

基于长时间序列 NDVI 的黄土高原延河流域及其沟壑区植被覆盖变化分析

贾云飞, 李云飞, 范天程, 曾 竞, 赵建林

(长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘 要:为探究退耕还林(草)等生态工程实施后延河流域坡面与沟壑地貌区的植被恢复情况,基于长时间序列 NDVI 和降雨数据,采用趋势分析法、Pettitt 突变点分析和残差分析以及人工交互样本法对 2000—2019 年延河流域以及流域坡面和沟壑区植被 NDVI 变化特征进行了分析。结果表明:(1) 2000—2019 年延河流域植被恢复明显(年均趋势率为 1.30%),但呈现分段特征,其中 2000—2008 年植被覆盖恢复迅速(年均趋势率为 2.00%);2009—2019 年植被覆盖恢复速度有所减缓(年均趋势率为 0.70%),且部分区域出现退化。(2) 2000—2019 年延河流域的沟壑区域 NDVI 随着坡面区域 NDVI 的增加而增加,且相关性较强($R^2=0.967$),沟壑区域 NDVI 与坡面区域 NDVI 数据值相近。(3) 2000—2019 年延河流域 NDVI 变化与降雨量的相关性较弱,降雨不是该地区 NDVI 变化的主导因子。人类活动与延河流域 NDVI 变化呈正相关关系,相关性较强;人类活动对 NDVI 年均贡献率为 1.29%。研究表明“退耕还林”等生态工程对植被恢复起到了重要作用,且沟壑区植被覆盖随着坡面植被覆盖变化而变化。

关键词:植被覆盖变化; 沟壑区; 延河流域; 退耕还林; NDVI

中图分类号:X87; Q948.15

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0240-08

Analysis of Vegetation Cover Change in Yanhe Basin and Its Gully Area on the Chinese Loess Plateau Based on Long Time Series NDVI

JIA Yunfei, LI Yunfei, FAN Tiancheng, ZENG Jing, ZHAO Jianlin

(School of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The objective of this study is to explore the tendency of vegetation restoration in the sloping and gully landform areas of the Yanhe Basin after the implementation of ecological projects such as ‘Grain for Green’ Program. Based on the long-term NDVI and rainfall data, the change and overall trend of vegetation cover in the Yanhe Basin as well as its gully and hilly areas from 2000 to 2019 were analyzed and tested by applying statistical methods including trend analysis method, Pettitt mutation point analysis as well as residual analysis. The results show that: (1) the significant and positive trend of vegetation restoration in the Yanhe River Basin had been observed for the period of 2000 to 2019 (Annual trend rate was 1.30%); however, a segmented feature existed in the general trend: the vegetation coverage was rapidly restored in 2000—2008 (Annual trend rate was 2.00%) following with a relatively slight increase in 2009—2019 (Annual trend rate was 0.70%), and some areas were degraded; (2) there was relatively strong correlation between gully area’s NDVI and hilly slope area’s NDVI ($R^2=0.967$); meanwhile, the NDVI of the gully area simultaneously increased with the increase of the NDVI of the hilly area from 2000 to 2019; (3) correlation analysis suggested that precipitation did not significantly contribute to the change of vegetation cover in the Yanhe River Basin from 2000 to 2019, while, residual analysis indicated that human activities (‘Grain for Green’ Program) significantly contributed to the vegetation cover change in Yanhe River Basin, with an annual rate of 1.29% for NDVI. These results show that ecological projects such

收稿日期:2021-07-06

修回日期:2021-07-22

资助项目:国家自然科学基金(41907048);中央高校基本科研业务费专项资金(300102260206)

第一作者:贾云飞(1998—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为区域生态评价。E-mail:2020226013@chd.edu.cn

通信作者:赵建林(1988—),男,陕西镇巴人,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀与区域生态评价研究。E-mail:jianlin.zhao@chd.edu.cn

as ‘Grain for Green’ Program played the important role in vegetation restoration and the vegetation coverage of gully region simultaneously changed with the change of slope vegetation coverage.

Keywords: vegetation cover change; gully areas; Yanhe Basin; Grain for Green Programs; NDVI

黄土高原位于我国中部偏北部,属半干旱大陆性季风气候区,气候变化敏感,生态环境脆弱^[1],是中国水土流失的严重区域之一。严重的水土流失会影响社会经济的发展,高泥沙输移会威胁黄河下游地区^[2]。相关研究表明黄河近 90% 的输沙量来源于黄土高原^[3]。

为了控制水土流失和高输沙量,过去 50 a 中国在黄土高原实施了一系列水土保持措施:其中包括坡面区域的大量梯田建设和生态修复项目,以及沟壑区域大量淤地坝的建设^[4]。其中最为显著的生态修复项目是自 1999 年开展的“退耕还林(草)”。相关研究表明自“退耕还林”政策实施以来,黄土高原植被覆盖度显著提高,植被状况明显好转;郭敏杰等^[5]研究表明 1982—2006 年黄土高原植被覆盖度呈现稳定的增加趋势,增速为 0.075%/a;黑哲^[6]研究表明 2000—2019 年超过 90% 的区域植被 NDVI 呈增加趋势,其中 71.56% 的地区呈显著增加;郭永强等^[7]研究表明实施“退耕还林”(2000—2015)后,植被覆盖率年均增幅为 0.59%,年植被覆盖率从 1987 年的 41.78% 提高到 2015 年的 53.23%。胡春宏等^[8]研究表明新中国成立后,经过治理,入黄沙量由 1919—1959 年 16 亿 t/a 锐减至 2000—2018 年约 2.5 亿 t/a。黄土高原具有典型的丘陵沟壑地貌,而侵蚀过程和泥沙主要来源于沟壑区与坡面。其中坡面以面蚀、细沟侵蚀以及耕作侵蚀为主,而沟壑区主要以沟蚀和重力侵蚀为主,研究表明在黄土高原流域中,沟壑间侵蚀产沙大于坡面产沙。Zhao 等^[9]研究表明当沟壑区的密度大于 30% 时,沟壑区对流域泥沙的贡献大于 75%。以往的研究表明坡面的植被覆盖情况有了明显的改善,但坡面的植被覆盖情况改善是否会诱发坡面间的沟壑区植被覆盖增加,目前还尚未有研究表明。

本文以黄土高原退耕还林重点区域延河流域为研究对象,基于 Google Earth(GE)平台采用系统样本法和人工交汇法提取该流域的沟壑区与坡面地貌;基于长时间序列 NDVI 数据,采用趋势分析法、Pettitt 突变点分析、残差分析法以及地学统计方法,在分析延河流域过去 20 a(2000—2019 年)整体的植被覆盖变化情况以及降雨量和人类活动对 NDVI 变化的影响的基础上,分析黄土高原坡面和沟壑区的植被覆盖变化情况,探索坡面与沟壑区植被变化的差异性及相关性。

1 研究区域概况

本文的研究区域是延河流域,延河是黄河的一级支流,全长 286.9 km。延河流域(108°45′—110°28′E, 36°23′—37°17′N)位于黄土高原中部,流域面积 7 725 km²,地势西北高、东南低。延河流域属于黄土丘陵沟壑区,地表破碎,沟壑密度在 2.1~4.6 km/km²,水土流失严重。流域的植被区划属于森林草原地带,主要是人工种植的次生植被和干旱草本植物。该流域属暖温带半湿润地区,年平均降水量约为 520 mm,降水主要集中在 6—9 月份,约占全年降雨量的 75%。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

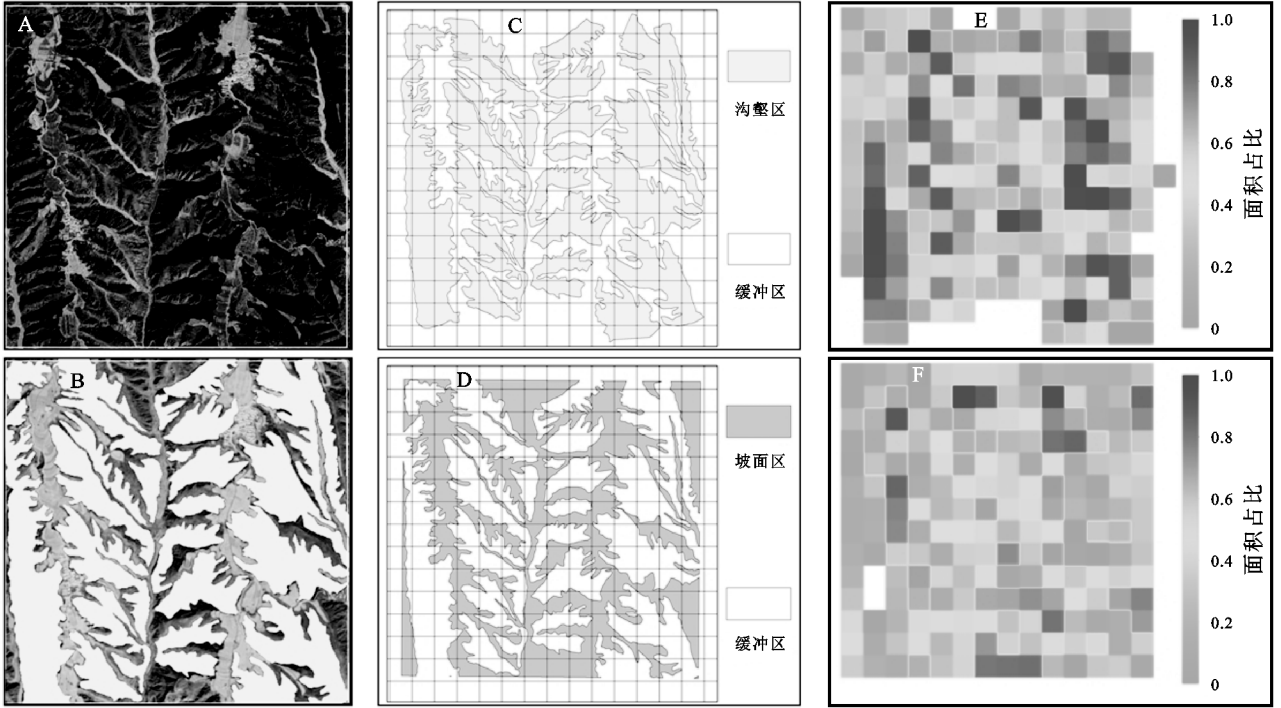
2.1.1 NDVI 数据 本文使用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)来分析植被覆盖变化。NDVI 与植被的初级生产力、叶覆盖、生物量具有很好的相关性,已被广泛用于量化植被的生长趋势和过程^[10]。本文使用的 NDVI 数据为 MODIS 16 d 合成的 NDVI 产品 MOD13Q1,空间分辨率为 250 m,时间跨度为 2000—2019 年,由 Google Earth Engine 平台提供,使用最大值合成法合成影像,得到延河流域各年的 NDVI 最大值栅格数据集,并将 NDVI 像元初始值转化到 -1~1^[11]。

2.1.2 降雨数据 为分析降雨对延河流域 NDVI 植被覆盖变化的贡献,本文采用 1 km 分辨率的降雨数据集,该数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的 1980 年以来逐年年降水量空间插值数据集,该数据集是基于全国 2 400 多个气象站点日观测数据,通过整理、计算和空间插值处理生成。本文使用了该数据集 2000—2019 年的降雨数据。

2.1.3 沟壑区样本提取与栅格化 为了区分沟壑区和坡面植被覆盖变化情况,本文首先在延河流域提取沟壑区样本,提取过程如下:首先,在延河流域系统均匀地分布 272 个 3 km×3 km 正方形样本区域,该样本覆盖整个延河流域。然后基于 Google Earth 平台,人工勾绘出每个样本区内的沟壑区域,并假设样本区内除沟壑区域外就是非沟壑区域即坡面区域。在此基础上,对提取的矢量沟壑区和坡面进行栅格化。栅格化过程如下:首先创建与 NDVI 像元一致的缓冲区,基于缓冲区对沟壑区矢量与坡面区矢量进行分割,使得分割后的

每一个区域能够正好覆盖所对应的像元,然后计算得到分割后的沟壑区和坡面区内像元对应的矢量面积,

再结合像元面积得到每个像元的沟壑区面积占比与坡面面积占比。具体流程见图 1。



注: A 为 272 个样本区中的某一样本区; B 为基于 Google Earth 人工勾绘的样本区内沟壑区域; C, D 为沟壑区矢量和坡面区矢量分割结果; E, F 为沟壑区和坡面区像元面积占比。

图 1 沟壑区样本提取及栅格化流程

由于本文采用的 NDVI 数据的空间分辨率为 250 m,故栅格化后的沟壑区和坡面的空间分辨率与 NDVI 像元一致,栅格化后的像元值为对应栅格的沟壑区面积占比(GD),计算公式如下:

$$GD = \frac{S_{\text{gully}}}{250 \times 250} \quad (1)$$

式中:GD 为每个像元值,即沟壑区面积占比; S_{gully} 为每个像元中人工勾绘沟壑的面积(m^2)。

坡面面积占比(SD)计算公式如下:

$$SD = \frac{S_{\text{slope}}}{250 \times 250} \quad (2)$$

式中:SD 为每个像元值,即坡面面积占比; S_{slope} 为每个像元中非沟壑区即坡面的面积(m^2)。

2.2 研究方法

2.2.1 延河流域沟壑区和坡面 NDVI 为分析延河流域沟壑区和坡面 NDVI 变化趋势,本文分别计算了 272 个样本区 2000—2019 年的样本区($\text{NDVI}_{\text{mean}}$),坡面($\text{NDVI}_{\text{slope}}$)和沟壑区($\text{NDVI}_{\text{gully}}$)的平均 NDVI 年最大值。其中,样本区平均 NDVI 等于样本区内各像元的平均值。沟壑区 NDVI 采用面积加权法计算,计算公式如下:

$$\text{NDVI}_{\text{gully}(i)} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{GD}_{ij} \times \text{NDVI}_{ij}}{\sum_{j=1}^n \text{GD}_{ij}} \quad (3)$$

式中: $i=1,2,\dots,272$; $\text{NDVI}_{\text{gully}(i)}$ 为第 i 个样本区的沟壑区平均 NDVI 最大值; NDVI_{ij} 为第 i 个样本区第 j 个像元的年 NDVI 最大值; GD_{ij} 为第 i 个样本区第 j 个像元对应的沟壑区面积占比。

坡面 NDVI 同样采用面积加权法计算,计算公式如下:

$$\text{NDVI}_{\text{slope}(i)} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{SD}_{ij} \times \text{NDVI}_{ij}}{\sum_{j=1}^n \text{SD}_{ij}} \quad (4)$$

式中: $i=1,2,\dots,272$; $\text{NDVI}_{\text{slope}(i)}$ 为第 i 个样本区的坡面平均 NDVI 最大值; NDVI_{ij} 为第 i 个样本区第 j 个像元的年 NDVI 最大值; SD_{ij} 为第 i 个样本区第 j 个像元对应的坡面面积占比。

在此基础上,本文采用 ANOVA 分析方法,分析延河流域沟壑区 NDVI($\text{NDVI}_{\text{gully}}$)和坡面区 NDVI($\text{NDVI}_{\text{slope}}$)是否具有显著差异(以 $p < 0.05$ 检验其显著性)。以及采用线性回归方程和 R^2 分析样本区中两者相关性即:

$$\text{NDVI}_{\text{gully}} = a + b \times \text{NDVI}_{\text{slope}} \quad (5)$$

式中: a 和 b 为线性回归系数,如果 $b > 1$ 则表明样本区中沟壑区 NDVI 大于坡面 NDVI,反之沟壑区 NDVI 小于坡面 NDVI。

2.2.2 趋势分析法 本文采用一元线性趋势分析法分

析整个延河流域 20 a 的 NDVI 变化趋势。基于像元尺度拟合 NDVI 变化,并整合每个像元的时变特征和区域空间变化,以反映研究区域 NDVI 的 20 a 时空格局演变^[12]。一元线性趋势线斜率的计算公式为:

$$k = \frac{n \times \sum_{j=1}^n j \times \text{NDVI}_j - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n \text{NDVI}_j}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - (\sum_{j=1}^n j)^2} \quad (6)$$

式中: n 为研究数据的时间长度,本文为 20 a; NDVI_j 为整个延河流域第 j 年的 NDVI 最大值; k 为像元回归方程趋势线斜率,若 $k > 0$,表示研究时段内 NDVI 变化呈增加趋势,反之,则呈减少趋势^[13]。为了更好地判断整个研究区域植被覆盖的动态变化趋势,根据 k 值的大小,可定义 7 个 NDVI 趋势变化水平^[14]:重度退化、中度退化、轻度退化、基本不变、轻度改善、中度改善以及明显改善(表 1)。

表 1 NDVI 趋势变化水平

k	变化等级
< -0.009	重度退化
$-0.009 \sim -0.0045$	中度退化
$-0.0045 \sim -0.001$	轻度退化
$-0.001 \sim 0.001$	基本不变
$0.001 \sim 0.0045$	轻度改善
$0.0045 \sim 0.009$	中度改善
> 0.009	明显改善

2.2.3 突变点分析 为了检验延河流域过去 20 a 植被覆盖变化是否连续,本文采用 Pettitt^[15] 突变检验方法检验延河植被覆盖变化是否存在显著突变点($p < 0.05$)。Pettitt 突变检验是一种非参数检验法,其假设样本容量中存在突变点 t ,采用 Mann-Whitney 的统计量 $U_{t,n}$ 检验样本序列突变点 t 前后两个子样本, x_1, \dots, x_t 和 x_{t+1}, \dots, x_n 二者累积分布是否存在显著差异。

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_t - x_i), t \in [2, n] \quad (7)$$

式中: x_t, x_i 分别为第 t 年和第 i 年的 NDVI 相邻时间段斜率样本; n 为数据系列长度; $U_{t,n}$ 为将根据第一个样本序列超过第二个样本序列次数的统计组成新的序列。

Pettitt 法原假设 H_0 为序列不存在突变点。若 t 时刻满足:

$$K_t = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}|, 1 \leq t \leq n \quad (8)$$

则 t 点处为突变点。

同时计算统计量:

$$p = 2 \exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (9)$$

若概率 $p \leq 0.05$,则认为检测出的突变点在统计

意义上是显著的。

2.2.4 NDVI 变化驱动力分析 由于延河流域过去 20 a 人类活动频繁,特别是退耕还林项目的实施,同时降雨也会对区域植被覆盖产生影响。因此,本文采用由 Evans 等^[16] 提出的残差分析方法研究降雨量和人类活动对延河流域 NDVI 变化的影响及相对贡献。该方法的主要步骤为:首先基于 2000—2019 年 NDVI 和降雨量时间序列数据,以 NDVI 为因变量,以降雨量为自变量,建立一元线性回归模型,计算模型中的指标参数(斜率和截距);基于降雨量与回归模型的参数,计算得到 NDVI 的预测值(NDVI_{PRE}),表示降雨量对 NDVI 变化的影响;最后计算 NDVI 观测值与 NDVI_{PRE} 的差值,即残差(NDVI_{HA}),表示人类活动对 NDVI 变化的影响。具体计算公式如下:

$$\text{NDVI}_{\text{PRE}} = c + d \times \text{PRE} \quad (10)$$

$$\text{NDVI}_{\text{HA}} = \text{NDVI}_{\text{OBS}} - \text{NDVI}_{\text{PRE}} \quad (11)$$

式中: NDVI_{PRE} 为回归模型的 NDVI 预测值,即降雨量对 NDVI 变化的贡献; PRE 为年降雨量(mm/a); NDVI_{HA} 为残差,即人类活动对 NDVI 变化的贡献; NDVI_{OBS} 为基于 NDVI 栅格数据集的观测值; c, d 为模型参数。

3 结果与分析

3.1 延河流域 NDVI 时空变化特征

(1) 2000—2019 年延河流域年平均 NDVI 整体呈现增加趋势,在研究时段内,延河流域年平均 NDVI 由 2000 年的 0.415 增加到 2018 年的 0.750,其增长率达到 44.60%,且年平均趋势率为 1.30%($p < 0.001$),相关系数 $R^2 = 0.544$,表明 2000—2019 年延河流域的植被覆盖状况改善较为明显。基于 Pettitt's 突变点分析表明延河流域 NDVI 突变年份在 2008 年($p < 0.001$),因此将延河流域 NDVI 变化整体趋势分为两个阶段:2000—2008 年和 2009—2019 年。2000—2008 年延河流域年平均 NDVI 增加显著,平均趋势率为 2.00%($p < 0.001$),相关系数 $R^2 = 0.343$;2009—2019 年延河流域年平均 NDVI 增加趋势减缓,平均趋势率为 0.70%($p < 0.001$),相关系数 $R^2 = 0.105$ (图 2)。

(2) 2000—2019 年延河流域 NDVI 变化趋势具有一定的空间异质性,延河流域大面积植被覆盖恢复良好,年平均 NDVI 呈增加和减小的区域分别占 98.90%,0.80%。其中呈现明显改善($k > 0.009$)的区域面积占比约为 81.27%,约 6 314.20 km^2 ;其次是中度改善的区域面积占比约为 14.44%,约 1 121.84 km^2 ,主要分布在西北部、西南部及东南部;重度退化($k < -0.009$)的面积占比约为 0.31%,约 24.42 km^2 (表 2),主要分布在中部地区,该地区为延安市区。

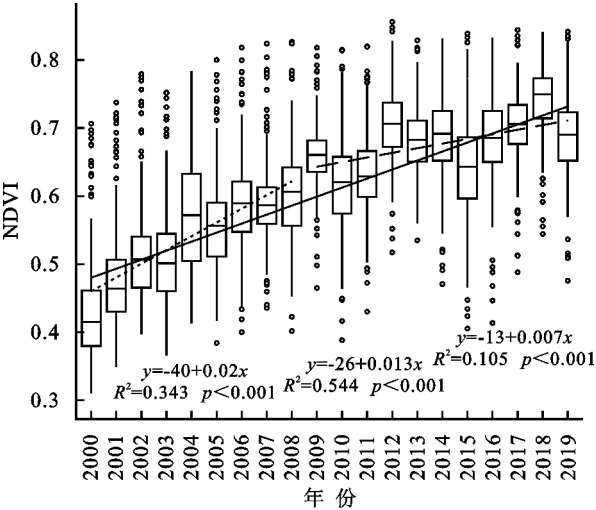


图 2 2000—2019 年延河流域 NDVI 年际变化及分段变化

通过对比可以发现 2000—2008 年延河流域植被覆盖状况增加趋势更加明显,整个延河流域植被覆盖情况都有所改善,退化的区域面积可以忽略不计;而 2009—2019 年植被覆盖状况增加趋势明显减缓,且具

有很大的空间异质性;除西北部、中部以及东南部地区均出现不同水平的退化趋势外,其他地区的增加趋势也有所减缓(图 3)。2000—2008 年延河流域年平均 NDVI 呈增加和减小趋势的区域面积分别占总面积的 98.57%,0.90%。其中呈明显改善($k > 0.009$)的区域面积占比约为 88.85%,约 6 903.16 km²;其次是中度改善的区域面积占比约为 7.41%,约 575.86 km²;退化的面积占比都在 0.50%以下。2009—2019 年延河流域年平均 NDVI 变化趋势具有很大的空间异质性;年平均 NDVI 呈增加和减小趋势的区域面积分别占总面积的 87.13%,7.33%。其中明显改善的区域面积占比约为 33.70%,约 2 617.78 km²;其次是中度改善的区域面积占比约为 34.01%,约 2 642.71 km²;再次是轻度改善的区域面积占比约为 19.42%,约 1 508.60 km²;基本不变的区域面积约 占 5.54%,约 430.51 km²;轻度退化的区域面积约 占 4.65%,约 361.20 km²(表 2)。

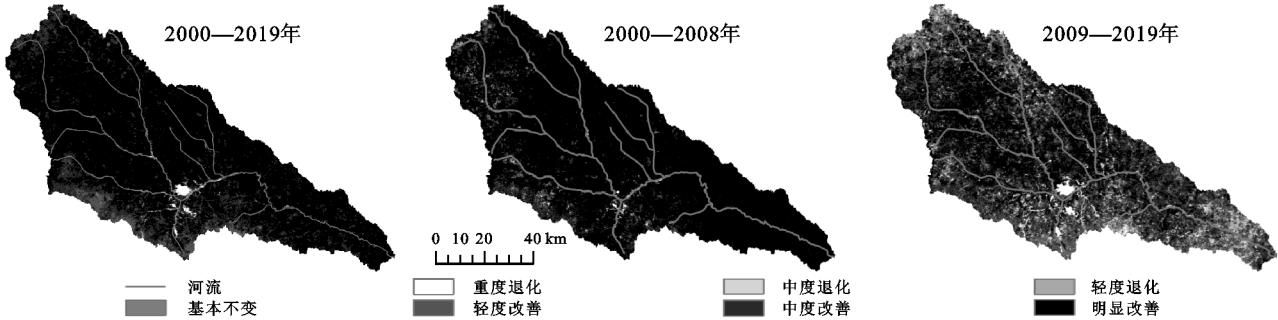


图 3 不同年份延河流域 NDVI 变化趋势空间分布对比

表 2 2000—2019 及分段时期延河流域趋势变化分布

NDVI 变化趋势	2000—2019 年		2000—2008 年		2009—2019 年	
	像元占比/%	面积/km ²	像元占比/%	面积/km ²	像元占比/%	面积/km ²
重度退化	0.31	24.42	0.18	13.91	1.02	78.94
中度退化	0.20	16.08	0.21	16.39	1.67	129.64
轻度退化	0.28	21.95	0.50	38.95	4.65	361.20
基本不变	0.28	21.44	0.54	41.84	5.54	430.51
轻度改善	3.21	249.44	2.31	179.26	19.42	1508.60
中度改善	14.44	1121.84	7.41	575.86	34.01	2642.71
明显改善	81.27	6314.20	88.85	6903.16	33.69	2617.77

3.2 NDVI 变化驱动力分析

延河流域 NDVI 变化驱动力分析表明 2000—2019 年延河流域降雨量对 NDVI 变化的影响一直保持稳定,平均趋势率为 0.037%/a($p < 0.05$),且相关性较弱($R^2 = 0.001$);而 2000—2019 年人类活动对 NDVI 变化的影响呈现明显增加的趋势,平均趋势率为 1.29%/a($p < 0.001$),相关性较强($R^2 = 0.755$)。这在一定程度上说明人类活动对延河流域植被覆盖的改善产生了积极影响。人类活动对延河流域 NDVI 变化的影响也呈现分段特

征,2000—2008 年人类活动对延河流域 NDVI 变化的贡献明显大于 2009—2019 年(图 4)。

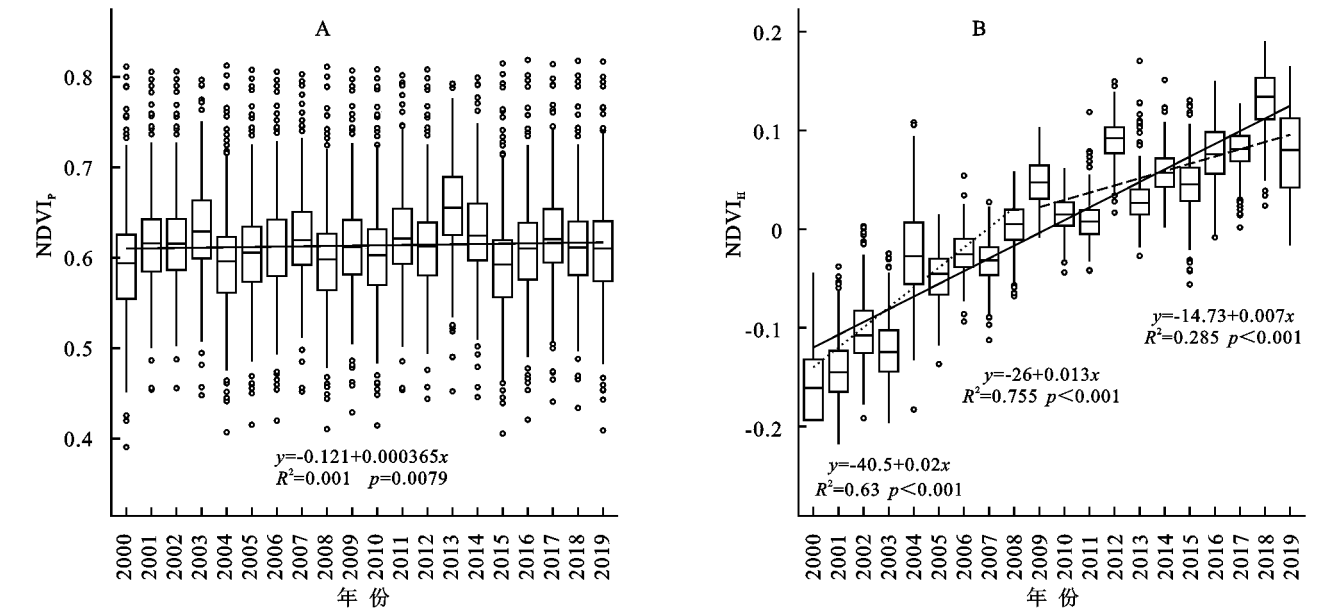
3.3 延河流域沟壑区与坡面植被覆盖变化特征

基于 272 个样本区内平均沟壑区 NDVI 和坡面 NDVI 分析表明,随着坡面 NDVI 的增加,沟壑区 NDVI 也呈现明显增加的趋势,沟壑区与坡面的线性趋势率为 1.02($p < 0.001$),即沟壑区植被覆盖要略大于坡面植被覆盖,两者相关系数 $R^2 = 0.97$ (图 5)。

然而,两者相关性存在年际差异,且与延河流域

整体 NDVI 变化趋势存在关联。如图 6 所示,基于每年样本区中沟壑区 NDVI 和坡面 NDVI 线性相关分析表明,2000—2008 年,各样本区中坡面 NDVI 与沟壑区 NDVI 的线性趋势率均 ≥ 1 ,且相关系数 R^2 均 > 0.90 ,即当整体植被覆盖呈现显著增加时,沟壑区植

被覆盖要好于坡面区域植被覆盖,且两者相关性较强;而 2009—2019 年,各样本区中坡面 NDVI 与沟壑区 NDVI 的线性趋势率均 < 1 ,即沟壑区植被覆盖小于坡面区域植被覆盖,且相关系数 R^2 除了 2010 年、2011 年、2015 年外,均小于 0.90。



注:NDVI_P,NDVI_H 分别为降水、人类活动对 NDVI 变化的贡献。

图 4 降水对 NDVI 变化的贡献与人类活动对 NDVI 变化的贡献

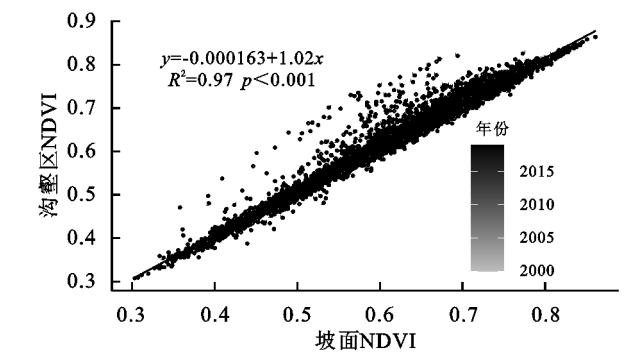


图 5 坡面 NDVI 与沟壑区 NDVI 线性相关

非独立样本 t 检验的结果表明沟壑区 NDVI 与坡面 NDVI 存在明显差异($p < 0.05$)。2000—2019 年沟壑区 NDVI 与坡面 NDVI 差异的均值为 0.012($p < 0.001$);2000—2008 年沟壑区 NDVI 与坡面 NDVI 差异的均值为 0.009($p < 0.001$);2009—2019 年沟壑区 NDVI 与坡面 NDVI 差异的均值为 0.014($p < 0.001$)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究表明,2000—2019 年延河流域整体植被覆盖改善较快,但具有一定的空间异质性,中部地区城市建设导致植被覆盖减少,其他地区都植被覆盖都呈现增加趋势。延河流域植被覆盖变化具有分段特征,2000—2008 年植被覆盖恢复速度较快,2009—

2019 年植被覆盖恢复速度有所减缓,恢复趋势趋于平稳。退耕还林还草分为 1999 年起实施的前一轮退耕还林还草和 2014 年起实施的新一轮退耕还林还草。1999—2001 年是退耕还林还草的试点示范阶段,2002 年全国全面启动退耕还林还草工程,2008 年起开始巩固各工程省区的退耕还林成果,为扩大退耕还林、退牧还草规模,2014 年开始了新一轮退耕还林还草^[17-18]。与此同时降雨和人类活动对 NDVI 变化归因分析表明,降雨量对延河流域 NDVI 变化的贡献保持稳定,而人类活动对延河流域 NDVI 的贡献有着明显增加的趋势。1999 年来开展的如“退耕还林”等一系列的生态工程是 2000—2019 延河流域 NDVI 明显增加的主要原因。

自退耕还林项目实施以来,延河流域丘陵沟壑区植被恢复态势较为显著,坡面植被覆盖状况也得到了明显改善^[19]。基于人工提取的大量沟壑区和坡面样本,本文初步分析了退耕还林项目对延河流域沟壑区和坡面区植被覆盖影响。初步结果表明样本区中沟壑区与坡面区的植被覆盖具有同步性,两者相关性较强,这表明当坡面植被覆盖增加时,也间接增加了沟壑区植被覆盖。这与人研究一致,相关研究表明沟壑区由于弃耕时间长且人为扰动较小,形成了比较稳定的植物群落,因此在坡面植被覆盖改善时,沟壑区的植被覆盖

也随之改善,且沟壑植被覆盖优于坡面植被覆盖。然而,坡面上的植被恢复与坡度、水土保持政策密切相关,近年来也得到了极大的改善^[20]。本文研究表明,延河流

域坡面 NDVI 与沟壑区 NDVI 具有较强的相关性,且同样具有分段特征,坡面 NDVI 增加的趋势越快,沟壑区 NDVI 增加的趋势也越快,且相关性较强。

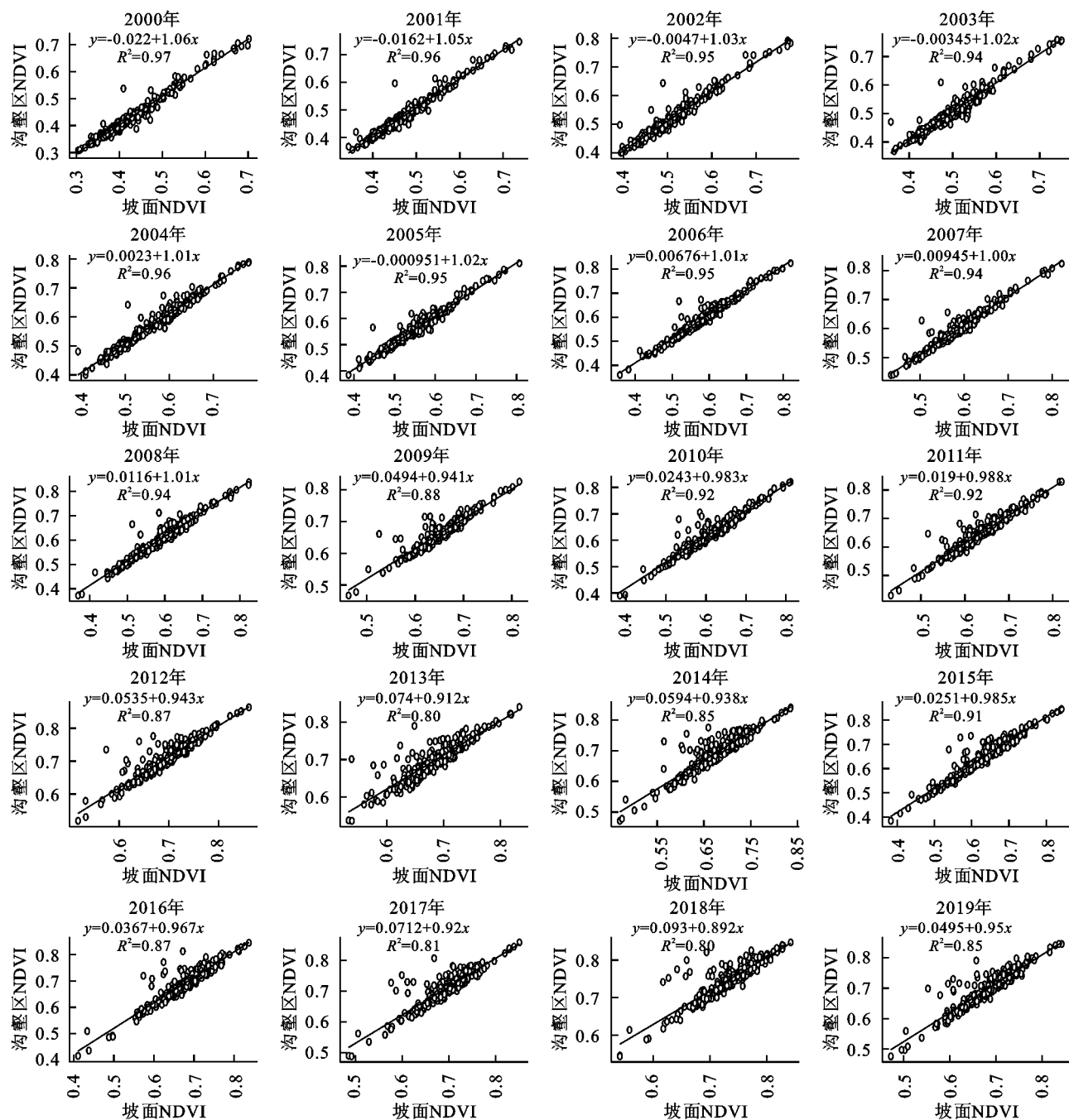


图 6 2000—2019 各年坡面 NDVI 与沟壑区 NDVI 的线性关系

4.2 结论

(1) 2000—2019 年延河流域植被 NDVI 增加显著,平均趋势率为 $1.30\%/a$ ($p < 0.001$),其中,中部地区是城市用地 NDVI 呈减小趋势;其他地区 NDVI 都呈现增加趋势,北部相比南部 NDVI 增加较明显。2000—2008 年延河流域植被 NDVI 增加显著,平均趋势率为 $2.00\%/a$ ($p < 0.001$),且整个延河流域植被覆盖都呈现改善状况;2009—2019 年植被 NDVI 增

加趋势减缓,平均趋势率为 $0.70\%/a$ ($p < 0.001$),且西北部、中部和东南部植被覆盖呈现轻度退化趋势。

(2) 降雨和人类活动对延河流域 NDVI 变化的贡献具有明显的差异性,2000—2019 年降雨对 NDVI 变化的贡献保持稳定,且相关系数 $R^2 = 0.001$,相关性较弱;而人类活动对 NDVI 变化的贡献较大,人类活动对延河流域 NDVI 变化的贡献的平均趋势率为 $1.30\%/a$ ($p < 0.001$),相关系数 $R^2 = 0.755$,存在较强的相关性。

(3) 2000—2019 年延河流域沟壑区域 NDVI 随着坡面 NDVI 的增加而增加,年平均趋势率为 1.02 ($p<0.001$),且相关系数 $R^2=0.967$,相关性较强。坡面 NDVI 与沟壑区 NDVI 的线性关系也呈现分段趋势,2000—2008 各年坡面 NDVI 与坡面 NDVI 的平均趋势率均 >1 ,且相关性较强,2009—2019 各年的平均趋势率均 <1 ,且相关性较 2008 年以前有所减弱。

参考文献:

[1] 陈淑娟,温仲明.延河流域地带性物种分布对未来气候变化的响应[J].水土保持学报,2011,25(1):157-161.

[2] 郭美丽.延河流域退耕植被恢复过程中土壤蓄水性能变化研究[D].陕西杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2017.

[3] Bai Y, Jiang B, Wang M, et al. New ecological redline policy (ERP) to secure ecosystem services in China[J]. Land Use Policy, 2016, 55:348-351.

[4] Zhao J, Oost K V, Chen L, et al. Moderate topsoil erosion rates constrain the magnitude of the erosion-induced carbon sink and agricultural productivity losses on the Chinese Loess Plateau[J]. Biogeosciences, 2016,13(16):4735-4750.

[5] 郭敏杰,张亭亭,张建军,等.1982—2006 年黄土高原地区植被覆盖度对气候变化的响应[J].水土保持研究,2014,21(5):35-40,48.

[6] 黑哲.黄土高原植被覆盖变化过程及评价方法差异性研究[D].陕西杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020.

[7] 郭永强,王乃江,褚晓升,等.基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J].中国环境科学,2019,39(11):4804-4811.

[8] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.

[9] Zhao J, Vanmaercke M, Chen L, et al. Vegetation cover and topography rather than human disturbance control gully

density and sediment production on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2016,274:92-105.

[10] 孔冬冬,张强,黄文琳,等.1982-2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J].地理学报,2017,72(1):39-52.

[11] 宋富强,康慕谊,杨朋,等.陕北地区 GIMMS, SPOT-VGT 和 MODIS 归一化植被指数的差异分析[J].北京林业大学学报,2010,32(4):72-80.

[12] 刘超,闫小月,姜逢清.天山北坡前山带降水分布型对荒漠植被的影响:基于逐日降水数据和 NDVI 分析[J].生态学报,2020,40(21):7790-7804.

[13] Gao J, Jiao K, Wu S. Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and NDVI in China during 1982 to 2013 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29(10):1597-1609.

[14] 宋怡,马明国.基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J].中国沙漠,2007,27(1):89-93.

[15] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 1979,28(2):126-135.

[16] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(4):535-554.

[17] 秦建明,陈程.我国退耕还林还草历史发展阶段及其政策演变[J].农业技术经济,2005(1):58-63.

[18] 国家林业和草原局.中国退耕还林还草二十年(1999—2019) [R/OL]. (2020-06-30) [2021-08-10]. [https:// www. forestry. gov. cn/ html/ main/ main_ 195/ 20200630085813736477881/ file/ 20200630090428999877621. pdf](https://www.forestry.gov.cn/html/main/main_195/20200630085813736477881/file/20200630090428999877621.pdf).

[19] 张宝庆,吴普特,赵西宁.近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293,400.

[20] 温仲明,焦峰,李静.黄土丘陵区纸坊沟流域植被自然演替阶段的识别与量化分析[J].水土保持研究,2009,16(5):40-44.