

新疆玛纳斯河流域植被变化的特征与归因

白旭阳¹, 刘昱坤¹, 杨武超¹, 付金霞¹, 李彦², 李志¹

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 植被覆盖是旱区生态环境状况的重要表征和直接反馈。气候变化和人类活动干扰加剧的背景下,亟需明确植被覆盖的变化状况和归因,但当前研究缺乏对各驱动因子贡献率的量化。为此,选取新疆玛纳斯河流域为研究区域,基于1982—2015年NDVI和气候数据,在分析植被时空变化格局的基础上,量化了气候变化和人类活动的贡献率。1982—2015年,流域年均NDVI值呈东高西低、北高南低的空间分布格局。34年间NDVI呈显著上升趋势($+0.60\%/10\text{ a}$),但存在年际变异;1995年发生突变,1982—1995年NDVI显著上升($+1.50\%/10\text{ a}$),而1996—2015年显著下降($-0.40\%/10\text{ a}$)。较1982—1995年,1996—2015年的植被变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,其对植被变化的贡献率分别为52%和48%。采取的贡献率量化方法有效地甄别了不同因子对植被变化的影响,量化的结果表明玛纳斯河亟需采取措施进行植被管理以提升其生态环境状况。

关键词: 植被覆盖; 时空变化; 归因分析; 气候变化; 人类活动

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0192-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.028

Characteristics and Attribution of Vegetation Coverage Change in the Manas River Basin, Xinjiang

BAI Xuyang¹, LIU Yukun¹, YANG Wuchao¹, FU Jinxia¹, LI Yan², LI Zhi¹

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 2.College of Hydraulic and Civil Engineering of Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052)

Abstract: Vegetation coverage directly represents the characteristics and changes in eco-environment in arid regions. Under the background of accelerated climate change and intensified human activities, it is thus urgent to investigate the changes and attributions of vegetation; however, the contributions of different controlling factors have rarely been quantified. Take the Manas River basin as the study area, this study analyzed the temporal and spatial changes of vegetation coverage with NDVI and climate data during the period 1982—2015, and further differentiated the contributions of climate change and human activities to vegetation change. From 1982 to 2015, the spatial pattern of NDVI decreased from the east to the west and from the north to the south. During the past 34 years, the NDVI showed a significant upward trend ($+0.60\%/10\text{ a}$), but exhibited interannual variations, and it changed abruptly in 1995. The NDVI increased/decreased significantly before/after 1995 ($+1.50\%/10\text{ a}$ and $-0.40\%/10\text{ a}$), respectively. Compared with 1982—1995, the vegetation change in 1996—2015 was the combined effects of climate change and human activities. The contributions of climate change and human activities to vegetation change were 52% and 48%, respectively. The method for contribution quantification effectively differentiated the impacts of different factors on vegetation change, and the results showed that it was urgent to implement land management to improve eco-environment in the Manas River basin.

Keywords: vegetation coverage; temporal and spatial variation; attribution analysis; climate change; human activities

植被覆盖状况受自然环境和人类活动综合影响^[1-4],既能反映自然环境的时空差异和演变过程,也对水土保持和水源保护等过程具有影响^[5-6]。工业革

命以来,气候变化和人类活动对陆地植被生态系统产生了前所未有的冲击^[7]。因此,探究植被时空特征及与气候和人类活动之间的关系,可为植被管理和环境

收稿日期: 2020-05-28

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1703124); 国家自然科学基金青年基金项目(41807070)

第一作者: 白旭阳(1998—),女,山西太原人,主要从事地理空间分析及系统模拟研究。E-mail: 445357264@qq.com

通信作者: 李志(1978—),男,山东沂水人,博士,教授,博士生导师,主要从事旱区水循环演变机理与调控研究。E-mail: lizhibox@nwfau.edu.cn

保护提供科学参考。

已有研究分析了植被变化的时空特征,但对植被变化的归因研究相对较少,且多为定性分析,主要探讨NDVI等植被指标与气候等自然因子和经济社会指标的关系,说明不同阶段植被变化的主导因素。丁玥等^[8]对新疆和田地区植被覆盖变化的研究表明,降水和温度是影响植被NDVI的主要因素;杨光华等^[9]分析了1998—2007年新疆植被覆盖变化发现,新疆植被覆盖变化是气候变化和人类活动共同作用的结果。近年来,少数研究^[10-15]基于残差分析原理开展了影响因子对植被变化贡献率的量化研究,通过将研究时段划分为基准期和变化期,量化变化期观测值与理论值的差异,从而推进了植被变化归因研究工作。阿多等^[11]运用残差分析的方法量化华北地区人类活动影响的强弱程度;李传华等^[13]运用残差分析的方法量化人类活动影响的方向。但目前缺少对气候变化和人类活动贡献率的具体量化结果^[16],量化各影响因子贡献率将有利于为生态环境管理提供更有意义的参考信息。

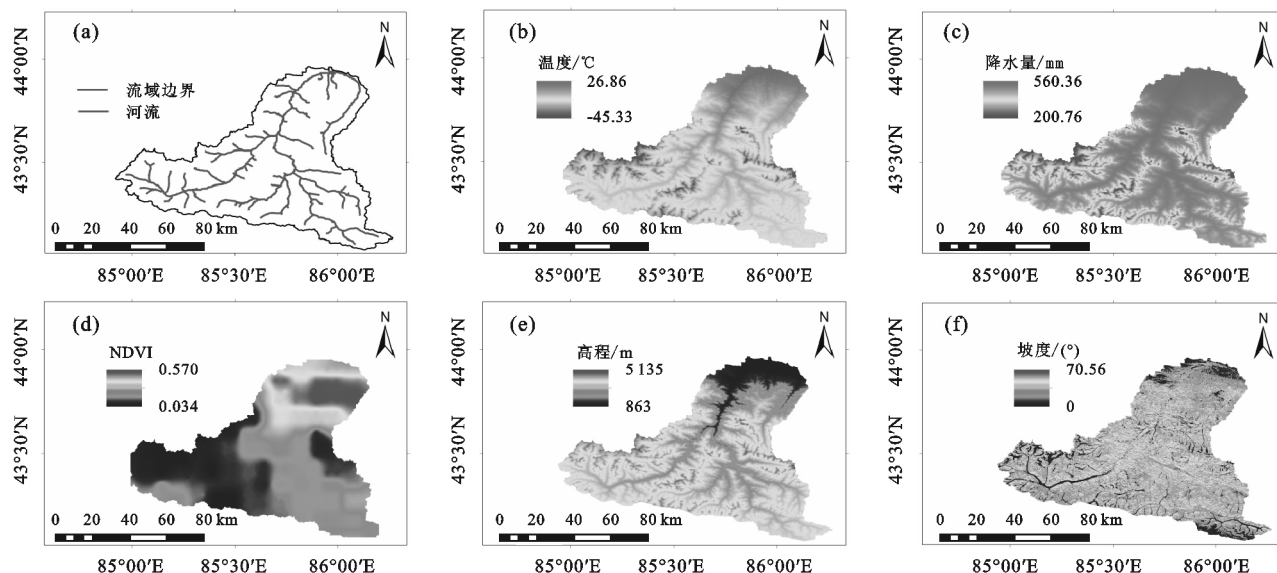
玛纳斯河是西北干旱区典型的内陆河,生态环境脆弱而敏感^[17-19],植被覆盖状况容易受到气候变化和人类活动的干扰^[20-21]。但目前对该区植被状况的研究较少,

特别是缺乏影响因子贡献率的定量研究。为此,本研究利用长时间序列的GIMMS NDVI3g^[22]和残差分析方法,在分析1982—2015年玛纳斯河流域植被覆盖时空变化的基础上,量化气候和人类活动的影响贡献率,以期为该区域植被管理和区域可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玛纳斯河流域位于 $84^{\circ}91'E-86^{\circ}26'E$, $43^{\circ}07'N-43^{\circ}96'N$,面积约 $0.702 \times 10^4 \text{ km}^2$,流域把口站为肯斯瓦特水文站(图1a)。流域内山区面积 $0.556 \times 10^4 \text{ km}^2$,平原面积 $0.146 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地势从南向北倾斜降低,海拔介于863~5 135 m,在接近山前平原附近,垂直高度从海拔5 000 m急降至800 m左右。属典型的大陆性气候,夏季温度高,冬季温度低,年均气温 6°C ,由北向南递减;夏季降雨量多,冬季降雨量少,年降水量175~220 mm。流域北部为平原地区,植被多为耕地,南部为山区,植被多为草地和林地,年均NDVI在空间上的表现为北部平原地区NDVI值高,南部山区NDVI值低。流域在90年代开始推广膜下滴灌节水技术^[23-24],并在1996年后得到广泛应用,耕地面积呈逐步扩张趋势。



注:(a)流域位置;(b)年均温度;(c)年均降水;(d)年均NDVI;(e)高程;(f)坡度。

图1 玛纳斯河流域位置、气候、NDVI和地形因子的空间格局

1.2 数据源与预处理

本研究数据源包括NDVI数据、气象数据和DEM数据。

(1)NDVI数据。利用美国国家航空航天局的植被指数产品,空间分辨率为 $1/12^{\circ}$,时间分辨率为15 d。数据期限1982年1月至2015年12月,每年24景,共816期。利用MATLAB和ArcGIS对图像数据进行格式转换和提取,生成了1982—2015年玛纳斯河流域NDVI数据集。

(2)气象数据。平均气温、降水数据来自中国气象局在流域附近的30个气象站,时段与NDVI对应。为获得具有空间分布特征的气候数据,考虑高程因素的影响,采用ArcGIS地统计克里格法进行插值,投影方式和空间分辨率与NDVI数据保持一致。

(3)高程数据。空间分辨率为30 m的ASTER GDEM。绘制流域高程分布曲线,发现流域70%左右面积的高程 $>1\,500 \text{ m}$,最大高程5 138 m,相对高差4 276 m。为更好探究高程对植被的影响,参考已有研究^[25],

将研究区划分为4个高程带: $<1\,500$, $1\,500\sim2\,700$, $2\,700\sim3\,600$, $>3\,600\text{ m}$, 主要土地利用类型分别为草甸、灌木、高山草甸和冰川永久积雪。

1.3 研究方法

(1)趋势和突变检验。采用线性拟合方法判断植被和气候在不同时段的变化趋势。利用 Pettitt 方法可以检测出植被和气候的突变点。由于是一种非参数检验方法,能客观地表征样本序列的整体变化趋势。

(2)植被变化的定性归因。采用相关性分析,研究 NDVI 与高程、降水和气温的关系,建立气候主导时段 NDVI 与气候的关系;同时,探讨人类活动在不同时段的主要形式,辅助说明人类活动对植被变化的可能影响。

(3)相关性分析。相关分析是研究2个或2个以上处于同等地位的随机变量间的相关关系的统计分析方法。本文选用此种方法来探讨 NDVI 与降水和气温之间的关系。

(4)植被变化的定量归因。以 NDVI 突变年份为界,将整个时期划分成2个时段 t_1 和 t_2 , 分别称为基准期 t_1 和变化期 t_2 。NDVI 变化值 $\Delta\text{NDVI}_{\text{tot}}$ 为2个时段平均值的差值:

$$\Delta\text{NDVI}_{\text{tot}} = \overline{\text{NDVI}}_{t_2} - \overline{\text{NDVI}}_{t_1} \quad (1)$$

人类活动导致的植被变化 $\Delta\text{NDVI}_{\text{ha}}$ 通过残差分析计算。根据当前研究结果,植被受人类活动干扰程度随时间增加,基准期 t_1 往往是气候主导,可建立 NDVI 与气候因子的关系式。将在 t_1 期间建立的关系式应用到 t_2 期间,以计算气候影响下的 NDVI 值。实测数据平均值 $\overline{\text{NDVI}}_{\text{obs}, t_2}$ 和计算数据平均值的差

值 $\overline{\text{NDVI}}_{\text{cal}, t_2}$, 即为 t_2 时段人类活动导致的植被变化。特别是可以将公式(2)应用到 t_1 时段计算人类活动的影响,得到的结果与 t_2 时段的差值也可以强调人类活动的贡献变化情况。

$$\Delta\text{NDVI}_{\text{ha}} = \overline{\text{NDVI}}_{\text{obs}, t_2} - \overline{\text{NDVI}}_{\text{cal}, t_2} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 植被变化的时空特征

1982—2015 年玛纳斯河流域地表植被覆盖总体较差,年平均值为 $0.033\,5\sim0.567\,0$, 平均值为 $0.319\,0$, $\text{NDVI}<0.4$ 的区域占 70% , 主要分布在 $0.1\sim0.2$ 区间。可见,植被覆盖以低级别 NDVI 为主。NDVI 的空间分布具有异质性(图 1d), 整体呈东高西低和北高南低的格局,这一分布特征与地形极为相关(图 1e), 山前平原植被覆盖较好,而山区植被覆盖较差。1982—2015 年,玛纳斯河流域年平均 NDVI 显著增加,增速为 $0.60\%/10\text{ a}$ (图 2a, $p<0.01$)。但需要注意的是,NDVI 在 1995 年发生了突变(图 2b)。NDVI 在突变前为上升趋势,升速为 $1.50\%/10\text{ a}$ ($p<0.01$);而在突变后为下降趋势,降速为 $-0.40\%/10\text{ a}$ ($p<0.05$)。突变前,NDVI 呈波动上升趋势,主要原因是前期植被受自然因素的影响较大,对温度、降水等自然影响因子的响应程度较好。突变后,NDVI 的变化主要分为4个阶段,上升、下降、上升、下降,2个波峰分别为 2000 年和 2005—2010 年,2个波谷分别为 2004 年和 2012 年。形成此现象的原因是因为此阶段人类活动较为频繁,既有促进也有破坏,是流域植被对于自然因子和人类活动双重影响下的综合反映。

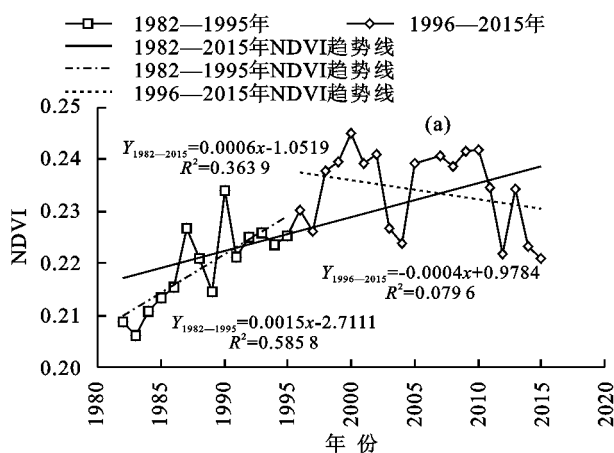
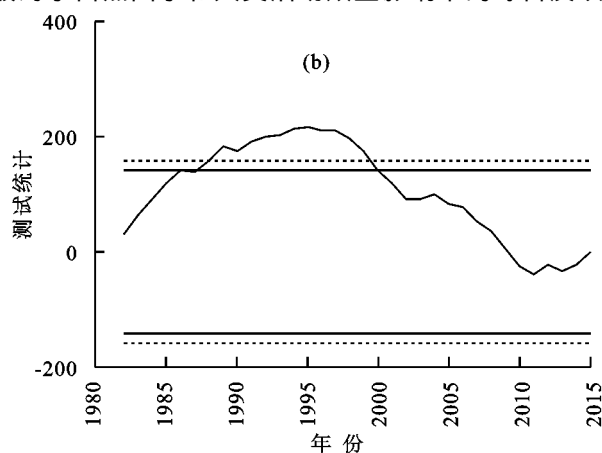


图2 1982—2015 年玛纳斯河流域 NDVI 变化趋势及突变



利用 NDVI 年值,分时段对每个像元进行线性拟合,得到 NDVI 变化速率空间分布图。从整体来看,1982—2015 年玛纳斯河流域 NDVI 变化趋势在空间上呈现不均匀性与复杂性,变化速率为 $-0.000\,418\sim0.003\,42$, 平均值为 $0.000\,424$ (图 3a)。流域北部山前低海拔区域 NDVI 为升高趋势,特别是平原区

NDVI 增长率最高,增长率位于 $0.003\,32\sim0.003\,40$; 南部山区 NDVI 呈负增长趋势。

进一步从不同时段检验 NDVI 变化速率,1982—1995 年(图 3b)玛纳斯河流域变化速率在 $-0.006\,06\sim0.004\,23$, 平均值为 $0.001\,241$ 。流域 82.7% 的区域 NDVI 变化速率为正值,平均值为 $0.001\,644$,表明流

域植被覆盖呈增加趋势;1996—2015 年(图 3c)玛纳斯河流域变化速率在 $-0.004\ 44\sim0.009\ 14$,平均值为 $-0.000\ 407$ 。流域 76.3%的区域 NDVI 变化速率为负值,表明流域植被覆盖呈下降趋势。

1982—1995 年 NDVI 变化速率范围小于 1996—2015 年(图 3b),且 1996—2015 年 NDVI 变化速率主要表现出低值 NDVI 减小、高值 NDVI 增加的趋势。

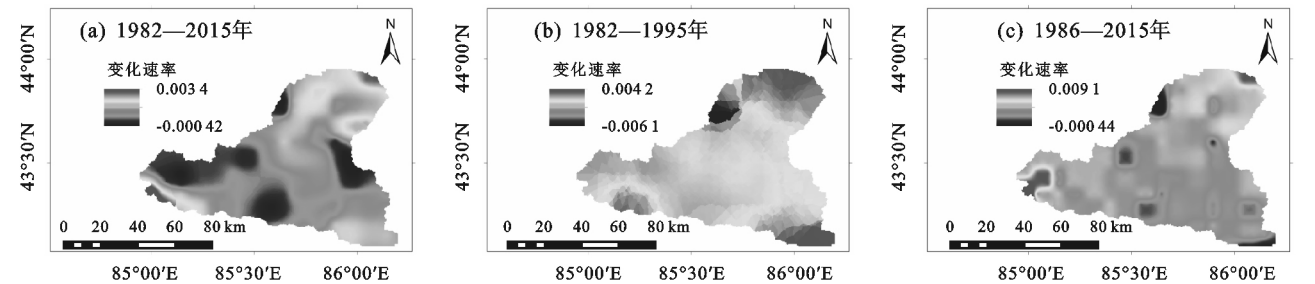


图 3 玛纳斯河流域 NDVI 变化速率的空间分布

2.2 植被变化的定性归因

2.2.1 植被与地形的关系 根据 DEM 数据,计算每个海拔区域的 NDVI 统计数据(表 1)。流域植被覆盖的空间分布存在变异性。随高程增加而降低,这与该区多年 NDVI 平均值东高西低、北高南低的分布特征一致。低海拔地区植被覆盖较好,尤其是 $<2\ 700\ \text{m}$ 范围内 NDVI 数值比较大,而 $>2\ 700\ \text{m}$ 低值 NDVI 不断增长。 $1\ 500\sim2\ 700\ \text{m}$ 区域的 NDVI 均值最大,是由于山区冰雪融水汇聚于此,水资源丰富,热量和水分都适合植被生长,植被多为灌丛。 $>3\ 600\ \text{m}$ 区域的 NDVI 均值最小,是由于随海拔上升温度降低,主要地表覆盖为冰川和永久积雪,植被生长所必须的热量条件受到限制。因此,地形因子的变化对于植被的分布起着一定的影响作用^[26]。

NDVI 的时间变化状况具有高程差异。不同高程带中, $<2\ 700\ \text{m}$ 区域的植被变化程度最明显, $2\ 700\sim3\ 600\ \text{m}$ 区域植被变化程度最小, $>3\ 600\ \text{m}$ 以上区域植被变化较为明显。导致上述变化的原因是, $<2\ 700\ \text{m}$ 以下区域易受人类活动影响,下游绿洲扩张导致部分草地变为耕地、退牧还林还草政策致使部分草地变林地; $2\ 700\sim3\ 600\ \text{m}$ 区域土地覆盖类型为草甸,且零星分布,植被生长自然环境较差,且受人类活动影响较小,所以植被变化不明显; $>3\ 600\ \text{m}$ 区域主要为常年积雪和冰川,近年来全球气候变暖致使冰川积雪融化,径流增加,部分区域变为高山草甸,植被变化较为明显。

表 1 不同高程区 NDVI 统计值

高程带/m	面积/km ²	1982—2015	1982—1995	1996—2015
<1500	317.53	0.3148	0.3037	0.3225
$1500\sim2700$	1140.96	0.3754	0.3672	0.3812
$2700\sim3600$	2924.74	0.2041	0.1980	0.2084
>3600	2636.12	0.1444	0.1389	0.1480

2.2.2 气候对植被变化的影响 气候决定着降水和能量的总体输入^[27-28],而地形因素也会影响降水和温

度的空间分布进而影响植被覆盖情况,因此,气温和降水常被用来解释气候与植被的关系。在空间上,流域年平均 NDVI 值由南向北递增,与年平均温度在空间上的分布较为相似(图 1)。1982—2015 年流域 NDVI 均值与年降雨、年温度相关系数分别为 0.577 ($p<0.01$)和 0.927($p<0.01$),表明整个研究期 NDVI 与降雨、温度显著相关(图 4a、图 4b)。从空间上和时间上来看,降雨和气温是研究区 NDVI 变化的主要驱动因子。

进一步检验不同时期植被与气候的关系,1982—1995 年 NDVI 与降雨、温度均呈现出较好的相关性,相关系数分别为 0.50 和 0.57(图 4a, $p<0.01$);但 1996—2015 年 NDVI 与降雨、温度的相关性略有降低,相关系数分别为 0.31 和 0.24(图 4b, $p<0.05$)。可见,气候对植被的影响在 1996 年后有所下降。与基准期相比,变化期降雨量和气温略有增加,而 NDVI 以 0.000 4/年的速度显著下降,说明植被覆盖可能受到人类活动的影响。

2.2.3 人类活动对植被变化的影响 除气候影响因素外,人类活动也是影响植被覆盖变化的重要影响因素^[29-30]。人类活动对其影响主要表现在正负两方面:一是起促进作用(生态工程等);二是起破坏作用(乱砍乱伐等)。1995 年以前,流域植被覆盖主要受自然因素的影响呈上升趋势^[24]。1990s 以来,玛纳斯河流域不断实施节水措施,且在 1996 年后膜滴灌技术得到广泛的应用,致使农地覆盖增加;同时,西部大开发政策^[24]的实施致使耕地面积快速增加,区域北部山前平原的植被得到改善,所以 1996—2000 年该区植被覆盖显著上升。但随着经济的发展,流域原有的植被由于开垦荒地、过度放牧和水资源的不合理利用,呈现退化或消失的趋势。退耕还林还草政策^[20]实施后,区域政府开展了南部山区退牧还草还林项目,使部分区域的植被得到了一定程度的恢复,所以 2000 年以后,流域植被覆盖的变化趋势呈双向波动状态。

总体来说,人类活动的影响力还在持续增强,且呈现

出负作用。

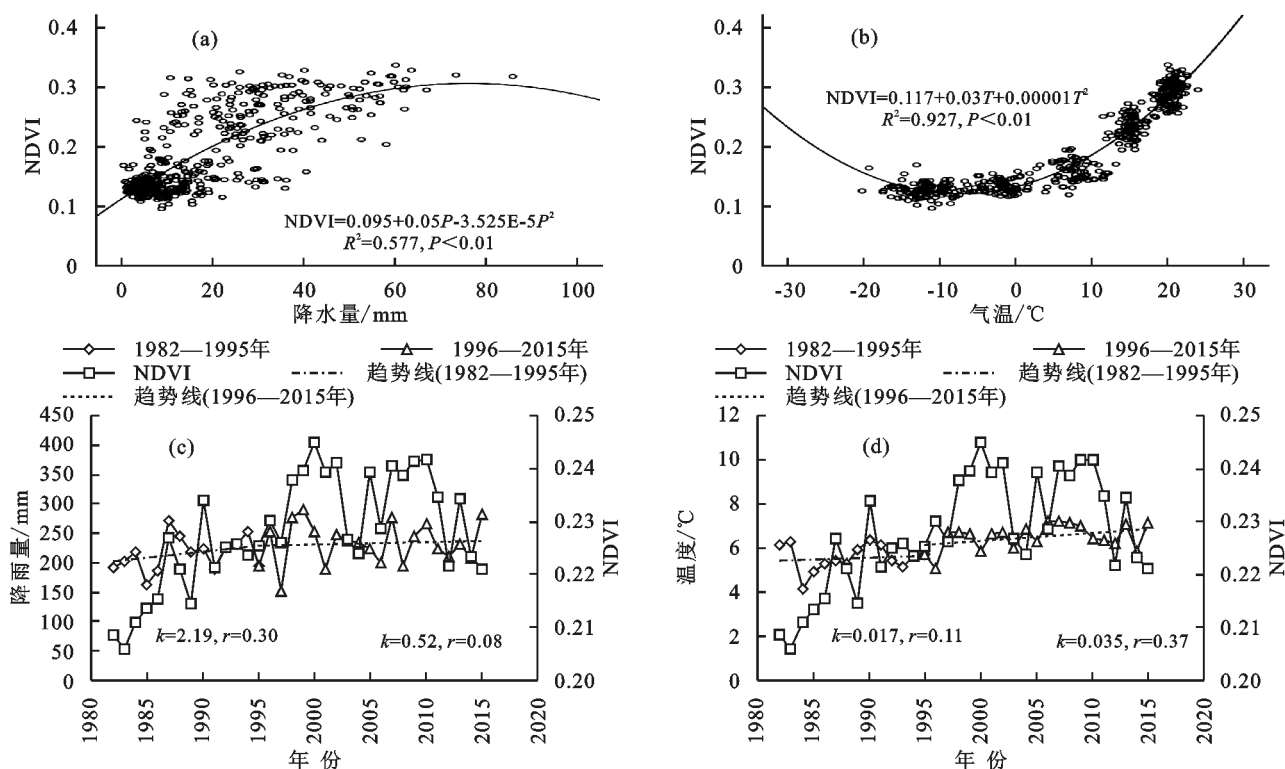


图 4 1982—2015 年流域 NDVI 与气候的关系

2.3 植被变化的定量归因

为了量化气候因子和人类活动因子对玛纳斯河流域 NDVI 变化的贡献率,首先,要确定基准期(主要受自然因子影响的天然时期)和变化期(主要受人类活动影响的时期),然后对 2 个时期的 NDVI 进行比较。基于 Pettitt 检验的结果确定的突变为 1995 年,进而将整个时段划分为基准期(1982—1995 年)和变化期(1996—2015 年)。

NDVI 变化值是 2 个时段平均值的差值,为 $\Delta\text{NDVI}_{\text{tot}}$,人类活动导致的植被变化为 $\Delta\text{NDVI}_{\text{ha}}$,实测数据平均值为 $\overline{\text{NDVI}}_{\text{obs}}$,计算数据平均值为 $\overline{\text{NDVI}}_{\text{cal}}$ 。则 NDVI 变化值为:

$$\Delta\text{NDVI}_{\text{tot}} = \overline{\text{NDVI}}_{1996-2015} - \overline{\text{NDVI}}_{1982-1995} \quad (3)$$

用残差分析法计算人类活动引起的植被变化。在 1982—1995 年基准期,NDVI 与温度(T)和降雨(P)显著相关,因此,建立了基准期 NDVI 与气温和降水的回归关系:

$$\text{NDVI} = 0.0001P + 0.0064T + 0.1616 \quad (R^2 = 0.41, P = 0.003) \quad (4)$$

通过此回归关系,可以计算在变化期气候影响下的 NDVI 数值 $\overline{\text{NDVI}}_{\text{cal}, 1996-2015}$ 。变化期实测数据平均值 $\overline{\text{NDVI}}_{\text{obs}, 1996-2015}$ 和计算数据平均值 $\overline{\text{NDVI}}_{\text{cal}, 1996-2015}$ 的差值即为变化期时段人类活动导致的植被变化。则人类活动导致的植被变化为:

$$\Delta\text{NDVI}_{\text{ha}} = \overline{\text{NDVI}}_{\text{obs}, 1996-2015} - \overline{\text{NDVI}}_{\text{cal}, 1996-2015} \quad (5)$$

人类活动对流域 NDVI 变化的贡献率 H_p 可表示为:

$$H_p = \Delta\text{NDVI}_{\text{ha}} / \Delta\text{NDVI}_{\text{tot}} \quad (6)$$

通过残差分析得到突变前后气候变化与人类活动对 NDVI 变化的贡献率。较基准期,变化期的 NDVI 均值降低 0.014 0,其中人类活动导致 NDVI 降低 0.006 8,贡献率为 48%,说明人类活动和气候变化对植被变化的影响基本相似。

3 讨论

不同类型的 NDVI 数据会影响结果的精度。目前,由于空间分辨率高,多数研究基于 MODIS NDVI 数据集来研究植被覆盖度的时空变化,但由于数据源时序较短,难以分析长期的变化。尽管多个数据源结合起来可以构建长时间序列数据集,但由于不同传感器来源的数据间分辨率和数据质量差异较大,可能会导致误差。本研究选用的 GIMMS 3 g NDVI 是目前描述植被随时间变化应用最广泛数据集之一,也是目前为止时序最长的数据集,对后续的量化各影响因子的贡献率降低了误差,增加了可信度。

人类活动对植被覆盖度的影响有多种方式,但由于难以量化和数据不宜获取,本文把人类活动当成一个整体来计算,没有定量各影响因素的贡献率。因此,进一步量化多种人类活动对植被覆盖变化的相对贡献,还有待深入研究。

由于本研究以肯斯瓦特水文站为出口的玛纳斯

河流域为研究区域,植被变化的归因分析未见前人报道,所得结果不能直接进行对照验证,但是可以进行间接验证。流域山前平原区域随节水灌溉技术的推广,耕地面积增加,植被覆盖变好;山区林地、草地等存在相互转换,植被覆盖变化复杂,这与朱磊等^[20]的研究相一致。本文以1995年为分界点,分界点前植被受自然因素影响较大,分界点后主要受人类活动影响。陈伏龙等^[31]的研究表明,1995年以后径流主要受人类活动影响,人类活动影响径流,从而影响植被,这与本文分界点的选择相一致。

4 结论

(1)从新疆玛纳斯河流域 NDVI 的时空变化来看,34年来流域 NDVI 整体显著上升,但植被覆盖在1995年发生突变,1982—1995年呈增加趋势,而1996—2015年呈下降趋势。与1982—1995年相比,1996—2015年 NDVI 变化是气候变化和人类活动共同作用的结果。从空间上来看,流域 NDVI 呈东高西低和北高南低的分布格局,山前平原区域植被覆盖较好,海拔较高的区域植被覆盖较差。

(2)从影响流域 NDVI 变化的因子来看,1982—2015年流域 NDVI 变化具有高程差异。 $<2\ 700\text{ m}$ 植被覆盖最好, $>3\ 600\text{ m}$ 的植被覆盖最差,可见,地形因子对于 NDVI 有一定的影响。1982—2015年,降水和温度对 NDVI 有显著的影响,相关性系数分别达到 $0.577(p<0.01)$ 和 $0.927(p<0.01)$ 。1982—2015年人类活动对 NDVI 产生了重要的影响,特别是1995年以后,趋于频繁的人类活动对 NDVI 产生了较大的影响。

(3)从影响因子的贡献率来看,人类活动与气候变化对于 NDVI 变化的贡献率基本相当,分别为48%和52%。

参考文献:

- [1] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(11):1504-1514.
- [2] 方健梅,马国青,余新晓,等.青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系[J].水土保持学报,2020,34(3):105-112.
- [3] 廖凯涛,胡建民,宋月君,等.南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系[J].水土保持学报,2019,33(3):36-42,50.
- [4] 周洪建,王静爱,李睿,等.基于 SPOT_VEG NDVI 和降水序列的退耕还林(草)效果分析[J].水土保持学报,2008,22(4):70-74.
- [5] 汪小钦,王苗苗,王绍强,等.基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J].农业工程学报,2015,31(5):152-157.
- [6] 喻锋,李晓波,张丽君,等.中国生态用地研究:内涵、分

- 类与时空格局[J].生态学报,2015,35(14):4931-4943.
- [7] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- [8] 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.
- [9] 杨光华,包安明,陈曦,等.1998—2007年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析[J].冰川冻土,2009,31(3):436-445.
- [10] 刘昊霞,赵瑞东,邵鹏,等.近15a黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2018,41(1):99-108.
- [11] 阿多,赵文吉,宫兆宁,等.1981—2013华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J].生态学报,2017,37(2):576-592.
- [12] 刘斌,孙艳玲,王中良,等.华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J].自然资源学报,2015,30(1):12-23.
- [13] 李传华,赵军,师银芳,等.基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究:以石羊河流域为例[J].生态学报,2016,36(13):4034-4044.
- [14] 黄森旺,李晓松,吴炳方,等.近25年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析[J].地理学报,2012,67(5):589-598.
- [15] 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.
- [16] Li J, Peng S, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J].Agricultural and Forest Meteorology,2017,247:260-270.
- [17] 阿依努·吐逊,张青青,徐海量,等.近57a玛纳斯河流域土地利用/覆被变化[J].干旱区研究,2019,36(3):599-605.
- [18] 穆艾塔尔·赛地,丁建丽,阿不都·沙拉木,等.天山北坡山区流域融雪径流模拟研究[J].干旱区研究,2016,33(3):636-642.
- [19] 唐湘玲,吕新,李俊峰.近50年玛纳斯河流域径流变化规律研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(5):124-129.
- [20] 朱磊,张丽,王新军.近40a玛纳斯河流域典型土地利用变化特征与趋势分析[J].新疆农业科学,2016,53(10):1914-1922.
- [21] 杨发相.新疆玛纳斯河流域的土地利用与退化问题[J].新疆环境保护,2002,24(1):8-12.
- [22] Beck P S A, Goetz S J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: Ecological variability and regional differences [J]. Environmental Research Letters, 2011,6(4).DOI:10.1088/1748-3182/6/4/049501.
- [23] 轩俊伟,盛建东.2001—2017年新疆玛纳斯河流域植被 NDVI 时空变化特征[J].林业资源管理,2018(6):30-37.

(下转第210页)

- mid-latitude central Asia for the past 100 years[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(1): 42-50.
- [3] 陈宣华, 王志宏, 陈正乐, 等. 中亚萨亚克大型铜矿田矽卡岩型铜成矿作用的年代学制约[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 1981-1994.
- [4] Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(2): 285-308.
- [5] 姚俊强, 刘志辉, 杨青, 等. 近 130 年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J]. *地理学报*, 2014, 69(3): 291-302.
- [6] 姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 222-230.
- [7] 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 79-93.
- [8] 李均力, 方晖, 包安明, 等. 近期亚洲中部高山地区湖泊变化的时空分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(10): 1839-1846.
- [9] 白洁, 陈曦, 李均力, 等. 1975—2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(1): 80-88.
- [10] 秦伯强. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析[J]. *湖泊科学*, 1999, 11(1): 11-19.
- [11] 李均力, 包安明, 胡汝骥, 等. 亚洲中部干旱区湖泊的地域分异性研究[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 941-950.
- [12] 王国亚, 沈永平, 王宁练, 等. 气候变化和人类活动对伊塞克湖水位变化的影响及其演化趋势[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(6): 1097-1105.
- [13] 王国亚, 沈永平, 秦大河. 1860—2005 年伊塞克湖水位波动与区域气候水文变化的关系[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(6): 854-860.
- [14] Salamat A U, Abuduwaili J, Shaidyldaeva N. Impact of climate change on water level fluctuation of Issyk-Kul Lake[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8: 5361-5371.
- [15] Alymkulova B, Abuduwaili J, Issanova G, et al. Consideration of water uses for its sustainable management, the case of Issyk-Kul Lake, Kyrgyzstan[J]. *Water*, 2016, 8(7): 298.
- [16] Alifujiang Y, Abuduwaili J, Ma L, et al. System dynamics modeling of water level variations of Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan[J]. *Water*, 2017, 9: 989.
- [17] 陈曦, 罗格平, 夏军, 等. 新疆天山北坡气候变化的生态响应研究[J]. *中国科学(地球科学): 中国科学*, 2004, 34(12): 1166-1175.
- [18] Birsan M V, Molnar P, Burlando P, et al. Streamflow trends in Switzerland[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 314(1/4): 312-329.
- [19] Kahya E, Kalayci S. Trend analysis of streamflow in Turkey[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 289(1/4): 128-144.
- [20] Aziz O I A, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1/4): 282-294.
- [21] 马龙, 刘廷玺, 马丽, 等. 气候变化和人类活动对辽河干上游径流变化的贡献[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 470-479.
- [22] 冯畅, 毛德华, 周慧, 等. 气候与土地利用变化对涟水流域径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 395-406.
- [23] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(2): 488-497.
- [24] Zhang R, Yuan Y, Gou X, et al. Stream flow variability for the Aksu River on the southern slopes of the Tien Shan inferred from tree ring records[J]. *Quaternary Research*, 2016, 85(3): 371-379.
- [25] 胡彩虹, 王纪军, 柴晓玲, 等. 气候变化对黄河流域径流变化及其可能影响研究进展[J]. *气象与环境科学*, 2013, 36(2): 57-65.
- [26] 徐浩杰, 杨太保, 柴绍豪. 1961—2010 年讨赖河山区径流变化特征及其驱动因素[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 878-884.
- [27] 陈曦. 吉尔吉斯斯坦自然地理[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- (上接第 197 页)
- [24] 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.
- [25] 李慧, 雷晓云, 包安明, 等. 基于 SWAT 模型的山区日径流模拟在玛纳斯河流域的应用[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(5): 686-690.
- [26] 王建邦, 赵军, 李传华, 等. 2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 504-519.
- [27] Baartman J E M, Temme A J a M, Saco P M. The effect of landform variation on vegetation patterning and related sediment dynamics [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(10): 2121-2135.
- [28] 位宏, 徐丽萍, 李晓蕾, 等. 玛纳斯河流域植被覆盖度随地形因子的变化特征[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(12): 814-824.
- [29] 李建军, 罗格平, 丁建丽, 等. 近 50 a 人工灌排技术进步对玛纳斯河流域耕地格局变化的影响[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 570-582.
- [30] 徐兴奎, 陈红, 张凤. 中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 41-47.
- [31] 陈伏龙, 王怡璇, 吴泽斌, 等. 气候变化和人类活动对干旱区内陆河径流量的影响: 以新疆玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站为例[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(4): 692-697.