DOI: 10.5846/stxb202107021768

黄豪奔,徐海量,林涛,夏国柱.2001—2020年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应.生态学报,2022,42(7): 2798-2809.

Huang H B, Xu H L, Lin T, Xia G Z.Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate change in the Altay region of Xinjiang from 2001 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7):2798-2809.

2001—2020年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变 化特征及其对气候变化的响应

黄豪奔1,2,徐海量1,2,*,林 涛3,夏国柱3

1 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011
 2 中国科学院大学,北京 100049
 3 新疆维吾尔自治区土地开发整理建设管理局,乌鲁木齐 830002

摘要:气候变化是干旱区植被变化的重要驱动因素,探究干旱区气候与植被关系的时空变化,有助于理解生态系统演化特征。 基于 MODIS-NDVI 与 CRU 数据集中气候数据(降水、平均气温、最高气温、最低气温、水汽压及潜在蒸散),采用 Sen+Mannkendall、Hurst 指数及相关分析法,在不同时间尺度评价了阿勒泰地区 NDVI 的时空变化特征及其对气候变化的响应。结果表 明:(1)在年尺度上,植被 NDVI 整体呈上升趋势,但存在弱反持续特征。区域内植被退化现象严重(12.11%),植被改善区域与 退化区域呈破碎化分布。(2)月尺度与季尺度上,NDVI 与降水、气温、极端气温、水汽压和潜在蒸散呈正相关,其中降水因素在 季尺度上的相关性高于月尺度。(3)不同土地利用方式下 NDVI 与气候因子的滞后效应表现为短期正效应与长期负效应。 关键词:归一化植被指数(NDVI);气候因素;滞后效应;阿勒泰地区

Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate change in the Altay region of Xinjiang from 2001 to 2020

HUANG Haoben^{1,2}, XU Hailiang^{1,2,*}, LIN Tao³, XIA Guozhu³

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Xinjiang Uygur Autonomous Region Land Development and Construction Administration, Urumqi 830002, China

Abstract: Vegetation, as the main body of terrestrial ecosystem, is closely related to natural elements such as atmosphere, soil and water through photosynthesis and respiration. It plays an irreplaceable role in regulating global material and energy cycle, maintaining regional climate stability, and indicating ecosystem change. Climate change is an important driving factor for vegetation variation in arid areas. Exploring the temporal and spatial changes of the relationship between climate change and vegetation in arid areas is beneficial to understand the evolution characteristics of ecosystems. Altay region of Xinjiang is a typical arid and semi-arid region of inner Asia, where significant climate change has been observed over the past several decades. Meanwhile, vegetation activities have shown sensitivity to climate change, especially the vegetation and desert complexes. However, previous studies have seldom examined the spatio-temporal variation characteristics at the monthly scale in Altay region. In order to address this issue, based on the climate factors (precipitation, average temperature, maximum temperature, minimum temperature, vapor pressure and evapotranspiration) of the CRU TS multivariate climate

基金项目:新疆自治区土地开发整理建设管理局委托完成干旱区微地形整治修复关键技术标准制定项目(E1400113)

收稿日期:2021-07-02; 网络出版日期:2021-12-15

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

data set and MODIS-NDVI, the temporal and spatial variation characteristics of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and its response to climate change in Altay region are investigated and compared at the monthly, seasonal and annual scales by using Sen+Mann-Kendall, Hurst index and correlation analysis methods. The results show that: (1) at the annual scale, the NDVI exhibited an overall upward trend with weak anti-persistent characteristics. In the past 20 years, about 56.29% of the total vegetation area presented a trend of annual increase, which was mainly distributed in Altai Mountain Reserve, Irtysh River Basin and Ulungu River Basin. However, there was serious vegetation degradation (12.11%), and the degraded areas were fragmented and distributed in river basins due to the impact of human activities. (2) at the monthly and seasonal scales, the NDVI was positively correlated with precipitation, temperature, extreme temperature, water vapor pressure and potential evapotranspiration. Further analyses indicated that the NDVI had the most significant correlation with temperature and extreme temperature, followed by vapor pressure and potential evapotranspiration, but the correlation of precipitation was higher at the seasonal scale than at the monthly scale. (3) the lag effects between the NDVI and climate factors under different land uses were manifested as short-term positive effects and long-term negative effects. This study can be conducive to predict and evaluate the vegetation dynamics in the context of global climate change and provide a theoretical reference for the management and conservation plan of regional natural ecosystem.

Key Words: NDVI; climatic factors; lag effects; Altay region

植被作为陆地生态系统的主体,通过光合作用、呼吸作用与大气、土壤及水分等自然要素形成紧密联系^[1],在调节全球物质能量循环、维持气候稳定以及指示生态系统变化过程中发挥着无法替代的作用。在全球气候变化的背景下,植被活动受到气候变化影响显著^[2-3],尤其是温度和降水,对植被生长、分布和碳收支有重要影响^[4-5]。因此,研究植被动态变化及其与气候因素的响应机制,能够作为探讨全球变化的理论依据,对评价区域环境质量与维护生态平衡具有现实意义^[6]。归一化植被指数(NDVI)广泛应用于植被动态变化研究中,与植被第一生产力、冠层覆盖面积及生物量具有较好的相关性,能够良好反应与评价植被生长状况^[7-9],深入研究 NDVI 与气候的关系并揭示其内在联系,对于了解植被的演变,预测未来气候变化下植被的变化特征具有重要价值。

NDVI 和气候在不同空间尺度上的关系已有深入的研究。在全球范围内,NDVI 对温度因素更为敏感,北 半球植被活动的增加主要是由温度升高所引起^[10-11]。但是,北半球植被的长期变化趋势与气温变化趋势并 不完全吻合,特别是在干旱与半干旱地带,降水在区域范围内对 NDVI 具有很大的影响^[12-13]。在分析 NDVI 与气候的关系时,时间尺度的选择非常重要,在年尺度与季尺度上植被与气候的关系已有许多的研究,但是植 被对气候变化存在累积效应,在年或季尺度上水热因素对植被的影响还不够清晰,难以反映它们之间的关 系^[14]。因此,在月时间尺度上探索区域 NDVI 与气候的关系可能更为合理。

鉴于上述情况,以新疆阿勒泰为例,基于栅格在不同时间尺度上对植被及气候特征进行定位与定量分析, 在区域尺度上揭示气候与植被关系的时空变化特征,有助于全面理解生态系统演化特征,以期为区域生态环 境保护提供理论依据。本研究主要探讨了三个问题:(1)阿勒泰 NDVI 趋势年际变化的时空特征及其未来趋 势变化。(2)NDVI 与不同时间尺度气候因子的相关性。(3)不同土地利用方式下 NDVI 与气候因子的滞后 效应。以期望预测与评价全球气候变化背景下区域尺度的植被动态,为区域生态环境保护提供理论参考。

1 研究区概况

阿勒泰地区位于 85°31′36″—91°01′15″E,44°59′35″—49°10′45″N 之间,地处阿尔泰山中段西南麓、准格尔 盆地北部。整个区域地形地貌复杂,河流综合。北部为阿尔泰山地,阿尔泰山麓缓坡地带为丘陵的主要分布 地,该地区主要河流均发源于阿尔泰山地,额尔齐斯河、乌伦古河为主要水系,呈东西走向横穿整个阿勒泰地 区,平原分布在两大水系的河谷区域及其他河流的中下游,南部遍布沙漠,延伸至古尔班通古特沙漠腹地。全 区受到中温带大陆性气候和高山气候控制,大气环流与地形、高差、地面性质等相互作用,形成明显的气候差 异:西部、北部山地年降水量可达 400—600 mm,东南部、丘陵平原年降水量仅 150—200 mm,南部荒漠年降水 量约 95 mm,全区多年平均温度为 3.7℃,气温年较差可达 30℃以上,山地丘陵地带年均温较低,处于 4℃以 下,平原地区年均温较高,处于 4℃以上。植被分布受地形、海拔与山地小气候影响,主要分布着森林、草原、 草甸、灌丛等植被类型。



图 1 初元区小息图 Fig.1 Overview of Altay region

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

2.1.1 NDVI 数据

本研究使用的 NDVI 数据来自于 MODIS MOD13Q1 数据集,时间分辨率为 16d,空间分辨率为 250 m,时间 序列为 2001 年 1 月—2020 年 12 月。由于研究区北部冬季积雪时间较长,NDVI 数据存在空值与低质量数 据,因此结合 Savitzky-Golay 滤波和质量控制文件对 NDVI 数据重构,保留高质量栅格(QA=0),低质量栅格 (QA≥1)由滤波后的值替换^[15]。利用最大值合成法(MVC)进一步获取 NDVI 月、季、年尺度的 NDVI 数据, MVC 可以降低或消除云、大气和太阳高度角对影像的影响^[16]。季节划分按照气象标准划分,春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月至次年 2 月。

2.1.2 气象数据

气象数据来源于 CRU TS4.05(https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3)^[17],选取的气象因子包括降水、平均气温、最高气温、最低气温、水汽压、潜在蒸散月尺度数据,空间分辨率为 0.5°×0.5°,对气象数据采用双线性插值法重采样与 NDVI 数据相匹配,后合成季节尺度与年尺度气象数据。

2.1.3 土地利用数据

土地利用数据使用了 GlobeLand30 数据集^[18], 空间分辨率为 30 m, 采用最邻近法进行重采样至 250 m。

选取研究区内的土地利用类型包括林地、草地、耕地、湿地、裸地、灌木地及人造地表,将2000、2010、2020年3 期数据中土地利用类型未发生改变的栅格提取,降低土地利用类型变化对本研究的影响。

2.2 研究方法

2.2.1 Sen+Mann-Kendall

Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验的结合使用,已经成为植被长时间序列分析中成熟的方法^[19-21]。该方法相比线性回归分析具有不需要数据样本遵循特定的分布,不易受离群值干扰等的优点,具有 很强的避免测量误差或异常数据的能力^[22]。Theil-Sen Median 趋势计算公式为:

$$\beta = \operatorname{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall i < j$$

式中, β 是植被变化的趋势, *i* 与 *j* 是时间序列, x_i 与 x_j 分别代表时间 *i* 和 *j* 时刻的 NDVI 值。 $\beta > 0$ 时, 反映 NDVI 呈现增长的趋势, 反之则反映 NDVI 呈现退化的趋势。

Mann-Kendall 检验用于判断趋势的显著性,定义为^[23]:

对于一系列的 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,计算用于趋势检验的统计量Z:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}}, S > 0\\ 0, S = 0\\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}}, S < 0 \end{cases}$$

$$(1, \theta > 0$$

 $\mathbb{R} \oplus S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \; ; \; \operatorname{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, \theta > 0 \\ 0, \theta = 0 \\ -1, \theta < 0 \end{cases} ; \; \operatorname{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$

式中,*n* 表示时间序列的长度,sgn 为符号函数,统计量 Z 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。设置原假设为序列没 有趋势,采用双边趋势检验。在给定的显著性水平 α 下,当 $|Z| > U_{1-\alpha/2}$ 时,则拒绝原假设,即序列趋势显著, 反之意味着趋势不显著。

参考袁丽华等^[24]的 NDVI 趋势分类,取α = 0.05,即|Z|≥1.96 时 NDVI 时间序列变化趋势显著。趋势水 平标准定义为 5 级:明显改善(β≥0.0005,|Z|≥1.96),轻微改善(β≥0.0005,|Z|<1.96),基本稳定(|β|< 0.0005,|Z|<1.96),轻微退化(β<-0.0005,|Z|<1.96),严重退化(β<-0.0005,|Z|≥1.96)。 2.2.2 Hurst 指数

自相似性和长期依赖性是自然界普遍存在的现象,并在水文、气候、地质等领域广泛运用,Hurst 指数是定量描述时间序列长期依赖性的有效方法^[25],在植被变化研究中也得以广泛应用^[24, 26-27]。Hurst 指数的估算 方法较多,本研究采用常用的 *R/S* 分析法,其估算结果更具可靠性^[28-29]。

对于时间序列 NDVI,, i=1,2,…,n, 定义该时间序列:

(1)均值序列 $\overline{\text{NDVI}_{(\tau)}} = \frac{1}{\tau} \sum_{1}^{\tau} \text{NDVI}_{(\tau)}$ $\tau = 1, 2, \cdots, n$

(2) 累积离差
$$X_{(\tau)} = \sum_{t=1}^{\tau} (\text{NDVI}_{(t)} - \overline{\text{NDVI}_{(\tau)}}) \quad 1 \le t \le \tau$$

(3)极差
$$R_{(\tau)} = \max_{1 \le t \le \tau} X_{(\tau)} - \min_{1 \le t \le \tau} X_{(\tau)} \qquad \tau = 1, 2, \cdots, n$$

(4)标准差
$$S_{(\tau)} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\text{NDVI}_{(i)} - \text{NDVI}_{(\tau)})^2}$$
 $\tau = 1, 2, \cdots, n$

对于比值 $R_{(\tau)}/S_{(\tau)} \cong R/S$,若存在如下关系 $R/S \propto \tau^{H}$,则时间序列存在 Hurst 现象。H 即为 Hurst 指数, 可根据 $\log(R/S)_n = a + H \times \log(n)$ 利用最小二乘法拟合得到。H 值的大小可以判断 NDVI 序列的持续性,包

42 卷

括三种形式:0.5<H<1,表明时间序列是一个持续性序列,具有长期相关的特征,且 H 越接近 1,持续性越强; H = 0.5,则 NDVI 序列为随机序列;0<H<0.5,则 NDVI 序列具有反持续性,H 越接近 0,反持续性越强。

2.2.3 相关系数法

相关系数用于分析两个变量之间的相关程度,两个变量相关系数的计算公式如下:

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

式中, r_{xy} 为x与y的相关系数,n为时间序列长度,i,j是时间; x_i 代表 NDVI 的观测值, y_j 表示气候因子的观测 值。基于 Matlab 平台,计算长期序列中每个栅格的 NDVI 与气候因子的相关性。当i = j时,意味着栅格上 NDVI 与气候因子处于同一时间点,即相关性研究;在滞后研究中, $j = i + k(k \in N^*)$,意味栅格上 NDVI 与气 候因子滞后 k 个时间点,从而表示 NDVI 与气候因子之间的总体滞后。

本研究将相关系数分为3个水平:弱相关(0<r≤0.4),中相关(0.4<r≤0.7),强相关(0.7<r≤1),并根据是 否通过 α = 0.01 的显著性水平来判断相关系数的显著性。此外,统计显著中相关(0.4<r≤0.7,α≤0.01)与显 著强相关(0.7<r≤1,α≤0.01)的栅格占研究区总面积的百分比,作为 NDVI 与气候因子的相关度。

3 结果与分析

3.1 近 20 年阿勒泰地区 NDVI 与气候因子的变化趋势

2001年起,新疆阿勒泰地区整体年均 NDVI 呈波动上升趋势,年际变化速率为 0.0015/a(图 2)。以 3 年 滑动平均评估植被年 NDVI,年 NDVI 变化以 2008年为拐点分为两个阶段:下降阶段(2001—2008),上升阶段 (2008—2020)。年降水量、平均气温、最高气温、最低气温、水汽压、潜在蒸散等气候因子在 20 年内呈正弦变 化趋势。年降水量波动程度最大,变化范围在 146.43 mm(2008)—226.77 mm(2016),平均降水量为 185.35 mm,水汽压变化趋势与年降水量相近,变化范围在 5.22 hPa(2014)—6.08 hPa(2016),二者总体呈微弱下降 趋势。平均气温的年变化呈微弱上升趋势,其中年均最高气温增速最快,达 0.032℃/a,其次为年均气温,增长 率为 0.025℃/a,年均最低气温增速为 0.018℃/a。潜在蒸散波动变化明显,研究区潜在蒸散最高为 2008年的 33.57 mm,最低为 2003年的 29.48 mm,增长速率为 0.046 mm/a。

3.2 NDVI 年际空间变化

NDVI的空间变化显示(图 3),植被明显改善与轻微改善的区域分别占 14.09%与 42.20%,明显改善的区域分布于额尔齐斯河、乌伦古河流域与阿尔泰山保护区东南部,轻微改善的区域多分布于山麓地带。严重退化与轻微退化的区域分别占 1.25%与 10.86%,退化的区域同样分布于河流流域内,在额尔齐斯河与阿尔泰山保护区西北部较为明显,此外阿勒泰地区的冬季牧场植被也出现明显退化现象。无明显变化的区域为 31.60%,多分布于阿勒泰地区南部,该区域为植被覆盖度低于 10% 的自然覆盖土地,包括荒漠、沙地、砾石地、裸岩等,生态环境恶劣。

阿勒泰地区 NDVI 的 Hurst 指数值域 0.12—0.99,均值为 0.43,研究区 Hurst 指数小于 0.5 的面积占比为 77.95%,表明整个区域 NDVI 表现出较弱的反持续性,因此研究区 NDVI 具有较强的波动,这与图 2NDVI 年际 变化趋势表现的一致。结合 NDVI 空间变化与 Hurst 指数,可判断 NDVI 未来变化趋势(图 3),在空间分布上, 植被持续改善区域集中于阿尔泰山保护区东南部与乌伦古湖周边的河流流域内;持续退化区域面积占 2.7%, 在河道周边零星分布;由增变减的区域广泛分布于整个研究区内,占比 41.46%,研究区北部阿尔泰山保护区 内林地林分结构中成过熟林比例较高,且放牧等人类活动因素影响强烈,保护区内植被 NDVI 反持续性特征 明显,研究区中南部为荒漠草地、裸地交错地带,气候干燥,生态环境脆弱,难以受到水源涵养的区域植被将呈 现退化的现象。

7期



图 2 2001—2020 年新疆阿勒泰 NDVI 与气候因子年际变化趋势

Fig.2 Interannual variation trends of NDVI and climatic factors in Xinjiang Altai region from 2001 to 2020

http://www.ecologica.cn

2803





3.3 NDVI 与气候因素的相关性分析

研究区内植被 NDVI 在月尺度与季节尺度与降水、气温、水汽压、潜在蒸散等气候因子呈正相关(图4. 图 5)。气温对研究区内 NDVI 影响强烈,无论在月尺度与季节尺度,平均气温、极端气温与 NDVI 显著正相 关,但极端气温与平均气温对植被活动的影响差异甚微,水汽压、潜在蒸散与研究区北部 NDVI 显著正相关, 降水与 NDVI 的相关性在所有气候因子中最弱。就季节尺度与月尺度对比而言(表1),降水与 NDVI 的相关 度在季节尺度上高于月尺度,因此降水对 NDVI 的影响具有更强的持续性,在季节尺度上更具有生态相关性。 其他气候因子与 NDVI 的相关度在月尺度上都高于季节尺度,在月尺度上生态相关性更高。在年尺度上,气 候因子与 NDVI 的相关性较弱,未通过显著性检验(P<0.01)的栅格占比高。总体所述,降水、气温、水汽压、潜 在蒸散对研究区植被活动均存在明显影响,且气温是植被活动的最显著驱动力因子。



图 4 新疆阿勒泰月尺度 NDVI 与气候因子的相关性



额尔齐斯河流域

北屯市

http://www.ecologica.cn

2805



图 5 新疆阿勒泰季节尺度 NDVI 与气候因子的相关性

Fig.5	Correlation	between	seasonal	NDVI	and	climatic	factors	in	Altay, Xinjiang	
-------	-------------	---------	----------	------	-----	----------	---------	----	-----------------	--

表1 新疆阿勒泰不同时间尺度 NDVI 与气候因子相关度/%

Table 1	Correlation of	degree	between	NDVI	and	climate	factors a	at different	time	scales in	Altav	. Xiniiar	ıg
												, , .	-

气候因子 Climatic factors	月月 At the more	己度 nthly scale	季节 At the sea	年尺度 At the annual scale	
climatic factors	相关度	极显著 正相关	相关度	极显著 正相关	相关度
降水 Precipitation	58.39	0.27	66.80	5.84	1.78
温度 Temperature	98.29	92.91	96.80	85.85	0.15
最高气温 Maximum temperature	98.28	92.87	96.79	85.56	0.16
最低气温 Minimum temperature	98.29	92.87	96.80	86.13	0.16
水汽压 Vapor pressure	98.01	57.13	95.99	54.30	0.06
潜在蒸散 Potential evapotranspiration	97.86	70.67	95.96	40.36	6.46

3.4 不同土地利用类型 NDVI 与气候因子的滞后效应

7期

为了进一步研究 NDVI 对气候因子的响应,本研究分别计算了研究期内 240 个月份不同土地类型 NDVI 与气候因子的相关度,考虑了最长 6 个月的时间滞后^[30]。图 6 展示了不同土地利用类型 NDVI 变化对气候因子的滞后效应,横坐标表示 NDVI 对气候的滞后时间,纵坐标以相关度表示,代表迟滞效应,其正负号分别代表正负效应。此外,本研究定义相关度超过 95%时,整个土地利用类型都存在滞后效应。

图 6 所示,不同土地利用类型下 NDVI 与气候因子的滞后效应以第 3 个月为时间节点分别表现为短期为 正(1—3 月)与长期为负(3—6 月)的特征。NDVI 对气温、水汽压的滞后效应表现相近,裸地、灌木地对平均 气温、极端气温、水汽压的滞后效应在两个月内下降趋势显著,草地的滞后效应下降趋势相对显著,在两个月 内对平均气温、最高气温、最低气温、水汽压分别维持 89.67%、91.77%、86.93%、79.13%以上的效应,林地、耕 地、湿地、人造地表对平均气温、极端气温的滞后效应则完全持续两个月,对水汽压的滞后效应则最低能维持 91.02%以上的水平。所有土地类型 NDVI 在第三个月对上述气候因子的滞后效应骤降至几乎为 0,在第 5 个 月即达到了完全负效应。耕地、湿地、人造地表三种土地类型 NDVI 对潜在蒸散滞后效应的正效应可维持 4 个月,湿地土壤水分充足,沼生、湿生植被繁多,耕地、人造地表受人类活动如灌溉影响频繁,因此短期正效应 相对其他气候因子较长,且在第 6 个月达到完全负效应。不同土地利用类型对降水的迟滞效应差异较大且与 其他气候因子有显著差异,林地、草地与降水相关性显著且短期迟滞效应高于其他土地类型,其他土地类型对 降水的迟滞效应虽弱但下降趋势平缓。





- 4 结论与讨论
- 4.1 讨论

新疆阿勒泰位于干旱半干旱地区,气候空间异质性明显,南部荒漠区降水稀少、蒸散发强,不利于植被活

动,随着纬度的增加,海拔也不断升高,降雨量增加,气温降低,缓和了严峻的气候限制,开展植被类型的时空 变化研究具有重要意义。结合 NDVI 时间变化与空间变化来看,植被变化的速率(β)存在明显的空间异质性, 改善的区域占比 56.29%,因此 NDVI 年变化呈增加趋势,但增速缓慢。植被改善区域集中在阿尔泰山保护区 与额尔齐斯河流域,阿尔泰山保护区气候适宜,满足以林地、草地为主的植被活动,额尔齐斯河近年生态水量 得到良好保障,能够及时补给河谷地区地下水含水层,增加土壤水分,满足流域内植被活动。植被退化区域破 碎化分布于河流流域,以额尔齐斯河流域最为明显,由于河谷两岸为牧民主要的打草场和放牧场所,人类活动 影响明显,流域内总体景观格局呈现破碎化^[31]。

新疆植被生长受水热条件双重调控,阿勒泰地区植被 NDVI 在月尺度、季节尺度与气温相关性最为显著, 与水汽压、潜在蒸散次之,与降水相关性最弱,与杜加强等及赵霞等^[32-33]在新疆生长季(4-10月)内研究结 果相似,但不同季节植被对气候因子的敏感程度不同,也是本研究日后可以深入探讨的一个方面,毛飞等[34] 在藏北地区基于旬尺度的研究结果则与本研究的结果更为吻合。植被活动响应气候变化归因于生理过程与 生理功能,如呼吸作用、光合作用、蒸腾作用等。NDVI 对气温表现出强相关性,反映了中高纬地带植被活动 对热因素的敏感性,研究区内常年温度较低,升高的气温难以显著加速地表蒸散过程(图2),在土壤水分流失 缓慢情况下能够促进有机物分解与提高植被养分利用有效性。降水因子通过增加土壤含水量来促进植物对 水分的吸收,但 NDVI 与降水的弱相关性可能归因于湿润期同时入射太阳辐射的减少^[35],此外,逐月降水量 变异性大于其他气候因子,也可能是导致弱相关的原因,而长期的植被活动取决于降水的连续性与一致性较 多^[36],因此 NDVI 与降水的相关性在季节尺度高于月尺度。水汽压与 NDVI 的关系相比降水与 NDVI 的关系 更为密切,水汽压代表空气中的水分含量,水汽充足可抑制蒸腾作用与地表蒸发,有利于土壤保墒和有机质积 累,与降水量相比能够更好的解释水分条件与 NDVI 的相互关系。潜在蒸散是太阳辐射、近地面温度、空气湿 度、风速等综合的产物,较好反映光、水、热等因素对 NDVI 波动变化的综合影响,潜在蒸散在流域区域与 NDVI 更具相关性(图4),这可能归因于土壤水分的补给更多来源于河流而非降水,也反映了研究区内植被活 动与降水的弱相关性,在今后的研究中需要更加关注环境因子对植被活动的解释作用。年尺度上,NDVI与 气候因子具有相关性,但不具备统计学意义,也能反应研究区 NDVI 增长的缓慢趋势。

根据栅格单元的最大相关系数出现的时间来判断 NDVI 与气候因子的滞后时间并非最合理的方式,相关 系数之间的差异可能并不显著[34]。本研究根据李鹏等[29]在黄土高原的研究基础,使用相关度(中相关以上 栅格占总栅格比)判断本研究区植被对气候因子的滞后效应。植被活动对气候因子的滞后效应在短期内为 正,这与研究区 NDVI 和气候因子的相关性是保持一致的,其下降趋势反映植被活动对气候的滞后时间;降水 表现出 1—2个月的滞后,气温、水汽压、潜在蒸散表现出 2—3个月的滞后,其中气温和降水的滞后效应与刘 宪锋等^[37]的结论基本吻合。负效应可理解为植被活动脱离气候迟滞影响的程度,以3个月为时间节点,气候 的迟滞影响甚微,但仍有栅格单元会受到影响(相关性低或未通过显著性检验),据下降趋势判断,气候的迟 滞影响在 4—5 个月完全消失。滞后效应因气候因素与植被类型而异。累积的降水被证明在很大程度上有利 于全球的植被生长[36],就特定植被类型而言,林地、草地显示需要更多的降水,滞后效应在两个月内都高于其 他土地类型(图6),该现象是由于林地叶面积大、生态系统导电率低,具有很强的蒸腾速率,草地具有高效利 用水的功能,都需要大量的水分来维持这一速率及相应的光合作用^[38],湿地植被活动与当月降水相关性较高 但次月滞后效应下降趋势剧烈,这归因于湿地内充沛的水源。值得注意的是,气温、水汽压、潜在蒸散对林地、 草地、耕地及湿地的滞后效应在两个月内维持较高的水平,可能的原因是温度升高致水源充沛区域土壤水分 蒸发,保持了较高的空气湿度,改善了局部小气候,水热之间的转换延长了植被生长对环境热因素的响应。湿 地、耕地、人造地表对潜在蒸散的响应滞后长于其他气候因子,得益于土壤水分的充足或人类灌溉等活动的 影响。

NDVI 对气候因子的响应和滞后期与气候区域、植被类型、生长状况及土壤质地有关,地理因素、环境因素、气候因素都是可能影响植被活动的因素,对于各影响因素的定量分离是一个值得探讨的问题。值得注意

的是,潜在蒸散是一个综合的气候因子,该因子与其他气候因子的独立影响也需进一步调查。

4.2 结论

基于 MODIS-NDVI 指数和 CRU 再分析气象数据,结合 Sen+Mann-Kendall 非参数统计检验、Hurst 指数、相关分析等方法,分析了阿勒泰地区 NDVI 的时空变化及其对多种气候因子的响应特征:

(1) 2001—2020 年, 植被 NDVI 随气候波动而波动变化, 年均 NDVI 总体呈增加趋势, 年际变化率为 0.0015/a, 植被改善区域与退化区域在河流流域内破碎化分布, 植被退化区域比重大; Hurst 指数分析显示研 究区内植被 NDVI 趋势呈反持续性特征, 未来植被出现退化趋势的比重极高。

(2) 植被 NDVI 与气温、降水、水汽压、潜在蒸散等气候因子在月尺度、季节尺度上呈正相关。NDVI 与气温相关性最为显著,与水汽压、潜在蒸散次之,与降水相关性最弱,但与降水的相关性在季节尺度上高于月尺度。

(3) 不同土地利用类型下的 NDVI 与气候因子的滞后效应差异性显著,表现为短期正效应与长期负效应的特征。

参考文献(References):

- [1] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.
- [2] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, Bousquet P, Ciais P, Peylin P, Braswell B H, Apps M J, Baker D, Bondeau A, Canadell J, Churkina G, Cramer W, Denning A S, Field C B, Friedlingstein P, Goodale C, Heimann M, Houghton R A, Melillo J M, Moore B, Murdiyarso D, Noble I, Pacala S W, Prentice I C, Raupach M R, Rayner P J, Scholes R J, Steffen W L, Wirth C. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. Nature, 2001, 414(6860): 169-172.
- [3] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [4] Xu X J, Du H Q, Fan W L, Hu J G, Mao F J, Dong H. Long-term trend in vegetation gross primary production, phenology and their relationships inferred from the FLUXNET data. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 605-616.
- [5] Xu Y F, Yang J, Chen Y N. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 126(1): 213-222.
- [6] 何月, 樊高峰, 张小伟, 柳苗, 高大伟. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应. 生态学报, 2012, 32(14): 4352-4362.
- [7] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [8] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution, 2005, 20(9): 503-510.
- [9] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [10] Mao J F, Shi X Y, Thornton P E, Hoffman F M, Zhu Z C, Myneni R B. Global latitudinal-asymmetric vegetation growth trends and their driving mechanisms: 1982-2009. Remote Sensing, 2013, 5(3): 1484-1497.
- [11] Piao S L, Tan J G, Chen A P, Fu Y S H, Ciais P, Liu Q, Janssens I A, Vicca S, Zeng Z Z, Jeong S J, Li Y, Myneni R B, Peng S S, Shen M G, Peñuelas J. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. Nature Communications, 2015, 6(1): 6911.
- [12] Jeong S J, Ho C H, Brown M E, Kug J S, Piao S L. Browning in desert boundaries in Asia in recent decades. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D2): D02103.
- [13] 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.
- [14] 庞静,杜自强,张霄羽.新疆地区植被对水热条件的时滞响应.中国农业资源与区划,2015,36(7):82-88.
- [15] Yin L C, Wang X F, Feng X M, Fu B J, Chen Y Z. A Comparison of SSEBop-model-based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River Basin, China. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2528.
- [16] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7 (11): 1417-1434.
- [17] Harris I, Osborn T J, Jones P, Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data, 2020, 7(1): 109.

- [18] Ju C, Ban Y F, Li S N. Open access to Earth land-cover map. Nature, 2014, 514(7523): 434-434.
- [19] Ali R, Kuriqi A, Abubaker S, Kisi O. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. Water, 2019, 11(9): 1855.

2809

- [20] 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.
- [21] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, Prince S D. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(6): 1133-1135.
- [22] 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.
- [23] Kendall M G. Rank Correlation Methods. 4th ed. London: Griffin, 1948.
- [24] 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.
- [25] 谢平,陈广才,雷红富.基于 Hurst 系数的水文变异分析方法.应用基础与工程科学学报,2009,17(1):32-39.
- [26] 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.
- [27] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 夏朝宗. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [28] 李卓,孙然好,张继超,张翀.京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析.生态学报,2017,37(22):7418-7426.
- [29] 潘竟虎,黄克军,李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. 生态学报, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [30] Li P, Wang J, Liu M M, Xue Z H, Bagherzadeh A, Liu M Y. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015. CATENA, 2021, 203: 105331.
- [31] 杨涵,陈学刚,王亚奇.1990—2010年新疆额尔齐斯河流域湿地景观动态变化.干旱区研究,2013,30(2):211-218.
- [32] Du J Q, Shu J M, Yin J Q, Yuan X J, Jiaerheng A, Xiong S S, He P, Liu W L. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 216-228.
- [33] Zhao X, Tan K, Zhao S, Fang J. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China. Journal of Arid Environments, 2011, 75(10); 946-952.
- [34] 毛飞, 卢志光, 张佳华, 侯英雨. 近 20 年藏北地区 AVHRR NDVI 与气候因子的关系. 生态学报, 2007, 27(8): 3198-3205.
- [35] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, Bonan G B, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luyssaert S, Margolis H, Oleson K W, Roupsard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Woodward F I, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. Science, 2010, 329(5993): 834-838.
- [36] Ding Y X, Li Z, Peng S Z. Global analysis of time-lag and-accumulation effects of climate on vegetation growth. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 92: 102179.
- [37] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,李宜展,赵安周. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [38] Ershadi A, McCabe M F, Evans J P, Wood E F. Impact of model structure and parameterization on Penman-Monteith type evaporation models. Journal of Hydrology, 2015, 525: 521-535.