DOI: 10.5846/stxb201708071416

玛地尼亚提·地里夏提,玉素甫江·如素力,姜红.2001—2014 年博斯腾湖流域植被物候时空变化及其驱动因子.生态学报,2018,38(19): - . MADINIYATI, Dilixiati, YUSUFUJIANG Rusuli, JIANG H. Temporal and spatial variation of vegetation phenology and its driving factor analysis in the Bosten Lake Drainage Basin from 2001 to 2014. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

2001—2014年博斯腾湖流域植被物候时空变化及其驱动因子

玛地尼亚提·地里夏提,玉素甫江·如素力*,姜 红

1 新疆师范大学地理科学与旅游学院流域信息集成与生态安全实验室,乌鲁木齐 830054
2 新疆干旱区环境与资源重点实验室,乌鲁木齐 830054

摘要:以博斯腾湖流域为研究对象,利用 MODIS 的 MCD12Q2 和 LST 产品、GHCN_CAMS 气温观测/再分析资料与气象数据,采 取趋势分析与相关性分析法探求了博斯腾湖流域 2001—2014 年植被物候的时空变化及其影响因素的相对作用,对博斯腾湖流 域植被物候分区不同的驱动区域。结果表明:① 在研究期内,整个研究区植被物候始期在第 76—168 天,末期在第 172—295 天;物候始期自南向北逐渐推迟、而末期逐渐提前,物候的空间分布特征与该区海拔高度的分布保持了较好的一致性;②2001—2014 年植被始期和末期有明显提前趋势(提前 3—6 天),主要分布在流域的盆地和平原绿洲区,表示研究区植被物候受到人类 活动的影响。③植被物候始期与末期变化受气候因子驱动影响的区域占比分别为 57.10%和 51.30%,主要分布在黄水沟流域, 清水河流域,孔雀河流域,大尤路都斯盆地和小尤路都斯盆地周围地区;而非气候因子占 42.90%和 48.70%,主要位于博斯腾湖 周围绿洲和库尔勒绿洲等地势较低的区域。④由植被生长季物候与降水、气温的偏相关性关系和复相关性关系可以得出,多年 物候始期和末期与气温有关;而且随海拔升高,气温的敏感幅度越高。博斯腾湖流域植被物候的时空变化不仅是受气候变化的影响,还主要受人类活动和海拔高度差异等影响因素的共同作用。

关键词:植被物候;气候变化;MCD12Q2;驱动因子;博斯腾湖流域

Temporal and spatial variation of vegetation phenology and its driving factor analysis in the Bosten Lake Drainage Basin from 2001 to 2014

MADINIYATI, Dilixiati, YUSUFUJIANG Rusuli*, JIANG Hong

1 Institute of Geographical Science and Tourism/Laboratory of Basin Information Integration and Eco-Security, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2 Xinjiang key laboratory o lake environment and resource in arid zone, Urumqi 830054, China

Abstract: Vegetation phenology is widely used as an independent measure and powerful indicator of primary net productivity, crop yields, insect emergence, bird migration, climate change, carbon balance and cycle, and fundamental ecosystem function and is influenced at the local and global scales by climatic factors (including precipitation, temperature) and human activities. Studies of vegetation phenology are important, as solutions are needed to overcome issues such as environmental change, sustainable management, and biodiversity conservation. Hence, an in-depth understanding of the spatio-temporal variations and driving factors of vegetation phenology are important in the currently changing environment. The Bosten Lake Drainage Basin is located in northwest China and covers a vast area with a complicated terrain, including most of the middle Tianshan Mountains in the northwest, whole Yanqi basin, and northeast part of the Tarim basin in the

基金项目:国家自然科学基金项目(41461006,47164003);变化环境下干旱区湖泊流域-生态-经济复合系统的协同进化与发展,模式研究 (U1703341)

收稿日期:2017-08-07; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: Yusupjan@ xjnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

south, which are characterized by distinctive distribution patterns of temperature, precipitation, and human activities. Here, based on the MCD12O2, GHCN CAMS air temperature, Digital Elevation Model (DEM), and metrological observed data, we established monthly geographical weighted regression (GWR) models and measured the near surface air temperature. Next, spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of vegetation phenology in the Bosten Lake Drainage Basin were studied by determining slope, partial correlation, and multiple correlations. The results demonstrated that: (1) the start of growth season (SOG) was concentrated in 76-168 Julian days, whereas the end of growth season (EOS) was in 172-295 Julian days; the SOG was delayed and EOS was gradually advanced from north to south. Elevation played an important role in the regional differentiation of vegetation phenology; with increasing altitude, SOG was significantly delayed, EOG was advanced, and the length of the growth season (LOG) was significantly shortened. (2) SOG and EOG advanced synchronously in the plane oasis area during 2001 and 2014 because of the influence of human activities. (3) Climatic factors affected the area of SOG and BOG accounted for 57.10% and 51.30%, respectively, and was mainly located in the Huangshuigou river watershed, Qingshui river watershed, Konqi river watershed, Qongyultuz basin, and around the Kiqikyultuz basin. Non-climatic factors affected the area of SOG and BOG, accounting for 42.90% and 48.70%, and were located in low-altitude regions including the oasis around Bosten lake and the Korla oasis. (4) The correlation between vegetation phenology and climatic factors by partial correlation and multiple correlations demonstrated that variations in inter-annual SOG and BOG were mostly affected by air temperature. As altitude increased, vegetation showed obvious sensitivity of phenology to temperature. In summary, spatio-temporal variations in vegetation phenology in the Bosten Lake Drainage Basin are not only influenced by climate change, but are also influenced by the combined effects of human activities and altitude.

Key Words: vegetation phenology; climate change; MCD12Q2; driving factor; Bosten Lake Drainage Basin

植被是联系大气圈、水圈和土壤圈的纽带,是陆地生态系统的核心^[1]。对自然地理环境要素(如温度、光照和水分等)和人文因素(如管理、施控、耕作制度和生活传统等)影响比较敏感的植被物候是环境变化的指示器^[2-3]。植被物候是指植被生长、发育和荣枯变化的周期性现象,物候变化影响到植被生产力、陆地生态系统碳储备及碳循环过程^[4-6],它不仅反映自然季节的变化,而且能表现出生态系统对全球环境变化的响应和适应。近百年来,全球气候与环境发生了巨大的变化,其中过去 50 年的变化更加显著^[7],20 世纪 50 年代以来超过一半的气候变暖是由人类活动引起的^[8]。随着人口的不断增加和社会经济的快速发展,加快了人类大规模水土开发活动的步伐,自然植被区转为农作区,长年覆盖的土地变为季节覆盖的耕地^[9]。在这种环境演变的大局下研究气候变化和人类活动的生态效应是目前相关领域学者研究的焦点问题之一^[10]。

目前对植被物候的变化进行监测主要基于特定植物种类的观测和遥感数据的观测^[11],然而大多数地区 往往缺乏对特定植被物侯的观测数据。随着遥感技术的不断进步以及数据的不断积累和更新,各国学者相继 开展了利用遥感数据对地面植被物候状况的监测^[4,12-16]。20世纪以来开展的大量植被物候研究结果表 明^[17-18],在欧洲和美洲地区的植被物候都有较强的生长季开始期提前和生长季长度延长的趋势,但是在中亚 及中国新疆干旱区范围内物候变化情况还不明确。位于天山中部南缘和塔克拉玛干沙漠北缘的博斯腾湖流 域是我国西北干旱区的气候变化明显^[19-20]、地貌条件较复杂^[21]和人类生产活动影响显著的区域之一^[22-23]。 探索变化环境下植被物候的时空变化及其影响因子的作用机制具有重要的理论意义及实用价值。

1 研究区概况

博斯腾湖流域位于中国西北部新疆巴音郭楞蒙古自治州境内,地理位置为 82°58′—88°16′E, 41°28′— 43°21′N。包括流入博斯腾湖的河流流域(主要有开都河上游、黄水沟上游、清水河上游等)、焉耆盆地和孔雀 河流域,总面积约 68687 km²,海拔高度 856—4798 m 之间。该区域属于温带大陆性干旱气候,年平均降水量 仅约 60 mm,而潜在蒸发量 2000 mm 左右。区域内地势总体呈西北高、东南低,北侧为天山中段,南侧为霍拉山—库鲁克塔格低矮山地。博斯腾湖流域景观格局的空间分布随海拔高度的变化,自上往下主要包括冰雪带、高山垫状植被带、高山草甸带、草原带、绿洲平原、荒漠草原带和荒漠带等^[24](图 1)。



Fig.1 Sketch Map of the research area

2 数据与方法

2.1 数据来源

(1) 遥感数据:本文采用 MODIS 反照率产品 MOD43B4 提供的天底反射率数据(NBAR)计算 EVI 值反演 植被物候期的 MLCD 物候产品(MCD12Q2 Collection 5)。王聪等对位于我国西北干旱区黑河流域 MLCD 物候 产品的验证结果表明,物候产品数据与地面观测数据相关性较好(*R*²均高于 0.90)^[24],对 2001 年以来的近期 植被物候时空变化特征的提取更适合^[25]。因此,考虑本研究的区域特征和时间段选用 MODIS 的 MLCD 物候 产品。

(2)气象要素遥感数据:本研究采用的气象数据有由 NASA(美国国家航空航天局)下载的 MOD11A2 地 表温度(LST) 8d 合成产品、空间分辨率1 km、时间跨度为 2000—2014 年和 TRMM 卫星第7 版本 3 级产品 (3B43 Version7)的月降水产品数据、空间分辨率为 0.25°×0.25°、时间跨度为 2000—2014 年。博斯腾湖流域 及其周围区域 TRMM 降水数据精度(R^2 =0.95^[26])能满足本项研究的精度需求。美国国家环境预报中心—气 候预报中心(NCEP-CPC)收集的 2 m 高气温观测/再分析资料 GHCN_CAMS(空间分辨率为 0.5°×0.5°)用于 反演 1 km 空间分辨率的近地表气温数据和 MOD11A2 地表温度(LST) 8d 合成产品、空间分辨率为 1 km。

(3) DEM 数据:DEM 数据是由美国国家航空航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)合作完成的先进 星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型 ASTER GDEM V2.0(分辨率为 90 m)数据从地理空间数据云平 台(http://www.gscloud.cn)下载获取;对高程数据进了投影转换、重采样等处理,最后统一为 500 m 空间分 辨率。

(4)气象观测数据:为了检验2m高气温数据的反演精度,选取博斯腾湖流域内巴音布鲁克、巴仑台、焉

耆、库尔勒和轮台等 5 个气象站 2001—2014 年的逐月平均气温观测数据,通过比较统计实测和反演的气温数 据在"点"尺度上进行验证。

2.2 研究方法

4

(1)近地表气温的遥感反演:由于我国西北干旱区气象观测站稀少,气温资料极度匮乏,现有的内插方法 不能保证气温在区域上的分布精度。为了获取研究区高时空分辨率的近地表气温数据集,本文利用 MODIS 的 LST 产品、GHCN_CAMS 气温观测/再分析资料、DEM 数据和地面观测资料等相结合,采用基于空间异质性 理论的地理加权回归分析方法(GWR)^[27],估算空间分辨率为1 km 的月均气温。主要步骤包括:(1)在 MOD11A2 地表温度 8 天合成产品的基础上统计获取研究区 2001—2014 年的空间分辨率为1 km 的逐月平均 LST 数据集;(2)对逐月的 GHCN_CAMS 气温观测/再分析资料进行 Kriging 插值(2215 个点),形成空间分辨 率为1 km 的2 m 高气温空间分布数据集;(3)通过重采样 ASTER GDEM V2.0(分辨率为 30 m)数据,获取研 究区1 km 空间分辨率的 DEM 数据;(4)各月 GHCN_CAMS 气温观测/再分析数据作为因变量,DEM 高程和 LST 数据作为自变量,建立逐月均气温估算 GWR 模型(表1);(5)通过比较统计气象站实测气温和估算气温 对反演精度进行验证。研究区内的巴音布鲁克、巴仑台、焉耆、库尔勒和轮台气象站 2001—2010 年的反演精 度(R²)都高于 0.91,估算精度能满足本研究对近地表气温时空分布数据的要求。

Table 1 Linear regression models of Ta for every month and their statistical values					
月 Month	回归方程 Regression model	决定系数 R ² Determination coefficient	最低气温 Min temperature/℃	最高气温 Max temperature/℃	平均气温 Average temperature/℃
1	$Ta = 0.3854 \ Ts \ -0.002575 \ H \ -2.579$	0.905	-23.228	-3.552	-10.958
2	$Ta = 0.3896 \ Ts \ -0.00287H \ + \ 0.4237$	0.910	-20.513	6.774	-5.606
3	Ta = 0.2788Ts - 0.003992H + 6.682	0.903	-14.556	10.098	1.511
4	Ta = -0.1144Ts - 0.007261H + 24.17	0.897	-10.040	15.600	7.617
5	Ta = -0.2159Ts - 0.008731H + 35.08	0.887	-7.187	22.474	11.585
6	Ta = 0.07937Ts - 0.006807H + 26.89	0.894	-5.393	24.115	15.336
7	Ta = 0.2993Ts - 0.005019H + 18.85	0.895	-4.220	26.093	16.341
8	Ta = 0.3283Ts - 0.00488H + 17.47	0.898	-4.873	25.379	15.747
9	Ta = 0.009682Ts - 0.006714H + 24.66	0.899	-7.393	19.202	11.454
10	Ta = 0.577Ts - 0.001542H + 5.306	0.913	-9.271	12.633	5.338
11	Ta = 0.4184Ts - 0.001699H + 3.015	0.904	-12.399	5.207	-1.179
12	Ta = 0.3978Ts - 0.001892H - 0.9964	0.897	-18.829	-2.617	-8.941

* Ta:地表气温 Surface temperature; Ts:地表温度, land surface temperature; H:高程, Elevation

(2)统计分析:在研究区物候、气温和降水栅格数据的基础上,借助于 IDL 编程语言分别逐像元计算各要素的变化趋势和要素之间的偏相关系数及复相关系数,分析 2001—2014 年的植被物候时空变化及其驱动因子。

(3)趋势分析:一元线性回归模型可以模拟空间上每个像元的植被生长季始期和末期的时间变化,斜率 (Slope)表示生长季始期变化的趋势,用最小二乘法来计算,公式如下:

Slope =
$$\frac{n \sum_{i=1}^{n} (i \times p_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} p_i}{n \sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2}$$
(1)

式中,n为累积年数,本文为 14; P_i 为第i年的生长季始期或末期;Slope为一元线性回归方程的斜率, 是n年 连续年份的趋势, Slope>0 说明生长季始期, 末期在n年间的变化趋势是推迟的, 反之则是提前的。

(4)相关性分析:在多元相关分析中,简单相关系数不能够真实的反映出变量 X 和 Y 之间的相关性,因为

变量之间的关系很复杂,它们可能受到不止一个变量的影响,偏相关系数有效的解决了这个问题。本文利用 基于像元的偏相关分析分别研究了降水和气温对植被物候变化的影响,线性相关系数计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[(x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{Y}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{Y})^2}}$$
(2)

式中, R_{xy} 为降水,气温两变量的线性相关系数; x_i 与 y_i 分别为x,y两变量第i年的值; \bar{x} 和 \bar{Y} 分别表示两变量n年的平均值;n为累积年数。基于线性相关系数的计算结果,偏相关系数计算公式:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^{2})}\sqrt{(1 - R_{yz})^{2}}}$$
(3)

式中, $R_{xy,z}$ 为自变量 z(降水或气温)固定后因变量 x(物候)与自变量 y(降水或气温)的偏相关系数。偏相关系数的显著性检验采用 t 检验法完成。其统计量计算公式:

$$t = \frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1 - R_{xy,z}^{2}}} \sqrt{n - m - 1}$$
(4)

式中,n为样本数(时间序列为2001—2014,即n=14);m为自变量个数。

实际上,一个要素的变化往往受多个因子的综合作用影响,而要素间又是相互影响、相互联系的,上述的 单相关分析和偏相关分析都不能反映各要素的综合影响,某个变量固定条件是不成立的,这就需要采用复相 关分析方法来解决。复相关的计算公式如下:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^{2})(1 - R_{xy}^{2})}$$
(5)

式中, $R_{x,yz}$ 表示因变量 x 和自变量 y,z 的复相关系数; R_{xy} 表示 x 与 y 的线性相关系数, $R_{xz,y}$ 表示固定自变量 y 之后因变量 x 与自变量 z 的偏相关系数。

本文用 F 检验对复相关系数进行显著性检验,其计算公式为:

$$F = \frac{R^2_{x,yz}}{1 - R^2_{x,yz}} \times \frac{n - k - 1}{k}$$
(6)

式中,n为样本数(时间序列为2001—2014,即n=14);k为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 植被物候始期和末期空间变化特征

2001—2014 年物候始期和末期的空间分布图可以看出博斯腾湖流域自南向北植被始期逐渐推迟、末期 逐渐提前、这种分布格局与该区海拔高度的分布保持了较好的一致性。博斯腾湖流域大部分地区生长季始期 均值主要集中分布在第 76—168 天,全区 14 年平均值为 120.7 天。焉耆盆地的大部分区域,霍拉山,库鲁克 塔格山,大、小尤路都斯盆地的腹部和塔里木盆地北部的低山区的植被始期比较早(即早于第 130 天)。孔雀 河流域的库尔勒和尉犁县绿洲区、焉耆盆地绿洲的中部、黄水沟流域和开都河流域中山区的植被始期比较晚 (图 2a)。

生长季植被物侯末期均值主要集中分布在第 172—295 天,14 年平均值为 220.3 天。研究区大部分高山 区和中山区的植被末期早于第 230 天,其中,大尤路都斯盆地的中部、博斯腾湖小湖区、焉耆盆地人工绿洲区 (包括农作物区)、黄水沟和清水河的河沟区在第 220—230 天之间。孔雀河流域的库尔勒、尉犁县、轮台县绿 洲区和博斯腾湖周围的天然植被区晚于第 230 天,即 8 月中旬(图 2b)。

3.2 植被物候始期和末期年际空间变化趋势分析

基于趋势分析得到了 2001—2014 年博斯腾湖流域植被生长季物候始期和末期的空间变化趋势。从图 3 可以看出,植被物候始期的变化比较明显。整个流域的 46.95% 区域呈现开始期提前趋势,每年平均提前



0.5 天。包括焉耆盆地大部分区,孔雀河流域的尉犁县,库尔勒绿洲区,塔里木盆地北部的低山区,提前了 3— 8 天;仅有 17.85%的区域开始期具有推迟趋势,主要包括流域内的大尤路都斯盆地腹地区呈 4—8 天推迟现象 (图 3a)。





SOG:生长季开始期,Start of growth season;EOG:生长季末期,End of growth season

博斯腾湖流域植被面积的46.04%的区域植被物候末期具有提前趋势,集中分布在焉耆盆地农作物区,提前了3—6天;研究区15.15%的区域物候末期呈现推迟趋势,主要分布在博斯腾湖小湖区,霍拉山,大尤路都斯盆地高山区,孔雀河流域的尉犁县和塔里木盆地北部区(图3b)。

3.3 植被物候与降水,气温的相关分析

3.3.1 偏相关分析

气候要素是决定植物生长状况的重要的因子,影响着植物生长发育的每个阶段。已有的大量研究显示, 植被物候可以与气温降水等气候因子之间同时发生相关关系。因此偏相关分析的结果既可能较为全面地揭 示出在综合气象条件下大气环境要素与逐个气象因子之间的相关关系,其分析结果也更接近于实际。博斯腾 湖流域生长季植被物候始期与降水的偏相关性分析图(4)可知,植被年物候均值与降水量在-0.82—0.89 之 间,正、负相关的区域分别占研究区植被面积的 43.30%和 56.70%。正相关区域主要集中霍拉山,博斯腾湖小 湖区,孔雀河流域的尉犁县,库尔勒绿洲区,黄水沟河流域和清水河流域中山区,大尤路都斯盆地腹地等区域; 负相关的区域在焉耆盆地绿洲中部,库鲁克塔格山,开都河流域高山区和大尤路都斯盆地周围的高山区;研究 区植被年物候始期均值与气温在-0.97—0.81之间,正、负相关的区域占流域植被面积的 20.81%和 79.19%; 研究区植被末期与降水的偏相关系数在-0.98—0.98之间,正、负相关区域面积占流域植被面积的 43.78%和 56.22%;正相关区域主要集中在焉耆盆地人工绿洲区(包括农作物区),拉沟山,霍拉山,库鲁克塔格山,孔雀 河流域的尉犁县和库尔勒绿洲,塔里木盆地北部低山区等;流域的北部区呈现负相关而且小尤路都斯盆地腹 地及高山区显示很明显;植被物候末期与气温的偏相关系数在-0.86—0.86之间,正、负相关区域分别占研究 区植被面积的 38.90%和 61.10%,表示研究区植被物候末期与气温之间有较高的负相关性关系。博斯腾湖流 域的植被始期,末期与气候因子的偏相关性关系中,物候与降水和气温的负相关性特征明显。意味着大部分 区域的秋季物候随着温度升高和降水量的增加而逐渐提前。这是跟博斯腾湖流域的气候特征和植被类型有 密切的关系。一般来说,气温上升会导致地温升高,会加速植物内部的化学反应过程,为植物发育提供有利条 件,使得植被春秋物候提前^[28]。

(图 5a)可以看出,研究区植被物候始期与气温相关不显著,其中极显著相关约有 1.29 %(a<0.01),置信 水平在 0.01—0.05 约占 5.52%,而大部分地区的植被物候始期与气温相关不显著,且在空间分布在无明显特 征,说明近 14 年博斯腾湖流域植被物候始期与气温相关较弱。研究区物候末期与气温偏相关显著水平空间 分布图(图 6a),得出无显著负相关约占 66.64%,分布在黄水沟流域和清水河流域周围,博斯腾湖小湖区,大 尤路都斯盆地腹地,库鲁克塔格山。而无显著正相关约占 42.76%,主要集中分布焉耆盆地及其周围平原绿洲 区,大尤路都斯和小尤路都斯盆地周围高山区。显著和极显著相关约占不到 2%,说明物候末期与气温相关 不显著,且以负相关为主。综上所述,近 14 年博斯腾湖流域植被物候与气温成较弱相关性,相关不显著,无明 显的空间分布特征。

博斯腾湖流域植被物候始期与降水偏相关显著空间特征(图 5b),负相关约占 56.73%,其中表现比较明显的是不显著负相关(a>0.05),空间分布比较零散,主要分布在研究区四周,尤其在靠近博斯腾湖周围的平原绿洲区,大尤路都斯和小尤路都斯盆地周围的高山区,库鲁克塔格山等区域,约占 55.89%;正相关主要表明为不显著正相关(a>0.05),集中分布在研究区的中心地区,以及靠近黄水沟河流域和清水河流域周围,博斯腾湖小湖区,大尤路都斯盆地腹地,约占 42.81%,其中显著正相关(a<0.05)分布较少,只有 0.38%。从物候始期 与降水相关的空间分布图来看,在河流密布的地区,水资源相对充沛,因而降水补给作用相对较弱,但在河流网稀疏的干旱地区,以及沙漠地区,水资源相对缺乏,降水补给作用较强,因而与降水呈正相关。研究区多年物候末期 与降水偏相关显著空间特征(图 6b),研究区大部分南部地区以及低海拔高度(<1500 m)的地区呈正相关,高海拔地区呈负相关,整个区域负相关相对大于正相关。其中负相关约为 62.86%,负相关程度不明显,主要表明为不显著负相关(a>0.05),约为 0.93%,零散分布;正相关约为 48.96%,正相关程度不明显,主要表明为不显著正相关(a>0.05),约为 47.69%,显著正相关相对较少(a<0.05),约为 1.29%零散分布。综合说明综合说海拔越高温度相对较低,加上降水也会降低气温,从而使得植被停滞生长提早,即末期提前。

3.3.2 复相关分析

研究区植被物候与降水和气温的复相关分析可知(图7),物候始期与气候因子(降水,气温)的复相关系 数在0—0.97之间。整体而言,植被物候始期与气候因子的复相关性较强的区域集中大,小尤路都斯盆高山 区和黄水沟流域中山区;复相关性较弱的区域包括焉耆盆地,黄水沟流域和清水河流域高山区,霍拉山,孔雀 河流域的尉犁县和库尔勒绿洲区。植被物候末期与气候因子的复相关系数在0—0.89之间,除了库鲁克塔格 山,黄水沟流域中,高山区和小尤路都斯盆地腹地等地区之外其它区域的复相关性较弱。通过分析,博斯腾湖 流域植被物候与气候因子的复相关性的差异很可能与海拔,植被类型和人类活动有关。博斯腾湖流域南北海 拔差异大,东北,西北部处于高海拔地区(>3000 m),南部大部分地区海拔1500 m 以下,根据有关研究,同纬



图 4 2001-2014 年植被物候与气候因子偏相关系数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of partial correlation between vegetation phenology and climatic factors during 2001-2014







度不同海拔气温变化敏感性有差异,高海拔地区对气温变化敏感度高于同纬度的低海拔地区^[29]。此外,博斯 腾湖流域东北,西北部植被类型以草甸和高山植被,南部地区一年生草本植被为主,草甸和高山植被对气温, 降水的敏感性要高于其他植被类型^[30]。

3.3.3 物候变化驱动分区

研究表明,植被物候的变化主要气候和人类活动有关。当然气候变化以及降水和气温的变化具有很重要的影响。本文参考国内外众多学者研究^[31-33],参照植被覆盖变化驱动分区的原则^[34],对博斯腾湖流域植被



图 6 物候末期与气温(a)和降水(b)的偏相关显著水平分布

Fig.6 Spatial Distribution of significant horizontal of partial correlations between EOG and temperature (a) and precipitation (b) EOG:生长季末期,End of growth season







物候变化进行驱动分区研究:①2001—2014年植被物候始期变化受降水,气温强驱动区域占研究区植被总面积的 20.72%,主要包括大,小尤路都斯盆地周围的高山区;物候末期与气候因子强驱动区域面积占 17.70%,集中在库鲁克塔格山区;②以气温为主要驱动因素的区域,在植被物候始期中,占研究区植被面积 25.98%,集中在流域大,小尤路都斯盆地腹地,黄水沟流域以及清水河流域中山区;植被物候末期中占 16.97%,包括黄水沟河流域和清水河流域;③植被物候始期中,以降水为主要驱动因素的区域面积较少占研究区植被面积的 10.30%;末期中占 16.30%,包括小尤路都斯盆腹地和黄水沟流域高山区;④植被物候始期和末期中以降水,气温为弱驱动因素的区域分别占研究区植被总面积的 0.02%和 0.30%;⑤除了湖泊和冰川之外的地区属于非气候因素驱动的区域。主要分布在博斯腾湖流域的中部和西南部的盆地和绿洲区。以上研究表明对流域的物 候变化非气候因子的影响比较强(图 8)。

4 结论

本文基于 2001—2014 年连续 14 年的 MCD12Q2 数据,利用 Slope 分析,相关性检验和驱动分析对博斯腾



图 8 博斯腾湖流域植被物候始期(a)和末期(b)变化驱动力分区

Fig.8 SOG (a) and EOG (b) change regions driven by different factors in Bosten Lake Drainage Basin

SOG:生长季开始期,Start of growth season;EOG:生长季末期,End of growth season;[T+P]+:气温,降水强驱动区 Change driven by temperature and precipitation strongly;T:气温为主驱动 Change driven by temperature mainly;P:降水为主驱动 Change driven by precipitation mainly;[T+P]-:气温降水弱驱动 Change driven by temperature and precipitation weakly; NC:非气候驱动 Change driven by non-climate

湖流域植被物候变化规律进行了分析研究,得到如下结论:

(1)研究区植被物候始期在第76—168 天,全区 14 年平均值为第 120.7 天;末期在第 172—295 天,14 年 平均值为 220.3 天。通过一元线性回归模型分析博斯腾湖流域植被生长季物候始期和末期的时空变化特征。 研究区 49.95%的区域始期呈 3—8 天的提前趋势现象,仅有 17.85%区域始期推迟 4—8 天;博斯腾湖流域的 46.04%的区域末期具有提前趋势,仅有 17.85%的区域开始期具有推迟趋势,主要包括流域内的大尤路都斯盆 地腹地及其周围的高山区呈 4—8 天推迟现象。

(2)2001—2014年博斯腾湖流域植被物候与气温成较弱相关性,相关不显著,无明显的空间分布特征。 对降水的影响而言,海拔越高温度相对较低,加上降水也会降低气温,从而使得植被停滞生长提早,即末期提前。根据复相关分析可以得到,研究区高海拔地区(>3000 m)植被对气温的敏感性强于低海拔地区,这跟所相关的研究结果一致。

(3)基于植被物候和气候因子的相关关系,分区了5个驱动区域:博斯腾湖流域物候始期和末期变化受 气候因子影响的区域占比分别是57.02%和51.27%(气温和降水强影响20.72%和17.70%;气温为主25.98% 和16.97%,降水为主10.30%和16.30%;气温和降水弱影响的0.02%和0.30%),主要分布在黄水沟流域,清水 河流域,孔雀河流域,大尤路都斯盆地以及小尤路都斯盆地周围地区;非气候因子(包括人类活动、自然灾害 等)占42.98%和48.73%,主要位于流域的盆地和绿洲区。

参考文献(References):

- [1] 周广胜,何奇瑾,殷晓洁.中国植被/陆地生态系统对气候变化的适应性与脆弱性.北京:气象出版社,2015.
- [2] Walker J, de Beurs K, Wynne R H. Phenological response of an Arizona dryland forest to short-term climatic extremes. Remote Sensing, 2015, 7 (8): 10832-10855.
- [3] 安佑志. 基于遥感的中国北部植被 NDVI 和物候变化研究[D]. 上海:华东师范大学, 2014.
- [4] Chen X Q, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1118-1130.
- [5] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. Nature, 1996, 382 (6587): 146-149.
- [6] Carrer M, Motta R, Nola P. Significant mean and extreme climate sensitivity of Norway spruce and silver fir at mid-elevation Mesic sites in the alps. PLoS One, 2012, 7(11): e50755.

- [7] IPCC. Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the IPCC. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [8] 秦大河, Stocker T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [9] 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.
- [10] 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,2016,36(18): 5750-5758.
- [11] 马勇刚, 张弛, 塔西甫拉提·特依拜. 中亚及中国新疆干旱区植被物候时空变化. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 95-102.
- [12] 国志兴,张晓宁,王宗明,方伟华. 东北地区植被物候对气候变化的响应. 生态学杂志, 2010, 29(3): 578-585.
- [13] 游松财, 宋春桥, 柯灵红, 刘高焕, 钟新科. 基于 MODIS 植被指数的藏北高原植被物候空间分布特征. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1513-1520.
- [14] Kariyeva J, van Leeuwen W J D, Woodhouse C A. Impacts of climate gradients on the vegetation phenology of major land use types in Central Asia (1981-2008). Frontiers of Earth Science, 2012, 6(2): 206-225.
- [15] Kariyeva J, van Leeuwen W J D. Environmental drivers of NDVI-based vegetation phenology in Central Asia. Remote Sensing, 2011, 3(2): 203-246.
- [16] Menzel A, Sparks T H, Estrella N, E Koch, A Aasa. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology, 2006, 12(10): 1969-1976.
- [17] Schwartz M D, Reiter B E. Changes in North American spring. International Journal of Climatology, 2000, 20(8): 929-932.
- [18] Zhang F Y, Li L H, Ahmad S. Streamflow pattern variations resulting from future climate change in middle Tianshan Mountains Region in China// World Environmental and Water Resources Congress. Sacramento, CA: American Society of Civil Engineers, 2017: 437-446.
- [19] 陈亚宁,李稚,方功焕,邓海军.气候变化对中亚天山山区水资源影响研究.地理学报,2017,72(01):18-26.
- [21] 周成虎,罗格平,李策,汤奇成,励惠国,王钦敏,Fukui H. 博斯腾湖环境变化及其与焉耆盆地绿洲开发关系研究. 地理研究, 2001, 20 (1): 14-23.
- [22] 玉素甫江・如素力. 基于 GIS-SD 的新疆焉耆盆地二元水循环过程模拟研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.
- [23] 黄小忠,陈发虎,肖舜,吕雁斌,陈建微,周爱锋.新疆博斯腾湖沉积物粒度的古环境意义初探.湖泊科学,2008,20(3):291-297.
- [24] 王聪,李静,柳钦火,柏军华,徐保东,赵静,曾也鲁.黑河流域遥感物候产品验证与分析.遥感学报,2017,21(3):442-457.
- [25] Peng D L, Zhang X Y, Wu C Y, Huang W J, Gonsamo A, Huete A R, Didan K, Tan B, Liu X J, Zhang B. Intercomparison and evaluation of spring phenology products using National Phenology Network and AmeriFlux observations in the contiguous United States. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 242: 33-46.
- [26] 孙占东, Opp C, 王润, 高前兆. 博斯腾湖流域山区地表径流对近期气候变化的响应. 山地学报, 2010, 28(2): 206-211.
- [27] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [28] Wu X C, Liu H Y. Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982-2006. Global Change Biology, 2013, 19(3): 870-880.
- [29] 李宗省,何元庆,辛惠娟,王春凤,贾文雄,张蔚,刘婧.我国横断山区 1960-2008 年气温和降水时空变化特征. 地理学报, 2010, 65 (5): 563-579.
- [30] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379-382.
- [31] 高志强,刘纪元,曹明涛,李克让,陶波.土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响.地理学报,2001,59(4):581-591
- [32] Mohamed M A A, Babiker I S, Chen Z M, Ikeda K, Ohta K, Kato K. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (NPP). Science of the Total Environment, 2004, 332(1/3): 123-137.
- [33] 刘军会,高吉喜.气候和土地利用变化对北方农牧交错带植被 NPP 变化的影响.资源科学,2009,31(3):493-500.
- [34] 陈云浩,李晓兵,史培军. 1983—1992年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.