

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.049.

王鹭, 高建恩, 龙韶博, 等延河流域典型治理阶段的土壤保持功能时空变化及驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 94-102.

WANG Lu, GAO Jianen, LONG Shaobo, et al. Temporal and Spatial Variation of Soil Conservation Function and Its Driving Factors in Typical Reclamation Stage in Yanhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 94-102.

延河流域典型治理阶段的土壤保持功能 时空变化及驱动因素分析

王鹭¹, 高建恩^{1,2,3}, 龙韶博¹, 王照润¹, 康有财², 高哲⁴, 郭子豪⁵

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

摘要: [目的]探究黄土高原所进行的退耕还林(草)及治沟造地等典型治理工程的生态系统水土保持功能时空变化及其驱动因素,对于黄土高原进一步发展具有重要指导作用。[方法]通过构建延河流域 InVEST 生态服务功能模型和地理探测器的方法,在验证的基础上,研究了典型治理阶段流域的生态系统土壤保持功能。[结果](1) 在时间变化上,与退耕还林前(1990—2000)相比,退耕还林期(2000—2010)和退耕还林+治沟造地期(2010—2017)的多年平均土壤保持量分别增加了 32.29%, 55.61%, 年均增加 4.92×10^6 t; (2) 在空间分布上,林草地和治沟造地的面积增加区域与土壤保持量增加区域具有一致性,治沟造地工程使得延河流域耕地整体的土壤保持能力提高,单位造地面积的土壤保持量增加 7 t/hm²。土壤保持量随坡度、高程的增加呈现先增加后减少的趋势,在海拔 1 200~1 500 m,坡度 15°~25°范围内土壤保持总量占年总土壤保持量比例较高。[结论] 土地利用类型的变化是影响土壤保持空间分布格局的主要驱动因子。延河流域土壤保持功能时空变化的驱动因素分析为黄土高原生态服务功能改善提供了科学支撑。

关键词: 土壤保持功能; 时空变化; InVEST 模型; 治理阶段

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0094-09

Temporal and Spatial Variation of Soil Conservation Function and Its Driving Factors in Typical Reclamation Stage in Yanhe River Basin

WANG Lu¹, GAO Jianen^{1,2,3}, LONG Shaobo¹, WANG Zhaorun¹,
KANG Youcai², GAO Zhe⁴, GUO Zihao⁵

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Research Center on Soil & Water Conservation, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: [Objective] It is important to explore the temporal and spatial changes of soil conservation function and driving factors in the Loess Plateau under the typical management such as returning farmland to forest (grassland) and gully land consolidation project, so as to guide the further development of the Loess Plateau. [Methods] Soil conservation function in typical reclamation stage in this basin by constructing the InVEST ecosystem service function model and geographic detector method in Yanhe River Basin. [Results] (1) In

收稿日期: 2022-05-09

修回日期: 2022-05-17

资助项目: 陕西省重点研发计划(2020ZDLSF06-03-01); 国家自然科学基金(41877078, 41371276); 国家重点研发计划(2021YFD1900704); 国家重点研发计划课题(2017YFC0504703)

第一作者: 王鹭(1997—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程方向。E-mail: wanglupuppy@163.com

通信作者: 高建恩(1962—), 男, 山西运城人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: gaojianen@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

terms of time change, compared with the period before returning farmland to forest (1990—2000), the annual average soil conservation amount increased by 32.29% and 55.61% during the period of returning farmland to forest (2000—2010) and the period of returning farmland to forest+gully land consolidation project (2010—2017), respectively, with an annual average increase of 4.92×10^6 t. (2) In terms of spatial distribution, the increasing area of forest and grass lands and gully land was consistent with the increasing area of soil conservation, gully land consolidation project improved the overall soil conservation capacity of cultivated land in Yanhe River Basin, and the soil conservation capacity per unit land reclamation area increased by 7 t/hm². The amount of soil conservation increased first and then decreased with the increase of slope and elevation, and the proportion of total amount of soil conservation to total amount of soil conservation was higher in the slope ranging from 15° to 25° at altitude ranging from 1 200 m to 1 500 m. [Conclusions] The change of land use type was the main driving factor affecting the spatial distribution pattern of soil conservation. The analysis of the driving factors of the temporal and spatial changes of soil conservation function in the Yanhe River Basin can provide scientific support for improvement of ecological services on the Loess Plateau.

Keywords: soil conservation function; temporal and spatial variation; InVEST model; reclamation stage

黄土高原是我国重要的生态屏障^[1],也是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一^[2]。解放以来,国家通过坡、沟及小流域综合治理、退耕还林(草)、“治沟造地”等一系列治理^[3],植被覆盖度大幅度提高,入黄泥沙由多年平均的 16 亿 t 减少至新世纪以来的 2~3 亿 t^[4],黄土高原生态环境发生了重大的改变,不同治理时期的水土保持生态服务功能逐渐成为社会及学界关心的重大科学问题。研究不同典型治理阶段的水土保持生态服务功能对黄土高原的进一步治理具有重要的现实意义。

目前,关于黄土高原的水土保持生态服务功能已有些研究。余新晓等^[5]在综合 Costanza 等关于生态服务功能概念的基础上,提出水土保持生态服务功能的含义。随后,国内学者们在不同尺度研究区进行了水土保持生态服务功能的评估:冯磊^[6]、宁婷^[7]等分别在空间分布上对黄土高原和山西省的水土保持功能重要区域进行了识别与划分;孙文义等^[8]利用 RUSLE 模型分析了 1990—2010 年期间黄土高原不同生态系统水土保持功能的动态变化;王森等^[9]基于遥感数据和水文气象资料,利用 InVEST 模型研究了土地利用变化对土壤侵蚀以及土壤保持功能的影响;张琨^[10]、杨殊桐^[11]、包玉斌^[12]、薛亚永^[13]等评估了退耕还林等植被恢复工程的水土保持生态服务功能效应;刘宥延等^[14]着重分析了人工灌草复合植被的水土保持功能,指出人工灌草地是黄土高原丘陵区适宜的植被类型。上述研究在某一治理阶段的水土保持生态服务功能上已取得一定的进展,但是在不同典型治理阶段特别是近年来所实施的治沟造地这一能够有效增加高质量农业用地的创新性水土保持措

施对土壤保持功能的影响研究相对较少。

本研究应用 InVEST 模型、地理探测器,以黄土高原延河流域为研究区,研究延河流域在退耕还林前(1990—2000 年)、退耕还林期(2000—2010 年)、退耕还林+治沟造地期(2010—2017 年)土壤保持功能的时空变化特征,并对其驱动因素进行分析,为黄土高原的进一步治理及生态服务功能的改善提供科学支撑。

1 研究区概况

延河位于黄河中游,发源于靖边县天赐湾乡周山,最终在延长县南河沟凉水岸与黄河汇流^[15],延河流域(36°27′—37°58′N, 108°41′—110°29′E)面积为 7 682.58 km²(见图 1),区域内沟壑纵横,沟壑密度高达 2.1~4.6 km/km²^[16],沟道平均比降 3.26%,平均海拔 1 218 m,平均坡度 17°^[17]。延河流域属于大陆性半干旱季风气候,年平均降雨量 495 mm,主要集中在 7—9 月份,平均气温 8.8~10.2℃,年均蒸发量约为 1 000 mm 左右。流域属于森林草原植被带,植被类型丰富,物种多样性高。占流域面积 80% 以上的土壤类型为黄绵土,其有机质含量低,抗冲蚀性差,水土流失严重,流失面积占流域总面积的 90% 左右。

2 研究方法与数据处理

2.1 研究方法

2.1.1 土壤保持量的计算 InVEST 模型的土壤保持模块(SDR)可以计算流域输沙,土壤侵蚀和土壤保持,并描述其空间变化特征。与 USLE 相比,该模块在计算泥沙时能够考虑到地类本身对上游沉积物的

拦截作用和泥沙输移比^[18]。详细计算如下:

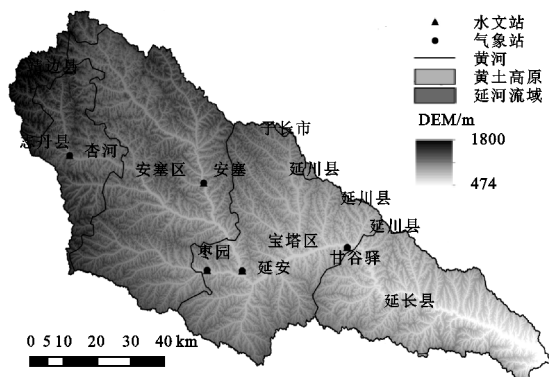


图1 延河流域地理位置

(1) 潜在土壤侵蚀量和潜在输沙量的计算:

$$RKLS_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (1)$$

$$S_x = R_x \times K_x \times LS_x \times SDR_{barex} \quad (2)$$

式中: $RKLS_x$ 为栅格 x 的潜在土壤侵蚀量(t); S_x 为栅格 x 的潜在输沙量(t); R_x, K_x, LS_x 分别为栅格 x 的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长坡度因子。 SDR_{barex} 为裸地环境下的泥沙输移比。

(2) 实际土壤侵蚀量和实际输沙量的计算:

$$USLE_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (3)$$

$$E_x = USLE_x \times SDR_x \quad (4)$$

式中: $USLE_x$ 实际土壤侵蚀量(t); E_x 为栅格 x 的实际输沙量(t); 也是栅格 x 进入河道的土壤侵蚀量; C_x, P_x 分别为栅格 x 的植被覆盖与管理因子、水土保持措施因子; SDR_x 为在植被和水土保持措施影响下的泥沙输移比。

(3) 计算土壤保持量:

$$SEDRET_x = S_x - E_x \quad (5)$$

式中: $SEDRET_x$ 为栅格 x 的土壤保持量(t)。

2.1.2 地理探测器 地理探测器是一种新的统计方法,用以探测空间分异性,揭示其背后的驱动因子^[19]。本研究采用该工具定量评估延河流域土壤保持量变化的单个驱动因子及其交互作用。土壤保持功能受到人类活动、气候变化等的影响,本文选取土地利用类型、年降雨量、NDVI、坡度、高程5个因子为自变量,土壤保持量为因变量,对自变量进行空间离散化处理,年降雨量采用自然断点法分为6级^[20], NDVI 植被指数分为6级^[21] ($<0.2, 0.2 \sim 0.3, 0.3 \sim 0.4, 0.4 \sim 0.5, 0.5 \sim 0.6, >0.6$), 高程参照前人研究分为5级^[22] ($<800, 800 \sim 1\,000, 1\,000 \sim 1\,200, 1\,200 \sim 1\,500, >1\,500$), 坡度分为6级 ($<5^\circ, 5^\circ \sim 8^\circ, 8^\circ \sim 15^\circ, 15^\circ \sim 25^\circ, 25^\circ \sim 35^\circ, >35^\circ$), 土地利用类型按类别进行分类。对栅格数据进行采样,采样间距为500 m,将5个因子分类后的值提取至样本点上,作为地理探测

器的运行数据。

在地理探测器中,因子探测器用来探测因变量的空间分异性,以及自变量对因变量的解释度,用 q 值度量。表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (6)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为 Y, X 的分类; σ_h^2, σ^2 分别为 h 层、全区 Y 的方差; N_h, N 分别为二者的单元数目; q 值的值域范围为 $[0 \sim 1]$ 。

交互作用探测器是对任意两个自变量因子交互作用的识别,用来评估两因子交互作用下对因变量的影响呈现增加或减弱。

2.2 数据来源与处理

InVEST 模型的 SDR 模块是基于像元尺度,以栅格为单元进行输沙量和土壤保持量的运算,最终输出基于栅格和子流域两种尺度的评价结果^[17],模型所需数据及其处理过程见表1。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

本研究选取不同治理期典型年1990年、2000年、2010年、2017年四期土地利用数据(见表2),通过分析可知,耕地、林地、草地是研究区主要的土地覆被类型,三者面积的合计比例在4个时期分别达到当年总面积的99.85%,99.29%,99.03%,98.67%,总体呈减少趋势;建筑用地占比逐渐增加,主要由于2012年延安新区开始建设,一部分的耕地、林地转换为建筑用地。从空间分布上来看(见图2),研究区林地面积沿着东南方向的宝塔区、延长县一带不断增加,由1990年的17.92%增加到2017年的35.75%,植被覆盖度明显提高;草地的增加主要是在安塞区、志丹县一带。总的来说,延河流域西北低山地区的草地面积大,植被生长环境差,覆盖度较低;东南方向延长县一带林地面积大,植被覆盖度较高,受人为干扰较小;延安市宝塔区一带人口较多,人类活动频繁,且通过建设大量的城市建筑使得该区不透水面增加。

3.2 模型的率定与验证

模型运行后,为了确定模型模拟结果的可信度,需对模型运行结果的适用性进行校正和验证。本文采用1990—2017年甘谷驿水文站实测输沙数据与模拟数据的纳什系数NSE和决定系数 R^2 为标准对模型精度进行评价。当 $R^2 > 0.6$, $NSE > 0.5$,模拟结果较好且可信^[32]。

表 1 模型所需参数来源及处理

数据类型	数据处理	数据来源及说明
DEM	进行预处理(裁剪、切割、填注等)	地理空间数据云,分辨率为 30 m
降雨侵蚀力因子 R	根据章文波 ^[23] 建立的基于逐月雨量估算降雨侵蚀力算法	来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享平台(http://www.geodata.cn)1 km 分辨率逐月降雨量数据
土壤可蚀性因子 K	本文采用 Williams 等 ^[24] 的侵蚀生产力评价模型 EPIC	来源于联合国粮农组织(FAO)所构建的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(http://westdc.westgis.ac.cn)
地形因子 LS	坡度坡长因子的计算使用 Desmet 和 Govers ^[25] 的二维地表计算方法	根据 DEM 数据,模型自动生成
土地利用	对遥感影像进行裁剪、投影转换、重分类,并依据现场调查与 91 卫星助手对错分地类进行校准	2000 年、2010 年土地利用数据来源于全球 30 m 地表覆盖数据(GlobeLand30), 1990 年、2017 年土地利用数据来源于宫鹏教授研究组发布的全球 1982—2015 年逐年长时序动态土地覆盖数据产品(GLASS-GLC) ^[26]
子流域	通过 SWAT 模型进行提取,确定最小汇水面积为 10 000 hm ² ,生成 46 个子流域	已填注的 DEM 数据
植被覆盖因子 C	基于 NDVI(归一化植被指数),采用 Van Leeuwen ^[27] 所建立的基于 MODIS-NDVI 数据建立的 NDVI 与 C 因子的线性回归方程	NDVI(归一化植被指数)来源于地理空间数据云 MODIS13Q1250m 16 d 最大合成数据产品,植被覆盖因子 C 以生物物理系数表输入
水土保持措施因子 P	采用 Lufafa 等 ^[28] 基于坡度推算 P 因子值的经验公式,同时结合研究区土地利用的实际情况与参考前人对相似流域的研究 ^[29-31]	以生物物理系数表输入
K_b 和 IC_0	$K_b=2, IC_0=0.5$	决定小流域水文过程空间联系与泥沙输移比关系形态的参数
SDR_{max}	$SDR_{max}=0.8$	栅格最大泥沙输移比

表 2 延河流域土地利用类型及其变化

年份	项目	土地利用类型						总计
		耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地	
1990	面积/km ²	2265.58	1369.71	3997.22	25.06	24.74	0.27	7682.58
	比例/%	29.64	17.92	52.29	0.33	0.32	0.00	100.00
2000	面积/km ²	2087.15	1171.73	4369.74	10.72	30.52	12.73	7682.58
	比例/%	27.17	15.25	56.88	0.14	0.40	0.17	100.00
2010	面积/km ²	2012.29	1186.81	4409.34	11.37	49.98	12.80	7682.58
	比例/%	26.19	15.45	57.39	0.15	0.65	0.17	100.00
2017	面积/km ²	2007.02	2746.66	2826.34	7.52	81.04	13.98	7682.58
	比例/%	26.12	35.75	36.79	0.10	1.05	0.18	100.00
1990—2017	面积变化量/km ²	−258.56	1376.95	−1170.88	−17.54	56.30	13.70	—
	变化率/%	−3.52	17.83	−15.50	−0.23	0.73	0.18	—

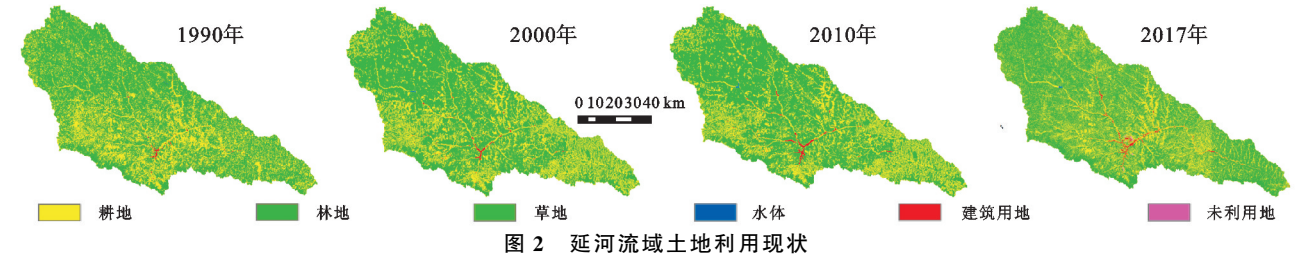


图 2 延河流域土地利用现状

本研究以退耕还林(草)为时间节点,以退耕还林(草)前 1990—2000 年为参数率定期,退耕还林(草)后 2001—2017 年为参数验证期。由图 3,4 可以看出,参数率定期与验证期的 NSE 和 R^2 均达到模型要求,具有较好的模拟精度,从而得到延河流域 1990—2017 年基于栅

格以及子流域尺度的年输沙量及土壤保持量。

3.3 不同治理阶段的土壤保持功能时空变化特征

3.3.1 不同治理阶段的年输沙量变化 从不同治理阶段的输沙量变化来看(图 5),退耕还林前(1990—2000 年)输沙量呈现较大程度的波动,多年平均值为

$4.70 \times 10^7 \text{ t}$, 退耕还林时期(2000—2010)多年平均值下降为 $2.46 \times 10^7 \text{ t}$, 输沙量减少了 47.60%, 其中 2000—2006 呈现较大程度的波动, 2006—2010 年趋于稳定, 主要是由于在退耕还林初期, 建设区以幼林地为主, 且工程的实施对地表的扰动较大, 2006 年以后, 幼林地逐渐成林, 植被覆盖度不断增加, 显著降低了泥沙输移能力, 减少了土壤侵蚀, 使得流域水土保持功能逐渐增强。退耕还林+治沟造地时期(2010—2017)多年平均输沙量为 $0.58 \times 10^7 \text{ t}$, 较退耕还林时期(2010—2017)减少了 76.36%, 且年输沙量变化较为平稳, 治沟造地工程降低了水流的挟沙能力, 拦截了大量的泥沙, 减少了土壤侵蚀量。从总体上来看,

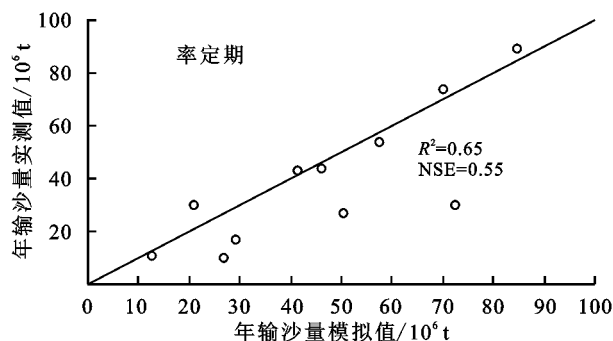


图4 延河流域年输沙量在率定期和验证期的模拟结果

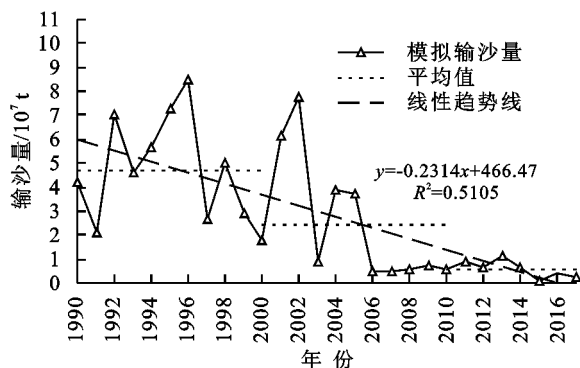


图5 延河流域1990—2017年输沙量变化趋势

3.3.2 不同治理阶段的土壤保持功能时空变化 为了充分了解延河流域不同治理阶段的土壤保持功能时空变化特征, 本文以土壤保持总量、单位面积土壤保持量为指标, 量化评估研究区土壤保持功能的变化。从时间变化上来看, 延河流域退耕还林前(1990—2000)、退耕还林时期(2000—2010)与退耕还林+治沟造地时期(2010—2017)的多年平均土壤保持量分别为 2.14 亿 t, 2.84 亿 t, 3.34 亿 t。由此可见, 与退耕还林前(1990—2000)相比, 退耕还林期(2000—2010)和退耕还林+治沟造地期(2010—2017)的多年平均土壤保持量分别增加了 32.29%, 55.61%。总体来讲, 研究区的土壤保持量呈波动增加趋势, 年均增加 $4.92 \times 10^6 \text{ t}$, 土壤保持能力逐年增强。

延河流域 1990—2017 年均输沙量为 $2.90 \times 10^7 \text{ t}$, 输沙模数为 $3771.67 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 输沙量整体呈现波动减少的趋势, 年均减少 $2.3 \times 10^6 \text{ t}$ 。

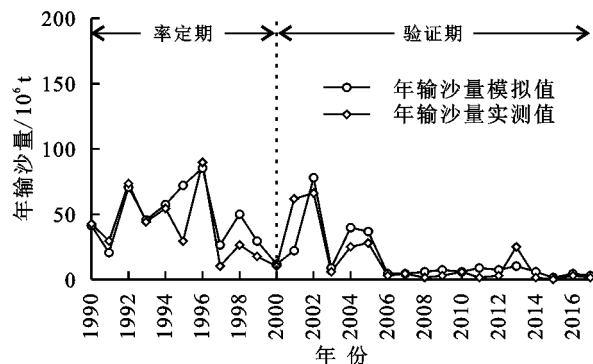


图3 延河流域 InVEST 模型年输沙量的参数率定和验证

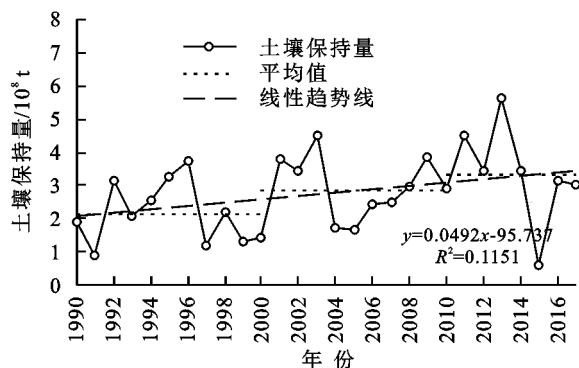
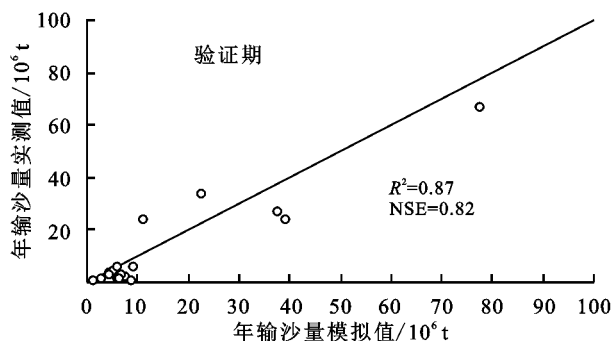


图6 延河流域1990—2017年土壤保持量变化趋势

尽管在栅格尺度上能够大致反映流域土壤保持量在空间上的差异, 但是为了更加细致地表现流域不同部位土壤保持量的空间差异性, 针对性地进行规划和治理, 本研究从子流域尺度进行了研究区单位面积土壤保持量的时空变化分析。从空间分布来看, 研究区的土壤保持量分布具有明显的空间差异性, 整体的空间分布格局基本稳定。2010 年与 2017 年的单位面积土壤保持量整体上高于 1990 年和 2000 年, 1990 年、2000 年、2010 年、2017 年所有子流域单位面积土壤保持量平均值分别为 239.57, 177.72, 372.85, 382.92 t/hm^2 , 1990 年与 2000 年各子流域单位面积土壤保持量均低于 300 t/hm^2 , 2010 年单位面积土壤保持量高于 300 t/hm^2 的子流域面积占到总面积的

78.81%,2017 年占到 87.76%。由此可见,相比 1990 年,2010 与 2017 年的土壤保持功能有了显著的提高。每个子流域在不同治理时期内降雨量、土地利用类型、坡度坡长等均不相同,使得其单位面积土壤保持量不同。与 1990 年相比,2010 年的 4—7 号子流域的单位面积土壤保持量有微弱的增加,主要是因为经过退耕还林工程的实施,一部分耕地转换为草地,减少了土壤侵蚀,但是这些子流域位于西北高山地区的靖边县、志丹县一带,不利于植被的生长,植被覆盖度增加缓慢,使得这些子流域的单位面积土壤保持量在全流域范围内仍然处于较低水平;位于东南方向延长县一带的 40,41,43—46 号子流域的单位面积土壤保持量有明显的增加,该区域在退耕还林的过

程中,造林力度较大,林地面积增加,再加之海拔低、降水丰富,植物生长良好,植被覆盖度高,土壤保持量增加显著且在全流域范围内处于较高水平。位于 17 号,18 号,29 号,22 号,23 号子流域由于人口较多,人类活动频繁,建筑用地增加,使得其单位面积土壤保持量较延长一带低。与 2010 年相比,2017 年的 15 号,16 号,28 号子流域的单位面积土壤保持量较高,主要是由于这些子流域为治沟造地主要的工程示范区,土壤保持能力有所增强。总的来说,虽然不同治理期各子流域的单位面积土壤保持量具有一定的差异,但其变化规律基本一致,呈现由西北向东南逐渐增加的趋势,林草地和治沟造地的面积增加区域与土壤保持量增加区域具有一致性。

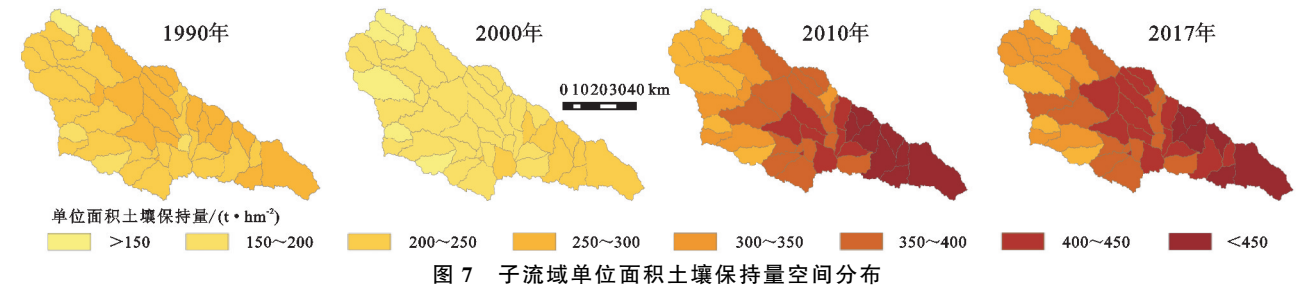


图 7 子流域单位面积土壤保持量空间分布

为了更进一步研究“治沟造地”对土壤保持的影响,在 InVEST 模型中,分别以治沟造地实施前后 2010 年、2017 年土地利用为变量,其他参数均以 2017 年为基准带入模型进行计算,从而得到研究区治沟造地前后土壤保持量的变化(表 3)。

表 3 治沟造地前后土壤保持量的变化

治理时期	土壤保持量/ (10 ⁶ t)	耕地土壤保持量/(10 ⁶ t)	耕地单位面积土壤保持量/(t·hm ⁻²)
治沟造地前	292.00	52.71	255.62
治沟造地后	300.00	51.43	262.63
变化量	8.00	-1.28	7.01

延安市政府自 2012 年起大范围开展治沟造地工程^[33],截至 2017 年,完成沟道土地整治面积 336.67 km²,其中大约三分之一的项目区位于延河流域。通过治沟造地,延河流域耕地的空间分布发生了变化,耕地面积由 2 012.29 km²减少到 2 007.02 km²,减少了 5.27 km²,其中,坡耕地继续实行退耕还林,转变为林草地;沟谷耕地的面积增加。与治沟造地前相比,造地后总的土壤保持量增加了 8.0×10⁶t,其中耕地土壤保持量减少 1.28 亿 t,而单位面积耕地土壤保持量增加 7.0 t/hm²。主要是由于新造沟谷耕地扩宽了原有水流的通道,降低了地表径流在汇流过程中的动能,水流的挟沙能力也随之减小,使得大量的泥沙被拦截

在沟道内沉积了下来,输沙量减少,相应的土壤侵蚀量也在减小,土壤保持能力提高。总的来说,治沟造地工程使得研究区耕地整体的土壤保持能力提高。

3.4 延河流域土壤保持功能的影响因素分析

从计算公式上来看,年土壤保持量的变化主要受土地利用类型以及潜在的侵蚀因子降雨、土壤类型、坡度坡长等因素的影响,具体表现为:

3.4.1 不同土地利用类型的土壤保持特征 通过分析不同土地利用类型下总的土壤保持量和单位面积土壤保持量可得(见表 4),单位面积土壤保持量的大小可以用来衡量不同地类土壤保持能力的强弱,在不同治理时期内,各土地利用类型中,林地的土壤保持能力较大,最大达到 498.21 t/hm²,其次为草地,耕地的土壤保持能力小于林草地,裸地和建筑用地的土壤保持能力均较小。从土壤保持量上来看,草地的土壤保持量占研究区总土壤保持量的比例分别为 61%,62%,62%,36%,林地占比分别为 21%,19%,20%,46%,由此可见,虽然草地的土壤保持能力弱于林地,但其土壤保持量高于林地,且草地的土壤保持量占比在逐渐减小,林地的占比在逐渐增大。整体来看,林草地是研究区保持土壤的中坚力量,贡献较大,占比达到了 70%以上。

3.4.2 不同海拔土壤保持变化 为了进一步研究不

同海拔梯度的土壤保持特征,本文高程采用与前文相同的分级,计算不同高程分级下的土壤保持量,见图 8,研究区不同治理时期典型年份土壤保持量随着海拔的升高呈现先增加后减少的趋势,其中 1 000~

1 500 m 海拔梯度的土壤保持量较大,占研究区土壤保持量的 70%以上,在海拔 1 200~1 500 m 出现峰值,海拔<800 m 的土壤保持量最小,约占研究区土壤保持量的 1%左右,其次为海拔>1 500 m。

表 4 不同土地利用类型下土壤保持量和单位面积土壤保持量

时间	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
1990 年	土壤保持总量/(10 ⁶ t)	26.83	35.80	99.58	0.32	0.38	0.00
	土壤保持总量比例/(%)	16.47	21.97	61.12	0.19	0.24	0.00
	单位面积土壤保持量/(t·hm ⁻²)	135.97	300.00	285.97	145.03	177.81	39.16
2000 年	土壤保持总量/(10 ⁶ t)	25.53	26.98	86.67	0.04	0.30	0.07
	土壤保持总量比例/%	18.29	19.33	62.09	0.03	0.21	0.05
	单位面积土壤保持量/(t·hm ⁻²)	122.32	230.23	198.34	37.63	97.32	52.55
2010 年	土壤保持总量/(10 ⁶ t)	52.23	57.39	181.04	0.11	0.95	0.26
	土壤保持总量比例/(%)	17.89	19.65	62.00	0.04	0.33	0.09
	单位面积土壤保持量/(t·hm ⁻²)	259.57	483.55	410.59	94.52	190.69	203.31
2017 年	土壤保持总量/(10 ⁶ t)	52.71	136.84	108.80	0.07	1.30	0.20
	土壤保持总量比例/%	17.57	45.63	36.28	0.02	0.43	0.07
	单位面积土壤保持量/(t·hm ⁻²)	262.63	498.21	384.95	92.09	160.20	143.88

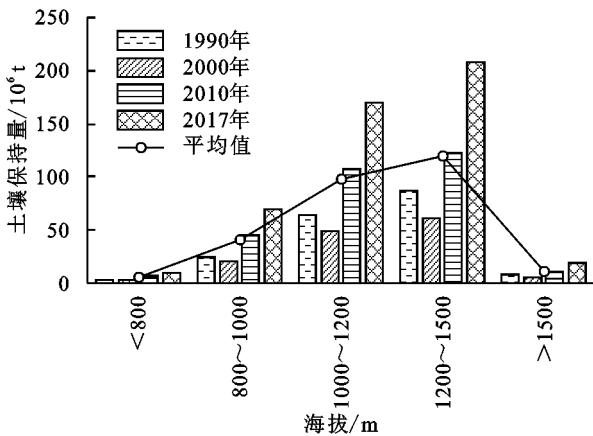


图 8 不同高程分级下的土壤保持量

3.4.3 不同坡度的土壤保持特征 本研究考虑延河流域地形、土地利用以及植被覆盖的分布,参考水土流失调查中划分坡度方法^[34],将坡度分为 6 级,计算不同坡度等级下的土壤保持量,见图 9,研究区土壤保持量均随着坡度的增加呈先增加后减小的趋势,小于 15°范围内,土壤保持量占比较小,四年分别为 13.74%,14.05%,14.02%,14.01%,15°~25°坡度范围内土壤保持量较大,均占研究区总土壤保持量的 35%以上,25°~35°坡度范围内土壤保持量的贡献仅次于 15°~25°范围,这两个等级土壤保持量总贡献均达到 70%以上。

3.4.4 基于地理探测器的土壤保持功能驱动因素分析 本文利用地理探测器,定量评估不同驱动因素对土壤保持功能空间分布影响的大小,结果显示(见表 5),不同影响因子对土壤保持量影响的解释力不同,

具体表现为土地利用类型>年降雨量>NDVI>坡度>海拔。土地利用类型的 q 值最高,是影响土壤保持空间分布格局的重要驱动因子,其次为年降雨量因子,海拔对土壤保持量影响的解释力较低。

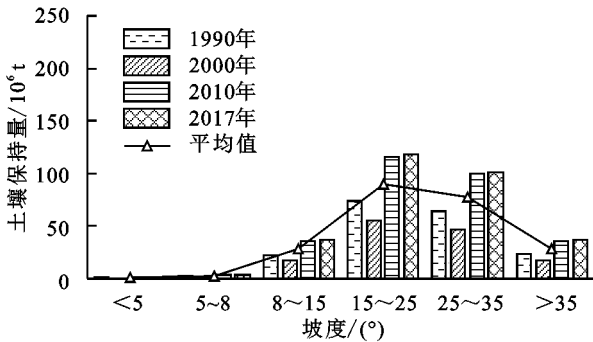


图 9 不同坡度下的土壤保持量

表 5 土壤保持量影响因子的 q 值

年份	海拔	坡度	土地利用类型	NDVI	年降雨量
1990	0.0011	0.0016	0.0424	0.0048	0.0072
2000	0.0048	0.0063	0.0223	0.0027	0.0128
2010	0.0077	0.0105	0.0207	0.0116	0.0132
2017	0.0037	0.0055	0.0268	0.0076	0.0121

经过交互作用探测结果可知,在研究期内,双因子交互作用的 q 值均大于单因子,即两因子共同作用下对土壤保持量的解释力大于单因子。将处于前三位的交互作用进行分析。由表 6 看出,在研究期内, q 值处于首位的均为土地利用类型与年降雨量,2017 年 q 值达到 0.052 4,较同年单因子 q 值有很明显的

增加。因此,在延河流域的土壤保持治理中,可以考虑以土地利用方式为主导,根据流域内降雨分布规律,优化研究区的土地利用格局,如在降雨强度较大的区域增强林草地的覆盖,增强土壤保持能力。

表 6 不同年份土壤保持影响因子交互作用探测

项目	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年
主导交互作用 1	土地利用类型∩年降雨量	土地利用类型∩年降雨量	土地利用类型∩年降雨量	土地利用类型∩年降雨量
<i>q</i>	0.0524	0.0412	0.0384	0.0392
主导交互作用 2	年降雨量∩坡度	土地利用类型∩坡度	土地利用类型∩坡度	土地利用类型∩NDVI
<i>q</i>	0.0479	0.0329	0.0362	0.0331
主导交互作用 3	年降雨量∩NDVI	土地利用类型∩海拔	土地利用类型∩海拔	土地利用类型∩坡度
<i>q</i>	0.0475	0.0304	0.0323	0.0326

4 讨论

(1) 本研究结果表明,治沟造地工程使得延河流域单位面积耕地的土壤保持量增加 7.0 t/hm²。此结果是在退耕还林基础上进行的分析,是退耕还林与治沟造地工程综合影响的结果。事实上,本模型的构建和验证是在延河流域处于裸地的条件下进行的,原则上该模型可以对在裸地基础上进行不同治理措施的作用进行研究。下一步可以在本研究的基础上进一步开展相关工作。

(2) 本研究认为,土地利用类型的变化是影响土壤保持空间分布格局的重要驱动因素,贾振宇等^[35]对辽河保护区土壤保持功能变化及其影响因素的研究认为土地利用类型改变是影响辽河保护区土壤保持格局的主导因素,本研究与其研究结果一致;不同土地利用类型的土壤保持能力不同,具体为:林地>草地>耕地>建筑用地>未利用地,这与薛亚永等^[36]对黄土高原森林草原区退耕还林(草)的土壤保持效应的研究结果一致。

(3) 本研究在模型模拟过程中,将 DEM 数据和土壤数据作为始终不变的数据输入模型进行计算,但实际上,随着退耕还林以及治沟造地工程的实施,植被覆盖逐渐增加,土壤中有机质增加,土壤肥力增强,使得土壤性质也发生了变化,与此同时,地形也在发生微小的变化,因此,假设地形和土壤未发生变化这一条件对模拟结果会造成一定的误差,在今后的研究中,要考虑地形和土壤变化对土壤保持的影响,使得计算结果更加准确。

5 结论

(1) 在时间变化上,与退耕还林前(1990—2000)相比,退耕还林期(2000—2010)和退耕还林+治沟造地期(2010—2017)的多年平均土壤保持量分别增加了 32.29%,55.61%,年均增加 4.92×10⁶ t,生态系统

土壤保持功能明显增强。

(2) 在空间分布上,林草地和治沟造地的面积增加区域与土壤保持量增加区域具有一致性,治沟造地工程使得延河流域耕地整体的土壤保持能力提高,单位造地面积的土壤保持量增加 7.0 t/hm²。土壤保持量随坡度、高程的增加呈现先增加后减少的趋势,在海拔 1 200~1 500 m,坡度 15°~25°范围内土壤保持总量占年总土壤保持量比例较高。

(3) 由于退耕还林和治沟造地工程的实施,延河流域土地利用类型的变化主要为一部分耕地转换为林草地,沟谷耕地逐渐增加,土地利用类型的变化是影响土壤保持空间分布格局的主要驱动因子。

参考文献:

[1] Deng L, Shangguan Z P. High quality developmental approach for soil and water conservation and ecological protection on the loess plateau[J]. Front. Agr. Sci. Eng., 2021,8(4):501-511.

[2] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.

[3] 李相儒,金钊,张信宝,等.黄土高原近 60 年生态治理分析及未来发展建议[J].地球环境学报,2015,6(4):248-254.

[4] Ren M. Sediment discharge of the Yellow River, China: Past, present and future-A synthesis[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015,34(2):1-8.

[5] 余新晓,吴岚,饶良懿,等.水土保持生态服务功能评价方法[J].中国水土保持科学,2007,5(2):110-113.

[6] 冯磊,王治国,孙保平,等.黄土高原水土保持功能的重要性评价与分区[J].中国水土保持科学,2012,10(4):16-21.

[7] 宁婷,郭新亚,荣月静,等.基于 RUSLE 模型的山西省生态系统土壤保持功能重要性评估[J].水土保持通报,2019,39(6):205-210.

[8] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.

[9] 王森.延安市土地利用变化及其土壤保持功能效应研究

- [D].北京: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.
- [10] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(1):23-31.
- [11] 杨殊桐,时鹏,李占斌,等.大理河流域退耕还林工程对生态系统服务功能的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):251-258.
- [12] 包玉斌,黄涛,吕林涛.陕北黄土高原实施退耕还林还草工程后的土壤保持效应[J/OL].宁夏大学学报:自然科学版,1-8[2022-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/64.1006.n.20210926.1009.024.html>.
- [13] 薛亚永,王晓峰.黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):122-128.
- [14] 刘有延,刘兴元,张博,等.黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估[J].水土保持学报,2020,34(3):84-90,97.
- [15] 于浩.基于时间序列的延河流域水沙周期分析及趋势预测[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [16] 王飞,穆兴民,焦菊英,等.基于含沙量分段的人类活动对延河水沙变化的影响分析[J].泥沙研究,2008(4):8-13.DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2008.04.003.
- [17] 王志杰.延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
- [18] 王森,王海燕,谢永生,等.延安市退耕还林前后土壤保持生态服务功能评价[J].水土保持研究,2019,26(1):280-286.
- [19] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [20] 付含培,王让虎,王晓军.1999—2018年黄河流域NDVI时空变化及驱动力分析[J].水土保持研究,2022,29(2):145-153,162.
- [21] 郭帅,裴艳茜,胡胜,等.黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J].水土保持通报,2020,40(3):1-7,13.
- [22] 汤巧英,戚德辉,宋立旺,等.基于GIS和RS的延河流域植被覆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.
- [23] 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.
- [24] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. Modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1984,27(1):129-144.
- [25] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996,51(5):427-433.
- [26] Liu H, Gong P, Wang J, et al. Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015[J]. Earth Syst. Sci. Data, 2020,12:1217-1243.
- [27] Van Leeuwen W J D, Sammons G. Vegetation dynamics and erosion modeling using remotely sensed data(MODIS) and GIS[C]//Tenth Biennial Usda Forest Service Remote Sensing Applications Conference. Salt Lake City, Ut: Us Department of Agriculture Forest Service Remote Sensing Applications Center, 2004:5-9.
- [28] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using GIS based Universal Soil Loss model[J]. Agricultural Systems, 2003,76:883-984.
- [29] 钟德燕.基于USLE模型的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [30] 闫瑞,张晓萍,李够霞,等.基于RUSLE的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究[J].水土保持学报,2017,31(4):32-37.
- [31] 秦伟,朱清科,张岩.基于GIS和RUSLE的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J].农业工程学报,2009,25(8):157-163,4.
- [32] 龚珺夫,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.
- [33] Kang Y, Shao H, Zhang Y, et al. Evaluating the flow and sediment effects of gully land consolidation on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600:126535.
- [34] 李智广.水土流失测验与调查[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [35] 贾振宇,王世曦,刘学,等.辽河保护区土壤保持功能时空变化及其影响因素分析[J].环境工程技术学报,2021,11(4):686-692.
- [36] 薛亚永,王晓峰.黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):122-128.