

# 黄河中游河龙区间植被覆盖变化与径流输沙关系研究

信忠保<sup>1</sup> 余新晓<sup>1</sup> 甘敬<sup>2</sup> 王小平<sup>2</sup> 李金海<sup>2</sup>

(1 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 2 北京市园林绿化局)

**摘要:**黄河中游河口镇至龙门区间(河龙区间)是黄河主要的多沙粗沙区,黄河泥沙主要来源于此。为揭示近 10 年退耕还林工程实施以来河龙区间植被覆盖恢复过程及其对河龙区间径流输沙的影响,该文基于 GIMMS 和 SPOT VGT 两种遥感数据,采用 GIS 空间分析方法研究了 1981—2007 年河龙区间植被覆盖时空变化及其与径流输沙的关系。研究发现:①1981—2003 年河龙区间归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)整体呈上升趋势,位于其西北部地势平坦的沙地草滩区植被 NDVI 上升趋势显著,而黄土丘陵沟壑区和山地森林区的植被 NDVI 呈下降趋势。②退耕还林工程实施以来,1999—2007 年河龙区间植被 NDVI 在降水偏低的背景下,仍表现出显著的上升趋势,植被覆盖恢复同势强劲。植被 NDVI 上升最显著区域位于黄土丘陵沟壑区,即窟野河、秃尾河、无定河中下游以及延河中下游地区。从前后两个时期对比看,后期 NDVI 较前期提高 10% 以上和 20% 以上的区域分别占总面积的 72.5% 和 36.4%。③1950—2007 年河龙区间产流量、产沙量呈减少趋势,尤其自 20 世纪 80 年代以来,减少趋势非常明显。与 1950—1969 年相比,1980—2007 年产流量和产沙量分别减少了  $34.8 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $6.4 \times 10^8 \text{ t}$ ,占前期的 49.4% 和 64.9%。④河龙区间植被 NDVI 与产流量、产沙量存在正相关关系,但退耕还林工程实施后,这种同步波动关系发生扭转,表现为植被 NDVI 上升,产流量、产沙量下降。虽然降水偏少是河龙区间产流、产沙下降的重要原因,但植被恢复可能加剧了该趋势。

**关键词:**黄河中游;河龙区间;植被恢复;退耕还林;径流输沙

中图分类号:S715.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2009)05-0001-07

XIN Zhong-bao<sup>1</sup>; YU Xin-xiao<sup>1</sup>; GAN Jing<sup>2</sup>; WANG Xiao-ping<sup>2</sup>; LI Jin-hai<sup>2</sup>. **Vegetation restoration and its effects on runoff and sediment yield in Hekouzhen-Longmen Section of the middle reaches of Yellow River.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009) 31(5) 1-7 [Ch, 29 ref.]

<sup>1</sup> Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

<sup>2</sup> Beijing Municipal Bureau of Landscape and Forestry, 100029, P. R. China.

Sediment yield of the Yellow River is mainly originated from the drainage area between Hekouzhen and Longmen area (Helong Section). Spatio-temporal variations of vegetation cover in this area during 1981-2007 were investigated using GIMMS and SPOT VGT NDVI data. The authors also analyzed the interannual variations of vegetation cover, annual runoff and sediment yield, which were resulted from precipitation changes and the Project of Conversion of Cropland to Forestland (PCCF). The results showed that vegetation cover of Helong area had experienced an increasing trend during 1981-2007. The northwestern Helong, where the flat sandy land was covered by grass, was the mostly significant increasing region. The region where vegetation cover showing a decreasing trend mainly appeared in southern and southeastern Helong area, which was gullied hilly area or forested area. During 1999-2007, although precipitation was relatively low, vegetation cover showed a significant increasing trend in the Helong area due to the implementation of PCCF. During 1999-2007, the most significant improvement of vegetation cover mainly appeared on the loess gullied

收稿日期:2008-12-31

http://www.bjfujournal.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(40871136)、国家林业局林业公益性行业科研专项经费项目(200804022)、“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A0201)、北京市科技计划重大项目(D0706001000091)。

第一作者:信忠保,博士,讲师。主要研究方向:河流文学、生态水文学。电话:010-62336097 Email: xinzhongbao@126.com 地址:100083 北京林业大学水土保持学院。

责任作者:余新晓,教授,博士生导师。主要研究方向:水土保持及森林生态水文。电话:010-62338846 Email: yxx.bjfu@yahoo.com.cn 地址:同上。994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

hilly area, such as the drainage basins of the Kuye River, Tuwei River and the middle and lower reaches of Wuding River and Yanhe River. Comparison of the average annual maximum NDVI between the earlier (1998–2002) stage and the later stage (2003–2007) of PCCF indicated that, the areas with increases of 10% and 20% in NDVI accounted for 72.5% and 36.4% of the total area, respectively. Interannual variability of annual runoff and sediment yield showed a decreasing trend, especially since the 1980s, the decreasing trend was very obvious. Compared with 1950–1969, the average runoff and sediment yield of 1980–2007 decreased by  $34.8 \times 10^8 \text{ m}^3$  and  $6.4 \times 10^8 \text{ t}$ , accounting for 49.4% and 64.9% to those of 1950–1969, respectively. There was a positive correlation between the annual maximum NDVI and annual runoff as well as sediment yield. But the positive correlation had been reversed after the implementation of PCCF since 1999, i.e. an increasing NDVI trend of the Helong area was associated with the decreased runoff and sediment yield. Although less precipitation was an important driving factor for the decreasing runoff and sediment yield during 1999–2007, the restoration and improvement of vegetation cover might exacerbate this decreasing trend by enhancing evapotranspiration and alleviating soil erosion.

**Key words** middle reaches of Yellow River; Hekouzhen-Longmen Section; vegetation restoration; conversion of cropland to forestland; runoff and sediment

黄河中游河口镇至龙门区间(河龙区间)位于黄河中游上段,是黄土高原的主要组成部分。河龙区间集水面积为  $11.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占黄河流域面积的 14.8%, 其中多沙粗沙区面积占黄河中游多沙粗沙区面积的 76.3%, 因此, 河龙区间是黄河流域泥沙, 尤其是粗泥沙的主要来源区<sup>[1]</sup>(图 1)。过去 50 年, 黄河中游河龙区间经历了以降水减少、温度上升为主要特征的气候暖干化过程<sup>[2-4]</sup>, 同期, 也进行了大规模的水库、淤地坝、梯田等水利水保措施建设, 这都深刻地影响了黄河中游河龙区间的水沙变化<sup>[5-6]</sup>。

1999 年我国政府实施了退耕还林工程, 截至 2006 年已完成投资 1 303 亿元, 项目预期总投资 4 310 亿元<sup>[7]</sup>。黄河中游河龙区间是我国著名水土流失区, 因此也是退耕还林工程建设重点区和典型区。植被覆盖上升可以降低雨能, 增大地表渗透率, 提高地表糙度和抗蚀性, 具有明显的减少径流和减缓土壤侵蚀的作用, 其水土保持作用显著<sup>[8-12]</sup>。退耕还林工程实施 10 年来, 由工程带来的生态水文效应日益受到政府、公众和学者的广泛关注。

归一化植被指数 (normal difference vegetation index, NDVI) 是遥感影像的近红外波段反射率 (NIR) 和红外波段反射率 (R) 的比值参数, 计算公式是  $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ 。NDVI 是目前最为常用的表征植被状况的指标, 它和植被覆盖度、生物量、叶面积指数密切相关。目前, 已有许多利用 NDVI 数据研究了中国青藏高原、西北、华北等地区植被年际变化规律, 在植被覆盖时空变化方面得到许多新认识, 但在分析植被覆盖变化的驱动机制时, 还很少涉及到地面人类活动因素<sup>[13-17]</sup>, 显然, 人类活动是黄河中游河龙区间植被覆盖变化不可忽视的驱动因素之一。虽然, 已有一些植被覆盖变化的研究

已涉及到退耕还林工程的植被恢复, 但还缺乏从大空间尺度对退耕还林工程所带来的生态恢复及其生态水文过程进行监测和评价的专门研究<sup>[18-22]</sup>。本研究不仅具有重要的恢复生态学、生态水文学的理论意义, 并且可以增进人们对植被自然恢复过程和机制及其对区域生态环境影响的理解, 对目前退耕还林等生态环境的建设工作具有现实指导意义。

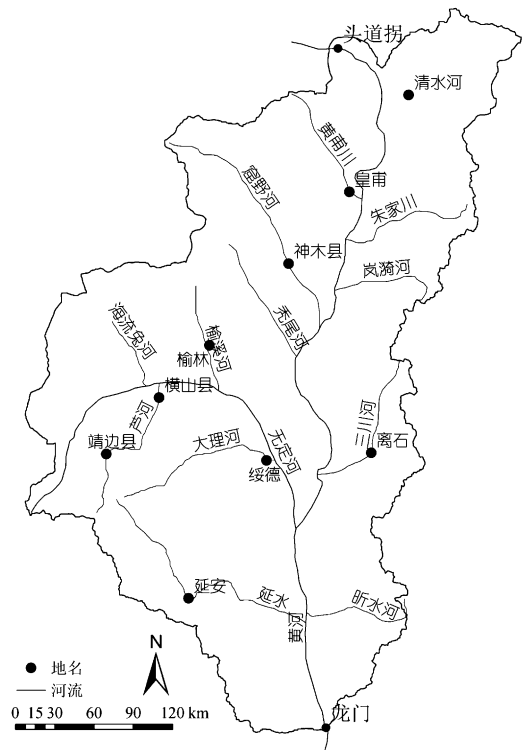


图 1 黄河中游河龙区间概况

FIGURE 1 Sketch map of Helong Section of the middle reaches of Yellow River

本文基于 GIMMS 和 SPOT VGT 两种植被 NDVI 数据, 研究了 1981–2007 年河龙区间植被覆盖变化

趋势和空间特征,探讨了黄河中游植被 NDVI 与径流量、输沙量的变化关系,以生态恢复角度增进黄河中游近年径流输沙锐减驱动机制的理解。

## 1 数据与方法

### 1.1 植被数据

本研究采用 8 km 分辨率的 GIMMS 数据和 1 km 分辨率的 SPOT VGT 两种植被 NDVI 数据,对 1981—2007 年黄河中游河龙区间的植被覆盖时空变化进行研究, GIMMS 数据的观测时间为 1981 年 7 月至 2003 年 12 月, SPOT VGT 数据为 1998 年 4 月至 2007 年 12 月,该数据恰与退耕还林工程同步,可用其对该工程的生态效应进行全程监测<sup>[23-24]</sup>。

### 1.2 水沙数据

黄河中游河龙区间的径流量、输沙量数据来自黄河水利委员会公布的《黄河泥沙公报》。头道拐和龙门分别是黄河中游河龙区间起始、结束的干流控制水文站,观测时间为 1950—2007 年。在分析植被 NDVI、水沙变化原因时,用到的年降水数据是河龙区间及其周边地区 18 个气象站点年降水量的平均值,时间序列为 1957—2005 年。

### 1.3 研究方法

基于 ARCGIS 9.2 平台,采用国际通用的最大化处理方法,将 15 日分辨率 GIMMS 数据通过最大化处理生成月最大化 NDVI,进而得到年最大化 NDVI。对 SPOT VGT 数据进行同样处理,得到月最大化 NDVI 和年最大化 NDVI。

以龙门与头道拐两水文站的年径流量之差作为河龙区间年产流量,以年输沙量之差作为河龙区间年产沙量,它们将被用于 1950—2007 年河龙区间年产流量、产沙量的年际间变化特征分析。

## 2 植被覆盖变化特征

### 2.1 月份变化

基于 GIMMS 数据统计不同月份植被 NDVI 的变化趋势。结果表明:1981—2003 年黄河中游河龙区间植被 NDVI 变化在不同月份之间呈现明显的差异,整体来看以植被 NDVI 上升为主要趋势,但只有春季的 5 月和秋季 10 月能超过  $P<0.01$  信度水平检验(表 1)。全球变暖造成生长期春季提前和秋季延后,是春秋季节植被 NDVI 呈显著上升趋势的主要原因<sup>[25-26]</sup>。

以  $P<0.05$  为显著性检验标准,统计黄河中游河龙区间 1981—2003 年不同月份植被 NDVI 显著上升、显著下降的面积占总面积的比例(表 1)。结果表明:1981—2003 年河龙区间植被 NDVI 以上升为主,植被 NDVI 在 5—10 月生长季呈显著上升的区域

占总面积的 19% 以上(除 6 月),其中 5 和 10 月分别达 51.2% 和 53.7%,而呈显著下降的区域所占面积比例较低,且大多在 10% 以下。

表 1 1981—2007 年黄河中游河龙区间不同月份植被覆盖变化趋势

TABLE 1 Monthly NDVI variation tendency in Helong Section of the middle reaches of Yellow River during 1981—2007

月份	1981—2003 年	显著上升 区/%	不明显/ %	显著下降 区/%	1999—2007 年
1	-0.28	0.9	86.2	12.9	-0.23
2	0.14	3.4	96.6	0.1	-0.20
3	-0.05	1.9	93.8	4.3	0.57
4	0.04	2.2	92.6	5.1	0.68*
5	0.54**	51.2	48.8	0.1	0.85***
6	-0.07	7.2	86.4	6.4	0.68*
7	0.05	19.6	70.8	9.6	0.70*
8	0.37	33.7	63.2	3.0	0.92***
9	0.31	27.2	71.4	1.4	0.92***
10	0.54**	53.7	46.3	0	0.84**
11	0.28	12.1	87.2	0.7	0.62*
12	-0.09	2.7	94.0	3.3	0.75**

注:1981—2003 年是指 1981—2003 年植被 NDVI 与年份的相关系数,正值表示 NDVI 上升,负值表示 NDVI 下降,1999—2007 年同此;\* 指植被 NDVI 变化通过  $P<0.05$  信度水平检验,\*\*指通过  $P<0.01$  信度水平检验,\*\*\*指通过  $P<0.001$  信度水平检验;显著上升区是植被覆盖上升趋势通过 0.05 显著性检验的区域占总面积的比例,显著下降区是植被下降趋势通过 0.05 显著性检验的区域占总面积的比例。

自 1999 年以来,在黄河中游地区大规模地实施了退耕还林工程,在此使用 SPOT VGT 数据研究 1999—2007 年不同月份植被 NDVI 的变化特征。逐年提取河龙区间不同月份植被 NDVI,将其与年份进行相关分析。研究发现:随着退耕还林工程的实施,1999—2007 年黄河中游河龙区间植被 NDVI 恢复态势强劲,5—10 月生长季植被 NDVI 都能通过显著性检验,其中 5、8 和 9 月都能通过  $P<0.001$  信度水平检验。

### 2.2 年际变化

年最大化 NDVI 代表了当地最佳植被覆盖水平,在此以其为植被覆盖指标,分析 1981—2007 年黄河中游河龙区间植被 NDVI 的年际波动特征。借助 GIMMS 和 SPOT VGT 在 1998—2003 年共有 6 年重叠期,采用线性外推方法对 GIMMS 年最大化植被 NDVI 进行插补,建立 1981—2007 年年最大化 NDVI 的时间序列( $R=0.952$ ,  $P<0.001$ ,  $N=6$ )。由图 2 可知,1981—2007 年黄河中游河龙区间植被 NDVI 呈显著上升趋势( $R=0.606$ ,  $P<0.001$ ,  $N=27$ ),期间大致经历 1981—1998 年植被 NDVI 上升期,1999—2001 年植被 NDVI 急剧下降到历史低位,然后植被 NDVI 进入了快速恢复、提升阶段,虽然 2004、2005 年降水相对偏少,但河龙区间植被 NDVI 仍表现为上升趋势。

### 2.3 时空变化

在分析了植被覆盖年际变化趋势的基础上,基于 GIMMS 数据进一步分析黄河中游河龙区间植被覆盖变化的空间特征。结果表明:1981—2003 年黄河中游

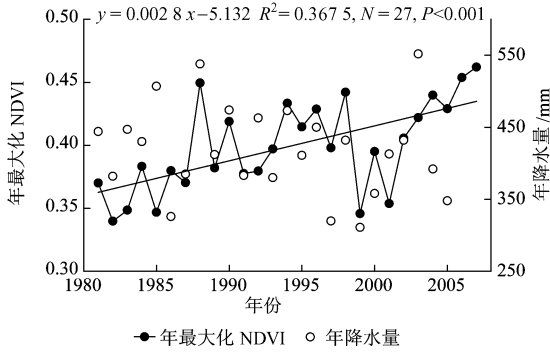


图2 1981—2007年黄河中游河龙区间植被覆盖年际变化趋势  
 FIGURE 2 Interannual variations of the annual maximum NDVI in Helong Section of the middle reaches of Yellow River during 1981—2007

河龙区间植被覆盖变化存在明显的空间差异, 植被NDVI显著上升区和显著下降区共存(图3a)。植被NDVI显著提高的区域成条带状分布于河龙区间的西北部, 大致从靖边、横山、榆林、神木、皇甫到清水河一带, 即沿长城一线以北沙丘沙地草滩区。植被NDVI显著下降的区域位于河龙区间南部黄土高原丘陵沟壑区和南部、东部的山地森林区。统计表明: 1981—2003年河龙区间有40.5%的区域植被NDVI呈现上升趋势, 8.6%的区域植被NDVI呈现明显下降趋势, 50.9%的区域不具有显著的变化趋势。

基于SPOT VGT数据分析退耕还林工程实施以来, 黄河中游河龙区间植被NDVI的变化特征。将时间序列分为工程实施前期(1998—2002年)和工程

实施后期(2003—2007年), 通过对工程实施前后两个时期的平均年最大NDVI的对比分析, 揭示植被覆盖变化的强度和空间特征, 在此用前后两时期NDVI的变化百分率进行量化。结果表明: 随着退耕还林工程的实施, 1999—2007年黄河中游河龙区间植被NDVI整体呈现强势恢复态势, 尤其是窟野河、秃尾河、无定河中下游以及延河中下游地区, 植被NDVI上升都在20%以上。统计表明: 后期NDVI较前期下降超过10%的区域只占总面积的0.3%, 而提高10%以上的区域占总面积的72.5%, 甚至有36.4%的面积提高20%以上, 可见植被覆盖提高是主要趋势。

值得说明的是: 1981—2003年植被覆盖显著上升区主要分布于河龙区间西北部的沙地草滩区, 该区侵蚀产沙强度相对较弱, 并不是河龙区间最主要的产沙区。以无定河流域为例, 其西北部的沙地草滩区输沙模数为118~725 t/(km<sup>2</sup>·a), 而黄土丘陵沟壑区达到1 879~25 112 t/(km<sup>2</sup>·a), 相差甚远<sup>[27]</sup>。位于河龙区间南部的黄土丘陵沟壑区是强烈侵蚀产沙区, 1981—2003年植被覆盖呈弱下降趋势。因此, 1981—2003年植被NDVI变化对黄河中游河龙区间产沙的影响可能并不显著。

黄土丘陵区是坡度大于25°的主要所在区域, 因此也是退耕还林工程实施的主要区域。从图3b可见, 1998—2007年植被恢复强劲区大多位于黄土丘

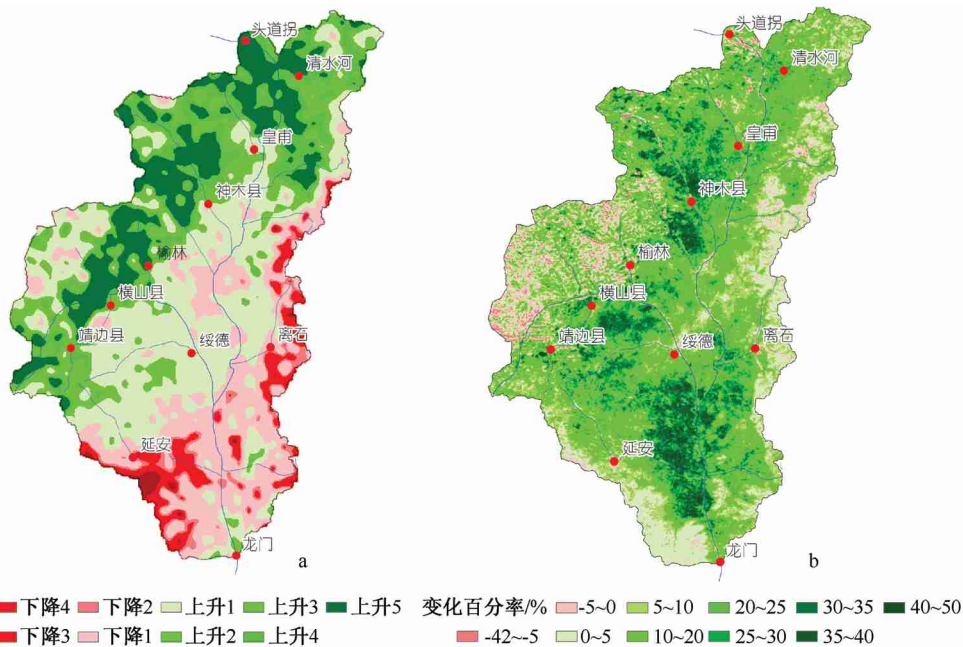


图3 1981—2007年黄河中游河龙区间植被覆盖时空变化

FIGURE 3 Spatio-temporal variations of vegetation cover in Helong Section of the middle reaches of Yellow River during 1981—2007

注: 图3a是1981—2003年河龙区间植被覆盖时空变化, 图例中下降1到下降5分别是指植被NDVI下降通过以下信度水平检验: ①  $P > 0.1$ , ②  $0.05 < P < 0.1$ , ③  $0.01 < P < 0.05$ , ④  $0.001 < P < 0.01$  和⑤  $P < 0.001$ ; 同理, 上升1到上升5分别是指植被NDVI上升通过以下信度水平检验: ①  $P > 0.1$ , ②  $0.05 < P < 0.1$ , ③  $0.01 < P < 0.05$ , ④  $0.001 < P < 0.01$  和⑤  $P < 0.001$ 。图3b是指退耕还林工程实施以来河龙区间植被覆盖的变化特征, 工程实施后期(2003—2007年)年最大NDVI值较前期(1998—2002年)的变化百分率。cnki.net

陵沟壑区，这里是黄河中游河龙区间重要的输沙区，这势必深刻地影响到该区的侵蚀产沙过程。

为进一步揭示植被覆盖变化在空间上的分布规律，以 1981—2003 年年最大 NDVI 值作为植被覆盖平均水平，通过叠置分析可知不同植被覆盖水平所对应的植被变化特征存在明显差异 (图 4a)。NDVI 大于 0.5 的区域大多分布在河龙区间南部、东部山地森林植被分布区，这里植被 NDVI 呈下降趋势，而 NDVI 相对较低的西北部沙地草滩区植被覆盖呈上升趋势。

将植被时空变化数据与基于 90 m DEM 数据生成的坡度数据进行叠置分析，进而统计不同坡度与植被变化的特征。结果表明：河龙区间西北部的沙地草滩区属于鄂尔多斯高原侵蚀残积、风积台地，地势平坦，坡度较小，期间植被 NDVI 呈上升趋势，而南部、东部黄土丘陵沟壑区和山地的坡度较大，植被 NDVI 呈下降趋势 (图 4b)。

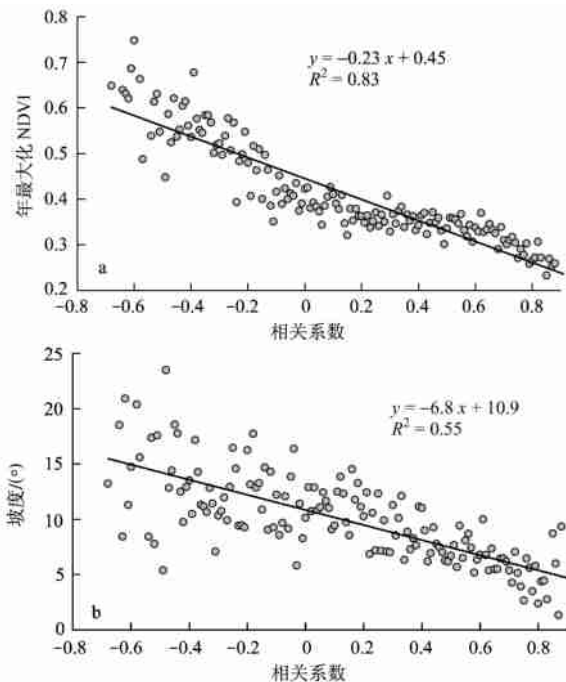


图 4 1981—2003 年黄河中游河龙区间植被变化与年最大化 NDVI、坡度之间的关系

FIGURE 4 Correlations between variations of NDVI and average annual maximum NDVI as well as slope degree in Helong Section of the middle reaches of Yellow River during 1981-2003

注：相关系数是指 1981—2003 年逐年最大化 NDVI 与年份的相关系数，正值表示植被 NDVI 呈上升趋势，负值表示植被 NDVI 呈下降趋势。

### 3 水沙变化趋势

河流径流量、输沙量是气候变化和人类活动共同作用的结果，对区域生态环境具有指示作用。过去 50 年，黄河中游河龙区间年产流量、年产沙量都

呈下降趋势 (图 5)。河龙区间产流量、产沙量 20 世纪 70 年代开始减少，80 年代大幅减少，90 年代中期以来急剧减少。与 1950—1969 年平均值相比，1980—2007 年河龙区间产流量减少了  $34.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，产沙量减少了  $6.4 \times 10^8 \text{ t}$ ，分别减少了 49.4% 和 64.9%。自 1999 年退耕还林以来，黄河中游河龙区间产流量和产沙量减少非常显著，较 20 世纪 90 年代分别下降了 35% 和 64%，只占 20 世纪五六十年代的 38% 和 17%。

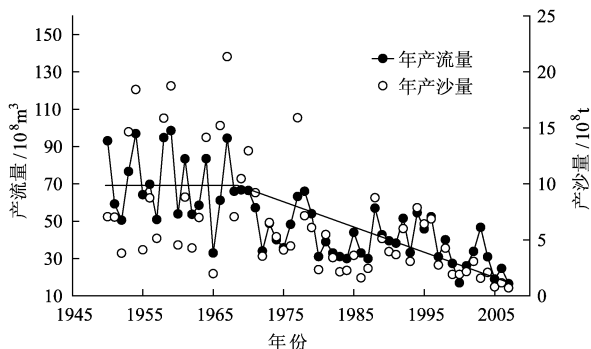


图 5 1950—2007 年黄河中游河龙区间产流量、产沙量的变化  
FIGURE 5 Interannual variations of annual runoff and sediment yield in Helong Section of the middle reaches of Yellow River during 1950-2007

关于黄河中游水沙自 20 世纪 70 年代以来明显减少的原因，已有大量研究<sup>[5-6]</sup>。普遍认为黄河中游开展的大规模水土保持工作，尤其是水库、淤地坝等水利水保工程措施的建设是黄河中游水沙明显减少的主要原因。

## 4 水沙变化与植被变化的关系

### 4.1 产流产沙与降水的关系

1957—2005 年黄河中游河龙区间年产流量、年产沙量与年降水量呈显著正相关，相关系数分别是 0.74 和 0.64，都能通过  $P < 0.001$  显著性水平检验。通过建立降水-产流和降水-产沙的双累积曲线，确定它们之间关系发生转折年份。由图 6 可知，大约在 1971 年降水-产流和降水-产沙关系发生了转折，即同样降水量所对应的产流量、产沙量较前期偏少，这与河龙区间 20 世纪 70 年代水土保持措施的面上拦沙密切相关。同样，大约在 1979 年，它们的关系又发生了一次转折，同样降水量所对应的产流量、产沙量再次偏少。值得注意的是，自 1999 年降水与产流产沙的关系再一次发生转折，同样降水所对应的产流产沙进一步偏少，这与退耕还林工程的实施同步。本研究使用的植被 NDVI 数据的时间序列是 1981—2007 年，这时期黄河中游河龙区间产流量、产

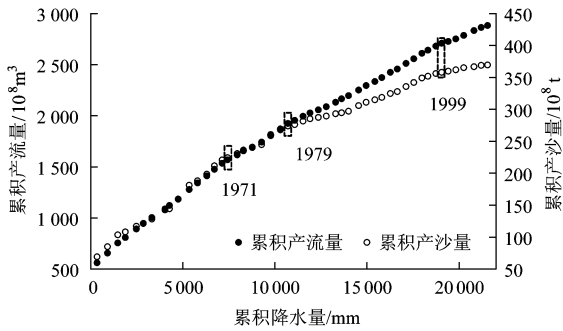


图6 黄河中游河龙区间降水量与产流量、产沙量的双累积关系

FIGURE 6 Correlations between annual precipitation and annual runoff as well as annual sediment yield in Helong Section of the middle reaches of Yellow River

沙量与自然状态有很大差别,在分析植被 NDVI 与产流量、产沙量关系时,要注意该水沙变化背景。

#### 4.2 产流产沙与植被 NDVI 的关系

黄河中游河龙区间产流量、产沙量与植被 NDVI 的年际间波动存在明显的同步性,它们的相关性分

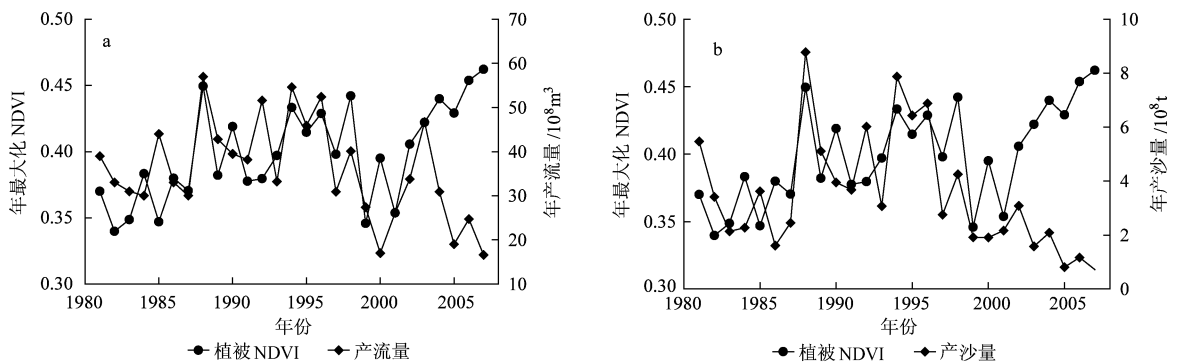


图7 1981—2007年黄河中游河龙区间产流量、产沙量与植被 NDVI 的关系

FIGURE 7 Correlations between the yearly maximum NDVI and annual runoff as well as annual sediment yield in Helong Section of the middle reaches of Yellow River during 1981-2007

近 10 年黄河中游河龙区间产流量、产沙量呈下降趋势,降水减少是其重要驱动因素。但是,随着植被 NDVI 提高,植被覆盖度的上升,区域蒸散发将随之加剧,因此,会造成地表径流的减少。许炯心<sup>[28]</sup>研究发现水土保持措施的实施增加了黄河中游河龙区间蒸发和蒸腾作用,降低了径流的可再生性。王浩等<sup>[29]</sup>基于分布式水文模型对河龙区间水土保持对径流量的影响进行了模拟,结果表明水土保持减少径流量  $9.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 减幅 14.4%。近 10 年来,在退耕还林工程的大规模建设下,河龙区植被覆盖恢复显著,这势必会通过加强植被蒸散发强度,进而减少了河龙区间近年来的径流量。

退耕还林工程主要是将  $>25^\circ$  的坡耕地转换为林地或草地,减少人类活动对坡耕地的扰动,降低水土流失强度,进而起到生态恢复重建的目的。黄土丘陵区是近 10 年河龙区间植被 NDVI 上升最为显著

别为 0.557 (1981—2003 年,  $N=23$ ,  $P<0.01$ ) 和 0.661 (1981—1998 年,  $N=18$ ,  $P<0.01$ )。但是,随着退耕还林工程实施,这种同步波动关系扭转为相反的变化趋势,表现为植被 NDVI 上升,产流量、产沙量下降(图 7)。产流量与植被 NDVI 年际波动关系自 2004 年开始扭转,而对于产沙量而言,自 1999 年之后其变化趋势就已不再同步。退耕还林工程实施所带来的植被 NDVI 迅猛恢复是造成这种异常变化的根本原因,1999—2005 年黄河中游河龙区间植被 NDVI 上升并不能很好地反映降水变化 ( $R=0.357$ ,  $P>0.5$ ,  $N=7$ )。

黄河中游河龙区间产流量、产沙量与降水量呈显著正相关关系,降水量偏低应是 2004—2007 年产流量、产沙量明显下降趋势的主要原因。1999—2003 年植被 NDVI 上升可能是随着降水恢复到常年水平的自然过程,但在 2004—2007 年降水偏少的情况下,植被 NDVI 仍表现出迅猛上升态势,由此可见,过去 10 年退耕还林工程带来的植被恢复成绩显著。

的区域,这里也是黄河中游主要的侵蚀产沙区,因此,这势必会降低区域侵蚀产沙强度,减少区间产沙量。另外,植被覆盖降低土壤侵蚀的过程中存在阈值现象,即只有植被覆盖度超过 30% 之后,植被才具有明显的减少土壤侵蚀的作用。NDVI 由工程初期的 0.35 上升到后期的 0.45,恰好是突破阈值之后的植被 NDVI 迅速提高,这很可能让植被覆盖的水土保持作用得以凸显。因此,退耕还林工程所带来的植被覆盖显著提高很可能是近年河龙区间产沙量显著减少的重要原因。

## 5 结 论

1) 1981—2007 年黄河中游河龙区间植被 NDVI 整体呈上升趋势,但不同月份变化趋势不同,只有 5 和 10 月具有明显的上升趋势,上升面积分别占总面积的 51.2% 和 53.7%。黄河中游河龙区间植被恢

复存在明显的空间差异。1981—2003年植被NDVI明显上升区域主要分布于西北部地势平坦的沙丘草滩区,即从靖边、横山、榆林、神木、皇甫到清水河一带;显著下降区域主要分布于南部黄土丘陵区 and 山地森林区。期间植被NDVI呈现上升趋势占总面积的40.5%,而明显下降的区域只有8.6%。

2)随着退耕还林工程的实施,1999—2007年黄河中游河龙区间植被NDVI在降水偏低的背景下,仍表现出显著的上升趋势,植被覆盖恢复态势强劲。植被NDVI上升最显著区域位于黄土丘陵沟壑区,即窟野河、秃尾河、无定河中下游以及延河中下游地区,这里也是黄土高原主要的侵蚀产沙区。从工程实施的前后两个时期对比来看,后期NDVI较前期提高10%以上的区域占总面积的72.5%,甚至有36.4%的面积提高20%以上,可见植被NDVI提高显著。

3)1950—2007年黄河中游河龙区间年产流量、年产沙量都呈下降趋势。与1950—1969年平均值相比,1980—2007年河龙区间产流量和产沙量分别减少了49.4%和64.9%。自1999年退耕还林以来,黄河中游河龙区间产流量和产沙量减少显著,较20世纪90年代分别下降了35%和64%,只占20世纪五六十年代的38%和17%。

4)1957—2005年黄河中游河龙区间年降水量和年产流量、年产沙量呈显著正相关,大约在1971、1979和1999年降水-产流、降水-产沙关系发生了明显变化。河龙区间产流量、产沙量与植被NDVI存在正相关关系,具有年际同步波动的特征。但自1999年之后,随着退耕还林工程实施,这种同步关系不再存在甚至相反,表现为植被NDVI明显上升,而产流量、产沙量明显下降。

### 参 考 文 献

- [1] 黄河中游水文水资源局.黄河中游水文(河口镇至龙门区间)[M].郑州:黄河水利出版社,2005:1.
- [2] 康玲玲,王昌高,张永兰,等.近50年黄河中游降水变化及其对径流的影响[J].人民黄河,2004,26(8):26-28.
- [3] 史辅成.河口镇—龙门区间降雨径流关系变化的原因[J].人民黄河,2006,28(4):24-25.
- [4] 信忠保,许炯心,马元旭.近50年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征[J].地理科学,2009,29(1):98-104.
- [5] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等.黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M].郑州:黄河水利出版社,2000:124-137.
- [6] 穆兴民,巴桑赤烈,ZHANG L,等.黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施响应[J].泥沙研究,2007(2):36-41.
- [7] 国家林业局.中国林业与生态建设状况公报[R/OL].(2008-01-21)[2008-12-14].[http://www.gov.cn/gzdt/2008-01/21/content\\_864441.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2008-01/21/content_864441.htm).
- [8] MORGAN R P C. *Soil erosion and conservation* [M]. Harlow: Longman, 1995.
- [9] BOCHET E, RUBIO J L, POESEN J. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain) [J]. *Geomorphology*, 1998, 23: 139-150.
- [10] DESCROIX L, VIRAMONTES D, VAUCLIN M. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico) [J]. *Catena*, 2001, 43: 115-135.
- [11] GYSSELS G, POESEN J, BOCHET E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29: 198-217.
- [12] 韦红波,李锐,杨勤科.我国植被水土保持功能研究进展[J].植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [13] 马明国,董立新,王雪梅.过去21年中国西北植被覆盖动态监测与模拟研究[J].冰川冻土,2003,25(2):232-236.
- [14] 梁四海,陈江,金晓媚,等.近21年青藏高原植被覆盖变化规律[J].地球科学进展,2007,22(1):33-40.
- [15] 徐兴奎,陈红,张凤.中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析[J].环境科学,2007,28(1):41-47.
- [16] 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):89-94.
- [17] 信忠保,许炯心.黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应[J].自然科学进展,2007,17(6):770-778.
- [18] 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.
- [19] 吴炳方,李苗苗,颜长珍,等.生态环境典型治理区5年期遥感动态监测[J].遥感学报,2005,9(1):32-38.
- [20] 卫建军,李新平,杨勤科,等.基于遥感的土地利用与退耕还林时空变化研究[J].水土保持通报,2007,27(2):87-90.
- [21] 李忠峰,李雪梅,蔡运龙,等.基于SPOT VEGETATION数据的榆林地区土地覆盖变化研究[J].干旱区资源与环境,2007,21(2):56-59.
- [22] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学:D辑 地球科学,2007,37(11):1504-1514.
- [23] TUCKER C J, PINZON J E, BROWN M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [24] ZHOU L, KAUFMANN R K, TIAN Y, et al. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D1): 4004.
- [25] MYNENI R B, KEELING C D, TUCKER C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1999 [J]. *Nature*, 1997, 386: 698-702.
- [26] 方精云,朴世龙,贺金生,等.近20年来中国植被活动在增强[J].中国科学:C辑 生命科学,2003,33(6):554-565.
- [27] 王随继.无定河流域不同地貌区水沙过程对比[J].地理研究,2007,26(3):508-517.
- [28] 许炯心.黄河流域河口镇至龙门区间的径流再生性变化及其影响因素[J].自然科学进展,2004,14(7):787-791.
- [29] 王浩,杨爱民,周祖昊,等.基于分布式水文模型的水土保持水文水资源效应研究[J].中国水土保持科学,2005,3(4):6-10.

(责任编辑 董晓燕)