

DOI: 10.5846/stxb201909191954

毛诚瑞,代力民,齐麟,王炎,周旺明,周莉,于大炮,赵福强.基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例.生态学报, 2020,40(18):6486-6494.

Mao C R, Dai L M, Qi L, Wang Y, Zhou W M, Zhou L, Yu D P, Zhao F Q. Constructing ecological security pattern based on ecosystem services: A case study in Liaohe River Basin, Liaoning Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6486-6494.

基于生态系统服务的流域生态安全格局构建 ——以辽宁省辽河流域为例

毛诚瑞^{1,2}, 代力民¹, 齐麟¹, 王炎^{1,2}, 周旺明¹, 周莉¹, 于大炮¹, 赵福强^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:人口和社会经济的高速发展导致土地利用格局的变化和生态系统服务的退化。构建生态安全格局是保障区域生态安全的重要途径。识别和保护关键生态区域对维持生态系统的稳定性和可持续性具有重要意义。以辽宁省辽河流域为例, 基于生态系统服务重要性评价, 根据区域自然特征和生态环境状况选取并定量评估固碳释氧、土壤保持、粮食供给和产水 4 项关键生态系统服务, 以生态系统服务的高价值区为生态源地, 综合各项生态系统服务功能构建阻力面, 运用电路理论的方法识别生态廊道和关键节点, 从而构建辽河流域生态安全格局。研究结果表明: 辽河流域内共有 129 个生态源斑块, 243 条生态廊道和 38 个“夹点”。其中, 生态源斑块主要分布在研究区东部, 主要由林地组成, 斑块连续、跨度范围较大; 生态廊道总长度为 1606.07 km, 呈梭形沿着平原与山区交错带延伸; “夹点”沿着河流分布在研究区的中部, 主要由林地、耕地组成。本文通过构建辽宁省辽河流域生态安全格局, 为缓解日益尖锐的辽河流域经济发展与生态保护之间的矛盾提出了新的思路。

关键词:生态安全格局; 电路理论; 生态系统服务; 辽河流域

Constructing ecological security pattern based on ecosystem services: A case study in Liaohe River Basin, Liaoning Province, China

MAO Chengrui^{1,2}, DAI Limin¹, QI Lin¹, WANG Yan^{1,2}, ZHOU Wangming¹, ZHOU Li¹, YU Dapao¹, ZHAO Fuqiang^{1,*}

1 Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The rapid growth of population and social economy, accompanied by the sharp change of land use pattern, has resulted in the loss of natural ecosystems and the degradation of ecosystem services, and thus threatened the sustainable development of human society. It is important to identify and protect key ecological areas to maintain the stability and sustainability of the ecosystem. The construction of ecological security pattern is an integrated approach to protect regionally ecological and society economic sustainability. Taking Liaohe River Basin as a case study area, this paper constructed the ecological security pattern of Liaohe River Basin through the following three steps. Firstly, based on the evaluation of the importance of ecosystem services, the ecological sources were identified through quantitative evaluating four ecosystem services, i.e. carbon fixation, soil conservation, crop production, and water yield. Secondly, we built resistance surface by synthesizing above ecosystem services. Finally, we identified the ecological corridors and key nodes by using circuit theory.

基金项目:国家自然科学基金(NSFC 41877549); 长白山科学研究院开放基金项目(201806)

收稿日期:2019-09-19; **网络出版日期:**2020-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaofuqiang@iae.ac.cn

The results showed that ecological security patterns in the Liaohe River Basin included 129 ecological sources, 243 ecological corridors, and 38 pinch-points. In details, the ecological sources were mainly distributed in the east of Liaohe River Basin, with the ecological corridors extending along the interlaced zone between plain and mountain areas in a shuttle shape, and both ecological sources and corridors were mostly covered with forest land. The “pinch-points” were distributed along the river in the middle of the study area, mainly covered by forest land and cultivated land. Identifying the spatial range of ecological corridors and the specific location of key nodes for effective ecological conservation based on ecosystem services and circuit theory, this paper puts forward a new idea for alleviating the increasingly sharp contradiction between economic development and ecological protection in Liaohe River Basin.

Key Words: ecological security pattern; circuit theory; ecosystem services; Liaohe River Basin

20 世纪 80 年代以来,随着人口和社会经济的高速增长,土地利用格局发生了极大的改变,深刻影响了区域物质能量流通和生态系统服务功能的供给,进而威胁了人类社会的可持续发展^[1-2]。通过区域生态安全格局的构建与优化,改善区域生态安全状况已经成为迫切的社会需求^[3-6]。目前,生态安全格局构建方法的研究日趋完善,“识别生态源-构建阻力面-提取廊道”的框架模式成为当前生态安全格局构建的基本范式^[7-8]。

生态源地和生态廊道的识别是构建区域生态安全格局的重要步骤。生态源地是物种或生态流向外扩散的起点,可以促进生态过程、维持系统完整性和提供高质量的生态系统服务,是保障区域生态安全的关键区域^[9]。生态源的识别方法有基于生态敏感性、生态重要性和景观连通性等^[8,10-11],其中基于生态系统服务的生态重要性评估应用最为广泛^[8,12]。阻力面的构建则通常根据土地利用/覆被类型参数^[13]、修订的土地利用类型参数^[7]或生态系统服务价值参数^[14]等计算得到。廊道是指景观基质中连接相邻生态源地之间的不同于周边基质的带状或线状要素,是生物迁徙和物质能量流通的重要路径^[15]。目前对生态廊道的提取应用最广泛的是最小累积阻力模型,该模型数据收集简单,地图成果形式表达好,并且可以快速地指出生态流的最优路径。但该方法忽略了潜在的替代路径,并且不能明确廊道的具体范围和关键节点。2007 年,McRae 和 Beier^[16]结合电路与运动生态学,将物理学领域中的电路理论引入生态学中,用以研究在异质景观中的基因流动。在电路理论中,异质景观被抽象为由一系列节点和电阻组成的网络。由于生态流具有与电流相似的随机游走特性,因此可以通过电路理论计算出与运动生态学相关的有效电阻、有效电压和有效电流(这种电流与异质景观中的随机漫步者的密度相类似,对预测廊道范围和识别有助于增加区域连接度的关键节点十分有用^[17])。目前已经有不少学者将电路理论运用到识别潜在的保护区域和廊道上,结果表明应用电路理论进行关键生态区的识别具有明显的优势^[18-20]。

近几年来,生态安全格局的构建被广泛运用于湿地^[21]、城市^[22]和山区^[23]等研究中,但关于流域生态安全格局的研究却很少涉及。流域作为典型的复合生态系统,是区域和自然生态系统的重要组成部分,具有显著的时空异质性和流动性特征,其特征决定着对流域进行生态安全格局构建及优化可有效提高区域生态系统的可持续发展水平^[24]。通过构建流域生态安全格局将景观格局与生态过程相结合,识别并保护景观中有助于提高区域景观连接度和维持重要生态过程的关键斑块,是实现流域生态可持续性发展的重要途径^[25]。

辽河流域是我国的七大水系之一,在《全国生态功能区划(2015 年修编)》中,辽河流域被划定为生物多样性保护、水源涵养和产品提供重要保护区。然而,随着辽河流域城镇化进程的加速,流域人口大量增加,自然资源的开发利用和城镇用地的扩张导致了区域景观格局的巨大改变,并引起了一系列的生态环境问题^[26-28]。本文以辽河流域为研究区域,选用电路理论构建流域生态安全格局,识别区域内有助于生态系统维护的关键生态区域。研究结果对提升该区生态系统稳定性,促进生态保护与社会经济的和谐发展具有重要意义。

1 研究地区与数据来源

1.1 研究区概况

辽宁省辽河流域(以下简称辽河流域)位于辽宁省北部,介于 $121^{\circ}16' - 125^{\circ}17'E$, $40^{\circ}28' - 43^{\circ}26'N$ 之间(图 1)。流域总面积 6.4 万 km^2 , 占全省总面积的 40.54% , 主要包括柳河口以上、柳河口以下、浑河、太子河及大辽河干流 4 大子流域。该地区土地利用类型较为单一, 以耕地和林地为主(图 2), 分别占研究区总面积的 53.42% 和 32.72% 。流域东部以山地丘陵为主, 植被覆盖度高, 流域中下游以平原为主, 工农业发达。研究区属于半湿润半干旱的季风气候, 年平均气温在 $4 - 9^{\circ}\text{C}$ 之间。年均降水量在 $500 - 600$ mm , 降水量多集中在 6—9 月份, 占全年降水量的 $60\% - 70\%$, 从东部向西部逐渐减少。

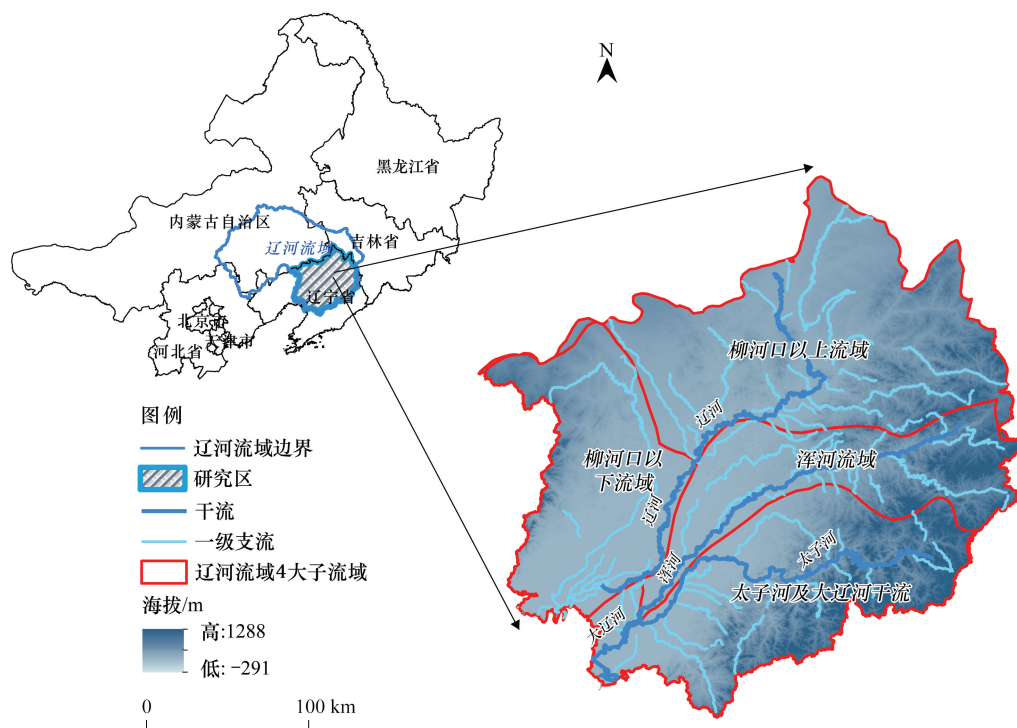


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源

本文的基础数据主要包括: (1) 2015 年数字高程模型 (DEM) 数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 30 m , 主要用于土壤保持服务中地形因子的测算; (2) 2015 年气象站点数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 包括温度与降水数据, 主要用于产水量的计算; (3) 2015 年归一化植被指数数据来源于美国航空航天局 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>), 空间分辨率为 250 m , 主要用于净初级生产力的计算; (4) 2015 年土壤属性数据来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>), 主要用于土壤保持服务的计算; (5) 基础地理数据 (土地利用与覆被、河流水域等) 来源于地理国情监测云平台 (<http://www.dsac.cn/>)。

2 研究方法

2.1 生态源的识别

生态源是对于区域生态过程与功能起决定性作用生境斑块, 同时它对区域生态安全具有重要意义并担负

着重要辐射功能^[29]。对于不同的生态系统,选取不同的评价指标,定量评估其关键生态系统服务的供给能力,将提供优质生态系统服务的生境斑块作为生态源地,是当前生态源地识别较好的方法。研究区占地面积大,跨度范围广,但是土地利用类型较单一,主要以耕地和林地为主。西部为平原农耕区,地势平坦,是区域粮食供给的主要来源。东部山区属于长白山山脉,植被覆盖度较高。然而由于山区地形起伏较大,导致其土壤流失较严重。因此,针对研究区的自然特征和生态环境状况,本文选取固碳释氧、土壤保持、产水和粮食供给 4 个生态系统服务作为区域关键生态系统服务功能进行定量评估。其中,固碳释氧功能由净初级生产力(NPP)表示,采用基于过程的 CASA 模型计算^[30];土壤保持功能采用修正的通用土壤流失方程计算得到,根据潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值计算土壤保持量^[31];产水功能采用 InVEST 模型产水模块计算,该模型基于水量平衡原理进行产水评估^[32];粮食供给服务根据各市统计年鉴中的粮食产量,对归一化植被指数(NDVI)进行空间插值分配,得到单个像元的粮食产量^[12]。各类生态系统服务的具体计算见表 1。

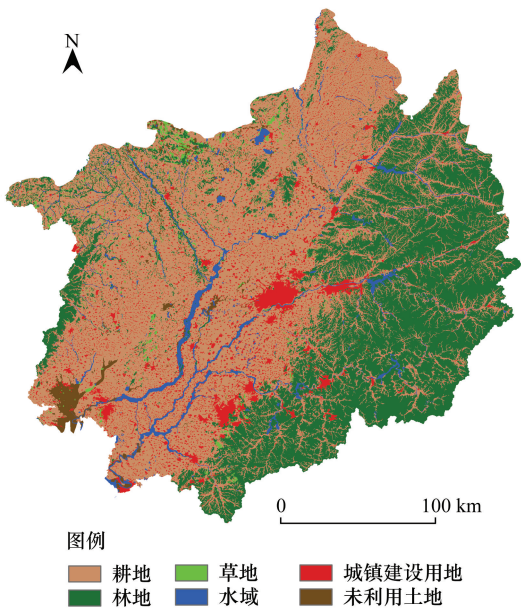


图 2 研究区土地利用类型
Fig.2 Land use types of the study area

表 1 生态系统服务计算方法
Table 1 Calculating methods of ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	计算模型/方法 Calculated model/ method	基本原理 Basic principle
固碳释氧 Carbon fixation	CASA 模型	$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \xi(x,t)$. 式中, $NPP(x,t)$ 为栅格 x 上的植被在 t 时段内的净初级生产力 ($gC\ m^{-2}\ a^{-1}$); $APAR(x,t)$ 为栅格 x 上 t 时段内植被所吸收的光和有效辐射; $\xi(x,t)$ 为栅格 x 上的植被在 t 时间段内的光能转化率
土壤保持 Soil conservation	RUSLE 模型	$A = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$. 式中, A 为单位面积年均土壤保持量 ($t\ hm^{-2}\ a^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子 ($MJ\ mm\ hm^{-2}\ h^{-1}\ a^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子 ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$); LS 为坡度坡长因子 (无量纲); C 为地表覆盖管理因子 (无量纲); P 为土壤保持措施因子 (无量纲)
产水 Water yield	InVEST 模型产水模块	$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \cdot P_x$ 式中, $Y_{(x)}$ 为栅格 x 上的年产水量 (mm); $AET_{(x)}$ 为栅格 x 上的年平均蒸散发量 (mm); $P_{(x)}$ 为栅格 x 上的年降水量 (mm)
粮食供给 Crop production	空间插值分配法	通过计算像元 NDVI 占行政单元上所有 NDVI 和的百分比乘上行政单元的总粮食产量,得到单个像元的粮食产量

根据研究区土地利用类型较简单的自然特征,权衡区域关键生态系统服务功能的供给,本文将处于每种生态系统服务功能值前 25% 的斑块提取出来进行叠加分析,取其交集作为生态源地。同时为了避免忽略生态系统服务类型单一,但是对特定生态系统服务又具有突出贡献的生境斑块,将每种生态系统服务功能值前 10% 的斑块也视为生态源地。综合二者的并集得到最终的生态源地^[8]。此外,考虑到面积小的斑块辐射功能较弱,对区域整体的生态安全格局影响较小。因此,本文在参考相关文献^[8,33]以及多次生态源面积阈值调试后,将面积小于 5 km² 且分布零散的斑块从生态源中剔除,同时对面积小但分布集中的斑块进行合并处理后作为生态源地。

2.2 生态阻力面设置

生态阻力面描述了物种、能量在异质景观间迁移、流动的困难程度,阻力值大小既与迁移、流动的距离有关,还受到自然干扰和人为活动的影响,这些影响可以用不同土地利用类型之间的差异来体现。因此,很多学者根据专家经验来确定与土地利用类型相对应的阻力值^[34],从而构建生态阻力面。虽然这种方法简单明了,但是它忽略了相同土地利用类型之间的内部差异。也有研究认为阻力值的大小取决于生态系统服务的大小,生态系统提供的服务越多,物质、能量在景观单元之间的流动就越容易,生态过程流动所遇到的阻力也就越小,因此基于生态系统服务来进行阻力面的构建广为研究者接受^[22,35-36]。本研究将 4 项生态系统服务功能进行等权叠加并将值域化为 0—1,以其反表面(1 减本身)作为生态阻力面。

2.3 生态廊道提取和“夹点”的识别

生态廊道是物种、能量流和信息流在生态系统中流通的具有特定宽度的条状区域,可以增强自然生境斑块之间的连通性和稳定性,是生态安全格局的重要组成部分之一。“夹点”一般位于生态廊道中,是生态过程流经的高频区域,对区域生态系统连通性十分重要,是生态保护的重点对象。本文根据电路理论模型 Linkage Mapper 软件计算生成廊道和识别“夹点”。

在电路理论中,景观被视为导电表面,生境良好的斑块(生态源)被视为节点,促进物种迁移扩散的景观类型赋予较低的电阻,反之赋予高电阻。这样异质景观就被抽象成由一系列节点和电阻组成的网络,结合生态过程将有效电阻、电流和电压等与物理电路相类比,赋予其生态学意义。

根据物理学中的欧姆定律,电路中的电流与电压呈正比,与电阻呈反比,表达式如下:

$$I = \frac{V}{R_{\text{eff}}}$$

式中, I 为电流; V 为电压; R_{eff} 为有效电阻。在生态学中, R_{eff} 被认为是反映节点间隔离程度的指标,电阻值越大,则表示对物种运动或基因交流阻碍能力越强; I 表示物种运动或基因交流过程中沿某一路径扩散的概率^[37],电流密度值越高的地区表示物种沿该地区扩散的概率越大,因此可以将识别出来的高电流区作为生态廊道和关键节点。

3 结果与分析

3.1 单一生态系统服务空间格局

辽河流域单一生态系统服务空间格局揭示了不同生态过程对于区域生态安全的影响与作用,如图 3 所示。粮食产量高的地方为柳河口以上流域和浑河流域内的沈阳、铁岭地区,该地区地势平坦,光照充足,适宜耕种。土壤保持方面,西部农耕区处于东北平原轻度侵蚀区,潜在土壤侵蚀与实际土壤侵蚀都很小;东部山区由于植被覆盖度高,因此其土壤保持量较高。空间上呈现东部山区土壤保持量高,西部平原较低的特征。产水功能方面,由于农作物需水量大,因此相比较而言,东部山区的产水量普遍高于中西部的农耕区;产水量较高的区域多为水域,洼地坑塘等,这些区域在汛期可以起到蓄水防洪的作用;又由于城市不透水层的影响,地面降水入渗率低,洪峰流量大,中部沈阳城区出现局部产水高值的现象。固碳释氧功能方面,研究区具有较高的固碳能力。固碳值高的地方主要位于东部山区,该地区降雨充沛、植被茂盛,人类活动相对较少,因此其固碳能力远高于中西部平原地区,在平原山区交错带形成明显的分界线。

3.2 重要生态源地

通过叠加法选取提供各类优质生态系统服务的区域,把该类优质区在空间上取并集最终得到辽河流域生态源分布格局(图 4)。根据表 2 可知,生态源地面积一共 21179 km²,占研究区总面积的 33.1%。整体上看,辽河流域生态源地斑块数量较多,但斑块破碎化程度较高,空间分布不均匀,大多集中分布在辽东山区,零散分布在研究区中西部以及西南部;从子流域区划上来看,生态源主要分布在太子河及大辽河干流、柳河口以上和浑河 3 个子流域,分别占研究区的生态源面积的 37.6%、31.6%和 24.5%。柳河口以下子流域由于区域气候

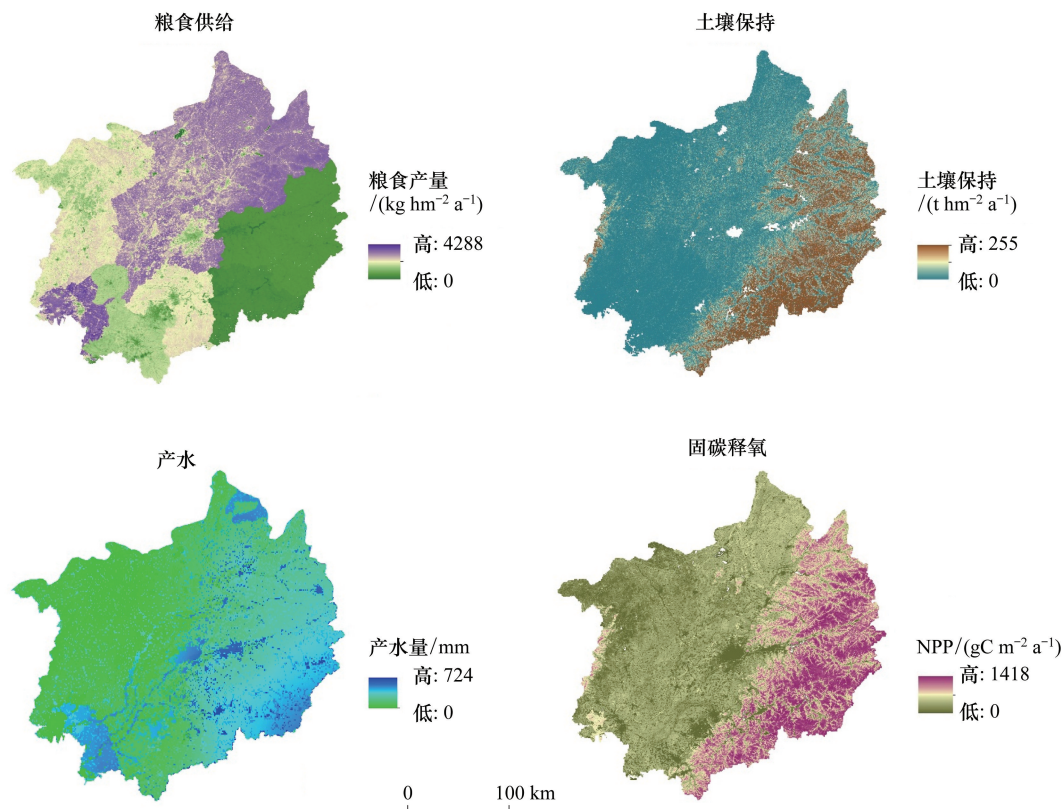


图3 辽河流域生态系统服务空间格局

Fig.3 Spatial pattern of ecosystem services in Liaohe River Basin

干燥缺水,生态环境恶劣,因此生态源分布非常少;从土地利用类型上看,生态源斑块主要以林地和耕地为主,分别占生态源地面积的 65.33% 和 30.48%。建设用地生态服务价值较低,基本上不属于生态源,而水体、草地等则分别只占小部分;从多种生态系统服务供给上来看,提供 1 项、2 项区域关键生态系统服务的区域分别占生态源地总面积的 20.78% 和 18.19%,零散分布在整個研究区内,提供 3 项、4 项区域关键生态系统服务的分别占 10.5% 和 7.87%,主要分布在研究区东部,中部、西南部有零星的分布。提供多种生态系统服务的生态源斑块占比较少,生态系统服务间的协同与权衡关系较为明显。

3.3 关键生态廊道和“夹点”

从整体上看,辽河流域的生态廊道分布较为广泛,沿着研究区平原山区交错带由南部向北部纵向延伸(图 4)。流域内一共有 243 条生态廊道(总长度为 1606 km,平均长度为 6609 m),主要由林地、耕地和小部分水域和农村居民地组成。由表 2 可以看出,辽河流域内生态廊道在空间上有明显的差异,柳河口以上流域

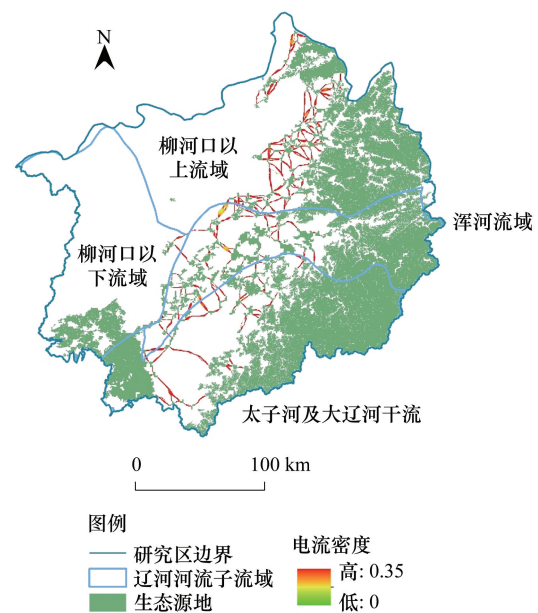


图4 研究区生态安全格局的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological security pattern in study area

最多,一共有 121 条生态廊道;其次是浑河、太子河及大辽河干流,分别拥有 68 和 52 条生态廊道;柳河口以下流域的生态廊道数量最少,仅有 2 条。此外,各子流域生态廊道的平均长度也大不相同,柳河口以下流域内虽然生态廊道分布稀少,但是却拥有 2 条极长的廊道,平均长度达到 9.0 km;太子河及大辽河干流流域内生境质量良好,生态源地分布广而连续,因此平均生态廊道长度较长,为 7.5 km;柳河口以上流域和浑河流域的平均生态廊道相似,分别为 6.4 km 和 6.2 km。另外,全区一共还识别出 38 个“夹点”,其中柳河口以上流域内的“夹点”分布最多,总共有 19 个,浑河流域、太子河及大辽河干流流域和柳河口以下流域分别只有 10 个、7 个和 2 个。这些“夹点”主要由林地和耕地组成,极大的增加了区域景观的连接性,是未来流域内重点生态保护对象。

表 2 辽河流域各子流域生态源地、廊道和节点的数量特征

Table 2 The quantitative characteristics of ecological sources, corridors and “pinch points” in each sub-watershed of Liaohe River Basin

	柳河口以上 Upstream Liuhekou River Basin	柳河口以下 Downstream Liuhekou River Basin	浑河 Hunhe River Basin	太子河及大辽河干流 Taizi River and the main stream of Daliao River	总计 Total
生态源地 Ecological source/km ²	6691	1319	5196	7973	21179
生态廊道 ecological corridor/条	121	2	68	52	243
廊道长度 Corridor length/km	779	18	421	388	1606
关键节点 Pinch point/个	19	2	10	7	38

4 讨论

4.1 研究方法的优点与待改进之处

辽河流域中、下游地区是东北工业经济最发达的地区之一,承载着振兴东北的历史使命。构建辽河流域生态安全格局对于促进协调区域经济发展与生态安全建设有重要意义。本研究根据辽河流域自然特征和生态环境状况,选取固碳释氧、土壤保持、产水和粮食供给 4 个区域关键生态系统服务进行定量评估,基于生态系统服务重要性选取生态源地,具有较强的理论性和科学性。其次,本研究采用电路理论的方法不但确定了生态廊道的空间范围,还识别出廊道中影响栖息地连接度的重要景观要素——关键节点。文章首次将电路理论的方法运用在辽河流域,并把流域内重要生态保护区域的位置空间化,为区域生态保护提供了重要的参考,也为珍稀物种保护和区域重要景观要素识别提供了一种全新的方法。结果表明,所识别的生态源斑块和生态廊道与辽宁省的生态保护红线的划定基本吻合,也证明了该方法的可靠性与合理性。

目前对于生态阻力面的构建,尚未形成统一的标准和量化方式。文中将地形因子(如高程、坡度、地形等)作为二级指标计算其对生态阻力的影响,地形因子是计算生态系统服务功能的重要指标,而生态阻力面基于生态系统服务重要性进行构建。如何将地形因子作为一级指标校正景观阻力面仍然有待进一步的研究。其次,本研究主要着重于辽河流域生态安全格局的构建,探讨生态廊道在空间上的分布格局,没有展开对生态廊道宽度的分析。生态廊道的宽度可直接影响其生态功能的发挥,不同的物种在不同的生态系统下对廊道的宽度需求也不尽相同^[7],如何确定最佳的生态廊道的宽度是生态安全格局构建下一步需要重点研究的方向。

4.2 人类活动对关键生态廊道的影响

辽河流域植被覆盖率高,生态廊道分布广泛。由图 5 可以看出,辽河流域的生态廊道主要分布在人类活动较为密集的地方。这些地方的地表粗糙度较小,很适合人类活动。近些年来,随着辽河流域内人口增长和城市扩张,流域内土地利用格局发生了巨大的改变。耕地和城市建设用地的扩张,大量自然生境斑块被侵占,生态源地破碎化程度增加,平均生态廊道的长度减小,城市扩张与生态保护之间的矛盾与日俱增。

生态廊道促进了生态过程和野生动物在自然生境斑块间的流动和迁移。如果生态廊道网络被道路、铁路或者城镇等阻断,这些廊道将失去它们原有的功能,并阻止生态过程和野生动物的进一步扩散。因此,在空间

上识别和保护这些关键的生态廊道显得尤为重要。人工湿地、人工林和城市绿化带等的建立,对改善区域生态环境,提高区域生态系统连通性有重要的意义。同时,从生态源地和廊道的土地利用类型上来看,辽河流域生态源地和廊道主要由林地组成。近些年来辽宁省政府大力实行的退耕还林还草、天然林保护等生态保护政策增加了流域内森林覆盖率,降低生态源地的破碎化程度。从源头上防止水土流失、减少自然灾害和增加固碳等,进一步改善和保护了区域关键生态廊道,推动了区域自然生态系统的健康发展,对提高区域景观连接度和提升区域生态系统稳定性有重要的意义。

4.3 辽河流域生态安全格局分布的影响因素及未来生态保护管理的建议

总的来说,辽河流域生态安全格局在空间上分布差异较为显著,这是在人与自然共同作用下导致的结果。太子河及大辽河干流的生态安全最好,该区域以大面积覆盖的林地为主,生态系统类型和生物多样性丰富,生境质量高。良好的生态环境以及较少的人类活动是该区域生态源地连续、面积大,平均生态廊道长度较长的主要原因;其次是柳河口以上流域,该地区以耕地为主,是整个流域的主要粮食供给地。流域内土壤肥沃、地势平坦并且光照和水分充足,是理想的粮食种植地。但是农作物需水量大,辽河上游灌溉用水的大量使用势必给辽河下游水资源安全状况带来巨大的压力;浑河流域的生态安全排在第三位,该地区城市发展迅速,人类活动频繁,近年来沈抚新区的建设又进一步加快了区域的城市扩张进程。城市扩张和社会经济的发展将不可避免地导致当地生态系统的丧失和生态系统服务的退化,这也是流域内生态源地破碎化和平均生态廊道较短的主要原因;柳河口以下流域生态安全最不稳定,该区域干旱缺水,森林覆盖率低,区域内生态阻力值高。区域内主要以矿产业、造船业和化工业为主,进一步破坏了区域的生态环境。因此柳河口以下流域内的生态源地和生态廊道数量都很稀少。

综上所述,结合辽河流域各子流域的生态安全状况,应该制定相应的生态保护措施,优化区域生态安全格局。首先柳河口以上流域应大力发展生态、绿色、节水农业,减少农业用水需求,既发挥了良好的区域粮食种植优势还可以缓解辽河下游水资源短缺的压力。浑河流域内环沈阳经济圈的发展是区域社会经济发展的重要驱动力,大力开展城市建设是今后必不可免的趋势。因此以浑河为生态走廊,大力开展流域内生态廊道的建设,保护现有的生态廊道和关键节点,是浑河流域乃至整个辽河流域可持续发展的必然要求。此外,未来城市发展规划中高人为干扰区应与生态廊道保持安全距离,保证生态源地之间物质能量的有效流动。太子河及大辽河干流森林覆盖率高,生态环境好,可发展为水源涵养生态保护区,为辽河流域提供重要的水源涵养生态系统服务。柳河口以下流域的产水服务、固碳释氧服务和土壤保持服务等生态系统服务功能较低,生态基底较为薄弱。近些年耕地和建设用地的过度开发加上人口的增长,导致流域内生态环境问题进一步恶化,未来应重点开展生态保护建设。首先开展辽河生态走廊建设,沿着干流修建人工湿地、种植人工林和绿化带等以构建生态源地和生态廊道,增强区域景观的连通性。其次大力开展产业转型,把高能耗、高污染的产业向低能耗、低污染的新型环保产业转型。

5 结论

本文依照“识别生态源-构建阻力面-提取廊道”的研究框架,定量评估了粮食供给、土壤保持、产水和固碳释氧4个区域关键生态系统服务功能用以识别区域生态源地,基于生态系统服务功能构建阻力面,采用电路理论模型提取生态廊道和“夹点”,从而构建辽河流域生态安全格局。主要结论如下:辽河流域生态安全格局主要由129块生态源地、243条生态廊道和38个“夹点”构成。生态源地、廊道和“夹点”主要由林地、耕地组成,林地和耕地的保护对区域生态安全的维持意义重大。在区域开发建设、城市扩张等过程中,应尽量避免这些重要的源地、生态廊道和“夹点”,以保持区域生态的稳定性和可持续性。此外,浑河流域生态源较其他子流域而言破碎化较为严重,未来要重视破碎化生境的保护与修复。

参考文献 (References):

- [1] 陈星,周成虎.生态安全:国内外研究综述.地理科学进展,2005,24(6):8-20.

- [2] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [3] Bolliger J, Lischke H, Green D G. Simulating the spatial and temporal dynamics of landscapes using generic and complex models. Ecological Complexity, 2005, 2(2): 107-116.
- [4] Schröder B, Seppelt R. Analysis of pattern-process interactions based on landscape models —Overview, general concepts, and methodological issues. Ecological Modelling, 2006, 199(4): 505-516.
- [5] 李宗尧, 杨桂山, 董雅文. 经济快速发展地区生态安全格局的构建——以安徽沿江地区为例. 自然资源学报, 2007, 22(1): 106-113.
- [6] 刘兆顺, 李淑杰. 基于生态系统服务价值的土地利用结构优化——以重庆万州为例. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 646-651.
- [7] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 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.
- [8] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.
- [9] 周锐, 王新军, 苏海龙, 娄翼来. 平坝山新区生态用地的识别与安全格局构建. 生态学报, 2015, 35(6): 2003-2012.
- [10] 张蕾, 危小建, 周鹏. 基于适宜性评价和最小累积阻力模型的生态安全格局构建——以营口市为例. 生态学杂志, 2019, 38(1): 229-236.
- [11] Zhang R S, Pu L J, Li J G, Zhang J, Xu Y. Landscape ecological security response to land use change in the tidal flat reclamation zone, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(1): 1.
- [12] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [13] 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.
- [14] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. 地理研究, 2017, 36(3): 429-440.
- [15] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 周朕, 孙宁. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [16] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19885-19890.
- [17] Walpole A A, Bowman J, Murray D L, Wilson P J. Functional connectivity of lynx at their southern range periphery in Ontario, Canada. Landscape Ecology, 2012, 27(5): 761-773.
- [18] 李慧, 李丽, 吴汎胜, 周跃, 李雯雯, 梅泽文. 基于电路理论的滇金丝猴生境景观连通性分析. 生态学报, 2018, 38(6): 2221-2228.
- [19] Ayram C A C, Mendoza M E, Salicrup D R P, Granados E L. Identifying potential conservation areas in the Cuitzeo Lake basin, Mexico by multitemporal analysis of landscape connectivity. Journal for Nature Conservation, 2014, 22(5): 424-435.
- [20] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [21] 任金铜, 杨可明, 陈群利, 莫世江, 王志红. 贵州草海湿地区域土地利用景观生态安全评价. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 158-165.
- [22] 王云, 潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3455-3467.
- [23] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 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.
- [24] 敦越, 杨春明, 袁旭, 杨燕平, 肖复晋, 梁斯琦, 陆颖. 流域生态系统服务研究进展. 生态经济, 2019, 35(7): 179-183.
- [25] Liu D, Chang Q. Ecological security research progress in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 111-121.
- [26] 问青春, 卢雁, 姜永伟, 李杨, 王朝霞. 辽河流域生态景观结构变化及驱动力研究. 环境科学与管理, 2016, 41(2): 138-141.
- [27] 田蕾, 王随继. 近 60 年来辽河流域径流量变化及其主控因素分析. 水土保持研究, 2018, 25(1): 153-159.
- [28] 张书源, 程全国, 孙树林. 辽河流域污染防治 PPP 模式的适用性研究. 环境工程, 2017, 35(1): 73-77.
- [29] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [30] Yu D Y, Shi P J, Han G Y, Zhu W Q, Du S Q, Xun B. Forest ecosystem restoration due to a national conservation plan in China. Ecological Engineering, 2011, 37(9): 1387-1397.
- [31] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. 自然资源学报, 2014, 29(3): 365-376.
- [32] 张福平, 李肖娟, 冯起, 王虎威, 魏永芬, 白皓. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1321-1329.
- [33] 李潇然, 李阳兵, 王永艳, 邵景安. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1959-1967.
- [34] Gurrutxaga M, Rubio L, Saura S. Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: a transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). Landscape and Urban Planning, 2011, 101(4): 310-320.
- [35] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例. 生态学报, 2010, 30(5): 1157-1166.
- [36] 刘杰, 叶晶, 杨婉, 郭怀成, 于书霞. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化. 自然资源学报, 2012, 27(5): 801-808.
- [37] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. Ecology, 2008, 89(10): 2712-2724.