基于 NDVI 的石羊河流域植被演变特征及其对沙尘暴的影响分析

罗晓玲1,杨梅1,李岩瑛1,2,蒋莉芳1,聂鑫2

(1.甘肃省武威市气象局,甘肃 武威 733000;2.中国气象局兰州干旱气象研究所,

甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,兰州 730020)

摘要:利用石羊河流域 2000—2016 年卫星遥感数据和 7 个气象站 1961—2020 年逐日沙尘暴资料,使用一元回归趋势法、线性倾向率、相关系数等方法,分析该流域植被覆盖与沙尘暴频次、持续时间、强度的多尺度变化特征及关系,探讨其对沙尘暴发生发展的影响程度。结果表明:流域植被轻微增大,NDVI 以每年0.000 9的速度增大,2007 年开始恢复,2010 年以后恢复比较明显,上中游恢复速度比下游快。沙尘暴频次显著减少,年际倾向率为—2.8 d/10 a,近 10 年减少最显著,较 70 年代减少 14.5 天;中游减少速度较慢,下游减少速度较快;四季减少速度为春季>夏季>冬季>秋季。沙尘暴持续时间显著缩短,年际倾向率为—12.2 m/10 a,近 10 年持续时间最短,较 70 年代缩短了 60.9 min;中游缩短时间较慢,下游缩短时间较快。沙尘暴强度无明显变化,最小能见度维持在 0.496 km 左右。沙尘暴频次和持续时间与当年和前 1 年全流域 NDVI,NDVI>0.3 面积、上中下游 NDVI 呈显著负相关。沙尘暴强度与当年全流域 NDVI,NDVI>0.3面积、上中下游 NDVI 呈弱负相关,与前 1 年的 NDVI 因子呈弱正相关。流域植被覆盖的改善对沙尘暴有明显抑制作用。

关键词: 归一化植被指数; 沙尘暴; 变化趋势; 影响分析; 石羊河流域

中图分类号:P445+.4 文献标识码:A

A 文章编号:1009-2242(2022)02-0084-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.011

Analysis on Characteristics of Vegetation Evolution and Its Impact on Sandstorm in Shiyang River Basin Based on NDVI

LUO Xiaoling¹, YANG Mei¹, LI Yanying^{1,2}, JIANG Jufang¹, NIE Xin²

(1. Wuwei City Meteorological Bureau, Wuwei, Gansu 733000; 2. Key Laboratory of

Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid

Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020)

Abstract: Based on the satellite remote sensing data from 2000 to 2020 and the daily sandstorm data of seven meteorological stations from 1961 to 2020 in the Shiyang River Basin, we analyzed the multi-scale variation characteristics and relationship between watershed vegetation coverage and sandstorm frequency, duration and intensity, and explored its influence on the occurrence and development of sandstorm by using the methods of univariate regression trend method, linear tendency rate and correlation coefficient. The results showed that the watershed vegetation coverage increased slightly, and NDVI increased at the rate of 0.000 9 per year. The NDVI began to recover in 2007. Recovery was more obvious after 2010, and the recovery rates in the upper and middle reaches were faster than that in the lower reaches. The sandstorm frequency decreased significantly, and the interannual trend rate was -2.8 d/10 a. It decreased the most significantly in the past 10 years, which was 14.5 days less than that in the 1970s. The rate of reduction was slower in the middle reaches and that was faster in the lower reaches. The rate of reduction in four seasons followed the order of spring > summer > winter > autumn. The sandstorm duration was significantly shortened, the interannual trend rate was -12.2 m/10 a. The duration in the last 10 years was the shortest, which was 60.9 min shorter than that in the 1970s. The shorting time in the middle reaches was slower and that was faster in

收稿日期:2021-06-30

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41975015)

第一作者:罗晓玲(1966—),女,高工,主要从事天气气候预测和相关研究。E-mail: qxjlxl@yeah.net

通信作者:杨梅(1987—),女,工程师,主要从事天气气候预报预测和相关研究。E-mail: wwqxjym@163.com

the lower reaches. The sandstorm intensity had no obvious change, and the minimum visibility was around 0.496 km. The frequency and duration of sandstorm were negatively correlated with full-basin NDVI, NDVI >0.3 area, NDVI of upper, middle and lower reaches in the current year and the previous year. The sandstorm intensity had a weak negative correlation with full-basin NDVI, NDVI >0.3 area, NDVI of upper, middle and lower reaches, and a weak positive correlation with NDVI of the previous year. The improvement of vegetation cover in the watershed had obvious restraining effect on sandstorm.

Keywords: NDVI; sandstorm; change trend; impact analysis; Shiyang River Basin

植被是生态系统的重要组成部分,在全球气候和 碳循环中极为重要,是连接土壤圈、大气圈、水圈、生 物圈的自然纽带,植被覆盖是植被地表最直接的表 征,反映植被的茂密程度和植物进行光合作用面积的 大小[1],是了解区域生态环境中的初级生产力、环境 承载力、水土流失强度等生态环境系统的状态与功能 的重要基础[2-3]。一方面植被覆盖度变化影响大气中 CO₂浓度,塑造异质性明显的流域气候;另一方面,气 候变化打破原有物质能量的交互平衡,特别是碳循环 等问题[4]。沙尘暴是我国北方常见的一种灾害天气, 因其造成的损失不容小觑[5]。沙尘暴形成的3个要 素是大风、丰富的沙尘源和不稳定天气,研究区因受 河西走廊地形狭管效应的影响,大风频次较高,下游 三面被沙漠包围,沙源丰富,成为甘肃乃至全国沙尘 暴的高发区之一,因沙尘暴造成的年均经济损失超过 3 783 万元,年均农业受灾面积超过 13 195 hm²,对 地方经济的发展已造成一定影响[6]。上世纪五六十 年代,因各种原因使石羊河流域生态环境日趋恶化, 祁连山冰川萎缩、雪线上升,上游来水逐年减少,中游 截流超用,下游地下水过度开采,植被曾经一度退化, 成为全国最干旱、荒漠化最严重、水资源最短缺、用水 矛盾最突出的地区之一。植被覆盖度差,地表沙源丰 富,沙尘暴频繁,造成恶性循环。对沙尘暴的防控,有 学者[7]提出通过植树种草,增加地表植被覆盖率来防 风固沙;李璠等[8]和马坤等[9]分析了起沙量与植被覆 盖度的关系认为,植被对沙尘暴有抑制作用。但这些 研究多为定性描述,Aulia 等[10]利用遥感数据研究植 被对干旱现象的响应,但缺乏石羊河流域植被与沙尘 暴的定量分析研究。本研究利用近60年石羊河流域 沙尘暴资料和石羊河流域综合治理前后遥感数据,从 植被指数、沙尘暴频次、持续时间和强度 4 个方面的 变化进行系统性分析,并首次研究植被指数 NDVI 与沙尘暴频次、持续时间和强度的关系,以期得到流 域植被与沙尘暴之间的定量关系,为防灾减灾、改善 生态环境、践行"绿水青山就是金山银山"意义重大。

1 研究区概况

石羊河流域(101°41′—104°16′E,36°29′—39°27′N)位于甘肃省河西走廊东部,乌鞘岭以西,祁连山北

麓,行政区划包括武威市、金昌市和张掖市的部分地区,其水系发源于祁连山,是甘肃省三大内陆河流域之一,上游贯穿天祝县、民乐县、肃南县,中游贯穿凉州区、永昌县、古浪县,下游在民勤县境内;流域地处黄土高原与戈壁荒漠的交汇带,为半干旱气候与干旱气候的交界区,也是高原气候和沙漠气候的共同影响区。流域内地形复杂,气候差异大,其所在区域包括绿洲农田、荒漠、荒漠湿地、荒漠湖泊和沙漠等多种生态系统。其海拔高度1300~5000 m,年降水量110~600 mm,年蒸发量700~2700 mm。流域地表植被覆盖度低,根据最新监测研究[11-12],上游南部祁连山拥为森林、草地和浅山灌丛,植被茂密,中游石羊河水灌溉地区为绿洲,植被适中,下游大部地方为半荒漠、荒漠和沙漠地区,植被稀疏。植被多由耐干旱的灌木、半灌木组成,植株稀疏矮小,生态环境十分脆弱。

2 材料与方法

2.1 数据来源

所用气象要素数据来源于 1961—2020 年石羊河流域内 7 个气象站(凉州、民勤、永昌、古浪、乌鞘岭、肃南、民乐)逐日观测资料;上游数据为乌鞘岭、民乐、肃南 3 站平均,中游为凉州、永昌、古浪 3 站平均,下游为民勤站数据。

卫星遥感数据来自甘肃省气象局气候中心遥感应用室 2000—2016 年 5—9 月监测数据。植被覆盖面积由 HJ-1B/CCD 卫星监测所得。归一化差分植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index,标准差异植被指数),由 Terra/MODIS 卫星资料监测分析所得,也称为生物量指标变化,可使植被从水和土中分离出来,是检测植被生长状态、植被覆盖度的最佳指示因子,被广泛运用在植被覆盖度研究中[13-15]。表达式为:NDVI=(NIR-R)/(NIR+R)。式中:NIR 为近红外波段的反射率值;R 为红波段的反射率值。NDVI 与植物的蒸腾作用、太阳光的截取、光合作用、地表净初级生产力有关。

根据《沙尘天气等级》^[16],依据地面水平能见度 V 分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴 5 个等级。分级标准为:沙尘暴 V < 0.05 km;特强沙尘暴 V < 0.05 km;特强沙尘暴 V < 0.05 km;

的观测在 1979 年及以前为 0~9 级,1980—1999 年的单位不一致,而且在地面观测月报表中有些年份没有最小能见度观测记录,故本文用 2000—2020 年的最小能见度资料统计分析沙尘暴的强度。

2.2 统计与分析方法

基于每个像元的基础上使用一元回归趋势法,按照趋势分析得到每年作物生长季 NDVI 植被指数的变化情况,以 NDVI 与时间序列的趋势斜率 k 值来代表植被覆盖的变化趋势,计算公式为:

$$k = \frac{n \times (\sum_{i=1}^{n} i \times C_i) - (\sum_{i=1}^{n} i)(\sum_{i=1}^{n} C_i)}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2}$$

式中:k 为趋势斜率;n 为监测时间段的年数; C_i 为第i 年的生长季 NDVI。根据趋势斜率的变化范围和研究区域的实际情况,将变化趋势分为 7 个等级:k < -0.001 5表示植被明显减少;-0.001 5< k < -0.001 0 表示植被中度减少;-0.000 5< k < -0.001 0 表示植被轻微减少;-0.000 5< k < 0.000 5< k < 0.001 0 表示植被稳定不变;0.000 5< k < 0.001 0 表示植被明显增大;0.001 0 表示植被明显增大。利用判定系数分析回归结果的线性拟合优度,判定系数 R^2 < 0.155 为未通过显著性检验。

以气候倾向率^[17-18]方法分析沙尘暴频次、持续时间和强度的变化趋势,在此基础上,利用相关系数(Pearson)法,分析 NDVI 与它们之间的关系,探讨NDVI 对沙尘暴发生发展的影响程度。

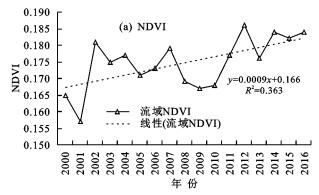


图 1 石羊河流域植被变化趋势

3.1.2 空间动态变化特征 NDVI 反映植物冠层的背景影响,如土壤、潮湿地面、雪、枯叶、粗超度等,且与植被覆盖有关, $-1 \le \text{NDVI} \le 1$,负值表示地面覆盖为云、水、雪等,0表示有岩石或裸土等,正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。流域内地势东北低,西南高,随着海拔高度的增加,植被覆盖逐渐增大,平均 NDVI 为下游 0.107 < 中游 0.184 < 上游 0.317。从流域 NDVI 时间变化曲线(图 2)可以看出,下游植被轻微增大(<math>k=0.000 6, P < 0.01), 2000-2004 年波动增大, 2005-2010 年波动减小,

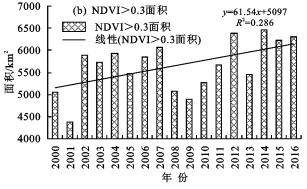
通过 Excel 2007、SPSS 22.0、vb6.0、Photoshop CC 2017 等软件对资料进行统计、处理和分析。

3 结果与分析

3.1 植被变化特征

地表植被覆盖能够有效改变影响地表的水分、能量和辐射的分配及平衡,进而影响水文过程、水循环和区域气候,植被退化能引发水土流失、土地沙漠化、冻土退化等一系列严重的后果[19]。石羊河流域以森林、绿洲、荒漠为主,是气候变化敏感区,在流域整体暖湿化背景下,植被变化非常重要。

时间变化特征 石羊河流域平均植被覆盖度 较低,多年 NDVI 为 0.175, NDVI > 0.3 的面积为 5 652 km², NDVI 和 NDVI > 0.3 面积时间序列变化 (图 1)显示,流域植被轻微增大,NDVI以每年 0.000 9 的速度增大(P < 0.01), NDVI> 0.3 面积每年增大 61.54 km^2 (P < 0.05),但各年度变化较大。2007 年 石羊河综合治理以前,由于人为活动引起的生态用水量 减少、地下水位持续下降,以致2000年和2001年是植被 最差的年份,2002年流域出现较大降水,植被迅速好转, 2003-2006 年植被波动减少,2000-2006 年流域植被总 体处于退化状态。2007年国务院批准以"民勤绿洲"为 重点的石羊河流域重点治理规划开始实施,2007-2016 年植被波动增大,特别2010年以后恢复比较明显。可以 看出,随着石羊河流域生态治理工程的开始,持续调水、 有效退耕还林,加上流域降水量的略增加,地下水位 近年来开始抬升,自然植被开始恢复。



2011—2016 年迅速增大,2012 年为 17 年来最大 (0.115),与石羊河流域生态综合治理工程的实施,压 沙、营造防风固沙林、关井压田、退耕还林(草)、地下水位不断上升密切相关[20-21]。中游植被中度增大 $(k=0.001\ 1,P<0.05)$,2012 年、2014 年为最大(0.198),2002 年为次大(0.195),2001 年为最小(0.161),中游植被的变化与降水量的大小,石羊河流域生态综合治理关井压田,退耕还林有关[21]。上游植被中度增大 $(k=0.001\ 1,P<0.05)$,2001 年最小(0.299),2016 年最大(0.346)。通过分析降水与 NDVI 的关系发现,降水量与 NDVI 呈显

著正相关,故上游植被的变化主要与降水量的变化和 环境保护关系密切。

通过分析可以看出,上游和中游的植被恢复速度较下游快,除综合治理以外,还与不同区域自身的地理位置和气候特征不同有较大关系,上游(342.8 mm)和中游(245.1 mm)年均降水量较下游(113.2 mm)降水量分别多 229.6,131.9 mm,即为 2.6,2.2 倍,在干旱半干旱地区,这一差距是极为显著的。上、中、下游近 60 年降水量增加速度分别为 8.25,7.00,4.07 mm/10 a,降水量增加速度较快区域的自然植被恢复速度相应较快。另外,上游以森林、草原为主,地面蓄水能力强,中游以耕地居多,且大多是水浇地,地 表湿度相对较好,而下游以荒漠为主,蒸发大(植物生长季蒸发量是降水量的 18.5 倍),地面蓄水能力差。所以,虽然流域近年来暖湿化进程加快,因区域地形地貌和气候的差异导致植被恢复速度有所不同。

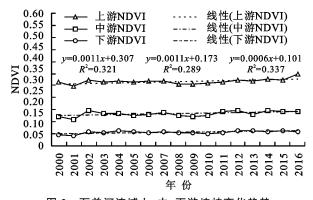


图 2 石羊河流域上、中、下游植被变化趋势

3.2 沙尘暴变化特征

3.2.1 沙尘暴频次的时间变化特征 近 60 年沙尘暴年频次变化(图 3)显示,流域沙尘暴显著减少,年际倾向率为-2.8 d/10 a(P<0.001),中游减少速度较慢(-1.4 d/10 a,P<0.001),下游减少速度较快(-7.1 d/10 a,P<0.001),上游未出现过沙尘暴;年代际变化(表 1)表明,20 世纪 70 年代是沙尘暴高频期,80年代开始持续减少,2001—2010 年减少速度有所减缓,近 10 年减少最明显,较 70 年代减少了 14.5 天。

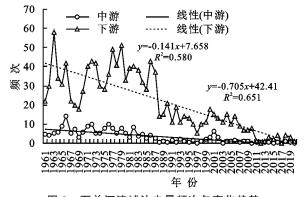


图 3 石羊河流域沙尘暴频次年变化趋势 从图 4 可以看出,石羊河流域沙尘暴四季均呈减少

趋势,减少速度为春季(-1.2 d/10 a)>夏季(-0.8 d/10 a)>冬季(-0.7 d/10 a)>秋季(-0.2 d/10 a), 日四季变化趋势均为P<<0.001。

表 1 石羊河流域沙尘暴频次距平年代际变化 单位:天

起止年限	中游	下游	流域
1961—1970	3.1	9.5	4.7
1971—1980	3.9	18.4	7.5
1981—1990	-0.2	9.8	2.3
1991—2000	-1.9	-8.7	-3.6
2001—2010	-1.8	-10.0	-3.9
2011—2020	-3.0	-19.0	-7.0

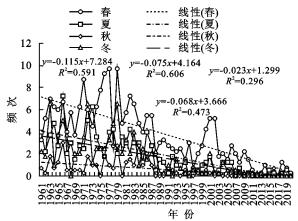


图 4 石羊河流域沙尘暴四季变化趋势

3.2.2 沙尘暴频次的空间变化特征 石羊河流域沙尘暴发生频次为民勤(20.9 d/a)>凉州(4.9 d/a)> 永昌(3.0 d/a)>古浪(2.1 d/a),乌鞘岭、肃南、民乐未出现过沙尘暴。地理分布为临近沙漠地区多,远离沙漠地区少。随着时间变化该区沙尘暴显著减少,其特点主要为下游三面被沙漠所围的民勤县,也是发生频次最多的地方,减少速度最快,其次为中游的凉州区、永昌县、古浪县。这与近年来全球气候变暖、中纬度西风带强度减弱、大风日数减少,区域生态的重建和恢复息息相关。

3.2.3 沙尘暴持续时间变化特征 石羊河流域沙尘暴过程平均持续时间为 133.3 min,中游为 96.8 min,下游为 146.6 min,下游是持续 60~300 min 的频次最多,占总频次的 51.8%,其次<60 min 占总频次的 34.2%,>300 min 频次最少,占总频次的 13.9%;中游<60 min 频次最多,占总频次的 50.1%,其次为60~300 min,占总频次的 45.6%,>300 min 的频次最少,仅占总频次的 4.3%。

冬季、春季、秋季持续时间为 $60\sim300$ min 的频次最多,分别占总频次的 52.9%, 52.1%, 56.5%, >300 min 的 频次最少,分别占总频次的 15.5%, 12.6%, 13.8%, 夏季 <60 min 频次最多,占总频次的 53.1%, >300 min 频次最少,仅占总频次的 4.9%.

近 60 年,沙尘暴持续时间显著缩短(图 5),年际倾向率为—12.2 min/10 a(P<0.01),中游缩短时间较慢(—10.4 min/10 a),P<0.1),下游缩短时间较快(—17.1 min/10 a,P<0.001)。年代际变化显示(表 2),中游是 21 世纪前 10 年持续时间最长,平均持续时间为 109.8 min,主要是因为 2006 年、2009 年出现 2次长时间沙尘暴所致。从 20 世纪 60 年代开始到 90 年代持续时间持续缩短,21 世纪前 10 年迅速反弹延长,近 10 年又迅速缩短。下游 20 世纪 70年代持续时间最长,平均持续时间为 161.1 min,80年代开始到 2020年持续时间最长,之后开始缩短,流域 20 世纪 70 年代持续时间最长,之后开始缩短,21 世纪前 10 年有所反弹,近 10 年持续时间最短,较70 年代缩短 60.9 min。

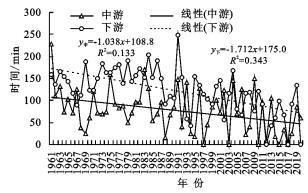


图 5 石羊河流域沙尘暴持续时间变化趋势 表 2 石羊河流域沙尘暴持续时间距平年代际变化

单位:min

起止年限	中游	下游	流域
1961—1970	19.2	16.2	17.7
1971—1980	10.4	38.3	19.2
1981—1990	10.7	25.6	15.2
1991—2000	-1.9	5.1	-0.1
2001—2010	32.6	-12.7	17.0
2011—2020	-34.0	-64.1	-41.7

3.2.4 沙尘暴强度变化特征 以每次沙尘暴天气过程中最小能见度的大小来表征沙尘暴的强度,流域沙尘暴过程平均最小能见度为 $0.496~\mathrm{km}$ (沙尘暴), $0.5\sim1.0~\mathrm{km}$ (沙尘暴)的频次最多,占总频次的 54.7%, 其次为 $0.05\sim0.50~\mathrm{km}$ (强沙尘暴)的,占总频次的 41.8%, $<0.05~\mathrm{km}$ (特强沙尘暴)的频次最少,仅占总频次的 3.5%。中下游均为 $0.5\sim1.0~\mathrm{km}$ (沙尘暴)的频次最多, $<0.05~\mathrm{km}$ (特强沙尘暴)的频次最少,流域沙尘暴以普通类型为主。

四季均为 $0.5 \sim 1.0$ km(沙尘暴)的频次最多,其次为 $0.05 \sim 0.50$ km(强沙尘暴)的,< 0.05 km(特强沙尘暴)的频次最少。

近 21 年流域沙尘暴年均最小能见度呈波浪式持平变化,维持在 0.496 km 上下波动,2012 年最小值

为 0.08 km, 2014 年最大值为 0.63 km。

3.3 植被覆盖度与沙尘暴的关系

3.3.1 NDVI与沙尘暴频次的关系 沙尘暴年序列与同期归一化植被指数变化曲线(图 6)显示,沙尘暴频次与 NDVI 有较好的反对应关系,沙尘暴呈逐年减少,NDVI则逐年增大,2001年沙尘暴最多(9.0 d),对应 NDVI最小(0.157),2012年沙尘暴最少(0.33 d),对应 NDVI最大(0.186),说明植被覆盖度的改善对沙尘暴有明显抑制作用。

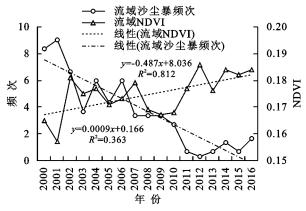


图 6 石羊河流域沙尘暴频次与 NDVI 变化趋势

进一步利用相关系数法分析沙尘暴频次与 ND-VI 的关系(表 3) 发现,流域沙尘暴与当年和前 1 年流域 NDVI、NDVI>0.3 面积、上中下游 NDVI 均呈显著负相关(P<0.05),表明随着气候暖湿化进程加快,植被覆盖面积逐渐扩大,抑制地面尘土扬起,从而导致沙尘暴减少。

表 3 石羊河流域沙尘暴频次与植被影响因子相关系数

植被影响因子	中游频次	下游频次	流域频次
当年全流域 NDVI	-0.63 * *	-0.58*	-0.65 * *
当年 NDVI>0.3 面积	-0.62 * *	-0.45	-0.55*
当年上游 NDVI	-0.45	-0.39	-0.45
当年中游 NDVI	-0.57 *	-0.55*	-0.61 * *
当年下游 NDVI	-0.69**	-0.60*	-0.69**
前1年全流域 NDVI	-0.62**	-0.55*	-0.63 * *
前1年 NDVI>0.3 面积	-0.53*	-0.47	-0.54*
前1年上游 NDVI	-0.44	-0.48	-0.51*
前1年中游 NDVI	-0.59*	-0.53*	-0.60*
前1年下游 NDVI	-0.67 * *	-0.47	-0.59*

注: * * 、* 表示分别通过 a = 0.01, 0.05 置信度检验。下同。

3.3.2 NDVI与沙尘暴持续时间的关系 沙尘暴持续时间与同期归一化植被指数变化曲线(图 7)显示,沙尘暴持续时间与 NDVI 也有较好的反对应关系,沙尘暴持续时间呈波动减少趋势, NDVI则呈波动增大趋势, 2004 年沙尘暴持续时间最长(152.6 min), 对应 NDVI 是平均状态(0.177), 并不是最小, 2012 年沙尘暴持续时间最短(4.7 min), 对应 NDVI 最大(0.186), 说明植被覆盖对沙尘暴的持续时间有一定影响, 植被覆盖较好的地方发生沙尘暴时持续时间较短。

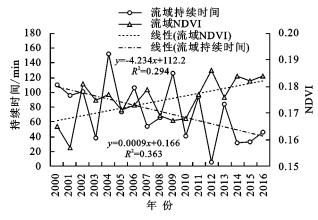


图 7 石羊河流域沙尘暴持续时间与 NDVI 变化趋势

利用相关系数法分析沙尘暴持续时间与 NDVI 的 关系(表 4)发现,流域沙尘暴持续时间与当年和前 1 年流域 NDVI、NDVI > 0.3 面积、上中下游 NDVI 均呈显著负相关,其中当年流域 NDVI、当年 NDVI > 0.3 面积、当年中游 NDVI 和前 1 年上游 NDVI 通过置信度 0.05 检验,其他未通过。

表 4 石羊河流域沙尘暴持续时间与植被影响因子相关系数

植被影响因子	中游时间	下游时间	流域时间
当年全流域 NDVI	-0.30	-0.57*	-0.48*
当年 NDVI>0.3 面积	-0.35	-0.47	-0.48 *
当年上游 NDVI	-0.22	-0.47	-0.36
当年中游 NDVI	-0.34	-0.52*	-0.50 *
当年下游 NDVI	-0.12	-0.58*	-0.32
前1年全流域 NDVI	-0.44	-0.25	-0.48
前1年 NDVI>0.3 面积	-0.39	-0.16	-0.40
前1年上游 NDVI	-0.52*	-0.33	-0.58*
前1年中游 NDVI	-0.42	-0.23	-0.45
前 1 年下游 NDVI	-0.34	-0.19	-0.37

3.3.3 NDVI与沙尘暴强度的关系 沙尘暴过程平均最小能见度与同期归一化植被指数变化曲线(图8)显示,沙尘暴强度与 NDVI 有较弱的反对应关系,沙尘暴强度基本维持不变, NDVI 则呈波动增大,2009年平均最小能见度最大(6.07 km),对应 NDVI是第3小值(0.167),2012年沙尘暴平均最小能见度最小(0.80 km),对应 NDVI最大(0.186),说明植被覆盖对沙尘暴强度有一定影响,植被覆盖较好的地方发生沙尘暴时强度相对较弱。

利用相关系数法分析沙尘暴强度与 NDVI 的关系(表 5)发现,流域沙尘暴强度与当年流域 NDVI、NDVI>0.3 面积、上中下游 NDVI 均呈弱负相关,与前 1年流域 NDVI、NDVI>0.3 面积、上中下游 NDVI 均呈弱正相关,以上均未通过信度 0.05 检验。即当年流域植被较好,发生沙尘暴时,强度较弱,当年植被对沙尘暴强度有一定弱化作用。前 1年流域植被较好,发生沙尘暴时强度反而较强,究其原因主要是

中游占地面积较大,地表以黏土为主,前1年降水较多时,夏季植被涨势好,冬季落叶干枯,干土层增厚,来年发生大风沙尘暴时,沙源丰富,利于尘土扬起,影响能见度的大小;下游以沙土为主,前1年植被涨势较好时,说明降水较多,土壤湿度大,来年发生大风沙尘暴时,能抑制沙尘扬起。

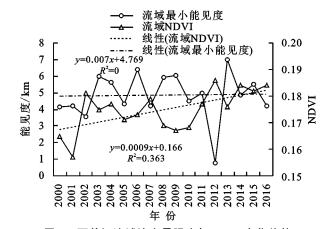


图 8 石羊河流域沙尘暴强度与 NDVI 变化趋势 5 石羊河流域沙尘暴强度与植被影响因子相关系数

植被影响因子	中游强度	下游强度	流域强度
当年全流域 NDVI	-0.34	-0.16	-0.27
当年 NDVI>0.3 面积	-0.37	-0.13	-0.26
当年上游 NDVI	-0.19	-0.19	-0.22
当年中游 NDVI	-0.44	-0.10	-0.31
当年下游 NDVI	-0.08	-0.19	-0.10
前 1 年全流域 NDVI	0.37	-0.15	0.28
前1年 NDVI>0.3 面积	0.41	-0.16	0.27
前1年上游 NDVI	0.23	0.03	0.26
前1年中游 NDVI	0.34	-0.24	0.21
前1年下游 NDVI	0.41	-0.07	0.36

3.3.4 大风日数相同情况下植被与沙尘暴的关系 大风、丰富的沙尘源和不稳定天气是沙尘暴形成的 3 大要素,众所周知,沙尘暴发生发展的决定因素是大 风(动力因子),主要影响因素是起尘源(物质条件)。 流域内植被覆盖度的好坏直接影响该区的起沙量,选 取大风日数相同年份的沙尘暴频次、平均持续时间、 平均最小能见度和相应年份的 NDVI 数据(表 6)分 析植被对沙尘暴的影响程度。结果发现,NDVI 与沙 尘暴频次和持续时间呈负相关(相关系数为 0.70), 均未通过 0.05 信度检验。

通过以上分析,进一步验证在沙尘暴决定因素 (大风)不变的情况下,流域植被覆盖度的大小直接影响起沙量的大小,间接影响沙尘暴的发生频次、持续时间和强度,特别对沙尘暴的强度影响程度最大,是沙尘暴发生发展的主要影响因子之一。由此可见,植被改善对沙尘暴有明显抑制作用。

表 6 大风、沙尘暴与植被的关系

年份	大风	沙尘暴	持续	最小	流域
平切	频次	频次	时间/min	能见度/km	NDVI
2006	9.3	4.5	105.9	5.9	0.173
2008	9.0	2.5	66.0	5.3	0.169
2010	8.8	2.0	40.6	4.5	0.168
2013	9.3	0.5	84.7	7.0	0.176
2014	9.3	1.0	32.1	6.3	0.184

4 讨论

石羊河流域植被 2000-2006 年总体处于退化状 态,2007-2016年波动增大,特别2010年以后恢复 比较明显,这一结论与徐晓宁等[23]和任媛等[24]的研 究基本一致;流域平均植被覆盖度较低,随着气候暖 湿化和流域综合治理工程的实施,全流域自然植被均 开始恢复,因地理位置和降水量增加速度不同,上、中 游恢复速度比下游快,与李丽丽等[12]的"全流域以增 加为主,绿洲区增加最为明显"的结论相同;沙尘暴频 次显著减少,过程持续时间显著缩短,与李玲萍等[25] 分析的结果相同;沙尘暴强度无明显变化,最小能见 度维持在 0.496 km 左右,这一结论与赵明瑞等^[26]用 2001-2010 年民勤沙尘暴资料得出的"最小能见度 有减小趋势"有所不同,主要原因是研究范围和资料 长度不同所致;沙尘暴频次与当年和前1年流域植被 覆盖度呈显著负相关,植被覆盖度的改善对沙尘暴有 明显抑制作用,与李璠等[8]的"植被对沙尘暴有明显 影响"结论基本一致,与杨晓军等[27]的"植被减少是 沙源不能根本改善的主要原因"结论一致,与特日格 乐等[28]的"沙尘暴发生日数与前1年的植被覆盖度 呈负相关"结论也基本一致,但与沈松雨等[29]的"沙 尘暴频次与植被覆盖度的相关性较低"不同,究其原 因是研究区地貌、气候特征、所用资料年代不同所致。 沙尘暴持续时间和强度与植被覆盖度之间的关系尚 未有同行研究,有待进一步探讨。"在大风日数相同 情况下,流域植被覆盖度的大小,直接影响着起沙量 的大小,间接影响着沙尘暴的发生频次、持续时间和 强度,特别对沙尘暴的强度影响程度较大,是沙尘暴 发生发展的主要影响因素之一",这一结论,因植被资 料年代较短,影响个例数量,有待积累更多资料,做进 一步探索研究。

5 结论

(1)石羊河流域植被轻微增大,但各年度变化较大,随着石羊河流域生态治理工程的实施,2007年开始自然植被逐渐恢复,特别2010年以后恢复比较明显;中游和上游植被中度增大,下游轻微增大;中游和

上游植被恢复速度比下游快,自然植被的恢复速度与降水量的增加速度呈显著正相关。

- (2)石羊河流域沙尘暴频次显著减少,年际倾向率为-2.8 d/10 a,近 10 年减少最显著,较 70 年代减少 14.5 天;中游减少速度较慢,下游减少速度较快;四季减少速度为春季>夏季>冬季>秋季。沙尘暴持续时间显著缩短,年际倾向率为-12.2 m/10 a,近 10 年持续时间最短,较 70 年代缩短 60.9 min;中游缩短时间较慢,下游缩短时间较快。沙尘暴以最小能见度 0.5~1.0 km 的普通类型为主,年均最小能见度呈波浪式持平变化,维持在 0.496 km 左右。
- (3) 石羊河流域沙尘暴频次和持续时间均与 NDVI 有较好的反对应关系,沙尘暴频次和持续时间呈 波动减少和缩短趋势,NDVI 则呈波动增大趋势;沙尘暴 频次和持续时间与当年和前1年全流域 NDVI、NDVI> 0.3 面积、上中下游 NDVI 均呈显著负相关。
- (4)石羊河流域沙尘暴强度与当年全流域 ND-VI、NDVI>0.3 面积、上中下游 NDVI 呈弱负相关,与前 1 年全流域 NDVI、NDVI>0.3 面积、上中下游 NDVI 呈弱正相关。
- (5)以上游保护涵养水源,中游修复生态环境,下游抢救民勤绿洲的具体举措,对石羊河流域进行综合治理后,自然植被逐渐恢复,抑制地面尘土扬起,加上大风频次显著减少,导致沙尘暴频次减少,持续时间缩短,强度有所弱化。石羊河流域专项治理成效显著,生态环境得到有效改善。

参考文献:

- [1] 何航,张勃,侯启,等.1982—2015 年中国北方归—化植 被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J].生态 与农村环境学报,2020,36(1);70-80.
- [2] Pan S F, Tian H Q, Shree R S, et al. Complex spatiotemporal responses of global terrestrial primary production to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century[J].PLoS One, 2014, 11(11):1-20.
- [3] 车彦军,赵军,张明军,等.不同气候变化情景下 2070—2099 年中国潜在植被及其敏感性[J].生态学报,2016,36(10):2885-2895.
- [4] 李丽丽,王大为,韩涛.2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J].中国沙漠,2018,38 (5):1108-1118.
- [5] 甄泉,王雅晴,冼超凡,等.沙尘暴对北京市空气细菌多样性特征的影响[J].生态学报,2019,39(2):717-725.
- [6] 罗晓玲,胡丽莉,杨梅.近30年石羊河流域气象灾害特征及风险评估技术研究[J].中国农学通报,2015,31 (32):205-210.
- [7] 高超,赵军,李传华,等.石羊河流域草地覆盖与其生态

- 服务功能变化[J].草业科学,2019,36(1):27-36.
- [8] 李璠,肖建设,祁栋林,等.柴达木盆地沙尘暴天气影响 因素[J].中国沙漠,2019,39(2);144-150.
- [9] 马坤,颜长珍,谢家丽,等.1975—2015 年鄂尔多斯沙漠 化的时空演变过程[J].中国沙漠,2018,38(2):233-242.
- [10] Aulia M R, Liyantono, Setiawan Y, et al. Drought detection of West Java's paddy field using MODIS EVI satellite images (case study: Rancaekek and Rancaekek Wetan)[J]. Procedia Envi-ronmental Sciences, 2016, 33:646-653.
- [11] 毛忠超,李森,张志山,等.荒漠一过渡带一绿洲界定:以石 羊河流域为例[J].中国沙漠,2020,40(2):177-184.
- [12] 李丽丽,王大为,韩涛.2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J].中国沙漠,2018,38 (5):1108-1118.
- [13] 郑倩,史海滨,李仙岳,等.河套灌区解放闸灌域植被指数与地下水埋深的定量关系[J].水土保持学报,2021,35(1):301-306,313.
- [14] 白旭阳,刘昱坤,杨武超,等.新疆玛纳斯河流域植被变化的特征与归因[J].水土保持学报,2020,34(6):192-197,210.
- [15] 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.
- [16] 中国气象局.GB/T 20480-2017 沙尘天气等级[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [17] 杨彩云,王世曦,杨春艳,等.川藏铁路沿线植被覆盖度时空变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2021,35(3):174-182.
- [18] 刘畅,胡雷,王军锋,等.湖北省一次能源消费的碳排放驱动 因素分解研究[J].环境科学与技术,2014,37(4),191-197.

(上接第83页)

- [20] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及 其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2): 232-237.
- [21] 李继福,胡敏,鲁剑巍.还田秸秆及其腐解产物的吸水能力研究[J].水土保持通报,2016,36(5):85-90.
- [22] 程东娟,齐鸣,刘淙琮.秸秆还田量对土壤持水性质影响的室内试验研究[J].节水灌溉,2020(9):30-32,38.
- [23] Yang J H, Liu H Q, Lei T W, et al. Effect of straw-incorporation into farming soil layer on surface runoff under simulated rainfall[J].Catena,2021,199:e105082.
- [24] 刘华清.秸秆掺混还田对坡面降雨产流水动力特征影响及机理研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2020.

- [19] 叶培龙,张强,王莺,等.1980—2018 年黄河上游气候变 化及其对生态植被和径流量的影响[J].大气科学学报,2020,43(6):967-979.
- [20] 滑永春,李增元,高志海.2001 年以来甘肃民勤植被覆盖变化分析[J].干旱区研究,2017,34(2):337-343.
- [21] 蓝欣,郑娇玉,江帆,等.石羊河流域下游植被覆盖变化与地下水和气候的响应分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2015,51(6):866-876.
- [22] 任立清,冉有华,任立新,等.2001—2018 年石羊河流域 植被变化及其对流域管理的启示[J].冰川冻土,2019, 41(5):1244-1251.
- [23] 徐晓宁,郭萍,张帆,等.政策驱动下石羊河流域生态效应变化分析[J].水土保持学报,2020,34(6):185-191.
- [24] 任媛,刘普幸.基于 EVI 和 MNDWI 指数的石羊河流域 水体、植被时空变化特征[J].冰川冻土,2018,40(4): 853-861.
- [25] 李玲萍,李岩瑛,孙占峰,等.河西走廊东部沙尘暴特征 及地面气象因素影响机制[J].干旱区研究,2019,36 (6):1457-1465.
- [26] 赵明瑞,闫大同,李岩瑛,等.甘肃民勤 2001—2010 年 沙尘暴变化特征及原因分析[J].中国沙漠,2013,33 (4):1144-1149.
- [27] 杨晓军,张强,叶培龙,等.中国北方 2021 年 3 月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J].中国沙漠,2021,41 (3):245-255.
- [28] 特日格乐,银山,咏梅,等.气象要素与植被覆盖对沙尘 暴发生发展的影响:以浑善达克沙地为例[J].赤峰学 院学报(自然科学版),2016,32(8),48-50.
- [29] 沈松雨,陈卫林.沙尘暴源区植被覆盖度变化:以北京为例[J].中国科技信息,2015(15):34-36.
- [25] 于美婷,李春雅,李华泰,等.秸秆还田对土壤理化性质影响的研究进展[门].江西农业学报,2021,33(1):33-39.
- [26] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.
- [27] 陈帅,陈强,孙涛,等.黑土坡耕地秸秆覆盖对表层土壤 结构和导气性的影响[J].水土保持通报,2016,36(1): 17-21.
- [28] 郝展宏,沙野,米国华.东北地区玉米秸秆覆盖技术应用现状与对策[J].玉米科学,2021,29(3):100-110.
- [29] 邹洪涛,王胜楠,闫洪亮,等.秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):52-60.