

基于贝叶斯网络的生态用地流失机制研究

郑涛^{1,2,3}, 陈爽¹, 张童^{1,2}, 徐丽婷^{1,2}, 马丽雅^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 华东师范大学中国现代城市研究中心, 上海 200062)

摘要: 从中微观尺度对城市滨江地区生态用地流失进行驱动因素分析, 尤其将政策规划等具有重要影响力的因子进行量化分析, 可为生态用地开发与保护政策制定提供参考。利用贝叶斯网络模型综合考虑导致生态用地流失的邻域因子、自然因子和政策规划因子, 以良好的图形描述方法较为清晰地展示出生态用地变化及其驱动因子之间的过程关系。以南京滨江地区作为典型案例区, 研究表明: (1) 2005—2018年间, 南京滨江地区约 11.0% 的生态用地发生流失, 维持稳定的生态用地占比 89.0%; (2) 政策规划保护力是影响南京滨江地区生态用地流失的主要驱动因素, 城镇扩张惯性力次之, 二者对生态用地流失的敏感性分别为 9.37% 和 2.53%, 而开发阻力的敏感性仅为 0.21%; (3) 在政策规划因子中, 沿江岸线规划对维持生态用地稳定性的作用效果高于土地利用规划, 表明要使生态空间得以长期存在, 应制定基于生态用地功能目标的保护政策。

关键词: 生态用地; 贝叶斯网络; 驱动机制; 南京

生态用地作为自然空间的实体地域, 为人类的生存及发展提供重要物质基础和空间载体^[1]。改革开放以来, 受快速城镇化与工业化影响, 我国城市生态用地不断遭受侵蚀, 尤其在经济较为发达地区, 大量城郊的耕地、湿地、草地、林地等生态用地被开发为建设用地, 对生态系统造成极大的迫害, 导致各项生态系统服务功能价值的降低^[2]。仅 2009—2012年间, 中国生态用地的生态系统服务价值就减少了 2911.70 亿元, 其中减少较多的地区集中于东部和西部生态环境脆弱区^[3]。生态用地的减少对本身就较为脆弱的城市生态系统造成较大影响, 热岛效应、空气污染、水污染等城市病现象愈加频繁。

生态用地变化驱动机制研究是生态用地变化研究的核心问题之一。在论述生态用地变化及其驱动因子之间的关系时, 通常采用定性或定量的研究方法, 且定性研究多于定量分析, 后者主要见于简单或多元线性回归分析, 但这些方法存在一定局限性^[4]。如: 生态用地演变与其驱动因子关系复杂, 很难用纯粹的线性关系描述; 对政策规划等因子难以量化, 而该类因子在土地利用变化尤其是区域或局地尺度上往往起到关键作用。也有学者利用主成分分析^[5]和相关性分析^[6]等方法进行驱动因素研究, 但此类方法较难处理空间因变量和离散因变量, 不利于对驱动机制的深入探析^[7]。近些年来, 地理探测器模型^[8]、

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771140); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA23020101); 江苏省自然科学基金项目 (BK20181105)

作者简介: 郑涛 (1994-), 男, 江苏溧阳人, 硕士, 研究方向为城市土地利用及其生态效应。

E-mail: zhengtao16@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 陈爽 (1968-), 女, 湖南湘潭人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为城市化及其环境效应、景观生态规划。E-mail: schens@niglas.ac.cn

逻辑斯蒂回归模型^[7]等被应用于生态用地演变驱动机制研究，此类方法对离散变量和邻域因子等分析效果较好，但只是探讨自变量与因变量之间的统计关系，而不能体现生态用地的变化过程。贝叶斯网络模型融合了图论与概率论的特点，相对于传统的统计方法以及“黑匣子”式模型（如人工神经网络模型）^[9]，其良好的图形描述方法较清晰地展示出土地利用变化与其驱动因子间的复杂关系及其变化过程，有利于对驱动机制进行深入研究。贝叶斯网络模型具有强大的建模功能和完善的推理机制，能有效纳入影响生态用地变化的邻域因子和政策规划因子，且对离散变量的处理效果较好。此外，相对于只能进行单方向计算的传统回归法，贝叶斯网络模型没有查询方向的限制，可以进行由因到果的预测推理和由果到因的诊断分析^[10]。在研究尺度上，学者在国家^[11,12]、区域^[13,14]和城市^[15,16]层面进行了众多研究，对中微观尺度关注较少。随着研究的深入，增强中微尺度空间范围的典型生态用地变化驱动机制研究，对深入探析生态用地演变规律和制定生态用地管控策略具有重要意义^[17]。

目前，贝叶斯网络模型成功应用于水资源管理^[18-20]、农民退耕还林^[21-23]、土地利用冲突识别^[24]—规划划定^[25,26]与生态系统服务评估^[27,28]等，多数研究侧重于对利益相关者的座谈或问卷调查。也有学者利用该模型整合土地自身生物物理属性与管理者个人决策作用，针对土地利用变化驱动机制进行分析，但所构框架对政策规划等重要宏观因子有欠考虑^[29]。本文基于客观的土地利用变化条件数据，在模型中纳入政策规划等因素，结合专家经验知识与实际观测数据，使所得结论更为真实有效，同时采用网格化的大样本量以提高模型精度，对补充土地利用变化驱动机制方法研究具有一定创新意义。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

南京地处长江下游平原，拥有近200 km的长江干流岸线和100 km的洲岛岸线，是江苏省唯一跨江发展的城市。滨江地区作为南京市极为重要的工业生产基地，“九五”期间约八百亿元工业固定资产投资于此（占总投资额的80%）。南京港作为远东内河第一大港，承担着长江航道重要运输功能。鉴于长江岸线资源对于南京市乃至江苏省社会发展的重要性，早在2003年江苏省和南京市便先后实施沿江大开发战略，南京滨江地区生态用地在近十五年内变化十分显著。同时，南京城市滨江带具有山、水、城、林、洲相融合的特色环境，拥有丰富的水资源和湿地资源，其生态用地不仅面积巨大，且种类丰富，具有较高生态系统服务功能，对维持生物多样性也有重要意义。

此外，长江南京段穿过南京主城，滨江地区对城市防洪和生态安全格局具有重要意义。长期以来，滨江土地开发与保护政策及相关专项规划对该区域生态用地变化影响显著。故本文选取南京滨江1 km范围及江中各洲岛作为生态用地流失驱动机制分析的典型案例区（图1），尝试利用贝叶斯网络模型将生态用地流失的人为管理因素和自身区位属性结合起来，构建一个由邻域因子、自然因子和政策规划因子等驱动因素组成的一般理论分析框架，深入探析城市滨江地区生态用地演变的驱动机制。

1.2 数据来源与处理

本文样本数据主要来源于南京滨江地区2005年和2018年的土地利用现状图、南京市

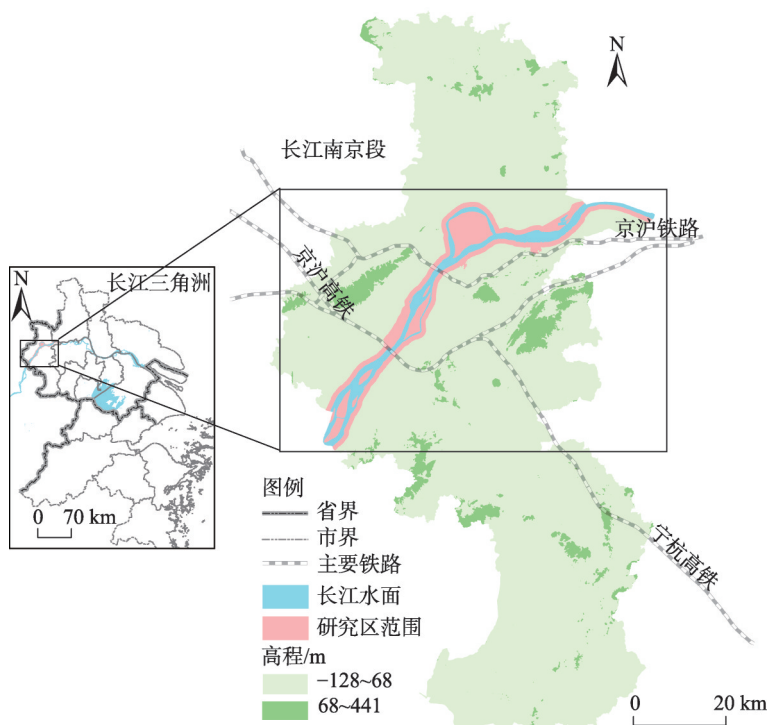


图1 研究区范围

Fig. 1 Location of the study area

土地利用规划图、南京市行政区划图、南京市DEM高程图、南京市沿江岸线规划等，同时利用ArcGIS空间分析工具得到各邻域因子的要素值。

以2005年研究区内生态用地为生成范围（面积小于 0.1 hm^2 的斑块舍去），由于本文采用的土地利用矢量数据分辨率为 1 m ，2005—2018年间生态用地流失斑块的平均面积为 11891 m^2 （表1），为保证大多流失斑块上能够被采样，故利用ArcGIS中的格网工具生成 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的网格，取落在所有生态用地斑块上的网格中心点为有效样点，共计生成21536个样点（图2）。

表1 2005—2018生态用地流失斑块特征

Table 1 Characteristics of ecological land patches lost in 2005-2018

地类名称	斑块数量/个	面积最小值/ m^2	面积最大值/ m^2	平均面积/ m^2	总面积/ m^2
耕地	760	1010	345189	12041	9150952
水域	511	1000	119959	7292	3726333
内陆滩涂	86	1033	433536	37764	3247727
其他土地	220	1003	384412	20199	4443814
园地	359	1002	101609	8124	2916641
林地	87	1022	59405	8220	715158
草地	77	1003	53351	10002	770180
总计	2100	1000	433536	11891	24970805

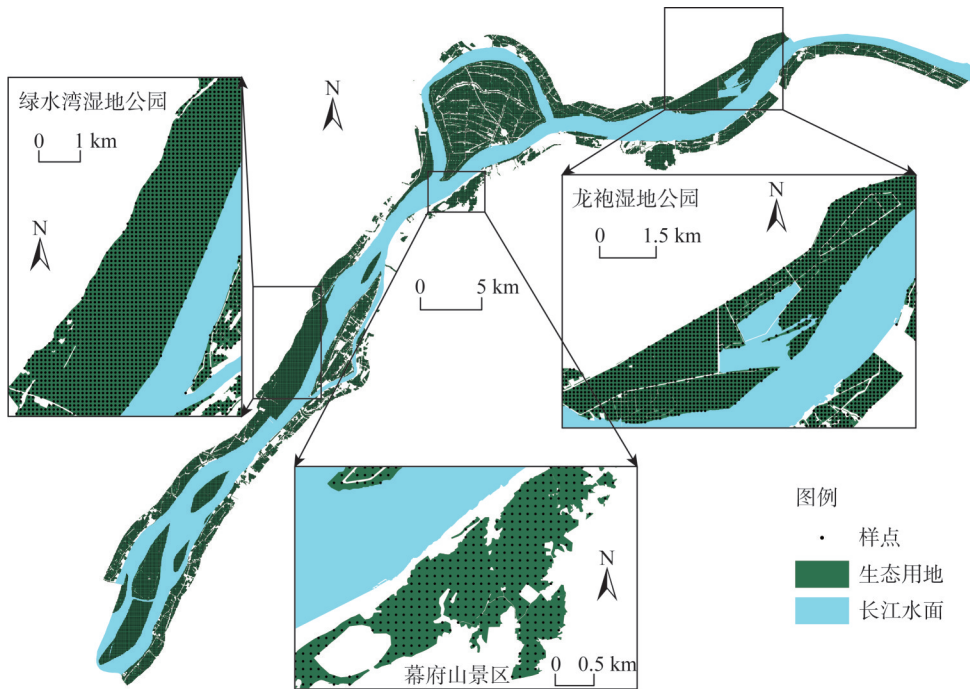


图2 生成样点空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of sample points

2 贝叶斯网络模型框架设定

2.1 贝叶斯网络模型

贝叶斯网络 (Bayesian Network, BN) 最初由美国学者 Pearl^[30]于 1988 年提出, 可将多元知识图解可视化, 是基于概率论和图论的不确定知识表示和推理模型。作为一种非参数统计工具, 贝叶斯网络模型依靠贝叶斯式 (1) 来推断解释变量对相关结果的影响, 它通常由两部分组成: 一是有向无环图 (Directed Acyclic Graph, DAG), 即贝叶斯网络结构, 用于描述变量之间的相互依赖关系, 用有向箭头连接不同的节点 (变量); 二是条件概率表 (Conditional Probability Tables, CPTs), 即贝叶斯网络参数, 它反映了节点之间因果关系的强弱^[31]。

$$P(Y|X) = P(XY)/P(X) \quad (1)$$

式中: $P(Y|X)$ 是事件 Y 在事件 X 已发生条件下的发生概率; $P(XY)$ 是事件 X 与事件 Y 的联合概率, 即两个事件共同发生的概率; $P(X)$ 是事件 X 的先验概率。

在贝叶斯网络结构中, 如果节点 A 与节点 B 存在依赖关系, 则用有向弧链接 A 和 B , 若有向弧由 A 指向 B , 则称 A 为 B 的父节点, B 为 A 的子节点; 反之则称 B 为 A 的父节点, A 为 B 的子节点。若某变量没有父节点, 则称该变量的条件概率为先验概率。假设用 S 代表贝叶斯网络结构, 则 S 由节点变量集 $V(V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\})$ 和有向边 $L(L = V_i V_j | V_i, V_j \in V)$ 组成。其中, 节点变量 V_i 是所研究问题的抽象表示, 而有向边 L 是节点变量 V_i, V_j 之间的依赖或因果关系。贝叶斯网络结构可表示为^[32]:

$$S = (V, L) \quad (2)$$

节点变量之间的参数是反映该节点间局部关联性的概率分布集，其表达式如下：

$$P = \{P(V_i | V_1, V_2, V_3, \dots, V_{i-1}), V_i \in V\} \tag{3}$$

如果用 V_{pi} 表示变量 V_i 的父节点集，则 V 的联合概率分布为：

$$P(V) = P(V_1, V_2, V_3, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^n P(V_i | V_{pi}) \tag{4}$$

目前，可以构建贝叶斯网络模型的平台包括：Bayes Net Toolbox (BNT)、Netica、Hugin、BayesBuider、Genie、JavaBayes 等，其中 Murphy^[33] 基于 Matlab 语言开发的 BNT 工具箱包含丰富的底层基础函数，能够满足用户的多样需求，但缺乏良好的图形用户界面 (GUI)^[32]。由 Norsys 公司利用 Java 语言开发的 Netica 软件因其提供了一个易于操作的图形界面且具备强大的诊断性分析和敏感性分析功能，所以成为当今应用十分广泛的贝叶斯网络软件^[34]，但缺陷是其推理算法较为单一。故本文主要利用 Matlab 2016b 软件中 BNT 工具箱以及 Netica 软件来构建和训练贝叶斯网络模型。图 3 为贝叶斯网络模型构建的技术流程。

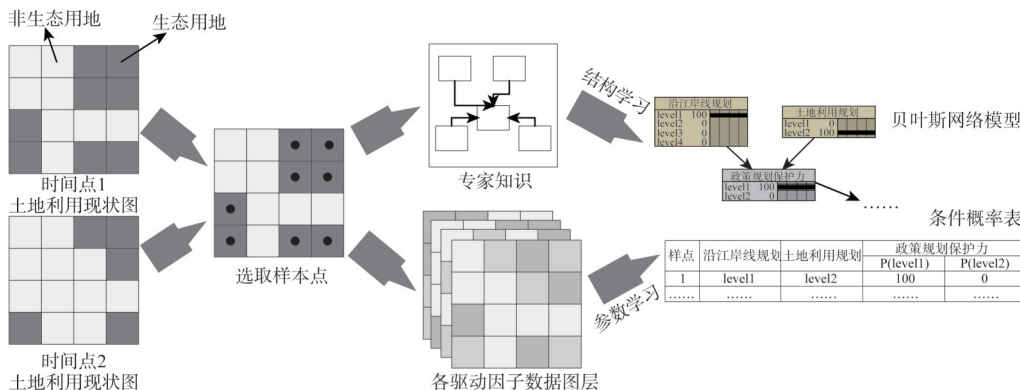


图 3 贝叶斯网络模型构建流程

Fig. 3 Flowchart of Bayesian network model construction

2.2 网络节点变量选取与离散化

贝叶斯网络模型中所选节点变量须有效体现研究对象内在的逻辑关系，通常可以将节点变量归为三类：(1) 输入层节点变量，即分析问题的起始因素；(2) 中间层节点变量，能有效表达网络输入与输出之间的映射关系，也是区别于其他“黑箱”模型的特征所在；(3) 输出层节点变量，通常为可观察变量或者是假设变量，一般是较为关心的研究目标^[32]。

通过对他人文献的阅读，结合南京滨江地区生态用地的实际特征，将生态用地变化的驱动因子主要分为邻域因子、自然因子和政策规划因子三类。自然条件、自然灾害等自然驱动因子，是人类进行土地开发利用的基础，在长时间大空间尺度上作用明显，但由于本文研究区（南京滨江地区）的自然条件变化微小，研究年限较短（2005—2018年），自然灾害等不可控因子和气候降水等大尺度条件因子的作用较小，故本文所选自然因子主要为：高程、坡度、距长江水面距离和土地类型。自然因子较能反映生态用地的开发阻力，一般认为沿江高程过低（易积水）过高（山地）、坡度较大等地区开发阻力较强；林地（受森林法保护、土地平整成本较大）、内陆滩涂（地质条件较差，土地开发成本较

大)等较裸地、草地、园地等开发阻力较强。政策规划因子主要指人类各种社会、经济、政治活动对土地内部结构、利用方式和强度的影响,本文主要选取土地利用规划、沿江岸线规划作为政策规划因子,表征政策规划对生态用地的保护力。鉴于沿江生态用地的重要生态服务功能和防洪功能,土地利用规划中允许建设区外对建设开发的限制、沿江岸线规划中生态岸线的划定,都在一定程度上体现政策规划对其保护力度。邻域因子表征空间外部性因素对生态用地产生的影响,选取距主干道距离、距镇中心距离、距已开发地块距离和距工业园距离作为主要邻域因子,表征城镇扩张的惯性力对生态用地流失的驱动。一般认为,距离主干道、镇中心、已开发地块和工业园的距离越近,生态用地流转为建设用地的可能性越大,其城镇扩张惯性力较强。除选取以上输出层变量外,选取城镇扩张惯性力、开发阻力和政策规划保护力这三个中间节点映射邻域因子、自然因子、政策规划因子与目标变量之间的关系,体现模型结构之间的因果关系,具体选取情况见表2。

表2 生态用地流失驱动因素指标体系

Table 2 Drivers and indicators of ecological land loss

因子层	指标层
邻域因子	距主干道距离、距镇中心距离、距已开发地块距离、距工业园距离、城镇扩张惯性力
自然因子	高程、坡度、距长江水面距离、土地类型、开发阻力
政策规划因子	土地利用规划、沿江岸线规划、政策规划保护力
目标变量	生态用地流失概率

将21536个训练样本点与各要素图层叠置分析获取各变量参数值,其中连续变量参数的描述性统计分析如图4所示。由于贝叶斯网络模型处理离散变量效果较好,且目前的概率推理算法大多采用离散表处理,所以针对连续变量需进行离散化处理,离散标准如表3所示。

2.3 网络结构构建和参数学习

贝叶斯网络构建主要包括模型结构构建和节点参数学习这两大部分,体现节点变量间定量和定性关系。传统的三阶段分析、SGS等纯粹机器学习算法可以得到变量间的统计学联系^[24],但不能反映变量之间真实的因果关系,且变量之间影响的方向不能由机器学习决定^[21]。故本文采用专家经验法,基于因子间的因果关系,在Matlab软件中编写程序构造贝叶斯网络结构,结果如图5所示。

贝叶斯网络模型的参数学习主要指在已知网络结构的前提下,通过样本数据来求得各节点之间的条件概率分布。当样本数据完整时,可采用最大似然估计或贝叶斯算法;当样本数据不完整时,假若已知网络拓扑结构,则采用EM算法,未知网络拓扑结构则采用结构最大期望(SEM)算法^[35]。由于本次研究样本数据完整,故采用最大似然法进行参数学习,并在Matlab BNT工具箱中编写程序设计实现。

2.4 网络敏感性和诊断性分析

敏感性分析和诊断性分析可以对贝叶斯网络模型中各因子之间的关系进行有效衡量^[36]。敏感性分析是利用贝叶斯网络正向推理能力,通过改变输入变量并观察目标变量响应概率的变化幅度来评价输入变量对目标变量的影响,这种变化幅度可以通过方差缩减(Variance Reduction)来表示,其计算过程见式(5)。为了便于比较,分析结果一般

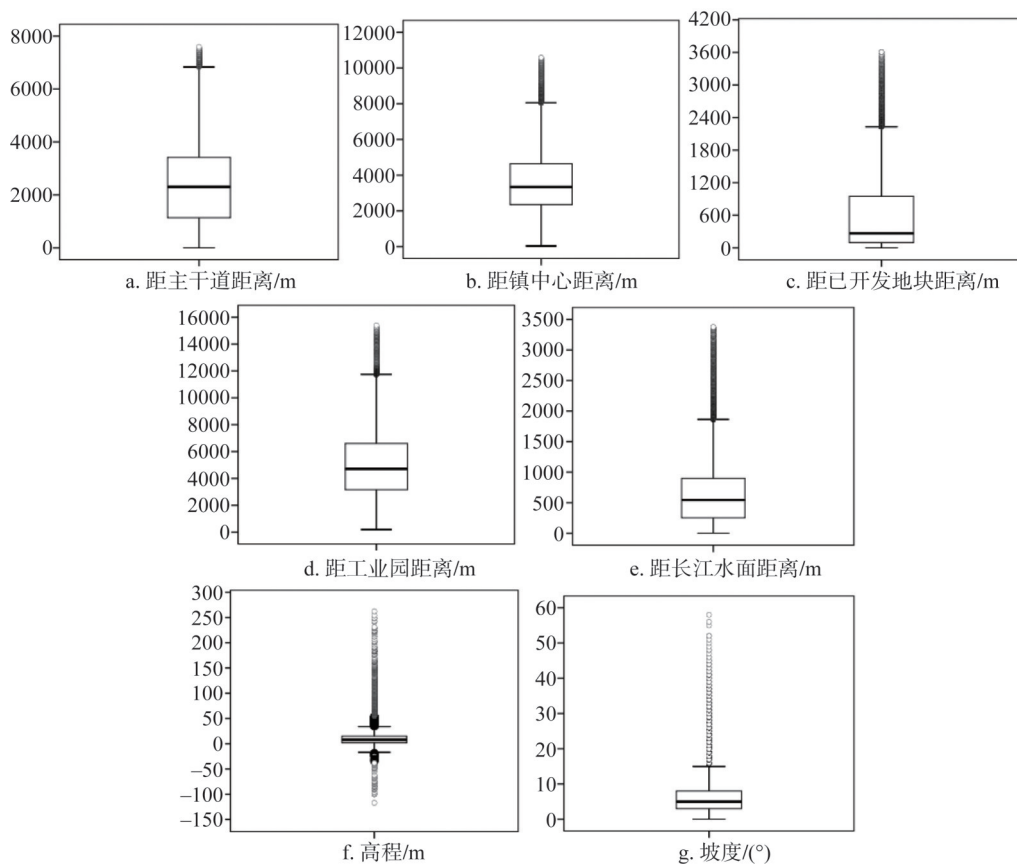


图4 各连续变量箱线图

Fig. 4 Boxplot of continuous variables

用方差缩减的百分比表示，值越大表示输入变量对目标变量的影响力越大^[37]。诊断性分析则是对目标变量设置一个特定状态，然后观察影响因子的概率变化幅度来评定后者的影响，其结果一般用概率值的变化程度表示，概率值变化越大表明该影响因子对目标变量的作用效果越大。本文利用Netica软件对贝叶斯网络模型进行敏感性和诊断性分析。

$$VR = V(ES) - V(ESI) = \sum_s P(s) \times (s - E[ES])^2 - \sum_s P(s|I) \times (s - E[ESI])^2 \quad (5)$$

式中： VR 表示方差缩减； $V(ES)$ 表示变量 ES 的方差； $V(ESI)$ 表示已知变量 I 情况下变量 ES 的方差； s 表示输出变量的状态。

3 结果分析

3.1 网络构建结果

将经过结构学习与参数学习后的贝叶斯网络在Netica软件中进行可视化(图6)，可以看出，2005—2018年间生态用地流失情况严重，约11.0%的生态用地转为非生态用地，维持稳定的生态用地占比89.0%。在空间分布上，将研究区2005年与2018年的土地利用数据进行叠加，自长江上游至下游以每5 km分段统计生态用地的流失程度(江心洲岛算为独立样本)，再按自然断裂法分为五级：弱、较弱、一般、较强和强。由图7可

表3 变量离散分级表

Table 3 The classification of discrete variables

变量名称	数值类型	等级代码							
		1	2	3	4	5	6	7	
目标变量									
生态用地流失概率	离散	是	否						
自变量									
邻域因子									
距主干道距离/m	连续	<1000	1000~2000	2000~4000	>4000				
距镇中心距离/m	连续	<2000	2000~4000	4000~6000	>6000				
距已开发地块距离/m	连续	<300	300~600	600~1200	>1200				
距工业园距离/m	连续	<2000	2000~4000	4000~8000	>8000				
城镇扩张惯性力	离散	强	弱						
自然因子									
高程/m	连续	<-50	-50~0	0~50	>50				
坡度/(°)	连续	0~2	2~5	5~15	>15				
距长江水面距离/m	连续	<250	250~500	500~750	>750				
土地类型	离散	耕地	园地	林地	草地	水域	其他土地	内陆滩涂	
开发阻力	离散	强	弱						
政策规划因子									
土地利用规划	离散	允许建设	非允许建设						
沿江岸线规划	离散	生态	生活	生产	其他				
政策规划保护力	离散	强	弱						

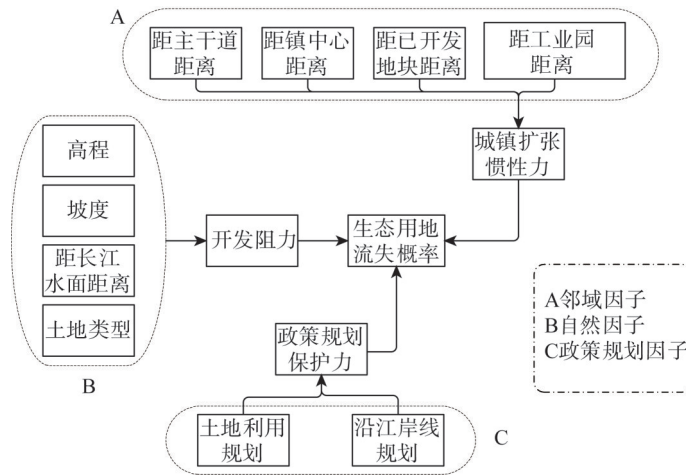


图5 贝叶斯网络模型结构

Fig. 5 The structure diagram of Bayesian network

知，流失程度较为严重的生态用地主要位于浦口区江浦街道与顶山街道交界处、河西新城南部双闸街道、栖霞区龙潭街道等，分别临近于珠江工业园区、雨花开发区和栖霞开发区，由于城乡过渡带房地产开发、滨江大道修建等使得较多耕地、园地、水域等生态用地转为建设用地。生态用地维护较好区域主要位于浦口区绿水湾湿地公园和六合区龙

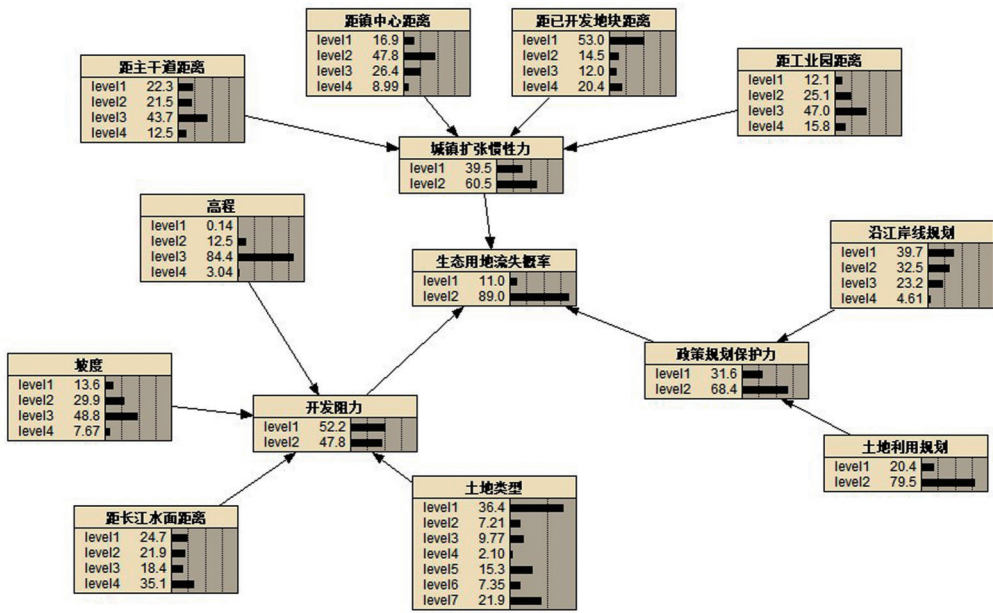


图6 贝叶斯网络模型训练结果
Fig. 6 The training results of Bayesian network

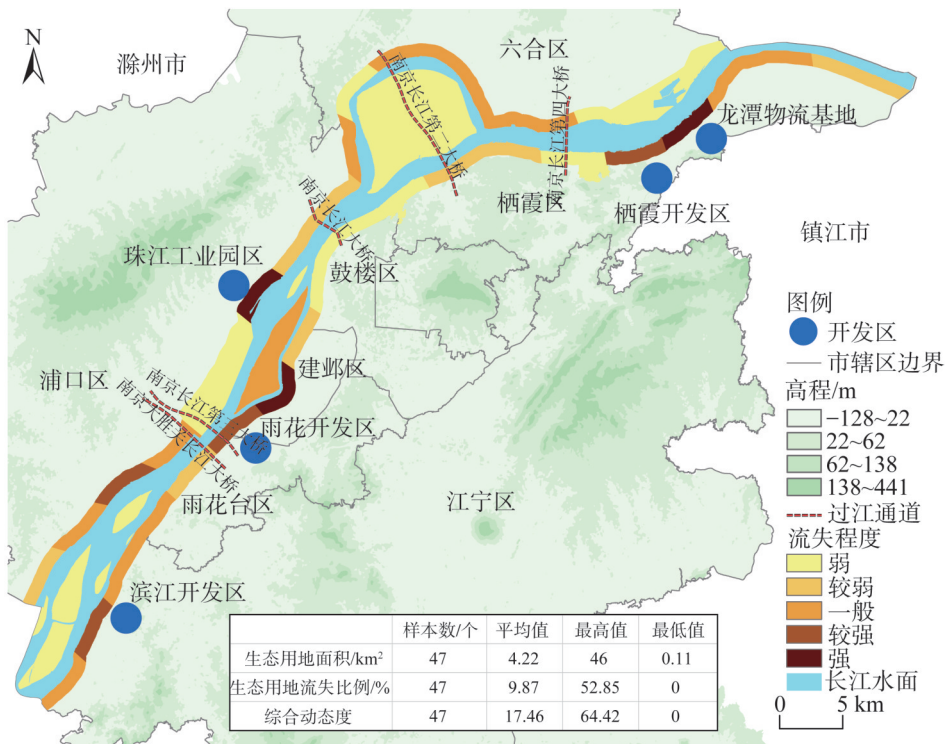


图7 2005—2018年南京滨江地区生态用地流失程度分布及与产业园区关系
Fig. 7 Ecological land loss and industrial parks distribution along the Yangtze River in Nanjing between 2005-2018

袍湿地公园，江心诸洲岛中，除江心洲因建设开发而流失较多生态用地外，其余洲岛生态用地流失程度较低。

此外，受城镇扩张惯性力较强的生态用地面积占比约为39.5%，主要受距主干道距离和距已开发地块距离的影响，其中“近或较近”的生态用地分别占比43.8%和67.5%；开发阻力较大的地块面积占比约为52.2%，主要受到土地类型和距长江水面距离的影响；而政策规划保护力较强的地块面积占比约为31.6%，其主要影响因子为沿江岸线规划。

3.2 网络敏感性分析结果

以目标变量“生态用地流失概率”为分析变量，利用Netica软件对其他变量进行敏感度分析，以体现各自变量对目标变量的影响力大小，分析结果如表4所示。由表4可知，13种驱动因子对目标变量的影响效果各不相同。在中间层节点中，政策规划保护力对生态用地流失概率作用显著，其方差缩减百分比高达9.37%；城镇扩张惯性力对生态用地流失概率作用高达2.53%；而开发阻力对生态用地流失的影响效果相对较低，仅为0.21%。在输入层节点因子中，政策规划因子对生态用地流失概率作用较大，其中沿江岸线规划的方差缩减百分比高达5.42%，而土地利用规划的方差缩减百分比为0.74%；邻域因子中距主干道距离、距已开发地块距离、距工业园距离的方差缩减百分比分别为0.43%、0.27%和0.27%，距镇中心距离的影响效果相对较低，其方差缩减百分比为0.17%；自然因子对生态用地流失概率的影响相对较小，仅土地类型变量的方差缩减百分比达到0.08%，而距长江水面距离、坡度和高程变量的方差缩减百分比都普遍较小，表明地形条件对南京滨江地区生态用地流失概率的作用甚微。

表4 目标变量敏感性分析结果

Table 4 Sensitivity to target variables (%)

节点名称	方差缩减
政策规划保护力	9.37
沿江岸线规划	5.42
城镇扩张惯性力	2.53
土地利用规划	0.74
距主干道距离	0.43
距已开发地块距离	0.27
距工业园距离	0.27
开发阻力	0.21
距镇中心距离	0.17
土地类型	0.08
距长江水面距离	0.06
坡度	0.01
高程	0

3.3 网络诊断性分析结果

选取政策规划保护力、沿江岸线规划、土地利用规划、城镇扩张惯性力等影响力较大的因子，进行诊断性分析。利用贝叶斯网络模型反向推理，获取影响因子与目标变量之间的定量因果关系。将生态用地流失概率值设定为“level 2”，即假设所有生态用地都维持稳定不发生流失，观察影响因子概率表的变化情况，结果如表5所示。

从表5中可知，政策规划保护力因子“强”状态的概率提高3.6%，沿江岸线规划因子“生态”状态的概率提高3.1%，土地利用规划因子“非允许建设”状态的概率提高1.1%，表明沿江地区政策规划因素可以有效维护生态用地的稳定性，其中沿江岸线规划中针对生态用地的保护划定生态岸线，其保护力度较土地利用规划中允许建设区更强。城镇扩张惯性力因子“强”状态下降2.4%，距主干道距离因子“<1000 m”状态、距已开发地块距离因子“<300 m”状态、距工业园距离因子“<2000 m”状态和距镇中心

表5 诊断性分析结果
Table 5 Diagnostic analysis results (%)

变量名称	变量状态	概率变化	变量名称	变量状态	概率变化
政策规划保护力	强	+3.6	城镇扩张惯性力	强	-2.4
	弱	-3.6		弱	+2.4
沿江岸线规划	生态	+3.1	距主干道距离/m	< 1000	-0.7
	生活	-1.7		1000~2000	-0.2
	生产	-1.2		2000~4000	+0.7
	其他	-0.2		> 4000	+0.3
土地利用规划	允许建设	-1.0	距已开发地块距离/m	< 300	-0.7
	非允许建设	+1.1		300~600	+0.1
开发阻力	强	+0.7		600~1200	+0.3
	弱	-0.7		> 1200	+0.3
土地类型	耕地	-0.3	距工业园距离/m	< 2000	-0.4
	园地	0		2000~4000	-0.3
	林地	+0.1		4000~8000	+0.5
	草地	0.0		> 8000	+0.2
	水域	-0.1	距镇中心距离/m	< 2000	-0.4
	其他土地	0		2000~4000	-0.1
	内陆滩涂	+0.3		4000~6000	+0.3
			> 6000	+0.1	

因子“< 2000 m”状态的概率分别下降0.7%、0.7%、0.4%和0.4%，表明远离建设用地的生态用地更能得到有效维护。开发阻力因子“强”状态的概率上升0.7%，表明开发阻力大的生态用地相对不易流失。土地类型因子中，“林地”和“内陆滩涂”的概率分别上升0.1%和0.3%，表明开发难度较大的林地和内陆滩涂相对于裸地、园地、耕地等不易流失。

4 结论与讨论

4.1 讨论

生态用地变化对区域生态安全作用显著，传统量化分析方法对生态用地变化驱动机制因果关系的体现不够明晰，且对政策规划等重要因子难以量化，但对于一些重要区域（如城市滨江地区），其生态功能和经济功能都十分重要，故政策规划因素作用巨大。从模型分析结果可以看出，政策规划保护力对生态用地流失起主要驱动作用，明显高于城镇扩张惯性力和开发阻力。由此可以推断，城市滨江具有重要防洪和生态保障功能的生态用地，其流失多缘于自上而下的有计划开发，政府制定的政策规划具有较强调控作用。同时，发现在政策规划因子中，沿江岸线规划由于其专门划定生态岸线保护边界，对生态用地的维护效果较土地利用规划更好。从生态空间的认知上看，一般存在三个层次^[38]，一是空间边界的形成，二是管理和政策边界的形成，三是文化和意象认知边界的形成。因此，要使生态空间得以长期存在不仅需要在地利用规划中对建设用地面积加以限制，更应当专门制定基于生态用地功能目标的保护政策，如沿江岸线功能规划、生态红线规划等，最为重要的是要加强公众认知水平建设，使得生态用地真正成为社会发

展和人们生活不可或缺的部分。

同时，城镇扩张惯性力对生态用地流失的驱动作用也不容忽视，其中距主干道距离、距已开发地块距离和距工业园距离均对生态用地的流失概率产生影响，这与南京滨江地区生态用地实际流失状况一致，也符合建设用地适宜性的要求。由于滨江地区生态用地的开发建设权大多在市区级政府，开发项目多为房地产建设、工业园区配套设施建设或滨江大道修建，所以距镇中心距离对生态用地的流失概率影响力相对较弱。因此，为避免城镇扩张惯性力加剧生态用地的流失概率，政府部门应制定相应规划条例严格限制在具有重要生态功能的地区周围进行开发建设，也应当权衡新修建主干道对周围生态用地的影响。而自然因子对生态用地流失的影响力均较弱，综合来说，开发阻力较大的生态用地相对而言更为稳定。

在本次研究中，贝叶斯网络模型对分析生态用地流失驱动机制的应用效果良好，其较强的建模功能和完善的推理机制可以有效融合专家知识与实际观测数据。在目前研究阶段，利用纯粹的机器学习算法求得网络结构一般与变量间实际因果关系差别较大，且在确定变量间联系方向上还有待改进，所以采用专家知识构建网络结构较受推崇^[21,26,39]。实际应用中，贝叶斯网络模型仍存在一些不确定性，主要体现在网络结构不确定、观测样本不确定和节点参数不确定^[40]。本文从城乡用地变化的演进规律出发，依据相关文献资料及专家经验知识，并结合研究区实际情况，构建了贝叶斯网络结构，但还有其他因子如研究区内人口、人均收入等对生态用地演变也具有一定影响作用，应在今后的研究中将其纳入模型，进而完善生态用地流失驱动机制框架。本文样本数据主要基于ArcGIS空间分析得到，数据完备且客观，故观测样本的不确定性较低，但观测数据主要为政策规划、邻域因子和自然因子数据，且多数基于空间关系，针对居民、企业个体的大样本调查不足，在今后研究中应进行补充完善。节点参数不确定性主要由连续变量和离散变量的等级划分产生^[20]，本文主要依据文献资料和专家知识进行分级，未来可以探索更加精准的分类方法来降低节点参数不确定性。

4.2 结论

(1) 南京滨江地区生态用地主要以耕地、内陆滩涂、水域和林地为主，其面积占比分别为36.4%、21.9%、15.3%和9.77%。2005—2018年间研究区内生态用地流失情况严重，约11.0%的生态用地转为非生态用地，维持稳定的生态用地占比89.0%。

(2) 政策规划保护力是导致南京滨江地区生态用地流失的主要驱动因素，城镇扩张惯性力次之，开发阻力的影响作用最弱。政策规划因子中沿江岸线规划的驱动作用较土地利用规划更大，表明要使生态空间得以长期存在，应制定基于生态用地功能目标的保护政策。邻域因子中距主干道距离、距已开发地块距离和距工业园距离的作用效果也相对较强，表明政府部门应制定相应规划条例严格限制在具有重要生态功能的地区周围进行开发建设，也应当权衡新修建主干道对周围生态用地的影响。

(3) 贝叶斯网络模型相较于传统生态用地变化驱动机制量化方法而言，较能体现变量之间的因果关系，对政策规划等因素量化效果较好。同时，由于其能有效结合专家经验知识和真实的生态用地变化数据，分析结果较为可靠，可为生态用地保护与开发政策制定提供有力支撑。

参考文献(References):

- [1] 祁帆, 李宪文, 刘康. 自然生态空间用途管制制度研究. 中国土地, 2016, (12): 21-23. [QI F, LI X W, LIU K. Research on the control system of natural ecological space use. China Land, 2016, (12): 21-23.]
- [2] 黄敏, 杨飞, 郑士伟. 中国城镇化进程对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2019, 26(1): 352-359. [HUANG M, YANG F, ZHENG S W. Impact of urbanization process on ecosystem service value in China. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 352-359.]
- [3] 管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 等. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报, 2018, 33(2): 195-207. [GUAN Q C, HAO J M, SHI X J, et al. Study on the changes of ecological land and ecosystem service value in China. Journal of Natural Resources, 2018, 33(2): 195-207.]
- [4] 倪绍祥. 土地利用/覆被变化研究的几个问题. 自然资源学报, 2005, 20(6): 138-143. [NI S X. Some issues in the study on land use/cover change. Journal of Natural Resources, 2005, 20(6): 138-143.]
- [5] 郭玲霞, 黄朝禧. 基于主成分分析法的武汉市生态用地变化驱动研究. 天津农业科学, 2011, 17(2): 37-41. [GUO L X, HUANG C X. Research on the driver of Wuhan city's ecological land change based on the principal component analysis. Tianjin Agricultural Sciences, 2011, 17(2): 37-41.]
- [6] 李晶辉. 郑州市土地利用变化及驱动力分析. 郑州: 河南农业大学, 2006. [LI J H. Analysis on land use change and its driving forces in Zhengzhou city. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006.]
- [7] 王海军, 刘艺明, 张彬, 等. 基于 Logistic-GTWR 模型的武汉城市圈城镇用地扩展驱动力分析. 农业工程学报, 2018, 34(19): 248-257, 310. [WANG H J, LIU Y M, ZHANG B, et al. Analysis of driving forces of urban land expansion in Wuhan metropolitan area based on Logistic-GTWR model. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 248-257, 310.]
- [8] 李颖, 冯玉, 彭飞, 等. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变. 经济地理, 2017, 37(12): 180-189. [LI Y, FENG Y, PENG F, et al. Pattern evolvement of ecological land in Tianjin based on geodetector. Economic Geography, 2017, 37(12): 180-189.]
- [9] 化虎蝶, 王晨祥. 基于贝叶斯网络的大连市空气质量预测与诊断. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 58-63. [HUA H D, WANG C X. Prediction and diagnosis of air quality in Dalian city based on Bayesian networks. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 58-63.]
- [10] 滕丽华, 魏俊. 基于贝叶斯网的生态工业园环境影响因子的分析方法研究. 工业技术经济, 2008, 27(12): 78-80. [TENG L H, WEI J. Research of analysis method of eco-industrial park environmental impact factor based on Bayesian network. Industry Economic and Technical, 2008, 17(12): 78-80.]
- [11] 刘继来, 刘彦随, 李裕瑞. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析. 地理学报, 2017, 72(7): 1290-1304. [LIU J L, LIU Y S, LI Y R. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of "production-living-ecological" spaces in China. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1290-1304.]
- [12] 陈瑜琦, 张智杰, 郭旭东, 等. 中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究. 中国土地科学, 2018, 32(2): 19-26. [CHEN Y Q, ZHANG Z J, GUO X D, et al. Spatial-temporal analysis on ecological land changes in the key ecological functional areas in China. China Land Science, 2018, 32(2): 19-26.]
- [13] 牛高华. 长江三角洲地区土地利用变化与耕地非农化分析. 南京: 南京农业大学, 2006. [NIU G H. Research on the change of land use and conversion of arable land in the Yangtze River Delta. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.]
- [14] 安国强. 基于 EKC&Lorenz Curve 的山东省生态用地时空演变及保护区划研究. 中国土地科学, 2018, 32(9): 89-96. [AN G Q. Spatio-temporal evolution and conservation zoning of ecological land in Shandong province based on EKC & Lorenz Curve. China Land Science, 2018, 32(9): 89-96.]
- [15] 陈爽, 刘云霞, 彭立华. 城市生态空间演变规律及调控机制: 以南京市为例. 生态学报, 2008, 28(5): 2270-2278. [CHEN S, LIU Y X, PENG L H. Dynamics of urban ecological space evolution and policy responses: A case study of Nanjing city. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2270-2278.]
- [16] 马才学, 孟芬, 赵利利. 1990—2005 年武汉市土地利用时空变化及其政策驱动因素分析. 水土保持研究, 2015, 22(2): 117-122. [MA C X, MENG F, ZHAO L L. Analysis on spatio-temporal change of land use and its policy-driven factor in Wuhan city from 1990 to 2005. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 117-122.]
- [17] 周锐, 胡远满, 王新军, 等. 快速城镇化地区生态用地演变及驱动力分析. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6): 1012-

1020. [ZHOU R, HU Y M, WANG X J, et al. Change characteristics of ecological land and its driving factors in rapidly urbanizing region. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(6): 1012-1020.]
- [18] 卢文喜, 罗建男, 鲍新华. 贝叶斯网络在水资源管理中的应用. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(1): 153-158. [LU W X, LUO J N, BAO X H. Application of Bayesian network in water resource management. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(1): 153-158.]
- [19] PHAN T D, SMART J C R, CAPON S J, et al. Applications of Bayesian belief networks in water resource management: A systematic review. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 85(C): 98-111.
- [20] 曾莉, 李晶, 李婷, 等. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化. *地理学报*, 2018, 73(9): 1809-1822. [ZENG L, LI J, LI T, et al. Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief network. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1809-1822.]
- [21] FRAYER J, SUN Z, MULLER D, et al. Analyzing the drivers of tree planting in Yunnan, China, with Bayesian networks. *Land Use Policy*, 2014, 36(1): 248-258.
- [22] 王欣. 贝叶斯网络在退耕农民土地利用行为中的应用. 西安: 西安科技大学, 2016. [WANG X. The application of Bayesian networks in land use behavior of farmers participation in retired farmland. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.]
- [23] SUN Z L, MULLER D. A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45: 15-28.
- [24] MCCLOSKEY J T, LILIEHOLM R J, CRONAN C. Using Bayesian belief networks to identify potential compatibilities and conflicts between development and landscape conservation. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(2): 0-203.
- [25] 关小东, 何建华. 基于贝叶斯网络的基本农田划定方法. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1061-1072. [GUAN X D, HE J H. Prime farmland protection zoning based on Bayesian network. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 1061-1072.]
- [26] 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. *生态学报*, 2018, 38(3): 800-811. [LI B, HE J H, QU S, et al. A method of delimiting urban ecological red line protection area based on Bayesian network. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 800-811.]
- [27] INGE A. Modeling land-use decision behavior with Bayesian belief networks. *Ecology and Society*, 2008, 13(1): 1-23.
- [28] LANDUYT D, BROEKX S, GOETHALS P L M. Bayesian belief networks to analyse trade-offs among ecosystem services at the regional scale. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 327-335.
- [29] LANDUYT D, BROEKX S, D'HONDT R, et al. A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 46: 1-11.
- [30] PEARL J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [31] JENSEN F. *Bayesian Networks and Decision Graphs*. New York: Springer, 2002.
- [32] 陈静, 蒋正凯, 付敬奇. 基于Netica的自学习贝叶斯网络的构建. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(11): 1687-1693. [CHEN J, JIANG Z K, FU J Q. Construction of self-learning Bayesian network based on Netica. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(11): 1687-1693.]
- [33] MURPHY K P. The bayes net toolbox for Matlab. *Computing Science and Statistics*, 2001, 33(2): 1024-1034.
- [34] MAHJOUR M A, KALTI K. *Software Comparison Dealing with Bayesian Networks*. International Conference on Advances in Neural Networks. Springer-Verlag, 2011.
- [35] 蒋望东, 林士敏. 基于贝叶斯网络工具箱的贝叶斯学习和推理. *信息技术*, 2007, (2): 5-8, 31. [JIANG W D, LIN S M. Bayesian learning and inference algorithm based on Bayesian networks toolbox. *Information Technology*, 2007, (2): 5-8, 31.]
- [36] POLLINO C A, WOODBERRY O, NICHOLSON A, et al. Parameterisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological risk assessment. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(8): 1140-1152.
- [37] LANDUYT D, BROEKX S, ENGELEN G, et al. The importance of uncertainties in scenario analyses: A study on future ecosystem service delivery in Flanders. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 504-518.

- [38] PADT F J G, WESTERINK J. Addressing scale in open space preservation: Learning from the hague region in the Netherlands. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 2012, 103(5): 601-614.
- [39] HECKERMAN D, GEIGER D, CHICKERING D M. Learning Bayesian networks: The combination of knowledge and statistical data. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 197-243.
- [40] CHEN S H, POLLINO C A. Good practice in Bayesian network modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 37(17): 134-145.

Research on driving mechanism of ecological land loss based on Bayesian network

ZHENG Tao^{1,2,3}, CHEN Shuang¹, ZHANG Tong^{1,2}, XU Li-ting^{1,2}, MA Li-ya^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The Center for Modern Chinese City Studies, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: From the micro perspective, the driving factors of ecological land loss in urban riverside area are analyzed, especially based on the quantitative analysis of the factors with crucial influences such as policy and planning, which has important reference significance for the formulation of ecological land protection policies. In this paper, the Bayesian network model is used to integrate the neighborhood factors, natural factors, policy and planning factors that lead to ecological land loss. And the relationship between ecological land change and its driving factors is clearly illustrated by a good graphical description method. The research results show that from 2005 to 2018, about 11.0% of the ecological land in Nanjing riverside area is lost, and the stable proportion of ecological land is 89.0%. The sensitivity of ecological land protection intensity to ecological land loss is as high as 9.37%, the sensitivity of construction potential factor is 2.53%, and the sensitivity of development difficulty is only 0.21%. The effect of shoreline planning is better than that of land use planning, which indicates that the protection policy based on the function goal of ecological land should be made to ensure the long-term existence of ecological space.

Keywords: ecological land; Bayesian network; driving mechanism; Nanjing