

基于模型的景观格局与生态过程研究

徐延达^{1,2}, 傅伯杰^{1,*}, 吕一河¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 景观格局与生态过程关系的研究是景观生态学的主要特色和理论核心之一。模型可以充分利用实验和观测数据并综合不同时间和空间尺度上的信息提炼规律或揭示内在机制, 模拟景观格局与生态过程的动态与相互关系, 成为景观生态学研究的有效工具。结合研究实例, 总结了基于模型的景观格局研究、生态过程研究和格局-过程关系研究的发展现状和薄弱环节, 同时探讨了通过构建耦合模型研究格局-过程相互关系的途径。总结了景观模型研究亟待发展的领域与发展趋势。

关键词: 景观模型; 景观格局; 生态过程; 耦合模型

Research on landscape pattern and ecological processes based on landscape models

XU Yanda^{1,2}, FU Bojie^{1,*}, LÜ Yihe¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: As one of the key topics of landscape ecology, the relationship between landscape pattern and ecological processes has been paid much attention. Landscape models, taking full advantage of limited data to reveal the change rules or mechanisms and simulate the dynamics of landscape pattern, ecological processes and their relationship at different temporal and spatial scales, have become powerful tools in landscape ecology research. This paper reviews the development status and existing problems of landscape pattern simulation, ecological processes simulation and coupling simulation of pattern and processes. The modeling approaches for integration of landscape pattern and ecological processes are put forward. The main trends of landscape model development are also discussed.

Key Words: landscape models; landscape pattern; ecological processes; integrative models

景观格局一般指空间格局, 即景观的空间结构特征, 包括景观组成单元(生态系统或土地利用/覆被类型)的类型、数目以及空间分布与配置。生态过程是景观中生态系统内部和不同生态系统之间物质、能量、信息的流动和迁移转化的总称, 强调事件或现象的发生、发展的动态特征^[1-3]。现实景观中, 景观格局与生态过程是不可分割的客观存在。景观格局是生态过程的载体, 格局变化会引起相关的生态过程改变; 而生态过程中包含众多塑造格局的动因和驱动力, 其改变也会使格局产生一系列的响应。景观格局与生态过程两者相互作用, 驱动着景观的整体动态。因此, 研究中必须考虑景观格局与生态过程的相互关系与耦合机制, 而这正是景观生态学的核心科学问题, 理解格局与过程之间的关系是进一步深化景观生态学研究的关键^[4-8]。

随着景观生态学学科发展和研究的不断深入, 直接的调查和观测手段显露出一些局限性, 在较大的空间和时间尺度上数据获取存在难度, 同时在数据提炼和机理探索方面由于重复性研究和数据连续性的难以实现

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB421104); 国家自然科学基金重点资助项目(40930528); 中国科学院知识创新项目(kzcx2-yw-421-3)

收稿日期: 2009-03-24; 修订日期: 2009-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@cees.ac.cn

而存在问题。模型可以克服实验和观测的困难,充分利用有限数据并综合不同时间和空间尺度上的信息提炼规律或揭示内在机制,诊断数据获取方面的漏洞或薄弱环节,增进对景观格局与生态过程的理解,进而模拟景观动态,成为景观生态研究的有力工具^[3,9-11]。因此,景观生态研究中涌现出大量模型并呈加速发展态势,被应用于不同的分支学科及研究领域中。本文在总结现有景观模型研究的基础上,尽可能全面地理解模型类型、模型原理、模型模拟对象及模拟效果等,分景观格局模拟、生态过程模拟和格局-过程关系模拟3个方面综述了景观模型的发展成就、不同类型模型的模拟方式和优缺点,概括了模型研究的薄弱环节与发展趋势,以期能促进基于模型的景观格局与生态过程深化研究。

用于景观格局模拟的模型一般通过确定景观转移概率或邻域规则,或基于智能体的行为与决策模拟和预测景观格局的变化;利用模型研究生态过程一般通过机理模拟实现生态过程量化和动态模拟;考虑景观格局信息并包含生态过程机理的模型可用于分析格局与过程之间的相互作用。

1 基于模型的景观格局研究

用于模拟景观格局变化的模型,或称格局模型,主要以空间马尔柯夫模型和细胞自动机模型为代表,近年来基于智能体模型也成为景观格局模拟的热门工具。模型通过确定景观转移概率或考虑邻近单元影响及智能体决策行为确定转换规则模拟预测景观空间格局动态,一般不考虑变化机制、不考虑生态过程。

马尔柯夫链是一种重要的随机过程,研究某一事件的状态及状态之间的转移规律。空间马尔柯夫模型将景观格局看作一种“无后效性”的马尔柯夫过程,即景观格局在 $t+1$ 时刻的状态只与 t 时刻的状态有关,而与以前各时刻的状态无关。其表达式如公式 1:

$$A(t+1) = A(t)P \quad (1)$$

式中, $A(t)$ 为景观各斑块在 t 时刻的状态矩阵, $A(t+1)$ 为景观斑块 $t+1$ 时刻的状态矩阵, P 为景观斑块转移矩阵^[3,12-14]。

空间马尔柯夫模型借助不同历史时期的调查、监测资料以及遥感影像解译等确定根据各土地利用/覆被类型的初始状态矩阵和转移矩阵,得到景观格局的转移概率矩阵,预测未来的景观格局变化。空间马尔柯夫模型已有很多应用案例^[12,15-19]。

细胞自动机(Cellular Automata, CA)是一种离散的网格动力学模型,其特点是通过简单的局部转换规则来模拟复杂的空间结构。细胞空间与基于几何定位的景观空间格局概念有类似的意义,细胞状态与景观中的单元变量具有相似的意义,因此细胞自动机模型被广泛用于景观格局的模拟。一个简单的一维 CA 模型由栅格网络、细胞状态、邻域规则和转换方程组成:

$$\alpha_{t+1}^s = f(\alpha_t^{s-r}, \alpha_t^{s-r+1}, \dots, \alpha_t^s, \dots, \alpha_t^{s+r}) \quad (2)$$

式中, α_t^s 表示细胞 s 在 t 时刻的状态, r 是与细胞 s 相邻的细胞距离, f 是与相邻细胞有关的转换规则^[20-21]。具体研究中,借助历史数据确定细胞领域规则与转化规则,生成景观水平上一系列约束景观动态变化幅度和方向的规则,模拟景观格局动态。细胞自动机模型应用广泛,尤其在城市增长、扩散和土地利用演化模拟中有较为丰富的实践^[22-25]。基于细胞自动机发展的一些景观模型如 LUSD^[26]、SLEUTH^[27] 等也不断涌现并获得发展。

细胞自动机模型虽然强调了空间的微观相互作用,但不能反映能动的微观个体对景观格局动态的影响。基于个体模型(individual-based model, IBM)和基于智能体模型(agent-based model, ABM)近年来越来越多地被引入到景观格局模拟研究中,前者可看作是后者的特例(将智能体限于生物个体)^[3]。基于智能体模型将具有自主性和反应性、存在于一定的环境中并与环境相互作用的个体或团体定义为智能体,模型由智能体、环境及定义智能体的规则所组成^[28-30]。根据智能体在决策过程中所起的作用不同,将其进行分类,例如在模拟城市空间规划过程中将智能体分为地方政府、农民组织和环境保护者三类^[31]。智能体通过感知器来感知环境,并对环境状态的改变(事件)来做出响应^[32],它们通过交互作用和协调,可以形成一定的系统群体和组织结构。模型通过建立包含智能体行为偏好函数的转换规则来预测景观格局变化^[33-34]。实际应用中基于智能

体模型常与细胞自动机模型结合使用,利用智能体模型模拟人类的决策行为,利用细胞自动机的方法求取每个细胞的转换规则,从而模拟景观格局的动态变化过程^[31,35]。基于智能体模型在城市土地利用变化模拟、农业土地利用变化模拟及水资源、草地资源和森林资源管理模拟等方面具有较强的优势和广泛应用^[36]。

景观格局动态不是一个真正的马尔柯夫过程,细胞状态也只是景观空间的一种抽象的形式。以空间马尔柯夫模型、细胞自动机模型和基于智能体模型为代表的景观格局模型的共同缺陷在于缺乏对格局变化机制的模拟和生态过程对景观格局影响的考虑。模型不涉及景观动态的机制,其可靠性完全取决于转换概率、邻域规则或转换的准确程度。在具有详尽的信息与数据的支持下格局模型可以相对准确地对格局动态做出模拟和预测。但由于不考虑生态过程,格局模型很难从机制上解释格局变化的原因与细节;生态过程是塑造景观格局的重要成因,格局模型在模拟生态过程积累、突变条件下的格局动态方面存在欠缺^[37]。

2 基于模型的生态过程研究

过程模型可定义为:依据机制进行生态过程的实现,并模拟生态过程的动态,以及环境条件或人类干扰对生态过程的影响的模型。过程模型通常在对生物生理过程、繁殖体传播、种群动态、种群竞争、群落演替、营养物积累及水分运动和泥沙、养分运移等的深入研究和理解基础上对这些生态过程进行模拟,实现生物量、营养物积累和生物地球化学循环等的模拟与预测,一般不考虑景观要素的空间分布,忽略景观空间异质性。

现有的过程模型应用多集中在生物量模拟、碳固定、营养物模拟及气候因子、火烧和人类干扰等对这些生态过程的影响研究。例如 Prasad V K^[38]使用 CENTURY 模型,模拟热带落叶林动态,包括生物量、土壤有机碳、森林总碳、总氮等,并模拟耕作行为对森林动态的影响;Rashleigh B^[39]利用 AQUATOX 模型研究鱼群对栖息地内物理和化学变化的响应,发现鱼群生物量对温度和腐质变化最敏感,对营养物、泥沙、pH 值和溶解氧变化不敏感;Sampson D A^[40]使用 SECRETS-3PG 模型模拟施肥对作物产量和碳固定的作用;Covington W W^[41]利用 FIRESUM 模型模拟森林生物量与氮含量对火烧和生态重建措施的响应;等等。

过程模型的优点在于考虑具体机制,可将人类活动因子结合到模型中。发展历史相对较长的生态系统研究数据积累为过程模型的开发与发展提供了丰富的数据基础。

然而过程模型参数化的尺度较小,多在基质、植被较均一的研究样地数据基础上开发,在相对均质的景观如农田、水体、密林中模型适用性与精确度较高,但在基质不均、植被类型多样的景观中模型适用性较差^[42-43];模型多在样地尺度上开发,而经常直接用在区域甚至全球尺度上,上推过程中存在误差^[44]。

3 基于模型的景观格局与生态过程关系研究

景观空间格局配置,即各种土地利用类型的存在、空间分布、面积大小及形状等是种群定殖与灭绝、水循环和营养物循环等生态过程产生、传输的基础。景观格局变化,即各种土地利用类型的形成、去除、替换及面积、形状变化都会引起生态过程的响应。

生态过程则是塑造或改变景观格局的动因之一。种群定殖、竞争、灭绝、繁殖体扩散等引起植被类型斑块的形成、变化、消失;水分、泥沙与养分运移则引起土壤类型空间分布、土壤水分与养分空间格局、繁殖体分布等变化或塑造地形,进而引起植被格局变化。

现实景观中,格局变化改变了生态过程的量与趋势,过程则反作用于格局,从而使格局进一步变化,如此循环往复,塑造了景观的整体动态。理想的景观动态模型应同时具有模型格局对过程和过程对格局作用的功能,同时能将这两部分融合起来,交替进行。但这在模型原理和开发上都具有相当的复杂性和难度,因此符合理想条件的模型研究非常少见,现有的景观模型研究通常都有所偏重,或模拟景观格局对生态过程的作用,或模拟生态过程对景观格局的影响,还有一类模型耦合研究,为模拟格局与过程相互作用提供了一种途径。

3.1 景观格局对生态过程作用的模拟研究

利用模型模拟研究景观格局对生态过程作用的步骤一般为:景观格局数据包含在机制模型的输入数据中,利用模型进行生态过程模拟与描述,分析景观要素的存在与空间分布对生态过程的作用;对景观要素进行模拟去除、空间位置变换或面积改变等处理,再进行生态过程模拟,从而分析景观格局变化对生态过程的

影响。

Hattermann F F^[45]使用 SWIM (soil and water integrated model) 模型,模拟流域尺度上及河岸带和湿地的水、营养物的流动和保持过程,并模拟了地下水位日动态、湿地植物提取地下水和营养物过程,量化河岸带和湿地对水文过程的影响,模拟结果显示,河岸带和湿地面积虽小,但对整个流域的水平衡和营养物平衡具有重要作用。

Milden M^[46]应用空间显式复合种群动态模型,将地理信息转化为栅格数据,明确栖息地斑块空间位置,模拟种群动态,从而分析复合种群栖息地空间配置对种群定殖和灭绝的作用,结果表明,研究对象(复合种群)定殖与灭绝速率都很慢,达到平衡的时间较长;种群周转多发生在孤立的小斑块上。

Li K Y^[47]为研究土地利用变化对流域径流量的影响,应用 THMB (terrestrial hydrology model with biogeochemistry) 模型,定量模拟森林和草地变化对水文过程的影响。仅占流域面积 5% 的森林皆伐后径流比由 0.15 增加至 0.44,年径流量增加 35%—65%,移除草地后年径流量增加 33%—91%。采伐面积和过度放牧面积与径流量间呈非线性且存在阈值效应。

Braud I^[48]应用 ANSWERS (areal non point source watershed environment response simulation) 模型,模拟不同尺度、不同植被覆盖的样点/子流域/流域的径流和泥沙量,分析植被对径流和泥沙产量的影响。结果显示这种影响与尺度有关:植被变化在小尺度、均一基质上对径流和泥沙产量影响更大,而流域尺度上植被变化在模型中没有敏感性,即对产流和产沙没有影响。

景观格局对生态过程作用的模型模拟研究缺陷在于,格局变化通常通过情景假设的方式实现^[49],而不是通过模拟人类活动与生态过程共同作用下景观格局的变化来实现,即不考虑格局变化的影响因素与变化趋势,仅假定某种或某几种土地利用方式全部去除、全部替换或按一定比例产生变化的情景,模拟生态过程的响应。因此模拟结果可以用来评价土地利用方式/植被覆盖对生态过程的作用,但不能用来准确推测未来景观格局的变化与生态过程响应。

3.2 生态过程对景观格局影响的模拟研究

相比景观格局对生态过程的作用,生态过程对景观格局影响的模拟研究相对较少,研究难度更大。此类研究一般思路为,将生态过程相关数据作为模型输入数据,运行模型,输出景观格局数据;更改某些生态过程数据或增加/去除某一生态过程,根据输出数据的变化分析景观格局变化,将格局数据作为指示数据,反推生态过程的作用。研究难点就在于这些具有反推作用的指示数据选取与分析^[50],即选择哪些类的景观格局特征与指数作为指示数据,以及将这些数据与哪些生态过程联系起来、如何联系起来。

Jeltsch F^[51]应用基于栅格的空间显式模型,模拟降水、火烧和放牧及种子可获得性变化下稀树草原中乔木分布型的变化,发现降水增加引起乔木数量增加且趋于聚集分布,降水减少和火烧、放牧使乔木减少且趋于随机或均匀分布;演替阶段的乔木分布型可作为生态过程的诊断标准。

Paruelo J M^[52]应用基于栅格的空间显式模型,模拟放牧行为和一些植物的萌发、生长和死亡,揭示降水与放牧体制与草丛密度间的关系。结论为放牧引起草丛密度降低,使地上净第一性生产力降低,这些影响表现出非线性与时滞性;降水年际变化对草丛密度变化的解释力大于放牧体制。

Schurr F M^[53]利用模型评价种子扩散与根系竞争在植被格局形成中的相对重要性:在模拟中加入预假设,如果形成格局的过程(种子扩散与根系竞争)中有一个占主导,植物功能群格局就会完全不同于零假设模型。利用模型预测了这种不同,并将模拟格局与观测格局进行比较,发现种子扩散在植被格局形成中起主导作用。

Bleher B^[54]利用个体行为模型评价热带森林空间格局形成的影响因子(种子传播、繁殖方式和森林密度)的相对重要性,模拟结果表明,种子传播距离和森林密度是主要影响因素,距离短、密度低时乔木趋于聚集分布;繁殖方式(雌雄同株/异株)影响适中;传播距离的空间分布和母种群空间分布影响较小。还指出模型具有评价更多影响因子(捕食行为、草食作用)的潜力。

生态过程对景观格局的影响过程漫长而难以监测,实地试验,尤其是景观尺度的观测试验难以开展,且格局变化的影响因素多,不易与生态过程建立起联系^[55],因此在建模上存在基础数据与机理欠缺的问题。过程对格局影响的模型研究是亟待发展的一个研究方向。

3.3 耦合模型研究

近年来有一类模型研究,通过编写代码或利用建模工具、GIS 软件组件等将两个或多个模型综合起来应用,模型间形成数据传递或数据共享的关系,从而实现模型功能的扩展或各自功能优势的发挥。耦合模型不仅可以发挥不同专业化模型的专长,还为格局-过程关系模拟提供了一种途径。

模型开发者与开发环境、开发目的的不同使模型在某些研究领域的精密程度与适用性较高,而在其它变量的模拟上通常只沿用一些通用的或普适的方程完成,因而也产生出一些诸如复合种群模型、植被动态模型、生物地球化学循环模型、水文模型等模型分类^[3]。耦合模型可以利用不同专业模型各自分工模拟其专长领域的变量,模拟结果互为补充或互为验证,取得对多个模拟变量精度均较高的模拟结果。

EDYS 模型(ecological dynamics simulation model)是一个多组件的机制模型,包含气候、土壤水分、营养物质、植物生长、火烧、干扰和管理等组件,擅长模拟干扰、胁迫下植被格局动态。模型也具有模拟样地尺度水分垂向运动和景观尺度地表径流的能力,但效果不及一些专业的水文模型,尤其是泥沙输移和河道径流的模拟存在缺陷。Childress W M^[56]借助模型集成工具 LMS (land management system) 将 EDYS 模型与水文模型 CASC2D 耦合起来,两个模型分段运行,段间互相传输输出数据,达到了较高的模拟精度。

如前所述,格局-过程关系模型一般都有所侧重,尤其是发展较为成熟的格局对过程作用的模拟研究,重点在于环境因子和植被的空间异质性对生态过程的影响,而输入或驱动变量的空间异质性往往通过 GIS 数据层或类似手段来提供,格局变化通过以情景假设的方式进行,因此缺乏过程对格局的反馈作用。解决这个问题的一个途径就是将格局模型与格局-过程关系模型结合起来,建立格局-过程耦合模型。通过格局模型模拟预测土地利用/植被覆盖变化,格局-过程关系模型则模拟生态过程对格局变化的响应,耦合结果分析景观的整体动态。

HILLS 模型(hesse integrated land use simulator)^[57]是在德国 Hesse 地区开发的一个用以模拟土地利用变化及生物地球化学循环变化的模型,它将改进的格局模型 LUCHesse 与改进的生物地球化学循环模型 GIS-Century 耦合在一起,耦合工具为 ArcGIS 软件的一个组件 COM (component object model)。

另一个实例是应用较多的 Patuxent 模型 PLM (patuxent landscape unit model)^[58-60],模型将地形、水文、营养物质动态、植被动态与土地利用格局和土地利用变化长期动态联系在一起。生态过程模拟采用了改进的通用生态系统模型 Pat-GEM (patuxent general ecosystem model),这种模拟在栅格化景观的像元上进行,像元间通过水和物质空间流联系。开发者还建立了一个区域经济学土地利用动态模型 ELUC (economic land-use conversion model)。耦合后的模型可用于模拟经济活动制约下土地利用的转化及植物生长、水与营养物质运移、有机物分解与形成等生态过程的响应。

其它相似的模型实例还有 MODULUS 耦合模型^[61]、IMAGE 耦合模型^[62]及格局模型 LANDIS 与植被动态模型 LINKAGES 耦合研究^[63]等。

4 景观模型研究展望

景观模型研究的一个重要目的是建立一套定量的、完善的和可重复的模型方法用以分析景观格局与生态过程间的相互关系^[50],增进对两者相互作用规律与机理的理解,准确模拟景观整体动态。针对上述几类景观模型研究的现状、特点和局限,景观模型亟待发展的方向与趋势可归纳为以下几点:

(1) 生态过程对景观格局的影响机理探索与模拟研究

景观格局对生态过程作用研究相对较为成熟,而过程对格局的影响由于相关因素复杂、外在表现不够直观且作用缓慢,很难进行实地观测,因此不易对其影响机理进行揭示与量化。现有的研究中,气候、火烧、放牧等作用下及生物生长、繁殖体传播、竞争等生态过程影响下植被空间分布的响应可算作研究较多的一个方向,

而其它更多的过程对格局影响研究还比较少见,例如径流通过改变地表水和土壤水分分配而产生的对土地利用/覆盖的影响,侵蚀对土壤类型空间分布及植被分布的作用,营养物运移对生物生长与分布的影响,等等^[55]。这些生态过程对格局的影响一般都是潜移默化的,但对格局的形成与变化是必不可少的。

今后研究中应在长期观测、可控试验或历史数据积累的基础上对影响机理进行探索,整合到模型中。只有完善过程对格局影响的模型,才能构建起真正的格局-过程耦合模型,模拟“格局影响过程,过程反作用于格局”的真实景观动态。

(2) 长期生态学研究与景观模型研究结合

长期生态学研究是对生态因子进行长期的监测,研究各种生态因子的相互作用及动态。长期研究可以排除干扰的不确定性,对于那些长期处于动态的、周期性的过程和现象或是复杂的现象和过程具有重要的意义和作用^[64]。对于景观模型研究来说,长期生态学研究具有重要的参考意义和数据支撑作用。模型是源于现实系统和现象的,模型定量化和检验则需要以实测数据为基础。景观变量的函数关系及模型参数值都是通过实地观测或可控试验确定的;模型检验是与模型建设同等重要的研究环节,不断发展新的检验手段与实效性测试技术是景观模型完善的一个前提,而这些都要在具有长期生态学实测数据的基础上才能完成。开展长期生态学研究,进行机理与数据积累是模型发展的前提与必然。

(3) 通过应用推进景观耦合模型发展

景观模型发展过程中,相关研究人员针对不同的景观、不同的尺度和不同的研究目的建立了大量的景观模型,在各自研究领域取得长足进展并具有一定的应用优势。通过模型比较,针对模型的专长与优势,根据已有数据或观测对模型进行改进完善,将多个模型集成进行优势互补或建立耦合模型,可以取得全面而准确的模拟结果,同时避免模型重复开发造成的浪费,在已有基础上使景观模型研究获得高效率的发展。

(4) 软件完善

模型研究一般都以计算机模拟的方式进行,模型的建立、求解、集成和耦合都要通过计算机程序来实现,例如耦合模型的建立一般要通过模型集成工具如 Simile^[65-66],SME (spatial modeling environment)^[68]以及前文述及的 LMS 和 ArcGIS 组件 COM 等。计算机技术和空间信息处理方法的发展可以促进模型软件的革新与完善,进而推进景观模型研究的发展。

References:

- [1] Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [2] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Wang Y L. The principles and application on landscape ecology. Beijing: Science Press, 2001: 59-106.
- [3] Wu J G. Landscape ecology: Pattern, process, scale and hierarchy. 2 ed. Beijing: Higher Education Press, 2007: 17-170.
- [4] Turner M G. Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process. Annual Review of Ecological System, 1989, 20(1): 171-197.
- [5] Gustafson E J. Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? Ecosystems, 1998, 1(2): 143-156.
- [6] Wu J, Hobbs R. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis. Landscape Ecology, 2002, 17(4): 355-365.
- [7] Fortin M-J, Agrawal A A. Landscape Ecology Comes of Age. Ecology, 2005, 86(8): 1965-1966.
- [8] Chen L D, Liu Y, Lü Y H, Feng X M, Fu B J. Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [9] Li H. Spatio-temporal pattern analysis of managed forest landscapes: A simulation approach. Ph. D dissertation, the Oregon State University, Corvallis, Oregou, USA, 1989.
- [10] Saura S, Martínez-Millán J. Landscape patterns simulation with a modified random clusters method. Landscape Ecology, 2000, 15(7): 661-678.
- [11] Peck S L. Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. Trends in Ecology & Evolution, 2004, 19(10): 530-534.
- [12] Aaviksoo K. Simulating vegetation dynamics and land use in a mire landscape using a Markov model. Landscape and Urban Planning, 1995, 31(1/3): 129-142.
- [13] Jenerette G D, Wu J. Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona-Phoenix region, USA. Landscape Ecology, 2001, 16(7): 611-626.

- [14] Lu D, Mausel P, Brondizio E, Moran E. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2365-2407.
- [15] Chen P L, Huang Q L. Analysis of land use situation and forecast of its development tendency in Fujian Province by Markov. *Journal of Natural Resources*, 1992, 7(1): 36-42.
- [16] Patil G P, Taillie C. A multiscale hierarchical Markov transition matrix model for generating and analyzing thematic raster maps. *Environmental and Ecological Statistics*, 2001, 8(1): 71-84.
- [17] Weng Q H. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(3): 273-284.
- [18] Tang J, Wang L, Yao Z. Spatio-temporal urban landscape change analysis using the Markov chain model and a modified genetic algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(15): 3255-3271.
- [19] Jiang H H, Li J H, Fan W Y, Bao C G. Landscape pattern change and its simulation forecast in Zigui County of Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 474-479.
- [20] Wolfram S. Cellular Automata as Models of Complexity. *Nature*, 1984, 311(5985): 419-424.
- [21] Luo P, Geng J J, Li M C, Li S. Mechanism of simulating geographic process and extension of cellular automata. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(6): 724-730.
- [22] Batty M, Xie Y, Sun Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23(3): 205-233.
- [23] Wu F L. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(8): 795-818.
- [24] Barredo J I, Kasanko M, McCormick N, Lavalle C. Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64(3): 145-160.
- [25] Al-Kheder S, Wang J, Shan J. Fuzzy inference guided cellular automata urban-growth modelling using multi-temporal satellite images. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(11/12): 1271-1293.
- [26] He C Y, Shi P J, Chen J, Pan Y Z, Li X B, Li J, Li Y C, Li J G. Scenarios simulation of land use using system dynamics and cellular automata model. *Science in China (Series D)* 2005, 35(5): 464-473.
- [27] Herold M, Goldstein N C, Clarke K C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 286-302.
- [28] Matthews R B, Gilbert N G, Roach A, Polhill J G, Gotts N M. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*, 2007, 22(10): 1447-1459.
- [29] Bithell M, Brasington J. Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(2): 173-190.
- [30] Tian G J, Wu J G. Simulating land use change with agent-based models: progress and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4451-4459.
- [31] Ligtenberg A, Wachowicz M, Bregt A K, Beulens A, Kettenis D L. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72(1/2): 43-55.
- [32] Sengupta R R, Bennett D A. Agent-based modelling environment for spatial decision support. *International Journal of Geographical Information Science*, 2003, 17(2): 157-180.
- [33] Valbuena D, Verburg P H, Bregt A K. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 128(1/2): 27-36.
- [34] Zhang H H, Zeng Y N, Jin X B, Yin C L, Zou B. Urban land expansion model based on multi-agent system and application. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(8): 869-881.
- [35] Ligtenberg A, Bregt A K, Van Lammeren R. Multi-actor-based land use modelling: spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 56(1/2): 21-33.
- [36] Wu W B, Yang P, Shibasaki R, Tang H J, Chen Z X. Agent-based model for land-use/cover change: A review. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 573-578.
- [37] Bolliger J, Lischke H, Green D G. Simulating the spatial and temporal dynamics of landscapes using generic and complex models. *Ecological Complexity*, 2005, 2(2): 107-116.
- [38] Prasad V K, Kant Y, Badarinath K V S. CENTURY ecosystem model application for quantifying vegetation dynamics in shifting cultivation areas: A case study from Rampa Forests, Eastern Ghats (India). *Ecological Research*, 2001, 16(3): 497-507.
- [39] Rashleigh B. Application of AQUATOX, a Process-Based Model for Ecological Assessment, to Contentnea Creek in North Carolina *Journal of*

- Freshwater Ecology, 2003, 18(4): 515-522.
- [40] Sampson D A, Waring R H, Maier C A, Gough C M, Ducey M J, Johnsen K H. Fertilization effects on forest carbon storage and exchange, and net primary production: A new hybrid process model for stand management. *Forest Ecology and Management*, 2006, 221(1/3): 91-109.
- [41] Covington W W, Fulé P Z, Hart S C, Weaver R P. Modeling Ecological Restoration Effects on Ponderosa Pine Forest Structure. *Restoration Ecology*, 2001, 9(4): 421-431.
- [42] Lü Y H, Chen L D, Fu B J. Analysis of the integrating approach on landscape pattern and ecological processes. *Progress in Geography*, 2007, 26(3): 1-10.
- [43] Fu B J, Chen L D, Lü Y H, Su C H. The latest progress of landscape ecology in the world. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 798-804.
- [44] Gao Q, Yu M, Liu Y, Xu H, Xu X. Modeling interplay between regional net ecosystem carbon balance and soil erosion for a crop-pasture region. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112.
- [45] Hattermann F F, Krysanova V, Habeck A, *et al.* Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling. *Ecological Modelling*, 2006, 199(4): 379-392.
- [46] Milden M, Munzbergova Z, Herben T, Ehrlén J. Metapopulation dynamics of a perennial plant, *Succisa pratensis*, in an agricultural landscape. *Ecological Modelling*, 2006, 199(4): 464-475.
- [47] Li K Y, Coe M T, Ramankutty N, De Jong R. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(3/4): 258-268.
- [48] Braud I, Vich a I J, Zuluaga J, Fornero L, Pedrani A. Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modelling. *Journal of Hydrology*, 2001, 254(1/4): 124-144.
- [49] Anderson K, Neuhauser C. Patterns in spatial simulations-are they real? *Ecological Modelling*, 2002, 155(1): 19-30.
- [50] Schroder B, Seppelt R. Analysis of pattern-process interactions based on landscape models-Overview, general concepts, and methodological issues. *Ecological Modelling*, 2006, 199(4): 505-516.
- [51] Jeltsch F, Moloney K, Milton S J. Detecting process from snapshot pattern: lessons from tree spacing in the southern Kalahari. *Oikos*, 1999, 85(3): 451-466.
- [52] Paruelo J M, Putz S, Weber G, Bertiller M, Colluscio R A, Aguiar M R, Wiegand T. Long-term dynamics of a semiarid grass steppe under stochastic climate and different grazing regimes: A simulation analysis. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(12): 2211-2231.
- [53] Schurr F M, Bossdorf O, Milton S J, Schumacher J. Spatial pattern formation in semi-arid shrubland: a priori predicted versus observed pattern characteristics. *Plant Ecology*, 2004, 173(2): 271-282.
- [54] Bleher B, Oberrath R, B hning-Gaese K. Seed dispersal, braeding system, tree density and the spatial pattern of trees — a simulation approach. *Basic and Applied Ecology*, 2002, 3(2): 115-123.
- [55] Schroder B. Pattern, process, and function in landscape ecology and catchment hydrology-how can quantitative landscape ecology support predictions in ungauged basins? *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10: 967-979.
- [56] Childress W M, Coldren C L, McIendon T. Applying a complex, general ecosystem model (EDYS) in large-scale land management. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 97-108.
- [57] Schaldach R, Alcamo J. Coupled simulation of regional land use change and soil carbon sequestration: A case study for the state of Hesse in Germany. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(10): 1430-1446.
- [58] Voinov A, Costanza R, Wainger L, Boumans R, Villa F, Maxwell T, Voinov H. Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. *Environmental Modelling & Software*, 1999, 14(5): 473-491.
- [59] Costanza R, Voinov A, Boumans R, Maxwell T, Villa F, Wainger L, Voinov H. Integrated ecological economic modeling of the patuxent river watershed, Maryland. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 203-231.
- [60] Binder C, Boumans R M, Costanza R. Applying the Patuxent Landscape Unit Model to human dominated ecosystems: the case of agriculture. *Ecological Modelling*, 2003, 159(2/3): 161-177.
- [61] Engelen G, M Van Der Meulen, Hahn B. MODULUS: a spatial modelling tool for integrated environmental decision making. in Final Report, Contract ENV4-CT97-0685, Directorate General XII, Environment IV Framework. 2000. Brussels Belgium.
- [62] Alcamo J, Leemans R, Kreilemann E. Global Change Scenarios of the 21st Century: Results from the IMAGE 2.1 Model. Elsevier Science, 1998.
- [63] He H S, Mladenoff D J, Crow T R. Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming. *Ecological Modelling*, 1999, 114(2/3): 213-233.
- [64] Schroder B, Seppelt R. Analysis of pattern-process interactions based on landscape models-Overview, general concepts, and methodological issues. in International Conference of the International-Environmental-Modelling-and-Software-Society. Osnabruck, GERMANY: Elsevier Science Bv, 2004.

- [65] Fu B J, Liu S L. Problems and trends of long-term ecological research. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2002, 13(4): 476-480.
- [66] Muetzelfeldt R, Massheder J. The Simile visual modelling environment. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 345-358.
- [67] Vancley J K. Spatially-explicit competition indices and the analysis of mixed-species plantings with the Simile modelling environment. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(2/3): 295-302.
- [68] Argent R M, Voinov A, Maxwell T, Cuddy S M, Rahman J M, Seaton S, Vertessy R A, Braddock R D. Comparing modelling frameworks — A workshop approach. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(7): 895-910.

参考文献:

- [2] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [8] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [15] 陈平留, 黄清麟. 应用马尔可夫链分析预测福建以林为主的土地利用趋势. *自然资源学报*, 1992, 7(1): 36-42.
- [19] 姜欢欢, 李继红, 范文义, 鲍晨光. 三峡库区秭归县景观格局变化及模拟预测. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 474-479.
- [21] 罗平, 耿继进, 李满春, 李森. 元胞自动机的地理过程模拟机制及扩展. *地理科学*, 2005, 25(6): 724-730.
- [26] 何春阳, 史培军, 陈晋, 潘耀忠, 李晓兵, 李京, 李月臣, 李景刚. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. *中国科学 D 辑地球科学*, 2005, 35(5): 464-473.
- [30] 田光进, 邬建国. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展. *生态学报*, 2008, 28(9): 4451-4459.
- [34] 张鸿辉, 曾永年, 金晓斌, 尹长林, 邹滨. 多智能体城市土地扩张模型及其应用. *地理学报*, 2008, 63(8): 869-881.
- [36] 吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 唐华俊, 陈仲新. 基于 Agent 的土地利用/土地覆盖变化模型的研究进展. *地理科学*, 2007, 27(4): 573-578.
- [42] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 1-10.
- [43] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 苏常红, 姚雪玲, 刘宇. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 798-804.
- [65] 傅伯杰, 刘世梁. 长期生态研究中的若干重要问题及趋势. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 476-480.