

DOI: 10.5846/stxb202201260251

陈春波, 李刚勇, 彭建. 1981—2018 年新疆草地归一化植被指数时空特征及其对气候变化的响应. 生态学报, 2023, 43(4): 1537-1552.

Chen C B, Li G Y, Peng J. Spatio-temporal characteristics of Xinjiang grassland NDVI and its response to climate change from 1981 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1537-1552.

1981—2018 年新疆草地归一化植被指数时空特征及其对气候变化的响应

陈春波^{1,2}, 李刚勇^{2,3,*}, 彭建^{2,3}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 干旱区草地生态系统遥感监测实验室, 乌鲁木齐 830049

3 新疆维吾尔自治区草原总站, 乌鲁木齐 830049

摘要: 在新疆开展长时间序列的草地监测, 分析草地生长的时空变化特征, 有利于草地环境压力分析和草地生态健康预测。以 NOAA-AVHRR NDVI 为数据源, 采用最大值合成、一元回归分析与相关性分析, 分别在年际尺度和多个空间尺度(全疆、南北疆与各地区及其 11 种草地类型)上探讨了 1981—2018 年新疆草地归一化植被指数(NDVI)时空特征及其对气温、降水的响应。结果表明: (1) 1981—2018 年, 新疆草地 NDVI 多年均值 0.326, 变化范围 0.259—0.386, 具有轻微年际波动特征; (2) 北疆、南疆草地 NDVI 均表现为轻微增加趋势; 全疆占草地总面积 41% 的区域 NDVI 呈显著增加趋势, 9% 为显著减少区域, 北疆草地 NDVI 显著增加的面积是南疆的 1.7 倍; (3) 由于垂直地带性及区域差异, 新疆草地 NDVI 由山区向盆地的荒漠降低; 北疆草地 NDVI 是南疆 1.4 倍, 总体上北疆各地区草地 NDVI 高于南疆各地区; (4) 草地类型植被 NDVI 对降水的显著响应高于气温, 其中温性荒漠类、温性荒漠草原类与温性草原类草地 NDVI 对降水变化的响应明显高于其余草地类型, 降水对草地 NDVI 的影响更为显著, 表明降水引起的地表水分变化是草地植被生长的重要限制因子。

关键词: 新疆草地; 时空特征; 归一化植被指数(NDVI); 气候变化

Spatio-temporal characteristics of Xinjiang grassland NDVI and its response to climate change from 1981 to 2018

CHEN Chunbo^{1,2}, LI Gangyong^{2,3,*}, PENG Jian^{2,3}

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Joint Laboratory for Remote Sensing Observation of Grassland Ecosystem in Arid Area, Urumqi 830049, China

3 Xinjiang Grassland Technical Promotion Station, Urumqi 830049, China

Abstract: Xinjiang Uygur Autonomous Region (Xinjiang) locates in the arid region of Northwest China. Xinjiang includes 11 grassland types and is one of the five largest pastoral areas in mainland China. Due to climate change and drastic in human activities, we should more focus on grassland ecological security and health. It is necessary to carry out long time series grassland observation based on remote sense. Then, we could further explore spatio-temporal features of grassland, and analyze current environmental pressure on grassland and predict the trend of grassland ecological health. Here, this research was designed to explore spatiotemporal dynamic characteristics of Xinjiang grassland Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) on different spatial scales (e.g., Xinjiang, northern and southern Xinjiang, 14 administrative

基金项目: 2020 年自治区创新环境(人才、基地)建设专项(天山青年计划)(2020Q084); 2020 年自治区创新环境(人才、基地)建设专项—自然科学基金(自然科学基金)青年科学基金项目(2020D01B57); 2021 年中央财政林业草原生态保护恢复资金(草原生态修复治理补助)项目(XJ-CYZZ202104); 2020 年第一批中央财政林业草原生态保护恢复资金(草原生态修复治理补助)项目(XJCYZZ202001)

收稿日期: 2022-01-26; 网络出版日期: 2022-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ligangyong1013@hotmail.com

districts and 11 natural grassland types) based on NOAA-AVHRR NDVI dataset from 1981 through 2018, with the method of descriptive statistics, maximum synthesis, and linear regression, respectively. We also analyzed the response of natural grassland NDVI to climate change (e.g., temperature and precipitation) due to correlation and partial correlation. The results illustrate that NDVI of grassland in Xinjiang showed the spatial and temporal variation during the past 40 years, and the responses of Xinjiang grassland NDVI to temperature and precipitation were different. The NDVI of grassland vegetation in Xinjiang showed a slight increase trend with slight interannual fluctuations from 1981 to 2018. After 2000, the interannual variation of grassland NDVI was further decreased. Overall, the Xinjiang grassland NDVI decreased gradually from Ili River Valley, Tianshan Mountains, western Junggar Mountains, Altai Mountains and Kunlun Mountains to Junggar Basin and Tarim Basin. The grassland NDVI, which accounted for 41% of the total grassland area in Xinjiang, showed a significant increase trend. However, 9% of Xinjiang grassland NDVI was a significant decrease trend. Although the grassland NDVI in northern and southern Xinjiang showed a slight increase trend, the water and heat conditions in northern and southern Xinjiang were different. The NDVI of grassland vegetation in northern Xinjiang was 1.4 times that of southern Xinjiang, and the area of grassland vegetation in northern Xinjiang showed a significant increase in NDVI. Correspondingly, the NDVI of grassland in northern Xinjiang was higher than that in southern Xinjiang. The NDVI of grassland types in Xinjiang had a significantly higher response to precipitation than air temperature. Among them, the NDVI of temperate desert grassland, temperate desert-steppe grassland, and temperate steppe grassland had significantly higher responses to precipitation changes than other grassland types, and precipitation had a greater impact on grassland NDVI. Our results indicated that the change of surface moisture caused by precipitation was an important limiting factor for grassland vegetation growth. Since the 1980s, climate in Xinjiang has been warming and humidifying. In this background, this research analyzed the response of grassland vegetation NDVI to temperature and precipitation in the same period. However, the impact of temperature and precipitation changes on Xinjiang grassland NDVI is particularly complicated, especially at different temporal and spatial scales. In the next step, it is necessary to be studied by using multi-source datasets to carry out long-time series scenario simulation.

Key Words: Xinjiang grassland; temporal and spatial characteristics; normalized difference vegetation index (NDVI); climate change

草地是我国陆地生态系统的重要组成部分,具有固沙防尘、涵养水源、调节气候等重要功能,在生物多样性保护及碳汇功能维持等方面发挥着重要作用^[1]。健康的草地生态系统具有活力,能维持自我运作能力,为人类持续提供生态服务^[2-3]。然而,草地生态一旦受损,不仅无法承载牲畜、调节区域气候、维持生态平衡,还将成为沙尘暴策源地^[4]。在生态环境脆弱的新疆,草地具有重要的生态地位,不仅是我国畜牧业发展的基本生产资料,也是保障农牧民生产生活与传承草原文化的基础。因此,在气候变化背景下,及时、准确地掌握草地生长的时空变化,既是草地生态健康评价的需要,也对新疆社会经济可持续发展具有重要意义。

近年来,以空天遥感为主的对地观测逐渐成为区域草地动态监测的重要技术手段。经遥感计算的植被指数,能够监测草地物候,量化草地植被生长状况,已广泛用于草地植被监测。国内学者基于遥感技术对新疆草地开展了大量工作,推动了新疆草地研究由样地样方尺度^[5-7]扩展到区域尺度,常用的数据源包括 MODIS NDVI(2000—至今)^[8-10]、SPOT-NDVI(1999—2020年)、AVHRR GIMMS NDVIg(1981—2006年)、AVHRR GIMMS3g NDVI(1981—2012年)^[11-13]与 NOAA-AVHRR NDVI(1981—至今)。当前,卫星遥感仍是新疆草地动态监测的重要数据源,常用于草地时序变化研究。如蔡朝朝等采用 2000—2018 年生长季(4—10月)的 MOD13A2-NDVI 数据,分析了新疆草地覆盖变化特征^[14];荀其蕾等基于 2010—2014 年 MOD09GA 遥感数据,分析了新疆草地的生长状况^[15];闫俊杰等利用 2000—2016 年 MOD13Q1-NDVI 时间序列数据,分析了新疆伊犁河谷近 17 年草地 NDVI 变化趋势^[10]。采用遥感数据量化分析草地对气候变化的响应,如陈宸等采用

1999—2018 年 SPOT-NDVI 卫星遥感数据,研究了近 20 年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应^[16];杜梦洁等采用 CASA 模型与 Landsat NDVI 数据计算草地 NPP,分析了环境因子对草地 NPP 分布格局的影响^[17];杨静雅等采用 Landsat 与 MODIS-NDVI 数据,分析了新疆和静县草地植被覆盖动态变化及其对气温、降水的响应^[18]。应用遥感模型估算草地 NPP 进而分析草地与气候变化的相关性,如张仁平等利用 CASA 模型与 MOD13Q1 数据,阐述了 2001—2014 年新疆草地 NPP 空间分布及其对气候变化的响应^[19];赵鹏等采用 1982—2015 年 GIMMS3g-NDVI 数据集,开展了气候变化与人类活动对新疆草地 NPP 影响的定量分析^[11],其 GIMMS3g-NDVI 数据集的空间分辨率 8 km×8 km,时间分辨率 15 天^[11,20]。目前,关于新疆草地时空特征与气候变化的研究已有了一些成果,但研究时段大多集中在 2000 年之后,且草地数据的时空分辨率和类型刻画有待进一步提高。综上所述,面向草原行业部门,针对新疆各地区、自治州与地级市(即各地、州、市,以下统称地区)及其 11 种草地类型,开展长时间序列的研究较少,特别是利用遥感监测 20 世纪 80 年代以来各地区及其草地类型的时空动态特征以及对气候变化的响应。

本研究采用最新发布的 NOAA-AVHRR NDVI 数据集开展时空动态分析,时间跨度为 1981—2018 年,空间分辨率为 5 km×5 km,时间分辨率为日尺度,在定量研究草地植被时空变化方面更具优势。以 NDVI 作为草地生态重要指标,在全疆、南疆与北疆、各地区以及 11 种草地类型中分别开展草地 NDVI 变化监测,分析不同时空背景下草地 NDVI 时序变化及其对气候变化的响应,探讨 1981—2018 年新疆草地时空变化以及草地生态环境面临的压力,能够为新疆草地健康评价和草地生态服务功能评价提供数据支撑。旨在为新疆草地资源合理利用、草地生态环境保护与生态保护补偿制度改革,进一步开展新疆草地健康评价与生态服务功能评价,为国家实现碳达峰、碳中和战略提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

新疆地处祖国西北、亚欧大陆腹地,面积 160 多万 km²(图 1)。新疆地域广阔,“三山夹两盆”的地形地貌发育了山地、绿洲、荒漠,由北向南依次为阿尔泰山、准噶尔盆地、天山、塔里木盆地与昆仑山。新疆位于亚洲干旱核心区,气候干旱少雨、蒸发强,属于典型的温带大陆性气候,特殊的自然地理环境引起水热时空分布差异,导致降水分布极不均匀,总体上北疆多于南疆^[21],西部多于东部,山区多于盆地,多年平均降水约 150 mm。研究显示,20 世纪 60 年代以后新疆气候由暖干型向暖湿型变化,降水表现为增加趋势;然而,降水绝对量值较低,从根本上无法改变新疆水资源的短缺^[22]。新疆天然草地居全国第三位(面积 5.725×10⁷ hm²),从平原到山地分布有多种草地类组(荒漠、草原、草甸与沼泽),总计 11 个大类、25 个亚类、131 个草地组和 687 个草地型。新疆天然草地 11 大类包括沼泽类、低平地草甸类、温性荒漠类、温性草原化荒漠类、温性荒漠草原类、温性草原类、温性草甸草原类、山地草甸类、高寒草甸类、高寒草原类与高寒荒漠类^[23](图 1)。

1.2 数据来源与预处理

气候数据来自国家青藏高原科学数据中心-中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49/>),数据源为*.nc 格式,时间分辨率 3 小时,空间分辨率 10 km×10 km。CMFD 以中国气象局常规气象观测为数据基础,参考了国际主流的 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)、GLSMD (Global Land Surface Model Data)、GLDAS (Global Land Data Assimilation System)与 GEWEX-SRB (Global Energy and Water Exchanges-Surface Radiation Budget)等数据,精度介于卫星遥感与气象局观测之间,优于国际上已发布的再分析数据^[24-25]。

NOAA-AVHRR 卫星遥感数据为归一化植被指数(NDVI,<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ndvi-normalized-difference-vegetation-index-noaa-avhrr>)。该数据集为逐日空间数据,空间分辨率 5 km×5 km,椭球体为 WGS-84,源数据格式*.nc。本研究获取了 1981—2018 年 NOAA-AVHRR NDVI 数据集。其它辅助数据包括新疆天然草地类型。

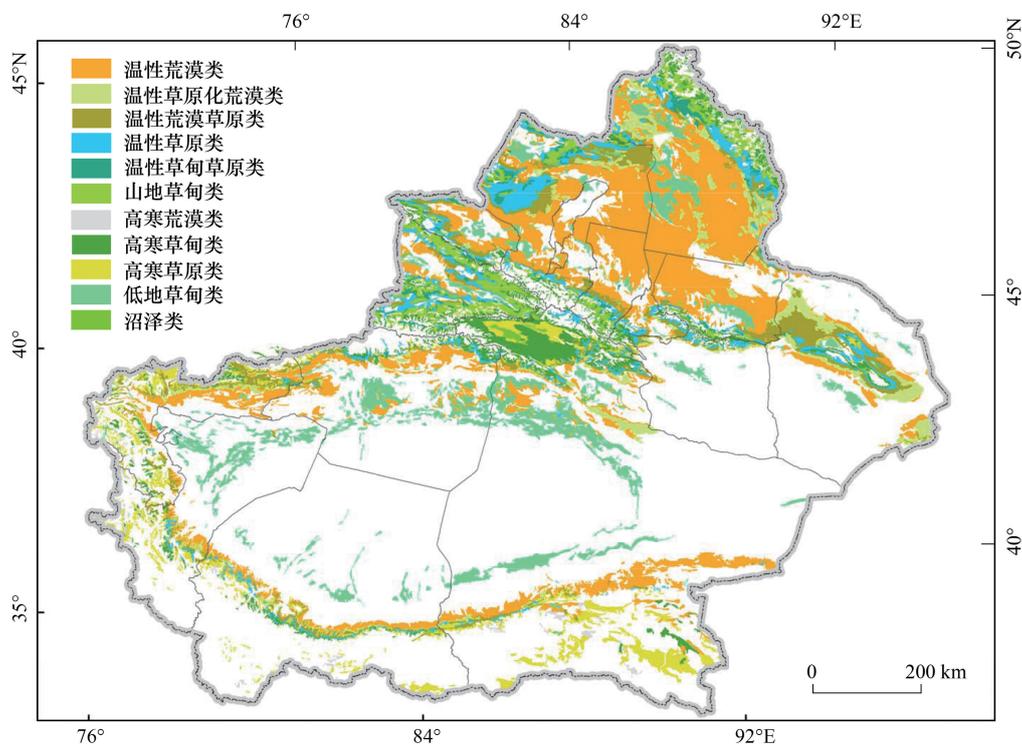


图1 新疆草地类型地理分布

Fig.1 Geographical distribution of grassland types in Xinjiang

新疆天然草地类型来源于新疆维吾尔自治区草原总站,该数据经预处理(坐标转换、投影变换与重采样)后作为新疆草地的掩膜(MASK)数据。本研究涉及的CMFD,主要为1981—2018年的气温和降水。关于CMFD预处理,主要包括降水速率转化为年降水,3小时气温转化为年均温。NOAA-AVHRR NDVI数据,经格式转化(即*.nc转*.tif格式)、镶嵌、投影转换与裁剪后,生成新疆草地NDVI数据。新疆维吾尔自治区标准地图为*.jpg格式,在ArcGIS中矢量化与赋值属性,生成全疆、各地区数据库文件。

1.3 研究方法

1.3.1 最大合成法

最大值合成(MVC)常用于具重访周期的卫星影像合成,以减少或消除云层、天气或其它因素对数据的影响^[26-27]。NOAA-AVHRR NDVI数据集时间分辨率为日尺度,能够每天获取地面植被信息,客观地捕捉了逐日地表植被特征。本研究采用MVC法开展NOAA-AVHRR NDVI数据处理,得到1981—2018年新疆草地年尺度NDVI栅格图像,代表草地植被的年内最佳生长状态。

1.3.2 草地NDVI统计方法

采用1981—2018年新疆草地NDVI,基于草地类型、各地区、南北疆及其全疆尺度分别计算草地NDVI均值与标准差。在空间上统计草地NDVI标准差,分析各个像元草地NDVI距离平均水平状况,反映研究时段草地NDVI的空间异质性变化。以上草地NDVI的分区统计与结果输出,均采用GDAL(地理数据格式操作库, <https://gdal.org/>)与Python编程语言实现。

1.3.3 草地NDVI趋势分析

在像元尺度上,本研究采用一元线性回归方法,计算1981—2018年新疆草地NDVI的年际变化率,表征草地在时间上的变化趋势及变化强度^[11],该方法综合考虑了研究时段内各年份草地NDVI,计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - (\sum_{i=1}^n i) \times (\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中, n 为研究时段的长度(本研究中 NDVI 数据为 1981—2018 年, $n=38$); i 为研究年份序号, 即 1981=1, 1982=2, …, 2018=38; $NDVI_i$ 为研究时段 i 年草地 NDVI 取值; θ_{slope} 为草地 NDVI 的年际变化率, 若 $\theta_{slope} > 0$, 草地 NDVI 呈增加趋势, 若 $\theta_{slope} < 0$, 草地 NDVI 呈减少趋势。

1.3.4 草地 NDVI 相关性分析

为量化草地 NDVI 与气温、降水的相关关系, 本研究采用 Pearson 相关分析, 在像元尺度上计算新疆草地 NDVI 与气温、降水间的单相关系数^[16], 计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, R_{xy} 为相关系数; x_i 为第 i 年草地 NDVI; y_i 为第 i 年气温、降水; \bar{x} 为研究时段草地植被 NDVI 均值; \bar{y} 为研究时段气温、降水均值。当 $|R_{xy}| > 0.8$ 为高度相关, $0.5 < |R_{xy}| < 0.8$ 为中度相关, $0.3 < |R_{xy}| < 0.5$ 且为低度相关, 一般情况下 $|R_{xy}| < 0.3$ 为不相关^[9,28]。

草地 NDVI 与同期气温、降水的偏相关系数, 即假定气温不变, 草地 NDVI 与降水之间的关系, 计算公式如下:

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

式中, $R_{xy \cdot z}$ 为假设变量不变的情况下, x 与 y 之间的偏相关系数, 以此类推。

2 结果与分析

2.1 新疆草地 NDVI 时空特征

2.1.1 新疆草地 NDVI 年际变化

1981—2018 年, 新疆草地 NDVI 呈微弱增加趋势并伴随轻微波动 ($R^2 = 0.5, P < 0.05$), 草地 NDVI 多年均值 0.326, 从 0.289 (1981 年) 增长到 0.356 (2018 年), 增加了 0.067 (图 2)。1981—1990 年新疆草地多年平均 NDVI 为 0.296, 1991—2000 年为 0.317 (与 1981—1990 年相比的增长率为 +7.1%), 2001—2010 年为 0.346 (与 1981—1990 年相比的增长率为 +16.7%), 2011—2018 年为 0.349 (与 1981—1990 年相比的增长率为 +17.9%)。分别将草地 NDVI 与前一年比较 (即同比), 草地 NDVI 年际振荡幅度逐渐缩小 (图 2)。1982—2000 年草地 NDVI 正负增长交替, 2001—2005 年为持续正增长, 2006 年增势略减 (-0.059), 2007—2018 年草地 NDVI 为正负增长。同 1981 年相比, 草地 NDVI (1982—2018 年) 总体为递增趋势, 仅 1982 年、1983 年和 1989 年草地 NDVI 为负增长 (图 2)。1989 年草地 NDVI 增量为 -0.03, 2005 年增量为 0.097, 同 1989 年比较, 2005 年草地 NDVI 增加了 0.127。

2.1.2 新疆草地 NDVI 空间格局及其变化趋势

利用 1981—2018 年 NOAA-AVHRR NDVI 数据集, 计算研究时段内草地 NDVI 的平均值, 得到新疆草地 NDVI 的空间分布图 (图 3)。采用一元线性回归方法, 计算同期新疆草地 NDVI 变化率并进行显著性检验, 得到草地 NDVI 年际变化及其显著性的空间分布图 (图 4)。总体来看, 新疆草地 NDVI 具有空间差异, 由伊犁河谷、天山、阿尔泰山及其准噶尔西部山地向准噶尔盆地与塔里木盆地逐渐降低 (图 3); 同时, 新疆草地 NDVI 的年际变化也具有分异特征, 草地 NDVI 年际变化呈减少趋势的区域主要分布于准噶尔盆地内、东天山北坡与昆仑山中段、东段以及阿尔金山 (图 4)。

新疆草地 NDVI 的高值 ($NDVI > 0.5$) 区域分布于伊犁河谷、天山山脉、准噶尔西部山地以及阿尔泰山, 草地 NDVI 低值 ($NDVI < 0.2$) 区域位于准噶尔盆地腹地、昆仑山中段、东段与阿尔金山及其塔里木盆地边缘 (图 3)。基于空间统计结果, 新疆草地 NDVI 高值区域占全疆草地总面积的 17.93%, 低值区域面积占比为 31.85%; 进一步划分后, 草地 NDVI ($NDVI > 0.3$, 且 $NDVI < 0.5$) 的面积占比为 26.87%, 其中草地 NDVI ($NDVI > 0.4$, 且 $NDVI < 0.5$) 面积占比仅为 11.85%。

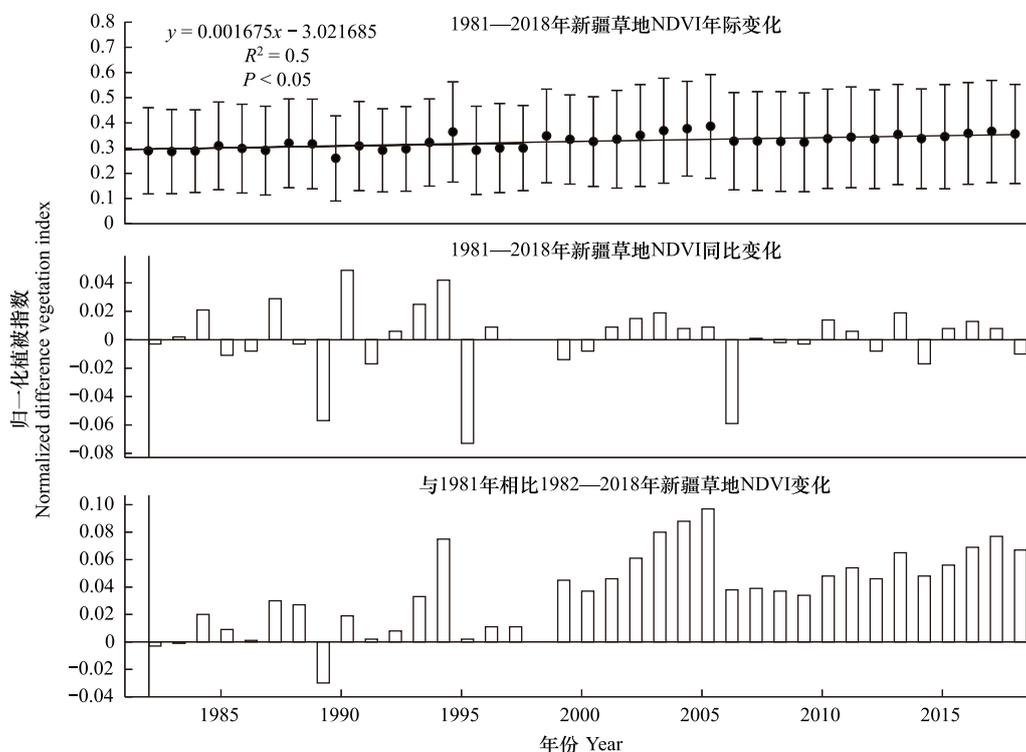


图2 新疆草地归一化植被指数时序变化

Fig.2 Temporal variation of normalized difference vegetation index (NDVI) in Xinjiang grassland

通过 1981—2018 年新疆草地 NDVI 年际变化分析,可以看出:占全疆草地总面积 68.84% 的区域,草地 NDVI 表现为增加趋势,31.17% 的区域为减少趋势,主要分布于准噶尔盆地内、东天山北坡与昆仑山中段、东段以及阿尔金山(图 4)。经显著性检验(t 检验)后,占新疆草地总面积的 41.06% 区域,草地 NDVI 呈显著增加趋势($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.05$),27.78% 的区域草地 NDVI 表现为增加趋势($\theta_{\text{slope}} > 0, P > 0.05$);占比 9% 的草地 NDVI 为显著减少($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.05$),22.17% 为减少趋势($\theta_{\text{slope}} < 0, P > 0.05$)(图 4)。

2.2 新疆南、北疆草地 NDVI 变化

2.2.1 南疆、北疆草地 NDVI 时序特征

本研究进一步分析了 1981—2018 年新疆南、北疆草地 NDVI 的时空变化。从时间上分析,北疆草地 NDVI 呈轻微增加趋势($R^2 = 0.57, P < 0.05$),1981—2018 年北疆草地 NDVI 值分布在 0.301—0.442 之间(图 5);南疆草地 NDVI 也表现出微弱增加趋势($R^2 = 0.35, P < 0.05$),NDVI 位于 0.214—0.327 间(图 5)。在 1989 年,南、北疆草地 NDVI 值均为研究时段的最低值。尽管南、北疆草地 NDVI 都表现为增加趋势,但北疆草地 NDVI 的多年平均值(0.379)是南疆(0.270)的 1.4 倍。北疆、南疆草地 NDVI 在空间上具有显著的异质性($P < 0.01$)。

从空间上来看,北疆草地 NDVI 高值(NDVI > 0.5)区域位于伊犁河谷、天山北坡、准噶尔西部山地以及阿尔泰山南坡,NDVI 低值(NDVI < 0.2)区域位于准噶尔盆地腹地(图 3)。南疆草地 NDVI 高值区位于天山南

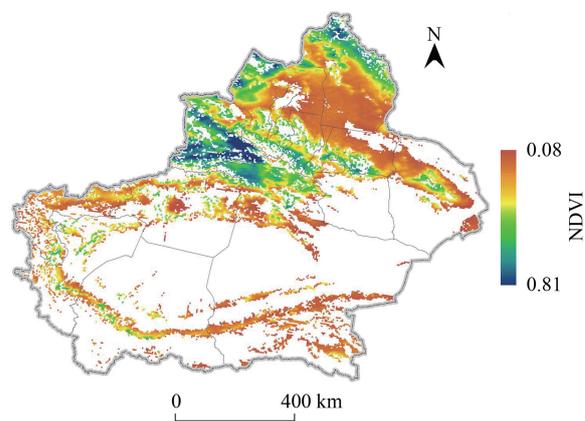


图3 1981—2018 年新疆草地多年平均 NDVI 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of mean average grassland NDVI in Xinjiang from 1981 to 2018

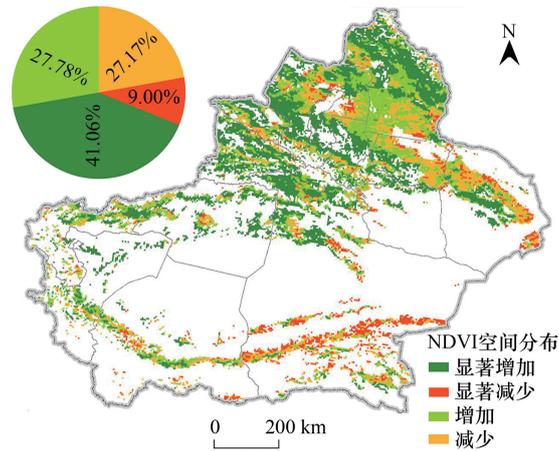


图 4 1981—2018 年新疆草地 NDVI 年际变化趋势及其显著性检验

Fig.4 Variation trend of grassland NDVI and its significance testing in Xinjiang from 1981 to 2018

坡。进一步分析研究时段内草地 NDVI 的年际变化趋势,经空间统计后显示:北疆草地 NDVI 呈增加趋势 ($\theta_{slope} > 0$) 的面积占全疆草地总面积 40.61%,显著增加的面积占比为 24.54% ($\theta_{slope} > 0, P < 0.05$);北疆草地 NDVI 表现为减少趋势 ($\theta_{slope} < 0$) 的面积占比为 11.82%,显著减少占比为 1.71% ($\theta_{slope} < 0, P < 0.05$) (图 4)。南疆草地 NDVI 表现为增加趋势的面积占比为 25.28% ($\theta_{slope} > 0$),减少趋势占比为 22.3% ($\theta_{slope} < 0$),其中显著增加占比为 14.76% ($\theta_{slope} > 0, P < 0.05$),显著减少占比为 6.9% ($\theta_{slope} < 0, P < 0.05$) (图 4)。

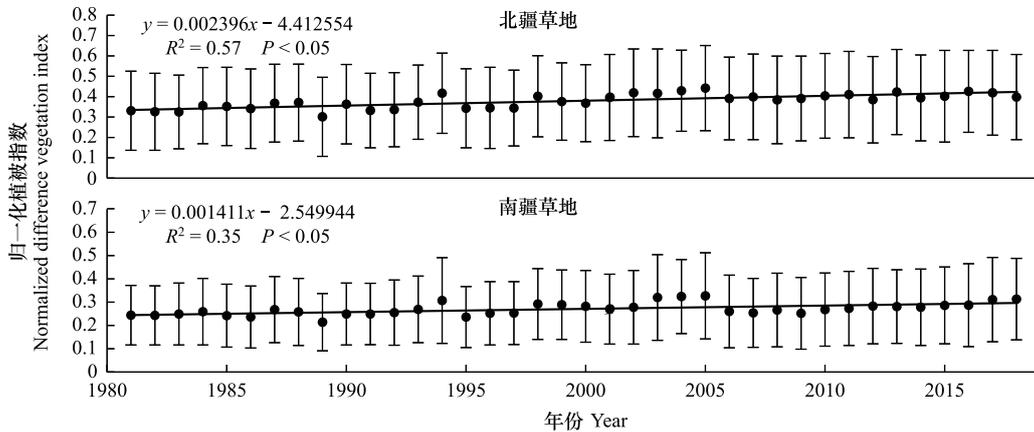


图 5 新疆北疆、南疆草地 NDVI 年际变化

Fig.5 Variation of grassland NDVI in northern and southern Xinjiang from 1981—2018

2.2.2 新疆各地区草地 NDVI 变化

本研究统计了 1981—2018 年新疆各地区草地 NDVI 平均值与标准差,得到了各地区草地 NDVI 的年际变化(图 6),分析了各地区草地 NDVI 的变化趋势并进行了显著性检验,在空间上统计了 1981—2018 年各地区草地 NDVI 变化的面积占比(表 1)。1981—2018 年新疆各地区草地 NDVI 呈微弱增加伴有年际波动。克拉玛依市草地 NDVI 增加趋势显著 ($R^2 = 0.85, P < 0.01$),其次为阿克苏地区 ($R^2 = 0.77, P < 0.01$) 与喀什地区 ($R^2 = 0.64, P < 0.01$);伊犁州直属县(市)、博尔塔拉蒙古自治州与塔城地区草地 NDVI 变化趋势的 R^2 (拟合优度) 介于 0.5—0.6,均通过了显著性检验 ($P < 0.01$)。乌鲁木齐市、巴音郭勒蒙古自治州、哈密市与克孜勒苏柯尔克孜自治州草地 NDVI 变化趋势的 R^2 较低,也通过了显著性检验 ($P < 0.05$)。和田地区草地 NDVI 呈轻微增加趋势,但是 R^2 极低,没有通过显著性检验 ($P > 0.05$)。

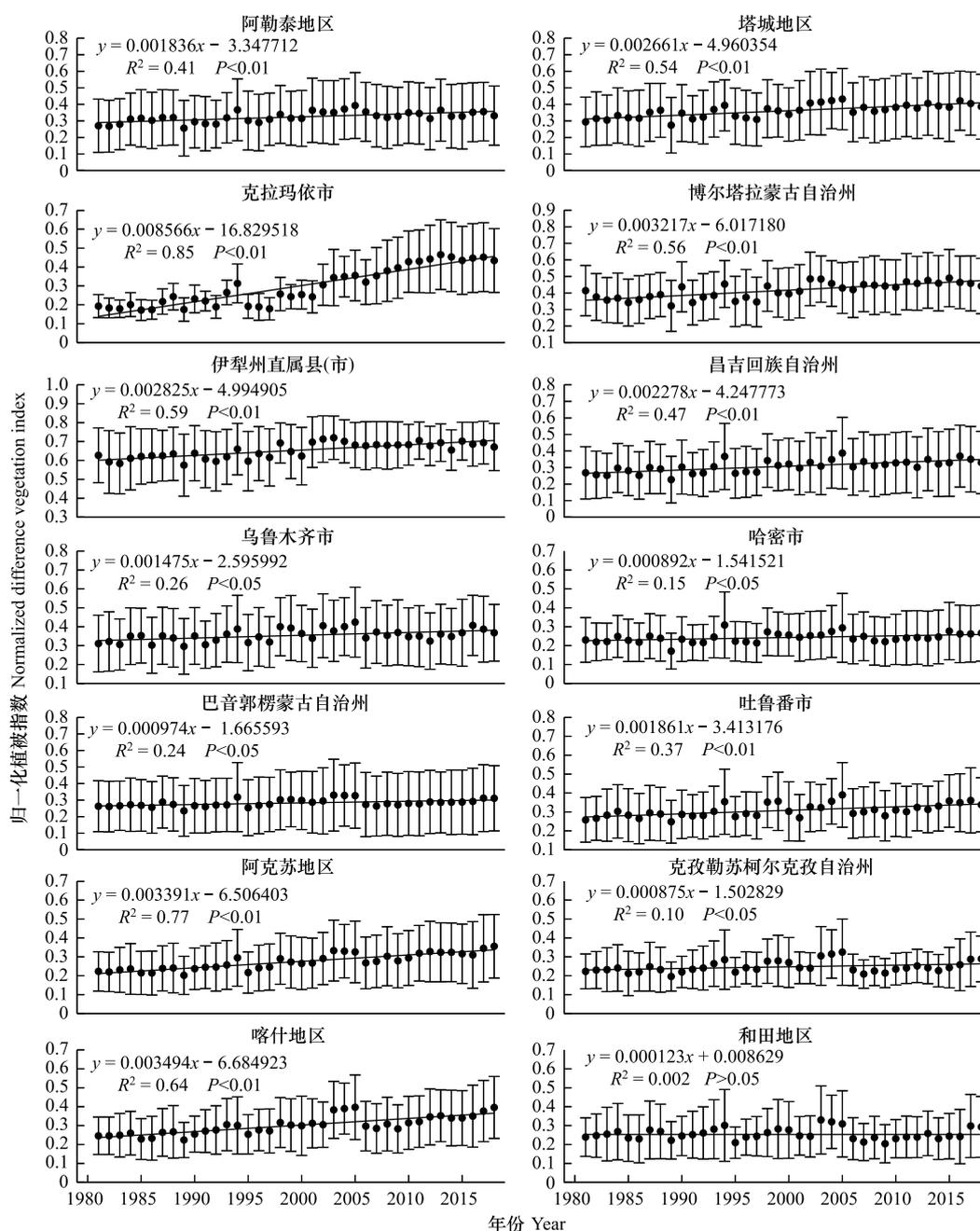


图 6 1981—2018 年新疆各地区草地 NDVI 年际变化

Fig. 6 Changing trend of grassland NDVI in various states, Xinjiang from 1981 to 2018

基于新疆各地区分别统计了草地 NDVI 变化占全疆草地总面积的比重(表 1)。阿勒泰地区(8.19%)、塔城地区(6.47%)与巴音郭勒蒙古自治州(6.13%)的草地 NDVI 呈显著增加($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.05$)的面积占比高于其它地区,巴音郭勒蒙古自治州(4.8%)、哈密市(1.07%)与和田地区(0.77%)草地 NDVI 呈显著减少($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.05$)的占比高于其它地区。研究中计算了 1981—2018 年新疆各地区草地 NDVI 多年平均值,结果显示北疆各地区草地 NDVI 高于南疆各地区,总体来看伊犁州直属县(市)草地 NDVI 最大(0.678),其次为博尔塔拉蒙古自治州(0.443)与塔城地区(0.385),哈密市(0.251)草地 NDVI 最低。除昌吉州外,北疆各地区草地 NDVI 均大于 0.35;南疆各地区草地 NDVI 位于 0.25–0.35,喀什地区草地 NDVI(0.332),克孜勒苏柯尔克孜自治州草地 NDVI 最低(0.257)。

表 1 1981—2018 年新疆各地区草地 NDVI 变化面积占比/%

Table 1 Area percentage of grassland NDVI change in Xinjiang prefecture, autonomous prefecture, and prefecture-level city during 1981 to 2018

地区、自治州、地级市 Prefecture, autonomous prefecture, and prefecture-level city	显著增加 Significant increase	增加 Increase	显著减少 Significant decrease	减少 Decrease
阿勒泰地区 Altay Prefecture	8.19	6.99	0.43	3.56
塔城地区 Tacheng Prefecture	6.47	4.13	0.65	2.69
克拉玛依市 Karamay City	0.6	0.05	0.02	0.05
博尔塔拉蒙古自治州 Bortala Mongolian Autonomous Prefecture	1.6	0.75	0.1	0.7
伊犁州直属县(市) Counties (cities) directly under Yili Prefecture	4.44	1.32	0.08	0.68
昌吉回族自治州 Changji Hui Autonomous Prefecture	3.74	2.97	0.45	2.65
乌鲁木齐市 Urumqi City	0.66	0.68	0.05	0.03
哈密市 Hami City	1.95	1.62	1.07	2.78
巴音郭勒蒙古自治州 Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture	6.13	3.89	4.8	4.66
吐鲁番市 Turpan City	0.64	0.25	0.1	0.23
阿克苏地区 Aku Prefecture	2.55	1.2	0.18	0.7
克孜勒苏柯尔克孜自治州 Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture	1.57	1.69	0.23	1.04
喀什地区 Kashi Prefecture	1.6	0.95	0.07	0.53
和田地区 Hotan Prefecture	1.01	1.4	0.77	1.66

面积占比为统计面积占全疆草地总面积的比重

2.3 新疆各草地类型 NDVI 时序变化

本研究分别统计了 11 种草地类型植被 NDVI 在空间上的均值与标准差,可视化了各草地类型的年际变化与空间异质性变化,在时间尺度上分析了各草地类型的变化趋势以及开展了显著性检验(图 7),在空间上统计了各草地类型变化的面积占比(表 2)。可以看出,1981—2018 年新疆 10 种草地类型植被 NDVI 表现为微弱增加趋势,仅高寒荒漠类草地 NDVI 呈轻微减少趋势,但拟合精度极低($R^2=0, P>0.05$);高寒草原类虽表现为轻微增加趋势,但其拟合精度低并且没有通过显著性检验($R^2=0.03, P>0.05$)。低地草甸类($R^2=0.79, P<0.01$)与沼泽类($R^2=0.67, P<0.01$)的拟合精度高,草地 NDVI 的空间差异较小,其余草地类型虽通过显著性检验($P<0.05$),但拟合优度均低于 0.5。

表 2 1981—2018 年新疆草地类型植被 NDVI 变化面积占比/%

Table 2 Area percentage of grassland type NDVI change in Xinjiang during 1981 to 2018

草地类型 Grassland type	显著增加 Significant increase	增加 Increase	显著减少 Significant decrease	减少 Decrease
低地草甸类 Lowland meadow	6.67	2.34	1.31	1.47
高寒草甸类 Alpine meadow	3.09	1.88	0.25	0.86
高寒草原类 Alpine grassland	1.73	1.88	1.02	1.97
高寒荒漠类 Alpine desert	0.07	0.17	0.14	0.23
山地草甸类 Mountain meadow	3.62	1.49	0.1	0.64
温性草甸草原类 Temperate meadow grassland	1.48	0.59	0.04	0.22
温性草原化荒漠类 Temperate grassland desertification	2.52	2.32	0.84	2.41
温性草原类 Temperate grassland	4.23	2.21	0.29	1.76
温性荒漠草原类 Temperate desert steppe	3.89	3.11	0.61	2.98
温性荒漠类 Temperate desert	13.41	12.35	3.79	9.61
沼泽类 Swamp	0.33	0.06	0.02	0.01

温性荒漠类草地 NDVI 呈显著增加($\theta_{slope}>0, P<0.05$)的面积占全疆草地总面积的 13.41%,其次为低地草甸类(6.67%)与温性草原类(4.23%),其余草地类型均低于 4%;温性荒漠类草地 NDVI 呈显著减少($\theta_{slope}<0$,

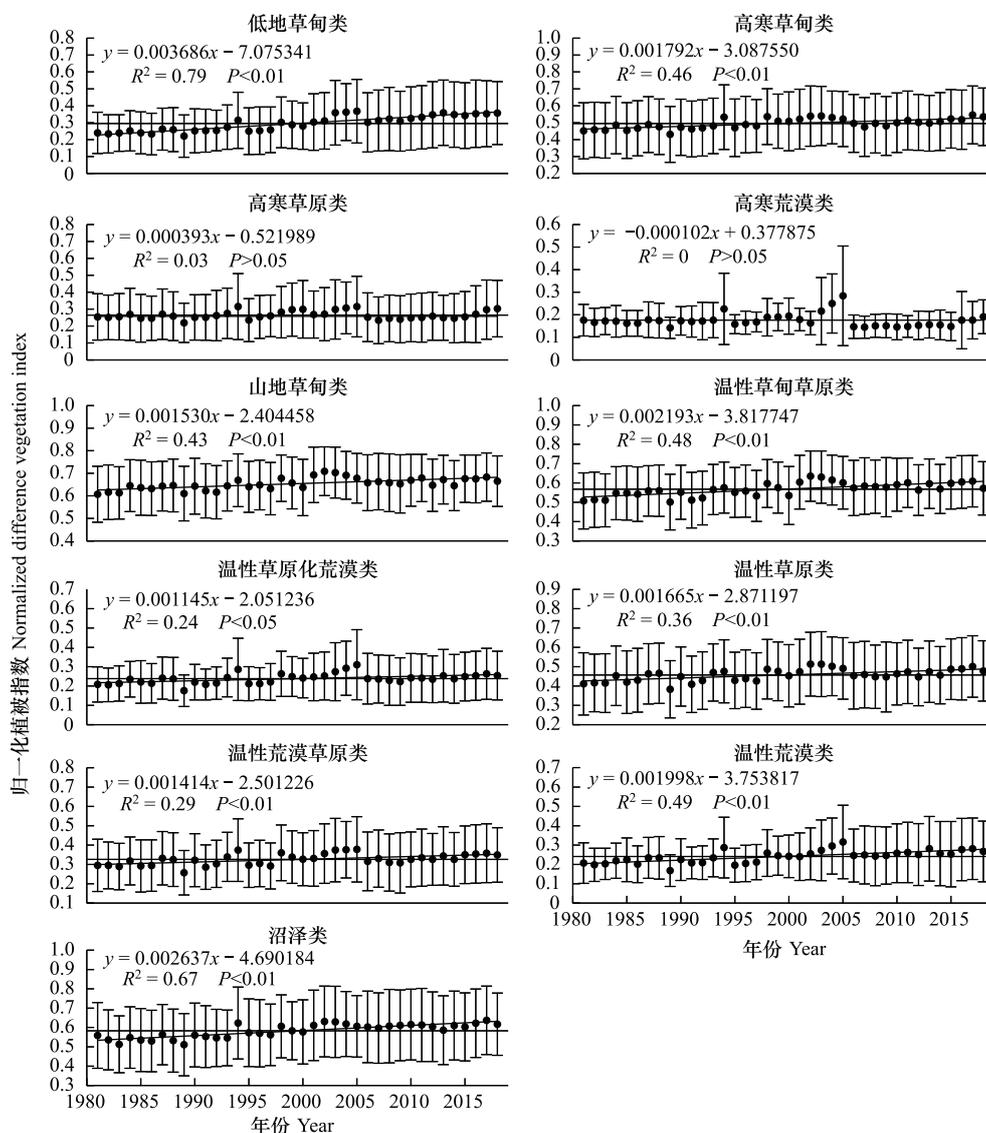


图7 1981—2018年新疆草地类型植被NDVI年际变化

Fig.7 NDVI trend of grassland types in Xinjiang from 1981 to 2018

$P < 0.05$) 的面积占比为 3.79%, 其次为低地草甸类(1.31%)与高寒草原类(1.02%), 其余 9 种草地类型均低于 1%。新疆 11 种草地类型植被 NDVI 多年平均值分别为 0.295(低地草甸类)、0.495(高寒草甸类)、0.265(高寒草原类)、0.174(高寒荒漠类)、0.654(山地草甸类)、0.568(温性草甸草原类)、0.238(温性草原化荒漠类)、0.457(温性草原类)、0.326(温性荒漠草原类)、0.241(温性荒漠类)和 0.583(沼泽类)。11 种草地类型植被 NDVI 最低值出现在 1989 年, 草地 NDVI 变化较大的是温性荒漠类(0.148), 其次是低地草甸类(0.147)、高寒荒漠类(0.142), 高寒草原类波动较小(0.096)。

2.4 新疆草地 NDVI 对气温、降水的响应

本研究分析了 1980 年后新疆气温、降水的时空变化格局, 以进一步探讨草地 NDVI 与气温、降水的相关关系。总体来看, 1981—2018 年新疆气候表现为“暖湿化”趋势(图 8)。研究时段内, 新疆年均气温呈显著上升趋势, 升温速率为 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ ($P < 0.01$); 新疆年降水量也表现出递增趋势, 增加速率为 $17\text{ mm}/(10\text{a})$ ($P < 0.01$)。基于气温、降水的年均空间分布格局, 新疆南疆的年均气温高于北疆地区, 但北疆的年降水量多于南疆; 山区(阿尔泰山、天山、昆仑山及其准噶尔西部山地)呈现为气温低、降水多, 准噶尔盆地和塔里木盆

地气温高、降水少,远离海洋、封闭的地形对新疆气候分布格局的影响明显(图 9)。为定量气温、降水在空间上的变化趋势,本研究针对研究时段内气温、降水的变化率展开分析,结果显示:全疆 67.61%的区域气温表现为上升趋势,32.39%呈下降趋势(图 9);1981—2018 年,全疆 95.16%的区域降水量表现为增加趋势,仅 4.84%的区域呈递减趋势(图 9)。

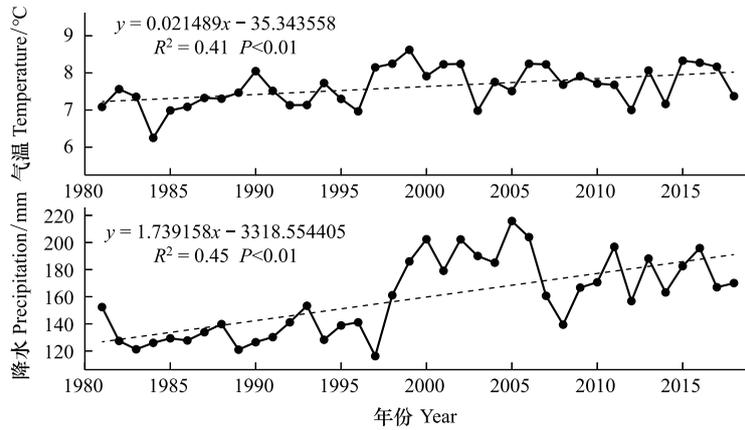


图 8 1981—2018 年新疆年均气温和年均降水变化趋势

Fig.8 Annual variation of temperature and precipitation in Xinjiang during 1981 to 2018

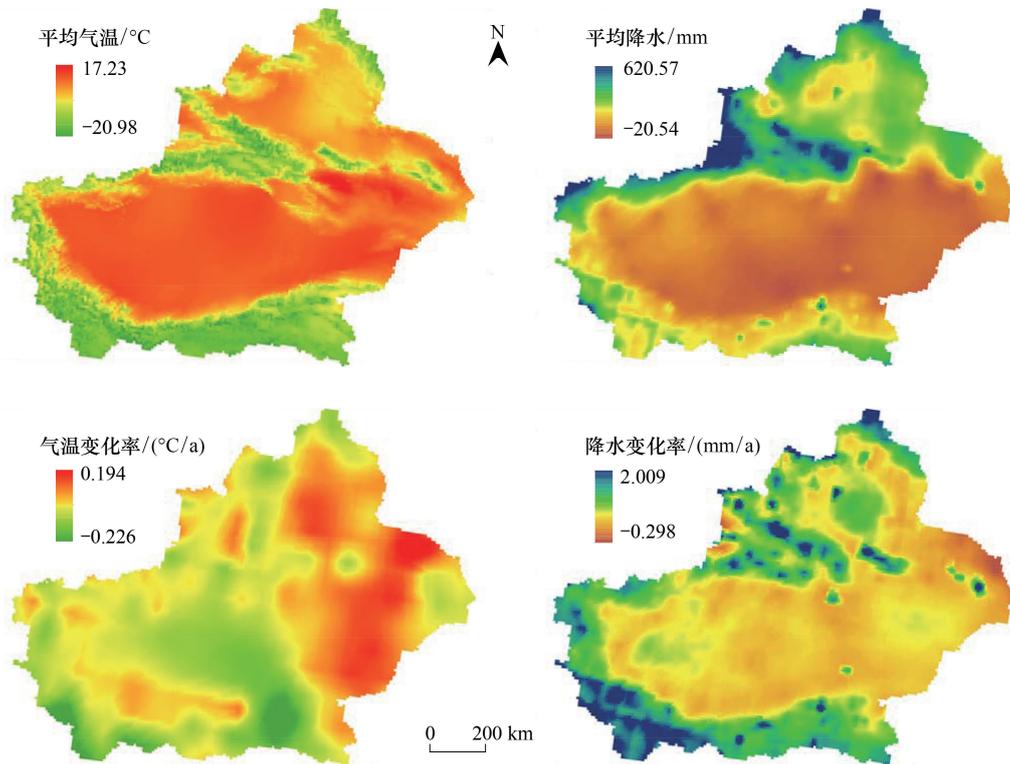


图 9 1981—2018 年新疆气温、降水多年均值空间分布及其变化率

Fig.9 The distribution of mean annual average and change rate of temperature and precipitation in Xinjiang from 1981 to 2018

采用新疆草地 NDVI 与同期气温、降水开展相关分析,结果输出为 1981—2018 年草地 NDVI 与气温、降水相关关系(图 10)与偏相关关系(图 11)。在研究时段内,全疆草地 NDVI 与气温、降水的相关系数与偏相关系数具有空间差异。草地 NDVI 与气温相关系数均值为 0.061,最高值为 0.808,最低值为 -0.764。1981—

2018 年间,全疆草地 NDVI 对降水响应主要表现为正相关,草地 NDVI 与降水的相关系数均值为 0.212,最高值为 0.817,最低值为 -0.580。草地 NDVI 与气温、降水的偏相关系数分别介于 -0.752—0.795 和 -0.597—0.837(图 11)。

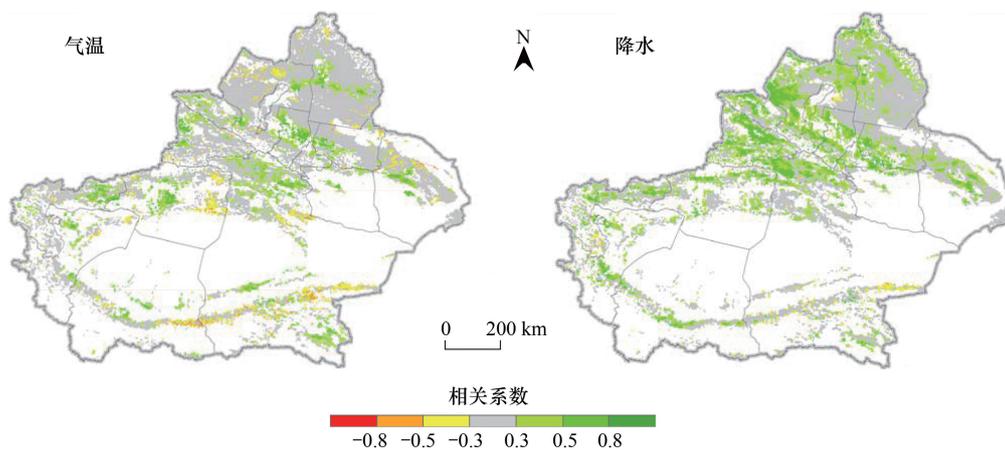


图 10 新疆草地 NDVI 与同期气温、降水的相关性

Fig.10 Correlation coefficients between Xinjiang grassland NDVI and temperature, precipitation

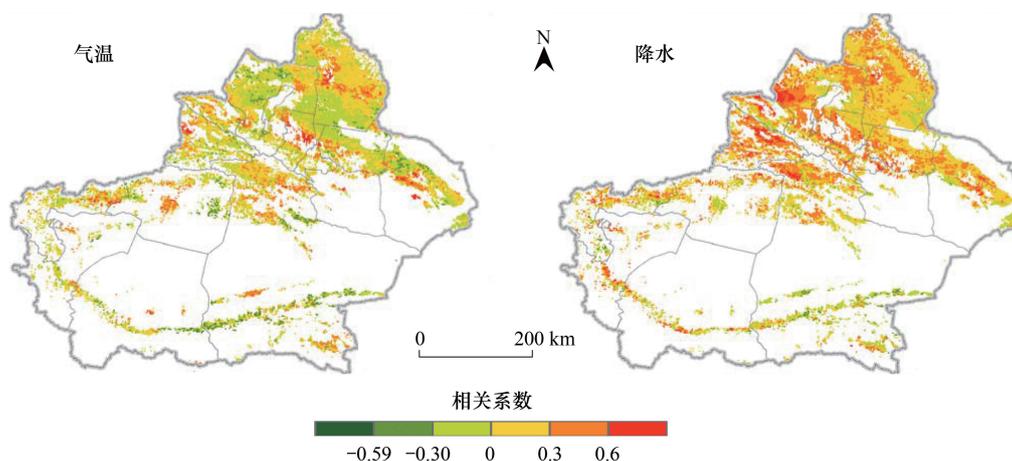


图 11 新疆草地 NDVI 与同期气温、降水的偏相关性

Fig.11 Partial correlation coefficients between Xinjiang grassland NDVI and temperature, precipitation

采用 1981—2018 年新疆草地 NDVI 与同期气温、降水开展显著性检验(图 12),结果显示全疆草地 NDVI 与降水为显著正相关的面积占比为 36.24% ($R_{xy} > 0, P < 0.05$),84.18%的面积占比与降水表现为正相关关系 ($R_{xy} > 0$),与降水呈显著正相关的草地主要分布在伊犁河谷、天山山脉、巴尔鲁克山脉以及昆仑山西段;基于降水变化趋势,占全疆草地总面积 15.82%的草地 NDVI 为负相关 ($R_{xy} < 0$),占比 2.65%的草地 NDVI 表现为显著负相关关系 ($R_{xy} < 0, P < 0.05$),主要分布在昆仑山东段及其阿尔金山(图 12)。

占全疆草地总面积 57.53%的区域,草地 NDVI 与气温的相关关系为正相关 ($R_{xy} > 0$);13.19%的面积占比与气温呈显著正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$),随气温升高草地 NDVI 显著增加;在空间上主要分布于伊犁河谷、天山山脉以及准噶尔盆地北缘。全疆草地总面积 42.37%的草地 NDVI 对气温的响应为负相关 ($R_{xy} < 0$),5.6%的面积占比与气温呈显著负相关 ($R_{xy} < 0, P < 0.05$),即气温增加,草地 NDVI 表现为显著降低;在空间上主要位于东天山北坡、库鲁斯台草原、昆仑山东段及其阿尔金山东段(图 12)。

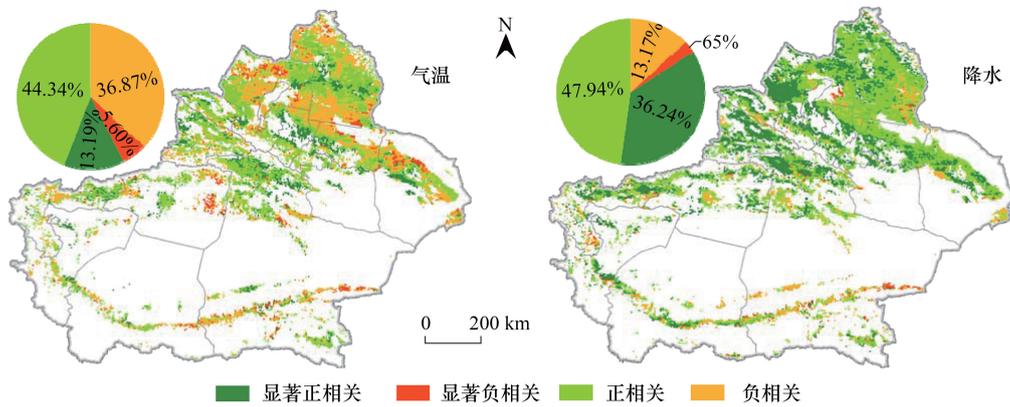


图 12 新疆草地 NDVI 与同期气温、降水的显著性检验

Fig.12 Significance testing between Xinjiang grassland NDVI and temperature, precipitation

基于新疆草地 NDVI 与同期气温、降水的相关性以及显著性检验结果,本研究进一步统计了各地区和 11 种草地类型植被 NDVI 的面积占比(表 3、表 4)。结果表明与气温呈显著正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$),巴音郭勒蒙古自治州草地占比为 3.28%、昌吉回族自治州占比为 2.12%、阿勒泰地区占比为 1.66%、哈密市占比为 1.12%、伊犁州直属县(市)为 1.09%以及塔城地区 1.02%,其余各地区的占比均小于 1%。草地植被 NDVI 与气温呈显著负相关 ($R_{xy} < 0, P < 0.05$),巴音郭勒蒙古自治州的面积占比为 1.33%,高于其它各地区,其次为塔城地区(0.88%)、阿克苏地区(0.79%)、哈密市(0.74%)与阿勒泰地区(0.72%),其余各地区的占比均小于 0.4%。与降水呈显著正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$),塔城地区的面积占比为 7.13%,其次为阿勒泰地区(5.35%)与巴音郭勒蒙古自治州(4.22%),其余各地区的占比均低于 4%。全疆草地 NDVI 与降水呈显著负相关 ($R_{xy} < 0, P < 0.05$) 的面积占比为 2.65%,巴音郭勒蒙古自治州的面积占比为 1.05%,其余各地区的面积占比均小于 0.4%。

表 3 新疆各地区草地 NDVI 与气温、降水显著性检验面积统计/%

Table 3 Area percentage of significance testing between grassland NDVI and temperature, precipitation in Xinjiang prefecture, autonomous prefecture, and prefecture-level city

	气温 Temperature				降水 Precipitation			
	显著正相关	正相关	显著正相关	正相关	显著正相关	正相关	显著正相关	正相关
阿勒泰地区 Altay Prefecture	1.66	10.15	0.72	9.8	5.35	13.28	0.23	2.05
塔城地区 Tacheng Prefecture	1.02	6.43	0.88	6.59	7.13	5.8	0.23	0.89
克拉玛依市 Karamay City	0	0.16	0.02	0.5	0.43	0.21	0	0
博尔塔拉蒙古自治州 Bortala Mongolian Autonomous Prefecture	0.44	1.87	0.05	0.61	1.34	1.06	0.05	0.39
伊犁州直属县(市) Counties (cities) directly under Yili Prefecture	1.09	3.46	0.11	1.92	3.92	2.03	0.06	0.37
昌吉回族自治州 Changji Hui Autonomous Prefecture	2.12	4.05	0.39	3.83	3.8	5.44	0.04	0.56
乌鲁木齐市 Urumqi City	0.22	0.95	0.01	0.47	0.67	0.72	0.02	0.14
哈密市 Hami City	1.12	2.63	0.74	3.64	2.12	3.72	0.1	1.08
巴音郭勒蒙古自治州 Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture	3.28	7.67	1.33	4.51	4.22	6.86	1.05	4.16
吐鲁番市 Turpan City	0.31	0.51	0.02	0.26	0.48	0.45	0.03	0.14
阿克苏地区 Aku Prefecture	0.5	2.01	0.79	1.52	2.25	3.04	0.09	0.94
克孜勒苏柯尔克孜自治州 Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture	0.74	2.43	0.16	1.49	2.25	2.46	0.37	1.13
喀什地区 Kashi Prefecture	0.43	0.78	0.13	0.78	1.15	1.05	0.14	0.22
和田地区 Hotan Prefecture	0.26	1.24	0.25	0.95	1.13	1.82	0.24	1.1

表 4 新疆草地类型植被 NDVI 与气温、降水显著性检验面积统计/%

Table 4 Area percentage of significance testing between vegetation NDVI of grassland type and temperature, precipitation in Xinjiang

	气温 Temperature				降水 Precipitation			
	显著 正相关	正相关	显著 正相关	正相关	显著 正相关	正相关	显著 正相关	正相关
低地草甸类 Lowland meadow	2.28	4.81	0.78	2.25	3.36	5.23	0.11	1.81
高寒草甸类 Alpine meadow	0.98	3.34	0.15	1.56	2.69	2.42	0.27	0.73
高寒草原类 Alpine grassland	0.80	2.41	0.28	1.54	1.81	2.45	0.46	0.92
高寒荒漠类 Alpine desert	0.02	0.09	0.04	0.13	0.07	0.14	0.02	0.11
山地草甸类 Mountain meadow	0.59	2.67	0.29	2.30	3.37	1.76	0.12	0.16
温性草甸草原类 Temperate meadow grassland	0.18	1.22	0.07	0.99	1.52	0.81	0	0.09
温性草原化荒漠类 Temperate grassland desertification	0.95	3.28	0.65	3.93	2.31	5.07	0.2	1.67
温性草原类 Temperate grassland	0.61	4.61	0.29	3.48	4.33	3.65	0.16	0.61
温性荒漠草原类 Temperate desert steppe	1.28	5.19	0.75	4.30	5.04	5.01	0.19	1.05
温性荒漠类 Temperate desert	5.38	16.5	2.29	16.36	11.48	21.33	1.12	5.98
沼泽类 Swamp	0.12	0.22	0.01	0.03	0.26	0.07	0	0.04

11 种草地类型植被 NDVI 与降水呈显著正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$) 的面积占比大于同期与气温呈显著正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$) 的面积占比; 与气温呈显著负相关 ($R_{xy} < 0, P < 0.05$) 的面积占比大于同期与降水呈显著负相关 ($R_{xy} < 0, P < 0.05$) 的面积占比(表 4)。高寒荒漠类草地 NDVI 与气温正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$) 的面积占比 (0.02%) 小于同期与气温负相关 ($R_{xy} < 0, P < 0.05$) 的占比 (0.04%), 其余草地类型均表现为与气温正相关的面积占比大于与气温负相关的占比。温性荒漠类草地 NDVI 与气温呈显著正相关的面积占比为 5.38% ($R_{xy} > 0, P < 0.05$), 同时与降水呈显著正相关的面积占比为 11.48% ($R_{xy} > 0, P < 0.05$), 面积明显高于其它草地类型。温性荒漠草原类、温性草原类与山地草甸类与降水呈显著正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$) 的面积占比高于同期与气温呈正相关 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$) 的面积占比。

3 讨论

在全球变化背景下, 1980 年以来新疆气候表现为暖湿化趋势, 气温上升、降水增加能够促进草地植被生长^[29-31]。本研究结果显示 1981—2018 年新疆草地 NDVI 呈轻微增加趋势, 但 1981—2000 年的草地 NDVI 年际变化略高于 2000—2018 年。新疆“暖湿化”具有高位、低位震荡^[22], 引起草地植被 NDVI 产生相应的年际变化。新疆气温、降水具有显著的空间差异, 山区降水多并且呈暖湿化趋势, 草地 NDVI (多年均值) 由伊犁河谷、天山、阿尔泰山与准噶尔西部山地向准噶尔盆地、塔里木盆地逐渐降低; 相应的草地 NDVI 也由阿勒泰地区、塔城地区、巴音郭勒蒙古自治州、伊犁州直属县(市)及其昌吉回族自治州向邻近区域递减。

新疆各地区草地所处的水热组合及其环境因子差异, 造成了各地区草地植被 NDVI 年际变化具有差异。昌吉回族自治州、巴音郭勒蒙古自治州、哈密市与塔城地区的气温上升, 引起草地返青期提前与枯黄期延后, 草地生长季节延长, 加之降水增加^[22], 有利于草地植被生长, 以上四地、州、市对气温、降水的响应 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$) 高于其余各地区。1981—2018 年新疆草地时空动态特征, 与降水的时空变化相关, 尤其生长季的极端降水增多有相关关系^[29]。1981—2018 年, 南疆各地区气温上升显著, 因气候变暖致使地表蒸散发加强, 引起气候局部暖干化^[22], 这对草地植被生长具有一定的负面影响^[32-33]。

在全疆气候暖湿化背景下, 11 种草地类型植被 NDVI 对气温、降水的响应具有差异, 同一种草地 NDVI 与降水呈显著正相关的面积占比大于同气温呈显著正相关的占比; 与气温呈显著负相关的面积占比大于同降水

呈显著负相关的面积占比。在新疆降水是影响草地类型植被 NDVI 的重要因子,这与张仁平等^[19]和陈宸等^[16]的研究结论一致。温性荒漠类、温性荒漠草原类与温性草原类通常分布于典型的干旱气候区,年均气温较高但降水少,本研究显示在暖湿化背景下温性荒漠类、温性荒漠草原类与温性草原类对降水的响应极其显著。已有研究表明,高海拔区域草地植被主要受气温影响^[34]。在新疆高寒草甸类、高寒草原类与高寒荒漠类草地植被 NDVI 对降水的响应 ($R_{xy} > 0, P < 0.05$) 明显高于气温,这与杨鑫等研究证实的高海拔草地植被生长的限制因子不是气温而是降水的结论一致^[26]。

采用 1981—2018 年 NOAA-AVHRR NDVI 数据集,本研究只是在年际尺度分析了全疆和各地区以及 11 种草地类型植被 NDVI 时空特征,但草地植被 NDVI 在生长季各阶段、月尺度以及旬尺度的变化依然重要。1980 年以来新疆气候呈暖湿化趋势,本文分析了草地植被 NDVI 对气温、降水的响应,然而气温、降水变化对新疆草地 NDVI 的影响非常复杂,尤其在不同时空尺度下气温、降水对草地 NDVI 的贡献率,这需要采用多源数据集开展长时序的情景模拟加以研究。尽管 CMFD 数据集精度介于卫星观测与站点观测之间,但是在新疆仍需进一步验证,本研究选择 CMFD 开展相关性分析,主要考虑接下来仍将采用该数据作为生态模型驱动数据。

4 结论

本研究采用 NOAA-AVHRR NDVI 与 CMFD 和相关辅助数据,以新疆草地 NDVI 作为草地生态状况的重要指标,从年际变化与多个空间尺度(全疆、南北疆、各地区与新疆天然草地类型)分析了新疆草地 NDVI 的时空特征及其对气温、降水变化的响应,结果表明:

(1) 1981—2018 年,新疆草地植被 NDVI 呈微弱增加趋势并伴随有轻微年际波动,2000 年后草地 NDVI 的年际变化进一步变小。草地植被 NDVI 由伊犁河谷、天山山脉、准噶尔西部山地、阿尔泰山及其昆仑山向准噶尔盆地、塔里木盆地逐渐降低。占新疆草地总面积 41% 的草地 NDVI 呈显著增加趋势,9% 的区域为显著减少区域。

(2) 尽管北疆、南疆草地 NDVI 表现为轻微增加趋势,然而北疆、南疆的水热条件差异,北疆草地植被 NDVI 是南疆的 1.4 倍,北疆草地植被 NDVI 呈显著增加的面积是南疆的 1.7 倍。相应的北疆各地区的草地 NDVI 高于南疆各地区。

(3) 1981—2018 年,在新疆气候“暖湿化”背景下,11 种草地类型对降水的响应高于气温,尤其温性荒漠类、温性荒漠草原类与温性草原类草地最为明显,降水对草地 NDVI 的影响更为显著,表明降水导致的地表水分变化是草地植被生长的重要限制因子。

致谢:感谢中国科学院新疆生态与地理研究所吴世新研究员、河南大学黄永涛博士、张晓博士在文章撰写中给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Xu Y J, Dong K, Jiang M, Liu Y L, He L Y, Wang J L, Zhao N X, Gao Y B. Soil moisture and species richness interactively affect multiple ecosystem functions in a microcosm experiment of simulated shrub encroached grasslands. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149950.
- [2] Robert C, Michael M. What is a healthy ecosystem? *Aquatic Ecology*, 1999, 33(1): 105-115.
- [3] Wu Z H, Lei S G, Lu Q Q, Bian Z F, Ge S J. Spatial distribution of the impact of surface mining on the landscape ecological health of semi-arid grasslands. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 105996.
- [4] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry E L, Johnson D, Lavallee J M, Provost G L, Luo S, Png K, Sankaran M, Hou X Y, Zhou H K, Ma L, Ren W B, Li X L, Ding Y, Li Y H, Shi H X. Combating global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720-735.
- [5] 杨峰, 钱育蓉, 李建龙, 杨齐, 杨智明. 天山北坡典型荒漠草地退化特征及其成因. *自然资源学报*, 2011, 26(8): 1306-1314.
- [6] 陈佼, 张丽. 天山北坡草地盖度高光谱遥感估算. *草业科学*, 2017, 34(1): 30-39.

- [7] 周李磊, 朱华忠, 钟华平, 杨华, 索菲娅, 邵小明, 周星杰. 新疆伊犁地区草地土壤容重空间格局分析. 草业学报, 2016, 25(1): 64-75.
- [8] 闫俊杰, 刘海军, 赵玉, 崔东, 刘影. 2000—2015 年新疆伊犁河谷草地 NPP 时空变化特征. 水土保持研究, 2018, 25(5): 390-396.
- [9] 任璇, 郑江华, 穆晨, 闫凯, 刘永强, 温阿敏, 杨会枫. 新疆近 15 年草地 NPP 动态变化与气象因子的相关性研究. 生态科学, 2017, 36(3): 43-51.
- [10] 闫俊杰, 刘海军, 崔东, 陈晨. 近 15 年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征. 草业科学, 2018, 35(3): 508-520.
- [11] 赵鹏, 陈桃, 王茜, 于瑞德. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系统 NPP 影响的定量分析. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51-62.
- [12] Duan H, Zhao H L, Jiang Y Z, Li Y L. Analysis of seasonal grassland change and its drivers during 1982-2006 in Xinjiang. Rangeland Ecology & Management, 2017, 70(4): 422-429.
- [13] 杜加强, 舒俭民, 赵晨曦, 贾尔恒·阿哈提, 王丽霞, 香宝, 方广玲, 刘伟玲, 何萍. 两代 AVHRR GIMMS NDVI 数据集的对比分析—以新疆地区为例. 生态学报, 2016, 36(21): 6738-6749.
- [14] 蔡朝朝, 淮永建, 白涛, 董蛮. 基于 NDVI 的新疆草地覆盖变化特征. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1369-1381.
- [15] 荀其蕾, 董乙强, 安沙舟, 闫凯. 基于 MOD 09GA 数据的新疆草地生长状况遥感监测研究. 草业学报, 2018, 27(4): 10-26.
- [16] 陈宸, 井长青, 邢文渊, 邓小进, 付皓宇, 郭文章. 近 20 年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应. 草业学报, 2021, 30(3): 1-14.
- [17] 杜梦洁, 郑江华, 任璇, 蔡亚荣, 穆晨, 闫凯. 地形对新疆昌吉州草地净初级生产力分布格局的影响. 生态学报, 2018, 38(13): 4789-4799.
- [18] 杨静雅, 李新国, 闫凯, 刘彬. 基于 NDVI 的新疆和静县草地植被覆盖动态变化及其与气温降水的关系. 生态科学, 2018, 37(6): 38-44.
- [19] 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.
- [20] 李净, 刘红兵, 李彩云, 李龙. 基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究. 地理科学, 2017, 37(4): 620-629.
- [21] 陈春波, 李刚勇, 彭建. 近 20 a 新疆天然草地 NPP 时空分析. 干旱区地理, 2022, 45(2): 522-534.
- [22] 姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克, 韩雪云, 毛炜峰. 新疆气候水文变化趋势及面临问题思考. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1498-1511.
- [23] 新疆维吾尔自治区畜牧厅. 新疆草地资源及其利用. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993.
- [24] Yang K, He J, Center NTPD. China Meteorological Forcing Dataset (1979-2018); National Tibetan Plateau Data Center, 2019.
- [25] He J, Yang K, Tang W J, Lu H, Qin J, Chen Y Y, Li X. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. Scientific Data, 2020, 7: 25.
- [26] 杨鑫, 曹文侠, 鱼小军, 汪海斌, 郝媛媛. 基于近 20 年 MODIS NDVI 日数据的青海省草地资源动态监测及其对环境因子的响应. 草业学报, 2021, 30(9): 1-14.
- [27] 刘艳, 李杨, 崔彩霞, 阮惠华. MODIS MOD13Q1 数据在北疆荒漠化监测中的应用评价. 草业学报, 2010, 19(3): 14-21.
- [28] 尹镨, 田亦陈, 袁超, 张飞飞, 苑全治, 花利忠. 基于 CASA 模型的北京植被 NPP 时空格局及其因子解释. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 133-139.
- [29] Li C, Wang R H, Ning H S, Luo Q H. Characteristics of meteorological drought pattern and risk analysis for maize production in Xinjiang, Northwest China. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 133(3): 1269-1278.
- [30] Wang Q, Zhai P M, Qin D H. New perspectives on 'warming-wetting' trend in Xinjiang, China. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 252-260.
- [31] Yao J Q, Chen Y N, Zhao Y, Mao W Y, Xu X B, Liu Y, Yang Q. Response of vegetation NDVI to climatic extremes in the arid region of Central Asia; a case study in Xinjiang, China. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131(3/4): 1503-1515.
- [32] 张锐, 刘普幸, 张克新. 新疆草地气候生产潜力变化特征及对气候响应的预测研究. 中国沙漠, 2012, 32(1): 181-187.
- [33] An L X, Hao Y H, Yeh T J, Zhang B J. Annual to multidecadal climate modes linking precipitation of the northern and southern slopes of the Tianshan Mts. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140(1): 453-465.
- [34] 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盖变化及其对气候变化的响应. 地理研究, 2010, 29(11): 2004-2016.