

DOI: 10.5846/stxb202202050295

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.

Yang A L, Zhang X P, Li Z X, Li Y C, Nan F S. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on vegetation NPP in the Qilian Mountain National Park. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1784-1792.

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

杨安乐^{1,*}, 张小平^{1,*}, 李宗省², 李玉辰¹, 南富森¹

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

摘要: 祁连山国家公园作为西北地区重要的生态安全屏障和水源涵养地, 研究其植被变化对西北地区的生态安全具有重要意义。基于 2000—2019 年祁连山国家公园的 MOD17A3 遥感数据, 利用一元线性回归、偏相关分析、多元线性回归和残差分析等方法, 分析了祁连山国家公园植被净初级生产力 (NPP) 的时空态势及其与降水、气温和人类活动的相关性, 在此基础上量化气候变化和人类活动对植被 NPP 的影响。结果表明: (1) 2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 整体呈波动上升趋势, 且空间上呈东高西低的分布格局, 其多年平均值为 $113.14 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 年均增长量达 $1.41 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; (2) 植被 NPP 与降水、气温均呈正相关, 其中降水对植被 NPP 影响更为显著; (3) 人类活动区植被 NPP 总体呈增加趋势, 与 2016 年相比, 2019 年人类活动区植被 NPP 增加的面积占 87%, 植被 NPP 降低的面积占 13%; (4) 在植被恢复区, 气候变化和人类活动对植被恢复分别解释了 92% 和 8%; 在植被退化区, 气候变化和人类活动对植被退化分别解释了 29% 和 71%。研究结果可为祁连山国家公园生态环境保护与管理提供科学的决策依据。

关键词: 气候变化; 人类活动; 祁连山国家公园; 植被净初级生产力; 残差分析

Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on vegetation NPP in the Qilian Mountain National Park

YANG Anle¹, ZHANG Xiaoping^{1,*}, LI Zongxing², LI Yuchen¹, NAN Fusen¹

1 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The Qilian Mountain National Park (QMNP) is an important ecological security barrier and water conservation area, and exploring its vegetation Net Primary Productivity (NPP) variation is of great significance to the ecological security in Northwest China. We used methods, including unary linear regression, partial correlation analysis, and multivariate linear regression analysis and residual analysis, to analyze the space distribution of vegetation NPP and its relationship with precipitation, temperature and human activities based on the MOD17A3 remote sensing data in the QMNP from 2000 to 2019. In terms of this, we quantified the vegetation NPP influenced by the climate change and human activities, respectively. The results showed that: (1) from 2000 to 2019 vegetation NPP in the QMNP had an overall fluctuating upward trend and decreased from east to west, with a multi-year average of $113.14 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and an average annual increase of $1.41 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; (2) The vegetation NPP was positively correlated with precipitation and temperature,

基金项目: 中国科学院“西部之光”交叉团队项目; 国家重点研发计划项目 (2020YFA0607702); 国家“万人计划”青年拔尖人才项目; 第二次青藏高原综合科学考察研究项目“生态安全屏障功能与优化体系”专题 (2019QZKK0405)

收稿日期: 2022-02-05; **网络出版日期:** 2022-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zxp296@163.com

with precipitation having a more significant effect on it; (3) In human activity area, the vegetation NPP presented an overall increasing trend, with 87% area increasing and 13% area decreasing of vegetation NPP in 2019 compared with those in 2016; (4) In the vegetation recovery area, climate change and human activities explained 92% and 8% of the vegetation recovery, respectively. While in the vegetation degradation area, they explained 29% and 71% of the vegetation degradation, respectively. The results can provide a scientific decision basis for ecological and environmental protection and management in QMNP.

Key Words: climate change; human activities; Qilian Mountain National Park; vegetation Net Primary Productivity; residual analysis

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通过光合作用积累的有机物质总量扣除自养呼吸后剩余的部分^[1],NPP既是衡量植被群落在自然环境条件下生产能力的重要指标,也是直接反映生态系统对环境气候条件的响应^[2]。通常,NPP受气候特别是气温和降水^[3-4]及人类活动如退耕还林还草、禁牧、探采矿和过度放牧等^[5-6]的双重影响。近年来,关于NPP变化的相关研究成果较多,Gang等^[7]分析了1981—2010年中国、北美、澳大利亚和欧洲的草地NPP对气候变化的响应;朱士华等^[8]利用干旱区生态系统模型(AEM)量化研究中亚地区植被NPP的空间态势及其对降水、气温和CO₂变化的响应;李登科等^[9]研究发现中国2000—2015年平均植被NPP呈现北低南高、西北低东南高的空间格局,且大部分地区植被NPP变化不明显;洪辛茜等^[10]认为退耕还林还草等生态工程的实施是2001—2018年我国西南地区植被NPP上升的主要影响因素;张颖等^[11]结合土地利用数据分析表明2001—2012年草地管理措施的改进对遏制三江源草地退化起到决定性作用。综合来看,当前的研究主要集中于植被NPP时空分布格局及其与气候因子、人类活动之间的响应关系等,而定量分析气候变化和人类活动对植被NPP影响的研究相对较少。

定量研究区域植被NPP变化及驱动因素,对理解植被变化驱动机制^[12]、认识气候变化和人类活动对植被NPP的影响^[13]及治理生态环境^[14]具有重要意义。例如,耿庆玲等^[15]定量评估了气候变化和人类活动对中国不同植被类型归一化植被指数(NDVI)变化的相对贡献率,表明人类活动在我国植被变化中占主导作用;高旭旭等^[14]研究发现京津冀地区植被的恢复和退化过程中人类活动的作用大于气候变化;在黄河三角洲的植被变化中人类活动的贡献更大^[16]。祁连山国家公园试点区域作为西北地区重要的生态安全屏障和水源涵养地,在气候变化和人类活动共同影响下出现植被退化、冰川与冻土加速消融等生态环境问题而受到学者的广泛关注^[17-18]。王新源等^[19]研究表明气候变暖、超载放牧和土地垦殖等是造成祁连山国家公园草地退化的关键因素;付建新等^[20]发现祁连山国家公园青海片区核心保护区的冰川退缩速度明显快于一般控制区;王莉娜等^[21]分析认为祁连山国家公园植被NPP的时空变化受到地形与气候因子的共同影响。而关于气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被NPP的相对作用尚未分析,不利于祁连山国家公园的有效保护和管理。因此,本文利用残差分析量化气候变化和人类活动分别对祁连山国家公园植被NPP的影响程度,以期为研究区生态保护和管理提供科学依据。

1 研究区概况

祁连山国家公园(36°47'—39°48'N,94°51'—103°00'E)地处甘肃和青海两省交界处,位于青藏、蒙新、黄土三大高原交汇地带的祁连山北部,平均海拔在4000—5000 m之间,主要以高山为主。高原大陆性气候特征显著,降水主要集中在夏季,冬季寒冷干燥^[22],气温和降水垂直地带性明显。独特的地理位置和气候条件使得研究区生物多样性丰富,自然景观多样,形成了森林、草原、湿地、冰川、荒漠等东西差异明显的自然生态系统。祁连山国家公园试点设立于2017年6月,是中国首批10个国家公园试点之一,总面积5.02×10⁴ km²,主要分为甘肃片区和青海片区,其中甘肃片区3.44×10⁴ km²,包括阿克塞、肃北、肃南、甘州、山丹、民乐、永昌、凉州、天祝、古浪、永登11个县(区)以及山丹马场;青海片区1.58×10⁴ km²,包括门源、祁连、天峻和德令哈4个县(市)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文的研究数据包括植被 NPP 数据集、数字高程模型 (DEM) 数据、气象数据和祁连山国家公园人类活动数据。NPP 数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心^[23], 数据源为 MOD17A3, 时间序列为 2000—2019 年, 时间分辨率为 1 年, 空间分辨率为 500 m; DEM 数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>); 气象数据来自中国气象数据共享网 (<http://data.cma.cn/>) 的中国地面气候资料数据集 (V3.0), 通过 ANUSPLIN 软件对气象数据进行空间插值, 形成投影为 WGS_1984_Albers 并重采样为像元大小 500 m 的栅格数据, 按祁连山国家公园边界掩膜提取植被 NPP 数据和气象数据; 人类活动数据来源于甘肃省祁连山生态环境研究中心 (<http://qls.casnw.net/>), 主要包括旅游、水电站、探矿和采矿等人类活动数据。

2.2 研究方法

2.2.1 一元线性回归模型

对 2000—2019 年 NPP_a (实际值)、 NPP_p (潜在值)、 NPP_h (残差值) 逐像元进行线性回归, 得到各类植被 NPP 在 n 年间的变化斜率, 表示该时段内祁连山国家公园植被 NPP 的变化趋势^[12], 计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (1)$$

式中, Slope 表示线性回归的斜率; i 表示自变量年份; n 为 20 年; NPP_i 为第 i 年的植被 NPP 值; Slope > 0 表示随时间增加植被 NPP 增加, Slope < 0 表示随时间增加而植被 NPP 减少。

2.2.2 偏相关分析

偏相关分析是指当两个变量同时与第三个变量相关时将第三个变量的影响剔除, 仅考虑另外两个变量之间相互关系^[24]。为了解释气候因子对植被 NPP 的影响, 计算研究区内植被 NPP 与降水、植被 NPP 与气温的偏相关系数, 通过两个偏相关系数来判断影响植被 NPP 变化的主要气候因素, 计算公式为:

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

式中, $r_{xy \cdot z}$ 为变量 z 固定后变量 x 与 y 的偏相关系数; $r_{xy \cdot z} > 0$ 表示变量 x 与 y 之间呈正相关关系; $r_{xy \cdot z} < 0$ 表示变量 x 与 y 之间呈负相关关系; r_{xy} 为变量 x 与 y 的相关系数; r_{xz} 为变量 x 与 z 的相关系数; r_{yz} 为变量 y 与 z 的相关系数。

偏相关系数的显著性检验, 一般采用 t 检验法, 计算公式为:

$$t = \frac{r_{xy \cdot z}}{\sqrt{1 - r_{xy \cdot z}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (3)$$

式中, n 表示样本数; m 表示自变量个数; t 为显著性检验系数, 查 t 分布表可获得不同显著性水平上的临界值 t_α 。

2.2.3 多元线性回归分析及残差分析

选用多元线性回归计算 NPP_p , NPP_p 表示植被 NPP 无人干扰的理想植被状态^[25], 公式如下:

$$NPP_p = a \times \text{TEMP} + b \times \text{PREC} + c \quad (4)$$

式中, NPP_p 表示潜在植被 NPP; PREC 表示生长季总降水量 (mm); TEMP 为生长季平均气温 (°C); a 、 b 、 c 为待定系数。

利用残差分析来分离气候变化和人类活动对 NPP_a 的影响, NPP_h 表示人类活动对植被 NPP 的影响, 为 NPP_a 与 NPP_p 之差。公式如下:

$$NPP_h = NPP_a - NPP_p \quad (5)$$

式中, NPP_a 为植被 NPP 实际值, NPP_p 为植被 NPP 潜在值, NPP_h 为植被 NPP 残差值。

2.2.4 评价方法

气候变化和人类活动对植被 NPP 变化过程中的相对作用,可以通过对每年 $S(NPP_a)$ 、 $S(NPP_p)$ 、 $S(NPP_h)$ 的变化来评估,具体参照赵鹏等^[12]的研究。如表 1 所示:

表 1 不同情景下气候变化和人类活动在 NPP_a 变化过程中的相对作用

Table 1 The relative roles of climate change and human activities in NPP_a change under different scenarios

方法(比较斜率值) Method (compare slope values)	植被 NPP 变化原因 Reasons for changes in vegetation NPP	方法(比较斜率值) Method (compare slope values)	植被 NPP 变化原因 Reasons for changes in vegetation NPP
$S(NPP_a) = 0$	NPP_a 没有发生变化	$S(NPP_a) < 0$ 和 $ S(NPP_p) > S(NPP_h) $	气候变化导致 NPP_a 减少
$S(NPP_a) > 0$ 和 $ S(NPP_p) > S(NPP_h) $	气候变化导致 NPP_a 增加	$S(NPP_a) < 0$ 和 $ S(NPP_p) < S(NPP_h) $	人类活动导致 NPP_a 减少
$S(NPP_a) > 0$ 和 $ S(NPP_p) < S(NPP_h) $	人类活动导致 NPP_a 增加		

NPP : 净初级生产力 Net Primary Productivity; NPP_a : 净初级生产力实际值 Net Primary Productivity actual; $S(NPP_a)$: 实际植被 NPP 的斜率; $S(NPP_p)$: 潜在植被 NPP 的斜率; $S(NPP_h)$: 残差植被 NPP 的斜率

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 时空变化特征

2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 整体呈波动上升的变化趋势,年均增长量达 $1.41 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 1)。2000—2005 年植被 NPP 呈波动增长的变化趋势,年均增长量为 $1.61 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,最低值出现在 2001 年;2005—2009 年植被 NPP 整体呈现平缓上升趋势,年均增长量仅为 $0.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;2009—2014 年植被 NPP 呈波动下降的变化趋势,年均下降量为 $0.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;2014 年后植被 NPP 呈现快速增长趋势,年均增长量高达 $4.48 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,由 2001 年的 $94.27 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增长到 2019 年最高值 $131.31 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

祁连山国家公园植被 NPP 呈现自东向西递减的空间分布特征,其多年平均值为 $113.14 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 2),植被 NPP 大于 $400 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的区域主要分布在天祝县、凉州区、永昌县、肃南县东北部和门源县东南部,约占研究区总面积的 3%;介于 $100—400 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的区域主要分布在肃南县中东部、祁连县、天祝县中部、民乐县、肃北县北部和门源县东北部地区,约占研究区总面积的 37%;介于 $0—100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的区域主要分布在天祝县西北部、门源县中西部、肃南县西北部、天峻县、肃北县、阿克塞县和德令哈市,约占研究区总面积的 60%。总体而言,祁连山国家公园植被 NPP 的空间分布差异较大,且植被稀疏区占大部分区域。

3.2 植被 NPP 驱动因素分析

3.2.1 气候因子对植被 NPP 的影响

为探索生长季气候因子对植被 NPP 的影响,分别对生长季降水量、平均气温与植被 NPP 进行显著性检验得到各类偏相关显著性的面积占比(表 2)。2000—2019 年祁连山国家公园内植被 NPP 与降水量的相关系数为 $0.61 (P < 0.05)$,表明降水量的增加是促进植被 NPP 增长的重要原因之一。从空间分布看(图 3),植被

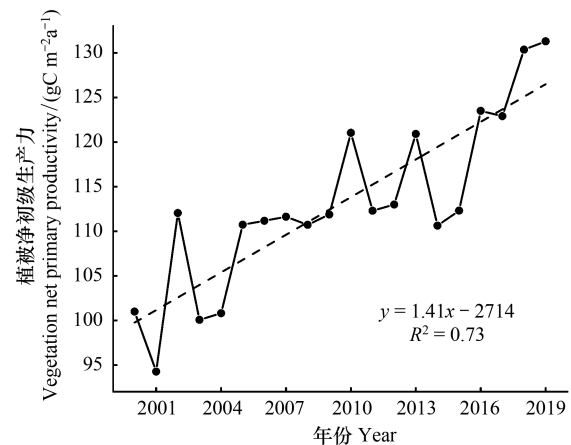


图 1 2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 时间变化趋势

Fig.1 Temporal trends of vegetation NPP in the Qilian Mountain National Park, 2000—2019

NPP : 净初级生产力 Net Primary Productivity

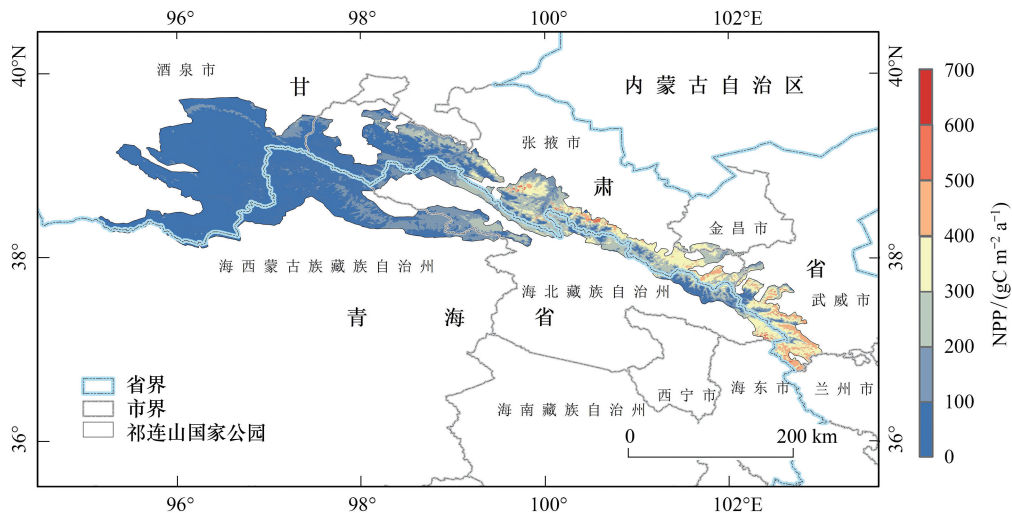


图2 祁连山国家公园年尺度植被 NPP 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual-scale vegetation NPP in the Qilian Mountain National Park

NPP 与生长季降水呈正相关的区域占植被区总面积的 97.14%,最大正相关系数达到 0.92 ($P<0.05$);其中显著正相关的区域占植被区总面积的 65.14%,主要分布在肃南县、肃北县、阿克塞县以及天峻县西北部;不显著正相关的区域占植被区总面积的 32%,主要分布在天祝县中西部、门源县和祁连县。植被 NPP 与生长季降水呈负相关的区域占植被区总面积的 2.86%,零星分布在肃南县中南部、门源县和祁连县。总之,祁连山国家公园植被 NPP 分布与降水量的变化在空间上有很强的相似性。

表 2 2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 与气候因子的相关性面积百分比

Table 2 Percentage area of correlation between vegetation NPP and climate factors in the Qilian Mountain National Park, 2000—2019		
相关性 Correlation	NPP 与生长季降水量/% NPP and growing season precipitation	NPP 与生长季平均气温/% NPP and average growing season temperature
显著正相关 Significantly positive correlation	65.14	43.72
不显著正相关 Non-significantly positive correlation	32.00	54.31
显著负相关 Significantly negative correlation	0.14	0.07
不显著负相关 Non-significantly negative correlation	2.72	1.90

2000—2019 年,祁连山国家公园植被 NPP 与气温的相关系数为 0.56 ($P<0.05$),表明气温对植被 NPP 的影响也较显著。从空间上看(图 4),植被 NPP 与生长季平均气温呈正相关的区域占植被区总面积的 98.03%,最大相关系数达到 0.9 ($P<0.05$),分布在肃南县中南部、天祝县中西部、天峻县、祁连县和门源县等高海拔区,说明这些区域气温上升有利于植被 NPP 的增加;植被 NPP 与生长季平均气温呈显著正相关区域占植被区总面积的 43.72%,主要分布在永昌县、肃南县与天祝县中南部、天峻县、祁连县和门源县,而不显著正相关区域占植被区总面积的 54.31%,主要分布在肃南县、祁连县和天峻县;植被 NPP 与生长季平均气温呈负相关的区域仅占植被区总面积的 1.97%,零星分布在祁连县西北部、肃北西北部、肃南县与天峻县和祁连县交接地带。

3.2.2 人类活动对植被 NPP 的影响

在祁连山国家公园内主要有水电开发、旅游、探矿和采矿等人类活动,能有效提取出植被 NPP 的水电站、旅游区、采矿区和探矿区共计 122 个(图 5),包括 17 个水电站、20 个旅游区、22 个采矿区、63 个探矿区,主要分布在研究区中东部。探采矿、水电开发和旅游等人类活动会对生态环境产生影响,且距离人类活动区越近,对周围植被的影响程度也越大^[6,26—27]。如图 6 所示,2000—2019 年各人类活动区年均植被 NPP 总体呈波动

增长趋势,水电站、采矿区和探矿区年均植被 NPP 值靠近趋势线且波动较小,而旅游区年均植被 NPP 值波动较大。其中采矿区植被 NPP 增速最快,年均增长量达 $4.44\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$;其次为旅游区,年均增长量为 $3.28\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$;而水电站和探矿区增速最慢,年均增长量分别为 2.88 和 $2.48\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$;旅游区植被 NPP 均高于水电站、采矿区和探矿区植被 NPP。

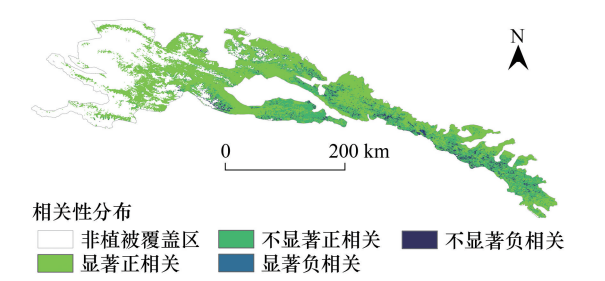


图3 经显著性检验 ($P<0.05$) 的 2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 与生长季降水的相关性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of correlation between vegetation NPP and growing season precipitation in the Qilian Mountain National Park from 2000–2019 with significance test ($P<0.05$)

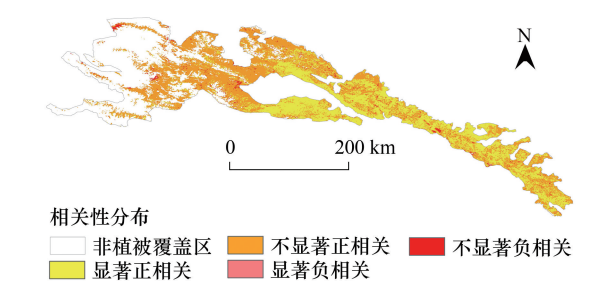


图4 经显著性检验 ($P<0.05$) 的 2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 与生长季平均气温的相关性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of correlation between vegetation NPP and growing season mean temperature in the Qilian Mountain National Park from 2000–2019 with significance test ($P<0.05$)

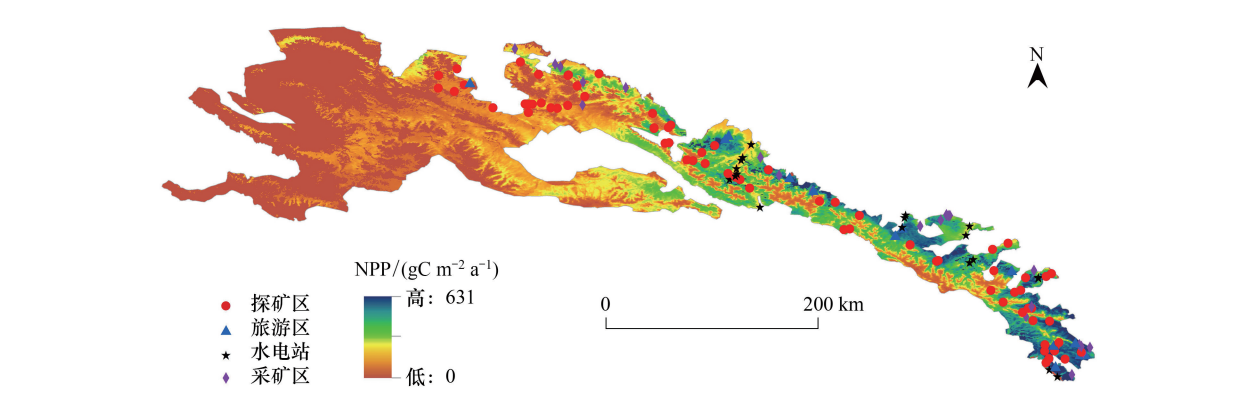


图5 祁连山国家公园人类活动区空间分布

Fig.5 Spatial distribution of human activities area in the Qilian Mountain National Park

2017 年国家 对祁连山国家公园内的人类活动进行了全面的规范整改,各类工程修复措施促进了人类活动区域植被的恢复,使得区域生态环境质量明显提高^[26]。依据规范整改前后植被 NPP 的变化,分别提取 2016 年和 2019 年人类活动区植被 NPP 值进行对比分析。由表 3 可得出,17 个水电站植被 NPP 均呈增加趋势,增加最快的是杂木河水电站;20 个旅游区植被 NPP 均出现增加趋势,增加最快的是土族山寨;22 个采矿区中有 2 个植被 NPP 出现降低趋势,其余 20 个均呈增加趋势,增加最快的是祁连重晶石粉厂重晶石矿,降低最明显的是哈溪镇铁矿;63 个探矿区中有 49 个探矿区植被 NPP 均呈增加趋势,其余探矿区植被 NPP 出现降

表 3 2016 年与 2019 年祁连山国家公园人类活动区植被 NPP 值的变化状态

Table 3 Change status of vegetation NPP values in the human activities area of the Qilian Mountain National Park in 2016 and 2019								
状态 Status	水电站		旅游区		采矿区		探矿区	
	Hydroelectric power plants		Tourist area		Mining area		Prospecting area	
	恢复	退化	恢复	退化	恢复	退化	恢复	退化
数量 Data/个	17	0	20	0	20	2	49	14

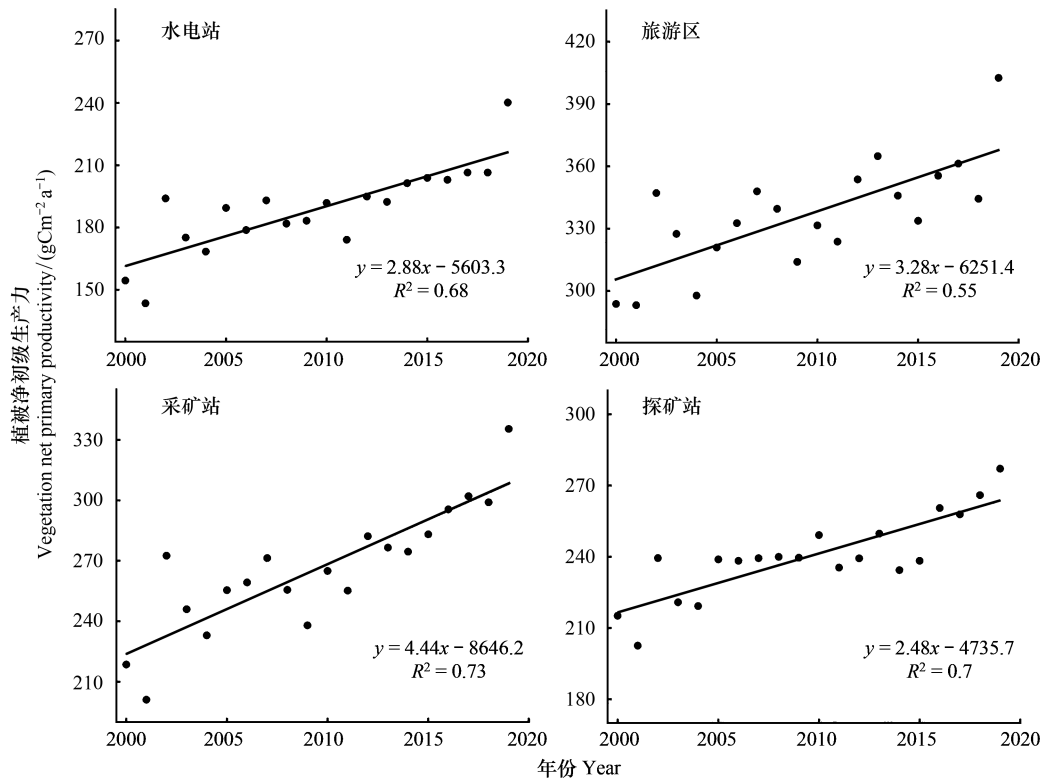


图 6 2000—2019 年祁连山国家公园各人类活动区植被 NPP 年际变化散点图

Fig.6 Scatterplot of interannual variation in vegetation NPP by human activities area in the Qilian Mountain National Park, 2000—2019

低趋势,增加最快的是百大坂钨矿,降低最明显的是花龙沟煤炭矿。总的来说,2019 年与 2016 年相比有 87% 的人类活动区植被 NPP 处于增加状态,13% 的人类活动区植被 NPP 处于下降态势,植被 NPP 降低的区域主要分布在探矿区和采矿区。

3.3 气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对作用

由 2000—2019 年气候变化和人类活动对植被 NPP 影响的空间分布(图 7)分析可得出,在植被恢复区,气候变化和人类活动对植被恢复分别解释了 92% 和 8%,受气候变化影响的区域分布广泛。而人类活动影响的区域分布较少且分散,主要集中在天祝县、凉州区、肃南县、祁连县和门源县。在规范整改后通过生态修复措施促进了植被 NPP 增加,例如肃南县在 2017—2018 年间封山育林 72.2 km²,造林 3.5 km²;天祝县 2017 年以来封山育林 60 km²,草原综合治理 231.33 km²,封禁围栏 220 km²;门源县完成荒滩造林绿化 6.67 km²,并对矿山区实施回填表土、种植绿化及围栏封育等修复工程。在植被退化区,气候变化和人类活动对植被退化分别解释了 29% 和 71%,人类活动是导致植被 NPP 降低的主要原因。退化区面积占植被区总面积积极小,气候变化导致的植被退化区域分布在肃南县和祁连县东北部接壤地带,受人类活动影响的区域零星分布在探采矿、水电开发和旅游等项目分布较多的门源县、祁连县、肃南县和天峻县境内。

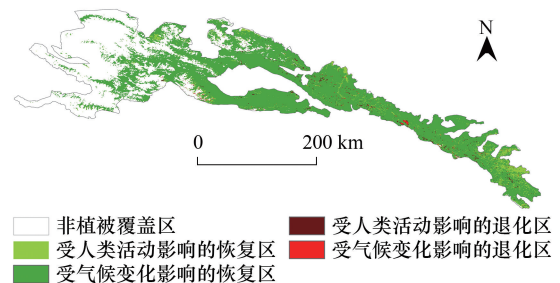


图 7 2000—2019 年气候变化和人类活动对植被 NPP 影响的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of climate change and human activities impacts on vegetation NPP, 2000—2019

4 讨论

植被 NPP 是探究生态系统碳收支和评价生态可持续性的重要因子^[28],其时间变化和空间分布受气候因子和人类活动共同影响^[6,29]。2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 整体呈波动上升趋势,且空间上呈东高西低的分布态势。就其驱动因素而言,研究区内生长季降水量和气温变化均促进了植被 NPP 增加,这是气候暖湿化的结果;暖湿化的气候趋势为植被的生长提供了有利环境^[30],相比降水的影响更显著,这与王莉娜等^[21]的研究结果相一致。进一步分析发现植被 NPP 与气温、降水的相关性空间分布正好相反,即受降水影响大的区域气温的影响小,受气温影响大的区域降水的影响小。主要原因是降水较多的地区主要分布在祁连山国家公园东南部,该区气温是植被 NPP 变化的主导因子;而研究区西北部多荒漠戈壁景观、气温较高、蒸发量大,降水是植被 NPP 变化的主导因子。

在人类活动影响下植被 NPP 整体上处于增加状态,与 2016 年相比,2019 年人类活动区植被 NPP 下降的区域为 13%,主要分布在探矿区和采矿区,说明探采矿对植被生长的干扰较强^[26]。而且人类活动对植被变化具有双重影响^[5,31],一方面,水电站建设、旅游开发、探采矿、过度放牧和开垦土地等人类活动使祁连山国家公园生态环境遭到破坏,导致其植被退化。另一方面,自 21 世纪以来,中央及地方政府针对祁连山地区实施了一系列生态保护政策和措施,如祁连山生态保护与综合治理规划、祁连山自然保护区矿业权退出及矿山生态环境恢复治理行动方案等;通过关闭所有探采矿区,分类处置水电站,全面整改旅游设施等措施,并结合退耕还林还草、禁牧及围栏封育等生态环境修复和保护活动使研究区生态环境逐步改善,植被得到恢复。

气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被 NPP 的相对作用结果表明,植被恢复区内气候变化是促进植被 NPP 恢复的主要原因,而在植被退化区内人类活动的影响是导致植被退化的主要因素。说明对祁连山国家公园最有效的保护就是减少人类活动的负面干扰,“给自然生态留下休养生息的时间和空间”。同时,对生态环境遭到严重破坏的区域如探采矿区实施回填表土、封山育林和补播草籽等生态修复措施,使受损生态环境逐步得到恢复和改善;并且设立国家公园既有科学研究、生态旅游和环境教育等价值,也有利于区域生态环境保护 and 规范管理。

5 结论

本文基于 2000—2019 年祁连山国家公园的植被 NPP 数据,分析了祁连山国家公园植被 NPP 的时空变化以及气候因子和人类活动对植被 NPP 变化的影响,并量化分析了气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对作用。主要得出以下结论:

- (1) 2000—2019 年祁连山国家公园植被 NPP 整体呈波动上升趋势,且空间上呈东高西低的分布态势;
- (2) 祁连山国家公园内植被 NPP 与生长季平均气温、降水量的相关性相比,降水对植被 NPP 的影响更显著;
- (3) 与 2016 年相比,2019 年人类活动区植被 NPP 整体上处于增加状态,植被 NPP 降低区域主要分布在探矿区和采矿区;
- (4) 在祁连山国家公园植被恢复区内气候变化和人类活动分别解释了 92% 和 8%,而植被退化区内气候变化和人类活动分别解释了 29% 和 71%。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 刘芳,迟耀斌,王智勇,王艳艳. NPP 列入生态统计指标体系的潜力分析——以北京地区 NPP 测算与空间分析为例. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 960-966.
- [3] 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.
- [4] 徐雨晴, 肖风劲, 於琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述. 生态学报, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [5] 葛丽娟, 党虹, 戎战磊, 高云飞, 赵传燕, 王红义. 祁连山中段植被群落的时空格局变化. 干旱区研究, 2018, 35(2): 346-353.
- [6] 桂娟, 高海宁, 李宗省, 邹海明, 袁瑞丰. 祁连山张掖段水电开发对区域生态环境的影响. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2159-2166.
- [7] Gang C, Zhou W, Wang Z, Chen Y, Li J, Chen J, Qi J, Odeh I, Groisman P Y. Comparative assessment of grassland NPP dynamics in response to climate change in China, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 201(1): 57-68.
- [8] 朱士华, 艳燕, 邵华, 李超凡. 1980—2014 年中亚地区植被净初级生产力对气候和 CO₂ 变化的响应. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1844-1856.
- [9] 李登科, 王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析. 生态环境学报, 2018, 27(3): 397-405.
- [10] 洪辛茜, 黄勇, 孙涛. 我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力时空演变. 生态学报, 2021, 41(24): 9836-9846.
- [11] 张颖, 章超斌, 王钊齐, 杨悦, 张艳珍, 李建龙, 安如. 气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究. 草业学报, 2017, 26(5): 1-14.
- [12] 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.
- [13] 王子玉, 许端阳, 杨华, 丁雪, 李达净. 1981—2010 年气候变化和人类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究. 地理科学进展, 2017, 36(8): 1025-1032.
- [14] 高旭旭, 于长文, 张婧, 张金龙. 定量评估京津冀气候变化和人类活动对植被 NPP 变化的相对作用. 中国农业气象, 2022, 43(2): 124-136.
- [15] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型 NDVI 对气候变化和人类活动的响应. 生态学报, 2022, 42(9): 1-12.
- [16] 张心茹, 曹茜, 季舒平, 陈浩, 张廷靖, 刘建. 气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响. 环境科学学报, 2022, 42(1): 56-69.
- [17] 张华, 宋金岳, 李明, 韩武宏. 基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1883-1894.
- [18] 汪有奎, 贾文雄, 刘潮海, 陈文, 赵成章, 王启尤, 汪杰. 祁连山北坡的生态环境变化. 林业科学, 2012, 48(4): 21-26.
- [19] 王新源, 杨栋武, 张莉丽, 张黎敏, 谢芳, 郭鹏. 祁连山国家公园草地退化成因及恢复对策. 草学, 2020(6): 81-86.
- [20] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 祁连山国家公园青海片区山水林田湖草的时空分异. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2866-2874.
- [21] 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.
- [22] 王利辉, 秦翔, 陈记祖, 张东伟, 刘宇硕, 李延召, 晋子振. 1961—2013 年祁连山区冰川年物质平衡重建. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1524-1533.
- [23] 张举涛, 张成琦. 祁连山地区 MODIS MOD17A3HGF 净初级生产力 (NPP) 数据集 (2000—2019 年). 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (www.ncdc.ac.cn), 2020. doi:10.12072/ncdc.qlsst.db0008.2020
- [24] 杨艳丽. 海河流域植被动态变化及其与气候、人类活动的关系研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2017.
- [25] Shi S Y, Yu J J, Wang F, Wang P, Zhang Y C, Jin K. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142419.
- [26] 李凤明, 白国良, 韩科明. 木里矿区生态环境受损特征及治理方法研究. 煤炭工程, 2021, 53(10): 116-121.
- [27] 李长春, 姚峰, 齐修东, 张光胜, 李昊东. 新疆准东煤田五彩湾露天矿区植被受损分析. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2015, 34(1): 124-128.
- [28] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [29] 刘亚荣, 贾文雄, 黄玫, 李悦悦, 武正丽, 张禹舜, 李燕飞. 近 51 年来祁连山植被净初级生产力对气候变化的响应. 西北植物学报, 2015, 35(3): 601-607.
- [30] 邸华, 贺晓香, 车宗彩. 祁连山区近 60 年气候变化对植被净第一性生产力的影响. 林业科技通讯, 2015(6): 8-11.
- [31] 柴立夫, 田莉, 奥勇, 王小青. 人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响. 水土保持研究, 2021, 28(6): 382-388.