

DOI: 10.5846/stxb202011042819

栗忠飞, 王小莲, 徐钰涛, 文林琴, 黄丽春. 1996—2015 年滇西北香格里拉植被净初级生产力变化. 生态学报, 2022, 42(1): 266-276.

Li Z F, Wang X L, Xu Y T, Wen L Q, Huang L C. Changes of Net Primary Productivity of vegetation from 1996 to 2015 in Shangri-La region, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 266-276.

1996—2015 年滇西北香格里拉植被净初级生产力变化

栗忠飞^{1,*}, 王小莲¹, 徐钰涛¹, 文林琴¹, 黄丽春²

¹ 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224

² 丽江市林业与草原局, 丽江 674100

摘要:地处青藏高原东南缘的滇西北香格里拉,其植被 NPP 的时空格局变化,对于深入了解青藏高原区域植被对气候变化的响应具有重要的科学意义。基于地面气象数据和 MODIS-NDVI 等遥感数据,运用改进的 CASA 模型,估算了 1996—2015 年香格里拉区域不同植被类型 NPP,分析探讨了区域植被 NPP 的演变特征及其对气候变化的响应规律。研究显示:1) 1995—2015 年间,香格里拉区域 6—8 月平均气温总体呈上升趋势,增速为 0.037℃/a;6—8 月总降水量为 373.1 mm,呈微弱下降趋势;20 年间辐射量基本维持波动稳定状态;2) 1996—2015 年,香格里拉区域 6—8 月最大月植被 NPP 平均值为 176.9 gC/m²,不同植被类型的变化范围为 128.9—286.9 gC/m²;空间格局上,表现为“从西北、东南及金沙江沿岸向中部递减”的特征;3) 香格里拉区域植被 NPP 显著地受到气温变化的调控($P < 0.05$),20 年间随着气温的持续升高,区域 NPP 总体呈增加趋势;4) 区域植被 NPP 未表现出受降水变化的显著影响($P > 0.05$),水分条件对区域植被 NPP 未形成限制性的影响作用。区域内植被 NPP 在 2005 年前后的变化特征,一定程度上也表明了人类活动干扰及生态保护修复等政策措施的影响。

关键词:改进的 CASA 模型;NPP;气候变化;香格里拉

Changes of Net Primary Productivity of vegetation from 1996 to 2015 in Shangri-La region, China

LI Zhongfei^{1,*}, WANG Xiaolian¹, XU Yutao¹, WEN Linqin¹, HUANG Lichun²

¹ College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

² Lijiang Forestry and Grassland Bureau, Lijiang 674100, China

Abstract: Studying on the spatial and temporal variation pattern of net primary productivity (NPP) in Shangri-La region in northwest Yunnan Province, which lies on the edge of southeast Qinghai-Tibet Plateau, is of scientific significance for exploring the response of vegetation to climate change. In this study, the NPPs of different vegetation types were estimated through using the improved CASA model based on surface meteorological data and remote sensing data including MODIS-NDVI and Landsat 5 TM image in Shangri-La region from 1996 to 2015. The spatial and temporal patterns of the NPP were analyzed and the responses of the NPP to major climate factors were revealed based on correlation analysis method. The results showed that: 1) from 1996 to 2015, the annually average temperature from June to August in Shangri-La area indicated an overall trend of increase, with an increase rate of 0.037 °C/a; the annually average precipitation of June-August was 373.1 mm, showing a slight downward trend; the annually total solar radiation basically maintained the fluctuation stable state during the period of 20 years; 2) From 1996 to 2015, the annually average NPP of vegetation in the Shangri-La area in June-August was 176.9 gC/m² and the variation range of different vegetation types was from 128.9—286.9 gC/m². Among them, the NPP of broad-leaved forest was significantly higher than that of other vegetation types,

基金项目:国家自然科学基金(31360122);国家重点研发计划(2016YFC0500205)

收稿日期:2020-01-10; 网络出版日期:2021-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhongfei2016@163.com

followed by cultivated land, grassland, shrub, and the NPP of coniferous forest was the lowest. The maximum monthly NPP of each vegetation type increased from 171.6 gC/m² to 182.3 gC/m² from the first 10 years to the second 10 years, increasing by 6.2%. In addition, the pattern of spatial distribution presented a trend of decrease from the northwest and southeast to middle of the zone; 3) The NPP of vegetation in Shangri-La region was significantly affected by annual temperature change ($P < 0.05$), and presented an increasing trend generally with the continuous rise of temperature over 20 years; 4) The NPP of vegetation in this region was not significantly affected by precipitation change ($P > 0.05$) which showed a nonrestrictive effect of water conditions to the NPP of vegetation. During the period from 1996 to 2005, the spatial distribution of NPP in Shangri-La was generally declining, and was obviously increasing during the period from 2005 to 2015. This change trend of NPP in the zone before and after 2005 also presented to some extent the influence of human activity disturbance and policy measures such as ecological protection and restoration on the NPP of regional vegetation.

Key Words: improved CASA model; net primary productivity(NPP); climate change; Shangri-La

陆地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是植物群落在其所处环境条件下生产能力的直接反应,是判定陆地生态系统碳源/汇特征的重要依据^[1-4]。气候是全球植被格局最重要的决定因素之一,对植被类型的分布、结构和生态功能具有重要影响^[5-7]。通过估算植被 NPP 可以直观反映出陆地生态系统对气候变化的响应,及其多尺度的相互作用过程^[8-10],相关研究对进一步理解气候变化对陆地植被及生态系统碳平衡的影响、以及评价生态系统服务功能质量或恢复保护状况等均具有重要作用^[11-12]。

NPP 的估算方法包括站点观测法、实验法和模型估算等^[13-15]。地面站点观测或实验法的估算结果较贴近实测值,但无法反映较大尺度的 NPP 及其动态变化,而模型的运用能更好地解决站点观测法的不足^[16]。国际上, Lieth 首次开展了利用模型对全球植被 NPP 进行估算的研究^[17]。在模型估算中, CASA 模型是 NPP 模拟研究中具代表性的一类模型^[18-20],被广泛应用于全球及区域 NPP 研究中^[14, 21-24]。CASA 模型利用 3S 技术和遥感数据与近地面的气候数据,能够反演出不同尺度植被 NPP 及其动态变化^[2, 10, 20, 25-26]。但是,因不同植被受水分、温度等因素的影响, CASA 模型中,不同植被类型的最大光能利用率均定义为 0.389 gC/MJ,对 NPP 的估算会出现较大误差^[27]。

国内学者朱文泉等人,将模型引入植被覆盖分类参数,基于中国植被 NPP 的实测数据,确定了不同植被覆盖类型的最大光能利用率,实现了 CASA 模型相关参数的简化与本地化,在相关研究中取得了良好的模拟效果^[28-30]。当前,这一改进的 CASA 模型已经被广泛应用于国内外陆地植被 NPP 的模拟研究中^[21, 29, 31-32]。

滇西北香格里拉区域,地处青藏高原东南缘及滇西北“三江并流区”,区域内植被覆盖率高,其 NPP 对气候变化的响应,对于揭示气候变化下青藏高原的响应具有重要科学意义。当前,有关该区域内植被 NPP 时空格局变化的研究仍然非常稀缺^[33-35],个别相关研究也缺少对该区域 NPP 时序变化特征,以及其对温度、降水等气候变化响应规律的分析。

由于植被覆盖水平、气候条件等的差异,植被 NPP 与 NDVI 之间的统计关系在生长季内不同时期存在差异,一般在 6—8 月份表现最优^[36],能够代表年度内最大 NPP 月份。气候变化下森林生态系统敏感的响应能力有可能导致生产力下降, NPP 时空格局发生改变^[37-38]。青藏高原东南缘香格里拉区域内分布有大面积的针叶林,是我国高山植被分布的典型区域。本研究运用改进的 CASA 模型,基于香格里拉区域的基础地理数据、近地面气象数据和 MODIS-NDVI 数据^[39-42],对区域内 1996—2015 年间,逐年 6—8 月 NPP 时序变化进行模拟估算,并分析其时空变化特征。研究旨在揭示香格里拉县近 20 年来区域植被 NPP 在温度、降水格局变换下的时空动态规律,为促进滇西北地区的植被保护与建设提供科学依据。

1 研究区概况

云南省香格里拉(99°23′—100°31′E, 26°52′—28°45′N)地处青藏高原东南缘、横断山脉腹地,是中国地势

三大阶梯中第一、二阶梯的过渡带,具有高海拔、低纬度的地理特征,区域内地形走势为西北高、东南低,境内平均海拔 3459 m,地貌类型主要为高原山地、盆地、河谷等。

区域内气候类型属于温带、寒温带季风气候,河谷区属北亚热带季风气候,年平均气温 6.3 °C,年均降雨量 651.1 mm,该地区终年太阳辐射强烈。区域内植被类型丰富,尤以针叶林、阔叶林、高山灌丛、高山草甸为主,并呈现典型的垂直带谱特征,其中针叶林所占面积最大^[34]。区域内土壤类型主要有棕壤、暗棕壤、草甸土等。

2 数据获取及其研究方法

2.1 遥感数据及处理

遥感数据采用 NASA 对地观测系统数据共享平台 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>) 提供的 2000—2015 逐年 6—8 月 MODIS 1B 数据,空间分辨率为 250 m、时间分辨率为 16 d 的 MODIS 植被指数产品 MOD13Q1,经最大值合成法(MVC)得到逐年 6—8 月 NDVI 数据^[43]。

1996—2000 年的 NDVI 数据采用地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 Landsat 5 TM 影像,经辐射定标、大气校正、融合裁剪等预处理后,执行波段运算与叠加,并经最大值合成法(MVC)处理,获得 1996—2000 逐年 6—8 月 NDVI 数据。然后,将前后 NDVI 数据重采样统一分辨率后逐像元对比,在两种数据源之间按一元线性回归进行序列同化,实现 NDVI 数据序列的插补展延^[44],最终获得全部 1996—2015 年逐年 6—8 月 NDVI 时间序列栅格数据。

植被类型数据采用地理空间数据云提供(<http://www.gscloud.cn/>)的 Landsat TM 影像数据。首先,进行数据预处理得到研究区域遥感影像;其次,采用监督分类中的支持向量机方法,结合目视解译以及谷歌地图等辅助参考数据作为选取样本依据,得到 30 m 空间分辨率的研究区土地利用分类图,经过影像解译精度评估,Kappa 系数在 85%以上,解译效果良好;最后,经重采样后将其转换为与以上 NDVI 数据相匹配的栅格数据。

2.2 气象数据及处理

气象数据采用中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>)提供的包括中甸、德钦、维西等香格里拉研究区域及周边 14 个气象站点 20 年间 6—8 月日平均温度、日降雨量、日照时数及太阳总辐射量等数据。首先,进行精度验证,去除异常值;其次,结合各站点的经纬度信息,基于气象插值软件 ANUSPLIN 4.3^[45],运用反距离权重法(IDW)对气象数据进行空间插值,得到温度、降水量及总辐射量序列数据,最后通过掩膜研究区,裁剪得到 1996—2015 年空间分辨率为 250 m 的气象栅格数据。

2.3 研究方法

2.3.1 模型选取

本文采用朱文泉改进的 CASA 模型估算 NPP,NPP 由植物光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ε)两个因子来表示,估算公式及其意义详见文献^[22,30,46]。

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

式中,APAR(x,t)表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射, MJ/m²; $\varepsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率, gC/MJ, NPP(x,t) 是像元 x 在 t 月的净初级生产力。

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

式中,SOL(x,t)表示 t 月在像元 x 上的太阳总辐射量(MJ/m²), FPAR(x,t) 植被层对入射的光合有效辐射吸收的比例,常数 0.5 表示植被利用的光合有效辐射(波长为 0.4—0.7 μm)占太阳总辐射的比例。在一定范围内,FPAR 与 NDVI 存在线性关系,所以,可根据 NDVI 得到对应的 FPAR^[2]。

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

式中, $T_{\varepsilon_1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon_2}(x,t)$ 表示低温和高温对光能利用率(NPP 累积)的胁迫作用; $W_{\varepsilon}(x,t)$ 为水分胁迫影响系数,反映水分条件的影响; ε_{\max} 是植被在理想条件下的最大光能利用率(gC/MJ)。

NPP 的大小由温度、降水量影响光能转化率的下调因子 δ 来决定^[30], 其中 δ 因子 ($\delta = T_{e1} \times T_{e2} \times W_e$) 表征植被净生产力受气候因素影响的大小。

FPAR 采用 MOD13Q1 产品中 NDVI 数据反演得出。公式(1)和(3)中, ϵ 表示光能转化率, 反映植被把所吸收的光合有效辐射转化为碳的比率, 其主要与温度和水分有关。公式(3)中, T_{e1} 和 T_{e2} 表示温度对光能转化率的影响; W_e 是水分胁迫系数; ϵ_{\max} 是理想条件下的最大光能转化率, 其值通常介于 0.09—2.16 gC/MJ 之间。最大光能转化率随着植被类型的不同而发生变化, 朱文泉等^[28,30] 根据不同植被类型调整的最大光能利用率参数, 适合中国植被状况, 其参数适用全国不同区域研究^[40—42]。本文中选取各植被类型的最大光能转化率参数见表 1。

表 1 不同植被类型的最大光能利用率 ϵ_{\max}

Table 1 Maximum light utilization rate of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	ϵ_{\max} 值/(gC/MJ) ϵ_{\max} value	植被类型 Vegetation type	ϵ_{\max} 值/(gC/MJ) ϵ_{\max} value
针叶林 Coniferous forest	0.389	草地 Grassland	0.542
阔叶林 Broad-leaved forest	0.692	建设用地 Construction land	0.542
灌木林 Shrubwood	0.429	水域 Water area	0.542
耕地 Cultivated land	0.542		

2.3.2 NPP 年际变化趋势分析

采用一元线性回归法, 运用改进的 CASA 模型^[26,28,47], 计算得到香格里拉 1996—2015 年间最大月 6—8 月不同植被类型的 NPP, 分析 1996—2015 年研究区逐年最大月 NPP 的变化规律, 以及与温度、降水等气候因子的相关性规律。

3 结果

3.1 香格里拉区域 1996—2015 年间气候因子变化

图 1 显示了 1996—2015 年香格里拉 6—8 月期间月平均温度、总降水量及总辐射量变化。月均温在 13.2—14.5℃ 之间波动, 平均为 13.9℃, 20 年来气温总体呈升高趋势, 上升斜率为 0.037℃/a, 在横向上呈正态分布, 且峰值向右偏移。2009、2013 年月均温最高, 均达到了 14.5℃ (图 1)。

6—8 月总降水量范围在 262.2—512.8 mm 之间, 多年均值为 373.1 mm, 最大绝对降水距平达到 139.8 mm。20 多年间 6—8 月总降水量呈波动下降特征, 下降斜率为 4.32 mm/a, 其中前 10 年的均值为 383.2 mm, 后 10 年的均值为 362.9 mm, 10 年下降幅度为 5.3% (图 1)。

区域内 20 年间 6—8 月太阳总辐射平均值为 563.8 MJ/m², 并以此为中心呈现波动平衡状态, 从其趋势线的负值斜率上, 显现出微弱下降特征 (图 1)。

3.2 不同植被类型最大月 NPP 年际变化

图 2 显示, 1996—2015 年间, 香格里拉地区不同植被类型逐年最大月 NPP 具有明显差异, 阔叶林 NPP 显著高于其它植被类型, 其 1996—2015 年的平均值达到 286.9 gC/m², 最高年份 1998 年达到 347.6 gC/m², 最低年份 2004 年为 201.1 gC/m²; 其次为耕地, 其 20 年间平均值为 182.1 gC/m², 此后依次为草地、灌丛植被, 其 20 年平均值分别为 149.5、137.3 gC/m²。所有植被类型中, 针叶林 NPP 最低, 20 年均值仅为 128.9 gC/m², 显著低于阔叶林 NPP (图 2)。

从变化趋势看, 各植被类型逐年最大月 NPP 呈微弱增加趋势 (图 2)。各植被类型平均增加斜率为 0.46 gC m⁻² a⁻¹, 其中阔叶林最低, 仅为 0.02 gC m⁻² a⁻¹, 草地最高, 为 0.78, 针叶林、耕地、灌丛分别为 0.69 gC m⁻² a⁻¹、0.51 gC m⁻² a⁻¹、0.26 gC m⁻² a⁻¹ (图 2)。从前 10 年, 到后 10 年, 各植被类型最大月 NPP 从 171.6 gC/m² 增加到了 182.3 gC/m², 上升了 6.2% (图 2)。

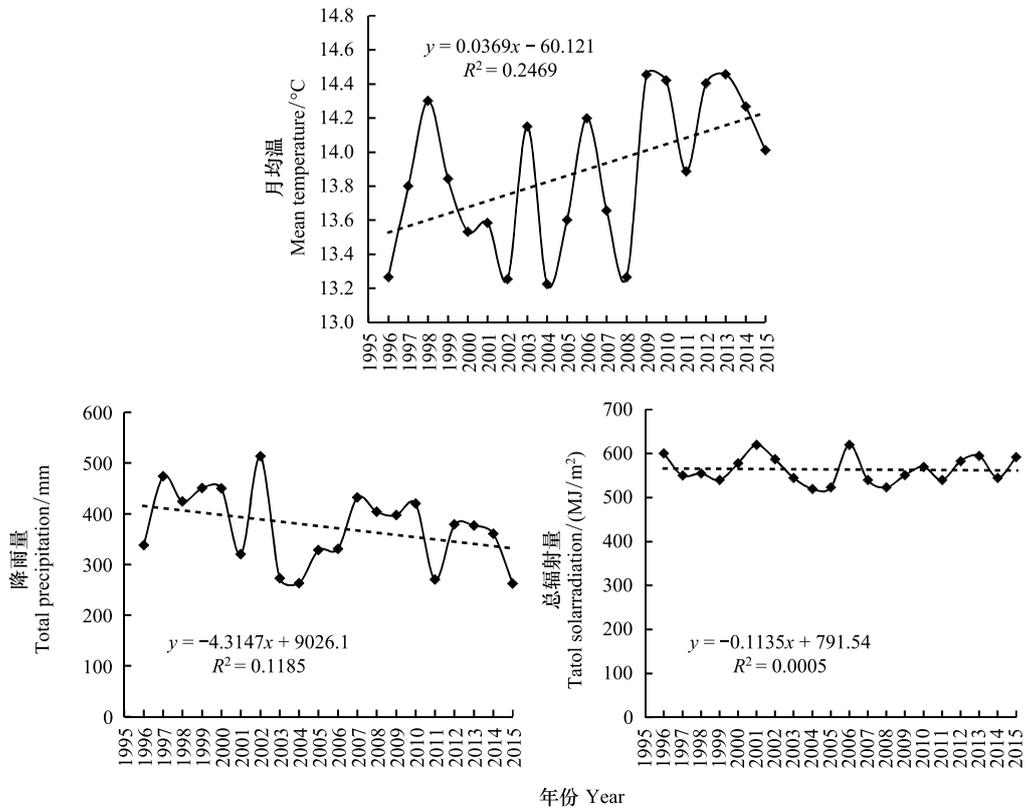


图1 1996—2015年香格里拉6—8月气候因子变化特征

Fig.1 Time variation curves of climatic factors during 6—8 month from 1996 to 2015 in Shangri-La

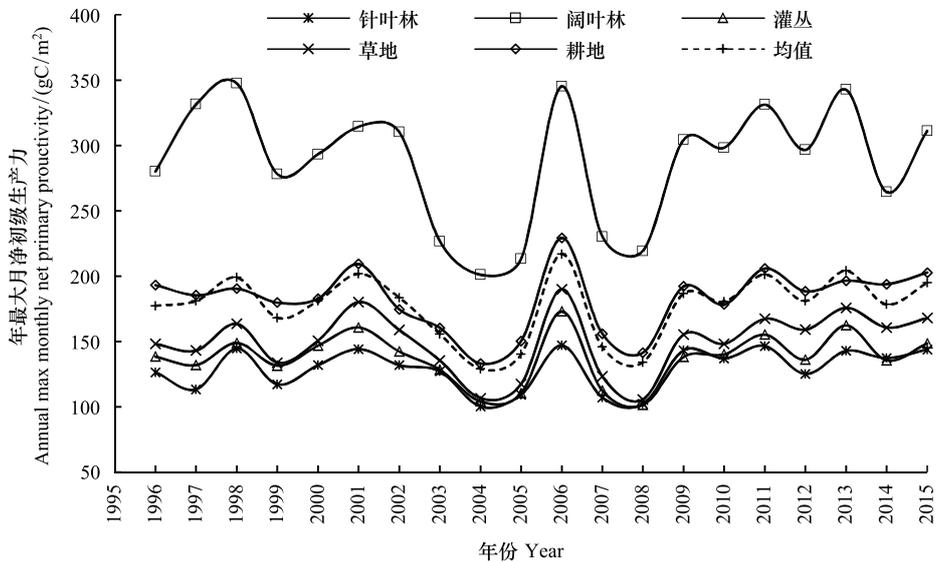


图2 1996—2015年间香格里拉地区各植被类型NPP变化

Fig.2 Inter-annual variation of NPP of different vegetation types in Shangri-La from 1996 to 2015

3.3 区域植被 NPP 空间格局变化特征

图3显示了香格里拉区域,1996—2015年间5个时期的最大月NPP空间分布格局,总体上表现出由中部向四周及两端逐渐增加的趋势。研究区域的南、北两端区域内的最大月NPP多达200 gC/m²以上,区域中部

及偏北范围内,其 NPP 达到了 300 gC/m^2 以上(图 3)。图 3 显示,从 1996 到 2005 年期间,香格里拉 NPP 空间分布总体上呈现下降特征,而从 2005 年开始到 2015 年又呈现上升趋势,尤其是在东部,以及西南部区域,变化尤其明显。

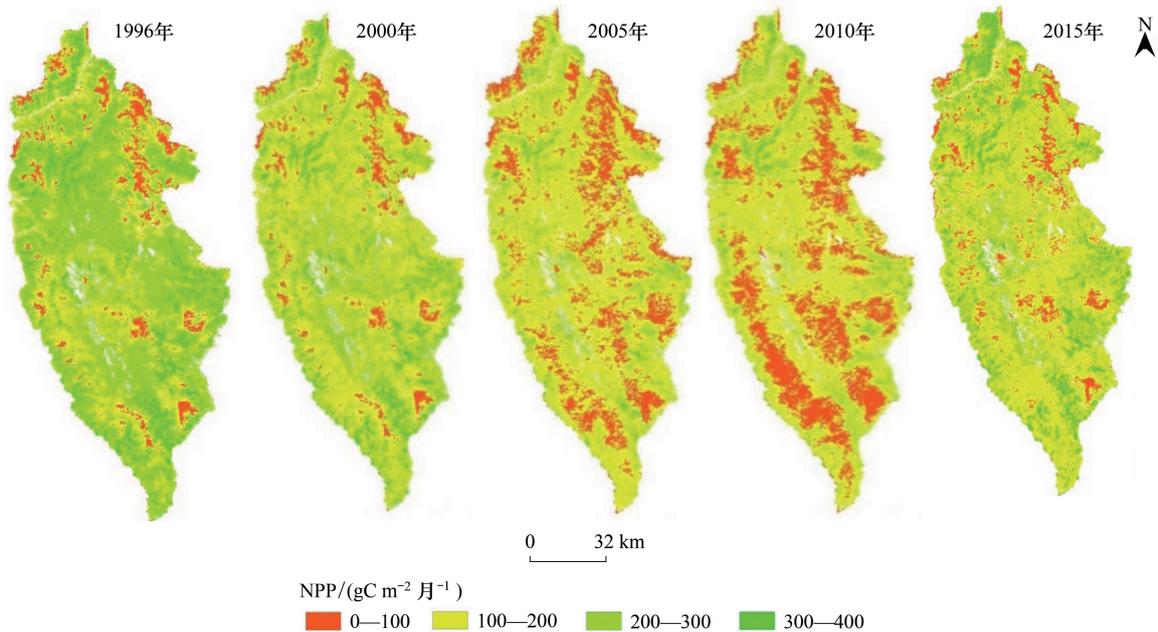


图 3 1996—2015 年香格里拉县植被 NPP 平均值变化

Fig.3 NPP mean change of vegetation in Shangri-La from 1996 to 2015

3.4 香格里拉植被 NPP 与气候因子的相关性

图 4 显示,各植被类型最大月 NPP 与月均温均达到了显著相关水平 ($P < 0.05$)。其中,针叶林相关性最高, R^2 达到 0.3474,其次为草地,最低的为灌丛。各植被类型 NPP 均值与温度的相关性同样达到显著水平 ($R^2 = 0.2679, P < 0.05$)。所有植被类型 NPP 均表现出受到温度正向调控的显著影响 ($P < 0.05$)。

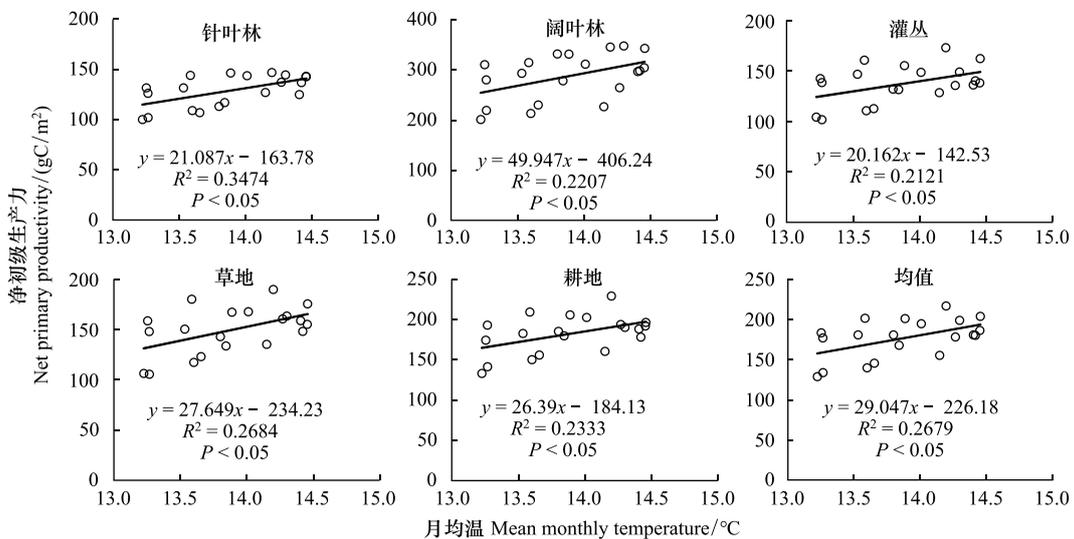


图 4 不同植被类型 NPP 与月均温的相关性

Fig.4 The correlation between NPP of different vegetation types and mean monthly temperature

图 5 显示,各植被类型最大月 NPP 与降水量均未呈现出显著相关性特征($P>0.05$)。从其斜率的负向变化来看,多数植被类型均呈现出随降水量增加、NPP 微弱下降的特征。

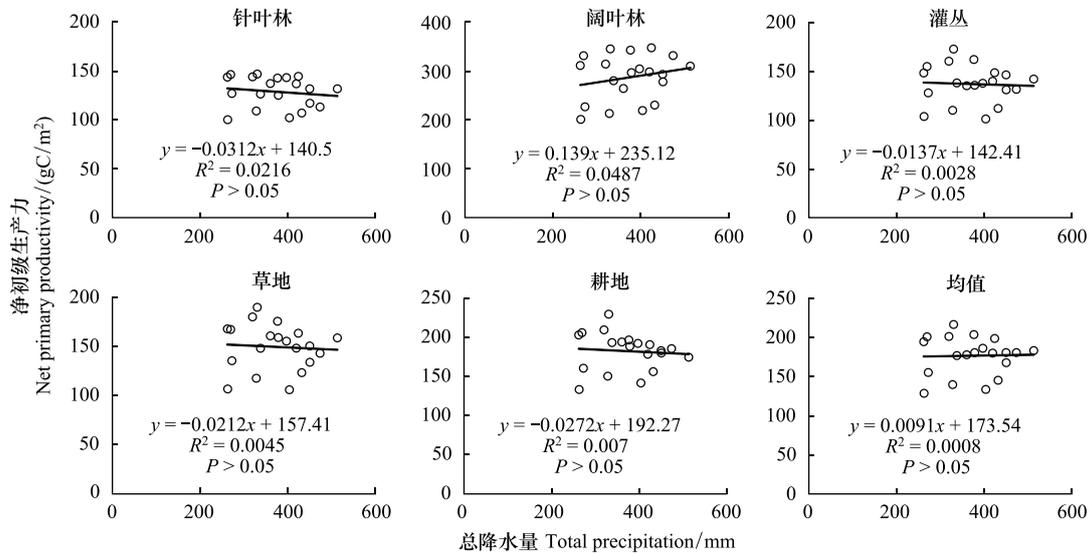


图 5 各植被类型 NPP 与总降水量的相关性

Fig.5 The correlation between NPP of different vegetation types and total precipitation

图 6 显示,相对于温度和降水而言,各植被类型最大月 NPP 与总辐射量呈现出显著的正相关特征($P < 0.01$),其 R^2 一致超过了 0.4。

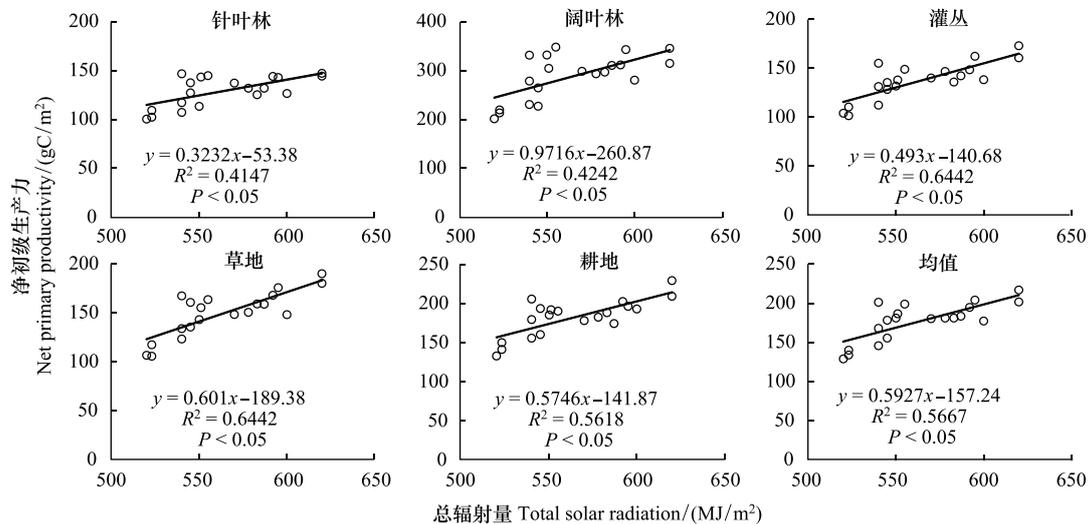


图 6 各植被类型 NPP 与总辐射量的相关性

Fig.6 The correlation between NPP of different vegetation types and total solar radiation

4 讨论

4.1 基于改进的 CASA 模型模拟的香格里拉区域最大月 NPP

香格里拉一年中的生长季 3—10 月^[35],实质上,受低纬度、高海拔特点的影响,区域内水热分布集中在夏季,因此,6—8 月是最为关键的生长季节,也是 NPP 积累的主要季节,期间,从森林到农田等各植被类型均具

有相对较高的 NPP(表 2)。表 2 显示了本研究中香格里拉区域 20 年间各植被类型最大月 NPP,与岳彩荣等人^[35]对同一区域的模拟结果比较显示,本研究中 6—8 月最大月 NPP 占到全年的 29.6%—65.9%,占比最大为阔叶林,最小的为针叶林。对比全国尺度上的模拟结果^[48—49],本研究与其基本处于接近的范围。改进的 CASA 模型,能够较好的适用于本研究区域,并能客观刻画区域各植被类型 NPP 的时空变化。

表 2 香格里拉植被 NPP 模拟结果的横向比较^{*}/(gC/m²)

Table 2 Comparison of simulation results of different vegetation types in Shangri-La

植被类型 Vegetation types	本研究 (最大月) In this study (Max month)	文献 ^[35] (香格里拉-全年) Literature ^[35] (Shangri-la full year)	占文献 ^[35] 结果比例/% Percentage in literature ^[35]	文献 ^[48] (全国-全年) Literature ^[48] (Whole country- full year)	文献 ^[49] (全国-全年) Literature ^[49] (Whole country- full year)
针叶林 Coniferous forest	128.9	435.7	29.6	527.5	370.2
阔叶林 Broad-leaved forest	286.9	434.7	65.9	532.7	754.9
灌木 Shrubwood	137.3	371.1	36.9	372.9	274.5
草地 Grassland	149.5	300.3	49.7	193.9	244.43
耕地 Cultivated land	182.1	367.1	49.6	389.8	741.94

* 本研究尚不含我国港澳台数据

4.2 气候因素对香格里拉区域 NPP 时空格局的影响

NPP 作为评定陆地生态系统的重要指标,直接反应区域植被在自然条件下的生产能力^[50],而区域温度、降水和辐射等气候因子是绝对自然状态下植被 NPP 的关键因素^[51]。相关研究显示,温度和降水大体上与 NPP 值呈现正相关特征^[52]。本研究中区域内植被 NPP 与温度的变化显示出显著的相关性特征($P < 0.05$) (图 4),表现出区域受温度调控的强烈影响。但是,研究中,NPP 对降水变化的响应却未见正相关性特征,从趋势线来看,反而呈现一定的负相关特征(图 5)。植被对温度和降水的气候因子的响应存在地域差异,有相关研究也表明,青藏高原区域内,植被 NPP 与降水呈负相关特征^[53—55]。此外,本研究显示出 2005 年是区域 NPP 上升的突变年份(图 2),相关研究也显示了类似的结果^[56]。表明,区域温度因子在时间序列上的波动变化,对区域内植被 NPP 的波动变化产生了显著的调控作用,与此同时也体现出,水分条件并未形成对区域植被 NPP 的限制与调控效应。

本研究中,植被 NPP 与总辐射量之间极显著的相关性特征(图 6),表明了受辐射因子的限制限制性影响作用。本研究的香格里拉区域内,每年从 5 月份进入雨季后,雨雾天气现象占据主导地位,在每年生长季盛期的太阳总辐射量稀缺,作为 CASA 模型的关键驱动因素,区域植被 NPP 的积累直接受了辐射因子的限制与调控,并呈现出一致强烈的正相关作用。

4.3 香格里拉区域植被 NPP 时空格局及人类活动影响

除上述气候因素外,人类活动也是影响区域植被 NPP 积累的不可忽略的因素^[16]。本研究区域内,人为干扰主要表现为人类聚居区域内,土地利用方式的改变、植被破坏等,以及国家及当地政府长期以来所采取的保护、治理措施。20 世纪 90 年代后期及新世纪初期,地方政府在经济、社会发展的压力下,自然植被资源过渡开发利用,区域内天然植被持续退化,尤其是靠近人类聚居区域的空间范围内,其 NPP 明显偏低(图 3)。随后的 10 多年里,当地政府及相关部分大力开展的生态保护与建设,以及国家生态文明建设的大力推进^[57],很大程度上促进了区域内植被 NPP 的增进趋势^[58]。此外,研究中显示出的针叶林 NPP 相对较低的特征,表明其一旦破坏、过渡采伐等,将需要较长的持续时间才能恢复,因此,区域内大面积的针叶林更需要重点保护^[59]。

地处青藏高原东南缘的香格里拉区域,对气候变化的影响更加敏感^[60],加之日趋复杂的人类活动影响,区域内植被 NPP 的变化将存在高度的不确定性,面向区域植被 NPP 变化的实测研究,以及基于模型的模拟研究,仍需要更为深入的开展。

5 结论

1) 1995—2015 年间, 香格里拉地区 6—8 月平均气温总体呈上升趋势, 增加速率为 $0.037^{\circ}\text{C}/\text{a}$; 6—8 月份月总降水量为 373.1 mm, 总体呈微弱下降趋势; 6—8 月总辐射量平均为 $563.8 \text{ MJ}/\text{m}^2$, 20 年间辐射量基本维持波动稳定状态。

2) 1996—2015 年间, 香格里拉区域最大月植被 NPP 平均值为 $176.9 \text{ gC}/\text{m}^2$, 不同植被类型 NPP 的多年平均值位于 128.9 — $286.9 \text{ gC}/\text{m}^2$ 之间; 空间格局上, 表现为“西北部、东南部及金沙江沿岸向中部递减”的空间格局;

3) 1996—2015 年间, 植被 NPP 显著地受到温度变化的影响 ($P < 0.05$), 随着 20 年间温度的持续上升, 区域 NPP 呈现增加趋势; 此外, 区域植被 NPP 未表现出受降水量的显著影响 ($P > 0.05$), 表明水分不是区域植被 NPP 的限制性因素。

4) 人类聚居区域及其周边的 NPP 相对较低, 表明区域内植被 NPP 受到不同程度人类干扰的影响; 分时段看, 区域内植被 NPP 从 1996—2005 年间呈现下降趋势, 2006—2015 年间呈现上升趋势, 这也显示出香格里拉区域所实施的生态建设各类政策措施对植被 NPP 的促进作用。

参考文献 (References):

- [1] Mu S J, Zhou S X, Chen Y Z, Li J L, Ju W M, Odeh L O A. Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland, China. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 29-41.
- [2] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [3] Whittaker R H. Estimation of net primary production of forest and shrub communities. *Ecology*, 1961, 42(1): 177-180.
- [4] Guo E L, Liu X P, Zhang J Q, Wang Y F, Wang C L, Wang R, Li D J. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 231-247.
- [5] Cook J, Nuccitelli D, Green S A, Richardson M, Winkler B, Painting R, Way R, Jacobs P, Skuce A. Quantifying the consensus on Anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 24024-24027.
- [6] Jones M O, Running S W, Kimball J S, Robinson N P, Allred B W. Terrestrial primary productivity indicators for inclusion in the National Climate Indicators System. *Climatic Change*, 2020, 163(4): 1855-1868.
- [7] Chaitra A, Uggupta S, Bhatta L D, Mathangi J, Anitha D S, Sindhu K, Kumar V, Agrawal N K, Murthy M S R, Qamar F, Murthy I K, Sharma J, Chaturvedi R K, Bala G, Ravindranath N H. Impact of climate change on vegetation distribution and net primary productivity of forests of Himalayan river basins: Brahmaputra, Koshi and Indus. *American Journal of Climate Change*, 2018, 7(2): 271-294.
- [8] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 16-27.
- [9] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. *生态学报*, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [10] Bayarsaikhan S, Mandakh U, Dorjsuren A, Batsaikhan B, Bao Y, Adiya Z, Myagmartseren P. Variations of vegetation net primary productivity and its responses to climate change from 1982 to 2015 in Mongolia. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, V-3-2020: 347-353.
- [11] Yin Y Y, Tang Q H, Wang L X, Liu X C. Risk and contributing factors of ecosystem shifts over naturally vegetated land under climate change in China. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 20905.
- [12] Yu B, Chen F. The global impact factors of net primary production in different land cover types from 2005 to 2011. *SpringerPlus*, 2016, 5(1): 1235.
- [13] Xiao X, Melillo J M, Kicklighter D W, Pan Y, McGuire A D, Helfrich J. Net primary production of terrestrial ecosystems in China and its equilibrium responses to changes in climate and atmospheric CO_2 concentration. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 97-118.
- [14] 陈吉泉, 阳树英. 陆地生态学研究方法. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [15] 李传华, 曹红娟, 范也平, 韩海燕, 孙皓, 王玉涛. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例. *生态学报*, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [16] 焦伟, 陈亚宁, 李稚. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 181-189.
- [17] Lieth H. Computer mapping of forest data//Proceedings of 51 Annual Meeting of the Society of American Foresters. Washington: Society of America

- Forests, 1973; 53-79.
- [18] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, Thawley M M, Small J. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 239-255.
- [19] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [20] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [21] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英, 潘竟虎, 车彦军. 甘肃省净初级生产力时空变化特征. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 163-170.
- [22] 项阳, 李君轶, 陈宏飞. 基于 CASA 模型的神东矿区植被 NPP 变化研究. *湖北农业科学*, 2017, 56(10): 1843-1846, 1856-1856.
- [23] Yuan W P, Chen Y, Xia J Z, Dong W J, Magliulo V, Moors E, Olesen J E, Zhang H C. Estimating crop yield using a satellite-based light use efficiency model. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 702-709.
- [24] Li Z Y, Liu X H, Niu T L, Kejia D, Zhou Q P, Ma T X, Gao Y Y. Ecological restoration and its effects on a regional climate: the source region of the Yellow River, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(10): 5897-5904.
- [25] 沈贝贝. 基于 CASA 模型的呼伦贝尔草原 NPP 模拟与分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [26] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in mainland China since the late 1980s. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 237-247.
- [27] 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.
- [28] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [29] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, Xin X P, Bao Y L, Bayarsaikan S, Zhou Y, Chuntai B. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 84-93.
- [30] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. *遥感学报*, 2005, 9(3): 300-307.
- [31] 王静, 王克林, 张明阳, 章春华. 南方丘陵山地植被净第一性生产力时空动态特征. *生态学报*, 2015, 35(11): 3722-3732.
- [32] 田建茹, 蒋楠, 左华, 郝菁. 基于 GIS 和 RS 的市域尺度下的植被 NPP 研究. *环境科学与管理*, 2017, 42(9): 35-38.
- [33] 潘继亚. 滇西北香格里拉生态资产遥感估算初步研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2015.
- [34] 岳彩荣, 崔同琦. 基于 GIS 的香格里拉县森林景观变化驱动力分析. *安徽农业科学*, 2011, 39(6): 3755-3760.
- [35] 岳彩荣, 唐瑶, 徐天蜀, 胥辉. 香格里拉县植被净初级生产力遥感估算. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(7): 90-98.
- [36] An N, Price K P, Blair J M. Estimating above-ground net primary productivity of the tallgrass prairie ecosystem of the Central Great Plains using AVHRR NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(11): 3717-3735.
- [37] Fettig C J, Reid M L, Bentz B J, Sevanto S, Spittlehouse D L, Wang T L. Changing climates, changing forests: a western North American perspective. *Journal of Forestry*, 2013, 111(3): 214-228.
- [38] Wang T L, Wang G Y, Innes J, Nitschke C, Kang H J. Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia-Pacific region. *Forest Ecology and Management*, 2016, 360: 357-366.
- [39] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 高金龙, 殷建鹏, 侯蒙京, 冯琦胜, 梁天刚. 基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究. *草业学报*, 2019, 28(6): 19-32.
- [40] 杨东辉. 基于 MODIS 数据的石羊河上游植被净第一性生产力变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2011.
- [41] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [42] Wu M Q, Niu Z, Wang C Y, Wu C Y, Wang L. Use of MODIS and Landsat time series data to generate high-resolution temporal synthetic Landsat data using a spatial and temporal reflectance fusion model. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 063507.
- [43] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [44] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 杨文瑾. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 102-109.
- [45] Hutchinson M F. ANUSPLIN Version 4.3 User Guide. Canberra: Centre for Resource and Environment Studies, the Australia National University, 2004.
- [46] Chen J M, Chen X, Ju W. Effects of vegetation heterogeneity and surface topography on spatial scaling of net primary productivity. *Biogeosciences*, 2013, 10(7): 4879-4896.
- [47] 张猛, 曾永年. 融合高时空分辨率数据估算植被净初级生产力. *遥感学报*, 2018, 22(1): 143-152.

- [48] 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2004.
- [49] 王军邦. 中国陆地净生态系统生产力遥感模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [50] Ren H R, Shang Y J, Zhang S. Measuring the spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity in Inner Mongolia using spatial autocorrelation. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106108.
- [51] Poonam T, Mukunda D B, Soumit K B, Nayan S. Investigating the contribution of climate variables to estimates of net primary productivity in a tropical deciduous forest in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 191(S3): 798.
- [52] Li H L, Ke C Q, Zhu Q H, Shu S. Spatial-temporal variations in net primary productivity in the Arctic from 2003 to 2016. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(8): 111-121.
- [53] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2019, 39(14): 5058-5069.
- [54] 仇洁. 青藏高原植被降水利用效率时空特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [55] 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 杨欢, 朱高峰, 刘晓文. 2000—2014 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 592-601.
- [56] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 韩保民, 范业稳, 杨潇, 何田莉, 刘悦, 杨雯娜. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [57] 陈槐, 鞠佩君, 张江, 王元云, 朱求安, 颜亮, 康晓明, 何奕忻, 曾源, 郝彦宾, 王艳芬. 青藏高原高寒草地生态系统变化的归因分析. *科学通报*, 2020, 65(22): 2406-2418.
- [58] Xu H J, Zhao C Y, Wang X P. Elevational differences in the net primary productivity response to climate constraints in a dryland mountain ecosystem of northwestern China. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(15): 2087-2103.
- [59] Vipasha N, Bhardwaj D R, Kumar R. Assessment of floristic diversity of different coniferous forests in Himalayan temperate climate of western Himalayas. *Indian Journal of Ecology*, 2018, 45(4): 711-716.
- [60] Li Z F, Gao J X, Wen L Q, Zou C X, Feng C Y, Li D Q, Xu D L. Dynamics of soil respiration in alpine wetland meadows exposed to different levels of degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 7469.