

湖南茶陵县域生态空间网络稳定性识别与重构策略

傅丽华, 莫振淳, 彭耀辉, 谢 美, 高兴燕

(湖南工业大学商学院, 株洲 412007)

摘要: 县域是国土空间规划与管理的基本单元, 针对县域生态空间网络的识别与重构是空间优化的重要途径, 对生态保护红线划定具有积极作用, 但现有空间网络分析的方法论明显滞后。以典型丘陵山区县湖南茶陵县生态空间网络构建和识别为基础, 运用鲁棒性分析法表达生态系统受特定干扰后的变化特征, 进行节点重要度评价和网络稳定性分析。结果表明: 节点重要度和数量是判定网络稳定性的关键因子, 该类节点数量占5%左右且多位于茶陵县域罗霄山片区, 对应景观类型多为林地, 其次为水域和草地、园地等生态用地; 生态空间网络稳定性变化值均表现出与节点数量的高度一致, 网络节点失效比率高于92%时将完全瘫痪, 低于20%可恢复稳定; 以人类活动干扰为主的蓄意破坏情景中连通鲁棒性变化更为敏感, 对网络连通性影响较大; 依据重要节点分布及稳定性判断结果, 结合生态保护红线划定方案, 提出区域生态保护的差异化管理和生态空间网络重构建议。研究既为县域生态空间规划和生态保护红线管控提供有效支撑, 也为类似区域生态空间网络研究提供了案例借鉴。

关键词: 生态空间; 鲁棒性; 节点重要度; 空间重构; 县域

DOI: 10.11821/dlxb201907010

1 引言

生态空间网络是指在特定尺度空间内能识别线性生态廊道特征, 有效联系各类生态斑块并反映空间要素组合规律及结构功能特征的空间组织体系。国外学者从20世纪70年代起关注生态网络研究, 在模型构建、种群与群落的网络分析、生物多样性保护、景观规划与生态环境保护等方面有较多的研究积累, 近年来运用图论和景观生态学理论及方法分析生态空间网络的格局及稳定性成为热点, 因其有助于发现不同生态系统的相似性和差异性, 展示了较好的应用潜力^[1-3]。国内学者对生态空间网络的关注意识滞后, 现有研究多局限于基于遥感数据的GIS技术应用, 以土地利用现状和景观结构分析为主, 兼顾生态空间网络特征识别^[4-6], 以及体系构建与评价、结构分析等方面^[7-9], 但对网络稳定性关注较少。

通常, 网络稳定性研究多运用于电气工程及自动化、通信工程、交通等领域。鲁棒性是英文“Robustness”的音译, 意为稳定性, 是指当一个系统面临内部结构或外部环境的改变对其造成冲击时, 系统受特定干扰的变化特征及维持多种原有功能的能力, 或是网络整体的运行效率。复杂网络的鲁棒性研究通常采取按节点度排序的方式, 运用动态仿真模拟法、随机图理论和空间网络结构分析^[10-11], 主要解决网络风险控制、网络结构优化问题, 或模拟测试随机攻击和蓄意攻击下的轨道交通网络鲁棒性^[12-14]。生态空间网络具有

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2019-04-26

基金项目: 国家社会科学基金项目(18BGL179) [Foundation: National Social Science Fund of China, No.18BGL179]

作者简介: 傅丽华(1971-), 女, 湖南永州人, 博士, 教授, 研究方向为国土空间规划与土地利用。E-mail: lihuaf88@163.com

1409-1419 页

典型的地域性特征,空间网络识别是生态保护和空间规划的重要依据。现有研究多基于城市空间尺度,从规划管理的角度定性分析网络有效性和合理性,其定量研究方法与交通网络、微生物群落结构分析类似,局限于生态系统网络稳定性和多样性的关系^[15],或生态环境系统鲁棒性评价及结构优化等^[16-17],缺乏生态空间网络组织与结构角度的网络稳定性影响分析。

2017年以来,中国全面划定生态保护红线并将其作为生态安全格局的底线和生命线,在此背景下开展生态空间网络稳定性识别与重构,对提高生态保护红线划定成果的科学性和针对性,建立差别化的区域生态保护措施和用途管制规则,实现空间秩序重构与格局优化,提升区域生态保护功能产生积极影响。生态空间稳定性研究将运用鲁棒模型分析县域生态空间网络稳定性的动态变化特征,以生态功能重要性评价与生态敏感性评价为基础,建立系统的县域生态空间网络分析框架,结合节点综合重要度评价和网络稳定性分析结果,运用空间重构理念及规划方法,以生态功能发挥为核心,提出生产、生活、生态空间协调发展的重构策略,为县域生态空间规划和生态保护红线管控提供有效的方法支撑和案例借鉴。

2 研究区与研究方法

2.1 研究区概况

茶陵县位于湖南株洲市南部、罗霄山脉西麓,县域三面环山,地势由南北部向中部区域逐渐降低,属典型的丘陵山区地貌,主水系洣水由南至北穿过全境,县域总面积为2499.81 km²,其中山地占49.73%,丘陵占21.48%,林地占70%。云阳山国家森林公园、东阳湖国家湿地公园、湖里湿地等国家级或省级重点生态保护区,S11、G72、G4E、G106和S320等5条主要交通干线呈斜“十”型贯穿全境,构成了县域生态空间网络的重要骨架。茶陵县是国家级贫困县和罗霄山片区扶贫重点县,也是国家级重点生态功能区财政转移支付县,如何协调经济发展与生态保护的关系尤为重要。

2.2 数据来源与数据处理

本文采用2015-2017年县域土地利用现状与规划、林地规划、生态保护红线划定等相关数据建立数据库,提取并导出居民点、交通、其他设施等3类建设用地,以及耕地、水域、林地及其他生态用地等共7种类型。利用ArcGIS属性表工具提取不同林种的面积、土深、郁闭度等林地保护规划数据,并将林种按植被覆盖类型分为6类。采用空间叠加工具提取生态保护红线方案已确定的水源涵养、水土保持、生物多样性保护等生态功能重要区的评价数据,以及重要保护区如云阳山国家森林公园、湖里和东阳湖国家湿地公园等地的功能分区划定数据。

2.3 研究方法与步骤

以研究区域生态空间特征尺度分析为基础,运用最小成本路径模型构建生态空间网络并提取拓扑结构模型,采用紧密度(closeness)衡量节点联系、中介度(betweenness)表示传播效率,点度(degree)和特征向量度(hubs-authorities)表示节点综合重要性,构建节点综合重要度模型并进行节点分级,综合生态斑块、生态节点等要素的重要度区分值,运用鲁棒模型分析法对网络稳定性程度评价。

2.3.1 生态空间网络构建 生态源地识别是网络分析的基础。已有研究表明,生态空间网络构建要注重特征尺度分析,并以此为基础建立相应的空间显现模型。基于分辨率考虑确定以15 m粒度为起点,并每隔15 m进行一次栅格输出,判断不同粒度下的景观指数

变化趋势,或变化响应拐点的位置。分析结果表明,景观格局指数值在60~75 m变化最明显,结合本区域地貌及土地利用情况,采用上线值75 m为生态源地识别的最佳分析粒径。本文选取水源涵养力、生物多样性、土壤保持力等指标构建生态功能重要性评价模型并按五级分类提取结果(图1),综合判断并划定一般生态源地和重要生态源地;其次,综合考虑自然因素和人为因素,将阻力分为景观类型阻力和人类活动干扰阻力,先进行缓冲区分析,再运用空间叠加工具输出景观阻力面,并形成景观阻力值分区图(图2);最后,采用最小成本路径法获得生态廊道和节点。

在复杂网络鲁棒性研究中通常假定为无向网络,但现实中大部分网络信息传输是有向网络,并包含很多无向网络不能表达的有用信息。因此,本网络构建的前提是不考虑生态斑块、节点之间能量流动及信息传播的方向性,将网络简化为拓扑边长、大小、面积等度量性质和数量无关的抽象拓扑网络结构。将区域内可识别的生态斑块、生态节点、生态廊道进行拓扑网络提取生成93个节点及171条边,将对应的.net.代码文件用Pajek软件读取,用Draw命令生成拓扑结构模型,相应结果导入得到生态空间网络图(图3)。

2.3.2 节点综合重要度评价 生态节点分布于生态空间范围内,连接相邻生态斑块,对生态流和网络稳定性起关键作用。将研究区相应生态斑块及节点抽象为拓扑网络中的点对点联系,采用点度、中介度、紧密度、特征向量度等拓扑网络评价指标,计算各节点综合重要度。

点度(K_i)是指表示与某节点相连的边数,数值越小说明该节点能调配的资源量少,生物、能量流在相关节点转移及传播的概率越小;紧密度(M_i)是指表示某节点出发到任意节点的最小距离和,数值越大反映节点间的联系越有效;中介度(F_i)是指所有经过节点 i 与总的最短路径数量比,数值越接近1,说明线路越直接;特征向量度是指经过指定变换后不发生方向改变的向量,若节点 i 与联系节点处于中心位置,则该节点特征向量度大^[19]。

$$Q_i = \theta K_i + \eta M_i + \gamma F_i + \delta H_i + \mu E_i \quad (1)$$

式中: Q_i 为节点 i 的综合重要度值; K_i 、 M_i 、 F_i 、 H_i 、 E_i 分别为某节点 i 的点度、紧密度、

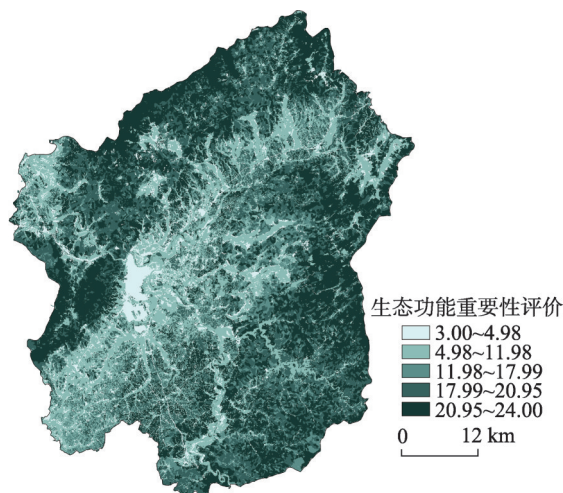


图1 茶陵县生态功能重要性评价图

Fig. 1 Evaluation of ecological function importance of Chaling county

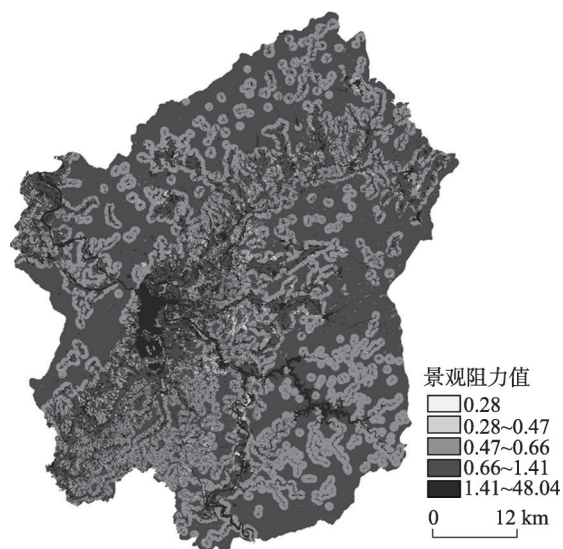


图2 茶陵县景观阻力值分区图

Fig. 2 Partition of landscape resistance values of Chaling county

中介度、特征向量度,及相应的生态系统服务价值; θ 、 η 、 γ 、 δ 、 μ 分别表示相应指标的权重

应用Pajek 4.09软件并输入如下命令依次计算节点的点度、紧密度、中介度和特征向量度。点度的计算命令为:“Net > Partitions > Degree”;紧密度、中介度和特征向量度计算命令:“Net > Vector > Centrality > Closeness/Betweenness/Important vertices (1-Mode: hubs-authorities)”。

2.3.3 生态空间网络稳定性分析 生态系统在遇到特定干扰时维持生存及延续的特性及稳定程度可用鲁棒性测度^[20]。通常,复杂网络稳定性评价采用连通鲁棒性、脆弱鲁棒性指标^[14, 21-23],对应于随机去掉节点的“随机攻击”策略,或有针对性去掉网络中重要度较高节点的“蓄意攻击”策略两种情形的动态模拟。

(1) 连通鲁棒性。连通鲁棒性表示因外力导致的干扰破坏引起的网络重要构成要素受损后,系统维持自身各要素的连通稳定性以及传递物质和能量的能力。多数影响景观多样性和最大斑块持续性低强度的自然环境变化或人为干扰,可视为随机攻击。在拓补网络中的公式为:

$$R_{\text{连}} = \frac{C_{\text{max}}}{n - n'} \quad (2)$$

式中: $R_{\text{连}}$ 指连通鲁棒性,表示连通状况; C_{max} 表示网络连通节点最大值; $n - n'$ 表示删除前后的节点数差值,在pajek 2.05软件中输入“net < components < strong”命令求得 C_{max} ,如任何两个节点相互可达,称为完全连通图;若因删除节点或边导致本层级网络不连通,但又不影响下一层级网络连通性,其最大连通子图的节点数最多。

(2) 脆弱鲁棒性。自然灾害或人为破坏干扰可视为蓄意攻击情景,采用脆弱鲁棒性表示。在受到外界蓄意破坏或干扰时,常用全局效率表示物质能量流的运行能力^[24-25],脆弱鲁棒性值与全局效率表达相似,其值越大表示运行效率越高。假设节点间能量均沿最短路径流动,其表达公式如下:

$$E_{\text{脆}} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

式中: $E_{\text{脆}}$ 为网络的脆弱鲁棒性; n 是节点个数; i 、 j 分别表示在同一网络中从属于 G 节点集合中的任意不同节点; d_{ij} 表示两个节点之间的最小距离。借助R软件和Pajek软件来计算 $E_{\text{脆}}$ 。将sna程序包导入R软件,然后在Pajek软件中输入“Tools < R < Send to R”命令运算后得到结果。

2.3.4 破坏情景模拟 对生态空间网络在遭受自然灾害或人为活动破坏情况进行拓补网络结构模拟,随机删除不能恢复的节点代表两种连通状况:一是当网络某个节点与其连接边同时被删除,二是只删除某单个节点。根据不同破坏情景下网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性的变化,得到网络的连通子图,可分为两种情景。第一种是蓄意破坏情景。在蓄意破坏情景中引入“人类干扰半径”控制情景模拟破坏的起始方向,以500 m经验值的城乡居民点边界为半径,进行缓冲区和空间叠加分析后得到节点分布;处于干扰半径外的

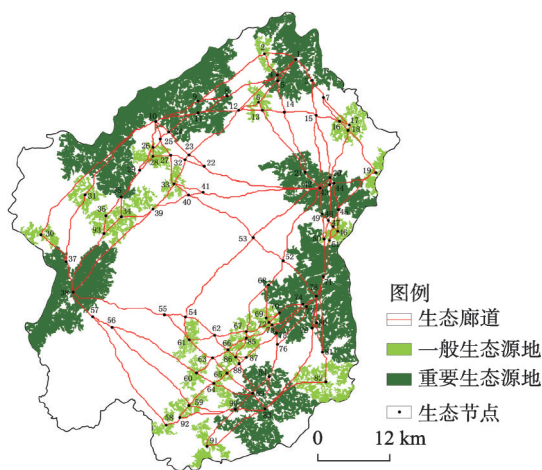


图3 茶陵县生态空间网络图

Fig. 3 Ecological space network in Chaling county

节点按综合重要度值依次分别计算网络连通鲁棒性和恢复鲁棒性。第二种是随机破坏情景。借助“在线随机数生成器”工具满足破坏的随机性，自动生成1~93个节点进行随机排列，对相应节点进行破坏后计算网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性。

3 结果分析

3.1 节点生态功能重要性

将点度 (K_i)、紧密度 (M_i)、中介度 (F_i)、特征向量度 (H_i) 和各点所在位置的生态功能重要性等级值 (E_i) 等运用z-score标准化处理，再采用熵权法确定各点的相应权重值，按公式 (1) 计算各节点综合重要度，采用系统聚类分析法将重要度分为5级，等级越高表明其节点综合重要程度越高。根据计算结果进行等级划分 (表1)。

表1 节点综合重要度等级划分
Tab.1 Nodes comprehensive importance assessment

节点数量(个)	节点序号(<i>i</i>)	等级划分	重要性描述
1	42	五级	高
4	15, 52~53, 78	四级	较高
14	10, 13~14, 20, 22, 33, 38, 40~41, 43~44, 54~55, 61	三级	一般
29	7~9, 17, 19, 26, 28~31, 34~36, 46, 58, 60, 64~65, 69~70, 72, 77, 81~82, 84~87, 60, 91	二级	较低
45	1~6, 11~12, 16, 18, 21, 23~25, 27, 32, 37, 39, 45, 47~51, 56~57, 59, 62~63, 66~68, 71, 73~76, 79~80, 88~90, 92~93, 83	一级	低

将节点综合重要度等级与对应景观类型结合分析 (图4)。区域生态空间的网络骨架由综合重要度较高的节点决定。该类节点大都位于茶陵县域的罗霄山片区，节点数量占统计节点数量的5%左右，有多条廊道与其他重要功能节点连通，主导景观类型多为林地，其次为水域、草地和园地等生态用地，其他重要节点分布于县域四周或横贯中部。等级较低的节点主要分布于县域西北和东南部，但东南部节点对应的景观类型更多样。

3.2 生态空间网络稳定性

生态空间网络稳定性与节点删除数量密切相关。图5、图6表明，不同破坏情景下的网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性与删除数量相关，且均呈下降趋势。连通鲁棒性起始值为1，脆弱鲁棒性起始值为0.25，数值越低表明网络稳定性程度越低。

3.2.1 节点数量对网络鲁棒性的影响 图5、图6、图7比较发现，两种破坏情形均表现为删除节点数量为20%左右时，网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性变化小，且网络连通子图数不改变，网络结构可维持现状；当系统中26%~64%的节点被删除时，网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性差异明显，表现为网络破碎化更高，连通子图数变大；当总节点减少至92%时，网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性值均为0，网络连通子图数与剩余节点数相等，由于节点互不相连而导致信息无法传递，此时网络处于瘫痪状态。

3.2.2 节点失效比和重要度对网络稳定性的影响 从图5与图6的网络节点删除数量来看，其连通鲁棒性和脆弱鲁棒性变化均表现出与节点数量的高度一致。可以判定，20%节点失效比临界值是维护网络整体结构的关键值，对维持网络结构的连通性和稳定性有指示作用；当节点失效比率在64%~92%时，网络的连通鲁棒性和脆弱鲁棒性评价价值降为初始值50%以下，网络脆弱性和敏感性增强，如果节点失效比大于92%，网络将完全瘫痪。节点失效比可以作为网络稳定性判断的重要指标，一定范围内的节点失效比反映网

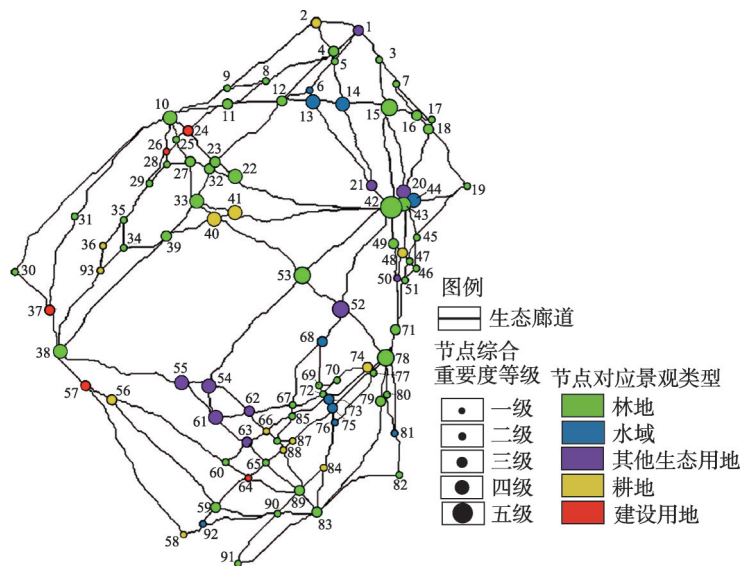


图4 茶陵县节点综合重要度等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of nodes importance level in Chaling county

络的整体性和复杂程度，也是衡量空间稳定性的

网络的整体性和复杂程度，也是衡量空间稳定性的

3.3 生态空间网络重构

系统科学认为，重构是对系统结构重新构架的方法论。系统在运行过程中由于外力冲击或内部各构成要素的离散作用，将导致原有系统构成要素难以正常运行或良性发展，通过重构可促使各要素优化组合，可实现系统根本性转型^[26]。生态网络重构提供了一种整合生态过程和空间尺度及生态系统的空间规划方法。自然状态下，稳定生态系统网络结构的

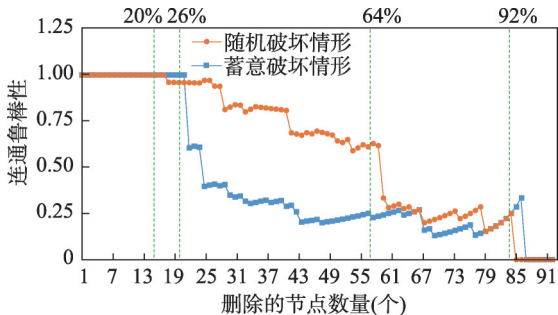


图5 不同破坏情景下连通鲁棒性变化

Fig. 5 Connectivity robustness transformation under different damage scenarios

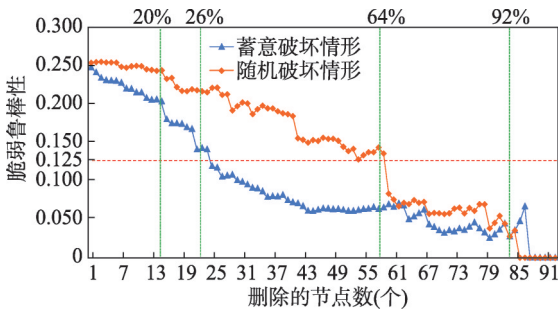


图6 不同破坏情景下脆弱鲁棒性变化

Fig. 6 Fragile robustness transformation under different damage scenarios

自然状态下，稳定生态系统网络结构的

空间破碎化程度更高。

节点是保障网络连通的关键，其交互性、重要度及数量是维持网络结构完整性和复杂性的重要因素。研究表明，应从质量和数量上重视关键节点的保护，既有利于景观连通度改善，又能有效促进物流和能流的良性循环^[18]。若空间结构良好且节点重要性得到了充分发挥，无论在何种攻击策略下的网络稳定性均较高。在蓄意破坏行为下实现网络攻击应对，依据重要节点分布特征提出差异化的空间管控和保护措施，将有效地改变网络形成机制并实现生态空间网络重构。

3.3.1 重构策略制定 生态空间网络重构要考虑网络结构的复杂性和不确定性。在一定区域范围内对系统构成要素的准确识别，有利于维持整体生态功能并有效保障生态安全。茶陵县生态保护红线划定方案已将自然保护区、饮用水源保护区、重要湿地等划为禁止开发区，但未进行生态空间网络识别及关键节点重要度分析，导致对生态空间网络稳定性预判不足。建议在生态保护红线划定后，要重点考虑生态空间网络体系稳定性的发挥，依据节点综合重要度和保护目的差异为筛选标准，制定个别保护、一般保护、广泛保护等3种差异化保护区域，通过生态空间网络的重构，更好发挥不同区域的景观生态功能，实施与节点重要度相对应的3种重构策略（表2、图8）。

（1）个别保护策略。依靠关键少数节点的保护实现生态空间网络的整体稳定，其对应的8个节点相对集中在茶陵县东部罗霄山区域，且景观类型以林地为主。由于被保护的节点数量较少，在该保护策略下生态空间网络特别敏感且稳定性低，仅能保证生态空间网络的基本功能。

（2）一般保护策略。一般保护策略确定了34个节点作为核心保护区域，主要集中于茶陵县西部、北部区域，对应景观类型以林地、水域和其他生态用地为主。该策略要实现生态空间网络基本抵御自然灾害对生态系统造成的影响，但对于人为破坏的抵御能力仍然较差。

（3）广泛保护策略。广泛保护策略是指对大部分区域进行重点生态保护。如图8所

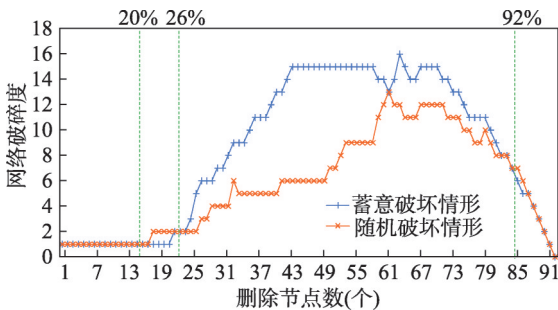


图7 不同破坏情景下网络连通子图数变化
Fig. 7 Connected subgraphs change under different damage scenarios

表2 不同保护策略对应的重点保护区域划分

Tab. 2 Division of protection areas under different strategies			
保护策略	策略要求	重点保护节点	保护等级
个别保护	将总节点数量的8%以上确定在相应等级及策略下保护	节点42	非常重要
		节点52、53、78、15、43、20、54	一般重要
一般保护	将总节点数量的36%以上确定在相应等级及策略下保护	节点42、52、53、78、15、43、20、54	非常重要
		节点41、10、38、13、55、40、33、22、61、14、44、39、23、21、68、83、63、32、12、27、4、1、24、79、59、49	一般重要
广泛保护	将总节点数量的74%以上确定在相应等级及策略下保护	节点42、52、53、78、15、43、20、54、41、10、38、13、55、40、33、22、61、14、44	非常重要
		节点39、23、21、68、83、63、32、12、27、4、1、24、79、59、49、16、57、37、89、75、11、56、71、48、2、62、18、74、73、88、90、51、80、67、5、93、3、45、76、25、	一般重要

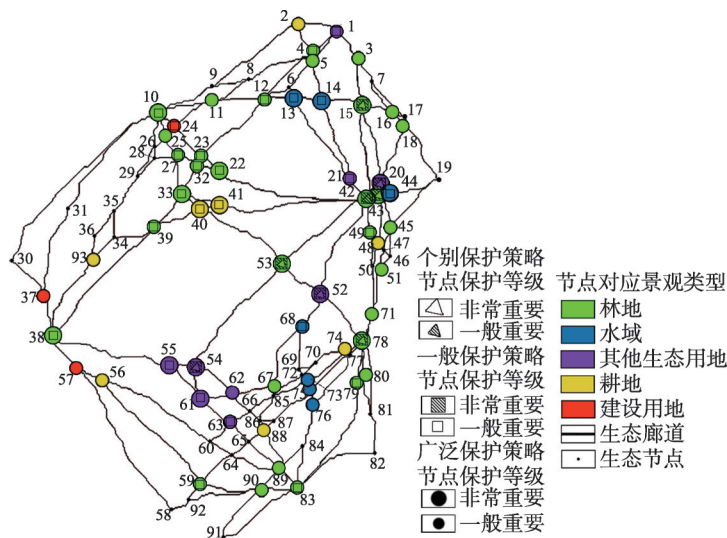


图8 不同生态保护策略下茶陵县的节点分布

Fig. 8 Nodes spatial distribution under different ecological protection strategies of Chaling county

示,按网络节点失效比率应不超过26%的要求,相应的69个节点被重点保护,主要为茶陵县北部和东部区域,对应节点的景观类型多样,包括生态用地、耕地和建设用地。由于被保护的节点数量较多,生态功能及结构不因自然灾害及人为破坏而发生较大的改变,生态空间网络稳定高。

3.3.2 生态空间差异化管控 生态空间网络重构与差异化的空间管理策略结合,是守住生态保护红线并加强区域生态保护的关键。根据生态空间网络稳定性确定具体的差异化管控策略,构建生态保护与人类发展良性循环的生命共同体系统,并通过有效的生态管理实现区域的绿色可持续发展。建议在生态保护红线管理中结合生态空间网络重构以及生态空间保护策略的差异,确定3种差异化管控区。

(1) 禁止开发主导区。禁止开发主导区对应于生态保护红线范围内的个别保护策略区,该区域对整体生态空间稳定性影响大,网络结构良好且生态功能突出,对维护区域生态安全至关重要。应注重提高区域的生态服务功能,以强制性措施为主保护策略,严格限制开发建设等人类活动对区域生态环境造成的影响,注重动态监控和跟踪研究。以重要保护区对应节点的林地景观为例,植被覆盖度提升可改善地表径流水平,既改进水土流失防御能力,又提高区域生物多样性等,以达到加强区域生态源地综合功能,有效提升生态空间网络稳定性。

(2) 限制开发主导区。限制开发主导区通常紧邻禁止开发区,对应于生态保护红线范围内的一般重要保护区。从空间网络结构来看,该区域是物质流与能量流必经之处,对维持生态空间网络稳定和保证区域生态安全有着重要作用。保护策略应以限制性措施为主,提高生态空间网络稳定性有适当限制在大型的项目开发建设,限制采矿、工业污染较为严重的人类建设活动,并采取轮伐、休鱼、休耕等管理措施,降低人类活动对林地、水域等生态用地造成的影响等;同时应增加栖息地的生物多样性,对与栖息地相连的生态廊道进行合理疏通,提高生物流的运行效率等。

(3) 引导开发主导区。引导开发区主导区对应于生态保护红线范围内的广泛保护策略区。这类区域在空间上分布较散,多靠近建设区而易受人类活动影响,由于对应的部

分重要节点为非生态用地, 将导致区域生态功能退化和生态服务价值偏低。因此, 对此类区域可进行恢复性的引导开发, 有效改善区域土地利用方式和集约利用水平, 防止地表过度硬化, 对于生态功能严重退化的区域应尽快采取生态修复措施改进。

4 结论与讨论

县域生态空间是国土空间规划与管理的基础, 也是生态保护红线划定后需要重点管控的基本单元。以茶陵县作为典型丘陵山区研究对象, 以生态空间构建的网络识别和节点重要度评价为基础, 以提取重要节点及网络鲁棒性分析为核心, 定量与定性结合分析县域生态空间网络稳定性。分析结果表明, 节点重要度及各相应保护策略的节点数量和空间分布直接影响生态空间网络稳定性。生态空间网络分析与生态红线划定管理结合, 提出了生态空间网络重构的设想和差异化的区域生态保护管控建议, 是一种管控方法的创新, 也为类似区域生态空间网络研究提供了案例借鉴。

当前, 国土空间开发保护亟待提出系统解决方法, 也是未来空间规划研究的重要内容。复杂网络和图论的相关理论和鲁棒性在生态空间网络稳定性综合评价仍有局限性, 后续研究可关注拓扑网络有向性和节点的出度和入度相关性大小等内容, 并进一步考虑网络节点的出入度联系对空间结构的影响, 加强对真实有向网络系统的复杂鲁棒性分析^[27]; 在复杂网络结构和系统稳定性之间找到可识别的模式, 并与随机和有目标的扰动联系, 提升其在基于复杂现实保护行为决策应用的参考价值^[28]。由于静态数据难以反映生态空间网络稳定性变化, 如果某情景下节点受到攻击暂时失效, 但恢复的可能性大, 需要密切关注生态空间网络自我恢复力的变化。

大数据与遥感数据联合应用将极大拓宽生态空间网络研究的视角, 拓扑网络抽象方法和编程语言则为网络动态变化和稳定性分析提供了更科学方法, 将成为实施国土空间开发与保护“一张图”管控的有力支撑。

参考文献(References)

- [1] Deng Jinjie, Chen Liuxin, Yang Chengyun, et al. Significance evaluation of ecological corridor in anhighly-urbanized areas: A case study of Shenzhen. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 573-582. [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. *地理研究*, 2017, 36(3): 573-582.]
- [2] Montis A D, Ganciu A, Cabras M, et al. Comparative ecological network analysis: An application to Italy. *Land Use Policy*, 2019, 81(2): 714-724.
- [3] Liu Xin, Jiao Yuanmei, Wang Mei, et al. Evaluation of key nodes and corridors of river and canal network in Hani Rice Terraces based on graph theory. *Chinese Journal of Ecology*, 2018(1): 287-294. [刘歆, 角媛梅, 王梅, 等. 基于图论的哈尼梯田区河渠网络关键节点和廊道评价. *生态学杂志*, 2018(1): 287-294.]
- [4] Yue Depeng, Wang Jiping, Liu Yongbin, et al. Landscape pattern optimization based on RS and GIS in northwest of Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1223-1231. [岳德鹏, 王计平, 刘永兵, 等. GIS与RS技术支持下的北京西北地区景观格局优化. *地理学报*, 2007, 62(11): 1223-1231.]
- [5] Yu Qiang, Yue Depeng, Zhang Qibin, et al. The evolution of landscape pattern and the construction of ecological infrastructure network in Dengkou, Inner Mongolia, China. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(3): 601-609. [于强, 岳德鹏, 张启斌, 等. 磴口县景观格局演变特征及生态网络构建. *中国沙漠*, 2017, 37(3): 601-609.]
- [6] Fu Qiang, Gu Chaolin. Delineation of ecological security pattern based on ecological network. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 1021-1029. [傅强, 顾朝林. 基于生态网络的生态安全格局评价. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1021-1029.]
- [7] Lv Dong, Wang Yuncai, Peng Zhenwei. The study on the ecological network planning of rapid urbanization areas based on the suitability assessment: A case study of Changbai Korean Autonomous county. *Landscape Architecture*, 2013(2):

- 54-59. [吕东, 王云才, 彭震伟. 基于适宜性评价的快速城市化地区生态网络格局规划: 以吉林长白朝鲜族自治县为例. 风景园林, 2013(2): 54-59.]
- [8] Xu Feng, Yin Haiwei, Kong Fanhua, et al. Developing ecological networks based on mspa and the least-cost path method: A case study in Bazhong Western New District. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6425-6434. [许峰, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于MSPA与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.]
- [9] Fu Qiang, Gu Chaolin. Evaluation of the structural elements of Qingdao ecological network based on the CL-PIOP method. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1729-1739. [傅强, 顾朝林. 基于CL-PIOP方法的青岛市生态网络结构要素评价. 生态学报, 2017, 37(5): 1729-1739.]
- [10] Bollobás B, Riordan O. Robustness and vulnerability of scale free random graphs. *Internet Mathematics*, 2004, 1(1): 1-35.
- [11] He Zheng, Zhang Xiaojun. Robustness and fragility of Innovation diffusion networks within an industry cluster. *Journal of Systems & Management*, 2011, 20(6): 682-689. [何铮, 张晓军. 集群创新扩散的鲁棒性和脆弱性. 系统管理学报, 2011, 20(6): 682-689.]
- [12] Duan Houli, Li Zhiheng, Zhang Yi. Coordinated development of traffic between central city and new urban districts and corresponding evaluation. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010(3): 70-75. [段后利, 李志恒, 张毅. 城市公交网络的鲁棒性分析模型. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010(3): 70-75.]
- [13] Zhang Jin. Structural characteristic studies of urban rail transit network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. [张晋. 城市轨道交通线网结构特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.]
- [14] Zhao Guofeng, Yuan Shaowei, Ci Yusheng. Analysis of complex network property and robustness of urban road network. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016(1): 119-124. [赵国锋, 苑少伟, 慈玉生. 城市路网的复杂网络特性和鲁棒性研究. 公路交通科技, 2016(1): 119-124.]
- [15] Li Yimin, Li Xin, Hua Jing. Ecological system stability and diversity based on complex networks. *Chinese Journal of Ecology*, 2014(6): 1700-1706. [李医民, 李鑫, 华静. 基于复杂网络的生态系统稳定性与生态多样性. 生态学杂志, 2014(6): 1700-1706.]
- [16] Wang Qingang. Research of robustness evaluation on ecological environmental system in Shengli oilfield [D]. Dongying: Shandong: China University of Petroleum, 2014. [王钦刚. 胜利油田生态环境系统鲁棒性评价研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.]
- [17] Yu Q, Yue D P, Wang Y H, et al. Optimization of ecological node layout and stability analysis of ecological network in desert oasis: A typical case study of ecological fragile zone located at Deng Kou County (Inner Mongolia). *Ecological Indicators*, 2018, 84: 304-318.
- [18] Xu Wenwen, Sun Xiang, Zhu Xiaodong, et al. Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1264-1272. [许文雯, 孙翔, 朱晓东, 等. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别. 生态学报, 2012, 32(4): 1264-1272.]
- [19] Newman M E J. A measure of betweenness centrality based on random walks. *Social Networks*, 2005, 27(1): 39-54.
- [20] Jie Jing. Study of robustness in the world. *Journal of Systems Engineering*, 2005, 20(2): 153-159. [接婧. 国际学术界对鲁棒性的研究. 系统工程学报, 2005, 20(2): 153-159.]
- [21] Zhou Xuan, Zhang Fengming, Zhou Weiping, et al. Evaluating complex network functional robustness by node efficiency. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(19): 1-7. [周璇, 张凤鸣, 周卫平, 等. 利用节点效率评估复杂网络功能鲁棒性. 物理学报, 2012, 61(19): 1-7.]
- [22] Zhang Rui. The network topology structure of ecological with sustainability [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. [张端. 具有持续性生态系统的网络拓扑结构[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.]
- [23] Wu Jiang, Wang Dong. Analysis on vulnerability of WSNs energy based on complex networks. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014(5): 24-26. [吴蒋, 王冬. 基于复杂网络的无线传感器网络能量脆弱性分析. 传感器与微系统, 2014(5): 24-26.]
- [24] Wang Yunqin. Research on connectivity reliability of urban transit network based on theory of complex network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. [王云琴. 基于复杂网络理论的城市轨道交通网络连通可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.]
- [25] Qiang Qiang. Recent development on the research of network vulnerability and robustness. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2011(3): 287-291. [强强. 网络脆弱性以及鲁棒性理论的近期研究发展. 上海理工大学学报, 2011(3): 287-291.]
- [26] Lei Zhendong. Conform and Restructure: Transformation of Rural Settlements in the Guanzhong Area. Nanjing: Southeast University Press, 2009. [雷振东. 整合与重构: 关中乡村聚落转型研究. 南京: 东南大学出版社, 2009.]

- [27] Liu Xueming. Research on the robustness and controllability of complex network [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. [刘雪明. 复杂网络的鲁棒性和可控性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.]
- [28] Babu S, Yadav G. Robustness through regime flips in collapsing ecological networks. *Complex Networks and Their Applications VII*, Cambridge United Kingdom, 2018: 841-853.

Stability identification and reconstruction strategy of ecological space network at the county scale: A case study of Chaling County, Hunan Province

FU Lihua, MO Zhenchun, PENG Yaohui, XIE Mei, GAO Xingyan
(College of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China)

Abstract: County is the basic unit of land space planning and management research. The identification and reconstruction of county ecological space network, an important way of space optimization, plays a positive role in the demarcation of ecological protection red line. However, the methodology of spatial network analysis is stagnant. Based on the construction and identification of the ecological space network in typical hilly areas and counties, this study expresses the characteristics of change brought about by specific disturbance with robustness analysis method, analyzes node importance degree, and evaluates network stability. The results show that nodes with high importance play a key role in maintaining the stability of ecological space network. The number of such nodes accounts for about 5% and most of them are located in the area of Luoxiao Mountain in Chaling county, and corresponding with woodland, water and grassland, garden and other ecological land landscape. The change value of the stability of the ecological space network is highly consistent with the number of nodes. When the failure rate of the network node is higher than 92%, it will be completely paralyzed; when the failure rate is lower than 20%, the stability can be restored. The change of connectivity robustness is more sensitive in the scenario of sabotage which is dominated by interference of human activities. Based on the distribution of important nodes and the judgment results of stability, combined with the red line demarcation scheme of ecological protection, this paper puts forward suggestions on the differentiated management of regional ecological protection and the reconstruction of ecological space network. The study not only provides effective support for county ecological space planning and ecological protection red line control, but also provides case reference for similar regional ecological space network research.

Keywords: ecological space; robustness; node importance; space reconstruction; county scale