

DOI: 10.5846/stxb201707151286

刘凤, 曾永年. 近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响分析. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Liu F, Zeng Y N. Spatial-temporal change in vegetation Net Primary Productivity and its response to climate and human activities in Qinghai Plateau in the past 16 years. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响分析

刘 凤, 曾永年*

中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

中南大学空间信息技术与可持续发展研究中心, 长沙 410083

摘要:采用 2000—2015 年 MOD13Q1—16 天合成的 250 m 分辨率 NDVI 时序数据, 基于 CASA 改进模型估算了青海高原植被 NPP, 分析了近 16 年来植被 NPP 时空变化的特征与规律及其对气候因素变化的响应, 并探讨不同区域生态保护工程建设的成效。研究表明: ①青海高原植被 NPP 多年平均值 $242.50 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 空间上呈东高西低, 南高北低, 由西北向东南逐渐递增分布趋势; ②2000—2015 年, 研究区年 NPP 分布在 53.24—96.56 TgC, 呈平稳增加, 年增长率 1.32 TgC/a ; ③气候的暖湿化是植被 NPP 增加的主要因素, 降水、气温的耦合作用是青海高原植被 NPP 年际波动的重要因素, 不同区域植被 NPP 受控因子存在差异; ④不同生态保护工程的实施, 对区域 NPP 时空格局及变化趋势存在不同程度的影响。其中, 三江源地区年 NPP 上升趋势最为明显, 环青海湖地区、东部地区次之, 柴达木地区是最缓慢的地区。

关键词:青海高原; 植被 NPP; 时空变化; 气候影响; 生态成效

Spatial-temporal change in vegetation Net Primary Productivity and its response to climate and human activities in Qinghai Plateau in the past 16 years

LIU Feng, ZENG Yongnian *

School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

Center for Geomatics and Regional Sustainable Development Research, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Based on MOD13Q1-250-m resolution-16-day synthesis NDVI data for the Qinghai Plateau from 2000 to 2015, by using the improved CASA model, we estimated the vegetation net primary productivity (NPP) of the Qinghai Plateau, analyzed the characteristics and regularities of NPP spatial-temporal variation, evaluated the correlation between NPP and meteorological factors, and explored the ecological effect of ecological protection project in different regions. The results indicate the following: ① The average annual NPP in the Qinghai Plateau is $242.50 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, which is high in the east and south and increases from northwest to southeast. ② During 2000—2015, the annual amount of NPP increased stably from 53.24 to 96.56 Tg C, with an annual growth rate of 1.32 Tg C/a . ③ The warm and humid climate is the main factor affecting the increase in vegetation NPP, and precipitation and temperature are significant factors in the inter-annual fluctuation of NPP in the Qinghai Plateau. Additionally, in different areas, the factors controlling NPP growth differed. ④ The implementation of different ecological protection projects has a varying influence on spatial-temporal patterns and inter-annual trends in regional NPP. Among them, the annual increasing trend in NPP in the Sanjiangyuan region was the most obvious, followed by the Qinghai Lake area, Eastern region, and Qaidam region.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171326); 国家自然科学基金项目(41201386)

收稿日期: 2017-07-15; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ynzeng@mail.csu.edu.cn

Key Words: Qinghai Plateau; vegetation Net Primary Productivity; spatial - temporal change; climate impact; ecological effect

植被净初级生产力(NPP, Net Primary Productivity)直接反映植物在自然环境条件下的生产能力,是理解全球变化对陆地生态系统影响及响应的关键参数,也是陆地生态系统碳循环研究的重要内容^[1-4]。因此,植被 NPP 的准确估算、时空分布与动态变化分析,NPP 与环境因子相关性的定量分析,对区域生态环境质量定量评价、生态环境治理、区域碳循环研究和自然资源合理开发利用均具有重要的理论与实践意义^[5-7]。

青海高原作为青藏高原的重要组成部分,生态环境脆弱,是气候及环境变化的敏感区域^[8]。近年来,受气候因素变化与人类活动的共同影响,青海高原生态环境退化问题突出,并已引起科学界及社会各界的广泛重视。因此,作为衡量生态系统功能与状况的定量指标——植被 NPP 的时空变化及其气候响应机制也成为研究热点。卫亚星等(2012)以实测数据为基础,估算并分析了 2006 年青海草地 NPP 空间分布与季相变化特征^[9];陈卓奇等(2012)基于 MODIS 数据分析了青藏高原植被 NPP,并探讨了气象因素对 NPP 的影响机制^[10];张懿铨等(2013、2015)分析了青藏高原高寒草地 NPP,并基于 NPP 数据和样区对比法对青藏高原自然保护区保护成效进行了分析^[11-12]。与此同时,为缓解青海高原生态环境进一步恶化的态势,近年来在青海高原的三江源区、青海湖流域、祁连山地开展了一系列生态环境保护与重建工程,为了科学全面的掌握生态保护与重建工程的成效,开展了许多有关植被 NPP 时空变化特征的研究。李英年等(2007、2008)采用野外气象站观测资料,分析长江源、黄河源区气候变化对植被生产力的影响^[13-14];张景华等(2008)基于草地资源调查及牧业气象站监测资料,分析青海祁连山地及环青海湖区 NPP 分布规律与变化特征^[15]。上述基于野外观测数据的 NPP 估算及分析研究,受观测站点数量、分布的限制,研究建立的 NPP 估算模型难以有效推广到较大的区域,研究结果也限于局部区域。为此,基于遥感数据与模型的区域 NPP 估算研究得到较多的应用。张懿铨等(2007)以 NOAA_8 km 分辨率数据为基础,分析了三江源地区植被指数的空间变化特征及地理背景^[16];王军邦等(2009)采用 GLOPEM-CEVSA 模型及 1 km 分辨率遥感数据,模拟 1988—2004 年青海三江源区 NPP 时空格局及其控制机制^[17];肖桐等(2009)利用 GLOPEM 模型模拟三江源地区 1988—2008 年 NPP 时空分布及特征^[18];邵全琴等(2013、2016)采用 GLOPEM 模型利用 Spot-NDVI 数据,估算三江源草地 NPP,评估了 2005—2009 年、1970—2012 年两个时段三江源区生态保护建设工程的生态成效^[19-20];Chen 等(2011)基于 MODIS 数据模拟青海湖流域植被 NPP,并分析植被碳储量^[21];DENG 等(2017)基于遥感数据、气象数据、社会经济数据分析了青海省植被 NPP 与畜牧生产之间的相互影响^[22];张颖等(2017)借助 CASA 模型和气候生产力模型,结合土地利用变化,定量分析了 2001—2012 年气候变化、土地利用和草地管理措施对三江源草地 NPP 变化的影响^[23]。上述研究为阐明青海高原植被生态系统 NPP 的时空分布特征、动态变化奠定了基础,并为 NPP 估算模型的选取、参数设置及验证等提供了参考。然而,这些研究多数集中在三江源区,并主要针对草地植被的研究,有关青海高原区域长时间序列、高分辨率 NPP 估算及时空演化研究尚显不足。因此,采用高时空分辨率遥感数据,估算青海高原长时间序列植被 NPP 的时空分异格局与变化规律,分析植被 NPP 与气候因素、人为因素的相关关系,对于全面系统地分析青海高原植被生态系统状况以及区域碳循环的研究具有重要的意义。

为此,本研究采用 2000—2015 年青海高原 MODIS13Q1—250 m 分辨率 NDVI 时间序列数据,结合相关气象、地形数据,利用 CASA 改进模型及 ArcGIS 空间分析方法,估算并分析了近 16 年来青海高原植被 NPP 时空分布规律、变化趋势及其对气候因素变化响应,探究重大生态保护工程对区域 NPP 的影响,以为青海高原植被生态系统生产力的评估、动态变化监测,以及重大生态保护工程的实施提供科学参考与决策依据。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

青海高原位居我国西部,地处东部季风区、西北干旱区和青藏高原三大地理区域的交汇处,地理位置介于

89°25′—103°04′E, 31°40′—39°19′N 之间。青海高原土地总面积 72.23 万 km², 约占青藏高原总面积的 30%, 境内地势西高东低, 南北高中间低, 平均海拔 3000 m 以上, 地形复杂, 地貌多样^[24]。属大陆性高原气候, 年降水量为 15—750 mm, 降水量时空分布不均, 从西北到东南渐增。年均温为 -5.1—9.0℃, 气温的垂直变化明显。主要植被类型有常绿针叶林、落叶阔叶林、高寒灌丛、高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠、温性草原等, 植被水平与垂直地带性分异显著。根据自然条件、资源禀赋、环境容量和经济社会发展基础及潜力, 将研究区划分为柴达木地区、环青海湖地区、东部地区和三江源地区四个区域^[25](图 1)。位于青海高原西北部的柴达木地区植被稀疏、种类单一; 环青海湖地区分布有草甸草地、高寒草甸、沼泽湿地等, 祁连山地区属青海高原森林资源聚集区; 三江源地区典型的植被类型为高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原; 东部地区位于青海高原的东部, 是主要的农业区, 主要的植被类型有常绿针叶林、落叶阔叶林、温性草原等。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 遥感数据及处理

归一化植被指数 (NDVI) 来自 NASA 官网 (<http://lpdaac.usgs.gov>), 遥感数据采用 MOD13Q1—16 天合成 NDVI 数据, 数据的空间分辨率为 250 m×250 m, 时间范围为 2000—2015 年, 每年共 23 期影像。整个研究区域由 5 帧 MOD13Q1 数据覆盖, 行列号分别是 h24v04、h24v05、h25v04、h25v05、h26v05。首先, 利用 MRT 软件, 将原始影像的正弦曲线投影转换为 Albers Equal Area Conic/WGS84 投影, 再拼接同期影像获得覆盖研究区的影像数据; 其次, 利用 ArcGIS 软件, 依据青海高原行政区界线完成影像的裁剪; 最后, 利用 ENVI 软件, 进行 MOD13Q1 数据最大值合成处理, 以进一步消除云、大气、太阳高度角等部分干扰, 并对 2000—2015 年逐月的 NDVI 序列数据进行了滤波处理, 剔除异常值, 获得 2000—2015 年逐月 NDVI 数据集。

1.2.2 气象及其他数据

气象数据来源于中国气象数据网 (<http://cdc.nmic.cn/>) 提供的 2000—2015 年青海高原及周围 59 个气象站点的月降水量、月平均气温观测数据, 以及 8 个太阳辐射站点的月太阳总辐射量。DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。利用 DEM 数据及各气象站点的经纬度信息、降水与气温数据, 借助 SPSS 及 ArcGIS 软件, 采用多元线性回归法, 空间插值获得 250 m 空间分辨率的气温与降水空间化栅格数据。

土地覆被数据来源于地球系统科学数据共享网 (<http://spacescience.data.ac.cn/>) 提供的 2005 年青海高原 1:25 万土地覆盖遥感调查与监测数据, 该数据集的精度为 80%—90%, 包括森林、草地、农田、建设用地、其他用地 5 个一级类及 20 个二级类。青海高原行政区划数据来源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

2 模型与方法

2.1 NPP 估算模型

基于 CASA 改进模型^[26-27], 依据青海高原的特点构建适用的模型参数, 估算并分析不同植被 NPP。CASA 模型通过植被吸收的光合有效辐射和光能利用率两个驱动因子估算植被 NPP, 其模型如式 1 所示:

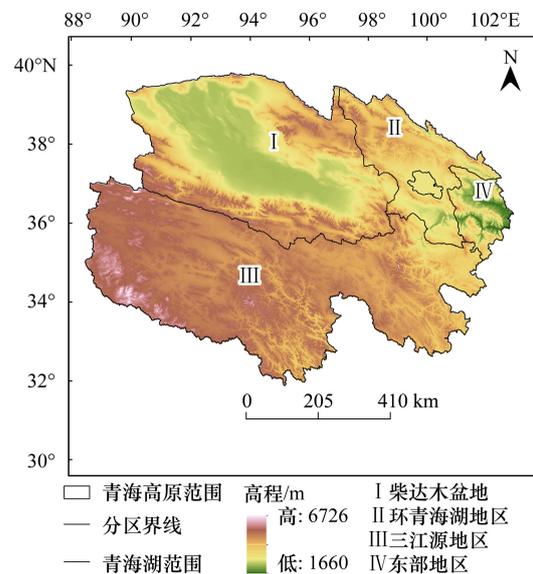


图 1 青海高原位置及区域分区图

Fig.1 Location and different zone partition in Qinghai Plateau

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

式中, $APAR(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\varepsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率 (gC/MJ)。

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中, $SOL(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月份的太阳总辐射量 (MJ/m^2); 0.5 表示植被光合作用利用的太阳有效辐射量占太阳总辐射的比例, $FPAR(x,t)$ 表示植被层对光合有效辐射 PAR 的吸收比例, 具体计算方法参考文献 [28]。

$$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon_1}(x,t) \times T_{\varepsilon_2}(x,t) \times W_{\varepsilon}(x,t) \times \varepsilon_{max} \quad (3)$$

式中, $T_{\varepsilon_1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon_2}(x,t)$ 表示高温或低温对光能利用率的胁迫系数, $W_{\varepsilon}(x,t)$ 为水分对光能利用率的胁迫程度, 计算方法参考文献 [29], ε_{max} 表示不同植被类型理想状态下的最大光能利用率, 本研究参考朱文泉估算中国陆地植被 NPP 及青海高原已有相关研究 [9,27-28], 确定研究区不同植被类型的最大光能利用率。

2.2 NPP 模拟精度评价

目前较为常用的 NPP 精度评价方法有两类: 一类是根据实测数据评价; 另一类是根据其他研究结果进行对比分析与评价。由于研究区范围广, 开展大范围的植被 NPP 验证数据的实测较为困难, 而且实测数据获取时间较难与模型模拟时间相匹配, 且二者由于气候因素变化及其他因素的影响存在一定程度的不可比性。基于以上考虑, 本研究利用研究时段内相关的实测数据及其他研究结果, 综合评估模拟结果的可靠性。

在分析研究区相关文献资料的基础上, 统计野外站点植被 NPP 实测值、地上净初级生产量、野外样地生物量实测数据。为利用地上生物量实测数据获得植被 NPP 值, 首先, 确定地上生物量与地下生物量的比率关系 (即根冠比, R/S), 本文选用的 R/S 为 5.8 [30]; 其次, 根据根冠比计算出相应植被的地下生物量, 并计算得到总生物量, 然后根据生物量与 NPP 的换算比率将生物量转换成碳单位, 本文选用 0.45 [30-31] 的比率将生物量转换成碳单位。NPP 估算精度分析中, 相对于 NPP 实测值中有站点位置信息的数据, 提取对应位置、时间的 NPP 模拟值; 对于仅有所在县级单位的实测数据, 提取对应年份、月份, 同一县级单元模拟结果平均值。最后, 利用 SPSS 软件分析模拟数据与实测数据的相关性, 并检验其显著性。同时, 整理统计其他模型模拟的 NPP 结果、提取与本研究对应时间、相同植被类型的 NPP 值进行对比分析与评价分析。

2.3 时空变化分析方法

2.3.1 NPP 年际变化率

采用一元线性回归法分析植被 NPP 的年际波动规律与动态变化 [32], 计算研究区逐像元多年回归趋势线斜率, 用于反映 NPP 年际变化率。计算公式如下:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (4)$$

式中, θ_{slope} 表示趋势斜率, n 表示估算年数, NPP_i 表示第 i 年的植被 NPP, 利用 NPP 值与时间序列的相关关系表示 NPP 年际变化的显著性, $\theta_{slope} > 0$ 表示增加, 反之减少。

2.3.2 NPP 与气候因素相关性

采用基于像元的空间分析法, 分析 NPP 与气候因素的相关性, 确定气候因素与 NPP 的相关系数 (式 (5)), 以及偏相关系数 (式 (6))。

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_p)(y_i - y_p)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_p)^2}} \quad (5)$$

式中, R_{xy} 表示 x, y 变量间的相关关系; x_i 为第 i 年的 NPP; y_i 表示第 i 年变量 y 的值; x_p 为多年 NPP 的平均

值; y_p 为变量 y 多年平均值; n 为样本数。

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中, r_{xy} , r_{yz} , r_{xz} 分别表示变量 x 与 y , y 与 z , 及 x 与 z 的相关系数, $r_{xy \cdot z}$ 指变量 z 固定后, 变量 x 与 y 之间的偏相关系数。

采用 T 检验法对各相关系数、偏相关系数进行显著性检验^[33], 显著性水平取 $\alpha = 0.05$ 。依据相关性系数将研究区划分为显著正相关($r > 0, P < 0.05$)、不显著正相关($r > 0, P \geq 0.05$)、显著负相关($r < 0, P < 0.05$) 和不显著负相关($r < 0, P \geq 0.05$) 不同的区域。

3 结果与分析

3.1 NPP 估算精度评价

根据研究区 2000—2015 年野外站点植被 NPP 实测值^[30, 34-36]、地上净初级生产量、地上生物量实测数据^[14, 37], 换算获得的观测站点的植被 NPP 值, 与本研究 NPP 估算值的相关性分析及显著性检验, 结果如图 2 所示。分析结果表明, 本文模拟结果与统计实测数据的相关系数为 0.86 ($P < 0.01$), $R^2 = 0.736$ ($n = 26$), 模拟值与实测值呈显著相关, 说明遥感估算结果的可靠性。为进一步验证本文模拟结果的可靠性, 将本文结果与其他模拟结果进行对比分析。分析结果表明, 青海高原范围内, 本文估算结果与王莉雯等^[34]采用光能利用率模型估算相接近, 草地 NPP 差 $17 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右; 本研究在三江源地区估算的植被 NPP 略高于祁威等^[38]基于 CASA 模型的模拟的同期结果, 相差值在 $16\text{—}20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间。总之, 本文估算结果与同期、同一区域的其他模拟结果比较接近。

3.2 青海高原植被 NPP 空间分布格局

2000—2015 年青海高原植被 NPP 多年平均值 $242.50 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, NPP 空间分布格局呈现东高西低, 南高北低, 由西北向东南逐渐递增趋势。NPP 多年平均值的高值区集中于青海高原的三江源区的东南部、环青海湖地区以及东部地区, 低及较低值分布在柴达木地区及三江源地区的西北部(图 3)。青海高原不同区域 NPP 多年平均值的空间分异特征如下:

I. 柴达木地区: 该区气候干旱少雨, 主要的植被类型为荒漠草地与低地草甸类草地, 周边有冰川、永久积雪, 以及大面积的裸地、裸岩, 区内土壤沙化、盐渍化严重, 植被覆盖度低。该区植被 NPP 多年平均值为 $89.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 是青海高原 NPP 低值分布区。区内 NPP 由西北向东南递增, 西北部分布着大面积的荒漠, NPP 偏低, 最高值仅 $20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 东部区域为农牧业区, NPP 多年平均值大于 $50 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 而柴达木盆地南部的荒漠草地与高寒草原区是本区 NPP 的高值区, NPP 多年平均值在 $50\text{—}200 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间。

II. 环青海湖地区: 水热组合条件相对较好, 草地、沼泽湿地、森林资源丰富。该区 NPP 多年平均值约 $269.34 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。其中, 祁连山地森林资源及草地资源丰富, NPP 多年平均值在 $45\text{—}500 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间, 空间上由西北向东南递增, 少数区域 NPP 高于 $500 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 环湖周边 NPP 多年平均值在 $20\text{—}700 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间, 呈从湖区向周边递减的趋势。总体上, 该区 NPP 空间差异性显著, 呈东高西低, 中部高边缘低的分布格局。

III. 三江源地区: 位于青藏高原腹地, 是我国面积最大的国家级自然保护区, 该区山脉绵延, 湖泊密布, 生物多样性丰富, 生态环境脆弱, 草地退化严重^[39]。植被 NPP 多年平均值为 $267.83 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 区内 NPP 呈西北向东南递增的趋势。其中, 黄河源区 NPP 多年平均值分布在 $300\text{—}400 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间, 少数区域大于 600

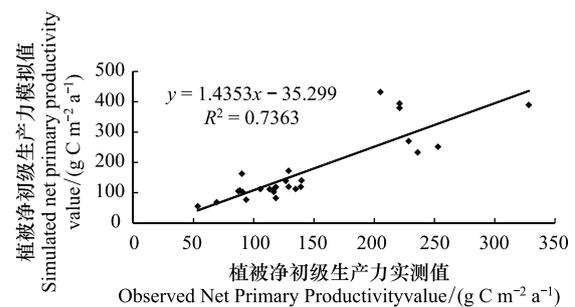


图 2 NPP 模拟值与实测值对比

Fig.2 Comparison of simulated values with measured values of vegetation NPP

$\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, NPP 多年平均值呈西北向东南递增态势;长江源区的西北部分布着大面积荒漠与雪山,兼有沼泽与河湖滩地零星分布,NPP 多年平均值总体较低,多分布在 $300 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以下,仅其东南部草地分布区达到 $300 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以上。

IV. 东部地区:东部地区地处黄土高原向青藏高原过渡的镶嵌地带,属暖凉温半干旱气候,境内水资源较为丰富,是青海高原自然条件最为优越的地区^[40],具备植被及农作物生长的水热与光照条件,区内近一半的耕地分布在河湟谷地。该区 NPP 多年平均值达 $346.89 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,是青海高原 NPP 多年平均值高值分布区。其中,北部大通河流域 NPP 多年平均值在 $300\text{—}600 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间,部分区域高于 $600 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$;中部湟水谷地海拔低、气候温和、环境适宜,植被 NPP 多年平均值在 $150\text{—}300 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间波动;南部黄河谷地 NPP 多年平均值大多在 $300 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以上,呈由北向南递增态势。

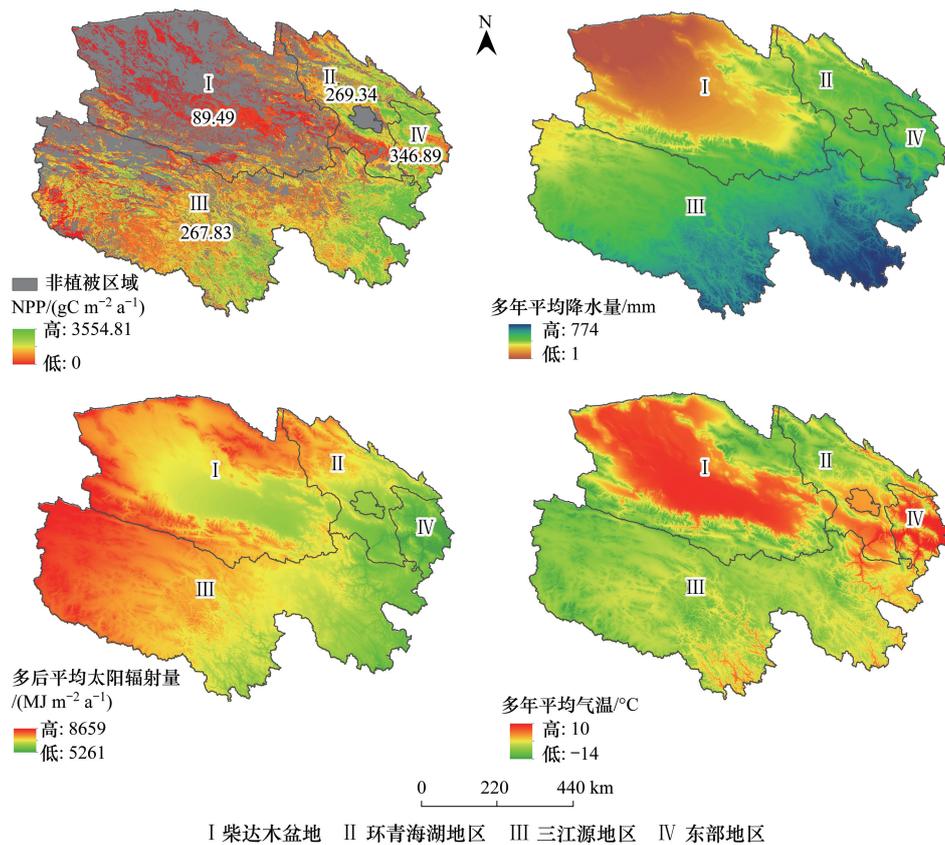


图3 青海高原多年平均 NPP、降水量、太阳总辐射量、气温空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of the annual average NPP, precipitation, solar radiation, and temperature in Qinghai Plateau

3.3 青海高原 NPP 年际变化特点

2000—2015 年,青海高原年 NPP 在 $53.24\text{—}96.56 \text{ TgC}$ 之间,平均值 79.39 TgC 。16 年间,年 NPP 呈平稳增加,年增长率 1.32 TgC/a ,并存在明显的阶段性变化特征(图 4)。其中,2000—2002 年,年 NPP 呈快速上升趋势,与该时段年降水量、年平均气温显著增加趋势一致,适宜的水热条件有利于该时段植被的生长发育与 NPP 增加;2003—2009 年,年 NPP 在波动中平稳增加,与区域水热条件年际差异显著相关;2010—2011 年,年 NPP 再次快速上升,并达到研究时段的最大值,其对应年份及前一年降水量显著增加,气温高于多年平均水平,适宜的水热条件适合植被生长及 NPP 的累积;2012—2013 年,年 NPP 呈下降态势,与该时段气温与降水错位相关;2014—2015 年,年 NPP 平稳上升,2014 年降水量充足、气温偏高,年 NPP 增加;2015 年虽降水量欠缺但气温适宜,同时受降水对植被生长的累积与滞后效应,年 NPP 仍有增加。

2000—2015 年,年 NPP 总体变化趋势分析表明,2000、2010、2011、2013 年年 NPP 变化较为明显,其中,

2000 年,全年平均 NDVI 指数偏低,年降水量、年均温异常偏低,年 NPP 偏低与欠佳的植被自然状况、低温少雨的气候因素导致的植被长势欠佳有关;2010、2011 年是青海高原生态保护工程实施的后期,植被得到恢复,覆盖度增加,生态工程的效应逐步得到体现,且年降水量与年均温均较高或处于多年平均水平之上,较好的植被生长本底辅之丰水、适温的气候因素,使得 2010、2011 年年 NPP 达到研究时段最大值;2013 年,年 NPP 主要受气候因素变化的影响,高温少雨的气候条件不利于植被 NPP 累积,导致该年年 NPP 稍低。

基于以上分析,2000—2015 年青海高原植被 NPP 的年际波动与区域水热组合条件的波动基本一致,水热条件是植被 NPP 变化的重要驱动因子。2010、2011、2015 年,植被 NPP 与当年及前一年降水、气温的变化分析表明,降水、气温对植被的生长存在累积与滞后效应。

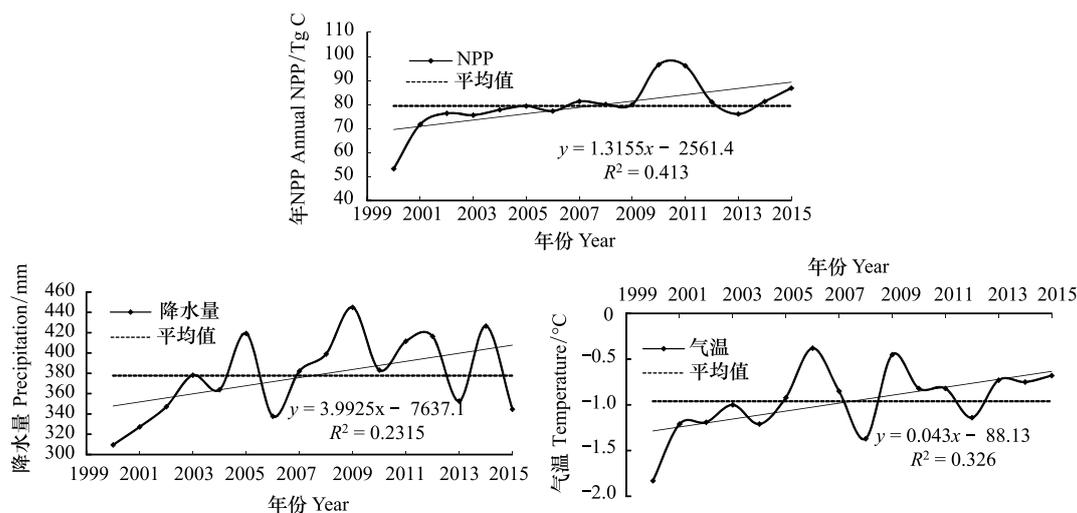


图 4 2000—2015 年青海高原年 NPP 总值、降水量、气温年际变化

Fig.4 Inter-annual variation of NPP, precipitation, temperature in Qinghai Plateau from 2000—2015

3.4 青海高原年 NPP 变化趋势分析

2000—2015 年,青海高原植被 NPP 年际增长率 $0.70 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年降水量与年均温变化率分别为: $(-1—22.1) \text{ mm/a}$ 和 $(0.01—0.086) \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ (图 5)。依据植被 NPP 变化程度将其划分为:明显变差 ($\theta_{\text{slope}} < -10$)、轻微变差 ($-10 \leq \theta_{\text{slope}} < -5$)、基本稳定 ($-5 \leq \theta_{\text{slope}} < 2$)、轻微好转 ($2 \leq \theta_{\text{slope}} < 5$)、明显好转 ($\theta_{\text{slope}} \geq 5$) 5 种情况,其所占的青海高原面积百分比分别为:0.38%、1.11%、57.28%、9.18%、6.96%。

NPP 明显好转、轻微好转区域主要分布于柴达木地区的东部与南部,环青海湖地区的祁连山地北部、青海湖区周边,三江源地区的东部,以及东部地区的河湟谷地,占青海高原总面积的 16.14%。这一变化趋势反映了近年来在这些地区开展的一系列生态保护与重建工程所取得的生态成效。同时,年 NPP 与年降水量、年均温变化的相关分析表明,植被 NPP 好转的区域,气温与降水逐年增加,气候向暖湿化的过渡,促使植被返青期提前、枯黄期推迟,从而利于 NPP 的积累与逐年增加;NPP 变差的区域零星地分布于环青海湖地区的祁连山地东南部、东部地区的北部,以及长江源区、黄河源区的少数区域,NPP 的退化可能与过度的人类活动影响有关,此外,也可能与生态保护工程效应的相对滞后有一定的关系^[20,41]。NPP 基本稳定的区域主要位于柴达木地区中部、环青海湖地区的祁连山地、青海湖区附近,以及青南高原的治多县、曲麻莱县一带的荒漠草地、草甸草地、高寒草甸分布区。综上所述,青海高原植被生态环境逐渐转好,局部区域仍处于退化状态。植被 NPP 的年际变化与水热条件的变化基本同步,降水量的增加、气候的变暖,有利于植被生长及植被 NPP 的增加。而局部地区由于自然与人类活动影响导致的草地退化,使部分区域 NPP 有下降的趋势。

3.5 青海高原 NPP 与气候因素的相关性

植被 NPP 与降水量、气温及太阳总辐射量的相关性分析表明,平均相关系数分别为 0.059、0.099 和 0.018

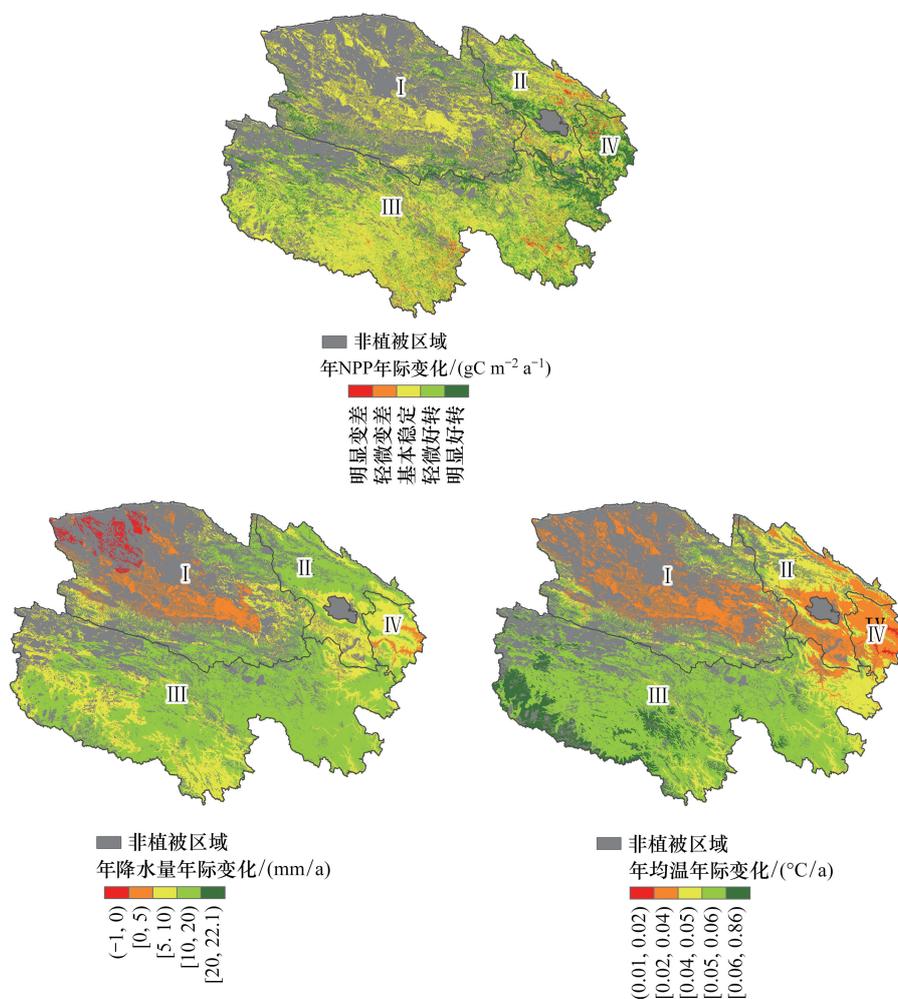


图 5 2000—2015 年青海高原年 NPP、降水量、气温时空变化格局

Fig.5 Temporal and spatial variation patterns of NPP, precipitation and temperature in Qinghai Plateau from 2000 to 2015

(图 6)。呈正相关的区域占研究区总面积的比例分别为 26.17%、30.45% 和 20.5%，其中，显著正相关的区域占研究区总面积比分别为 25.16%、29.77%、13.87%；呈负相关面积比分别为 9.49%、5.22% 和 15.17%，显著负相关面积为 8.53%、4.58% 和 13.87%，说明随着青海高原气候向暖湿化演化，适宜的水分与温度条件、加之充足的光照条件，是青海高原植被 NPP 增加的主要驱动因素。

植被 NPP 与降水量、气温偏相关性的进一步探讨表明(图 6)，当温度条件不变的情况下，降水量与 NPP 呈显著负相关的区域上升 6.51%，呈显著正相关的区域下降近 7%，说明一定温度范围内，降水量的增多可能会导致植被生长受限，这是由于连续的低温、阴雨天气减少了植被接受的日照时数，不利于植被光合作用，阻碍了植被 NPP 的积累；而在降水条件不变的情况下，气温与 NPP 的相关性存在一定的波动，但仍以显著正相关为主，说明降水量一定时，小范围的温度升高并不会对植被生长及 NPP 的积累有明显作用。

不同区域相关性分析结果表明(表 1)，在柴达木地区、环青海湖地区及三江源地区，温度是区域 NPP 积累的关键因素，而东部地区降水量是影响 NPP 积累的主要因素。

3.6 青海高原 NPP 时空变化与生态工程效应

根据青海高原各区域生态保护与重建工程实施类别、年份差异^[25]，将研究时段划分为 A、B 两个阶段(表 2)，以此分析各区域不同阶段的植被年 NPP 变化及生态工程效应。

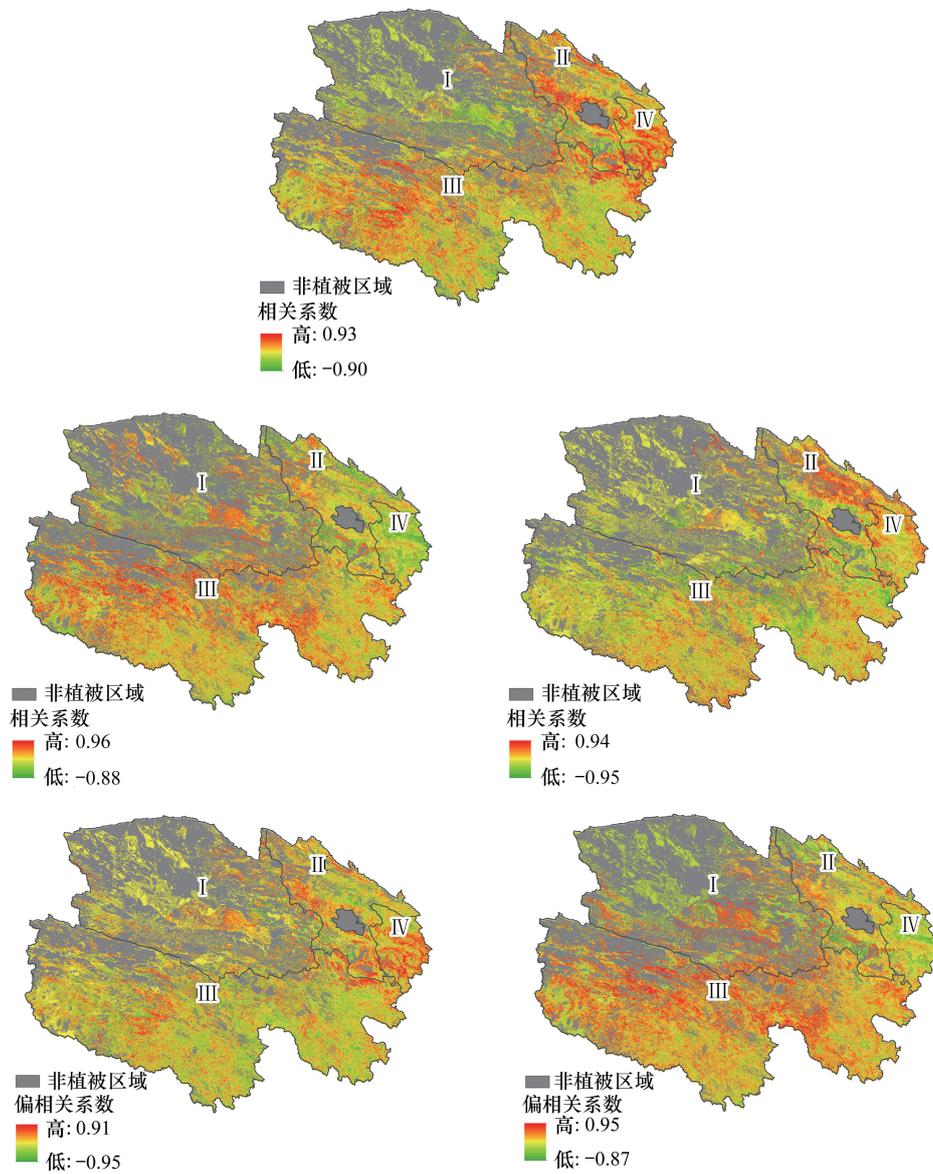


图 6 植被 NPP 与气候因素相关、偏相关关系

Fig.6 Correlation and partial correlation between vegetation NPP and climate factors

表 1 NPP 与气候因素相关性面积百分比

Table 1 Correlation percentage of NPP and climatic factors

区域 Different areas	相关关系 Correlation	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average value
青海高原 Qinghai Plateau	降水量	0.933	-0.904	0.059
	气温	0.960	-0.881	0.099
	太阳辐射量	0.941	-0.948	0.018
	降水量 ^偏	0.907	-0.947	0.008
	气温 ^偏	0.946	-0.873	0.096
I 区柴达木地区 District I Qaidam region	降水量	0.912	-0.904	0.012
	气温	0.934	-0.797	0.035
	太阳辐射量	0.883	-0.877	0.02
	降水量 ^偏	0.890	-0.900	0.009

续表

区域 Different areas	相关关系 Correlation	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average value
II 区环青海湖地区 District II Qinghai Lake area	气温 ^偏	0.932	-0.850	0.037
	降水量	0.902	-0.902	0.053
	气温	0.919	-0.833	0.052
	太阳辐射量	0.923	-0.840	0.032
	降水量 ^偏	0.906	-0.937	0.013
III 区三江源地区 District III Sanjiangyuan region	气温 ^偏	0.912	-0.843	0.043
	降水量	0.933	-0.879	0.056
	气温	0.960	-0.862	0.112
	太阳辐射量	0.941	-0.948	0.011
	降水量 ^偏	0.901	-0.947	-0.003
IV 区东部地区 District IV Eastern region	气温 ^偏	0.946	-0.860	0.109
	降水量	0.917	-0.806	0.141
	气温	0.853	-0.881	0.036
	太阳辐射量	0.903	-0.800	0.054
	降水量 ^偏	0.907	-0.855	0.073
	气温 ^偏	0.835	-0.873	0.035

降水量^偏、气温^偏分别代表 NPP 与气候因素的偏相关关系

表 2 青海高原各区域生态工程实施阶段划分

Table 2 Division of ecological engineering implementation stage of different regions in Qinghai Plateau

不同区域 Different regions	生态工程实施阶段/a Ecological engineering implementation phase	
	A 阶段 Stage A /a	B 阶段 Stage B /a
柴达木地区(I 区) Qaidam region(District I)	2000—2008	2009—2015
环青海湖地区(II 区) Qinghai Lake area(District II)	2000—2007	2008—2015
三江源地区(III 区) San jiang yuan region(District III)	2000—2004	2005—2015
东部地区(IV 区) Eastern region(District IV)	2000—2004	2005—2015

I.柴达木地区:2000—2015 年,该区年 NPP 在 4.91—8.79 TgC 之间(图 7),占青海高原总值的 7.72%—10.56%,属青海高原年 NPP 最低的区域。研究时段,年 NPP 呈增加趋势,年际增长率 0.09 TgC/a,总体生态环境趋于转好。生态工程实施 A 阶段(2000—2008 年)是“三北防护林工程”及巩固退耕还林工程的实施期,期间年 NPP 呈显著增加,年际增长率达 0.22 TgC/a,高于整个研究时段;生态工程实施 B 阶段(2009—2015 年)为省级生态保护项目及小型生态项目实施的阶段,相对于 A 阶段,年 NPP 呈递减趋势,年际变化率-0.11 TgC/a。

II.环青海湖地区:2000—2015 年,该区年 NPP 在 9.45—16.89 TgC 间,约占青海高原总值 15.09%—20.98%。16 年间,年 NPP 呈增加趋势,年际增加率 0.13 TgC/a,植被生态系统得到一定程度恢复与改善。生态工程实施 A 阶段(2000—2007 年)是该区国家级自然保护区建立与实施期,以及“三北防护林”、“天然林资源保护”工程实施阶段,大规模的生态环境建设促使植被生态系统的好转、植被年 NPP 呈显著增长,年际变化率达 0.31 TgC/a,高于 16 年平均增长水平;生态工程实施 B 阶段(2008—2015 年)是“青海湖流域生态环境保护与综合治理”规划的实施期,年际增长率仅 0.12 TgC/a。

III.三江源地区:该区作为青海高原生态保护工程实施与建设的重点区域,2000—2015 年,年 NPP 在 37.

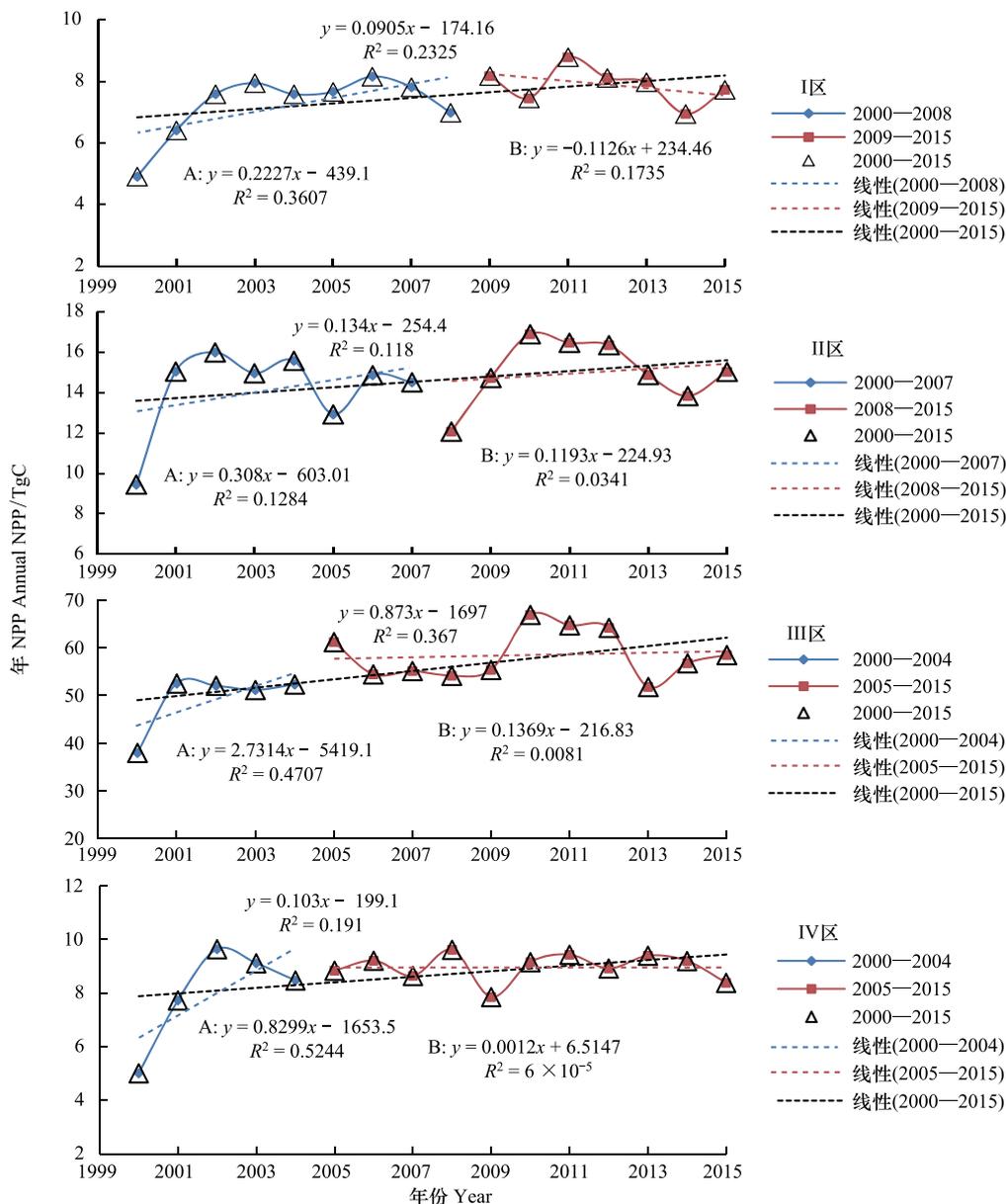


图 7 不同区域年 NPP 变化趋势

Fig.7 Changes of annual NPP in different regions

97—66.88 TgC 之间波动,占青海高原总值的 67.27%—79.16%,是青海高原年 NPP 最高的地理单元。16 年间,年 NPP 增长率 0.87 TgC/a,属青海高原增长率最高的区域,说明生态工程建设取得一定的成效,区域生态环境转好,植被生长状况得到改善。生态工程实施 A 阶段(2000—2004 年)为生态工程前期,这一时期年 NPP 呈快速增长态势,年际增长率 2.73 TgC/a,显著高于整个研究阶段;生态工程实施 B 阶段(2005—2015 年)实施了三江源生态保护工程一期,年 NPP 增加,年际增长率 0.14 TgC/a。其中,2005—2012 年,年 NPP 显著高于 2000—2004 年,并在 2010—2012 年度达到显著高于往年水平。16 年间,三江源地区年 NPP 的变化与一系列生态保护规划的实施以及前期保护工程实施的累积效应密切相关,“生态移民”、草原有害生物防控及减畜工作的实施^[42],使区内植被退化得到一定程度的控制、退化草地得以恢复,生态系统向良性方向发展。与此同时,气候的暖湿化使植被生长期延长。因此,在自然与人为有利因素的影响下,植被 NPP 得到有效积累与提高。

IV.东部地区:2000—2015 年,年 NPP 在 5.02—9.64 TgC 之间,占青海高原总值 9.42%—12.63%。16 年

间,年 NPP 年际波动不大,呈平稳增加态势,年际增长率 0.10 TgC/a ,表明生态工程以及区域水热组合条件的改善,有利于植被 NPP 的累积。生态工程实施 A 阶段(2000—2004 年)为大规模退耕还林工程实施的重要时段,年 NPP 年际增长率达 0.83 TgC/a ,生态保护工程的成效显著;生态工程实施 B 阶段(2005—2015 年),年 NPP 基本保持稳定态势,增长率为 0.001 TgC/a 。总之,“三北防护林工程”、“天然林资源保护工程”、“巩固退耕还林成果专项工程”、“青海三江源自然保护区生态保护和建设”等一系列生态保护工程的实施,有效改善了青海高原生态环境,但受气象因素的影响,年 NPP 年际波动较大,且受生态保护工程实施的规模与力度的影响,不同区域年 NPP 分布及年际变化趋势差异显著。三江源地区年 NPP 上升趋势最为明显,环青海湖地区、东部地区次之,柴达木地区是青海高原年 NPP 增长最慢的区域。

4 结论

(1)2000—2015 年,青海高原植被 NPP 多年平均值 $242.50 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,呈东高西低,南高北低,由西北向东南逐渐递增分布趋势。

(2)2000—2015 年,青海高原年 NPP 分布在 $53.24—96.56 \text{ TgC}$ 。年 NPP 呈平稳增加,年际增长率 1.32 TgC/a ,年际变化特征显著。

(3)2000—2015 年,青海高原植被 NPP 年际增长率 $0.70 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,植被生态环境逐步好转,局部区域仍处于退化状态。年 NPP 呈明显变差、轻微变差、基本稳定、轻微好转、明显好转,所占的青海高原总土地面积比分别为:0.38%、1.11%、57.28%、9.18%、6.96%。

(4)近年来,气候的暖湿化有利于植被生长与 NPP 增加,降水、气温的耦合作用是青海高原植被 NPP 年际波动的重要因子。气象因素对不同区域植被 NPP 影响存在一定的差异,温度是影响柴达木地区、环青海湖地区及三江源地区植被 NPP 的关键因素,而降水是影响东部地区植被 NPP 的关键因素。

(5)生态保护工程的实施,对不同区域 NPP 空间格局、年变化趋势存在不同程度的影响。研究期间,三江源地区年 NPP 年际上升趋势最为明显,环青海湖地区、东部地区次之,柴达木地区是青海高原年 NPP 增长最慢的区域。

本研究仅对植被 NPP 对气候因素变化、生态保护工程实施的效应做了分析,而 NPP 的变化是自然与人为因素综合作用的结果,是一个相对复杂的植物生理过程。因此,在后续的研究中,将进一步详细分析植被 NPP 与气候、人为因素之间的相关关系,以便更加准确探究 NPP 时空变化的成因机制。

参考文献(References):

- [1] 刘玉安,黄波,易成功,程涛,余健,曲乐安. 基于地形校正的植被净初级生产力遥感模拟及分析. 农业工程学报, 2013, 29(13): 130-141.
- [2] 陈利军,刘高焕,励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测. 遥感学报, 2002, 6(2): 129-135.
- [3] Liu C Y, Dong X F, Liu Y Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China. CATENA, 2015, 125: 190-199.
- [4] 谢宝妮,秦占飞,王洋,常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. 农业工程学报, 2014, 30(11): 244-253.
- [5] 潘竞虎,黄克军,李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. 生态学报, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [6] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [7] Wang L C, Gong W, Ma Y Y, Zhang M. Modeling regional vegetation NPP variations and their relationships with climatic parameters in Wuhan, China. Earth Interactions, 2013, 17(4): 1-20.
- [8] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,张德铤. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [9] 卫亚星,王莉雯,石迎春,李路子. 青海省草地资源净初级生产力遥感监测. 地理科学, 2012, 32(5): 621-627.
- [10] 陈卓奇,邵全琴,刘纪远,王军邦. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究. 中国科学:地球科学, 2012, 42(3): 402-410.
- [11] 张德铤,祁威,周才平,丁明军,刘林山,高俊刚,摆万奇,王兆锋,郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报,

- 2013, 68(9): 1197-1211.
- [12] 张懿铨, 胡志俊, 祁威, 吴雪, 摆万奇, 李兰晖, 丁明军, 刘林山, 王兆锋, 郑度. 基于 NPP 数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析. 地理学报, 2015, 70(7): 1027-1040.
- [13] 李英年, 赵新全, 汪诗平, 周华坤. 黄河源区气候温暖化及其对植被生产力影响评价. 中国农业气象, 2007, 28(4): 374-377.
- [14] 李英年, 赵新全, 周华坤, 汪诗平. 长江黄河源区气候变化及植被生产力特征. 山地学报, 2008, 26(6): 678-683.
- [15] 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. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 97-102.
- [16] 张懿铨, 丁明军, 张玮, 刘林山, 王兆锋, 阎建忠, 摆万奇, 郑度. 三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景. 地理研究, 2007, 26(3): 500-507, 639-639.
- [17] 王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 刘荣高, 樊江文, 陈卓奇. 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. 植物生态学报, 2009, 33(2): 254-269.
- [18] 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. 地球信息科学学报, 2009, 11(5): 557-565.
- [19] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 樊江文, 徐新良, 王军邦. 2005—2009 年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. 地理研究, 2013, 32(9): 1645-1656.
- [20] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. 地理学报, 2016, 71(1): 3-20.
- [21] Chen K L, Han Y L, Cao S K, Ma J, Cao G C, Lu H. The study of vegetation carbon storage in Qinghai lake valley based on remote sensing and CASA model. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1568-1574.
- [22] Deng X Z, Gibson J, Wang P. Quantitative measurements of the interaction between net primary productivity and livestock production in Qinghai Province based on data fusion technique. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 758-766.
- [23] 张颖, 章超斌, 王钊齐, 杨悦, 张艳珍, 李建龙, 安如. 气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究. 草业学报, 2017, 26(5): 1-14.
- [24] 国家环境保护总局, 国家测绘局. 中国西部地区生态环境现状遥感调查图集. 北京: 科学出版社, 2002.
- [25] 王一鸣, 曹文虎, 王青云. 青海省区域协调发展规划研究. 西宁: 青海人民出版社, 2009.
- [26] 陈晓玲, 曾永年. 亚热带山地丘陵区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例. 地理学报, 2016, 71(1): 35-48.
- [27] 朱文泉, 陈云浩, 潘耀忠, 李京. 基于 GIS 和 RS 的中国植被光利用率估算. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(8): 694-698, 714-714.
- [28] 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, 2005.
- [29] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [30] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 张志军, 丁玲玲, 张涛, 许丽丽. 三江源植被净初级生产力估算研究进展. 地理学报, 2016, 71(9): 1596-1612.
- [31] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [32] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [33] 吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 王蕊, 刘兆飞. 基于 MODIS 的长江源植被 NPP 时空变化特征及其水文效应. 自然资源学报, 2016, 31(1): 39-51.
- [34] 王莉雯, 卫亚星. 青海省植被净初级生产力的模拟研究. 第四纪研究, 2011, 31(1): 180-188.
- [35] 范月君. 围栏与放牧对三江源区高山嵩草草甸植物形态、群落特征及碳平衡的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [36] Luo T X, Pan Y D, Ouyang H, Shi P L, Luo J, Yu Z L, Lu Q. Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau. Global Ecology and Biogeography, 2004, 13(4): 345-358.
- [37] 牛志春, 倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型. 地理学报, 2003, 58(5): 695-702.
- [38] 祁威, 摆万奇, 张懿铨, 吴雪, 李兰晖, 丁明军, 周才平. 生态工程实施对美塘和三江源国家级自然保护区植被净初级生产力的影响. 生物多样性, 2016, 24(2): 127-135.
- [39] 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. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376.
- [40] 曾永年, 靳文凭, 王慧敏, 张鸿辉. 青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评价. 农业工程学报, 2014, 30(4): 185-194.
- [41] 张懿铨, 刘林山, 摆万奇, 沈振西, 阎建忠, 丁明军, 李双成, 郑度. 黄河源地区草地退化空间特征. 地理学报, 2006, 61(1): 3-14.
- [42] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 刘璐璐. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 35-44.