

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.005

# 岔巴沟流域植被变化特征及其对水沙的影响

吴志勇<sup>1</sup>, 侍恒<sup>1</sup>, 何海<sup>1</sup>, 徐征光<sup>1</sup>, 李源<sup>1</sup>, 倪用鑫<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:**基于 30 m × 30 m 分辨率陆地卫星 (Landsat) 遥感数据分析 1987—2018 年岔巴沟流域植被覆盖度的时空演变特征并生成流域土壤面蚀等级图, 分析其对流域产流产沙的影响。结果表明: 岔巴沟流域植被覆盖度整体呈现快速增长趋势, 从 1987 年的 24.7% 增加至 2018 年的 53.1%; 流域植被覆盖度构成发生很大转变, 2002 年以后中、高覆盖度区域比例大幅上升, 增长主要集中在丘陵沟壑地区; 随着植被覆盖度的增长, 流域产流产沙呈现减少趋势, 地表面蚀有所减少, 植被对产沙影响大于对产流影响。

**关键词:** 植被覆盖; 退耕还林; 产流; 产沙; 岔巴沟流域

**中图分类号:** TV14; Q948.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)01-0031-07

**Characteristics of vegetation change and impact on runoff and sediment in Chabagou Watershed** // WU Zhiyong<sup>1</sup>, SHI Heng<sup>1</sup>, HE Hai<sup>1</sup>, XU Zhengguang<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, NI Yongxin<sup>2</sup> (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** Based on the 30 m × 30 m resolution Landsat remote sensing data, the temporal and spatial evolution characteristics of vegetation coverage in Chabagou Watershed from 1987 to 2018 were analyzed, and the soil surface erosion level map of the watershed was generated to analyze its impact on runoff generation and sediment yield in the watershed. The results show that the vegetation coverage of Chabagou Watershed was increasing rapidly, from 24.7% in 1987 to 53.1% in 2018. The composition of vegetation coverage in the watershed had changed a lot. Since 2002, the proportion of medium and high coverage areas increased significantly, and the growth was mainly concentrated in hilly and gully areas. With the increase of vegetation coverage in the watershed, the runoff generation and sediment yield decreased, and the surface erosion decreased. The impact of vegetation on sediment yield was greater than that on runoff generation.

**Key words:** vegetation coverage; returning farmland to forests; runoff generation; sediment yield; Chabagou Watershed

近年来,黄河泥沙大幅度减少和黄土高原植被覆盖大幅度增加引起学术界的普遍关注<sup>[1-2]</sup>。不同植被覆盖度可改变下垫面的产流产沙条件,致使流域产汇流机制和水沙关系发生变化,进而对流域径流量与输沙量产生影响<sup>[3-4]</sup>。开展流域植被变化特征与水沙影响研究对有效开展黄土高原流域水土保持工作意义重大。

植被变化的监测一般采用人工实地测量和利用遥感影像计算植被指数两种方法。人工实地测量法主要有目估法、采样法、仪器法、模型法等,但人工实地测量只能应用在小区域,无法给出大尺度区域的植被信息。遥感具有大范围连续观测和高效获取数

据能力的特点<sup>[5]</sup>,已成为区域或全球植被覆盖度估算的有效手段。通过遥感数据计算植被覆盖度的方法主要有回归模型法、植被指数法、像元分解模型法等。像元分解模型法中的像元二分模型由于其简单的形式和原理,得到了广泛的应用。

陆地卫星 (Landsat) 系列遥感数据具有长期连续性、全球覆盖、时空分辨率适中等特点,是植被覆盖研究中最有效的遥感数据之一<sup>[6]</sup>。杨旭超等<sup>[7]</sup>采用该系列数据对呈贡区 30 年来植被覆盖度时空变化特征进行了分析;马娜等<sup>[8]</sup>基于该系列数据研究了正蓝旗生态工程对植被覆盖度改善的效果。植被变化趋势的分析通常采用一元线性回归方法,突

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51779071,51579065);中央高校基本科研业务费专项(2019B10214);中央级公益性科研院所基本业务费专项(HKW-JBYW-2017-12)

作者简介:吴志勇(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事水文物理规律模拟及预报研究。E-mail: zywu@hhu.edu.cn

变分析一般有 M-K 突变检验、Pettitt 突变检验等。如,李登科等<sup>[9]</sup>利用一元线性回归方法计算陕西省各市植被变化趋势;张亮等<sup>[10]</sup>采用 M-K 突变检验分析了长江流域植被覆盖度突变现象的区域差异;卫宇婷<sup>[11]</sup>采用 Pettitt 突变检验对陕西省 NDVI 序列进行突变点识别。

岔巴沟流域位于黄土高原主要产沙区,20 世纪 70—80 年代开展了大量淤地坝等工程建设,取得了较好的水土保持效果<sup>[12-14]</sup>;1990 年以后,淤地坝减水减沙效果进入相对稳定时期<sup>[15]</sup>。为突出研究植被变化对流域产流产沙的影响,选取 1987—2018 年共 32 年陆地卫星遥感数据,利用像元二分法计算植被覆盖度,结合高分辨率地理空间数据分析植被覆盖度的时空变化特征,并根据 1987 年以来的 66 场洪水数据,探讨植被变化对产流产沙的影响。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究区域概况

岔巴沟流域位于陕西省子洲县北部,流域平均海拔 1 080 m,是黄河中游的无定河流域支流,属于黄土高原丘陵沟壑区,坡陡沟深<sup>[16-17]</sup>。多年平均降水量为 470 mm,属干燥少雨的大陆性气候,年内降雨分配极不均匀,有 70% 的降水发生在 7—9 月,且多为降雨强度较大而历时短暂的暴雨,而暴雨是引起土壤侵蚀的关键因子<sup>[18]</sup>。岔巴沟流域水系、雨量站和水文站分布见图 1。

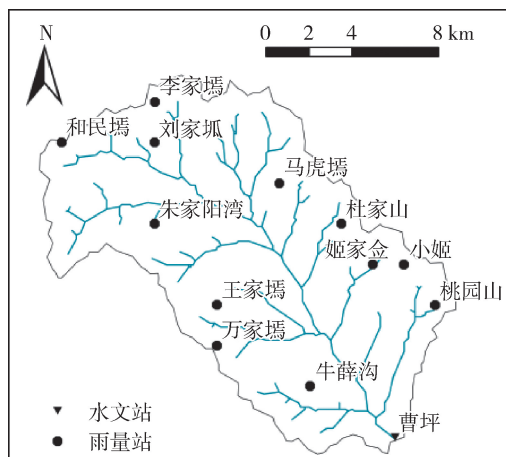


图 1 岔巴沟流域与站点分布

Fig. 1 Chabagou Watershed and site distribution

### 1.2 数据来源和处理方法

研究选用的遥感数据来自美国地质勘探局 (<http://glovis.usgs.gov>) 提供的 Landsat5、7、8 卫星 TM 数据,空间分辨率为 30 m × 30 m。因为 5—6 月以及 7 月上旬作物盖度较小,而非作物植被盖度同

一时期则比较大<sup>[19]</sup>,遥感影像主要选取 5—6 月云覆盖度均小于 10% 的影像,如果 5—6 月间影像均不满足云覆盖度均小于 10% 的条件,则选择 7 月影像,以降低作物和云量影响。采用辐射校正和大气校正去除天气、地理位置等影响。场次降雨、场次径流和场次泥沙数据来自黄河水利委员会水文局,年限为 1987—2017 年,其中 1987—1991 年有 14 场,1992—1996 年有 13 场,1997—2001 年有 9 场,2002—2006 年有 15 场,2007—2011 年有 6 场,2012—2017 年有 9 场。流域面平均雨量基于 13 个站点(图 1)资料采用反距离权重法先插值到 1 km 网格再取平均得到。

植被覆盖度计算采用像元二分模型<sup>[20]</sup>。像元二分模型是一种广泛采用的植被覆盖度计算方法,该方法假设一个像元的地表由植被覆盖部分与无植被覆盖部分组成,而遥感传感器观测到的光谱信息也由这两部分线性加权合成,各因子的权重即各自面积在像元中所占的比例,植被覆盖度就是植被覆盖部分面积所占的权重。植被覆盖度  $F_c$  计算公式为

$$F_c = (S - S_{soil}) / (S_{veg} - S_{soil}) \quad (1)$$

式中: $S$  为归一化植被指数; $S_{soil}$ 、 $S_{veg}$  分别为归一化植被指数在累计频率 0.5% 和 99.5% 处的值。为分析不同等级植被覆盖度的变化,将流域的植被覆盖度分为裸地[0,10%)、低[10%,30%)、中低[30%,50%)、中[50%,70%)、高( $\geq 70\%$ )5 个等级。

流域植被覆盖度变化率采用一元线性回归方程的斜率来说明,斜率大于 0 时说明该像元内植被覆盖度在某段时间的变化率是增加的,反之则是减少。变化趋势的显著性检验采用 M-K 检验<sup>[21]</sup>,其优点是统计测试的样本不需要服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,被广泛应用于检测非正态分布的水文气象等要素序列的变化趋势。植被覆盖度突变点采用 Pettitt 检验方法进行识别,该方法可以识别突变点的位置和数量,还可以判断其显著性。

流域面蚀情况是采用 30 m 陆地卫星遥感数据、土地利用类型数据和坡度数据,并根据 SL 190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》生成流域面蚀等级图。

## 2 结果分析

### 2.1 植被变化的时间趋势

岔巴沟流域植被覆盖度年际变化情况见图 2。1987—2018 年该流域的植被覆盖度增长趋势显著(通过 0.01 显著性水平检验),其中 2000 年的植被

覆盖度最低,2018 年的植被覆盖度最高。从 Pettitt 检验结果(图 3)可知,突变发生在 2002 年(通过 0.01 显著性水平检验),将植被年际变化情况分为两个阶段:①1987—2001 年植被覆盖度保持相对稳定状态阶段;②2002—2018 年植被覆盖度显著增加阶段。

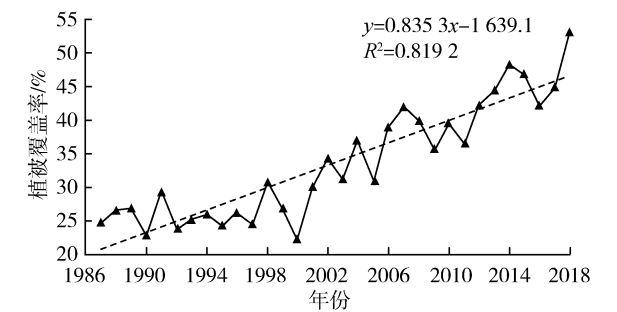


图 2 岔巴沟流域植被覆盖度年际变化

Fig.2 Interannual change of vegetation coverage in Chabagou Watershed

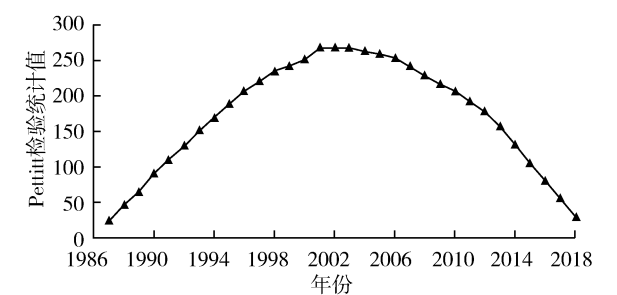


图 3 岔巴沟流域植被覆盖度 Pettitt 突变点检验

Fig.3 Pettitt mutation test of vegetation coverage in Chabagou Watershed

2.2 植被空间分布的变化趋势

岔巴沟流域植被空间变化以及不同等级植被覆盖度面积统计见图 4 和图 5。1987—2018 年每隔 5~6 年输出一张流域植被覆盖度图。1987 年植被覆盖度等级为低覆盖度和裸地的面积之和占流域面积 70.3%,中覆盖度和高覆盖度之和则不足 10%。1987—2001 年不同等级植被覆盖度面积保持相对稳定态势,从图 4 可以看出 1987 年、1992 年、1997 年 3 年中除沟谷区域植被覆盖度较高之外,其余区域植被覆盖度都很低。2002 年起裸地和低覆盖度面积迅速缩小,中覆盖度面积迅速增大,高覆盖度面积稳中有升。从图 4 可以看到 2002 年、2008 年、2012 年中高植被覆盖度区域开始沿河道向外拓展,到了 2018 年低覆盖度和裸地面积之和占全流域面积不足 15%,中覆盖度和高覆盖度面积之和超过 60%。岔巴沟流域植被覆盖度有转好的趋势,高植被覆盖度网格所占的面积逐渐增加,低植被覆盖度网格所占的面积则相反。

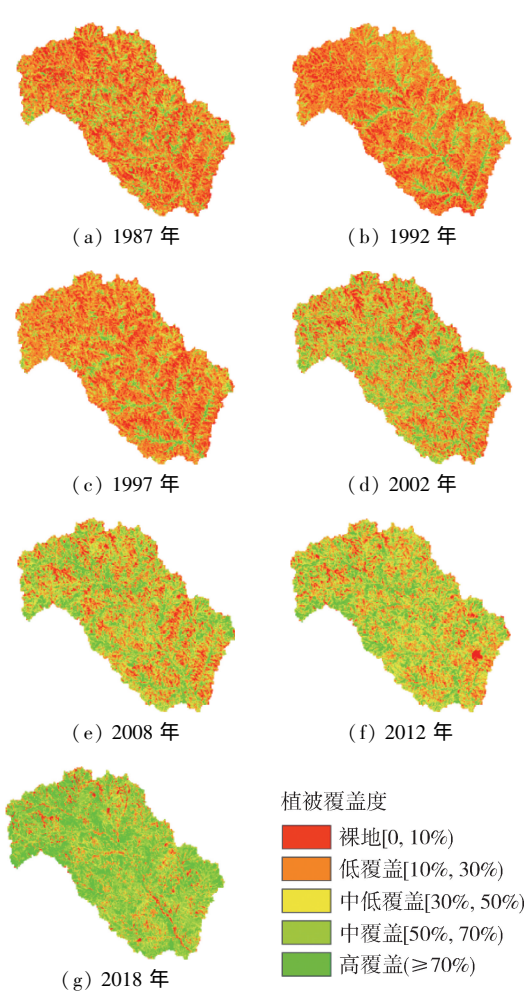


图 4 岔巴沟流域植被覆盖度空间变化

Fig.4 Spacial change of vegetation coverage in Chabagou Watershed

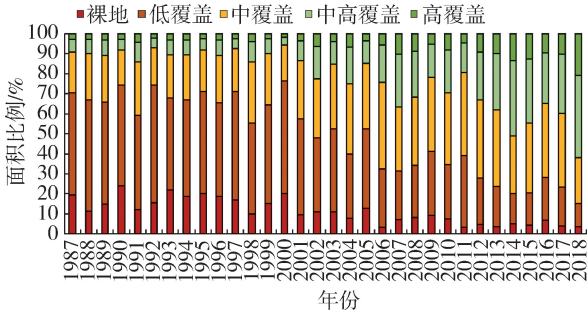


图 5 岔巴沟流域不同等级植被覆盖度面积统计

Fig.5 Statistics of vegetation coverage area of different grades in Chabagou Watershed

图 6(a) 为 1987—2018 年岔巴沟流域植被覆盖度变化率,岔巴沟流域植被大体呈现增长或者维持态势,少数区域植被覆盖度呈减少趋势。植被覆盖增长较大( $\geq 1\%$ )区域占流域面积 30.9%,略微增加( $0.1\% \sim 1\%$ )区域占比 48.2%,增长区域总计占比 79.1%,主要集中在沿沟分布的丘陵沟壑地区;植被减少较大区域( $< -1\%$ )占流域面积 2.7%,略微减少( $-1\% \sim -0.1\%$ )区域占比 11.8%,减少区域



总计占比 14.5%。图 6(b) 为植被覆盖度变化率显著性检验,其中减少趋势显著(通过 0.01 显著水平检验)区域和减少趋势明显(通过 0.05 显著水平检验)总计占比 3.8%,不通过显著性检验区域占比 21.9%,增加趋势显著(通过 0.01 显著水平检验)区域和增加趋势明显(通过 0.05 显著水平检验)区域总计占比 74.3%。增长趋势明显及显著区域和植被覆盖增长较大区域大致相同,而减少趋势明显及显著区域却明显少于植被覆盖度变化率减少区域,这说明大部分减少区域植被覆盖度的变化具有较大的偶然性,并不是一种稳定的演变。

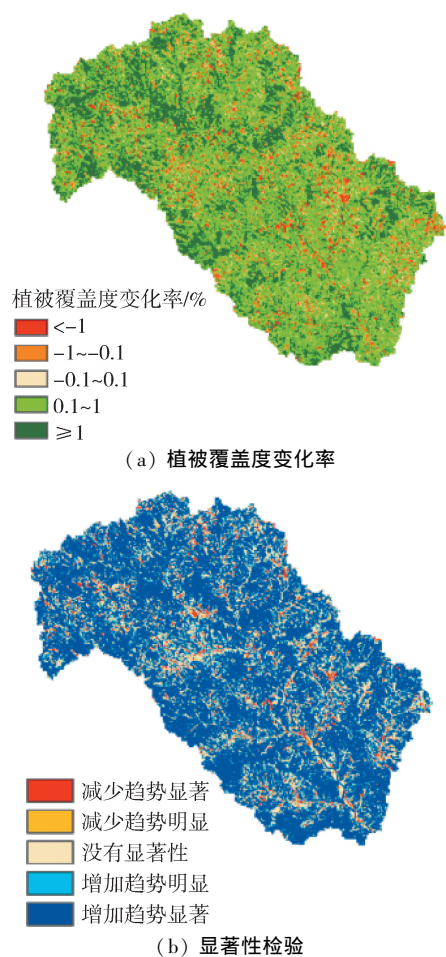


图 6 1987—2018 年岔巴沟流域植被覆盖度变化率  
Fig. 6 Vegetation change rate in Chabagou Watershed from 1987 to 2018

坡度是影响流域侵蚀的重要因素,探讨在不同坡度上的植被变化具有重要意义。图 7 为 1987—2018 年岔巴沟流域植被变化与坡度关系。就覆盖度而言,在坡度较小区( $<10^{\circ}$ ),多年平均植被覆盖度较小,且随着坡度增加植被覆盖度出现缓慢减小;在坡度中等区( $10^{\circ}\sim25^{\circ}$ ),多年平均植被覆盖度接近最小;在坡度较大区( $\geq25^{\circ}$ ),多年平均植被覆盖度较大。就增长率而言,植被覆盖度增长率随坡度增加而增加。参考耕地坡度标准,将  $25^{\circ}$  以下作为

缓坡, $25^{\circ}$  以上作为陡坡,陡坡多年平均植被覆盖度和变化率都是大于缓坡的。坡度制约着人类活动的强度和频率,陡坡区域人类破坏性活动较少,而建设性活动如退耕还林较多<sup>[22]</sup>,陡坡植被总体生存状况和恢复状况都要优于缓坡区域。

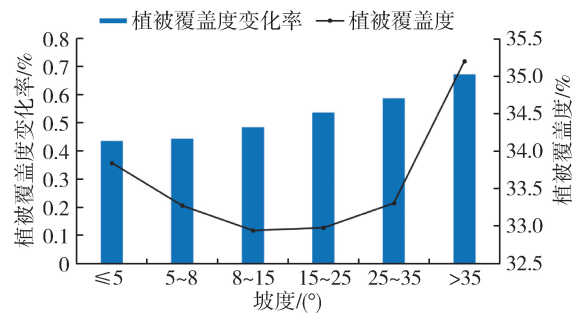


图 7 1987—2018 年岔巴沟流域植被变化与坡度关系  
Fig. 7 Relationship between vegetation change and slope in Chabagou Watershed from 1987 to 2018

3 讨论

3.1 植被覆盖度的变化原因

在自然条件下,降水是影响植被变化的主要气候因子,与植被覆盖呈较大正相关关系<sup>[23]</sup>。图 8 为岔巴沟流域多年平均降水量与植被覆盖度的关系。从图 8 可以看出,1987—2001 年间植被覆盖度和降水的相关系数为 0.41,而 2002—2017 年间两者相关系数为 0.29,两个时期降水均对植被生长有一定促进作用。虽然两个时期都没有通过显著性检验,但第一时期相关系数明显大于第二时期,这表明在 2002 年以后降水量对于植被变化的影响小于 2002 年以前。尽管如此,2008、2009 年以及 2015、2016 年较少的降水量使得植被覆盖度回落,这说明降水量过少是植被生长的限制因素。

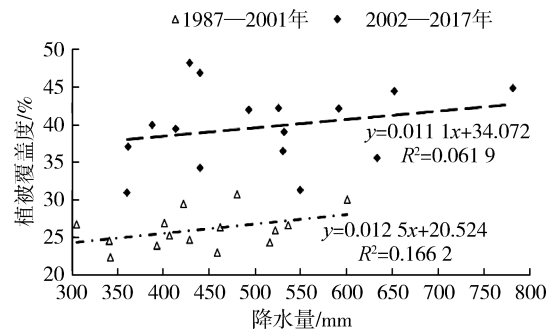


图 8 岔巴沟流域多年平均降水量与植被覆盖度关系  
Fig. 8 Relationship between annual average rainfall and vegetation coverage in Chabagou Watershed

2002 年以后,影响植被覆盖度增长的主要因子发生变化。张宝庆等<sup>[24]</sup>认为在 1999 年之后黄土高原地区植被覆盖对气候等自然因子相关性变差,植被增长主因是大规模植被建设。20 世纪 90 年代

末,全国开始推行退耕还林工程,1999 起子洲县总退耕还林面积为 262.1 km<sup>2</sup><sup>[25]</sup>,直接促进了岔巴沟流域植被的大幅增长。退耕还林 5 年以后土壤有机质会显著增加,10 年以上土壤碳、氮和速效养分会显著增加,退耕还林后当地生态系统会更有利于植被生长<sup>[26]</sup>。此外大量农牧民外出务工,减少了对植被的干扰和破坏,也为植被自然修复创造了良好环境<sup>[27]</sup>。岔巴沟流域退耕还林时间是 1999 年,但植被覆盖度突变点时间发生在 2002 年,突变时间相比退耕时间略有滞后,主要原因为 2000 年、2001 年连续两年降水量较少,以及早期退耕还林中存在植被建设布局 and 模式的科学性不足等问题共同导致造林成活率低<sup>[28]</sup>。

3.2 植被覆盖度变化的影响

植被覆盖度的大幅增加改变了下垫面的构成,进而对流域产流特性产生影响。选取 1987—2017 年 66 场洪水建立植被覆盖度突变前后的降水-径流关系(图 9)。可见突变前后差异较为明显,突变前后平均径流系数分别为 0.13 和 0.10,突变后相同降水条件下径流显著小于突变前。相同降水量下,突变后径流为突变前的 84.2%,说明植被覆盖度的增加减少了流域产流。

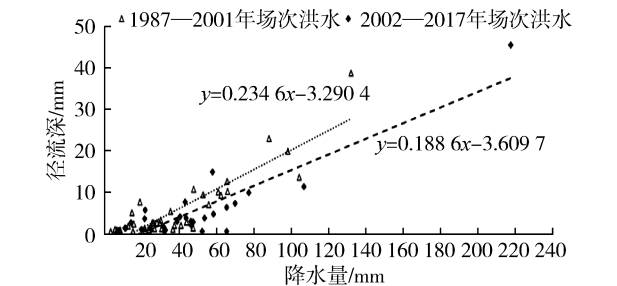


图 9 1987—2017 年岔巴沟流域降水量与径流的关系  
Fig.9 Relationship between rainfall and runoff in Chabagou Watershed from 1987 to 2017

植被通过截留雨水、减少产流与流速和提高土壤抗蚀性与抗冲性减少流域面蚀。根据植被覆盖度、坡度分布情况以及土地利用类型绘制 1987—2018 年每隔 5~6 年面蚀等级图(图 10)。从图 10 可以看出,1987—2018 年,面蚀程度和范围都有大幅度的削减。其中 1987—1997 年整体侵蚀情况变化不大,强烈及以上面蚀程度面积一直保持全流域面积 70.0% 以上,微度面蚀不足 5.0%。2002—2012 年强烈及以上面蚀程度面积不断减少,从 2002 年的 58.2% 减少到 2012 年的 47.0%,微度面蚀则从 2002 年的 6.2% 增长到 2012 年的 7.2%。2018 年流域侵蚀状况进一步好转,其中强烈及以上面蚀程度面积仅占 27.3%,微度面蚀则增长到 14.9%。岔巴沟流域植被覆盖度变化以及退耕还林政策的实

施深刻影响了流域面蚀,面蚀程度的变化则会进一步影响流域产沙。

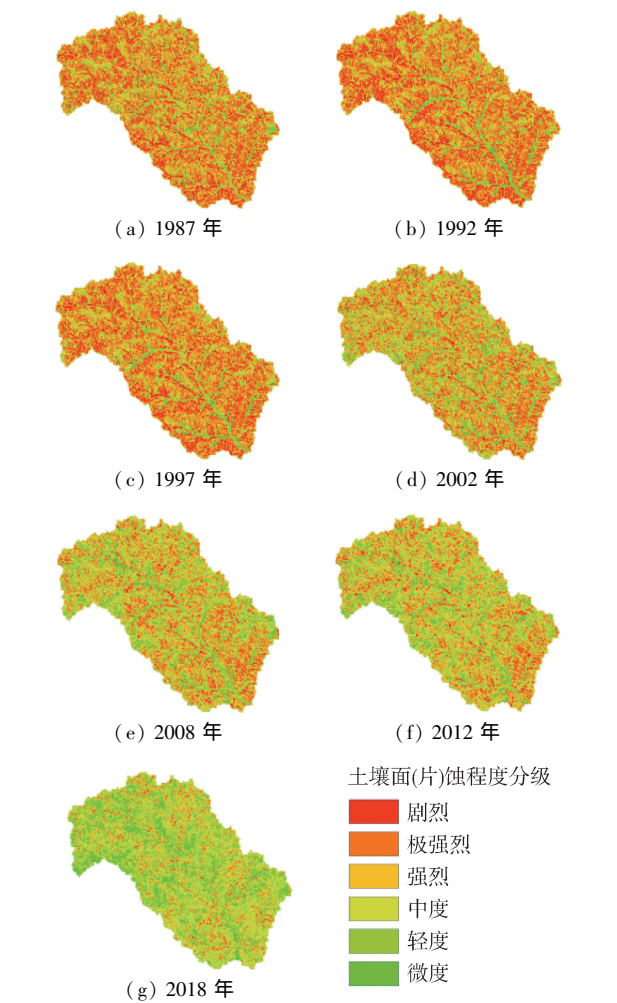


图 10 岔巴沟流域面蚀等级  
Fig.10 Grade of surface erosion in Chabagou Watershed

建立植被覆盖度突变前后的径流深-单场洪水输沙量关系(图 11)。可见植被覆盖度突变前后输沙量差异明显,相同径流量下,突变后单场洪水输沙量远小于突变前。从输沙总量来看,突变后的 30 场洪水中有 5 场洪水输沙量不超过 1 万 t,突变前则没

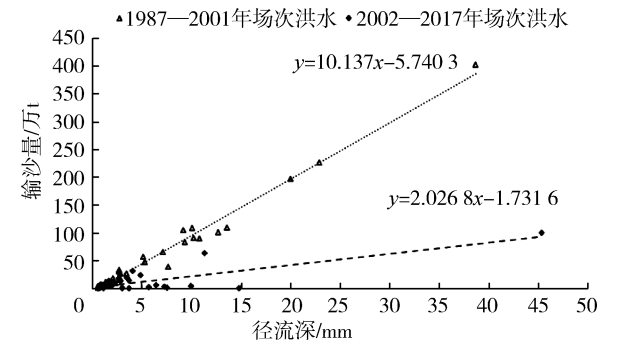


图 11 岔巴沟流域径流深与输沙量的关系  
Fig.11 Relationship between runoff depth and sediment discharge in Chabagou Watershed

有;从含沙量来看,突变前后平均含沙量分别为  $433 \text{ kg/m}^3$  和  $159 \text{ kg/m}^3$ ,突变后平均含沙量为突变前的 36.7%,特别是 2007 年以后的 15 场洪水,平均含沙量仅为  $21.4 \text{ kg/m}^3$ 。相比植被覆盖度增加的减水效果,其减沙效果更为显著。

## 4 结 论

a. 1987—2018 年岔巴沟流域植被覆盖度增长明显,从 1987 年的 24.7% 增长到 2018 年的 53.2%。变化主因是流域大规模植被建设活动的实施,其次降雨多寡也对植被生长具有重要影响。由于 2000、2001 年降水量过少以及早期退耕还林经验不足等原因,植被覆盖度的突变时间发生在 2002 年,相比退耕还林开始实施时间具有一定的滞后性。

b. 岔巴沟流域 79.1% 区域植被覆盖度呈现增长趋势,且陡坡区的增长率大于缓坡。2002 年以后中高覆盖度区域面积比例显著提升,从 1987 年中高覆盖度区域面积占流域面积不足 10% 到 2018 年超过 60%。植被覆盖增长区域占流域面积 79.1%,主要集中在丘陵沟壑地区。这种变化改变了流域面蚀格局、影响流域产流产沙特性。

c. 植被覆盖度的增加,减少了岔巴沟流域产流和产沙。植被覆盖度的增加显著减少了研究流域面蚀等级,强烈及以上面蚀程度面积从 1987 年占流域面积的 70.5% 到 2018 年仅占 27.3%,微度面蚀面积从 1987 年 4.1% 到 2018 年 14.9%。2002 年后,岔巴沟流域产流和产沙减少趋势明显,输沙量的减少情势比径流更显著。

## 参考文献:

- [1] 彭俊,陈沈良.近 60 年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响[J].地理学报,2009,64(11):1353-1362. (PENG Jun, CHEN Shenliang. The variation process of water and sediment and its effect on the Yellow River Delta over the six decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1353-1362. (in Chinese))
- [2] 张金萍,肖宏林,张鑫.基于经验模态分解方法和信息熵的水沙关系研究[J].水资源保护,2019,35(4):30-34. (ZHANG Jinping, XIAO Honglin, ZHANG Xin. Study on relationship between water and sediment based on empirical mode decomposition and information entropy [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 30-34. (in Chinese))
- [3] 刘慧,白音包力皋.植被物候模型研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):23-29. (LIU Hui, Baiyinbaoligao. Overview on the research of vegetation phenological model [J]. Journal of Hohai University

- (Natural Sciences), 2018, 46(1): 23-29. (in Chinese))
- [4] 肖培青,李艳霞,苏广旭,等.植被坡面产流特征及其侵蚀动力研究进展[J].人民黄河,2016,38(10):115-118. (XIAO Peiqing, LI Yanxia SU Guangxu, et al. Research progress and prospects for runoff generation and soil erosion dynamics under vegetation cover[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 115-118. (in Chinese))
- [5] 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. (CHENG Hongfang, ZHANG Wenbo, CHEN Feng. Advances in researches on application of remote sensing method to estimating vegetation coverage [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008(1): 13-18. (in Chinese))
- [6] 姜高珍,韩冰,高应波,等. Landsat 系列卫星对地观测 40 年回顾及 LDCM 前瞻[J].遥感学报,2013,17(5):1033-1048. (JIANG Gaozhen, HAN Bing, GAO Yingbo, et al. Review of 40-year earth observation with Landsat series and prospects of LDCM [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(5): 1033-1048. (in Chinese))
- [7] 杨旭超,张军,李杰,等.呈贡区近 30 年植被覆盖度时空变化特征与土地利用驱动[J].水土保持研究,2019,26(4):232-238. (YANG Xuchao, ZHANG Jun, LI Jie, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and land use driving in Chenggong District in recent 30 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 232-238. (in Chinese))
- [8] 马娜,胡云锋,庄大方,等.基于遥感和像元二分模型的内蒙正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J].地理科学,2012,32(2):251-256. (MA Na, HU Yunfeng, ZHUANG Dafang, et al. Vegetation coverage distribution and its changes in Plan Blue Banner based on remote sensing data and dimidiate pixel model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(2): 251-256. (in Chinese))
- [9] 李登科,范建忠,王娟.陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J].应用生态学报,2010,21(11):2896-2903. (LI Dengke, FAN Jianzhong, WANG Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage(FVC) in Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2896-2903. (in Chinese))
- [10] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].自然资源学报,2018,33(12):2084-2097. (ZHANG Liang, DING Mingjun, ZHANG Huamin, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982-2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(12): 2084-2097. (in Chinese))
- [11] 卫宇婷.山西省 1986—2015 年植被覆盖变化分析及其对气候因子的响应[D].晋中:山西农业大学,2018.
- [12] 慕俊谕,蔡强国,方海燕,等.岔巴沟流域水土保持减水减沙作用[J].中国水土保持科学,2010,8(1):28-33. (QI Junyu, CAI Qiangguo, FANG Haiyan, et al. Effects of

- soil and water conservation on reduction of runoff and sediment in Chabagou Watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(1): 28-33. (in Chinese))
- [13] 莫淑红, 巩瑶, 李洁, 等. 人类活动对岔巴沟流域洪水过程影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(3): 492-508. (MO Shuhong, GONG Ya, LI Jie, et al. Impact of human activities on flood process in Chabagou Basin of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(3): 492-508. (in Chinese))
- [14] 冉大川, 张志萍, 罗全华, 等. 大理河流域 1970—2002 年水保措施减洪减沙效益深化分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 17-23. (RAN Dachuan, ZHANG Zhiping, LUO Dahua, et al. More comprehensive analysis on benefits of flood & sediment reduction of soil and water conservation measures during 1970—2002 in Dali River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 17-23. (in Chinese))
- [15] 孙维营, 翟广宇, 张攀, 等. 淤地坝坝系在小流域综合治理蓄洪拦沙中的作用: 以岔巴沟流域为例[J]. 中国水土保持, 2016(2): 27-29. (SUN Weiying, ZHAI Guangyu, ZHANG Pan, et al. The silt dam system in comprehensive management of flood storage and sediment retention in small watershed: a case study of the Chabagou Watershed[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(2): 27-29. (in Chinese))
- [16] 刘万铨. 黄河流域黄土高原地区水土保持专项治理规划简介[J]. 人民黄河, 1991(2): 37-42. (LIU Wanquan. A short guide to the management plan of soil and water conservation of loess plateau region in the Huanghe River Basin[J]. Yellow River, 1991(2): 37-42. (in Chinese))
- [17] 邵治亮. 陕北丘陵沟壑区退耕种草战略研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [18] 邹宏荣, 王烨, 陆国宾, 等. 淮河上游产沙模拟研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 80-83. (ZOU Hongrong, WANG Ye, LU Guobing, et al. Simulation of sediment yield in upper reaches of Huaihe River[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 80-83. (in Chinese))
- [19] 张岩, 张清春, 刘宝元. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 2002(2): 268-272. (ZHANG Yan, ZHANG Qingchen, LIU Baoyuan. Study on vegetative coverage and height variation in Northern Loess Plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 2002(2): 268-272. (in Chinese))
- [20] 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(4): 153-159. (LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. Resources Science, 2004(4): 153-159. (in Chinese))
- [21] 董瑞, 杨肖丽, 任立良, 等. 黄河流域 1961—2012 年蒸发时空变化特征及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 16-21. (TONG Rui, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961—2012 and analysis of its influence factors[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 16-21. (in Chinese))
- [22] 李建国, 濮励杰, 刘金萍, 等. 2001 年至 2010 年三峡库区重庆段植被活动时空特征及其影响因素[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1500-1507. (LI Jianguo, PU Lijie, LIU Jinping, et al. The temporal and spatial characteristics of vegetation activity in Three Gorges Reservoir Area (Chongqing) from 2001 to 2010 and its influencing factors[J]. Resources Science, 2012, 34(8): 1500-1507. (in Chinese))
- [23] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 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(3): 204-210. (SUN Hongyu, WANG Changyao, NIU Zheng, et al. 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(3): 204-210. (in Chinese))
- [24] 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. (ZHANG Baoqing, WU Pute, ZHAN Xining. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982—2009[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 287-293. (in Chinese))
- [25] 李双双, 延军平, 刘新颜, 等. 新一轮退耕还林的“子洲模式”[N]. 陕西农村报, 2016-7-27(1).
- [26] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005(2): 272-278. (PENG Wenying, ZHANG Keli, CHEN Yao, et al. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the loess sloping croplands[J]. Journal of Natural Resources, 2005(2): 272-278. (in Chinese))
- [27] 马思远, 刘晓燕, 董国涛, 等. 近 40 a 河龙间西北片林草植被变化及其驱动力[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 103-106. (MA Siyuan, LIU Xiaoyan, DONG Guotao, et al. Vegetation change and its driving forces in the northwest area from Hekouzhen to Longmen of the Yellow River Basin in the last 40 years[J]. Yellow River, 2018, 40(5): 103-106. (in Chinese))
- [28] 田均良, 刘国彬. 黄土高原退耕还林工程中的现存问题及有关建议[J]. 水土保持通报, 2004(1): 63-65. (TIAN Junliang, LIU Guobing. Existing problems and suggestions on program for conversion of farmland to forestland or grassland in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004(1): 63-65. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-10-31 编辑: 王 芳)