

DOI: 10.5846/stxb201801280223

王新源, 连杰, 杨小鹏, 赵学勇, 王小军, 马仲武, 龚丞馥, 曲浩, 王彬. 玛曲县植被覆被变化及其对环境要素的响应. 生态学报, 2019, 39(3): - .
Wang X Y, Lian J, Yang X P, Zhao X Y, Wang X J, Ma Z W, Gong C K, Qu H, Wang B. Variation in vegetation and its response to environmental factors in Maqu County. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

玛曲县植被覆被变化及其对环境要素的响应

王新源^{1,2}, 连杰^{1,*}, 杨小鹏², 赵学勇¹, 王小军², 马仲武², 龚丞馥², 曲浩¹, 王彬²

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 奈曼沙漠化研究站, 兰州 730000

2 甘肃省生态环境监测监督管理局, 兰州 730020

摘要: 植被覆被变化是气象要素和人类活动综合作用的结果, 能够反映区域内生态系统的演替趋势。玛曲高寒生态区作为黄河上游重要的水源涵养和补给区, 具有维持区域生物多样性和生态安全, 保障经济社会健康发展的重要作用, 因此厘清该区域植被变化与气候及人类活动等环境要素的相互关系有助于为玛曲县生态治理与恢复提供科学参考。鉴于此, 以 2000—2015 年 MODIS/NDVI 数据为基础, 结合同期气象与人类活动数据, 应用趋势分析法、相关分析以及通径分析等方法, 分析了玛曲县植被 NDVI 的时空变化规律, 并详细探讨了气象要素和人类活动对植被覆被变化的影响。结果表明: (1) 2000—2015 年玛曲县 NDVI 呈波动上升趋势, 上升速率为 0.01015/10a; 各土地利用/覆被类型中, 增加幅度由大到小依次为高山稀疏植被、湿地、沙化草甸、山地疏林地、高寒草甸、亚高山硬叶灌丛、亚高山阔叶灌丛和高寒草原; 增加面积占相应地类总面积比例由大到小分别是高山稀疏植被 (75.57%)、山地疏林地 (71.45%)、沙化草甸 (71.18%)、湿地 (70.66%)、高寒草甸 (68.15%)、亚高山硬叶灌丛 (66.96%)、亚高山阔叶灌丛 (66.24%) 和高寒草原 (66.05%); (2) 气象要素中, 气温与 NDVI 间具有显著正相关 ($P < 0.05$), 是影响植被覆被的决定性因子, 利于植被的生长与发育; 降水与 NDVI 间相关不显著 ($P > 0.05$), 对植被覆被的影响较小; (3) 人类活动要素中, 与放牧强度密切相关的大牲畜存栏数和羊存栏数是植被生长的主控因子, 其中大牲畜存栏数呈显著的抑制作用 ($P < 0.05$), 羊存栏数具有较强的促进作用 ($P < 0.05$); (4) 通径分析发现, 气温、大牲畜存栏数和羊存栏数的决定系数依次为 0.3005, -0.0563 和 0.0128, 说明气温对 NDVI 的综合作用强度最高、大牲畜存栏数次之, 羊存栏数最低; 此外, 剩余通径系数为 0.53。该数值较大, 表明仍有部分对 NDVI 增加存在影响的环境要素未考虑到, 需在今后的研究中给予关注。

关键词: MODIS/NDVI; 玛曲县; 气象要素; 人类活动要素; 通径分析

Variation in vegetation and its response to environmental factors in Maqu County

WANG Xinyuan^{1,2}, LIAN Jie^{1,*}, YANG Xiaopeng², ZHAO Xueyong¹, WANG Xiaojun², MA Zhongwu², GONG Chengkui², QU Hao¹, WANG Bin²

1 Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 Ecological Environmental Supervision and Administration Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020, China

Abstract: Change in vegetation coverage, which can reflect the direction of regional succession in ecosystems, is the result of the combined action of meteorological factors and human activities. As an important water conservation and recharge area in the upper reaches of the Yellow River, the alpine ecological zone of Maqu County plays an important role in maintaining regional biodiversity and ecological security, and also in ensuring the healthy development of human economy and society. Clarification of the relationships among vegetation change and climatic conditions and human activities or other environmental factors in this region would thus make an important contribution to ecological management and restoration in

基金项目: 国家重点研发计划科技基础资源调查专项 (2017FY100200); 国家自然科学基金项目 (41807525, 41471083, 41501572)

收稿日期: 2018-01-28; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lianjeco@outlook.com

Maqu County. Therefore, we used trend, correlation, and path analyses to analyze the temporal and spatial variation of vegetation normalized difference vegetation index (NDVI) in Maqu County based on MODIS/NDVI data obtained between 2000 and 2015 and meteorological and human activity data for the same period. Furthermore, we present a detailed discussion on the effect of meteorological factors and human activities on vegetation cover change. The following results were obtained. (1) Fluctuation in the NDVI of Maqu County increased from 2000 to 2015, with a rate of increase of 0.01015/10 a. Among all land use and cover types, the range increased in the following order: alpine sparse vegetation > wetland > desertification meadow > open forest > alpine meadow > subalpine sclerophyllous shrubs > subalpine broadleaf shrubs > alpine grassland. The order of the increasing area accounting for the total area was alpine sparse vegetation (75.57%) > open forest (71.45%) > desertification meadow (71.18%) > wetland (70.66%) > alpine meadow (68.15%) > subalpine sclerophyllous shrubs (66.96%) > subalpine broadleaf shrubs (66.24%) > alpine grassland (66.05%). (2) Among the meteorological factors examined, there was a significant positive correlation between temperature and NDVI ($P < 0.05$), which was a decisive factor affecting vegetation cover and beneficial to the growth and development of vegetation. Vegetation cover was less affected by precipitation and there was no significant correlation between precipitation and NDVI ($P > 0.05$). (3) Among the human activities examined, large livestock and sheep population numbers were the main factors controlling vegetation growth, which was closely related to grazing intensity, with large livestock populations having significant inhibitory effects ($P < 0.05$) and sheep populations having strong promoting effects ($P < 0.05$). (4) Path analysis yielded decision coefficients of 0.3005, -0.0563, and 0.0128 for air temperature, large livestock population number, and sheep population number, respectively, indicating that the effect of temperature on NDVI was the strongest and the effect of sheep population number was the weakest. In addition, the residual path coefficient of 0.53 indicated that there are certain other environmental factors that have an effect on the increase of NDVI, but were not taken into consideration, which warrant further attention in future research.

Key Words: MODIS/NDVI; Maqu County; meteorological factor; human activity factor; path analysis

植被是构建陆地生态系统的主要组分,是大气圈、土壤圈和水圈内物质循环和能量流动的载体^[1-2],在指示气候变化^[3],实现生态系统服务功能等方面具有重要作用。陆地生态系统生态退化或恢复的多种类型,包括荒漠化、生物多样性水平波动、土壤污染与恢复、水土流失与保持等,在一定程度上均能由植被的生长、变化和迁移来刻画。因此,观测和分析植被动态特征已成为研究生态环境变化的重要切入点^[4]。

在植被的动态研究中,由于能较为精确的度量植被的生长状况和覆盖程度^[3,5],归一化植被指数 (Normal Difference Vegetation Index, NDVI) 被广泛应用于植被生物量监测^[6]、植被群落组成与分类、自然灾害灾情评估、土地利用和覆被变化等研究领域^[7-8]。同时,作为遥感数据,NDVI 具有覆盖范围广^[9],时空延续性好^[10],数据序列完整等特点,为区域尺度上定量分析植被动态变化提供了可能。考虑到 NDVI 在中低植被覆盖区有较高的敏感性和解释力^[11],因此,其在寒冷干旱等植被生长受限生态系统具有良好的适用性,如北美大草原^[12],北美洲北极沿海区^[13]、东亚蒙古戈壁^[14]及我国的青藏高原等^[15],而玛曲县位于青藏高原高寒生态区,对气候变化和人类活动的响应敏感^[16],是应用 NDVI 诠释植被动态变化的理想区域。

玛曲县地处青藏高原东北缘,是黄河上游干支流重要的水源涵养和补给区^[17-18],分布在区域内的植被是维持当地生态系统服务功能,保障黄河流域生态安全和促进经济社会健康有序发展的关键要素。源于特殊的自然环境和气候条件,玛曲地区陆地生态系统以高寒草甸和湿地为主,植物群落结构简单、生态功能稳定性较差、抗干扰能力弱,极易受环境变化的影响^[19-20]。因此,玛曲县植被对生态环境变化的“指示作用”尤为灵敏。近年来,有关利用 NDVI 数据与环境要素相关关系的研究已在玛曲县及周边区域广泛开展,其研究内容主要集中于植被动态特征与驱动要素两个方面。在植被动态变化方面,存在“植被持续退化”^[21]和“植被逐步恢复”^[22]两类截然不同的观点。在驱动要素方面,研究范围以气温和降水等气候因子为主,但这些因子对植被

的作用与影响仍有争议,存在正相关^[22-23]、负相关^[19]和相关不显著^[19,24]等多个结论。值得注意的是,上述研究多以玛曲地区整体空间区域内的 NDVI 为研究对象,对不同土地利用/覆被类型下 NDVI 变化规律的关注相对不足,且在驱动要素的分析方面,也多侧重于气候因素,缺乏对社会经济活动等人类因素的定量分析。鉴于此,本文利用 2000—2015 年 MODIS NDVI 数据,探究玛曲县不同土地利用/覆被类型 NDVI 的时空变化规律,阐明每种土地和植被覆被类型的 NDVI 和气候因子的相关关系。在此基础上,应用通径分析,度量包括人类活动在内的环境要素对玛曲地区植被覆被变化的直接作用和间接影响,以为玛曲县生态功能维护和各项生态环境保护措施的开展提供基础数据及理论依据。

1 研究区概况

玛曲县地处青藏高原东北缘,位于甘肃省西南角,与四川、青海两省相邻,地理坐标为 $100^{\circ}45'45''$ — $102^{\circ}29'00''$ E, $33^{\circ}06'30''$ — $34^{\circ}30'15''$ N。区域内海拔 3300—4806 m,由西北向东南逐步降低,按地貌分布格局,全县可划分为西北部高山区,中南部丘陵区 and 东部河岸阶地三部分^[24]。黄河自青海省久治县门堂乡进入玛曲,从南、东、北 3 个方向绕县境西流,流经区域汉河密集,支流众多,形成大面积湿地滩涂(图 1)。

玛曲县属于高寒湿润型气候,年均降水量 615.5 mm,年平均蒸发量为 1347.3 mm;年均温 1.1°C ,最热月(7 月)平均气温 11.3°C ,最冷月(1 月)平均气温 -8.7°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 258.6°C ,无绝对无霜期;年平均风速 2.5 m/s ,其中风速大于 17 m/s 的大风天达 77.1 d。植被类型包括山地针叶林、高寒常绿灌木林,高寒草甸、高寒草原等多种,以高寒草甸分布面积最广^[17]。

此外,玛曲县隶属于甘南藏族自治州,是一个以藏族为主的纯牧业县,牲畜存出栏规模大、产量高,其各类生产经营活动与畜牧业关系密切^[17,25]。

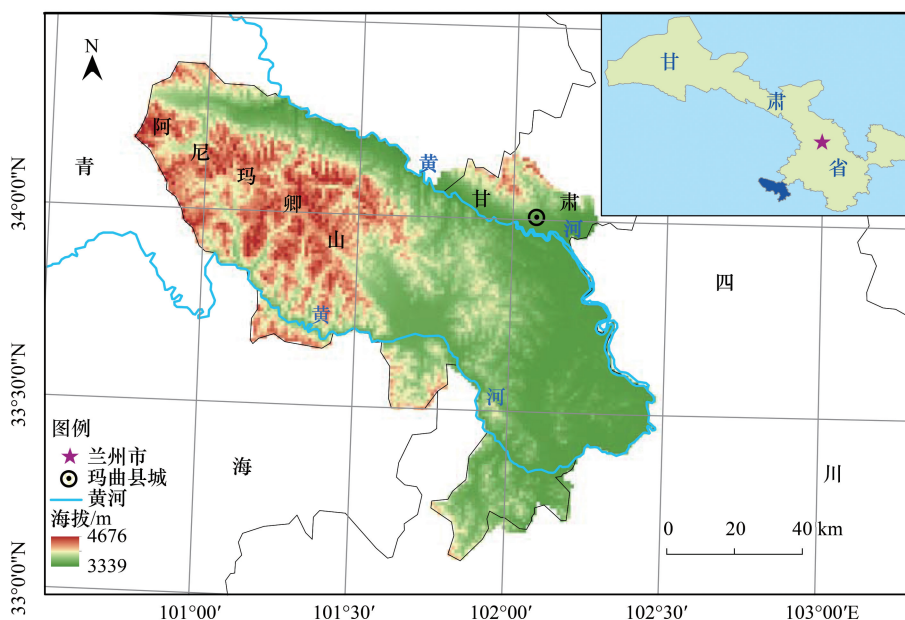


图 1 玛曲县概况

Fig.1 The sketch map of the Maqu County

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

NDVI 数据采用美国 LPDAAC(Land Process Distributed Active Archive Center)数据集中的植被指数产品 MOD13Q1,时间分辨率 16 d,空间分辨率 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$,时间序列为 2000 年 3 月至 2015 年 12 月。应用 MRT (Modis Reprojection Tools) 软件对源数据进行图像镶嵌、格式转换和重新投影,并运用均值迭代滤波法^[26]修正

异常值。之后,利用最大值合成法 MVC(Maximum Value Composites)对全年数据进行处理,获得基于像元的 NDVI 年最大值,代表当年植被覆盖最佳状况^[8]。该方法可有效降低云层、太阳高度角、气溶胶等因素的干扰,尤其是排除了高寒生态区冬春季积雪的不利影响^[24],进一步提高 NDVI 数据的可靠性。

依据中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)产品序列中的 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据和中国 100 万植被类型空间分布数据^[27],同时参考玛曲县实际情况,将区域内土地利用/覆被类型划分为山地疏林地、高山稀疏植被、亚高山阔叶灌丛、亚高山硬叶灌丛、高寒草原、高寒草甸、湿地、沙化草甸、水体和城乡建设用地等 10 种(图 2)。鉴于本文的关注重点为多年植被覆盖区,因此水体和城乡建设用地不再作为研究对象进行探讨。

气象数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)的气象空间插值数据集,应用投影转换和数据掩膜,提取出与 NDVI 投影坐标和分辨率一致的栅格数据。在分析研究区内气象数据时,采用 ARCGIS 做栅格均值化处理,获得气象数据的区域平均值。

社会经济数据来源于《甘肃省发展年鉴》^[28],综合玛曲县自然条件与产业结构^[29],选取林业总产值、牧业总产值、大牲畜存栏数、羊存栏数、工业总产值、农村用电量 6 个指标作为分析对象。

2.2 研究方法

2.2.1 NDVI 变化趋势分析

一元回归趋势线法可分析单个像元的变化趋势,从而度量给定时间内植被覆盖动态变化的空间特征^[30]。本文应用该方法来模拟 2000—2015 年研究区内 NDVI 的空间变化趋势,计算公式如下:

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

式中, n 为研究时间序列年数,即 16 年(2000—2015 年); i 代表年序号; NDVI_i 代表第 i 年最大化 NDVI 值; Θ 为趋势线斜率,代表单位像元 NDVI 的变化趋势,当 $\Theta > 0$ 时,表明该像元 16 年间植被覆盖趋于改善;反之,则说明此像元植被生长趋于退化。

2.2.2 相关分析

相关分析可度量要素间的相互关系,本研究应用相关分析法分析 NDVI 对气象要素的响应程度。相关分析的数学表达式为:

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

式中, n 为研究时长(16 a); i 为年序号; x_i 代表第 i 年年降水量或年均温, $\bar{x}$ 代表年降水量或年均温在研究时长的平均值; y_i 代表第 i 年 NDVI 值, $\bar{y}$ 代表 NDVI 在研究时长的平均值。

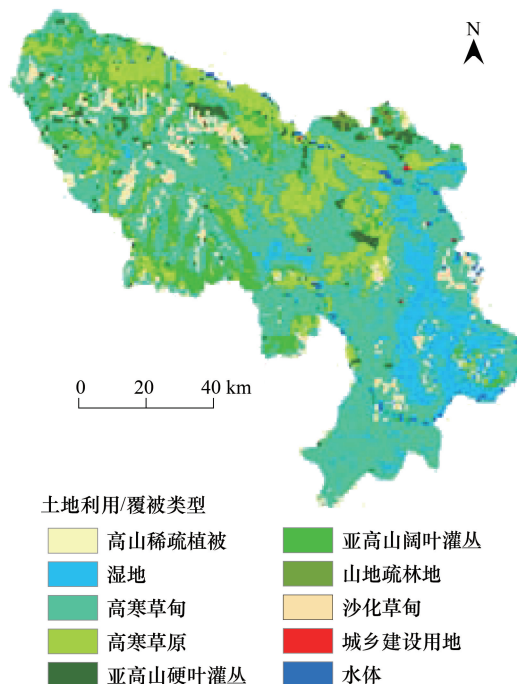


图 2 玛曲县土地利用与覆被类型
Fig.2 Land use/cover types in Maqu County Distribution of sites

2.2.3 偏相关分析

考虑到地理系统受多种要素的共同影响,各要素间可能并不相互独立,对此,应用偏相关分析度量两要素间相互关系,可排除其他要素的影响。在获得 NDVI 与降水和气温相关系数的基础上,进一步计算可得 NDVI 与两气象要素的偏相关系数^[31],具体公式如下:

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2) + (1 - r_{bc}^2)}} \quad (3)$$

式中, $r_{ab,c}$ 代表将要素 c 固定为常量后要素 a 与要素 b 的偏相关系数; r_{ab} , r_{ac} , r_{bc} 分别代表要素 a 与要素 b 、要素 a 与要素 c 、要素 b 与要素 c 的相关系数。

2.2.4 通径分析

通径分析是以相关分析和多元回归分析为基础,将自变量与因变量间的相关系数分解为自变量对因变量的直接效应和间接效应^[32-33],能够直观的反映变量间的相互关系及作用路径。决定系数是通径分析的主要指标,其可将自变量对因变量的综合作用进行排序^[34],并确定自变量对因变量的作用性质与相对重要性。具体公式如下:

$$R_x^2 = 2P_x r_{xy} - P_x^2 \quad (4)$$

式中, R_x^2 表示自变量 x 的决定系数,当 $R_x^2 > 0$ 时,代表自变量对因变量存在正面效应,作用为协同,反之,自变量对因变量产生负面效应,作用为限制; P_x 为自变量 x 的直接通径系数; r_{xy} 为自变量 x 与因变量 y 的相关系数。

3 结果与分析

3.1 NDVI 的年际变化规律

应用 MVC 法获得基于像元的年度 NDVI 最大值后,采取逐象元加权平均处理,获得该年度玛曲县的区域平均 NDVI,对研究时间序列的 NDVI 进行分析,探讨其年际变化规律。

由图 3 可以看出,2000—2015 年间玛曲县及其境内不同土地利用/覆被类型 NDVI 的变化规律基本一致,均呈波动上升趋势,植被覆盖有所增加。在研究时段内,各土地利用/覆被类型 NDVI 变化趋势存在阶段性,表现为 2000—2006 年处于逐步上升期,2006 年之后大幅降低,除亚高山阔叶灌丛,其余地类 NDVI 均在 2008 年下降至谷值,之后呈波动增加的趋势,其中亚高山阔叶灌丛、亚高山硬叶灌丛、高寒草原和高寒草甸于 2010 年上升至最高值,沙化草甸、湿地和高山稀疏植被则在 2012 年达到峰值。

采用线性回归对不同土地利用/覆被类型 NDVI 的年际变化进行分析,确定其在研究时段的变化强度(表 1),同时应用 Mann—Kendall 检验计算置信度水平。结果表明,玛曲县 NDVI 在研究时段的增长速率为 0.01015/10a,变化幅度未达到显著水平($P > 0.05$)。各土地利用/覆被类型 NDVI 增幅由大到小依次为高山稀疏植被、湿地、沙化草甸、山地疏林地、高寒草甸、亚高山硬叶灌丛、亚高山阔叶灌丛和高寒草原,具体速率分别是 0.01826/10a、0.01535/10a、0.01385/10a、0.01169/10a、0.00986/10a、0.0089/10a、0.00879/10a 和 0.00743/10a,其中高山稀疏植被、湿地和沙化草甸通过了 0.05

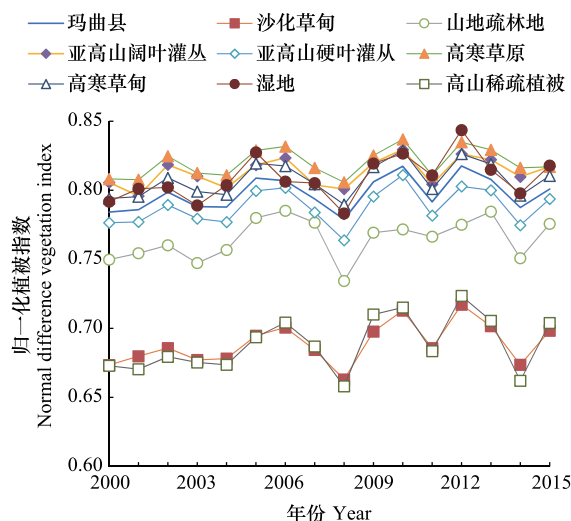


图 3 2000—2015 年玛曲县不同土地利用/覆被类型年均 NDVI 变化

Fig.3 NDVI variation of different land use/cover types in Maqu County from 2000—2015

水平的显著性检验。

表 1 玛曲县不同土地利用/覆被类型 NDVI 年际变化线性回归分析
Table 1 Linear regression of NDVI from different land use/cover types in Maqu County

土地利用/覆被类型 Land use/cover types	线性回归方程 Linear regression equation	R
玛曲县 Maqu County	$y=0.001015x+0.789$	0.3993
山地疏林地 Open forest	$y=0.001169x+0.7549$	0.3741
亚高山阔叶灌丛 Subalpine broadleaf shrubs	$y=0.000879x+0.8055$	0.4105
亚高山硬叶灌丛 Subalpine sclerophyllous shrubs	$y=0.00089x+0.7804$	0.3237
高寒草原 Alpine grassland	$y=0.000743x+0.8135$	0.3417
高寒草甸 Alpine meadow	$y=0.000986x+0.7994$	0.3797
湿地 Wetland	$y=0.001535x+0.7956$	0.4642
高山稀疏植被 Sparse vegetation	$y=0.001826x+0.6731$	0.4383
沙化草甸 Desertification meadow	$y=0.001385x+0.6772$	0.4385

3.2 NDVI 的空间变化规律

一元线性回归分析直观的反映了玛曲县 NDVI 在空间上的动态特征,图 4 显示了 NDVI 变化斜率与显著性的空间分布情况,可以看出,研究区内 NDVI 整体呈增加趋势,植被覆盖有所好转,同时在整体性之下,存在几处显著改善区和显著退化区。其中植被覆盖明显改善的区域主要分布于玛曲县东南缘的齐哈玛和采日玛乡南部的高寒草甸以及曼日玛乡与黄河干流之间的大片湿地。植被覆盖显著下降的地区多集中在玛曲县城和阿万仓等城镇周边,区域内高寒草甸、高寒草原及沙化草甸交错分布。统计发现(表 2),玛曲县 NDVI 增加区域的面积为 6866.34 km²,占县域总面积(不包含水体和城乡建设用地,下同)的 68.21%,其中增加幅度达到显著水平以上($P<0.05$)的面积为 1317.25 km²,占县域面积的 13.08%。

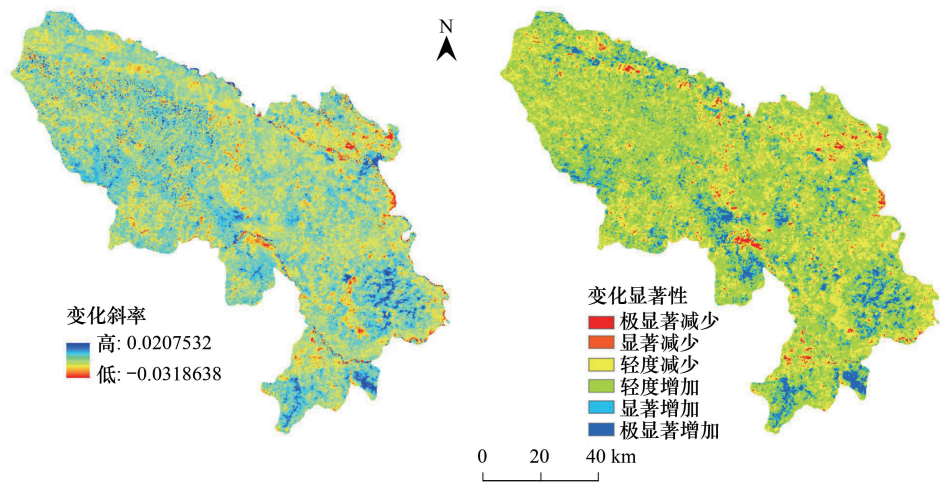


图 4 2000—2015 年玛曲县 NDVI 变化趋势及其显著性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of NDVI trend and significance (Student's t -test, $\alpha = 0.05$) for individual pixels in Maqu County from 2000—2015

土地利用/覆被类型不同,NDVI 的变化趋势亦不同,运用 Student's t -test 分析各土地利用/覆被类型的变化斜率,可精确度量其变化方向与显著水平。由表 2 可得,玛曲县各种土地利用/覆被类型中,按 NDVI 增加面积占相应地类总面积的比例进行排序,由大到小依次为高山稀疏植被(75.57%)、山地疏林地(71.45%)、沙化草甸(71.18%)、湿地(70.66%)、高寒草甸(68.15%)、亚高山硬叶灌丛(66.96%)、亚高山阔叶灌丛(66.24%)和高寒草原(66.05%),其中前四种类型的增加面积比例大于玛曲县平均水平;以 NDVI 增加幅度达

显著水平 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$) 的面积占比为基准, 由大到小依次为湿地 (19.84%)、亚高山阔叶灌丛 (13.30%)、高寒草原 (12.90%)、高寒草甸 (12.71%)、高山稀疏植被 (9.76%)、山地疏林地 (9.57%)、沙化草甸 (8.73%) 和亚高山硬叶灌丛 (7.81%)。此外, 由于不同土地利用/覆被类型间面积差异明显, 对玛曲县 NDVI 增加贡献最大的为高寒草甸。

3.3 NDVI 对气象要素的响应

3.3.1 气象要素的年际变化

图 5 反映了玛曲县 2000—2015 年间气温和降水的变化趋势。气温方面, 16 年间玛曲县年均气温表现出波动上升态势, 整体呈向上倾斜的 M 型, 增加速率达 $0.55^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 通过了 0.05 的显著水平检验; 其中气温峰值出现于 2010 年, 谷值发生在 2000 年, 2003、2006 以及 2009 年的气温处于较高水平, 2004 和 2008 年则位于偏低区间。总体来看, 在研究时间序列内, 玛曲县气候变暖倾向明显, 这与该区域相关研究结论基本一致^[19]。降水方面, 2000—2015 年间玛曲县年均降水量呈波动微增趋势, 增加率仅为 $16.81\text{ mm}/10\text{a}$, 未通过 0.05 的显著水平检验, 其中除在 2015 年出现异常偏低值外, 其余年度降水量均呈平稳波动状态。

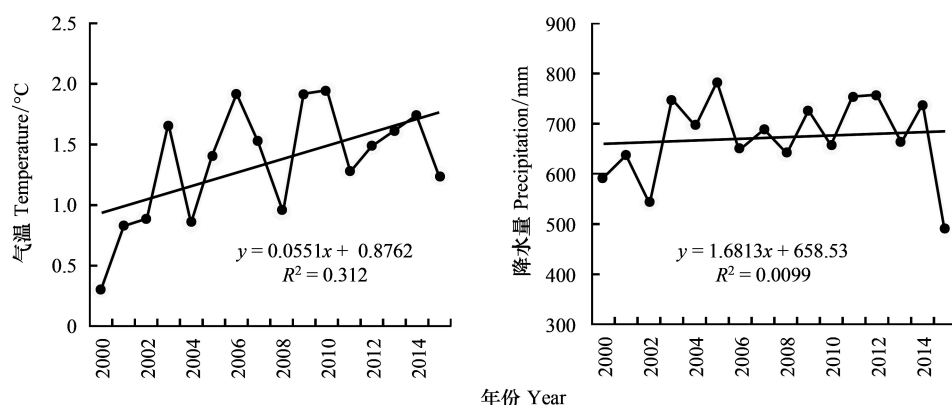


图 5 玛曲县 2000—2015 年年均气温和年均降水量变化趋势

Fig.5 Variation trend of annual average temperature and annual precipitation in Maqu County from 2000—2015

3.3.2 植被 NDVI 对气象要素的响应特征

以年为时间基准, 分析计算像元尺度上 2000—2015 年 NDVI 与年均温的相关系数 (图 6)。结果表明, 玛曲县植被 NDVI 和气温以正相关为主 (79.63%), 其中呈显著正相关 ($P < 0.05$) 的区域为 17.75%, 主要分布于

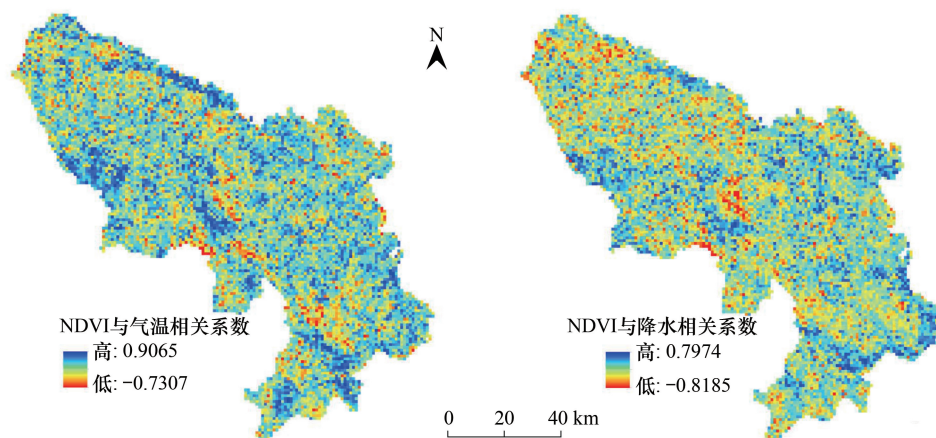


图 6 2000—2015 年玛曲县 NDVI 与年均温、年降水量的相关系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of correlativity of NDVI with temperature and precipitation in Maqu County from 2000—2015

表 2 玛曲县不同土地利用/覆被类型 NDVI 变化的显著性分析
Table 2 Significant statistical analysis of NDVI variation from different land use/cover types in Maqu County

土地利用/覆被类型 Land use/cover types	显著水平 Significance level											
	极显著下降 Excellent decrease			显著下降 Significant decrease			0.01<P<0.05 θ <0			轻度下降 Slight decrease		
	面积 Area/km ²	面积占比 Ratio/%	P<0.01 θ <0	面积 Area/km ²	面积占比 Ratio/%	P<0.01 Significant decrease	面积 Area/km ²	面积占比 Ratio/%	0.01<P<0.05 θ <0	面积 Area/km ²	面积占比 Ratio/%	轻度下降 Slight decrease
玛曲县 Maqu County *	74.00	0.74		150.96	1.50		2975.03	29.55		5549.09	55.13	5549.09
山地疏林地 Open forest	0.00	0.00		0.72	1.05		18.76	27.50		42.21	61.88	42.21
亚高山阔叶灌丛 Subalpine broadleaf shrubs	5.96	0.73		16.01	1.96		253.79	31.07		432.44	52.94	432.44
亚高山硬叶灌丛 Subalpine sclerophyllous shrubs	0.64	0.19		2.50	0.74		108.42	32.11		199.71	59.15	199.71
高寒草原 Alpine grassland	22.38	1.37		33.33	2.04		498.92	30.54		868.30	53.15	868.30
高寒草甸 Alpine meadow	37.19	0.71		76.47	1.46		1554.52	29.68		2903.73	55.44	2903.73
湿地 Wetland	6.36	0.56		15.44	1.36		311.38	27.42		577.11	50.82	577.11
高山稀疏植被 Sparse vegetation	0.13	0.14		0.29	0.32		21.62	23.97		59.35	65.81	59.35
沙化草甸 Desertification meadow	1.34	0.18		6.20	0.83		207.62	27.81		466.24	62.45	466.24

* 不包含水体和城乡建设用地面积; θ <0 表示趋势线斜率, θ >0 代表象元内植被趋于退化, θ >0 代表象元内植被趋于恢复

玛曲县东南缘的高寒草甸区、西北部黄河干流南岸高寒草原带以及阿尼玛卿山南麓;呈负相关的区域分布较为分散,其中相关性达到 0.05 显著水平的区域面积不足 1%。可以看出,温度是玛曲县 NDVI 动态变化的关键气象要素,气温上升有利于植被的生长与恢复。

图 6 显示了 2000—2015 年 NDVI 与年均降水量的相关系数。统计发现,玛曲县植被 NDVI 和降水量间正负相关并存,呈正相关的区域面积较大,达 58.58%,而呈显著正相关 ($P<0.05$) 和显著负相关 ($P<0.05$) 的区域均十分有限,占玛曲县总面积的比例分别为 3.3% 和 1.59%,说明在像元尺度上,玛曲县多数区域 NDVI 对降水变化的响应不敏感。

为了更加简明的刻画不同土地利用/覆被类型下植被对气象要素的响应强度,在区域尺度上,对 2000—2015 年 NDVI 与各气象要素进行相关分析和偏相关分析(表 3),统计表明,玛曲县 NDVI 与气温的相关和偏相关系数分别为 0.6099 和 0.6186,呈显著正相关 ($P<0.05$),除湿地和山地疏林地外,其余土地利用/覆被类型的 NDVI 与气温间相关和偏相关系数均通过了 0.05 水平的显著性检验,特别是高寒草原与高寒草甸区,气温对植被生长的协同作用达到极显著水平 ($P<0.01$)。相比气温,玛曲县 NDVI 与降水量的相关和偏相关系数仅为 0.1385 和 -0.1893,均未达到显著水平 ($P>0.05$),各土地利用/覆被类型的 NDVI 与降水量间相关和偏相关系数与玛曲县整体情况基本一致,同样未达到显著水平 ($P>0.05$)。值得注意的是,排除温度影响,多数土地利用/覆被类型区降水对 NDVI 的效应由协同转为抑制,说明温度变化在一定程度上影响了植被生长对降水的响应方向,其可能原因是区域内降水事件的发生常常伴随着云量增加和气压变化,由此引发的光照减少与气温降低对植被的光合与蒸腾作用产生较强的限制作用,导致其生长趋于减缓^[35]。另外,相较其他地类,沙化草甸 NDVI 与降水量间存在较高的正相关性,这可能源于沙化草甸水源涵养能力较差,土壤含水量相对较低,降水对植被生长的重要性有所增加。

表 3 玛曲县 NDVI 与气候要素的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between NDVI and climatic factors in Maqu County

土地利用/覆被类型 Land use/cover types	NDVI-T		NDVI-P	
	R_{NDVI-T}	$R_{NDVI-T/P}$	R_{NDVI-P}	$R_{NDVI-P/T}$
玛曲县 Maqu County	0.6099 *	0.6186 *	0.1385	-0.1893
山地疏林地 Open forest	0.4891	0.5221 *	0.0073	-0.2098
亚高山阔叶灌丛 Subalpine broadleaf shrubs	0.594 *	0.6703 **	-0.0032	-0.3861
亚高山硬叶灌丛 Subalpine sclerophyllous shrubs	0.5793 *	0.627 *	0.0297	-0.2958
高寒草原 Alpine grassland	0.6295 **	0.6428 **	0.1294	-0.2106
高寒草甸 Alpine meadow	0.6239 **	0.6353 **	0.1378	-0.2049
湿地 Wetland	0.4819	0.4406	0.218	0.0183
高山稀疏植被 Sparse vegetation	0.5555 *	0.5829 *	0.0455	-0.2171
沙化草甸 Desertification meadow	0.5725 *	0.6017 *	0.4378	0.2376

T: 气温, Temperature; P: 降水量, Precipitation; * 表示显著性水平通过 0.05 检验, ** 表示显著性水平通过 0.01 检验; R_{NDVI-T} 和 $R_{NDVI-T/P}$ 分别表示 NDVI 与气温的相关系数和排除降水量影响后与气温的偏相关系数; 以此类推

3.4 不同环境要素对 NDVI 的驱动作用

植被的生长特征与分布格局是环境要素综合作用的结果^[36]。这些环境因子既包括气温、降水等气象要素,也涵盖经济结构、生产生活方式等人类活动要素。作为地处高寒生态区的纯牧业县,玛曲牧民的生产经营活动对区域内植被变化的影响同样深刻^[25]。鉴于此,本研究选取 2000—2015 年间玛曲县林业总产值、牧业总产值、大牲畜存栏数、羊存栏数、工业总产值、农村用电量 6 个社会经济指标作为人类活动要素,其中,林业总产值和牧业总产值分别代表了林业与畜牧业的生产能力及发展程度;大牲畜存栏数与羊存栏数一定程度上反映了当年的放牧强度;工业总产值代表工业化和现代化发展情况;农村用电量与非迁徙牧民数量及牧民生产生活水平密切相关。

将 NDVI (Y) 作为因变量,气温 (X_1)、降水量 (X_2)、林业总产值 (X_3)、牧业总产值 (X_4)、大牲畜存栏数

(X_5)、羊存栏数(X_6)、工业总产值(X_7)和农村用电量(X_8)8个要素作为自变量,进行逐步回归分析,建立最优多元回归方程: $Y=0.0088X_1-0.0023X_5+0.001X_6+0.8524$ ($R^2=0.7158, P<0.05$),说明气温、大牲畜存栏数和羊存栏数对NDVI存在显著效应($P<0.05$),其余影响不显著($P>0.05$)的要素在逐步回归中被剔除。

基于多元回归方程,建立气温、大牲畜存栏数、羊存栏数与NDVI间的通径分析(表4),结果表明,气温的直接通径系数为0.3429,间接通径系数为0.2668,说明气温主要以直接的方式对NDVI产生促进作用,通过其他要素引起的正效应相对较小。大牲畜存栏数的直接通径系数为-0.7917,间接通径系数是0.4314,表明大牲畜存栏数对NDVI存在明显的负面作用,但在其他要素的间接影响下,其抑制作用有所下降。羊存栏数的直接通径系数为0.6558,间接通径系数为-0.3181,代表羊存栏数对NDVI存在较高的协同作用,但通过其他要素产生的负面影响,抵消了一部分正效应。此外,气温、大牲畜存栏数和羊存栏数的决定系数依次为0.3005, -0.0563和0.0128,说明气温对NDVI的综合作用强度最高、大牲畜存栏数次之,羊存栏数最低,其中气温为主要协同要素,大牲畜存栏数为主要限制要素。

表4 玛曲县NDVI与环境要素的通径分析

Table 4 Path analysis between NDVI and environmental factors in Maqu County

环境要素 Environmental factors	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient			决定系数 Decision coefficient
			气温 Temperature	大牲畜存栏数 Number of livestock	羊存栏数 Number of sheep	
气温 Temperature	0.6097	0.3429		-0.0605	0.3273	0.3005
大牲畜存栏数 Number of livestock	-0.3603	-0.7917	0.0262		0.4052	-0.0563
羊存栏数 Number of sheep	0.3377	0.6558	0.1711	-0.4893		0.0128

4 讨论

植被变化是气候和人类活动影响陆地生态系统的重要表征。玛曲县地处青藏高原东北缘,属于中国大地貌单元第一阶梯与第二阶梯的交汇区,气候条件和人类活动具有明显地域特征,是研究植被响应环境变化的理想区域。

研究表明,无论是整个玛曲县,还是具体到某一土地利用/覆被类型,NDVI上升的面积均大于65%,说明近年来玛曲县及各土地利用/覆被类型植被生长状况总体处于改善状态,地表生态趋于恢复。这一发现与国内在青藏高原及周边地区的多个研究结论基本一致^[37-38]。究其原因,一方面,在研究时间序列内,得益于环境温度的持续上升,植被覆盖有所增加;另一方面,一些人类活动的积极影响,如退牧还草、防沙治沙、湿地修复等生态保护工程的实施,在一定程度上促进了植被的恢复。

气温和降水是影响植被覆盖的主要自然要素^[39-40]。本研究中,气温对NDVI的影响强度明显高于降水,是驱动玛曲县植被动态变化的主导因子,这主要归因于玛曲属于高寒生态区,温度相对较低,长期热量供应不足造成土壤微生物活性和植被机体代谢水平偏低,从而导致植被生长发育受限。一定程度上,气温的持续上升缓解了热量对植被的限制,成为植被生长与扩张的主要驱动力。进一步研究表明,不同土地利用/覆被类型中,高寒草甸和高寒草原NDVI对气温的响应达到极显著水平($P<0.01$),可能源于这两种地类属玛曲县的主要放牧区,羊群的适度活动间接的促进了气温的影响效果(表4);湿地NDVI对气温的响应不显著,可能原因是各土地利用/覆被类型中,湿地的环境温度最高(2000—2015, 3.08℃),水热条件较好,植被对气温的依赖性降低。相较气温,研究区内各土地利用/覆被类型NDVI对降水的响应普遍不敏感,且该现象在山地疏林地、亚高山阔叶灌丛和亚高山硬叶灌丛中表现的尤为明显(表3)。这主要源于三方面因素。一是玛曲降水年均值长期处于较高水平,且地表径流充沛,土壤水分足够植被生长所需。二是可能与降水作用存在季节滞后和机制变化有关,冬春季降雪在夏季消融,形成下垫面产流和积水,以地表水和土壤水的形式作用于植被,在一定程度上削弱了降水对植被的直接效应^[24]。三是山地疏林地、亚高山阔叶灌丛和亚高山硬叶灌丛的优势种

多为根系发达的乔灌木,其根生物量在深层土壤中的比例较高,有助于提升植被利用深层土壤水和地下水的功能,减少对降水的依赖性^[41-43]。此外,当气温的影响被排除后,降水对 NDVI 产生的影响由不显著($P>0.05$)的促进作用转变为不显著的抑制作用($P>0.05$),客观反映了植被生长对降水的响应很大程度上来源于晴雨天气转变产生的温度变化。

通径分析表明,除气温外,放牧活动(大牲畜存栏数、羊存栏数)对植被的覆被变化同样产生了深刻影响。其中大牲畜存栏数对 NDVI 呈负面的限制作用,羊存栏数表现为正面的促进作用。两种放牧要素对植被 NDVI 影响的不同很大程度上归因于放牧强度和牲畜种类的差异。随着放牧强度增加,家畜对植被的采食和践踏超过其耐受范围,机体组分受损且难以恢复,进而影响分蘖和繁殖更新,生长发育严重受限^[44]。此外,牲畜对植被的采食存在偏好性,过度放牧导致群落中适口性好、产量高的禾草和莎草迅速减少,具有较强耐牧性、产量低的毒草和杂草比例上升,群落结构发生改变。如不及时干预,群落将迅速向以毒草、杂草为主的方向演替,最终失去其生产与生态服务功能^[45]。反之,适度放牧促使牧草产生超补偿生长,一定程度上增加了植被生物量^[46]。同时,适度放牧产生的少量牲畜排泄物为土壤微生物提供可利用的营养物质,有利于微生物的繁衍生长^[47],微生物数量上升加快了土壤中养分的周转速率,为植被正常生长提供物源保障。在玛曲县,大型牲畜以牦牛为主,小畜以藏绵羊为主,两者对植被的影响存在差异。相关研究证实,同一放牧强度下,对于给定土地利用/覆被类型(高寒草原和高寒草甸),单纯放牧绵羊区域的植被生物量明显高于单纯放牧牦牛区域^[48]。产生这一现象的原因有多个方面,主要包括:一是采食特性,当草本植物株高较低时,牦牛采取舔食,造成部分富集于地表的种子在舔食过程中进入牦牛消化道;而绵羊很少采用舔食,对植物种子的消耗远小于牦牛;二是排粪策略,牦牛排粪量大且不易分解,绵羊粪便体积小,易分解,利于植被吸收和利用;三是践踏强度,源于体重的巨大差异,牦牛对下垫面植被的践踏更严重,导致土壤容重变大,孔隙度减小,透水透气功能降低,植物根系生长受限。不难发现,大牲畜存栏数和羊存栏数对 NDVI 呈截然不同的影响效果,是放牧强度与牲畜种群生物特性综合作用的结果。说明玛曲县以牦牛为主的大型牲畜种群数超过了环境的最大容纳量,存在一定的过牧超载现象,而绵羊的放牧强度处于合理区间,对植被生长有一定积极作用。

本研究中,剩余因子的通径系数为 $e = \sqrt{1 - R^2} = 0.53$,该数值处于较高水平,说明有部分对 NDVI 增加影响较明显的环境要素还未考虑到。综合分析本研究选取的环境要素,自然因素中,除气象要素外,成土母质可能是引起植被变化的重要因素^[49];人类活动要素中,本研究着重探讨了可能产生负面影响的社会经济因素,对人类改善生态给予的一些积极干预关注不足。查阅相关资料发现^[28],玛曲自 2009 年以来,重点实施了甘南黄河重要水源补给生态功能区生态保护与建设、湿地保护、天然林保护、退牧还草和川西北甘南沙化草地综合治理项目等诸多生态工程。因此,近年来玛曲县植被趋于恢复的态势可能得益于这批生态保护工程^[50],对这些工程的定量分析应是今后该区域 NDVI 驱动力研究的重要内容。

5 结论

本研究以 2000—2015 年 MODIS/NDVI 数据为基础,结合同期气象与社会经济数据,应用 ARCGIS 空间分析、一元线性趋势分析、通径分析等多种统计学方法,研究了年际尺度上玛曲县植被 NDVI 的时空变化规律,并对驱动这种变化的环境要素进行了探讨与分析,得出以下结论:

(1) 研究时段内,玛曲县 NDVI 总体呈波动上升趋势,增速为 0.01015/10a。空间上,增长趋势显著的区域主要分布于玛曲县东南缘的齐哈玛和采日玛乡南部的高寒草甸以及曼日玛乡与黄河干流之间的大片湿地;下降幅度较明显的区域集中在玛曲县城和阿万仓等城镇周边,区域内高寒草甸、高寒草原及沙化草甸交错分布。整体来看,NDVI 增长区域多处于人类干预不明显、水热条件较好的地区;而降低的地区具有生境单元均一化程度低、人类活动较频繁的特点。

(2) 研究时段内,玛曲县气温上升趋势明显,其增加速率为 0.55℃/10a,通过了 0.05 的显著水平检验,而降水增速仅为 16.81 mm/10a,整体变化幅度有限,基本处于平衡状态($P>0.05$)。

(3)研究时段内,气象要素中,气温与植被 NDVI 间存在显著的正相关性($P<0.05$),是玛曲县植被生长的主控因子;降水与植被 NDVI 间相关性较低,对植被生长的影响有限。

(4)研究时段内,人类活动要素中,与放牧强度密切相关的大牲畜存栏数和羊存栏数是植被生长的关键因子,其中大牲畜存栏数呈显著的限制作用($P<0.05$),羊存栏数具有较强的协同作用($P<0.05$)。

综合可见,各种环境要素中,气温、大牲畜存栏数和羊存栏数是 NDVI 动态变化的主控因子,其中气温和羊存栏数作用为正向,利于植被生长;大牲畜存栏数影响为负向,限制植被生长。因此,在现有气候条件下,放牧模式应以控制总量、多羊少牛为主。此外,通径分析进一步表明,玛曲县植被生长与分布格局还受到其他环境要素的影响,根据近年来玛曲 NDVI 逐步向好的变化趋势,这种影响可能来自人类采取的某些积极措施,如退牧还草、湿地修复、天然林保护等生态工程,对这些工程的定量化分析应是今后玛曲县植被变化研究的重点。此外,需要说明的是,玛曲县地域广阔,但其境内及周边的气象站点却相对较少,且在地理位置上分布不均。因此,应用基于这些气象台站的空间插值数据来诠释整个区域内植被 NDVI 变化及其对气候因子的响应,存在一定的局限性。鉴于此,应在今后的研究中,一是加大区域内基础气象台站的密度,以改善空间插值数据的准确度。二是寻求适合该区域的插值分析方法,以更加精确的刻画气候因子对植被覆被变化的影响。

参考文献(References):

- [1] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [2] 李奇虎, 陈亚宁. 1981—2006 年西北干旱区 NDVI 时空分布变化对水热条件的响应. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 327-334.
- [3] 侯光雷, 张洪岩, 郭聃, 郭笑怡. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 285-292.
- [4] Keller F, Kienast F, Beniston M. Evidence of response of vegetation to environmental change on high-elevation sites in the Swiss Alps. *Regional Environmental Change*, 2000, 1(2): 70-77.
- [5] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y, Cai Q, Feng J M. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change*, 2006, 16(4): 340-348.
- [6] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 58-66.
- [7] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [8] 宋富强, 邢开雄, 刘阳, 刘志超, 康慕宜. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.
- [9] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究. *生态学报*, 2012, 32(11): 3404-3413.
- [10] 郭锐, 朱燕君, 王介民, 邓朝平. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 319-327.
- [11] 杨玲莉. 2000—2014 年黄河源区植被 NDVI 时空变化特征与气候变化响应分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [12] Maxwell S K, Sylvester K M. Identification of "ever-cropped" land (1984-2010) using landsat annual maximum NDVI image composites: Southwestern Kansas case study. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 186-195.
- [13] Post E, Bhatt U S, Bitz C M, Brodie J F, Fulton T L, Hebblewhite M, Kerby J, Kutz S J, Stirling I, Walker D A. Ecological consequences of sea-ice decline. *Science*, 2013, 341(6145): 519-524.
- [14] Sternberg T, Tsoimon R, Middleton N, Thomas D. Tracking desertification on the Mongolian steppe through NDVI and field-survey data. *International Journal of Digital Earth*, 2011, 4(1): 50-64.
- [15] 卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [16] 陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系. *地理科学*, 2017, 37(2): 292-300.
- [17] 陈文业, 张瑾, 戚登臣, 赵明, 张继强, 李广宇, 魏强, 王芳, 朱丽, 刘振恒, 孙飞达, 康建军, 罗文莉. 黄河首曲—玛曲县高寒草甸沙化动态演变趋势及其驱动因子定量分析. *草业学报*, 2013, 22(2): 11-21.
- [18] 胡梦珺, 潘宁惠, 左海玲, 李向锋. 基于 RS 和 GIS 的玛曲高原土地沙漠化时空演变研究. *生态学报*, 2017, 37(3): 922-931.
- [19] 褚琳, 黄翀, 刘高焕, 刘庆生. 2000-2010 年黄河源玛曲高寒湿地生态格局变化. *地理科学进展*, 2014, 33(3): 326-335.
- [20] Gao Q Z, Li Y, Wan Y F, Qin X B, Jiangcun W Z, Liu Y H. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet. *Climatic Change*, 2009, 97(3/4): 515.
- [21] 张德铨, 刘林山, 摆万奇, 沈振西, 阎建忠, 丁明军, 李双成, 郑度. 黄河源地区草地退化空间特征. *地理学报*, 2006, 61(1): 3-14.

- [22] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [23] 徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 黄河源区植被生长季 NDVI 时空特征及其对气候变化的响应. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1205-1210.
- [24] 陈世强, 文莉娟, 吕世华, 陈昌平, 奥银焕, 张宇, 鲍艳. 黄河上游玛曲县植被指数与气候变化研究. 冰川冻土, 2007, 29(1): 131-136.
- [25] 赵雪雁. 高寒牧区草地退化的人文因素研究——以甘南牧区玛曲县为例. 草业学报, 2007, 16(6): 113-120.
- [26] 李杭燕, 颀耀文, 马明国. 时序 NDVI 数据集重建方法评价与实例研究. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 596-602.
- [27] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001: 101-104.
- [28] 《甘肃发展年鉴》编委会. 甘肃发展年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001-2016.
- [29] 王庆辉, 窦学诚, 龚大鑫. 高寒牧区草地沙化问题研究——以玛曲草原为例. 干旱区地理, 2012, 35(2): 302-308.
- [30] Stow D A, Hope A, McGuire D, Verbyla D, Gamon J, Huemmrich F, Houston S, Racine C, Sturm M, Tape K, Hinzman L, Yoshikawa K, Tweedie C, Noyle B, Silapaswan C, Douglas D, Griffith B, Jia G S, Epstein H, Walker D, Daeschner S, Petersen A, Zhou L M, Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra ecosystems. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 281-308.
- [31] 姜红涛, 塔西甫拉提·特依拜, 阿尔达克·克里木, 张飞, 买买提·沙吾提, 吴雪梅. 艾比湖流域 NDVI 变化及其与降水、温度的关系. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1678-1684.
- [32] Du J L, Li M L, Yuan Z F, Guo M C, Song J Z, Xie X Z, Chen Y L. A decision analysis model for KEGG pathway analysis. BMC Bioinformatics, 2016, 17: 407.
- [33] Lian J, Zhao X Y, Li X, Zhang T H, Wang S K, Luo Y Q, Zhu Y C, Feng J. Detecting sustainability of desertification reversion: vegetation trend analysis in part of the agro-pastoral transitional zone in Inner Mongolia, China. Sustainability, 2017, 9(2): 211.
- [34] 宋小园, 朱仲元, 刘艳伟, 赵宏瑾. 通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现. 干旱区研究, 2016, 33(1): 108-113.
- [35] 李玲玲, 史江峰, 侯鑫源, 叶金水, 毛海波, 赵欣慰, 鹿化煜. 中国东南高海拔黄山松生长对气候的响应——以浙江省九龙山和安徽省牯牛降为例. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1849-1856.
- [36] 王新源, 陈翔舜, 丁乾平, 赵学勇, 王小军, 马仲武, 连杰. 不同荒漠化阶段植被生态特征对土壤环境因子的响应——以民勤荒漠绿洲过渡带为例. 生态学报, 2018, 38(5): 1569-1580.
- [37] 梁四海, 陈江, 金晓媚, 万力, 龚斌. 近 21 年青藏高原植被覆盖变化规律. 地球科学进展, 2007, 22(1): 33-40.
- [38] 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.
- [39] 南颖, 刘志锋, 董叶辉, 李秀霞, 吉喆. 2000—2008 年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究. 地理科学, 2010, 30(6): 921-928.
- [40] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 杨艳昭. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1425-1435.
- [41] van Tol G, van Dobben H F, Schmidt P, Klap J M. Biodiversity of Dutch forest ecosystems as affected by receding groundwater levels and atmospheric deposition. Biodiversity & Conservation, 1998, 7(2): 221-228.
- [42] Vervoort R W, van der Zee S E A T M. On stochastic modelling of groundwater uptake in semi-arid water-limited systems: Root density and seasonality effects. Ecohydrology, 2012, 5(5): 580-595.
- [43] Di N, Liu Y, Mead D J, Xie Y Q, Jia L M, Xi B Y. Root-system characteristics of plantation-grown *Populus tomentosa* adapted to seasonal fluctuation in the groundwater table. Trees, 2018, 32(1): 137-149.
- [44] 梁芸, 王大为. 2000 年以来甘南植被变化趋势及原因分析. 草业科学, 2016, 33(6): 1102-1111.
- [45] 仁青吉, 崔现亮, 赵彬彬. 放牧对高寒草甸植物群落结构及生产力的影响. 草业学报, 2008, 17(6): 134-140.
- [46] 毛绍娟, 吴启华, 李红琴, 张法伟, 李英年. 放牧强度对高寒杂草类草甸群落结构及生物量的影响. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1372-1380.
- [47] Wang K H, McSorley R, Bohlen P, Gathumbi S M. Cattle grazing increases microbial biomass and alters soil nematode communities in subtropical pastures. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(7): 1956-1965.
- [48] 鱼小军. 牦牛粪维系青藏高原高寒草地健康的作用机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [49] 邓朝平, 郭锐, 王介民, 马金辉. 近 20 余年来西北地区植被变化特征分析. 冰川冻土, 2006, 28(5): 686-693.
- [50] 郭锐, 韩天虎, 王静, 韩涛, 孙斌. 玛曲退牧还草工程生态效果的遥感监测. 中国沙漠, 2010, 30(1): 154-160.