

延河流域生态系统土壤保持服务时空变化

刘 婷, 周自翔, 朱 青, 白继洲

(西安科技大学, 西安 710054)

摘 要:为了明确延河流域 2003—2014 年土壤保持量的时空动态变化特征及其约束条件,基于合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar,INSAR)获取的高分辨率数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM),结合 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)水文模型模拟流域逐月土壤保持量,从时空变化的角度展开分析,并引入流域水土保持措施及植被覆盖措施数据,以此揭示水土保持治理对流域土壤保持服务的影响。并在此基础上通过叠加分析揭示了地形因子对土壤保持的影响。结果表明:(1) SWAT 模型在进行径流、泥沙模拟时,率定期和验证期的模拟结果均达到模型要求。(2) 2003—2014 期间,延河流域年均土壤保持量为 1 002.02 万 t,以土壤低保持量为主。土壤保持量的时空动态特征表现为时间变化主要受降水量影响,总体上呈增加趋势;空间变化主要受地形影响,具体表现为下游最大,上游次之,中游最低。其中 2003 年和 2014 年的空间分布特征表明,多年来实施的水土保持措施以及植被覆盖措施产生了明显的生态效益。(3) 土壤保持量受坡度、高程、坡向的影响规律明显,具体表现为:随坡度、高程的增大土壤保持量呈先增大后减小的趋势;对坡向而言,土壤保持量表现为半阳坡>阴坡>阳坡>半阴坡>平地。该研究可为延河流域水土治理提供一定的科学依据。

关键词:土壤保持; SWAT 模型; 叠加分析; 延河流域; 高分辨率 DEM

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0093-08

Spatiotemporal Change of Soil Conservation Service in Yanhe Watershed

LIU Ting, ZHOU Zixiang, ZHU Qing, BAI Jizhou

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

Abstract: To clarify the spatiotemporal dynamic characteristics and constraints of soil conservation in Yanhe River Basin from 2003 to 2014, the high-resolution Digital Elevation Model (DEM) obtained by Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) was used to simulate the monthly soil conservation in the watershed by combining with SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological Model. From the perspective of spatial and temporal changes, the data of soil and water conservation measures and vegetation cover measures were introduced to reveal the impact of soil and water conservation treatment on soil conservation services in the basin. On this basis, the impact of topographic factors on soil conservation was revealed by superposition analysis. The results showed that: (1) when the SWAT model was used to simulate runoff and sediment, the simulation results of the calibration and validation period met the requirements of the model; (2) from 2003 to 2014, the average annual soil retention in the Yanhe watershed was $1.002\ 02 \times 10^7$ t, which was dominated by low soil retention; the temporal and spatial dynamic characteristics of soil conservation were shown as follows: the temporal change was mainly affected by precipitation, which showed the increasing trend on the whole; the spatial variation was mainly affected by the terrain, which was the largest in the downstream, followed by the upstream, and the lowest in the middle; the spatial distribution characteristics in 2003 and 2014 indicated that soil and water conservation and vegetation cover measures implemented over the years had produced obvious ecological benefits. (2) The soil conservation was influenced by slope, elevation, and slope direction, which was shown as follows: with the increase of slope and elevation, the soil

收稿日期:2020-01-20

修回日期:2020-04-22

资助项目:国家自然科学基金(41771576,41771198);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JM4010);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(合作交流—NSFC-NRF(中韩))(41811540400);西安科技大学博士启动金项目(2017QDJ040)

第一作者:刘婷(1996—),女,陕西延安人,硕士研究生,主要从事生态系统服务研究。E-mail:932104031@qq.com

通信作者:周自翔(1977—),男,陕西西安人,副教授,研究生导师,主要从事生态系统服务研究。E-mail:zhouzixiang@xust.edu.cn

conservation increased at first and then decreased; for aspect, the soil conservation volume decreased in the order: half sunny slope>shady slope>sunny slope>half shady slope>flat. This study can provide the scientific basis for soil and water control in the Yanhe River Basin.

Keywords:soil conservation; SWAT model; superposition analysis; Yanhe River Basin; high-resolution DEM

土壤侵蚀是全球性环境问题之一,不仅是造成土地退化、农业生产力下降的主要原因,也是阻碍流域可持续发展的重要生态环境问题,一直以来都是大家的关注热点^[1-3]。延河流域地处黄土高原,是中国水土流失严重的区域之一,为了遏制严重的水土流失,中国政府在黄土高原区域采取了一系列的水保措施,包括梯田、造林、淤地坝等^[4]。随着水保措施的实施,延河流域植被状况逐渐好转,土壤侵蚀状况不断改善,土壤保持服务所受的关注度也越来越高。基于此,诸多学者对黄土高原的土壤保持服务进行了研究,如韩永伟等^[5]、杨波等^[6]、王森等^[7]利用多种方法评估了土壤保持服务功能及其产生的经济价值,也有众多学者研究土壤保持与地形因子之间的关系,例如陆传豪等^[8]基于 RUSLE 模型研究万州区土壤保持服务功能空间分布特征与坡度和土地利用类型之间的关系;刘睿等^[9]研究三峡库区重庆段土壤保持功能与地形因素之间的分布关系;饶恩明等^[10]以四川省为研究区域,探究土壤保持功能空间特征及地形、植被等对其的影响。以上研究在探讨地形因子对土壤保持的影响时,并未充分考虑地形因子的精细度,目前以高分辨率数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为基础数据,探讨地形因子对土壤保持影响的研究还比较欠缺,故可将高分辨率 DEM 获取的地形因子纳入到土壤保持的研究中。

本文以延河流域为研究区,利用合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar,INSAR)技术生成的高分辨率 DEM,并基于 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)水文模型模拟 1999—2014 年产沙量,获得流域实际土壤侵蚀量,通过修改模型源代码,获得潜在土壤侵蚀量,进而获得土壤保持量,从而分析土壤保持服务的时空动态变化特征及其约束条件,为区域水土流失研究和治理提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

延河流域位于东经 108°45′—110°28′,北纬 36°23′—37°17′,面积为 7 725 km²,平均坡度 4.4%,河网长度 4.7 km/km²。该区域属于暖温带大陆性半干旱季风气候,年均降水量为 500 mm,年均气温为 8.8~10.2℃。土壤类型主要以黄绵土为主,占流域面积 80%以上,该土体疏松、软绵,抗侵蚀能力差,因此,延河流域是我国水土流失的重要区域之一。研究区地势西北高东南低,地貌类型主要包括,残原平梁沟壑区、黄土丘陵沟壑、黄土台地、以及黄土覆盖的山地,其中分布最为广泛的是丘陵沟壑区,约占研究区面积的 90%。由于流域内水土流失严重,近年来采取了一系列的水土保持措施及植被覆盖措施,使得流域生态状况逐渐好转,图 1 为 2003 年、2014 年的年 NDVI 空间分布特征。

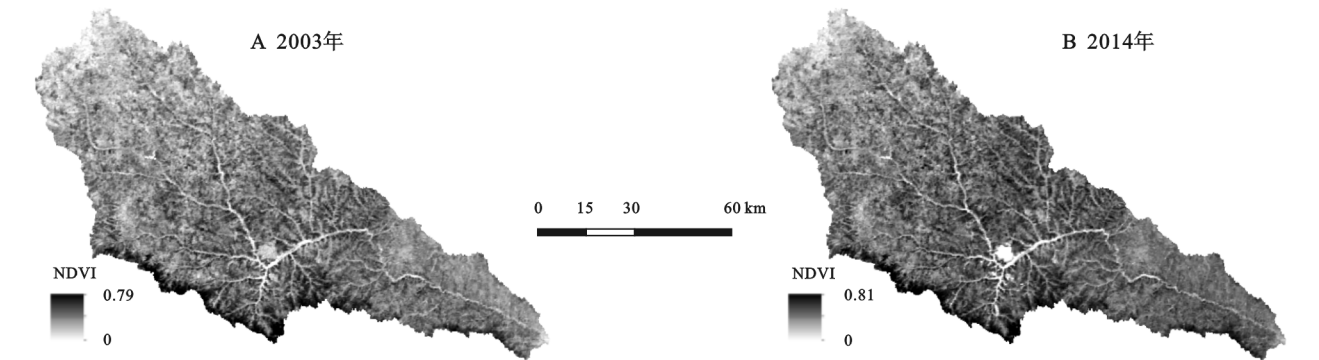


图 1 延河流域 2003 年和 2014 年 NDVI 空间分布

1.2 数据来源

本研究所使用的数据:(1)研究区 DEM 是通过选用 Sentinel-1A 数据为数据源,利用 INSAR 技术获取的,分辨率为 16.87 m,通过与水经注获取的 19.11 m 的 DEM 进行对比验证,发现该 DEM 精度较高。(2)土地利用数据来源于中国科学院资源科学环境数据中心,分辨率为 30 m,研究中主要选用 2005

年、2010 年土地利用数据。(3)土壤数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD),通过土壤参数计算软件(Soil Parameter Calculation Software, SPCS)获取土壤参数数据。(4)气象数据来源于中国气象数据共享网,包括延河流域内及周边站点的 1999—2014 年的逐日降雨、温度、相对湿度和风速数据。(5)水文数据来源于《中

华人民共和国水文年鉴》,包括甘谷驿水文站 1999—2014 年的逐日径流数据和 1999—2014 年逐日产沙数据。(5) 梯田、水库数据来自于 Sentinel-2A 数据,通过解译影像得到 2015 年研究区梯田、水库分布情况。(6) 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)数据来自 MOD13Q1 产品,该产品具有 250 m 的空间分辨率,每隔 16 d 提供一次,通过合成处理,得到 2003—2014 年 NDVI 数据。

2 试验材料与方法

2.1 延河流域 SWAT 模型的构建

2.1.1 SWAT 模型土壤侵蚀子模块以及土壤保持量的获取 目前已有大量研究利用 SWAT 水文模型对黄土高原区域的产流产沙进行模拟^[11-13],因此本研究选用 SWAT 模型,对延河流域土壤保持量进行模拟。该模型中产沙量的计算采用改进版通用水土流失方程(Modified Universal Soil Loss Equation,MU-SLE),如式(1)所示。

$$\text{Sed}=11.8\cdot(Q_{\text{surf}}\cdot q_{\text{peak}}\cdot \text{area}_{\text{hru}})^{0.56}\cdot K_{\text{usle}}\cdot C_{\text{usle}}\cdot P_{\text{usle}}\cdot \text{LS}_{\text{usle}}\cdot \text{CFRG}\quad (1)$$

式中:Sed 为模拟产沙量; Q_{surf} 为地表径流($\text{mm H}_2\text{O}/\text{hm}^2$); q_{peak} 为径流峰值(m^3/s); area_{hru} 为 HRU 面积(hm^2); C_{usle} 为地表植被覆盖因子; P_{usle} 为水土保持措施因子; K_{usle} 为土壤可蚀性因子; LS_{usle} 为地形因子,包括坡长因子 L 和坡度因子 S ;CFRG 为直径大于 2 mm 的粗碎块因子。

(1) 土壤可蚀性因子(K_{usle})可以表示土壤对侵蚀的敏感性,SWAT 中计算 K_{usle} 因子的方法,具体公式如下式所示。

$$K_{\text{usle}}=f_{\text{csand}}\cdot f_{\text{cl-si}}\cdot f_{\text{orgc}}\cdot f_{\text{hisand}}\quad (2)$$

式中: f_{csand} 为沙质土地土壤侵蚀因子; $f_{\text{cl-si}}$ 为黏壤土土壤侵蚀因子; f_{orgc} 为土壤有机质因子; f_{hisand} 为高沙质土壤侵蚀因子。

$$f_{\text{csand}}=(0.2+0.3\exp[-0.256m_s\cdot(1-\frac{m_{\text{silt}}}{100})])\quad (3)$$

$$f_{\text{cl-si}}=0.3(\frac{m_{\text{silt}}}{m_c+m_{\text{silt}}})\quad (4)$$

$$f_{\text{orgc}}=(1-\frac{0.25\text{orgC}}{\text{orgC}+\exp[3.72-2.95\cdot\text{orgC}]})\quad (5)$$

$$f_{\text{hisand}}=(1-\frac{0.7(1-\frac{m_s}{100})}{(1-\frac{m_s}{100})+\exp[-5.51+22.9\cdot(1-\frac{m_s}{100})]})\quad (6)$$

式中: m_s 、 m_{silt} 、 m_c 分别为砂粒、粉粒、黏粒的含量(%);orgC 为有机碳含量(%)。

(2) 植被覆盖因子(C_{usle})是影响土壤侵蚀的最

敏感因子,主要受到覆盖度、植被类型等的影响,SWAT 模型中计算公式如下。

$$C_{\text{usle}}=\exp([\ln(0.8)-\ln(C_{\text{usle,mn}})]\cdot \exp[-0.00115\cdot \text{rsd}_{\text{surf}}]+\ln[C_{\text{usle,mn}}])\quad (7)$$

式中: $C_{\text{usle,mn}}$ 为土地利用的最小植被覆盖度因子; rsd_{surf} 为土壤表面残留物(kg/hm^2)。

$$C_{\text{usle,mn}}\text{ 因子可由已知的 }C_{\text{usle,aa}}\text{ 因子用下式估计:}$$
$$C_{\text{usle,mn}}=1.463\ln[C_{\text{usle,aa}}]+0.1034\quad (8)$$

式中: $C_{\text{usle,mn}}$ 为土地利用的最小植被覆盖度因子; $C_{\text{usle,aa}}$ 为土地利用年均植被覆盖因子。

(3) 水土保持措施因子(P_{usle})是指采取水保措施后,土壤流失量相对于未采取任何措施时的比例,取值范围为 0~1^[14]。0 表示不存在侵蚀现象的区域,1 表示未采取水土保持措施的区域。SWAT 模型中 P_{usle} 因子是采用 Wischmeier 和 Smith 给出的信息计算,为了使模拟结果更适合研究区,因此本文对 P_{usle} 因子进行了修改。SWAT 模型中可对每一个 HRU 的 P_{usle} 因子进行修改,HRU 中包含土地利用、坡度等信息,因此本文根据土地利用类型及坡度范围,并考虑前人在黄土高原的研究以及黄土高原上水保措施的实施,包括梯田、水平沟以及鱼鳞坑等的影响^[15-16],最终确定表 1 中 P_{usle} 因子的取值。

表 1 水土保持措施因子(P_{usle})的取值

土地利用类型	坡地分级/(°)			
	0~15	15~25	25~35	>35
耕地 AGRL	0.25	0.35	0.5	0.65
林地 FRST	0.1	0.15	0.18	0.2
园地 ORCD	0.1	0.18	0.25	0.3
高覆盖草地 PAST	0.1	0.25	0.3	0.35
低覆盖草地 HAY	0.2	0.3	0.4	0.5
水域 WATR	0	0	0	0
建筑用地 URBN	0	0	0	0
未利用地 UINS	1	1	1	1

(4) 坡度坡长因子(LS)可以表示地形因子对土壤侵蚀的影响,SWAT 模型中采用如下公式进行计算。

$$\text{LS}_{\text{usle}}=(\frac{L_{\text{hill}}}{22.1})^m\cdot(65.41\cdot\sin^2(\alpha_{\text{hill}})+4.56\cdot\sin\alpha_{\text{hill}}+0.065)\quad (9)$$

式中: L_{hill} 为坡长(m); m 为指数项; α_{hill} 为坡度。

$$m\text{ 的计算公式如下:}$$
$$m=0.6(1-\exp[-35.835\cdot\text{slp}])\quad (10)$$

式中:slp 为 HRU 的坡度。

$$\text{slp 与 } \alpha_{\text{hill}}\text{ 的关系为:}$$
$$\text{slp}=\tan\alpha_{\text{hill}}\quad (11)$$

研究中涉及潜在土壤侵蚀量(Sed_q)、实际土壤侵蚀量(Sed_a)、土壤保持量(Sed_c)3 种数据量的计算。

潜在土壤侵蚀量是指在假定没有地表植被覆盖和水土保持措施下的侵蚀量,即通过将 SWAT 源代码和数据库中的 C_{usle} , P_{usle} 因子修改为 1 得到的产沙量。实际土壤侵蚀量是指流域实际发生的侵蚀量,即由 SWAT 模型直接模拟得到的产沙量。土壤保持量是二者的差值,计算公式如下式所示。

$$Sed_e = Sed_q - Sed_a = 11.8 (Q_{surf} \cdot q_{penk} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{usle} \cdot LS_{usle} \cdot CFRG \cdot (1 - C_{usle} \cdot P_{usle}) \quad (12)$$

2.1.2 数据库的构建

(1) 土地利用数据库。研究中主要使用 2005 年、2010 年的土地利用数据,将延河流域土地利用数据分为耕地、林地、园地、高覆盖草地、低覆盖草地、建设用地、水域和未利用地 8 类,模型在输入土地利用数据时,同时还需要输入土地利用索引表,方便将流域的土地利用类型与 SWAT 模型自带的植被生长模型库和农业管理数据库进行连接。因此,按照 SWAT 模型中土地利用的编码对各种土地利用重新进行编码,见表 2,从而建立土地利用索引表。

表 2 土地利用类型 SWAT 编码

序号	土地利用类型	SWAT 数据库编码
1	耕地	AGRL
2	林地	FRST
3	园地	ORCD
4	高覆盖草地	PAST
5	低覆盖草地	HAY
6	建设用地	URBN
7	水域	WATR
8	未利用地	UINS

(2) 土壤数据库。本文所使用的土壤数据来源于 HWSD,流域的土壤类型主要包括黄绵土、冲积土、粗骨土、红黏土、潜育始成土等,见图 2。通过在 HWSD 中获取各种土壤的部分参数以及利用 SPCS 软件计算部分土壤参数,建立土壤参数数据库,并根据各类土壤在 SWAT 中的编码,建立土壤参数索引表。

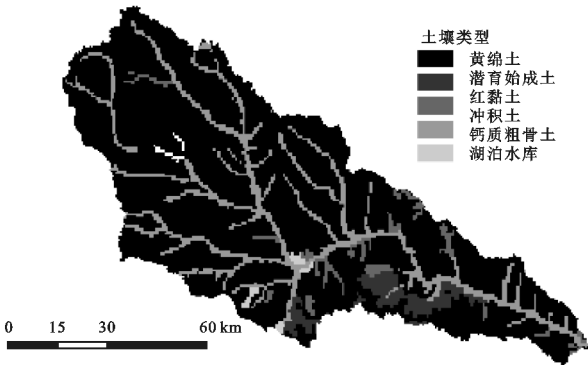


图 2 土壤类型

(3) 气象数据的准备。本文选用流域内及距离流域较近的 11 个传统气象站点 1999—2014 年的逐日气象资料输入到 SWAT 模型中,其中降水、最高温度、最低温

度、相对湿度、风速可直接在中国气象数据共享网站获取,太阳辐射数据通过天气发生器模拟得到。

2.1.3 模型的建立 本研究使用 ArcSWAT 2012 版本,首先是子流域的划分,基于 DEM 生成河网,通过设定阈值(形成子流域的最小给水面积)为 10 000 hm^2 ,设置流域出水口点,将延河流域划分为 41 个子流域;其次是水文响应单元(HRU)的划分,模型在划分子流域的基础上,通过叠加土地利用数据、土壤数据和坡度数据,获得各个子流域中具有相同土地利用类型、土壤类型和坡度的 HRU。最后将气象数据等导入模型,对延河流域 1999—2014 年产沙量进行模拟。模型以 1999—2002 年作为预热期,利用 2003—2008 年甘谷驿水文实测值进行率定,利用 2009—2014 年的水文实测值进行验证。由于研究时间较长,土地利用会发生一定程度地变化,因此将预热期和率定期视为整体,选用 2005 年土地利用进行模拟;在验证期时选用 2010 年土地利用进行模拟。

2.1.4 模型的参数敏感性分析、率定、验证以及不确定性分析 本文通过选用 SWAT-CUP(SWAT-Calibration and Uncertainty Programs)中的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型进行敏感性参数分析、率定、验证以及不确定性分析。在该算法中,采用判定系数(Coefficient of determination, R^2)和纳什效率(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)对模型进行适用性评价,其中 R^2 可评价模拟值与实测值变化趋势的一致性, NSE 可反映模拟值与实测值之间的拟合程度^[17]。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2} \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)(Q_{mi} - Q_m)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_m)^2} \quad (14)$$

式中: Q_{mi} 为模拟值; Q_{oi} 为实测值; Q_m 为模拟均值; Q_o 为实测均值。

2.2 地形因子的获取

本文选用的地形因子包括:坡度、坡向和高程,其中坡度由 DEM 直接获取,将其分为 $0^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 25^\circ$, $25^\circ \sim 35^\circ$ 以及 $> 35^\circ$ 共 4 个等级,获得坡度分级图;坡向由 DEM 直接获取,将其分为平地、阳坡、半阳坡、半阴坡及阴坡 5 类,获得坡向分级图;高程由 DEM 直接获取,通过设置 50 m 的高程间隔,分为 26 个等级,获得高程分级图。

3 结果与分析

3.1 模型率定与验证

本文选用甘谷驿水文站 1999—2014 年的逐月径流数据和泥沙数据作为实测值,由于未能获取枯水期

时泥沙数据,因此选用 0 值代替。在 SWAT-CUP 中进行敏感性参数分析后,完成对模拟结果的率定和验证。图 3 为研究区径流和泥沙实测值与模拟值的比较结果。一般研究认为, $R^2>0.6$, $NSE>0.5$ 时,模拟结果较可靠,校准期和验证期模拟结果都较好时,参数的最佳校准值适用于研究区域^[18]。

从图 3(A1—A2)可以看出,径流量在率定期

(2003—2008 年)和验证期(2009—2014 年)模拟结果的 R^2 和 NSE 均达到模型要求;从图 3(B1—B2)可以看出,泥沙量在率定期(2003—2008 年)和验证期(2009—2014 年)模拟结果的 R^2 和 NSE 也均达到模型要求。因此,SWAT 模型可以对延河流域的水文状况进行较好地模拟。从而可得到延河流域基于 HRU 的 2003—2014 年逐月产沙量。

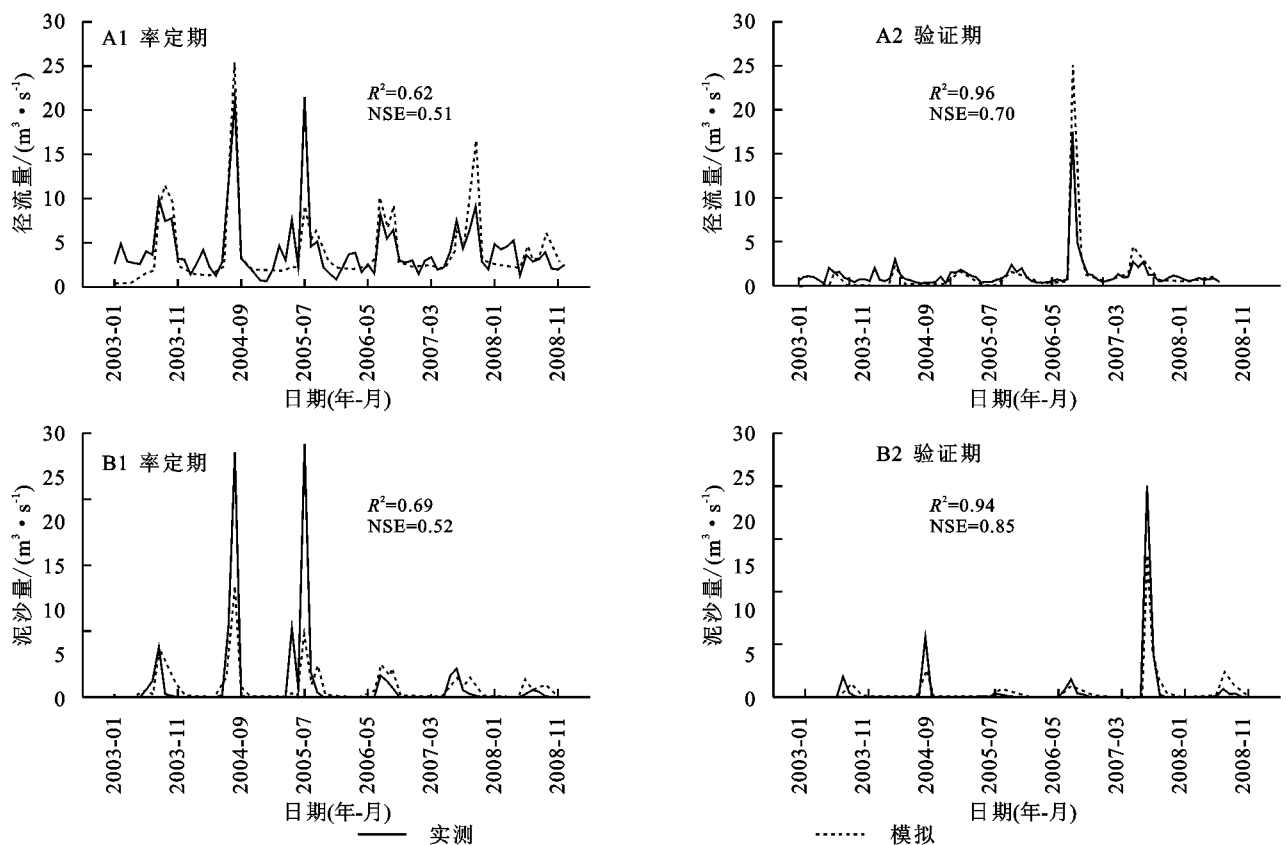


图 3 延河流域甘谷驿水文站点月径流量和月产沙量在率定期、验证期的模拟结果

3.2 水土保持量分布及变化

3.2.1 时间尺度变化 从图 4 可以看出,在时间尺度上,潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量和水土保持量变化趋势相同,均会产生不同幅度的波动,主要原因是受降水因子的影响,各个月份的降水量、降水强度均不同,其中在 2013 年 7 月份 3 种数据量均产生了大幅度增加且均达到多年最大值,主要原因是该月降雨总量为 435 mm,远远超过其他月份的降水量。因此,可以发现延河流域水土保持在时间尺度上的变化主要受降水因子的影响。

延河流域水土保持量在 2003—2014 年,整体上呈现出波动的趋势,但水土保持量仍有所增加,其中 2003 年水土保持总量为 677.1 万 t,2014 年水土保持总量为 1 345.02 万 t。二者的空间分布格局也产生了很大的变化。由图 5 可以看出,2003 年水土保持量主要集中在流域下游,主要原因是该下游区域,地势平坦,侵蚀轻微,因此产生的水土保持量较高,而在

2014 年水土保持量在整个流域均有分布,主要原因是该区域近年来实行了一系列的水保措施及植被覆盖措施产生了良好的生态效应。

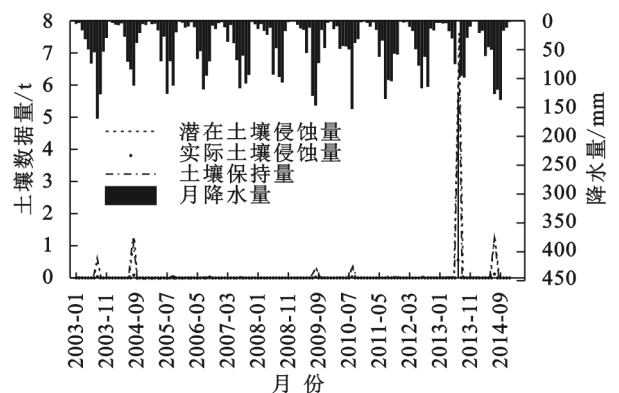


图 4 潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量和水土保持量随时间变化趋势

为了更加明确水土保持服务在不同年份空间分布差异性的原因,本文尝试分析研究区水土保持措施及植被覆盖措施的变化及其对水土保持服务的影响。

因此,本文通过解译高分辨率影像得到研究区梯田、水库分布情况,并用此来表示研究区水土保持措施实施的情况。由于梯田数据的提取需要高分辨率影像的支持,因此选用 10 m 分辨率的 Sentinel-2A 数据,但该数据是最早发行时间为 2015 年,因此通过解译影像得到研究区 2015 年梯田、水库数据,通过观察可知,经过多年来对坡耕地的改造,到 2015 年为止流域上中游梯田及水库分布较广泛,下游分布相对较少。本文通过处理 MOD13Q1 数据得到的研究区 2003 年、2014 的年 NDVI 数据,并用此来表示研究区植被覆盖状况的变化。可以看出,经过多年来实施的退耕还林(草)工程,整个流域的植被覆盖状况发生了明显地好转,尤其是流域的上中游区域。由此可知,梯田、水库和 NDVI 数据在空间上的变化可以直接证明 2003 年和 2014 年土壤保持量在空间上的差异,也进一步说明水土保持措施及植被覆盖措施在流域治理过程中发挥了至关重要的作用。

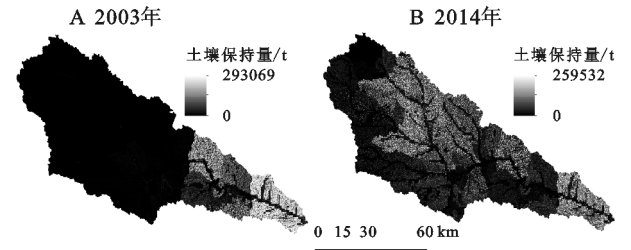


图 5 延河流域 2003 年和 2014 年土壤保持量

3.2.2 空间尺度变化 从图 6 可以看出,在空间尺度上,土壤保持量主要受地形因子的影响。2003—2014 年延河流域年均土壤保持量为 1 002.02 万 t,在流域上中下游区域表现不同,其中在下游年平均土壤保持量最大,上游次之,中游最低,造成这种现象的主要原因是,流域下游的区域主要为残原平梁沟壑区,该区域黄土侵蚀方式以雨滴击溅侵蚀为主,侵蚀轻微,且地面平坦、土层肥厚^[19],因此有着最高的土壤保持量;流域上游主要为黄土覆盖的山地区域,该区域 25° 以上的陡坡占总面积的 70% 以上^[19],虽易受土壤侵蚀的影响,导致该区域的潜在土壤侵蚀量大于其他区域,但由于近年来这个区域实施退耕还林力度最大,使得 25° 以上的区域全部退耕,进而植被不断恢复,植被覆盖度不断增大,该区域实际土壤侵蚀量随之不断减少,所以该地区的土壤保持量相对中游较高;流域中游主要为梁峁丘陵沟壑区,该地区人类活动频繁,垦殖严重,因此该区域的土壤保持量最低。

为了更清楚延河流域土壤保持量受地形因子的影响,将多年平均土壤保持量进行标准化,参照蒋春丽等人的研究^[20],将标准化后的土壤保持量分为低(0~0.2)、

较低(0.2~0.4)、中(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)、高(0.8~1.0)5 个等级,见表 3。延河流域主要以低保持为主,面积为 5 432.94 km²,占总面积的 73%。

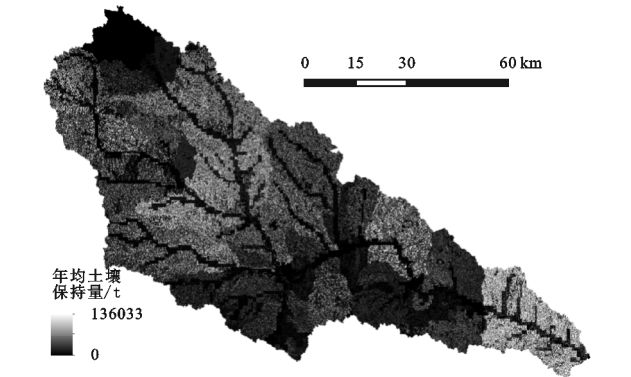


图 6 延河流域多年(2003—2014)年平均土壤保持量

表 3 土壤保持量分级统计

土壤保持量分级	保持面积/km ²	比例/%
低保持	5432.94	73.20
较低保持	1141.71	15.38
中保持	597.23	8.05
较高保持	82.02	1.11
高保持	168.02	2.26

3.3 不同地形因子土壤保持分布特征

3.3.1 坡度与土壤保持分布特征 经统计得到各土壤保持量在不同坡度等级所占面积比例(表 4)。由表可知,各级土壤保持量随坡度的增大均呈先增加后减小的趋势,其中在<25°区域,低保持占比较多。主要是因为耕地在这一区域分布范围较广^[21],人类活动比较频繁,易发生土壤侵蚀。>25°区域,低保持占比较小,较低、中和高保持量占比较多。这主要是因为延河流域自退耕还林以来,坡度是执行退耕的首要标准,>25°以上的坡耕地必须退耕^[21],这一措施导致>25°的区域耕地面积逐渐下降,草地、林地面积相应增加,中度和强度以下侵蚀的面积占比显著增加,剧烈侵蚀面积显著下降。而>35°的区域各级保持量均低于 25°~35°区域,主要是因为大于 35°属于急陡坡,其耕作类型虽发生改变,但该区域地形陡峭,易受土壤侵蚀的影响。

总之,流域土壤保持随坡度变化规律明显,25°的坡面是土壤保持量的关键带,也是今后水土保持工作应重点关注的区域。

3.3.2 坡向与土壤保持分布特征 通过将土壤保持量分级图与坡向进行叠加分析,得到土壤保持量空间分布的坡向特征图(图 7)。由此可知,在平地上,基本只存在低、较低和中保持量,其他各级保持量几乎为 0。经统计可得,土壤保持量在不同坡向上的规律表现为半阳坡>阴坡>阳坡>半阴坡>平地。这主

要是因为对于黄土丘陵沟壑区,平地上人类活动频繁,因此基本只存在低、较低和中保持量,且占比都较小;阳坡所获得的太阳辐射总量高于阴坡,但阳坡土壤湿度低于阴坡,且阳坡上人类耕作现象较多^[22-24],并参照汤巧英等^[24]的研究成果,可知延河流域 2000 年、2010 年植被覆盖度总体表现为阴坡>阳坡>平

地,因此阴坡上的土壤保持量高于阳坡。又根据李勉等人^[25]的研究成果可知,黄土高原不同坡向土壤侵蚀速率大小表现为半阴坡>阳坡>半阳坡,从这一规律可以看出半阳坡的土壤保持量应相对较高。由此可知,土壤保持量在不同坡向的分布与坡向的植被覆盖、土壤湿度、侵蚀速率等有着紧密的联系。

表 4 不同坡度土壤保持面积分布情况

坡度/(°)	低保持		较低保持		中保持		较高保持		高保持	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
0~15	1464.11	26.95	236.20	20.69	101.89	17.06	2.43	2.96	4.49	2.67
15~25	2204.09	40.57	363.19	31.81	147.80	24.75	73.03	89.05	64.50	38.39
25~35	1392.09	25.62	414.72	36.32	268.63	44.98	6.56	7.99	80.86	48.12
>35	372.65	6.86	127.61	11.18	78.91	13.21	0.00	0.00	18.18	10.82
合计	5760.26	100.00	988.15	100.00	728.88	100.00	68.92	100.00	164.49	100.00

总之,流域土壤保持随坡向变化规律明显,主要是与坡向上的植被覆盖、湿度、光照、侵蚀速率等因子关系密切。半阳坡为土壤保持量最大的区域,半阴坡为土壤保持量较小的区域,二者均为日后开展水土保持的重点对象。

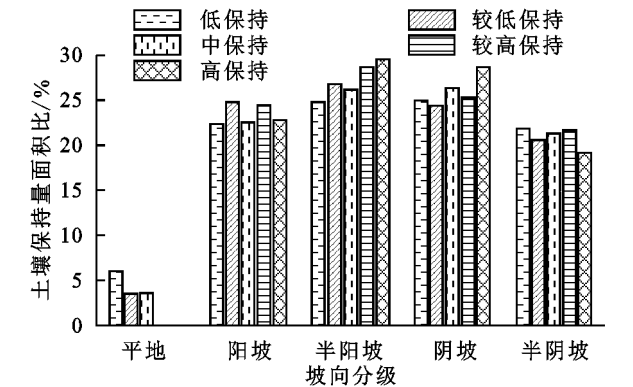


图 7 土壤保持量坡向分布特征

3.3.3 高程与土壤保持分布特征 将流域高程分级图与土壤保持量分级图进行叠加分析,得到土壤保持量空间分布的高程特征图(图 8)。由此可知,随着高程的增加,土壤保持量大致呈先增大后减小的现象,土壤保持量在低、较低、中和较高保持的高程分布特征大致相同,其峰值均在 1 250~1 300 m 高程范围内,土壤高保持峰值主要分布在 950~1 000 m 的高程范围内,主要原因是,在 1 250~1 300 m 高程范围内,主要为黄土丘陵沟壑区,是延河流域典型的地貌类型,该种地形上虽易发生土壤侵蚀^[26],但近年来在丘陵沟壑区开展了淤地坝工程,给该地区带来了良好的生态和经济效益,使得该地区的土壤保持量不断增加;在 950~1 000 m 的高程范围内,一般为黄土台地,土壤肥厚,地面平坦,不易发生土壤侵蚀现象,因此存在高土壤保持量。

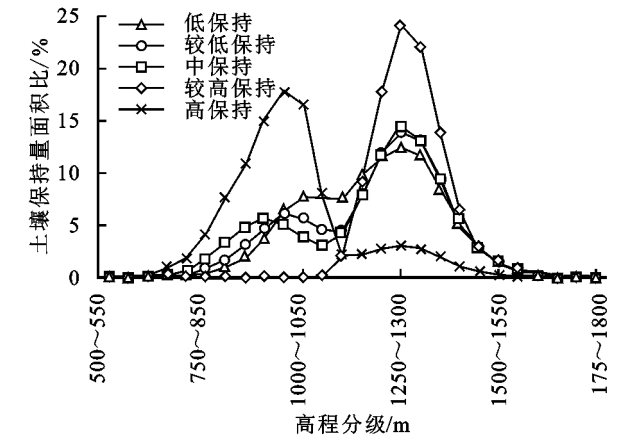


图 8 土壤保持量高程分布特征

总之,流域土壤保持随高程变化分异特征明显,950~1 000 m 和 1 250~1 300 m 是土壤保持量最多的地带,也应是今后水土保持的关注重点。

4 结论

- (1) 基于高分辨率的 DEM,应用 SWAT 模型开展流域生态系统土壤保持服务的模拟,不仅提高了产沙的精度,而且拓展了 SWAT 模型的应用领域。
- (2) 延河流域在 2003—2014 年期间,年均土壤保持量为 1 002.02 万 t,土壤保持功能有所增强,在时间上的变化趋势主要受降水量的影响,空间上的变化趋势主要受地形因子的影响。其中流域 2003 年和 2014 年土壤保持量的空间分布特征表明,近年来流域内实施的一系列水土保持及植被覆盖措施使水土流失现象得到了一定程度的改善,对流域生态建设发挥了极其重要的作用。
- (3) 土壤保持量受坡度、高程、坡向影响规律明显。具体表现为,土壤保持量随坡度、高程的增大呈先增大后减小的趋势,土壤保持量在不同坡向上的规律表

现为半阳坡>阴坡>阳坡>半阴坡>平地。在>25°的坡面、950~1 000 m 和 1 250~1 300 m 的高程范围、以及半阳坡上均存在较高的土壤保持量,应是今后水土保持工作关注的重点。

本文的研究方法和研究结果能比较真实地模拟延河流域土壤保持服务的真实状况,但在研究过程中仍然存在一些不足之处,如在利用 SWAT 模型计算土壤保持量的过程中,土壤参数对产沙的模拟有很大影响,但 SWAT 土壤数据库中输入的一些土壤参数是直接根据经验方程计算得到的,虽然具有一定的科学性,但仍然会存在一定误差;在进行模拟结果的率定和验证时,未能获取枯水期时泥沙数据,因此选用 0 值代替;在研究地形因子对土壤保持量的影响时,发现土壤保持量同时还会受到人类活动、植被覆盖、气候等因子的综合影响,因此,后续研究将进行多种因子对土壤保持量的共同影响,从而更好地分析土壤保持服务变化的原因。

参考文献:

- [1] Dotterweich M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation-A global synopsis[J]. *Geomorphology*, 2013,201:1-34.
- [2] Soksamnang K, 何洪鸣, 赵宏飞, 等. 黄土高原 50 余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2018,25(2):1-7.
- [3] 崔晓临, 雷刚, 王涛, 等. 退耕还林还草工程实施对洛河流域土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2016,23(5):68-73.
- [4] 高健翎, 张建国, 朱莉莉, 等. 黄土丘陵沟壑区水土保持关键措施变化特征[J]. *水土保持通报*, 2019,39(3):114-118.
- [5] 韩永伟, 高吉喜, 王宝良, 等. 黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J]. *农业工程学报*, 2012,28(17):78-85,294.
- [6] 杨波, 王全九, 董莉丽. 榆林市还林还草后土壤保持功能和经济价值评价[J]. *干旱区研究*, 2017,34(6):114-123.
- [7] 王森. 延安市土地利用变化及其土壤保持功能效应研究[D]. 陕西杨陵: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- [8] 陆传豪, 代富强, 刘刚才. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的万州区土壤保持服务功能空间分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2017,26(8):1228-1236.
- [9] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等. 三峡库区重庆段土壤保持服务时空分布格局研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016,25(6):932-942.
- [10] 饶恩明, 肖懿. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018,38(24):741-749.
- [11] 刘兴誉. 基于 SWAT 模型的藉河流域产流产沙模拟研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [12] 卢爱刚, 索安宁, 张镭. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价[J]. *水土保持研究*, 2011,18(2):57-61,65,275,271.
- [13] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 陕西杨陵: 中国科学院研究生院(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [14] 田宇, 朱建华, 李奇, 等. 三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J]. *生态学杂志*, 2020,39(4):1164-1174.
- [15] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 流域侵蚀控制度的概念与计算方法: 以王茂沟流域为例[J]. *中国水土保持科学*, 2013,11(1):17-24.
- [16] 马斗斗. 基于 RUSLE 和 PESERA 的皇甫川流域 LUCC 的土壤侵蚀效应模拟[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [17] 刘俊, 刘时银, 上官冬辉, 等. CMADS, ITPCAS 和 TRMM 3 B423 套降水数据集在玉龙喀什河流域的适用性评价[J]. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2017,38(5):28-37.
- [18] 龚珩夫, 李占斌, 李鹏, 等. 基于 SWAT 模型的延河流域径流侵蚀能量空间分布[J]. *农业工程学报*, 2017,33(13):120-126.
- [19] 孙虎. 陕西延河流域地貌组合类型的模糊聚类划分[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 1996,024(4):79-84.
- [20] 蒋春丽, 张丽娟, 张宏文, 等. 基于 RUSLE 模型的黑龙江省 2000—2010 年土壤保持量评价[J]. *中国生态农业学报*, 2015,23(5):642-649.
- [21] 陈浩. 黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [22] 程圣东, 李占斌, 鲁克新, 等. 文安驿流域植被盖度时空分异及其与地貌因子关系研究[J]. *西安理工大学学报*, 2011,27(2):145-150.
- [23] 党晶晶, 赵成章, 李钰, 等. 祁连山高寒草地甘肃臭草叶性状与坡向间的关系[J]. *植物生态学报*, 2015,039(1):23-31.
- [24] 汤巧英, 戚德辉, 宋立旺, 等. 基于 GIS 和 RS 的延河流域植被盖度与地形因子的相关性研究[J]. *水土保持研究*, 2017,24(4):198-203.
- [25] 李勉, 李占斌, 刘普灵, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀坡向分异特征[J]. *水土保持学报*, 2004,18(1):63-65,99.
- [26] 周自翔. 延河流域景观格局与水文过程耦合分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.