•研究报告•

基于MODIS-EVI评估三江源高寒草地的保护成效

宋瑞玲¹ 王 昊^{1*} 张 迪¹ 吕 植^{1,2} 朱子云^{1,2} 张 璐¹
刘炎林^{1,3} 才文公保² 吴 岚¹

1 (北京大学生命科学院自然保护与社会发展研究中心, 北京 100871)

2 (北京山水自然保护中心, 北京 100871)

3 (中国林业科学院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要: 三江源是我国生态保护的优先区域。自2005年以来, 国家投入大量资金在三江源实施了一系列生态保护措施和工程, 主要目的之一是保护和恢复草地生态系统。本文基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)增强型植被指数(EVI)数据和野外实测样方, 从草地生物量的角度评估了三江源工程的保护成效, 以期后续的保护措施提供参考。本文使用2000–2016年间在青藏高原248个样地的实测地上生物量数据和同期的EVI数据, 比较了通过EVI估算草地地上生物量的不同建模方法, 并从中选择表现最佳的乘幂模型反演了三江源高寒草地的地上生物量, 用趋势分析法得出了生物量的变化。结果显示, 2000–2016年间, 三江源高寒草地地上生物量没有发生显著变化的面积占62%, 显著增加的地方主要在西部和北部, 占22%, 显著减少的地方则主要在中部和南部, 占16%; 2000–2016年间, 草地地上生物量的年际波动较大, 但总趋势不显著; 在2012年后, 地上生物量表现出显著降低的趋势。三江源国家级自然保护区外部的草地地上生物量高于内部, 使用匹配法比较保护区内外草地地上生物量变化的情况, 结果发现在生态保护工程实施的2005–2012年间, 三江源保护区内的草地生物量没有显著增加。

关键词: 三江源; 草地退化; 成效评估; 自然保护区; 生物量; MODIS-EVI

Conservation outcomes assessment of Sanjiangyuan alpine grassland with MODIS-EVI approach

Ruiling Song¹, Hao Wang^{1*}, Di Zhang¹, Zhi Lü^{1,2}, Ziyun Zhu^{1,2}, Lu Zhang¹, Yanlin Liu^{1,3}, Caiwengongbao², Lan Wu¹

1 Center for Nature and Society, School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871

2 Shanshui Conservation Center, Beijing 100871

3 Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

Abstract: The Sanjiangyuan Region is a priority area for ecosystem conservation in China. Since 2005, the government has contributed significant funding to implement ecological conservation and restoration to protect and restore the grasslands. This study correlated aboveground biomass (AGB) data from 248 sites scattered across the Sanjiangyuan Region with MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) data from 2000 to 2016 and utilized four regression models to estimate AGB by EVI. Results showed that power-function model worked best for grasslands in the Sanjiangyuan Region. Trend analysis showed no significant trends in 62% of the area of Sanjiangyuan, with 22% of the area, mainly distributed in the western and northern regions, increasing significantly and 16% of the area, sporadically located in the central and southern regions, decreasing significantly from 2000 to 2016. In general, the AGB of the entire area showed no significant increases or decreases with high annual fluctuations since 2000. However, there have been significant decreases since 2012. The AGB inside of the Sanjiangyuan Nature Reserve was lower than that found outside, and didn't increase significantly during first-stage projects between 2005 and 2012, based on results from matching methods.

收稿日期: 2017-07-04; 接受日期: 2018-01-18

基金项目: 北京大学生物多样性快速调查项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wanghao@pku.edu.cn

Key words: Sanjiangyuan Region; rangelands degradation; effectiveness assessment; nature reserve; biomass; MODIS-EVI

三江源(89.4°–102.2° E, 31.5°–36.3° N)位于青海省南部、青藏高原的腹地,是长江、黄河、澜沧江的发源地,被称为“中华水塔”。三江源总面积约36.3万km²,占青海省总面积的50.4%。东西跨度约1,150 km,南北跨度约490 km,平均海拔在4,000 m以上。三江源也是青藏高原生物多样性最集中的地区(刘敏超等, 2005)和全球气候变化的敏感区(Su et al, 2015),是我国青藏高原生态安全屏障的重要组成部分。高寒草地是三江源分布最广泛、最主要的植被类型,约占总区域面积的65%,草地以高寒草甸和高寒草原为主,分别占76%和23%(徐新良等, 2008)。高寒草地是三江源生物多样性和生态系统服务功能、畜牧业生计和文化的基础,恢复草地生态是三江源保护工程的主要目标之一。

近几十年来,由于受到全球气候变暖和人类活动加剧的双重影响,该区域生态系统发生了严重退化(邵全琴和樊江文, 2012)。为保护三江源的生态环境,青海省在2000年建立了面积为15.2万km²的三江源自然保护区,2003年保护区升为国家级,2012年范围调整后面积变为14.8万km²。2005年,国务院批准实施《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》(以下简称《一期规划》),相应的工程称“一期工程”,总投资75亿元。建设内容包括生态保护与建设项目(49.2亿元)、农牧民生产生活设施项目(22.2亿元)和支撑项目(3.6亿元)等3大类22项,重点工程区为三江源国家级自然保护区,包括全部18个自然保护分区,面积占三江源地区总面积的42%。为加强三江源的保护力度,2011年国务院又批准实施《青海三江源国家生态保护综合试验区总体方案》,总投资近160.6亿元,范围扩展为整个综合试验区,即包括玉树、果洛、海南、黄南4个州的21个县和格尔木市的唐古拉山镇的总面积39.5万km²的区域,规划期限为2013–2020年(邵全琴等, 2016)。

为更有效地实施大规模的生态保护和建设工程,中国科学院地理科学与资源研究所牵头多家单位对一期工程的生态成效进行了监测和综合评估,基于十几个研究机构和政府相关部门连续多年(2005–2012)的监测,结合多种遥感数据的解译及空

间分析,评估了一期工程前后三江源的气候、植被、土壤、水文等多个方面的变化。评估认为,重点工程区内生态恢复程度好于非工程区,除了气候影响以外,工程的实施对促进植被恢复具有明显而积极的作用;然而,草地退化局面没有获得根本性扭转,未达到预期的“草地植被盖度平均提高20–40%”的目标(邵全琴和樊江文, 2012; 邵全琴等, 2016)。除此之外,相应的保护成效研究还较少。

本研究在对三江源草地实地调查的基础上,基于中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)的增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)数据反演生物量,并进行时间上的趋势分析,识别出草地生物量明显增加和减少的区域的空間分布和在工程期间的变化情况,以此评估三江源生态保护一期工程对草地保护的成效;用匹配法分析了重点工程区——三江源国家级自然保护区在工程期间对草地上生物量变化的作用情况,并识别出18个保护区分区对草地保护成效的贡献,为提高后续工程的有效性提供参考。同时在方法上,本研究基于MODIS的植被指数数据,尝试寻找一种既有说服力,技术和资金门槛又比较低的方法,这样既可用于长期监测三江源的草地变化,也可以推广应用到类似的评估中。

1 材料与方法

已有研究表明,基于遥感影像的植被指数可以用来评估区域空间尺度的草地质量的变化(Zhao et al, 2005; Zhang et al, 2007; 余晓等, 2011)。本研究使用的MODIS植被指数数据为MOD13Q1 V005,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d。与其他卫星遥感数据相比,MODIS数据的空间分辨率中等,常应用于中大尺度的区域评价;还具有时间分辨率高、数据免费公开、可以很好地反映植被的时空变化特征等优势,在草地遥感监测中的应用越来越广泛(Eisfelder, 2012; 除多等, 2013)。本研究分析时所用的EVI综合了MODIS数据集的EVI和PR(像元可信度, pixel reliability)数据,去掉了无数据、被冰雪或云覆盖的数据,相对更加准确。

2006–2016年, 本研究组在三江源各地广泛取样, 累积了248个样点(图1)的地上生物量实测数据, 每个样点3个重复样方, 总计744个样方。为了提高草地地上生物量遥感反演模型的估算效果, 采样点的选取考虑了植被分布的特点、地形等因素, 尽量保证采样数据的代表性和遥感数据的可读性。为了尽量减小植被指数与样方的空间尺度差异的影响, 尽量选择面积较大、比较均质的草地作为样点。取样时间为植被生长季盛期7–9月, 以获取当年植被的最大现存地上生物量。在采样点沿着某一方向设一条150 m的样带, 每隔50 m设一个小样方。样方大小视植被盖度而定, 盖度在50%以上的为0.5 m × 0.5 m, 盖度在50%以下为1 m × 1 m。用直接收获法将样方内植被地上部分齐地面剪下来, 装入信封, 做好标记。实验室内85℃烘干至恒重后称量干重。取每个样点3个样方的均值作为该点地上生物量干重的实测值。

根据每个样点所在地点和取样时间, 从MODIS数据集中提取该位点对应时相的EVI值, 分析地上生物量与EVI的相关关系, 并评估一元线性、二次多项式、指数、乘幂共4种回归模型。用回归方程的决定系数 R^2 表示模型拟合度, 越接近于1拟合度越高; 用地上生物量预测值和实测值之间的误差系数(公式(1))表示模型的精度, 误差系数越小越好。以拟合方程的决定系数最大而误差系数最小为最优评估模型(李聪等, 2007)。

误差系数(%)=(预测值–实测值)/实测值×100% (1)

依据最优反演模型, 用每年生长季6–9月共8个时相的EVI平均值, 估计每年生长季的平均地上生

物量。叠加中国科学院1:100万植被类型数据集(2001), 提取出其中分布最为广泛的高寒草甸和高寒草原的地上生物量, 作为评估高寒草地质量及变化的指标。

为评估工程效果, 我们分3个时期比较: 2000–2004年为工程前, 2005–2012年为工程期, 2013–2016年为工程后。为评估保护区在其中的作用, 我们基于三江源自然保护区提供的地图数字化了保护区的边界图层, 分别提取出每年保护区内外及各个保护分区的高寒草地地上生物量, 比较保护区内部和外部的异同。该操作在ArcGIS 10.2.1中完成。对每个时间段, 用一元线性回归的方法分析地上生物量和EVI的变化趋势(余晓等, 2011; 顾垒等, 2015)。

总体的保护成效是每个空间单元上保护成效的汇总, 要提高后续工程的成效以达成预期总目标, 可以通过GIS分析识别出负成效所在的区域、驱动力和相关的管理机构, 从而使得工程的实施更加科学有效。近年来, 在保护区成效评估中所使用的匹配法(matching method)可以有效地降低由空间位置、地理和人为干扰等因素带来的误差, 更准确地解析出保护区内外生态指标的差别(Joppa & Pfaff, 2011; 王伟等, 2016; 陈冰等, 2017)。匹配法的应用出现于20世纪40年代(Greenwood, 1945), 通过构建平衡的观测数据样本组来分析变量之间的因果关系, 从而估计待评估变量的处理效应(treatment effect) (Rubin, 1974; 温兴祥和杜在超, 2015)。本研究将保护区的有无作为待评估的变量, 结合三江源的自然地理情况, 选取海拔、坡度、草地类型

图1 高寒草甸和高寒草原野外实测地上生物量取样点的空间分布

Fig. 1 The locations of the aboveground biomass sample sites of the alpine meadow and alpine grassland

(高寒草原、高寒草甸)及2000年的人口密度(人/km²) 4个影响因子作为协变量,以一期工程(2005–2012)期间三江源草地地上生物量的年均变化率(即一元回归的系数)作为评估草地保护成效的指标。取样时对研究区域进行网格化处理,在保护区内每1.5 km × 1.5 km 网格内取中心点(58,657个),保护区外每1 km × 1 km 网格内取中心点(117,552个),使得对照组的样本量多于处理组,以得到更佳的匹配效果(Ho et al, 2007; Sekhon, 2011),将取样点分别与30 m分辨率DEM数据、草地类型数据及1 km²分辨率人口密度数据叠加,实现对上述4个协变量的信息提取。选用倾向评分匹配法(propensity score matching)将协变量转换为介于0–1之间的倾向分,然后从处理组(保护区内)和对照组(保护区外)中选择倾向分最为接近的匹配样本,比较匹配样本间的地上生物量变化之间的差异(公式(2), Rosenbaum & Rubin, 1983)。

处理组平均处理效应(ATT) =

$$E(Y_{i1} / T_i = 1) - E(Y_{i0} / T_i = 1) \tag{2}$$

其中, Y为因变量(2005–2012年间地上生物量的年均变化率), *i*为第*i*个样本, *T*为处理变量(保护区有无)。

为获得更准确的评估结果,在对照区域中排除了青藏公路以西包括可可西里国家级自然保护区在内的范围,以及在评估期间可能受到湿地扩张影响的近湖区域(即基于GLOBAL LAND30土地利用图,排除其中的水体和湿地,及其周边1 km范围内且2012年地上生物量< 10 g/m²的区域)。匹配分析时,规定参与匹配的协变量标准差不超过0.2 (*caliper* = 0.2),取样与变量获取在ArcGIS 10.2.1中完成,匹配及数据分析在R 3.3.1中完成。

2 结果

2.1 地上生物量反演模型

248个实测样地地上生物量为0.85–339.6 g/m²,

平均76.6 ± 70.15 g/m²。其中,高寒草甸的地上生物量为116.25 ± 76.02 g/m²,高寒草原的地上生物量为37.67 ± 32.16 g/m²。实测地上生物量与对应EVI之间的Pearson相关系数为0.779,达到了0.01水平(双侧)上的显著相关,即可以通过EVI来监测植被地上生物量的变化。

4种回归模型中(表1),乘幂函数的决定系数最大,而平均误差系数最小,为其中的最优模型。因此选择乘幂模型来估算三江源高寒草地地上生物量。当EVI < 0.3时,估计值误差较小;而三江源高寒草地的EVI绝大部分都低于0.3,用该模型能够得到较准确的地上生物量估计值。

2.2 地上生物量时空分布格局及保护区内外的比较

依据乘幂模型,基于每年6–9月共8个时相的EVI平均值估计得到每年生长季的高寒草地平均地上生物量。2016年三江源草地地上生物量总体上呈现从东南到西北逐渐减少的梯度分布。最高的在东部河南、泽库等县,平均140 g/m²;最低的在西北部可可西里,约20 g/m²;三江源高寒草地总体平均是60 g/m²。

2000–2016年,保护区内草地地上生物量平均为61.9 g/m²,保护区外为63.2 g/m²。每年保护区内的草地地上生物量都低于保护区外,二者的总体年际波动变化一致。总体来看,2000–2016年保护区内外的地上生物量的变化斜率都小于零,但趋势并不显著(图2)。以三江源一期工程的起止年为节点,在工程实施期间(2006–2012),保护区内外的草地地上生物量都显著高于工程实施之后(2013–2016) (保护区内*P* = 0.013,保护区外*P* = 0.023),而与工程实施之前的没有显著性差异。

2000–2016年,像素水平上EVI的趋势分析结果表明,三江源高寒草地地上生物量没有发生显著变化的面积占62%,显著增加的面积占22%,显著减少的面积占16%。无论保护区内外,60%以上草地

表1 据实测地上生物量与对应增强型植被指数(EVI)建立的4种回归模型(其中*X*为EVI, *Y*为地上生物量)
Table 1 The four regression models based on the measured aboveground biomass and the related enhanced vegetation index (EVI) (*X* = EVI; *Y* = aboveground biomass)

模型 Model	拟合方程 Function	决定系数 <i>R</i> ² Coefficients of determination	Sig.	平均误差系数 Mean error coefficients
线性 Linear	$Y = 376.571X - 17.075$	0.606	< 0.001	33.4%
二次 Quadratic	$Y = 163.385X^2 + 280.199X - 6.634$	0.609	< 0.001	43.0%
乘幂 Power	$Y = 383.897X^{1.3}$	0.675	< 0.001	24.3%
指数 Exponential	$Y = 11.977e^{5.653X}$	0.611	< 0.001	32.4%

图2 2000–2016年三江源自然保护区内外生长季平均地上生物量的波动变化

Fig. 2 The fluctuations of the average aboveground biomass of the growing season inside and outside of Sanjiangyuan Nature Reserve (2000–2016)

面积的EVI都没有显著变化(图3)。相比而言,保护区内EVI显著减少的面积比例为17.3%,大于保护区外(14.6%);而保护区内EVI显著增加的面积比例为19.6%,小于保护区外(23.8%)。综合上述结果,保护区外的草地地上生物量相对更高,草地生物量增加的面积也更多一些。

2.3 草地生物量发生明显变化的区域

由图3可知, EVI显著增加的区域主要在三江源的北部和西部,如可可西里保护区、玛多县、兴海县、同德县和泽库县的北部; EVI显著减少的区域主要在三江源中部和南部,如玉树州的囊谦县、杂多县、称多县、曲麻莱和治多的东部,以及果洛州的久治县、甘德县,特别是甘德与达日交界的地方。

各保护分区的变化情况各不相同。位于三江源北部的星星海、约古宗列、麦秀保护区, EVI显著增

加的面积比例较高,在25%以上, EVI显著降低的比例不到10%;相反,位于南部的保护分区,如江西、果宗木查保护区, EVI显著降低的比例较高,约30%。同时,本研究注意到,青藏公路以西没有实施工程的区域, EVI显著增加的比例较大,如可可西里自然保护区, 2000–2016年间地上生物量显著增加, EVI显著增加的比例达40%。

2.4 保护区成效的匹配法分析结果

将一期工程(2005–2012)期间三江源草地上生物量的年均变化率(即一元回归的系数)作为评估草地保护成效的指标,分别评估青藏公路以东三江源保护区、18个保护分区及核心区的保护成效。运用倾向评分匹配后,海拔、坡度、草地类型、人口密度这4个协变量在保护区内外的差距都缩小(表2),草地类型趋于一致(以高寒草甸为主,含部分高寒草原)。在此基础上的分析结果表明,实施一期工程后三江源保护区内草地地上生物量变化的平均处理效应(ATT)为-158.170 (表3),差异性检验P值为0.000。

在紧邻保护区的区域内,可能存在保护区的“溢出效应(neighborhood leakage)” (Andam et al, 2008),即保护区建立对周边自然资源可能产生的或正面或负面的额外影响,多发生在10 km范围内 (Clements et al, 2014; 陈冰等, 2017)。若将保护区外10 km缓冲带内样本去除以减少溢出效应,重复上述分析,得到ATT = -126.700 (表3),差异性检验P = 0.002;依据断点回归的设计思路,将保护边界内外

图3 2000–2016年三江源高寒草地生长季平均增强型植被指数(EVI)变化的空间分布

Fig. 3 The spatial pattern of the trend of average enhanced vegetation index (EVI) of the growing season from 2000 to 2016 in Sanjiangyuan Region

各5 km范围内的样点进行匹配分析,结果得 $ATT = -211.200$, $P = 0.000$ (表3)。两种分析结果与之前不考虑“溢出效应”的分析结果一致,表明一期工程实施期间(2005–2012年),三江源保护区内草地上生物量的年均增长率较保护区外更低。

对18个保护分区单独进行分析,保护区内草地上生物量年均增长率高于保护区外($ATT > 0$ 且差异性显著)的有果宗木查、索加–曲麻河、玛可河、年保玉则和通天河沿岸共5个保护分区(表4,图4),其余保护分区则无明显差异或增长率更低(表4,图4)。

3 讨论

本文通过2000–2016年的MODIS-EVI数据和实测地上生物量数据,建立了估计三江源高寒草地上生物量的模型。由于样方大小与EVI像元大小之间有较大差异,反演结果有一定的不确定性,本文并未将反演结果作为输入变量用于进一步的计算,同时也未去推算对误差有精细要求的问题。本文着重分析了区域尺度上地上生物量的空间分布格局和时间变化趋势。在空间分布上,地上生物量总体呈现从东南到西北逐渐减少的梯度分布,这与已有研究结果一致(Fan et al, 2010; 孙庆龄等, 2016),与

西高东低的地势,以及西北干冷东南温润的温度和湿度的梯度吻合。在时间序列上,这种纵向比较大降低了反演所带来的不确定性,可以用于对地上生物量变化趋势的判断和比较。基于MODIS-EVI的评估方法在技术和资金方面的门槛较低,可用于持续监测和快速评估区域尺度上草地的变化。

对草地生物量变化趋势的分析结果表明,2000–2016年三江源地上生物量总体有所减少,但变化趋势并不显著。肖桐等(2014)基于MODIS-NDVI的评估认为,2000–2011年三江源草地覆盖度总体增加,特别是黄河源区域;张继平等(2015)的评估结果表明,2000–2010年,三江源草地净初级生产力在波动中有所增加。邵全琴等(2016)和孙庆龄等(2016)的结果也都认为三江源草地覆盖度在2000–2013年总体呈增加趋势。这些研究中选择的评估时段不同,回归得到的地上生物量或植被指数等指标的年变化率会有所不同,但从其数据的波动情况看,均没有显著变化趋势。其中三江源北部和西部有较多区域的地上生物量显著增加,而中部和东部则有较多区域的地上生物量显著减少,地上生物量的增加很可能主要受气候暖湿化的影响(Lehnert et al, 2016; 邵全琴等, 2016)。气候数据表明,近十几年来,三江源气候持续变暖(Fan et al, 2010; 邵全琴等, 2016),北

表2 匹配后处理组(三江源保护区内)与对照组(保护区外)在4种协变量上的差距缩小
Table 2 The differences of the 4 covariates inside and outside of Sanjiangyuan Nature Reserve were smaller after matching

匹配前后 Before & after matching (BM & AM)	统计值 Statistics	海拔 Elevation (m)	坡度 Slope (°)	草地类型(高寒草甸/高寒草原) Grassland type (Alpine meadow/ Alpine steppe)	人口密度(人/km ²) Population density (per km ²)
匹配前 BM	均值 Mean (内/外 Inside/Outside)	4,567.200 /4,414.500	10.911/12.770	1.129/1.092	0.799/2.782
匹配后 AM	均值 Mean (内/外 Inside/Outside)	4,566.700 /4,572.500	10.914/11.085	1.129/1.120	0.799/1.752
匹配前 BM	标准化均数差 Standardized mean difference	49.409	−19.899	11.040	−9.659
匹配后 AM	标准化均数差 Standardized mean difference	−1.894	−1.833	2.453	−4.639

表3 三江源保护区内外地上生物量年均变化率的处理组平均处理效应(ATT)和配对t检验结果
Table 3 Results of the average treatment effect on the treated (ATT) and paired-samples t-test of aboveground biomass change rate inside and outside of Sanjiangyuan Nature Reserve (NR)

序号 No.	评估对象(处理组/对照组) Items (treatment /control)	ATT	t	P-value
1	保护区内/外 Inside/outside of NR	−158.170	−4.7394	0.000**
2	保护区内/外(去除10 km 缓冲区) Inside/outside (without 10 km buffer) of NR	−126.700	−3.030	0.002**
3	保护区内/外5 km缓冲区 5 km buffer inside and outside the border of NR	−211.200	−5.755	0.000**
4	保护区核心区 Core areas of NR	−185.410	−5.668	0.000**

** $P < 0.01$.

表4 18个保护分区的草地上生物量年均变化率的处理组平均处理效应(ATT)和配对t检验结果
Table 4 Results of the average treatment effect on the treated (ATT) of aboveground biomass change rate inside and outside of 18 sub-reserves

序号 No.	保护分区 Sub-reserves	ATT	t	P-value
1	格拉丹东 Kelha Dandong	-119.880	-0.777	0.436
2	麦秀 Manshuk	-139.200	-0.770	0.442
3	果宗木查 Gorzong Mecha	295.070	8.240	0.000**
4	当曲 Dangchu	-259.300	-9.970	0.000**
5	索加-曲麻河 Suogya-Chemar River	94.364	3.438	0.001**
6	多可河 Dokhuk River	-198.440	-0.600	0.548
7	玛可河 Makhuk River	587.030	3.740	0.000**
8	年保玉则 Nyanpo Yetse	540.270	5.380	0.000**
9	约古宗列 Yeger Zongne	-309.160	-7.644	0.000**
10	扎陵湖-鄂陵湖 Gyaring Lake-Ngoring Lake	-777.280	-19.414	0.000**
11	星星海 Xingxing Lake	-1695.200	-29.040	0.000**
12	阿尼玛卿 Anye Maching	-584.970	-8.290	0.000**
13	中铁-军功 Zhongtie-Jungong	-612.480	-7.840	0.000**
14	通天河沿岸 Druchu Riverbank	609.100	8.250	0.000**
15	东仲 Dorzong	-568.930	-4.140	0.000**
16	江西 Skyoshi	-966.400	-5.270	0.000**
17	白扎 Drultsa	-285.800	-4.670	0.000**
18	昂赛 Namser	-755.750	-5.510	0.000**

** P < 0.01.

图4 一期工程期间(2005–2012)三江源生长季平均地上生物量变化的空间分布及各保护分区成效示意图
Fig. 4 The spatial pattern of the trend of average biomass of growing season during the first-stage projects period (2005–2012) in Sanjiangyuan and the protection effectiveness in each sub-reserve

部和西部的降水有所增加(王军邦等, 2009; Long et al, 2010; Lehnert et al, 2016; 孙庆龄等, 2016), 植被指数的增加与气温和降水有更高的正相关性(孙庆龄等, 2016)。而三江源草地生物量显著增加的西部和北部区域大部分是在工程区(保护区)外, 保护区

内的草地变化并不显著(图3)。

使用倾向评分匹配法降低地形、人口等变量可能带来的评估偏差后, 保护区内的草地地上生物量与保护区外相比并未显示更为积极的变化, 区内的平均处理效应为负值, 显示保护区内草地变好的程

度较保护区外更低。推测可能的情况包括: 在生物量变化速度上, 区内比区外的地上生物量降低速度更快, 或增加速度更慢; 在生物量变化的面积上, 区内生物量减少的区域面积更大, 或生物量增加的区域面积更小。保护区未显示出正效应, 也可能与保护工程的实施未严格参照保护区边界执行有关, 工程中资金占比最大的项目, 如退牧还草工程(42%)等都是以行政单元(乡镇)来执行的; 实地考察时, 在有保护区的行政单元中, 也并未发现保护行动力度有区内和区外的差异。

本研究以从MODIS-EVI估算出的生物量增加作为保护有成效的指标, 评估方法快捷, 能够说明一定的问题。然而仅凭生物量增加这一个指标, 或不足以说明草地质量和生物多样性的改善, 灌木入侵、缺乏饲用价值的植物增加、退化指示种大量繁殖等都会导致生物量增加但草地质量下降的情况, 因此需要进一步增加物种组成、群落结构分析等内容。

本文结果与邵全琴等(2016)对三江源保护一期工程评估所得出的草地生物量的分布及其变化格局基本一致, 即草地生物量减少的趋势并未发生逆转, 但与其认为“生态保护工程对草地生物量的增加起了正面作用”的结论不尽相同, 本研究未发现保护区内因工程实施而显示出正面效应。此外, 有研究认为保护工程中的部分措施如围栏封育、毒杀鼠兔等对恢复退化草地和保护生物多样性没有积极作用(Harris, 2010; Wu & Wang, 2017)。三江源地区生态环境严酷、植被脆弱, 对气候变化非常敏感。为遏制草地退化和增强应对气候变化的抵抗力, 一方面需要进一步增加保护关注和投资力度, 另一方面则需要提高保护行动之间的协调和措施的成效。建议针对目前正在实施的《青海三江源国家生态保护综合试验区总体方案》, 进行更细致的成效评估, 并基于评估结果重新审阅工程中有争议的保护行动, 以实现保护三江源的初衷。

致谢: 本研究在研究思路上和野外调查中得到了George Beals Schaller 博士、顾垒博士和山水自然保护中心的工作人员和十几位研修生的帮助; 使用的MODIS-EVI 数据来自美国大地调查局(USGS)地球资源观察和科学中心(EROS)的陆地科学研究小组(LPDAAC), 特此致谢。

参考文献

- Andam KS, Ferraro PJ, Pfaff A, Sanchez-Azofeifa GA, Robalino JA (2008) Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 16089–16094.
- Chen B, Liu FZ, Zhang YB, Du JH, Wang W, Li JS (2017) Assessment of forest conservation in the Cangshan Nature Reserve based on propensity score matching. *Biodiversity Science*, 25, 999–1007. (in Chinese with English abstract) [陈冰, 刘方正, 张玉波, 杜金鸿, 王伟, 李俊生 (2017) 基于倾向评分配比法评估苍山自然保护区的森林保护成效. *生物多样性*, 25, 999–1007.]
- Chu D, Deji YZ, Ji QM, Tang H (2013) Aboveground biomass estimate methods for typical grassland types in the Tibetan Plateau. *Remote Sensing for Land and Resources*, 25(3), 43–50. (in Chinese with English abstract) [除多, 德吉央宗, 姬秋梅, 唐红 (2013) 西藏高原典型草地地上生物量遥感估算. *国土资源遥感*, 25(3), 43–50.]
- Clements T, Suon S, Wilkie DS, Milner-Gulland EJ (2014) Impacts of protected areas on local livelihoods in Cambodia. *World Development*, 64, S125–S134.
- Eisfelder C, Kuenzer C, Dech S (2012) Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 2937–2984.
- Fan JW, Shao QQ, Liu JY, Wang JB, Harris W, Chen ZQ, Zhong HP, Xu XL, Liu RG (2010) Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 170, 571–584.
- Gu L, Wen C, Luo M, Wang H, Lü Z (2015) A rapid approach for assessing the conservation effectiveness of the most concerned endangered species in China. *Biodiversity Science*, 23, 583–590. (in Chinese with English abstract) [顾垒, 闻丞, 罗玫, 王昊, 吕植 (2015) 中国最受关注濒危物种保护现状快速评价的新方法探讨. *生物多样性*, 23, 583–590.]
- Greenwood E (1945) *Experimental Sociology: A Study in Method*. King's Crown Press, New York.
- Harris RB (2010) Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau: A review of the evidence of its magnitude and causes. *Journal of Arid Environments*, 74, 1–12.
- Ho DE, Imai K, King G, Stuart EA (2007) Matching as non-parametric preprocessing for reducing model dependence in parametric causal inference. *Political analysis*, 15, 199–236.
- Joppa LN, Pfaff A (2011) Global protected area impacts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 1633–1638.
- Lehnert LW, Wesche K, Trachte K, Reudenbach C, Bendix J (2016) Climate variability rather than overstocking causes recent large scale cover changes of Tibetan pastures. *Scientific Reports*, 6, 24367.
- Li C, Xiao JD, Cao ZZ, Shi Y, Yang ZH (2007) Application of MODIS data in remote sensing estimation of prairie biomass in different seasons. *Arid Zone Research*, 24, 386–391. (in

- Chinese with English abstract) [李聪, 肖继东, 曹占洲, 石玉, 杨志华 (2007) 应用MODIS数据估算草地生物量. 干旱区研究, 24, 386–391.]
- Liu MC, Li DQ, Wen YM (2005) The protection of biological diversity in the Sanjiangyuan Nature Reserve. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 19(4), 49–53. (in Chinese with English abstract) [刘敏超, 李迪强, 温琰茂 (2005) 论三江源自然保护区生物多样性保护. 干旱区资源与环境, 19(4), 49–53.]
- Long Y, Zhou L, Liu W, Zhou HK (2010) Using remote sensing and GIS technologies to estimate grass yield and livestock carrying capacity of alpine grasslands in Golog Prefecture, China. *Pedosphere*, 20, 342–351.
- Rubin DB (1974) Estimating causal effects of treatment in randomized and nonrandomized studies. *Journal of Educational Psychology*, 66, 688–701.
- Rosenbaum PR, Rubin DB (1983) The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, 70, 41–55.
- Sekhon JS (2011) Multivariate and propensity score matching software with automated balance optimization: The matching package for R. *Journal of Statistical Software*, 42(7), 52.
- Shao QQ, Fan JW (2012) Integrated Monitoring and Assessment of Ecosystem in Sanjiangyuan Region. Science Press, Beijing. (in Chinese) [邵全琴, 樊江文 (2012) 三江源区生态系统综合监测与评估. 科学出版社, 北京.]
- Shao QQ, Fan JW, Liu JY, Huang L, Cao W, Xu XL, Ge JS, Wu D, Li ZQ, Gong GL, Nie XM, He T, Wang LY, Bing LF, Li QJ, Chen ZQ, Zhang GQ, Zhang LX, Yang YS, Yang F, Zhou WF, Liu LL, Qi YG, Zhao GS, Li YZ (2016) Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan Region. *Acta Geographica Sinica*, 71, 3–20. (in Chinese with English abstract) [邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲 (2016) 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. 地理学报, 71, 3–20.]
- Su J, Aryal A, Nan Z, Ji W (2015) Climate change-induced range expansion of a subterranean rodent: Implications for rangeland management in Qinghai-Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 10, e0138969.
- Sun QL, Li BL, Xu LL, Zhang T, Ge JS, Li F (2016) Analysis of NDVI change trend and its impact factors in the Three-River Headwater Region from 2000 to 2013. *Journal of Geoinformation Science*, 18, 1707–1716. (in Chinese with English abstract) [孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 张涛, 葛劲松, 李飞 (2016) 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, 18, 1707–1716.]
- Wang W, Xin LJ, Du JH, Chen B, Liu FZ, Zhang LB, Li JS (2016) Evaluating conservation effectiveness of protected areas: Advances and new perspectives. *Biodiversity Science*, 24, 1177–1188. (in Chinese with English abstract) [王伟, 辛利娟, 杜金鸿, 陈冰, 刘方正, 张立博, 李俊生 (2016) 自然保护区保护成效评估: 进展与展望. 生物多样性, 24, 1177–1188.]
- Wang JB, Liu JY, Shao QQ, Liu RG, Fan JW, Chen ZQ (2009) Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988–2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the “Three-River Headwaters” Region of Qinghai Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 254–269. (in Chinese with English abstract) [王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 刘荣高, 樊江文, 陈卓奇 (2009) 基于遥感-过程耦合模型的1988–2004年青海三江源区净初级生产力模拟. 植物生态学报, 33, 254–269.]
- Wen XX, Du ZC (2015) Survey on matching method: Theory and applications. *Statistical Research*, 32(4), 104–112. (in Chinese with English abstract) [温兴祥, 杜在超 (2015) 匹配法综述: 方法与应用. 统计研究, 32(4), 104–112.]
- Wu L, Wang H (2017) Poisoning the pika: Must protection of grasslands be at the expense of biodiversity? *Science China Life Science*, 60, 545–547.
- Xiao T, Wang CZ, Feng M, Qu R, Zhai J (2014) Dynamic characteristic of vegetation coverage in the Three-River Source Region from 2000 to 2011. *Acta Agrestia Sinica*, 22(1), 39–45. (in Chinese with English abstract) [肖桐, 王昌佐, 冯敏, 屈冉, 翟俊 (2014) 2000–2011年青海三江源地区草地覆盖度的动态变化特征. 草地学报, 22(1), 39–45.]
- Xu XL, Liu JY, Shao QQ, Fan JW (2008) The dynamic changes of ecosystem spatial pattern and structure in the Three-River Headwaters region in Qinghai Province during recent 30 years. *Geographical Research*, 27, 829–838, 974. (in Chinese with English abstract) [徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 樊江文 (2008) 30年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化. 地理研究, 27, 829–838, 974.]
- Yu X, Wang H, Li C, Wang YC (2011) Assessment of vegetation cover change in the Argun basin based on MODIS/EVI. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 9(2), 110–115. (in Chinese with English abstract) [余晓, 王昊, 李翀, 王义成 (2011) 基于MODIS/EVI的额尔古纳河流域植被变化分析. 中国水利水电科学研究院学报, 9(2), 110–115.]
- Zhang JP, Liu CL, Hao HG, Sun L, Qiao Q, Wang H, Ning YC (2015) Spatial-temporal change of carbon storage and carbon sink of grassland ecosystem in the Three-River Headwaters Region based on MODIS GPP/NPP data. *Ecology and Environmental Sciences*, 24, 8–13. (in Chinese with English abstract) [张继平, 刘春兰, 郝海广, 孙莉, 乔青, 王辉, 宁杨翠 (2015) 基于MODIS GPP/NPP数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究. 生态环境学报, 24, 8–13.]
- Zhang L, Wylie B, Loveland T, Fosnight E, Tieszen LL, Ji L, Gilmanov T (2007) Evaluation and comparison of gross primary production estimates for the Northern Great Plains Grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 106, 173–189.
- Zhao M, Heinsch FA, Nemani RR, Running SW (2005) Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 95, 164–176.

(责任编辑: 白永飞 责任编辑: 黄祥忠)