

基于生态系统服务流的水生态安全格局构建

——以辽河干流为例

路旭,连聆毓,郭曼曼

(沈阳建筑大学建筑与规划学院,沈阳 110168)

摘要: [目的] 为了解水生态安全格局的构建对流域的生态保护修复和可持续发展。 [方法] 以辽河干流流域为例,选择产水量、水质净化及土壤保持 3 项具有水文传导特征的水生态系统服务,基于“源-流-汇”的理念框架,采用 InVEST 模型定量评估水生态系统服务供需关系以识别“源”和“汇”,采用电路理论识别以水流为媒介的生态廊道及生态夹点和障碍点,最终构建流域水生态安全格局。 [结果] 综合 3 项水生态系统服务的“源”面积为 1.22 万 km²,“汇”面积为 0.49 万 km²;树状、网络状“流”287 条,主要沿着干河流向支流延伸;生态夹点 79 个,生态障碍点 111 个。 [结论] 研究结果可为流域生态修复的分区分类、关键区识别和修复工程布局等提供依据和策略。

关键词: 水生态系统服务; 服务流; 水生态安全格局; 电路理论; 辽河干流流域

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0290-10

Construction of Water Ecological Security Pattern Based on Ecosystem Service Flows

—A Case Study of Main Stream of Liao River

LU Xu, LIAN Lingyu, GUO Manman

(School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the construction of the water ecological security pattern in ecological protection, restoration, and sustainable development of river basins. [Methods] Taking the Liao River main stream basin as a case study, three water ecological services with hydrological transmission characteristics, namely water yield, water purification, and soil conservation, were selected. Based on the "source-flow-sink" conceptual framework, the InVEST model was employed to quantitatively assess the supply-demand relationship of water ecosystem services to identify the "sources" and "sinks". The circuit theory was utilized to identify ecological corridors, ecological pinch points, and barriers mediated by water flow. Ultimately, the water ecological security pattern of the river basin was constructed. [Results] The total area identified for the three water ecosystem services is 12 200 km² for the "source" and 4 900 km² for the "sink"; there are 287 tree-like and network-like "flows", primarily extending from the main river to the tributaries; there are 79 ecological pinch points and 111 ecological barrier points. [Conclusion] The research findings provide a basis and strategies for zoning and classification, identification of key areas, and layout of restoration projects in river basin ecological restoration.

Keywords: water ecosystem services; service flow; water ecological security pattern; circuit theory; Liao River main stream basin

Received: 2025-02-10

Revised: 2025-03-14

Accepted: 2025-03-26

Online(www.cnki.net): 2025-06-19

收稿日期: 2025-02-10

修回日期: 2025-03-14

录用日期: 2025-03-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-19

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(52178045)

第一作者: 路旭(1980—),男,博士,教授,主要从事寒地城市更新与城市设计研究。E-mail: luxupku@163.com

通信作者: 路旭(1980—),男,博士,教授,主要从事寒地城市更新与城市设计研究。E-mail: luxupku@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

基于“源-汇-流”框架,流域产水或者蓄水的单元本身可以作为水生态系统服务的提供者,将其称之为供给区(service provide areas, SPAs),即“源”;产生的水生态系统服务如产水、水质净化及土壤保持等可依附水流的方向流动,在流经的过程中对自然系统及周围的人类社会产生影响,称之为受益区(service benefit areas, SBAs),即“汇”^[1]。水生态系统服务流是指在水生态系统中,服务供给区所产生的水生态系统服务在不同的载体作用下,由人为或者自然因素的驱动沿着一定的方向或者路径,将服务传递到受益区的时空过程^[2]。目前,对水生态系统服务流的研究主要集中在水资源的供给及水文调节服务上,受到流域水生态系统服务的多样性、时空异质性和联系复杂性的限制^[3],对于定量和可视化的研究处于概念模型阶段。同时,水生态系统服务流源于水生态系统各种服务供给与需求之间的空间关系,进而指导水生态安全格局构建^[4]。

流域作为提供水生态系统服务的主要单元,是发生完整生态过程、自然和社会多种特征协同构成的社会-生态耦合系统^[5],也是理论上生态修复效益更高的空间单元。水生态安全格局是解决流域水资源、水环境与水灾害等耦合交错生态环境问题的重要抓手。目前,水生态安全格局研究的方法主要有3种:1)基于景观生态学格局-过程理论综合构建水生态安全格局^[6];2)通过模型量化涉水综合评价指标构建水生态安全格局^[7];3)借鉴生态安全格局框架构建水生态安全格局^[8]。目前,水生态安全格局构建已经形成“源地识别-阻力面构建-廊道的提取-格局构建”的基本范式^[9]。其中源地的识别主要通过水供给^[10]、土壤保持^[11]等单一水生态系统服务进行构建;阻力面构建从土地利用/土地覆被、土地植被、与水生态源地的距离和高程等方面出发,通过利用 Linkage Mapper 进行综合构建^[12];基于综合阻力面的基础上利用蚂蚁模型、最小累积模型^[13]和电路理论^[14]识别出相应的生态廊道。其中,电路理论能够通过斑块之间的电流强度反映斑块和廊道的重要性,并能识别出“源”“汇”上下游的关系,识别出流动过程中的关键节点。当前的研究成果为本文的研究奠定坚实的基础,但也存在不足:1)目前,有研究对单一水生态系统服务流的供需及流动机制进行研究探讨,缺少对水生态系统服务流的多项综合耦合分析,单一的水生态系统服务流不足以支撑生态系统服务的研究;2)在阻力面及生态廊道的构建中,生态过程中水的流动特性多被忽视。

为弥补现有研究不足,本文以辽河干流流域为研究对象,基于“源-流-汇”的研究范式,探索构建复合水生态系统服务流的水生态安全格局。具体包括:首先,将水资源的空间差异性和流动特性进行连接,建立基于复合生态服务流的水安全框架。其次,基于复合水生态服务流综合识别水生态“源”“汇”区。再次,在考虑传统的地形、海拔等阻力因素的基础上,将河网通道和人类干扰因素纳入水生态综合阻力面,利用电路理论识别的廊道即“流”、生态夹点及障碍点。同时结合水流自身的流动性和水的重力作用,对应到实际流域及水生态系统中明确“流”的方向。最后,构建出辽河干流水生态安全格局。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

辽河干流($41^{\circ}11'09''\sim 43^{\circ}13'11''N, 121^{\circ}00'56''\sim 125^{\circ}05'00''E$)位于辽宁省中部,地处辽东和辽西丘陵之间,是辽河中下游流域,流域面积为6.47万 km^2 (图1)。辽河干流水田和旱地的农业种植面积空间占比超过68%,因此辽河干流是以粮食种植为主的农业流域。目前辽河干流面临一系列的生态问题:首先,水资源短缺。辽河流域在资源型缺水和水质型缺水的双重压力下导致流域缺水,流域内农业种植、畜牧业养殖和居民的日常生活等加剧对水资源的供需矛盾;其次,水土流失严重;最后,水环境污染严重,目前河流干流的水质监测主要以Ⅱ、Ⅲ类水质为主。辽河干流水生态系统的特殊性和复杂性,为农业和缺水型河流的水生态安全格局构建提供理想的研究对象。

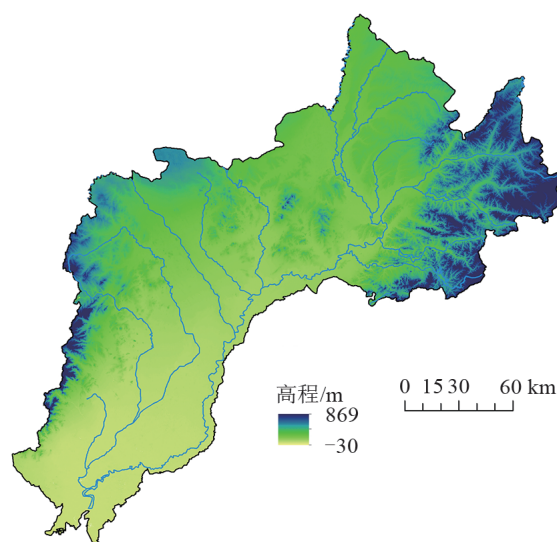


图1 辽河干流流域区位

Fig. 1 Location of Liao River main stream basin

1.2 数据来源

本研究中 InVEST 的产水、水质净化和土壤保持的模块所需要的数据分别为土地利用数据、高程数据、降水数据、土壤数据、蒸散量数据和生物参数和辽河干流流域的边界数据。计算相应的水生态系统需求所需各个市县的生活、工业、农业用水及市县的人口等相关经济统计数据。数据来源主要包括：1) 2023 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) 2023 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) 2023 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; 4) 基础地理数据 (土地利用与覆被、河流水域等) 来源于资源与环境科学数据平台 (<https://www.resdc.cn/>); 5) 《水资源公报》、辽河水质监测数据等源自辽宁省生态环境厅 (<https://sthj.ln.gov.cn/>) 等官方网站。

2 研究方法

从生态系统服务的空间布局和流动特性出发, 生态系统服务可分为就地服务 (in situ service)、全向服务 (omni-directional service) 和定向服务 (directional service) 3 种类型, 其中全向服务和定向服务按照服务范围 and 机制可分为邻近服务和全球服务, 到达用户型和用户到达型^[15]。从外部性理论 (externality theory) 角度来解释原因: 由于流域区、行政区等空间边界的存在, 除就地服务外的其他生态系统服务均具有空间外溢效应, 也是生态修复领域的重要难题之一。相比于以空间为媒介的全向服务, 流域作为以水流为核心的完整生态单元, 是能够实现以水流运动为媒介的定向服务生态效益内部化的空间尺度。水流作为载体, 生物物理性质较为明确, 所以提供的水生态系统服务随着水体重力的作用下从上游的“源”流动到下游的“汇”, 形成水生态系统服务流。在满足该区域的需求后如果还有盈余, 则随着水流朝下一个“汇”直到服务耗尽^[16] (图 2)。因此, 以流域为单元、以水生态系统服务为对象的水生态安全格局构建是流域高效生态修复的重要前提。基于此, 本文从与水文运动紧密相关的产水量、水质净化和土壤保持 3 项水生态系统服务出发, 研究流域的水生态安全格局构建。

基于流域的水生态安全格局概念模型形成本文的技术路线: 在分别量化 3 项水生态系统服务供需的基础上, 采用信息熵及权重赋值等方法识别综合“源”和“汇”; 基于电路理论构建生态廊道, 识别生态夹点和障碍点, 最终构建流域水生态安全格局 (图 3)。

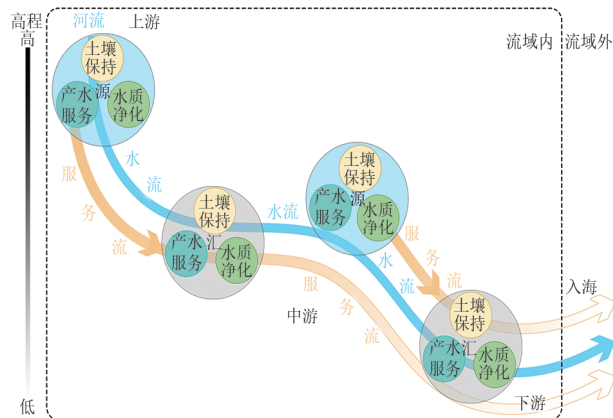


图 2 流域水生态系统服务流

Fig. 2 Water ecosystem service flows in river basin

2.1 “源”与“汇”水生态系统服务供需计算

2.1.1 单项服务计算 产水量、土壤保持和水质净化水生态系统服务供需的量化方法见公式 (1)~公式 (8)。其中, 产水量是生态系统供水能力的测度, 基于 Budyko 水热耦合平衡假设, 根据年降水量和实际水蒸散量之差计算年平均产水量^[17], 利用 InVEST 模型产水量模块计算可得。需水量不能直接获取栅格尺度上的用水数据, 只能通过空间离散及反距离权重的方法, 将现有的数据分配到每个栅格中。土壤保持服务利用植物根系的固定作用, 防止或者缓解土壤的侵蚀, 以达到保持土壤的目的。本文利用 InVEST 模型中的泥沙输送比模块计算由水力冲刷产生的土壤流失量, 即土壤保持的需求量和土壤保持供给量^[18]。水质净化服务主要是评估植被和土壤对氮磷的残留效应。本文通过对输出氮量来反映水质净化的程度。利用 InVEST 模型的养分输送比模块对河流的水质净化进行量化, 根据相关研究设置具体参数^[19]; 水质净化的需求量通过流域单位栅格的氮输出率和最终氮的输出量, 反映实际输出水体氮的特征。为确保各项水生态系统服务评估结果的可靠性, 参照该区域的相关研究^[20]和辽河流域水质、水文监测数据和水资源公报, 调整各模块的相关参数, 最终把各模块估算结果的相对误差控制在 15% 以内。

产水量供给表达式为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为 x 、 j 生态系统类型的产水量, mm/a; AET_{xj} 为 j 类生态类型 x 的实际蒸散量, mm/a; P_x 为 x 中年降水量, mm/a。

生活需水量表达式为:

$$D_{domestic} = \frac{P_{distract}}{P_{province}} \times \frac{D_{province}}{N_{distract}} \quad (2)$$

式中: $P_{distract}$ 、 $P_{province}$ 为县区和省市人口数量; $D_{province}$ 为省市生活用水量, m^3/a ; $N_{distract}$ 为县区建设用地栅格数量。

农业需水量的表达式为:

$$D_{\text{agricultural}} = \frac{A_{\text{province}}}{A_{\text{area}}} \left(\frac{5}{6N_{\text{paddy}}} + \frac{1}{6N_{\text{dry}}} \right) \quad (3)$$

式中: A_{province} 为各省市农业用水总量, m^3/a ; A_{area} 为各省市农业用地面积, hm^2 ; N_{paddy} 、 N_{dry} 分别为水田和旱地的栅格数量。其中有研究^[21]表明,单位面积的农业用水是旱地的5倍。

工业需水量的表达式为:

$$D_{\text{industrial}} = \frac{V_{\text{distract}}}{V_{\text{province}}} \times \frac{T_{\text{province}}}{N_{\text{distract}}} \quad (4)$$

式中: V_{distract} 、 V_{province} 为县区和省市单元二产增加值; V_{province} 为省市二产增加值总量; N_{distract} 为各县区建设用地栅格数量。

土壤保持供给的表达式为:

$$SC = RKLS(1 - PC) \quad (5)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡度坡长因子; C 为植被管理因子; P 为土壤保持措施因子。

土壤保持需求的表达式为:

$$SC = RKLSPC \quad (6)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡度坡长因子; C 表示植被管理因子; P 为土壤保持措施因子。

水质净化供给的表达式为:

$$NDR_i = NDR_{0,i} \left[1 + \exp \left(\frac{IC_0 - IC_i}{k} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

式中: IC_0 为标定参数; IC_i 为地形指数。

水质净化需求的表达式为:

$$WP_d = \sum \text{modifiedload}(x, i) NDR_i \quad (8)$$

式中: WP_d 为水质净化的需求, $\text{modifiedload}(x, i)$ 为根据当地条件调整后栅格 i 的氮负荷量; NDR_i 为氮输出率。

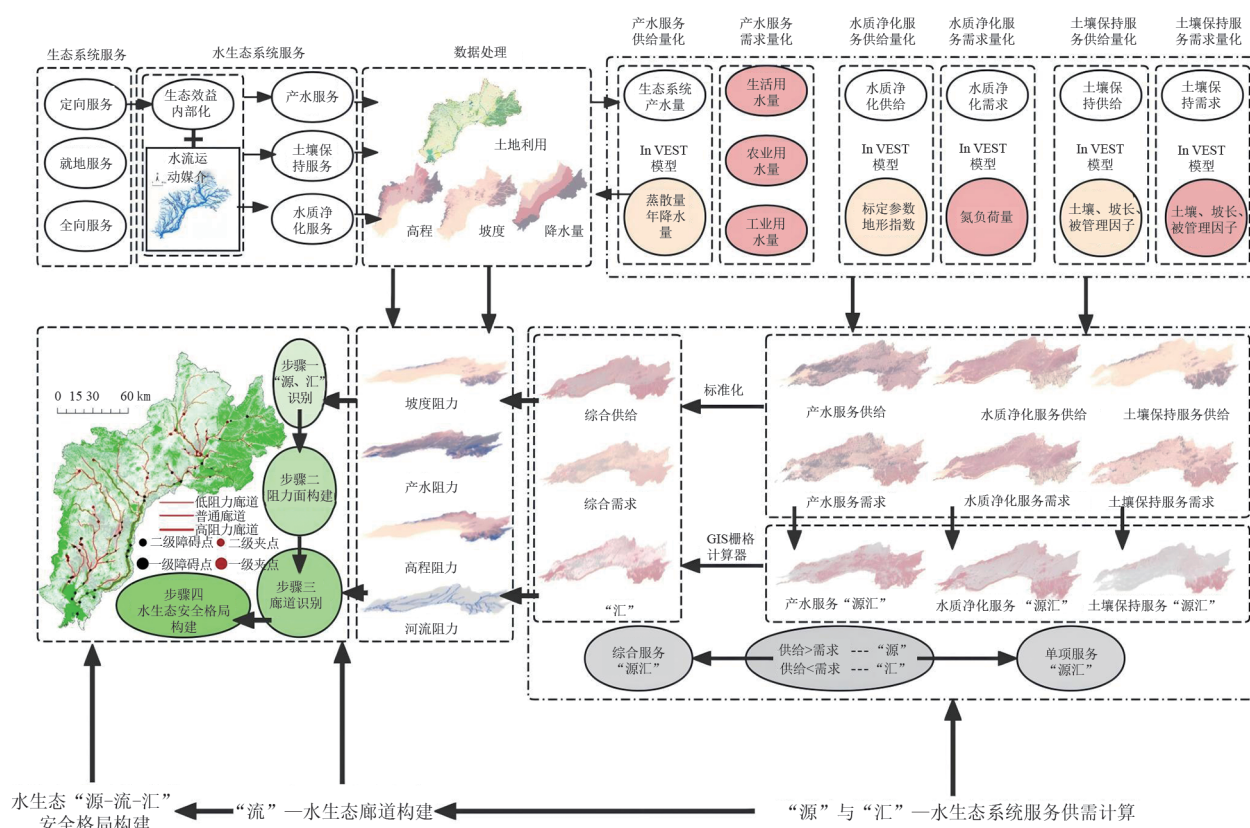


图3 研究框架

Fig. 3 Research framework

2.1.2 “源”“汇”指标综合 识别流域的“源”和“汇”是构建水生态系统安全格局的重点,通过对水生态系统各项服务供需进行量化,其中对于供给大于需求的即“源”;对于供给小于需求的即“汇”。以往研究确定水生态系统服务流的“源”“汇”只是通过单一的服务供需量化确定,导致所选择的水生态系统服务流不能充分代表研究区域内的真实情况。因此,本文通过3项复合服务供需确定“源”和“汇”。

由于产水量、水质净化及土壤保持3种生态系统

服务具有典型的耗散结构特征,采用信息熵及权重赋值能够提高识别“源”“汇”的准确性。对3种服务的供需进行无量纲化处理见公式(9)。

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (9)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中: z 为标准化后水生态系统服务的供需量; x_i 为第 i

个标准化单元的供需量; $\bar{x}$ 为研究区平均值; s 为研究区标准方差; n 为标准化单元的总数;利用Z分数法对数据进行预处理,对每种服务系统的供需预处理进行差值计算,根据公式(10)分别得到相应服务的信息熵。

$$H_k = -\frac{1}{\ln m} \sum_{k=1}^m \ln x_{kj} \quad (10)$$

$$W_k = \frac{1 - H_k}{m - \sum_{k=1}^m H_k} \quad (11)$$

式中: H_k 为信息熵; m 为源汇的面积; x_{kj} 为对应源汇归一化插值数据;最终根据公式(11)得到产水、水质净化及土壤保持的熵权分别为0.46、0.21和0.33。

对于水生态系统服务的供需分析包括数量和空间分析,其中利用数学模拟法较多,主要是利用数学公式采用相对基差^[22]和比值法等^[23]对栅格数据进行计算。本文采用差值法直接体现供需之间的数量差异及各水生态系统服务类型数量供需匹配程度,最终得到研究区域复合产生的“源”“汇”区域。

2.2 水生态廊道“流”构建

电路理论将流域内不同景观单元视为导线面,此概念与电路中电流传输原理相似。在此类比中,景观单元的阻力值呈非均匀分布。具体而言,将对物种间物质交换和能量流动起促进作用的景观单元视为低阻力面,反之视为高阻力面。

根据电路理论模型,本文进行电阻面计算、生态夹点和生态障碍点的识别。阻力面计算类似电路中电流通过电阻器的路径,通过计算电阻面的最短距离和成本路径,得到不同生态节点之间的累积电阻值。累积电阻值的大小反映物种迁移量达到特定生态节点的程度,可以根据其值大小来界定生态廊道。电流值较大的区域具有更重要的景观功能,将其视为生态夹点,电流值较小的区域则影响不同生态源地之间的连通性,将其视为生态障碍点。

2.2.1 阻力面 水生态系统服务流受到路径和传输过程中水流的影响。对于不同时空对区域水资源利用的复杂性,从辽河干流缺水的状态出发,结合相关研究^[4]及对于水资源调配的影响,选择河网、坡度、高程和产水量作为阻力因子。

采用自然断裂法将各因子阻力面划分为5个等级,引入地理探测器的 q 统计量作为分析^[24],最终得出坡度、产水、高程及河流的权重分别为0.14、0.23、0.16和0.47,以更加全面地反映流域空间异质性对阻力面的影响,从而确保各阻力因子权重分配的合理性。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (12)$$

式中: N_h 和 N 分别为层 h 和整个研究区的样本单元数; h 为变量 Y 或者因子 X 的分区, $h=1,2,\dots,L$; L 为分区的数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 σ^2 和整个研究区的离散方差; q 为探测因子的探测值。

2.2.2 生态廊道 流域水生态安全格局综合考虑生态服务流和物理流的特征,物理流主要考虑到河流重力和坡度的影响,河道一般都是从上游到下游流动的过程,水生态系统服务流只考虑从供应地到需求地之间的过程。在以往的识别中,利用 Linage Mapper工具只是简单地确定廊道的位置,并没有确定廊道的方向,无法进行可视化。本文利用最小阻力模型,确保河流的“源”“汇”之间的流动方向。

2.2.3 夹点、障碍点 生态夹点是指生态电流集中、强度高的区域,物种通过这些区域的阻力较小,易促进两地间的生态流动。采用 Pinch point Mapper模块,量化源地之间的电流以确定物种移动的关键路径和位置,累计电流值高的区域即为生态夹点,是维持景观连接的重要区域^[25]。生态障碍点是物种在不同生态斑块进行迁移构成的阻碍,不利于生态廊道的形成或维持具有负面的影响,提升或改善生态障碍点,可以提高生态廊道的连通性和质量^[25]。利用 Barrier Mapper工具识别阻力较大的区域,形成阻力阈值,最终得到生态障碍点分布。

3 结果与分析

3.1 “源”“汇”识别

3.1.1 单一生态系统服务“源”“汇”识别 通过对单一水生生态系统服务供给和需求之间的差值来确定盈余和赤字在空间上的分布。进一步通过盈余和赤字来对应“源”和“汇”(图4)。从供水生态系统服务供需的角度分析,水资源盈余,即“源”主要在东北的林地地区,水资源赤字,即“汇”主要在中部及中部大部分耕地。总体来看,主要研究区域的东、中部的的水资源供需关系比较紧张,一方面是辽河干流地处干旱和半干旱地区,降水少;另一方面,由于该地区主要为耕地,农业灌溉用水量大,位于中部的建设用地、城市化及工业化程度高,因此需水量相对较高,进一步加大了用水的需求。从土壤保持水生态系统服务供需角度分析,“源”主要集中在研究区域的东北地区及小部分西部的草地地区,“汇”分布面积广,相对比较分散。因此,土壤保持水生态系统服务研究的结果与现有相关研究结论保持一致,土壤保持服务的供需受到植被覆盖及地形2个因素的共同影响,在林地及坡度较高的地区对土壤保持服务更为优良。从水质净化水生态系统服务供需角度分析,“源”主要分布在林地及辽河下游的湿地地区,其中湿地受到国家自然保护区的治理和防治,减少人为对水资源的污染和消耗,“汇”分布也相对比较分散,主要集中在中部的建设用地。

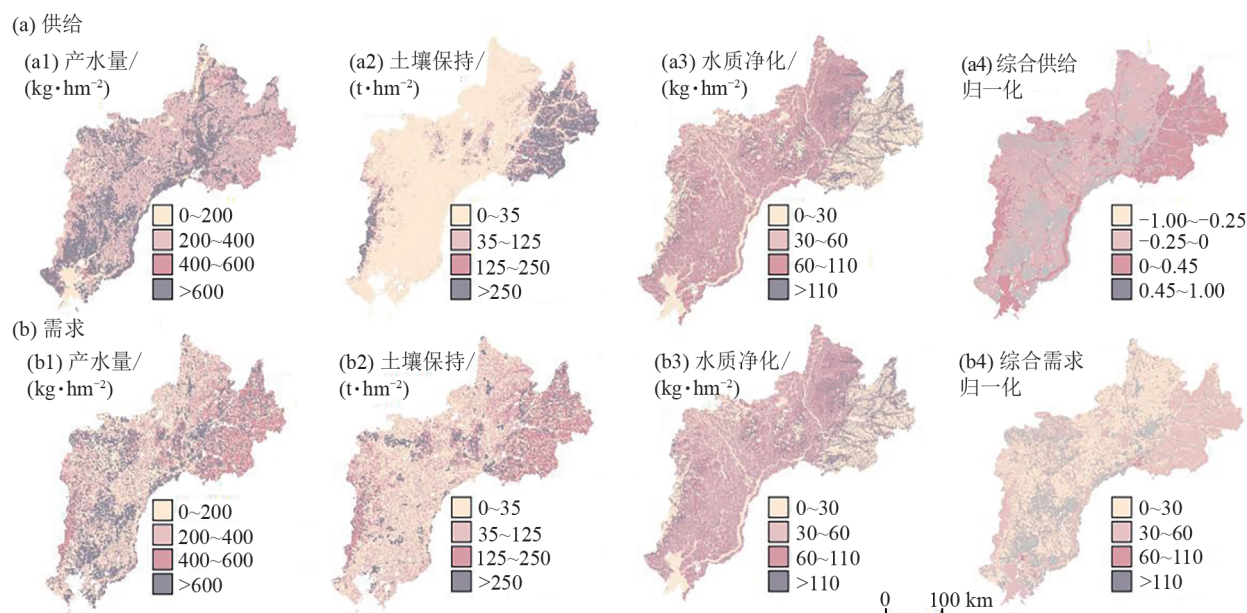


图4 水生态系统服务的“供”“需”量

Fig. 4 “Supply” and “demand” quantities of water ecosystem services

3.1.2 综合生态系统服务“源”“汇”识别 通过权重叠加3种生态系统服务供需确定出“源”“汇”,参考相关研究^[26],将面积 $<5\text{ km}^2$ 且分布零散的斑块从生态原地中剔除,对面积小但分布集中的源地斑块合并处理,结果见图5。

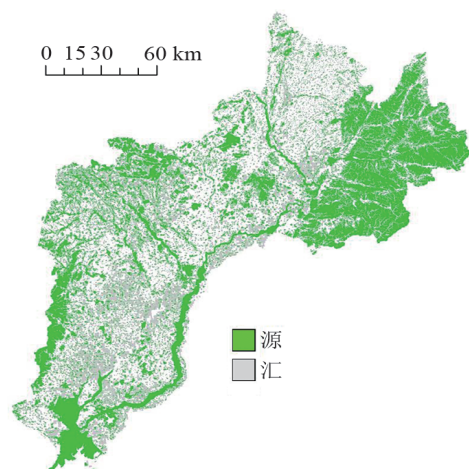


图5 水生态安全格局的复合“源”“汇”

Fig. 5 Composite “sources” and “sinks” of water ecological security pattern

整体来看,辽河干流的“源”“汇”斑块数量较多,但空间分布不均匀。通过对综合水生态系统服务供需量化得到辽河干流水生态安全“源”,生态源地的面积为 1.22 万 km^2 ,占总面积的18.85%,主要分布在研究区的东北林地及辽河干流下游的湿地;“汇”的面积为 0.49 万 km^2 ,占总面积的7.72%,分布相对比较分散,主要分布在中部大面积的耕地及中部建设地区,与人类的生产、生活用水保持一致。同时,东北作为

我国主要的粮食生产基地,已发展为商品化生产,因此对农业的灌溉水量增大。

3.2 生态廊道“流”识别

由于水生态安全格局的构建,区别于其他生态系统阻力面的选择,充分考虑河流自身的因素并依赖专家知识增加河网及产水量的阻力值。在水生态系统的阻力面构建将坡度、高程、产水及河网的密度进行等权的叠加作为水生态安全格局的生态阻力面(图6)。研究表明,水生态阻力值空间受地形和气候的影响,因此,高阻力值主要分布在东北林地和建设集中的地区。结合电路理论,可以识别出3类生态廊道“流”,利用成本加权距离与最小成本路径的比值对“流”连通性进行分级,分为保护的低阻力流、需修复的高阻力流和普通流(图6)。从整体来看,辽河干流“流”分布较为广泛,主要沿着研究区的干流向子河流延伸。但研究区西侧缺乏“流”,是因为该地区为农田和建设用地,地势比较高,土壤流失严重。结果表明,“流”有287条,总长度为 $2\,477.96\text{ km}$,平均长度为 8.63 km 。其中低阻力流有36条,长度为 292.72 km ,最长的为 95.53 km ,各条流的长度相对较短,更加有利于服务及信息的快速迁移和流动。位于研究区东北的林地区域,生境质量良好,生态源地分布广且连续,需要修复的流有83条,长度为 450.77 km ,其中最长的为 139.07 km ,各条流长度较长,增加生态系统服务和信息流动的风险和不确定性。位于柳河口以下流域的农田和建设用地,人类的活动和建设对流的构建具有强烈的阻隔效应,普通流为168条,占生态廊道的60.43%,河流密集且呈现树状,主要位于辽河干流中部的耕地区域。

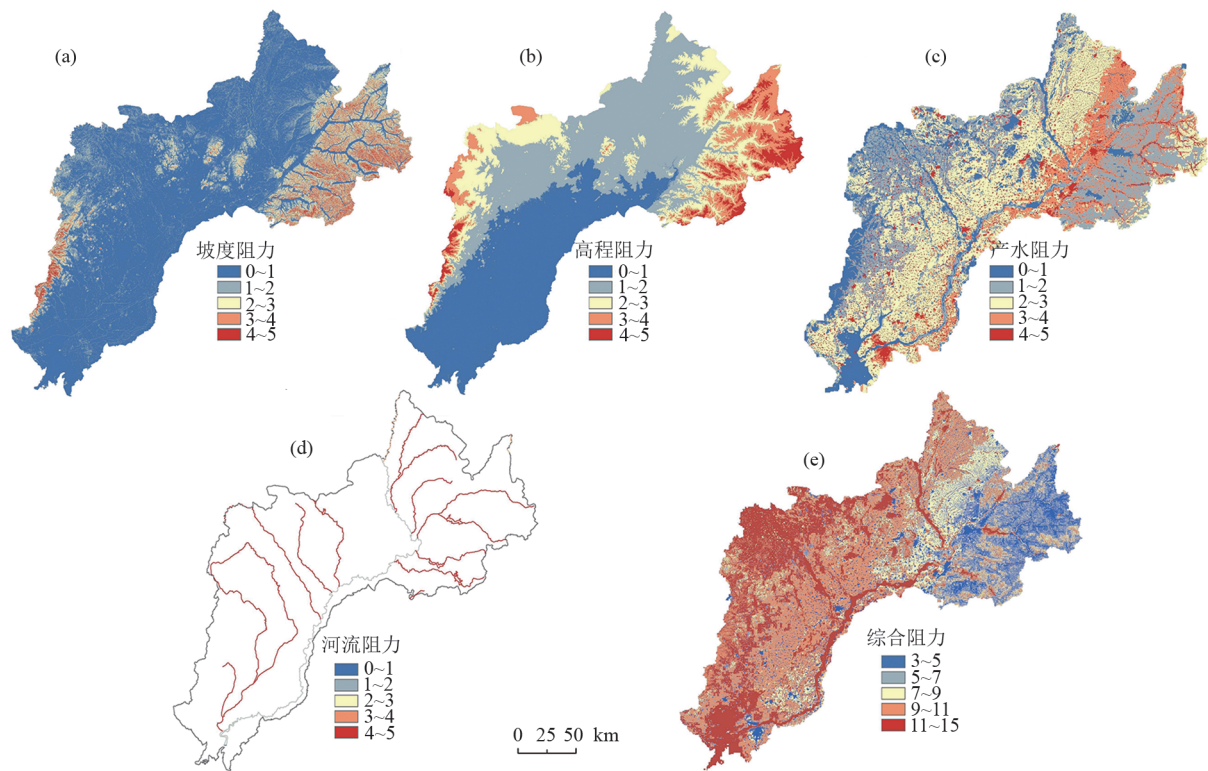


图 6 生态阻力
Fig. 6 Ecological resistance

3.3 水生态安全格局构建

基于源、汇和生态廊道的识别,进一步计算流域的生态夹点和障碍点,最终构建辽河干流流域的水生态安全格局(图 7)。

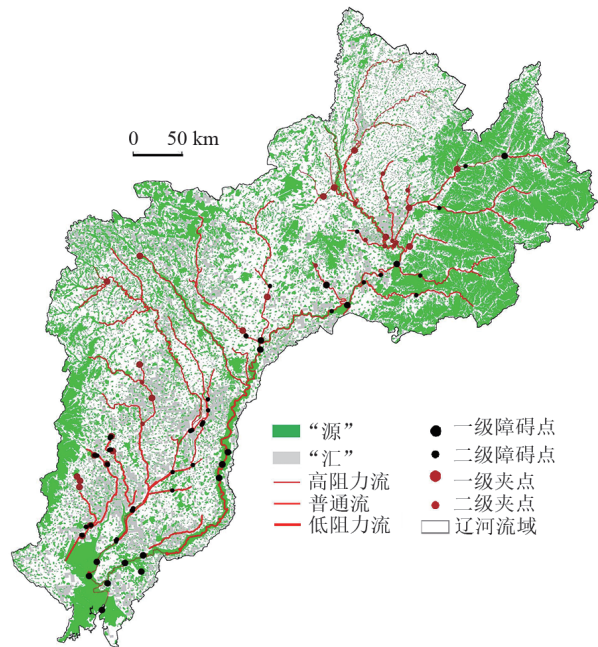


图 7 水生态安全格局构建
Fig. 7 Construction of water ecological security pattern

3.3.1 生态夹点 生态夹点是廊道中电流密度较大的区域,对维持整个生态系统的安全具有重要的作用。本研究利用电路理论中的 Pinch Point Mapper 工

具来识别生态夹点,按照相应的自然间断法将电流密度分为 5 个等级,选择最高级的作为夹点,将位于高、低阻力廊道上的夹点定义为一、二级夹点(图 7)。研究表明,生态夹点呈带状分布,多位于流出入位置。共有夹点 69 个,其中一级夹点 23 个,主要集中在辽河下、中游草地、耕地及河流地类上游的林地;二级夹点主要分布在辽河中部的林、草地,极大程度上增加源汇之间的连接性。

3.3.2 生态障碍点 生态障碍点阻碍信息流在生境斑块运动的区域,消除之后可以增加生态源地与汇之间的连通性,经过多次参数设置,确定在 400~800 m 内,以 200 m 为步长探测,最终将改进的得分结果按照自然断点法分为 5 个等级,5、4 级分别作为 1、2 级障碍点(图 7)。共有生态障碍点 111 个,分布较分散,其中 1 级障碍点有 88 个,主要集中在辽河下游的建设用地;2 级障碍点有 33 个,主要集中在辽河上游的建设用地及河流交汇处。大部分的障碍点位于流交汇区域,部分的生态障碍点与生态夹点紧邻或者重叠,限制流的扩展,需对区域进行优先修复。

4 讨论

4.1 “源-流-汇”水生态安全格局构建科学性与创新性

本文基于产水量、水质净化及土壤保持 3 项综合服务为流域的“源”和“汇”。辽河干流是农业型河流,农业需水量比较大,因此研究就充分考虑到农业

需水量对产水需求及水质净化需求进行完善和补充。研究表明,“源”主要分布在辽河干流上游的东北林地区及辽河干流下游的湿地地区,“汇”分布相对比较分散,主要分布在辽河干流中、下部大面积的耕地及中部建设地区。本文计算识别的流域生态源地和汇地的空间分布特征与贾艳红等^[27]和王雪然等^[28]对漓江流域和太湖流域的研究结论基本一致,符合流域生态安全格局的分布特征。

水生态安全格局的构建是在特定的水、流域等环境下识别、保护、加强联系、提高管理的重要途径。不同于以往聚焦在产水量、土壤保持等单一生态系统服务的研究,本文重点探讨基于水生态系统复合流的流域安全格局构建。在以往的研究主要集中在建立生态安全格局的单一观点;有的只考虑到供给服务、土壤保持等单项服务的格局需求。但是,流域是发生完整生态过程的空间单元,具有复合性和整体性,基于单一过程或服务的安全格局构建无法真正满足流域生态保护的全部需求。一方面,本文综合以水流为媒介的水生态系统服务的产水量、土壤保持和水质净化3项服务,通过InVEST模型等方法对3项服务的供给量和需求量分别进行空间量化,采用加权加和的方式综合确定“源”“汇”的区域;另一方面,将流域的空间差异性、水生态过程和流动性进行连接,识别的廊道即“流”,同时结合水流自身的流动性和水的重力作用,对应到实际流域及水生态系统中明确“流”的方向;最终,在流域范围内构建更具复合性和整体性的水生态安全格局。因此,本文的研究是对以往水生态安全格局构建的进一步完善和延展,对今后流域的国土空间生态修复和山水林田湖草综合治理具有重要的现实价值。

4.2 基于水生态安全格局的流域生态修复策略

流域水生态安全格局的生态源地、生态节点和生态廊道等结构可以为国土空间规划布局 and 生态修复及综合整治提供依据,为生态修复的分区、关键区识别和工程布设等提供信息和策略。

1) 辽河干流流域“源”主要分布在东北山林地区,面积集中,位于辽河干流上游,且生态障碍点分布较少。因此,在未来应该严格实施生态保护策略,一方面提升源地的质量,严格控制人类活动对其的干扰,加强生物多样性;另一方面,增加源地的数量,消除生态障碍点。在距离过长“流”上增加相应供需赤字生态系统服务,创建出新的生态源地。

2) 结合生态节点,优化廊道连接性。大部分生态障碍点都位于辽河干流和饶阳河2条重要的“流”上。其中1级障碍点主要位于辽河干流下游,存在产水和土壤保持生态系统服务赤字,下游高程低、坡度

低,水土流失严重。加强辽河干流下游生境质量,注重林种搭配,优化植被结构提高土壤保持服务供给,增强廊道的连接性。2级障碍点主要位于饶阳河上,存在水质净化和土壤保持服务赤字。因此,积极推进退耕还林、还草及湿地保护,建立良好的耕地生态系统,保护改善农业环境;同时实现绿色、科技农业,减少农业对流域的污染。建设用地内部应该增加小型绿地斑块,提高植被覆盖率,水域注重防治污染,打造良好的蓝绿空间。对于单位长度较长的廊道,极易出现断裂,生态稳定性差,因此通过绿地缓冲带保护廊道的优化,可促进3项水生态系统服务功能的流动,有效输出水生态效益,增加廊道的连接性。

3) 生态修复分区。根据水生态系统服务供需综合作用,划分土壤保持修复区、水质净化修复区、水源涵养修复区及复合修复区(图8)。

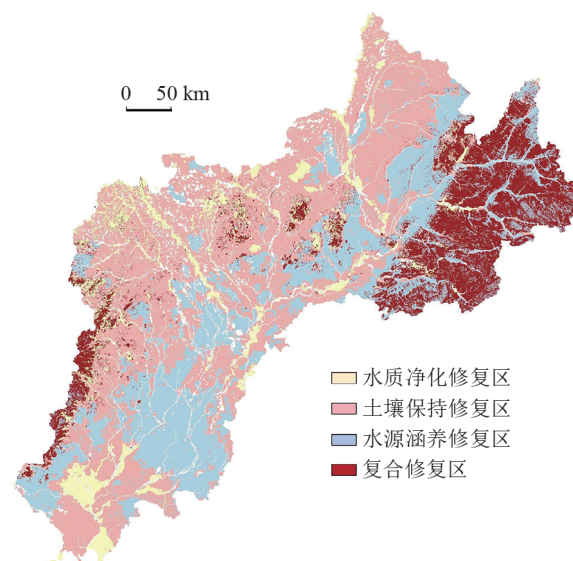


图8 辽河干流流域修复分区

Fig. 8 Restoration zoning of Liao River main stream basin

土壤保持修复区对于水土流失严重的河流两岸,实现生态的修复保护,在河道两岸种植绿植,形成防护绿地屏障,维持土壤,减缓水土流失;水质净化修复区加强水质的净化及动态的监测,促进水资源的节约和循环利用;制定生产、生活及生态源污染的综合防治方案,调整农业的种植和布局,推进河流截污控源,加强水生态修复,形成良好的水生态环境;水源涵养区开展退耕还林、退养还滩、还湖,逐渐增大林地的覆盖率,推进外来物种的防控及保护本土物种,营造多样化的森林类型,形成多样物种、多层次的景观结构,最大程度上发挥河流水生态廊道的保护作用;复合修复区开展综合治理工程建设和生态清洁小流域综合治理,加强生态保护红线管理和修复。将流域纳入山水林田湖生态保护修复的生态系统中,实现河流的转型,构建科学的空间布局。

5 结 论

1)“源”地面积为 1.22 万 km², 主要分布在研究区的东北林地及辽河干流下游的湿地;“汇”面积为 0.49 万 km², 分布相对分散, 主要分布在中部大面积的耕地及中部建设地区。

2)基于电路理论识别出 287 条“流”, 夹点 79 个, 呈带状分布, 多位于流出入位置;生态障碍点 111 个, 主要位于建设区。

3)依据“源-流-汇”提出相应生态修复策略, 为干旱、农业型河流生态安全格局构建和生态修复提供参考。

未来, 一方面在流域静态水生态安全格局研究的基础上, 融合情景模拟、生态系统服务权衡关系、生态系统服务供需关系等科学方法, 在历史与未来时间尺度上进一步拓展流域水生态安全格局研究的时间维度, 探索水生态安全格局的时间演变特征;另一方面, 在现有流域尺度水生态安全格局构建的基础上, 基于尺度推演和尺度嵌套等理论方法, 关注小流域生态网络和大流域安全格局等内容, 拓展流域水生态安全格局研究的时空尺度, 探索流域水生态安全的尺度效应。

参考文献:

- [1] 官冬杰, 张喻翔, 陈明珠, 等. 水源供给服务供需流空间不匹配特征识别及优化[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5070-5082.
GUAN D J, ZHANG Y X, CHEN M Z, et al. Identification and optimization of spatial mismatch characteristics of supply and demand flows for water supply services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 5070-5082.
- [2] 方国华, 李智超, 钟华昱, 等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 10-18.
FANG G H, LI Z C, ZHONG H Y, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. *Journal of Hohai University*, 2023, 51(3): 10-18.
- [3] 陈龙, 徐丽, 于名召, 等. 水生态系统服务流研究进展[J]. 生态学报, 2025, 45(2): 1000-1012.
CHEN L, XU L, YU M Z, et al. Research progress of water ecosystem service flows[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(2): 1000-1012.
- [4] CHEN Z L, LIN J Y, HUANG J L. Linking ecosystem service flow to water-related ecological security pattern: A methodological approach applied to a coastal province of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: e118725.
- [5] LI Y G, LIU W, FENG Q, et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi regions, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: e158940.
- [6] 丘思程, 胡金龙, 杨淮深. 基于生态系统服务和生态敏感性评价的漓江流域生态安全格局构建[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(6): 153-162.
QIU S C, HU J L, YANG H S. Construction of ecological security pattern in the Lijiang River basin based on the assessment of ecosystem services and ecological sensitivity[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(6): 153-162.
- [7] 杨荣钦, 穆振侠, 黄婉婷, 等. 基于生态系统可持续的塔里木河流域生态安全格局构建[J/OL]. 环境科学, 1-19. DOI: 10.13227/j.hjkk.202410268.
YANG R Q, MU Z X, HUANG W T, et al. Construction of ecological security pattern of Tarim River basin based on ecosystem sustainability [J/OL]. *Environmental Science*, 1-19. DOI: 10.13227/j.hjkk.202410268.
- [8] 刘颂, 董宇翔, 蒋理, 等. 基于生态系统服务协同优化的生态空间划定及弹性分级策略: 以山东省栖霞市为例[J]. 风景园林, 2022, 29(8): 86-92.
LIU S, DONG Y X, JIANG L, et al. Strategy for demarcation and elastic grading of ecological space based on synergistic optimization of ecosystem services: A case study of Qixia City in Shandong Province [J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(8): 86-92.
- [9] 易浪, 孙颖, 尹少华, 等. 生态安全格局构建: 概念、框架与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 845-856.
YI L, SUN Y, YIN S H, et al. Construction of ecological security pattern: Concept, framework and prospect [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(4): 845-856.
- [10] 陶德凯, 张子建, 周文莉, 等. 基于生态系统服务供需协同的生态安全格局构建: 以安徽省为例[J]. 规划师, 2024, 40(10): 16-24.
TAO D K, ZHANG Z J, ZHOU W L, et al. Construction of ecological security pattern based on demand-supply coordination of ecosystem service: A case study of Anhui Province [J]. *Planners*, 2024, 40(10): 16-24.
- [11] 刘世梁, 王清波, 缪驰远, 等. 基于生态网络的黄河上游(四川段)水源涵养生态安全格局构建[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(3): 418-426.
LIU S L, WANG Q B, MIAO C Y, et al. Ecological security patterns of water conservation in the upper reaches of the Yellow River basin (Sichuan section) with ecological network approach [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2024, 60(3): 418-426.
- [12] 沈舟, 尹海伟, 孔繁花, 等. 江苏省域鸟类多样性保护格局构建与生态廊道优化[J]. 自然资源学报, 2024, 39(12): 2834-2852.
SHEN Z, YIN H W, KONG F H, et al. Construction of avian biodiversity conservation patterns and optimization of ecological corridors in Jiangsu Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(12): 2834-2852.
- [13] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 等. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 555-565.

- YANG K, CAO Y G, FENG Z, et al. Research progress of ecological security pattern construction based on minimum cumulative resistance model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5):555-565.
- [14] 戴亚南,陶红,彭渤,等.基于最小累积阻力模型的平江县生态安全格局构建[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2022, 45(1):110-119.
- DAI Y N, TAO H, PENG B, et al. Construction of ecological security patterns in Pingjiang County based on the model of minimum cumulative coefficient [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022, 45(1):110-119.
- [15] 李旭,孙秀锋,贺禹文,等.基于景观文化服务的重庆市山地乡村景观空间分异及类型识别[J]. *园林*, 2024, 41(3):95-103.
- LI X, SUN X F, HE Y W, et al. Research on spatial differentiation and type identification of mountain rural landscape in Chongqing based on landscape cultural services [J]. *Landscape Architecture Academic Journal*, 2024, 41(3):95-103.
- [16] ZHU Q, TRAN L T, WANG Y, et al. A framework of freshwater services flow model into assessment on water security and quantification of transboundary flow: A case study in northeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304:e114318.
- [17] 王壮壮,张立伟,李旭谱,等.区域生态系统服务供需风险时空演变特征:以陕西省产水服务为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(6):1887-1900.
- WANG Z Z, ZHANG L W, LI X P, et al. Spatio-temporal pattern of supply-demand risk of ecosystem services at regional scale: A case study of water yield service in Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6):1887-1900.
- [18] JIANG J, ABULIZI A, ABLIZ A, et al. Construction of landscape ecological security pattern in the Zhundong Region, Xinjiang, NW China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(10):e6301.
- [19] 刘灿均,门宝辉,申耀铎,等.滦河流域土壤保持和水质净化服务及其权衡与协同关系[J]. *生态学报*, 2023, 43(14):5740-5752.
- LIU C J, MEN B H, SHEN Y D, et al. Soil conservation and water purification services and their trade-offs and synergies in Luanhe River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(14):5740-5752.
- [20] 孙才志,安志英.基于生态系统服务流的东北地区水安全格局[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3):11-19.
- SUN C Z, AN Z Y. Water security pattern in Northeast China based on ecosystem service flow [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3):11-19.
- [21] 李兆碧,陶宇,欧维新,等.基于水量与水质的太湖流域水生态服务供需关系及多情景评估[J]. *生态学报*, 2023, 43(5):2088-2100.
- LI Zhaobi, TAO Yu, OU Weixin, et al. Supply and demand relationship and multi-scenario assessment of water ecological services related water quantity and quality in Taihu Lake Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):2088-2100.
- [22] 张平,朱翔,贺清云,等.长江经济带生态系统服务供需时空分异与平衡格局分析[J]. *生态科学*, 2020, 39(6):155-166.
- ZHANG P, ZHU X, HE Q Y, et al. Analysis on the spatial-temporal differentiation and supply-demand balance pattern of ecosystem services in the Yangtze River Economic Zone [J]. *Ecological Science*, 2020, 39(6):155-166.
- [23] 姜芊孜,李金煜,梁雪原,等.基于文献计量的绿色基础设施水生态系统服务供需评价研究进展[J]. *生态学报*, 2023, 43(4):1738-1747.
- JIANG Q Z, LI J Y, LIANG X Y, et al. Research progress on supply-demand evaluation of water ecosystem services in green infrastructure based on bibliometric analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4):1738-1747.
- [24] 张怡,王志慧,卢小平,等.黄土高原生态系统碳汇时空变化及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1):266-274.
- ZHANG Y, WANG Z H, LU X P, et al. Evolution of ecosystem carbon sink and its driving factors in the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):266-274.
- [25] 王秀明,赵鹏,龙颖贤,等.基于生态安全格局的粤港澳地区陆域空间生态保护修复重点区域识别[J]. *生态学报*, 2022, 42(2):450-461.
- WANG X M, ZHAO P, LONG Y X, et al. Identification of key areas of land space ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security Guangdong, Hong Kong and Macao [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2):450-461.
- [26] 刘颂,柳迪子,杜守帅.基于多模型和权衡矩阵法的乡村生态—游憩景观安全格局重构[J]. *风景园林*, 2024, 31(3):99-105.
- LIU S, LIU D Z, DU S S. Reconstruction of rural eco-recreational landscape security pattern based on multiple models and the tradeoff matrix method [J]. *Landscape Architecture*, 2024, 31(3):99-105.
- [27] 贾艳红,吴春竹,胡洪文,等.基于电路理论的漓江流域生态安全格局构建研究[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(5):201-212.
- JIA Y H, WU C Z, HU H W, et al. Construction of ecological security pattern in Lijiang River basin based on circuit theory [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 42(5):201-212.
- [28] 王雪然,万荣荣,潘佩佩.太湖流域生态安全格局构建与调控:基于空间形态学-最小累积阻力模型[J]. *生态学报*, 2022, 42(5):1968-1980.
- WANG X R, WAN R R, PAN P P. Construction and adjustment of ecological security pattern based on MSPA-MCR Model in Taihu Lake basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5):1968-1980.