

DOI: 10.5846/stxb202105191307

任小玢,张东海,俞鸿千,徐洁,蒋齐,王占军,吴旭东.气候变化和人为活动在宁夏草地变化中的相对作用.生态学报,2022,42(19):7989-8001.
Ren X B, Zhang D H, Yu H Q, Xu J, Jiang Q, Wang Z J, Wu X D. Assessment of relative effects of climate change and human activities on grassland dynamic in Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7989-8001.

气候变化和人为活动在宁夏草地变化中的相对作用

任小玢^{1,4}, 张东海², 俞鸿千^{1,4}, 徐洁³, 蒋齐^{1,4,*}, 王占军^{1,4}, 吴旭东^{1,4}

1 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002

2 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054

3 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

4 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室, 银川 750002

摘要:气候变化和人为活动是草地生态系统退化或恢复过程中的两大驱动因素。选取植被净初级生产力(NPP)为衡量指标,利用改进的Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模型、Thornthwaite Memorial模型以及残差趋势法分别计算了宁夏草地实际净初级生产力(ANPP)、潜在净初级生产力(PNPP)和人为活动影响的生产力(HNPP)及其变化趋势,定量评估了2001—2019年气候变化和人为活动在宁夏4种类型草地(温性草甸、温性草原、温性荒漠草原和温性草原化荒漠)动态变化中的相对作用。结果表明,2001—2019年宁夏草地实际净初级生产力增加的面积占宁夏草地总面积的97.84%;全区草地潜在净初级生产力均表现为增加趋势,表明气候变化有利于植被恢复。草地恢复过程中,气候变化引起的草地恢复面积占草地恢复总面积的61.68%,气候变化和人为活动共同作用引起的草地恢复面积占38.32%;人为活动是导致草地退化的绝对主导因素。4种类型草地动态变化的驱动因素存在差异,气候变化是促进温性草甸(68.94%)和温性草原化荒漠(70.51%)恢复的主导因素,气候变化和人为活动共同作用是促进温性草原恢复的主导因素(62.30%),温性荒漠草原的恢复是气候变化和人为活动共同作用的结果(97.93%)。水热条件好转,尤其是降水增加是宁夏草地恢复的主导气候因子,生态保护政策的实施是促进草地恢复的主要人为因素,对草地的不合理利用是导致草地退化的主要人为因素。

关键词:宁夏草地;草地动态变化;气候变化因素;人为活动因素

Assessment of relative effects of climate change and human activities on grassland dynamic in Ningxia

REN Xiaobin^{1,4}, ZHANG Donghai², YU Hongqian^{1,4}, XU Jie³, JIANG Qi^{1,4,*}, WANG Zhanjun^{1,4}, WU Xudong^{1,4}

1 Institute of Desert Manage, Ningxia Agriculture and Forestry Science Academy, Yinchuan 750002, China

2 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

3 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil & Water Conservation, Yinchuan 750002, China

Abstract: Climate change and human activity are two main factors driving vegetation dynamics during grassland recovery or degradation. In this study, the net primary productivity (NPP) was selected as the index, the improved Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model and Thornthwaite Memorial model were used to estimate actual net primary productivity (ANPP) and potential net primary productivity (PNPP) determined by climatic conditions, respectively. The residual trend analysis (RESTREND) method was applied to analyze the residuals of potential and actual net primary productivity and further identify non-climatic effects on vegetation dynamics in four types of natural grassland, including meadow steppe,

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2018AAC03277);宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-14-03,NGSB-2021-15-01);陕西省教育厅项目(20JK0760)

收稿日期:2021-05-19; **网络出版日期:**2022-05-24

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

warm steppe, desert steppe and warm steppe desert of Ningxia. Results showed that the ANPP in 97.84% of the grassland increased from 2001 to 2019 generally. The PNPP of the whole region presented an increasing trend, revealing that climate change had a positive effect on vegetation recovery across the study area. During the grassland restoration, 61.68% of the recovered grassland resulted from climate change, while 38.32% of the recovered grassland from the combined effects of climate change and human activity. Anthropogenic activities were considered as the absolutely dominant influencing factor for vegetation degradation. The driving factors of vegetation dynamic showed differences in the four types of grassland. Climate change was the dominant factor for the recovery of warm meadow (68.94%) and warm steppe desert (70.51%). The combined effects of climate change and human activities were the main factors for the recovery of warm steppe (62.30%). The recovery of warm desert steppe resulted from the combined effects of climate change and human activities (97.93%). The improvement of hydrothermal conditions, especially the increases in precipitation, was the main influencing factor for grassland restoration in Ningxia. The implementation of ecological protection policies produced significantly positive effects on the restoration of grassland, and the unreasonable occupation of grassland was the main anthropogenic factor leading to grassland degradation.

Key Words: Ningxia grassland; vegetation dynamics; climatic factors; anthropogenic factors

草地生态系统是陆地生态系统中最重要、分布最广的生态系统类型之一,在全球碳循环和气候调节中发挥着重要作用^[1-2]。气候变化和人为活动是草地生态系统退化或恢复过程中的两大驱动因素^[3-4]。有研究表明,我国北方地区将呈现降水增加、温度显著升高的变化趋势^[5],不同区域植被生产力对气温和降水变化的响应程度存在差异^[6-8];极端气候事件频率将显著增加^[9],干旱可能导致植被生产力降低,植被物种多样性减少,植被组成的空间格局发生变化^[10-11]。此外,随着社会经济的发展,草原利用过程中人为活动方式和规模的改变不可避免地对植被生长造成影响,人为活动逐渐成为植被生长的关键因素之一。因此,定量识别气候变化和人为活动在植被变化过程中的相对作用对于草地生态修复及重建具有一定意义。

宁夏各类草地面积之和占全区国土总面积的 58% 以上,是自治区的半壁河山和面积最大的绿色生态屏障。草地资源作为宁夏面积最大的土地类型和主要的可更新资源,不仅是草原畜牧业发展的物质基础,而且对维护生态平衡,保护人类生存环境发挥着重要作用。宁夏地处典型的气候过渡带和农牧交错区,生态环境脆弱,草地退化或恢复的过程受到气候变化和人为活动的共同作用,但是两者的相对贡献率存在相互交织而难以区分的问题。近年来,宁夏草地动态变化及其驱动力的监测和研究较多,主要针对不同土地利用方式^[12]、不同景观特征或斑块尺度^[13]、不同植被群落分布格局^[14]以及不同降水梯度下^[15]草原植被对气候环境的响应,也有研究分析了宁夏草地生产力的变化趋势及其对气候变化的响应^[16-17],但是定量划分气候变化和人为活动对草地生产力相对作用的研究较少。

随着 3S 技术的不断发展,利用遥感手段对区域植被动态变化的监测和模拟研究弥补了野外调查方式的不足^[18],针对植被动态变化的研究尺度从局部近距离的直接介入性研究拓展到区域性整体的定量模拟研究^[19]。植被生产力的下降或上升是植被退化或恢复的重要表现方面,植被净初级生产力(Net primary productivity, NPP)是植物通过光合作用在单位时间和面积上所积累的有机干物质总量,不仅可以准确反映植被生长状况,也是判定生态系统碳汇及调节生态过程的主要因子^[20-21]。在干旱半干旱地区,年降水量较少且年际间变化较大,使得很难将气候变化对植被生产力变化的作用从人为活动的作用中剥离^[22]。已有研究将 NPP 作为公共指标^[23-26],并利用残差趋势法(Residual trend analysis, RESTREND)定量区分植被动态变化过程中气候变化和人为活动的相对作用,尤其适用于对降水更为敏感的干旱和半干旱地区^[27-29]。

因此,本研究选取 NPP 作为衡量指标,利用实际 NPP 监测 2001—2019 年宁夏草地生产力的动态变化,结合潜在 NPP 和人为活动影响的 NPP(潜在 NPP 与实际 NPP 的差值)定量评估气候变化和人为活动在宁夏主要类型草地退化或恢复过程中的相对作用,以期为宁夏草地生态修复和可持续发展及利用提供理论支撑。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

宁夏地处我国西北地区东部(35°14'—39°23' N, 104°17'—107°39' E), 国土总面积 6.64 万 km², 地势南高北低, 西部高差较大, 东部起伏较缓。宁夏地处半湿润区、半干旱区向干旱区的过渡带, 气候类型为典型的大陆性半湿润半干旱气候, 冬季较长, 夏季较短, 降水量少, 风大干燥。多年平均降水量 183.4—677 mm, 主要集中在夏季, 空间上呈现出南多北少的特点^[30]。多年平均气温为 5.20—8.19℃, 近 60 年全区平均气温以 0.38℃/10a 的速率升高, 且近 20 年增温效果更为明显^[31]。年日照时数 2247.20—3083.50 h, 日照百分率 51%—70%。宁夏草地植被呈现典型的地带性分布特征, 由南向北表现为从草原向荒漠过渡(图 1)。宁夏主要草地类型有温性草甸、温性草原、温性荒漠草原以及温性草原化荒漠^[32]。其中, 温性草甸草原主要分布于海原、固原、彭阳、泾源的部分地区, 植物优势种有蒙古风毛菊(*Saussurea mongolica*)、白莲蒿(*Artemisia stechmanniana*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等, 土壤主要为山地棕壤土、暗灰褐土和黑垆土; 温性草原主要分布于宁夏南部海原、固原、西吉、隆德和彭阳大部分地区以及盐池南部麻黄山地区, 植物优势种有大针茅(*Stipa grandis*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、赖草(*Leymus secalinus*)、中亚苔草(*Carex duriuscula*)和碱菀(*Tripolium pannonicum*)等, 土壤主要为黄绵土、淡栗钙土和黑麻土; 温性荒漠草原是宁夏分布面积最大的草地类型, 主要分布于宁夏中北部地区, 植物优势种有短花针茅(*Stipa breviflora*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosic*)、老瓜头(*Cynanchum mongolicum*)和牛枝子(*Lespedeza potaninii*)等, 土壤主要有草原风沙土、灰钙土和淡灰钙土; 温性草原化荒漠面积较少, 零散分布于中卫迎水镇、中宁石空镇、青铜峡邵岗镇以及灵武临河镇等, 优势灌木有珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)和猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)等, 草本植物有中亚苔草(*Carex duriuscula*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和碱蓬(*Suaeda glauca*)等。

1.2 数据来源及处理

本研究所用的数据包括归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、土地覆被类型、气象数据等。其中, 2001—2019 年 NDVI 数据为 MOD13Q1 影像(通过 <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/> 下载), 数据周期为 16 d, 空间分辨率 250 m。使用 MRT (MODIS reprojection tool) 对遥感影像进行格式转换、重投影、图像拼接等预处理, 采用最大合成法得到 NDVI 的月遥感数据。2001—2019 年土地覆盖数据是基于国际地圈生物圈计划(The International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)分类系统的 MCD12Q1 产品(通过 LPDAAC 的 EOS/MODIS 数据中心下载), 空间分辨率 500 m。根据研究需要将 IGBP 分类系统的 17 个类别划分为 7 个主要土地覆被类型: 水体、森林、草地、农田、农田/自然植被、城市和荒漠^[19]。

气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>), 搜集并整理宁夏及周边 24 个气象台站

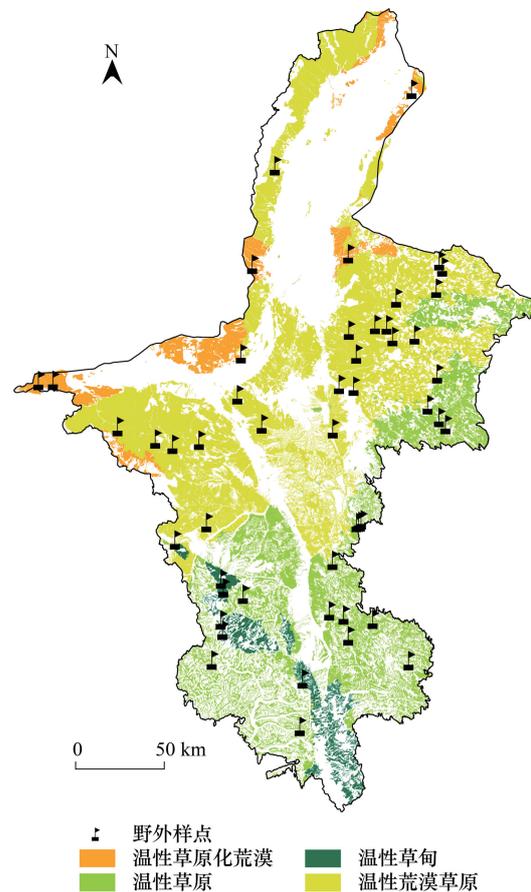


图 1 宁夏主要类型草地分布图

Fig.1 The distribution of main types of grassland in Ningxia

2001—2019 年日平均温度(°C)、日降水量(mm)、日照时数(h)等数据,采用 Kriging 插值法将站点数据插值为空间栅格数据,最后利用研究区边界裁剪得到 2001—2019 年逐月降水量、平均气温、太阳总辐射的空间数据。以上空间数据均采用 Albers equal area conical-WGS 84 投影坐标系统,分辨率统一为 500 m。

对宁夏草地类型空间格局进行了遥感解译。初步根据 20 世纪 80 年代宁夏草地类型空间分布图设计采样带与采样点,选用 2015 年资源三号卫星(全色波段空间分辨率 2.1 m)、高分一号卫星(全色波段空间分辨率 2 m)遥感影像,在对 2015 年宁夏草地类型自动分类的基础上,进行目视解译。2017 年 8 月底—9 月初,在宁夏主要类型草地调查 95 个核心样点,记录沿途踩点 2000 个以上,用于分类结果的人工修改,确保草地类型的解译精度高于 80%以上^[33]。

根据宁夏主要草地类型及其优势种,设置了 49 个野外监测点(图 1),于 2018 年 8 月实地调查各监测点生物量。每个监测点随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方(灌木样方 10 m×10 m),各样方间隔距离 50 米以上。齐地收割植物地上部分生物量并烘干称重,以 3 个样方地上生物量的平均值代表该监测点地上生物量,结合地上/地下生物量比例系数^[34]和碳转换系数(0.475)^[35]计算每个监测点的实测 NPP。

2 研究方法

本研究选取了 3 种草地净初级生产力,即实际净初级生产力(ANPP)、潜在净初级生产力(PNPP),以及人为活动影响下的草地净初级生产力(HNPP)。

2.1 实际净初级生产力(ANPP)

CASA 模型是植被 NPP 估算的光能利用率模型之一,其利用遥感数据、近地面气象数据和植被类型等数据反演不同尺度植被 NPP,已广泛用于全球及区域尺度的 NPP 研究中^[21, 36–38]。本研究采用由朱文泉等改进的 CASA 模型估算草地实际净初级生产力(ANPP)^[35],改进的 CASA 模型考虑了不同植被覆盖分类精度对 NPP 估算结果的影响,以及最大光能利用率的区域差异;在保持模型原有植物生理生态学基础上,通过改进水分胁迫因子估算方法,简化了相关参数,使得模型的实际可操作性更强^[35]。NPP 由植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(ϵ)两个变量确定,计算公式如下:

$$\text{ANPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中,ANPP(x, t)为像元 x 在 t 月实际净初级生产力(gC/m^2);APAR(x, t)表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射(MJ/m^2),该指标取决于太阳辐射总量和植被本身的特征; $\epsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的光能利用率(gC/MJ),即植物把吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率,受到理想条件下的最大光能利用率和植物生长环境(温度和水分)的影响。植被吸收的光合有效辐射(APAR)取决于太阳总辐射和植被光合有效辐射的吸收比例,计算公式如下:

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

式中,SOL(x, t)表示 t 月份在像元 x 处的太阳总辐射量(MJ/m^2),本研究利用 Angstrom 模型计算太阳总辐射量^[39];FPAR(x, t)为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例(无单位),其与 NDVI、比值植被指数(Simple ratio, SR)存在着线性关系,根据 Potter 等^[40]的方法计算;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射(波长为 0.38—0.71 μm)占太阳总辐射的比例。

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中, $T_{\epsilon_1}(x, t)$ 和 $T_{\epsilon_2}(x, t)$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用(无单位),受月平均温度和全年 NDVI 达到最大值时的温度调节; $W_{\epsilon}(x, t)$ 为水分胁迫影响系数(无单位),主要反映水分条件的影响,由月平均气温和相应的土壤特性决定^[40]; ϵ_{\max} 是理想条件下的最大光能利用率(gC MJ^{-1}),不同植被类型的最大光能利用率不同,本研究取值采用朱文泉等^[41]的研究结果。

利用野外实测 NPP 验证改进的 CASA 模型的模拟精度。图 2 为实测值与模型模拟值的散点图以及线性回归方程,相关系数为 0.818($P < 0.01$),决定系数 $R^2 = 0.670$,表明实测值与模拟值具有较强的相关性,模型的

模拟精度满足研究需求。

2.2 潜在净初级生产力(PNPP)

草地潜在净初级生产力即气候条件对草地动态变化的驱动作用。Miami 模型是早期基于气象因子评估植被 NPP 区域分布的模型之一,其根据实测 NPP 和气温、降水数据之间最小二乘法回归关系建立^[42]。本研究利用 Thornthwaite Memorial 模型计算草地潜在净初级生产力(PNPP),该模型基于 Miami 模型中使用的数据建立,对传统模型中的 Thornthwaite 潜在蒸散量模型进行了修正^[42-43],且在北方农牧交错区草地潜在净初级生产力模拟中具有较好的适用性^[44-45]。计算公式为:

$$PNPP = 3000 \times [1 - e^{-0.0009695(v-20)}] \quad (4)$$

$$v = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{1.05r}{L}\right)^2}} \quad (5)$$

$$L = 3000 + 25t + 0.05t^3 \quad (6)$$

式中,PNPP 为潜在净初级生产力(gC m⁻² a⁻¹),v 为年实际蒸散量(mm),L 为年最大蒸散量(mm),t 为年均气温(°C),r 为年降水量(mm)。

2.3 人为活动影响的草地净初级生产力(HNPP)

草地潜在净初级生产力和实际净初级生产力的差值表征人为活动影响的草地净初级生产力(HNPP)^[26]。负值表示人为活动有利于 NPP 增加,即草地处于恢复状态;正值表示人为活动导致 NPP 损失,即草地处于退化状态。计算公式为:

$$HNPP = PNPP - ANPP \quad (7)$$

2.4 气候变化和人为活动对草地变化相对作用的定量评估

利用 ANPP 的变化趋势评价草地动态变化,利用 PNPP 和 HNPP 的变化趋势评价气候变化和人为活动对草地动态变化的影响。采用一元线性回归模型逐像元计算 2001—2019 年宁夏草地净初级生产力的变化趋势。计算公式如下:

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad (8)$$

式中,y 为 NPP,x 为监测年数,α 为截距,β 为斜率,ε 为误差。β>0 表示 NPP 处于增加趋势,反之则为降低趋势。对斜率 β 进行 t 检验,P<0.05 通过显著性检验。

本研究利用 NPP 的变化定量评估气候变化和人为活动在草地变化中的相对作用。ANPP 斜率 β_A 大于 0,表示草地处于恢复状态;β_A 小于 0,表示草地处于退化状态。PNPP 斜率 β_p 大于 0,表示气候变化有利于草地恢复;β_p 小于 0,表示气候变化引起草地退化。HNPP 斜率 β_H 大于 0,表示人为活动引起草地退化;β_H 小于 0,表示人为活动有利于草地恢复。参照已有研究结果^[26],气候变化和人为活动对草地动态变化的影响存在 6 种情景(表 1)。

3 结果分析

3.1 实际和潜在净初级生产力

图 3 为 2001—2019 年宁夏草地实际(ANPP)和潜在(PNPP)净初级生产力空间格局,宁夏草地 ANPP 和 PNPP 均表现为由北向南逐渐升高。2001—2019 年,宁夏草地实际净初级生产力均值为 242.84 gC m⁻² a⁻¹,潜在净初级生产力均值为 520.01 gC m⁻² a⁻¹。不同类型草地净初级生产力存在差异(图 4),温性草甸、温性草原、温

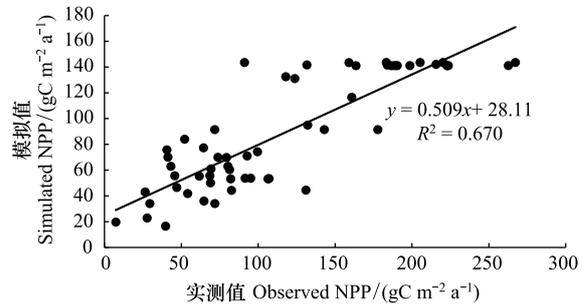


图 2 草地 NPP 实测值与模拟值的比较

Fig.2 The comparison of NPP measured in the field and simulated by the improved Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model

NPP:净初级生产力 Net primary productivity

性荒漠草原和温性草原化荒漠年均 ANPP 分别为 $605.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $356.46 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $185.79 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $137.98 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 年均 PNPP 分别为 $765.46 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $696.95 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $444.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $363.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

表 1 草地变化过程中气候变化和人为活动相对作用的情景

Table 1 Scenarios for assessing the relative effects of climate change and anthropogenic activities on grassland restoration or degradation				
β_A	情景 Scenarios	β_P	β_H	情景描述 Description for each scenario
草地恢复($\beta_A > 0$) Grassland restoration	情景 1	< 0	< 0	草地恢复主要由人为活动引起
	情景 2	> 0	> 0	草地恢复主要由气候变化引起
	情景 3	> 0	< 0	草地恢复由二者共同作用引起
草地退化($\beta_A < 0$) Grassland degradation	情景 1	> 0	> 0	草地退化主要由人为活动引起
	情景 2	< 0	< 0	草地退化主要由气候变化引起
	情景 3	< 0	> 0	草地退化由二者共同作用引起

β_A : 实际净初级生产力的斜率, Slope of actual net primary productivity; β_P : 潜在净初级生产力的斜率, Slope of potential net primary productivity; β_H : 人为活动影响的草地生产力斜率, Slope of net primary productivity determined by human activity

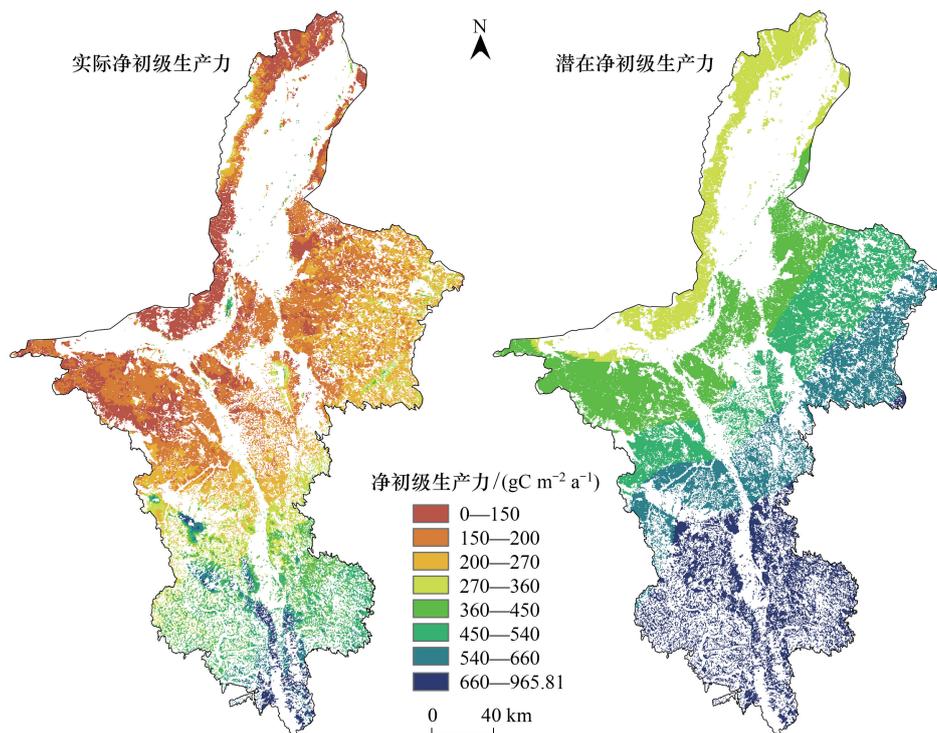


图 3 2001—2019 年宁夏草地年均 ANPP 和 PNPP 空间格局

Fig.3 Spatial pattern of average annual ANPP and PNPP of grassland in Ningxia from 2001 to 2019

ANPP: 实际净初级生产力 Actual net primary productivity; PNPP: 潜在净初级生产力 Potential net primary productivity

3.2 ANPP、PNPP 和 HNPP 的变化趋势

2001—2019 年宁夏草地 ANPP 总体呈增大趋势(图 5), 单位面积年均增长率为 $7.01 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。不同类型草地净初级生产力年均变化速率存在差异(图 6), 温性草甸、温性草原、温性荒漠草原和温性草原化荒漠 ANPP 年均变化率分别为 $9.96 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $12.47 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $4.68 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $3.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。空间分布上, ANPP 增加($\beta_A > 0$)的草地面积为 22625.02 km^2 , 占宁夏草地总面积的 97.84%, 其中呈显著增加趋势($P < 0.05$)的草地面积占 73.72%(图 5)。由表 2 可知, 温性荒漠草原 ANPP 呈增大趋势的面积最多, 占宁夏草原总面积的 55.29%; 温性草原化荒漠 ANPP 呈增大趋势的面积最少, 占宁夏草原总面积的 4.82%。此外, ANPP 总体呈减小趋势($\beta_A < 0$)的草地面积为 498.87 km^2 , 仅占宁夏草地总面积的 2.16%。

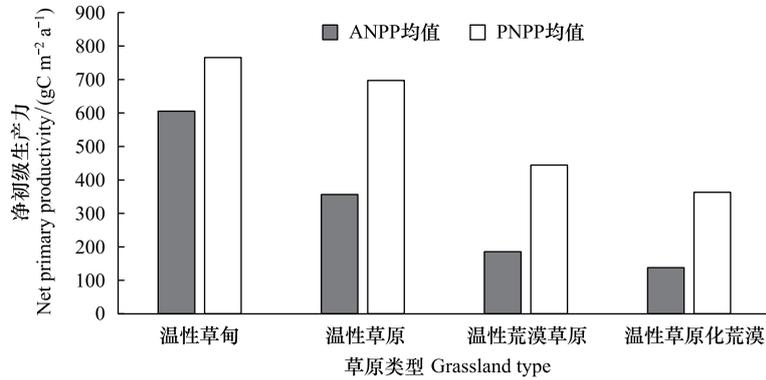


图 4 2001—2019 年宁夏主要类型草地年均 ANPP 和 PNPP

Fig.4 The average annual ANPP and PNPP of different types of grassland of Ningxia from 2001 to 2019

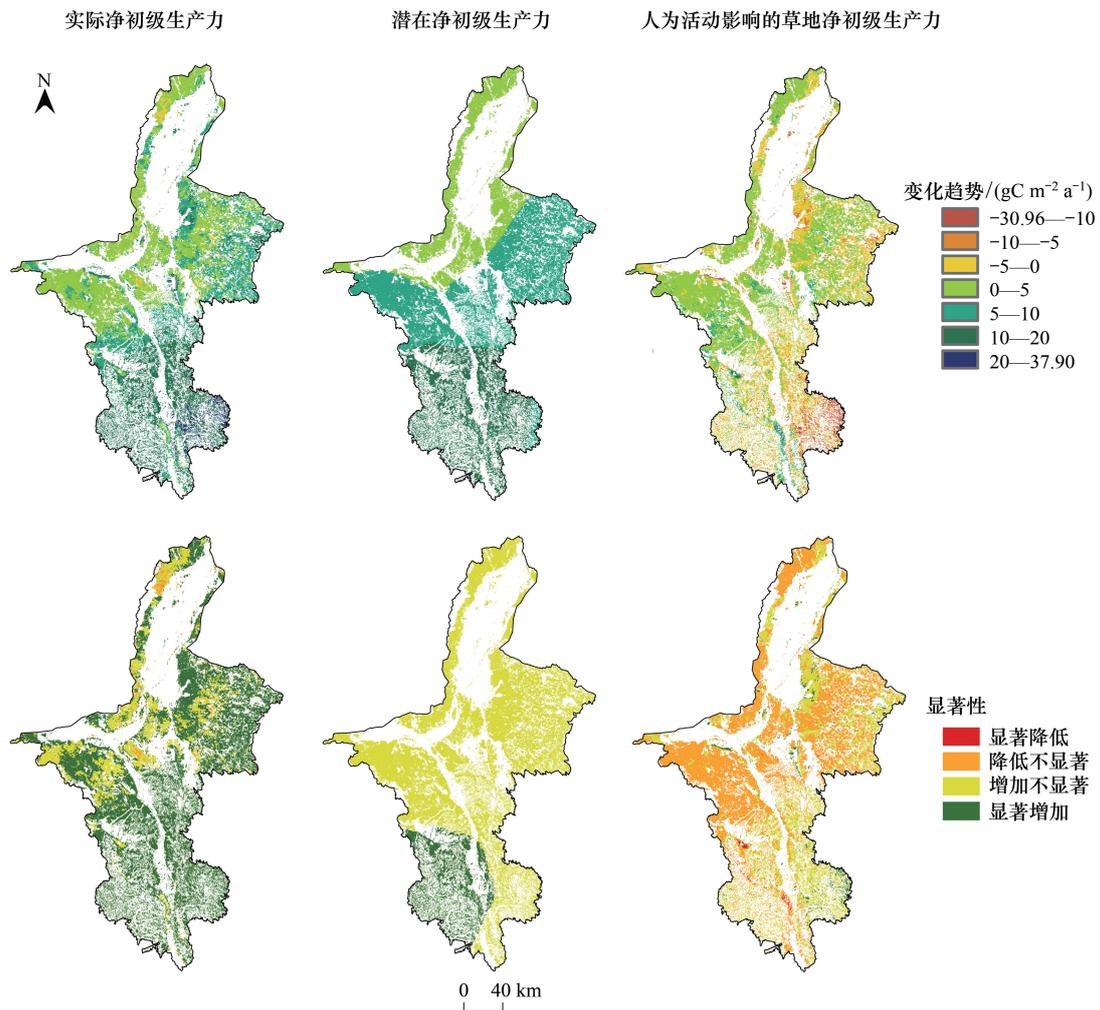


图 5 2001—2019 年宁夏草地 ANPP、PNPP 和 HNPP 变化趋势及显著性空间格局

Fig.5 Spatial pattern of change trend and its significance for ANPP, PNPP and HNPP of grassland in Ningxia from 2001 to 2019

HNPP:人为活动影响的草地净初级生产力,Net primary productivity determined by human activity

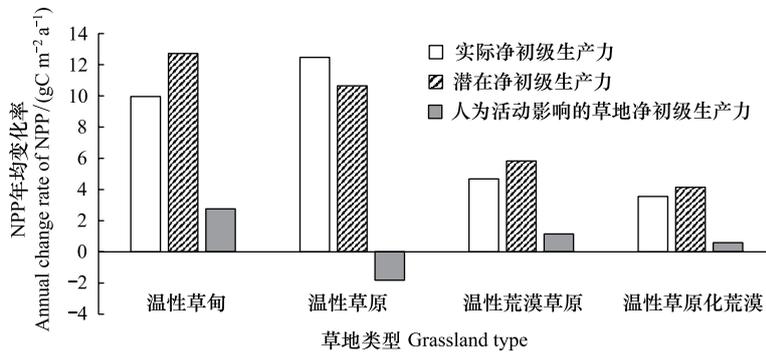


图 6 宁夏主要类型草地净初级生产力年均变化速率

Fig.6 The annual change rate of ANPP, PNPP and HNPP of different types of grassland in Ningxia

2001—2019 年宁夏全区草地 PNPP 均有所增加(图 5),表明研究区气候变化有利于植被恢复,单位面积 PNPP 年均增长率为 $7.46 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。其中,温性草甸、温性草原、温性荒漠草原和温性草原化荒漠 PNPP 年均变化率分别为 $12.72 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $10.65 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $5.83 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $4.14 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 6)。空间分布上,宁夏草地 PNPP 均呈增大趋势($\beta_p > 0$),其中呈显著增加趋势($P < 0.05$)的草地面积占草地总面积的 12.85%(图 5)。此外,温性荒漠草原 PNPP 呈增加趋势($\beta_p > 0$)的面积最多,占宁夏草原总面积的 57.20%,温性草原化荒漠 PNPP 呈增加趋势($\beta_p > 0$)的面积仅占 4.99%(表 2)。

表 2 宁夏主要类型草地净初级生产力变化趋势的面积及百分比

Table 2 Area and percentage of net primary productivity of different types of grassland in Ningxia

草地类型 Grassland type	ANPP 增加趋势 ($\beta_A > 0$) Increasing trend of ANPP		ANPP 减少趋势 ($\beta_A < 0$) Decreasing trend of ANPP		气候变化促进 草地恢复($\beta_p > 0$) Recovered grassland resulted from climate change		人为活动引起 草地退化($\beta_H > 0$) Degraded grassland resulted from human activity		人为活动促进 草地恢复($\beta_H < 0$) Recovered grassland resulted from human activity	
	面积/ km^2	百分比/%	面积/ km^2	百分比/%	面积/ km^2	百分比/%	面积/ km^2	百分比/%	面积/ km^2	百分比/%
温性草甸 Meadow steppe	1481.36	6.40	2.57	0.01	1483.72	6.42	1026.50	4.44	457.44	1.98
温性草原 Warm steppe	7244.94	31.33	13.31	0.06	7258.25	31.39	2741.84	11.86	4516.42	19.53
温性荒漠草原 Desert steppe	12784.86	55.29	442.63	1.91	13227.70	57.20	9851.97	42.61	3375.51	14.60
温性草原化荒漠 Warm steppe desert	1113.86	4.82	40.36	0.17	1154.22	4.99	823.86	3.56	330.36	1.43
合计 Total	22625.02	97.84	498.87	2.16	23123.89	100.00	14444.17	62.46	8679.72	37.56

ANPP: 实际净初级生产力 Actual net primary productivity

2001—2019 年,人为活动导致草地净初级生产力降低($\beta_H > 0$)的面积占宁夏草地总面积的 62.46%,其中 0.57%的草地净初级生产力显著降低($P < 0.05$)(图 5),人为活动导致草地退化主要分布于宁夏中西部和北部地区,零星分布于南部地区;人为活动促进草地净初级生产力上升($\beta_H < 0$)的面积占宁夏草地总面积的 37.56%,其中 2.88%的草地净初级生产力显著上升($P < 0.05$),人为活动促进草地恢复($\beta_H < 0$)主要分布于宁夏南部地区,零星分布于中北部地区;HNPP 变化趋势表明人为活动对宁夏草地生产力造成损失的作用更大。从不同草地类型来看(图 6),温性草甸、温性草原、温性荒漠草原和温性草原化荒漠 HNPP 年均变化率分别为 $2.76 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-1.82 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $1.15 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.59 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。此外,人为活动引起温性荒漠草原退化($\beta_H > 0$)的面积最大,占人为活动引起草地退化总面积的 42.61%;人为活动促进温性草原恢复($\beta_H < 0$)的面积最大,占人为活动促进草地恢复总面积的 19.53%(表 2)。

3.3 气候变化和人为活动的相对作用

将 2001—2019 年草地处于恢复状态($\beta_A > 0$)的区域与气候变化和人为活动对草地变化的影响进行叠加分析,结合表 1 分析草地恢复过程中气候变化和人为活动的相对作用。结果表明(图 7),气候变化是宁夏草地恢复的主导因素,其引起的草地恢复面积占草地恢复总面积的 61.68%,气候变化和人为活动共同作用引起的草地恢复面积占 38.32%。4 种类型草地恢复的主导因素不同(图 8)。气候变化是温性草甸恢复的主导因素,其恢复面积占温性草甸恢复总面积的 68.94%;气候变化和人为活动共同作用是温性草原恢复的主导因素,其恢复面积占温性草原恢复总面积的 62.30%;气候变化和人为活动的共同作用是温性荒漠草原恢复的因素,其恢复面积占温性荒漠草原恢复总面积的 97.93%;气候变化是温性草原化荒漠恢复的主导因素,其恢复面积占温性草原化荒漠恢复总面积的 70.51%。

将 2001—2019 年草地处于退化状态($\beta_A < 0$)的区域与气候变化和人为活动对草地变化的影响进行叠加分析,结合表 1 分析草地退化过程中气候变化和人为活动的相对作用。结果表明,尽管宁夏草地退化面积较少(占宁夏草地总面积的 2.16%),但是人为活动是 4 种类型草地退化的绝对主导因素,气候变化与人为活动共同作用引起的草地退化面积仅占 0.05%(图 8)。

4 讨论

宁夏地处干旱、半干旱气候区,温度和降水是影响植被生长的重要因素,气候暖湿化可以促进植被生长,而气候暖干化会降低草地生产力,水分条件是区内植物生长的限制因子^[46]。由图 9 可知,2001—2019 年宁夏年均气温和年降水量均呈上升趋势,表明区域气候呈现向暖湿化演变的特征^[30-31],水热条件的好转有助于提高草地植被生产力,进而促进草地恢复。相较于短期的气温变化,年降水量对植被生长的影响更大^[47],进一步对年均气温和年降水量与 PNPP 值进行回归分析,结果表明宁夏草地 PNPP 与气温呈不显著相关($R^2 = 0.29, P = 0.22$),而与降水量呈显著正相关($R^2 = 0.99, P < 0.01$),表明降水增加是宁夏草地动态变化的主导气候因子,这与已有研究的结论是一致的^[16, 26]。

对 2001—2019 年宁夏草地年均气温和年降水量的空间变化趋势进行分析(图 10),结果表明年均气温和年降水量的变化趋势具有区域差异。宁夏中北部气温升高的趋势较大,由北向南升高趋势逐渐减小;相反,宁夏南部降水增加趋势较大,总体表现为由南向北降水增加趋势逐渐减小。统计了 2001—2019 年 4 种草地类型年均气温和年降水量的变化率,温性草甸、温性草原、温性荒漠草原和温性草原化荒漠年均气温变化率分别为 0.021、0.027、0.04、0.047 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$,年降水量变化率分别为 8.19、6.65、3.17、2.14 mm/a 。温性荒漠草原和温性草原化荒漠区域气温升高趋势较大,年降水量略微增加。温性草甸和温性草原区域气温增加趋势低于温性荒漠草原和温性草原化荒漠,但是降水增加趋势高于其他草地类型,因此温性草甸和温性草原草地生产力的增加

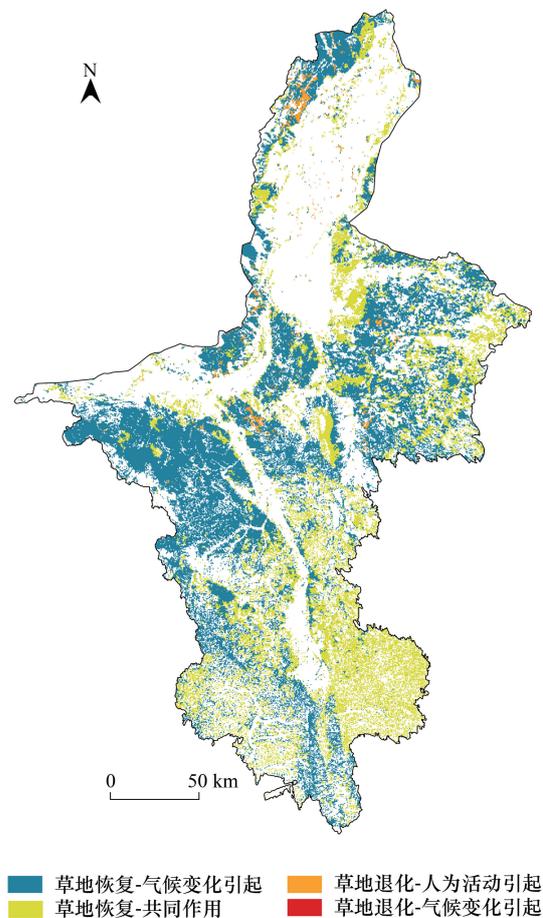


图 7 宁夏草地恢复和草地退化过程中气候变化、人为活动及二者共同作用驱动格局

Fig.7 Spatial distribution of the relative roles of climate change, anthropogenic activities and the combination of these two factors on the restoration and degradation of grassland in Ningxia

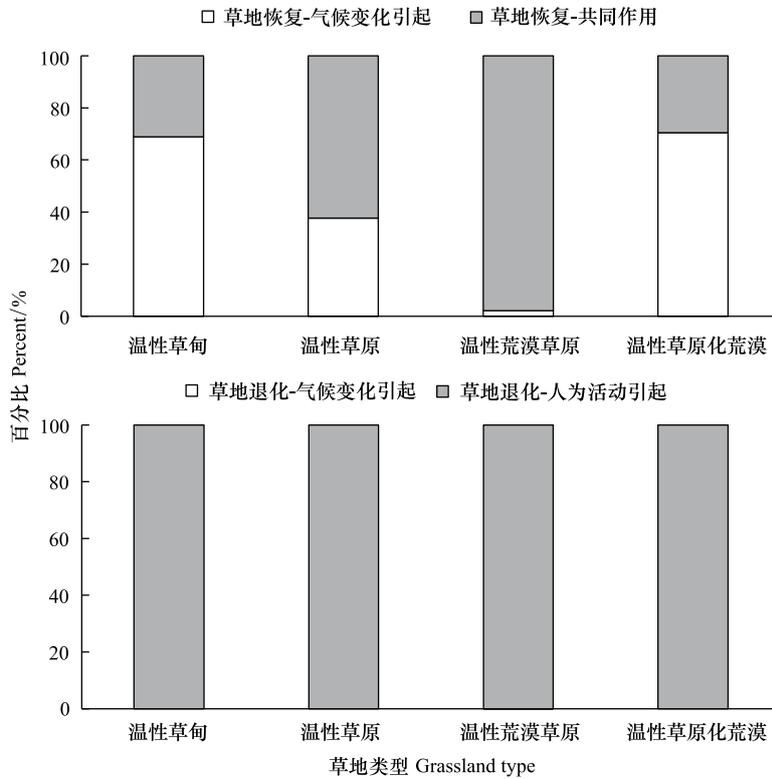


图 8 宁夏草地恢复和草地退化过程中气候变化和人为活动的相对作用

Fig.8 Relative roles of anthropogenic and climatic effects on restoration and degradation of grassland in Ningxia

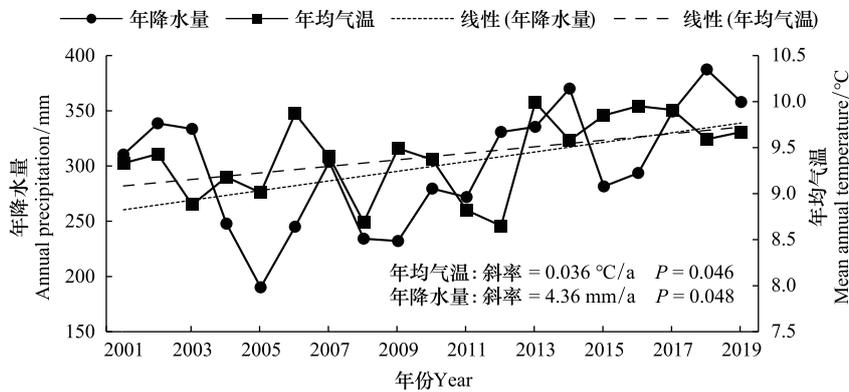


图 9 2001—2019 年宁夏年均气温和年降水量

Fig.9 Changes in mean annual temperature and annual precipitation in Ningxia from 2001 to 2019

趋势高于其他草地类型,气候因素尤其是降水增加明显促进了这两类草原生产力的提高。

经统计,2001—2019 年宁夏年末牲畜存栏数缓慢增长(图 11),近 19 年间年末牲畜存栏数增长了近 50%,这期间草地实际净初级生产力(ANPP)呈增加趋势,可见牲畜存栏数增加并未导致草地实际生产力下降,这可能与生态保护政策的实施密切相关。为了遏制天然草原环境恶化的趋势,2000 年以来我国陆续开始实施“退耕还林还草”和“封育禁牧”等重大草原生态保护与管理工程。当禁牧程度达到完全禁牧的 40%,草地恢复的趋势即可基本趋于稳定^[48],2003 年宁夏开始实施全域禁牧政策,并通过贯彻落实相关草原生态保护与管理政策来消除放牧压力,草原植被得到明显恢复^[49],因此实施生态保护政策是促进草地恢复的人为因素之一。此外,2001—2019 年人为活动对草地生产力的影响(HNPP)总体并未表现出明显的增加趋势,且人为活

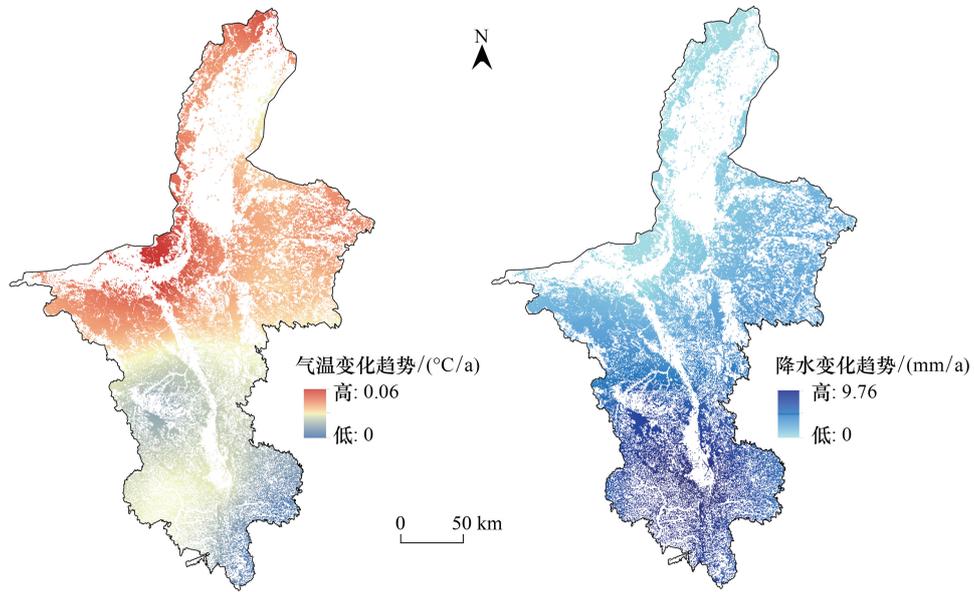


图 10 2001—2019 年宁夏草地年均气温和年降水量的变化趋势

Fig.10 The change trend for mean annual temperature and annual total precipitation of grassland in Ningxia from 2001 to 2019

动对草地实际生产力造成了不同程度的损失(年均 HNPP 均为正值),一方面由于潜在净初级生产力(PNPP)的增加趋势(7.46 gC m⁻²a⁻¹)略高于实际净初级生产力(ANPP)(7.01 gC m⁻²a⁻¹),导致两者差值没有显著的变化趋势;另一方面虽然宁夏实施全域禁牧政策,但实际生产中仍然存在不同程度地“偷牧”现象^[50],这些不合理的人为活动对草地退化产生了一定影响。

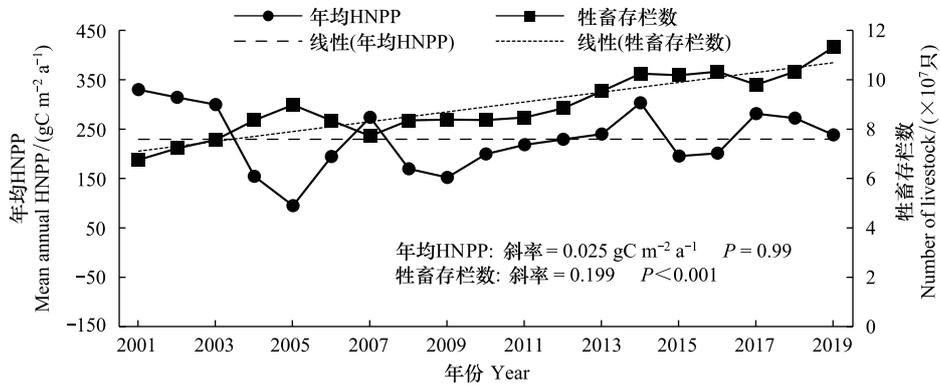


图 11 2001—2019 年年均 HNPP 和年末牲畜存栏量变化趋势

Fig.11 The change trend for mean annual HNPP and number of livestock between 2001 and 2019 in Ningxia

HNPP: 人为活动影响的生产力

2001—2019 年,人为活动促进草地恢复($\beta_H < 0$)的面积占宁夏草地总面积的 37.54%,主要分布于水热条件相对较好的温性草原和温性草甸,表明除了气候条件的有利因素,退耕还林还草等生态政策的实施发挥了一定积极作用。人为活动引起草地退化($\beta_H > 0$)的面积占宁夏草地总面积的 62.46%,主要分布于水热条件相对较差(尤其是降水偏少)的温性荒漠草原,表明人为活动对温性荒漠草原的负面影响仍然存在。2000—2016 年宁夏草地面积减少 34.77 万公顷,随着工业化和城镇化等社会经济发展,人工建设用地与耕地等扩张过程中占用草地的现象明显^[33, 51],因此对草地的不合理利用是加速草地退化的人为因素之一。其次,有研究表明禁牧程度达到 40% 以后继续增加禁牧程度直至完全禁牧,并不能更有效的提高草地沙漠化的逆转速

度^[48],长期禁牧对草地植被生产能力等产生不良影响^[52],因此禁牧政策是否完全发挥了正面作用需要进一步探讨。综上所述,草原生态保护与管理政策在草地恢复及草地沙化治理过程中发挥了一定作用^[53],但是人为活动对草地不合理的利用方式是导致草地退化的原因之一,同时人为活动对草地变化过程的内在驱动机制以及禁牧的长期成效还需要进一步探讨。

5 结论

本文选取植被净初级生产力(NPP)为衡量指标,定量评估了2001—2019年宁夏主要类型草地动态变化以及气候变化和人为活动在草地变化中的相对作用。研究表明,2001—2019年宁夏草地实际净初级生产力增大的面积占宁夏草地总面积的97.84%,其中73.72%的草地呈显著恢复趋势;全区草地潜在净初级生产力均表现为增加趋势,表明气候变化有利于植被恢复。草地恢复过程中,气候变化引起的草地恢复面积占草地恢复总面积的61.68%,气候变化和人为活动共同作用引起的草地恢复面积占38.32%;草地退化过程中,尽管宁夏草地退化面积较小,但是人为活动是导致草地退化的绝对主导因素。4种类型草地动态变化中的驱动因素不同。其中,气候变化是温性草甸(68.94%)和温性草原化荒漠(70.51%)恢复的主导因素,气候变化和人为活动共同作用是温性草原恢复的主导因素(62.30%),温性荒漠草原的恢复是气候变化和人为活动共同作用的结果(97.93%)。水热条件好转,尤其是降水量的增加是草地恢复的主导气候因子,生态保护政策的实施是促进草地恢复的主要人为因素,对草地的不合理利用是导致草地退化的主要人为因素。

参考文献(References):

- [1] 朴世龙,方精云,贺金生,肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [2] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [3] Wang L H, Tian F, Wang Y H, Wu Z D, Schurgers G, Fensholt R. Acceleration of global vegetation greenup from combined effects of climate change and human land management. *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5484-5499.
- [4] Xiong Q L, Xiao Y, Liang P H, Li L J, Zhang L, Li T, Pan K W, Liu C G. Trends in climate change and human interventions indicate grassland productivity on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2015. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108010.
- [5] 高学杰,赵宗慈,丁一汇. 区域气候模式对温室效应引起的中国西北地区气候变化的数值模拟. 冰川冻土, 2003, 25(2): 165-169.
- [6] 谢宝妮,秦占飞,王洋,常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. 农业工程学报, 2014, 30(11): 244-253.
- [7] 朴世龙,张宪洲,汪涛,梁尔源,汪诗平,朱军涛,牛犇. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. 科学通报, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [8] 乌尼图,刘桂香,杨勇,宋向阳,白海花. 基于光能利用率模型的内蒙古天然草原植被净初级生产力动态监测与气候因子的响应. 草业学报, 2020, 29(11): 1-10.
- [9] 胡实,莫兴国,林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势. 干旱区地理, 2015, 38(2): 239-248.
- [10] Ni J. Plant functional types and climate along a precipitation gradient in temperate grasslands, north-east China and south-east Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53(4): 501-516.
- [11] Kang W P, Wang T, Liu S L. The response of vegetation phenology and productivity to drought in semi-arid regions of Northern China. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 727.
- [12] 杜庆,李美君,边振,张克斌. 不同土地利用方式下草地植被动态变化特征——以宁夏盐池县为例. 干旱区研究, 2016, 33(3): 569-576.
- [13] 王文晓,黄文广,杨君珑,马红彬,李小伟. 宁夏草原物种丰富度分布格局及其水热解释. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 158-163.
- [14] 苏莹,李月飞,陈林,祝忠有,袁闯,孟文婷,朱林. 土壤类型和降雨变化对猪毛蒿种群动态的影响. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1175-1185.
- [15] 吴旭东,季波,何建龙,任小玢,俞鸿千,王占军. 控制降水梯度对荒漠草原优势植物叶功能性状及土壤养分的影响. 生态学报, 2021, 41(7): 2719-2727.
- [16] 朱玉果,杜灵通,谢应忠,刘可,宫菲,丹杨,王乐,郑琪琪. 2000—2015年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应. 生态学报, 2019, 39(2): 518-529.
- [17] 陈晶,兰剑,俞鸿千. 气候因子对宁夏干旱、半干旱区天然草地第一性生产力的影响. 广东农业科学, 2014, 41(16): 45-49.
- [18] Ruppert J C, Harmsen K, Henkin Z, Snyman H A, Sternberg M, Willms W, Linstädter A. Quantifying drylands' drought resistance and recovery: the importance of drought intensity, dominant life history and grazing regime. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1258-1270.
- [19] 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.

- [20] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 58-66.
- [21] 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.
- [22] Higginbottom T P, Symeonakis E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9552-9575.
- [23] Zhao C L, Yan Y, Ma W Y, Shang X, Chen J G, Rong Y J, Xie T, Quan Y. RESTREND-based assessment of factors affecting vegetation dynamics on the Mongolian Plateau. *Ecological Modelling*, 2021, 440: 109415.
- [24] Mu S J, Zhou S X, Chen Y Z, Li J L, Ju W M, Odeh I O A. Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland, China. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 29-41.
- [25] Wu S H, Zhou S L, Chen D X, Wei Z Q, Dai L, Li X G. Determining the contributions of urbanisation and climate change to NPP variations over the last decade in the Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 397-406.
- [26] 李庆, 高素改, 张春来, 王仁德, 周娜, 李继锋, 郭中领, 常春平. 内蒙古草地变化过程中气候变化和人类活动的相对作用评估. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(3): 99-104.
- [27] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [28] 殷崎栋, 柳彩霞, 田野. 基于 MODIS NDVI 数据(2001—2018)的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1571-1582.
- [29] Jiang L L, Guli · Jiapaer, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 967-980.
- [30] 王素艳, 李欣, 王璠, 马阳, 张雯, 黄莹, 高睿娜. 宁夏降水资源格局演变特征. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 733-746.
- [31] 刘学智, 李王成, 苏振娟, 王帅, 李晨, 王霞. 1962—2015 年宁夏平均气温和极端气温的变化特征. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1173-1180.
- [32] 赵勇, 于钊. 宁夏草原监测. 银川: 阳光出版社, 2016.
- [33] 徐洁. 生态系统服务空间流动研究——以宁夏回族自治区为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [34] 季波, 何建龙, 王占军, 蒋齐. 宁夏天然草地植被碳储量特征及其构成. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1259-1268.
- [35] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [36] 栗忠飞, 王小莲, 徐钰涛, 文林琴, 黄丽春. 1996-2015 年间滇西北香格里拉植被 NPP 变化分析. *生态学报*, 2022, 42(1): 266-276
- [37] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 786-797.
- [38] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in mainland China since the late 1980s. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 237-247.
- [39] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. *气象学报*, 1963, 31(1): 78-96.
- [40] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [41] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [42] Li Q, Zhang C L, Shen Y P, Jia W R, Li J. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity. *CATENA*, 2016, 147: 789-796.
- [43] Lieth H, Box E. Evapotranspiration and primary productivity: C.W. Thornthwaite memorial model. *Publications in climatology*, 1972, 25: 37-46.
- [44] 杜金荣, 于德永. 气候变化和人类活动对中国北方农牧交错区草地净初级生产力的影响. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 365-372.
- [45] 李辉, 红英, 邓国荣, 乌日罕, 张洪岩, 赵建军, 郭笑怡. 1982—2015 年气候变化和人类活动对内蒙古草地净初级生产力的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 415-424.
- [46] 胡海英, 李惠霞, 倪彪, 师斌, 许冬梅, 谢应忠. 宁夏荒漠草原典型群落的植被特征及其优势植物的水分利用效率. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 45(4): 460-471.
- [47] Eckert S, Hüsler F, Liniger H, Hodel E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2015, 113: 16-28.
- [48] 周立华, 朱艳玲, 黄玉邦. 禁牧政策对北方农牧交错区草地沙漠化逆转过程影响的定量评价. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 308-313.
- [49] 周蕾, 王微. 宁夏草原生态保护与管理政策认知调研分析. *资源开发与市场*, 2020, 36(4): 389-394.
- [50] 侯彩霞, 周立华, 文岩, 陈勇. 生态政策下草原社会-生态系统恢复力评价——以宁夏盐池县为例. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(8): 117-126.
- [51] 郑永超, 文琦. 宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 207-212.
- [52] 萨如拉, 特木尔布和, 阿拉腾布力格, 斯琴, 田彦军, 孟根其木格. 放牧方式对短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原植被和土壤的影响. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(5): 44-48.
- [53] 樊胜岳, 徐裕财, 徐均, 兰健. 生态建设政策对沙漠化影响的定量分析. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 893-900.