

和海秀,付爱红,王川.塔城地区西北部低山草甸植被指数变化及其驱动力[J].中国沙漠,2023,43(1):187-196.

塔城地区西北部低山草甸植被指数变化及其驱动力

和海秀¹,付爱红²,王川²

(1.新疆生产建设兵团第九师农业科学研究所,新疆 额敏 834699; 2.中国科学院新疆生态与地理研究所 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:以新疆塔城地区西北部低山草甸植被为研究对象,利用2001—2020年归一化植被指数(NDVI)、气象数据(年均气温和降水量)及社会经济发展数据(年末牲畜存栏数、肉类总产量和农牧民人均纯收入),运用ArcGIS 10.5软件、R语言和matlab等语言,运用相关分析法和趋势分析法,研究了不同时段低山草甸植被NDVI、气象因子和社会经济发展数据的时空变化特征,从气候变化和人类活动角度探讨了影响低山草甸植被NDVI变化的驱动力,揭示了以往采取的草地恢复措施的有效性和时效性。结果表明:2001—2008年低山草甸植被处于“绿化”状态,“绿化”现象主要分布在研究区的西南、南部和东部,但存在“褐化”趋势,NDVI的降幅在夏季最大;2009—2020年处于“褐化”状态,“褐化”现象分布在除了研究区西南部的其他区域,但存在微弱的“绿化”趋势,NDVI的增幅在夏季最大;2001—2020年生长季总体呈“暖干”趋势,但2009年以来“暖干”趋势有所减缓,低山草甸的南部经历了一个降水减少的暖化过程,而西北和东北部则表现出降水增加的冷却过程;过去20年年末牲畜存栏数和肉类总产量都呈现先急速增加后平缓增加而又急剧减少的趋势,人均纯收入呈增加趋势;NDVI与降水之间呈极显著的正相关性,与气温和牲畜养殖量不呈相关性。以往实施的退耕还草、退牧还草等措施产生的生态效应是短暂的,即使在2009年后草甸植被呈微弱的“绿化”趋势,但仍然难以挽回植被退化的状态。今后,需提出新的措施或工程,从根本上实现草地的修复和长期可持续发展。

关键词:低山草甸;归一化植被指数(NDVI);气候变化;驱动力;塔城地区

文章编号:1000-694X(2023)01-187-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00122

中图分类号:S812

文献标志码:A

0 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分,是连接大气、土壤、水体的“自然纽带”,在调节气候、保持水土、维持物质循环等方面具有重要作用^[1-2]。然而,植被覆盖和生长状况受气候变化和人类活动的影响^[3-4],是影响生态系统服务的重要因素。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为反映植被生长和时空变化研究的重要指标,与植被覆盖度、生物量以及光合作用等联系密切,多数学者广泛利用NDVI进行全球或区域植被覆盖度变化及驱动力研究,NDVI的趋势可近似表达植被“绿化”或“褐化”的趋势^[5-6]。

许多学者对新疆、西北干旱区乃至中亚草地植被覆盖度、长势等的时空变化特征进行了研究。在区域暖干化的背景下,1982—2008年哈萨克斯坦草原植被净初级生产力(NPP)呈先上升后降低的趋势^[7];受持续畜牧超载及气候条件恶化影响,2001—2010年新疆全区草地NPP总量呈波动减少的趋势,下降最明显的区域位于天山西部^[8];与20世纪80年代相比,新疆天然草地的牧草产量和载畜量下降20%~30%,草地覆盖度下降5%~10%^[9],这可能与全疆大部分草原区域遭受旱情有关^[10]。以往研究多针对较大空间区域内不同类型草地长势的时空变化特征进行综合分析,未对某一具体草地类型如低

收稿日期:2022-08-06; 改回日期:2022-09-26

资助项目:新疆生产建设兵团第九师科技局科技计划项目(2020JS016)

作者简介:和海秀(1987—),女,硕士,畜牧师,从事畜牧生产、牧场栽培和草原生态过程研究。E-mail: 1522554@qq.com

通信作者:付爱红(E-mail: fuah@ms.xjb.ac.cn)

山草甸进行深入研究,近几十年来,在人类活动和气候变化影响下低山草甸植被是否退化或恢复尚不明瞭。

影响草地植被分布和生长的因素有地理位置、地形地貌、土壤、气候变化和人类活动等^[11-12],准确估计这些因子对草地动态的影响,了解其动态驱动力,对于缓解草地退化、实现草地恢复具有重要意义。地理位置不同,气候条件各异,光照、温度、降水等自然资源存在差异,可导致植被差异^[12]。气候变化是全球草地退化的最主要原因,导致了45.51%的草地退化;而人类活动次之,导致32.53%的草地退化^[13]。对于中国西北干旱区,近年来植被覆盖既受数十年或数年尺度的气候干湿波动的作用,同时也受人类不合理经济活动的影响^[14]。气候变暖促进了植被活动^[15-17],在里海北部低地秋冬季节显著的升温 and 生长季水分供应的增加,导致其普遍的中生植被化,黑蒿(*Artemisia pauciflora*)群落被伏地肤(*Kochia prostrata*)取代^[18]。气温升高还导致北半球高纬度地区的植被生物量增加和生产力提高^[19-22],对植被在春季和冬季的生长有正面影响,植被绿化期提前。温度升高是天山山地植被垂直带变化的主要原因。在气温显著上升的背景下,新疆西部山地草原的分布边界将转移到更高的高度,这可能增加牧场的承载能力,促进当地畜牧业的发展^[23]。徐满厚等^[24]发现,气候变暖对高山植被生长有积极影响,即促进了高山植被的生长。但也有研究发现,欧亚大陆草地主要受年降水量的显著影响,对温度的响应普遍较弱^[7]。对于塔城地区,郭宏^[25]发现影响该区域天然草地退化的因素主要为降水和放牧制度;古丽娜尔·沙亚汗等^[26]发现降水少、气温高有利于该区域草地的生长,降水多、气温低不利于山地草甸的生长。在人类活动对草地生长影响方面,Ehrensberger^[27]2000年发现半自然草甸植被区系组成随着耕作或立地条件的微小变化而逐渐发生变化。2000—2014年,新疆草地NPP呈降低趋势,主要是由人类活动引起的,包括大面积开荒、过度放牧和矿产开采等活动^[28]。2010年国家对于农九师实施了草原生态保护补助奖励机制,2011年通过实地监测发现,地表生物量明显增加,做到了减畜不减产,实现了牧民增收^[29]。如今已11年过去,随着气候变化和人类活动的持续影响,草原植被长势如何,绿度怎样尚不得而知。通过掌握当前低山草甸

植被的生长状况,结合气候和人类活动的变化,深入探讨气候变化和人类活动对低山草甸植被绿度的影响。该研究可为提出更加高效的草原生态修复措施,促进山地草原的有效恢复,实现更高的生态、经济和社会效益提供科学依据。

1 研究区和方法

1.1 研究区概况

新疆典型低山草甸位于中国塔城地区西北部,平均海拔1 200 m。它位于新疆西北部伊犁哈萨克自治州中部,涉及到额敏县、裕民县、托里县和塔城市,地理范围为45°—47°N、82°—85°E(图1)。

新疆生产建设兵团农九师是新疆著名的边境草原区,近年来由于人为和自然因素影响,草地退化严重。草原分布区的准噶尔西部山地由一系列山地组成,除个别山峰在3 000 m以外,山地大多有不同高度的准平原面,土壤类型多样。它是世界上塔巴加泰山上典型的低山草甸,灌木建群种有金丝桃叶绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、异花栒子(*Cotoneaster allochrous*)、新疆忍冬(*Lonicera tatarica*)、宽刺蔷薇(*Rosa platyacantha*)、绿叶木蓼(*Atraphaxis laetevirens*)、野扁桃(*Amygdalus ledebouriana*)等,草本建群种有细叶针茅(*Stipa lessingiana*)、矮羊茅(*Festuca coelestis*)、西北绢蒿(*Seriphidium nitrosum*)、龙蒿(*Artemisia dracunculus*)、伊犁岩风(*Libanotis iliensis*)、串珠老鹳草(*Geranium transversale*)、亚洲耆(*Achillea asiatica*)、准噶尔乌头(*Aconitum soongaricum*)等。此外,它被认为是亚洲甚至世界的“一个花的世界”“万花园的野生植物”“野生动物的自然博物馆”及世界上重要的动物和植物资源银行。它也是亚洲,特别是中国的重要牧区。这些草地每年为超过4 275 000只家畜提供食物。同时,该研究区拥有一个温和的温带干旱和半干旱气候。低山草甸生态环境脆弱,对气候变化和畜牧业生产敏感^[26,30]。

1.2 数据收集

1.2.1 NDVI数据

利用MODIS_TERRA植被指数16 d全球250 m分辨率MOD13Q1获取2001—2020年的NDVI产品。全球MOD13Q1是一个使用Sinusoidal projec-

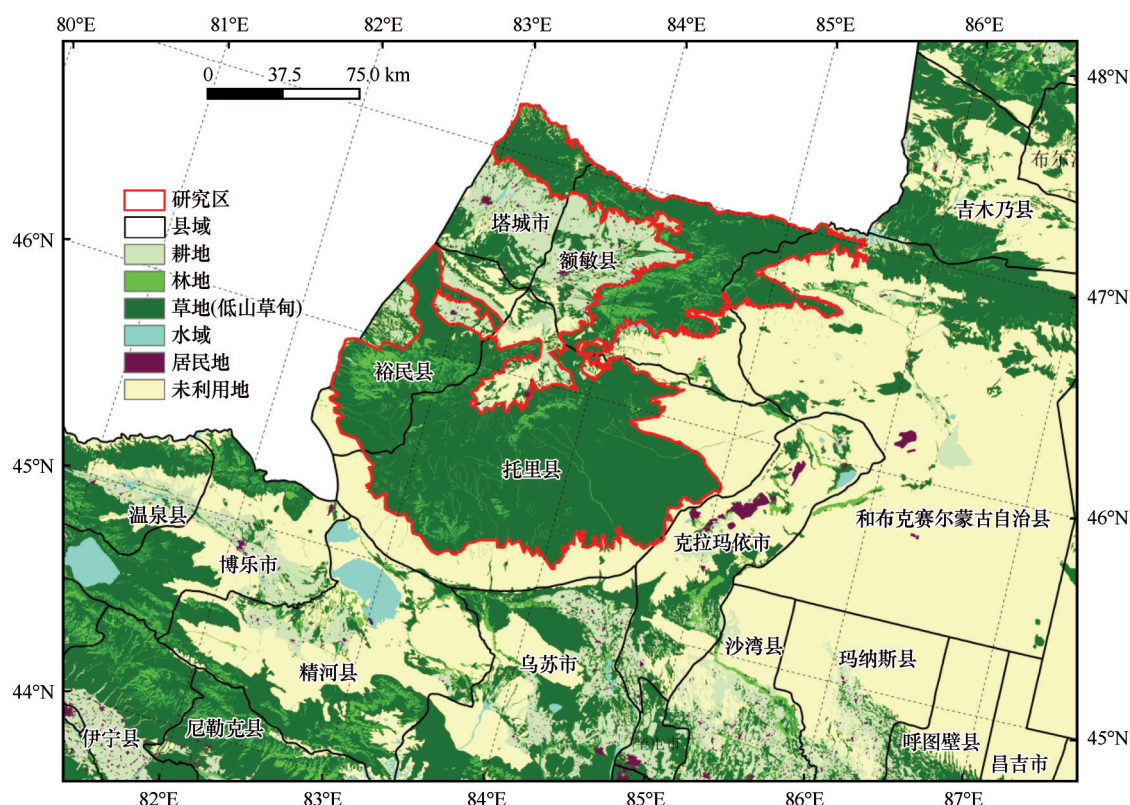


图1 塔城地区西北部低山草甸植被分布

Fig.1 Distribution map of low mountain meadow in the northwest of Tacheng region

tion 的3级网格数据产品,空间分辨率为250 m,每16 d提供一次。EVI使用500 m分辨率的蓝色波段来校正250 m分辨率的蓝色波段丢失时的残余大气效应。运用ArcGIS 10.5软件中的“数据管理”工具箱“栅格”工具对250 m分辨率的NDVI数据进行重采样,得到空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的数据,便于与气象数据进行比较与相关分析。NDVI为空间点数据。

1.2.2 气象数据

CRU_TS4.05版(2021年7月发布)气象数据集是由英国气象局(英国哈德利中心)和英国东安格利亚大学气候研究中心(CRU)共同开发的。最新版本的数据更好地提高了每个网格值和输入观测值之间的可追溯性。本研究从CRU_TS 4.05中选取并下载了2001—2020年的月平均气温和降水量资料,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。气象数据为空间点数据。

1.2.3 社会经济发展数据

通过查阅2002—2021年《塔城地区统计年鉴》,获得裕民县、托里县、额敏县和塔城市每年载畜量、肉类总产量和农牧民人均纯收入数据,这些数据没有空间网格属性。

1.3 分析方法

1.3.1 趋势分析

我们建立了年平均气温($^{\circ}\text{C}$)、降水量(mm)、NDVI和时间序列(年)的线性回归方程:

$$y_i = \alpha + \beta(x_i - \bar{x}) + e_i \quad (1)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$; e_i 是随机误差; α 和 β 分别是运用最小二乘法计算得到的线性拟合的截距和斜率; y_i 是每个像元的时间序列。

1.3.2 统计分析

自相关函数分析。自相关函数分析是判断时空序列性质的一种方法。通过自相关分析,可以揭示时间序列的属性和性质。这是时间序列回归分析和相关性分析的基础。

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: t 是时间序列; k 是时间延迟; n 是样本路径的长度; x_t 是第 t 时刻的值; \bar{x} 是变量的平均值。对于随机序列,除了没有信息的0滞后点外,其他自相关功能值应在正负双标准误差带内变化。在这种情况下

下,变量序列没有自相关性,或者自相关性不显著。它可能与其他变量相关,可以用相关分析来研究。相反,原来的变量序列应该被提出来,然后进行相关分析。

相关分析。它可以描述变量之间的相关程度,逐像素计算可以从时间和空间的多维度分析变量。将NDVI、气温和降水所有空间数据点分别进行均值计算,得到2001—2020年NDVI、气温和降水数据逐年均值,将NDVI与气温、降水、载畜量数据进行相关分析,得到NDVI与这些影响因素之间的相关性。公式是:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} 是变量 x 和 y 的简单相关系数; x_i 是第 i 年自变量的值; \bar{x} 是自变量的平均值; y_i 是第 i 年因变量的值; \bar{y} 是因变量的平均值; $n=1, 2, \dots$ 。

2 结果与分析

2.1 低山草甸NDVI时空变化

2.1.1 时间变化

在过去20年中,生长季植被NDVI总体呈现略有上升的趋势,以每10年0.001的速度增长(图2)。2008年左右出现了逆转,主要表现为2001—2008年呈显著下降趋势(下降率为每10年0.005),2009—2020年呈上升趋势(上升率为每10年0.003)。这些变化趋势表明,低山草甸植被指数呈现先降后升的变化趋势,2009年后植被表现出较小的绿化趋势。

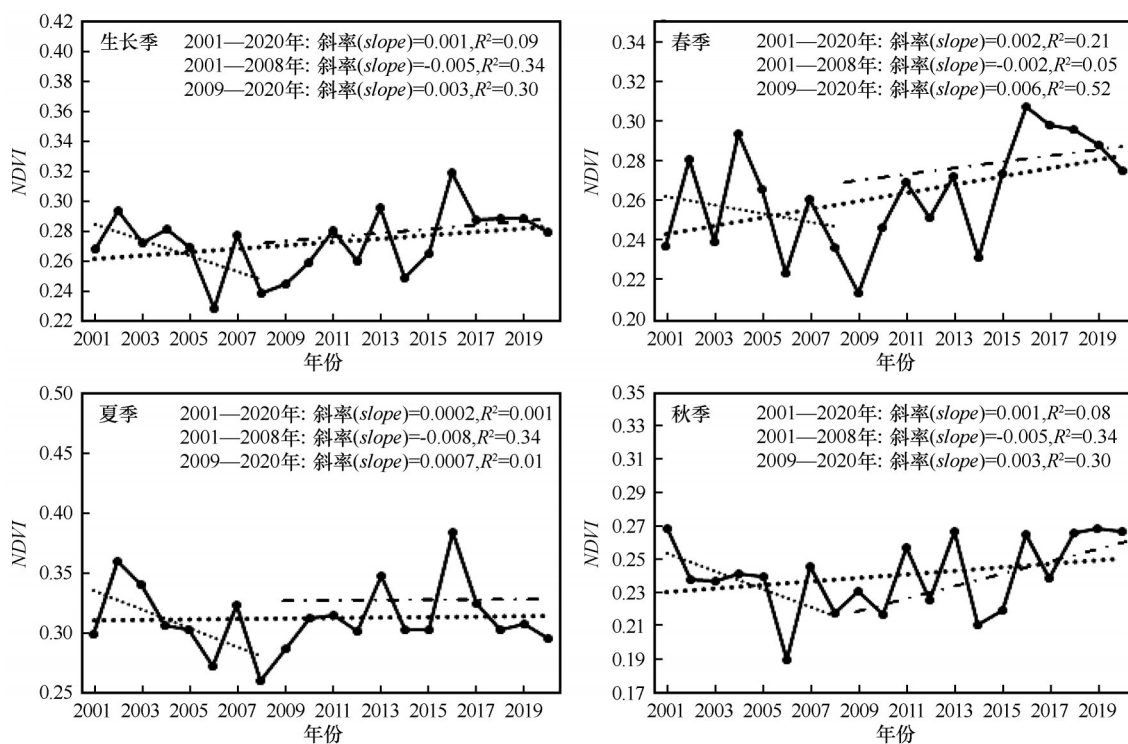


图2 生长季、春季、夏季和秋季NDVI年际变化

Fig.2 Annual variation of NDVI in growing season, spring, summer and fall

在季节尺度上,NDVI在2008年左右也出现了类似的变化(图2)。具体来说,在第一个时期(2000—2008年),NDVI的降幅在夏季(6—8月)最大(每10年0.008),在春季(3—5月)最小(每10年0.002)。在第二个时期(2009—2020年),NDVI增长率春季最大(每10年0.006),夏季最小(每10年0.0007)。在整个研究时期内,春季NDVI的增长速度最大(每10年0.002),夏季NDVI的增长速度最小(每10年

0.0002)。在NDVI的动态变化和趋势逆转中,春季和秋季的贡献率较大,与现有的物候和植被绿化趋势研究结论^[31-33]相差不大。

2.1.2 空间变化

2001—2020年,85%的低山草甸植被的NDVI在生长季呈下降趋势。年平均变化率为-0.00253,植被“褐化”分布于整个区域(图3)。2001—2008年植被总体呈现“绿化”状态,年平均“绿化”率为

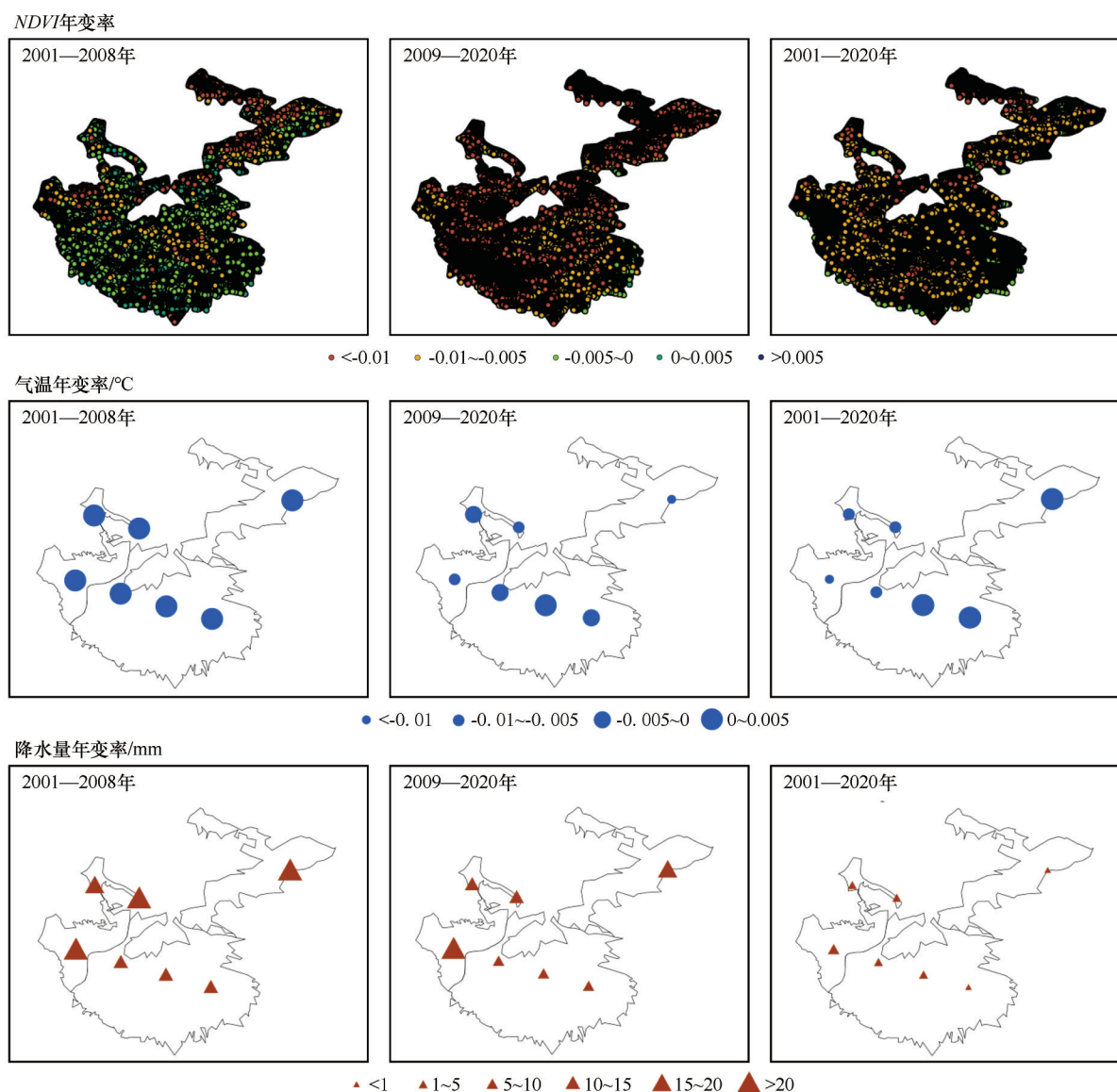


图3 生长季NDVI、气温和降水量变化率在不同时段的空间变化趋势

Fig.3 The spatial change trend of NDVI, air temperature and precipitation in different periods during the growing season

0.00487,“绿化”面积占总面积的87.6%。在此期间,“绿化”现象主要分布在研究区的西南、南部和东部。2009年以后,植被总体表现出明显的“褐化”状态,年平均变化率为 -0.00477 ,变化面积占80.8%。这一时期的植被“绿化”仅分布在研究区的西南部。

植物的生长季节性很强。季节变化具有春季>秋季>夏季的特征,这与Wang等^[34]和李素艳^[35]的研究结论相似。从地理分布的角度看,2008年以前植被NDVI在春季和秋季增加的地区主要是研究区的北部,夏季主要是研究区的北部和西部。2008年以后,整个区域在春季、夏季和秋季呈现“褐化”状态,尤其是研究区北部。

2.2 低山草甸NDVI变化的驱动力

2.2.1 气温和降水的时空变化

2001—2020年,生长季节的总体表现是“暖干”趋势。气温变化率为 $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,降水变化率为 $0.096\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,气温和降水呈现不同的变化规律(图3)。特别是2008年以后,气温的升高和降水的减少都比2008年以前有所减缓,而且变化率分别由 $0.076\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 变为 $0.067\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,由 $-1.446\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 变为 $-0.092\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,说明近12年来“暖干”趋势有所减缓。春、夏季气温和降水的变化规律与生长季相似。2001—2020年,春、夏季气温和降水变化率分别为 0.074 、 $0.028\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 -0.338 、 $-0.102\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2008年春季和夏季的气温和降水都达到高峰,然后降水量

短暂增加,气温短暂下降(图4)。气温和降水趋势存在明显的区域差异。以2008年为边界,在生长季节,低山草甸的南部经历了一个降水减少的暖化过程,

而西北和东北部则表现出降水增加的冷却过程。在春、夏、秋季,中、南部地区经历了降水减少的增暖过程,北部地区经历了降水增加的降温过程(图4)。

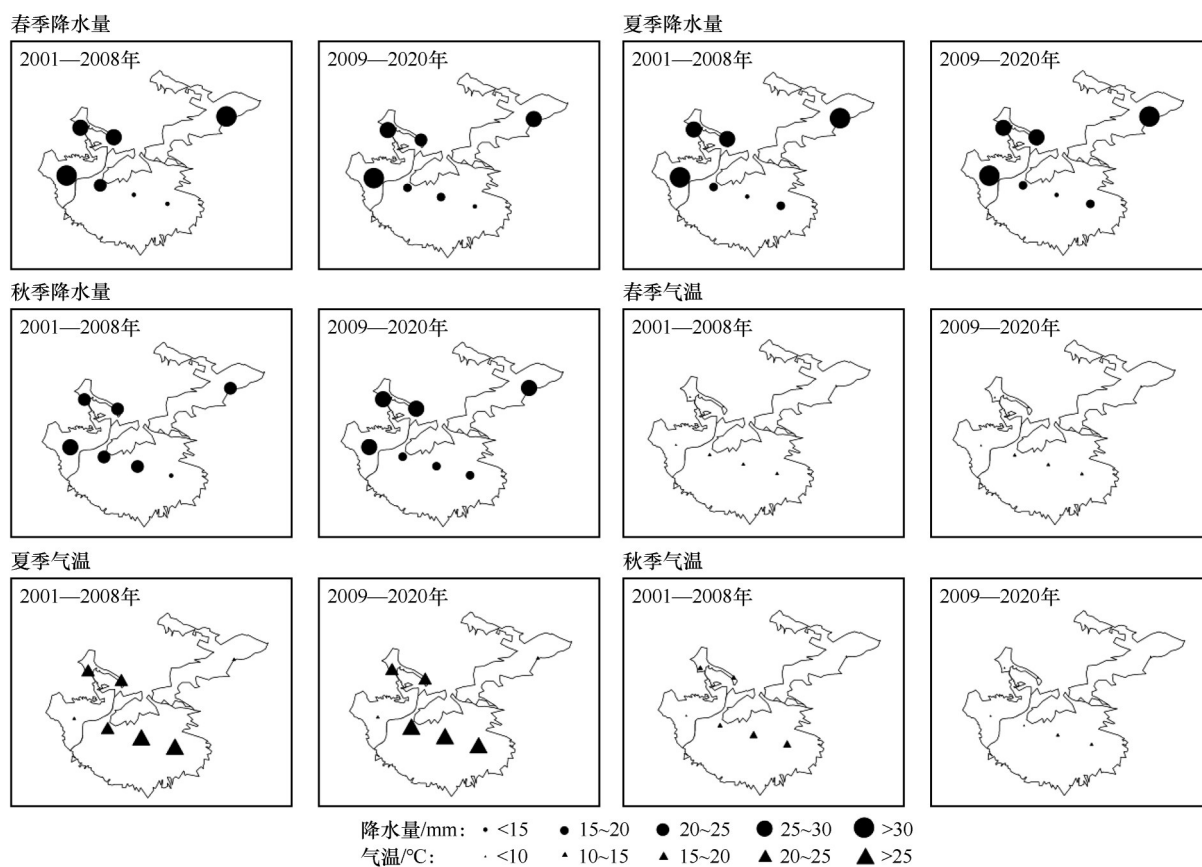


图4 2001—2020年不同时段春季、夏季和秋季降水量和气温变化量空间变化

Fig.4 Spatial variation of precipitation and air temperature in Spring, Summer and Autumn in different periods from 2001 to 2020

2.2.2 牲畜养殖量变化

2001—2020年,塔城地区年末牲畜存栏数和肉类总产量都呈现先急速增加后平缓增加而又急剧

减少的趋势(图5)。具体来看,2005年后年末牲畜存栏数开始减少,但2008年后减少明显,与2005年相比减少了20%,2016年达到了峰值,随后急剧减

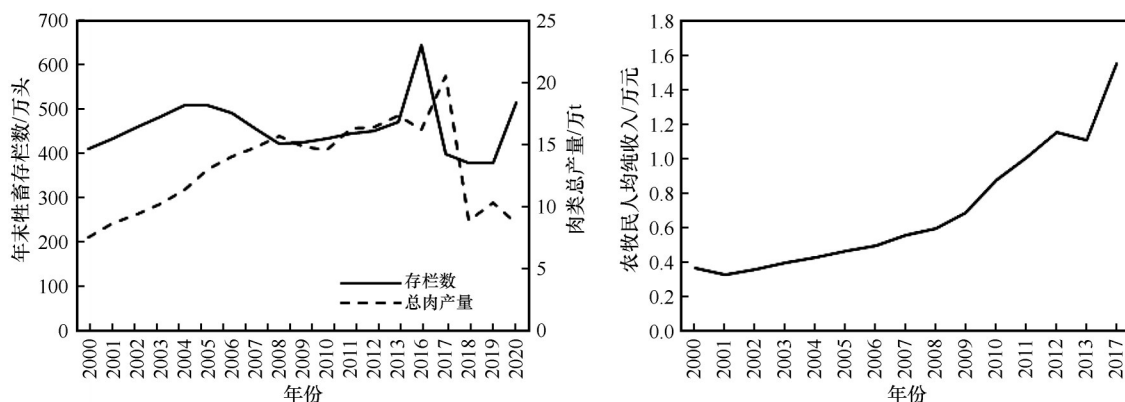


图5 2001—2020年年末牲畜存栏数、肉类总产量和农牧民人均纯收入年际变化

Fig.5 Annual changes in the number of stocks, total meat production and per capita net income of farmers and herdsmen at the end of 2001-2020

少,最低值出现在2018年,为377.68万头。年肉类总产量与牲畜存栏数具有相同的变化趋势,但年肉类总产量的变化趋势具有滞后性。牲畜存栏数和肉类总产量的降低与当地的禁牧、休牧、退耕还草、退牧还草等措施有关,虽然执行这些措施一定程度上缓解了牲畜存栏数和肉类总产量的继续增加,但牲畜存栏数和肉类总产量基数依然远远高于2001年,分别维持在400万头、15万t左右,并未影响当地农牧民的人均纯收入,过去十几年来,人均纯收入呈增加趋势,与2000年相比,2017年人均纯收入增加了2倍。

2.2.3 植被NDVI与气温、降水和牲畜养殖量之间的相关系数

不同年份NDVI间自相关性可能会影响NDVI与气温、降水和牲畜养殖量之间的相关性^[36-38]。2001—2020年NDVI值为0~1.0,NDVI可被理解为一种随机序列,能被用来执行下面的相关分析。2001—2020年NDVI与降水之间呈极显著的正相关性,相关系数为0.564,双尾显著性检验P值为0.010;与气温不呈相关性,相关系数仅为0.098,与当地的牲畜载畜量也不呈显著相关性,相关系数仅为0.005。这种相关性在夏季表现得最为明显,夏季NDVI与降水呈显著的正相关性,相关系数为0.523,P值为0.018,说明在该区域降水对NDVI的正向影响最大。

3 讨论

3.1 低山草甸NDVI变化趋势

本研究发现,在过去20年,位于中国新疆西北部的低山草甸NDVI在2008年前后存在由非绿转微绿的趋势,2001—2008年存在“褐化”趋势,但总体上绝大部分区域属于“绿化”状态,而2009—2020年虽存在微弱的“绿化”趋势,但总体上植被仍处于“褐化”状态,植被在退化。这与Liu等^[39]研究得出的1982—2015年亚洲高山植被在1998年前后存在由绿转褐的趋势不同,与Zhang等^[40]和Xu等^[41]的研究结论(1982—2013年随着气温的升高和降水的增加,亚洲高山区域植被有“绿化”的趋势)也略有不同。这可能与不同的研究对象和研究时段有关,Liu等^[39]、Zhang等^[40]、Xu等^[41]的研究对象是高山植被,研究时段为2015年之前;而本文的研究对象是低山草甸,研究时段为2020年之前。但本文研究结论与

杨红飞^[8]的结论相似,即2001—2010年新疆全区草地NPP总量呈波动减少趋势,且下降最明显的区域位于天山西部,即为塔城地区低山草甸区。

3.2 NDVI与气温、降水关系

气候变化是全球草地退化的最主要原因,导致了45.51%的草地退化;而人类活动次之,导致32.53%的草地退化^[13]。在本文中,春季NDVI的增加速度较其他季节大,夏季NDVI的增加速度最小,NDVI主要受降水的正向影响较大,在过去20年来夏季降水经历了明显降低的趋势,因此,夏季NDVI增加速度最小,这与王飞等^[42]的研究结论(降水量是限制塔城地区气候生产潜力的关键因素)相类似,张善红^[43]和陈晓光等^[44]也认为春夏季降水是影响植被生长的关键性因素,杨红飞^[8]更是研究得出新疆植被NPP的变化主要依赖降水,与平均气温之间的相关关系不显著。在本研究区的中、南部2008年后降水减少,NDVI呈降低趋势;北部降水增加,NDVI相应增加,也说明NDVI与降水之间关系密切。

3.3 退化低山草甸修复评估

过去几十年,由于人们在经济发展过程中忽视了草原生态环境的恶化,对草原区进行不合理的掠夺式开发利用,加之,超载过牧、鼠虫害及人为破坏等因素,导致草地生产力下降,草原退化、沙化,水土流失加重。而人类活动是草地改善的主导因素,占改善草地总面积的45.51%,气候变化导致了30.60%的草地改善^[8]。截至目前,塔城地区已实施了一系列草地保护措施。针对塔城地区库鲁斯台草地存在不同程度退化的问题,当地政府实施了轮牧、休牧和禁牧措施,即在平均植被覆盖度在30%以上的区域进行划区轮牧,在因超载过牧而退化的春秋草场进行季节性休养生息,在植被覆盖度为10%左右的区域实现禁牧制度^[45]。2008年之后,在塔城地区还实施了退耕还草、退牧还草工程等,通过实施这些工程,起到了一定的生态恢复效应^[45-47]。本文研究得出的2008年后该区域低山草甸植被存在微绿趋势,也说明实施生态修复措施促进了生态恢复,但从近10年来看,NDVI仅以每10a 0.001的速率增长,植被恢复效果不佳。段少敏^[30]也发现在该区域即使实施了禁牧、草畜平衡和补偿奖励政策,草原生态恢复具有短暂性,从长期来看生态修

复工程实施的整体效益一般。今后,该区域草地恢复还需结合植被生长主要依赖降水量的结论及当地人们的生产和生活实际,研发节水灌溉等水资源保障配套技术和退化草原生态治理技术,从根本上实现草地的修复和长期可持续发展。

4 结论

2001—2008年低山草甸植被处于“绿化”状态,“绿化”现象主要分布在研究区的西南、南部和东部,但存在“褐化”趋势,*NDVI*的降幅在夏季最大;2009—2020年处于“褐化”状态,该现象分布在除了研究区西南部的其他区域,但存在微弱的“绿化”趋势,*NDVI*的增幅在夏季最大;2001—2020年生长季总体呈“暖干”趋势,但2009年以来“暖干”趋势有所减缓,低山草甸的南部经历了一个降水减少的暖化过程,而西北和东北部则表现出降水增加的冷却过程。

2001—2020年牲畜存栏数和肉类总产量都呈现先急速增加后平缓增加而又急剧减少的趋势,人均纯收入呈增加趋势;*NDVI*与降水之间呈极显著的正相关性,与气温和牲畜养殖量不呈相关性。

以往实施的退耕还草、退牧还草等措施产生的效应是短暂的,即使在2009年后草甸植被呈微弱的“绿化”趋势,但仍然难以挽回植被退化的状态。今后,需实施新的措施或工程,从根本上实现草地的修复和长期可持续发展。

参考文献:

- [1] Wookey P A, Aerts R, Bardgett R D, et al. Ecosystem feedbacks and cascading processes: standing the irrole in the ponies of Arctic tundra pineco system stoen vironmen talchange [J]. *Global Change Biology*, 2010, 15(5): 1153–1172.
- [2] Chen B, Xu G, Coops N C, et al. Satellite-observed changes in terrestrial vegetation growth trends across the Asia-Pacific region associated with land cover and climate from 1982 to 2011 [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(11): 1055–1076.
- [3] 丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,刘传胜.策勒绿洲植被覆盖动态变化遥感研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 79–83.
- [4] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(2): 313–328.
- [5] Alcaraz-Segura D, Chuvieco E, Epstein H E, et al. Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 760–770.
- [6] Bai Z G, Dent D L, Olsson L, et al. Proxy global assessment of land degradation [J]. *Soil Use and Management*, 2008, 24(3): 223–234.
- [7] 陈奕兆,李建龙,孙政国,等.欧亚大陆草原带1982–2008年间净初级生产力时空动态及其对气候变化响应研究[J]. *草业学报*, 2017, 26(1): 1–12.
- [8] 杨红飞.新疆草地生产力及碳源汇分布特征与机制研究[D]. 南京:南京大学,2013.
- [9] 穆晨,李晓敏.新疆主要牧区夏草场退化状况及恢复对策研究[J]. *新疆畜牧业*, 2011(5): 4–6.
- [10] 闫洋,彭建,李刚勇,等.基于像元二分模型法反演新疆天然草原植被覆盖度变化[J]. *草食家畜*, 2020(6): 63–68.
- [11] 黄仁湘,高中起.吉林省东部低山丘陵草地类型及其利用特性[J]. *吉林畜牧兽医*, 1992(1): 31–34.
- [12] 张小燕.西北地区植被背景值及演替规律研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2003.
- [13] 刚成诚.全球草地生产力时空动态定量评估及其驱动因素分析[D]. 南京:南京大学,2015.
- [14] 张宏斌.基于多源遥感数据的草原植被状况变化研究:以内蒙古草原为例[D]. 北京:中国农业科学院,2007.
- [15] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, et al. Evaluation of high-resolution satellite rainfall products using rain gauge data over complex terrain in southwest China [J]. *Theoretical Applied Climatology*, 2014, 119: 203–219.
- [16] Piao S L, Tan J G, Chen A P, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6911.
- [17] Shen M G, Jiang N, Peng D L, et al. Can changes in autumn phenology facilitate earlier green-up date of northern vegetation? [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 291: 108007.
- [18] Sapanov M K, Sizemskaya M L. Climate-dependent changes in herbaceous vegetation on Solonchakous Solonchets of the Northern Caspian lowland [J]. *Biology Bulletin*, 2011, 38(10): 1031–1036.
- [19] Campbell T K F, Lantz T G, Fraser R H, et al. High arctic vegetation change mediated by hydrological conditions [J]. *Ecosystems*, 2021, 24: 106–121.
- [20] Zhu Z C, Piao S L, Yang H, et al. Greening of the earth and its drivers [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 791–795.
- [21] Gao Q Z, Zhu W Q, Schwartz M W, et al. Climatic change controls productivity variation in global grasslands [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26958.
- [22] Piao S L, Liu Q, Chen A P, et al. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25: 1922–1940.
- [23] Zhang Y, Liu L Y, Liu Y, et al. Response of altitudinal vegetation belts of the Tianshan Mountains in northwestern China to climate change during 1989–2015 [J]. *Scientific Reports*, 2021,

- 11:4870.
- [24] 徐满厚,薛娴.青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应[J].生态学报,2013,33:2071-2083.
- [25] 郭宏.新疆塔城地区天然草原退化原因及治理对策[J].草食家畜,2015(3):55-57.
- [26] 古丽娜尔·沙亚汗,李佳欢,谭学周,等.新疆塔城不同类型草场生产力动态变化[J].草业学报,2017,25(1):49-54.
- [27] Ehrensberger K S.Synthesis of semi-natural grassland vegetation of a biogeographically heterogeneous area: mesophilous species-rich meadows in Switzerland [J]. Folia Geobotanica, 2000, 35:289-313.
- [28] Zhang R P, Liang T G, Guo J, et al.Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014[J].Scientific Reports, 2018, 8:2888.
- [29] 张强强,景亚平,杨雪.新疆兵团农九师实施草原生态补奖政策效益初探[J].中国畜牧业,2013(4):71-73.
- [30] 段少敏.基于农户视角的塔城草原生态补偿效益研究[D].石河子:石河子大学,2015.
- [31] Li P L, Hu Z M, Liu U Y W.Shift in the trend of browning in Southwestern Tibetan Plateau in the past two decades[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 287: 107950.
- [32] Piao S L, Zhang X Z, Wang G T, et al.Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 6:2842-2855.
- [33] 刘轩,赵珮杉,高广磊,等.沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)物候特征及其对气候的响应[J].中国沙漠,2022, 42(2):25-35.
- [34] Wang X H, Piao S L, Ciais P, et al.Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 [J].PNAS, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [35] 李素艳.洪善达克地区草地资源评价与载畜量的研究:以内蒙古正蓝旗为例[D].北京:北京林业大学,2004.
- [36] 吴倩倩,张晓,徐书兴,等.亚洲内陆干旱区NDVI与树木生长的气候响应及其影响因素[J].中国沙漠,2022,42(4):1-10.
- [37] 尹振良,冯起,王凌阁,等.2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J].中国沙漠,2022,42(4):11-21.
- [38] 朱士华,方霞,杭鑫,等.中亚草地植被指数(NDVI)对气候变化及人类活动的响应[J].中国沙漠,2022,42(4):229-241.
- [39] Liu Y C, Li Z, Chen Y N.Continuous warming shift greening towards browning in the Southeast and Northwest high mountain Asia[J].Scientific Reports, 2021, 11: 17920.
- [40] Zhang G, Zhang Y, Dong G J, et al.Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011 [J]. PNAS, 2013, 110:4309-4314.
- [41] Xu H J, Wang X P, Yang T B.Trend shifts in satellite-derived vegetation growth in Central Eurasia, 1982-2013 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1658-1674.
- [42] 王飞,刘红霞.新疆塔城地区近56年气候生产潜力变化特征分析[C]//第35届中国气象学会年会S17气候环境变化与人体健康论文集.2018.
- [43] 张善红.太白山植被时空变化及其对区域气温的响应[D].西安:西北大学,2011.
- [44] 陈晓光,李剑萍,李志军,等.青海湖地区植被覆盖及其与气温降水变化的关系[J].中国沙漠,2007,27(5):797-804.
- [45] 丛英利,闫凯,史韶武,等.实施退牧还草工程提高塔城地区库鲁斯台草原畜牧业生产水平[J].草食家畜,2003(3): 17-20.
- [46] 魏兴琥,雷俐,邹学勇,等.京津风沙源浑善达克沙地治理区退耕还林地的植被变化[J].中国沙漠,2013,33(2):604-612.
- [47] 殷桂涛.退耕还草工程在塔城地区塔尔巴合台山前旱地的生态恢复效果研究[J].草食家畜,2016(5):70-73.

Vegetation index change and its driving forces of low mountain meadow vegetation in the northwest of Tacheng Region, Xinjiang, China

He Haixiu¹, Fu Aihong², Wang Chuan²

(1. Agricultural Science Research Institute in The Ninth Division of the Corps, Emin 834699, Xinjiang, China; 2. National Key Laboratory of Ecological Security and Sustainable Development in Arid Area, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: In this paper, low mountain meadow in Tacheng, Xinjiang, China, is taken as the research object. Combined with the monthly Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) data, meteorological data (including annual mean temperature and precipitation) and socio-economic development data (including annual average livestock carrying capacity, total meat production and per capita net income of farmers and herdsmen) from 2001 to 2020, using correlation analysis and trend analysis by means of ArcGIS 10.2.2 software, the temporal and spatial variation characteristics of *NDVI*, meteorological factors and socio-economic development data in study area were studied in the 20 years. From the point of view of climate change and human activities, the driving forces affecting *NDVI* change of low mountain meadow were discussed, and the effectiveness and timeliness of grassland restoration measures taken in the past were revealed. The results showed that: (1) In the past 20 years, *NDVI* in the vegetation growing season generally showed a slight upward trend. However, there was a reversal around 2008, mainly in the form of a significant downward trend from 2001 to 2008 and an upward trend from 2009 to 2020. These trends indicate that the vegetation index of lowland meadow shows a trend of first decreasing and then increasing, and the vegetation shows a smaller greening trend after 2009. From 2001 to 2008, low mountain meadow was in the greening state, the greening phenomenon was mainly distributed in the southwest, South and east of the study area, but there was a browning trend, and the decrease of *NDVI* was the biggest in summer, and it was in the browning state from 2009 to 2020, the greening phenomenon is mainly distributed in the southwest of the study area, but there is a weak greening trend, and the increase of *NDVI* is the biggest in summer. (2) The general change of the growing season from 2001 to 2020 is a “warm and dry” trend, but the “warm and dry” trend has slowed down since 2009, the southern part of the meadow experienced a warming process of decreasing precipitation, while the northwest and northeast parts showed a cooling process of increasing precipitation in the past 20 years. (3) The number of livestock and total meat production both showed a trend of rapid increase, then a gradual increase and a sharp decrease, and the per capita net income showed an increasing trend. The reduction in the number of livestock and meat production is related to local measures such as banning grazing, closing down grazing, returning farmland to grassland, returning grazing to grassland, etc. (4) There was significantly positive correlation between *NDVI* and precipitation, but not for temperature and livestock production. (5) The measures implemented in the past, such as returning farmland to grassland, returning grazing to grassland and so on, had produced short-term effects. Even though the meadow vegetation showed a weak greening trend after 2009, it is still difficult to reverse the state of vegetation degradation. In the future, new measures or projects should be proposed in order to fundamentally realize the restoration and long-term sustainable development of grassland.

Key words: low mountain meadow; normalized difference vegetation index (*NDVI*); climate change; driving forces; Tacheng Region