

基于 GIS 和 RUSLE 模型的万州区土壤保持服务功能空间分布特征^{*1}

陆传豪^{1, 2} 代富强^{3*} 刘刚才¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 重庆工商大学旅游与国土资源学院, 重庆 400067)

【摘要】: 土壤保持服务是重要的生态系统服务之一, 代表生态系统对土壤侵蚀所起到的削减和改善作用。以万州为研究区, 基于 GIS 平台和修正通用土壤流失方程(RUSLE), 运用降雨、DEM 等数据建模, 探讨万州区土壤保持服务功能的空间分布特征并分析其影响因素。结果显示: (1) 万州区土壤保持总量为 $1435.84 \times 10^5 \text{t/a}$, 单位面积年均土壤保持量为 $417.91 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 具有较高的土壤保持服务功能重要性; (2) 土壤保持服务空间分布受地形和人类活动等的显著影响, 东南部山地区域较高, 而铁峰山与方斗山之间的长江河谷较低, 其空间分布特征与土壤侵蚀的分布状况大致相反; (3) 坡度角度, $15^\circ \sim 25^\circ$ 坡度区产沙量最大占全区的 41.56%, $8^\circ \sim 15^\circ$ 区域次之, 这两个坡度区人地矛盾最为集中; 土地利用类型中, 旱地侵蚀最为强烈, 而林地侵蚀微弱并表现出很高的土壤保持服务功能。研究结果对万州乃至整个三峡库区的水土保持工作有借鉴意义。

【关键词】: 万州区; 土壤侵蚀; 土壤保持; 时空分布; 影响因素

【中图分类号】: P964 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)08-1228-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201708013

土壤保持服务是生态系统对土壤侵蚀所起到的削减和抑制效用的总称, 在控制土壤流失和维持土地生产力中起着关键作用^[1]。对土壤保持的研究目的在于明晰现状, 以便采取适当措施控制侵蚀危害, 提高土壤保持能力。土壤侵蚀和土壤保持研究已有百余年历史, 1965 年 Wischmeier 等^[2] 提出通用土壤流失方程(USLE), 成为土壤侵蚀研究的里程碑。1997 年美国农业部通过改进

¹ 收稿日期: 2016-11-21; 修回日期: 2017-03-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471232) [National Natural Science Foundation(41471232)]; 国家自然科学基金资助项目“雅鲁藏布江河谷区农户种植生计下耕地土壤肥力质量的时空变化特征”(41301351) [National Natural Science Foundation(41301351)]; 重庆市教委科技项目“三峡水库屏障区生态系统服务功能非线性耦合机理与调控模拟研究”(KJ1600611) [Scientific Project of Chongqing Education Committee(KJ1600611)]

作者简介: 陆传豪(1988~), 男, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持. E-mail: luchh@foxmail.com

***通讯作者** E-mail: daifq@ctbu.edu.cn

得到精度更高的修正通用土壤流失方程(RUSLE)^[3]。过去几十年土壤侵蚀研究逐步拓展到了土壤保持这一范畴,尤其是20世纪90年代3S技术的出现为研究提供了巨大的技术支持,有力推动了研究的发展^[4]。国内土壤侵蚀研究始于20世纪30年代,初期较有代表性的如20世纪四五十年代刘善建^[5]、黄瑞采^[6]等学者对国内土壤侵蚀的初步探索。自RUSLE模型被引入国内以来,许多学者对该模型的参数和适用性进行了分析,并进行了大量实证研究,较典型的如对川中丘陵区^[7]、澜沧江流域^[8]、秦岭山区^[9]、海南岛^[10]等地区的土壤保持状况进行评价和分析。

万州位于三峡库区的核心地带,与三峡大坝所在的湖北宜昌和库尾的重庆距离均大于300km,作为三峡库区的中心城市,万州是库区最为重要的节点,同时也是受三峡工程影响最为典型的区域。在中国水土流失分区中万州属于西南水蚀分区下的西南土石山片区,区内农业人口基数大,地势起伏多坡耕地,水土流失一直是其主要生态环境问题之一。2000年以来,三峡工程建设、蓄水和运行,加之万州社会经济快速发展,地区环境发生了巨大变化,给土壤侵蚀和土壤保持带来了诸多不确定因素。本次研究以万州作为研究区,运用修正土壤流失模型(RUSLE),基于ArcGIS平台,研究三峡水库蓄水后万州土壤侵蚀和土壤保持的现状,并分析其影响因素。研究结果可为万州区水土流失防治、土地资源的保护和合理利用提供科学依据,同时也可对整个三峡库区的的水土流失研究和治理提供借鉴。

1 研究区概况

万州地处三峡库区腹地,重庆市东北部,总面积3457km²。区内气候温润,年平均气温17.7℃,年均降水1243mm左右,多集中于4~9月。境内河流多切割深,长江自西南长坪乡流入,从东北黄柏乡流出,流程逾80km,将全区近似等分成西北东南两部^[11]。全区处于川东地质构造带,地形起伏大,多丘陵山地,南山、铁峰山、方斗山等主要山系均呈西南东北走向,最高点沙坪峰海拔1762m,最低点黄柏乡长江边海拔106m。裸露地层以中生代侏罗纪为主,三叠纪次之,局部地区参杂二叠纪和新生代第四纪地层。土壤类型包括紫色土、石灰土、潮土和水稻土,其中太白甘宁等地多紫色土和水稻土,武陵等沿江地区有潮土分布^[12]。植被类型复杂,有亚热带常绿阔叶、常绿及落叶阔叶混交林等,植物总有99科,代表性树种如马尾松、黄荆等^[13]。土地利用以林地和耕地为主,其中又以耕地类的旱地分布最为广泛。万州坡耕地多,降水充沛,人类活动密集,新千年以来三峡水库蓄水运行和社会经济快速发展让区内环境发生了巨大改变,导致土壤侵蚀形势一直较为严峻。

2 方法与数据

2.1 土壤保持量计算

本次研究以修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)为评价模型^[14]。该模型自被引入中国以来,已在包括三峡库区在内的诸多区域进行了实证应用,其科学性和有效性已得到广泛的验证。模型基本形式如下:

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

式中:A为年平均土壤侵蚀量[t/(hm²·a)];R为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)];K为土壤可蚀性因子[(t·h·hm²)/(hm²·MJ·mm)];LS为地形因子,包括坡长因子L和坡度因子S;C为地表植被覆盖因子;P为水土保持措施因子。

研究过程中涉及潜在侵蚀(Ap)、现实侵蚀(Ar)、土壤保持量(Ac)3个主要数据量的计算。潜在土壤侵蚀量(Ap)是在假定没有地表植被覆盖和水土保持措施状态下的侵蚀量,即侵蚀潜力;现实土壤侵蚀量(Ar)指实际发生的侵蚀量;土壤保持量(Ac)为潜在土壤侵蚀量(Ap)与现实土壤侵蚀量(Ar)二者的差值。土壤保持量的计算公式如下:

$$A_c = A_p - A_r = R \cdot K \cdot LS \cdot (1 - C \cdot P) \quad (2)$$

2.2 侵蚀因子的计算

2.2.1 降雨侵蚀力因子 R 的计算

R 因子是评价降雨潜在侵蚀力的指标，降雨是引起土壤侵蚀的驱动力，降雨的多少、强度以及时空分布决定了降雨侵蚀力的特性。R 因子的计算方法有很多，本次研究选择被广泛应用的基于月尺度降雨量数据的 R 值计算公式^[15]，该公式综合考虑了年降雨量和月降雨量特征，是当前降雨侵蚀力因子计算中最为科学的方法之一，且已经在三峡库区大宁河流域等^[16]同类地区进行过实证应用。公式如下：

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10}(P_i^2/P) - 0.08188)} \quad (3)$$

式中： P_i 为月降雨量(mm)；P 为年降雨量(mm)。以万州区过去 30a 的降雨数据为基础，利用公式(3)计算研究区的 R 值，并运用 ArcGIS 工具对 R 值进行空间化处理。

2.2.2 土壤可蚀性因子 K 的计算

K 因子代表土壤抵抗侵蚀的能力，反映了土壤对侵蚀的敏感性，是土壤渗透率、渗透量、容水量以及土壤颗粒抵抗分散和输送能力的综合反映。K 值的计算方法很多，结合研究区特点采用 EPIC 模型中提出的 K 值计算方法^[17]，该方法简洁科学，计算结果能真实反映实际情况，且在三峡库区已有较长的应用历史，其在该地区的有效性已得到充分验证，其公式如下：

$$K = \{0.2 + 0.3e^{[-0.0256S_d(1-S_i/100)]}\} \times [S_i/(Cl + S_i)]^{0.3} \times \{1 - 0.25C/[C + e^{(3.72-2.95C)}]\} \times \{1 - 0.7(1 - S_d/100) / [1 - S_d/100 + e^{[-5.51+22.9(1-S_d/100)}]]\} \quad (4)$$

式中： S_d 为砂粒含量； S_i 为粉粒含量；Cl 为黏粒含量；C 为有机碳含量，且均以百分数格式进行运算。研究基于万州区土壤的砂、粉、黏、有机碳含量的基础数据，利用公式(4)计算得到各土壤类型的 K 值，再利用 ArcGIS 进行转化处理。

2.2.3 地形因子 LS 的计算

LS 因子反映地形中坡长和坡度对土壤侵蚀的影响。在坡面尺度，该因子值可以通过观测获得，并以此计算 LS 因子；在流域及更大尺度下，可基于数字高程模型 (DEM)，利用 ArcGIS 空间分析工具，通过提取、裁剪、修正等操作并结合经验公式计算获得地形因子 LS。本研究 LS 因子的计算的经验公式如下^[18]：

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (5)$$

式中:L为坡长因子;λ为坡长(m);坡度大于5%时参数m为0.5,坡度介于3%和5%之间时m为0.4,坡度小于3%时m为0.3;同时根据 McCool 等^[19]的研究成果,L因子在计算过程中设定坡长上限为150m。

$$\begin{aligned} S &= 10.8 \sin \theta + 0.03 \theta < 9\% \\ S &= 16.8 \sin \theta - 0.50 \theta \geq 9\% \end{aligned} \quad (6)$$

式中:S为坡度因子;θ为坡度(°)。

用 ArcGIS 的空间分析工具从万州区 DEM 中提取坡长和坡度,再采用公式(5)和公式(6)计算得到L值和S值。

2.2.4 地表覆盖因子C和水土保持因子P的确定

确定C因子和P因子的方法有很多,包括人工赋值法、小区实验法等,综合考虑万州实际和研究条件,本次研究均采用较为通用的人工赋值法。在过去几十年中已经有大量学者对三峡库区的C因子和P因子进行了探索和研究,至今为止基本已经形成较为固定的C因子和P因子赋值范围。本次研究C因子和P因子(表1)的设置借鉴前人在三峡库区研究中通过测算和验证所获得的赋值,并结合研究区实际进行小幅修正。

表1 万州区不同土地利用类型的C因子值和P因子值
Tab.1 C Factor Value and P Factor Value of Land Use in Wanzhou District

土地利用类型	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
C因子	0.31	0.18	0.006	0.014	0	0.2	0.06
P因子	1	0.15	1	1	0	0	1

C因子指某种植被覆盖下的土壤流失量与实施耕种后的连续休闲地的土壤流失量的比值,值介于0~1,越接近1表示越容易发生侵蚀。C因子设置借鉴蔡崇法等^[3]在三峡库区秭归王家桥小流域测算获得的C因子值,该赋值结果在库区土壤侵蚀研究中已有较长时间应用,且效果良好。

P因子指的是采取一定水土保持措施情况下与顺坡种植时候的土壤流失量比值,值介于0~1,其中0值代表不会发生土壤侵蚀,1值代表没有采取任何水土保持措施。P值设置借鉴了王万忠等^[20]在侵蚀影响因子方面的研究成果,并结合刘爱霞等^[21]学者在三峡库区同类研究中P因子的设置情况实际进行修正。

2.3 数据来源

万州区地处三峡库区腹地,受三峡工程影响深远,三峡工程于2009年完全竣工,本次研究所涉及的数据资料均来自三峡成库之后。研究区2013年降雨数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),由万州气象局下属的气象观测站记录。土壤数据基于第二次全国土壤普查获得的土壤类型分布图。万州区2013年DEM(30m分辨率)和遥感影像来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://datamirror.csdb.cn>)。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,并结合万州区2013年土地利用现状调查结果、万州区规划项目。社会概况数据来源于2013年《万州区统计年鉴》和《重庆市统计年鉴》。

3 结果与分析

3.1 万州区潜在土壤侵蚀分布特征

潜在土壤侵蚀是衡量土壤侵蚀潜力的标准，是假定在没有地表覆盖和水土保持措施状态下的土壤侵蚀。运用模型计算获得万州区潜在侵蚀数据，结果表明，万州区潜在土壤侵蚀总量为 $1587.77 \times 10^5 \text{t/a}$ ，年平均潜在侵蚀模数为 $462.13 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。潜在侵蚀分布线大致与区内各山脉走向一致，河谷区域潜在侵蚀相对较小，随坡度的抬升逐步增加，各类山地陡坡区域为潜在侵蚀最大的地区(图 1)。

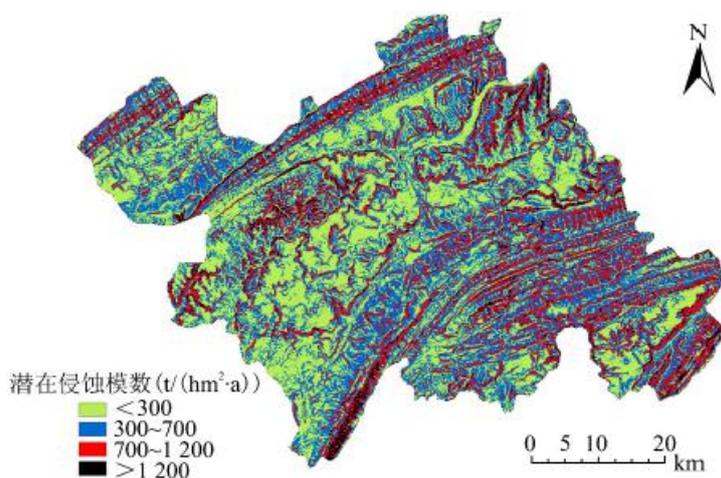


图 1 万州区潜在土壤侵蚀分布

Fig. 1 Distribution of Potential Erosion in Wanzhou District

参照坡度划分标准将研究区划分为 6 个坡度区，后通过 ArcGIS 将潜在侵蚀分布图与坡度图叠置，并利用空间分析模块下的区域统计功能获取各个坡度区的潜在侵蚀模数和侵蚀量(表 2)，并以此为基础进行统计分析。结果表明，全区坡度处于 $0^\circ \sim 67.5^\circ$ 之间，面积最大的是 $15^\circ \sim 25^\circ$ 区域占总面积的 31.54%，最小值为大于 35° 的陡坡区仅占 3.64%，其中 74.96% 的土地位于 $8^\circ \sim 35^\circ$ 区域，此外方斗山和七曜山之间山地为最陡区域，而长江河谷坡度较为缓和。潜在侵蚀强度方面，最小值为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 坡度区的 $86.62 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，最大值为坡度大于 35° 区域的 $1143.95 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，强度随着坡度的抬升逐步增加。侵蚀总量方面，潜在侵蚀量最大的是 $15^\circ \sim 25^\circ$ 区域为 $618.02 \times 10^5 \text{t/a}$ ，占研究区总量的 38.92%；最小的是小于 5° 区域的 $29.46 \times 10^5 \text{t/a}$ ，占总量的 1.86%；85.15% 的潜在侵蚀量分布在坡度 $8^\circ \sim 35^\circ$ 之间。潜在侵蚀是理论上的最大侵蚀量，在土壤保持措施制定和实施过程中应当重点关注潜在侵蚀较大的区域。

表 2 万州区不同坡度潜在侵蚀状况

Tab. 2 Potential Erosion of Different Slope in Wanzhou District

坡度 分级 (°)	面积 (hm ²)	面积 比例 (%)	平均侵 蚀模数 (t/(hm ² ·a))	侵蚀总量 (10 ⁵ t/a)	侵蚀量 比例 (%)
< 5	34 004.61	9.90	86.62	29.46	1.86
5~8	39 563.64	11.52	160.31	63.43	3.99
8~15	100 452.78	29.24	311.84	313.26	19.73
15~25	108 354.87	31.54	570.36	618.02	38.92
25~35	48 706.11	14.18	863.78	420.72	26.50
>35	12 491.46	3.64	1 143.95	142.90	9.00

3.2 现实土壤侵蚀状况

现实土壤侵蚀是指存在植被覆盖和水土保持措施情况下的土壤侵蚀，即实际发生的土壤侵蚀量。运用模型计算得到万州区现实土壤侵蚀量为 $151.92 \times 10^5 \text{t/a}$ ，平均现实土壤侵蚀模数为 $44.22 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，整体处于中度侵蚀状态，现实侵蚀量远低于潜在侵蚀量。现实侵蚀分布受人为活动的影响显著，坡地及农垦密集区侵蚀量较大。现实土壤侵蚀最强烈地区位于方斗山和铁峰山之间，尤其以响水镇、分水镇一带最为典型，该区域人为活动集中，人地矛盾较为突出(图 2)。

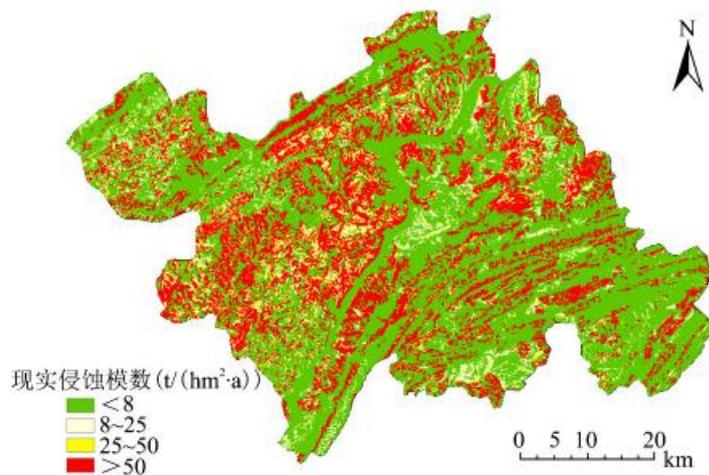


图 2 万州区现实土壤侵蚀分布

Fig. 2 Distribution of Reality Erosion in Wanzhou District

根据《土壤侵蚀分类分级标准》在现实土壤侵蚀强度中取 8、25、50、80、150 五个端点，将其分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈 6 个等级(表 3)。结果表明，侵蚀面积方面，微度侵蚀区面积最大达到 208635.93hm^2 ，占总侵蚀面积的 60.73%；其次为剧烈侵蚀区占 11.06%。侵蚀强度方面，不同强度区现实土壤侵蚀模数差异显著，微度侵蚀区平均侵蚀模数仅为 $2.92 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，而剧烈区的平均侵蚀模数达到了 $230.72 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。现实侵蚀总量方面，剧烈侵蚀区 $87.71 \times 10^5 \text{t/a}$ 的侵蚀量占到了全区总量的 57.73%，极强烈侵蚀区侵蚀量占全区总量的 24.05%，其它强度区侵蚀量均较小。从结果可以发现，万州区现实土壤侵蚀两级分化严重，微度侵蚀区面积大、侵蚀强度低、产沙量小；剧烈和极强烈侵蚀区面积小、侵蚀强度高、产沙量大；

中间几个强度区面积、强度和产沙量占比均很低。剧烈、极强烈侵蚀区应成为万州下一阶段水土流失治理的重中之重。

表 3 万州区土壤现实侵蚀强度分级统计
Tab. 3 Reality Soil Erosion Intensity Classification Statistics in Wanzhou District

强度分级 ($t/(hm^2 \cdot a)$)	平均侵蚀模数 ($t/(hm^2 \cdot a)$)	面积 (hm^2)	面积比例 (%)	侵蚀总量 ($10^5 t/a$)	侵蚀量比例 (%)	
< 8	微度	2.92	208 635.93	60.73	6.09	4.01
8~25	轻度	14.29	30 512.88	8.88	4.36	2.87
25~50	中度	36.65	17 251.29	5.02	6.32	4.16
50~80	强烈	64.71	16 844.67	4.90	10.90	7.18
80~150	极强烈	113.09	32 313.87	9.41	36.54	24.05
>150	剧烈	230.72	38 014.83	11.06	87.71	57.73

3.2.1 不同坡度区土壤侵蚀特征分析

利用 ArcGIS 的空间分析工具处理获得现实土壤侵蚀，后将现实侵蚀分布图与坡度图叠置，利用区域统计功能获取各个坡度区的侵蚀模数和侵蚀量，并进行分析。结果显示，侵蚀强度上，区内土壤侵蚀强度随坡度的增加呈先上升后略下降的变化过程(表 4)，最大值为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 坡度区的 $64.49t/(hm^2 \cdot a)$ ，最小值为小于 5° 区的 $10.40t/(hm^2 \cdot a)$ 。现实侵蚀总量方面， $15^\circ \sim 25^\circ$ 区域侵蚀量最大为 $63.14 \times 10^5 t/a$ ，占到总量的 41.56%； $8^\circ \sim 15^\circ$ 区域次之为 $38.33 \times 10^5 t/a$ ，占总量的 25.23%；最小值为小于 5° 区域的 $3.54 \times 10^5 t/a$ 。研究发现 66.79% 的土壤侵蚀量来源于坡度 $8^\circ \sim 25^\circ$ 区域，产生这一现状的主要原因是 $8^\circ \sim 25^\circ$ 坡度区面积大，多坡耕地，同时也是人群生产居住的主要区域，人类活动密集加之坡耕地易于发生侵蚀的特性使得该区域土壤侵蚀最为严重。

表 4 万州不同坡度区侵蚀状况
Tab. 4 Soil Erosion Under Different Slope

坡度 分级 ($^\circ$)	面积 (hm^2)	面积 占比 (%)	平均侵 蚀模数 ($t/(hm^2 \cdot a)$)	侵蚀总量 ($10^5 t/a$)	侵蚀量 占比 (%)
< 5	34 004.61	9.90	10.40	3.54	2.33
5~8	39 563.64	11.52	20.04	7.93	5.22
8~15	100 452.78	29.24	38.15	38.33	25.23
15~25	108 354.87	31.54	58.27	63.14	41.56
25~35	48 706.11	14.18	64.49	31.41	20.67
>35	12 491.46	3.64	60.66	7.58	4.99

3.2.2 不同土地利用类型区土壤侵蚀差异

依据《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》，将全区土地利用分为 7 类，后将现实侵蚀分布图与土地利用类型图叠置，利用 ArcGIS 空间分析模块下的区域统计功能获取各个土地利用类型区的侵蚀模数和侵蚀量，并进行分析。结果表明，万州区各土地利用方式面积差异显著(表 5)，林地是万州面积最大的土地利用类型，其面积 $168987.24hm^2$ 占全区的 49.19%；旱地次之占全区面积的 32.67%；水田占 10.66%；其余利用方式面积相对较小。土壤侵蚀强度方面，旱地土壤侵蚀强度为 $126.70t/(hm^2 \cdot a)$

远远大于其它土地利用类型区；水田的侵蚀强度 $10.15\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 亦显著高于林地草地；林地和草地的侵蚀强度仅分别为 3.33 和 $6.34\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。在侵蚀总量上，旱地土壤侵蚀量为 $142.19 \times 10^5\text{t}/\text{a}$ ，占全区总量的 93.59% ，远大于其它区域，是万州最主要的侵蚀泥沙策源地；林地的侵蚀量仅为 $5.63 \times 10^5\text{t}/\text{a}$ ，占总量的 3.70% 。林地的侵蚀强度均低于 $5\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，属于微度侵蚀，说明研究区各类林地在控制土壤侵蚀方面效果良好。当前，万州区土壤侵蚀量主要来源于旱地区域，旱地植被在覆盖度和根系固持能力方面均弱于林地和草地，加之区内地形起伏大和农耕活动集中等特点，使得旱地成为侵蚀发生的核心区，故对旱地土壤侵蚀的控制应为下一阶段侵蚀防治的关键。

表 5 万州区主要土地利用类型侵蚀状况
Tab. 5 Soil Erosion in Different Land Use Area

土地利用类型	面积 (hm^2)	面积占比 (%)	平均侵蚀模数 ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	侵蚀总量 ($10^5\text{t}/\text{a}$)	侵蚀量占比 (%)
旱地	112 229.10	32.67	126.70	142.19	93.59
林地	168 987.24	49.19	3.33	5.63	3.70
水田	36 617.58	10.66	10.15	3.72	2.45
草地	5 797.71	1.69	6.34	0.37	0.24
未利用土地	4.50	0.00	17.43	0.00	0.00

3.3 万州区土壤保持服务功能空间分布特征

土壤保持服务指生态系统对土壤侵蚀所起到的削减和改善作用。当前，万州区土壤保持总量为 $1435.84 \times 10^5\text{t}/\text{a}$ ，年平均单位面积土壤保持强度为 $417.91\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。空间上，研究区土壤保持较强区域大致位于各山地区，农垦密集区的土壤保持能力显著较低。局部看，山间河谷区域保持强度相对较小，随着坡度增加一定程度增大，这是因为坡度抬升，潜在土壤侵蚀量迅速升高，地表植被所发挥的土壤保持效果显著增大。区内保持强度最高的地区位于东南侧山地区域，该类区域山高坡陡，潜在土壤侵蚀大，同时各类植被和水土保持措施发挥的效用也相应较大(图 3)。

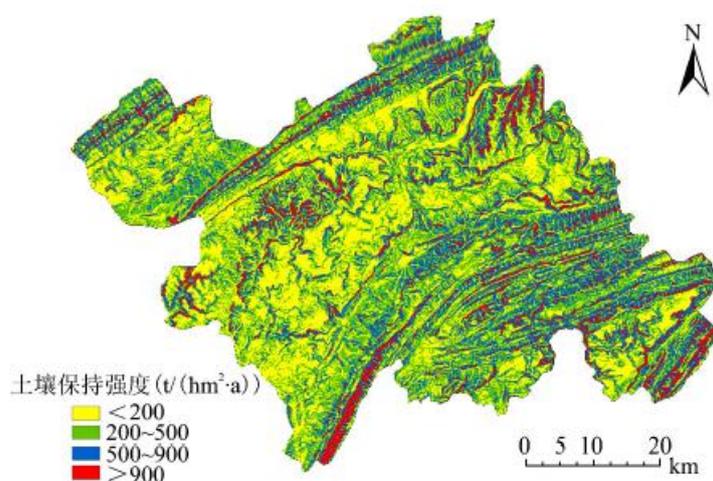


图 3 万州区土壤保持现状分布

Fig. 3 Distribution of Soil Conservation in Wanzhou District

3.3.1 不同坡度条件下的土壤保持服务功能特征

运用前述方法获得各个坡度区的土壤保持数据, 并进行统计分析(表 6), 结果表明, 土壤保持强度方面, 保持强度随坡度增加呈现抬升态势, 平均保持强度最大的是大于 35° 区域为 1083.29t/(hm²·a), 最小的是小于 5° 区域为 76.22t/(hm²·a)。保持总量上, 15°~25° 坡度区土壤保持总量最大为 554.87×10⁵t/a, 占全区总量的 38.64%; 25°~35° 区域次之为 389.30×10⁵t/a, 占全区总量的 27.11%; 大于 35° 区域, 虽然平均保持强度最大, 但由于面积较小, 总保持量仅占全区的 9.42%; 万州区土壤保持量主要集中在 15°~35° 坡度区, 该区间保持总量占到了全区总量的 65.75%。总体而言, 坡度小于 8° 的区域的土壤侵蚀量和保持量都较低, 而随着坡度抬升, 潜在侵蚀增加, 地表植被和水土保持措施所发挥的土壤保持效果也逐步增大, 使单位面积土壤保持强度不断提高。

表 6 万州区不同坡度土壤保持服务功能
Tab. 6 Soil Conservation Under Different Slope

坡度分级(°)	面积(hm ²)	面积占比(%)	平均保持强度(t/(hm ² ·a))	总保持量(10 ⁵ t/a)	保持量占比(%)
< 5	34 004.61	9.90	76.22	25.92	1.81
5~8	39 563.64	11.52	140.27	55.50	3.87
8~15	100 452.78	29.24	273.69	274.93	19.15
15~25	108 354.87	31.54	512.09	554.87	38.64
25~35	48 706.11	14.18	799.29	389.30	27.11
>35	12 491.46	3.64	1 083.29	135.32	9.42

3.3.2 不同土地利用类型条件下的土壤保持服务功能特征

林地、旱地和水田是万州区最为主要的土地利用类型, 三者合计占到总面积的 92.52%, 其它土地利用方式面积相对较小。基于土壤保持状况图与土地利用类型图, 利用 ArcGIS 获取各个土地利用类型区的土壤保持数据(表 7)。土壤保持强度方面, 林地土壤保持强度最大达到 530.67t/(hm²·a); 草地次之; 旱地土壤保持强度仅为 282.82t/(hm²·a), 远小于林地和草地; 此外水田土壤保持强度 362.83t/(hm²·a) 亦较低。在土壤保持总量上, 林地土壤保持总量为 896.76×10⁵t/a, 占全区总量的 62.46%, 是万州区土壤保持量最高的土地利用类型; 旱地次之为 317.40×10⁵t/a, 占全区总量的 22.11%; 其它土地利用类型的土壤保持量占比均较小。这一现状充分说明旱地作物的土壤保持能力远弱于林地植被, 而研究区多坡地、多旱地的特征, 更加凸显提升旱地土壤保持能力, 减少产沙量的必要性。

表 7 万州区不同土地利用类型土壤保持服务功能

Tab. 7 Soil Conservation in Different Land Use Area

土地利用类型	面积 (hm ²)	面积占比 (%)	平均保持强度 (t/(hm ² ·a))	总保持量 (10 ⁵ t/a)	保持量占比 (%)
旱地	112 229.10	32.67	282.82	317.40	22.11
林地	168 987.24	49.19	530.67	896.76	62.46
水田	36 617.58	10.66	362.83	132.86	9.25
草地	5 797.71	1.69	439.17	25.46	1.77
未利用土地	4.50	0.00	273.11	0.01	0.00

研究表明, 林地、旱地和水田是研究区分布最大的三类土地利用方式, 当前旱地的单位面积土壤保持强度远弱于林地, 说明旱地具有较大的土壤侵蚀风险。旱地区域作为当前研究区最大的泥沙策源地, 在下一阶段的工作中, 应当通过采取适当的水土保持措施, 或者进行合理的规划调整, 提高旱地的土壤保持能力, 减少土壤侵蚀。

4 讨论

4.1 精度和结果验证

精度验证采用 2013 年进行的野外调查数据, 并结合 2013 年重庆市水土流失调查结果, 参照同期 Google Earth 发布的高分辨率影像及各类航拍图片, 随机选取 139 个点与 ArcGIS 处理结果进行对比验证, 得到实验的精度为 86.33%。本次研究的结果与 2013 年重庆市水土保持公报公布的结果一致; 与 2011 年范建容等^[22]运用遥感技术分析三峡库区土壤侵蚀特征所获得的结果基本一致; 与 2016 年刘睿等^[23]在三峡库区重庆段土壤保持服务研究中的结果基本一致。说明研究所选择的方法和获得的结果具有较高的可信度。

4.2 整体土壤保持服务较高, 林地旱地成为关键区域

万州区土壤保持总量为 $1435.84 \times 10^5 \text{t/a}$, 平均单位面积土壤保持量为 $417.91 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 结合近几年相关研究和调查结果可以发现, 万州土壤保持功能在重庆各区县中处于中等偏上的位置, 土壤保持服务水平较高。其中林地贡献了 62.46% 的土壤保持量, 是万州土壤保持服务贡献度最大的土地利用类型; 而旱地则成为土壤保持中最薄弱的区域, 其保持能力仅约为林地的 1/2。林地和旱地合计占到全区面积的 81.86%, 而在土壤保持能力上却呈现巨大的反差, 说明在较长时期内, 林地旱地的结构变化仍将是决定万州土壤保持功能大小的关键。基于林地在面积和保持能力上的绝对优势, 在发展过程中需保障林地面积和质量, 严控对林地资源的过渡利用与破坏; 对旱地需要转变不良的耕作方式, 提升其土壤保持服务功能。

4.3 地形破碎导致分布杂乱, 人类活动加剧空间差异

万州土壤保持服务的分布较为破碎杂乱, 空间上大致呈现东南高西北低、山区高谷地低的分布状况。破碎的分布主要是地形因素所致, 万州地形破碎度高, 起伏大, 地表连续性弱, 受此影响土壤侵蚀和土壤保持功能均呈现出破碎杂乱并缺乏连续性的分布特征。另一方面, 人类活动尤其是农业活动通过改变地表植被, 导致空间差异扩大, 全区侵蚀强度大、土壤保持能力弱的区块几乎都位于人群城镇密集的区域, 而山地等人类活动相对少的地区土壤保持能力均较高。在各类政策措施制定过程中, 需要充分考虑地形因素所带来的影响, 并警惕人类活动对生态系统土壤保持功能的不良干扰。

4.4 长江谷地问题突出，坡面旱地侵蚀严重

长江河谷地区土壤保持功能薄弱，谷内坡面旱地侵蚀严重，已经成为当前万州侵蚀泥沙最主要的策源地。长江河谷作为万州综合条件最为优越的区域，容纳了全区绝大部分城镇和人口，谷内地势起伏较为平缓，旱地分布广泛。旱地植被覆盖度低，保水保土能力弱，加之人为活动密集，使得该区域土壤保持功能弱、侵蚀状况较为严重。剧烈的侵蚀破坏土壤肥力，降低生产力，使得土地的承载力下降；另一方面，长江水位上升土地减少，区域内社会经济发展和人口增加，对土地的依赖不断增加，使得该区域的人地矛盾不断加剧。探寻社会发展和土地利用结构转变的契合点，缓解这一关键区域的人地矛盾，对万州土壤保持功能的提升和社会经济的可持续发展具有重要的意义。

5 结论

本次研究以 RUSLE 模型和 GIS 平台为基础，利用万州区 DEM、土地利用和降雨等数据，分析当前万州区土壤侵蚀和土壤保持的现状，并探究其影响因素。结果表明：

(1) 当前，万州区土壤保持总量为 $1435.84 \times 10^5 \text{t/a}$ ，平均单位面积土壤保持量为 $417.91 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。万州区潜在土壤侵蚀总量为 $1587.77 \times 10^5 \text{t/a}$ ，平均潜在侵蚀模数为 $462.13 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。现实土壤侵蚀总量为 $151.92 \times 10^5 \text{t/a}$ ，平均现实土壤侵蚀模数为 $44.22 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，整体处于中度侵蚀状态。

(2) 不同坡度下， $8^\circ \sim 25^\circ$ 坡度区面积占比大，侵蚀量占到全区总量的 66.79%，但土壤保持量占比相对落后，故 $8^\circ \sim 25^\circ$ 区域是万州区人地矛盾最为集中的地区。不同地类中，林地土壤保持能力最强，而旱地的土壤保持能力远不及各类林地和草地，故旱地具有较大的土壤侵蚀风险。

(3) 土壤侵蚀和土壤保持空间分布较为破碎，且空间差异显著。土壤保持功能呈现东南部高于西北部的分布特征，而土壤侵蚀呈现相反的分布状况。铁峰山和方斗山之间的长江河谷区域侵蚀强烈，土壤保持能力弱，成为控制侵蚀和提升土壤保持功能的关键地区。

(4) 在今后工作中，需要持续推进对天然林的保护，在符合条件地区推行坡改梯、退耕还林等措施；对土壤保持能力不同的模块可结合实际搭配不同的林草植被；同时要转变不合理的生产耕作方式，减少顺坡耕作；对各类土地利用类型区包括居民点等进行合理布局，降低对环境的负面人为干扰，以期通过以上措施降低区域土壤侵蚀量，提高生态系统的土壤保持服务功能。

本次研究所选择的方法和研究成果能比较真实的反映万州土壤保持服务的真实现状，但研究过程中仍存在一些不足之处，如因子设置仍旧有一定的主观性；利用 ArcGIS 处理数据的过程中存在一定误差，处理精度有待于进一步提高等，这些均需在在今后的工作中进一步完善。

参考文献：

[1] 谢高地，肖玉，鲁春霞. 生态系统服务研究：进展、局限和基本范式 [J]. 植物生态学报，2006，30(2)：191—199.

【XIE G D, XIAO Y, LU C X. Study on ecosystem services: progress, limitation and basic paradigm [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(2)：191—199.】

[2] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning

[M] . Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, 1978.

[3] 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.

【CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J] . Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2) : 19 —24. 】

[4] 史志华. 基于 GIS 和 RS 的小流域景观格局变化及其土壤侵蚀响应 [D] . 华中农业大学博士毕业论文, 2003.

【SHI Z H. Research on changes of landscape pattern and responses of soil erosion in watershed level using GIS and RS [D] . PHD Thesis of Huazhong Agricultural University, 2003. 】

[5] 刘善建. 天水水土流失测验的初步分析 [J] . 科学通报, 1953(12) : 59—66.

【LIU S J. Primary analysis of soil erosion test in Tianshui [J] . Chinese Science Bulletin, 1953(12) : 59 —66. 】

[6] 黄瑞采. 雨量坡度及作物对于四川紫棕土冲蚀之影响 [J] . 土壤学报, 1948(1) : 9—20.

【Huang R C. A Study on Rainfall, Slope, and Crop in Relation to Erosion of the Purple Brown Soil of Szechuan [J] . Acta Pedologica Sinica, 1948(1) : 9—20. 】

[7] 花利忠, 贺秀斌, 朱波. 川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究 [J] . 水土保持通报, 2007, 27(3) : 111—115, 183.

【HUA L Z, HE X B, ZHU B. Soil erosion distribution of a small watershed in the hilly area of central Sichuan Basin [J] . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(3) : 111—115, 183. 】

[8] 陈龙, 谢高地, 裴厦, 等. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布 [J] . 应用生态学报, 2012, 23(8) : 2249—2256.

【CHEN L, XIE G D, PEI X, et al. Ecosystem' s soil conservation function and its spatial distribution in Lancang River Basin Southwest China [J] . Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8) : 2249—2256. 】

[9] 李婷, 刘康, 胡胜, 等. 基于 INVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价 [J] . 长江流域资源与环境, 2014, 23(9) : 1242—1250.

【LI T, LIU K, HU S, et al. Soil erosion and ecological benefits evaluation of Qinling Mountains based on the INVEST model [J] . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(9) : 1242—1250. 】

[10] 饶恩明, 肖焱, 欧阳志云, 等. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素 [J] . 生态学报, 2013, 33(3) : 746—755.

【RAO E M, XIAO Y, OUYANG Z Y, et al. Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3) : 746—755. 】

[11] 何立平, 付川, 谢昆, 等. 三峡库区万州段不同类型消落带土壤磷形态贮存特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 42(4) : 534—541.

【HE L P, FU C, XIE K, et al. Soil phosphorus species and storage characteristics of different types in water fluctuation zone of the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 42(4) :534—541. 】

[12] 左太安, 苏维词, 马景娜, 等. 三峡重庆库区针对水土流失的土地资源生态安全评价 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2) : 74—78.

【ZUO T A, SU W C, MA J N, et al. Ecological security of land evaluation in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing for water and soil erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2) : 74—78. 】

[13] 祝浩翔, 王鑫, 徐伟, 等. 重庆万州区山地型城市绿地类型景观组成特点分析 [J]. *林业调查规划*, 2014, 39(5) : 136—142.

【ZHU H X, WANG X, XU W, et al. Landscape composition characteristics of mountainous urban greenland of Wanzhou District [J]. *Chongqing. Forest Inventory and Planning*, 2014, 39(5) : 136—142. 】

[14] 刘青, 范建容. 长江上游生态系统土壤保持重要性评价及分区 [J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(11) : 22—27.

【LIU Q, FAN J R. Significance evaluation and zoning of ecosystem soil conservation in the upstream of the Yangtze River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(11) : 22—27. 】

[15] PRASANNAKUMAR V, VIJITH H, GEETHA N, et al. Regional Scale Erosion Assessment of a Sub-tropical Highland Segment in the Western Ghats of Kerala, South India [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(14) : 3715—3727.

[16] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民. 基于 GIS 的大宁河流域土壤侵蚀评价及其空间特征研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(5) : 563—566.

【FAN L L, SHEN Z Y, LIU R M. Evaluation of soil erosion and spatial analysis based on GIS in Daning River watershed [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2007, 43(5) : 563—566. 】

[17] United States Department of Agriculture. EPIC-erosion / productivity impact calculator 1. Model Documentation. Technical Bulletin Number 1768 [R]. Washington D. C: USDA-ARS, 1990.

[18] DESMET P J J, GOVERS G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5) : 427—433.

[19] MCCOOL D, BROWN L, FOSTER G, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation

[J]. Transactions of the Asae, 1987, 30(5) : 1387-1396.

[20] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究 [J]. 水土保持通报, 1996, 16(5) : 12-20.

【WANG W Z, JIAO J Y. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(5) : 1-20. 】

[21] 刘爱霞, 王静, 刘正军. 三峡库区土壤侵蚀遥感定量监测——基于 GIS 和修正通用土壤流失方程的研究 [J]. 自然灾害学报, 2009, 18(04) : 25-30.

【LIU A X, WANG J, LIU Z J. Remote sensing quantitative monitoring of soil erosion in Three Gorges Reservoir area: a GIS /RUSLE-based research [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(4) : 25-30. 】

[22] 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子 [J]. 山地学报, 2011, 29(3) : 306-311.

【FAN J R, LIU F, GUO F F, et al. Soil erosion assessment and cause analysis in Three Gorges Reservoir area based on remote sensing [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(3) :306-311. 】

[23] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等. 三峡库区重庆段土壤保持服务时空分布格局研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(6) : 932-942.

【LIU R, ZHOU L L, PENG Y, et al. Spatio-temporal variations of soil conservation services in Three Gorges Reservoir area of Chongqing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(6) : 932-942. 】