

DOI: 10.5846/stxb201901270204

张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力 (NPP) 空间分布格局及其对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(15): 5318-5326.

Zhang R P, Guo J, Zhang Y L. Spatial distribution pattern of NPP of Xinjiang grassland and its response to climatic changes. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5318-5326.

新疆草地净初级生产力 (NPP) 空间分布格局及其对气候变化的响应

张仁平^{1,2,*}, 郭靖³, 张云玲⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆林业科学院, 乌鲁木齐 830000

4 新疆维吾尔自治区草原总站, 乌鲁木齐 830049

摘要: 分析植被物候与净初级生产力对气候变化的响应一直是研究全球变化的核心内容之一。新疆草地生态系统极为脆弱, 对气候和环境变化的影响十分敏感, 在新疆地区开展草地物候和净初级生产力及其对气候变化的响应有着独特的意义。基于遥感数据和野外台站实测数据, 利用 CASA 模型模拟了新疆草地植被净初级生产力 (NPP), 阐述了 2001—2014 年新疆地区草地的 NPP 的空间格局及与气象因子的关系。(1) 通过实测生物量精度检验表明, CASA 模型基本可以反映新疆地区草地植被 NPP。(2) 2001—2014 年新疆草地 NPP 平均值为 $102.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。不同草地类型的 NPP 存在明显差异。其中, 山地草甸平均 NPP 最高, 达到 $252.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 温性草甸草原次之, 为 $204.93 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。高寒荒漠和温性荒漠的平均 NPP 最低, 分别为 $43.94 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $53.11 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。(3) 新疆 NPP 的空间分布格局具有如下特点: 山区 NPP 高于盆地 NPP, 北疆 NPP 高于南疆 NPP;(4) 降水能够促进新疆草地 NPP 增加, 其中, 夏季和秋季的降水对草地 NPP 的影响最为明显, 温度对新疆地区草地 NPP 影响不大。降雨可以促进新疆草原 NPP 的增加。特别是在降水量较少但温度较高的草原, 如温带荒漠草原、温带草原沙漠、温带沙漠、低地草甸等, 年降水量和夏秋降水量对草地 NPP 有显著影响。温度对新疆草地 NPP 的影响不大。通过对新疆草地空间格局的分析, 研究了草地 NPP 对气候变化的响应, 为合理规划新疆草地的生产和利用, 以及草地生态系统的健康发展和应对气候变化提供决策依据。

关键词: 草地; NPP; 新疆; CASA 模型

Spatial distribution pattern of NPP of Xinjiang grassland and its response to climatic changes

ZHANG Renping^{1,2,*}, GUO Jing³, ZHANG Yunling⁴

1 College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology under Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang Academy Forestry, Urumqi 830000, China

4 General Grassland Station of Xinjiang, Urumqi 830049, China

Abstract: Analysis of vegetative net primary productivity (NPP) in response to climate change has been one of the core issues of global change studies. The grassland ecosystem in Xinjiang is extremely fragile and sensitive to climate and environmental changes. Hence, it is particularly important to investigate grassland net primary productivity and its response to climate change in Xinjiang. This study simulates the NPP of Xinjiang grassland vegetation with the CASA model based on

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31860145); 中央财政专项资金 (新[2020]TG06)

收稿日期: 2019-01-27; 修订日期: 2020-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zrp2013@126.com

remote sensing data and measured data from field stations and describes the relationship between spatial patterns of the NPP on the Xinjiang grassland and meteorological factors from 2001 to 2014. (1) Through accuracy verification with the measured biomass data, it was shown that the CASA model can basically reflect the NPP of Xinjiang grassland vegetation. (2) The average value of the NPP of the Xinjiang grassland from 2001 to 2014 was $102.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. There are significant differences in NPP among different grassland types. The NPP of mountain meadows is the highest, reaching $252.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, followed by that of the temperate meadow grasslands, with $204.93 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. The NPP of alpine desert and temperate grassland desert is the lowest, at $43.94 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and $53.11 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. (3) The spatial distribution pattern of the NPP of Xinjiang grassland vegetation has the following characteristics: the NPP of the mountain grassland is higher than that of the basin grassland, and the NPP of the grassland in northern Xinjiang is higher than that of the grassland in southern Xinjiang. (4) Rainfall can promote an increase in the NPP of Xinjiang grasslands. In particular, in grasslands with less precipitation but higher temperatures, such as temperate desert grasslands, temperate grassland deserts, temperate deserts, and lowland meadows, annual precipitation and summer and autumn precipitation have a significant impact on grassland NPP. However, the temperature has little influence on the NPP of the Xinjiang grassland. By analyzing the spatial patterns of the grassland in Xinjiang, the response of grassland NPP to climate change was studied in order to provide a decision-making basis for the rational planning of grassland production and utilization, the healthy development of grassland ecosystems and the response to climate change.

Key Words: grassland; NPP; Xinjiang; CASA model

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,草地植被是陆地上面积最大的一种可更新资源,对于调节全球碳循环和气候具有重要的作用,同时草地也是畜牧业发展的重要物质基础^[1-3]。植被净初级生产力作为陆地表面碳循环的重要部分,不仅反映自然环境下植被的生产能力,也是衡量生态系统碳源/碳汇转换的主要因子,因而在分析碳循环以及全球变化中有着重要的意义^[4]。

随着全球变化研究的不断深入,植被 NPP 已成为气候变化对陆地生态系统影响的研究热点^[5-7]。地面测量数据无法描述 NPP 在区域及全球尺度上的变化特征,因此利用遥感数据和数学模型模拟 NPP 就成为一种被广泛接受的重要研究方法^[8]。近年来,许多学者基于遥感数据建立了许多模型对植被 NPP 进行估算^[9-10]。然而,估算净初级生产力应用最广泛的当属 CASA 模型^[9,11]。CASA 模型主要用于模拟区域或全球植被实际净初级生产力,但对于点上的验证还较为匮乏。

近年来,在全球气候变暖的背景下,区域植被 NPP 变化对气候变化存在着区域差异。一些研究表明,随着降水和温度的增加,草地 NPP 呈现增加趋势^[12-14],相反,有一些区域随着温度的增加,草地 NPP 呈现下降趋势^[6,15]。不同区域植被 NPP 对不同季节的降水和温度的变化的响应也明显不同^[16]。目前,新疆地区植被 NPP 研究较为薄弱,主要集中 NPP 空间分布格局、变化趋势以及对气候的响应上^[7,17-19],但不同草地类型对不同季节的气象因子的响应研究尚有待进一步研究。

新疆草地生态系统是当地最重要、分布最广泛的生态系统之一。由于地处新疆干旱和半干旱地区,草地生态系统极为脆弱,对气候和环境变化的影响十分敏感。因此,在新疆地区开展草地 NPP 及其对气候变化的响应有着独特的地位。综上所述,在气候变化日趋频繁的影响下,掌握新疆草地 NPP 的空间格局及其对气候的响应关系,不仅是新疆草地生态系统健康发展的需要,而且是实现当地畜牧业可持续发展的战略需要。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于我国西北部,地理位置介于 $34^{\circ}22'—49^{\circ}33' \text{ N}$, $73^{\circ}22'—96^{\circ}21' \text{ E}$, 总面积为 $166 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的 $1/6$ (图 1)。新疆地处欧亚大陆腹地,四面高山环抱,北有阿尔泰山,南有昆仑山

系,中有横亘全境的天山,三山环抱中为广袤的准噶尔和塔里木盆地,“三山夹两盆”构成了新疆独特的地理环境特征。新疆气候属于典型的温带大陆干旱性气候,光热资源充足,年日照时数达 2550—3500 h,年平均气温 9—12 ℃,无霜期长达 180—220 d,降水量稀少,北疆年降水为 100—200 mm,南疆在 100 mm 以下。而蒸发量则相反,北疆为 1500—2300 mm,南疆为 2100—3400 mm。由于特殊的地理位置、地形条件和干旱气候的影响,新疆生态环境极为脆弱,植物种类稀少,覆盖度低,类型结构简单。新疆草地总面积居我国第三位,毛面积约 57.26 万 km²,可利用草地面积约 48 万 km²,占新疆国土面积的 34.4%,新疆草地面积是耕地面积的 15 倍,是森林面积的 22 倍,占全区绿色植被面积的 86%^[20]。图 1 草地类型来源于 1:1000000 中国草地资源图^[21]。

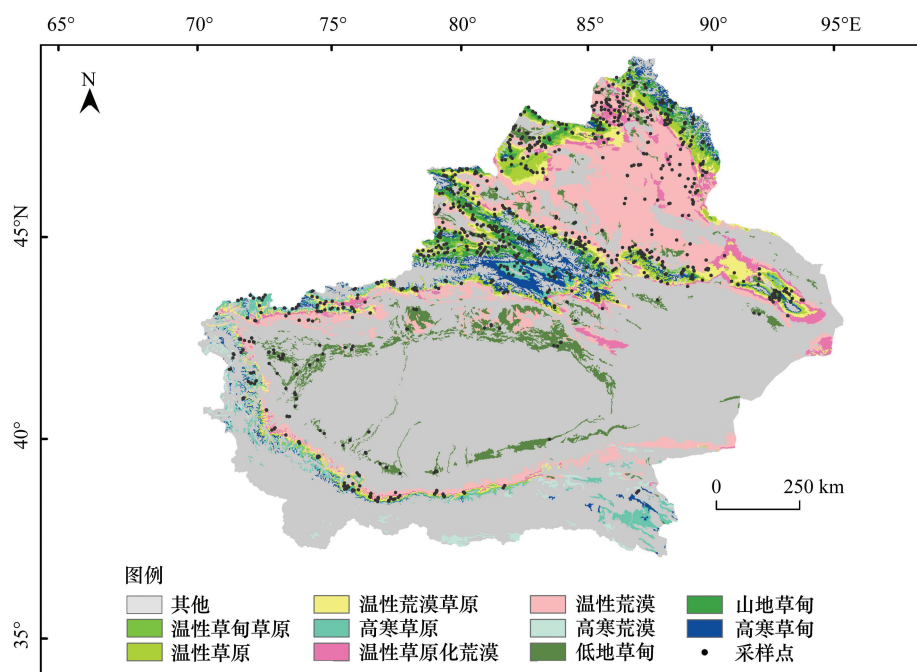


图 1 研究区草地类型及生物量采样点空间分布

Fig.1 Location of grassland types and grassland aboveground biomass sample sites

1.2 数据来源

本研究所用 MODIS NDVI 数据源自美国国家航空航天局 NASA/EOS LPDAAC 数据中心 (<https://lpdaac.usgs.gov/>),为 2001—2014 年 MODIS 产品 MOD13Q1 数据集,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 16 d。利用 MRT (MODIS Re-projection Tools) 进行拼接处理、投影转换,得到 TIFF 格式文件。同时,对 16 d 的 MODIS-NDVI 数据采用最大化合成法 (maximum value composite, MVC) 得到每月 NDVI 数据,并利用 Savitzky-Golay 方法对 MODIS-NDVI 数据进行滤波处理,以便减少由云和薄雾造成的噪音。

气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/site/index.html>),一共有 67 个气象台站。利用 ANUSPLIN 软件,对研究区域的气温、降水数据以及日照时数进行插值处理^[22]。

生物量数据选用 2010—2014 年草原监测数据 (图 1) (<http://202.127.42.194/jiance/login.aspx>)。依据不同的气候及草地类型空间分布特点,在每年的 7 月末或者 8 月初监测新疆地区草地的最大生物量,收集的数据包括 791 个样地,样地大小为 (500 m×500 m),每个样地在四角及中心位置各设置 1 个小样方 (1 m×1 m),记录每个小样方内采集的样本在 65℃ 烘箱烘干 48 h 后测量的干物质产量。收集的 791 样地数据分布如下:温性草甸草原类分布有 48 个、温性草原类分布有 109 个、温性荒漠草原类分布有 137 个、高寒草原类分布有 53 个、温性草原化荒漠类分布有 59 个、温性荒漠类分布有 135 个、高寒荒漠类分布有 16 个、低地草甸类分布有 71 个、山地草甸类分布有 96 个、高寒草甸类分布有 67 个。根据不同草地类型地上生物量和地下生物量的

比值算出单位面积内植物的生物量^[23],按每 1.0 g 干重约等于 0.475 g 碳换算,得到每个样地的草地 NPP,统一以碳(gC/m²)的形式表示^[24]。

1.3 草地植被 NPP 遥感估算方法

基于遥感和气候数据的 CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) 模型可以用来评估大尺度上的草地 NPP^[4,25]。CASA 模型是 Potter 等建立的光能利用率模型的典型代表,NPP 的估算可以由植物的光合有效辐射 APAR(MJ/m²)和实际光能利用率 ε (gC/MJ)两个因子来表示,其估算公式如下:

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

植被吸收的光合有效辐射取决于植物本身的特征以及太阳总辐射。其计算公式为:

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

式中,SOL 是太阳总辐射量(MJ/m²),FPAR 为植被冠层对入射光合有效辐射的吸收比例,通过 NDVI 影像数据集来计算^[26]。

实际光能利用率 ε 是植物固定太阳能,并通过光合作用将所截获/吸收的能量转化为碳(C)/有机质干物质的效率,一般用 gC/MJ 表示。Potter 等认为在理想条件下植被具有最大光能利用率,而在现实条件下的最大光能利用率主要受温度和水分的影[4,26],其计算公式是:

$$\varepsilon = T_{\varepsilon 1} \times T_{\varepsilon 2} \times W_{\varepsilon} \times \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中, $T_{\varepsilon 1}$ 和 $T_{\varepsilon 2}$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用,可采用 Potter 等^[25]提出的方法进行估算。 $\varepsilon_{\max}$ 表示在理想状态下植被的最大光能利用率,是指植被在没有任何限制的理想条件下对光合有效辐射的利用率。由于全球相同植被也难免与中国存在较大差别^[27],因此本文中的最大光能利用率取值采用了朱文泉等关于中国草地类型的最大光能利用率模拟结果^[9],即草地的最大光能利用率为 0.542 gC/MJ。 W_{ε} 为水分胁迫系数,其计算方式及改进见文献^[28]。

2 结果与分析

2.1 草地 NPP 估算结果验证

验证模型模拟结果是模型在实际中应用的前提条件。由于缺乏大尺度生物量监测数据,所以进行模型验证较为困难。但本研究采用的生物量实测数据样方数量较多,也比较典型,监测时间也较为一致,可以较好地代表新疆地区草地地上净初级生产力。本文利用 2010—2014 年地面实测生物量数据对 CASA 模型模拟的草地 NPP 进行验证,实测生物量数据和 CASA 模型模拟 NPP 决定系数(R^2)是 0.78($P < 0.001$)(图 2),表明 CASA 模型是适合于估算当地草地 NPP。

2.2 草地植被 NPP 时空格局分析

为了探讨新疆地区草地 NPP 的空间分布格局,基于 CASA 模型模拟了新疆地区 2001—2014 年草地 NPP,结果表明,全疆平均草地 NPP 值为 102.49 gC m⁻² a⁻¹(图 3)。在新疆各个区域中,伊犁河谷及阿尔泰山海拔较高区域的草地 NPP 相对较高,其次是天山和阿尔泰山的中山带区域,而准噶尔盆地和塔里木盆地的一些区域草地 NPP 最低。

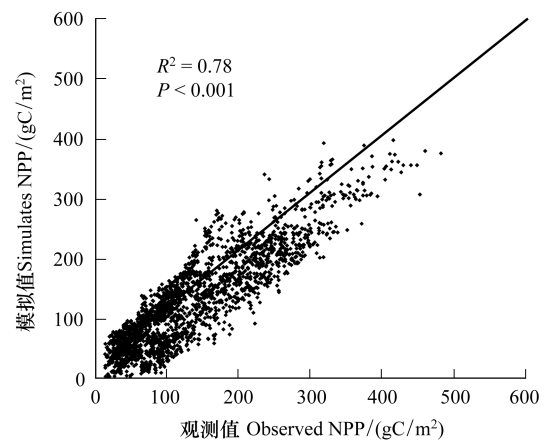


图 2 净初级生产力(NPP)模拟值与观测值的比较
Fig.2 Comparison of simulated net primary productivity (NPP) and observed NPP

在 2001—2014 年,新疆不同草地类型的 NPP 存在明显差异,见表 1。山地草甸 NPP 最高,达到 252.57 gC m⁻²a⁻¹,其次为温性草甸草原,其 NPP 达到 204.93 gC m⁻²a⁻¹;高寒荒漠和温性草原化荒漠的 NPP 两者最低,其 NPP 分别为 43.94 gC m⁻²a⁻¹和 53.11 gC m⁻²a⁻¹。

2.3 草地 NPP 对气候因子的时间响应特征

对新疆地区草地 NPP 与年(季节)均温、年(季节)降水的相关分析表明(表 2)。就整个新疆草地来说,除冬季降水与草地 NPP 呈负相关之外,年降水和其他 3 季的降水与草地 NPP 呈正相关关系,其中年降水、夏季的降水对草地 NPP 有较明显的影响,相关系数 R 分别达到 0.48($P<0.1$)和 0.50($P<0.1$)。温度对草地 NPP 没有明显的影响($R=0.07$)。对于降水较少,但是温度较高的草地,比如温性荒漠草原、温性草原化荒漠、温性荒漠、低地草甸,年降水、夏秋两季降水对草地 NPP 有较明显的影响。冬季降水与大多数草地 NPP 呈负相关关系,但是相关关系不显著。年(季节)平均温度对新疆地区所有类型的草地影响不大。

总体而言,新疆地区草地 NPP 主要受夏秋两季降水的影响,温度与草地 NPP 的相关性较低,说明温度不是新疆草地 NPP 的制约因素。

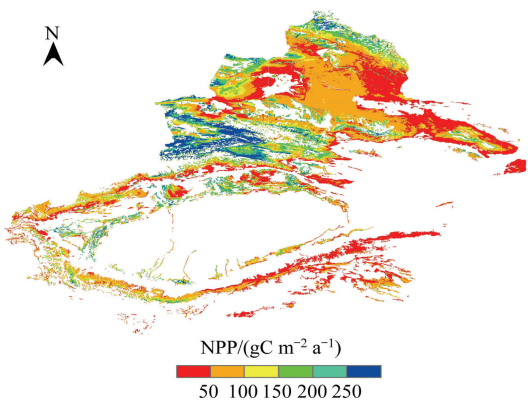


图 3 新疆草地 2001—2014 年平均 NPP 空间分布图
Fig.3 Spatial distribution of mean NPP in Xinjiang grassland during 2001—2014

表 1 2001—2014 年新疆不同草地类型平均 NPP
Table 1 The mean NPP of different grassland types in Xinjiang during 2001—2014

草地类型 Grassland types	NPP/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	草地类型 Grassland types	NPP/ (gC m ⁻² a ⁻¹)
温性草甸草原类 Temperate meadow steppe	204.93	温性荒漠类 Temperate desert	65.73
温性草原类 Temperate steppe	134.00	高寒荒漠类 Alpine desert	43.94
温性荒漠草原类 Temperate desert steppe	82.77	低地草甸类 Louland meadow	134.82
高寒草原类 Alpine steppe	99.98	山地草甸类 Mountain meadow	252.57
温性草原化荒漠类 Temperate steppe desert	53.11	高寒草甸类 Alpine meadow	179.42

2.4 草地 NPP 对气候因子的空间响应特征

新疆地区的温度和降水空间分布明显不同,因此草地 NPP 对温度和降水变化响应也不同。根据相关系数显著性检验表和 F 检验结果,样本数为 14(2001—2014 年),当 $|r|>0.53$ 时,表明 NPP 与气候因子呈显著相关关系,当 $0.46<|r|<0.53$ 时,NPP 与气候因子存在着较显著的相关关系。分析新疆地区草地 NPP 与温度、降水的相关性发现(图 4),不同区域草地 NPP 对温度和降水的空间响应特征明显不同。位于新疆地区准噶盆地东部以及天山高海拔区域的草地 NPP 与年均温呈显著的正向相关关系,相关系数 $r>0.53$ 的地区占新疆草地的 7.5%;相关系数 $0.46<r<0.53$ 的区域占新疆地区草地面积的 4.8%;呈现正相关但不显著的区域占草地面积的 45.6%,主要分布于准噶尔盆地及伊犁河谷区域。位于新疆准噶尔盆地中心地带及塔里木区域的草地 NPP 与年均温呈负相关关系,面积比例为 42%,达到较显著或者显著水平的象元很少。新疆地区草地 NPP 与降水呈正相关的草地占新疆地区草地的 71.3%,其中 $r>0.53$ 和 $0.46<r<0.53$ 的草地分别占新疆地区草地的 12.5%和 7.6%,主要分布在伊犁河谷地区、天山北坡与盆地接壤的区域以及准噶尔盆地南缘。草地 NPP 与

降水呈负相关的草地占有所有草地的 28.7%,达到较显著和显著水平的草地很少。

表 2 新疆地区草地 NPP 和气候因子的相关性分析
Table 2 Correlation analysis between grassland NPP and climatic factors in Xinjiang

草地类型 Grassland types	降水 Precipitation					温度 Temperate				
	年 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
温性草甸草原类 Temperate meadow steppe	0.39	0.17	0.40	0.49	-0.45	0.24	0.30	-0.06	-0.07	0.09
温性草原类 Temperate steppe	0.42	-0.12	0.50	0.50	0.41	0.12	0.24	-0.14	-0.09	0.02
温性荒漠草原类 Temperate desert steppe	0.61	0.12	0.56	0.56	-0.40	0.02	0.19	-0.15	-0.07	-0.04
高寒草原类 Alpine steppe	0.33	-0.11	0.42	0.36	-0.29	0.04	0.02	0.02	0.12	0.00
温性草原化荒漠类 Temperate steppe desert	0.54	-0.13	0.53	0.53	-0.42	0.08	0.10	0.05	0.00	-0.03
温性荒漠类 Temperate desert	0.48	0.18	0.50	0.37	-0.27	0.08	0.03	-0.04	0.12	0.13
高寒荒漠类 Alpine desert	0.47	-0.12	0.50	0.37	-0.20	0.07	0.01	0.17	0.25	-0.01
低地草甸类 Louland meadow	0.46	0.24	0.54	0.40	-0.22	-0.09	-0.13	0.02	0.03	-0.04
山地草甸类 Mountain meadow	0.26	-0.25	0.38	0.48	-0.41	0.18	0.13	0.15	-0.02	0.03
高寒草甸类 Alpine meadow	-0.14	-0.17	0.22	0.21	-0.26	0.10	-0.02	0.13	0.14	0.02
所有类型 All	0.48	0.03	0.50	0.45	-0.31	0.07	0.06	-0.01	0.06	0.04

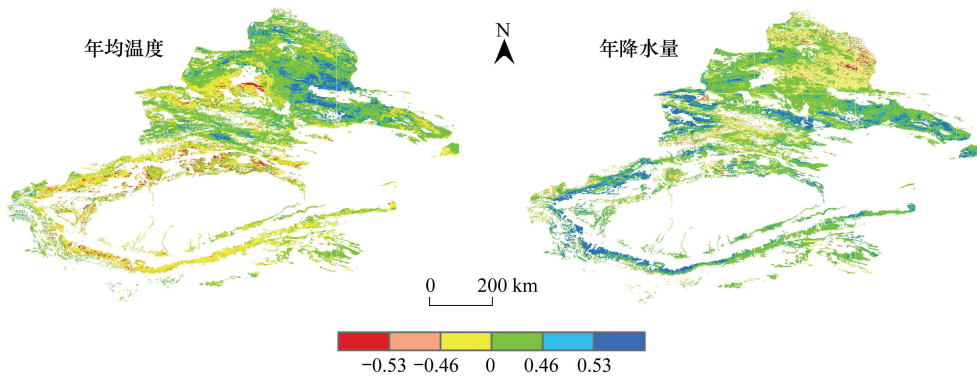


图 4 新疆草地 NPP 与年均温度和降水相关系数空间分布格局
Fig.4 Spatial distribution pattern of correlation coefficient between Xinjiang grassland NPP and annual temperature and precipitation

分析新疆草地 NPP 与四季平均温度和降水的相关系数空间分布格局表明(图 5),新疆草地 NPP 与四季温度的正向和负向相关的面积比例变化不大,占新疆地区约 80%面积的草地 NPP 与四季平均温度相关性达不到较显著水平,新疆草地 NPP 与四季平均温度相关系数达到显著水平的区域有一定的变化。春季温度对草地 NPP 有显著正相关的草地主要分布在伊犁河谷及塔城附近的山区,而负相关达到显著水平的区域主要位于准噶尔盆地的中心地带以及塔里木北缘。位于伊犁河谷高山带的草地 NPP 与夏季温度的正向相关系数达到显著水平,塔里木盆地边缘地带以及准噶尔盆地南缘的一些区域草地 NPP 与夏季温度呈现显著的负向相关。夏季温度与草地 NPP 呈现显著正向相关的区域主要位于塔里木盆地南缘以及准噶尔盆地中心地带,伊犁河谷部分区域显著呈现负相关关系。位于准噶尔盆地中心地带的草地 NPP 与冬季温度表现出显著的正相关关系。

新疆大部分区域的草地 NPP 与夏季温度和秋季温度呈正向相关,其面积比例分别为 80.9%和 75.9%,其中夏季温度与草地 NPP 呈现较显著和显著相关的面积比例分别为 9.1%和 17.6%,主要分布于伊犁河谷、塔里木盆地以及准噶尔盆地中心地带。秋季温度与草地 NPP 呈现较显著和显著的相关的面积比例分别为 7.6%

和 14.9%,主要位于新疆东部、伊犁河谷地带以及塔城附近的山区。冬季降水与大部分区域草地 NPP 呈负向相关关系,面积比例达 68.5%,其中达到较显著和显著水平的区域主要位于准噶尔盆地北部以及天山高山区。

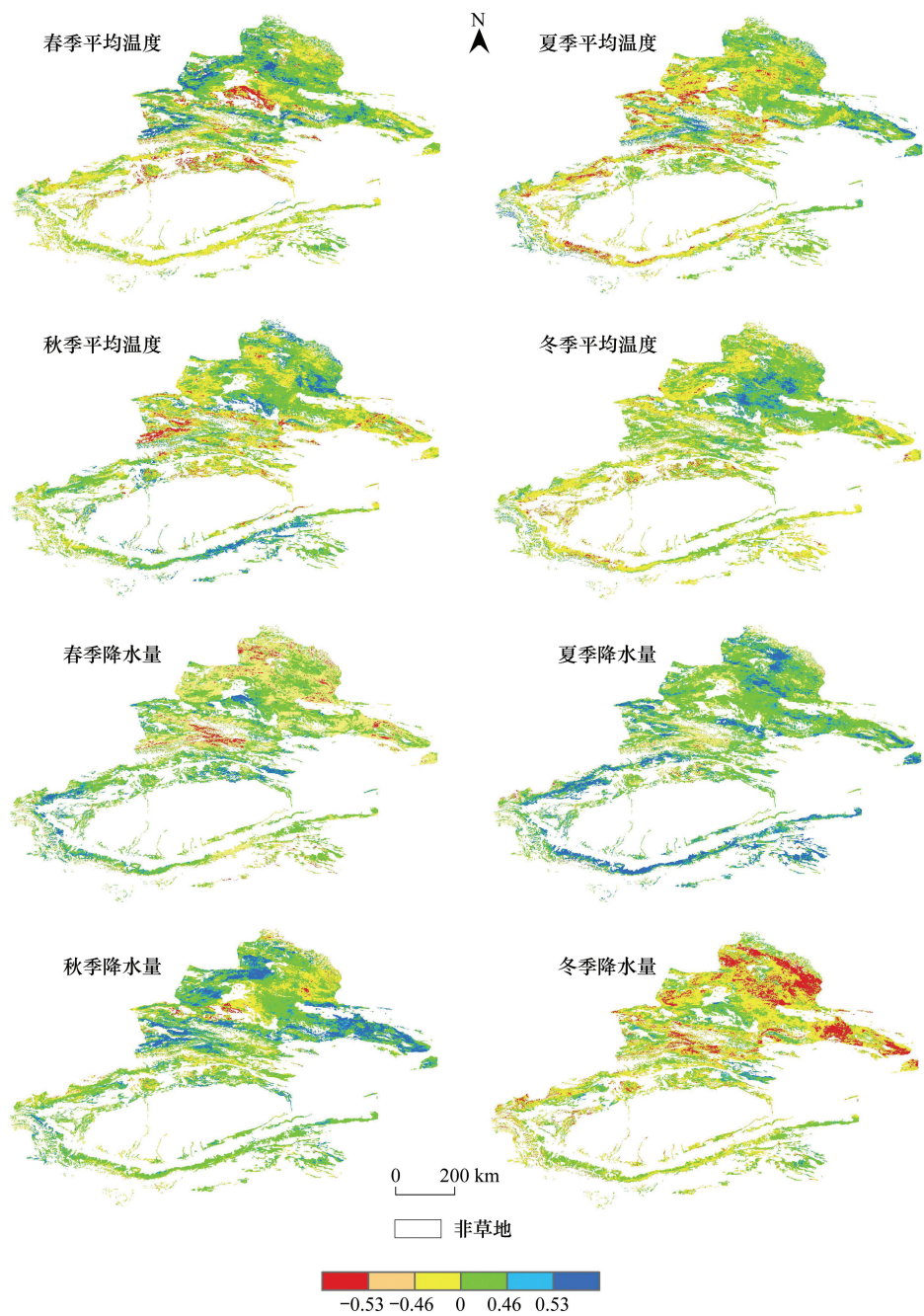


图 5 NPP 与四季平均温度和降水相关系数空间分布格局
Fig.5 NPP and annual temperature and precipitation

3 讨论

利用 CASA 模型模拟植被净初级生产力主要取决于植被吸收的 APAR 与光能利用率 ϵ 两个变量。一般来说,植被吸收的 FPAR 通过植被指数(比如 NDVI 和 EVI)和植被类型表示。光能利用率表示植被把吸收的 APAR 转变为有机碳的效率,其主要受到土壤水分和温度的影响。虽然 CASA 模型考虑了植被所在的环境条件与植被本身的特征,但在确定参数和计算过程方面有一定的不足之处。本文草地的最大光能利用率选择朱

文泉等人的研究结果,即草地的最大光能利用率为 $0.542 \text{ gC/MJ}^{[28]}$,通过验证后发现,改进的 CASA 模型基本可以反映新疆地区草地 NPP。通过 CASA 模型模拟的草地 NPP 整体水平较低,平均值仅为 $102.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,表现为草甸>草原>荒漠,这与杨红飞等^[7]的研究结果类似。新疆地区植被主要受降水因素的制约,当山区降水较为充沛,新疆草地 NPP 相对来说较高,南疆区域光照虽然较好,但是降水极少。因此,新疆草地 NPP 空间分布格局应该是山区区域高于盆地区域,新疆北部>新疆南部,本研究证明确实如此。

新疆地区草地 NPP 与夏秋两季降水具有明显的正相关关系,说明新疆地区草地植被生长在夏秋两季主要受降水的影响,这与普宗朝等^[75]和陈奕兆等^[7]的研究结果类似,如:普宗朝和张山清^[7]研究发现降水增加对新疆地区植被 NPP 产生正面影响;陈奕兆等^[5]发现蒙古草原的植被对降水有正面响应。然而,本研究结果与张戈丽等人在青藏高原植被的有所不同,张戈丽等^[29]研究认为青藏高原植被主要受气温的影响。新疆地区属于典型干旱半干旱气候,区域内年均温较高,降水较少,因此水分是制约草地生长的决定因素,由于降水通常会改善土壤水分对植被的供给,有利于光合速率增强,从而提高植被生产力。而青藏高原由于气温较低,热量是影响植被生产的主要气候因子。

本文植被 NPP 与气候因素的相关关系均是在线性基础上进行分析的,而气候变化是十分复杂,如何更合理的分析气候变化与 NPP 之间的关系,是进行植被 NPP 对气候变化响应的研究基础。本文只是分析了温度和降水对植被 NPP 的影响,然而,各种气候指标对生态系统均有一定的影响,但是各种气候指标对植被 NPP 产生的影响有多大?这种影响到底与区域有关还是植被类型有关,这些仍需要长期系统的研究。

4 小结

基于 CASA 模型模拟了新疆草地植被 NPP,进而探讨了草地植被 NPP 的空间分布格局,并分析了草地 NPP 对气候变化的响应。主要结论如下:

基于 CASA 模型估算的 NPP 基本可以反映新疆草地植被净初级生产力的基本情况。在 2001—2014 年间,新疆草地 NPP 平均值为 $102.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。不同草地类型的 NPP 存在明显差异。其中,山地草甸平均 NPP 最高,达到 $252.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;高寒草地的平均 NPP 最低,为 $43.94 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。新疆草地植被 NPP 分布呈现为山区草地 NPP 高于盆地区草地 NPP,新疆北部草地 NPP 高于新疆南部草地 NPP。

降水能促进新疆地区草地 NPP 增加,其中夏季和秋季的降水对草地 NPP 的影响最为明显。对于降水较少,但是温度较高的草地,比如温性荒漠草原、温性草原化荒漠、温性荒漠、低地草甸,年降水、夏秋两季降水对草地 NPP 有较明显的影响。冬季降水与大多数草地 NPP 呈负相关关系,但未通过显著性检验。年(季节)温度对新疆地区所有类型的草地影响不大。

参考文献(References):

- [1] Du M Y, Kawashima S, Yonemura S, Zhang X Z, Chen S B. Mutual influence between human activities and climate change in the Tibetan Plateau during recent years. *Global and Planetary Change*, 2004, 41(3/4): 241-249.
- [2] Liang T G, Feng Q S, Yu H, Huang X D, Lin H L, An S Z, Ren J Z. Dynamics of natural vegetation on the Tibetan Plateau from past to future using a comprehensive and sequential classification system and remote sensing data. *Grassland Science*, 2012, 58(4): 208-220.
- [3] 朱玉果,杜灵通,谢应忠,刘可,宫菲,丹杨,王乐,郑琪琪. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应. *生态学报*, 2019, 39(2): 518-529.
- [4] 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.
- [5] 陈奕兆,李建龙,孙政国,刚成诚. 欧亚大陆草原带 1982-2008 年间净初级生产力时空动态及其对气候变化响应研究. *草业学报*, 2017, 26(1): 1-12.
- [6] Wang H, Liu G H, Li Z S, Ye X, Wang M, Gong L. Impacts of climate change on net primary productivity in arid and semiarid regions of China. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(1): 35-47.
- [7] 杨红飞,刚成诚,穆少杰,章超斌,周伟,李建龙. 近 10 年新疆草地生态系统净初级生产力及其时空格局变化研究. *草业学报*, 2014, 23

- (3): 39-50.
- [8] 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.
- [9] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [10] Xu D Y, Kang X W, Liu Z L, Zhuang D F, Pan J J. Assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification of Ordos region, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 855-868.
- [11] Hicke J A, Asner G P, Randerson J T, Tucker V, Los S, Birdsey R, Jenkins J C, Field C, Holland E. Satellite-derived increases in net primary productivity across North America, 1982-1998. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 1427.
- [12] 韩王亚, 张超, 曾源, 刘国华. 2000—2015 年拉萨河流域 NPP 时空变化及驱动因子. *生态学报*, 2018, 38(24): 8787-8798.
- [13] Zhou W, Gang C C, Zhou F C, Li J L, Dong X G, Zhao C Z. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 560-569.
- [14] Xu C C, Chen Y N, Yang Y H, Hao X M, Shen Y P. Hydrology and water resources variation and its response to regional climate change in Xinjiang. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 599-612.
- [15] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [16] 刘刚, 孙睿, 肖志强, 崔天翔. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. *生态学报*, 2017, 37(15): 4936-4945.
- [17] 普宗朝, 张山清. 气候变化对新疆天山山区自然植被净第一性生产力的影响. *草业科学*, 2009, 26(2): 11-18.
- [18] 刘卫国, 魏文寿, 刘志辉. 新疆气候变化下植被净初级生产力格局分析. *干旱区研究*, 2009, 26(2): 206-211.
- [19] 姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区 NPP 驱动力分析——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例. *生态学报*, 2019, 39(8): 2995-3006.
- [20] 许鹏. 新疆草地资源及其利用. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993.
- [21] 苏大学. 1:1000000 中国草地资源图的编制与研究. *自然资源学报*, 1996, 11(1): 77-83.
- [22] Plouffe C C F, Robertson C, Chandrapala L. Comparing interpolation techniques for monthly rainfall mapping using multiple evaluation criteria and auxiliary data sources: a case study of Sri Lanka. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 67: 57-71.
- [23] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.
- [24] 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.
- [25] Potter C S, Klooster S A. Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soil pools: response to changes in vegetation quality and biomass allocation. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1997, 49(1): 1-17.
- [26] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney M 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.
- [27] 彭少麟, 郭志华, 王伯荪. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率. *生态学报*. 2000, 20(6): 903-909.
- [28] 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.
- [29] 张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 周才平, 徐兴良. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2010, 29(11): 2004-2016.