

# 定量评估气候变化与人类活动对西北地区 草地变化的相对作用

同琳静<sup>1</sup>, 刘洋洋<sup>1</sup>, 章钊颖<sup>2</sup>, 李晓宇<sup>1</sup>, 王倩<sup>1</sup>, 李建龙<sup>1</sup>

(1.南京大学 生命科学学院 生态学系, 南京 210093; 2.南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210046)

**摘要:**为了定量区分气候和人为因素在草地动态过程中的相对贡献,基于遥感数据和人为因素数据,结合 CASA 模型和 Thornthwaite Memorial 模型,定量评估了气候变化和人类活动对西北地区草地净初级生产力(NPP)的影响,结果表明:(1) 2000—2015 年,西北地区 83.2%的草地呈现恢复状态,而仅有 16.8%的草地呈现退化趋势。NPP 的增加量为 18 645.56 Tg C, NPP 损失量为 428.16 Tg C。(2) 人类活动是草地恢复的主要成因,其主导恢复的草地面积和 NPP 总量分别为  $1.11 \times 10^6$  km<sup>2</sup> 和 10 478.4 Tg C。而草地退化主要由气候变化引起,气候变化主导的草地退化面积占草地总面积的 9.97%,造成的 NPP 损失量 341.76 Tg C。(3) 西北地区草地恢复主要归因于草地保护政策实施,而干旱的缓解是草地呈现恢复的主要气候原因。草地退化主要由区域水热状况不均衡和不合理人类活动(人口增加、过度放牧和草地开垦等)造成。

**关键词:**净初级生产力; 草地; 气候变化; 人类活动; 西北地区

中图分类号:Q948; P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0202-09

## Quantitative Assessment on the Relative Effects of Climate Variation and Human Activities on Grassland Dynamics in Northwest China

TONG Linjing<sup>1</sup>, LIU Yangyang<sup>1</sup>, ZHANG Zhaoying<sup>2</sup>, Li Xiaoyu<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, Li Jianlong<sup>1</sup>

(1. *Department of Ecology, School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;*

2. *International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, China*)

**Abstract:** In order to quantitatively distinguish the relative contributions of climate and human factors in the process of grassland dynamics, based on the remote sensing data and human factor data, combination of CASA model and Thornthwaite memorial model, the relative contributions of climate variation and human activities to grassland primary net productivity (NPP) in northwest China were quantitatively assessed. The results showed that: (1) 83.20% of total grassland area exhibited restoration during 2000—2015, while only 16.8% underwent degradation; the increment of total NPP was 18 645.56 Tg C, and the loss of total NPP was 428.16 Tg C; (2) human activities were the main reason for grassland restoration; the human-induced restoration areas and NPP loss were  $1.11 \times 10^6$  km<sup>2</sup> and 10 478.4 Tg C, respectively; grassland degradation was mainly caused by climate variation; the climate-induced grassland degradation area accounted for 9.97% of the total grassland area, resulting in loss of 341.76 Tg C of NPP; (3) further analysis demonstrated that the restoration in northwest China mainly attributed to the implementation of the grassland protection policies, while the mitigation of drought was main climatic factor for grassland restoration. Unbalance of local hydrothermal condition (climatic factor) and irrational human activities (population increase, overgrazing and grassland reclamation) were the reasons for grassland degradation.

**Keywords:** NPP; grassland; climate variation; human activities; northwest China

收稿日期:2019-08-02

修回日期:2019-09-04

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800201);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB950702);国际 APN 全球变化项目(ARCP2015-03CMY-Li)

第一作者:同琳静(1995—),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为生态遥感及陆地生态系统碳循环。E-mail:TLJ1654@163.com

通信作者:李建龙(1962—),男,吉林长春人,教授,博导,国家长江学者讲座教授,主要从事全球变化及陆地生态系统碳循环研究。E-mail:lijianlongnjl@163.com

草地生态系统是全球面积最大的生态系统之一,其在气候调节、生态系统碳循环及碳储存中扮演着重要角色<sup>[1-2]</sup>。我国草地资源丰富,面积达到4亿 $\text{hm}^2$ ,占国土面积的41.7%<sup>[3-4]</sup>。但近年来,随着人类活动和气候变化的日益加剧,草地退化及草地生物多样性降低等问题已成为威胁我国生态安全和人民生活的重要因素,而且也严重影响草地气候调节、水源涵养和水土保持等生态服务功能的发挥<sup>[5]</sup>。全国接近85%的草地集中在西北地区,该地区气候干旱,生态环境较为敏感、脆弱<sup>[6]</sup>。过去几十年由于全球变暖、人口增加、草地开垦、过度放牧和管理滞后等问题,西北地区草地退化问题较为严重,年退化草地面积高达6700 $\text{km}^2$ <sup>[6]</sup>。这一生态问题已受到了政府的关注,为了改善和保护草地生态环境,2000年以来我国开始制定并实施退耕还林、退耕还草等一系列草地保护政策,使得西北地区草地生态环境得到改善<sup>[3]</sup>。

研究表明,草地的恢复与退化主要由气候变化和人类活动引起,气候变化是一种内在动力,而人类活动为外部动力,可在一定程度上缓解或加剧气候变化的影响<sup>[7]</sup>。因此,定量评估气候变化和人类活动在恢复和退化当中的相对作用对于草地生态治理具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。近年来全国气候变暖现象较为明显,针对西北部分地区已有学者探究草地生产力对气候变化的响应<sup>[10-11]</sup>。另外,人类活动如土地利用变化、放牧强度和方式等对草地的影响也有报道<sup>[12-14]</sup>,也有相关文献定量评估了人类活动和气候变化在西北地区草地恢复与退化中的相对贡献<sup>[8]</sup>,但本研究进一步扩大了研究的时间尺度,并分析了该区人口和畜牧量动态,丰富了研究内容。

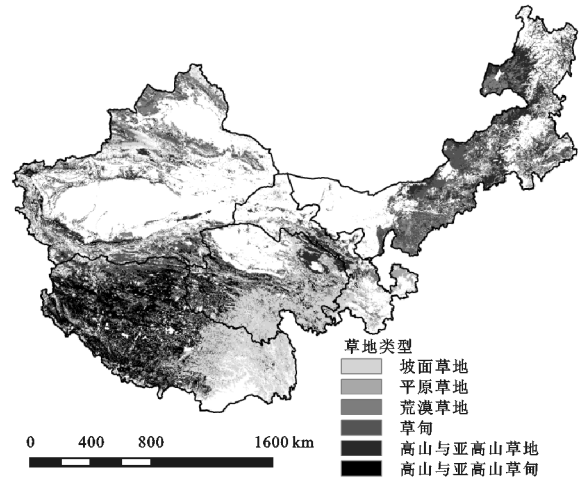
随着卫星遥感技术的进步,人类对于草地退化的研究视角已经可以从局部近距离研究扩大到整体性区域性研究<sup>[15]</sup>。净植被初级生产力(NPP)定义为单位时间及单位面积内植被能通过光合作用固定的干物质的总量<sup>[5]</sup>。NPP对于气候变化和人类活动较为敏感,是表征草地生产力和评估陆地生态系统健康状况的重要指标<sup>[16]</sup>。因此,开展区域性的NPP时空变化特征及影响因素研究是草地生态监测和管理的关键。

本研究结合多源遥感数据,利用CASA模型模拟西北地区草地的实际NPP,利用Thornthwaite Memorial模型模拟了潜在NPP,以潜在NPP与实际NPP的差值代表人类活动引起的NPP变化状况,通过构建不同情景定量评估气候变化和人类活动对草地恢复与退化的影响,并结合气象数据和人为因素数据等分析草地生产力变化的原因。本研究结论对于促进西北地区区域经济和生态环境的协调发展,完善草地管理保护措施,实现草地的可持续发展具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本文选取中国西北五省(内蒙古自治区、甘肃省、新疆维吾尔自治区、青海省、西藏自治区)作为研究区域,地理坐标为 $32^{\circ}31'—36.53^{\circ}\text{N}$ , $73^{\circ}32'—108^{\circ}46'\text{E}$ (图1)。该区域内大部分地区属于干旱和半干旱区。年均温较低,年总降水量为400~800 mm,主要集中在夏秋两季。地形以盆地、平原和高原为主,主要包括柴达木盆地、塔里木盆地、河西平原、黄土高原和青藏高原等<sup>[17]</sup>。



注:空白部分表示无草地分布。

图1 中国西北地区草地类型分布

### 1.2 数据来源及方法

#### 1.2.1 遥感数据

(1) NDVI 数据。NDVI 数据采用美国 NASA 提供的 EOS/MODIS 的 MOD13A1 数据集(<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>)。下载数据的时间序列为2000—2015年,时间分辨率为16 d,空间分辨率为500 m。使用MRT(MODIS Reprojection Tools)完成数据的格式转化和重投影,并进行图像的拼接与重采样。采用最大合成法(Maximum Value Composite, MVC)对16 d的MODIS-NDVI数据进行处理,并利用西北地区边界裁剪出研究区2000—2015年逐月的NDVI遥感数据集<sup>[6]</sup>。

(2) 土地覆被数据。土地覆被数据来自GLC2000(Global Land Cover 2000)数据集集中的中国区域子集,空间分辨率为1 $\text{km}^2$ <sup>[18]</sup>。中国西北地区草地分为坡面草地、平原草地、荒漠草地、草甸、高山与亚高山草甸和高山与亚高山草地(图1)。

(3) 气象数据。气象数据使用中国气象数据网下载的2000—2015年全国720站点的月平均气温和降水数据,辐射数据来源于全国120个辐射站点的月太阳总辐射数据<sup>[19]</sup>。采用ANUSPLIN对气象数据进行插值,利用西北各省边界进行裁剪,得到逐月的

气象数据栅格影像,该数据集与 NDVI 数据具有相同的投影和像元大小。

1.2.2 人为因素数据 人口数量和年末存栏数等数据均来自于各省的统计年鉴。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 NPP 的估算

(1) 实际 NPP 的估算。实际 NPP(ANPP)用来表示气候变化和人类活动共同影响下的草地的实际 NPP,本研究中 ANPP 由 CASA 模型模拟得到,该模型主要涉及植物吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率( $\epsilon$ )两个变量<sup>[20]</sup>。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中:APAR( $x, t$ )为像元  $x$  处  $t$  月份吸收的光合有效辐射( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ); $\epsilon(x, t)$ 为像元  $x$  处  $t$  月份吸收的实际光能利用率( $\text{g C}/\text{MJ}$ )。

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

式中:SOL( $x, t$ )为像元  $x$  处  $t$  月份太阳总辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );FPAR( $x, t$ )为植被吸收入射光合有效辐射的比例;0.5 为植被能吸收的有效辐射(0.4 ~ 0.7  $\mu\text{m}$ )与太阳总辐射的比值。

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

式中: $T_{\epsilon_1}(x, t)$ 为低温对光能利用率的影响; $T_{\epsilon_2}(x, t)$ 为高温对光能利用率的影响; $W_{\epsilon}(x, t)$ 为水分对光能利用率的影响; $\epsilon_{\max}$ 为最大光能利用率(理想状态),本研究中采用的草地的  $\epsilon_{\max}$  为 0.542  $\text{g C}/\text{MJ}$ 。 $T_{\epsilon_1}(x, t)$ ,  $T_{\epsilon_2}(x, t)$ 和  $W_{\epsilon}(x, t)$ 等的具体计算方法可参考文献[18]。

(2) 潜在 NPP 的估算。潜在 NPP(PNPP)指理想状态下植被的净初级生产力,本研究采用的 PNPP 由 Thornthwaite Memorial 估算得到,该模型在 Miami 模型的基础上提出,并通过 Thornthwaite 潜在蒸散模型进行了改进<sup>[15]</sup>,其计算公式如下:

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

式中: $v$  为年实际蒸散量( $\text{mm}$ )。

$$V = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + (1 + 1.05r/L)^2}} \quad (5)$$

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

式中: $r$  为年总降水量( $\text{mm}$ ); $L$  为年最大蒸散量( $\text{mm}$ ); $t$  为年平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

(3) 人为 NPP 的估算。人为 NPP(HNPP)定义为人类活动影响下的植被 NPP,该方法假设实际 NPP 与潜在 NPP 的差别仅由人类活动引起,HNPP 的计算公式如下:

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

1.3.2 模型验证 为了验证 CASA 模型的精度,本课题组于 2009 年在西北地区进行草地生物量实地调查,共采集 60 个样点数据。样点的实测数据与同一位置的模拟数据相比较,发现两组数据达到基本吻合( $R^2 = 0.74$ ,  $p < 0.01$ )(图 2)。因此,可认为 CASA 模型适用于西北地区草地植被 NPP 的估算。

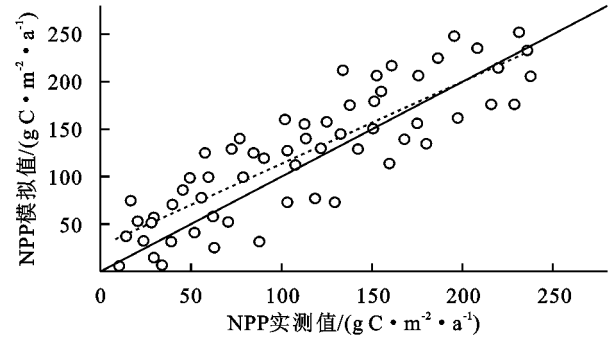


图 2 NPP 实测值与模拟值的比较

1.3.3 趋势分析 采用一元回归分析方法对草地和气象因素的变化趋势进行研究,其计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{var}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{n=1}^n \text{var}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (8)$$

式中:slope 为变化斜率; $i$  为第几年; $n$  为研究年限 16 年; $\text{var}_i$  为第  $i$  年的变化量。若  $\text{slope} > 0$ ,表示变量呈现增加趋势,反之则表现出减小趋势。若草地 ANPP 的  $\text{slope} > 0$ ,说明草地出现恢复,若  $\text{slope} < 0$ ,则表明草地出现退化。对不同变量的 slope 进行 F 检验,具体的计算方法可参考文献[18]。

1.3.4 相关性分析 采用 pearson 相关系数来探究西北地区 2000—2015 年草地 NPP 与气象因素的相关性。

$$r_{xy} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \times \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (9)$$

式中: $r_{xy}$  为相关性系数; $n$  为研究年限(16 年); $x_i$  为第  $i$  年的 NPP; $y_i$  为第  $i$  年的年均温或降水。

1.3.5 评估情景的构建 本研究将上述 3 种 NPP (ANPP, PNPP, HNPP) 的 slope 进行比较,对人类活动和气候变化在草地退化和恢复的相对贡献进行区分,定义草地变化的 6 种情景(表 1)。表中,SA 为正值说明草地出现恢复,而 SA 为负值说明草地呈现退化。SP 大于 0 说明气候变化有助于植物的生长,而 SP 小于 0 表示气候变化抑制植物的生长。SH 大于 0 代表人类活动引起草地退化,SH 小于 0 表示人类活动引发草地恢复<sup>[3]</sup>。



表 1 气候变化和人类活动影响草地恢复与退化的 6 种情景

情景	SA	SP	SH	气候变化和人类活动的相对贡献
1	>0	>0	>0	气候变化主导的草地恢复(CDR)
2	>0	<0	<0	人类活动主导的草地恢复(HDR)
3	>0	>0	<0	气候变化和人类活动共同主导的草地恢复(BDR)
4	<0	<0	<0	气候变化主导的草地退化(CDD)
5	<0	>0	>0	人类活动主导的草地退化(HDD)
6	<0	<0	>0	气候变化和人类活动共同主导的草地退化(BDD)

注:SA 为 ANPP 的变化率;SP 为 PNPP 的变化率;SH 为 HNPP 的变化率。

## 2 结果与分析

### 2.1 西北地区草地 NPP 的动态变化特征

2.1.1 草地 NPP 的年际变化特征 对西北地区 3 种 NPP 的年际变化进行统计,结果表明 3 种 NPP 都呈增加趋势。其中,ANPP 的增加达到极显著水平( $p<0.01$ ),增加速率为  $1.92\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ 。ANPP 在 2015 年出现最大值[ $193.25\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ ],在 2001 年出现最小值[ $146.91\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ ],16 年的平均值为  $171.80\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ 。研究年限内 PNPP 的值在  $512.37\sim394.32\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$  波动,增加速率为  $2.18\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ 。HNPP 研究年限内的平均值为  $454.83\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ ,变化速率为  $1.41\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ ,线性增长未达到显著性水平( $p>0.05$ )。HNPP 的变化趋势与 PNPP 接近,同样在 2003 年达到最大值[ $510.25\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ ],但最小值[ $381.70\text{ g C}/(\text{m}\cdot\text{a})$ ]出现在 2006 年(图 3)。

2.1.2 草地 NPP 的空间变化特征 从空间上分析,

ANPP 呈现增加趋势(草地恢复)的区域与呈减少趋势(草地退化)区域相间分布。其中,呈现增加趋势面积占草地总面积的  $83.20\%$ ,说明西北地区大部分草地处于恢复状态(图 4A)。具体分析可得,ANPP 显著增加的面积占草地总面积的  $6.72\%$ ,主要集中在青藏高原的东部和中部,以及甘肃的北部。显著减少的区域面积较少,未达到总面积的  $1\%$ (图 4B)。整体上,西北地区草地状态呈现良好的发展态势,少部分草地生产力出现降低。由图 4C 可得,2000—2015 年,PNPP 的值在研究区的北部呈现减少趋势,而南部呈增加趋势。对 PNPP 的变化显著性进行统计,出现显著变化的面积较少,出现显著增加的比例仅为  $0.47\%$ ,主要分布在内蒙古的东北部,而显著减少的区域( $0.32\%$ )集中在青藏高原的北部(图 4D)。HNPP 的变化速率的空间分布与 PNPP 较为接近,整体上呈现北部减少南部增加的格局(图 4E)。研究区内  $97.43\%$  的草地 HNPP 未显著变化,HNPP 显著增加和显著减少的区域分别占总面积的  $0.71\%$ 、 $1.86\%$ (图 4F)。

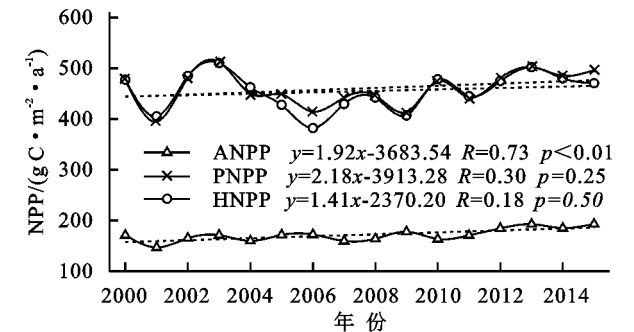


图 3 中国西北地区草地 NPP 的年际变化

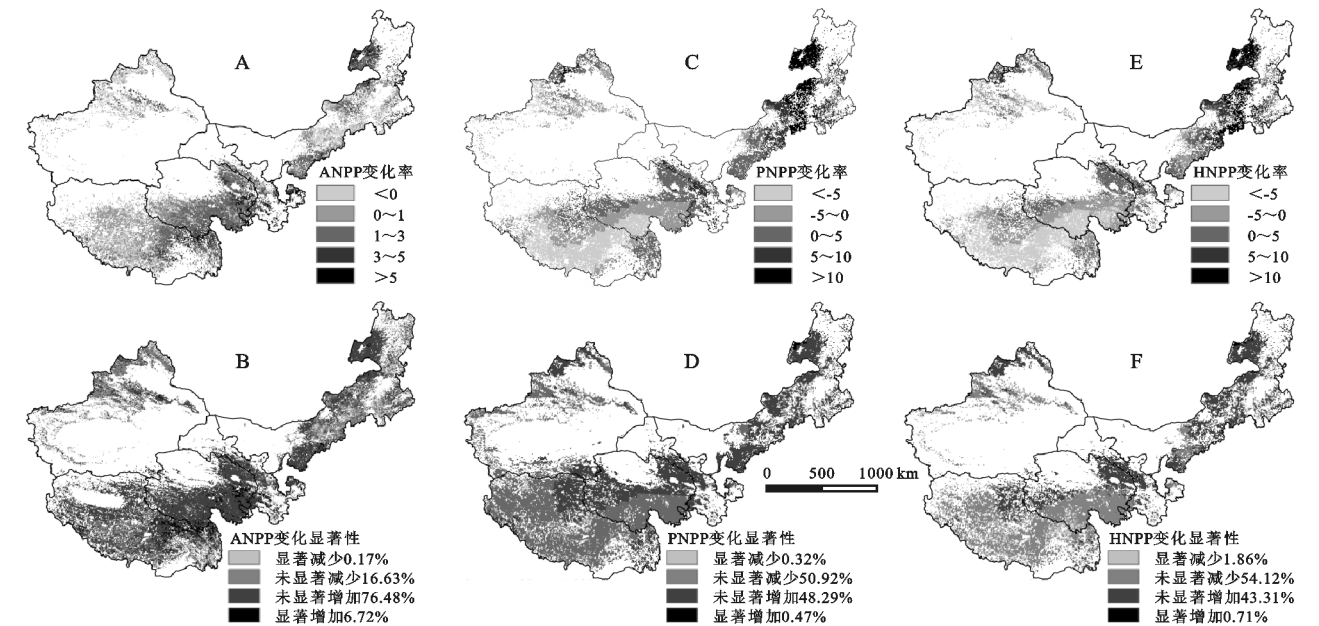


图 4 中国西北地区草地 NPP 变化速率及其显著性

### 2.2 草地退化与恢复的驱动力分析

2.2.1 人类活动和气候变化对草地退化与恢复的相

对贡献 2000—2015 年,西北地区草地恢复的面积远大于草地退化的面积(图 5A)。草地恢复部分面积占总面积

积的 83.20%，恢复面积约为  $2.23 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。草地退化的比例为 16.8%，面积为  $4.55 \times 10^5 \text{ km}^2$  (表 2)。根据表 1 中方法对气候变化和人类活动在西北草地恢复与退化中的相对贡献进行分析，结果如图 5 所示。气候变化主导的和人类活动主导的草地恢复的面积占总面积的比例分别为 33.79%，41.55%，两因素共同主导的草地恢复比例为 7.86%，因此可认为人类活动是西北地区草地恢复的主要原因，该结果可能与我国 21 世纪以来实施的退耕还林、退耕还草政策密切相关。同时，结果表明气候变化和人类活动对草地恢复的贡献在不同区域间存在差异。气候变化主导的草地恢复主要出现在内蒙的北部，青海的中部及西

部，以及西藏的西部地区。而人类活动主导的草地恢复集中在青藏高原的大部分地区、青海的北部，其余零星分布在新疆、内蒙和甘肃等。气候变化和人类活动共同主导的恢复在内蒙和青海分布较广，其余分布在甘肃和西藏的中部，在新疆的北部也有零星分布 (图 5A)。西北地区草地退化的面积较少，其中由气候变化主导的面积占总面积的 9.97%，这些区域主要分布在内蒙中部和新疆北部。由人类活动主导的草地退化集中在青藏高原的南部和新疆北部，该类型所占比例为 6.11%。由气候和人为因素共同主导的草地退化面积较少，零星分布在新疆的北部 (图 5B)。因此可知，气候变化是西北地区草地退化的主要原因。

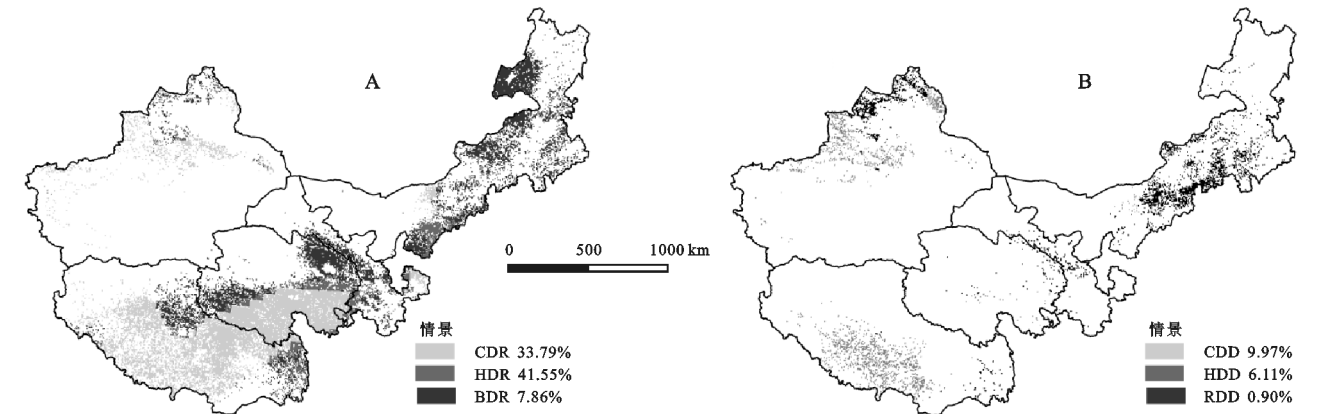


图 5 气候变化和人类活动对草地恢复和退化的相对贡献

由表 2 可知，2000—2015 年西北地区草地增加的 NPP 总量为 18 546.56 Gg C，其中人类活动贡献的 NPP 增加量最大 (10 478.4 Gg C)，在气候主导恢复的区域，NPP 的变化率达到  $0.59 \text{ g C}/(\text{m} \cdot \text{a})$ 。气候主导草地恢复区域的面积为  $9.06 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，NPP 的增加速率为  $0.51 \text{ g C}/(\text{m} \cdot \text{a})$ 。另外，草地退化区域损失的 NPP 总量为 428.16 Gg C。气候主导草地退化的面积为  $2.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，导致的 NPP 损失量为 341.76 Gg C。由人类活动和两因素共同作用下造成的 NPP 损失较小，损失量分别为 78.72，7.68 Gg C。

表 2 不同因素影响下的草地恢复与退化的面积、NPP 变化率和总 NPP

不同主导因素	面积/ $\text{km}^2$	NPP 变化率/ $(\text{g C} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	总 NPP/ Gg C
CDR	$9.06 \times 10^5$	0.51	7392.96
HDR	$1.11 \times 10^6$	0.59	10478.40
BDR	$2.11 \times 10^5$	0.20	675.20
CDD	$2.67 \times 10^5$	-0.08	-341.76
HDD	$1.64 \times 10^5$	-0.03	-78.72
BDD	$2.4 \times 10^4$	-0.02	-7.68

2.2.2 不同省份和不同草地类型 NPP 变化的原因分析 对不同草地类型恢复和退化的面积进行统计可

得，每个类型草地恢复的面积均大于退化的面积，说明不同草地类型的生长状况均得到了改善。其中，高山与亚高山草地的恢复面积最大，其值达到  $8.44 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。草甸的退化面积为  $1.07 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，属于退化面积最大的草地类型。相对而言，坡面草地的退化面积较少，仅为  $1.47 \times 10^3 \text{ km}^2$  (图 6A)。针对不同省份分析，甘肃和青海草地的退化面积较其他省份较少，分别为  $1.35 \times 10^4$ ， $1.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。新疆草地恢复和退化的面积较为接近，分别为  $1.52 \times 10^5$ ， $1.51 \times 10^5 \text{ km}^2$  (图 6B)。

分析不同草地类型退化与恢复的成因可得，气候变化是导致草甸、荒漠草地和平原草地恢复的主要因素，而高山与亚高山草地和高山与亚高山草甸出现草地恢复可主要归因于人类活动，坡面草地的恢复由人类活动和气候变化共同主导 (图 7A)。另外，气候变化是草甸、荒漠草地、平原草地和坡面草地退化的主要成因，而人类活动主导了高山与亚高山草地和高山与亚高山草甸的退化 (图 7B)。从不同省份的统计结果可得，内蒙、甘肃和青海草地恢复的主要原因为人类活动，而新疆和西藏的草地恢复主要由气候变化主导 (图 7C)。从草地退化角度分析，气候变化导致的退化比例最大的情况主要出现在内蒙、新疆、甘肃和青海，因此气候变化是导致这些省份草地退化的主导因素。

另外,西藏 92.50%的草地面积退化由人类活动引起, 人类活动是该省草地退化的主要原因(图 7D)。

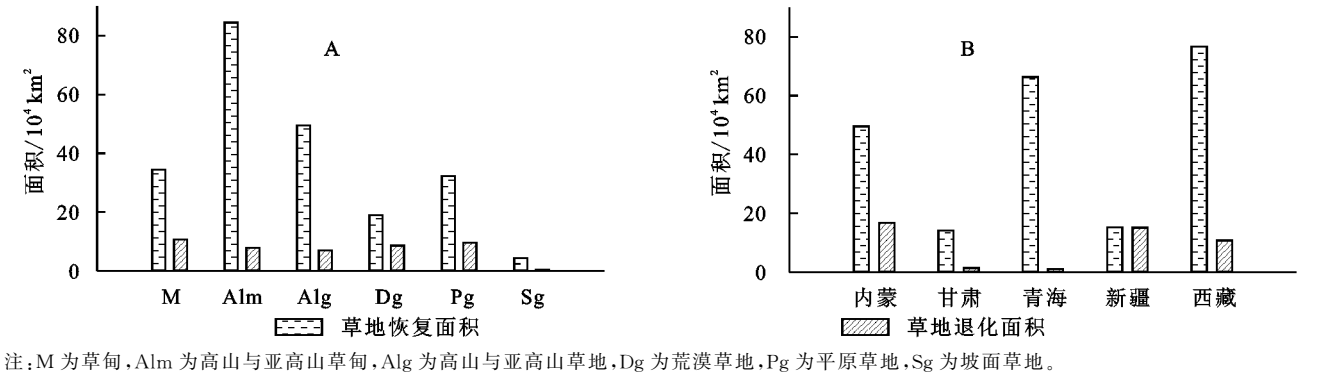


图 6 不同省份中不同因素主导的草地恢复与退化面积

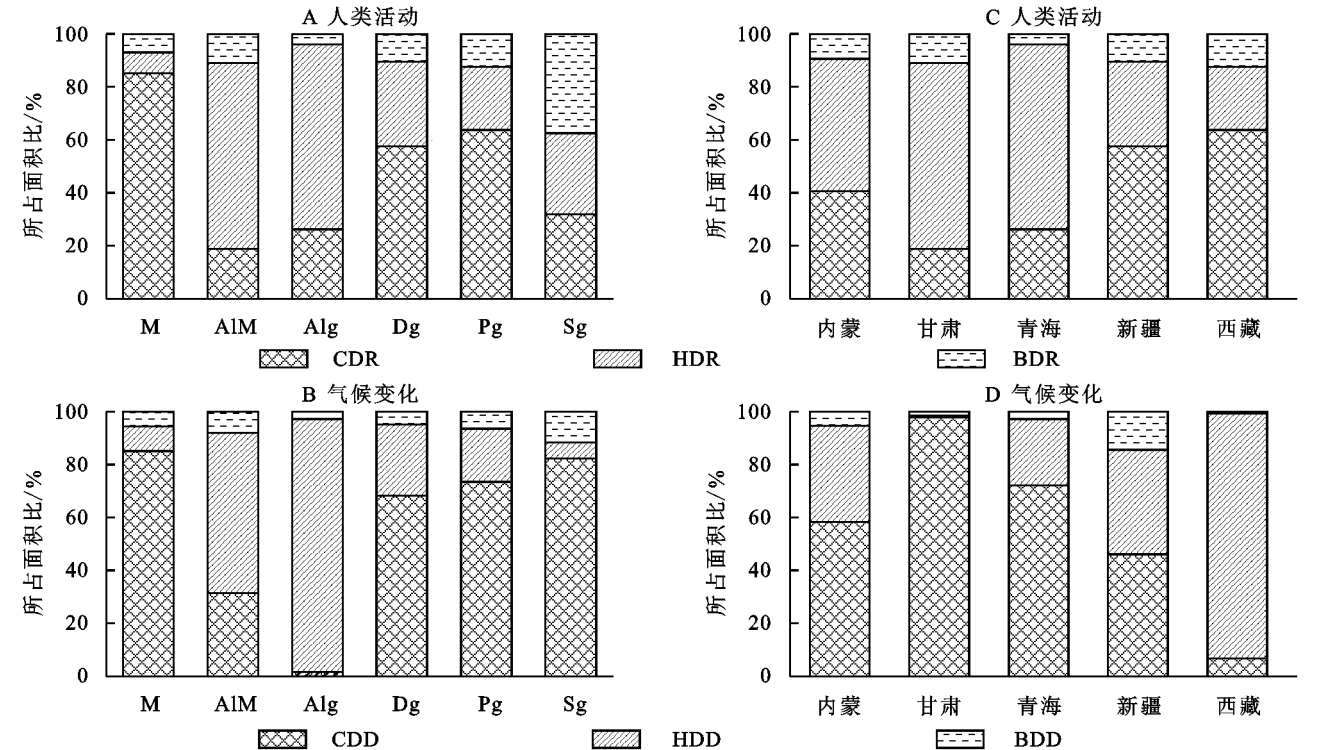


图 7 人类活动和气候变化在不同草地类型和不同省份草地恢复和退化中的相对贡献

2.3 中国西北草地 NPP 与气候变化的响应

2.3.1 气象因子的时空动态 从空间上分析,西北地区降水总体上呈现南部降低北部增加的格局,研究区内 55.98%的草地降水呈增加趋势,其主要分布在青海南部、西藏的中部和南部、新疆的北部。降水减少的区域在内蒙和甘肃分布较广,其余还分布在西藏中部、青海的西部以及新疆的北部(图 8A)。时间变化上,2000—2015 年降水呈现波动增加趋势,增加速率为 2.11 mm/a,增加趋势未达到显著性水平( $p < 0.05$ )。16 年降水的平均值为 295.41 mm,其中 2003 年达到最大值 330.09 mm,2001 年出现最小值 (258.78 mm)(图 8C)。

图 8B 为 2000—2015 年温度的空间变化速率,其平均变化率为  $-0.03^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。研究区内出现温度降低的面积比例为 66.79%,其主要集中在内蒙的中部和北部,甘肃中部、青海东部和北部、西藏的西部,以

及新疆的北部。而温度增加的区域集中在内蒙北部、青海西部、西藏东部,在新疆的北部也有部分分布。此外,温度在时间上呈轻微的增加趋势,但增加趋势不显著( $p < 0.05$ )。2000—2015 年,年均温在  $0.68 \sim 3.76^{\circ}\text{C}$  波动,平均为  $2.78^{\circ}\text{C}$ (图 8C)。

2.3.2 草地 ANPP 与气象因子的相关性 在像元水平上对降水、温度和 ANPP 进行相关性分析,并对其相关性系数进行显著性检验,结果如图 9 所示。对不同相关性水平所对应的像元数进行统计,结果可得西北地区草地 ANPP 与降水正相关的面积大于呈负相关的面积( $65.75\% > 34.25\%$ )。其中,呈极显著和显著正相关的比例分别为 8.85%,18.94%,这些区域主要集中在内蒙的中部和东部,甘肃的中部、青海的东部和新疆北部边界。ANPP 与降水的负相关关系达到极显著水平的比例为 5.08%,主要分布在青藏



高原的东部。相关关系不显著的区域所占比例较大，在每个省份均有分布(图 9A)。由图 9B 可得，ANPP 与气温呈显著正相关的区域集中在青藏高原的中部和北部，其面积所占比例为 14.90%。ANPP 与气温呈极显著和显著负相关的比例分别为 2.04%，9.86%，其主要分布在内蒙的北部、甘肃北部、青海东部和青藏高原的西南部，其余零星分布在其余地区。由相关性面积比例可得，总体上西北地区草地 ANPP 与降水呈正相关，与温度呈负相关。另外，因 ANPP 与降水相关关系达到极显著水平的比例大于气温 (32.87%>26.80%)，因此可得 ANPP 对于降水变化的响应更加敏感。

2.4 中国西北地区人口和畜牧数量动态

由图 10A 可知，2000—2015 年西北地区人口总体呈现增加趋势。其中，西藏的日喀则、那曲、林芝地区，新疆的乌鲁木齐，以及内蒙的呼和浩特和赤峰人口增加速率较大。人口增加会使得人均占有草地资源的减少，增加对资源环境的压力，因此人口数量是影响草地 NPP 的一个重要因素。同时，牛、羊、马等牲畜将草类等作为主要饲料来源，过度放牧对草地的生产力影响较大。图 10B 表明西北五省畜牧量变化速率在区域间存在差异。青藏高原和青海东部畜牧量都呈现减少，畜牧量呈现增加趋势分布在新疆北部和甘肃的大部分地区。具体分析，由于内蒙和甘肃的中部人口数量和畜牧量均呈增加趋势，因此可能导致草地出现不同程度的退化。同时，畜牧量减少的区域主要分布在内蒙的北部和西藏的中部，该区域草地呈现恢复趋势，可能原因为草食家畜的减少使得草类的生产力损失降低，覆盖度增加，进而促进 NPP 的增加。

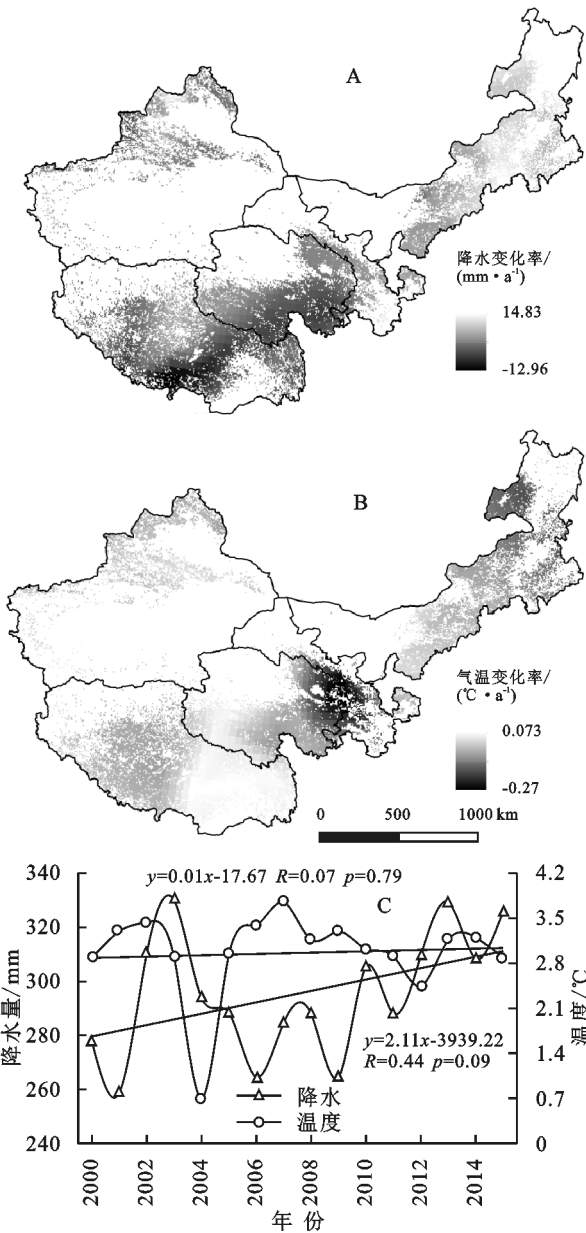


图 8 气象因素的变化速率和年际变化趋势

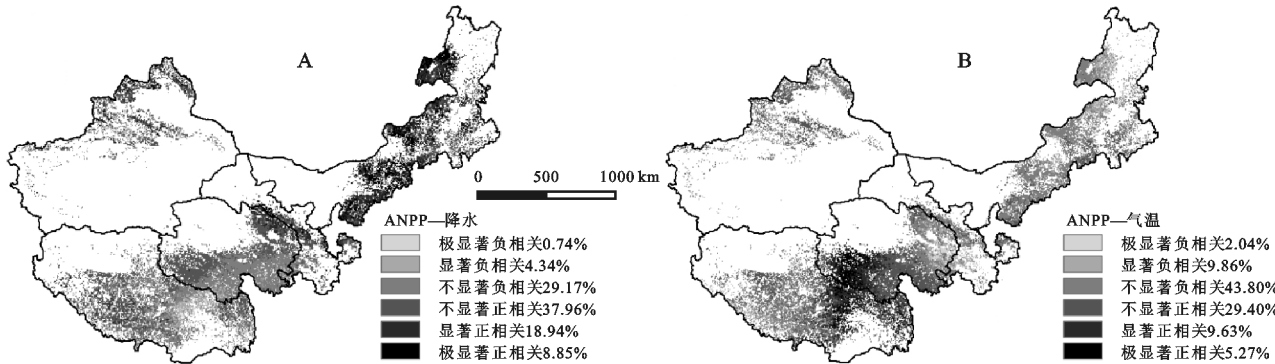


图 9 草地 ANPP 与降水、气温的相关性

3 讨论

3.1 气候变化对草地动态的影响

陆—气间相互作用通过温度、降水机制的改变以及季节变化而进行周期性波动，对植物的生长以及分

布产生较大影响<sup>[21]</sup>。年际变化上，PNPP 与降水的波动趋势较为吻合，但与温度的变化趋势基本呈现相反的关系。而 ANPP 与气温、降水的年际变化趋势吻合度较低，可能是受到人类活动干扰的原因(图 3 和图 8C)。研究表明，自 19 世纪 80 年代末以来，我

国西北地区气候逐渐从“暖干化”转变为“暖湿化”<sup>[6,22]</sup>。本研究表明“暖湿化”的趋势主要分布在青藏高原和新疆的北部,而大部分地区呈现“冷湿化”的趋势,说明西北地区的气候格局处在不断变化的过程当中,气候干旱的缓解在一定程度上促进了西北地区草地的恢复(图 8A—B)。研究表明在水资源较为有限并温度升高的生态系统中,降水可为植物生长提供足够的水分<sup>[23]</sup>。西北地区气候较为干旱,因此草地 ANPP 对降水较为敏感,降水与 ANPP 具有较好的

正相关关系,本研究结果与前人研究结果相一致<sup>[6]</sup>。但结果显示,那曲东部地区 ANPP 与降水间存在显著的负相关关系。太阳辐射可促进草地 NPP 的积累,但在海拔较高地区降水的增加会对植被吸收光合辐射产生限制,所以地形因素可能是造成那曲区域 ANPP 与降水呈负相关的原因<sup>[9]</sup>。总体上,研究区内 ANPP 与气温呈现负相关关系,原因为干旱、半干旱地区,气温升高会使得蒸散增加,土壤水分减少,从而降低了植被的光合效率<sup>[24]</sup>。

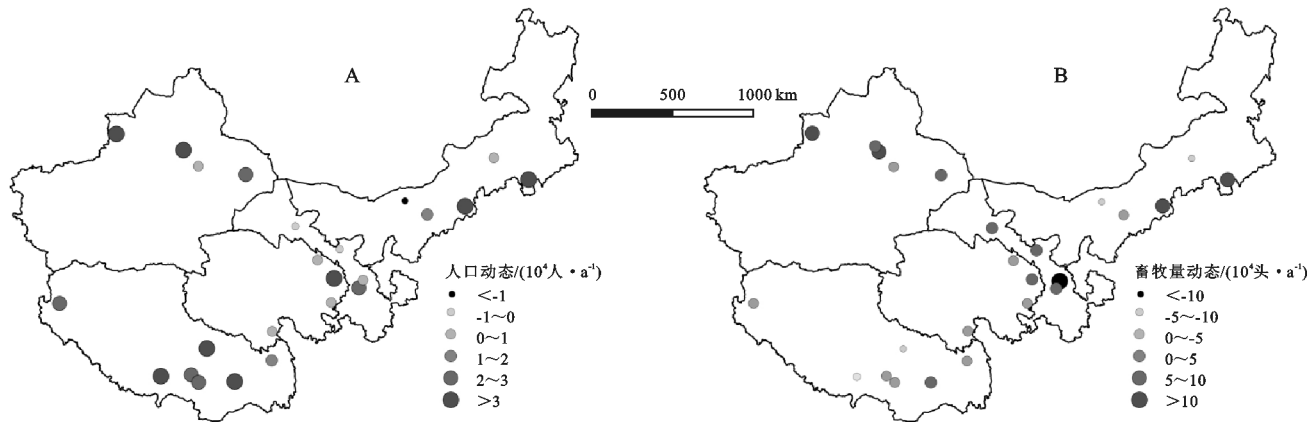


图 10 西北地区主要城市人口和畜牧数量动态

### 3.2 草地管理措施对草地动态的影响

20 世纪,由于人们片面追求经济利益,过度放牧和草地开垦情况严重,加上政府缺乏有效的管理和保护措施,使得我国西北地区草地出现大面积的退化。草地退化不仅体现在草地面积的减少,还体现在草地覆盖度降低,群落退化、草地生产力下降等多个方面<sup>[15]</sup>。合理的草地经营管理措施对于维护草地生态服务价值发挥具有重要意义。21 世纪以来,我国政府已开始重视这一生态问题。本研究得出,2000 年以来人类活动是草地恢复的主要成因(图 5),说明相关政策已取得积极的生态效应。2000—2003 年草地 ANPP 呈现快速增加趋势,可能与 2000 年开始实行的退耕还林还草措施有关。2003—2004 年间有所波动减少,2004 年政府开始实施退牧还草生态工程,使得草地生长环境得到改善,ANPP 呈现增加趋势。另外,“减畜工程”的实施对于草地恢复也起到了一定的作用<sup>[15]</sup>。研究表明,放牧对于草地植被的盖度、叶数和叶层高度、地上部生物量均有影响,尤其是生物量减少较为显著,说明过度放牧是引发草地退化的重要因素之一<sup>[25]</sup>。畜牧量减少可减轻牲畜对草类的采食和践踏,减缓了过度放牧的危害。2000 年以来,西北地区呈现畜牧量较少的区域较多,尤其是在青藏高原地区,放牧强度的减轻促进了这些地区的草地的恢复<sup>[26]</sup>。

### 3.3 模型误差

本研究采用的 Thornthwaite Memorial 模型仅

以气温和降水作为模拟参数,PNPP 表示理想状态仅受气候变化(气温、降水)影响下的草地所能达到的最大 NPP。但是,这些情况受到草原火灾、草地三害(毒害、鼠害、虫害)和草原物种的影响。HNPP 定义为 PNPP 与 ANPP 的差值,但是实际情况下两者之间的差异不仅仅只受到人类活动的影响<sup>[7]</sup>。因此,这些因素都会导致结果的不确定性。但是运用该方法能在大尺度上区分气候变化和人类活动对草地 NPP 的影响<sup>[18]</sup>。

## 4 结论

(1) 2000—2015 年,西北地区 83.20% 的草地呈现恢复状态,恢复的面积达到  $2.23 \times 10^6 \text{ km}^2$ , NPP 的增加总量为 18 645.56 Tg C。而仅有 16.8% 的草地呈现退化趋势,面积为  $4.55 \times 10^5 \text{ km}^2$ , NPP 的损失总量为 428.16 Gg C。

(2) 人类活动是草地恢复的主要成因,人类活动主导的草地恢复面积占草地总面积的 49.94%,其导致 NPP 的增加量为 10 478.4 Tg C。而气候变化是草地退化的主导因素,气候变化引起的 NPP 损失量为 341.76 Tg C。

(3) 进一步分析得到西北地区草地呈现恢复趋势的原因为气候呈现“冷湿化”的趋势,干旱的情况得到了一定缓解。此外,退耕还林、退耕还草和“减畜工程”的实施,进一步改善草类的生长环境,促进了西北地区草地的恢复。而区域水热条件不均衡和不合理的人类活动易造成草地退化。



## 参考文献:

- [1] Scurlock J, Hall D. The global carbon sink: A grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 1998,4(2):229-233.
- [2] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995,51(1):74-88.
- [3] 李玲,张福平,冯起,等.环青海湖地区草地对气候变化和人类活动的响应[J].*生态学杂志*,2019,38(4):1157-1165.
- [4] Mu S J, Chen Y Z, Li J L, et al. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Inner Mongolia, China between 1985 and 2009[J]. *Rangeland Journal*, 2013,35(3):315-329.
- [5] Wang Z Q, Yue Y, Li J L, et al. Simulation of terrestrial carbon equilibrium state by using a detachable carbon cycle scheme[J]. *Ecological Indicators*, 2017,75:82-94.
- [6] Zhou W, Gang C C, Zhou L, et al. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the northwest China [J]. *Acta Oecologica*, 2014,55(2):86-96.
- [7] Chen T, Bao A M, Jiapaer G, et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982—2015 [J]. *Science of The Total Environment*, 2019,653:1311-1325.
- [8] Zhou W, Gang C C, Zhou F C, et al. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator[J]. *Ecological Indicators*, 2015,48:560-569.
- [9] Yang Y, Wang Z Q, Li J L, et al. Comparative assessment of grassland degradation dynamics in response to climate variation and human activities in China, Mongolia, Pakistan and Uzbekistan from 2000 to 2013 [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016,135:164-172.
- [10] 郭灵辉,郝成元,吴绍洪,等.21 世纪上半叶内蒙古草地植被净初级生产力变化趋势[J].*应用生态学报*,2016,27(3):803-814.
- [11] 辛良杰,李秀彬,谈明洪,等.2000—2010 年内蒙古防沙带草地 NPP 的变化特征[J].*干旱区研究*,2015,32(3):585-591.
- [12] 樊江文,邵全琴,王军邦,等.三江源草地载畜压力时空动态分析[J].*中国草地学报*,2011,33(3):64-72.
- [13] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, et al. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,563:210-220.
- [14] Mu S J, Zhou S X, Chen Y Z, et al. Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland, China [J]. *Global & Planetary Change*, 2013,108(3):29-41.
- [15] 张颖,章超斌,王钊齐,等.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[J].*草业学报*,2017,26(5):1-14.
- [16] Liu Y Y, Yang Y, Wang Q, et al. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient[J]. *Science of The Total Environment*, 2019,652:671-682.
- [17] 丁文广,魏银丽,牛贺文.西北干旱区植被恢复的土壤养分效应[J].*生态环境学报*,2010,19(11):2568-2573.
- [18] Wang Z Q, Zhang Y Z, Yang Y, et al. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, in China [J]. *Ecological Informatics*, 2016,33:32-44.
- [19] Xu H J, Wang X P, Zhang X X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012 [J]. *Ecological Engineering*, 2016,92:251-259.
- [20] Gang C, Zhou W, Chen Y Z, et al. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,72(11):4273-4282.
- [21] 王耀斌,赵永华,韩磊,等.2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其趋因子[J].*应用生态学报*,2018,29(7):2373-2381.
- [22] Shi Y F, Shen Y P, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China [J]. *Climatic Change*, 2007,80(3/4):379-393.
- [23] 罗玲,王宗明,毛德华,等.松嫩平原西部草地净初级生产力对气候变化及人类活动的响应[J].*生态学杂志*,2012,31(6):1533-1540.
- [24] 魏靖琼,柳小妮,任正超,等.区域尺度下气候因子的插值优化及其与草地 NPP 的相关性[J].*草业科学*,2012,29(12):1842-1848.
- [25] 夏景新,朱昌平.多年生黑麦草草地生态系统中放牧强度对草地结构及组织转化的影响[J].*应用生态学报*,1995,6(1):23-28.
- [26] 张良侠,樊江文,邵全琴,等.生态工程前后三江源草地产草量与载畜压力的变化分析[J].*草业学报*,2014,23(5):116-123.