基于 RUSLE 模型的长汀县水土流失评估

傅水龙[1,2]，梁娟珠[1,2]，黄路平[1,2]
(1. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室，
福建 福州 350002；2. 福建省空间信息工程研究中心，福建 福州 350002)

摘　要：[目的] 为中国南方红壤分布区 RUSLE 模型的本地化研究提供重要参考，同时为福建省长汀县水土流失防治及解决与此相关的其他问题提供科学的决策依据。[方法] 以修正的通用水土流失方程 RUSLE (revised universal soil loss equation)为评估基础，以长汀县为试验研究区，在地理信息系统和遥感技术的支持下，通过研究新方法计算降雨侵蚀力因子、参数调校或利用现有方法计算其余因子完成研究区水土流失评估。[结果] 得到 2013 年长汀县水土流失等级分布图。2013 年研究区水土流失已大有好转，但仍比较严重，主要为轻度和中度流失，其中河田镇、策武乡、濯田镇、三洲乡是重灾区。[结论] 尽量减少不合理的人类活动，有效提高植被覆盖率，是研究区今后水土流失防治的基本措施。

关键词：水土流失；评估；修正的通用水土流失方程；长汀县
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2016)01-0196-05　　**中图分类号**：S157.1，TP7，P208
文献参数：傅水龙，梁娟珠，黄路平. 基于 RUSLE 模型的长汀县水土流失评估[J]. 水土保持通报，2016，36(1)：196-200. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.035

Assessment of Soil and Water Loss in Changting County Based on RUSLE Model

FU Shuilong[1,2], LIANG Juanzhu[1,2], HUANG Luping[1,2]
(1. *Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian* 350002, *China*; 2. *Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou, Fujian* 350002, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to improve the RUSLE (revised universal soil loss equation) model for its using in the southern red soil area in order to provide scientific basis for soil erosion control in Changting County of Fujian Province. [Methods] Based on RUSLE model and combined with GIS and RS technologies, we assessed the soil and water loss in Changting County. The rainfall erosion factors were calculated by a new developed method. The remaining factors that were used in RUSLE model were derived by improving or using the existing methods. [Results] A map of soil erosion intensity grades distribution in 2013 was obtained by an empirical research. The results show that soil erosion in Changting County has been improved in 2013, but still serious. The dominated types of erosion were slight and moderate loss. The area most affected by soil erosion was Hetian, Cewu, Zhuotian and Sanzhou Township. [Conclusion] To reduce the human activities and increase the vegetation coverage are the main effective measures for erosion control in the future.

Keywords: **soil erosion**; **assessment**; **revised universal soil loss equation**; **Changting County**

长汀县位于武夷山脉南端、福建西部，是南方红壤分布带中水土流失灾害最突出的县份之一。其地貌以中山丘陵为主，土壤以红壤为主，植被以马尾松、荒草坡、灌木丛为主，河流较多，水系发达；处中亚热带季风性气候区，年平均降雨约 1 700 mm，且年内分配不均，春夏多雨，秋冬干旱。特殊的自然地理环境与长期不科学的开发利用使得长汀县成为福建省乃至整个南方红壤区水土流失的典型区域，崩岗等侵蚀劣地的治理久攻不克、部分经过治理过的水土流失区存在“空中绿化”与“老头松”现象，同时，随着土地开发利用的不断推进，边治理边破坏的问题仍然十分严重。因此，如何有效地防治水土流失，是提升当地生态环境质量，实现经济社会可持续发展必须认真研究的课题；水土流失评估是其中的重要内容，其目标是

收稿日期：2014-12-09　　**修回日期**：2015-03-04
资助项目：国家科技支撑计划项目“南方红壤水土流失治理技术研究与示范”(2013BAC08B00)
第一作者：傅水龙(1989—)，男(汉族)，福建省龙岩市人，硕士研究生，研究方向为地理信息工程。E-mail：imshuilong@163.com。

为水土流失防治提供科学的决策依据。

20 世纪 60 年代 Wischmeier 和 Smith 基于大量小区观测资料和人工模拟降雨试验资料提出了通用水土流失方程(universal soil loss equation,USLE)[1];1992 年美国农业部农业研究局针对 USLE 模型的缺陷推出了修正的通用水土流失方程(revised universal soil loss equation,RUSLE)[2-3];USLE 和 RUSLE 是当前应用最广泛的水土流失评估模型。RUSLE 的基础理论承袭于 USLE,但大部分因子利用新技术重新评估,因而有更高的评估精度和更强的实用性。同时,随着 GIS 与 RS 技术的不断发展,USLE,RUSLE 与二者的集成及其在区域水土流失估算中的应用研究也越来越成熟。本文以 RUSLE 模型为理论基础,在 GIS 和 RS 技术的支持下,研究长汀县水土流失评估的方法与流程,并根据 2013 年的数据资料得到当地水土流失评估结果,试图为解决中国南方红壤分布区 RUSLE 模型本地化研究提供具有参考借鉴意义的实证案例并为长汀县水土流失防治提供科学的决策依据。

1　资料收集

本研究采用的数据包括 4 类:即实测数据、地形图、专题图和遥感数据。其中:实测数据为研究区 13 个气象站点 2005—2013 年的降雨数据,用于提取降雨因子;地形图为 1∶10 000 数字地图,用于提取坡度坡长因子;专题图为 2013 年福建省水土保持监测站官方的土壤类型图和研究区 1∶50 000 行政区划图,分别用于提取土壤因子和确定研究区乡镇边界;遥感数据为研究区 2013 年 TM 遥感影像(空间分辨率 30 m),用于提取植被覆盖因子和水保措施因子。

2　研究方法

RUSLE 模型的表达式为:

$$A=R\cdot K\cdot L\cdot S\cdot C\cdot P \tag{1}$$

式中:A——水土流失的评估值〔t/(hm^2 · a)〕;R——降雨的侵蚀力测量值〔(MJ · mm)/(hm^2 · h · a)〕;K——土壤的可蚀性评估值〔(t · hm^2 · h)/(MJ · hm^2 · mm)〕;LS——地形影响的评估值;C——植被作用的评估值;P——水保措施作用的评估值。

2.1　降雨侵蚀力因子 *R*

R 因子是 RUSLE 模型中的主导因子,描述降雨对水土流失潜在的作用力,是降雨侵蚀力的定量测度值。本文根据长汀县的实际情况,以现有相关研究成果[4-6]为基础,提出了一种适合计算研究区 R 值的新简易算法:即将每日降雨量划分成 10 个等级(1 级为日雨量<20 mm,10 级为日雨量≥100 mm,2—9 级分别为日雨量 20～30,30～40,…,90～100 mm),并统计每月各等级降雨量之和,再以各月降雨量之和为自变量,以经典法 $R=\sum E\cdot I_{60}$[6] 计算的月降雨侵蚀力为因变量,利用 SPSS 软件做多元回归分析,获取 Coefficients,标准误差,tStat,P-value 等相关参数,从而得到新的 R 值简易算法:

$$R_i=0.165X_1+0.295X_2+0.273X_3+0.316X_4+0.475X_5+0.472X_6+0.473X_7+0.688X_8+0.812X_9+0.548X_{10}+0.865 \tag{2}$$

$$R=\sum_{1}^{12}R_i \tag{3}$$

式中:R_i——第 i 月的降雨侵蚀力;X_1,X_{10}——1 个月中日降雨量在 13～20 mm 之间的总和、日降雨量大于 100 mm 的总和;X_2—X_9——1 个月中日降雨量在 20～30,30～40,…,90～100 mm 之间的总和;X_i(i=1～10)的系数为各元的 Coefficients 值,0.865 为回归模型的 Coefficients 截距值。经计算,模型的相关参数十分接近(如 R^2 均在 0.87 以上),其中在以 13 mm 为日侵蚀性降雨标准下得到的回归模型各项参数均为最优($R^2=0.877$,$p<0.05$,达到显著水平),精度明显优于周伏建等[5-6]提出的福建地区 R 因子简易计算模型($R^2\approx0.69$,相关系数 r 仅为 0.828;许多学者将其用于本研究区)。

利用上述方法对研究区 2005—2013 年的降雨数据进行处理,得到 R 值分布图(图 1)。

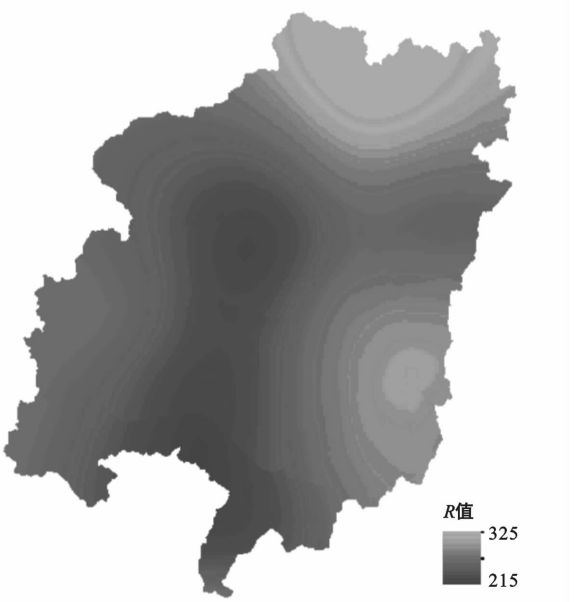


图 1　*R* 值分布

2.2 土壤可蚀性因子 *K*

K 因子反映土壤产生水土流失的敏感性和降水产生径流量与径流速率的大小。影响 *K* 值的因素很多，一般土壤类型不同产生的侵蚀率也不同。研究区的土壤主要有黄壤、红壤、水稻土和紫色土等，其中水稻土多起源于红壤、黄壤和紫色土。为了更好地求取 *K* 值，很多学者提出了基于土壤理化性质计算的模型。吕喜玺[7]、方纲清[8]等利用 EPIC 模型计算了中国南方主要土壤类型的 *K* 值。本文在吕喜玺、方纲清等人[7-8]研究的基础上，结合研究区土壤的实际情况，通过试验研究进行赋值分析，得到不同土壤类型的 *K* 值(表 1)及 *K* 值分布图。

表 1 研究区 *K* 值

土壤类型	硅铝质红壤	硅铝铁质红壤	硅质红壤	硅铁质红壤	侵蚀红壤	水化红壤	红壤性土	黄红壤
K 值	0.235 7	0.237 3	0.310 0	0.216 2	0.270 8	0.235 4	0.227 0	0.230 3
土壤类型	黄 壤	黄壤性土	酸性粗骨土	酸性紫色土	山地草甸土	渗育水稻土	潴育水稻土	潜育水稻土
K 值	0.228 0	0.197 0	0.254 9	0.213 1	0.224 0	0.244 7	0.339 1	0.212 0

2.3 坡度坡长因子 LS

LS 因子为水土流失的加速因子，用于定量测度地形特征对水土流失的作用。坡度坡长是计算 LS 因子的基础。坡度坡长一般从 DEM 数据中提取。关于坡度，ArcGIS 平台中提供了很成熟的计算工具。关于坡长，快速法与直接法[9-10]是现有文献中针对 USLE 和 RUSLE 模型提出的两种较有代表性的计算方法，前者将每个点沿垂直方向到山脊线的水平距离作为近似该点的坡长，精度较低；后者将每个格网单元到汇流起点的最大累计水流长度作为该格网的坡长，比较贴近实际，精度较高。因此本文应用 ArcGIS 平台提取坡度、直接法提取坡长，然后选用陈明华等[11]针对长汀县提出的 LS 公式计算坡度坡长因子：

$$L=(l/20)^{0.41},\ S=(\theta/10)^{0.78} \tag{4}$$

式中：*L*——坡长因子；*l*——坡长；*S*——坡度因子；*θ*——坡度(°)。

利用上式对研究区 1∶10 000 地形图进行处理，得到 *LS* 值分布图(图 2)。

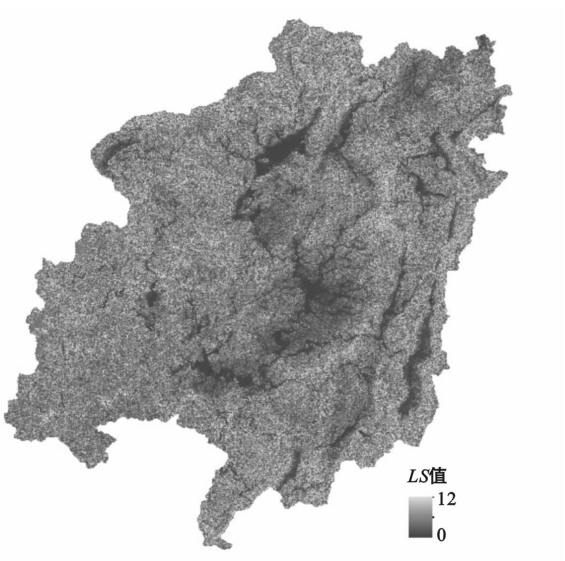


图 2 *LS* 值分布

2.4 植被覆盖因子 *C*

植被覆盖因子是指在相同的土壤、坡度和降雨条件下，某一特定作物或植被下的水土流失量与耕种过后连续休闲地的水土流失量之比值，是植被与经营管理对保持水土作用的定性描述。植被覆盖因子主要受作物覆盖、轮作顺序、管理措施的综合影响，基于此产生了众多的计算模型，其中 2001 年由马超飞等[12]提出的通过植被覆盖度 *V* 计算 *C* 的方法是较有代表性的研究成果。其后，江洪[13]根据研究区特有的植被覆盖情况，对马超飞等[12]提出的模型进行本地化改进，得到了更适合于研究区 *C* 值计算的模型。本文经过研究分析，决定选用江洪的改进公式提取 *C* 因子，具体求解过程如下：

(1) NDVI 提取：

$$\mathrm{NDVI}=(\mathrm{NIR}-R)/(\mathrm{NIR}+R) \tag{5}$$

式中：NIR——分别表示近红外波段的反射率；*R*——红光波段的反射率。

(2) 植被覆盖度 *V*[14]提取：

$$V=\left(\frac{\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI}_{\min}}{\mathrm{NDVI}_{\max}-\mathrm{NDVI}_{\min}}\right)^2$$

式中：$\mathrm{NDVI}_{\max}$——最大值，即纯植被像元的 NDVI 值，$\mathrm{NDVI}_{\min}$——最小值，即全裸土象元的 NDVI 值。

(3) 植被覆盖因子 *C* 提取：

$$\begin{cases} V=0 & (C=1) \\ 0<V<0.87 & (C=0.666\ 5-0.343\ 6\lg V) \\ V>0.87 & (C=0) \end{cases} \tag{6}$$

2.5 水保措施因子 *P*

水保措施因子 *P* 为特定水土保持措施下的土壤流失量与相应地块未实施水土保持措施前、顺坡耕作时的土壤流失量之比值。常用的水保措施包括套种、坡改梯、排水沟等，它们通过调整水流形态、斜坡坡度、表面水流汇流或者减少径流量、降低径流流速等方式减轻水土流失，不同水保措施对水土流失的抑制

作用一般不同,评价过程中可通过对 P 因子赋不同的经验值来体现这种差异。

本文以 2013 年研究区 TM 影像为数据源,参考地形地貌、长汀县志、谷歌地图等资料,结合实地考察,在 ENVI 软件支持下进行人机交互解译,得到研究区土地利用数据。在综合利用现有研究成果[15-17]的基础上,通过比较分析确定了适合研究区不同土地利用类型的 P 因子值:居民地和水体 0,高密度植被 0.20,耕地 0.45,低密度植被 0.5,建设用地 1.0,将上述 P 因子值赋给土地利用图中的对应类型,得到 P 值分布图。

2.6　水土流失计算

在 ArcGIS 支持下,完成上述 6 个因子图层的叠加相乘运算,再乘以 224.2,最后根据水利部批准的《土壤侵蚀分级分类标准》(SL190-2007)进行分级统计,得到研究区水土流失强度分布结果(表 2)。

3　评估结果与分析

3.1　精度验证

将评估结果与现有文献中 2013 年以前针对研究区的历次评估结果[13,17-19]以及福建省水土保持监测站 2009 年长汀县水土流失监测结果进行对比分析(表 3),结果表明本文评估得到的水土流失总面积和不同强度水土流失区的面积与历史上历次评估的趋势基本一致;将评估结果与福建省水土保持监测站 2012 年长汀县水土流失监测结果(水土流失等级分布图)进行对比,结果表明二者所确定的水土流失空间分布格局(包括整体和各等级流失分布区域、趋势等等)基本相近;将本文评估结果与 2013 年研究区水土治理报道进行对比(表 3),结果表明二者具有较好的一致性。利用 2014 年 5 月在研究区采集的 250 个水土流失样点验证本文所得到的评估结果,其中 203 个点等级一致,精度为 81.20%。由此说明评估精度满足应用要求、试验方法合理可行。

表 2　研究区水土流失等级及其面积

流失等级	水土流失模数/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	水土流失面积/km^2	占总面积比/%
微度流失	＜500	2 850.89	91.97
轻度流失	500～2 500	201.29	6.49
中度流失	2 500～5 000	30.86	1.00
强烈流失	5 000～8 000	9.36	0.30
极强烈流失	8 000～15 000	5.63	0.18
剧烈流失	＞15 000	1.91	0.06
合 计		3 099.9	100.00

表 3　研究区历年流失资料汇总　　km^2

各年度流失评估	水土流失等级					流失总面积
	轻度	中度	强度	极强烈	剧烈	
1988 林惠花[18]估算值	389.59	140.72	109.95	72.85	8.86	721.97
1994 江洪[13]估算值	474.74	170.45	69.16	38.49	9.16	761.97
1995 戴清霞[17]估算值	459.19	161.43	69.80	47.91	20.92	759.19
2003 江洪[13]估算值	352.87	124.47	54.39	37.18	18.40	587.30
2003 王维明等[19]估算值	306.7	164.02	90.59	17.19	3.36	581.86
2009 省水保监测文件	155.67	100.39	44.01	5.87	16.52	322.46
2013 水土治理报道						266.67
13 a 评估	201.29	30.86	9.36	5.63	1.91	249.05

3.2　结果分析

由表 2—3 可知,研究区 2013 年水土流失较 2009 年明显好转,但流失总面积(占研究区总面积8.03%)和中度及以上的流失面积(47.76 km^2)在福建省依然十分突出。水土流失区主要位于研究区中部、东南和东北部,其中中部集中了大部分中度以上(含中度)的水土流失区。河田、策武、濯田、三洲是研究区水土流失最严重的乡镇,流失面积大,各等级水土流失的影响最大;其次为大同、涂坊、南山 3 个乡镇,以轻度、中度流失为主;再次为新桥、馆前等乡镇,以轻度流失为主,同时存在少量中度流失区;其余乡镇水土流失面积小且多为轻度流失。

结合 2013,2014 年野外考察结果,综合分析水土流失强度分布图、土地利用类型图、TM 影像图与植被覆盖度图,可以发现,研究区水土流失(特别是中度及以上程度)主要集中在人类影响强度大的区域,如居民地周围、建设用地开发区、采沙场、采石场、稀土采集区、耕地、果园种植地等等,这些区域大多植被覆盖较低甚至没有;部分分布于人烟稀少的地区,如深山山顶、坟地或植被较稀疏的山地等。较低的植被覆盖度固然有土质、地形、气候对植被生长的制约等自然原因,但更重要的是人为原因。不合理的人类活动,不仅给植被也给土壤带来不同程度的破坏,使得植被覆盖降低、土壤裸露、土质破坏、生态失衡等,加

上降雨量大，暴雨冲击多，导致土壤抗侵蚀能力下降，从而水土流失多发。

4 结 论

（1）基于 RUSLE 模型结合 RS 与 GIS 技术实现水土流失评估的关键在于如何选取各因子的计算模型及模型参数的本地化调教，本文所取得的研究成果可为研究区的水土流失防治提供科学的决策依据，对与研究区条件类似的其他区域的水土流失评估研究也具有重要的参考价值。

（2）2013 年研究区水土流失相比往年已大有好转，但仍较为严重，其中河田镇、策武乡、濯田镇、三洲乡是重灾区，应重点治理。

（3）不合理的人类活动是造成研究区水土流失的主要原因，尽量减少不合理的人类活动、有效提高植被覆盖率是今后治理研究区水土流失的重要参考措施。

（4）本研究可为解决我国南方红壤分布区 RUSLE 模型本地化研究提供重要参考，可为长汀县水土流失防治及解决与此相关的其他问题提供科学决策依据。

[参 考 文 献]

[1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland and east of the Rocky Mountains [M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1965.

[2] 陈云明，刘国彬，郑粉莉，等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究，2004，11(4)：80-83.

[3] Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1997.

[4] 黄炎和，卢程隆，郑添发，等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报，1992，6(4)：1-5.

[5] 周伏建，陈明华，林福兴，等. 福建省天然降雨雨滴特征的研究[J]. 水土保持学报，1995，9(1)：8-12.

[6] 周伏建，陈明华，林福兴，等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报，1995，9(1)：13-18.

[7] 吕喜玺，沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J]. 水土保持学报，1992，6(1)：63-70.

[8] 方纲清，阮伏水，吴雄海，等. 福建省主要土壤可蚀性特征初探[J]. 福建水土保持，1997(2)：19-23.

[9] 曹龙熹，符素华. 基于 DEM 的坡长计算方法比较分析[J]. 水土保持通报，2007，27(5)：58-62.

[10] Hickey R A, Smith P J. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID[J]. Computors, Enviroment and Urban Systems, 1994, 18(5): 365-380.

[11] 陈明华，周伏建，黄炎和，等. 坡度和坡长对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报，1995，9(1)：31-36.

[12] 马超飞，马建文，布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. 水土保持通报，2001，21(4)：6-9.

[13] 江洪. 长汀县水土流失遥感监测及其生态安全评价[D]. 福州：福州大学，2005.

[14] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B, et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(1): 1-17.

[15] 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.

[16] 黄金良，洪华生，张珞平，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.

[17] 戴清霞. 基于 GIS 和遥感的长汀县水土流失动态监测[D]. 福州：福建师范大学，2006.

[18] 林惠花. 典型区域土壤侵蚀的地理学分析：以福建长汀为例[D]. 福州：福建农林大学，2009.

[19] 王维明，陈明华，林敬兰，等. 长汀县水土流失动态变化及防治对策研究[J]. 水土保持通报，2005，25(4)：73-77.

（上接第 173 页）

[11] Li Xiaoyan. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess of northwest China[J]. Catena, 2003, 52(2): 105-127.

[12] 吕殿青，王文焰，王全九. 滴灌条件下的土壤水盐运移特性的研究[J]. 灌溉排水，2000，19(1)：15-21.

[13] 李卓，吴普特，冯浩，等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报，2009，25(6)：40-45.

[14] 王永东，张宏武，徐新文，等. 风沙土水分入渗与再分布过程中湿润锋运移试验研究[J]. 干旱区资源与环境，2009，23(8)：190-194.