

基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化

和娟, 师学义, 付扬军

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要: 生态安全格局的优化是保障区域生态安全, 维护生态系统稳定和提升生态系统服务的重要空间途径。以汾河源头区域为例, 定量评估产水量、生境质量、土壤保持量三种生态系统服务, 利用热点分析法识别重要的生态源地, 考虑到河流在生态系统中复杂的作用机制, 构建了两种模式的生态安全格局, 并在此基础上提出了综合生态安全格局。研究表明: 汾河源头区域共 19 个生态源地, 占研究区面积的 16.59%, 三种模式分别构建了 33 条、42 条、43 条潜在生态廊道。网络结构评估结果表明: 三种模式均可生成闭合的生态网络, 优化后的生态廊道总长度为 565.957 km, 网络闭合度、节点连接率及网络连接度较高, 成本比较小。此外, 共识别了 35 个生态断裂点, 明确了生态保护与修复建设的重点区域, 以期为区域生态保护与修复规划提供空间指引。

关键词: 生态系统服务; 热点分析; 生态廊道; 生态安全格局; 汾河源头区域

生态安全格局的优化对于保护生态系统结构及功能的完整性, 维持生态系统服务, 保障生态安全具有重要的意义^[1]。生态廊道能够将生态系统各要素有效连接起来, 是提升生态系统服务和保护生物多样性的重要生态举措。党的十九大报告强调: “实施重要生态系统保护和修复重大工程, 优化生态安全屏障体系, 构建生态廊道和生物多样性保护网络, 提升生态系统质量和稳定性”。生态安全格局的构建充分考虑景观格局与生态过程的耦合^[2], 从生态的角度模拟生态过程的空间运动, 从而识别关键的景观组分, 得到多类别、多层次及多目标的空间配置方案, 从而落实在空间地域上, 增强生态系统的连通性和整体性, 可有效解决生态脆弱区生态环境问题^[3,4], 提升区域生态安全水平^[5]。

20 世纪 90 年代末, 俞孔坚^[6]首次提出景观生态安全格局的理论和方法后, 国内外学者利用“源地—阻力面—廊道”的组合方式对不同的空间尺度开展了许多相关研究^[7,8], 最小累积阻力模型、图论方法、电流理论等是较常见的研究方法^[9-11]。对于源地的识别多是基于区域自然保护区、生态红线及大面积集中连片的林草地及水域等^[12,13], 较少考虑同类地类的内部差异^[14], 或是仅考虑单一生态功能重要性或构建综合指标体系等^[15]。从阻力面的设置来看, 多是对土地利用类型进行均一化赋值^[16], 忽略了不同区域自然条件及社会经济差异。河流宽度过大在很大程度上会制约多数陆生生物的迁徙活动, 影响生态斑块间物质能量的交换, 另一方面又促进了湿地环境的建设。但是目前关于阻力面的设置很少考虑河流在生态系统中复杂的作用机制^[17]。

收稿日期: 2019-04-18; 修订日期: 2019-08-20

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项 (201411007)

作者简介: 和娟 (1995-), 女, 山西晋城人, 硕士, 主要从事土地利用评价与土地规划研究。

E-mail: joann0214@163.com

通讯作者: 师学义 (1960-), 男, 山西祁县人, 博士, 教授, 主要从事土地利用评价与土地规划研究。

E-mail: shixueyi60@163.com

汾河源头是华北平原生态屏障和山西最重要的水源涵养区,生物多样性丰富,在国家生态安全格局中占有重要的地位。但近年来生态环境未得到根本性好转,生态系统敏感而脆弱,导致了生态系统服务下降、景观破碎化严重等一系列生态问题,从根本上解决此问题的重要途径之一便要构建空间上的生态安全格局。本文基于InVEST模型中产水量模块和生物多样性模块,以及利用水土流失通用方程评估汾河源头产水量、生境质量、土壤保持量三种生态系统服务,采用热点分析法识别重要的生态源地,考虑到河流在生态系统中的复杂作用机制,设置了两种阻力模式且构建了相应的潜在生态廊道,对廊道网络空间结构进行分析,提出了优化后的生态安全格局,识别了生态断裂点,以期对汾河源头山水林田湖草生态保护与修复规划提供空间指引,对县域尺度的国土空间规划的编制具有参考价值。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

研究区为汾河源头——宁武、静乐两县,地处山西省西北部黄土高原、汾河上游,东依原平市、忻府区,南连娄烦县、古交市,西隔管涔山,与五寨、岢岚县为邻,北靠神池县及朔州市,国土总面积3981.29 km²。地理坐标在111°42'43"~112°36'55"E、38°7'57"~39°8'41"N之间。汾河自北向南流经芦芽山和云中山之间,纵贯宁武、静乐两县,流域总面积3441 km²,其中宁武境内1395 km²,静乐境内2046 km²。区域地形复杂,主要为土石山区、黄土丘陵沟壑区、河川区三大类,海拔高度差异很大,景观破碎化严重,生态环境问题突出。区域“山、水、林、田、湖、草”六大生态资源要素完备,通过生态廊道可将各个生态要素串联起来,有效提升生态系统服务,维护生态系统的完整性。

1.2 数据来源

主要数据包括:2017年土地利用变更数据,来源于宁武、静乐两县国土局;DEM数据(30 m分辨率),来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),由此生成高程、坡度数据;降雨量数据,来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>),根据研究区及周边气象站点的降雨数据进行空间插值获得;潜在蒸散发量,来源于国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统(<http://www.cnern.org.cn/>);土壤厚度和土壤质地等数据(1:100万土壤数据),来源于世界土壤数据库中国土壤数据集(<http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/Ex->

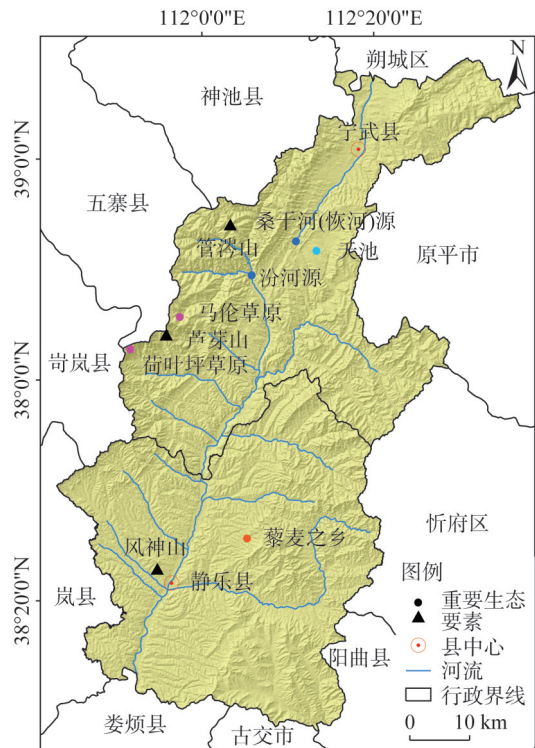


图1 研究区地理位置和范围

Fig. 1 Geographical location and scope of the study area

ternal-World-soil-database/HTML/)。为便于空间数据的分析处理,所有数据均转换为统一的坐标及投影系统,数据精度可满足本次研究需求。

1.3 研究方法

1.3.1 生态源地的识别

生态源地是指区域中具有较高生态系统服务价值的斑块,对景观过程发展能够产生较大价值的景观组分^[18],生态源地对于维持生物多样性具有重要的生态学意义。汾河是山西境内第一大河流,也是山西人民的母亲河,同时汾河源头是华北平原的生态屏障和山西省重要的水源涵养区,生物多样性丰富,湿地类型多样且生态系统服务价值较高,不仅对本区域生态环境有着关键的作用,也对全省生态环境质量具有重要影响。针对区域生态本底状况,选择产水量、生境质量及土壤保持量三种生态系统服务进行定量评价,选取每种生态系统服务前20%的斑块,取并集后作为生态斑块,利用热点分析法识别生态源地。

(1) 生态系统服务

① 产水量。基于InVEST模型中的产水模块,利用水量平衡法对汾河源头产水量进行估算,该模块是以每一个栅格上的降雨量扣除蒸散量(包括地表蒸发及植物蒸腾)后剩余的那一部分水量。输入参数有降雨量、潜在蒸散发量、土地利用/覆被类型、土壤有效含水量、土壤厚度及生物物理参数表等。其中,以1981-2010年汾河源头区域内及周边气象站点的降雨数据为基础,利用反距离插值法对区域降雨量进行空间插值;通过ArcGIS软件从中国土壤数据集中获取研究区土壤质地、土壤厚度等数据;利用经验公式,计算土壤质地的百分比含量得到土壤有效含水量;结合已有研究得到生物物理参数表^[19,20],见表1。

表1 产水量模块参数表

Table 1 Input files for the water yield module

代码	土地利用类型	根系深度/mm	流速系数	蒸散系数
1	耕地	500	1100	0.45
2	灌木林地	600	600	0.4
3	园地	550	800	0.7
4	湿地	1	2012	1.12
5	建设用地	1	2012	0.3
6	裸地	1	2012	0.5
7	其他草地	200	1500	0.65
8	其他林地	1300	380	0.8
9	天然牧草地	800	400	0.9
10	有林地	1800	360	1

② 生境质量。生境质量优劣表明生态系统能够提供物种生存环境和繁衍发展的潜力大小,与生物多样性存在正相关性,因此在一定程度上可以表征生物多样性的丰富程度。运用InVEST模型中的生物多样性模块评估,从外界威胁因子和生境敏感性来评价生境质量的优劣,该模块参数包含土地覆被、生境类型和威胁因子的距离、威胁因子的影响、生境类型对威胁因子的敏感性等变量,本文根据实地调查和参考前人研究的基础上^[21,22],确定农田、道路、村庄、建制镇、工矿用地及综合生态风险源(滑坡、泥石流、土壤侵蚀、干旱、地震)等对地表景观影响较大的自然或人为因子为研究区生态威胁因子,见表2。在模块中输入以上要素,获得生境质量评价结果。

③ 土壤保持量。采用修正后的水土流失通用方程,包括降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子以及植被因子,用潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值定量计算土壤保持量^[23],公式如下:

$$A=R \times K \times L \times S \times (1-C \times P) \quad (1)$$

式中: A 为土壤保持量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; L 和 S 分别为坡长和坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子, 具体计算过程可参考相关文献^[24,25]。

(2) 热点分析法

通过生态系统服务选取的生态斑块较为分散, 规模较小且零星分布, 热点分析法基于 Getis-Ord G_i^* 统计法^[26], 对生态系统服务高值或低值在空间上的聚类情况进行分析, 破碎且不具有集中连片的斑块随着距离阈值的增加而不断被剔除, 距离相近且相连的斑块聚集, 形成规模较大的斑块。

1.3.2 阻力面的确定

地形和土地覆盖类型是生态“源”向外扩散中遭遇阻力的主要来源^[27], 研究区地形主要为土石山区、黄土丘陵沟壑区、河川区三大类, 海拔差异较大, 因此选择高程、坡度及土地利用类型作为阻力因子。地表基面特征的不同, 造成生态源地产生的生态能量在区域中扩散时受到的阻力也不尽相同。研究区汾河干流位于研究区中部区域, 总长 81.6 km, 河道平均宽度 220 m, 考虑到宽度较大的河流对于生物迁徙的阻力较大, 但是河流的连通性又促进了湿地生态环境的进程, 为湿地生物提供了栖息地, 因此, 复杂的生态系统便需要从多方面考虑。阻力系数反映了生态能量扩散的难易程度, 地形阻力因子不论从保护生物多样性的角度, 还是从促进湿地生态环境的建设来看, 阻力系数基本相同, 本文仅对土地利用阻力因子从两个方面考虑, 一方面根据生物物种的分布及河流水系对生物物种迁移的阻力, 设置模式一阻力值; 另一方面考虑河流水系对汾河上游湿地生态环境的促进作用, 因此河流水系没有阻力, 从而设置模式二阻力值。具体阻力系数的设置见表 3。

表 3 研究区阻力因子以及阻力系数的设置

Table 3 Resistance factors and resistance coefficient in the study area

阻力因子	阻力因子/模式一阻力系数/模式二阻力系数						权重
土地利用类型	林地/1/1 耕地/10/10	自然湿地/30/1 其他用地/70/70	河流水面/80/1 交通运输用地/80/80	人工湿地/50/10 建设用地/100/100	园地/5/5	草地/5/5	0.5
高程/m	1000~1300/10	1301~1600/20	1601~1900/40	1901~2200/60	2201~2500/80	2501~2800/100	0.2
坡度/(°)	0~2/10	2~6/30	6~15/50	15~25/70	> 25/100		0.3

1.3.3 关键廊道的提取

根据最小累积阻力模型, 利用 ArcGIS 软件空间分析模块中的成本距离分析方法, 基于最小累积阻力面, 结合生态源地分布情况, 生成研究区每个景观单元到成本耗费面上邻近源地斑块的最小累积成本距离, 然后利用成本路径分析方法, 识别从源地斑块到目标区域的最小成本路径, 去除重复的路径后得到最优的关键潜在生态廊道^[28]。计算公式

如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (2)$$

式中: MCR 为最小累积阻力值; f 表示生态过程与最小累积阻力为正相关关系; D_{ij} 为生态源地斑块 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元对生物物种迁徙的阻力系数。

1.3.4 生态节点

生态节点位于生态廊道中生态功能较脆弱的地方, 对生态流的运行具有关键作用^[29]。生态廊道为相邻源地间的低阻力通道, 即最小路径, 在 ArcGIS 中利用水文分析模块得到最小耗费阻力面的“山脊线”, 为最大路径, 最大路径与最小路径的交汇点为生态节点。

1.3.5 网络结构评价

本文利用网络结构分析方法, 选择网络闭合度 (α 指数)、节点连接率 (β 指数)、网络连接度 (γ 指数) 以及成本比等指标对生态廊道进行评价^[30], 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \alpha &= (L - V + 1) / (2V - 5) \\ \beta &= L / V \\ \gamma &= L / 3(V - 2) \\ \text{成本比} &= 1 - (L / C) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: L 表示廊道数量 (条); V 表示节点数 (个); C 表示廊道长度 (km)。

2 结果分析

2.1 生态系统服务评价

通过定量评价产水量、生境质量及土壤保持生态系统服务, 得到汾河源头三种生态系统服务空间格局。汾河源头区域自然生态要素齐备, 生态功能完整, 对调节区域气候、改善空气质量、提升生态环境功能和保障山西供水安全具有不可替代的作用, 在国家生态安全格局中占有重要的地位。从产水服务来看, 相对于其他土地利用类型, 林地土壤入渗能力强, 以及地表径流截留的作用, 产水能力较低, 建设用地由于其不透水表面, 降水入渗低, 产水量较高; 生物资源在维持生态系统平衡方面起着决定性的作用, 研究区平均生境质量指数达到 0.85, 将其按照 0~0.3、0.3~0.6、0.6~0.9、0.9~1.0 等级进行划分, 生境质量等级从低到高的面积所占比例分别是 1.3%、0.8%、43.4%、54.5%; 土壤保持服务方面, 研究区管涔山片区土壤保持量较高, 西南部土壤侵蚀强度较高, 多集中在宁武县的薛家洼乡以及静乐县的王村乡、丰润镇、辛村乡。从图 2 明显可以看出, 研究区整体上自然本底条件较好, 汾河源头、管涔山国家森林公园、芦芽山国家级自然保护区以及研究区的东部区域产水较低 (水源涵养较高)、生境质量及土壤保持量较高, 在区域生态环境保护和建设中占有不可或缺的作用。但从土壤保持服务来看, 部分区域植被稀疏, 存在严重的水土流失生态问题, 大量的泥沙下泻对汾河下游的安全构成了直接的威胁, 有必要对该区域进行生态保护修复建设使其完善生态功能。

2.2 重要生态源地的识别

生态系统服务冷热点的空间分布反映生态系统服务的强弱。综合产水量、生境质量及土壤保持生态系统服务的评价结果, 选取每种生态系统服务前 20% 的生态斑块, 取并集后基于 ArcGIS 软件, 利用空间统计模块中热点分析工具, 得到研究区生态系统服务的

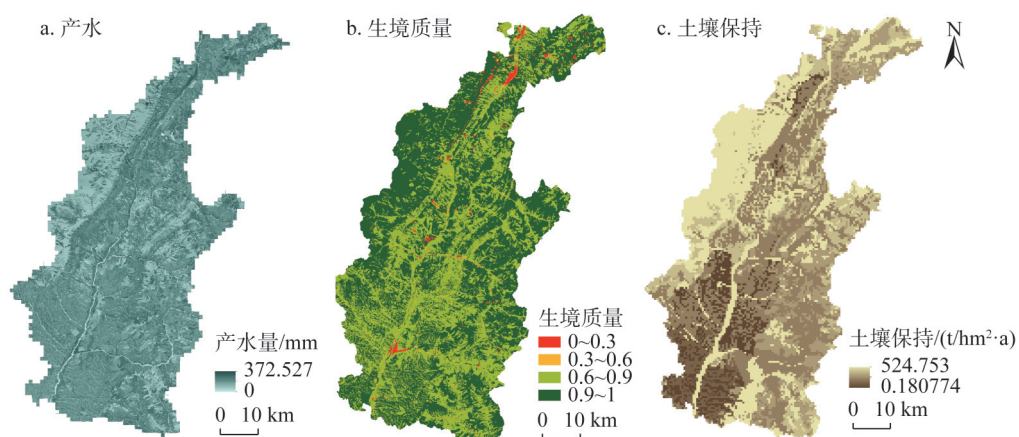


图2 研究区生态系统服务空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of ecosystem services in the study area

热点区域,见图3。热点区多分布于管涔山片区及东部区域,而中部汾河两岸以坡耕地为主,分布较稀疏,生态系统服务较弱。经过人工修正,去除零星分布且面积小于 0.3 km^2 的斑块,从而识别重要的生态源地。最终确定生态源地19个,总面积为 660.40 km^2 ,占研究区面积的16.59%。

2.3 不同阻力方案下的生态廊道的构建

从构建的阻力面中可以看到整个研究区的自然地形走势,总体呈现“两山一川”大格局,以芦芽山、云中山为两翼,以汾河川为中心从北到南贯穿整个研究区。研究区西北区域的植被覆盖率较高,阻力值较小;北部区域为县城所在地,人类活动较多,采矿活动频繁,阻力值较高。针对汾河源头湿地和河流水系相依存的特征,为了构建更加科学合理且符合研究区“两山一川”特点的生态安全格局,本文综合考虑河流生态系统复杂的作用机制,采取了两种模式构建阻力面。通过多次野外调研以及参考有关专家的建议,了解到研究区大多数哺乳动物,如褐马鸡、金钱豹等长期栖息在管涔山区域,迁徙活动范围较小,且汾河干流纵贯研究区,河川平均宽度约 220 m ,境内长度达到 81.6 km ,阻碍了东西方向生物物种的迁徙。因此模式一把河流水系作为不适宜生境类型,沿汾河两岸分别做源地间的潜在廊道,可满足区域大多数哺乳动物及迁徙能力有限的生物迁徙。研究

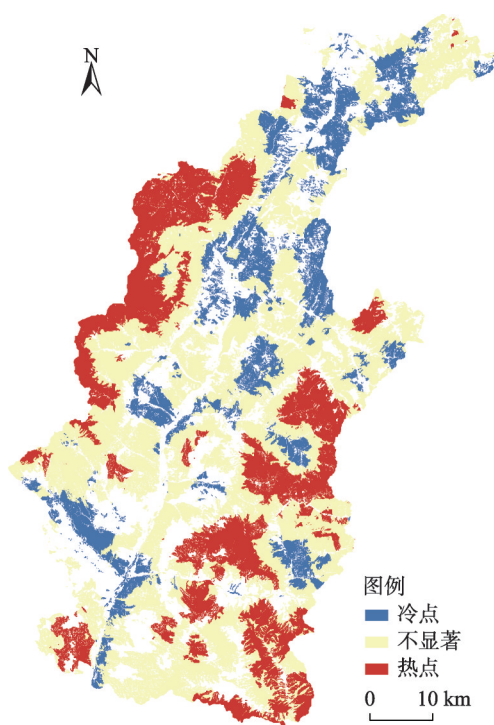


图3 汾河源头区域生态系统服务冷热点区域的识别

Fig. 3 Identification of cold and hot areas of ecosystem services in the source area of Fenhe River Basin

区拟建汾河川国家湿地公园，湿地总面积为412.95 hm²，为促进湿地生物及生态流的迁徙及扩散，必须考虑湿地斑块间的水文连通性，因此模式二充分考虑河流水系对于湿地生境的促进作用。

生态廊道可有效连接相邻两个源地，是物种迁徙和能量扩散的重要路径。根据19个生态源地以及构建的最小累积阻力面，去除冗余且阻力累积值较大的廊道后得到研究区潜在生态廊道。如图4，模式一构建了33条潜在生态廊道，识别37个生态节点，大多分布在汾河干流两侧，呈南北走向，避开了汾河干流对生物物种迁徙的阻碍作用；模式二构建了42条潜在生态廊道，36个生态节点，纵横分布，生态廊道将生态源地有效地连接起来，可便于湿地生物的迁徙和物质能量的交换。

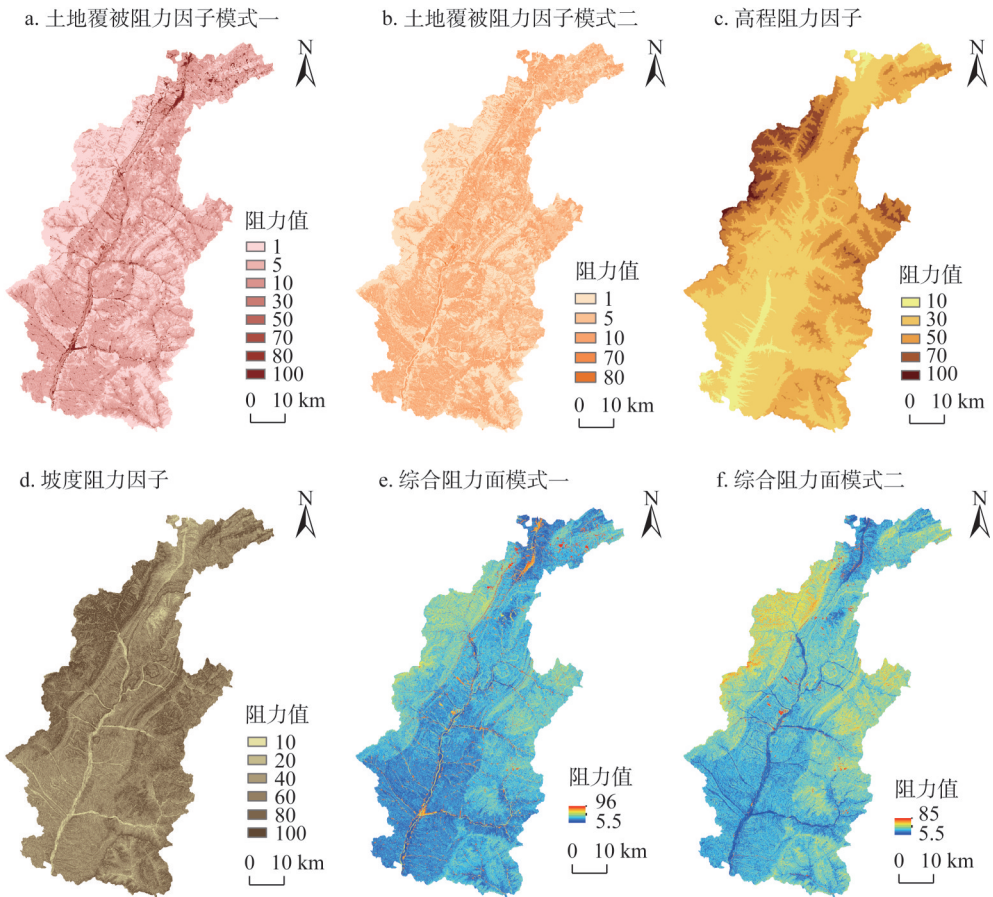


图4 研究区累积阻力面的构建

Fig. 4 Construction of cumulative resistance surface in the study area

本文充分考虑了区域地形地貌特征及生物物种迁徙的习惯，从保护生物多样性和促进河流湿地环境建设两个角度分别构建了阻力面及潜在生态廊道，识别生态安全格局。模式一构建的生态廊道可满足多数陆地生物的迁徙及生态能量的扩散；汾河川湿地面积较大及生态环境建设完好，模式二构建的生态廊道，对营造良好的湿地环境和保持湿地生境的连通性具有至关重要的作用（图5）。为解决既要满足生物物种迁徙的需求，又要

促进湿地生境的连通性的矛盾,本文提出一种综合生态廊道,采用以下三种方法确定:一,穿过自然保护区及生态红线内的潜在廊道,为营造生境的建设,选择模式一的生态廊道;二,源地间有河流穿过,且很少有生物的分布,则选择模式二的生态廊道;三,源地在自然保护区或生态红线内,且有河流穿过,则为了达到保护生物多样性的目的,选择模式一的生态廊道,将关键生态廊道与源地进行连接,从而构建了多功能的生态网络,不仅满足生物迁徙的需求,又充分发挥连通汾河川周边生态源地的作用,提升区域生境质量,提出汾河源头生态安全格局规划。

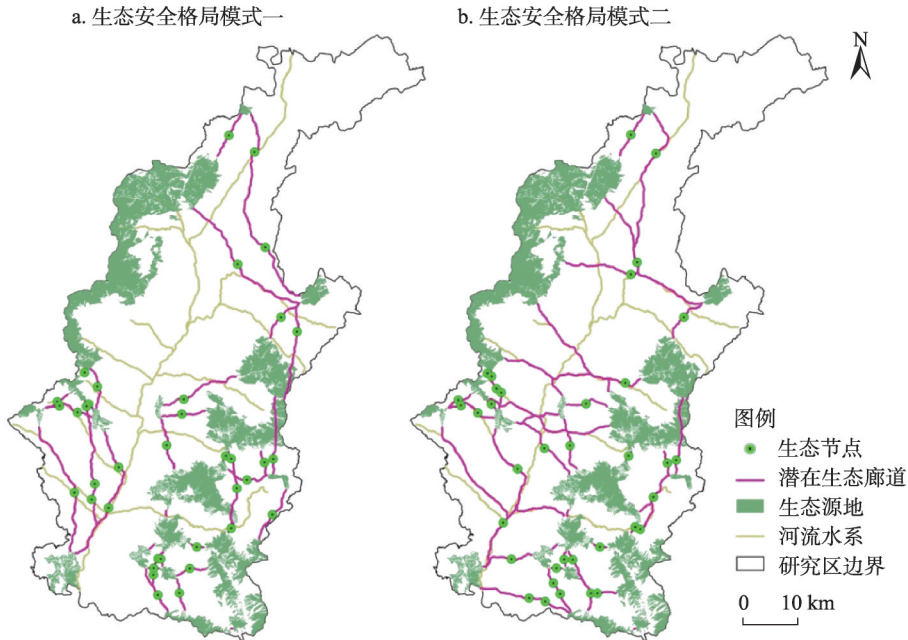


图5 两种模式生态安全格局构建图

Fig. 5 Two modes mapping of ecological security pattern

2.4 网络结构评价及生态安全格局优化

从生态网络结构指数的评价结果来看(表4),三种生态网络均具有较完整的结构,但有些许差异,分别构建了33条、42条、43条潜在廊道,廊道长度分别为363.81 km、556.42 km、565.957 km。三个生态网络节点之间都形成了连接,网络闭合度在0.455~0.758之间,节点连接率在1.737~2.263之间,网络连接度在0.647~0.843之间,成本比在0.909~0.924之间。生态网络结构指数表明模式二比模式一网络更复杂,廊道与连接点之间的连通性更强,有利于物质和能量在廊道方向上的扩散。相对前两种生态网络模式而言,综合生态网络的 α 指数、 β 指数、 γ 指数均明显较高,成本比低于模式二生态网络,生态廊道连通性强,为最优的生态网络,可有效提高区域生态系统服务价值,降低景观破碎化程度。

生态源地生态系统服务较完善,可为物种提供良好的生态环境,在生态保护修复规划中,要以源地为核心,使之达到向外辐射的最大范围。生态节点位于生态功能薄弱处,加强生态节点的建设可有力改善区域生态系统结构的稳定性。综合研究区现有廊道及潜在生态廊道,可分为道路廊道、河流廊道、绿带生态廊道。河流廊道主要有汾河、

恢河、洪河、新堡河、西马坊河、鸣河、东碾河、西碾河、万辉河等，生态基础较好，在河流生态修复规划中应规范河道，引导河水流向，增加湿地面积，优化河道两侧植物；汾河源头拥有典型和独特的生态资源要素，通过生态廊道将“山、水、林、田、草”等生态系统各要素有效地串联起来，实现山上山下、流域上下游联动的整体性；道路廊道主要有宁静铁路、忻保高速、太佳高速以及215省道、305省道、313省道等，可通过增加行道树的宽度，尽可能地减少对生态过程的干扰；生态断裂点严重阻碍了廊道物质与能量的正常流动，在道路廊道与潜在生态廊道的交汇处共识别了35个断裂点，由图6可看出，生境斑块被纵横交错的交通道路网切割，使原本连续完整的生态系统受到了破坏，造成了研究区景观的破碎化。同时也对生物物种的迁徙造成了严重的安全隐患，特别是宽度较大的道路会增加生物受伤或死亡的风险，因此对生态断裂点的修复和改善刻不容缓，可采取必要的工程措施或生物措施，预留生态建设的空间，如通过修建涵洞、天桥或隧道等为生物提供迁徙专用通道，有针对性地保护生物多样性，增加生态系统的稳定性。

3 结论与讨论

汾河源头是山西省重要的水源涵养区，是华北平原的生态屏障。本文通过定量评估产水量、生境质量、土壤保持量三种生态系统服务，根据在空间上的集聚特征识别重要的生态源地，考虑到河流在生态系统中复杂的作用机制，构建了两类阻力面及相应的生态安全格局，并在此基础上提出了综合生态安全格局，并对生态网络结构进行分析，旨在全面提升各类生态系统稳定性和生态系统服务，筑牢汾河源头区域生态安全屏障。主要得到如下结论：(1) 通过选取单一生态系统服务前20%的生态斑块，利用热点分析法识别了19个生态源地，占研究区面积的16.59%，主要分布在管涔山、芦芽

表4 生态网络景观组分及结构指数分析

Table 4 Analysis of landscape components and structure index of ecological network

指标	模式一生态网络	模式二生态网络	综合生态网络
廊道数	33	42	43
廊道总长度	363.81	556.42	565.957
α 指数	0.455	0.727	0.758
β 指数	1.737	2.211	2.263
γ 指数	0.647	0.778	0.843
成本比	0.909	0.824	0.924

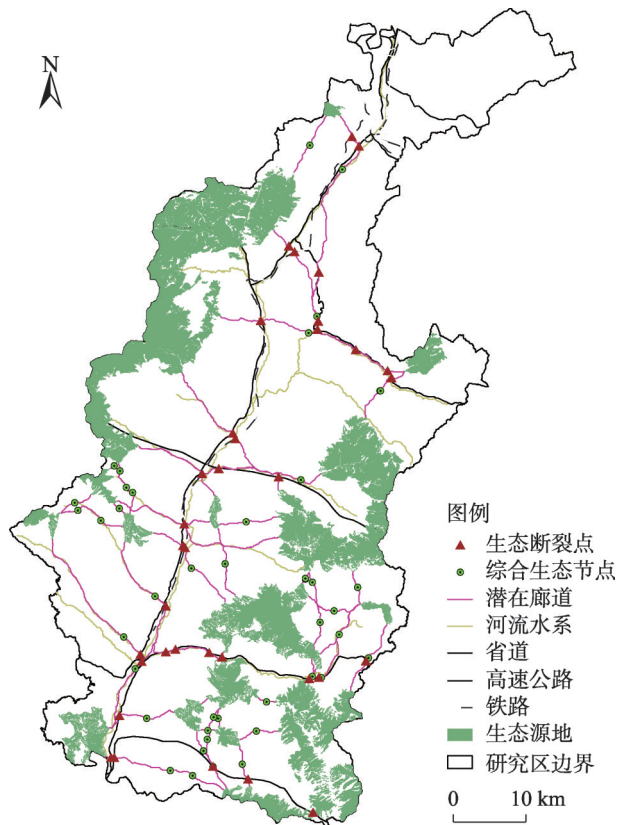


图6 研究区生态安全格局综合规划

Fig. 6 Comprehensive planning of ecological security patterns in the study area

山、天池(马营海湿地)及汾河川周边。(2)两种模式生态安全格局中分别构建了33条、42条潜在生态廊道,为了提升生态廊道的连通性和发挥最有效的作用,提出了最优化的生态安全格局,共构建了43条潜在生态廊道、35个生态断裂点。(3)网络结构评估结果表明,三种模式均可生成闭合的生态网络,优化后的综合生态安全格局网络闭合度、节点连接率及网络连接度较高,成本比较小。通过生态源地、生态廊道及生态断裂点的分布可以明确生态保护修复的重点区域,以构建“山青、水绿、林郁、田沃、河美”的区域生态安全格局。

本文基于生态系统服务和热点分析法识别生态源地,为源地的精准空间划定提供了科学依据。但随着区域生态环境的变化和社会经济的快速发展,相关要素都处于动态变化中,未来的相关研究中要着重考虑现有的源地是否可满足区域生态安全的需要,以及新建源地的位置、修复措施等问题,使生态源地达到更大范围的辐射覆盖率。考虑到研究区部分生态廊道发生受损、生物多样性功能下降的状况,应恢复破碎生境,加大对廊道沿线生态绿化建设,使之达到更为稳定的生态系统。需要说明的是,由于考虑到汾河源头区域的生态环境本底条件和生态功能定位,确定阻力因子时仅考虑了自然因子和土地覆被状况,未将社会经济因子纳入评价体系,在未来的研究中可深入探讨。

参考文献(References):

- [1] 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 contents and progress of ecological security pattern research. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3382-3392.]
- [2] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.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. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect of regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [3] 刘洋,蒙吉军,朱利凯.区域生态安全格局研究进展.生态学报,2010,30(24):6980-6989. [LIU Y, MENG J J, ZHU L K. Research progress on regional ecological security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6980-6989.]
- [4] REYNOLDS J F, SMITH M S, LAMBIN E F, et al. Global desertification: Building a science for dry land development. *Science*, 2007, 316(5826): 847-851.
- [5] 李建春,袁文华.基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究.自然资源学报,2017,32(6):988-1001. [LI J C, YUAN W H. Assessment of urban land ecological security in Yinchuan city based on the grid method. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 988-1001.]
- [6] 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 of biological conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15.]
- [7] 杨志广,蒋志云,郭程轩,等.基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建.应用生态学报,2018,29(10):3367-3376. [YANG Z G, JIANG Z Y, GUO C X, et al. Construction of ecological network using morphological spatial pattern analysis and minimal cumulative resistance models in Guangzhou city. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3367-3376.]
- [8] 杜悦悦,胡熠娜,杨旸,等.基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建:以云南省大理白族自治州为例.生态学报,2017,37(24):8241-8253. [DU Y Y, HU Y N, YANG Y, et al. Building ecological security patterns in southwestern mountainous areas based on ecological importance and ecological sensitivity: A case study of Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan province. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8241-8253.]
- [9] 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. Construction of Yunfu city's ecological security pattern based on the framework of "Importance-Sensitivity-Connectivity". *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [10] 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 function nodes-key corridors: A case study of Shenzhen city. *Progress in Geography*, 2018, 37(12): 1663-1671.]
- [11] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 等. 基于“质量—风险—需求”框架的武汉市生态安全格局构建. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 615-626. [HUANG L Y, LIU S H, FANG Y, et al. Construction of Wuhan's ecological security pattern in under the "quality-risk-requirement" framework. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 615-626.]
- [12] CEN X T, WU C F, XING X S, et al. Coupling intensive land use and landscape ecological security for urban sustainability: An integrated socioeconomic data and spatial metrics analysis in Hangzhou city. *Sustainability*, 2015, 7(2): 1459-1482.
- [13] PENG J, PAN Y J, LIU Y X, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [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] 刘杰, 叶晶, 杨婉, 等. 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. [LIU J, YE J, YANG W, et al. Landscape pattern optimization of Dianchi basin based on GIS. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(5): 801-808.]
- [16] 余宇晨, 陈彩虹, 贺丹, 等. 基于MCR模型和Kriging的海口市景观格局优化分析. *西北林学院学报*, 2016, 31(3): 233-238. [SHE Y C, CHEN C H, HE D, et al. Landscape pattern optimization analysis based on MCR model and Kriging in Haikou. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(3): 233-238.]
- [17] 吴晶晶, 栗云召, 高猛, 等. 四种河流水系阻力下的黄河三角洲湿地生态网络构建及对比研究. *湿地科学*, 2018, 16(4): 493-501. [WU J J, LI Y Z, GAO M, et al. Construction and comparative study of wetland ecological network in the Yellow River Delta under the resistance of four river systems. *Wetland Science*, 2018, 16(4): 493-501.]
- [18] 梁发超, 刘浩然, 刘诗苑, 等. 闽南沿海景观生态安全网络空间重构策略: 以厦门市集美区为例. *经济地理*, 2018, 38(9): 231-239. [LIANG F C, LIU H R, LIU S Y, et al. Spatial restructuring countermeasures of landscape ecological security network in Southern Fujian: A case study of Jimei district in Xiamen. *Economic Geography*, 2018, 38(9): 231-239.]
- [19] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676. [BAO Y B, LI T, LIU H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation function in the Loess Plateau of Northern Shaanxi based on InVEST model. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664-676.]
- [20] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于InVEST模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 577-585. [LIU J, FU B, ZHANG C H, et al. Water conservation and value assessment of ecosystem in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 577-585.]
- [21] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究. *地理科学*, 2018, 38(6): 979-986. [XIU Y C, GONG J, ZHANG S X, et al. Spatial and temporal pattern of landscape biodiversity in Bailong River Basin based on remote sensing and InVEST model. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(6): 979-986.]
- [22] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118. [CHU L, ZHANG X R, WANG T W, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST models. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4106-4118.]
- [23] 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 等. 基于GIS重庆土壤侵蚀及土壤保持分析. *生态学报*, 2015, 35(21): 7130-7138. [XIAO Y, OUYANG Z Y, XU W H, et al. Analysis of soil erosion and soil conservation in Chongqing based on GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21): 7130-7138.]
- [24] 刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望. *生态学报*, 2019, 39(2): 432-440. [LIU Y, ZHAO W W, JIA L Z. Soil conservation service: Concept, assessment and outlook. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 432-440.]
- [25] 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. [SUN W Y, SHAO Q Q, LIU J Y. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 365-376.]
- [26] GETIS A, ORD J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24

- (3): 189-206.
- [27] 王旭熙, 彭立, 苏春江, 等. 基于景观生态安全格局的低丘缓坡土地资源开发利用: 以四川省泸县为例. 生态学报, 2016, 36(12): 3646-3654. [WANG X X, PENG L, SU C J, et al. Exploitation and utilization of land resources on low hills and gentle slopes based on landscape ecological security pattern: A case study of Luxian county, Sichuan province. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3646-3654.]
- [28] 张继平, 乔青, 刘春兰, 等. 基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究. 生态学报, 2017, 37(19): 6313-6321. [ZHANG J P, QIAO Q, LIU C L, et al. Study on ecological land use planning in Beijing based on minimum cumulative resistance model. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6313-6321.]
- [29] 曾黎, 杨庆媛, 杨人豪, 等. 三峡库区生态屏障区景观格局优化: 以重庆市江津区为例. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1364-1373. [ZENG L, YANG Q Y, YANG R H, et al. Landscape pattern optimization of the ecological barrier area in the Three Gorges Reservoir Area: A case study of Jiangjin district, Chongqing. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5): 1364-1373.]
- [30] 殷炳超, 何书言, 李艺, 等. 基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究. 生态学报, 2018, 38(12): 4373-4382. [YIN B C, HE S Y, LI Y, et al. Development and application of an ecological network model for a coastal megalopolis based on land-sea integration. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4373-4382.]

Optimization of ecological security pattern in the source area of Fenhe River Basin based on ecosystem services

HE Juan, SHI Xue-yi, FU Yang-jun

(School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The optimization of the ecological security pattern is an important spatial way to ensure regional ecological security, maintain ecosystem stability and enhance ecosystem service. Taking the source area of Fenhe River Basin as an example, this paper quantitatively evaluated ecosystem services including water production, habitat quality and soil conservation, and used hot spot analysis to identify important ecological sources. Considering the complex mechanism of rivers in ecosystems, this paper established two ecological security patterns, and on this basis, put forward a comprehensive ecological security pattern. The results showed that there were 19 ecological sources in the source area of Fenhe River Basin, accounting for 16.59% of the total study area. Three ecological security patterns established 33, 42 and 43 potential ecological corridors respectively. The network structure evaluation results showed that three patterns could generate a closed ecological network. The total length of the optimized ecological corridor is 565.957 km, and comprehensive ecological security pattern had higher network closure, node connection rate and network connectivity, and the cost was relatively low. In addition, 35 ecological breakpoints were identified, and key areas for ecological protection and restoration construction were determined. This pattern can provide spatial guidance for regional ecological protection and restoration planning.

Keywords: ecosystem services; hotspot analysis; ecological corridor; ecological security pattern; the source area of Fenhe River Basin