

DOI: 10.5846/stxb201909021822

王塞,王思诗,樊风雷.基于时间序列分割算法的雅鲁藏布江流域 NDVI (1985—2018) 变化模式研究.生态学报, 2020, 40(19): 6863-6871.

Wang S, Wang S S, Fan F L. Change patterns of NDVI (1985—2018) in the Yarlung Zangbo River Basin of China based on time series segmentation algorithm. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6863-6871.

# 基于时间序列分割算法的雅鲁藏布江流域 NDVI (1985—2018) 变化模式研究

王 塞<sup>1</sup>, 王思诗<sup>2,3</sup>, 樊风雷<sup>1,2,\*</sup>

1 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

2 西藏大学高原地表环境遥感监测联合实验室, 拉萨 850000

3 天津大学环境科学与工程技术学院, 天津 300350

**摘要:** 归一化植被指数 NDVI 可有效表征植被生长信息, 其中, 长时间序列 NDVI 在分析全球和局部植被变化扮演重要角色。利用 Google Earth Engine 提供的全系列 Landsat 卫星数据, 应用 LandTrendr 时间序列分割算法, 讨论了雅鲁藏布江区域植被覆盖变化特征, 并对植被变化模式进行判别。研究表明: 1985—2018 年间雅鲁藏布江流域, (1) NDVI 总体呈现上升趋势, 仅在局部区域出现下降, 自上游至下游 NDVI 变化强度逐渐增加, 1986—1990 年 NDVI 变化最为剧烈, 1991—2000 年次之, 2001—2017 年 NDVI 变化强度逐渐减弱; (2) NDVI 干扰变化 95% 集中在 0—0.42 之间, 平均干扰时间 4.96 年; NDVI 恢复变化 95% 集中在 0—0.4 之间, 平均恢复时间 12.55 年; (3) NDVI 干扰模式主要以持续下降为主, 但 2000 年前的下降速率小于 2000 年后的下降速率; NDVI 恢复模式以持续上升为主, 但 2000 年前的上升速率大于 2000 年后的上升速率。

**关键词:** LandTrendr; NDVI; NDVI 变化模式; Google Earth Engine; 雅鲁藏布江流域

## Change patterns of NDVI (1985—2018) in the Yarlung Zangbo River Basin of China based on time series segmentation algorithm

WANG Sai<sup>1</sup>, WANG Sishi<sup>2,3</sup>, FAN Fenglei<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 Joint Laboratory of Plateau Surface Remote Sensing, Tibet University, Lhasa 850000, China

3 School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

**Abstract:** Information on vegetation growth can be effectively characterized by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), in which the long-term NDVI plays a significant role in analyzing global and local vegetation change patterns. The major purpose of this study is to elucidate the characteristics of vegetation coverage changes in the Yarlung Zangbo River Basin, and detect the vegetation pattern changes with a series of Landsat satellite data from Google Earth Engine, applying the LandTrendr time series segmentation algorithm. The results indicated that from 1985 to 2018, (1) with only few regional declines, the overall NDVI showed an upward trend. The intensity of NDVI change increases gradually from upstream to downstream, with the most significant change between 1986 to 1990 and less significant change between 2001 to 2017. (2) 95% of the NDVI disturbance ranged between 0 and 0.42 and the average duration of the disturbance was 4.96 years. 95% of the NDVI recovery changed between 0 and 0.4 and the average duration of the recovery was 12.55 years. (3) The disturbance event had a declined NDVI and the decline rate before 2000 was slower than the decline rate after 2000.

**基金项目:** 中央支持地方高校发展专项资金(西藏大学)-资源环境与地理信息系统学科建设项目(GX2016341); 西藏自治区高校青年教师创新支持计划项目(QCZ2016-07)

收稿日期: 2019-09-02; 网络出版日期: 2020-07-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanfenglei@gig.ac.cn

The recovery event had an increased NDVI and the increase rate before 2000 was faster than the increase rate after 2000.

**Key Words:** LandTrendr; NDVI; NDVI change patterns; Google Earth Engine; Yarlung Zangbo River Basin of China

植被是联结水分、大气和土壤的重要纽带,也是评价生物多样性和生态服务的重要指标,在全球碳平衡和气候变化中扮演重要角色<sup>[1-3]</sup>。雅鲁藏布江流域生态环境脆弱,对气候变化和人类活动的响应显著<sup>[4]</sup>。近 30 年来,流域所属的青藏高原年平均气温每 10 年上升 0.7℃,升温趋势总体呈现由南向北逐渐降低,降水量受复杂地形影响在不同区域差异显著,流域气候暖干化趋势明显。由此,干旱程度加剧导致的植被稀疏化对流域脆弱的生态系统产生不利影响。此外,土地过度开垦、过度放牧和城市化进程等人类活动也加剧了流域植被退化<sup>[5-7]</sup>。因此,雅鲁藏布江流域的植被变化及其影响因素倍受学界关注。目前研究的方法与途径主要是,以遥感影像为数据源,通过对不同类型的植被覆盖指标与气温、降水等气候因子进行耦合测度,进而判别该流域内生态环境状况<sup>[6,8-10]</sup>。开展高原高寒植被物候期变化研究,讨论气候变化对植被生长的影响与作用规律<sup>[11]</sup>。然而,对雅鲁藏布江流域植被变化模式研究鲜有相关报道。

随着遥感技术的发展,中分辨率遥感数据已经成为在国家和大陆尺度上进行环境监测的重要数据源<sup>[12]</sup>。基于中分辨率长时间序列遥感卫星影像是大范围区域进行长期监测,分析其土地利用变化趋势,并对植被变化模式进行判别,已成为评价区域植被变化的重要手段<sup>[13-14]</sup>。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)在植被变化研究中得到广泛应用。NDVI 反映植被冠层在近红外与红光波段的吸收和散射作用,与植被的光合作用与生理生化反应密切相关,因此既能监测植被对全球气候变化的响应,又能识别城市扩张对植被的影响<sup>[15]</sup>。中分辨率长时间序列 NDVI 数据集成以上优势,已逐渐成为研究植被变化重要的数据源。NDVI 时间序列变化监测算法按原理可分为阈值、差异、分割、轨迹分类、统计和回归六类<sup>[16]</sup>。Landsat 数据源的时间序列分割算法(LandTrendr)在森林植被覆盖变化检测与生长模式判别等研究方面取得了丰硕的成果<sup>[13,17-18]</sup>。Google Earth Engine(GEE)是处理和存储地理大数据的云计算平台,已在作物生长监测、土地覆盖变化和灾害预警等领域成功应用<sup>[19]</sup>。GEE 平台实现的 LandTrendr 算法(<https://emapr.github.io/LT-GEE>)已经成为大区域长时间序列变化监测的有利工具<sup>[20]</sup>。

综上,本研究以 GEE 平台共享的 Landsat TM/ETM+/OLI 影像为数据源,利用 LandTrendr 算法提取雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化特征。在系统分析 1985—2018 年雅鲁藏布江流域 NDVI 变化特征基础上,按 NDVI 不同的变化强度和持续时间进行分类,进而对流域内 NDVI 变化模式进行判别,并进一步探查不同变化模式产生的可能原因,以期对雅鲁藏布江流域生态环境保护提供决策支持。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

雅鲁藏布江流域位于北纬 27°50′—31°15′,东经 81°57′—97°5′,发源于喜马拉雅山北麓的杰玛央宗冰川,流经里孜、派乡和巴昔卡,最后流入印度,流域总面积 25.8 万 km<sup>2</sup>(图 1)。流域内自然环境复杂,海拔范围在 149—7172m 之间,多年平均气温 4.7—8.3℃,年降水量 251.7—580.0mm<sup>[6]</sup>。复杂的自然环境造就了多样的植被覆盖类型,上游段植被覆盖以高山草甸和高山草原为主,中游段主要为灌木草原,下游段以乔木和次生植被为主要类型<sup>[21]</sup>。雅鲁藏布江流域因其独特的自然环境,造就了该区域多样的植被覆盖类型,因其脆弱和敏感的自然环境而备受研究者关注。

### 1.2 数据与处理

本研究中使用的 NDVI 时间序列数据由 Google Earth Engine 地理云计算平台提供的 1985—2018 年 Landsat TM/ETM+/OLI 影像生成时间序列堆栈计算生成,其余数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心<sup>[22]</sup>。其中 Landsat 5 TM 影像共 1737 景,Landsat 7 ETM+影像共 1877 景,Landsat 8 OLI 影像共 1077 景,并对

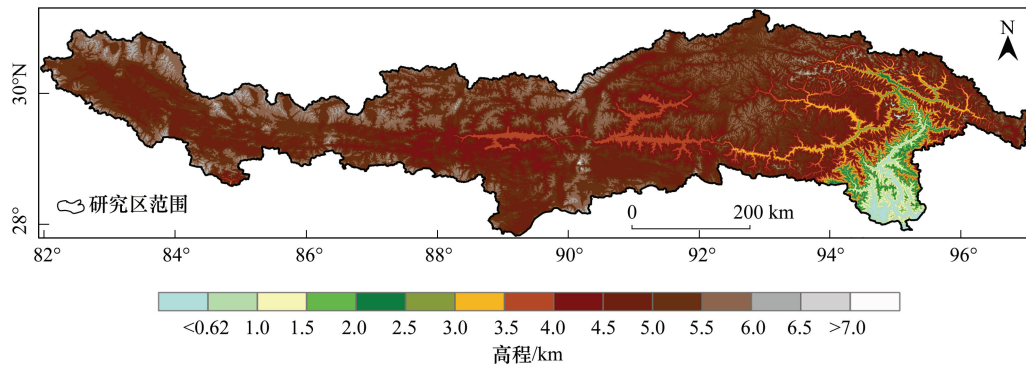


图1 研究区示意

Fig.1 Map of study area

数据堆栈中数据质量较差区域(云,云阴影和雪)进行掩膜。由于 Landsat 7 ETM+相比 Landsat 8 OLI 数据具有较低的辐射分辨率,本研究利用反射率归一化最小化传感器之间的差异<sup>[23]</sup>。为获取以年为周期的 NDVI 时间序列数据,将研究区内同一年份所有 NDVI 数据进行年最大值合成,以削弱大气气溶胶和太阳高度角等因素的影响。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 NDVI 时间序列分割算法

时间序列分割算法(LandTrendr)对以年为间隔的 NDVI 时间序列进行分割、拟合和平滑,获取单个像元 NDVI 值在整个研究时间段内的变化特征<sup>[17]</sup>(图 2)。该分割算法主要分为如下 4 个步骤:

(1)数据预处理。去除 NDVI 时间序列轨迹异常值,设定阈值对轨迹中的突变值进行筛选;去除超过 NDVI 正常变化趋势的异常值,并对缺省值进行插值填补。为削弱异常值对变化趋势的影响,增加信噪比,本研究采用 3×3 滑动窗口均值进行异常值剔除。

(2)时间序列分割。识别轨迹变化剧烈位置作为潜在分割点,并对潜在分割点进行判断。对比潜在分割点 NDVI 值,剔除由云、云阴影和雪等因素造成的伪分割点,并通过角度阈值剔除小于阈值的分割点。

(3)分割点拟合。对比第一和第二分割点间连线和拟合直线与原始 NDVI 轨迹间的均方误差(Mean Square Error, MSE),选取误差最小的拟合方法作为初始连接线,并在保证曲线连续的情况下按照 MSE 最小原则对 NDVI 时间序列进行拟合。

(4)拟合模型简化与遴选。通过迭代最大分割时间序列,利用定义的恢复率和置信度对模型进行筛选。考虑到植被覆盖恢复期应长于 1 年,剔除恢复率过高的分割段,使拟合模型具有更好的分割效果

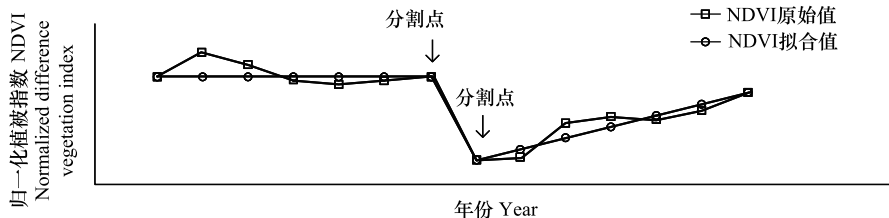


图2 LandTrendr 分割算法示意

Fig.2 Conceptual diagram of LandTrendr segmentation algorithm

本研究基于 GEE 平台实现的 LandTrendr 算法对 NDVI 时间序列进行分割与拟合<sup>[24]</sup>。分割算法需要设置适用于研究区的分割和拟合参数(表 1),通过多次参数调整以适应该研究区的 NDVI 变化特征。

表 1 时间序列分割模型参数

Table 1 Time series segmentation model parameters

类型 Type	参数 Parameters	值 Value	类型 Type	参数 Parameters	值 Value
分割 Segmentation	光谱指数	NDVI	制图 Mapping	顶点阈值	0.9
	最大分割数量	6		最优模型比例	0.75
	最大拟合 $p$ 值	0.05		恢复期长于一年	True
	恢复阈值	1		最小制图单位	6

### 1.3.2 NDVI 变化概念模型

全球气候变化和人类活动对雅鲁藏布江流域脆弱的生态环境产生显著影响。温度和水在整个生长季内对植被生长产生显著影响,水分控制作用是影响青藏高原植被生长的最主要因素<sup>[25]</sup>,城市化过程加剧和过度放牧等人类活动促使该区域 NDVI 下降,一定程度的气温和降水量增加以及退耕还林还草等生态保护工程都对 NDVI 上升产生促进作用<sup>[26]</sup>。基于前人成果,本研究构建雅鲁藏布江流域 NDVI 变化概念模型(图 3),即,全球暖湿化和生物质累积使年时间分辨率 NDVI 曲线随植被生长缓慢上升,人类活动加剧和自然环境恶化导致 NDVI 曲线下降,生态保护工程或气候暖湿化等自然环境改善又使 NDVI 曲线呈现上升趋势,生态保护工程效果减弱或者保护区再次被破坏都将导致 NDVI 曲线的再次下降。影响 NDVI 曲线趋势的因素包括植被物候特征、人类活动和遥感影像采集的时间和数量,因此本研究将 NDVI 曲线波动最剧烈年份作为变化时间点,基于持续时间和变化强度对 NDVI 变化模式进行判别。

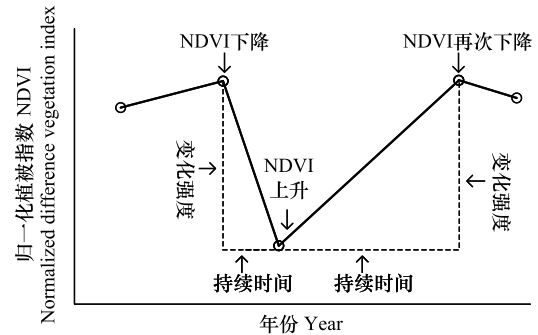


图 3 NDVI 变化概念模型

Fig.3 Conceptual model for NDVI change

## 2 结果

### 2.1 干扰与恢复时空分布特征

#### 2.1.1 空间分布

利用时间序列分割算法对雅鲁藏布江流域 1985—2018 年 NDVI 时间序列数据进行变化特征提取,得出 NDVI 干扰与恢复空间分布情况(图 4)。结果显示,自流域上游至下游发生干扰年份逐渐推迟的趋势明显,其空间异质性与地形特征存在明显的相关性。流域上游(贡嘎县以上)的广大区域 NDVI 干扰集中发生于 2000 年左右。流域中上游的贡嘎县、昂仁县和日喀则市 NDVI 干扰集中发生在 1986—1990 年间。中游当雄县等海拔较高区域 NDVI 干扰主要发生于在 2000 年之前,而拉萨河谷等海拔较低区域 NDVI 干扰主要发生在 2010 年后。流域下游工布江达县、米林县和林芝县海拔较低区域 NDVI 干扰年份发生在 2000 年左右,而海拔较高区域干扰多发生在 2010 年之后。自流域上游至下游恢复发生年份具有明显提前趋势,其与海拔、地形特征关联度较高。流域中上游的广大区域 NDVI 恢复年份发生在 2010 年之后。流域下游的米林县和林芝县 NDVI 恢复发生年份存在明显的海拔差异,高海拔区域恢复年份发生在 2010 年之后,低海拔区域恢复发生在 2000 年左右,但念青唐古拉山及唐古拉山以南的部分高海拔区域恢复发生在 1990 年之前,不同于以上规律。

#### 2.1.2 时间分布

NDVI 干扰与恢复面积随时间变化特征能表征植被覆盖变化活动的强弱,按 NDVI 时序变化趋势,流域内 18.2 万  $\text{km}^2$  划分为干扰类别,24.3 万  $\text{km}^2$  划分为恢复类别(图 5)。流域不同时间段植被覆盖变化强弱不同。1986—1990 年,干扰和恢复面积皆呈先上升后下降趋势,干扰区域占流域总面积 20.97%,恢复区域占总面积



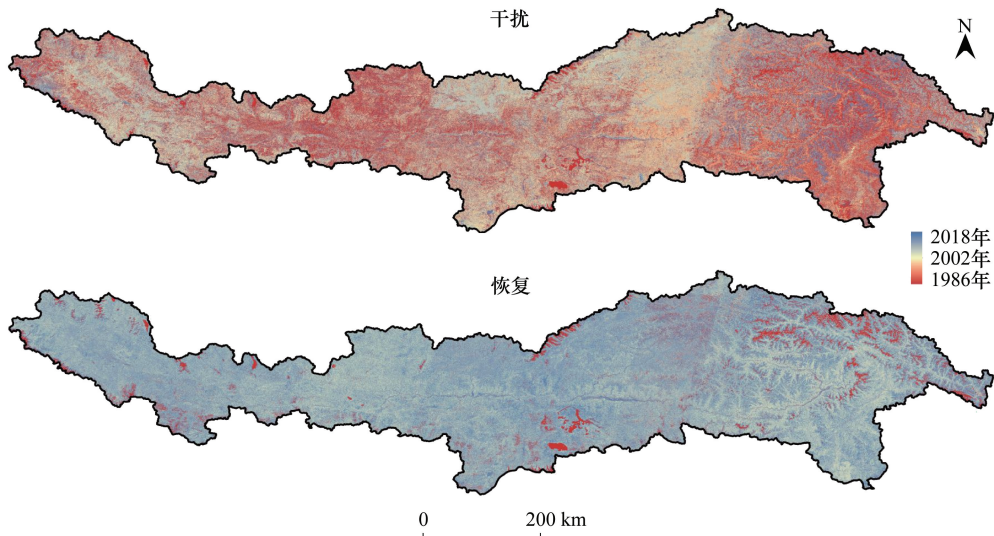


图 4 干扰与恢复空间格局

Fig.4 Spatial pattern of disturbance and recovery

43.49%,恢复面积大于干扰二者相差 22.52%,流域植被覆盖总体呈恢复态势。1991—2000 年,干扰和恢复面积也呈现先上升后下降趋势,分别占总面积 30.54%和 27.67%,干扰面积略大于恢复,二者相差 2.87%,研究区植被覆盖总体呈下降趋势。2001—2017 年期间,干扰和恢复都呈现波动变化趋势,变化比例分别占流域总面积 19.03%和 23.02%,恢复面积略大于干扰,二者相差 3.99%,流域植被覆盖度总体呈现恢复态势。综观 1986—2017 年间,研究区 NDVI 干扰和恢复植被变化面积总体呈先升后降趋势,恢复区域面积大于干扰区域面积,二者相差 23.64%。

### 2.2 干扰和恢复持续时间与强度

#### 2.2.1 持续时间

1985—2018 年间雅鲁藏布江流域 NDVI 干扰和恢复持续时间具有明显的时间序列非平稳性,干扰和恢复持续时间皆呈现先下降后上升的趋势,分别集中在 1—10 年和 28—32 年,其中二者下降持续期(1—10 年)干扰略小于恢复,而上升持续期(28—32 年)干扰明显大于恢复(图 6)。NDVI 干扰持续时间 85%少于 10 年,干扰平均持续时间 4.96 年,其中 49.08%的干扰持续时间少于等于 1 年。流域内 NDVI 干扰持续时间超过 20 年的区域主要集中在拉萨城区、墨竹工卡北部和仲巴县以南的部分区域(图 7)。NDVI 恢复持续时间 50%少于 6 年,平均恢复时间 12.55 年。对比地形数据可见,NDVI 恢复时间超过 20 年的区域主要分布在河谷等海拔相对降低的区域(图 7)。

#### 2.2.2 强度

NDVI 干扰和恢复强度主要集中在 0—0.75 之间,恢复强度大于干扰强度(图 6)。干扰活动剧烈区域主要集中在拉萨城区、林芝及其北部区域和里加(图 7)。NDVI 干扰强度 95%都集中在 0—0.42 之间,平均下降 0.14。NDVI 干扰强度接近 2 时表明由植被转为水体。NDVI 恢复强度 95%集中在 0—0.4 之间,平均上升 0.13,流域上游和中游区域 NDVI 上升强度较低,NDVI 上升剧烈区域主要集中在里加和林芝以东区域(图 7)。

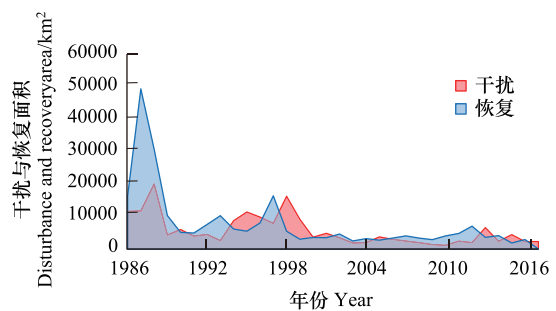


图 5 1985—2018 年干扰与恢复面积年际变化

Fig.5 Annual variation of disturbance and recovery area from 1985 to 2018

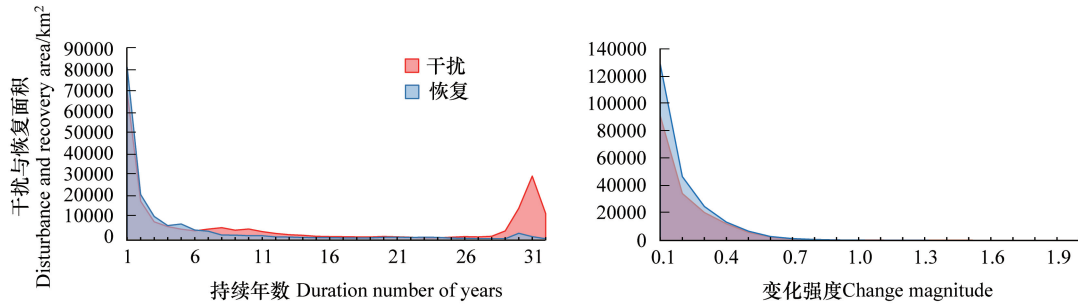


图 6 干扰与恢复面积随持续时间和强度变化

Fig.6 The duration and magnitude of disturbance and recovery area

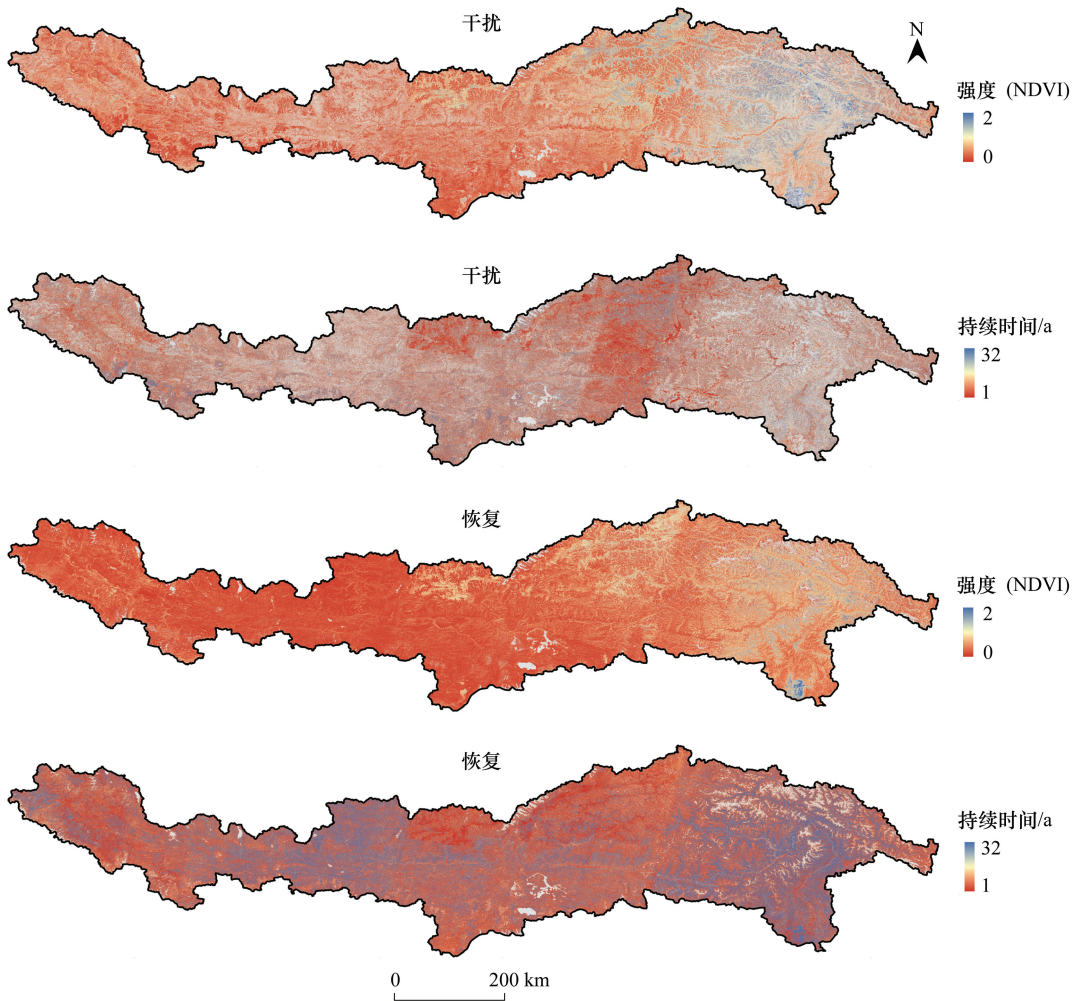


图 7 干扰与恢复持续时间和强度空间格局

Fig.7 Spatial pattern of duration and magnitude of disturbance and recovery

2.3 干扰与恢复变化模式

1985—2018 年 NDVI 时间序列为判别 NDVI 变化模式提供基础,将 1987、2000 和 2016 三年 NDVI 拟合数据进行假彩色合成,进而判别 NDVI 的不同变化模式。流域内 NDVI 变化主要分为上升和下降两种趋势,NDVI 变化模式空间分布如图 8 所示,NDVI 上升在整个流域内都有分布,而 NDVI 下降主要集中在河流谷地

等海拔较低的区域,共划分为 12 种典型变化模式(图 8),其中具有明显变化模式的面积占流域总面积 87.23%。

流域内 NDVI 总体呈现上升趋势,其中上升模式 E 和下降模式 E 所占面积比例最高(图 8)。下降模式 E 具有 NDVI 在 1987—2000 年间逐渐下降,2000—2016 年 NDVI 快速下降的变化模式,主要集中在拉萨河和米林宽谷;下降模式 F 次之,表征 NDVI 在研究时间段内降低减速,主要分布在南木林和墨竹工卡等区域。上升模式 E 为流域内主要的 NDVI 增加变化模式,NDVI 在 1987—2000 年快速上升,2000—2016 年缓慢上升,主要集中在拉萨市北部和林芝县以东海拔较高的山区;先上升后下降的上升模式 A 主要分布在林芝和日喀则以东区域。

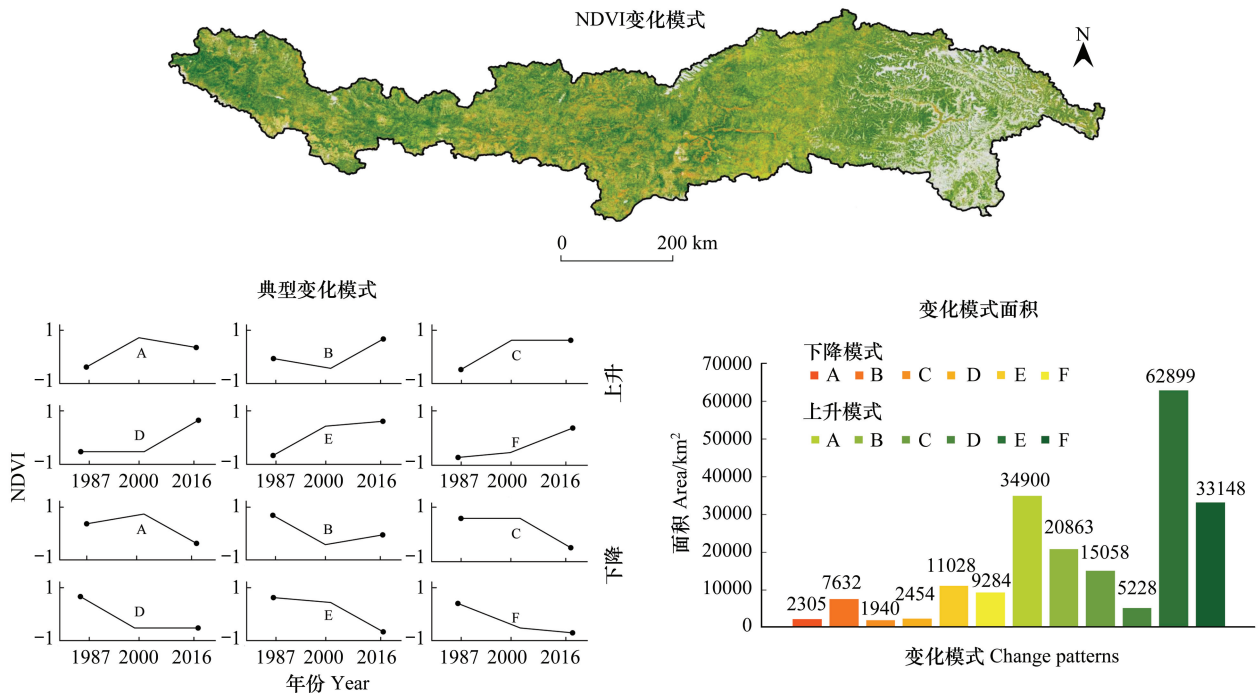


图 8 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化模式

Fig.8 Different patterns of NDVI change in the Yarlung Zangbo River Basin

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

本研究选择 1985—2018 年经过地形校正的 Landsat TM/ETM+/OLI Level1 数据,通过掩膜剔除云、云阴影和雪的区域,计算时间序列数据集的 NDVI 值,将一年内所有的 NDVI 数据进行最大值合成,相比较月或更短时间间隔的 NDVI 时间序列数据,该方法既能突出植被覆盖年际变化特征,又能削弱云、大气和太阳高度角等因素的干扰<sup>[13]</sup>。时间序列分割算法(LandTrendr)对 NDVI 时间序列进行分割和拟合,提取 NDVI 变化特征,广泛应用于植被覆盖变化及其变化原因分析<sup>[27]</sup>。相比于基于统计特征的时间序列变化检测方法,时间序列分割方法能提取子序列的时间变化特征,进而分析时间序列的变化模式<sup>[28]</sup>。

雅鲁藏布江流域植被对全球气候变化的响应显著,气候变暖和降水量增加导致植被覆盖增加,NDVI 总体呈上升趋势,但受种间关系和降水时空分布的不均匀性,以及人类活动的影响,不同区域具有不同的变化趋势,这与已有学者研究结论相一致<sup>[29-30]</sup>。对比图 4 与图 8,念青唐古拉山及唐古拉山以南的部分高海拔区域恢复在 1990 年前的区域 NDVI 变化模式不显著,考虑到 NDVI 变化的复杂性,尚需进一步研究。

20 世纪 80 和 90 年代,受全球气候变化的影响,流域上游和中游地区高原高寒植被物候期延长趋势明



显,净初级生产力与得到显著提高<sup>[31]</sup>,与研究结果上游和中游 NDVI 恢复持续时间较短且恢复持续强度较低相对应。上游和中游部分海拔较高区域 NDVI 干扰活动剧烈,可能与高海拔地区降水和长波辐射等因素对 NDVI 持续上升的限制因素有关<sup>[2]</sup>。下游森林覆盖区受采伐和保护双重作用,致使当地植被覆盖快速变化,如 20 世纪 90 年代前的森林大规模采伐、1998 年后天然林资源保护工程实施<sup>[32]</sup>,森林破坏面积下降,恢复面积缓慢增加,流域内恢复面积大于干扰破坏面积,NDVI 干扰和恢复都经历了剧烈变化,但 NDVI 总体呈现增加趋<sup>[9]</sup>,与本研究恢复和干扰在 2000 年前变化剧烈,而 2001 年后变化活动逐渐减弱的结果相吻合。影响流域内植被恢复强度受不同植被覆盖类型存在差异,流域上至中下游存在明显的恢复强度差异。本文研究结果表明,干扰和恢复持续时间都出现了下降后上升的趋势,干扰和恢复持续时间主要集中在 10 年内的较短时期,分布集中在流域的中上游,这与近 20 年来青藏高原暖湿化,草地生态系统恢复期较短相对应,下游区域因森林经历大规模采伐,森林覆盖需较长的时间才能恢复。

NDVI 增加模式以先加速上升后减速为主,主要位于雅鲁藏布江流域下游植被覆盖较好的区域,植被覆盖增加受气候和人类活动的共同影响,NDVI 增加速率降低可能与降水的空间分布与树种组成结构变化有关<sup>[30]</sup>。随着生态保护工程的启动 30 多年<sup>[33]</sup>,老年林所占的比例有所增加 NDVI 增加趋势逐渐减弱。NDVI 下降速率逐渐增加主要集中在人类活动较多的宽谷地区,放牧和城市化过程加剧导致的植被破坏,NDVI 下降模式在人口密集的海拔较低区域出现空间聚集<sup>[34]</sup>,这与已有的研究结论相一致。考虑到影响雅鲁藏布江流域植被变化的因素众多,不同影响因素在不同的区域时空分布差异巨大,因此在分析 NDVI 变化模式特征及其时空分异时,还应分别对不同影响因素间相互作用模式进行耦合研究。

### 3.2 结论

本研究基于 1985—2018 年 Landsat 数据合成的年最大 NDVI 时间序列为数据源,通过 Google Earth Engine 平台实现的 LandTrendr 时间序列分割方法对 NDVI 时空变化特征进行提取,进而描述研究区内 NDVI 变化模式,主要结论如下:

(1) 雅鲁藏布江流域植被时空变化显著,总体呈现上升趋势,仅在局部区域出现下降现象,自上游至下游 NDVI 变化强度逐渐增加。1985—1990 年恢复面积大于干扰,NDVI 变化剧烈;1990—2000 年干扰和恢复变化面积差异不大;2000—2018 恢复面积略大于干扰,NDVI 变化活动逐渐减弱。

(2) 1985—2018 年间流域内 NDVI 干扰 95%集中在 0—0.42 之间,平均下降 0.14,平均干扰时间 4.96 年。NDVI 恢复 95%集中在 0—0.4 之间,平均上升 0.13,平均恢复时间 12.55 年。NDVI 干扰和恢复在强度上相近,但平均持续时间和变化面积差异显著,因此在近 30 年内 NDVI 总体呈现上升趋势,但上升趋势逐渐减弱。

(3) 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化模式以上升为主,流域内 NDVI 主要的干扰变化模式为先缓慢下降后快速下降;NDVI 恢复模式为先快速上升后缓慢上升。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 傅伯杰,于丹丹,吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.
- [ 2 ] Ye Z X, Cheng W M, Zhao Z Q, Guo J Y, Ding H, Wang N. Interannual and seasonal vegetation changes and influencing factors in the extra-high mountainous areas of southern Tibet. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1392.
- [ 3 ] 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, 2(3): 204-210.
- [ 4 ] 樊启顺,沙占江,曹广超,曹生奎. 气候变化对青藏高原生态环境的影响评价. 盐湖研究, 2005, 13(1): 12-18.
- [ 5 ] 李森,杨萍,高尚玉,陈怀顺,姚发芬. 近 10 年西藏高原土地沙漠化动态变化与发展态势. 地球科学进展, 2004, 19(1): 63-70.
- [ 6 ] 刘慧,李晓英,肖建华,姚正毅. 1961—2015 年雅鲁藏布江流域风蚀气候侵蚀力变化. 地理科学, 2019, 39(4): 688-695.
- [ 7 ] 于惠. 青藏高原草地变化及其对气候的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [ 8 ] 李海东,沈渭寿,蔡博峰,纪迪,张晓勇. 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与风沙化土地演变的耦合关系. 生态学报, 2013, 33(24): 7729-7738.
- [ 9 ] 吕洋,董国涛,杨胜天,周秋文,蔡明勇. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系. 资源科学, 2014, 36(3): 603-611.



- [10] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.
- [11] 黄文洁, 曾桐瑶, 黄晓东. 青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征. *草业科学*, 2019, 36(4): 1032-1043.
- [12] Herrmann S M. Human-Environment Relationships in Drylands-with a Focus on the West African Sahel. Arizona: The University of Arizona.
- [13] Zhu L H, Liu X N, Wu L, Tang Y B, Meng Y Y. Long-term monitoring of cropland change near Dongting Lake, China, using the LandTrendr algorithm with Landsat imagery. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1234.
- [14] Yang Y J, Erskine P D, Lechner A M, Mulligan D, Zhang S L, Wang Z Y. Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 353-362.
- [15] 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.
- [16] Zhu Z. Change detection using Landsat time series: a review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 370-384.
- [17] Kennedy R E, Yang Z Q, Cohen W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2897-2910.
- [18] 沈文娟, 李明诗, 黄成全. 长时间序列多源遥感数据的森林干扰监测算法研究进展. *遥感学报*, 2018, 22(6): 1005-1022.
- [19] Kumar L, Mutanga O. Google earth engine applications since inception: usage, trends, and potential. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1509.
- [20] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [21] 单菊萍. 基于 DEM 的雅鲁藏布江河流地貌特征的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [22] 徐新良. 基于 DEM 提取的中国流域、河网数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统. <http://www.resdc.cn>. (2019-09-02).
- [23] Roy D P, Kovalsky V, Zhang H K, Vermote E F, Yan L, Kumar S S, Egorov A. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 57-70.
- [24] Kennedy R E, Yang Z, Gorelick N, Braaten J, Cavalcante L, Cohen W B, Healey S. Implementation of the LandTrendr algorithm on google earth engine. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 691.
- [25] 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(03): 128-137.
- [26] 刘正佳, 邵全琴, 王丝丝. 21 世纪以来青藏高原高寒草地的变化特征及其对气候的响应. *干旱区地理*, 2015, 38(02): 275-282.
- [27] Kennedy R E, Yang Z Q, Cohen W B, Pfaff E, Braaten J, Nelson P. Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 117-133.
- [28] 赵忠明, 孟瑜, 岳安志, 黄青青, 孔赞珑, 袁媛, 刘晓奕, 林蕾, 张蒙蒙. 遥感时间序列影像变化检测研究进展. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1110-1125.
- [29] 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. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [30] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 梁尔源, 汪诗平, 朱军涛, 牛犇. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [31] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189-190: 11-18.
- [32] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天祥, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高青竹, 张德铨, 欧阳华. 青藏高原生态变化. *科学通报*, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [33] 王青霞, 吕世华, 鲍艳, 马迪, 李瑞青. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析. *高原气象*, 2014, 33(2): 301-312.
- [34] 张德铨, 刘林山, 王兆锋, 摆万奇, 丁明军, 王秀红, 阎建忠, 许尔琪, 吴雪, 张炳华, 刘琼欢, 赵志龙, 刘峰贵, 郑度. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征. *科学通报*, 2019, 64(27): 2865-2875.