

廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建

韩宗伟^{1,2}, 焦胜¹, 胡亮¹, 杨宇民¹, 蔡青³, 黎贝¹, 周敏¹

(1. 湖南大学建筑学院, 长沙 410082; 2. 铜仁学院旅游与地理系, 铜仁 554300;

3. 湖南省环境保护科学研究院, 长沙 410004)

摘要: 构建生态联系紧密且生态干扰更小的生态安全格局, 是平衡国土空间规划中生态保护与经济社会发展的重要手段。在国土空间中, 为形成廊道与源地的协调与保护兼顾的生态安全格局, 以环洞庭湖区域33个县(区)为例, 针对核心生态源地与自然廊道、经济社会源地与人工廊道分别形成的生态格局、城镇格局, 揭示两者之间生态关键点及生态干扰点的分布特征, 并差异化应对。结果表明: (1)为促进生态要素的空间联系, 1537条生态廊道应纳入生态安全格局中, 908处生态关键点需要保护, 而0.48%的经济社会源地面积应退让给自然廊道。(2)受干扰的核心生态源地面积占比和自然廊道长度占比分别为1.36%、12.95%, 8800处生态干扰点可采取缓冲、预警等主要应对策略, 以协同发展自然—人工系统。(3)为满足生态保护用地应持续增加的需求, 非核心生态源地内, 面积分别为203.22 km²、125.67 km²、35.59 km²的一、二、三级自然廊道可分批作为生态安全格局未来发展的储备用地。研究结果可为协调国土空间规划体系中生态用地与城镇建设用地提供参考。

关键词: 国土空间; 生态安全格局; 生态廊道与源地保护; 生态战略点; 环洞庭湖区域

优化国土空间开发格局在党的“十八大”报告中首次被提升到国家战略高度, 生态安全格局是其确定的三大战略格局优化目标之一, 必需与城市化格局、农业发展格局相均衡^[1]。生态环境保护与经济社会发展之间的全领域、全过程空间协调, 成为广泛关注并亟待解决的重要科学问题。构建生态安全格局主要包括设计和优化生态空间、生活空间、生产空间(以下简称“三生空间”)复杂耦合系统的组织结构、功能定位、组合分布, 消解对生态系统不利的因素, 形成结构完整、功能完备、分布连续的生态空间布局形态。因此, 构建生态安全格局对践行生态保护、推进生态文明建设和保障国土空间永续发展意义重大^[2-4]。

生态安全格局的研究起源于20世纪40年代国外的土地健康研究^[5]。国外呈现出以“生物多样性保护^[6]—生态系统服务评估^[7]—自然经济社会系统耦合^[8]”为主的研究脉络。而国内起步较晚, 经历了以“生态功能界定—评价体系构建—生态机理挖掘”为主的发展历程^[9]。已有研究表明, 构建生态安全格局可为协调环境保护和经济社会发展提供空间参考, 具有控制城市的无序扩张和保障区域的生态安全等作用, 进而更好地维系和提升国土空间规划中生态保护用地和经济社会发展用地空间耦合的科学性、协调性、合

收稿日期: 2019-04-10; 修订日期: 2019-07-30

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2018NK2053, 2017SK2220, 2019SK2101); 贵州省科技厅联合基金项目(黔科合LH字[2016]7305号)

作者简介: 韩宗伟(1987-), 男, 湖北宜昌人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为生态城市及海绵城市规划研究。
E-mail: hansarm@foxmail.com

通讯作者: 焦胜(1973-), 男, 湖南长沙人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为生态城市规划、城乡人居环境可持续发展及绿色建筑。E-mail: jiaosheng2008@163.com

理性^[10-11]。生态安全格局的构建主要通过多目标生态布局叠加^[12-13]、生态过程分析^[14-15]、机器学习与数据挖掘^[16-17]、生态服务供需安全分析^[18]、生态保护红线划定^[19-20]等方法实现,涵盖国土空间规划中生态空间保护与提升的生态源地保护、生态廊道提取、生态布局优化。综上,生态安全格局往往以研究生态系统自身的空间特征为主,而通过辨识自然生态系统与经济社会系统的空间结构特征及相互联系,指导生态用地与城镇建设用地的协调,达到统筹并集成维护生态过程稳健性、保持生态要素空间联系紧密性、增强生态系统抗干扰性等目标的相关研究还有待深入^[21-23]。

目前,生态保护红线被广泛关注,并为生态安全格局的构建奠定了空间基础,截至2018年2月,15个省份的生态保护红线划定方案获国务院批准,红线区占15个省份辖区国土面积的25%左右^[24]。对于复杂生态系统而言,生态保护红线实现了核心生态源地的保护,却较少考虑它们与外部的连通性,如相邻生态源地的联通通道(以下称“自然廊道”)中蕴含的联系,对生态系统的生物多样性、结构稳定性、功能多元性等也发挥着重要作用。同时,自然廊道可能被人工廊道(如综合交通廊道)或经济社会源地(如城镇建设用地)阻断、侵入、隔离、替代,从而影响生态系统的稳定性和区域的生物多样性^[25-27]。因此,在划定核心生态源地和建立自然廊道的基础上形成的生态格局,虽然为严格控制人类活动对生态系统可能产生的影响,明确了生态空间的保护界线,但还需要减少人工廊道、经济社会源地等人类活动区域对生态系统的干扰,以实现生态保护由点状、斑块状结构向网络化、系统化结构转变。基于此,本文以湖南省环洞庭湖生态区域的33个县(区)为例,识别以生物迁徙廊道、潜在雨水廊道为代表的自然廊道,将其与核心生态源地叠合形成生态格局,同时挖掘以综合交通廊道为代表的人工廊道和经济社会源地形成的城镇格局对生态格局造成的影响,并提出应对策略,进而建构联系紧密、系统平衡、结构稳定且廊道与源地相协调的生态安全格局。本研究可为国土空间中核心生态用地的管控和拓展,以及生态保护与经济社会发展的协调提供技术思路,对维持生态系统稳定性、保护生物多样性、优化生态服务功能发挥积极作用,进而保障国土空间规划中生态空间保护与提升的质量和水平。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

研究区由常德市、岳阳市、益阳市和长沙市内的33个县(区)组成,辖区总面积57146.73 km²,2017年总人口2308.2万人,是环洞庭湖生态经济区的一部分,与长株潭、武汉等大城市群毗邻,连接湖南、湖北、江西三省(图1)。该区域位于110°53'~114°20'E、27°99'~30°00'N之间,属于亚热带季风气候,动物、植物物种丰富,拥有13种国家一级保护动物,国家重点保护鸟类45种,是麋鹿、白鳍豚、江豚、小白额雁、白鹤等濒危珍稀物种的主要栖息地,是湖南省生态保护红线相对集中的地区之一,红线区总面积13558.93 km²。区域内地形复杂,东、南、西三面环山,海拔较高,起伏大;中部和北部海拔较低,地势平缓;北面临水,与长江接壤,属于湘、资、沅、澧四水流域,水域面积3439.36 km²。

1.2 数据来源

考虑相关数据的可获取性和研究区的空间尺度,主要选取了包括土壤、土地利用覆

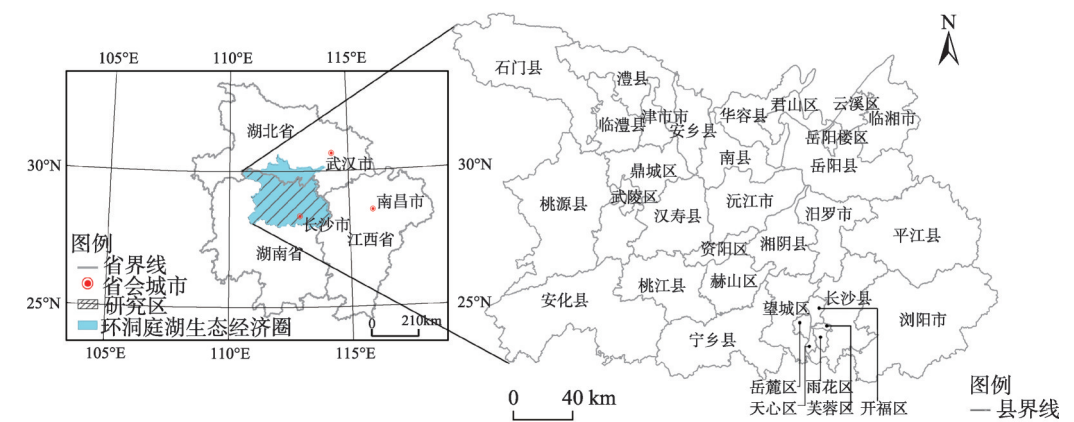


图1 研究区区位及范围示意

Fig. 1 The scope and location of the study area

被、遥感影像、道路、核心生态源地等数据（表1）。其中，道路系统是人类通行活动的条带状区域，选取乡镇级别以上硬化道路组成的综合交通廊道作为人工廊道；生态保护红线明确了区域内需要保护的核心生态区，将现有已划定的生态保护红线区域作为核心生态源地；城市建成区是人类经济社会活动比较活跃的面状区域，选取乡镇级别以上的城镇建设用地作为经济社会源地，该数据由作者基于2017年Google遥感影像目视解译获得。

表1 数据来源及其说明

Table 1 The data sources and its description

数据类型	数据产品	来源	空间分辨率
湖南省环洞庭湖区核心生态源地	湖南省生态保护红线区空间数据（2018年）	湖南省自然资源厅	1：25万
硬化的道路（乡道级别以上）	湖南省道路矢量数据（2015年）	国家地球系统科学数据共享服务平台	1：25万
DEM	ASTER GDEM V2 版	地理空间数据云	30 m
土壤数据和土地覆被	中国土壤数据集（v1.1）	黑河计划数据管理中心	1：100万
河网水系（三级河流以上）	中国河网水系矢量数据	地理空间数据云	1：25万
城镇建设用地边界（乡镇级别以上）	Google 遥感影像（2017年）	作者目视解译提取	10 m

1.3 研究方法

本文的研究方法主要有三部分，即生态格局的构建、城市格局的提取、两种格局形成的生态战略点的应对。具体的技术路线如图2所示。

1.3.1 基于自然廊道与核心生态源地构建生态格局

将核心生态源地作为生态空间的基准框架，其中的生态斑块之间仍缺乏必要的空间联系。生物迁徙廊道、潜在雨水廊道对核心生态源地、经济社会源地的生境维持、环境自净、雨洪安全等方面均有积极的影响，因此将两者作为核心生态源地对外联系的主要自然廊道^[28]。采用最小累积阻力模型、GIS水文分析、空间叠加分析方法提取上述两类自然廊道，并在此基础上将核心生态源地与自然廊道空间叠合形成生态格局。

（1）对于生物迁徙廊道的识别与分级。依据林地、园地、耕地、草地、水域、未利用地和建设用地空间分布提取生态关键区，并在此基础上设定生态关键区和景观介面的生

态阻力系数（表2）^[29]，利用最小累积阻力模型（Minimal Cumulative Resistance, MCR）^[30-31]分析生物从生态关键区扩散到空间某点的最小累积阻力，其计算公式如下：

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=b}^{i=a} D_{ij} \times Z_i \quad (1)$$

式中： D_{ij} 代表物种从生态关键区*i*到空间单元*j*的距离； Z_i 代表*i*类空间单元对物种迁徙的阻力系数。结合ArcGIS 10.6中成本路径分析工具，获得生物迁徙所有路径，形成生物迁徙网络系统。由于该系统中连接生态关键区的路径冗余度较高，进一步在ArcGIS 10.6中利用网络分析模型，筛选累积阻力最小的生物迁徙廊道，并利用自然断裂法按阻力值大小将潜在生物迁徙廊道划分为一级、二级、三级，各自的宽度分别为200 m、90 m、30 m^[32]。

（2）对于潜在雨水廊道的识别与分级。选取影响水文流动过程的高程、坡度、坡向、土壤类型、覆被类型五个因素组成评价体系，借助ArcGIS 10.6水文分析工具模拟地表径流途径，得到研究区的汇水网络。在此基础上，划定影响水生态系统各因子的阻力等级，并采用熵权法确定各阻力因素的指标权重，如表3所示，通过空间加权叠加各指标获得综合阻力评价结果。同时，结合SCS模型^[33]，计算各网格的径流量、下渗量、汇水面积等水文特征，进而确定流域内潜在雨水廊道。由于廊道达到一定宽度时才会显著发挥作用且该值为7~12 m^[34]，因此将12 m、9 m、7 m分别作为一级、二级、三级潜在雨水廊道的宽度。

1.3.2 基于人工廊道与经济社会源地提取城镇格局

交通系统为经济社会发展提供支撑的同时，也会影响核心生态源地的连续性及生态系统的稳定性。因此，选取研究区内人工廊道中以快速交通为主的铁路、高速公路、国

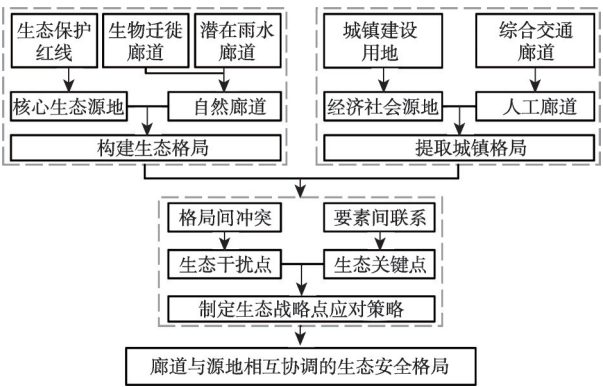


图2 技术路线
Fig. 2 Technical workflow

表2 MCR模型的阻力因子体系

Table 2 The resistance criteria for the MCR model

阻力因子	阻力系数	阻力因子	阻力系数
林地	10	沙地、裸地	450
水域	30	设施农用地	600
园地	100	农村道路	700
草地	200	公路	1000
耕地	300	村庄	1500
滩涂、沼泽	400	城镇	3500

表3 水生态影响因子阻力分级体系及指标权重

Table 3 The resistance classification system of the factors affecting water ecosystem and weight for the factors

因子	阻力分级					指标权重
	5	4	3	2	1	
高程/m	30~70	70~120	120~165	165~210	210以上	0.15
坡度/°	0~5	5~10	10~15	15~25	25以上	0.22
坡向	南	东南、西南	东、西	东北、西北	北	0.1
土壤类型	河潮土	—	水稻土	—	红壤土	0.23
覆被类型	城镇建设用地	农田	裸地	草地、湿地	林地	0.3

道、省道、县道、乡道组成综合交通廊道,作为干扰核心生态源地的影响来源之一^[35],并将其与经济社会源地叠合形成城镇格局。其中,综合交通廊道的分级,参照《城市道路工程设计规范》CJJ 37-2012 (2016),以各类道路对应的车速、车流量、道路宽度、以及对周边环境干扰程度作为三级廊道的划分依据,即铁路、高速公路和国道为一级交通廊道,省道和县道为二级交通廊道,乡道为三级交通廊道,各等级的廊道宽度分别为150 m、120 m、40 m。

1.3.3 两种格局中廊道及源地间生态战略点的提取和应对

生态格局在实现生态服务价值并产生积极影响的同时,生态过程会受到城镇格局中人类活动的负面影响,上述影响在两种格局之间的重叠区域更加明显,因此本文主要识别两种格局中廊道、源地之间的交集区。在 ArcGIS 10.6 中利用多要素空间叠置和地理统计,以交点数量、有交点斑块数占比、源地内廊道长度占比、源地内廊道面积占比、廊道与源地平均最近邻距离为指标体系,分析廊道与源地之间的空间联系。生态格局构成要素的重叠区域越多或距离越近,而生态格局与城镇格局构成要素的重叠区域越少或距离越大,区域内生态安全格局的稳定性越好。因此,将前一类重叠区域作为生态关键点,而将后一类重叠区域作为生态干扰点,并分析它们的来源、类型、数量特征。由于这些生态战略点所处的环境和涉及的对象存在较大差异,为消除生态干扰点的不利影响并强化生态关键点的积极作用,应以顺应生态系统自然发展规律、保障要素合理流动空间、维系区域生物多样性为原则,分别设计应对策略,以保障国土空间廊道与源地的协调,促进生态过程的可持续发展,进而构建出符合生态系统发展规律、加强生态要素空间联系的生态安全格局。

2 结果分析

2.1 自然廊道与人工廊道的空间分布特征

不同级别自然廊道和人工廊道的空间分布如图3所示。其中,生物迁徙廊道主要集中于研究区东西两侧,安化县、桃江县境内分布较多;潜在雨水廊道呈现出中部多而东西两侧较少的分布特征;综合交通廊道比较密集,以常德市、岳阳市、益阳市和长沙市市中心为核心区域,呈现出向四周扩散的分布特征。

在廊道的长度和面积方面,自然廊道均小于人工廊道,而不同等级自然廊道与人工廊道的差异较大,各级别的大小顺序不同,如表4所示。

2.2 廊道、源地间的空间联系及干扰

不同类型的廊道及源地分别形成的生态格局和城镇格局如图4所示。生态格局中,核心生态源地主要集中于沅江市、岳阳县、平江县、石门县、安化县境内,自然廊道将孤立的生态源地斑块连接成统一的生态系统。城镇格局中,经济社会源地呈现出以市中心多核集聚、乡镇中心零星散列的特征。人工廊道连接不同发展水平的经济社会源地,形成复杂的城镇系统,为城镇发展提供了重要支撑,同时也将区域内的三生空间划分成不同规模大小的斑块,影响生态系统的活力和斑块之间的生态联系。为保持核心生态源地与外界的联系,顺应核心生态源地范围只增不减的趋势,并构建更加系统的生态安全格局,需在现有核心生态源地确定的生态保护框架下,分阶段将不同等级的自然廊道划入生态安全格局的保护范畴。其中,一、二、三级自然廊道的条数分别为833条、458

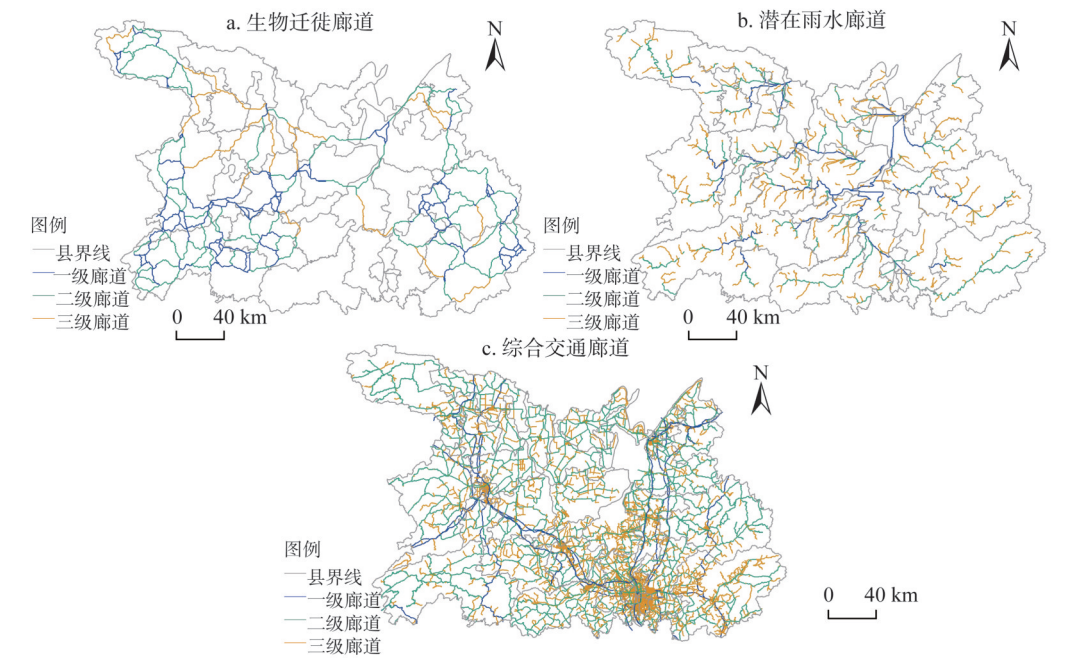


图3 三种廊道的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of three corridors

表4 三种廊道不同等级的面积及长度

Table 4 The area and length of three corridors at all levels

廊道类型 及等级	生物迁徙廊道				潜在雨水廊道				综合交通廊道			
	一级	二级	三级	汇总	一级	二级	三级	汇总	一级	二级	三级	汇总
面积/km ²	329.89	187.95	23.85	541.69	13.79	15.99	21.1	50.88	542.72	1263.3	497.99	2304.01
长度/km	1649.45	2088.32	794.98	4532.75	1149.33	1776.54	3013.72	5939.59	3618.13	10527.51	12449.73	26595.38

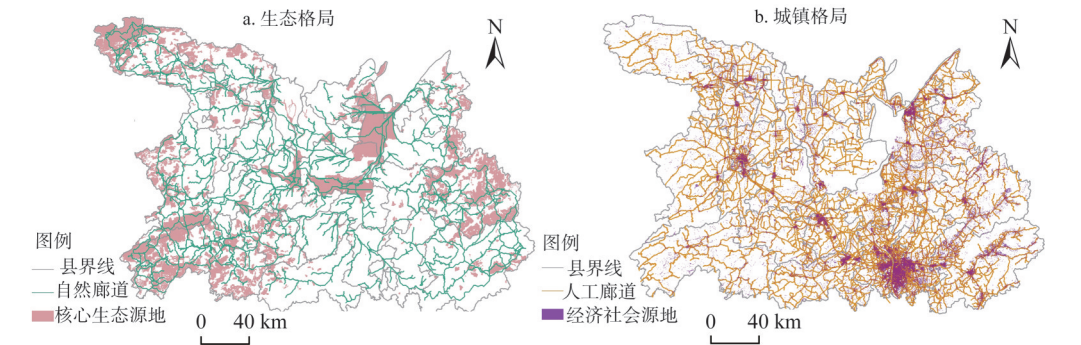


图4 生态格局和城镇格局

Fig. 4 The spatial pattern of urbanization and ecology

条、246条，长度分别为2798.77 km、3864.86 km、3808.71 km，非核心生态源地内自然廊道的面积分别为203.22 km²、125.67 km²、35.59 km²，分别占现有核心生态源地面积的1.50%、0.93%、0.26%。

生态格局和城镇格局构成要素之间的空间联系,如表5所示。核心生态源地和经济社会源地斑块中,与自然廊道有交点的斑块数占各自总数的比例分别为11.74%、3.17%,可见生物迁徙廊道、潜在雨水廊道不仅与核心生态源地有联系,也与非核心生态源地有联系。由交点斑块数占比、廊道长度占比、廊道面积占比、平均最近邻距离各项指标可知,各类廊道与源地之间的联系差异较大。核心生态源地中有7.29%的面积遭受了人工廊道的干扰,长度占人工廊道的1.36%,而经济社会源地内有0.48%的面积应属于自然廊道,长度占自然廊道的12.95%。对比不同等级廊道与源地的空间联系发现,较低级别的廊道对应的空间联系更高,如二级生物迁徙廊道和三级潜在雨水廊道与核心生态源地、经济社会源地的平均最近邻距离最小。综上,生态格局中核心生态源地及其内部的自然廊道能得到很好的保护,但核心生态源地外的自然廊道因与经济社会源地邻近,会受到诸多因素的干扰。如果这些影响因素不能消除,将会威胁到区域内生态过程的连续性、完整性、安全性,影响生态系统的理化环境、生物结构、景观格局等,进而阻碍生态安全格局的可持续发展。另外,廊道与源地之间均保持了一定的距离,为未来生态格局和城镇格局的发展提供了可拓展的用地空间。

表5 不同等级廊道与源地的空间联系特征

Table 5 Characteristics of spatial relationship between different level corridors and source areas

廊道等级		核心生态源地				经济社会源地			
		有交点斑 块数占比/%	廊道长度 占比/%	廊道面积 占比/%	平均最近邻 距离/km	有交点斑 块数占比/%	廊道长度 占比/%	廊道面积 占比/%	平均最近邻 距离/km
生物迁徙 廊道	一级	2.56	1.00	14.97	11.07	0.29	0.97	0.20	18.34
	二级	2.73	0.55	18.43	8.69	0.45	1.65	0.15	13.98
	三级	1.23	0.04	4.20	27.12	0.26	0.97	0.03	21.58
	总体	6.52	1.60	37.61	5.88	1.00	3.59	0.38	10.11
潜在雨水 廊道	一级	1.03	0.03	6.64	19.44	0.31	1.45	0.02	17.55
	二级	1.40	0.02	5.76	8.82	0.69	3.09	0.04	7.28
	三级	2.79	0.03	8.75	5.22	1.17	4.82	0.04	4.61
	总体	5.22	0.08	21.16	4.68	2.17	9.36	0.10	3.77
综合交通 廊道	一级	1.46	0.14	0.48	17.79	1.40	4.59	4.08	14.54
	二级	6.18	1.02	4.33	2.68	6.34	11.95	8.50	1.79
	三级	3.49	0.19	2.48	2.84	5.05	21.99	5.21	1.74
	总体	11.14	1.36	7.29	1.72	12.79	38.53	17.80	0.91

2.2.1 生态格局构成要素之间的生态关键点特征

生态格局的构成要素之间形成的908处生态关键点分布如图5所示。图5a中自然廊道与核心生态源地产生的生态关键点有723处,其中,一、二、三级生物迁徙廊道对应的生态关键点数量分别为143处、82处、16处,一、二、三级潜在雨水廊道对应的生态关键点数量分别为129处、130处、223处;而由两类自然廊道产生的185处生态关键点如图5b所示,不同等级之间形成的生态关键点具体数量矩阵如图5c所示。

2.2.2 城镇格局与生态格局构成要素之间的生态关键点特征

城镇格局与生态格局的构成要素之间形成的8800处生态干扰点分布如图6所示。图6a中呈现了人工廊道对核心生态源地的1618处生态干扰点,各级别人工廊道对应的生态干扰点数量由大到小依次为二级的833处、三级的640处、一级的145处,说明不同级别的

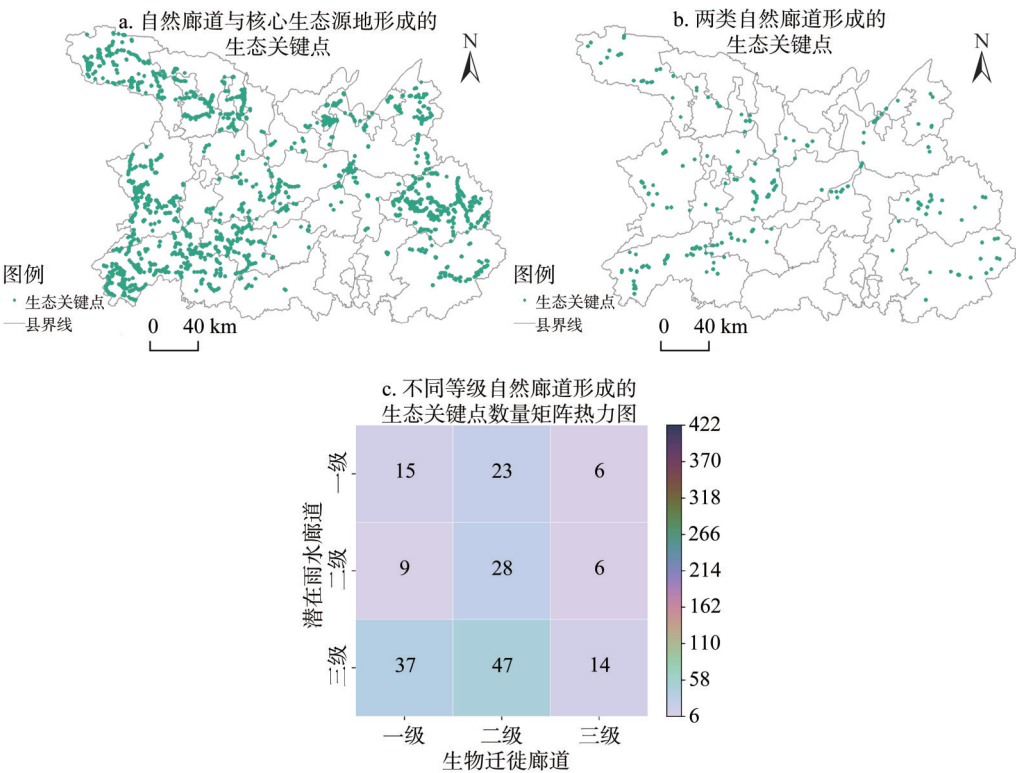


图5 生态关键点的空间分布及不同等级自然廊道间生态关键点的数量矩阵热力图
Fig. 5 The spatial distribution of ecological positive points and the number matrix heatmap of ecological positive points between different natural corridor levels

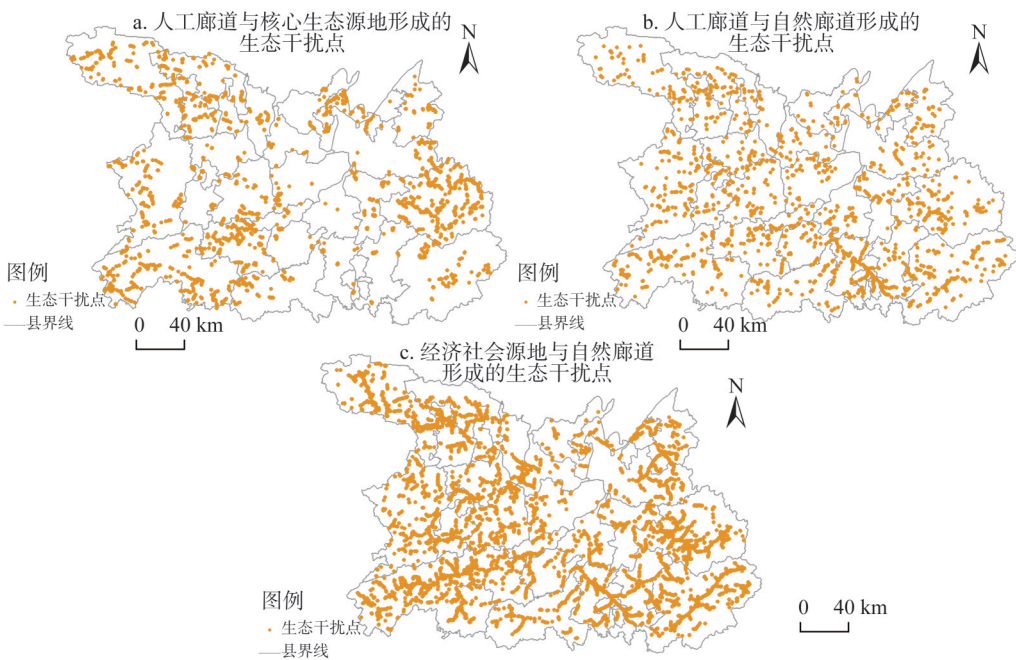


图6 生态干扰点的空间分布
Fig. 6 The spatial distribution of ecological disturbing points

人工廊道对生态安全格局的影响存在较大的差异；图 6b 中展示了人工廊道对自然廊道的 2129 处生态干扰点，其中对生物迁徙廊道的生态干扰点有 409 处，对潜在雨水廊道的生态干扰点有 1720 处；图 6c 中经济社会源地对自然廊道的生态干扰点有 5053 处，其中对一、二、三级生物迁徙廊道的生态干扰点分别有 465 处、689 处、401 处，对一、二、三级潜在雨水廊道的生态干扰点分别有 504 处、1119 处、1875 处。

不同类型不同等级的廊道间产生的生态干扰点数量矩阵如图 7 所示，可见人工廊道对自然廊道的生态干扰点，多发生在较低级别的廊道之间。

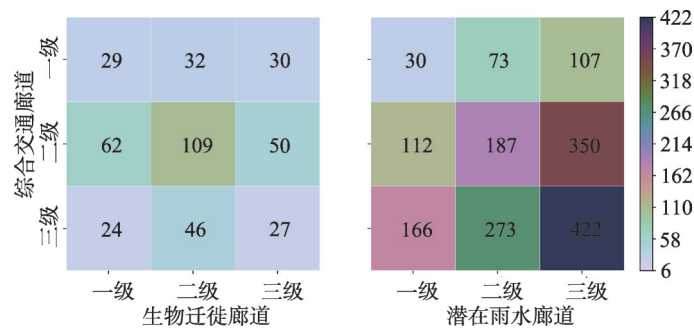


图7 不同等级自然廊道、人工廊道间生态干扰点的数量矩阵热力图

图7 The number matrix heatmap of ecological disturbing points between different natural corridor levels and artificial corridor levels

2.3 国土空间生态保护战略点的应对

本文识别的国土空间生态战略点主要由生态干扰点和生态关键点组成，这些区域的生态价值和受影响的程度远大于生态空间内部。前者是生态空间外界事物入侵生态空间，从而形成阻碍其发展的聚集区域，在生态空间中会干扰生态过程的正常秩序；后者是生态空间与外界联系的重要门户或保障生物驻足汲水的重要区域，在生态空间中能够发挥促进生态过程联系的作用。因此，采取全局调整和局部优化的策略，消除生态干扰点的不利影响和保护生态关键点的积极作用，以服务于国土空间规划中生态空间的优化调整。全局调整层面，在国土空间规划中补充对生态过程流动要素和廊道系统的考量，与资源环境承载力评价、土地适应性评价协调互补，共同指导“三区三线”的划定；局部优化层面，依据战略点影响程度大小、类型、以及周围的环境，通过布局优化、空间整治、协调控制、管理维护等手段，对既定的国土空间结构进行反馈优化。

2.3.1 生态干扰点的治理策略

为应对已识别的三类生态干扰点类型对生态系统可持续发展的影响，主要采取缓冲、预警等手段，依据影响程度的大小和类型、以及干扰点周围的环境选择相应的对策。

(1) 经济社会源地对自然廊道的干扰点应对。应严格控制经济社会源地内高污染产业的发展，合理调整城镇空间的产业结构，鼓励推动绿色产业发展。需根据自然廊道的等级大小，将干扰点附近的自然廊道及其两侧适宜宽度划为生态缓冲区，以削弱人类活动的直接影响。同时，可以依据实际情况改变重要自然廊道与经济社会源地重合区域的地用性质，转移该区域的房屋建筑及构筑物。另外，可以考虑增加绿地面积和植被丰富度，恢复其生态属性，并将其纳入为核心生态源地内以消除经济社会源地对自然廊道的影响。

(2) 人工廊道对自然廊道的干扰点应对。应结合生态建设理念,合理布局交通廊道绿化设施,增设防护设施,拓宽道路绿化带,布设车辆减速慢行装置,利用天桥、涵洞建设拱涵型生态通道,保障指示性生物迁徙和雨水流经的通道。另外,在保证不影响原有交通的正常运行情况下,在人工廊道两侧增设更高标准的生态缓冲带。在规划新的人工廊道时,可根据实际需求调整道路等级,或改变干扰点附近交通线路走向,并将自然廊道及其两侧区域纳入核心生态源地内,以减弱人工廊道对自然廊道的负面影响。

(3) 人工廊道对生态源地的干扰点应对。可以考虑在干扰点附近增设综合交通廊道防护设施,拓宽绿化带,减少高排量车辆经干扰点通过生态源地。同时,可依据区域选择性降低车辆行驶限速标准,以削弱噪声、扬尘、尾气等对生态源地的影响。另外,可控制核心生态源地内静态交通设施数量及规模,开展生态防护林、生态停车场等建设。

2.3.2 生态关键点的保护策略

为保障已识别的两类生态关键点在生态系统发展中持续发挥积极作用,并保持区域生物群落结构与生物食物网结构的完整性,结合生态关键点的类型及所处的环境,设计相应的保护措施。

(1) 自然廊道与生态源地的生态关键点保护。由于该生态关键点是核心生态源地与外界联系的重要门户,可在其周围一定范围内设置生态缓冲区,减缓外界因素对核心生态源地内部生态环境的干扰。同时,可采用多级净化手段治理关键点及其周边的污染现象,消除生态环境污染源,保障和提升核心区域的生态自我修复能力,逐步提升关键点的生物多样性及生态稳定性。另外,需要建设生态关键点污染监测与预警机制体系,以规避潜在的生态污染风险。

(2) 生物迁徙廊道与潜在雨水廊道的生态关键点保护。因部分关键点处于核心生态源地内可得到较好的保护,应重点关注核心生态源地外此类生态关键点的保护。涉及的两类廊道在生态系统中存在协同效应,通过在生态关键点及其相连的自然廊道周边建立生态隔离区,利用生态拦截方法,避免由外来污染物经潜在雨水廊道渗入造成的水环境质量问题的。同时,采用水文流量控制方法保障生态关键点的水文调节能力,使水流量满足生物需求,以保护该区域的生物多样性及生态稳定性。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 以构建国土空间中源地和廊道协调与保护兼顾的生态安全格局为目标,在现有13558.93 km²核心生态源地且有1.36%的面积受到干扰的空间框架下,为促进生态要素的空间联系,需要增补其与外界联系的1537条自然廊道,面积592.56 km²、长度10472.34 km,其中受到干扰的长度占12.95%,同时识别出了需要重点保护的生态关键点908处和需重点治理的干扰点8800处。

(2) 针对不同类型、不同来源的生态关键点和生态干扰点,提出了以顺应自然发展规律、保障要素合理流动、保护生物多样性为原则的差异化应对策略,主要采取缓冲、预警等手段处理,以保障自然—人工系统的协同发展。

(3) 将自然廊道的保护提升到与核心生态源地的保护同等重要的程度,对未来核心生态源地的发展设计了不同层次的拓展方案,即非核心生态源地内一、二、三级自然廊

道对应的 203.22 km²、125.67 km²、35.59 km² 面积作为未来核心生态源地划定范围的参考,进而满足生态系统可持续发展的需求。

3.2 讨论

本文以生态优先为主、多系统协调为辅的原则,为国土空间规划中协调生态保护和经济社会发展,提出基于自然廊道分批保护和生态战略点差异化应对的生态化思路和空间发展框架,充实了国土空间规划内“三区三线”评定体系对廊道效应的考虑,强化了核心生态源地与外界联系的廊道,构建出联系紧密、系统平衡、结构稳定、干扰减少的生态安全格局。在国土空间规划中,可为城镇建设用地、交通体系布局对生态空间的退让提供前期指导和反馈优化依据,有利于区域生态系统的稳定性维护和协调发展。本文在生态安全格局的构建中,试图综合考虑生态过程的保护和生态干扰的应对,但仍有若干问题需要深入讨论。复杂的生态空间中,自然廊道的功能多样,生态战略点的来源及形态复杂,若能进一步实现多功能廊道系统的识别与融合、生态战略点重要程度的定量化评定、生态效益与经济社会效益的精细化平衡等方面的研究,可更加合理地指导国土空间规划中生态保护策略的实施,并构建更为科学的生态安全格局。

参考文献(References):

- [1] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 1-12. [FAN J. Theoretical innovation in optimization of protection and development of China's territorial space and coping strategy of 13th Five-Year Plan. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(1): 1-12.]
- [2] 郑文聚, 高璐璐, 张超, 等. 从生态文明视角看我国土地利用的变化及影响. 环境保护, 2018, 46(20): 31-35. [YUN W J, GAO L L, ZHANG C, et al. The change and influence of land use in China from the perspective of ecological civilization. Environmental Protection, 2018, 46(20): 31-35.]
- [3] 孙鸿烈, 郑度, 夏军, 等. 专家笔谈: 资源环境热点问题. 自然资源学报, 2018, 33(6): 1092-1102. [SUN H L, ZHENG D, XIA J, et al. Experts interviews: Disputes on current hotspot issues in resources and environment. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 1092-1102.]
- [4] 焦胜, 曾光明, 何理, 等. 小城镇生态规划的不确定性分析. 城市环境与城市生态, 2003, 16(s1): 43-45. [JIAO S, ZENG G M, HE L, et al. Analysis of uncertainties in ecological planning for small-sized town. Urban Environment and Urban Ecology, 2003, 16(s1): 43-45.]
- [5] RAPPORT D J. Ecosystems not optimized: A reply. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1993, 2(1): 57-57.
- [6] HESS G R, FISCHER R A. Communicating clearly about conservation corridors. Landscape and Urban Planning, 2001, 55(3): 195-208.
- [7] KENCHINGTON R A, DAY J C. Zoning, a fundamental cornerstone of effective marine spatial planning: Lessons learnt from the great barrier reef, Australia. Journal of Coastal Conservation, 2011, 15(2): 271-278.
- [8] LIU J, MOONEY H, HULL V, et al. Systems integration for global sustainability. Science, 2015, 347(6225): 1258832.
- [9] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392. [YE X, ZOU C X, LIU G H, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3382-3392.]
- [10] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 等. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. 地理研究, 2017, 36(3): 441-452. [YANG T R, KUANG W H, LIU W D, et al. Optimizing the layout of eco-spatial structure in Guanzhong urban agglomeration based on the ecological security pattern. Geographical Research, 2017, 36(3): 441-452.]
- [11] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京城市扩张的生态底线: 基本生态系统服务及其安全格局. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24. [YU K J, WANG S S, LI D H, et al. Ecological baseline for Beijing's urban sprawl: Basic ecosystem services and their security patterns. City Planning Review, 2010, 34(2): 19-24.]
- [12] 丛佃敏, 赵书河, 于涛, 等. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定: 以天水市规划区(2015-2030年)为例. 自然资源学报, 2018, 33(1): 14-26. [CONG D M, ZHAO S H, YU T, et al. Urban growth boundary delimitation method integrating comprehensive ecological security pattern and urban expansion simulation: A case study of planning areas in Tianshui city (2015-2030). Journal of Natural Resources, 2018, 33(1): 14-26.]
- [13] 田健, 黄晶涛, 曾穗平. 基于复合生态平衡的城市边缘区生态安全格局重构: 以铜陵东湖地区为例. 中国园林,

- 2019, 35(2): 92-97. [TIAN J, HUANG JT, ZENG S P. Research on the reconstruction of ecological security pattern in urban fringe based on the compound ecological balance: A case study of Donghu district in Tongling city. *Chinese Landscape Architecture*, 2019, 35(2): 92-97.]
- [14] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784. [HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771-784.]
- [15] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484. [CHEN X, PENG J, LIU Y X, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [16] 袁少雄, 陈军, 官清华, 等. 基于Apache Spark 机器学习的生态安全格局构建方法. *生态学报*, 2019, 39(13): 1-12. [YUAN S X, CHEN J, GONG Q H, et al. An ecological security pattern construction method based on Apache Spark machine learning. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 1-12.]
- [17] PENG J, ZHAO S Q, DONG J Q, et al. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities. *Environmental Modelling and Software*, 2019, 117: 214-222.
- [18] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. *地理科学*, 2018, 38(3): 361-367. [PENG B F, ZHENG Y, LIU Y. Coupling ecosystem services and regional ecological security pattern. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 361-367.]
- [19] 李维佳, 马琳, 臧振华, 等. 基于生态红线的洱海流域生态安全格局构建. *北京林业大学学报*, 2018, 40(7): 85-95. [LI W J, MA L, ZANG Z H, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line in Erhai Lake Basin of Southwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(7): 85-95.]
- [20] 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. *生态学杂志*, 2016, 35(1): 250-258. [YANG S S, ZOU C X, SHEN W S, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: A case study of Jiangxi province. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(1): 250-258.]
- [21] 安静, 徐明德, 孙凯迪, 等. 三级生态保护体系区划研究: 以山西省高平市为例. *环境科学与技术*, 2018, 41(10): 226-232. [AN J, XU M D, SUN K D, et al. Research on delineation of three-level ecological conservation system: A case study in Gaoping city, Shanxi province. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(10): 226-232.]
- [22] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 中国生态环境敏感区评价. *自然资源学报*, 2015, 30(10): 1607-1616. [LIU J H, GAO J X, MA S, et al. Evaluation of ecological sensitivity in China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(10): 1607-1616.]
- [23] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15. [YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15.]
- [24] 高敏. 北京等15省份生态保护红线划定方案获批. http://www.xinhuanet.com/2018-02/12/c_1122409127.htm, 2018-2-12. [GAO JING. Layout of the ecological essential lines have been approved in 15 provinces including Beijing. http://www.xinhuanet.com/2018-02/12/c_1122409127.htm, 2018-2-12.]
- [25] 焦胜, 李振民, 高青, 等. 景观连通性理论在城市土地适宜性评价与优化方法中的应用. *地理研究*, 2013, 32(4): 720-730. [JIAO S, LI Z M, GAO Q, et al. The application of landscape connectivity theory in urban ecology suitability assessment and optimization. *Geographical Research*, 2013, 32(4): 720-730.]
- [26] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于“功能节点—关键廊道”的城市生态安全格局构建: 以深圳市为例. *地理科学进展*, 2018, 37(12): 1663-1671. [WU J S, MA H K, PENG J. Improving urban ecological security pattern based on functional nodes-key corridors: A case study of Shenzhen city. *Progress in Geography*, 2018, 37(12): 1663-1671.]
- [27] GUO R, WU T, LIU M G, et al. The construction and optimization of ecological security pattern in the Harbin-Changchun Urban Agglomeration, China. *International journal of environmental research and public health*, 2019, 16(7): 1-18.
- [28] 刘昌明, 王中根, 杨胜天, 等. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展. *地理学报*, 2014, 69(5): 579-587. [LIU C M, WANG Z G, YANG S T, et al. Hydro-informatic modeling system: Aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 579-587.]
- [29] 胡飞, 余亦奇, 郑翔, 等. 生态保护红线划定方法研究. *规划师*, 2018, 34(5): 108-114. [HU F, YU Y Q, ZHENG Y, et al. An innovative study of ecological red line delimitation. *Planners*, 2018, 34(5): 108-114.]
- [30] 陈竹安, 况达, 危小建, 等. 基于MSPA与MCR模型的余江县生态网络构建. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(8): 1199-1207. [CHEN Z A, GUAN D, WEI X J, et al. Developing ecological networks based on MSPA and MCR: A case study in Yujiang county. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2017, 26(8): 1199-1207.]
- [31] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 等. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2675-2684. [TANG F, ZHANG P T, ZHANG G J, et al. Construction of ecological corridors in Changli county based on ecological sensitivity and ecosystem service values. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2675-2684.]

- [32] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. 生态学报, 2005, 25(9): 2406-2412. [ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2406-2412.]
- [33] 焦胜, 韩静艳, 周敏, 等. 基于雨洪安全格局的城市低影响开发模式研究. 地理研究, 2018, 37(9): 1704-1713. [JIAO S, HAN J Y, ZHOU M, et al. Low-impact urban development mode based on waterlogging security pattern. *Geographical Research*, 2018, 37(9): 1704-1713.]
- [34] FORMAN R, GODRON M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley & Sons, 1986: 121-155.
- [35] 韩志勇, 王忠伟, 韩志刚. 生态交通研究进展. 生态经济, 2017, 33(12): 198-202. [HAN Z Y, WANG Z W, HAN Z G. Research progress on eco-traffic. *Ecological Economy*, 2017, 33(12): 198-202.]

Construction of ecological security pattern based on coordination between corridors and sources in national territorial space

HAN Zong-wei^{1,2}, JIAO sheng¹, HU Liang¹, YANG Yu-min¹, CAI Qing³, LI Bei¹, ZHOU Min¹

(1. School of Architecture, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Department of Tourism and Geography, Tongren University, Tongren 554300, Guizhou, China; 3. Hunan Research Academy of Environmental Sciences, Changsha 410004, China)

Abstract: Constructing an ecological security pattern with closer ecological connections and less ecological disturbance is an important way to make contributions to the balance between ecological protection and economic development in national territorial planning. This paper aims to establish an ecological security pattern, which should take into account the coordination and protection of sources and corridors in the ecological system in an integrated manner. Taking 33 counties (districts) around Dongting Lake as examples, it puts forward the ecological pattern formed by the ecological essential source areas and natural corridors, and the urbanization pattern formed by economic society source areas and artificial corridors. Then, we reveal the spatial characteristics of the ecological positive points and ecological disturbing points between the ecological pattern and urbanization pattern, and offer artificial and natural countermeasures for the problems in particular areas of the ecological environment. The main conclusions can be drawn as follows: (1) There should be 1537 identified ecological corridors in the ecological security pattern and 908 key points urged to be protected, which takes up 0.48% of economic society areas for returning to the ecological core source area, so as to promote the spatial relationship between ecological elements; (2) There are 8800 ecological disturbing points, 1.36% of ecological essential source areas and 12.95% of the length of natural corridors are in disturbance. In order to collaboratively develop the natural and artificial systems, the interference areas should be managed by means of creating buffers, establishing an early-warning system, and so on; (3) Natural corridors of the first to third levels in non-essential patches can be measured as 203.22 km², 125.67 km² and 35.59 km², respectively, which can be defined as protected area of future ecological security pattern separately to meet a continuous increasing demand for ecological protection land. The results can provide a reference for the coordination of ecological land and urban construction land in the national territorial planning system.

Keywords: national territorial space; ecological security pattern; ecological corridors and sources protection; ecological strategy point; Dongting Lake