

# 应用 GIS 实现水土流失定量遥感监测

陈永宝 陈志伟 郭志民

(福建省南安市水土保持试验站 福建南安 362300)

**摘 要** 首次报道了福建省南安市 1991 年以来应用 RS 和 GIS 技术,建立了以像元(30m×30m)为基础的空间数据模型,针对土壤流失量的定量遥感监测问题,完成了 1988 年和 1996 年的水土流失定量遥感监测。结果表明:全市水土流失面积减少 20.63%,水土流失量下降了 35.7%,河区悬移质输沙量减少了 54.7%。同时也指出了水土流失的一些新变化,并对本方法的优缺点作了简单的评述。

**关键词** GIS 土壤流失量 遥感 观测

## The Quantitative Remote Sensing Monitoring of Soil and Water Loss by Using GIS

Chen Yongbao Chen Zhiwei Guo Zhimin

(Soil and Water Conservation Experimental Station of Na'an City in Fujian Province Na'an 362300)

**Abstract** The application of RS and GIS techniques of Na'an city in Fujian province since 1991 is reported first, the spatial data model on the basis of pixel (30m×30m) were established. The quantitative remote sensing monitoring of soil and water loss in 1988 and 1996 has been completed aimed at the problem on the quantitative remote sensing of soil erosion amount. The results showed that, in the areas with soil and water loss, soil and water loss amount and suspended load in rivers of whole city were decreased respectively as follows: 20.63%, 35.7% and 54.7%. Meanwhile, some new changes of soil and water loss are pointed out, the merits and demerits of the method are evaluated briefly.

**Key words** GIS soil erosion amount remote sensing monitoring

土壤侵蚀是外营力对地表土壤物质的分散和转运的过程。土壤侵蚀归根结底是土壤流失量问题,它既是水土保持的出发点,也是水土保持的归宿点。《水土保持法》第 29 条规定:“国家对水土流失动态进行监测预报,并予以公告”。多年来,我们往往认为水土流失治不胜治,是由于执行水土保持法不力,实际上重要原因是缺乏一种快速、科学、准确地监测与评估方法。过去许多研究者不论是采用人工普查法、遥感目视判读法,还是近几年来 RS 与 GIS 相结合的方法,均未能有

真正意义上的土壤流失量的定量监测。1991 年以来,我们以福建省南安市为实验区,利用 USLE 建模,运用 RS 与 GIS 技术,建立了土壤流失量的定量遥感监测方法,初步实现了水土流失定量监测,不仅促进了水土保持科学决策,也取得了显著的生态效益、经济效益和社会效益。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区概况

南安市位于闽东南沿海的晋江流域中下游,土地面积 2 042.72km<sup>2</sup> 人口 146 万人,人均耕地 0.02hm<sup>2</sup>,素有“七山一水二分田”之称。由于历史的原因,水土流失十分严重,是福建省 7 个严重流失县之一。1982 年以来,为治理水土流失,南安市把杨梅作为治理水土流失的突破口,带动其它热带亚热带果树的发展,明显地改善了流域生态环境,并实现了“变水土流失区为经济作物区”的战略构想,取得了流域经济的快速、持续、健康地发展,多次荣获全国水土保持工作、小流域经济综合治理和监督执法试点的先进单位称号。

### 1.2 水土流失定量遥感方法简介

利用现势性强的卫星遥感(RS)获得的 TM 数据,经过图形图像技术系统的处理,同时利用过去已有资料图件(如土地利用、土壤普查、分版地形图、点面降雨站资料等)、部分实测资料、新编制的软件及其集成系统,以 USLE 为基础构架,以像元(30m×30m)监测为基本单位,建立空间数据模型。再应用地理信息系统(GIS)方法,实现定量监测。然后依据水土流失的紧迫程度和水土保持经费投入量等实际情况,来确定(预报)来年或近期水土流失治理的重点区(或流域)和治理力度,从而为水土保持决策提供有力的科学依据(具体原理和方法另行报道)。

### 1.3 监测所用的模型

模型为  $A = f \cdot R \cdot K \cdot SL \cdot CP$ , 预报模型为  $\Delta = CP - C'P'$ 。其中 DEM 模型资料来自省测绘局的分版地形图, R 因子点资料来自市气象局,面资料来自 20 个水库雨量站资料, K 因子资料来自市土壤普查资料及 110 个实测样本, SL 因子系根据 DEM 模型用新编的 SiLi 软件算得, CP 因子的遥感资料来自中国卫星地面站的 1988 和 1996 年的 TM 数据,土地利用资料来自市土地管理局土地详查资料,水文资料来泉州市水文总站。

## 2 监测结果

### 2.1 水土流失定量监测总成果

表 1 南安市水土流失定量遥感监测结果

流失程度	1984 年人工普查	1988 年定量遥感	1996 年定量遥感	1996 年与 1998 年比	1996 年与 1984 年比
无明显流失(km <sup>2</sup> )	1466.78	1485.84	1600.72	114.88	133.94
轻度流失(km <sup>2</sup> )	333.26	280.71	237.57	-43.14	-95.69
中度流失(km <sup>2</sup> )	113.98	77.48	68.97	-8.51	-45.01
强度流失(km <sup>2</sup> )	128.70	198.67	135.47	-63.2	6.77
流失面积合计(km <sup>2</sup> )	575.94	556.86	442.01	-114.85	-133.93
占土地面积(%)	28.8	27.26	21.64	-5.62	-7.16
流失量(万 t)	* 553.4	504.69	324.39	-180.3	-228.98
侵蚀模数(t/km <sup>2</sup> )	2709	2470.70	1588.05	-882.65	-1120.95

\* 为估约数。

由表 1 可见,南安市水土流失治理成效显著,土壤流失总量由 1988 年的 504.69 万 t 下降为

1996年的324.39万t,土壤侵蚀模数由2470.70t/km<sup>2</sup>下降为1588.05t/km<sup>2</sup>,减幅35.7%。水土流失面积由556.86km<sup>2</sup>减少到442.01km<sup>2</sup>,下降114.85km<sup>2</sup>,减幅20.62%。与1984年比,土壤流失量下降228.98万t,侵蚀模数下降1120.95t/km<sup>2</sup>,下降41.4%;水土流失面积减少133.93km<sup>2</sup>,减少23.3%。由此可见,15年来水土流失治理工作卓有成效。

## 2.2 分布

通过监测发现,过去一直认为水土流失区主要发生在花岗岩地区,目前,虽然凝灰岩侵蚀强度仍不及花岗岩地区大,但凝灰岩土壤侵蚀规模已空前广泛,流失面积达219.18km<sup>2</sup>,土壤流失量160.14万t,均已占流失总面积和总量近50%。其次,虽然水土流失主要仍发生在海拔50~300m,但在海拔500~800m地区的水土流失变化异常,山区坡地开发引起的水土流失应予以重视。在土壤类型分布上,水稻土流失问题也极为严重,监测发现,水稻土流失面积达161.37km<sup>2</sup>,占水土流失总面积的36.51%;土壤流失量也达102.94万t,占总流失量31.73%。耕地水土流失范围广,流失面积170.17km<sup>2</sup>,占流失总面积的40.32%;土壤流失量110.85万t,占流失总量的34.17%。监测还显示:采石山的水土流失依然严重,侵蚀模数高达6599.26t/(km<sup>2</sup>·a);茶果园地次之,侵蚀模数3052.08t/(km<sup>2</sup>·a);居民区及厂矿用地第三,侵蚀模数2335.20t/(km<sup>2</sup>·a),显然与近几年来经济开发区的发展有关,城郊水土保持同样必须引起我们的重视;坡耕地第四,侵蚀模数2026.68t/(km<sup>2</sup>·a)。此外,荒山、疏林地及有林地侵蚀模数基本趋于一致,侵蚀模数在1100~1650t/(km<sup>2</sup>·a),以疏林地较为严重,这与疏林地的现状相符。灌木林地侵蚀最轻,侵蚀模数670.50t/(km<sup>2</sup>·a),这对于我们贯彻草灌先行的治理原则似有启发。

表2 各乡镇水土流失定量遥感监测结果(1996年)

乡镇名	地类面积(km <sup>2</sup> )	流失面积(km <sup>2</sup> )	占%	流失量(t)	侵蚀模数(t)
溪美	135.72	34.93	25.74	33.95	2501.18
美林	104.48	21.56	20.64	11.48	1099.07
仑苍	46.61	13.38	28.71	10.38	2227.49
东田	172.39	35.07	20.34	28.89	1675.78
英都	79.01	17.20	21.77	12.47	1577.88
翔云	67.34	18.86	28.01	17.33	2573.04
金淘	103.91	20.61	19.83	11.21	1079.09
眉山	58.11	12.94	22.27	9.58	1648.86
诗山	83.49	18.90	22.64	11.49	1376.62
蓬华	41.92	11.13	26.55	8.38	2000.39
码头	108.73	29.77	27.38	21.30	1958.78
九都	95.40	11.57	12.13	9.35	979.88
向阳	64.36	12.44	19.33	10.27	1595.73
罗东	131.18	24.30	18.52	14.37	1095.76
梅山	55.85	13.26	23.74	9.47	1695.04
洪濂	77.51	19.55	25.22	12.94	1669.96
洪梅	49.96	11.81	23.64	5.92	1183.90
康美	68.08	15.66	23.00	15.24	2238.63
丰州	109.90	31.20	28.39	22.92	2085.60
官桥	129.15	34.09	26.39	25.63	1984.60
水头	118.40	17.12	14.46	9.46	798.60
石井	88.55	16.68	18.84	13.64	1540.40

## 2.3 各乡镇水土流失概况

由表2可见,各乡镇水土流失面积占土地面积一般在12%~28.5%之间;土壤侵蚀模数在

800~2 500t/(km<sup>2</sup>·a)之间,乡镇之间的差异比较明显。从总体上看,南安市水土流失严重性的区域分布既有由原来的山区向平原地区发展的趋势,也有向山区坡地开发区发展的趋势,局部高强度水土流失形势严峻,特别是开发区、采石区、道路基建区等造成新的水土流失问题也较为严重,水土流失治理力度和监督执法力度仍需加大。

### 3 水土流失及经费预算

1984 年按照乡镇行政区界为单元,以水土流失面积占土地面积的百分比为基础进行评价,这是基于没有定量方法而为之。现在有了定量方法,则应以流失量(或侵蚀模数)来评价为宜。其次,在评价过程中,一方面根据全国土壤侵蚀分区标准对本区进行总体定位,例如,按照全国水土流失区划标准(六级评价法),南安市平均土壤侵蚀模数 1 588.05t/(km<sup>2</sup>·a),当属中度水土流失区,这与南安市在全国水土流失严重度上的定位吻合。依据该标准,南安市 22 个乡镇只有 2 个乡镇(溪美镇和翔云镇)属中度流失区,其余 20 个乡镇属轻度流失区。显然,这种评价方法对于指导南安市水土流失治理实践的意义不大(其原因主要是该标准以野外目视判读为基础,因而要求土壤侵蚀量变幅间距大,以便实地掌握,其次是该标准以黄土高原土壤侵蚀基准,对于福建省的评价则属偏轻水平)。为此,我们根据定量遥感方法的特点,在参考 1984 年人工普查评价等级的同时,着重考虑评价结果对于水土流失治理实践具有地方性指导作用,故本次评价主要依据土壤侵蚀模数(按每 500t/km<sup>2</sup> 为一个等级)为指标进行定量评价(标准及代号如表 3 所示),评价结果如表 4 所示。

表 3 水土流失评价等级标准

侵蚀模数(t/(km <sup>2</sup> ·a))	流失等级	代号
0~500	无明显流失区	I
500~1000	一般流失区	II
1000~1500	较严重流失区	III
1500~2000	严重流失区	IV
2000~2500	较强烈流失区	V
2500~3000	强烈流失区	VI
>3000	剧烈流失区	VII

表 4 各乡镇土壤侵蚀等级的评价结果

等级	无明显	一般流失区	较严重流失区	严重流失区	较强烈流失区	强烈流失区	剧烈流失区
代号	I	II	III	IV	V	VI	VII
个数	1	2	5	9	4	2	0
乡镇		九都 水头	美林 金淘 诗山 洪梅 罗东	东田、南都 码头、向阳 官桥、石井 梅山、洪濂 眉山	仑苍 蓬华 康美 丰州	溪美 翔云	

由表 4 可见,全市 22 个乡镇一般流失区 2 个,较严重流失区 5 个,严重流失区 9 个,较强烈流失区 4 个,强烈流失区 2 个。与 1984 年比,强烈、较强烈流失区减少 6 个乡镇,严重和较严重流失增加 5 个。其中明显得到改善的乡镇有 10 个,流失程度下降 1~3 个等级(其中“六五”期间确立的 9 个重点治理乡镇中有 7 个乡镇在其内,并明显的得到改善)。然而也有 7 个乡镇水土流失并未得到真正改善,这些乡镇大部分过去植被较好、流失较轻。此外,在 5 个乡镇基本持平。

由表 5 可见,全市近期急需采取强化治理面积 19.75km<sup>2</sup>,需要一般性治理面积 66.01km<sup>2</sup>,需要进行水土保持执法监督面积 356.25km<sup>2</sup>。按照水土流失治理的紧迫性和现行资金投入水平

和可能。共需要水土保持防治经费 1 141.02 万元,其中治理经费 1 087.58 万元,监督执法经费 53.44 万元。

表 5 南安市水土流失防治强度预报及经费概算

防治类型	面积(km <sup>2</sup> )	标准(元/km <sup>2</sup> )	金额合计(万元)
防治良好区	1424.36		
预防监督区	356.25	1500	53.44
一般治理区	66.01	75000	495.08
重点治理区	19.75	300000	592.50

## 4 水土流失定量遥感监测的精度

### 4.1 面积控制准确、精度高

根据南安市土地管理局(委托省地质测绘大队)利用 1978 年空军航测团摄制的 1/2.5 万底版图测算,南安市国土总面积 2 042.972 1km<sup>2</sup>,本次遥感监测结果为 2 042.722 8km<sup>2</sup>,精度 99.99%。其中陆地面积 2 009.782 1km<sup>2</sup>,遥感监测结果为 2 009.532 8km<sup>2</sup>,精度 99.99%;各乡镇的土地面积误差率在 10%以内。此外,根据模建 DEM 模型对南安市后桥水库(1962~1966 年建库)闭合小流域进行分割及 TM 影像图进行计算机取样,结果该流域面积为 33.193 8km<sup>2</sup>,查阅建库说明书面积为 33.2km<sup>2</sup>,精度 99.98%。

### 4.2 土壤流失等级分类清晰,趋势与人工普查基本吻合

1984 年南安市水土流失人工普查流失面积 575.94km<sup>2</sup>,遥感监测 1988 年流失即 A≥500t/(km<sup>2</sup>·a)面积 556.86km<sup>2</sup>,相差 19.08km<sup>2</sup>,1996 年 442.01km<sup>2</sup>,与 1988 年相差 114.88km<sup>2</sup>,与 1984 年相差 133.93km<sup>2</sup>。全市 1984~1996 年治理水土流失面积 368.4km<sup>2</sup>,其中治理良好并予建档的面积 173.52km<sup>2</sup>。可见,遥感监测的结果与水土流失治理实践相吻合。

### 4.3 土壤流失量监测结果符合实际、数据可靠

根据流域出口处的石碧水文站(国家网站)1988 年实测输沙量为 300.0 万 t,1996 年输沙量为 136 万 t,降幅分别为 54.7%;遥感监测的土壤归槽(河)流失量 1988 年为 504.69 万 t,1996 年为 324.39 万 t,降幅为 35.7 万 t,输移比分别为 0.594 4 和 0.149 2,基本符合流域水文特征,这可从下表分析即知:

表 6 水土流失定量遥感监测与水文站资料的对比计算

遥感监测	1988 年	1996 年	减少量(万 t)	减少(%)
总计	504.69	324.39	-180.3	-35.7
其 1. 山美	21.91	16.81	-5.1	-23.3
中 2. 沿海	138.57	81.92	-56.7	-40.9
小计	160.48	98.73	-61.75	-38.5
实际汇入	344.21	225.66	-118.55	-34.4
水文实测	1988 年	1996 年	减少量(万 t)	减少(%)
石碧	300	136	-164	-36.8
安溪	283	179	-104	-36.8
差值	-17	43	60	* 39.5
矫正后	300	136+60=196	-104	-34.7
洪濂	23.7	21.7	-2.0	-8.4

\*净增长率(%) =  $\frac{\text{安溪} 88}{\text{安溪} 96} \div \frac{\text{石碧} 88}{\text{石碧} 96} \times 100\% - 1$ 。

表 6 显示,如果假定流域的上游(安溪县)水土流失降幅不变,并剔除山美水库流域和沿海诸

河流域的土壤流失量后,则监测的南安境内的晋江东西流域的归槽流失量 1996 年为 225.66 万 t,比 1988 年为 344.21 万 t 减幅为 34.4%;而河区 1996 年悬移质输沙量应为 196 万 t(实际上这就是安溪至石砵段的减沙效益),比 1988 年减少为 34.7%,从这里分析即可看出定量遥感监测的结果符合实际、数据可靠。

#### 4.4 土壤流失监测现状图和防治强度预报图直观、实用性强

根据部颁标准对流失量的定量遥感监测结果及防治强度预报的成果进行图件整饰(着色),图像清晰、直观,便于部门及领导宏观决策。就 1988 年监测成果图而言,一是水土流失遍及全市各个角落,水土保持形势严峻;二是西溪北岸及沿海南部的两片一线水土流失集中、急需重点治理,这正是南安市“八五”期间确立的 7 个重点治理区,故而实用性强。

## 5 结 论

(1)南安市经过 10 余年来的水土流失综合治理成效是显著的。不仅表现在水土流失量减少 180.3 万 t,水土流失面积减少 20.63%,流失程度降低 35.7%;同时也表现在流域河区悬移质输沙量、含沙量的大幅度减少(含沙量由 1988 年  $0.6\text{kg}/\text{m}^3$  下降为 1996 年的  $0.28\text{kg}/\text{m}^3$ ),实际减沙效益达 196 万 t。无疑,这对于改善流域生态环境起到了积极的作用。其次,经过治理后的强烈、较强烈流失区已由原来的 12 个乡镇下降为 6 个,特别是洪梅、美林、洪濂、官桥、石井、水头、罗东等乡镇平均降幅一级以上,是南安市“六五”“七五”和“八五”期间水土保持工作成效之所在。据测算,如果不采取水土保持综合治理,不执行《水土保持法》的话,则 1996 年水土流失面积将达到  $620.13\text{km}^2$ ,占土地总面积的 30.36%;土壤流失量也将达到 644.97 万 t,侵蚀模数将达  $3157.4\text{t}/\text{km}^2$ 。由此可见,南安市 1882 年以来确立的“以杨梅为突破口,变水土流失区为经济作物区”的技术路线是正确的,执行《水土保持法》是有成效的,流域生态环境的改善也是实在的。

(2)改革开放以来,随着经济的发展和治理力度的加强,原有的水土流失状况也发生了变化,旧的资料已难以适应目前水土保持工作发展的需要。例如南安市“六五”以来确定的 9 个重点治理乡镇有 7 个乡镇得到明显的改善,但不容忽视的是也出现了新情况。通过监测显示,目前水土流失不论是在土壤类型、土地利用类型、海拔高程等,还是流域政区等都发生了明显的变化,例如,蓬华镇、翔云镇等高海拔地区,蓬华镇在过去只是一般流失区,由于坡地开发,水土流失明显加剧,上升为较强烈流失区,净增了 2 个等级,如果不是通过这次监测,一般是难以发现的。再如沿海的水头镇,虽然地处经济开发区,但由于其坡地水土保持 10 余年来的持续开展,水土流失从较严重流失区下降为一般流失区,这样,就有利于客观的评价一个地区的水土保持工作成效。

(3)和以往的人工普查方法及其它遥感方法不一样,它的核心问题是实现土壤流失量的定量监测。对比之下,具有以下优缺点:①方法是建立在以像元为基础的空间数据监测模型,选取的软件系统(如 ARC/INFO、IDRISI、autoCAD 等)通用性能好,选取的监测和预报模型以国际通用土壤流失方程接轨,因此,监测的方法及结果在今后便于与国际上接轨,可比性和共享性强。②监测结果客观,受人为因素干扰小。监测与预报模型一经建立,则完全变成机器语言,因而可大大减少人为(如调查人员目视判读、绘图、统计等的技术熟练程度)误差,重复性能好,在不同地区获得的监测结果具有客观、公正,有较强的重复性和统一性。③分辨率高,控制精度好。卫星 TM 数据地面控制精度 1/10 万地形图达  $30\text{m}\times 30\text{m}$ ,小流域经技术处理后可达  $10\text{m}\times 10\text{m}$ ,根据南安 1988 年和 1996 年监测结果表明,面积控制精度均在 99%以上,各级土壤流失面积和流失量既与人工普查结果相符,又与水文站实测结果吻合,因而可信度高。④实现定量监测,既可对各种水土

流失程度的面积实施监测,又可对土壤流失总量进行监测,因而可对短期内水土流失程度的细微变化实施有效的评估。例如水土流失治理初期,其土壤理化性能及地表物质组成不可能在3~5年出现明显地改变,但土壤流失量的微小变化则是可监测出的。⑤节省大量人力、物力、财力和时间。过去用人工法,整个泉州市需要组织100~150人的普查队,历时一年才能完成外业野外调查,按当时(1984年)的经费支出标准,全市约需50万元。若按现行价计算,则需200万元以上方能完成,而采取本方法,第一次建立空间数据模型及数据库约半年左右时间,经费每公顷平均0.3元左右,可节约经费150万元以上。监测模型建立后,以后每次监测经费每公顷仅需0.15元,人员只需1~2人,时间在一个月之内便可完成全市的监测和预报任务,节约经费180万元以上,可谓费微效宏。⑥实施监测结果不仅可以输出监测编制的成果图和预报图,图件具有直观、一目了然,方便领导决策,而且还可建立随机查询、统计和汇报系统,对于日后水土流失治理规划特别是小流域的综合治理规划中的图件、数据表式资料等的利用十分省时、快速、方便。⑦该方法由于初步主要以GIS技术为支撑,主要工作在内业计算机平台完成。因此,在某些方面也有不足之处,如在沟蚀、风蚀、崩岗区,土壤出露程度、造成危害等方面需要进一步应用全球定位系统(GPS)技术、数据库系统(DBS)、专家系统(ES)技术、航测技术等结合加以解决。

**作者简介** 陈永宝,高级工程师,现任南安市科学协会副主席,南安市水土保持试验站站长。

(上接第103页)

#### 参考文献

- 1 Moldenhaur, W. C., Procedure for studying soil characteristics using disturbed samples and simulated rainfall, Transaction, American Society of Agricultural Engineers. 1965, 8(1): 74~75
- 2 张洪江,解明曙等. 长江三峡地区花岗岩地区坡面糙率系数研究. 水土保持学报, 1994, 8(1): 33~38
- 3 曾秋云. 溱水流域的降水产沙特性及森林滞沙作用. 中国水土保持, 1994, 9: 26~35
- 4 陈廉杰. 森林土壤允许流失量的研究. 水土保持学报, 1993, (1): 19~22

**作者简介** 张洪江,男,1955年1月生于河北省易县,1975年毕业于北京林学院(现北京林业大学)水土保持专业,1989年获农学硕士学位。1996年获农学博士学位。现为北京林业大学水土保持学院副教授,水土保持原理教研室主任,硕士研究生导师。已在国内外科技刊物发表论文和译文50余篇。