

# 丹江口库区水土流失遥感监测应用研究 ——以商南县为例

张锦凰<sup>1</sup>, 刘丹强<sup>2</sup>, 姜小三<sup>3\*</sup>, 卞新民<sup>1\*</sup>

(1.南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095; 2.商南县水务局, 陕西 商南 726300; 3.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:**基于水土流失监测模型 QRSM,研究了丹江口库区商南县共 698 条集水区构成的小流域水土流失现状。结果表明,微度和轻度侵蚀面积占总面积的 63.43%,流失量占总侵蚀量的 5.27%,集中在商南县北部和南部治理区,水土流失轻度等级以上面积达 57.92%。极强度和剧烈侵蚀面积占总面积的 20.40%,侵蚀量占总侵蚀量的 87.14%,是造成全县水土流失的主要区域,集中分布在以县城为中心的主河道两岸,从 698 条小流域整体分布来看,中、轻度侵蚀以上面积占总面积百分比超过 40%的小流域达 560 条,占全部 698 条小流域总数的 80.2%。

**关键词:**丹江口库区;水土流失;遥感监测;水土流失监测模型

中图分类号:X144

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)02-0162-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0344

## Research on Soil Erosion Using Remote Sensing Method in Danjiangkou Reservoir —A Case Study of Shangnan County

ZHANG Jin-huang<sup>1</sup>, LIU Dan-qiang<sup>2</sup>, JIANG Xiao-san<sup>3\*</sup>, BIAN Xin-min<sup>1\*</sup>

(1.College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Shangnan County Water Authority, Shangnan 726300, China; 3.Center of Resources and Environment Information Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** The current status of soil loss in 698 small watersheds in Shangnan County in Danjiangkou Reservoir area was investigated based on the quantitative remote sensing model (QRSM). The results showed that the area for weak erosivity and slight erosivity occupied 63.43% of the total study area, the amount of soil loss accounted for 5.27% of total soil erosivity, which focused on the treated area of north and south part of Shangnan county. The percentage of the area for slight erosivity and above reached to 57.92%. The area for high erosivity and violent erosivity was up to 20.4% of total area, and the soil loss up to 87.14%, which mainly located in the region along the main river around the county city. From the small watershed, the amount of the watershed with the area of slight and moderate erosivity exceeding 40% was up to 560 watersheds, and occupied 80.2% of the total small watersheds in the county.

**Keywords:** Danjiangkou Reservoir; soil and water loss; remote sensing monitor; quantitative remote sensing model (QRSM)

长江上游丹江口库区是我国南水北调中线工程主要水源地,南水北调工程的实施,很大程度上造成长江流域水土流失加剧、生态环境遭到严重破坏<sup>[1-3]</sup>。由于水土流失监测工作的滞后,使得水土流失变化情况缺乏令人信服的科学数据<sup>[4]</sup>。

随着计算机科学信息技术的快速发展,水土流失定量遥感调查方法已成为新的研究领域和热点。将卫

星遥感数据与降雨、地形、土壤、土地利用等非遥感资料数据结合,综合考虑降雨侵蚀动力因子、土壤可侵蚀性因子、土壤地形因子和土壤植被覆盖与工程措施保持因子,实现从流失量到侵蚀强度级别的判定<sup>[4-9]</sup>。水土流失定量遥感调查法包括影响土壤侵蚀的各个因素,避免了人为定级的主观性、随意性。本研究的目的是探索长江上游地区有效监测土壤流失量的方法,建立水土流失管理信息数据库,为快速、实时、准确地开展该区域水土流失监测和预报提供科技支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长江三级水系丹江发源于陕西省秦岭南坡凤凰

收稿日期:2014-12-02

基金项目:丹江治理工程长江委员会“长江流域上游土壤侵蚀定量计算检测方法研究”(2009112803)

作者简介:张锦凰(1970—),男,陕西榆林人,博士研究生,高级讲师,研究方向为生态农业。E-mail: zhanghs8228@126.com.

\* 通信作者:卞新民 E-mail: bjxlm1@163.com

姜小三 E-mail: xsjiang@163.com

山,自陕西商州经河南淅川县由西北向东南流入丹江口水库,是南水北调源头之一。丹江口水库水源区水土流失综合治理项目涉及陕、豫、鄂、甘、川、渝6省(市)49个县(市、区),土地总面积9.52万km<sup>2</sup>,水土流失面积5.07万km<sup>2</sup>,是长江流域侵蚀强度最大、产沙强度最高的地区。商南县位于长江上游丹江口库区,地理位置110°24′~111°01′E,33°06′~33°74′N,面积2313km<sup>2</sup>,多年平均降水量682.8~925.4mm。商南县地势西高东低,境内沟谷交织,河流密布。海拔216.4~2057.9m,地势高差大,属以中低山为主的山地丘陵沟谷区,低山、丘陵占总面积的77%。丹江自西向东横贯中部,把全县分成南、北两部分,北部属于秦岭南麓蟒岭东延区,南部是新开岭山地,属于长江流域典型的山区气候。大于15°的较陡坡面积1613.83km<sup>2</sup>,占总面积的67.75%。

全县人口24.2万,其中农业人口占58.8%,人口密度约105人·km<sup>-2</sup>。2011年农业经济总量18.25亿元,工业经济总量11.34亿元。工业经济总量增幅迅速,较1991年增加了94%,主要在县域附近进行工业开发。

## 1.2 研究方法

水土流失定量遥感监测 QRSM(Quantitative Remote Sensing Model)模型<sup>[4-5]</sup>是基于美国土壤流失方程 USLE 和修订的通用土壤流失方程 RUSLE<sup>[6-9]</sup>思想架构,由卜兆宏等根据大量实测资料所建立,在多地得到应用<sup>[10-12]</sup>。其算法表达式为:

$$A=f \times R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中, $A$ —年平均流失量; $R$ —降雨侵蚀力因子; $K$ —土壤可蚀性因子; $LS$ —地形因子; $C$ —植被覆盖因子; $P$ —水土保持措施因子; $f$ —常数等于224.2,单位转换为t·km<sup>-2</sup>综合常数。

侵蚀雨量与侵蚀动能的关系密切,汛期雨量 $P_f$ 与年流失量相关性较高,采用最大30min雨强( $I_{30B}$ )的年代表值 $I_{30B}$ 将年总动能转化为 $R$ 值,建立降雨侵蚀力 $R$ 的算法表达式<sup>[13-14]</sup>。这种算法仅用汛期雨量 $P_f$ 和年 $I_{30B}$ 估算降雨侵蚀力,数据易获取,处理较容易,精度一致<sup>[15-16]</sup>。估算式为:

$$R_n=0.128P_f I_{30B}-0.192I_{30B} \quad (2)$$

计算结果表明,使用该式平均精度达到89.9%<sup>[11-12]</sup>。可用于本次研究。

$K$ 值的计算与 $K$ 值图的研制,是基于研究区不同土壤类型100多个剖面点实测数据,矫正不同土壤类型土壤剖面点的有机质、机械组成等土壤普查数据,

利用公式法计算不同土壤类型土壤剖面点的土壤 $K$ 值,然后对土壤图的不同土壤类型赋相应土壤所属的 $K$ 值。计算过程中根据土壤有机质、不同机械组成划分渗透级别与土壤结构等系数<sup>[17-18]</sup>,使土壤可蚀性 $K$ 值更符合应用区域的实际。

$$K=[2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12-M_0)+3.25(S-2)+2.5(I-3)]/100 \quad (3)$$

式中: $K$ 为土壤可蚀性; $M$ 为粉砂与极细砂的百分含量之和与土壤除去粘粒后的百分含量之积; $M_0$ 为土壤有机质含量; $S$ 为结构系数; $I$ 为渗透性等级。该方程尤其适用于温带中质地土壤。

在USLE和RUSLE中,地形对土壤流失的影响用坡度坡长因子( $LS$ )表示<sup>[6]</sup>。根据单位水流功率理论推导出具有物理基础的 $LS$ 计算方法<sup>[7-9]</sup>,所建立的计算USLE模型中坡度坡长 $LS$ 因子的方程式应用得较为广泛<sup>[19-20]</sup>。

$$LS=(A_s/22.13)^m \times (\sin \beta / 0.896)^n \quad (4)$$

式中: $A_s$ 为坡面面积; $\beta$ 为坡度; $m$ 、 $n$ 为常数,分别取值0.4~0.6和1.20~1.30。

在水土流失定量遥感监测模型中,采用的植被因子与植被覆盖度关系式算法是卜兆宏等<sup>[21-22]</sup>提出的“用于土壤流失量遥感监测的植被因子算式”即:

$$C=0.450-0.00786c \quad (5)$$

式中: $C$ 为年平均植被覆盖度,以百分数表示。而 $c$ 即为代入水土流失定量监测方程的植被因子值。

采用ERDAS软件处理遥感数据与图像分类。将卫星影像文件转换为image格式,在Arcview软件Warp模块下用商南县1:5万地形图对卫星影像进行几何校正,误差保证在1/2个象元以内,用掩模运算获取商南县域的卫星遥感影像。在IDRISI软件下对其进行监督分类与最大似然法进行交互式混合分类,将不同植被覆盖度地区分出来,采用相应时期土地利用图,采取随机点位进行验证,分类精度达到93.2%,得到各类地物植被覆盖度 $C$ 值(百分数)影像资料,最后利用公式(5)进行计算<sup>[21-22]</sup>。

## 1.3 数据及处理

### 1.3.1 资料收集

本研究所收集到的资料包括商南县1:5万地形图14幅,用于建立研究区数字高程模型,提取坡长坡度因子,并用于精校正遥感图像;商南县13个雨量站的雨量数据;商南县2010年1:5万土地利用图,作为遥感图像解译的参考;商南县土壤类型图及二次土壤普查数据,用于估算当地土壤可蚀性因子;2010年9

月环境小卫星(HJ-1B)图像资料,空间分辨率可达 5 m,用于进行植被覆盖与水保措施因子以及土地利用解译等方面的研究。

### 1.3.2 数据处理

对地形图、土壤图、土地利用图,分别进行扫描、几何配准、矢量化、拼接,分层保存与管理;对遥感图像进行几何精校正、去除干扰信息、图像增强、信息提取、图像分类,并进行预处理和格式转换,建立统一的投影与坐标系统。

#### 1.3.2.1 降雨侵蚀力 $R$ 值的计算与制图

整理 13 个雨量站所记录数据,获取年内次降雨过程,用式(2)估算雨量站的  $R$  值,见表 1。

表 1 商南县雨量站点降雨侵蚀力

Table 1 Rainfall position of rainfall erosivity of Shangnan

| 站点名称 | 站点经纬度            | 站点类型 | $R_n$  |
|------|------------------|------|--------|
| 商南   | 33.54°N 110.54°E | 一般站  | 311.09 |
| 曹营   | 33.62°N 110.86°E | 一般站  | 277.73 |
| 富水   | 33.50°N 110.98°E | 一般站  | 288.98 |
| 过风楼  | 33.43°N 110.78°E | 一般站  | 248.49 |
| 赵川   | 33.18°N 110.70°E | 一般站  | 201.37 |
| 魏家台  | 33.25°N 110.83°E | 一般站  | 225.64 |
| 耀岭河  | 33.34°N 110.69°E | 一般站  | 232.04 |
| 马蹄店  | 33.40°N 110.95°E | 一般站  | 267.77 |
| 太吉河  | 33.41°N 110.58°E | 一般站  | 265.40 |
| 鹦鹉沟  | 33.51°N 110.90°E | 代表站  | 244.56 |
| 马槽沟  | 33.05°N 110.94°E | 代表站  | 302.78 |
| 气象站  | 33.53°N 110.89°E | 一般站  | 292.22 |
| 清油河  | 33.62°N 110.74°E | 一般站  | 149.87 |

注:鹦鹉沟和马槽沟为独立设置的 2 个雨量站,用于 QRSM 模型  $PI$  与 USLE 经典算法  $EI$  比较, $R$  值预报效果一致性达 90% 以上,其他 11 个雨量站为商南县气象固定雨量观测站。

GIS 技术支持下,采用 Kriging 法进行 30 m×30 m 像元空间插值,交叉验证插值精度在允许范围(图 1)。

#### 1.3.2.2 土壤可蚀性 $K$ 值估算

以矫正后的不同类型土壤有机质、机械组成等资料(表 2),利用公式(3)计算不同土壤类型土壤剖面点  $K$  值,结合土壤类型图,制作研究区土壤可蚀性  $K$  值图(图 2)。本研究在  $K$  值计算中,根据流域内部土壤有机质、不同土壤机械组成的实际来划分渗透级别与土壤结构等系数,使土壤可蚀性  $K$  值更符合应用区域实际情况。

#### 1.3.2.3 小流域边界提取及坡度等级划分

利用 1:5 万地形图,数字化等高线与高程点,在 ArcGIS 中,模拟制作商南 1:5 万数字高程模型(DEM),

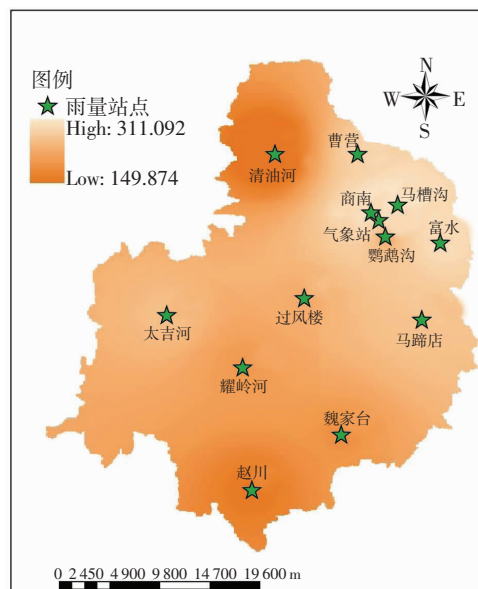


图 1 商南县降雨侵蚀力

Figure 1 Rainfall erosivity Map

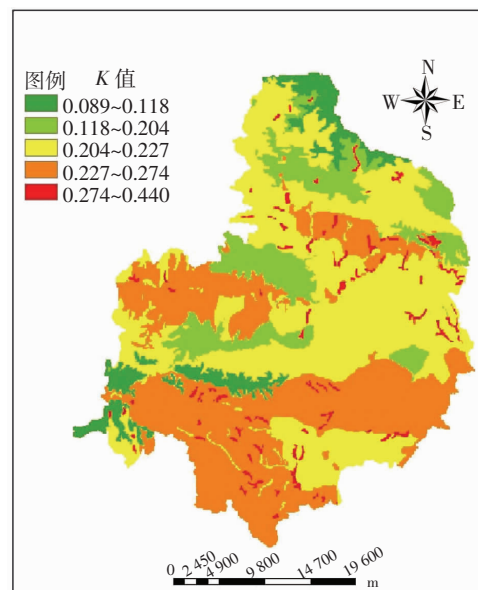


图 2 商南县土壤可蚀性图

Figure 2 Soil erodibility map

进而提取地形因子和坡度特征,获得地形坡度等级图。采用 ENVIRIVER TOOLS,进行子流域边界提取,得到全县 698 条小流域分布图。

#### 1.3.2.4 地形 $LS$ 因子估算

采用公式(4),以像元为基础进行坡度和坡长因子估算(图 3)。

#### 1.3.2.5 遥感图像的处理及 $CP$ 因子估算

对收集到的环境小卫星遥感数据解译,结合商南县土地利用图进行分类,将地面分为山地、坡度和平

地 3 大类,根据植被覆盖和土地类型提取地面覆盖和工程措施  $CP$  因子(图 4)。

$CP$  因子计算是根据遥感影像资料上各类地物的植被覆盖度,用卜兆宏等<sup>[21-22]</sup>植被因子与植被覆盖度关系算式公式(5)计算求得植被因子值  $C$ 。 $C$  是反映植被覆盖状况或作物管理因子,为无量纲参数。当地面完全裸露时, $C$  值为 1.0;而当地面得到良好的保护时, $C$  值为 0.001。对于  $P$ ,0 值代表无侵蚀地区;1 值

表 2 矫正后各土属类型机械组成及  $K$  值

Table 2 Aechemical components and  $K$  values of soil type of after correction

| 土类  | 土属          | 土壤代码 | 砂粒含量 /% | 粉粒含量 /% | 黏粒含量 /% | 有机质含量 /% | $K$ 值   | 占总面积比例 /% |
|-----|-------------|------|---------|---------|---------|----------|---------|-----------|
| 水稻土 | 冲积洪积型淹育性水稻土 | 113  | 41.05   | 36.32   | 22.63   | 1.67     | 0.283 5 | 0.099 2   |
|     | 黄褐土型淹育性水稻土  | 112  | 30.84   | 36.59   | 32.57   | 1.67     | 0.292 6 | 0.012 2   |
|     | 冲积洪积型潜育性水稻土 | 123  | 43.03   | 35.85   | 21.12   | 2.40     | 0.252 1 | 0.018 3   |
|     | 黄褐土型潜育性水稻土  | 121  | 29.87   | 38.68   | 31.45   | 2.09     | 0.282 8 | 0.028 8   |
| 潮土  | 壤质潮土        | 212  | 51.99   | 35.25   | 12.76   | 1.19     | 0.288 9 | 0.153 4   |
|     | 沙质潮土        | 213  | 88.36   | 9.68    | 1.97    | 0.35     | 0.120 3 | 0.061 5   |
|     | 壤质湿潮土       | 222  | 30.56   | 58.33   | 11.11   | 1.23     | 0.383 1 | 0.042 5   |
| 新积土 | 洪积新积土       | 312  | 45.30   | 38.70   | 16.00   | 1.20     | 0.303 9 | 1.906 4   |
|     | 冲积新积土       | 313  | 55.12   | 28.34   | 16.55   | 1.52     | 0.253 6 | 1.534 6   |
| 黄棕壤 | 泥质岩类黄棕壤     | 431  | 38.31   | 35.96   | 25.73   | 2.32     | 0.257 9 | 5.856 9   |
|     | 沙质岩类黄棕壤     | 432  | 46.87   | 33.02   | 20.11   | 1.96     | 0.257 8 | 6.577 1   |
|     | 石灰岩类始成黄棕壤   | 443  | 51.00   | 45.23   | 3.76    | 4.16     | 0.254 8 | 33.848 7  |
|     | 泥质岩类始成黄棕壤   | 441  | 37.22   | 36.38   | 26.40   | 2.56     | 0.251 6 | 28.766 3  |
|     | 沙质岩类始成黄棕壤   | 442  | 43.89   | 30.76   | 25.35   | 2.41     | 0.234 2 | 12.150 5  |
|     | 下蜀黄土质黄褐土    | 411  | 23.68   | 36.46   | 39.86   | 1.21     | 0.314 1 | 1.415 8   |
| 棕壤  | 泥质岩类棕壤      | 511  | 41.13   | 41.83   | 17.04   | 4.97     | 0.245 7 | 0.396 9   |
|     | 沙质岩类棕壤      | 512  | 60.94   | 29.69   | 9.37    | 5.09     | 0.205 7 | 2.444 8   |
|     | 沙质岩类始成棕壤    | 531  | 59.85   | 35.45   | 4.70    | 5.84     | 0.223 6 | 3.412 1   |
|     | 泥质岩类始成棕壤    | 532  | 78.00   | 17.84   | 4.16    | 20.80    | 0.148 6 | 0.221     |
| 紫色土 | 红色沙砾石灰性紫色土  | 611  | 64.58   | 28.60   | 6.82    | 34.10    | 0.201 8 | 0.413 4   |
|     | 紫色页岩石灰性紫色土  | 612  | 63.84   | 23.58   | 12.58   | 1.73     | 0.227 9 | 0.639 8   |

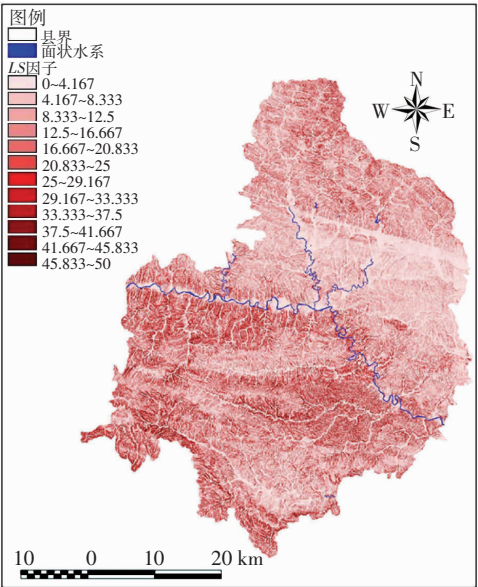


图 3 商南县土壤侵蚀  $LS$  因子图

Figure 3 Erodibility factor  $LS$  map

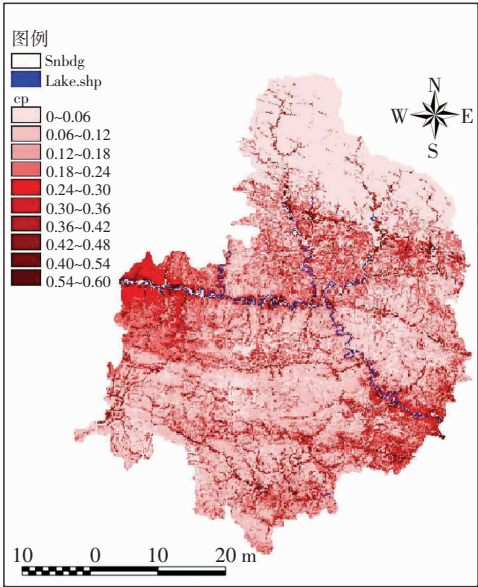


图 4 商南县土壤侵蚀  $CP$  因子图

Figure 4 Erodibility  $CP$  factor map

则用于表示未采取任何水保措施的地区。 $C$  和  $P$  值均在 0~1 之间变化。在所有土壤侵蚀因子中  $CP$  因子对侵蚀量的影响最大,  $CP$  因子作为侵蚀动力的抑制因子, 反映了植被或作物以及管理措施对土壤流失的影响。

#### 1.3.2.6 模型因子叠加

将商南县降雨侵蚀力图、土壤可蚀性图、地形因子  $LS$  值图、 $CP$  因子图进行叠加运算, 获取像元土壤流失量, 进行空间的统计和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水土流失监测数据分析

商南县 2010 年水土流失定量监测结果统计, 见表 3。经与商南县当地水保部门核实, 平均侵蚀模数基本与当地情况符合。可以看出, 微度水土流失面积占全县总面积的 37.38%, 轻度水土流失面积占全县总面积的 26.05%, 中度水土流失面积占全县总面积的 7.16%, 强度水土流失面积占全县总面积的 4.32%, 极强度水土流失面积占全县总面积的 6.56%, 剧烈水土流失面积占全县总面积的 13.84%。总体上, 轻度流失以上面积达 68.13%, 占一半以上。

表 3 小流域水土流失量监测结果统计  
Table 3 The statistical results of monitoring soil erosion

| 侵蚀等级      | 侵蚀模数 / $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ | 面积 / $km^2$ | 流失量 / $t$ |
|-----------|---------------------------------------|-------------|-----------|
| 水域        | 0                                     | 108.68      | 0         |
| 微度        | $\leq 500$                            | 864.42      | 172 884   |
| 轻度        | 500~2 500                             | 602.38      | 301 190   |
| 中度        | 2 500~5 000                           | 165.54      | 413 852   |
| 强度        | 5 000~8 000                           | 99.82       | 499 100   |
| 极强度       | 8 000~15 000                          | 151.60      | 1 212 800 |
| 剧烈        | $\geq 15 000$                         | 320.08      | 4 801 200 |
| $\geq$ 轻度 |                                       | 1 575.48    |           |
| 平均侵蚀模数    | 3 200.43                              |             |           |
| 流失总量      |                                       | 2 312.51    | 7 401 024 |

### 2.2 轻度流失等级以上小流域分布

全县 698 条小流域中, 轻度侵蚀以上面积占小流域总面积百分比超过 40% 的达 560 条, 占全部 698 条小流域总数的 80.2%; 绝大多数小流域呈现出轻度侵蚀以上的状况(图 5)。

进一步分析结果显示, 侵蚀模数超过  $5 000 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$  的小流域, 占 24.71%, 即侵蚀等级在强度以上(包括强度)的小流域, 在商南地区占近 1/4, 侵蚀模数小于  $2 500 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$  的小流域, 占 63.43%, 即侵蚀等级在中度以下(不包括中度)的小流域, 在商南地区

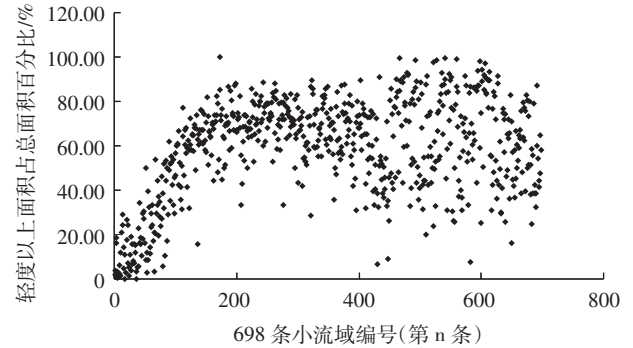


图 5 698 条小流域轻度侵蚀以上面积百分比分布

Figure 5 The percentage of areas of mild erosion

占近 2/3。

### 2.3 不同侵蚀度的面积与侵蚀量关系

从监测结果可以看出微度和轻度侵蚀面积占总面积的 63.43%, 流失量占总侵蚀量的 5.27%, 主要分布在人口稀少的山区, 主要是由于人类居住和生活破坏造成的, 要加大该区域的治理; 中度和强度侵蚀面积占总面积的 10.88%, 流失量占总侵蚀量的 7.59%, 主要分布在中部山区, 该区人口密度较大, 对土壤过度开发利用; 极强度和剧烈侵蚀面积占总面积的 20.40%, 流失量占总侵蚀量的 87.14%, 是造成全县水土流失的主要侵蚀区, 主要分布在中部地区, 说明该区域水土流失情况已非常严重, 剧烈侵蚀强度面积虽小, 但土壤受侵蚀危害很大, 是综合治理的重点区域(图 6)。

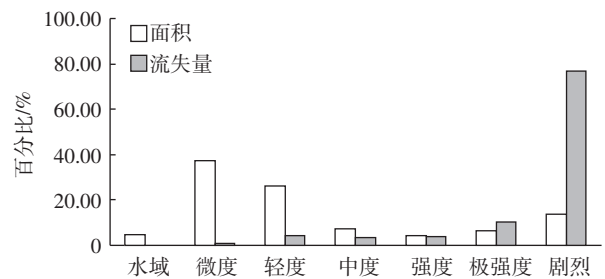


图 6 小流域水土流失面积与流失量比较

Figure 6 Comparison of soil erosion area and loss volume

### 2.4 小流域平均侵蚀模数等级分布

全县 698 条小流域平均侵蚀模数达到极强度和剧烈程度有 462 条, 面积占到总面积的 66.75%, 土壤流失量占总流失量的 86.69%, 是整个商南县主要水土流失区域。从商南县监测结果看出除了地势较高、山地为主的县境北部和西南部因为林木覆盖土壤保持较好之外, 侵蚀强度较大的小流域主要分布在中部区和东南部区域, 且分布面积很广, 该区域是丘陵低

山和川道地区,因人口稠密,人为活动频繁,坡耕地分布多,道路建设、坡地耕作等人类活动频繁,造成森林减少,植被稀疏,加剧了水土流失的发生(图 7)。

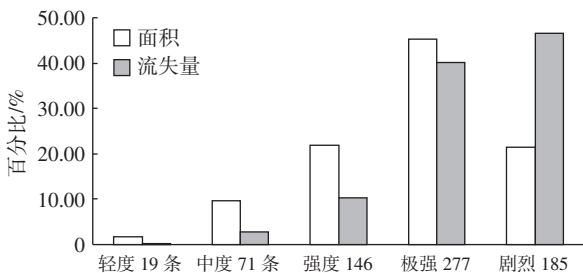


图 7 商南县 698 条小流域平均侵蚀模数等级分布

Figure 7 Average erosion modulus level distribution of catchments

### 3 结论

对商南县全县 698 条小流域水土流失进行了全面监测,从监测结果可以看出微度和轻度侵蚀面积占总面积的 63.43%,水土流失量占总侵蚀量的 5.27%,主要分布在商南县的北部和南部治理区;水土流失轻度等级以上面积达 57.92%,占一半以上,该区域在今后应加强综合治理的管护工作;极强度和剧烈侵蚀面积占总面积的 20.40%,侵蚀量占总侵蚀量的 87.14%,是造成全县水土流失的主要侵蚀区,该区域主要分布在以县城为中心主河道两岸区域,主要是由于人为的过度开发利用和破坏造成的,今后应合理规划,限制不合理的开发和加大治理措施。从 698 条小流域整体分布来看,中轻度侵蚀以上面积与小流域总面积百分比超过 40%的达 560 条,占全部 698 条小流域总数的 80.2%;绝大多数小流域呈现出轻度等级以上的侵蚀状况。

#### 参考文献:

[1] 严 军,胡建兰,苗 卉,等.南水北调对长江流域水资源承载力的影响及水资源优化配置方法[J].水力发电学报,2007,26(3):105-109.  
YAN Jun, HU Jian-lan, MIAO Hui, et al. The influence of South-to-North water transfer project on the water resources load capacity of the Yangtze River basin and the methods to optimize the allocation of water resources[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(3): 105-109.(in Chinese)  
[2] 苗 卉,严 军,丁占稳,等.南水北调对长江水资源承载力影响的初步分析[J].人民黄河,2006,28(3):40-41.  
MIAO Hui, YAN Jun, DING Zhan-wen, et al. The pilot study of influence of south-to-north water transfer project on the water resources load capacity of the Yangtze River[J]. *Yellow River*, 2006, 28(3): 40-41.(in Chinese)

[3] 李思悦,张全发.运用水质指数法评价南水北调中线水源地丹江口水库水质[J].环境科学研究,2008,21(3):61-68.  
LI Si-yue, ZHANG Quan-fa. Assessing the water quality in the water source area of the middle route of the south-to north water transfer project (Danjiangkou Reservoir) using a water quality index method[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(3): 61-68.(in Chinese)  
[4] 卜兆宏,唐万龙,席承藩,等.水土流失定量遥感方法应用与研究的新进展[J].世界科技研究与发展,2000,S1:64-67.  
BU Zhao-hong, TANG Wan-long, XI Cheng-pan, et al. The advancement of the application and study of quantitative remote sensing method for soil erosion loessess[J]. *World Sci-Technology Research and Development*, 2000, S1: 64-67.(in Chinese)  
[5] 卜兆宏,孙金庄,周伏建,等.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):235-245.  
BU Zhao-hong, SUN Jin-zhuang, ZHOU Fu-jian, et al. A study on quantitative remote sensing method of soil erosion and its application[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 1997, 34(3): 235-245.(in Chinese)  
[6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses[M]. USDA Handbook, No1537, 1978.  
[7] 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]. USDA Handbook, No1537, 1997.  
[8] 郑国权,张晓远,刘协亭.基于GIS的广东省水土流失潜在危险度评价[J].水土保持通报,2014,34(2):139-142.  
ZHENG Guo-quan, ZHANG Xiao-yuan, LIU Xie-ting. Assessment on potential danger degree of soil and water loss in Guangdong Province based on GIS[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(2): 139-142.(in Chinese)  
[9] 邓 辉,何政伟,陈 晔,等.基于GIS和RUSLE模型的山地环境水土流失空间特征定量分析——以四川泸定县为例[J].地球与环境,2013(6):120-125.  
DENG Hui, HE Zheng-wei, CHEN Ye, et al. The spatial features of soil erosion in mountain environment based on GIS and RUSLE--A case study in Sichuan Luding[J]. *Earth and Environment*, 2013(6): 120-125.(in Chinese)  
[10] 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丘区的研究[J].土壤学报,1999(1):1-8.  
BU Zhao-hong, SUN Jin-zhuang, DONG Qin-rui, et al. Study on quantitative remote sensing method for soil erosion loessess and its application in Shandong Province, China[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 1999(1): 1-8.(in Chinese)  
[11] 卜兆宏,唐万龙,杨林章,等.水土流失定量遥感方法新进展及其在太湖流域的应用[J].土壤学报,2003(1):1-9.  
BU Zhao-hong, TANG Wan-long, YANG Lin-zhang, et al. The progress of quantitative remote sensing method for soil erosion loessess and its application in Taihu-lake catchments[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2003(1): 1-9.(in Chinese)  
[12] 卜兆宏,卜宇行,陈炳贵,等.用定量遥感方法监测 UNDP 试区小流域水土流失研究[J].水科学进展,1999(1):32-37.  
BU Zhao-hong, BU Yu-hang, CHEN Bing-gui, et al. A study on monitoring soil erosion loss in small valley of UNDP experiment region by

- using quantitative remote sensing method[J]. *Advances in Water Science*, 1999(1): 32-37.(in Chinese)
- [13] 卜兆宏, 唐万龙. 降雨侵蚀力(R)最佳算法及其应用的研究成果简介[J]. 中国水土保持, 1999(6): 18-19.  
BU Zhao-hong, TANG Wan-long. The optimized method for rainfall erosivity (R) and the brief introduction of the research of its application[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1999(6): 18-19.(in Chinese)
- [14] 卜兆宏, 宫世俊, 阮伏水, 等. 降雨侵蚀力因子的算法及其在土壤流失量监测中的选用[J]. 遥感技术与应用, 1992(3): 1-10.  
BU Zhao-hong, GONG Shi-jun, YUAN Fu-shui, et al. Preliminary study on the algorithms of erosivity factor of rainfall and their application in monitoring soil loss[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1992(3): 1-10.(in Chinese)
- [15] 陈 丹, 姜小三. 丹江流域典型地区降雨侵蚀力的研究[J]. 南京农业大学学报, 2012(3): 138-142.  
CHEN Dan, JIANG Xiao-san. Study on rainfall erosivity in typical region along Danjiang River catchment[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012(3): 138-142.(in Chinese)
- [16] 胡续礼, 姜小三, 杨树江, 等. 降雨侵蚀力简易算法地区适用性的初步探讨[J]. 中国水土保持科学, 2006(5): 44-49.  
HU Xu-li, JIANG Xiao-san, YANG Shu-jiang, et al. Preliminary study on adaptability of rainfall erosivity model to different regions[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006(5): 44-49.(in Chinese)
- [17] 卜兆宏, 杨林章, 卜宇行, 等. 太湖流域苏皖汇流区土壤可蚀性 K 值及其应用的研究[J]. 土壤学报, 2002(3): 296-300.  
BU Zhao-hong, YANG Lin-zhang, BU Yu-hang, et al. Soil erodibility (K) value and its application in Taihu Lake catchment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002(3): 296-300.(in Chinese)
- [18] 姜小三, 潘剑君, 杨林章, 等. 土壤可蚀性 K 值的计算和 K 值图的制作方法研究——以南京市方便水库小流域为例[J]. 土壤, 2004(2): 177-180.  
JIANG Xiao-san, PAN Jian-jun, YANG Lin-zhang, et al. Methods of calculating and mapping soil erodibility (K) -- A case study of Fangbian watershed of Nanjing[J]. *Soil*, 2004(2): 177-180.(in Chinese)
- [19] 卜兆宏, 唐万龙, 李士鸿. 像元坡度新算法的初步研究[J]. 遥感技术与应用, 1993(1): 1-7.  
BU Zhao-hong, TANG Wan-long, LI Shi-hong, et al. Preliminary study of the new algorithm of pixel slope[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1993(1): 1-7.(in Chinese)
- [20] 唐万龙, 卜兆宏. 图像处理在土壤流失量像元地形因子新算法中的应用[J]. 遥感信息, 1995(2): 34-35.  
TANG Wan-long, BU Zhao-hong. Application of image processing in the new algorithm of pixel landform of soil loss[J]. *Remote Sensing Information*, 1995(2): 34-35.(in Chinese)
- [21] 卜兆宏, 李士鸿. 水土流失调查的遥感数据处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989: 216.  
BU Zhao-hong, LI Shi-hong. Remote sensing data processing in soil loss investigation[M]. Nanjing: Dongnan University Press, 1989: 216.(in Chinese)
- [22] 卜兆宏, 赵宏夫, 刘绍清, 等. 用于土壤流失量遥感监测的植被因子算式的初步研究[J]. 遥感技术与应用, 1993(4): 16-22.  
BU Zhao-hong, ZHAO Hong-fu, LIU Hong-qing, et al. Preliminary study of algorithm formula vegetation factor for undisturbed areas in remote sensing monitoring soil loss[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1993(4): 16-22.(in Chinese)