

基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀量估算

——以辽宁省阜新市为例

李雪莹, 杨俊, 温海明, 姚云, 薛忠跃, 魏志明

(北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: [目的] 准确把握辽宁省阜新市的土壤侵蚀状况, 为政府制定土地和经济方面的相关政策提供科学依据。[方法] 基于修正的土壤流失方程(RUSLE), 运用 RS 和 GIS 等技术和方法, 对阜新市的土壤侵蚀状况进行分析和研究。[结果] 阜新市年均土壤侵蚀量为 1.99×10^7 t, 土壤侵蚀模数为 $19.18 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。土壤侵蚀强度在中度以下的区域占研究区总面积的 77.01%, 对研究区土壤侵蚀量的贡献率为 12.57%, 而中度以上侵蚀区域占研究区总面积的 22.99%, 对研究区土壤侵蚀量的贡献率高达 87.43%。[结论] $5^\circ \sim 25^\circ$ 为研究区主要侵蚀坡度段, 裸土地、湖泊和农村居民点为研究区主要侵蚀地带, 应将其列为水土保持重点治理对象。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE; GIS; 阜新市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0199-06

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.037

Estimation of Soil Erosion Amount Based on RUSLE Model

— A Case Study in Fuxin City of Liaoning Province

LI Xueying, YANG Jun, WEN Haiming, YAO Yun, XUE Zhongyue, WEI Zhiming

(School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] To understand the situation of soil erosion in Fuxin City of Liaoning Province and provide scientific support for policy making about soil and economic development. [Methods] The annual average soil erosion in Fuxin City was calculated with revised universal soil loss equation (RUSLE) under RS and GIS platforms. [Results] The annual average amount of soil erosion in Fuxin City was 1.99×10^7 t, soil erosion modulus was $19.18 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, and erosion intensity was on the mild level. The regional soil erosion intensity below moderate level accounted for 77.01% of research area, and contributed 12.57% of the soil erosion in the studied area, while other area above moderate level contributed 87.43%. The spatial heterogeneity of regional soil erosion was high. [Conclusion] The slope between $5^\circ \sim 25^\circ$ was the major erosion section, and bare lands, lakes and rural areas were major erosion areas. These sections and areas should be listed as the key areas of soil and water conservation.

Keywords: soil erosion; RUSLE; GIS; Fuxin City

土壤侵蚀是由水力和风力作用引起的土壤颗粒的分离与搬运过程, 土壤侵蚀严重破坏了土地资源, 导致土地干旱、退化、洪涝等灾害问题, 引发生态环境恶化^[1-2]。土壤侵蚀已成为当今世界主要的环境问题之一^[3-4], 区域内土壤侵蚀可以导致土壤流失和土地沙漠化, 造成当地环境恶化。土壤侵蚀是影响区域内土壤结构和生态环境的重要因素, 因此对研究区土壤侵蚀量的估算具有重要意义^[5-6]。

阜新市是辽宁省粮食主产区之一, 担负着国家粮

食安全的重大责任。近年来, 随着经济高度发展, 人口增长, 导致土地利用过度、土壤流失严重、土壤肥力下降等问题。为了保护生态环境和提高土地利用率, 我们应该更加科学合理地利用土地资源。土壤侵蚀作为破坏土地结构的重要因素, 对阜新市土壤侵蚀进行定量估算及其分等定级具有重要的现实意义。

土壤侵蚀模型是进行土壤侵蚀量估算的有效工具。通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)^[7]及其修订方程(revised universal soil loss

收稿日期: 2013-07-08

修回日期: 2013-07-23

资助项目: 辽宁省大学生创新创业训练计划项目“基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀时空分异特征”(201310165011)

第一作者: 李雪莹(1992—), 女(汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用规划和地理教育。E-mail: m18940829589@163.com。

通信作者: 杨俊(1978—), 男(汉族), 湖北省孝昌县人, 博士, 副教授, 主要从事区域地表过程与地理信息系统研究。Email: hsrc@lnnu.edu.cn。

equation, RUSLE)^[8] 是学者们研究土壤侵蚀广泛使用的经典模型。RUSLE 是在经验模型通用土壤流失方程 (USLE) 的基础上发展而来的, 与 USLE 相比, RUSLE 从因子的算法和技术性上都有所改进, 使其计算精度大大提高。随着地理信息系统 (GIS) 技术的快速发展, 以 GIS 为平台, 采用 RUSLE 模型对土壤侵蚀进行定量估算, 已成为研究土壤侵蚀的有效手段^[9-10]。中国学者基于 GIS, RS 与通用土壤流失方程及其修订方程做了大量的研究工作^[11-12], 并逐步从大尺度范围向小尺度范围转变。这对于中国土壤侵蚀量的估算及其预报模型的研制起到了积极的作用。

本研究选择阜新市为研究对象, 应用 GIS 和 RS 技术基于修订的土壤流失方程 RUSLE 对研究区的土壤侵蚀现状进行了研究和分析。为阜新市改善土壤状况、提高土地资源利用率提供基础资料和科学依据。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

阜新市位于东北辽河平原和内蒙古高原的中间过渡区域, 属辽宁省西部的低山丘陵区, 位于东经 121°01′—122°56′, 北纬 41°41′—42°56′。土地总面积为 10 360 km², 其中耕地面积 3 760 km²; 有林地面积 3 067 km²。丘陵山地占 58%; 风沙地占 8%; 平原占 23%。地势西北高, 东南低; 西南高, 东北低。该地区属北温带半湿润半干旱大陆性季风气候。年均气温

7.6 °C, 年均降水量 481 mm, 大水面蒸发量 1 789 mm。土壤以褐土为主, 有机质含量低, 保水保肥能力差, 土地利用方式以农牧业为主。

1.2 数据来源及处理

本文采用的基础数据包括: 1:50 000 数字高程模型 (DEM); 2010 年 6—9 月 Landsat ETM 数据, 空间分辨率为 15 m×15 m (为了使地表的植被信息表现的更加清楚, 本研究对其进行了 5, 4, 3 波段的假彩色合成); 1951—2009 年阜新市降雨量数据; 1:1 000 000 土壤类型数据; 2010 年土地利用数据。

数字图像处理所应用到的软件: ENVI 4.7 用于遥感图像的预处理及其分类等。ArcGIS 10.0 用于地图的代数运算和空间分析等。

1.3 研究方法

将土壤质地、降水、植被、坡度、坡长及人类活动干扰等影响因素考虑在内的 RUSLE 模型是为评价某地区多年平均土壤侵蚀量而设计的。遥感数据的应用, 使其结果具有更好的价值性与适应性, 是目前使用最为广泛的土壤侵蚀预报模型。该模型的具体公式如下:

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

式中: A ——土壤流失量 [t/(hm²·a)]; R ——降雨侵蚀因子 [MJ·mm/(hm²·a)]; K ——土壤可蚀性因子 [t·h/(MJ·mm)]; L, S ——地形因子, 由坡长和坡度因子组成; C ——植被覆盖因子; P ——水土保持措施因子。土壤侵蚀量计算过程如图 1 所示。

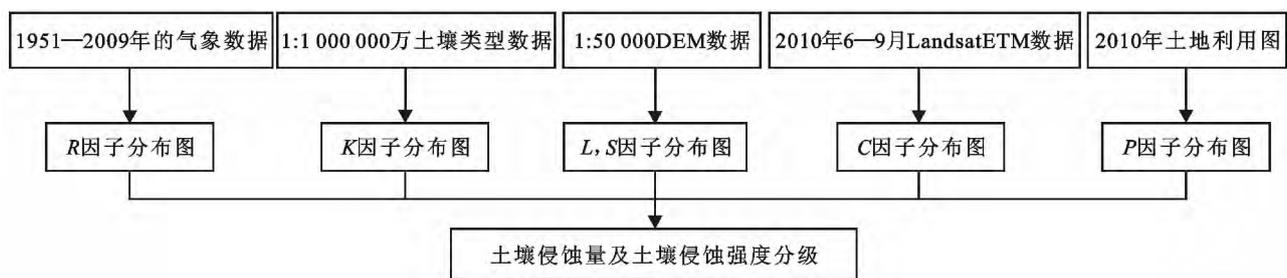


图 1 土壤侵蚀量计算过程

2 RUSLE 模型各因子的确定

2.1 RUSLE 模型各因子的计算

2.1.1 降雨侵蚀力因子 降雨侵蚀力可以反应降雨对研究区土壤侵蚀的影响^[13], 降雨强度、降雨量、雨型、降雨历时、瞬时雨率和降雨动能等都是其影响因素。本研究计算 R 值的具体公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^{12} j_i^2 / J \quad (2)$$

式中: j_i ——月降水 (mm); J ——年降水 (mm);

i ——月份。 R 与 F 的具体关系如下:

$$R = 4.17F - 152 \quad (3)$$

式中: R ——降雨侵蚀力因子 [MJ·mm/(hm²·a)], R 值计算结果如表 1 所示。

表 1 阜新市降雨侵蚀力因子 R 值 MJ·mm/(hm²·a)

行政区	R 值
阜新市市区	222.23
阜新县	221.71
彰武县	230.32

2.1.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性因子(K)值的大小表示土壤被侵蚀的难易程度,是导致土壤流失的内在因素^[14]。本研究采用董婷婷等^[15]在辽西进行土壤侵蚀的定量研究的相关结果数据作为阜新市不同类型土壤的可蚀性 k 值(表 2)。并且以阜新市第二次全国土壤普查图(1:100 万)为基础数据,经坐标校准后进行栅格化处理得到全市土壤可蚀性分布图(如图 2 所示)。

表 2 阜新市主要土壤类型的可蚀性 K 值

土壤类型	K 值	土壤类型	K 值
棕壤	0.48	草原风沙土	0.74
潮棕壤	0.50	草甸风沙土	0.59
棕壤性土	0.52	中性石质土	0.66
褐土	0.49	粗骨土	0.68
石灰性褐土	0.60	钙质粗骨土	0.65
淋溶褐土	0.51	草甸土	0.48
潮褐土	0.47	石灰性草甸	0.49
褐土性土	0.53	盐化草甸土	0.49
碱化潮土	0.10	腐泥沼泽土	0.31
滨海盐土	0.53	淹育水稻土	0.49
盐化潮土	0.53	红褐土	0.41
潮土	0.56		

注:K——土壤可蚀性因子(t·h/(MJ·mm))。

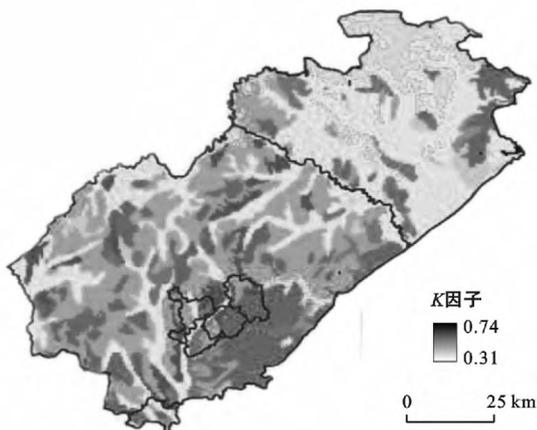


图 2 阜新市土壤可蚀性因子(K)分布

2.1.3 地形(LS)因子 坡长与坡度作为地形地貌特征严重影响着土壤侵蚀,这两个因子是降雨侵蚀力的促进因子^[16]。本研究将坡度分为陡坡和缓坡来考虑它对土壤侵蚀的影响。陡坡和缓坡采用 D. K. McCool 等^[17]研究的坡度公式。具体算法如下:

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.05 & (5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ) \\ 21.92\sin\theta - 0.96 & (\theta > 10^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

式中:S——地形因子; θ ——地面坡度。

利用阜新市的 1:50 000 数字高程模型可以计

算出坡度 θ ,其空间分辨率为 30 m×30 m。在 ArcGIS 10.0 软件的支持下,根据坡度和(4)式计算出坡度因子(S),进而获得坡度因子(S)的空间分布图(图 3)。

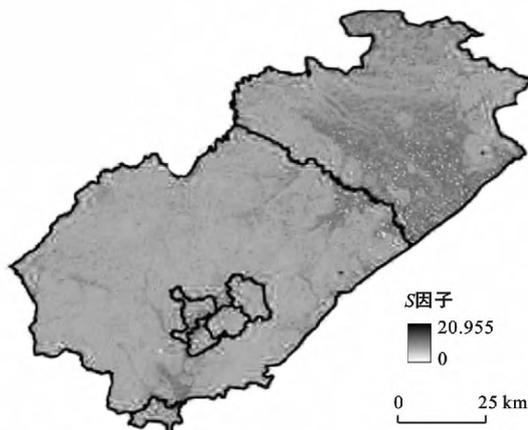


图 3 阜新市坡度因子分布

坡长因子(L)的计算公式如下:

$$L = (\lambda / 72.6)^m \quad (5)$$

式中: $m = \beta / 1 + \beta$, $\beta = (\sin\theta / 0.0896) / [3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56]$; L——坡长因子值; λ ——水平投影坡长(m)。以研究区 DEM 为基础数据,利用 ArcGIS 的空间分析功能中的水文分析工具计算 λ 值。然后根据公式(5)求得坡长因子(图 4),再将坡度因子乘以坡长因子得出地形因子分布图。

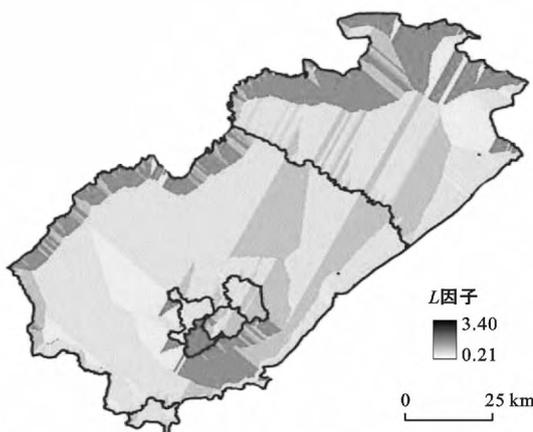


图 4 阜新市坡长因子分布

2.1.4 植被覆盖因子 在某些特定条件下采取了适当的田间管理或有植被覆盖的坡地土壤流失量与相同状况下实施清耕的连续休闲地土壤流失量之比即为植被覆盖因子(C)。它抑制着土壤侵蚀的发生,起着保护水土流失的作用^[18]。本研究采用蔡崇法^[19]提出的植被覆盖度与 C 因子的方程:

$$\begin{cases} C=1 & (c=0) \\ C=0.6508-0.34361 \times \lg c & (0 < c \leq 78.3\%) \\ C=0 & (c > 78.3\%) \end{cases} \quad (6)$$

式中： C ——植被覆盖因子； c ——植被覆盖度。

阜新市 6—9 月是植物生长发育最好的时期，因此这个时期植物的覆盖度比较大。基于 ENVI 软件，利用阜新市 2010 年 6—9 月 Landsat ETM 遥感影像数据计算 NDVI 值，再利用 NDVI 值计算植被覆盖度，最后求出植被覆盖因子分布图(如图 5 所示)。公式为：

$$c = (NDVI - NDVI_0) / (NDVI_x - NDVI_0) \quad (7)$$

式中： $NDVI_x$ ——完全被植被覆盖像元的 NDVI 值； $NDVI_0$ ——无植被覆盖或裸土像元的 NDVI 值。

$$NDVI = (band4 - band3) / (band4 + band3) \quad (8)$$

2.1.5 水土保持措施因子 针对研究区采取特定防治措施后的土壤侵蚀量与顺坡种植时没有采取相应措施的土壤侵蚀量之比即为水土保持措施因子(P)，一般没有采取水土保持措施的土地类型 P 值为 1，其

他情况 P 值在 0~1 之间^[20]。

参照董婷婷等的研究成果^[15]，结合当地土地利用及农业生产活动确定本研究区的 P 值(见表 3)。将 P 值以土地利用类型为单元赋值生成 P 值栅格图(图 6)。

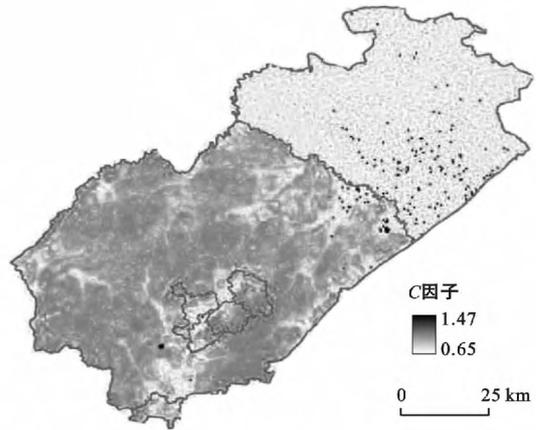


图 5 阜新市植被覆盖因子分布

表 3 阜新市不同土地利用类型的 P 因子值

土地利用类型	灌木林	有林地	疏林地	其他林地	低覆盖度草地	中覆盖度草地	高覆盖度草地	湖泊	河渠	水库坑塘
P 因子值	0.50	0.50	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
土地利用类型	滩地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	沙地	盐碱地	沼泽	裸土地	水田	旱地
P 因子值	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	1.00	0.01	0.25

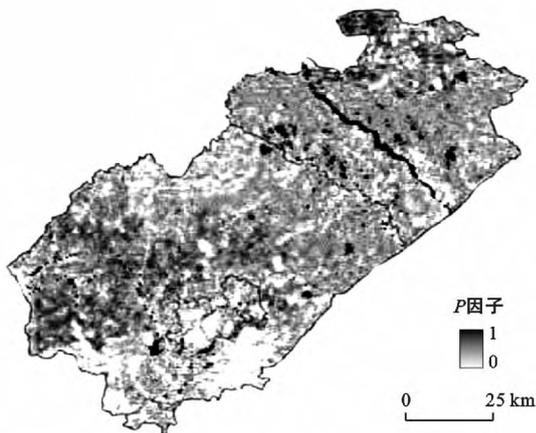


图 6 阜新市水土保持措施因子分布

2.2 土壤侵蚀量的计算及强度分级

将以上研究计算得到的 RUSLE 模型的各项因子及具有其空间属性的栅格数据，在 ArcGIS 10.0 下相乘得到阜新市土壤侵蚀量分布图。采用中华人民共和国水利部发布的侵蚀强度标准作为本次研究土壤侵蚀分级标准^[21]，根据研究区的具体情况，本文将阜新市土壤侵蚀强度共分为 7 个等级，得到研究区内的土壤侵蚀强度分级图(如附图 11)。

3 研究结果分析

3.1 阜新市土壤侵蚀与空间分布

统计结果表明(表 4)：阜新市年均土壤侵蚀总量为 1.99×10^7 t，年均土壤侵蚀模数为 $19.18 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，属于轻度侵蚀。土壤侵蚀模数小于 $5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的面积占研究区总面积的 17.18%，属于微度侵蚀。轻度土壤侵蚀的面积占到了阜新市总面积的 59.83%。而中度以上的土壤侵蚀约占研究区总面积的 22.99%，强度以上侵蚀占 11.08%，其中极强度侵蚀占 5.48%。辽西地区土壤侵蚀强度等级以轻度为主，阜新市土壤侵蚀状况一般。因此本研究与前人相关研究结果基本吻合，结果可信^[15]。

3.2 土地利用类型对土壤侵蚀的影响

利用 ArcGIS 将土地利用类型图和土壤侵蚀强度等级图进行叠加分析，最终得到不同土地利用类型的平均土壤侵蚀模数与土壤侵蚀量如表 5 所示。由表 5 可以得出：占研究区总面积 64.04% 的旱地为阜新市最主要的土地利用类型；中覆盖度草地次之，占到了 12.08%；裸土地所占面积最小，仅为 0.01%。

表 4 阜新市土壤侵蚀强度等级

侵蚀强度	侵蚀面积/km ²	面积百分比/%	土壤侵蚀量/(t·a ⁻¹)	侵蚀量百分比/%
微度侵蚀	1 779.85	17.18	88 389.00	0.44
轻度侵蚀	6 198.39	59.83	2 411 084.25	12.13
中度侵蚀	1 233.88	11.91	2 122 267.50	10.68
强度侵蚀	276.61	2.67	1 084 731.75	5.46
极强度侵蚀	567.73	5.48	4 558 502.25	22.94
剧烈侵蚀	150.22	1.45	2 608 769.25	13.13
极剧烈侵蚀	153.32	1.48	6 995 202.75	35.21

从土地利用类型对土壤侵蚀的角度来看:裸土地面积仅占总土地面积的 0.01%,但侵蚀量却占总侵蚀量的 0.23%,属于极剧烈侵蚀。农村居民点的土壤侵蚀量最大,占研究区侵蚀量的 39.67%,年均侵蚀模数为 146.02 t/(hm²·a),属于极强度侵蚀,是侵蚀的主要发生区。沼泽、湖泊的土壤侵蚀模数分别 118.33 和 156.40 t/(hm²·a),分别属于极强度侵蚀和剧烈侵蚀。而其他土地利用类型的土壤侵蚀量所占的百分比均较小。因此裸土地、湖泊、农村居民点和沼泽是研究区土壤侵蚀的主要发生区域,所以应加大这些区域的水土保持治理力度。

表 5 不同土地利用类型的土壤侵蚀状况

土地利用类型	面积/km ²	面积百分比/%	年均侵蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	土壤侵蚀量/(t·a ⁻¹)	侵蚀量百分比/%
有林地	472.42	4.56	38.04	1 797 184.00	9.05
灌木林	274.54	2.65	60.39	1 658 080.70	8.35
疏林地	649.57	6.27	37.37	2 427 603.70	12.22
其他林地	13.47	0.13	59.25	79 808.00	0.40
高覆盖度草地	44.55	0.43	29.39	130 937.00	0.66
中覆盖度草地	1 251.49	12.08	21.73	2 719 679.00	13.69
低覆盖度草地	64.23	0.62	56.93	365 675.00	1.84
河渠	97.38	0.94	35.64	347 048.40	1.75
湖泊	17.61	0.17	156.40	275 423.85	1.39
水库坑塘	25.90	0.25	45.50	117 845.10	0.59
滩地	80.81	0.78	51.45	415 769.85	2.09
城镇用地	71.48	0.69	8.60	61 437.60	0.31
农村居民点	539.76	5.21	146.02	7 881 483.60	39.67
其他建设用地	36.26	0.35	24.34	88 244.10	0.44
沙地	7.25	0.07	74.61	54 089.10	0.27
盐碱地	19.68	0.19	70.27	138 286.35	0.70
沼泽	12.43	0.12	118.33	147 083.85	0.74
裸土地	1.04	0.01	437.49	45 498.60	0.23
水田	45.58	0.44	41.10	187 345.35	0.94
旱地	6 634.55	64.04	1.40	930 423.60	4.67

3.3 地形坡度对土壤侵蚀空间差异的影响

利用 ArcGIS 对各坡度带所占面积和总的侵蚀量进行计算,最终得到不同坡度等级的侵蚀结果如表 6 所示。由表 6 可以得出:坡度在 5°以下的区域占研究区总面积的 51.47%,对土壤侵蚀总量的贡献率为 19.23%,年均土壤侵蚀模数为 7.17 t/(hm²·a)。坡

度在 25°以上的区域占研究区总面积的 12.2%,对土壤侵蚀总量的贡献率为 9.7%,年均土壤侵蚀模数为 15.25 t/(hm²·a)。坡度在 5°~25°之间的区域年均土壤侵蚀模数介于 30.80~40.31 t/(hm²·a)之间,其面积占研究区总面积的 36.33%,对土壤侵蚀总量的贡献率为 71.07%,是研究区的主要土壤侵蚀坡度段。

表 6 不同坡度的土壤侵蚀

坡度分级/(°)	面积/km ²	面积百分比/%	年均侵蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	土壤侵蚀量/(t·a ⁻¹)	侵蚀量百分比/%
0~5	5 332.29	51.47	7.17	3 820 798.46	19.23
5~10	959.34	9.26	38.85	3 727 414.41	18.76
10~15	1 172.75	11.32	38.59	4 526 146.07	22.78
15~20	884.74	8.54	40.31	3 566 475.94	17.95
20~25	746.96	7.21	30.80	2 300 824.03	11.58
>25	1 263.92	12.20	15.25	1 927 287.84	9.70

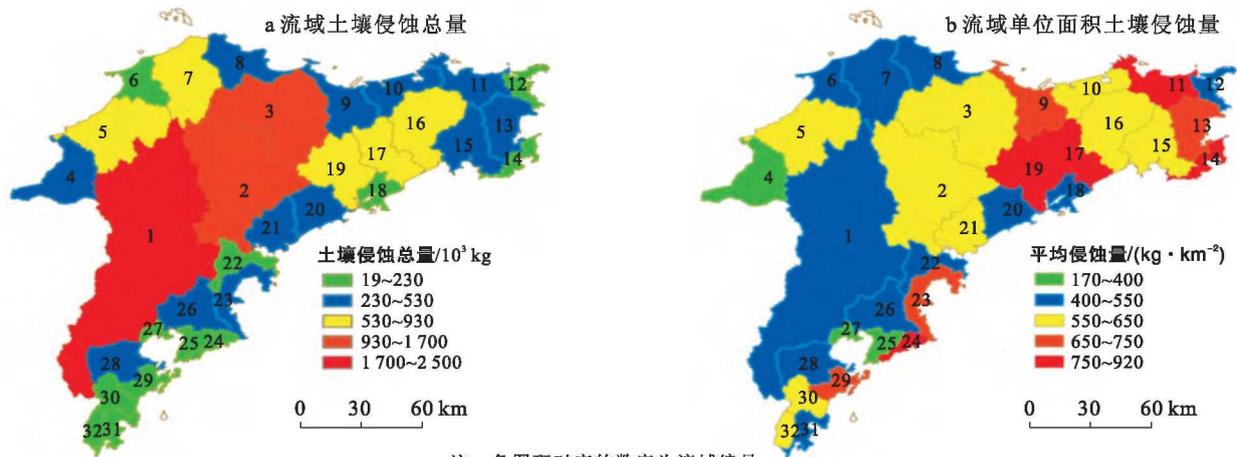
4 结论

(1) 阜新市年均土壤侵蚀总量为 1.99×10^7 t, 年均土壤侵蚀模数为 $19.18 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 其中中度以下侵蚀区域占研究区总面积的 77.01%, 其侵蚀量占总侵蚀量的 12.57%。中度以上侵蚀区域占研究区总面积的 22.99%, 侵蚀量占总侵蚀量的 87.43%。占研究区面积仅 1.48% 的极剧烈侵蚀对侵蚀总量的贡献率高达 35.21%。

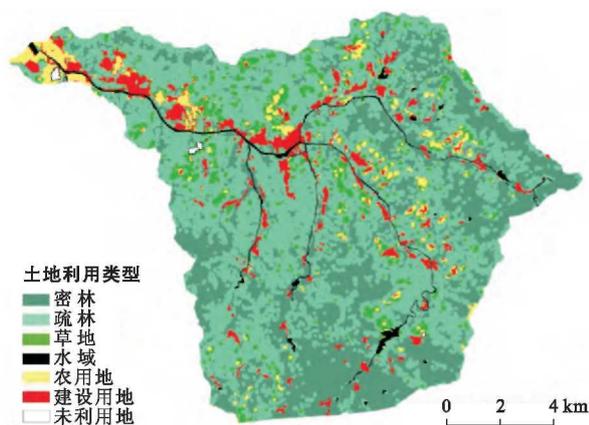
(2) 阜新市土壤侵蚀空间差异明显, 研究区的地表形态、坡度和土地利用类型变化是导致这种差异的主要原因。5°~25° 为区内主要侵蚀坡度段; 裸土地的年均侵蚀模数最大, 湖泊和农村居民点次之, 为区内主要侵蚀地带, 应将其列为水土保持重点治理对象。

[参 考 文 献]

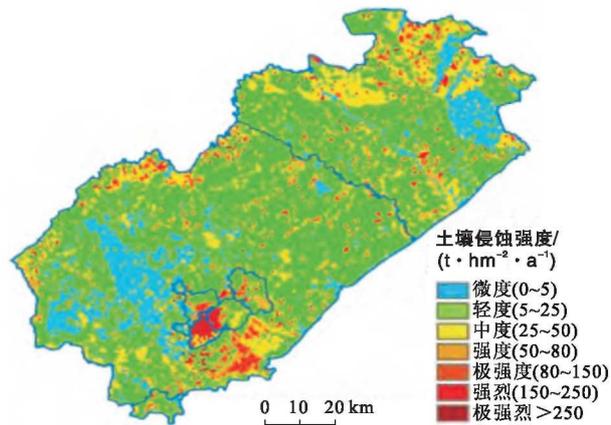
- [1] 潘美慧, 伍永秋, 任斐鹏, 等. 基于 USLE 的东江流域土壤侵蚀量估算[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2154-2164.
- [2] 潘竟虎, 冯兆东, 魏宏庆. 长江上游小流域土壤侵蚀动态模拟与分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(2): 93-96.
- [3] 黄金良, 洪华生, 张珞平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2005, 18(5): 75-79.
- [4] 张有全, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于 GIS 和 USLE 的密云县土壤侵蚀评价及空间特征研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 358-362.
- [5] 田静毅, 李月芬, 王立新, 等. 基于 RS 和 GIS 的土壤侵蚀量预测应用研究[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(1): 78-82.
- [6] 张树文, 王文娟, 李颖, 等. 近 50 年来三江平原土壤侵蚀动态分析[J]. 资源科学, 2008, 30(6): 843-849.
- [7] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M] // U. S. Department of Agriculture, ed. Agricultural Handbook. Washington: U. S. Department of Agriculture, 1978.
- [8] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Agriculture Handbook (Washington), 1997.
- [9] 赵磊, 袁国林, 张琰, 等. 基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 42-46.
- [10] 王晓慧, 陈永富, 陈尔学, 等. 基于遥感和 GIS 的黄土高原中阳县土壤侵蚀评价[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 442-448.
- [11] 许月卿, 邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 67-71.
- [12] 张旭群, 陈耀强, 陈浩昆, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的粤东黄冈河流域土壤侵蚀评估[J]. 中国水土保持, 2013(2): 34-37.
- [13] 李铨, 李俊祥, 朱飞鸽, 等. 基于 RUSLE 的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1577-1585.
- [14] 王晓峰, 常俊杰, 余正军, 等. 基于 RUSLE 的土壤侵蚀量研究: 以南水北调中线陕西水源区为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(3): 545-549.
- [15] 董婷婷, 张增祥, 左利君. 基于 GIS 和 RS 的辽西地区土壤侵蚀的定量研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 48-52.
- [16] 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: 以云南省丽江市为例[J]. 山地学报, 2008, 25(5): 548-556.
- [17] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE; American Society of Agricultural Engineers (USA), 1987, 30(5): 1387-1396.
- [18] 姬翠翠, 李晓松, 曾源, 等. 基于遥感和 GIS 的宣化县水土流失定量空间特征分析[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(2): 107-112.
- [19] 蔡崇法, 丁树文. 应用 USLE 模型与地理信息系统 ID-RISI 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.
- [20] 傅世锋, 查轩. 基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J]. 地球信息科学, 2008, 10(3): 393-395.
- [21] 中华人民共和国水利部标准. 水土保持试验规范 SD239-97Es[S]. 北京: 水利电力出版社, 1986.



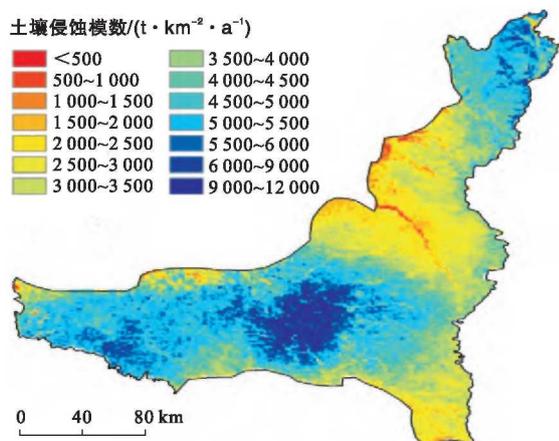
附图9 胶东半岛不同流域土壤侵蚀量空间分布(190页)



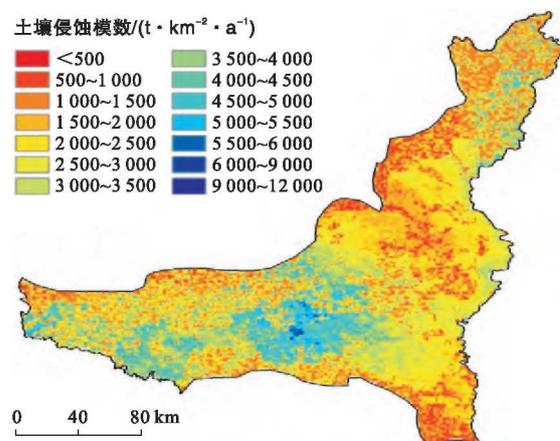
附图10 山东省济南市锦阳川流域土地利用类型(195页)



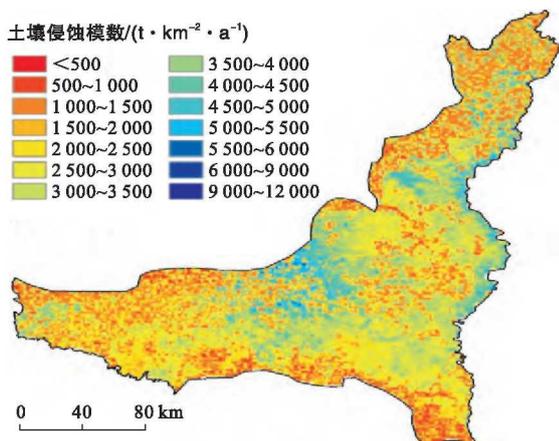
附图11 辽宁省阜新市土壤侵蚀强度分级(202页)



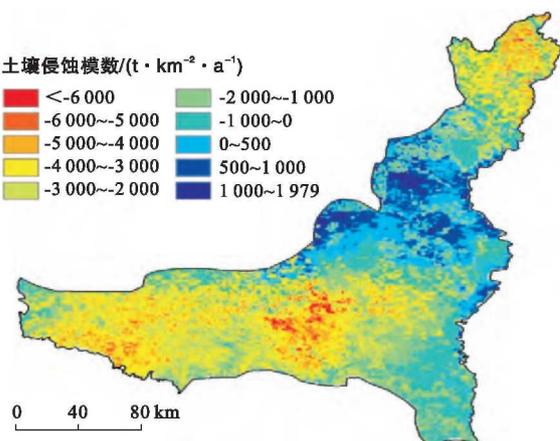
附图12 2000年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图13 2007年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图14 2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图15 2000—2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数差值示意图(222页)