

# 基于 GIS 和 RS 的辽西地区土壤侵蚀的定量研究<sup>\*</sup>

董婷婷<sup>1,2</sup>, 张增祥<sup>1</sup>, 左利君<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 土壤侵蚀是土地退化的根本原因, 也是导致生态环境恶化的重要因素。以辽西地区作为研究对象, 利用修正的土壤流失方程(RUSLE)计算了辽西地区的土壤侵蚀量, 对土壤侵蚀强度进行了分级, 同时对不同的土壤侵蚀强度在数量上、空间分布及与土地利用方式的相关性上进行了分析。结果表明: 辽西地区的土壤侵蚀强度等级以轻度为主, 强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀均有发生, 但所占百分比不大; 朝阳市是辽西地区土壤侵蚀最严重的地区, 葫芦岛市次之, 锦州市和阜新市土壤侵蚀状况一般; 辽西地区的微度、轻度、中度侵蚀主要分布在旱地上, 强度、极强度和剧烈侵蚀主要分布在中覆盖度的草地、有林地和疏林地上; 增加林地、草地的覆盖度, 减少坡耕地的分布是减少辽西地区土壤侵蚀的主要措施。

**关键词:** 土壤侵蚀; 通用土壤流失方程; 地理信息系统

中图分类号: S157. 1; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005 3409(2008)04 0048-05

## Quantitative Study of Soil Erosion in West of Liaoning Province Based on GIS and RS

DONG Tingting<sup>1,2</sup>, ZHANG Zeng-xiang<sup>1</sup>, ZUO Li-jun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Soil erosion is the basic reason of land degradation. It is also the important factor resulting in ecological environment deterioration. This paper select s the west of Liaoning province as the research object. It uses revised universal soil loss equation to calculate soil erosion and classify soil erosion intensity. It also analyzes soil erosion quant ity, spatial distribution and the relation with land use. Results show that low-level is the main soil erosion level. Highr level, ultrã highr level and acute also happen, but their percentages are relative low. Chaoyang city is the most serious city in west of Liaoning province, Huludao city is the second. Jinzhou city and Fuxin city are common. The slight, low-level and mediunr level soil erosion distribute mainly in arid land. Highr level, ultrã highr level and acute soil erosion mainly distribute in medium covered meadow, forest land and sparse forest land. Increasing vegetation coverage of forest land and meadow and decreasing the distribution of sloping land are the primary measures in controlling soil erosion.

**Key words:** soil erosion; revised universal soil loss equation (RUSLE); geographic information system (GIS)

土壤侵蚀是土地退化的根本原因, 也是导致生态环境恶化的重要因素<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀已成为全球性的公害, 严重地威胁着人类的生存和发展。我国是世界上土壤侵蚀最为严重的国家之一, 根据水利部第二次遥感普查结果, 我国现有土壤侵蚀面积  $3.67 \times 10^9 \text{ km}^2$ , 占国土总面积的 38.2%<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀已成为制约我国经济和社会可持续发展的突出问题之一。早在 19 世纪国内外学者就开始对土壤侵蚀进行研究, 到目前为止, 定量化研究土壤侵蚀的模型主要有基于经验的模型和基于理论的模型两种。前者主要包括 USLE 和 RUSLE<sup>[3-4]</sup>, 后者主要包括 WEPP, ANSWERS, LISE。基于经验的模型主要

从侵蚀因子的角度, 研究土壤侵蚀量与降雨、地形、植被、土壤、水土保持措施等因子之间的关系, 公式简单, 计算方便。随着 GIS 和 RS 技术的迅猛发展, 基于经验的模型广泛应用于区域范围内土壤侵蚀的定量研究。如: 杨娟<sup>[5]</sup>利用 USLE 对卧龙地区的土壤侵蚀进行了预报, 黄金良<sup>[6]</sup>利用 ULSE 对九龙江流域的土壤侵蚀量进行了预测, 何兴元<sup>[7]</sup>利用 RUSLE 对岷江上游土壤侵蚀的动态变化进行了研究。

辽西地区在历史上曾经是植被茂盛生态环境良好的地区, 随着人口的快速增加, 人们砍伐森林, 过度放牧, 在陡坡上开垦耕地, 到处开矿, 这些行为在一定程度上加大了土壤侵蚀

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007 10 09

基金项目: 国家 973 项目(2002CB412507)

作者简介: 董婷婷(1980-), 女, 辽宁沈阳人, 在读博士, 主要从事国土资源遥感研究。E-mail: dongtingting8074@163.com

通信作者: 张增祥(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事国土资源与环境领域的遥感应用研究。E-mail: zx\_zhang@263.net

的发生和发展。在短短几十年内, 辽西地区生态环境急剧恶化, 这些制约了辽西地区经济的发展, 因此, 及时掌握辽西地区土壤侵蚀的状况对于生态环境治理具有指导性的意义。

1 研究区概况

辽西地区即辽宁省的西部地区, 位于东经 118. 84° - 122. 97°, 北纬 39. 99° - 42. 84°, 在行政区上包括阜新市、朝阳市、葫芦岛市和锦州市, 陆地面积约 5× 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 占辽宁省总面积的 34. 82%。辽西地区属于大陆性季风气候, 年平均温度 7. 9℃, 年平均降雨量 400~ 600 mm, 年平均蒸发量 1 800~ 2 100 mm。各年降雨分布不均匀, 常形成周期性旱年。地形地势复杂多变, 地形上以丘陵、山地为主, 约占总面积的 70%, 地势由西北向东南递减。土壤以褐土为主, 有机质含量低, 保水保肥能力差, 土壤贫瘠。植被以油松为主, 由于植被破坏严重, 天然林存量很少, 多以人工林和天然次生林为主。辽西地区地处北方农牧交错带, 在土地利用方式

上, 西北部以农牧业为主, 东南部以农业为主。

2 研究方法

通用土壤流失方程(USLE)是 1965 年美国科学家 W. Wischmeier 和 D. Smith 对美国东部地区 30 个州的 1 000 个径流小区近 30 a 的观测资料进行系统分析后提出的, 该模型结构简单, 物理意义明确, 并在许多地区成功应用, 但是 USLE 模型是在美国国情的基础上得出的, 这样就降低了它的普适性。1992 年 Rernard 等在全面考虑了各个影响因子的基础上, 提出了修正的土壤流失方程(RUSLE)。本研究采用 RUSLE 模型来计算辽西地区的土壤侵蚀量。

$$A = RKLSCP \tag{1}$$

式中:  $A$ ——土壤侵蚀量(t/hm<sup>2</sup>·a);  $R$ ——降雨侵蚀力因子;  $K$ ——土壤侵蚀性因子;  $L$ ——坡长因子;  $S$ ——坡度因子;  $C$ ——植被覆盖因子;  $P$ ——水土保持措施因子。土壤侵蚀量计算的技术路线如图 1 所示:

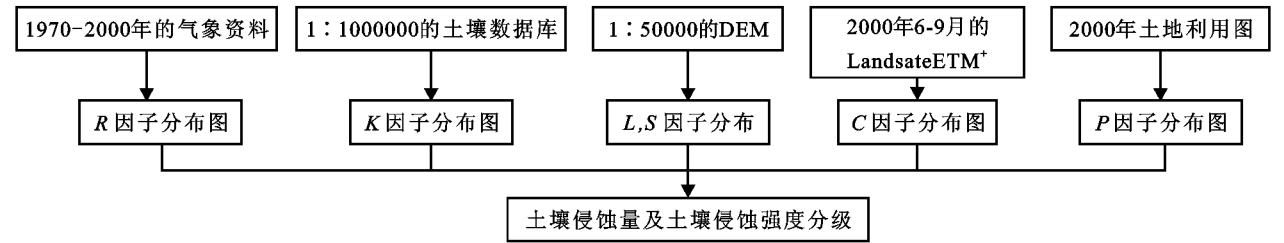


图 1 计算土壤侵蚀的技术路线

2.1 降雨侵蚀力因子

降雨侵蚀力因子  $R$  是一项评价降雨引起土壤侵蚀潜在能力的指标, 反映了气候因素对土壤侵蚀的作用。  $R$  因子的值多难以直接测定, 大多用降雨参数来估算。常用的算法有经典算法和简易算法两种。经典算法需要提供详尽的降雨时序雨量和雨强, 而这些资料通常难以获得。本研究采用 Arnoldus 提出的简便算法, 采用月降水和年降水资料来修订 Fouriner 指数(MFI), 然后利用一个普遍使用的  $R$  因子方程来计算  $R$  值, 其公式为

$$F = \sum_{i=1}^{12} j_i^2 / J \tag{2}$$

式中:  $j_i$ ——月降水;  $J$ ——年降水;  $i$ ——月份。  $R$  与  $F$  的关系如式(3):

$$R = 4.17F - 152 \tag{3}$$

$R$  值见表 1, 将  $R$  因子按行政区赋值生成栅格图。

2.2 土壤可蚀性因子

土壤可蚀性因子  $K$  是一项评价土壤在降雨侵蚀力作用下发生分离、冲蚀和搬运难易程度的指标, 反映了土壤的性质。其测定方法主要有: 土壤理化性质测定法、仪器测定法、小区测定法、数学模型法、图解法和水动力学模型试验求解法。本研究采用 Wischmeier 等利用粉粒+ 极细砂粒含量、砂粒含量、有机质含量、结构和入渗 5 项指标与土壤可蚀性因子做出的土壤可蚀性诺谟图法<sup>[8]</sup>, 其公式为

$$K = [2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - OM) + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)] / 100 \tag{4}$$

式中:  $M$ ——(粉沙+ 极细沙)% 与 (100- 黏粒%) 之积;

$OM$ ——土壤有机质含量;  $S$ ——土壤的结构指数;  $P$ ——土壤的渗透性等级。

研究区的  $K$  值见表 2, 将  $K$  因子按土壤类型赋值生成栅格图。

表 1 研究区降雨侵蚀力因子  $R$  值

行政区		$R$	行政区		$R$
阜新市	彰武县	230. 32	锦州市	义县	258. 29
	阜新市	221. 71		黑山县	278. 28
	建平县	178. 30		锦州市	287. 12
朝阳市	北票市	208. 63	葫芦岛市	建昌	273. 35
	朝阳市	244. 20		葫芦岛市	315. 41
	凌源市	193. 22		绥中	334. 09
喀左县		221. 89	兴城市		305. 44

2.3 地形因子

地形对土壤侵蚀的影响包括坡度和坡长两个因子, 坡度的计算公式为

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta \leq 9^\circ \\ S = 16.8 \sin \theta - 0.50 & \theta > 9^\circ \end{cases} \tag{5}$$

式中:  $\theta$ ——坡度。

坡长的计算公式为

$$L = (N / 72.6)^m \tag{6}$$

其中,  $M = \beta / 1 + \beta$ ,  $\beta = \frac{(\sin \theta / 0.0896)}{[3(\sin \theta)^{0.8} + 0.56]}$  利用 1: 50 000 的 DEM 在 erdas 软件下提取坡度因子  $S$ , 然后按照上面的公式计算坡长因子  $L$ , 最后将坡度因子与坡长因子相乘得到地形

因子。

表 2 研究区土壤可蚀性因子  $K$

土壤类型	$K$	土壤类型	$K$	土壤类型	$K$
棕壤	0.48	草原风沙土	0.74	碱化潮土	0.51
潮棕壤	0.50	草甸风沙土	0.59	腐泥沼泽土	0.31
棕壤性土	0.52	石质土	0.60	草甸沼泽土	0.23
褐土	0.49	中性石质土	0.66	草甸盐土	0.11
石灰性褐土	0.60	钙质石质土	0.60	滨海盐土	0.53
淋溶褐土	0.51	粗骨土	0.68	滨海沼泽盐土	0.42
潮褐土	0.47	钙质粗骨土	0.65	滨海潮滩盐土	0.34
褐土性土	0.53	草甸土	0.48	水稻土	0.34
淡栗褐土	0.67	石灰性草甸土	0.49	淹育水稻土	0.49
红黏土	0.41	盐化草甸土	0.49	潜育水稻土	0.57
积钙红黏土	0.36	潮土	0.56	盐渍水稻土	0.35
冲积土	0.52	盐化潮土	0.53		

2.4 植被覆盖因子

植被覆盖因子  $C$  定义为一定条件下有植被覆盖或实施田间管理的土壤流失量与同等条件下清耕休闲地上的土壤流失量之比,是土壤侵蚀的抑制因子,起着水土保持的作用<sup>[9]</sup>。它与植被的覆盖度和土地利用类型密切相关,而遥感技术在大范围内监测植被覆盖度与土地利用类型上有着其它技术不可替代的优势。本研究中作物覆盖因子采用蔡崇法<sup>[10]</sup>提出的植被覆盖度与  $C$  因子的方程,该方法简单,含义明确,适合通过遥感手段在大范围内应用,其方程为

$$\begin{cases} C=1 & c=0 \\ C=0.6508-0.34361\times\lg c & 0<c\leq 78.3\% \\ C=0 & c>78.3\% \end{cases} \quad (7)$$

式中: $c$ ——植被覆盖度。

辽西地区的植被生长季大致为 4~10 月,其中 6~9 月为植被生长最茂盛的季节即此时植被的覆盖度最大。本研究利用 2000 年 6~9 月的 Landsat ETM+ 影像,在 ERDAS 软件下提取各期影像的 NDVI 值,然后提取研究区各个像元对应的最大的 NDVI 值(植被覆盖度的最大值对应得像元),最后利用 NDVI 值计算植被覆盖度,公式为: $f_g = \frac{NDVI-NDVI_0}{NDVI_g-NDVI_0}$  式中: $NDVI_0$ ——裸土或无植被覆盖的像元的 NDVI 值; $NDVI_g$ ——完全被植被覆盖的像元的 NDVI 值;其中  $NDVI = \frac{band4-band3}{band4+band3}$

2.5 水土保持措施因子

水土保持措施因子  $P$  定义为采用专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量之比。 $P$  取值在 0~1 之间,0 表示水土保持措施得当的地区,基本没有土壤侵蚀发生;1 表示未采取任何水土保持措施的地区。通常的水土保持措施包括:等高耕作,等高带状种植和修梯田等。凡修水平梯田的地区  $P$  为 0.01。本研究区中,坡耕地多修梯田,而其他土地利用类型几乎没有采取任何水土保持措施,其  $P$  值为 1。将  $P$  值以土地利用类型为单元赋值生成  $P$  值栅格图。

2.6 土壤侵蚀量的计算

将生成的降雨侵蚀力因子图、土壤可蚀性因子图、地形因子图、植被覆盖因子图、水土保持措施因子图以地形因子图为基础,重采样为 25 m×25 m,最后在 erdas 下将这几个因子相乘得到研究区的土壤侵蚀量分布图,按照土壤侵蚀强度分级标准将研究区土壤侵蚀强度进行分级。结果如图 2。

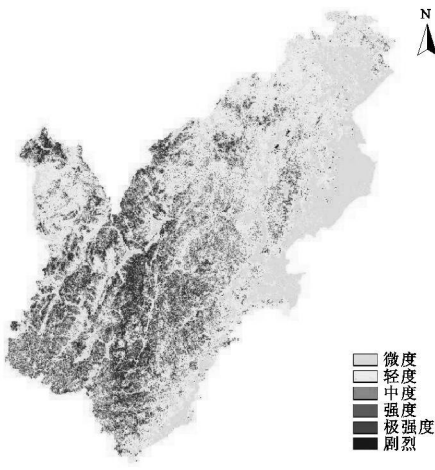


图 2 土壤侵蚀强度等级图

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀强度等级的数量分析

表 3 不同土壤侵蚀强度等级的面积

土壤侵蚀强度等级	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
微度	1.18×10 <sup>4</sup>	23.38
轻度	2.46×10 <sup>4</sup>	48.92
中度	9.2×10 <sup>3</sup>	18.31
强度	3.51×10 <sup>3</sup>	6.98
极强度	1.14×10 <sup>3</sup>	2.27
剧烈	69.83	0.14

将生成的土壤侵蚀强度等级图按照各个等级包括的栅格数量乘以每个栅格面积计算出各个等级的土壤侵蚀面积见表 3,由表 3 可知辽西地区的土壤侵蚀强度等级以轻度为主,占辽西地区总面积的 48.92%。微度侵蚀次之,占总面积的 23.38%。中度侵蚀第三,占总面积的 18.31%,与微度侵蚀所占的百分比接近。强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀均有发生,但所占百分比不大。

3.2 土壤侵蚀强度等级的空间分布

将辽西地区的城市边界图与土壤侵蚀强度等级图叠加,得到土壤侵蚀强度等级在辽西各市的分布情况见表 4,由表 4 可知,微度侵蚀主要发生在锦州市,阜新市次之。轻度侵蚀主要发生在朝阳市,阜新市次之。中度侵蚀主要发生在朝阳市,葫芦岛市次之。强度侵蚀主要发生在朝阳市,葫芦岛市次之。极强度侵蚀主要发生在朝阳市,葫芦岛市次之。剧烈侵蚀主要发生在朝阳市,葫芦岛市次之。由此可得出朝阳市是辽西地区土壤侵蚀最严重的地区,除微度侵蚀外,在其它各等级中所占的比例均最大。葫芦岛市在中度侵蚀、强度、极强度和剧烈侵蚀等级中所占的比例仅次于朝阳市,也

是土壤侵蚀比较严重的地区。相对而言锦州市和阜新市土壤侵蚀状况一般。

3.3 土壤侵蚀强度与土地利用的相关分析

产生土壤侵蚀的原因有自然原因和人为原因,在辽西地区自然原因包括:雨量、雨强、坡度、土壤性质等。人为原因

主要是不合理的土地利用造成地表植被破坏引发的土壤侵蚀。自然原因很难改变,而人为原因却可以通过适当调整土地利用结构达到抑制土壤侵蚀发生发展的目的。本研究将土壤侵蚀强度等级图与土地利用图进行叠加分析土壤侵蚀强度与土地利用方式的关系,见表 5。

表 4 不同土壤侵蚀强度等级的空间分布

强度等级	锦州市		葫芦岛市		阜新市		朝阳市	
	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	百分比/ %
微 度	4998.19	42.52	1526.25	12.98	3188.22	27.12	2042.66	17.38
轻 度	3855.39	15.68	4567.81	18.58	6279.60	25.53	9885.89	40.21
中 度	881.82	9.58	2595.40	28.20	710.78	7.72	5016.92	54.50
强 度	163.90	4.67	1172.31	33.44	150.77	4.30	2018.93	57.59
极强度	30.77	2.70	390.26	34.20	44.65	3.91	675.31	59.19
剧 烈	3.6725	5.26	20.95	30.01	7.2706	10.42	37.91	54.31

表 5 土地利用类型在土壤侵蚀强度等级上的分布

强度面积 土地利用类型	微 度		轻 度		中 度		强 度		极强度		剧 烈	
	面积	百分比	面积	百分比	面积	百分比	面积	百分比	面积	百分比	面积	百分比
	/ km <sup>2</sup>	/ %	/ km <sup>2</sup>	/ %	/ km <sup>2</sup>	/ %	/ km <sup>2</sup>	/ %	/ km <sup>2</sup>	/ %	/ km <sup>2</sup>	/ %
11	705.83	6.00	188.48	0.77	5.58	0.06	1.42	0.04	0.61	0.05	0.12	0.17
12	7562.19	64.33	13631.85	55.43	2454.61	26.66	562.87	16.05	116.33	10.19	6.43	9.21
21	696.70	5.93	2740.74	11.15	1794.16	19.49	691.94	19.73	199.42	17.47	6.73	9.64
22	244.88	2.08	528.79	2.15	339.62	3.69	105.09	3.00	17.56	1.54	0.88	1.25
23	357.76	3.04	2001.03	8.14	1641.80	17.83	709.60	20.24	215.78	18.91	8.67	12.42
24	99.90	0.85	267.51	1.09	58.88	0.64	10.72	0.31	1.66	0.15	0.10	0.14
31	48.31	0.41	155.84	0.63	116.56	1.27	57.74	1.65	28.26	2.48	3.65	5.22
32	406.23	3.46	2469.35	10.04	2259.18	24.54	1196.41	34.12	498.27	43.66	26.67	38.20
33	61.49	0.52	449.02	1.83	369.53	4.01	120.28	3.43	38.35	3.36	2.95	4.22
41	134.81	1.15	151.63	0.62	8.37	0.09	2.71	0.08	1.53	0.13	0.69	0.98
42	17.36	0.15	19.60	0.08	1.65	0.02	0.57	0.02	0.37	0.03	0.21	0.30
43	34.58	0.29	116.50	0.47	11.37	0.12	4.18	0.12	2.11	0.19	2.14	3.07
45	15.72	0.13	122.80	0.50	2.89	0.03	1.00	0.03	0.33	0.03	1.11	1.58
46	240.98	2.05	299.72	1.22	27.07	0.29	10.70	0.31	6.77	0.59	2.15	3.08
51	94.40	0.80	157.40	0.64	12.31	0.13	2.96	0.08	1.04	0.09	0.28	0.40
52	868.30	7.39	1172.16	4.77	91.40	0.99	22.60	0.64	6.59	0.58	0.91	1.30
53	18.18	0.15	93.65	0.38	9.34	0.10	4.39	0.13	4.85	0.42	5.21	7.46
61	0.85	0.01	1.06	0.00	0.15	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
63	17.84	0.15	4.44	0.02	0.09	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
64	128.89	1.10	17.76	0.07	0.46	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
65	0.62	0.01	1.48	0.01	0.94	0.01	0.60	0.02	0.46	0.04	0.06	0.09
66	0.23	0.00	0.68	0.00	0.92	0.01	0.88	0.03	0.97	0.09	0.89	1.28

注: 11 水田 12 旱地 21 有林地 22 灌木林 23 疏林地 24 其他林地 31 高覆盖度草地 32 中覆盖度草地 33 低覆盖度草地 41 河渠 42 湖泊 43 水库 坑塘 45 海涂 46 滩地 51 城镇用地 52 农村居民点 53 工交建设用地 61 沙地 63 盐碱地 64 沼泽地 65 裸土地 66 裸岩砾地

由表 5 可知,旱地的土壤侵蚀面积最大,中等覆盖度的草地次之,有林地第三,但土壤侵蚀面积的大小与土壤侵蚀强度等级并不具有直接的关系,因此分析土地利用类型在不同强度等级上的分布更有意义。微度侵蚀主要发生在旱地,农村居民点用地次之,有林地第三。轻度侵蚀主要发生在旱地,有林地次之,中等覆盖度的草地第三。中度侵蚀主要发

生在旱地,中等覆盖度的草地次之,有林地第三。强度侵蚀主要发生在中等覆盖度的草地,疏林地次之,有林地第三。极强度侵蚀主要发生在中等覆盖度的草地,疏林地次之,有林地第三。剧烈侵蚀主要发生在中等覆盖度的草地,疏林地次之,有林地第三。由此可得出微度、轻度、中度侵蚀主要发生在旱地上,这与辽西地区的种植方式有关,旱地多分布在

坡度 25° 以下。强度、极强度、剧烈侵蚀主要分布在中覆盖度的草地、有林地和疏林地上,这与辽西地区林地、草地覆盖度低、破坏严重有关,因此减少辽西地区土壤侵蚀的有效措施是增加林地、草地的覆盖度,减少坡耕地的分布。

4 结 论

(1) 辽西地区的土壤侵蚀强度等级以轻度为主,微度侵蚀次之,中度侵蚀第三,强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀均有发生,但所占百分比不大。

(2) 朝阳市是辽西地区土壤侵蚀最严重的地区,除微度侵蚀外,在其他各等级中所占比例均最大。葫芦岛市在中度以上等级中所占的比例仅次于朝阳市,也是土壤侵蚀比较严重的地区。锦州市和阜新市土壤侵蚀状况一般。

(3) 辽西地区的微度、轻度、中度侵蚀主要分布在旱地上,强度、极强度、剧烈侵蚀主要分布在中覆盖度的草地、有林地和疏林地上,增加林地、草地的覆盖度,较少坡耕地的分布是减少辽西地区土壤侵蚀的主要措施。

参考文献:

[ 1 ] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi arid loess hilly area, China[ J ]. Journal of Hydrology, 2007, 335( 3 ): 247-258.

[ 2 ] 李嘉俊, 许有鹏, 桑银江, 等. GIS 支持下的土壤侵蚀动

态变化研究: 浙江一例[ J ]. 南京大学学报: 自然科学版, 2005, 41( 3 ): 297-303.

[ 3 ] 潘建平, 龚健雅, 李长风. 土壤侵蚀模性研究的现状和 GIS、RS 应用[ J ]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16( 1 ): 89-93.

[ 4 ] 刘光. 土壤侵蚀模型研究进展[ J ]. 水土保持研究, 2003, 10( 3 ): 73-76.

[ 5 ] 杨娟, 葛剑平, 李庆斌. 基于 GIS 和 USLE 的卧龙地区小流域土壤侵蚀预报[ J ]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46( 9 ): 1526-1539.

[ 6 ] 黄金良, 洪华生, 杜鹏飞, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[ J ]. 水土保持学报, 2004, 18( 5 ): 75-79.

[ 7 ] 何兴元, 湖之滨, 李月辉, 等. GIS 支持下的岷江上游土壤侵蚀动态研究[ J ]. 应用生态学报, 2005, 16( 12 ): 2271-2278.

[ 8 ] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[ J ]. 自然资源学报, 1999, 14( 4 ): 345-350.

[ 9 ] 张岩, 刘宝元, 史培军, 等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[ J ]. 生态学报, 2001, 21( 7 ): 1050-1056.

[ 10 ] 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.

( 上接第 47 页)

[ 34 ] Fen Li Zheng, Chi Hua Huang, L. Darrell Nortorn, Vertical Hydraulic Gradient and Run On Water and Sediment Effects on Erosion Processes and Sediment Regimes[ J ]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 4-11.

[ 35 ] Gilley J E, Woolhiser D A, McWhorter D B. Interrill soil erosion: part II. testing and use of model equations[ J ]. Transactions of the ASAE, 1985, 28( 1 ): 154-159.

[ 36 ] Govers G. Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldemberg experimental site[ J ]. Catena Supplement, 1987, 8: 17-34.

[ 37 ] Moore L D, Burch G J. Physical Basis of the length slope Factor in the Universal Soil Loss Equation[ J ]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50( 5 ): 1294-1298.

[ 38 ] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水利条件研究[ J ]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4( 1 ): 41-46.

[ 39 ] 蔡强国, 等. 黄土坡耕地上坡长对径流侵蚀产沙过程

的影响, 水土流失规律与坡地改良利用[ M ]. 北京: 环境科学出版社, 1998.

[ 40 ] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[ J ]. 水土保持学报, 1992, 6( 2 ): 17-23.

[ 41 ] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[ J ]. 中国水土保持, 1989( 8 ): 23-24.

[ 42 ] Hickey R A, Smith P, Jankowski. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID[ J ]. Computers, Environment and Urban Systems, 1994, 18( 5 ): 365-380.

[ 43 ] Hickey R A. Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS[ J ]. Cartography, 2000, 29( 1 ): 1-8.

[ 44 ] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[ M ]. 北京: 科学出版社, 2002.

[ 45 ] Desmet P, Grovers G. GIS based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information[ J ]. Catena, 1995, 25: 389-401.

[ 46 ] Mitsova H. Surfaces and Modeling[ J ]. Grassclippings, 1993, 7( 1 ): 18-19.