

区域生态安全格局优化研究进展

岳德鹏 于强 张启斌 苏凯 黄元 马欢

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 区域生态安全格局的最优化是保障区域生态安全的基础,采用模型方法准确地对区域生态安全格局进行分析及优化对于区域生态环境可持续发展有重要意义。区域生态安全格局优化需要多学科的综合、多角度的分析和多种实现手段的结合。一般建立在对不同景观类型、景观的空间格局、景观过程以及功能之间关系深入理解的基础上,首先找到景观格局对过程的影响方式,建立数量关系,其次利用景观生态学的原理集成数学模型,优化土地利用,多层次、多角度、多学科进行区域生态安全格局优化。本文在分析国内外相关研究进展的基础上,对区域生态安全格局的概念发展、研究内容演变、优化方法等进行了总结,在此基础上得出未来区域生态安全格局优化的研究趋势:多模型、多方法、多技术的有机集成;区域生态安全标准量化的探索;公众参与机制及利益协调的管理手段研究。

关键词: 区域生态安全格局;生态安全;格局优化;模型集成

中图分类号: X821 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0001-10

Progress in Research on Regional Ecological Security Pattern Optimization

YUE Depeng YU Qiang ZHANG Qibin SU Kai HUANG Yuan MA Huan

(Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Optimization of regional ecological security pattern is the basis of regional ecological security. It is of great significance to analyze and optimize the regional ecological security pattern by using proper models and methods. The optimization of regional ecological security pattern requires the integration of multi-disciplinary synthesis, multi-perspective analysis and the combination of various means. It is generally based on the understanding of the relationship between different landscape types, landscape spatial pattern, landscape process and function. Typically, the impact ways of landscape pattern on the process are found first. Then, a mathematical model is built based on the principles of landscape ecology to optimize land use and local ecological security pattern from multi-level, multi-perspective and multi-disciplinary views. Based on the analysis of domestic and foreign research progress, a summary of the concept development, the evolution of the research content and the optimization methods of regional ecological security pattern was made. And the future research trend of regional ecological security pattern was obtained, including organic integration of multi model, multi method and multi technology, quantitative exploration of regional ecological security standards, public participation mechanism and management methods of interest coordination.

Key words: regional ecological security pattern; ecological security; pattern optimization; model integration

引言

随着社会经济的迅速发展,人类需求与土地生态之间的矛盾日益凸显,并由此导致了水土流失、荒漠化、牧草地退化、生物多样性锐减、水生态平衡失

调等生态环境问题,严重威胁着区域可持续发展,生态安全目标下的区域生态安全格局分析以及优化已经成为迫切需求^[1]。近年来,一些学者提出了区域生态安全格局的概念与理论基础、设计原则与方法,将研究尺度扩展到区域上,对区域内的各种自然和

人文因素进行设计、组合和布局,得到点、线、面组成的多目标、多层次、多类别的空间配置方案,以维持生态系统结构和功能的完整性,力求在宏观层面上谋求社会经济需求与生态安全的平衡^[2]。区域生态安全格局结构优化逐渐成为改善区域生态安全状况的重要手段,如何进行准确的、实用的区域生态安全格局优化成为目前国内外研究的热点^[3]。国外学者主要从土地利用优化配置和景观生态规划两种途径进行相关研究。国内众多学者则以景观格局优化、土地利用结构优化、生态系统敏感性等作为切入点进行了大量研究,并在城市、湿地、干旱区等进行了大量实证研究^[1]。本文在总结以往研究成果的基础上,对区域生态安全格局的概念提出及发展、格局优化的研究内容及方法进行梳理,提出区域生态安全格局优化的思路和未来的发展趋势,以期为区域生态安全格局的优化工作以及区域生态环境安全管理提供理论支撑。

1 区域生态安全与生态安全格局概念

生态安全的概念最早建立于环境安全的概念基础上^[4-5]。环境安全最先由 LESTER^[6] 在 1977 年提出,随后,联合国世界环境与发展委员会(WCED)在 1987 年的《我们共同的未来》报告中使用了“环境安全”一词^[7],在此基础上,国际应用系统分析研究所(IASA)在 1989 年首次提出了生态安全的概念^[8]。

此后,不断有学者对生态安全概念及生态安全格局分析进行补充拓展研究。国内主要有:马克明等^[3]提出区域生态安全格局的概念,并将其定义为针对区域的生态环境问题,在排除干扰的基础上,通过对生物多样性的保护和恢复,以及对生态系统结构和过程完整性的维持,来达到对区域生态环境问题的有效控制和不断改善为目的的区域性空间格局。郭荣中等^[9]进行了长株潭地区耕地生态安全评价研究,发现生态安全整体水平呈波动上升趋势。孙鸿烈等^[10]针对青藏高原生态安全状况,提出了加强青藏高原国家生态安全屏障保护与建设的对策建议。时卉等^[11]对新疆天池景区景观生态安全度的时空演变特征进行分析并探讨了导致格局演变的驱动机制。朱卫红等^[12]对图们江流域的湿地进行生态安全评价与预警研究,结果表明该地区湿地生态系统处于预警状态,急需实施保护。何玲等^[13]对基于生态安全格局的河北省黄骅市土地利用格局优化进行了研究。杨姗姗等^[14]对基于生态红线划分的江西省生态安全格局构建进行了研究。国外学者主要是从景观生态规划和土地利用优化配置两方面对

生态安全格局进行研究,主要有:RESHMIDEVI等^[15]对流域农业区域进行土地适宜性评价研究,并根据研究结果从土地利用格局优化的角度得出了当地有 52% 的土地不适宜种植稻谷的结论。SUN等^[16]在景观设计规划中应用了生态安全策略,取得了良好的成效。SZABO等^[17]利用景观格局指数对生态网络进行优化以达到保护重要物种的目的。SHAYGAN等^[18]通过对 Taleghan 流域的土地利用配置进行优化来达到构建生态安全格局的目的。

生态安全研究虽历经多年的发展,但目前其概念在学术界仍未达成统一,就研究范围而言,主要分为狭义和广义两种观点^[19]。吴柏海等^[20]认为,狭义的生态安全更多关注于生态系统的稳定性与持续性,是指自然或半自然生态系统的安全。于成学^[21]认为,广义的生态安全主要体现整体性,包含自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全,三者组合成一个复合的生态安全系统,由于其涉及范围较广,为大多数研究者所接受。IASA 在 1989 年提出的生态安全定义就是广义的生态安全:生态安全是指人类在生活、健康、安乐、生活保障来源、基本权利、社会秩序、必要资源和适应环境变化的能力等方面不受到威胁的状态。

2 区域生态安全格局优化及其研究内容

2.1 生态安全格局优化

区域生态安全格局优化的理论方法经过 30 多年的发展,从 HABER^[22] 提出的土地利用分异战略和 FORMAN^[23] 提出的最优景观格局思想开始,国外主要针对景观结构、功能对生态过程的相互作用及影响,通过调整各景观类型在空间上和数量上的布局,实现可持续发展。近年来,国内俞孔坚^[24]在 KNAAPEN 提出的最小耗费距离模型基础上,进行修正并运用于生态安全格局优化,之后该模型逐渐被应用到生态用地保护及景观安全格局优化,相比传统的概念模型和数学模型能更好地表达景观格局和生态过程的相互关系。景观生态安全格局优化本质上是调整景观空间结构,增强生态系统的整体性和连通性,关键在于确定并构建维护或控制区域生态过程的空间格局^[25]。

2.2 研究内容

早期学者研究的主要是景观生态规划,20 世纪 90 年代,国内学者提出景观生态规划与设计的基本内容包括:景观生态分类、景观生态评价、景观生态设计、景观生态规划和实施 4 方面的内容^[26]。彭建等^[27]从景观生产力、景观受胁迫度与景观稳定性 3 方面构建了海岸带土地利用可持续性的景观生态评价

体系。王仰麟等^[28]基于景观生态规划与设计对采矿废弃地做了相关研究。

目前对生态安全格局优化的相关理论、技术方法,RESHMIDEVI等^[15]从土地利用优化配置角度对生态安全格局优化作了研究,SZABO等^[17]对景观生态规划通过建立景观测量指标和景观聚集敏感性评价。国内学者康相武等^[29]从区域生态安全格局构建方面对北京顺义区做了相关研究。胡道生等^[31]构建了由生态源、生态廊道、生态斑块和生态楔组成的生态安全格局。蒙吉军等^[2]将最小累积阻力模型(MCR)引入土地利用生态安全格局,对鄂尔多斯土地利用进行优化。为此,本文在总结以往相关研究成果基础上,结合国内外最新研究,提出笔者的看法并对未来发展趋势进行展望,以期将来开展区域生态安全格局优化研究和实践提供理论支撑和方法参考。

区域生态安全格局优化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,通过调查研究取得自然与社会数据,并分析相应的景观类型空间合理的分布格局,调节景观组分在空间和数量上的分布,对景观格局动态分析、功能分化使景观综合价值达到最大化。对于特定目的景观格局优化(如自然保护区的选址等),则应该以单个目标价值最大作为景观空间格局优化设计思想。景观格局优化研究是建立在对不同景观类型、景观的空间格局与

景观过程以及功能之间关系深入理解的基础上,首先找到景观格局对过程的影响方式,建立起数量关系,其次利用景观生态学的原理,优化土地利用,多层次、多角度、多学科进行区域生态安全格局优化。

2.3 优化原则

根据前捷克斯洛伐克的景观生态规划理论体系^[26],景观生态规划与设计应包括7个原则:整体优化原则、异质性原则、多样性原则、景观个性原则、遗留地保护原则、生态关系协调原则、综合性原则。王军等^[31]归纳凝练提出景观生态规划的原则:自然优先原则、持续性原则、针对性原则、综合性原则。黎晓亚等^[32]通过对景观生态规划原则的增补,确定了区域生态安全格局的设计原则:针对性原则、自然性原则、主动性原则、异质性原则、等级性原则。韩文权等^[33]认为景观格局优化的原则应包括:整体生态功能优先原则、多目标原则、结构优化原则、尺度适宜原则、平衡原则。

笔者总结前人研究,认为区域生态安全格局设计的原则应遵循一般生态学的规律,并突出区域与景观格局研究的理论对区域生态安全格局保障特殊的要求,以干扰排除和控制为目标、以生态学理论为基础、以景观生态学格局与过程关系为依据的生态规划模式。这些也是生态安全保障的基本原则,适应区域生态安全格局设计的特点,各原则的具体描述见表1。

表1 区域生态安全格局的优化原则

Tab.1 Optimization principles of regional ecological security pattern

优化原则	具体描述
可持续性	景观生态规划以可持续发展为基础,立足于景观资源的可持续利用和生态环境的改善,保证社会经济的可持续发展
针对性	明确针对区域生态环境问题及其干扰来源,以干扰排除和控制为目标进行规划设计,如为保护生物多样性的自然保护区设计、为农业服务的农业布局调整以及为维持良好环境的城市规划等。因此,具体到某一景观规划时,针对规划目的应选取不同的分析指标,采用不同的评价及规划方法
生态功能完整优先	景观格局优化是使景观结构达到合理,由于景观是由多个相互作用的生态系统组成的,需要把多个生态系统作为一个整体来研究,不必苛求每一个生态系统的最优。因为景观是由多个生态系统组成具有一定结构和功能的整体,是自然与文化的复合载体,这就要求景观生态规划必须从整体出发,对整个景观进行综合分析,使区域景观结构、格局和比例与区域自然特征和经济发展相适应,谋求生态、社会、经济三大效益的协调统一,以达到景观的整体优化利用
等级性	根据生态环境破坏的实际状况,确定区域生态安全建设的层次,有层次地进行规划设计
多目标	景观作为生态、经济和社会功能的载体,不同格局会产生不同生态、社会和经济效益,景观格局优化应将多种功能综合考虑,要达到多目标价值综合最优

3 区域生态安全格局优化方法

3.1 数量优化方法

3.1.1 最优化技术法

最优化方法,也称作运筹学方法,此类方法通过把管理问题抽象成一个模型,通过求解模型来获得问题的最优解。常用的最优化方法包括线性规划模

型、灰色线性规划模型、多参数平衡法、多目标规划等。生态安全格局的数量优化是一个典型的最优化问题,在充分调查研究区景观格局现状、土地资源情况及存在问题的情况下,对各景观类型的数量进行优化,最终达到经济效益、社会效益与生态效益的平衡。最优化方法最早于1984年由加拿大学者^[1]运用到土地利用配置问题中,其后,利用多目标方法进

行土地利用数量配置的研究大量展开,此类方法的一般步骤可概括为:明确土地资源配置目标,构建约束条件,设置优化问题的可控变量和参数,优化模型的求解和方案优选。段建南等^[34]利用多参数平衡法建立了土地利用结构优化模型,对辽西喀左县后坎树的土地利用格局进行了优化。EMILIO^[35]利用线性规划模型构建了土地利用优化模型,曾永年等^[36]利用线性规划模型对海东市的土地利用结构进行了优化。ZANDER等^[37]利用多目标规划方法从可持续利用视角构建了土地利用优化方案,郜允兵等^[38]实现了时序快照统计优化算法,提高了土地利用时空数据的同级效率。赵阳等^[39]利用灰色线性规划理论对北京山区怀柔水库的土地利用进行了结构优化。

最优化技术在土地数量优化方面具有较大优势,然而仍有较多问题需要改进。首先,对生态效益的评价是一个复杂的过程,仅用现有的指标并不能对其准确反映。当前常用的生态约束条件包括生态服务功能值^[40]、森林覆盖率^[41]等,也有学者提出利用能值^[42]、碳排放^[43]、生态足迹^[44]、生态绿当量^[45-46]等作为约束条件,但不同土地利用类型在水土保持、防风固沙、水源涵养等方面的作用仍然难以准确量化,这直接影响了最终生态安全格局优化方案的科学性与合理性。其次,最优化技术中的模型多为静态模型,然而土地利用优化是一个动态的过程,相应的规划目标与规划方案通常受经济、社会、政策等因素的影响而发生变化,因此由最优化模型构建的土地利用优化方案往往适应性不强。另外,最优化模型仅从数量结构上对生态安全格局中各土地利用类型的配置进行优化,而各土地利用类型的空间布局仅通过最优化技术方法不能解决。

3.1.2 系统动力学模型

系统动力学模型在规划复杂社会经济系统的未来行为和相应的长期战略决策方面具有明显优势,将该模型与土地利用系统结合,形成了土地利用结构优化的新方法。系统动力学模型具有能够反映复杂系统结构、功能与动态行为间相互作用关系的特点,它通过结构、功能与历史数据的结合,可以方便灵活地进行决策模拟和多方案比较,具有动态性、仿真模拟性优势,以往的研究结果证明,系统动力学模型可以从宏观角度反映土地利用系统的复杂行为,可以通过构建不同情景,模拟土地利用演化^[44,47-49]。当前系统动力学模型在区域尺度与国家尺度的土地资源决策中已经得到较广泛的使用,如庞永师等^[50]利用系统动力学模型研究了政府、企业、村民、村委等对象的行为因素,对“城中

村”的形成因素进行了分析,构建了“城中村”改造策略;徐磊等^[51]利用系统动力学模型,优化土地利用结构,实现了土地利用减碳增效的目的。ZHAO等^[52]利用系统动力学耦合模型,分析了多尺度土地利用演化的驱动因子。

然而系统动力学模型仍然存在一些不足。模型的建立对研究者知识储备的要求较高,若不能充分了解与把握系统内部的各种反馈机制,模型构建往往难以达到预期效果;在模拟方案的最优设计上,部分参数随意性较大,难以准确度量。同时该模型同样没有解决土地利用空间优化的问题,仅能从数量上确定土地资源的最优配置模式。因此将系统动力学模型与空间优化模型(例如元胞自动机)相结合,是当前研究的热点之一。

3.2 空间优化方法

3.2.1 基于生态学理论的景观格局优化模型

基于生态学理论的景观格局优化模型主要运用景观生态学理论,识别景观格局中的关键组分(包括生态源地、生态廊道与生态节点),通过点、线、面的空间组合,提升区域的生态健康度,保护或恢复其生物多样性,其基本思想是通过调整影响区域生态过程,实现对生态环境的持续改善。从景观结构与功能整体优化的角度,HABER^[22]首先将该理论运用到土地利用优化中,提出了土地利用分异战略(differentiated land use);FORMAN^[23]则提出了不可替代格局和集聚间有离析的整体景观配置模式。针对这一问题,国内学者也展开了相关研究,如岳德鹏等^[53-54]采用累积耗费阻力模型结合GIS与RS技术,对北京西北地区的景观格局进行了优化,以景观流运行顺畅为出发点,研究了北京西北地区景观格局的紧密性以及生态功能的差异性,并构建了包括生态原地、生态廊道、生态节点在内的生态网络,提出了针对该地区的景观格局优化方案。

上述理论的发展经历了由定性到定量,由静态到动态的发展过程,理论不断完善,然而此类模型仍然存在一些问题。首先,研究者借助景观生态理论所构建的生态网络的科学性与合理性往往难以验证,分析过程中多种指标阈值(例如在成本距离分析中的搜索阈值)的设定仍然具有主观随意性,多种优化方案间的优选难以实现,缺乏明确的判定标准。其次,景观格局优化的理论基础仍然不够完善,格局与过程间相互影响的机理仍然不够明确,目前尚不能完全满足对景观格局优化进行指导的要求。

3.2.2 元胞自动机 CA

元胞自动机是一种时间、空间都离散的动力学模型,它通过一定的规则控制局部元胞的演化状态,

经自下而上的分布式模拟过程,获得全局的演化规律。由于元胞自动机中每种元胞在某一时刻的状态都是明确且离散的有限个,元胞所在的空间也特别容易具象化成为土地利用格局,因此在土地利用模拟与规划方面具有独特的优势。TOBLER^[55]最早认识到元胞自动机的这一优势,并于 1970 年将其应用到底特律城区的扩张模拟中。近年来众多学者利用元胞自动机模型对土地利用格局进行了优化,例如刘小平等^[56]利用生态位元胞自动机研究了不同土地利用政策下城市土地利用发展情景,对土地可持续利用进行了规划。刘耀彬等^[57]利用元胞自动机模型,对环鄱阳湖区分区的土地利用情景进行了模拟;张利等^[58]利用元胞自动机研究了基于不同种类生态安全的土地利用情景模拟。

元胞自动机本身具有的特点使其在离散时间的空间动态模拟方面具有先天优势,然而该模型仍存在一些可改进的方面。首先,元胞自动机的模拟方

式为自上而下,通过局部规则推测整个区域的演化,然而土地利用演化作为一个复杂过程,既受到小尺度范围规则的影响也受到大尺度政策的影响,因此仅从 CA 邻域入手判断其土地利用类型的演化难免太过片面。其次,不同的邻域大小与形状将产生不同的模拟结果,当前元胞自动机的邻域定义仍具有较大的任意性,较流行的邻域定义方式一般为摩尔邻域、冯诺依曼邻域或扩展的摩尔邻域,如图 1 所示。然而这 3 种邻域定义手段均不能反映土地利用的空间特征。最后,元胞自动机的运行依靠一定的规则进行,而模型本身在规则定义部分的理论较为薄弱,难以满足土地利用相关研究的需要,因此众多学者借助其他方法,试图更科学地定义转换规则,例如黎夏等^[59]利用神经网络与元胞自动机结合,构建了新的转换规则定义方法,韦春竹等^[60]利用遗传神经网络与元胞自动机整合,构建了土地利用模拟分析模型。

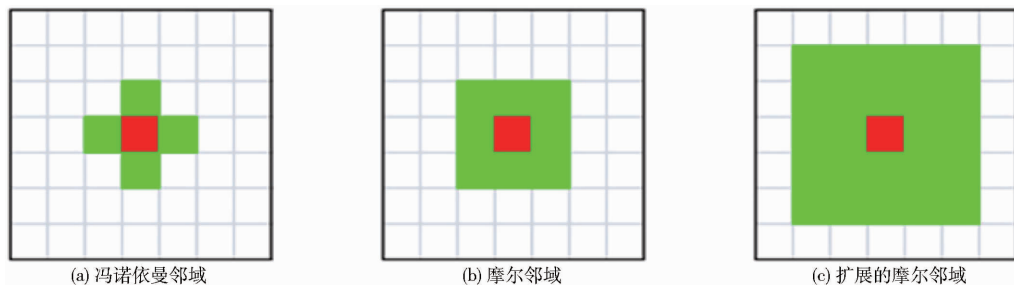


图 1 元胞自动机邻域示意图

Fig. 1 Neighborhood diagrams of CA

3.2.3 群智能算法

群智能算法是一种基于概率的搜索算法,其基本思想是通过模拟自然界生物群体的行为来构造算法,相较于传统的演化算法与梯度应用算法,它的优点包括:自组织性良好,采用分布式控制来实现个体与个体间和个体与环境间的交互作用;通过个体对环境的相互作用调整个体行为,个体与个体间不发生直接作用,系统的可扩展性好;不需要集中控制,不会因为个别个体的故障影响对全局问题的求解;模型的规则简单,分布式计算可有效缩短系统运行时间。该算法具有的一系列优点使其在短期内便得到了国际演化计算研究领域的认可,并在计算机、最优化问题求解、人工智能等方面获得了广泛应用。土地生态安全格局优化问题,本质上是一个最优化问题求解的过程,众多学者利用群智能算法对这一问题进行了研究。例如 LIU 等^[61]利用系统动力学模型、粒子群优化算法和遗传算法对广东省番禺市的城市用地进行了优化。LIU 等^[62]利用优化后的蚁群算法对阜阳市高桥镇的土地利用格局进行了优化。郭小燕等^[63]利用混合蛙跳算法,对兰州市的土

地利用格局进行了优化,并证明模型具有较强的全局优化能力以及较快的收敛速度。

虽然群智能算法具有鲁棒性强、适用范围广等优势,但仍存在一些需要改进的缺陷,例如收敛速度难以控制、优化结果有时不够理想等,众多学者针对这些问题进行了大量研究,但仍有一些问题亟待解决。

3.3 综合优化算法

综合优化算法通过不同模型间的有机结合,综合多种模型的优点,往往能同时考虑到数量结构上的优化与空间布局的优化,目前以 CLUS-S 模型和集成模型最具有代表性。

3.3.1 CLUE-S 模型

土地利用变化及效应模型(Conversion of land use and its effects model, CLUE Model)最初由荷兰瓦格宁根大学 VELDKAMP 等^[64]提出,CLUE-S 模型(Conversion of land use and its effects at small region extent)是由 CLUE 模型改进而来,它更加适合在较小尺度上模拟土地利用变化及其环境效应。CLUE-S 模型具有综合性、开放性和空间性的特

点,其模型结构如图2所示。它从系统论的角度出发,综合考虑社会、经济及生态驱动因子,采用多重建模技术从不同尺度动态研究土地利用变化。CLUE-S模型的本质是多种模型的有机整合,寻找可以综合描述社会、经济和生态等因素的综合方法。CLUE-S模型在土地利用类型演变驱动力分析、土地利用转化系数设置、土地需求数量估算等方面具有很好的开放性,可以整合多种情景分析模型,具有较好的兼容性。此外该模型还可以通过土地利用分布概率图 etc 空间数据对不同用地类型进行空间上的分配,具有鲜明的空间特性,这使得遥感、地理信息系统等空间技术可通过 CLUE-S 模型,直接用于土地利用的模拟与优化。梁友嘉等^[65]利用 SD 与 CLUE-S 模型对张掖市的土地利用情景进行了分析。WU 等^[66]将系统动力学模型与 CLUE-S 模型结合,分析了土地利用变化对生态系统服务价值的影响。

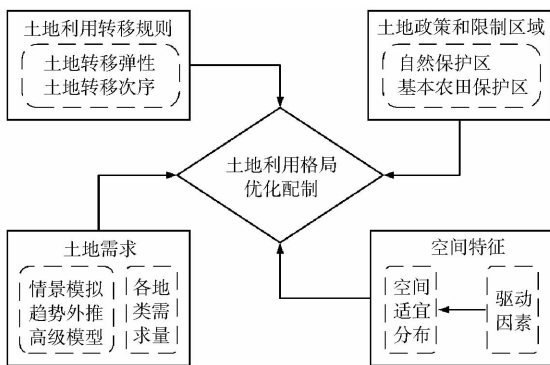


图2 CLUE-S模型结构图

Fig. 2 Structure diagram of CLUE-S model

尽管 CLUE-S 模型具有良好的扩展性与兼容性,能从时间与空间上综合多种因素对土地利用演化进行多尺度模拟,但是仍有一些需要改进的地方。首先,区域不同土地利用的需求面积作为外部输入参数进入到模拟过程中,其数量的科学性与准确性难以把握。其次,该模型是根据先验知识对土地利用的演化进行预测,其模拟精度受因子选择的影响,而居民的文化偏好、政府政策等人文因子往往难以量化,因此模型模拟的准确性难免受其影响。

3.3.2 集成模型

不同的模型在土地生态安全评价方面均具有其局限性,因此部分学者试图将多种模型结合,构建出基于多种模型的集成模型,弥补单一模型在土地利用模拟方面的不足。众多学者利用 Markov 模型与 CA 模型集成的 CA-Markov 模型开展了土地利用模拟研究,取得了大量有意义的研究成果^[67-70]。尹

昌应等^[71]利用 Dyna-CLUE 集成模型,研究了情景约束下的城市土地利用空间模拟。YANG 等^[72]将景观格局指数与 CA-Markov 模型结合,对北京市昌平区的景观格局演化进行了模拟。WANG 等^[73]将 ANN-CA 模型与景观格局理论集成,构建了土地利用演化模型并取得了较高的模拟精度。

不同的模型由于在建模思想上的差异,使得它们在解决某些特定问题时具有明显优势,而将多种模型有机结合,充分发挥每个模型的优势,是解决土地生态安全格局优化的有效途径。当前云计算、分布式计算、GIS 技术、现代数学方法的发展,使得复杂模型的求解成为可能,集成模型计算任务得以有效处理。因此在当前缺乏成熟、完善理论指导的情况下,有机综合多种模型是区域土地生态安全格局优化研究的有效途径。

4 结论与展望

区域生态安全格局优化研究经历了定性到定量、静态到动态、刚性条件约束到弹性条件最优、数量配置到空间演变过程。研究方法逐步趋于多种方法集成化、先进化。研究重点由关注数量结构的生态优化发展到基于过程的空间格局优化。研究目的逐渐从物种保护等转移到整个区域的生态可持续发展。未来的研究重点主要包括:

(1)在跨学科综合研究的基础上,如何实现多模型、多方法、多技术的集成。模型、方法、技术的集成既考虑空间特征又考虑非空间特征,如何相互弥补不足,对区域生态安全格局更加客观地、实用地、可靠地进行分析、优化是未来的研究重点。

(2)区域生态安全格局的生态安全标准化问题仍然是研究难点。对于生态安全格局优化研究,如何针对研究区在深入理解景观格局、过程与功能相互联系的基础上,确定自然生态过程的一系列阈值和安全层次需进一步研究。基于动态的生态过程如何构建过程模型、如何量化地将时空动态以及发展趋势考虑到生态安全格局优化的研究中是未来的研究热点也是难点。

(3)区域生态安全格局优化设计的实施将遇到很多现实的问题。如何提升公众的参与力度,使公众关注点由短期社会经济效益转向长期生态环境效益;如何协调不同组织水平利益相关者之间的利益冲突;如何通过先进的管理手段使区域生态安全格局的优化构建更加人性化、操作性更强是未来的研究关键与重点。

参 考 文 献

- 1 刘洋, 蒙古军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展[J], 生态学报, 2010, 30(24):6890-6898.
LIU Yang, MENG Jijun, ZHU Likai. Progress in the research on regional ecological security pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24):6890-6898. (in Chinese)
- 2 蒙古军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2):590-596.
MENG Jijun, YAN Qun, XIANG Yunyun. The optimization of ecological security pattern based on land use and assessment of schemes in Ordos [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2):590-596. (in Chinese)
- 3 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[J]. 生态学报, 2004, 24(4):761-768.
MA Keming, FU Bojie, LI Xiaoya, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): the concept and theoretical basis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4):761-768. (in Chinese)
- 4 ROBERT C, BRYAN G Norton, BENJAMIN D Haskell. Ecosystem health: new goals for environment management [M]. Washington DC: Island Press, 1992.
- 5 WHITFORD W G, RAPPORT D J, DESOYZA A G. Using resistance and resilience measurements for fitness tests in ecosystem health[J]. Journal of Environmental Management, 1995, 57(3):21-29.
- 6 LESTER R Brown. Redefining national security[M]. Washington DC: World Watch Institute, 1977:40-41.
- 7 WCED. Our common future[M]. Changchun: Jilin People's Press, 1997:3-11.
- 8 WANG Genxu, CHENG Guodong, QIAN Ju. Several problems in ecological security assessment research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9):1551-1555.
- 9 郭荣中, 杨敏华, 申海建. 长株潭地区耕地生态安全评价研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10):193-201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.025.
- 10 GUO Rongzhong, YANG Minhua, SHEN Haijian. Evaluation for ecological security of cultivated land in Chang-Zhu-Tan region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):193-201. (in Chinese)
- 11 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1):3-12.
SUN Honglie, ZHENG Du, YAO Tandong, et al. Protection and Construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1):3-12. (in Chinese)
- 12 时卉, 杨兆萍, 韩芳, 等. 新疆天池景区生态安全度时空分异特征与驱动机制[J]. 地理科学进展, 2013, 32(3):475-485.
SHI Hui, YANG Zhaoping, HAN Fang, et al. Characteristics of temporal-spatial differences in landscape ecological security and the driving mechanism in Tianchi scenic zone of Xinjiang [J]. Progress in Geography, 2013, 32(3):475-485. (in Chinese)
- 13 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于3S技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6):1379-1390.
ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al. Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6):1379-1390. (in Chinese)
- 13 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):275-284.
HE Ling, JIA Qijian, LI Chao, et al. Land use pattern simulation based on ecosystem service value and ecological security pattern [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3):275-284. (in Chinese)
- 14 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1):250-258.
YANG Shanshan, ZOU Changxin, SHEN Weishou, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: a case study of Jiangxi Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1):250-258. (in Chinese)
- 15 RESHMIDEVI T V, ELDHO T I, JANA R. A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds [J]. Agricultural Systems, 2009, 101(1-2):101-109.
- 16 SUN K Z. Research on the ecological strategies in landscape design and planning [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 71-78:1805-1808.
- 17 SZABO S, CSORBA P, SZILASSI P. Tools for landscape ecological planning-scale, and aggregation sensitivity of the contagion type landscape metric indices [J]. Carpathian Journal of Earth & Environmental Sciences, 2012, 7(3):127-136.
- 18 SHAYGAN M, ALIMOHAMMADI A, MANSOURIAN A, et al. Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using NSGA-II [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(3):906-916.
- 19 欧定华, 夏建国, 张莉, 等. 区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1):163-173.
OU Dinghua, XIA Jianguo, ZHANG Li, et al. Research progress on regional ecological security pattern planning and discussion of planning technique flow [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1):163-173. (in Chinese)
- 20 吴柏海, 余琦竣, 林浩然. 生态安全的基本概念和理论体系 [J]. 林业经济, 2016, 38(7):19-26.
WU Bohai, YU Qiyun, LIN Haoran. Basic concepts and theoretical system of eco-security [J]. Forestry Economics, 2016, 38(7):19-26. (in Chinese)
- 21 于成学. 基于“3S”技术的生态安全评价研究进展 [J]. 华东经济管理, 2013, 127(4):149-154.

- YU Chengxue. Review on the assessment for ecological security based on “3S” technology [J]. East China Economic Management, 2013, 127(4): 149–154. (in Chinese)
- 22 HABER W. Using landscape ecology in planning and management [M] // Using Landscape: An Ecological Perspective, New York: Springer-Verlag, 1990: 217–232.
- 23 FORMAN R. Land mosaics: the ecology of landscape and regions [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 24 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型[J]. 地理学报, 1998, 53(增刊1): 11–20.
YU Kongjian. Ecologically strategic points in landscape and surface model [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(Supp. 1): 11–20. (in Chinese)
- 25 郑新奇, 付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 26 贾宝全, 杨洁泉. 景观生态规划: 概念、内容、原则与模型[J]. 干旱区研究, 2000, 17(2): 70–77.
JIA Baoquan, YANG Jiequan. A review of landscape planning [J]. Arid Zone Research, 2000, 17(2): 70–77. (in Chinese)
- 27 彭建, 王仰麟, 刘松, 等. 海岸带土地持续利用景观生态评价[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 363–371.
PENG Jian, WANG Yanglin, LIU Song, et al. Landscape ecological evaluation for sustainable coastal land use [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(3): 363–371. (in Chinese)
- 28 王仰麟, 韩荡. 矿区废弃地复垦的景观生态规划与设计[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 454–462.
WANG Yanglin, HAN Dang. The landscape ecological planning and design of depleted mined land [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(5): 454–462. (in Chinese)
- 29 康相武, 刘雪华. 北京顺义区域生态安全格局构建[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(10): 71–78.
KANG Xiangwu, LIU Xuehua. Construction of regional ecological security pattern for Shunyi District Beijing [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(10): 71–78. (in Chinese)
- 30 胡道生, 宗跃光, 许文雯. 城市新区景观生态安全格局构建-基于生态网络分析的研究[J]. 城市发展研究, 2011, 18(6): 37–43.
HU Daosheng, ZONG Yueguang, XU Wenwen. Research on the construction of landscape ecological security pattern in the new Urban region development based on ecology network [J]. Analysis Urban Development Studies, 2011, 18(6): 37–43. (in Chinese)
- 31 王军, 傅伯杰, 陈利顶. 景观生态规划的原理和方法[J]. 资源科学, 1999, 21(2): 71–76.
WANG Jun, FU Bojie, CHEN Liding. The principle and methodology of landscape eco-planning [J]. Resources Science, 1999, 21(2): 71–76. (in Chinese)
- 32 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 等. 区域生态安全格局: 设计原则与方法[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1056–1062.
LI Xiaoya, MA Keming, FU Bojie, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): designing principles and method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 1056–1062. (in Chinese)
- 33 韩文权, 常禹, 胡远满. 景观格局优化研究进展[J]. 生态学报, 2005, 24(2): 1487–1492.
HAN Wenquan, CHANG Yu, HU Yuanman. Research advance in landscape pattern optimization [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(2): 1487–1492. (in Chinese)
- 34 段建南, 唐耀先. 建立土地利用结构模型的研究——以辽西喀左县后坟村为例[J]. 自然资源, 1989(1): 61–69.
- 35 EMILIO C. Integration of linear programming and GIS for land-use modelling [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1993, 7(1): 71–83.
- 36 曾永年, 王慧敏. 以低碳为目标的海东市土地利用结构优化方案[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 2010–2017.
ZENG Yongnian, WANG Huimin. Optimization of land use structure for low-carbon targets in Haidong City, Qinghai Plateau [J]. Resources Science, 2015, 37(10): 2010–2017. (in Chinese)
- 37 ZANDER P, KACHELE H. Modelling multiple objectives of land use for sustainable development [J]. Agricultural Systems, 1999, 59(3): 311–325.
- 38 部允兵, 张翼鹏, 高秉博, 等. 长时序海量土地利用时空数据统计优化方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 290–296. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.046.
GAO Yunbing, ZHANG Yipeng, GAO Bingbo, et al. Optimization method of massive spatio-temporal data for long time series land use [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 290–296. (in Chinese)
- 39 赵阳, 张艺, 涂志华, 等. 基于生态服务价值的多目标水源地土地利用结构优化[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 232–238.
ZHAO Yang, ZHANG Yi, TU Zhihua, et al. Multi-objective optimization of land use structures for water resources area based on eco-service value [J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 232–238. (in Chinese)
- 40 李虹, 唐秀美, 赵春江, 等. 基于力矩平衡点法的北京市生态系统服务价值时空分布[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 151–156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151121&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.021.
LI Hong, TANG Xiumei, ZHAO Chunjiang, et al. Temporal and spatial distribution of ecosystem service value in Beijing based on torque balance point method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 151–156. (in Chinese)
- 41 秦伟, 朱清科, 左长清, 等. 大规模植被重建背景下的黄土高原流域土地利用时空演变[J]. 水土保持学报, 2014,

- 28(5):43-50.
- QIN Wei, ZHU Qingke, ZUO Changqing, et al. Spatio-temporal changes of land use/cover driven by large-scale vegetation restoration on watershed in the loess plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):43-50. (in Chinese)
- 42 黄永斌,董锁成,李泽红.基于能值分析的资源型城市新陈代谢水平评价——以石嘴山市为例[J].*资源科学*, 2015, 37(8):1621-1628.
- HUANG Yongbin, DONG Suocheng, LI Zehong. Urban metabolism evaluation of resource-based cities using emergy synthesis: a case study in Shizuishan City[J]. *Resources Science*, 2015, 37(8):1621-1628. (in Chinese)
- 43 柴立龙,马承伟.玻璃温室地源热泵供暖性能与碳排放分析[J/OL].*农业机械学报*, 2012, 43(1):185-191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120133&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.033.
- CHAI Lilong, MA Chengwei. Performance and carbon emission analysis on glass-covering greenhouse heating with ground source heat pump technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1):185-191. (in Chinese)
- 44 吴孟孟,贾培宏,潘少明,等.连云港海岸带土地利用变化生态效应量化研究[J].*海洋通报*, 2015, 34(5):530-539.
- WU Mengmeng, JIA Peihong, PAN Shaoming, et al. Quantitative research on the ecological effect of land use change of the coastal zone in Lianyungang[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(5):530-539. (in Chinese)
- 45 胡蒙蒙,张军民,徐丽萍,等.基于生态绿当量的玛纳斯河流域土地利用生态效益研究[J].*干旱区研究*, 2016, 33(5):996-1002.
- HU Mengmeng, ZHANG Junmin, XU Liping, et al. Eco-efficiency of land use based on ecological green equivalent in the Manas River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(5):996-1002. (in Chinese)
- 46 唐秀美,郝星耀,刘玉,等.生态系统服务价值驱动因素与空间异质性分析[J/OL].*农业机械学报*, 2016, 47(5):336-342. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.046.
- TANG Xiumei, HAO Xingyao, LIU Yu, et al. Driving factors and spatial heterogeneity analysis of ecosystem services value[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):336-342. (in Chinese)
- 47 SHEN Q, CHEN Q, TANG B S, et al. A system dynamics model for the sustainable land use planning and development[J]. *Habitat International*, 2009, 33(1):15-25.
- 48 HE C, PAN Y, SHI P, et al. Developing land use scenario dynamics model by the integration of system dynamics model and cellular automata model[C]//*Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, 4:2647-2650.
- 49 李秀霞,徐龙,江恩赐.基于系统动力学的土地利用结构多目标优化[J].*农业工程学报*, 2013, 29(16):247-254.
- LI Xiuxia, XU Long, JIANG Enci. Multi-objective optimization of land use structure in western Jilin province based on system dynamics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(16):247-254. (in Chinese)
- 50 庞永师,蒋雨含,刘景矿,等.基于系统动力学的“城中村”改造策略[J].*系统工程*, 2016(1):54-63.
- PANG Yongshi, JIANG Yuhan, LIU Jingkuang, et al. Urban village reconstruction strategy based on system dynamics[J]. *Systems Engineering*, 2016(1):54-63. (in Chinese)
- 51 徐磊,董捷,张安录.湖北省土地利用减碳增效系统仿真及结构优化研究[J].*长江流域资源与环境*, 2016, 25(10):1528-1536.
- XU Lei, DONG Jie, ZHANG Anlu. Study on simulation and structure optimization of land use carbon reduction and efficiency improvement system of Hubei province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(10):1528-1536. (in Chinese)
- 52 ZHAO J S, YUAN L, ZHANG M. A study of the system dynamics coupling model of the driving factors for multi-scale land use change[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6):1-13.
- 53 岳德鹏,王计平,刘永兵,等.北京西北地区景观格局优化[J].*地理学报*, 2009, 19(3):1223-1231.
- YUE Depeng, WANG Jiping, LIU Yongbing, et al. Landscape pattern optimization based on RS and GIS in Northwest of Beijing[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(3):1223-1231. (in Chinese)
- 54 李谦,戴靓,朱青,等.基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究[J].*地理科学*, 2014, 34(6):733-739.
- LI Qian, DAI Liang, ZHU Qing, et al. Ecological connectivity changes and its pattern optimization during land consolidation based on minimal accumulative resistance model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(6):733-739. (in Chinese)
- 55 TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970, 46(Supp.1):234-240.
- 56 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[J].*生态学报*, 2007, 27(6):2391-2402.
- LIU Xiaoping, LI Xia, PENG Xiaojuan. Niche based cellular automata for sustainable land use planning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6):2391-2402. (in Chinese)
- 57 刘耀彬,戴璐,董玥莹.环鄱阳湖区分区土地利用景观格局变化模拟研究[J].*长江流域资源与环境*, 2015, 24(10):1762-1770.
- LIU Yaobin, DAI Lu, DONG Yueying. Simulation of landscape pattern change of Poyang lake area patition[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(10):1762-1770. (in Chinese)

- 58 张利, 周亚鹏, 门明新, 等. 基于不同种类生态安全的土地利用情景模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):308-316.
ZHANG Li, ZHOU Yapeng, MEN Mingxin, et al. Land use scenario simulation with different types of ecological security[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5):308-316. (in Chinese)
- 59 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究, 2005, 24(1):19-27.
LI Xia, YE Jiān. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks[J]. Geographical Research, 2005, 24(1):19-27. (in Chinese)
- 60 韦春竹, 郑文锋, 孟庆岩, 等. 基于元胞自动机的遗传神经网络在土地利用变化模拟分析中的应用[J]. 测绘工程, 2014, 23(1):45-49.
WEI Chunzhu, ZHENG Wenfeng, MENG Qingyan, et al. Genetic neural network based on cellular automata applied to the simulation analysis of land use change[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2014, 23(1):45-49. (in Chinese)
- 61 LIU X, OU J, LI X, et al. Combining system dynamics and hybrid particle swarm optimization for land use allocation[J]. Ecological Modelling, 2013, 257(2):11-24.
- 62 LIU Y L, TANG D W, KONG X S, et al. A land-use spatial allocation model based on modified ant colony optimization[J]. International Journal of Environmental Research, 2014, 8(4):1115-1126.
- 63 郭小燕, 刘学录, 王联国. 基于混合蛙跳算法的土地利用格局优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24):281-288.
GUO Xiaoyan, LIU Xuelu, WANG Lianguo. Land use pattern optimization based on shuffled frog leaping algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24):281-288. (in Chinese)
- 64 VELDKAMP A, FRESCO L O. CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects [J]. Ecological Modelling, 1996, 85(2):253-270.
- 65 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于SD和CLUE-S模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J]. 地理研究, 2011, 30(3):564-576.
LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei. Land use scenario analyses based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: a case study of Ganzhou district of Zhangye city [J]. Geographical Research, 2011, 30(3):564-576. (in Chinese)
- 66 WU M, REN X Y, YUE C, et al. A coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value: a case study in Baoshan District, Shanghai, China[J]. Environmental Management, 2015, 56(2):1-18.
- 67 井云清, 张飞, 张月. 基于CA-Markov模型的艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化及预测[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11):3649-3658.
JING Yunqing, ZHANG Fei, ZHANG Yue. Change and prediction of the land use/cover in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve based on CA-Markov model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11):3649-3658. (in Chinese)
- 68 陈爱玲, 都金康. 基于CA-Markov模型的秦淮河流域土地覆盖格局模拟预测[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2):184-189.
CHEN Ailing, DU Jinkang. Simulation and forecast of land cover pattern in Qinhuai River Basin based on the CA-Markov model [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(2):184-189. (in Chinese)
- 69 何丹, 周璟, 高伟, 等. 基于CA-Markov模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2014, 50(6):1095-1105.
HE Dan, ZHOU Jing, GAO Wei, et al. An integrated CA-Markov model for dynamic simulation of land use change in Lake Dianchi Watershed [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6):1095-1105. (in Chinese)
- 70 赵冬玲, 杜萌, 杨建宇, 等. 基于CA-Markov模型的土地利用演化模拟预测研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3):278-285. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160339&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.039.
ZHAO Dongling, DU Meng, YANG Jianyu, et al. Simulation and forecast study of land use change based on CA-Markov model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):278-285. (in Chinese)
- 71 尹昌应, 石忆邵. 规划情景约束下的城市土地利用空间格局模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2):66-71.
YIN Changying, SHI Yizhao. Modeling urban land use pattern under the constraints of land planning scenarios [J]. Geography and Geo-information Science, 2014, 30(2):66-71. (in Chinese)
- 72 YANG Xin, ZHENG Xinqi, CHEN Rui. A land use change model: integrating landscape pattern indexes and Markov-CA [J]. Ecological Modelling, 2014, 283(7):1-7.
- 73 WANG Xin, ZHAO Yu, CHEN Rui. Simulating land use change by integrating ANN-CA model and landscape pattern indices [J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2015, 7(3):1-15.