

土地利用生态安全格局研究进展

谢花林^{1,2}

(1. 江西财经大学资源与环境管理学院, 江西 南昌 330032; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 土地生态安全格局研究不仅可以为有效解决水土流失、土壤退化等区域生态安全问题提供新的思路, 而且对提高区域土地生态系统的安全性和可持续性具有重要的现实意义。从土地利用生态安全评价、面向生态的土地利用格局和土地生态安全格局构建方法 3 个方面, 综述了土地利用生态安全格局的研究现状和最新进展, 并对今后的研究方向进行了展望, 以促进土地生态安全格局研究的继续深入开展。提出近期的研究重点主要包括: (1) 面向生态安全格局设计的生态安全评价方法与模型; (2) 不同类型生态脆弱地区的土地生态安全格局; (3) 土地生态安全格局的空间显示模型; (4) 区域土地生态安全格局情景模拟。

关键词: 生态安全格局; 土地利用; 空间显示模型

文章编号: 1000-0933(2008)12-6305-07 中图分类号: Q171, F124.5 文献标识码: A

Review and the outlook of land use ecological security pattern

XIE Hua-Lin^{1,2}

1 College of Resource & Environment Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6305 ~ 6311.

Abstract: The research of Land ecological security pattern not only can provide a new thinking of effectively solving regional ecological security problems including soil and water loss, soil degradation, desertification, but also has an important realistic meanings for improving the safety and sustainability of land use ecosystem. In this paper, the present research status and some recent advances in the land use ecological security assessment, land use pattern based on ecology, optimization method of land ecological pattern are reviewed, and future research directions are discussed. In the near term, the priority research areas are: (1) Method and model of ecological security assessment for ecological security pattern; (2) Land ecological security pattern of different ecological friable areas; (3) Spatial explicit model of land ecological security pattern; (4) Scenario simulation of regional land ecological pattern.

Key Words: ecological security pattern; land use; spatial explicit model

近半个世纪以来, 由于经济的发展和工业化进程的加速, 环境污染与生态破坏日益严重, 温室效应、臭氧层破坏、酸雨区扩展、自然资源短缺、水土流失、土壤沙化、森林减少、草场退化、洪涝灾害、水污染、大气污染

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40801106); 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAB15B02); 中国博士后科学基金资助项目 (20080430544)

收稿日期: 2008-05-31; 修订日期: 2008-09-28

作者简介: 谢花林 (1979 ~), 男, 江西莲花县人, 博士, 教授, 主要从事土地利用和生态安全研究. E-mail: xiehl_2000@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40801106), Supporting Planning Project of National Science and technology (No. 2006BAB15B02), Postdoctoral Science Foundation of China (No. 20080430544)

Received date: 2008-05-31; **Accepted date:** 2008-09-28

Biography: XIE Hua-Lin, Ph. D., Professor, mainly engaged in land use and ecological security. E-mail: xiehl_2000@163.com

等生态环境问题严重威胁着人类的生存和发展,生态环境问题已逐步成为生态安全问题;生态安全研究已经成为当前生态学、地学以及资源与环境科学研究的前沿任务和重要领域^[1]。诸多生态安全问题的出现,从根本上是不合理的土地开发利用活动的结果。

近年来,在土地利用与环境变化、可持续土地利用评价等研究逐渐深入的背景下,土地生态安全格局研究作为区域可持续发展的重要途径和手段受到广泛重视,相关设计方法和模型方面的研究成为研究热点。但在以下两方面仍显不足:第一,土地利用优化配置目标最终应该通过土地利用的经济效益、社会效益和生态环境效益 3 个方面来体现,而对于生态效益的标准尚缺乏完整而系统的研究,例如目前土地生态安全格局设计中最多见的方法是以经济效益为主导性目标,建立目标函数,辅以社会效益和生态效益作为约束条件,而由于生态效益尚缺乏完整系统的生态标准,因此在具体研究中为了简化问题,研究者常常以林草覆盖率等绿化面积比例作为生态约束条件,并且常常以政策规定或者地方经验值来作为这些生态指标的量化标准,而对于区域生态环境非常重要的水土流失、土壤退化、水资源安全等相关指标较少涉及,这直接制约着土地生态安全格局的科学性和合理性;第二,传统的土地生态安全格局方法大多停留在优化指标相互作用关系的静态优化上,且难以定量地考虑格局的空间优化。以空间显式模型为核心的格局优化模式,真正触及了土地利用格局的形成机制,并体现了景观生态学强调水平方向生态学过程的特征。因此,通过模拟格局演化来进行优化的客观性和自动化程度较高,而且模拟演化过程本身就验证了优化方案的效果和可实现性。土地生态安全格局研究不仅可以为有效解决水土流失、土壤退化等区域生态安全问题提供新思路,而且对提高区域土地利用生态系统的安全性和可持续性具有重要的现实意义。本文通过对土地生态安全格局的国内、外研究现状作一述评,在此基础上展望土地生态安全格局的研究前景,以推动土地生态安全格局的研究,具有重要的意义。

1 土地利用生态安全评价研究进展

生态安全是一个区域的可持续发展不致因生存空间和生态环境遭受破坏而受到威胁的状态^[1,2]。在诸多影响区域生态安全的因素与过程中,土地利用/覆盖及其格局的变化是影响区域生态安全最重要的方面^[2]。

土地利用生态安全评价是土地生态安全格局构建的基础^[3]。目前土地利用生态安全评价研究主要体现在评价指标体系和评价方法两个方面。

建立科学的指标体系与评价标准是土地利用生态安全评价的关键环节,现阶段国内外尚无统一标准的土地资源生态安全评价指标体系,但与此相关的土地质量评价指标体系研究已取得了一些成果,为土地资源生态安全评价指标体系的构建提供了基础和借鉴。FAO 于 1993 年发表了《可持续土地管理评价大纲》^[4],其中的生态可持续性(ecological sustainability)也就意味着生态安全性(ecological security)的要求。为了更好地掌握土地质量变化及其驱动力,提供土地退化的早期预警和及时发现出现土地质量问题的地区,1995 年 6 月,世界银行(WB)与联合国粮农组织(FAO)、联合国开发计划署(UNDP)及联合国环境规划署(UNEP)共同发起,建立了土地质量指标体系项目研究的全球联盟基础,并发布了《土地质量指标》^[5]。在此基础上,近年来,国内知名学者(如傅伯杰、蔡运龙、陈百明等)从不同角度、选择不同研究区域进行了土地质量指标体系及土地可持续评价指标体系的研究^[6~8]。

目前土地生态安全评价指标体系研究尚属起步阶段,Zhao 等^[9]基于 P-S-R 框架模型,从土地生态压力、土地生态环境状态和土地生态环境响应三方面进行指标筛选,构建了土地资源生态安全评价指标体系;李玉平和蔡运龙^[10]、刘勇^[11]则是从土地自然生态安全系统、土地经济生态安全系统和土地社会生态安全系统 3 个角度选取指标,构建了区域土地资源生态安全评价指标体系。这些研究为区域土地资源生态安全评价指标体系的建立提供了一些思路和尝试。喻锋和李晓兵^[12]在像元水平上对皇甫川流域生态安全进行了综合评价,并重点分析了流域土地利用变化与生态安全的关系,从而为科学地组织人类有序活动、调整和优化土地利用格局,以确保流域生态安全提供了理论基础。

目前土地利用生态安全评价方法研究还处在实践和探索阶段,比较常用的方法有以下几种:(1)综合指

数评价法^[9~11]。由于土地资源生态安全的评价标准具有相对性和发展性,不同时期或者不同国家和地区,其评价标准也会不同,这给土地资源生态安全评价指标安全阈值的确定带来困难。(2)土地承载力分析法。目前常用的是传统的土地资源承载力分析方法和近年来兴起的生态足迹法^[13]。生态足迹的方法从一个新的角度阐释了人类及其发展与资源环境的关系,其定量化程度高,可用较少的因素定量测算生态承载力状况,但因无法考虑生态承载力复杂因素间的作用,同时单纯以人类对自然资源的占有与利用角度分析系统的承载力水平,因而难免有些缺憾^[14]。

综上所述,目前土地利用生态安全评价研究还不够完善,提出来的评价指标体系是面向整个区域,有些指标不能体现在像元水平上,评价结果不能较好地为土地生态安全格局服务。此外,针对某些区域(如南方红壤丘陵区、喀斯特地区)的土地利用生态安全评价指标体系和评价标准研究还较少,有待于进一步补充完善。

2 面向生态的土地利用格局研究进展

以土地资源可持续利用为导向的区域土地利用结构优化研究中,生态因素已成为重要的约束条件和优化目标,生态安全的理念也开始在土地利用结构优化中得以体现。

在面向生态的土地利用结构优化方面,Makowski^[15]以欧共体农用地资源面临的最主要的污染问题为导向,以氮流失量最小为规划目标,建立了欧共体农业土地利用结构优化模型。Herrmann^[16]应用系统工程方法,以土壤肥力、地下水质量、地表水、群落生境和景观五方面选取指标作为生态约束条件,进行乡村土地利用结构优化设计。结合土地资源可持续利用研究,我国学者也开始了面向生态的土地利用结构优化方法的探讨。徐学选^[17]应用线性规划模型,以土壤侵蚀量作为生态约束条件,探讨了黄土丘陵区生态建设中农林牧土地结构优化模式。林彰平^[18]针对生态脆弱的东北农牧交错带的主要生态问题,提出了生态安全条件下土地利用模式优化研究的概念框架,并采用灰色线性规划模型,以生态效益最佳为目标,探讨了以生安全为目标的农牧交错带土地利用结构优化方法。岳耀杰^[19]基于遥感影像解译和GIS技术,制定并实施了土地利用结构优化技术规程、沙区分步优化判定层次标准、对沙区土地利用分类和生态安全评价等,可以对沙区土地高效利用提供技术支持和优化范例。

另外,刘艳芳^[20]等对基于绿当量的最佳森林覆盖率标准的生态优化方法进行了探讨。对生态标准的量化引入了“绿当量”的概念,在考虑耕地与草地的生态服务价值的基础上,引入森林与耕地、草地之间基于“绿量相当”的面积换算关系,定量测算出该类用地的生态绿当量。针对不同的区域,根据区域降水量、土壤饱和蓄水能力以及土壤自然含水量来计算区域最佳森林覆盖率,并以此作为该地区生态优化的目标,这对于土地利用优化中关于生态标准的量化探讨有着重要的启发意义,但对土地利用结构生态标准的衡量指标只取了森林覆盖率,这种选取还不尽全面,有待进一步完善。

综上所述,我国的土地利用结构优化研究多关注土地利用数量结构的生态优化(如林地覆盖率、坡耕地比例等),却忽视了土地利用空间格局对诸多生态过程的影响,如地表水的径流、侵蚀,物种的多样性,以及干扰的传播或边缘效应等。结构和功能、格局与过程之间的联系与反馈是景观生态学的基本命题^[21~23]。景观生态学的一个最基本假设是空间格局对过程(物流、能流和信息流)具有重要影响,而过程也会创造、改变和维持空间格局^[24,25]。景观生态学中的最优景观格局原理和生态安全格局原理为土地利用结构优化提供了重要的途径^[28~31]。

近年来有些学者提出了土地利用安全格局的新概念,它是指能够满足和保障区域土地资源生态安全的土地利用格局^[26,30]。不同的地区面临的主要生态问题不同,生态安全条件也不同,应该从区域实际生态问题角度出发,探讨土地生态安全格局的构建方法。目前,国际上较多关注的是由化肥所造成的土地污染问题,并多以小流域为研究尺度,Seppelt^[31,32]以美国南部HuntingCreek小流域为试区,以控制化肥引起的污染问题为目标,应用GIS以及景观空间分异模型设计了土地利用空间配置方案和化肥施用量最大标准分布。Allan^[33]以保护区域水质为目标,应用GIS和缓冲区设计方法,建立了小流域土地利用格局优化模型。我国学者杨子生^[34]在针对山区土地资源面临水土流失严重的生态问题,设计了基于允许土壤流失量条件下的土

地生态安全格局。牛振国^[35]应用 GIS 在对主要生态水文过程模拟的基础上,建立了土地利用最小耗费表面模型,为荒漠化地区土地生态安全格局设计提供新的思路。张红旗^[36]针对红壤地区土壤侵蚀严重的问题,将 GIS 技术与线性规划模型有效结合,通过限制某些可能加剧土壤侵蚀的农作物的空间配置来实现土地利用安全目标。刘彦随等^[37]从要素控制、地段设计到系统模式优化的不同层次,提出了三峡库区土地生态设计模式与措施。高清竹等^[4]针对黄河中游砒砂岩地区水土流失、干旱缺水和生物多样性降低等生态问题,运用多目标规划方法和 GIS 手段,进行了丘陵沟壑区土地生态安全格局设计。此外,陈利顶、马克明和俞孔坚等探讨了区域生态安全格局构建的原理和方法^[38,26,28],这对于土地利用生态安全格局研究具有重要的借鉴作用。

3 土地生态安全格局构建方法研究进展

由于土地生态安全格局的问题从本质上说是利用景观生态学原理解决土地合理利用的问题,随着景观生态学原理日益渗透到土地合理利用的问题中,格局优化成了土地利用规划的核心内容^[39]。

传统的直接来自于景观格局优化的土地生态安全格局构建方法,如线性规划、灰色系统规划、层次分析法、系统动力学模型等等,缺乏定量的空间处理功能,难以刻画景观要素空间上水平方向的相互作用^[40,41]。为了体现景观生态学对格局优化的要求,人们越来越求助于空间直观模型。国外比较成功的案例有 Seppelt 等对农业土地利用格局优化的研究^[31,32],其中的优化模型建立了不同管理措施下的养分平衡,构建的优化判别标准考虑到了经济和生态两方面因素,如农民的农业收入,流域的氮流失。这个优化模型通过计算优化不同土地利用方式和施肥措施下的最大产出值作为判别标准,建立了一个空间直观的动态生态系统模拟模型进行数量模拟,利用基于随机过程的蒙特-卡罗方法来模拟检测优化结果的可信度。

土地生态安全格局的构建方法经历了由定性分析评估到定量计算、由静态优化到动态模拟、由固定条件下的孤立寻优到可变条件下的趋势分析、由数量配置为主到预测空间变化的过程,定量、可变、动态的空间模拟将是土地生态安全格局设计研究的主要方式。

土地利用格局变化与生态过程改变互为因果,了解局部演变时空规律及其演变驱动机制是结合生态过程进行土地利用格局分析和优化的前提与基础。但现阶段对土地利用格局、过程和功能相互作用的研究还不够成熟,还不能满足对土地生态安全格局设计的理论指导要求。

将上述两方面结合起来看,一方面土地生态安全格局对动态的空间模拟提出越来越高的要求,另一方面空间模拟迟迟得不到景观尺度上定量化规律的有力支持,使得传统“自上而下”的优化思路难以依靠模型实现自动化;要在目前景观生态学的基础研究水平上解决这个矛盾,似乎只有采纳复杂性科学所倡导的复杂性研究方法——“自下而上”的构模方法,针对特定的生态过程,将生态过程结合到格局分析中。

在这方面,元胞自动机具有天然优势。基于元胞自动机的空间直观模型不关心景观尺度上定量化的规律,而是直接在较低的一个尺度上,从景观组成单元入手,模拟它们的状态和局部相互作用,即能在总体上表现土地利用格局的演变过程。这也是基于元胞自动机的空间直观模型在模拟土地利用空间格局与过程相互作用的研究中被广泛应用的主要原因^[42]。

目前国外已有一些学者基于 CA 进行土地利用规划的研究。例如,Strange 等^[43]发展了一种基于元胞自动机(CA)的进化优化算法,它能有效解决造林规划的空间决策问题。Mathey 等^[44-46]通过设计一种基于 CA 的进化算法整合了时间和空间目标,探索了一种协同演化的元胞自动机模型,用于空间显现自然动态过程的森林规划。Mathey 等^[45,46]整合了时间和空间目标,探索了一种协同演化的元胞自动机模型,用于空间显现自然动态过程的森林规划。Stevens 等^[47]探讨了基于 GIS 和 CA 的城市规划决策模型。

近年来国内也有部分学者开始尝试运用 CA 探讨土地利用格局的优化问题。Chen^[48]在综合使用“自上而下”的灰色线性规划(GLP)方法和“自下而上”的元胞自动机(CA)方法的基础上,建立了土地利用格局优化模拟模型,进行了中国北方农牧交错带生态安全条件下的土地利用格局优化模拟研究。刘小平^[49]提出了基于“生态位”的元胞自动机(CA)的新模型,并探讨了如何通过“生态位”元胞自动机和 GIS 的结合进行城市

土地可持续利用的规划。该模型可方便地探索不同土地利用政策下城市土地利用发展情景,能够为城市规划提供有用的决策支持。杨小雄^[50]探讨了元胞自动机模型在政策及相关规划约束、邻域耦合、适宜性约束、继承性约束及土地利用规划指标约束下的土地利用规划布局的元胞自动机模型,并以广西东兴市为例进行了模型的仿真研究。

综上所述,传统的土地生态安全格局设计方法大多停留在指标相互作用关系的静态设计上,且难以定量地考虑格局的空间优化。以空间显式模型为核心的格局模式,真正触及了土地利用格局的形成机制,并体现了景观生态学强调水平方向生态学过程的特征。因此,通过模拟格局演化来进行设计的客观性和自动化程度较高,而且模拟演化过程本身就验证了生态安全方案的效果和可实现性。

4 展望

4.1 面向生态安全格局设计的生态安全评价方法与模型研究

近年来提出土地利用系统的生态安全评价指标体系构建问题,但是相应的以此为基础的基于生态安全评价的土地利用安全格局设计并不多见。根据土地利用和生态安全之间的关系,在像元水平上选取体现空间特征的评定指标,量化生态安全指标标准,建立面向生态安全格局设计的土地利用生态安全评价方法和模型,为土地生态安全格局构建提供服务。

4.2 不同类型生态脆弱地区的土地生态安全格局研究

根据黄土高原区、南方红壤丘陵区、西北干旱区、沙区和喀斯特地区等不同类型的生态脆弱地区的特点,对区域生态安全问题进行诊断和分析,找出区域生态安全所面临的关键问题和影响因素,探求维护区域生态安全的关键性要素和过程,进行不同类型生态脆弱地区的土地生态安全格局研究。

4.3 土地生态安全格局的空间显式模型研究

土地利用安全格局的设计方法经历了由定性分析评估到定量计算、由静态设计到动态模拟、由固定条件下的孤立寻优到可变条件下的趋势分析、由数量配置为主到预测空间变化的过程,定量、可变、动态的空间模拟将是土地利用安全格局设计研究的主要方式。通过模拟格局演化可验证生态安全方案的效果和可实现性。基于元胞自动机的空间直观模型不关心景观尺度上量化的规律,而是直接在较低的一个尺度上,从景观组成单元入手,模拟它们的状态和局部相互作用,即能在总体上表现土地利用格局的演变过程。因此,基于元胞自动机和多主体模型进行土地生态安全格局的构建,将是未来发展的主流方向。

4.4 区域土地生态安全格局情景模拟研究

区域土地安全格局不仅仅要注重生态环境的保护,在一定程度上要特别关注区域的经济和社会的可持续发展。不同阶段和不同历史时期由于受到多种因素的制约,区域土地安全格局也并不是一成不变的。因此在考虑区域耕地保护、退耕还林还草、经济发展和人口政策等不同政策情景下,如何建立一定的模拟模型,模拟区域土地生态安全格局;并利用基于随机过程的蒙特-卡罗方法来模拟检测结果的可信度,将是未来区域土地生态安全格局研究的主要内容。

References:

- [1] Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (3): 354—358.
- [2] Gao Q Z, Xu H M, Jiang Y, *et al.* Preliminary discussion on ecological security pattern of land use and land cover in the soft rock area of Middle Reaches of the Yellow River: a case study of Changchuan watershed, Inner Mongolia, China. *Transactions of the CSA E*, 2006, 22 (3): 51—56.
- [3] Xie H L. GIS-based land-use eco-security evaluation in typical agro-pastoral zone. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 (1): 135—139.
- [4] FAO. FESLM: An International Framework for Evaluating Sustainable Land Management. *World Soil Resources Report*, FAO, Rome, Italy, 1993.
- [5] World Bank. *Land Quality Indicators*, World Bank Discussion Papers 315. The World Bank, Washington D. C., 1995.
- [6] Fu B J, Chen L D, Ma C. The index system and method of land sustainable use evaluation. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 112—118.
- [7] Chen B M. Design and evaluation of indicator system of regional land for sustainable use. *Progress in Geography*, 2002, 21(3): 204—215.

- [8] Cai Y L, Li J. Measurement of land use sustainability: A comprehensive method representing processes. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 305—313.
- [9] Zhao Y Z, Zou X Y, Cheng H, *et al.* Assessing the ecological security of the Tibetan plateau: Methodology and a case study for Lhaze County. *Journal of Environmental Management*, 2006, 80 (2): 120—131.
- [10] Li Y P, Cai Y L. Security evaluation of land ecology in Hebei province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 2(3): 1—6.
- [11] Zuo W, Zhou H Z, Zhu X H, *et al.* Integrated evaluation of ecological security at different scales using remote sensing. *Pedosphere*, 2005, 15 (4): 456—464.
- [12] Yu F, Li X B. Land Use Change and Eco-security Assessment of Huangfuchuan Watershed. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6): 645—653.
- [13] Huang Q, Wang R H, Ren Z Y, *et al.* Regional ecological security assessment based on long periods of ecological footprint analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(1): 24—41.
- [14] Wang G X, Chen G D, Qian J. Several problems in ecological security assessment research. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1551—1556.
- [15] Makowski D, Eligius M T, Hendrix, *et al.* A framework to study nearly optimal solutions of linear programming models developed for agricultural land use exploration. *Ecological Modelling*, 2000, 131: 65—77.
- [16] Herrmann S, Osinski E. Planning sustainable land use in rural areas at different spatial using GIS and modeling tools. *Landscape and Urban Planning*, 1999, 46: 93—101.
- [17] Xu X X, Zhang S B, Wang S Q. Optimizing land use structure by linear programming in the loess hilly region for constructing eco-agriculture. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2001, 19(2): 95—99.
- [18] Lin Z P. A Case study on land use pattern under ecological security in ecotone between agriculture and animal husbandry in Northeastern China, *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21 (6): 15—19.
- [19] Yue Y J, Zhou H J, Wang J A, *et al.* Research on the land use structure of asian desert regions at ecological security level. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 131—137.
- [21] Liu Y F, Ming D P, Yang J Y. Optimization of land use structure based on ecological green equivalent. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(5): 493—498.
- [21] Turner M G. Predicting the spread of disturbance in heterogeneous landscape. *Oikos*, 1989, 55: 1221—1229.
- [22] Lenz R J M, Stery R. Landscape diversity and land use planning: a case study in Bavaria. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 31: 387—398.
- [23] Vuilleumier S, Prélaz-Droux, R. Map of ecological networks for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58: 157—170.
- [24] Wu J, Hobbs R. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology*, 2002, 17: 355—365.
- [25] Wu J, Jones B, Li H, *et al.* Spatial Scaling and Uncertainty Analysis. *Ecology: Methods and Application*. Columbia University Press, New York, 2004.
- [26] Ma K M, Fu B J, Li X Y, *et al.* The regional pattern for ecological security (RPES): the concept and theoretical basis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (4): 761—768.
- [27] Forman R T T. Some general principles of landscape ecology. *Landscape Ecology*, 1995, 10(3): 133—142.
- [28] YU K J. Security pattern and surface model in landscape ecological planning. *Landscape Urban Planning*, 1996, 36: 1—17.
- [29] Opdam P, Foppen R, Vos C. Bridging the gap between ecology and spatial planning in landscape Ecology. *Landscape Ecology*, 2002, 16: 767—779.
- [30] Zhang H B, Liu L M. Main Progress and Prospects of Land Resource Ecological Security Research. *Progress in Geography*, 2006, 25(5): 77—85.
- [31] Seppelt R, Voinov A. Optimization methodology for land use patterns using spatially explicit landscape models. *Ecological Modelling*, 2002, 151: 125—142.
- [32] Seppelt R, Voinov A. Optimization methodology for land use patterns-evaluation based on multiscale habitat pattern comparison. *Ecological Modelling*, 2003, 168: 217—231.
- [33] Allan I, Peterson J. Spatial modeling in decision support for land- use planning: a demonstration from the Lal Lal catchment, Victoria, Australia. *Australian Geographical Studies*, 2002, 40(1): 84—92.
- [34] Yang Z S, Wang Y P. A Preliminary approach to the ecological security patterns of land use for controlling soil erosion in Jinsha River Basin of Yunnan Province. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(4): 402—409.
- [35] Niu Z G, Li B G, Zhang F R. Optimum land-use patterns based on regional available soil water. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3): 173—177.
- [36] Zhang H Q, Li J Y, Niu D. Study on spatial optimization allocation of land use in the Typical Red Soil Hilly Region in South China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 668—676.
- [37] Liu Y S, Fang C L. A study on regional forced land use conversion and optimal allocation — Taking the Three Gorges Reservoir Area as an example. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(4): 334—340.
- [38] Chen L D, Li Y H, Tian H Y, *et al.* Principles and methodology for ecological rehabilitation and security pattern design in key project construction. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (3): 674—680.

- [39] Guan W B, Xie C H, Ma K M, *et al.* Landscape ecological restoration and rehabilitation is a key approach in regional pattern design for ecological security. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (1): 64—73.
- [40] Zhang H Y, Wang Y L. Ecological optimization of landscape in land resource exploitation: Overview of the methods. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(8):112—120.
- [41] Qing X D, Ming Q W. Application of cellular automata in landscape pattern optimization. *Resources Science*, 2007, 29(4):85—94.
- [42] Wu J G. *Landscape Ecology -Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [43] Strange N, Meilby H, Thorsen B J. Optimization of land use in afforestation areas using evolutionary self-organization. *For. Sci.* 2002, 48, 543—555.
- [44] Mathey A H, Krcmar E, Vertinsky I B. Re-evaluating our approach to forest management planning: a complex journey. *For. Chron.* 2005, 81, 359—364.
- [45] Mathey A H, Krcmar E, Tait D, *et al.* Forest planning using co-evolutionary cellular automata. *For. Ecol. Manage.* 2007, 239, 45—56.
- [46] Mathey A H, Krcmar E, Tait D, Dragicevic S, *et al.* An object-oriented cellular automata model for forest planning problems. *Ecol. Model.* 2007. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.11.003
- [47] Stevens D, Dragicevic S, Rothley K. iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22, 761—773.
- [48] Chen Y H, Li X B, Su W, *et al.* Simulating the optimal land-use pattern in the farming-pastoral transitional zone of Northern China, *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2008.01.001.
- [49] Liu X P, Li X, Peng X J. Niche based cellular automata for sustainable land use planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (6): 2391—2402.
- [50] Yang X X, Liu Y L, Wang X H, *et al.* Land utility planning layout model based on constrained conditions cellular automata. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32 (12):1164—1167.

参考文献:

- [1] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. *应用生态学报*, 2002, 13 (3): 354—358.
- [2] 高清竹, 许红梅, 江源, 等. 黄河中游砒砂岩地区长川流域土地利用/覆盖安全格局初探. *农业工程学报*, 2006, 22 (3): 51—56.
- [3] 谢花林. 基于 GIS 的典型农牧交错区土地利用生态安全评价. *生态学杂志*, 2008, 27 (1): 135—139.
- [6] 傅伯杰, 陈利顶, 马诚. 土地可持续利用评价的指标体系与方法. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 112—118.
- [7] 陈百明. 区域土地可持续利用指标体系框架的构建与评价. *地理科学进展*, 2002, 21(3): 204—215.
- [8] 蔡运龙, 李军. 土地利用可持续性的度量: 一种显示过程的综合方法. *地理学报*, 2003, 58(2): 305—313.
- [10] 李玉平, 蔡运龙. 河北省土地生态安全评价. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007, 2(3): 1—6.
- [12] 喻锋, 李晓兵. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. *地理学报*, 2006, 61(6): 645—653.
- [14] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1551—1556.
- [17] 徐学选, 张世彪, 王栓全. 黄土丘陵区生态建设中农林牧土地结构优化模式探讨. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(2): 95—99.
- [18] 林彰平. 东北农牧交错带土地利用生态安全模式案例研究. *生态学杂志*, 2002, 21(6): 15—19.
- [19] 岳耀杰, 周洪建, 王静爱, 等. 生态安全条件下亚洲沙区土地利用结构研究. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 131—137.
- [20] 刘艳芳, 明冬萍, 杨建宇. 基于生态绿当量的土地利用结构优化. *武汉大学学报·信息科学版*, 2002, 27(5): 493—498.
- [26] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24 (4): 761—768.
- [30] 张虹波, 刘黎明. 土地资源生态安全研究进展与展望. *地理科学进展*, 2006, 25(5): 77—85.
- [34] 杨子生, 王云鹏. 基于水土流失防治的云南金沙江流域土地利用生态安全格局初探. *山地学报*, 2003, 21(4): 402—409.
- [35] 牛振国, 李保国, 张凤荣. 基于区域土壤水分供给量的土地利用优化模式. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 173—177.
- [36] 张红旗, 李家永, 牛栋. 典型红壤丘陵区土地利用空间优化配置. *地理学报*, 2003, 58(5): 668—676.
- [37] 刘彦随, 方创琳. 区域土地利用类型的胁迫转换与优化配置——以三峡库区为例. *自然资源学报*, 2001, 16(4): 334—340.
- [38] 陈利顶, 吕一河, 田惠颖, 等. 重大工程建设中生态安全格局构建基本原则和方法. *应用生态学报*, 2007, 18 (3): 674—680.
- [40] 张惠远, 王仰麟. 土地资源利用的景观生态优化方法. *地学前缘*, 2000, 7(8): 112—120.
- [41] 秦向东, 闵庆文. 元胞自动机在景观格局优化中的应用. *资源科学*, 2007, 29(4): 85—94.
- [42] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [49] 刘小平, 黎夏, 彭晓鹃. “生态位”元胞自动机在土地可持续规划模型中的应用. *生态学报*, 2007, 27 (6): 2391—2402.
- [50] 杨小雄, 刘耀林, 王晓红. 基于约束条件的元胞自动机土地利用规划布局模型. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(12): 1164—1167.