

文章编号: 1007-4619 (2004)-03-0254-07

基于 GIS 和元胞自动机的荒漠化演化预测模型

陈建平, 丁火平, 王功文, 厉青, 冯春

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 荒漠化是当今全球最严重的环境与社会经济问题之一, 荒漠化以其发展速度和严重的灾害性而引起国际学术界的广泛关注。开展荒漠化变化的驱动因素及其作用机制研究, 尤其是在此基础上对荒漠化与其驱动因素之间的关系进行量化及动态模拟模型研究, 对荒漠化的防治和治理具有十分重要的意义。尝试利用 3S 技术, 结合元胞自动机理论架构出一套荒漠化动态模拟模型, 进而对北京及邻区荒漠化的发展趋势进行预测。实验证明, 这套系统是对荒漠化演化机制从宏观和微观角度进行模拟的有效方法。

关键词: 荒漠化; 元胞自动机; 驱动因素; 动态模拟

中图分类号: P208/XB7 **文献标识码:** A

1 引言

荒漠化是指包括气候变异和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱、亚湿润干旱区的土地退化。荒漠化已经演变为全球性的环境问题之一, 对人类的生存发展构成严重威胁^[1]。据资料显示: 全球陆地面积的 1/4 受荒漠化威胁, 9 亿多人口受到荒漠化影响; 全球荒漠化正以每年约 50000—70000 km² 的速度扩展; 全球荒漠化造成的直接经济损失每年达 423 亿美元。中国是世界上受荒漠化影响最严重的国家之一。目前, 中国的荒漠化土地约为 261 万 km², 并有更多的土地正面临着荒漠化的潜在威胁; 荒漠化土地从东北经华北到西北形成一条不连续的弧形分布带。荒漠化土地不仅面积广大, 而且其发展速率仍在加大, 在 20 世纪 60—70 年代为 1560 km²/a, 80 年代为 2100 km²/a, 90 年代已经达到 2460 km²/a^[2]。荒漠化的不断发展, 已经严重地影响了中国北方地区生态环境建设和社会经济的可持续发展。荒漠化以其发展速度和严重的灾害性而引起国际学术界的广泛关注和重视。中国在荒漠化治理研究方面进行了大量的工作, 取得了一系列成果。近几年来, 遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)及其集成技术迅速发展, 大量应

用于灾害监测、资源监测等方面, 在多元数据定量分析与综合研究方面取得了很好的效果, 不足之处在于动态模拟演化研究。本文基于元胞自动机理论将荒漠化动态演化规律与其空间分布特征相结合, 利用 3S 技术的集成技术, 结合数学模型探讨荒漠化时空动态演变规律, 并预测其未来发展趋势。

CA 模型(Cellular Automaton Model)又叫元胞(细胞, 元胞, 分子或点格)自动机模型。最初是由 John Von Neumann 40 年代末提出来的, 用于研究自复制系统的逻辑特性。CA 理论在地学中的应用最早可追溯到 20 世纪 60 年代。美国北卡来罗那州大学的 Chapin 和 Weiss (1968) 在土地利用变化研究中采用了离散动态模型, 十分接近 CA 模型。Tobler 在 70 年代, 认识到 CA 理论在模拟复杂地学现象中的优势, 首先正式采用了 CA 概念模型来模拟当时美国五大湖边底特律地区城市的迅速扩展。进入 80 年代后, 伴随着 CA 理论的深入和发展, CA 在地学中的应用和理论研究也取得了长足的进步, 成为地学研究的热点。Yong 和 Wadge 用 CA 模拟了火山爆发时, 火山熔岩在重力作用下的漫流扩散过程。Simth 设计了一个简单地学元胞自动机模型模拟了地形侵蚀的过程。Flavio Bonfatti 等人, 用 CA 模型对意大利威尼斯泻湖在周期性潮汐作用下的动态变化进行了生动的模拟和预测。CA 在地学中的许多邻域都已

收稿日期: 2003-01-09; 修订日期: 2003-04-23

基金项目: 本项研究得到国家自然科学基金项目(No. 40072030)、教育部博士点基金(20010491007)和国土资源部科研项目(B1-9)共同资助。

作者简介: 陈建平(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 1995 年毕业于成都理工学院, 获博士学位, 主要从事资源评价和“3S”技术应用的科学与科研工作, 已发表文章 80 余篇, 专著 7 部。E-mail: cs@cugb.edu.cn

经有了广泛的应用,而且展现出巨大潜力。在国际地学界,CA 模型逐渐受到重视,且研究越来越深入。

CA 模型是离散动态系统概念和应用建模的一种方法。标准的 CA 系统是一个由元胞(cells)、元胞状态(Cellular States)、领域(neighbors)和规则(Transition Rules/Functions)构成的四元组。从数学模型的角度看,CA 模型是基于元胞(cell-based)的动态模拟系统,所以它能够与基于栅格的 GIS 系统很好地集成,这样,一方面增强了当前 GIS 软件所缺乏的动态建模能力,提高了 GIS 的操作性能,并为处理时态维提供了一个很好的方法,另一方面,GIS 强大的空间数据处理能力也可为 CA 模型准备数据和定义有效的转换规则,还可以对结果进行直观的显示。因此,CA 与 GIS 的集成,可以克服各自的缺点,形成一个全新的优势互补的动态系统,用来对复杂时空现象、行为和过程进行动态建模分析。

荒漠化变化其实是土地景观变化的一种,也是一种行为很复杂的地学现象,运用 CA 和 GIS 的集成研究方法来研究它,不仅能顾及荒漠化的空间维,还能顾及其时间维,这为荒漠化动态模拟模型的研究提供了一个很好的方向。

2 用元胞自动机模型模拟荒漠化变化

2.1 元胞自动机的特点及其在地学系统时空动态模拟中的概念模型

CA 模型可用公式简单地描述如下:

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

式中, A 为元胞自动机; S 为元胞状态; N 为邻近关系; R 为状态转换规则,其组成结构如图 1。CA 的基本原理就是一个元胞下一时刻的状态是上一时刻其邻域状态的函数。

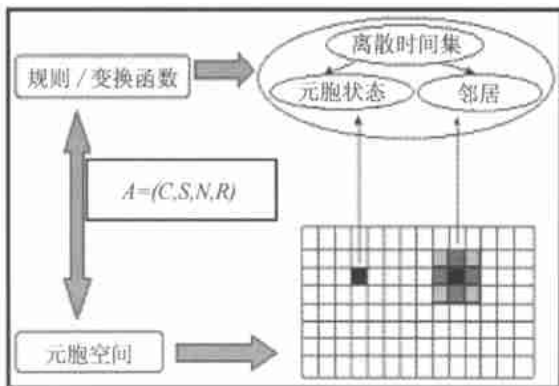


图 1 元胞自动机的组成(据周成虎^[3])

Fig.1 Structure of cellular automata

CA 模型为一空间-时间离散的模型,以其框架简单、开放和适于模拟复杂的具有自组织结构的环境、社会、经济复合体为特点,具有很强的生命力,简单地说,它具有以下几个特点:

(1) “自下而上”的思路,没有一个既定的数学方程,因而具有灵活性和开放性特征,易于地学领域应用;

(2) 时空离散和并行计算特征且具有强大的复杂计算能力,易于计算机建模,因为计算机对客观世界的表示是离散的;

(3) 规则、离散的空间结构,在空间数据结构上,易于与 RS、GIS 等地理信息技术集成;

(4) 天然的空间动力学模型,适于时空复杂系统建模。

正因为如此,CA 模型比较适合空间信息的时空动态分析,尤其是时空动态过程的模拟,从而为 GIS 中的时空分析提供了思路和建模方法,图 2 是元胞自动机在地学系统应用中的概念模型。

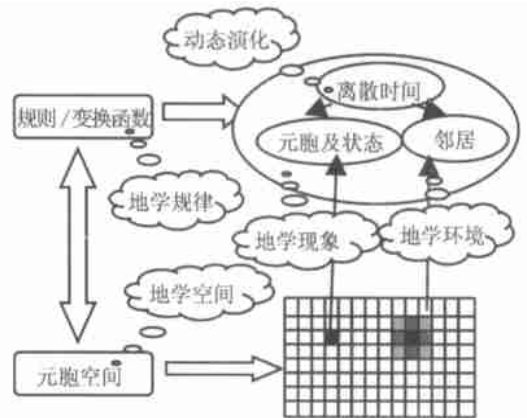


图 2 地学应用的 CA 概念模型

Fig.2 Conceptual model of cellular automata applied to geoscience

2.2 针对荒漠化动态模拟的 CA 模型构建方法框架

荒漠化是一个相当复杂的过程。要模拟荒漠化时空演化,必须先探讨影响荒漠化变化的驱动因素和荒漠化演变的综合机理。我们采用的研究思路是:在荒漠化现状野外调研和不同时相遥感图像荒漠化信息提取和演变分析的基础上,结合研究区已有的多元信息基础资料及研究成果(包括地质、地理、多时期的水文气象、经济、人文以及 DEM 数据等),运用 GIS 强大的空间分析功能和概率统计、曲线估计、逻辑分析、主成分分析、层次分析等数学方

法综合研究了荒漠化与各驱动因子之间的相关关系,揭示了研究区荒漠化的主要驱动因素和荒漠化动态演化规律^[4,5]。在此基础上,以地球系统科学理论为指导,结合 3S 技术和元胞自动机模型,在

ARCVIEW 和 ARCINFO 地理信息系统软件平台上,运用 AML 语言编程实现相应的荒漠化演化数学模型;GeoCA-Desertification 模型。整个模拟系统的方法框架如图 3。

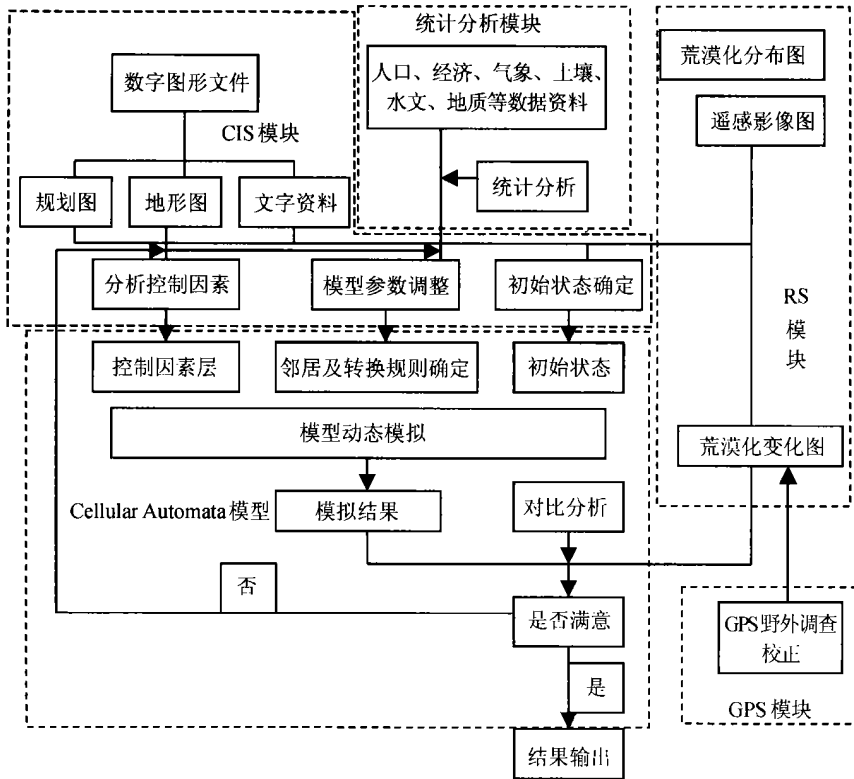


图 3 基于 GIS-RS 和元胞自动机的荒漠化动态模拟方法框架图

Fig. 2 Method framework of desertification dynamic simulation based on GIS-RS and cellular automata model

3 模型实施

3.1 模型结构

模型的设计是以栅格数据为基础。整个模型由二大部分组成:荒漠化分布层、综合控制因素层。它们通过统一空间分辨率的栅格结构相互联系在一起。荒漠化分布层是由遥感解译和野外实地调查的数据栅格化获得。本模型按模型中元胞状态将荒漠化分布层划分为 3 类:非荒漠化土地、荒漠化土地,限制荒漠化土地(如水域、林地、森林等)。模型中元胞根据邻居构形确定自身行为的同时,其行为规则受到控制因素层的影响。

综合控制因素层作为元胞模型的外部环境,影

响和控制着荒漠化的演化行为。荒漠化是一个非常复杂的地学现象,影响因素很多。通过对荒漠化演化综合机理的分析^[4,5],确定了影响荒漠化的六大因子,并且运用优化的层次分析法(AHP)确定了各驱动因素的权系数(表 1),将综合控制因素层划分为三个:①气候植被人文等综合控制层;②地形地貌控制层;③风速风向控制层。其中气候植被人文等综合控制层的值(C)通过下面的公式空间叠加分析得出。需要指出的是,人类改造荒漠化的因素通过植被覆盖率形式间接反映于模型运算中。

$$C_{ij}^t = \sum W_k * P_{ijk}^t \quad (1)$$

其中 C_{ij}^t 是在位置 (i, j) 处 t 时刻荒漠化转换指数评价结果;随后我们采用下面的负幂函数将结果映射为 $[0, 1]$ 范围内的荒漠化转换概率 P 。

$$P = \frac{1}{1 + \exp\{-\lambda C\}} \quad (2)$$

表1 北京及邻区荒漠化因子选取及权重

Table 1 Drive factor of desertification and its weighting

变量类型 (一层)	权系数/%	变量类型 (二层)	权系数/%
植被覆盖	19.40	>50%(森林、人造林地、含水草原)	5.7
		31%—50%(人造林地、草地)	14
		10%—30%(人造草场、草地、山地、丘陵)	23
		<10%(沙化草地、山地、丘陵)	57
土壤质地	13.21	裸岩区(岩性特征、组合)	6.5
		沙壤土(透水性缓慢)	13.5
		砾砂土(透水性慢)	20
		砂土(透水性较快)第三、四纪地层	27
		粉砂土(透水性快)第四纪地层	33
气候因子	26.26	3—5月降水均值	39.02
		3—5月蒸发量均值	14.61
		3—5月平均气温	1.03
		3—5月平均风速	39.23
		3—5月平均相对湿度	6.11
地形因子	16.41	坡度因子	20
		坡向因子	20
		地貌类型(高原、山地、平原)	30
		海拔高度	30
水文因子	14.52	地表水分布密度	40
		地表水类型(咸、碱/淡)	30
		水体级别(4级)	30
人为因子	10.16	羊头数	62.2
		人口出生率	20.8

其中 α 表示标准化常数, λ 是一种调节系数。

3.2 邻居构形和转换规则的确定

根据荒漠化综合机理分析结果^[4,5], 在本模型中, 我们主要考虑了荒漠化演化的两种增长模式, 一种是受风、河流等周围环境的作用, 其邻居元胞内已有荒漠化元胞的繁殖, 另一种来自于环境恶化的非荒漠化元胞的突变。模型的转换规则主要考虑以下几个指标:

邻域荒漠化函数 描述当前的元胞受周围邻域元胞影响程度的指标, 可以用邻域内荒漠化元胞的比例等因子来描述, 其公式如下,

$$P_{(x,y)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_{(i,j)}$$

其中 $P_{(x,y)}$ 表示邻居构形内荒漠化元胞所占百分比, N 表示邻居构形内元胞个数, $X_{(i,j)}$ 表示荒漠化土地元胞, Ω 表示邻域空间。

元胞转换指数 描述当前元胞的转换费用值, 是前面六大类驱动因素按照公式(1)进行数字权重叠加后的结果。

风向风速指数 由于荒漠化的演化与风相关性很强, 风向风速在一定程度上反映了荒漠化演化的方向和速度。

一个邻居构形里荒漠化土地元胞通用的行为规

则可以利用下面的集合符号表示:

$$V_t^i = \{N_t, P_t, T_t, L_t, S_t, D_t\}$$

其中, V_t^i 为表示从 t 到 $t+1$ 时刻, 位置处元胞的行为, 是维持现状, 还是产生荒漠化; N_t 为表示该位置的邻居构形, 根据它来确定土地元胞的行为; P_t 为表示邻域荒漠化函数, 即当前的元胞受周围邻域元胞影响程度的指标; T_t 为表示元胞转换指数, 即当前元胞的转换费用值; L_t 为表示地形地貌控制; S_t 为考虑到区域内 3, 4, 5, 11, 12 月期间少雨、干旱、风大, 是荒漠化活动的强烈季节, 这里的 S_t 主要取这 5 个月的平均风速大小; D_t 为表示区域内 3, 4, 5, 11, 12 月最多风向。

这个公式表示: 每一土地元胞在下一时刻的状态, 取决于自身的变化条件和周围的邻居状态。考虑到荒漠化是一个很复杂的地学过程, 也是一个随机过程, 为了更加真实地模拟荒漠化演化情况, 模型中许多规则采用了基于概率的随机过程, 为此在模型中广泛采用了蒙特卡罗方法。本模型也是一个不同构的元胞自动机模型, 在模型中, 针对每个元胞所处外界环境的不同, 我们对其建立了不同的邻居构形。具体地说, 每一个元胞的邻居构形取决于该元胞处的风向条件。为此, 我们定义了 8 种风向(北风, 东北风, 东风, 东南风, 南风, 西南风, 西风, 西北风), 并且确定了每一种风向所对应的邻居构形。

4 实 例

4.1 系统集成

我们以北京及邻区为例, 在 ARCVIEW, ARC/INFO 的 GRID 环境下, 结合 CA 模型的理论实现了荒漠化动态模拟模型, 该模型的集成方式属于一种松散型的集成方式, GIS 和 CA 模型具有共同的图形用户界面, 其中 CA 模型的运行由 ARC/INFO 的 AML 语言驱动, ARC/VIEW GIS 模块主要负责完成数据的处理、模型运行监视和模型结果显示等功能。

4.2 模型校验和结果分析

模型校验一方面可以确定模型的优选参数, 另一方面可以将系统时间映射到真实时间上。本文采用历史数据来检验模型。即利用已有的 1987、1996、2000 年的荒漠化演化作为参照和检验数据, 进行参数的优选。具体过程是, 在一定参数组合下在 1987

年的基础上运行模型, 将运行结果与 1996 年进行比较, 在 1996 年的基础上运行模型, 将运行结果与已知的 2000 年进行比较, 根据比较和分析结果粗略地确定模型参数的调整方案, 然后再重新运行模型, 再进行分析比较; 经过反复运行, 比较和调整, 从而确定一套比较合适的模型运行参数, 进而运用这套优选的参数进行未来时期荒漠化的演化模拟分析。

根据上述模型及模拟原则, 以北京及邻区 1987 年荒漠化实际情况为初始状态, 对研究区荒漠化正向演变过程进行模拟, 结果如图 4, 1996 年时荒漠化分布与实际情况较一致; 模拟的 2000 年荒漠化分布与 2000 年实际情况在研究区西部不太吻合, 而在东部有一致性, 这主要是因为 2000 年的荒漠化分布图是通过“中巴资源卫星图像”解译获得, 而 1987 和 1996 年的荒漠化分布图是通过 TM 图像解译获得的, 而且 2000 年的中巴资源卫星图像是由多景不同月份的影响镶嵌而成的(这也是 2000 年荒漠化分布图局部有一些异常的原因)。最后, 在 2000 荒漠化分布图的基础上, 预测模拟了 2010 年荒漠化的分布状况。荒漠化模拟结果显示: 从荒漠化空间分布上看, 研究区荒漠化总体上受地形地貌影响明显, 整体演化趋势由西向东, 荒漠化分布北强南弱, 北部地区由康保至多伦荒漠化级别由中度向重度过渡; 部分沙化土地呈带状分布达几公里, 风蚀作用显著; 南部地区主要分布在张家口的五大沙滩地, 沿洋河、永定河谷呈线状分布, 是水蚀与风蚀双重作用的结果, 其规模受地形地貌限制远低于北部地区。从荒漠化演化速度上看, 西北部地区演化的速度较其它地区快, 尤其是正镶蓝旗至多伦县一带, 其演化的速度最大; 从治理角度来看, 坝上地区(康保、正镶蓝旗至多伦)距离北京 300—400km, 平均海拔为 1200m, 远高于北京(平均海拔 45m), 是北京周边地区荒漠化的重灾区, 其扬沙、沙尘暴天气直接影响北京的空气质量。该区的治理需要结合当地贫乏的水资源实际状况, 建议通过封育草场优化土壤结构、增加适宜的林地面积重点综合治理和改善环境状况。丰宁、怀来地区距离北京分别为 110km 和 72km, 两地的荒漠化发展演化直接影响北京地区; 燕山山脉与太行山脉在两地平均海拔高程 580m, 成为北京阻挡风沙的天然屏障, 因此该区的绿化造林是北京防沙治沙工作重点区域。北京的门头沟区、昌平区是潜在的荒漠化区, 该区域退耕还林与人工绿化应进一步加强。

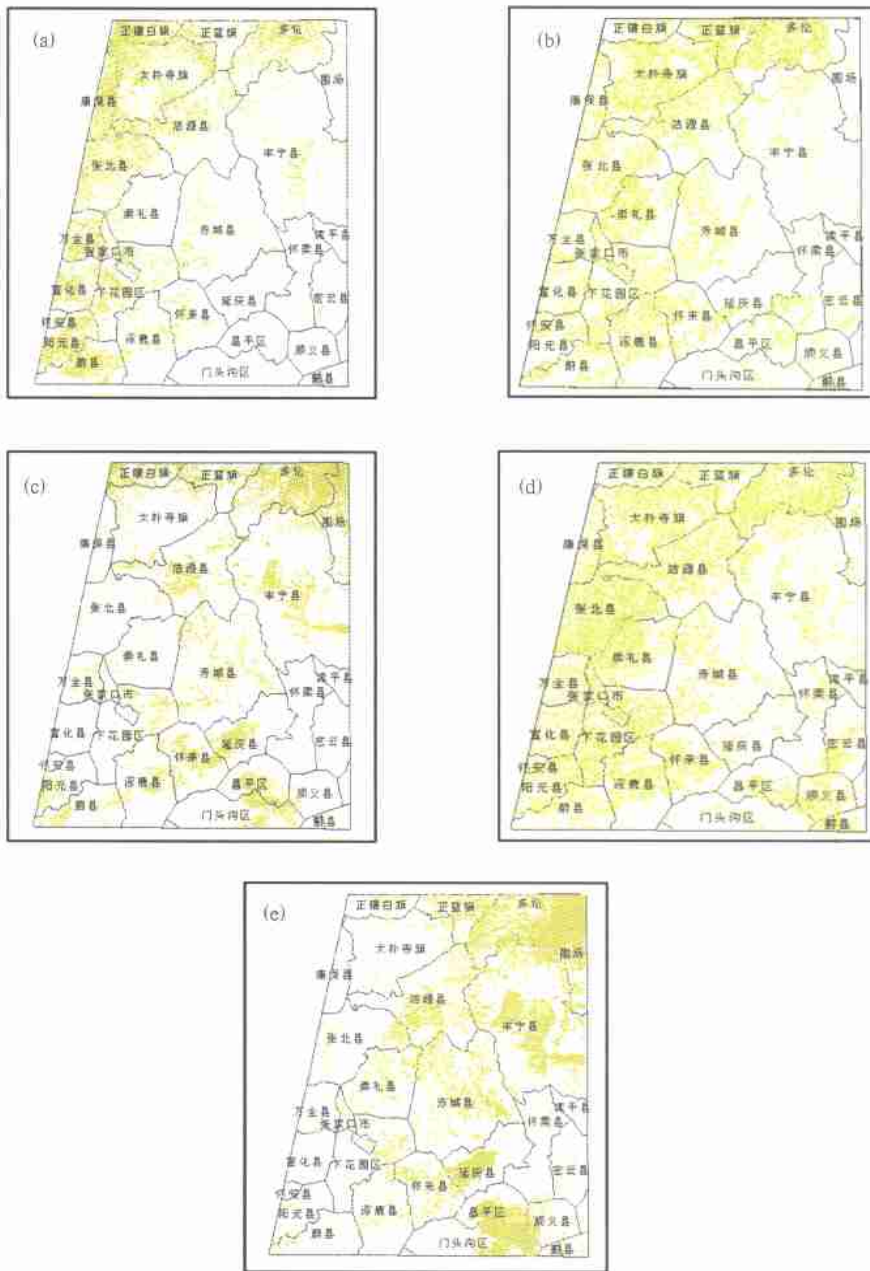


图 4 研究区县级土地荒漠化实际与模拟情况对比(黄色为荒漠化土地)

(a) 1996 年荒漠化演变实际情况;(b) 1996 年荒漠化演变趋势模拟情况;(c) 2000 年荒漠化演变实际情况;(d) 2000 年荒漠化演变趋势模拟情况;
 (e) 2010 年荒漠化演变趋势模拟情况

Fig.4 The contrast between actual distribution of desertification evolution and simulation result based on county (yellow represents desertification)

(a) The actual distribution of esertification evlovement ,1996;(b) The simulation result of desertification evlovement trend in 1996;
 (c) The actual distribution of desertification evlovement in 2000;(d) The simulation result of desertification evlovement trend in 2000;

(e) The simulation result of desertification evlovement trend in 2010

5 结论与讨论

利用 3S 技术,结合 CA 模型进行荒漠化演化预测模拟分析,是可行而有效的研究方法。但荒漠化演化动态预测模拟模型的研究还有待进一步深化,例如,如何把基于区域的动态预测模型,如人口预测

模型、土壤侵蚀模型等动态地嵌入到模型的控制因素中,如何将模糊推理与 CA 模型相结合以及荒漠化演化综合机理量化的进一步研究等,这些技术的解决将进一步提高模型预测的精度。最后必须强调的是,数据的质量和数量都会对模拟结果产生决定性的影响,良好的数据和控制因素层的合理确定会在一定程度上提高模拟的精度。

参 考 文 献 (References)

- [1] Layoub A. Degradation of Dryland Ecosystems: Assessment and Suggested Actions to Combat it [A]. Blume H-P. Towards Sustainable Land Use I. Advances in Geo Ecology 31[C], Reikirchen: Catena Verlag, 1998.
- [2] Wu W. The TM Image Application of Land Desertification Monitoring [J]. *Remote Sensing Technology*, 2001, 16(2): 86-90. [吴薇. 土地沙漠化监测中 TM 影像的利用[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(2): 86-90.]
- [3] Zhou C H, Sun Z L, Xie Y C. Geo-Celluar Automata Research[M]. Beijing: Science Press, 1999. [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.]
- [4] Li Q, Duan Y C, Wang G W, et al. The Problems of Land Desertification in Beijing and Its Neighboring areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 136. [厉青, 段怡春, 王功文等. 北京及周边地区土地沙漠化问题[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 136.]
- [5] Duan Y C, Chen J P, Li Q, et al. Desertification: From Layers Coupling to Global Change [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 277-285. [段怡春, 陈建平, 厉青等. 沙漠化: 从圈层耦合到全球变化[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 277-285.]

Desertification Evolution Modeling through the Integration of GIS and Cellular Automata

CHEN Jian-ping, DING Huo-ping, WANG Gong-wen, LI Qing, FENG Chun

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Desertification is one of the most serious environment and social economic problem nowadays in the world. Desertification causes extensive concern of international academia for its development speed and serious calamity. It's very significant to study quantitatively the relationships between desertification driving factors and desertification, and to build up dynamic simulation model to predict the expansion of desertification. This paper states how to build up desertification dynamic simulation model based on the cellular automata theory using 3S technology. The design of model based on grid data and embraced two parts: the layer of desertification distributing, and the layer of combination control factor. Therefore, the layer of combination control acting as external environment of model impacts and controls the behaviour of desertification expansion. After analyzing syntheses mechanism of desertification expansion, we established six impact factors of desertification, and established this layer's weight coefficients of drive factors by using optimized Analytic Hierarchy Process (AHP). After making certain neighbor configuration and transformation rule, we utilized this model to predict desertification expansion in Beijing and its neighbouring areas. The result of the simulation proves that the model is effective to simulate desertification expansion in terms of macroscopic and microcosmic. According to the research we can say that the desertification has influence on Beijing and its neighbouring areas for a long time, but the desertification expansion mainly occurs in the northern areas of Beijing.

Key words: desertification; celluar automata; drive factor; dynamic simulation