

中国西部地区植被净初级生产力的时空格局

卢 玲¹, 李 新¹, Frank Veroustraete²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 比利时佛莱芒区科技研究所遥感与大气过程中心)

摘要: 利用基于 Monteith 光能利用率理论的碳通量估算模型 C-FIX, 1km 分辨率逐旬 SPOT/VEGETATION 遥感数据和全球 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 格网化逐日气象数据, 估算了 2002 年中国西部地区植被净初级生产力 (NPP)。对西部地区植被 NPP 的空间分布格局、季节变化及不同土地利用类型植被的 NPP 总量和平均生产力水平进行了初步研究。结果表明: 2002 年我国西部地区植被年 NPP 总量约为 0.96 PgC ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$)。西部地区年 NPP 空间分布基本格局是东南和西北两区域高, 然后以东南西北方向为轴心逐渐向内陆中心迅速递减, 该分布格局与各区域的水热条件差异和植被类型的地带性分异规律紧密相关。西部地区陆地生态系统 NPP 具有显著的季相变化规律, 这与温度、降水的季节变化以及人为生产活动安排有很高的相关性。西部地区尽管土地面积广阔, 由于区域气候和自然条件相对恶劣, 导致土地资源利用率差, 生态系统整体生产力水平相对低下, 区域内各种土地利用类型植被的生产力水平差异大且空间分布十分不均衡, 是我国生态环境相对脆弱的区域。

关键词: 净初级生产力; C-FIX 模型; 遥感; 中国西部地区

文章编号: 1000-0933(2005)05-1026-07 **中图分类号:** Q149, Q948 **文献标识码:** A

Terrestrial net primary productivity and its spatial-temporal variability in western China

LU Ling¹, LI Xin¹, Frank Veroustraete² (1. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Flemish Institute for Technological Research (VITO), Centre for Remote Sensing and Atmospheric Processes (TAP), Boeretang 200, B-2400 Mol, Belgium). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1026~1032.

Abstract: Net Primary Productivity (NPP) is an important variable in the studies of the carbon cycle and in natural resource managements at regional and global scales. The Monteith type parametric model, C-FIX is used to estimate the NPP of the terrestrial ecosystems in western China ($73^\circ \sim 112^\circ \text{E}$, $26^\circ \sim 50^\circ \text{N}$) in 2002. The principal driven variables in the C-FIX model are temperature, radiation and the fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (fAPAR). The mean daily air temperatures and daily incoming global radiation in western China in 2002 are obtained from the global meteorological data with a grid size of 1.5° , provided by Meteo France. The ten-day fAPAR data set in the same region in 2002 are extracted from the SPOT4/VEGETATION NDVI remote sensing data with a pixel resolution of 1 km. In addition, a land use for the western China is mapped for further evaluation of the NPP values of different ecosystems.

Validations by comparing the estimated NPP with some *in situ* NPP observations in the same region indicated a satisfactory accuracy for simulated results. The results show that the annual total NPP of the western China in 2002 is estimated about 0.96 P ($= 10^{15}$) g C, which is an equivalent of 168 g C/m^2 per year over the study area of 4.5 million km^2 . The fundamental spatial pattern of annual NPP in western China is characterized by high NPP levels distributed in the southeast and northwest

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40401044); 中比科技合作资助项目 (BWS, BIL 01/79); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新资助项目 (2004111)

收稿日期: 2004-05-27; **修订日期:** 2005-01-10

作者简介: 卢玲 (1970~), 女, 湖南津市, 博士, 副研究员, 主要从事生态遥感与生物圈过程建模研究。E-mail: luling@lzb.ac.cn

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No. 40401044), the Project BWS, BIL 01/79, between Vito and UIA from Belgium (Flemish Region); the innovation project of the Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences (No. 2003102)

Received date: 2004-05-27; **Accepted date:** 2005-01-10

Biography: LU Ling, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in ecological and biosphere process modeling using remote sensing. E-mail: luling@lzb.ac.cn

corners probably due to relatively richer precipitation. Then the NPP levels rapidly decrease from the two corners into the arid inland regions. In addition, the terrestrial NPP in western China has pronounced seasonal variations in the year. For most ecosystems, maximum NPP growth rates are observed in summer, whereas minima are obtained in winter. Furthermore, the NPP seasonality vary geographically in western China, probably due to the influences of strong zonation in climate, vegetation and farming practices. Different land use types and their corresponding NPP values also are compared using the latest 1:1M land-use map of western China. Grasslands contribute the most to the annual total NPP of western China due to their large area extends. Forests have the highest mean unit NPP values. On the other hand, large expanses of western China such as desert, glaciers and permanent snow have very sparse vegetation or even no vegetation. Although Western China has a large area of land, mean unit NPP level was very low due to the very limited availability to water resource over large arid inland regions and other harsh ecological environments.

Key words: net primary productivity (NPP); C-FIX model; remote sensing; western China

近 20a 来,在“粮食安全”和“全球变暖”这两个重大问题的驱动下,陆地生态系统净初级生产力(简称 NPP)研究倍受重视,NPP 建模及其应用得到迅速发展^[1],一系列适用于区域和全球尺度的 NPP 估算模型相继而出^[2]。孙睿和朱启疆^[3]根据模型对各种调控因子的侧重点以及对 NPP 调控机理的解释,将现有 NPP 模型大体分为 3 类:传统的气候相关统计模型、生态系统过程模型和光能利用率模型。其中,光能利用率模型直接利用遥感数据和方法,而遥感具有周期性强和观测面广的特点,因而极大地提高了该类模型的时空分辨率,使大范围的 NPP 估算及其时空动态监测成为可能。近几年来,光能利用率模型因为与卫星遥感技术相联系而成为 NPP 模型研究的一个主要发展方向^[4],遥感也越来越成为研究区域及全球尺度上的动态 NPP 模型不可或缺的手段^[5~7]。我国不少研究人员运用国外一些比较成功的光能利用率模型或对该类模型进行改进,开展了对中国陆地生态系统 NPP 总量、时空格局分布及其变化研究^[8~11]。

近年来为探索“CO₂ 失汇之谜”,研究者们把目光都集中在北半球中高纬度地区,认为该地区的陆地生态系统是一个巨大的碳汇^[12~14]。此外,大量的研究还表明大气 CO₂ 浓度增加产生的施肥效应可能增加陆地植被的净初级生产力^[15~16],而相对增加的 NPP 可能在于旱区最大^[17]。另一方面,大气温度的升高很可能提高陆地生态系统的呼吸量(包括自养呼吸和异养呼吸),从而又可能降低整个生态系统的碳储量^[18~20],尤其是在寒冷地区^[21]。中国西部地区地域辽阔,南北跨 24 个纬度,东西越 30 个经度,大部分区域位于北半球中高纬度,且主要由广漠的西北干旱区和高寒的青藏高原区组成。中国西部地区这种环境、气候和植被的多样性与复杂性为研究中国甚至全球不同陆地生态系统类型的生产力及其格局提供了良好的素材。此外,研究中国西部地区陆地生态系统 NPP 不仅具有重要的科学意义,也能为该地区的社会经济和生态环境可持续发展提供重要的数据集。

1 模型简介

C-FIX 模型是基于 Monteith 理论的光能利用率模型,主要由 3 类数据集驱动:即气温、辐射和植被冠可吸收的光合作用有效辐射比例($fAPAR$),可以在区域及全球尺度上估算 3 个基本的碳循环分量,即总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)和净生态系统生产力(NEP)。该模型的主要设计者是本文作者之一 Veroustraete Frank 博士。C-FIX 模型在欧洲地区以及非洲大陆的成功应用已经在不少文献中报道^[22~25]。对于每一给定的点位置或格网,C-FIX 模型使用以下公式来计算每天的 NPP 值,单位为 $gC/m^2/d$,下标 d 代表日值:

$$NPP_d = (p(T_{atm}) \times CO_2fert \times \epsilon \times fAPAR \times c \times S_{g,d}) \times (1 - A_d) \quad (1)$$

式中, $p(T_{atm})$ 表示归一化气温依赖因子,该因子计算公式由 Wang^[26]给出。 CO_2fert 表示归一化 CO₂ 施肥效应因子,其计算公式由 Veroustraete^[27]给出。 ϵ 表示植被在 GPP 阶段的光能利用率,其值约为 $1.1 gC/MJ(APAR)^{[28]}$ 。

$fAPAR$ 表示植被冠可吸收的光合作用有效辐射比例,一般采用遥感植被指数推算。本研究直接使用 Myneni and Williams^[29]给出的 $fARAR = 1.1638 \times NDVI_{loc} - 0.1426$ 算法,因为该算法建立在物理机制十分明确的三维辐射传输模型和大量的实测验证数据基础上,算法具有普适性且不受象元异质性影响,相关系数达到 $r^2 = 0.919$ 。 c 表示光合作用有效辐射能($0.4 \sim 0.7 \mu m$)占太阳入射辐射总量的比例。本研究将之确定为常数 $0.48^{[30]}$ 。 $S_{g,d}$ 表示太阳入射总辐射通量, ($MJ/m^2/d$)。 A_d 为植被自养呼吸率,模型采用 Goward and Dye^[31]建立的依赖于温度的 A_d 简单算法。

2 数据处理

本论文的研究区域位于中国西部地区,包括整个西北干旱区和青藏高原,地理位置位于东经 $73^\circ \sim 112^\circ E$,北纬 $26^\circ \sim 50^\circ N$,总面积约 445 万 km^2 。在行政区划上包括新疆、西藏、青海、甘肃、宁夏、陕西和内蒙古西北部的阿拉善盟地区。

2.1 数据来源与预处理

为计算模型输入参数 $fAPAR$,负责全球 SPOT4-VEGETATION 数据存档与用户定单的比利时 VITO 研究所图像处理与

存档中心(CTIV)为本研究提供了2002年1月1日~2002年12月31日中国西部地区1km分辨率VGT-S10 NDVI(10d最大化NDVI)数据产品。为驱动C-FIX模型,还需要2002年研究区范围内单位面积上逐日的太阳总辐射和气温资料。本研究使用来自法国气象局(Meteo France)全球 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 格网化逐日气象数据产品,由VITO研究所遥感与大气过程中心(TAP)提供。利用图像处理软件ENVI中的Subset Spatial功能,将2002年中国西部地区逐日气温和总辐射图像从全球数据集中提取出来,再利用三次方卷积内插方法将这些 1.5° 分辨率的图像内插成C-FIX模型设计的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格网分辨率。

土地利用图可以提取中国西部地区不同植被覆盖类型,以评价不同植被类型生产力水平及其季节动态等特征上的差异。本研究使用的土地利用图来自于中科院地理所最新编制的1:100万中国土地利用矢量图。该图是在大量实地考察的前提下建立分类系统,通过对1996年至2000年间多幅TM遥感影像(30m分辨率)解译判读而来。考虑中国西部地区的植被生长的地域特点,利用GIS软件对原1:100万中国土地利用图的分类系统(25类)进行适当归并,如西部地区没有滩涂和滩地类型,将河渠、湖泊和水库坑塘3种类型归并为水体,将城镇用地、农村居民地和其它建设用地归并为城乡用地,而植被类型保持原分类标准,最终将西部地区土地利用类型分为四大类18次类,即:林业用地包括有林地、疏林地、灌木林;草业用地包括高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地;农业及城乡居民用地包括水田、旱地和城乡用地;未利用土地包括沼泽地、盐碱地、戈壁、裸岩石砾地、寒漠、沙地、裸土地、水体和永久性冰川雪地。

2.2 模型结果验证

由于缺少研究区内2002年NPP的实测资料,对模型估算值进行实时验证一般很困难。本研究通过收集多种文献及数据库中公布的有关中国西部地区森林及草原历年NPP实测值,对模型估算的这两类植被生态系统NPP值进行了验证。

中国西部地区森林主要分布在该区域各大山系,约占到整个西部地区总面积8%。本研究对森林NPP的验证使用由罗天祥收集并整理的1989~1993年中国林业局的森林NPP清查以及1994年前中国60多种文献中公布的森林NPP实测测量数据集。这些数据来自全国690个森林样地,其中西部地区约站125个样地。经过计算,这125个样地点的实测NPP平均值为 $1047 \text{ gDM}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中DM表示干物质,模型估算平均值为 $399.76 \text{ gDW}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,模型值比实测值低14%。如果考虑土地利用变化的影响,以编制的1km分辨率中国西部地区土地利用图参考,仅有51处原样地保持原森林类型,它们绝大多数分布在陕西秦岭和西藏横断山脉地区。经过计算,51个样地点的实测NPP平均值为 $1103.53 \text{ gDM}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,模型估算平均值为 $1140.98 \text{ gDM}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,两者十分接近。这些数据说明C-FIX模型对中国西部地区森林NPP的估算具有较高的精度。如图1所示:51个森林样地的模型值和实测值的散点图大多都在1:1线附近分布,模型值对实测值没有出现整体高估或低估的情况,但数据分布仍然有些离散,这与1994年之前实测值和2002年模型值之间的时间差异有关,即十多年来还存在气候变化对森林生长的影响以及森林自然新陈代谢过程的作用,会出现一些森林样地生长迅速而较原实测NPP值高,相反有些森林样地由于生长状况不好或自然更新等而较实测NPP值低。

草地是中国西部地区最主要的植被生态系统,分布面积最广。李博等^[32]根据多年的观测研究得到我国温带草原群落的年平均NPP为 $230.6 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。C-FIX模型估算的2002年整个西部地区高覆盖度草地年平均NPP为 $231 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,这与李博的研究结果十分一致,说明西部地区高覆盖度草地非常接近我国温带草原的整体平均生产力水平。此外,依据胡自治^[33,34]1980~1981年在甘肃农业大学天祝草原试验站($102^{\circ}26'E$ 、 $37^{\circ}12'N$)测量的两种原生高山草甸群落平均NPP值为 $1130 \text{ gDW}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,而C-FIX模型在该站点估算的NPP平均值为 $1266 \text{ gDW}/\text{m}^2/\text{y}$,模型值高出实测值12%。高估的原因除了有模型值与实测值之间年份的差异问题,各草地类型所占混合象元比例问题以及模型本身对草地参数化的误差。鉴于有限的实测数据的验证结果,可以认为C-FIX模型适用于西部地区草地NPP的估算。

3 结果分析

3.1 中国西部地区植被年NPP空间分布格局

2002年中国西部地区NPP总量约为 0.96 PgC ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$),区域内NPP最高值达 $1714 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最低值为 $0 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,平均到单位面积上的NPP仅为 $168 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。如图版1所示,中国西部地区年NPP空间分布基本格局是东南和西北两区域高,然后以东南西北方向为轴心逐渐向内陆中心部分递减,这与各区域的水热条件差异和植被类型地带性分异规律紧

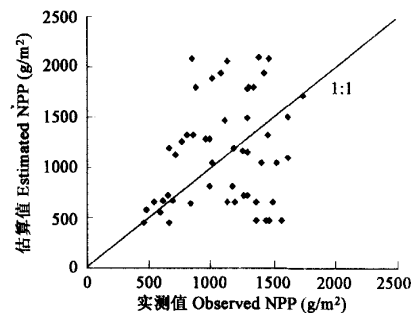


图1 51个森林样地NPP实测值与模型值比较

Fig. 1 Comparison of estimated and observed NPP in the 51 sampling sites of forest

密相关。

中国西部东南区域包括陕西,甘肃东部以及西藏东南部,由于受东南季风和西南季风的影响,水热条件组合好,是 NPP 分布的高值区。其中尤以西藏东部的横断山区和雅鲁藏布江南部地区的 NPP 最高,这些地区纬度低,植被多以亚热带常绿阔叶林和亚热带、热带山地常绿针叶林为主,且覆盖度高,年 NPP 超过 $1\,000\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。其次是陕西秦岭及黄龙山一带,植被类型以亚热带阔叶林为主,年 NPP 在 $800\sim1\,000\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。在这些 NPP 高值区的偏西北方向地区,水热条件组合稍差,植被类型转变为农田,温带草原和高寒草甸,生产力水平普遍比森林低,NPP 多在 $200\sim500\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,为中国西部地区 NPP 中值区。在新疆西北区域包括天山、阿尔泰山及塔城地区的植被,尽管地处高纬度,却受惠于西风带环流带来的暖湿水汽影响,生长着寒温带、温带山地落叶针叶林和温带草原,NPP 多在 $200\sim700\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,为中国西部地区 NPP 偏高值区。

除上述 NPP 较好区域外,中国西部广大的内陆区域包括整个内蒙古阿拉善地区、新疆南部以及青藏高原大部地区的 NPP 呈急剧下降趋势。由于这些区域全年受欧亚大陆性高压气候控制和高海拔影响,日温差大,且降水稀少常年干旱,如此恶劣的气候条件导致水热状况组合十分不利于植被的生长,地表覆盖以中低覆盖度草地、荒漠、戈壁、沙漠和冰雪为主,因此年平均 NPP 累积量极低,基本在 $0\sim100\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 之间。在西部干旱区的各大内陆河流域,NPP 积累量和空间格局沿河床走向呈现上游地区向下游地区递减的特点,如塔里木河流域、黑河流域以及疏勒河流域等,反映水分是我国西北干旱内陆区植被 NPP 的主要制约因子。

3.2 中国西部地区植被 NPP 的季节变化

图版 II 显示了中国西部地区 2002 年各月 NPP 的季节动态特征,可以看到西部地区 NPP 的季相变化是十分明显的,这与温度、降水以及太阳辐射的季节变化有很高的相关性。总体来说,夏季植被生长状况好,NPP 高,7 月份 NPP 月累积量达到最高;冬季绝大多数地区的植被停止生长,NPP 低,1 月份 NPP 月累积量达到最低。

研究区内不同植被类型以及生长在不同区域的相同植被类型,其 NPP 季节变化特征也有较大差异,这主要取决于植被类型的地带性分异。如图版 II 和图 2 所示,在西藏东部横断山区和雅鲁藏布江南部地区,以及陕西秦岭的部分山区,由于生长着热带、亚热带常绿林,它们在各月的 NPP 累积量都较高,即使在冬季也有较好的植被生长。秦岭亚热带常绿阔叶林的 NPP 月变化廓线呈现双峰特征,反映出 6 月和 9 月份是该植被类型生物量积累的两个高峰期。而在新疆西北部,由于地处高纬度的地区 ($45^{\circ}\sim50^{\circ}\text{N}$),冬季长而低温,植被类型以寒温带、温带山地落叶针叶林和温带草原为主,全年植被生长季节短。以天山针叶林为例,5 月至 9 月份是该植被明显的 NPP 增长期,在水热条件最好的 7 月份生长最快,可到达 $320\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{month})$ 。

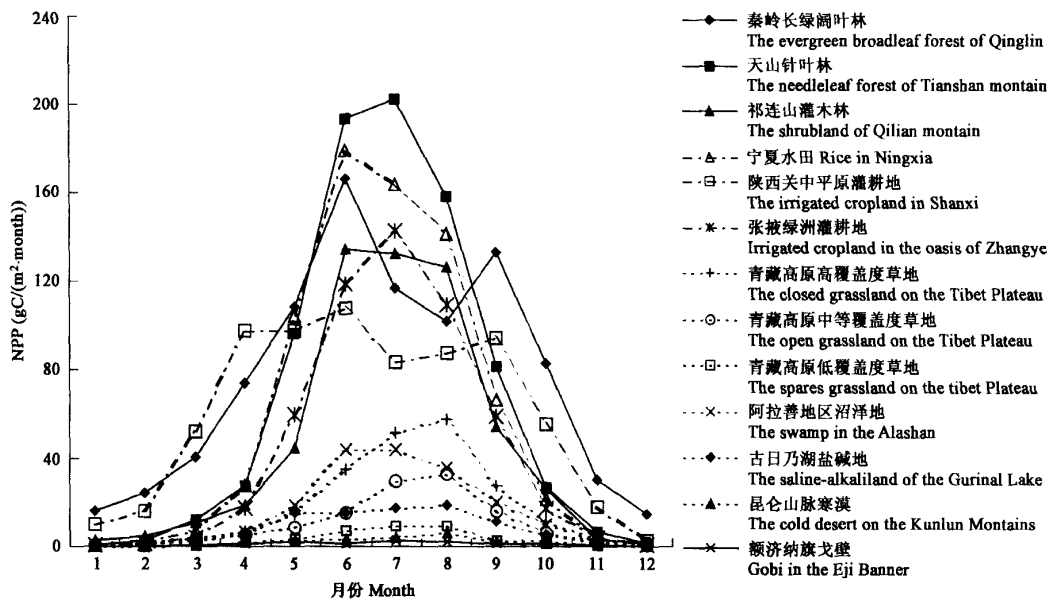


图 2 西部地区不同植被生态系统 NPP 月变化廓线

Fig. 2 The monthly profiles of NPP for different ecosystems in the western China

在陕西关中平原、甘肃河西走廊、宁夏河套平原以及新疆塔里木河流域,集中分布着较多的农田植被,这些农业植被生态系

统的 NPP 季节变化与人类生产活动密切相关,一般在每年的 4 月开始有 NPP 累积,5 月至 8 月份 NPP 增长最快,平均在 100~150gC/(m²·month)之间,到 10 月农作物基本收割完成,NPP 累积量降低到 30gC/(m²·month)以下。其中关中平原的灌耕地由于种植一年两熟或多熟作物,其 NPP 月廓线出现多峰现象。而其它地区尤其是干旱区绿洲的农田植被 NPP 季节变化均为单峰曲线。

西部地区尤其是青藏高原的草地面积分布最广。比较青藏高原高、中和低覆盖度草地的 NPP 月变化廓线(图 4),可以看到 3 种草地生态系统的生长期基本在 4 月至 10 月份之间,NPP 月积累在水热条件配置最好的 8 月到达最高。但它们在各月的生产力能力却相差很大,仅以 8 月峰值来比较,高、中和低覆盖度草地 NPP 分别为 58gC/(m²·month),33gC/(m²·month)和 10gC/(m²·month),呈现出明显的退化趋势。在西部广大的干旱区内陆地区,除了星星点点几处内陆河流域地区,由于水分条件相对较好,植被 NPP 在夏季有相对高一些的积累外,其它区域多沙漠、戈壁和裸露土地,植被以生产力极低的荒漠为主,且覆盖度低,NPP 无论在哪个月份都很低,几乎没有季相变化,各月 NPP 累积量都在 10gC/(m²·month)以下。

3.3 西部地区不同土地利用类型 NPP 评价

依据编制的 1km 分辨率中国西部地区土地利用栅格图,为分析和评价西部地区不同植被类型和土地利用类型净初级生产力的差异及其对西部整体生态系统生产力贡献,表 1 统计了 2002 年各类土地利用类型 NPP 总量及其平均生产力状况。

从 NPP 总量来看,西部地区由于草地覆盖面积广(总面积占到西部地区 48.22%),草地生态系统积累的植物碳量最多,其中高覆盖度草地为 0.221PgC/a,中覆盖度草地为 0.151PgC/a,低覆盖度草地为 0.101PgC/a,总计占到西部地区 2002 年 NPP 总量的 49.27%,因此草地生态系统对西部地区净初级生产力的贡献率最大。其次是林业用地,2002 年西部地区有林地、疏林地和灌木林累积的 NPP 碳量总和为 0.227PgC/a,占西部地区 NPP 总量的 23.65%。农业用地居第 3 位,水田和旱地累积的 NPP 碳量总和为 0.142PgC/a,占西部地区 NPP 总量的 14.79%。其它未利用土地包括沼泽地、盐碱地、戈壁、裸岩石砾地、寒漠、沙地、裸土地、水体和永久性冰川雪地,虽然它们的面积之和占到西部地区总面积的 40.32%,但它们对西部地区净初级生产力的贡献率很低,NPP 年累积量仅为 0.116PgC/a,只占到西部地区 NPP 总量的 12%。

表 1 2002 年中国西部地区不同土地利用类型 NPP 比较

Table 1 Comparison of the annual NPP of different land use types in the western China in 2002

土地利用类型 Land use type	NPP 平均值 Mean NPP(gC/(m ² ·a))	总面积 Numbers of pixels	NPP 总量 Total of NPP(PgC/a)	面积百分比(%) Percentage of area	NPP 总量百分比 Percentage of NPP
有林地 ^①	680	219222	0.149	3.85	15.52
疏林地 ^②	711	39534	0.028	0.70	2.92
灌木林 ^③	473	105176	0.050	1.85	5.21
高覆盖度草地 ^④	231	955491	0.221	16.80	23.02
中覆盖度草地 ^⑤	156	970842	0.151	17.07	15.73
中覆盖度草地 ^⑥	124	815765	0.101	14.34	10.52
水田 ^⑦	632	9541	0.006	0.17	0.63
旱地 ^⑧	492	276081	0.136	4.85	14.17
城乡用地 ^⑨	311	2199	0.00068	0.04	0.07
沼泽地 ^⑩	222	15225	0.0033	0.27	0.34
盐碱地 ^⑪	54	110230	0.006	1.94	0.63
戈壁 ^⑫	45	455430	0.020	8.01	2.08
裸岩石砾地 ^⑬	43	647836	0.028	11.39	2.92
寒漠 ^⑭	74	163578	0.012	2.88	1.25
沙地 ^⑮	56	670837	0.037	11.80	3.85
裸土地 ^⑯	58	99430	0.0057	1.75	0.59
水体 ^⑰	55	63813	0.0034	1.12	0.35
永久冰川雪地 ^⑱	0	66638	0	1.17	0.00

① Open forest; ② Sparse forest; ③ Shrub land; ④ Closed grassland; ⑤ Open grassland; ⑥ Sparse grassland; ⑦ Rice; ⑧ Irrigated/non-irrigated cropland; ⑨ Urban and built-up; ⑩ Swamp; ⑪ Saline-alkali land; ⑫ Gobi; ⑬ Bare rock; ⑭ Cold desert; ⑮ Sandy land; ⑯ Bare soil; ⑰ Water bodies; ⑱ Glacier and permanent snow

从 NPP 的平均水平来说,林地的净初级生产力水平最高,其中有林地 为 680gC/(m²·a),疏林地 为 711gC/(m²·a),灌木林 为 473gC/(m²·a)。由于西部疏林地大量栽培着人工次生林,近年来其生长速度超过原生有林地,导致其生物量积累也略高于有林地。农业植被由于人类的精耕细作,NPP 平均水平也比较高,约为 497gC/(m²·a),仅次于森林。此外,比较有趣的是城乡用地 NPP,尽管它在总量上几乎对西部地区 NPP 没有贡献,但 NPP 平均水平却不低,约为 311gC/(m²·a),反映出城乡区域的植被由于受到人为活动较好的选择、栽培与呵护,水热条件也较好,因此这些植被类型的 NPP 水平一般较高。虽然西部地区

草地年 NPP 总量相当高,其 NPP 平均水平却次于林地和农业用地,从高覆盖度草地到中覆盖度草地和低覆盖度草地的净初级生产力水平呈下降趋势,分别为 $231\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、 $156\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $124\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。在未利用土地类型中沼泽地的平均 NPP 较高,为 $222\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;其次为寒漠,约 $73\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;其它类型如盐碱地、戈壁、裸岩石砾地、沙地、裸土地和水体,它们的 NPP 平均水平都相当低,仅在 $50\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 左右。永久性冰川雪地没有植被生长,所以对 NPP 的贡献为 0。通过以上分析,可以发现中国西部地区各种土地利用类型的生产力水平差异很大且空间分布十分不均衡。

4 结论与讨论

本研究利用考虑了 CO_2 施肥效应的光能利用率模型 C-FIX,高时空分辨率的 SPOT/VEGETATION 遥感数据,全球格网化气象再分析资料以及最新的西部地区土地利用图,估算了 2002 年中国西部地区陆地生态系统 NPP 总量,分析了该地区 NPP 时空分布格局,并对西部地区不同土地利用植被类型的生产力水平进行了评价。其主要结论如下:

中国西部地区 NPP 时空分布格局是区域环境、气候、植被以及人类生产活动长期共同作用和影响的结果。中国西部地区年 NPP 空间分布基本格局是东南和西北两区域高,然后以东南西北方向为轴心逐渐向内陆中心迅速递减,该分布格局与各区域的水热条件差异和植被类型的地带性分异规律紧密相关。

西部地区陆地生态系统 NPP 具有显著的季相变化规律,这与温度、降水的季节变化以及人为生产活动安排有很高的相关性。而且不同植被类型甚至相同类型但生长在不同地域的植被群落,它们的 NPP 季节变化特征亦呈现较大差异,这主要取决于不同植被生态系统类型各自的光合作用功能以及地貌单元的地带性分异。

中国西部地区各种土地利用类型的生产力水平差异大且空间分布十分不均衡。西部地区尽管土地面积广阔,由于区域气候和自然条件相对恶劣,导致土地资源利用率差,生态系统整体生产力水平相对低下,是我国生态环境相对脆弱的区域。

从方法上讨论,C-FIX 模型最大的特点是直接将大气 CO_2 浓度升高对陆地生态系统生产力产生的施肥效应考虑进来,而其它模型只能采用 CO_2 倍增的气候情景分析来进行预测。利用遥感和 GIS 技术的 C-FIX 模型能够高精度地估算西部地区 NPP,并实现对西部地区不同生态系统 NPP 时空异质性的直观表达,这是其它统计模型和非遥感生态过程模型难以做到的。进一步强化各种生产力模型与遥感技术的结合,可以实现对区域和全球陆地生态系统生产力时空动态的快速诊断与准确评估。

References:

- [1] IPCC. Second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Environ. Policy Law*, 1996, **26**(5): 234~235.
- [2] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, **5** (Supp. 1): 1~15.
- [3] Sun R, Zhu Q J. Net primary productivity of terrestrial vegetation - a review on related research. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(6): 757~760.
- [4] Cheng B. Progress in the response of net primary productivity of terrestrial vegetation to global climate changes. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2001, **18**(4): 445~449.
- [5] Potter C S, Randerson J, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycle*, 1993, **7**: 811~841.
- [6] Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**: 815~835.
- [7] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, *et al.* Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach. *Ecological Modelling*, 1999, **122**: 239~255.
- [8] Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Terrestrial net primary productivity and its spatial-temporal patterns in China during 1982~1999. *Univiersitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium)*, 2001, **37**(4): 563~569.
- [9] Sun R, Zhu Q J. Effect of climate change of terrestrial Net Primary Productivity in China. *Journal of Remote Sensing*, 2001a, **5**(1): 58~61.
- [10] Chen L J, Liu G H, Feng X F. Advances in study on net primary productivity of vegetation using remote sensing. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(2): 53~57.
- [11] Sun R, Zhu Q J. Estimation of net primary productivity in China using remote sensing data. *Journal of Geographical Sciences*, 2001b, **11**(1): 14~23.
- [12] Fang J Y. Seeking for the missing carbon sinks. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(2): 255~256.
- [13] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, *et al.* Consistent land- and atmosphere- based US carbon sink estimates. *Science*, 2001, **291**: 2316~2320.
- [14] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*,

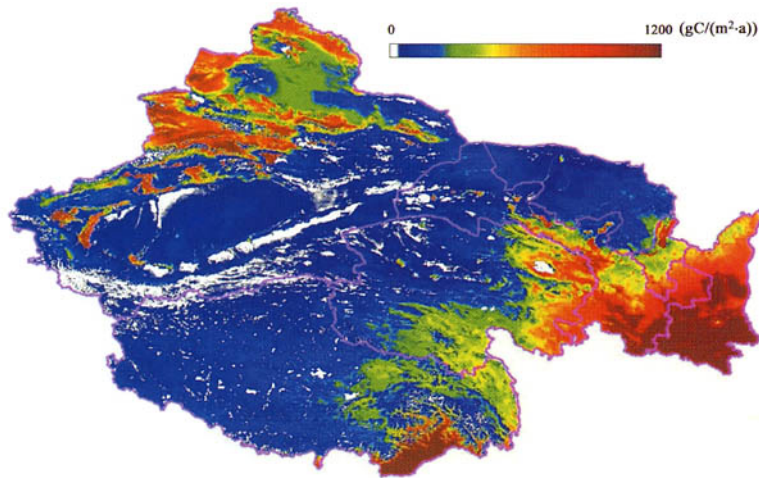
- 2001, **414**: 169~172.
- [15] Drake B G. The impact of raising CO₂ on ecosystem production. *Water, Air, Soil Pollution*, 1992, **64**: 25~44.
- [16] Jackson R B, Sala O E, Field C B, *et al.* CO₂ alters water use, carbon gain, and yield for the dominant species in a nature grassland. *Oecologia*, 1994, **98**: 257~262.
- [17] Polly H W, Johnson H B, Marino B D, *et al.* Increase in C₃ plant water use efficiency and biomass over Glacial to present CO₂ concentrations. *Nature*, 1993, **361**: 61~64.
- [18] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, *et al.* Climate edaphic and biotic controls over carbon and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochem Cycles*, 1994, **8**: 279~293.
- [19] Peterson E, *et al.* Effects of elevated CO₂ on rhizosphere carbon flow and soil microbial processes. *Global Change Biology*, 1997, **3**: 363~377.
- [20] Lin G, *et al.* Elevated CO₂ and temperature impacts on different components of soil CO₂ efflux in Douglas-fir terracosms. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 157~168.
- [21] Chapin F S, *et al.* Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate. *Ecology*, 1995, **76**: 694~711.
- [22] Veroustraete F, Patyn J, Myneni R B. Estimating net ecosystem exchange of carbon using the Normalized Difference Vegetation Index and an Ecosystem Model. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 115~130.
- [23] Sabbe H, Veroustraete F. Estimation of the carbon balance of European terrestrial ecosystems by means of the C-Fix model. *Proceedings of 'The 1999 EUMETSAT Meteorological Satellite Data User's Conference*, Copenhagen, 6~10 September 1999. 271~278.
- [24] Sabbe H, Veroustraete F. Demonstration of a standard Net Primary Productivity product for the SPOT4-VEGETATION instrument. Vito report; 9 ex. DWTC; 3 ex. TAP/062, 2000.
- [25] Veroustraete F, Sabbe H, Herman E. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-FIX model and Euroflux data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 376~399.
- [26] Wang F K Y. Canopy CO₂ exchange of Scots pine and its seasonal variation after four year exposure to elevated CO₂ and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **82**: 1~27.
- [27] Veroustraete F. On the use of ecosystem modeling for the interpretation of climate change effects at the ecosystem level. *Ecological Modelling*, 1994b, **75-75**: 221~237.
- [28] Wofsy F S C, Goulden F M L, Fan F S M, *et al.* Net exchange of CO₂ in midlatitude forests. *Science*, 1993, **260**: 1314~1317.
- [29] Myneni R B, Williams D L. On the relationship between fAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **49**: 200~211.
- [30] McCree K J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, 1972, **10**: 442~453.
- [31] Goward S N, Dye D G. Evaluating North-American net primary productivity with satellite observation. *Advanced Space Research*, 1987, **7**(11): 165~174.
- [32] Li B, Yong S P, Li Y, Liu Y J. *Grasslands in China*. Beijing: Science Press, 1990. 213~218.
- [33] Hu Z Z, S J X, Zhang Y S, *et al.* Studies on primary production and energy efficiency in Tianzhu Alpine Kobresia Capillifolia meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 1988, **8**(2): 183~190.
- [34] Hu Z Z, Sun J X, Li Y, *et al.* The characteristics of biomass and conversion efficiency of solar radiation for principal types of alpine grassland in Tianzhu, Gansu province, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, **18**(2): 121~131.

参考文献:

- [3] 孙睿,朱启疆.陆地植被净第一性生产力的研究.应用生态学报,1999,**10**(6): 757~760.
- [4] 陈波.陆地植被净第一性生产力对全球气候变化影响研究的进展.浙江林学院学报,2001,**18**(4): 445~449.
- [8] 朴世龙,方精云,郭庆华.1982~1999年我国植被净第一性生产力及其时空变化.北京大学学报(自然科学版),2001,**37**(4): 563~569.
- [9] 孙睿,朱启疆.气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究.遥感学报,2001,**5**(1): 58~61.
- [10] 陈利军,刘高焕,冯险峰.遥感在植被净第一性生产力研究中的应用.生态学报,2002,**21**(2): 53~57.
- [12] 方精云.探索 CO₂ 失汇之谜.植物生态学报,2002,**26**(2): 255~256.
- [32] 李博,雍世鹏,李瑶,等.中国草地.北京:科学出版社,1990. 213~218.
- [33] 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.生态学报,1988,**8**(2): 183~190.
- [34] 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.植物生态学报,1994,**18**(2): 121~131.

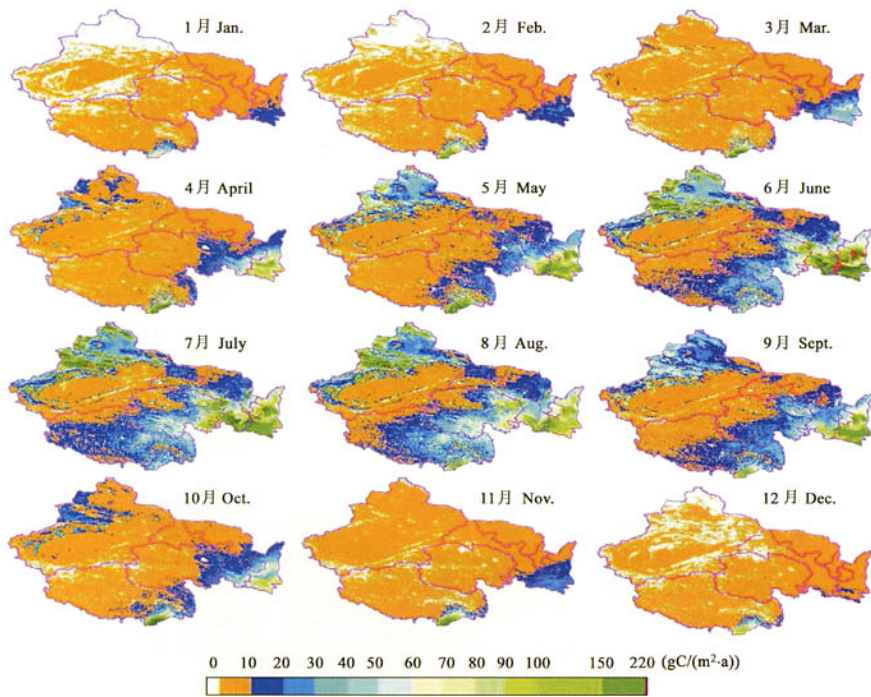
卢 玲，等：中国西部地区植被净初级生产力的时空格局

LU Ling, *et al*: Terrestrial net primary productivity and its spatial-temporal variability in western China



图版 I 中国西部地区 2002 年 NPP 总量分布格局

Plate I The spatial pattern of annual-accumulated NPP in the western China in 2002



图版 II 中国西部地区 2002 年 NPP 季节变化

Plate II The seasonal changes of NPP in the western China in 2002