

“一江两河”中部流域植被净初级生产力估算*

周才平¹ 欧阳华¹ 曹宇^{2**} 裴志永³ 杨丁丁¹⁽¹⁾中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;⁽²⁾浙江大学土地管理系,杭州 310029;⁽³⁾中国21世纪议程管理中心,北京 100038)

摘要 基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)的遥感数据以及地面实际观测资料,采用数学模型方法,对西藏“一江两河”中部流域地区2000和2006年的植被净初级生产力(NPP)进行了估算。结果表明:研究区NPP由河谷向山脊逐渐递减,这与该区的水热梯度基本一致;该区单位面积年NPP平均为 $86.8 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,2006年比2000年高 $2.15 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,不同植被类型的单位面积年NPP以农田($243.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)最大,荒漠($35.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)最小,研究区两年平均总NPP为 $512.8 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$,2006年比2000年高 $12.7 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$,不同植被类型的总NPP以草甸($194.4 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$)最高,荒漠($30.3 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$)最低。研究期间,人类活动强烈区域(道路缓冲区0~4 km)的植被NPP呈下降趋势,而人类活动较难到达区域的植被NPP呈增加趋势。

关键词 西藏 一江两河 净初级生产力 中分辨率成像光谱仪

文章编号 1001-9332(2008)05-1071-06 中图分类号 Q948.11;TP79 文献标识码 A

Estimation of net primary productivity in middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries. ZHOU Cai-ping¹, OUYANG Hua¹, CAO Yu², PEI Zhi-yong³, YANG Ding-ding¹
(¹Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²Department of Land Resource Management, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; ³Management Center of 21st Century, Beijing 100038, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2008, 19(5): 1071-1076.

Abstract: Based on the MODIS data and field measurement, the net primary production (NPP) in 2000 and 2006 in the middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries in Tibet were estimated by using a mathematic model. The results showed that in study area, the NPP decreased gradually from valley to ridge, which was accorded with the gradients of precipitation and temperature. The annual NPP per unit area was averagely $86.8 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and was $2.15 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ higher in 2006 than in 2000. Farmland ecosystem had the highest annual NPP per unit area ($243.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), while desert ecosystem had the lowest one ($36.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). The average total NPP in the two years was $512.8 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$, with the value in 2006 being $12.7 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$ higher than that in 2000. Meadow ecosystem had the highest annual total NPP ($194.4 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$), while desert ecosystem had the lowest one ($30.3 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$). In 2000-2006, the NPP value in the areas with strong human disturbance (0-4 km away from road) had a decreasing trend, while that in the areas difficult for human to reach was in adverse.

Key words: Tibet; Yarlung Zangbo River and its two tributaries; net primary production; MODIS.

净初级生产力(NPP)是陆地生态系统碳循环的一个主要组成部分。生产力是生态学研究的基本要素,也是反映植被生长状况的一个重要指标。陆地生态系统通过NPP储存的碳对于控制大气CO₂浓度

的上升起着举足轻重的作用^[1-4]。基于GIS的计算机模型是区域尺度上精确计算NPP的最有效方法。NPP的GIS计算模型主要有3种:统计模型,是利用气候因子或蒸发散计算NPP的回归模型^[5-7];遥感参数模型,是利用光能的转换效率将植被吸收的太阳辐射转换为NPP^[8-10];生态过程模型,则可以模拟影响NPP行程的生物学过程,包括光合作用、植物呼吸和物质转换等^[11-13]。其中,生态过程模型是

* 国家重大基础研究前期专项项目(005CCA05500)、科技基础性工作专项项目(2006FY110200)和国家自然科学基金项目(30700098)。

** 通讯作者。E-mail: caoyu@zju.edu.cn

2007-06-08 收稿,2008-03-11 接受。

最可靠的,也是最复杂的,需要较多的参数和输入因子,其在区域计算中的应用取决于参数的质量和可获取程度,并且是基于特定植被类型和土壤类型的同质性的假设。而遥感参数模型采用的是光能转换效率,借助遥感影像可以减少生态过程模型中存在的确定性。

西藏“一江两河”流域是西藏人口和人类活动较集中的地区,也是西藏自治区粮食生产的主要区域,是国家“八五”计划和十年规划的农业综合开发区。目前,对该区土地荒漠化与控制^[14-18]、农业与耕地资源开发^[19-20]等方面的研究较多,且大都基于沙漠化普查工作和农业统计数据,而从生态机理角度(如植被 NPP)分析该区生态环境状况的研究则鲜有报道。为了较准确地反映近年来由“一江两河”流域综合开发所产生的生态效应,本文利用该流域 2000 和 2006 年的中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据,结合遥感生产力模型和实际观测数据估算了该地区的植被 NPP,分析了该区域植被 NPP 的时空分布特征,并探讨了气候变化和人类活动双重作用下的区域 NPP 时空变化趋势,旨在为该区域的农牧业开发与发展提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

西藏“一江两河”流域位于西藏自治区中南部(28°20′—31°20′ N, 89°00′—92°35′ E),地处青藏高原南部,包括雅鲁藏布江、拉萨河、年楚河的中部流域地区,面积 $6.65 \times 10^4 \text{ km}^2$,占西藏自治区总面积的 5.52%。该区属高原季风温带半干旱气候,年均气温 $4.7 \text{ }^\circ\text{C} \sim 8.3 \text{ }^\circ\text{C}$,年降水量 $251.7 \sim 580.0 \text{ mm}$,年蒸发量 $2\,293 \sim 2\,734 \text{ mm}$,干燥度大,而且 80% 的降水主要集中于 5—9 月,形成极为明显的干、湿季。区内土壤主要是山地灌丛草原土和高山草原土,自然植被主要为砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)、小角柱花(*Ceratostigma minus*)、三刺草(*Aristida trisetia*)、固沙草(*Orinus thoroldii*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)和蒿属种类,地表植被稀疏低矮,生态环境极为脆弱。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及处理方法 NPP 计算中所需的空

表 1 2000 和 2006 年“一江两河”中部流域生长季平均温度和降水量

Tab. 1 Average temperature and precipitation in growth season of 2000 and 2006 in middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries

气象站点 Weather station	生长期天数 Growing day (d)		平均温度 Average temperature (°C)		降水量 Precipitation (mm)	
	2000	2006	2000	2006	2000	2006
日喀则 Xigaze	218	226	12.6	14.1	640.4	329.6
拉萨 Lhasa	245	255	14.4	15.8	506.3	295.9

年青藏高原的气象数据(表 1),按照经纬度和三维地形在 ArcGIS 中用 IDW 方法插值。该数据已用中国科学院野外台站观测数据进行校正。

本文的植被分类数据源于《1:1 000 000 中国植被图集》^[21]。通过数字化后,参考当地 1:100 000 土地利用图,对植被分类数据进行修正。将研究区植被类型划分为 6 种主要植被类型:农田、草原、草甸、灌丛、荒漠和无植被地段,裸地、湖泊、河流和冰雪均归为无植被地段。光合有效辐射比例(FPAR)数据是从 EROS 数据中心网站上下下载的 2001 和 2006 年 MOD15 数据产品^[22],数据的时间步长为 8 d。采用最大值法获取这两个年度每月的 FPAR 数据,从而有效地去除云的影响。

MODIS 地表反射数据源于 EROS 数据中心网站^[22],选取了 NIR 波段(841~875 nm)和 SWIR 波段(1 628~1 652 nm)。该数据的时间步长为 8 d,空间分辨率为 500 m,在计算地表湿润指数前,采用二次线性重采样方法将空间分辨率调整为 1 km。

生产力验证数据包括两部分:1)野外采样分析数据,用来验证草地(本研究将草原、草甸和灌丛均归为草地)的 NPP。2006 年夏季(8 月中下旬)沿年楚河设 4 个高寒草原样地、3 个高寒草甸样地和 1 个灌丛样地,荒漠草原由于植被极少而未设立样地,每个样地设 3 个采样点。采集植被的地上部分植物体(包括叶、枝、茎、花和果实),带回实验室于 60 °C 烘箱中烘干 48 h,然后称量并计算当年植被的生长季地上部分最大生物量,以地上部分最大生物量作为当年的 NPP。2)当地的粮食生产产量数据,用来验证农田的 NPP。通过作物收获指数(0.4),将研究区 2006 年粮食产量数据和拉萨农田生态站观测的作物产量数据换算成实际 NPP^[19,23]。通过这两部分数据来验证模型模拟的“一江两河”流域植被 NPP。

1.2.2 NPP 的计算 采用 CASA 模型计算研究区 2000 和 2006 年的植被 NPP。其公式如下^[11]:

$$NPP = S_p \times FPAR \times \varepsilon_{\max} \times T_a \times W \quad (1)$$

式中: S_p 为地表太阳净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); $FPAR$ 为光

合有效辐射比例(0~1); ε_{\max} 为最大光能利用效率($g C \cdot MJ^{-1}$),为 $0.56 g C \cdot MJ^{-1}$; T_a 为温度影响因子(0~1); W 为湿度影响因子(0~1). T_a 采用 TEM 模型的相关算法计算^[11],公式如下:

$$T_a = \frac{(T - T_{\min})(T - T_{\min})}{(T - T_{\min})(T - T_{\max}) - (T - T_{opt})^2} \quad (2)$$

式中: T_{opt} 、 T_{\min} 、 T_{\max} 分别为光合作用最佳温度、最低温度和最高温度($^{\circ}C$); T 为大气温度($^{\circ}C$).

在传统的遥感生产力模型中,湿度影响因子(W)一般为土壤湿度或地表实际蒸散的函数.但这种方法往往需要比较精确的空间降水数据和土壤质地数据,而对降水数据的空间插值目前还没有非常有效的办法,从而影响了湿度影响因子在空间异质性方面的表达.本研究采用了最近新发展的一种遥感反演地表湿润指数(LSWI)方法^[9,24-27].该方法在空间异质性方面表现较好,能够从时空尺度上较准确地反映地表的湿润状况,从而能更好地计算影响生产力形成的湿度控制因子.

$$W = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{\max}} \quad (3)$$

式中: $LSWI$ 为地表湿润指数,是近红外波段(ρ_{nir})和短波红外波段(ρ_{swir})的归一化指数,在 MODIS 影像中,本文采用的 ρ_{nir} 和 ρ_{swir} 波段范围分别为 841~875 nm 和 1 628~1 652 nm; $LSWI_{\max}$ 为每种植被类型中全年最大的地表湿润指数. $LSWI$ 的取值范围在-1到1之间, W 的取值范围在0到1之间.

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (4)$$

1.2.3 模型参数 模型中的 $LSWI_{\max}$ 、 T_{\max} 、 T_{\min} 、 T_{opt} 等为植被特征参数,不同植被类型采用的参数值不同. $LSWI_{\max}$ 为两年中每种植被类型 $LSWI$ 的最大值.各植被类型的 T_{\max} 、 T_{\min} 、 T_{opt} 值大部分为 TEM 模型的设定值,小部分从野外站的实际观测与试验数据中获得(表2).

表2 植被特征参数值

Tab.2 Vegetation-specific parameters

植被类型 Vegetation type	栅格数 Pixels	最高温度 Maximum temperature T_{\max} ($^{\circ}C$)	最低温度 Minimum temperature T_{\min} ($^{\circ}C$)	最佳温度 Optimum temperature T_{opt} ($^{\circ}C$)	最大地表 湿润指数 Maximum land surface wet index $LSWI_{\max}$
灌丛 Shrub	8191	48.50	1.00	26.50	0.40
草原 Grassland	12092	48.00	0.00	30.00	0.07
草甸 Meadow	28846	48.00	0.00	30.00	0.08
荒漠 Desert	8509	48.50	-1.00	25.00	0.10
农田 Cropland	1593	48.00	-3.00	25.00	0.11
无植被地 Barren	259	-	-	-	-

1.2.4 数据处理 采用 ArcGIS 9.2 中的 zonalmean 和 zonalsum 函数计算不同植被和不同海拔范围的 NPP 平均值.采用 ArcGIS 9.2 中 Buffer 工具创建道路缓冲区,并与“一江两河”流域 NPP 年际变化图叠加,分析距道路不同距离的缓冲区内植被 NPP 的变化趋势.

2 结果与分析

2.1 “一江两河”流域植被 NPP 的空间分布

“一江两河”流域 2000 和 2006 年的植被 NPP 空间分布趋势均表现为由河谷向山脊逐渐递减(图1),这与该地区的水热梯度基本一致.从图1可以看出,除河谷地区的植被 NPP 较高外,其他区域基本上都小于 $150 g C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$.研究区植被 NPP 最高值出现在 4 000 m 以下的河谷地区,达 $222.5 g C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$;随着海拔的上升,植被 NPP 逐渐递减,其最低值出现在海拔 5 000 m 以上的山坡和山脊,平均仅为 $57.3 g C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ (表3).其原因可能是河谷地区水热条件较好,适合植被生长,加之人类活动(如灌溉和施肥等措施)的干预,导致该区植被生长状况比其他海拔段高,生产力相应地也比其

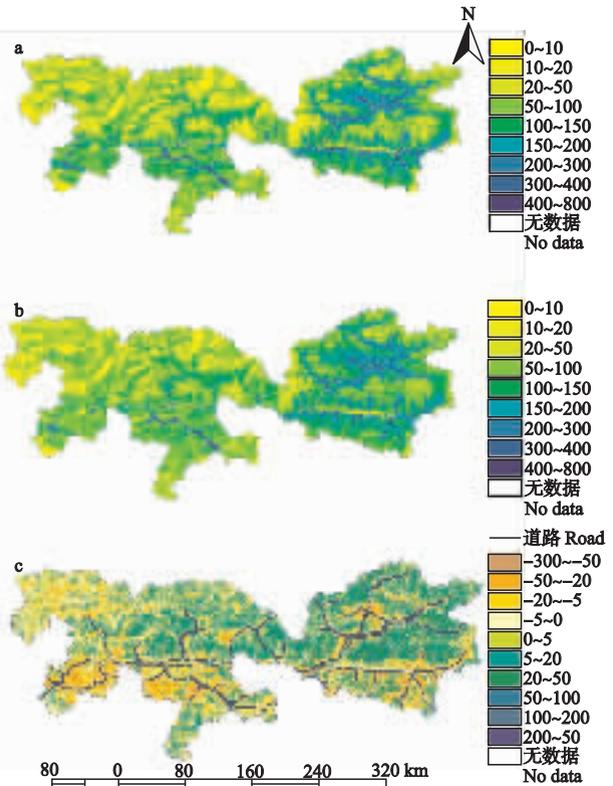


图1 2000(a)和2006年(b)“一江两河”中部流域植被 NPP 分布图及期间(c)的变化趋势

Fig.1 NPP distribution in 2000 (a) and 2006 (b) and changes from 2000 to 2006 (c) in middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries ($g C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$).

表3 “一江两河”中部流域不同海拔范围的平均植被 NPP
Tab.3 Average NPP for various altitude gradients in middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries

海拔范围 Elevation range (m)	面积 Area (100 km ²)	NPP (g C · m ⁻² · a ⁻¹)
> 5000	314.4	57.3
4800 ~ 5000	70.7	104.6
4600 ~ 4800	46.9	136.8
4400 ~ 4600	59.0	125.0
4200 ~ 4400	36.8	148.4
4000 ~ 4200	43.3	168.3
3800 ~ 4000	10.8	222.5
< 3800	12.0	202.9

他区域高。

模型估算的研究区不同植被类型的单位面积平均 NPP 大小依次为农田(243.1 g C · m⁻² · a⁻¹)、灌丛(137.2 g C · m⁻² · a⁻¹)、草原(113.3 g C · m⁻² · a⁻¹)、草甸(67.7 g C · m⁻² · a⁻¹)和荒漠(35.6 g C · m⁻² · a⁻¹),平均植被 NPP 为 86.8 g C · m⁻² · a⁻¹。由于不同植被类型的面积不同,总 NPP 以草甸最高(194.4 × 10¹⁰ g C · a⁻¹),荒漠最小(30.3 × 10¹⁰ g C · a⁻¹)。由于农田面积最小(仅占整个流域面积的 2.7%),其总 NPP 值也相对较低(39.1 × 10¹⁰ g C · a⁻¹)。

“一江两河”流域的面积约占青藏高原总面积的 2.5% 左右,其总 NPP(512.8 × 10¹⁰ g C · a⁻¹)占青藏高原总 NPP(302.44 × 10¹² g C · a⁻¹)²⁸ 的 1.8%,远低于青藏高原的整体水平。其原因主要是“一江两河”流域处于青藏高原的高寒半干旱地区,水热条件相当差,近 90% 区域分布于海拔 4 500 m 以上(表 3),另外,大部分区域的年均降水量只有 250 ~ 300 mm,导致该流域植被覆盖度非常低,除河谷农田分布区外,其他地区的植被覆盖度基本上都小于 30%。

2.2 “一江两河”流域植被 NPP 的年际变化

从研究区植被 NPP 的模拟情况看,2006 年道路和居民区周围人类活动比较剧烈区域的 NPP 比 2000 年低,其他区域则呈现出明显的上升趋势(图 1)。从图 2 可以看出,2006 年草甸和荒漠地区的植被 NPP 比 2000 年略有增加,而农田、灌丛和草原则出现了略微降低的趋势。从整个流域来看,2006 年研究区植被的平均 NPP 比 2000 年高 2.15 g C · m⁻² · a⁻¹,而总 NPP 则上升了 12.7 × 10¹⁰ g C · a⁻¹。其原因可能有两方面:一方面,研究区近 20 年来的气候呈暖湿化的变化趋势²⁹,2006 年生长季气温比 2000 年高约 1.5 °C(表 1),而西藏“一江两

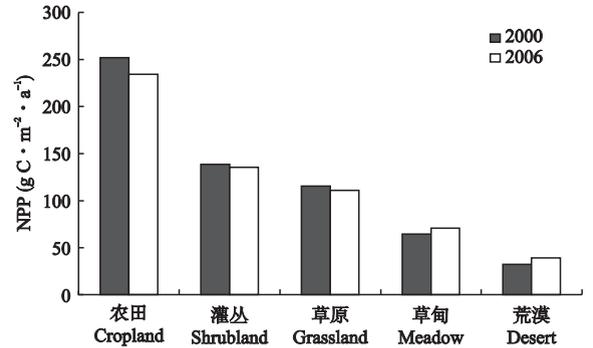


图2 2000 和 2006 年“一江两河”中部流域不同植被类型的 NPP

Fig.2 NPP for various vegetations in 2000 and 2006 in middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries.

河”流域整个区域属高寒半干旱气候,对气候因子的变化非常敏感,因此气温的略微上升可能会促进植物叶片的光能利用效率,从而增强植物光合作用能力;另一方面,由于气候变暖,“一江两河”流域植被的生长期随之延长,2006 年的生长期天数比 2000 年增加了近半个月(表 1),生长期的延长可能会增加植物的光合作用时间,使植物累积的干物质质量随之增加。虽然 2006 年生长季降水比 2000 年下降近一半,但与温度升高相比,降水量减少对植被生产力的影响作用较小。

2.3 人类活动对“一江两河”流域植被 NPP 的影响

本研究将人类活动的主要发生区(即主要道路两侧不同距离缓冲区)与“一江两河”流域 NPP 年际变化趋势图进行叠加,以分析道路不同距离缓冲区内植被 NPP 的分布规律。将道路缓冲区设为 5 级,每级按 2 km 道路垂直距离递增,即第 1 缓冲区为 0 ~ 2 km,第 5 缓冲区为 8 ~ 10 km(表 4),离道路的距离越远,人类活动强度或影响植被 NPP 的能力越小。

从图 1 和表 4 可以看出,2000—2006 年,离道路越近的缓冲区植被 NPP 降幅越大,反之,其植被 NPP 增幅越显著。出现植被 NPP 下降趋势的缓冲区主要集中在第 1 和第 2 缓冲区,即离道路 0 ~ 4 km 的范围内,而植被 NPP 增加趋势明显的缓冲区主要分布在第 4 和第 5 缓冲区,即离道路 > 6 km 的范围。在离道路最近的第 1 缓冲区(0 ~ 2 km)的植被 NPP 平均下降了 9.93 g C · m⁻² · a⁻¹,下降率为 5.83%,在离道路最远的第 5 缓冲区(8 ~ 10 km)的植被 NPP 平均增加了 7.25 g C · m⁻² · a⁻¹,增加率为 8.31%。说明受人类活动影响比较显著的区域主要集中在离道路 0 ~ 4 km 范围内。

表 4 “一江两河”中部流域不同道路缓冲区平均植被 NPP 的变化

Tab. 4 Changes of average net primary production for various road buffers in middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries (2000–2006)

道路缓冲区 Road buffer (km)	NPP 变化值 NPP change ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	NPP 变化率 NPP change rate (%)
0~2	-9.93	-5.83
2~4	-3.67	-3.08
4~6	1.21	1.16
6~8	4.78	4.98
8~10	7.25	8.31

总体来说,在人类活动影响剧烈的区域(离道路 0~4 km 范围)植被 NPP 下降趋势明显;而在人类活动较难到达的区域(离道路 >6 km 范围)植被 NPP 呈增加趋势。近年来,“一江两河”中部流域地区的人口增长和畜牧业发展较快^[30],放牧量和其他人类活动的增加导致居民地和道路两旁的草原植被受到较强干扰,从而影响了植被生长,导致植被 NPP 出现下降趋势。研究区生态环境非常脆弱,生态系统的恢复能力较差,因此在以后的区域经济发展中要注意控制放牧量、减少人类活动对自然生态环境的影响。

2.4 模型验证

从图 3 可以看出,模拟结果与实测数据基本相符,误差都在 20% 范围之内。农田生态系统的 NPP 模拟值比实测值低,这可能与农田生态系统的人为干预较大有关,由于其水热条件尤其是水分条件一直都处于最佳状态,而遥感生产力模型无法完全估算到该部分的影响作用,因此其估算的生产力比实际的生产量偏低。

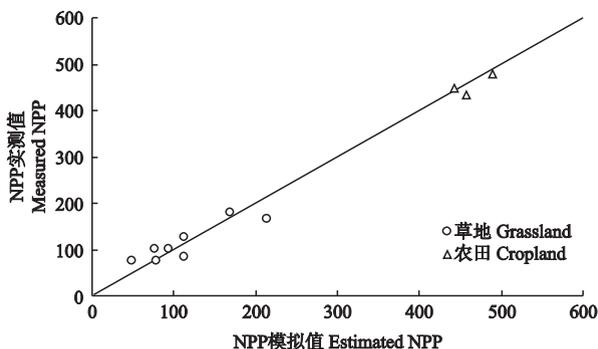


图 3 植被 NPP 模拟值与实测值的比较

Fig. 3 Comparison between observed and simulated value of NPP ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$).

3 讨 论

本研究利用 MODIS 卫星数据与生态系统模型

相结合的方法对西藏“一江两河”中部流域植被 NPP 进行的估算效果较好。模拟结果表明,研究区植被 NPP 的空间分布表现为从河谷到山脊逐渐递减,这与该区水热梯度基本一致。整个流域的平均植被 NPP 为 $86.8 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中农田植被 NPP 最高($243.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),荒漠生态系统的最低($35.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。流域 2006 年平均植被 NPP 比 2000 年增加了 $2.15 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,总 NPP 增加了 $12.7 \times 10^{10} \text{ g C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。NPP 增加的原因可能是近年来气候变暖导致植被光合作用能力增强所致。因为“一江两河”中部流域属高寒半干旱气候,对气候因子的变化非常敏感,因此气温的略微上升可能会促进植物叶片的光能利用效率,从而增强植物的光合作用能力。但由于只有 2 年的数据,很难从定量分析的角度确切地说明 NPP 上升是气候变暖的结果,还需要进一步分析该区域多年植被 NPP 的变化趋势及其与气候因子的关系。

在人类活动强烈的区域(道路缓冲区 0~4 km)植被 NPP 呈下降趋势,而人类活动难以到达的区域植被 NPP 呈增加趋势,说明人类活动对当地生态环境的破坏是显而易见的。西藏“一江两河”流域生态环境条件脆弱、生态系统不稳定,在缺乏生态屏障保护下对资源的大量开发利用、天然植被的过量掠夺必将导致生态环境的恶化,从而影响人类的生存质量,最终将制约该地区经济的可持续发展。近年来,人类活动区的植被生产力呈明显下降趋势也指示着部分区域生态环境质量的逐渐恶化。因此,进行区域开发的同时,必须进一步扩大生态环境建设与恢复等工作,大规模开展人工造林、人工种草、改良草场和沙漠化整治等生物工程措施,从而确保该区域生态环境的恢复与改善,以适当地工农业可持续发展的战略目标。

参考文献

- [1] Cramer W, Field CB. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Introduction. *Global Change Biology*, 1999, 5: 3–4
- [2] Euskirchen ES, Chen J, Li H, et al. Modeling landscape net ecosystem productivity (LandNEP) under alternative management regimes. *Ecological Modelling*, 2002, 154: 75–91
- [3] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 58–66
- [4] Hou Y-Y (侯英雨), Liu Q-H (柳钦火), Yan H (延昊), et al. Variation trends of China terrestrial vegetation net primary productivity and its responses to climate

- factors in 1982–2000. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(7): 1546–1553 (in Chinese)
- [5] Yuan W-P (袁文平), Zhou G-S (周广胜). Responses of three *Stipa* communities net primary productivity along Northeast China Transect to seasonal distribution of precipitation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(4): 605–609 (in Chinese)
- [6] Lieth H. Modelling the primary production of the world// Lieth H, Whittaker RH, eds. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1975: 237–263
- [7] Monteith JL. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, **9**: 747–766
- [8] Potter CS, Randerson JT, Field CB, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**: 811–841.
- [9] Potter CS, Klooster SA, Brooks V. Interannual variability in terrestrial net primary production: Exploration of trends and controls on regional to global scales. *Ecosystems*, 1999, **2**(1): 36–48
- [10] Xiao XM, Zhang QY, Braswell B, et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**: 256–270
- [11] Bonan GB. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**: 2817–2831
- [12] Melillo JM, McGuire AD, Kicklighter DW, et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, **363**: 234–240
- [13] Running SW, Coughlan JC. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 1988, **42**: 125–154
- [14] Zhang W-M (张伟民), Dong G-R (董光荣), Qu J-J (屈建军). A preliminary study on the desertification situation in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, Tibet. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 1993, **13**(4): 52–56 (in Chinese)
- [15] Wang J-J (王家骥), Shu J-M (舒俭民), Gao J-X (高吉喜), et al. Control of land desertification in valley area of Tibet. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 1998, **12**(2): 30–34 (in Chinese)
- [16] Liu Y-H (刘毅华), Dong Y-X (董玉祥). Driving factors of sandy desertification change in the middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries in Xizang. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2003, **23**(4): 355–360 (in Chinese)
- [17] Yuan P-X (袁佩新), Zhou M-W (周明伟). Remote-sensing survey for land desertification in Xizang autonomous region. *Acta Geologica Sichuan* (四川地质学报), 2004, **24**(4): 223–225 (in Chinese)
- [18] Zou X-Y (邹学勇), Dong G-R (董光荣), Li S (李森), et al. Desertification and its prevention and control strategy in Tibet. *Journal of Natural Disasters* (自然灾害学报), 2003, **12**(1): 17–24 (in Chinese)
- [19] Yang B-J (杨本津), Liu H-T (刘厚田). The agricultural ecological environment and its protection ways in the middle region of Tibet “One River and Two Streams”. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 1997, **10**(1): 46–51 (in Chinese)
- [20] Wang X-D (王玄德), Jia X-Y (贾小燕), Liu X-H (刘秀华), et al. An investigation of the arable land resources in the YLN area in Tibet and the prospect of their exploitation. *Journal of Southwest Agricultural University* (西南农业大学学报), 1999, **21**(2): 126–129 (in Chinese)
- [21] Editorial Board of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences (中国科学院中国植被图编辑委员会). 1: 1 000 000 Vegetation Atlas of China. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
- [22] NASA and Affiliated Centers. Earth Observing System Data Gateway [EB/OL]. (2007-01-01) [2007-03-08]. <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>
- [23] Zhang F-C (张福春), Zhu Z-H (朱志辉). Harvest index for various crops in China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 1990, **23**(2): 83–87 (in Chinese)
- [24] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **77**: 22–33
- [25] Ceccato P, Flasse S, Gregoire JM. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **82**: 188–207
- [26] Boles S, Xiao X, Liu J, et al. Land cover characterization of Temperate East Asia: Using multi-temporal image data of VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 477–489
- [27] Xiao XM, Zhang QY, Saleskab S, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**: 105–122
- [28] Zhou C-P (周才平), Ouyang H (欧阳华), Wang Q-X (王勤学), et al. Estimation of net primary productivity in Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2004, **59**(1): 74–79 (in Chinese)
- [29] Bian D (边多), Du J (杜军). Climate variation feature and its effect on environment change in central Tibet from 1961 to 2000. *Journal of Applied Meteorological Science* (应用气象学报), 2006, **17**(2): 169–175 (in Chinese)
- [30] Tao H-P (陶和平), Gao P (高攀), Zhong X-H (钟祥浩). A study of regional eco-environment vulnerability: A case of “One-River-Two-Tributaries”, Tibet. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2006, **24**(6): 761–768 (in Chinese)

作者简介 周才平,男,1972年生,博士.主要从事陆地生态系统生物地球化学循环研究,发表论文20篇. E-mail: zhoucp@igsnr.ac.cn

责任编辑 杨弘

