

文章编号: 0375-5444 (2000) 03-0266-08

地貌形态模拟

许世远, 孙以义

(华东师范大学资源与环境学院, 上海 200062)

摘要: 对地貌模拟, 常用的物理机制和统计规律都有其自身的不足之处。而采用地貌形态模拟的方法, 即运用地理信息系统方法把数字模型和数学模型有机地结合起来, 将时间和空间缩小、定量化, 可以形象地再现地貌形态的空间特征和地貌演化的过程。这一技术的实现在于创建四维地貌数据库, 建立分形地貌模拟模型, 用分形内插技术实现地貌形态的模拟。四维地貌数据库扩充了数字地面模型数据库, 分形地貌模拟模型第一次把地貌的分形特征用计算机模拟实现。同其它地貌模拟方法相比, 本模型具有定量化、快速准确、操作方便和视觉效果好等优点, 弥补了以往方法的不足之处。

关键词: 地貌模拟; 数字地面模型; 计算机图形

中图分类号: P931.1; X87 **文献标识码:** A

1 问题的提出

地貌形态的演化在时间上具有长期性, 在空间尺度上具有广阔性。一个地貌学家通常很难亲眼目睹某一地貌演化的全过程。随着现代科学技术的进步, 现代地貌研究由定性的描述向量化的研究发展, 地貌研究大量借助计算机进行仿真模拟和分析^[1]。

由于地貌问题涉及的介质多变、过程复杂、作用因子多、周期漫长使得对地貌的定量研究十分困难, 故而通常试图从物质构成(沉积学)和动力过程(动力地貌学)出发, 研究地貌演变的根本原因和解释地貌的演变过程。因此, 地貌模拟大体分为 2 种类型: 把地貌过程视为物理过程, 引用动力学、流体力学、热力学的物理定律和方程, 用计算机求解, 以得出地貌演变规律, 其分析基础是物理学模型。对地貌现象作统计和计量性分析, 采用数理统计的计算方法, 其分析基础是样本数据和统计模型。

但是无论是物理过程模拟还是统计分析模拟, 这 2 种模拟均有其局限性。物理学的模型, 必须基于一组复杂的边界条件, 在地貌研究领域内定义边界条件要比物理研究领域内规定理想状态困难得多, 甚至无法规定确切的边界条件。统计学的模型能用于从复杂演变中找出规律性, 但是这种模型, 仅仅获得复杂过程的频率和趋势, 但缺乏整体的空间性、区位性。本文提出一种新的地貌模拟——地貌形态模拟, 用计算机再现地形特征和地形随时

收稿日期: 2000-01-27; 修订日期: 2000-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49771011)及教育部博士点基金项目(9326903) [Foundation Item: National Natural Science Foundation of China, No. 49771011; Doctoral Spot Foundation of Ministry of Education, No. 9326903]

作者简介: 许世远(1938-), 男, 1962 年研究生毕业, 教授, 博导。主要从事沉积环境、地质与第四纪地貌科研工作, 已发表论著 80 余篇(部)。E-mail: Shyxu@public4.sta.net.cn

间演化过程。

地貌模拟中, 采用数字模型和数学模型研究已有不少。但过去的模拟机制反映的都是连续、平均变化的地貌过程。而实际上, 地貌过程是个突变和不平均变化过程, 是分形的演变过程。近几年开始利用分形法研究地貌形态。David A. Noever 分析了单个河道的分形几何特性, 并用计算机模拟其形态^[2]。F. J. Molz 和 G. K. Boman 提出地下水渗透分形随机算法^[3]。Wen-liang Chang 用分形法描述了分层土壤的潮湿前沿在渗透过程中的分枝结构^[4]。Ignacio Rodriguez 等分析了自组织河流盆地的分形和 multidimensional 特性^[5]。Valdimir Nikora 等以新西兰的 Hutt 河盆地为例, 分析了河道网络分形特性^[6]。但这些研究都是从理论上论述在河流地貌形成过程具有分形的特性, 并没有从地貌形态上模拟体现出来。

正式运用四维时空数据库, 以此为数据基础, 建立分形模拟模型, 用 OOP (面向对象, Object-oriented program) 方法编程实现, 实现了地貌分形过程的形态模拟, 改变了以往连续、平均变化的地貌过程模拟。

2 地貌分形形态模拟的实现

2.1 地貌形态模拟的数据库设计

地貌形态模拟的基础是建立存储任意时间尺度和空间尺度上的地貌形态四维数据库。有了四维地貌数据库, 地貌研究人员定位到时空的任意点, 就能再现地貌的时空特征, 进行观测和研究; 比较不同时间的地貌形态, 就能模拟出地貌的演变过程。因为地貌形态模拟的数据源在空间和时间上都十分有限, 这就需要选用适当内插方法, 在空间上和时间上加密数据。最简单的内插方法就是把已知点用直线连接起来, 但是这种方法得到的是折线, 不大符合实际情况。本文对空间上的内插采用了分形内插法, 对时间上的内插采用了曲线拟合技术, 并提出了在不同时空进行时间配准的问题。

(1) 空间内插。因为地貌形态或者地貌演变过程不一定非常光滑, 而可能是突变性的。可以使用分形内插法。它能模拟不太光滑的表面或趋势面。分形内插法, 也称格子 IBM 法。从一个有 4 个角点状态的正方形开始, 然后细分正方形。通过随机选择角点之一的状态选择中点处的状态, 把这个过程继续下去, 并选择某个中点的状态作为附近的状态。这个过程的结果是处于 4 个状态间的良好和随机化的边界^[7], 具体过程如图 1 所示。

图 1a 为原始的数字高程模型格网点, 从图 1a 进行第一次插值, 在边界上, 插值点的高程值, 取其相邻两点高程值的 IBM 平均值, 在图中心点位置上, 插值点的高程值取围绕他的 4 个点高程值的 IBM 平均值, 图 1b 到图 1c 为第二次插值, 从 4 个原始点, 可以获得 25 个点的高程值。边界上高程插值的方法是:

$$y = (y_1 + y_2)/2 + N(0, stdev) \quad (2-1)$$

式中 y_1, y_2 是两端点的高程值, y 是插值点的高程值, $N(0, stdev) = stdev * N(0, 1)$, 这里需要重复计算, 直到新插值

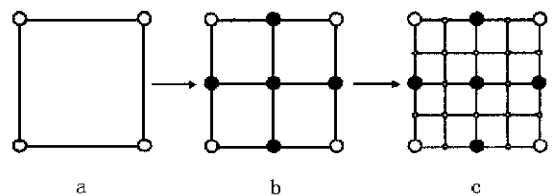


图 1 格子 IBM 示意

Fig. 1 The form of IBM

的标准偏差减小到原值的 $2^{-1/2}$ 。

分形内插的优点在于：自然化。用各种统计技术，选择合适的随机偏移量，能模仿自然变化。使经分形内插的地貌形态图像将显得更为逼真。动态分辨率。分形内插是动态计算细节模型，对任何给定的视点，递归调用分形内插算法，直至达到显示设备不能分辨这个细节层次。如果视点较远，那么就可以减少递归计算次数。假设视点较近，就增加递归次数，显示出地貌形态的细节。

(2) 时间拟合。对多个时间的数字高程模型上相同空间坐标，设计三次多项式，找出与已知点匹配最好的多项式系数，用多项式计算生成插值数据点。这种方法内插后的曲线必定通过已知的关键点，它能模拟出光滑和连续的曲线。这样就能计算出任意年代的模拟数字高程模型。一般三次多项式插值需要 5 个已知点。

(3) 配准。在四维地貌数据库必须严格保持数字高程模型数据的坐标匹配。即每个格网点在任意年代均是指向同一个经纬度，否则在时序上的内插和在空间上的叠加分析都是没有意义的。一般常常使用最小二乘法纠正的算法作数字高程模型的坐标配准，最小二乘法纠正算法的公式为：

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1 * X + A_2 * Y + A_3 * X * Y \\ Y &= B_0 + B_1 * X + B_2 * Y + B_3 * X * Y \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中 X 、 Y 表示原始坐标； X 、 Y 表示配准纠正后的坐标； A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 表示最小二乘法系数。

任何数量都有一个精度，且精度有其相对性，任何科学规律都作用在一定的精度范围之内，并不一定精度越高越好，一定程度的综合与模糊，在某些场合可能更合理和实用。这条原理对地貌研究很重要，因为地貌研究的空间和时间尺度差异很大。在建立四维地貌形态数据库的时候，应根据具体情况，选定数字高程模型的空间分辨率和时序插值的间隔。

2.2 地貌形态模拟的软件设计

在地貌形态模拟软件开发中参考了文献 [8~11]，使用面向对象 (OOP) 的程序设计方法，设计出一组对象类，包括：数字高程模型类 GeoGrid、显示驱动的通用抽象类 TPltDrv、在 Windows 下的派生子类 GeoPltDrv_WN_Delphi、三维可视化地貌模拟的观察几何类 GeoViewGeometry 及其交互式地貌形态模拟的鼠标工具类 DragTool。

数字高程模型在计算机中用 GeoGrid 类来表示，这个类包含了一个二维数组，存储高程矩阵数据，以及有关的网格行列数、网格大小、显示色彩等数据，同时该类还包含了对这些数据的方法，如从磁盘文件中读入高程矩阵的方法、显示高程矩阵三维立体图形的方法、改变颜色和色调的方法等等，体现了 OOP 中封装的概念。

以下仅用 Object Pascal 语法列出了数字高程模型类 GeoGrid 含义说明。

```
GeoGrid = class
```

```
    EnableLight, Mono, Render: boolean;
```

```
    r1, g1, b1, r2, g2, b2: byte;      // 显示属性
```

```
    numColumns, numRows: integer;      // 高程矩阵行列数
```

```
    MaxValue, MinValue, dValue: single; // 高程极值
```

```
    data: array [0..MAXGridNUMBER, 0..MAXGridNUMBER] of single; // 高
```

```
程矩阵
```

```

x _ cell _ size, y _ cell _ size: single;      // 高程矩阵网格大小
iidraw, jjdraw: integer;      // 显示缓冲区
p1, p2, p3, p4: GeoPoint3D;      // 显示缓冲区

Public
    constructor Create (nx, ny: integer);      // 构造函数
    destructor destroy;      // 析构函数
    procedure Resize (nx, ny: integer);      // 改变大小
    procedure LoadFrom File (fn: string);      // 从文件中读入数据
    procedure SetColor (c1, c2: TColor);      // 设置过渡色调
    procedure Draw 3D (pd: TPltdrv; vg: GeoV iew Geometry);      // 显示立体图
    procedure Draw 3DCell (pd: TPltdrv; vg: GeoV iew Geometry; ii, jj: integer);
    procedure Draw CubeFlag (pd: TPltdrv; vg: GeoV iew Geometry);      // 显示 XYZ 轴
    procedure Redraw;      // 重画图形
    procedure Draw Tick (pd: TPltdrv; vg: GeoV iew Geometry);      // 后台绘图过程
End;
```

软件开发采用 OOP 能改进软件系统的结构, 简化软件系统的设计、编码和调试过程。本文用此方法开发的一套地貌形态软件, 它们实现了三维连续色调地貌的立体图显示; 光照效应模拟; 分形 IBM 模拟模型; 四维时空的定位与视点存储; 矢量地物的叠加功能和任意地形剖面线的切割观察、多时代同一剖面的对比、冲淤分析等等主要功能。

3 地貌形态模拟的实例

为了验证地貌形态模拟的理论体系和技术, 选择长江河口南部地区作为试验区域, 研究区范围为 $30^{\circ}48'N \sim 31^{\circ}25'$, $121^{\circ}29'E \sim 122^{\circ}25'E$ 。这里是现代三角洲及其伴生沉积体系发育比较典型的地区之一。上海市位于该区内。对本区地貌演变过程的动态模拟将对滩涂开发利用、港口航道建设、长江口治理、围海造地和海岸等工程, 具有重要的实践意义^[12]。

(1) 三维立体图。三维立体图显示系统的功能是在计算机上模拟地貌形态。地貌形态是三维立体的, 并且配合有阳光照射效果, 使用连续过渡彩色, 图象显示非常逼真和形象化。地形再现的方式是交互式的, 可以任意控制图形显示方式, 例如可以任意调整观察点的位置和角度、任意设置色彩、任意改变光源以及能任意放大和缩小, 改变显示的比例尺 (图 2)。目前计算机屏幕已经能显示 1 600 多万种的颜色, 分辨率已达到每屏 $1\,280 \times 1\,024$ 像素, 地貌形态信息得以大大增强, 随着观察比例的放大和缩小, 计算机自动调整分形插值的递归次数。

(2) 地形剖面分析系统。该系统的功能是作任意地形剖面的切割观察, 多时代同一剖面的地形比较和地形变化数据的显示以及在计算机上能作数字分析和测量 (图 3)。

(3) 冲淤分析系统。地貌过程中的堆积和侵蚀是一对矛盾, 正是由于它们对地形的相互作用, 形成了地形演变。在水下区域堆积和侵蚀又被称为淤积和冲刷。冲淤分析系统的功能是再现冲刷和淤积在空间的分布和数量及速度。这是地貌形态模拟中非常重要的内容之一。图 4 显示了在 1953~1990 年间长江河口南部的地形冲淤变化程度及其在空间的分布。

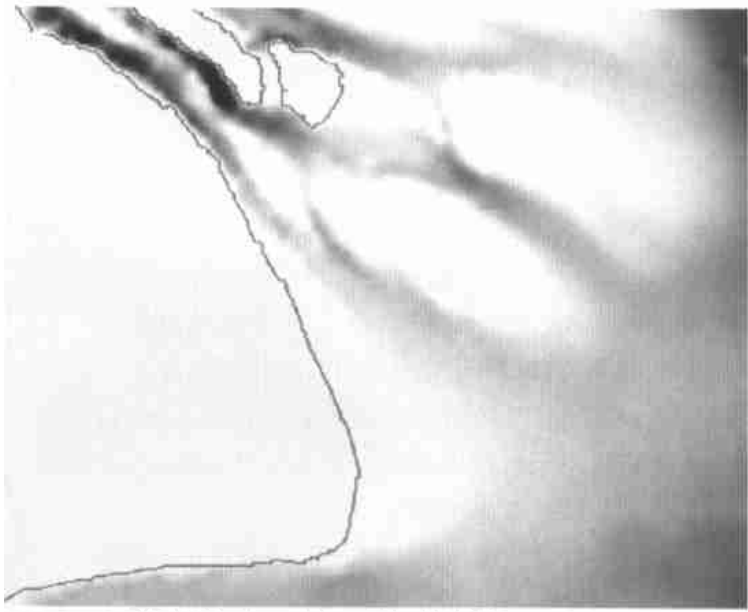


图 2 长江河口南部数字高程模型

Fig. 2 DEM of the southern Changjiang River Estuary

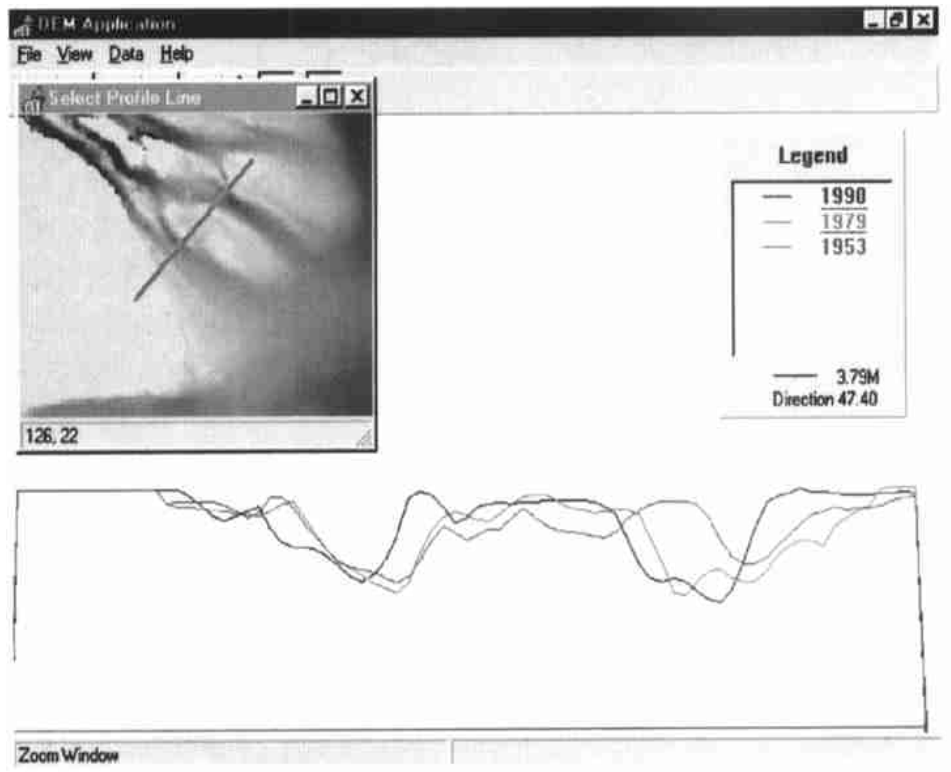


图 3 地形剖面分析系统界面

Fig. 3 Interface of landform profile

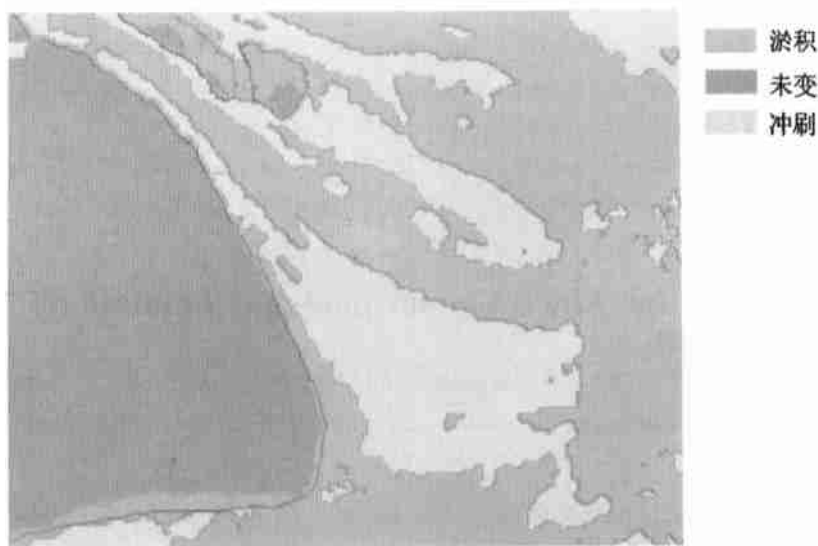


图 4 冲淤分析系统界面

Fig. 4 Interface of the erosion-deposition system

地貌形态模拟不仅具有上述功能, 还可以发挥地理信息系统技术的特点, 将各种信息结合起来, 在地形冲淤演变结果显示的同时, 叠加流速、流向等水文信息和泥沙分布信息, 这样, 除了能模拟显示出地貌形态, 还能反映出形成这种形态的成因和动力机制, 为进一步的地貌形态预测研究提供依据。对于地貌形态在时间上的内插和预测需要一定数量的已知数据, 最好 5 个年份以上, 所以有关工作还在研究中。

本文提出的地貌形态模拟的理论和技术方案, 与其他地貌模拟方法相比, 能够再现任意时间上和任意空间中的地貌形态, 形象直观、操作方便、视觉效果好, 对地貌学的研究将起到促进的作用。

参考文献 (References)

- [1] Jin Desheng Experiments and Simulations in Geomorphology[M]. Beijing: Earthquake Press, 1995 6~ 7. (In Chinese) [金德生地貌实验与模拟[M]. 北京: 地震出版社, 1995 6~ 7.]
- [2] Noever D A. Fractal geometry and its computer simulation[J]. *Water Resource Research*, 1993, 29(10): 3561~ 3568
- [3] Molz F J, Boman G K. A fractal-based stochastic interpolation scheme in subsurface hydrology[J]. *Water Resource Research*, 1993, 29(11): 3769~ 3774
- [4] Chang Wenlian, Biggar J W, Nielsen D R. Fractal description of wetting front instability in layered soils[J]. *Water Resource Research*, 1994, 30(1): 125~ 132
- [5] Ignacio Rodriguez-Iturbe, Marco Marani, Riccardo Rigon. Self-organized river basin landscapes: Fractal and multifractal characteristics[J]. *Water Resource Research*, 1994, 30(12): 3531~ 3539
- [6] Vladimir Nikora, Richard Ibbitt, Ude Shankar. On channel network fractal properties: A case of study of the Hutt basin, New Zealand[J]. *Water Resource Research*, 1996, 32(11): 3375~ 3384
- [7] Barnsley M F. The Science of Fractal Images[M]. Beijing: Ocean Press, 1995. (In Chinese) [Barnsley M F. 分形图形学[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.]
- [8] Chen Shupeng. Geographic system and geographic information system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 46(1). (In Chinese) [陈述彭. 地理系统和地理信息系统[J]. 地理学报, 1991, 46(1).]

- [9] Huang Xinyuan et al. Introduction to Geographic Information System [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989. (In Chinese) [黄杏元等. 地理信息系统概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.]
- [10] Monmonier M. Strategies for the visualization of geographic time series data [J]. *Catographica*, 1993, 27(1).
- [11] Tobler W R. Three Presentations on Geographical Analysis and Modeling [R]. NCGA Technical Report 93-1. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis, 1993.
- [12] Yan Q inshang, Xu Shiyan. Recent Yangtze Delta Deposits [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1987. 59. (In Chinese) [严钦尚, 许世远. 长江三角洲现代沉积研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987. 59.]

Computer Aided Geomorphologic Simulation

XU Shi-yuan, SUN Yi-yi

(College of Resources and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract: The concept, theory and research method of geomorphology develops rapidly due to the development of modern science and technique. 1997's computer simulation and analysis are introduced into geomorphologic research. It makes the research methods move from qualitative description to quantitative expression. This paper introduces a new type of geomorphologic simulation based on the computer graphic theory. It focuses on the geomorphology topic- topography and intends to reduce the parameter definition difficult in the physical models and avoid the non-spatial characteristics of statistic models. A new theoretical system is established. Research work included:

(1) Design integration system, which contains both digital models and mathematical models. Digital models are a presentation of the real world status, while mathematical model is a presentation of the real world evaluation processes.

(2) Use the Digital elevation model as the presentation of 3-dimensional topography. By the 3-dimension concept to 4 dimension expanding we developed the geomorphologic temporal-spatial database. Thus make the geomorphologic simulation base on the information system technique.

(3) Apply the fractal model. Besides the present continuous process modeling, this model provides a non-continues process modeling method. Also, fractal model is the tool to analysis the chaotic set in the dynamic system. The use of fractal model will be important in the further research.

(4) By using the new object-oriented programming language, 32 bit memory mode and multi-thread concept and the interactive GUI of Windows, etc., the 3D visualization tool, profile analysis tool and accumulation-erosion analysis tool are developed. They have high performance efficiency, high analysis functions and high visual effects, and are easy to learn and easy to use.

(5) Implement the software in the southern part of Changjiang Estuary and verify the theory and technique of the computer aided geomorphologic simulation. The application of this method has significance in the geomorphology, environment research and decision.

making support

This study is not the simply application of computer technique or system integration. The result of the work expands the theory and method of multi-discipline. The study creates a new research area of geomorphologic simulation. In the realworld application, it provides a new viewpoint to the geomorphology research. It will make great contribution to geomorphology modernization process.

Key words: geomorphologic simulation; digital geomorphologic model system; computer graphics

新 书 介 绍

中国科学院地理科学与资源研究所编、廖克主编的《涛声集——陈述彭院士科学思维述评》由中国环境科学出版社 2000 年 2 月出版。该书汇编了 20 余篇论文, 从不同角度分析和介绍陈述彭院士的科学思维。

阎小培著的《信息产业与城市发展》由科学出版社 1999 年 10 月出版。书中深入分析和探讨了信息产业发展与产业结构演变、城市经济发展、城市社会结构变化、城市地域结构的关系及未来城市发展的趋势。

周一星、孟延春著的《北京的郊区化及其对策》由科学出版社 2000 年 1 月出版。本书综述了国内外郊区化研究动态的基础上, 揭示了北京的郊区化现象, 分析了北京郊区化发生的机制, 剖析了北京郊区化过程中产生的利弊, 提出了引导郊区化健康发展的对策。

刘卫东、彭俊等著的《城市化地区土地非农开发》由科学出版社 1999 年 10 月出版。全书分为理论探索、背景分析和实证研究三篇探讨我国大城市郊区土地非农开发及其合理利用模式问题, 包括 24 篇论文。

刁承泰著的《城市地貌学》由西南师范大学出版社 1999 年 6 月出版。此书介绍了国内外城市地貌学研究进展和探讨了城市地貌学的理论体系和实践方法, 并在城市地貌环境、人造地貌营力、城市地貌分类与制图等方面作了较为详细的介绍。

杨子生、陈昌琼、杨升吉等编著的《德宏傣族景颇族自治州土地利用总体规划与研究》由科学出版社 1999 年 6 月出版。全书分为土地利用总体规划、基本农田保护区规划和专题分析研究三部分。

秦明周著的《土地利用及持续开发理论与实践》由西安地图出版社 1998 年 3 月出版。该书在分析土地利用理论的基础上, 以南宁市为例, 剖析了南宁市土地资源开发利用, 探讨了我国南方丘陵赤红壤地区土地资源持续开发的范例与模式。

李克让、郭其蕴、张家诚主编的《中国干旱灾害研究及减灾对策》由河南科技出版社 1999 年 5 月出版。书中介绍了国内外干旱灾害研究进展、分类、指标、评估内容、方法、遥感和 GIS 应用、近代及历史时期干旱时空规律、形成原因、预测、干旱灾害的影响、减灾对策等, 并附有国内外历史上发生的主要旱灾的时间、地点和灾情。