

农业现代化研究

NONGYE XIANDAIHUA YANJIU

(双月刊)

第 41 卷第 6 期 (总第 241 期)

2020 年 11 月

目次

数字乡村建设视角下乡村数字经济指标体系设计研究	崔凯, 冯献 (899)
乡村振兴与发展中的产业富民: 国际经验与中国实践	王国峰, 邓祥征 (910)
优化乡村振兴路径思考——基于中西方国家乡村发展评价	常煜, 武圣钦 (919)
中国粮食产需平衡的时空格局演变分析——基于粮食用途和省域层面的视角	孟召娣, 李国祥 (928)
新型农业经营主体发展模式的选择与优化——基于粮食安全和吸纳劳动力视角的经济学分析	钱煜昊, 武舜臣 (937)
农业保险对家庭经营收入的影响效果——基于全国三类农户调查的实证分析	韩旭东, 刘爽, 王若男, 郑凤田 (946)
风险感知、保险认知与养殖户肉鸡保险购买意愿——基于肉鸡主产区的实证分析	王越, 何军 (957)
农户林权抵押贷款的收入效应及其差异性研究	马橙, 高建中, 姚畅燕 (969)
社会化服务、农地确权对农业生产效率的影响研究	廖文梅, 袁若兰, 王璐, 高雪萍 (978)
耕地流转、土地调整与小麦种植技术效率分析——基于随机前沿生产函数和 Tobit 模型的实证	顾冬冬, 关付新 (988)
家庭禀赋视域下农户秸秆还田意愿与行为悖离研究——兼论生态认知的调节效应	邰建功, 颜廷武, 杨国磊 (999)
消费者对不同可追溯产品支付意愿及影响因素差异分析	徐芬, 陈红华 (1011)
农业信息资源配置对农产品电商绩效影响机制研究——以东部地区为例	贾铖, 夏春萍, 陈鹏宇 (1020)
非洲猪瘟疫情背景下养殖场户生产决策研究——对生猪生产恢复发展的思考	聂赞彬, 高翔, 李秉龙, 乔娟 (1031)
生产者质量控制认知与行为分析——以肉羊养殖户为例	樊慧丽, 付文阁 (1040)
水稻矮秆小粒突变体 <i>dsg1</i> 的表型鉴定及粒形基因精细定位	吕召坤, 玉一岚, 李兰英, 张德春 (1051)
基于 RUSLE、InVEST 和 USPED 的土壤侵蚀量估算对比研究——以陕北延河流域为例	翟睿洁, 赵文武, 贾立志 (1059)
农业水贫困对农户灌溉技术采用效果的影响——以宝鸡峡灌区为例	张华, 王礼力 (1069)
《农业现代化研究》2020 年 (第 41 卷) 总目次	(1078)

引用格式:

翟睿洁, 赵文武, 贾立志. 基于 RUSLE、InVEST 和 USPED 的土壤侵蚀量估算对比研究——以陕北延河流域为例 [J]. 农业现代化研究, 2020, 41(6): 1059-1068.

Zhai R J, Zhao W W, Jia L Z. A comparative study of soil erosion estimation based on RUSLE, InVEST and USPED models: A case study of the Yanhe River Basin in Northern Shaanxi[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(6): 1059-1068.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2020.0094



基于 RUSLE、InVEST 和 USPED 的土壤侵蚀量估算对比研究 ——以陕北延河流域为例

翟睿洁^{1,2}, 赵文武^{1,2*}, 贾立志^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部 / 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学地理科学学部 / 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875)

摘要: 黄土高原是我国水土流失的重灾区, 准确地估算土壤侵蚀量对于当地的退耕还林、水土保持以及土地管理等措施的实行具有重要的指导意义。本研究选取黄土高原延河流域为研究区, 以 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年共 4 期的 Landsat TM 遥感影像及日降雨量、土地利用、数字高程模型和土壤属性等为源数据, 比较 RUSLE、InVEST 和 USPED 三个模型对土壤侵蚀的估算在该研究区的适用性, 并分析不同地形和植被条件下土壤侵蚀的分布及变化规律。研究发现: 1) 2000 年后延河流域土壤侵蚀量先增加后减少, 2005 年后减少幅度逐渐增加, 表明退耕还林工程效果显著; 2) 与实测产沙量数据相比, RUSLE 模型估算的侵蚀量偏大, USPED 模型和 InVEST 模型的误差相对较低, 建议在延河流域使用 InVEST 和 USPED 模型计算土壤侵蚀; 3) 土壤侵蚀量随坡度的增加而增加, RUSLE 模型增加幅度最大; 4) 当 NDVI > 0 时, 土壤侵蚀量随 NDVI 的增加而减少, 并且当 NDVI 在 0~0.1 时, 土壤侵蚀量最大。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE; InVEST; USPED; 延河流域; 黄土高原

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0275 (2020) 06-1059-10

A comparative study of soil erosion estimation based on RUSLE, InVEST and USPED models:

A case study of the Yanhe River Basin in Northern Shaanxi

ZHAI Rui-jie^{1,2}, ZHAO Wen-wu^{1,2*}, JIA Li-zhi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The Loess Plateau suffers from severe soil erosion in China. The accurate estimation of soil erosion has important guiding significance for the implementation of local projects such as land management, water and soil conservation. In this study, we selected Yanhe River Basin as the study area, and four years Landsat TM remote sensing data (in 2000, 2005, 2010, and 2015), rainfall, land use, DEM and soil properties as the source data. We compare the RUSLE, InVEST and USPED models in the studied area. We analyze the prediction accuracy under different terrains and vegetation distributions. The results showed that 1) soil erosion in the Yanhe River Basin increased first and then decreased from 2000. The reduction gradually increased after 2005. It indicates that the project of Grain for Green had a significant effect; 2) compared with the sediment yield data, the amount of soil erosion predicted by the RUSLE model are relatively large, and the USPED and InVEST models are more accurate than RUSLE model. Therefore, the InVEST and USPED models are suggested to predict soil erosion in the Yanhe River Basin; 3) soil erosion increased with the increase of slope, and the RUSLE model increased the most; 4) when NDVI > 0, soil erosion decreased with the increase of NDVI; and when NDVI was between 0 and 0.1, soil erosion was the largest.

Key words: Soil erosion; RUSLE; InVEST; USPED; Yanhe River Basin; Loess Plateau

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0501604); 中央高校基本科研业务费专项。

作者简介: 翟睿洁 (1996—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统服务, E-mail: zhairj122@gmail.com; 通信作者: 赵文武 (1976—), 男, 山东曹县人, 博士, 教授, 硕士 / 博士生导师, 主要从事景观格局与生态过程、生态系统服务与可持续发展方面的研究工作, E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn。

收稿日期: 2020-08-08, **接受日期:** 2020-11-06

Foundation item: The National Key Research Program of China (2016YFC0501604); The Fundamental Research Funds for the Central Universities.

Corresponding author: ZHAO Wen-wu, E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn.

Received 8 August, 2020; **Accepted** 6 November, 2020

土壤侵蚀被认为是当今全球土壤退化的主要原因之一,也是中国面临的主要环境问题之一^[1],它不仅破坏土地资源,造成土地生产力下降以及生物多样性降低,还严重地威胁着人类的生存和发展^[2-3]。随着土壤侵蚀研究的深入,土壤侵蚀研究方法和技术日渐成熟^[4-9],从径流小区定点分析到基于 GIS 的大流域评估,土壤侵蚀模型是估算土壤侵蚀的重要手段。早期建立的土壤侵蚀模型主要是以 Wischmeier 和 Smith^[10]于 1965 年建立的通用土壤流失方程 USLE 为主。1993 年,美国农业部颁布的 RUSLE 模型^[11]逐步代替 USLE 用于农耕地、草地、林地和建设用地的土壤流失预报。20 世纪 80 年代以来,我国学者以 USLE 模型为基础,也建立了不同类型的区域性土壤侵蚀预报模型,如江忠善等^[12]考虑浅沟侵蚀对坡面侵蚀的影响,构建的坡面土壤流失预报模型和 Liu 等^[13]建立的中国土壤流失方程 CSLE 等。同时,考虑土壤侵蚀过程的物理模型也相继问世,如美国的 USPED^[14]、WEPP^[15],欧洲的 EUROSEM^[16]和 LISEM^[17]模型,地中海区域的 SEMMED^[18]等。此外,包含土壤侵蚀估算模块的生态系统服务模型也得到了快速发展,美国先后发布了 InVEST、ARIES^[19]、LUCI^[20]等模型。InVEST 模型利用其泥沙输移模块 (SDR) 描述坡面土壤侵蚀和流域输沙空间过程,它与 RUSLE 的不同之处在于考虑了每个地块对泥沙的拦截作用并计算了下游地块泥沙拦截率。

根据建模方法的差异,各个模型的内在机理不同,模型模拟结果也有所差异。Aiello^[21]对比分析了 RUSLE 和 USPED 模型在意大利南部的布拉塔诺河流域的模拟情况,结果显示 RUSLE 模型对侵蚀量的评估偏高,这是由于 RUSLE 是一个剥离能力有限的模型,它的结果表明了在不考虑土壤沉积情况下的土壤侵蚀量。相反,USPED 是一个运输能力有限的模型,它能够识别恒定的降雨条件下侵蚀和沉积速率的空间分布;考虑到生物、工程和耕作措施的 CSLE 模型^[22]估算的陕西省洛川县土壤侵蚀量不到 RUSLE 模型计算结果的 1/2。Li 等^[2]分别从预测精度、数据和模拟过程等方面比较研究了 11 个在黄土高原使用过的模型,结果表明,基于物理过程的模型和基于经验的模型不一定能在黄土高原上得到更准确的结果。经验模型可用于快速评估某一地区的土壤侵蚀率和产沙量,而基于物理过程的模型可用于详细的土壤侵蚀和产沙量评估,包括确定泥沙来源、沉积分布和情景分析。

随着土壤侵蚀模型的发展,对不同模型进行

对比分析,分析模型的适用条件和范围,显得尤为重要。延河流域地形复杂,植被条件多样,不同模型模拟结果差异较大,选择不适合的土壤侵蚀预报模型,可能会导致模拟的结果和实际观测值差别很大。本文从现有模型中选择了目前应用较多且输入数据及因子相同的三个模型:RUSLE、USPED 和 InVEST 中的 SDR 模块,以黄土高原延河流域为例,估算自 1999 年退耕还林后四个时期(2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年)的土壤侵蚀量,探究不同模型在不同坡度条件和不同植被条件下土壤侵蚀的差异情况,旨在遴选合适该研究区的土壤侵蚀模型并探讨其适用范围,以期能为土壤侵蚀量估算提供指导和支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延河属于黄河中游河口镇—龙门区间的一级支流,发源于靖边县天赐湾乡周山,由西北向东南流经志丹、安塞、延安等县,在延长县南河沟乡凉水岸附近汇入黄河^[23]。干流总长 289.9 km,流域总面积为 7 725 km²,主要支流有杏子河、西川、潘龙川和南川等(图 1)。延河流域地处陕北黄土高原中部,地理位置为 36° 21'~37° 19' N 和 108° 38'~110° 29' E 之间,包括杏河、枣园、安塞、延安和甘谷驿五个集水区。该地域属暖温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 8.8~10.2 °C,年平均降雨量为 500 mm,其中 6—9 月降雨量占全年降雨量的 75% 以上。

延河(甘谷驿出口控制站)1952—2015 年平均径流量为 2.023×10⁸ m³,输沙模数为 6.570×10³ t/(km²·a)。土壤类型以黄绵土为主,土壤质地均一,土质疏松,稳定性弱,抗侵蚀能力差^[24]。流域地势西北高东南低,黄土丘陵沟壑区面积占 90%。流域内土壤侵蚀严重,据 2000 年全国土壤侵蚀调查结果显示,延河流域强度以上侵蚀面积达 60%,造成该地区土壤侵蚀的主要原因是恶劣的自然条件和人类长期不合理的耕作方式。

1.2 数据获取

研究使用的基础遥感影像来源于 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 9 月份北纬 49 号带的 Landsat TM 遥感影像,空间分辨率为 30 m,经过几何纠正、辐射定标、大气校正和地形校正四个预处理步骤。降雨资料收集延河流域周边 15 个气象站点 2000—2015 年的逐日降雨资料。数字高程模型 DEM,空间分辨率为 30 m,来源于地理空间数据云。结合延河流域土地利用、地形等数据,利用

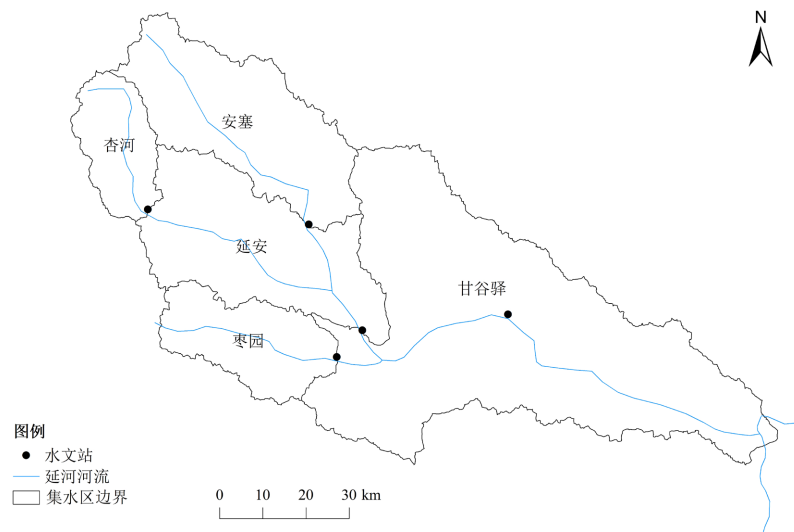


图 1 延河流域集水区

Fig.1 Catchment area of Yanhe River basin

RUSLE、InVEST 和 USPED 模型估算延河流域土壤侵蚀量，根据中华人民共和国行业标准《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)，将流域土壤侵蚀模数划分为 $\leq 10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (微度)、 $10.1 \sim 25.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (轻度)、 $25.1 \sim 50.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (中度)、 $50.1 \sim 80.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (强烈)、 $80.1 \sim 150.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (极强烈) 和 $> 150.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (剧烈) 五个等级。

1.3 土壤侵蚀量计算方法

本研究分别运用 RUSLE 模型、InVEST 模型和 USPED 模型，估算退耕还林后四期 (2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年) 延河流域的土壤侵蚀量。

1.3.1 RUSLE 模型 RUSLE 是美国农业部于 1997 年在通用土壤流失模型 USLE 的基础上修订建立并正式实施的一种适用范围更广的经验模型。RUSLE 模型为：

$$A=R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中： A 为土壤侵蚀量 ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)； R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$)； K 为土壤可蚀性因子 ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$)； LS 为坡长坡度因子 (无量纲)； C 为地表植被覆盖因子 (无量纲)； P 为土壤保持措施因子 (无量纲)。

降雨侵蚀力因子 (R) 反映了降雨强度对土壤的侵蚀作用，是土壤侵蚀的主导因子。章文波和付金生^[25]利用 5 种降雨资料分析不同估算降雨侵蚀力简易算法的精度，根据其研究结果，本文采用精度最高的日雨量模型：基于日降雨量，以半月为时段步长的简易算法模型：

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^K (D_j)^\beta \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.144P_{d12}^{-1} + 24.455P_{y12}^{-1} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中： M_i 为第 i 个半月时段的侵蚀力 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$)； K 为该半月时段内的天数， D_j 为半月时段内第 j 日的日雨量，否则以 0 计算； P_{d12} 为日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均雨量， P_{y12} 为日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均雨量； α 和 β 为模型待定参数。

土壤可蚀性因子 (K) 体现不同土壤类型对侵蚀的敏感程度。 K 因子采用土壤分类数据，根据文献^[26-27]对延河流域土壤侵蚀研究中得到每类土壤 K 值：黄绵土为 0.078 4、红土为 0.021 4、粗骨土为 0.029 2、新积土为 0.034 8 以及黑垆土为 0.054 6。

地形因子 (LS) 反映了地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。本文采用 Oliveira^[28]建立的坡度坡长因子公式：

$$L = (m+1) \left(\frac{\lambda_A}{22.1} \right)^m \quad (5)$$

$$S = \left(\frac{\sin(0.01745 \times \theta_{\text{deg}})}{0.09} \right)^n \quad (6)$$

式 (5、6) 中， λ_A 为坡长， m 和 n 为土壤对侵蚀的敏感性， θ 为坡度。

植被覆盖因子 (C) 和工程措施因子 (P) 反映不同植被盖度条件下和特定保持措施下对土壤侵蚀的影响。土地利用信息可以间接反映植被覆盖程度和水土保持措施，在大尺度的土壤侵蚀研究中， C 和 P 因子通常采用土地利用数据赋值法确定。本研究 C 因子根据张岩等^[29]对陕西安塞水土保持试

验资料计算得到; P 因子参照文献^[30-31]对土地利用数据赋值(表 1)。

表 1 不同土地利用类型对应的 C 值和 P 值
Table 1 The C and P value in different land cover type

土地利用类型	C 值	P 值
森林	0.004	0.7
灌丛	0.004	1.0
草地	0.012	0.5
耕地	0.600	1.0
聚落	0	1.0
水域	0.001	1.0

1.3.2 InVEST 模型计算 InVEST 模型是由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发的生态系统服务功能评估工具。本文运用 InVEST 模型的泥沙输移模块(SDR)计算研究区土壤侵蚀量,泥沙输移模块作用是描述坡面土壤侵蚀和流域输沙空间过程。InVEST 模型与 RUSLE 模型的不同之处在于,InVEST 考虑每个地块对上游泥沙的拦截作用,在计算过程中考虑了每个地块泥沙拦截率。

1.3.3 USPED 模型计算 USPED 模型是一个模拟土壤侵蚀和沉积的简易模型,它能够识别出降雨量恒定状态下侵蚀和沉积的空间分布,预测研究区土壤侵蚀和沉积的空间分布和模拟每个栅格的土壤侵蚀和沉积能力^[14,32]。USPED 模型未考虑下游地块的拦截能力,但模拟了每个像元的侵蚀和沉积能力,它的计算结果分为正负值,正值代表该像元土壤发生侵蚀,负值代表该像元土壤发生沉积。USPED 模型适用于降雨稳定的地区。USPED 模型为:

$$A = \frac{d(T \times \cos \alpha)}{dx} + \frac{d(T \times \sin \alpha)}{dy} \quad (7)$$

$$T = R \times K \times C \times P \times U^{1.6} (\sin \beta)^{1.3} \quad (8)$$

式(7、8)中: A 为土壤侵蚀量($t/(hm^2 \cdot a)$); T 为挟沙力函数($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$); K 为土壤可蚀性因子($t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot a \cdot MJ \cdot mm)$); C 为地表植被覆盖因子(无量纲); P 为土壤保持措施因子(无量纲); x 和 y 为平面坐标; α 为坡向, β 为坡度; U 为上坡面汇水面积。 R 、 K 、 C 和 P 因子的计算同 RUSLE 模型一样。

2 结果与分析

2.1 2000—2015 年土壤侵蚀量变化

三个模型各年模拟结果如图 2 所示。三个模型模拟的土壤侵蚀量差异较大,其中 RUSLE 模型

模拟得到的土壤侵蚀量最大,USPED 模型居中,InVEST 模型最小,并且 USPED 模型和 InVEST 模型模拟所得的结果相差不大(图 3)。这主要是因为 USPED 模型和 InVEST 模型属于分布式模型,在计算产沙量的过程中均考虑到了拦截和泥沙的沉积作用,所以计算结果偏小。而 RUSLE 模型未考虑坡面沉积的过程,因此,模拟得出的侵蚀量偏大。总的来说,退耕还林后研究区 2000、2005、2010 和 2015 年四期土壤侵蚀量先上升后下降(图 3),在 2005 年土壤侵蚀量达到峰值,之后土壤侵蚀量下降,这主要是因为 2005 年延河流域降雨量显著高于其他年份,从而使得研究区降雨侵蚀力因子(R)较高,因此土壤侵蚀量也随之增加。而在 2005 年之后土壤侵蚀量降低,这主要是因为退耕还林工程实施以来,延河流域植被覆盖度增加,植被冠层对降雨的截留作用,减少了降雨对地表的直接打击,并且植被根系也能够改善土壤性质、降低土壤可蚀性因子(K)。

根据 2000—2015 年的土壤侵蚀量,计算得到 15 a 内的土壤侵蚀量变化率(表 2),总的来说,三个模型计算得出的土壤侵蚀量变化相同,均是先增加后减少,并且 2005 年后减小速率增加,说明退耕还林工程效果日渐显著。RUSLE 模型和 InVEST 模型在 2000—2015 年变化率相差不大,而 USPED 模型在 2000—2005 年变化不大,变化率仅为 0.22%,2005—2015 年减少幅度逐渐增大。2005 年降雨量骤增导致降雨侵蚀力增加,从而使土壤侵蚀量增加,三个模型模拟结果在 2005 年达到峰值,随后持续减小。

为对比模型模拟结果在不同集水区之间的准确程度,根据延河流域水文站将延河流域划分为杏河、枣园、安塞、延安和甘谷驿五个集水区,分区统计土壤侵蚀量并与水文站的输沙数据对比验证模型精度(图 4)。总的来说,三个模型计算的土壤侵蚀量在不同集水区变化与输沙数据相一致,表现为随着集水区面积增加而增加。不同集水区模拟精度也不同,三个模型预测的土壤侵蚀量与输沙量数据的差值随着集水区面积的增加而增加。RUSLE 模型模拟的结果与实际产沙量相差最大,而 InVEST 模型和 USPED 模型由于考虑了泥沙在坡面和河道沉积等问题,模拟产沙结果与实测产沙量比较接近,精度较高。因此,建议在延河流域运用 InVEST 模型的 SDR 模块或 USPED 模型计算流域产沙量。

2.2 不同坡度条件下土壤侵蚀量变化

为反映三个模型在不同坡度条件下的土壤侵蚀

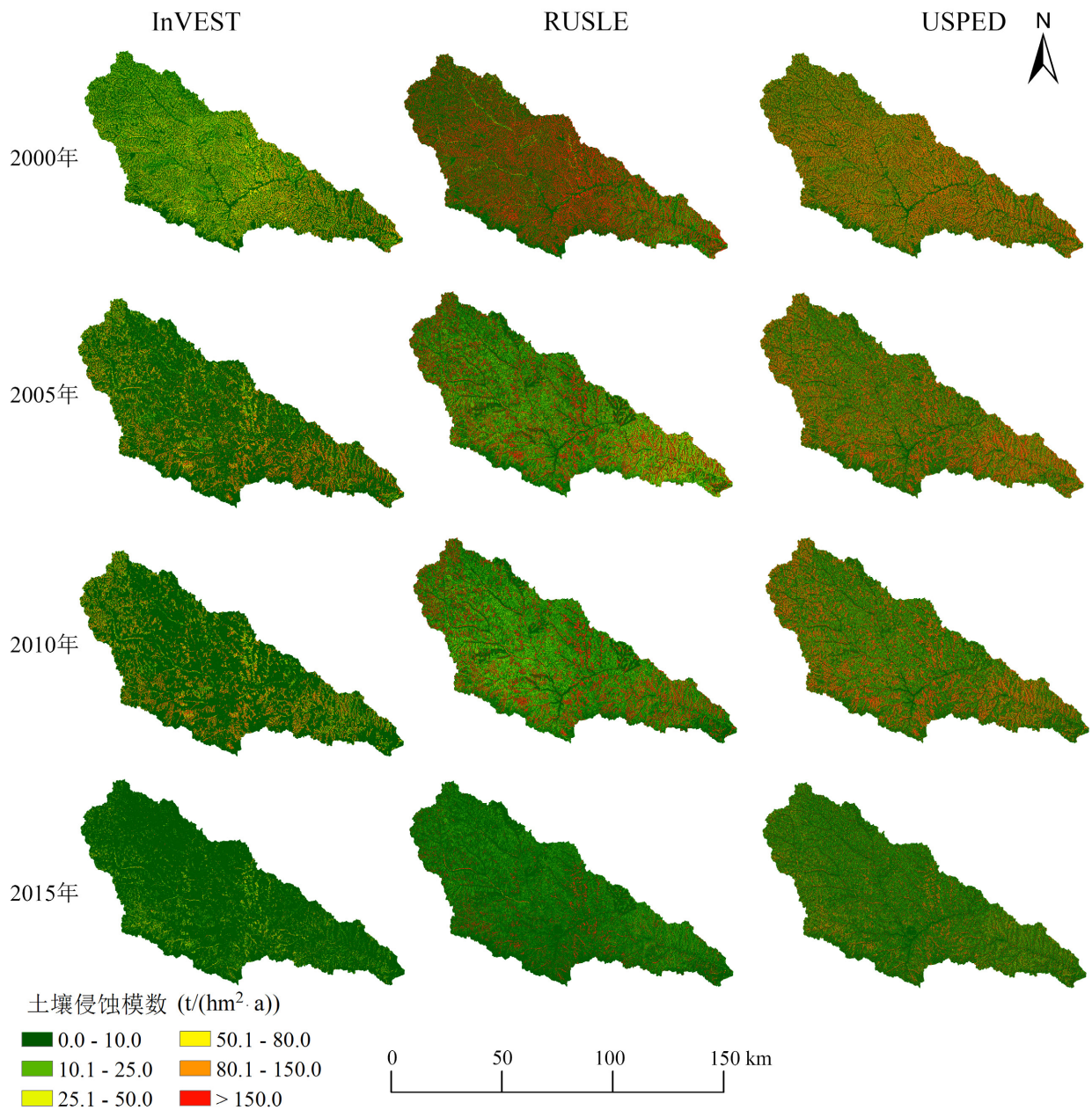


图 2 2000—2015 年 InVEST, RUSLE 和 USPED 模型土壤侵蚀量
Fig. 2 Soil erosion in InVEST, RUSLE and USPED models from 2000 to 2015

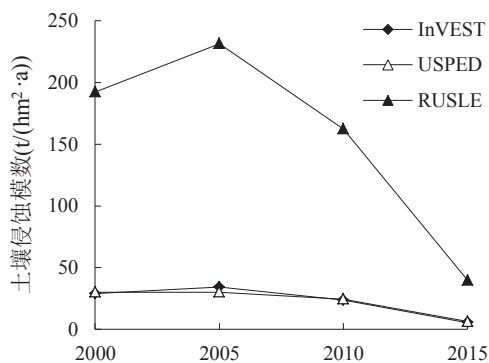


图 3 2000—2015 年不同模型土壤侵蚀模数
Fig. 3 Soil erosion simulated by different models from 2000 to 2015

表 2 2000—2015 年不同模型的土壤侵蚀量变化率 (%)
Table 2 Change rate of soil erosion in different models from 2000 to 2015

模型	土壤侵蚀量变化率		
	2000—2005	2005—2010	2010—2015
USPED	0.22	-18.79	-74.01
InVEST	18.75	-30.73	-76.70
RUSLE	20.32	-29.86	-75.44

量模拟差异情况，本研究将延河流域划分为 $<5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 8^\circ$ 、 $8^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 和 $>35^\circ$ 6 个不同等级的坡度范围，然后分别对比不同模型在这 6 个坡度区间的土壤侵蚀模数（图 5）。

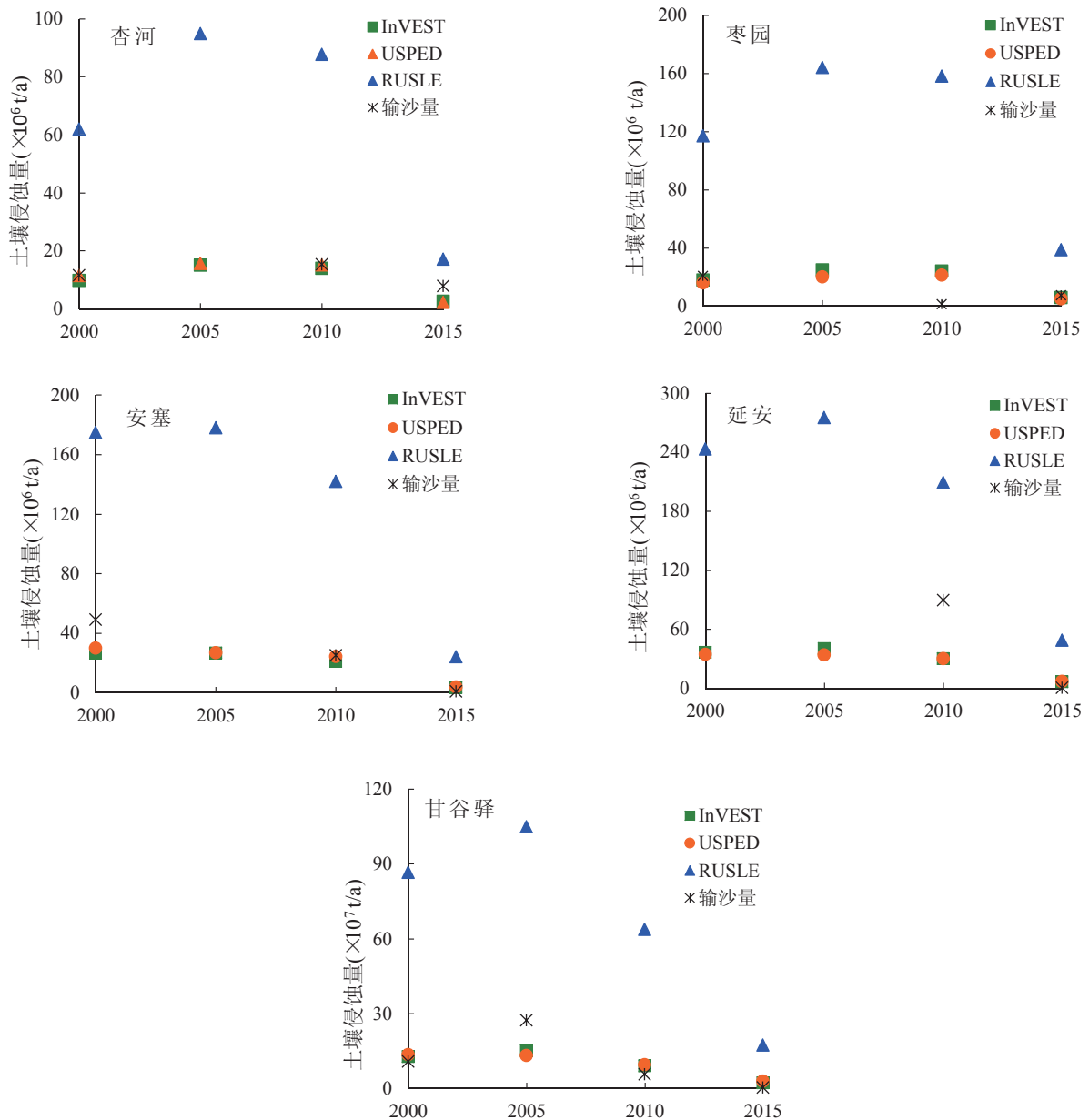


图 4 2000—2015 年不同集水区土壤侵蚀量和输沙量

Fig. 4 Soil erosion and sediment transport in different catchment areas from 2000 to 2015

结果表明,三个模型结算得出的土壤侵蚀模数变化随坡度的增大而增大。InVEST模型的模拟结果在 $<5^\circ$ 条件下,土壤侵蚀模数基本为0,随坡度的增加土壤侵蚀模数增加幅度较小。而RUSLE模型模拟的结果随坡度的增加而明显增加,到 35° 左右,增加幅度趋向减小。USPED模型模拟结果显示在 $<8^\circ$ 的条件下,土壤沉积能力大于侵蚀能力,所以发生沉积; $>8^\circ$ 的条件下,土壤侵蚀量随坡度的增加而稳定增加。

将三个模型模拟的土壤侵蚀量根据不同坡度分级统计,得到2000—2015年不同地形条件下土壤侵蚀量变化率(表3),由于USPED模型估算结

果在 $<8^\circ$ 的地形下不发生侵蚀,所以记为0。由表3可知,变化率随坡度的增高而增高。InVEST模型和RUSLE模型在 $>35^\circ$ 的条件下减小最多,分别为84.9%和84.2%;USPED模型在 $25^\circ\sim 35^\circ$ 条件下减小最多,达到了60.5%。在土壤侵蚀总量逐年减少的情况下,不同地形条件的土壤侵蚀减小程度不同,高坡度地区的土壤侵蚀减少量明显高于低坡度区域,说明退耕还林工程对于坡度较陡地区土壤保持效果显著。

2.3 不同植被条件下土壤侵蚀量变化

为反映三个模型在不同植被条件下的土壤侵蚀量的演变情况,首先要提取不同年份的NDVI值,

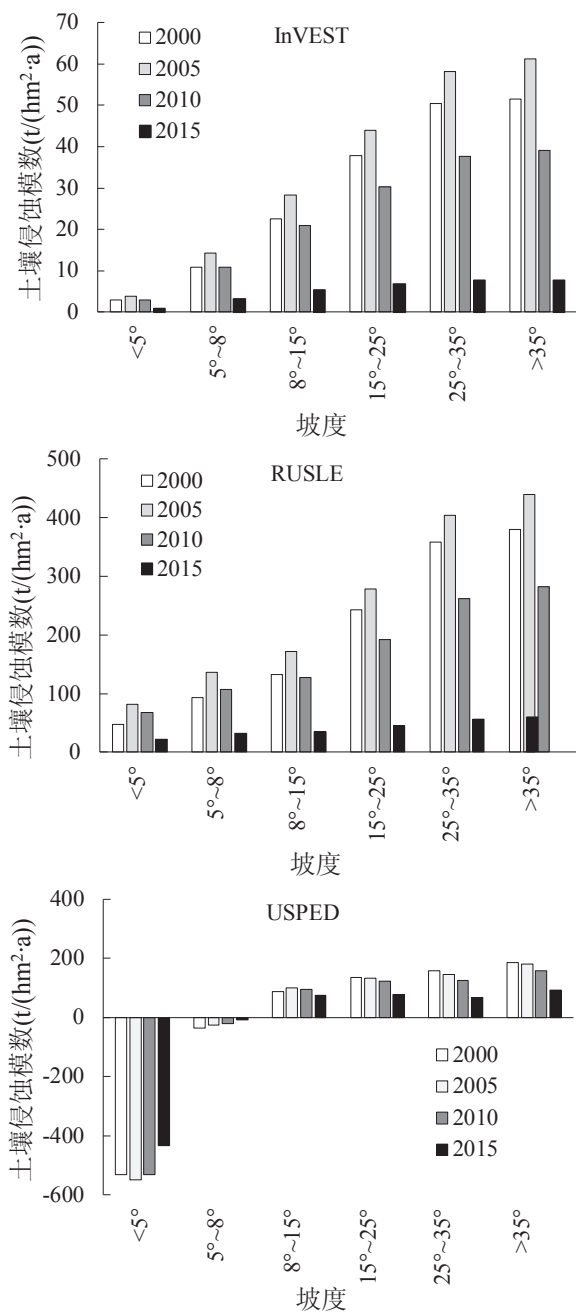


图 5 不同坡度条件下土壤侵蚀量

Fig. 5 Soil erosion under different slope conditions

表 3 2000—2015 年不同地形条件的土壤侵蚀量变化率 (%)

Table 3 Change rate of soil erosion under different topographic conditions in 2000 to 2015

坡度	土壤侵蚀量变化率		
	InVEST	RUSLE	USPED
<5°	-68.5	-54.7	0.0
5°~8°	-70.9	-64.8	0.0
8°~15°	-75.9	-73.9	-14.9
15°~25°	-82.0	-81.5	-43.3
25°~35°	-84.7	-84.2	-56.5
>35°	-84.9	-84.2	-50.5

将 NDVI 划分为 <0、0~0.1、0.1~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~0.6 和 0.6~1.0 共 8 个等级。计算统计 8 个不同等级下的土壤侵蚀量 (图 6)。

结果表明, 土壤侵蚀模数基本随 NDVI 的增加而减少。NDVI 值越低的地区, 土壤侵蚀模数越高; 反之, NDVI 值越高的地区, 土壤侵蚀模数越低。当 NDVI < 0 时, 土壤侵蚀模数小于 NDVI 在 0~0.1 这一区间的土壤侵蚀模数, 是因为在 NDVI < 0 的部分区域, 如水体, 不发生侵蚀。NDVI 低值地区, 植被覆盖度低, 裸地固土能力差, 降雨直接冲刷地

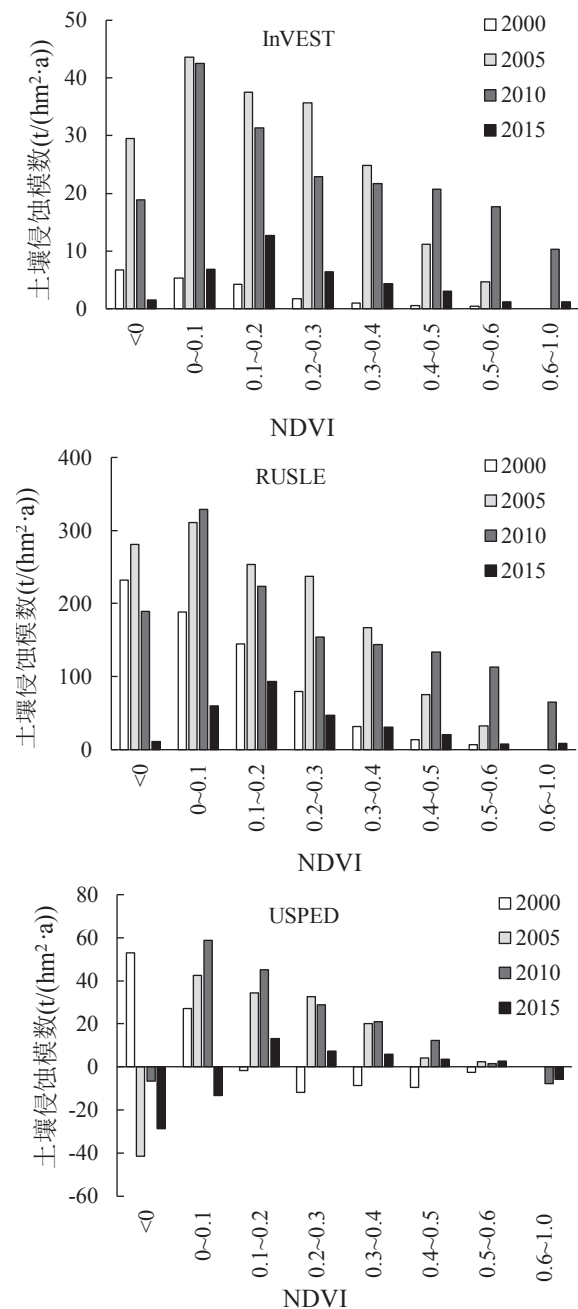


图 6 不同植被条件下土壤侵蚀量

Fig. 6 Soil erosion under different vegetation conditions

面, 导致土壤侵蚀量大。退耕还林后, 植被覆盖度增加, NDVI 高值地区面积增加, 从而导致土壤侵蚀量减少。

3 讨论

本研究选取黄土高原典型流域延河流域为研究区, 分别基于 USPED、RUSLE 和 InVEST 模型估算 2000—2015 年 4 期的土壤侵蚀量, 研究土壤侵蚀量变化以及在不同地形、不同植被条件下土壤侵蚀量的差异情况, 主要得出以下结论和认识:

1) 三个模型土壤侵蚀总量变化与输沙量变化一致, 但估算的土壤侵蚀总量有明显差异。由于缺少空间分布的测量数据, 因此很难在流域规模验证结果的空间分布。综合来说, 在陡峭地区, 地形和降雨状况是土壤侵蚀的主要驱动力; 在平缓地区, 植被覆盖度是侵蚀的主要驱动力。将三个模型估算的土壤侵蚀量结果与输沙量对比分析时发现, 在不同集水区下 USPED 模型、InVEST 模型的模拟结果与输沙量最为接近, 精确度更高, 但三个模型结果均偏大, 原因可能是由于本研究在计算土壤侵蚀量时未考虑淤地坝的拦截作用, 且模型模拟的是该地区土壤侵蚀的预测值, 对人类活动考虑较少, 且植被覆盖因子和工程措施因子仅根据前人在延河流域的研究结果而进行赋值, 准确性有待提高。

2) RUSLE 模型模拟的侵蚀量结果偏大, 原因是 RUSLE 在计算土壤侵蚀的过程中不考虑沉积过程, 它仅计算土壤侵蚀量, 而 InVEST 和 USPED 考虑地块对泥沙的拦截能力, 但是沉积过程在土壤侵蚀中是确实存在的^[33], 在坡面模型 WEPP 模型中, 也考虑到了上坡侵蚀下坡位置沉积的情况^[34-35]。在本文比较的三个模型的计算中, 主要差别在地形因子, 只有 RUSLE 模型计算地形因子时, 未考虑沉积过程, 而 InVEST 和 USPED 则计算了地块拦截率, 所以 RUSLE 会导致其高估土壤侵蚀。USPED 模型模拟每个地块的侵蚀和沉积, 结果显示在坡度平缓的地区, 土壤沉积能力大于侵蚀能力, 所以发生沉积, 杨维鸽等^[36]和苏正安等^[37]在坡面的实验均发现在坡脚沉积现象明显, 范昊明等^[38]也指出侵蚀量随着坡度的增加而增加。USPED 模型在不同地形条件下结果有明显差异, 而且能模拟出土壤侵蚀和沉积的空间分布。但是, RUSLE 和 InVEST 模型在不同地形条件下变化差别不大, 适用于地形起伏平缓的区域。

3) 自 1999 年政府实行退耕还林(草)工程后^[39], 土壤侵蚀量逐年减少。但在极端暴雨条件下, 由于

降雨侵蚀力大幅增加, 导致土壤侵蚀量随之增加。2005 年降雨量骤增导致的土壤侵蚀增加, 研究发现降雨是影响土壤侵蚀的主导因素之一, 侵蚀主要发生在汛期。黄土高原植被覆盖度逐年升高, 从而致使土壤固沙能力增加, 抗侵蚀能力提高, 焦菊英等^[40]在极端暴雨条件下侵蚀产沙的研究发现, 经过十余年的退耕还林(草)工程的实施, 延河流域的植被恢复效果明显, 即使出现极端暴雨, 也能有效地抵御坡面土壤侵蚀的发生。RUSLE 和 InVEST 模型对降雨较为敏感, 当降雨量骤增时, 能有较好的模拟结果; USPED 模型受降雨影响较小, 当降雨量骤增时, 不能很好地反应在土壤侵蚀模拟结果中, 因此不适于降雨量变化较大区域的土壤侵蚀量估算。

4) 土壤侵蚀模数随坡度的增加而增加, 但增加幅度逐渐减小。由于退耕还林(草)工程主要是在 25°以上的坡耕地进行^[41], 坡度越高, 退耕还林(草)面积越大, 而植被覆盖度的增加会导致土壤侵蚀模数减少, 从而导致随坡度的增加, 土壤侵蚀模数增加幅度减小的情况。随着退耕还林(草)工程的进行, NDVI 高值地区面积逐渐增加, 植被固土能力优于裸地, 所以随着 NDVI 的增加土壤侵蚀模数减少。

4 结论

1) 2000—2015 年延河流域土壤侵蚀模数呈先增加后减小的趋势, USPED 模型土壤侵蚀模数从 30.07 t/(hm²·a) 降至 6.36 t/(hm²·a), 降低 79%; RUSLE 模型土壤侵蚀模数从 192.48 t/(hm²·a) 降至 39.90 t/(hm²·a), 降低 79%; InVEST 模型土壤侵蚀模数从 28.82 t/(hm²·a) 降至 5.52 t/(hm²·a), 降低 81%; USPED 和 InVEST 模型计算的土壤侵蚀强度从中度侵蚀变为微度侵蚀, RUSLE 模型计算的土壤侵蚀强度从剧烈侵蚀变为中度侵蚀。

2) 延河流域土壤侵蚀模数随坡度的增加而增加, 当坡度 <5°时, USPED 模型侵蚀强度为不发生侵蚀; RUSLE 模型侵蚀强度从 2000 年的中度侵蚀变为 2015 年的轻度侵蚀; InVEST 模型侵蚀强度为微度侵蚀; 当坡度 >35°时, 在 2000—2015 年三个模型的侵蚀强度均发生变化, USPED 模型从剧烈侵蚀变为极强烈侵蚀; RUSLE 模型从剧烈侵蚀变为强烈侵蚀; InVEST 模型从强烈侵蚀变为微度侵蚀。

3) 土壤侵蚀模数随 NDVI 的增加而减小, 当 NDVI 在 0~0.1 区间内土壤侵蚀模数最大, USPED、RUSLE 和 InVEST 模型最大值分别为 58.80、329.11 和 43.53 t/(hm²·a); 当 NDVI>0.6 时, 土壤侵蚀模数

最小, 几乎不发生侵蚀。

参考文献:

- [1] 张骁, 赵文武, 刘源鑫. 遥感技术在土壤侵蚀研究中的应用述评[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 228-238.
Zhang X, Zhao W W, Liu Y X. Application of remote sensing technology in research of soil erosion: A review[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 228-238.
- [2] Li P F, Mu X M, Holden J, et al. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 170:17-30.
- [3] 刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 432-440.
Liu Y, Zhao W W, Jia L Z. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 432-440.
- [4] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1515.
Gao H D, Li Z B, Li P, et al. The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [5] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 28-38.
Zhao M S, Li D C, Zhang G L, et al. Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 28-38.
- [6] 何维灿, 赵尚民, 王睿博, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的山西省土壤侵蚀风险研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 58-64.
He W C, Zhao S M, Wang R B, et al. Research on soil erosion risk based on GIS and CSLE in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 58-64.
- [7] Wang X, Zhao X L, Zhang Z X, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010[J]. Catena, 2016, 137: 256-268.
- [8] Hernandez M, Nearing M A, Al-Hamdan O Z, et al. The rangeland hydrology and erosion model: A dynamic approach for predicting soil loss on rangelands[J]. Water Resources Research, 2017, 53(11): 9368-9391.
- [9] Dymond J R, Vale S S. An event-based model of soil erosion and sediment transport at the catchment scale[J]. Geomorphology, 2018, 318: 240-249.
- [10] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation Planning[M]. United States: Department of Agriculture, 1978.
- [11] Renard K G, Ferreira V A. RUSLE model description and database sensitivity[J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(3): 458-466.
- [12] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. 泥沙研究, 2005(4):1-6.
Jiang Z S, Zheng F L, Wu M. Prediction model of water erosion on hillslopes[J]. Journal of Sediment Research, 2005(4): 1-6.
- [13] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation[A]. Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference[C]. China: 12th ISCO Conference, 490-494.
- [14] Mitasova H, Hofierka J, Zlocha M, et al. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1996, 10(5): 629-641.
- [15] Laboratory U A N S E. USDA-Water Erosion Prediction Project: hillslope profile and watershed model documentation[J]. NSERL Report, 1995(10).
- [16] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- [17] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. Lisem: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8):1107-1117.
- [18] de Jong S M, Paracchini M L, Bertolo F, et al. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data[J]. Catena, 1999, 37(3/4): 291-308.
- [19] Villa F, Bagstad K J, Voigt B, et al. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment[J]. PLoS One, 2014, 9(3): e91001. DOI:10.1371/journal.pone.0091001.
- [20] Jackson B, Pagella T, Sinclair F, et al. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 112(2): 74-88.
- [21] Aiello A, Adamo M, Canora F. Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy[J]. Catena, 2015, 131: 174-185.
- [22] 李军, 邱海军, 郝俊卿, 等. 基于 USLE 和 CSLE 的洛川县土壤侵蚀对比分析研究[J]. 生态经济(学术版), 2013(2): 403-407.
Li J, Qiu H J, Hao J Q, et al. Study on soil erosion of Luochuan Country based on USLE and GIS[J]. Ecological Economy, 2013(2): 403-407.
- [23] 娄雪婷, 曾源, 吴炳方, 等. 延河流域阔叶林地上生物量遥感监测及空间分布特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2229-2238.
Lou X T, Zeng Y, Wu B F, et al. Above-ground forest biomass retrieval and spatial distribution estimation across the Yanhe basin from remote sensing[J]. Resources Science, 2010, 32(11): 2229-2238.
- [24] 王佑民, 郭培才, 高维森. 黄土高原土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 11-16.
Wang Y M, Guo P C, Gao W S. A study on soil antierodibility in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(4): 11-16.
- [25] 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.
Zhang W B, Fu J S. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. Resources Science, 2003, 25(1): 35-41.
- [26] 姚好, 张沛, 严力蛟, 等. 基于 RUSLE 和景观安全格局的土壤侵蚀风险格局研究——以甘肃省甘南藏族自治州迭部县为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 161-167, 255.
Yao Y, Zhang P, Yan L J, et al. Risk pattern analysis of soil erosion based on RUSLE and SPs—A case study of Diebu County, Gansu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(3): 161-167, 255.
- [27] Vrieling A, Sterk G, Vigiak O. Spatial evaluation of soil erosion

- risk in the West Usambara Mountains, Tanzania[J]. Land Degradation and Development, 2006, 17(3): 301-319.
- [28] Oliveira A H, da Silva M A, Naves Silva M L, et al. Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models[M]. UK: Intech, 2013.
- [29] 张岩, 刘宝元, 史培军, 等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1050-1056.
Zhang Y, Liu B Y, Shi P J, et al. Crop cover factor estimating for soil loss prediction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7): 1050-1056.
- [30] 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.
Li T H, Zheng L N. Soil erosion changes in the Yanhe watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [31] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62-68.
You S C, Li W Q. Estimation of soil erosion supported by GIS—A case study in Guanji township, Taihe, Jiangxi[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(1): 62-68.
- [32] Mitas L, Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention[J]. Water Resources Research, 1998, 34(3): 505-516.
- [33] 谭贞学, 王占礼, 马春艳, 等. 黄土坡面下坡位土壤侵蚀过程的模拟试验[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 12-17, 28.
Tan Z X, Wang Z L, Ma C Y, et al. Simulated-rainfall experimental research on soil erosion processes on downslope segment of loess hillslope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 12-17, 28.
- [34] 王建勋, 郑粉莉, 江忠善, 等. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价——以坡度因子为例[J]. 泥沙研究, 2008(6): 52-60.
Wang J X, Zheng F L, Jiang Z S, et al. Assessment on WEPP model applicability (Hillslope version) to hill-gully region of the Loess Plateau—A case study in slope gradient factor[J]. Journal of Sediment Research, 2008(6): 52-60.
- [35] 张玉斌, 郑粉莉, 贾媛媛. WEPP 模型概述[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 146-149.
Zhang Y B, Zheng F L, Jia Y Y. WEPP model and its application[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 146-149.
- [36] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 572-581.
Yang W G, Zheng F L, Wang Z L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(3): 572-581.
- [37] 苏正安, 李艳, 熊东红, 等. 龙门山地震带坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 118-124.
Su Z A, Li Y, Xiong D H, et al. Effect of soil erosion in slope cultivated land of Longmenshan earthquake zone on lateral movement of soil organism carbon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 118-124.
- [38] 范昊明, 王铁良, 蔡强国, 等. 东北黑土漫岗区侵蚀沟发展模式研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 328-330, 334.
Fan H M, Wang T L, Cai Q G, et al. Gully erosion developing model in the gentle hilly black soil regions in northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 328-330, 334.
- [39] 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.
Cui X L, Lei G, Wang T, et al. Impacts of grain for green project on soil erosion in Luohe river basin of northern Shaanxi Province, China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5): 68-73.
- [40] 焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 等. 延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 159-167.
Jiao J Y, Wang Z J, Wei Y H, et al. Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainstorms in Yanhe Watershed based on field measurement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 159-167.
- [41] 度阳. 黄土高原地区退耕还林(草)工程效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Du Y. Study on effects of SLCP in Loess Plateau[D]. Yangling, China: Northwest A & F University, 2018.

(责任编辑: 王育花)

RESEARCH OF AGRICULTURAL MODERNIZATION (Bimonthly)

Vol. 41, No. 6 (Sum. No. 241)

Nov., 2020

CONTENTS

- Research on the indicator system design for rural digital economy from the perspective of digital village construction
..... CUI Kai, FENG Xian (899)
- Industrial development to increase rural income under the strategy of rural revitalization: International experiences and China's practices
..... WANG Guo-feng, DENG Xiang-zheng (910)
- Optimizing the rural revitalization path: The important direction of rural development in China and western countries
..... CHANG Ting, WU Sheng-qin (919)
- The spatio-temporal evolution of China's grain production and demand balance: From the perspectives of grain use and provincial level
..... MENG Zhao-di, LI Guo-xiang (928)
- Development mode selection and optimization of the new agricultural business operations: An economic analysis from the perspectives
of grain security and labor absorption QIAN Yu-hao, WU Shun-chen (937)
- The impacts of crop insurance on rural household income: An empirical analysis based on a survey data of three types of rural households
..... HAN Xu-dong, LIU Shuang, WANG Ruo-nan, ZHENG Feng-tian (946)
- Risk perception, insurance cognition and breeders' willingness to purchase broiler insurance: Empirical analysis based on major broiler
production areas WANG Yue, HE Jun (957)
- Income effects and the heterogeneity of forest property right mortgage MA Cheng, GAO Jian-zhong, YAO Chang-yan (969)
- The influences of socialized services and farmland contracting right confirmation on the efficiency of agricultural production
..... LIAO Wen-mei, YUAN Ruo-lan, WANG Lu, GAO Xue-ping (978)
- Farmland transfer and reallocation and the technical efficiency of wheat production: An empirical research based on the stochastic frontier
production function and the Tobit model GU Dong-dong, GUAN Fu-xin (988)
- The paradox between farmers' willingness and their behaviors of straw-return-to-field practice from the perspective of family endowment
and the analysis of the moderating effects of farmers' ecological cognition ZHI Jian-gong, YAN Ting-wu, YANG Guo-lei (999)
- Consumers' willingness to pay for different traceable food products and its influencing factors
..... XU Fen, CHEN Hong-hua (1011)
- The influencing mechanism of agricultural information resource allocation on agricultural e-commerce performance in eastern China
..... JIA Cheng, XIA Chun-ping, CHEN Peng-yu (1020)
- Farmers' production decision under the background of African swine flu: Thoughts on the recovery and development of hog production
..... NIE Yun-bin, GAO Xiang, LI Bing-long, QIAO Juan (1031)
- The analysis of quality control cognitions and behaviors of sheep farmers FAN Hui-li, FU Wen-ge (1040)
- Phenotypic characterization and identification of the grain shape gene rice responsible for the dwarf and small grain mutant *dsg1*
..... Lü Zhao-kun, YU Yi-lan, LI Lan-ying, ZHANG De-chun (1051)
- A comparative study of soil erosion estimation based on RUSLE, InVEST and USPED models: A case study of the Yanhe River Basin in
Northern Shaanxi ZHAI Rui-jie, ZHAO Wen-wu, JIA Li-zhi (1059)
- The impact of agricultural water poverty on farmers' adoption of irrigation technology: A case study of Baojixia irrigation district
..... ZHANG Hua, WANG Li-li (1069)

《农业现代化研究》第五届编委会

顾 问：傅伯杰 印遇龙 邹学校 骆世明 吴金水

主 编：王克林

副主编：张林秀 史志华 刘黎明 王育花（常务）

编 委：柏连阳 曹林奎 曾希柏 陈利顶 邓 伟 葛体达

谷树忠 胡新艳 孔祥智 匡远配 李德军 刘世荣

刘彦随 刘 颖 梅旭荣 彭 建 谭支良 王 飞

王亚华 吴志峰 武拉平 夏显力 谢炳庚 谢永宏

辛 岭 徐志刚 颜晓元 杨林章 张兴义 章家恩

赵文武 周清波 朱教君 朱满德 宋宝辉 章春华

编辑部：童成立 王育花

农业现代化研究

NONGYE XIANDAIHUA YANJIU

（双月刊，1980年创刊）

第41卷第6期（总第241期）2020年11月

RESEARCH OF AGRICULTURAL
MODERNIZATION

(Bimonthly, started in 1980)

Vol. 41, No. 6 (Sum. No. 241) Nov., 2020

主 管	中国科学院	Administrated by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院亚热带农业生态研究所	Sponsored by	Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences
出 版	科学出版社 (北京东黄城根北街16号, 邮编: 100717)	Published by	Science Press (16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China)
主 编	王克林	Chief Editor	WANG Ke-lin
编 辑	《农业现代化研究》编辑部 地址: 湖南长沙市芙蓉区远大二路644号 邮编: 410125 电话: 0731-84615231 E-mail: nyxdhyj@isa.ac.cn	Edited by	Editorial Department of Research of Agricultural Modernization
印刷装订	湖南省农业科学院印刷厂	Address	No. 644, Yuanda 2nd Road, Furong District, Changsha City, Hunan, China
国内总发行	中国邮政集团公司湖南省报刊发行局	Postal Code: 410125 Telephone: 0731-84615231	
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 地址: 北京399信箱 邮编: 100044	Distributed	China International Book Trading Corporation
订 购 处	全国各地邮政局(所)	Abroad by	(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

ISSN 1000-0275
CN 43-1132/S

国内邮发代号 42—46
国外发行代号 BM6665

国内外公开发行
定价: 15.00 元