

# 退耕还林(草)以来陕北白于山区植被覆盖与土壤侵蚀强度变化

黑哲<sup>1,3</sup>, 王飞<sup>1,2,3</sup>, 韩剑桥<sup>1,2</sup>, 史尚渝<sup>1,3</sup>, 戈文艳<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为了研究白于山区土壤侵蚀特征,基于 MODIS-NDVI 和 Landsat 影像、DEM 和土地利用数据,分析了白于山区 2000—2018 年植被盖度时空变化规律,并结合坡度和土地利用资料评估了退耕还林(草)工程以来的土壤侵蚀强度变化状况。结果表明:(1)白于山区植被覆盖呈显著增加趋势,年均 NDVI 增幅为 0.065/10 a ( $p < 0.01$ );(2)白于山区 NDVI 具有明显的空间分异性,高植被覆盖区主要集中在吴起县,低植被覆盖区主要集中在定边县西部和靖边县中部;受到地形因子的影响,NDVI 分别在海拔 1 250~1 400 m,坡度 50°~56°范围内达到最大值,且阴坡植被覆盖大于阳坡;(3)白于山区植被盖度整体呈显著增加趋势,植被退化面积与恢复面积分别占研究区面积的 3.18%, 64.20%;(4)白于山区轻度侵蚀和中度侵蚀的面积减少,但强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的面积增加;(5)土壤侵蚀强度减弱的面积占总面积的 51.30%,主要集中在吴起县,农耕地面积的减少是土壤侵蚀改善的主要原因。

**关键词:**植被覆盖变化;归一化植被指数;土壤侵蚀风险;白于山区;退耕还林(草)

中图分类号:Q948.1; S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)04-0039-08

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20200604.001

## Change in Vegetation Cover and Soil Erosion in Baiyushan Hilly Area Since the Grain for Green Project

HEI Zhe<sup>1,3</sup>, WANG Fei<sup>1,2,3</sup>, HAN Jianqiao<sup>1,2</sup>, SHI Shangyu<sup>1,3</sup>, GE Wenyan<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** In order to explore the characteristics of soil erosion in Baiyushan Mountain area, based on the datasets of MODIS-NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Landsat, DEM and land use data, we analyzed the regional vegetation cover change in Baiyushan Mountain area from the initiation of the Grain-for-Green Project of China in 2000 till 2018, and assessed the soil erosion intensity with information of slope and vegetation coverage. The results are shown as follows. (1) The annual average NDVI of the Baiyushan Mountain area had increased significantly ( $p < 0.01$ ) with a rate of 0.065/decade over the study period. (2) The regional distribution of NDVI varied obviously spatially, and the vegetation cover in Wuqi was high but that in the western of Dingbian and the central of Jingbian were quite poor; the vegetation cover in the study area reached a relative high level at the altitude ranges of 1 250~1 400 m and the slope ranges of 50°~56°, and the vegetation cover on shady slopes was much greater than that on the slopes to southern part. (3) The areas with vegetation degradation and the vegetation recovering accounted for 3.18% and 64.20% of the total area, respectively, and the vegetation cover increased obviously during the whole period. (4) The areas suffering mild erosion and moderate erosion reduced, but the areas with intensive erosion, strong erosion and severe erosion increased. (5) The area with

收稿日期:2019-07-24

修回日期:2019-09-21

资助项目:国家重点研发计划专题计划(2016YFC0501707);国家自然科学基金(41807067,41771558);陕西省水利水保科技项目(2017sbkj-01)

第一作者:黑哲(1995—),女,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为水土保持监测评价。E-mail:heizhe17@mails.ucas.ac.cn

通信作者:王飞(1971—),男,陕西户县人,研究员,主要从事水土保持环境效应评价与流域管理研究。E-mail:wafe@ms.iswc.ac.cn

soil erosion decline accounted for 51.3% of the total area, mainly occurred in Wuqi County, and the main reason for erosion decline is the reduction of agricultural land area on the slopes.

**Keywords:** vegetation cover change; NDVI; soil erosion risk; Baiyushan Mountain area; Grain-for-Green Project

植被是陆地生态系统中的重要组成部分,在全球物质循环和能量流动中有重要作用<sup>[1]</sup>。研究地表植被盖度及其变化,对于揭示植被生长状况,空间分布规律,评价区域生态环境质量具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。同时植被在防治土壤侵蚀过程中有重要作用<sup>[4]</sup>。一方面,植物冠层能够拦截降雨,植物枯枝落叶层能够增加入渗来减少径流<sup>[5]</sup>。另一方面,植被能够阻挡泥沙运移,减少水土流失<sup>[6-8]</sup>。在植被与土壤侵蚀的关系研究中,植被覆盖是影响土壤侵蚀的重要指标。传统的植被覆盖测量虽然在不断改进,但仍然有野外操作不便、成本较高、难以快速大范围动态监测等缺点,而遥感技术可以有效解决这一问题<sup>[9-11]</sup>。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够相当精确地反映植被盖度、生长状况、生物量以及光合作用强度等,是目前最常用的植被指数<sup>[12-14]</sup>。为了进一步认识植被与土壤侵蚀的关系,有必要研究植被的时空变化对土壤侵蚀风险性的影响。

土壤侵蚀风险性研究主要依据土壤侵蚀预报模型,国际上先后开发了通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)、修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)、水蚀预报模型(Water Erosion Prediction Project, WEPP)、欧洲水蚀预报模型(European Soil Erosion Model, EUROSEM)等。此外一些学者基于 USLE 建立了若干侵蚀预报模型<sup>[15]</sup>,但是以上土壤侵蚀预报模型都需要获取降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、作物覆盖和水土保持措施因子基础数据,且需要多年长期监测数据,在基础设施薄弱的地区并不适用。有学者基于植被盖度、地形和土地利用进行水土流失风险评价,使得大范围长时间尺度的土壤侵蚀研究成为可能<sup>[16-18]</sup>。遥感技术能够对地形、植被覆盖、土地利用方式和地表裸露程度等土壤侵蚀的重要标志进行规则重复的观测,是进行动态环境监测的重要技术手段,目前被广泛应用于土壤侵蚀监测<sup>[19-20]</sup>。彭文甫等<sup>[21]</sup>利用 Landsat5/8 影像研究了岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态变化;彭双云等<sup>[22]</sup>利用 RUSLE 模型对滇池流域 1999—2014 年土壤侵蚀时空演变进行了分析;陈学兄<sup>[23]</sup>利用坡度和植被盖度的指标对中国水土流失进行评价。

白于山区是陕西省水土流失最为严重的地区之一,该地区气候干旱,降雨集中,地形破碎,加之退耕实施不

彻底,经济发展落后等因素的影响,导致区域水土流失现象并未明显缓解,土壤侵蚀风险一直较高。但目前对其土壤侵蚀的评估还较少涉及,因此快速评估白于山区植被状况和土壤侵蚀风险,对水土保持措施决策提供依据具有非常重要的意义。为此,本文利用 MODIS-NDVI 和 Landsat 数据,结合 GIS 手段,分析白于山区退耕还林(草)以来植被覆盖和土壤侵蚀强度变化特征,为该地区生态环境建设提供科技支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白于山区(107°16'17"—109°1'55"E, 36°49'11"—37°32'55"N)位于陕北榆林市与延安市的交界处,北邻毛乌素沙地,南为黄土丘陵沟壑区。全区包括定边县、靖边县的南部,吴起县的大部,总面积约 8 706.48 km<sup>2</sup>,最高海拔 1 913 m,最低海拔 1 178 m。白于山梁长沟深,沟坡陡峻,由主梁分出的次一级长梁分别向东、南、北方向延伸,呈波状阶梯式降低,为无定河、洛河、延河、清涧河等陕北主要河流的发源地。该区属于温带半干旱大陆性季风气候,年均气温为 7.8~10℃,年降雨量 320~490 mm,主要集中在 5—9 月。土壤类型多为细沙黄绵土,质地均一,土质疏松,抗侵蚀能力差,加之坡面流水侵蚀、重力侵蚀活跃,退耕还林实施面积小,坡耕地较多,水土流失严重。

### 1.2 数据来源及处理

本研究使用的遥感数据来源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)EOS/MODIS 卫星的 MOD13Q1 v006 数据产品数据集(<https://lpdaac.usgs.gov/>),空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,2000—2018 年内共有 434 期影像。该产品属于 MODIS 三级数据产品,进行过大气校正和几何纠正。研究中使用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对数据进行波段提取、投影转换、格式变换等处理并用最大值合成法(maximum Value Compositess, MVC)获得月栅格图像和年栅格图像。为了更精确地研究植被盖度的地形分布特征和土壤侵蚀特征,本研究利用 30 m 分辨率的 Landsat 数据与相同分辨率的 DEM 数据和土地利用数据进行叠加。Landsat 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m,选取了 2010 年、2017 年和 2018 年 7 月份无云

覆盖的影像。利用 ENVI 5.1 进行辐射定标和大气校正并用像元二分模型计算植被盖度。数字高程模型 (DEM) 是空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM。土地利用数据来源于清华大学 Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover 数据库 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>), 空间分辨率为 30 m。

### 1.3 研究方法

1.3.1 最大值(MVC)合成法 最大值合成法是将每个月的最大值假设为天气晴朗时获取的影像, 通过最大值合成方法可以较好地去除云和大气的干扰。基本表达式如下:

$$NDVI_i = (NDVI_j)_{\max} \quad (1)$$

式中:  $NDVI_i$  为第  $i$  月 NDVI 影像 ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ),  $NDVI_j$  为当月两景 NDVI 影像 ( $j = 1, 2$ )。

1.3.2 NDVI 趋势分析 为了对 NDVI 变化逐像元分析, 采用一元线性回归分析法可计算每个栅格的 NDVI 值在研究时段中的变化趋势, 并估计变化幅度。本文使用该方法模拟 2000—2018 年 19 a 平均的变化趋势, 其计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NDVI_{mvc}^i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_{mvc}^i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: 变量  $i$  为 1—19 的年序号;  $NDVI_{mvc}^i$  为第  $i$  年的  $NDVI_{mvc}$ ;  $\text{slope}$  为这条趋势线的斜率,  $\text{slope} > 0$  说明 NDVI 在  $n$  年间呈上升趋势,  $\text{slope} < 0$  则说明 NDVI 在  $n$  年间呈下降趋势。本研究根据计算结果将  $\text{slope}$  划分为 7 个等级: 严重退化、中度退化、轻微退化、基本不变、轻微改善、中度改善和明显改善 (表 1)。

表 1 植被覆盖变化趋势分类标准

NDVI 变化范围	程度
$\text{slope} \leq -0.01$	严重退化
$-0.01 < \text{slope} \leq -0.001$	中度退化
$-0.001 < \text{slope} \leq 0.00$	轻微退化
$0.00 < \text{slope} \leq 0.005$	基本不变
$0.005 < \text{slope} \leq 0.01$	轻微改善
$0.01 < \text{slope} \leq 0.015$	中度改善
$0.015 < \text{slope}$	明显改善

1.3.3 土壤侵蚀分级 研究中使用 ArcGIS 将研究区的土地利用类型、坡度和植被盖度数据叠加分析, 并参照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007), 将土壤侵蚀强度分为 5 个等级<sup>[24]</sup> (表 2)。

1.3.4 像元二分法 为了评估研究区土壤侵蚀强度, 需要利用像元二分模型将植被指数转换为植被盖度 (Fractional vegetation coverage, FVC), 再对植被指数进行等级划分。植被盖度计算公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\text{soil}}}{NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}} \quad (3)$$

式中: FVC 为植被盖度值; NDVI 为各像元的 NDVI 值;  $NDVI_{\text{soil}}$ ,  $NDVI_{\text{veg}}$  分别为纯土壤覆盖像元和纯植被覆盖像元的 NDVI 值。根据李苗苗等<sup>[25]</sup> 提出的估算  $NDVI_{\text{soil}}$  和  $NDVI_{\text{veg}}$  的方法, 将研究区内 NDVI 累计频率为 0.5%, 99.5% 时的值作为全土壤覆盖和全植被覆盖下的 NDVI 值, 然后利用上式计算每像元植被盖度。

表 2 土壤侵蚀分级指标

地类	非耕地林 草盖度/%	地类坡度/(°)				
		5~8	8~15	15~25	25~35	>35
非耕地	60~75	轻度	轻度	轻度	中度	中度
	45~60	轻度	轻度	中度	中度	强烈
	30~45	轻度	中度	中度	强烈	极强烈
	<30	中度	中度	强烈	极强烈	剧烈
坡耕地		轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈

## 2 结果与分析

### 2.1 植被盖度空间变化特征

2.1.1 NDVI 随高程变化特征 白于山区高程分布如图 1 所示, 大部分区域高程范围在 1 300~1 700 m, 高程最高的区域位于定边县南部白湾子镇, 从中心到四周高程环形递减。随着山区内高程的增加 (图 2), 植被盖度均呈现出“增加—减少”的趋势, 不同年份均在 1 250~1 400 m 范围内达到峰值。

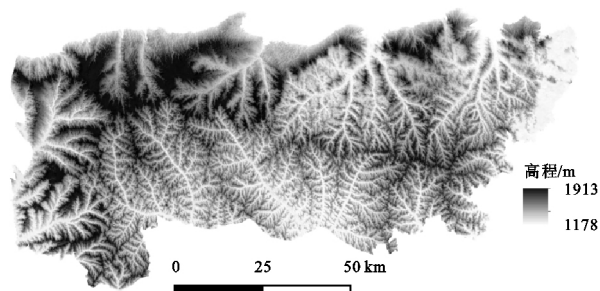


图 1 白于山区高程分布

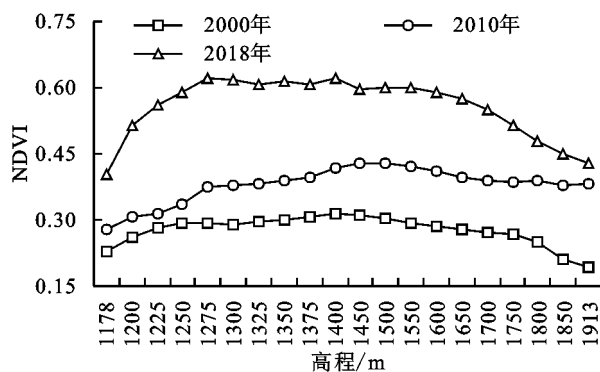


图 2 2000 年、2010 年、2018 年白于山区 NDVI 随高程的变化

2.1.2 NDVI 随坡度变化特征 以 2° 为间距来估算研究区 NDVI 与坡度关系表明 (图 3), 2000 年、2010

年、2018 年 NDVI 随坡度的变化趋势均为“增加—减少”，2000 年植被盖度整体偏低，在坡度  $\leq 50^\circ$  范围内 NDVI 呈现缓慢增长趋势， $> 50^\circ$  陡坡处达到最高值 0.34。2010 年 NDVI 均值为 2000 年的 1.38 倍，2018 年 NDVI 相比 2010 年增加了 45%，其中在坡度  $0^\circ \sim 25^\circ$  范围内快速增长，在坡度为  $56^\circ$  时达到最高值 0.65，在  $56^\circ$  以上，各年份植被盖度均显著减少。

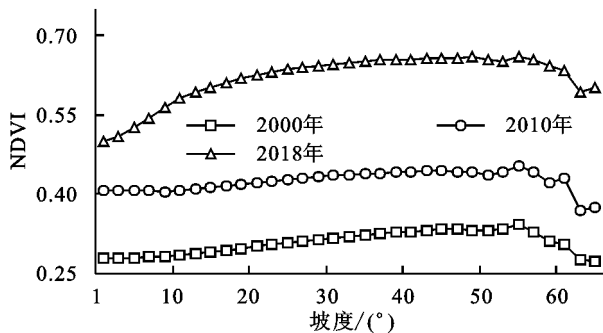


图 3 2000 年、2010 年、2018 年白于山区 NDVI 随坡度的变化

2.1.3 NDVI 随坡向变化特征 将研究区坡向按照平地 ( $-1^\circ$ )、阴坡 ( $0^\circ \sim 45^\circ$ ,  $315^\circ \sim 360^\circ$ )、半阳坡 ( $45^\circ \sim 135^\circ$ )、阳坡 ( $135^\circ \sim 225^\circ$ )、半阴坡 ( $225^\circ \sim 315^\circ$ ) 分为 5 个坡向，按照年份分别统计研究区 NDVI 随坡向的变化特征研究，结果表明植被覆盖在坡向上的差异较小，2000 年、2010 年总体植被盖度随坡向变化趋势相同，从小到大依次为：阳坡  $<$  半阳坡  $<$  平地  $<$  半阴坡  $<$  阴坡，2018 年平均植被盖度随坡向变化由小到大依次为：平地  $<$  阳坡  $<$  阴坡  $<$  半阳坡  $<$  半阴坡，表明坡面植被得以较快恢复。

2.1.4 NDVI 空间分布特征 白于山区 2000—2018 年平均 NDVI 空间分异比较明显 (图 4)，其中植被覆盖最好的地区位于吴起县，NDVI 最高值可达 0.72，白于山区的 NDVI 多年平均值主要分布在  $0.2 \sim 0.3$ ，占整个区域 73.63%，整个研究区 NDVI 平均值仅有 0.25，整体上植被覆盖偏低 (表 3)。

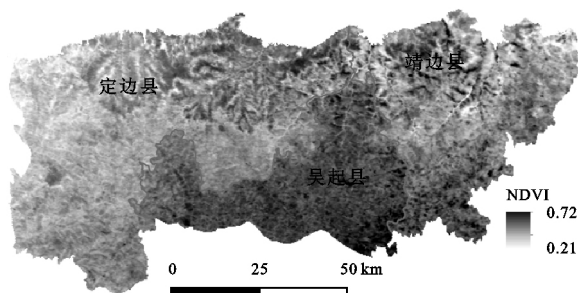


图 4 2000—2018 年白于山区平均 NDVI 空间分布

## 2.2 植被盖度时间变化特征

2.2.1 NDVI 年际变化特征 通过最大值合成法 (MVC) 处理得到 2000—2018 年研究区各像元年最大 NDVI 值并在整个研究区进行平均，以年平均值代表研究区植被覆盖最佳状况。图 5 是 2000—2018

年研究区植被覆盖年变化趋势，植被盖度在 2000—2018 年呈极显著上升趋势 ( $p < 0.001$ )，其增速为  $0.065/10 a$ 。总体来说研究区植被盖度的年际变化大致可以分为 3 个阶段，第 1 阶段为 2000—2003 年，是大规模生态建设初期，植被覆盖随年份呈稳定增加趋势，其增速达到  $0.36/10 a$  ( $p < 0.001$ )。第 2 阶段为 2004—2015 年，该阶段植被覆盖处于相对稳定状态，NDVI 最低值 (0.41) 出现在 2015 年。第 3 阶段为 2016—2018 年，植被呈快速增长趋势，增速达到  $0.59/10 a$  ( $p < 0.001$ )。

表 3 2000—2018 年白于山区平均 NDVI 空间分布

NDVI 分级	NDVI 范围	面积/km <sup>2</sup>	比重/%
1	$< 0.1$	0.005	0.004
2	$0.1 \sim 0.2$	14.191	11.319
3	$0.2 \sim 0.3$	92.317	73.633
4	$0.3 \sim 0.4$	18.770	14.917
5	$> 0.4$	0.092	0.073

注：研究区平均 NDVI 值为 0.248。

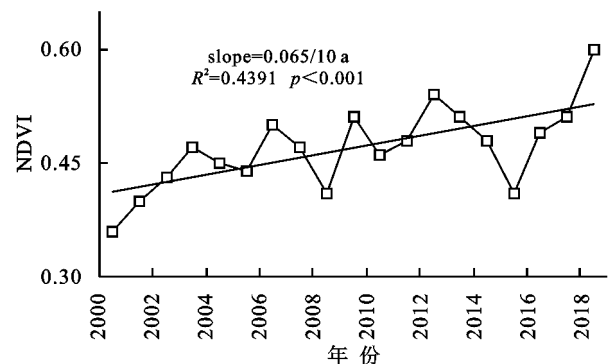


图 5 2000—2018 年白于山区 NDVI 年际变化趋势

为了进一步分析 2000—2018 年白于山区植被覆盖的年际空间变化趋势，经过 Slope 分析并通过 Mann-Kendall 检验计算出置信度水平。根据计算结果将趋势变化划分为严重退化到明显改善，将 M-K 检验计算结果划分为无显著变化、弱显著变化 ( $p < 0.1$ )、显著变化 ( $p < 0.05$ ) 和极显著变化 ( $p < 0.01$ )，结果见图 6—7 和表 4，空间格局的主要变化特征有：(1) 呈退化趋势的区域比重占 3.18%，分布在定边县白于山南部丘陵沟壑区和靖边县中部的零星区域；其中定边县东部零星区域呈现极显著 ( $p < 0.01$ ) 退化趋势，主要是因为工程建设导致植被退化。(2) 基本不变区域比重为 32.62%，连片分布在定边县中部地带即白于山南缘和靖边县中南部区域；(3) 轻微改善区域占研究区面积的 45.66%，连片分布于吴起县东部、靖边县北部和南部区域、定边县北部区域。而且这些区域的改善趋势都通过了 0.001 的信度检验，为极显著改善；(4) 中度改善的区域比重为 16.38%，主要是吴起

县的东部区域、定边县白于山北部和靖边县的部分区域,改善趋势为极显著( $p < 0.01$ );(5) 明显改善的区

域较小,比重为 2.16%,零星分布在吴起县的东部和靖边县的南部。

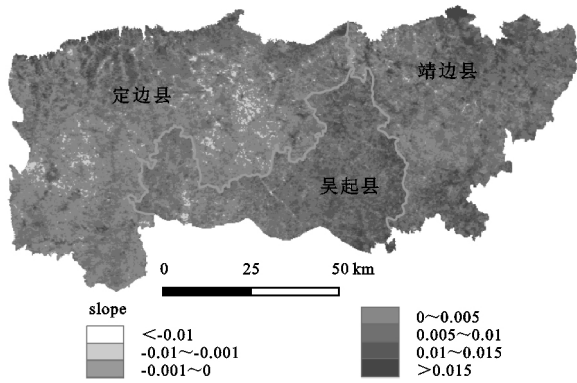


图 6 白于山区多年平均 NDVI 时空演变

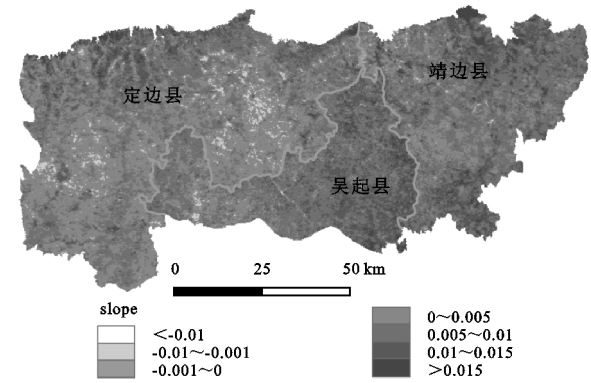


图 7 白于山区 NDVI 变化趋势置信度水平

表 4 2000—2015 年白于山区植被覆盖演变趋势

项目	严重退化	中度退化	轻度退化	基本不变	轻微改善	中度改善	明显改善
面积/km <sup>2</sup>	0.190	133.190	143.500	2839.960	3975.410	1426.200	188.060
比重/%	0.002	1.530	1.648	32.619	45.660	16.381	2.160

2.2.2 NDVI 年内变化特征 为了研究白于山区季节尺度上 NDVI 变化特征,采用气象学标准进行季节划分:春季 3—5 月,夏季 6—8 月,秋季 9—11 月,冬季 12 月—次年 2 月。图 8 为白于山区 4 个季节平均 NDVI 的年度变化,可以看到冬季的 NDVI 值最低,其次为春季、秋季,夏季最高,这反映了植被与物候的关系。统计得出,4 个季节均呈现显著( $p < 0.05$ )上升趋势,但是增速有所不同,植被增速由快向慢依次为夏季(0.069/10 a) > 秋季(0.044/10 a) > 春季(0.039/10 a) > 冬季(0.017/10 a)。

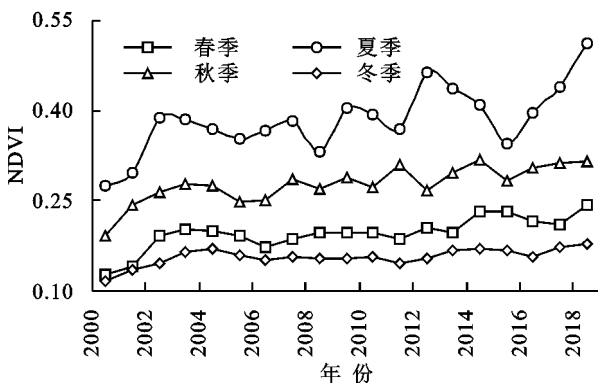


图 8 白于山区季度 NDVI 变化趋势

2.2.3 NDVI 月变化特征 由图 9 可知,多年 NDVI 的月变化均随年份呈现不同程度的增长趋势,其中 1 月、2 月呈显著( $p < 0.05$ )上升趋势,其余 10 个月均呈极显著( $p < 0.001$ )上升趋势。增速最快的为 7 月(0.082/10 a),最慢为 2 月(0.015/10 a)。研究区植被覆盖随月份变化显著,NDVI 为 0.15~0.46,其中 2 月最低,8 月最高,平均值为 0.25,其中 6—9 月都在平均值以上,植被盖度在年内的变化曲线整体呈单峰型波动。

### 2.3 土壤侵蚀变化特征

2.3.1 土壤侵蚀等级结构变化特征 根据水利部标准,利用植被盖度、坡度和耕地数据对研究区 2010 年和 2017 年土壤侵蚀状况进行评价,并统计出土壤侵蚀面积(图 10,表 5)。2010 年和 2017 年土壤侵蚀等级分布面积最大的等级均为中度侵蚀,2010 年土壤侵蚀面积为中度侵蚀 > 轻度侵蚀 > 强烈侵蚀 > 极强烈侵蚀 > 剧烈侵蚀,2017 年土壤侵蚀面积为中度侵蚀 > 强烈侵蚀 > 轻度侵蚀 > 极强烈侵蚀 > 剧烈侵蚀。2010—2017 年期间,轻度侵蚀面积显著减少,由 2010 年的 3 437.87 km<sup>2</sup> 减少至 2017 年的 1 728.22 km<sup>2</sup>,轻度侵蚀面积占比减少了 19.64%。中度侵蚀的面积变化较小,减少了 5.23%。强烈侵蚀的面积变化较大,增加面积为 15.24%。极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积均为小幅度增加,分别增加了 7.64%,1.98%。

对比分析 2010 年和 2018 年研究区土壤侵蚀等级结构变化,计算得到两年土壤侵蚀强度转移矩阵(表 6)。2010—2017 年期间,轻度侵蚀面积减少 19.64%,其中 45.64%转化为中度侵蚀,5.68%转化为强烈侵蚀。中度侵蚀面积减少 5.23%,其中 1.43%的面积好转为轻度侵蚀,44.14%的面积转化为强烈侵蚀,11.80%的面积转化为剧烈侵蚀。强烈侵蚀的面积增加了 15.24%,其中 31.43%来源于极强烈侵蚀,7.92%来源于剧烈侵蚀,说明土壤侵蚀状况略有好转。极强烈侵蚀的面积增加 7.64%,其中有 20%来自剧烈侵蚀,11.04%来源于中度侵蚀。剧烈侵蚀的面积增加较少,仅有 1.98%,其中 4.69%来自于强烈侵蚀,15.56%来自于极强烈侵蚀,说明极强烈侵蚀的土壤在 2010—2017 年改善不明显。

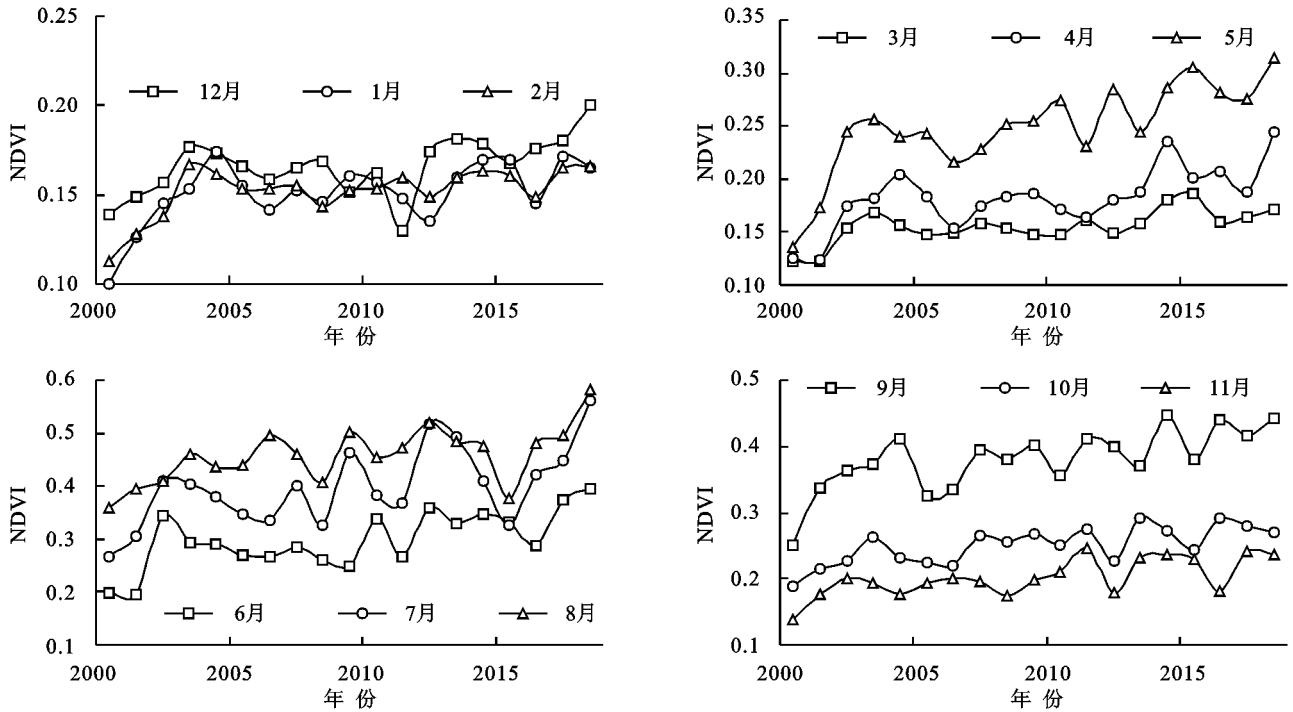


图 9 白于山区月均 NDVI 变化趋势

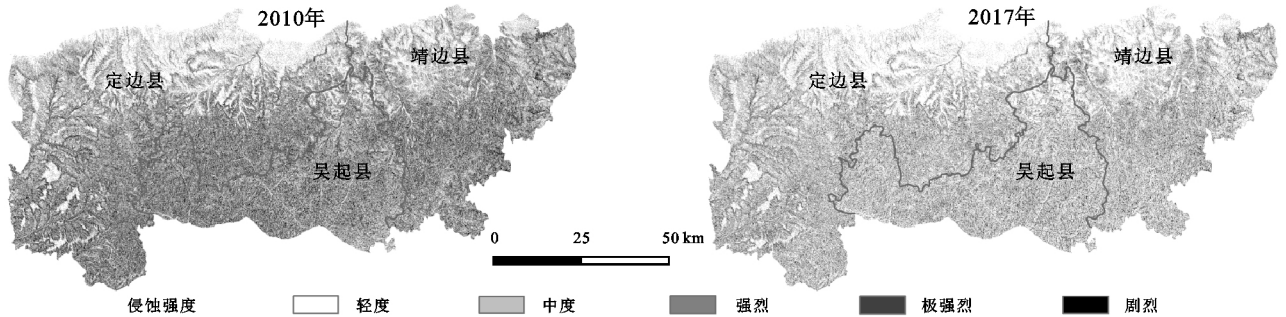


图 10 2010 年和 2017 年土壤侵蚀强度

表 5 2010 年、2017 年白于山区土壤侵蚀面积

侵蚀等级	2010 年		2017 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
轻度侵蚀	3437.87	39.49	1728.22	19.85
中度侵蚀	3706.85	42.58	3252.03	37.35
强烈侵蚀	1120.52	12.87	2447.29	28.11
极强烈侵蚀	375.77	4.32	1041.05	11.96
剧烈侵蚀	65.49	0.75	237.91	2.73

2.3.2 土壤侵蚀空间变化特征 为了探究 2010—2017 年土壤侵蚀等级变化的空间异质性,将白于山区 2010 年和 2017 年土壤侵蚀强度图叠加、相减,并分区得到土壤侵蚀等级变化分布图(图 11)。其中 4~ -4 代表侵蚀状况由显著改善到显著退化。对比 2010 年和 2017 年土壤侵蚀等级,其中,51.30% 的面积土壤侵蚀有所改善,42.21% 的面积土壤侵蚀无明显变化,6.49% 的面积土壤侵蚀状况加剧,即研究区内大部分面积的土壤侵蚀有所改善。其中定边县土壤侵蚀加剧的面积占比为 8.06%,稍大于吴起县的 6.08% 和靖边县的 5.97%,整体退化趋势不显著。定

边县和靖边县内侵蚀无变化的区域最大,面积占比分别为 48.33%,41.47%,说明定边县和靖边县从 2010—2017 年土壤侵蚀状况未有明显好转,吴起县内土壤侵蚀轻微改善的面积最大,为 41.08%。土壤侵蚀中度改善和明显改善的面积为吴起县>靖边县>定边县,即吴起县土壤侵蚀状况有较好改善。

### 3 讨论

植被覆盖和土地利用方式是影响土壤侵蚀的重要指标,目前已经受到广大学者的关注<sup>[26-27]</sup>。本研究基于植被盖度、坡度和土地利用 3 个因子评价区域土壤侵蚀风险性,与传统的土壤流方程相比,本文重点在于快速便捷地评价区域内土壤侵蚀风险性<sup>[28-29]</sup>。同时利用长时间序列的遥感数据对研究区平均 NDVI 时空变化进行了分析,关于植被与土壤侵蚀风险性的研究表明,随着植被盖度的增加,土壤侵蚀风险逐渐降低。这是由于植被具有较高的水土保持功能,其冠层能够防止雨滴直接击打地面,根系能够吸收降水,

共同阻止土壤侵蚀的发生。如张雪峰等<sup>[30]</sup>对内蒙古锡林河流域草地生态系统的研究表明,提高植被覆盖可以显著提升草地生态系统的土壤保持能力。孙文义等<sup>[31]</sup>对黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价研究中表明植被抗土壤侵蚀能力随植被覆盖度的增加而增加,认为植被盖度大于70%时,地表土壤

侵蚀很微弱。本研究与上述结论基本一致。除植被盖度之外,植被类型对土壤侵蚀的影响也有所不同<sup>[32]</sup>。例如实施“退耕还林(草)”等生态修复工程时植树造林的植被与农耕地分布有较大差异<sup>[33]</sup>。之后可以进一步分析白于山区不同植被类型对土壤侵蚀风险的影响,降雨侵蚀力与不同类型植被 NDVI 的一致性。

表6 2010年和2017年白于山区土壤侵蚀强度转移矩阵

km<sup>2</sup>

土壤侵蚀等级	2017年						转移比例/%
	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀	合计	
2010年 轻度侵蚀	1672.67	1568.5	195.15	0.01	0.00	3436.34	-19.64
中度侵蚀	53.12	1558.68	1636.76	437.59	21.78	3707.93	-5.23
强烈侵蚀	1.77	107.01	571.05	352.26	88.76	1120.85	15.24
极强烈侵蚀	0.03	18.07	41.49	241.09	75.21	375.88	7.64
剧烈侵蚀	0.00	0.06	3.08	10.19	52.18	65.51	1.98
合计	1727.59	3252.32	2447.52	1041.15	237.93		

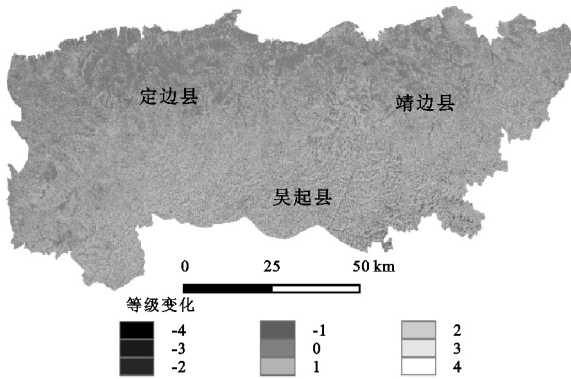


图11 白于山区土壤侵蚀等级变化分布

## 4 结论

(1) 研究时段内,年均 NDVI 呈现显著上升趋势,增长速率为 0.065/10 a。

(2) NDVI 空间分布上,吴起县 NDVI 较高,而定边县西部和靖边县中部 NDVI 较低。随着海拔和坡度的增加,NDVI 变化趋势均为先增大后减小,其中在海拔 1 250 ~ 1 400 m 达到峰值,在坡度 50° ~ 56° 达到峰值;NDVI 的坡向差异性较小,基本趋势为阴坡植被覆盖大于阳坡。

(3) 研究区植被退化面积为 276.88 km<sup>2</sup>,主要集中在白于山南部丘陵沟壑区,植被保持稳定的面积为 2 839.96 km<sup>2</sup>,主要集中在定边县中部,植被改善的面积为 5 589.67 km<sup>2</sup>,主要集中于白于山北部和靖边县北部区域。

(4) 2010 年和 2017 年二期土壤侵蚀状况表明,轻度侵蚀和中度侵蚀的面积减少,强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的面积增加。

(5) 2010 年和 2017 年研究区土壤侵蚀加重的面积占比仅为 6.49%,主要集中在定边县的北部和靖边县的中西部区域;土壤侵蚀改善的面积占比为 51.30%,主要集中在吴起县。

## 参考文献:

- [1] 朴世龙,方精云.1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J].地理学报,58(1):119-125.
- [2] Liu X F, Zhu X F, PAN Y Z, et al. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(1):45-58.
- [3] 李小亚,张勃,靳自宝.基于 MODIS-NDVI 的甘肃河东地区植被覆盖度动态监测[J].水土保持研究,2013,20(1):112-115,307.
- [4] 吴发启,张洪江.土壤侵蚀学[M].北京:科学出版社,2012.
- [5] Ligdi E E, Morgan R P C. Contour grass strips: A laboratory simulation of their role in soil erosion control[J]. Soil Technology, 1995,8(2):109-117.
- [6] Descheemaeker, K, Nyssen, et al. Runoff on slopes with restoring vegetation: A case study from the Tigray highlands, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology Amsterdam, 2006,331(1):219-241.
- [7] Abu-Zreig M, Rudra R P, Lalonde M N, et al. Experimental investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips [J]. Hydrological Processes, 2004,18(11):2029-2037.
- [8] 张青春,刘宝元,翟刚.植被与水土流失研究综述[J].水土保持研究,2002,9(4):97-102.
- [9] 程红芳,章文波,陈锋.植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J].国土资源遥感,2008(1):13-18.
- [10] 杨存建,刘纪远,张增祥,等.遥感和 GIS 支持下的中国退耕还林还草决策分析[J].遥感学报,2002,6(3):205-211.
- [11] 王思远,黄裕婕,陈志祥.黄河流域退耕还林还草的遥感研究[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(3):306-309.
- [12] 陈琼,周强,张海峰,等.三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究[J].生态环境学报,2010,19(6):30-35.

- [13] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [14] 李双双,延军平,万佳.近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [15] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [16] 周为峰,吴炳方,李苗苗,等.利用植被和地形信息进行水土流失风险度评价[J].世界科技研究与发展,2005,27(5):51-55.
- [17] 周为峰.基于遥感和 GIS 的区域土壤侵蚀调查研究[D].北京:中国科学院研究生院,2005.
- [18] 曾大林,李智广.第二次全国土壤侵蚀遥感调查工作的做法与思考[J].中国水土保持,2000(1):28-31.
- [19] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344.
- [20] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波.基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J].中国环境科学,2011,31(7):1197-1203.
- [21] 彭文甫,王广杰,周介铭,等.基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J].生态学报,2016,36(7):1975-1988.
- [22] 彭双云,杨昆,洪亮,等.基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J].农业工程学报,2018,34(10):146-154,313.
- [23] 陈学兄.基于遥感与 GIS 的中国水土流失定量评价[D];陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [24] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [25] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):154-160.
- [26] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [27] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [28] 王凯,夏燕秋,马金辉.基于 CSLE 和高分辨率航空影像的孤山川流域土壤侵蚀定量评价[J].水土保持研究,2015,22(1):26-32.
- [29] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
- [30] 张雪峰,牛建明,张庆.内蒙古锡林河流域草地生态系统土壤保持功能及其空间分布[J].草业学报,2015,24(1):12-20.
- [31] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.
- [32] 张亭亭,张建军,郭敏杰.北洛河流域不同地貌和植被类型区径流演变特征及控制因素[J].水土保持学报,2014,28(4):78-84.
- [33] 周梦甜,李军,朱康文,等.近 15 a 新疆不同类型植被 NDVI 时空动态变化及对气候变化的响应[J].干旱区地理:汉文版,2015,38(4):779-787.

(上接第 38 页)

- [34] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [35] 赵维俊,刘贤德,金铭,等.祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J].土壤学报,2016,53(2):477-489.
- [36] 向云西,陈胜魁,潘萍,等.马尾松叶片—枯落物—土壤的碳氮磷化学计量特征[J].森林与环境学报,2019,39(2):120-126.
- [37] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(4):947-954.
- [38] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2016,31(11):91-101.
- [39] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,等.关于黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究Ⅲ:小老树的成因及其改造途径[J].水土保持学报,1991,5(4):80-86.
- [40] 张海鑫,曾全超,安韶山,等.黄土高原子午岭林区主要林分生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2017,32(6):1043-1052.
- [41] 丁小慧,罗淑政,刘金巍,等.呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J].生态学报,2012,32(11):3467-3476.
- [42] 宋光,温仲明,郑颖,等.陕北黄土高原刺槐植物功能性状与气象因子的关系[J].水土保持研究,2013,20(3):125-130.
- [43] 任运涛,徐翀,张晨曦,等.贺兰山青海云杉针叶 C, N, P 含量及其计量比随环境因子的变化特征[J].干旱区资源与环境,2017,31(6):185-191.
- [44] 苏爱玲.气候变化对高寒草甸枯落物分解特性的影响及温度敏感性研究[D].北京:中国科学院,2010.
- [45] Yuan Z Y, Chen H Y H. Global trends in senesced-leaf nitrogen and phosphorus [J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 18(5):532-542.
- [46] 王淑平,周广胜,吕育财,等.中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2002,26(5):513-517.