

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201702036



应用 RUSLE 模型的长汀县 水土流失风险空间分析

梁娟珠^{1,2}, 张青^{1,2}, 傅水龙^{1,2}

(1. 福州大学 空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350002;
2. 福州大学 福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350002)

摘要: 以修正的通用水土流失方程(RUSLE)为理论基础,以长汀县为研究区,利用地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术,在计算各影响因子的基础上估算水土流失,生成流失风险等级分布图.对水土流失的主要因素进行空间叠加分析,并将研究区水土流失风险综合评估结果与坡度、植被覆盖度及土地利用图层进行空间相关分析.结果表明:研究区水土流失中、高风险区分布仍较多,其中,河田、三洲、策武 3 乡镇形势最为严峻;水土流失风险呈现出一定的地域性特点,与植被覆盖度有严格的负相关关系,但与坡度并无严格的正相关关系.

关键词: 水土流失; 空间分析; 修正的通用水土流失方程; 长汀县

中图分类号: S 157.1; TP 7; P 208(256) **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)06-0836-06

Spatial Analysis on Water and Soil Erosion Risk in Changting County Using RUSLE Model

LIANG Juanzhu^{1,2}, Zhang Qing^{1,2}, FU Shuilong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education,
Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;
2. Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Based on revised universal soil loss equation (RUSLE) model, taking Changting County as the research area, geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) technologies were used to estimate the soil and water erosion by calculating the influence factors, and the distribution map of the erosion risk was generated. The spatial overlap analysis of the main factors of soil and water erosion was carried out, and the spatial correlation analysis between the comprehensive evaluation results of soil and water erosion risk with the slope, vegetation coverage and land use layer was carried out. The results show that: there are more middle and high risk areas of water and soil erosion in the study area. Hetian, Sanzhou and Cewu three towns are the most serious situation. The risk of soil erosion has a bound regional characteristic, the risk of soil erosion and vegetation cover have strict negative correlation, but the risk of soil erosion and slope have not strict positive correlation.

Keywords: water and soil erosion; spatial analysis; revised universal soil loss equation; Changting County

水土流失是威胁人类生存与发展的重要环境问题之一^[1],它可以使土层变薄、肥力降低,造成土地“砂石化”,使之永远失去农业价值.同时,土壤侵蚀使大量泥沙进入河道,造成河床淤积,加剧洪涝灾害

收稿日期: 2017-02-20
通信作者: 梁娟珠(1978-),女,助理研究员,博士,主要从事地理信息工程的研究. E-mail: liangjuanzhu@163.com.
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC08B00)

的发生,严重威胁着人类社会的生存与发展^[2]. 水土流失的严重危害受到各国政府及学术界的关注^[3-4], 20 世纪 60 年代,Wischmeier 等^[5]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);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通用水土流失方程(revised universal soil loss equation,RUSLE)^[6-7]. 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,各因子之间不再相互独立而是彼此关联影响,因而 RUSLE 有更高的评估精度和更强的实用性. 同时,RUSLE 模型形式简单,参数易获取及各因子均含物理意义. 因此,被广泛应用于水土流失评估. 卜兆宏等^[8]根据实测数据对 USLE 模型进行参数本地化调校,得到了适合我国本土的 USLE 模型,并提出了运用遥感技术快速评估水土流失的方法,该研究成果在我国福建、江西、山东等地区得到推广应用. 随着遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术在水土流失中的应用,水土流失的研究已突破了小区或坡面尺度的限制,区域尺度的水土流失研究成为可能^[9-13]. 我国南方红壤区水土流失严重,而福建省长汀县是南方丘陵水土流失的典型,是福建省水土流失最严重的区域. 本文选取福建省长汀县为研究对象,利用 GIS,RS 技术,对福建省长汀县的水土流失风险分布与影响因素加以分析.

1 研究区概况

1.1 研究区概况

福建省长汀县位于 25°18′40″N~26°02′05″N,116°00′45″E~116°39′20″E,地处福建省西南部,属亚热带季风气候,降雨量充沛,土壤抗蚀力差,年平均气温 17.5~18.8℃,年平均降水量 1 737 mm,年日照时数 1 924.6 h. 研究区地势东、西、北 3 面高,中、南部低,自北向南倾斜,地形破碎,以纵横交错、岭谷相间的低山为主. 低山、丘陵占全县总面积的 71.11%. 县内土壤多为花岗岩发育而来的红壤,抗蚀性差,且人为破坏严重.

1.2 研究资料

研究采用的数据有实测、地形图、专题图、遥感影像 4 类数据. 实测数据包括研究区 13 个气象站点 2005—2013 年的降雨数据;用于提取降雨侵蚀力因子. 研究区 1:5 万土壤类型图,用于提取土壤可蚀性因子. 地形图数据为 1:1 万地形图,用于提取坡度坡长因子. 专题图数据为研究区 1:5 万行政区划图和 2013 年 1:1 万土地利用类型图,行政区划图用于确定研究区乡镇边界和研究结果的统计,土地利用类型图用于提取水保措施因子. 遥感数据为 2007,2010,2013 年研究区 2.5 m 分辨率的 ALOS 遥感影像,用于提取植被覆盖因子.

2 研究方法

RUSLE 模型为 $A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$,其中: A 表示水土流失的评估值; R 表示降雨的侵蚀力测量值; K 表示土壤的可蚀性评估值; LS 表示地形影响的评估值; C 表示植被作用的评估值; P 表示水保措施作用的评估值.

2.1 降雨侵蚀力因子 R

R 因子是降雨对土壤分离和搬运作用的评价指标,是 RUSLE 模型中的主导因子,是降雨侵蚀力的定量测度值. 根据研究区的实际情况,在前人研究的基础上^[14-16],提出针对研究区的 R 值新提取法. 将每日降雨量划分成 10 个等级(一级为日雨量 <20 mm,十级为日雨量 ≥ 100 mm,二至九级分别为日雨量 20~30,30~40,⋯,90~100 mm),并统计每月各等级降雨量之和. 以各月降雨量之和为自变量,以经典法 $R = \sum E \cdot I_{60}$ 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 R 值新简易算法,即

$$R_i = 0.165\chi_1 + 0.295\chi_2 + 0.273\chi_3 + 0.316\chi_4 + 0.475\chi_5 + 0.472\chi_6 + 0.473\chi_7 + 0.688\chi_8 + 0.812\chi_9 + 0.548\chi_{10} + 0.865. \tag{1}$$

式(1)中: R_i 为第 i 月的降雨侵蚀力 R 值; χ_1 表示一个月中日降雨量在 13~20 mm 之间的总和; χ_{10} 表示日雨量大于 100 mm 的总和; $\chi_2 \sim \chi_9$ 分别表示一个月中日降雨量在 20~30,30~40,⋯,90~100 mm 之

间的总和. 年降雨侵蚀力为各月 R 之和.

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),这比周伏建等^[15]提出的福建区简易模型(许多学者将其用于福建省长汀地区)的精度($R^2\approx0.69$, 相关系数 r 仅为 0.828)有很大提高.

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,一般情况下,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,文中根据吕喜玺等^[17]研究的成果,结合研究区土壤的实际情况,对不同土壤类型进行赋值,得到不同土壤类型的 K 值,如表 1 所示.

表 1 研究区主要土壤类型 K 值表
Tab. 1 K value of agrotype in study area

土壤名称	$K/(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) \cdot (\text{MJ} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$	土壤名称	$K/(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) \cdot (\text{MJ} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$
潴育水稻土	0.044 660	水化红壤	0.029 527
侵蚀红壤	0.035 664	红壤	0.029 527
硅铝铁质红壤	0.033 531	酸性紫色土	0.028 065
渗育水稻土	0.032 227	潜育水稻土	0.027 920
山地草甸土	0.032 135	硅质红壤	0.025 826
黄红壤	0.030 331	硅铝质红壤	0.022 534
黄壤	0.030 028		

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. LS 的计算关键在于坡度和坡长的提取. 在大尺度区域上坡度坡长很难进行实测,因此,一般通过数字高程模型(DEM)进行提取. 关于坡度, ArcGIS 平台已有很成熟的工具可以进行提取. 关于坡长,快速法与直接法^[18-19]是现有文献中针对 USLE 和 RUSLE 模型提出的两个较有代表性的研究成果,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,应用 ArcGIS 平台提取坡度,直接法提取坡长,然后,选用陈明华等^[20]针对福建省长汀县提出的 LS 公式. 坡度坡长因子(L)为 $L=(\tau/20)^{0.41}$, 坡度因子(S)为 $S=(\theta/10)^{0.78}$.

2.4 植被覆盖因子 C

福建省长汀县降雨年内变化差异较大,呈很强的季节性,因此,仅凭单期遥感影像估算 C 值存在一定误差. 为了尽量减小这种误差, C 值的计算采用多期影像,并充分考虑降雨的年内分布,给予适当权重^[18],其计算公式为

$$C_{\text{year}} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_{\text{year}}} C_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

上式中: P_i, C_i 分别为第 i 个时间段的降雨量和植被覆盖度因子 C 值; $C_{\text{year}}, P_{\text{year}}$ 分别为年降雨量和年植被覆盖度因子 C 值. 实际在计算时,由于受到卫星成像条件限制,很难获得一年中多个时段的影.

2.5 水保措施因子 P

根据福建省长汀县的农事活动和土地利用情况,参考研究成果^[19-20],得出一组较适合于研究区的 P 值:居民地为 0, 水体为 0, 高密度植被为 0.20, 耕地为 0.45, 低密度植被为 0.5, 以及建设用地为 1.0.

3 水土流失特征

3.1 水土流失强度

以上计算的各水土流失影响因子,由于数据源各不相同,所以得出的各因子图层存在空间尺度上的差异. 为了进行 RUSLE 的水土流失侵蚀模数计算,首先,将各图层转换为统一坐标,以及重采样成统一像元大小;然后,将以上获取的 6 个因子图层进行叠加相乘,得到各个像元的英制单位水土流失量图;其

次,将所得结果乘以系数 224.2,进行单位转换,得到公制单位为 $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ 的各像元年水土流失量图;最后,根据水利部批准的 SL 190—2007《土壤侵蚀分级分类标准》进行分级统计,得到研究区水土流失强度分布图,如图 1 所示.

3.2 水土流失风险

由于 RUSLE 模型的计算结果是对区域水土流失的定量化评估,同时,考虑到 RUSLE 应用对象及其尺度的差异,对计算结果进行定性化分级,侵蚀模数分别为 $0 \sim 5, 5 \sim 10, 10 \sim 25, >25 t \cdot hm^2 \cdot a^{-1}$ 时,水土流失风险等级分别为很低,低,中,高. 水土流失的风险等级分布图,如图 2 所示. 反映研究区不同空间位置上未来水土流失发生的概率高低. 通过对不同风险等级的坡度、植被覆盖度的统计分析研究区水土流失风险的分布规律.

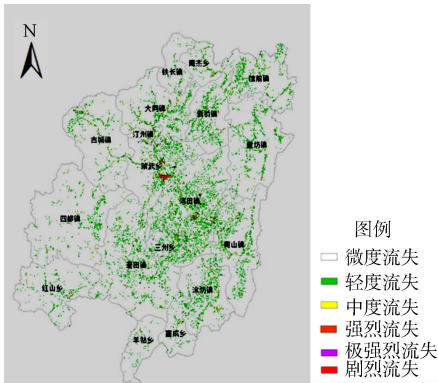


图 1 水土流失强度分布图

Fig. 1 Distribution map of soil erosion intensity

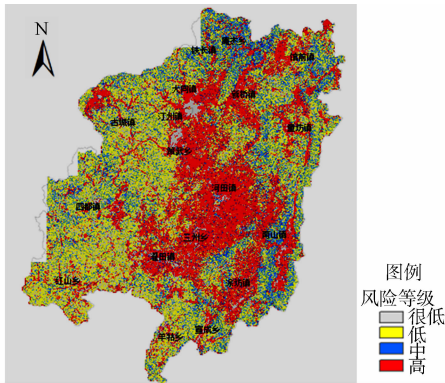


图 2 水土流失风险等级分布图

Fig. 2 Distribution map of soil erosion risk level

由图 2 可知:研究区发生大面积水土流失的风险性高,中、高级风险区面积巨大(达 $1\,404.752\,4\,km^2$, 占总面积比率 $0.453\,1$),高级风险区占总面积比率 $0.279\,0$,而很低级风险区占的比率不及三分之一;水土流失中、高风险区主要位于中部、东南和东北部,其中,中部集中了过半高级风险区. 河田、三洲是研究区水土流失风险性最大的乡镇,高级风险覆盖大半个乡镇(三洲几乎整个乡),很低、低、中级风险区分布较少. 同时,这两个乡镇也是水土流失最严重的区域,存在大面积强烈及以上的水土流失;濯田、涂坊、南山、策武、新桥是水土流失风险性次之的乡镇,以高级风险分布为主,且中度及以上流失面积较大;这些乡镇植被覆盖较低,土地开发、破坏大,是福建省长汀县水土流失风险性大的主要原因.

4 各影响因子与水土流失风险的空间关系

4.1 坡度与水土流失风险性的关系

坡度作为 RUSLE 的重要参数,是影响水土流失风险性高低的主要因子之一. 当其他因子相对不变时,水土流失的风险性随着坡度的增加而上升. 通过研究坡度与水土流失风险性的关系,可加强对水土流失机理的理解和对研究区水土流失风险性空间分布规律的分析,为后续的坡改梯、建排水沟、封山育林等水土保持措施的选择提供数据支持. 为分析研究区不同坡度下的水土流失风险性情况,运用 ARCINFO 软件的空间分析功能,将坡度等级分布图与水土流失风险等级(η)图进行叠置分析,从而得到不同风险等级的各坡度区统计,如表 2 所示.

由表 2 可知:研究区 $0^\circ \sim 35^\circ$ 坡度范围内属于水土流失高风险区域;中级风险区过半分布于 $20^\circ \sim 45^\circ$ 的坡度范围内;而很低、低级风险区则分布于 50° 以上的区域;4 个等级的风险区在各个坡度区上都有或多或少的分布,呈现一种交叉镶嵌的复杂状态. 因此,未来研究区水土流失的治理应以坡度在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 区间的中、高水土流失风险区为主,同时,应适当关注其他区间的中、高风险地区.

在其他因素相对不变的情况下,坡越陡,降雨产生的坡面径流越大,水土流失总动能也越大,从而在坡度越陡的地区产生水土流失的风险性也就越高. 但从研究区坡度分布上看,水土流失风险性并没有随坡度等级的增加而显著增强:除了很低、低风险区主要分布于低、中坡度区外,高级风险区也主要分布于低、中坡度区($0^\circ \sim 35^\circ$),而非高坡度区. 这表明研究区水土流失的风险性因受其他因素的重要影响,使

坡度对其影响的潜在规律不明显.

表 2 各坡度带的风险等级的统计
Tab. 2 Statistics of soil erosion risk level by slope factor

坡度	η (很低)/%	η (低)/%	η (中)/%	η (高)/%
0°~5°	0.102 26	0.019 07	0.041 95	0.166 98
5°~10°	0.063 00	0.028 00	0.027 08	0.108 34
10°~15°	0.076 95	0.052 51	0.036 29	0.101 14
15°~20°	0.107 73	0.094 26	0.062 25	0.114 24
20°~25°	0.138 92	0.146 32	0.104 73	0.127 31
25°~30°	0.158 07	0.188 63	0.156 50	0.131 22
30°~35°	0.148 35	0.193 16	0.190 31	0.113 70
35°~40°	0.109 60	0.149 35	0.179 05	0.077 36
40°~45°	0.059 57	0.082 45	0.119 09	0.039 40
45°~50°	0.024 59	0.033 10	0.056 56	0.014 56
50°~55°	0.008 27	0.009 95	0.019 44	0.004 34
55°~60°	0.002 17	0.002 65	0.005 55	0.001 12
60°~65°	0.000 46	0.000 50	0.001 09	0.000 24
>65°	0.000 06	0.000 05	0.000 11	0.000 05

4.2 植被覆盖度与水土流失风险性的关系分析

针对研究区水土流失风险分布状况,将植被覆盖度进行分级统计,共分为 5 级,并计算整个研究区和不同风险等级的水土流失区中各植被覆盖等级所占的比率(δ),如表 3 所示.

表 3 不同植被覆盖度分布的风险等级的统计
Tab. 3 Statistics of soil erosion risk level by vegetation cover factor

植被覆盖度	δ /%				
	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
很低	0.043 79	0.010 86	0.008 13	0.010 98	0.926 24
低	0.000 03	0.000 13	0.000 74	0.006 05	0.993 05
中	0.000 33	0.001 36	0.005 46	0.043 80	0.949 05
高	0.074 01	0.120 49	0.231 47	0.439 81	0.134 22

由表 3 可知:研究区的居民地、建设用地、水域的植被覆盖度在 0~0.2 之间,其属于水土流失低风险区;在 0~0.4 植被覆盖度区间比低、中等级拥有较高的比例,该风险等级水土流失的其余区域,由于山林较多,植被保护较好,因此,植被覆盖度基本上都在 60%以上,且大多在 80%以上;低级水土流失区的植被覆盖度 99%以上都集中在 0.8~1.0 区间,是植被覆盖度最好的水土流失风险等级,该区域也大多是山林地带,土地开发利用少,植被保护较好;中风险等级水土流失区的植被覆盖度 99%以上,集中于 0.6~1.0 区间,且基本上集中于 0.8~1.0 区间,也是植被覆盖度非常好的区域,该区域也多处山林地带,植被保护较好,但由于地形陡峭的主要原因,使得风险等级较高;高风险等级水土流失区,是植被覆盖最差的流失区,60%以上的植被覆盖度不足 58%,80%以上的不足 14%,该区域是人类活动影响最强烈的地带,土地开发利用大,植被破坏严重,从而导致水土流失极易发生.整体而言,除了高风险等级水土流失区的不同植被覆盖度等级分布比较均匀外(平均植被覆盖度在 0.6~0.7 区间),其余等级水土流失区的 90%以上都集中于 0.8~1.0 的植被覆盖度区间(平均植被覆盖度都在 80%以上).

一般情况下,当其他因素相对不变时,植被覆盖度越高,水土流失的风险性越低,但上述分析可知,在很低、低、中 3 个风险等级区间中,影响水土流失风险性的主要因子除了植被之外,还受其他因子的重要影响,从而导致植被覆盖度与水土流失的一般规律性不明显;同时,高风险等级水土流失区植被覆盖度最差,而高风险区也是研究区水土流失最严重的区域,中度及以上的水土流失主要集中于此,故植被覆盖度是高风险等级水土流失区形成的极重要因素.

5 结束语

福建省长汀县水土流失中、高风险区分布仍较多,未来防治任务依然艰巨.河田、三洲、策武等 3 乡

镇存在较大面积的中、高水土流失风险区,濯田、涂坊、南山、大同及新桥等乡镇的中、高风险分布也较为突出.福建省长汀县水土流失风险呈现出一定的地域性特点,与植被覆盖度有较为严格的负相关关系,但与坡度无严格的正相关关系,且不同风险区形成的主导因素也存在一定的差异性.不合理的人类活动是造成研究区水土流失风险较高的主要原因,在提高植被覆盖度的同时尽量减少不合理的人类活动是研究区未来水土流失防治努力的方向,人类活动强度大的中、高风险区(如河流沿岸、道路两旁、坡耕地集中区、土地资源开采区、土地开发建设区以及居民地或建设用地周围的低植被覆盖区)是水土流失防治的重点目标.

参考文献:

[1] MITRA B,SCOTT H D,DIXON J C,*et al.* Application of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed[J]. *Geoderma*,1988,86(3/4):183-209.

[2] 李秀霞,倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J]. *地理科学进展*,2009,28(3):161-162.

[3] 汪东川,卢玉东. 国外土壤侵蚀模型发展概述[J]. *中国水土保持科学*,2004,2(2):35-40.

[4] COOK M F. The natural and controlling variables of the water erosion process[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1936,1(C):60-64.

[5] 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,1965:282-291.

[6] 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. DOI:10. 3969/j. issn. 1005-3409. 2004. 04. 017.

[7] RENARD K G,FOSTER R,WEESIES G A,*et al.* Predicting rainfall erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[J]. *USDA Agriculture Handbook*,1997,703:1-367.

[8] 卜兆宏,孙金庄,周伏建,等. 水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J]. *土壤学报*,1997,34(3):235-245. DOI:10. 3321/j. issn:0564-3929. 1997. 03. 002.

[9] 汤丽洁,舒畅. 基于 GIS 和 RS 的巢湖流域水土流失评估[J]. *水土保持通报*,2013,33(1):305-308.

[10] 刘波,王培法,余江峰,等. 基于 GIS 和 RS 的长清区南部山区水土流失研究[J]. *遥感信息*,2009(6):15-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3177. 2009. 06. 004.

[11] 陈燕红,潘文斌,蔡莞缤. 基于 RS/GIS 和 RUSLE 的流域土壤侵蚀定量研究:以福建省吉溪流域为例[J]. *地质灾害与环境保护*,2007,18(3):5-10.

[12] 刘森,胡远满,徐崇刚. 基于 GIS、RS 和 RUSLE 的林区土壤侵蚀定量研究:以大兴安岭呼中地区为例[J]. *水土保持研究*,2004,11(3):21-24.

[13] 周斌,杨柏林,洪业汤,等. 基于 GIS 的岩溶地区水土流失遥感定量监测研究:以贵州省(原)安顺市为例[J]. *矿物学报*,2000(1):13-21.

[14] 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. DOI:10. 3321/j. issn:1009-2242. 1992. 04. 004.

[15] 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. DOI:10. 3321/j. issn:1009-2242. 1995. 01. 001.

[16] 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. DOI:10. 3321/j. issn:1009-2242. 1995. 01. 003.

[17] 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. DOI:10. 3321/j. issn: 1009-2242. 1992. 01. 005.

[18] 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. DOI:10. 3321/j. issn:1009-2242. 1995. 01. 012.

[19] 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.

[20] 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. DOI:10. 3321/j. issn:1009-2242. 2004. 05. 019.