

元胞自动机在模拟土壤侵蚀时空演化过程中的应用

原立峰^{1,2,3}, 周启刚^{1,3}

(1. 中科院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
2. 中科院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 土壤侵蚀作为一个全球性的环境问题已经越来越受到人们的广泛关注。动态模拟和预测土壤侵蚀的发育及演化过程具有十分重要的意义。元胞自动机(Cellular Automata 简称CA)是一种‘自下而上’的动态模拟建模框架,具有模拟地理复杂系统时空演化过程的能力。从元胞自动机的概念和原理入手,介绍了CA模型的特征及其在土壤侵蚀学科中的应用情况和存在问题,对CA模型应用于土壤侵蚀过程的模拟、预测的可行性和可操作性进行了探讨。

关键词: 元胞自动机; 复杂性; 时空模拟; 地理模型

中图分类号: S 157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2005)06-0058-03

The Application of Cellular Automata in Simulating the Spatial-temporal Dynamic Development Process of Soil Erosion

YUAN Li-feng^{1,2,3}, ZHOU Qi-gang^{1,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, CAS, Beijing 100101, China;
3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Soil erosion, as a global environmental problem, has been paid more and more attention. It is very important to dynamicaly simulate and forecast the development and evolutionary process of soil erosion. Cellular Automata(simple named “CA”)is a dynamic modeling framework, being capable to simulate the spatial-temporal evolutionary process of geographical complex system. It was introduced that the concept and the characteristic of CA theory and its application in soil erosion. Some present problems were discussed. The feasibility was proved while CA model was applied to simulating and forecasting the process of soil erosion.

Key words: cellular automata; complexity; spatial-temporal simulation; Geo-model

1 引言

复杂性科学是在现代系统科学和非线性科学、人工智能、模糊理论的基础上发展起来的,是研究复杂性现象的科学,代表着科学演化的未来形态。钱学森院士曾多次指出,地理学的研究对象——地球表层,是一个自然、社会、经济复合的、开放的复杂巨系统^[1]。许多的地理现象都具有非平衡性、多尺度性、不确定性、自相似性、层次性、随机性和交互性等复杂性现象的特征^[2]。研究复杂的地理现象需要应用复杂系统的理论,结合地理学的本质,采用适当的研究方法,建立空间复杂系统的科学模型^[3]。

元胞自动机作为研究空间复杂性现象的一个方法工具,正在受到地理学界的普遍重视。CA模型是定义在一个由离

散、有限状态的元胞组成的元胞空间上,按照一定的局部规则,在离散时间维上演化的动力学系统^[4]。由于CA模型‘自下而上’的研究思路、强大的复杂计算功能、固有的并行计算能力和鲜明的时空耦合特征使得它特别适合于地理空间系统的动态模拟研究^[5]。

目前,CA已经逐渐成为一个国际前沿的研究领域。CA的应用范围非常广泛,从物理、生物现象的微观模拟^[6]到地理、社会进程的宏观模拟^[7],几乎无所不包,应用的领域涉及社会学、生物学、信息科学、计算机科学、数学、物理、化学、军事等许多学科。随着复杂系统理论的发展,元胞自动机模型在地理学中的应用逐渐倾向于模拟和预测复杂的地理过程。CA在我国的研究刚刚起步,在土壤侵蚀学科领域中,人们对CA还比较陌生。然而,对土壤侵蚀的发育和演化过程模

* 收稿日期: 2004-11-12
基金项目: 国家杰出青年基金项目“多尺度时空数据分析”(编号40225004)资助
作者简介: 原立峰(1978-),男,山西太原人,博士研究生,主要从事土壤侵蚀和GIS应用方面的研究。

拟及预测显然是CA 应用的又一个潜在领域, 具有广阔的应用前景。我们在这方面进行一些初步探讨, 以推动 CA 模型在该领域内的研究和发展。

2 元胞自动机理论

2.1 元胞自动机的概念和构成

元胞自动机(Cellular Automata, 又称细胞自动机, 分子自动机或者点格自动机, 简称CA), 是一种时间、空间、状态都离散, 空间相互作用和时间因果关系皆局部的网格动力学模型^[8], 可以将它简单的描述为: CA 的基本构成单元是“元胞”, 这些元胞被规则的排列在元胞空间所确定的格网上, 每个元胞的状态取有限状态集中的一个, 并且随着时间而变化, 元胞的状态取决于上一时刻该元胞的状态以及该元胞所有邻居的状态, 元胞空间内的元胞按照这样的局部规则进行同步状态更新, 整个元胞空间表现为离散的时间维上的变化^[4]。CA 系统的时间是离散时间, 它不具有物理意义。用集合的语言来描述CA 模型, 即:

$$S^{t+1}=f\left(S^t,N\right)$$

式中, S ——一个有限集合, 代表元胞状态, N ——元胞邻域, t ——时间, f ——局部转换规则。一个基于转换规则的标准元胞自动机的演化过程可以表示为如下形式:

IF any cell $\{x \pm 1, y \pm 1\}$ is already developed
THEN $P_d\{x, y\} = \sum_{\{i,j\} \in \Omega} P_d\{i, j\} / n$
&
IF $P_d\{x, y\} >$ some threshold value
THEN cell $\{x, y\}$ is developed with some other probability $\rho\{x, y\}$

式中: $P_d\{x, y\}$ ——邻域函数; $\rho\{x, y\}$ ——细胞 $\{x, y\}$ 的发展概率; n ——邻居的数目; 细胞 $\{i, j\}$ 取值于邻域 Ω ^[9]。

2.2 元胞自动机的特征分析

CA 模型以其框架的简单、开放和可以模拟十分复杂的系统行为而具有很强的生命力, 从目前的研究看, 它具有以下特点:

- (1) 空间性, 反映在以栅格单元空间来定义元胞自动机, 因而能很好地和许多空间数据集相互兼容。
- (2) 离散性, 即空间的离散性、时间的离散性、状态的离散性。
- (3) 同步性, 可以将元胞自动机的状态变化看成是对数据或信息的计算或处理, 这时的重要特征是计算的并行性。
- (4) 局部性, 每一个元胞的状态, 只对其周围半径为 R 邻域内的元胞在下一时刻的状态有影响。
- (5) 高维数, 在动力系统中一般将变量的个数称为维数, 从这个角度看, 元胞自动机的维数是无穷的^[10]。

3 CA 模型在土壤侵蚀时空演化模拟中的应用

3.1 CA 模型在土壤侵蚀学科中的应用现状

上个世纪90 年代以来, 国外已经有科学家将CA 模型成功应用于土壤侵蚀研究中。Simth(1991) 设计了一个简单的地学元胞自动机模型模拟了地形侵蚀的过程^[11]。Murray 和 Paola(1994, 1997) 建立了一个用来模拟交织流动小溪的 CA 模型, 在模拟现象的主要特征方面取得了成功^[12]。Pilotti 和 Menduni(1997) 利用二维格子气模型模拟了面蚀过程, 以及侵蚀物质的输移过程^[13]。S. Di Gregeorio(1999) 等人利用CA

模型模拟了土壤水蚀过程, 开发了“SCAVATU”模型, 并将其应用于意大利南部卡拉布里亚区Fiumara Armaconi 的一个小流域, 取得了令人满意的效果^[14]。Uri Wilensky(2004) 等人利用 Net Logo 元胞自动机设计软件建立了一个土壤侵蚀模型, 形象生动地表达了不同地表粗糙度下的地形侵蚀情况^[15]。

近几年来, 受国际研究的影响和推动, 国内也有人开始了这方面的研究。周成虎(1999) 等人在总结前人工作的基础上, 提出了地理元胞自动机(GeoCA) 模型, 推动了CA 模型在地学中的应用。马力(2003) 等人利用CA 模型, 在GIS 的技术支持下, 分析了不同土地利用模式下土壤侵蚀的空间演化状况, 预测了不同土地利用模式中以地块为单元的土壤侵蚀的发展方向, 取得了一定的效果^[16]。陈建平(2004) 等人利用 GeoCA, 建立了土地荒漠化动态演化预测模型, 并对北京及邻区的土地荒漠化情况做出了对比分析, 并提出了一些有益的建议^[17]。史晓霞(2004) 等人以吉林省西部盐碱化土地为研究区, 在GIS 的支持下系统分析了土壤盐碱化的特征及其影响因子, 建立了基于GeoCA 的土壤盐碱化动态模型, 模拟了吉林省西部土地盐碱化发生发展的时空动态规律^[18]。

总体来说, 国内将CA 模型应用于土壤侵蚀学科方面的研究才刚刚起步, 应用程度还比较浅, 需要该领域内的专家给予必要的重视。

3.2 CA 模型应用于土壤侵蚀时空演化模拟的可行性

土壤侵蚀发育及演化过程的模拟是一项十分复杂的系统工程。由于土壤侵蚀过程是随时间发展不断变化的瞬态过程, 传统的土壤侵蚀模型, 无论是基于统计资料的经验模型, 还是基于物理过程的理论模型^[19], 从本质上来说, 都属于一种稳态模型, 仅仅能够做一些事后的预报, 或者说预测预报的范围极其有限, 并不能实现真正意义上的土壤侵蚀预报。除此之外, 传统的侵蚀模型不能回答土壤侵蚀的时空分布规律^[20], 更不能动态反映土壤侵蚀的发生、发育和演化的全过程。所以从土壤侵蚀模型研究的角度来说, 呼唤研究方法的创新和突破。于是, CA 以其方法的灵活性和新颖性进入人们的视野。

首先, CA 方法本身就是从微观的角度入手来建立模型, 所以较之传统方法更有利于对土壤侵蚀机理的分析研究, 从而可以进一步揭示侵蚀过程的规律性。其次, CA 模型的特点决定了它适合于土壤侵蚀过程的时空动态分析及模拟。这是因为:

- (1) CA 模型采用“自下而上”的构模方式, 而且没有一个既定的数学方程, 只是一个建模原则, 因此具有很好的开放性和灵活性, 更符合人们认识复杂事物的思维方式。
- (2) CA 模型是一个基于微观个体相互作用的时空动态模拟模型, 将地理实体的空间和时间特性统一在模型中, 通过划分研究对象的元胞空间和研究初始状态及状态转换规则, CA 模型就可以自行迭代运算, 模拟系统演化过程。
- (3) CA 模型将空间和时间离散化, 适合于建立计算机模型, 具有并行计算特征, 因为计算机对客观世界的表示是离散的。
- (4) CA 模型具有不依赖比例尺的概念, 元胞只是提供了一个行为空间, 本身不受元胞空间测度和时间测度的影响, 时空测度的影响通过转换规则体现。因此CA 模型可以用来模拟小流域、中尺度和大流域的土壤侵蚀过程。

(5)从数据模型的角度看,CA模型中的元胞和基于栅格GIS中的栅格一样,所以CA模型易于和GIS、遥感数据处理等系统集成^[21]。

由以上CA模型具有的特点可以看出,将其应用于土壤侵蚀发生、发育和演化过程的模拟不但是可行的,而且有利于对土壤侵蚀内在机理的理解,并且稍加改动即可实现土壤侵蚀模型时空尺度的自由转换。

3.3 基于CA模型的土壤侵蚀时空动态演化模拟

虽然利用CA来模拟土壤侵蚀过程的动态演化具有很大的吸引力,但是由于土壤侵蚀发育机理及演化过程的复杂性,必须对标准的CA模型进行拓展,才能满足其进行时空模拟的需要,真实准确地模拟和预测土壤侵蚀的演化过程。

(1)元胞与元胞空间的扩展。元胞空间不再是抽象的空间,而是与笛卡尔坐标下的实际地理空间相对应,并可以抽象为二维的地域或研究区。每一个元胞可以具有地理含义,如可以代表土粒单元、一定大小的地形单元或整个小流域。当然,不同空间尺度元胞单元的地理定义会直接影响建模的复杂程度。

(2)元胞状态的扩展。地理元胞可以有多种状态,其状态集合可以定义为表征地理单元的自然属性(如地形、海拔等),或者是影响侵蚀的具体指标(降雨强度、土壤可蚀性、植被覆盖度等)等等。

(3)元胞状态转换规则的扩展。转换规则可以视为宏观土壤侵蚀发育机理在微观个体变化规律的体现,表现土壤侵蚀过程的动态演化十分复杂,排除人为因素以外,除受局部个体间相互作用的影响外,还受各种区域自然条件的影响。因此,CA模型中状态转换规则必须兼顾微观局部单元和宏观区域自然条件。而且,转换规则在元胞空间和时间上是不同构的,应该随区域差异和时间而调整。

(4)时间概念的扩展。CA模型中的模拟时间必须和土壤侵蚀过程中的真实时间建立对应关系,否则,建模就失去了利用价值。一般可以采用多年的土壤侵蚀观测数据来建立两者之间的对应关系。

4 存在的问题

CA模型是一种模拟土壤侵蚀时空动态演化过程很有前景的方法框架,但是由于CA模型框架的简单性与土壤侵蚀机理、演化过程复杂性之间存在的矛盾,用CA来模拟土壤侵蚀的时空动态演化过程也面临以下的问题和挑战。

(1)CA空间尺度的划分问题。不同的空间尺度下,由于模型的表现效果以及影响模型的各种外在因素作用程度的差异,系统单元表现的规律也不相同,因此,根据研究的参考文献:

要,如何确定合适的空间分辨率是一个需要考虑的问题^[22]。

(2)CA转换规则体系的建立问题。建立合理的转换规则是CA模型取得成效的关键,在CA模型中,转换规则反映了地理单元间的局部相互作用。这个局部规则与传统的宏观规律,既有联系,又存在较大的差别。它的产生有时靠的是直觉和经验,而且找到一个确切规则的难度是比较大的,这也是CA模型应用于模拟土壤侵蚀过程能否成功的重要因素。

(3)CA模型的时间校准问题。标准CA模型的时间是一个抽象的概念,那么它的模拟结果如何与实际的时间尺度如年、月、日相对应,是CA模型面临的一个难题。一般可以利用已有的历史数据来校准模型的时间概念,即用某时段观测到的土壤侵蚀结果数据与现有CA模型计算运行的结果相拟合,得到一个时间对应关系。但这种方法的局限性在于一般只适用于有关测站点的地区或流域,并且已经积累了大量的野外观测历史数据。

(4)CA模型与GIS集成的问题。GIS系统的支撑已经成为地理系统建模的必要条件。虽然CA模型与栅格模型GIS在空间数据结构上存在较大的相似性,然而CA模型是一个时空动态模型。传统的GIS并不能完整的表示地理实体的时空信息和时空关系,时空分析能力很弱^[23]。如何将二者动态的紧密集成,也是阻碍CA模型在模拟土壤侵蚀动态演化过程中的一个障碍^[5]。

由以上CA模型在具体应用中存在的问题可以看出,如何建立CA模型的转换规则及校准CA模型的时间直接关系到模型模拟结果的真实性和准确性,所以是模拟土壤侵蚀时空演化过程所必须解决的核心与关键问题。

5 结 语

土壤侵蚀的发生、发育及演化过程是一个非常复杂的现象,具有极大的不确定性和混沌特征,虽然存在一定的规律,但要通过数学模型精确的预测它们的发展变化是非常困难的。CA提供了研究这一现象的有力工具。但是,CA在土壤侵蚀学科领域内的应用在我国才刚刚起步,将CA应用于模拟土壤侵蚀过程的动态演化研究还有待进一步深化。例如:可以在CA的模拟过程中由系统自动调整模型的参数和规则的定义,实现模型在时空尺度上的自由转换;将模糊推理与CA模型紧密结合,建立智能化的CA模拟专家系统;以及实现土壤侵蚀演化过程的三维动态CA模拟,使人更加真实地领略到土壤侵蚀的形成和发展过程。这些问题的深入研究与解决,将使CA模型在越来越多的时空分析领域发挥更大的作用。

[1] 孙战利. 空间复杂性与地理元胞自动机模拟研究[J]. 地球信息科学, 1999, (2): 32- 37.

[2] 钱学森, 于录元, 戴汝为. 一个新的学科领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, (1): 3- 10.

[3] 罗平, 杜清运, 何素芳, 等. 基于关系数据库的CA模型扩展和时空模拟实验研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(3): 8- 12.

[4] 谢惠民. 非线性科学丛书: 复杂性与动力系统[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994.

[5] 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. 23- 26.

[6] Gutowitz. Cellular automata theory and theory and experiment[M]. Boston, MA: 1st MIT Press edition, 1991.

[7] Weimar J. Simulation with Cellular Automata[M]. Berlin: Logos Verlag, 1998.

[8] Wolfram S. Cellular Automata as Model of Complexity [J]. Nature, 1984, 311: 419- 424.

流失总量为扰动破坏原地貌新增土壤流失量和弃土弃渣流失量之和,其值为83.54万t,其中:扰动破坏原地貌新增土壤流失量为68.00万t,占总流失量的81.41%;弃土弃渣流失量为15.53万t,占总流失量的18.59%。扰动破坏原地貌造成新增土壤流失是防治的重点,必须采取切实可行的防治措施。

4 土壤流失的防治

4.1 防治分区

根据外业调查结果,在对西气东输管道工程陕西段沿线水土流失现状、地形特点、工程的功能分区对土壤流失的影响和拟采取的防治措施等因素综合分析的基础上,将其土壤流失防治区域分成以下二个区:

4.1.1 风蚀防治区

管线由靖边以西止陕宁交界段(DB046~DA001),全长139.84 km。沿线大部分地区地形平坦,气候较干旱,在季风影响下,沙漠化和土地沙化、退化严重;在个别地形起伏较大地区突发性暴雨及洪水侵蚀较严重。该区生态上属干旱草原景观,生态环境较为恶劣,农业资源较缺乏,人口稀少,社会经济不发达。土壤大部分是粉沙土或沙土,发育极弱,有多处盐碱化土地分布。植被较稀,以耐干旱、耐盐碱植物群落为主,种类较少。

4.1.2 水蚀防治区

管线由靖边以东止延安市延川县延水关入黄口(DC001~DE394),全长206.18 km。该区生态上属半干旱半湿润森林草原景观,生态环境相对脆弱,农业资源较为丰富,人口密集,社会经济中等或较发达。土壤主要以黄土性土壤为主,由于黄土性土抗蚀性极差,区内大部分地区降雨是短历时高强度

参考文献:

[1] 段喜明,王治国. 塑黄铁路山西段水土流失预测及治理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, (6): 53- 56.
[2] 水利部水土保持司. 开发建设项目水土保持方案技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
[3] 师明洲. 西气东输工程水土流失综合防治体系设计[J]. 人民黄河, 2003, (5): 27- 29.

(上接第60页)

[9] 张显峰. 基于CA的城市扩展动态模拟与预测[J]. 中国科学院研究生院学报, 2000, 17(1): 70- 79.
[10] 杜宁睿, 邓冰. 细胞自动机及其在模拟城市时空演化过程中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(6): 9- 11.
[11] Smith R. The application of cellular automata to the erosion of landforms[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 273- 281.
[12] Murray C A B, Paola C. A cellular model of braided rivers[J]. Nature, 1994, 371: 54- 57.
[13] Pilotti M, Menduni, G. Application of lattice gas techniques to the study of sediment erosion and transport caused by laminar sheet flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22(9): 885- 893.
[14] D D'Ambrosio, S Di Gregorio, S Gabriele, et al. A cellular automata model for soil erosion by water[J]. Phys. Chem. Earth(B), 2001, 26(1): 33- 39.
[15] Wilensky, U. Netlogo Erosion model[EB/OL]. <http://cd.northwestern.edu/netlogo/models/Erosion> Center for Connected Learning and Computer-based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 2004.
[16] 马力, 杨新民, 吴照柏, 等. 不同土地利用模式下土壤侵蚀空间演化模拟[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 49- 51.
[17] 陈建平, 丁火平, 王功文, 等. 基于GIS和元胞自动机的荒漠化演化预测模型[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 254- 260.
[18] 史晓霞, 王静, 任春颖, 等. 基于GIS与GeoCA模型的半干旱区土壤盐碱化动态模拟研究[J]. 东北师大学报, 2004, 36(2): 88- 94.
[19] 吕喜玺, 史德明. 土壤侵蚀模型研究进展[J]. 土壤学进展, 1994, 22(2): 9- 14.
[20] 雷廷武, 邵明安, 李占斌, 等. 土壤侵蚀预报模型及其在中国发展的考虑[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 162- 166.
[21] 张显峰, 崔伟宏. 集成GIS和元胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法[J]. 测绘学报, 2001, (5): 48- 155.
[22] 崔伟宏, 张显峰. 土地资源的动态监测和动态模拟研究[J]. 地球信息科学, 2002, 3(1): 79- 85.
[23] Goodchild M. Geographical Information Science[J]. Journal of International Geographical Information Systems, 1992, 6(1): 31- 45.

度的暴雨,因此工程建设的开挖扰动、弃土将会产生严重的水土流失。所以该区是水土保持重点治理区。

4.2 防治措施总体布局

针对两个防治分区内主体工程建设的塑地貌水土流失特点,在分析评价主体设计中具有水土保持功能措施的基础上,把伴行公路和河流穿越弃渣、管线冲沟穿越、站场绿化作为重点防治对象。

4.2.1 风蚀防治区

管线在该区域主要经过固定沙地、半固定沙地、流动沙地、覆沙黄土丘陵区、盐碱地等。该区主要防治因工程建设造成的固定和半固沙地的流动化、流动沙地被扰动后流动加剧、覆沙黄土区的风力、低洼盐碱地开挖扰动造成的土壤侵蚀和土地退化。管线经过的固定沙地、半固定沙地、和流动沙地采用人工沙障与植物结合的防风固沙工程进行防治;覆沙黄土区黄土梁峁采用边坡整治与绿化结合、黄土沟道采用防冲、湿陷、滑坡工程及绿化结合进行防治;弃渣采用护沟、护岸、渣场护坡和土地整治进行防治;新修道路采用护坡、排水防冲及绿化工程进行防治。

4.2.2 水蚀防治区

管线经过该区域降雨相对较多,生态环境脆弱,人口密集,工程施工对植被和原地貌破坏较大,严重的水土流失将对区域生态环境和社会经济有重大影响,是主体工程建设中防治的重点。管道开挖扰动的弃土、填方边坡、开挖面采用栏护、土地整治和绿化工程进行防治;冲沟穿越采用谷坊、淤地坝和绿化护坡进行防治。新修道路的开挖边坡及周边、填方段采用排水、护坡、拦挡及绿化进行防治;施工便道采用土地整治进行防治。