

基于 LUE 模型的长江源流域 NPP 时空变化特征分析

潘萌甜¹, 梁俊红^{1*}, 李 佳², 姜群鸥³

(1. 湖北师范大学 城市与环境学院, 湖北 黄石 435002; 2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101;
3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要:长江源流域具有独特的高寒植被生态系统,研究植被净初级生产力变化及其与气候因子的关系,能够反映生态系统对全球变化的响应。利用改进的遥感光能利用率模型(LUE)模拟了2001—2010年长江源流域植被NPP时空变化特征,结合同期气温和降水数据,运用趋势分析法和偏相关分析法,研究了植被NPP对气候因子的响应特征。结果表明:1)植被多年平均NPP值为171.83 gC/m²/a,高寒针叶林NPP值最大(392.64 gC/m²/a),高寒草原最小(70.41 gC/m²/a)。而高寒草甸和高寒草原分布最广,占植被NPP总量的86.6%。2)植被NPP呈增加的趋势(6.39 gC/m²/a),增加趋势不显著,在水热条件的影响下,植被NPP增长呈现出空间异质性,增加幅度由东南向西北逐渐减少。不同植被类型的NPP增长趋势不同,其中高寒针叶林、灌丛、高寒草甸、高寒草原和高山垫状植被的NPP增长率分别为15.98、12.61、3.13、2.69和1.01 gC/m²/a。3)植被NPP相比于降水,对温度的敏感性更高。近10 a温度的显著增加是导致植被NPP增加的主要因素。研究结果有利于把握长江源流域高寒生态系统功能特征,为生态规划建设提供科学依据。

关键词:长江源流域;NPP;光能利用率;时空特征

中图分类号:S771.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)05-0237-06

Spatial and Temporal Analysis of NPP Characters in Headwater Region of Yangtze River

PAN Meng-tian¹, LIANG Jun-hong^{1*}, LI Jia², JIANG Qun-ou³

(1. College of Urban and Environmental Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China;
2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083, China)

Abstract: Unique alpine ecosystem is in the source region of Yangtze River, to study the alpine vegetation net primary production (NPP) change and relationship to climate factors is considered to reflect alpine ecosystem responses to global climate changes. In this study, the light use efficiency model based on remote sensing data was used to simulate the NPP from 2001 to 2010 in the resource region of Yangtze River, the relationships between NPP and climate factors were also analyzed. The results indicated that: 1) mean annual vegetation NPP was 171.83 gC/m²/a, while the biggest NPP type was alpine coniferous forest (392.64 gC/m²/a) and alpine steppe was the lowest NPP (70.41 gC/m²/a). The NPP of alpine grasslands that were most widely distributed in the area accounted for 86.6% of the total. 2) Vegetation NPP increased by 6.39 gC/m²/a, but not significantly. The increase range decreased from southeast to northwest. NPP increase trend in alpine coniferous forest, scrubs, alpine meadow, alpine steppe and alpine vegetation were 15.98, 12.61, 3.13, 2.69, and 1.01 gC/m²/a, respectively. 3) Vegetation NPP was more sensitive to

收稿日期: 2017-01-09 修回日期: 2017-02-28

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20162502); 国家自然科学基金委重大研究计划(91325302); 中国博士后基金(2014M560110)。

作者简介: 潘萌甜, 女, 本科, 研究方向: 生态环境遥感。E-mail: 46662473@qq.com

* 通信作者: 梁俊红, 女, 讲师, 研究方向: 土地可持续利用与GIS遥感应用。E-mail: 1284651461@qq.com

temperature than precipitation,the increase temperature was the key factor for the NPP increase from 2001 to 2010. The results of this study would be beneficial for the understanding of the alpine ecosystem characters in the resource region of Yangtze River,and could provide the scientific basis for the design and development of the ecosystem.

Key words:source region of Yangtze River; NPP; light use efficiency; spatial and temporal analysis

长江源流域地处海拔 4 000 m 以上区域,具有高寒植被生态系统,是我国生态系统脆弱和敏感区域之一,是研究植被和气候变化关系的热点区域,在全球变化研究中发挥着重要的作用^[1]。长江源生态退化问题在最近几十年越来越严重,对当地人民的生存与发展造成了巨大影响^[2-3]。国家从 2005 年以来开始实施三江源生态保护工程,开展重点区域生态治理,实施退牧还草和黑土滩治理重点工程,长江源成为其中重要的区域。因此,研究长江源植被变化和气候的关系有重要意义^[1]。

植被净初级生产力(net primary production, NPP) 作为植物在单位时间和单位面积上所产生的有机干物质总量,是反映植被生态系统对气候变化响应的重要指标。国内外对陆地碳循环研究的不断深入,发展了很多 NPP 估算模型。这些模型主要分为 3 类:传统经验模型,如 Miami 模型^[4];基于生态过程模型,如 BIOME-BGC 模型^[5];遥感光能利用率模型,如 CASA^[6],GLOPEM^[7]。目前针对长江源区植被 NPP 的研究主要利用遥感光能利用率模型^[8-13]。由于遥感光能利用率模型结构和参数的差异很大,有不确定性,已有些研究对模型结构与方法进行改进,提高了模型模拟的精度^[14-16]。模型的改进为进一步模型和探讨长江源植被净初级生产力的变化特点及其成因奠定了基础。因此,本文利用改进的完全基于 MODIS 遥感数据驱动 NPP 的光能利用率模型(Light Use Efficient,LUE)模拟长江源流域植被 NPP^[14],研究近 10 a(2001—2010)来长江源区植被 NPP 的时空变化特征,定量分析气候因子对植被 NPP 的影响,以期掌握气候变化对长江源区植被生长的影响,为源区进一步生态发展和规划提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江源流域位于青海省境内,直门达水文站控制的以上区域,面积达 $13.78 \times 10^4 \text{ km}^2$,地理位置 $32^\circ 30' - 35^\circ 50' \text{ N}$, $90^\circ 30' - 97^\circ 10' \text{ E}$,平均海拔 4 295 m(图 1)^[1]。源区水系主要包括沱沱河、当曲和楚玛尔河。流域内分布着多年冻土发育,冰川雪被、湖泊沼泽和源泉^[1]。土壤类型有高山草甸土、沼

泽土和高山草原土^[17]。多年平均气温 -2.2°C ,最冷月平均气温 -13.0°C ,最暖月平均气温 9.7°C ^[1]。多年均降水量为 365 mm,降水量由东南向西北逐渐减少,东部湿润区和西部干旱区景观差异显著^[1,18]。

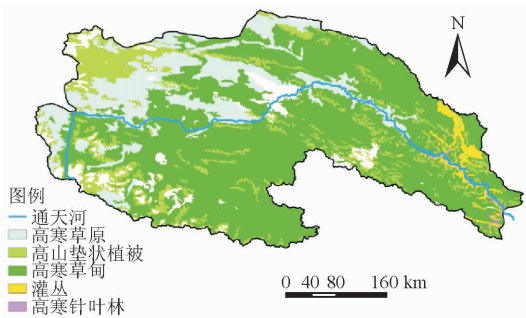


图 1 长江源流域植被空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of temperate grassland in the source region of Yangtze River

1.2 数据

气象观测资料从中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn>)获取。选取了覆盖研究区的 9 个气象台站数据,包括降水,温度,太阳辐射,地表水气压,日照日数,风速和相对湿度等参数。气象数据主要用于驱动 LUE 模型反演 NPP 和偏相关分析。通过 ANUSPLINE 软件进行插值得到^[19]区域尺度的气象数据。

本文的长江源流域植被空间分布图是在长江源流域土地覆盖数据(LUCC)与 1 : 100 万中国植被分布图基础上^[20],通过 ArcGIS 平台利用空间叠加分析生成。土地覆盖数据(LUCC)由地球系统科学数据共享平台提供。选取研究区 2005 年土地覆盖图,然后与中国植被图的植被类型融合,得到了长江源流域植被空间分布图(图 1)。总体上有 5 种植被类型:高寒草原、高山垫状植被、高寒草甸、灌丛和高寒针叶林。其中,高寒草甸、高寒草原和高山垫状植被分布最广,分别占植被总面积的 63.8%、20.3%和 13.5%,而灌木和高寒针叶林只有 1.9%和 0.3%。

本文使用的 LUE 模型需要的遥感数据包括 MODIS 陆面和大气相关产品。其中,估算光合有效辐射(PAR)需要用到 MODIS 大气产品的 angstrom's 系数,大气水汽含量,臭氧层厚度,云层光学厚度和云顶气压^[14]。此外,估算 NPP 需要用

到 MODIS 陆面产品植被吸收光合有效辐射比例 (FPAR) 以及 AMSR-E 传感器提供的土壤湿度数据 (Soil Moisture)。大气云层数据会有部分的缺失,在估算 NPP 之前,本文用 Savitzky-Golay 滤波的办法处理了这些数据^[21]。

1.3 LUE 模型

本文利用新发展的 LUE 模型模拟 $NPP^{[14]}$,该模型主要的特点是用 MODIS 遥感数据驱动。NPP 估算公式如下:

$$NPP = PAR \times FPAR \times \epsilon - R_a \tag{1}$$

式中, ϵ 是光能转化率, R_a 是植被自养呼吸,包括维持性呼吸和生长性呼吸^[22-23]。 PAR 是植被光合有效辐射,在模型中用 MODIS 大气产品数据反演得到。 $FPAR$ 是植被吸收光合有效辐射比例,直接从 MODIS 陆面产品中获取。NPP 详细计算过程参照文献^[14]。

1.4 NPP 趋势分析

参照 Liu^[24] 等线性回归分析法计算植被 NPP 时空变化趋势,其计算公式为:

$$\theta_s = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{2}$$

式中, θ_s 为变化斜率; n 代表时间(年); NPP_i 表示第 i 年的 NPP; 当 $\theta_s > 0$ 或 $\theta_s < 0$ 表示 NPP 的增加或者减少。本文还利用显著性检验判断 NPP 变化趋势是否显著。

1.5 偏相关系数

偏相关系数的计算是在线性相关系数基础上得到的。本文研究长江源植被 NPP 对气象因子(温度和降水量)的响应。植被 NPP 与温度或降水量的线性相关系数计算公式如下^[24]:

$$R_{xy} = \frac{\sum [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{3}$$

式中, R_{xy} 是因子 x, y 的简单相关系数; X_i 代表第 i 年的 NPP 值; Y_i 代表第 i 年降水或温度值; \bar{X} 代表 NPP 平均值; \bar{Y} 代表气象因子平均值(温度或降水)。

偏相关系数的计算公式如下^[24]:

$$r_c^{ab} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r_{ac}^2)(1-r_{bc}^2)}} \tag{4}$$

其中,是将变量 c 固定后,变量 a 和 b 之间的偏相关系数,分别代表数值 a, b, c 三者相互之间的偏相关系数。这里的 a, b, c 代表 NPP, 降水和温度。偏相关系数计算用 Matlab 程序处理。本文研究 NPP 与降水或者温度之间年尺度的偏相关系数,简写为 NPP 与降水年偏相关/NPP 与温度年偏相关。

2 结果与分析

2.1 NPP 空间分布特征

图 2 描述了长江源流域 2001—2010 多年平均 NPP 空间分布特征。NPP 具有从东南部向西北部逐渐递减特征。对于整个流域而言,2001—2010 年植被多年平均 NPP 值为 $171.83 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,这 10 a 间,年平均值 $145.46 \sim 221.25 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。植被 NPP 年平均总量 20.3 TgC/a , 大约占三江源流域的 $38.9\%^{[16]}$ 。

对于 5 种植被类型,高寒针叶林 NPP 值最大 ($392.64 \text{ gC/m}^2/\text{a}$),高寒草原最小 ($70.41 \text{ gC/m}^2/\text{a}$)。高寒针叶林 NPP10 年平均值是 $392.64 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,年平均值 $308.86 \sim 507.27 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。灌丛 NPP10 年平均值是 $357.41 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,年平均值 $290.86 \sim 443.16 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。高寒草甸 NPP10 年平均值是 $177.88 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,年平均值 $140.89 \sim 231.25 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。高山垫状植被 NPP10 年平均值是 $81.99 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,年平均值 $69.09 \sim 108.56 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。高寒草原植被 NPP10 年平均值是 $70.41 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,年平均值 $52.95 \sim 106.57 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。5 种类型 NPP 年平均总量分别是高寒草原 1.97 TgC/a 、高山垫状植被 1.52 TgC/a 、高寒草甸 15.6 TgC/a 、灌丛 0.96 TgC/a 和高寒针叶林 0.17 TgC/a 。因此,长江源流域植被 NPP 主要是来源于草地(高寒草原和高寒草甸),占总 NPP 的 86.6% 。

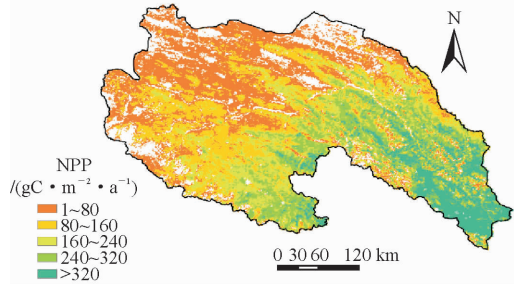


图 2 长江源流域 2001—2010 年平均 NPP 空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of mean annual NPP in the source region of Yangtze River

2.2 NPP 时间变化特征

长江源流域植被 2001—2010 年 NPP 呈现出并不显著的增加趋势,增长斜率为 $6.39 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,这趋势和已有的研究结果一致^[1]。2010 年植被 NPP 值最大,年平均值为 $221.25 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,2008 年植被 NPP 值最小,年平均值为 $144.71 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ (图 3)。5 种植被类型 NPP 在这 10 a 间均呈现出增加的趋势(图 3)。长江源流域东南部植被覆盖率高,广泛分布高寒草甸、高寒灌丛和高寒针叶林,由于水热条

件好,适合植被生长,NPP 值高。其中高寒针叶林在 10 a 间年平均增长 $15.98\text{ gC/m}^2/\text{a}$,灌丛在 10 a 间年平均增长 $12.61\text{ gC/m}^2/\text{a}$,高寒草甸在 10 a 间年平均增长 $3.13\text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。而长江源流域广大中西部地区,雨水较少,海拔较高,主要分布高寒草原和高山垫状植被,植被盖度低,NPP 值小。高寒草原在 10 a 间年平均增长 $2.69\text{ gC/m}^2/\text{a}$,高山垫状植被在 10 a 间年平均增长 $1.01\text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。此外,本文还进一步分析了长江源流域 NPP 年际变化趋势在空间上的显著性差异(图 4)。结果表明,长江源大部分数区域都是 NPP 增加的趋势,主要集中在广大中部和东南部地区,而减少的主要在西部地区,其中显著增加或减少($P<0.05$)和极端显著增加或减少($P<0.01$)的区域分别占整个研究区的 6.2% 和 1.1%,其余的变化不显著($P>0.05$),占整个研究区的 92.7%。

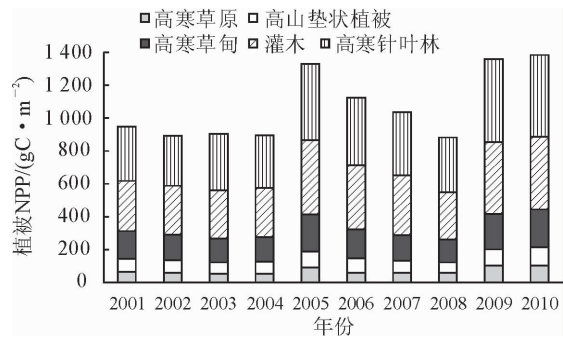


图 3 长江源流域不同植被类型 NPP 年际变化特征
Fig. 3 Dynamic change in NPP by different vegetation types in the source region of Yangtze River

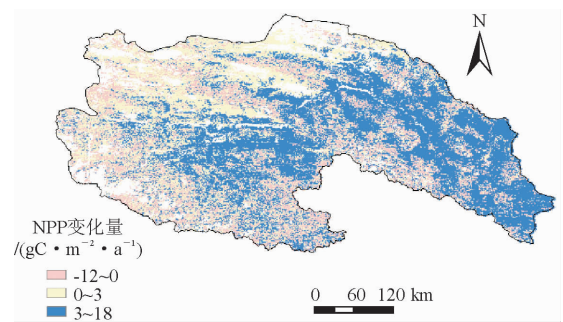


图 4 2001—2010 年长江源流域植被 NPP 变化特征
Fig. 4 Vegetation NPP change character in the source region of Yangtze River from 2001 to 2010

2.3 NPP 对降水和温度的响应

本文研究长江源流域植被 NPP 与年降水量和年均温的偏相关系数。分析结果认为,长江源流域植被 NPP 有 76.1% 的区域与降水量有正相关性,而 NPP 只有 87.8% 区域与温度有正相关性(偏相关系数 >0)。NPP 与温度的平均偏相关系数为 0.36,NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.21。简而言之,长江源流域植被 NPP 变化对温度的敏感性强于对降水的敏

感性,这一结论与已有的研究结果相符合^[1]。

表 1 给出了不同植被类型 NPP 与气候因子的偏相关系数。对于高寒草原来说,NPP 变化同时受到降水和温度变化的影响,其中 NPP 与温度的平均偏相关系数为 0.38,NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.42。高寒草原主要分布在中西部较干旱的地区,植被同时受到降水和温度的影响。高寒垫状植被和高寒草甸分布在中部和东南部较湿润地区,水分条件基本满足植被生长,因此植被生长主要受到温度因子的影响。高寒垫状植被与温度平均偏相关系数为 0.39,NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.19。高寒草甸与温度平均偏相关系数为 0.37,NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.22。高寒针叶林和灌丛主要分布在东南部地区,温度较高,胁迫植被生长主要跟降水因子有关。高寒针叶林与温度平均偏相关系数为 0.19,NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.47。灌丛与温度平均偏相关系数为 0.07,NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.18。

表 1 不同类型植被 NPP 与气候因子偏相关系数

Table 1 The coefficient of partial correlation between vegetation NPP and climate factors					
类型	时间	气候因子	最小	最大	平均值
高寒草原	年	降水	−0.26	0.89	0.42
		温度	−0.63	0.87	0.38
高山垫状植被	年	降水	−0.76	0.93	0.19
		温度	−0.45	0.92	0.39
高寒草甸	年	降水	−0.67	0.91	0.22
		温度	−0.75	0.94	0.37
灌丛	年	降水	−0.63	0.72	0.18
		温度	−0.81	0.61	0.07
高寒针叶林	年	降水	0.42	0.52	0.47
		温度	0.03	0.41	0.19

表 2 NPP 模拟结果验证

Table 2 Validation of NPP modeled results			
模型	年份	NPP 结果 /($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	文献
Miami	2004—2008	486.90	蔡雨恋 ^[25] 等,2013
Montreal	1960—2011	570.35	郭佩佩 ^[26] 等,2013
CASA	2001—2010	169.02	张颖 ^[27] 等,2014
CASA	2004—2008	168.68	蔡雨恋 ^[25] 等,2013
CASA	2010	146.66	沃笑 ^[16] 等,2014
CEVSA	1988—2004	143.17	王军邦 ^[28] 等,2009
GLOPEM	1988—2004	194.85	邵全琴 ^[7] 等,2010
LUE	2001—2010	171.83	本文

3 结论与讨论

基于 LUE 模型和 MODIS 遥感数据,模拟了长江源流域 2001—2010 年植被 NPP 时空变化规律。由于长江源流域海拔高,数据缺乏,利用遥感数据驱动模拟 NPP 弥补了数据缺乏带来的困难,为区域尺

度研究植被生产力提供了一个解决方案。

本研究将模型模拟结果与已有结果进行对比验证。由于研究区范围是主要是草地(高寒草甸+高寒草原),因此,主要比较植被 NPP 和草地植被 NPP 的模拟结果。表 2 列出了本文模拟 NPP 与已有相关长江源区域植被 NPP 模拟值的比较结果^[7,16,25-28]。总体上说,气候模型模拟的植被 NPP 值高于遥感光能利用率模拟的结果^[29-30],比如 Miami 和 Montreal 模型植被 NPP 结果高于 CASA, GLOPEM,CEVSA 和 LUE 模型。这主要是由于气候模型只考虑了植被生长与气候因子的线性关系,不像遥感光能利用率模型还考虑了植被生长所需光合作用和胁迫过程^[7,14,27],因此,得到的 NPP 结果更加反应植被实际生长情况。已有的 5 篇研究里关于长江源 NPP 模拟的平均值是 164.47 gC/m²/a,最大值是 194.85 gC/m²/a,最小值是 143.17 gC/m²/a^[7,16,25,27-28]。而本文的植被 NPP 模拟结果为 171.83 gC/m²/a,在已有的模拟结果波动范围之内(表 2)。此外,还进行草地 NPP 的模拟结果对比验证。本研究对长江源草地 NPP 反演均值为 155.62 gC/m²/a,结果与沃笑^[16]等(162.87 gC/m²/a)、周才平^[31]等(161.64 gC/m²/a)估算的草地 NPP 几乎相等,而高于朴世龙和方精云^[32](121.39 gC/m²/a)、陈卓奇^[33]等(135 gC/m²/a)、赵国帅^[34](102 gC/m²/a)和皱德富^[35](129.01 gC/m²/a)的研究结果。由于以上关于草地 NPP 模拟的结果也是基于遥感光能利用率模型,模型本身结构和数据有一定的差异,而本文草地 NPP 结果比有些研究略高一些,主要原因可能是模拟的时间段不一样,比如本文是基于 2000 年以后草地的研究,而有些研究是基于 2000 年以前^[32-33]。由于长江源草地在 2000 年以后,气候条件变化(降水增加,温度升高)和三江源工程开展都造成了草地恢复,植被生产力提高^[7,30]。因此,总体上说 2000 年以后的草地 NPP 高于 2000 年以前的值。综上所述,本模型估算的长江源流域植被和草地 NPP 值均在合理的范围之内,可将结果用于 NPP 时空特征分析。

长江源流域在 2001—2010 期间,总体上 NPP 年平均增加 6.39 gC/m²/a。空间上有很大差异性,大部分数区域都是 NPP 增加的趋势,主要集中在广大中部和东南部地区,而减少的主要在西部地区;其中显著增加或减少($P<0.05$)的区域分别占整个研究区的 7.3%,而 92.7%的区域变化不具备显著性。这和已有的研究结果一致^[1]。水热条件决定了植被的生长。西部区域植被有一定增加,主要因为近年来温度的上升而引起冰川和冻土消融,植被生长获

得了更多的水分条件,但增加幅度小于中部和东南部区域。植被生长增加明显的中部和东南部,处于植被对水热共同响应区。对于不同的植被类型,长江源区分布最广的是高寒草甸,在近年来水分条件满足的情况下,增温为植被生长提供热量,造成了高寒草甸增长趋势。而东南部的针叶林和灌丛植被 NPP 增加趋势比高寒草甸还要明显,这可能与 2005 年以来三江源自然保护区生态工程开展有关。

2001—2010 年,长江源区气温显著升高,降水量有所增加。不同植被类型的 NPP 对温度更加敏感,这是因为温度上升,更多的热量保证了植被的生长;温度上升导致了源区内冰川和冻土消融,同时为植被生长提供有利的水分条件。因此,长江源区植被 NPP 呈增加的趋势,气温是主要的控制因素之一。研究结果也认为 NPP 与温度的平均偏相关系数(0.36)高于降水的偏相关系数(0.21)。这反映了长江源区高寒植被生态系统对气候因子的响应特征,更加深入地了解这个地区的植被生长状况。然而,除了气候对植被生长有影响,人类活动也同时发挥着作用。因此,在今后的研究中,应该探讨人类活动对植被生态的作用,定量区分气候变化和人类活动贡献率,为研究高寒地区植被生长对全球变化的响应提供参考。

参考文献:

[1] 吴珊珊,姚治君,姜丽光,等. 基于 MODIS 的长江源植被 NPP 时空变化特征及其水文效应[J]. 自然资源学报,2016,31(1): 39-51.

[2] 程胜高,吴登定,陈德兴. 长江源生态环境问题与可持续发展对策[J]. 地球科学—中国地质大学学报,1999,24(4):424-426. CHENG S G, WU D D, CHEN D X. Eco-environmental problems in Yangtze river source region and corresponding solutions in sustainable development[J]. Earth Science, 1999, 24 (4):424-426. (in Chinese)

[3] 吴豪,虞孝感. 长江源自然保护区生态环境状况及功能区划分[J]. 长江流域资源与环境,2001,10(3):252-257.

[4] 蔡雨恋,郑有飞,王云龙,等. 利用改进的 CASA 模型分析三江源区净植被生产力[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版, 2013,5(1):34-42. CAI Y L, ZHENG Y F, WANG Y L, *et al.* Analysis of terrestrial net primary productivity by improved CASA model in Three-river headwaters region [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2013, 5(1): 34-42. (in Chinese)

[5] 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.

[6] 张颖,陈怀艳,李建龙. 三江源生态系统近 10 年净初级生产力估测[J]. 天津农业科学,2014,20(10):25-28.

[7] 邵全琴,赵志平,刘纪远,等. 近 30 年来三江源地区土地覆被与

宏观生态变化特征[J]. 地理研究, 2010, 29(8): 1440-1451.

[8] PRINCE S D, GOWARD S N. Global primary production: a remote sensing approach[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22: 815-835.

[9] KNORR W, HEIMANN M. Impact of drought stress and other factors on seasonal land biosphere CO₂ exchange studied through an atmospheric tracer transport model[J]. Tellus, 1995, 47B: 471-489.

[10] RUIMY A, DEDIEU G, SAUGIER B. TURC: a diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10: 269-286.

[11] XIAO X, HOLLINGER D, ABER J D, *et al.* Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen need leaef forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 519-534.

[12] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51: 74-88.

[13] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 气候变化对陕南汉江流域植被净初级生产力的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 51-57

JIANG C, WANG F, MU X M, *et al.* Effects of climate changes on net primary productivity(NPP) of vegetation in Han River basin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 51-57. (in Chinese)

[14] LI J, CUI Y P, LIU J Y, *et al.* Estimation and analysis of net primary productivity by integrating MODIS remote sensing data with a light use efficiency model[J]. Ecol. Model., 2013, 252: 3-10.

[15] 吴文浩, 李明阳, 卜子汇. 基于开放式数据库的江苏省植被净生产力遥感估测方法研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(5): 146-151

WU W H, LI M Y, BU Z H. Estimation of net primary productivity of vegetation in Jiangsu Province based on open datasets[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 146-151. (in Chinese)

[16] 沃笑, 吴良才, 张继平, 等. 基于 CASA 模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 45-50.

[17] 张小咏, 李佳, 杨艳昭, 等. 基于 SWAT 模型的长江源区径流模拟[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(5): 38-44.

ZHANG X Y, LI J, YANG Y Z, *et al.* Runoff simulation of the catchment of the head waters of the Yangtze River based on SWAT model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 38-44. (in Chinese)

[18] 李佳, 张小咏, 杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 119-124.

[19] HUTCHINSON M F. ANUSPLIN version 4. 2 user guide [D]. Australian National University, 2001.

[20] 侯学煜. 1 : 1 000 000 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[21] CHEN J, JONSSON P, TAMURA M. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the savitzky-golay filter[J]. Remote Sensing of Environ-

ment, 2004, 91: 332-344.

[22] RUNNING S W, COUGHLAN J C. A general model of forest ecosystem processes for regional application I. hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes[J]. Ecological Modelling, 1988, 42: 125-154.

[23] RYAN M G. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems[J]. Tree Physiology, 1991, 9: 255-266.

[24] LIU C Y, DONG X F, LIU Y Y. 2015. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China[J]. Catena, 125: 190-199.

[25] 蔡雨恋, 郑有飞, 王云龙, 等. 利用改进的 CASA 模型分析三江源区净植被生产力[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2013, 5(1): 34-42.

CAI Y L, ZHENG Y F, WANG Y L, *et al.* Analysis of terrestrial net primary productivity by improved CASA model in three-river headwaters region [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2013, 5(1): 34-42. (in Chinese)

[26] 郭佩佩, 杨东, 王慧, 等. 1960-2011 年三江源地区气候变化及其对气候生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2806-2814.

[27] 张颖, 陈怀艳, 李建龙. 三江源生态系统近 10 年净初级生产力估测[J]. 天津农业科学, 2014, 20(10): 25-28.

[28] 王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感-过程耦合模型的 1988-2004 年青海三江源区净初级生产力模拟[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 254-269.

WANG J B, LIU J Y, SHAO Q Q, *et al.* Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988-2004 based on glopem-cevsa model in the Three-river headwaters region of Qinghai Province, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(2): 254-269. (in Chinese)

[29] 李惠梅, 张安录. 三江源草地气候生产力对气候变化的响应[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2014(1): 124-130.

[30] 王翀. 三江源区高寒草地净初级生产力模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.

[31] 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.

ZHOU C P, OU Y H, WANG Q X, *et al.* Estimation of net primary productivity in Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(1): 74-79. (in Chinese)

[32] 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): 373-380.

[33] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(3): 402-410.

CHEN Z Q, SHAO Q Q, LIU J Y, *et al.* Analysis of net primary productivity of terrestrial vegetation on the Qinghai-Tibetan Plateau, based on MODIS remote sensing data[J]. Sci. China Earth Sci., 2012, 42(3): 402-410. (in Chinese)

[34] 赵国帅. 基于光能利用率模型的青海植被净初级生产力模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

[35] 邹德富. 基于 CASA 模型的青藏高原 NPP 时空分布动态研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.