

# 土壤水力侵蚀的遥感信息模型研究 ——以江西省为例

刘 波<sup>1</sup> 齐述华<sup>2</sup> 廖富强<sup>2</sup> 李贵才<sup>3</sup>

(1 韶关市政府投资建设项目代建管理局, 韶关市工业西路, 512001)

(2 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌市东湖区北京西路 437 号, 330022)

(3 国家卫星气象中心, 北京市中关村南大街 46 号, 100081)

**摘 要:** 通过利用 Terra/Aqua 卫星上搭载的 MODIS 传感器计算获取的 16 d 合成植被指数产品 (MOD13A2), 进一步按照最大值合成法计算月合成光谱植被指数, 按照 USLE 模型月模式评价江西省 2005 年土壤侵蚀, 并与传统的 USLE 模型年模式计算的结果进行了比较。

**关键词:** 土壤侵蚀; USLE; 遥感; 江西

**中图法分类号:** P237.9

土壤侵蚀是在各种外营力的作用下, 土壤物质被剥离、迁移、沉积的过程, 是地球表面最普遍的自然地理过程, 也是导致全球土地退化面积最大的生态环境问题<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀模型分为经验统计模型和物理过程模型。经验统计模型选取影响某一流域侵蚀产沙较大的若干因子进行统计分析, 从而得到侵蚀量和各因子之间的关系。物理模型采用数学和物理公式模拟降雨、截流、填洼、产流、汇流等水文过程和土粒分离、搬运、沉积等侵蚀过程, 模型物理意义明确, 但需要输入大量难以获取的分布式物理参数, 难以用于评价大区域的土壤侵蚀, 但在小流域水土流失模拟实验中广泛使用。

通用土壤流失方程 (universal soil loss equation, USLE) 模型是 Wischmeier 等提出的用于定量预报土壤侵蚀的经验模型<sup>[2]</sup>, 该模型采用 6 个影响因子连乘的模式计算年总土壤侵蚀量。自 20 世纪 80 年代以来, USLE 模型在我国也得到了广泛应用<sup>[3~8]</sup>, 但在利用 USLE 模型的过程中, 往往忽略植被覆盖的季节动态性和降水的季节不均匀性, 采用年总降水和单一的植被覆盖因子参与运算<sup>[3~7]</sup>。游松材等<sup>[8]</sup>认识到植被覆盖的季节性, 但受遥感数据获取的限制, 只采用年平均植被覆盖度参与 USLE 模型运算。随着遥感技术的

发展, 快速获取陆地表面植被覆盖已成为可能, 因此, 充分考虑植被覆盖的季节变化特征与降水组合具有可行性, 也必然会提高土壤侵蚀的准确性。

## 1 研究区概况

江西省位于长江中下游南岸, 地处北纬 24°29′~30°05′、东经 113°35′~118°29′之间, 东南西三面环山, 北有鄱阳湖, 内侧丘陵广亘, 中部平原坦荡, 地势自南而北向鄱阳湖倾斜。国土总面积为 16.69×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 以山地、丘陵为主。江西省属亚热带湿润季风气候区, 多年平均降水量在 1 400~1 900 mm 之间, 降雨地区省境四周多于中部, 雨量东部大于西部。但全省降水时段普遍相对集中, 主要分布在 4~8 月<sup>[9]</sup>, 并且全省分布较广的第四纪红壤, 土壤质地黏重、透水性差, 极易造成水力侵蚀, 属典型的南方丘陵红壤区。

由于自然、社会和历史的原因, 江西各地都有不同程度的水土流失, 许多森林资源遭到严重破坏, 导致生态环境恶化, 是我国水土流失比较严重的省份之一, 流失面积自 20 世纪 50~80 年代呈逐年扩大的趋势<sup>[10]</sup>, 水土流失重灾区主要集中在兴国县、于都县、宁都县、赣县、南康市、章贡区等。据 1996 年卫星遥测资料<sup>[11]</sup>, 全省水土流失面积

$3.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 21.1%, 其中轻度流失面积  $1.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 中度流失面积  $1.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 强度及其以上流失面积  $1.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。经过近 30 a 的生态环境治理, 江西省陆地植被生态系统的面积显著提高, 尽管林相结构还存在着一些问题, 但自 20 世纪 80 年代以来, 赣江外洲水文站观测的输沙量持续下降, 表明赣江流域水土流失治理取得了显著的成效。

## 2 模型原理

通用土壤流失方程 (USLE) 是美国农业部 (USDA) 1958 年利用 36 个地区 8 000 个径流小区 1 a 的观测数据得出的分析研究成果, 其模型方程表达式为:

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

随着遥感技术的发展, 快速获取陆地表面植被覆盖成为可能, 考虑到降水的时间不均衡性和植被覆盖的季节动态性, 将 USLE 模型修正为:

$$A = K \times L \times S \times P \times \sum_{m=1}^{12} (R_m \times C_m) \quad (2)$$

式中,  $m$  为月份。为方便下文区分, 按式(1)式计算土壤侵蚀的方法称为 Yearly-USLE 模式, 按式(2)计算土壤侵蚀的方法称为 Monthly-ULSE 模式。

## 3 USLE 模型参数的计算

### 3.1 土壤可蚀性因子

土壤可蚀性因子  $K$  是单位侵蚀力所产生的土壤流失量, 反映土壤对侵蚀的敏感性。  $K$  值主要与土壤质地、土壤结构、土壤渗透性、有机质含量和土壤深度等因素的影响。当土壤颗粒粗、渗透性大时  $K$  值就低, 反之则高; 抗侵蚀能力强的土壤  $K$  值低, 反之则高。本文根据江西省地质岩性图和全国第二次土壤普查得到的 1:50 万江西省土壤图, 按照可蚀性因子查找表(表 1)形成江西省土壤可蚀性因子分布图。

表 1 江西省土壤可蚀性因子查找表<sup>[12-13]</sup>

Tab. 1 The Look Up Table of Soil Erodibility for Jiangxi Province Soil

土壤代码	土壤名称	土壤母质类型	可蚀性(K 值)
10	红壤	花岗岩、片麻岩、石英砂岩等残积和残积坡积物	0.224 2
20	黄壤	花岗岩、砂岩、混合岩及第四纪风积物	0.228
30	黄棕壤	中酸性岩分化物及弱富铝分化的第四纪沉积物	0.219
40	山地草甸土	坡积物	0.244 0
50	紫色土	紫色砂页岩	0.342
60	黄褐土	在富钙的黄土性母质上发育的残余碳酸盐黄棕壤	0.219
70	火山灰土	火山灰母质	0.219
80	石灰土	石灰岩	0.217
90	新积土	新近冲击物、洪积物和塌积物	0.037
11	石质土	基岩风化的残积母质	0.219 6
12	粗骨土	石灰岩类风化的残积物	0.144 2
13	潮土	河湖沉积物	0.339
14	水稻土	各类自然土壤水耕熟化而成	0.39

### 3.2 坡长坡度因子(LS)<sup>[14]</sup>

坡长坡度因子反映了地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。坡长被定义为一点沿水流方向到其流向起点的最大地面距离在水平面上的投影长度。按照这种定义可实现坡长的离散化, 为 GIS 方法基于栅格数据计算坡长提供了理论基础。本文利用 SRTM(shuttle radar topography mission) 获得的 90 m 空间分辨率的 DEM 数据, 用 Arc/Info 的 GRID 模块进行基于 DEM 的地形分析, 提取坡度坡长图。土壤流失方程中的坡长因子  $L$  的计算方法为:

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (3)$$

式中,  $L$  为标准化到 22.13 m 坡长上的土壤侵蚀

量;  $\lambda$  为坡长:

$$\lambda = \text{flowacc} \times \text{cell size} \quad (4)$$

其中 flowacc 可由 ArcGIS Toolbox 中水文分析模块实现;  $m = n/(1+n)$ , 其中,

$$n = (\sin\theta/0.0896)/(3.0 \times \sin^{0.8}\theta + 0.56) \quad (5)$$

式中,  $\theta$  为坡度。坡度因子采用分段计算, 即缓坡采用 McCool<sup>[15]</sup> 公式, 陡坡采用 Liu<sup>[16]</sup> 公式:

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin\theta + 0.03, & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \times \sin\theta - 0.50, & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \times \sin\theta - 0.96, & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (6)$$

### 3.3 降雨侵蚀因子 R

降雨侵蚀因子与降雨量、降雨强度、历时、雨

滴的大小以及雨滴下降速度有关,反映降雨对土壤的潜在侵蚀能力。降雨侵蚀力难以直接测定,大多用降雨参数,如雨强、雨量等来估算降雨分侵蚀力。周伏建等<sup>[17]</sup>根据福建省 5 个试验观测站资料,提出了适用于福建省的年降雨侵蚀力指标的计算公式:

$$R = \sum_{m=1}^{12} (-2.6398 + 0.3046 \times P_m) \quad (7)$$

考虑到江西省与福建省具有相似的土壤植被景观特征,并认为月降雨侵蚀力总是不小于 0,并参考式(7),形成月降雨侵蚀力计算公式:

$$R = \begin{cases} -2.6398 + 0.3046 \times P_m, P_m \geq 8.7 \text{ mm} \\ 0, P_m < 8.7 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $P_m$  为月降雨量(mm);  $R_m$  为月降雨侵蚀力。

### 3.4 土地覆盖因子 C

C 是根据地面植被覆盖状况不同而反映植被对土壤侵蚀影响的因素,与土地利用类型、覆盖度密切相关。根据文献[6]的方法, C 可以表达为:

$$C = \begin{cases} 1, f_c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f_c, 0 < f_c < 78.3\% \\ 0, f_c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $f_c$  为植被覆盖度。根据植被覆盖度的像元二分模型,通过遥感传感器所观测到的信息可以表达为由绿色植被部分所贡献的信息和由无植被覆盖(裸土)部分所贡献的信息两部分组成。像元二分模型估算植被覆盖度时多采用 EVI (enhanced vegetation index), 此时植被覆盖度的估算公式为<sup>[18]</sup>:

$$f_c = \frac{EVI_m - EVI_{\min}}{EVI_{\max} - EVI_{\min}} \quad (10)$$

式中,  $EVI_m$  为某像元具体某时间的植被指数;  $EVI_{\min}$  代表裸土条件下的植被指数;  $EVI_{\max}$  代表植被完全覆盖条件下的植被指数;  $EVI_{\min}$  和  $EVI_{\max}$  分别由 2005 年 MODIS 传感器获取的 EVI 数据产品累积概率达到 10% 和 90% 所对应的 EVI 值替代。

### 3.5 水土保持措施因子

水土保持措施因子为措施后土壤流失量与顺坡种植土壤流失量的比值,无任何水土保持措施的土地类型取值 1, 其他情况在 0~1 之间。本文首先利用 2005 年 Landsat 卫星获取的影像,采用监督分类和目视判读相结合的方法,进行江西省土地利用制图,然后根据傅世锋等<sup>[5]</sup>划分的土地利用方式确定水土保持措施因子(表 2)。

表 2 不同土地利用方式的水土保持措施因子

Tab. 2 P Value Forwater and Soil Conserving Operation

土地利用类型	水田	旱地	林地	灌木林	疏林地	园地	造林地	迹地
P 值	0	0.3	1.0	1.0	1.0	0.3	0.2	0.2
土地利用类型	城镇用地		农村居民点		工交建设用地		裸地	水域
P 值	1.0		1.0		1.0		1.0	0

## 4 结果与讨论

### 4.1 2005 年江西省土壤侵蚀状况

参照水利部 1997 年发布的土壤侵蚀分类分级标准划分江西省土壤侵蚀等级,结果表明:

1) 根据 USLE 模型计算出不同土壤侵蚀强度的面积(表 3),利用年模式和月模式计算结果的平均面积表明,2005 年江西省轻度以上强度侵蚀面积 40 312 km<sup>2</sup>, 约占国土面积的 24.1%; 中度以上侵蚀面积达总面积约 14 906 km<sup>2</sup>, 占国土总面积的 8.92%, 其中中度侵蚀面积 8 374 km<sup>2</sup>, 强度侵蚀面积 3 089 km<sup>2</sup>, 极强度侵蚀面积 2 087 km<sup>2</sup>, 剧烈侵蚀面积 1 356 km<sup>2</sup>。

2) 从彩色插页 I 图 1 可以看出,鄱阳湖平原、吉泰盆地等地形平缓地区的土壤侵蚀不明显, 强度以上侵蚀区主要分布于赣江、抚河、信江、饶

河、修河等五河上中游地区, 范围广泛, 土壤侵蚀形势依然严峻;

3) 按照 USLE 模型的月模式和年模式计算江西省 2005 年总的土壤侵蚀量分别为 1.268 亿吨和 1.424 亿吨, 平均为 1.346 亿吨, 全省土壤侵蚀模数平均为 805.6 吨/(km<sup>2</sup>·a)。

根据 Monthly\_USLE 计算的结果, 利用江西省行政县(区市)边界, 统计各县的平均土壤侵蚀模数(彩色插页 I 图 1), 结果表明, 江西省土壤侵蚀依然严重的县主要有: 赣西北的铜陵、修水、武宁县, 赣西的井冈山市和崇义县以及赣东的资溪县和铅山县; 土壤侵蚀比较严重的县主要有: 赣东北的德兴市、上饶县、玉山县和广丰县, 上犹县、遂川县、莲花县、上栗县和芦溪县, 赣西北的瑞昌市和靖安县; 赣中的宜黄县。

### 4.2 Yearly-USLE 与 Monthly-USLE 的比较

从表 2 和彩色插页 I 图 1 可以看出, Yearly-

表3 土壤侵蚀分类分级标准及2005年江西省各侵蚀强度的面积

Tab.3 Grading Standard for Soil Erosion Intensity and Area for Every Level in Jiangxi Province in 2005

土壤侵蚀强度分级	年均侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> ·a)	土壤侵蚀面积和比例			
		Yearly-USLE		Monthly-USLE	
		面积/km <sup>2</sup>	占总面积比例	面积/km <sup>2</sup>	占总面积比例
无侵蚀	0	83 926.76	0.502	83 926.87	0.502
微度侵蚀	<500	41 442.50	0.248	42 807.36	0.256
轻度侵蚀	500~2 500	25 697.93	0.154	26 479.58	0.159
中度侵蚀	2 500~5 000	8 882.66	0.053	7 865.51	0.047
强度侵蚀	5 000~8 000	3 335.24	0.020	2 842.38	0.017
极强度侵蚀	8 000~15 000	2 271.19	0.014	1 902.92	0.011
剧烈侵蚀	>15 000	1 490.12	0.009	1 222.00	0.007

USLE 与 Monthly-USLE 计算各级土壤侵蚀强度的面积差异比较明显,其中 Monthly-USLE 计算的强度以上侵蚀的面积分别比 Yearly-USLE 小 17%、19%和 22%。Yearly-USLE 计算的年总土壤侵蚀量也比 Monthly-USLE 结果大 12%。造成这种差异的原因主要是:根据 2005 年江西省及其周边的 120 个雨量站观测的降水资料表明,降水的季节性非常明显,主要集中在 5~8 月份,占全年总降水量的 65.7%,降水的不均匀和植被的季节性变化是导致结果存在差异的最主要原因。

## 5 结 语

本文利用 2005 年的 MODIS 植被指数产品推算的各月份植被覆盖情况和各月降水,结合 USLE 模型,按照两种模式评价了江西省 2005 年土壤侵蚀现状。江西省强度以上侵蚀主要分布于鄱阳湖流域的五大河流的中上游山区;由于降雨和植被生长的季节性,认为按月计算土壤侵蚀会更合理;近些年来,江西省土壤侵蚀得到一定程度的遏制,生态环境工程建设在遏制土壤侵蚀的进一步发展取得了显著的成效,但江西省土壤侵蚀依然比较严重,特别严重的县(市区)有:赣西北的铜陵、修水、武宁县;赣西的井冈山市和崇义县以及赣东的资溪县和铅山县。

此外,文中利用遥感获取光谱植被指数计算植被覆盖度来指示土地覆盖因子,忽略林相结构等对土壤侵蚀的影响,忽略不同树冠类型对降雨截留能力的差异,都将对耦合遥感的 USLE 定量估计产生误差。

## 参 考 文 献

[1] 李天杰,赵焯,张科利,等. 土壤地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:302-304  
 [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-erosion Losses from Cropland East of the Rocky

Mountains[R]. USDA Agricultural Handbook, United States Department of Agriculture, Washington D C, 1965

- [3] 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  
 [4] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. 应用 USLE 和地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(2):19-24  
 [5] 傅世锋,查轩. 基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J]. 地球信息科学,2008,10(3):390-395  
 [6] 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  
 [7] 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  
 [8] 游社财,李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪镇为例[J]. 自然资源学报,1999,14(1):62-68  
 [9] 马良,姜广辉,左长清,等. 江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(10):61-68  
 [10] 谢永生. 长江中游洞庭湖、鄱阳湖流域水土流失特点与防治对策[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):8-12  
 [11] 姚毅臣,王红东. 江西省水土流失现状及治理对策[J]. 水土保持研究,2002,9(4):119-121  
 [12] 梁音,史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 水土保持研究,1999,6(2):47-52  
 [13] 赵其国,张桃林,鲁如坤,等. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京:科学出版社,2002  
 [14] 孔亚平,张科利,曹龙熹. 土壤侵蚀研究中的坡长因子评价问题[J]. 水土保持研究,2008,15(4):43-48  
 [15] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of ASAE, 1989,

- 32: 1 571-1 576
- [16] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope Gradient Effectson Soil Loss for Steep Slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37:1 835-1 840
- [17] 周伏建, 陈明华, 林福兴. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13-18
- [18] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRIS 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24
- [19] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准[M]. 北京: 中国水利水电出版社出版, 1997: 9-10
- [20] 姚毅臣, 王红东. 江西省水土流失现状及治理对策[J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 119-121
- [21] 水电部南京水文水资源研究所, 江西省水土保持委员会办公室. 应用遥感技术编制江西省土壤侵蚀图研制成果报告[R]. 南昌, 1988
- [22] 江西省水土保持委员会办公室, 中国科学院南京土壤研究所. 江西省水土流失遥感调查成果报告[R]. 南昌, 1998
- [23] 黄越, 彭泽洲, 滑舸. 卫星遥感技术在江西水土流失调查中的应用[J]. 江西地质, 2001, (15)3: 197-202
- [24] 江西省水利厅《江西省第三次土壤侵蚀遥感调查》编制组. 江西省第三次土壤侵蚀遥感调查土壤侵蚀现状和动态变化分析报告[R]. 南昌, 2001

第一作者简介: 刘波, 高级工程师, 博士, 主要研究方向是遥感与地理信息系统。

E-mail: zjliubo@vip. sina. com

## Study on Hydraulic Soil-Erosion with Remote Sensing Information for Jiangxi Province

LIU Bo<sup>1</sup> QI Shuhua<sup>2</sup> LIAO Fuqiang<sup>2</sup> LI Guicai<sup>3</sup>

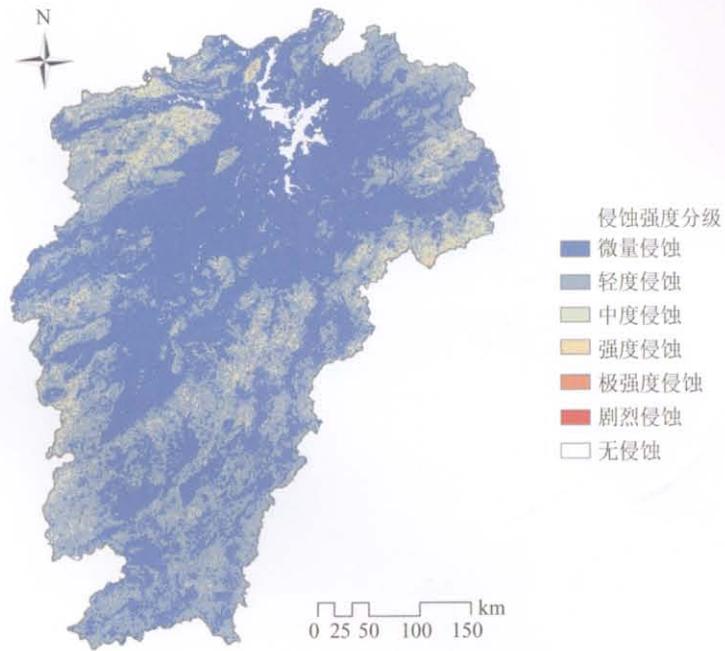
(1 Shaoguan Bureau of Agency of Construction Management, West Gongye Road, Shaoguan 512001, China)

(2 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, 437 West Beijing Road, Nanchang 330022, China)

(3 National Satellite Meteorological Center, 46 South Zhongguancun Street, Beijing 100101, China)

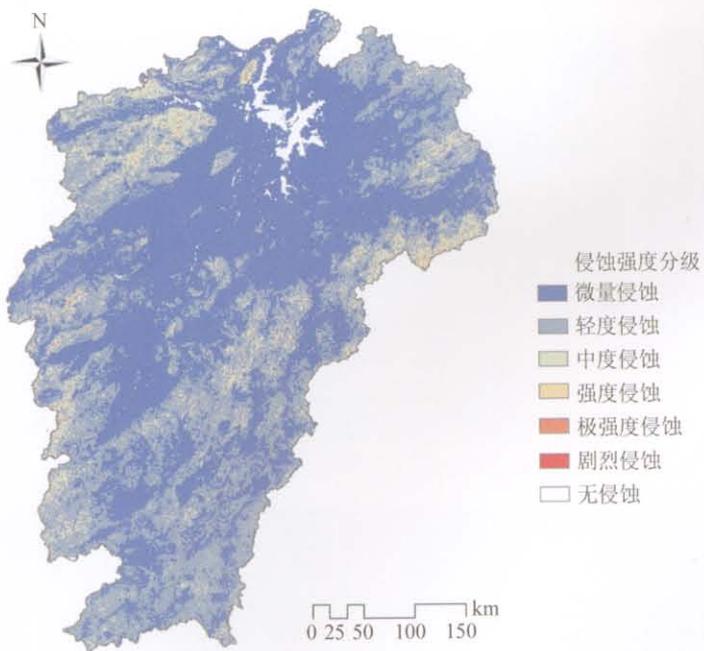
**Abstract:** Rich of quaternary red soil with sticky clay, low water permeability and abundant precipitation caused soil erosion extensive in Jiangxi Province. USLE have been used in evaluating soil erosion for several decades with a multiplication formula by 5 parameters characterizing annual erosion power of precipitation, annual vegetation factor, topography, measure of land management and Soil erodibility respectively. Considering that most of precipitation happened during from May to August in Jiangxi Province and the growth of the vegetation show seasonal temporal pattern, improving USLE with a monthly model was attempted for Jiangxi Province with the monthly EVI composited from the 8-day MODIS EVI product in 2005. Results showed that: (1) Soil erosion is still serious in Jiangxi Province, serious erosion was widely happened over the upper and middle reaches of Ganjiang River, Huhe River, Xinjiang River, Raohe River and Xiuhe River and the amount of soil erosion is about  $1.346 \times 10^9$  ton p. a. ; (2) about 21.4% of the area in Jiangxi Province is in soil erosion. The region with a area of  $14906 \text{ km}^2$  is in over-moderate soil erosion, in which the area of moderate soil erosion is  $8374 \text{ km}^2$ , of intensive soil erosion is  $3089 \text{ km}^2$ , of extreme intensive erosion is  $\text{km}^2$  and of drastic intensive erosion is  $1356 \text{ km}^2$ ; (3) though the Monthly-USLE is more reasonable because of the seasonality of precipitation and vegetation growth, the soil erosion happened in Jiangxi Province from Monthly-USLE is not similar with that from Yearly-USLE. The soil loss estimated by Monthly-USLE is smaller than that by Yearly-USLE.

**Key words:** soil erosion; USLE; remote sensing; Jiangxi province



Monthly-USLE

(a)



Yearly-USLE

(b)

图 1 2005 年江西省土壤侵蚀等级空间分布

Fig. 1 Soil Lose Level Spatial Pattern for Jiangxi Province in 2005