

基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估

秦伟^{1,2}, 朱清科^{2*}, 张岩²

(1. 中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 北京 100044; 2. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对基于上坡汇流面积的坡长因子算法进行改进, 提出考虑上坡土地利用/覆盖对汇流影响的坡长因子算法, 运用 GIS 和 RUSLE 评估黄土高原四面窑沟流域的土壤侵蚀强度及其与环境因素的关系。结果表明, 流域多年平均侵蚀强度 $4\ 399.79\ t/(km^2 \cdot a)$, 属中度侵蚀; 侵蚀强度和侵蚀量均随坡度增加而显著增加, 80.59%的侵蚀量来源于占流域总面积 59.06%的 25° 以上坡度带; 不同坡向的侵蚀强度表现为正阳坡>半阳坡>半阴坡>正阴坡, 其中, 占总面积 45.07%的阳坡产生 56.50%的侵蚀量; 不同土地利用类型中, 占总面积 57.07%的草地产生 96.37%的侵蚀量, 成为目前流域内主要侵蚀产沙源。研究为应用修正通用土壤流失方程在黄土高原进行侵蚀评估提供技术范例, 为该区侵蚀防治和水土资源利用提供有益参考。

关键词: 土壤, 侵蚀, 地理信息系统, 修正通用土壤流失方程, 黄土高原

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.029

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0157-07

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.
Qin Wei, Zhu Qingke, Zhang Yan. Soil erosion assessment of small watershed in Loess Plateau based on GIS and RUSLE[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 157—163. (in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤侵蚀通过剥蚀、搬运土壤, 破坏土壤结构、减少土壤养分, 不仅使土地生产力下降、水土资源流失, 而且造成河湖库塘的泥沙淤积, 加剧洪涝、干旱等灾害发生, 成为危及人类生存与发展的重要环境问题之一。修正通用土壤流失方程(RUSLE)是目前世界上应用最广泛的水蚀预报经验模型。随着地理信息系统(GIS)技术不断盛行, 基于GIS运用RUSLE定量评估土壤侵蚀, 已成为合理规划、利用区域水土资源的有效手段, 在世界许多国家得到广泛应用和研究^[1-4]。

国内对GIS和RUSLE的综合应用始于20世纪80年代末, 相继出现了一系列有关不同省份和地区的研究报道^[5-8]。然而, 在中国乃至世界范围水土流失最为严重的黄土高原地区, 基于GIS和RUSLE预报土壤侵蚀的研究却十分少见。同时, 坡长因子(L)作为RUSLE中的重要因子^[9], 在现有报道中均存在一定不足, 严重影响了土壤侵蚀预报精度。现有在GIS平台上获取 L 因子的方法, 主要存在两个方面的问题: 首先, 因子算法的选取不尽合理。在GIS中, 单元格代表坡面的一个坡段, 而现有研究则大多选用规则坡面 L 因子算法^[10], 并以单元格边

长、对角线长或边长与坡度余弦比等作为其坡长进行运算, 忽略了单元格间的汇流过程, 将其作为水文孤岛, 从而严重减小 L 因子、低估侵蚀强度^[10]。虽然有的研究选用不规则坡面的坡段 L 因子算法^[11], 并以分水线到单元格的实际汇流长度为坡长进行计算, 在一定程度上考虑了上坡汇流对侵蚀的作用、量化了坡面内不同坡段的侵蚀差异, 但GIS中的均匀单元格实际是将三维地形简化成二维地形, 单元格的侵蚀强度由上坡汇流面积决定。因此, 这种算法所获得结果也存在较大误差。其次, 上坡汇流面积确定不准确。鉴于二维空间中, 单元格侵蚀强度由上坡汇流面积决定, Desmet等^[10]提出基于上坡汇流面积的 L 因子算法, 得到广泛应用。然而, 现有研究中的汇流面积都是根据数字高程模型(DEM)确定的汇流方向简单累加得到, 未考虑汇流路径上土地利用/覆盖对汇流的影响, 尤其是植被对降雨再分配而产生的减少、阻滞地表径流的水文效应。虽然RUSLE中的植被覆盖和经营管理因子(C)可反映地表覆盖对土壤侵蚀的影响, 但基于单元格评估土壤侵蚀时, 各因子的作用仅局限于所在单元格, 上坡土地利用/覆盖对汇流的作用无法由 C 因子体现。因此, 这类方法所获得结果仍与实际存在较大差别。

本文以地处黄土高原丘陵沟壑区的陕西省吴起县四面窑沟流域为研究区, 根据不同土地利用类型的产流系数确定考虑地表覆盖影响的上坡汇流面积, 以此对基于上坡汇流面积的 L 因子算法^[10]进行改进, 并针对研究区特点选定其他因子的算法, 最后基于GIS和RUSLE评估、分析流域土壤侵蚀强度和特征, 旨在为运用RUSLE在黄土高原地区进行土壤侵蚀评估提供技术依据, 为黄土高原生态脆弱地区的土壤侵蚀防治和水土资源利用提供有益

收稿日期: 2008-06-09 修订日期: 2009-07-03

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAD03A03); 国际泥沙研究中心生态建设综合效益评价课题

作者简介: 秦伟(1982—), 男, 陕西汉中, 博士, 主要研究方向: 水土保持及林业生态工程。北京 中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 100044。Email: qinwei_office@sina.com

*通信作者: 朱清科(1956—), 男, 宁夏人, 博士, 教授, 主要研究方向: 水土保持和林业生态工程。北京 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 100083。Email: xiangmb@bjfu.edu.cn

参考。

1 研究流域概况

四面窑沟流域位于陕西省吴起县铁边城镇 (107°45'47"~107°49'24"E, 36°54'08"~36°59'58"N), 北洛河上游南岸, 属北洛河水系, 河道全长 12.5 km, 大致由西南流向东北, 面积 32.68 km² (见图 1)。流域内海拔 1 369~1 730 m, 沟壑纵横, 属黄土高原丘陵沟壑地形。土壤为地带性黑垆土剥蚀后广泛发育在黄土母质上的黄绵土, 质地为轻壤。气候属暖温带大陆性干旱季风气候, 多年平均降雨量 478.3 mm, 降水年际变化大, 7~9 月降水量占年均降雨量的 62.4%, 且多为暴雨。由于长期的耕作等人为活动, 天然植被已严重破坏, 现存植被主要为退耕还林等林业生态建设后恢复的次生植被, 以沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、柠条 (*Caragana microphylla*) 等灌木, 河北杨 (*Populus hopeiensis*)、小叶杨 (*Populus simonii*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、山杏 (*Prunus sibirica*)、杜梨 (*Pyrus betulaefolia*) 等落叶阔叶乔木以及紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 等人工牧草为主。

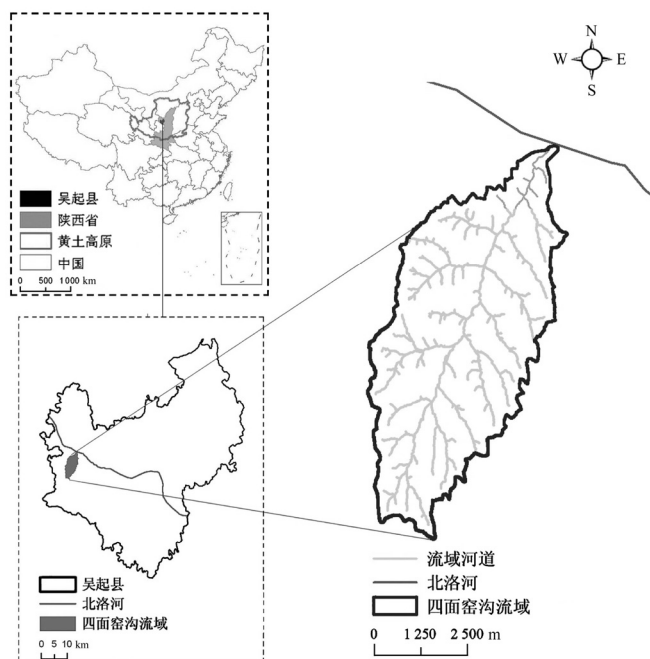


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

2 研究方法

选用修正通用土壤流失方程 (RUSLE), 并根据研究区特点和数据获取条件确定各因子算法, 评估流域土壤侵蚀

$$A = K \cdot R \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A ——年平均土壤流失量, t/(hm²·a); R ——降雨侵蚀因子, MJ·mm/(hm²·h·a); K ——土壤可蚀性因子, t·h/(MJ·mm); L ——坡长因子; S ——坡度因子; C ——覆盖与管理因子; P ——水土保持措施因子。

2.1 土壤可蚀性因子 K 估算

土壤可蚀性即土壤遭受侵蚀的敏感程度, 是土壤抵

抗由降雨、径流产生的侵蚀能力的综合体现。RUSLE 中, 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。采用 RUSLE 推荐的在缺少资料时采用土壤颗粒平均几何直径计算 K 因子的方法^[12]:

$$K = 7.594(0.0034 + 0.0405 \exp\{-\frac{1}{2}[(\log D_g + 1.659)/0.7101]^2\}) \quad (2)$$

$$D_g = \exp(0.01 \sum f_i \ln m_i) \quad (3)$$

式中: D_g ——土壤颗粒平均几何直径, mm; m_k ——第 k 级粒级下组分限值的平均值, mm; f_k ——第 k 级粒级组分的质量百分比, %。

流域土壤类型为黄绵土、属坡黄绵土亚类。根据土壤粒径大小及其质量分数^[13] (见表 1), 由公式 (2)、

(3) 算得 K 因子值为 0.047 t·h/(MJ·mm)。

表 1 四面窑沟流域土壤粒径大小及质量分数

Table 1 Size and mass fraction of soil particle in Simianyaogou watershed

粒径等级/mm	>0~<0.002	0.002~<0.01	0.01~<0.02	0.02~2
质量分数/%	21.37	26.12	30.95	21.56

2.2 降雨侵蚀因子 R 估算

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。经典算法用降雨动能和最大 30 min 雨强的乘积度量降雨侵蚀力, 须以次降雨资料为基础。在许多国家和地区, 长时间序列的降雨过程资料难以获得, 且处理和计算繁琐, 限制了应用。选用基于日降雨资料的年降雨侵蚀力算法^[14]

$$M_x = \alpha \sum_{y=1}^k (D_y)^\beta \quad (4)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.144P_{d12}^{-1} + 24.455P_{y12}^{-1} \quad (5)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{7.1891} \quad (6)$$

式中: M_x ——第 x 年的降雨侵蚀力, MJ·mm/(hm²·h·a); k ——1 a 内的天数, d; D_y ——年内第 y 日侵蚀性降雨量 (mm, 按黄土高原侵蚀性降雨标准^[15], 要求大于 12 mm, 否则按 0 计); P_{d12} ——日雨量 ≥ 12 mm 的日均降雨量, mm; P_{y12} ——日雨量 ≥ 12 mm 的年降雨量, mm; α 、 β ——模型参数。

流域内降雨空间异质性不明显, 统一采用吴起县气象站降雨数据计算。由 1971—2004 年日降雨资料获得 34 a 的降雨侵蚀力 (见图 2), 平均降雨侵蚀力为 1 345.49 MJ·mm/(hm²·h·a)。

2.3 坡度因子 S 估算

坡度因子表示其他因子相同时, 一定坡度的坡面上, 土壤流失量与标准径流小区典型坡面土壤流失量的比值, 是侵蚀加速因子, 与坡长因子一起反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。采用 Nearing^[16]提出的坡度因子的连续函数回归方程

$$S = -1.5 + 17/(1 + e^{2.3 - 6.1 \sin \theta}) \quad (7)$$

式中 θ ——坡度, (°)。

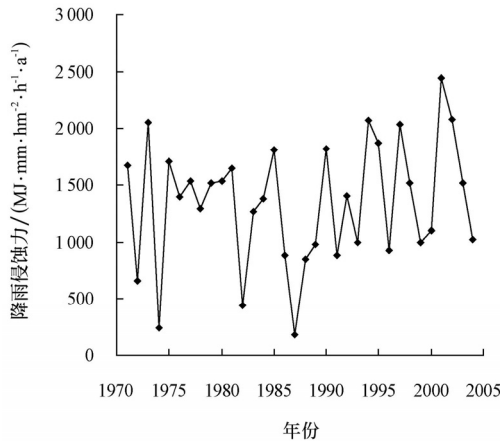


图 2 四面窑沟流域 1971—2004 年降雨侵蚀力

Fig.2 Rainfall erosivity (R) in Simianyaogou watershed from 1971 to 2004

该公式完全适用于坡度小于 25° 时 S 因子的计算,同时也适用于陡坡的 S 因子计算。流域 91% 的区域坡度大于 10° , 因此采用此算法。在 ArcGIS 中,基于 DEM 提取坡度,并利用栅格计算获得 S 因子图层。

2.4 坡长因子 L 估算

坡长因子表示其他条件相同时,一定坡长的坡面上,土壤流失量与标准径流小区典型坡面土壤流失量的比值。在 GIS 中,单元格实际是一个坡段,而二维空间中坡长应由汇流面积代替,因此选取 Desmet 等^[10]提出的以基于上坡单宽汇流面积的不规则坡面的坡段 L 因子算法。同时,坡面汇流是地形、降雨强度、降雨历时、土壤入渗及土地利用/覆盖等因素综合作用的结果。基于 DEM 提取的汇流方向仅能反映地形对汇流的影响,单纯按流向得到的汇流面积只是理论上的潜在汇流面积。实际上,地表覆盖对产流的影响,尤其是植被对降雨的再分配而产生的减少、阻滞地表径流的水文效应更是坡面汇流的重要因素。因此,首先根据黄土区有关研究成果^[17-22],确定流域不同土地利用类型的多年平均产流系数。鉴于 RUSLE 是以休闲耕地为侵蚀基准建立的模型,各因子的计算标准都应应以休闲耕地为基础。因此,以裸地的产流系数为换算标准,将不同土地利用类型的产流系数与裸地的产流系数比值作为对应单元格的汇流面积贡献率,即实际汇流面积与单元格面积的比例(见表 2)。最后,将每个单元格的实际汇流面积,按流向累加,得到单元格上坡实际汇流面积,以此计算 L 因子

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j} + t_n \cdot D^2)^{m+1} - A_{i,j}^{m+1}}{D^{m+2} x_{i,j}^{m+1} (22.13)^m} \quad (8)$$

$$x_{i,j} = \cos \alpha_{i,j} + \sin \alpha_{i,j} \quad (9)$$

式中: $A_{i,j}$ ——第 i 行、第 j 列单元格考虑地表覆盖的上坡实际汇流面积, m^2 ; D ——单元格边长, m ; t_n ——不同土地利用类型的汇流面积贡献率; $x_{i,j}$ ——第 i 行、第 j 列单元格的等高线长度系数; $\alpha_{i,j}$ ——第 i 行、第 j 列单元格的坡向; 22.13——标准小区的坡长, m ; m ——坡长指数(当 $\theta \leq 0.5^\circ$, $m=0.2$; 当 $0.5^\circ < \theta \leq 1.5^\circ$, $m=0.3$; 当 1.5°

$< \theta \leq 2.5^\circ$, $m=0.4$; 当 $\theta > 2.5^\circ$, $m=0.5$)。

表 2 不同土地利用类型产流系数和覆盖与管理因子值

Table 2 Runoff coefficient and cover and management factor of different land use types

土地利用类型		产流系数	汇流面积贡献率	覆盖与管理因子 C	备 注
	农地	0.22	0.33	0.560	等高耕作
	有林地	0.11	0.16	0.004	油松, 小叶杨
	灌木林地	0.06	0.09	0.083	沙棘林
	疏林地	0.07	0.11	0.144	山杏, 油松
天然 荒地	低覆盖草地	0.26	0.39	0.440	覆盖度 $\leq 30\%$
	中覆盖草地	0.23	0.34	0.270	$30\% \leq \text{覆盖度} \leq 60\%$
	高覆盖草地	0.14	0.21	0.170	覆盖度 $\geq 60\%$
	建设用地	0.67	1.00	1.000	裸地

计算中应注意确定坡长的截止位置。RUSLE 中坡长截止位置定义为坡度降低而出现沉积或坡面漫流汇集形成水道地方。为确保 L 因子的准确性,先对 DEM 进行填洼处理,去除 DEM 中存在的与真实地形不符的破碎洼地。基于填洼的 DEM 提取 L 因子时,在坡面不会出现漫流沉积区,仅需考虑汇流形成的水道,并以此作为计算终点。鉴于此,首先基于填洼的 DEM 提取沟谷,并将按不同汇流阈值提取的沟谷与 2.5 m 分辨率 SPOT 遥感影像叠加对比,选取能真实反映水道的沟谷线;其次,根据调查确定流域水道的平均宽度为 6 m,对沟谷线做缓冲区(buffer)处理,形成宽度 6 m、长度和分布同实际一致的水道,以此作为 L 因子计算终点;最后,根据流向、汇流面积贡献率和水道,通过 C 语言编程获得 L 因子图层(见图 3)。



图 3 四面窑沟流域坡长因子分布

Fig.3 Distribution of slope length factor in Simianyaogou watershed

2.5 覆盖与管理因子 C 估算

RUSLE 中,植被覆盖和经营管理因子定义为有特定植被覆盖或田间管理土地上的土壤流失量,与其他条件相同时清耕休闲地上的土壤流失量之比,反映耕作和管

理措施对土壤侵蚀率的影响。 C 因子由植被类型、覆盖度、高度和叶面积指数等因素决定, 不同类型植被在不同生长时期具有不同的 C 值大小, 介于 0~1。据调查, 流域农田为丘陵旱地, 多种植谷子 (*Setaria italica*)、玉米 (*Zea mays*)、大豆 (*Glycine max*)、马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 等作物, 种植面积比例大致为 1:2:1:6。研究^[23]表明, 黄土高原谷子、玉米、大豆、马铃薯的 C 因子分别为 0.53、0.28、0.51、0.47, 按作物种植面积比例进行加权平均得到丘陵旱地的平均 C 因子值为 0.44。同时, 流域林地主要为退耕还林工程所营造, 乔木林多为小叶杨、刺槐、山杏等与沙棘混交, 灌木林主要为沙棘纯林, 故将有林地、灌木林地、疏林地的 C 因子确定为 0.004、0.083、0.144^[24]。草地包括人工草地和荒草地两类。天然荒草地主要生长蒿类、菊科、豆科和禾本科的一年或多年生草本植物, 平均覆盖度约为 60%, 根据江忠善等^[25]研究的草地覆盖度与 C 因子的关系曲线估算不同盖度天然荒草地的 C 因子。油井、道路等建设用地为裸露黄土, C 因子为 1。基于上述获得流域不同土地利用类型 C 因子 (见表 2)。同时, 结合野外调查和退耕还林造林小班等资料, 在 ERDAS 遥感软件中, 采用监督分类对流域 2004 年 9 月 22 日的 SPOT 遥感数据进行分类处理, 获得土地利用图 (见图 4), 分别赋予对应的 C 因子值, 获得 C 因子图层。

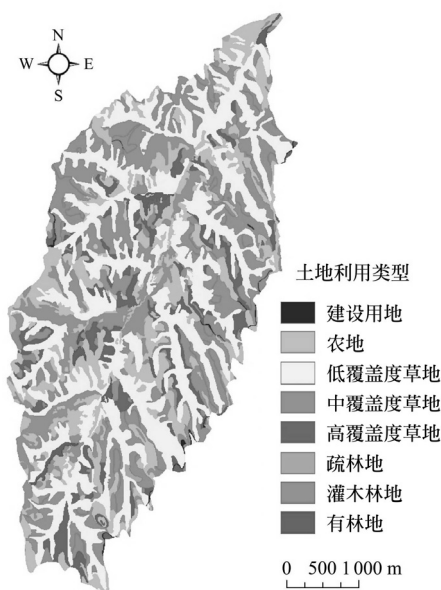


图 4 四面窑沟流域土地利用类型

Fig.4 Land use types in Simianyaogou watershed

2.6 水土保持措施因子 P 估算

RUSLE 中, 水土保持措施因子定义为采用特定措施土地上的土壤流失量与顺坡种植的土壤流失量的比值, 介于 0~1。水土保持措施通过采取一定的耕作方式或改变小地形、拦蓄地表径流、增加降雨入渗, 以充分利用光热和水土资源, 改善农业生产条件, 达到保水保土保肥、减少土壤侵蚀和提高农业生产的目的, 主要包括耕作措施和工程措施两大类。据调查, 流域内的农地主要为退耕还林后保留的基本农田, 大多已完成梯田改造;

林地大部分是退耕还林工程造林, 一般都进行了鱼鳞坑整地。研究^[26-28]表明, 水平梯田和鱼鳞坑整地平均分别减少坡面侵蚀 91.6%和 81.3%, 因此将水平梯田和鱼鳞坑整地的 P 因子分别确定为 0.084 和 0.187。未采取水土保持措施的土地利用类型 P 因子值为 1。对不同土地利用类型分别赋予对应的 P 因子值, 获得 P 因子图层。

3 结果与分析

土壤侵蚀是多因素综合作用的结果, 分析土壤侵蚀与不同因素间的关系对有效防治土壤侵蚀, 科学开展水土保持及评价其实施成效具有重要指导意义。

3.1 流域土壤侵蚀强度

在 ArcGIS 中, 将各因子图层叠加相乘, 并根据国家标准^[29]划分等级, 获得流域土壤侵蚀强度空间分布图 (如图 5 所示)。结果显示, 该流域多年平均侵蚀强度为 4 399.79 t/(km²·a), 属中度侵蚀。这与吴起县的实际调查结果较为吻合^[30], 说明基于 GIS 和 RUSLE 模型评估黄土区小流域土壤侵蚀的方法有效、可行。从不同侵蚀强度的分布 (见表 3) 来看, 占流域面积 57.28%的范围内发生轻度以下的侵蚀, 说明流域的水土流失在总体上得到了较好的控制, 侵蚀强度较低。但仍有占流域面积 32.26%的范围属于强烈以上的侵蚀等级, 表明局部水土流失严重, 有待加强治理。

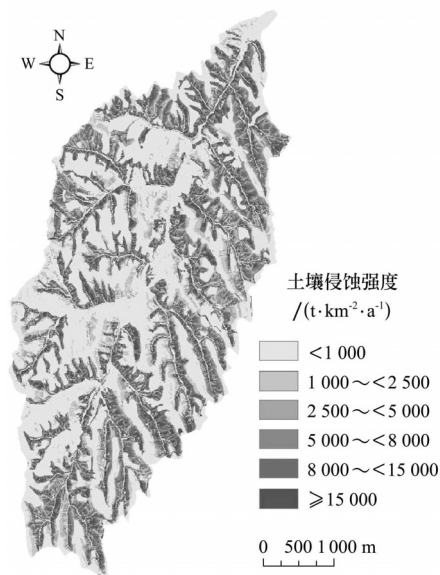


图 5 四面窑沟流域土壤侵蚀强度分布

Fig.5 Distribution of soil erosion intensity in Simianyaogou watershed

表 3 四面窑沟流域土壤侵蚀强度分级及响应面积

Table 3 Soil erosion intensity grades and areas in Simianyaogou watershed

侵蚀强度/(t·km ² ·a ⁻¹)	面积/km ²	比例/%
微度 (<1000)	15.41	47.15
轻度 (1 000~<2 500)	3.31	10.13
中度 (2 500~<5 000)	3.42	10.46
强烈 (5 000~<8 000)	3.31	10.13
极强烈 (8 000~<15 000)	4.81	14.72
剧烈 (≥15 000)	2.42	7.41

3.2 不同坡度的土壤侵蚀

将侵蚀强度图与坡度等级图叠加分析，得到不同坡度等级的侵蚀强度和侵蚀量（表 4）。结果表明，随坡度增加，侵蚀强度和侵蚀量均显著增加。其中， $0\sim5^\circ$ 、 $>5^\circ\sim8^\circ$ 、 $>8^\circ\sim15^\circ$ 和 $>15^\circ\sim25^\circ$ 4 个坡度带的平均侵蚀强度均小于流域平均侵蚀强度。这是由于 25° 以下属缓坡区域，且经过退耕还林工程后主要为人工林地和保留的基本农田，植被在缓坡易于生长，林草覆盖度较高，保留的基本农田大多进行了梯田改造，种植作物通常采用等高耕作。因此，该缓坡区域侵蚀强度较低。 $>25^\circ\sim35^\circ$ 及 $>35^\circ$ 以上坡度带的平均侵蚀强度均高于流域平均侵蚀强度，侵蚀量占流域总侵蚀量的 80.59%。这是由于坡度越陡，降雨产生的径流流速越大，侵蚀动力越强，使陡坡区域具有产生强度侵蚀的地形条件。同时，植被在陡坡生长困难，林草地的覆盖度相对较低。因此，陡坡区域土壤侵蚀强度较大。值得注意的是， 25° 以上的陡坡区域占流域总面积的 59.06%，平均侵蚀强度达 $6\ 004.22\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以上，然而流域土壤侵蚀强度的总体分析则显示，占流域总面积 67.74%的区域内仅存在强度小于 $5\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的中度以下的侵蚀。这说明，并非所有 25° 以上的陡坡地段都存在严重的土壤侵蚀，大部分陡坡地段经过退耕还林工程的治理后，水土流失已得到有效治理，但少数陡坡地段的土壤侵蚀却极其严重，因此造成 25° 以上陡坡区域的平均土壤侵蚀强度依然较高。不同坡度等级的土壤侵蚀强度分析显示，流域内 25° 以上的坡度带，尤其是少数陡坡地段仍存在剧烈侵蚀，应作为水土流失治理的重点区域。

表 4 不同坡度的土壤侵蚀
Table 4 Soil erosion of different slope gradients

坡度 / $^\circ$	面积 / km^2	占流域 面积比 /%	平均土壤 侵蚀强度 / $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	侵蚀量 / $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	占流域 侵蚀量比 /%
$0\sim5$	1.12	3.42	82.77	92.71	0.06
$>5\sim8$	0.84	2.57	397.71	334.08	0.23
$>8\sim15$	3.38	10.34	1 185.86	4 008.21	2.79
$>15\sim25$	8.04	24.61	2 919.71	23 474.47	16.33
$>25\sim35$	10.66	32.62	5 001.98	53 321.11	37.08
>35	8.64	26.44	7 240.79	62 560.43	43.51

3.3 不同坡向的土壤侵蚀

将侵蚀强度图与坡向图叠加分析，得到不同坡向的侵蚀强度和侵蚀量（见表 5）。结果显示，不同坡向的侵蚀大小排序为正阳坡 $>$ 半阳坡 $>$ 半阴坡 $>$ 正阴坡。其中，正阳坡和半阳坡的侵蚀强度明显高于流域平均侵蚀强度，属强烈侵蚀。而正阴坡和半阴坡的侵蚀强度则明显低于流域平均侵蚀强度，属中度侵蚀。从侵蚀量来看，正阳坡与半阳坡的侵蚀量占流域总侵蚀量的 56.50%，而其面积仅占流域总面积 45.07%。这说明流域内的土壤侵蚀主要发生在正阳坡和半阳坡，且强度较高。在半干旱地区，水分是植被生长的主要限制条件，阳坡较阴坡光照时数长，土壤含水较少，植被生长受到限制，地表覆盖稀少，更易发生水土流失。不同坡向的侵蚀强度分析

显示，阳坡不仅是林业生态建设的困难立地也是水土流失防治的重点区域。

表 5 不同坡向的土壤侵蚀
Table 5 Soil erosion of different slope aspects

坡向	面积 / km^2	占流域 面积比 /%	平均土壤 侵蚀强度 / $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	侵蚀量 / $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	占流域 侵蚀量比 /%
正阳坡	6.16	18.85	5 926.54	36 507.49	25.39
半阳坡	8.57	26.22	5 219.31	44 729.49	31.11
正阴坡	8.82	26.99	3 250.91	28 673.03	19.94
半阴坡	9.13	27.94	3 710.95	33 880.97	23.56

3.4 不同土地覆盖的土壤侵蚀

将侵蚀强度图与土地利用图叠加分析，得到不同土地利用类型的侵蚀强度和侵蚀量（见表 6）。流域主要土地利用类型为草地和林地，面积分别为 $18.65\ \text{km}^2$ 和 $7.55\ \text{km}^2$ ，占流域总面积的 57.07%和 23.11%，流域总植被覆盖率达 80.18%，说明退耕还林工程使该区植被得到显著改善，这也是流域平均侵蚀强度相对较低的主要原因。其余土地利用类型为农地和建设用地，分别占流域总面积的 19.49%和 0.33%。各种土地利用类型中，林地主要为实施退耕还林工程后的人工林地，多为沙棘灌木林，郁闭度较高且造林时一般都进行了鱼鳞坑整地，因此林地的平均侵蚀模数较低，仅为 $37.31\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ，属微度侵蚀；草地包括实施退耕还林工程后种植的人工草地以及封山育林后形成的荒草地，面积较大，但大部分为中、低覆盖度，因此草地的侵蚀强度依然保持较高等级，达 $7\ 429.74\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ，且侵蚀量占流域总侵蚀量的 96.37%，成为流域的主要侵蚀区域。农地为开展退耕还林工程后保留的基本农田，主要集中在缓坡地上，且大多进行了梯田改造，种植作物采用等高耕作，因此侵蚀并不严重，为 $547.57\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ，属微度侵蚀。建设用地主要为近年来为石油开采过程中修建的运输道路和钻采平台。建设用地的地表植被遭到严重破坏，形成了裸露黄土，水土流失十分严重，侵蚀模数高达 $13\ 242.19\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ，属极强烈侵蚀。因此，面积仅占流域总面积的 0.11%，但侵蚀量却占流域总侵蚀量的 1.01%。不同土地覆盖的土壤侵蚀强度分析显示，草地和建设用地的侵蚀强度较高，是侵蚀的主要发生区，应作为今后水土流失防治的重点区域。

表 6 不同土地利用类型土壤侵蚀
Table 6 Soil erosion of different land use types

土地利用 类型	面积 / km^2	占流域 面积比 /%	平均土壤 侵蚀强度 / $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	侵蚀量 / $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	占流域 侵蚀量比 /%
林地	7.55	23.11	37.31	281.69	0.19
草地	18.65	57.07	7 429.74	138 564.65	96.37
农地	6.37	19.49	547.57	3 488.02	2.43
建设用地	0.11	0.33	13 242.19	145.64	1.01

4 结 论

1) 根据不同土地利用类型的产流系数确定上坡实际汇流面积，以此计算坡长因子，提出了考虑土地利用/覆

盖对汇流影响的坡长因子算法。基于 GIS 和 RUSLE, 采用新坡长因子算法评估获得四面窑沟流域的多年平均侵蚀强度为 $4\,399.79\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 属中度侵蚀, 结果与实际调查较为吻合, 说明因子算法改进有效、可行。

2) 流域侵蚀强度的空间分布受地形影响显著。随坡度增加, 侵蚀强度和侵蚀量显著增加, 80.59%的侵蚀量来源于占流域总面积 59.06%的 25° 以上坡度带。不同坡向的侵蚀强度则表现为正阳坡>半阳坡>半阴坡>正阴坡, 其中, 占流域总面积 45.07%的阳坡产生 56.50%的侵蚀量。因此, 阳向陡坡是该流域今后水土流失防治的重点区域。

3) 不同土地利用类型中, 林地侵蚀强度最低, 而建设用地的侵蚀强度最高。草地侵蚀强度虽低于建设用地, 但由于占流域总面积的 57.07%, 且多为中、低覆盖度, 因此产生 96.37%的侵蚀量, 成为目前流域内主要侵蚀产沙源, 应作为今后开展水土保持的首要对象。

[参 考 文 献]

- [1] Hoyos N. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes[J]. Catena, 2005, 63(1): 85—108.
- [2] Onori F, Bonis P D, Grauso S. Soil erosion prediction at the basin scale using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a catchment of Sicily(southern Italy)[J]. Environmental Geology, 2006, 50(8): 1129—1140.
- [3] Fu Guobin, Chen Shulin, McCool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 85(1/2): 38—49.
- [4] Vente J, Poesen J, Verstraeten G, et al. Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain[J]. Global and Planetary Change, 2008, 60(3/4): 393—415.
- [5] 缪驰远, 何丙辉, 陈晓燕. 水蚀模型 USLE 与 WEPP 在紫色土水蚀预测中的应用对比研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 13—16.
Miao Chiyuan, He Binghui, Chen Xiaoyan. Application and comparison of the erosion model USLE and WEPP in predicting erosion of purple soil[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周为峰, 吴炳方. 基于遥感和 GIS 的密云水库上游土壤侵蚀定量估算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 46—50.
Zhou Weifeng, Wu Bingfang. Soil erosion estimation of the upriver areas of Miyun Reservoir located on the Chaobai River using remote sensing and GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [7] 喻锋, 李晓兵, 陈云浩, 等. 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1947—1956.
Yu Feng, Li Xiaobing, Chen Yunhao, et al. Land use change and soil erosion evaluation in Huangfuchuan Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1947—1956. (in Chinese with English abstract)
- [8] 许月卿, 蔡运龙. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀量计算及其背景空间分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 50—54.
Xu Yueqing, Cai Yunlong. Estimation of soil erosion and its spatial analysis in Maotiaohe watershed, Guizhou Province[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [9] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1997.
- [10] Desmet P J, Govers G. A GIS procedure for the automated calculation of the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51: 427—433.
- [11] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J]. Trans of the ASAE, 1974, 17(2): 305—309.
- [12] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 345—350.
Liu Baoyuan, Zhang Keli, Jiao Juying. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(4): 345—350. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵民涵. 延安土壤[M]. 西安: 西安地图出版社, 1989.
- [14] 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 Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. Resources Science, 2003, 25(1): 35—41. (in Chinese with English abstract)
- [15] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6—11.
Xie Yun, Liu Baoyuan, Zhang Wenbo. Study on standard of erosive rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 6—11. (in Chinese with English abstract)
- [16] Nearing M A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(3): 917—919.
- [17] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
Sun Lida, Zhu Jinzhao. Evaluation and Study on Multiple Benefits of Soil and Water Conservation Forest[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [18] 吴钦孝, 赵鸿雁, 汪有科. 黄土高原油松林地产生沙及其过程研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 151—157.
Wu Qinxiao, Zhao Hongyan, Wang Youke. Flow production and sediment production and their processes in Chinese pine woodlands in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(2): 151—157. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王辉, 王全九, 邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 10—18.
Wang Hui, Wang Quanjie, Shao Mingan. Effect of soil bulk density on soil nutrient in runoff from loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 10—18. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴淑芳, 吴普特, 冯浩, 等. 标准坡面人工草地减流减沙效应及其坡面流体力学机理研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 99—104.
Wu Shufang, Wu Pute, Feng Hao, et al. Effects of forage grass on the reduction of runoff and sediment and the hydrodynamic characteristic mechanism of slope runoff in the standard slope plot[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(3): 99—104. (in Chinese with English abstract)

- [21] 潘成忠, 上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制: 以人工油松林和次生山杨林为例[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1597—1602.
Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Generation mechanism of woodland runoff and sediment on Loess Plateau under hypo-rainfall: A case study of artificial *P. tabulaeformis* and secondary natural *P. dadidiana* stands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1597—1602. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张建. CREAMS 模型在计算黄土坡地径流量及侵蚀量中的应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1995, 1(11): 54—57.
Zhang Jian. Utilization of CREAMS model for estimating runoff and sediment from a plot on loess slope[J]. Journal of Soil Erosion and Water Conservation, 1995, 1(11): 54—57. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 Yan, Liu Baoyuan, Shi Peijun, et al. Crop cover factor estimating for soil loss prediction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7): 1050—1056. (in Chinese with English abstract)
- [24] Zhang Yan, Liu Baoyuan, Zhang Qingchun, et al. Effect of different vegetation types on soil erosion by water[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(10): 1204—1209.
- [25] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1—9.
Jiang Zhongshan, Wang Zhiqiang, Liu zhi. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region[J]. Journal of Soil Erosion and Water Conservation, 1996, 2(1): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34—37.
Wu Faqi, Zhang Yubin, Wang Jian. Study on the benefits of level terrace on soil and water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1): 34—37. (in Chinese with English abstract)
- [27] 石生新. 水土保持措施强化降水入渗试验研究[D]. 杨凌: 中国科学院、水利部水土保持研究所, 1992.
Shi Shengxin. Study on Soil and Water Conservation Strengthening Rainfall Infiltration[D]. Yangling: Nothwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Resources, 1992. (in Chinese with English abstract)
- [28] 水建国, 孔繁根, 郑俊臣. 红壤坡地不同耕作影响水土流失的试验[J]. 水土保持学报, 1989, 3(1): 84—90.
Shui Jianguo, Kong Fangen, Zheng Junchen. Effects of different uses of red soil slopes on soil and water loss[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 3(1): 84—90. (in Chinese with English abstract)
- [29] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL190-2007)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of China Standards for classification and gradation of soil erosion (SL190-2007)[S]. Beijing: China Hydroelectricity Press, 2008. (in Chinese)
- [30] 杨光, 丁国栋, 赵廷宁, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林的水土保持效益研究: 以陕西省吴旗县为例[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 88—90, 99.
Yang Guang, Ding, Guodong, Zhao Tingning, et al. Study on benefits of soil and water conservation about returning cropland to forest in loessy hilly region of north Shaanxi: take Wuqi County in Shaanxi province as an example[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(2): 88—90, 99. (in Chinese with English abstract)

Soil erosion assessment of small watershed in Loess Plateau based on GIS and RUSLE

Qin Wei^{1,2}, Zhu Qingke^{2*}, Zhang Yan²

(1. Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The algorithm of slope length factor based on up-slop runoff area was mended and new algorithm of slope length factor considering the effect of land use/cover for up-slop runoff was produced. By using geographic information system (GIS) and the revised universal soil loss equation (RUSLE), the soil erosion intensity and its relationship with environmental factors in the Simianyaogou watershed, located at Loess Plateau were studied. The results showed that the average annual soil erosion intensity in the watershed was 4 399.79 t/(km²·a), which was in the category of moderate degree erosion. Both soil erosion intensity and amount increased significantly with the increasing of the slop gradient. 80.59% of the total soil loss occurred in the region with a gradient more than 25 degree, of which the area was 59.06% of the total watershed area. Soil erosion intensity varied with slope aspects in a trend of sunny slope > half-sunny slope > half-shady slope > shady slope. The area of sunny slope occupied 45.07% of the total watershed area, but the erosion amount of which occupied 56.50% of the total erosion amount. In different land use types, the grassland occupied 57.07% of the total watershed area, but the erosion amount of which occupied 96.37% of the total erosion amount. So, grassland had became the major erosion and sediment source in the watershed. The study provides technical basis for applying RUSLE to assess soil erosion on Loess Plateau and offers useful references for water and soil resource utilization in the region.

Key words: soils, erosion, geographic information system (GIS), revised universal soil loss equation (RUSLE), loess plateau