

## 基于 GIS、RS 和 RU SLE 的林区土壤侵蚀定量研究 ——以大兴安岭呼中地区为例

刘 淼<sup>1,2</sup>, 胡远满<sup>1</sup>, 徐崇刚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** U SLE 是美国农业部 (USDA) 土壤保持局建立的以大量试验数据为基础的经验性方程, 主要应用于农业区域的土壤侵蚀的监测, 现已被广泛应用。RU SLE 是 U SLE 的改进方程, 尽管它们的表达式相同, 但 RU SLE 从技术性和确定因子的两方面进行了改进, 具有更广泛的应用范围和更高的精度。以地理信息系统 (GIS)、遥感 (RS) 和修正的通用土壤流失方程 (RU SLE) 为核心, 根据呼中地区 1990 年遥感影像解译数据、统计资料和实地考察得到地貌、植被、降雨量、林业采伐、火烧迹地等资料, 确定方程中各因子, 并介绍林区各因子确定的方法, 对大兴安岭呼中地区土壤流失量进行了量化分析, 评价该区森林采伐和火烧对土壤流失的影响, 进行水土流失的定量评价。结果表明呼中地区总水土流失量为 427 537.5 t/a, 大部分地区小于 3.5 t/(hm<sup>2</sup>·a), 低于水利部 1984 年颁布的允许流失量标准 (2~10 t/hm<sup>2</sup>·a), 总体水土保持良好。但是研究区内水土流失严重地区十分集中, 主要分布在坡度较陡处和火烧、采伐迹地。在无人类和火烧干扰的情况下坡度对水土流失影响最显著。

**关键词:** 土壤流失; GIS; 通用土壤流失方程; 呼中地区

**中图分类号:** TP79; S157

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2004)03-0021-04

## Quantitative Study of Forest Soil Erosion Based on GIS, RS and RU SLE ——A Case Study of Huzhong Region, Daxing'anling

L U Miao<sup>1,2</sup>, HU Yuanman<sup>1</sup>, XU Chong-gang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Applied Ecology, CAS, Shenyang 110016, China; 2 Graduate School of CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract:** U SLE is an empirical soil loss equation developed by USDA. U SLE is originally developed to predict soil loss in agricultural area. RU SLE is the revised version of U SLE. Though RU SLE has the same expression with U SLE, the technology and method of factors determination in RU SLE has been significantly improved. RU SLE has higher accuracy and can be more widely used than U SLE. Based on the RS data, the forest inventory data derived in 1990 and the field data (including physiognomy, vegetation, rainfall, harvest and fire data), RU SLE is combined with GIS to estimate the soil loss by erosion. At the same time, we also estimated the influence of fire and harvest on soil loss. Results showed that the total soil erosion of Huzhong is 427 537.503 6 t/a. Soil loss in most area is less than 3.5 t/(hm<sup>2</sup>·a) and the standard of the Ministry of Water Resources in 1984 (2~10 t/hm<sup>2</sup>·a). The places where has the severe soil loss are located in fired and harvested regions, especially in steep slope regions. In the situation without human disturbance and fire, slope is the most important factor.

**Key words:** soil loss; GIS; RU SLE; Huzhong region

通用土壤流失方程 (U SLE) 是美国农业部 (USDA) 1958 年利用 36 个地区 8 000 个径流小区一年的观测数据得出的分析研究成果, 其模型方程表达式为  $A = RKLSCP$ 。它在美国各州都有成功应用的实例, 现已被众多国家所采用, 在国内也被广泛应用。由于方程中各因子参数的复杂性, 美国农业部针对提高各因子计算的通用性又提出了修正方程 RU SLE<sup>[1]</sup>。水土流失计算方程, RU SLE 是 U SLE 的修正方程, RU SLE 从技术性和因子的算法两方面进行了改进, 使 RU SLE 具有更广泛的应用范围和更高的精度, 现在

RU SLE 也被国内外水土流失定量评价中所应用。

地理信息系统 (简称 GIS), 是 60 年代由加拿大在土地资源清查中首先提出的。GIS 融计算机图形和数据库于一体, 把地理位置和相关地理属性有机结合起来, 具有强大的空间信息处理和数据分析能力, 能够根据实际需要在计算机上准确地进行空间分析和可视化表达, 在 GIS 中能够对土壤侵蚀的各个因子进行有效的管理和综合计算<sup>[9]</sup>。

本文以 GIS 为操作平台, 结合 RS 定量对大兴安岭的呼中林业局地区的水土流失量进行评价, 并分析水土流失与各

收稿日期: 2004-05-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (基金课题批准号: 40331008) 资助; 中国科学院“百人计划”项目 (基金课题批准号: BR010403) 资助  
作者简介: 刘淼 (1979-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事景观生态和土地承载力方面研究。

影响因子的关系, 评价水土流失与采伐和火烧的关系, 对指导林业采伐预案和森林防火且有现实意义。

1 研究区概况

呼中地区位于我国大兴安岭地区, 地理坐标为东经 122°39′~124°21′, 北纬 51°14′~52°25′。全境东西宽 11.5 km, 南北长 125 km, 研究区总面积为 770 031 hm<sup>2</sup>, 其地理位置如图 1 所示。呼中地区山峦连绵起伏, 山体浑圆, 坡度平缓, 一般坡度在 15°以下。呼中地处大兴安岭北部高纬度寒温带地区, 属大陆性季风气候, 为寒冷湿润气候区。1992~2001 年平均降雨量 511 mm, 年际差 113 mm。呼中地区植被在植物区系上, 属泛北极植物区东西伯利亚植物区系, 以西伯利亚植物区系成分为主, 混有东北植物区系成分和蒙古植物区系成分。地带性植被类型为寒温性针叶林, 以兴安落叶松为单优势的针叶林。

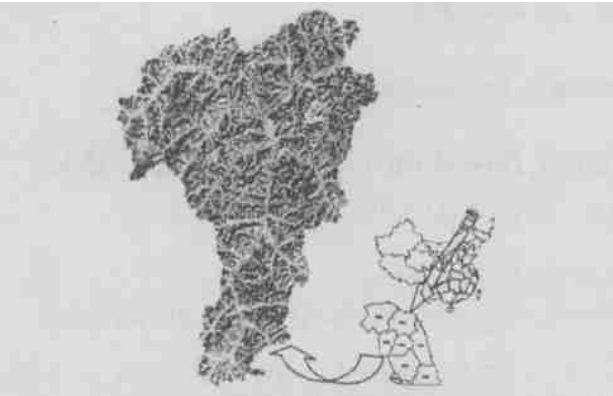


图 1 研究区地理位置示意图

2 土壤侵蚀监测模型

修正的通用土壤流失方程(RUSLE)已被广泛的应用于长期年平均土壤侵蚀量的计算<sup>[1,6]</sup>, 其表达式为:

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

式中:  $A$ ——土壤流失量( $t/hm^2 \cdot a$ );  $R$ ——降雨侵蚀力因子;  $K$ ——土壤可蚀性因子;  $L$ ——坡长因子;  $S$ ——坡度因子;  $C$ ——覆被管理因子;  $P$ ——土壤侵蚀控制措施因子。

3 呼中地区各因子计算

各因子计算过程在 GIS 软件 ARC/INFO 中进行, 把研究区划分成 90 m × 90 m 的单元格进行计算<sup>[7,8]</sup>, 各因子计算结果生成因子图层, 各因子运算如下:

3.1 降雨侵蚀力因子  $R$

降雨侵蚀因子采用 Wischmeier 经验公式, 该公式既考虑年降水总量, 又考虑降水的年内分布:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \exp \{1.5 \cdot \lg \frac{P_i}{P} - 0.8188\} \quad (2)$$

式中:  $P_i$ ——各月平均降雨量(mm);  $P$ ——年平均降雨量(mm)。

由于研究区的面积不大, 根据研究区范围内的 1992~2001 年降雨资料的平均数据和公式(2)计算出惟一  $R$  值, 求得  $R = 24.91533$  以常数的形式输入到模型中进行计算。

3.2 土壤可蚀性因子的计算

土壤可蚀性因子( $K$ )反映土壤可蚀性, 表现为雨滴和地表水冲击下土壤被剥离的难易程度。<sup>[1]</sup>决定土壤侵蚀因子两个最主要因子是: 土壤机械组成和土壤有机质的含量。不同

土壤类型在不同土壤有机质含量下的  $K$  值可由表 1 查到。

表 1 土壤侵蚀性因子的一般数量级指标

土壤类型	有机质含量/%		
	0.5%	2%	4%
砂土	0.05	0.03	0.02
细砂土	0.16	0.14	0.10
壤质砂	0.12	0.10	0.08
壤质细砂土	0.24	0.20	0.16
砂壤土	0.27	0.24	0.19
细砂壤土	0.35	0.30	0.24
壤土	0.38	0.34	0.29
粉砂壤土	0.48	0.42	0.33
粉砂土	0.60	0.52	0.42
砂质黏壤土	0.27	0.25	0.21
黏壤土	0.28	0.25	0.21
粉砂黏壤土	0.37	0.32	0.26
砂粉土	0.14	0.13	0.12
粉砂黏土	0.25	0.23	0.19
黏土	0.13~0.29		

土壤类型从呼中林业局 1990 年的森林调查数据(林相图)和遥感影像中获得, 呼中林业局地区内的土壤类型有砂土、砂壤土、壤土、黏壤土、黏土。对于土壤有机质含量, 在长期存在的森林地区, 地表积累了大量的有机物质, 其含量一般都高于 4%<sup>[4]</sup>。因此在本研究中, 认为所有有林地的土壤有机质含量均高于 4%; 对于无林地, 其土壤的有机质含量要低于林地的有机质含量, 但由于还有有机质的残留, 其有机质含量要高于 0.5%, 取其有机质含量为 2%<sup>[4]</sup>。林地分布图由遥感图像解译获得, 从而得到有机质含量分布图层。

根据土壤类型图层、土壤有机质含量分布图层和表 1 计算并得到土壤可蚀性因子, 形成  $K$  因子图层。

3.3 地形因子( $L$ )

地形对土壤侵蚀的影响由坡度( $S$ )和坡长( $L$ )决定。坡长因子由下式计算:

$$L = (\lambda/72.6)^m \quad (3)$$

式中:  $m$  由如下方程获得,

$$\begin{cases} m = \beta / (1 + \beta) \\ \beta = (\sin \theta / 0.0896) / [3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\theta$ ——坡度(°)。坡度因子( $S$ )由如下方程获得,

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03 & S < 9\% \\ S = 16.8 \sin \theta - 0.50 & S > 9\% \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $S$ ——坡度(%)。  $L$  与  $S$  的乘积即为地形因子的值, 在每一个网格上计算其地形因子, 根据 DEM 图和上面的计算公式可得到  $LS$  图层。

提取该区的等高线, 建立 DEM 模型, 形成 90 m × 90 m 的单元格 grid 图, 计算出其坡度( $S$ )图层和坡长( $L$ )图层, 根据公式(3)、(4)、(5)求出  $LS$  图层。

3.4 覆被管理因子( $C$ )和水土保持因子( $P$ )<sup>[4]</sup>

Disneyer 和 Foster<sup>[4]</sup>指出, 林区的覆被管理因子( $C$ )与 9 个次级因子有关, 即: (1)裸露土; (2)树冠; (3)土壤固结; (4)高有机质含量; (5)细根; (6)耕作残留物黏合作用; (7)地表沉积; (8)阶梯(由土壤在障碍物前沉积形成)和(9)等高耕作。呼中地区主要以营林为主, 到目前为止, 还没农业耕作, 因此在本研究中不考虑次级因子(6)和(9)。同时, 由于没有相关的资料, 也不考虑次级因子(7)和(8)。所以, 本研究根据前 5

个次级因子确定覆被管理因子( $C$ )。裸露地(以裸露地的百分比来表示)、细根(以土壤表层 3 cm 有密细根块的裸露地占所有裸露地的百分比来表示)对土壤侵蚀的作用可根据表 2 获得<sup>[4]</sup>。本研究中裸露地分别取 5%、10%、20%。根据我们的调查,我们对所有林地的土壤表层 3 cm 有密细根块的裸露地占所有裸露地的百分比取 80%。土壤固结次级因子,主要基于如下考虑:如果停止耕作,那么土壤会随时间固结从而变得越来越不可侵蚀。在 RU SLE 中,土壤侵蚀因子( $K$ )是在长期耕作的情况下获得的,没有考虑土壤固结的作用。Dissmeyer and Foster<sup>[4]</sup>指出,在没有耕作的林区,土壤固结因子应取 0.45。高有机质含量次级因子,主要基于如下考虑:有机质含量越高,土壤越不可侵蚀。但是在 RU SLE 中,在获取土壤侵蚀因子( $K$ ),有机质含量最高只考虑到 4%。在森林长期存在的

地区,土壤的有机质含量往往要高于 4%。因此,Dissmeyer and Foster<sup>[4]</sup>指出,在没有耕作的林区,应加入高有机质含量次级因子,并建议取 0.7。树冠次级因子主要由树高和有树冠遮盖的裸露地占所有裸露地的百分比决定(表 3)<sup>[5]</sup>。在本研究中,有树冠遮盖的裸露地占所有裸露地的百分比用郁闭度来表示。根据呼中 1990 年的森林调查数据,利用每一个树种的年龄和树高的对数回归方程<sup>[10]</sup>在每一个象元上可获得每一个树种的树高和郁闭度,取各树种树高和郁闭度的平均值,由表 3 可得树冠次级因子。

研究区内没有任何的水土保持措施, $P$  值取 1<sup>[1]</sup>。  
根据各次级因子计算结果,求得裸露地百分比分别 5%、10%、20% 时的  $CP$  值图层。

表 2 未耕作的林地中裸露地、细根对土壤侵蚀的作用

裸露土百 分比/%	土壤表层 3 cm 的有密细根块的裸露地占所有裸露地的百分比/%										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.001	0.0012	0.0014	0.0016	0.0018
2	0.008	0.008	0.001	0.0012	0.0014	0.0017	0.002	0.0023	0.0027	0.0031	0.0036
5	0.003	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.011	0.012
10	0.005	0.005	0.006	0.008	0.009	0.011	0.013	0.015	0.017	0.02	0.023
20	0.011	0.012	0.014	0.017	0.02	0.024	0.028	0.033	0.038	0.044	0.05
30	0.017	0.018	0.02	0.025	0.029	0.036	0.042	0.05	0.059	0.068	0.077
40	0.023	0.024	0.027	0.034	0.042	0.049	0.058	0.068	0.079	0.092	0.104
50	0.03	0.032	0.038	0.045	0.054	0.064	0.074	0.088	0.103	0.118	0.135
60	0.037	0.038	0.043	0.055	0.067	0.079	0.092	0.109	0.127	0.147	0.167
70	0.047	0.049	0.054	0.068	0.083	0.098	0.117	0.138	0.161	0.187	0.212
80	0.055	0.058	0.066	0.081	0.098	0.118	0.141	0.164	0.192	0.221	0.252
85	0.066	0.069	0.078	0.095	0.115	0.138	0.165	0.195	0.228	0.264	0.3
90	0.075	0.08	0.089	0.111	0.133	0.157	0.187	0.222	0.26	0.301	0.342
95	0.086	0.09	0.102	0.125	0.155	0.182	0.217	0.255	0.298	0.345	0.392
100	0.099	0.104	0.117	0.144	0.18	0.207	0.248	0.293	0.342	0.396	0.45

表 3 冠层次级因子对照表

冠层高度/m	有树冠遮盖的裸露地百分比/%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.5	1	0.91	0.83	0.74	0.66	0.58	0.49	0.041	0.32	0.24	0.16
1	1	0.93	0.86	0.79	0.72	0.65	0.58	0.51	0.44	0.37	0.3
2	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
4	1	0.97	0.95	0.92	0.9	0.87	0.84	0.82	0.79	0.76	0.74
6	1	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.92	0.9	0.89	0.87	0.85
8	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92
16	1	1	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

4 结果与分析

将上述各因子图层按公式(1)叠加计算,分别得到裸露地为 5%、10%、20% 水土流失结果(图 2、图 3、图 4)。在研究区内裸露土地主要分布在采伐迹地内,所以提取出采伐迹地斑块,计算在 5%、10%、20% 土地裸露情况下的采伐迹地内水土流失量,并生成统计图(图 7)。对研究区的遥感影像进行解译分析,得到研究区内的火烧迹地(图 5)和采伐迹地图(图 6)。

呼中地区总体上森林覆盖都比较好,所以其土壤流失量总体比较少。土地裸露为 10% 时,研究区内的土壤侵蚀量的平均值为 0.449 9 t/(hm<sup>2</sup> · a),最大值为 83.010 5 t/(hm<sup>2</sup> · a),总水土流失量为 427 537.5 t/a,绝大部分地区的水土流失量在 3.5 t/(hm<sup>2</sup> · a) 以下,说明该地区的水土保持的比较

好。研究区内的水土流失十分集中,根据土壤侵蚀图层与 DEM 图层进行比较可以发现在无人类和火烧干扰的情况下坡度较陡处水土流失严重,说明在无人干扰和火烧的情况下  $L S$  因子对水土流失量的影响最大;与采伐迹地图层和火烧迹地图层进行比较可以得到水土流失比较严重的地区绝大部分集中在采伐迹地和火烧迹地,且以火烧迹地为最严重,特别是在坡度较陡的山坡地区,水土流失最严重的部分就集中在这样的地区。这是由于火烧使地表的植被覆盖物全部或大部消失,土壤裸露面积大大增加,从而使得水土流失加剧。再有一小部分的水土流失最严重的地区集中在建立在河边的城镇和农业用地。在采伐迹地的分析中,由图 7 可知当土壤裸露面积增加时,水土流失增加的十分迅速,当裸露面积从 5% 增加到 20% 水土流失的量增加了近 1.5 倍,说明

人类在对森林进行采伐时其不同的采伐方式造成不同的土壤裸露面积,显著影响着水土流失量。

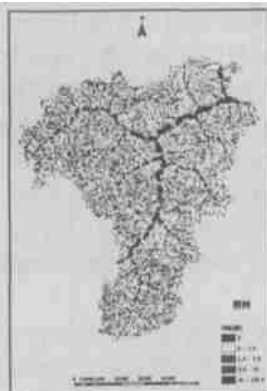


图2 土地裸露5%时水土流失量分布图



图3 土地裸露10%时水土流失量分布图

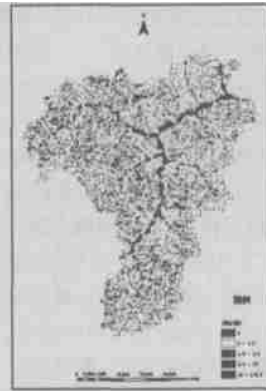


图4 土地裸露20%时水土流失量分布图

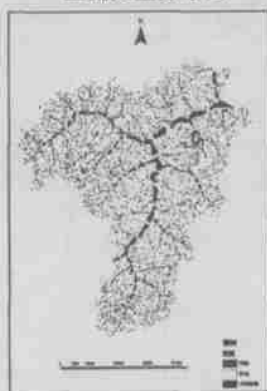


图5 火烧迹地图



图6 采伐迹地图

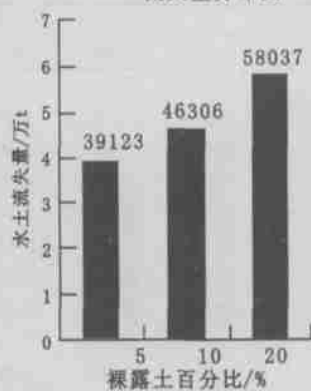


图7 采伐迹地水土流失量与土地裸露关系图

## 5 讨论

结果表明火烧和采伐对水土流失的影响最显著,同时也说明植被覆盖因子对水土流失具有决定性的作用。同时水土流失在坡度陡的采伐地区明显增加,在火烧迹地剧烈上升,这对于森林采伐和管理保护特别是防火工作具有十分重要的指导作用。

RUSLE 在以前的研究工作中主要被应用于农业区域的水土流失的评价,我们首次应用 RU SLE 对林区的土壤侵

蚀进行研究,并且首次利用详细的树冠次级因子和地表覆盖层次级因子来获得  $c$  因子,而前人的研究则主要是通过经验赋值<sup>[2,3,5]</sup>。方程中的各因子的确定方法存在一定的地域性,所以不能十分精确的确定方程中各个因子,因而模型的运行结果存在着很大的不确定性。对树冠层次级因子和地表覆盖层次级因子的确定是由回归模型或生长模型来获得,也存在着一定的不确定性。对各因子精确性的提高和对林区水土流失因子确定方法的进一步研究应是以后研究工作的重点。

## 参考文献

- [1] Renard K G, et al. RUSLE revisited status and the future[J]. Soil and Water Conservation, 1994, 49(3): 213- 220
- [2] 于书霞, 王宁, 朱颜明等. 基于地理信息系统的土壤侵蚀研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 20- 23
- [3] Preben Olsen, Per R. Kristensen. Using a GIS system in mapping risks of nitrate leaching and erosion on the basis of SO L /SO L - N and U SLE simulations[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 50: 307- 311
- [4] Dissmeyer G E, Foster G R. A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land[M]. Technical publication SA - TP- 11. USDA - Forest Service- State and Private Forestry- Southeastern Area, 1980
- [5] Wisheier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning[M]. U. S Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 1978 1- 537
- [6] K M Turnage, et al. Comparison of soil erosion and deposition rates using cesium-137, RUSLE, and buried soil in dolines in East Tennessee[J]. Environmental Geology, 1997, 29(7): 1- 10
- [7] Okan fistikoglu, Nilgun B Hamancioglu. Integration of GIS with U SLE in Assessment of Soil Erosion [J]. Water Resources Management, 2002, (16): 447- 467
- [8] Wallin D O, Swanson F J, Marks B. Landscape pattern response to changes in pattern generation rules-land-use legacies in forestry[J]. Ecological Application, 1994, (4): 569- 580
- [9] 邬伦, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京, 科学出版社, 2001
- [10] 邱扬, 李湛东, 张玉钧, 等. 大兴安岭北部原始林兴安落叶松种群世代结构的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(3): 15- 22