

退耕还林（草）和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响

谢红霞^{1,2}, 李锐², 杨勤科², 李静², 梁伟²

(¹湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】通过定量评估退耕还林（草）和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响, 为延河流域水土保持效益评价、流失治理和环境建设提供决策参考。【方法】利用延河流域日降雨、数字高程模型、土壤类型图、土地利用图和植被覆盖图, 运用 RUSLE 模型, 在 ArcGIS 平台的支持下计算流域 1997 年和 2000 年土壤侵蚀量, 并分别模拟了退耕还林（草）和气候变化对土壤侵蚀的影响。【结果】由于降雨的变化, 研究区年降雨侵蚀力均值由 1997 年的 $775.32 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加到了 2000 年的 $1292.07 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 降雨大大加剧了流域土壤侵蚀; 由于退耕还林（草）政策的实施, 坡耕地面积大大减少, 林草面积增加, 植被覆盖和管理因子值显著减少, 由退耕还林（草）前的 0.1714 下降到了退耕还林（草）后 0.1592, 减小了流域土壤侵蚀; 由于退耕还林（草）的实施、气候变化以及水土保持工程措施和耕作措施变化共同影响, 单位面积平均土壤侵蚀量由退耕还林（草）前的 $3\ 012 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加到了退耕还林（草）后 $4\ 671 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 年土壤侵蚀总量 $2314 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到了 $3589 \times 10^4 \text{ t}$ 。【结论】降雨变化使得研究区土壤侵蚀量增加了 71.28%, 退耕还林（草）约减少研究区土壤侵蚀量 7.84%, 二者共同作用使得研究区土壤侵蚀量增加了 59.26%, 退耕还林（草）政策的实施对减少区域土壤侵蚀的作用是显著的。

关键词: 土壤侵蚀; 退耕还林（草）; 降雨变化; 延河流域

Effect of Returning Farmland to Forest (Pasture) and Changes of Precipitation on Soil Erosion in the Yanhe Basin

XIE Hong-xia^{1,2}, LI Rui², YANG Qin-ke², LI Jing², LIANG Wei²

(¹College of Resources and Environment Sciences, Hunan Agricultural University, Changsha 410128; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】The aim of this study is to provide some references for decrease of soil loss and for improvement of ecological environment in Yanhe Basin of Loess Plateau by quantitatively assessing effect of returning farmland to forest (pasture) and changes of precipitation on soil erosion. 【Method】The daily precipitation data from 35 gauges in the period of 1950-2000, soil type map, a digital elevation model (DEM), land use maps based on the interpretation of Landsat TM images acquired in 1997 and 2000 and NDVI maps from the images were used. The RUSLE was used as a model to calculate the unit soil loss and some suitable methods were also used to calculate the value of each erosion factor. Finally, the factor values and soil loss were calculated, the maps of the factor values and soil loss in each spatial unit were obtained. 【Result】Firstly, the rainfall factor R value changed significantly from $775.32 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ in 1997 to $1\ 292.07 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ in 2000 primarily because of the change of precipitation. Secondly, the combined effect of the changes of slope cropland to forest land, pasture and the change in precipitation and the changes of the practice of engineering and tillage resulted in soil loss increased from $3\ 012 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in 1997 to $4\ 671 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in 2000. Thirdly, the C factor value which was defined by the land use and vegetation cover was 0.1714 before the change of slope cropland to forest land and pasture and 0.1592 after the change of slope cropland to forest land and pasture. The changes of C factor value resulted in the decrease of soil loss in this basin. 【Conclusion】Returning from slope cropland to forest or pasture by itself decreased soil loss by 7.84%, whereas the precipitation itself increased soil loss by close to 71.28%, but both together increased soil loss by 59.26%. The effect of returning of the slope cropland to forest or pasture is obvious in decreasing soil loss.

收稿日期: 2008-01-22; 接受日期: 2008-08-22

基金项目: 国家“973”计划项目(2007CB407203)和国家自然科学基金项目(40771019)

作者简介: 谢红霞(1973—), 女, 湖南岳阳人, 博士, 研究方向为城乡国土资源评价、环境遥感与地理信息系统。Tel: 15973196669; E-mail: xiehongxia136@sina.com. 通信作者李锐(1946—), 男, 河北磁县人, 研究方向为区域水土保持、遥感与地理信息系统。E-mail: lirui@ms.iswc.ac.cn

Key words: soil erosion; change of slope cropland to forest land and pasture; precipitation change; Yanhe Basin

0 引言

【研究意义】黄土高原是中国水土流失最严重的地区，新中国成立以来中央和地方政府都十分重视黄土高原生态环境建设工作。自 1999 年退耕还林（草）工程实施以来，该区治理进入了一个新阶段，治理的规模扩大、投资增强、速度加快。而延河流域是全国退耕还林（草）最早和退耕速度最快的地区之一，退耕还林（草）工程使土地利用、植被覆盖状况发生了较大变化，水土流失有减轻的趋势^[1]。在降雨年际差异显著背景下，了解退耕还林（草）对区域土壤侵蚀影响的程度，对区域治理和有关决策有着及其重要的参考价值。【前人研究进展】已有研究中，较多关注退耕还林（草）对土壤侵蚀及其空间分布、植被恢复对测站径流、对土壤理化性质以及对社会经济的影响^[2-6]。但这些研究只评价了土壤侵蚀的总体变化状况，而未明确区分降水变化和退耕还林（草）各自的作用方式与强度。【本研究切入点】本研究利用延河流域退耕还林（草）前后的数据和土壤侵蚀计算模型，模拟不同降雨情景和土地利用情景下的土壤侵蚀。【拟解决的关键问题】分析延河流域退耕还林（草）和气候变化可能对区域土壤侵蚀各自的作用及二者的共同作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延河属黄河中游河口镇—龙门区间的一级支流。流域属大陆性气候，年降雨量 472 mm 左右（流域多年雨量平均值）。流域内黄土丘陵沟壑面积占全流域的 90%，大部分地区坡度都在 15°以上。流域地处黄土高原丘陵沟壑区（图 1），属温暖半湿润气候区和温和半湿润区；植被跨暖温性森林地带、暖温性森林草原地带和暖温性典型草原地带；地貌则是延长县以北为黄土梁峁状丘陵沟谷区，安塞—延长之间沿河一带为河阶地发育，延长县以南为黄土宽梁残塬沟谷区，流域出口处为黄土覆盖石质丘陵沟谷区，脆弱的自然条件和长期陡坡耕种的习惯，致使流域土壤侵蚀强烈，并长期成为治理的重点地区。延河流域无论在自然条件方面，还是在治理方面，均是一个十分理想的研究区域。

1.2 数据来源

本研究所用的基础数据主要包括：国家基础地理信息中心购买的延河流域 25 m 分辨率 DEM，由 1997 和 2000 年 TM 影像提取的 NDVI 和解译获得的土地利用图，土壤图，流域内及其周边共计 35 个雨量站的近 50 年日降雨数据。为便于各要素图层的运算和保证面积上的精度，统一转换成 Albers 等面积双标准纬线圆锥投影，各图层栅格尺寸统一为 25 m。

1.3 研究方法

本研究利用基于 GIS 和 RUSLE 集成的方法完成对土壤侵蚀的评价。

侵蚀模型：根据区域土壤评价研究的进展和现状^[7]，参考澳大利亚土壤普查^[8]和全球土壤侵蚀定量评价方法^[9]，选通用土壤流失方程式（RUSLE）完成对每个栅格单元土壤侵蚀量的估算^[10]，模型如下：

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{1}$$

式中，A 为年单位面积的土壤侵蚀量（t·hm⁻²·a⁻¹）；R 为年降雨侵蚀力因子（MJ·mm·hm⁻²·h⁻¹·a⁻¹）；K 为土壤可蚀性因子（t·hm⁻²·h·hm⁻²·MJ⁻¹·mm⁻¹）；L 为坡长因子；S 为坡度因子；C 为植被和管理因子，P 为措施因子。各因子计算方法如下：

降雨侵蚀力：利用研究区及其周边共计 35 个雨量站的日降雨数据，用公式（2）～（5）分别计算了各个雨量站 1997 年和 2000 年的降雨侵蚀力^[11]，用 IDW（inverse distance weighted）方法内插得到延河流域 1997 年和 2000 年降雨侵蚀力图（图 2，3）。

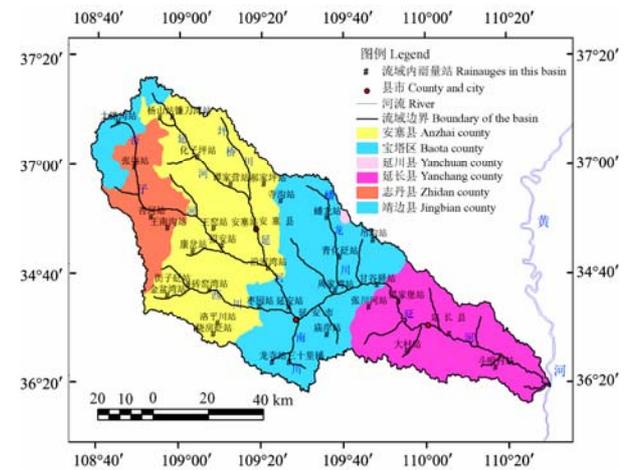


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the research area

$$R_{\text{半月}} = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \quad (2)$$

$$R_{\text{年}} = \sum_{i=1}^{24} R_{\text{半月}i} \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + (18.177/P_{\text{d}12}) + (24.455/P_{\text{y}12}) \quad (4)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (5)$$

式中, $k=1, 2, \dots, m$ 是某半月内侵蚀性降雨日数, P_k 是半月内第 k 天的日雨量, 本研究使用的标准是 12 mm^[12]; $P_{\text{d}12}$ 是一年内侵蚀性降雨日雨量的平均值 (即

一年中 ≥ 12 mm 日雨量的总和与相应日数的比值)。 $P_{\text{y}12}$ 是侵蚀性降雨年总量的多年平均值 (即 ≥ 12 mm 日雨量年累加值的多年平均), 降雨侵蚀力单位为公制单位 ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)。

土壤可蚀性因子: 以土壤类型图为数据基础, 运用 EPIC 模型计算, 得到估算延河流域不同类型土壤的可蚀性 K 值, 生成了流域土壤可蚀性 K 值图。 K 值计算模型为:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[0.0256SAN(1 - SIL/100)]\} \times \left(\frac{SIL}{CLA + SIL}\right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times \left[1.0 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)}\right] \quad (6)$$

式中, SAN 、 SIL 和 CLA 分别是砂粒、粉粒、粘粒和有机碳含量(%), 其中 $SN1 = 1 - SAN/100$ 。 K 值单位为美制单位, $\text{t}\cdot\text{acre}\cdot\text{h}\cdot 100^{-1}\cdot\text{acre}^{-1}\cdot\text{ft}^{-1}\cdot\text{tonf}^{-1}\cdot\text{in}^{-1}$, 但国际上通常用公制单位 $\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, 两者的换算关系: 美制 $\times 0.1317 =$ 公制单位。

坡度坡长因子: 考虑到黄土高原陡坡地较多, 应用 RUSLE 的坡度因子计算公式计算缓坡坡度因子和刘宝元在黄土高原建立的计算陡坡的坡度因子计算方法 (式 7-10), 计算了研究区 LS 因子值^[13]。具体计算采用了由 Van Remorte 编写的 AML 语言程序, 在 ARC/INFO workstation 运行程序^[14-15], 由于 25 m 分辨率 DEM 概化了许多小的地形信息, 根据 5 m 分辨率 DEM 提取的地形参数和 25 m 分辨率 DEM 提取的地形参数数量关系对 25 m 提取的地形参数进行整体修正, 获得了延河流域坡度坡长因子值图^[16]。

$$L = (\lambda/22.1)^\alpha \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.05 & 5^\circ \leq \theta < 14^\circ \\ 21.91\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 14^\circ \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha = \beta / (1 + \beta) \quad (9)$$

$$\beta = (\sin\theta/0.089) / [3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \quad (10)$$

式中, L 为坡长因子; λ 为由 DEM 提取的坡长 (m); 22.1 为 22.1 m 标准小区坡长; α 为坡度坡长指数; S 为坡度因子, θ 为由 DEM 提取的坡度值。

植被覆盖因子: 利用遥感解译的土地利用图和基于 TM 影像计算的植被盖度图 (公式 11)^[17], 参考有关研究成果, 赋予了研究区不同土地利用类型和不同盖度下 C 值 (表 1)^[18-20], 最后利用 ArcGIS 平台获得整个研究区的 C 因子图。

$$f = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (11)$$

式中, f 为植被盖度, $NDVI$ 为归一化植被指数, $NDVI_{\min}$ 、 $NDVI_{\max}$ 分别为研究区内 $NDVI$ 的最小值和最大值。

表 1 延河流域不同土地利用类型和不同植被盖度下的 C 值

Table 1 C value of different land uses and different vegetation cover ratios in Yanhe Basin

	植被盖度 Vegetation cover ratio (%)				
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
林地 Forest land	0.100	0.080	0.060	0.020	0.004
草地 Grass land	0.450	0.240	0.150	0.090	0.043
耕地 Cropland					0.230
建设用地 Construction land					0.900
水体 Water area					1.000

水土保持措施因子: 考虑到研究区面积较大, 通过实地调查难以获得研究区水土保持措施数据, TM 影像上也难以提取水土保持措施, 本研究用流域调查

的工程措施数据和耕作习惯 (表 2) 来计算水土保持措施因子^[21], 即工程措施因子 E 和耕作措施因子 T 的乘积。通过到当地管理部门和农村调查, 以乡镇为单

位收集了延河流域的梯田和淤地坝数据等工程措施数据,把乡镇工程措施的减少侵蚀的效果平摊到整个乡镇范围内,尝试提出了流域水土保持措施中工程措施因子(E)的计算方法,计算公式为:

$$E = (1 - \frac{S_t}{S} \times \alpha)(1 - \frac{S_d}{S} \times \beta) \quad (12)$$

式中, S_t 为梯田面积, S_d 为淤地坝控制面积, S 为土地面积, α , β 分别为梯田和淤地坝的减沙系数,淤地坝控制面积根据黄河上中游管理局《淤地坝设计》中不同类型淤地坝控制面积标准来计算,其中小型淤地坝控制面积 $< 1 \text{ km}^2$, 中型淤地坝控制面积为 $1 \sim 3$

km^2 , 大型淤地坝控制面积为 $3 \sim 8 \text{ km}^2$, 延河流域淤地坝总控制面积的计算,取各个类型淤地坝控制面积范围内的均值,即小型、中型及大型淤地坝控制面积分别为 0.5 、 2.0 及 5.5 km^2 [22]。

降水变化和退耕还林(草)对土壤侵蚀影响作用模拟:利用 1997 年和 2000 年气候、植被、土壤、地形和水土保持措施等数据,分别计算延河流域 1997 年和 2000 年土壤侵蚀量。同时,分别模拟在 1997 年的气候条件下、1997 年水土保持措施条件下 2000 年的土壤侵蚀,与前面计算出的 1997 年实际土壤侵蚀量比较,即可获得延河流域退耕还林(草)和气候变化

表 2 延河流域耕地不同坡度下耕作措施因子值

Table 2 T value of tillage practice in different slope steepness in Yanhe Basin

坡度范围 Slope steepness range	$\leq 5^\circ$	$5 \sim 10^\circ$	$10 \sim 15^\circ$	$15 \sim 20^\circ$	$20 \sim 25^\circ$	$> 25^\circ$
耕作措施因子值 Tillage practice value	0.100	0.221	0.305	0.575	0.735	0.800

对土壤侵蚀的影响。

2 结果与分析

2.1 RUSLE 各要素的计算结果

2.1.1 降雨侵蚀力因子值 降雨侵蚀力时空变化十分显著,1997 年和 2000 年平均值分别为 $775.32 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1292.07 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,整体上自南向北呈减少趋势(图 2,图 3)。两期降雨侵蚀力差值表明(图 4),2000 年降雨侵蚀力高于 1997 年,2000 年全区 95% 的地区降雨侵蚀力高于 1997 年。降雨侵蚀力的这种时空变化主要是由于延河流域降水时空分布不均引起的。

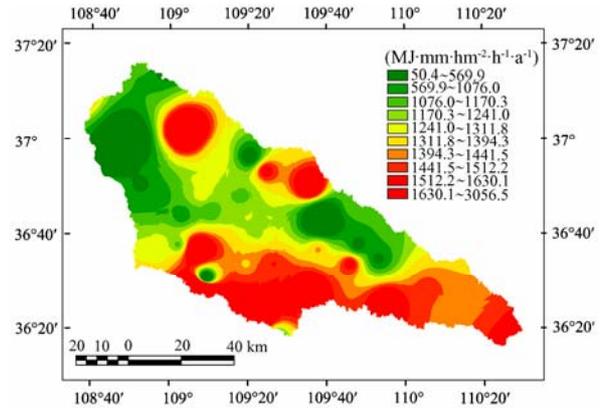


图 3 延河流域 2000 年降雨侵蚀力图
Fig. 3 Map of the value of rainfall erosivity in 2000

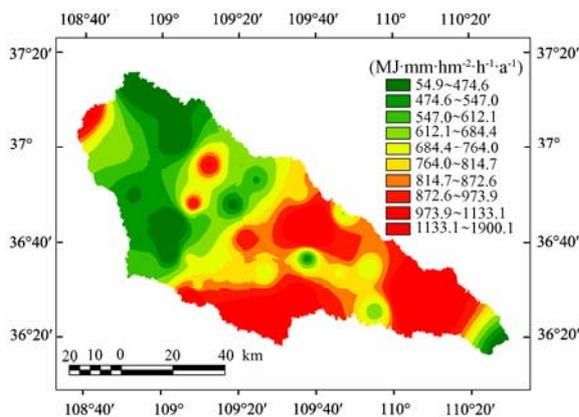


图 2 延河流域 1997 年降雨侵蚀力图
Fig. 2 Map of the value of rainfall erosivity in 1997

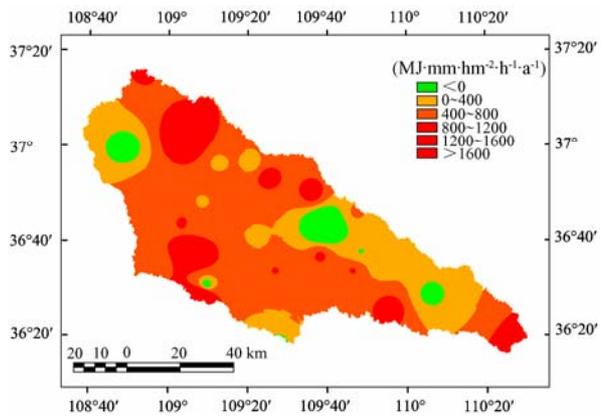


图 4 延河流域降雨侵蚀力变化图
Fig. 4 Map of the value change of rainfall erosivity from 1997 to 2000

2.1.2 土壤可蚀性因子值 延河流域土壤可蚀性 K 值介于 $0.0211 \sim 0.0569 \text{ t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，由于黄绵土占到了整个区域面积的 95%，而黄绵土抗蚀性较差，土壤可蚀性 K 值达到 $0.0569 \text{ t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，整个流域平均土壤可蚀性 K 值达 $0.0548 \text{ t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ （图 5）。

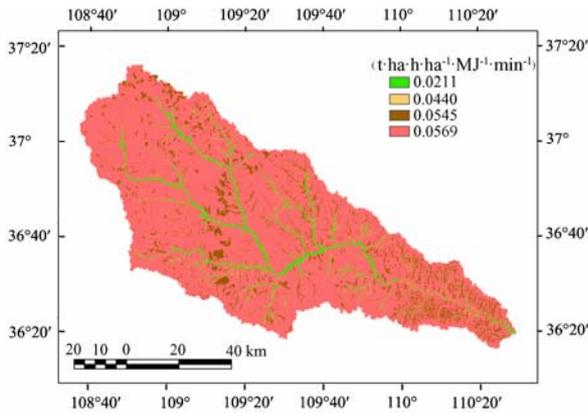


图 5 延河流域土壤可蚀性 K 值图
Fig. 5 Map of the value of soil erodibility in Yanhe Basin

2.1.3 地形因子值 利用延河流域 25 m 分辨率 DEM（图 6）在 arc 下运行 aml 即可获得地形参数，延河流域坡度因子和坡长因子的均值分别为 9.42 和 1.20。对结果进行整体修正后即可获得流域坡度坡长因子图（图 7），流域坡度坡长因子值最小值为 0，最大值为 157.3，平均值为 11.3，流域 30% 面积坡度坡长因子值在 5 以下，坡度坡长因子值在 10 以下的约占流域面积的 50%，90% 的面积坡度坡长因子值在 27 以下。

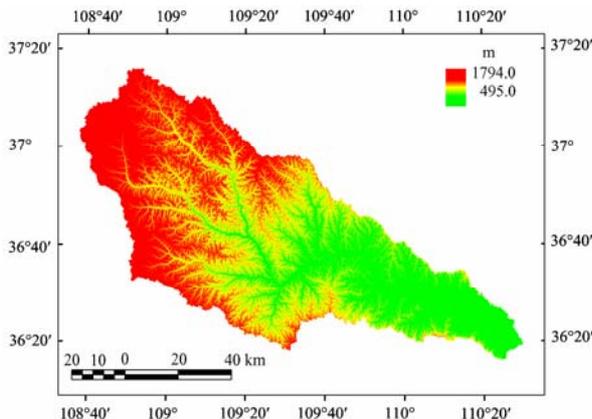


图 6 延河流域数字高程模型（DEM）
Fig. 6 Map of digital elevation model of Yanhe Basin

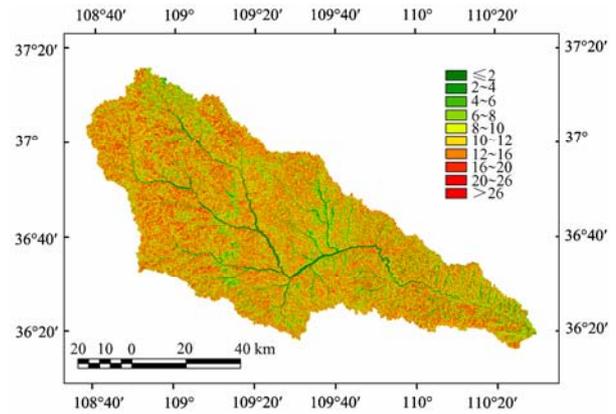


图 7 延河流域坡度坡长因子值（ LS ）图
Fig. 7 Map of the value of slope steepness and slope length factor

2.1.4 植被覆盖和管理因子值 1997 年和 2000 年植被覆盖和管理因子平均值分别为 0.1714 和 0.1592（图 8，图 9），这种变化主要是由于退耕还林（草）政策的实施，坡耕地向林（草）地转化，从 1997 年到 2000 年，耕地面积由 $3\,083.56 \text{ km}^2$ 减少到 $2\,191.86 \text{ km}^2$ ，林草地面积则由 $4\,549.78 \text{ km}^2$ 增加到了 $5\,439.97 \text{ km}^2$ 。植被覆盖和管理因子的变化反映出研究时段内退耕还林（草）对区域土壤侵蚀的减小作用。

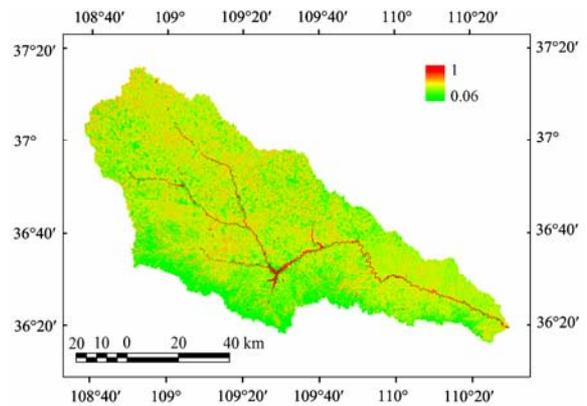


图 8 1997 年植被覆盖和管理因子值图
Fig. 8 Map of the value of vegetation cover and management in 1997

2.1.5 水土保持措施因子值 1997 年和 2000 年延河流域水土保持措施因子平均值分别为 0.506 和 0.498，流域内南部措施整体上优于北部（图 10，图 11）。

2.2 延河流域土壤侵蚀变化

利用前面计算的各个因子图层和 RUSLE 即可计算出 1997 年和 2000 年流域土壤侵蚀量（图 12，图 13），具体实现则是在 ArcGIS 中利用地图代数计算方法完

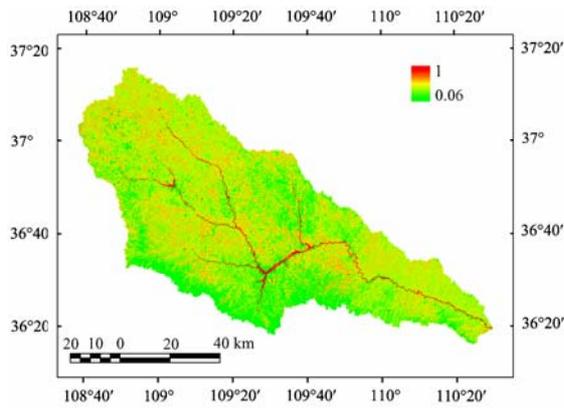


图 9 2000 年植被覆盖和管理因子值图
Fig. 9 Map of the value of vegetation cover and management in 2000

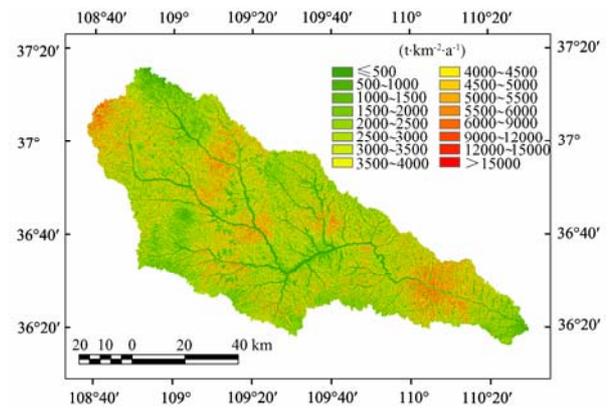


图 12 延河流域 1997 年单位面积土壤侵蚀图
Fig. 12 Soil erosion module of Yanhe Basin in 1997

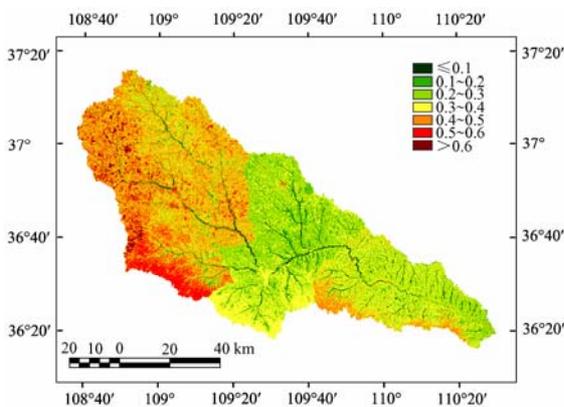


图 10 1997 年水土保持措施因子值图
Fig. 10 Map of the value of soil and water conservation practice factor in 1997

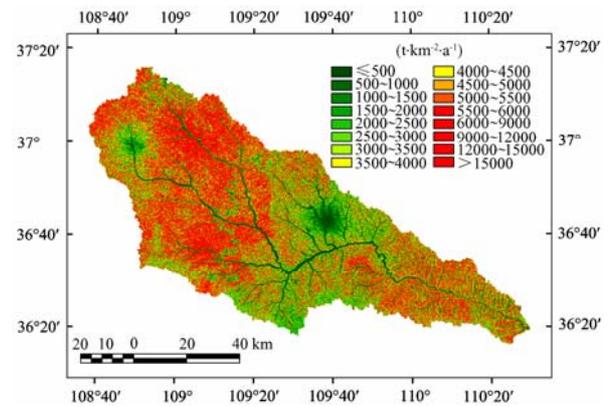


图 13 延河流域 2000 年单位面积土壤侵蚀图
Fig. 13 Soil erosion map of Yanhe Basin in 2000

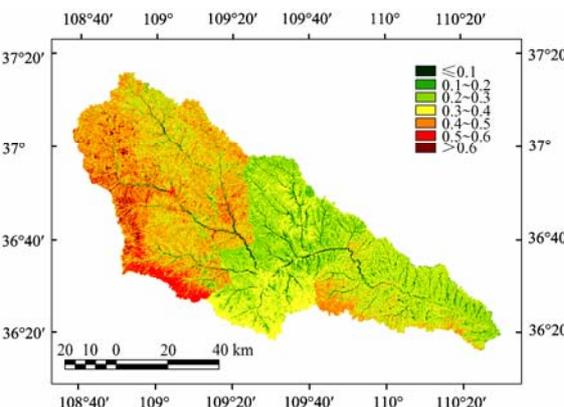


图 11 2000 年水土保持措施因子值图
Fig. 11 Map of the value of soil and water conservation practice factor in 2000

成。计算结果表明：（1）延河流域 1997 年较 2000 年土壤侵蚀轻，1997 年流域平均侵蚀模数为 $3\ 012\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，流域 32.61% 面积侵蚀模数在 $1\ 000\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下，侵蚀模数在 $3\ 000\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下的约占到流域面积的 65.82%；2000 年流域平均侵蚀模数为 $4\ 671\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，流域 24.86% 面积侵蚀模数在 $1\ 000\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下，侵蚀模数在 $3\ 000\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下的约占流域面积的 49.92%；（2）土壤侵蚀模数图中出现几个明显的圆形斑块，这主要是由于几个降水中心的影响；（3）梁峁正地形部位较轻而沟壑负地形部位较强，这种状况是因为梁峁部位地形相对平缓而沟谷部位相对较陡；（4）利用流域内甘谷驿站观测的泥沙观测数据和甘谷驿站控制范围内的土壤侵蚀量相比，1997 年和 2000 年甘谷驿站控制范围土壤侵蚀量分别为 $1\ 684.33 \times 10^4\ \text{t}$ 和 $2\ 766.24 \times 10^4\ \text{t}$ ，观测的输沙量分别为 986.52

$\times 10^4 \text{t}$ 和 $1\ 087.53 \times 10^4 \text{t}$, 计算侵蚀量和输沙量具有一致的变化趋势, 而且二者间相关性比较好但并不相等, 这主要是由于土壤侵蚀量计算直接采用了坡面模型来计算坡面侵蚀和沟蚀, 虽然考虑了工程措施的拦沙作用, 但没有考虑重力侵蚀和水沙输移过程中泥沙的沉积, 即最后的侵蚀量是基于坡面模型的每个单元侵蚀量的总和, 并没有考虑到每个栅格侵蚀量是否都输移到了观测把口站, 即没有考虑每个单元侵蚀量在输移过程中的沉积, 因此计算的侵蚀量和把口站观测输沙量有一定的差距。

2.3 退耕还林(草)和降雨变化对土壤侵蚀的影响

由于土壤侵蚀的变化是受自然和人类活动的综合作用的结果, 本研究在自然方面主要考虑了降雨的变化, 人类活动则主要考虑了退耕还林(草)的实施和研究时段内工程耕作措施的变化。为了在一定程度上区分自然和人类活动对区域土壤侵蚀的不同影响, 分别模拟了仅考虑降雨变化和仅考虑退耕还林(草)情景下 2000 年的土壤侵蚀情况, 主要按以下步骤完成:

(1) 分别计算 1997 年和 2000 年实际土壤侵蚀模数 A_{97} 和 A_{00} 。(2) 不考虑其它要素变化, 仅考虑降雨时 2000 年土壤侵蚀模数: $A_{00r} = R_{00} \times K \times L \times S \times C_{97} \times P_{97}$ 。(3) 不考虑其它要素变化, 仅考虑退耕还林(草)时 2000 年土壤侵蚀模数: $A_{00c} = R_{97} \times K \times L \times S \times C_{00} \times P_{97}$ 。(4) 以 1997 年作为参考进行比较, 获得降雨变化、退耕还林(草)等对研究区土壤侵蚀的影响。结果表明: (1) 综合考虑降雨变化、工程耕作措施实施和退耕还林(草)三者的共同影响, 2000 年单位面积土壤侵蚀量均值和年土壤侵蚀总量分别为 $4\ 671 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3\ 589 \times 10^4 \text{ t}$; (2) 仅考虑降雨变化时, 2000 年单位面积土壤侵蚀量均值和年土壤侵蚀总量分别为 $5\ 159 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3\ 964 \times 10^4 \text{ t}$; (3) 仅考虑退耕还林(草)时, 2000 年单位面积土壤侵蚀量均值和年土壤侵蚀总量分别为 $2\ 776 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2\ 133 \times 10^4 \text{ t}$; (4) 同时考虑退耕还林(草)和降雨变化, 2000 年单位面积土壤侵蚀量均值和年土壤侵蚀总量分别为 $4\ 797 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3\ 686 \times 10^4 \text{ t}$ 。通过对比可以看出, 从 1997 年到 2000 年, 退耕还林(草)减少了研究区侵蚀, 而降雨变化则加剧了研究区土壤侵蚀, 其中退耕还林(草)减少研究区土壤侵蚀量 7.84%, 降雨变化则使得研究区土壤侵蚀量增加了约 71.28%, 二者共同作用使得研究区土壤侵蚀量增加了 59.26%, 再加上水土保持工程措施的实施和耕作措施的变化, 三者共同作用使得研究区土壤侵蚀量增加了 55.08%。

3 讨论

本研究对侵蚀强度的估算结果, 与相关研究^[1,6]相比偏低, 更接近实测输沙量。其原因在于本研究结合区域实际情况, 考虑了工程措施的作用, 将流域内各乡镇的水土保持工程措施和耕作措施进行了计算, 而文献^[1,6]则利用坡度推算耕作措施因子, 合理性不足。C 因子值的估算方面, 上述研究只考虑了土地利用类型, 而没有考虑坡耕地转化为林草地过程中覆盖度的逐渐变化, 因而高估了退耕初期林(草)地的水土保持功能。本研究克服以上的不足。通过本研究得到了两点启示: (1) 利用 RUSLE 估算较大流域土壤侵蚀的宏观时空动态, 是可行的, 计算结果能反映区域内土壤侵蚀的时空差异。(2) 基于 RUSLE 合理估算一个地区的侵蚀强度, 对水保措施和耕作措施的准确估算是十分重要的。然而 RUSLE 只计算面蚀强度, 而无法反映沟蚀和重力侵蚀的影响, 这也是众多研究存在的共同问题^[8-9]。

4 结论

利用研究区日降雨数据计算的降雨侵蚀力时空差异显著, 1997 年和 2000 年研究区降雨侵蚀力平均值分别为 775.32 和 $1\ 292.07 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 全区 95% 的地区 2000 年降雨侵蚀力高于 1997 年, 其中降雨侵蚀力有 50% 面积的降雨侵蚀力增幅在 $400 \sim 800 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 从全区平均值来看 2000 年降雨侵蚀力比 1997 年增加了 66.65%。降雨侵蚀力的这种时空变化主要是由于延河流域降水时空分布不均引起的。

虽然退耕还林(草)和降雨变化的共同作用使得研究区土壤侵蚀量增加了 59.26%。但由于退耕还林(草)政策的实施, 坡耕地面积大大减少, 林草面积增加, 植被覆盖和管理因子值显著减少, 由退耕还林(草)前的 0.1714 下降到了退耕还林(草)后 0.1592, 实际上退耕还林(草)约减少研究区土壤侵蚀量 7.84%, 计算结果充分表明退耕还林(草)政策的实施对减少区域土壤侵蚀的作用是显著的, 是利于延河流域生态环境改善的。

References

- [1] 汪邦稳, 杨勤科, 刘志红, 孟庆香. 延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 27-33.

Wang B W, Yang Q K, Liu Z H, Meng Q X. Changes of soil erosion intensity due to conversion of farmland to forest and grassland in

- Yanhe River Basin. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(4): 27-33. (in Chinese)
- [2] 彭文英, 张科利, 陈 瑶, 杨勤科. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 272-278.
Peng W Y, Zhang K L, Chen Y, Yang Q K. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the Loess Sloping Croplands. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 272-278. (in Chinese)
- [3] 苗光忠, 陈 谦. 退耕还林还草是实现山川秀美的关键—以陕北退耕还林还草为例. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 1-5.
Miao G Z, Chen Q. Reducing cultivated land to plant forest and grass is key measure for realizing graceful landscape—Taking reducing cultivated land to plant forest and grass in north Shaanxi as an example. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 1-5. (in Chinese)
- [4] 李 蕾, 刘黎明, 谢花林. 退耕还林草工程的土壤保持效益及其生态经济价值评估—以固原市原州区为例. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 161-163, 167.
Li L, Liu L M, Xie H L. Eco-economic benefit evaluation of soil conservation service of cropland conversion program: a case study of Yuanzhou district in Guyuan City. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 161-163, 167. (in Chinese)
- [5] 景 可, 郑粉莉. 黄土高原水土保持对地表水资源的影响. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 11-12, 73.
Jing K, Zheng F L. Effects of soil and water conservation on surface water resource on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 11-12, 73. (in Chinese)
- [6] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, Zhang Q J, Lü Y H, Gulinck H, Poesen J. Assessment of soil erosion at large watershed scale using rusle and GIS: a case study in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2005, 16: 73-85.
- [7] 杨勤科, 李 锐, 曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展. *地球科学进展*, 2006, 21(8): 849-856.
Yang Q K, Li R, Cao M M. Advances of quantitative assessment on regional soil erosion. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 849-856. (in Chinese)
- [8] Lu H, Gallant J, Prosser I P, Moran C, Priestley G. Prediction of sheet and rill erosion over the Australian continent, incorporating monthly soil loss distribution. Canberra: CSIRO Land and Water Technical Report 13 /01, 2001.
- [9] Yang D W, Kanae S, Oki T, Koike T, Musiak K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 2913-2928.
- [10] Foster G R, Renard K G, Weesies G A, McCool D C, Yoder D C. Predicting Soil Erosion by Water. A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook, N0.703,1997.
- [11] 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. *地理科学*, 2002, 22 (6): 705-711.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22 (6): 705-711. (in Chinese)
- [12] 谢 云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究. *水土保持学报*, 2000, 14 (4): 6-11.
Xie Y, Liu B Y, Zhang W B. Study on standard of erosive rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 6-11. (in Chinese)
- [13] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37 (6): 1835-1840.
- [14] 汪邦稳, 杨勤科, 刘志红, 赵心畅. 基于 DEM 和 GIS 的修正通用土壤流失方程地形因子值的提取. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 18-23.
Wang B W, Yang Q K, Liu Z H, Zhao X C. Extraction of RUSLE-LS factors using DEM and GIS techniques. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(2): 18-23. (in Chinese)
- [15] Van Remortel R, Hamilton M, Hickey R. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography*, 2001, 30 (1): 27-35.
- [16] 谢红霞. 延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D]. 陕西师范大学, 2008.
Xie H X. Study on the spatio-temporal change of soil loss and on the assessment of impacts of soil and water conservation in Yanhe Basin[D]. Shaanxi Norman University, 2008. (in Chinese)
- [17] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
Zhao Y S. *The Application Principle and Method of Remote Sensing*. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [18] 张 岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1033-1036.
Zhang Y, Yuan J P, Liu B Y. Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 1033-1036. (in Chinese)
- [19] Zhang Y, Liu B Y, Zhang Q C, Xie Y. Effect of different vegetation types on soil erosion by water. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1204-1209.
- [20] 马超飞, 马建文, 布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 6-9.
Ma C F, Ma J W, Buhe Aosaier. Quantitative assessment of vegetation coverage factor in USLE model using remote sensing data. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(4): 6-9. (in Chinese)
- [21] 水利部水土保持监测中心. (2006). 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告. Monitoring Center of Soil and Water Conservation of Water Resource Ministry. (2006). Report of the Development of Predicting Model of Soil Erosion in Loess Plateau of North-Western China.(in Chinese)
- [22] 黄河上中游管理局. 淤地坝设计. 北京: 中国计划出版社, 2004.
Upper and Middle Yellow River Bureau. *Designment of Check-dam*. Beijing: Chinese Planning Press, 2004. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)