

坡面细沟自组织形成过程的 CA 模拟^{*}

原立峰¹, 常春平²

(1. 南京邮电大学 电子信息科学系, 南京 210003; 2. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050016)

摘要: 细沟侵蚀作为由面蚀向沟蚀转化的重要环节, 是坡面水蚀物理过程的一个重要组成部分, 在坡面侵蚀产沙机理研究中具有重要意义。传统侵蚀模型很难精确地动态模拟和再现这一自组织现象的形成过程。元胞自动机是一种“自下而上”的动态模拟建模框架, 通过元胞间的相互作用, 能够在整体上表现出许多复杂的非线性行为和现象, 具有模拟复杂地理系统时空演化过程的能力。运用元胞自动机理论和方法建立了黄土坡面细沟侵蚀时空演化过程模型——CA Rill, 对坡面细沟发育过程进行了动态虚拟实验, 生动地模拟了坡面细沟自组织形成过程, 并对结果进行了分析。研究突破传统试验方法的束缚, 为细沟侵蚀研究提供了新的途径。

关键词: 细沟侵蚀; 自组织; 元胞自动机

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)03-0007-04

A Cellular Automata Approach to the Simulation of Rill Self-Organizing Development Process on Hillslope

YUAN Lìfeng¹, CHANG Chunping²

(1. Department of Electronics and Information Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)

Abstract: Rill erosion is an important link on the transition from sheet erosion to gully erosion, and is an important component of water erosion physical process on hillslope. Rill erosion research is of great importance to comprehend erosion and sediment mechanism on slope surface. Traditional erosion model is difficult to accurately dynamic simulate and reproduce rill initiation and development process on slope, and this process is self organizing. Cellular automata, simple named ‘CA’, is a ‘from down to up’ dynamic modeling framework. It is able to simulate the spatial temporal evolutionary processes of complex geographical system. By interaction between one cell and another, CA can show a great deal of complex nonlinear action and phenomena as a whole. CA-Rill, a rill erosion dynamic model on loess slope, is constructed by use of theory and method of cellular automata. The dynamical virtual experiment is carried out for rill self organizing process on slope. A rill initiation and development process is simulated vividly. The experimental results are analyzed. This research is a breakthrough in traditional test approach, and gives us a new way for researches in rill erosion.

Key words: rill erosion; self organizing; cellular automata

1 引言

细沟侵蚀是坡面侵蚀发展到特定阶段的一种侵蚀形态和过程, 作为由面蚀向沟蚀转化的重要环节和坡面水蚀物理过程的重要组成部分, 在坡面侵蚀产沙机理研究中具有重要意义。尽管国内外学者针对细沟侵蚀已经进行了大量的研究工作^[1-4], 但人们还并未充分理解和掌握细沟侵蚀的形成和演化机理。目前, 对于细沟侵蚀的研究主要集中在细沟产生的临界条件、影响细沟侵蚀的因素、细沟形态与其影响因素间的关系等方面^[5], 而对于细沟侵蚀过程模拟研究则相对薄弱^[6]。现有的大多数侵蚀产沙模型也只注重一般的土壤侵蚀预报目的, 不能模拟细沟形态演化的时空动态过程^[7]。

细沟侵蚀的研究方法目前还主要是野外或室内外动力条件可控的模拟试验研究。由于细沟侵蚀机理的复杂性及发生过程的随机性和持续时间的短暂性, 以及受侵蚀土壤性质的差异性, 依靠传统的试验研究方法很难揭示影响细沟发育的各因素之间的相互关系; 由于测量手段的限制及研究方法的局限性, 现有模型大都将动态复杂的细沟发育过程简化为静态简单的过程^[8], 或者假设坡面侵蚀发生时, 坡面上已经有细沟存在; 且细沟形态在整个降雨过程中不会发生变化^[9]。例如, 将细沟在整个产沙过程中按静态处理, 或根据细沟形态变化的实测结果与侵蚀动力变量建立简单的经验

^{*} 收稿日期: 2007-09-21

基金项目: 南京邮电大学“攀登计划”项目(XK0020906075); 国家自然科学基金项目(40301025); 国家科技攻关课题(2005BA517A06)

作者简介: 原立峰(1978-), 男, 山西太原人, 讲师, 主要从事遥感技术和GIS应用研究。E-mail: yuanlifeng7833@126.com

关系;WEPP 模型中预先假设细沟有统一 1 m 的沟间距;EROUSEM 则事先需要提供细沟宽度、深度、坡度等参数的平均值。所有这些显然与细沟发育的真实过程不相符合。

近年来,随着复杂系统研究的发展,已有学者应用新的理论和方法来研究细沟侵蚀过程的机理问题。例如,Price^[10]利用随机行走模型模拟了沟网地形的产生;Fujiwara 等^[11]采用凝聚扩散模型进行细沟形成模拟。这些方法虽然能够生成与真实情况相近的沟网平面形态,但它们都是静态模型,不能模拟细沟随时间变化所展现出的动态发展过程。Wright 等^[12]采用随机模型研究了细沟侵蚀过程和地形变化间的动态关系,但由于模拟尺度偏小且忽略了微地貌的作用,模拟结果与实际沟网形态差别很大;Favis Mortlock^[13]利用自组织动力系统方法开发出 RillGrow 模型,生动地模拟了坡面在降雨后细沟的发育过程,但模型只考虑坡面细沟深度的变化,不能模拟沟长和沟宽的变化,流速也为常量;此外,该模型未考虑下渗和沉积的作用;倪晋仁^[14]等人基于自组织理论建立了坡面细沟形成的三维机理模型,模型能够定量的预测坡面细沟的发育过程,并通过计算机模拟能够得到可视化的结果,但模型没有考虑泥沙的沉积、细沟的归并和细沟的侧向侵蚀;雷廷武^[7]等人构建了能够模拟细沟侵蚀时空动态演化的数学模型,并介绍了模型的有限元计算方法,但模型没有提供一个可视化的运行平台,且模型需要进行复杂的数值求解。

由此可见,细沟侵蚀模型的建立和完善,需要研究方法和建模手段的突破与创新。元胞自动机(Cellular Automata,简称“CA”)作为研究空间复杂性现象的一个方法工具,具有模拟复杂地理系统时空演化过程的能力。本文以黄土坡面细沟侵蚀过程为例,利用元胞自动机理论与方法构建黄土坡面细沟侵蚀过程元胞模型——CA-Rill,并利用计算机实验模拟细沟的发育过程,探讨黄土坡面细沟形成的机理。

2 CA 的基本概念及原理

CA 是一种在时间、空间和状态上都离散的网格动力学模型^[15]。CA 最基本的组成单元就是元胞(Cell)、元胞空间(Lattice)、邻居(Neighbor)及规则(Rule)。CA 可以视为由一个元胞空间和定义于该空间的变换函数所组成。标准 CA 是一个四元组,其可表示为: $A = \{d, S, N, f\}$ 。式中: A ——一个 CA 系统; d ——一个正整数,表示 CA 的维数; S ——元胞有限离散的状态集合; N ——一个所有邻居内元胞的组合(包括中心元胞),即包含 n 个不同元胞状态的一个空间矢量,记为: $N = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$, n 是元胞的邻居个数, $s_i \in Z$ (整数集合), $i \in (1, \dots, n)$; f ——将 S^n 映射到 S 上的一个局部转换函数。所有的元胞位于 d 维空间上,其位置可用一个 d 元的整数矢量 Z^d 来确定^[16]。

CA 的基本原理是利用大量元胞在简单规则下的并行演化来模拟复杂而丰富的宏观现象,其思想根源于复杂性科学的一个重要观点:局部规则导致系统宏观变化,即有序行为和自组织的出现。散布在规则格网中的每一个元胞取有限的离散状态,遵循同样的作用规则,依据确定的局部规则作同步更新。大量元胞通过简单的相互作用而构成动态系

统的演化。不同于一般的动力学模型,CA 不是由严格定义的物理方程或函数来确定,而是由一系列简单的规则构成。凡是满足这些规则的模型都可以看作是 CA 模型。因此,确切地讲,CA 是一类模型的总称,或者说是一个方法框架。

3 模型构造

3.1 模型假设

已有研究证明^[17],坡面细沟侵蚀主要受制于细沟中水流特性和土壤的性质,而受雨滴打击的影响很小,因此,模型忽略了雨滴溅蚀的作用,另外模型作如下条件假设:

- (1)假设坡面裸露、质地均匀,微地形凸凹起伏随机分布;
- (2)降雨随机地落在坡面上,雨强不随时间变化,并且每个雨滴的大小相等;
- (3)模型不考虑蒸散发损失;
- (4)模型不考虑土壤前期含水量和地表结皮对细沟形成的影响。

3.2 模型结构

根据元胞模型的构成,CA-Rill 模型可以表示为下式:

$$CA-Rill = \{L, N, S, P, \forall\} \tag{1}$$

式中: L ——元胞空间,对应细沟侵蚀发生的坡面上一定大小的区域,其边界选用定值型边界,CA-Rill 模型采用正方形规则格网对坡面进行空间离散,每一个元胞都具有确定面积; N ——元胞邻居,模型采用摩尔(Moore)型邻域,邻居半径 $r = 1$ 。元胞模型与规则格网 DEM 的数据结构具有一致性,在构建局部规则时易于同用来处理格网 DEM 汇流的流向算法结合; S ——元胞状态,这里主要状态变量指高程,通过元胞及其邻居间的来水来沙量和出水出沙量差异导致的元胞高程变化来反映细沟形成过程中的侵蚀、沉积和不变。此外,元胞的属性还包括当前蓄水量,通过水深来表示; P ——影响模型运行的全局和局部参数,可表示成 $P = \{P_c, P_t, P_{ri}, P_s, P_r, P_k\}$,其中包括元胞大小(P_c)、时间步长(P_t)、雨强(P_{ri})、坡度(P_s)、地表粗糙度(P_r)、土壤可蚀性(P_k)以及演化规则中的各种参数; \forall ——元胞演化规则,是 CA-Rill 模型的核心,它是包括下渗、流路确定及流量分配、侵蚀及泥沙运移在内的一系列规则的集合。

3.3 演化规则(\forall)

3.3.1 下渗

下渗模型不考虑土壤水分损失,采用如下简单规则进行计算:如果降雨强度 $r <$ 土壤稳渗率 K ,则下渗率等于降雨强度;如果降雨强度 $r >$ 土壤稳渗率 K ,则下渗率等于土壤稳渗率。下渗公式用下式表示:

$$i = \begin{cases} r & \text{if } r < K \\ K & \text{if } r > K \end{cases} \tag{2}$$

3.3.2 坡面流

元胞坡度是元胞间高程差比两元胞中心之间的距离。通过寻找元胞所在平面与水平面的夹角,可以得到元胞的近似坡度。具体计算公式如下

$$\tan \beta_{ij} = \frac{Z_i - Z_j}{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}} \tag{3}$$

式中: $\tan \beta_{ij}$ ——元胞 i 与元胞 j 间的坡度; X, Y ——元胞单

元的平面直角坐标系; Z ——元胞的高程。

流向确定采用最陡坡降算法。模型中当前元胞的蓄水量由降雨生成, 并通过当前元胞及其周围邻居间的流入流出量来维持水量平衡。 Q_0 的计算公式如下:

$$Q_0 = r + \sum_{i=1}^k Q_i - i \tag{4}$$

式中: r ——当前元胞上接受的雨量; $\sum_{i=1}^k Q_i$ ——所有上游元胞流入当前元胞的流量之和; i ——当前元胞的下渗量。

3.3.3 土壤颗粒的分离、输移和沉积

CA-Rill 模型采用如下公式计算细沟的侵蚀率

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \left[1 - \frac{qc}{T_c} \right] \tag{5}$$

式中: D_r ——细沟侵蚀率[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; K_r ——与土壤性质有关的比例系数[$\text{kg}/(\text{N} \cdot \text{s})$]; τ ——作用在单位土壤面积上的水流剪切应力(N/m^2); τ_c ——侵蚀发生的临界切应力(N/m^2); q ——单宽流量[$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$]; c ——泥沙含量(kg/m^3); T_c ——水流的输沙能力[$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]。

水流剪切应力 τ 的求解为

$$\tau = \rho g R S \tag{6}$$

式中: ρ ——水的容重(g/cm^3); g ——重力加速度(m/s^2); R ——水力半径, 可以用径流深 h (即每个元胞上的水深) 来近似表示; S ——水力坡度, 取坡度的正弦。

泥沙的输移和沉积取决于径流含沙量和径流的输移能力。径流的含沙量采用我国学者张科利等^[18] 的研究结果:

$$c = 11.89 Q^{0.1029} J^{1.137} \tag{7}$$

式中: c ——径流含沙量(kg/m^3); Q ——径流量(m^3/s); J ——坡度。

径流的输移能力 T_c 的计算采用 Nearing 等^[19] 的研究成果, 可以用下面的公式来表示:

$$\lg T_c = \frac{\alpha + \beta e^{\gamma + \delta \lg \omega}}{1 + e^{\gamma + \delta \lg \omega}} \tag{8}$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ——经验常数; ω ——细流力(stream power)(kg/s^3)。其计算式为

$$\omega = \rho g q S \tag{9}$$

式中: ρ ——水的容重(g/cm^3); g ——重力加速度(m/s^2); S ——水力坡度, 取坡度的正弦; q ——单宽流量(m^2/s)。

3.3.4 填洼与决口规则

首先识别洼地, 如果径流挟带的泥沙足以填充洼地, 则水流和填充洼地后剩余的泥沙继续移向下游新的元胞; 如果水流挟带的泥沙量刚好填充洼地, 则泥沙全部沉积, 而水流继续向下游元胞流动; 如果水流和泥沙均不足以填充洼地, 则泥沙沉积, 水流停止。随流入洼地的水和泥沙的增加, 当洼地元胞的高程(水深+ 高程+ 沉积) 超出周围最低的元胞邻居, 则发生决口, 水流继续向下游元胞流动, 且水流在流出洼地时遵循侵蚀产沙规则, 重新计算洼地中的高程和水深。

3.4 运行流程

CA-Rill 模型的运行流程见图 1。

模型运行时, 首先初始化模型的全局性参数, 然后进入主循环, 每次循环开始先判断第 N 个雨滴是否是最后一个

雨滴, 即降雨是否结束。如果降雨结束, 则停止循环, 如没有结束, 则产生一个新的雨滴, 该雨滴随机地降落在坡面上, 接着运行下渗子模块判断是否发生产流, 如果没有发生, 则重新进入主循环, 如果发生, 则判断是否有比当前元胞更低的元胞存在。如果有, 则调用侵蚀模块, 侵蚀当前元胞, 按流量分配算法, 当前元胞上的水、沙流动到下游元胞; 如果没有, 则当前元胞是洼地, 调用填洼与决口算法, 再看是否当前元胞的高度(高程+ 水深) 要比周围元胞邻居的高, 如果还没有, 则返回主循环; 如果有, 进行决口算法, 按流量分配法则, 水、沙移动到新元胞, 再看是否到达边界, 如果没有到达边界, 继续判断是否产流, 依上述流程继续, 如果到达边界, 则进入下一轮循环。

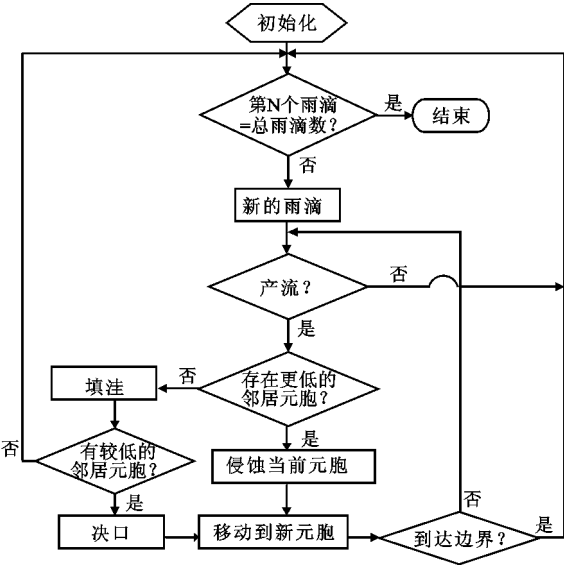


图 1 CA-Rill 模型的运行流程

4 细沟自组织形成过程模拟

4.1 初始条件

由于缺乏真实的小尺度坡面降雨实测资料, 研究用计算机来随机生成初始模拟地表, 从理论上探讨细沟的发生、发展过程。试验中经验系数取值多数来自我国学者在黄土高原地区所做科学试验取得的成果。受到计算能力限制, 模型假设每一滴雨能够铺满整个元胞, 并减去下渗量转化为当前元胞的蓄水量。由于无法确切知道每一个点侵蚀发生的临界切应力, 所以取整个坡面的平均值。在模拟试验中, 设置坡长 190 cm, 坡宽 100 cm 的一个长方形区域作为细沟侵蚀形成区域。元胞大小取 2 cm, 高程由计算机随机生成, 范围在 0~ 50 cm。其它详细参数设置见表 1。

4.2 细沟发育的地学虚拟试验

图 2 给出了降雨作用下坡面发育各个阶段的模拟形态, 展示了细沟形成和发育全过程。从细沟发育的形态上来看, 降雨一段时间以后才出现细沟, 细沟分散在整个坡面的中下部, 坡上方出现一个未被细沟切割的区域, 细沟基本上呈等间距分布, 并伴随有细沟沟道的归并, 模拟结果与野外观测到的结果十分形似。

除细沟侵蚀形态外, 沟深、沟长及总侵蚀量也是评价模

型好坏的重要指标。采用张科利^[4]等人的试验研究成果,取细沟侵蚀的临界沟深 0.8~1.0 cm 为确定细沟的标准。本文选择侵蚀深度大于 1.0 cm 为确定细沟的界限。模拟试验一共产生细沟 10 条,平均沟宽 2 cm,沟道总长度 496 cm,平均沟长 49.6 cm,平均沟深 4 cm,计算侵蚀量为 4.37 kg。

表 1 模拟参数取值

参数	值	描述、公式
元胞大小/ cm	2	全局参数
时间步长/ s	0.2	全局参数
降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	1.5	全局参数
平均坡度/ $^{\circ}$	15	全局参数(7)
地表粗糙度	0.5	全局参数
土壤可蚀性	8.18×10^{-4}	全局参数
土壤稳渗率/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.15	(2)
经验系数 α	-34.47	(8)
经验系数 β	4.14	(8)
经验系数 γ	0.845	(8)
经验系数 δ	0.412	(8)
水容重/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	1.0	(6)(9)
重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8	(6)(9)
土壤临界剪切力/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	6.78	(5)

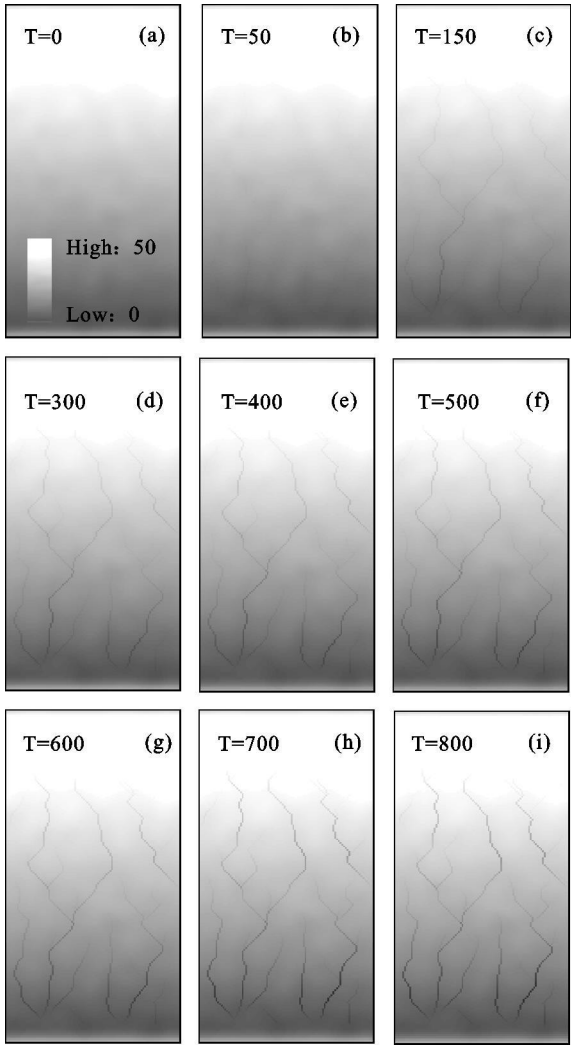


图 2 坡面细沟形成的虚拟过程

需要指出的是,模拟试验中由于雨点降落的随机性(由

一组随机数来确定雨滴降落在坡面上的位置)和微地貌的起伏变化(由计算机随机生成),所以细沟在坡面上产生的位置也是随机确定的,这与实际过程中的情况是一致的。

4.3 细沟形成过程分析

降雨初期(图 2 b),降雨量小,土壤下渗阻碍了地表径流的产生,坡上方形成汇水区,至坡下方发生产、汇流,因此,坡下方依稀可见有较细纹沟出现;随着雨量的增大(图 2 c),降雨量超过了坡面下渗能力,在沟间地形成片流,片流逐步向低洼地进行汇集,形成线状冲刷,使坡下方已经形成的纹沟内水量增大,侵蚀力增强继续向上做溯源侵蚀,逐渐形成细沟形态;随着流量的不断增大(图 2 d),坡面侵蚀继续发展,又形成一些新的细沟,而其它沟间地产生的细小纹沟由于得到的汇水量小,侵蚀力也逐渐降低,水量逐步被主要的细沟所夺取,这些纹沟逐步消亡,另外,水流受微地形的扰动,已经形成的细沟发生归并,进一步增强了其输移能力;随时间的演进(图 2 e),坡面细沟成为坡面径流和泥沙输移的主要通道,细沟的下切侵蚀增强;随降雨和径流量的不断增加(图 2 f, h),细沟的侵蚀力不断增强,主要表现在沟深和侵蚀量上的变化;至迭代时间步长为 800 时(图 2 i),坡面细沟的沟网形态已经完整地展现出来。由此可见,利用 CA-Rill 模型能够对细沟的形成过程做出全面的动态模拟。

5 结论与展望

坡面细沟的发育过程是系统在多种内外因素综合作用下产生的自组织现象,具有极大的不确定性和混沌特征,虽然存在一定规律,但要通过数学模型精确预测它们的发展变化则是非常困难的。传统模型很难精确地动态模拟和再现这一自组织现象的形成过程。CA 是研究复杂地理系统的有力工具,大量元胞在简单规则下的并行演化来模拟复杂而丰富的宏观现象。

本文基于 CA 理论和方法建立了细沟侵蚀过程模型——CA-Rill,该模型侧重坡面侵蚀微观机理的考虑,通过元胞间的局部相互作用关系反映坡面细沟从无到有的沟网形成过程,完整再现了黄土坡面细沟的发育过程,其模拟结果与野外观测到的细沟沟网分布在形态上十分接近。另外,模型不需要进行复杂的数值求解。目前,将 CA 应用于模拟细沟侵蚀过程的动态演化研究才刚刚开始,下一步研究工作包括:(1)模型敏感性分析;(2)利用野外实测资料对模型进行校验,提高模型的实用性。CA 方法应用到侵蚀过程模拟还是一个新的研究领域,今后的应用前景将会十分广阔。

参考文献:

[1] Kirkby M J, Morgan R P C. Soil erosion[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1980.

[2] Govern G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. Earth Surface Processes Landforms, 1986, 11: 15-24.

[3] Selby M J. Hillslope materials & processes[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.

单化,导致生态系统结构和功能极度脆弱,造成了生境质量退化。尤其城镇所在区域,大气污染、水污染和固废污染的程度都高于非城镇区域。与此同时,居民地和建设用地大多由农用地转变而来,这也大大降低了自然生态系统对污染物的降解能力,使得区域环境容量下降。

(3)道路网作为一种人工干扰廊道,具有双重功能。一方面,道路可以促进生态系统间物质和能量交换,使系统更为开放,起着通道作用;而另一方面,四通八达的道路将均质的区域自然单元分割破碎化,在一定程度上影响生态系统的连通性,阻碍生态系统间物质和能量的交换,并影响着局地小气候;同时城市建成区内道路两侧建筑物连片,绿化带缺失或过窄,噪声、废气污染对道路附近的居民生活产生了严重的干扰。

5 结 语

(1)从土地资源利用的角度,翔安区和同安区为厦门未来海湾型城市建设留有较充足的后备土地资源。农田和林地作为控制性的土地利用类型,对维持区域整体生态环境状态起到关键作用,但其受到的干扰和影响也明显,处于不断退化状态。

(2)城镇建设用地快速增长,借助道路网络,不断向农村和林地区域延伸扩展,在一定程度上影响区域自然生态格局

的稳定性。

(3)在快速城市化发展战略下,目前区域土地利用格局人工化趋势将进一步得到加强。因此一方面要维护作为生态屏障的山地林的生态功能得到充分稳定和发挥,另一方面也要对区域产生的消极生态影响进行有效预防和控制。

参考文献:

[1] 史培军,江源,王静爱,等.土地利用/土地覆盖变化与生态安全响应机制[M].北京:科学出版社,2004.

[2] 傅伯杰,陈利顶,蔡运龙,等.环渤海地区土地利用变化及可持续利用研究[M].北京:科学出版社,2004.

[3] 郝慧梅,任志远.基于 RS 和 GIS 的包头市土地利用动态及其生态效应定量研究[J].水土保持学报,2006,20(2):139-143.

[4] 于兴修,杨桂山,李恒鹏.典型流域土地利用/土地覆盖变化及其景观生态效应[J].自然资源学报,2003,18(1):13-19.

[5] 王思远,刘纪远,张增祥,等.中国土地利用时空特征分析[J].地理学报,2001,56(6):631-639.

[6] 欧维新,杨桂山,于兴修,等.盐城海岸带土地利用变化的生态环境效应研究.[J]资源科学,2004,26(3):76-83.

[4] 张科利,秋吉康宏.坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):41-46.

[5] 倪晋仁,韩鹏,张剑.基于自组织理论的黄土坡面细沟发育特征分析[J].水利学报,2002(1):6-9.

[6] 张晴雯.细沟水蚀动力过程试验研究[D].陕西杨陵:中科院水土保持研究所,2001.

[7] 雷廷武,姚春梅,张晴雯,等.细沟侵蚀动态过程模拟数学模型和有限元计算方法[J].农业工程学报,2004,20(4):7-13.

[8] Bryan R B. Processes and significance of rill development[J]. Catena Supplement, 1987, 8: 1-15.

[9] Parsons A J, Wainwright J, Abrahams A D, et al. Distributed dynamic modeling of interrill overland flow [J]. Hydrological Processes, 1997, 11: 1833-1859.

[10] Price W E. A random walk simulation model of alluvial fan deposition [M]// Merriam D F. Random processes in geology. Berlin: Springer Verlag, 1991: 55-62.

[11] Fujiwara T, Fukada M, et al. Simulation analysis of rill patterns that develop on hill slopes[R]// Technology reports of the Yamaguchi university, 1989, 4(3): 247-256.

[12] Wright A C, Webster R A. Stochastic distributed model of soil erosion by overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 207-226.

[13] Favis Mortlock D T, Quinton J N, Dickinson W T. The GCTE validation of soil erosion models for global change studies[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 397-403.

[14] 倪晋仁,张剑,韩鹏.基于自组织理论的黄土坡面细沟形成机理模型[J].水利学报,2001(12):1-7.

[15] 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.

[16] 孙战利.空间复杂性 & 地理元胞自动机模拟研究[J].地球信息科学,1999:32-37.

[17] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A Hydraulics velocity relationship [J]. Laboratory Study of Rill Trans of ASAE, 1984, 27(3): 790-796.

[18] 张科利,张竹梅.黄土陡坡细沟侵蚀及其产沙特征的实验研究[J].自然科学进展,2000(10):1136-1139.

[19] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulic sand erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876.