

基于亚米级遥感影像的土壤侵蚀治理成效监测评估 ——以福建长汀县朱溪小流域为例

周小成, 余治忠, 汪小钦, 鲁林

(福州大学 地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002)

摘要:以福建长汀县朱溪小流域为示范区,选取2011年和2014年两期亚米级高分辨率遥感影像为主要数据源,辅助降雨数据、1:1万DEM、土壤数据等开展土壤侵蚀治理成效监测评估。通过高分辨率遥感影像有效提取了小流域梯田、植被覆盖度、详细土地利用分布等结果,最后利用CSLE模型对朱溪小流域土壤侵蚀变化进行了定量评价。结果表明:朱溪小流域强度到剧烈土壤侵蚀面积从2011年的4.55%减少到2014年的1.93%。其中剧烈侵蚀从占流域面积0.44%减少到2014年的0.15%。2011—2014年3年间强度以上土壤侵蚀明显减少,土壤侵蚀治理措施取得了明显成效。研究认为,亚米级高分辨率遥感影像是土壤侵蚀治理成效监测评估的有效手段。

关键词:高分辨率遥感; CSLE; 傅里叶变换; 土壤侵蚀; 朱溪小流域

中图分类号:S157; TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0007-06

Monitoring and Evaluating the Effectiveness of Soil Erosion Control Based on High Resolution Remote Image

—A Case in Zhuxi Watershed, Changting County, Fujian Province

ZHOU Xiaocheng, YU Zhizhong, WANG Xiaoqin, LU Lin

(Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing, Ministry of Education, National Engineering Research Center of Spatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: We used GIS and RS technology, and combined with high resolution remote image of Zhuxi watershed, rainfall data obtained from hydrologic station, DEM in the scale of ten thousand and soil attribute data. The watershed terrace, vegetation coverage and land use/cover was extracted from high resolution by Fourier transform and object-oriented classification. The CSLE model was selected to make quantitative evaluation of soil erosion in Zhuxi watershed. And then, we carried out space analyses on the erosion result. It turns out that the overall proportion of intense erosion and severe erosion decreased from 4.55% in 2011 to 1.93% in 2014. The proportion of severe erosion decreased from 0.44% in 2011 to 0.15% in 2014, intense erosion and more serious situation decreased significantly during these three years, which means that the measures of soil erosion control have made the significant achievement. Then, we analyzed it from the perspective of land cover types, we found that intense erosion and severe erosion mainly occurred in the woodland, next in some woodland, which mainly focused in the no vegetation under trees. Sub-meter resolution remote sensing image is an effective means to monitor the effectiveness of soil erosion control.

Keywords: high resolution image; CSLE; Fourier transform; soil erosion; Zhuxi watershed

土壤侵蚀治理与生态建设是实现美丽中国重要的内容,开展对土壤侵蚀治理成效的遥感监测评估是土壤侵蚀动态监测的重要研究方向,但其中针对于亚米级高分辨率遥感影像的土壤侵蚀监测评估较少。从Wischmeier等^[1]提出通用土壤流失方程(USLE: Universal Soil Loss Equation)起,我国学者以USLE

为蓝本,根据实际情况进行修正,对主要水蚀区的坡面侵蚀预报模型进行了探索^[2-5],刘宝元等^[6]以USLE为蓝本,提出适用于全国范围的中国土壤侵蚀预报方程(Chinese Soil Loss Equation)。CSLE形式简单,将USLE中的植被覆盖管理因子和水土保持措施两个因子细化为水土保持的生物措施、工程措施

与耕作措施3个因子,其他因子不变。CSLE模型是中国第四次土壤侵蚀普查中评价水力侵蚀的推荐模型。但CSLE模型中各因子提取的精度成为影响土壤侵蚀模数计算精度的关键。高分辨率遥感技术的发展为快速有效提取大面积的土壤侵蚀因子提供了可能。

福建省长汀县朱溪小流域是南方红壤水土流失治理的典型区域,该地区近10余年以来开展了大规模的水土流失治理行动。因此,本研究尝试从亚米级影像角度探讨提取土壤侵蚀相关因子等问题,选取朱溪小流域多时相亚米级高分辨率遥感影像为主要数据源,结合相关辅助数据,提取土壤侵蚀影响因子,利用CSLE模型进行土壤侵蚀模数计算,定量评价朱溪小流域水土流失治理成效,为高分辨率遥感影像在土壤侵蚀治理成效监测评价中的应用提供经验和参考。

1 研究区概况

朱溪小流域位于 $25^{\circ}38'15''$ — $25^{\circ}42'55''$ N, 116°

$23'30''$ — $116^{\circ}30'30''$ E,地处福建省长汀县河田镇东部,总面积为 $4\,496\text{ hm}^2$ 。流域内以低山、丘陵为主;气候属中亚热带季风性湿润气候,多年平均气温 18.3° ,平均降水量为 $1\,700\sim 2\,000\text{ mm}$ ^[7]。研究区植被主要为马尾松林,土壤类型以花岗岩风化而成的酸性红壤为主,抗侵蚀能力较差,极易发生水力侵蚀,是长汀县水土流失治理重点区域。

2 研究方法

2.1 数据源与技术路线

本文获取的研究数据有朱溪小流域2011年12月Worldview2影像、2014年12月Pleiades影像,两种影像属于相同季相,影像分辨率均为 0.5 m ,利于动态监测。采用无人机航拍影像和野外调查数据进行结果验证。同时搜集了长汀水保站统计的降雨数据、朱溪小流域 $1:1\text{万}$ DEM、流域土壤数据等。

根据获取的数据源和拟采用的CSLE模型特点,设计了本文研究的技术路线(图1)。

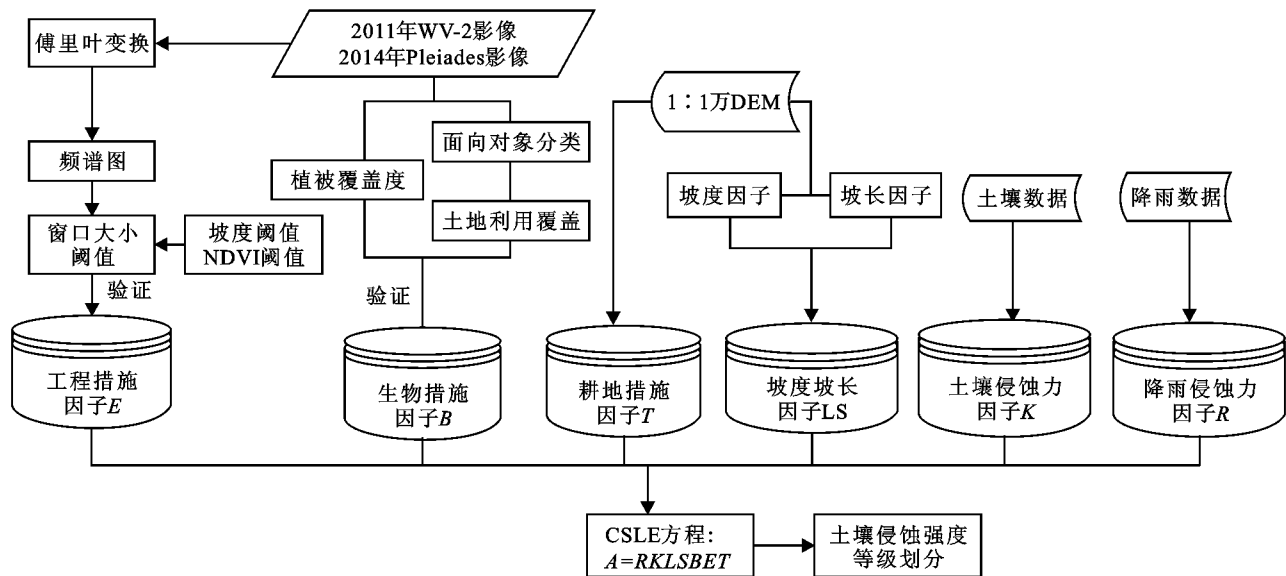


图1 朱溪小流域土壤侵蚀治理成效高分辨率遥感监测评估技术路线

2.2 CSLE模型

本文土壤侵蚀模型选用中国水土流失方程CSLE,该模型方程为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A 是年均土壤水蚀模数 $t/(hm^2 \cdot a)$; R 是降雨侵蚀力因子 $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 是土壤可蚀性因子 $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; LS 是坡长坡度因子; B 是生物措施因子; E 是工程措施因子; T 是耕作措施因子;后4个因子无量纲。

2.3 基于高分辨率遥感影像的土壤侵蚀因子提取

2.3.1 工程措施因子 E 的获取 工程措施因子是指通过改变小地形(如坡改梯等平整土地的措施),改善

农业生产条件,减少或防止土壤侵蚀,合理开发、利用水土资源而采取的措施因子^[8-9]。结合试验区域实际情况,本文侧重于提取朱溪小流域的梯田,作为研究区域的工程措施因子。在土地利用分类研究中常用的TM等中低分辨率影像无法识别梯田这种特殊工程措施,从而影响到土壤侵蚀模数计算结果的精度。本文选取的 0.5 m 高分辨率遥感影像地物内容丰富,纹理特征明显,适合进行精细的土地利用覆盖分类。分类方法选用面向对象影像分类和傅里叶变换特征提取结合来进行。首先利用面向对象影像分类方法获得基本的土地利用分类结果,其次对于需要提取的梯田专题信息,通过分析梯田特征,选用傅里叶变换提取梯田特

征信息。从研究区中选取4种纹理特征形状的梯田影像,对影像进行傅里叶变换,变换结果见图2中梯田频谱图,从图2中可发现不管梯田影像中有无噪声,在频

谱图中频谱能量在与原图像纹理垂直方向上得到叠加,原图像纹理特征越明显的梯田,能量值越大。并且发现,频谱图呈现出中心对称的性质。

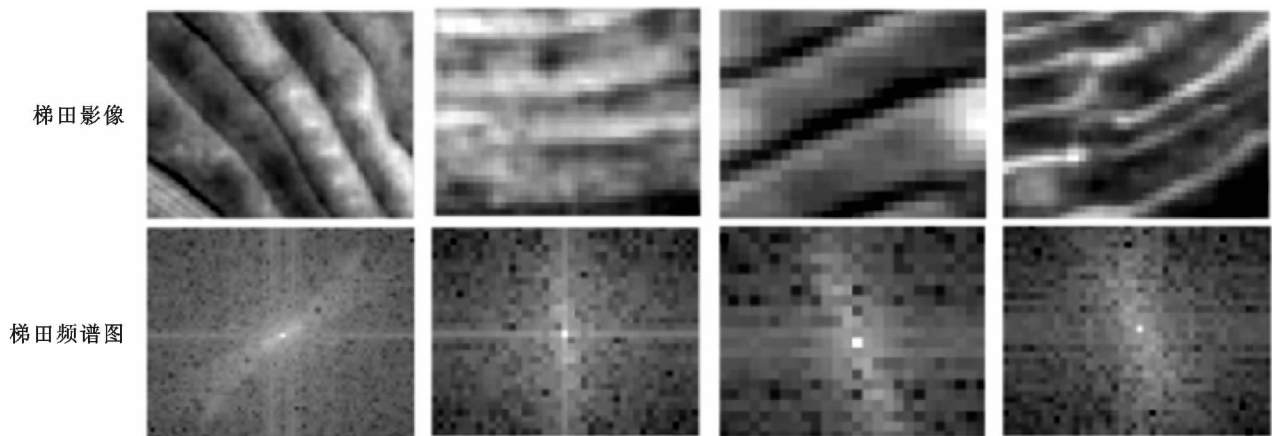


图2 梯田傅里叶变换对比

从梯田频谱图的中心对称性质来考虑,将频谱图用极坐标显示,用函数 $S(r, \theta)$ 表达, S 为频谱函数, r 和 θ 是以原点为中心的半径和方向,可取频谱图第一、第四象限,对应到极坐标中为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的范围, $S(\theta)$ 作为频谱在原点出发的某方向的行为特征,也就是对某一个方向求和。纹理方向上的影像经傅里叶变换之后其垂直方向上的能量比其他方向上的能量都要大,因此可以用公式(2)作为梯田的特征值选取方法:

$$m_\theta = \max[S(\theta)] / \sum_{1}^{r_0} \sum_{0}^{\pi} S(\theta) \quad (2)$$

式中: m_θ 表示极坐标值最大方向上的能量和与所有方向上能量和的比值,称其为最大值比值。也就是 $m(\theta)$ 大于某个阈值时,说明最大值方向上的能量占有优势,反映到原图像上就呈现出梯田纹理特征。本文工程措施因子(梯田)主要根据上述原理来提取,试验决定对影像采取逐窗口的提取方式,因此窗口大小及阈值的选取成为关键。本文选取一块影像作为试验区域,见图3。



注: A 为试验区域影像; B 为梯田提取(阈值 0.05, 窗口 17×17); C 为目视解译。

图3 试验区域梯田提取与目视解译结果对比

从图3中可看出,跟原影像的梯田范围比较,最终确定窗口为17,阈值为0.55,在此基础上,利用坡度大于 10° 并且 $NDVI > 0.2$ 的规则提取梯田。通过与人工解译结果进行对比,梯田自动提取的总体精度为 92.78%, Kappa 系数为 0.747,满足后续分析精度要求。

根据秦伟等^[10]在赣北红壤野外径流小区观测资料,工程措施因子(梯田)赋值为 0.329 5。

2.3.2 生物措施因子 B 的获取 生物措施因子 B 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情况下的土壤流失量与耕种过后连续休闲土地的土壤流失量的比值^[11]。已有研究表明:盖度高的乔灌木、灌木、草本等措施的水土流失量最小,水土保持效果最为明显^[12-13]。蔡崇法等^[14]利用径流小区人工降雨和部分天然降雨的观测结果,通过计算坡

面产沙量与植被覆盖度的相关关系建立了植被覆盖度与 B 因子间的数学关系。0.5 m 分辨率影像有利于区分水土流失区细微植被覆盖度差异。本文基于高分辨率影像归一化植被指数(NDVI),采用像元二分法估算植被覆盖度:

$$f_c = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (3)$$

式中: $NDVI_v$, $NDVI_s$ 分别为全植被覆盖像元和无植被覆盖的裸地像元的 NDVI 值。本文对于林草地的生物措施因子采用蔡崇法等建立的方程估算出,如公式(4)所示:

$$B = \begin{cases} 1 & C = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg C & 0 < C < 78.3\% \\ 0 & C \geq 78.3\% \end{cases} \quad (4)$$

上述方程表示当植被覆盖度为 0 时,生物措施因子

为最大值 1,土壤侵蚀量最大;当植被覆盖度在 0 到 78.3%时,生物措施因子可用 $0.6508-0.3436\lg C$ 计算;当植被覆盖度大于 78.3%时,生物措施因子为 0,基本不会发生土壤侵蚀。根据式(3)—(4) 获得 2011 年和 2014 年朱溪小流域精细植被覆盖度分布图(附图 1)。

其他地类参考汪邦稳等^[15]在赣南红壤地区的成果,耕地赋值 0.230,不透水面赋值 0.004,果园 0.48。

2.3.3 降雨侵蚀力因子 R 的获取 降雨侵蚀力(R)是指由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,是一项客观评价由降雨引起土壤分离和搬运动力的指标。本文采用周伏建等^[16]提出的福建省降雨侵蚀力 R 值的简便算式,如公式(5)所示:

$$R=\sum_{i=1}^{12}(-2.6398+0.3046P_i) \quad (5)$$

式中: P_i 为月降雨(mm); R 为年降雨侵蚀力指标 R 值($J \cdot cm$)/($m^2 \cdot h$)。由于实际研究区域面积较小,可采用一个站点数据即可得出其值。根据气象站点 2011 年及 2014 年的逐月降雨量数据,计算出研究区 2011 年及 2014 年的 R 值,分别为 135.15,142.11。

2.3.4 土壤可蚀性因子 K 的获取 土壤可蚀性因子(K)对土壤侵蚀的影响一般用土壤的抗侵蚀性来表示^[17]。抗侵蚀力强的土壤 K 值低,反之则高。

目前大多研究皆采用 Sharply^[18]建立的模型(公式 6)进行土壤侵蚀力计算,其精确性具有公认性。如针对南方红壤区,郭志民^[19]和方纲清^[20]等研究了福建省红壤区的土壤可蚀性状况,利用公式(6)得出不同土壤类型的 K 值。故本文亦采取该公式估算研究区域土壤可蚀性因子。

$$K=[0.2+0.3\exp(-\frac{0.025SAN}{100})] \cdot (\frac{SIL}{CLA+SIL})^{0.3} \cdot (1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-0.95C)}) \cdot [1-\frac{0.75SN}{SN+\exp(-5.51+22.9SN)}] \quad (6)$$

3 结果与分析

3.1 精度分析

3.1.1 土壤侵蚀量计算结果 根据上述各因子研究方法,分别计算出朱溪小流域各因子值的栅格图。利用以上计算的因子结果和 CSLE 模型,运用地图代数得到朱溪小流域 2011 年及 2014 年土壤侵蚀图(附图 2)。

3.1.2 精度评价 研究区内有一个卡口站,卡口站作为流域总出口,通过收集卡口年泥沙量趋势和长汀县土壤侵蚀数据,为本文计算结果提供验证参考。研究区卡口站建于 2012 年,收集卡口站 2013—2015 年流域年径流泥沙量(表 2)和福建省水保站提供的

式中: K 为土壤侵蚀因子; SAN 为含沙量; SIL 为土壤淤泥含量; CLA 为黏土含量; C 为土壤有机氮含量; $SN=1-SAN/100$ 。关于朱溪小流域土壤属性数据,谢军等^[21]运用模糊隶属度方法,基于 30 个独立验证点及制图结果空间分布进行评价,获得良好结果。本文基于谢军获取的朱溪小流域土壤属性数据和公式(6)得到土壤可蚀性因子。

2.3.5 坡度坡长因子 LS 的获取 坡长 L 和坡度 S 因子反映了地形地貌对土壤侵蚀的影响,通常为侵蚀动力的加速因子。本文坡度坡长因子根据所得长汀县 1:10 000 DEM 数据,采用刘宝元等^[22]的计算方法获得 L 和 S 因子,式中 θ 皆为坡度。

$$L=(\lambda/22.1)^m \quad (7)$$

式中: λ 为坡长; m 为坡长指数。 M, λ 的计算方法见式(8),(9)。

$$m=\begin{cases} 0.2 & \theta < 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda=F_a \cdot P_s \quad (9)$$

式中: F_a 为汇流累积量,可在 ArcGIS 软件中根据 DEM 计算得到, P_s 为像元大小。

$$S=\begin{cases} 10.9\sin\theta+0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta-0.5 & 5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ 21.9\sin\theta-0.96 & \theta > 10^\circ \end{cases} \quad (10)$$

2.3.6 耕地措施因子 T 的获取 耕作措施面积较小,且某些耕作措施因子需要时序分析,暂无有效的自动化提取方法。根据目前学者^[23-24]对于耕作措施对土壤流失的影响相关研究,主要根据坡度的不同,赋予不同的 T 因子值,见表 1。

表 1 研究区耕作措施因子

| 坡度范围 | <2° | 2°~6° | 6°~15° | 15°~20° | 20°~25° | >25° |
|---------|-----|-------|--------|---------|---------|------|
| T 因子值 | 0.1 | 0.221 | 0.305 | 0.575 | 0.735 | 0.8 |

2006—2012 年长汀县土壤侵蚀数据(表 3)。根据表 2 和表 3 分析,2009—2012 年土壤侵蚀面积呈减小趋势,且 2013—2015 年径流泥沙量亦然。总体上,2009—2015 年土壤侵蚀有减轻之势,这与本文统计结果吻合。

表 2 2013—2015 年研究区年径流泥沙数据

| | t/hm ² | | |
|------|-------------------|------|------|
| 年份 | 2013 | 2014 | 2015 |
| 产沙模数 | 2.41 | 1.71 | 1.10 |

从定性角度来分析,可采用陈志彪^[25]等试验结果作为参考值,对 2011 年土壤侵蚀计算结果进行验证,精度见表 4。

表 3 2009 年、2012 年土壤侵蚀强度实测统计数据

| 年份 | 资料 出处 | 土壤侵蚀强度/km ² | | | | | | 总流 |
|------|----------|------------------------|--------|-------|------|-------|--------|-------|
| | | 轻度 | 中度 | 强度 | 极强 | 剧烈 | 总流失 | 失率/% |
| 2009 | 长汀县监测报告 | 155.67 | 100.39 | 44.01 | 5.87 | 16.52 | 322.46 | 10.45 |
| 2012 | 省水保站统计 | 166.95 | 97.57 | 25.82 | 9.04 | 1.10 | 300.84 | 9.75 |

表 4 研究区土壤侵蚀面积 hm²

| 项目 | 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 | 轻度及以上侵蚀 |
|-----------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|---------|
| 2011 年估算值 | 3264.97 | 723.67 | 302.17 | 135.40 | 49.40 | 20.05 | 1230.69 |
| 2011 年参考值 | 3217.58 | 778.62 | 328.35 | 109.43 | 45.43 | 16.25 | 1278.08 |

为评价 2014 年土壤侵蚀强度计算结果,以野外考察点土壤侵蚀强度调查为主,并结合 2013—2015 年 0.2~0.5 m 无人机遥感和卫星遥感影像特征进行评价。为此建立了土壤侵蚀强度与遥感影像特征解译标志,辅助进行结果验证。

2014 年的估算结果通过野外调查采集的数据为主进行验证。其中,以 151 个实测值为标准,列成矩阵(表 5),表中判对数指遥感监测结果与实测结果等级相同的个数。从表 5 看出,精度达到 77.84%,能够满足应用的精度要求。

表 5 土壤侵蚀强度与遥感影像对应关系

| 强度等级 | 微度及以下 | 轻度 | 中度 | 强度 | 极强度 | 剧烈 | 合计 | 判对数 | 精度% |
|-------|-------|----|----|----|-----|----|-----|-----|-------|
| 微度及以下 | 13 | 2 | | | | | 15 | 13 | 86.67 |
| 轻度 | 4 | 40 | 6 | | | | 50 | 40 | 80 |
| 中度 | 1 | 3 | 22 | 5 | 1 | | 32 | 22 | 68.75 |
| 强度 | | | | 20 | | | 25 | 20 | 80 |
| 极强度 | | 1 | | 4 | 23 | 3 | 31 | 23 | 74.19 |
| 剧烈 | | | | 3 | 5 | 33 | 41 | 33 | 80.49 |
| 总计 | 18 | 46 | 28 | 32 | 32 | 36 | 194 | 151 | 77.84 |

3.2 土壤侵蚀变化分析

3.2.1 不同时期土壤侵蚀强度等级面积 对 2011 年及 2014 年土壤侵蚀强度进行统计(表 6),从表 6 中可以看出,强度到剧烈土壤侵蚀总体比例从 2011 年占流域面积的 4.55%,减少到 2014 年的1.93%。其中剧烈侵蚀从占流域面积 0.44%减少到 2014 年的 0.15%。

从空间分布角度来分析,附图 2 中可看出强度及以上程度土壤侵蚀主要分布于东部河田镇大排村、来油坑村、游坊村。西部河田镇朱溪村由于建设开发,

2014 年该村区域出现部分轻度左右程度土壤侵蚀。总体而言,2011—2014 年,朱溪小流域水土流失治理的成效明显,强度以上土壤侵蚀向轻中度侵蚀转化。

经试验结果分析认为,朱溪小流域水土流失强度以微度和轻度侵蚀为主。2011—2014 年,轻度侵蚀呈现增加的态势,主要有以下几点原因。一是大规模的工程建设,如工业开发区、赣龙铁路、西气东输工程,对土壤侵蚀强度造成一定扰动。另外,由于坡改梯工程正在实施,短时间未覆盖植被的梯田等计算结果表现为中度侵蚀。

表 6 研究区不同时期土壤侵蚀强度等级面积及占比统计

| 指标 | 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 |
|---|--------------------|----------|-----------|-----------|------------|--------|
| 平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) | <500 | 500~2500 | 2500~5000 | 5000~8000 | 8000~15000 | >15000 |
| 2011 年 | 面积/hm ² | 3264.97 | 723.67 | 302.17 | 135.40 | 20.05 |
| | 比例/% | 72.62 | 16.10 | 6.72 | 3.01 | 0.44 |
| | 面积/hm ² | 3445.86 | 723.72 | 239.58 | 49.45 | 30.50 |
| 2014 年 | 比例/% | 76.65 | 16.10 | 5.33 | 1.10 | 0.68 |
| | | | | | 0.68 | 0.15 |

3.2.2 不同土地利用覆盖类型水土流失强度占比分析 土壤侵蚀强度在不同的土地利用覆盖类型中会有所差异,本文将 2014 年土壤侵蚀结果与该年的土地利用覆盖类型进行叠加分析发现:朱溪小流域强烈到剧烈土壤侵蚀主要发生在疏林地,其次发生在部分有林地,具体分析主要是无林下植被的有林地,具体因为草本植物生长茂盛,坡面侵蚀力被层层削弱,水土保持

作用较好。而乔木、乔灌措施下,其贴地面覆盖度相对较低,其水土保持效果较差。不同土地利用类型基本以微度侵蚀和轻度侵蚀为主。疏林地和果园的微度侵蚀比例较低,分别只有 37.2%和 44.4%。裸土地以微度侵蚀为主,分析原因认为,裸土地主要分布在坡度较低的平缓区域,主要是工程建设开发区。发生强烈侵蚀的裸土地,主要发生在坡度较高的区域。

果园中存在 10.1% 的中度侵蚀和约 2.5% 的强烈侵蚀。这是由于部分杨梅园、板栗园林下无植被覆盖、坡度较大的原因造成的。梯田中主要发生微度和轻度侵蚀,中度侵蚀极少,无强烈以上侵蚀。说明坡改梯,对于减少水土流失强度具有重要意义。

4 结论

(1) 亚米级高空间分辨率遥感影像应用于土壤侵蚀治理成效监测具有明显优势。亚米级遥感影像有利于建立清晰可靠的土壤侵蚀强度解译标志,可以快速获取土壤侵蚀治理区工程措施因子、精细植被类型和覆盖度信息。

(2) 结合高分辨率遥感影像获取有关因子,可以确保 CSLE 土壤侵蚀模型计算结果的精度。以本文朱溪河流域示范区为例,经过对比已有研究测算结果,估算精度至少达到 78% 以上。朱溪小流域强度到剧烈土壤侵蚀面积从 2011 年的 4.55%,减少到 2014 年的 1.93%。从空间上看,强度及以上程度土壤侵蚀主要分布在该流域东部地区。2011—2014 年三年间强度以上土壤侵蚀明显减少,朱溪河流域土壤侵蚀治理措施取得了明显成效。

(3) 高分辨率影像精细土地利用和植被分类结果有利于土壤侵蚀治理成效的评估。通过高分辨率遥感影像提取的土地利用覆盖精细分类结果和土壤侵蚀计算结果,清楚发现,朱溪小流域强烈到剧烈土壤侵蚀主要发生在疏林地,以及无林下植被的有林地。不同土地利用类型基本以微度侵蚀和轻度侵蚀为主。疏林地和果园的微度侵蚀比例较低,分别只有 37.2% 和 44.4%。坡度平缓区域的裸土地以微度侵蚀为主,坡度较大的区域裸土区则存在强烈和极强烈侵蚀。

参考文献:

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky-Mountains [M]. Agriculture Handbook, 1965.
- [2] 刘善建. 天水水土流失测验的初步分析[J]. 科学通报, 1953(12):59-65.
- [3] 张建香, 张勃, 张华, 等. 黄土高原的景观格局变化与水土流失研究: 以黄土高原马莲河流域为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1513-1524.
- [4] 许晓鸿, 隋媛媛, 张瑜, 等. 东北丘陵漫岗区坡耕地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 32-35.
- [5] 杨冉冉, 徐涵秋, 林娜, 等. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 2974-2982.
- [6] Baoyuan L, Keli Z, Yun X. An empirical soil loss equation[C]// Proceedings 12th international soil conservation organization conference. Vol. III. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [7] 陈志强, 陈志彪, 陈丽慧. 南方红壤侵蚀区典型流域土壤侵蚀危险性评价[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 1080-1082.
- [8] 胡建民, 胡欣, 左长清. 红壤坡地坡改梯水土保持效应分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 271-273.
- [9] 徐勇, 党丽娟, 汤青, 等. 黄土丘陵区坡改梯生态经济耦合效应[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1258-1266.
- [10] 秦伟, 左长清, 郑海金, 等. 赣北红壤坡地土壤流失方程关键因子的确定[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 115-125.
- [11] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington, DC: US Government Printing Office, 1997.
- [12] 梁娟珠. 南方红壤区不同植被措施坡面的水土流失特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 95-99.
- [13] 陈海滨, 陈志彪. 侵蚀红壤小流域水土保持措施的土壤肥力效应评价: 以朱溪小流域为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 81-86.
- [14] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 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.
- [15] 汪邦稳, 方少文, 杨勤科. 赣南地区水土流失评价模型及其影响因子获取方法研究[J]. 中国水土保持, 2011(12): 16-19.
- [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.
- [17] 王占礼. 关于黄土高原土壤抗冲性研究的认识[M]//李锐, 杨勤科. 区域水土流失快速调查与管理信息系统研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
- [18] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation [R]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990 1768 Pt 1).
- [19] 郭志民, 陈永宝, 陈志伟. 土壤可蚀性特征及其 K 值图制作研究[J]. 山西水土保持科技, 2002, 3(1): 15-17.
- [20] 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.
- [21] 谢军, 秦承志, 肖桂荣, 等. 模糊聚类方法在南方红壤小流域土壤属性制图中的应用: 以长汀朱溪河小流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 132-139.
- [22] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [23] 孙禹. 基于 GIS 的土壤侵蚀模数监测[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- [24] 郭乾坤, 刘宝元, 朱少波, 等. 中国主要水土保持耕作措施因子[J]. 中国水土保持, 2013(10): 22-25.
- [25] 陈志彪, 陈志强, 岳辉. 花岗岩红壤侵蚀区水土保持综合研究: 以福建省长汀朱溪小流域为例[M]. 北京: 科学出版社, 2013.