

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0092

陆荫, 杨淑霞, 李晓红. 甘南州高寒天然草地生长状况遥感监测. 草业科学, 2021, 38(1): 32-43.

LU Y, YANG S X, LI X H. Monitoring of grassland herbage accumulation by using remote sensing in Gannan Prefecture. Pratacultural Science, 2021, 38(1): 32-43.

甘南州高寒天然草地生长状况遥感监测

陆 荫, 杨淑霞, 李晓红

(甘肃省环境监测中心站, 甘肃兰州 730020)

摘要: 以甘南州高寒天然草地为研究对象, 利用 2016–2019 年草地地上生物量实测数据和 MOD13Q1 植被指数产品, 构建了甘南州草地地上生物量遥感反演模型, 分析了近 20 年 (2000–2019 年) 甘南州高寒天然草地地上生物量的时空分布特征。结果表明: 1) MODIS EVI 植被指数适宜于甘南州高寒天然草地地上生物量变化监测研究, 模型决定系数 $R^2 = 0.5249$, 均方根误差 $RMSE = 527.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2) 20 年间甘南州高寒草甸和山地草甸的地上生物量均呈增加趋势, 而沼泽类草地地上生物量呈减少趋势; 3) 近 20 年来甘南州草地呈现出整体恢复、局部恶化的趋势, 全州 66.04% 的草地呈稳定或恢复趋势, 33.96% 的草地地上生物量呈减少趋势, 其中 18.08% 的草地呈持续性恶化趋势。研究结果为甘南州草地植被动态监测和高寒草地退化修复提供了数据支持。

关键词: 草地地上生物量; 植被指数; 变化趋势; 高寒天然草地; 甘南州; 时空分布; 遥感反演模型

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2021)01-0032-12

Monitoring of grassland herbage accumulation by using remote sensing in Gannan Prefecture

LU Yin, YANG Shuxia, LI Xiaohong

(Gansu Province Environmental Monitoring Center, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: This study focuses on grasslands in the Gannan Prefecture, we used the measured data of aboveground grassland biomass (AGB) and the MOD13Q1 vegetation index product from 2016 to 2019, to construct a remote sensing inversion model of grassland AGB, and further analyzed the characteristics of temporal and spatial changes in the grassland AGB in the last 20 years (from 2000 to 2019). The results showed that: 1) Our moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index (MODIS EVI) is suitable for grassland biomass inversion ($R^2 = 0.5249$, $RMSE = 527.9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). 2) In the past 20 years, the alpine meadows and mountain meadows showed an increasing trend, while swamp AGB decreased. 3) In the past 20 years, the grasslands in Gannan Prefecture showed a trend towards partial deterioration; the overall trend for grassland vegetation in Gannan Prefecture was positive, 66.04% of the grassland showed a trend of stabilization or recovery, 33.96% of the grassland AGB decreased, and 18.08% of the grasslands showed a continuous deterioration trend. The study results provide data support for Gannan Prefecture grassland vegetation dynamic monitoring and alpine grassland degradation restoration.

Keywords: aboveground biomass; vegetation index; variation trend; alpine natural grassland; Gannan Prefecture; spatial and temporal distribution; remote sensing inversion model

Corresponding author: YANG Shuxia E-mail: 289865617@qq.com

收稿日期: 2020-03-04 接受日期: 2020-05-06

第一作者: 陆荫 (1973-), 女, 河南温县人, 高级工程师, 本科, 研究方向为生态遥感监测与评估。E-mail: 347228391@qq.com

通信作者: 杨淑霞 (1983-), 女, 甘肃宁县人, 工程师, 博士, 研究方向为生态遥感监测与评估。E-mail: 289865617@qq.com

草地地上生物量是表征土壤肥力和调节气候的参考指标,在草地生态系统的物质循环和能量流动过程中起着重要的作用^[1]。关于草地地上生物量的研究对于解释草地植被变化、制定适宜的草地载畜量、分析及评价区域生态环境具有重要的意义^[2-3]。近年来,遥感技术在草地生态系统变化监测中被广泛应用^[4]。马青青等^[5]结合 2016 年的实测数据和同时期的 MODIS 影像资料,建立草地地上生物量和 NDVI (normalized difference vegetation index) 之间的回归模型,结果发现,6 月-9 月调查点 NDVI 和地上生物量之间相关性较好,随着 NDVI 的增加,生物量呈上升趋势,且 9 月的拟合结果 ($R^2 = 0.51$) 达到极显著水平。其他学者利用 Agricultural Digital Camera (ADC) 便携式农业多光谱相机数据,构建了研究区草地地上生物量的模型,分析了草地地上生物量的分布特征^[6-7]。曾纳等^[8]、Yang 等^[9]结合遥感植被指数、气象观测资料、地面实测数据构建了 Back Propagation (BP) 人工神经网络模型,表明人工神经网络方法在草地地上生物量的模拟方面具有很好的优势。张媛等^[10]基于神经网络训练了玛纳斯河流域植被地上生物量模型,结果表明,Extreme Learning Machine (ELM) 反演植被地上生物量,可以获得较高的模型精度, R^2 达 0.89。Zeng 等^[11]的研究基于随机森林的方法,结合地面实测数据与遥感植被指数、气象数据和地形数据,构建了青藏高原的草地地上生物量模型,结果表明,该模型可以很好地反映草地地上生物量的变化。除此之外,相关学者就环境因子对草地地上生物量的影响进行了研究。王紫等^[12]对半干旱地区的甘肃省天祝县抓喜秀龙乡的东祁连山高寒草地地上生物量的时空变化进行研究,结果表明,受坡向和坡位导致的水热条件和土层厚度等环境因子影响,高寒地区草地地上生物量的时空变化明显又复杂。赵晓英^[13]利用锡林浩特国家基准站、牧业气象站和牧业气象试验站 2004-2018 年牧草生长季气象资料和生态观测资料,分析了各气象因子对锡林郭勒典型草原地上生物量在全生育期的潜在影响。

甘肃省甘南州位于青藏高原东缘,是气候敏感区和生态脆弱区,其草地类型主要以高寒草甸和山地草甸为主,甘南州牧区特殊的地理环境使其具有比较典型的高寒天然草地特征。在特殊的地理、环

境和气候条件下,甘南州草地变化趋势如何?不同区域草地变化趋势是否一致?基于以上原因,本研究以甘南州为研究区,结合地面实测数据,探讨了 MODIS 植被指数与草地地上生物量之间的关系,探索了甘南州近 20 年 (2000-2019 年) 的草地地上生物量空间分布状况,对甘南州草地地上生物量的空间分布格局和变化趋势进行分析,以为甘南州草地植被动态监测和高寒草地退化修复提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘南州地处青藏高原东部、黄土高原和陇南山地的过渡地带,不仅具备青藏高原的气候敏感性,还属于生态脆弱带,是黄河、长江上游的重要水源涵养区及生物多样性保护区^[14]。甘南州位于 $33^{\circ}06' - 36^{\circ}10' N$, $100^{\circ}46' - 104^{\circ}44' E$, 平均海拔 3 000 m 以上。甘南州境内山峦重迭,沟谷纵横,地形错综复杂。西南部的积石山系、西北部的西倾山系与南部的岷山-迭山山系形成州境地貌的主要构架。甘南藏族自治州具有大陆性季风气候的特点,其光照充裕,利用率低;热量不足,垂直差异大;降水较多,地理分布差异显著。草地调查结果显示,甘南草地总面积为 $2.603 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占甘南州总面积的 67.64%^[15]。

1.2 研究数据

1.2.1 地面实测数据

本研究所用的草地外业调查数据来自 2016-2018 年 7 月-8 月盛草期的实地观测调查。样区面积设置为长 \times 宽 ($3 \text{ km} \times 2 \text{ km}$), 在此样区内设置 3~5 个样方,其大小为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。样地调查内容主要记录样地的草地类型、地形、坡度、坡向、物种数、叶面积指数、草地植被覆盖度、草层高度、地上生物量鲜重,以及于 65°C 烘箱中烘干 48 h 后测量的干物质产量等特征指标。2016-2018 年甘南州草地监测的 20 个点位均为定点监测,其中合作市 2 个点、碌曲县 5 个点、玛曲县 7 个点、夏河县 4 个点及迭部县 2 个点。2019 年的 20 个草地调查监测点覆盖甘南州 7 县 1 市 (图 1)。

1.2.2 MODIS 植被指数数据

本研究所用的遥感数据为 MOD13Q1 产品,包括 NDVI 和 EVI (enhanced vegetation index), 时间分

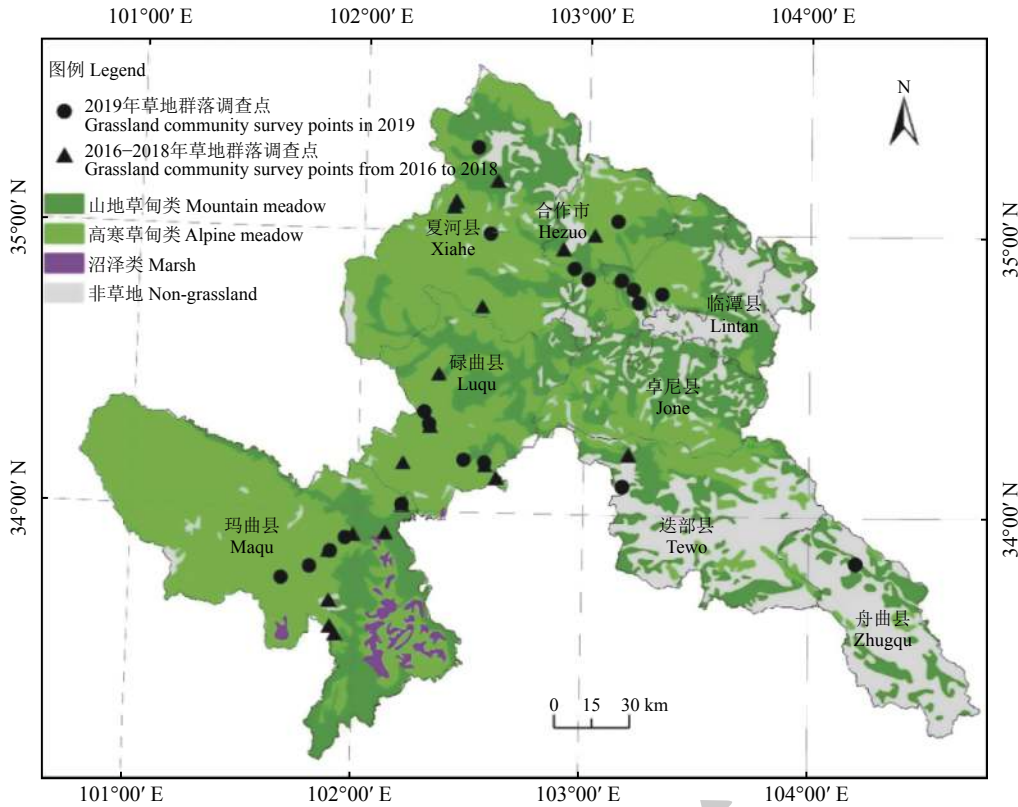


图 1 甘南州草地群落调查点分布图

Figure 1 The distribution map of grassland community survey points in the Gannan Prefecture

分辨率为 16 d, 空间分辨率为 250 m。本研究所用的空间位置在全球正弦投影系统中编号为 h26v06 的影像, 版本为 V006, 数据格式为 EOS-HDF, 时间序列为 2000–2019 年生长季 (5 月 – 10 月)。使用 MRT (MODIS Reprojection Tools) 和 ArcGIS (V10.5) 软件, 对下载的 MOD13Q1 进行格式转换、拼接和转投影等预处理。

1.2.3 气象数据

气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的 2000–2018 年 (由于气象数据滞后, 未获取到 2019 年的气象数据) 甘南州玛曲和合作气象站的月、日值数据资料。

1.3 研究方法

1.3.1 草地地上生物量遥感监测模型的构建与精度评价

利用 SPSS V16.0 软件的回归分析方法, 统计分析 NDVI 和 EVI 与地面实测数据之间的相关关系, 分别构建基于甘南州草地地上生物量与 MODIS 植被指数之间的线性、乘幂、指数和对数 4 种模型, 分别利用均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R^2) 比较

分析不同模型的模型精度。

1.3.2 甘南州草地地上生物量时空动态特征

利用适宜于甘南州草地地上生物量最优模型和 MODIS EVI, 结合草地类型图和行政区划图, 分析了甘南州 2000–2019 年生长季最大草地地上生物量多年平均值及甘南州不同草地类型的年际变化趋势。

1.3.3 草地地上生物量变化动态分析

采用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 趋势检验, 研究甘南州草地地上生物量的时空变化动态。采用 Hurst 指数对甘南州草地地上生物量变化趋势的可持续性进行分析。具体算法参见文献 [16-24]。

2 结果

2.1 草地地上生物量遥感监测模型的构建

基于 MODIS 植被指数产品 (MOD13Q1 V006) 数据, 提取与观测时间、位置相对应的 16 d NDVI、EVI 植被指数, 结合 2016–2019 年甘南州草地生物

量监测数据, 采用最小二乘回归的方法分别构建了甘南州草地地上生物量与 NDVI 和 EVI 植被指数之间的线性、指数、对数和乘幂函数模型 (表 1), 并基于模型 R^2 、 $RMSE$ 分析不同模型的模拟精度。通过对比发现, 基于 EVI 的指数模型反演精度最高, 误

差最小, 确定为甘南州草地地上生物量遥感反演最优模型 (图 2), 其模型为 $y = 299.82e^{3.386 2x}$, 其中 y 为甘南州草地地上生物量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), x 为 MODIS EVI 植被指数, 模型决定系数 $R^2 = 0.524 9$, $RMSE = 527.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 1 甘南州草地地上生物量反演模型精度评价

Table 1 Accuracy assessment of the grassland aboveground biomass inversion model in the Gannan Prefecture

模型形式 Model type	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)		增强型植被指数 Enhanced vegetation index (EVI)	
	R^2	$RMSE/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	R^2	$RMSE/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$
线性 Linear	0.274 0	671.3	0.513 2	549.9
指数 Exponential	0.340 9	676.0	0.524 9	527.9
乘幂 Power	0.339 0	677.3	0.499 1	549.4
对数 Logarithms	0.266 8	674.6	0.470 8	581.8

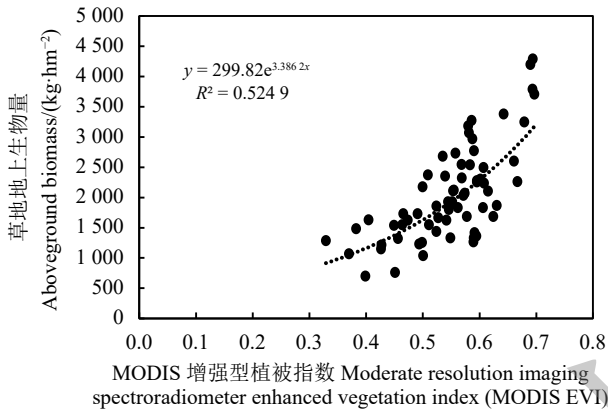


图 2 甘南州草地地上生物量遥感反演模型

Figure 2 The grassland aboveground biomass remote sensing inversion model of the Gannan Prefecture

2.2 甘南州草地地上生物量年际变化趋势

基于上述确定的甘南州草地地上生物量最优遥感反演模型和 MOD13Q1 植被指数产品, 反演得到甘南州近 20 年 (2000–2019 年) 草地地上生物量空间分布数据库 (图 3)。对甘南州草地地上生物量的动态变化进行分析, 结果表明, 高寒草甸和山地草甸草地的地上生物量在 20 年间均表现出增加趋势, 但不显著 ($P > 0.05$), 而沼泽类的地上生物量呈减少趋势, 就甘南州草地地上生物量而言, 整体呈增加趋势 (图 4)。由此可见, 20 年间甘南州生态环境整体呈改善趋势, 甘南州草地地上生物量介于 $1\ 607.51 \sim 2\ 139.72 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从图 3 可以看出, 地上生物量高值区主要分布在玛曲县、碌曲县和夏河县西南部,

迭部县和舟曲县地上生物量值较低。甘南州不同草地类型地上生物量年际变化动态图 (图 4) 表明, 高寒草甸地上生物量最大, 其次是山地草甸, 沼泽类草地的地上生物量最小。

就各县 (市) 而言, 玛曲县平均草地地上生物量最大, 为 $2\ 021.66 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 迭部县平均草地地上生物量最小, 为 $1\ 401.21 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 合作市、临潭县、夏河县、舟曲县的草地地上生物量空间变异较大, 而迭部县、玛曲县和卓尼县的草地地上生物量空间变异较小。20 年变化趋势分析显示, 舟曲县草地地上生物量增加趋势最明显, 其次是夏河县、合作市、临潭县、碌曲县、卓尼县, 玛曲县草地地上生物量增加幅度较小, 而迭部县草地地上生物量呈减少趋势 (表 2)。

2.3 甘南州草地地上生物量变化趋势分析

基于 2000–2019 年生长季 MODIS EVI 数据, 结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验以及 Hurst 指数方法, 分析了近 20 年甘南州草地地上生物量变化趋势及变化特征的空间分布特征。结果表明, 甘南州草地主要以稳定和恢复为主, 全州 20 年间 12.35% 的草地保持稳定, 33.95% 的草地呈现恶化趋势, 53.70% 的草地呈现恢复趋势 (表 3)。高寒草甸、山地草甸和沼泽类轻微恢复的草地面积比例分别为 44.34%、43.52% 和 31.07%, 明显恢复的草地面积比例分别为 8.70%、11.99% 和 6.10%, 恶化的草地面积比例分别为 34.36%、32.74% 和 46.20%。除迭部县外, 其他县 (市) 草地均以稳定和恢复为

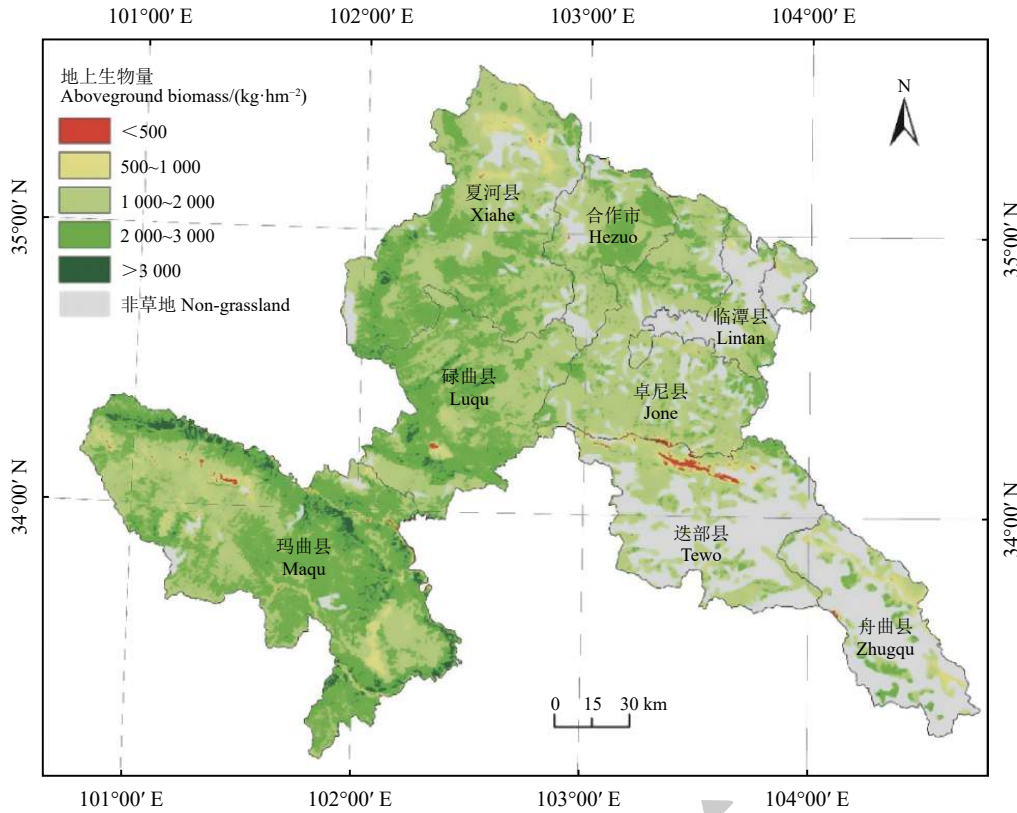


图3 甘南州2000–2019年草地地上生物量空间分布图

Figure 3 Spatial distribution map of the grassland aboveground biomass from 2000 to 2019 in the Gannan Prefecture

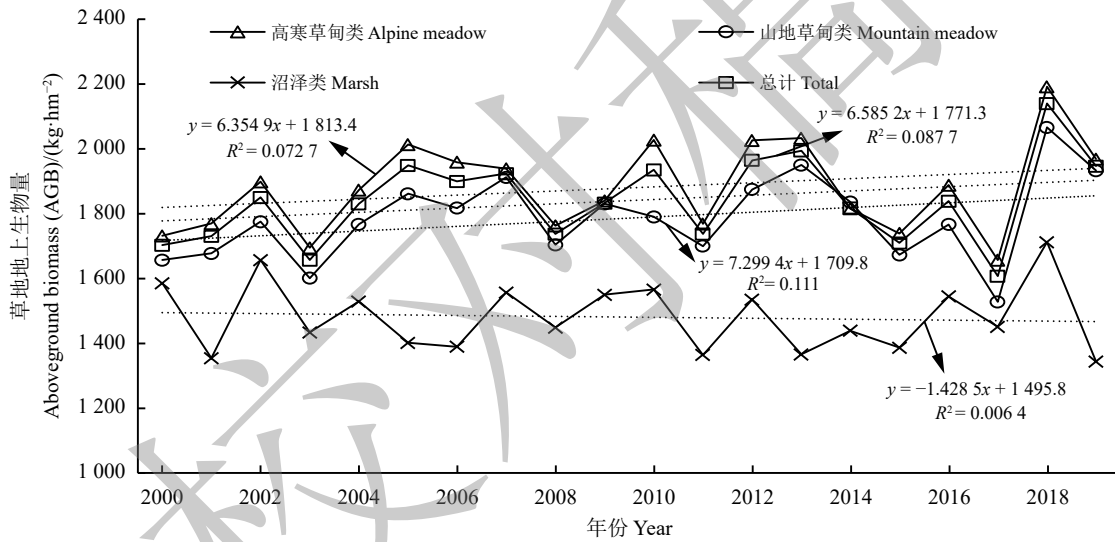


图4 甘南州不同草地类型地上生物量年际变化动态

Figure 4 Dynamics of yearly variation in aboveground biomass of different types of grasslands in the Gannan Prefecture

主, 其中夏河县草地呈现稳定和恢复状态的面积比例最大, 达 83.90%, 其次依次是临潭县、舟曲县、合作市、碌曲县、卓尼县和玛曲县。就空间分布特征而言, 甘南州草地变化空间异质性较高, 20 年来呈恶化趋势的草地大多分布在玛曲县、卓尼县和碌曲县

局部区域, 夏河县和合作市主要以恢复为主 (图 5)。

草地上生物量变化特征分析结果表明 (表 4), 甘南州 44.39% 的草地变化趋势不具有可持续性, 18.07% 的草地呈持续性恶化趋势, 而 33.08% 的草地呈持续性恢复趋势。山地草甸和高寒草甸变化趋

表 2 甘南州各县市草地地上生物量统计
Table 2 Statistics of grassland aboveground biomass of different counties (cities) in the Gannan Prefecture

行政区划 Administrative division	平均值 Average/(kg·hm ⁻²)	标准差 Standard deviation/(kg·hm ⁻²)	变异系数 Coefficient of variation/%	年变化率 Yearly variation/[kg·(hm ² ·a) ⁻¹]
迭部县 Tewo	1 401.21	80.45	5.74	-4.02
合作市 Hezuo	1 823.11	209.23	11.48	14.66
临潭县 Lintan	1 627.30	158.97	9.77	14.17
碌曲县 Luqu	1 990.87	175.77	8.83	7.87
玛曲县 Maqu	2 021.66	143.89	7.12	0.65
夏河县 Xiahe	1 802.26	186.87	10.37	16.23
舟曲县 Zhugqu	1 496.11	179.51	12.00	18.84
卓尼县 Jone	1 646.11	105.83	6.43	3.34
甘南州 Gannan	1 840.44	131.55	7.15	6.59

表 3 2000–2019 年甘南州各类草地变化趋势的面积比例
Table 3 Area rate of different grassland change trends from 2000 to 2019 in the Gannan Prefecture

行政区划 Administrative division	草地类型 Grassland type	明显恶化 Significant deterioration	轻微恶化 Mild deterioration	稳定 Stability	轻微恢复 Mild restoration	明显恢复 Significant restoration
迭部县 Tewo	山地草甸 Mountain meadow	7.73	48.02	13.00	28.30	2.96
	高寒草甸 Alpine meadow	6.74	45.71	22.69	22.61	2.25
	小计 Total	7.34	47.11	16.81	26.06	2.68
合作市 Hezuo	山地草甸 Mountain meadow	2.10	18.14	11.80	52.17	15.80
	高寒草甸 Alpine meadow	1.13	18.59	12.27	56.31	11.70
	小计 Total	1.42	18.45	12.13	55.04	12.96
临潭县 Lintan	山地草甸 Mountain meadow	1.65	17.19	9.48	49.19	22.50
	高寒草甸 Alpine meadow	4.32	23.89	11.79	44.00	16.00
	小计 Total	1.89	17.80	9.69	48.72	21.90
碌曲县 Luqu	山地草甸 Mountain meadow	1.65	23.91	12.19	52.72	9.53
	高寒草甸 Alpine meadow	2.82	28.96	12.51	48.12	7.59
	沼泽 Marsh	0.92	55.96	14.68	26.61	1.83
	小计 Total	2.47	27.52	12.42	49.44	8.15
玛曲县 Maqu	山地草甸 Mountain meadow	6.19	42.52	10.81	34.59	5.89
	高寒草甸 Alpine meadow	5.38	38.20	12.70	39.08	4.64
	沼泽 Marsh	7.38	38.63	16.67	31.14	6.17
	小计 Total	5.65	39.18	12.45	37.74	4.98
夏河县 Xiahe	山地草甸 Mountain meadow	0.75	10.47	12.53	60.72	15.53
	高寒草甸 Alpine meadow	1.20	16.99	9.54	53.87	18.40
	小计 Total	1.07	15.03	10.44	55.93	17.53
舟曲县 Zhugqu	山地草甸 Mountain meadow	1.03	16.69	7.14	34.41	40.73
	高寒草甸 Alpine meadow	1.90	33.08	13.21	35.04	16.78
	小计 Total	1.14	18.73	7.90	34.49	37.75
卓尼县 Jone	山地草甸 Mountain meadow	3.87	33.66	13.35	41.32	7.80
	高寒草甸 Alpine meadow	4.33	36.61	14.82	39.32	4.91
	小计 Total	4.08	35.00	14.01	40.41	6.49
甘南州 Gannan	山地草甸 Mountain meadow	3.59	29.15	11.76	43.52	11.99
	高寒草甸 Alpine meadow	3.66	30.70	12.60	44.34	8.70
	沼泽 Marsh	7.28	38.92	16.63	31.07	6.10
	总计 Total	3.69	30.26	12.35	43.85	9.85

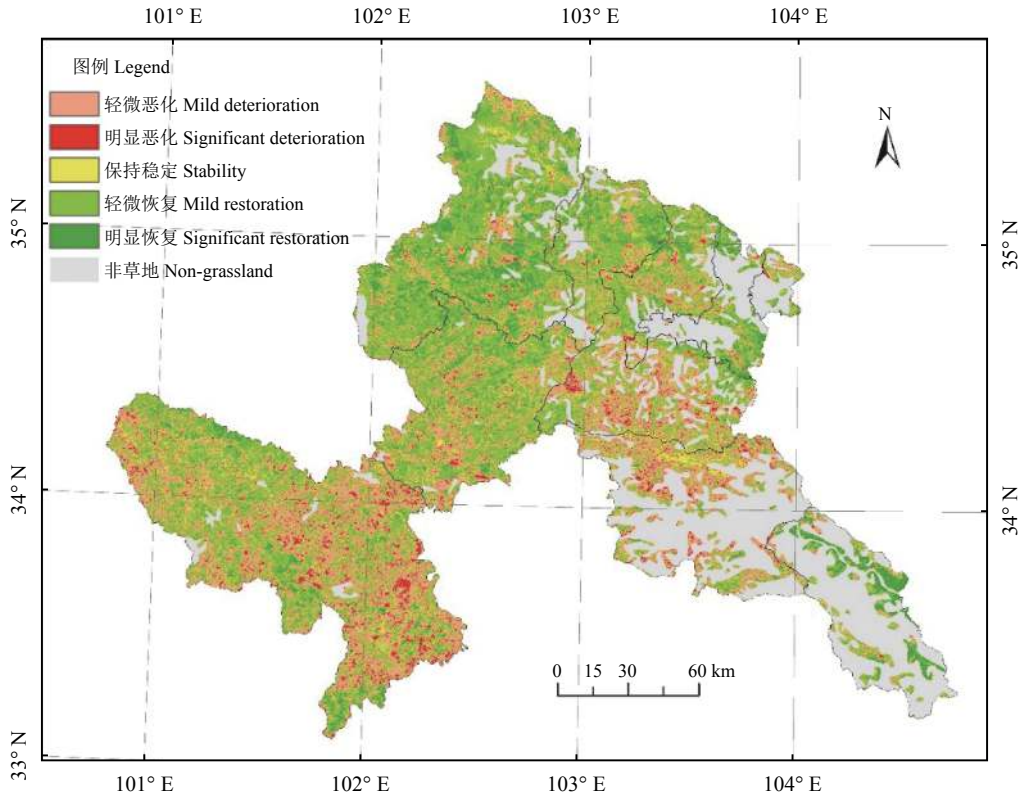


图 5 2000–2019 年甘南州草地变化趋势空间分布

Figure 5 Spatial distribution of the grassland change trend from 2000 to 2019 in the Gannan Prefecture

势类似，而沼泽类持续性轻微恶化的草地占比较大。就各县(市)而言，迭部县草地呈持续性恶化趋势的面积占比最高，达 30.00%；其次是玛曲县和卓尼县，舟曲县、夏河县、合作市和临潭县草地呈持续性恶化趋势的面积占比均低于 10.00%；临潭县、夏河县和舟曲县有 50.00% 以上的草地呈持续性恢复趋势。甘南州草地变化特征空间分布图显示，甘南州草地变化特征的空间异质性较高，呈持续性恶化趋势的草地大多分布在玛曲县、卓尼县、迭部县和碌曲县局部区域，呈持续性恢复趋势的草地主要分布在夏河县和合作市，草地变化趋势不确定(即变化趋势不具有可持续性)的区域主要集中分布在玛曲县、碌曲县、舟曲县和合作市(图 6)。

总体而言，近 20 年来甘南州草地恢复的面积比例 (53.70%) 大于退化的面积比例 (33.95%)，但仍有 18.07% 的草地呈持续性恶化趋势，因此甘南州草地整体上以恢复为主，局部地区仍表现出持续恶化态势。

3 讨论

3.1 甘南州草地植被状况变化影响因素分析

本研究结合 MODIS 植被指数和野外调查数据，

构建了适合于甘南州草地地上生物量的最优模型，并对甘南州 2000–2019 年的草地地上生物量时空变化趋势进行了分析，结果表明，近 20 年来甘南州草地呈现出整体恢复、局部恶化的趋势，其主要原因包括气候变化和国家政策实施两方面。相比较而言，高寒地区高温有利于植被的生长^[25]。通过分析甘南州 2000–2014 年的气象数据发现，甘南州年均温和年降水量均呈波动上升趋势；从月际变化趋势分析发现，甘南州降水主要集中在每年的生长季 (5 月–9 月)，其中 7 月降水最为丰沛，一年中的月平均温度大于 10 °C 的月份也集中在生长季，8 月的温度最高，达 15 °C^[26-27]。本研究通过分析甘南州 2000 年以来的温度、降水变化趋势可看出，近 20 年来甘南州玛曲县和合作市的温度和降水均呈增加趋势，且降水呈显著增加趋势，甘南州气候变化以暖湿化为主(图 7)。由此表明，高寒地区植被的生长发育与水热条件密切相关，这也是甘南州草地地上生物量不断增加的因素之一。

甘南牧区是我国重要的草原畜牧业生产地和生态安全屏障，长期以来受自然和人为因素的影响，加剧了甘南州牧区草地退化程度。为了防止甘南州

表 4 2000–2019 年甘南州各类草地变化特征
 Table 4 Analysis of the changes in the characteristic of different grasslands from 2000 to 2019 in the Gannan Prefecture

行政区划 Administrative division	草地类型 Grassland type	变化趋势不确定 Uncertain change trend	持续性 Persistence				
			明显恶化 Significant deterioration	轻微恶化 Mild deterioration	稳定不变 Stability	轻微恢复 Mild restoration	明显恢复 Significant restoration
迭部县 Tewo	高寒草甸 Alpine meadow	51.79	6.37	21.42	7.99	10.32	2.12
	山地草甸 Mountain meadow	48.53	7.25	24.20	4.27	12.97	2.79
	小计 Total	49.81	6.90	23.10	5.73	11.93	2.52
合作市 Hezuo	高寒草甸 Alpine meadow	51.20	1.02	7.34	3.46	25.86	11.11
	山地草甸 Mountain meadow	48.06	2.00	8.05	3.39	23.60	14.89
	小计 Total	50.24	1.32	7.56	3.44	25.17	12.27
临潭县 Lintan	高寒草甸 Alpine meadow	47.37	4.11	7.47	3.05	22.32	15.68
	山地草甸 Mountain meadow	36.85	1.60	7.85	3.24	28.49	21.96
	小计 Total	37.81	1.83	7.82	3.22	27.93	21.39
碌曲县 Luqu	高寒草甸 Alpine meadow	43.92	2.65	14.38	4.92	26.90	7.24
	山地草甸 Mountain meadow	40.88	1.60	12.35	4.76	31.17	9.24
	沼泽 Marsh	63.30	0.92	22.94	0.92	10.09	1.83
	小计 Total	43.06	2.33	13.79	4.87	28.13	7.82
玛曲县 Maqu	高寒草甸 Alpine meadow	48.37	4.98	18.19	4.57	19.52	4.37
	山地草甸 Mountain meadow	45.83	5.83	20.15	3.95	18.49	5.75
	沼泽 Marsh	40.27	7.14	21.94	7.34	17.43	5.89
	小计 Total	47.45	5.26	18.79	4.56	19.20	4.74
夏河县 Xiahe	高寒草甸 Alpine meadow	34.83	1.14	8.92	3.93	33.56	17.61
	山地草甸 Mountain meadow	38.51	0.73	5.29	4.09	36.38	15.00
	小计 Total	35.94	1.02	7.82	3.98	34.41	16.83
舟曲县 Zhugqu	高寒草甸 Alpine meadow	51.87	1.78	13.50	3.45	12.67	16.72
	山地草甸 Mountain meadow	36.03	0.97	6.11	1.89	14.93	40.06
	小计 Total	38.01	1.07	7.03	2.09	14.65	37.15
卓尼县 Jone	高寒草甸 Alpine meadow	52.59	4.07	16.14	4.56	18.07	4.57
	山地草甸 Mountain meadow	43.77	3.73	17.42	5.37	22.22	7.49
	小计 Total	47.78	3.88	16.84	5.00	20.33	6.16
甘南州 Gannan	高寒草甸 Alpine meadow	45.40	3.41	14.63	4.55	23.72	8.28
	山地草甸 Mountain meadow	42.79	3.41	14.29	4.19	23.70	11.62
	沼泽 Marsh	40.65	7.03	21.95	7.23	17.31	5.82
	总计 Total	44.39	3.46	14.61	4.46	23.62	9.46

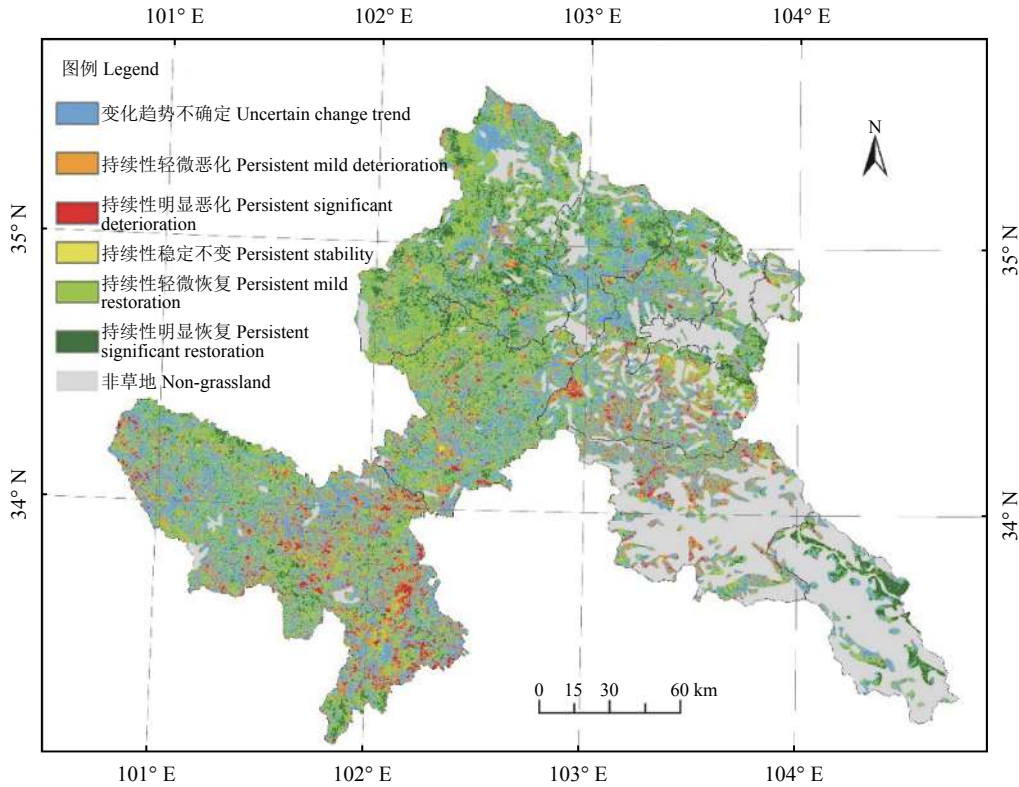


图 6 2000–2019 年甘南州草地变化特征空间分布

Figure 6 Spatial distribution of the changes in grassland characteristics from 2000 to 2019 in the Gannan Prefecture

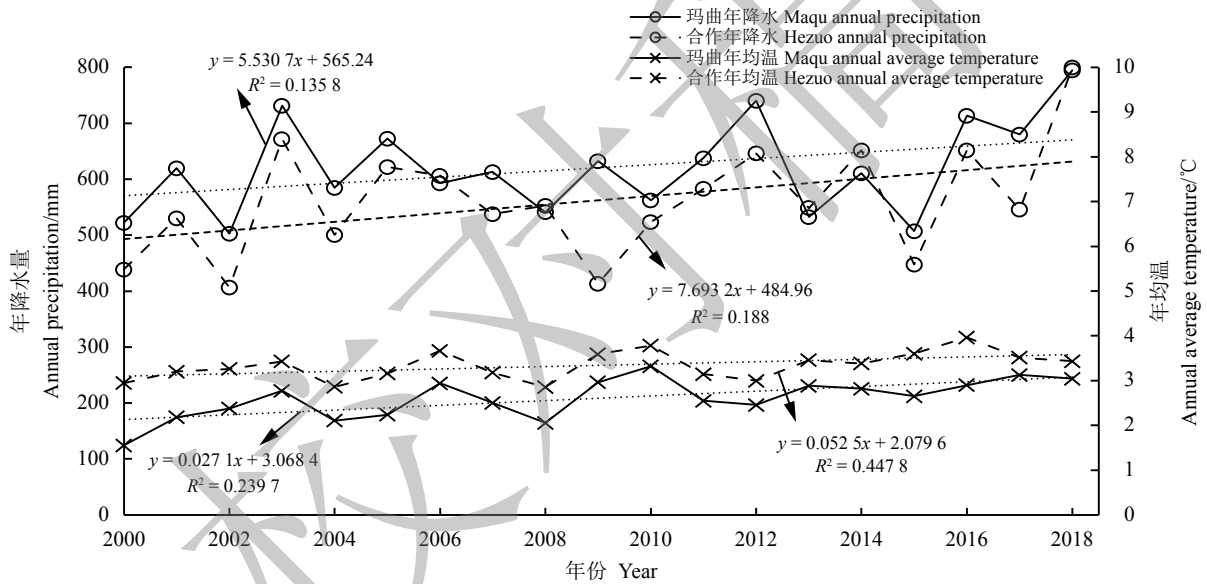


图 7 甘南州 2000–2018 年玛曲和合作气温、降水变化趋势

Figure 7 Temperature and precipitation change trends of Maqu and Hezuo from 2000 to 2018 in the Gannan Prefecture

牧区草地生态服务功能减弱，国家推出了一些大的生态保护和建设项目。1999 年国家开始推行“退耕还林还草”生态工程；从 2003 年开始，国家对“退牧还草”生态工程进行试点推行，国家相继推出了若

干保护草原的优惠政策；2011 年，在“退牧还草”生态工程建设的基础上，推出草原生态奖补机制。这些政策的实施对于草地保护和恢复具有重要的意义。相关研究表明，草原生态保护政策的实施对甘

南州牧区退化草地的恢复、牧民生活质量的提高以及牧区经济发展的促进等方面效果显著。除此之外,草原生态保护政策的实施有利于牧区草地资源的可持续发展与利用,这为管理部门的决策提供了参考^[28-29]。

3.2 草地地上生物量遥感监测算法

本研究结合遥感数据与野外实测数据,构建了植被指数与地上生物量之间的模型,并对模型精度进行评价,筛选出适合模拟甘南州草地生长状况的最优模型。目前,就草地监测的遥感模型研究而言,出现了很多不同的植被指数。遥感模型形式不同,主要是因为草地类型、研究区域及遥感资料不同,导致基于植被指数和生物量构建的估算模型存在较大差异。梁天刚等^[30]以每日地表反射率数据 MOD09GA 和地面调查资料,构建了甘南牧区草地地上生物量最优遥感反演模型,并对甘南牧区草地地上生物量的变化动态进行了分析,结果表明,基于 MODIS EVI 的乘幂模型能够很好地反映甘南牧区草地地上生物量鲜重的变化,相关系数达 0.797。这种现象的出现主要是因为本研究所用的地面实测数据为干重,而梁天刚等^[30]研究所用的实测生物量为鲜重,由于地上生物量鲜重中含有水分,一定程度上会影响模型精度。孟宝平^[15]利用 MOD13Q1 植被指数与实测地上生物量数据构建的草地地上生物量单因子模型,结果与本研究非常接近,前者研究所选用的遥感数据与本研究一致,均为 MOD13Q1,

两者所构建的地上生物量模型均为基于 MODIS EVI 的指数模型。杨荣荣等^[1]的研究结果表明,不同区域由于气候条件的影响,草地的返青期不同,构建的草地地上生物量反演模型精度存在着不同程度的差异。

4 结论

本研究以甘南州为研究区,结合遥感资料和野外实测数据,构建了适宜于甘南州草地地上生物量反演的最优模型,实现了对 2000–2019 年甘南州草地地上生物量的反演分析,并探讨分析了不同行政区和草地类型的草地地上生物量时空变化特征。获得如下主要结果:

1) 基于 MODIS EVI ($y = 299.82e^{3.3862x}$) 构建的甘南州草地地上生物量反演模型适宜于天然草地地上生物量变化监测研究,模型决定系数 $R^2 = 0.5249$, $RMSE = 527.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2) 20 年间甘南州高寒草甸和山地草甸的地上生物量均呈现增加趋势,而沼泽类草地的地上生物量呈减少趋势。多年统计结果显示,高寒草甸地上生物量最大,其次是山地草甸,沼泽类草地的地上生物量最小。

3) 近 20 年来甘南州草地呈现出整体恢复、局部恶化的趋势。全州 66.04% 的草地呈稳定或恢复趋势,其中 37.54% 的草地呈持续性稳定或恢复趋势;33.96% 的草地地上生物量呈减少趋势,其中 18.08% 的草地呈持续性恶化趋势。

参考文献 References:

- [1] 杨荣荣, 兰焱, 张卓. 中国近 30 年草地地上生物量的研究进展. *亚热带水土保持*, 2019, 31(2): 38-41.
YANG R R, LAN Y, ZHANG Z. Research progress on grassland biomass in China in the past 30 years. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2019, 31(2): 38-41.
- [2] 赖焱敏, 赖日文, 薛娴, 李成阳, 尤全刚, 黄翠华, 彭飞. 基于植被盖度和高度的不同退化程度高寒草地地上生物量估算. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 127-134.
LAI C M, LAI R W, XUE X, LI C Y, YOU Q G, HUANG C H, PENG F. Estimation of aboveground biomass of different degraded alpine grassland based on vegetation coverage and height. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(5): 127-134.
- [3] 杨淑霞, 冯琦胜, 孟宝平, 高金龙, 葛静, 梁天刚. 三江源地区高寒草地地上生物量时空动态变化. *草业科学*, 2018, 35(5): 956-968.
YANG S X, FENG Q S, MENG B P, GAO J L, GE J, LIANG T G. Temporal and spatial dynamics of alpine grassland biomass in the Three River Headwaters Region. *Pratacultural Science*, 2018, 35(5): 956-968.
- [4] 于惠, 吴玉峰, 金毅, 张峰. 基于 MODIS SWIR 数据的干旱区草地地上生物量反演及时空变化研究. *遥感技术与应用*, 2017,

- 32(3): 524-530.
- YU H, WU Y F, JIN Y, ZHANG F. An approach for monitoring the aboveground biomass of grassland in arid areas based on MODIS SWIR bands. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(3): 524-530.
- [5] 马青青, 柴林荣, 马海玲, 常生华, 程云湘. 玛曲高寒草甸放牧强度的遥感监测. *草业科学*, 2018, 35(5): 941-948.
- MA Q Q, CHAI L R, MA H L, CHANG S H, CHENG Y X. Monitoring of grazing intensity in Maqu alpine meadow by remote sensing. *Pratacultural Science*, 2018, 35(5): 941-948.
- [6] 杨鹏万, 付刚, 李云龙, 周宇庭, 沈振西. 多光谱相机估算藏北高寒草甸地上生物量. *草业科学*, 2014, 31(7): 1211-1217.
- YANG P W, FU G, LI Y L, ZHOU Y T, SHEN Z X. Aboveground biomass assessment in the Northern Tibet Plateau using ground-level remotely-sensed data. *Pratacultural Science*, 2014, 31(7): 1211-1217.
- [7] 葛静, 孟宝平, 杨淑霞, 高金龙, 殷建鹏, 张仁平, 冯琦胜, 梁天刚. 基于 ADC 和 MODIS 遥感数据的高寒草地地上生物量监测研究: 以黄河源区为例. *草业学报*, 2017, 26(7): 23-34.
- GE J, MENG B P, YANG S X, GAO J L, YIN J P, ZHANG R P, FENG Q S, LIANG T G. Monitoring of above-ground biomass in alpine grassland based on agricultural digital camera and MODIS remote sensing data: A case study in the Yellow River Headwaters Region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(7): 23-34.
- [8] 曾纳, 任小丽, 何洪林, 张黎, 李攀, 李志强, 张林波. 基于神经网络的三江源区草地上生物量估算. *环境科学研究*, 2017, 30(1): 59-66.
- ZENG N, REN X L, HE H L, ZHANG L, LI P, LI Z Q, ZHANG L B. Aboveground biomass of grassland in the Three-River Headwaters Region based on neural network. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(1): 59-66.
- [9] YANG S X, FENG Q S, LIANG T G, LIU B K, ZHANG W J, XIE H J. Modeling grassland above-ground biomass based on artificial neural network and remote sensing in the Three-River Headwaters Region. *Remote Sensing of Environment*, 2018(204): 448-455.
- [10] 张媛, 王玲, 包安明, 刘海隆. 基于神经网络的玛纳斯河流域植被地上生物量反演. *干旱区研究*, 2019, 36(4): 863-869.
- ZHANG Y, WANG L, BAO A M, LIU H L. Inversion of vegetable aboveground biomass in the Manas River Basin based on neural network. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 863-869.
- [11] ZENG N, REN X L, HE H L, ZHANG L, ZHAO D, GE R, LI P, NIU Z G. Estimating grassland aboveground biomass on the Tibetan Plateau using a random forest algorithm. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 479-487.
- [12] 王紫, 赵锦梅, 王彦辉, 蒋志荣. 东祁连山高寒草地地上生物量的时空变化. *中国水土保持科学*, 2019, 17(3): 113-120.
- WANG Z, ZHAO J M, WANG Y H, JIANG Z R. Spatio-temporal variation of the aboveground biomass of the alpine grassland in eastern Qilian Mountains. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(3): 113-120.
- [13] 赵晓英. 气象因子对典型草原地上生物量的潜在影响. *草原与草业*, 2019, 31(2): 15-18.
- ZHAO X Y. Potential impact of meteorological factors on above-ground biomass of typical steppe. *Grassland and Prataculture*, 2019, 31(2): 15-18.
- [14] 刘双, 谢正辉, 高骏强, 曾毓金, 刘斌, 李锐超. 高寒生态脆弱区冻土碳水循环对气候变化的响应: 以甘南州为例. *高原气象*, 2018, 37(5): 1177-1187.
- LIU S, XIE Z H, GAO J Q, ZENG Y J, LIU B, LI R C. Response of carbon and water cycles to climate change in the high-frigid ecotone: A case study of Gannan zone. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(5): 1177-1187.
- [15] 孟宝平. 基于 UAV 和机器学习算法的甘南地区高寒草地地上生物量遥感估测研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2018.
- MENG B P. Estimating grassland aboveground biomass based on UAV technology and machine learning methods in alpine grassland Gannan region. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [16] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- YUAN L H, JIANG W G, SHEN W M, LIU Y H, WANG W J, TAO L L, ZHENG H, LIU X F. The spatio-temporal variation of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [17] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170-1186.
- CAI B F, YU R. Advanced and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. *Journal of*

- Remote Sensing, 2009, 13(6): 1170-1186.
- [18] MILICH L, WEISS E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 235-260.
- [19] LUNETTA R S, KNIGHT J F, EDIRIWICKREMA J, LYON J G, WORTHY L D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(2): 142-154.
- [20] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [21] HOAGLIN D C, MOSTELLER F, TUKEY J W. *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. New York: Wiley-Interscience, 2000: 169-181.
- [22] KENDALL M G. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, 1970.
- [23] TOŠIĆ I. Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 77(1): 47-56.
- [24] 侯西勇, 应兰兰, 高猛, 毕晓丽, 路晓, 朱明明. 1998-2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征. *地理科学*, 2010, 30(5): 735-741.
HOU X Y, YING L L, GAO M, BI X L, LU X, ZHU M M. Character of vegetation cover change in China's eastern coastal areas 1998-2008. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(5): 735-741.
- [25] 王桂钢, 周可法, 孙莉, 秦艳芳, 李雪梅. 近 10a 新疆地区植被动态与 R/S. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 84-90.
WANG G G, ZHOU K F, SUN L, QIN Y F, LI X M. Study on the vegetation dynamic change and R/S analysis in the past ten years in Xinjiang. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 84-90.
- [26] 王朋岭, 唐国利, 曹丽娟. 1981-2010 年青藏高原地区气温与高程及纬度的关系. *气候变化研究进展*, 2012, 8(5): 313-319.
WANG P L, TANG G L, CAO L J. Surface air temperature variability and its relationship with altitude and latitude over the Tibetan Plateau in 1981-2010. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2012, 8(5): 313-319.
- [27] 王伟军, 赵雪雁, 万文玉, 李花, 薛冰. 2000-2014 年甘南高原植被覆盖度变化及其对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2494-2504.
WANG W J, ZHAO X Y, WAN W Y, LI H, XUE B. Variation of vegetation coverage and its response to climate change in Gannan Plateau from 2000 to 2014. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 2494-2504.
- [28] 姚文杰. 甘南牧区草地生态补偿绩效评价. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2017.
YAO W J. Performance evaluation on grassland ecological compensation of Gannan pastoral area in Gansu Province, China. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [29] 韩枫. 草场生态保护对牧民生活的影响研究: 以甘南牧区为例. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2016.
HAN F. The influence research of grassland protection for herdsman' livelihood: An empirical study of Gannan grassland. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [30] 梁天刚, 崔霞, 冯琦胜, 王莺, 夏文韬. 2001-2008 年甘南牧区草地地上生物量与载畜量遥感动态监测. *草业学报*, 2009, 18(6): 12-22.
LIANG T G, CUI X, FENG Q S, WANG Y, XIA W T. Remotely sensed dynamics monitoring of grassland aboveground biomass and carrying capacity during 2001-2008 in Gannan area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6): 12-22.

(责任编辑 张瑾)