

DOI: 10.5846/stxb201811192509

赵旺林, 罗天祥, 张林. 气候变化与放牧对西藏典型高寒荒漠草地植被指数变化的相对影响. 生态学报, 2019, 39(22): - .

Zhao W L, Luo T X, Zhang L. Relative impact of climate change and grazing on NDVI variations in typical alpine desert grasslands in Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): - .

气候变化与放牧对西藏典型高寒荒漠草地植被指数变化的相对影响

赵旺林^{1,2}, 罗天祥^{1,3}, 张 林^{1,3,*}

1 中国科学院高寒生态重点实验室, 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

摘要: 高寒荒漠草地是青藏高原天然牧场的重要组成部分, 对气候变化的响应敏感, 且受放牧活动干扰较大, 然而, 目前仍缺乏数据解释气候变化与放牧对高寒荒漠草地生长的相对影响。西藏阿里地区的日土县, 处于季风带和西风带的过渡区, 形成以高寒荒漠草原为主的植被类型。本研究基于西藏日土县 2000—2016 年间的 MODIS 遥感植被指数 (NDVI), 以牲畜存栏数 (LN) 作为放牧的关键指标, 以气温、降水和标准化降水蒸散指数 (SPEI) 数据作为气候变化的指标, 分析了研究区草地 NDVI 的时空变化格局以及气候变化与放牧对 NDVI 变化的相对影响, 据此评估已实施的退牧还草生态建设工程效应。主要研究结果如下: 1) 2000—2016 年间 NDVI 先减后增, 总体呈现增加趋势, 这与温度、降水、SPEI 以及 LN 的变化密切相关, 其中, LN 对 NDVI 变化的影响相对更大; 2) 偏相关分析结果表明, 退牧还草工程实施前 (2000—2007), LN 对 NDVI 变化的影响更大, 而工程实施后 (2008—2016), 表现为 SPEI 对 NDVI 变化的影响更大。研究结果表明, 高寒荒漠草地生态系统十分脆弱, 在不同空间以及时间尺度受到气候变化和放牧活动的影响也有所不同。退牧还草工程通过控制牲畜数量, 减轻放牧压力, 在很大程度上遏制了该地区植被尤其是草原和湿地 NDVI 的降低趋势。

关键词: 标准化降水蒸散指数; 牲畜存栏数; 偏相关分析; 植被指数; 退牧还草工程

Relative impact of climate change and grazing on NDVI variations in typical alpine desert grasslands in Tibet

ZHAO Wanglin^{1,2}, LUO Tianxiang^{1,3}, ZHANG Lin^{1,3,*}

1 Key Laboratory of Alpine Ecology, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of sciences, Beijing 100049, China

3 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100101, China

Abstract: As an important part of the alpine pasture on the Qinghai-Tibet Plateau, the alpine desert grasslands, which are assumed to be sensitive to climate change, are suffering from rising grazing intensity. However, due to the lack of data, the relative impact of climate change and grazing on the growth of alpine desert grasslands is still in debate. Ritu County in Ali area of Tibet is located in the transition zone between the monsoon and the westerly zone. The most typical vegetation type here is alpine desert grasslands. In this study, based on data of the satellite-derived normalized difference vegetation index (NDVI) during 2000—2016, we analyzed the relative impacts of climate change and grazing on NDVI changes for Ritu County. Data of air temperature, precipitation and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) were used as

基金项目: 国家自然科学基金 (41471039); 科技基础性工作专项子课题 (2015FY11030001-5).

收稿日期: 2018-11-19; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglin@itpcas.ac.cn

indicators of climate change, and those of livestock (*LN*) were enrolled as a key indicator of grazing. The results showed that: 1) NDVI tended to increase during 2000—2016, which is associated with the variation of temperature, precipitation, SPEI and *LN*. And *LN* seems to exert relative larger impacts on the variation of NDVI. 2) Partial correlations indicted that *LN* was a main driving force for the variation of NDVI before the launch of the ecological restoration project (Grazing Withdrawal Program, GWP) in 2000—2007. However, the main driving force shifted to SPEI since the GWP started (during 2008—2016). The results indicate that alpine desert grasslands are vulnerable to grazing activities and climate change. The impacts of climate change and grazing on vegetation differs between different time scales or space scales. By controlling the number of livestock and therefore reducing the pressure of grazing, the GWP effectively suppressed the significant decrease of NDVI in grasslands and wetlands in Ritu County.

Key Words: standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); livestock; partial correlation analysis; NDVI; Grazing Withdrawal Program

气候变化对陆地植被生长的影响及其机制是当前全球变化研究领域的热点问题。大量研究认为全球气候变化是近几十年来陆地植被变化的重要驱动因子^[1-3]。就青藏高原而言,通常认为气温和降水同时增加将有利于高寒植被的生长^[4-6],然而,本世纪初植被生产力对温度变化的敏感程度下降,而非生长季气候变暖被认为是敏感性下降的主要原因^[7]。非生长季气候变暖不利于冬季积雪的保存,在一定程度上通过影响生长季早期的水分供应,进而间接影响植被生长^[8]。另有研究发现,在生长季初期,增温很可能通过改变降水形态影响高寒草地植被生长^[9]。由此可见,气候变化背景下,与温度相比,尽管降水的变化不一定是青藏高原植被 NDVI 变化的主要限制因子^[10],但温度导致的水分变化(如蒸发加剧)极有可能影响植被的生长。此外,气温和降水对青藏高原植被 NDVI 的影响因季节、区域不同而呈现明显差异^[11-12];甚至也有研究发现青藏高原植被 NDVI 对气温和降水的响应存在明显滞后效应,且滞后水平存在空间差异^[13]。可见,探索气候变化对高寒草地的影响,需要充分考虑温度和降水的时空变化。

青藏高原是我国主要牧区之一,长期以来的放牧活动对青藏高原草地植被具有双重影响。放牧一方面通过牛羊啃食和践踏影响草地植被生物量和土壤紧实度,另一方面也可能刺激植物生长^[14],通过粪便提高土壤肥力^[15],因此放牧强度在很大程度上决定了其对高寒草地的影响作用。例如,过度放牧会抑制草地植被的生长,牛羊过度啃食会减弱牧草与其他杂草的竞争力,在生长季末期还会影响植物越冬性,进而影响牧草第二年春季的生长发育^[16],而适度放牧通常有利于草地植被的生长,牛羊适度啃食会刺激植物新叶的生长,使植物叶片保持嫩绿状态从而有利于提高植物光合作用^[17]。由此可见,放牧活动对牧区植被的影响因放牧密度和牧期长短而异,探索合理的放牧强度是当前高寒草地植被保护和牧草永续利用的关键,但相关研究仍存在争议。

1961—2010 年间,青藏高原气候整体出现暖湿化趋势,导致高寒草地 NPP 增加^[18]。张宪洲等(2015)^[19]和 Lehnert 等^[20]指出气候因素是高寒草地生态系统变化的主要控制因子,然而 Pan 等^[21]认为 1982—2013 年非气候因子才是青藏高原高寒草地变化的主要影响因子。另有研究认为,高寒草地植被变化的主要决定因素在青藏高原退牧还草工程实施前后存在明显差异:退牧还草工程实施之前,尽管相对良好的水热条件有助于草地生长,但过度放牧造成了大面积的草地退化;退牧还草工程实施之后,人类活动影响减弱,气候变化则可能成为驱动草地变化的主要因素,且气候变化和放牧对高寒草地植被变化的影响程度存在明显的时空差异^[20-23]。此外,也有研究表明退牧还草工程实施以后,气候变化对围封后的不同植被类型草地的影响也有所不同,例如变暖有利于高寒草甸的恢复,但并不利于高寒草原和荒漠植被的恢复,而变湿的影响正好相反^[24]。由此可见,我们需要在不同时间尺度考虑气候变化和人类活动(如放牧)对植被的影响,尤其是 21 世纪以来,退牧还草等重大工程在植被恢复过程中起到了非常重要的作用。

日土县地处青藏高原西北部,是季风带和西风带的过渡区,植被由高寒草原向高寒荒漠过渡,形成以高寒

荒漠草原为主的植被类型。同时该区地势高低起伏,冰川发育,湖泊和河流众多,使得湿地植被广泛分布,而在高海拔的草地分布上限附近往往形成较为湿润的高寒草甸。西藏退牧还草工程始于 2004 年,先在那曲、比如、改则三县进行试点,2005 年开始全面实施,工程的布局和实施安排以藏西北为重点区域,日土县于 2005 年开始实施,2006 年进一步推广实施。此区域高寒荒漠草地对气候和放牧强度变化更敏感,更容易区分两者的相对影响,因此,本文以日土县为研究对象,利用 2000—2016 年间的 MODIS 遥感植被指数(NDVI),以牲畜存栏数(LN)作为放牧的关键指标,以气温、降水和标准化降水蒸散指数(SPEI)表征气候变化,开展放牧和气候变化对该区高寒草地植被影响的研究,旨在阐明 2000 年以后气候变化和放牧对高寒荒漠草地的相对影响,为评估高寒草地对气候变化响应和制定合理放牧政策提供理论依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

日土县位于西藏自治区西北部的阿里地区,地处昆仑山脉南部,喀喇昆仑山东部,地理位置为 32.11° — 35.07°N , 78.11° — 82.07°E (图 1A)。该地区气候类型属高原亚寒带(部分高原温带)干旱大陆性气候,根据附近气象站数据,多年平均气温 0.4°C ,多年平均降水量 71.2 mm ,6—9 月份降水量占全年降水量的 84.2% ,年平均风速为 2.95 m/s ^[25]。气候寒冷干燥,多大风,日照充足。低温少雨的干旱特征使得研究区植被稀疏,具有明显荒漠特征^[26]。研究区植被可分为湿地、高寒草原、高寒荒漠和高山稀疏植被四大类(图 1B),根据中国 1:100 万植被图^[27],各类型植被分布面积分别占 0.21% 、 64.84% 、 13.5% 和 13.68% 。日土县主要以饲养山羊、牦牛为主,牛羊数量比例为 1:32,牧业比重大(畜牧业收入占总收入的 92.35%),其中羊绒收入占总收入的 49.4% ,白绒山羊被称为日土县的“软黄金”^[28]。

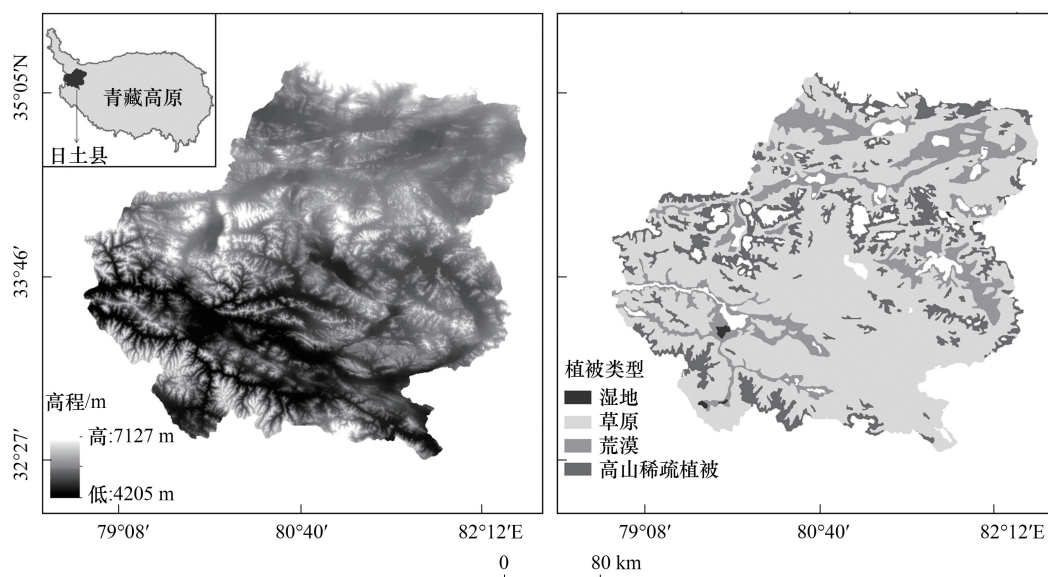


图 1 日土县高程分布(A)及植被类型分布(B)

Fig.1 Distribution pattern of (A) elevation and (B) vegetation types in Ritu County

1.2 数据处理

归一化差异植被指数(NDVI)是近红外波段的反射值与红光波段的反射值之差与两者之和的比值,可反映植被生长的季节和年际变化特征^[29]。本研究所使用的 MODIS NDVI 数据来自 NASA 官网提供的植被指数产品 MOD13Q1 数据集,时段为 2000—2016 年,空间分辨率为 250 米。该产品采用 16 天最大值合成(MVC)而来,然后使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件将下载的 MOD13Q1 产品数据进行拼接、投影转换等预处理。研究植被指数的变化特征需要确定一个阈值以确定低植被覆盖区植被分布范围。理想状态下 NDVI 负

值代表云、水、雪,0 值表示有岩石或裸土等土地覆盖类型,正值表示有植被覆盖且随覆盖度增大而增大。但受大气辐射、和传感器敏感性等影响,影像 NDVI 可能会与真实土地覆被 NDVI 产生偏差。日土县植被稀疏,高寒荒漠植被 NDVI 值偏小,本文确定以 $\text{NDVI} \geq 0.08$ 的区域作为主要分析对象。本文选用生长季最大 NDVI 作为生产力的代用指标,具体指生长季内影像中每个栅格所对应最大的像元值,植被生长季最大 NDVI 不仅能够反应植被覆盖度、生物量、生产力,而且也可以很灵敏地反映 NPP 的动态变化^[30-32]。利用 ArcGIS 像元统计数据工具的 MAXIMUM 方法计算出每一年植被生长季(日土县植被生长季为 5—9 月份,即 MODIS 影像每年第 11—17 期)最大 NDVI。本文中 NDVI 如无特殊说明皆指植被生长季最大 NDVI。

由于日土县缺乏长期的气象观测数据,本文运用了狮泉河站(距离日土县 120 公里,海拔与日土十分接近)的气象观测数据(数据来自中国科学数据共享服务网)。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>) SRTM DEM,分辨率为 90m。植被类型数据(1:100 万植被图)来自于地球大数据科学工程数据共享服务系统(<http://data.casearth.cn/>)。鉴于温度和降水可能同时影响植被的生长,同时单点(气象站)的气温降水数据不足以反映区域尺度的气候状况,因此本研究采用了网格数据标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),该指数能够综合表征温度和降水的变化,SPEI 来自 Global Drought Monitor(<http://spei.csic.es/index.html>)。SPEI 利用月水分亏缺量(月降水量与月潜在蒸发量之差)描述当前地表干湿变化,由于不同时间、不同地域的水分亏缺量变化幅度很大,很难进行相互比较,且其概率分布是一种偏态分布,因而采用 log-logistic 概率分布函数来描述水分亏缺量的变化,最后经正态标准化得到 SPEI 值。SPEI 具有多时间尺度特征,时间尺度越小,干湿变化越显著,其值波动较大,反映短期的干旱程度^[33]。一个月尺度的 SPEI 主要受每月的温度和降水控制,可以准确反映土壤水分状况^[34],而土壤水分是影响植被生长的最主要因子。因此,本研究采用了 2000—2015 年间植被生长季早期平均 SPEI 衡量研究区植被生长季早期的干旱程度。

本文以青藏高原科学数据中心(<http://www.tpdatabase.cn/>)提供的日土县年末牲畜存栏数(Livestock numbers, LN)作为放牧的关键指标。

1.3 数据分析方法

1.3.1 NDVI 时空变化趋势分析

一元线性回归模拟是以单个像元的时间变化规律反映整体的空间变化规律。Stow^[35]用一元线性回归方程的斜率反映每个栅格上植被年际变化趋势。本文运用最小二乘法计算回归系数,即 NDVI 年际变化率。

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

其中: i 为年序号, NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值, n 为样本量。 θ_{slope} 是 NDVI 在研究时间内的变化率(即表示年际变化的最小二乘的线性回归方程的斜率),如果其为正值,说明此单元格的植被状况趋好,其值为负则说明该单元格的植被状况趋于退化。根据显著性检验结果将变化程度分级(显著变化($p \leq 0.05$)、无显著变化($p > 0.05$)),然后对 NDVI 的变化率进行计算,统计不同变化趋势的栅格所占的比例。

1.3.2 NDVI 与主要影响因子相关性分析

通过相关系数的计算与显著性检验来测度植被长势变化与气候要素之间的相互关系。Pearson 相关系数的数学表达式为:

$$R = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (X_i \times \text{NDVI}_i) - (\sum_{i=1}^n X_i \times \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i)}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^n (X_i^2) - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \sqrt{n \times \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i^2) - (\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i)^2}}$$

式中: R 为相关系数, n 为样本数; X_i 、 NDVI_i 分别为自变量和因变量;本研究基于日土县 2000—2016 年 MODIS

NDVI 时间序列数据及相应的 SPEI 数据、 LN 数据,对研究区植被 NDVI 与主要气候、人为因子的相关关系进行分析,同时进行显著性检验。

本文运用偏相关方法分析放牧和气候变化对 NDVI 变化的相对影响。当只有三个变量时,可以用简单相关系数间接计算偏相关系数,设三个变量为 LN 、SPEI 和 NDVI,则 LN 保持一定时,SPEI 和 NDVI 的偏相关系数为:

$$R_{NDVI\ SPEI\cdot LN} = \frac{R_{NDVI\ SPEI} - R_{SPEI\ LN} \times R_{NDVI\ LN}}{\sqrt{(1 - R_{SPEI\ LN}^2) \times (1 - R_{NDVI\ LN}^2)}}$$

式中: $R_{NDVI\ SPEI\cdot LN}$ 为 LN 固定时,NDVI 与 SPEI 的偏相关系数,其中 $R_{NDVI\ SPEI}$ 、 $R_{NDVI\ LN}$ 、 $R_{SPEI\ LN}$ 分别为 NDVI 与 SPEI、NDVI 与 LN 、SPEI 与 LN 的相关系数。

2 结果与分析

2.1 日土县草地 NDVI 变化的空间格局

日土县 2000—2016 年间,草地 NDVI 总体呈现增加趋势,显著增加区域所占比例为 12.14%,尤其在北部地区更为明显,NDVI 减少的地方主要在南部,占 2.13% (图 2)。在 NDVI 增加的区域,荒漠和湿地植被增加最为明显,分别占植被分布区的 18.65% 和 15.46%,在显著减少的区域,相对来说湿地和草原更明显,占比分别为 2.92% 和 2.2% (图 2)。

从 2000—2016 年日土县不同草地类型 NDVI 变化趋势的海拔分布格局来看,高山稀疏植被 NDVI、湿地 NDVI 变化趋势的海拔差异不显著 (图 3);荒漠 NDVI 显著增加、显著减少的区域分别集中在 4800—5200 m、4400 m 以下 (图 3);草原 NDVI 显著增加、显著减少的区域分别集中在 5000—5400 m、4400—5000 m (图 3)。

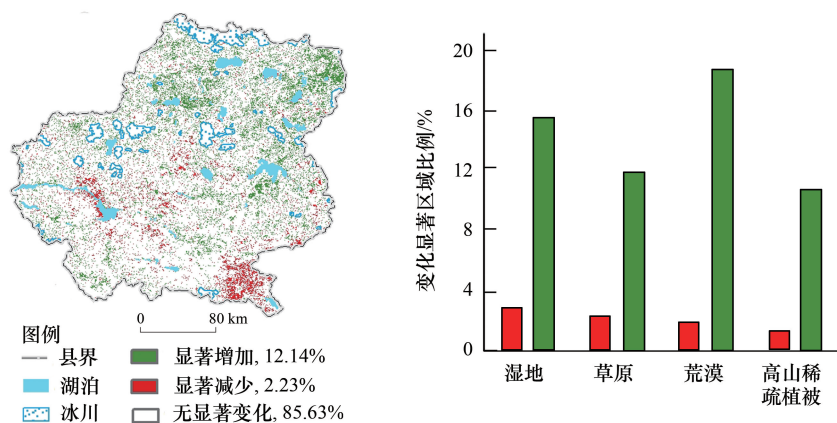


图 2 2000—2016 年日土县草地 NDVI 变化趋势的空间格局

Fig.2 Spatial pattern for the trends of NDVI variations in Ritu County during 2000—2016

2.2 气候变化与放牧对日土县草地 NDVI 变化的相对影响

2000—2016 年间日土县草地 NDVI、生长季前期平均气温 (图 4A) 和降水 (图 4B) 均呈现出先降后升的总趋势,NDVI 在 2009 年和 2016 年分别出现近 17 年间的最小值和最大值。SPEI 在 2000—2009 年间呈下降趋势,2009 年出现转折,随后波动上升 (图 4C)。放牧指标牲畜存栏数 LN 在 2000—2007 年间逐年增加,受退牧还草工程影响,2007 年出现转折,随后逐年减少 (图 4D)。

根据 Pearson 相关分析,日土县高寒草地 NDVI 与生长季前期气温 (图 4A 插图, $R^2 = 0.30$, $P < 0.05$)、降水 (图 4B 插图, $R^2 = 0.25$, $P < 0.05$) 以及 SPEI (图 4C 插图, $R^2 = 0.30$, $P < 0.05$) 均呈正相关,与 LN 成负相关 (图 4D 插图, $R^2 = 0.49$, $P < 0.01$)。偏相关分析表明, LN 比 SPEI 对日土县高寒草地 NDVI 影响更大 (表 1)。

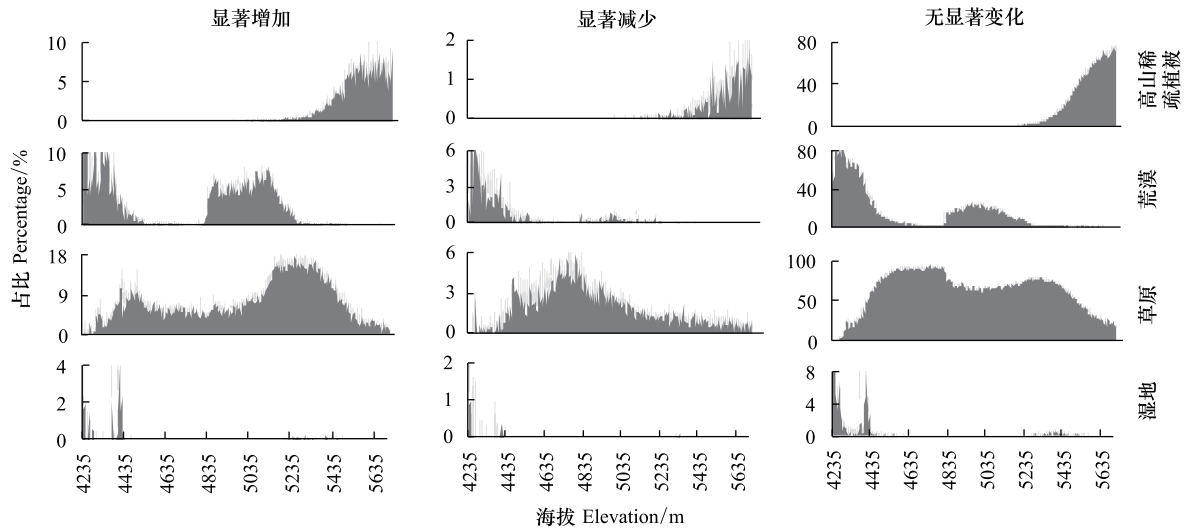


图3 2000—2016年日土县不同草地类型NDVI变化趋势的海拔分布

Fig.3 Altitudinal distribution for the trends of NDVI variations of different grassland types in Ritu County during 2000—2016

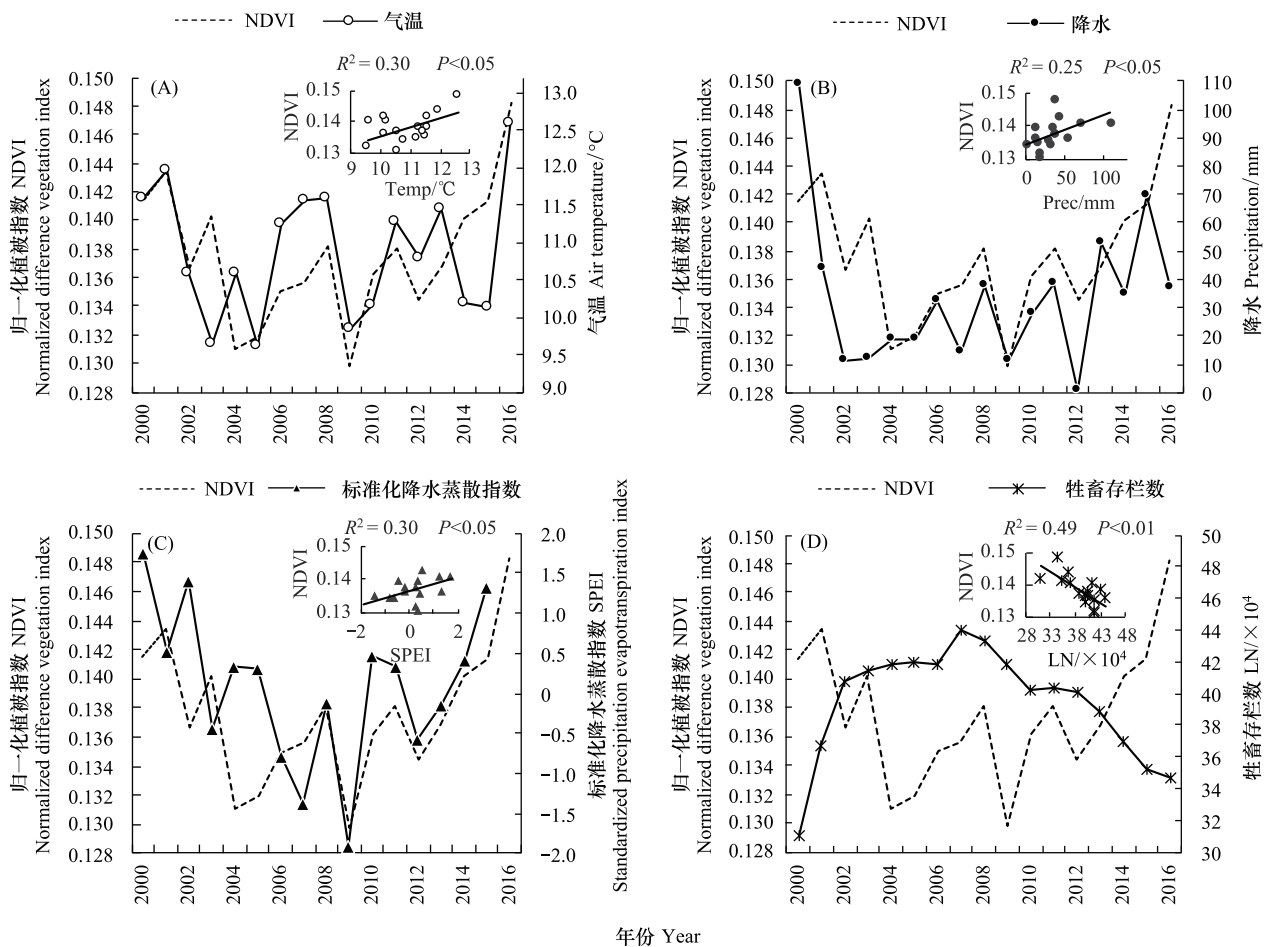


图4 2000—2016年日土县草地NDVI与平均温度(A)、降水(B)、标准化降水蒸散指数(C)和牲畜存栏数(D)的 annual 变化及相关关系

Fig.4 Inter-annual variations of NDVI, air temperature (A), precipitation (B), SPEI (C), LN (D) in Ritu during 2000—2016. Inserted boxes presented the relationships between NDVI and corresponding impact factors

表 1 2000—2016 年日土县草地 NDVI 与 LN 和 $SPEI$ 的偏相关系数Table 1 The Partial correlation coefficient between NDVI and LN , $SPEI$ in Ritu during 2000—2016

植被类型 Vegetation types	偏相关系数(LN) Partial correlation coefficient (LN)	偏相关系数($SPEI$) Partial correlation coefficient ($SPEI$)
湿地 Wetlands	-0.565 *	-0.368
草原 Steppes	-0.461 *	0.226
荒漠 Deserts	-0.277	0.200
高山稀疏植被 Alpine sparse vegetation	-0.301	-0.014
草地 Grasslands	-0.617 *	-0.025

* 表示 $P < 0.05$

2.3 退牧还草工程实施前后日土县草地 NDVI 的变化趋势

日土县退牧还草工程实施前(2000—2007),草地 NDVI 总体呈现减少趋势,显著减少区域所占植被分布区的比例为 6.52%,在南部地区更为明显。就不同植被类型而言,草原和湿地 NDVI 的减少相对更明显,占比分别为 8.12% 和 6.03%。NDVI 显著增加的区域主要在北部,仅占 3.34%,荒漠和湿地植被增加最为明显,占比分别为 4.41% 和 3.9%(图 5A)。

退牧还草工程实施后(2008—2016),草地 NDVI 总体呈现增加趋势,显著增加区域所占植被分布区的比例为 7.09%,在北部地区更为明显。就不同植被类型而言,荒漠和湿地植被增加最为明显,占比分别为 7.87% 和 7.01%。NDVI 减少的地方仅占 0.89%,主要以草原和湿地为主(图 5B)。

偏相关分析表明,退牧还草工程实施前(2000—2007), LN 比 $SPEI$ 对 NDVI 的影响更大;实施后(2008—2016), $SPEI$ 比 LN 对 NDVI 的影响更大(表 2)。

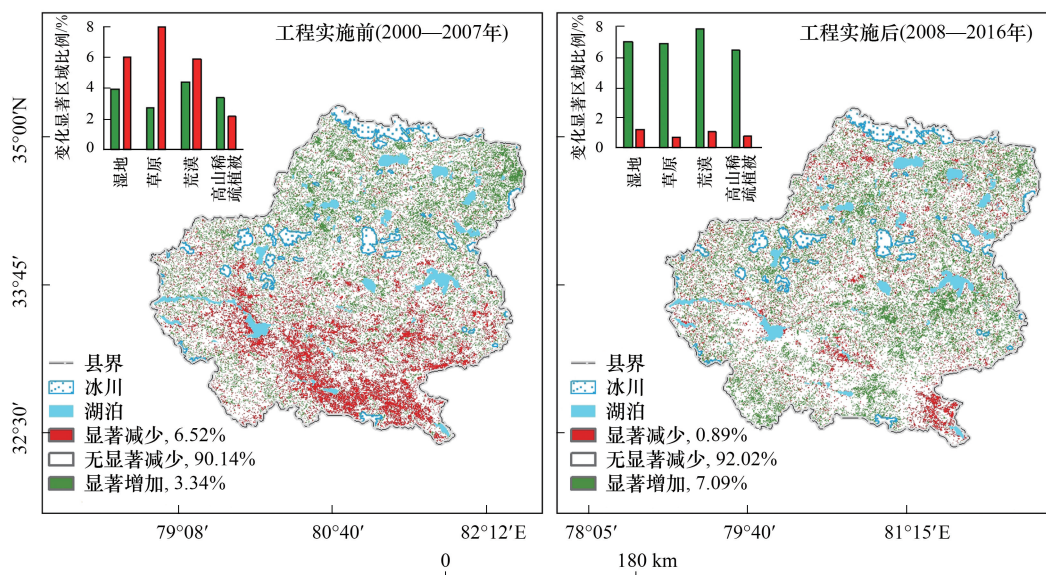


图 5 退牧还草工程实施前后草地 NDVI 空间变化趋势。(A) 工程实施前(2000—2007 年), (B) 工程实施后(2008—2016 年)

Fig.5 Spatial variation of grasslands NDVI before and after the launch of Grazing Withdrawal Program. (A) 2000—2007, (B) 2008—2016

3 讨论

3.1 日土县退牧还草工程实施效果

2000—2016 年间日土县草地 NDVI 变化同时受到气候变化和放牧的影响,其中放牧的影响相对更大,但退牧还草工程实施前后日土县草地 NDVI 的变化及其影响因子却有所不同。2000—2007 年间在干旱持续加

剧(SPEI 不断降低)和牲畜数量激增的双重压力下,草地 NDVI 呈下降趋势,放牧活动的加剧是影响这一时期草地 NDVI 降低的主要原因。受退牧还草工程影响,日土县牲畜数量在 2007 年达到近 20 年来最大值(43.95 万头)之后逐渐下降,放牧压力逐渐减小,加之干旱状况有所缓解,2007—2016 年日土县草地 NDVI 呈上升趋势,气候因子则是这一时期草地 NDVI 变化的主要影响因素。类似研究同样表明^[30,36],退牧还草工程实施前,青藏高原草地退化主要受过度放牧影响,而退牧还草工程实施后,放牧压力减小,植被生长主要受气候变化影响。畅慧勤等^[37]研究表明,日土县可利用天然草地理论载畜量为 43 万个羊单位,而本研究发现,2000—2016 年间日土县牲畜存栏数平均为 39.48 万头,折算为羊单位约 44.03 万头,略大于 43 万,因此,总体而言该区处于过牧状态,但退牧还草工程的实施,严格控制了载畜量,使得载畜量由 2007 年的 49.11 万个羊单位逐渐降低到 2016 年的 37.40 万个羊单位。由此可见,退牧还草工程在一定程度上促进了退化草地恢复,有效遏制了草地退化,总体有利于畜牧业的可持续发展。

表 2 日土县草地 NDVI 与 LN 和 SPEI 的偏相关系数
Table 2 The partial correlation coefficient between NDVI and LN, SPEI of grasslands in Ritu County

植被类型 Vegetation types	偏相关系数(LN)		偏相关系数(SPEI)	
	Partial correlation coefficient (LN)		Partial correlation coefficient (SPEI)	
	2000—2007 年	2008—2016 年	2000—2007 年	2008—2016 年
湿地 Wetlands	-0.691 *	-0.464	-0.567	-0.065
草原 Steppes	-0.765 *	0.132	-0.429	0.853 **
荒漠 Deserts	-0.451	0.001	-0.164	0.824 *
高山稀疏植被 Alpine sparse vegetation	-0.476	-0.571	-0.443	0.713 *
草地 Grasslands	-0.719 *	-0.647	-0.431	0.384

* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

根据本研究结果,退牧还草生态工程总体有利于退化草地的恢复,因此建议继续实施退牧还草工程,控制家畜数量在 43 万个羊单位以内。此外,由于日土县草地 NDVI 的变化存在明显的空间差异,尤其在退牧还草工程实施之前,草地 NDVI 显著减少地区主要集中在日土县南部,而草地 NDVI 显著趋好的地区主要集中在日土县北部,因此,根据目前的草地 NDVI 变化情况,应该重点控制日土县南部牲畜数量,增加牧场的流动性或使部分主要牧场北迁。

3.2 不同草地类型 NDVI 变化趋势的差异

从不同草地类型 NDVI 的年际变化来看,紫花针茅、沙生针茅草原 NDVI 显著减少的区域明显高于其他植被类型,垫状驼绒藜荒漠、青藏藁草草原 NDVI 显著增加区域的比例明显高于其他植被类型(图 6),这种现象可能与牧民的放牧技术、牛羊选择性取食有关。已有研究表明,牛羊对牧草种类的选择性取食会导致放牧活动对高寒草地不同植被类型产生不同影响^[38]。高寒草原的优势物种,紫花针茅营养价值高,耐牧性强^[39],沙生针茅营养物质的降解率较低,营养成分容易积累,是一种催肥的优质牧草^[40],二者的适口性好,因而成为牛羊的主要采食对象,故牛羊数量的变化对这两个物种地上生物量影响较大。青藏藁草叶秆短小,垫状驼绒藜植株低矮,群落较为稀疏,主要分布在寒旱、盐碱、贫瘠的高海拔地区^[41],牛羊取食较少,所以放牧对稀疏植被总体影响较小,相对而言,气候因素的影响通常较大。

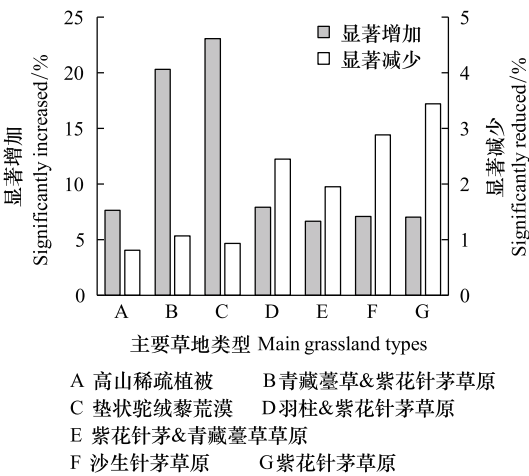


图 6 2000—2016 年 NDVI 发生显著变化的草地类型比较

Fig.6 Comparisons between vegetation types showing significant changes in NDVI during 2000—2016

理论上讲,将县域尺度的载畜量分解到不同的植被类型中是无法实现的,即不同植被类型 NDVI 与载畜量的关系存在很大的不确定性,但我们可以根据植被的分布规律做一些定性分析,因为牲畜对不同植被的影响是不同的。首先,由于日土县主要植被类型分布存在明显的海拔分异(图 3),湿地主要分布在 4400 m 以下的河谷或湖边区域;草原分布较广,几乎每个海拔区间都可见;荒漠主要分布在 4400 m 以下地区和 4800—5300 m 之间地区;高山稀疏植被则主要分布在 5000 m 以上高山地区。草地植被的海拔分异在一定程度上决定了其载畜能力,即牲畜对不同海拔草地的影响是不同的。其次,由于牧民的放牧技术、牧草的适口性和营养价值不同,所以牛羊取食有一定的选择性,这种人为或自然因素导致的选择性取食决定了牲畜对不同植被类型产生的影响不同(图 6)。因此,将 LN 与各种植被类型进行回归分析可比较牲畜对不同植被类型的相对影响,尽管存在不确定性,但相关结果具有一定的合理性。

3.3 展望

归一化植被指数 NDVI 可以作为表征植被生长状态的指标,但是 NDVI 无法反应植被物种组成和群落结构信息^[42],本研究利用地球大数据科学工程数据共享服务系统已有的数字化植被图(1:100 万),尝试分析了不同区域、不同植被类型 NDVI 的变化情况及其海拔差异,但由于人类活动的影响以及土地利用的变化,现有植被图能否反映目前植被的真实分布情况,仍存在不确定性,加强对该区不同植被类型开展长期定位观测研究将有助于进一步验证上述遥感分析结果。

针对放牧而言,本研究只利用了县域水平的牲畜数量数据,旨在分析区域尺度上载畜量对草地植被的影响,但是,放牧方式、放牧制度以及退牧还草工程中的一些具体措施如休牧^[43]、轮牧^[44,45]、围栏封育管理^[24,46]等,对草地植被的结构和功能都有重要影响,通过实地入户跟踪调查和不同围封年限的草地调查将有助于全面了解不同放牧方式对草地植被的影响机制,从而不断完善现有草地管理制度,为高寒区草地植被恢复以及草场可持续发展提供科学决策。

参考文献(References):

- [1] Zhao X, Tan K, Zhao S, Fang J. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the Northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.
- [2] Kim Y, Kimball J S, Zhang K, McDonald K C. Satellite detection of increasing northern hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008: implications for regional vegetation growth. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 472-487.
- [3] Zhang Y L, Gao J G, Liu L S, Wang Z F, Ding M J, Yang X C. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: a case study in the Koshi river basin in the middle Himalayas. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 139-148.
- [4] 王根绪,胡宏昌,王一博,陈琳. 青藏高原多年冻土区典型高寒草地生物量对气候变化的响应. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 671-679.
- [5] Hu M Q, Mao F, Sun H, Hou Y Y. Study of normalized difference vegetation index variation and its correlation with climate factors in the three-river-source region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(1): 24-33.
- [6] Sun J, Cheng G W, Li W P, Sha Y K, Yang Y C. On the variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2013, 5(4): 1894-1911.
- [7] Piao S L, Liu Z, Wang T, Peng S S, Ciais P, Huang M T, Ahlstrom A, Burkhardt J F, Chevallier F, Janssens I A, Jeong S J, Lin X, Mao J F, Miller J, Mohammad A, Myneni R B, Peñuelas J, Shi X Y, Stohl A, Yao Y T, Zhu Z C, Tan P P. Weakening temperature control on the interannual variations of spring carbon uptake across northern lands. *Nature Climate Change*, 2017, 7(5): 359-363.
- [8] Wang X Y, Wang T, Guo H, Liu D, Zhao Y T, Zhang T T, Liu Q, Piao S L. Disentangling the mechanisms behind winter snow impact on vegetation activity in northern ecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1651-1662.
- [9] Li R C, Luo T X, Mölg T, Zhao J X, Li X, Cui X Y, Du M Y, Tang Y H. Leaf unfolding of Tibetan alpine meadows captures the arrival of monsoon rainfall. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20985.
- [10] 张戈丽,欧阳华,张宪洲,周才平,徐兴良. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2010, 29(11): 2004-2016.
- [11] Sun J, Qin X J, Yang J. Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4): 291.
- [12] Zhang L, Guo H D, Lei J, Lei L P, Wang C Z, Yan D M, Li B, Li J. Vegetation greenness trend (2000 to 2009) and the climate controls in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073572.
- [13] 丁明军,张德铨,刘林山,王兆锋,杨续超. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 507-512.
- [14] Liu J S, Wang L, Wang D L, Bonser S P, Sun F, Zhou Y F, Gao Y, Teng X. Plants can benefit from herbivory: stimulatory effects of sheep saliva

- on growth of *Leymus chinensis*. PLoS One, 2012, 7(1): e29259.
- [15] Lin Y, Hong M, Han G D, Zhao M L, Bai Y F, Chang S X. Grazing intensity affected spatial patterns of vegetation and soil fertility in a desert steppe. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 138(3/4): 282-292.
- [16] 赵新全, 张耀生, 周兴民. 高寒草甸畜牧业可持续发展: 理论与实践. 资源科学, 2000, 22(4): 50-61.
- [17] Owensby C E, Ham J M, Auen L M. Fluxes of CO₂ from grazed and ungrazed tallgrass prairie. Rangeland Ecology & Management, 2006, 59(2): 111-127.
- [18] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, Wu N, Wang Y F, Fang X Q, Gao Y H, Zhu D, Yang G, Tian J Q, Kang X M, Piao S L, Ouyang H, Xiang W H, Luo Z B, Jiang H, Song X Z, Zhang Y, Yu G R, Zhao X Q, Gong P, Yao T D, Wu J H. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [19] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天祥, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高清竹, 张德铨, 欧阳华. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [20] Lehnert L W, Wesche K, Trachte K, Reudenbach C, Bendix J. Climate variability rather than overstocking causes recent large scale cover changes of Tibetan pastures. Scientific Reports, 2016, 6: 24367.
- [21] Pan T, Zou X T, Liu Y J, Wu S H, He G M. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau. Ecological Engineering, 2017, 108: 307-317.
- [22] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 11-18.
- [23] 孙银良, 周才平, 石培礼, 宋明华, 熊定鹏. 西藏高寒草地净初级生产力变化及其对退牧还草工程的响应. 中国草地学报, 2014, 36(4): 5-12.
- [24] Wu J S, Feng Y F, Zhang X Z, Wurst S, Tietjen B, Tarolli P, Song C Q. Grazing exclusion by fencing non-linearly restored the degraded alpine grasslands on the Tibetan Plateau. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15202.
- [25] 尚可政, 韩晶晶, 杨德保, 王式功. 西藏西北高原气候变化趋势及预测——以狮泉河站为例. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(6): 27-32.
- [26] 中国科学院植物研究所. 西藏植被. 北京: 科学出版社, 1988.
- [27] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 1:1000000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.
- [28] 何晓蓉, 李辉霞, 陈新武. 西藏日土县农牧民收入结构现状及发展对策. 地域研究与开发, 2004, 23(4): 105-108.
- [29] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [30] Cai H Y, Yang X H, Xu X L. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: the effects of ecological protection and restoration projects. Ecological Engineering, 2015, 83: 112-119.
- [31] Vickers H, Høgdal K A, Solbø S, Karlsen S R, Tømmervik H, Aanes R, Hansen B B. Changes in greening in the high arctic: insights from a 30 year AVHRR max NDVI dataset for Svalbard. Environmental Research Letters, 2016, 11(10): 105004.
- [32] Davis C L, Hoffman M T, Roberts W. Long-term trends in vegetation phenology and productivity over Namaqualand using the GIMMS AVHRR NDVI3g data from 1982 to 2011. South African Journal of Botany, 2017, 111: 76-85.
- [33] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [34] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系. 生态学报, 2012, 32(17): 5467-5475.
- [35] Stow D, Daeschner S, Hope A, Douglas D, Petersen A, Myneni R, Zhou L, Oechel W. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5): 1111-1117.
- [36] 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. Ecological Engineering, 2016, 92: 251-259.
- [37] 畅慧勤, 徐文勇, 袁杰, 吕继照, 张硕新. 西藏阿里草地资源现状及载畜量. 草业科学, 2012, 29(11): 1660-1664.
- [38] 段敏杰, 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 郭亚奇, 旦久罗布, 洛桑加措. 放牧对藏北紫花针茅高寒草原植物群落特征的影响. 生态学报, 2010, 30(14): 3892-3900.
- [39] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1987.
- [40] 曹仲华, 呼天明, 曹社会, 张中岳. 西藏山南地区 6 种野生牧草营养价值评定. 草地学报, 2010, 18(3): 414-420.
- [41] 赵海卫, 郭柯, 乔鲜果, 刘长成. 青藏高原垫状驼绒藜高寒荒漠的生态地理特征. 地理研究, 2017, 36(12): 2441-2450.
- [42] 孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 张涛, 葛劲松, 李飞. 2000-2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1707-1716.
- [43] 王静, 郭锐, 蔡迪花, 邓振镛. 玛曲县草地退牧还草工程效果评价. 生态学报, 2009, 29(3): 1276-1284.
- [44] 李勤奋, 韩国栋, 敖特根, 卫志军. 划区轮牧中不同放牧利用时间对草地植被的影响. 生态学杂志, 2004, 23(2): 7-10.
- [45] 希吉日塔娜. 不同放牧制度和轮牧时间对短花针茅荒漠草原植被的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [46] 吴建波, 王小丹. 围封年限对藏北退化高寒草原植物群落特征和生物量的影响. 草地学报, 2017, 25(2): 261-266.