

基于GIS与RS的土壤侵蚀变化定量监测

——以黄土高原水保二期世行贷款庆城项目区为例

汪明冲¹, 潘竟虎², 赵军²

(1. 佛山科学技术学院资源环境系, 广东 佛山 528000; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 在GIS软件ArcMap和ArcView的支持下, 建立研究区的空间数据库, 利用GIS软件的栅格数据空间分析功能, 将研究区空间离散化为10 m×10 m的栅格, 生成通用土壤流失方程RUSLE所需的各因子栅格图; 借助GIS软件的地图代数运算, 将各因子连乘, 得到土壤侵蚀量栅格图, 在此基础上对侵蚀栅格图进行分类, 获得土壤侵蚀等级图。将得到的土壤侵蚀图与土地利用图和坡度图叠加, 获得不同土地利用方式下和不同坡度下的土壤侵蚀量, 据此对土壤侵蚀与土地利用以及土壤侵蚀与坡度之间的关系进行分析, 以为水土流失的防治和保护规划方案的制定提供科学依据。

关键词: 土壤侵蚀; 通用土壤流失方程; 定量监测; 遥感; GIS

中图分类号: S157; TP39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)03-0116-06

土壤侵蚀及其导致的土地退化、生态环境恶化和泥沙危害, 已成为我国的头号环境问题。特别是黄土高原是我国乃至全球土壤侵蚀最严重的地区, 该地区的侵蚀模数在50 t/(hm²·a)以上^[1]。土壤侵蚀具有明显的时空变化特征, 研究其时空变化规律对于科学地进行土壤侵蚀防治具有重要意义。然而, 土壤侵蚀是一个复杂问题, 涉及的影响因素很多, 利用常规方法进行时空变化研究, 难度很大。其原因在于土壤侵蚀分布地域广大, 大规模经常性地进行常规土壤侵蚀调查不大可能。遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术的结合, 给土壤侵蚀时空变化研究提供了先进的手段, 和传统手段相比, 优势在于提供了全球或大区域精确定位的高频度宏观影像, 提供了多学科综合分析的数据, 在遥感与GIS基础上建立的数学模型为定量化分析奠定了基础^[2]。土壤侵蚀预报模型是定量评价土壤侵蚀与强度, 进行土地资源合理利用和水土保持规划的科学工具。近40 a来, 通用土壤流失方程(USLE)及其修正版RUSLE成为众多土壤侵蚀预报经验模型的典范, 受到了许多国家的重视, 并得以广泛的应用。本文在RS和GIS技术支持下应用RUSLE模型对黄土高原地区的典型区域进行两期土壤侵蚀定量计算, 同时探讨了土壤侵蚀与土地利用类型和坡度之间的关系, 以为水土流失的防治和保护规划方案的制定提供依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区基本概况

研究区位于甘肃省庆城县西部, 泾河上游的蒲河流域。地势由西北向东南倾斜, 山、川、塬兼有, 海拔(1 200~1 500 m)。土地总面积约为416.28 km², 人口9.6万。研究区属北温带半湿润、半干旱气候过渡区, 年平均气温7.8~9.6℃。7月最热, 平均气温20.0~22.8℃, 1月气温最低, 平均气温-4.9~-7.7℃。多年平均降水量为537.4 mm, 多集中在7~9三个月份, 年蒸发量平均1 435.8~1 667.9 mm。年日照平均总时数2 244.8 h, 无霜期157 d。区内土壤类型以黄绵土和黑垆土为主, 占总面积的97.7%, 另外少量分布有淤积土类和红土类土壤。

1.2 数据与软件

遥感影像为两期的标准产品全色SPOT和多光谱TM卫片, SPOT获取时间为1998-07-02和2004-05-21, TM获取时间为1998-09-11和2004-06-07。SPOT全色波段地面分辨率为10 m, TM多光谱波段地面分辨率为30 m。辅助数据包括研究区1998年和2004年气象资料, 土壤资料, 土壤侵蚀实测数据, 1:1万地形图和DEM等。

数字图像处理软件ERDAS IMAGINE 8.5用于遥感图像的纠正与融合等处理; ArcView GIS 3.2用于屏幕矢量化及地图代数运算; ArcGIS 9用于面元拓扑关系建立及空间数据库建库。

收稿日期: 2006-11-24

基金项目: 甘肃省黄土高原水保二期世行贷款监测评价项目

作者简介: 汪明冲(1980—), 男, 江苏徐州人, 助教, 主要研究方向为环境遥感与GIS应用。E-mail: wangmc@126.com.

2 研究方法与技术路线

2.1 技术路线

利用 ERDAS 编制遥感图像土地利用图,然后运用 GIS 软件的数据库管理功能和栅格空间分析功能,根据通用土壤流失方程 USLE 的形式,读取

数据库文件,生成模型各因子专题图;经 GIS 的地图代数运算,将各因子连乘,得到土壤侵蚀量栅格图,对侵蚀栅格图进行分类,获得两期土壤侵蚀等级图;将得到的 2004 土壤侵蚀图与土地利用图和 DEM 坡度图叠加,获得不同土地利用方式下和不同坡度下的土壤侵蚀量。数据处理流程如图 1。

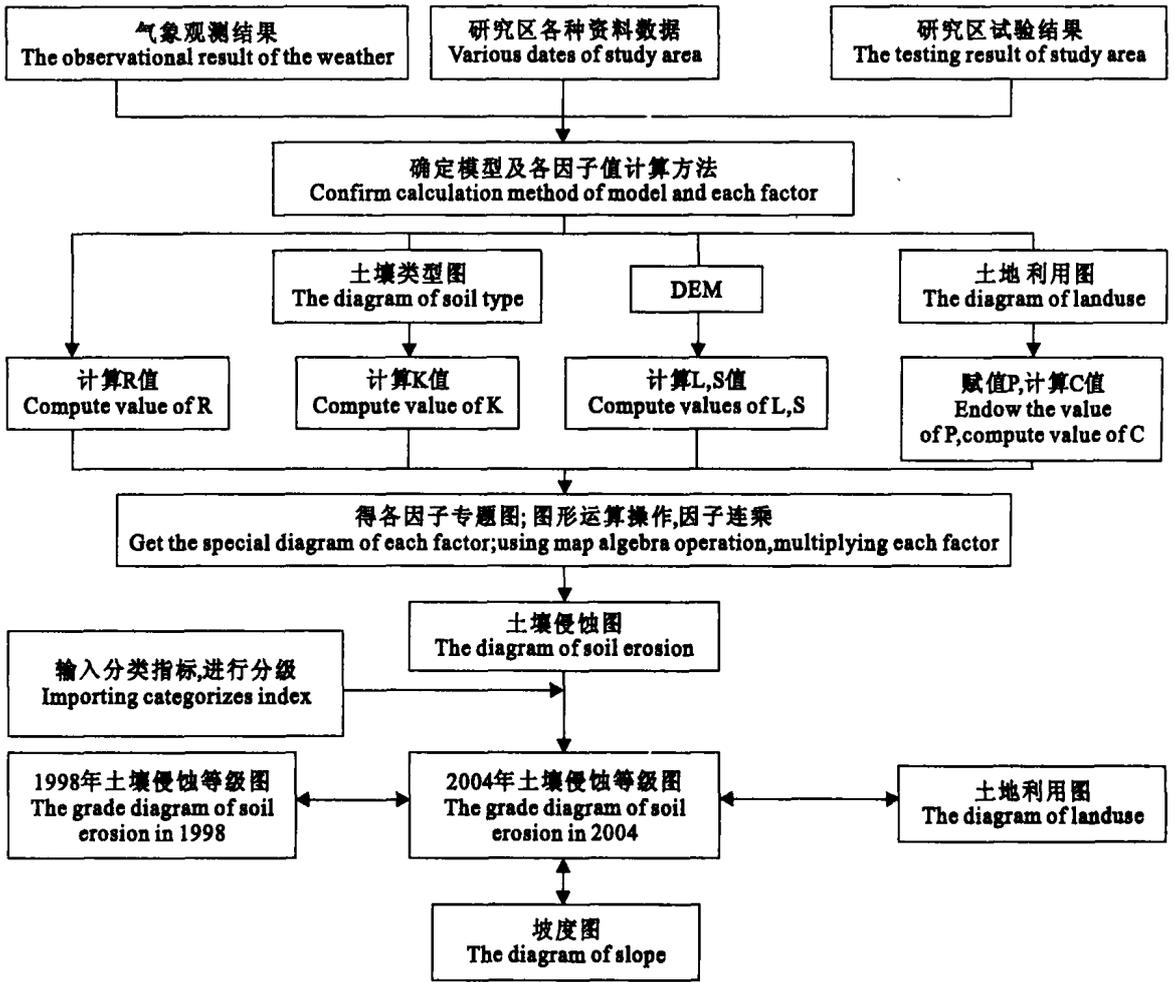


图 1 土壤侵蚀监测流程

Fig.1 Flow chart of soil erosion survey

2.2 土壤侵蚀定量模型

通用土壤流失方程 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 由 W·H·Wischmeier 和 D·D·Smith 于 1958 年提出,美国农业部为提高各因子计算的通用性提出了修正方程 RUSLE。表达式为:

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

式中: A 为年土壤流失量,单位 $t/(km^2 \cdot a)$; R 为降雨和径流因子; K 为土壤可蚀性因子; L 和 S 分别为坡长、坡度因子; C 为植被与经营管理因子; P 为水土保持措施因子, C 与 P 为无量纲单位; f 为使 A 的单位转换为 $t/(km^2 \cdot a)$ 的常数,其值为 $224.2^{[3]}$ 。

2.3 RUSLE 方程中各因子的厘定

2.3.1 R 因子提取 采用 Wischmeier 提出的直接利用多年各月平均降雨量推求 R 值的经验公式^[4]计算出研究区 1998 年 R 值:56.6207,2004 年 R 值:53.3297。由于研究区面积不大,将 R 值以常数的形式带到方程中运算。

2.3.2 K 因子提取 根据刘宝元等在黄土地区的试验^[5],再根据庆城县土壤普查数据,收集研究区各种土壤的机械组成、粒级含量、有机质含量数据。计算得研究区 K 值为:黄绵土 0.470;黑垆土 0.336。

2.3.3 L 、 S 因子提取 参考江忠善等人根据黄土丘陵观测试验小区多年土壤年侵蚀量以及标准径流

小区土壤侵蚀量推导出的 L 、 S 的计算公式^[6], 利用研究区 DEM, 在 ArcView 扩展模块 Spatial Analysis 和 Hydro 支持下, 提取坡长 λ 形成 L 图层。坡度 α 可直接在 ArcView 的 Surface 分析功能下提取, 形成 S 图层。

2.3.4 C 因子提取 根据蔡崇法等人通过对坡面产沙量与植被覆盖度相关关系的研究, 建立的 C 因子值与植被覆盖度 c 之间的数学关系^[7], 计算得研究区 C 值为: 水田 0.18, 旱地 0.31, 林地 0.006, 园地 0.24, 疏林地 0.017, 草地 0.05, 荒地 0.06, 居民

地 0.2, 工矿交通用地 0.22, 难利用地 0.36。以土地利用图层为基础, 将 C 值赋予不同土地利用类型栅格, 形成 C 因子栅格图。

2.3.5 P 因子提取 一般无任何水土保持措施的土地 P 值取为 1。在我国最基本的水土保持工程措施是梯田, 农耕梯地不同耕作方式下 P 因子值不同, 将 P 因子值对土地利用现状图进行赋值得 P 因子图。不同坡度和水土保持措施下的 P 值如表 1 所示。

表 1 不同水土保持措施下的 P 值

Table 1 P values of different water and soil conservation measures

坡度(°) Gradient	等高带状耕作 Isometry zonal cultivate	草田带状间作 Zonal grass/crop	水平梯田 Horizontal terrace	水平沟 Horizontal ditch	等高垄作 Isometry ridging
<5	0.3	0.1		0.01	0.1
5~10	0.5	0.1	0.03	0.05	0.1
>10	0.6	0.2		0.1	0.3

根据 RULSE 模型各因子的取值, 生成各因子栅格图层, 栅格大小采样确定为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 统一投影系。利用 ArcView 的 Map Calculator 功能, 将各因子图相乘, 计算土壤侵蚀量, 并生成土壤侵蚀图

层。根据中国土壤侵蚀强度等级划分标准^[8], 利用土壤侵蚀图层生成本研究区两期的土壤侵蚀强度等级图(图 2)。

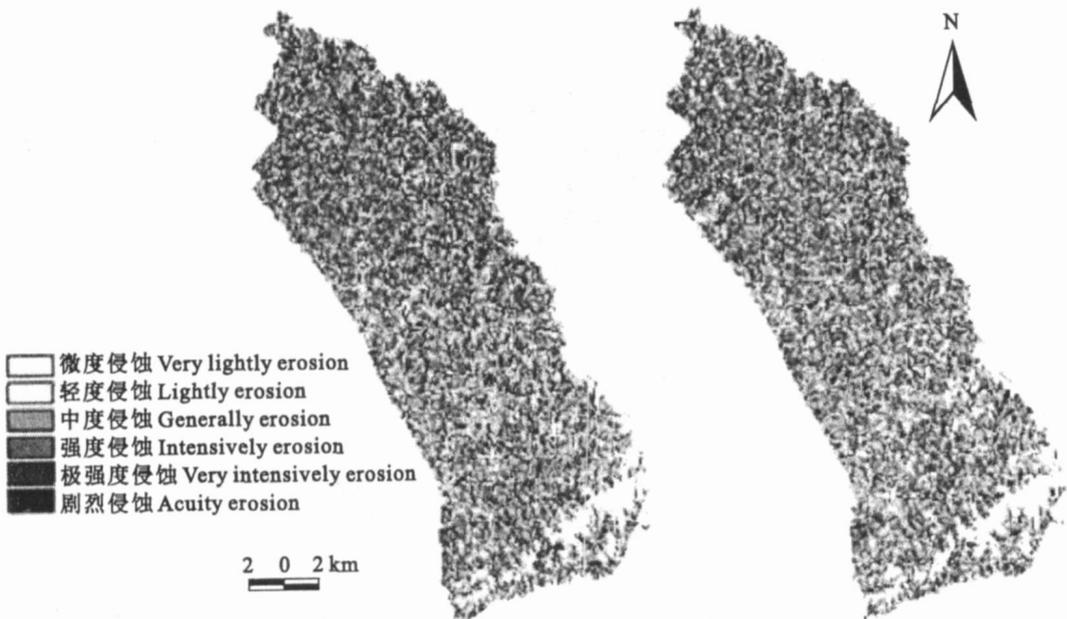


图 2 土壤侵蚀强度分布(左为 1998 年, 右为 2004 年)

Fig. 2 The distributes diagram of soil erosion (left: 1998, right: 2004)

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀现状分析

从表 2 中可以看出, 2004 年项目区土壤侵蚀面

积为 $32\,912\text{ hm}^2$, 中度以上的侵蚀面积占总侵蚀面积的 85.22%。研究区年侵蚀总量为 293.85 万 t, 62.2% 的泥沙来自于占区域面积仅 24.83% 的极强度和剧烈侵蚀区域, 中度和强度侵蚀区的土壤侵蚀

量占 33.92%，轻度侵蚀的土壤侵蚀量占 2.91%，而微度侵蚀(无明显侵蚀)的土壤侵蚀量仅占 0.97%。

研究区年平均侵蚀模数为 70.58 t/hm²，按照土壤侵蚀强度等级划分标准，属于强度侵蚀区。

表 2 土壤侵蚀等级相关项目统计

Table 2 The statistics for gradation of soil erosion

侵蚀模数 Erosion modulus [t/(hm ² ·a)]	土壤侵蚀等级 Gradation of soil erosion	1998			2004		
		平均侵蚀量 Average erosion [t/(hm ² ·a)]	面积 Area (hm ²)	侵蚀总量 Total erosion (10 ⁴ t/a)	平均侵蚀量 Average erosion [t/(hm ² ·a)]	面积 Area (hm ²)	侵蚀总量 Total erosion (10 ⁴ t/a)
0~10	微度 Very lightly	3.34	8190.99	2.74	3.28	8715.76	2.85
10~25	轻度 Lightly	17.44	4537.47	7.91	17.53	4862.91	8.52
25~50	中度 Generally	37.21	7536.45	28.05	37.11	8031.19	29.81
50~100	强度 Intensively	72.17	9444.77	68.17	72.17	9680.82	69.88
100~200	极强度 Very intensively	139.68	8533.75	119.21	137.84	7810.53	107.68
>200	剧烈 Acuity	300.95	3385.04	101.87	297.22	2527.06	75.11
合计 Total		78.77	41628.47	327.95	70.58	41628.27	293.85

3.2 土壤侵蚀变化和转化分析

研究区 2004 年的土壤侵蚀总量与 1998 年相比有所下降(表 2)，降幅为达 10.40%；其中剧烈侵蚀等级的侵蚀量减幅最大为 26.27%，其次是极强烈为 9.68%；强度侵蚀及其以下等级的侵蚀量都有所增加。就其面积来看，研究区 2004 年的土壤侵蚀面积与 1998 年相比有所下降，降幅达 1.57%；侵蚀面积减幅最大的仍然是剧烈侵蚀区为 25.35%，其次是极强烈为 8.48%；强度侵蚀及其以下等级区的侵蚀面积都有所增加。

在 ArcView GIS 软件支持下，对 1998 年和 2004 年两期土壤侵蚀强度类型图利用转换矩阵算法，可以求得从 1998 年到 2004 年的土壤侵蚀强度

各种类型的数量变化(表 3)。从表 3 来看，其中转化面积最大的是从 1998 年的极强度侵蚀转化到 2004 年的强度侵蚀，达 1 455.77 hm²，转化幅度为 17.06%。总的来看，表 3 的对角线矩阵数据，是 1998 年和 2004 年土壤侵蚀强度都没有变化的，右上三角矩阵土壤侵蚀强度都有不同程度的增强，合计面积为 425.35 hm²；左下三角矩阵土壤侵蚀强度都有不同程度的减弱，合计为 5 000.33 hm²，其中减弱为微度侵蚀的面积为 652.09 hm²。从此看出，从 1998 年到 2004 年，研究区的土壤侵蚀状况逐步得到好转，水土治理效果显著，退耕还林还草实施得较好。但也应看到，由于开矿、修路、气候干旱等原因，土壤侵蚀在部分区域有恶化趋势，但面积不大。

表 3 1998~2004 年庆城项目区各土壤侵蚀强度类型转换矩阵(hm²)

Table 3 Types change of soil erosion in the Qingcheng Area from 1998 to 2004

强度等级 Erosion intensity	微度 Very lightly	轻度 Lightly	中度 Generally	强度 Intensively	极强度 Very intensively	剧烈 Acuity	1998 年 合计 Total 1998
微度 Very lightly	8062.74	34.28	35.11	26.90	22.53	7.31	8188.87
轻度 Lightly	387.52	4079.90	26.40	33.60	8.70	1.29	4537.41
中度 Generally	65.33	658.90	6696.42	45.18	54.06	17.52	7537.41
强度 Intensively	78.72	66.72	1144.51	8077.26	48.63	29.69	9445.53
极强度 Very intensively	87.84	20.09	87.45	1455.77	6849.12	34.15	8534.42
剧烈 Acuity	32.68	2.61	41.78	42.55	827.86	2436.95	3384.43
2004 年合计 Total 2004	8714.83	4862.50	8031.67	9681.26	7810.90	2526.91	41628.07

3.3 土地利用类型与土壤侵蚀强度的关系

将土壤侵蚀图层与土地利用图层作叠置分析,求得研究区各土地利用类型的土壤侵蚀量(表 4)。由表 4 可看出,不同土地利用类型土壤侵蚀状况差异较大,难利用地(包括河滩地、裸土地、沙地和盐碱地)平均侵蚀量高达 $218.68 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属极强度侵蚀,侵蚀总量也很大,仅次于农田,占研究区侵蚀总

量的 16.88%。侵蚀总量最大的是农田(包括平原旱地、沟谷地、梯田、坡耕地和菜地),农田平均侵蚀量为 $81.62 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属强度侵蚀,超过黄土高原小流域最大容许土壤流失量的地类还有建设用地(包括乡镇居民地、农村居民地、工矿及交通用地),侵蚀模数为 $76.82 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属强度侵蚀,年土壤流失总量达到 5.84 万 t。

表 4 2004 年庆城县项目区不同土地利用类型下的土壤侵蚀状况

Table 4 The soil erosion of various land use types in 2004

土地利用类型 Landuse type	面积 Area(hm^2)							侵蚀总量 Total erosion (10^4 t/a)	比例 Proportion (%)	平均侵蚀量 Average erosion ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)
	微度 Very lightly	轻度 Lightly	中度 Generally	强度 Intensively	极强度 Very intensively	剧烈 Acuity	合计 Total			
农田 Farmland	3204.70	1907.67	3294.55	6454.01	6449.77	1012.74	22323.44	182.21	62.02	81.62
林地 Woodland	3290.15	274.78	483.11	1046.10	564.31	31.66	5690.11	19.62	6.68	34.49
草地 Grassland	1939.57	2549.25	4067.01	1815.31	82.99	69.62	10523.75	36.51	12.43	34.69
水体 Water bodies	60.27	0.51	1.12	0.44	0.29	0.10	62.73	0.04	0.01	5.57
建设用地 Construction Land	175.70	75.74	94.14	164.61	208.44	41.72	760.35	5.84	1.99	76.82
难利用地 Badland	45.27	54.65	91.91	200.69	504.74	1370.50	2267.76	49.59	16.88	218.68

3.4 坡度与土壤侵蚀强度的关系分析

将土壤侵蚀图层与坡度图层作叠置分析,求得研究区各级坡度的土壤侵蚀量(表 5)。由表 5 可看出,庆城项目区的 2004 年的土壤侵蚀面积在不同坡度情况下的分布状况差异较大,其中 $16 \sim 25^\circ$ 和 $26 \sim 35^\circ$ 的土壤侵蚀面积占总面积的比例最大,达到 65.89%,其次是 $9 \sim 15^\circ$ 的坡度,占 13.63%, $\leq 5^\circ$ 、 $6 \sim 8^\circ$ 和 $> 35^\circ$ 的情况下侵蚀面积比较小,分别占总面积的 8.46%、3.45% 和 8.57%。强度和极强度侵蚀的面积主要分布在 $16 \sim 25^\circ$ 和 $26 \sim 35^\circ$ 的坡度,分别占该侵蚀等级分布面积的比例为 78.69% 和

86.17%。

不同坡度土壤侵蚀状况差异较大, $> 35^\circ$ 平均侵蚀量高达 $142.14 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属极强度侵蚀,侵蚀总量也很大,仅次于 $16 \sim 25^\circ$ 和 $26 \sim 35^\circ$,占研究区侵蚀总量的 17.27%。侵蚀总量最大的是 $26 \sim 35^\circ$,占总侵蚀量的 42.51%,其次是 $16 \sim 25^\circ$,占总侵蚀量的 31.69%。 $26 \sim 35^\circ$ 平均侵蚀量为 $101.68 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,也属极强度侵蚀,超过黄土高原小流域最大容许土壤流失量的坡度级还有 $16 \sim 25^\circ$,侵蚀模数为 $61.49 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属强度侵蚀,年土壤流失总量达到 93.12 万 t。

表 5 2004 年庆城县项目区不同坡度级的土壤侵蚀

Table 5 The soil erosion of various slopes in 2004

土地利用坡度 Gradient ($^\circ$)	面积 Area(hm^2)							侵蚀总量 Total erosion (10^4 t/a)	比例 Proportion (%)	平均侵蚀量 Average erosion ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)
	微度 Very lightly	轻度 Lightly	中度 Generally	强度 Intensively	极强度 Very intensively	剧烈 Acuity	合计 Total			
≤ 5	2865.51	422.21	138.78	68.59	23.43	3.07	3521.59	3.10	1.06	8.81
$6 \sim 8$	611.20	479.29	222.910	92.32	28.30	3.75	1437.77	3.03	1.03	21.11
$9 \sim 15$	1466.27	1398.10	1673.56	938.67	174.42	20.58	5671.60	18.93	6.44	33.38
$16 \sim 25$	2150.01	2053.40	3267.85	5237.42	2102.60	333.35	15144.63	93.12	31.69	61.49
$26 \sim 35$	1248.89	447.72	2446.42	2380.25	4627.60	1132.53	12283.41	124.90	42.51	101.68
> 35	373.79	62.19	281.67	963.57	854.18	1033.78	3569.18	50.73	17.27	142.14

4 结 语

根据研究区的计算结果,难利用地、建设用地和农田(主要是坡耕地)三类土地利用类型具有相对较高的侵蚀模数,这是因为这几类土地利用类型植被覆盖度低或具有一定的地形坡度,同时受人为耕作影响频繁,土壤受重力、人类活动、降雨径流冲刷作用明显。为防止本研究区水土流失,必须采取合理有效的防治措施。

如果将强度以上土壤侵蚀区域减少到中度侵蚀,则流域泥沙可减少 178.38 万 t,侵蚀模数下降到 27.74 t/(hm²·a),侵蚀强度下降一个等级。因此现在流域治理的重点应是面积占 48.08%的土壤流失强度区。植被覆盖度的增加和坡耕地、裸地面积的减少是降低侵蚀强度与减少流失量的主要途径,常用减少水土流失的方法有 2 种^[9]:植树造林和坡改梯。坡改梯可减少产沙量 60%左右,植树造林可将 C 值从 0.31 或 0.36 降到 0.006 或 0.017,减少产沙量 85%以上。显然采用坡改梯措施将极强度侵蚀降到中度侵蚀不太容易,而植树造林、退耕还林还草是可行的。

参 考 文 献:

- [1] 傅伯杰,陈利顶,邱 扬,等.黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M].北京:科学出版社,1998.
- [2] 孙希华,闫福江.基于遥感和 GIS 的青岛市土壤侵蚀遥感监测动态变化研究[J].山东科学,2004,17(1):36-39.
- [3] 卜兆宏,孙金庄,董勤瑞,等.应用水土流失定量遥感方法监测山东全省山区的研究[J].土壤学报,1999,36(1):1-8.
- [4] Wischemier W H. A soil erodibility nomograph farm land and construction sites [J]. Soil and Water Conservation, 1971, 26: 189-193.
- [5] 刘宝元,张科利,焦菊英,等.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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国行业标准.土壤侵蚀分类分级标准 SL190-96 [S].北京:中国水利水电出版社,1997.2-16.
- [9] 罗志军,刘耀林,贾泽露.基于 RS 和 GIS 的小流域土壤侵蚀量估算研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2005,39(2):269-272.

Quantitative survey of the soil erosion change based on GIS and RS

—Take the Qingcheng area as an example

WANG Ming-chong¹, PAN Jing-hu², ZHAO Jun²

(1. Department of Resources & Environment, Foshan College of Science and Technology, Foshan, Guangdong 528000;

2. College of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Desktop GIS software, i. e. ArcMap and ArcView, is used to establish the spatial database, including boundary of study area, landuse, soil category, plant, etc. Based on the GIS's function of raster spatial analysis, the study area is discreted into uniform grids with the cell of 10 m × 10 m. According to the database management function of GIS software, RUSLE is integrated with ArcView and ArcGIS to predicted soil erosion in the study area after reading the database document and selecting reasonable RUSLE factor values. With the help of map algebra operation of the GIS software, we have got the grid diagram of soil erosion quantity by multiplying each factor. Carrying on a classification towards the grid diagram of erosion, we acquired the grade diagram of the soil erosion, too. Then we use the diagram of soil erosion to get the overlay between it and the diagram of landuse, also between the diagram of DEM slope. Ultimately, we have acquired the soil erosion quantity based on the condition of different landuse and different slope. This text also gets the relationships between soil erosion and land using type, slope.

Keywords: universal soil loss equation; soil erosion; quantitative survey; remote sensing; GIS