

基于 GIS 的小流域养分流失预测*

倪九派 魏朝富 谢德体

(西南农业大学资源与环境学院, 重庆 400716)

摘要 在 GIS 技术的支持下, 将流域划分为多个独立的坡面单元, 运用室内人工降雨实验坡面养分流失的研究结果和通用土壤流失方程(USLE)进行了重庆市丰都三合小流域的养分流失预测与评价。研究表明, 利用流域泥沙流失量进行流域养分流失预测时, 只能对流域全量养分(有机质、全氮、全磷、全钾)的流失进行较为准确的预测, 而对流域速效养分(有效氮、有效磷、有效钾)流失量进行预测时, 径流携带流失的部分不能被忽略。要对流域养分流失量进行准确的预测与评价, 必须通过建立流域分布式径流模型, 结合土壤侵蚀模型来进行。

关键词 养分流失; 小流域; GIS; USLE

中图分类号 S157.1 文献标识码 A

运用 GIS 技术进行流域乃至区域水土流失的预测预报是目前水土保持研究中的一个重要方法^[1-3]。大多数研究侧重于流域泥沙和径流的流失量预测, 有关流域养分流失量预测的研究较少, 而有关紫色土流域养分流失预测的研究则更少。据调查, 紫色土占三峡库区耕地面积的 78.7%, 且其中绝大多数为坡耕地。举世瞩目的三峡工程已完成大坝截流, 而库区周围及长江上游的水土流失状况却令人担忧。大量资料表明, 坡耕地严重的水土流失是大量江河泥沙的主要来源, 使山地丘陵区土层变薄, 养分流失, 土地生产力低下, 从而严重阻碍山地丘陵地区农业可持续发展, 使广大山区农民无法脱贫致富, 更造成恶性循环, 加速坡耕地的水土流失^[4]。紫色土作为三峡库区坡地主要土壤类型, 土壤侵蚀严重, 因此, 有必要对三峡库区紫色土的养分流失进行研究。

此前运用 GIS 技术对流域泥沙及养分流失量的预测一般是直接利用 GIS 软件的栅格分析功能, 以栅格图层建库, 即把研究流域分为均匀的栅格^[5-8]。这种方法的优点是图形库中所有图形拥有统一固定的控制点, 实现了图形数据与属性数据的有机联结, 每个图形自带一个属性数据库, 可方便进行互相调用、转换和提取。但由于栅格为相同面积的单元, 没有考虑坡长这一影响坡面水土流失的重要因素, 而

且坡面泥沙侵蚀是一个边移动边沉积的过程, 即坡面上部的栅格中流失的泥沙及养分的一部分会沉积在坡面下方的栅格中, 但运用栅格法是将每个栅格的水土流失量相加来计算流域水土流失量, 而没有考虑流失泥沙在坡面移动过程中的沉积。显然, 将流域分为均匀栅格来计算不能准确地预测流域的水土流失量。为此, 本研究以丰都三合小流域为例, 在 GIS 支持下, 将流域划分为独立坡面, 以坡面为单元建立流域数据库, 借助通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)进行流域土壤养分流失的预测评价, 旨在探索一种准确合理的预测流域水土流失及养分流失的方法, 为三峡库区及长江上游水土资源利用与保护提供理论与实践依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

重庆市丰都三合小流域位于丰都县长江南岸三合镇境内, 三合小流域区呈狭长形, 南北长 1.6 km, 东西宽约 0.9 km, 幅员面积 1.44 km²。三合小流域地处亚热带湿润季风气候区, 多年平均降雨量为 1 087mm, 该区地处四川盆地东部平行岭谷区, 岭为低山, 谷为中丘, 呈现地形坡度大, 起伏变化多的特征。土壤为侏罗系沙溪庙组砂岩、泥岩母质发育而

* 教育部重点项目(03111)和重庆市科技攻关项目(027418)资助

作者简介: 倪九派(1976~), 博士生, 湖北孝感人, 主要从事地理信息系统及土地资源管理与利用等方面的研究。E-mail: njpbetter@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-12-01; 收到修改稿日期: 2004-04-12

成的中性紫色土,土地利用主要为水稻田、坡耕地、柑桔园和水域,其中坡耕地、水稻田和水域占比重最大,占总土地面积的72.51%。流域内人多地少,耕地数量有限,人地矛盾十分突出,加上不同程度的掠夺式经营,造成了流域内生态环境的恶化。

1.2 研究方法

采用ESRI公司制作的ARC/INFO 8.1、ARCVIEW3.2地理信息系统软件与通用土壤流失方程(USLE)相结合的方法进行流域养分流失量的预测。ARC/INFO8.1地理信息系统是基于矢量格式和栅格格式进行分析的地理信息系统,空间分析功能强大,同时支持矢量和栅格两种数据格式。其功能包括矢量数据的转换、数据库的管理查询、空间数据分析等。

以三合小流域数字化土地利用现状图和地形图为工作底图,结合实地取样分析所得资料,利用ARC/INFO的数据库管理和空间分析功能,对三合小流域进行土壤养分流失评价单元的划分。并通过实地取土进行室内人工降雨实验,定量确定流失泥沙和径流与土壤养分流失量的关系,将实验结果应用于坡面养分流失量的计算,分不同坡面单元进行流域土壤养分流失量的预测。

2 坡面单元的划分

坡面单元的划分是以研究区数字化土地利用现状图、数字化地形图为工作底图,结合实地取样分析所得数据,利用ARC/INFO的数据库管理和空间分析功能完成的。划分坡面单元时主要遵循以下3个原则。(1)综合分析原则。土壤侵蚀是由地貌、植被、土壤、气候、人类活动等自然因素和人为因素综合作用而形成的,具有综合性的特点综合。综合分析影响土壤侵蚀各因素之间的相互关系及其组合特点,是划分坡面单元的重要原则。(2)主导性原则。土壤侵蚀是由多种自然地理因素和人为因素综合作用的结果,但其差异性主要受那些对土壤侵蚀影响深、作用稳定的因素制约,也就是主导性因素的制约,对主导因素进行分析,坡面单元的差异性就能确切地反映出来。(3)与土地利用现状相结合的原则。预测养分流失量的目的,就是为生产服务,在划分坡面单元时,要充分考虑土地利用现状,并与其紧密结合。

利用地形图和实地取样分析所得资料,运行ARC/INFO的空间分析功能,得到坡度、坡向、植被

覆盖度等单因子的GRID模型,生成一系列过渡图层。通过上述操作生成的单因子GRID模型,其属性数据存储于与其相联的VAT文件中。将GRID模型转化为面Coverage时,可以指定VAT文件中的属性数据,将其存储于与面Coverage相联的PAT文件中。利用ARC/INFO强大的空间分析功能,将土地利用现状图与坡度、坡向、植被覆盖度等单因子图层进行叠加,得到一系列过渡图层^[9-11]。考虑到流域内居民点小且分散,将其并入到相邻的地类进行评价。对生成图层的边缘现象和内部的多边形碎块进行处理,得到三合小流域坡面单元分布图。坡面单元分布如图1,整个小流域共划分了77坡面单元,其中3号单元是水域,单独列出。

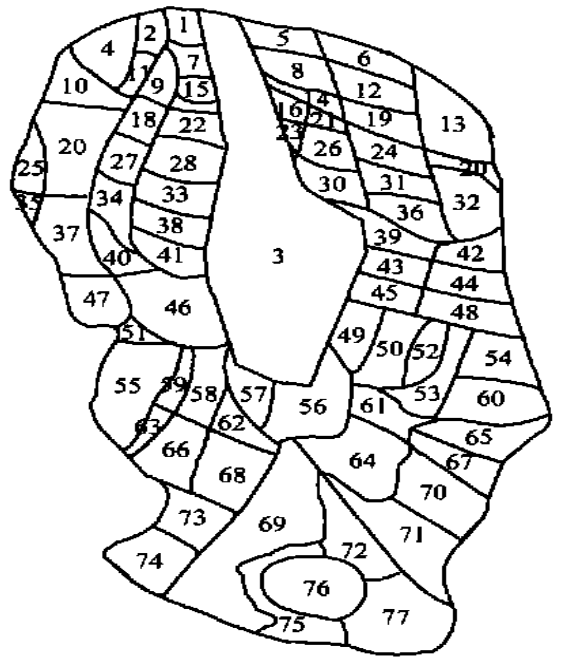


图1 坡面单元分布图

Fig 1 Slope unit distribution map

3 坡面养分流失

坡面养分流失的研究通过实地取土进行室内人工降雨实验进行的。实验研究表明,雨强对流失泥沙中养分含量(e_s)和径流中养分含量(e_r)均无影响,坡度对径流中养分含量(e_r)无影响,对流失泥沙中养分含量(e_s)有轻微的影响,雨强和坡度对土壤养分流失的影响都是通过影响其载体流失泥沙量和径流量来实现的^[12]。从人工降雨试验的表土、径流、泥沙中养分含量以及径流、泥沙分别携带的养分流失量分析可以看出:坡面流失泥沙一般来自表层

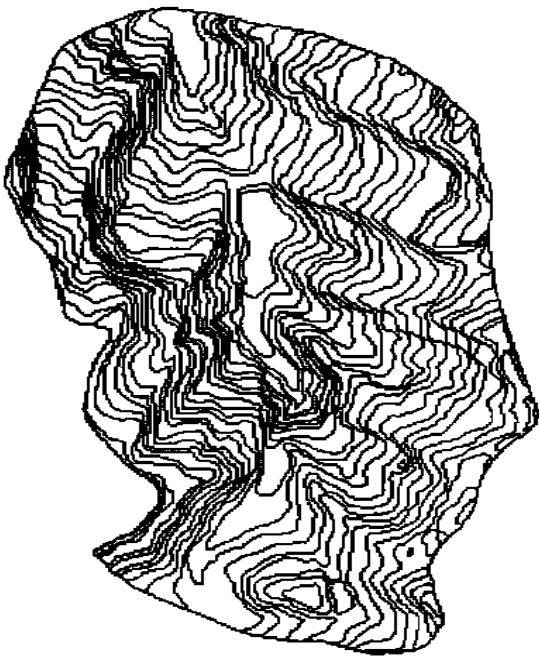


图 2 研究区地形图

Fig 2 Relief map of Sarhe watershed

土壤, 且以细颗粒为主。通过对流失泥沙中养分浓度与表层土壤养分含量相比, 发现泥沙中的各种养分浓度均高于表层土壤养分含量, 更远高于径流中

的养分浓度, 说明流失的养分在流失泥沙上发生富集。试验数据表明, 不仅径流中的养分浓度远远低于流失泥沙和表层土壤中的养分含量, 而且其携带的养分流失量也远低于泥沙携带的养分流失量。

以往对土壤侵蚀造成的土壤养分流失量的预测是直接通过土壤侵蚀量乘以估算的养分含量计算的, 这种直接估算的方法与实际的养分流失量有很大的误差, 也无法弄清养分流失在流域内不同地貌单元的分布。如果通过实测流失泥沙中的养分含量来计算土壤养分流失量, 可以比较准确地计算出坡面养分流失量, 但工作量太大, 而且失去了进行流域养分预测的意义。所以我们引入养分富积度的概念, 即把流失泥沙中养分含量与其来源的表土中养分含量之比称为富积度(E_r), 根据试验得到某一土壤各种养分的富积度, 便可推算出其流失泥沙中的养分含量, 进而进行坡面和流域的养分流失量预测。本试验结果计算的有机质、全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、有效钾的富积度(E_r) 都大于 1.0, 其大小顺序为有效磷 > 有效氮 > 有机质 > 全氮 > 有效钾 > 全磷 > 全钾。一般认为, 富积度的大小顺序是土壤不同类型及形态养分流失难易程度的表现。

表 1 径流与泥沙养分含量和养分流失量对比

Table 1 Nutrient contents in runoff and sediment and nutrient loss

养分 Nutrient	养分含量 Nutrients content ($g\ kg^{-1}$)			泥沙养分 富积度 E_r Sediment enrichment of nutrient	养分流失量 Nutrient loss ($g\ m^{-3}$)		e_s/e_R	E_s/E_R
	表土 Topsoil	泥沙 e_s Sediment	径流 e_R Runoff		泥沙携带 E_s In sediment	径流携带 E_R In runoff		
	有机质	23.94	33.90		3.82×10^{-4}	1.416		
全氮	0.96	1.27	3.68×10^{-6}	1.323	2.35	1.44×10^{-4}	345 100	16 260
全磷	0.58	0.67	2.72×10^{-6}	1.155	1.24	1.07×10^{-4}	246 300	11 600
全钾	28.49	29.80	1.34×10^{-5}	1.046	55.04	0.52×10^{-3}	2 223 900	104 800
有效氮	0.112	0.213	0.72×10^{-3}	1.902	0.39	0.28×10^{-1}	2 958	14
有效磷	0.006	0.016	0.69×10^{-4}	2.758	0.03	0.27×10^{-2}	231	11
有效钾	0.065	0.083	0.61×10^{-3}	1.273	0.15	0.23×10^{-1}	136	7

注: E_r = 泥沙养分含量/表土养分含量 Note: E_r = Nutrients content in sediment/ Nutrients content in topsoil

表 1 反映的是雨强为 $1.947\ mm\ min^{-1}$ 、坡度为 15 时一次降雨径流与泥沙养分含量和养分流失量对比。可以看出, 泥沙中养分含量与径流中养分含量之比(e_s/e_R), 全量比为 88 740~ 2 223 900, 有效养分比也达到 136~ 2 958。由于径流量较泥沙量大得多, 所以泥沙携带的养分流失量与径流携带的养分

流失量的比值(E_s/E_R) 稍低, 虽然其所携带的有效养分之比只有 7~ 14, 但其所携带的流失养分全量之比达到了 4 181~ 104 783。所以, 可以认为紫色土坡面土壤全量养分流失主要是以泥沙为载体, 并认为坡面土壤全量养分流失量中泥沙携带的养分流失量可以代表坡面全量养分流失总量, 可以通过流失

泥沙量的计算获得,而对紫色土坡面土壤有效养分的流失而言,则是由流失泥沙和径流共同携带,故有效养分流失的预测评价需要通过建立研究区分布式径流模型,结合土壤侵蚀模型来进行。本研究是通过流域的流失泥沙量来计算小流域的养分流失量,故只对小流域的有机质、全氮、全磷和全钾的流失量进行预测与评价。

4 流域养分流失量预测

4.1 泥沙流失量的预测

采用的土壤侵蚀模型是通用土壤流失方程(USLE),该方程式形式简单,所需的参数较易获得,且因子的解释具有物理意义,是目前预测土壤侵蚀量最为广泛使用的方法。其定型模式为: $A = RKD_{LS}CP$ 。这个定型模式由影响水土流失的6因子用连乘的形式组成,式中 A 为年土壤流失量, R 为降雨和径流因子, K 为土壤可蚀性因子, D_{LS} 为坡长坡度因子, C 为植被覆盖因子, P 为侵蚀防治措施因子。应用GIS和USLE模式预测土壤侵蚀的关键是上述6个因子因子图的生成。

4.1.1 K 值 K 因子反映了土壤对侵蚀的敏感性及降水所产生的径流量与径流速率的大小。估算 K 值的方法很多,一般根据没有任何植被,完全休闲,无水土保持措施的标准小区内实测的 A 值,应用通用水土流失方程反求获取 K 值,但获取大面积的实测 A 值是不可能的。依据 El-Swaify 等的研究, K 值的大小与土壤质地有较高的相关性。本研究中, K 值的获取是通过实地采样分析,运用 Williams 等在 EPIC 模型中的方法,利用土壤有机质和颗粒组成资料进行估算得到:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.025 6S_d(1 - S_i/100)]\} [S_f / (C_l + S_i)]^{0.3} \{1.0 - 0.25C / [C + \exp(3.72 - 2.95C)]\} [1.0 - 0.7(1 - S_d/100)] / \{1 - S_d/100 + \exp[-5.5 + 22.9(1 - S_d/100)]\}$$

式中, S_d 砂粒含量; S_i 粉粒含量; C_l 粘粒含量; C 有机质含量。取样分析计算的结果,研究流域的 K 值为 $(0.237 + 0.018 \sim 0.237 - 0.018)$ ($n = 64$),同时,生成小流域土壤的 K 值分布图。

4.1.2 R 值 本研究采用 FAO 建立的通过修订 Fournier 指数推算 R 值的方法,既考虑年降水总量,又考虑了降水的年内分布,应用可操作性强。 $F =$

$\sum_{j=1}^{12} (j^2 / J)$ 。式中, i 是月份, j_i 是月降水量, J 是年降水量。然后建立 R 与该指数的关系为: $R = aF + b$ 。式中 a 与 b 取决于气候条件,依据研究小流域气候条件与世界其他地区的类似分析, a 与 b 的取值分别为 4.17 和 -152。利用丰都县 1994、1995、1996、1997、1998 五年年平均降雨量和多年各月平均降雨量,根据上面提出的计算公式推求小流域年降雨侵蚀力。由于研究地区面积较小,可认定降水的分布是均一的,根据降雨资料推算,研究小流域的年降雨侵蚀力 $R = 328.4$ 。

4.1.3 D_{LS} 因子值 坡度 S 和坡长 L 值可以采用数字高程模型(DEM)通过计算获取,本研究中,坡度 S 和坡长 L 的值是通过比例尺为 1:10 000 的数字高程模型(DEM)计算获取的。在 ARC/INFO 地理信息系统中,DEM 的建立与应用主要由它的 GRID 模块和 TIN 模块完成,其基本原理是在生成一个表面模型的基础上,进行表面分析。打开数据库,读取小流域地面高程等值线图(等高线图),运行 ARC/INFO 的 TIN 模块和 GRID 模块,生成小流域的数字高程模型(DEM),进行表面分析。计算式为: $D_{LS} = (Y/22)^{0.3} (1/5.16)^{1.3}$ 。式中, Y 为坡长值(m); S 为坡度值(度)得到每一栅格的 D_{LS} 值,形成相应的 D_{LS} 图。

4.1.4 C 值 C 因子值与植被覆盖度 c 之间的数学关系^[8]: $C = 0.6508 - 0.3436 \lg c$ 。式中 C 的最小值应为 0,即不产生土壤流失,此时 c 为 78.3%,即当 c 大于或等于 78.3% 时, C 值为 0; c 为 0 时, C 值为 1。

C 值主要受植被覆盖度和土地利用现状的制约^[13,14],利用上式计算得各地类年均 C 因子估算值将 C 因子值对土地利用现状图进行赋值得 C 因子图。

4.1.5 P 值 侵蚀防治措施因子 P 是指采用专门措施后的土壤流失量与顺坡耕作时的土壤流失量的比值。借用其他研究资料,以自然植被和坡耕地 P 因子值为 1,水田的 P 因子值为 0.01,结合研究小流域的土地利用现状,将 P 因子值对土地利用现状图进行赋值得 P 因子图。

把以上各因子的分坡面计算值代入通用土壤流失方程 USLE,获得各坡面的土壤流失量预测值(表 2)。

4.2 泥沙携带的养分流失量预测

在获得各坡面的土壤流失量预测值以后,由试

验可知, 坡面养分流失以泥沙携带为主, 由此可以得到坡面养分流失量的计算公式: $N = SE_r C$ 。式中, N 为坡面养分流失量(g), S 为坡面土壤流失量(kg), E_r 为养分富积度, C 为坡面表土养分平均含量($g\ kg^{-1}$)。 E_r 值来源于表 1 的研究结果, C 值则通过流域土壤养分含量数据库及其土壤图而生成的坡面养分含量图, 得到分坡面的表土养分平均含量 C 值。

根据得到坡面养分流失量的计算公式的形式,

分坡面计算各种养分流失量的预测值(表 2), 显然, 坡面养分流失量的计算公式综合考虑了各坡面的土壤流失量、表土养分含量以及养分富积度, 其养分流失预测值更接近实际。此外, 坡面养分流失量的计算公式获得的是各个坡面的养分流失量预测值, 从而可以较准确地推算流域养分流失的来源及不同土地利用现状、不同植被覆盖度坡面的养分流失强度, 为流域水土流失治理提供科学依据。

表 2 三合小流域坡面单元划分指标及养分流失量预测结果

Table 2 Indexes for division of slope units and assessment of soil and nutrient losses from Sanhe watershed

编号 No.	面积 Area (m^2)	坡度坡长 因子 D_{IS}	植被覆盖 因子 C	泥沙流失量 Sediment loss (t)	养分流失量 Nutrient loss (kg)			
					有机质	全氮	全磷	全钾
					O. M.	Total N	Total P	Total K
1	5 347	239.4	0.027	2.84	96.28	3.61	1.90	84.63
2	5 750	980.8	0.054	25.37	860.0	32.22	17.00	756.0
3	152 200	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	13 590	474.7	0.347	187.5	6 357	238.2	125.6	5 588
5	8 792	507.3	0.104	38.77	1 314	49.24	25.98	1 155
6	9 990	637.6	0.083	44.05	1 493	55.94	29.51	1 313
7	5 285	52.98	0.227	5.23	177.3	6.64	3.50	155.9
8	11 850	686.9	0.017	11.72	397.3	14.88	7.85	349.3
9	6 677	656.0	0.133	48.59	1 647	61.71	32.56	1 448
10	12 510	301.4	0.289	91.03	3 086	115.6	60.99	2 713
11	3 982	808.7	0.015	3.94	133.6	5.00	2.64	117.4
12	12 320	245.2	0.048	12.18	412.9	15.47	8.16	363.0
13	21 360	558.5	0.094	94.19	3 193	119.6	63.11	2 807
14	5 020	99.61	0.064	2.67	90.51	3.39	1.79	79.57
15	4 199	16.67	0.366	2.23	75.60	2.83	1.49	66.45
16	3 793	79.09	0.148	3.75	127.1	4.76	2.51	111.8
17	2 381	117.6	0.444	10.50	356.0	13.34	7.04	312.9
18	7 531	682.6	0.127	54.80	1 858	69.60	36.72	1 633
19	10 060	511.0	0.023	9.95	337.3	12.64	6.67	296.5
20	27 060	133.8	0.393	119.3	4 045	151.5	79.94	3 556
21	2 901	434.3	0.015	1.54	52.21	1.96	1.03	45.89
22	8 168	138.4	0.379	36.01	1 221	45.73	24.13	1 073
23	2 471	141.6	0.083	2.44	82.72	3.10	1.63	72.71
24	11 110	117.9	0.054	5.89	199.7	7.48	3.95	175.5
25	7 669	1 198	0.138	105.9	3 588	134.4	70.92	3 154

续表

编号 No.	面积 Area (m ²)	坡度坡长 因子 <i>D_{LS}</i>	植被覆盖 因子 <i>C</i>	泥沙流失量 Sediment loss (t)	养分流失量 Nutrient loss (kg)			
					有机质	全氮	全磷	全钾
					O. M.	Total N	Total P	Total K
26	9 032	480.6	0.013	4.80	162.7	6.10	3.22	143.0
27	8 385	2 124	0.078	115.7	3 923	147.0	77.53	3 448
28	14 140	98.28	0.536	62.36	2 114	79.20	41.78	1 858
29	4 739	0.00	0.115	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	10 090	171.4	0.037	5.36	181.7	6.81	3.59	159.7
31	8 921	261.2	0.024	4.74	160.7	6.02	3.18	141.2
32	17 390	19.55	0.162	4.62	156.6	5.87	3.10	137.7
33	12 210	60.62	0.286	53.82	1 824	68.35	36.06	1 604
34	9 568	596.8	0.146	69.63	2 360	88.43	46.65	2 075
35	2 490	1 313	0.126	34.36	1 165	43.64	23.02	1 024
36	11 570	72.57	0.022	1.54	52.21	1.96	1.03	45.89
37	18 120	177.4	0.487	131.9	4 470	167.5	88.35	3 930
38	10 660	152.0	0.346	46.99	1 593	59.68	31.48	1 400
39	10 500	808.8	0.204	144.9	4 911	184.0	97.07	4 317
40	8 588	637.0	0.1364	62.50	2 119	79.38	41.88	1 862
41	10 110	194.7	0.270	44.56	1 511	56.59	29.86	1 328
42	9 181	481.4	0.180	66.82	2 265	84.86	44.77	1 991
43	8 446	0.00	0.197	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	11 130	0.00	0.176	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	9 494	16.85	0.184	2.52	85.43	3.20	1.69	75.10
46	27 120	1 190	0.073	197.4	6 692	250.7	132.2	5 882
47	12 600	225.4	0.385	91.67	3 108	116.4	61.42	2 732
48	13 860	40.41	0.158	7.36	249.5	9.35	4.93	219.3
49	11 020	353.9	0.466	152.1	5 157	193.2	101.9	4 533
50	15 490	283.5	0.425	156.1	5 292	198.2	104.6	4 652
51	3 236	1 097	0.068	20.31	688.5	25.79	13.61	605.2
52	8 087	597.3	0.276	111.6	3 784	141.7	74.78	3 326
53	12 630	274.6	0.316	91.95	3 117	116.8	61.61	2 740
54	15 130	549.9	0.300	208.8	7 079	265.2	139.9	6 223
55	28 469	591.9	0.147	207.2	7 023	263.1	138.8	6 174
56	24 310	1 253	0.122	311.2	10 550	395.2	208.5	9 273
57	9 259	1 314	0.075	76.64	2 598	97.33	51.35	2 284
58	12 890	599.0	0.275	177.9	6 030	225.9	119.2	5 301
59	4 847	542.6	0.304	66.90	2 268	84.96	44.82	1 994

续表

编号 No.	面积 Area (m ²)	坡度坡长 因子 <i>D_{LS}</i>	植被覆盖 因子 <i>C</i>	泥沙流失量 Sediment loss (t)	养分流失量 Nutrient loss (kg)			
					有机质 O. M.	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
60	19 360	179.8	0.483	140.9	4 775	178.9	94.38	4 198
61	10 460	179.8	0.417	65.66	2 226	83.39	43.99	1 957
62	7 635	399.5	0.443	113.0	3 831	143.5	75.72	3 368
63	4 457	547.4	0.279	57.06	1 934	72.47	38.23	1 700
64	25 560	554.4	0.388	460.1	15 600	584.3	308.2	13 710
65	15 510	533.2	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
66	15 300	566.8	0.333	241.6	8 189	306.8	161.8	7 198
67	11 760	534.8	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
68	19 550	541.8	0.304	269.8	9 146	342.6	180.8	8 039
69	56 910	0.00	0.131	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	21 940	572.4	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
71	27 840	629.3	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	16 370	6.11	0.524	4.34	147.1	5.51	2.91	129.3
73	13 880	425.7	0.477	236.1	8 004	299.9	158.2	7 036
74	17 020	478.7	0.344	235.0	7 965	298.4	157.4	7 002
75	17 860	560.5	0.093	77.72	2 635	98.70	52.07	2 316
76	24 000	340.0	0.415	283.3	9 603	359.7	189.8	8 441
77	30 450	10.51	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

由表 2 的预测结果可知, 小流域年均土壤侵蚀量为 5 839 t, 年均土壤侵蚀模数为 5 167 t km⁻², 属于中度侵蚀。小流域年均养分流失量有机质为 197.9 t, 全氮为 7.42 t, 全磷为 3.91 t, 全钾为 174.0 t, 年均养分流失模数有机质为 175.2 t km⁻², 全氮为 6.57 t km⁻², 全磷为 3.46 t km⁻², 全钾为 154.0 t km⁻²。

5 结 语

1) 目前流域土壤侵蚀以及养分流失的预测均采用网格法进行, 没有考虑坡长这一影响坡面土壤侵蚀的重要因素, 也没有考虑泥沙移动过程中的沉积, 预测结果往往偏大。本研究通过合理划分坡面单元, 科学使用 USLE 来预测土壤侵蚀量及养分流失量。

2) 划分坡面单元时是运用计算机通过地理信息系统软件 ARC/INFO、ARCVIEW 来完成的, 综合考虑

了多个因子, 避免了人为划分坡面的主观性和不确定性。

3) USLE 是在坡面尺度上建立起的一个土壤侵蚀模型, 其适用范围应为坡面尺度, 而目前国内多数研究将其直接运用在流域及区域上, 造成 USLE 的误用。本研究分坡面使用 USLE 进行土壤侵蚀量的计算, 将其更为合理的应用于流域的土壤侵蚀研究。

4) 目前流域养分预测多采用通过土壤侵蚀量乘以其估算的养分含量获得养分流失量, 这一方法虽然简便, 但其准确性较低, 本研究采用室内模拟试验结合野外观测, 引入养分富积度的概念, 建立了养分流失量与土壤侵蚀量之间的数学模型, 可以较准确地进行坡面乃至流域的养分流失预测。

5) 在坡面养分流失的研究中, 只考虑了雨强和坡度对流失泥沙和径流养分含量的影响, 对植被这个关键的因子没有进行研究, 以后应加强植被对流失泥沙和径流养分含量的影响的研究。

6) 本研究中采用的方法只能对流域全量养分流

失量进行较为准确的预测,对有效养分流失量的预测只能完成其中流失泥沙携带的部分,而径流中携带的有效养分可能是水体富营养化的主要诱因^[15],故要对流域养分流失量进行更为准确的预测与评价,必须通过建立研究区分布式径流模型,结合土壤侵蚀模型来进行。

参考文献

- [1] John I, Jeffrey L, Christian V. The GCTE soil erosion network: A multi-participatory research program. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5): 377~ 380
- [2] 潘剑君,赵其国,张桃林. 江西省兴国县、余江县土壤侵蚀时空变化研究. *土壤学报*, 2002, 39(1): 58~ 64. Pan J J, Zhao Q G, Zhang T L. Spatial and temporal changes in soil erosion in Xingguo and Yujing of Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 58~ 64
- [3] Al-abed M, Zhou S, Yaghi A, *et al.* An integrated GIS/RS approach for soil erosion assessment and modeling in Syrian coastal soils. *Pedosphere*, 2001, 11(2): 167~ 174
- [4] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 坡耕地土壤侵蚀研究进展. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 123~ 128. Fu T, Ni J P, Wei C F, *et al.* Recent development of sloping field erosion (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3): 123~ 128
- [5] Cochrane T A, Flanagan D C. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 51(4): 678~ 685
- [6] 倪九派,傅涛,李瑞雪,等. 应用 ARC/INFO 预测茅子沟小流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 29~ 32. Ni J P, Fu T, Li R X, *et al.* Supplying Geographical Information System ARC/INFO to predict soil erosion of watershed (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 29~ 32
- [7] 游松财,李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 23~ 25. You S C, Li W Q. Estimation of soil erosion supported by GIS (In Chinese). *Journal of Natural Resource*, 1999, 14(1): 23~ 25
- [8] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. GIS 支持下三峡库区典型小流域土壤养分流失量预测. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 9~ 12. Cai C F, Ding S W, Shi Z H, *et al.* Prediction on soil nutrient losses at typical small watershed of Three Gorges area with GIS (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 9~ 12
- [9] 倪九派,傅涛,何丙辉,等. 基于 GIS 的丰都三合小流域土壤侵蚀危险性评价. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 62~ 66. Ni J P, Fu T, He B H, *et al.* Assessment on danger of soil erosion in Sanhe ecological orchard based on GIS (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1): 62~ 66
- [10] 石常蕴,周慧珍. GIS 技术在土地质量评价中的应用. *土壤学报*, 2001, 38(1): 248~ 255. Shi C Y, Zhou H Z. Evaluation of land quality based on GIS (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 248~ 255
- [11] 周勇,张海涛, Bimin R V, 等. 土壤资源与生态环境数据库的建立及应用. *土壤学报*, 2002, 39(5): 653~ 663. Zhou Y, Zhang H T, Bimin R V, *et al.* Establishment and application of land resources and eco-environment database (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 653~ 663
- [12] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 71~ 74. Fu T, Ni J P, Wei C F, *et al.* Research on nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 71~ 74
- [13] Zhao Y G, Zhang G L, Gong Z T. SOTER based soil water erosion simulation in Hainan island. *Pedosphere*, 2003, 13(2): 139~ 146
- [14] Tian G M, Wang F E, Chen Y X, *et al.* Effect of different vegetation systems on soil erosion and soil nutrients in red Soil region of south-eastern china. *Pedosphere*, 2003, 13(2): 121~ 128
- [15] Gao X J, Hu X F, Wang S P, *et al.* Nitrogen losses from flooded rice field. *Pedosphere*, 2002, 12(2): 151~ 156

GIS-BASED PREDICTION OF NUTRIENT LOSS FROM A SMALL WATERSHED

Ni Jiupai Wei Chaofu Xie Deti

(College of Resources and Environment, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China)

Abstract The Sanhe small watershed was divided into many slope units with the aid of GIS and its nutrient loss was assessed on the basis of the results of the study slope nutrient loss by means of simulated rainfall, using the universal soil loss equation (USLE). Results showed that the total nutrient (organic matter, TN, TP, TK) loss could be well and truly estimated by calculating sediment in the small watershed, but in estimating of the available nutrients (available nitrogen, available phosphate, available potassium), the nutrients in runoff should not be neglected. In order to accurately estimate the nutrient loss in the small watershed, a runoff distribution model of the watershed should be established and used in combination with the soil erosion model with the aid of GIS. In the Sanhe small watershed, the average quantity of soil loss per year was 5 839t and for the average quantity of nutrient loss per year, the organic matter, TN, TP and TK reached 197. 9, 7. 42, 3. 91, and 174. 0 t, respectively.

Key words Nutrient loss; Small watershed; GIS; USLE