

# 新疆博尔塔拉-精河流域植被净初级生产力 变化及其与主要气候因子的关系

赵 鹏<sup>1a,2</sup>, 于瑞德<sup>1a,①</sup>, 陈 桃<sup>1b,2</sup>, 郭艳飞<sup>1a,2</sup>, 吴燕良<sup>1a,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所: a. 干旱区环境演变实验室, b. 荒漠与绿洲国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为揭示新疆博尔塔拉-精河流域植被净初级生产力(NPP)的变化特征及其对气候变化的响应,基于MOD17A3遥感数据对2000年至2015年该地区植被NPP值的时空变化进行了分析,并对植被NPP值与主要气候因子(年均温和年均降水量)的相关性进行了分析。结果表明:在2000年至2015年,林地、耕地、灌木地和草地4种地表覆盖类型植被NPP值的平均值分别为321.1、254.1、190.3和131.7  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,整个研究区植被NPP值的平均值为0.0~393.7  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其空间分布呈现中间高、四周低的特征;57.22%区域的植被NPP值增加,19.90%区域的植被NPP值减少,22.88%区域的植被NPP值保持不变。相关性分析结果表明:53.45%区域的植被NPP值与年均温呈负相关,23.67%区域的植被NPP值与年均温呈正相关;41.65%区域的植被NPP值与年均降水量呈正相关,35.47%区域的植被NPP值与年均降水量呈负相关。值得注意的是,9.95%区域的植被NPP值与年均降水量呈显著正相关,且这些区域均为博尔塔拉河上游和中游两侧山地的草地。研究结果显示:在2000年至2015年,新疆博尔塔拉-精河流域的植被NPP值总体呈上升趋势;年均温和年均降水量对该区域植被生长有一定影响,并且年均降水量对博尔塔拉河上游和中游两侧山地的草地植被NPP值的影响最显著。

**关键词:** 净初级生产力(NPP); 博尔塔拉-精河流域; 时空变化; 年均温; 年均降水量; 相关性分析

中图分类号: Q141; Q948.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)01-0079-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.01.10

## Variation of vegetation net primary productivity in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang and its relationship with main climatic factors

ZHAO Peng<sup>1a,2</sup>, YU Ruide<sup>1a,①</sup>, CHEN Tao<sup>1b,2</sup>, GUO Yanfei<sup>1a,2</sup>, WU Yanliang<sup>1a,2</sup> (1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences; a. Laboratory of Environmental Change in Arid Lands, b. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(1): 79-84

**Abstract:** In order to reveal variation characteristics of vegetation net primary productivity (NPP) in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang and its response to climate change, temporal and spatial variations of vegetation NPP value in this area from 2000 to 2015 were analyzed based on MOD17A3 remote sensing data, and the correlation between vegetation NPP value and main climatic factors of annual mean temperature and annual mean precipitation was analyzed. The results show that from 2000 to 2015, the means of vegetation NPP values of four kinds of land cover types of forest land, cultivated land, shrub land, and grassland are 321.1, 254.1, 190.3, and 131.7  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectively, while the mean of vegetation NPP value of the whole research area is 0.0-393.7  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , and its spatial distribution shows a pattern of high in center and low in around; vegetation NPP value of 57.22% of the area increases, that of 19.90% of the area decreases, while that of 22.88% of the area remains unchanged. The

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目专项经费(2016B02017-4)

作者简介: 赵 鹏(1993—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事环境演变方面的研究。

①通信作者 E-mail: ruideyu@ms.xjb.ac.cn

correlation analysis result shows that vegetation NPP value of 53.45% of the area shows a negative correlation with annual mean temperature, while that of 23.67% of the area shows a positive correlation with annual mean temperature; vegetation NPP value of 41.65% of the area shows a positive correlation with annual mean precipitation, while that of 35.47% of the area shows a negative correlation with annual mean precipitation. Notably, vegetation NPP value of 9.95% of the area shows a significantly positive correlation with annual mean precipitation, and these areas are all grasslands in mountainous area on both sides of the upper and middle stream of Bortala River. It is suggested that from 2000 to 2015, vegetation NPP value in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang shows a tendency to increase in total; annual mean temperature and annual mean precipitation have a certain effect on growth of vegetation in this area, and annual mean precipitation has the most significant effect on vegetation NPP value of grasslands in mountainous area on both sides of the upper and middle streams of Bortala River.

**Key words:** net primary productivity (NPP); Bortala-Jinghe River Basin; temporal and spatial variations; annual mean temperature; annual mean precipitation; correlation analysis

净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指植物在单位时间、单位面积通过光合作用累积的有机物总量扣除自身生长消耗的有机物的量后剩余的部分<sup>[1]</sup>,不仅能反映植被固定CO<sub>2</sub>的能力,而且对维系陆地生态系统气候稳定有重要作用<sup>[2]</sup>。大气与陆地生态系统的碳循环主要由地表植被完成,因此,植被NPP值是评估生态系统碳汇及功能的重要因子。另外,植被NPP值也是评估生态环境修复情况及了解水资源开发和碳平衡生态效应的重要指标<sup>[3]</sup>。

MOD17A3 遥感数据已经被广泛应用于研究不同地区植被生长发育状况、监测环境变化、估算生物量和全球气候变化等领域<sup>[4-11]</sup>。小流域植被NPP值的动态变化与碳循环和碳扰动、气候变化、土地利用变化和自然资源管理等密切相关<sup>[1]</sup>。然而,关于小流域植被NPP值动态变化情况及其与气候关系的研究十分匮乏,因此,开展流域和区域尺度的植被NPP值动态变化研究具有十分重要的意义。

新疆博尔塔拉-精河流域位于干旱、半干旱地区,生态环境问题突出,生态退化程度很高<sup>[12]</sup>。博尔塔拉-精河流域是重要的防沙、治沙和湿地保护区,在天山北坡生态防护体系中占有重要地位。然而,随着全球气候变化和人类活动加剧,博尔塔拉-精河流域的荒漠化问题日益严重<sup>[13]</sup>。目前,关于该地区水资源可利用性、河流水文特征、气候变化特征和生态系统评价等方面<sup>[14-17]</sup>已有许多研究报道,但尚不清楚该地区植被生长对气候变化的响应。

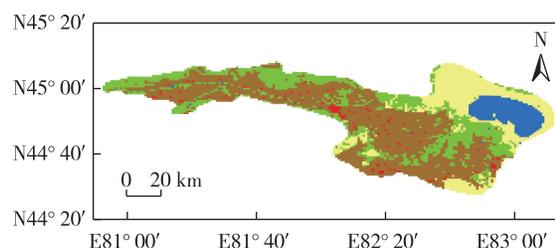
鉴于此,基于2000年至2015年的MOD17A3遥感数据,作者对新疆博尔塔拉-精河流域植被NPP值的时空变化及其与该地区主要气候因子年均温和年均降水量的关系进行了研究,以期探明博尔塔拉-精

河流域植被NPP值的中长期变化,了解该地区的环境承载力及其生态结构健康状况,为博尔塔拉-精河流域的生态环境保护和生态建设提供理论基础。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究区位于新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州的博尔塔拉-精河流域绿洲地区,地理坐标为北纬43°38'~45°52'、东经80°53'~85°02',主要由南北两侧的山地、中部的博尔塔拉谷地和东部的艾比湖盆地组成,海拔(400~2 000 m)由西向东递减。该地区属温带大陆性干旱气候,绿洲面积约6 337 km<sup>2</sup>,年均降水量约181 mm,年均蒸发量约1 562 mm,年均温6℃~8℃;地表覆盖类型主要有耕地、草地、林地、灌木地、水体、建设用地和裸地(图1),其中,耕地和草地面积分别占该地区总面积的45%和27%,林地和灌木地面积之和占该地区总面积的3%。



■: 耕地 Cultivated land; ■: 草地 Grassland; ■: 水体 Water body; ■: 建设用地 Building land; ■: 裸地 Barren land; ■: 林地 Forest land; ■: 灌木地 Shrub land.

图1 新疆博尔塔拉-精河流域的地表覆盖类型  
Fig. 1 Land cover type in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang

## 1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及处理方法 植被 NPP 值数据为美国 NTSG (numerical terradynamic simulation group) 网站 (<http://www.ntsug.umd.edu/>) 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域的 MOD17A3 遥感数据, 拟合模型为 BIOME-BGC 模型, 分辨率为 1 km×1 km, 并将非植被因子造成的异常值像元赋值为 0。地表覆盖数据来源于国家基础地理信息中心 (<http://www.globallandcover.com/>)。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>)。由于部分站点缺失个别年份数据, 故选用新疆 52 个站点 2000 年至 2015 年的年均温和年均降水量数据, 利用 Kriging 插值法<sup>[18-19]</sup>进行插值, 并将插值数据裁剪成与研究区大小、形状和分辨率一致的栅格图像。

1.2.2 相关性分析 基于像元计算新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值与年均温和年均降水量的相关系数<sup>[20]</sup>。相关系数介于-1~1, 大于 0 为正相关, 小于 0 为负相关, 等于 0 为不相关; 相关系数的绝对值越大, 说明相关性越强, 反之则相关性越弱。

1.2.3 变化趋势分析 采用一元线性回归分析法<sup>[21]</sup>, 基于像元分析 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值的变化, 单个像元线性回归线的斜率即年际变化率。

## 2 结果和分析

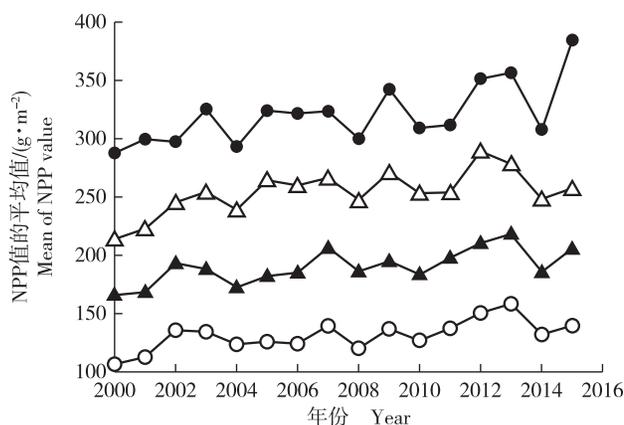
### 2.1 植被 NPP 值的时间变化特征

由 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域不同地表覆盖类型植被 NPP 值的变化(图 2)可见: 4 种地表覆盖类型的植被 NPP 值总体呈上升趋势且均在 2000 年最小, 但最大值的年份不同, 其中, 林地和耕地的植被 NPP 值分别在 2015 年和 2012 年最大, 灌木地和草地的植被 NPP 值在 2013 年最大。

在 2000 年至 2015 年期间, 林地的植被 NPP 值为 287.7~384.5 g·m<sup>-2</sup>, 平均值为 321.1 g·m<sup>-2</sup>; 耕地的植被 NPP 值为 213.9~289.2 g·m<sup>-2</sup>, 平均值为 254.1 g·m<sup>-2</sup>; 灌木地的植被 NPP 值为 166.3~206.2 g·m<sup>-2</sup>, 平均值为 190.3 g·m<sup>-2</sup>; 草地的植被 NPP 值为 106.7~158.6 g·m<sup>-2</sup>, 平均值为 131.7 g·m<sup>-2</sup>。根据植被 NPP 值的平均值, 该地区各地表覆盖类型植被 NPP 值从高到低依次为林地、耕地、灌木地、草地。

结果(表 1)表明: 2000 年至 2015 年整个研究区

植被 NPP 值的平均值、最大值和最小值变化存在明显差异。其中, 2003 年该地区植被 NPP 值的最小值最小, 仅为 0.2 g·m<sup>-2</sup>; 2013 年该地区植被 NPP 值的最大值最大, 为 484.7 g·m<sup>-2</sup>。根据植被 NPP 值的平均值, 其在 2000 年最小(182.0 g·m<sup>-2</sup>), 在 2012 年最大(248.6 g·m<sup>-2</sup>)。2000 年至 2015 年该地区植被 NPP 值的极差为 347.0~479.8 g·m<sup>-2</sup>, 极差最大



●: 林地 Forest land; △: 耕地 Cultivated land; ▲: 灌木地 Shrub land; ○: 草地 Grassland.

图 2 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域不同地表覆盖类型植被净初级生产力(NPP)的变化

Fig. 2 Variation of vegetation net primary productivity (NPP) of different land cover types in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang from 2000 to 2015

表 1 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域植被净初级生产力(NPP)的平均值( $\bar{X}$ )、最大值(Max)和最小值(Min)

Table 1 Mean( $\bar{X}$ ), the maximum value (Max), and the minimum value (Min) of vegetation net primary productivity (NPP) in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang from 2000 to 2015

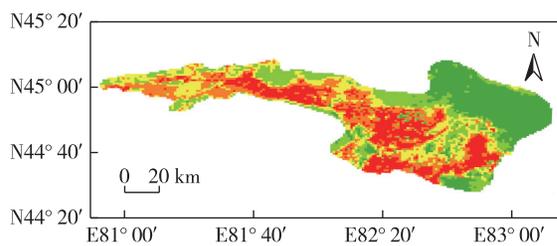
年份 Year	NPP/(g·m <sup>-2</sup> )		
	$\bar{X}$	Max	Min
2000	182.0	405.6	2.8
2001	190.3	412.2	35.4
2002	213.7	418.1	21.0
2003	219.2	470.2	0.2
2004	205.2	397.5	9.0
2005	223.0	435.4	6.2
2006	218.9	444.0	19.6
2007	228.5	422.5	35.6
2008	209.1	375.6	28.6
2009	230.7	481.5	1.7
2010	216.0	405.7	36.6
2011	220.1	400.2	32.7
2012	248.6	467.1	24.6
2013	244.4	484.7	30.2
2014	214.6	384.6	36.7
2015	223.1	416.1	37.7

值出现在 2009 年,极差最小值出现在 2008 年。

## 2.2 植被 NPP 值的空间变化特征

由 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值的平均值空间分布(图 3)可见;该地区植被 NPP 值的平均值为  $0.0 \sim 393.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其空间分布呈现中间高、四周低的特征。距离 2 条河流较近的区域多为耕地、林地和灌木地,植被 NPP 值的平均值较高( $213.1 \sim 393.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ );博尔塔拉河上游和中游两侧的山地及其下游入湖口区域多为草地,植被 NPP 值的平均值较低( $0.0 \sim 213.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ );2 条河流下游部分区域及艾比湖周围多为裸地和建设用地,几乎无植被覆盖,植被 NPP 值的平均值为  $0.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

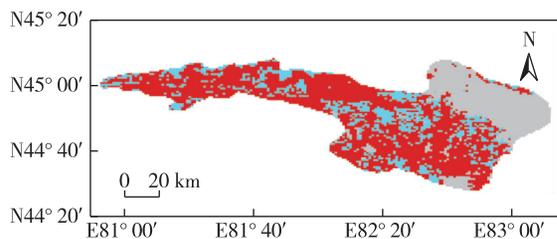
基于像元,对该地区植被 NPP 值与时间进行一元线性回归分析,从而获得植被 NPP 值空间分布的变化(图 4)。结果表明:环境因子改变导致植被 NPP 值空间分布变化呈现一定差异。该地区植被 NPP 值



■:  $M=0.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; ■:  $0.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} < M \leq 123.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; ■:  $123.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} < M \leq 213.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; ■:  $213.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} < M \leq 297.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; ■:  $297.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} < M \leq 393.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; M: 植被 NPP 值的平均值 Mean of vegetation NPP value.

图 3 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域植被净初级生产力(NPP)平均值的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mean of vegetation net primary productivity (NPP) in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang from 2000 to 2015



■: 减少 Decrease; ■: 不变 Unchange; ■: 增加 Increase.

图 4 2000 年至 2015 年新疆博尔塔拉-精河流域植被净初级生产力(NPP)空间分布的变化

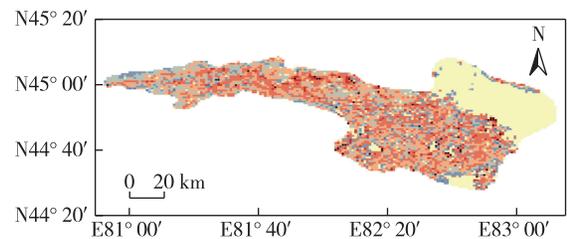
Fig. 4 Variation of spatial distribution of vegetation net primary productivity (NPP) in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang from 2000 to 2015

空间分布变化以增加为主,植被 NPP 值增加的区域占该地区总面积的 57.22%;植被 NPP 值减少的区域占该地区总面积的 19.90%,主要分布在博尔塔拉河上游两侧的山地区域及河流下游区域;植被 NPP 值不变的区域占该地区总面积的 22.88%,主要分布在城镇、艾比湖及其周围无植被的区域,这些区域主要为建设用地、水体和裸地。

## 2.3 植被 NPP 值与主要气候因子的相关性分析

基于像元,新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值与年均温和年均降水量的相关性分别见图 5 和图 6。

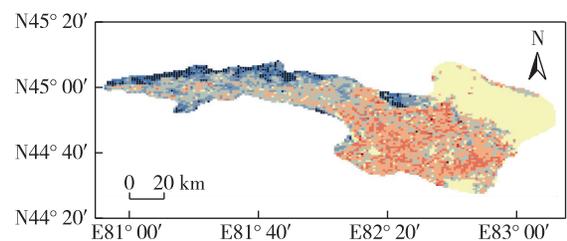
由图 5 可见;该地区 53.45%区域的植被 NPP 值与年均温呈负相关,其中 1.89%区域的植被 NPP 值与年均温呈显著( $P < 0.05$ )负相关;23.67%区域的植



■:  $-1.00 \leq R \leq -0.40$ ; ■:  $-0.40 < R \leq -0.20$ ; ■:  $-0.20 < R \leq -0.01$ ; ■:  $-0.01 < R \leq 0.01$ ; ■:  $0.01 < R \leq 0.20$ ; ■:  $0.20 < R \leq 0.40$ ; ■:  $0.40 < R \leq 1.00$ ; R: 植被 NPP 值与年均温的相关系数 Correlation coefficient between vegetation NPP value and annual mean temperature. ●:  $P < 0.05$ .

图 5 新疆博尔塔拉-精河流域植被净初级生产力(NPP)与年均温的相关性

Fig. 5 Correlation between vegetation net primary productivity (NPP) and annual mean temperature in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang



■:  $-1.00 \leq R \leq -0.40$ ; ■:  $-0.40 < R \leq -0.20$ ; ■:  $-0.20 < R \leq -0.01$ ; ■:  $-0.01 < R \leq 0.01$ ; ■:  $0.01 < R \leq 0.20$ ; ■:  $0.20 < R \leq 0.40$ ; ■:  $0.40 < R \leq 1.00$ ; R: 植被 NPP 值与年均降水量的相关系数 Correlation coefficient between vegetation NPP value and annual mean precipitation. ●:  $P < 0.05$ .

图 6 新疆博尔塔拉-精河流域植被净初级生产力(NPP)与年均降水量的相关性

Fig. 6 Correlation between vegetation net primary productivity (NPP) and annual mean precipitation in Bortala-Jinghe River Basin of Xinjiang

被 NPP 值与年均温呈正相关,其中 0.28% 区域的植被 NPP 值与年均温呈显著正相关;22.88% 区域的植被 NPP 值与年均温不相关。总体来看,新疆博尔塔拉-精河流域大部分区域的植被 NPP 值与年均温呈负相关,而与年均温呈正相关的区域则比较分散。

由图 6 可见:41.65% 区域的植被 NPP 值与年均降水量呈正相关,其中 9.95% 区域的植被 NPP 值与年均降水量呈显著正相关,这些区域主要分布在博尔塔拉河的上游和中游,尤其是其上游和中游两侧山地的草地植被 NPP 值与年均降水量的相关性最高;35.47% 区域的植被 NPP 值与年均降水量呈负相关,其中 0.24% 区域的植被 NPP 值与年均降水量呈显著负相关,这些区域主要分布在 2 条河流的下游;22.88% 区域的植被 NPP 值与年均降水量不相关,这些区域主要为水体、裸地和建设用地。

### 3 讨论和结论

高原<sup>[22]</sup>的研究结果表明:2000 年至 2010 年,新疆博尔塔拉河流域植被 NPP 值呈上升趋势。本研究中,林地、耕地、灌木地和草地 4 种地表覆盖类型的植被 NPP 值在 2000 年至 2015 年总体呈上升趋势,这可能与新疆地区气候持续暖湿化的变化有关<sup>[23]</sup>,这种气候变化利于植被生长。并且,整个研究区 57.22% 区域的植被 NPP 值增加。比较而言,在新疆博尔塔拉-精河流域,林地的植被 NPP 值最高,耕地的植被 NPP 值次之,灌木地的植被 NPP 值较低,草地的植被 NPP 值最低。不同植被类型特有的生物学性质导致其在同一气候条件下生产能力存在差异<sup>[24]</sup>。林地多位于适宜植被生长的地区,植物对太阳辐射的利用率高,虽然林地面积偏小,但乔木的生物量最大,因此,林地的植被 NPP 值最高;虽然耕地农作物的生物量偏小,但面积最大,因此,其植被 NPP 值也较高;相比而言,虽然灌木的生物量较大,但灌木地的面积却最小,而草地虽然面积较大,但草本植物的生物量却最小,因此,灌木地和草地植被 NPP 值总体上较低。实际上,新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值多年平均值的空间分布特征与地表覆盖类型关系密切。距离 2 条河流较近的区域多为耕地、林地和灌木地,其植被 NPP 值的平均值较高,而草地多分布在博尔塔拉河上游和中游两侧的山地及其下游入湖口区域,其植被 NPP 值的平均值较低,导

致新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值的空间分布呈现中间高、四周低的特征。

由于植被的生长状况与气候变化密切相关<sup>[25-26]</sup>,因此,探明植被 NPP 值对全球和区域气候变化的响应是研究植被与气候因子关系的一个重要方面<sup>[27]</sup>。20 世纪 80 年代至 90 年代以来,北疆地区的年均温和年均降水量均呈上升趋势,区域气候朝暖湿方向发展<sup>[28]</sup>,利于植被生长<sup>[23]</sup>。另外,人类活动也会对该区域植被 NPP 值产生影响,适当限制人类活动有利于促进该区域天然植被生长<sup>[29]</sup>。相关性分析结果表明:新疆博尔塔拉-精河流域上游和中游两侧山地的草地与年均降水量呈显著正相关,说明年均降水量对新疆博尔塔拉-精河流域上游和中游两侧山地的草地植被 NPP 值的影响很大。由于这些区域草地的海拔较高,且距离博尔塔拉河较远,植被受河流水量的影响较小,加上这些区域草地植被为天然草地植被,几乎没有人类活动干扰,据此推测,这些区域草地植被与年均降水量关系密切,年均降水量可能是影响这些区域草地植被 NPP 值的主要气候因子。相关性分析结果还表明:2 条河流下游区域大部分地区的植被 NPP 值与年均降水量呈负相关,这可能是由于 2 条河流下游区域水量充足,能够满足植被生长需求,降水时云层增厚反而影响植物的光合作用,从而抑制植物生长<sup>[30]</sup>。此外,新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值与年均温总体呈负相关,这可能是由于气温升高导致植物蒸发量增加,限制了植物生长。

值得注意的是,在博尔塔拉河上游和中游两侧山地的草地与年均降水量呈显著正相关的区域,部分草地的植被 NPP 值减少,这是因为虽然该地区年均降水量总体呈增加趋势,但极有可能存在空间分布不均现象,在降水量偏少的区域植被生长受到抑制。另外,2 条河流下游区域的植被 NPP 值减少,且这些区域与年均温和年均降水量的相关性不显著,推测这些区域植被 NPP 值减少可能与人类活动有关。

本研究中,2000 年至 2015 年,新疆博尔塔拉-精河流域的植被 NPP 值总体呈上升趋势,只有小部分区域(占该研究区总面积的 19.90%)植被 NPP 值减少;区内植被 NPP 值的平均值呈现中间高、四周低的分布特征,说明研究区内的植被主要分布在河流附近区域。总体来看,年均温和年均降水量对新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值有一定影响,其中,53.45% 区域的植被 NPP 值与年均温呈负相关,23.67% 区域

的植被 NPP 值与年均温呈正相关;41.65%区域的植被 NPP 值与年均降水量呈正相关,35.47%区域的植被 NPP 值与年均降水量呈负相关,且年均降水量对博尔塔拉河上游和中游两侧山地的草地植被 NPP 值影响最显著。

本研究利用 MOD17A3 遥感数据分析了新疆博尔塔拉-精河流域植被 NPP 值的时空变化及其对气候变化的响应,但在实际研究过程中没有考虑到人为活动(如灌溉、施肥和放牧等)对植被 NPP 值的影响,因此,该地区植被 NPP 值变化的主导因子到底是气候因子还是人为因子还需要后续的深入研究。

#### 参考文献:

- [1] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] 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.
- [3] 张燕,尹立河,胡伏生,等.毛乌素沙地海流兔河流域植被净初级生产力估算[J].*植物资源与环境学报*, 2017, 26(3): 84-91.
- [4] 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.
- [5] 王新闯,王世东,张合兵.基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局[J].*生态学杂志*, 2013, 32(10): 2797-2805.
- [6] 李剑萍,曹宁,桑建人,等.宁夏生物质能的遥感估算[J].*安徽农业科学*, 2011, 39(25): 15593-15596.
- [7] SCHUT A G T, IVITS E, CONIJN J G, et al. Trends in global vegetation activity and climatic drivers indicate a decoupled response to climate change[J]. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0138013.
- [8] 相恒星,王兴,张晶,等.基于 MOD17A3 的图们江流域植被 NPP 时空变化特征[J].*河南科学*, 2017, 35(7): 1125-1131.
- [9] 成方妍,刘世梁,张月秋,等.基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响[J].*生态学报*, 2017, 37(18): 5924-5934.
- [10] 李登科,范建忠,王娟.基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J].*生态学杂志*, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [11] 王琳,景元书,李琨.江苏省植被 NPP 时空特征及气候因素的影响[J].*生态环境学报*, 2010, 19(11): 2529-2533.
- [12] 毋兆鹏,胡江玲,陈学刚.博尔塔拉河、精河流域绿洲植被盖度变化的自然及人文耦合分析[J].*干旱区资源与环境*, 2010, 24(7): 127-133.
- [13] 王合玲,张辉国,秦璐,等.新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J].*生态学报*, 2012, 32(16): 4969-4980.
- [14] 高建芳,章曙明,李新贤.艾比湖流域水资源可利用量分析[J].*水文*, 2004, 24(5): 32-36.
- [15] 李艳红,楚新正,金海龙.新疆艾比湖流域水文特征分析[J].*水文*, 2006, 26(5): 68-71.
- [16] 格丽玛,何清,冷中笑,等.新疆艾比湖流域近 40 年来气候变化特征分析[J].*干旱区资源与环境*, 2007, 21(1): 54-58.
- [17] 任建丽,金海龙,叶茂,等.基于 PSR 模型对艾比湖流域生态系统健康评价研究[J].*干旱区资源与环境*, 2012, 26(2): 37-41.
- [18] 潘竟虎,李真.2001—2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化[J].*生态学杂志*, 2015, 34(12): 3333-3340.
- [19] 杨红飞,刚成诚,穆少杰,等.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[J].*草业学报*, 2014, 23(3): 39-50.
- [20] 李晓荣,高会,韩立朴,等.太行山区植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析[J].*中国生态农业学报*, 2017, 25(4): 498-508.
- [21] 穆少杰,李建龙,周伟,等.2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J].*生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [22] 高原.基于遥感的新疆 NPP 时空变化特征及其影响因素分析[D].兰州:西北师范大学地理与环境科学学院, 2015: 36-40.
- [23] 李军媛,徐维新,程志刚,等.1982—2006 年中国半干旱、干旱区气候与植被覆盖的时空变化[J].*生态环境学报*, 2012, 21(2): 268-272.
- [24] 陈雅敏,张伟倩,杨天翔,等.中国不同植被类型净初级生产力变化特征[J].*复旦学报(自然科学版)*, 2012, 51(3): 377-381.
- [25] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [26] MELILLO J M, MCGUIRE A D, KICKLIGHTER D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [27] ZHANG H, GAO S, ZHENG Q. Responses of NPP of salinized meadows to global change in hyperarid regions[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(3): 489-498.
- [28] 甘艳露,李宏,马勇刚,等.近 50 年新疆北疆地区气候变化趋势分析研究[J].*云南地理环境研究*, 2012, 24(6): 80-86.
- [29] 王璐,丁建丽.艾比湖保护区荒漠植被时空过程变化及其植被指数影响因素分析[J].*草业学报*, 2015, 24(5): 4-11.
- [30] 蒋高明.陆地生态系统净第一性生产力对全球变化的响应[J].*植物资源与环境*, 1995, 4(4): 53-59.

(责任编辑:佟金凤)