

DOI: 10.5846/stxb201612082530

陈永林, 谢炳庚, 钟典, 吴亮清, 张爱明. 基于微粒群-马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟——以长株潭城市群为例. 生态学报, 2018, 38(1): 55-64.

Chen Y L, Xie B G, Zhong D, Wu L Q, Zhang A M. Predictive simulation of ecological space based on a particle swarm optimization-Markov composite model: A case study for Chang-Zhu-Tan urban agglomerations. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 55-64.

基于微粒群-马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟 ——以长株潭城市群为例

陈永林^{1,2}, 谢炳庚^{1,*}, 钟典¹, 吴亮清², 张爱明²

1 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081

2 赣南师范大学地理与规划学院, 赣州 341000

摘要:生态空间具有重要的生态功能,对生态空间进行科学预测模拟可为保护国土空间生态安全提供决策依据。利用 ArcGIS 及 MATLAB 软件,在生态空间风险评价的基础上构建了微粒群-马尔科夫复合模型,并以长株潭城市群为研究区,基于 2013 年土地利用现状数据,对 2020 年的生态空间进行了预测模拟,最后在此基础上提出了生态空间重构的基本思路。结果表明:1)微粒群-马尔科夫复合模型(PSO-Markov)构建的基本步骤为:第一步:粒子的选择与设计,以 2000 m×2000 m 的正方形单元作为基本粒子。第二步:粒子的初始化设定,根据生态空间风险由低到高的原则进行选择。第三步:适应度函数的建立,用生态空间的风险值来确定生态空间的空间格局。第四步:空间位置的更新,根据自身的历史最优值及粒子群的全局最优值进行速度和位置更新。2)微粒群-马尔科夫复合模型(PSO-Markov)是一种土地利用格局预测的新途径,生态空间的数量规模可以通过改进后的马尔科夫模型进行预测,生态空间的格局可以通过微粒群模型进行预测。3)微粒群-马尔科夫复合模型具有 4 个特点:第一、数量预测较为合理。第二、搜索范围大、较好地考虑到局部对全局的影响。第三、受问题维数变化影响小,在求解多目标问题时具有明显优势。第四、收敛时间短、运算速度快、易于实现。4)2020 年,长株潭城市群的生态空间总体数量减少,其中林地和未利用地面积变化最明显,空间变化主要集中分布在西南部地区。生态空间总面积减小的主要原因是建设用地的扩张。因此,要控制城市群的人口密度,优化城市群生产—生活—生态的数量结构及空间布局,尤其要合理规划与利用城市建设用地,充分发挥水体与未利用地的生态价值,重点保护好生态源地、廊道及关键节点,构建结构合理、功能齐全的生态网络系统,提高系统的生态服务价值功能,要在规划的指导下合理调整城市群的城乡局部空间结构,保护生态环境,提高生境质量和景观多样性。这是今后一段时期面临的主要任务。

关键词:生态空间;预测;微粒群-马尔科夫复合模型;长株潭城市群

Predictive simulation of ecological space based on a particle swarm optimization-Markov composite model: A case study for Chang-Zhu-Tan urban agglomerations

CHEN Yonglin^{1,2}, XIE Binggeng^{1,*}, ZHONG Dian¹, WU Liangqing², ZHANG Aiming²

1 Department of resources and environment, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2 Department of geography and planning, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China

Abstract: The distribution of ecological space has important functions, and its scientific prediction can provide a basis for making decisions regarding protecting the ecological security of a national landscape. A particle swarm optimization-Markov (PSO-Markov) composite model based on a risk assessment of ecological space was conducted using ArcGIS and MATLAB.

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502406);教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(14JJD720016);江西省社科规划项目(15SH10);江西省高校人文社会科学项目(SH1401);江西省教育厅科技项目(GJJ151018);江西省教育厅教改项目(JXJG-15-14-9)

收稿日期:2016-12-08; 网络出版日期:2017-09-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xbyb@sina.com

The ecological space of the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration in 2020 was predicted based on land-use data for 2013, and the resulting particle swarm was used to reconstruct the ecological space. The PSO-Markov composite model was established according to the following steps: First, a particle swarm was selected and designed, and a 2000 m × 2000 m square unit was selected as the basic particle. Second, the particle was initialized from low to high risk based on the principle of ecological space. Third, a fitness function was established, and the value of ecological space risk was used to determine the spatial pattern of ecological space. Finally, the spatial position and speed of a particle swarm were updated according to the history of optimal value and the global optimal value of the particle swarm. The PSO-Markov composite model is a relatively new method for land-use pattern prediction. The quantitative scale of ecological space is predictable with an improved Markov model, and the pattern of ecological space is predictable with a PSO model. Thus, the PSO-Markov composite model has the following features compared with other models: First, this model can yield more reasonable quantitative predictions. Second, it utilizes a large search area and thoroughly considers local and global influence. Third, it is less influenced by the problem of dimension change, and it has a significant advantage regarding the solution of multi-objective problems. Finally, with short convergence time and high arithmetic speed, it is easy to realize. The ecological space of the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration was predicted to decrease by 2020 with woodland and unused land changing the most dramatically and spatial variation primarily concentrating in the southwest region. The decrease in total ecological space area was shown to be primarily due to the expansion of land development. Thus, we must control the population density of urban agglomerations and optimize the structure and spatial distribution of agriculture/industry, human settlements, and the ecosystem in the urban agglomeration. In particular, we must reasonably plan and utilize urban developed land, as well as make full use of the ecological value of water bodies and undeveloped land, with emphasis on the protection of ecological resources, ecological corridors, and key ecological areas so as to establish a rationally structured, functioning ecological net system and to improve the ecological services of the ecosystem. Urban and rural spatial structure must be regulated rationally under the guidance of city planning. Moreover, measures should be carried out to protect and improve the quality of the environment and to enhance landscape diversity. These are our priorities for the future.

Key Words: ecological space; prediction; particle swarm optimization (PSO)-Markov composite model; Chang-Zhu-Tan urban agglomeration

随着城镇化进程的不断深入,城市人口高度密集,经济活动强度日益增大,资源紧缺及环境污染问题严重威胁着人类的生存发展,生产、生活及生态空间(“三生”空间)利用矛盾十分突出。生态空间指具有重要生态功能、以提供生态产品和生态服务为主的区域,在保障国家或区域生态安全中发挥重要作用^[1]。生态空间的诸多学术问题已成为学者们关注的重点^[2]。现有的研究主要集中在生态空间的现状及演化特征分析^[3-4]、空间重构与优化^[5-8]、空间保护与利用^[9]等,但对生态空间的预测模拟研究较为鲜见。生态空间作为一种重要的土地利用空间形态,在自然要素和人类活动的共同作用下将发生深刻的变化,未来生态空间的数量规模及空间格局将直接影响到国土空间的生态安全。因此,从国土空间生态安全的角度出发,构建一个预测模型科学合理地对未来某一时期生态空间的数量及格局进行预测模拟,可为保护国土空间生态安全提供决策依据。城市群中的生产、生活及生态空间的矛盾最为突出,应该作为研究的重点区域。

土地利用格局预测模拟是 LUC 研究的核心内容之一^[10]。国内外对土地利用格局模拟的模型构建方法不一^[11-12],常见的模型主要有元胞自动机(CA)模型^[13-15]、CLUE-S 模型^[16-18]、神经网络模型^[19]、多情景模型^[20-21]等,有的学者还运用多种模型建立复合模型^[22-23]。这些方法都有各自的不足:元胞自动机(CA)模型过分强调局部元胞之间的相互作用,而忽视了宏观因素对过程的影响,模拟的结果与现实事件存在一定的差距;CLUE-S 模型只考虑经济效益的最大化,而对自然环境效应及政策因素考虑不多;神经网络模型的收敛速度慢,易陷入局部极小,网络结构难以确定;多情景模型考虑人文因素过多。因此,找出一种快速高效、搜索范

围大且易于实现的模型来科学预测土地利用格局变化成为亟待解决的科学问题。微粒群(PSO)模型是一种典型的群集智能算法,最早由美国社会心理学家 Kennedy 博士和电气工程师 Eberhart 博士等提出^[24-25],目前在电力系统优化、工业制造、交通运输优化、资源优化配置等领域得到广泛应用,在土地利用空间预测中也偶有涉及,如在商场选址^[26]、土地空间布局优化^[27-28]、土地利用分区^[29]、城镇土地利用扩张^[30]等方面,但将这一模型与马尔科夫模型复合,并对土地利用空间进行预测模拟的研究较为鲜见。

本研究在压力-状态-响应(P-S-R)机理下构建生态空间风险评价体系,并将各粒子的风险等级值作为适应度函数,综合运用改进的微粒群—马尔科夫(PSO-Markov)复合模型对长株潭城市群 2020 年生态空间的数量及格局进行预测,试图找到一种快速高效预测生态空间的新方法,为相关研究提供方法借鉴,同时也为城市群生态空间重构的战略决策提供参考依据。

1 研究区概况及数据说明

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省东北部,地理位置为 110°49′—114°29′E,26°05′—30°13′N(图 1),是我国京广经济带、泛珠三角经济区、长江经济带的接合部,区位和交通条件优越。城市群由长沙、株洲、湘潭三市以及周边的岳阳、益阳、常德、娄底和衡阳五市构成,总面积约为 9.6 万 km²,约占全省总面积的 45.68%,是湖南发展的核心增长极,也是城市群生态空间的核心区。

1.2 数据说明

为使生态空间探讨有具体的载体与依托,参考相关学者的研究^[31],本研究界定一级土地利用类型中的林地、草地、水体及未利用地为生态空间,所采用的土地利用数据均来源于中国科学院完成的全国土地利用/覆被变化数据库成果,DEM 数据(分辨率为 90 m)来源于地理空间数据云网(<http://www.gscloud.cn/>)。生态空间预测的基年为 2013 年,目标年为 2020 年。

2 生态空间风险评价体系的构建

生态空间风险是指生态空间转变为其他用地类型的风险。生态空间的变化与空间的风险值密切相关。预测生态空间的变化必须首先评价空间的风险等级。以 2000 m×2000 m 的正方形网格为评价单元,采用压力-状态-响应(P-S-R)机理框架构建生态空间风险评价体系,采用层次分析法(AHP)和熵值法确定指标的权重,咨询相关专家并参考相关研究^[32],确定风险等级阈值,见表 1。

生态空间风险指标体系建立以后,根据不同风险评价指标的要求,得到每个评价单元不同指标的风险等级,对不同等级进行赋值,“高风险等级”赋值为 3,“中风险等级”赋值为 2,“低风险等级”赋值为 1。从不同因子的角度出发,同一单元的风险值可能出现风险值不一的结果,根据多目标问题的解决思路:将各因子计算出的风险值按照权重大小进行加权,将多目标问题整合成为一个单一目标问题,最终得到不同空间粒子的风险等级综合值 P (式 1)。

$$P = \text{Max}(w_1f_1 + w_2f_1 + \dots + w_nf_n) \quad (1)$$

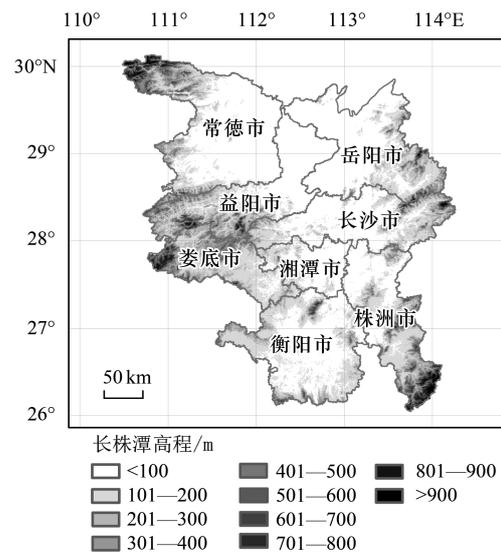


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

表 1 生态空间风险评价体系

Table 1 Risk assessment system of ecological space

目标 Objectives	系统 System	因子 Factor	指标 (权重) Index (weight)	指标解析 Index analysis	数据来源 Data sources	不同风险等级下的指标值 Index values under different risk levels			
						高风险 High risk	中风险 Medium risk	低风险 Low risk	
生态空间风险评价 Risk evaluation of ecological space	空间压力	人类活动压力	夜间灯光指数 (0.084)	夜间灯光指数是人类活动监测的良好数据源,灯光指数越大,人类活动越密集	2013 年研究区 DMSP/OLS 夜间灯光数据整理而得	7—9 级 (灯光指数级别)	4—6 级 (灯光指数级别)	1—3 级 (灯光指数级别)	
			自然环境压力	洪涝灾害(0.067)	洪涝灾害对生态空间的破坏作用明显,直接影响生态空间的风险	按照历史时期洪涝灾害发生地数字化而得	高发区	中发区	低发区
				地质灾害(0.069)	地质灾害对生态空间的压力明显,易发区的空间压力大	按照历史时期地质灾害发生地数字化而得	高发区	中发区	低发区
		空间距离状态	距道路网距离 (0.061)	道路对自然生态过程有隔离和屏障作用,距道路越近,风险越大	由 2013 年的公路、铁路网构成	0—1 km	1—5 km	5 km 以上	
			距聚落距离(0.063)	聚落占用生态空间导致空间萎缩,生态风险增大	由土地利用类型图提取	0—1 km	1—5 km	5 km 以上	
	空间格局状态	斑块密度 PD (0.058)	表示每 100 km ² 面积中斑块个数,可以反映景观破碎化程度	用 fragstats 软件对栅格单元景观格局指数计算而得	1.0 个/ 100 km ² 以上	0.5 个/ 100 km ²	0—0.5 个/ 100 km ²		
			最大斑块指数 LPI (0.053)	表示某一斑块类型中的最大斑块占据整个景观面积的比例,其值的变化,可以改变干扰的强度和频率,反映人类活动的方向和强弱	0—5	5—10	10 以上		
			平均斑块分维数 FRAC-MN(0.052)	描述斑块几何形状的复杂程度,形状越简单,越有规律,越趋近于 1	0.8 以上	0.6—0.8	0—0.6		
		Shannon 多样性指数 SHDI(0.055)	其值的大小可以敏感反映景观的多样性、异质性和景观中各斑块在面积上分布的不均匀程度	1—1.1	1.1—1.2	1.2 以上			
		聚集度 CONTAG (0.058)	描述景观中不同斑块类型的非随机性或团聚程度	0—60	60—80	80 以上			

续表

目标 Objectives	系统 System	因子 Factor	指标(权重) Index (weight)	指标解析 Index analysis	数据来源 Data sources	不同风险等级下的指标值 Index values under different risk levels		
						高风险 High risk	中风险 Medium risk	低风险 Low risk
			聚合度 AI(0.051)	栅格格式数据中各属性网格的聚合程度		0—60%	60%—80%	80%以上
		空间冲突状态	土地利用转换程度 (0.051)	描述生态空间转出与转入的频率	对多期土地利用图叠加计算而得	三级(转换2次以上)	二级(转换1次)	一级(未转换)
		政府调控响应	功能分区(0.063)	政府调控主要体现在对空间的规划,人为影响生态空间的分布	由《长株潭城市群区域规划(2008—2020)》局部调整规划(2014年)整理而得	城镇功能区	城乡混合区	生态功能区
		生态网络调控响应	距“源”的位置 (0.057)	面积大于 100 km ² 的林地与水域是重要的生态源,离源越近,生态风险越低	由最小累计耗散距离模型计算而得	10 km 以上	5—10 km	0—5 km
		空间响应	距水源地距离 (0.051)	水源地是重要的生态空间,保障生物的用水安全		10 km 以上	5—10 km	0—5 km
			距“战略点”的位置 (0.053)	战略点是廊道与廊道之间的节点,对维持景观生态功能健康发展有重要的意义		10 km 以上	5—10 km	0—5 km
			距“流/廊道”的位置 0.054)	廊道的构建可以增强景观组分之间的联系和防护功能		10 km 以上	5—10 km	0—5 km

3 微粒群-马尔科夫模型的构建与优势

3.1 微粒群模型

微粒群模型的基本原理是通过观察和模仿鸟类或鱼类的群居生活现象来解决多目标的随机问题。这种算法具有运算速度快、搜索范围大、受问题维数变化影响小、易于实现等优点^[22],在解决多目标问题中具有明显的优势。具体步骤为如下:

第一步:粒子的选择与设计;

为了客观准确地对城市群生态空间的格局特征进行模拟,首先要对生态空间进行栅格化处理,每个栅格单元就是微粒群模型的粒子,每个粒子都附有各自的自然属性、社会经济属性和空间属性。经多次比较、删选与评估,本研究最终确定 2000 m×2000 m 的正方形单元作为基本粒子。

第二步:粒子的初始化设定;

粒子的几何中心既是粒子的初始位置,也是其他粒子可能到达的位置。每个粒子搜寻的空间范围为整个研究区的所有栅格单元,根据事先给定的飞行约束条件与规则(按照生态空间风险由低到高的原则进行选择),所有粒子在搜索范围内不断飞行搜索,直到搜索到满足所有给定的约束条件位置时,粒子才会停止搜索,算法终止,粒子的新空间位置确定。

第三步:适应度函数的建立;

生态空间重构是多目标共同完成的,这些目标最终都可以量化为生态空间的风险大小值。本研究用生态空间的风险值(即前文所提的生态空间风险值计算结果)来确定生态空间的空间格局。

第四步:空间位置的更新;

粒子根据目标函数在研究区范围内进行搜寻,找出最优值所处的位置作为新的空间位置。随着搜寻的不断进行,粒子会根据搜索结果不断更新其所处的位置。在多次迭代计算中,每个粒子会根据自身的历史最优值及粒子群的全局最优值进行速度和位置更新。

以上步骤具体公式见相关参考文献^[30]。

3.2 马尔科夫模型及改进

马尔科夫模型是一种基于转移概率的数学统计模型,由于土地利用的动态演化过程具有较明显的马尔科夫性质,可以利用土地利用类型的状态转移概率(不同用地类型之间相互转换的面积数量或比例关系)来对土地利用的面积进行预测。很多学者利用马尔科夫模型开展了相关研究^[33],模型公式如下:

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \times S_{(t)} \quad (2)$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n} \\ P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2n} \\ \dots, \dots, \dots \\ P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$(P_{ij} \in [0, 1], \sum_{n=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n))$$

式中, $S_{(t)}$, $S_{(t+1)}$ 分别为 t 、 $t+1$ 时刻的土地利用状态, P_{ij} 为状态转移矩阵, n 为土地利用类型。

预测土地利用变化时常常要考虑时间间隔对土地利用转移的影响,因此很有必要引入土地利用动态度来对状态转移矩阵进行改进。改进后的转移矩阵为:

$$P_{ij}' = K \times T_2 \times P_{ij} \quad (4)$$

$$K = \frac{(S_2 - S_1)}{S_1} \times \frac{1}{T_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中, K 为土地利用动态度, S_1 、 S_2 分别为期初和期末的某类土地利用类型的面积, T_1 为期初年份和期末年

份的间隔数, T_2 为预测年份和基准年份的间隔数。需要说明的是, P_{ij}' 中, P_{11} 、 P_{22} ... P_{mm} 为不变土地面积, 因此不需要与土地利用动态度相乘计算。

根据新修订的 P_{ij}' 值, 可以计算出预测年份与基准年份的土地利用转移矩阵, 从而得出各类土地利用类型的面积(式 6)。

$$S_{(t+1)} = P_{ij}' \times S_{(t)} \quad (6)$$

3.3 微粒群-马尔科夫模型的复合

微粒群模型主要是模拟粒子搜索的空间状态, 无法实现对数量规模的预测, 在使用之前需要设定参与搜索的粒子数。因此, 对于搜寻粒子数的预测需要借助其他算法来完成, 在这一方面马尔科夫模型具有明显的优势。将微粒群模型与马尔科夫模型复合, 利用马尔科夫模型预测粒子的数量规模, 再利用微粒群模型预测粒子的空间格局, 最终实现对生态空间的预测模拟。

3.4 微粒群-马尔科夫模型在生态空间预测中的优势

生态空间预测问题是一个涉及到自然环境因素及社会人文因素的多目标、多条件约束的土地利用空间优化问题, 需要从生态空间的风险评价出发, 结合空间结构的压力-状态-响应系统分析, 综合考虑空间压力、空间状态及空间响应的多个因素的影响, 从而实现生态空间结构的优化重组。微粒群-马尔科夫复合模型具有以下几点优势:

第一, 改进后的马尔科夫模型在预测土地利用数量规模上具有明显的优势, 一方面既考虑了前一时段的土地利用现状, 又考虑了不同土地利用类型之间的转换概率, 另一方面还充分反映了时间间隔对土地利用变化预测的影响。

第二, 凭借微粒群模型强大的空间搜索能力, 可以更好的模拟宏观区域尺度的生态空间变化。城市群土地利用格局是一个巨大的、复杂的自然—社会空间系统, 系统格局的变化往往具有全局意义。微粒群算法具有强大的复杂系统运算能力, 可以通过对简单的局部规则模拟, 由局部推演至全局, 计算出极为复杂的全局空间系统的变化过程。因而选择微粒群算法可以较好的考虑到局部对于全局的影响, 使模型能更好模拟真实。

第三, 利用微粒群算法优越的综合评判力, 可以更好地找到生态空间重构的最优方案。微粒群算法采用精英策略的方法, 在求解多目标空间优化问题时具有明显优势。即在迭代计算的过程中, 粒群会根据不同的适应度函数保存个体最优值及全局最优值, 并通过比较二者之间的差异, 选择其中的最优方案。

第四, 利用改进后的微粒群算法的全局最优收敛所需的时间短、计算速度快的优势, 可以保证迭代计算的顺利运行。相对于其他模型(如元胞自动机)的目标搜寻方法而言, 微粒群算法在目标搜寻的过程中全局最优值起到主导作用, 一方面可以防止局部最优解的出现, 另一方面还可以在短时间内实现收敛, 防止算法陷入死循环中, 保证了计算的顺利运行。

4 长株潭城市群生态空间预测模拟结果

4.1 生态空间的规模预测

基于 2013 年的长株潭城市群土地利用基础数据, 通过改进后的马尔科夫模型模拟计算出 2020 年生态空间的总规模(表 2)。

由表 2 可以看出: 1) 2013—2020 年间, 长株潭城市群生态空间总面积呈减小的趋势, 共减小了 98.46 km²; 2) 不同类型的生态空间变化情况不一: 林地和草地呈面积减小的趋势, 其中林地减小了 144.3 km², 草地减小了 31.75 km², 水体和未利用地呈面积增加的趋势, 其中水体增加了 13.98 km², 未利用地增加了 63.61 km²。

从土地利用转移矩阵来看(表 3), 由耕地、建设用地转化为生态空间的面积分别为 269.75、22.68 km², 由生态空间转化为耕地、建设用地的面积分别为 159.69、231.21 km², 表明: 一方面耕地与生态空间相互转化较为容易, 退耕还林还草与毁林毁草复耕的可能性比较大; 另一方面建设用地占用生态空间的趋势明显, 是生态

空间总面积减小的主要原因。

表 2 长株潭城市群 2013 年与 2020 年生态空间面积比较/km²

Table 2 Comparison of ecological space area of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration in 2013 and 2020

年份 Years	林地 Forest land	草地 Grassland	水体 Water	未利用地 Unused land	总面积 Total area
2013	51831.35	1354.29	5777.43	981.48	59944.55
2020	51687.05	1322.54	5791.41	1045.09	59846.09
变化量 Change quantity	-144.3	-31.75	13.98	63.61	-98.46

表 3 长株潭城市群 2013 年与 2020 年土地利用转移矩阵/km²

Table 3 Transition matrix of land use of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration in 2013 and 2020

土地利用类型 Land use types	2020						总面积 Total area
	耕地 Farmland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	
耕地	32934.85	107.20	2.41	151.69	262.96	8.45	33467.56
林地	52.94	51532.50	10.90	19.36	212.34	3.31	51831.36
草地	1.51	29.14	1307.54	11.38	3.86	0.86	1354.30
2013 水域	102.46	8.72	0.79	5546.52	14.60	104.34	5777.43
建设用地	21.30	9.20	0.37	12.26	3285.80	0.84	3329.79
未利用地	2.78	0.29	0.52	50.20	0.41	927.28	981.48
总面积	33115.85	51687.05	1322.54	5791.41	3779.98	1045.09	96741.91

4.2 生态空间的格局预测

根据改进后的微粒群模型设置相应约束条件及适应度函数,在 ArcGIS 软件及 MATLAB 软件的支持下,对 2020 年长株潭城市群生态空间进行预测模拟,得到图 2。

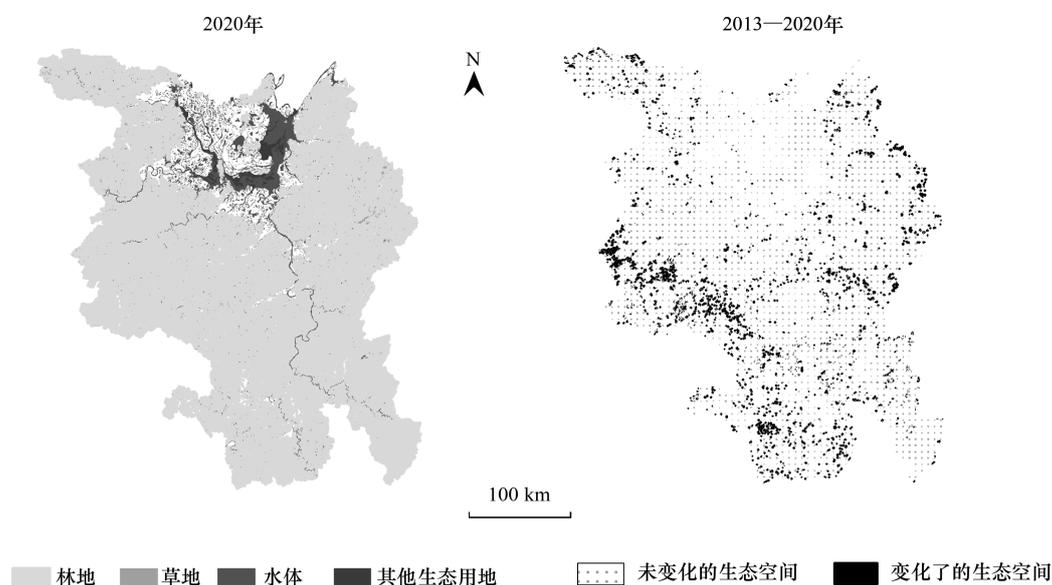


图 2 2020 年长株潭城市群生态空间预测模拟图

Fig.2 Simulation diagram of ecological space forecast of Chang-Zhu-Tan urban in 2020

由图 2 可以看出,2020 年生态空间的基本格局呈现出以下特点:1) 林地分布范围最广,在区内大部分地区均匀分布,水体与草地集中分布在洞庭湖及周边地区,未利用地零散分布在各地;2) 研究区的西南部地区

生态空间变化明显,中部地区、西北部地区(长沙市、常德市)的生态空间变化不大,洞庭湖周边及益阳市、株洲市等地的生态空间变化最小。

4.3 生态空间的重构策略

从预测结果可以看出,长株潭城市群生态空间总面积减小的主要原因是建设用地的扩张,因此,控制城市群的人口密度,优化城市群生产-生活-生态的数量结构及空间布局,尤其要合理规划与利用城市建设用地,这是今后一段时期面临的主要任务。水体与未利用地有增加的趋势,需要充分发挥水体与未利用地的生态价值,重点保护好生态源地、廊道及关键节点,构建结构合理、功能齐全的生态网络系统,提高系统的生态服务价值功能。从空间格局来看,研究区西南地区的生态空间变化明显,要重点关注林地面积的减少,退耕还林的压力仍然较大。中部地区的生态空间变化不大,主要可能受《长株潭城市群生态绿心地区总体规划(2010—2030)》的影响,绿心区的建设对生态空间的保护起到关键性的作用。因此,下一步工作要在规划的指导下合理调整城市群的城乡局部空间结构,保护生态环境,提高生境质量和景观多样性。

5 结论与讨论

将微粒群模型与改进后的马尔科夫模型进行复合,并运用该模型对2020年长株潭城市群生态空间进行预测模拟,得出以下结论:

(1)微粒群-马尔科夫复合模型的构建:首先,引入土地利用动态度来对马尔科夫模型进行改进;其次,通过生态空间风险评价体系建立微粒群模型的适应度函数和约束指标;最后,将两个模型进行复合,生态空间的数量规模可以通过改进后的马尔科夫模型进行预测,生态空间的格局可以通过微粒群模型进行预测;

(2)微粒群-马尔科夫复合模型可以在土地利用格局预测中运用,具有以下优势:一是在预测生态空间的数量变化中既考虑了土地利用的转移概率,又考虑了预测年份的时间间隔,更加科学合理;二是具有强大的空间搜索能力,较好的考虑到局部对于全局的影响;三是具有优越的综合评判力,在求解多目标空间优化问题时(如生态空间重构)具有明显优势;四是具有全局最优、收敛所需的时间短、计算速度快的优势,可以保证迭代计算的顺利运行;

(3)预测模拟结果显示:2020年,长株潭城市群的生态空间总体数量减少,其中林地和未利用地面积变化最明显,空间变化主要集中在西南部地区,要从区域的整体角度出发进行生态空间重构。

相比现有的相关研究而言,本研究主要的创新之处在于:首先将改进后的马尔科夫模型和微粒群模型进行复合,并运用于生态空间的预测中,可以为相关的空间预测研究提供方法借鉴;其次以城市群为研究区域,运用复合模型对研究区的生态空间数量及格局进行了预测模拟,在实践运用上是一次尝试,模拟结果可为保护国土空间生态安全提供决策依据。

参考文献(References):

- [1] 欧阳志云, 李小马, 徐卫华, 李煜珊, 郑华, 王效科. 北京市生态用地规划与管理对策. 生态学报, 2015, 35(11): 3778-3787.
- [2] 王如松, 李锋, 韩宝龙, 黄和平, 尹科. 城市复合生态及生态空间管理. 生态学报, 2014, 34(1): 1-11.
- [3] 许尔琪, 张红旗. 中国核心生态空间的现状、变化及其保护研究. 资源科学, 2015, 37(7): 1322-1331.
- [4] 姚娜, 马履一, 杨军, 贾黎明, 段劫, 贾黎明. 北京市平原地区1992—2013年生态空间演变. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1427-1434.
- [5] 龙花楼. 论土地整治与乡村空间重构. 地理学报, 2013, 68(8): 1019-1028.
- [6] 叶兴平, 何常清, 陈燕飞. 低碳生态视角下的江苏省生态空间规划研究. 城市规划, 2013, 37(2): 23-26.
- [7] 龙花楼, 李婷婷, 邹健. 我国乡村转型发展动力机制与优化对策的典型分析. 经济地理, 2011, 31(12): 2080-2085.
- [8] 郭荣朝, 苗长虹, 夏保林, 李军甫. 城市群生态空间结构优化组合模式及对策——以中原城市群为例. 地理科学进展, 2010, 29(3): 363-369.
- [9] 吕贤军, 李锐, 李志学. 城市群地区城乡生态空间保护与利用研究——以长株潭生态绿心地区为例. 城市发展研究, 2013, 20(12): 82-87.
- [10] Xu Q L, Yang K, Wang G L, Yang Y L. Agent-based modeling and simulations of land-use and land-cover change according to ant colony

- optimization: a case study of the Erhai Lake Basin, China. *Natural Hazards*, 2015, 75(1): 95-118.
- [11] Qiang Y, Lam N S N. Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(3): 57-57.
- [12] 吴桂平, 曾永年, 邹滨, 齐庆超, 杨松. AutoLogistic 方法在土地利用格局模拟中的应用——以张家界市永定区为例. *地理学报*, 2008, 63(2): 156-164.
- [13] 杨青生, 乔纪纲, 艾彬. 基于元胞自动机的城市生态安全格局模拟——以东莞市为例. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2599-2607.
- [14] 王晓学, 李叙勇, 吴秀芹. 基于元胞自动机的喀斯特石漠化格局模拟研究. *生态学报*, 2012, 32(3): 907-914.
- [15] Dewan A M, Kabir M H, Nahar K, Rahman M D. Urbanisation and environmental degradation in Dhaka metropolitan area of Bangladesh. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 2012, 11(2): 118-147.
- [16] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测. *地理科学进展*, 2015, 34(8): 976-986.
- [17] 张荣天, 焦华富. 镇江市土地利用格局演变与情景模拟. *经济地理*, 2015, 35(10): 156-162.
- [18] 王鑫, 刘伟玲, 张丽, 张林波, 郑娇琦. 基于 CLUE-S 模型的辽河流域景观格局空间分布模拟. *地球信息科学学报*, 2014, 16(6): 925-932.
- [19] 宋戈, 王越, 赵可, 周春风. 东北区耕地利用系统安全格局模拟及其阈值的确定. *地理研究*, 2015, 34(3): 555-566.
- [20] 王祺, 蒙古军, 毛熙彦. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化. *地理研究*, 2014, 33(6): 1073-1084.
- [21] 孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟. 中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例. *生态学报*, 2012, 32(20): 6440-6451.
- [22] 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. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(10): 1762-1770.
- [23] 欧维新, 肖锦成, 李文昊. 基于 BP-CA 的海滨湿地利用空间格局优化模拟研究——以大丰海滨湿地为例. *自然资源学报*, 2014, 29(5): 744-756.
- [24] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization//*Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, WA: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [25] Martinez-Rojas M, Sumper A, Gomis-Bellmunt O, Sudrià-Andreu A. Reactive power dispatch in wind farms using particle swarm optimization technique and feasible solutions search. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4678-4686.
- [26] 杜国明, 陈晓翔, 黎夏. 基于微粒群优化算法的空间优化决策. *地理学报*, 2006, 61(12): 1290-1298.
- [27] 刘殿锋, 刘耀林, 刘艳芳, 赵翔. 多目标微粒群算法用于土地利用空间优化配置. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(6): 751-755.
- [28] 王汉花. 基于微粒群算法的村镇土地空间优化模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [29] 王华, 刘耀林, 姬盈利. 基于多目标微粒群优化算法的土地利用分区模型. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 237-244.
- [30] 钟典. 基于变异微粒群算法的城镇土地扩展模拟研究——以津澧新城为例[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015.
- [31] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 王静, 刘爱霞. 生态用地分类初步研究. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 1-7.
- [32] 林佳, 宋戈, 宋思铭. 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例. *生态学报*, 2011, 31(20): 5918-5927.
- [33] 王友生, 余新晓, 贺康宁, 李庆云, 张由松, 宋思铭. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 330-337.