

DOI: 10.20103/j.stxb.202208272444

王川,王丽莎,张勇勇,赵文智,冯相艳.2000—2020 年祁连山植被净初级生产力时空变化及其驱动因素.生态学报,2023,43(23):9710-9720.

Wang C, Wang L S, Zhang Y Y, Zhao W Z, Feng X Y. Spatiotemporal change and driving factors of net primary productivity in Qilian Mountains from 2000 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9710-9720.

2000—2020 年祁连山植被净初级生产力时空变化及其驱动因素

王 川^{1,2}, 王丽莎^{1,2}, 张勇勇², 赵文智^{2,*}, 冯相艳²

1 湖北文理学院资源环境与旅游学院, 襄阳 441053

2 中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000

摘要: 植被净初级生产力(NPP)是评价植被生长的重要参数,也是评估陆地生态系统质量与功能的重要指标。基于 MODIS NPP、数字高程模型(DEM)、气象水文及人类活动数据,采用空间分析、趋势分析,分别从像元尺度和县域尺度识别了 2000—2020 年以来祁连山 NPP 时空变化特征,采用偏相关分析研究了 NPP 对年均温和年降水的响应,并借助理探测器模型揭示了 NPP 变化的驱动因素,最后采用 Hurst 指数预测了 NPP 未来变化趋势。结果表明:2000—2020 年祁连山平均 NPP 呈波动增加趋势,年均增加 2.38 g C/m²,其中栽培植被和阔叶林增长最为明显。近 20 年,像元尺度上有 75.37% 的区域 NPP 增加,主要位于东南部;县域尺度上,古浪、平安、化隆和永登县 NPP 增速较快,而祁连、海西、德令哈和门源县增速较慢。祁连山 NPP 空间分布具有明显的集聚性,高值集聚区主要位于东南部,而低值集聚区主要位于西北部。年均温和降水量的增加均促进了 NPP 的增加,但不同区域 NPP 对气温和降水的响应有明显差异。降水量、饱和水汽压差和蒸散发是 NPP 变化的主要驱动因子,驱动因子之间对植被 NPP 变化存在交互作用,分为双因子增强和非线性增强效应。未来祁连山 NPP 变化以增加非持续性为主,说明植被变化面临较大不确定性。研究结果有助于揭示全球气候变化背景下区域植被 NPP 对气候变化及人类活动的非线性响应机制,亦可为祁连山生态保护与可持续发展提供理论依据。

关键词: 植被净初级生产力(NPP); 时空变化; 驱动因素; 变化趋势; 祁连山

Spatiotemporal change and driving factors of net primary productivity in Qilian Mountains from 2000 to 2020

WANG Chuan^{1,2}, WANG Lisha^{1,2}, ZHANG Yongyong², ZHAO Wenzhi^{2,*}, FENG Xiangyan²

1 College of Resource Environment and Tourism, Hubei University of Arts and Sciences, Xiangyang 441053, China

2 Chinese Ecosystem Network Research Linze Inland River Basin Research Station/Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) is an important parameter for evaluating ecosystem vegetation growth and a critical indicator for representing the quality and function of terrestrial ecosystems. This paper collected the MODIS NPP data, DEM, meteorological, hydrological, and human activity data to reveal the spatiotemporal dynamic characteristics and driving factors of NPP in the Qilian Mountains (QLM) during the last 20 years. Based on the pixel and county scales, we investigated the spatiotemporal variation of the NPP in the QLM by employing spatial analysis and trend analysis. Furthermore, we studied the response of NPP to the meteorological factors (i.e. annual average temperature and annual

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”(XDA23060304); 国家自然科学基金项目(42071044); 国家重点研发计划项目(2019YFC0509405)

收稿日期:2022-08-27; 网络出版日期:2023-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn

precipitation) by using partial correlation and regression analysis. The Geodetector model was employed to reveal the driving mechanism of the NPP change. At last, the Hurst index was introduced to predict the future change trend of NPP. The results indicated that there was a fluctuant increase trend of NPP in the QLM during 2000—2020 with a slope of $2.38 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, the rising degree of the cultivated vegetation and broad-leaved forest was larger compared with other vegetation types. In the past 20 years, 75.37% of the regional NPP increased in the pixel scale, which primarily located in the southeastern regions of the QLM. At the county level, the NPP growth rates of Gulang County, Ping'an County, Hualong County, and Yongdeng County were fast, while that of Qilian County, Haixi County, Delingha County, and Menyuan County were slow. The spatial distribution of NPP in the QLM has obviously spatial agglomeration characteristics. The high-value agglomeration area mainly located in the southeast regions of the QLM, while the low-value agglomeration area mainly situated in the northwest regions of the QLM. The increase in annual average temperature and precipitation promoted the increase of NPP, but the responses of NPP to temperature and precipitation were significantly diverse in different regions. Precipitation, saturated water vapor pressure deficit, and evapotranspiration were the main driving factors of NPP change, and there were interactions effects of driving factors on NPP change, which were two-factor enhancement and nonlinear enhancement effects, respectively. The changing trend of the NPP in the QLM will dominate by the increase with nonpersistent in the future, which indicates that vegetation development in the QLM will face greater uncertainty. The results can help to reveal the nonlinear response mechanism of vegetation NPP to climate change and human activities under the background of global climate change and provide scientific support for the ecological protection and sustainable development of the QLM.

Key Words: vegetation net primary productivity; spatiotemporal change; driving factors; change trend; Qilian Mountains

植被净初级生产力(NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物的质量,是植物通过光合作用所固定的碳与植被自身呼吸作用所消耗的碳的差值^[1]。NPP 是识别碳源(汇)的关键指标,也是生态系统承载力、稳定性及可持续性评价中的一个重要参数,已广泛应用于生态学和地理学相关研究^[2-5]。研究 NPP 变化趋势及驱动因素对于区域生态保护具有显著意义,已成为全球变化研究的重要方向之一。

随着遥感技术的发展,众多学者采用遥感数据对植被变化及植被生物量进行监测与估算^[6-8]。MODIS 17A3 NPP 产品是结合 BiomeBio Geochemical Cycles (Biome-BGC 模型)与光能利用率模型建立的 NPP 估算模型。作为目前空间覆盖广、精度高、时间跨度长的陆地植被净初级生产力遥感产品,在全球范围内已经得到广泛应用^[9-11]。已有研究对祁连山地区 NPP 变化做了一定的探索,如王莉娜等^[12]利用光能利用率模型(CASA 模型)与相关分析对 2000—2018 年祁连山国家公园 NPP 时空演变及对气温和降水的响应进行了探究。兰云飞等^[13]探究了 2000—2015 年祁连山地区植被 NPP 时空格局及其对气候变化的响应。刘凤和曾永年^[14]揭示了气候变化对青藏高原碳源/汇的影响。总之,已有研究主要分析了祁连山地区植被 NPP 时空变化特征及其对气温和降水的响应,而对于 NPP 变化的驱动因素及其相互作用关系研究存在不足。

祁连山是我国西部重要的生态安全屏障,是河西内陆河流域及黄河上游重要水源地,也是我国生物多样性保护优先区域^[15-16]。受到高原季风、东亚季风和西风控制,在地形与海拔的综合影响下,祁连山具有景观分异明显、生态系统多样且脆弱等特点。同时,祁连山植被对气候变化及人类活动较为敏感^[17-19],定量分析祁连山地区 NPP 空间格局、变化趋势及驱动因素,对于深化理解区域植被变化及科学保护与管理祁连山生态系统具有重要意义。鉴于此,本文拟探究祁连山近 20 年植被 NPP 时空演变规律及其对潜在驱动因子的响应,并预估 NPP 未来变化的持续性,以期为该区域生态系统保护与管理提供参考。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

祁连山自然保护区(35.5° — 40°N , 94° — 104°E)地处欧亚大陆腹地,南靠青藏高原,北临内蒙古高原、东接

黄土高原,位于我国第一阶梯和第二阶梯过渡带,总面积约 193131 km²,跨越甘肃和青海二省,其中甘肃省内 53400 km² (27.65%),青海省内 139731 km² (72.35%)。区内地形地貌、气候、土壤、植被、水文条件差异明显,景观多样,形成了集冰川、冻土、森林、草原、湿地、荒漠等景观于一体的多样化生态系统。年均温约-0.5℃,年降水从西至东介于 80—700 mm。高山区冰川发育,冰雪融水和降雨形成地表径流,是河西地区 50 余条河流的发源地,也是黄河上游和青海湖的重要供水区。祁连山分布有大量的珍稀野生动植物,是我国西北地区重要生态屏障及生物多样性保护热点地区^[15]。独特的地理位置和气候条件使得祁连山自东向西形成了差异十分明显的生态系统类型。区内植被类型主要包括针叶林、阔叶林、草原、草甸、荒漠、高山植被和栽培植被,其中草甸是区内分布最广的生态系统类型,占比达到 30.48%,其次是草原(26.25%)。栽培植被占1.22%,主要分布于祁连山北坡和东部地区。祁连山 2000—2020 年平均 NPP 介于 1.7—761.3 g C/m²,并呈现由东南向西北逐渐降低的空间格局(图 1)。

1.2 数据来源与处理

数据信息如表 1 所示。2000—2020 年逐年 NPP 基于谷歌地球引擎云平台检索、处理并下载。年均气温和降水数据采用 ANUSPLINE 4.2 软件以海拔为协变量对祁连山及其周边共 39 个气象站的年均气温和年降水进行插值得到。所有空间数据在 ArcGIS Pro 软件中统一为 WGS_1984 Albers 坐标系,分辨率为 1000 m。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据 Data	时间 Time	分辨率 Resolution	来源 Source
MODIS 17A3HGF(NPP)	2000—2020	500 m	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/
年均气温 & 年降水量 Annual mean temperature & precipitation	2000—2020	—	中国气象数据共享网 http://data.cma.cn/
植被类型 Vegetation type	1990—2000	1:1000000	中国科学院资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/
行政边界 Administrative boundary	2020	—	
海拔 Altitude (DEM)	—	90 m	美国地质调查局(USGS) https://earthexplorer.usgs.gov/
太阳辐射 Solar radiation (SR)	2000—2020	4400 m	TerraClimate 数据集 https://climate.northwestknowledge.net/
饱和水汽压差 Vapor Pressure Deficit (VPD)	2000—2020	4400 m	
土壤含水量 Soil Moisture (SM)	2000—2020	4400 m	
蒸散发 Evapotranspiration (ET)	2000—2020	4400 m	
人类活动强度 Human activity intensity (HA)	2000—2018	1000 m	Mu 等 ^[20]

NPP: 植被净初级生产力 Net primary productivity

1.3 研究方法

1.3.1 NPP 时空变化

采用一元线性回归计算 NPP 年际变化趋势,线性回归方程的斜率为 NPP 变化趋势斜率。计算公式如下^[21]:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_i - \left(\sum_{i=1}^n i\right) \left(\sum_{i=1}^n \text{NPP}_i\right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \tag{1}$$

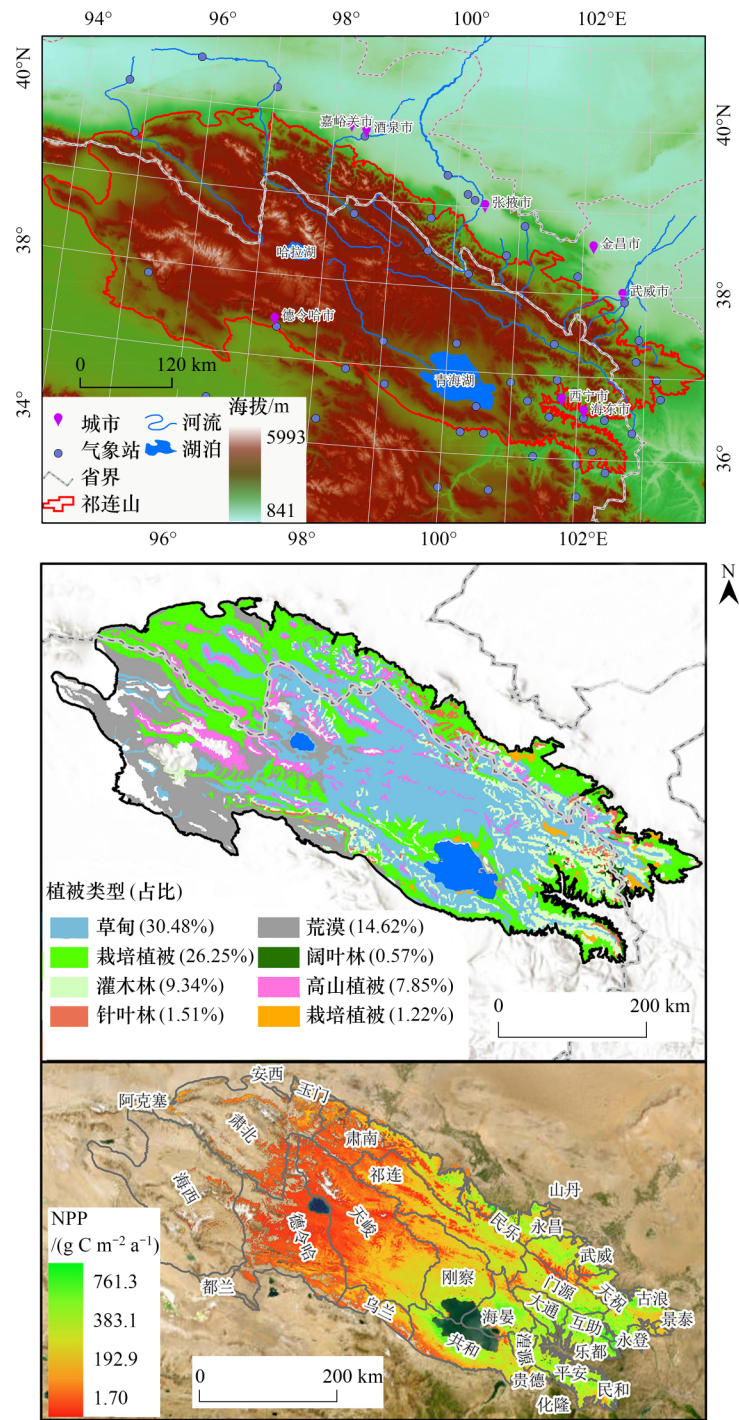


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

NPP: 植被净初级生产力 Net primary productivity

式中,slope 为 NPP 变化斜率; i 为时间变量; n 为研究期年数; NPP_i 为第 i 年 NPP。变化斜率绝对值越大,表示 NPP 变化越快。采用 t 检验法对 NPP 年际变化进行显著性检验。

1.3.2 NPP 空间集聚特征

采用全局 Moran's I 指数探测祁连山地区 2000—2020 年平均 NPP 总体空间集聚特征。计算公式^[22]:

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (NPP_i - \overline{NPP}) (NPP_j - \overline{NPP})}{\sum_{i=1}^N (NPP_i - \overline{NPP})^2} \quad (2)$$

式中, NPP_i 为像元 i 的 NPP 值; N 为像元数量; W_{ij} 为标准化的空间权重矩阵, 通过构建邻接规则与距离规则得到; I 值介于 $[-1, 1]$, 若 I 显著为正, 则表明相近的观测值具有空间集聚特征; 若 I 显著为负, 则表明相近的观测值具有分散分布特征。

进一步采用 Getis-Ord G_i^* 热点分析识别 NPP 局部自相关性。计算公式:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} NPP_j - \overline{NPP} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (3)$$

式中, $\overline{NPP}$ 为 NPP 均值; S 为 NPP 标准差; W_{ij} 为标准化的空间权重矩阵; n 为像元总数。 G_i^* 为统计值, 值越大表示 NPP 热点集聚程度越高, 反之则冷点集聚程度越高。

1.3.3 NPP 变化驱动因素

首先, 基于像元尺度采用偏相关分析祁连山 NPP 对年均气温和降水的独立响应^[23]。计算控制降水(气温)的 NPP 与气温(降水)的偏相关系数, 并采用 t 检验法检验偏相关系数的显著性。

其次, 使用地理探测器模型中的因子探测器和交互探测器来揭示 NPP 变化的驱动因素。因子探测器用于分析自变量对因变量的解释强度, 交互作用探测器是探索两个自变量的联合效应是否会增强/削弱对因变量的影响力, 影响力的大小通过 q 值来反映, q 值越大, 影响力越强^[24]。计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} \quad (4)$$

式中, q 表示离散化后的自变量(驱动因子)对因变量(NPP 变化量)的影响力, $0 \leq q \leq 1$, L 是自变量的分类或分层, $h=1, 2, 3, \dots, L$, N_h 和 δ_h^2 分别为 h 层的样本数和方差, N 和 δ^2 分别为总样本量和总方差。

1.3.4 NPP 变化趋势预测

重标极差分析法(R/S 算法), 是一种定量描述时间序列信息依赖性的分析方法^[25]。利用基于 R/S 算法的 Hurst 指数预测祁连山 NPP 未来变化趋势。Hurst 指数有 3 种取值形式: ① $Hurst=0.5$, 表明 NPP 时间序列变化呈随机型, 不存在长期相关性; ② $0 < Hurst < 0.5$, 表明 NPP 时间序列变化具有反持续性, Hurst 值越接近于 0, 反持续性越强; ③ $0.5 < Hurst < 1$, 表明 NPP 时间序列变化具有持续性, 即植被未来变化与过去变化趋势一致, Hurst 指数越接近于 1, 说明时间序列数据的持续性越强。参考朱莹莹等^[26]的研究, 进一步划分为 4 种类型: 强反持续性 ($Hurst < 0.35$), 弱反持续性 ($0.35 < Hurst < 0.5$), 弱持续性 ($0.5 < Hurst < 0.65$), 强持续性 ($Hurst > 0.65$)。

2 结果分析

2.1 NPP 时空变化

2000—2020 年祁连山 NPP 介于 174.07—239.54 g C/m², 2001 年最低, 2018 年最高, 总体呈波动增加趋势, 年均增加 2.38 g C/m² ($P < 0.05$), 平均值为 207.72 g C/m²。2010 年以前的年份 NPP 均低于或约等于平均值, 而 2010 年以后基本高于平均值。从不同植被类型来看, 2000—2020 年祁连山不同植被类型 NPP 年际变化趋势存在明显差异。其中, 增加较快的植被类型是栽培植被 (slope = 4.28 g C/m²) 和阔叶林 (slope = 3.68 g C/m²), 分别增加 130.52 g C/m² 和 129.24 g C/m², 增幅分别为 54.20% 和 34.86%。针叶林和草原居中, 分别增加 95.87 g C/m²、77.11 g C/m² 和 43.30 g C/m², 增幅分别为 35.97%、30.73% 和 31.33%。而荒漠、草甸和高山植被变化相对稳定, 变化幅度和斜率均在 10 g C/m² 和 0.5 g C/m² 以下。阔叶林的平均 NPP 最高为

441.22 g C/m², 其次是栽培植被、针叶林和灌木林, 均在 290—310 g C/m² 之间; 再次是草原和草甸植被, 平均 NPP 介于 150—160 g C/m², 而荒漠和高山植被较低, 年均 NPP 在 45 g C/m² 以下 (图 2)。

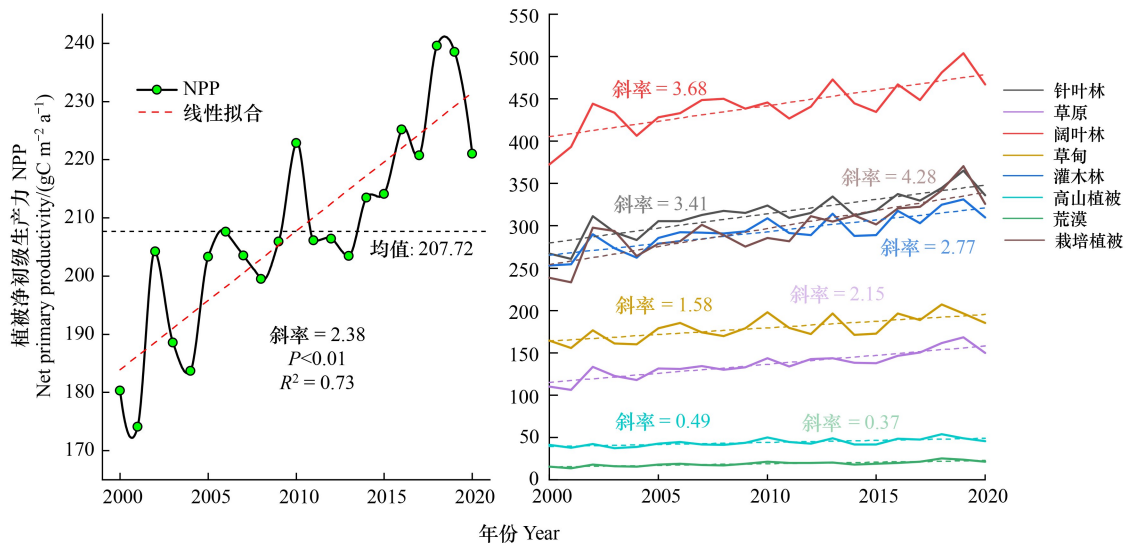


图 2 祁连山 2000—2020 年 NPP 变化

Fig.2 Interannual variations in NPP of Qilian Mountains from 2000 to 2020

基于像元尺度的 NPP 变化趋势分析结果表明, 三个阶段 NPP 变化趋势均以轻微增加为主 ($0 \text{ g C/m}^2 < \text{slope} < 5 \text{ g C/m}^2$), 占比均在 38% 以上, 主要位于中部地区。其次是基本不变 (变化幅度 $< 1 \text{ g C/m}^2$), 占比约为 25%, 主要分布在中西部。2010 年前, NPP 以增加为主, 增速较快的有甘肃的山丹、民乐和青海的化隆、乐都和平安等县域, 而古浪县则出现了明显的下降趋势。2010 年后, NPP 仍以增加为主, 且增幅更大, 整个东南部及甘肃段祁连山北坡增长较为明显。2000—2020 年祁连山大部分区域 (84.11%) NPP 变化显著 ($P < 0.05$)。NPP 增速最大的区域主要位于东南部的互助、湟中和化隆, 其年均增幅在 $4.6—20.3 \text{ g C/m}^2$ ($P < 0.01$), 中等增加的区域主要分布在甘肃省内的天祝、山丹、民乐和肃南, 以及青海省的共和县和刚察县, 这些区域 NPP 增速在 $2.6—4.6 \text{ g C/m}^2$; NPP 轻微增加的区域较大, 占比达到 40.23%, 主要分布在中部的祁连、天峻、刚察和肃北等地, 其增速 $< 3 \text{ g C/m}^2$ 。而减小的区域较小, 占比不足 0.5%, 主要位于青海省的祁连、门源和德令哈, 年均降速在 $-21.6—-1 \text{ g C/m}^2$ 。总之, 2000—2020 年祁连山 NPP 以显著增加为主, 占比达到 75.37% (图 3)。

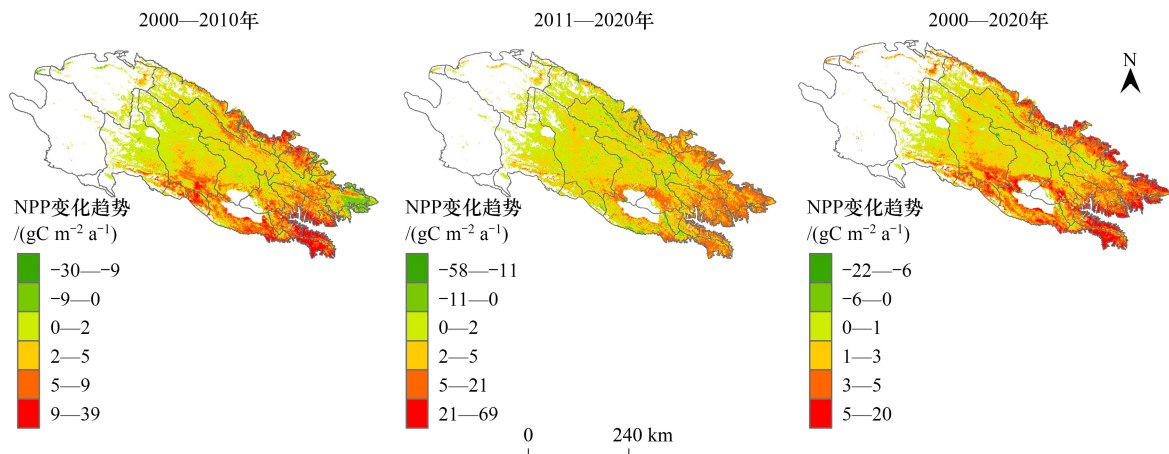


图 3 祁连山 2000—2020 年 NPP 变化趋势

Fig.3 NPP change trend in Qilian Mountains from 2000 to 2020

2.2 NPP 空间集聚特征

NPP 全局 Moran' I 指数为 0.95 ($P < 0.01$), 表明祁连山 NPP 空间分布具有较强的空间自相关特征。热点分析表明祁连山 NPP 空间集聚类型以 99% 置信水平冷/热点 (99% CS/HS) 型为主, 分别占 24.45% 和 21.57%。其中, 99% HS 区域主要位于东南部地区, 包括甘肃省的天祝、肃南、山丹和青海省的互助、湟中、大通、乐都县大部分区域及环青海湖地区; 而 99% CS 区域主要位于西北部, 包括青海省的天峻、祁连和德令哈及甘肃省的肃南、肃北县 (图 4)。95% 置信水平冷/热点 (95% CS/HS) 区域分别占 2.67% 和 2.20%, 主要位于 99% 置信水平冷/热点的过渡地带 (天峻县东南部、刚察县东北部)。

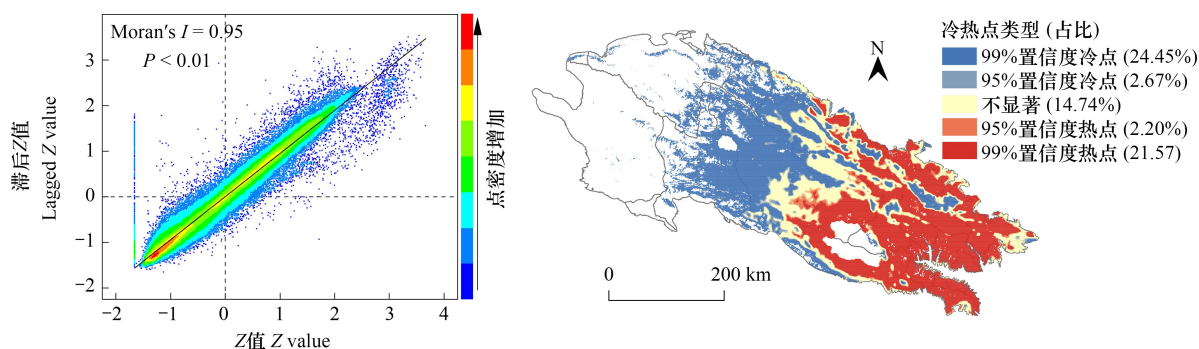


图 4 祁连山 NPP 空间集聚特征

Fig.4 Spatial concentration characteristic of NPP in Qilian Mountains

2.3 NPP 变化驱动因素

在控制降水的条件下, 祁连山 NPP 与年均气温偏相关系数为 0.336 ($P < 0.05$), 56.14% 的区域表现为 NPP 与年均温呈正相关, 主要位于祁连山东部和中部高海拔地区 (包括肃南、山丹、祁连、门源、刚察、海晏和共和县等), 这些区域由于海拔较高, 常年气温较低, 因此升温有助于植被生长和干物质累积 (图 5)。而呈负相关的占 9.35%, 主要分布在西北部的肃北以及德令哈南部地区, 这些区域本身气候干燥, 升温会增大水分对植被的胁迫。在控制气温的条件下, 祁连山 NPP 与降水偏相关系数为 0.205 ($P < 0.01$), 其中有 53.94% 的区域 NPP 与降水呈正相关, 主要位于西北部 (肃北、德令哈) 和东南部 (乐都、民和、化隆县等)。仅有 11.56% 的区域 NPP 与降水呈负相关, 主要分布在天峻和刚察县南部 (图 5)。总体上, 不同区域 NPP 与年均温和年降水具有不同的响应关系。主要是由于 NPP 的影响因素较多且关系复杂, 如: 水热组合状况、植被类型地带性差异、不同植被类型对水分的要求等, 这些因素对植被 NPP 有着直接或者间接影响, 导致 NPP 与气候因子的相关性

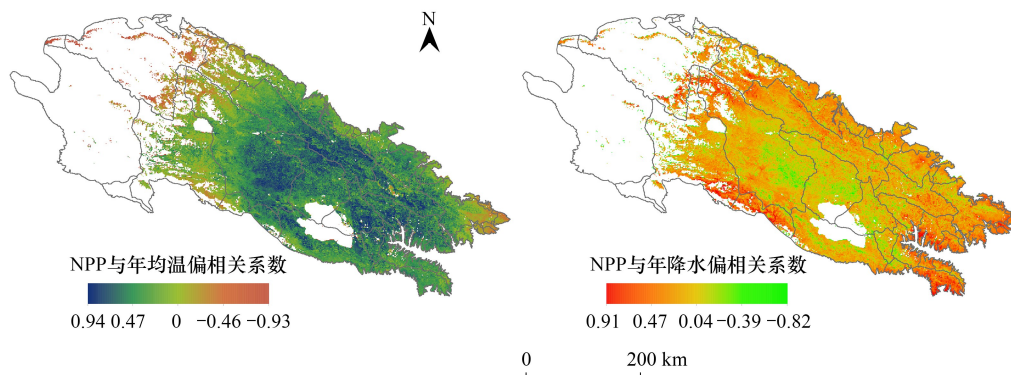


图 5 祁连山 NPP 与年均温及年降水偏相关关系

Fig.5 The spatial distribution of the partial correlation coefficient between NPP and annual mean temperature and precipitation in the Qilian Mountains

存在空间差异。

不同植被类型的 NPP 与气候因子间相关性具有明显差异(表 2)。其中,阔叶林、草原和荒漠和对降水有较强的响应($r>0.34$, $P<0.05$),草原和荒漠植被主要是浅根系植被,因此对降水更加敏感。而灌丛、草甸和高山植被对气温有着更强的响应($r>0.25$, $P<0.05$),这些植被类型主要生活中海拔较高的区域,因此对气温的响应更加敏感。栽培植被对气温和降水响应均不显著($P>0.05$),主要是由于栽培植物主要受人类活动干扰,气候因素对其影响被削弱。

表 2 不同类型植被 NPP 与年均温及降水偏相关

Table 2 Partial correlation coefficient between NPP and annual mean temperature and precipitation for each vegetation type								
植被类型 Vegetation types	草原 Grassland	高山植被 Alpine vegetation	灌木 Shrub	阔叶林 Broadleaf forest	栽培植被 Cultivated vegetation	草甸 Meadows	针叶林 Coniferous forest	荒漠植被 Desert vegetation
气温 Temperature	0.383 *	0.251 *	0.562 *	0.208	0.232	0.362 *	0.264 **	0.224
降水 Precipitation	0.341 **	0.351	0.239 *	0.354 *	0.374	0.157	0.359 *	0.357 *

** 表示通过 99%的置信度检验, * 表示通过 95%的置信度检验

地理探测器结果表明(图 6),选取的 7 个驱动因子对 NPP 变化均有显著影响($P<0.05$),不同因子对 NPP 变化存在明显差异。各驱动因子对 NPP 变化的解释力为降水量($P, q=0.44$)>饱和水气压差($VPD, q=0.32$)>蒸散发($ET, q=0.25$)>土壤含水量($SM, q=0.21$)>年均温($T, q=0.19$)= 太阳辐射($SR, q=0.19$)>人类活动强度($HA, q=0.04$)。驱动因素之间的交互作用对 NPP 变化的影响超过任何单一因素的影响。近 20 年来,蒸散发与降水量和饱和水气压差间的耦合对 NPP 变化的影响最为显著,其次是降水与饱和水气压差和年均温。总体来看,降水量、蒸散发和饱和水气压差与其他因子间的交互作用也显著影响了祁连山 NPP 变化。人类活动对 NPP 变化的单独影响虽然较小,但当人类活动耦合其他因子时,其对 NPP 变化的影响强度明显增强。

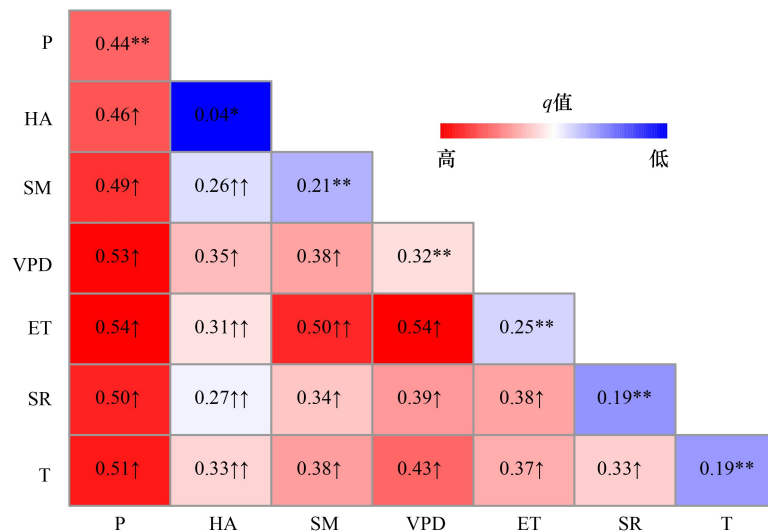


图 6 驱动因素对 NPP 变化的单个效应和组合效应

Fig.6 Individual and combined effects of driving factors on NPP change

P:年降水 Annual total precipitation; HA: 人类活动强度 Human activity intensity; SM: 土壤含水量 Soil moisture; VPD: 饱和水气压差 Vapor pressure deficit; ET: 蒸散发 Evapotranspiration ; SR: 太阳辐射 Solar radiation; T: 年均温 Annual mean temperature; * 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$, ↑ 和 ↑↑ 分别表示双因子增强(组合效应 q 值大于单独效应中最大值)和非线性增强(组合效应 q 值大于单独效应 q 值之和),驱动因素是指 2000—2020 年间的变化量

2.4 NPP 未来变化趋势

祁连山 Hurst 指数介于 0.14—0.96 之间,平均值为 0.44。高值区域主要分布于东部边缘区域(包括天祝、

肃南、湟中、互助县等),而低值区主要位于中部地区(包括海晏、刚察、祁连、门源县等)。Hurst 指数大于 0.5 的区域占 19.58%,小于 0.5 的区域占 80.42%,表明总体上祁连山 NPP 未来变化具有较强的反持续性。Hurst 指数与趋势分析结果叠加表明,祁连山未来 NPP 可能增加的区域占 19.89%。其中,增加呈持续性及减小呈反持续性分别占 19.04%和 0.85%,主要位于东北和东南部(包括天祝、肃南、山丹、肃南、湟中、化隆和贵德县等),此外,在西部的德令哈也有少量分布,表明这些区域未来植被可能改善。而 NPP 呈减小持续性和增加反持续性的区域分别占 0.54%和 79.57%,主要位于中部的高海拔地区(包括天峻、刚察、祁连、门源和共和县等),这些区域在未来气候变化和人类干预下,植被变化面临较大不确定性,应重点关注(图 7)。

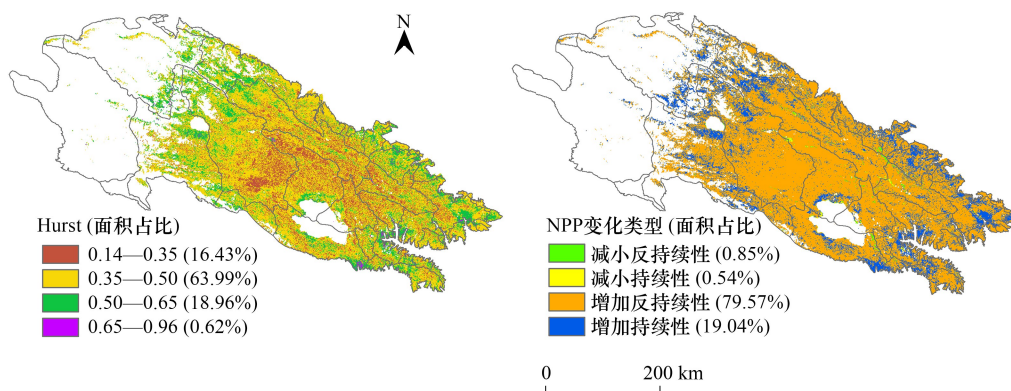


图 7 祁连山 NPP 变化趋势预测

Fig.7 Prediction of NPP change trend in the Qilian Mountains

3 讨论

祁连山地处我国西北干旱区,总体上降水量较小^[27]。此外,祁连山大部分区域海拔较高(超过 3500 m 的区域占 58.43%),区内年平均温度较低,生长季较短^[28],因此总体 NPP 偏低。空间分布上,从东南向西北逐渐降低,祁连山西北地区海拔高、气温低而降水少,不利于植被生长,区内植被单一、盖度较低,因此整体 NPP 较低,而东南部海拔较低,年均温较高,降水相对较大,水热条件明显较西北部更好,因此 NPP 更高。相较于气温,降水量对祁连山植被变化的影响更大,这与杨安乐等^[9]和张华等^[29]的研究一致。降水增加促进了土壤含水量和大气湿度增加(饱和水气压差降低),进而促进了 NPP 的上升^[30]。

气候因子通过调控植物的代谢过程(光合作用、呼吸作用等)而直接影响植物群落 NPP^[31]。此外气候也能控制土壤以及局部水热条件、调控生长季长度、群落生物量和年龄结构等,间接影响植物群落 NPP^[32]。2000—2020 年平均 NPP 呈波动上升趋势,年均增加量为 2.38 g C/m²。2000 年以来祁连山地区气候总体呈现暖湿化,促进了祁连山地区植被生长^[33]。虽然总体上增温增湿促进了祁连山地区植被 NPP 增加,但具体来看,温度和降水对祁连山 NPP 的存在双面影响,在海拔较高的区域,气温升高有利于冰雪融化,增加土壤含水量,进而促进植被生长^[34];在相对湿润的区域,升温有助于生长季的延长,促进植被生长。而在干旱的荒漠区,气温升高则会增强土壤蒸发耗水,进而抑制植被生长^[35]。降水促进植被生长的区域主要位于西北地区(图 5),这些区域气候干旱,水是限制植被生长的主要因子,因此降水增加有利于 NPP 增加,而在中部高寒地区,NPP 与降水呈负相关,可能是由于这些区域本身相对湿润,降水增加减弱了植被光合作用^[36]。

区域 NPP 变化是一个多因素耦合驱动的过程^[21,37],气候水文因子间及人类活动与气候水文因子间的交互作用明显增强了对 NPP 变化的作用力。尽管当前人类活动对祁连山地区 NPP 变化影响较小,但人类活动叠加气候变化可能会增强对 NPP 变化的影响。尽管已有研究表明 MODIS 产品在祁连山具有较好的准确度^[11,37],但遥感数据本身的不确定性难以避免,且该产品存在空间分辨率较低(500 m)以及在植被覆盖极低

的区域无数据等问题。因此,未来要结合实地调查数据提高评估结果精度。此外,由于 NPP 变化的复杂性,Hurst 指数表明未来 NPP 变化具有较大不确定性,而具体变化趋势需要结合相关数据和方法进一步分析。

4 结论

基于 MODIS NPP、气象水文及人类活动数据,结合趋势分析、空间分析、偏相关分析和地理探测器模型,探究了祁连山 NPP 时空变化及其驱动因素。结果表明:2000—2020 年,祁连山 NPP 呈波动上升的趋势,其中栽培植被、阔叶林和灌木林 NPP 增加明显。75.37%的区域 NPP 增加,古浪、平安和化隆县 NPP 增长较快,而德令哈、海西、刚察和祁连县等增长较慢。祁连山 NPP 空间分布具有明显的集聚性,高值集聚区主要位于东南部(天祝、互助、湟中和乐都县等),低值集聚区主要出现在中西部地区(天峻、祁连、德令哈和肃北县等)。气温和降水增加均对 NPP 有促进作用,但不同区域 NPP 变化对气温和降水的响应有明显差异。大致表现为在中部高海拔地区(祁连、门源、刚察县等)对气温响应更敏感,而在西北(肃北县)和东南部(乐都、民和、化隆县等)对降水更加敏感。气候变化是 NPP 变化的主要驱动因素,其中湿度因子(降水量和饱和水汽压差)对 NPP 变化影响较大,而人类活动影响总体较小,驱动因子间的交互作用增强了其对 NPP 变化的影响。未来祁连山大部分地区(79.57%)NPP 变化呈增加反持续性,NPP 变化面临较大不确定性。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [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: 74-88.
- [3] 陈晓玲,曾永年. 亚热带山地丘陵区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例. *地理学报*, 2016, 71(1): 35-48.
- [4] 穆少杰,李建龙,周伟,杨红飞,章超斌,居为民. 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. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [5] 刘铮,杨金贵,马理辉,柯增鸣,胡宇美,岩晓莹. 黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 113-122.
- [6] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, Han J Q. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145648.
- [7] 任立清,冉有华,任立新,谭美宝. 2001—2018 年石羊河流域植被变化及其对流域管理的启示. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1244-1253.
- [8] Zhang F G, Zeng B, Cao Y, Li F, Tang Z Y, Qi J G. Human activities have markedly altered the pattern and trend of net primary production in the Ili River Basin of Northwest China under current climate change. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(14): 2585-2595.
- [9] 杨安乐,张小平,李宗省,李玉辰,南富森. 气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被净初级生产力的定量影响. *生态学报*, 2023, 43 (5): 1784-1792.
- [10] Azhdari Z, Rafeie S E, Bazrafshan O, Zamani H, Singh V P, Saravi M M, Ramezani M. Impact of climate change on net primary production (NPP) in south Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 2020, 192: 1-16.
- [11] Qin X, Liu W B, Mao R C, Song J X, Chen Y N, Ma C, Li M Y. Quantitative assessment of driving factors affecting human appropriation of net primary production (HANPP) in the Qilian Mountains, China. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 106997.
- [12] 王莉娜,宋伟宏,张金龙,马晓芳,赵鸿雁,黄晓东. 祁连山国家公园植被净初级生产力时空演变及驱动因素分析. *草业科学*, 2020, 37 (8): 1458-1474.
- [13] 兰云飞,李传华. 近 16 年祁连山植被 NPP 时空格局及其对气候变化的响应. *草地学报*, 2022, 30(1): 188-195.
- [14] 刘凤,曾永年. 近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响. *生态学报*, 2019, 39(5): 1528-1540.
- [15] Yan K, Ding Y. The overview of the progress of Qilian Mountain National Park System Pilot Area. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2020, 8: 210-214.
- [16] 吕荣芳,赵文鹏,田晓磊,张建明. 祁连山地区生态系统服务间权衡的社会-生态环境响应机制研究. *冰川冻土*, 2021, 43(3): 928-938.
- [17] Wang C, Zhao W Z, Zhang Y Y. The change in net ecosystem productivity and its driving mechanism in a mountain ecosystem of arid regions, northwest China. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 4046.
- [18] 李新,勾晓华,王宁练,盛煜,金会军,祁元,宋晓谕,侯扶江,李育,赵长明,邹松兵,王宏伟,郑东海,陈莹莹,牛晓蕾. 祁连山绿色

- 发展:从生态治理到生态恢复. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937.
- [19] 刘佳茹, 赵军, 王建邦. 2001—2016 年祁连山地区植被覆盖度对干旱的响应. 草业科学, 2021, 38(3): 419-431.
- [20] Mu H W, Li X C, Wen Y N, Huang J X, Du P J, Su W, Miao S X, Geng M Q. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 1-9.
- [21] 潘竟虎, 黄克军, 李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. 生态学报, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [22] Ren H, 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.
- [23] 刘婵, 刘冰, 赵文智, 朱钊岑. 黑河流域植被水分利用效率时空分异及其对降水和气温的响应. 生态学报, 2020, 40(3): 888-899.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] 王建邦, 赵军, 李传华, 朱钰, 康重阳, 高超. 2001-2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局. 地理学报, 2019, 74(3): 504-519.
- [26] 朱莹莹, 韩磊, 赵永华, 奥勇, 李军军, 许凯波, 刘冰, 葛媛媛. 中国西北地区 NPP 模拟及其时空格局. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1861-1871.
- [27] Wang H, Zang F, Zhao C Y, Liu C L. A GWR downscaling method to reconstruct high-resolution precipitation dataset based on GSMaP-Gauge data: a case study in the Qilian Mountains, Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 152066.
- [28] Qiao C C, Shen S, Cheng C X, Wu J X, Jia D, Song C Q. Vegetation phenology in the Qilian Mountains and its response to temperature from 1982 to 2014. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 286.
- [29] 张华, 李明, 宋金岳, 韩武宏. 基于地理探测器的祁连山国家公园植被 NDVI 变化驱动因素分析. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2530-2540.
- [30] Liu Q, Fu Y H, Zhu Z C, Liu Y W, Liu Z, Huang M T, Janssens I A, Piao S L. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology. *Global Change Biology*, 2016, 22(11): 3702-3711.
- [31] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156-173.
- [32] Peng Q, Wang R H, Jiang Y L, Li C. Contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in Qilian Mountain National Park, northwest China. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 32: e01947.
- [33] Ma Y, Guan Q, Sun Y, Zhang J, Yang L Q, Yang E Q, Li H C, Du Q Q. Three-dimensional dynamic characteristics of vegetation and its response to climatic factors in the Qilian Mountains. *Catena*, 2022, 208: 105694.
- [34] Yang J, Zhang X C, Luo Z H, Yu X. Nonlinear variations of net primary productivity and its relationship with climate and vegetation phenology, China. *Forests*, 2017, 8: 361.
- [35] Simoes M, Baruch Z. Responses to simulated herbivory and water stress in two tropical C₄ grasses. *Oecologia*, 1991, 88(2): 173-180.
- [36] Mao D H, Wang Z M, Luo L, Ren C Y. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 528-536.
- [37] 李传华, 朱同斌, 周敏, 殷欢欢, 王玉涛, 孙皓, 曹红娟, 韩海燕. 河西走廊植被净初级生产力时空变化及其影响因子研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1931-1943.