基于 CSLE 模型的陕北纸坊沟流域土壤侵蚀评价

马亚亚[1]，王 杰[2]，张 超[2]，刘国彬[3]，庞国伟[4]

(1. 西北农林科技大学 林学院，陕西 杨凌 712100；2. 西北农林科技大学 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究，陕西 杨凌 712100；4. 西北大学 城市与环境学院，陕西 西安 710069)

摘 要：[目的] 对陕北纸坊沟流域土壤侵蚀状况进行评价，为该流域不合理土地利用方式的调整和优化以及水土流失治理措施的合理布设提供科学依据。[方法] 以陕西省安塞县纸坊沟流域为研究区，基于 ArcGIS 技术，利用 2005—2016 年纸坊沟流域水文站月降雨量数据、DEM 数据、土壤类型数据和土地利用数据，率定中国土壤流失方程(CSLE)的相关参数，计算研究区的土壤侵蚀强度，对土地利用变化与坡度和土壤侵蚀强度之间的关系进行分析。[结果] ①研究区内不同坡度带上的土壤侵蚀强度差异较大，15°～25°左右的坡耕地是土壤侵蚀的敏感部位。②纸坊沟流域内土地以林地、耕地、草地为主，耕地面积不断减少，林地和草地面积不断增加。该区域实施退耕还林后，土壤侵蚀的面积与强度整体呈现改善趋势；土地利用变化与土壤侵蚀强度具有密切联系，表现为耕地的土壤侵蚀强度较强，林地和草地侵蚀强度相对较弱，说明增加林地和草地面积，减少耕地面积，能够显著减弱土壤侵蚀。[结论] 研究区内土壤侵蚀空间分布受土地利用方式和坡度制约，该区今后水土流失治理的重点区域是 15°～25°左右的坡耕地。

关键词：土壤侵蚀；CSLE；水土保持；纸坊沟流域

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)06-0095-08 **中图分类号**：S157.1

文献参数：马亚亚，王杰，张超，等. 基于 CSLE 模型的陕北纸坊沟流域土壤侵蚀评价[J]. 水土保持通报，2018，38(6)：95-102. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20180904.001. Ma Yaya, Wang Jie, Zhang Chao, et al. Evaluation of soil erosion based on CSLE model in Zhifanggou watershed of Northern Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 95-102.

Evaluation of Soil Erosion Based on CSLE Model in Zhifanggou Watershed of Northern Shaanxi Province

MA Yaya[1], WANG Jie[2], ZHANG Chao[2], LIU Guobin[3], PANG Guowei[4]

(1. *College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi* 712100, *China*;
2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi* 712100, *China*;
3. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling, Shannxi* 712100, *China*; 4. *School of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, Shannxi* 710069, *China*)

Abstract: [Objective] The soil erosion situation was evaluated in the Zhifanggou watershed of Northern Shaanxi Province in order to provides scientific basis and theoretical support for the adjustment and optimization of unreasonable land use patterns and the rational arrangement of soil and water conservation control measures in the watershed. [Methods] The present study amended the parameters of Chinese soil loss equation(CSLE) and calculated soil erosion intensity based on the data of monthly rainfall, DEM, soil type, and land use from 2005 to 2016 in the Zhifanggou watershed at Ansai County of Northern Shaanxi Province using ArcGIS. The linkages between land use change, slope degree and soil erosion intensity were also analyzed. Based on the aforementioned results, we put forward suggestions for the management of soil and water loss in this area. [Results] Soil erosion intensity differed greatly among different slope zones in the investigated area. Farmlands with 15°～25° slope in the watershed were sensitive to soil erosion. Forestland, farmland and grassland dominated the Zhifanggou watershed. The area of farmland decreased continuously and that of forestland and grassland increased gradually. Since the project of Grain for Green initiated, the area that subjected to soil erosion, and the erosion intensity were both decreased. There was a close association

收稿日期：2018-04-27 **修回日期**：2018-06-16

资助项目："十三五"国家重点研发项目"黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式"(2016YFC0501707)；国家自然科学基金项目(41771554)

第一作者：马亚亚(1996—)，女(汉族)，甘肃省静宁县人，硕士研究生，研究方向为水土保持与植被恢复。E-mail：mayaya1996@163.com。

通信作者：张超(1985—)，男(汉族)，陕西省宝鸡市人，博士，副研究员，从事水土保持与植被恢复研究。E-mail：zhangchaolynn@163.com。

between land use change and soil erosion intensity, characterized by higher erosion intensity in farmland and lower density in forestland and grassland. These results indicated that increasing the forestland and grassland and decreasing the farmland could be favorable for the reduction of soil erosion. [Conclusion] Spatial distribution of soil erosion in the study area was dominantly determined by the land use types and slope degree. Soil and water loss management should focus on the slope land with degree of 15°～25°.

Keywords: soil erosion; CSLE; soil and water conservation; Zhifanggou watershed

黄土高原脆弱的生态环境以及人类的社会经济活动导致该区域水土流失日益严重。剧烈的土壤侵蚀使得土壤的表土层随径流流走,土壤中的营养物质大量流失,导致土壤肥力下降,土壤利用率降低以及生态环境恶化[1]。据统计,黄土高原的总面积为6.40×10^5 km^2,土壤侵蚀面积达3.90×10^5 km^2,土壤侵蚀模数大于等于15 000 t/(km^2·a)的剧烈水蚀面积3.67×10^4 km^2,占全国同类面积的89%[2]。当前,对土壤侵蚀的研究已经引起了农学、土壤学、水文学等多学科的广泛关注[3]。因此,掌握土壤流失量的动态变化,这对优化配置水土保持措施、保护水土资源具有重要意义。土壤侵蚀模型是检测和预报土壤流失的重要工具。美国的Wischmeier等[4]于1965年建立的通用土壤流失方程USLE是最早建立的土壤侵蚀模型;1993年,Renard等[5]通过对通用土壤流失方程的修改而形成的新一代土壤侵蚀预测模型—修正通用土壤流失方程RUSLE。20世纪80年代以来,我国的专家学者以USLE的基本形式为依据,结合我国当地的地形特征,建立了不同的土壤侵蚀经验模型,其中比较有代表性的模型是江忠善[6]的坡面水蚀模型、范瑞瑜[7]建立的黄河中游地区小流域土壤侵蚀预报模型。此外,具有物理成因的土壤侵蚀模型也相继出现,Knisel等[8]建立的CREAMS模型;美国筹建水蚀预报项目WEPP[9];澳大利亚Misra等[10]提出的GUEST等,但是由于物理模型自身的局限性,其实用性较低。因此,本文以刘宝元利用美国的通用土壤流失方程式(USLE)和修正通用土壤流失方程式(RUSLE)的有关思想,结合我国的地形特征提出的中国土壤流失方程(CSLE)为研究模型,该模型充分考虑了生物措施、工程措施和耕作措施对土壤侵蚀和水土流失过程和结果的影响,使其更适合中国实际。本研究采用中国水土流失方程(CSLE)作为研究模型,坡度坡长因子、降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、生物措施因子、耕作措施因子作为土壤侵蚀的5大因子,利用ArcGIS技术代入影响土壤侵蚀的各因子值,得到土壤侵蚀图,从而探讨土壤侵蚀强度与影响因子之间的空间变化的关系,以期为纸坊沟流域不合理的土地利用方式的调整和优化提供科学依据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

纸坊沟流域隶属于陕西省安塞县沿河湾镇,地理位置在东经109°13′46″—109°16′3″,北纬36°42′42″—36°46′28″,是延河支流杏子河下游的一级支沟,流域呈南北向狭长形,面积8.27 km^2,海拔1 425.71～1 041.5 m。年平均降水量为549.1 mm,降水年际变化率较大,降雨量多集中在7—9月,且3个月的降水占到全年降水量的61.1%。流域地形破碎,土壤类型以黄绵土为主,其面积占土壤总面积的63.5%;且沟壑密度8.06 km/km^2,水土流失严重,多年平均侵蚀模数达14 000 t/km^2。流域植被区划属于暖温带森林草原区,受人为活动的影响,天然森林已经绝迹,取而代之的天然植被,多为干旱草本植物。由于流域集水面积小,地面坡度陡,土质疏松,因此在降雨情况下,特别是暴雨后,产流集中,挟沙量大;短历时高强度的暴雨是造成严重水土流失的主要原因[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 CSLE模型及其参数计算

(1) CSLE模型[12]。研究区内主要以水蚀为主,对土壤侵蚀量的计算采用的是中国土壤流失方程CSLE(Chinese soil Loss equation),其计算表达式为:

$$A=R\cdot K\cdot L\cdot S\cdot B\cdot E\cdot T \tag{1}$$

式中:A——年均土壤流失量[t/(hm^2·a)];R——研究区降雨和径流因子[(MJ·mm)/(hm^2·h·a)];K——土壤可侵蚀因子[t·h/(MJ·mm)];L——坡长因子;S——坡度因子;B——生物措施因子;E——工程措施因子;T——耕作措施因子。

(2) 降雨侵蚀力因子[13]。计算公式为:

$$R=\sum_{i=1}^{12}1.735\times10^{[1.5\times\lg(P_i^2/P)-0.8188]} \tag{2}$$

式中:P_i——多年的月均降水量(mm);P——多年的年降水量(mm)。

采用Wischmeier[13]提出的经验公式,根据安塞站及周边各气象站点观测的气象数据,得到降雨侵蚀力因子R值,然后采用反距离加权内插法生成研究区降雨侵蚀力R值图。

(3) 土壤可蚀性因子[14-15]。计算公式为:

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.025\ 6S_{AN}\left(1-\frac{S_{IL}}{100}\right)\right]\right\}\left(\frac{S_{IL}}{C_{LA}+S_{IL}}\right)^{0.3}\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\left[1-\frac{0.7SN_1}{SN_1+\exp(-5.51+22.9SN_1)}\right] \quad (3)$$

$$SN_1=1-\frac{S_{AN}}{100} \quad (4)$$

式中:S_{AN}——砂粒含量(%);C_{LA}——粉粒含量(%);S_{IL}——黏粒含量(%);C——有机碳含量。

张科利等[16]通过在全国建立 6 个观测点(其中包括西北黄土高原的陕西安塞)来研究了我国不同水土流失区的土壤可蚀性值问题。结果表明,国外关于土壤可侵蚀性的研究成果不能直接应用于我国的研究中。虽然估算值明显大于实测值,但估算值与实测值之间存在有良好的线形关系。为此提出了针对国外模型的订正模型,其计算表达式为:

$$K=-0.013\ 86+0.515\ 75 \quad (5)$$

(4) 坡度坡长因子。采用张宏鸣根据 CSLE 的计算公式编写的 AML 程序提取 LS 因子,同时对 DEM 值中的 NoData 值也进行了填充[12],坡度因子的算法是对 McCool 等[17]和刘宝元等[18]提出的坡度算法的改良,当坡度 $\beta\leqslant5°$时,采用等 McCool 提出的坡度因子算法,当坡度 $\beta>5°$时,采用的是刘宝元的坡度因子计算方法;坡长因子的计算,采用的是 Wischmeier 和 Smith[4]提出的经验公式。计算公式为:

$$\begin{cases} S=10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5°) \\ S=16.8\sin\theta-0.5 & (5°\leqslant\theta<14°) \\ S=21.91\sin\theta-0.96 & (\theta\geqslant14°) \end{cases} \quad (6)$$

$$L=(\lambda/22.13) \quad (7)$$

$$\alpha=\beta/(\beta+1) \quad (8)$$

$$\beta=(\sin\theta/0.089\ 6)/[3.0(\sin\theta)^{0.8}+0.56] \quad (9)$$

式中:S——坡度因子;θ——从 DEM 提取的坡度值(°);L——坡长因子;λ——DEM 提取的坡长值;22.13——标准小区的坡长;α——坡长因子指数;β——细沟侵蚀和面蚀的比值。

(5) 水保措施因子(BET)。CSLE 模型将水保措施因子区分为生物措施因子(B)、工程措施因子(E)以及耕作措施因子(T)。工程措施因子(T)由于缺少基础数据,本研究中暂不考虑其对土壤侵蚀的影响,将其按照常量对待。生物措施因子(B)和耕作措施因子(T)均参考谢红霞等[16]对黄土高原土壤侵蚀的研究,利用研究区土地利用类型图和基于归一化植被指数求得的植被盖度图,对陕北纸坊沟流域的不同土地利用类型和不同植被盖度赋予不同的 B 值,利用 ArcGIS 技术得到研究区 B 值分布图;对耕作措施因子(T)赋值,没有耕作措施的地方赋值为 1,然后得到了研究区 T 值分布图。

1.2.2　分析土壤侵蚀影响因子空间分布特征　土壤固有结构和地貌特征决定了土壤侵蚀力因子和坡度坡长因子,因此在 CSLE 中没有必要考虑时间序列上的差异。但降雨侵蚀力和水保措施因子是随着时间的推移而变化,它可以作为土壤侵蚀研究动态变化的关键因素[19]。在区域土壤侵蚀模型中,坡度坡长因子是对土壤侵蚀最为敏感的因子,生物措施因子是区域土壤侵蚀中第二敏感因子,它们随着 DEM 分辨率的增大,土壤侵蚀模数都会变大。降雨侵蚀力因子和土壤可蚀性因子是土壤侵蚀模型中不敏感因子,改变栅格的大小,土壤侵蚀模数不会发生大的变化。但降雨侵蚀力因子随着时间变化,对土壤侵蚀具有显著的影响。

1.2.3　分析土壤侵蚀影响因子空间分布规律　通过前面对中国水土流失方程各因子的计算,确定了小流域土壤侵蚀所必需的各因子的数据,利用 ArcGIC 10.0 将上述各因子值的图层叠加运算,得到各计算单元的土壤侵蚀量。根据土壤侵蚀的试验结果,参考中国水利部 2007 年制定的《土壤侵蚀分类分级标准》[20],将研究区的土壤侵蚀强度等级划分为微度侵蚀、轻度侵蚀、重度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀 6 类,制作出研究区土壤侵蚀强度等级分布图,分析土壤侵蚀强度分级的分布规律。

2　结果与分析

2.1　土壤侵蚀影响因子空间分布特征

2.1.1　降雨侵蚀力因子　降雨侵蚀力因子反映降雨引起土壤分离和搬运的动力大小,即降雨产生土壤侵蚀的潜在能力[21]。降雨侵蚀力因子 R 的大小主要取决于研究区降雨强度和持续时间,暴雨越大,持续时间越长,侵蚀越容易发生。由图 1 可知,从整体来看,2005—2016 年流域年降雨量的起伏变化波动不大,但是 2013 年间降雨量最大。11 a 期间的平均降雨量为 476.6 mm,波动范围在±403 mm 之间,每月最大降雨量与年降水量变化趋势大致相同,2016 年的降水俩最低,最高值为 2013 年的降雨量,虽然各个年份之间的降雨量起伏波动,但总体上呈现出下降趋势。大量研究结果表明:降雨侵蚀力的变化趋势与降雨量变化趋势基本一致,说明研究区内各个年份的降雨量逐渐减少,而降雨侵蚀力也就越来越弱。

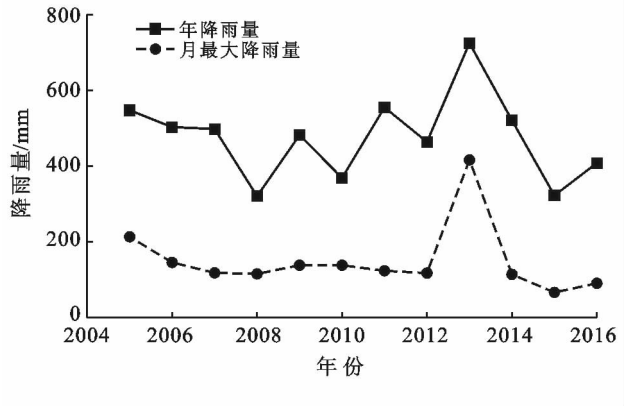


图1 纸坊沟流域降雨特征

2.1.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性因子定义为标准小区内单位降雨侵蚀力引起的土壤流失率，是土壤对雨滴击溅或地表径流等侵蚀介质剥蚀和搬运的敏感程度，反映了土壤颗粒被降雨和径流破坏、输移的敏感性，也是土壤抵抗由降雨、径流产生的侵蚀能力的综合体现[22]。纸坊沟小流域内主要土壤类型为黄绵土，占土壤总面积的63.4%左右；其次为红胶土，其面积占该流域总面积的25.1%，其余为零星分布的潮土、新积土、粗骨土和石质土等。本研究以纸坊沟流域土壤类型图为基础，参考李斌兵等[21]对纸坊沟流域土壤侵蚀强度空间分布的研究成果，获得各土壤类型对应的K值单位，在ArcGIC中将K值作为属性字段添加到土壤类型图中，生成30 m栅格大小的K值栅格图。纸坊沟流域内黄绵土、红胶土、潮土、新积土、粗骨土、石质土的K值分别为：0.37，0.42，0.34，0.22，0.23和0.24 $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$。由于黄绵土土质疏松，质地均一，所以抗侵蚀性差。

2.1.3 坡长坡度因子 坡长和坡度因子反映了地形地貌对土壤侵蚀的影响，通常为侵蚀动力的加速因子[23]。坡度和坡长因子是土壤侵蚀研究中最重要的地形因子之一，也是决定径流冲刷能力的主要因素。在其他条件相同的情况下，坡度越陡，坡长越长，土壤发生分离、滑落的潜在危险性就越大，土壤侵蚀就越来越严重。

本研究采用流域的5 m分辨率的DEM数据对研究区坡度因子进行提取。首先在ArcGIC中用Spatial Analyst模块中的Surface Analyst功能得到坡度栅格图，然后在ArcMAP中，利用3D Analyst模块中的Reclasify模块将坡度栅格图分成≤5°，5°～8°，8°～15°，15°～25°，25°～35°，≥35°共6个坡度级，最后对于生成的坡度分级结果，打开其属性表，利用字段计算器求得各个坡度级别的面积(表1)。

研究区坡度坡长因子的空间分布特征与海拔分布具有显著的一致性。从坡度分级结果来看，该流域坡度≤5°的面积为0.53 km^2，占全流域面积的6.46%；坡度为5°～8°的面积为0.84 km^2，占全流域10.21%；坡度为8°～15°的面积为1.28 km^2，占全流域15.53%；坡度为15°～25°的面积为1.46 km^2，占全流域17.66%；坡度为25°～35°的面积为1.83 km^2，占全流域23.34%；坡度为≥35°的面积为2.21 km^2，占全流域面积的26.80%。从流域的坡度分级图可以看出研究区内坡度比较大，全流域坡度大于15°的面积占全流域的67.80%，是土壤侵蚀的主要来源区域。

表1 纸坊沟流域坡度分级统计

编码	坡度	面积/km^2	百分比/%
1	≤5°	0.53	6.46
2	5°～8°	0.84	10.21
3	8°～15°	1.28	15.53
4	15°～25°	1.46	17.66
5	25°～35°	1.83	23.34
6	≥35°	2.21	26.80

坡度坡长因子反映了地形地貌对土壤侵蚀的影响，通常为侵蚀动力的加速因子。在其他条件相同的情况下，坡度越来越陡，坡长越来越长，产流形成的流量越大，土壤侵蚀越来越严重。坡度坡长因子可以利用LP-Tool[14]软件进行计算，然后将坡度因子栅格分布图(图2)与坡长因子栅格分布图(图3)进行相乘叠加，得到该流域的LS值分布图(图4)。流域内5 m分辨率的LS因子平均值为8.79，最大值为138。小于5的坡度坡长因子值的面积占流域面积31.41%，坡度坡长因子值位于5，10的占流域面积的30.89%，19.30%的流域面积的坡长因子值在10～15，坡度坡长因子值在26以下约占流域面积的97.46%。说明大于CSLE模型中规定的LS最大值72的地形因子值很少，5 m分辨率计算出的坡度坡长因子值与实际情况吻合度极高。

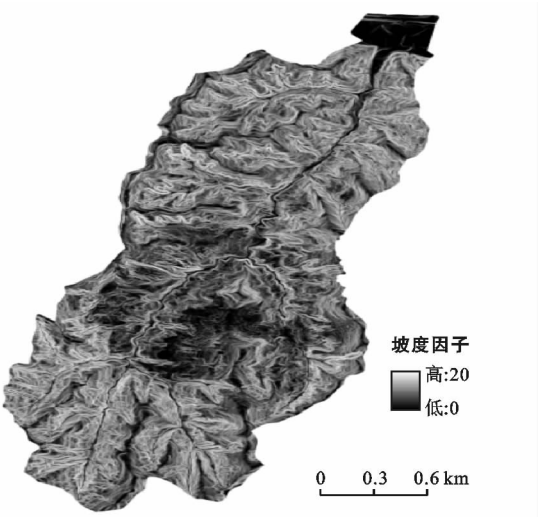


图2 纸坊沟流域坡度因子值分布

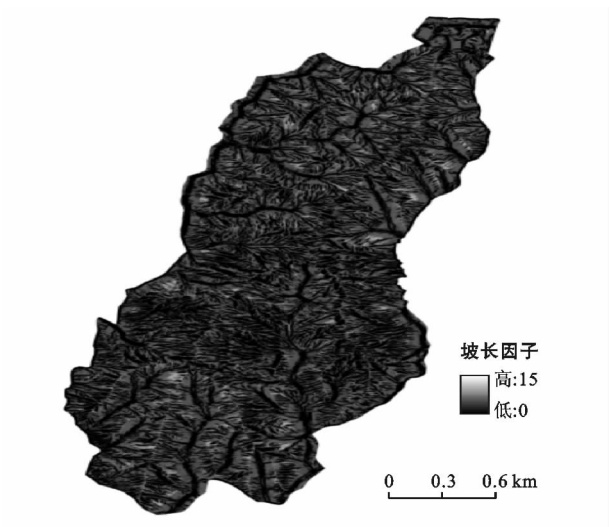


图 3　纸坊沟流域坡长因子值分布

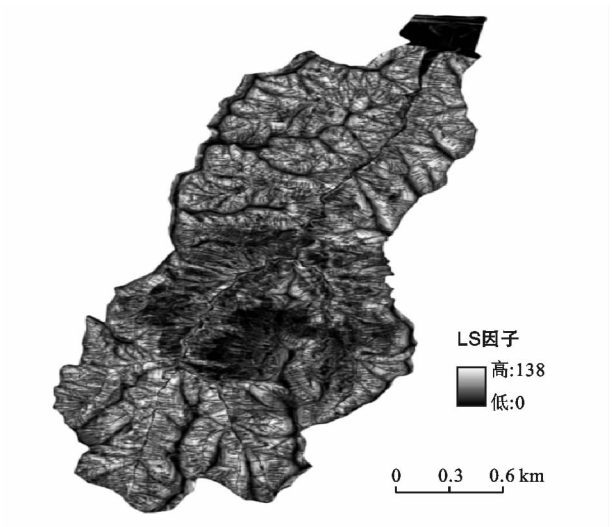


图 4　纸坊沟流域 *LS* 因子值分布

2.1.4　水保措施因子　生物措施因子(B)定义为在一定地表覆盖和管理措施下土壤流失量与同等条件下适时翻耕、连续休闲对照地上土壤流失量之比[24]。植被覆盖通常被认为是土壤侵蚀动力的抑制因子,其值小于或等于 1。植被覆盖纸坊沟流域主要农作物为玉米、土豆、谷子和大豆,据张岩等[21]研究,黄土高原玉米、土豆、谷子、大豆的 C 因子分别为 0.28,0.47,0.53 和 0.51,由于缺乏具体农作物信息,取其均值 0.45 作为研究区耕地的 B 因子值,水域的 B 因子赋值为 1,林地为 0.05,草地为 0.09。利用纸坊沟流域的土地利用图层,将 B 因子值赋予相应的土地利用类型,得到研究区植被覆盖 B 因子图层(图 5)。从图中可以看出生物措施因子 B 值接近于 1 的植被稀疏区主要分布在沟口和流域左岸,例如拐沟、大范家沟、大罗锅沟、正沟。

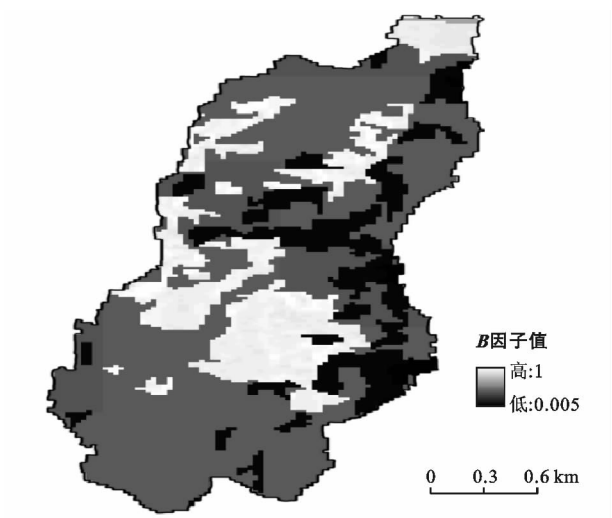


图 5　纸坊沟流域 *B* 因子值分布

在 CSLE 模型中,耕作措施因子定义为采取了一定的耕作措施后,土壤流失量相对于顺坡种植时土壤流失量的比例[25]。农业生产中通常利用等高耕作、等高带状种植、梯田等水土保护措施,调整水流形态、斜坡坡度和表面流的汇流方向,减少径流量,降低径流速率,从而减轻土壤侵蚀。T 值通常介于 0～1 之间,不会发生土壤侵蚀的地区赋值为 0;1 值被赋予无任何水土保持措施的土地类型。土壤耕作措施因子 T 被认为是 CSLE 模型中最难确定的因子,因此参考谢红霞提出的耕作措施因子的计算方法得到纸坊沟流域的耕作措施因子值(表 2),并借助 ArcGIS 中的栅格计算器将 T 因子值赋予相应的坡度分级图中,得到水土保持耕作措施 T 因子值图。在图中,非耕地所占用的面积占总面积的 56.29%,坡度为≤5°的耕地占总面积的 16.29%,5°～10°坡度的耕地面积占总面积的 25.48%,10°～15°的耕地占总面积的 1.94%。

表 2　不同坡度下耕作措施因子值

坡度范围	≤5°	5°～10°	10°～15°	15°～20°	20°～25°	>25°
耕作措施因子值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	0.800

2.2　小流域土壤侵蚀强度的空间分布

通过统计各个侵蚀强度的面积及其所占总面积之比的数据(表 3),从中可以看出,侵蚀强度占比例最大的一类为中度侵蚀,接近总面积的 50%左右,其次 3 类比较严重的侵蚀之和占到了总面积的 45%以上,微度侵蚀和轻度侵蚀各占总面积的 1.29%和 3.97%,从总体来看纸坊沟流域土壤侵蚀仍比较严重,须采取必要的治理措施。从图 6—7 可看出,流域土壤侵蚀分布特征为沟口区易发生极强烈和剧烈侵蚀,土壤流失比较严重;流域的中部以中度侵蚀为主;

沟头侵蚀强度为轻度和中度侵蚀。不同坡度带上的土壤侵蚀强度差异较大，流域中部坡度较缓，坡度大多集中在 15°以上，土壤侵蚀以轻度和中度为主，并且微度与轻度的土壤侵蚀主要发生在林地或水域，说明该处是植被覆盖和水土保持比较好的地块。而流域沟头坡度较陡，坡度大多集中在 15°～35°，且植被覆盖和水土保持措施较差，所以土壤侵蚀明显以中度为主，并且以主沟为界，流域左岸的侵蚀强度明显的高于右岸，说明流域的侵蚀强度呈明显不对称性。不同土地类型上土壤侵蚀强度的差异性，主要是由于各类土地的土壤理化性质和所处谷坡坡度造成的[26]。在各土地利用类型中，侵蚀面积最小的是水域；其次是林地和草地侵蚀面积较小，由此可知，侵蚀强度较大的区域主要分布在耕地。主要由于长期不合理的耕作方式，使地表土质疏松，导致土壤蓄水和透水能力变差，从而加重土壤流失。

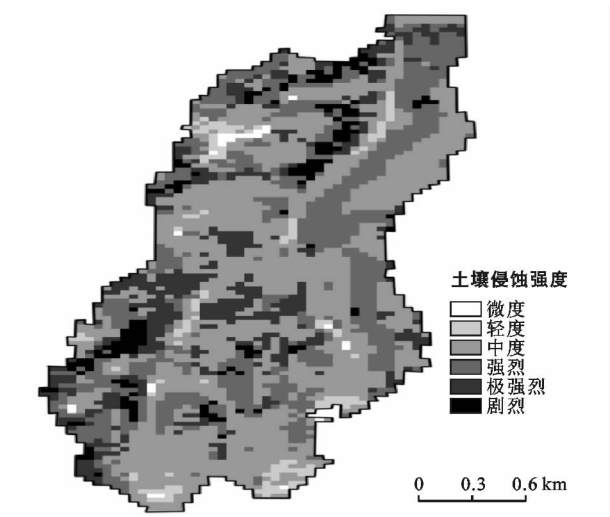


图 6 土壤侵蚀等级

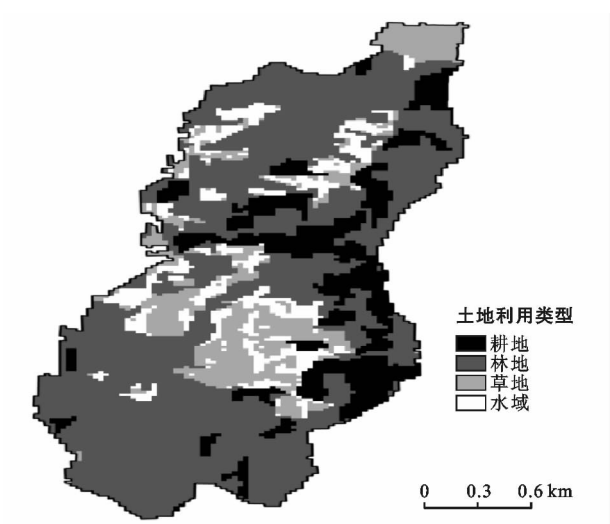


图 7 研究区土地利用状况

表 3 基于 CSLE 的土壤侵蚀强度分级面积

侵蚀强度级别	面积/hm^2	占面积的百分比/%
微度	1 075	1.29
轻度	3 300	3.97
中度	40 600	48.78
强烈	22 475	27.00
极强烈	11 375	13.67
剧烈	4 400	5.29

3 讨 论

3.1 土地利用与土壤侵蚀关系的讨论

纸坊沟流域内土地类型以林地、耕地、草地为主。耕地是土壤侵蚀最易发生的地类，坡地开垦和坡地耕作是造成土壤流失的主要原因。耕地种植区实施退耕还林后，耕地面积不断减少，过度开垦状况有所好转，生态环境不断改善，土壤侵蚀的面积与强度整体呈现改善趋势。在林地动态区，林地面积持续增加，但由于退耕还林初期，大量育林育草，对地表扰动大，林木的覆盖度低，土壤侵蚀强度不降反增，但随着林木覆盖度的不断增加，土壤侵蚀强度慢慢降低。在草地动态区，草地主要向林地转移。由于退耕还草工程的实施，使得部分耕地退化为草地，部分草地来自于林地，土壤侵蚀强度逐渐变小。耕地、林地和草地的不断变化，说明土地利用变化与土壤侵蚀强度具有密切联系，表现为耕地的土壤侵蚀强度较强，林地和草地侵蚀强度相对较弱，说明增加林地和草地，减少耕地，能够显著减弱土壤侵蚀。

3.2 小流域土壤侵蚀防治措施

纸坊沟流域位于黄土丘陵沟壑区，地块狭小分散、沟壑纵横、土质松软、植被稀疏，土壤侵蚀严重；不合理的土地利用方式，脆弱的生态环境，水土流失严重制约了地方经济的可持续发展。为了改善当地生态环境，实现区域经济的可持续发展，按照新时期水土保持规划内容，分析纸坊沟流域内的土壤侵蚀强度，以高效合理的利用土地资源，建设人地协调的绿色生态系统为目标，通过合理安排土地资源的利用方式，确保粮食安全；同时根据纸坊沟流域的自然条件实施造林种草，确保生态安全；贯彻执行国家和地方有关生态文明建设的政策和规定，既要绿水青山，也要金山银山，实现社会、经济、生态效益的并行发展，但是要把生态环境保护放在更加突出的位置。

由坡度分级图和土壤侵蚀强度图分析可知，土壤侵蚀与土地的坡度和植被覆盖关系密切。坡度为 15°～25°的区域土壤侵蚀状况严重，一方面由于 15°～

25°地区范围内遭受人为开垦,另一方面由于 15°以上地区以草地和稀疏植被为主,水土保持作用低。因此在纸坊沟流域水土保持规划设计中,应加强对 15°～25°坡度地区重点防治,布设相应的措施。纸坊沟流域内地形破碎,植被稀疏,中度以上侵蚀面积比例超过 50%,稀疏植被和裸地缺少地表覆盖、草地植被退化和耕地垦殖是土壤侵蚀相对严重的主要原因[27]。如表 4 所示,5°～20°之间,土壤侵蚀以轻度和中度为主,着重梯田工程措施,提高单位土地面积的生态效益和经济效益;对于土壤侵蚀严重的陡坡地实施有计划的封禁保护,抚育措施,减少人为干预,使其自然恢复;没有修建梯田的坡耕地,可在坡地上种植草地、灌木,实行草粮或草灌带状间作,缩小坡面长度,减缓降雨对地面的冲刷,提高水土保持功能。

研究区土壤侵蚀强度与土地利用和植被覆盖表现出很大的相关性,土地资源的合理利用,是水土保持的一项重要措施和根本途径[28]。因此在纸坊沟流域水土保持规划设计中,合理的安排农、林、牧用地,增加植被覆盖度,例如在农牧交错带,实行以综合防治为主,工程与治理相结合;以保护和促进生态自然修复为主,坚持生态保护与治理相结合[29],为区域经济的发展提供优良的生态环境保证。在坡度平缓的地区建设高标准的良田,利用改垄、梯田等措施改造坡耕地,提高土壤蓄水保土能力;坡中部利用等高耕作和等高带状间作等工程措施,拦蓄地表径流,减少水土流失;坡上部全部退耕,还林还草,营造生态防护林。林草植被建设是水土保持综合治理、改善黄土高原的生态环境的重要措施之一。实施造林种草,应遵循适地适树,宜林则林,宜草则草的根本性原则。

表 4　小流域坡面水土保持技术措施

措 施	适宜坡度	适宜土地单元
水平梯田	20°以内	坡耕地、果园
坡式梯田	25°以下	坡耕地、草地、灌木林地
隔坡梯田	25°以下	坡耕地、草地、果林地
水平沟种植	25°以下	坡耕地、草地、灌木林地
等高耕作	20°以下	坡耕地
水平犁沟	20°以下	夏季休闲地和草坡地
草粮带状间作	20°以下	坡耕地、人工草地
草灌带状间作	各种坡度	草地、灌木地
等高带状间作	25°以下	坡耕地、人工草地

4　结 论

本研究在基于 ArcGIS 技术上采用 CSLE 模型对纸坊沟流域影响土壤侵蚀的相关因子进行建模和可视化处理,估算了单元土壤侵蚀量,结合水利部水力侵蚀强度分级,分析了纸坊沟流域土壤侵蚀强度空间分布特征[30]。

(1) 流域土壤侵蚀分布特征为沟口区易发生极强烈和剧烈侵蚀,土壤流失比较严重;流域的中部以中度侵蚀为主;沟头侵蚀强度为轻度和中度侵蚀。侵蚀强度占比例最大的一类为中度侵蚀,接近总面积的 50%左右。

(2) 同坡度带上的土壤侵蚀强度差异较大,流域中部坡度较缓,坡度大多集中在 5°～15°,土壤侵蚀以轻度和中度为主,并且微度与轻度的土壤侵蚀主要发生在林地或水域。

(3) 不同类型土地上土壤侵蚀强度具有差异性,侵蚀面积最小的是水域;林地和草地侵蚀面积较小;耕地的侵蚀强度最大。

[参 考 文 献]

[1] 陈丽华,鲁绍伟,张学培,等. 晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析[J]. 水土保持研究,2008,15(1):394-397.

[2] 程琳,杨勤科,谢红霞,等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):61-66.

[3] 蔡凌雁,汤国安,熊礼阳,等. 基于 DEM 的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究[J]. 水土保持通报,2014,34(3):141-144.

[4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[M]. US Washington D C: Agriculture Handbook, 1978:537.

[5] Renard K G, Ferreira V A. RUSLE model description and database sensitivity[J]. Journal of Environmental Quality, 1993,22(3):458-466.

[6] 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.

[7] 花利忠, 贺秀斌, 朱波. 川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3):111-115.

[8] Knisel W G. CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosions from Agricultural Management Systems[R]. USDA Conservation Research Report No. 26, US: US Department of Agriculture, 1980.

[9] Flangan D C, Nearing M A. USDA Water Erosion Prediction Project: Hill Slope Profile and Watershed Model Documentation[R]. USA: USDA-ARS, NSERL, Report No10 USDA-ARS, West Lafayette, Indiana. 1995.

[10] Misra R K, Rose C W. Application and sensitivity analysis of process-based erosion model-GUEST [J]. European Journal Soil Science, 2010, 47(4):593-604.

[11] 鲁克新. 黄土高原流域生态环境修复中的水沙响应模

拟研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2006.
[12] 刘宝元.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[R].北京:水利部水土保持监测,2006.
[13] Mccool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers(USA), 1987,30(5):1387-1396.
[14] Zhang, Hongming, Yao Zhihong, Yang Qinke, et al. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs[J]. Catena, 2017 (151):174-181.
[15] Zhu Hanhua, Wu Jinshui, Guo Shengli, et al. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau[J]. Catena, 2014, 120(1):64-72.
[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 西安:陕西师范大学,2008.
[17] Liu Baoyuan, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,64(5):1759-1763.
[18] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
[19] 林慧龙,郑舒婷,王雪璐.基于RUSLE模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价[J].草业学报,2017,26(7):11-22.
[20] 中华人民共和国水利部.SL190-2007土壤侵蚀分类分级标准[M].北京:中国水利水电出版社,2008:3-12.
[21] 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.
[22] 怡凯,王诗阳,王雪,等.基于RUSLE模型的土壤侵蚀时空分异特征分析:以辽宁省朝阳市为例[J].地理科学,2015,35(3):365-372.
[23] 杨冉冉,徐涵秋,林娜,等.基于RUSLE的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J].生态学报,2013,33(10):2974-2982.
[24] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J].生态学报,2014,34(16):4461-4472.
[25] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于RUSLE模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
[26] 王锦志,刘林,王小平.3S技术在王家沟流域沟道侵蚀研究中的应用[J].山西水土保持科技,2017(3):9-12.
[27] 方广玲,香宝,赵卫,等.基于GIS和RUSLE的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2015,29(3):6-12.
[28] 王春梅,杨勤科,王琦,等.区域土壤侵蚀强度评价方法研究:以安塞县为例[J].中国水土保持科学,2010,8(3):1-7.
[29] 孟祥志,刘艇,王继红.我国黑土区水土流失研究综述[J].中国农村水利水电,2010(10):36-38.
[30] 李斌兵,郑粉莉,龙栋材,等.基于GIS纸坊沟小流域土壤侵蚀强度空间分布[J].地理科学,2009,29(1):105-110.

(上接第94页)

[25] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等.不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J].农业工程学报,2015,31(24):106-110.
[26] Perfect E, Mclaughlin N B, Kay B D, et al. An improved fractal equation for the soil water retention curve[J]. Water Resources Research, 1996,32(2):281-288.
[27] 施威,魏继红,宋京雷,等.含水率对下蜀土抗剪强度的影响[J].西华大学学报:自然科学版,2016,35(3):97-101.
[28] 王丽,梁鸿.含水率对粉质黏土抗剪强度的影响研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009,30(1):170-174.
[29] 张奎,李梦姿,杨贝贝.含水率和干密度对重塑黄土抗剪强度的影响[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2016,36(3):74-79.
[30] 李振,邢义川.干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J].岩土力学,2006,27(12):2255-2260.
[31] 许旭堂,简文彬,柳侃.含水率和干密度对残积土抗剪强度参数的影响[J].地下空间与工程学报,2015,11(2):364-369.
[32] Su Lijun, Zhou Wanhua, Chen Weibin, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface[J]. Measurement,2018,122:339-346.
[33] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005,29(2):189-217.