基于中国土壤流失方程模型的区域土壤侵蚀定量评价

王 略，屈 创，赵国栋

（黄河水利委员会 黄河上中游管理局，陕西 西安 710021）

摘 要：[目的] 用中国土壤流失方程(CSLE 模型)对区域土壤侵蚀定量计算的方法进行初步探索，以期提高土壤侵蚀监测精度，有效、客观地反映水土流失治理效果。[方法] 采用 CSLE 模型、遥感解译与统计分析相结合的方法，对准格尔旗境内的皇甫川流域进行土壤侵蚀定量评价。[结果] 研究区 2015 年侵蚀总量 1.38×10^7 t，年均侵蚀模数 4 920.23 t/(km^2 · a)。土壤侵蚀强度以中度为主，轻度和强烈次之。[结论] 用 CSLE 模型进行土壤侵蚀定量分析，综合考虑了降雨、土壤、植被、地形、措施等多项因子，可用于区域土壤侵蚀定量研究。

关键词：中国土壤流失方程(CSLE 模型)；土壤侵蚀；遥感解译；准格尔旗

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)01-0122-04 **中图分类号**：S157.1

文献参数：王略，屈创，赵国栋. 基于中国土壤流失方程模型的区域土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持通报，2018，38(1)：122-125. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.021. Wang Lue, Qu Chuang, Zhao Guodong. Quantitative assessment of regional soil erosion based on Chinese soil loss equation model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 122-125.

Quantitative Assessment of Regional Soil Erosion Based on Chinese Soil Loss Equation Model

WANG Lue, QU Chuang, ZHAO Guodong

(*Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Xi'an, Shaanxi* 710021, *China*)

Abstract: [Objective] Based on the Chinese soil loss equation (CSLE), this study aims to explore the method to quantitatively calculate soil erosion and improve the accuracy of soil erosion monitoring and reflect the effect of soil and water conservation effectively and objectively. [Methods] By using the CSLE model, the remote sensing interpretation and the statistical analysis, we quantitatively assessed the soil erosion in the overlapping area of the Zhungeer Banner and Huangfuchuan river basin. [Results] The total erosion in the study area was 13.778 3 million tons in 2015, and the annual erosion modulus was 4 920.23 t/(km^2 · a). The erosion was mainly moderate erosion, mild erosion and strong erosion are followed. [Conclusion] The soil erosion was quantitatively analyzed with CSLE model, and several factors such as rainfall, soil, vegetation, topography and measures were considered, which could be used for quantitative study of soil erosion.

Keywords: **Chinese soil loss equation (CSLE Model); soil erosion; remote sensing interpretation; Jungar Banner**

开展土壤侵蚀状况调查，对客观反应水土流失治理成效、评价治理效益、编制水土保持规划和国民经济发展规划有十分重要的意义。中国对于区域土壤侵蚀评价比较常用的方法是分析土地利用、植被覆盖、坡度这 3 个因子，依据水利部颁发的《土壤侵蚀分级分类标准》(SL190-2007)[1]，定性评价土壤侵蚀强度，该方法简单实用，可操作性强，但也存在一些问题，如不能直接反映气候、土壤的影响，不能全面反映水土保持措施的影响。

第四次遥感普查的实践表明，采用土壤侵蚀模型、地面抽样、野外调查、遥感解译、基础数据收集相结合的方法，通过土壤侵蚀模型定量评价[2-3]全国尺度的水土流失情况可行，但用此方法在流域尺度的应用研究还较少。

本文拟选择内蒙古自治区准格尔旗境内的皇甫川流域作为研究区，用 CSLE 模型对土壤侵蚀定量评价[4-5]的方法进行初步探索，以期提高土壤侵蚀监测精度，有效、客观地反映水土流失治理效果。

收稿日期：2017-08-31 **修回日期**：2017-11-12

资助项目：国家重点研发计划项目“黄河水沙变化机理与趋势预测”(2016YFC0402409)；全国水土流失动态监测与公告项目(1261520154801)

第一作者：王略(1983—)，女(汉族)，湖北省麻城市人，本科，高级工程师，主要从事水土保持监测工作。E-mail：85688457@qq.com。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

准格尔旗位于黄河河龙区间多沙粗沙重点治理区北端,鄂尔多斯高原东部,地处黄土高原边缘地带。境内沟壑纵横,地貌以丘陵沟壑为主,类型复杂。大部分土壤属于干旱草原型的轻黑垆土的延续部分,小部分属于自治区的栗钙土区。准格尔旗总面积约 7 692 km^2,水土流失面积占 92.5%。土壤流失高达 1.88×10^5 t/(km^2 · a),水土流失严重。皇甫川流域发源于准格尔旗的点畔沟,自西北流向东南,干流长 137 km,总面积 3 246 km^2,流域水土流失面积 3 139.74 km^2,占总面积的 96.7%,平均侵蚀模数 1.30×10^4 t/(km^2 · a),强度以上侵蚀面积占 76.7%。准格尔旗境内的流域为毛乌素沙漠向黄土高原的过渡地区,属黄土丘陵沟壑区。研究区域面积为 2 801.33 km^2,开展过黄河流域全国水土流失动态监测与公告项目和黄河中游多沙粗沙区皇甫川等重点支流等 2 个水土保持监测项目,具有良好的研究基础。

1.2　研究模型

本研究采用刘宝元等[6]提出的中国土壤流失方程 CSLE(Chinese soil loss equation)模型。该模型参考 USLE 的有关思想,根据中国水土保持的实际情况,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与结果的影响,同时考虑到中国地形地貌的特征,对地形因子的算法,尤其是陡坡地形因子进行改进,因此,CSLE 模型表达更适用于中国区域的土壤侵蚀计算。模型的表现形式为:

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

式中:A——土壤水蚀模数〔t/(hm^2 · a)〕;R——降雨侵蚀力因子〔MJ · mm/(hm^2 · h · a)〕;K——土壤可蚀性因子〔t · hm^2 · h/(hm^2 · MJ · mm)〕;L,S——坡长、坡度因子;B——生物措施因子;E——工程措施措施因子;T——耕作措施因子;L,S,B,E,T 因子均无量纲。

1.3　数据及数据来源

模型所采用的数据及数据来源如下:①研究区及周边 100 km 范围内,8 个气象站点,1980—2010 年(30 a)期间大于等于 12 mm 日降雨数据;②研究区高分辨率遥感影像 1 期。拍摄时间为 2015 年 7—8 月,以天绘 1 号为主,辅以高分 1 号和资源 3 号影像,分辨率为 2 m。投影为高斯—克吕格(Gauss-Kruger),CGCS 2000 国家大地坐标系,1985 国家高程基准;③研究区 2015 年 1∶1 万数字高程模型(DEM);④研究区土地利用专题数据。(②③④均来源于黄河流域全国水土流失动态监测与公告项目 2016 年监测数据);⑤园地及有林地的植被盖度季节变化曲线(根据第四次遥感普查准格尔旗野外调查单元数据整理);⑥研究区多期低分辨率遥感影像,下载 2011—2015 年(5 a)modis-NDVI 半月合成产品,生成 24 个半月 modis-NDVI 产品,250 m 分辨率。

1.4　模型各因子获取

1.4.1　降雨侵蚀力因子(R)　降雨侵蚀力因子指降雨导致土壤侵蚀发生的潜在能力,反映了雨滴对土壤颗粒的击溅分离以及降雨形成径流对土壤冲刷的综合作用。本次研究根据 R 值计算公式[7-9],采用研究区及周边 100 km 范围内 8 个气象站点 30 a(1980—2010 年)日降雨数据,计算出每个站点多年平均降雨侵蚀力,再用克里金插值方法获得研究区降雨侵蚀力因子,生成栅格分辨率为 10 m 的降雨侵蚀力 R 值图。

$$\overline{R}=\sum_{k=1}^{24}\overline{R}_{半月k} \tag{2}$$

式中:$\overline{R}$——多年平均年降雨侵蚀力〔MJ · mm/(hm^2 · h · a)〕;k——将一年划分为 24 个半月的数(k=1,2,…,24);$\overline{R}_{半月k}$——第 k 个半月的降雨侵蚀力〔MJ · mm/(hm^2 · h)〕。下同。

$$\overline{R}_{半月k}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=0}^{m}(\alpha\cdot P_{i,j,k}^{1.726\,5}) \tag{3}$$

式中:i——所用降雨资料年份序列的编号(i=1,2,…,n);j——第 i 年第 k 个半月内侵蚀性降雨日的编号(j=0,…,m);$P_{i,j,k}$——第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日降雨量(mm),如果某年某个半月内没有侵蚀性降雨,即 j=0,则令 $P_{i,j,k}$=0;α——参数,暖季 α=0.393 7,冷季 α=0.310 1。

1.4.2　土壤可蚀性因子(K)　土壤可蚀性因子反映土壤是否容易遭受雨滴溅蚀和径流冲刷的敏感程度指标,是土壤抵抗降雨径流侵蚀能力的综合体现。本次研究采用 Wischmeier 在 RUSLE 模型中修正的土壤可蚀性因子 K 的计算方法计算出 K 值,生成研究区土壤可蚀性 K 值图。

$$K=\{2.1\times10^{-4}(12-O)(N_1\times N_2)^{1.14}+3.25(2-S)+2.5(P-3)\}/100 \tag{4}$$

式中:O——土壤有机质含量;N_1——0.002～0.1 mm 粉砂与细砂粒的含量之和;N_2——0.1～2 mm 砂粒与 N_1 的含量之和;S——土壤结构系数;P——土壤渗透性等级。

1.4.3　地形因子(L,S)　坡长因子是指某一坡面土壤流失量与坡长为 22.13 m,其他条件一致的坡面产生土壤流失量的比率。坡度因子是指某一坡度土壤流失量与坡度为 5.13°,其他条件一致的坡面产生

土壤流失量的比率。本次研究坡度因子的计算采用刘宝元等[10]在黄土高原建立的坡度坡长因子计算公式(公式 5)。坡长因子(L)计算采用 W. H. 维希. 迈尔等[11]提出的计算公式(公式 6)计算。为:

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5^\circ)\\ 16.8\sin\theta-0.50 & (5^\circ\leqslant\theta<10^\circ)\\ 21.91\sin\theta-0.96 & (\theta\geqslant10^\circ)\end{cases} \quad (5)$$

$$L=(\lambda/22.1)^m \quad (6)$$

$$m=\begin{cases}0.2 & (\theta\leqslant1^\circ)\\ 0.3 & (1^\circ<\theta\leqslant3^\circ)\\ 0.4 & (3^\circ<\theta\leqslant5^\circ)\\ 0.5 & (\theta>5^\circ)\end{cases}$$

式中:S——坡度因子(无量纲);θ——坡度值(°);L——坡长因子(无量纲);λ——坡长(m);m——可变的坡长指数。

本次研究中,L 和 S 的获取方法为基于研究区的 1∶10 000 DEM,用北京师范大学开发的土壤侵蚀模型地形因子计算工具生成坡度坡长 L,S 栅格图。

1.4.4 *生物措施因子(B)* 生物措施因子是指有植被覆盖条件下的土地土壤流失量与同等条件下清耕休闲地的土壤流失流失量之比。它是模型中最敏感、易变化的因子。本次研究中,将 2015 年 1 期高分辨率影像与 24 个半月的 modis-NDVI 融合,生成 24 个半月的高分辨率盖度影像产品。B 因子的计算分 3 种类型:①根据土地利用分类栅格图,将耕地、居民点及工矿用地、交通运输用地、水域及水利设施用地或其他土地直接赋值得到 B 值(表 1);②表征植被覆盖只有盖度指标的园地、林地或草地,依据盖度计算得到半月 B_i,盖度来源于 24 个半月的高分辨率盖度影像产品;③表征植被覆盖同时有盖度和郁闭度指标的园地或林地,依据盖度和郁闭度计算得到半月 B_i;郁闭度来源于 24 个半月的高分辨率盖度影像产品,盖度来源于园地或林地的植被盖度季节变化曲线。针对园地、林地或草地,得到半月 B_i 后,结合降雨侵蚀力比例栅格图,根据式 6,得到年生物措施 B 值图。

$$B=\sum_{i=1}^{24}B_i\times R_i/\sum_{i=1}^{24}R_i \quad (7)$$

式中:B_i——第 i 个半月的生物措施因子值;R_i——第 i 个半月的降雨侵蚀力。

表 1 不同土地利用类型 *B* 因子赋值

土地利用		B 因子值	赋值说明
Ⅰ级类型	Ⅱ级类型		
耕 地	水 田	1	水保效益通过 T 因子反映
	水浇地	1	水保效益通过 T 因子反映
	旱 地	1	水保效益通过 T 因子反映
居民点及工矿用地	城镇居民点	0.010	相当于 80%的植被覆盖
	农村居民点	0.025	相当于 60%的植被覆盖
	独立工矿用地	1	相当于无植被覆盖
	公共用地	0.01	相当于 80%的植被覆盖
	特殊用地	0.10	—
交通运输用地	—	0.01	相当于 80%的植被覆盖
水域及水利设施用地	—	0	强制为 0,使侵蚀量等于 0
其他土地	—	0	裸地为 1,其他非调查重点,强制为 0

1.4.5 *工程措施措施因子(E)* 工程措施因子是指为采取某种工程措施土地土壤流失量与同等条件下无工程措施土地土壤流失量之比。本次研究根据高分辨率遥感影像土地利用的解译成果,对各地块进行赋值,梯田赋值 0.1,其他赋 1,生成水土保持措施工程措施 E 值图。

1.4.6 *耕作措施因子(T)* 耕作措施因子是指为采取某种耕作措施的土地土壤流失量与同等条件下平作土地土壤流失量之比。本次研究根据高分辨率遥感影像土地利用的解译成果,对各地块进行赋值,耕地赋 0.524,其他赋 1,生成水土保持措施耕作措施 T 值图。

2 结果与分析

将研究区各因子值的栅格图通过地图代数计算方法,得到研究区 2015 年土壤侵蚀图(图 1)。经统计,研究区总面积为 2 801.33 km^2,微度侵蚀面积 656.52 km^2,水土流失面积 2 144.81 km^2。依据土壤侵蚀分类分级标准对研究区进行土壤侵蚀强度分级,其中:轻度侵蚀年均侵蚀模数 1 989.25 t/(km^2 · a),面积 718.87 km^2,占总面积 25.66%,占水土流失面积 33.52%;中度侵蚀年均侵蚀模数 4 876.25 t/(km^2 · a),面积 767.14 km^2,占总面积 27.38%,占水土流失面积 35.77%;强烈侵蚀年均侵蚀模数 7 765.34 t/(km^2 · a),

面积 491.41 km^2,占总面积的 17.54%,占水土流失面积 22.91%;极强烈侵蚀年均侵蚀模数13 562.82 t/(km^2 · a),面积 46.58 km^2,占总面积的 1.66%,占水土流失面积 2.17%;剧烈侵蚀年均侵蚀模数 30 894.74 t/(km^2 · a),面积 120.80 km^2,占总面积的 4.31%,占水土流失面积 5.63%。研究区主要侵蚀类型为水力侵蚀,2015 年侵蚀总量达到 1.38×10^7 t,年均侵蚀模数为 4 920.23 t/(km^2 · a)。土壤侵蚀强度以中度为主,轻度和强烈次之(表 2)。

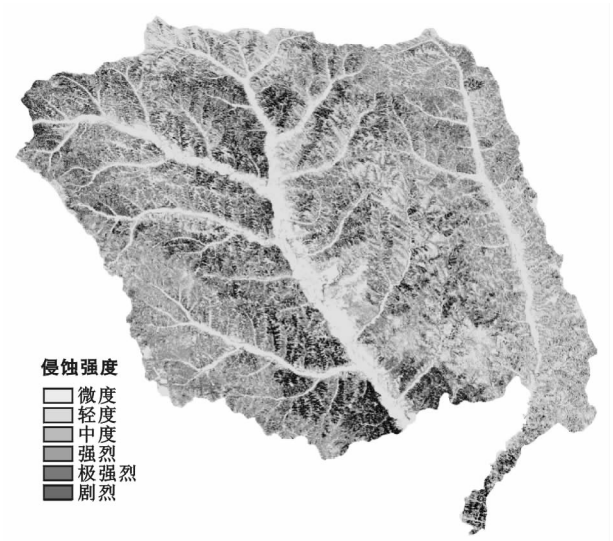


图 1　研究区 2015 年土壤侵蚀强度

表 2　研究区 2015 年土壤侵蚀强度分级

侵蚀强度分级	面积/km^2	占研究区面积比例/%	年均侵蚀模数/(t · km^{-2} · a^{-1})	年侵蚀量/(10^4 t · a^{-1})
微度	656.52	23.44	658.96	43.26
轻度	718.87	25.66	1 989.25	143.00
中度	767.14	27.38	4 876.25	374.08
强烈	491.41	17.54	7 765.34	381.60
极强烈	46.58	1.66	13 562.82	63.18
剧烈	120.80	4.31	30 894.74	373.20
总计	2801.33	100.00	4 920.23	1 378.32

在 2016 年开展的黄河流域全国水土流失动态监测与公告项目中,用三因子法对研究区 2015 年土壤侵蚀进行了定量评价(表 3)。

表 3　研究区 2015 年土壤侵蚀状况

侵蚀强度分级	面积/km^2	占研究区面积比例/%
微度	740.56	26.44
轻度	620.83	22.16
中度	655.09	23.38
强烈	443.79	15.84
极强烈	164.24	5.86
剧烈	176.82	6.31
总计	2 801	100

对比 CSLE 模型和三因子法对研究区土壤侵蚀定量评价结果,由于 CSLE 模型相较于三因子,引入了降雨因子、土壤可蚀性因子,同时考虑了水土保持工程措施、生物措施、耕作措施等因子,地形因子也从单一的坡度变化为坡长坡度因子,计算出的侵蚀强度等级面积有所不同。用 CSLE 模型计算的研究区轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀面积较三因子法有所增加,轻度侵蚀面积增加 98.05 km^2,占总面积 3.50%;中度侵蚀面积增加 112.05 km^2,占总面积 4.00%;强烈侵蚀面积增加 47.62 km^2,占总面积 1.70%。而微度侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀面积较三因子法有所减少,微度侵蚀面积减少 84.04 km^2,占总面积 3.00%;极强烈侵蚀面积减少 117.66 km^2,占总面积 4.20%;剧烈侵蚀面积减少 56.03 km^2,占总面积 2.00%。总的来说,用 CSLE 模型计算的研究区微度和极强烈、剧烈等两个极端的侵蚀强度等级面积减少,而其他侵蚀强度等级的面积增加。

3　讨论与结论

(1) 本文采用 CSLE 模型对 2015 年研究区土壤侵蚀进行定量分析,并与黄河流域全国水土流失动态监测与公告项目三因子法成果对比印证,得出的结论基本合理,说明 CSLE 模型可以用于区域土壤侵蚀定量研究。

(2) CSLE 模型进行土壤侵蚀定量分析,综合考虑了降雨、土壤、植被、地形、措施等多项因子,提高了区域土壤侵蚀定量计算的精度。

(3) CSLE 模型作为经验方程,在黄土高原使用还存在需要继续完善的地方:一是需将 K 值、林下盖度曲线等参数的本地化,二是模型中采用的是多年平均降雨,可进一步研究当年降雨和多年平均降雨的非线性的比值关系,减少降雨在丰、平、枯不同时期造成的误差等。

(4) CSLE 模型进行区域土壤侵蚀定量研究过程中,未能考虑风蚀的影响,评价结果与实际侵蚀情况必定存在一定的出入,此问题的解决仍需进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 中华人民共和国水利部.(SL190-2007)土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

[2] 张岩,刘宪春,李智广,等.利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J].农业工程学报,2012,28(10):165-171.

[3] 杨勤科,李锐,刘咏梅.区域土壤侵蚀普查方法的初步探讨[J].中国水土保持科学,2008,6(3):1-7.

(下转第 130 页)

面积、坡度、地表组成物质等几个主要因素，初步形成侵蚀沟稳定性评价指标体系。结合监测过程、结果讨论得出以下建议：

(1) 根据各流域侵蚀沟动态变化的监测结果来看，在同一小流域的支毛沟，因为其空间距离较小，各种影响侵蚀因素的情况基本类似，监测结果也很相似。所以一个小流域内只重点选择 1～2 条支毛沟开展监测工作即可。

(2) 侵蚀沟监测的重点应放在支毛沟尺度，重点监测支毛沟变化情况以及支毛沟的地形、断面、沟沿线等内容。

(3) 后续的侵蚀沟监测工作可增加一些治理度差的沟道进行，并对侵蚀沟至少进行 5～10 a 连续监测，才能得出更科学、准确的结论。

[参 考 文 献]

[1] 陈永宗，景可，蔡强国，等. 杏子河流域的侵蚀地貌[J]. 水土保持通报，1984，4(5)：321-327.

[2] 刘秉正，翟明柱，吴法放. 渭北高原沟谷怪蚀初探[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊，1990，12：25-33.

[3] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京：科学出版社，2004：32-36.

[4] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素(1)：类型与气候因素 [J]. 水土保持通报，1981，1(3)：1-9.

[5] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素(4)：植被因素 [J]. 水土保持通报，1982，2(3)：40-44.

[6] 姚志红，杨勤科，吴喆，等. 区域尺度降雨径流估算方法研究：算法设计[J]. 水土保持研究，2006，13(5)：306-308.

[7] 姚志红. 基于 GIS 的区域水土流失过程模型研究[J]. 水土保持研究，2010，19(6)：15-18.

[8] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素(3)：土壤因素 [J]. 水土保持通报，1982，2(1)：25-30.

[9] 谢红霞，李锐，杨勤科，等. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀影响[J]. 中国农业科学，2009，42(2)：569-576.

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

(上接第 125 页)

[4] 程琳，杨勤科，谢红霞，等. 基于 GIS 和 CLSE 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.

[5] 杨勤科，李锐，曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展，2006，21(9)：31-38.

[6] 刘宝元，毕小刚，符素华，等. 北京土壤流失方程[M]. 北京：科学出版社，2010：7-13.

[7] 章文波，谢云，刘宝元. 利用日降雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学，2002，22(6)：705-711.

[8] 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.

[9] 章文波，谢云，刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报，2003，21(1)：33-40.

[10] Liu Baoyuan, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.

[11] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Washington: United States Department of Agriculture, Agriculture handbook, 1978, 537.