

川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究

花利忠^{1,2}, 贺秀斌¹, 朱波¹

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 将地理信息系统(GIS)技术 Arc/Info 与通用土壤流失方程(USLE) 相结合进行了小流域土壤侵蚀量的估算。以盐亭农田生态系统国家野外科学观测研究站内的截流村小流域(简称截流村小流域)为研究对象, 依据实地调查资料及地形、土地利用、土壤和植被等数据, 建立了小流域空间数据库, 利用 GIS 的栅格数据空间分析功能, 将小流域空间离散化为 10m×10m 的栅格, 在栅格内根据合适的 USLE 因子算法进行了土壤侵蚀量估算, 进而对小流域内土壤侵蚀强度空间分异和小流域内侵蚀量进行了统计分析。结果表明, 截流村小流域年均输沙模数为 1 244.7 t/(km²·a), 侵蚀强度属轻度; 坡耕地占流域面积的 44.17%, 年均土壤侵蚀模数为 2 195.0 t/(km²·a), 其侵蚀总量占流域总侵蚀量 77.93%, 表明坡耕地是该小流域水土流失的策源地, 小流域水土流失治理的关键是实现流域内坡耕地的合理利用。同时对于林地和小于 10° 坡耕地的侵蚀模数结果与相关研究仅相差 19.8% 和 4.4%, 证实了该模型的准确性和可靠性。

关键词: GIS; 通用土壤流失方程; 土壤侵蚀量; 川中丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0111-05

中图分类号: S157.1

Soil Erosion Distribution of a Small Watershed in the Hilly Area of Central Sichuan Basin

HUA Li-zhong^{1,2}, HE Xiu-bin¹, ZHU Bo¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Jieliucun watershed in the hilly area of central Sichuan Basin was chosen as the typical study area. Based on field survey, geographic information system (GIS) software and Arc/Info, geographical database of the watershed, including digital elevation model (DEM), landuse, soil and vegetation, was built. The watershed was divided into some uniform grids (10m×10m) in accordance with the GIS's function of raster spatial analysis. Integrated with GIS, Universal Soil Loss Equation (USLE) was applied to predict the amount of soil erosion in the watershed after studying the reasonable method for calculating factor values of USLE. Results show that the annual average amount of soil erosion is 1 244.7 t/(km²·a), which is in the category of lightly eroded area. Sloping land covers 44.17% of the total area, but the amount of its soil erosion accounts for 77.93% of that in the watershed. The study demonstrates that sloping land is the major source of soil loss, and therefore rational sloping land use is the key to soil loss control. The case study of Jieliucun watershed indicates that the model is reliable compared with other related studies.

Keywords: geographical information system (GIS); Universal Soil Loss Equation (USLE); soil erosion; hilly area of the central Sichuan Basin

在我国经济建设不断发展,人民生活水平不断提高的今天,生态环境问题、水资源的保护问题、流域管理问题、土地利用与土地生产力等问题得到了人们更多的关注。然而,土壤侵蚀及其产生的泥沙使土壤养分流失、土地生产力下降、湖泊淤积、江河堵塞,并造成诸如洪水等自然灾害,泥沙携带的大量营养物和污染物加剧了水体富营养化,水质恶化,不断严重威

胁到人类的生存。水土流失已成为中国重要的环境问题,土壤侵蚀研究已成为目前环境保护中的一个重要课题。

土壤侵蚀预报是有效监测水土流失和评价水土保持措施效益的手段,侵蚀模型则是进行土壤流失监测和预报的重要工具。然而传统预测方法需要大量经费、时间和人力的投入,因此,在一定精度范围内通过有

收稿日期: 2006-11-21

资助项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB 2-07-01); 国家自然科学基金课题(40671120); 国家 973 项目(2003CB415201)

作者简介: 花利忠(1978-), 男(汉族), 山西省晋中市人, 博士生, 从事土壤侵蚀与水土保持。E-mail: hualizhong2008@yahoo.com.cn.

限的数据输入,得到满足要求的土壤侵蚀预测结果成为趋势^[1]。20世纪80年代以来,随着地理信息系统(Geographical Information System, GIS)的成熟,它开始与土壤侵蚀模型—通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)相结合进行流域土壤侵蚀量的预测和估算,业已成为土壤侵蚀动态研究的有力工具。GIS与USLE相结合的分布式方法运用GIS的栅格数据分析功能,可预测出每个栅格的土壤侵蚀量,便于管理者识别关键源区,并通过确定引起水土流失的关键因子,针对性地提出最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs),为流域内土地资源的质量评价、利用规划和经营管理等提供科学依据与决策手段。

本研究在地理信息系统 Arc/Info 支持下,以盐亭农田生态系统国家野外科学观测研究站内的截流村小流域为研究区域,建立流域空间数据库,进行了小流域的土壤侵蚀量预测,进一步分析了不同坡度坡耕地土壤侵蚀量,为截流村小流域土地利用和水土保持提供科学依据,进而为川中丘陵区及长江上游水土资源合理利用与保护提供科学理论与依据。

1 实验区概况及与研究材料

1.1 实验区概况

盐亭农田生态系统国家野外科学观测研究站内的截流村小流域(105°27'E, 31°16'N)(简称截流村小流域)位于川中丘陵区北部的盐亭县林山乡,处于嘉陵江与涪江的分水岭上,总集水面积 34.64 hm²。地质构造处于八角场背斜北翼,梓潼向斜的东南翼,岩层倾向北东 55°和北西 35°左右,倾角 3°~6°,裂隙发育,砂岩裂隙频度较高,泥岩次之^[2]。地形为中丘,海拔 400~535 m。属于中亚热带湿润季风气候,年均气温 17℃,多年平均降雨量 826 mm,年内水量分配不均,多集中于夏、秋两季,占年降水的 85%左右。土壤为水稻土和石灰性紫色土,土层厚度一般 20~70 cm,质地为中壤,黏粒含量<20%,粉粒为 33.1%~43.8%,碳酸钙含量为 3%~13%^[3]。自然植被类型为柃木和柏木混交林,农作物主要有水稻、玉米、小麦、甘薯、油菜等。

1.2 数据准备

基础图件由盐亭站提供,包括:2000—2004年逐日降雨量、数字地形图、土壤分布图、1995年土地利用图(见附图1)、植被图和地质图等数据,各图形比例尺均为 1:5 000。本文在 Arc/Info 的支持下,建立流域的空间数据库,利用 GIS 的栅格数据空间分析功能,将小流域空间离散化为 10 m×10 m 的栅格。

2 基于 GIS 和 USLE 的截流村小流域土壤侵蚀量预测

采用的土壤侵蚀模型——通用土壤流失方程式(USLE),形式简单,参数容易获取,且各因子具有明显的物理解释意义,是目前预测土壤侵蚀量较为广泛使用的方法之一。其公式为:

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

式中: A ——单位面积上的年均土壤流失量 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; R ——降雨/径流侵蚀指数 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$,用多年平均年降雨侵蚀力指数表示; K ——土壤可蚀性因子 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$; L ——坡长因子; S ——坡度因子; C ——作物栽培管理因子; P ——水土保持工程措施因子。

2.1 USLE 模型中各因子值的确定

本文研究选择的 USLE 模型,包含了近期研究关于模型各因子的最新修订,具有较高的准确性。

2.1.1 降雨侵蚀力因子 R 本研究利用日降雨量估算降雨侵蚀力的多参数模型^[4]来计算截流村小流域的降雨侵蚀力,公式如下:

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k (D_j)^\beta \quad (2)$$

式中: M_i ——第 i 个半月时段的侵蚀力值 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; α, β ——模型参数; k ——该半月时段内的天数; D_j ——半月时段内第 j 天的日雨量,要求日雨量 ≥ 12 mm,否则以 0 计算,12 mm 与侵蚀性降雨标准对应;参数 α 和 β 反映了区域降雨特征,如下式:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中: P_{d12} ——日雨量 ≥ 12 mm 的日平均雨量; P_{y12} ——日雨量 ≥ 12 mm 的年平均雨量。

根据盐亭实验站 5 a 的逐日降雨资料按式(3)和(4)估算该站的 α 和 β 分别为 1.006 和 1.531。由于流域面积小,降雨分布比较均匀,全流域只采用一个 R 值,利用式(2)计算逐年各半月的降雨侵蚀力,经汇总统计得到多年平均降雨侵蚀力,即 $R = 3719.5 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.1.2 土壤侵蚀因子值 K K 因子反映了土壤对侵蚀的敏感性。影响 K 因子的因素是多方面,但一般说来,质地越粗或越细的土壤有较低 K 值,而质地适中的反而有较高的 K 值。国外 K 值估算的常用方法 Wischmeier 诺谟图并不适合我国亚热带大多数土壤,包括紫色土^[5]。因此,本研究采用 Williams 等在 EPIC

模型中的方法, 利用土壤有机质和颗粒组成因子进行估算^[6], 计算式如下:

$$k = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 S_d(1 - S_i/100)]\} \times [S_i/(C_l + S_i)]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25 C/[C + \exp(3.72 - 2.95 C)]\} \times [1.0 - 0.7(1 - S_d/100)] / \{1 - S_d/100 + \exp[-5.51 + 22.9(1 - S_d/100)]\} \quad (5)$$

式中: S_d ——砂粒含量; S_i ——粉粒含量; C_l ——黏粒含量; C ——有机质含量。根据四川省第二次土壤普查结果^[7]计算截流村小流域土壤的 K 值。

2.1.3 地形因子 L, S 地形 L, S 因子是反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响, 在其它地理环境因子相同的条件下, 坡度越大, 坡长越长, 土壤侵蚀就越严重。利用 Arc/Info 的 Grid 模块进行基于盐亭 DEM 的地形特征分析, 提取坡度坡长因子。坡长因子采用 Wischmeier 和 Smith 提出的经验公式计算^[8],

$$L = \left(\frac{l}{22.13}\right)^m \quad (6)$$

式中: L ——坡长因子; l ——像元坡长; m ——坡长指数, 像元坡长的计算式如下^[9]:

$$l_i = \sum_1^i (D_i / \cos \theta_i) - \sum_1^{i-1} (D_i / \cos \theta_i) = D_i / \cos \theta_i \quad (7)$$

式中: l_i ——像元坡长; D_i ——沿径流方向每像元坡长的水平投影距(在栅格图像中为两相邻像元中心距, 随方向而异); θ_i ——每个像元的坡度($^\circ$); i ——自山脊像元至待求像元个数。

m 取值如下式:

$$m = \begin{cases} 0.5 & \beta \geq 5\% \\ 0.4 & 3\% \leq \beta < 5\% \\ 0.3 & 1\% \leq \beta < 3\% \\ 0.2 & \beta < 1\% \end{cases} \quad (8)$$

式中: β ——像元坡度($^\circ$)。

美国通用土壤流失方程允许计算的最大坡度为 18% (10°)^[10], 不太适合我国多丘陵山地, 地形陡峻的土壤侵蚀环境特点。截流村小流域坡度 $\geq 18\%$ 的占 50% , 因此本研究借鉴刘宝元对坡度在 $9\% \sim 55\%$ 的陡坡土壤侵蚀的研究^[11], 把坡度因子 S 分段计算, 即: 缓坡采用 McCool 坡度公式, 陡坡采用刘宝元的坡度公式, 合并表示如下式:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ ——像元坡度($^\circ$)。

2.1.4 植被覆盖度因子 C 和水保措施因子 P 植被覆盖度因子, 又称作物经营管理因子。经验指出,

植被覆盖度与土壤侵蚀量关系极大。在其它地理环境因子值相同的情况下, 植被覆盖度越大, 土壤流失量越小; 反之, 则越大。截流村小流域的主要土地利用类型包括耕地、林地、草地、居民点等等, 参考国内外的研究成果^[12-14], 结合截流村小流域的实际情况, 对截流村小流域的 C 因子赋值如表 1。

表 1 截流村小流域不同土地利用 C 因子值

土地利用类型	旱地	水田	交通用地和水体	草地	居民地	林地
C 因子	0.31	0.18	0.00	0.06	0.20	0.01

水土保持措施因子是采取水保措施后, 土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值。通常, 包含于这一因子中的控制措施有: 等高耕作、等高带状种植和修梯田等。将土地利用图与 P 值属性库文件记录建立链接, 再分别将 P 值赋给土地利用图, 得到 P 值因子图。由于小流域没有设小区实验, 主要参照美国农业部手册 703 号、实验站提供的土地利用现状图和相关文献来进行 P 值的率定^[12-14]。以自然植被 P 因子为 1, 坡耕地为 0.35, 水稻是梯田修筑最好的一种土地利用, P 值为 0.01。

2.2 栅格流失量的计算和土壤侵蚀等级图的生成

运用 GIS 的数据库管理功能和栅格空间分析功能, 生成模型的 R, L, S, K, C 和 P 共 6 个因子专题图, 将各因子连乘后, 得各像元土壤侵蚀量 [$t/(hm^2 \cdot a)$] 图, 再乘以系数 100, 即转换为 $t/(km^2 \cdot a)$ 。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叠加, 获得不同土地利用方式下的土壤侵蚀量图, 将此图与坡度图叠加分析不同坡度坡耕地的土壤侵蚀量。

3 预测结果与讨论

3.1 截流村小流域土壤侵蚀等级与侵蚀量

根据土壤侵蚀分级标准, 将其分为微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈侵蚀 6 类(表 2)。

表 2 截流村小流域土壤侵蚀强度分级

侵蚀分级	侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	面积/ hm^2	百分比/ $\%$
微度侵蚀	< 500	17.96	51.86
轻度侵蚀	500 ~ 2500	8.68	25.06
中度侵蚀	2500 ~ 5000	6.02	17.37
强度侵蚀	5000 ~ 8000	1.64	4.73
极强度侵蚀	8000 ~ 15000	0.34	0.98
剧烈侵蚀	> 15000	0.00	0.00

研究表明,截流村小流域的平均土壤侵蚀模数为 $1\,244.7\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,土壤侵蚀轻度属轻度,大于水利部颁布的西南土石山区土壤允许流失量 $500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的标准,水土流失治理的任务仍然艰巨。截流村小流域土壤侵蚀等级如图 1 所示。

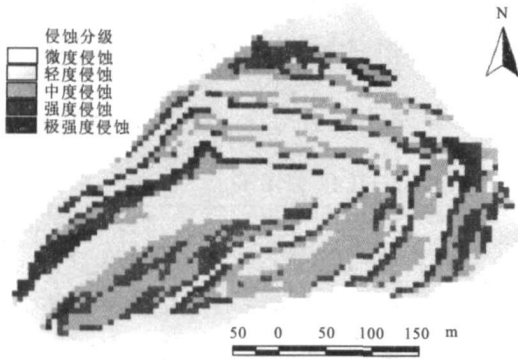


图 1 截流村小流域土壤侵蚀强度分级

3.2 截流村小流域土地利用方式与侵蚀量

截流村小流域土地利用以森林和旱地为主(表 3),旱地以坡耕地的形式存在,基本上未采取侵蚀防

治措施。总的看来,流域土地利用结构不合理,种植业比重过高,不利于流域水土资源的高效利用。土地利用方式直接影响土壤流失量,表 3 显示流域内各种土地利用类型侵蚀总量为 $431.2\text{ t}/\text{a}$,占流域面积 44.17% 的坡耕地侵蚀量占流域总侵蚀量的 77.93% ,占流域面积 55.83% 的其它地类对流域土壤侵蚀量的贡献率仅为 22.07% ,这表明坡耕地是截流村小流域水土流失的策源地。

表 4 表明, 15.31 hm^2 的坡耕地中,有 26.09% 的属于微度, 33.01% 属于轻度, 32.36% 属于中度, 8.55% 属于强度。

张信宝先生等人于 2002 年用 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 的双同位素示踪法对川中丘陵区盐亭县武家沟小流域泥沙来源测定结果显示流域内林地和缓坡农地 ($< 10^\circ$) 的侵蚀模数分别为 $173\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ^[15] 和 $886\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ^[13]。表 3 和表 4 显示林地和小于 10° 坡耕地的侵蚀模数分别为 215.8 和 $926.6\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,两者相接近(分别相差 19.8% 和 4.4%),证实了模型的准确性和可靠性。

表 3 截流村小流域不同土地类型土壤侵蚀量

土地利用类型	平均侵蚀模数/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	面积/ hm^2	百分比/ $\%$	侵蚀量/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	百分比/ $\%$
水田	26.5	3.85	11.11	1.0	0.24
坡耕地	2 195.0	15.31	44.17	336.1	77.93
森林	215.8	11.74	33.91	25.3	5.87
草地	1 458.9	0.85	2.46	12.4	2.88
坑塘	0.0	0.32	0.91	0.0	0.00
居民点	2 764.8	2.04	5.90	56.4	13.08
交通用地	0.0	0.53	1.55	0.0	0.00
合计	—	34.64	—	431.2	—

表 4 截流村小流域坡耕地不同坡度土壤侵蚀量与强度分级

坡度/ $(^\circ)$	平均侵蚀模数/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	侵蚀分级	占坡耕地面积比例/ $\%$	侵蚀量/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$
< 5	503.6	微度侵蚀	26.09	20.1
$5\sim 10$	1 261.0	轻度侵蚀	33.01	63.7
$10\sim 15$	2 860.5	中度侵蚀	21.40	93.7
$15\sim 20$	4 367.4	中度侵蚀	10.96	73.3
$20\sim 25$	5 871.9	强度侵蚀	5.48	49.3
> 35	8 663.2	强度侵蚀	3.07	36.0

流域内土壤侵蚀强度空间分异和小流域内侵蚀量进行了统计分析,为截流村小流域土地利用和水土保持提供科学依据。本研究结果与相关的研究基本吻合,较为可信。

相对于传统的集中式的方法进行土壤侵蚀量的预测,这种分布式的方法由于运用了 GIS 的栅格数据分析功能,可以预测出每个栅格的土壤侵蚀量,便于管理者找出较为严重的土壤侵蚀区,寻求最佳管理措施(BMPs),从而为流域规划和流域管理提供决策依据。

该模型在解决了土壤侵蚀以及水土流失动态预测预报问题的同时又节省了大量的时间、人力和物力,是一个十分值得推广的流域土壤侵蚀模型,在我国具有良好的应用前景。

4 结论

本研究在 GIS 软件支持下,根据合适的 USLE 因子算法在栅格内进行了土壤侵蚀量估算,进而对小

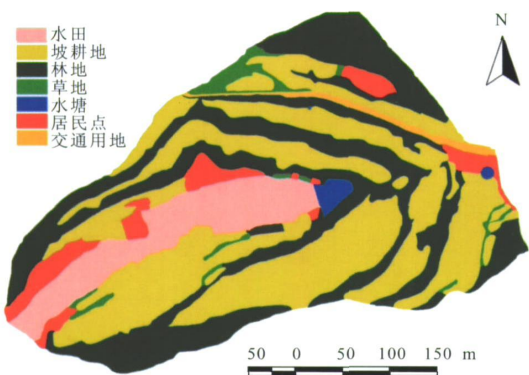
[参 考 文 献]

- [1] 张照录, 崔继红. 通用土壤流失方程最新研究改进分析 [J]. 地球信息科学, 2004, 4(4): 51—54.
- [2] 张先婉, 李仲明. 川中丘陵区的农田生态系统 [J]. 土壤通讯, 1984, 6(1): 1—11.
- [3] 朱波, 彭奎, 高美荣, 等. 川中丘陵区土地利用变化的生态环境效应——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站集水区为例 [J]. 山地学报, 2001, 19(增刊): 14—19.
- [4] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35—41.
- [5] 史学正, 于东升, 邢延安. 用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性 K 值 [J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 399—405.
- [6] 梁音, 史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性因子的研究 [J]. 水土保持研究, 1999, 6(2), 47—52.
- [7] 四川省土壤普查办公室, 四川省农牧厅. 四川省第二次土壤普查数据资料汇编 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1992.
- [8] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of ASAE, 1989, 32: 1571—1576.
- [9] 朱蕾, 黄敬峰, 李军. GIS 和 RS 支持下的土壤侵蚀模型应用研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(4): 413—416.
- [10] 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]. Handbook NO. 703. Washington D C: U. S. Department of Agriculture, 1997.
- [11] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37: 1835—1840.
- [12] 倪九派, 傅涛, 李瑞雪, 等. 应用 ARC/INFO 预测芋子沟小流域土壤侵蚀量的研究 [J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 29—33.
- [13] 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.
- [14] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62—68.
- [15] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 双同位素法研究 [J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1537—1541.

(上接第 110 页)

[参 考 文 献]

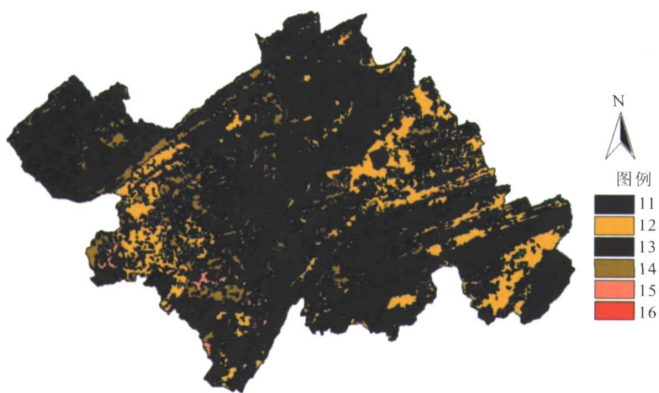
- [1] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业区非点源污染潜在危险性评价——以于桥水库流域磷流失为例 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 262—269.
- [2] Tripathi M P, Panda R K, Raghuvanshi N S. Identification and prioritization of critical sub-watershed for soil conservation management using the SWAT model [J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(3): 365—379.
- [3] 刘枫, 王华东, 刘培桐. 流域非点源污染的量化识别方法及其在于桥水库流域的应用 [J]. 地理学报, 1988, 43(4): 329—339.
- [4] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业区非点源污染敏感性评价的一种方法 [J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 56—59.
- [5] 张美琴, 陈静. 巢湖主要入湖河道磷的污染现状 [J]. 广东微量元素学, 2003, 10(4): 41—44.
- [6] 李凤, 吴长文. RUSLE 侵蚀模型及其应用(综述) [J]. 水土保持研究, 1997, 4(1): 109—112.
- [7] Sivertun A, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gisselo watershed using GIS [J]. Environmental Modelling & Software, 2003, (18): 887—898.
- [8] Rekolainen S. Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland [J]. Aqua Fennica, 1989, (19): 95—107.
- [9] Grizzetti B, Bouraoui F, Granlund K, et al. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model [J]. Ecological Modelling, 2003, (169): 25—38.
- [10] Trevisan M, Padovani L, Capri E. Nonpoint—Source Agricultural Hazard Index: A Case Study of the Province of Cremona, Italy [J]. Environmental Management, 2000, 26(5): 577—584.
- [11] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律 [J]. 中国水土保持, 1994(4): 12—13.
- [12] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62—68.
- [13] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的小流域农地水土保持规划研究 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 172—175.



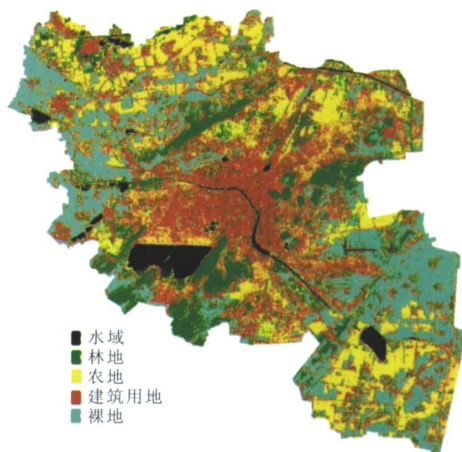
附图1 截流村小流域土地利用图



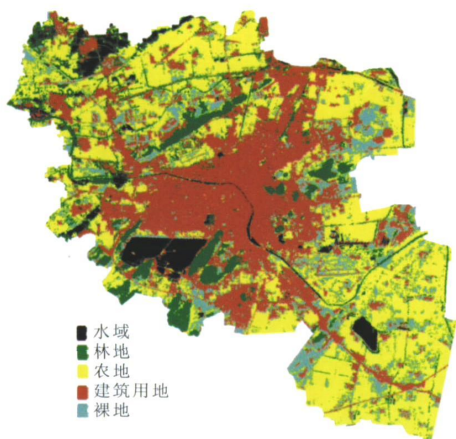
附图2 万洲市2003年底元胞演化结果图



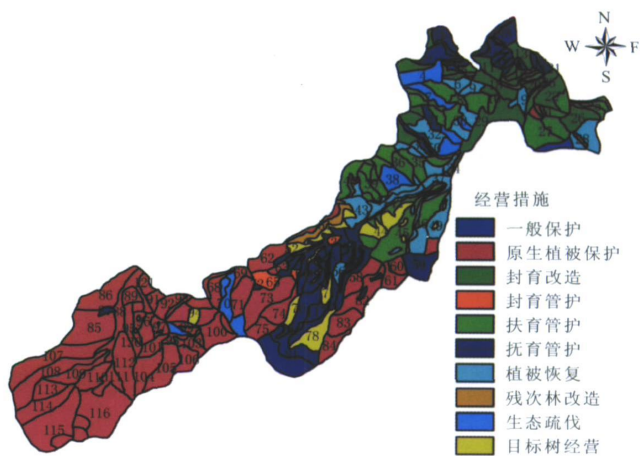
附图3 万洲市2003年水土流失强度图



附图4 非监督分类结果



附图5 监督分类结果



附图6 八达岭林场240个细班森林健康经营模式