

基于空间贝叶斯识别城市扩张与 生态保护潜在的兼容区和冲突区 ——以鄱阳湖生态经济区为例

危小建^{1, 2} 谢亚娟² 孙显星²¹

(1. 东华理工大学 资源与环境经济研究中心, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学 测绘工程学院, 江西 南昌 330013)

【摘要】: 快速城市扩张在提高社会经济水平的同时, 伴随着一系列的生态问题, 如何合理协调城市扩张与生态保护之间的矛盾是当前我国新型城镇化建设中的一项重要任务。科学识别城市扩张与生态保护的冲突是其基础。以鄱阳湖生态经济区为研究区域, 采用空间贝叶斯方法识别城市扩张与生态保护潜在的兼容区和冲突区。研究结果表明: (1) 城市扩张适宜性区域分布较为集中, 最适宜区域主要分布在南昌市主城区周边县域、余江县和乐平市, 较适宜区域主要分布在新建区、瑞昌市、高安市和都昌县, 较不适宜区域主要分布在武宁县以及鄱阳湖东岸, 不适宜区域主要分布在鄱阳县、浮梁县与武宁县。(2) 生态保护适宜性区域分布较为分散, 最适宜区域主要分布在武宁县、瑞昌市、鄱阳县和浮梁县, 较适宜区域主要分布在主城区东北部、东南部、余江县和湖口县, 较不适宜区域主要分布较为分散, 各区(市)县均有分布, 不适宜区域主要分布在南昌市周边区域和鄱阳湖东岸。(3) 综合分析城市扩张和生态保护适宜性评价结果得到的冲突区主要分布在瑞昌市、南昌县和新建区; 兼容区中城市发展适宜性高的区域主要分布在南昌市的东南部以及永修县、星子县、余江县, 生态保护适宜性高的区域主要分布在鄱阳湖东岸和武宁县; 城市扩张和生态保护适宜性都较低的区域主要分布在鄱阳县、余干县、都昌县。研究结果可为土地利用规划与生态安全保护提供参考和借鉴。

【关键词】: 空间贝叶斯 城市扩张 生态保护 冲突区 GIS 鄱阳湖生态经济区

【中图分类号】: TU984 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)02-0310-12

新型城镇化背景下, 城市生态环境保护是人们首要关注话题^[1]。长期以来城市发展形成的外延粗放式增长模式带来了耕地流失和生态用地被侵占等一系列生态环境问题^[2]。城市扩张与生态环境保护之间的矛盾已成为学术界的研究热点^[3]。如何合理协调城市发展和生态保护两者的关系也是近年来的热点之一, 对城市生态可持续发展具有重要意义。

作者简介: 危小建(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为土地利用规划、评价和土地信息智能化处理. E-mail: weixiaojian1988@ecit.cn; 谢亚娟 E-mail: xieyajuan1104@163.com

基金项目: 东华理工大学资源与环境经济研究中心(18GL03); 湖北省自然科学基金资助项目(2017CFC847); 国家自然科学基金资助项目(51708098); 江西省自然科学基金资助项目(20171BAA218018); 江西省高校人文社会科学研究项目(GL17201); 江西省社科规划项目(17GL30)。

识别城市扩张和生态保护潜在空间兼容区与空间冲突区,追求生态和谐型的城市发展很早就引起了研究者的关注。国外与城市化相关的研究主要是围绕城市发展和生态保护可持续性来开展, Martina 等^[4~6]从社会、经济、人口和环境等方面入手来研究城市发展与生态保护。国外发达地区较早就提出了生态敏感区保护的理念,并尝试将生态制图纳入城乡规划中^[7],相应的规划决策技术主要集中于土地生态适宜性评价等^[8]。近些年国外学者也开始利用各种模型,如 DINAMICA-EGO 模型^[9]、遥感^[10]和 SLEUTH 模型^[11]等方法研究城市发展对生态环境的影响,分析土地利用变化对城市扩张与制定有效规划的促进作用。国内已有研究主要聚焦于城市扩张模型构建和生态红线划定,例如,马世发等^[12]基于 GeoSOS 空间分析技术研究城市扩张与生态保护二元空间协调;柯新利等^[3]、刘菁华等^[13]通过多目标优化模型对城市扩张布局以及减少重要生态用地占用进行探讨;黎夏等^[14]、张晓丹等^[15]、陈逸敏等^[16]利用元胞自动机,基于地理模拟与优化系统理论模拟城市扩张情景下的生态控制线划定问题。同时,俞孔坚等^[17]根据动物迁徙廊道保护需求,提出的最小累积阻力模型以及吕圣东^[18]运用 RS、GIS 地理模拟技术构建城市生态廊道都是比较简单实用的生态保护规划分析技术。然而,这些研究都是基于城市发展适宜性或生态功能性评价分析城市扩张与生态保护之间的协调性,忽略了对土地利用变化规律的学习。由于缺乏对城市扩张区域生态用地历史变化规律的研究,不能保证城市发展与区域土地利用变化趋势相适应,生态保护用地被占用的风险较大。因此,寻找一种能够将经验与现有数据相结合,随时更新出现的新信息的方法对制定合理的土地利用规划非常重要。空间贝叶斯是一种基于贝叶斯因果推理的概率网络模型^[19]。通过先验数据和经验构建初始概率模型,再利用新的观察数据对初始模型进行改进学习。与其他模型方法不同,空间贝叶斯模型属于非黑箱模型,能够表达各因子间的定性因果关系,支持预测性与诊断性等定量分析^[20]。利用空间贝叶斯模型可以将土地的动态变化规律(先验知识)和现状的影响要素(观察数据)结合起来,进行综合的城市扩张和生态保护的识别^[21]。

本文结合城市发展变化规律和生态保护适宜性条件,以鄱阳湖生态经济区为研究区,运用能将经验与现有数据结合的空间贝叶斯方法识别研究区城市扩张与生态保护潜在的兼容区和冲突区。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

鄱阳湖生态经济区位于长江中下游南岸、江西省北部,地理位置为 $114^{\circ} 29' E \sim 117^{\circ} 42' E, 27^{\circ} 30' N \sim 30^{\circ} 06' N$ (图 1)。是以鄱阳湖为核心,以鄱阳湖城市圈为依托,以保护生态、发展经济为重要战略构想的经济特区,总面积为 51200km^2 ,江三角洲、海峡西岸经济区等重要经济板块的直接腹地,近年来经济发展迅速。与此同时,该区域也是我国重要的生态功能保护区,承担着调洪蓄水、调节气候、降解污染等多种生态功能。因此,选取鄱阳湖生态经济区作为研究区具有典型性。

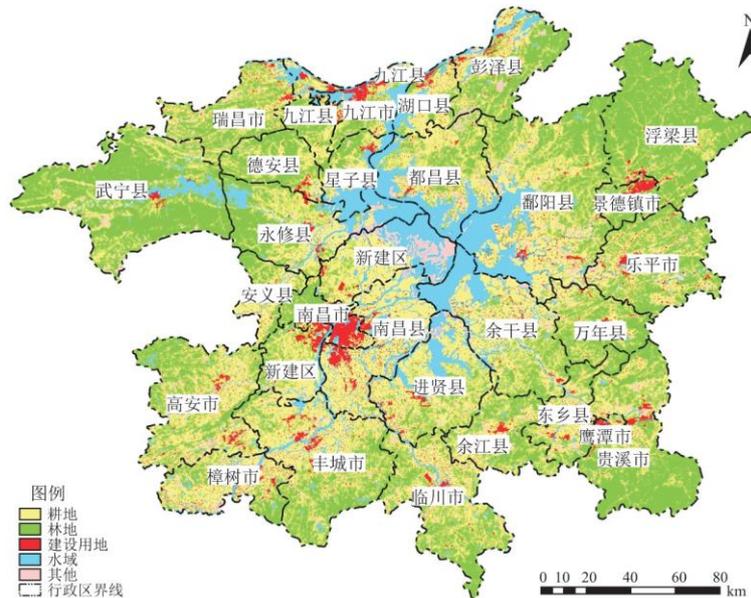


图 1 研究区

1.2 数据来源与预处理

本文所使用的土地利用数据来源于全国土地利用数据产品,主要以 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像为主要数据源,影像分辨率为 30m,通过人工目视解译生成。DEM 数据采用 ASTER GDEM 数据产品,空间分辨率为 30m,来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>);坡度是根据研究区 DEM 数据,通过 ArcGIS 中的“坡度”工具提取得到;距水域距离、距城镇距离、距道路距离、距林地距离是利用 ArcGIS 中的“欧式距离”工具做统计分析得到的距离图层;生态廊道数据根据文献^[22]构建;NDVI 数据采用中国 2015 年的 SPOT_Vegetation 1 km 月度植被指数 (NDVI) 数据集,共 12 期,采用最大值合成法得到 2015 年 NDVI 值;土壤侵蚀数据采用中国土壤侵蚀空间分布数据;NDVI、土壤侵蚀数据及 GDP、人口、POI 密度、生物多样性数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。部分基础数据如图 2 所示。

考虑到模型的精度和复杂性,参考相关政策、文献^[23~25]及专家经验知识的情况下将连续变量离散为 2~4 个等级。其中,高程的分级在土地利用相关研究中没有固定的标准。本文以分级结果能很好体现研究区地貌的客观分布规律为基准,经过对高程数据进行多次分级试验,确定最终分级标准。坡度是根据我国《第二次土地调查技术规程》,分为“0~2”,“2~5”,“5~15”和“≥15”4 个等级。距离变量的分级以能更好的体现土地利用类型空间分布与研究区主干道路的关系为基准,经过多次分级试验来确定最终分级标准。GDP、人口、POI 密度数据是通过 ArcGIS 软件中的自然断点法进行分级。生态廊道数据参照文献^[22]进行分级,NDVI 植被指数和土壤侵蚀变量的分级参考相关文献^[26,27]。二元变量的等级根据土地利用变化状况设定。例如,将“生态用地”为“是”的设为 1,“否”的设定 2。两个模型中选取的土地适宜性评价因子与变量离散分级情况如表 1 所示。

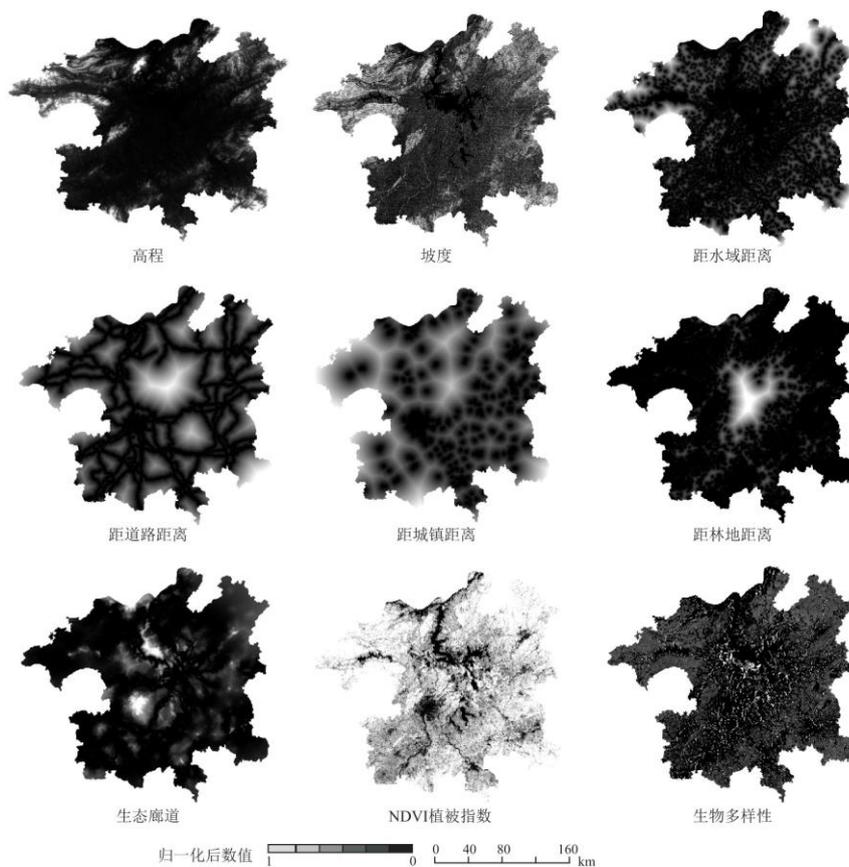


图 2 部分基础数据

表 1 变量离散分级表

变量名称	数值类型	等级代码			
		<20	20~50	50~80	≥80
高程	连续变量	<20	20~50	50~80	≥80
坡度	连续变量	0~2	2~5	5~15	≥15
距水域距离	连续变量	<500	500~1000	1000~2000	≥2000
距道路距离	连续变量	<1000	1000~2000	2000~4000	≥4000
距火车站距离	连续变量	<3000	3000~6000	6000~9000	≥9000
距城镇距离	连续变量	<2000	2000~4000	4000~6000	≥6000
距林地距离	连续变量	<500	500~1000	1000~2000	≥2000
NDVI 植被指数	连续变量	<0.2	0.2~0.5	0.5~0.7	≥0.7
土壤侵蚀	连续变量	<12	12~13	13~15	≥15
GDP	连续变量	<500	500~550	550~650	≥650
人口	连续变量	<150	150~600	600~1000	≥1000
POI 密度	连续变量	<0.0008	0.0008~0.0016	0.0016~0.0024	≥0.0024
生态廊道	连续变量	<500	500~1000	1000~2000	≥2000
生态服务功能重要性	离散变量	一般重要	中度重要	高度重要	极重要
生态敏感性	离散变量	无或轻度	中度敏感	高度敏感	极度敏感
重要湿地	离散变量	是	否		
重要林地	离散变量	是	否		
可能城市用地	离散变量	是	否		
可能生态用地	离散变量	是	否		

2 研究方法

2.1 空间贝叶斯模型结构构建

空间贝叶斯结构构建的目的是体现因子间定性与定量两方面的联系。传统的算法如三阶段分析算法^[28]和 SGS (Spirtes, Glymour, Scheines) 算法^[29]可以得到因子间的统计学联系, 但无法获得因子间因果关系^[30]。因此, 本文采用专家经验法, 基于因子间的因果联系, 参照文献^[31]构建空间贝叶斯模型结构 (图 3)。城市扩张模型结构中, 目标变量“发展适宜性”受到城市扩张适宜性和便利发展适宜性的直接影响; 城市扩张适宜性受到城镇扩张压力、GDP、POI 密度的共同影响, 模拟在交通设施和经济变化的条件下, 城市发展的适宜性情况; 便利发展适宜性受到人口、距林地距离和距水域距离的影响, 反映了当前便利条件下城市发展的适宜性情况。生态保护模型结构中, 目标变量“生态用地适宜性”受到生态服务功能重要性和生态敏感性影响的同时也受到优先保护生态用地的直接影响; 生态敏感性受到土壤侵蚀、坡度和距水域距离的共同作用, 模拟土地的质量、地形和灌溉条件对生态环境的影响力; 生态服务功能重要性受到 NDVI 植被指数和距林地

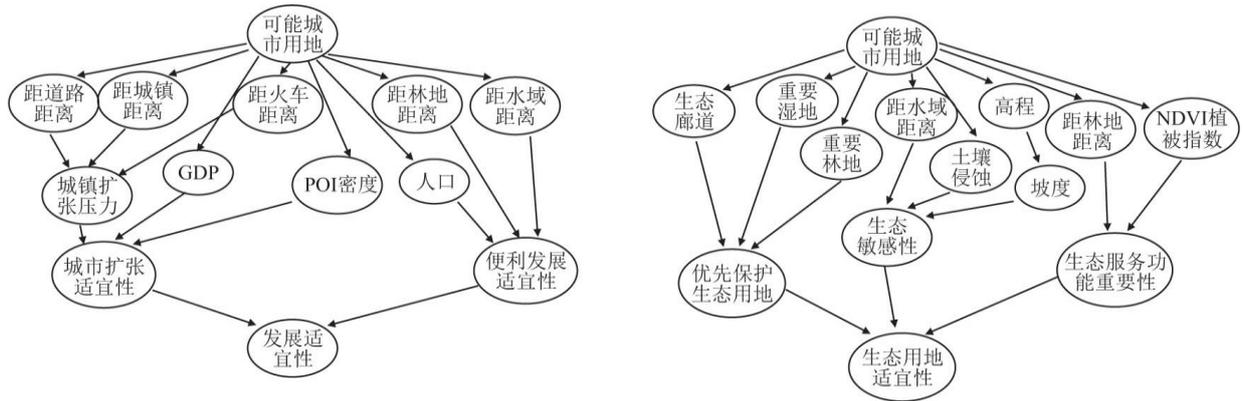


图3 空间贝叶斯模型结构

距离的作用, 模拟植被、林地对生态系统服务价值的评估; 优先保护生态用地受到生态廊道、重要湿地、重要林地要素影响, 反映植被、水体、湿地等重要生态用地的优先保护适宜性情况。

2.2 空间贝叶斯模型参数学习

空间贝叶斯模型参数学习方法包括数据完整时贝叶斯方法^[32]、最大似然估计法^[33]和数据不完整时的吉布斯抽样算法^[34]和最大期望算法^[35]。本文实验训练数据较完整, 采用最大似然法通过 Netica 软件对空间贝叶斯变量进行参数学习。在模型中构建的每个可用性图层的先验概率, 都是根据研究区域内每个县(市、区)所占的百分比来进行分配的。其中, 连接 GIS 变量的条件概率表是使用从组合 GIS 变量中计算得到的条件概率来填充。对于模型中两个压力节点和总体适宜节点或者连接性和总体适宜性节点是没有经验数据的。和一些静态模型不同的是, 本文使用的空间贝叶斯模型是动态的。专家在打分时, 可以根据研究区不同的未来发展情景, 把规划信息, 比如用地规模等未来城市发展因素考虑在内, 对评价因子的权重设置会发生变化, 城市扩张和生态保护适宜性结果也会相应地改变。因此, 在综合考虑相关规划信息因素前提下, 使用专家意见对这些节点的条件概率表进行填充, 得到了两个模型的条件概率表分别为表 2 和表 3。

表 2 城市发展适宜性条件概率表

地理信息系统图层		专家知识		
便利发展适宜性	城市扩张适宜性	高	中	低
高	高	95	5	0
高	中等	20	80	0
高	低	30	30	40
中等	高	90	10	0
中等	中等	30	60	10
中等	低	30	30	40
低	高	80	10	10

低	中等	20	40	40
低	低	0	5	95

表 3 生态保护适宜性条件概率表

地理信息系统图层			专家知识			地理信息系统图层			专家知识		
优先保护生态用地	生态服务功能重要性	生态敏感性	高	中等	低	优先保护生态用地	生态服务功能重要性	生态敏感性	高	中等	低
是	极重要	高	95	5	0	否	极重要	高	60	35	5
是	极重要	中等	80	20	0	否	极重要	中等	50	40	10
是	极重要	低	65	25	10	否	极重要	低	30	30	40
是	高度重要	高	80	20	0	否	高度重要	高	50	40	10
是	高度重要	中等	70	30	0	否	高度重要	中等	35	40	25
是	高度重要	低	40	40	20	否	高度重要	低	30	30	40
是	中度重要	高	65	25	10	否	中度重要	高	35	50	15
是	中度重要	中等	40	40	20	否	中度重要	中等	20	60	20
是	中度重要	低	25	30	45	否	中度重要	低	10	20	70
是	一般重要	高	50	30	20	否	一般重要	高	20	30	50
是	一般重要	中等	40	30	30	否	一般重要	中等	10	30	60
是	一般重要	低	15	25	60	否	一般重要	低	0	20	80

表 2 作为城市发展适宜性的条件概率表的示例,使用专家知识,描述了便利发展适宜性和城市扩张适宜性是如何影响发展的。表中每一行的值之和为 100,并且表示与地理信息系统图层标准相对应的像素适合(高、中、低)用于开发的概率。

表 3 作为生态环境保护适宜性的条件概率表的示例利用专家知识对生态用地适宜性节点的条件概率表进行了示例,该表使用了优先保护生态用地、生态服务功能重要性和生态敏感性这三个变量如何影响到当前生态用地保护适宜性的专家知识。表中每一行的数值之和为 100,表示与地理信息系统图层标准相对应的像素适合生态用地保护(高、中、低)的可能性。

2.3 兼容区与冲突区确定

本文在识别城市扩张与生态保护的冲突区和兼容区时采用了自然断点法和阈值法。在划分不同的适宜性区域时,根据城市发展的空间布局、规模数量以及生态保护需求的不同趋势,相应地改变划分方法以及阈值,最终兼容区与冲突区的识别结果也会不同。因此,模型区间划定的动态性,能把影响未来城市发展的因素考虑在内,使得划定的结果更加合理。文中结合鄱阳湖生态经济

区城市扩张与生态保护适宜性评价结果,确定兼容区、冲突区和低适宜性区。从适宜性角度来看,城市扩张和生态保护适宜性都是最适宜、较适宜的区域为冲突区,城市扩张或生态保护适宜性是最适宜的区域为兼容区,其余为低适宜性区。参照文献^[36],将两种级别进行叠加组合得到 16 种空间组合,按照表 4 所示的适宜性标准进行重新划分得到兼容区与冲突区的空间布局。

表 4 兼容区与冲突区确定

生态保护适宜性	城市扩张适宜性			
	最适宜	较适宜	较不适宜	不适宜
最适宜	冲突区	兼容区	兼容区	兼容区
较适宜	兼容区	冲突区	低适宜性区	低适宜性区
较不适宜	兼容区	低适宜性区	低适宜性区	低适宜性区
不适宜	兼容区	低适宜性区	低适宜性区	低适宜性区

3 结果与分析

3.1 空间贝叶斯模型结果

在构建空间贝叶斯结构后,将离散化后的数据代入模型中,采用最大似然法对模型进行参数学习。经过参数学习后的贝叶斯模型得到土地利用类型动态变化结果及各因子的概率分布情况(图 4、图 5)。城市扩张模型中的城市扩张压力取决于距道路、城镇或火车站距离的组合(表 1 和图 4);此外,GDP 变量影响也较大,表明 GDP 高的区域适合进行城市开发活动。便利发展适宜性则取决于到水域和生态公益林距离的组合,靠近大型水体或当前生态保护用地的区域不适合作为城市用地发展;假设大城市中心设施便利,那么也可以用人口变化这一变量减小该区域城市发展的压力。生态保护模型中的优先保护生态用地取决于生态廊道、重要湿地或重要林地的组合(表 1 和图 5)。另外,生态敏感性与生态服务功能重要性对生态用地适宜性影响也较大。

3.2 空间贝叶斯模型敏感度分析

敏感度分析是量化空间贝叶斯模型中因子依赖程度的方法^[37]。通过贝叶斯模型的正向推理,对目标因子“发展适宜性”和“生态用地适宜性”进行敏感度分析,可以得到各因子对城市发展用地和生态保护用地的影响力大小(表 5)。敏感度分析结果用熵约简来表示,熵约简值越大,输入因子的影响力就越大。本文通过 Netica 软件对空间贝叶斯变量进行敏感度分析。

从表中可以看出,城市扩张模型中“城市扩张适宜性”对“发展适宜性”产生最大影响,熵约简结果为 0.43,表明城市周边区域最适合进行开发建设活动。生态保护模型中“优先保护生态用地”是影响“生态适宜性”的最主要因素,熵约简结果为 0.23,在这些区域应优先作为生态保护用地;生态敏感性和生态服务功能重要性的熵约简结果均为 0.06,两个变量对区域的生态保护意义重大。

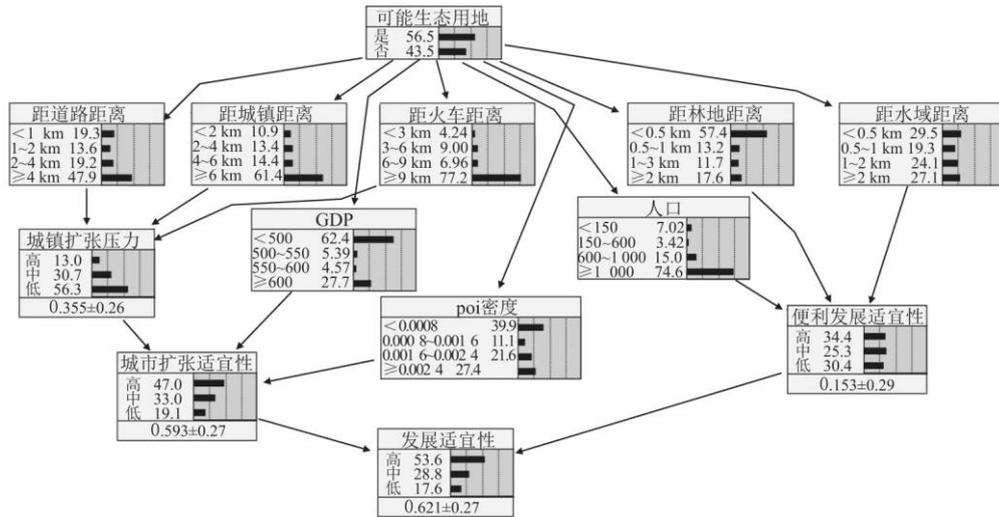


图 4 城市扩张空间贝叶斯模型结果

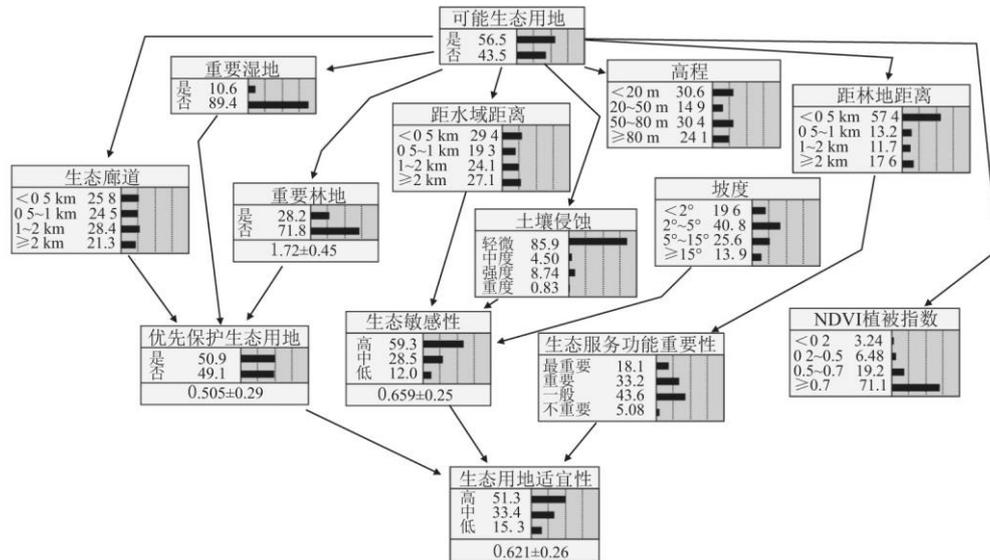


图 5 生态保护空间贝叶斯模型结果

表 5 敏感度分析结果

节点	熵约简	节点	熵约简
发展适宜性		生态保护适宜性	
城市扩张适宜性	0.42956	优先保护生态用地	0.23447
便利发展适宜性	0.07641	生态敏感性	0.06353
GDP	0.04484	生态服务功能重要性	0.06022

poi 密度	0.02982	生态廊道	0.00982
城镇扩张压力	0.01975	NDVI 植被指数	0.00672
距水域距离	0.01018	距水域距离	0.00584
距林地距离	0.00871	坡度	0.00513
人口	0.00487	重要林地	0.00377
距道路距离	0.00414	距林地距离	0.00309
距城镇距离	0.00307	土壤侵蚀	0.00276
距火车站距离	0.00194	高程	0.00226
		重要湿地	0.00208

3.3 划定结果及其分析

3.3.1 城市扩张适宜性评价

运用空间贝叶斯方法,确定城市发展适宜性等级。总体来看,鄱阳湖生态经济区最适宜地块面积 10396.26km²,占参与评价地块面积的 38.22%,主城区周边县域、余江县和乐平市的城市发展适宜性整体较高。较适宜地块面积 11735.89km²,占参与评价地块面积的 43.14%,主要分布在新建区、瑞昌市、高安市和都昌县。较不适宜地块面积 3065.62km²,占参与评价地块面积的 11.27%,主要分布在武宁县以及鄱阳湖东岸。不适宜地块面积 2003.73km²,占参与评价地块面积的 7.37%,主要分布在鄱阳县、浮梁县与武宁县。选取具有典型特征的 A、B、C、D、E、F6 个区域进行比较研究(图 6)。其中,C、D、E 和 F 区中城市发展用地在适宜性评价中整体为最适宜发展,A 区是较适宜发展的,B 区中城市发展用地适宜性整体是较不适宜和不适宜。

3.3.2 生态环境保护适宜性评价

通过对空间贝叶斯训练数据和研究区土地利用数据进行处理,得到生态保护用地适宜性等级图(图 7)。整体来看,鄱阳湖生态经济区的生态保护用地适宜性各不相同。鄱阳湖生态经济区最适宜地块面积 10453.52km²,占参与评价地块面积的 38.43%,武宁县、瑞昌市、鄱阳县和浮梁县的生态保护适宜性整体较高。较适宜地块面积 10687.63km²,占参与评价地块面积的 39.29%,主要分布在主城区东北部、东南部、余江县和湖口县。较不适宜地块面积 2955.96km²,占参与评价地块面积的 10.87%,适宜性地块较为分散,各区(市)县均有分布。不适宜地块面积 3103.35km²,占参与评价地块面积的 11.41%,主要分布在南昌市周边区域和鄱阳湖东岸。在选取的 6 个特征区中,A、B 区生态保护用地适宜性最大,而 C、D、E 和 F 区的适宜性稍小一些。

3.3.3 兼容区与冲突区识别

综合考虑城市发展用地和生态保护用地适宜性评价结果,得到鄱阳湖生态经济区的冲突区与兼容区分布图(图 8)。将研究区内参与评价的土地分为四种:冲突区、兼容区(发展适宜性高区域、保护适宜性高区域)、低适宜性区域。鄱阳湖生态经济区中冲突区面积为 7356.64km²,占参与评价区域面积的 27.04%,主要分布在瑞昌市、南昌县和新建区。兼容区面积为 15281.67km²,占参与评价区域面积的 56.18%,其中,城市发展适宜性高区域面积为 7813.14km²,主要分布在南昌市的东南部以及永修县、星子县、余江县;生态保护适宜性高区域面积为 7468.53km²,主要分布在鄱阳湖东岸和武宁县。低适宜性区域面积为 4563.19km²,占参与评价区域面积的 16.78%,主要分布在鄱阳县、余干县、都昌县。

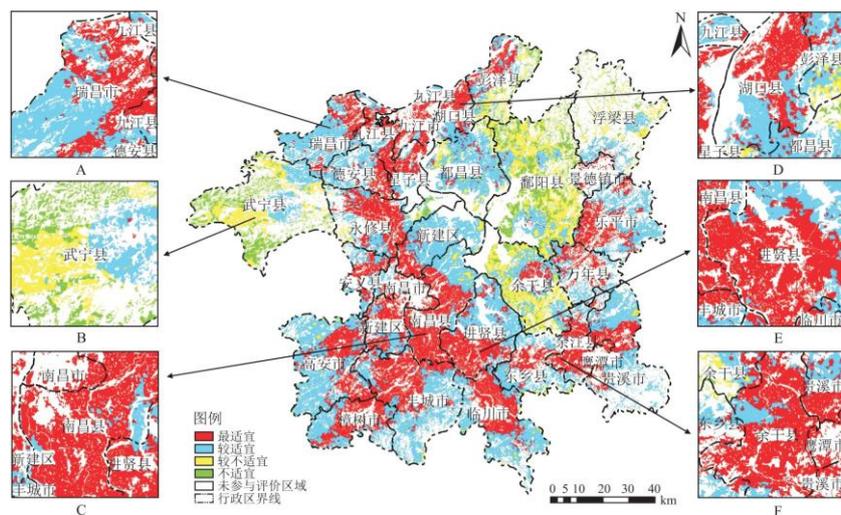


图 6 鄱阳湖生态经济区城市发展用地适宜性评价图

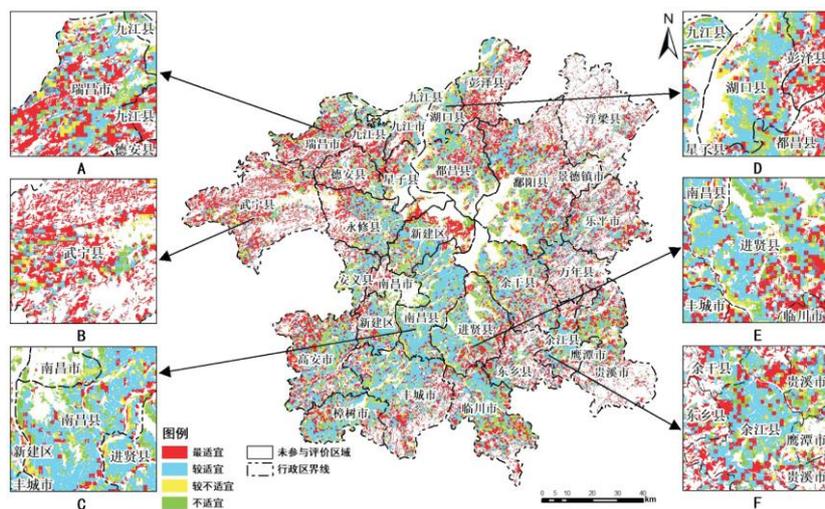


图 7 鄱阳湖生态经济区生态保护用地适宜性评价图

对比城市发展适宜性评价结果和生态保护适宜性评价结果发现, A、D 区中城市发展和生态保护用地多数是最适宜, 主要为冲突区域, 在这些区域要禁止不符合主体功能定位的开发活动, 同时要积极探索建立多渠道的生态补偿渠道。C、E、F 区主要是发展适宜性高区域, 土地开发潜力较大, 生态成本较低, 可作为城市扩张的重点区域。B 区主要是保护适宜性高区域和低适宜性区域, 应把生态建设放在优于经济发展的地位。

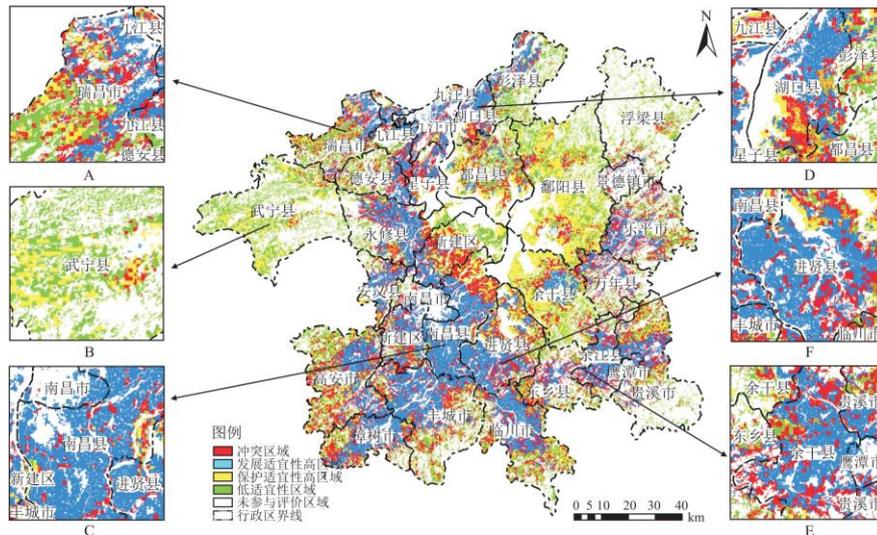


图 8 鄱阳湖生态经济区潜在兼容区和冲突区分布图

4 结论与讨论

本文运用空间贝叶斯方法,对鄱阳湖生态经济区的城市发展适宜性区域、生态环境保护适宜性区域、兼容区域以及冲突区域进行了识别,得到了以下结论:

(1)城市扩张适宜性区域分布较为集中,最适宜、较适宜、较不适宜、不适宜地块面积分别为:10396.26、11735.89、3065.62与2003.73km²。最适宜区域主要分布在南昌市主城区周边县域、余江县和乐平市,较适宜区域主要分布在新建区、瑞昌市、高安市和都昌县,较不适宜区域主要分布在武宁县以及鄱阳湖东岸,不适宜区域主要分布在鄱阳县、浮梁县与武宁县。

(2)生态保护适宜性区域分布较为分散,最适宜、较适宜、较不适宜、不适宜地块面积分别为:10453.52、10687.63、2955.96与3104.39km²。最适宜区域主要分布在武宁县、瑞昌市、鄱阳县和浮梁县,较适宜区域主要分布在主城区东北部、东南部、余江县和湖口县,较不适宜区域主要分布较为分散,各区(市)县均有分布,不适宜区域主要分布在南昌市周边区域和鄱阳湖东岸。

(3)综合分析城市扩张和生态保护适宜性评价结果得到冲突区、兼容区与低适宜性区域面积分别为7356.64、15281.67与4563.19km²。冲突区主要分布在瑞昌市、南昌县和新建区;兼容区中城市发展适宜性高的主要分布在南昌市的东南部以及永修县、星子县、余江县,生态保护适宜性高的主要分布在鄱阳湖东岸和武宁县;城市扩张和生态保护适宜性都较低的区域主要分布在鄱阳县、余干县、都昌县。

本文选取典型的生态经济区鄱阳湖区作为研究区,采用空间贝叶斯方法,通过构建城市扩张与生态保护空间贝叶斯模型,能够综合考虑城市扩张适宜性和生态保护适宜性,使冲突区和兼容区域划定结果更加科学合理。然而,本文在模型的建立以及评价因子的选择上还存在一些不足:

(1)在城市扩张模型中,模型的动态性主要是通过自然断点法、阈值法与专家打分时权重的侧重点来体现,只考虑了距城镇距离、距道路距离、人口等现实因素,忽略了城市规划的影响。如果把未来城市发展,比如用地规模等因素带入模型中,研究结果会更加科学合理。

(2)本文只对城市扩张和生态环境保护进行了分析探讨,没有考虑到耕地保护与两者之间的关系。未来研究中,应该构建更加

合理的空间贝叶斯模型,进一步优化土地利用结构。

参考文献:

- [1]杨刚新. 城市生态环境保护与可持续发展[J]. 绿色环保建材, 2018:251-253.
- [2]李光明, 邓杰. 产业支撑、生态保护与城市可持续发展研究——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4):868-876.
- [3]柯新利, 郑伟伟, 杨柏寒. 权衡城市扩张、耕地保护与生态保育的土地利用布局优化——以武汉市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(5):9-13.
- [4]JAMES M, FETHI A. Assessing urban sprawl using remote sensing and landscape metrics A[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2018, 5(32):31-42.
- [5]H. A B, M. C C, S V. Modelling urban dynamics in rapidly urbanising Indian cities[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2018, 3(21):201-210.
- [6]MARTINA A, LUIS I, PEILEI F. Urban sprawl, compact urban development and green cities. How much do we know, how much do we agree[J]. Ecological Indicators, 2019, 2(96):3-9.
- [7]高天, 邱玲, 陈存根. 生态单元制图在国外自然保护和城乡规划中的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2010, 25(6):978-989.
- [8]史同广, 郑国强, 王智勇, 等. 中国土地适宜性评价研究进展[J]. 地理进展, 2007, 2(26):106-115.
- [9]DAVID T, YOHAY C. Landscape patterns of development under two alternative scenarios Implications for conservation[J]. Land Use Policy, 2016(54):221-234.
- [10]WARD D, PHINN S R, MURRAY A T. Monitoring growth in rapidly urbanizing areas using remotely sensed data[J]. The Professional Geographer, 2000, 3(52):371-386.
- [11]JJANTZ C A, GOETZ S J, SHELLEY M K. Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in Baltimore-Washington metropolitan area[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2003(30):251-271.
- [12]马世发, 艾彬. 基于地理模型与优化的城市扩张与生态保护二元空间协调优化[J]. 生态学报, 2015, 35(17):5874-5883.
- [13]刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等. 京津冀城市群扩张模式对区域生态安全的影响预测[J]. 生态学报, 2018, 38(5):1650-1660.
- [14]LI X, LAO C, LIU X, et al. Coupling urban cellular automata with ant colony optimization for zoning protected natural areas under a changing landscape[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2011, 4(25):575-593.
- [15]张晓丹. 城市扩张对生态控制线的影响——以广州市为例[J]. 城市勘测, 2017(2):50-54.

-
- [16]陈逸敏,黎夏,刘小平,等.基于耦合地理模拟优化系统 GeoSOS 的农田保护区预警[J].地理学报,2010,65(9):1137-1145.
- [17]俞孔坚,李伟,李迪华,等.快速城市化地区遗产廊道适宜性分析方法探讨——以台州市为例[J].地理研究,2005,24(1):69-76.
- [18]吕圣东.环境模拟技术支持下城市生态廊道构建——以郑州市中牟文创区为例[J].中外建筑,2019(2):122-125.
- [19]李德毅,刘常昱,杜鹤,等.不确定性人工智能[J].软件学报,2004(11):1583-1594.
- [20]FRAYER J,SUN Z,MÜLLER D,et al.Analyzing the drivers of tree planting in Yunnan,China,with Bayesian networks[J].Land Use Policy,2014(36):248-258.
- [21]关小东,何建华.基于贝叶斯网络的基本农田划定方法[J].自然资源学报,2016,31(6):1061-1072.
- [22]邓金杰,陈柳新,杨成韞,等.高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例[J].地理研究,2017,36(3):573-582.
- [23]龚亚男,韩书成,朱永恒.基于 GIS 的土地适宜性评价——以安徽省铜陵县横冲流域为例[J].经济师,2018(3):26-28.
- [24]姜英超.基于 GIS 的威海环翠区城市土地适宜性评价[J].北京测绘,2018,5(32):594-598.
- [25]方然,孔雪松.武汉市城镇扩张适宜性与景观生态安全格局的时空耦合关系研究[J].测绘与空间地理信息,2018,41(7):29-33,38.
- [26]李益敏,朱军.基于 GIS 的区域土壤侵蚀敏感性评价——以怒江州为例[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(1):98-106.
- [27]崔娟敏,季文光,李洋宰.基于 NDVI 的山区土地生态环境质量时空变化研究[J].江苏农业科学,2018,46(8):264-267.
- [28]FEENEY S M,JOHNSON M C,MCEWEN J D,et al.Hierarchical Bayesian detection algorithm for early-universe relics in the cosmic microwave background[J].Physical Review D,2013,4(88).
- [29]JAMMALAMADAKA A,LI Z,JABERI F.Apriori and aposteriori assessment of SGS models for shock-boundary layer interactions[J].Bayesian Analysis,2010,3(8):723-740.
- [30]SUN Z L,MULLER D.A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models,Bayesian belief networks and opinion dynamics models[J].Environmental Modelling and Software,2013(45):15-28.
- [31]黎斌,何建华,屈赛,等.基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法[J].生态学报,2018,3(38):800-811.
- [32]QINGPING Z,WENQING L,JINGLAI L,et al.An approximate empirical Bayesian method for large-scale linear-Gaussian inverse problems[J].Inverse Problems,2018,9(34):95-100.

[33]CHAUDHARY A,HANTUSH M M. Bayesian monte carlo and maximum likelihood approach for uncertainty estimation and risk management:Application to lake oxygen recovery model[J]. Water Research, 2017, 108:301.

[34]VELASCO J, SAUCEDO-ESPINOSA M A, ESCALANTE. An estimation of distribution algorithm with adaptive Gibbs sampling for unconstrained global optimization[J]. Mathematics, 2011, 3(20):20-42.

[35]STÉPHANIE A, ESTELLE K. Convergent stochastic expectation maximization algorithm with efficient sampling in high dimension:Application to deformable template model estimation [J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2015, 91:4-19.

[36]T M J, J L R, CHRISTOPHER C. Using Bayesian belief networks to identify potential compatibilities and conflicts between development and landscape conservation[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 2(101):190-203.

[37]POLLINO C A, WOODBERRY O, NICHOLSON A, et al. Parameterisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological risk assessment[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 8(22):1140-1152.