

doi: 10.6046/zrzyyg.2021233

引用格式: 曾晖,任华忠,朱金顺,等. 叙利亚战争对植被的影响[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):121-128. (Zeng H, Ren H Z, Zhu J S, et al. Impacts of the Syrian Civil War on vegetation[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 121-128.)

# 叙利亚战争对植被的影响

曾晖<sup>1</sup>, 任华忠<sup>1,2</sup>, 朱金顺<sup>1</sup>, 郭金鑫<sup>1</sup>, 叶昕<sup>1</sup>, 滕沅建<sup>1</sup>, 聂婧<sup>1</sup>, 秦其明<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室(北京大学), 北京 100871)

**摘要:** 战争不仅会造成大量的人员伤亡和经济损失,还可能对环境带来不利影响。利用2001—2018年长时间序列卫星遥感数据探究叙利亚地区植被生长对战争所引起环境变化的响应,结果表明,叙利亚战争冲突最为激烈区域的植被指数存在较为明显的下降趋势,从战争开始的2011—2015年,土地类型变化并不显著,但在2015—2018年之间,土地类型发生了较大的变化。18 a间,草地面积减少了10.08%,农作物种植区面积减少21.87%。研究进一步探索了人为因素对植被状态的影响,发现东部幼发拉底河两岸及延伸区域受人为因素影响最为显著。研究揭示了战争给植被生长带来的负面影响,对于军事冲突地区粮食安全等方面研究与战略制定具有参考意义。

**关键词:** NDVI; 时间序列; 植被; 叙利亚战争

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)03-0121-08

## 0 引言

全球环境的变化日益威胁着人类及其社会的持续发展,因此越来越受到人们的重视。在全球环境变化中,植被扮演着陆地生态系统中最重要角色。由于植被具有明显的年际变化和季节变化特点,并且是联结土壤、大气和水分的自然“纽带”,在一定程度上能代表土地覆盖的变化,所以在全球变化研究中充当着“指示器”的作用<sup>[1]</sup>。植被指数是用来度量地表植被生长情况、覆盖情况和种类情况等植被状态的间接指标。其中归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)在植被指数中占有重要的位置<sup>[2]</sup>,已被广泛用于区域和全球的植被状态研究<sup>[3]</sup>。

区域性战争可对地区的地表类型和社会经济造成重大伤害,并严重影响地区的作物、草地和森林等地表植被覆盖的生长状况。以往对地表植被的长时间变化的研究主要集中在自然状态下,而对于战争这种激烈的人类活动状态,还需要考虑在因自然因素导致的变化中加入人为因素影响因子。事实上,这个方向已得到国内外同行们的关注<sup>[4-5]</sup>。位于中

东地区的叙利亚,自2011年内战爆发以来,造成了严重的人道主义危机,生态环境也面临着巨大的挑战。那么,叙利亚战争对当地植被覆盖是否存在影响以及存在多大程度的影响对于研究战争区域的生态环境十分重要,但是至今学术界并未对以上问题进行报道。为了解决这一问题,本文将以长时间序列的植被指数、地表覆盖和气象数据为基础,通过对叙利亚地区植被变化时间序列进行分析,探究局部战争对植被生长状况和生态环境造成的影响,并为战后重建提供相应的前期参考。

## 1 研究区概况和数据源

研究区叙利亚(E35°34'~42°22', N32°17'~37°19')位于亚洲西部,地中海东岸,北与土耳其接壤,东同伊拉克交界,南与约旦毗连,西南与黎巴嫩、以色列为邻。叙利亚领土大部分是西北向东南倾斜的高原,西北部地中海沿岸为平原地区,东南部为大片的沙漠地区,幼发拉底河贯穿叙利亚东部国境。叙利亚沿海和北部地区属地中海气候,夏季炎热干燥,冬季温和多雨,雨热不同期,年均降雨量在600~800 mm之间。南部地区属热带沙漠气候,全年高温

收稿日期: 2021-07-28; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 国家重点研发计划项目“城乡生态资源高分遥感与地面协同监测信息服务应用示范”(编号: 2017YFB0503905-05)、国家自然科学基金项目“高空间分辨率城市地表温度遥感反演方法研究”(编号: 41771369)及国家对地观测科学数据中心开放基金项目“基于高分五号热红外数据的高空间分辨率地表温度产品集生成”(编号: NODAOP2020001)共同资助。

第一作者: 曾晖(1990-),男,硕士研究生,研究方向为热红外遥感应用与研究。Email: zenghui@pku.edu.cn。

通信作者: 任华忠(1985-),男,研究员,博士生导师,研究方向为热红外遥感研究。Email: renhuazhong@pku.edu.cn。

干旱,降雨量稀少,年均降雨量在 40 ~ 200 mm 之间。2011 年叙利亚内战爆发,叙利亚政府军、反政府武装、库尔德武装、极端组织等多方力量在叙利亚西北部和幼发拉底河流域等区域展开了激烈的军事对抗。随着时间的推移,以及美国领导的国际联盟、俄罗斯、土耳其等多方军事力量的介入,叙利亚战争规模逐步扩大。

本文中使用的数据包括 NDVI 数据、地表分类数据以及气象数据。NDVI 数据来自于 2001—2018 年研究区的 MODIS NDVI 月度遥感产品 (MOD13A3, V006), 其空间分辨率为 1 km, 可从美国国家航空航天局官网上获得 (<https://earthdata.nasa.gov/>)。该数据集已通过辐射校准、几何纠正和大气校正<sup>[6-7]</sup>, 其月度合成值来自于当月观测的 NDVI (MVC) 最大值, 以最大程度地减少云量的影响<sup>[8]</sup>。

地表分类数据为 2001—2018 年的 MODIS 地表分类产品 (MCD12Q1, V006), 空间分辨率为 500 m, 共有 5 种不同的分类方案, 本文根据研究需要使用第 5 种分类方案 (植物功能性分类)。从图 1 所示的 2001 年研究区地表分类示意图中可以看出, 研究区主要包括森林、作物、草地、灌木和荒原。其中, 森林包括针叶林与阔叶林, 而作物包括谷类作物和阔叶作物。

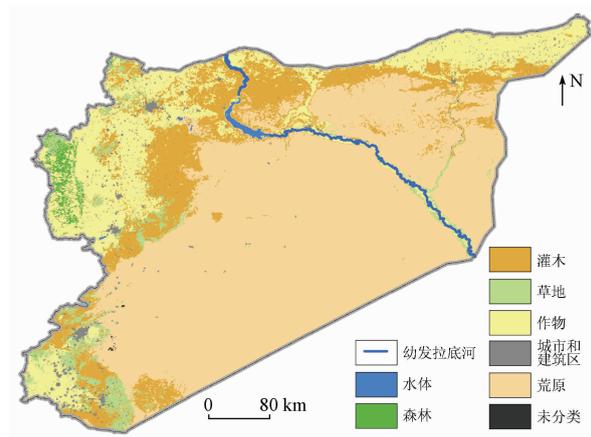


图 1 2001 年研究区地表分类示意图

Fig. 1 Surface classification map of the study area in 2001

气象数据为 2001—2018 年月均降雨量、月均最大温度、月均最小温度, 数据来自 <https://worldclim.org/>, 为空间分辨率 0.04° 的格网数据。这些数据是由 East Anglia 大学气候研究小组从 CRU-TS-4.03 降尺度并使用 WorldClim 2.1 软件进行偏差校正得到的<sup>[9-10]</sup>。

## 2 长时间序列变化趋势分析方法

### 2.1 数据预处理

利用 MODIS 再投影工具 (MODIS reprojection

tool, MRT) 对植被指数产品 MOD13A3 和地表分类产品 MCD12Q1 数据进行拼接、投影转换、波段提取和重采样, 像元大小为 0.01°, 并利用质量控制数据集筛选高质量的 NDVI 和地表分类产品, 从而减少噪声数据或无效数据对分析结果的影响<sup>[11-12]</sup>。由于大气校正不完全、观测数据存在误差等, NDVI 遥感数据年变化可能存在突变或者跳跃, 从而不能完全刻画像元植被覆盖年际变化情况, 因此常常需要对 NDVI 长时间序列数据进行滤波平衡处理。经过平滑去噪之后的 NDVI 时间序列曲线可以反映出作物生长的物候参数, 本文使用 LDOPE 工具和 Timesat 3.3 软件对 NDVI 时间序列数据进行质量控制及滤波操作, 并根据前人对旱区植被物候分析经验, 采用动态阈值法 (阈值设置为 0.2) 提取出生长季始期和末期<sup>[13-15]</sup>。在该软件的 3 种滤波算法中, 非对称高斯滤波 (asymmetric gaussians, AG) 算法对原始高质量数据保真性最高, 双重逻辑函数滤波 (double logistic, DL) 算法性能次之, 而最小二乘卷积 Savitzky-Golay (S-G) 算法拟合结果的保真性最差<sup>[16]</sup>, 本文计算 3 种滤波算法重建后的 NDVI 时间序列与原始值之间年度的平均差异程度, 得到均方根误差分别为 9.41, 9.42 和 10.06, 为此本文选择 AG 算法对 NDVI 时间序列数据进行滤波操作。生长季提取结果如图 2 所示, 为了便于计算, 设定生长季为 1—6 月。

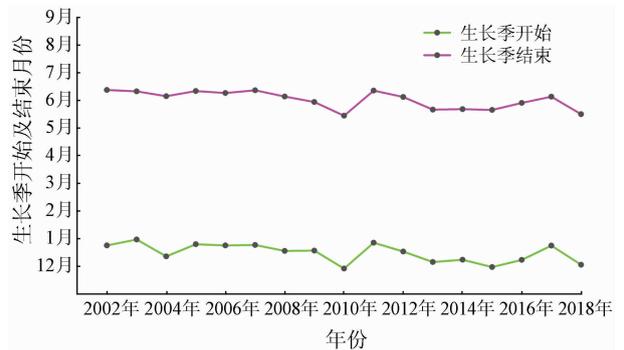


图 2 AG 算法重建后动态阈值法提取叙利亚作物区物候年际变化

Fig. 2 Interannual phenology changes in Syrian crop area by dynamic threshold method after reconstruction of AG algorithm

### 2.2 Theil-Sen & Mann-Kendall 趋势分析法

一般线性回归方法要求时间序列数据符合正态分布, 回归效果易受噪声干扰。泰尔森估算法 (Theil-Sen estimator) 是选择通过所有成对点的所有线的斜率的中值来稳健地将线拟合到平面中的采样点方法<sup>[17-18]</sup>, 可以很好地减少噪声的干扰, 减少异常值的影响, 具有更好的鲁棒性。但是仅有趋势

性还不够,需要做显著性判断。曼 - 肯德尔 (Mann - Kendall) 趋势检验是一种非参数检验,它不需要数据服从特定的分布(如高斯分布等),本质是做 2 组变量序列之间的“秩”相关<sup>[19]</sup>。

通过计算得到曼 - 肯德尔趋势检验的统计量  $Z$ ,其中  $Z$  的正(负)表明数据随着时间有增大(减小)的趋势。基于 0.05 置信度,采用双尾趋势检验,当  $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2} = 1.96$  时,接受原假设,即趋势不显著;若  $|Z| > Z_{1-\alpha/2} = 1.96$  时,则拒绝原假设,即认为趋势明显<sup>[20]</sup>。把泰尔森估算法得到的趋势值  $\beta$  和曼 - 肯德尔趋势检验法得到的显著性值  $Z$  结合起来,本文就可以获取长时间序列 NDVI 变化趋势的显著性划分结果,如表 1 所示。

表 1 NDVI 变化趋势的变化程度划分

Tab. 1 Variation levels of the NDVI change trend

$\beta$	$Z$	NDVI 变化趋势
$>0$	$\geq 1.96$	显著增长
$>0$	$(-1.96, 1.96)$	轻微增长
$0$	$(-1.96, 1.96)$	稳定或无植被区域
$<0$	$(-1.96, 1.96)$	轻微退化
$<0$	$\leq -1.96$	显著退化

$$S_{(\tau)} = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (NDVI_{(i)}) - NDVI_{(\tau)}^2 \right]^{1/2}, \quad \tau = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

如果比值  $R(\tau)/S(\tau) \triangleq R/S$  存在如下关系,即

$$R/S \propto \tau^H, \quad (5)$$

则说明时间序列  $\{NDVI_{(t)}\} (t = 1, 2, \dots, n)$  存在 Hurst 现象,  $H$  称为 Hurst 指数,其数值可以根据拟合式得到,即

$$\ln(R/S)_n = a + H \ln(n). \quad (6)$$

$H$  的取值范围为  $0 < H < 1$ ,主要用于判断时间序列数据遵从随机游走还是有偏的随机游走过

### 2.3 赫斯特 (Hurst) 指数未来趋势分析法

Hurst 指数最初是由英国水利学家 Hurst 提出,已广泛用于水文学、经济学、气候学、地质学等领域<sup>[21]</sup>,后被 Mandelbrot 等<sup>[22]</sup>在理论上进行了证明,并加以补充和完善。基本原理如下:

考虑一个时间序列  $\{NDVI_{(t)}\} (t = 1, 2, \dots, n)$ ,对于任意正整数  $\tau \geq 1$ ,定义均值序列  $\overline{NDVI}_{(\tau)}$  为:

$$\overline{NDVI}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} NDVI_{(t)}, \quad \tau = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

计算累计离差  $X_{(t,\tau)}$  为:

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{i=1}^t (NDVI_{(i)} - \overline{NDVI}_{(\tau)}), \quad 1 \leq t \leq \tau. \quad (2)$$

计算极差  $R_{(\tau)}$  为:

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)}, \quad \tau = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

计算标准差  $S_{(\tau)}$  为:

程,一般存在以下几种情况:①当  $H > 0.5$  时,时间序列为一致性序列,表明未来趋势将与研究期一致;②当  $H = 0.5$  时,时间序列是一个随机序列,表明未来的趋势与研究期间的趋势无关;③当  $H < 0.5$  时,时间序列为不一致序列,表明过去趋势与未来趋势极有可能相反。

如果将之前的研究期趋势性分析结果与 Hurst 分析结果进行叠加,可以得到对未来发展的趋势性判断,如表 2 所示。

表 2 NDVI 变化趋势的变化程度划分

Tab. 2 Division of the degrees of variation of the NDVI change trend

$\beta$	$Z$	$H$	NDVI 变化趋势	$\beta$	$Z$	$H$	NDVI 变化趋势
$>0$	$\geq 1.96$	$>0.5$	一致且显著增长	$<0$	$(-1.96, 1.96)$	$<0.5$	从增长到退化
$>0$	$(-1.96, 1.96)$	$>0.5$	一致且轻微增长	$<0$	$(-1.96, 1.96)$	$>0.5$	一致且轻微退化
$>0$	$(-1.96, 1.96)$	$<0.5$	从退化到增长	$<0$	$\leq -1.96$	$>0.5$	一致且显著退化
$0$	$(-1.96, 1.96)$	$0.5$	稳定无变化				

### 2.4 残差因果分析法

影响植被覆盖变化的主要因素是气候因素,同时人为因素影响也会导致植被发生变化。残差分析主要通过剔除 NDVI 变化中的气候因子,分离植被覆盖变化中的自然因素和人为因素<sup>[23]</sup>。首先,建立平均 NDVI 与气候因子之间的回归关系;然后,使用这种关系得到 NDVI 预测值,计算 NDVI 观测值与

NDVI 预测值之间的残差;将残差作为去除了自然因素影响后的人为因素部分,得到与自然因素无关的植被变化趋势。当 NDVI 残差的变化趋势不明显时,NDVI 的变化可以用气候趋势来解释。相反,当 NDVI 残差的变化趋势很明显时,NDVI 的变化不能用气候趋势来解释,而可能是人类活动造成的<sup>[24]</sup>。

叙利亚大部分地区处于干旱半干旱区,面临较

大植被退化和土地沙化风险,降雨成为影响植被变化的自然因素中最主要的成分,战争的爆发带来人口流动、农业灌溉不足等加剧了这一进程<sup>[25-26]</sup>。气温也是需要考虑的气象因子,本文计算生长季平均 NDVI 与月均最大、最小温度的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.096 和 0.102,并无显著相关关系,故不加入气候因子分析。

残差趋势分析(residual trends, RESTREND)方法是建立在植被量与降雨量之间具有强关系的假设基础上的。植被量通常在降雨量非常高的年份达到高峰期,超过该年后就不会继续增加;并且,NDVI 总和( $\sum NDVI$ ,用  $Sum_{NDVI}$  表示)与总降雨量的自然对数(用  $\ln(Sum_{pre})$  表示)之间的关系是近似线性的,因此在 RESTREND 方法中可以将其视为线性关系<sup>[24,27]</sup>。该分析方法的具体步骤为:①逐像素计

算非战争期生长季  $\sum NDVI$  与  $\ln(Sum_{pre})$  之间的回归关系,即

$$Sum_{NDVI} = f[\ln(Sum_{pre})] \quad (7)$$

式中  $f$  为回归函数;②利用回归关系计算预测值,得到残差,即

$$\Delta Sum_{NDVI} = Sum_{NDVI} - f[\ln(Sum_{pre})] \quad (8)$$

③对残差做时间回归,得到残差变化趋势度  $P_{NDVI}$ ;④ $P_{NDVI}$  与生长季平均 NDVI 变化趋势叠加得到分析结果。

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被 NDVI 趋势分析

研究区在 2001—2018 年间 NDVI 的分析结果如图 3 所示。

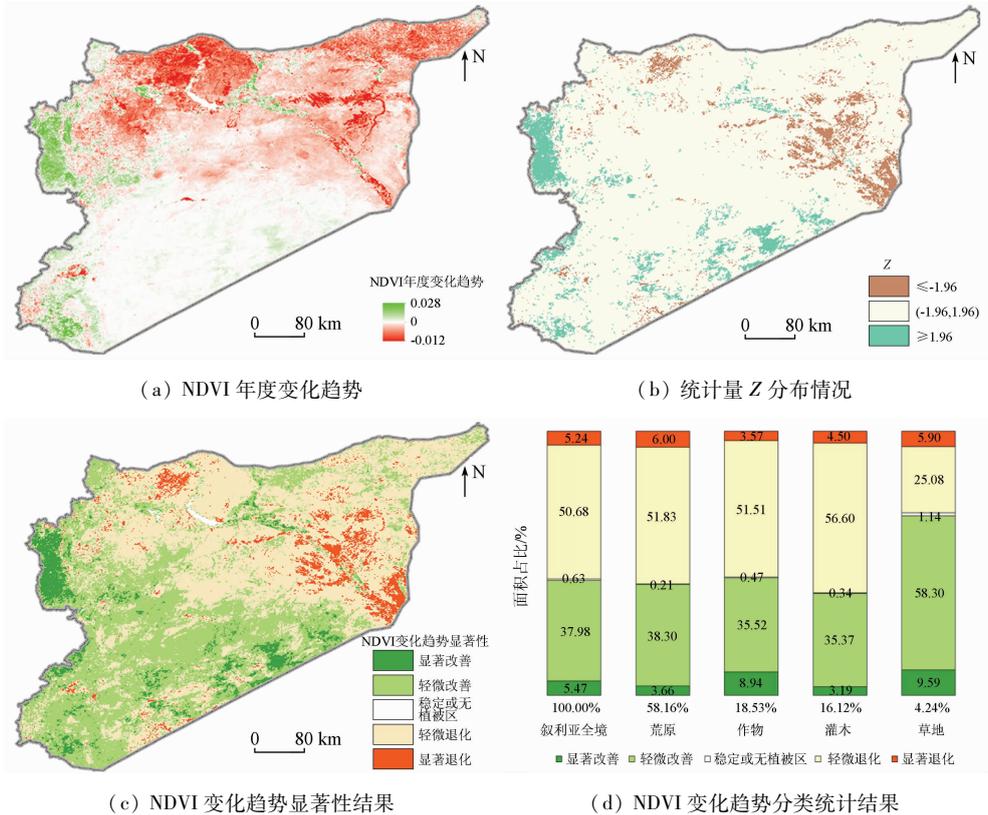


图 3 研究期趋势分析结果示意图

Fig.3 Trend analysis results during the study period

1)图 3(a)是采用泰尔森估算法得到的生长季 NDVI 年度变化趋势,绿色代表上升趋势,红色代表衰退趋势。从图中可以发现增长区域主要集中在西部沿海区域,增长面积的像元占比 55.92%;衰退区域主要集中在北部及东部幼发拉底河流域,衰退面积的像元占比 43.35%。图 3(b)是曼-肯德尔趋势检验法得到的统计量 Z 的分布情况,  $\geq 1.96$  和  $\leq -1.96$  的区域是经过了 95% 置信度双尾检验的

强显著性区域。  
 2)图 3(c)是将 NDVI 变化趋势和显著性叠加之后变化趋势分析结果,得到了 5 种变化趋势。整体来看,叙利亚西南部相对东北部展现出更好的 NDVI 改善趋势,其中显著退化的区域主要集中在与伊拉克交界和与土耳其接壤的地区,显著改善区域主要位于西部沿海区域。  
 3)图 3(d)是对 5 种变化趋势的分类统计结果,

可以发现除了草地地表类型外,其他地表类型均以衰退为主。灌木和荒原地类衰退面积像元占比分别高达 61.10% 和 57.83%,作物地表类型衰退面积像元占比 55.08%,但其有 8.94% 像元占比的显著改善区域,主要位于未经受过多战争侵扰的西部沿海区域。

总的来说,研究期内叙利亚生长季 NDVI 总体趋势以衰退为主。显著衰退区域集中在东部与伊拉克交界处幼发拉底河流域,显著改善区域主要位于西部沿海区域。

同时,本文对叙利亚全境及 4 种主要地表类型 NDVI 年均变化和地表覆盖变化做出分析,如图 4 和表 3 所示。

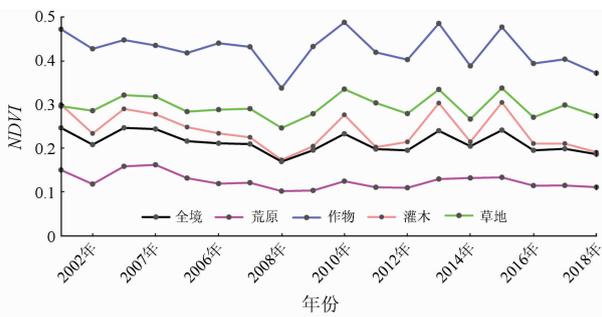


图 4 叙利亚多种地表类型生长季内 NDVI 变化趋势 (2001—2018)

Fig. 4 Annual variation trends of NDVI during the growing season of different surface types in Syria (2001—2018)

表 3 叙利亚土地覆盖转移矩阵

Tab. 3 Syria land cover transfer matrix

像素数	荒原	作物	灌木	草地	2018 年合计
荒原	98 531	504	6 349	1 535	107 036
作物	21	32 865	543	582	34 406
灌木	639	8 621	18 674	1 927	29 869
草地	403	1 423	1 198	4 625	7 938
2001 年合计	99 596	44 035	26 785	8 828	
总变化数	7 440	-9 629	3 084	-890	
变化率/%	7.47	-21.87	11.51	-10.08	

图 4 中发现叙利亚地区植被相关区域生长季 NDVI 变化情况,除荒原地类变化趋势不显著外,其他地表类型存在较为明显的波动变化。其中,2007—2010 年叙利亚地区遭受多年难遇的旱灾<sup>[28]</sup>,对植被,特别是作物类造成较大的影响,NDVI 值出现了明显的低谷。在 2011 年叙利亚内战爆发后,NDVI 值存在较大的波动变化,并表现出下降趋势。

表 3 展示了利用 MODIS 土地覆盖数据统计得到的叙利亚地区在 2001—2018 年间的土地覆盖转移矩阵。表 3 中数字为各地表类型对应的像素数量,每个格子拥有横纵坐标 2 个属性,格子中的数字

表示 2001—2018 年,从横坐标地类转移到纵坐标地类的像素数量,从表中可以看到,18 a 间,草地和作物面积分别减少了 10.08% 和 21.87%,而灌木和荒原面积相应发生增长。

单独对作物地类和荒原地类像素变化进行分析,如图 5 所示。发现作物面积从减少到增加,而荒原面积从增加到减少的拐点发生在 2008 年,这是因为研究区自 1998—2012 经历了长达 14 a 的旱灾,其中 2008 年的干旱情况最为严重。

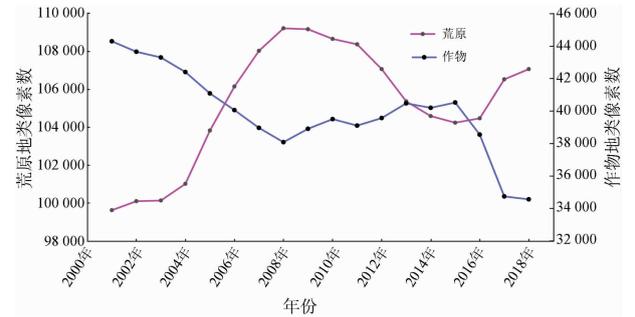


图 5 荒原和作物地类像素变化 (2001—2018)

Fig. 5 Pixel change of barren and crop land (2001—2018)

第二个拐点出现在 2015 年,在此之前作物区面积处于增长趋势,同时荒原面积不断减少,爆发于 2011 年的叙利亚内战并未改变这一趋势。但从 2015 年开始,作物区面积存在较大幅度的下降,同时荒原面积增加。可能原因是战争规模的扩大,即从 2015 年开始叙利亚战争进一步升级,极端组织从伊拉克经由幼发拉底河一路入侵到叙利亚西北腹地,与此同时,多方军事力量对叙利亚境内的极端组织进行了高强度的火力打击。

### 3.2 植被未来趋势分析

叙利亚战争迄今仍未结束,对于叙利亚地区未来植被变化趋势的分析也是关注的重点。将 Hurst 指数计算结果与研究期内的显著趋势性分析结果叠加得到了未来趋势的分析结果(图 6)。图 6(a)展示了 7 种未来趋势,主要分为 3 类:一是和研究期保持一致,显著或者不显著的改善和退化;二是和研究期不一致,从退化到改善或从改善到退化;三是保持现状。与研究期保持一致且改善的区域主要位于叙利亚南部荒漠地区和西部沿海区域;与研究期一致且退化的区域集中在叙利亚中部幼发拉底河沿岸以及东部与伊拉克交界处;从退化到改善的区域主要位于叙利亚西南部大部分地区;从改善到退化的区域位于叙利亚东北部大部分地区,以北部土叙边境处较为显著。同样的,图 6(b)对 7 种未来趋势的分类进行了统计,从图 6 中可以发现:未来的趋势相对乐观,即“从退化到改善”占主要比例。除了幼发拉底河及东部边境区域未来仍

有着显著退化的趋势外,“从退化到改善”的比例大于“从改善到退化”的比例。以幼发拉底河为界,西南部大部分地区未来趋势以改善为主,东北部大部

分区域则以衰退趋势为主,流域沿岸一些区域表现出严重退化趋势,这些区域刚好也是战争交火密集区。

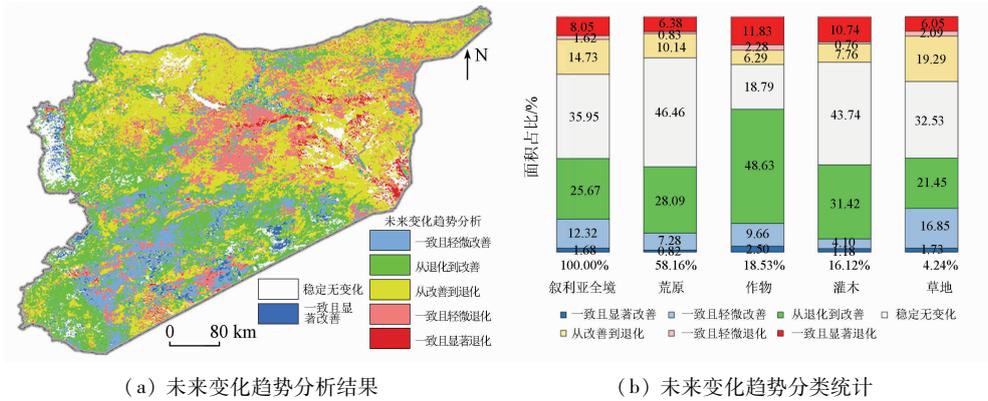


图 6 未来变化趋势分析结果示意图  
Fig. 6 Analysis results of future change trends

### 3.3 植被变化影响因素分析

利用残差分析法可以获得研究区植被变化的影响因素。图 7(a)为叙利亚地区生长季年均降雨量数据,图 7(b)为根据残差分析方法得到的人为因素影响结果,颜色由浅入深分别代表人为因素影响的

强弱,颜色越浅表示人为因素影响的植被增长或衰退越明显,颜色越深则表明植被变化趋势和人类活动并无显著相关。其中与人类活动极其相关的植被衰退区域(最浅紫色)占比 14.10%,与人类活动极其相关的植被增长区域(最浅绿色)占比 2.60%。

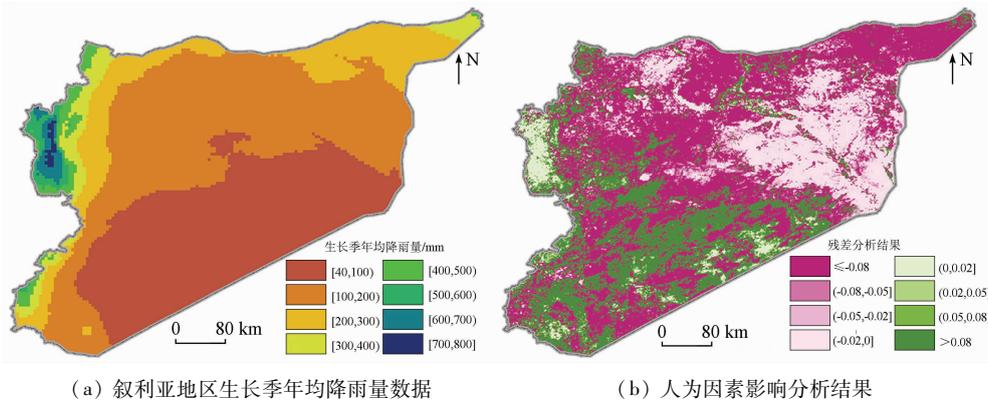


图 7 叙利亚地区生长季降雨量数据和残差分析结果示意图  
Fig. 7 Rainfall data and residual analysis results in the growing season in Syria

残差显著且植被呈增加趋势的浅绿色区域在空间上较为聚集,主要分布在叙利亚西部,是政府军控制的地中海沿岸平原区域; NDVI 残差显著且植被呈减少趋势的浅紫色区域集中分布在幼发拉底河沿岸,植被的这种变化不能用降雨量的变化来解释,主要是由人类活动引起的,而这些区域与极端组织入侵叙利亚的区域存在较多的一致性; NDVI 残差并没有显著变化的深紫色或深绿色区域与气候变量因素有关,而且南部区域以增长为主,北部区域以衰退为主。

就从未停止过。人类通过开垦、灌溉等手段改良荒地,增加植被覆盖,也会因为过度伐木,放牧导致森林面积减少,土地荒漠,减少植被覆盖。但是战争,特别是现代化战争给土地植被覆盖带来的变化是难以想象的。

持续至今的叙利亚战争已造成超过 560 万叙利亚人成为难民,670 万人成为国内流离失所者,境内有 1 340 多万人需要人道主义援助(截止到 2021 年 3 月)。流离失所的难民给原住地和接收地自然资源,特别是植被和土壤带来较大的影响。笔者通过植被和土地覆盖类型的变化展现战争对环境的影响,可以在一定程度上为人道主义援助提供宏观视野,给战后重建规划者提供技术参考。当然,战争对自然资源的影响是一个复杂的过程,需要进一步详

## 4 结论与讨论

人类活动对地表植被变化的影响从人类诞生起

细研究。

通过本研究成果,发现在2011年开始的叙利亚战争导致该国草地和作物面积大幅度减少,而灌木和荒原面积相应发生增长,与人们对战争带来的破坏预期是一致的。但是,结合已知的叙利亚战争局势,并综合之前多种遥感数据分析方法和结果,还发现植被变化速率随着战争局势的不断恶化呈现加速状态,在叙利亚战争初期(2011—2014年),战争并未对植被(特别是种植区)带来较大的破坏,但随着2015年多方军事力量的介入,战争对植被的影响开始出现巨大的负面作用。此外,从研究期趋势分析和未来趋势分析结果中发现,提取的显著破坏和衰退区域与现实战争中各方军事力量占领区以及交战区的分布情况较为吻合。

同时,通过残差分析法来探索自然因素和人为因素对植被变化的影响,以更好地揭示战争这样的人类剧烈活动对环境变化造成的影响。政府军、土耳其军方、反政府武装、库尔德武装、极端组织武装活动范围和交战区存在较为明显的人为因素导致的植被水平降低。其中,叙利亚东部与伊拉克接壤处以及幼发拉底河两岸扩展区域存在极为明显的人为因素导致的植被破坏,这些区域与极端组织侵入区域有较大的重合度,极端组织侵入带来的植被破坏较其他战争参与方更为突出。叙利亚西部沿海区域以及叙利亚南部政府军控制区域有较为明显的人为因素导致的植被水平提高现象,这些区域相对来说受战争影响较弱,人们有更好的条件来改善居住区的生态环境。

本研究也存在一定的局限性,一是所利用数据分辨率尺度较大,数据种类较单一,对局部地区的进一步定量分析存在一定程度限制。使用更高空间分辨率数据,结合多种类数据对局部热点地区做更深入的分析可能会有更多更有价值的分析结果;二是对2001—2018年共18 a长时间序列数据进行综合分析,并没有针对2011年爆发的叙利亚战争前后数据进行分段对比分析,战争前后对比可能会对战争对植被的影响有更好的展示;三是未能获取地面站点数据,不能对物候数据进行验证,亦不能在环境多因子分析中增加多种气候因子;四是战争除了带来植被的变化外,对地表温度也可能带来影响,加入地表温度变化的分析是后续工作中需要重点考虑的。

## 参考文献(References):

[1] 孙红雨,王长耀. 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[J]. 遥感学报,1998,2(3):204-210.

Sun H Y, Wang C Y. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3):204-210.

[2] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [J]. *NASA Special Publication*, 1974, 351(1974):309.

[3] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展 [J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4):327-333.

Tian Q J, Min X J. Advances in study on vegetation indices [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(4):327-333.

[4] Li X, Li D. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian crisis? [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(18):6648-6661.

[5] Li X, Chen F, Chen X. Satellite-observed nighttime light variation as evidence for global armed conflicts [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(5):2302-2315.

[6] Huete A, Didan K, van Leeuwen W. MODIS vegetation indices [M] // *Land remote sensing and global environmental change*. New York: Springer, 2010:579-602.

[7] Beck H E, McVicar T R, van Dijk A I J M. Global evaluation of four AVHRR-NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10):2547-2563.

[8] Huete A, Justice C, Van Leeuwen W. MODIS vegetation index (MOD13) [J]. *Algorithm Theoretical Basis Document*, 1999, 3(213):295-309.

[9] Harris I, Jones P D, Osborn T J. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: The CRU TS3.10 Dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3):623-642.

[10] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12):4302-4315.

[11] 柯灵红, 王正兴, 宋春桥. 青藏高原东北部 MODIS LST 时间序列重建及与台站地温比较 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(7):819-826.

Ke L H, Wang Z X, Song C Q. Reconstruction of MODIS LST time series and comparison with land surface temperature among observation stations in the northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(7):819-826.

[12] 曹云锋, 王正兴, 邓芳萍. 3种滤波算法对NDVI高质量数据保真性研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1):118-125.

Cao Y F, Wang Z X, Deng F P. Fidelity performance of three filters for high quality NDVI Time-series analysis [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1):118-125.

[13] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data [J]. *Computers and Geosciences*, 2004, 30(8):833-845.

[14] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8):1824-1832.

[15] Eklundh L, Jönsson P. TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing software manual [R]. Sweden: Lund and Malmö University, 2017.

- [16] 宋春桥,柯灵红,游松财. 基于 TIMESAT 的 3 种时序 NDVI 拟合方法比较研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 147 – 154.  
Song C Q, Ke L H, You S C. Comparison of three NDVI time – series fitting methods based on TIMESAT; Taking the grassland in Northern Tibet as case[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 147 – 154.
- [17] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica; Journal of the Econometric Society, 1945; 245 – 259.
- [18] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379 – 1389.
- [19] Gilbert R O. Statistical methods for environmental pollution monitoring[M]. New York: John Wiley and Sons, 1987.
- [20] 王佃来,刘文萍,黄心渊. 基于 Sen + Mann – Kendall 的北京植被变化趋势分析[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 13 – 17.  
Wang D L, Liu W P, Huang X Y. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen + Mann – Kendall method[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(5): 13 – 17.
- [21] Hurst H E. Long – term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(1): 770 – 799.
- [22] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence [J]. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967 – 988.
- [23] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human – induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535 – 554.
- [24] Wessels K J, van den Bergh F, Scholes R J. Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 125: 10 – 22.
- [25] Abdo H G. Impacts of war in Syria on vegetation dynamics and erosion risks in Safita area, Tartous, Syria[J]. Regional Environmental Change, 2018, 18(6): 1707 – 1719.
- [26] Jaafar H H, Zurayk R, King C. Impact of the Syrian conflict on irrigated agriculture in the Orontes basin[J]. International Journal of Water Resources Development, 2015, 31(3): 436 – 449.
- [27] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J. Can human – induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(2): 271 – 297.
- [28] Kelley C P, Mohtadi S, Cane M A. Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(11): 3241 – 3246.

## Impacts of the Syrian Civil War on vegetation

ZENG Hui<sup>1</sup>, REN Huazhong<sup>1,2</sup>, ZHU Jinshun<sup>1</sup>, GUO Jinxin<sup>1</sup>,  
YE Xin<sup>1</sup>, TENG Yuanjian<sup>1</sup>, NIE Jing<sup>1</sup>, QIN Qiming<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*; 2. *Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and Its Application, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** Besides numerous casualties and economic losses, wars may cause damage to the environment. Using a long time series of satellite remote sensing data from 2001 to 2018, this study explored the response of vegetation growth to the environmental changes in Syria caused by the Syrian Civil War. The results are as follows. The vegetation index significantly decreased in regions that experienced the most intense conflict in the war. The land types changed slightly from 2011 when the war started to 2015 but changed significantly from 2015 to 2018, with the grassland area decreasing by 10.08% and the crop planting area decreasing by 21.87%. This study further explored the impacts of human activities on the vegetation status, revealing that both sides of the Euphrates River in the east and their extensional areas are most significantly affected by human activities. This study discovered the negative impacts of the war on vegetation growth and can be utilized as a reference for the research and strategy formulation on food security in areas with military conflicts.

**Keywords:** NDVI; time series; vegetation; Syrian Civil War

(责任编辑: 陈理)