

基于 USLE 模型的 2001—2015 年 江西省土壤侵蚀变化研究

周夏飞, 马国霞, 曹国志, 於方, 周颖, 贾倩, 张宇航

(环境保护部 环境规划院, 北京 100012)

摘要: [目的] 准确估算区域土壤侵蚀量并掌握其动态变化, 指导区域水土保持规划。[方法] 基于通用土壤流失方程(USLE)模型, 利用遥感数据、气象数据、DEM 等数据测算 2001、2015 年的土壤侵蚀模数, 分析 2001—2015 年江西省土壤侵蚀强度的动态变化特征。[结果] 江西省土壤侵蚀状况在 2001—2015 年得到一定程度的改善, 2001 年土壤侵蚀模数为 $7\,042.4\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 2015 年土壤侵蚀模数为 $6\,375.3\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 降低了约 9.5%; 全省大部分地市的土壤侵蚀强度降低, 其中抚州市、宜春市、赣州市、萍乡市等 4 市的平均土壤侵蚀模数下降幅度最为显著; 但也有少量地市的土壤侵蚀呈进一步扩大趋势, 主要有九江市、南昌市、新余市; 土壤侵蚀强度转移矩阵表明江西省大部分区域侵蚀强度等级不变, 部分地区侵蚀强度等级向低一级转移; 2001—2015 年 52.7% 的面积土壤侵蚀强度等级不变, 25.8% 的面积土壤侵蚀强度等级降低一级。[结论] 江西省土壤侵蚀状况总体上有所好转, 但部分地市的土壤侵蚀进一步扩大, 水土流失的形势依然十分严峻。

关键词: 江西省; USLE; 土壤侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)01-0008-04

中图分类号: S157, P237

文献参数: 周夏飞, 马国霞, 曹国志, 等. 基于 USLE 模型的 2001—2015 年江西省土壤侵蚀变化研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 8-11. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.002. Zhou Xiafei, Ma Guoxia, Cao Guozhi, et al. Soil erosion changes in Jiangxi Province from 2001 to 2015 based on USLE model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 8-11.

Soil Erosion Changes in Jiangxi Province from 2001 to 2015 Based on USLE Model

ZHOU Xiafei, MA Guoxia, CAO Guozhi, YU Fang,

ZHOU Ying, JIA Qian, ZHANG Yuhang

(Environmental Planning Institute, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China)

Abstract: [Objective] To estimate regional soil erosion modulus and the dynamic change accurately for soil and water conservation planning. [Methods] Using USLE (universal soil loss equation) model, the soil erosion modulus in Jiangxi Province in 2001 and 2015 were estimated with remote sensing data, meteorological data and DEM. Then the temporal and spatial changes of soil erosion intensity in Jiangxi Province from 2001 to 2015 were analyzed. [Results] From 2001 to 2015, soil erosion in Jiangxi Province showed a declining tendency. The soil erosion modulus in 2001 was $7\,042.4\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ and the soil erosion modulus in 2015 was $6\,375.3\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, decreased by 9.5%. The soil erosion intensity has decreased in most of the cities in Jiangxi Province. The soil modulus decreased significantly in Fuzhou, Yichun, Ganzhou and Pingxiang Cities. But soil erosion modulus increased in a few cities such as Jiujiang, Nanchang and Xinyuin. The transformation matrix of soil erosion intensity indicated that soil erosion intensity remained unchanged in 52.7% of the total area of Jiangxi Province from 2001 to 2015. About 25.8% of the total area experienced soil erosion intensity transformation from high level to low level during 2001—2015. [Conclusion] The soil

收稿日期: 2017-05-18

修回日期: 2017-07-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“中国区域经济发展的生态环境代价核算及趋势模拟”(41371533); 国家科技支撑计划课题(2015BAK12B02)

第一作者: 周夏飞(1991—), 男(汉族), 湖南省祁东县人, 硕士, 研究方向为资源环境遥感、环境风险评估等。E-mail: zhouxf@caep.org.cn.
通讯作者: 於方(1972—), 女(汉族), 山西省太原市人, 博士, 研究员, 主要从事环境经济核算、环境损害评估等研究。E-mail: yufang@caep.org.cn.

erosion situation in Jiangxi Province has improved in general, but the soil erosion in some cities has expanded further, and the situation of soil and water loss remains serious.

Keywords: Jiangxi Province; USLE; soil erosion

土壤侵蚀是全球性的重大环境问题之一。它不仅造成土地资源的破坏,导致农业生产环境恶化,生态平衡失调,而且还影响农业生产的发展^[1-2]。中国土壤侵蚀尤为严重,遭受土壤侵蚀的面积约为 $3.60 \times 10^6 \text{ km}^2$,占国土面积的 37%^[3]。因此,准确估算区域土壤侵蚀量并掌握其动态变化,对指导区域水土保持规划、优化水土资源利用具有重要的意义。

目前,利用模型方法估算土壤侵蚀量是最有效的手段之一,最早的土壤侵蚀模型是由美国学者 Wischmeier 于 1965 年提出的通用土壤流失方程 (USLE)^[4],该方程较为全面的考虑了影响土壤侵蚀的各种因素,因其具有一定的精度又相对简单,至今仍是土壤侵蚀估算的主要工具^[5-6]。在近 40 a 多的研究中,许多国家和地区以 USLE 为基础,结合本国本地区的实际情况,对 USLE 模型各因子^[5,7-11]进行修正,建立了适合各自国家或地区的通用土壤流失方程,如江忠善等^[12]考虑浅沟侵蚀对坡面侵蚀的影响,构建的坡面土壤流失预报模型和刘宝元等^[13]建立的中国水土流失方程 (chinese soil loss equation, CSLE)。

江西省位于长江中下游南岸,地理坐标为 $24^{\circ}29' - 30^{\circ}05' \text{ N}$, $113^{\circ}35' - 118^{\circ}29' \text{ E}$,总面积为 $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$,属于亚热带季风气候,地形以山地、丘陵为主,多年平均降水量在 $1\ 400 \sim 1\ 900 \text{ mm}$ 之间,江西省属于中国南方典型的红壤区,其红壤的成土母质主要有 4 种,其中第四纪红土、红砂岩和花岗岩发育的红壤分布较广,土壤质地黏重、透水性差,极易造成水力侵蚀。由于自然、社会和历史的原因,江西省是中国水土流失最严重的省份之一,水土流失面积自 20 世纪 50—80 年代呈逐年扩大的趋势^[14]。

基于此,本文拟基于 USLE 模型,利用遥感数据、气象数据、DEM 数据计算 2001,2015 年江西省土壤侵蚀量,并分析其 2001—2015 年土壤侵蚀动态变化,以期对江西省水土保持和生态环境管理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源及预处理

(1) 遥感数据。本文采用的遥感数据为 2001,2015 年的 MOD13 A3 数据,来源于美国国家航空航天局 (NASA) 的 EOS/MODIS 数据产品 (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov>),空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,时

间分辨率为 1 个月。由于 MODIS/NDVI 产品经过水、云、气溶胶等处理,保证了数据质量,加之较高的空间分辨率,因此被广泛应用于土壤侵蚀量估算的研究中。

(2) 土地利用类型数据。本文采用的土地利用类型数据为 2000,2015 年的土地利用类型数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (www.resdc.cn),空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$;土地利用类型数据分为耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地的 6 个 I 级类型以及 25 个 II 级类型。

(3) 土壤类型数据。本文采用的土壤类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (www.resdc.cn),空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$;土壤类型数据共分为 12 土纲,61 个土类,227 个亚类。

(4) 数字高程模型 (DEM) 数据。本文采用的 DEM 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (www.resdc.cn),空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。

(5) 气象数据。本文所利用的气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),时间为 2001,2015 年,数据内容为月降水量,以及各气象站点的经度、纬度和海拔高度。计算土壤侵蚀量需要栅格化的气象数据,并从空间上与遥感数据相匹配。利用 GIS 的插值工具,根据各气象站点的经纬度信息,通过对气象数据进行 Kriging 插值和基于 DEM 的插值,获取像元大小与 NDVI 数据一致、投影相同的气象要素栅格图。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤侵蚀量估算 本研究采用通用土壤流失方程 (USLE) 估算土壤侵蚀量,其计算式为:

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

式中: A ——年土壤侵蚀量 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; R ——降雨侵蚀力因子 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; K ——土壤可蚀性因子 [$\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$]; LS ——坡长坡度因子,无量纲; C ——植被覆盖因子,无量纲; P ——水土保持措施因子,无量纲。下同。

(1) 降雨侵蚀力因子 R 的估算。采用周伏建等^[15]提出的 R 值计算式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792P_i) \quad (2)$$

式中: P_i ——月降雨量 (mm)。

(2) 土壤可蚀性因子 K 值的估算。采用陈明华等^[16]建立的土壤可蚀性 K 值计算公式:

$$K=10^{-3}(160.80-2.31x_1+0.38x_2+2.26x_3+1.31x_4+14.67x_5) \quad (3)$$

式中： x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ——细砾、细砂、粗粉粒、细粉粒、有机质的百分含量。在此公式中：要求土壤颗粒分析标准为美国制，而中国土壤普查一般采用国际制，因此需进行质地转换。

$$\text{转换方程为：} y=ax^b \text{ 和 } y=ax^2+bx+c \quad (4)$$

式中： $x = \ln p$ ， p ——粒径大小(mm)； y ——小于 p 粒径的累计颗粒含量百分数(%)。

(3) 地形因子 LS 值的估算。通过数字高程模型 (DEM)，计算获得坡长和坡度，然后根据林敬兰等^[17]建立的方程式，获得 LS 的空间分布特征：

$$LS=0.08L^{0.35}\alpha^{0.6} \quad (5)$$

式中： L ——坡长(m)； α ——百分比坡度。

(4) 地表覆盖因子 C 值的估算。地表覆盖因子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、植被覆盖度密切相关^[18]。 C 值的估算采用如下公式：

$$C=\begin{cases} 1 & (f_c=0) \\ 0.6508-0.3436\lg f_c & (0<f_c\leq 78.3\%) \\ 0 & (f_c>78.3\%) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_c=(\text{NDVI}-\text{NDVI}_{\min})/(\text{NDVI}_{\max}-\text{NDVI}_{\min}) \quad (7)$$

式中： f_c ——植被覆盖度，它由亚像元分解法^[19]计算得到； NDVI_{\min} ——植被整个生长季的 NDVI 最小值； NDVI_{\max} ——植被整个生长季的 NDVI 最大值。

(5) 水土保持措施因子 P 值的估算。 P 为实施水土保持措施后土壤流失量与顺坡种植土壤流失量的比值。本文中耕地的 P 值为 0.15，其他土地利用类型取值为 1.00，在 GIS 软件下生成 P 因子栅格图。

1.2.2 土壤侵蚀强度分级 本研究主要参考水利部颁发的土壤侵蚀强度分类分级标准 (SL190-96)^[20]对江西省进行土壤侵蚀量的等级划分(表 1)，由于江西省属于南方红壤丘陵区，土壤容许流失量为 500 t/(km²·a)，相当于微度的侵蚀模数，因而微度侵蚀地块可认为是无水土流失。

表 1 土壤侵蚀强度分级

| 土壤侵蚀强度 | 土壤侵蚀模数范围/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) |
|--------|---|
| 微度侵蚀 | <500 |
| 轻度侵蚀 | 500~2 500 |
| 中度侵蚀 | 2 500~5 000 |
| 强度侵蚀 | 5 000~8 000 |
| 极强度侵蚀 | 8 000~15 000 |
| 剧烈侵蚀 | >15 000 |

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀强度年际变化

2001—2015 年江西省土壤侵蚀模数计算结果如图 1 所示，土壤侵蚀强度面积百分比统计结果如表 2 所示。结果表明，江西省土壤侵蚀状况在 2001—2015 年期间得到一定程度的改善，具体表现在：2001 年江西省平均土壤侵蚀模数为 7 042.4 t/(km²·a)，2015 年土壤侵蚀模数为 6 375.3 t/(km²·a)，降低约 9.5%；轻度侵蚀以上面积所占比例由 78.60%下降为 61.93%；这主要是由于江西省政府自 20 世纪 80 年代以来积极开展山江湖建设工程，清理江湖泥沙淤积、并在城镇范围大量植树造林，提高区域植被覆盖，减少水土流失。

表 2 2001—2015 年江西省土壤侵蚀强度面积百分比变化

| 侵蚀强度 | 面积比例/% | |
|-------|--------|--------|
| | 2001 年 | 2015 年 |
| 微度侵蚀 | 21.40 | 38.07 |
| 轻度侵蚀 | 9.16 | 5.55 |
| 中度侵蚀 | 17.33 | 11.35 |
| 强度侵蚀 | 15.44 | 14.27 |
| 极强度侵蚀 | 23.28 | 17.2 |
| 剧烈侵蚀 | 13.39 | 13.56 |

从各地市级来看，江西省大部分地市的土壤侵蚀模数降低，其中，抚州市、宜春市、赣州市、萍乡市等 4 市的平均土壤侵蚀模数下降幅度最为显著，下降幅度达到 1 500 t/(km²·a)，但九江市、南昌市、新余市的土壤侵蚀呈进一步加剧趋势(表 3)。

表 3 2001—2015 年江西省各地市平均土壤侵蚀模数变化 t/(km²·a)

| 城市 | 平均土壤侵蚀模数 | |
|-----|----------|---------|
| | 2001 年 | 2015 年 |
| 九江 | 7 440.0 | 7 817.9 |
| 抚州 | 8 166.8 | 6 183.6 |
| 鹰潭 | 6 354.9 | 6 031.4 |
| 景德镇 | 6 320.7 | 5 159.1 |
| 宜春 | 6 612.0 | 6 009.9 |
| 赣州 | 7 394.7 | 5 616.0 |
| 南昌 | 2 956.6 | 3 822.8 |
| 萍乡 | 10 417.6 | 8 087.1 |
| 上饶 | 6 909.1 | 6 640.7 |
| 吉安 | 7 383.3 | 7 248.0 |
| 新余 | 6 706.3 | 7 660.1 |

2.2 土壤侵蚀强度空间分布变化

2.2.1 空间分布特征 在空间上江西省土壤侵蚀主要发生在鄱阳湖流域各子流域的上游,这主要是由于鄱阳湖流域的上游地区海拔较高,坡度较陡,同时广泛分布着具有较高土壤可蚀性因子的红壤,具备产生土壤侵蚀的自然条件;而在广大的鄱阳湖平原地区,由于地形平坦,坡度较缓,土壤侵蚀较弱。

2.2.2 空间分布变化 为进一步揭示中国土壤侵蚀强度变化的空间分布特征,本文利用 GIS 的空间分析功能分析了 2001—2015 年土壤侵蚀强度空间转化,结果如附图 2 所示。通过统计可以得知,2001—2005 年土壤侵蚀强度不变的面积占总面积的 52.7%,主要分布在南昌市、鹰潭市北部、吉安市中部、赣州市中部等地区;土壤侵蚀强度降低一级的面积占 25.8%,主要分布在九江市中东部、宜春市中部及北部、南昌市西部、鹰潭市北部、吉安市西部等地区;土壤侵蚀强度升高幅度较大的区域主要分布在九江市西部、景德镇市北部、上饶市北部、抚州市中部、宜春市西北部、萍乡市南部、赣州市西北部等地区,这主要有两方面的原因:一是由于鄱阳湖流域的上游地区海拔较高,坡度较陡,同时广泛分布着具有较高土壤可蚀性因子的红壤,再加之 2015 年降水量较大,导致上游部分地区(如九江、景德镇等)土壤侵蚀偏高;二是由于江西省是有色金属、稀土之乡,部分地区(如赣州等)采矿活动相对较多,导致土壤侵蚀偏高。

对不同土壤侵蚀强度面积数据进行分析,制成土壤侵蚀强度转移矩阵(如表 4 所示)。2001—2015 年江西省微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀、剧烈侵蚀的稳定率分别为 79.9%,84.3%,69.7%,58.8%,72.8%,70.5%;江西省大部分地区土壤侵蚀强度向低等级转移,2001—2015 年剧烈侵蚀中 53.0%转为微度侵蚀,极强度侵蚀中 35.9%转为微度侵蚀;强度侵蚀中 16.8%转为微度侵蚀,这与江西省政府自 20 世纪 80 年代以来实施的山江湖工程建设所取得的重大的生态环境建设效益密不可分。

表 4 2001—2015 年江西省土壤侵蚀强度转移矩阵 %

| 项目 | 2015 年 | | | | | |
|--------|--------|------|------|------|------|------|
| | 微度 | 轻度 | 中度 | 强度 | 极强 | 剧烈 |
| 2001 年 | 88.4 | 1.3 | 0.1 | 0.6 | 2.8 | 6.9 |
| 微度 | 88.4 | 1.3 | 0.1 | 0.6 | 2.8 | 6.9 |
| 轻度 | 1.7 | 57.6 | 40.5 | 0.2 | 0.0 | 0.0 |
| 中度 | 5.6 | 0.0 | 43.9 | 49.9 | 0.6 | 0.0 |
| 强度 | 16.8 | 0.0 | 0.0 | 35.5 | 47.7 | 0.0 |
| 极强 | 35.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 39.2 | 24.8 |
| 剧烈 | 53.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 47.0 |

3 讨论与结论

(1) 江西省土壤侵蚀在 2001—2015 年得到一定程度的改善。全省平均土壤侵蚀模数由 7 042.4 t/(km²·a)下降为 6 375.3 t/(km²·a);轻度以上侵蚀面积所占比例由 2001 年的 78.60%下降为 2015 年的 61.93%。

(2) 土壤侵蚀强度等级转移矩阵表明江西省大部分地区土壤侵蚀强度保持不变,部分地区土壤侵蚀强度向低一级转移。2001—2015 年土壤侵蚀强度不变的面积占总面积的 52.7%,土壤侵蚀强度降低一级的面积占 25.8%。

(3) 江西省土壤侵蚀状况进一步向好的方向发展,轻度以上强度侵蚀的面积均有所减少;但部分市区的土壤侵蚀进一步增大,生态环境依然脆弱,水土流失的形势依然严峻。

本研究存在的不足主要是 USLE 模型的 P 因子的确定,土壤保持措施因子 P 是表示采用专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值,一般无任何水土保持措施的土地类型 P 值为 1^[21]。国内确定 P 值的方法少有报道,实际运算中一般通过对比的方法求出某些水土保持措施下的 P 值,但不同地区的误差较大。由于本文研究的区域较大,因而本文主要根据土地利用类型确定 P 值,忽略了水土保持措施对其的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Qiao Yuliang, Qiao Yun. Fast soil erosion investigation and dynamic analysis in the loess plateau of China by using information composite technique[J]. Advances in Space Research, 2002,29(1):85-88.
- [2] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- [3] Ni Jinren, Li Xiuxia, Borthwick A G L. Soil erosion assessment based on minimum polygons in the Yellow River basin, China[J]. Geomorphology, 2008,93(34):233-252.
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[M]. USDA: Agriculture Handbook,1978:537.
- [5] Liu Baoyuan, Nearing M A, Shi Peijun, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1759-1763.

- [6] 许月卿,邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算:以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006,28(4):67-71.
- [7] 彭建,李丹丹,张玉清. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析:以云南省丽江为例[J]. 山地学报,2007,25(5):548-556.
- [8] 蒋春丽,张丽娟,张宏文,等. 基于 RUSLE 模型的黑龙省 2000—2010 年土壤保持量评价[J]. 中国生态农业学报,2015,23(5):642-649.
- [9] 李天宏,郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- [10] 王春菊,汤小华,郑达贤. GIS 支持下的土壤侵蚀敏感性评价研究[J]. 水土保持通报,2005,25(1):68-74.
- [11] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学,2002,22(6):705-711.
- [12] 王明晓. 三峡库区降雨侵蚀力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2011.
- [13] 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.
- [14] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [15] 张科利,蔡永明,刘宝元,等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究[J]. 生态学报,2001,21(10):1687-1695.
- [16] 吴昌广,曾毅,周志翔,等. 三峡库区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 中国水土保持科学,2010,8(3):8-12.
- [17] Nearing M A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997,61(3):917-919.
- [18] Moore L D, Wilson J P, CHEN Qibo. 坡长、坡度因素的简单计算方法(I)[J]. 水土保持科技情报,1995(2):30-33.
- [19] Lin Chaoyuan, Lin Wentzu, Chou Wenchieh. Soil erosion prediction and estimation: The Taiwan experience [J]. Soil & Tillage Research, 2002,68(2):143-152.
- [20] 许月卿,彭建. 贵州猫跳河流域土地利用变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 资源科学,2003,30(8):1218-1225.
- [21] 范建容,刘飞,郭芬芬,等. 基于遥感技术的三峡库区土壤侵蚀量评估及影响因子分析[J]. 山地学报,2011,29(3):306-311.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[M]. 北京:中国标准出版社,2008.

(上接第 11 页)

- [6] 李宏伟,郑钧滢,彭庆卫,等. 国外土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(5):183-185.
- [7] Marques M J, Bienes R, Jiménez L, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots[J]. Science of the Total Environment, 2007,378(1):161-165.
- [8] Nazzareno D, Gianni B. Estimating monthly(R)USLE climate input in a Mediterranean region using limited data[J]. Journal of Hydrology, 2007,345(3/4):224-236.
- [9] 潘建平. RUSLE 及其影响因子的快速计算分析[J]. 地质灾害与环境保护,2008,19(1):88-92.
- [10] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等. 基于 DEM 和 GIS 的修正通用土壤流失方程地形因子值的提取[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):18-23.
- [11] 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.
- [12] 江忠善,郑粉莉. 坡面水蚀预报模型研究[J]. 水土保持学报,2004,11(1):66-69.
- [13] 刘宝元,史培军. WEPP 水蚀预报流域模型[J]. 水土保持通报,1998,18(5):6-12.
- [14] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波. 基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学,2011,31(7):1197-1203.
- [15] 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.
- [16] 陈明华,周伏建,黄炎和. 土壤可蚀性因子的研究[J]. 水土保持研究,1995,9(1):19-24.
- [17] 林敬兰,陈明华,周伏建,等. 闽南地区地形坡度与土壤侵蚀的关系研究[J]. 福建农业学报,2002,14(2):86-89.
- [18] 盛莉,金艳,黄敬峰. 中国水土保持生态服务功能价值估算及其空间分布[J]. 自然资源学报,2010,25(7):1105-1113.
- [19] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(8):1533-1543.
- [20] 水利部. (SL190-196) 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [21] 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):337-344.