

# 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀预测研究 ——以云南新平大红山铁矿为例<sup>\*</sup>

徐清艳<sup>1</sup>, 周跃<sup>2</sup>

(1. 闽江学院 化学与化学工程系, 福州 350108; 2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650093)

**摘 要:**将地理信息系统 (GIS) 与通用土壤流失方程 (USLE) 相结合对云南新平大红山铁矿进行土壤侵蚀量的预测和估算。结果表明:全区土壤流失面积为 5.54 km<sup>2</sup>, 占矿区总面积的 65.17%, 年土壤流失量为 4.855 万 t。矿区 50 a 之后, 土壤流失面积变化不大, 年流失量下降为 2.736 万 t, 减少了 43.65%。完成土地生物复垦后的土壤流失变化趋势是强度及其以上级别的土壤侵蚀量降低, 中度及其以下的侵蚀量增加。

**关键词:**地理信息系统; 通用土壤流失方程; 土壤侵蚀量; 大红山铁矿

中图分类号: S157.1; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0072-04

## Study on Prediction of Soil Erosion Based on GIS and USLE —Taking Dahongshan Iron Mine at Xinping of Yunnan Province as A Case Study

XU Qing-yan<sup>1</sup>, ZHOU Yue<sup>2</sup>

(1. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Soil loss was predicted and risk areas of soil erosion were identified in Dahongshan Iron Mine at Xinping of Yunnan province by means of combinin geographical information system (GIS) and universal soil loss equation (USLE). The results showed that the area of regional soil erosion was predicted to be 5.54 km<sup>2</sup>, which was 65.17% of the studied area. The annual soil loss is 4.855 × 10<sup>4</sup> t. And the erosion area will not change too much in 50 years, but annual soil loss amount will decline to 2.736 × 10<sup>4</sup> t, at a reducing rate of 43.65%. The change trend of accomplished vegetation rehabilitation is that the erosion loss amount of highly eroded area will reduce. And the erosion loss amount of low-grade erosion area will increase.

**Key words:** geographical information system; universal soil loss equation; soil erosion; Dahongshan Iron Mine

矿业是云南经济发展的五大支柱产业之一<sup>[1]</sup>。但是矿业开发也导致了土地资源破坏、环境污染等问题,特别是工矿区造成的水土流失和生态环境破坏更为严重。目前,云南矿区土壤侵蚀和水土保持的实验研究资料比较缺乏,很难科学客观地评价和开展矿区水土保持规划设计。20 世纪 80 年代以来, GIS 开始被引入与通用土壤流失方程 (USLE) 结合进行流域土壤侵蚀量的预测和估算。90 年代初至今,二者的集成被广泛地应用于土壤侵蚀的风险评价、关键源区的识别、不同水土保持方案的模拟评价以及进行流域的管理规划等<sup>[1]</sup>。相对于传统的集中式方法进行土壤侵蚀量预测,这种分布式方法

由于运用 GIS 的栅格数据分析功能,可预测出每个栅格的土壤侵蚀量,便于找出较为严重的土壤侵蚀区,从而针对性地提出最佳管理措施 (BMPs),有效地提高了土壤侵蚀量的预测效率和结果的显示度<sup>[2]</sup>。基于此,以大红山铁矿为研究区域,选取合适的因子算法,定量确定了土壤侵蚀因子指标。在 Arc/Info 的支持下,建立了矿区空间数据库,根据土壤侵蚀预测模型对数据库进行图形运算,实现了对矿区土壤侵蚀量的预测和土壤侵蚀强度的分等定级,标识出矿区土壤侵蚀的关键源区,并模拟了土壤侵蚀的控制措施,为开展矿区水土保持工作提供科学依据。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-01-01

基金项目: 云南省自然科学基金 (2002D0017M)

作者简介: 徐清艳 (1977 - ), 女, 福建建瓯人, 硕士, 讲师, 研究方向为水处理及生态环境研究。E-mail: qingyanx3298@126.com

## 1 研究区概况

大红山铁矿位于云南省玉溪市新平县嘎洒镇境内,地理坐标东经 101°39' - 101°42', 北纬 24°06' - 24°10'。矿区紧靠哀牢山东侧的嘎洒江东岸,属侵蚀成因的中低山地貌,有多级剥夷面,一般山坡 30°~40°,山顶和附近阶梯状缓坡 5°~20°。矿区年降雨量 700~1 200 mm,大约 75% 的降雨集中在 5~10 月间的雨季,多阵雨、暴雨。海拔范围 600~1 850 m,中低海拔地带有燥红土、赤红壤,中高海拔有黄壤。海拔 800 m 以下河谷属于热河谷植被,多为低矮灌木草丛覆盖;800~1 100 m 多为灌木和稀疏乔木群落,高海拔地区植被较好。

大红山铁矿采用地下坑道开采和无底柱分段崩落工艺,除了在废石场、坑口作业区和矿区道路沿线以外,开发中前期造成的土壤流失并不严重,但是随地下开采范围的扩大,在中后期主矿体将陷落 116 万 m<sup>3</sup>,地面将会出现较大范围的塌陷,出现占地面积较大的基建、南部和小庙沟 3 个废石场。

## 2 数据采集作业

### 2.1 相关资料的收集与预处理

主要收集有关 RS 数据和非 RS 数据如土壤资料、降雨资料、土地利用资料、地形图、地质图等,依据建模需要对有关图件进行扫描,为下一步建立数据库和制作 DEM 做准备。

### 2.2 建立水土流失地理数据库

对扫描图件按一定精度在 Arcview 上进行数字化,经 Arc/Info 中编辑无误建立拓扑关系后,进行坐标变换和投影变换,并进行矢量到栅格的转换,提取各专题图层,同时完成属性数据的输入。在通过唯一标识码实现图形库和属性库的连接,并对研究区不同图幅进行接边处理,之后在 Arc/Info 中建立 1:2000 的水土流失信息空间数据库(包含图形数据库和属性数据库),将项目区内各项资源和环境信息按空间分布进行存储管理,实现数据查询、检索、处理、分析和制图功能。

### 2.3 制作 DEM

在地形图上数字化各幅等高线图层,经编辑无误后,建立拓扑,并进行投影、坐标变换及接边处理,然后给每一条等高线赋值,提取等高线专题图。在 Arcview 中运行 Surface 子模块,生成 TIN 模型,然后输出栅格 DEM。

### 2.4 水土流失监测模型的建立

在现有数据库的基础上,依据各因子算式及编制方法,完成研究区各因子像元图的编制。这其中

利用土壤类型图、土地利用图、DEM、TM 影像等空间信息进行矢量栅格化,空间叠加和数据提取及处理。运行所建模型,获取土壤侵蚀各因子像元图和定量遥感结果图件,完成对项目区 2004 年土壤可蚀性  $K$  值图、降雨侵蚀力因子  $R$  值图、地形因子  $LS$  值图、植被和保土因子  $CP$  因子图、土壤侵蚀量图,大红山矿区水土流失现状图,并在 Arcview 及 Arc/Info 软件中运行相关子系统进行有关土壤侵蚀面积和流失量等相应统计、计算和属性查询。

## 3 因子图件的 GIS 生成

研究采用 Wischmeier 于 20 世纪 50 年代提出的通用土壤流失方程(USLE)<sup>[3]</sup>,表达式为:  $A = R \cdot K \cdot LS \cdot CP$ ,式中:  $A$ ——年土壤流失量;  $R$ ——降雨侵蚀因子;  $K$ ——土壤可蚀性因子;  $LS$ ——坡度坡长因子;  $C$ ——作物覆盖因子;  $P$ ——水土保持因子。

### 3.1 降雨侵蚀因子 $R$ 值的估算

降雨侵蚀因子  $R$  是一项客观评价由降雨引起土壤分离和搬运的动力指标。本研究  $R$  值计算采用联合国粮农组织推荐的公式<sup>[4]</sup>如式(1)。

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[1.51g(P_i^2/P) - 0.8188]} \quad (1)$$

式中:  $P_i$ ——第  $i$  月的平均降雨量(mm);  $P$ ——全年或多年平均降雨量(mm);  $i = 1, 2, \dots, 12$ 。  $P_i$  和  $P$  来自 2004 年实测值和新平县气象站的降雨资料。本研究根据植被分布的规律来划分降水量,采用式(1)进行运算,然后按内插法和等值线法进行插值,得出降水侵蚀力  $R$  因子图。

### 3.2 土壤可蚀性因子 $K$ 值的估算

土壤可蚀性因子  $K$  值,是一项评价土壤降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的指标。影响  $K$  因子的有多方面的因素,它与土壤有机质含量、机械组成、渗透性、土壤结构有关。一般说来,质地越粗或越细的土壤有较低  $K$  值,而质地适中的反而有较高的  $K$  值。在本研究中,  $K$  因子由诺模方程式来确定<sup>[5]</sup>。当粉砂百分数不大于 70%,其方程式如式(2)。

$$K = 2.1 M^{1.14} (10^{-4}) (12 - a) + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3) / 100 \quad (2)$$

式中:  $M$ ——粉砂和极细砂的含量(%);  $a$ ——土壤有机质含量(%);  $b$ ——土壤结构编号;  $c$ ——土壤剖面渗透等级。以代表性土壤的实测  $K$  值为基础,并结合诺模方程式即可计算出  $K$  值。

### 3.3 坡度坡长因子 $LS$ 的估算

坡度坡长因子  $LS$  综合反映了坡长和坡度对土壤侵蚀的影响。土壤侵蚀量一般随着坡长和坡度的增大

而增大,用复合因子  $LS$  来反映这两者与侵蚀量的关系。大红山矿区坡度比较大,本研究采用付素华等的研究成果<sup>[6]</sup>,坡度坡长因子  $LS$  由式(3) - (6)计算。

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad \theta < 5^\circ \quad (3)$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \quad 5^\circ < \theta < 10^\circ \quad (4)$$

$$S = 21.9 \sin \theta - 0.96 \quad \theta > 10^\circ \quad (5)$$

$$L = (D/22.3 \cos \theta)^m$$

式中:  $\theta$ ——坡度( $^\circ$ );  $\sin \theta$ ——百分比坡度(%);  $D$ ——坡长; $m$ ——依赖于  $\theta$  的参数:若  $\theta < 1^\circ$ ,则  $m=0.2$ ;  $1^\circ < \theta < 3^\circ$ ,则  $m=0.3$ ;  $3^\circ < \theta < 5^\circ$ ,则  $m=0.4$ ;  $\theta > 5^\circ$ ,则  $m=0.5$ 。

由等高线建立  $Tin$ ,再转成栅格形式,然后转成百分比坡度图,进而编制  $S$  和  $L$  因子图。前者按  $< 9^\circ$  和  $9^\circ$  进行图层提取;后者按坡度  $< 1^\circ$ ;  $1^\circ < \theta < 3^\circ$ ;  $3^\circ < \theta < 5^\circ$ ;  $\theta > 5^\circ$  进行图层提取。将提取后的图层按上面公式分别进行运算叠加后即可获得  $S$  和  $L$  因子栅格图。将  $L$  因子图和  $S$  因子图相乘即可得到坡度坡长  $LS$  图。

### 3.4 植被覆盖因子 $CP$ 值的估算

作物覆盖因子  $C$  是指在特定条件下种植农作物土地上的土壤流失量与休闲土地上相应的土壤流失量之比。 $C$  值的大小很大程度上依赖于作物生长的不同阶段以及降雨期间的植被覆盖度,虽然  $C$  值小于或等于 1,但相对变化范围却是诸因子中最大的。根据马超飞等的研究<sup>[7]</sup>, $C$  因子算式如式(6)。

$$C = 0.6508 - 0.3406 \lg c \quad (6)$$

式中: $c$ ——年平均植被覆盖度(%)。根据 Wischmeier 等的实际观测, $C$  因子除与地表覆盖率有关外,还与植被冠层类型、高度等有关,也就是说与土地利用类型有关<sup>[3]</sup>,因此  $C$  因子的取值须参考土地利用类型。在通过遥感数据获取的地表覆盖率的基础上,结合实地调查考虑土地利用方式,并参考王万忠和焦菊英对中国土壤侵蚀因子的确定方法<sup>[8]</sup>来率定  $C$  值。另外,通过对卫星影像的监督分类解译,获取了土地利用现状图。同样基于王万忠和焦菊英对中国土壤侵蚀因子的确定方法<sup>[8]</sup>,利用土地利用现状图,率定出不同土地利用方式的  $P$  值。将土地利用图与  $C$  值和  $P$  值属性库文件记录项建立连接,再分别将  $C$  值和  $P$  值赋给土地利用图,并进行叠加得到  $CP$  值图层。

### 3.5 土壤侵蚀量的计算

在 Arc/Info 支持下,将各因子图(Grid 数据)进行连乘,得到像元土壤侵蚀量图,其单位是英制( $\text{sht/ac} \cdot \text{a}$ ),需进行单位转换。乘以 224.2 转换为  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的公制单位,得像元土壤流失量图。

## 4 结果与分析

### 4.1 矿区土壤流失量现状预测

根据水利部颁布的侵蚀强度标准确定土壤侵蚀分级<sup>[9]</sup>,得出矿区不同强度等级的土壤侵蚀量(见表 1)。结果表明:大红山矿区土壤侵蚀现状比较严峻。全区土壤流失面积为  $5.54 \text{ km}^2$ ,土壤流失量为 4.855 万 t。微度侵蚀占土壤流失面积的 34.93%。微度侵蚀主要分布在  $0 \sim 5^\circ$  的缓坡上,轻度侵蚀主要分布在  $8^\circ \sim 15^\circ$  的坡上,中度侵蚀比较普遍,各种坡度都有。极强度侵蚀和剧烈侵蚀主要分布在  $> 35^\circ$  的陡坡上。地表植被覆盖度大的地方,即使在陡坡,发生的侵蚀也较弱;反之,在地表植被覆盖度小的地方,即使坡度小,土壤流失量也较大。因此,增加水土保持的重点应在植被覆盖较差的陡坡地及开垦的荒坡上,增加植被覆盖度对减少矿区水土流失有重大意义。

### 4.2 50 a 后的矿区土壤流失量预测

矿区开采后期,塌陷将引起地形、地貌以及地表自然因素如坡长、坡度、植被覆盖等变化,这是矿区水土流失与农耕区水土流失最大的不同点之一。由于大红山铁矿规划是 50 a 的服务期限,所以使用终了后主要变化有:坑采塌陷区的出现,南部、基建和小庙沟三个废石场的形成及矿区土地复垦计划的实施,这些变化将引起侵蚀因子的改变。根据矿区开采规划和矿区土地复垦方案,并假定这些规划和方案要求的目标完全实现,塌陷区和 3 个废石场的地形条件将被改造成确定面积和确定坡度的陡坡、缓坡和平地 3 种地形。

由于塌陷区和 3 个废石场的总面积以及它们 50 a 后完成复垦时的坡度分布、各个坡度的面积已经在矿区开采规划和复垦方案中给出了,矿山其他地段的植被、坡度、面积没有变化,我们可以采用前面  $LS$  和  $CP$  值的确定方法计算形成包括塌陷区、废石场以及无变化地段的新的  $LS$  和  $CP$  值图层。如果假定矿区  $K$ 、 $R$  值 50 a 后不变,则可以计算出 50 a 后矿区的土壤侵蚀量(表 1)。

结果表明:矿区 50 a 之后土壤流失面积变化不大,只减少了 3.30%,而流失总量下降为 2.736 万 t,减少土壤流失量 2.119 万 t(表 1)。微度侵蚀面积上升为  $3.25 \text{ km}^2$ ,占流失总面积的 38.22%,上升了 3.29%。完成土地生物复垦后土壤流失的总趋势是:强度、极强度和剧烈侵蚀级别的土壤侵蚀量降低了,尤其是剧烈侵蚀量下降了 82.98%,微度和轻度侵蚀增加了(图 1,图 2)。但总侵蚀状况有较大程度的改善,土壤侵蚀总量比现状减少了 43.65%。

表 1 矿区土壤侵蚀量现状与重建植被后的土壤侵蚀量对照

侵蚀模数范围/ ( $t \cdot km^{-2}$ )	流失级别	土壤流失量/ 万 t (现状/ 重建后)	流失面积/ $km^2$ (现状/ 重建后)	流失面积占总面积的比例/ % (现状/ 重建后)	重建后流失量 的变化/ %
< 500	微度侵蚀	0.0351/ 0.0498	2.97/ 3.25	34.93/ 38.22	增加 41.88
500 ~ 2500	轻度侵蚀	0.233/ 0.287	1.33/ 1.66	15.60/ 19.51	增加 23.18
2500 ~ 5000	中度侵蚀	0.617/ 0.623	1.70/ 1.73	19.99/ 20.39	增加 0.97
5000 ~ 8000	强度侵蚀	0.627/ 0.577	0.99/ 0.92	11.70/ 10.78	减少 7.97
8000 ~ 15000	极强度侵蚀	0.938/ 0.790	0.87/ 0.74	10.18/ 8.67	减少 15.78
> 15000	剧烈侵蚀	2.402/ 0.409	0.65/ 0.21	7.60/ 4.56	减少 82.98
合计		4.855/ 2.736	5.54/ 5.26	65.17/ 61.88	减少 43.65

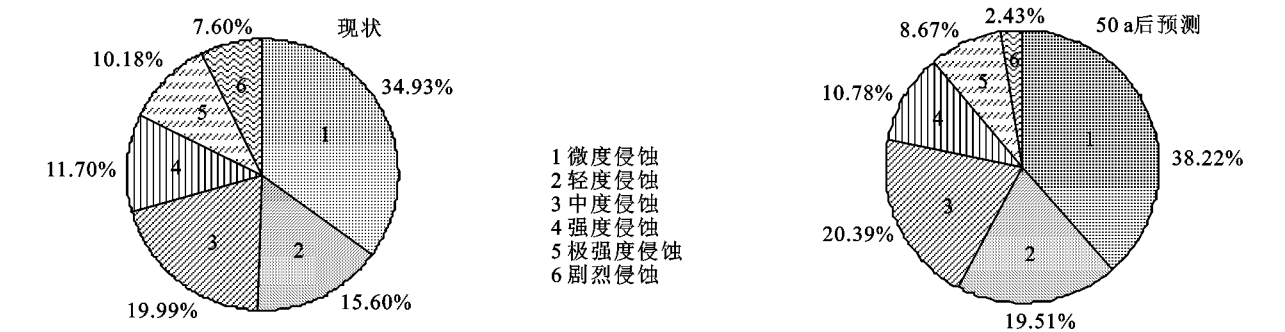


图 1 红山铁矿水土流失现状和 50 a 后预测的大红山铁矿土壤侵蚀变化情况

5 结 语

研究利用 GIS 强大的空间数据管理能力,进行 USLE 方程各因子参数的输入和运算,并且利用 GIS 的栅格数据内插方法,实现对大红山铁矿区土壤侵蚀量的初步预测,提高了土壤侵蚀量的预测效率,也加强了结果的显示度。目前的预测模型和侵蚀因子的算式算法多是借鉴我们原有的技术和国内外相关的方法与成果来确定的<sup>[10-14]</sup>,虽然对水土流失的预测结果与矿区所在乡镇水土流失普查结果相差不大,但其使用效果仍然不能满足水土保持规划设计的需要。在以后的工作中,还应根据矿区水土流失实测结果,进行校准、改进各因子的算式算法,作进一步的补充与完善以突出矿区特色。另外,由于本研究只是根据矿区土地复垦和铁矿开采规划,并假定  $K$ 、 $R$  值不变,来预测重建植被 50 a 后的土壤流失量。今后对矿区未来的土壤侵蚀预测应更深入了解矿区土壤、地形、覆被等影响因素的变化,加强对未来各侵蚀因子变化的定量分析,以提高预测的可靠性和准确性。

参考文献:

[1] Walsh S J. Geographic information system for natural resource management[J]. Soil and water conservation, 1985, 40:202-205.

[2] Christopher Cox, Chandra M. Application of geographic information systems in watershed management planning in St. Lucia[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 1999, 20:229-250.

[3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses[R]. USDA Agriculture Handbook:US Department of Agriculture, 1978:537.

[4] Renard K G, Foster G R, Yoder D C, et al. RUSLE Revisited:status, questions, answers and the future[J]. Soil and Water Conservation, 1994, 49(3):213-220.

[5] 谢应齐,杨子生. 云南省农业自然灾害区划[M]. 北京:中国农业出版社, 1995:170-205.

[6] 符素华,张卫国,刘宝元,等. 北京山区小流域土壤侵蚀模型[J]. 水土保持研究, 2002, 21(4):114-120.

[7] 马超飞,马建文,布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4):6-9.

[8] 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):119-123.

[9] 中华人民共和国水利部标准. 水土保持实验规范 SD239-97[S]. 北京:水利电力出版社, 1986.

[10] 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.

[11] 卜兆宏,孙金庄,唐永红. 水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(3):235-244.

[12] 周跃,万晔,汪竹清,等. 对研制云南山地水土流失动态监测系统的初步尝试[J]. 山地学报, 2003, 20(4):480-484.

[13] 周跃,杨永红,汪竹清. 云南滇中丘陵区水土流失动态监测和防治决策系统研究[J]. 昆明理工大学学报, 2002, 27(2):111-114.

[14] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. 应用 USLE 和地理信息系统 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.