

基于 RUSLE 模型的 2000—2010 年 长江三峡库区土壤侵蚀评价

王萌¹, 刘云¹, 宋超¹, 李春蕾², 肖文发²

(1. 北京农学院 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206;

2. 中国林业科学研究院 森林生态与环境保护研究所, 北京 100000)

摘要: [目的] 探究三峡库区土壤侵蚀程度, 为区域土壤侵蚀合理化治理提供依据。[方法] 采用 RUSLE 模型, 结合多源数据 (MODIS-NDVI, DEM, 土地利用等), 定量评价长江三峡库区 2000—2010 年的土壤侵蚀时空分布。[结果] ① 三峡库区除西部地区外, 其它地区土壤侵蚀情况严重; 2000—2010 年, 长江沿岸以剧烈侵蚀和极强度侵蚀为主; ② 三峡库区土壤侵蚀状况在 2000—2010 年间得到一定程度的改善, 强度以上土壤侵蚀面积由 2000 年的 1.71×10^6 hm^2 下降为 2010 年的 6.82×10^5 hm^2 ; 库区内平均侵蚀模数由 2000 年的 $36.75 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 下降为 2010 年的 $22.79 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; ③ 三峡库区经过多年侵蚀治理, 强度、极强度、剧烈侵蚀面积逐渐减少的同时, 轻度、中度土壤侵蚀面积在逐渐增加。[结论] 研究区需要进一步加强轻度、中度土壤侵蚀的治理。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 多源数据; 三峡库区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)01-0012-06

中图分类号: S157.2, TP79

文献参数: 王萌, 刘云, 宋超, 等. 基于 RUSLE 模型的 2000—2010 年长江三峡库区土壤侵蚀评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 12-17. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.003. Wang Meng, Liu Yun, Song Chao, et al. Evaluating soil erosion based on RUSLE model in Three Gorges Reservoir area during 2000—2010[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 12-17.

Evaluating Soil Erosion Based on RUSLE Model in Three Gorges Reservoir Area During 2000—2010

WANG Meng¹, LIU Yun¹, SONG Chao¹, LI Chunlei², XIAO Wenfa²

(1. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with

Forestry and Fruit Trees, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100000, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to investigate the soil erosion degree in the Three Gorges Reservoir area in order to provide the basis for regional soil erosion control. [Methods] The revised universal soil loss equation (RUSLE) model was used in conjunction with MODIS-NDVI data, DEM elevation data and land use classification data to evaluate the spatial distribution of soil erosion quantitatively in Three Gorges Reservoir area from 2000 to 2010. [Results] ① Soil erosion in Three Gorges Reservoir area was severe except for the western regions during the period from 2000 to 2010. Soil erosion in Yangtze River was dominated by severe and extreme intensity erosion. ② Soil erosion in Three Gorges Reservoir area was improved from 2000 to 2010, and the area of intensive soil erosion was decreased from 1.71×10^6 hm^2 in 2000 to 6.82×10^5 hm^2 in 2010. Average soil erosion modulus decreased from $36.75 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in 2000 to $22.79 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in 2010. ③ After years of erosion control, the area of intensive, severe and the extremely intensive soil erosion

收稿日期: 2017-08-02

修回日期: 2017-08-17

资助项目: 2014 国家气象公益行业项目“气候和土地利用变化对森林的影响及适应对策”(GYHY201406035); 科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)[市级(PXM2017_014207_000024)]

第一作者: 王萌(1993—), 女(汉族), 北京市平谷区人, 硕士研究生, 从事景观生态与环境效应研究。E-mail: wangmeng9303@126.com。

通信作者: 刘云(1971—), 女(汉族), 新疆维吾尔自治区库尔勒市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事景观生态与环境效益研究。E-mail: housqly@126.com。

decreased, while the area of mild and moderate soil erosion increased. [Conclusion] Mild and moderate intensity soil erosion control need to be enhanced in the study area.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; multi-source data; Three Gorges Reservoir

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[1]。作为全球最大的生态环境问题之一,土壤侵蚀会导致土壤质量下降,理化性质变差,土地荒漠化,降低农业生产力,河流、湖泊泥沙淤积等诸多环境问题^[2]。中国由于人口众多,地质条件和地形结构复杂,土壤侵蚀已严重威胁着人类生存与社会经济发展,成为 21 世纪人类社会可持续发展的重大挑战之一^[3]。

修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE 模型),是由美国农业部在通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)的基础上修正而成的^[4]。RUSLE 模型因其简洁的计算公式和较低的数据需求已成为全球应用广泛的土壤侵蚀定量估算模型^[5]。在模型使用的过程中,往往忽略植被覆盖的季节动态性和降水的季节不均匀性,采用年总降水计算的降水侵蚀力因子和单一的植被覆盖因子参与运算。随着遥感技术的发展,快速获取陆地植被覆盖状态成为可能,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。中国学者也运用该模型做了大量研究:许月卿等^[6]对贵州猫跳河流域的土壤侵蚀量进行了计算;彭建等^[7]对云南丽江的土壤侵蚀特征进行了分析;蒋春丽等^[8]对黑龙江省土壤保持量多年的空间分布特征进行了评价;李天宏等^[9]对延河流域多年的土壤侵蚀动态变化进行了研究,等等。这些研究结果对管理部门采取相关措施,减少土壤侵蚀,推动区域可持续发展具有重要意义。

三峡库区东起湖北宜昌,西至重庆江津,地理位置为东经 105°50′—111°40′,北纬 28°31′—31°44′,包括湖北省和重庆市共 20 个区、县,总面积约为 5.78 × 10⁴ km²。库区属于中亚热带湿润季风气候,年平均气温 17~19 °C,年降水量为 1 000~1 200 mm。地貌以山地、丘陵为主;土壤类型以紫色土、石灰土、黄壤、黄棕壤为主;土地利用类型包括林地、灌丛、草地、果园、耕地、水体和城镇建设用地等。自库区建成以来,土地利用和植被覆盖发生巨大变化,加剧了土壤侵蚀的发生。由于生态环境的脆弱性及其作为长江中下游生态安全屏障的重要地位,三峡库区成为中国水土保持工作的重点地区^[11]。三峡工程实施后,国家采取了一系列的封山育林措施,评估三峡大坝建

成后的土壤侵蚀情况,可以间接评估三峡库区森林水源涵养功能是否得到提升。

本文应用拟 GIS 和 RS 技术,基于多源数据,采用 RUSLE 模型计算长江三峡库区 2000,2005,2010 年的土壤侵蚀量,分析该地区土壤侵蚀强度分布特点,评价三峡库区建成后的 10 a 间土壤侵蚀的动态变化,以期为区域土壤侵蚀合理化治理提供依据。

1 计算方法

1.1 RUSLE 模型

修正通用土壤流失方程(RUSLE)的表达式为:

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

式中:A——年平均土壤侵蚀量;R——降雨侵蚀力因子;K——土壤可蚀性因子;LS——坡长、坡度因子;C——植被覆盖与管理因子;P——水土保持措施因子。RUSLE 模型的应用,关键在于 R, K, LS, C, P 这些因子的确定和求算。

1.2 RUSLE 模型各因子的计算

1.2.1 降雨侵蚀因子 R 的估算 降水是引起土壤侵蚀的重要原因之一,主要是由降雨雨滴所携带的动能对土粒产生冲击而引发土壤侵蚀。R 值是降雨能量和强度的函数,在实际研究工作中一般用来反映降雨对土壤侵蚀的影响^[10]。国内,章文波等^[11]利用日降雨量建立的中国降雨侵蚀力模型得到了广泛应用,王明晓^[12]结合章文波和其他学者的降雨侵蚀力模型,以长江三峡库区近 40 a 来的降雨资料为基础,通过差值计算和回归分析,得到了适用于长江三峡库区的降雨侵蚀力 R 值简便算法,计算公式为:

$$R = \sum_i^{12} 0.287 P_i^{1.574} \quad (2)$$

式中:R——年降雨侵蚀力;P_i(≥12mm,否则以 0 计算)为月降雨量(mm)。

1.2.2 土壤可蚀性因子 K 的估算 在众多影响土壤侵蚀的因素中,土壤自身的抗侵蚀能力也是不可忽略的,国际上通常用土壤可蚀性 K 值来衡量^[13]。K 值大小表示土壤被侵蚀的难易程度,反映土壤对侵蚀外营力剥蚀和搬运的敏感性,是进行土壤侵蚀定量评价的重要参数^[14]。土壤可蚀性作为土壤特性,可蚀性 K 值具有唯一性,即一种土壤只能有一个值^[15]。本研究选用吴昌广等结合前人研究成果经过计算、实测和验证得到的三峡库区各土类土壤可蚀性 K 值^[16]见表 1。

表 1 三峡库区土类及亚类的土壤可蚀性 K 值

土类	土类 K 值	亚类	亚类 K 值
红壤	0.007 5	黄红壤	0.007 7
		红壤性土	0.006 5
黄壤	0.015 6	黄壤	0.015 7
		黄壤性土	0.014 5
黄棕壤	0.016 8	黄棕壤	0.016 2
		暗黄棕壤	0.018 2
		黄棕壤性土	0.017 5
黄褐土	0.019 2	黄褐土	0.019 2
棕壤	0.007 2	棕壤	0.007 2
暗棕壤	0.011 3	暗棕壤	0.011 3
石灰土	0.017 1	黑色石灰土	0.014 7
		棕色石灰土	0.018 6
		黄色石灰土	0.016 7
		酸性紫色土	0.019 6
紫色土	0.018 4	中性紫色土	0.017 9
		石灰紫色土	0.017 4
		酸性粗骨土	0.005 5
粗骨土	0.007 7	中性粗骨土	0.008 6
		钙质粗骨土	0.009 7
		山地草甸土	0.017 6
水稻土	0.018 5	潞育水稻土	0.019 5
		淹育水稻土	0.014 2
		渗育水稻土	0.018 6
		潜育水稻土	0.019 2

1.2.3 坡度坡长因子 LS 的估算 LS 因子反映了地形地貌特征中坡长与坡度对土壤侵蚀的影响,二者是降雨侵蚀动力的加速因子。地形因子通过影响坡面径流的流速和流量,进而影响水流的携沙能力和土壤侵蚀强度。坡度因子 S 是指标准小区条件下,任意坡度下的单位面积土壤流失量与标准小区坡度下的单位面积土壤流失量之比值。同样,坡长 L 因子是指在其他条件相同的情况下,任意坡长的单位面积土壤流失量与标准小区条件下单位面积土壤流失量之比值。坡度因子采用 Nearing 等^[17]提出的坡度因子连续函数回归方程估算,公式为:

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + e^{(2.3 - 6.1 \sin \theta)}} \quad (3)$$

式中: θ ——坡度($^{\circ}$),该方程综合考虑了缓坡和陡坡的影响,适用于各种坡度因子计算。

坡长因子采用 Moore 等^[18]提出的 RUSLE 坡长因子计算公式:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (4)$$

式中: λ ——水平坡长(m); m ——坡长指数;22.13 为标准小区的坡长(m),其中 m 取值如下:

$$m = \begin{cases} 0.5 & (\tan \theta > 0.05) \\ 0.4 & (0.03 < \tan \theta \leq 0.05) \\ 0.3 & (0.01 < \tan \theta \leq 0.03) \\ 0.2 & (\tan \theta \leq 0.01) \end{cases} \quad (5)$$

1.2.4 植被覆盖与管理因子 C 的估算 植被覆盖与管理因子 C 反映的是覆盖和管理对土壤侵蚀的影响,定义为在一定条件下有植被覆盖坡地的土壤流失量与同等条件下适时翻耕、连续休闲对照地上的土壤流失量之比。它是一个无量纲数,其值变化范围在 0~1 之间。 C 因子评价的是所有与覆盖有关的变量对土壤侵蚀的综合作用,是侵蚀动力的抑制因子。为解决遥感应用的局限性,部分学者尝试利用归一化植被指数提取区域尺度上的 C 值。Lin 等^[19]建立的 C 因子与 NDVI 的非线性回归方程适用广泛。

$$C = [(1 - \text{NDVI}) / 2]^{1 + \text{NDVI}} \quad (6)$$

本文以 2000,2005,2010 年 30 d 合成的 MODIS-NDVI(MOD13A3)产品为数据源,利用公式(6)计算得到三峡库区的 C 值。

1.2.5 水土保持措施因子 P 的估算 水土保持措施 P 因子是指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,比值介于 0~1。水土保持措施主要包括耕作措施和工程措施两大类,如等高耕作,带状耕作,修筑梯田等达到保水保土保肥,减少径流量,以达到保持土壤的目的。本研究参考三峡库区土地利用图及相关研究成果和参考文献[20-21],确定 P 值(表 2),土地利用图由 TM 影像获取。

表 2 不同土地利用类型的水土保持措施因子

土地利用类型	水田	旱地	园地	林地	草地	水域	居民建设用地	裸岩
P 值	0.01	1	0.69	1	1	0	0	0

2 结果与分析

2.1 三峡库区 2000—2010 年土壤侵蚀强度分析

应用 RUSLE 模型计算 2000,2005 和 2010 年土壤侵蚀模数,根据水利部颁发的 SL190-2007《土壤侵

蚀强度分类分级标准》^[22],将库区的土壤侵蚀划分为微度侵蚀 [$< 5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]、轻度侵蚀 [$5 \sim 25 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]、中度侵蚀 [$25 \sim 50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]、强度侵蚀 [$50 \sim 80 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]、极强度侵蚀 [$80 \sim 150 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]和剧烈侵蚀 [$> 150 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]6 个标

准(表 3),制作三峡库区 2000,2005 和 2010 年的土壤侵蚀强度等级空间分布图(附图 3)。

由附图 3 可以看出:2000 年,三峡库区除上段河流地带外,其他地区土壤侵蚀较为严重,尤其是三峡库区中段大部分地区表现为强度以上等级。随着时间的推移,土壤侵蚀在一定程度上得到改善,强度等级减弱,尤其是三峡库区的河流上段和中段地区。进一步比较 2000,2005,2010 年 3 个年份三峡库区河流沿岸的土壤侵蚀情况,表现为以剧烈侵蚀和极强度侵蚀等级为主。分析其原因,可能是自三峡工程开展以来,库区移民、城镇扩建、毁林开荒等活动对地表植被

造成破坏,引起长江沿岸土壤侵蚀等级强度恶化。

对比三峡库区 2000—2010 年的土壤侵蚀具体情况(见表 3),可见三峡库区土壤侵蚀状况在 2000—2010 年得到一定程度的改善。主要体现在:强度以上等级(即强度,极强度和剧烈 3 个等级)土壤侵蚀面积大幅减少。面积由 2000 年的 $1.71 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 下降为 2010 年的 $6.82 \times 10^5 \text{ hm}^2$,侵蚀比例由 2000 年的 29.57%下降为 2010 年的 11.80%;微度、轻度、中度侵蚀面积逐渐增加,由 2000 年的 $4.07 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 上升为 2010 年的 $5.11 \times 10^7 \text{ hm}^2$,侵蚀比例由 2000 年的 70.44%上升为 2010 年的 88.21%。

表 3 2000,2005 和 2010 年三峡库区各侵蚀强度等级的土壤侵蚀面积和比例

侵蚀分级	年平均侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	土壤侵蚀面积/ 10^2 hm^2			占总面积比例/%		
		2000	2005	2010	2000	2005	2010
微度	<5	10 574.92	11 670.41	12 631.37	18.29	20.19	21.85
轻度	5~25	15 686.53	19 880.67	21 755.92	27.13	34.39	37.63
中度	25~50	14 464.94	16 747.00	16 611.51	25.02	28.97	28.73
强度	50~80	9 521.27	7 296.47	5 635.42	16.47	12.62	9.75
极强度	80~150	6 600.99	2 068.74	1 100.12	11.42	3.58	1.90
剧烈	>150	970.99	138.28	85.29	1.68	0.24	0.15

三峡库区 2000—2010 年各区县的土壤侵蚀模数见图 1。由图 1 可见,2000 年三峡库区内开县和云阳的平均土壤侵蚀模数最高,达到 $60 \sim 75 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,巫溪、巫山、奉节、万州和秭归等区县平均土壤侵蚀模数次之,为 $45 \sim 60 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其他各区县的平均土壤侵蚀模数都小于 $45 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。2005 年各区县的平均土壤侵蚀模数进一步减少,均小于 $45 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,平均土壤侵蚀模数比较大的区县仅有 7 个(开县、万州、云阳、奉节、巫溪、巫山和兴山),为 $30 \sim 45 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其他各区县的平均土壤侵蚀模数均小于 $30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。到 2010 年,所有区县平均土壤侵蚀模数进一步减少,仅有 5 个(开县、巫溪、

巫山、巴东和秭归)的平均土壤侵蚀模数为 $30 \sim 45 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其它各区县的平均土壤侵蚀模数均小于 $30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

2000—2010 年这 10 a 间,仅秭归县的平均侵蚀模数变化异常,2000—2005 年期间,秭归县的平均侵蚀模数由 $45 \sim 60 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 减少为 $15 \sim 30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,而 2005—2010 年期间,秭归县的平均侵蚀模数由 $15 \sim 30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 增加为 $30 \sim 45 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其他区县的平均侵蚀模数在 2000—2010 年的 10 a 间均在逐渐减少。总体上来看,2000,2005,2010 年的平均土壤侵蚀模数分别为 $36.75, 26.00, 22.79 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,平均侵蚀模数呈下降趋势。

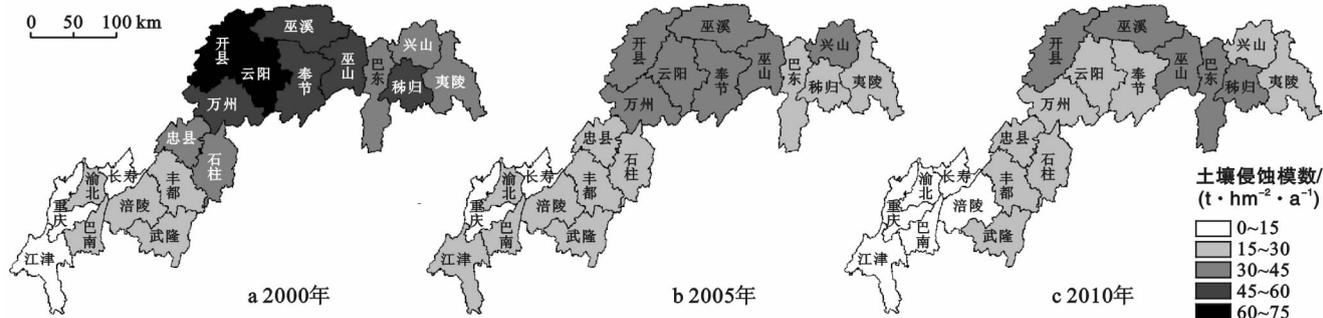


图 1 2000,2005 和 2010 年三峡库区各区县土壤侵蚀模数 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]

2.2 三峡库区 2000—2010 年土壤侵蚀动态变化
计算土壤侵蚀强度的面积转移矩阵见表 4。由

表 4 可以看出:2000—2005 年,侵蚀强度没有发生变化的面积为 $3.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占库区总面积的

61.14%。侵蚀强度增强的面积为 $2.01 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，占库区总面积的3.48%。侵蚀强度降低的面积为 $2.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，占库区总面积的 35.38%。高强度侵蚀级别向低于其 1~2 级的侵蚀级别转移趋势明显。

2005—2010 年土壤侵蚀强度的面积转移矩阵见表 5。由表 5 可以看出：侵蚀强度没有发生变化的面积为 $4.14 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，占库区总面积的 71.71%。侵蚀

强度增强的面积为 $4.60 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，占库区总面积的 7.97%。侵蚀强度降低的面积为 $1.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，占库区总面积的 20.32%。高强度侵蚀级别向低于其 1 级的侵蚀级别转移趋势明显。

比较 2 个阶段(2000—2005 年期间,2005—2010 年期间),土壤侵蚀等级减弱的面积总体增加,但第 1 阶段土壤侵蚀减弱的比例高于第 2 阶段。

表 4 2000—2005 年土壤侵蚀强度面积转换矩阵

10^2 hm^2

项目	2005 年						2000 年合计	
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈		
2000 年	微度	9 408.39	794.02	255.83	80.70	26.26	4.79	10 569.98
	轻度	1 600.65	13 581.80	490.03	3.27	0.03	0.06	15 675.83
	中度	356.45	5 363.67	8 449.51	284.80	6.02	0.02	14 460.46
	强度	173.92	135.36	6 629.45	2 522.69	58.07	0.24	9 519.74
	极强度	104.89	3.45	917.44	4 319.37	1 249.94	5.32	6 600.40
	剧烈	24.81	0.03	4.25	85.58	728.42	127.85	970.95
2005 年合计	11 669.10	19 878.33	16 746.51	7 296.40	2 068.73	138.28	57 797.35	

表 5 2005—2010 年土壤侵蚀强度面积转换矩阵

10^2 hm^2

项目	2010 年						2005 年合计	
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈		
2005 年	微度	10 341.96	974.45	252.02	76.49	20.23	3.95	11 669.10
	轻度	1 726.79	16 583.29	1 541.05	26.09	1.10	0.00	19 878.33
	中度	363.66	4 156.50	10 892.00	1 278.73	54.77	0.85	16 746.51
	强度	126.09	29.78	3 821.61	2 961.97	354.54	2.41	7 296.40
	极强度	53.01	0.25	101.20	1 288.83	608.12	17.34	2 068.73
	剧烈	13.79	0.01	0.00	2.51	61.23	60.74	138.28
2010 年合计	12 625.30	21 744.28	16 607.89	5 634.61	1 099.99	85.28	5 7797.35	

3 讨论与结论

(1) 三峡库区土壤侵蚀情况时间和区域特点明显,2000—2005 年期间,三峡库区河流中段大部分地区表现为强度以上等级,而在 2005—2010 年期间,该区域土壤侵蚀强度等级减弱;相对而言,10 a 期间,库区河流其他区域的土壤侵蚀强度等级比较弱。

(2) 三峡库区土壤侵蚀状况在 2000—2010 年间得到一定程度的减弱,强度以上土壤侵蚀面积由 2000 年的 $1.71 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 下降为 2010 年的 $6.82 \times 10^5 \text{ hm}^2$;库区内平均侵蚀模数由 2000 年的 $36.75 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 下降为 2010 年的 $22.79 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

(3) 三峡库区经过多年侵蚀治理,强度、极强度、剧烈侵蚀面积逐渐减少的同时,轻度、中度土壤侵蚀面积在逐渐增加并逐渐成为侵蚀情况的主流;但部分区县的平均侵蚀模数和轻度侵蚀以上面积占比都有小幅度的增加,需要进一步加强对轻度、中度土壤侵蚀的治理。

本研究仍存在一定的不足,在运用 RUSLE 模型进行各因子的计算过程中,利用了国内外已有的研究方法和相关地区的研究成果,由于不同地域差别的影响以及各数据精度的限制,导致结果出现一定的偏差。今后的研究需要重点关注如何提高数据精度,同时结合实地考察来验证结果的准确性、可靠性。

[参 考 文 献]

- [1] 段炼. 三峡区域新人居环境建设研究[M]. 南京:东南大学出版社,2011.
- [2] 汪涛. 三峡库区土壤侵蚀遥感监测及其尺度效应[D]. 武汉:华中农业大学,2011.
- [3] 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.
- [4] 陈正发. 基于 RUSLE 模型的重庆市土壤流失方程研究[D]. 重庆:西南大学,2011.
- [5] 吴昌广,吕华丽,汪涛,等. 三峡库区土壤侵蚀空间分布特征[J]. 中国水土保持科学,2012,10(3):15-21.

- [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,郑钧霖,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.