

# 2000—2018年塔里木盆地北缘绿洲植被 覆被变化及对环境要素的响应

衡嘉尧<sup>1,2</sup>, 王宏卫<sup>1,2</sup>, 樊影<sup>1,2</sup>, 王正伟<sup>1,2</sup>, 高一薄<sup>1,2</sup>, 伊素燕<sup>1,2</sup>

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** [目的] 研究塔里木盆地北缘绿洲区植被覆被变化与环境要素的相互关系, 旨在为该区生态治理与恢复提供科学参考。[方法] 以2000—2018年MODIS/NDVI数据为基础, 结合时序内气象因素与人类活动数据, 运用趋势线分析法、相关分析法、ArcGIS空间叠加与通径分析方法, 总结塔里木盆地北缘绿洲时空变化特征, 并探讨环境要素对绿洲区植被NDVI变化的影响。[结果] ①2000—2018年塔里木盆地北缘绿洲不同植被类型总体处于波动上升态势, 增长速率为0.033/10 a; 植被覆盖类型的增长速率由高到低依次为栽培植物、灌丛、阔叶林、草甸、荒漠、草原、湿地、针叶林和高山植被; ②在气象因素中, 气温与绿洲区植被主要呈负相关, 负相关区域面积占绿洲区72.15%。③在人为环境要素中, 林业总产值和牧业总产值是影响植被NDVI的主控因子。[结论] 在所选环境要素中, 气温对NDVI的综合作用最强, 林业总产值次之, 牧业总产值对NDVI作用较弱。剩余通径系数为0.26, 说明还有部分因素对NDVI增加有较明显的影响, 今后需要进一步研究。

**关键词:** 塔里木盆地; 绿洲; NDVI; 气象要素; 人为环境要素; 通径分析

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)04-0017-08

**中图分类号:** Q948, TP79

**文献参数:** 衡嘉尧, 王宏卫, 樊影, 等. 2000—2018年塔里木盆地北缘绿洲植被覆被变化及对环境要素的响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 17-24. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.003; Heng Jiayao, Wang Hongwei, Fan Ying, et al. Vegetation cover change and its response to environmental factors in northern margin oasis of Tarim Basin from 2000 to 2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 17-24.

## Vegetation Cover Change and Its Response to Environmental Factors in Northern Margin Oasis of Tarim Basin from 2000 to 2018

Heng Jiayao<sup>1,2</sup>, Wang Hongwei<sup>1,2</sup>, Fan Ying<sup>1,2</sup>, Wang Zhengwei<sup>1,2</sup>, Gao Yibao<sup>1,2</sup>, Yi Suyan<sup>1,2</sup>

(1.College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang

830046, China; 2.MOE Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

**Abstract:** [Objective] The relationship between vegetation cover change and environmental factors in the oasis in northern margin of Tarim Basin was studied in order to provide scientific reference for ecological management and restoration of the study area. [Methods] Based on MODIS/NDVI data from 2000 to 2018, combined with meteorological factors and human activities data in the same time series, the temporal and spatial variation of oasis in the northern fringe Tarim Basin were analyzed by using trend line analysis, correlation analysis, ArcGIS spatial overlay and through path analysis methods, to explore the influence of environmental factors on the NDVI changes of vegetation in the oasis area. [Results] ① From 2000 to 2018, each cover types of oasis in the Northern Tarim Basin was in a fluctuating upward trend, with a propagation

收稿日期: 2020-12-29

修回日期: 2021-04-20

资助项目: 国家自然科学基金地区项目“乡村振兴战略背景下的新疆绿洲乡村聚落布局优化研究”(41861037)

第一作者: 衡嘉尧(1995—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区昌吉市人, 硕士研究生, 研究方向为绿洲区生态安全格局与城乡聚落优化。Email: 17590019924@163.com。

通讯作者: 王宏卫(1967—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 博士, 教授, 主要从事乡村振兴战略背景下的绿洲生态安全格局与乡村聚落发展方面的研究。Email: wanghw\_777@163.com。

rate of 0.033/10 a. The propagation rate of vegetation cover types from high to low were cultivated plants, shrubs, broad-leaved forest, meadow, desert, grassland, wetland, coniferous forest and alpine vegetation.

② Temperature change had a negative effect on NDVI of oasis vegetation in the northern margin of Tarim Basin, and the negative correlation area accounted for 72.15% of the oasis area. ③ Among the factors of human environment, the total output value of forestry and animal husbandry were the main controlling factors of NDVI. [Conclusion] Temperature had the strongest effect on NDVI, followed by gross output value of forestry and animal husbandry, and the effect of total output value of animal husbandry on NDVI is weak. In addition, the residual path coefficient is 0.26, which indicates that there are some other factors that have not been taken into account and need further study.

**Keywords:** Tarim Basin; oasis; NDVI; meteorological factors; human activity factors; path analysis

植被覆被的变化对于干旱区绿洲较脆弱的生态系统具有一定的影响<sup>[1]</sup>。在迅速的全球环境变化下,植被覆盖变化容易受到气候和人类活动的共同影响,地表植被对气象因素和人类活动干扰响应已成为全世界研究的热点问题<sup>[2]</sup>。塔里木盆地北缘绿洲地处我国西北干旱区,属于生态敏感性较强的区域,同时也是该区人类生产生活的聚集区域,绿洲区内城乡聚落慢慢形成。因此,分析绿洲区内植被覆被时空变化特征并探讨气象要素和人类活动要素对其变化的影响对于干旱区绿洲植被的治理与恢复提供重要的理论依据。归一化植被指数(NDVI)在植被生物量监测<sup>[3]</sup>、植被群落组成与分类、自然灾害灾情评估、土地利用和覆被变化等研究领域被广泛应用<sup>[4-5]</sup>。此外,作为遥感监测数据,NDVI覆盖范围广<sup>[6]</sup>,其数据具有时序特征<sup>[7]</sup>,为地理学者提供了一种定量分析地表植被变化的方法。塔里木盆地北缘绿洲区是典型的大陆性暖温带干旱气候,北边有天山作为屏障,其植被分布特点为:南部平原植被覆被度低,山地垂直带明显,森林面积有限,总体植被覆盖度较低,生态系统脆弱<sup>[8]</sup>。根据徐长春等<sup>[9-10]</sup>对新疆 NDVI 的研究表明,区域整体 NDVI 主要呈增长趋势,并且与温度、日照长度与降水等因素有关;刘超等<sup>[11]</sup>利用 1999—2014 年的 NDVI 数据分析天山北坡前山带降水分布型对荒漠植被的影响;张文强等<sup>[12]</sup>利用 RF 模型对北疆干旱区绿洲植被变化与驱动进行模拟分析;但对于塔里木盆地北缘绿洲植被变化特征及其响应因素研究较少,值得注意的是,上述研究都是在单一尺度探讨 NDVI 的变化特征,且注重气候要素对覆被变化的影响,缺乏对人类活动对覆被变化影响定量分析。鉴于此,本文利用 2000—2018 年基于 MODIS 的 NDVI 产品数据,探究塔里木盆地北缘绿洲 NDVI 及不同覆被类型 NDVI 的时空变化规律,分析不同覆被类型与环境要素的响应关系,并探讨人类活动要素对绿洲区植被覆被变化的直接和间接影响,旨在为

塔里木盆地北缘绿洲区生态功能维护和各项生态保护措施的开展提供基础数据及理论依据。

## 1 研究区概况

塔里木盆地北缘绿洲位于新疆天山南麓、塔里木盆地以及世界第二大沙漠塔克拉玛干沙漠的北部,东部与巴音郭楞蒙古自治州相邻地。理坐标 78°08′—89°58′E,39°31′—43°36′N。东西走向塔里木河贯穿绿洲区,南北走向有阿克苏河、渭干河、迪娜河与开都河。研究区由阿克苏绿洲和巴州北部绿洲组成,是温带大陆性干旱气候且地处塔克拉玛干沙漠北缘<sup>[13]</sup>,其南部植被覆盖度较低。该绿洲区地形地貌多样,气候干燥,降水稀少,夏季炎热,冬季干冷<sup>[14]</sup>,年温差和日温差较大,年日照时数为 2 658~4 440 h,昼夜温差大,无霜期较长。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源及处理

NDVI 数据来自地理空间数据云的植被指数产品 MOD13A1,时间分辨率 16 d,空间分辨率 500 m × 500 m,时间序列为 2000 年 1 月至 2018 年 12 月。利用最大值合成法 MVC(maximum value composites)对全年数据进行处理,从而获得的 NDVI 年最大值,代表当年植被覆盖最优状态。该方法可有效降低云层、气溶胶等因素的干扰,尤其是排除了绿洲区冬春季积雪对植被观察的影响<sup>[15]</sup>,进一步提高 NDVI 数据的可靠性。根据中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.com>)中 2015 年中国 100 万植被类型空间矢量数据<sup>[16]</sup>,根据国家植被分类系统中植被型组划分出针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草甸、湿地、高山植被与荒漠,并结合塔里木盆地北缘绿洲区人工植被划分出栽培植物。由于研究区属于地处沙漠边缘,因此绿洲区包括部分沙漠区域。鉴于本文

的关注重点为多年植被覆盖区,因此水体和沙漠地不再作为研究对象进行探讨。气温与降水数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.com>) 的气象空间插值数据集,作投影转换和数据掩膜处理,提取出与 NDVI 投影坐标和分辨率一致的栅格数据。在分析研究区内气象数据时,采用 ArcGIS 做栅格均值化处理,获得气象数据的区域平均值。人类活动数据来源于《新疆统计年鉴》<sup>[17]</sup> 和《新疆生产建设兵团统计年鉴》<sup>[18]</sup>,综合塔里木盆地北缘绿洲自然条件与产业结构,选取人口、牲畜数量、林业总产值、工业总产值、牧业总产值和固定资产投资 6 个指标作为分析对象。

## 2.2 研究方法

2.2.1 NDVI 变化趋势分析 通过对栅格采用一元回归趋势分析可直观地看到研究时序内植被 NDVI 覆盖动态变化的空间特征<sup>[19]</sup>,计算公式为:

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: $n$  为研究时间序列年数,即 19 a(2000—2018 年); $i$  代表年序号;NDVI<sub>*i*</sub> 代表第  $i$  年最大化 NDVI 值; $\theta$  为趋势线斜率,代表单个像元 NDVI 的变化趋势,当  $\theta > 0$  时,表明该目标像元 19 a 间植被覆盖趋于改善;反之,则说明此像元植被生长呈退化趋势。

2.2.2 相关分析 通过探求环境要素与植被 NDVI 间的相互关系,分析影响塔北绿洲区植被 NDVI 的影响程度。本研究采用相关分析法分析 NDVI 对气象要素的响应程度。表达式为:

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

式中: $n$  为时序长度; $i$  为(1,19)的整数; $x_i$  为第  $i$  年均温或降水量; $\bar{x}$  表示 19 a 年均温或降水量平均值; $y_i$  为第  $i$  年 NDVI 值; $\bar{y}$  表示塔里木盆地北缘绿洲植被 NDVI 在 19 a 间的平均值。

2.2.3 偏相关分析 考虑到植被覆盖变化受多种要素的共同影响,各要素间可能并不相互独立,运用偏相关分析对要素之间的相关关系进行测度,可单独分析单个要素对植被 NDVI 的影响。根据年均温、年降水量与 NDVI 的相关系数,计算气象要素与 NDVI 的偏相关系数<sup>[20]</sup>:

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r_{ac}^2)(1-r_{bc}^2)}} \quad (3)$$

式中: $r_{ab,c}$  为剔除要素  $c$  后  $a$  与  $b$  的偏相关系数; $r_{ab}$ ,  $r_{ac}$ ,  $r_{bc}$  分别代表要素  $a$  与要素  $b$ 、要素  $a$  与要素  $c$ 、要素  $b$  与要素  $c$  的相关系数。

2.2.4 通径分析 将环境要素与 NDVI 相关系数分解为要素对植被 NDVI 的直接效应与间接效应<sup>[21-22]</sup>。参考杜家菊等<sup>[23]</sup>的研究方法,通过影响因子与植被 NDVI 的通径分析,研究各主控因子对 NDVI 的直接作用(通径系数)和间接作用(间接通径系数),间接通径系数公式如下:

$$\sum r_{ij} P_i = r_{x_i x_j} \cdot P_{x_j} \quad (4)$$

式中: $\sum r_{ij} P_j$  为间接通径系数; $r_{x_i x_j}$  为形态性状  $x_i$  和  $x_j$  之间的相关系数; $P_{x_j}$  为影响因子  $x_j$  对 NDVI 的通径系数。

决定系数是将环境要素对 NDVI 的综合作用进行排序<sup>[24]</sup>,利用相关系数和通径系数,根据下列公式计算影响因子对绿洲区植被 NDVI 的决定系数,表达式为:

$$d_{x_i} = P_{x_i}^2 \quad (5)$$

式中: $d_{x_i}$  代表环境要素  $x_i$  的决定系数,当  $P_{x_i} > 0$  时,代表环境要素对植被 NDVI 作用为协同,反之,作用为限制。

## 3 结果与分析

### 3.1 NDVI 年际变化规律

采用最大值合成法(MVC)获得每一年植被 NDVI 后作加权平均处理,得到该年度绿洲区的平均 NDVI 值,分析其年际变化特征。从图 1 可以看到,2000—2018 年塔里木盆地北缘绿洲不同植被类型 NDVI 总体处于波动上升态势,植被覆盖有所增加。研究各时段不同植被 NDVI 时序变化中,2000—2003 年均处于逐步上升趋势,自 2003 年开始有大幅度下降,之后处于波动下降趋势,至 2009 年不同植被类型 NDVI 开始呈大幅度上升趋势,湿地、针叶林、草甸、阔叶林在 2011 年达到最大值,草原、高山植被和荒漠在 2010 年达到峰值。草原、湿地、针叶林与灌丛 NDVI 波动幅度较大,荒漠和栽培植物 NDVI 增加显著。从表 1 可知,塔里木盆地北缘绿洲 NDVI 增长速率为 0.033/10 a,植被覆盖类型的增长速率由高到低依次为栽培植物、灌丛、阔叶林、草甸、荒漠、草原、湿地、针叶林和 高山植被,变化速率依次为 0.073/10 a, 0.064/10 a, 0.052/10 a, 0.043/10 a, 0.041/10 a, 0.03/10 a, 0.024/10 a, 0.023/10 a 和 0.018/10 a。



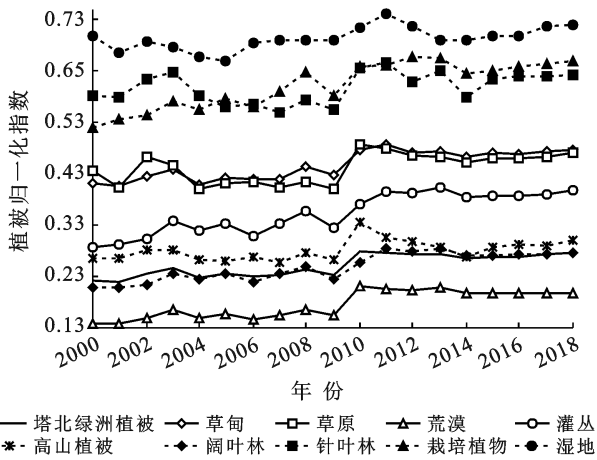


图 1 塔里木盆地北缘绿洲 2000—2018 年不同覆被类型年均 NDVI 变化

### 3.2 NDVI 空间变化规律

一元回归趋势线法直观地反映了塔里木盆地北缘绿洲植被 NDVI 在空间上的变化特征(表 1)。从图 2 可以看到塔北绿洲区 NDVI 变化斜率和变化显著性,研究区植被 NDVI 整体呈增加趋势,北部海拔较高区域和中部聚落区域 NDVI 存在退化现象。其中,柯坪县、乌什县、阿克苏市、阿瓦提县中部、拜城县南部、

新和县、库车县中部与北部地区、轮台县北部与南部地区、焉耆回族自治县东部、和静县东南部、和硕县南部与中部部分地区、尉犁县南部和东部部分地区植被覆盖度明显改善;温宿县西南部、库车县南部、轮台县中部、和静县、博湖县和尉犁县北部部分地区植被覆盖有明显退化现象。统计得出塔里木盆地北缘绿洲 NDVI 增加区域面积 239 732.09 km<sup>2</sup>,占区域总面积的 89.75%,增加幅度达到显著水平( $p < 0.05$ )以上的面积为 60 619.05 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 22.69%(表 2)。

表 1 塔里木盆地北缘绿洲不同植被类型 NDVI 年际线性变化

植被类型	线性变化	R
草甸	$y=0.004\ 3x+0.403\ 7$	0.735 2
草原	$y=0.003\ 0x+0.411\ 8$	0.325 8
荒漠	$y=0.004\ 1x+0.134\ 3$	0.738 7
灌丛	$y=0.006\ 4x+0.289\ 2$	0.824 6
高山植被	$y=0.001\ 8x+0.263\ 4$	0.248 3
阔叶林	$y=0.005\ 2x+0.199\ 5$	0.806 9
针叶林	$y=0.002\ 3x+0.575\ 3$	0.181 7
栽培植物	$y=0.007\ 3x+0.529\ 8$	0.812 0
湿地	$y=0.002\ 4x+0.669\ 9$	0.351 8
塔里木盆地北缘绿洲	$y=0.003\ 3x+0.218\ 9$	0.733 9

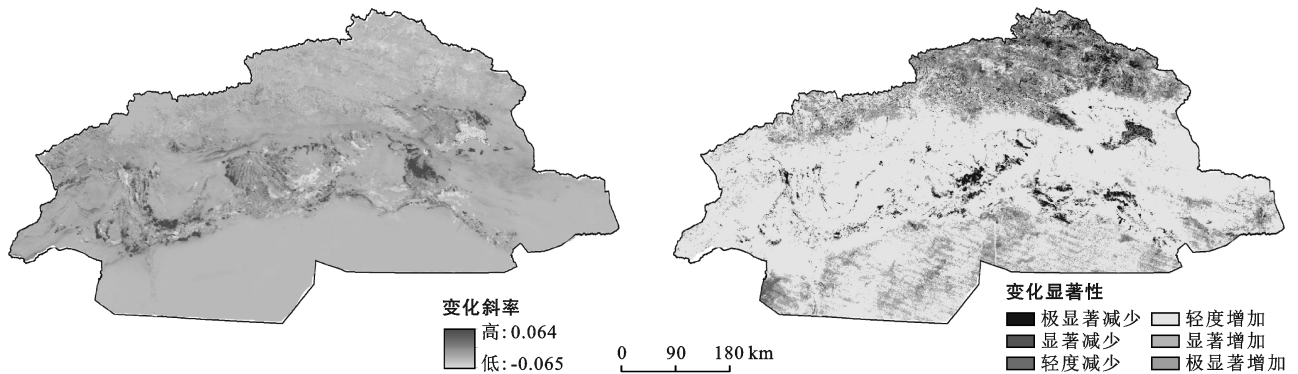


图 2 塔里木盆地北缘绿洲 2000—2018 年 NDVI 变化趋势及其显著性空间分布

其中前 3 种植被类型高于塔北绿洲区平均水平;按植被 NDVI 增加幅度的显著水平以上( $p < 0.05$ )的面积占比排序,依次为针叶林(50.35%)、高山植被(46.55%)、湿地(41.68%)、草原(34.48%)、草甸(24.73%)、灌丛(14.69%)、阔叶林(14.58%)、荒漠(10.92%)和栽培植物(10.87%)。从 NDVI 增加面积来看,荒漠、栽培植物与草甸对塔北绿洲区植被改善贡献最大。

### 3.3 NDVI 对气象要素的响应

3.3.1 气象要素的年际变化 图 3 为塔里木盆地北缘绿洲区 19 a 间降水和气温的变化趋势图。19 a 间年均降水量表现出波动微降趋势,下降速率为 27.22 mm/10 a,未通过 0.05 的显著性水平检验,其中在

2007 年降水异常偏高达到峰值,在 2015 年达到谷值,其余年份降水量均达呈波动变化状态;气温方面,绿洲区 19 a 间的气温呈波动下降状态,下降速率为 0.772 °C/10 a,通过显著性检验,其中气温的峰值在 2008 年达到 8.96 °C,谷值在 2015 年仅为 6.22 °C,在 2002,2004,2009,2013 和 2016 年气温均处于较高状态,在 2003,2012 和 2018 年处于较低水平。

3.3.2 植被 NDVI 对自然要素的响应特征 分析像元尺度的上的 19 a 间 NDVI 与降水的相关系数。结果表明,塔里木北缘绿洲区植被 NDVI 和降水不相关区域占 75.82%,说明降水与绿洲区 NDVI 相关关系并不显著,这与徐应涛<sup>[25]</sup>、王涛<sup>[26]</sup>、丁玥等<sup>[27]</sup>人研究结论一致。值得注意的是,与气温呈正相关植被

NDVI 主要分布在塔里木河流域<sup>[28]</sup>。塔北绿洲区 NDVI 与降水呈显著负相关的区域占极少, 仅占绿洲区 0.42%。总体来看, 塔里木盆地北缘绿洲 NDVI 与降水量特征相关性并不显著。由图 4 可以看出, 2000—2018 年 NDVI 与气温的相关关系。结果表明, 塔里木盆地北缘绿洲 NDVI 与气温负相关为主导 (72.15%), 其中显著负相关占研究区面积的 9.27%,

主要分布在塔里木河流域和开都河流域, 这与张晋霞等<sup>[9]</sup>人研究结论一致; 呈正相关的区域占研究区的 1.85%, 主要分布在塔北绿洲北部高山植被与草甸区域, 其中呈显著正相关仅占区域总面积的 0.14%。总体来看, 气温变化对塔里木盆地北缘绿洲植被 NDVI 具有负面效应, 尤其是气温降低促进流域附近植被覆盖度增加。

表 2 塔里木盆地北缘绿洲各覆被类型 NDVI 变化显著性

覆被类型	显著水平											
	极显著下降		显著下降		轻度下降		轻度增加		显著增加		极显著增加	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
草甸	2 109.51	4.81	1 210.23	2.76	6 276.53	14.32	2.34×10 <sup>4</sup>	53.38	8 362.21	19.08	2 475.73	5.65
草原	1 328.15	5.32	1 018.24	4.08	4 762.71	19.08	9 243.54	37.03	6 370.91	25.52	2 236.05	8.96
高山植被	425.18	3.06	380.42	2.73	2 203.46	15.84	4 426.31	31.82	4 772.42	34.30	1 704.06	12.25
灌丛	227.55	5.66	55.37	1.38	202.55	5.04	2 943.53	73.23	404.02	10.05	186.47	4.64
荒漠	1 128.66	1.13	392.19	0.39	2 205.35	2.21	8.53×10 <sup>4</sup>	85.35	6 181.10	6.19	4 731.02	4.74
阔叶林	113.76	2.42	44.91	0.95	228.28	4.85	3 635.95	77.20	437.47	9.29	249.23	5.29
湿地	27.85	2.16	24.07	1.87	214.56	16.66	484.47	37.62	389.91	30.28	146.82	11.40
栽培植物	282.47	2.21	80.71	0.63	393.44	3.07	1.06×10 <sup>4</sup>	83.22	870.95	6.81	520.10	4.06
针叶林	86.98	4.84	71.03	3.95	382.69	21.30	351.17	19.55	676.60	37.66	227.95	12.69
塔里木盆地北缘绿洲	5 921.95	2.22	3 285.63	1.23	1.82×10 <sup>4</sup>	6.80	1.79×10 <sup>5</sup>	67.06	38 652.51	14.47	2.20×10 <sup>4</sup>	8.22

注:①极显著下降 ( $p < 0.01, \theta < 0$ ), 显著下降 ( $0.01 < p < 0.05, \theta < 0$ ), 轻度下降 ( $p < 0.05, \theta < 0$ ), 轻度增加 ( $p > 0.05, \theta > 0$ ), 显著增加 ( $0.01 < p < 0.05, \theta > 0$ ), 极显著增加 ( $p < 0.01, \theta > 0$ ); ②代表单个像元 NDVI 的变化趋势, 当  $\theta > 0$  时, 表明该目标像元 19 a 间植被覆盖趋于改善; 反之, 则说明此像元植被生长呈退化趋势。

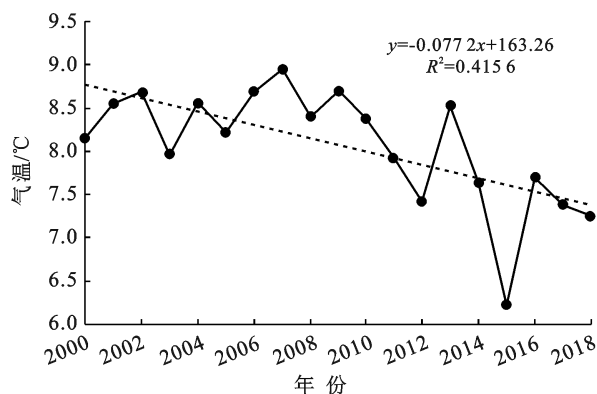
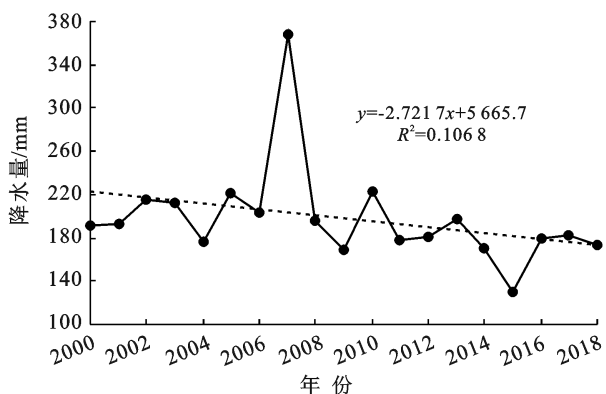


图 3 塔里木盆地北缘绿洲 2000—2018 年年均降水量和年均气温变化趋势

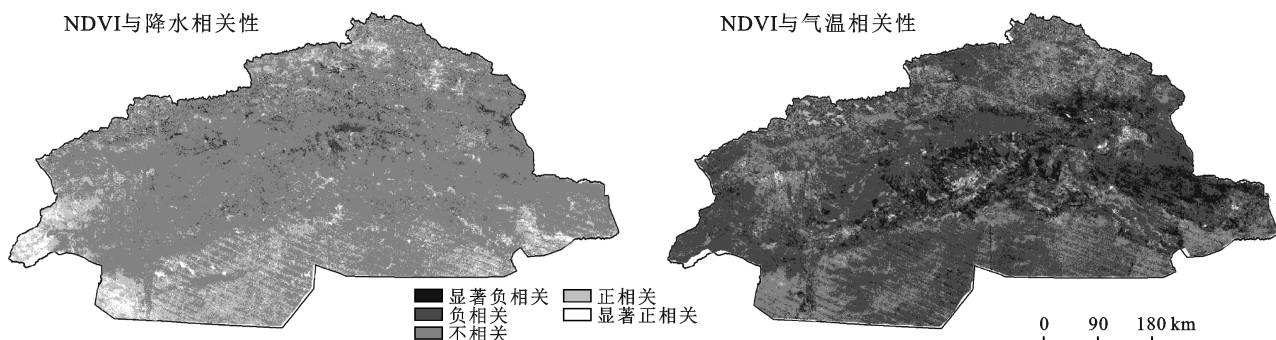


图 4 塔里木盆地北缘绿洲 2000—2018 年 NDVI 与年均降水量、年均气温的相关性空间分布

为分析不同植被类型对气象要素的响应情况,对绿洲区 2000—2018 年各个植被类型进行相关分析和偏相关分析。统计可得(表 3),塔里木盆地北缘绿洲 NDVI 与气温的相关系数为  $-0.605 2$ ,呈显著负相关( $p < 0.05$ ),除了湿地、高山植被和针叶林外,其余覆被类型均相关系数均通过 0.05 水平显著性检验。相比气温,降水对不同覆被类型的 NDVI 均未达到显著性水平,不同覆被类型的 NDVI 与降水量间的相关系数与绿洲区整体情况基本一致,说明降水对塔北绿洲各植被变化相关性较弱。从偏相关分析看到,排除年均温的影响,年均降水量对不同覆被类型 NDVI(除荒漠和湿地)由抑制转为协同作用,但并不显著,说明温度的变化影响了植被生长对降水的响应方向,其可能的原因是气温的降低使得蒸腾作用减少,即使降雨量下降植物亦能保持水分。

表 3 塔里木北缘盆地绿洲 NDVI 与自然要素的相关系数

覆被类型	NDVI-P		NDVI-T	
	$R_{NDVI-P}$	$R_{NDVI-P/T}$	$R_{NDVI-T}$	$R_{NDVI-T/P}$
塔里木盆地北缘绿洲	-0.300 2	0.044 7	-0.605 2*	-0.343 7
草甸	-0.351 5	0.020 2	-0.425 0*	-0.355 5
草原	-0.293 1	0.012 4	-0.530 5*	-0.287 0
高山植被	-0.203 6	0.037 1	-0.352 2	-0.332 3
灌丛	0.225 9	0.090 2	-0.645 3**	-0.377 3
荒漠	-0.223 5	-0.051 8	-0.632 5**	-0.363 9
阔叶林	0.272 8	0.083 9	-0.543 6*	-0.302 9
湿地	-0.353 5	-0.071 7	-0.405 9	-0.206 0
栽培植物	-0.291 0	0.082 5	-0.531 1*	-0.321 2
针叶林	-0.166 3	0.060 8	-0.414 7	-0.249 2

注:“ $R_{NDVI-P}$ 、 $R_{NDVI-P/T}$ ”分别表示 NDVI 同降水的相关系数和 NDVI 在排除气温影响与降水的相关系数;\*,\*\* 分别表示在 0.1 和 0.05 水平上显著相关。

### 3.4 人为环境要素对 NDVI 的驱动作用

植被生长变化是不仅是气象要素的影响,它是环

境要素的综合作用<sup>[29]</sup>。这些环境要素还包括生产生活方式、经济结构等人为环境要素。本研究选取人口、牲畜数量、林业总产值、牧业总产值、工业总产值、固定资产投资 6 个社会经济指标作为人为环境要素。其中,林业总产值代表林业生产使用情况,侧面反映当年林业发展状况,牧业总产值代表了畜牧业的生产情况,牲畜数量代表了绿洲区放牧强度,工业总产值代表了工业化和现代化的发展水平,人口数量和固定资产投资反映了社会发展水平。

将 NDVI 作为因变量,降水量( $X_1$ )、气温( $X_2$ )、人口( $X_3$ )、牲畜数量( $X_4$ )、林业总产值( $X_5$ )、牧业总产值( $X_6$ )、固定资产投资( $X_7$ )、工业总产值( $X_8$ )这 8 个要素作为自变量,建立最优化多元回归方程:

$$Y = -0.008X_2 + 4.167 \times 10^{-4}X_5 - 3.114 \times 10^{-5}X_6 + 0.313 \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.939, p < 0.05)$$

说明气温、林业总产值与牧业总产值对研究区 NDVI 存在显著效应( $p < 0.05$ ),其余因素对 NDVI 影响不显著,在逐步回归分析中剔除。基于回归方程,对气温、林业总产值、牧业总产值进行通径分析,从表 4 可以看到,气温对植被 NDVI 的直接通径系数为  $-0.394$ ,间接通径系数为  $0.123$ ,说明气温对塔里木北缘绿洲 NDVI 存在负面作用,通过其他要素从抑制转为协同。林业总产值直接通径系数为  $0.612$ ,说明林业总产值对绿洲区 NDVI 具有很好的正效应。牧业总产值直接通径系数为  $-0.527$ ,间接通径系数为  $-0.148$ ,说明牧业产值的增加对植被 NDVI 变化具有抑制作用,但通过其他要素对植被抑制降低。此外,气温、林业总产值和牧业总产值的决定系数分别为  $0.353$ 、 $0.227$  和  $0.160$ ,说明气温对 NDVI 的综合作用最强,林业总产值次之,牧业总产值对 NDVI 作用较弱,其中林业总产值为主要协同要素,气温为主要限制要素。

表 4 塔里木盆地北缘绿洲植被 NDVI 与环境要素的通径分析

环境要素	相关系数	直接通径系数	间接通径系数			决定系数
			气温	林业总产值	牧业总产值	
气温	-0.605	-0.394		-0.255	0.378	0.353
林业总产值	0.492	0.612	0.164		-0.396	0.227
牧业总产值	-0.415	-0.527	0.282	-0.460		0.160

## 4 讨论

塔里木盆地北缘绿洲属于大陆性暖温带干旱气候<sup>[13]</sup>,北有天山作为屏障,南受塔克拉玛干沙漠影

响,干旱少雨,自然环境较为恶劣,生态环境十分脆弱,因此对其植被覆被的变化特征和影响因素具有探究价值。结果表明,塔里木北缘绿洲区不同植被类型 NDVI 增加面积均大于 60%,总体趋于上升状态,地



表生态逐渐改善。总体来看,本文植被 NDVI 变化趋势的结果与欧亚大陆得出的植被覆盖变化结论基本一致<sup>[30]</sup>。气温和降水是影响植被覆盖的主要自然要素<sup>[31]</sup>。塔里木盆地北缘绿洲区气温对植被 NDVI 的影响远大于降水。其原因可能有两个因素导致,绿洲区属于大陆性暖温带干旱气候,降水量稀少,因此降水量的变化特征对塔北绿洲区植被的影响很小。此外,气温的降低会导致蒸腾作用的减少,在一定程度上削弱了降水对植被的直接作用<sup>[32]</sup>;绿洲区南部处于塔克拉玛干沙漠北部,多为荒漠植被,荒漠植被旱化特征明显,大多依靠地下水或者降水转化的土壤水供给植被,因此对年际降水量的响应较低。进一步研究发现,不同覆被类型对降水的响应普遍不显著,该现象在灌丛、阔叶林和高山植被较为明显,分别探究其成因,首先,灌丛和阔叶林对降水的响应低主要因其发达根茎深入土壤,植被的生长取决于深层土壤含水量,与年均降水量关系较小<sup>[33]</sup>;其次,高山植被位于高山带,具有耐寒性<sup>[34]</sup>,其对于降水的依赖性远低于气温的变化。除此之外,排除气温的影响后,降水对不同植被 NDVI 的影响由不显著抑制转为不显著促进作用,说明在塔北绿洲区气温会影响降水对植被的作用方向。

通过通径分析发现,林业总产值、牧业总产值对植被增长同样产生较大影响。其中牧业总产值对绿洲区 NDVI 存在负面的限制作用,林业总产值对植被 NDVI 呈促进作用。牧业总产值侧面反映了放牧强度,产值的增加反映牛羊数量增加,进而放牧强度增加使得牲畜对植被的踩踏与过度食用,并由此引发一系列土壤理化性质的变化。在过度放牧下,植被群落有直接的损失,其引起土壤状态变化也不利于植物个体生长,使植被群落数量普遍减小<sup>[35]</sup>。林业总产值的持续增长侧面反映了林业活动发展的速度,自 2007 年以来,巴州地区和阿克苏地区林业建设重点应以防治治沙、森林资源保护和林果产业发展为重点,加强造林育林工程,壮大以特色林果业等林业产业体系建设,加强以林木种苗、森林资源保护管理等林业保障体系建设<sup>[36]</sup>,森林资源和林果业的发展对绿洲区植被生长具有一定促进作用。进一步计算剩余因子的通径系数  $e = \sqrt{1-R^2} = 0.26$ ,说明还有部分因素对 NDVI 增加有较明显的影响未考虑到。综合分析本研究选取的自然要素,除温度、降水外,气溶胶和成土母质可能是引起植被变化的重要因素<sup>[37]</sup>;人类活动要素中,本文主要探讨了 5 项人类活动因素对绿洲区 NDVI 变化的影响。自 2000 年来,新疆的天然保护工程、塔里木河干流林草生态保护与建设工程

以及 2007 年南疆三地州森林资源保护建设等工程的开展,使得工程区内的生态环境得到了明显改善,因此塔北绿洲区植被的逐渐增长可能得益于这些生态建设工程,对这些人为措施的定量分析应是今后塔北绿洲区 NDVI 驱动因素研究一个新着力点。

## 5 结论

(1) 2000—2018 年,塔里木盆地北缘绿洲植被 NDVI 增加区域面积为  $2.39 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占区域总面积的 89.76%,绿洲区 NDVI 整体呈波动上升趋势,增速为  $0.033/10 \text{ a}$ 。在空间尺度上表现为研究区中部至南部整体呈增加趋势,植被覆盖度有所好转,北部和中部的部分地区存在退化区域。

(2) 研究时段内,绿洲区 19 a 间的气温呈波动下降状态,下降速率为  $0.772 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,通过了 0.05 显著性检验;降水方面,19 a 间表现出波动微降趋势,下降速率为  $272.17 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ,基本处于平衡趋势状态。气象要素中,绿洲区植被 NDVI 与气温呈显著负相关,相关系数为  $-0.605 2$ ,负相关区域站绿洲区总面积 72.15%。绿洲区 NDVI 与降水量相关性并不显著,对植被的生长影响较低。

(3) 在人为环境要素中,林业总产值和牧业总产值是影响植被 NDVI 的主控因子,其中林业总产值对绿洲区 NDVI 具有很好的正效应,牧业总产值增加对植被 NDVI 变化具有抑制作用。

综合分析,气温、林业总产值和牧业总产值是绿洲区 NDVI 变化的主控因子,其中气温对植被变化综合作用最强,林业总产值作用次之,牧业总产值作用最弱。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 武磊,李常斌,王刘明,等.基于 ESA-LUC 和 MODIS-NDVI 的西北干旱荒漠—绿洲体系分类阈值及应用[J].中国沙漠,2020,40(6):139-150.
- [2] Zhao Sen, Pereira P, Wu Xiuqin, et al. Global karst vegetation regime and its response to climate change and human activities [J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106208.
- [3] Yang Wei, Kobayashi H, Wang Cong, et al. A semi-analytical snow-free vegetation index for improving estimation of plant phenology in tundra and grassland ecosystems [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 228:31-44.
- [4] 殷崎栋,柳彩霞,田野.基于 MODIS NDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J].生态学报,2021,41(4):1571-1582.
- [5] Vidhya L S, Ramalakshmi M, Rakshith R K, et al. An

- integration of geospatial technology and standard precipitation index for drought vulnerability assessment for a part of Namakkal District, South India [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33(1):1206-1211.
- [6] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究[J]. *生态学报*, 2012, 32(11):3404-3413.
- [7] 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[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2):319-327.
- [8] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(19):6198-6208.
- [9] 张晋霞, 徐长春, 杨秋萍. 2001—2017 年新疆 NDVI 变化及其对极端气候的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5):250-256, 275, 341.
- [10] 杨秋萍, 徐长春, 张晋霞, 等. 2001—2017 年开都—孔雀河流域植被物候特征及其对气候变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3):729-738.
- [11] 刘超, 闫小月, 姜逢清. 天山北坡前山带降水分布型对荒漠植被的影响: 基于逐日降水数据和 NDVI 分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(21):7790-7804.
- [12] 张文强, 罗格平, 郑宏伟, 等. 基于随机森林模型的内陆干旱区植被指数变化与驱动力分析: 以北天山北坡中段为例[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(11):1113-1126.
- [13] 孙力, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘荒漠典型植物叶片化学计量特征及其与土壤环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5):1208-1214.
- [14] 刘枝军, 王宏卫, 王媛媛. 塔里木盆地北缘绿洲县域人均粮食占有量时空格局及其驱动力分析[J]. *新疆农垦经济*, 2017(10):17-23.
- [15] 王新源, 连杰, 杨小鹏, 等. 玛曲县植被覆被变化及其对环境要素的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(3):923-935.
- [16] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001:101-104.
- [17] 《新疆统计年鉴》编辑委员会. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [18] 《新疆生产建设兵团统计年鉴》编委会. 新疆生产建设兵团统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [19] Douglas A S, Allen H, David M, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 89(3):281-308.
- [20] 孟丹, 李小娟, 宫辉力, 等. 京津冀地区 NDVI 变化及气候因子驱动分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(8):1001-1007.
- [21] Du Junli, Li Manlin, Yuan Zhifa, et al. A decision analysis model for KEGG pathway analysis[J]. *BMC Bioinformatics*, 2016, 17(1).
- [22] Lian Jie, Zhao Xueyong, Li Xin, et al. Detecting sustainability of desertification reversion: Vegetation trend analysis in part of the agro-pastoral transitional zone in Inner Mongolia, China [J]. *Sustainability*, 2017, 9(2).
- [23] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 2010, 45(2):4-6.
- [24] 宋小园, 朱仲元, 刘艳伟, 等. 通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1):108-113.
- [25] 张远东, 徐应涛, 顾峰雪, 等. 荒漠绿洲 NDVI 与气候、水文因子的相关分析[J]. *植物生态学报*, 2003(6):816-821.
- [26] 王涛, 赵元真, 王慧, 等. 基于 GIMMS NDVI 的青藏高原植被指数时空变化及其气温降水响应[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2):641-652.
- [27] 丁玥, 阿布都热合曼·哈力克, 陈香月, 等. 和田地区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(4):1258-1268.
- [28] 郭继凯, 吴秀芹, 董贵华, 等. 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[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(3):621-629.
- [29] 孙立群, 李晴岚, 陈骥, 等. 欧亚大陆不同生态区植被生长对降水响应的季节变化规律[J]. *生态学报*, 2018, 38(22):8051-8059.
- [30] 王新源, 陈翔舜, 丁乾平, 等. 不同荒漠化阶段植被生态特征对土壤环境因子的响应: 以民勤荒漠绿洲过渡带为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(5):1569-1580.
- [31] 王旭洋, 李玉霖, 连杰, 等. 半干旱典型风沙区植被覆盖度演变与气候变化的关系及其对生态建设的意义[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1):183-194.
- [32] 陈世强, 文莉娟, 吕世华, 等. 黄河上游玛曲县植被指数与气候变化研究[J]. *冰川冻土*, 2007(1):131-136.
- [33] Vervoort R W, van der Zee S E A T M. On stochastic modelling of groundwater uptake in semi-arid water-limited systems: Root density and seasonality effects [J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(5):580-595.
- [34] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于 maxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估[J]. *生态学报*, 2019, 39(24):9033-9043.
- [35] 毛绍娟, 吴启华, 李红琴, 等. 放牧强度对高寒杂类草甸群落结构及生物量的影响[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5):1372-1380.
- [36] 俞言琳. 大力推进以特色林果业为主的现代林业产业建设: 访新疆维吾尔自治区林业厅党委书记、副厅长张小平[J]. *中国林业*, 2007(7):34-35.
- [37] 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[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5):686-69.