

DOI: 10.5846/stxb201811292600

丁玥, 阿布都热合曼·哈力克, 陈香月, 木卡达斯·阿不都热合曼. 和田地区植被覆盖变化及气候因子驱动分析. 生态学报, 2020, 40(4): 1258-1268.

Ding Y, Abdirahman · Halik, Chen X Y, Mukaddas · Abdirahman. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in Hotan Prefecture. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1258-1268.

和田地区植被覆盖变化及气候因子驱动分析

丁 玥¹, 阿布都热合曼·哈力克^{1,*}, 陈香月^{1,2,3}, 木卡达斯·阿不都热合曼¹

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 基于 MODIS NDVI (2000—2016 年) 数据集, 结合气温、降水数据, 利用最大值合成法、斜率分析法及相关分析等方法, 分析和田地区近 17 年的植被覆盖时空变化特征及其与气候因子的相关性。结果表明: (1) 近 17 年和田地区植被覆盖的月际变化表现为先增加再减少, 年际变化表现为显著上升趋势, 增速为 0.452/10a; (2) 近 17 年和田地区植被覆盖增加和减少的区域分别占总面积的 4.48% 和 0.21%, 绿洲及昆仑山北部部分区域变化剧烈, 高海拔区域基本不变; (3) 近 17 年温度和降水小幅增加, 增速分别为 0.144/10a 和 0.156/10a; 月尺度上, 植被覆盖与温度为正相关, 植被生长滞后于温度两个月; 与降水以负相关为主, 滞后效应不明显。 (4) NDVI 对气候因子响应的空间分布中, NDVI 与平均温度以负相关为主, 与降水以正相关为主, 与降水的相关性较温度的相关性高; 昆仑山北部植被对降水变化更敏感, 和墨洛绿洲、策勒-于田绿洲和和田地区西南部山区对温度变化更敏感。

关键词: 植被覆盖; MODIS NDVI; 气候变化; 和田地区

Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in Hotan Prefecture

DING Yue¹, Abdirahman · Halik^{1,*}, CHEN Xiangyue^{1,2,3}, Mukaddas · Abdirahman¹

1 College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: To explore the relationship between vegetation cover change and climatic changes, we used MODIS NDVI (2000—2016) data set and climate (temperature and precipitation) data to analyze temporal and spatial variation characteristics of vegetation cover and its correlation with climatic factors in the Hotan Prefecture from 2000 to 2016. The results showed the following: (1) The data for inter-monthly changes in vegetation cover in the Hotan Prefecture during the last 17 years showed that vegetation cover first increased and then decreased. The inter-annual variation showed a significant upward trend, with a growth rate of 0.452/10a; (2) In the past 17 years, the areas where vegetation cover increased and decreased accounted for 4.48% and 0.21% of the total area, respectively. The oasis and the northern part of the Kunlun Mountains changed considerably, and the high-altitude area remained basically unchanged; (3) Over the past 17 years, temperature and precipitation increased slightly, with growth rates of 0.144/10a and 0.156/10a, respectively. On a monthly scale, vegetation cover was positively correlated with temperature, and vegetation growth lagged behind temperature for two months. There was a negative correlation with precipitation, but the lag effect was not obvious. (4) In the spatial distribution of NDVI response to climate factors, NDVI was negatively correlated with average temperature and positively

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41761019, 41061052); 西部地区人才培养特别项目 (201408655089)

收稿日期: 2018-11-29; **网络出版日期:** 2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ah@xju.edu.cn

correlated with precipitation. The correlation with precipitation was higher than that with temperature. Therefore, we conclude that vegetation in the northern Kunlun Mountains is more sensitive to precipitation changes, and the oasis and mountains in southwestern Hotan Prefecture are more sensitive to temperature changes.

Key Words: vegetation cover; MODIS NDVI; climatic change; Hotan Prefecture

植被在区域和全球生态系统稳定性中起着至关重要的作用,植被覆盖是水土保持和改善生态环境的关键因素^[1]。在全球气候变化的大背景下,研究区域和全球尺度下植被与气候间的定量关系变得十分重要^[2-4]。由于植被对环境变化非常敏感,且气候变化是环境变化的重要驱动力之一,因而气候对植被的生长具有十分重要的影响^[5-8]。

已有研究表明,过去几十年间全球气温显著上升,北半球中高纬度地区的植被受气温影响,生长季节已经延长^[9],这些变化已经引起了国内外研究学者的广泛关注。由于干旱半干旱地区受水资源短缺的限制,植被生长对气候变化十分敏感^[10-11],是研究植被变化对气候响应的热点区域。新疆地处中亚干旱区腹地,气候极端干旱,当地生态系统对气候变化的响应最为敏感^[12]。而和田地区(78°17'—82°38' E、36°52' N—37°19' N)位于新疆维吾尔自治区西南缘,南与昆仑山及西藏自治区交界,北与塔克拉玛干大沙漠及阿克苏相连,东与巴音郭楞蒙古自治州毗邻,西与喀什地区接壤,西南与喀喇昆仑山相邻。该区气候干旱,生态环境非常脆弱,研究其生态环境的变化具有十分重要的意义。

近年来,遥感影像的应用十分广泛,利用 NDVI(归一化植被指数,Normalized Different Vegetation Index)研究长时间序列植被覆盖变化的方法较为成熟,主要集中于植被覆盖的整体时空变化及植被对气候变化与人类活动的响应。高江波等^[13]分析了 1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响,探究了中国植被 NDVI 及其动态特征对气候变化响应的空间格局;杜加强等^[14]研究了新疆 1982—2012 年间植被生长的动态变化,发现研究时段内生长季植被 NDVI 呈极显著增加趋势,在不同时段 NDVI 与气候因子的相关性存在差异;郭继凯等^[15]对 2001—2013 年塔里木河流域气候变化和人类活动对植被覆盖变化的相对作用进行定量分析,结果表明塔里木河流域植被覆盖变化主要受人类活动影响。目前关于和田地区植被覆盖变化及其驱动力研究的空间尺度主要分为两类,一类为更大的空间尺度,如新疆^[16],另一类为更小的空间尺度,如和田地区内部某一绿洲^[17-19],对和田地区这一空间尺度的研究较少。本文使用 MODIS NDVI(2000—2016 年)数据集,探讨和田地区植被覆盖的时空变化特征及其对主要气候因子的响应,并以 2010 年土地利用分类数据和 DEM 数据为参考,分析不同生境植被覆盖变化与气候因子的相关关系,以期在全球气候变化背景下为和田地区的生态环境管理与保护提供科学依据。

1 研究区概况

和田地区(图 1)包含皮山县、墨玉县、和田县、洛浦县、策勒县、于田县、民丰县及和田市,东西长约 670 km²,南北宽约 570 km²,总面积约 24.78×10⁴ km²。区域内部地貌单元可分为:最高山带(5200—5500 m),是现代冰川和永久积雪带;高山带(4200—5200 m),一般为裸地;亚高山带(3400—4200 m),山势起伏大,一般坡度 20—38 度;中山带(3000—3400 m)分布着辽阔的优良草场,是和田地区重要牧业基地;低山带(2200—3000 m),山势平缓,在河流沿岸阶地上分布着农田,是农牧结合区;山麓倾斜平原(1250—2200 m)生长着稀疏超旱植被,分布着古老绿洲;沙漠区(<1250 m)北部地区接塔克拉玛干沙漠腹地,生长着耐旱植被。当地气候干旱,多风沙天气,降水量少而蒸发量大,不同地形、地貌条件下,气候差异极大。年降水量为 28.9—47.1 mm,蒸发量高达 2198—2790 mm,属于干旱荒漠气候区^[20]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所采用的遥感数据是 MODIS NDVI 数据集。该数据可在美国国家航空航天局(National Aeronautics

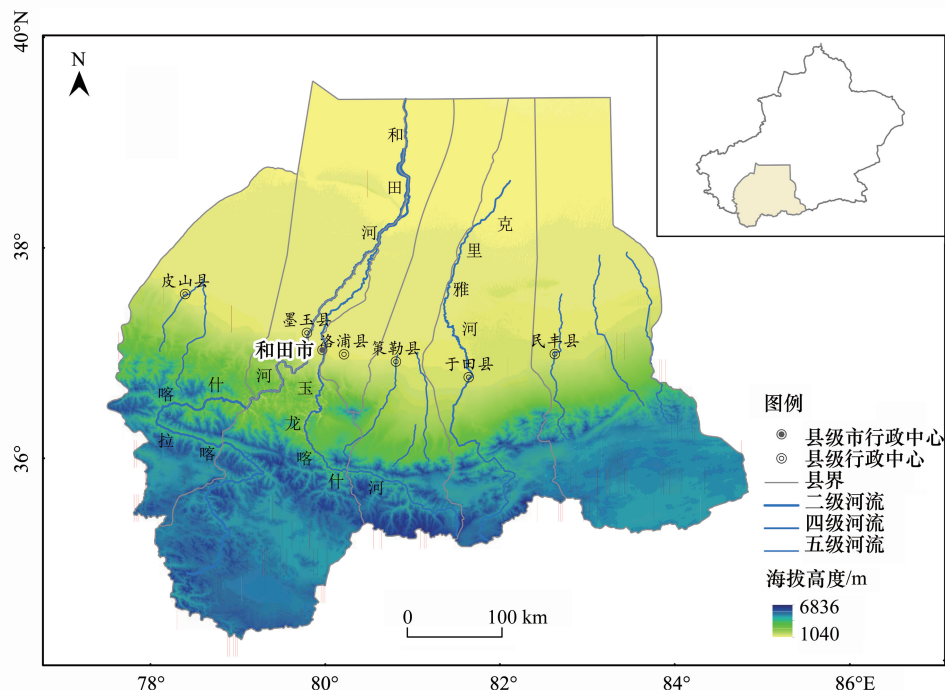


图1 研究区位置及高程

Fig.1 The location of study area and its elevation

and Space Administration, NASA) 网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 免费下载, 时间序列为 2000—2016 年, 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 1 月。气象基础数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>), 选用 2000—2016 年和田地区及其周边地区共 25 个气象站点的月平均气温及月降水量。

为了消除云层、大气和太阳高度角等的干扰, 采用最大值合成法 MVC (Maximum Value Composites) 获得年 NDVI 的最大值, 其公式为^[21-22]:

$$Y_{\text{NDVI}_i} = \max(\text{NDVI}_{ij})$$

式中, Y_{NDVI_i} 为第 i 年的年最大 NDVI 值 ($i=2000, 2001, \dots, 2016$); NDVI_{ij} 为第 i 年第 j 月的 NDVI ($j=4, 5, \dots, 9, 10$)。一般认为生长季植被 NDVI 不受植被物候变化及积雪覆盖的影响, 因此本文选取 4—10 月的 NDVI 平均值作为年 NDVI 平均值。考虑到生长季植被 NDVI 大于 0.1 表示有植被覆盖, 小于 0.1 则表示地表无植被覆盖^[23], 因此为方便计算, 只计算 $\text{NDVI} > 0.1$ 的像元。

整理和田地区及其周边地区 25 个气象站点 2000 年 1 月—2016 年 12 月的月降水量和月平均气温, 利用 ArcGIS 软件采用反距离权重法 (IDW) 对气象数据进行空间插值, 获得与 NDVI 数据相同投影和空间分辨率的栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 斜率分析法

采用斜率分析法基于像元尺度分析 2000—2016 年研究区植被覆盖年际变化特征, 由此反映不同区域植被覆盖空间变化趋势, 其公式为^[24-25]:

$$\theta_{\text{Slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times M_{\text{NDVI}_i} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n M_{\text{NDVI}_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

式中, n 为监测时间段的累计年数; M_{NDVI_i} 为第 i 年 4—10 月最大化 NDVI 值; θ_{slope} 是趋势线的斜率。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时,表示 NDVI 在 n 年间呈增加趋势,当 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 时,表示 NDVI 在 n 年间呈现退化趋势。对植被覆盖度变化趋势进行 F 检验,按显著性水平 0.1 将 NDVI 变化趋势划分为 7 个等级。

2.2.2 相关分析法

采用相关分析法可研究植被 NDVI 对气候变化的响应,其计算公式为^[26]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}}$$

式中, r 为 a 、 b 两变量的相关性; n 为监测时间段的累计年数; a_i 为第 i 年的植被 NDVI, b_i 为第 i 年的累积降水量或平均温度; $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 为变量样本值的平均值。

2.2.3 极差标准化

由于 NDVI 与气温及降水具有不同的单位和量纲,无法直观研究其中规律,因而采用极差标准化对数据进行处理,其公式为:

$$x'_i = \frac{x_i - \min\{x_i\}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}}$$

式中, x_i 为原始数据; x'_i 为标准化所得的新数据,各要素的极大值为 1,极小值为 0,其余的数值均在 0 与 1 之间。

3 结果分析

3.1 植被变化特征分析

3.1.1 植被 NDVI 月际变化

通过统计研究区 2000—2016 年 4—10 月的 NDVI 值,可以看出 NDVI 的变化趋势基本一致(图 2),即 4—7 月呈上升趋势,在 7 月或 8 月达到峰值,8—10 月呈下降趋势。2004、2006、2008、2009、2011、2013、2015 年 7 月的月 NDVI 值最大;其余年份的月 NDVI 值在 8 月最大。原因在于和田地区被植被覆盖的土地利用类型主要包括耕地、林地和草地,在气温和降水的影响下,4 月份植被开始生长,NDVI 逐渐增大;7 月或 8 月植被生长最为茂盛,NDVI 达到峰值;不久后农作物成熟并开始收割,植被逐渐减少,NDVI 逐渐减小。

4 月 NDVI 值最大的是 2016 年,5 月 NDVI 值最大的是 2013 年,6、7、8 月 NDVI 值最大的是 2012 年,9、10 月 NDVI 值最大的是 2010 年。4 月 NDVI 最小值出现在 2000 年,5、6、10 月 NDVI 最小值出现在 2001 年,7、8 月 NDVI 最小值出现在 2009 年,9 月 NDVI 最小值出现在 2008 年。4—10 月的 NDVI 平均值分别为 0.0104、0.0184、0.0272、0.034、0.0347、0.0307、0.0194,其中 8 月 NDVI 最大,4 月 NDVI 最小。

3.1.2 植被 NDVI 年际变化空间分布

通过斜率分析法对研究区 2000—2016 年各年最大 NDVI 值与其相对应的时间序列进行逐像元回归分析,按斜率及显著性检验划分为七类,以表达此段时间内植被覆盖变化的趋势,其中 27.9%通过了显著性检验,72.1%未通过显著性检验,划分标准及结果见图 3、表 1。和田地区坐落于塔里木盆地,受地形因素制约降

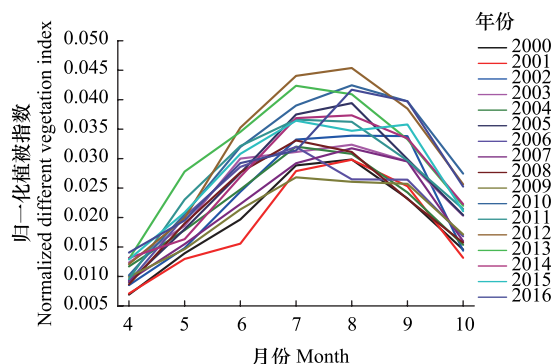


图 2 2000—2016 年月 NDVI 值变化

Fig.2 Change in monthly NDVI from 2000 to 2016

水较少,区域内水源主要来自地下水及冰雪融水。植被主要分布在山地、绿洲及河流附近,植被覆盖的区域面积约为 80886 km²,约占研究区总面积的 32.44%;无植被覆盖的区域面积约 168467 km²,约占研究区总面积的 67.56%。17 年间研究区植被覆盖增长的区域面积约 11172 km²,约占研究区总面积的 4.48%;退化的面积约 524 km²,约占研究区总面积的 0.21%;植被覆盖变化不明显的区域面积约 69190 km²,约占研究区总面积的 27.75%。由此可知,和田地区植被覆盖整体呈增加趋势。其中,植被轻度增加的面积最大,为 108778 km² (4.363%);植被轻度减少的面积次之,为 496 km² (0.199%);植被中度增加的面积为 204 km² (0.082%),之后是显著增加和中度减少,面积分别为 90 km² (0.036%) 和 20 km² (0.008%),植被显著减少的面积最小为 8 km² (0.003%)。结合 2010 年土地利用分类数据,植被显著增加的土地利用类型为耕地,位于皮墨农场;植被中度增加的土地利用类型为耕地和草地,前者分布在绿洲内部,后者分布在绿洲外围;植被轻度增加的土地利用类型主要为草地,分布在昆仑山北部以及绿洲外围,其次为分布在绿洲内部的耕地以及极少的林地,林地分布在于田县克里雅河尾间及民丰县牙通古孜河附近。植被减少的面积较少,部分分布在和墨洛绿洲、策勒-于田绿洲、民丰绿洲内部(土地利用类型为城乡建设用地),其余零星分布在昆仑山北部(土地利用类型为草地)。由上述分析可知,近 17 年和田地区植被覆盖变化基本平稳略有增加,主要变化集中在海拔相对较低、人类活动较为频繁的绿洲,高海拔区域主要受气候因素影响,植被覆盖变化主要表现为基本不变。

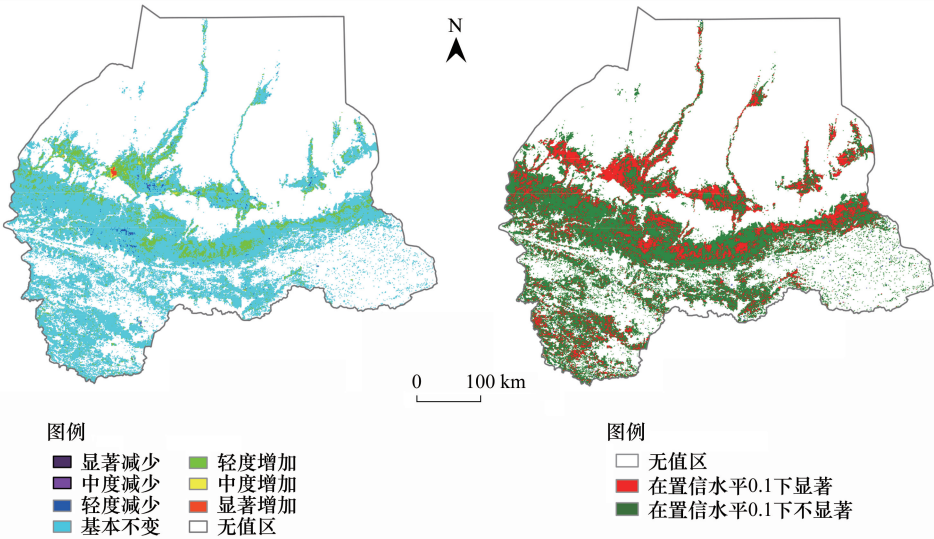


图3 和田地区 NDVI 变化趋势及显著性检验

Fig.3 The change trend of NDVI and its significance testing in Hotan Prefecture

表 1 2000—2016 年和田地区 NDVI 变化趋势分类标准及结果统计

斜率变化范围 The range of slope	变化程度 The degree of slope	所占面积 Area/km ²	占全区面积百分比 The percentage of total area/%
−0.027569 — −0.019	显著减少	8	0.003
−0.019 — −0.012	中度减少	20	0.008
−0.012 — −0.0052	轻度减少	496	0.199
−0.0052 — 0.0052	基本不变	69190	27.748
0.0052 — 0.0186	轻度增加	10878	4.363
0.0186 — 0.0316	中度增加	204	0.082
0.0316 — 0.04458	显著增加	90	0.036
0	无值区	168467	67.561

3.2 植被 NDVI 变化对气候因子的响应

3.2.1 2000—2016 年 4—10 月植被 NDVI 及气候因子的变化趋势

在气温和降水的影响下,4—10 月是植物生长的最佳时期。考虑到农作物的季节性特征,本文统计了 2000—2016 年 4—10 月的总降水量和平均温度及 NDVI,为了更好的进行分析,采用极差标准化处理。由图 4 可以看出,NDVI 与总降水量和平均温度均为上升趋势,NDVI 的上升速度较快为 0.452/10a,而总降水量和平均温度的上升速度相对缓慢,分别为 0.144/10a 和 0.156/10a。通过对图 4 各曲线的波峰和波谷进行分析,NDVI 与总降水量和平均温度均为上升趋势的是 2015 年和 2016 年;NDVI 与总降水量和平均温度均为下降趋势的是 2009 年和 2014 年。当总降水量和平均温度相差较大时,当年 NDVI 变化趋势相对较小。此外三者的最大值和最小值出现的年份均不相同,NDVI 最大值出现在 2012 年,最小值出现在 2001 年;总降水量的最大值出现在 2010 年,最小值出现在 2009 年;平均温度的最大值出现在 2011 年,最小值出现在 2003 年。

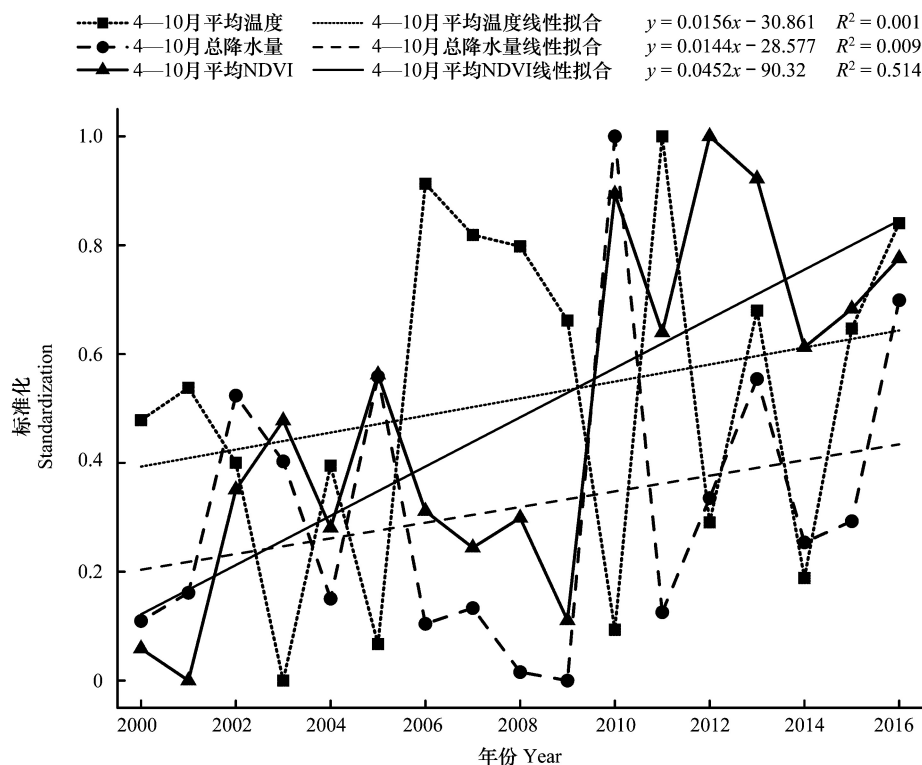


图 4 2000—2016 年 4—10 月平均 NDVI、总降水量和平均温度的变化趋势

Fig.4 The change trend of mean NDVI and total precipitation and mean temperature from April to October during 2000—2016

3.2.2 植被 NDVI 对气候因子的时滞效应

随机选取 400 个点,在 Excel 2003 和 SPSS 中分别计算和田地区 2000—2016 年各年 4—10 月的 NDVI 平均值与对应气象数据前期二月(2—8 月)、前期一月(3—9 月)和同期(4—10 月)平均温度及总降水量的 Pearson 相关系数,并进行显著性检验,得到图 5。4—10 月 NDVI 序列与前期二月、前期一月和同期平均温度序列均为正相关且均通过 0.01 的置信度检验,前期二月平均温度序列与 4—10 月 NDVI 序列的相关系数在 0.494—0.712 之间;前期一月平均温度序列与 4—10 月 NDVI 序列的相关系数在 0.475—0.695 之间;同期平均温度序列与 4—10 月 NDVI 序列的相关系数在 0.484—0.672 之间,三者最低值均出现在 2003 年,最高值均出现在 2009 年。综合平均温度序列与 NDVI 序列发现,在任意给定年份,前期二月平均温度序列与 4—10 月 NDVI 序列的相关性明显高于其他两个温度序列,说明总体上,和田地区植被的生长滞后于温度两个月。

4—10 月 NDVI 序列与前期二月、前期一月和同期总降水量序列多为负相关且通过 0.01 的置信度检验,

前期二月总降水量序列与 4—10 月 NDVI 序列的正相关出现在 2003 年(0.377)、2004 年(0.109)、2005 年(0.288)和 2012 年(0.222),相关性均较低,负相关系数在 -0.139 — -0.732 之间,绝对值最低出现在 2008 年,最高出现在 2009 年;前期一月总降水量序列与 4—10 月 NDVI 序列的正相关出现在 2003 年(0.345)、2004 年(0.081)、2005 年(0.407)和 2012 年(0.194),仅 2005 年与前期二月相比有所提升,其余值均小于前期二月,负相关系数在 -0.364 — -0.745 之间,绝对值最低出现在 2006 年,最高出现在 2009 年;同期总降水量序列与 4—10 月 NDVI 序列的正相关出现在 2003 年(0.346)、2005 年(0.417),负相关系数在 -0.103 — -0.747 之间,绝对值最低出现在 2012 年,最高出现在 2009 年。综合总降水量序列与 NDVI 序列发现,当降水量序列与 NDVI 序列为正相关性时,NDVI 与降水的相关性较弱,仅 2003 年可以看出 NDVI 与降水存在一定的滞后关系(前期二月>同期>前期一月),2005 年同期总降水量序列与 NDVI 序列的相关系数最大,为 0.417。当降水量序列与 NDVI 序列为负相关性时,同期总降水量序列与 4—10 月 NDVI 序列的负相关性略高于其他两个总降水量序列。

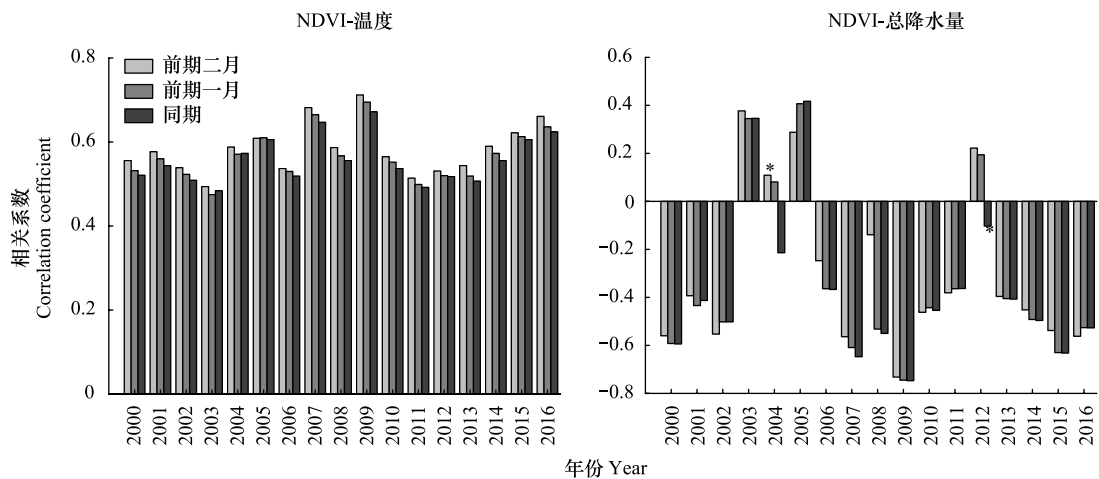


图 5 2000—2016 年和田地区 4—10 月 NDVI 与不同时期温度、降水的相关系数

Fig.5 The correlation coefficients of NDVI and mean temperature, precipitation in different time series in Hotan Prefecture from 2000 to 2016

* 表示通过 0.05 的置信度检验,“前期”指对应气象数据之前的(时间)

3.2.3 植被 NDVI 对气候因子响应的空间分布

通过 ArcGIS 栅格计算器逐像元计算 2000—2016 年和田地区前期二月、前期一月和同期平均温度、总降水量与 4—10 月 NDVI 的相关系数,得到其空间分布图(图 6、图 7)。2000—2016 年和田地区植被变化与前期二月温度的平均相关系数为 -0.018 ,区域正相关系数和负相关系数的所占比例分别为 35.82%和 64.18%,在此研究时段内研究区植被覆盖变化与温度主要为负相关。在正相关区域中,低度正相关($0-0.3$)、中度正相关($0.3-0.5$)和高度正相关($0.5-0.8$)区域分别占植被覆盖面积的 26.3%、8.12%和 1.4%,主要集中在和墨洛绿洲(耕地和草地)、策勒-于田绿洲(耕地和草地)、克里雅河尾间中部(林地)以及皮山县绿洲北部和中部(耕地和草地)、民丰县西部绿洲的中部和南部(耕地和草地),零星分布在和田地区西南部山区(草地)。在负相关区域中,低度负相关($-0.3-0$)、中度负相关($-0.5-0.3$)和高度负相关($-0.8-0.5$)区域分别占植被覆盖面积的 34.73%、23.29%和 6.17%,主要集中在昆仑山北部(草地)、皮山绿洲外围(草地)、和墨洛绿洲中东部(城乡建设用地和耕地)及和田河沿岸(灌木)、策勒-于田绿洲东北部(草地)及克里雅河尾间(林地)大部分地区和民丰县的东部绿洲(草地和林地),零星分布和田地区西南部山区(草地)。

2000—2016 年和田地区植被变化与前期一月温度的平均相关系数为 -0.014 ,区域正相关系数和负相关系数的所占比例分别为 36.77%和 63.23%,在此研究时段内研究区植被覆盖变化与温度主要为负相关。低度

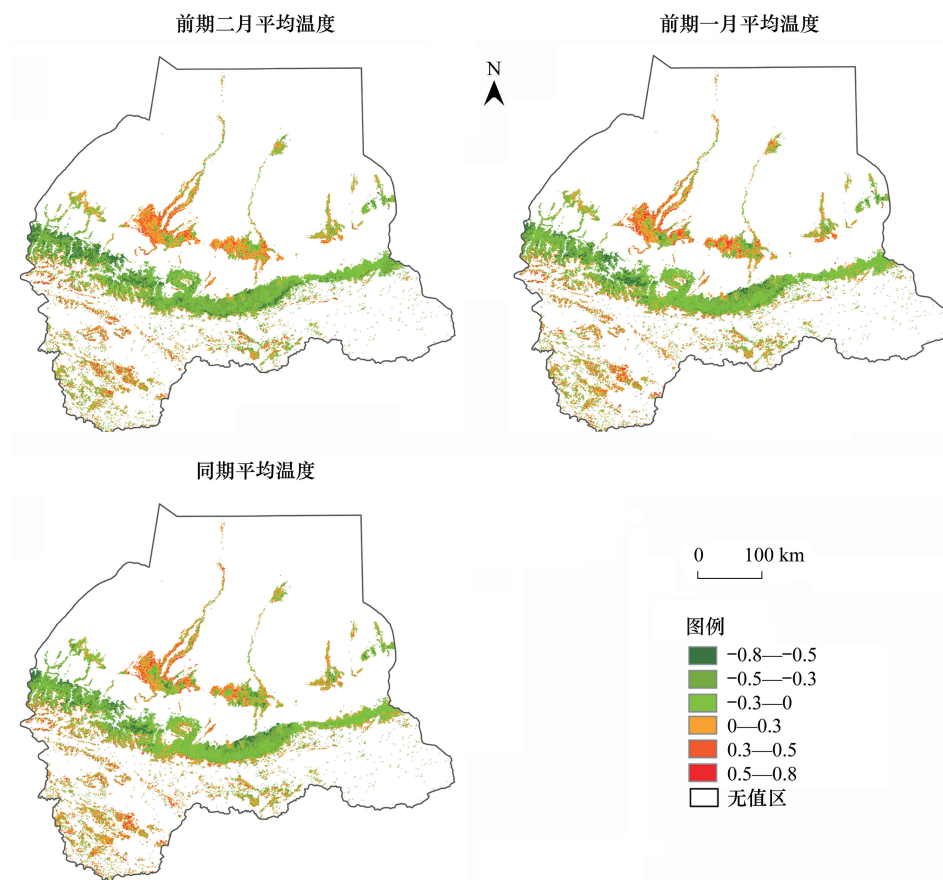


图 6 2000—2016 年和田地区 4—10 月 NDVI 与不同时期平均温度的空间相关分布图

Fig.6 Spatial pattern of correlation coefficients between NDVI and mean temperature in Hotan Prefecture during 2000—2016

正相关、中度正相关和高度正相关区域分别占植被覆盖面积的 26.17%、9.02% 和 1.57%；低度负相关、中度负相关和高度负相关区域分别占植被覆盖面积的 39.58%、19.17% 和 4.48%，与前期二月相比负相关性所占百分比减小，正相关性所占百分比增大。在负相关区域中，表现为低度负相关所占百分比增大、中度负相关和高度负相关所占百分比减小；在正相关区域中，表现为低度正相关所占百分比减小、中度正相关和高度正相关所占百分比增大。空间分布上表现为，昆仑山北部大部分区域由中高度负相关转换为低度负相关或正相关，和墨洛绿洲和策勒-于田绿洲内部部分区域由低度正相关转换为中高度正相关部分转换为低度负相关，特别是克里雅河尾间正相关增加明显。

2000—2016 年和田地区植被变化与同期温度的平均相关系数为 -0.013 ，区域正相关系数和负相关系数的所占比例分别为 37.95% 和 62.05%，在此研究时段内研究区植被覆盖变化与温度主要为负相关。低度正相关、中度正相关和高度正相关区域分别占植被覆盖面积的 28.18%、8.35% 和 1.42%；低度负相关、中度负相关和高度负相关区域分别占植被覆盖面积的 40.05%、17.65% 和 4.35%，与前期一月相比负相关性所占百分比减小，正相关性所占百分比增大。在负相关区域中，表现为低度负相关所占百分比增大、中度负相关和高度负相关所占百分比减小；在正相关区域中，表现为低度正相关所占百分比增大、中度正相关和高度正相关所占百分比减小。空间分布上表现为，皮山县绿洲、和墨洛绿洲和策勒-于田绿洲内部城镇化水平较高的区域由低度正相关转换为低度负相关和中度负相关，克里雅河尾间区域由低度正相关转换为低度负相关，昆仑山北部部分区域由中度负相关转换为低度负相关或低度负相关转换为低度正相关。

综上所述，温度与 NDVI 的相关性还与植被类型有关。土地利用类型为耕地时，在和墨洛绿洲和策勒-于田绿洲，NDVI 与前期二月温度相关性最高，表明和墨洛绿洲和策勒-于田绿洲的植被生长对气温变化响应的

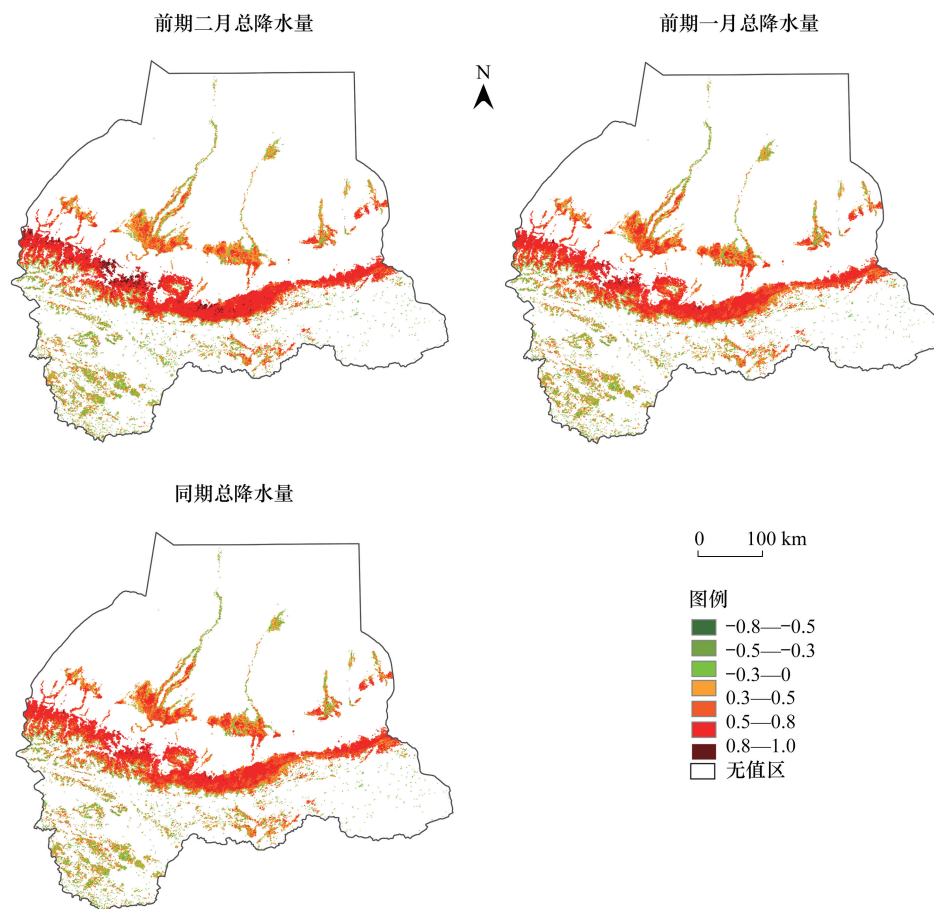


图7 2000—2016年和田地区4—10月NDVI与不同时序总降水量的空间相关分布图

Fig.7 Spatial pattern of correlation between NDVI and total precipitation in Hotan Prefecture during 2000—2016

滞后期约为两个月。土地利用类型为草地时,在昆仑山北部,NDVI与温度为负相关性,这是因为和田地区降水较少,温度越高,土壤水分蒸发越严重,抑制植被的生长;在和田地区西南部山区,NDVI与温度为正相关性,这是因为海拔越高,温度越低且植被生长依赖冰雪融水,因而温度越高越有利于植被的生长。

2000—2016年和田地区植被变化与前期二月总降水量的平均相关系数为0.061,区域正相关系数和负相关系数的所占比例分别为83.88%和16.12%,在此研究时段内研究区植被覆盖变化与总降水量主要为正相关。在正相关区域中,低度正相关(0—0.3)、中度正相关(0.3—0.5)、高度正相关(0.5—0.8)和极高度正相关(0.8—1)区域分别占植被覆盖面积的24.07%、19.9%、36.91%和3.01%。低度正相关和中度正相关分布在皮山县绿洲北部(耕地和草地)、和墨洛绿洲的主要区域及河流沿岸(耕地和草地)、策勒-于田绿洲的主要区域(耕地和草地)、克里雅河尾间(林地)、民丰县的部分绿洲(耕地和草地),零星分布在和田地区西南部山区(草地);高度正相关主要分布在昆仑山北部(草地)和皮山县绿洲南部(耕地和草地),其余零星分布在各绿洲内部。在负相关区域中,低度负相关(-0.3—0)、中度负相关(-0.5—-0.3)和高度负相关(-0.8—-0.5)区域分别占植被覆盖面积的13.85%、2.06%和0.22%,负相关的区域面积较小,零散分布在和田地区西南部山区(草地)、河流沿岸、绿洲外围及绿洲内部人口密度较大的区域。

2000—2016年和田地区植被变化与前期一月总降水量的平均相关系数为0.056,区域正相关系数和负相关系数的所占比例分别为84.24%和15.76%,在此研究时段内研究区植被覆盖变化与总降水量主要为正相关。低度正相关、中度正相关、高度正相关和极高度正相关区域分别占植被覆盖面积的24.63%、25.25%、33.72%和0.65%;低度负相关、中度负相关和高度负相关区域分别占植被覆盖面积的13.53%、2.01%和

0.21%,与前期二月相比负相关性所占百分比减小,正相关性所占百分比增大。负相关变化幅度较小,空间分布变化并不明显。在正相关区域中,表现为低度正相关和中度正相关所占百分比增加、高度正相关和极高度正相关所占百分比减小。空间分布上表现为,昆仑山北部大部分地区由高度正相关和极高度正相关转换为中度正相关,和墨洛绿洲和策勒-于田绿洲部分地区由低度正相关和中度正相关转换为中度正相关和高度正相关。

2000—2016 年和田地区植被变化与同期总降水量的平均相关系数为 0.055,区域正相关系数和负相关系数的所占比例分别为 84.18%和 15.82%,在此研究时段内研究区植被覆盖变化与总降水量主要为正相关。低度正相关、中度正相关、高度正相关和极高度正相关区域分别占植被覆盖面积的 25.07%、26.57%、32.18%和 0.36%;低度负相关、中度负相关和高度负相关区域分别占植被覆盖面积的 13.62%、1.97%和 0.23%,与前期一月相比负相关性所占百分比增加,正相关性所占百分比减小。在负相关区域中,表现为低度负相关和高度负相关所占百分比增大、中度负相关所占百分比减小。在正相关区域中,表现为低度正相关和中度正相关所占百分比增大、高度正相关和极高度正相关所占百分比减小。由于以上相关性变化幅度均较小,空间分布变化并不明显。

综上所述,总降水量和 NDVI 的相关性与土地利用类型及海拔高度有关。土地利用类型为草地时,在和田地区西南部山区,总降水量和 NDVI 的相关性为负相关或低度正相关,这一区域降水量相对较多,降水增加会导致光照强度下降、光合作用减弱,从而抑制植被的生长^[27];昆仑山北部海拔相对较低,总降水量和 NDVI 的相关性为正相关且时滞效应明显,植被生长对降水变化响应的滞后期约为两个月。和墨洛绿洲和策勒-于田绿洲地势平坦海拔相对较低,植被类型主要为耕地和草地,该区域 NDVI 与降水存在一定的滞后相关,前期一月和同期降水都会促进植被的生长。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)2000—2016 年 4—10 月 NDVI 的月际变化表现为先增加再减少,年际变化表现为显著上升趋势,增速为 0.452/10a。

(2)2000—2016 年 NDVI 的空间变化基本稳定,植被覆盖增加的区域大于减少的区域,二者分别占总面积的 4.48%和 0.21%。绿洲及昆仑山北部部分区域变化显著,高海拔区域基本不变;绿洲上的植被覆盖变化与人类活动有关;昆仑山北部的植被覆盖变化与气候因子有关。

(3)2000—2016 年温度与降水均小幅增加,增速分别为 0.144/10a 和 0.156/10a。在月尺度上,研究区 NDVI 与平均温度均为正相关,植被生长滞后于温度两个月;NDVI 与总降水量以负相关为主,滞后效应不明显。

(4)NDVI 对气候因子响应的空间分布上,NDVI 与平均温度以负相关为主,分布在昆仑山北部;正相关分布在和墨洛绿洲、策勒-于田绿洲和田地区西南部山区。NDVI 与总降水量以正相关为主,分布在昆仑山北部及和田地区各个绿洲;负相关分布在和田地区西南部山区及绿洲内部城镇化水平较高的区域。

4.2 讨论

和田地区的植被覆盖在全球变化的背景下也发生了显著的变化,近 17 年和田地区植被覆盖呈显著增加趋势,且植被覆盖增加的区域主要集中在昆仑山北部及绿洲。植被覆盖变化是气候、地形、人为等多种因素共同作用的结果,在本文研究时段内,研究区温度与降水均小幅增加,但在不同时空尺度 NDVI 与气候因子的相关性也有所不同。昆仑山平均海拔 5500—6000 m,较少受到人类活动的干扰,植被覆盖变化应与自然因素有关。昆仑山北部 NDVI 与温度为负相关,与降水为正相关,说明该区域植被生长受降水主导,降水越多,植被生长越有利,而温度升高则可能导致蒸散发作用加强,干旱趋势加剧^[28]。和田地区西南部山区海拔相对较高,植被基本没有发生变化,该区域植被生长对温度变化更为敏感。和墨洛绿洲和策勒-于田绿洲人口相对稠

密,城镇化水平相对较高,植被覆盖变化受人为因素影响较大。因此今后对和田地区植被覆盖变化的研究不仅要考虑不同时段气候因子的响应,还要考虑人为因素(人口密度、社会经济、城市扩张等)对植被覆盖变化的影响,揭示和田地区植被覆盖对气候因素与人为因素的响应机制,从而更有效地保护和和田地区的生态环境。

参考文献(References):

- [1] Hupy J P. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58(2): 167-179.
- [2] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. *生态学报*, 2013, 33(2): 519-531.
- [3] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, Bao G. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998-2007 in Inner Mongolia, China. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(7): 1696-1706.
- [4] Gonsamo A, Chen J M, Lombardozzi D. Global vegetation productivity response to climatic oscillations during the satellite era. *Global Change Biology*, 2016, 22(10): 3414-3426.
- [5] Piao S L, Cui M D, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Liu J, Tang Y H. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1599-1608.
- [6] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592.
- [7] 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.
- [8] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [9] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, (03): 204-210.
- [10] 陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系. *地理科学*, 2017, 37(2): 292-300.
- [11] 李净, 刘红兵, 李龙, 李彩云. 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.
- [12] 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(1/2): 213-222.
- [13] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982-2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543.
- [14] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 方广玲, 阴俊齐, 香宝, 袁新杰, 房世峰. 1982—2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3567-3578.
- [15] 郭继凯, 吴秀芹, 董贵华, 李延森, 吴瑞. 基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析. *干旱区研究*, 2017, 34(3): 621-629.
- [16] 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.
- [17] 董弟文, 阿布都热合曼·哈力克, 王大伟, 田世英. 1994—2016 年和田绿洲植被覆盖时空变化分析. *生态学报*, 2019, 39(10): 3710-3719.
- [18] 刘明月. 克里雅河下游水系特征及对植被的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.
- [19] 袁玉芸. 克里雅绿洲植被覆盖的空间特征与其环境因子分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [20] 刘海涛, 张向军, 李盈奎, 郭华, 买买提. 和田地区沙尘暴天气的时空分布特征. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(5): 85-89.
- [21] 沈斌, 房世波, 余卫国. NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异. *遥感学报*, 2016, 20(3): 481-490.
- [22] 陈爱京, 肖继东, 曹孟磊. 基于 MODIS 数据的伊犁河谷植被指数变化及其对气候的响应. *草业科学*, 2016, 33(8): 1502-1508.
- [23] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展. *遥感学报*, 2006, 10(3): 421-431.
- [24] Stow D, Daeschner S, Hope A, Douglas D, Petersen A, Myneni R, Zhou L, Oechel W. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1111-1117.
- [25] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 89-93.
- [26] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 章超斌, 穆少杰, 孙政国. 1982-2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 15-30.
- [27] 王强, 张勃, 张志强, 张喜风, 戴声佩. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化与影响因子分析研究(英文). *资源与生态学报*, 2014, 5(1): 53-59.
- [28] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.