

# 退耕还林还草工程实施对洛河流域土壤侵蚀的影响

崔晓临, 雷刚, 王涛, 郝宁燕, 付立萌, 李贝贝

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054)

**摘要:**退耕还林还草工程是中国实施的重要生态环境建设与保护工程,对区域植被覆盖及土壤侵蚀产生重要影响。以洛河流域(陕北黄土高原部分)为研究对象,利用流域通用土壤侵蚀方程(RUSLE),结合流域降雨、土壤类型、DEM、植被覆盖等数据,定量分析了 2000—2010 年退耕还林还草工程实施对流域土壤侵蚀的影响。结果表明:(1)洛河流域 2000—2010 年耕地面积减少,林地、草地面积增加,土地利用变化主要发生在 2000—2005 年;(2)洛河流域 2000—2010 年土地利用变化导致植被 NDVI 平均值增大,耕地变化区域植被 NDVI 值增加幅度高于耕地未变化区域,表明耕地变化区域植被 NDVI 增加对耕地区域总体植被 NDVI 值增加贡献较大;(3)降雨侵蚀力和退耕还林还草工程实施对土壤侵蚀具有明显的影响。受降雨侵蚀力增大影响,2000—2010 年洛河流域土壤侵蚀呈增加趋势;不考虑降雨侵蚀力变化情况下,洛河流域土壤侵蚀呈减少趋势,反映出退耕还林还草工程实施对土壤侵蚀的减缓作用。

**关键词:**土壤侵蚀; 植被覆盖; RUSLE; 洛河流域

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0068-06

## Impacts of Grain for Green Project on Soil Erosion in Luohe River Basin of Northern Shaanxi Province, China

CUI Xiaolin, LEI Gang, WANG Tao, HAO Ningyan, FU Limeng, LI Beibei

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Grain for Green Project (GGP) is an important ecological and environmental construction and protection engineering project in China, and it has great influence on vegetation cover and soil erosion. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), together with precipitation, soil type, DEM and vegetation cover, was used to investigate the impacts of GGP on soil erosion from 2000 to 2010 in Luohe River Basin, northern Shaanxi Province, China. Results showed that: (1) farmland decreased while forestland and grassland increased due to GGP, and land use change mainly occurred from 2000 to 2005; (2) the increase of vegetation NDVI value induced because of land use change from 2000 to 2010 in Luohe River Basin, and the increase rate of vegetation NDVI in farmland changing area was higher than that in the unchanged area; (3) both rainfall erosivity and GGP implementation have the significant impact on soil erosion. The increase of soil erosion in Luohe River Basin during 2000—2010 mainly resulted from the increase of rainfall erosivity. If rainfall erosivity keeps constant, then soil erosion in the basin would decrease because of the effects of GGP on soil erosion.

**Keywords:** soil erosion; vegetation cover; RUSLE; Luohe River Basin

退耕还林还草工程是中国规模较大的生态环境建设与保护工程,旨在改善区域生态环境,促进农村经济结构调整及提高农民生活水平<sup>[1]</sup>,1999 年开始在全国部分县区开展退耕工作。陕北黄土高原是中国水土流失严重、生态环境脆弱区域,退耕还林还草工程实施,对区域植被覆盖以及土壤侵蚀产生了重要影响。尽

管退耕政策已实施多年,但土壤侵蚀状况仍较严重,是黄河及其支流泥沙的主要来源地<sup>[2]</sup>,因此陕北黄土高原土壤侵蚀研究具有重要理论与现实意义。

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力等外力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程<sup>[3]</sup>。长期的土壤侵蚀会造成河流泥沙淤积、土地生

收稿日期:2015-09-15

修回日期:2015-10-05

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41271103);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1616);西安科技大学培育基金资助项目(2014007);西安科技大学博士启动金项目(2015QDJ061)

第一作者:崔晓临(1965—),女,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要从事土地利用变化与环境效应研究。E-mail:xiaolin\_cui@xust.edu.cn

通信作者:王涛(1984—),男,河南汤阴人,博士,讲师,主要从事区域环境变化研究。E-mail:wht432@163.com

产力下降,还会加剧洪涝和干旱等自然灾害<sup>[4]</sup>,因此,土壤侵蚀已成为生态环境建设与保护不可忽视的问题。Wischmeier 等<sup>[5]</sup>提出了通用土壤流失方程,在此基础上一些学者提出了 ANSWERS、CREAMS 和 AG-NPS 等土壤侵蚀模型<sup>[6-8]</sup>。20 世纪 80 年代以后,国内研究人员利用美国通用土壤流失方程(USLE)结合 GIS(Geographical Information System)和 RS(Remote Sensing)技术,根据研究区的实际情况算出因子参数,从而得到土壤侵蚀经验模型。目前来看,尽管已经建立基于中国国情的 CSLE(Chinese Soil Loss Equation)模型<sup>[9]</sup>,但 RUSLE 模型仍是土壤侵蚀研究当中应用较为广泛的模型<sup>[10]</sup>。

洛河和延河均是陕北黄土高原地区重要的河流,但延河流域研究明显多于洛河流域,如谢红霞等<sup>[11]</sup>利用 RUSLE 模型分析了 1997 年和 2000 年延河流域土壤侵蚀状况,认为退耕还林还草工程实施引起的植被覆盖改善以及降雨侵蚀力的增加对流域土壤侵蚀均产生了重要影响,但降雨侵蚀力增加导致的土壤侵蚀量明显高于植被覆盖改善减少的土壤侵蚀量。汪邦稳等<sup>[12]</sup>利用 1986 年、1997 年和 2000 年数据分析了延河流域退耕前后土壤侵蚀变化。可见,退耕还林还草工程对延河流域土壤影响受到更多的关注,而洛河流域相对较少。

鉴于谢红霞<sup>[11]</sup>、汪邦稳<sup>[12]</sup>等使用数据仅限于 2000 年前,而第一轮退耕还林还草工程在 2008 年已经结束,且于 2014 年底又重启了第二轮,有必要对退耕还林还草工程长期实施对土壤侵蚀影响进行分析,可为新一轮工程实施提供理论支持与政策建议。基于此,本文以研究较少的洛河流域(陕北黄土高原部分)为对象,利用应用较为成熟、广泛的 RUSLE 模型,结合流域降雨数据、DEM、植被覆盖、土壤类型等数据,分析 2000—2010 年退耕还林还草工程实施对土壤侵蚀的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究对象主要为洛河流域位于陕北黄土高原的部分,地处中国西北部陕西省境内(107°33′—109°51′E, 35°19′—37°19′N),包括榆林地区的定边县和靖边县部分区域,延安地区的吴起县、志丹县、甘泉县、富县、黄陵县和洛川县,以及黄龙县部分区域。流域内海拔为 688~1 900 m,西北部地势较高,中部洛河河谷区域地势较低。地貌属黄土丘陵沟壑地貌,植被覆盖南部区域高于北部,且南部区域以林地为主,而北部区域以草地为主。流域所在区域属温带大陆性季风

气候,年平均气温为 14.1℃,年均降水量为 533 mm,降水主要集中在夏秋季节,同时也是土壤侵蚀的高发时期。夏秋季的集中降水、地表植被覆盖状况以及地势、土壤类型等决定了洛河流域也是土壤侵蚀较为严重的区域。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 研究使用数据包括:(1)陕北黄土高原地区 30 m 分辨率 DEM 数据,来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)。DEM 的用途有二:一是利用 DEM 提取洛河流域范围;二是利用 DEM 生成坡度,用于计算土壤侵蚀因子。(2)1991—2010 年 7 个站点(榆林、横山、绥德、延安、定边、吴起、洛川)逐日降水数据,结合洛河流域范围,文中选择定边、吴起、延安和洛川 4 个站点,用于计算 2000 年、2005 年和 2010 年流域降雨侵蚀力。(3)1:50 万陕西省土壤图,利用洛河流域边界,提取流域土壤类型空间分布图。(4)250 m 分辨率 MODIS NDVI 13Q1-Level 3 数据(2000 年、2005 年和 2010 年),收集自 <http://ladsweb.nasa.gov>。(5)陕西省 1:10 万土地利用类型矢量图(2000 年、2005 年和 2010 年),来源于“全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估”项目。

1.2.2 土壤侵蚀计算 土壤侵蚀计算采用 RUSLE 模型,表达式如下<sup>[13]</sup>:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: $A$  为年均土壤侵蚀量; $R$  为降雨侵蚀力因子; $K$  为土壤可侵蚀性因子; $L$  为坡长因子; $S$  为坡度因子; $C$  为地表覆盖因子; $P$  为水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )。  $R$  因子反映的是区域内降雨对地表土壤的侵蚀能力。采用章文波等<sup>[14-15]</sup>提出的计算方法:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k P_j^\beta \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.144P_{d12}^{-1} + 24.455P_{y12}^{-1} \quad (4)$$

式中: $R_i$  为第  $i$  年的降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)]; $k$  为一年中形成侵蚀性降水的的天数( $d$ ); $P_j$  为第  $j$  天的侵蚀性降雨量(mm);降雨 $\geq 12$  mm/d 是形成侵蚀性降雨的条件,小于该值则记为 0 mm<sup>[16]</sup>;  $\alpha$  和  $\beta$  为系数,由  $P_{d12}$  和  $P_{y12}$  计算得到,其中  $P_{d12}$  为降雨 $\geq 12$  mm/d 的多年平均日降雨量(mm), $P_{y12}$  为降雨 $\geq 12$  mm/d 的年平均降水量(mm)。

(2) 土壤侵蚀因子( $K$ )。  $K$  因子反映土壤抵抗降雨侵蚀的能力,通过 EPIC 模型计算<sup>[17]</sup>:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ 0.0256M \left( 1 - \frac{F}{100} \right) \right] \right\} \cdot \left( \frac{F}{N+F} \right)^{0.3} \left[ 1.0 - \frac{0.25T}{T + \exp(3.72 - 2.95T)} \right] \cdot \left[ 1.0 - \frac{0.7\delta}{\delta + \exp(-5.51 + 22.9\delta)} \right] \quad (5)$$

式中： $M$ 、 $F$ 、 $N$ 为土壤中砂粒、粉沙粒和黏粒质量分数(%)； $T$ 为土壤有机碳质量分数(%)； $\delta = 1 - M/100$ 。计算出的结果乘以0.1317转化为国际制单位。

(3) 地形因子(LS)。LS因子包括坡长( $L$ )因子和坡度( $S$ )因子,基于DEM并参考Renard<sup>[18]</sup>、McCool<sup>[19]</sup>和Liu<sup>[20]</sup>等的计算方法得到,计算方法如下:

$$L = (\lambda/22.13)^\alpha \quad (6)$$

$$\alpha = \beta/(\beta+1) \quad (7)$$

$$\beta = (\sin\theta/0.0896)/[3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \quad (8)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 9\% \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & 9\% \leq \theta < 14\% \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 14\% \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\lambda$ 为坡长； $\alpha$ 为坡长指数； $\theta$ 为坡度(%)。

(4) 植被覆盖因子( $C$ )。C因子反映地表覆盖状况对土壤侵蚀的影响,主要基于MODIS NDVI数据计算得到<sup>[21]</sup>,计算方法如下:

$$AVHRR \text{ NDVI} = 0.18 \text{ MODIS NDVI} + 0.131 \quad (10)$$

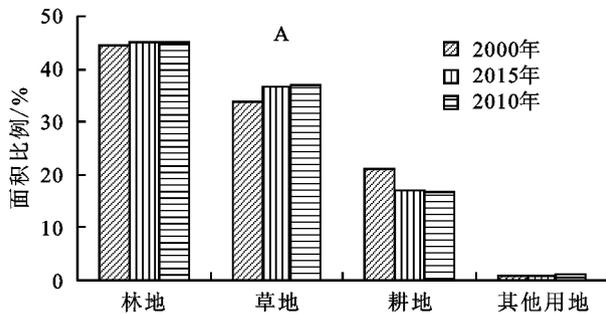


图1 洛河流域2000—2010年土地利用结构及各时段变化量

变化量上,草地、耕地是洛河流域面积变化量最大的土地利用类型,其次为林地。2000—2010年,洛河流域草地和林地分别由2000年的6 044.21 km<sup>2</sup>、7 977.26 km<sup>2</sup>增加到2010年的6 623.81 km<sup>2</sup>、8 113.07 km<sup>2</sup>,分别增加了579.60 km<sup>2</sup>、135.81 km<sup>2</sup>;耕地面积由2000年的3 759.67 km<sup>2</sup>减少到2010年的3 032.19 km<sup>2</sup>,减少727.48 km<sup>2</sup>(图1B)。变化阶段上,2000—2005年是洛河流域土地利用剧烈变化时期,2005—2010年土地利用变化较缓。具体表现为,2000—2005年林地、草地增加面积分别占2000—2010年总增加面积的92.72%和84.29%,耕地减少面积占93.11%。以上分析表明,2000—2010年洛河流域土地利用以林地、草地和耕地为主,受退

$$C = \exp[-\alpha \cdot AVHRR \text{ NDVI}/(\beta - AVHRR \text{ NDVI})] \quad (11)$$

式中： $\alpha$ 和 $\beta$ 取值分别为2,1;C值通过AVHRR NDVI计算得到,需要先将MODIS NDVI转化为AVHRR NDVI再计算。

(5) 水土保持措施因子( $P$ )。P因子计算通过以下公式<sup>[22]</sup>:

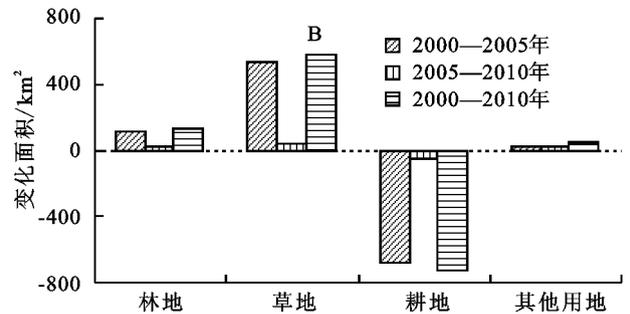
$$P = 0.2 + 0.03\theta \quad (12)$$

式中： $\theta$ 为坡度(%)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化

洛河流域2000年、2005年和2010年土地利用结构均以林地、草地和耕地为主,三者占流域比例在95%以上,其他用地(水域、建设用地、未利用地)面积比例低于5%。受退耕还林还草工程实施影响,洛河流域2000—2010年林地、草地呈增加趋势,二者所占面积比例分别由2000年的44.48%和33.70%增加到2010年的45.15%和36.86%,分别增加0.66%和3.16%;耕地面积呈减少趋势,面积比例由2000年20.97%减少到2010年的16.87%,减少4.09%(图1A),可见,2000—2010年洛河流域耕地面积减少最大,而草地面积增加最多。



耕还林还草工程实施影响,流域内草地面积增加最大,而耕地面积减少最多,并且土地利用剧烈变化主要发生在2000—2005年。

### 2.2 植被 NDVI 变化

退耕还林还草工程实施引起的洛河流域土地利用变化,必然影响流域内植被覆盖变化,植被NDVI是植被覆盖的重要反映。基于2000—2010年洛河流域耕地数据,获取2000年耕地区域、2000—2010年耕地未发生变化区域和2000—2010年耕地变化区域,结合2000年、2005年和2010年流域MODIS NDVI数据,得到不同耕地区域植被NDVI变化情况,见表1。

由表1可知,洛河流域2000—2010年植被NDVI均值较高,反映出流域内植被覆盖水平较高。对

于 2000 年为耕地的区域,总体上植被 NDVI 值由 2000 年的 0.501 7 增加至 2010 年的 0.625 9,增加 24.76%。植被 NDVI 值的增加得益于退耕还林还草工程实施引起的耕地向林地、草地的转变。结合 2000—2010 年耕地区域是否发生变化,即 2000 年是耕地,2010 年是否转变为其他土地利用类型,划分为耕地未变化区域和耕地变化区域。可知,2000 年耕地区域的植被 NDVI 变化,受到该两部分区域的影响。对于 2000—2010 年耕地未变化区域,植被 NDVI 值由 2000 年的 0.511 6 增加至 2010 年的 0.627 5,增加 22.65%;而

2000—2010 年耕地变化区域,植被 NDVI 值由 2000 年的 0.461 3 增加至 2010 年的 0.619 5,增加 34.39%。对比可知,2000—2010 年耕地未变化区域植被 NDVI 值明显高于同期耕地变化区域,但耕地变化区域植被 NDVI 值增加对耕地区域植被 NDVI 值增加贡献较大。其原因可能为,退耕还林还草工程实施,主要针对坡耕地及生产力较低的耕地,该部分耕地植被 NDVI 较小;同时,由于耕地转变为林地、草地初期,植被覆盖度较小,植被 NDVI 值较低,通过较长时间的生长发育,植被覆盖率升高,植被 NDVI 值逐渐增加。

表 1 不同耕地区域植被 NDVI 均值变化

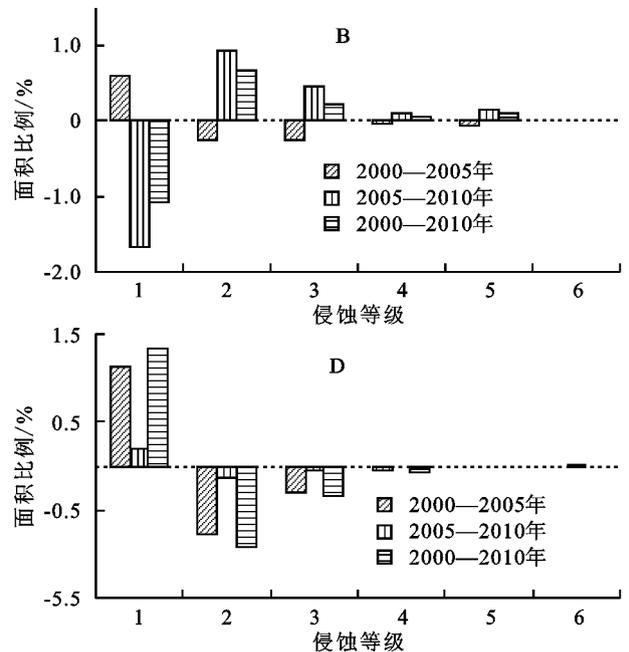
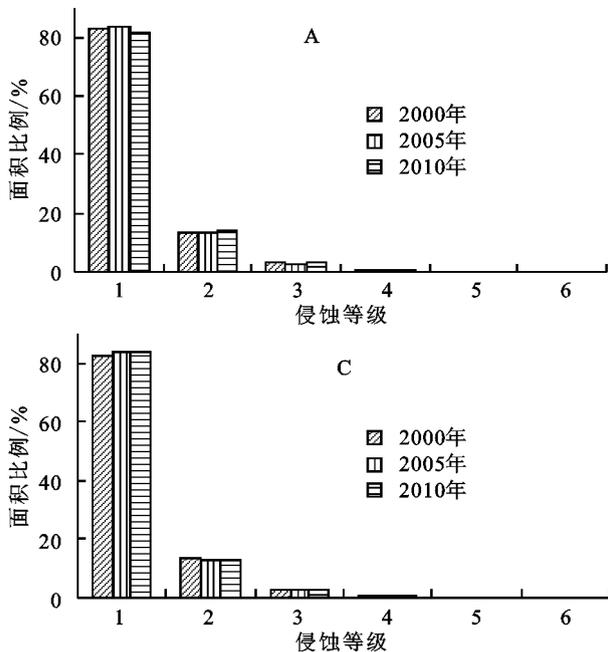
| 项目                 | 2000 年 | 2005 年 | 2010 年 | 2000—2005 年 | 2005—2010 年 |
|--------------------|--------|--------|--------|-------------|-------------|
| 2000 年耕地区域         | 0.5017 | 0.6012 | 0.6259 | 0.0995      | 0.1242      |
| 2000—2010 年耕地未变化区域 | 0.5116 | 0.607  | 0.6275 | 0.0954      | 0.1159      |
| 2000—2010 年耕地变化区域  | 0.4613 | 0.5778 | 0.6195 | 0.1165      | 0.1582      |

### 2.3 土壤侵蚀变化

退耕还林还草工程实施,促使洛河流域耕地向林地、草地的转变,从而引起植被 NDVI 的变化,植被覆盖得到一定程度的改善。对于 RUSLE 模型估算流域土壤侵蚀,模型中除降雨侵蚀力(R)、植被覆盖和管理因子(C)每年均有变化外,其他因子各年份的变动很小,故不同年份土壤侵蚀的估算值,主要受到 R 因子和 C 因子的影响。结合前文可知,退耕还林还草工程实施影响到 C 因子的变化,而 R 因子作为自然因素,不受控于人为作用。通过计算 R 因子可知,2000 年、2005 年和 2010 年洛河流域降雨侵蚀力平均值分别为 1 236,1 326,1 550 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a),呈增加趋势。

年和 2010 年年土壤侵蚀量,参照国家标准<sup>[23]</sup>,将土壤侵蚀程度划分为 6 个等级,分别是 1 级[微度侵蚀,<1 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],2 级[轻度侵蚀,1 000~2 500 t/(km<sup>2</sup>·a)],3 级[中度侵蚀,2 500~5 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],4 级[强烈侵蚀,5 000~8 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],5 级[极强烈侵蚀,8 000~15 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],6 级[剧烈侵蚀,≥15 000 t/(km<sup>2</sup>·a)]。统计各等级所占面积比例及面积比例在研究时段内的变化情况,得到图 2A 和图 2B。鉴于降雨侵蚀力(R)具有增加趋势,为了反映退耕还林还草工程实施的影响,在计算土壤侵蚀时,利用 2000 年降雨侵蚀力重新计算 2005 年和 2010 年土壤侵蚀量,统计各等级面积比例及面积比例在研究时段的变化情况,得到图 2C 和图 2D。

利用 RUSLE 模型计算得到洛河流域 2000 年、2005



注:A 和 B 利用 2000 年、2005 年和 2010 年降雨侵蚀力计算得到;C 和 D 利用 2000 年降雨侵蚀力重新计算得到。

图 2 洛河流域 2000—2010 年不同土壤侵蚀等级面积比例及变化

图 2A 和图 2C 表明,洛河流域 2000—2010 年土壤侵蚀以微度、轻度和中度侵蚀为主,其中微度侵蚀面积占 80% 以上,强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积比例均较小。2000 年、2005 年和 2010 年降雨侵蚀力计算结果表明,洛河流域 2000—2010 年除微度侵蚀面积呈减少趋势外,其他各土壤侵蚀等级均呈增加趋势,同时可以看出,2005—2010 年是土壤侵蚀减少和增加的主要时期(图 2A 和图 2B)。利用 2000 年降雨侵蚀力重新计算 2005 年和 2010 年土壤侵蚀,结果表明,与图 2A 和图 2B 结果相反,除微度侵蚀呈增加趋势外,其他各土壤侵蚀等级均呈减少趋势,且 2000—2005 年是土壤侵蚀增加和减少的主要时期。

图 2B 反映出受到降雨侵蚀力增加及植被覆盖改善影响,洛河流域 2000—2010 年土壤侵蚀呈增加状况;图 2D 反映出,当降雨侵蚀力维持在 2000 年水平时,洛河流域 2000—2010 年土壤侵蚀受植被覆盖改善的影响,表现为土壤侵蚀的减少。综合二者可以认为,降雨侵蚀力和植被覆盖对土壤侵蚀具有显著的影响,洛河流域 2000—2010 年降雨侵蚀力对土壤侵蚀的增加作用明显高于植被覆盖的减少作用,总体呈现为土壤侵蚀增加趋势。

## 2.4 结果验证

查阅黄河水资源和泥沙公报(2000—2010 年)中洛河流域状头水文站 2000—2010 年年径流量和年输沙量数据(<http://www.yellowriver.gov.cn>),绘制得到图 3。洛河流域 2000—2010 年年径流量呈波动变化,但总体变化维持在 6 亿  $m^3$  左右,但年输沙量呈明显的减少趋势(图 3)。

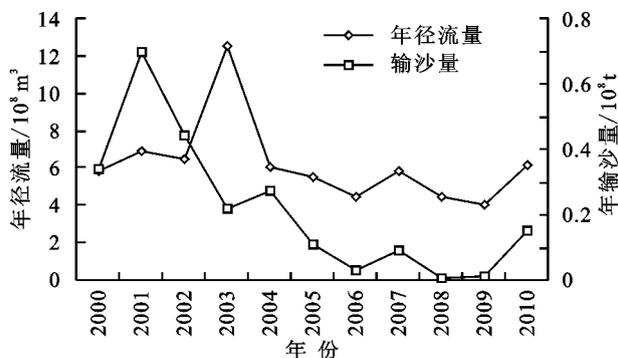


图 3 洛河流域状头水文站 2000—2010 年年径流量和年输沙量变化

在年径流量变动不大情况下,年输沙量呈显著的减少趋势,反映出洛河流域 2000—2010 年土壤侵蚀呈下降趋势,显然文中 RUSLE 模型计算的土壤侵蚀结果与水文站实测结果存在差异。原因可能为 RUSLE 模型计算得到土壤侵蚀结果是空间静态状况,与实际河流的输沙量之间存在不一致性,二者之间需要通过坡面径流相联系,计算结果表明土壤侵蚀呈增加趋势,而实测结果为减少趋势,可能与退耕还林还草工程实施

引起的地表植被覆盖改善,减缓坡面径流、涵蓄水源能力增加有关。

## 3 结论

(1) 洛河流域 2000—2010 年耕地面积减少,共减少 727.48  $km^2$ ,减少 4.09%;林地、草地面积增加,分别增加 579.60,135.81  $km^2$ ,增加 0.66%和 3.16%;洛河流域土地利用变化主要发生在 2000—2005 年期间。

(2) 洛河流域 2000—2010 年土地利用变化提高了植被平均 NDVI 值,流域内耕地区域植被 NDVI 值增加了 24.76%,其中,耕地变化区域植被 NDVI 值增加 34.29%,高于耕地未变化区域的 22.65%。表明耕地变化区域植被 NDVI 增加对耕地区域总体植被 NDVI 值增加贡献较大。

(3) 降雨侵蚀力和退耕还林还草工程实施对土壤侵蚀具有明显的影响。受降雨侵蚀力增大影响,2000—2010 年洛河流域土壤侵蚀呈增加趋势;不考虑降雨侵蚀力变化情况下,洛河流域土壤侵蚀呈减少趋势,反映出退耕还林还草工程实施对土壤侵蚀的减缓作用。

致谢:非常感谢西北大学城市与环境学院杨勤科教授、评审专家及编辑部老师提出的宝贵建议,感谢澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO Land and Water)傅国斌研究员对文章英文摘要的修改。特此致谢!

## 参考文献:

- [1] 刘会静,姜志德,王继军.黄土高原退耕区农业后续产业发展影响因素的多层线性分析[J].经济地理,2014,34(2):125-130.
- [2] 甘枝茂,桑广书.关于黄土高原退耕还林(草)问题[J].干旱区资源与环境,2002,16(1):62-65.
- [3] 韩富伟,张柏,宋开山,等.长春市土壤侵蚀潜在危险度分级及侵蚀背景的空间分析[J].水土保持学报,2007,21(1):39-43.
- [4] 何耀帮,赵玉兰,田国行,等.基于 RS 和 GIS 的伊河流域土壤侵蚀研究[J].中国农学通报,2012,28(20):237-242.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide to conservation planning [M] // Agriculture Handbook No. 537. Washington D C: USDA, 1978.
- [6] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. Answers: A model for watershed planning[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(4): 938-944.
- [7] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [8] Knisel W G. CREAMS: A field-scale model for chemi-

- cals, runoff and erosion from agricultural management systems[R]. Washington D C: USDA, 2010.
- [9] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation[C]// Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [10] Fu G, Chen S, McCool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1): 38-49.
- [11] 谢红霞, 李锐, 杨勤科, 等. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 569-576.
- [12] 汪邦稳, 杨勤科, 刘志红, 等. 延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 27-33.
- [13] Yoder D, Lown J. The future of RUSLE: inside the new revised universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(5): 484-489.
- [14] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [15] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [16] 谢云, 刘宝元. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [17] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation[J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990, 4(4): 206-207.
- [18] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting rainfall erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loess Equation (RUSLE)[M]// Agricultural Handbook NO. 730. Washington D C: USDA, 1997.
- [19] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [20] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [21] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [22] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model [J]. Agricultural Systems, 2003, 76(3): 883-894.
- [23] 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, 2007.

(上接第 67 页)

挠力河流域地处三江平原腹地,是该地区主要的商品粮输出地,耕地的开发与利用是当地农业经济的主要来源。自 20 世纪 90 年代初期以来,“以稻治涝”农业结构调整政策的大量推行造成该流域旱地水田化现象非常明显,而近年来,黑龙江省东部“两江一湖工程”、“高标准基本农田建设工程”等多项土地整治工程陆续实施,对该地区耕地数量及水田化进程造成了强烈的影响<sup>[9-12]</sup>。开展该地区垦殖过程研究有助于流域土地资源开发与保护,为农业经济的可持续发展提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 曹银贵,袁春,周伟,等. 中国耕地变化的驱动因子及其省域差异分析[J]. 中国土地科学, 2008, 22(2): 17-22.
- [2] 宋开山,刘殿伟,王宗明,等. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 93-104.
- [3] 刘吉平,赵丹丹,田学智,等. 1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3234-3244.
- [4] 杨春艳,沈渭寿,王涛. 近 30 年西藏耕地面积时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 264-271.
- [5] 王宗明,宋开山,刘殿伟,等. 1954—2005 年三江平原沼泽湿地农田化过程研究[J]. 湿地科学, 2009, 7(3): 208-217.
- [6] 栾兆擎,胡金明,邓伟,等. 人类活动对挠力河流域径流情势的影响[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 46-51.
- [7] 周浩,雷国平,张博,等. 1990—2013 年挠力河流域耕地变化下水土资源平衡效应分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 272-280.
- [8] 刘红玉,张世奎,吕宪国. 20 世纪 80 年代以来挠力河流域湿地景观变化过程研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(6): 698-705.
- [9] 杜国明,李昀,于风荣,等. 基于遥感的 2000—2009 年三江平原北部耕地变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 225-229.
- [10] 杜国明,潘涛,尹哲睿,等. 水田化进程中的富锦市耕地景观格局演化规律[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 207-214.
- [11] 宋戈,梁海鸥,林佳,等. 黑龙江省垦区耕地利用综合效益评价及驱动力分析[J]. 经济地理, 2010, 30(5): 835-840.
- [12] 王帅,曲长祥,冯翔迪,等. 黑龙江省耕地集约利用的区域差异及影响因素分析[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(5): 142-146.