

基于 GeoCA 和 GIS 的水土流失空间演化模拟研究

欧敏^{1,2}, 黄建国¹, 张永兴¹, 熊有胜³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆水利局水保站, 重庆 401147; 3. 西南农业大学 资源与环境学院, 重庆 400716)

摘要: 传统的水土流失研究主要是以通用方程(USLE)为基础的一种确定性分析。实际上, 水土流失是一个影响因素众多, 边界条件复杂的连续不间断的不确定过程。研究了用地理元胞自动机来模拟水土流失的原理、方法和工作流程, 并在 GIS 技术支持下采用标准的 Von. Neumann 邻居定义, 着重探讨元胞状态转化所遵循的规则和水土流失从一种强度到另一种强度这一微观动态变化过程, 最终形成 GeoCA—Soil Erosion 系统。最后, 以重庆市万洲区为例, 用元胞空间与研究区域相一致的地理元胞自动机模型, 得出了重庆市万洲区水土流失等级图并分析了水土流失与其背景的空间关系。研究结果表明, 万洲区水土流失已经得到有效控制。并运用 ArcView 软件作为开发平台与之集成, 将这一过程可视化表达。

关键词: 地理元胞自动机; GIS; 水土流失; 模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0116-05

中图分类号: S157.1

Spatial Evolution Simulation of Soil and Water Loss Based on GeoCA and GIS

OU Min¹, HUANG Jian-guo¹, ZHANG Yong-xing¹, XIONG You-sheng²

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Soil and Water Station of Soil Conservancy Bureau of Chongqing Municipality, Chongqing 401147,

China; 3. Faculty of Resource and Environment, Southwest Agriculture University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The traditional descriptions of soil and water loss are mostly the definite approaches based on the current equation (USLE). In fact, soil erosion is an indefinite complicated process influenced by various factors and complicated border conditions. This paper aimed to study how to use GeoCA to simulate soil and water loss in terms of its principles, forms and processes. Moreover, sustained by GIS, the study paid a great attention to the rules and the dynamic micro-processes from one state to another in order to form the GeoCA—Soil Erosion system using the Von Neumann neighbor. As an example, the system was applied in Wanzhou district, Chongqing City, and the relations of soil erosion with the basic factors were analyzed. Results show that urban soil and water loss in Wanzhou district has been effectively controlled, At the same time, the process can be visualized with the integration of GIS and CA technology.

Keywords: GeoCA; GIS; soil and water loss; simulation

水土流失是一个全球性的问题, 水土流失的结果是降低了土壤的肥力及可耕性, 导致沟渠塘库的淤积, 进而降低了排灌能力并引起农业生产力的下降。三峡库区水土保持的成果直接关系到三峡工程的运行。估算土壤侵蚀量的途径主要有两方面: 一是确认需采取水土保护的地域; 二是通过确定引起水土流失的关键因子, 采用相应的模型。目前在土壤侵蚀量估算中较为广泛应用的方法是 20 世纪 60 年代 Wis-

chmeier 提出的通用土壤侵蚀方程(USLE), 该模型是建立在土壤侵蚀理论及大量实地观测数据统计分析基础上, 表达式为 $A = RKS L P C$ 。该方程确立了土壤侵蚀量与各因子之间的线形关系, 但各因子指标值的确定需要大量实测试验数据, 对于广大地区尤其是无实测数据资料地区实施该模型有一定的困难^[1]。像许多地理现象一样, 水土流失发展是复杂的非线性系统, 现有的线性数学模型很难对此进行模拟, 因此

收稿日期: 2006-12-11

修稿日期: 2007-01-25

资助项目: 国家十五攻关项目“三峡库区生态环境安全及生态经济系统重建关键技术研究及示范”(2001BA604A); “地质灾害监测、预警及辅助决策支持系统关键技术研究及示范”(2001BA604A02); 博士后基金项目“重庆市水土保持生态环境监测研究”

作者简介: 欧敏(1975—), 男(汉族), 重庆市人, 博士, 从事水土保持、生态环境、地质灾害与 GIS 研究。E-mail: oum inlove@126.com。

通讯作者: 张永兴(1961—), 男(汉族), 江苏省南通市人, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程、生态环境、地质灾害与 GIS 研究。

需要一种能分析水土流失空间演化内在规律的非线性模型才能达到目的。区域科学的发展研究自 20 世纪 80 年代以来正由静态的、均衡的范式逐渐向一种动态演化的范式转变, 开始应用复杂科学的理论研究和分析时空演化的内在规律。如神经网络、元胞自动机、分形学、随机布尔格网等。其中元胞自动机(CA)是一种具有时空计算特征的动力学模型, 通过一些十分简单的局部转换规则, 来模拟十分复杂的空间结构, 非常适宜于模拟水土流失的空间演化。元胞自动机最早是由 Von Neumann 在 20 世纪 40 年代提出的一种在初始条件下, 通过构造简单的数学规则, 时间和空间都离散的用来描述离散动力系统内部单元之间因强烈的非线性作用而导致系统自演化过程的一种数学模型。散布在规则格网(Lattice grid)中的每一元胞(Cell)取有限的离散状态, 遵循同样的作用规则同步更新。大量元胞简单的相互作用而构成动态系统的演化。它不同于一般的动力学模型, 元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定, 而是由一系列模型构造的规则构成, 凡是满足这些规则的模型都可以算做是元胞自动机模型。

20 世纪 60 年代, 元胞自动机开始在地理领域中得到应用, 由于它具有规则划分的离散空间结构, 在数据结构上易于与遥感(RS)、地理信息系统(GIS)等地理信息技术集成, 地理元胞自动机(GeoCA)迅速发展起来, 在林火模拟、城市发展、土地利用、交通模拟、水土保持、地质灾害等领域得到广泛的应用^[2-3]。地

理元胞自动机模型(A)由元胞演化区域的坐标点集(R), 元胞状态点集(S), 元胞邻居模式(N), 元胞局部演化规则(f)4个基本部分组成。可表达为:

$$A = (R, S, N, f)$$

元胞又称单元, 是元胞自动机最基本的组成部分, 离散的分布在一维、二维或多维的欧几里德空间网格点上, 构成一个元胞空间; 元胞在某一时刻只能保持一种状态, 这些有限的状态点集组成元胞空间; 邻居是按元胞周围一定的形状划分的元胞集合, 它们影响元胞下一时刻的状态; 规则是元胞的状态转移函数, 这个函数构造了一种简单、离散的空间、时间范围的局部转化关系^[4-5]。

1 GEOCA—Soil Erosion 基本模型构建

1.1 元胞空间

元胞空间是将研究区域按照一定的空间分辨率划分的离散网格, 每个单元为正方形单元, 与 GIS 中的栅格(Grid)结构基本一致。

1.2 元胞状态

本研究采用水利部水土流失等级划分标准, 元胞状态值按相应的等级取 1~6, 分级如表 1。元胞的初始状态值可根据已有资料按表 1 对应取值, 也可以运用水土流失通用方程, 确定其降雨和径流因子 R, 土壤可蚀性因子 K, 坡长坡度因子 LS, 植被覆盖因子 C 和侵蚀防治措施因子 P, 计算出水土流失模数, 确定元胞初始状态值^[6-7]。

表 1 水土流失强度分级

强 度	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	<1 000	1 000~2 500	2 500~5 000	5 000~8 000	8 000~15 000	>15 000
元胞取值	1	2	3	4	5	6
符 号	▲	■	●	●	●	●
代 码	11	12	13	14	15	16

1.3 邻居定义

在 CA—LANSLIDE 模型中, 采用标准的 Von Neumann 邻居类型, 即每个元胞的上、下、左、右 4 个相邻元胞为邻居元胞(如图 1)。其邻居半径为 1, 定义如下:

$$N_{neumann} = \{v_i = (v_{ix}, v_{iy}) \mid |v_{ix} - v_{ox}| + |v_{iy} - v_{oy}| \leq 1, (v_{ix}, v_{iy}) \in Z_2\}$$

式中: v_{ix}, v_{iy} —— 邻居元胞的行列坐标值; v_{ox}, v_{oy} —— 中心元胞的行列坐标值。

1.4 转化规则

转换规则是该模型的核心, 也就是元胞状态是否发生改变, 以及它向那种状态改变所满足的条件, 元胞对其邻居的影响总是元胞状态值大的影响元胞状态值小的向自身趋同的方向进行。我们无法算出单个元胞下一元胞时间的确切转化方向, 但可以计算出它向各个方向转化的概率, 大量的元胞都遵循这一同样的规则, 其宏观表现便是元胞的空间动态演化, 表示水土流失的动态变化过程。

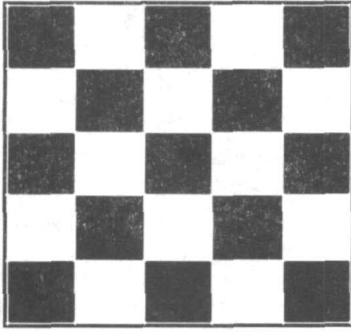


图 1 Von Neumann 邻居定义图

(1) 新生元胞的类型。对于产生新元胞所代表的侵蚀等级概率结合专家经验确定。令 N_{ij} 表示处于编号为 i, j 元胞的状态值, $N_{(i-1)j}$, $N_{(i+1)j}$, $N_{i(j-1)}$, $N_{i(j+1)}$ 分别表示上、下、左、右 4 个相邻元胞的状态值, 则:

如果 $N_{ij,t} - 0.25[N_{(i-1)j} + N_{(i+1)j} + N_{i(j-1)} + N_{i(j+1)}] = 0$, 则:

$N_{ij,t}(t+1) = N_{ij,t}$ (表示不受邻居元胞影响, 其元胞状态不会自己发生改变)

如果 $N_{ij,t} - 0.25[N_{(i-1)j} + N_{(i+1)j} + N_{i(j-1)} + N_{i(j+1)}] = 1$, 则

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t}] = 0.6$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+1}] = 0.4$$

$P[N_{ij,(t+1)} \geq N_{ij,t+2}] = 0$ (表示邻居对元胞的影响不会超过邻居自己的状态值)

如果 $N_{ij,t} - 0.25[N_{(i-1)j} + N_{(i+1)j} + N_{i(j-1)} + N_{i(j+1)}] = 2$, 则

$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t}] = 0.4$; $P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+1}] = 0.4$; $P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+2}] = 0.20$;

$$P[N_{ij,(t+1)} \geq N_{ij,t+3}] = 0$$

如果 $N_{ij,t} - 0.25[N_{(i-1)j} + N_{(i+1)j} + N_{i(j-1)} + N_{i(j+1)}] = 3$, 则

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t}] = 0.35$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+1}] = 0.35$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+2}] = 0.25$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+3}] = 0.15$$

$$P[N_{ij,(t+1)} \geq N_{ij,t+4}] = 0$$

如果 $N_{ij,t} - 0.25[N_{(i-1)j} + N_{(i+1)j} + N_{i(j-1)} + N_{i(j+1)}] = 4$, 则

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t}] = 0.25$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+1}] = 0.25$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+2}] = 0.20$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+3}] = 0.15$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+4}] = 0.15$$

$$P[N_{ij,(t+1)} \geq N_{ij,t+5}] = 0$$

如果 $N_{ij,t} - 0.25[N_{(i-1)j} + N_{(i+1)j} + N_{i(j-1)} + N_{i(j+1)}] = 5$, 则

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t}] = 0.10$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+1}] = 0.15$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+2}] = 0.25$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+3}] = 0.25$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+4}] = 0.15$$

$$P[N_{ij,(t+1)} = N_{ij,t+5}] = 0.10$$

元胞的各个邻居对该元胞的影响, 使其向自己状态发展转变的概率用 P_k 表示, 则总概率为:

$$P = \sum_i P_k[i]$$

$i = 1, 2, 3, 4$, 表示相邻的 4 个元胞。

向 1 方向元胞发展演化的概率与水土流失向 1 方向元胞的速度相当, 这里引入 Rothermel 模型中的计算公式, 向 1 方向元胞发展的速度:

$RS_k[1] = f$ (降雨和径流因子 R , 土壤可蚀性因子 K , 坡长坡度因子 LS , 植被覆盖因子 C , 侵蚀防治措施因子 P)

那么, 向 1 方向元胞发展的概率 $P_k[1]$ 可以根据 $RS_k[1]$ 来确定:

$$P_k[1] = RS_k[1] / \sum_{m=1}^4 RS_k[m]$$

(2) 新生元胞位置确定。在模型中, 针对不同类型的单元, 设定其产生新单元的最大距离为 d_{max} , 那么新生单元到母体的距离 d_{jk} 则可取区间 $[1, d_{max}]$ 的任意整数值, 则相应的 d_{jk} 的概率可用如下线性衰减函数计算:

$$\prod(d_{jk}) = 2(d_{max} - d_{jk} + 1) / [d_{max}(d_{max} + 1)]$$

有了距离和方向的概率, 就可用蒙特卡罗方法确定具体的距离和方向^[8-9]。

1.5 GeoCA—Soil Erosion 的工作流程

GeoCA—Soil Erosion 的工作流程如图 2 所示。

(1) 元胞自动机模型的确立: 根据具体的研究区情况确定元胞空间和邻居定义, 并修订元胞自动机其它部分, 将相关数据存入 GIS 系统中, 并与元胞自动机模型集成。

(2) 将整个元胞空间等效划分 $M \times N$ 个栅格, 每个栅格表示一个元胞, 同时为这些元胞指定状态。

(3) 元胞邻居和规则的判定。先根据所采用的邻居规则按照具体的算法对邻居信息元数据进行研

究处理, 然后进行邻居标识, 判定每个元胞有那些邻居及它是那些元胞的邻居以及它们所处的状态。

(4) 根据元胞状态转化规则确定在一个元胞时间内元胞状态的转化, 并根据转化结果对邻居规则和元胞转化规则进行重新定义或修订, 然后进行下一轮元胞状态转化^[2]。

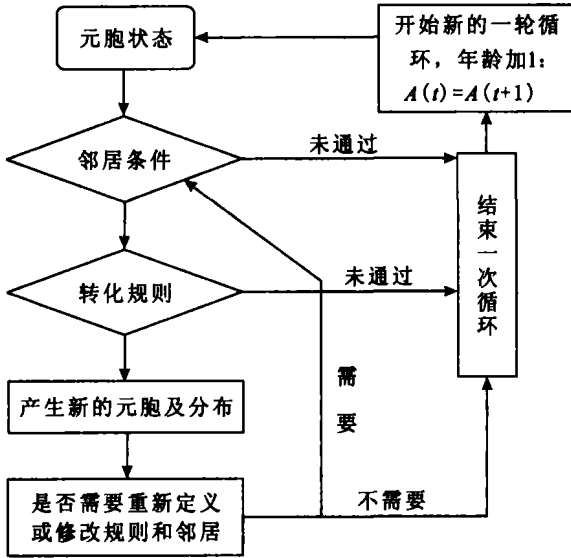


图 2 GeoCA-Soil Erosion 流程图

1.6 与 GIS 的集成

当前 GIS 具有一定的空间分析功能, 但只能处理静态的空间信息, 难以表达和分析时空数据; GeoCA 是一个有效的、典型的动态时空分析模型。两者的集成既可以提高 GIS 的分析功能和扩大其应用范围, 又可以协助 GeoCA 模型的构建, 提高模型的实用性、运行性和可视性。GeoCA 模型与 GIS 的集成有 3 种形式: 松散耦合型、紧密耦合型、嵌入型。本研究采用 ESRI 公司的 ArcView 软件平台, 运用其提供的二次开发语言 Avenue 编程与 GeoCA 进行松散耦合集成(图 3)^[2]。

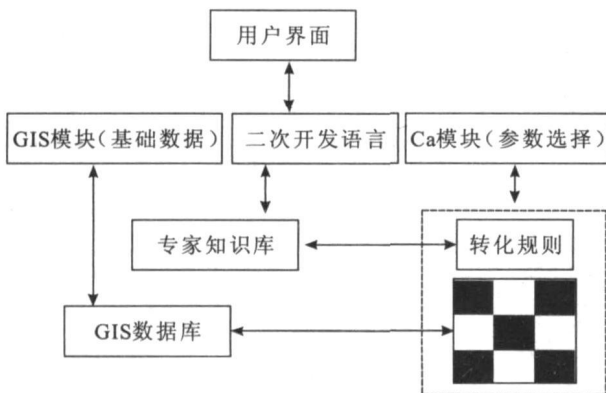


图 3 CA 与 GIS 集成框架图

2 实例分析

本研究采用 ArcView 作为操作平台, 运用其二次开发语言 Avenue 编写程序。根据万洲区农机水局提供的资料, 输入 1995 年万洲区水土流失强度分级数据并转换成 GeoCA 数据, 以此为初始元胞状态, 然后按本模型进行空间演化动态模拟, 最后将相邻元胞状态相同的元胞进行合并。

另外, 为便于编程, 且二者都是字符型数据, 本次模拟用符号代码代替元胞取值。由于数据量大, 本次演化以一个月为一个元胞时间, 经过 96 次演化得到附图 2 为 2003 年底元胞演化结果图, 其对应的水土流失强度等级图如附图 3 所示, 各等级水土流失面积如表 2 所示。

万洲区地处四川盆地东缘, 重庆市东北边缘, 为重庆市第二大新兴工业城市; 万洲区位于东经 107°55'22" - 108°53'25", 北纬 30°24'25" - 31°14'58", 东与云阳, 南与石柱和湖北利川, 西与忠县和梁平, 北与开江和开县接壤, 东西广 97.25 km, 南北袤 67.25 km, 面积 3457 km²。

万洲区是重庆市最大的区, 幅员面积 3457 km², 总人口 1.68 × 10⁶ 人; 辖龙宝、天城、五桥 3 个移民开发区和江南新区, 92 个乡镇街道。万洲区境内属亚热带季风湿润带, 气候四季分明, 日照充足, 雨量充沛, 天气温和, 无霜期长, 霜雪稀少。据统计, 多年平均降水 1243 mm, 最多年降水量为 1549.6 mm, 最低年降水量为 981.9 mm, 多年平均年水面蒸发为 620 mm, 年蒸发总量达 1.09 × 10⁹ m³。

从表 2 可知, 1995 - 2003 年万洲区水保工作取得了有效成绩, 激烈侵蚀面积减少了 146 km², 达到 27.2%。强度侵蚀和极强度侵蚀面积都有所减少; 从分布来看, 水土流失发生较剧烈的地方主要集中在西南面和东部 20° - 30° 的坡耕地, 而这几年侵蚀强度减弱的主要也是这一带。

这一方面是因为万洲区调整土地利用结构和产业结构, 大力推广果树种植和建设水土保持生态园区; 另一方面主要是因为近年来国家加大对生态环境的投入, 特别是退耕还林政策的实施, 使万洲区 > 25° 的 108959.7 hm² 坡耕地全部退耕还林, 有效地遏制了水土流失。另外, 万洲区近年城市建设大大加快, 从而引发了新的城市水土流失, 这也将是今后水保工作的重点。同时, 本模型模拟得出的结果与西南农业大学根据遥感图片结合实地调查得出的数据比较吻合(表 2)。

表 2 万洲区水同时段水土流失面积对照

km²

等级	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
1995 年	139 934.7	57 873.25	122 931.8	20 721.83	1 890.213	483.358
2003 年	140 042.0	57 621.17	122 953.9	20 693.37	1 861.008	337.775
调查结果	140 036.5	57 611.29	122 932.4	20 690.86	1 851.273	358.130

3 结论

本次研究采用 GIS 与地理元胞自动机相结合, 定义了元胞空间和邻居, 着重研究并制定了元胞转化规则, 最终形成 GeoCA- Soil erosion 系统, 运用本系统实例分析了万洲区自 1995 年来水土流失发展的空间演化规律。通过以上研究, 可以得出以下结论。

(1) 采用地理元胞自动机来模拟水土流失, 不仅可以得到某一时刻水土流失发展的状态, 预测其发展规律, 而且可以借助 GIS 观察在整个时期内的空间演化发展过程, 从而研究水土流失发展与各因子 (R , K , LS , P , C) 变化之间的线性或非线性关系。

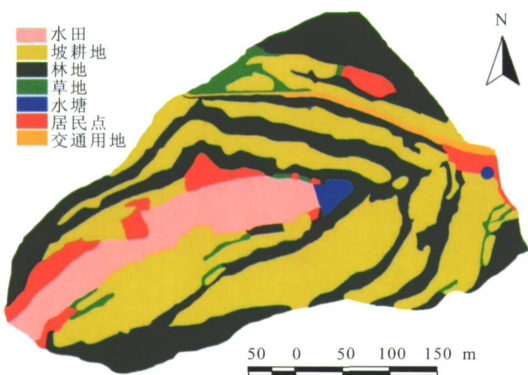
(2) GIS 的空间分析功能、可视化表达和超强的建模能力与 CA 模型对时空和动态的模拟分析相结合, 为彼此的发展提供了新的研究方法, 必将在地理及其相关领域得到越来越广泛的应用。

[参 考 文 献]

[1] 申文明, 张建, 王文杰, 等. 基于 RS 和 GIS 的三峡库区生态环境综合评价[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13

(2): 159—162.

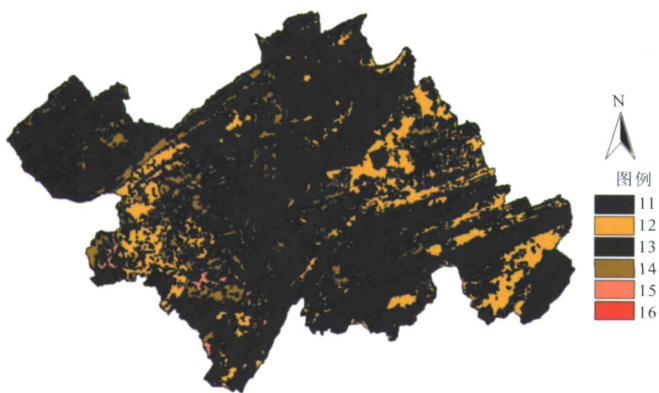
- [2] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 郇伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 何素芳, 罗平, 黄耀丽, 等. 标准元胞自动机模型的缺陷及拓展研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2002, 6(2): 52—56.
- [5] Stephen Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata[J]. Journal of Statistical Physics, 1986, 33(4): 27—29.
- [6] 汤君友, 杨桂山. 基于 RS 与 GIS 的无锡市城镇建设用地扩展时空特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(5): 423—428.
- [7] 孟庆枚. 黄土高原水土保持[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996.
- [8] 马力, 杨新民, 吴照柏, 等. 不同土地利用模式下水土流失空间演化模拟[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 49—51.
- [9] 张利华, 薛重生. “3S” 技术在土壤侵蚀研究中的应用——以湖北省东北地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(5): 503—506.



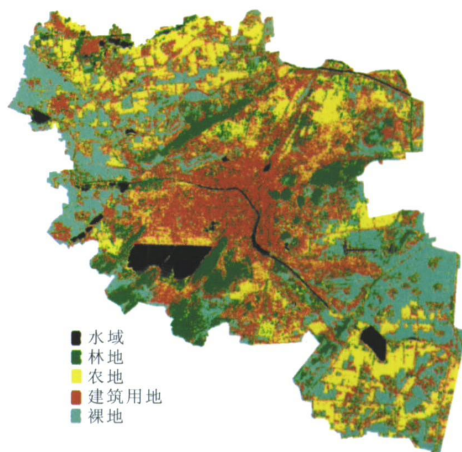
附图1 截流村小流域土地利用图



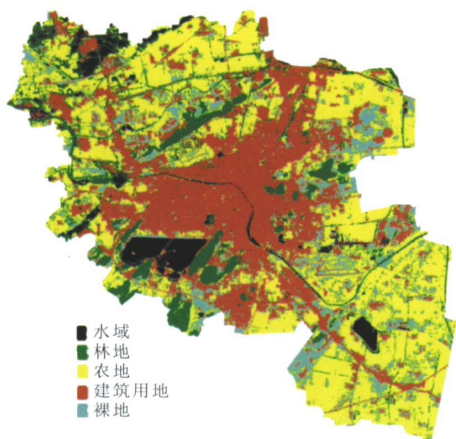
附图2 万洲市2003年底元胞演化结果图



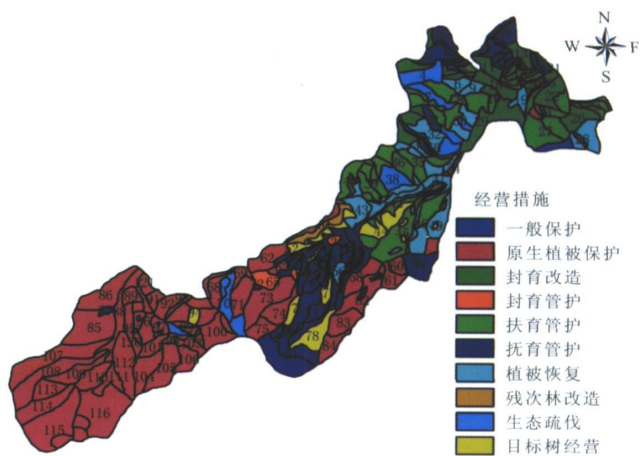
附图3 万洲市2003年水土流失强度图



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