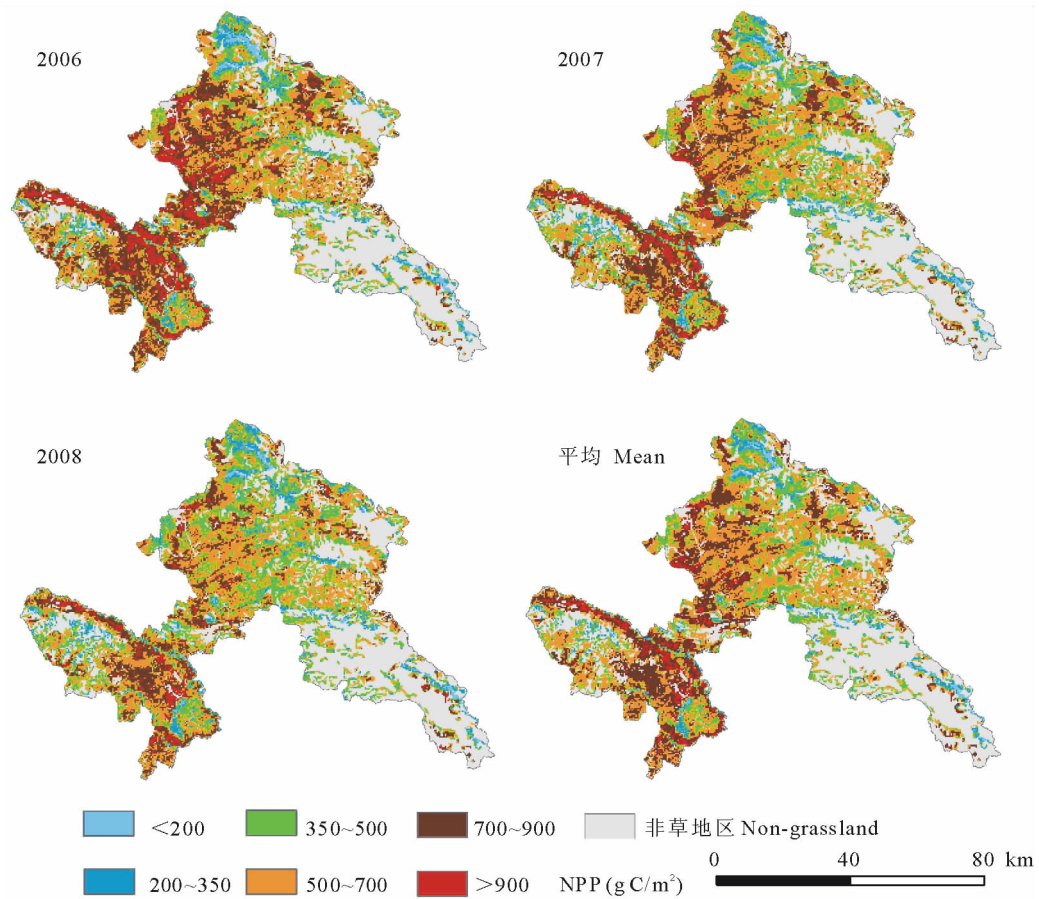


图4 甘南草地年 NPP 空间分布

Fig. 4 Annual NPP distribution of grassland in Gannan

图6表示了甘南草地2007年1—12月NPP月累积量的月度动态变化过程,可以看到甘南草地NPP具有鲜明的季相变化特征,这与该区域内太阳地表辐射、气温、降水的季节变化有很高的相关性。在1和2月冬季期间,整个地区气温很低,地表冻结,植被停止生长,大部分地区NPP基本为0;3和4月开春,东南部低海拔地区首先升温,积雪融化供给地表径流,植被开始出现生机,但NPP累积值还不高。5和6月气温继续升高,降水增多,辐射也增强,区域内大部分地区都开始有较明显的植被生长。到夏季的7和8月是该地区高温季节,太阳辐射也最强,降水和地表径流量也多集中在这个季节。良好的光、热、水配置使得甘南草地植被处于生长状况最好的时期,各月NPP累积量都较高,7月甘南草地NPP累积量与6月相比多了5.78 Tg C,甘南的主要牧场(玛曲、碌曲、舟曲)7和8月草地NPP值基本都达到了500 g C/m²以上,有的地区单位面积产量甚至超过了900 g C/m²。9月入秋,气温开始下降,草地开始枯黄,NPP累积量较8月急剧减少。到10月全区域NPP累积值大部分都降到了100 g C/m²以下。到11和12月入冬季节,气温、降水和辐射都达到全年最低,植被停止生长,因此NPP也下降到最低值,并一直持续到来年的1和2月。

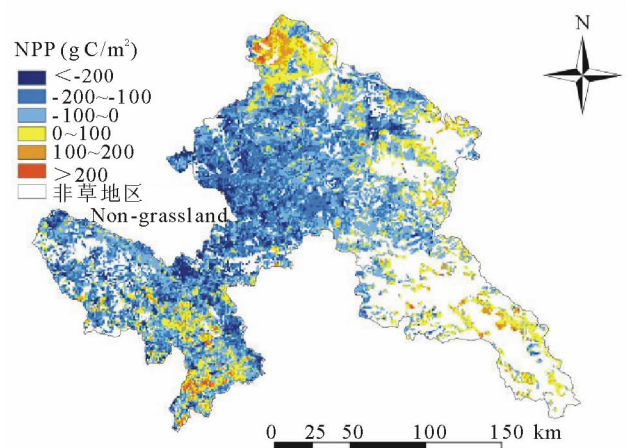


图5 2006—2008年甘南草地NPP变化

Fig. 5 NPP change of grassland in Gannan during 2006—2008

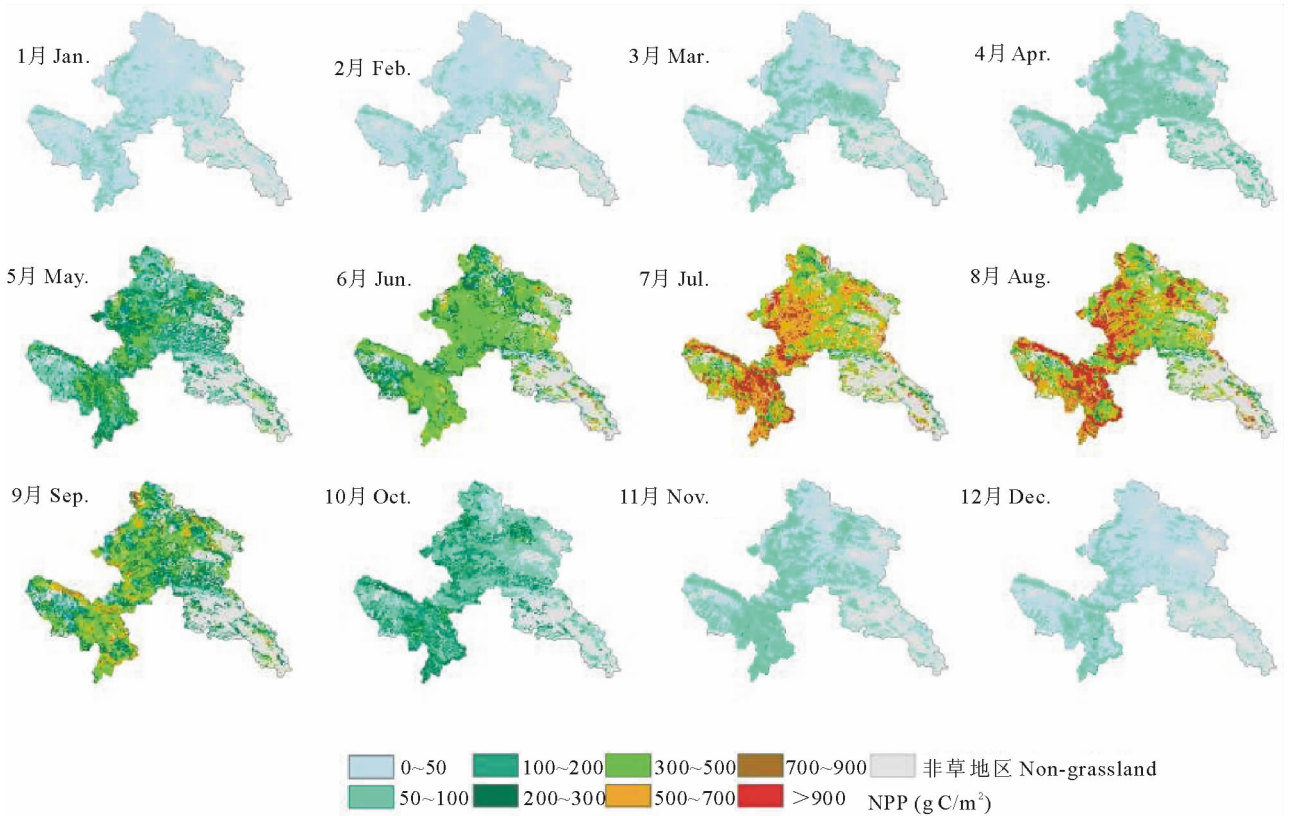


图 6 甘南草地 NPP 月度变化动态

Fig. 6 Monthly NPP dynamics of grassland in Gannan

3 结论与讨论

同气候生产潜力模型、生态系统过程模型和光能利用率模型相比,本研究采用统计回归的方法计算了 NPP 的变化动态,其优势在于一旦确定了干物质遥感反演模型,就可以通过植物的根冠比和干物质转碳率对不同草地类型进行 NPP 计算,需要的参数少,计算简便,可适用于区域 NPP 的估算。由于植被指数对地面植被叶绿素变化的敏感性和较高的时空分辨率,因此可以很灵敏地反映 NPP 的动态变化。模型估测方法需要的参数多,有的参数在某些区域极难获取,比如每日气象数据、土壤呼吸率等,有很多参数在不同区域其值也存在显著差异,需要大量的野外工作,并且很多模型是基于全球尺度的,对于小区域的计算精度不够。

卫星植被指数可以较好的反映草地 NPP 的年际变化和不同草地的 NPP 差异,但是由于植被指数本身的局限性,使得其对于高盖度植被模拟较好,而对于低盖度草地以及在冬春季易受土壤背景、植被类型和云雪的影响,估测结果有较大误差。

本研究在计算甘南牧区草地 NPP 时,不同草地类型的根冠比采用了多位研究者^[47,54]在不同研究区的科研成果。此外,由于缺乏高寒灌丛草甸类的根冠比数据,所以选用高寒草甸的根冠比来近似代替。这是影响 NPP 计算精度的一个重要因素,也是今后需要加强研究的一个重点。

参考文献:

- [1] 刘兴元,陈全功,王永宁. 甘南草地退化对生态安全与经济的影响[J]. 草业科学, 2006, 23(12): 39-41.
- [2] 甘肃省草原总站. 甘肃省草地资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1999: 386.
- [3] 李自珍,杜国祯,惠苍,等. 甘南高寒草地牧场管理的最优控制模型及可持续利用对策研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(4): 83-85.
- [4] 闫玉春,唐海萍. 草地退化相关概念辨析[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 93-99.
- [5] 姚玉璧,王润元,邓振镛,等. 黄河上游主要产流区气候变化及其对水资源的影响——以甘南高原为例[J]. 中国沙漠,

2007, 27(5): 903-909.

- [6] 吕晓英, 吕胜利. 甘南草地畜牧业的可持续发展[J]. 草业科学, 2002, 19(7): 1-4.
- [7] Cramer W, Field C B. Comparing global models of terrestrial net primary productivity(NPP): Introduction[J]. Global Change Biology, 1999, 5: 3-4.
- [8] Euskirchen E S, Chen J, Li H, *et al.* Modeling landscape net ecosystem productivity (Land NEP) under alternative management regimes[J]. Ecological Modelling, 2002, 154: 75-91.
- [9] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 81: 58-66.
- [10] IGBP(International Geosphere-Biosphere Program). The terrestrial carbon cycle: Implications for Kyoto protocol[J]. Science, 1998, 280: 1393-1394.
- [11] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity(NPP): Overview and key results[J]. Global Change Biology, 1999, 5(Suppl. 1): 1-15.
- [12] 张贞明, 韩天虎. 几种高寒灌丛地上植物量的估测模型[J]. 草业科学, 2008, 25(1): 10-13.
- [13] 李海亮, 赵军. 草地遥感估产的原理与方法[J]. 草业科学, 2009, 26(3): 34-38.
- [14] Leith H, Whittaker R H. Modeling the primary productivity of the world[A]. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [15] 崔霞, 冯琦胜, 梁天刚. 基于遥感技术的植被净初级生产力研究进展[J]. 草业科学, 2007, 24(10): 36-42.
- [16] Ruimy A B, Sougier. Methodology for the estimation of terrestrial net primary productivity from remotely sensed data[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 5263-5283.
- [17] Esser G. Osnabruck biosphere model: Structure, construction, results[A]. In: Esser G, Overdieck D. Modern Ecology: Basic and Applied Aspects[M]. New York: Elsevier, 1991: 210-235.
- [18] Bazilevich N I, Drozdov A V, Rodin L E. World forest productivity, its basic regularities and relationship with climatic factors[A]. Duvigneard P III. Productivity of Forest Ecosystems[M]. Paris: UNESCO, 1971: 345-353.
- [19] Band L E, Peterson D L, Running S W, *et al.* Forest ecosystem process at the watershed scale: Basis for distributed simulation[J]. Ecological Modelling, 1991, 56: 171-196.
- [20] Hunt E R, Piper S C, Nemani R, *et al.* Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem simulation model and three-dimensional atmospheric transport model[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10: 431-456.
- [21] Liu J, Chen J M, Cihlar J, *et al.* A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 158-175.
- [22] Monteith J L. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain(Series B)[M]. London: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1977: 277-294.
- [23] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9: 747-766.
- [24] Potter C S, Randerson J, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycle, 1993, 7: 811-841.
- [25] Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22: 815-835.
- [26] Veroustraete F, Sabbe H, Eerman E. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-FIX model and Euroflux data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 376-399.
- [27] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [28] 李文华, 李飞. 中国森林资源研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [29] 李镇清, 刘振国, 陈佐忠, 等. 中国典型草原区气候变化及其对生产力的影响[J]. 草业学报, 2003, 12(1): 4-10.
- [30] 任继周. 草地农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [31] 李镇清, 任继周. 草原生物适宜度模型及其应用[J]. 生态学杂志, 1997, 16(3): 70-75.
- [32] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 等. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松(*Pinus elliottii*)人工林 GPP 和 NPP[J]. 生态学

报, 2008, 28(11): 5314-5321.

- [33] 冯险峰. 基于过程的中国陆地生态系统生产力和蒸散遥感研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2004.
- [34] 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 等. 基于 CASA 模型的藏北地区草地植被净第一性生产力及其时空格局[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2526-2532.
- [35] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786-797.
- [36] 张杰, 潘晓玲, 高志强, 等. 基于遥感-生态过程的绿洲-荒漠生态系统净初级生产力估算[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2): 255-261.
- [37] 崔林丽, 史军, 唐娉, 等. 中国陆地净初级生产力的季节变化研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 8-17.
- [38] 卢玲, 李新, Frank V. 黑河流域植被净初级生产力的遥感估算[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 823-830.
- [39] 周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 74-79.
- [40] 姚玉璧, 张秀云, 朱国庆, 等. 青藏高原东北部天然草场植物气候生产力评估[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 32-34.
- [41] 刘岩, 赵英时, 冯晓明, 等. 半干旱草地净第一性生产力遥感模型研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(5): 620-627.
- [42] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.
- [43] 王爱民, 刘加林, 缪磊磊, 等. 青藏高原东北边缘及毗邻地区自然环境与人地系统响应[J]. 山地学报, 2000, 18(2): 97-103.
- [44] 郭正刚, 高新华, 刘兴元, 等. 甘南草地类型的生态经济价值与功能及其分类经营[J]. 山地学报, 2004, 22: 655-660.
- [45] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1975: 237-263.
- [46] 陈世荣, 王世新, 周艺. 基于遥感的中国草地生产力初步计算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 208-212.
- [47] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义[A]. 见: 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 129-139.
- [48] 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.
- [49] 卢玲. 中国西部地区净初级生产力及碳循环研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003.
- [50] 胡自治, 孙吉雄, 李洋, 等. 甘肃天祝主要高山草地的生物量及光能转化率[J]. 植物生态学报, 1994, 18(2): 121-131.
- [51] 胡自治, 孙吉雄, 张映生, 等. 高山线叶蒿草草地的第一性生产和光能转化率[J]. 生态学报, 1988, 8(2): 183-190.
- [52] 杨福国, 王启基, 史顺海. 矮蒿草草甸生物量季节动态与年间动态[A]. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1988: 61-70.
- [53] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 等. 基于 MODIS 数据的草地净初级生产力模型探讨[J]. 中国草地学报, 2006, 28(6): 72-76.
- [54] 李文华, 王启基, 罗天祥, 等. 青藏高原生态系统生物量及生产力[A]. 见: 李文华, 周兴民. 青藏高原生态系统及优化利用模式[M]. 广州: 广东科学与技术出版社, 1998: 183-270.

**Spatial and temporal dynamic changes of net primary product based
on MODIS vegetation index in Gannan grassland**

WANG Ying¹, XIA Wen-tao¹, LIANG Tian-gang¹, WANG Chao²

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

2. National Laboratory of Western China's Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Dry matter yield information from field surveying quadrats and MODIS vegetation index data in Gannan Prefecture during 2006–2007 were used to construct a remote sensing monitoring model for aboveground dry matter biomass of grassland. The net primary product (NPP) of grassland was estimated and used to, complete the spatial distribution maps of annual NPP accumulation and monthly NPP dynamic changes, and to evaluate the NPP difference between various grassland vegetation types. The annual maximum NPP of grassland in Gannan Prefecture during 2006–2008 were 637.04, 599.98 and 566.59 g C/(m² · a), respectively. The distribution of annual maximum NPP has a trend of gradual reduction from southwest to northeast and the yearly maximum NPP accumulation of all grassland types was in July and August. The three grassland types with the highest NPP accumulation were marsh, alpine shrub meadow, and alpine meadow, with monthly maximum NPP values of 1 137.28, 553.76 and 527.66 g C/m², respectively (mean values for the three years). The grassland NPP in Gannan Prefecture was continuously decreasing over the three years, with an annual reduction for the total grassland of 1.2 Tg/a. The reduction of marsh NPP is especially significant, with an annual rate of 125.92 g C/(m² · a).

Key words: Gannan Prefecture; MODIS vegetation index; remote sensing monitoring model; grassland net primary production