

黑土区典型小流域土壤侵蚀空间格局模拟研究

张少良¹, 刘威¹, 张兴义², 刘爽², 李续峰², 李浩²

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要: 利用校正后的基于 GIS 的 USLE 模型预测了黑土区土壤侵蚀量的空间分布格局。研究结果表明, 研究区小流域年侵蚀量值范围在 0~60 t/(hm² a), 无侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀和强度侵蚀面积分别占研究区总面积的 28.7%, 56.2%, 18.6% 和 0.1%。研究区坡顶土壤侵蚀量较少 [0~5 t/(hm² a)], 坡肩和坡背侵蚀量较大 [3~15 t/(hm² a)]。基于 GIS 的 USLE 不能够很好地模拟黑土区坡麓和坡足区域土壤沉积和侵蚀沟的空间分布格局, 但可以较好地模拟坡顶、坡肩和坡背处的土壤流失状况。

关键词: 黑土; 侵蚀沉积; 侵蚀沟; 空间格局

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0224-04

中图分类号: S157.1

Spatial Pattern Prediction of Soil Erosion in Small Typical Watersheds in Black Earth Region

ZHANG Shao-liang^{1,2}, LIU Wei¹, ZHANG Xing-yi², LIU Shuang², LI Xu-feng², LI Hao²

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract: GIS-based USLE (Universal soil loss equation) was used to predict the spatial pattern of soil erosion in the black earth region of China. The primary results indicated that soil loss was 0~60 t/(hm² a) in the study area with the area of zero erosion, slight erosion, moderate erosion, intensity erosion, accounting for 28.7%, 56.2%, 18.6% and 0.1% respectively. The little soil loss occurred with 0~5 t/(hm² a) at the top of slope, big soil loss of 3~15 t/(hm² a) on the slope shoulder and back slope. GIS-based USLE can efficiently predicted soil loss distribution on top of the slope, slope shoulder and back slope other than the distribution of soil deposit and gullies at the foot of the slope.

Keywords: black earth; soil erosion and deposit; gully; spatial pattern

水土流失是当前世界上最主要的生态环境问题之一, 水土流失的治理、模拟和预测一直是水土流失治理研究中的重要内容^[1]。当前坡地土壤侵蚀模拟仍然多采用美国通用土壤流失方程 (universal soil loss equation, USLE) 或修正后的通用土壤流失方程 (modified universal soil loss equation, MUSLE), USLE 是 1954 年在美国科学暨教育委员会领导和普渡大学的协助下, 在美国农业部国家径流及土壤流失资料中心开始研究的^[2]。该模型是通过利用全美 21 个州 36 个地方, 超过 7 500 个标准试区和 500 个集水区年资料发展而来的, 至今该模型仍是世界各国应用最广泛的土壤流失计算方法^[2-6]。当前关于区域土壤侵蚀空间分布预测和模拟的研究, 多是基于 GIS

开展的, 主要有: (1) 以 GIS 为工具, 利用 GIS 提取模型所需因子, 然后按照模型要求利用 GIS 的图形运算和地图代数运算, 最后得到计算结果; (2) 将 GIS 与土壤侵蚀模型作为两个不同的系统, 考虑结合方法的问题; (3) 利用 GIS 开发新的模型或改善已有模型, 一些分布式模型的开发就属于该类应用^[7]。当前以第(1)种方法较为常见, 主要是将 USLE 中各因子分别基于遥感图像的栅格, 每个栅格的分辨率相同, 都是基于小区试验土壤侵蚀模拟模型, 即中式 USLE。

黑土区是我国重要的商品粮生产基地, 但由于近几百年的不合理地耕作和管理, 水土流失已经成为制约当地农业、经济和生态可持续发展的主要因素之一^[8]。因此, 选择在典型黑土区通过多年标准径流小

收稿日期: 2012-09-04

修回日期: 2012-11-20

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“黑土区小流域土地养分空间分异规律及其主要驱动机制研究”(41101262); 黑龙江省教育厅项目(12521010); 东北农业大学博士启动基金(2012RCB03)

作者简介: 张少良(1980—), 男(汉族), 黑龙江省五常市人, 博士, 讲师, 主要从事黑土农田景观生态过程研究。E-mail: hljzsl@yahoo.com.cn。

通信作者: 张兴义(1966—), 男(汉族), 黑龙江省密山市人, 博士, 研究员, 从事黑土农业生态研究。E-mail: xyzhang1966l@yahoo.com.cn。

区观测单次侵蚀量和年侵蚀量数据,以及当地的气象数据校正基于 GIS 的 USLE 模型,并利用校正后完全基于 GIS 的 USLE 模型模拟小流域土壤流失量空间分布格局,分析其结果存在的不足,可为区域水土流失治理、模拟和预测等提供理论和技术支撑。

1 研究区概况和研究方法

1.1 试验区概况

小流域位于黑龙江省海伦市前进乡光荣村(47°20.71′—47°21.49′N,126°49.55′—126°50.97′E),流域面积为 182.56 hm²。该区地形为漫川漫岗,属寒温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨,年均气温 1.5℃,极端最高温度为 37℃,极端

最低温度为-39.5℃,多年平均降水量 530 mm,平均蒸发量 2 300 mm,平均风速 1.8 m/s,年均有效积温 2 450℃,年均日照时数为 2 600~2 800 h,无霜期为 125 d,地下水水位埋深 10~20 m。土壤类型为典型中层黑土,主要种植作物为玉米、大豆,种植制度为玉米和大豆轮作区,一年一熟制。

1.2 流域径流观测场概况

流域内观测场于 2006 年秋建成,小区面积 100 m²(20 m×5 m),坡向面东,坡度 9%。实验设 6 个处理,3 次重复,随机区组排列,有传统耕作、免耕、少耕、横坡垄作、荒地和裸地,其中裸地常年保持 0 覆盖度,小区坡下设径流收集装置。研究区土壤理化性状详见表 1。

表 1 研究区土壤理化性状

土壤深度/ cm	有机质/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	田间持水量/%	饱和含水量/%	枯萎含水量/%
0—20	42.1	1.27	52.1	24.4	43.2	12.1
20—40	28.4	1.19	55.1	24.4	44.2	13.4
40—60	18.6	1.21	54.3	23.4	43.6	14.2

1.3 基于 GIS 的通用土壤流失方程(USLE)计算

(1) USLE 模型公式^[9-10]。

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

式中:A——土壤流失量(t);R——降雨侵蚀力因子;K——土壤侵蚀因子;L——坡长因子(m);S——坡度因子(%);C——土地覆盖和管理因子;P——保护措施因子。

(2) R 值的计算。采用降雨动能乘以降雨强度法^[10-11]。

$$R=E_{60} I_{30} \quad (2)$$

式中:R——次降雨侵蚀力(J/m²);E₆₀——次降雨 60 min 最大降雨产生的动能(J/m²);I₃₀——次降雨 30 min 最大降雨强度(cm/h)。

降雨动能的计算采用维斯奇迈尔的经验公式:

$$E=E_1 p \quad (3)$$

$$E_1=210.3+89 \lg I \quad (4)$$

式中:E——次降雨中某段降雨量产生的动能(J/m²);p——某时段降雨量(cm);E₁——某时段降雨单位面积上每厘米降雨产生的动能(J/m²);I——某时段降雨强度(cm/h)。

本研究计算结果 2007—2010 的平均值与张宪奎等人^[11]的研究结果接近,详见表 2。

(3) K 值的计算^[11]。年侵蚀量用小流域内标准观测场裸地 4 年数据根据公式(11)进行校正。本研究计算结果 2007—2010 的平均值与张宪奎^[11]等人的研究结果相差 1/2(表 2)。

$$K=\frac{A}{R} \quad (5)$$

(4) LS 的计算。

$$LS=\left(\frac{L}{20}\right)^{0.08} \left(\frac{S}{8.75}\right)^{1.3} \quad (6)$$

式中:L——坡长(m);S——坡倾角(%),在 GIS 中是完全基于像元的计算方法^[11-13]。

表 2 不同计算方法得到的 R 和 K 值

年份	年降雨量/mm	降雨侵蚀力 R/(J·m ⁻²)	侵蚀模数 A/(t·a ⁻¹ ·hm ⁻²)	侵蚀因子 K	参用公式
2007	388	17.72	17.68	1.00	(2),(5)
2008	562	175.72	205.24	1.17	(2),(5)
2009	453	133.97	17.24	0.13	(2),(5)
2010	402	97.03	9.55	0.10	(2),(5)
平均	467	109.13	62.43	0.60	(2),(5)
		102.23	26.58	0.26	参考值 ^[11]

(5) C 和 P 取值。研究区耕作方式为传统耕作,大部分区域均为玉米大豆轮作,没有水土保持措施, C 为覆盖管理因子。根据张宪奎等^[11]文献提供的参考数据和研究区实际调查情况,耕地大豆 C 值取 0.262 6,耕地玉米 C 值取 0.257 8,草地覆盖度 80% C 值取 0.043 0,林地覆盖度 80% C 值取 0.040 0,水田、水体、沼泽和建筑用地 C 值确定为 0。无植被 C 值取 1,无水土保持措施 P 值取 1,水体和居民地 P 值取 0。

1.4 数据处理和制图

空间数据分析通过 ArcGIS 10.0 完成,回归分析和显著性检验在 SPSS 13.0 中完成。

2 结果与讨论

由研究小流域的土壤侵蚀空间分布图分析可知,年侵蚀量值范围在 0~60 t/(hm² a),研究小流域侵蚀模数为 0,0~15,15~50 和大于 50 t/(hm² a)的面积分别占研究区总面积的 28.7%,56.2%,18.6%和 0.1%,大部分区域属于无侵蚀和轻度侵蚀,少部分区域处于中度侵蚀,强度侵蚀几乎没有^[14]。通过年侵蚀空间分布格局图与 DEM 对比分析发现,研究区坡顶土壤侵蚀量较少处于 0~5 t/(hm² a),坡肩和坡背侵蚀量较大,且大部分处于 3~15 t/(hm² a)。研究区坡足土壤侵蚀状况较复杂,结合李浩等人^[15]在本研究区的研究成果^[15],表明靠近侵蚀沟位置大部分区域侵蚀量较小,最小为 0,主要是坡足区域坡度较缓,且部分土地利用为草地或湿地;靠近侵蚀沟位置小部分区域侵蚀量较大,最大达 60 t/(hm² a),是由于坡度较陡,且没有较好的植被覆盖度。但是,此研究结果并没有体现侵蚀沟位置以及侵蚀沟沟底高侵蚀速率的现象,而侵蚀沟(浅沟和切沟)在研究区域是比较普遍的^[15]。

完全基于 GIS 的土壤流失方程(USLE)是当前土壤侵蚀空间分布研究所采用的主要方法^[3-7,13],但是由于该方程是基于标准径流小区修正后的经验方程,没有涉及土壤侵蚀过程的研究,其模拟结果不能很好的反应客观实际。范昊明等人^[16]的研究结果表明,黑土漫岗坡地面蚀(溅蚀)—沉积过程自上而下通常可分为互相过渡的几个带,即岗顶溅蚀带、面蚀加强带、面蚀强烈带、面蚀减缓带和坡下沉积带,对于复式坡还会出现坡间沉积带,至于各带的宽度和排列关系都受坡度、坡长及坡形的影响,坡面土壤侵蚀沉积也比较复杂,根据黑土区特有的地形地貌特征侵蚀沉

积多发生在坡足地势平缓或植被覆盖较好的地带。因此在研究黑土区坡面土壤侵蚀时应特别注意坡麓和坡足处侵蚀沉积现象,不可孤立地认为该区域侵蚀为 0 而忽视沉积作用。

根据方华军等人^[17]在吉林省黑土区利用¹³⁷Cs 示踪技术计算的坡耕地黑土降雨侵蚀与侵蚀因子之间的关系,本研究根据基于 GIS 的 USLE 计算方法计算了因水蚀产生的年侵蚀量,其结果与方华军等人的依据¹³⁷Cs 示踪技术计算结果差异较大,特别是坡底沉积处差异较大。通过 USLE 计算的坡顶、坡肩、坡背的年侵蚀量总体相对较小,坡麓和坡足处相对较大,且没有沉积(表 3)。

表 3 黑土区坡长、坡度与侵蚀沉积的关系

坡长/ m	坡度/ %	年侵蚀量 (¹³⁷ Cs 法)	年侵蚀量 (USLE 法)	两种方法的差值 (¹³⁷ Cs-USLE)
0	0	0	0	0
28	6.45	0	6.03	-6.03
43	5.36	52.59	6.69	45.90
118	3.19	28.68	7.65	21.03
213	4.42	0.22	18.70	-18.48
253	1.47	7.53	5.12	2.41
28	5.98	19.45	5.46	13.99
43	5.64	28.77	7.15	21.62
118	3.63	12.40	9.04	3.36
213	1.73	-19.08	5.52	-24.60
253	0.17	-79.87	0.32	-80.19
28	6.17	10.51	5.69	4.82
43	6.38	19.34	8.38	10.96
118	2.78	24.00	6.37	17.63
213	3.26	4.07	12.62	-8.55
253	3.72	-1.33	17.16	-18.49

注:负号表示沉积。

根据文献中坡形因子与侵蚀量之间的关系,利用多元线性回归强制剔除因子法得到年侵蚀量差(¹³⁷Cs-USLE)与坡度和坡长因子之间的回归方程:

$$A = 0.06989 - 20.879S - 1.557LS + 0.04893LS^3 - 0.00336LS^4 + 0.00304L^2S - 0.000418L^2S^2 - 6.482L^{\frac{1}{2}} + 22.568L^{\frac{1}{2}}S - 2.415L^{\frac{1}{2}}S^2$$

式中: A ——土壤侵蚀量差(t/hm² a); L ——坡长; S ——坡度;方程 $R^2=0.938$,其各回归项显著性检验结果详见表 4。

表 4 侵蚀量差与坡长、坡度的回归方程参数显著性检验

项目	常数项	S	$L \cdot S$	$L \cdot S^3$	$L \cdot S^4$	$L^2 \cdot S$	$L^2 \cdot S^2$	$L^{\frac{1}{2}}$	$L^{\frac{1}{2}} \cdot R$	$L^{\frac{1}{2}} \cdot R^2$
显著性	0.99	0.38	0.03	0.09	0.25	0.01	0.17	0.00	0.03	0.03

根据此方程计算研究区土壤侵蚀差 (^{137}Cs -USLE)空间分布图,分析后得出,其研究区除部分区域坡顶、坡肩、坡背的年侵蚀量差值在 $0\sim 50\text{ t}/(\text{hm}^2\text{ a})$,有小部分区域侵蚀量差值达 $1\ 000\text{ t}/(\text{hm}^2\text{ a})$ 左右。坡麓和坡足沉积区域也出现 $-1\ 000\text{ t}/(\text{hm}^2\text{ a})$ 的极值,因此,应用此方程不能修正本研究区的完全基于 ArcGIS 的 USLE 方程关于侵蚀堆积格局的预测。分析其原因可能是由于本研究区和方华军等人研究区域地形有一定差异,特别是本研究大部分区域坡长大于 253 m ,因此,考虑沉积问题,要修正本研究区域完全基于 ArcGIS 的 USLE 需要结合本研究区域实际地形与坡面沉积之间的关系。虽然研究区土壤侵蚀差 (^{137}Cs -USLE)空间分布图没有准确反映坡面土壤侵蚀沉积,但是可做为判定坡面土壤侵蚀沉积区的位置,坡面土壤侵蚀沉积多出现在坡麓和坡足,但并不是所有的坡麓和坡足都表现出沉积的结果,主要是因为黑土区并不是所有的坡麓和坡足都表现出地势平坦和有较好植被覆盖的特征。同时应用此种方法也未能有效的预测侵蚀沟的空间分布状况。

因此,本研究应用完全基于 GIS 的 USLE 模型模拟黑土区域土壤侵蚀空间分布的方法只能有效的模拟坡顶、坡肩、坡背的年侵蚀量空间分布趋势,不能准确地模拟坡麓和坡足处土壤侵蚀沉积量和侵蚀沟的空间分布,这是由黑土区独特的地形条件所决定。关于基于模型的坡面土壤侵蚀沉积和侵蚀沟空间分布模拟和预测的问题需要进一步探讨和研究,这是准确模拟和预测东北黑土区土壤侵蚀空间分布的重要基础。

3 结论

研究区小流域年侵蚀量值范围在 $0\sim 60\text{ t}/(\text{hm}^2\text{ a})$,大部分区域土壤侵蚀量集中在 $0\sim 50\text{ t}/(\text{hm}^2\text{ a})$,多发生在坡肩和坡背。研究区坡顶土壤侵蚀量较少处于 $0\sim 5\text{ t}/(\text{hm}^2\text{ a})$,坡肩和坡背侵蚀量较大大部分处于 $3\sim 15\text{ t}/(\text{hm}^2\text{ a})$ 。研究区无侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀和强度侵蚀面积分别占研究区总面积的 28.7% , 56.2% , 18.6% 和 0.1% 。应用完全基于 GIS 的 USLE 不能准确预测坡面侵蚀沉积效应和侵蚀沟分布情况。准确模拟黑土区区域土壤侵蚀沉积不能简单地应用黑土区其它区域经验方程。

[参 考 文 献]

- [1] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation[M]. Third Edition. Malden USA: Blackwell Publishing Ltd, 2005:1-9.
- [2] 林俐玲. 通用土壤流失公式(USLE)之应用与误用[J]. 水土保持, 2010, 5(2):119-121.
- [3] 魏建兵, 肖笃宁, 李秀珍, 等. 东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2608-2615.
- [4] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 等. 基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 337-346.
- [5] 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5):75-79.
- [6] 王禹, 杨明义, 刘普灵. 东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分[J]. 核农学报, 2010, 24(4):790-795.
- [7] 刘光. 土壤侵蚀模型研究进展[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3):73-76.
- [8] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京, 科学出版社, 2004: 208-211.
- [9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-erosion Losses From Cropland East of the Rocky Mountains[M]. USDA-ARS: Agriculture Handbook, 1965.
- [10] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. USDA-ARS: Agriculture Handbook, 1978.
- [11] 张奎奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4):1-10.
- [12] 孙振钧. 生态学实验与野外实习指导[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [13] 陈永宝, 黄传伟, 陈志伟, 等. USLE 在我国的应用和发展[J]. 中国水土保持, 2003(10):11-14.
- [14] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理学报, 2006, 26(6):687-692.
- [15] 李浩, 张兴义, 刘爽, 等. 典型黑土区村级尺度侵蚀沟演变[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2):21-28.
- [16] 范昊明, 蔡强国, 崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):8-12.
- [17] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. ^{137}Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J]. 生态学报, 2005, 25(6):1376-1382.