

DOI: 10.20103/j.stxb.202407011536

俞文政, 于龙辉, 周华坤, 魏柱灯, 周雅文, 王珉焱. 祁连山南麓温性草原时空演变及其对气候变化的响应. 生态学报, 2025, 45(8): 3700–3715.

Yu W Z, Yu L H, Zhou H K, Wei Z D, Zhou Y W, Wang M Y. Investigation into the spatio-temporal dynamics of the Temperate Steppe in the southern foothills of Qilian and its response to climate change. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3700–3715.

祁连山南麓温性草原时空演变及其对气候变化的响应

俞文政^{1,*}, 于龙辉¹, 周华坤², 魏柱灯¹, 周雅文¹, 王珉焱¹

¹ 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044

² 中国科学院西北高原生物研究所青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008

摘要: 为探究高寒草地生态系统在垂直地带性上对气候变化的响应机制, 选择祁连山南麓温性草原为研究对象, 深入分析了 1987—2019 年祁连山南麓温性草原的时空演变特征, 定量评估了关键气候因子对温性草原面积变化的相对重要性, 揭示了温性草原面积变化对各气候因子变化的非线性响应关系及阈值。结果表明: (1) 1987—2019 年祁连山南麓温性草原面积呈增加趋势, 增加速率为 $28.3 \text{ km}^2/\text{a}$, 增加区域主要集中在青海湖周边及河谷谷底和青海南山海拔 3000 m 以上山区, 而减少区域则集中在青海湖东部的沙地和青海南山海拔 3000 m 以下地区; 垂直方向上, 温性草原向海拔 2900 m 以上高程区迁移, 且向坡度 25° 以上山地以及平地 and 半阳坡迁移。(2) 气温、降水和风速是影响该地区温性草原面积变化的主要气候因素, 其中 9 月降水贡献率最高 (20.6%), 风速贡献率次之 (18.5%)。(3) 降水、风速和气温等气候因子以复杂的非线性方式共同影响温性草原面积变化。当该地区 9 月降水变化率在 $0.2\text{--}0.5 \text{ mm/a}$, 风速变化率在 $-0.005\text{--}-0.0025 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 3 月气温变化率在 $0.01\text{--}0.02 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 时, 4 月、8 月气温变化率在 $0.02\text{--}0.06 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 时, 7 月气温变化率在 $0.02\text{--}0.03 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 时, 温性草原面积的增加趋势最为明显; 在其他情况下面积的增加趋势有所减缓, 但并未呈现负增长。研究结果将为祁连山南麓地区温性草原植被保护、恢复和管理提供科学决策支持。

关键词: 祁连山南麓; 温性草原; 时空演变; 气候变化; 响应规律

Investigation into the spatio-temporal dynamics of the Temperate Steppe in the southern foothills of Qilian and its response to climate change

YU Wenzheng^{1,*}, YU Longhui¹, ZHOU Huakun², WEI Zhudeng¹, ZHOU Yawen¹, WANG Minyan¹

¹ School of Geography Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

² Qinghai Provincial Key Laboratory of Cold Regions Restoration Ecology, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: This study aims to explore the response mechanisms of alpine grassland ecosystems to climate change in terms of vertical zonation, specifically focusing on the temperate steppe on the southern slope of the Qilian Mountains. We conducted a comprehensive analysis of the spatio-temporal evolution characteristics of this temperate steppe over the past 35 years, quantitatively evaluating the relative importance of key climatic factors affecting changes in the area of the temperate steppe, and revealing the nonlinear response relationships and thresholds between area changes and climatic fluctuations. The findings indicate that: (1) Over the past 35 years, the area of the temperate steppe on the southern slope of the Qilian Mountains has shown an increasing trend, at a rate of $28.3 \text{ km}^2/\text{a}$. The areas of expansion are mainly concentrated around Qinghai Lake, in river valleys, and in mountainous regions above 3000 m elevation on the southern Qilian Mountains, while the areas of reduction are chiefly located in sandy regions east of Qinghai Lake and in areas below 3000 m elevation.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U20A2098)

收稿日期: 2024-07-01; **网络出版日期:** 2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ywzheng519@126.com

Vertically, the temperate steppe has migrated to elevations above 2900 m, as well as to slopes exceeding 25° , flat lands, and semi-sunny slopes. (2) Temperature, precipitation, and wind velocity are the main climatic factors affecting the area changes of the temperate steppe, with the contribution rates of the climatic factors ranked as September precipitation > wind velocity > March temperature > April temperature > August temperature > July temperature. Of these, September precipitation has the greatest contribution rate (20.6%), succeeded by wind velocity (18.5%). (3) Climatic factors, including precipitation, wind velocity, and temperature, collectively impact the area change of temperate grasslands in a complex, nonlinear fashion. When the precipitation change rate in this area is within 0.2—0.5 mm/a in September, the wind speed change rate is within -0.005 — -0.0025 m s⁻¹ a⁻¹, the temperature change rate in March is within 0.01—0.02 °C/a, the temperature change rate in April and August is within 0.02—0.06 °C/a, and the temperature change rate in July is within 0.02—0.03 °C/a, the increasing trend of the area of temperate steppe is the most significant. Under other circumstances, the increasing trend of the area slows down, but no negative growth is presented. These discoveries will offer scientific decision-making support for the protection, restoration, and management of temperate steppe vegetation in the southern Qilian Mountain region.

Key Words: southern foothills of Qilian Mountains; temperate steppe; spatio-temporal evolution; climate change; response regularity

祁连山作为青藏高原和西北内陆干旱和半干旱区的分界线,是西北地区重要的生态屏障,拥有独特的地理位置和复杂的气候条件,孕育了丰富多样的生态系统^[1-2]。其中,温性草原作为该地区主要的草地生态系统之一,对维护生态平衡和生物多样性具有不可替代的作用^[3-4]。

在全球气候变化背景下,温度升高、降水模式的改变、极端气候事件的增多以及冰川冻土消融等对自然生态系统产生了深远的影响^[5-6]。草地生态系统的生长和发育依赖于适宜的水热条件,温度和降水的适度变化能够促进草地发育,而异常的气候波动则会抑制草地的发育^[7-8]。研究表明,气温、降水、光照和风速等气候因子与草地发育有显著相关性^[9-10]。其中,气温和降水是草地发育的主要驱动因素,在量化评估中,气温和降水变化对草地植被的贡献尤为显著^[11],除了气温和降水外,太阳辐射、风速、积雪覆盖、湿度等因子也在草地生态系统的动态变化中起着关键作用^[12-13]。

目前,受全球气候变化和人类活动的影响,祁连山地区的温性草原正经历着复杂的时空演变过程^[14-15],其空间分布格局进一步复杂化多样化,除了在垂直高度的分布梯度进一步扩大外,在同一高程、不同坡度也发生相应变化。因此,有必要对该地区长时间序列内温性草原的时空演变特征及影响因素进行探究,定量分析不同气候因子对草地生态系统演变的作用机理及其响应机制,为制定合理的保护对策和恢复工程措施提供决策支持。

目前,针对草地变化的气候因子定量评估已有大量研究,常用方法包括回归分析、残差分析和主成分分析等^[16-17],这些方法在分析气温、降水、光照和风速等气候因子对草地变化的影响方面取得了重要进展^[18]。然而,传统的线性方法在应对草地变化的复杂驱动机制时存在局限性,因为气候因子与草地间的关系往往是动态的、复杂的、非线性的,单纯的线性模型无法合理解释^[19]。为克服这一局限,部分研究引入了机器学习模型来处理气候因子与草地变化之间的非线性关系^[20]。与线性模型相比,机器学习模型在多变量非线性分析中具有明显优势^[21]。然而,现有研究通常直接使用机器学习模型,忽视了高维度气候因子的筛选,容易导致过拟合,并增加了模型的解释难度^[22]。本研究首先通过逐步多元回归分析对气候因子进行筛选,减少模型复杂度并降低过拟合风险。随后,采用机器学习模型中的增强回归树模型(Boosted Regression Trees, BRT)量化气候因子的相对重要性。尽管 BRT 模型实现了对温性草原气候驱动因素的相对重要性排序^[20-23],但无法进一步突显出各气候因子是如何影响温性草原面积变化的。为此,本研究引入了偏依赖分析(Partial Dependence Plots, PDPs),其具有可解释和可视化的特点,能够直观展示变量间的非线性关联^[24],捕捉草地变化对气候因

子的响应阈值,揭示温性草原面积变化对各气候因子变化的非线性响应关系。

基于此,本研究以 1987—2019 年草地分类数据,对祁连山南麓地区温性草原时空演变规律进行分析,采用逐步多元回归模型筛选影响温性草原变化的主控气候因子。通过构建温性草原与主控气候因子的增强回归树模型和偏依赖函数关系,旨在评估各气候因子对温性草原面积变化的相对重要性,揭示温性草原面积变化对各气候因子变化的非线性响应关系及阈值,以期对祁连山地草地生态系统的保护、修复工程和持续利用提供决策支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

祁连山南麓位于青藏高原东北边缘,是祁连山区的青海境内部分,位于柴达木盆地的北缘,黄土高原西部(图 1),是中国西北地区的重要生态安全屏障。其海拔在 2148—5814 m,地势由西向东降低,地形多为山地(图 1),气候条件复杂^[2]。气候属温带大陆性气候和高原山地气候,表现为:冬季漫长且寒冷干燥,夏季短而温凉湿润,东部气候湿润,西部气候干燥,年降雨量为 400—700 mm,年均温为 4 ℃,水热条件差异大,是内陆河流石羊河、黑河和疏勒河的发源地和径流形成区^[25]。植被受到东南季风和地势条件等的共同作用下表现出明显的垂直地带性特征,海拔从低到高分布有温性草原、高寒草原、高寒草甸和高寒荒漠类^[26]。

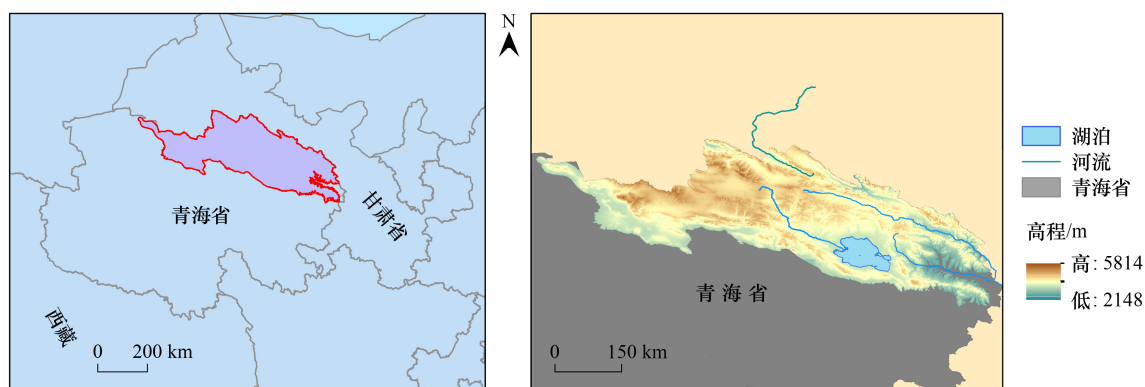


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源及处理

本研究使用的草地类型分类数据是以长时间序列的高空间分辨率 Landsat 遥感数据为基础,基于 Google Earth Engine(GEE)云平台 and 随机森林(Random Forest, RF)机器学习算法,得到的空间分辨率为 30 m 的祁连山南麓地区 1987—2019 年逐年草地分类数据,其总体分类精度可达 85%^[27]。在 ArcGIS 软件中创建研究区内的 1 km×1 km 的渔网,通过统计落入网格内 30 m 分辨率温性草原栅格总面积,得到空间分辨率为 1 km 的温性草原面积栅格数据。

祁连山高程数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>),空间分辨率为 30 m。逐月气温、逐月降水及蒸散发栅格数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpcd.ac.cn/home>)。相对湿度、太阳辐射和风速数据来源于 CHELSA 气候数据(<https://chelsa-climate.org/>),空间分辨率为 1 km。积雪日数数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>),空间分辨率为 5 km。高程及气象数据来源如表 1 所示,将所有数据进行掩膜提取、投影转换与重采样等处理,保证所有栅格数据行列号一致,投影坐标系为 WGS1984,空间分辨率为 1 km,应用的所有数据时间统一为 1987—2019 年。

表 1 高程及气象数据来源
Table 1 Sources of elevation and meteorological data

数据类型 Data type	时间 Time period	分辨率 Resolution	来源 Source
祁连山高程数据 Qilian mountains elevation data	—	30 m	国家冰川冻土沙漠科学数据中心
逐月降水 Monthly precipitation	1901—2022	1 km	青藏高原科学数据中心
逐月气温 Monthly temperature	1901—2022	1 km	青藏高原科学数据中心
蒸散发 Evapotranspiration	1901—2022	1 km	青藏高原科学数据中心
相对湿度 Relative humidity	1987—2019	1 km	https://chelsa-climate.org/
太阳辐射 Solar radiation	1987—2019	1 km	https://chelsa-climate.org/
风速 Wind speed	1987—2019	1 km	https://chelsa-climate.org/
积雪日数 Snow days	1980—2020	5 km	国家冰川冻土沙漠科学数据中心

1.3 研究方法

1.3.1 Sen+MK 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析是一种用于分析时间序列数据的非参数化方法,能够检测数据中的趋势,而无需对数据的分布做出任何假设^[28]。计算公式为:

$$\text{Sen}_{\text{slope}} = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \tag{1}$$

式中, $\text{Sen}_{\text{slope}}$ 为面积变化趋势; i, j 分别代表对应时间, x_i, x_j 分别为第 i, j 时间的温性草原面积;当 $\text{Sen}_{\text{slope}} > 0$ 表明温性草原面积呈上升趋势,当 $\text{Sen}_{\text{slope}} < 0$ 表明温性草原面积呈下降趋势。

结合非参数统计检验 Mann-Kendall 方法判断温性草原面积变化趋势显著性^[29],具体判断标准如表 2。

表 2 温性草原面积变化类型及划分依据
Table 2 Types of temperate steppe area changes and the basis for their classification

变化类型 Type of change	划分依据 Criteria for classification
显著增加 Significantly increased	$\text{Sen}_{\text{slope}} > 0, z \geq 1.96$
弱显著增加 Weakly significantly increased	$\text{Sen}_{\text{slope}} > 0, 1.64 \leq z < 1.96$
稳定 Stable	$ z < 1.64$
弱显著减少 Weakly significantly decreased	$\text{Sen}_{\text{slope}} < 0, 1.64 \leq z < 1.96$
显著减少 Significantly decreased	$\text{Sen}_{\text{slope}} < 0, z \geq 1.96$

$\text{Sen}_{\text{slope}}$:Theil-Sen Median 趋势分析的斜率,反映温性草原面积变化趋势方向; $|z|$:Mann-Kendall 检验统计量的绝对值,用于判断趋势显著性水平

1.3.2 逐步多元回归

逐步多元回归分析是多元回归分析中的一种,可以从大量的可供选择的变量中自动选择那些对于建立回归方程显著重要的变量,剔除不显著的变量,从而建立最优回归方程^[30—32]。在本研究中,使用双向逐步多元回归分析,通过向前引入和向后剔除变量的双向过程,筛选出对温性草原面积变化具有显著影响的气候要素。

$$Y_k = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \cdots + b_kX_k \tag{2}$$

式中, Y 为草地面积(因变量); $X_i(i = 1, 2, 3 \cdots k)$ 为第 i 个气候因子; b_0 为常数项; $b_i(i = 1, 2, 3 \cdots k)$ 为第 i 个气候因子的回归系数。

1.3.3 增强回归树模型

增强回归树是统计学中应用的一种先进的机器学习技术,它融合了回归树算法和增强(Boosting)技术^[33]。BRT 模型能够精确捕捉自变量与因变量之间的相关关系,量化各个因素对因变量总方差的贡献^[20]。以往的研究指出,草地生态系统变化的驱动机理较为复杂,可能与气候因素存在高度的非线性关系^[34]。作为一种非参数机器学习算法,BRT 能有效度量各气候因子的相对重要性,尤为适用于非线性变化、发生机理复

杂的草地驱动因素分析。

在本研究中,采用随机抽样的方法将数据集分为训练集(占 70%)和测试集(占 30%),分别用于建立模型和验证模型的准确性。在模型构建过程中,尝试使用不同的学习率(0.1、0.05 和 0.01)和树复杂度(从 2 到 10),并运用交叉验证技术来优化和验证模型的性能。本研究将逐步多元回归模型筛选出的气候因子的变化率作为自变量,温性草原面积变化率作为因变量,以此来构建 BRT 模型。通过这种方法,能够定量评估各气候因子对温性草原面积变化的驱动力大小。

1.3.4 偏依赖模型分析

偏依赖分析是一种用于解释增强回归树模型的技术分析手段^[35–36]。该方法通过控制其他自变量不变,单独考察一个或多个关注因子在它们取值范围内变化时,模型预测的平均效应,进而得到因变量随自变量变化而变化的偏依赖图^[20]。本研究将在增强回归树模型构建基础上,采用偏依赖分析来定量探究温性草原面积变化与不同气候因子的非线性关系及响应阈值。这一分析过程将有助于深入理解不同气候因子与温性草原之间的复杂关系,并识别出关键的响应点。计算公式如下:

$$\hat{f}_{xs}(xs) = E_{xc} [\hat{f}_{xs,xc}] \quad (3)$$

式中, $\hat{f}$ 为增强回归树模型, xs 为偏依赖图需要绘制的变量, xc 为增强回归树模型中使用的其他变量。

2 结果与分析

2.1 温性草原时空演变特征

2.1.1 温性草原空间演变特征

本研究通过创建渔网得到 1 km 网格上温性草原的面积。如图 2 所示为 2019 年温性草原的空间分布,可以看出温性草原主要分布在东部湟水谷地、青海湖周围地区、青海南山、共和盆地和大通河流域等地。如图 2 所示为祁连山南麓温性草原逐年总面积演变趋势,可以看出:1987—2019 年温性草原面积整体呈显著增加趋势($P < 0.01$),增长率为 $28.3 \text{ km}^2/\text{a}$, R^2 为 0.8。整体变化趋势可以分为三个阶段:第一阶段为 1987—2000 年,温性草原面积变化具有一定波动性,呈现缓慢波动增长的趋势,面积增长率仅为 $3.05 \text{ km}^2/\text{a}$;第二阶段为 2000—2010 年,温性草原面积变化表现为先增加后减少再增加的趋势,其增长的波动性较大,总体面积增长率为 $10.5 \text{ km}^2/\text{a}$;第三阶段为 2010—2019 年,温性草原面积呈现快速增长阶段,且增加速度在三个阶段中最快,增长率为 $61.7 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

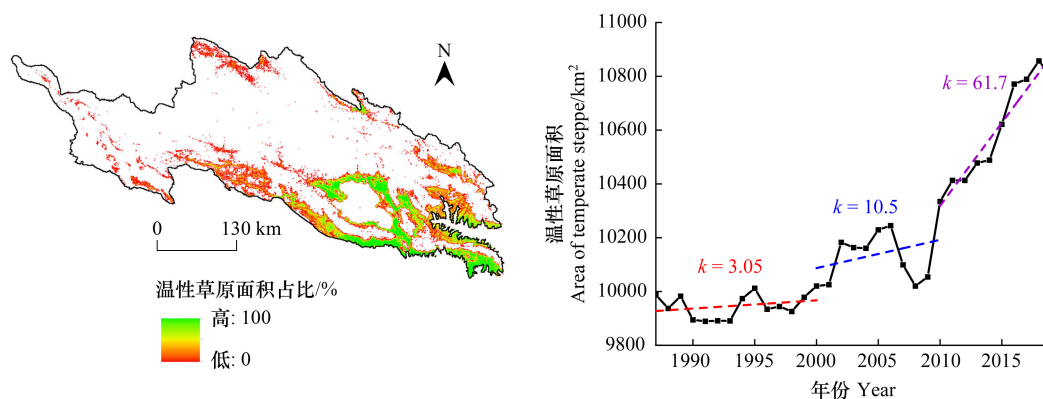


图 2 2019 年温性草原空间分布及 1987—2019 年温性草原面积变化

Fig.2 Spatial distribution of temperate steppe in 2019 and changes in area from 1987 to 2019

k 为趋势线的斜率,表示温性草原面积的年变化速率(km^2/a)

本研究基于 Sen+MK 趋势分析方法,得到祁连山南麓温性草原面积的变化趋势及变化类型空间分布

(图 3),结果表明:1987—2019 年温性草原面积整体呈增加趋势,平均空间变化趋势为 829 m²/a。结合表 3 可知,温性草原呈显著增加趋势的面积达 7289 km²,占总面积的 31.85%,主要分布在大通河流域和青海湖北岸地区,以及青海南山和巴音河流域附近。呈显著减少趋势的面积占比较少,约占总面积的 16.09%左右,主要分布在布哈河流域中段和青海南山南部以及青海湖东部的沙地。

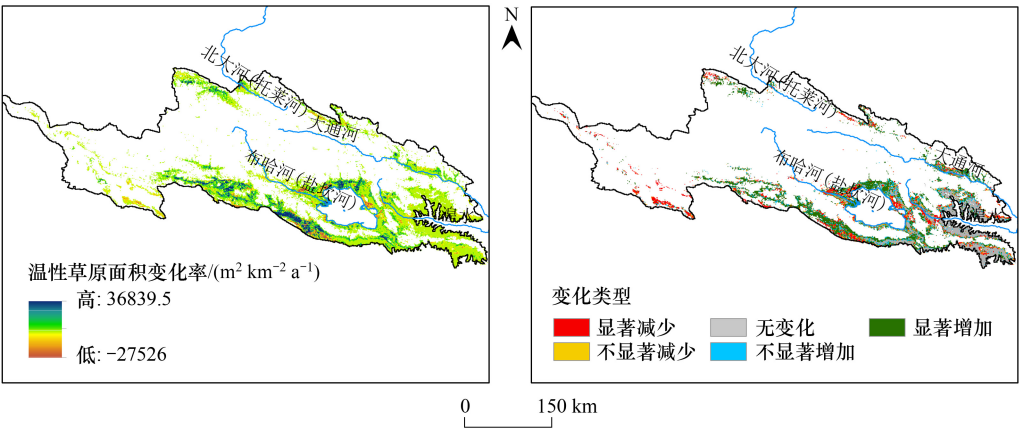


图 3 1987—2019 年温性草原面积变化趋势及变化类型空间分布

Fig.3 Spatial distribution of temperate steppe area changes and trends from 1987 to 2019

表 3 1987—2019 年温性草原面积变化类型及比例

Table 3 Changes in temperate steppe area and proportions from 1987 to 2019

变化类型 Types of changes	变化趋势面积/km ² Area of the trend in change	所占比例/% Proportion
显著减少 Significantly decreased	3681	16.09
弱显著减少 Weakly significantly decreased	393	1.72
稳定 Stable	10934	47.78
弱显著增加 Weakly significantly increased	587	2.57
显著增加 Significantly increased	7289	31.85

2.1.2 温性草原垂直演变特征

高程、坡度、坡向等在一定程度上影响了祁连山的气候和土壤状况等自然条件,随着全球气候变暖,不同高程水热组合发生变化,因而导致温性草原在空间上表现出不同的变化趋势^[37]。论文根据研究区地形地势以及温性草原分布特征,将高程划分为<2600、2600—2900、2900—3200、3200—3500、3500—3800、3800—4100 m 和>4100 m 共七级;根据自然资源部颁布的《第三次全国国土调查技术规程》将坡度分为≤5°,5°—10°,10°—15°,15°—25°,25°—40°和>40°共 6 级;将坡向分为平地、阳坡(135°—225°)、半阳坡(225°—315°)、阴坡(315°—45°)和半阴坡(45°—135°)5 类^[38],生成高程、坡度、坡向分级图(图 4)。将温性草原面积与高程、坡度、坡向分级图进行分区统计,得到温性草原在不同高程、坡度、坡向上的面积变化。

由图 4 显示,祁连山南麓温性草原主要分布在海拔<2600 m、3200—3500 m、3500—3800 m,坡度在 5—10°、15—25°的半阳坡和平坦区域。

由温性草原在不同高程面积变化及面积变化率图显示(图 5),温性草原在海拔 2300—4500 m 之间皆有分布,且在不同高程和区域出现较为明细的分异特征,在高程 2900 m 以上的区域呈明显的上升趋势,2900 m 以下出现下降趋势,如在青海南山地区;面积显著增加的区域集中在海拔 3000 m 以上,而在海拔 3000 m 以下则表现为减少趋势。

由图 5 分析发现,在整个研究周期内不同高程区域内温性草地面积变化特征也存在明显差异,主要存在以下 5 种演变特征:①高程>4100 m 区域,温性草原面积占比最小,且呈现波动上升的趋势,上升幅度不明显,

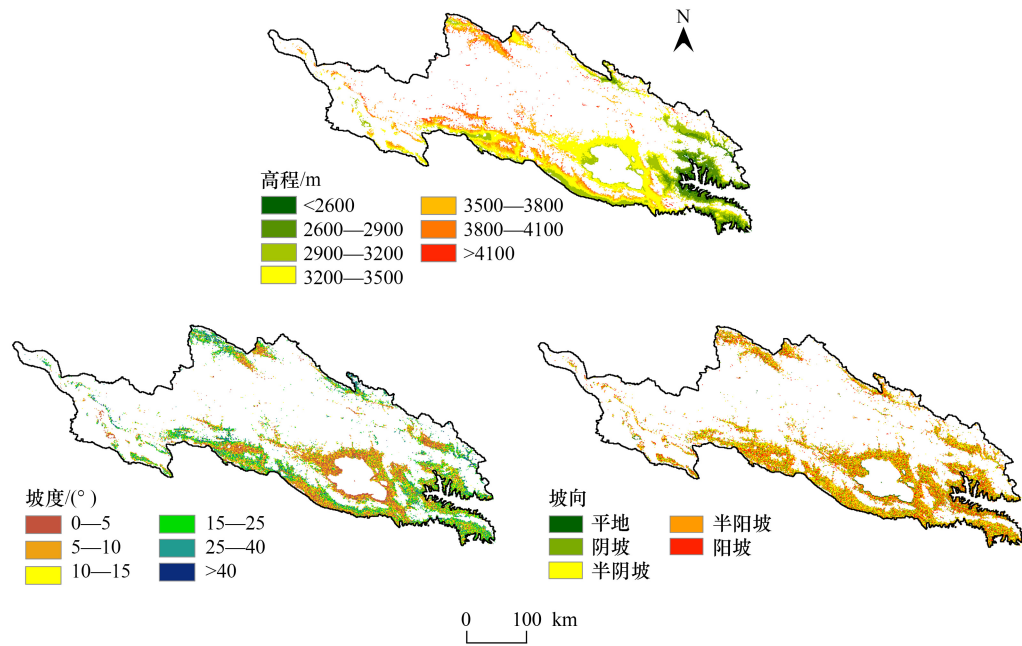


图 4 温性草原不同高程、坡度、坡向空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of temperate steppe at different elevations, slopes, and aspects

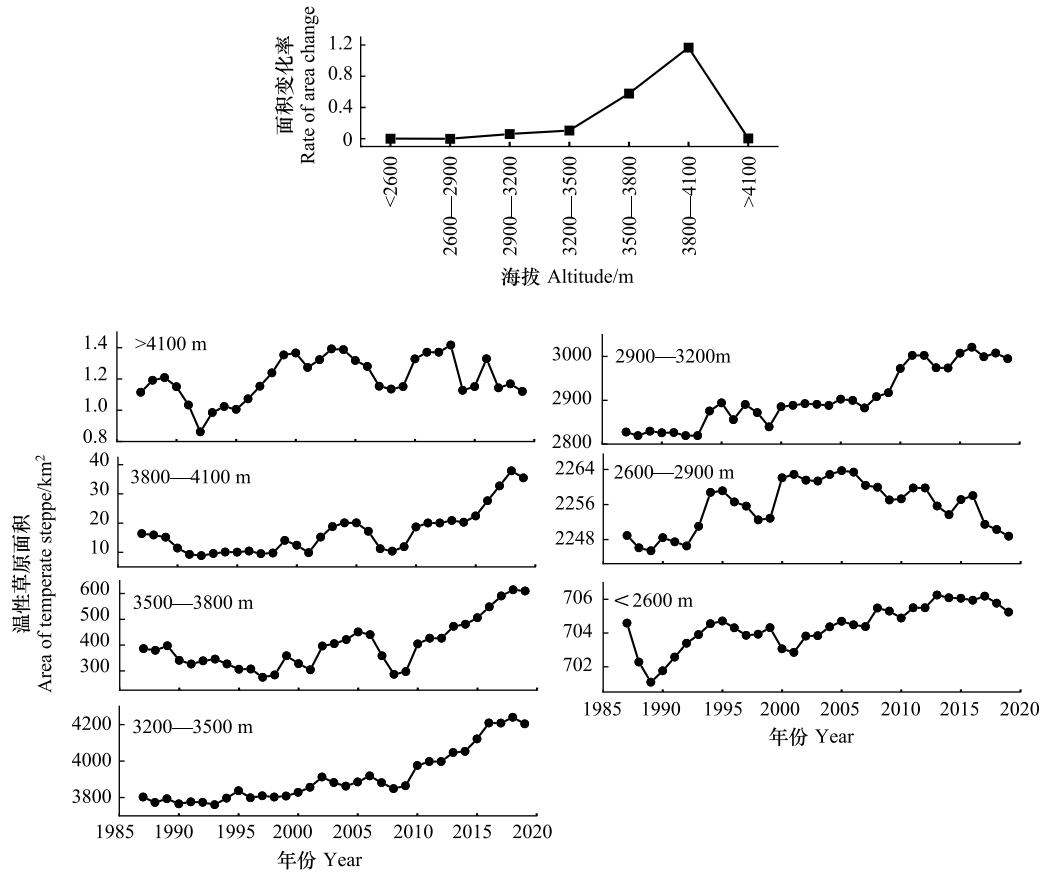


图 5 1987—2019 年不同高程区温性草原面积变化及面积变化率

Fig.5 Illustrates the changes in temperate steppe area and the corresponding rate of change at different elevations from 1987 to 2019

但波动幅度较大;②高程 2600—2900 m 区域,温性草原面积占比较大,研究周期内变化较为剧烈,呈现先增加后减少的演变趋势,增加和减少的突变点在 2005 年左右;③高程 3800—4100 m、3500—3800 m、3200—3500 m、2900—3200 m 区域,温性草原分布最为广泛的区域,其演变特征出现了类似特征,即呈现 1987—2010 年期间均呈现缓慢增长趋势,但从 2010 年左右,都呈现出显著增长趋势;④在高程 <2600 m 区域,温性草原出现了波动增长的趋势,但增长的趋势不显著;⑤研究期内温性草原面积变化率随高程区的升高呈先增加后降低的变化趋势,3800—4100 m 高程区内面积变化率最高,为 $1.17 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

坡度通过影响径流和水分的再分配以及土壤状况好坏等自然因素,同时也影响着人类活动,随着坡度升高人类活动减少,从而也减少了对草地生态系统的扰动^[38]。由图 6 可知,在空间尺度上,祁连山南麓温性草地主要分布在坡度 40° 以下的缓坡,特别是在坡度在 15° — 25° 、 5° — 10° 和 $\leq 5^\circ$ 最为集中,而坡度为 5° — 10° 的区域面积占比最大。在时空尺度上,呈现以下特征:①在研究期内,各坡度区域的温性草原面积变化总体呈上升趋势,其中在坡度为 25° — 40° 时,面积变化率最大;②坡度大于 15° 的温性草原面积呈微弱下降趋势, 40° 以上坡度区域的面积变化率较大;③2000—2010 年和 2010—2019 年期间,各坡度区域的温性草原面积均呈显著上升趋势,突变点出现在 2010 年。

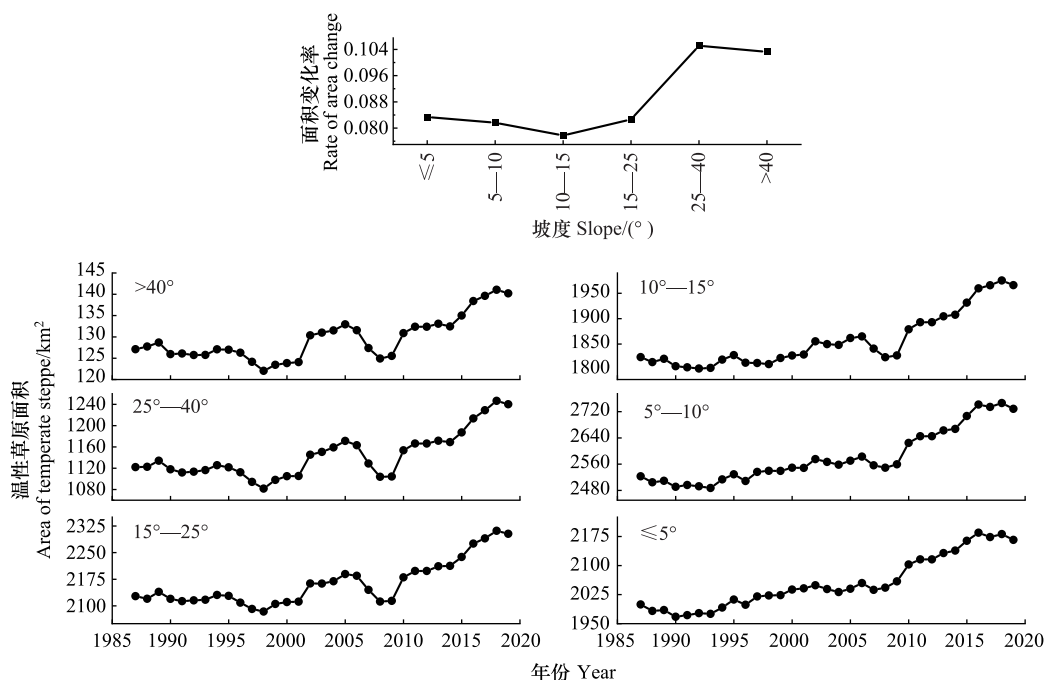


图 6 1987—2019 年不同坡度温性草原面积变化及面积变化率

Fig.6 Illustrates the changes in temperate steppe area and the corresponding rate of change at different slopes from 1987 to 2019

大型山体的坡向一般会影响到太阳辐射量、蒸发量、降雨量等气候因子,从而进一步影响草地生态系统的分异规律^[39]。由图 7 可知,空间上,祁连山南麓温性草地主要分布在半阳坡、阳坡、半阴坡、阴坡,其中在半阴坡区域的面积占比最大。在时空尺度上,呈现以下特征:①在研究期内,各坡向区域的温性草原面积总体均呈增加趋势,面积变化率在平地、半阴坡和半阳坡较高,而阴坡和阳坡较低,这表明温性草原向温暖湿润的半阴坡、半阳坡和平地迁移;②在 1987—2000 年期间,阴坡和半阳坡温性草原面积变化趋势较为平稳,半阴坡温性草原面积呈微弱下降趋势,而平地 and 阳坡则为上升趋势;③2000—2010 年和 2010—2019 年两个时期,各坡向区域的温性草原面积均显著上升,显著上升的突变点在 2010 年左右。

在研究期内祁连山南麓温性草原出现以下几个方面演变特征:①其主要分布在海拔 2300—4500 m 之间,在 2900 m 以上的区域呈明显的上升趋势,2900 m 以下出现下降趋势,生境逐渐向高海拔地区扩展;②在

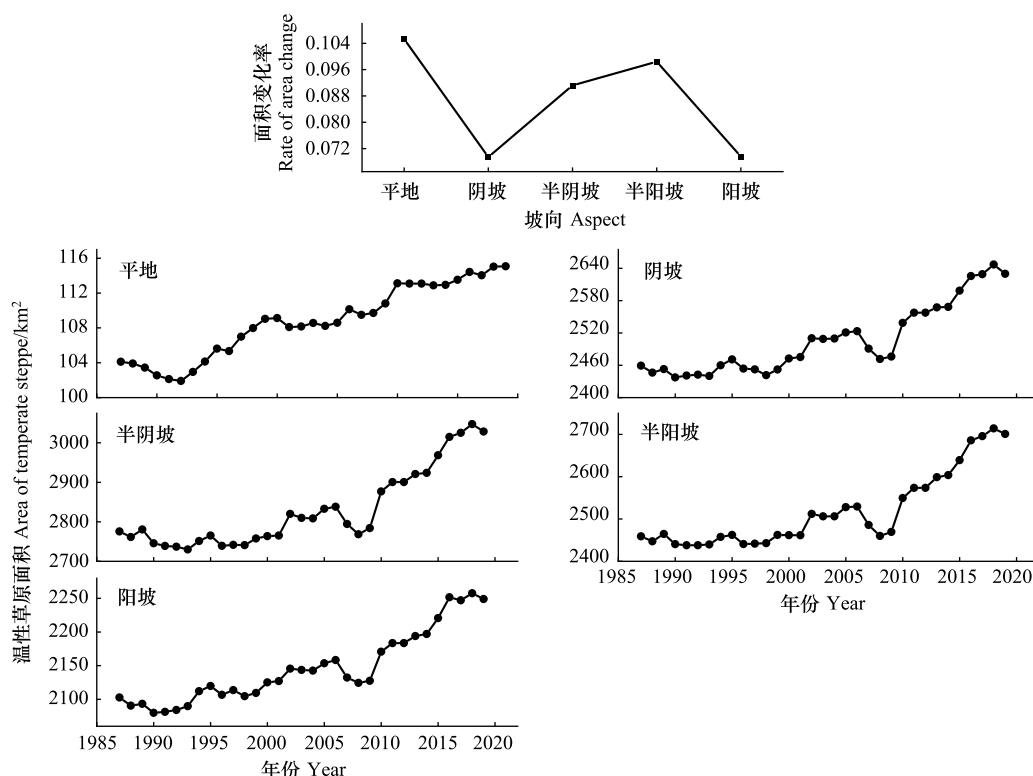


图7 1987—2019年不同坡向温性草原面积变化及面积变化率

Fig.7 Depicts the changes in temperate steppe area and the corresponding rate of change at different aspects from 1987 to 2019

坡度大于 25° 的温性草原的面积变化率较大,坡度小于 25° 区域变化相对缓慢,说明影响该区域温性草原变化的主要是气候因子;③在研究期内,各坡向区域的温性草原面积总体均呈增加趋势,面积变化率在平地、半阴坡和半阳坡较高,而阴坡和阳坡较低,这表明温性草原向温暖湿润的半阴坡、半阳坡和平地迁移。

2.2 温性草原对气候变化的响应机制

2.2.1 基于逐步多元回归模型的气候因子筛选

本研究中将 1987—2019 年逐年温性草原面积作为因变量,温性草原所处区域内各气候因子均值(太阳辐射、相对湿度、蒸散发、积雪日数、风速以及 1—12 月各月气温和降水共计 29 个气候因子)作为自变量,通过逐步多元回归模型逐步纳入自变量,剔除不显著变量,筛选出对温性草原面积变化影响最显著的主控气候因子,分别为风速、9 月降水、3 月气温、4 月气温、7 月气温和 8 月气温 6 个因子。

构建回归方程模型如下:

$$Y = -1196.0 x_1 + 5.7 x_2 + 69.4 x_3 + 81.3 x_4 + 117.9 x_5 + 119.7 x_6 + 11203$$

式中, Y 为温性草原面积, x_1 — x_6 依次为风速、9 月降水、3 月气温、4 月气温、7 月气温和 8 月气温。

各因子标准化系数(Beta)、显著性(P 值)以及共线性诊断(VIF)如表 4 所示,各因子均通过显著性检验且不存在共线性问题,模型 $R^2 = 0.64$, F 值为 7.55,显著性水平为 0.000,说明模型拟合度较好且可用。根据回归方程模型分析得出,气温和降水与温性草原面积呈正相关,风速与温性草原面积呈负相关,表明研究期内增温多雨(暖湿化)对温性草原面积演变起积极促进作用,而风速提高对温性草原面积演变为抑制作用。其中,4 个气温因子中以春季和夏季气温为主,且均为正相关,其中 8 月份气温对温性草原的演变起主要作用。

2.2.2 基于增强回归树模型的气候驱动因子分析

通过 BRT 模型得到各主控气候因子对温性草原面积变化的相对重要性,结果如图 8 所示。气候因子相对重要性大小为 9 月降水 > 风速 > 3 月气温 > 4 月气温 > 8 月气温 > 7 月气温。在主控因子中,9 月降水的贡献率

最高,贡献率达 20.6%,并与温性草原呈正相关,这可能是因为 9 月降水改善了水分条件,为草地类型转换提供了适宜的环境条件,促使其他草地类型逐渐转变为温性草原。风速贡献率为 18.5%,且风速与温性草原呈负相关,这可能是由于风速加速了土壤的蒸发,使得水分更快流失,导致生境气候干冷化,从而促使温性草原向其他草地类型转变。气温因子中,3 月气温的贡献率最高,为 17.6%,4 月、8 月和 7 月气温贡献率较为接近,均在 13%以上,且均与温性草原呈正相关,表明春季和夏季的气温对于温性草原扩张具有促进作用。其中 3 月和 4 月气温的升高使得冰雪融化,改善了早春季节的水热条件,可能推动了其他草地类型向温性草原转变,如荒漠类或高寒草原类。而 7 月和 8 月气温的升高可能使得草甸类植被向更适宜温暖条件的温性草原转化,促进了温性草原的扩张。

表 4 1987—2019 年温性草原面积变化与各气候因子的逐步多元回归模型指标及结果

Table 4 Stepwise multiple regression model indicators and results of various climate factors for temperate steppe from 1987 to 2019							
气候因子 Climate factors	标准化系数 Beta	显著性 P	共线性诊断 VIF	气候因子 Climate factors	标准化系数 Beta	显著性 P	共线性诊断 VIF
风速 Wind	-0.38	0.007	1.18	4 月气温 April temperature	0.29	0.035	1.18
9 月降水 September precipitation	0.36	0.008	1.09	7 月气温 July temperature	0.30	0.042	1.36
3 月气温 March temperature	0.22	0.088	1.1	8 月气温 August temperature	0.45	0.002	1.17

Beta: 标准化系数 Beta coefficient; P: 显著性 Significance; VIF: 共线性诊断 Variance inflation factor

本研究通过主控气候因子相对重要性分析,从宏观层面量化了各个主控气候因子对温性草原面积变化的解释能力。然而,该方法并不能完全揭示因变量随自变量取值变化的具体响应模式^[40]。为了深入理解温性草原面积变化与气候因子之间的复杂关系,论文基于 BRT 模型的运行结果,绘制了温性草原面积变化与各主控气候因子的偏依赖图,反映了温性草原面积变化对气候因子取值变化的响应规律。

根据图 9 显示,温性草原面积变化与主控气候因子的响应关系如下:①随 9 月降水变化率增加,温性草原面积变化率先增后减,当 9 月降水变化率达到 0.5 mm/a 时,面积增加速率最快,之后随着 9 月降水变化率的增加,增加速率减缓(图 9)。以上分析说明在祁连山南麓其他水热条件相对稳定的情况下,当 9 月降水增加到 0.2 mm/a 时,其他草地类型(如温性荒漠)开始向温性草原转化,其面积逐渐扩大,而当降水增加到 0.5 mm/a 时,转化速率最快,也说明该阈值最适宜温性草原发育,而当 9 月降水变化率增加超过 0.5 mm/a 时,温性草原开始转化为其他草地类型,比如高寒草原类或者草甸类;②当风速变化率为-0.0025 m s⁻¹ a⁻¹时,温性草原面积增加速率最快,风速变化率超过 0.0075 m s⁻¹ a⁻¹阈值后,面积变化率趋于稳定(图 9),说明在祁连山南麓其他因子保持相对稳定时,随着风速的增加,温性草原逐渐转化为其他草地,主要转化为温性荒漠和高寒荒漠;③温性草原面积变化率随 3 月气温变化率的增加表现为先增后减再增的变化模式,当 3 月气温变化率达到 0.02 ℃/a 时,面积变化速率最快,气温变化率超过 0.048 ℃/a 阈值后,面积变化率趋于稳定(图 9);对于 4 月气温变化率的增加,温性草原面积变化表现为逐渐增加的变化模式,当 4 月气温变化率超过 0.06 ℃/a 阈值后,面积变化率趋于稳定(图 9)。8 月气温与 4 月气温的变化模式相似,均为逐渐增加的变化趋势,当 8 月气

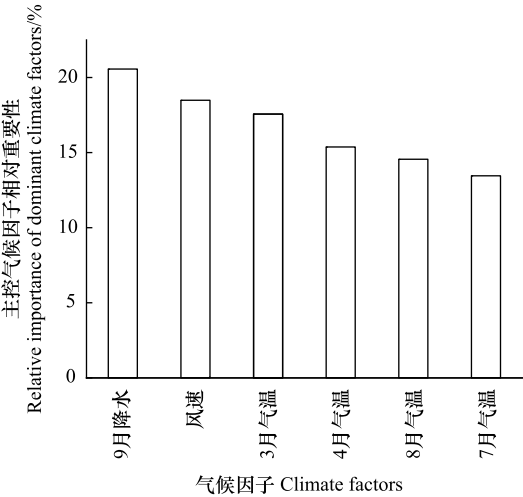


图 8 温性草原主控气候因子相对重要性
Fig.8 The relative importance of the dominant climate factors in temperate steppe

温变化率超过 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,面积变化率趋于稳定(图 9)。温性草原面积变化率随 7 月气温变化率的响应模式与 3 月气温相似,均为先增后减再增的变化模式。在变化率为 $0.025\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,面积变化速率最快,之后在气温变化率超过 $0.045\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 阈值后,面积变化率趋于稳定(图 9)。

从以上分析可以看出,在祁连山南麓降水、风速和气温等气候因子以复杂的非线性方式共同影响温性草原的演变。当该地区 9 月降水变化率在 $0.2\text{--}0.5\text{ mm/a}$,风速变化率在 $-0.005\text{--}-0.0025\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$,3 月气温变化率在 $0.01\text{--}0.02\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,4 月、8 月气温变化率在 $0.02\text{--}0.06\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,7 月气温变化率在 $0.02\text{--}0.03\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,其他草地类型向温性草原转化,温性草地出现正向演替,其面积也逐渐增加。而在其他情况下,温性草原开始转化为其他类型草地,如温性荒漠、高寒草原、高寒荒漠等,其出现负向演替,面积变化率也出现逐渐减缓趋势。

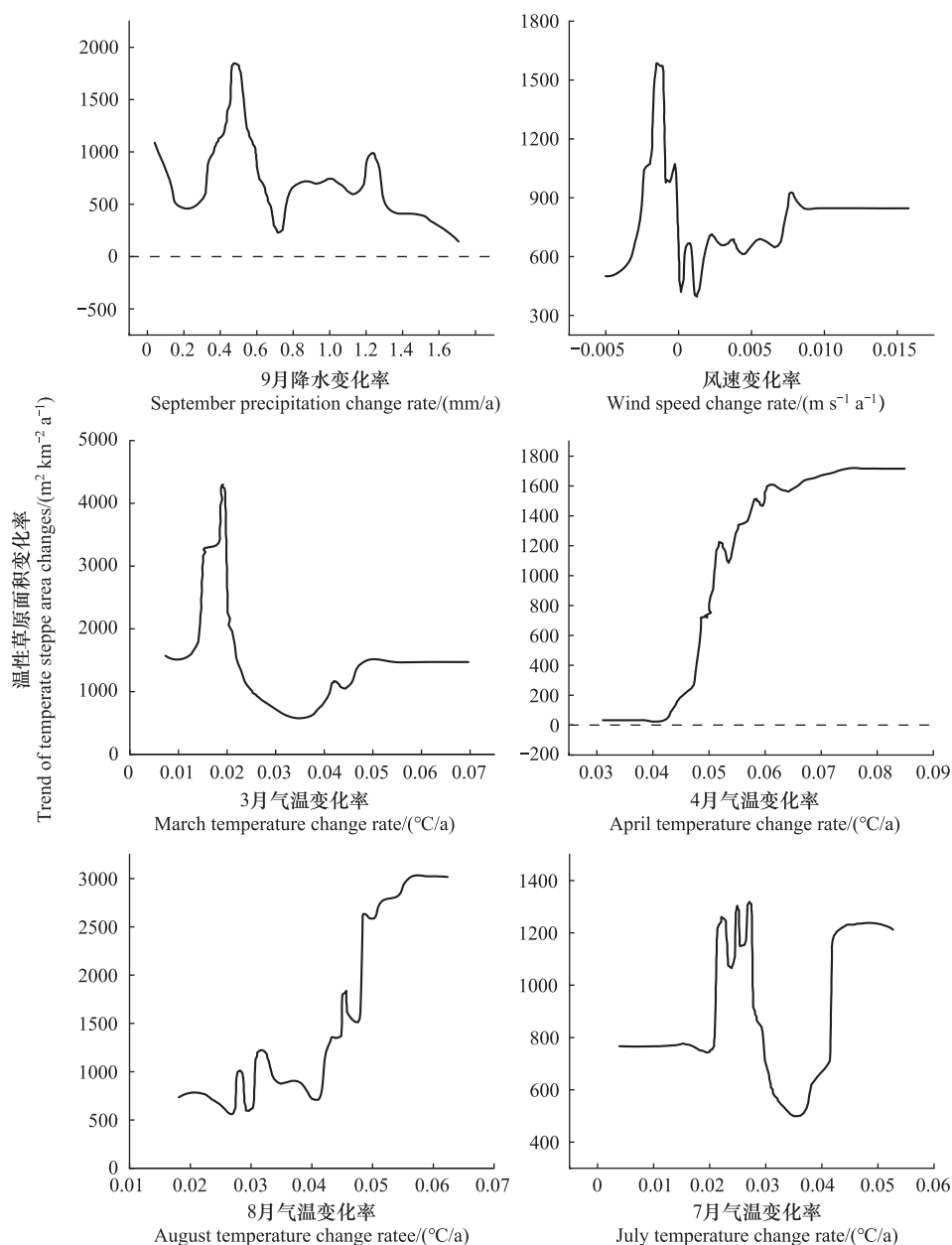


图 9 温性草原主控气候因子偏依赖图

Fig.9 Partial dependence plots of dominant climatic factors for the temperate steppe

虚线为温性草原面积变化率为 0 的临界线,表示面积增减的平衡点

3 讨论

3.1 温性草原面积时空演变特征

1987—2019 年间祁连山南麓温性草原面积时间上呈显著增加态势,面积增长率为 28.3 km²/a。在空间上整体以增加趋势为主,面积增加趋势为 817 m²/a,总体表现为较大的空间异质性。这也表明温性草原面积时空演变特征均以增加趋势为主,这也与李娟等^[38]和张良侠等^[41]的研究结果一致。具体而言,第一阶段温性草原面积变化趋势缓慢且具有一定波动性。根据表 5 的温性草原与其他草地类型的转化情况可见,温性草原转入面积略大于转出面积,表明温性草原面积基本保持稳定,变化不显著。此外,以青海省海北州为例,1989 年开始在部分乡镇试点草场承包到户;1993 年在全州范围内实施承包经营;到 1998 年基本实现冬春草场的承包经营,而四季草场的承包直到 2000 年才基本完成^[42]。这一过程中,草场承包责任制的推进缓慢,耗时较长,可能导致温性草原面积变化缓慢且波动性较强。第二、三阶段温性草原面积变化明显,既受到气候暖湿化的自然因素驱动,也得益于生态工程的实施和草原保护政策的支持。由表 6 可知,温性草原转入面积大于转出面积,大量荒漠类、高寒草原类和草甸类草地转化为温性草原。生态工程实施方面,青海省自 2003 年起开始大规模实施退牧还草工程^[43],并于 2005 年相继启动了青海湖、祁连山等重大生态保护工程^[44]。这些生态保护工程的实施均促进了生态环境的改善,进而使得荒漠类草地转化为草原,这也在吴晶晶等^[14]的研究中得到印证。此外,青海省在 2011 年全面推行草原生态保护补助奖励机制,激发了牧民对草原保护的积极性,进一步巩固了生态恢复的成果^[45]。例如自 2011 年起国家每年下达青海省生态保护补助奖励资金 19.47 亿元,实施禁牧面积 1634.15 万公顷,对禁牧区域以外的 1529 万公顷草原实行草畜平衡^[46]。

表 5 1987—2000 年温性草原转化情况/km²
Table 5 Conversion of temperate steppe from 1987 to 2000

1987 年	2000 年				
	温性草原 Temperate steppe	高寒草原类 Alpine steppe	荒漠类 Desert	草甸类 Meadow	流出总计 Total area loss
温性草原 Temperate steppe	9067.55	239.55	464.72	215.63	919.91
高寒草原类 Alpine steppe	246.39	—	—	—	—
荒漠类 Desert	173.17	—	—	—	—
草甸类 Meadow	533.37	—	—	—	—
流入总计 Total area gain	952.92	—	—	—	—

表 6 2000—2019 年温性草原转化情况/km²
Table 6 Conversion of temperate steppe from 2000 to 2019

2000 年	2019 年				
	温性草原 Temperate steppe	高寒草原类 Alpine steppe	荒漠类 Desert	草甸类 Meadow	流出总计 Total area loss
温性草原 Temperate steppe	9151.01	274.51	179.65	415.29	869.46
高寒草原类 Alpine steppe	299.28	—	—	—	—
荒漠类 Desert	953.93	—	—	—	—
草甸类 Meadow	394.78	—	—	—	—
流入总计 Total area gain	1647.99	—	—	—	—

对于垂直方向植被演变特征,李娟等^[38]的研究结果表明,海拔及坡度较高的区域由于人类活动较少,气候变化对植被的影响更为显著,因此植被覆盖度明显增加。本研究的结果与此一致,祁连山南麓地区的气候逐渐趋向暖湿化,导致海拔和坡度高处区域的水热条件得到改善^[47],促使温性草原向更高海拔和坡度的区域扩展。这一变化可能是由于在气候变化驱动下草地类型发生转化,大量荒漠类草地、高寒草原类和草甸类草地逐渐转化为温性草原,推动了温性草原的扩展^[48]。然而,与李娟等^[38]和陈宸等^[49]的研究不同,本研究发

现温性草原在坡向上的分布存在显著差异。李娟等和陈宸等的研究表明,坡向对植被的分布影响较小,而本研究结果则显示,温性草原向半阳坡、半阴坡等坡向迁移。这种迁移可能是由于气候变暖和降水增加,使得半阳坡、半阴坡等坡向的水热条件组合更为适宜温性草原植被的生长^[47],促使其他草地类型逐渐向温性草原转化。

3.2 温性草原对气候变化的响应机制

本研究表明降水、风速和气温等气候因子以复杂的非线性方式共同影响温性草原面积变化,其中 9 月降水贡献率最高,风速贡献率次之。不同于以往单纯依赖统计相关性或较为简单的回归模型来分析气候因子影响的研究,本研究引入了逐步多元回归分析进行初步筛选,随后通过增强回归树模型量化各气候因子的相对重要性。这一组合方法不仅确保了筛选出的气候因子具有统计显著性,还有效减少了模型的复杂性和过拟合风险。此外,本研究通过偏依赖分析,进一步明确了不同气候因子变化对温性草原的非线性驱动机制,并确定了各气候因子的响应阈值。以下将详细分析这些因子对温性草原扩展的非线性影响机制。

9 月降水是影响温性草原面积变化的最主要气候因子,贡献率为 20.6%。本研究显示 9 月降水量呈增加趋势(图 10),当降水变化率在 0.2—0.5 mm/a 时,温性草原呈正向演替,面积逐渐增加。可能原因为为在温性

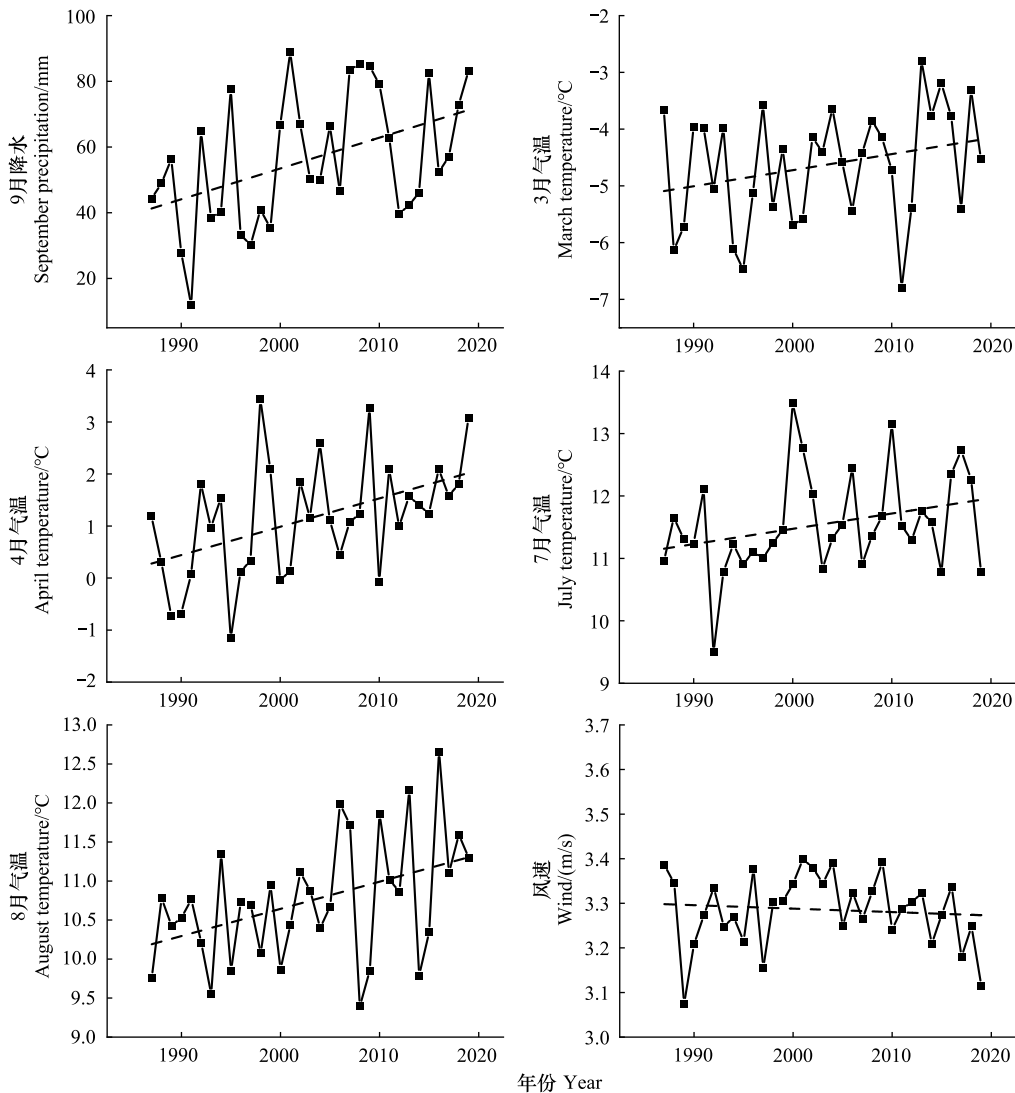


图 10 温性草原主控气候因子变化趋势

Fig.10 Trend of dominant climatic factors in temperate steppe

草原与荒漠类草地的交界地带,9月降水改善了水分条件,增加了土壤湿度,从而为草地类型转换提供了适宜的环境条件,促使荒漠类草地逐渐转变为温性草原(如温性荒漠、高寒荒漠等)^[48]。而降水变化率超过 0.5 mm/a 时,温性草原出现负向演替,面积扩展速率逐渐减缓。这表明适度的降水增加有利于荒漠类植被向温性草原转化,但降水量在达到 0.5 mm/a 的阈值后,草原植被的水分需求已经得到满足,过量的降水反而使温性草原向草甸类植被转化(如低地草甸、山地草甸等)^[34]。因此,适度的降水增加有利于温性草原的扩展,但过量降水可能改变草地类型的演替方向。

与降水类似,风速也是影响温性草原面积变化的关键气候因素,其贡献率为 18.5%。在本研究中,当风速变化率在 -0.005 — $-0.0025 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 时,温性草原表现为正向演替,面积逐渐增加。风速对蒸散发过程的调节是影响草地变化的关键因素^[3],较低的风速有利于土壤保持较高的湿度,提供稳定的水分供应,促进了荒漠类植被向温性草原转化。这一结果与吴运力等^[50]的研究较为相似,即风速较小时有利于草原植被的生长。而在风速变化率超过 $-0.0025 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 阈值后,温性草原出现负向演替,面积扩展速率逐渐减缓。这表明适度的风速有利于草原植被扩展,但过高的风速会破坏草地的水分平衡,加速土壤水分的蒸发,减缓草地类型的转化和扩展速度从而影响温性草原扩展^[39,51]。本研究中,风速呈下降趋势(图 10),因此温性草原表现为正向演替,面积呈持续增加。

本研究中春季气温和夏季气温对温性草原的面积扩张有显著影响,其中 3 月和 4 月气温贡献率相对较高,分别为 17.6% 和 15.4%,而 7 月和 8 月气温贡献率较低。当 3 月气温变化率在 0.01 — $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$,4 月气温变化率在 0.02 — $0.06 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,温性草原出现正向演替,面积逐渐增加。可能原因为 3 月和 4 月气温的增加,使得祁连山地区冰雪消融,水热条件得到改善,促进了高寒草原类和草甸类植被向温性草原转化^[52]。而当 3 月气温变化率超过 $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$,4 月气温变化率超过 $0.06 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,温性草原出现负向演替,草原的扩展速度逐渐减缓。表明气温促进温性草原的扩展并不是简单的线性关系,而是存在一个转折点,当气温升高到一定水平时,草原的扩展速度会减缓或趋于稳定^[53]。这可能是由于随气温的持续升高,促进了温性草原植被向荒漠类植被转化(如温性荒漠等)^[54]。当 7 月气温变化率在 0.02 — $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$,8 月气温变化率在 0.02 — $0.06 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,温性草原出现正向演替,面积逐渐增加。表明 7 月和 8 月气温的升高可能使得高寒草原类和草甸类植被向更适宜温暖条件的温性草原转化,促进了温性草原的扩张^[55]。而当 7 月气温变化率超过 $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$,8 月气温变化率超过 $0.06 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 时,温性草原出现负向演替,面积扩展速度逐渐减缓,这表明随气温的持续升高,使得温性草原向荒漠类植被转化^[54]。本研究中,3 月、4 月、7 月和 8 月气温均呈增加趋势(图 10),气温变化率分别为 $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 和 $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$,温性草原均为正向演替,故该地草原面积呈上升趋势。

3.3 不足与展望

本研究采用了机器学习模型定量评估了气候变化对温性草原的影响,揭示了温性草原随气候因子变化的具体响应模式。然而,本研究的焦点并未扩展到人类活动对温性草原影响的定量分析。人类活动的多样性和复杂性,以及与之相关的长期数据序列的获取难度,限制了对人类活动影响机制进行深入探讨的可能性。因此,本文未能评估人类活动对温性草原的具体影响,也将在未来的研究中尝试进行探讨。

4 结论

(1) 祁连山南麓 1987—2019 年间温性草原面积整体呈显著增加态势($P < 0.01$),增加速率为 $28.3 \text{ km}^2/\text{a}$,但不同地区呈现显著的空间差异性,增加区域占总面积的 31.85%,主要集中在大通河流域和青海湖北岸地区,以及青海南山和巴音河流域附近,而减少区域约占总面积的 16.09% 左右,主要分布在布哈河流域中段和青海南山南部以及青海湖东部的沙地。垂直方向上呈现出向高海拔(2900 m 以上)、陡坡(25° 以上)以及不同坡向(半阴坡和半阳坡等)的迁移趋势。

(2) 气温、降水和风速是影响祁连山南麓温性草原面积变化的主导气候因素,主控气候因子相对重要性大小为 9 月降水 > 风速 > 3 月气温 > 4 月气温 > 8 月气温 > 7 月气温,其中 9 月降水贡献率最高(20.6%),风速贡

献率次之(18.5%)。

(3)降水、风速和气温等气候因子以复杂的非线性方式共同影响温性草原面积变化。当该地区9月降水变化率在0.2—0.5 mm/a,风速变化率在 -0.005 — $-0.0025\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$,3月气温变化率在0.01—0.02 °C/a时,4月、8月气温变化率在0.02—0.06 °C/a时,7月气温变化率在0.02—0.03 °C/a时,温性草原面积的增加趋势最为明显;在其他情况下面积的增加趋势有所减缓,但并未呈现负增长。

参考文献(References):

- [1] 高翔,黄星星,刘宽梅,米小婷,温蕊阳. 祁连山自然保护区植被对气候变化的响应. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 79-88.
- [2] 杨学亭,樊军,盖佳敏,杜梦鸽,金沐. 祁连山不同类型草地的土壤理化性质与植被特征. 应用生态学报, 2022, 33(4): 878-886.
- [3] 杨志贵,张建国,李锦荣,于红妍,常丽,宜树华,吕燕燕,张玉琢,孟宝平. 内蒙古温性草原草地类型近20年时空动态变化研究. 草业学报, 2023, 32(9): 1-16.
- [4] 马蓉,夏春林,张佳琦,神祥金. 中国温带草原植被NDVI时空变化及其对气候变化的响应. 生态学杂志, 2023, 42(2): 395-405.
- [5] 武正丽. 2000—2012年祁连山植被覆盖变化及其对气候的响应研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [6] Povak N A, Manley P N. Evaluating climate change impacts on ecosystem resources through the lens of climate analogs. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2024, 6: 1286980.
- [7] 王亚晖,唐文家,李森,赵鸿雁,谢家丽,马超,颜长珍. 青海省草地生产力变化及其驱动因素. 草业学报, 2022, 31(2): 1-13.
- [8] 兰云飞,李传华. 近16年祁连山植被NPP时空格局及其对气候变化的响应. 草地学报, 2022, 30(1): 188-195.
- [9] 邱丽莎,张立峰,何毅,刁振源,陈有东. 2000—2017年祁连山植被动态变化遥感监测. 遥感信息, 2019, 34(4): 97-107.
- [10] Wu Y Y, Yang J L, Li S L, Guo C Z, Yang X D, Xu Y R, Yue F, Peng H J, Chen Y C, Gu L, Shi Z H, Luo G. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 2000 to 2020 in Miaoling Karst Mountain area, SW China. *Land*, 2023, 12(7): 1267.
- [11] 张华,李明,宋金岳,韩武宏. 基于地理探测器的祁连山国家公园植被NDVI变化驱动因素分析. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2530-2540.
- [12] 杨晓渊,马丽,张中华,张骞,郭婧,周秉荣,邓艳芳,汪新川,王芳,余延娣,周华坤. 高寒草甸植物群落生长发育特征与气候因子的关系. 生态学报, 2021, 41(9): 3689-3700.
- [13] 霍莉莉,陈懂懂,李奇,张莉,贺福全,舒敏,赵亮. 三江源地区草地植物功能性状与蒸散发关系研究. 草地学报, 2022, 30(8): 2182-2190.
- [14] 吴晶晶,焦亮,张华,杜达石,朱许丽,车曦晨. 生态修复前后祁连山地区植被覆盖变化. 生态学报, 2023, 43(1): 408-418.
- [15] 杨金涛,张晓晗,尹正辉,桑旦群培,古桑群宗. 禁牧对西藏贡山温性草原主要植物生态位及种间联结的影响. 西北植物学报, 2024, 44(2): 330-337.
- [16] Hu Y F, Dao R N, Hu Y. Vegetation change and driving factors: contribution analysis in the Loess Plateau of China during 2000—2015. *Sustainability*, 2019, 11(5): 1320.
- [17] 刘铮,杨金贵,马理辉,柯增鸣,胡宇美,岩晓莹. 黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素. 应用生态学报, 2021, 32(1): 113-122.
- [18] 魏建洲. 黄土高原草地植被变化及其驱动力分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [19] 李月皓,王晓峰,楚冰洋,牛泽鹏,符鑫鑫,延雨. 青藏高原生态屏障生态系统时空演变及驱动机制. 生态学报, 2022, 42(21): 8581-8593.
- [20] 杨亮,刘丽男,孙少波. 1982—2015年青藏高原植被变化的主导环境因子. 生态学报, 2023, 43(2): 744-755.
- [21] Piao S L, Liu Q, Chen A P, Janssens I A, Fu Y S, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G, Zhu X L. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [22] 陈晓青. 中国不同植被类型NDVI时空变异特征及其归因研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [23] 陈懂懂,霍莉莉,赵亮,陈昕,舒敏,贺福全,张煜坤,张莉,李奇. 青海高寒草地水热因子对土壤微生物生物量碳、氮空间变异的贡献——基于增强回归树模型. 生态环境学报, 2023, 32(7): 1207-1217.
- [24] 张紫怡,全照民,张立亭,刘耀林. 景观格局对生态系统服务的非线性影响和阈值调控——以福建省生态高效协同区为例. 生态学报, 2024, 44(21): 9535-9551.
- [25] 单姝瑶,徐浩杰,杨磊,齐效镰,陈甜,陈生云,高雅月. 祁连山国家公园生态承载力年际变化特征及其影响因素分析. 草地学报, 2022, 30(8): 2191-2198.
- [26] 辛玉春,杜铁瑛,辛有俊. 青海天然草地生态系统服务功能价值评价. 中国草地学报, 2012, 34(5): 5-9.

- [27] 俞文政,周雅文,魏柱灯,姚鑫,张玉冰. 青海高原温性草原对气候变化和人类活动响应动态机制研究. 地理研究, 2024, 43(8): 1941-1957.
- [28] 刘洋,李诚志,刘志辉,邓兴耀. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208.
- [29] 石淞,李文,丁一书,林晓鹏,翟育涔. 东北地区植被时空演变及影响因素分析. 中国环境科学, 2023, 43(1): 276-289.
- [30] 邢楠,赵玮,付宗钰,王媛媛,亢妍妍. 多元动态逐步回归方法在北京地区 能见度预报中的应用. 干旱气象, 2020, 38(4): 665-673.
- [31] Le X B, Wang X Y, Li H B, Zhang B Y, Zhao X, Zou X Y. Capacity prediction of VRLA batteries based on stepwise regression analysis. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2659(1): 012014.
- [32] 游士兵,严研. 逐步回归分析法及其应用. 统计与决策, 2017, 33(14): 31-35.
- [33] 金晓龙,邓学良,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥. 基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析. 环境科学, 2024, 45(5): 2694-2706.
- [34] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [35] 赵艳艳,张晓平,陈明星,高珊珊,李润奎. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析. 地理学报, 2021, 76(11): 2814-2829.
- [36] 李桂娥,李杰,赵冲,焦洋阳,闫庆武. 生态系统服务时空演化的非线性影响因子——以钱塘江流域为例. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5941-5952.
- [37] 马云瑞. 近 20 年祁连山区植被动态及其对气候变化的响应 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [38] 李娟,龚纯伟. 祁连山国家公园植被覆盖变化地形分异效应. 水土保持通报, 2021, 41(3): 228-237.
- [39] 常博,刘贤德,王顺利,张玉珍,张学龙,孙于卜. 祁连山不同坡向草地蒸散量及其影响因子的分析. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(4): 90-95.
- [40] 王晓楠,苏文浩,董灵波. 基于随机森林的兴安落叶松天然林单木年龄预估模型. 应用生态学报, 2024, 35(4): 1055-1063.
- [41] 张良侠,岳笑,周德成,樊江文,李愈哲. 气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响. 环境科学, 2023, 44(5): 2694-2703.
- [42] 王勇. “草场承包”为何姗姗来迟. 西北民族大学学报: 哲学社会科学版, 2013(4): 149-153.
- [43] 夏翠珍,周立华,裴孝东,王娅,李军豪. 三江源国家公园区政府和牧民二元视角下的退牧还草工程绩效研究. 自然资源学报, 2023, 38(6): 1570-1587.
- [44] 赵苗苗,赵海风,李仁强,张丽云,赵峰侠,刘丽香,沈瑞昌,徐明. 青海省 1998—2012 年草地生态系统服务功能价值评估. 自然资源学报, 2017, 32(3): 418-433.
- [45] 朱振琪. 青海省实施草原生态保护补助奖励机制中存在的问题及探讨. 农民致富之友, 2017(18): 32-33.
- [46] 高榕,刘冷馨. 青海省实施生态效益补偿机制的实践及建议. 宏观经济管理, 2018, (1): 77-82.
- [47] 熊雪婷,李传华,陈佳豪. 植被对气候变化响应的地形调控作用. 地理学报, 2023, 78(9): 2256-2270.
- [48] 潘冬荣. 祁连山地区 NDVI 变化的影响因素及草地生态服务功能评价 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [49] 陈宸,井长青,邢文渊,邓小进,付皓宇,郭文章. 近 20 年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应. 草业学报, 2021, 30(3): 1-14.
- [50] 吴运力,张钰,田佳裕. 气候变化和人类活动对内蒙古高原不同植被类型 NDVI 的影响. 中国农业气象, 2023, 44(12): 1155-1168.
- [51] 徐霞,成亚薇,江红蕾,李霞,刘颖慧. 风速变化对草原生态系统的影响研究进展. 生态学报, 2017, 37(12): 4289-4298.
- [52] 宋伟宏,王莉娜,张金龙. 甘肃祁连山自然保护区草地时空变化及其对气候的响应. 草业科学, 2019, 36(9): 2233-2249.
- [53] Zhang K, Kimball J S, Nemani R R, Running S W, Hong Y, Gourley J J, Yu Z B. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration. Scientific Reports, 2015, 5: 15956.
- [54] 神祥金,周道玮,李飞,张海艳. 中国草原区植被变化及其对气候变化的响应. 地理科学, 2015, 35(5): 622-629.
- [55] 李晓婷,郭伟,倪向南,卫晓依. 高寒草甸植物物候对温度变化的响应. 生态学报, 2019, 39(18): 6670-6680.