

基于GIS和RUSLE的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析 ——以云南省丽江市为例

彭建^{1,2}, 李丹丹¹, 张玉清²

(1. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081)

2. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 土壤侵蚀空间分布特征, 是进行土壤侵蚀防治规划、实践的重要基础与依据。研究以云南省丽江市为例, 应用RUSLE估算了县域土壤侵蚀量, 并基于GIS的空间统计分析功能, 分析了土壤侵蚀在海拔、坡度与土地利用类型等方面的空间分布特征。结果表明, 全县平均土壤侵蚀模数为 $52.50 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属于强度侵蚀, 县域东部的金沙江沿岸、3500~6000 m高程带、 $25^\circ \sim 90^\circ$ 坡度带, 以及裸地与荒草地、旱地等不同类型区域是研究区土壤侵蚀治理的重点地区。

关键词: RUSLE; GIS; 土壤侵蚀; 空间分布特征; 丽江市

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

土壤侵蚀严重制约了土地生物生产力的发挥, 并极易诱发滑坡、泥石流等山地地质灾害, 是滇西北山区乃至全球共同面临的重要生态环境问题。滇西北地区作为长江上游土壤侵蚀防治的重点地段之一, 减少土壤侵蚀已成为实现山区生态安全的重要先决条件之一。而定量评估区域土壤侵蚀量及其强度等级, 分析土壤侵蚀的空间分布特征, 无疑对因地制宜地采取相关对策措施保持土壤、减少土壤侵蚀具有重要意义。因此, 本研究以云南省丽江市为例, 采用修正的通用土壤流失方程, 定量评估区域年平均土壤侵蚀量与土壤侵蚀强度, 并基于地理信息系统的空间统计分析功能, 探讨研究区土壤侵蚀在海拔、坡度、土地利用类型等方面的空间分布特征, 以期能为该区域土壤侵蚀防治规划制定、实践提供基本依据。

1 研究区概况

云南省丽江纳西族自治县(以下简称丽江市)地处云南省西北部, 位于 $99^\circ 23' \sim 100^\circ 32' \text{E}$, $26^\circ 34' \sim 27^\circ 46' \text{N}$ 。全县东西长112 km, 南北宽150.7 km, 土地总面积 7648 km^2 。丽江市属滇西北金沙江高山峡谷的地貌类型, 地势西北高东南低, 金沙江及其支系深切于崇山峻岭之间, 地貌类型复杂破碎。全县均属低纬高原气候, 全年太阳辐射较强, 年内温度变化不明显, 四季不分明, 部分区域具有典型的立体气候特征。全县辖24个乡镇, 是云南省西北部经济发展较为迅速的地区之一。截至2001年末, 全县总人口349149人, 其中农业人口占67.70%, 少数民族人口占83.03%, 以纳西、彝等民族为主, 人均可支配收入6368元。

收稿日期(Received date): 2007-04-15; 改回日期(Accepted): 2007-08-15.

基金项目(Foundation item): 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室开放课题项目和国家自然科学基金资助项目(40471002) [Supported by the Open Project Program of Key Laboratory of Resource Remote Sensing & Digital Agriculture Ministry of Agriculture, Beijing 100871, China and the National Natural Science Foundation of China (No. 40471002)]

作者简介(Biography): 彭建(1976-), 男, 博士研究生, 主要研究景观生态与土地利用。[Peng Jian (1976-), male, presently a candidate for PhD, major in landscape ecology and land use. E-mail: jianpeng@hotmail.com]

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

2 研究方法

目前,土壤侵蚀量的定量测算主要包括三种方法:①野外实地观测法,是开展土壤侵蚀理论与实证研究的主要方法,但由于实地观测得到的多为典型样点的数据,扩展到区域空间需要进行插值,难以保证数据精度,同时在研究经费与时间上也否决了在整个区域开展实地观测的可能;②遥感解译法,通过解译遥感影像上的主要侵蚀控制因素,并根据相关规则对这些因素进行综合以确定土壤侵蚀的基本单元及其强度,但该方法主观经验性强、绘图精度差和绝对定标准等方面的弱点,使得该方法无论在定量、定位还是在定时等三个方面均无法满足现代政府和规划管理部门对土壤侵蚀数据的要求^[1-3];③模拟模型法,由于既能用于有土壤侵蚀监测资料的地区,又能用于缺乏监测资料的地区^[4],该方法在土壤侵蚀研究中应用最为广泛。目前,该方法使用的模型大致分为统计模型与过程模型两类,二者分别以美国1965年提出的通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)及其修正模型RUSLE,和美国1995年发布的水蚀预报项目(Water Erosion Prediction Project, WEPP)为代表,其中,RUSLE模型以其形式简单、使用方便、易于推广接收,而得到了世界各地的普遍应用^[5]。因此,本研究采用RUSLE模型估算研究区年平均土壤侵蚀量。RUSLE模型的土壤流失预测公式为

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

式中 A 为单位面积年平均土壤流失量,单位为 $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子,单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子,单位为 $(t/(hm^2 \cdot h))/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; LS 为坡长、坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲。

2.1 降雨侵蚀力(R)因子

降雨侵蚀力主要衡量雨滴冲击的动能,反映降雨这一气候因素对土壤侵蚀的潜在作用能力。由于降雨资料难以获得,一般利用气象站整编降雨资料评估计算降雨侵蚀力,常用年平均雨量、月平均雨量、逐年年雨量、逐年月雨量及逐年日雨量等5种代表性雨量资料估算降雨侵蚀力^[6]。基于研究区雨量资料的可得性,本研究采用5~10月年平均降雨量计算降雨侵蚀力^[5],即

$$R = 0.4448P^{0.96982}$$
 (2)

式中 R 为降雨侵蚀力系数,单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; P 为年平均5~10月降雨量,单位为 mm 。

本研究依据丽江市气象站提供的全县年平均降雨量等值线图(1:10万)为基础数据源,考虑到全县各气象站点5~10月降雨量均占全年降雨量90%^[7],以年降雨量的90%作为5~10月年平均降雨量,经矢量化和坐标校准后,以TM影像栅格为基础,采用Krigin内插法进行空间插值得到TM影像各像元栅格的年平均降雨量值,并应用式2计算得到各栅格的降雨侵蚀力。

2.2 土壤可蚀性(K)因子

土壤可蚀性因子 K 值反映土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运的难易程度,作为对某一特定土壤固有可蚀性程度的定量描述,是土壤侵蚀预报模型中的关键参数,指标准小区在单位降雨侵蚀力指标下的土壤侵蚀量,一般通过小区试验测定。本研究采用杨子生(1999,2002)^[5,8]在云南北部山区进行坡耕地土壤可蚀性试验的相关实测值,作为研究区不同类型土壤的可蚀性 K 值(表1)。

本研究依据丽江市第二次全国土壤普查图(1:10万)为基础数据源,经矢量化和坐标校准后,按30m×30m的网格大小进行栅格化,得到全县土壤类型分布图及其土壤可蚀性分布图。

表 1 丽江市主要土壤类型的可蚀性 K 值 $((t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm))$
Table 1 The soil erodibility factor (K) in Lijiang County $((t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm))$

土壤类型	K 值	土壤类型	K 值	土壤类型	K 值
红壤	0.410 0	褐红土	0.342 0	高山冰川和原始土壤	0.338 8
红棕壤	0.356 2	燥红土	0.336 0	黑色石灰土	0.308 0
棕壤	0.292 0	沼泽土	0.466 9	山地灌丛草甸土	0.332 2
暗棕壤	0.286 0	草甸土	0.425 8	亚高山草甸土	0.499 4
灰壤和暗棕壤	0.286 0	水稻土	0.466 9	高山寒漠土和原始土壤	0.338 8
基岩露头 and 原始土壤	0.338 8				

注:数据来源于杨子生(1999,2002)。

2.3 地形 (LS)因子

地形地貌特征对土壤侵蚀的影响集中表现在坡长与坡度两方面,因此,一般用坡长 (L)与坡度 (S)因子估算地形因素对土壤侵蚀的影响,二者是降雨侵蚀动力的加速因子。其中,坡度因子是在其他条件相同的情况下,特定坡度的坡地土壤流失量与标准径流小区坡度的坡地土壤流失量之比值;坡长因子则是在其他条件相同的情况下,特定坡长的坡地土壤流失量与标准径流小区坡长的坡地土壤流失量之比值。一般认为,土壤流失量与坡度、坡长的之间呈幂函数关系,本研究采用杨子生 (1999, 2002)在云南北部山区坡耕地土壤侵蚀小区试验确定的 LS 因子计算公式^[5,9],即

$$LS = (L/20)^{0.24} (S/5)^{1.32} \tag{3}$$

式中 LS 为地形因子, L 为坡长 (m), S 为坡度 (°)。

本研究以丽江县 1:5万数字地形图为基础数据源,经坐标校准,按 30 m × 30 m 的网格大小进行栅格化,在 ARC/INFO 8.3 中的 ARC 模块下运行编好的程序,得到各栅格的坡长、坡度与 LS 因子值。

2.4 植被覆盖与水土保持措施 (CP)因子

植被覆盖 – 作物管理 (C)因子表征所有植被特征,如植被类型、作物种植顺序、生产力水平、生长季长短、栽培措施、作物残余物管理等因素对土壤侵蚀的综合影响^[10],具体指在相同的土壤、坡度和降雨条件下,某一特定作物或植被状况下的土壤流失量

与耕种过后连续休闲土地上相应的土壤流失量之比值;水土保持措施通过降低地表径流速率等作用减轻土壤侵蚀, P 因子具体指特定水土保持措施下的土壤流失量与相应未实施该措施的顺坡种植时的土壤流失量之比值^[4],研究中通常考虑的水土保持措施主要包括等高耕作、等高带状种植、梯田等方式。因此, C 、 P 因子是降雨侵蚀动力的重要抑制因子。由其定义可知,二者的变化值域均为 $[0, 1]$,其值越小,表示植被覆盖与水土保持措施对土壤侵蚀的抑制作用越明显;等于 0 说明根本不发生土壤侵蚀;等于 1 表明抑制作用完全失效。

目前,径流小区土壤侵蚀的 C 、 P 因子值一般通过试验观测确定^[5],而在流域土壤侵蚀研究中,则难以通过实测方法确定相关参数值^[2],并由于土地利用/土地覆被能够基本反映植被覆盖率的高低与水土保持措施的差异,往往采用依据土地利用类型赋值的方法确定 C 、 P 值。根据研究区土地利用现状及具体的农林牧渔业生产经营状况,基于杨子生 (1999, 2002)在云南北部山区坡耕地土壤侵蚀小区试验测定数据^[5,11,12],参考相关学者的研究结果^[2,3,13-16],确定研究区不同土地利用类型的 C 、 P 值 (表 2)。而各土地利用类型的空间分布则由覆盖研究区的 Landsat TM 遥感影像 (131_41: 2002-02-07, 131_42: 2002-02-07, 132_41: 2002-01-13)解译而得。

表 2 丽江县不同土地利用类型的 CP 值
Table 2 The C value and P value of different land use types in Lijiang County

土地利用类型	有林地	其他林地	草地	荒草地	水田	旱地	河湖水面	冰川积雪	建设用地	裸地
C 值	0.006	0.02	0.04	0.1	0.18	0.35	0	0	0	1.0
P 值	1.0	1.0	1.0	1.0	0.03	0.55	0	0	0	1.0
CP 值	0.006	0.02	0.04	0.1	0.0054	0.1925	0	0	0	1.0

2.5 土壤侵蚀量估算及其强度分级

在 ARC/INFO 8.3 下将上述各因子图层相乘,得到研究区土壤侵蚀空间分布图,根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96),并考虑

到研究区土壤侵蚀量的实际分布特征,确定土壤侵蚀强度分级标准 (表 3),将同一侵蚀强度的像元归并,形成土壤侵蚀强度等级分布图。

表 3 丽江县土壤侵蚀强度等级划分标准
Table 3 The criteria for the division of soil erosion grade in Lijiang County

侵蚀强度等级	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	极剧烈侵蚀
侵蚀模数 (t/(hm ² ·a))	0~5	5~25	25~50	50~80	80~150	150~250	>250

2.6 潜在土壤侵蚀量与土壤保持量

潜在土壤侵蚀量,指在没有任何植被覆盖和水土保持措施条件下,即C、P值均为1情况下的年均土壤流失量^[16],其计算公式为

$$A^1 = R \times K \times LS \tag{4}$$

式中 A^1 为单位面积年平均潜在土壤流失量,单位为 $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子,单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子,单位为 $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; LS 为坡长、坡度因子,无量纲。

土壤保持量则是现实土壤侵蚀量与潜在土壤侵蚀量之差,指因植被覆盖和实施水土保持措施而减少的土壤侵蚀量,即

$$\square A = A^1 - A \tag{5}$$

式中 $\square A$ 为单位面积年平均土壤保持量, A 为单位面积年平均土壤流失量, A^1 为单位面积年平均潜在土壤流失量。

3 结果分析

3.1 土壤侵蚀量与土壤侵蚀强度

全县土壤侵蚀面积 $7\,384\,25\,km^2$, 占总面积的 96.55%, 土壤侵蚀总量 $3\,923\,72 \times 10^4\,t/a$ 平均土壤侵蚀模数 $52\,50\,t/(hm^2 \cdot a)$, 属于强度侵蚀; 土壤侵蚀强度的空间分布差异不大, 全县大部分地区土壤侵蚀强度较弱, 土壤侵蚀严重地区主要分布在县域东部的金沙江沿岸, 以及奉科乡的每鲁各古山(海拔 $4\,517\,m$)、宝山乡的百花山(海拔 $4\,376\,m$)、白沙乡的玉龙雪山(海拔 $5\,596\,m$)等极高山区, 是研究区土壤侵蚀治理的重点地区。

此外, 尽管极剧烈侵蚀面积比例不到 4%, 其土壤侵蚀量却占总侵蚀量的 65% 以上, 而剧烈、极强度侵蚀对总侵蚀量的贡献率也是其相应面积比例的 2~4 倍(表 4)。因此, 极剧烈侵蚀是研究区土壤侵蚀防治的重点侵蚀级别, 剧烈、极强度侵蚀的治理对全县土壤侵蚀总量的缩减也有重要意义。

3.2 潜在土壤侵蚀量与土壤保持量

全县年潜在土壤侵蚀总量达到 $71\,965.63 \times 10^4\,t$ 而年平均土壤侵蚀模数则高达 $962.86\,t/(hm^2 \cdot a)$, 远远超过极剧烈侵蚀强度等级的标准; 全县大部分地区潜在土壤侵蚀强度较高, 并以玉龙雪山地区最为严重, 金沙江沿岸、老君山与玉龙雪山支系各山峰的潜在土壤侵蚀也较为严重, 而县域东南部的丽江坝、拉市坝、七河坝、九河坝等盆地区的潜在土壤侵蚀相对较低。由于高潜在土壤侵蚀模数对侵蚀高危险区的重要指示意义^[16], 上述高潜在土壤侵蚀模数分布区是研究区土壤侵蚀防治与监控的重点区域。

而全县土壤保持模数的空间分布, 则与潜在土壤侵蚀模数较为一致, 即高值区也主要分布在玉龙雪山、老君山地区, 以及金沙江沿岸, 而丽江坝、拉市坝、七河坝、九河坝等盆地区的土壤保持模数相对较低。

3.3 土壤侵蚀空间分布特征

3.3.1 土壤侵蚀的海拔分布特征

由丽江市不同海拔带的平均土壤侵蚀模数(表 5), 可以看出, 尽管土壤侵蚀与海拔具有较大的相关性, 但研究区土壤侵蚀强度与海拔无直接的线性关联。除 $2\,500 \sim 3\,000\,m$ 和 $3\,000 \sim 3\,500\,m$ 高程带相差不大, 其值相对较低外, 其余各高程带上的平均

表 4 丽江市各土壤侵蚀强度等级平均土壤侵蚀模数与土壤侵蚀量
Table 4 The mean soil erosion modulus and soil loss ratio in different soil erosion grades of Lijiang County

土壤侵蚀 强度等级	土地面积比重 (%)	平均土壤侵蚀模数 ($t/(hm^2 \cdot a)$)	土壤侵蚀量 ($\times 10^4\,t/a$)	土壤侵蚀量比重 (%)
微度侵蚀	37.66	2.28	64.31	1.64
轻度侵蚀	47.59	9.32	331.48	8.45
中度侵蚀	4.01	34.83	104.49	2.66
强度侵蚀	2.03	63.73	96.65	2.46
极强度侵蚀	3.07	113.13	259.42	6.61
剧烈侵蚀	2.20	192.58	316.82	8.07
极剧烈侵蚀	3.44	1 070.46	2 750.57	70.10

土壤侵蚀模数均较大,且差异显著,其中,3 500~6 000 m高程带的平均土壤侵蚀模数最高,属剧烈侵蚀,2 000 m以下高程带次之,属强度侵蚀,其他高程带的土壤侵蚀分属中度、轻度侵蚀级别。上述平均土壤侵蚀模数在不同高程带的分布特征主要缘于研究区高程的空间分布及其植被覆盖类型的差异,即海拔2 000 m以下地区多为金沙江沿岸地区,山高谷深,相对高度大、坡度大,土地利用类型以水田、旱地、裸地、荒草地及建设用地等为主,自然植被覆盖相对较少;而海拔3 500 m以上地区由于面积较少,零散分布于全县各极高山区,大多山高坡陡,由于光热水土资源相对较为贫瘠,土地利用类型多为荒草地、裸地与其他林地,自然植被也以针叶林、高山草甸与高山灌丛为主,对水土的保持能力相对较低;而2 000~3 500 m高程带占研究区80%以上的面积比例,是丽江县有林地、其他林地等高植被覆盖地类的集中分布区,植被水土保持能力较高,并由于分布相对较为集中,尽管海拔较高,该高程带上各像元栅格的相对高差一般不大,坡度较低,土壤侵蚀

模数因而相对较低。

由丽江县不同高程带的土壤侵蚀量(见表5),可以看出,尽管3 500~6 000 m高程带仅占研究区土地总面积的9.57%,其侵蚀量却占全县总土壤侵蚀量的43%以上,2 000 m以下高程带的土壤侵蚀量比重也略高于其土地总面积比重,而2 000~3 500 m高程带上的土壤侵蚀量比重则远小于其土地总面积比重,因此,3 500~6 000 m高程带是研究区土壤侵蚀治理的重点地区,2 000 m以下高程带上的土壤侵蚀也应引起重视。

由不同高程带上土壤侵蚀强度等级的面积比例构成(表6),可以看出,丽江县不同海拔带上的土壤侵蚀强度特征各异,各海拔带上以微度、轻度侵蚀强度等级占绝对比重(57%~94%),强度侵蚀的面积比例普遍最低。此外,极强度侵蚀在2 000 m以下高程带上占次重要地位,2 000~3 500 m高程带上微度、轻度侵蚀以外的其他各侵蚀强度面积比例差异不大,3 500~6 000 m高程带上极剧烈侵蚀与中度侵蚀的面积比例也较高。

表 5 丽江县不同高程带平均土壤侵蚀模数与土壤侵蚀量

Table 5 The mean soil erosion modulus and soil loss ratio in different elevation zones of Lijiang County

高程带 (m)	土地面积比例 (%)	平均土壤侵蚀模数 (t/(km ² ·a))	土壤侵蚀量 (×10 ⁴ t/a)	土壤侵蚀量比重 (%)
< 2 000	7.13	87.22	464.80	11.85
2 000~2 500	20.27	43.74	662.61	16.89
2 500~3 000	37.09	21.36	592.18	15.09
3 000~3 500	25.94	24.68	478.51	12.20
3 500~6 000	9.57	241.18	1 725.62	43.98

表 6 丽江县不同高程带土壤侵蚀强度等级面积比例构成(单位:%)

Table 6 The area ratio of soil erosion grades in different elevation zones of Lijiang County (unit: %)

土壤侵蚀 强度等级	< 2 000 m	2 000~2 500 m	2 500~3 000 m	3 000~3 500 m	3 500~6 000 m
微度侵蚀	40.85	40.42	37.33	38.20	29.27
轻度侵蚀	16.86	42.39	52.71	55.16	41.13
中度侵蚀	4.08	2.17	3.65	3.77	9.93
强度侵蚀	5.31	2.35	1.66	0.83	3.56
极强度侵蚀	15.61	4.56	1.95	0.40	2.15
剧烈侵蚀	10.08	4.14	1.29	0.19	1.21
极剧烈侵蚀	7.20	3.97	1.41	1.45	12.75

3 3 2 土壤侵蚀的坡度分布特征

由丽江市不同坡度带的平均土壤侵蚀模数与土壤侵蚀量 (表 7), 可以看出: ①研究区土壤侵蚀强度与坡度有着较为显著的正相关, 随着坡度的增大, 平均土壤侵蚀模数明显上升。其中, 0°~ 6°坡度带平均土壤侵蚀模数最低, 属于微度侵蚀, 6°~ 15°坡度带属于轻度侵蚀, 15°~ 25°坡度带属于中度侵蚀, 25°~ 35°坡度带属于强度侵蚀, 35°~ 45°坡度带属于极强度侵蚀, 而 45°~ 90°坡度带的平均土壤侵蚀模数最高, 属于极剧烈侵蚀; ②尽管 45°~ 90°坡度带仅占全县土地总面积的 4. 27%, 其土壤侵蚀量却占总侵蚀量的 18% 以上, 35°~ 45°坡度带上的侵蚀量比重也远大于其土地面积比重, 而 25°~ 90°坡度带上的土壤侵蚀量占总侵蚀量的近 80%。因此, 25°~ 90°坡度带是丽江市土壤侵蚀防治的主要区域, 其中, 以 45°~ 90°、35°~ 45°坡度带上的土壤侵蚀治理最为关键。

由不同坡度带上各土壤侵蚀强度等级的面积比例构成 (表 8), 可以看出, 不同土壤侵蚀强度等级在各坡度带上均有分布, 但存在较大的面积比例差异: ①0°~ 6°坡度带上以微度侵蚀占绝对比重 (87% ~ 89%), 轻度侵蚀占一定比重, 其他侵蚀强度等级比例较低; ②6°~ 15°坡度带上仍以微度侵蚀占绝对比重 (71% ~ 74%), 轻度、中度侵蚀占一定比重, 其他侵蚀强度等级比例较低; ③15°~ 25°坡度带上以微度侵蚀比重最高 (55% ~ 57%), 轻度侵蚀占较大比重, 其他侵蚀强度等级比例较低; ④25°~ 35°、35°~ 45°坡度带上的侵蚀强度等级比重分布特征基本相似, 都以轻度侵蚀占绝对比重 (77% ~ 80%), 其他侵蚀强度比重差异不大, 均较低; ⑤45°~ 90°坡度带上以轻度侵蚀比重最高 (60% 左右), 极剧烈侵蚀占较大比重 (11% ~ 14%), 剧烈、微度侵蚀次之 (7% ~ 9%), 其他侵蚀强度等级比例较低。

表 7 丽江市不同坡度带平均土壤侵蚀模数与土壤侵蚀量
Table 7 The mean soil erosion modulus and soil loss ratio in different slope zones of Lijiang County

坡度带 (°)	土地面积比例 (%)	平均土壤侵蚀模数 (t/(hm ² ·a))	土壤侵蚀量 (×10 ⁴ t/a)	土壤侵蚀量比重 (%)
0~ 6	10.88	3.10	25.23	0.64
6~ 15	15.76	16.44	193.58	4.93
15~ 25	25.18	32.30	607.88	15.49
25~ 35	27.53	59.92	1232.95	31.42
35~ 45	16.38	92.72	1134.89	28.92
45~ 90	4.27	228.36	729.18	18.58

表 8 丽江市不同坡度带的土壤侵蚀强度等级面积比例构成 (单位: %)
Table 8 The area ratio of soil erosion grades in different slope zones of Lijiang County (unit: %)

坡度带 (°)	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	极剧烈侵蚀
0~ 6	87.37	10.10	1.64	0.27	0.49	0.13	0.01
6~ 15	73.89	12.68	5.89	3.98	1.60	0.46	1.50
15~ 25	56.90	30.45	2.83	2.03	4.27	1.45	2.07
25~ 35	5.26	79.02	4.31	1.29	3.30	3.26	3.57
35~ 45	2.22	76.25	4.96	2.15	3.78	3.30	7.35
45~ 90	8.68	60.43	4.61	3.66	3.75	7.32	11.55

3 3 3 土壤侵蚀的土地利用类型分布特征

由丽江市不同土地利用类型的平均土壤侵蚀模数 (表 9), 可以看出, 不同土地利用类型的平均土壤

侵蚀模数存在较大差异, 相差上千倍, 而由表 2 可知, 各土地利用类型的 CP 值最高相差不到 200 倍 (0 值除外), 因此, 尽管这种土地利用类型之间侵蚀

强度的差异在相当程度上由土地利用类型自身的水土保持能力(即 CP 值)所决定,但同时也受各土地利用类型空间分布的地形、降水等因素所制约。例如,裸地在研究区往往分布在极高山或金沙江沿岸的地形破碎地区,坡度一般较大。

而由丽江县不同土地利用类型的土壤侵蚀量(见表 9),可以看出,尽管裸地不足研究区土地总面积的 3%,其侵蚀量却占全县土壤侵蚀总量的 59%以上,荒草地、旱地的土壤侵蚀量比重也是其土地总面积比重的 2 倍左右,而其他林地、有林地与水田的土壤侵蚀量比重则远小于其土地总面积比重,因此,裸地是研究区土壤侵蚀防治的重点土地利用类型,荒草地与旱地的土壤侵蚀也值得关注。

由不同土地利用类型土壤侵蚀强度等级的面积比例构成(表 10),可以看出:①水田仅发生微度、轻

度两种强度的土壤侵蚀,并以微度侵蚀占绝对比重(84%以上);②各侵蚀强度等级在旱地均有分布,并以极强度、剧烈与极剧烈等侵蚀强度等级为主;③有林地主要发生微度、轻度侵蚀,及不足 1%比重的中度侵蚀,并以轻度侵蚀比重略大;④其他林地以轻度侵蚀为主,中度、微度侵蚀也占一定比重,以及总面积比例不超过 3%的强度、极强度与剧烈侵蚀,无 极剧烈侵蚀等级;⑤各侵蚀强度等级在牧草地均有分布,并以轻度侵蚀为主,中度侵蚀次之,强度与微度侵蚀也占一定比重,其他侵蚀强度等级面积比例则不足 7%;⑥荒草地分布有各侵蚀强度等级,并以极强度侵蚀为主,剧烈、强度侵蚀也占较大比重;⑦裸地也分布有各侵蚀强度等级,但以极剧烈侵蚀占绝对比重,其他侵蚀强度等级面积比例差异不大,均为 1%~5%。

表 9 丽江县不同土地利用类型平均土壤侵蚀模数与土壤侵蚀量

Table 9 The mean soil erosion modulus and soil loss ratio in different land use types of Lijiang County

土地利用 类型	土地面积比例 (%)	平均土壤侵蚀模数 ($t/(hm^2 \cdot a)$)	土壤侵蚀量 ($\times 10^4 t/a$)	土壤侵蚀量比重 (%)
水田	4.86	2.11	7.65	0.19
旱地	6.22	137.62	639.30	16.29
有林地	67.53	6.12	308.91	7.87
其他林地	7.26	19.76	107.25	2.73
牧草地	3.95	32.20	95.02	2.42
河湖水面	0.89	0.00	0.00	0.00
冰川积雪	1.18	0.00	0.00	0.00
建设用地	1.36	0.00	0.00	0.00
荒草地	4.19	99.77	312.31	7.96
裸地	2.56	1 280.81	2 453.29	62.52

表 10 丽江县不同土地利用类型的土壤侵蚀强度等级面积比例构成(单位: %)

Table 10 The area ratio of soil erosion grades in different land use types of Lijiang County(unit %)

土地利用 类型	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	极剧烈侵蚀
水田	84.17	15.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
旱地	9.81	10.83	11.62	9.58	17.97	20.68	19.50
有林地	40.91	59.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
其他林地	11.00	61.00	25.08	2.47	0.44	0.02	0.00
牧草地	16.69	34.23	25.01	17.32	6.27	0.47	0.01
荒草地	7.22	10.22	9.75	12.95	38.38	19.35	2.13
裸地	5.31	3.42	0.95	1.13	2.52	3.32	83.35

4 结语

采用 RUSLE 模型估算研究区年平均土壤侵蚀量,结果表明,全县年平均土壤侵蚀模数为 $52.50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属于强度侵蚀;而土壤侵蚀的空间特征分析则表明,县域东部的金沙江沿岸、3 500~6 000 m 高程带、 $25^\circ \sim 90^\circ$ 坡度带,以及裸地与荒草地、旱地等不同类型区域是研究区土壤侵蚀防治的重点地区,因地制宜的采取相关对策措施以减少土壤流失量,至关重要。其中,金沙江沿岸与 3 500~6 000 m 高程带的防治重点在于维持原生植被的自然演替、退耕还林还草, $25^\circ \sim 90^\circ$ 坡度带宜开展坡改梯、等高耕作等生物、工程措施以保持水土,裸地、荒草地土壤侵蚀防治的基本方向则是积极引导其向有林地、灌木林地、牧草地等环境友好型土地利用/土地覆被类型的转型。

参考文献 (References)

- [1] Pickup G., Chewing S. V. H. Forecasting patterns of soil erosion in arid lands from Landsat MSS data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(1): 69~84
- [2] Zhou Bin, Yang Bolin, Hong Yeyang *et al*. Study on quantitative remote sensing monitoring of soil erosion in karst areas based on GIS [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(1): 13~21 [周斌, 杨柏林, 洪业汤, 等. 基于 GIS 的岩溶地区水土流失遥感定量监测研究 [J]. 矿物学报, 2000, 20(1): 13~21]
- [3] Xu Yueqing, Cai Yunlong. Estimation of soil erosion and its spatial analysis in Maotiaohe watershed, Guizhou province [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5): 50~54 [许月卿, 蔡运龙. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀量计算及其背景空间分析 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 50~54]
- [4] Liu Baoyuan, Xie Yun, Zhang Keli. Soil Erosion Prediction Model [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2001. [刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001]
- [5] 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. 云南省金沙江流域土壤流失方程研究 [J]. 山地学报, 2002, 20(增刊): 1~9]
- [6] Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. *Resource 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]
- [7] The Edit Council of Lijiang. The County Record of Lijiang [M]. Kunming: Yunnan Public Press, 2001. [丽江纳西族自治县志编纂委员会. 丽江纳西族自治县志 [M]. 昆明: 云南人民出版社, 2001.]
- [8] Yang Zisheng. Soil erosibility factor of sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan province [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(suppl): 10~15 [杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子 [J]. 山地学报, 1999, 17(增刊): 10~15]
- [9] 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*, 2002, 20(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]
- [10] Wisdmieier W. H., Smith D. D. Agriculture Handbook No. 537. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning with the Universal Soil Loss Equation (USLE) [R]. 1978
- [11] Yang Zisheng. Crop planting factor of soil erosion of sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan province [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(suppl): 19~21 [杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的作物经营因子 [J]. 山地学报, 1999, 17(增刊): 19~21]
- [12] Yang Zisheng. The factor of soil and water conservation measures of soil erosion on sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan province [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(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]
- [13] 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]
- [14] You Songcai, Li Wenqing. Estimation of soil erosion supported by GIS [J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(1): 62~68 [游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62~68]
- [15] Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua *et al*. Study of applying USLE and geographical information system (GIS) 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 (GIS) 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]
- [16] Xu Yueqing, Shao Xiaomei. Estimation of soil erosion supported by GIS and RUSLE [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4): 67~71 [许月卿, 邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 67~71]

Analysis of Spatial Characteristics of Soil Erosion in Mountain Areas of Northwestern Yunnan Based on GIS and RUSLE

PENG Jian^{1,2}, LIDandan¹, ZHANG Yuqing²

(1 The Key Laboratory of Resources Remote Sensing & Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

2 The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract The spatial distribution characteristics are important basis for the planning and application of soil erosion prevention. In the study, taking Lijiang County of Yunnan Province as a case study, we estimated the soil loss in the whole county with the application of Revised Universal Soil Erosion (RUSLE), $A = R \times K \times LS \times C \times P$, where A was annual mean soil erosion modulus, the rainfall erodibility factor (R) came from annual mean rainfall accumulated from May to October, the soil erodibility factor (K) depended on corresponding soil types, the topography factor (LS) was calculated according to elevation and slope, and the vegetation cover factor (C) and the soil and water conservation measure factor (P) was determined by land use types. Furthermore, the spatial distribution characteristics were also analyzed with the application of GIS in the view of elevation, slope and land use types. The results showed that the soil erosion modulus were $52.50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, which belonged to the grade of intensity erosion. The results also showed that soil erosion, especially soil erosion with high grade, mostly distributed in the following areas: that is riverside of Jinsha River in the east of the county, elevation area from 3 500 to 6 000 meters, slope area from 25 to 90 degree, and uncovered land, waste grassland, and dry land.

Key words RUSLE; GIS; soil erosion; spatial distribution characteristics; Lijiang County; Yunnan Province

欢 迎 订 阅

全国中文核心期刊

《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊

全国水利系统优秀科技期刊

河南省优秀科技期刊

2008年度《中国水土保持》月刊

《中国水土保持》是水利部主管、黄河水利委员会主办的全国性水土保持业务与技术综合性期刊。本刊紧密围绕全国水土保持中心工作,贯彻水土保持方针政策,报道水土保持科技成果,推广生态建设先进技术,介绍监督执法新鲜经验,普及水土保持基础知识,提供水土保持动态信息。20多年的办刊实践形成了融政策性、技术性、新闻性和实用性为一体的独特风格,内容雅俗共赏,印刷质量精美,开设了20多个栏目,深受读者欢迎。读者对象为从事水土保持生态建设管理与科研的干部、工作者,有关农、林、水、牧、地理、生态行业的管理者与科研、教学人员,以及关心我国水土保持生态建设事业的各界人士。

本刊为大16开,每月5日在郑州出版,每册定价6.00元,全年定价72.00元。本刊为自办发行,通过杂志社随时可订阅,订阅款可信汇也可邮汇。信汇开户行:河南省郑州交行政二街支行,银行户名:黄河水利委员会新闻宣传出版中心,账号:411060200010149028852。邮汇地址:郑州市金水路11号《中国水土保持》杂志社,邮编:450003。联系电话:0371-66020720、66022619、66022338(含传真)。E-mail:swcc2000@sina.com。网址: <http://www.swcczz.cn>