

基于 MODIS 数据的博斯腾湖流域植被变化及其与气候因子的关系*

万洪秀^{1,2}, 覃志豪^{1,3**}, 徐永明⁴

(1: 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

(4: 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044)

摘要: 以博斯腾湖流域为研究区, 基于 2001—2016 年时间序列的 MODIS *NDVI* 数据分析了研究区植被的时空变化趋势, 并结合流域气象站点的气温、降水、日照时数和相对湿度数据分析了植被生长季累积 *NDVI* 和 16 天 *NDVI* 与气候因子之间的响应特征。结果表明: (1) 流域植被覆盖变化呈改善趋势, 生长季累积 *NDVI* 年变化率为 0.014 a^{-1} , 16 天 *NDVI* 变化率均为正值, 植被改善趋势显著区域主要分布在高山草原湿地和农业灌溉区边缘的新增农田。(2) 植被生长季累积 *NDVI* 主要受降水和相对湿度影响, 植被总体生产力与水分条件关系最密切, 生长季逐 16 天 *NDVI* 与同期气温和日照时数在植被生长初期和末期关系显著, 而与降水没有显著的相关性, 说明植被短期瞬时长势对热量条件更为敏感。(3) 在植被生长不同阶段对气候变化具有不同的滞后效应, 其中植被生长初期和末期对气温有 0.5~1 个月的滞后, 生长盛期对降水有 0.5~3 个月的滞后、日照时数有 1.5~2.5 个月的滞后、相对湿度有 0.5~2.5 个月的滞后, 揭示了植被不同生长阶段水热条件对其生长韵律的控制差异。

关键词: 气候变化; 物候学; MODIS *NDVI*; 时滞效应; 博斯腾湖流域

Variation of vegetation cover and its relationship with climatic factors in the Bosten Lake Basin using MODIS data

WAN Hongxiu^{1,2}, QIN Zhihao^{1,3**} & XU Yongming⁴

(1: *International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(3: *Institute of Natural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, P.R. China*)

(4: *School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P.R.China*)

Abstract: The response of vegetation to climate at different scales provides synthetic understandings of environmental changes. In this paper, the spatio-temporal variation of the vegetation and its relationship with climatic factors in the Bosten Lake Basin was studied based on MODIS *NDVI* dataset. The correlation and time lag between the *NDVI* (16-day *NDVI* and cumulative *NDVI* in growing season) and the climate factors (air temperature, precipitation, sunshine duration and relative humidity) were investigated during 2001–2016. The results show that: (1) The cumulative *NDVI* in growing season exhibited an increasing trend by 0.014 a^{-1} . The most significant increasing areas are mainly located in the lower edge of permafrost belts and the new irrigated farmland areas. (2) The interannual variation of vegetation cover was strongly related with the water conditions. The significant correlation between 16-day *NDVI* and the climate factors had highlighted the significant impacts from temperature and lower correlation with precipitation, which indicated that the short-term growth of vegetation is mainly sensitive to thermal conditions. (3) The time lag correlation

* 国家自然科学基金项目(40701025, 41671028)资助。2018-04-26 收稿; 2018-06-11 收修改稿。万洪秀(1978~), 女, 助理研究员; E-mail: hxwan@niglas.ac.cn.

** 通信作者; E-mail: qinzh@caas.net.cn.

between 16-day *NDVI* and the climate factors showed that vegetation had different time-lag effects on climate change during different growth stages. There was a 0.5–1 month time lag effect on temperature during the early and late stages of the growing seasons. However, the most significant effect during the fast growing seasons was the 0.5–3 month time lag on precipitation. This difference revealed the mechanism rhythms of hydrothermal conditions on the vegetation growth at different stages.

Keywords: Climate change; phenology; MODIS *NDVI*; time lag effect; Bosten Lake Basin

植被是连接土壤、大气和水分的自然纽带,在全球变化研究中具有“指示器”的作用^[1-4]. 作为反映植被生长状况最有效的参数之一^[4-5],归一化差值植被指数(*NDVI*)在植被动态变化遥感监测研究中得到了广泛应用. 近几十年高时间分辨率遥感传感器技术的发展为深入探讨植被与气候变化关系提供了新的数据源,如 GIMMS、SPOT/VGT 和 EOS/MODIS 等. 国内外很多学者基于这些长时间序列 *NDVI* 数据开展了植被对气候变化的响应研究^[6-10]. 我国西北地区是典型的干旱半干旱地区,生态环境恶劣,植被对气候变化敏感^[11]. 针对西北地区植被对气候变化的响应,李震等^[12]基于西北地区 1982–2001 年植被变化的研究认为降水是影响西北地区植被变化最主要的自然因素;Zhao 等^[13]则认为干旱半干旱区 *NDVI* 变化主要受生长季降水量和蒸散发的影响;李净等^[14]研究表明西北地区近 30 年来 *NDVI* 整体呈上升趋势,且降水是影响植被变化的主要因素;杜加强等^[15]对新疆近 30 年 *NDVI* 变化研究表明植被呈显著增加趋势,植被受水热条件控制存在月份差异. 现有研究主要是基于区域和行政单元,对植被物候响应过程的差异性和滞后性研究较少^[16].

流域作为独立的水文单元,可以更好地反映植被对水热条件变化的过程差异^[17-18]. 博斯腾湖流域属于塔里木盆地的一个子流域,地形地貌空间差异显著,流域植被生长体现了比较明显的季节差异和空间差异^[19-20],在区域气候变化响应和湖泊流域过程研究中具有良好代表性^[21-22]. 本文以博斯腾湖流域为研究区,基于 MODIS *NDVI* 时间序列数据并结合流域气象站点观测资料,研究植被 *NDVI* 对气候因子的响应特征,揭示不同生长阶段的植被对水热条件的需求及其对气候变化的敏感性,为正确认识植被对气候变化的响应提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

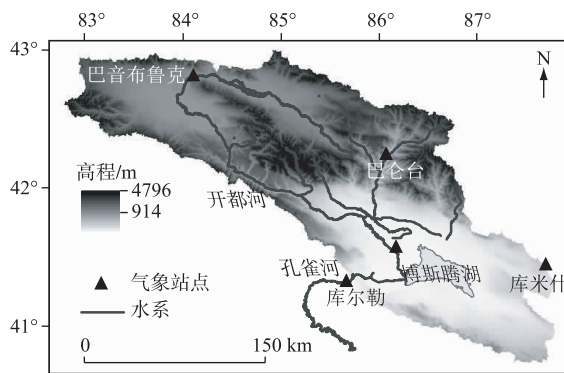


图 1 研究区地形、水系及气象站点
Fig.1 DEM, stream networks and meteorological stations of the study area

博斯腾湖流域位于塔里木盆地北缘的天山南坡(41°25′~43°34′N, 82°57′~88°18′E),包括博斯腾湖及上游开都河及下游孔雀河部分区域,总面积约 $4.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1). 流域西北部属天山中段的高位山间盆地,海拔在 2400~4500 m 之间,气候为高寒山区气候,土地覆盖以高寒草甸、高寒草原和高寒低地沼泽草甸为主,是典型的牧区,年平均气温 -4.5℃,年平均降水量 276 mm;流域东南部为焉耆盆地,海拔在 1000~2000 m 之间,属暖温带大陆性干旱气候,土地覆盖随海拔高度自上而下包括高山草甸、草原、荒漠、农田及河湖湿地等,多年平均气温 8.6℃,年降水量 50~80 mm. 中国内陆最大的淡水湖泊——博斯腾湖位于该流域的东南部焉耆盆地的中心,对开都河与孔雀河具有重要的径流调节作用^[20,22].

节作用^[20,22].

1.2 数据来源与处理

植被指数遥感数据主要采用 2001–2016 年 TERRA/MODIS 植被指数产品 MOD13Q1,该数据为 250 m 分辨率的 16 天合成 *NDVI* 植被指数,每年共 23 景影像. 其中,第 1 景影像为第 1~16 天的最大值合成,第 2 景影像为第 17~32 天的最大值合成,以此类推. MODIS 数据除了 11 月只包含 1 景数据之外,其他月份均包

含 2 景数据(表 1),16 年共 368 景影像. 对下载的数据进行镶嵌、投影转换与裁切等处理,得到研究区 2001—2016 年逐 16 天合成 *NDVI* 时间序列数据. 地面气象数据包括来自研究区范围内 5 个气象站点(巴伦台、库米什、巴音布鲁克、焉耆和库尔勒)的气温、降水、日照时数和相对湿度. 对这 5 个站点 2001—2016 年逐日气温、降水、日照时数和相对湿度进行 16 天合成计算,以与 16 天合成 *NDVI* 相对应.

1.3 研究方法

在植被覆盖率低的干旱半干旱地区,通常采用 *NDVI* 均值 0.1 作为阈值来界定植被的生长季^[23-24]. 根据博斯腾湖流域 2001—2016 年平均 16 天合成 *NDVI* 年内变化规律,确定博斯腾湖流域植被生长季开始于 4 月的下半月(第 8 景),结束于 10 月的上半月(第 19 景). 每年生长季共有 12 个上、下半月数据,将这 12 景 *NDVI* 数据进行累加,得到生长季累积 *NDVI* (即 $\sum NDVI$) 作为植被变化分析的基础数据用于后续分析.

逐像元利用最小二乘法对 $\sum NDVI$ 因变量数据进行一元线性回归分析,拟合出的回归斜率 *Slope*(即年变化率)表征植被在该时段内的变化趋势. 计算公式为:

$$\theta_{Slope} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (i \cdot NDVI_i) - \sum_{i=1}^n i \cdot \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (1)$$

式中, n 为监测时间(年数), $NDVI_i$ 为第 i 年的 $\sum NDVI$ 值. 若 *Slope*>零,说明植被变化呈增加趋势,反之植被变化呈下降趋势.

为了研究植被不同生长阶段与水热条件的关系,分别计算 $\sum NDVI$ 和 16 天 *NDVI* 与平均气温、累积降水量、平均日照时数和平均相对湿度的相关系数,公式为:

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中, n 为样本数, X_i 和 Y_i 分别为两个变量的观测值, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为两个变量的均值, R_{xy} 表示两个变量间线性相关强弱的程度,采用 T 检验并查询相关系数的临界值表来判断相关系数的显著水平.

2 结果与讨论

2.1 植被 *NDVI* 的时间变化

从 2001—2016 年流域植被覆盖变化(图 2)可知,16 年间 *NDVI* 多年平均值为 2.85,年变化率为 0.014,在 0.05 水平上达显著. 从不同阶段变化来看,研究区 $\sum NDVI$ 从 2001 年的 2.73 上升到 2002 年的 2.95,然后快速下降到 2004 年的 2.66,之后在 2005—2015 年期间呈相对平缓的上升趋势,到 2016 年快速上升到 3.17. 在 16 年间研究区的植被覆盖状况整体上有所改善,这与之前对该流域植被 2013 年前 *NDVI* 年际变化呈不显著减少趋势的结论有差异^[25],主要原因是 2014—2016 年期间研究区 *NDVI* 迅速上升(图 2),这是由大尺度区域性降水量的增加所引起的^[26]. 植被对气候变化响应的研究中需要关注不同时空尺度变化过程,研究时段的选择会影响植被变化趋势和突变点的差异^[27].

从逐 16 天 *NDVI* 植被短期覆盖状况分析(图 3)可以看出所有时期 *NDVI* 的变化率均为正值,9 月上半月和 4 月下半月植被生长的年变化率最大,超过了 $15.50 \times 10^{-4} a^{-1}$,其次为 6 月下半月和 6 月上半月,分别为 14.67×10^{-4} 和 $14.04 \times 10^{-4} a^{-1}$,5 月上半月和 8 月上半月 *NDVI* 的年变化率相差不大,约为 $13.50 \times 10^{-4} a^{-1}$,其后分别为 8 月下半月、7 月上半月、9 月下半月、5 月下半月、7 月下半月和 10 月上半月,其中仅 6 月下半月

表 1 MODIS 数据逐月对应的数据情况

Tab.1 Adopted monthly MODIS data

月份	第几天	第几景影像	月份	第几天	第几景影像
1	1、17	1、2	7	193、209	13、14
2	33、49	3、4	8	225、241	15、16
3	65、81	5、6	9	257、273	17、18
4	97、113	7、8	10	289、305	19、20
5	129、145	9、10	11	321	21
6	161、177	11、12	12	337、353	23

NDVI 年变化率在 0.05 水平上显著升高. 结合前期流域气候和冰川等变化研究认为这主要与期间冻土消融补给、积温或植被生长萌芽期滞后有关^[21].

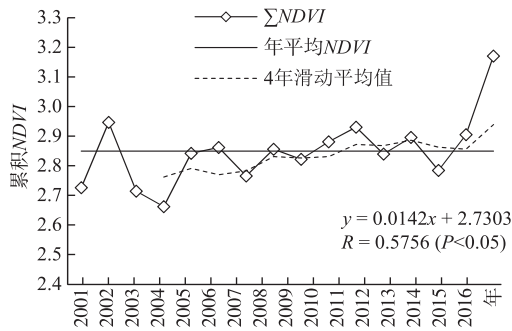


图2 研究区植被生长季累积 NDVI 的时间变化过程

Fig.2 Accumulative NDVI dynamics during growing seasons

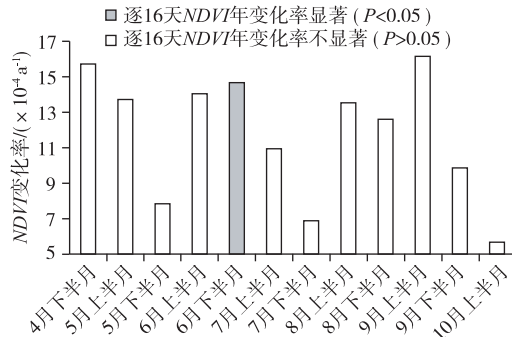


图3 2001—2016 年植被逐 16 天 NDVI 年变化率

Fig.3 Change rate of 16-day NDVI during 2001–2016

2.2 植被 NDVI 的空间变化

从研究区 2001—2016 年平均 ΣNDVI 的空间分布 (图 4a) 可以看出, 博斯腾湖流域西北部和东南部植被具有明显的空间差异. 流域西北部除冰雪覆盖的高海拔高山地带受冰川分布的影响 ΣNDVI < 0 之外, 其他区域 ΣNDVI 均在 3.0 以上, 其中巴音布鲁克草原、开都河流域大部分地区植被生长活动最旺盛, ΣNDVI 在 4.5 以上. 东南部焉耆盆地大部分区域平均 ΣNDVI < 1.0, 几乎都是裸地或低植被覆盖地, 而博斯腾湖湖区西南与西北侧之间的湿地和农业种植用地 ΣNDVI > 3.0. 流域西北部地势较高, 植被覆盖变化受气候变化影响较大, 而流域东南部地势较低, 位于中心的博斯腾湖为生产和生活提供了丰富的水资源, 人口分布比较集中, 该区域植被覆盖受人类活动影响大于气候变化的影响^[28].

流域 2001—2016 年植被变化趋势空间分布 (图 4b) 表明, 植被变化呈略微减少趋势的区域主要在北部中天山部分山区和博斯腾湖西南小湖区出湖口下游部分区域, 而在巴音布鲁克草原的湿地和焉耆盆地的农业灌溉区边缘植被呈现出明显改善趋势, 尤其是博斯腾湖南缘部分区域植被呈显著改善趋势, 这部分区域主要受人类活动影响使得植被变化呈增加趋势. 植被变化趋势的空间特征与王涛等^[25]和哈丽旦·司地克等^[28]的前期研究结果相近, 但是空间分布范围上略有差异, 这一差异主要与 2014—2016 年研究区 NDVI 明显升高有密切关系.

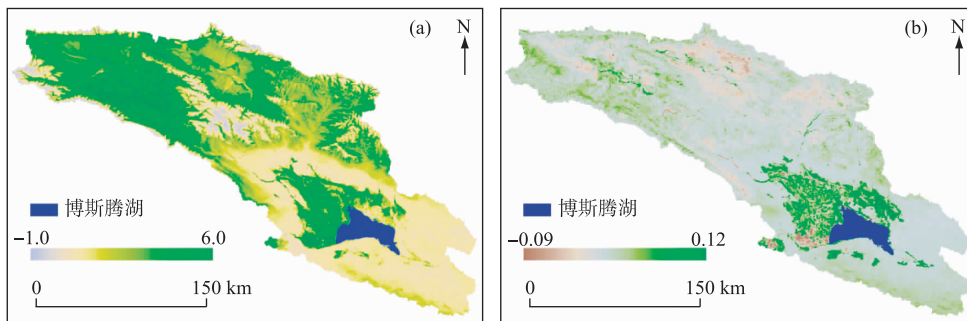


图4 研究区 2001—2016 年年均 ΣNDVI (a) 及变化趋势 (b) 的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the average accumulative NDVI (a) and the change trend (b) during 2001–2016 in the study area

2.3 植被 NDVI 与气候因子的关系

区域植被覆盖的变化不仅受到气温和降水量的影响,还受到日照时数和相对湿度等能量和水分条件的影响^[3,8-9]。此外,植被变化对气候变化的响应往往还具有一定的滞后性特征^[27,29]。

2.3.1 累积 NDVI 与气候要素变化 从图 5 可以看出,生长季累积 NDVI 气候因子的相关性从大到小依次为:降水、相对湿度、日照时数和气温。年累积 NDVI 与降水和相对湿度均呈显著正相关,且相关性较强,相关系数分别为 0.7444 和 0.4955,而年累积 NDVI 与气温和日照时数呈负相关,相关性未达到显著水平,说明博斯腾湖流域植被年际变化与水分关系更为密切。博斯腾湖流域植被覆盖变化主要受降水和相对湿度影响,而与气温的相关性较弱,这与 Zhao 等^[13]认为干旱半干旱区 NDVI 变化主要受生长季降水量的影响,与气温关联性较小的结论一致,而与整个新疆植被变化驱动因素的认识存在一定差异^[12]。不同研究结果存在差异主要由研究区、研究时段和研究尺度的不同所致。

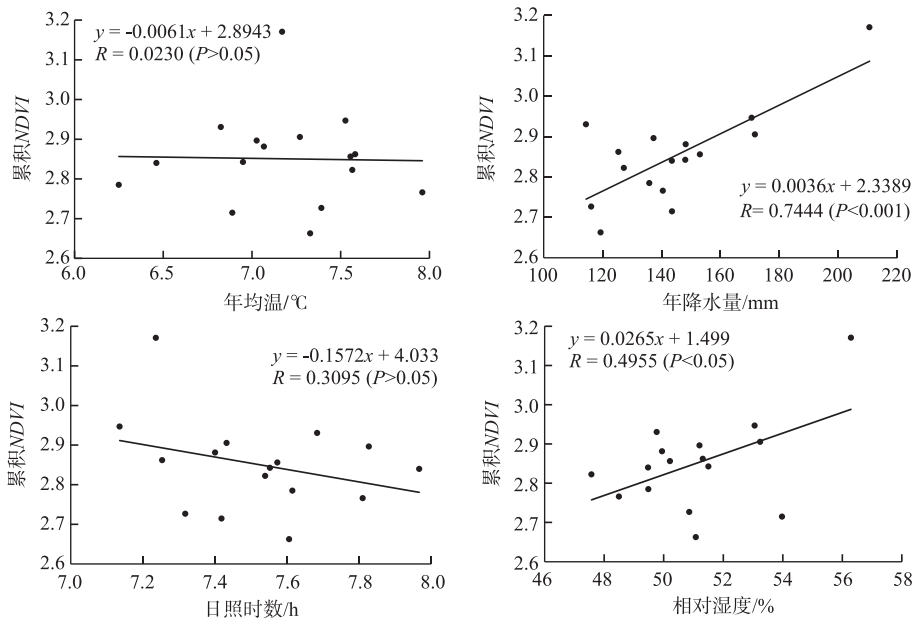


图 5 研究区植被累积 NDVI 与年均温、累积降水、日照时数和相对湿度的相关性

Fig.5 Correlation between accumulative NDVI and average annual temperature, accumulative precipitation, sunshine duration and relative humidity in the study area

2.3.2 逐 16 天 NDVI 与气候要素变化 由 2001—2016 年博斯腾湖流域气温、降水、日照时数和相对湿度逐 16 天的年变化率(图 6)可知,逐 16 天气温年变化率既有增加也有下降,其中 4 月下半月增加率达 0.15°C/a,但不显著,5 月下半月气温下降最明显,年变化率为-0.16°C/a,在 0.05 水平上显著;降水年变化率大多以增加趋势为主,其中 5 月下半月增加最为明显,达 0.96 mm/a,但所有月份降水变化均不显著;逐 16 天日照时数年变化率以增加为主,7 月上半月增加最明显,达 0.17 h/a,且在 0.05 水平上显著;相对湿度变化既有增加也有减少,其中 4 月下半月减少趋势最明显,年变化率达-0.65%/a,5 月下半月增加趋势最明显,年变化率约为 0.39%/a,均在 0.05 水平上显著。

为了研究植被生长对不同时期气候要素变化的响应特征,分析植被变化与当期、前 0.5 月、前 1 月、前 1.5 月、前 2 月、前 2.5 月和前 3 月气温、降水、日照时数和相对湿度变化的关系(表 2)。当期植被 NDVI 在 4 月下半月和 9 月下半月受同期气温(T0)变化影响较大,相关系数分别在 0.01 和 0.05 水平上达显著水平,与前期气温(T1~T6)在 4 月下半月、5 月上、下半月以及 9 月下半月和 10 月上半月有 0.5 个月的滞后,5 月上半月有 1 个月的滞后;植被变化受同期降水(P0)的影响均不显著,与前期降水(P1~P6)在 7 月上半月有 0.5 个月的滞后,6 月下半月和 7 月上、下半月有 1 个月的滞后,7 月上、下半月和 8 月上半月有 1.5 个月的滞后,

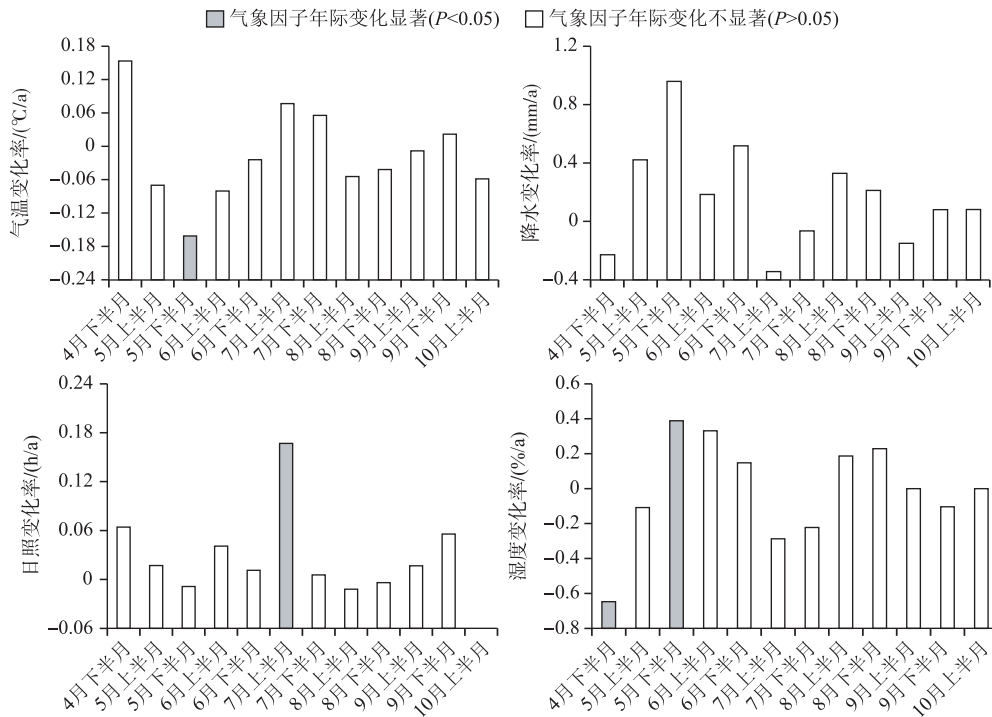


图6 博斯腾湖流域 2001—2016 年逐 16 天气温、降水量、日照时数和相对湿度的年变化率

Fig.6 Interannual variation of temperature, precipitation, sunshine duration and relative humidity during 2001–2016 in Bosten Lake Basin

7 月下半月和 8 月上、下半月有 2 个月的滞后, 5 月上半月、8 月上半月和 9 月上半月有 2.5 个月的滞后, 8 月下半月和 9 月下半月有 3 个月的滞后; 植被变化在 4 月下半月、8 月上半月和 9 月上半月受同期日照时数 (S0) 的影响显著, 与前期日照时数 (S1~S6) 在 4 月下半月、5 月上半月、8 月下半月、9 月下半月和 10 月上半月有 0.5 个月的滞后, 4 月下半月和 7 月上半月有 1.5 个月的滞后, 4 月下半月和 7 月下半月有 2 个月的滞后, 5 月上半月和 7 月上半月有 2.5 个月的滞后; 植被变化仅 4 月下半月受当期相对湿度 (H0) 影响显著, 与前期相对湿度 (H1~H6) 在 6 月下半月、7 月上半月和 10 月上半月有 0.5 个月的滞后, 6 月下半月和 7 月上半月有 1 个月的滞后, 7 月上半月、8 月下半月有 1.5 个月的滞后, 7 月下半月、8 月上半月有 2 个月的滞后, 8 月上半月有 2.5 个月的滞后。由此可见, 在博斯腾湖流域植被生长对同期不同的气候要素变化有瞬时响应特征, 对前 0.5~3 月气候要素还具有不同时间长度的滞后性。

研究表明, 植被对气温变化的瞬时响应主要在植被生长初期和末期, 且存在 0.5~1 个月的滞后期, 对降水变化的瞬时响应均不显著, 但在生长盛期有 0.5~3 个月不等的滞后效应。这表明虽然博斯腾湖流域植被生长对气温的瞬时响应要强于降水, 但降水比气温对植被影响的滞后时间长。这可能是由于在流域西北部冰川融水是植被生长的重要水源, 气温升高使冰川融化、径流量增加, 植被覆盖度增大。而降水在土壤中的循环和植物体内输送、吸收有一个过程, 因此使得植被生长对降水的滞后期延长。植被生长部分时期受日照时数和相对湿度变化瞬时响应较显著, 同时也有 0.5~2.5 个月不等的滞后性。这些研究结果与在西北黑河上中游流域植被受气温的影响大于降水的认识一致, 对降水的响应更为迅速的结论有差异^[30], 而与新疆地区植被对降水的响应一般以 2 个月时滞为主, 对气温的响应一般以时滞 1 个月为主, 植被对前期降水与对同期气温的响应程度较为明显的结果基本一致^[31], 同时也与天山山区在旬尺度上的 NDVI 变化与同期气温、日照时数相关性较强, 降水的滞后时间尺度长于气温, 以及植被受日照时数影响的滞后期较长这些结论一致, 但与同期降水相关性弱和日照时数相关性弱的结论存在差异^[32]。研究结论存在差异的原因主要是

同区域植被在不同生长时期的响应特征以及植被类型、人类活动,甚至下垫面土壤结构差异的影响. 植被变化对气候要素变化的时滞响应研究揭示了植被生长不同时期与哪个气候要素的关系更密切,以及不同气候因子对植被生长节律的控制,反映了植被生长不同阶段对水热条件的响应特征及植被的物候特征.

表 2 研究区逐 16 天 *NDVI* 与当期、前 0.5~3 月的气温、降水量、日照时数和相对湿度的相关系数

Tab.2 Correlation coefficient between 16-day *NDVI* of current stage and temperature, precipitation, sunshine duration, relative humidity of the previous stages in the study area

气候因子	与 <i>NDVI</i> 的相关系数											
	4 下	5 上	5 下	6 上	6 下	7 上	7 下	8 上	8 下	9 上	9 下	10 上
T0	0.73**	0.14	0.17	-0.20	-0.11	-0.18	0.19	0.21	-0.07	0.30	0.58*	0.05
T1	0.59*	0.58*	0.54*	0.19	-0.16	-0.34	-0.17	0.40	0.23	-0.21	0.48*	0.49*
T2	0.20	0.59*	0.23	0.42	-0.23	-0.20	-0.07	0.02	0.14	0.04	-0.27	0.20
T3	0.21	0.24	0.25	0.33	-0.01	0.00	0.03	0.15	-0.19	0.07	0.24	-0.28
T4	-0.12	0.13	0.07	0.15	0.01	-0.39	0.01	-0.04	0.21	0.14	0.42	-0.17
T5	-0.21	-0.15	0.24	-0.44	-0.18	-0.42	-0.42	0.04	-0.01	0.12	0.06	0.18
T6	-0.28	-0.12	0.28	-0.34	-0.40	-0.43	-0.14	-0.33	0.16	-0.09	-0.11	-0.04
P0	-0.46	0.15	0.09	0.06	0.20	0.06	0.01	0.25	-0.15	-0.31	0.13	-0.05
P1	-0.17	-0.23	-0.15	0.15	0.27	0.59*	0.46	0.34	0.22	-0.23	-0.47	-0.48
P2	-0.15	-0.16	0.42	-0.04	0.66**	0.64**	0.54*	0.20	0.28	0.22	-0.26	0.01
P3	0.02	-0.06	-0.09	0.29	0.12	0.49*	0.53*	0.57*	0.27	0.40	0.03	-0.19
P4	-0.44	-0.12	-0.03	-0.23	0.24	-0.09	0.53*	0.50*	0.51*	0.22	0.06	-0.10
P5	-0.23	-0.52*	0.19	0.34	-0.16	0.32	-0.05	0.52*	0.40	0.59*	0.12	-0.18
P6	0.44	-0.25	-0.19	0.06	0.36	0.17	0.29	0.12	0.51*	0.42	0.55*	-0.05
S0	0.68**	-0.01	0.15	0.20	-0.15	0.05	0.06	-0.53*	-0.21	0.53*	0.25	-0.02
S1	0.72**	0.59*	0.19	-0.08	0.03	-0.29	-0.24	-0.25	-0.56*	-0.26	0.85**	0.53*
S2	0.47	0.43	0.25	0.11	-0.43	-0.34	-0.18	0.03	-0.20	-0.39	-0.31	0.33
S3	-0.48*	0.31	0.13	0.02	0.23	-0.64**	-0.02	-0.27	0.01	-0.24	-0.46	-0.14
S4	0.51*	-0.46	0.02	0.12	-0.11	-0.04	-0.55*	0.22	-0.18	0.20	-0.16	0.00
S5	0.15	0.54*	-0.35	-0.38	0.06	-0.51*	-0.17	-0.39	0.26	-0.11	-0.07	0.10
S6	0.08	0.15	0.38	0.08	-0.44	-0.26	-0.15	-0.25	-0.40	0.24	-0.03	0.11
H0	-0.52*	0.03	0.15	0.34	0.35	0.21	0.21	0.40	0.33	-0.10	-0.05	-0.33
H1	-0.25	-0.27	0.12	0.38	0.50*	0.69**	0.46	0.23	0.41	0.25	-0.12	-0.60*
H2	-0.31	-0.29	0.35	0.01	0.79**	0.61**	0.37	0.38	0.33	0.33	0.00	-0.03
H3	0.16	-0.43	-0.11	0.22	-0.09	0.48*	0.43	0.28	0.50*	0.29	0.23	-0.07
H4	-0.14	0.05	-0.07	0.09	0.04	-0.10	0.58*	0.48*	0.19	0.22	0.19	-0.01
H5	0.06	-0.39	0.13	0.24	0.15	0.30	0.16	0.53*	0.33	0.20	0.10	-0.08
H6	0.10	-0.04	-0.02	0.21	0.39	0.44	-0.03	0.25	0.33	0.41	0.34	-0.07

* 为在 0.05 水平上显著, ** 为在 0.01 水平上显著;“4 下”即 4 月下半月,以此类推;T、P、S、H 分别代表温度、降水量、日照时数和相对湿度;T0、T1、T2、T3、T4、T5、T6 分别代表当期、前 0.5 月、前 1 月、前 1.5 月、前 2 月、前 2.5 月和前 3 月气温、降水、日照时数和相对湿度以此类推.

3 结论

本文基于 2001—2016 年 MODIS *NDVI* 时间序列数据分析了博斯腾湖流域植被时空变化特征,并结合气象数据分析了植被对气候变化的响应特征,得出如下结论:

1) 16 年间博斯腾湖流域生长季累积 *NDVI* 年变化呈增长趋势,明显增加的区域主要分布在山区中部的巴音布鲁克草原湿地和受人类活动影响较大的流域东南部新增灌区,体现了气候和人类活动双重影响下的植被分布及其变化的格局特征.

2) 流域植被累积 *NDVI* 长期(年)变化主要受降水和相对湿度等水分条件的影响, 生长季逐 16 天 *NDVI* 对同期气温、日照时数等热量条件更为敏感, 而受同期降水和相对湿度影响并不显著, 反映了植被生长不同阶段对水热条件敏感差异。

3) 流域植被生长对不同的气候要素变化具有不同的时间滞后性, 在生长季初期和末期植被变化对气温、日照时数的响应表现出明显的滞后性, 而生长旺盛时期植被变化对降水和相对湿度有较长时间的滞后效应, 揭示了水热条件对植被年内生长时间韵律的控制特征。

4 参考文献

- [1] Meng M, Zong M. Impacts of changes in climate variability on regional vegetation in China: NDVI-based analysis from 1982 to 2000. *Ecological Research*, 2011, **26**(2): 421-428.
- [2] Peng J, Liu Z, Liu Y *et al.* Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecological Indicators*, 2012, **14**(1): 28-39.
- [3] Walther GR, Post E, Convey P *et al.* Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, **416**: 389.
- [4] Diodato N, Bellocchi G. Modelling vegetation greenness responses to climate variability in a Mediterranean terrestrial ecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **143**(1): 147-159.
- [5] Eckert S, Hüsler F, Liniger H *et al.* Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2015, **113**: 16-28.
- [6] Ndayisaba F, Guo H, Bao A *et al.* Understanding the spatial temporal vegetation dynamics in Rwanda. *Remote Sensing*, 2016, **8**(2): 129.
- [7] Jiang L, Jiapaer G, Bao A *et al.* Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, **599/600**: 967-980.
- [8] Nash M, Wickham J, Christensen J *et al.* Changes in landscape greenness and climatic factors over 25 years (1989–2013) in the USA. *Remote Sensing*, 2017, **9**: 295.
- [9] Guo N, Zhu YJ, Wang JM *et al.* The relationship between NDVI and climate elements for 22 years in different vegetation areas of northwest China. *Journal of Plant Ecology: Chinese Version*, 2008, **32**(2): 319-327. [郭妮, 朱燕君, 王介民等. 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.]
- [10] Li JY, Xu WX, Cheng ZG *et al.* Spatial-temporal changes of climate and vegetation cover in the semi-arid and arid regions of China during 1982-2006. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, **21**(2): 268-272. [李军媛, 徐维新, 程志刚等. 1982-2006 年中国半干旱、干旱区气候与植被覆盖的时空变化. 生态环境学报, 2012, **21**(2): 268-272.]
- [11] Zhang TR, Zhang JH, Shen YB *et al.* Analysis of vegetation variation and its effect factors in northwestern China during 1981-2001. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, **31**(3): 586-590. [张钰仁, 张佳华, 申彦波等. 1981-2001 年西北地区植被变化特征分析. 中国农业气象, 2010, **31**(3): 586-590.]
- [12] Li Z, Yan FL, Fan XT. The variability of NDVI over Northwest China and its relation to temperature and precipitation. *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(3): 308-313. [李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系. 遥感学报, 2005, **9**(3): 308-313.]
- [13] Zhao X, Tan K, Zhao S *et al.* Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2011, **75**(10): 946-952.
- [14] Li J, Liu HB, Li L *et al.* Vegetation dynamic changes in northwest China based on multi-source remote sensing datasets in recent 30 years. *Arid Land Geography*, 2016, **39**(2): 387-394. [李净, 刘红兵, 李龙等. 基于多源遥感数据集的近 30a 西北地区植被动态变化研究. 干旱区地理, 2016, **39**(2): 387-394.]
- [15] Du JQ, Gao Y, Jiaerheng AHT *et al.* Spatio-temporal patterns and driving factors of vegetation growth anomalies in Xinjiang over the last three decades. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(7): 1915-1927. [杜加强, 高云, 贾尔恒·阿哈提等. 近 30 年新疆植被生长异常值时空变化及驱动因子. 生态学报, 2016, **36**(7): 1915-1927.]
- [16] Wu D, Zhao X, Liang S *et al.* Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 2015, **21**(9): 3520-3531.
- [17] Yang DW, Lei HM, Cong ZT. Overview of the study on interaction between the hydrological processes and vegetation in catchment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **39**(10): 1142-1149. [杨大文, 雷慧闽, 丛振涛, 流域水文过程

- 与植被相互作用研究现状评述. 水利学报, 2010, **39**(10): 1142-1149.]
- [18] Wang Z, Shi QS, Wang T *et al.* Spatial-temporal characteristics of vegetation cover change in mountain-oasis-desert system of Xinjiang from 1982 to 2006. *Journal of Natural Resources*, 2011, **26**(4): 609-618. [王智, 师庆三, 王涛等. 1982—2006 年新疆山地-绿洲-荒漠系统植被覆盖变化时空特征. 自然资源学报, 2011, **26**(4): 609-618.]
- [19] Xu N, Yao YL, Wang M *et al.* Spatial distribution of plant communities and environmental interpretation in Xinjiang Bayanbulak marsh. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 409-419. DOI:10.18307/2017.0217. [徐娜, 姚艳玲, 王铭等. 新疆巴音布鲁克高寒沼泽湿地植物群落空间分布与环境解释. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 409-419.]
- [20] Xia J, Zuo QT, Shao MC eds. The sustainable development of water resources in Bosten Lake: theory, method, practice. Beijing: Science Press, 2003. [夏军, 左其亭, 邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用:理论·方法·实践. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [21] Shi YF, Shen YP, Hu RJ. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 219-226.]
- [22] Lan WH, Abiti, An HY. Conservation and control of aquatic environment of Bosten Lake Watershed, Xinjiang. *J Lake Sci*, 2003, **15**(2): 147-152. DOI: 10.18307/2003.0208. [兰文辉, 阿比提, 安海燕. 新疆博斯腾湖流域水环境保护与治理. 湖泊科学, 2003, **15**(2): 147-152.]
- [23] Chen Q, Zhou Q, Zhang HF *et al.* Spatial disparity of NDVI response in vegetation growing season to climate change in the Three-River Headwaters Region. *Ecology and Environment*, 2010, **26**(6): 1284-1289. [陈琼, 周强, 张海峰等. 三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究. 生态环境学报, 2010, **26**(6): 1284-1289.]
- [24] Deng CP, Guo N, Wang JM *et al.* Vegetation cover variation in northwest China during the past 22 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, (5): 686-693. [邓朝平, 郭妮, 王介民等. 近 20 余年来西北地区植被变化特征分析. 冰川冻土, 2006, (5): 686-693.]
- [25] Wang T, Tao H, Lei G *et al.* Analysis of vegetation cover changes and its driving forces in Bosten Lake Basin. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, **31**(4): 228-236. [王涛, 陶辉, 雷刚等. 博斯腾湖流域植被覆盖变化及驱动因素分析. 中国农学通报, 2015, **31**(4): 228-236.]
- [26] Shang SS, Lian LZ, Ma T *et al.* Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in northwest China in recent 54 years. *Arid Zone Research*, 2018, **35**(1): 68-76. [商沙沙, 廉丽姝, 马婷等. 近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征. 干旱区研究, 2018, **35**(1): 68-76.]
- [27] Jong R, Verbesselt J, Schaepman ME *et al.* Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change. *Global Change Biology*, 2012, **18**(2): 642-655.
- [28] Halidan S, Yusufujiang R, Hamit Y. Ecological effects of human activities and climate change in Yanqi Basin, Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **18**: 5750-5758. [哈丽旦·司地克, 玉素甫江·如素力, 海米提·依米提. 新疆焉耆盆地人类活动与气候变化的效应机制. 生态学报, 2016, **18**: 5750-5758.]
- [29] Li X, Li XB, Chen YH *et al.* Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of northern China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(6): 1054-1062. [李霞, 李晓兵, 陈云浩等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应. 植物生态学报, 2007, **31**(6): 1054-1062.]
- [30] Zhao J, Xu ZX, Niu ZR *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation in response to changes in temperature and precipitation in upper and middle reaches of the Heihe River basin; a SPOT NDVI dataset study. *Journal of Beijing Normal University*, 2016, (3): 387-392. [赵捷, 徐宗学, 牛最荣等. 黑河上中游流域植被时空演变规律及其对水热条件的响应特征分析. 北京师范大学学报, 2016, (3): 387-392.]
- [31] Pang J, Du ZQ, Zhang XY. Time-lagged response of vegetation to hydro-thermal factors in Xinjiang region. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2015, **36**(7): 82-88. [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.]
- [32] Wang GG, Zhou KF, Sun L *et al.* Temporal responses of NDVI to climate factors in Tianshan Mountainous Area. *Arid Land Geography*, 2011, **34**(2): 317-324. [王桂钢, 周可法, 孙莉等. 天山山区草地变化与气候要素的时滞效应分析. 干旱区地理, 2011, **34**(2): 317-324.]