

# 利用改进的 CASA 模型分析三江源区净植被生产力

蔡雨恋<sup>1,2</sup> 郑有飞<sup>1</sup> 王云龙<sup>1</sup> 吴荣军<sup>1</sup>

## 摘要

利用改进 CASA 模型计算了三江源地区植被净初级生产力(NPP). NPP 值在区域上呈现由东南向西北递减的趋势,黄河源区东南部地区的植被 NPP 值较高,而长江源西北部的植被生长稀疏;2004—2008 年三江源区 NPP 值呈略下降趋势,2006 年该区植被的 NPP 年总量最大为  $62.93 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ ,2005 年 NPP 总量最小为  $60.9 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ ;从季节分布来看,NPP 值从 5 月开始增加,到 7 月达到最大,随后又逐渐降低.三江源地区草甸植被 NPP 值最大为  $188.95 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;高寒草原为  $129.41 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ .其中,草原植被受气候年际变化影响相对较大,高寒草原年际变化表现为 2004—2006 持续上升.NPP 的波动主要是由于该地区的温度、年降水量以及年太阳总辐射量等因素的变化造成的.在海拔较高的地区,温度与 NPP 的呈极显著相关,相关系数为 0.8,而降水量与 NPP 的相关系数为 0.7.

## 关键词

改进 CASA 模型;净初级生产力;三江源

中图分类号 Q148

文献标志码 A

收稿日期 2010-02-08

资助项目 中国气象局干旱气象科学研究基金(IAM201101);中国气象局小型基建项目“农业干旱监测预报与农情分析业务系统建设”;青海省气象局科研基金(2009-Q-01)

## 作者简介

蔡雨恋,女,硕士生. xyyxyy@163.com

郑有飞(通信作者),男,教授,博士生导师,主要从事大气物理与大气环境的相关研究工作. zhengyf@nuist.edu.cn.

1 南京信息工程大学 环境科学与工程学院,南京,210044

2 南京博环环保有限公司,南京,210037

## 0 引言

草地是我国分布面积最广、最重要的生态系统之一,在全球碳循环和气候调节中起重要的作用,同时对维持生物多样性、发展牧业、保持水土和维护生态系统平衡方面有着重大的作用<sup>[1]</sup>.草地在全球变化中的作用越来越受到重视,正确估算草地植被净生产力已成为全球变化与地球科学研究领域的前沿与热点问题.

三江源区是长江、黄河、澜沧江 3 大河流的发源地,也是我国最大的国家级自然保护区,对我国的生态环境起着重要的影响作用.草地生态系统对三江源区生态环境起着决定性作用.相关研究<sup>[2-4]</sup>表明:由于人类活动以及气候变化的双重影响,特别是对于草原这种脆弱的自然生态系统,该地区草原呈现出退化趋势,草地生产力也逐渐下降.为此,迫切需要深入研究三江源地区净初级生产力的变化,尤其是其对气候变化的响应与适应.

近几十年来,已经有许多学者对全球或区域植被净生产力做了大量研究,但是在区域和全球尺度上,无法直接和全面地测量生态系统的生产力,利用遥感模型估算植被生产力已成为一种重要的研究方法<sup>[5]</sup>.目前,以 CASA(Carnegie Ames Stanford Approach)模型为代表的净初级生产力模型在国内外都得到了广泛的应用.该模型针对北美地区植被建立,随后,许多学者根据不同的需求和植被特征调整了 CASA 模型,并对其做了改进,但将该模型修改为针对草地 NPP(Net Primary Productivity)模型的研究较少<sup>[6]</sup>.本文以三江源区为研究对象,结合遥感技术,探讨近几年当地的草地植被 NPP 变化情况,为该区生态系统研究以及 NPP 对气候变化的响应和适应能力提供一定的参考依据.

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

三江源区位于我国西部,地处青藏高原腹地、青海省南部,为长江、黄河和澜沧河汇水区.地理位置为  $89^{\circ}45' \sim 102^{\circ}23' \text{ E}$ ,  $31^{\circ}39' \sim 36^{\circ}12' \text{ N}$ ,区域面积  $36.3 \text{ 万 km}^2$ ,约占整个青海省总土地面积的 50.3%.三江源区以山地地貌为主,山脉绵延,地势高耸,地形复杂,海拔在  $2\ 800 \sim 6\ 564 \text{ m}$  之间.该区气候类型属典型高原大陆型气候,具有寒冷、干旱、多风等特征.高寒草甸、高寒草原、高寒灌丛以及高寒沼泽为该区

主要的草原植被类型,这些植被在水源涵养、减缓径流、蓄洪防旱、降解污染、维持生物多样性方面有着不可替代的作用和巨大的生态功能.三江源区气候及生态环境的变化不仅直接影响着当地的资源开发利用和经济建设,而且对全国乃至全球气候变化及生态平衡起着极其重要的作用<sup>[7]</sup>.近年受气候变化和人为活动的影响,三江源区草地退化,导致了植被格局、水碳平衡和生产力的改变,影响到经济社会的可持续发展.

### 1.2 研究方法

本文采用改进的 CASA 模型<sup>[8]</sup>评估三江源地区的草原植被 NPP(记其量值为  $P_{NP}$ ). CASA 模型由 Potter 等<sup>[9]</sup>提出,主要通过光合有效辐射(Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR)和光能转化率( $\epsilon$ )来实现.该方法综合了生态原则和遥感数据,具有较高的时间和空间分辨率.

$$P_{NP}(x,t) = R_{APA}(x,t) \times \epsilon(x,t), \quad (1)$$

式(1)中,  $t$  表示时间,  $x$  表示空间位置.

$$R_{APA}(x,t) = L_{SO}(x,t) \times F_{PAR}(x,t) \times 0.5, \quad (2)$$

式(2)中,  $L_{SO}(x,t)$  是  $t$  月像元  $x$  处的太阳总辐射量 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $F_{PAR}(x,t)$  为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例,由归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和植被类型决定,常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射(波长为  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ )占太阳总辐射的比例.

$$\epsilon(x,t) = T_1(x,t) \times T_2 \times W_\epsilon(x,t) \times \epsilon^*, \quad (3)$$

式(3)中,  $T_1(x,t)$  和  $T_2(x,t)$  表示温度对光能转化率的影响,  $W_\epsilon(x,t)$  为水分胁迫影响系数,反映水分条件的影响,  $\epsilon^*$  是理想条件下的最大光能转化率,一般为  $0.389 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ <sup>[9]</sup>,在实际模拟过程中,本文引用了朱文泉等<sup>[10]</sup>基于 GIS 和 RS 估算所得全国不同的植被类型光能利用率值.

植被层对入射光合有效辐射的吸收比例(Fraction of Photosynthetically Active Radiation, FPAR)在一定范围内与 NDVI 存在线性关系,这一关系可以根据 NDVI 的最大值和最小值及其所对应的 FPAR 最大值和最小值来确定.同时, FPAR 与比值植被指数(Simple Ratio Vegetation Index, SR)也存在良好的线性关系.因此,通过将这两种方法结合起来,取其平均值作为 FPAR 的估算值,这样,估算的 FPAR 与实测值之间的估算达到最小.具体方法见参考文献<sup>[8]</sup>.

$L_{SO}(x,t)$  是太阳总辐射量,因为三江源区缺少

实测数据,根据王炳忠经验公式<sup>[11]</sup>,通过时长推算得到月总辐射量.

由于 CASA 模型所用的土壤水分模型涉及大量的土壤物理参数,比较难以获取而且精确度难以保证.本文采用朱文泉<sup>[8]</sup>改进的水分胁迫因子  $W_\epsilon(x,t)$  估算方法,利用周广胜等<sup>[12]</sup>建立的区域实际蒸散量模型来求取,区域潜在蒸散量通过 Boucher 提出的互补关系<sup>[13]</sup>求取.

### 1.3 数据来源与预处理

1) 遥感数据.本文使用的 NDVI 数据来源于 MODIS 卫星,该数据从 NASA 数据共享网(<https://wist.echo.nasa.gov/api/>)下载.时间范围是 2004 年 1 月—2008 年 12 月,为 16 d 最大化合成 NDVI 数据,空间分辨率  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ .根据不同植被类型,确定 NDVI 和 SR 最大值和最小值(表 1).

2) 气象数据.本文所用的气象数据来源于中国科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),包括 2004—2008 年逐日气温、降水、日照时长等气象资料,共涉及 42 个台站.气象数据使用 Kriging 方法进行插值,得到栅格数据.

3) 模型通过 Fortran 软件来实现模型计算,通过 ArcGIS 软件显示结果.其中,逐月 NPP 单位为  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mon}^{-1}$ ,年平均 NPP 单位为  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,年总 NPP 单位为  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ .

表 1 不同植被类型的 NDVI 以及 SR 最大值与最小值

Table 1  $I_{NDV,max}$ ,  $I_{NDV,min}$ ,  $I_{SR,max}$  and  $I_{SR,min}$  of typical vegetation types

类型	$I_{NDV,min}$	$I_{NDV,max}$	$I_{SR,min}$	$I_{SR,max}$
常绿叶针叶林	0.035	0.778 3	1.072 5	8.02
灌丛	0.035	0.778 5	1.072 5	8.03
芨芨草原	0.035	0.582 0	1.072 5	3.78
紫花针茅草原	0.035	0.527 2	1.072 5	3.23
荒漠化草原	0.035	0.254 4	1.072 5	1.68
灌木荒漠	0.035	0.488 0	1.072 5	2.91
矮嵩草甸	0.035	0.791 0	1.072 5	8.57
草原化草甸	0.035	0.750 2	1.072 5	7.00
沼泽化草甸	0.035	0.653 5	1.072 5	4.77
高山垫状植被	0.035	0.427 8	1.072 5	2.49
稀疏植被	0.035	0.634 9	1.072 5	4.48
栽培植被	0.035	0.744 8	1.072 5	6.84
无植被地段	0.035	0.478 3	1.072 5	2.83

## 2 结果与分析

### 2.1 三江源气候变化特征

三江源地区人口稀少,气候变化是影响 NPP 变化不可忽视的重要原因,而气温和降水是最基本的气候要素,对生态环境的变迁起着决定性作用<sup>[14]</sup>. 本文利用三江源区伍道梁、沱沱河、曲麻莱、杂多、清水河、玉树、囊谦、玛多、兴海、达日、玛沁、班玛、河南、久治 14 个气象站 1969—2008 年平均气温、月降水量资料,分析三江源 40 a 来的气候变化特征.

1969—2008 年,三江源地区具有明显的变暖趋势(图 1a),增温速率为  $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,表现为波动升高. 李林等<sup>[15]</sup>对近 43 a 来三江源温度研究,发现其变化趋势为  $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ;张景华等<sup>[16]</sup>对近 47 a 的三江源区气温分析,得出其升高倾向率为  $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ .

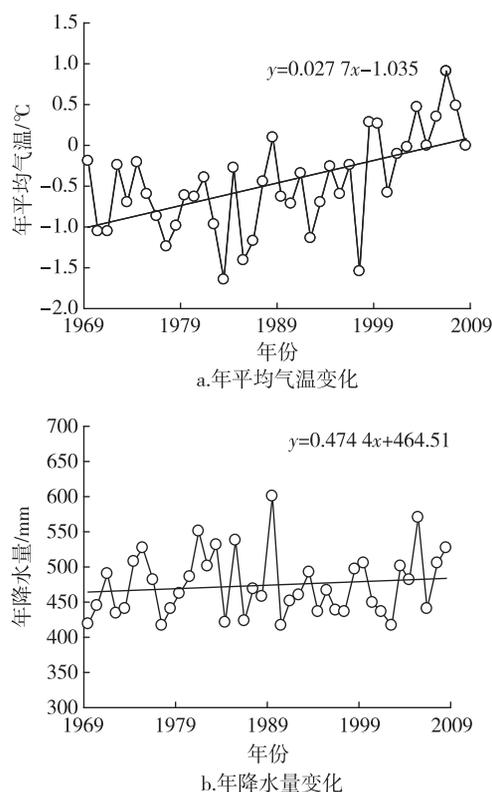


图 1 三江源 40 a 气候特征变化

Fig. 1 Climate change characteristics in Three-river headwaters region during 1969—2008, (a) for annual mean temperature change, and (b) for annual precipitation change

从 1969—2008 年 40 a 三江源降水量的多年变化过程曲线(图 1b)看,三江源区的年降水量呈上升趋势,变化趋势为  $4.7\text{ mm}/(10\text{ a})$ . 其中,年降水量最多时段为 20 世纪 80 年代,多年平均为  $497.91$

mm;最少时段是 20 世纪 90 年代,多年平均为  $459.76\text{ mm}$ . 进入 21 世纪后,年降水量低于 20 世纪 80 年代,但高于 90 年代,特别是 2004 年以后,呈上升趋势. 降水量年际间变化明显,大于年代变化,年际间干湿交替频繁.

### 2.2 结果验证

图 2 为 CASA 模型模拟值 ( $P_{NP,s}$ ) 与实测值 ( $P_{NP,o}$ ) 相关关系,模拟值与实测值达到显著相关水平. 对于整个数据集  $P_{NP,s} = 0.532\ 9P_{NP,o} + 12.876$ , 决定系数  $R^2 = 0.647$ . 由此表明, CASA 模型的模拟结果是较为理想的,达到显著相关水平 ( $r = 0.804$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 52$ ). 可以认为,该模型适用于三江源植被 NPP 的研究. 但由于牧草产量实测地点多位于保护区内,保护区内 NPP 始终高于保护区外,保护区内的 NPP 变化速率较慢<sup>[17]</sup>;同时,保护区内的植被覆盖状况较好,受人为影响较少,因此,部分实测值明显要高于模拟值. 另一方面,由于 NPP 的实测数据获取较困难,数据采集试验点上所获数据与模型所模拟的时间不一致,所以,二者之间存在着一定程度的误差.

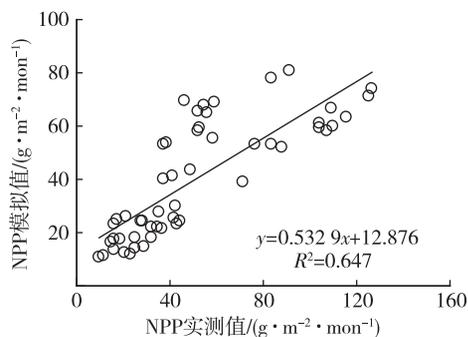


图 2 植被净第一生产力的实测值和模拟值之间的比较  
Fig. 2 Comparison of simulated net primary productivity ( $NPP_s$ ) and observed net primary productivity ( $NPP_o$ )

植被净初级生产力受多种因素综合影响,因此,改进的 CASA 模型进一步考虑温度和降雨量的年际动态对 NPP 的影响. 将 Miami 模型<sup>[17]</sup>、周广胜模型<sup>[18]</sup>的结果与本文模型进行对比(表 2). 其中, Miami 模型属于统计模型,缺乏植物生理生态方面的理论基础,可靠性也仅为  $66\% \sim 75\%$ <sup>[18]</sup>. 周广胜模型结合了植物生理生态学和统计方法,具有半理论半经验的特点,该模型以土壤水分供给充分为前提条件来推导地表蒸散量,无法满足不同区域的估算.

可以看出, Miami 模型 NPP 的计算结果明显高于改进的 CASA 模型和周广胜模型,而且其 2004—

2008 年际变化趋势与热量条件变化趋势一致,2006 年温度最高,其生产力也是最高,而 2008 年温度最低,其 NPP 值也最低. 其原因是 Miami 模型在计算中仅考虑了水热条件对植被生产力的影响,忽略了土壤、地形以及植被本身的生理特性等因素,因此,主要由热量条件起主导因子的三江源地区 NPP 变化趋势与温度相一致,而且整体数值偏大. 在改进的 CASA 模型中,年 NPP 最大的一年也是 2006 年. 说明改进的 CASA 模型并没有只考虑温度,但温度是影响 NPP 变化的重要因素. 改进的 CASA 模型与周广胜模型结果较为接近,但其年变化趋势相差较大,其原因是周广胜模型模拟的净初级生产力取决于该地区的净辐射量与降水量<sup>[18]</sup>,所以降水量成为周广胜模型年际变化的主要驱动因子.

改进的 CASA 模型模拟值明显小于 Miami 模型和周广胜模型,这是因为 Miami 模型和周广胜模型在计算过程中都没有考虑当地植被覆盖情况,所估算出的仅是区域潜在植被净初级生产力值<sup>[19]</sup>. 若将仅在气象站点上估算获得的净初级生产力数据经过插值扩展到面上,其结果一定偏高<sup>[5]</sup>. 因此,改进的 CASA 模型相对于统计模型与半理论半经验模型,更适用于三江源地区,能够较好地体现气候变化与 NPP 的关系.

表 2 本文模拟的年 NPP 与其他模型相对比

Table 2 Comparison of simulated net primary productivity between improved CASA model and other models  $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$

年份	本文方法	方差法	Miami 模型	周广胜模型
2004	173.36	123.86	457.16	277.56
2005	167.76	117.21	474.81	325.62
2006	181.42	118.79	551.06	279.58
2007	168.03	115.40	480.44	301.99
2008	169.24	118.75	471.05	327.51

### 2.3 三江源区植被净初级生产力的空间分布特征

图 3 为 2004—2008 年平均三江源净初级生产力的空间分布格局, NPP 变化范围为  $0.37 \sim 1111.52 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ , 平均值为  $168.68 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ . 年 NPP 空间分布趋势表现出由东南向西北逐渐递减的梯度, 该趋势与水、热梯度的表现基本一致, 由东南往西北, 气候也由暖到冷, 由湿到干. 黄河源区的植被净生产力要大于长江源区. 在黄河源区的东南部, 植被 NPP 较大, 在  $230 \sim 410 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$  之间, 主要是由于东南部相对海拔较低, 水、热条件较好, 其中

常绿叶针叶林的 NPP 达到  $500 \sim 1100 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ , 同时该区域也是草甸广泛分布的区域, 这些植被 NPP 在  $200 \sim 500 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$  之间. 黄河源区的西北部是高寒草原和草甸分布区域, 其 NPP 在  $60 \sim 350 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$  之间. 长江源区植被年均 NPP 较小, NPP 变化范围为  $80 \sim 230 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ . 其中, 长江源区的西北部海拔较高, 降水稀少, 植被稀疏, NPP 在  $100 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$  以下. 澜沧江源区占三江源区面积较少, 降水条件较好, 年均 NPP 较高, 在  $180 \sim 410 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$  之间.

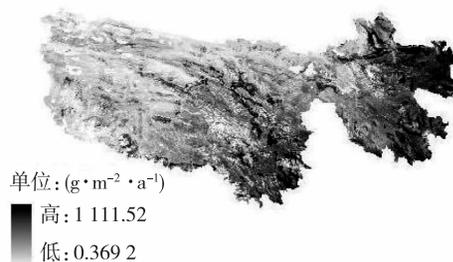


图 3 三江源区 NPP 空间分布

Fig. 3 Spatial patterns of NPP in Three-river headwaters region

### 2.4 三江源区植被净初级生产力的时间分布特征

三江源植被初级生产力呈倒 U 型分布(图 4a), 呈现出非常明显的季节变化趋势. 夏季(6—8 月)为植被生长季节, 气温与辐射达到最大值, 其 NPP 也最大, 占全年的 80% 以上. 5—6 月, 在三江源区水、热条件充足的条件下, 植被开始生长, 进入发育期, 随月份增加, NPP 也相应增加, 到 7、8 月达到最大, 5 a 平均达到  $39.16 g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ , 9 月气温降低, 植被生长发育进入末期, NPP 值迅速降低.

2004—2008 年三江源地区净初级生产力呈下降趋势(图 4b), NPP 年总量在  $60.9 \sim 62.93 Tg \cdot a^{-1}$  之间, 其中, 2006 年该区植被的 NPP 年总量最大, 2005 年 NPP 总量最小. 5 a 间 NPP 年总量平均每年降低  $0.29 Tg \cdot a^{-1}$ , 分为 2004—2005 和 2006—2007 年 2 个阶段减少, 从时间序列看, NPP 值在 2004—2005 年间变化最大.

除降水以外, 温度也是影响三江源区植被 NPP 的主要因素. 2006 年三江源区平均温度最高, 特别是生长季 6—9 月, 平均温度显著高于其他年份, 而 2008 年平均温度最低, 6—9 月平均温度也是最低, 其 NPP 值相对较低, 这与 NPP 年际变化趋势相一致. 另一方面, 植被对气候变化的影响可能有滞后效应<sup>[20]</sup>. 由于 2005 年降雨较多, 土壤中的水分较高, 导致第二年植物生长旺盛, 草原生产量和前一年 9 月降雨量有很好

的相关关系. 同时, 太阳总辐射量也成为影响 NPP 的因素之一. 由于 2005 年太阳总辐射量偏低, 特别是 6、7 月植被生长季太阳辐射量低于 5 a 平均辐射的 17% 左右, 从而导致 2005 年植被净生产力最低.

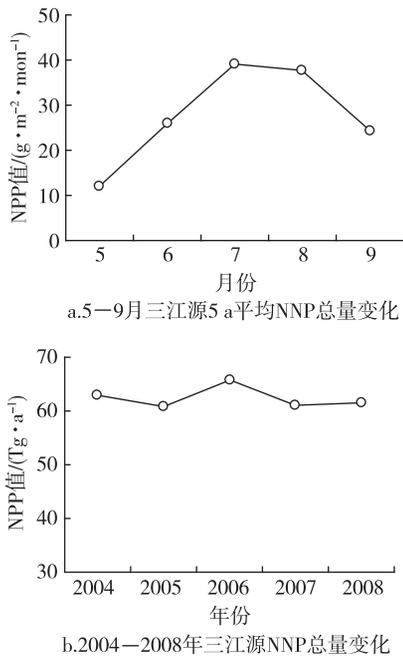


图4 2004—2008年5 a平均NPP时间分布  
Fig. 4 Temporal patterns of NPP change in Three-river headwaters region, for monthly change from May to September, and for annual change during 2004—2008

## 2.5 不同草原植被类型的净第一生产力特征值

草地生态系统是三江源区最主要的生态系统类型, 广泛分布于三江源区, 其分布面积占三江源地区总面积的 65% 左右. 该区主要植被为草甸和高寒草原, 其中草甸面积为草地面积的 76% 左右, 成为三江源主要的植被<sup>[21]</sup>. 因此, 本文根据植被分类图, 将三江源区划分为 3 种植被类型: 高寒草原、草甸、其他植被.

该区 2004—2008 年不同类型植被年均 NPP 特征表明(表 3), 3 种植被类型中, 草甸 NPP 值最大, 介于 0.44 ~ 727.85 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间, 年均值为

188.95 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; 高寒草原植被的 NPP 介于 0.43 ~ 607.2 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间, 年均值为 129.41 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. 从年际变化可以看出, 草甸与其他植被变化趋势相一致, 而高寒草原则表现为 2004—2006 持续上升, 2007—2008 又再次上升, 2006 年年均 NPP 最大, 2004 年年均 NPP 最小, 这与樊江文等<sup>[22]</sup>对草地产量变化的研究结果相一致. 主要原因是高寒草原一般分布于海拔 4 000 ~ 4 500 m 的寒冷地区, 因此对环境条件的变化更为敏感, 受水、热变化的影响更大, 2005 年是水、热条件最好的一年, 因此导致草原植被受气候年际变化影响相对较大.

## 2.6 三江源区植被初级净生产力的影响因素

植被净初级生产力受多种因素综合影响, 包括该地区的植被生长状况、年降水量、年平均温度、土壤和微生物以及人类活动等<sup>[23]</sup>, 而气候变化是主要因素之一. NPP 年际间的波动就是由这些因子引起的.

为了便于体现 NPP 与降水、温度、辐射之间的关系, 均采用乘幂进行拟合. 可以发现, 5 a 中, 温度是决定植被 NPP 变化的关键因素之一, NPP 与气温呈明显的二次曲线关系, 其相关性达到显著水平 ( $R^2 = 0.68, p < 0.01, n = 45$ ), 相关系数为 0.8 (图 5a). 当气温增加时, 三江源区植被净初级生产力也增加, 当超出适宜生长温度时, NPP 不再生长, 因温度过高会伤害植被. 本文通过对 5 a NPP 值与温度相关分析发现, 全年均温最高不宜超过 3.44 °C 左右. 通过分析年 NPP 与气候因子相关关系表明, 降水量也显著影响 NPP 的变化 ( $R^2 = 0.55, p < 0.01, n = 45$ ), 其相关系数为 0.7 (图 5b). 随着年降水量的增加, NPP 增加. 说明对于三江源区, 降水量和温度都是该区的影响因素. 由于海拔和气候的影响, 温度变化对其净生产力的影响要大于降水量变化的影响. 同时, 在水、热条件较好的情况下, 太阳总辐射量也对 NPP 变化起了重要作用, 图 5c 是在降水与温度较好的情况下, 其 NPP 随着太阳总辐射量增加而增大, 但也可以看出相关性较小 ( $R^2 = 0.413, p < 0.01, n = 22$ ), 相关系数为 0.6.

表3 2004—2008年三江源区不同植被年均NPP比较

Table 3 Comparison of NPP for different vegetation types in Three-river headwaters region from 2004—2008

植被类型	区域/%	NPP 均值/(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )					
		2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	5 a 平均
高寒草原	24.64	122.95	125.67	139.72	124.46	134.25	129.41
草甸	54.46	193.64	185.69	197.52	184.50	183.42	188.95
其他植被	20.90	184.11	174.64	192.96	173.67	177.55	180.59

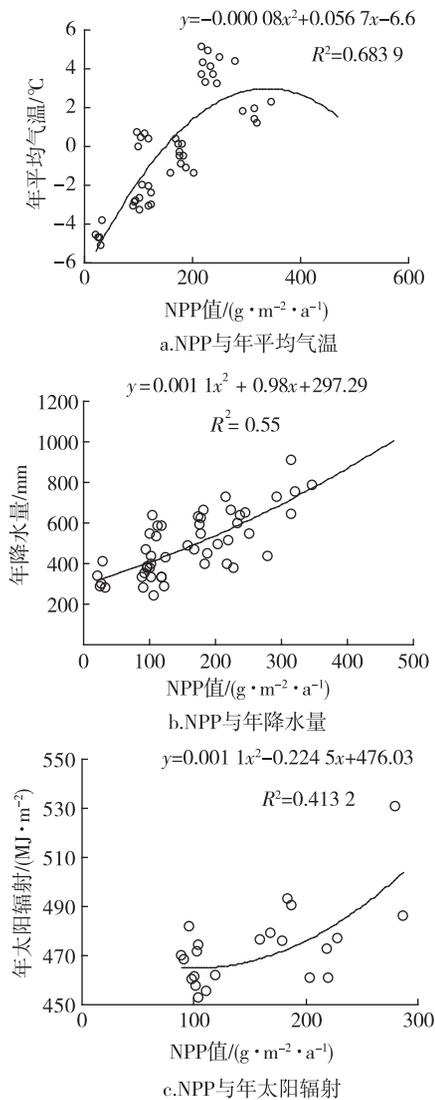


图5 2004—2008年NPP与年均温、年降水量以及太阳总辐射量的相关关系

Fig. 5 Relationships between NPP and annual mean temperature, annual precipitation, and annual solar radiation during 2004—2008

### 3 讨论

#### 3.1 三江源区植被NPP时空分布特征

从时间分布特征来看,5 a NPP平均值为  $168.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,与朱文泉<sup>[8]</sup>结果比较一致,在  $100 \sim 250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间.前人研究发现,2004—2005年黄河源区与长江源区净初级生产力都呈下降趋势<sup>[21-22]</sup>,与本研究基本结果一致.进一步模拟发现2006—2007年年NPP呈下降趋势,主要是由于2006—2007年植物生长季时期,温度和辐射均呈下降趋势,从而

导致植被净生产力下降.也有研究表明,三江源区保护区内2004—2008年呈上升趋势,但是该研究重点讨论保护区内外的年际NPP差异,没有研究三江源区整体NPP,研究NPP年际变化的趋势也比较有限<sup>[24]</sup>.从季节变化特征看,有大量研究表明,三江源区NPP在夏季(6—8月)较高,在7、8月达到峰值<sup>[25-26]</sup>,这主要是由于温度和降水是三江源主要的限制因子,夏季水、热因子均比较优越,而且夏季也是光合有效辐射最丰富的季节,有利于植物的光合作用,从而利于植物生长.2004—2008年三江源区植被净生产力空间分布总体趋势呈现由东南向西北逐渐递减的梯度,与其他文献结果一致<sup>[23,27]</sup>.在东南部海拔较低的地区,水、热条件较好,植被NPP较大,也是草甸广泛分布的区域.东部和中部地区是高寒草原和草甸分布区域,其NPP在  $60 \sim 350 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间.西北部海拔较高,植被稀疏,分布着稀疏灌丛,大部分地区的NPP在  $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下.

#### 3.2 三江源区植被净初级生产力影响因素

由于海拔高、气候条件恶劣,三江源区域生态环境十分脆弱且易遭破坏,因此成为气候变化影响的敏感区域之一.本研究表明,与三江源地区的NPP变化相关性最好的因子是年平均气温,相关系数为0.8,其次是年降水量,相关系数为0.7.根据年平均气温年际变化趋势可以发现,由于与常年同期相比,2006年三江源地区年平均气温偏高,特别是植被生长季节,2005、2008年年平均气温较低,这与NPP年际变化趋势一致.究其原因是由于三江源地区平均海拔约4257 m,地势高,常年平均气温较低,1969—2008年该区各站年平均气温在  $-7.3 \sim 5.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,远低于我国东部同纬度低海拔地区.郭晓寅等<sup>[27]</sup>利用MODIS17A3资料分析得到,江河源地区陆地植被的净初级生产力与生长季节温度的相关系数为0.7,而降水与NPP的相关性达到了0.6;朱文泉<sup>[8]</sup>的研究结果表明,三江源区温度与植被NPP相关系数较高.其他研究也显示,在寒冷气候时期,温度是影响陆地植被净初级生产力的主要因素<sup>[28]</sup>.另一方面,当温度超过植被生长适宜温度,植被NPP就开始呈下降趋势,经过分析,发现三江源区全年均温最高不宜超过  $3.44 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,但在这方面研究较少,需要进一步验证.因此,在三江源地区,温度成为影响该地区陆地植被净初级生产力的主要因素,但是降水对当地植被的生长也有重要影响.这是由于三江源区高寒干旱,日照时间长,辐射强,降水也是植被生长的关键因素之一.该结果与

我国东北地区的植被 NPP 与气候的关系类似. 进一步研究表明,在水热条件较好的情况下,太阳总辐射量也成为影响 NPP 变化的因素,2005 年降水与温度条件较好,但由于太阳总辐射量较低,特别是 6—9 月辐射量低于同常年同期水平,从而导致 2005 年 NPP 较低. 另一方面,在降水与温度较好的情况,其太阳总辐射量与 NPP 的相关性分析也同样证明,太阳总辐射量影响着三江源地区 NPP 的变化情况. 文献[23]也指出,太阳辐射量与 NPP 相关性较好,当辐射量显著较小时,会影响其 NPP 的变化情况.

#### 4 结论

基于 2004—2008 年 NDVI、气温、降水以及太阳辐射等资料,结合三江源区植被类型图,应用改进的 CASA 模型模拟和分析了三江源区植被净初级生产力的变化,主要结论如下:

1) 2004—2008 年三江源区植被 NPP 呈现由东南向西北递减的趋势,黄河源区东南部地区的植被生长较好,其年均 NPP 在  $230 \sim 410 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  之间;而长江源西北部的植被生长稀疏,年均 NPP 普遍小于  $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . 2004—2008 年,三江源区 NPP 呈略下降趋势,2006 年该区植被年均 NPP 总量最大为  $62.93 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,2005 年年均 NPP 最小,为  $60.9 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ . 季节分布上看,自 5 月开始,随月份增加,NPP 也相应增加,到 7 月达到最大,5 a 平均达到  $39.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,然后又逐渐降低.

2) 3 种植被类型中草甸 NPP 值最大为  $188.95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,高寒草原最大为  $129.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . 草甸与其他植被变化趋势相一致. 草原植被受气候年际变化影响相对较大,高寒草原年际变化表现为 2004—2006 持续上升,2007—2008 又再次上升,2006 年年均 NPP 最大,2004 年年均 NPP 最小.

3) 三江源区 NPP 与温度呈显著相关关系,经相关分析,发现三江源区全年均温最高不宜超过  $3.44 \text{ }^{\circ}\text{C}$  左右. 年降水量也显著影响植被 NPP 的变化情况,但温度变化对该区净生产力的影响要大于降水量变化的影响. 当水、热条件较好时,太阳总辐射量也成为影响 NPP 变化的因素之一.

#### 参考文献

##### References

- [1] 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

- PIAO Shilong, FANG Jingyun, HE Jinsheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 491-498
- [2] 李凤霞,颜亮东,吴素霞,等. 江河源地区草地植被变化特征及水土保持功能评价[J]. 草业科学,2007,24(7):6-11
- LI Fengxia, YAN Liangdong, WU Suxia, et al. The change characteristics of grassland vegetation and the assessment of grassland function on water and soil conservation in the source regions of Yangtze River and Yellow River[J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(7): 6-11
- [3] 王素萍,宋连春,韩永翔,等. 玛曲气候变化对生态环境的影响[J]. 冰川冻土,2006,28(4):556-561
- WANG Suping, SONG Lianchun, HAN Yongxiang, et al. Impacts of climate change on ecological environment in Maqu grassland, Gansu[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 556-561
- [4] 郭连云,丁生祥,吴让,等. 气候变化对三江源区兴海县天然牧草的影响[J]. 草业科学,2009,26(6):90-95
- GUO Lianyun, DING Shengxiang, WU Rang, et al. Effect of climate change on the forages in natural grassland of Xinghai county Three-River headwaters region[J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(6): 90-95
- [5] 朴世龙,方精云,郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报,2001,25(5): 603-608
- PIAO Shilong, FANG Jingyun, GUO Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 603-608
- [6] 李刚,辛晓平,王道龙,等. 改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用[J]. 生态学杂志,2007,26(12):2100-2106
- LI Gang, XIN Xiaoping, WANG Daolong, et al. Application of improved CASA model in productivity evaluation of grassland in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2100-2106
- [7] 李怀南. 三江源区生态环境面临的问题和防治措施[J]. 青海师范大学学报:自然科学版,2003(4):73-75
- LI Huainan. The eco-environmental problems and prevention measures on the Sanjiangyuan nature reserve[J]. *Journal of Qinghai Normal University: Natural Science Edition*, 2003(4): 73-75
- [8] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京:北京师范大学资源学院,2005
- ZHU Wenquan. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing and its relationship with global climate change[D]. Beijing: College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, 2005
- [9] Potter C S, Randerson J T, 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
- [10] 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 Yaozhong, HE Hao, et al. Simula-

- tion of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 700-706
- [11] 陈芳, 马英芳, 李维强. 青海高原太阳辐射时空分布特征[J]. 气象科技, 2005, 33(3): 231-234  
CHEN Fang, MA Yingfang, LI Weiqiang. Distribution characteristics of solar radiation over Qinghai plateau [J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(3): 231-234
- [12] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候: 植被分类研究[J]. 植物学报, 1996, 38(1): 8-17  
ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. Study on climate: Vegetation classification for global change in China [J]. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(1): 8-17
- [13] 张志明. 计算蒸发量的原理与方法[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990  
ZHANG Zhiming. Theory and methods about computing evapotranspiration [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1990
- [14] 唐红玉, 杨小丹, 王希娟, 等. 三江源地区近 50 年降水变化分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 47-54  
TANG Hongyu, YANG Xiaodan, WANG Xijuan. Analyses of precipitation change in the source regions of Three Rivers during 1956—2004 [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(1): 47-54
- [15] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79-85  
LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over “Sanjiangyuan” region in recent 43 years [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79-85
- [16] 张景华, 李英年. 青海气候变化趋势及对植被生产力影响的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 97-106  
ZHANG Jinghua, LI Yingnian. The research on effect of climate change on vegetation productivity in Qinghai province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 97-106
- [17] 陈国南. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J]. 自然资源学报, 1987, 2(3): 270-278  
CHEN Guonan. Preliminary study on calculation of primary production of ecosystem in China with application of Miami model [J]. Journal of Natural Resources, 1987, 2(3): 270-278
- [18] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200  
ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. A natural vegetation NPP model [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1995, 19(3): 193-200
- [19] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 36-45  
SUN Rui, ZHU Qijiang. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993 [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1): 36-45
- [20] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8  
YANG Yuanhe, PIAO Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 1-8
- [21] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376  
LIU Jiyuan, XU Xinliang, SHAO Quanqin. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River headwaters region in Qinghai province [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 63(4): 364-376
- [22] 樊江文, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1988-2005 年三江源草地草量变化动态分析[J]. 草地学报, 2010, 18(1): 5-10  
FAN Jiangwen, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan, et al. Dynamic changes of grassland yield in Three River headwater region from 1988 to 2005 [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(1): 5-10
- [23] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 373-379  
PIAO Shilong, FANG Jingyun. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in Qinghai-Xizang Plateau, China during 1982-1999 [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 373-379
- [24] 肖桐, 刘纪远, 邵全琴. 近 20 年青海三江源自然保护区植被生产力变化模拟[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(5): 558-565  
XIAO Tong, LIU Jiyuan, SHAO Quanqin. A simulation on changes in vegetation productivity in “Three River Sources” nature reserve, Qinghai province over past 20 years [J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(5): 558-565
- [25] 徐晓桃. 黄河源区 NPP 及植被水分利用效率时空特征分析[D]. 兰州: 兰州大学资源环境学院, 2007  
XU Xiaotao. Spatial and temporal analysis of net primary productivity and water use efficiency in Yellow River source region [D]. Lanzhou: College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, 2007
- [26] 张春敏. 长江源区植被净生产力及水分利用效率的估算研究[D]. 兰州: 兰州大学资源环境学院, 2007  
ZHANG Chunmin. Estimation of the vegetation net primary productivity and water use efficiency of the Yangtze River source region [D]. Lanzhou: College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, 2007
- [27] 郭晓寅, 何勇, 沈永平, 等. 基于 MODIS 资料的 2000—2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 512-518  
GUO Xiaoyin, HE Yong, SHEN Yongping, et al. Analysis of the terrestrial NPP based on the MODIS in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers from 2000 to 2004 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 512-518
- [28] He Y, Dan L, Dong W J, et al. The terrestrial NPP simulations in China since last glacial maximum [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(18): 2074-2079

## Analysis of terrestrial net primary productivity by improved CASA model in Three-river headwaters region

CAI Yulian<sup>1,2</sup> ZHENG Youfei<sup>1</sup> WANG Yunlong<sup>1</sup> WU Rongjun<sup>1</sup>

1 School of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Nanjing Grand Environmental Protection Co., Ltd, Nanjing 210037

**Abstract** An improved CASA (Carnegie ames stanford approach) model is used to estimate the terrestrial net primary productivity (NPP) in Three-river headwaters region. Results indicate that the NPP decreased from the southeast to the northwest, while the NPP in southeastern area of Yellow River is higher than that of the Yangtze River. NPP shows a slightly downward trend during 2004—2008, with the maximum of  $62.93 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  in 2006, and minimum of  $60.9 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  in 2008. Seasonal variation of NPP is also prominent, which started to increase from May to July, then decreased gradually. The annual NPP of alpine meadow is  $188.95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , higher than that of alpine steppe of  $129.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  in the region, while interannual variation of alpine steppe is increasing during 2004—2006. The analysis shows that temperature is the key factor controlling the terrestrial NPP in the region, followed by precipitation and total solar radiation. The NPP fluctuation in the higher elevations of this region is significantly related with temperature, with correlation coefficient being 0.8, while the correlation coefficient between NPP and precipitation is 0.7.

**Key words** improved CASA model; net primary productivity; Three-river headwaters region