

玛纳斯河流域 NDVI 时空变化及对气象因子的响应

位宏¹, 李晓蕾¹, 徐丽萍¹, 孟欣^{2,3}

(1. 石河子大学 理学院, 新疆 石河子 832003; 2. 南京师范大学
地理科学学院, 南京 210023; 3. 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

摘要:基于 MODIS-NDVI 数据和同期的气象资料,运用趋势分析、R/S 分析、偏相关分析等方法,在区域和像元两个尺度上研究玛纳斯河流域的植被空间变化特征。结合趋势分析结果和 Hurst 指数,研究玛纳斯河流域 NDVI 变化的可持续性特征,并从气温和降水量 2 个因素分析了 NDVI 对气象因子的响应。结果表明:(1) 2000—2015 年玛纳斯河流域 NDVI 变化呈微弱增长趋势,增长速率为 0.044/10 a。(2) 玛纳斯河流域植被覆盖状况改善的区域占总面积的 42.03%,没有发生显著变化的区域占总面积的 55.88%,显著退化的区域仅占总面积的 2.09%,研究区整体生态环境有所改善。(3) 从 Hurst 指数来看,研究区大部分地区 NDVI 变化具有可持续性,但局部地区具有反持续性。持续性改善区域占总面积的 52.81%,持续退化的面积比重为 29.54%,15.87% 面积的区域未来变化趋势无法确定。(4) 相关性分析结果显示:NDVI 与年降水量呈正相关,与平均温度呈负相关,降水对 NDVI 的影响高于平均温度。

关键词:MODIS-NDVI; 气象因子; 响应; 玛河流域

中图分类号:TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0215-06

Spatial and Temporal Distribution of NDVI and Its Response to Climate Factors in the Manasi River Basin

WEI Hong¹, LI Xiaolei¹, XU Liping¹, MENG Xin^{2,3}

(1. College of Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Nanjing 210023, China)

Abstract:Based on the MODIS-NDVI data and the corresponding meteorological data, trend analysis, R/S analysis, partial correlation analysis were carried out to study the characteristics of the spatial variation of vegetation in the Manasi River Basin from the two scales of region and pixel. The trend analysis result and Hurst index were combined to study the sustainability characteristics of NDVI pattern in Manasi River Basin. The response of NDVI to meteorological factors was analyzed from two aspects of temperature and precipitation. The results indicate that: (1) during 2000—2015, the NDVI in Manasi River Basin showed the weak growth trend, with a growth rate of 0.044/decade; (2) the areas of vegetation improvement in the Manasi River Basin accounted for 42.03% of the total area, 55.88% of the total area without significant change, the significant degradation area accounted for only 2.09% of the total area, the overall ecological environment in the study area had been improved; (3) according to the Hurst index, NDVI changes were sustainable in most regions of the study area, but were anti-sustainability in some regions; the area of sustainable improvement accounted for 52.81% of the total area, the area of continuous degradation was 29.54%, and the area where the future trend of change could not be determined accounted for 15.87%; (4) the results of correlation analysis showed that NDVI was positively correlated with precipitation and negatively correlated with average temperature, suggesting that the effect of precipitation on NDVI was higher than average temperature.

Keywords:MODIS-NDVI; meteorological factors; response; Manasi River Basin

作为陆地生态系统的重要组成部分,植被是连接土壤、水分和大气等要素间物质循环和能量流动的自然纽带,也是气候变化的“指示器”^[1]。植被对全球变化及人类活动的响应十分敏感,可在一定程度上反映气候变化的趋势及生态系统的变化特征,因此监测植被动态变化已成为生态学和地理学的热点研究领域之一。遥感因其时效性强、信息量大、探测范围广以及成本低的优点,已成为大区域植被动态监测的有效手段^[2]。通过遥感手段来实现定量化统计植被覆盖程度需要借助一定的植被指数,植被指数的选择很大程度上决定了区域植被覆盖度反演结果的精度。归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)是当前应用最为广泛的表征植被生长态势的指标之一。NDVI 可以直接反映地表植被的覆盖程度,尤其是基于长时间序列的 NDVI 已成为探究陆表植被活动时空演变规律及变异特征的主要方法之一^[3]。利用不同时间序列的 NDVI 数据,国内外学者对区域植被变化及其与气象因子之间的相关性进行了广泛研究^[4-5]。目前应用比较普遍的植被指数数据包括 NOAA-AVHRR NDVI, SPOT-VGT NDVI, TERRA-MODIS NDVI 和 GIMMS NDVI 等,其中 MODIS 数据因其较高的空间分辨率,并且改进了在红光波段和近红外波段的波幅及辐射定标等技术,使其更详尽地反映地表植被的空间差异,已被广泛应用于区域植被的动态监测^[6]。

相关研究表明,气候变化导致全球局部区域植被覆盖变化剧烈^[7]。作为最直观反映气候变化的两个自然要素,降水和气温是植被变化的主要驱动因子。关于 NDVI 与气象要素之间的关联性,国内外学者已经做了很多工作^[8]。玛纳斯河流域作为我国典型的生态脆弱区,地处天山北麓经济带的核心区,是新疆最大的绿洲农耕区和我国第四大农业灌溉区。随着经济技术的发展,近年来,该流域引进了膜下滴灌的高效节水技术并大规模实施,耕地面积迅速增加,绿洲扩张速率加速,地表景观格局演变剧烈^[9]。本文以 2000—2015 年 MODIS-NDVI 数据为基础,辅以 30 m 空间分辨率的数字高程数据(DEM),结合同时期气象站点的观测数据,利用 GIS 及相关统计方法,从生态系统的视角出发,研究 16 a 来玛纳斯河流域 NDVI 时空变化特征,探讨 NDVI 与气候因子之间的相关关系,旨在为该区域环境保护、生态文明建设提供科学基础和理论依据。

1 研究区概况

玛纳斯河流域(简称玛河流域)位于天山北麓中段,准格尔盆地西南缘,地理位置为 $85^{\circ}01'—86^{\circ}32'E$,

$43^{\circ}27'—45^{\circ}21'N$,属典型的温带大陆性气候(图 1)。行政区划包括石河子市、玛纳斯县、沙湾县、兵团农八师和农六师的农牧团场,另有克拉玛依市、和布克赛尔蒙古自治县以及和静县的部分地区,流域总面积 $34\ 050.35\text{ km}^2$ 。流域自南向北地貌依次表现为高山冰川、森林、草甸、干草原和荒漠草原,景观垂直分异特性显著。玛河流域地处欧亚大陆腹地,远离海洋,气候干燥,年平均气温 $4.7\sim 5.7^{\circ}\text{C}$,年降水量 $160\sim 200\text{ mm}$,年蒸发量 $1\ 700\sim 2\ 200\text{ mm}$,降水量稀少,蒸发量大,温差较大^[10]。流域内共分布 7 条内陆河流,其中玛纳斯河是径流量最大、流程最长的内陆河流。流域内河流径流主要靠降水和冰雪融水补给。随着集约高效的节水灌溉技术以及人工管理的介入,使玛纳斯河流域成为新疆水资源利用率较高的灌区之一,但资源高强度开发的同时,绿洲内的生态环境也有一定程度的退化,出现了诸如草场退化、土地沙化、盐渍化和生物多样性降低等一系列生态环境问题^[11]。

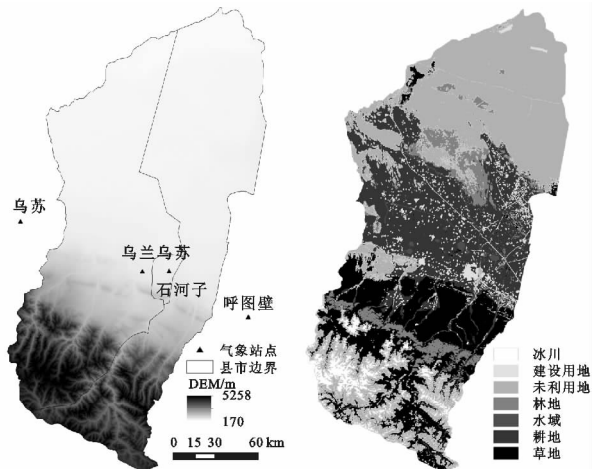


图 1 研究区 DEM 及 2010 年土地利用状况

2 数据来源与处理

本研究所采用的气象数据为国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)下载的 2000—2015 年地面降水和气温 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点栅格数据集,在 ArcGIS 软件中通过栅格计算得到研究区年降水量与年平均温度数据。该数据集是基于 2 472 个国家气象观测站的气温和降水资料,利用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法(TPS, Thin Plate Spline)并结合三维地理空间信息进行空间插值生成。MODIS NDVI 数据采用美国国家航空航天局地球观测系统(<http://ecocast.arc.nasa.gov/>)下载的 MOD13Q1 级植被指数产品,时间范围为 2000—2015 年,空间分辨率 250 m,时间分辨率为 16 d。DEM 数据来源于 ASTER GDEM 数据,空间分辨率为 30 m。为了后续的空间分析,需要将不同分辨率数据统一至同一空间分辨率,在 ArcGIS 软件中对 DEM 数据进行拼接、裁剪、重采样等处理得到研究区 250 m 分辨率的

DEM 数据。土地利用数据由寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 提供,参考 2015 年国家《土地利用现状分类》标准,将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、冰川、城建用地、未利用地(包括盐碱地、沼泽地、沙地、裸地)共 7 类。

对于 NDVI 数据,首先使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对下载的影像进行批量格式和投影转换,然后完成图像的拼接和裁切。对得到的影像进行国际通用的 MVC 法(Maximum Value Composites)进行最大值合成,获取 NDVI 月最大值和年最大值。消除云层、大气和太阳高度角等的影响,减少噪声,提高数据的可靠性。

$$\text{NDVI}_i = \max(\text{NDVI}_{ij}) \quad (1)$$

式中:NDVI_i 表示第 i 年的年 NDVI 最大合成值($i=2000, 2001, 2002, \dots, 2015$);NDVI_{ij} 表示第 i 年第 j 个月的 NDVI($j=3, 4, \dots, 11$)。

3 研究方法

3.1 趋势分析

回归趋势分析法是对一组数据在时间尺度上的变化趋势和强度进行分析的方法,通过构建年 NDVI 值和时间序列间的一元线性方程,对每个像元的 NDVI 数值进行一元线性回归分析,来反映不同时期植被的时空格局演变特征。计算公式如下^[12]:

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times M_i) - (\sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n M_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: S 代表 NDVI 回归方程的斜率; M_i 为第 i 年 NDVI 最大值; n 为研究期;变量 i 为研究期内各年份序号。当 $S > 0$ 时,说明研究期内植被覆盖度增加;当 $S = 0$ 时,说明植被覆盖度没有变化;当 $S < 0$ 时,说明植被覆盖度降低,植被退化。

3.2 R/S 分析

重标极差分析法(Rescaled Range Analysis, R/S)是一种定量描述一组数据随时间序列变化趋势的方法。该方法最初由英国水文学家 Hurst 在大量实证研究的基础上提出,后经不断完善,现已被广泛应用到气候学、地理学、水文学等领域中,该方法已成为定量描述样本数据时间序列信息长期依赖性的有效方法。R/S 方法的结果是 Hurst 指数, Hurst 指数的计算方法如下^[13]:

对于一个 NDVI 时间序列 $\{\text{NDVI}(t)\}$, $t=1, 2, 3, \dots, n$, 以及任意正整数 $P \geq 1$, 定义均值序列:

$$\text{NDVI}_{(P)} = \frac{1}{P} \sum_{t=1}^P \text{NDVI}(t) \quad (3)$$

计算累积离差:

$$\text{NDVI}(t, P) = \sum_{t=1}^P [\text{NDVI}(t) - \text{NDVI}(P)], 1 \leq t \leq P \quad (4)$$

定义极差序列 $R(P)$:

$$R(P) = \max_{1 \leq t \leq P} \text{NDVI}(t, P) - \min_{1 \leq t \leq P} \text{NDVI}(t, P) \quad (5)$$

定义标准差序列 $S(P)$:

$$S(P) = \sqrt{\left\{ \frac{1}{P} \sum_{t=1}^P [\text{NDVI}(t) - \text{NDVI}(P)]^2 \right\}} \quad (6)$$

计算 Hurst 指数:

$$\frac{R(P)}{S(P)} = (\alpha P)^H \quad (7)$$

式中: H 即为 Hurst 指数,可以在双对数坐标系中用最小二乘法拟合求得。根据 Hurst 指数的大小来判断 NDVI 变化趋势是完全随机的还是存在规律性。Hurst 取值范围为 $0 \sim 1$, 当 $H = 0.5$ 时, NDVI 变化趋势是随机的,不存在长期相关性;当 $0 < H < 0.5$ 时,说明 NDVI 未来的变化趋势与过去的相反,即反持续性;当 $H > 0.5$ 时,说明未来的 NDVI 变化趋势与过去的保持一致。

3.3 相关性分析

相关分析是研究两个或多个变量之间内在联系的一种方法。考虑到 NDVI 的影响因素较多,本文采用偏相关分析法研究两变量之间的关系,排除其他因素的干扰。首先计算两变量之间的相关系数,通过相关系数进一步计算得到偏相关系数^[14]。相关系数计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中: r_{xy} 表示变量 x, y 的相关系数; x_i 表示第 i 年 NDVI 值; y_i 表示相应时间内累积降水量或平均温度; \bar{x}, \bar{y} 为变量 x 和 y 的平均值; i 表示样本数。

偏相关系数计算公式为:

$$r_{12,3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}} \quad (9)$$

式中: $r_{12,3}$ 表示除去变量 3 干扰后变量 1 和变量 2 之间的偏相关系数; r_{12}, r_{13}, r_{23} 分别表示变量 1 与变量 2, 变量 1 与变量 3, 变量 2 与变量 3 之间的相关系数。

4 结果与分析

4.1 玛纳斯河流域 NDVI 时空分布特征

空间尺度上,利用 2000—2015 年研究区年最大值 NDVI 数据,计算 16 a 的平均值 NDVI 空间分布图(图 2A)。参照方利等人的研究^[15],将玛河流域 NDVI 分为 4 个等级,NDVI ≥ 0.6 为高植被覆盖, $0.4 \leq \text{NDVI} < 0.6$ 为中等植被覆盖, $0.1 \leq \text{NDVI} < 0.4$ 为低植被覆盖, NDVI < 0.1 为无植被覆盖。结果表明:研究区主要以低植被覆盖为主,研究区近一半面积为低植被覆盖(46.41%),主要分布在玛河流域北部,部分穿插分布在高植被覆盖区之间,土地利用方式以草地和未利用地为主;高植被覆盖区主要分布在玛河流域中部和山前平原

带,土地利用方式以耕地为主,占总面积的 26.43%;中等植被覆盖区零散分布在高植被覆盖区周围,土地利用方式以草地和林地为主,占总面积的 17.01%;无植被覆盖区面积较少,主要是水域及高山冰雪区。全区的 NDVI 平均值为 0.38,属于低植被覆盖等级水平,但是总体还是高于新疆平均水平^[16]。

时间尺度上,2000—2015 年玛纳斯河流域 NDVI 值在 0.314~0.452 间波动(图 2B),总体呈微弱增长趋势,增长速度为 0.044/10 a 并通过了显著性检验($p <$

0.05),说明研究区植被覆盖度在不断增加。依据年际尺度可将研究期大致分为 3 个阶段:2000—2008 年小幅度波动阶段;2009—2011 年相对快速增长阶段;2012—2015 年持续降低阶段。月际尺度上,研究区 NDVI 年内差异显著(图 2C),年内变化呈单峰型曲线,夏季 NDVI 明显高于其他季节。主要表现为春季(3—6 月)NDVI 迅速增加,秋季(9—11 月)NDVI 骤减,夏季 NDVI 处于高位小幅波动(6—9 月),冬季冰雪覆盖,NDVI 最低,几乎呈无植被状态(11 月—翌年 3 月)。

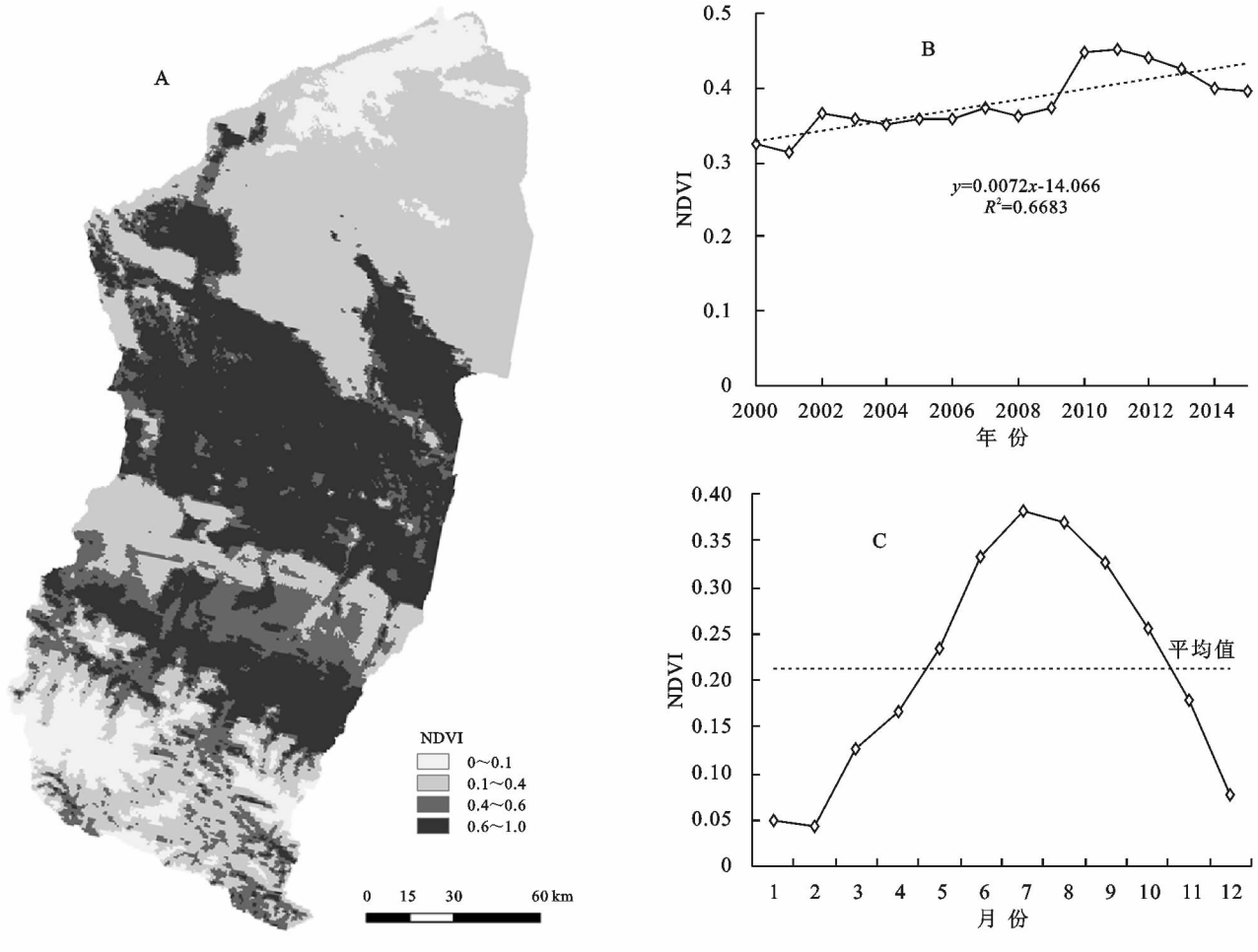


图 2 2000—2015 年玛纳斯河流域 NDVI 趋势变化

4.2 玛纳斯河流域 NDVI 变化趋势分析

为了解 2000—2015 年玛纳斯河流域 NDVI 在空间上的变化状况,本研究利用趋势分析模型,计算得到了 Slope 图来反映 NDVI 的变化趋势(图 3A)。并根据不同像元值所占比例的突变点将研究区 Slope 值分为 5 个等级。从玛纳斯河流域 NDVI 变化趋势图可以看出,2000—2015 年研究区 55.88% 面积的 NDVI 并未发生变化,未发生变化的区域土地利用方式主要是未利用地,该区域几乎无植被覆盖,因此 NDVI 无明显变化;极显著改善区域主要分布在研究区中西部,占研究区总面积的 3.40%;显著改善区域面积所占比例较大,达到了 38.63%,主要分布在研究区中部,土地利用方式以耕地和草地为主,主要原

因是受生态保护和耕地扩张的影响,这些区域植被覆盖明显改善;显著退化和极显著退化区域所占的面积极少,二者共占总面积的 2.09%,说明 2000—2015 年,玛纳斯河流域 NDVI 总体呈增加趋势。

Hurst 指数可以直观的反映 NDVI 变化是否具有可持续性,利用 R/S 分析,得到玛纳斯河流域 NDVI 变化的 Hurst 指数空间分布图(图 3B)。玛纳斯河流域的 Hurst 指数介于 0.24~0.87,全区均值为 0.57,说明玛纳斯河流域 NDVI 变化将继续保持现有的变化趋势。其中 $Hurst > 0.5$ 的像元占玛河总面积的 96.16%, $Hurst < 0.5$ 的区域占总面积的 3.84%。 $Hurst < 0.5$ 的区域主要分布在研究区北部玛纳斯河附近及研究区南部冰雪覆盖区,表明该地区 NDVI

变化具有反持续性。从图 3B 可以看出,玛河流域中部的 Hurst 指数分布复杂,北部的 Hurst 指数大多集中分布在 0.55~0.65。总体来看,研究区 NDVI 变化具有较好的可持续性,呈反持续性变化的面积较小,这与慈晖^[16]等人对整个新疆地区 NDVI 变化可持续性研究的结论相一致。

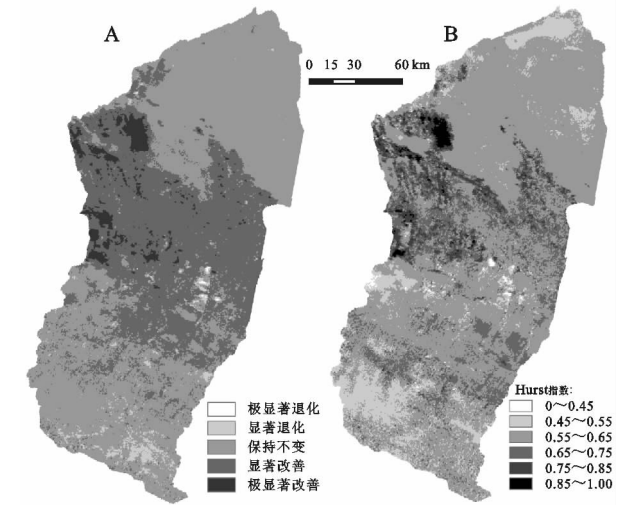


图 3 玛纳斯河流域 NDVI 变化程度及 Hurst 指数空间分布

为了进一步探讨玛纳斯河流域 NDVI 变化的可持续性,本文将 Slope 图与 Hurst 指数分布图在 GIS 中进行空间叠加分析,获得 NDVI 变化趋势的持续性特征分布图(图 4)。

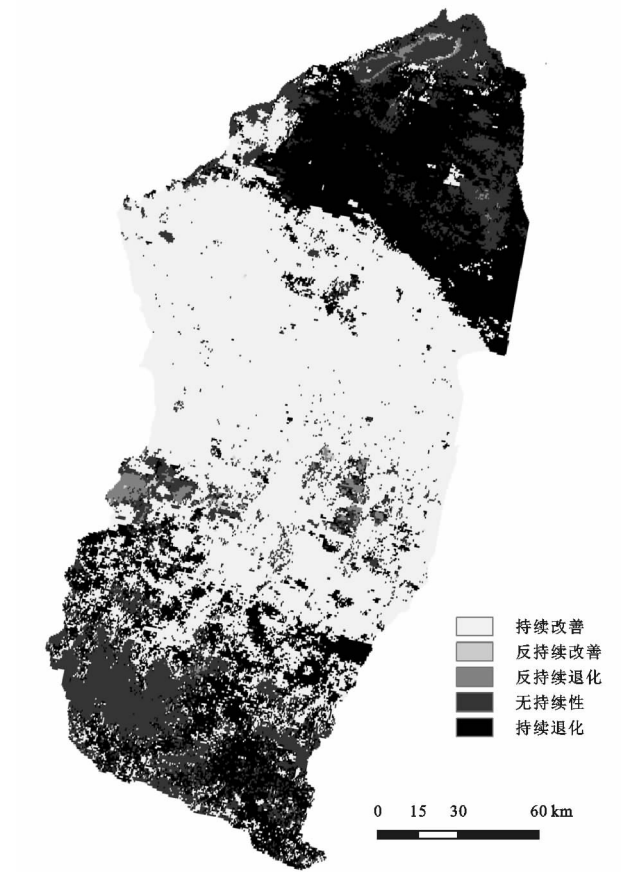


图 4 2000—2015 年玛纳斯流域 NDVI 变化

依据 Slope 图和 Hurst 指数的空间叠加分析结果,将研究区 NDVI 变化可持续性趋势分为反持续改善(即从改善到退化)、持续改善、无持续性、持续退化和反持续退化(即从退化到改善)5 个等级。由图 4 可以看出:NDVI 持续改善的面积比重超过一半(52.81%),主要分布在玛纳斯河流域中部农田耕种区,这一区域受人类活动影响较大,耕地和城建用地面积增幅很大,且二者面积的增加主要是由草地和未利用地转化而来^[17],未利用地的平均 NDVI 值很小,草地的平均 NDVI 值也小于耕地和城建用地,因此这一区域的 NDVI 有所改善;持续退化的面积比重为 29.54%,主要分布在玛纳斯河流域北部和南部山区,这些地区自然环境恶劣,降水量少,植被覆盖程度较低,加之人类不合理的水土资源利用方式,导致了 NDVI 的持续退化^[18];NDVI 变化无持续性的面积比重为 15.87%,主要分布在流域北部玛纳斯湖及南部冰雪覆盖区,这些区域主要为水域,无植被覆盖;反持续改善面积比重为 0.31%,整体情况较为乐观,说明退耕还林还草和生态保护工程等政策的实施效果显著。

4.3 玛纳斯河流域 NDVI 变化与气温、降水的相关性研究

以年为单位,分别计算各像元 2000—2015 年 NDVI 与年降水量、年平均温度的相关系数及偏相关系数(表 1),通过 t 统计量检验偏相关系数的显著性。

相关研究认为,在干旱、半干旱地区植被覆盖度变化主要受降水量与蒸散发的影响,受气温的影响很小^[19]。本研究结果表明:玛河流域植被的生长受到温度和降水条件的共同影响,这与杜加强等^[20]的研究结果相一致。相关性分析结果显示:NDVI 与降水和气温存在明显的相关关系。NDVI 与降水的相关系数为 0.747($p<0.01$),与温度的相关系数为-0.556($p<0.05$)。为了排除气温和降水之间的相互影响,本文又进行了偏相关分析,偏相关分析的结果也表明 NDVI 与降水呈正相关($r=0.711, p<0.01$),与温度呈负相关($r=-0.740, p<0.01$)。主要原因是新疆地处大陆腹地,温度较高,降水稀少,植被生长会随着温度的升高而退化,温度的升高使地表蒸散发量进一步增加,加剧水分的缺乏,致使植被的净光合作用减弱,抑制植物的生长^[21]。水是植物生长的源泉,降水量增加显著地促进植被的生长,尤其在新疆这种干旱半干旱地区,这种作用更加明显。

表 1 NDVI 与气象要素的相关性、偏相关性分析

参数	Spearman 秩相关系数	p	偏相关 系数 r	p
气温	-0.556	0.025*	-0.740	0.002**
降水	0.747	0.001**	0.711	0.003**

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

5 结论

(1) 16 年间,玛纳斯河流域年最大 NDVI 在 0.314~0.452 间波动,最大值出现在 2011 年(0.452),最小值出现在 2001 年(0.314),NDVI 总体呈微弱增长趋势,增长速度为 0.044/10 a。空间分布上,高植被覆盖区主要分布在玛河流域中部和山前平原带,占总面积的 26.43%;中等植被覆盖区零散分布在高植被覆盖区周围,占总面积的 17.01%;低植被覆盖区主要分布在玛河流域北部,部分穿插分布在高植被覆盖区之间,占总面积的 46.41%;无植被覆盖区面积较少,主要是水域及高山冰雪区。

(2) 玛纳斯河流域植被覆盖状况改善的区域占植被覆盖总面积的 42.03%,土地利用方式主要是耕地和草地;没有发生显著变化的面积占研究区总面积的一半以上(55.88%),土地利用方式以未利用地为主,植被覆盖程度极低,变化趋势不明显;显著退化的区域占总面积的 2.09%,说明研究区整体生态环境有所改善。

(3) Hurst 指数结果表明 NDVI 持续改善的面积比重超过一半(52.81%),持续退化的面积比重为 29.54%,NDVI 变化无持续性的面积比重为 15.87%,这些区域主要为水域,无植被覆盖;反持续改善面积比重为 0.31%,整体情况较为乐观,说明退耕还林还草和生态保护工程等政策的实施效果显著。

(4) 偏相关分析和线性相关分析结果显示:NDVI 与降水量呈正相关($r=0.711, p<0.01$),与平均温度呈负相关($r=-0.740, p<0.01$),降水对 NDVI 的影响高于平均温度。

参考文献:

- [1] 李奇虎,陈亚宁. 1981—2006 年西北干旱区 NDVI 时空分布变化对水热条件的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2):327-334.
- [2] Hilker T, Lyapustin A I, Hall F G, et al. On the measurability of change in Amazon vegetation from MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 166: 233-242.
- [3] 刘可,杜灵通,侯静,等. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6):1885-1896.
- [4] 李跃鹏,刘海艳,周维博. 陕西省 1982—2015 NDVI 时空分布特征及其与气候因子相关性[J]. 生态科学, 2017, 36(6):153-160.
- [5] Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, et al. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends: Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9):1886-1898.
- [6] 闫俊杰,乔木,周宏飞,等. 基于 MODIS/NDVI 的新疆伊犁河谷植被变化[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3):512-519.
- [7] Studer S, Appenzeller C, Defila C. Inter-Annual variability and decadal trends in alpine spring phenology: A multivariate analysis approach[J]. Climatic Change, 2005, 73(3):395-414.
- [8] Sun J, Qin X. Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4):1-9.
- [9] 刘金巍,靳甜甜,刘国华,等. 新疆玛纳斯河流域 2000—2010 年土地利用/覆盖变化及影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(12):3211-3223.
- [10] 张宏锋,欧阳志云,郑华,等. 新疆玛纳斯河流域景观格局变化及其生态效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1408-1414.
- [11] 李慧婷,徐丽萍,郭鹏,等. 玛纳斯河流域景观格局变化与地形控制分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6):273-278.
- [12] 张静郑,郑辉,朱连奇,等. 豫西山地区植被 NDVI 及其气候响应的多维变化[J]. 地理研究, 2017, 36(4):765-778.
- [13] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7798-7806.
- [14] 姜红涛,塔西甫拉提·特依拜,阿尔达克·克里木,等. 艾比湖流域 NDVI 变化及其与降水、温度的关系[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6):1678-1684.
- [15] 方利,王文杰,蒋卫国,等. 2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2017, 37(11):1745-1754.
- [16] 慈晖,张强. 新疆 NDVI 时空特征及气候变化影响研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5):662-671.
- [17] 姜亮亮,刘海隆,包安明,等. 玛纳斯河流域景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4):256-262.
- [18] 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.
- [19] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625):1560-1563.
- [20] 杜加强,贾尔恒·阿哈提,赵晨曦,等. 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[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12):3567-3578.
- [21] 罗敏,古丽,加帕尔,等. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1):50-63.