

基于 GIS 和 USLE 的朱溪河小流域 土壤侵蚀经济损失评估

林惠花, 武国胜, 朱鹤健, 戴文远

(福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 以朱溪河小流域 2007 年遥感数据为基础, 在 GIS 技术支持下, 利用 USLE 模型计算该流域土壤侵蚀量, 并运用环境经济学理论, 计算流域土壤侵蚀造成的养分损失(N、P、K、有机质含量)、水分损失、土地损失、泥沙滞留损失及泥沙淤积损失等 5 种经济损失总值。结果显示: 2007 年朱溪河小流域土壤侵蚀总量为 42 893.96 t, 土壤侵蚀模数达 954.047 t/(km²·a), 土壤侵蚀的经济损失总值达 957.507 万元。土壤侵蚀导致流域内土地的年经济损失为 21.296 7 万元/km², 相当于该县单位面积农副经济年产出的 27.33%。土壤侵蚀直接导致流域内土地生产力下降和农业发展受阻。

关键词: USLE; 土壤侵蚀; 经济损失; 朱溪河; 小流域

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2011)01-0183-06

Estimation of the Economic Losses Caused by Soil Erosion in Zhuxi Small Watershed by GIS and USLE

LIN Hui-hua, WU Guo-sheng, ZHU He-jian, DAI Wen-yuan

(College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Based on SPOT remote sensing data of Zhuxi small watershed in 2007, the watershed soil erosion quantities were worked out by using the geographic information system (GIS) and universal soil loss equation (USLE), and according to the basic principles and methods of environment economics, the economic losses were estimated which included soil nutrient loss, water loss, land loss, sediment retention and accumulation etc. The results show that the soil erosion amounts to 42 893.96 t in the studied watershed, and the soil erosion modulus is 954.047 t/(km²·a). The total cost of soil erosion is 9 575 070 yuan, which means that the annual economic losses caused by erosion in the watershed is 212 967 yuan/km², corresponding to 27.33% of the total local agricultural and sideline output. The research result indicates that soil erosion causes directly the decline of land productivity in the Zhuxi watershed and clogs the agricultural development.

Key words: USLE; soil erosion; economic loss; Zhuxi River; small watershed

土壤侵蚀是当前世界性的重大环境问题。货币化度量土壤侵蚀造成的损失是各级政府制定水土保持政策时迫切关心的问题,更是当前以土壤整治为主体的生态环境建设和实现国民经济绿色核算迫切需要回答的重大问题^[1-3]。目前土壤侵蚀经济损失的评估已成为国内外研究的热点。在国外, Pretty J N 等^[4]应用财政支付法估测了英国农业总外部性经济投入中土壤侵蚀造成的养分流失的价值; Martinez

收稿日期: 2010-09-09 修回日期: 2010-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871141)和福建省自然科学基金项目(2060203)

作者简介: 林惠花(1972—),女,博士,讲师,主要从事区域土壤侵蚀与综合整治研究, E-mail: lhh613@163.com。

- Casasnovas J A 等^[5]利用折合成本法和替代价值法估算了西班牙葡萄园由于土壤侵蚀造成的渠系堵塞和土壤养分流失两方面的经济损失; Jayatilleke S Bandara 等^[6]应用“可计算一般均衡模型”(computable general equilibrium, CGE), 分析斯里兰卡的土壤侵蚀造成的环境损失, 指出自由贸易对减少土壤侵蚀的经济损失有边际效用, 国家应把原来作为补贴土壤侵蚀经济损失的税收和津贴减少, 以降低由于土壤侵蚀造成的社会损失; Matthew J Cohen 等^[7]利用能值合成(emergy synthesis)法分析肯尼亚在国家、地区和局域三个尺度下, 不同社会经济状态的土壤侵蚀经济损失差异, 首次提出可持续发展基线。在国内, 杨志新等^[8]人应用多种环境经济学方法估算了北京地区土壤侵蚀所带来的经济损失及治理收益。许月卿等^[9]计算出贵州猫跳河流域土壤侵蚀经济损失的同时揭示了其空间格局, 为区域水土流失防止提供科学依据。夏建国^[10-11]运用边际效益分析四川名山县蒙山的水土流失经济损失时得出: 该区侵蚀所造成的直接经济边际损失每增加1万元, 其生态价值的边际损失将增加76~91元, 并提出治理土壤侵蚀的投入产出(收益)模型最优控制理论设想。李根^[12]采用重置成本法估算了2000年我国土壤侵蚀作为非点源污染所造成的经济损失为304.4372亿元。潘竞虎等^[13]首次从人文驱动力因素着手对陇东黄土高原土壤侵蚀的经济损失进行分析。综上所述, 国内外土壤侵蚀的经济损失研究的方法和内容虽存在差异但都不同程度推动了估算手段的发展。对研究地区土壤侵蚀的整治起着重要的推动作用。福建长汀县因其水土流失历史久、程度严重、治理时间长而成为南方红壤丘陵侵蚀区的代表, 而朱溪河小流域是其综合整治的典型小流域。目前针对该流域自然地理环境景观及其效应的研究有较深入开展^[14-15], 但流域土壤侵蚀所造成的经济损失的度量未见重视, 土壤侵蚀对流域发展危害的强弱无法量化, 不利于今后小流域土壤侵蚀环境整治工作的开展, 为此, 本文基于GIS技术和USLE模型, 在计算朱溪河小流域土壤侵蚀量的基础上, 应用环境经济学原理度量朱溪河流域内土壤侵蚀造成的经济损失, 为决策部门进一步开展整治活动提供科学参考和决策依据。

1 研究区概况

朱溪河小流域位于福建省长汀县河田镇东部和南山镇西北部, 介于东经 $116^{\circ}23'30'' \sim 116^{\circ}30'30''$, 北纬 $25^{\circ}38'15'' \sim 25^{\circ}42'55''$, 土地总面积为 44.96 km^2 。属汀江一级支流, 流域内地貌以低山、丘陵为主, 山地土壤为燕山晚期粗晶花岗岩风化而成的红壤, 土层深厚、节理发育且极其松软, 抗蚀性极差。该流域属中亚热带季风气候, 多年平均降水量在 1700 mm 左右, 暴雨多集中在梅雨期(4—6月), 其中6月份的平均降水量可达 310.9 mm 。

朱溪河流域历史上曾被称为“竹子垄”、“松林源”, 是个山青水秀的好地方。100多年前的战乱和宗教械斗等大肆砍伐林木破坏植被, 导致水土流失日趋严重。该流域从1940年福建省土壤保肥试验区开始研究探索治理途径, 由于种种原因至20世纪80年代仍光山依旧, 1980年冬开始全面规划治理, 并逐步取得成效。1995年被列为福建省重点治理小流域及全国水土保持环境建设“十百千”示范小流域, 并于2000年底通过全国“十百千”示范小流域验收。2007年朱溪河小流域被列入全国30条典型小流域, 其监测数据进入中国水土保持公报^[15]。

2 研究数据与过程

2.1 研究数据收集与处理

本文收集了长汀县气象资料(1961—2000年)、DEM数据、第二次土壤普查资料和相关水土保持研究成果, 通过对2007年SPOT5全色遥感影像进行校正、融合处理, 配合野外实地调查等方法, 解译提取朱溪河小流域土地利用类型图、植被覆盖图等。根据国内相关学者已有的研究结果, 结合研究区的实际情况及野外调查数据, 根据美国通用土壤侵蚀方程USLE中各因子的算法需要进行本地化处理, 并收集了研究区2007年统计年鉴、相关部门文献资料及其他社会经济数据。

2.2 研究过程

2.2.1 基于USLE的流域土壤侵蚀量计算 通用流失方程式(USLE)是美国水土保持专家威斯奇迈尔(Wischmeier)于1954年提出的。USLE模型拥有较高的精度, 可以满足一般的应用需要, 而且形式简单, 对参数要求不高, 易于实现。20世纪80年代以来, 具有强大的空间分析能力和数据管理能力的地

理信息系统(GIS)开始被引入与通用土壤流失方程(USLE)结合,进行流域土壤侵蚀量的预测和估算。相对于传统的土壤侵蚀量预测方法,由于GIS具有栅格数据分析功能,与USLE相结合可预测出每个栅格的土壤侵蚀量,便于管理者找出较为严重的土壤侵蚀区,以便针对性地提出最佳管理措施,有效地提高了土壤侵蚀量的预测效率和结果的显示度^[16]。

USLE由影响水土流失的6个因子以连乘的形式组成,一般表达如下:

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

式中: A 表示年土壤流失量,单位为 $t/(hm^2 \cdot a)$; R 表示降雨侵蚀因子,单位为 $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot ha)$; K 表示土壤可蚀性因子,单位为 $t \cdot hm^2 \cdot MJ \cdot mm$; LS 表示坡度坡长因子,又称地形因子,无量纲因子; C 为植被与经营管理因子,无量纲因子; P 是水土保持因子,无量纲因子。各因子有明确的意义,并且各自独立。各个因子的计算分别如下:

(1) 降雨侵蚀因子 R 的计算。降雨侵蚀因子 R 是一个地区降雨侵蚀潜力的一个量度,与降雨量、降雨强度、历时长短、雨滴的大小以及雨滴下降速度有关。根据区域特征,本文采用周伏建等^[17]针对福建提出的 R 值简便计算公式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.1527 + 0.1792P_i) \quad (2)$$

式中 P_i 为月降雨量, R 为全年的降雨侵蚀力。因流域面积不大,借鉴相关研究的经验^[18],全流域采用一个 R 值,利用长汀县气象站1961—2000年的逐月降雨数据平均得出多年月平均降雨量,利用上述公式计算可得 R 值为 $292.55 MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot ha)$,并在ArcView3.3下给 R 赋属性值。

(2) 坡度坡长因子 LS 的计算。 LS 是描述坡长 L 和坡度 S 对坡面土壤流失的影响的因子,反映了地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。本文在朱溪河流域1:50000的DEM数据的基础上,采用陈明华等^[19]根据福建省实测数据提出的 LS 算式进行 L 、 S 的计算:

$$L = (\theta/10)^{0.78} \quad S = (\sqrt{20})^{0.41} \quad (3)$$

$$LS = (\theta/10)^{0.78} \quad S = (\sqrt{20})^{0.41} \quad (4)$$

式中: θ 为坡度,单位为度($^\circ$); t 为实际坡长,单位为米(m)。

在ArcView3.3中打开DEM,根据上述公式对坡度图和坡长图进行计算,分布得到 L 和 S 的因子图,再将 L 因子图与 S 因子图连乘即可得到坡度坡长因子 LS 值分布图。

(3) 土壤可蚀性因子 K 的计算。 K 因子反映了土壤对侵蚀的敏感性及其降水所产生的径流量与径流速率的大小,是反映土壤自身特性对降雨的减蚀和冲刷作用抵抗能力的描述。 K 值的大小与土壤质地、土壤有机质含量有较高的相关性^[20]。根据长汀县土壤普查成果及相关文献^[21],获得朱溪河小流域4种不同土壤的质地和有机质含量,查找Wischmeier等建立的 K 值诺谟图,可得出研究区内4种土壤的可蚀性因子 K 值,即硅铝铁红壤($K=0.2546$)、侵蚀红壤($K=0.2708$)、潴育水稻土($K=0.21$)、渗育水稻土($K=0.24$)。

(4) 植被与经营管理因子 C 的获取。 C 因子反映的是有关覆盖和管理变量对土壤侵蚀的综合作用,大小取决于具体的作物覆盖、轮作顺序及管理措施的综合作用等,为实际植被状态和经营管理条件下土壤流失量与裸露连续休闲地的土壤流失量之比。它考虑的因素包括植被冠层覆盖、地表覆盖、地表粗糙度、土壤水分、先前的土地利用情况随降雨在年内的变化等,其值范围在0~1。当地面完全裸露时, C 值为1.0;当地面植被很好时, C 值可取0.001。根据野外调研的流域植被情况和土地利用类型图,参照Wischmeier的原始 C 因子取值对照表的定义,朱溪河小流域各土地利用类型的 C 值如表1所示。

(5) 水土保持因子 P 的获取。水土保持因子 P 是采用专门措施后土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值,反映植被的管理措施差异引起的土壤流失量差别^[22]。通常的水土保持措施有:等高耕作、等高带状种植、修筑梯田等。 P 值还未有定量公式,一般取经验值,其范围在0~1.0。0代表水土保持措施比较完善,基本上不发生侵蚀的地区,1代表未采取任何控制措施或顺坡种植的地区。本研究在流域土地利用现状基础上,结合流域治理措施分布图和朱溪河流域治理管理表等相关资料对 P 进行赋值如表2所示,生成 P 值栅格数据及其空间分布图。

表1 朱溪河小流域各土地利用类型的C值
Tab.1 C value of landuse types at Zhuxi small watershed

土地利用类型 Land use type	林地 Woodland	疏林地 Open woodland	高覆盖草地 High-coverage grassland	低覆盖草地 Low-coverage grassland	水田 Paddy land	旱地 Dryland	建筑物 Building
C 值	0.017	0.04	0.035	0.04	0.18	0.31	0.25

表2 朱溪河小流域各土地利用类型的P值
Tab.2 P value of Landuse types at Zhuxi small watershed

土地利用方式 Landuse type	P 值 P value	土地利用方式 Landuse type	P 值 P value
林地 Woodland	0.60	水田 Paddy land	0.01
疏林地 Open woodland	0.85	旱地 Dryland	0.80
高覆盖草地 High-coverage grassland	0.01	建筑物 Building	1.0
低覆盖草地 Low-coverage grassland	0.80		

根据上述五大因子栅格图的连乘计算,即可获得每个栅格的土壤侵蚀模数,根据《土壤侵蚀强度分级标准》,分别进行强度归并,从而形成侵蚀强度分布图如图所示1,每种侵蚀强度的面积与侵蚀模数相乘累加即得到朱溪河小流域的年土壤侵蚀总量。

2.2.2 土壤侵蚀经济价值估算

本文主要应用环境经济学的基本原理和方法,如价格替代法、影子工程法、机会成本法以及恢复成本法等,并借鉴相似地区土壤侵蚀经济损失的评估经验,确定相关评估指标,计算土壤侵蚀的经济损失中的土壤养分损失、土壤有机质损失、土壤水分损失、泥沙滞留淤积损失和土壤生产能力降低造成的土地废弃损失等五方面,作为估算朱溪河小流域土壤侵蚀经济损失的组成。

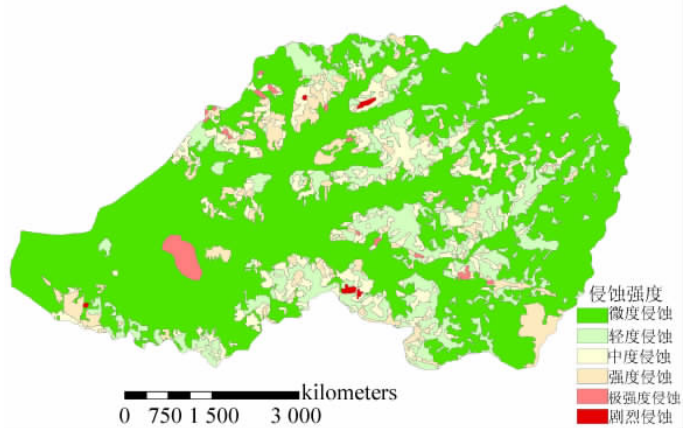


图1 2007年朱溪河流域土壤侵蚀强度图

Fig.1 Soil erosion intensity grades of Zhuxi River small watershed in 2007

(1) 土壤养分经济损失。土壤侵蚀使大量的土壤养分流失,主要是土壤中的氮、磷、钾,对其流失的经济损失主要采用价格替代法,即用当前市场上的一些肥料来替换直接对氮、磷、钾的计算,其公式为:

$$E_i = \sum Q \times C_i \times S_i \times P_i \tag{5}$$

式中 E_i 为 N、P、K 养分流失所损失的价值(元); i 为 N、P、K 3 种元素; Q 为土壤年侵蚀的总量(t); C_i 为 N、P、K 在土壤中的平均含量(%); S_i 为 N、P、K 折算为尿素、磷酸二铵或氯化钾的系数,分别为 132/14、132/31、75/39; P_i 为尿素、磷肥二铵和氯化钾肥料的价格(元) 根据调查的资料,2007 年尿素、磷酸二铵和氯化钾平均价格分别是:1 890 元/t、2 910 元/t 和 2 750 元/t。

(2) 土壤有机质的经济损失估算。土壤侵蚀中土壤有机质流失的损失,采用价格替代法,其计算公式为:

$$E_p = Q \times F \times P_p \tag{6}$$

式中 E_p 为坡地土壤有机质损失价值(元); Q 为土壤年侵蚀的总量(t), F 为土壤中有有机质的平均含量(%); P_p 为有机质的价格(元)。根据薪材转换成有机质的比例为 2:1^[10] 和薪材的机会成本价值为 198 元/t(取自当地林业部门 2007 年数据) 来换算有机质的价格。

(3) 水分流失损失价值估算。水分流失的经济损失应用影子工程法,按该流域流失的土壤水量与修建每立方米农用水库所需投资费用的乘积计算^[23-24],公式如下:

$$V_n = Q \times W / \rho \quad (7)$$

$$E_n = V_n \times P_n \quad (8)$$

式中 V_n 为水分流失量 (m^3) E_n 为不同土地利用方式下水分流失损失 (元/a); Q 为土壤年侵蚀的总量 (t); W 为不同土地利用方式下土壤平均自然含水量 (%); P_n 为修建每 1 m^3 农用水库所需的投资费用 (元)。根据长汀县第二次土壤普查资料, ρ 取 $1.285 \text{ g}/\text{m}^3$; P_n 为修建每 1 m^3 农用水库所需的投资费用 (元), 取值为 2007 年当地新修 4 个农用水库的平均造价 $5.23 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

(4) 土地废弃价值损失估算。土地废弃价值指因土壤流失导致全部耕层丧失或因耕层变薄贫瘠而废弃所造成的损失, 应用机会成本法估算, 公式如下:

$$E_i = Q_s \times B_i / (h \times 10\ 000 \times \rho) \quad (9)$$

式中: E_i 为土地废弃的经济损失价值 (元/a); Q_s 、 ρ 同上; B_i 为土地损失的机会成本, 根据朱溪河小流域 2007 年的土地利用类型及实地调查所得的各类型土地造价取 $36.41 \text{ 万元}/\text{km}^2$; h 为土层厚度, 本文取 0.5 m 。

(5) 泥沙流失量价值损失估算。泥沙滞留损失采用恢复费用法, 泥沙淤积损失采用影子工程法计算。根据国内已有的研究成果, 我国土壤侵蚀总量中滞留泥沙和淤积泥沙所占的比例分别为 33%、24%^[25]。计算公式如下:

$$E_z = Q_s \times 33\% \times P_z / \rho \quad (10)$$

$$E_y = Q_s \times 24\% \times P_y / \rho \quad (11)$$

式中 E_z 、 E_y 分别为泥沙滞留与淤积的损失价值; Q_s 同上; P_z 、 P_y 分别为挖取泥沙的费用和修建 1 m^3 水库的投资费用 (元/ m^3)。根据调查和价格换算 P_z 取 $13 \text{ 元}/\text{m}^3$, 根据汀江流域水库单位库容造价 P_y 取 $5.23 \text{ 元}/\text{m}^3$; ρ 同上。

3 结 果

3.1 土壤侵蚀量

根据 USLE 模型计算朱溪河小流域 2007 年土壤侵蚀总量为 $42\ 893.96 \text{ t}$, 平均土壤侵蚀模数 $954.047 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。该方法研究结果与相关研究采取的遥感影像解译结果基本吻合^[15], 可见 USLE 模型在该流域的应用是可行的。已有的遥感解译研究结果表明 2000 年初该流域的平均土壤侵蚀模数达 $1\ 260 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[14-15], 可见在 2000—2007 年 7 年间, 该流域土壤侵蚀模数下降明显, 土壤侵蚀的严重性得到有效的遏制。但该结果与南方红壤丘陵区土壤容许侵蚀量 $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 相比, 说明该流域的土壤侵蚀仍相当严重, 有待于进一步的土壤综合整治。

3.2 经济损失结果

根据上述环境经济学计算方法, 研究区 2007 年的经济损失为 806.459 万元 , 各项损失及比例如表 3 所示。

表 3 朱溪河小流域 2007 年土壤侵蚀经济损失值
Tab. 3 Economic costs of soil erosion of Zhuxi small watershed in 2007

类型 Type	万元							合计 Sum	
	土壤养分损失 Soil nutrient loss			有机质 Organic matter	水分 Water	土地废弃 Land	泥沙滞留 Sediment		泥沙淤积 Sediment
	N	P	K	loss	loss	loss	retention		accumulation
金额 Cost	83.631	57.597	345.297	203.967	5.425	243.08	14.320	4.190	957.507
比例/% Percent	8.73	6.02	36.06	21.3	0.57	25.39	1.5	0.44	100

从表 3 可知: 2007 年朱溪河小流域因土壤侵蚀所造成的经济损失为 957.507 万元 。其中土壤侵蚀造成的土壤养分 (N、P、K) 损失为 486.525 万元 , 占总损失的 50.81% 。加上有机质损失比例则达 72.11% 。土壤侵蚀的这部分损失直接导致土壤肥力的降低, 进而造成农业耕作成本的增加及农产品质量的下降。此外土地废弃占土壤侵蚀经济损失的 25.39% , 这种适宜农业发展的土地面积的不断缩减, 从空间上限制了农业的发展。

为了进一步说明流域因土壤侵蚀造成的经济损失程度, 本文利用统计年鉴及相关数据进行对比分析。2007 年长汀县农林牧副渔总产值为 $241\ 374 \text{ 万元}$, 相当于该县土地农林牧副渔的产值为 77.93 万

元,而朱溪河小流域土地因土壤侵蚀造成的经济损失高达 21.2967 万元/ km^2 相当于单位面积农林牧副渔产值的 27.33%。据研究^[26]2007 年长汀县因土壤侵蚀每平方千米土地经济损失为 5.489 万元/ km^2 ,朱溪河小流域是全县的 3.88 倍。可见该流域是长汀县土壤侵蚀的重灾区之一。

4 讨论

本文基于 GIS 技术和 USLE 模型对朱溪河小流域土壤侵蚀量的估算,其结果与相关研究的成果基本吻合^[15],具有较高的可信度。本文对朱溪河小流域土壤侵蚀经济损失的计算只是对部分损失的估算,其结果还不是流域内土壤侵蚀造成的全部价值损失。但这并不影响计算结果说明研究区土壤侵蚀造成经济损失严重性的意义。今后随着生态系统服务功能研究的进一步发展深化,特别是针对研究区域的参数设定的进一步研究,对土壤侵蚀造成的经济损失的估算也将不断完善,人们对土壤侵蚀的危害把握也会更清晰。

参考文献:

- [1]徐高岭. 中国环境破坏的经济损失计量——实例与理论[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1998: 121 - 154.
- [2]郑玉歆. 环境影响的经济分析——理论、方法与实践[M]. 北京: 社会科学文献出版社,2003: 2 - 5.
- [3]王玉庆. 环境经济学[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2002: 20 - 23.
- [4]Pretty J N ,Brett C ,Gee D. An assessment of the total external costs of UK agriculture [J]. *Agricultural Systems* ,2000 ,65 (2) : 113 - 136.
- [5]Martinez - Casanovas J A , Ramos M C. The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penede ' s - Anioia Region(NE Spain) [J]. *Catena* 2006 ,68 (3) : 194 - 199.
- [6]S Bandara Jayatilleke , Chisholm Anthony , Ekanayake Anura , et al. Environmental cost of soil erosion in Sri Lanka: Tax/ Subsidy policy [J]. *Environmental Modelling & Software* 2001 ,16(6) : 497 - 508.
- [7]Matthew J Cohen , Mark T Brown , Keith D Shepherd. Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emergy synthesis [J]. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 2006 ,114(2) : 249 - 269.
- [8]杨志新 郑大玮 李永贵. 北京市土壤侵蚀经济损失分析及价值估算[J]. *水土保持学报* 2004 ,18(3) : 175 - 178.
- [9]许月卿 蔡运龙. 土壤侵蚀经济损失分析及价值估算——以贵州省猫跳河流域为例[J]. *长江流域资源与环境* 2006 , 15(4) : 470 - 474.
- [10]夏建国 胡萃 刘芸. 川西低山区土壤侵蚀经济损失及其评估模式——以名山县蒙山为例[J]. *生态学报* 2006 ,26 (11) : 3696 - 3703.
- [11]夏建国,胡萃 刘芸 等. 土壤侵蚀经济损失及治理投入产出优化模型——以四川省名山县蒙山为例[J]. *中国水土保持科学* 2007 ,5(6) : 76 - 81.
- [12]李根 毛锋. 我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估[J]. *中国水土保持* 2008(2) : 9 - 12.
- [13]潘竞虎,张伟强,秦晓娟. 陇东黄土高原土壤侵蚀的人文因素及经济损失分析[J]. *中国水利* 2008 ,12: 37 - 39.
- [14]岳辉,陈志彪. 朱溪河小流域水土流失治理与生态环境效应[J]. *福建地理* 2003 ,18(1) : 6 - 8.
- [15]邹爱平 陈志彪 陈丽慧. 红壤丘陵区典型小流域侵蚀景观时空变化分析——以福建长汀县朱溪河小流域为例[J]. *中国水土保持科学* 2009 ,7(2) : 93 - 99.
- [16]Lufafa A , Tenywa M M , Isabirye M , et al. Prediction of soil erosion in a lake victoria basin catchment using a GIS based universal soil loss model [J]. *Agricultural Systems* 2003 ,76(3) : 883 - 894.
- [17]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 47 - 48.
- [18]洪华生 杨远 黄金良. 基于 GIS 和 USLE 的下庄小流域土壤侵蚀量预测研究[J]. *厦门大学学报* 2005 44(5) : 675 - 679.
- [19]陈明华 周伏建 黄炎和 等. 坡度和坡长对土壤侵蚀的影响. *水土保持学报* ,1995 9(1) : 31 - 36.
- [20]游松财 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀估算[J]. *自然资源学报* ,1999 ,14(1) : 62 - 68.
- [21]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.
- [22]赵世民 杨常亮 徐玲. 基于 USLE 和 GIS 的阳宗海流域土壤侵蚀与预测研究[J]. *环境科学导刊* 2007 26(4) : 1 - 4.
- [23]杨子生. 土壤流失方程在山区耕地可持续利用适宜性评价与土地利用规划中的应用[J]. *山地学报* ,1999 ,17: 36 - 44.
- [24]杨青华,张志. 武汉市土壤侵蚀经济损失估算研究[J]. *中国水土保持* 2008(2) : 20 - 23.
- [25]侯秀瑞,许云龙,毕绪岱. 河北省山地森林保土生态效益计量研究[J]. *水土保持通报* ,1998 ,18(1) : 17 - 21.
- [26]林惠花 武国胜 朱鹤健. 福建长汀土壤侵蚀的动态经济度量[J]. *四川农业大学学报* 2010 28(2) : 159 - 163.