

基于日降雨量的年均降雨侵蚀力估算模型及其应用 ——以四川省凉山州为例

黄凤琴, 第宝锋, 黄成敏*, 谭琼

(四川大学环境科学与工程系 四川 成都 610065)

摘 要: 为提高连续性降雨强度、降雨量、雨滴动能等数据缺乏地区修正通用土壤侵蚀方程(RUSLE) 的计算精度, 提出了针对我国西南地区基于日降雨的年均降雨侵蚀力估算模型。进而 RUSLE 与 GIS 技术结合, 剖析了四川省凉山州的土壤侵蚀空间分布特征。研究表明, 四川省凉山州西北部土壤侵蚀较轻, 东部和南部侵蚀较高, 特别是金沙江干流沿岸、雅砻江下游、黑水河和美姑河等流域侵蚀最为严重。结合土地利用和坡度分析, 凉山州 $> 6^\circ$ 的旱地土壤侵蚀最严重, 而林地和草地土壤侵蚀的强弱主要取决于植被覆盖程度。

关键词: RUSLE; 土壤侵蚀; 降雨侵蚀力; GIS; 凉山州

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

水土流失治理成功与否, 取决于是否根据当地实际情况进行针对性治理, 对于不同流失程度的土地, 防治的侧重点有所不同^[1]。金沙江下游地区是长江上游水土流失最严重区域, 多年平均输沙模数 $2\ 060\ t/(km^2 \cdot a)$, 为金沙江和长江上游流域平均输沙模数的 4 倍^[2]。四川省凉山彝族自治州(以下简称凉山州) 90% 以上的土地位于金沙江下游流域, 也是我国水土流失极为严重的地区之一。据全国第二次土壤侵蚀遥感调查显示, 凉山州水土流失面积达 $2.97 \times 10^4\ km^2$, 占幅员面积的 49%, 水土流失面积比例比全国平均值(37%) 高出 12 个百分点, 比四川省平均值(31%) 高出 18 个百分点^[3]。凉山州幅员面积大, 各小流域自然条件千差万别, 加之经济欠发达, 给水土流失治理带来了很大的困难^[4]。为此, 定量地分析区域土壤侵蚀及其空间分

布特征, 对合理利用土地资源和采取相应措施开展退化土地治理具有重要意义。

修正通用土壤侵蚀方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)^[5] 是目前应用最广泛的土壤侵蚀经验模型^[6], 此模型考察因素全面, 能够很好的反映一个地区的土壤侵蚀状况; 若与地理信息系统(Geographic Information System, GIS) 技术相结合, 更能反映土壤侵蚀的空间分布。RUSLE 涉及降雨侵蚀力(R)、坡长因子(L)、坡度因子(S)、土壤可蚀性因子(K)、植被覆盖因子(C) 和水土保持措施因子(P) 等 6 个因子。

降雨侵蚀力因子被定义为总降雨动能 E 与最大 30 min 降雨量(I_{30}) 的乘积($R = E * I_{30}$)^[7]。 R 因子准确取值对 RUSLE 合理估算起着重要作用。因 R 值计算需要连续性降雨强度、降雨量、雨滴动

收稿日期(Received date): 2012 - 06 - 30; 改回日期(Accepted): 2012 - 10 - 29。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划课题(2012BAC06B02), 国际科技合作与交流专项(2012DFG91520)。 [Supported by the National Key Technology R & D Program of China (2012BAC06B02) and the International Science & Technology Cooperation Program of China (2012DFG91520) .]

作者简介(Biography): 黄凤琴(1987 -), 女(汉族), 重庆市九龙坡区人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持规划与评价。 [Huang Fengqin (1987 -), female (Han), graduate student for master degree, major in water and soil conservation evaluation and planning.] E-mail: huang-fq1111@gmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): 黄成敏(1968 -), 教授, 主要从事环境土壤学与区域环境变化、环境地球化学研究。 [Huang Chengmin (1968 -), professor, major in environmental soil science involved in regional environmental change and environmental geochemistry.] E-mail: cmhuang@tom.com

能等数据难以获得^[8]。特别是山区,资料缺乏尤为严重,因此国内外学者一般尝试采用易获得的降雨数据来估算。目前, R 值简易估算方法使用的降雨量数据主要为日雨量、逐年或多年平均的月雨量和年雨量等,数学形式主要有幂次函数、一次线性函数、二次线性函数、三次线性函数等^[9]。而不同计算方法得到的结果差异明显^[10]。近年来随着日雨量整编资料的日趋完善化,降雨侵蚀力简易算法的研究开始从年雨量和月雨量转向日雨量。

章文波等^[11]采用中国66个气象站点降雨数据,提出了根据日雨量计算月降雨侵蚀力的方法,此方法与 $P^* I_{10}$ (P 为日降水量, I_{10} 为该日最大10 min降雨强度)进行回归分析得到,而 $P^* I_{10}$ 本身也是一种简易计算方法,并没有和 $E^* I_{30}$ 值进行比较,故此方法的准确性还有待检验。Yu和Rosewell^[12-14]通过对澳大利亚南部、新南威尔士州及热带地区的降雨侵蚀力的研究,得出了能够反映降雨侵蚀力时间和季节分布的日降雨计算模型,但此模型需要参数多,对参数的选择也是一个难题。Loureiro等^[15]和Shamshad等^[16]利用 $rain_{10}$ 和 $days_{10}$ 这两个参数分别对葡萄牙阿尔加维地区和马来西亚檳城岛进行了回归分析,也得到了很好的结果。

为了能够反映降雨侵蚀力的长期特征,需要对至少20 a的降雨系列数据进行分析^[7],但这些模型建立时,使用资料年限往往少于20 a。另外,由于降雨侵蚀力的简易算法均属于经验模型,且每一个地区的气候都有它的唯一性,那么不同的地区需要对其进行不同的考虑^[17]。上述三种采用日雨量计算降雨侵蚀力的方法中,以 $rain_{10}$ 和 $days_{10}$ 模型结构最为简单,且便于统计分析。

本文拟采用年均 $rain_{10}$ 和 $days_{10}$ 这两个参数建立我国西南地区年均降雨侵蚀力简易计算模型。进而利用GIS,根据RUSLE的计算结果,分析凉山州土壤侵蚀的空间分布特征,以期对凉山州以及类似地区的水土流失防治提供科学依据。

1 凉山州概况

凉山州位于四川省西南部、金沙江下游,介于 $100.1^{\circ} \sim 103.9^{\circ} \text{E}$ 、 $26.0^{\circ} \sim 29.3^{\circ} \text{N}$ 间,是我国西南云、贵、川三省接壤地带“金三角”的腹心区域。全州幅员面积 $60\,115 \text{ km}^2$ ^[18],位于青藏高原向四川盆地的过渡地带,地势西北高,东南低,地质构造复杂,

地表起伏大,高差悬殊,海拔最高为木里县恰朗多吉峰 $5\,958 \text{ m}$,最低处雷波县大岩洞金沙江谷底仅 305 m ;境内以山地、高原为主,占全州幅员面积90%以上^[18-19]。凉山州属于亚热带季风气候区,年均气温 $10.1 \sim 19.3^{\circ}\text{C}$ ^[20],日温差大,年温差小,立体气候明显。州内雨量充沛,但地区分布不均且干湿季分明,干热河谷地带年均降雨仅 $600 \sim 800 \text{ mm}$ ^[21],随着海拔的升高,年均降雨量逐渐增大,州北部最大降水中心年降水量高达 $2\,200 \text{ mm}$ ^[19]。冬半年少雨干燥,夏半年云雨较多,气候凉爽,雨季降水量占年降水量的90%以上^[4]。州内土壤类型繁多,据统计有黄壤、红壤、水稻土等共21种,大多土壤厚度不足 100 cm ,而旱地土壤厚度多在 50 cm 左右,土层浅薄^[22]。2010年全州常住人口453万,其中农村人口占72.48%^[23],是一个以农业生产为主的地区。土地利用以林地、草地和耕地为主,耕地又以坡耕地为主,坡耕地占全州耕地的 $2/3$ ^[24]。

2 数据采集与分析方法

2.1 数据收集

根据研究需要,收集了凉山州土壤、地形、降雨和土地利用等相关资料。降雨数据为我国西南地区19个气象站1956—1984年逐日降水量和凉山州内及周边18个气象站1971—2010年逐日降水量。凉山州数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)采用等高距为 20 m 的等高线生成 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 的栅格数据,然后经填洼处理得到。另外,采用了中科院成都山地灾害与环境研究所编制的凉山州2000年1:20万土地利用图;土壤图由四川省1:100万土壤分布图经扫描矢量化后获得;土壤属性数据来自于四川土种志^[22]和凉山州土种志,且采用对数正态分布函数^[25]将土壤质地分类由前苏联卡庆斯基分类制转换为美国农业部分类制。

2.2 研究方法

通用土壤侵蚀的方程的基本形式表达如下^[5]

$$M = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中 M 为土壤侵蚀模数 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; R 为降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{a})$]; K 为土壤可蚀性值 [$\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{hr}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$]; L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为植被覆盖因子, P 为水土保持措施因子,均无量纲。

2.2.1 土壤可蚀性因子

表 1 四川凉山州不同土地利用类型的 C 值

Table 1 Assumed C values under various land use in Liangshan ,Sichuan

土地利用 分类	旱地	低盖度 草地	中盖度 草地	高盖度 草地	疏林地	灌木 林地	有林地	迹地或经 济林地	水田	工矿用地 及裸土	其他 土地
C	0.31	0.1	0.03	0.002	0.05	0.01	0.003	0.1	0.18	1	0

土壤可蚀性因子(K) 为标准小区上单位降雨侵蚀力引起的土壤流失率。目前土壤可蚀性因子多采用 1995 年 Williams 等^[26] 在 EPIC 模型中提出的 K 因子估算方法计算

$$K = \{ 0.2 + 0.3 \exp [- 0.0256 S_d (1 - \frac{S_i}{100})] \} \times (1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}) \times (\frac{S_i}{C_i + S_i})^{0.3} \times [1.0 - \frac{0.75_n}{S_n + \exp(- 5.51 + 22.95_n)}] \times 0.1317 \quad (2)$$

式中 $S_n = 1 - S_d/100$; S_d 、 S_i 、 C_i 分别为土壤砂粒、粉砂和粘粒含量(%); C 为土壤有机碳含量(%); 0.1317 为单位换算系数。

2.2.2 地形因子

在实际工作中,一般将坡度因子与坡长因子结合起来,作为一个复合因子(即地形因子 LS),较单因子计算更方便,计算公式如下^[27-28]

$$LS = (\frac{L}{20})^{0.24} (\frac{S}{S^0})^{1.32} \quad (3)$$

式中 S 为坡度(°), L 为坡长(m)。其中坡长 L 在 ArcInfo 软件中采用非累积流量法计算^[29]。此方程建立在坡度为 5 ~ 45° 的地区。通过对凉山州 DEM 的分析与统计,全州坡度介于 5 ~ 45° 的区域占 91.7% ,因而此方程适用于凉山州。

2.2.3 植被覆盖与水土保持措施因子

植被覆盖度因子反映植被覆盖和田间管理措施对土壤侵蚀的影响,与土壤侵蚀量成反比,对土壤侵蚀具抑制作用,其值介于 0 ~ 1。本文中借鉴前人的研究成果^[30-33],并结合实际情况,给定了不同土地利用的 C 值(表 1)。

水土保持措施因子是指在特定水土保持措施的土壤流失与起伏地耕作的相应土壤流失之比。对于复杂地区,可以根据前人的研究成果^[32,34],结合研究区的水土保持措施进行人为赋值(表 2)。

2.3 基于日降雨的年均降雨侵蚀力计算

王万忠等^[35] 计算的全国大部分地区 1956—1984 年间年均降雨侵蚀力适用性较广,且被众多学

者引用^[10]。本文引用了其中西南地区 19 个气象站年均降雨侵蚀力作为我国西南地区年均降雨侵蚀力的实际值(以下简称 R 值),并利用逐日降雨量数据统计得到了这 19 个气象站 1956—1984 年的年均 $rain_{10}$ 和 $days_{10}$ 参数,随后建立了 R 值与 $rain_{10}$ 和 $days_{10}$ 之间的线性和非线性回归关系。最后,选择其中的最佳回归方程来计算凉山州及周边 18 个气象站 1971—2010 年的年均降雨侵蚀力,以此增加年均降雨侵蚀力的空间分布密度,提高空间插值精度。回归关系式如下

$$R = 13.1102 \times rain_{10} - 313.7792 \times days_{10} - 336.962 \quad (4)$$

$$R = 3.7375 \times 10^{-3} rain_{10}^{3.0564} \times days_{10}^{-2.1149} - 937.9719 \quad (5)$$

式中 $rain_{10}$ 为月降雨量 ≥ 10 mm 的年均降雨(mm), $days_{10}$ 为日降雨量 ≥ 10 mm 的年均天数。

通过相关系数(R^2)、显著性检验(F - test),均方根误差($RMSE$)和相对误差(Re)对回归方程进行了评价(表 3)。 R 值与 $rain_{10}$ 和 $days_{10}$ 的线性和非线性回归都通过了 0.001 的显著性检验,且相关系数均 > 0.9 ,说明 R 值与 $rain_{10}$ 和 $days_{10}$ 具显著相关性。我国西南地区的年均降雨侵蚀力大多在 3 000 MJ · mm/($hm^2 \cdot hr \cdot a$) 以上^[35],而本文计算得到的 $RMSE$ 值约 400 MJ · mm/($hm^2 \cdot hr \cdot a$),占年均降

表 2 凉山州不同土地利用类型的 P 值

Table 2 Assumed P values under various land use in Liangshan ,Sichuan

土地利用分类	山地、陡坡旱地	丘陵旱地	平坝旱地	水田	其他土地
P	0.55	0.4	0.3	0.03	1

表 3 回归方程的统计检验表

Table 3 Statistical test for the regression equations

回归方程	R^2	F 值	$RMSE$	Re
(4)	0.912 ***	176.68	386.22	0.000%
(5)	0.901 ***	154.55	410.37	-0.002%

***表示显著性水平为 0.001;
表中 $Re = (P - Q) / Q \cdot 100\%$,其中 P 为采用回归方程计算的降雨侵蚀力均值, Q 为西南地区年均降雨侵蚀力(R)的均值。

雨侵蚀力的 13% 左右,说明式(4)和式(5)都具有较高的精确性;从 R_e 可以看出式(4)的计算结果总体没有偏差,而式(5)的计算结果总体略偏小。

上述结果表明无论是线性还是非线性的回归方程 R 值都与 rain^{10} 呈正相关,而与 days^{10} 呈负相关。也就是说,全年日降水 $\geq 10 \text{ mm}$ 的日数愈小,而全年日降水 $\geq 10 \text{ mm}$ 的累计降雨量越大,则降雨侵蚀力 R 越大。

式(4)比式(5)不仅检验结果有优势,且二元一次方程结构简单,也能给数据的计算带来方便。因此,本文采用式(4)计算凉山州年均降雨侵蚀力。

对降水而言,距离权重反比法(IDW)估值精度高于其他插值方法^[36]。所以,在 ArcGIS 中采用 IDW 对 R 值进行插值运算,获取凉山州年均降雨侵蚀力分布图。

3 结果与讨论

3.1 凉山州土壤侵蚀分布

按照土壤侵蚀分级分类标准(SL190_2007)^[37],

将凉山州土壤侵蚀程度分为 6 级,并分别统计了每个土壤侵蚀等级的平均土壤侵蚀模数、土壤侵蚀量、土壤侵蚀面积百分比和土壤侵蚀量百分比。

凉山州西北部的理塘河中、下游流域及雅砻江中游地区虽然山高坡陡,但高盖度的林地、草地面积比例高,且该区域人口密度小,人类活动给环境带来的影响不大,因此水土流失并不严重。位于中部的安宁河谷底部侵蚀强度低,这是由于安宁河谷为一个宽谷,底部地势平坦,不易造成大面积水土流失;但其左岸支流孙水河流域及西昌以下的干旱河谷区域土壤侵蚀非常严重,导致安宁河干流的输沙模数仍然很大。根据《凉山州主要河流泥沙变化趋势及治理对策研究》报告,与孙水河汇流前,安宁河多年平均输沙模数为 590 t/km^2 ,而汇流后安宁河干流多年平均输沙模数达 1010 t/km^2 ,越往下河流含沙量越大。凉山州东部和南部侵蚀较强,特别是金沙江干流沿岸、雅砻江下游、黑水河和美姑河等流域侵蚀最为严重,这些区域坡度陡峭,坡耕地分布广,人口压力大,人地矛盾突出,且自然植被的覆盖度也较低,因此极易造成水土流失(图 1)。

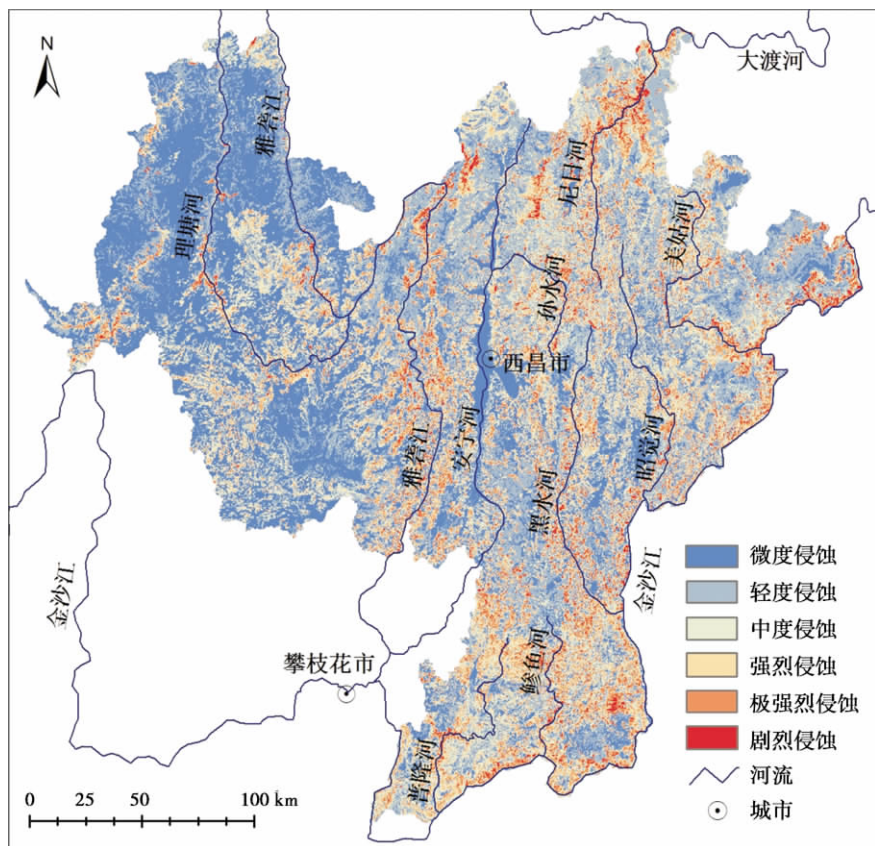


图 1 四川凉山州土壤侵蚀空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of soil erosion intensity in Liangshan, Sichuan

总体上,凉山州 57% 的区域属于轻度及轻度以上侵蚀类型(表 4)。虽然剧烈侵蚀类型面积仅占区域总面积的 7%,但其年均土壤侵蚀量占了全州总土壤侵蚀量的 46%,凉山州 80% 以上的土壤侵蚀量来自强烈及强烈以上侵蚀类型。

3.2 不同坡度的土壤侵蚀

根据凉山州的地形特征,将坡度分成了 0°~6°、6°~15°、15°~25°、25°~35°、35°~45°和 >45°等 6 个等级。然后分别统计了每个坡度等级的土壤侵蚀强度分布及其土壤侵蚀量所占凉山州土壤侵蚀总量的比例(表 5)。

坡度 0~6°的区域由于地势平坦,土壤侵蚀以微度侵蚀为主,占该区域的 82%,根据计算结果,理论上该区域不存在强烈、极强烈和剧烈侵蚀类型。6°~15°、15°~25°、25°~35°三个坡度等级侵蚀分布较一致,微度侵蚀类型超过 40%,轻度侵蚀占 20%左右,中度侵蚀占 10%左右,但强烈及强烈以上侵蚀随着坡度的增加而增多,土壤侵蚀量也随坡度的增加而增大,坡度 15°~25°比 6°~15°区域面积增加不到一倍,而土壤侵蚀量增加了 2 倍多;坡度为 15°~25°与 25°~35°区域面积相差不大,但后者土壤侵蚀量明显增大。35°~45°和 >45°的区域,以

轻度土壤侵蚀为主,其次是微度侵蚀,强烈及强烈以上土壤侵蚀面积比例进一步增多。

总的来说,坡度越大,土壤侵蚀越严重。坡度 <6°区域的土壤侵蚀明显比 6°~15°的土壤侵蚀轻,一个原因是坡度缓,另一个重要的原因就是坡度 <6°区域中水域和建筑用地等几乎不存在土壤侵蚀的土地利用类型占的比例较多。6°~35°区域坡度较陡,经统计该区域约 16% 的土地为旱地,受人类活动影响较大,因此土壤侵蚀较为严重,35°以上区域虽然人类活动减弱,与 6°~35°区域相比,旱地比例减少为了 6%,但由于坡度非常陡,因此土壤侵蚀仍很严重。凉山州坡度 >6°的区域占 93.6%,坡度陡峭是造成凉山州水土流失的重要因素之一。

3.3 不同土地利用的土壤侵蚀

在不同土地利用类型中,工矿用地及裸土的土壤侵蚀最严重,90% 都为剧烈侵蚀,由于面积仅占全州土地面积的 0.02%,对土壤侵蚀量的贡献小(表 6)。凉山州大部分旱地土壤厚度不足 50 cm,土壤结构不良,土体松散,且雨季地面覆盖度小,雨水对地表冲刷强烈,因而旱地土壤侵蚀十分严重,其中强烈侵蚀、极强烈侵蚀比例分别占 11% 和 26%,剧烈侵蚀更高达 43%。同时旱地分布广泛,凉山州 50%

表 4 四川凉山州土壤侵蚀分布特征
Table 4 Basic features of soil erosion in Liangshan, Sichuan

侵蚀强度	面积百分比/%	平均侵蚀模数/[t/(km ² ·a)]	土壤侵蚀量/(10 ⁴ t/a)	土壤侵蚀量百分比/%
微度侵蚀	43	222	566	2
轻度侵蚀	25	1 197	1 826	8
中度侵蚀	10	3 641	2 214	10
强烈侵蚀	7	6 365	2 869	12
极强烈侵蚀	8	10 861	4 937	22
剧烈侵蚀	7	25 995	10 575	46
合计	100	3 825	22 988	100

表 5 四川凉山州不同坡度下的土壤侵蚀
Table 5 Soil erosion under different slopes in Liangshan, Sichuan

坡度	面积比例	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀	土壤侵蚀量百分比/%
0°~6°	6.40	82	16	2	0	0	0	1
6°~15°	16.66	47	27	11	8	6	1	9
15°~25°	29.20	43	20	14	6	9	8	29
25°~35°	29.91	41	24	9	10	6	10	36
35°~45°	14.87	27	39	6	9	11	8	20
>45°	2.96	16	45	11	5	13	10	5

表 6 四川凉山州不同土地利用下的土壤侵蚀

Table 6 The soil erosion under different land use types in Liangshan ,Sichuan

/%

土地利用类型	面积比例	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀	土壤侵蚀量百分比
旱地	14.35	4	7	9	11	26	43	54
水田	2.81	83	17	0	0	0	0	0
低盖度草地	1.65	2	11	19	21	28	19	4
中盖度草地	10.43	5	34	35	19	7	0	11
高盖度草地	15.80	96	4	0	0	0	0	2
疏林地	13.40	4	19	29	26	20	2	20
灌木林地	13.93	14	79	7	0	0	0	6
有林地	26.76	77	23	0	0	0	0	3
迹地或经济林地	0.06	11	9	13	13	32	22	0
工矿用地及裸土	0.02	1	5	1	1	2	90	0
其他土地	0.81	100	0	0	0	0	0	0

以上的土壤侵蚀量都来自旱地 ,是造成凉山州水土流失的主要土地利用类型。低盖度草地、迹地或经济林地侵蚀也较严重 ,其次为疏林地和中盖度草地 ,有林地和高盖度草地土壤侵蚀最轻。高盖度草地虽然面积比中盖度草地多 ,但由于植被覆盖度的提高 ,土壤侵蚀量明显减少 ,同样 ,有林地的面积约为疏林地的两倍 ,但土壤侵蚀量百分比反而低了很多。

凉山州 85% 的土壤侵蚀量都来自于旱地和植被覆盖度不高的中盖度草地及疏林地 ,因此旱地的退耕还林(草) 工程及坡耕地改造和提高林草地的植被覆盖度是改善水土流失状况的关键。

3.4 主要土地利用类型在不同坡度下的土壤侵蚀

为了更深入地了解土地利用和坡度对土壤侵蚀分布的影响 ,进一步统计了凉山州旱地、中盖度草地、高盖度草地、疏林地、灌木林地和有林地分别在 0°~6°、6°~15°、15°~25°、25°~35°、35°~45°和 >45°等 6 个坡度等级下的土壤侵蚀状况(图 2) 。

中盖度草地和疏林地的侵蚀较严重 ,从 25°开始 ,出现了剧烈的土壤侵蚀; 灌木林地以轻度和中度侵蚀为主; 有林地和高盖度草地侵蚀最轻 ,以微度侵蚀为主 ,随着坡度的增大 ,部分有林地和高盖度草地也出现了轻度侵蚀。凉山州旱地土壤侵蚀最为严重 ,旱地除了坡度为 0°~6°区域主要为微度和轻度侵蚀外 ,其他坡度等级的土壤侵蚀大部分为强烈及强烈以上侵蚀 ,25°以上几乎全部为剧烈侵蚀。旱地坡度从 0°~6°增加到 6°~15°后 ,平均侵蚀模数增加近 4 倍 ,并且随着坡度的增加 ,土壤侵蚀模数显著增大; >6°的坡耕地土壤侵蚀量占旱地土壤侵蚀

量的 99% ,>25°的陡坡耕地占旱地面积比例不到 30% ,而土壤侵蚀量占旱地土壤侵蚀量的一半(表 7) 。

坡耕地造成了凉山州严重的水土流失现象 ,若将 6°~25°间的旱地通过坡改梯 ,使其坡度低于 6° ,那么这部分土地的土壤侵蚀将以微度和轻度为主; 同时 ,>25°的旱地实施退耕还林还草 ,植被经中盖度草地和疏林地逐渐过渡到高盖度草地和有林地 ,土壤侵蚀将会以微度和轻度侵蚀为主 ,土壤侵蚀的状况将得到显著改善。

4 结 论

1. 降雨侵蚀力 R 值与基于日雨量数据统计获得的 rain^{10} 和 days^{10} 参数具有以下关系: $R = 13.1102 \times \text{rain}^{10} - 313.7792 \times \text{days}^{10} - 336.9624$ 。此方程适用于我国西南连续性降雨强度、降雨量、雨滴动能等数据缺乏地区的年均降雨侵蚀力估算。本文利用此关系式计算了凉山州 18 个气象站点的年均降雨侵蚀力 ,增加了 R 值分布密度 ,从而提高了其空间插值精度。

2. 利用修正通用土壤侵蚀方程(RUSLE) 与地理信息系统(GIS) 技术相结合 ,分析了四川省凉山州的土壤侵蚀强度空间分布。凉山州西北部受人类活动影响小 ,植被覆盖度高 ,土壤侵蚀较弱; 而东部和南部由于坡度陡峭 ,坡耕地分布广 ,自然植被的覆盖度也低 ,侵蚀程度较强 ,特别是金沙江干流沿岸、雅砻江下游、黑水河和美姑河等河谷区侵蚀最为严

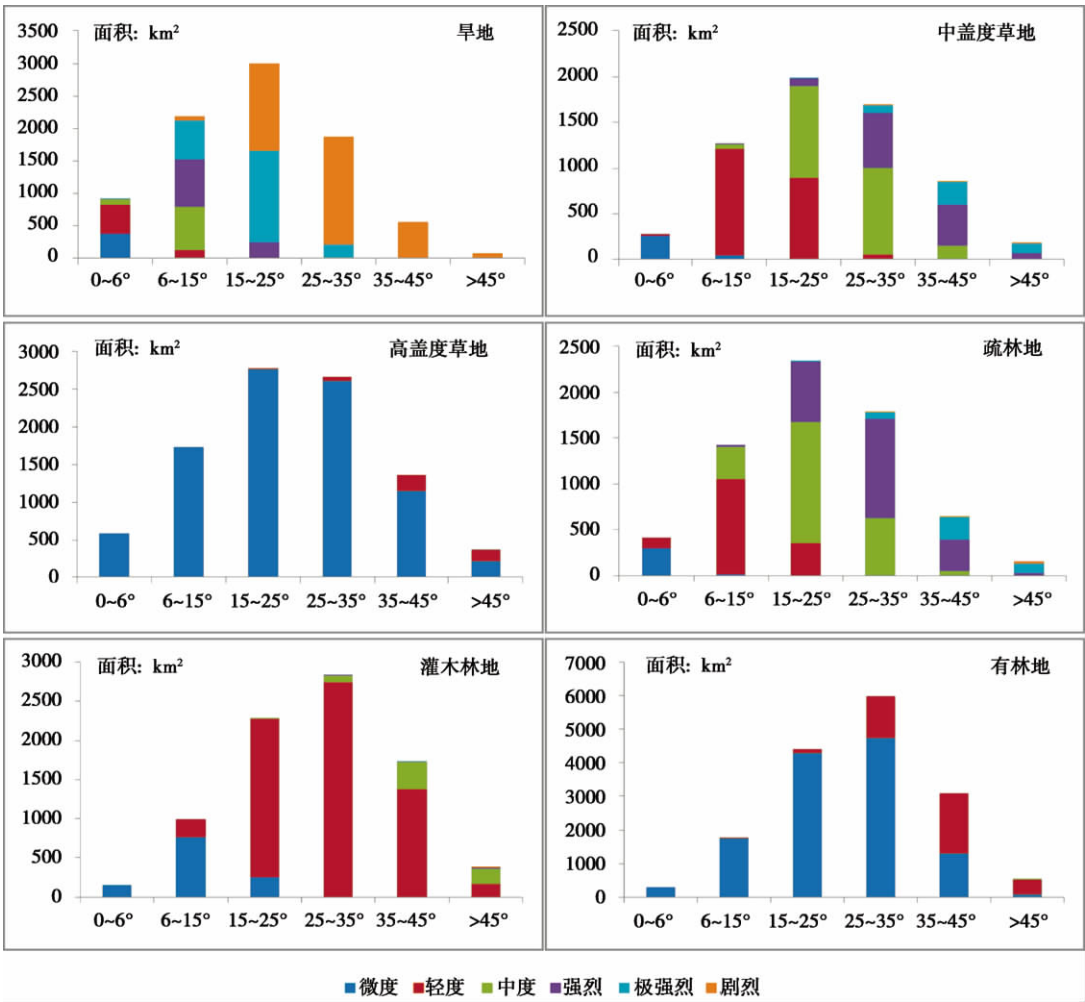


图 2 四川凉山州主要土地利用类型在不同坡度下的土壤侵蚀
Fig. 2 Soil erosion under different slopes and land use

表 7 四川凉山州旱地在不同坡度下的土壤侵蚀分布

Table7 The soil erosion of farmland under different slopes in Liangshan ,Sichuan

坡度	面积比例/%	平均侵蚀模数/[t/(km ² ·a)]	土壤侵蚀量/(10 ⁴ t/a)	土壤侵蚀量百分比/%
0°~6°	10.51	1 963	177	1
6°~15°	25.48	7 410	1 625	14
15°~25°	35.07	14 080	4 250	35
25°~35°	21.61	21 575	4 013	33
35°~45°	6.44	30 490	1 691	14
>45°	0.90	41 072	318	3

重。凉山州水土流失面积占全州面积的 57% ,其中剧烈侵蚀类型的土壤侵蚀量占了全州土壤侵蚀量的 46% ;凉山州 80% 以上的土壤侵蚀量来自强烈及强烈以上的土壤侵蚀类型。

3. 坡度与土地利用对土壤侵蚀空间分布有着重要的影响。随着坡度的增大 ,土壤侵蚀有加重的趋

势;造成凉山州水土流失的主要土地利用类型为旱地 ,尤其以 >6° 的坡耕地土壤侵蚀最严重 ,坡耕地土壤侵蚀量占旱地土壤侵蚀量的 99% ,而旱地土壤侵蚀量占整个凉山州土壤侵蚀量的 54% ;林地和草地土壤侵蚀的强弱主要取决于植被覆盖程度。因此 ,在水土流失治理的过程中 ,改造坡耕地 ,采用水土保

持耕作措施以及提高林地和草地的覆盖度显得尤为重要。

参考文献(References)

- [1] Di Baofeng, Cui Peng, Ai Nanshan, et al. The study of building measures on ecological restoration in China [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(2): 64-69 [第宝锋, 崔鹏, 艾南山, 等. 中国水土保持生态修复分区治理措施[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(2): 64-69]
- [2] Chai Zongxin, Fan Jianrong. Strong erosion and formations in lower reaches of Jinsha River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5): 14-17 [柴宗新, 范建容. 金沙江下游侵蚀强烈原因探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 14-17]
- [3] Xu Feng, Guo Suoyan, Zhang Zengxiang. The distribution of soil erosion in China at the end of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 139-146 [许峰, 郭索彦, 张增祥. 20 世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 139-146]
- [4] Liu Yongbi, Zhao Jianmin. Present situation and countermeasures of soil erosion in Liangshan [J]. Journal of Xichang Agricultural College, 2004, 18(3): 4-5 [刘永碧, 赵健民. 凉山州水土流失治理现状及对策[J]. 西昌农业高等专科学校学报, 2004, 18(3): 4-5]
- [5] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil loss by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RSULE) [S]. Agricultural handbook No. 703, 1997
- [6] Li Wenhong, Liu Huiping. Advance of GIS application in research of soil erosion [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(3): 89-94 [李文航, 刘慧平. GIS 在土壤侵蚀分析中的应用研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(3): 89-94]
- [7] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning with the Universal Soil Loss Equation (USLE) [S]. Agricultural handbook No. 537, 1978
- [8] Lin Jinshi, Zhang Liming, Yu Dongsheng, et al. Characteristics of rainfall erosivity and simple algorithm in south China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 112-116 [林金石, 张黎明, 于东升, 等. 我国南方地区降雨侵蚀力特征及简易算法研究——以江西省鹰潭地区为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 112-116]
- [9] Gu Shixian, Wang Xiaodan, Liu Shuzhen. The preliminary research on rainfall erosivity based on simple estimation method in the Hengduan mountainous region of the eastern Tibet [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 28-31 [辜世贤, 王小丹, 刘淑珍. 青藏高原东部横断山区降雨侵蚀力初步研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 28-31]
- [10] Wu Qiuju, Wu Faqi, Zhai Yanbin, et al. Comparative study of rainfall erosion model in Loess Plateau in the north of Shanxi Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(6): 138-140 [吴秋菊, 吴发启, 翟艳斌, 等. 陕北黄土高原降雨侵蚀力简易计算模型比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 138-140]
- [11] Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. Resources science, 2003, 25(1): 35-41 [章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41]
- [12] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales [J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34: 139-152
- [13] Yu B, Rosewell C J. Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropic [J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36: 143-165
- [14] Yu B, Hashim G M, Eusof Z. Estimating the R-factor with limited rainfall data: a case study from Peninsular Malaysia [J]. Soil and Water Cons, 2001, 56: 101-105
- [15] Loureiro N D S, Coutinho M D A. A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve Region, Portugal [J]. Journal of Hydrology, 2001, 250: 12-18
- [16] Shamsad A, Azhari M N, Isa M H, et al. Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia [J]. Catena, 2008, 72, 423-432
- [17] Millward A, Mersey J E. Adapting the RUSLE to model soil erosion in a mountainous tropical watershed [J]. Catena, 1999, 38: 109-129
- [18] Liu Sha. Agricultural economic development investigations and thinking of Liangshan, Sichuan [J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Humanities and Social Science, 2003, (11): 75-79 [刘莎. 凉山州农业经济发展的调查与思考[J]. 西南民族大学学报: 人文社科版, 2003, (11): 75-79]
- [19] The Local Chronicles Compilation Committee of Liangshan Yi Autonomous Prefecture. The record of Liangshan Yi Autonomous Prefecture (1991-2006) [M]. Beijing: Local Chronicles Press, 2011 [凉山彝族自治州地方志编纂委员会. 凉山彝族自治州志 (1991-2006) [M]. 北京: 方志出版社, 2011]
- [20] Luo Qing, Liu Xiaoying. A meteorological yield model of potato in Liangshan, Sichuan [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2011, 36(5): 114-118 [罗清, 刘晓迎. 凉山州马铃薯气象产量模型研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2011, 36(5): 114-118]
- [21] Wang Weiping. The ecological restoration and reconstruction countermeasures and suggestions in the dry-hot valleys in Liangshan, Sichuan [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2012, 33(1): 77-79 [王维平. 凉山州干热河谷困难地带生态恢复与重建对策和建议[J]. 四川林业科技, 2012, 33(1): 77-79]
- [22] Agriculture and Animal Husbandry Department of Sichuan Province, Soil Census Office of Sichuan Province. The soil species record of Sichuan Province [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川省土种志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994]
- [23] Bureau of Statistics of Liangshan Yi Autonomous Prefecture. The

- main data communique of the sixth nationwide population census of Liangshan (No. 2) [凉山州统计局. 凉山州 2010 年第六次全国人口普查主要数据公报(第二期) [EB/OL]. <http://www.lsz.gov.cn/Detail/Index/7d3b29ba-ac2c-464b-a48d-7d86b5c644a0>]
- [24] Liu Yongbi, Zhao Jianmin. Research of soil and water conservation measurements in Liangshan, Sichuan [J]. Protection Forest Science and Technology, 2006, (1): 37-38 [刘永碧, 赵建民. 凉山州高寒山区水土保持措施研究[J]. 防护林科技, 2006, (1): 37-38]
- [25] Liu Jianli, Xu Shaohui, Liu Hui. Investigation of different models to describe soil particle-size distribution data [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5): 588-592 [刘建立, 徐绍辉, 刘慧. 几种土壤累积粒径分布模型的对比研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 588-592]
- [26] Williams J R, Sharply A N. EPIC - erosion/ productivity in pact calculator 1. model documentation, technical bulletin number 1768 [M]. Washington D C: USDA - ARS, 1990: 8-9
- [27] Yang Zisheng. Study on soil loss equation in Jinsha river basin of Yunnan Province [J]. Journal of Mountain science, 2002, 20(Suppl.): 1-9 [杨子生. 云南省金沙江流域水土流失方程研究[J]. 山地学报, 2002, 20(增刊): 1-9]
- [28] Yang Zisheng. The topographic factor of soil erosion of sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan Province [J]. Journal of Mountain science, 1999, 17(Suppl.): 16-18 [杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的地形因子[J]. 山地学报, 1999, 17(增刊): 16-18]
- [29] Jin Bei, Liu Xuejun, Zhen Yan, et al. Analysis of slope length extracted from grid-based digital elevation model in ArcGIS environment [J]. Journal of Geo-information Science, 2010, 12(5): 700-706 [晋蓓, 刘学军, 甄艳, 等. ArcGIS 环境下 DEM 的坡长计算与误差分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(5): 700-706]
- [30] Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, 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 [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]
- [31] Fan Jianrong, Liu Fei, Guo Fenfen, 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 [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]
- [32] Wang Wanzhong, Jiao Juying. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(5): 1-20 [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): 1-20]
- [33] Peng Jian, Li Dandan, Zhang Yuqing. Analysis of spatial characteristics of soil erosion in mountain areas of northwestern Yunnan based on GIS and RUSLE [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(5): 548-556 [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]
- [34] Yang Zisheng. Cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan Province [J]. Journal of Mountain science, 1999, 17(Suppl.): 22-24 [杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的水土保持措施因子[J]. 山地学报, 1999, 17(增刊): 22-24]
- [35] Wang Wanzhong, Jiao Juying, Hao Xiaopin, et al. Distribution of rainfall erosivity R value in China [J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 29-39 [王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(II) [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 29-39]
- [36] Lu Zhongyan, Yuan Zipeng, Cai Fu, et al. Method for calculating temperature and precipitation based on GIS data in Liaoning Province [J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 36(4): 389-395 [陆忠艳, 袁子鹏, 蔡福, 等. 基于 GIS 的气温和降水推算方法研究[J]. 气象科技, 2008, 36(4): 389-395]
- [37] The Ministry of Water Resource of the People's Republic of China. SL 190-2007, Standards for classification and gradation of soil erosion [S]. Beijing: China Water Power Press, 2008 [中华人民共和国水利部. SL 190-2007, 土壤侵蚀分类分标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008]

Spatial Distribution of Soil Erosion in Liangshan , Sichuan Based on a New Equation to Estimate the Rainfall Erosivity

HUANG Fengqin , DI Baofeng , HUANG Chengmin , TAN Qiong

(Department of Environmental Science & Engineering , Sichuan University , Chengdu 610065 , China)

Abstract: To improve the applicability of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in areas short of rainfall data , such as precipitation , continuous rainfall intensity and raindrops kinetic energy , a new procedure is proposed to estimate the rainfall erosivity factor (R) in mountainous area , southwest China. Soil erosion in Liangshan Yi Autonomous Prefecture in Sichuan of China was selected as an example to be studied using the proposed model. The spatial distribution of soil erosivity across Liangshan Prefecture was analyzed considering land usage and slope of the land employing Geographic information system techniques. The results showed that , soil erosion was less severe in northwest part of Liangshan than in southern and eastern parts , especially in the dry valley sections of such rivers as the Yalong , Heishui and Meigu. Serious soil erosion occurred in farmland with a slope of more than 10.5% (or 6°) . The vegetation coverage may affect the soil erosivity in woodland and grassland. The finding will provide support to the soil and land management in Liangshan in regarding to soil erosion.

Key words: RUSLE; soil erosion; rainfall erosivity factor; GIS; Liangshan Yi Autonomous Prefecture

封面照片说明: 三江源区

三江源区是长江、黄河、澜沧江的发源地,位于青海省南部,涉及果洛藏族自治州、玉树藏族自治州、海南藏族自治州、黄南藏族自治州的16个县和格尔木市的唐古拉乡。其西部、南部与西藏自治区相邻,东部与四川省接壤。

三江源区地处青藏高原腹地,平均海拔约4 000 m,雪山冰川众多,冰雪融水汇集成哺育中华民族的长江、黄河和澜沧江等大江大河,因此被誉为“中华水塔”,是我国淡水资源的重要补给地。此外,该区还是世界高海拔地区生物多样性最集中的地区,也是生态系统最敏感的地区。特殊的地理位置、区域性涵养水源的重要功能以及对整个流域生态环境的直接影响,使该区成为青藏高原生态安全屏障的重要组成部分,其生态环境的保护对流域涉及的中国广大区域的经济社会可持续发展都有重要影响,在建设美丽中国 and 全国生态文明建设中具有特殊重要地位。2000年5月青海省成立“三江源自然保护区”,2003年1月国务院批准为国家级自然保护区;2011年11月16日,国务院常务会议决定建立青海三江源国家生态保护综合试验区。

照片为三江源区西北部的可可西里山脉及冰川和草甸。

(嘉 益)