

环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目: 基于最优管理尺度的松花江流域生态系统服务供需匹配时空演变、驱动机制、阈值效应与综合分区
作者: 张驰, 张家鸣, 李法松
DOI: 10.13227/j.hjkk.202604141
收稿日期: 2026-04-10
网络首发日期: 2026-09-07
引用格式: 张驰, 张家鸣, 李法松. 基于最优管理尺度的松花江流域生态系统服务供需匹配时空演变、驱动机制、阈值效应与综合分区[J/OL]. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202604141>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于最优管理尺度的松花江流域生态系统服务供需匹配时空演变、驱动机制、阈值效应与综合分区

张弛¹, 张家鸣², 李法松^{1*}

(1. 安庆师范大学能源环境与空间信息工程学院, 安庆 246133; 2. 哈尔滨师范大学经济与管理学院, 哈尔滨 150025)

摘要: 在全球气候变化与人类活动加剧的背景下, 厘清生态系统服务供需匹配的时空格局、驱动机制及管控策略, 成为区域可持续发展的迫切需求。以松花江流域为例, 选取生境质量、碳储量、土壤保持量、产水量和粮食生产量这五项关键服务, 构建格局识别-尺度优选-机制解析-阈值提取-综合分区的系统分析框架, 揭示 2000~2020 年供需匹配的演变规律, 识别主导驱动因子及其非线性阈值, 并划定差异化的综合生态管理分区。结果表明: ①松花江流域生态系统服务供需呈非均衡匹配格局。粮食生产供需改善最显著, 盈余空间充沛; 碳储量与产水量供需失衡突出, 生境质量与土壤保持盈余收窄。经空间异质性、空间集聚及驱动因子解释力这三维定量验证, 县域是供需协调的关键管理层级。②供需匹配以低-低均衡型与高-低盈余型县域为主导, 高-高协同型县域稀少。生境质量均衡分散, 碳储量全域盈余、城市点状赤字, 土壤保持平原主导、山地分散, 产水量呈东西双极格局, 粮食生产平原供给主导、空间错位显著, 整体空间匹配程度偏低。③五项服务供需匹配均存在显著的非线性阈值效应, 但驱动结构与响应模式差异显著。生境质量与土壤保持量由自然因子主导, 碳储量与产水量由人文因子主导, 粮食生产受地形与人类活动联合调控。跨越阈值后供需匹配呈增益放大、持续恶化或趋于饱和等差异化响应。④综合生态分区呈外围输出、中部缓冲、内核管控的梯度格局, 划分为生态盈余输出区、生态功能平衡区、生态脆弱修复区与生态冲突调控区, 分别对应生态源地、缓冲带、退化修复及人地矛盾靶区。研究识别的阈值可为生态管控红线划定量化锚点, 4 类分区为差异化国土空间治理提供了明确的空间靶向。研究成果可为松花江流域生态保护与高质量发展提供科学依据, 也为其他区域的生态系统服务供需匹配与分区管控研究提供方法参考。

关键词: 生态系统服务; 供需匹配; 多尺度分析; 阈值效应; 综合分区

DOI:10.13227/j.hjlx.202604141

Spatiotemporal Evolution, Driving Mechanisms, Threshold Effects, and Comprehensive Zoning of Ecosystem Service Supply-demand Matching in the Songhua River Basin Based on the Optimal Management Scale

Zhang Chi¹, Zhang Jia-ming², Li Fa-song^{1*}

(1. School of Energy, Environment and Geomatics Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China; 2. School of Economics and Management, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: Against the backdrop of global climate change and intensifying human activities, clarifying the spatiotemporal patterns, driving mechanisms, and management strategies of ecosystem service supply-demand matching has become an urgent need for regional sustainable development. Taking the Songhua River Basin as a

收稿日期: 2026-04-10; 修订日期: 2026-06-26

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重大项目 (2023AH040070)

作者简介: 张弛 (1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用与生态系统服务, E-mail: 2389892173@qq.com

*通信作者, E-mail: lifs628@163.com

case study, five key ecosystem services—habitat quality, carbon storage, soil conservation, water yield, and food production—were selected to construct a systematic analytical framework of "pattern identification, scale optimization, mechanism analysis, threshold extraction, and comprehensive zoning." This framework was used to reveal the evolution of supply–demand matching from 2000 to 2020, identify dominant driving factors and their nonlinear thresholds, and delineate differentiated comprehensive ecological management zones. The results showed that: ① The supply–demand matching of ecosystem services in the Songhua River Basin exhibits a non-equilibrium pattern. Food production shows the most significant improvement, with ample surplus; carbon storage and water yield display prominent imbalances, while the surplus of habitat quality and soil conservation is narrowing. Through three-dimensional quantitative validation of spatial heterogeneity, spatial clustering, and driving factor explanatory power, the county level is identified as the key management tier for supply–demand coordination. ② The supply–demand matching is dominated by low-low balanced and high-low surplus counties, with very few high-high synergistic counties. Habitat quality shows a balanced and dispersed pattern; carbon storage exhibits a basin-wide surplus with point-source deficits in urban areas; soil conservation is dominated by plains and scattered in mountainous areas; water yield presents a bipolar east-west pattern; food production is dominated by plains with pronounced spatial mismatch. The overall spatial matching degree is relatively low. ③ All five services exhibit significant nonlinear threshold effects, but with distinct driving structures and response patterns. Habitat quality and soil conservation are dominated by natural factors, carbon storage and water yield are dominated by human factors, and food production is jointly regulated by topography and human activities. Beyond the thresholds, supply–demand matching exhibits differentiated nonlinear responses including gain amplification, continuous deterioration, or approaching saturation. ④ The comprehensive ecological zoning exhibits a gradient pattern of "peripheral outflow, central buffer, and core control," and is divided into four zones: ecological surplus export zone, ecological function balance zone, ecologically fragile restoration zone, and ecological conflict regulation zone, corresponding respectively to ecological source areas, buffer zones, degraded restoration areas, and human-land conflict target areas. The identified thresholds provide quantitative anchors for ecological control redlines, and the four zones offer clear spatial targets for differentiated territorial space governance. The findings provide a scientific basis for ecological protection and high-quality development of the Songhua River Basin, and also offer a methodological reference for ecosystem service supply–demand matching and zoning management in other regions.

Key words: ecosystem services; supply-demand matching; multi-scale analysis; threshold effects; comprehensive zoning

生态系统服务是自然生态系统为人类社会提供的直接或间接利益^[1],是人类福祉维持与提升的重要基础^[2]。在全球气候变化与人类活动强度持续增加的背景下,生态系统服务供给能力不断下降,而社会经济发展对服务的需求却日益攀升,供需矛盾愈发尖锐^[3]。例如,一项全球尺度的最新研究表明^[4],2000~2020年间,全球粮食生产和土壤保持服务总体上呈盈余趋势,但碳固存和产水量的赤字区域持续扩大,尤其是人口密集或工业化地区,气候变化与人类活动共同重塑了全球生态系统服务的供需平衡^[5]。松花江流域是我国东北地区重要的生态安全屏障和水源涵养区,承担着生物多样性保护、碳汇维持、水土保持、粮食生产与水资源供给等关键生态系统服务功能^[6]。近年来,随着城镇化进程加快和人口持续集聚,流域生态空间面临的压力不断增加,生境质量下降、碳汇功能减弱和水资源供需矛盾等问题日益显现^[7,8]。尽管已有大量研究关注生态系统服务供需匹配^[9-11],但流域尺度下其供需格局的演变规律、驱动机制及管控策略仍有待系统研究,以期为后续政策优化提供更坚实的科学支撑。因此,如何科学识别该区域供需匹配的空间格局、揭示其驱动机制、划定差异化的生态管理分区,已成为区域可持续发展研究的前沿与紧迫议题。

当前,生态系统服务供需匹配研究已从单一服务评估转向多服务综合测度^[12],从静态格局描述转向动态演变分析^[11],从定性分区转向定量综合分区^[13,14]。例如,有学者从省域尺度系统揭示了河北省 4 种关键生态系统服务的供需时空演变与多情景预测^[15],另有研究通过多尺度评估框架探讨了生态系统服务供需匹配的尺度效应及其对生态管理分区的指导意义^[12,16]。然而,现有研究仍存在以下不足:第一,多尺度视角下供需匹配的尺度效应及其对管理单元选择的影响尚未充分厘清。现有研究多在单一空间尺度上考察生态系统服务,往往忽视需求动态和跨尺度交互作用^[17,18],而生态系统服务供需关系实际上具有明显的尺度依赖性,不同尺度下呈现的格局与主导因素各不相同^[19,20]。第二,驱动机制分析多采用局部线性回归模型^[21,22],难以捕捉驱动因子的非线性阈值效应。事实上,社会生态驱动因子对生态系统服务的影响存在单阈值、单调影响和复杂曲线等多种非线性类型^[23,24],忽略以上非线性关系可能导致对关键临界点的误判,从而影响管理决策的科学性。第三,综合分区方法多依赖主观规则,对阈值信息的融合不够充分。近年来虽有研究开始尝试将阈值效应纳入分区框架^[25-27],但如何将识别出的非线性阈值有效地融入分区指标体系,形成兼具客观性与可操作性的综合分区方案,仍有待深入探索。因此,亟需构建一个融合多尺度分析、非线性阈值识别与数据驱动分区的综合研究框架。

基于此,本研究以松花江流域为研究区,选取生境质量、碳储量、土壤保持量、产水量与粮食生产量这五项关键生态系统服务,构建格局识别、尺度优选、机制解析、阈值提取与综合分区的系统分析框架。具体目标包括:①揭示 2000~2020 年五项服务的供给与需求时空演变规律,明确供需匹配的多尺度特征并确定最佳管理尺度;②识别各服务供需匹配的主导驱动因子及其非线性阈值;③融合供需比、四象限类型及阈值约束信息,采用自组织映射神经网络划定差异化的综合生态管理分区。本研究旨在为松花江流域生态保护与高质量发展提供科学依据,也为其他区域的生态系统服务供需匹配与分区分区管控研究提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

松花江流域地处中国东北地区,地理位置介于东经 119°52′~132°31′、北纬 41°42′~51°38′之间,总面积约 55.48 万 km²,是中国七大江河流域之一(图 1)。流域地势三面环山,中部为平原,北部及西北部为小兴安岭和大兴安岭山地,中部与西部则为松嫩平原。主要支流包括嫩江、第二松花江和牡丹江等。土地利用类型以耕地和林地为主,耕地集中分布于松嫩平原与三江平原,林地主要分布于大小兴安岭及长白山区,森林覆盖率高,是东北地区重要的生态屏障。流域内土壤侵蚀以微度和轻度为主,侵蚀区主要集中于东南部,侵蚀面积呈逐渐减少趋势。

作为东北地区重要的水源涵养区和生态安全屏障,松花江流域承担着生物多样性保护、碳汇维持、水土保持及水资源供给等关键生态系统服务功能。近年来,依托吉林西部供水、牡丹江生态修复等工程的实施,流域生态环境持续改善,但城镇化与农业开发所带来的生态压力依然突出。

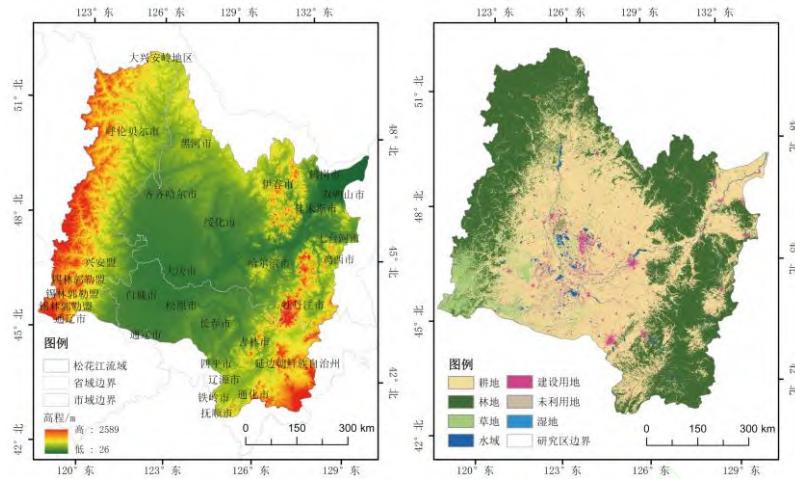


图 1 研究区域与土地利用概况

Fig.1 Overview of the study area and land use

1.2 数据来源及处理

本研究数据来源如表 1 所示。为保证空间数据的一致性，所有数据均统一投影至 WGS_1984_UTM_Zone_48N 坐标系，并重采样为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的空间分辨率。

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and description

数据名称	年份	来源
土地利用数据	2000~2020	武汉大学 CLCD
DEM	2020	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
土壤数据	2013	世界土壤数据库(HWSD) (http://www.tpdc.ac.cn/)
气候数据	2000~2020	国家地球系统科学数据中心 (https://www.geodata.cn/main/)
NDVI	2020	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
夜间灯光数据	2020	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
人口数据	2000~2020	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
GDP 数据	2006~2020	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
需水量	2000~2020	水资源公报
碳排放	2000~2020	EDGAR (https://edgar.jrc.ec.europa.eu/emissions_data_and_maps)
粮食产量	2000~2020	研究区中各省、市统计年鉴
粮食需求	2000~2020	研究区中各省、市统计年鉴

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务供需评估

(1) 生境质量供需 生境质量评估基于 InVEST 模型中的生境质量模块进行计算，得分越接近 1 表示生境质量供给量越高，反之越低，其计算公式如下：

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + E^z} \right)$$

式中， Q_{xj} 为 j 类土地利用的 x 类网格生境质量指数； H_j 为土地利用类型 j 的生境属性； Z 为一个标准化常数，通常设置为 2.5； E 为半饱和常数,取值为 0.5。

生境质量需求的核算方法在学术界尚未形成统一共识^[15]。生境质量受到多种威胁因子的共同影响，其中人类活动干扰与植被退化尤为显著。生境退化度作为评估威胁程度的关键指标，能够有效反映生境所受压力。基于此，本研究结合松花江流域自然地理与社会经济发

展特征，采用生境退化度替代生境质量需求^[28]，退化度越高，表明生境质量需求越大；退化度越低，则需求越小。

(2) 碳储量供需 采用 InVEST 模型中的 Carbon Storage and Sequestration 模块进行评估碳储量。该模块基于土地利用类型数据，分别估算各斑块的生物量碳和非生物量碳储量。碳密度数据主要参考与研究区条件相近的已有成果^[29,30]，具体计算公式如下：

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$$

式中， C_{tot} 为总碳储量； C_{above} 为地上物质碳储量； C_{below} 为地下碳储量； C_{soil} 为土壤碳储量； C_{dead} 为死亡有机质碳储量。

碳排放主要源于能源消耗、工业生产、交通运输、农业活动、森林砍伐及建筑运营等人类活动过程，因此固碳服务需求可通过人均碳排放水平，涵盖煤炭、石油、天然气及其他化石燃料消耗，与人口密度的乘积进行量化估算^[9,12]。

(3) 土壤保持量供需 采用 InVEST 模型中的泥沙输移比模块进行估算。该模型以修正通用土壤流失方程为基础，同时考虑了样地尺度的泥沙截留能力。土壤保持服务的供给量通过潜在土壤侵蚀量与实际侵蚀量之差计算得出^[31]；需求量则采用实际土壤侵蚀量表示^[32]。具体计算公式如下：

$$SDR = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$$

式中，SDR 为土壤保持量； R 为降雨侵蚀因子； K 为土壤可蚀性因子； LS 为地形因子； P 为水土保持措施因子； C 为植被覆盖因子。

(4) 产水量供需 产水服务通过 InVEST 模型的 Annual Water Yield 模块进行量化^[33]。该模块基于水量平衡原理计算产水量^[34]，其中蒸散系数、植物根系深度与植被属性等参数，参考已有研究进行设定^[35]。计算公式如下：

$$Y_{xi} = \left(1 - \frac{AET_{xi}}{P_x}\right) \times P_x$$

式中， Y_{xi} 为 i 类土地利用类型下栅格 x 的产水量； AET_{xi} 为 i 类土地利用类型下栅格 x 的实际蒸散量； P_x 为栅格 x 的降水量

需水量主要源于人类的生产与生活活动，涵盖农业、工业、生活及生态用水，因此本研究基于人口密度数据，将区域用水总量统计数据空间化至各栅格单元^[12,36]。

(5) 粮食生产量供需 耕地是粮食生产的基础，也是生态系统的重要服务功能体现。植被覆盖指数 (NDVI) 能够有效表征耕地的粮食生产能力。本研究以各栅格单元的 NDVI 值与耕地总 NDVI 值之比作为分配系数，将区域粮食总产量分配到每个栅格单元中；粮食需求量则由人均粮食消费量与人口密度相乘得到^[9,12]。计算公式如下：

$$FP = \frac{NDVI(x)}{NDVI_{sum}} \times G_{sum}$$

式中,FP 表示粮食服务供给量； $NDVI(x)$ 为栅格单位 x 的植被覆盖指数； $NDVI_{sum}$ 为耕地的植被覆盖指数之和； G_{sum} 为粮食总产量。

1.3.2 多尺度生态系统服务供需匹配分析方法

为揭示不同空间尺度下生态系统服务的供需匹配状态及其空间分异特征，本文采用供需指数 (SDI) 作为核心测度指标^[36]。该指数能够综合反映生态系统服务供给与需求之间的相对平衡程度，有效识别供需盈余与赤字区域，为刻画供需格局的空间异质性提供量化依据^[37]。基于多尺度分析框架，SDI 被应用于流域、省、市、县、格网这 5 个行政与自然单元尺度，以揭示不同尺度下供需匹配的差异规律。该方法为后续驱动机制分析与综合分区提供了统一的度量基础。具体公式如下：

$$SDI_j = \frac{ES_j - ED_j}{ES_j + ED_j}$$

式中, SDI_j 为地区 j 的生态系统服务供需比值, ES_j 与 ED_j 分别表示生态系统服务的供给与需求量。 $SDI_j > 0$ 表明生态系统服务为盈余状态; $SDI_j < 0$ 表明生态系统服务存在赤字情况; $SDI_j = 0$ 则表明生态系统服务供需平衡。

1.3.3 生态系统服务供需关系分析与最优尺度识别

(1) 相关性分析 生态系统服务相互作用具有显著尺度依赖性。本研究在流域、省、市、县、格网这 5 个尺度上计算 Pearson 相关系数, 以识别其尺度效应^[38]。该方法主要用于揭示相关性随尺度的变化规律, 而非精确刻画权衡与协同的非线性关系。通过多尺度对比, 为后续分析选取最优空间单元提供依据。

$$R_{mn} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})(n_i - \bar{n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 \sum_{i=1}^n (n_i - \bar{n})^2}}$$

式中, R_{mn} 为 2020 年生态系统服务 m 和 n 之间的空间相关系数; m_i 和 n_i 分别为第 i 个空间单元的两种生态系统服务值; $\bar{m}$ 和 $\bar{n}$ 分别为两种服务在研究区的空间平均值; n 为空间单元总数。

(2) 最优尺度识别 为定量识别最优管理尺度, 本研究引入变异系数 (coefficient of variation, CV) 和全局莫兰指数 (global Moran's I), 从空间异质性强度与空间集聚特征两个维度, 对省、市、流域、县、格网这 5 个尺度下的 SDI 进行定量比较。同时, 计算各尺度下 OPGD 模型的全因子平均 q 值, 从驱动因子解释力维度补充验证。以上三项指标共同构成最优管理尺度的定量判据。变异系数衡量不同尺度下 SDI 的相对离散程度, CV 值越大, 表明该尺度捕捉供需匹配空间差异的能力越强^[39]。其计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma_{SDI}}{\mu_{SDI}}$$

式中, σ_{SDI} 为某一尺度下各空间单元 SDI 的标准差, μ_{SDI} 为 SDI 的均值。

全局莫兰指数衡量 SDI 的空间自相关强度, 反映供需匹配在空间上的集聚或分散特征。Moran's I 值越高且显著, 表明该尺度下供需匹配的空间集聚越明显, 越有利于识别空间管控的热点与冷点区域^[17]。其计算公式为:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中, n 为空间单元数, x_i 和 x_j 分别为单元 i 和 j 的 SDI 值, $\bar{x}$ 为 SDI 均值, w_{ij} 为空间权重矩阵, $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$ 。Moran's I 经 999 次随机置换检验显著性 ($P < 0.05$)。驱动因子解释力验证方面, 在各尺度下分别运行 OPGD 模型, 计算 8 个驱动因子对各项服务 SDI 的全因子平均 q 值。平均 q 值越高, 表明该尺度下供需匹配的驱动机制越清晰, 越适合作为机制解析的空间单元。

(3) 四象限供需匹配模式 四象限供需匹配模式是一种用于识别生态系统服务供给与需求空间错位类型的直观方法^[40]。本研究基于各服务在县域尺度的供给量与需求量, 首先对二者分别进行 Z-score 标准化处理, 使其均值为 0、标准差为 1^[41]。以标准化后的供给值为横轴、需求值为纵轴构建二维坐标系, 根据正负象限将供需匹配划分为四种类型, 供给与需求均大于 0 的县域定义为高供给-高需求型 (H-H), 供给小于 0 而需求大于 0 为低供给-高需求型 (L-H), 供给与需求均小于 0 为低供给-低需求型 (L-L), 供给大于 0 而需求小于 0 为高供给-低需求型 (H-L)^[40]。通过该分类, 可直观识别各服务供需匹配的空间格局及错位特征, 为差异化生态管理提供方向性依据。具体公式如下:

$$Z = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

式中, Z 为标准化后的供给/需求值; X_i 为第 i 个县域的供给量或需求量; $\bar{x}$ 为全流域所有县域供给量或需求量的平均值; s 为全流域所有县域供给量或需求量的标准差。

1.3.4 生态系统服务簇识别

生态系统服务簇是指在特定时空尺度上重复出现的生态系统服务组合,能够揭示不同服务之间的协同与权衡关系及其空间分布规律^[42]。本研究采用自组织映射神经网络对松花江流域县域尺度的生态系统服务簇进行识别。SOM 聚类分析法是一种无监督学习方法,能够根据生态系统服务在空间上的共现相似性,将每个研究单元或县域分配到相应的服务簇中^[43]。为保证不同时期聚类结果的可比性,对三期生态系统服务的供给量进行相同尺度的标准化处理。SOM 聚类分析基于 R 语言 4.0 软件中的 kohonen 包执行。

1.3.5 最优参数的地理探测器 (OPGD) 模型

最优参数地理探测器 (OPGD) 是在传统地理探测器基础上的重要改进,二者在基本原理上保持一致^[44]。其核心改进主要体现在两个层面,第一,对连续变量的空间离散化过程进行参数优化。第二,探讨空间异质性研究中可塑面积单元问题 (MAUP) 的影响。OPGD 通过遍历多种离散化方法,包括等间距法、自然断点法、分位数法、几何间隔法和标准差法,以及不同分类数量的参数组合,计算各组合下驱动因子对因变量的解释力 (q 值),并选取最大 q 值对应的参数作为最优离散方案^[45]。 q 值的具体计算公式为:

$$Q = 1 - \frac{\sum_{l=1}^L N_l \sigma_l^2}{N \sigma^2}$$

式中, $l=1, 2, \dots, L$ 为空间分层个数; N_l 和 N 依次为层 l 和区域整体的空间分析单位个数; σ^2 为被解释变量的方差; Q 越大表明对生态系统服务的影响越强。

为进一步解析多因子协同作用对 SDI 的非线性增强效应,本研究引入地理探测器的交互作用探测模块。交互作用探测通过比较两因子独立作用的 q 值之和与交互作用的 q 值,判断因子间是否存在非线性增强或双变量增强关系。具体判别规则为:若 $Q_{X_1 \cap X_2} > Q_{X_1} + Q_{X_2}$, 为非线性增强;若 $Q_{X_1 \cap X_2} = Q_{X_1} + Q_{X_2}$, 为双因子独立;若 $Q_{X_1 \cap X_2} > \max(Q_{X_1}, Q_{X_2})$, 为双因子增强。交互作用的识别有助于揭示生态系统服务供需匹配受多重自然-人文因素协同驱动的复杂机制,避免仅聚焦单一主导因子而遗漏重要交互效应。

1.3.6 非线性检验与阈值识别

(1) 非线性关系检验 采用广义加性模型 (generalized additive model, GAM) 对 SDI 与主导因子进行单变量拟合。GAM 作为一种非参数回归方法,通过平滑函数灵活拟合数据,无需预设参数形式,能够有效捕捉生态响应中的非线性特征。通过 F 检验比较非线性模型与线性模型的拟合优度,判断非线性关系是否显著存在^[46,47]。若非线性模型显著优于线性模型 ($P < 0.05$), 则确认主导因子与 SDI 之间存在显著的非线性关系。GAM 模型基于 R 语言中的 mgcv 包实现,该包提供了广义加性模型的拟合函数 gam 及配套的平滑参数自动优化方法。

(2) 阈值识别 在确认非线性关系显著的基础上,采用分段回归 (segmented regression) 方法构建两段式线性模型,识别响应关系发生突变的结构断点^[48]。分段回归通过在数据中寻找最优分割点,分别拟合两个线性方程,以捕捉关系在不同区间的差异化变化规律。通过 Davies 检验确认断点统计显著性 ($P < 0.05$), 并基于 AIC 比较分段模型与线性模型的拟合优度,以量化生态系统服务供需匹配发生状态质变的临界阈值^[49]。分段回归基于 R 语言中的 segmented 包实现,该包专门用于拟合具有断点关系的分段线性回归模型, Davies 检验由该包内置的 davies.test 函数完成。

1.3.7 基于 SOM 的综合分区方法

为融合多源信息划定差异化的生态管理分区,采用自组织映射神经网络对县域单元进行无监督聚类。输入指标包括五项服务的供需比作为连续变量、五项服务的四象限类型作为取值 1 至 4 的整数编码,以及五项服务是否突破安全阈值作为取值为 0 或 1 的二值变量,共计 15 个指标。所有连续变量经 Z-score 标准化后输入模型。该 SOM 分析独立于服务簇识别过程,前者以各期服务供给量为输入,用于揭示服务组合格局;而此处以供需匹配状态、错位

类型及阈值约束信息为输入，用于划定综合管理分区。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务供需匹配

2.1.1 生态系统服务供需时空变化

2000~2020 年间，松花江流域五项生态系统服务的供给与需求呈现差异化演变趋势（表 2）。从供给端看，生境质量（HQ）供给从 0.524 小幅下降至 0.508，降幅为 3.1%；碳储量（CS）供给从 17491.37 t·km⁻² 降至 17268.24 t·km⁻²，降幅为 1.3%，两者均呈微弱下降趋势；土壤保持（SR）供给从 4481.13 t·km⁻² 上升至 6265.31 t·km⁻²，增长率为 39.8%；产水量（WY）供给从 142570.53 m³·km⁻² 上升至 254544.18 m³·km⁻²，增长率为 78.5%；粮食生产量（FP）供给从 3353.4 万吨增长至 9601.7 万吨，增长率为 186.3%；三者供给能力显著增强。供给端呈现两降三升格局，产水量与粮食生产量的供给增长尤为突出。从需求端看，生境质量需求在 0.236~0.240 之间小幅波动，总体稳定；碳储量需求从 256.14 t·km⁻² 激增至 547.32 t·km⁻²，增长率为 113.7%，增幅最大；土壤保持需求从 100.47 t·km⁻² 升至 153.91 t·km⁻²，增长率为 53.2%，增速较快；产水量需求从 71306.53 m³·km⁻² 升至 80943.52 m³·km⁻²，增长率为 13.5%，增速相对平缓。粮食生产需求从 954.6×10⁴ t 降至 746.2×10⁴ t，降幅为 21.8%，是五项服务中唯一需求下降的类型。需求端以碳储量和土壤保持的增长为主，粮食需求呈收缩态势，生境质量和产水量的需求变化较小。

总体而言，碳储量的供需失衡最为突出，需求增速远超供给；粮食生产供给增速远超需求，盈余空间持续扩大；土壤保持供给和需求分别上升，但需求增速高于供给，盈余空间收窄；产水量供给增速远超需求，水资源盈余扩大；生境质量供给量略有下降，自然生境呈轻度退化。五项服务中，粮食生产的供需匹配改善最为显著，碳储量的供需矛盾最为尖锐。

表 2 2000~2020 年松花江流域生态系统服务供需量

Table 2 Ecosystem service supply and demand in the Songhua River Basin from 2000 to 2020

年份	HQ		CS/t km ⁻²		SR/t km ⁻²		WY/m ³ km ⁻²		FP ×10 ⁴ /t	
	供给	需求	供给	需求	供给	需求	供给	需求	供给	需求
2000	0.524	0.237	17491.37	256.14	4481.13	100.47	142570.53	71306.53	3353.4	954.6
2010	0.523	0.236	17398.63	509.64	5664.70	131.90	219052.59	82295.84	7640.1	755.6
2020	0.508	0.240	17268.24	547.32	6265.31	153.91	254544.18	80943.52	9601.7	746.2

2.1.2 生态系统服务供给量空间变化

生态系统服务供给量空间分布格局如图 2 所示。2000~2020 年间，松花江流域的生境质量呈现山地高、平原低的梯度分布特征。高值区稳定分布于流域西部的大兴安岭、北部的小兴安岭以及东南部的张广才岭等山地林区，该区域以天然林、湿地等生态用地为主，人类活动干扰较弱，生境连通性与完整性较高。低值区则集中分布于流域中西部的松嫩平原和东北部的三江平原核心区，该区域为东北黑土区的主要农业带，长期高强度的耕地开发与城镇扩张导致生境破碎化，生态功能持续退化。过去 20 a 间，生境质量的空间格局整体保持稳定，但局部呈现出高值区萎缩、低值区扩张的趋势：西北部山地高值区边界向内部收缩，部分边缘林区因林地用途转换和生态退化导致生境质量下降；中西部平原低值区范围持续扩大，且低值区内部生境质量进一步劣化，反映出农业集约化与城镇化对平原区生境的持续胁迫。

碳储量的空间分布特征与生境质量高度相似：高值区集中于流域四周的山地森林生态系统，森林植被的高生物量与土壤碳库是其主要来源；低值区主要分布于平原地带，以耕地和建设用地为主。2000~2020 年，碳储量空间格局整体稳定，其中高值区碳储量基本保持不变，平原区碳库则有所损耗。具体而言，中西部平原低值区范围略有扩张，部分区域碳储量持续下降，这与耕地复种指数提高、黑土退化及城镇扩张所导致的碳库流失密切相关。

土壤保持量整体呈现全域低值、局部微高的分布特征。流域 90%以上区域的土壤保持量处于 0~150 t·km⁻²的低水平，仅在东部、北部山地的局部沟谷与坡地存在零星高值区。中西部松嫩平原全域为低值区，反映出平原区地形平缓、侵蚀动力弱的特点，但同时该区域黑土区坡耕地仍存在轻度侵蚀风险。2000~2020 年间，土壤保持量空间格局总体稳定，未发生显著突变。东部与北部山地局部区域土壤保持量略有提升，与退耕还林、坡耕地治理等水土保持工程的实施有关；平原区土壤保持量无明显变化，表明黑土区水土流失防控仍需持续加强，现有措施的生态效益尚未充分显现。

产水量呈现东南高、西北低的显著分异格局，高值区稳定分布于流域东南部的山地、丘陵区，该区域降水充沛、植被截留与蒸散特征适配，产水能力强；中值区呈条带状分布于高值区西北侧，为山地与平原过渡带；低值区集中于中西部的松嫩平原与西南部大兴安岭地区，受降水偏少、农业灌溉耗水和蒸散旺盛等因素影响，产水能力弱。20 a 间产水量呈现高值区向西北扩张、低值区持续萎缩的显著演变趋势；2000 年高值区仅分布于东南部边缘，2010 年高值区向中西部过渡带延伸，2020 年东南部全域进入高值区间，且高值区数值持续提升；中西部、北部平原低值区范围持续缩小，产水量逐步提升，反映出流域降水格局变化是产水量变化的主要驱动因素。

粮食生产量的空间格局与前四项服务形成显著反差，高值区集中于流域中西部的松嫩平原，该区域地势平坦、土壤肥沃，是东北地区重要的商品粮生产基地，粮食供给能力远高于东部山地丘陵区。2000~2020 年间，粮食供给空间格局呈现出显著的时间演变特征，松嫩平原核心农作区的粮食产量持续增长，高值斑块在 2010 年与 2020 年两期图上不断强化和扩展，反映了农业技术进步与单产提升的累积效应。整体来看，粮食供给的“平原高、山地低”格局在 20 a 间不断强化，空间极化程度有所加剧。

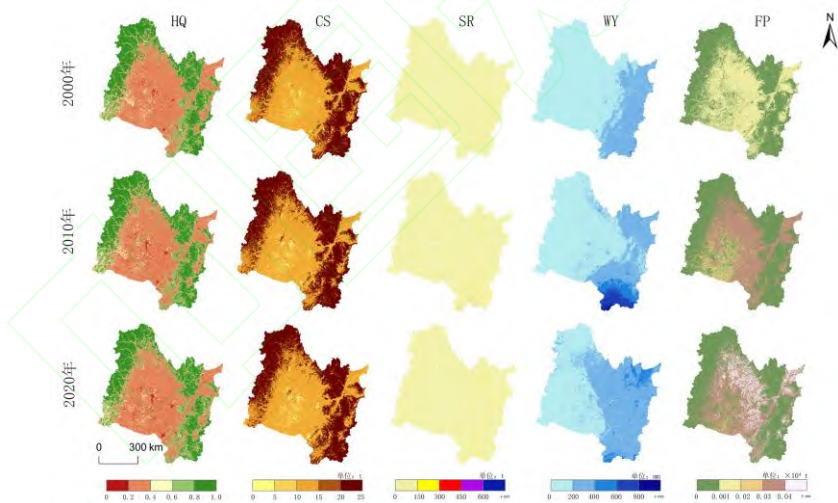


图 2 松花江流域生态系统服务供给量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem service supply in the Songhua River Basin

2.1.3 生态系统服务需求量空间变化

生态系统服务需求量空间分布格局如图 3 所示。松花江流域生境质量需求量高值区域主要集中于城区及建设用地密集区周围，以上区域由于人类活动强烈、自然生境破碎化，对生态修复和生境保护的需求较高；低需求区域则集中于绥化市北部及大兴安岭西部北部地区，以上地方人口稀少且开发强度低，生境本底较好。在长期变化趋势上，高需求区域呈小幅收缩态势，这主要受城市开发边界、生态保护红线等空间管控政策制约，建设用地无序扩张得到遏制；中需求区域沿城镇扩张与耕地开垦方向持续蔓延，表明人类活动对生境的压力仍在向外围扩散；而中部低值区域的连片化程度不断加剧，说明未开发区域保持了良好的生态连

续性，低干扰空间正在形成更大范围的连片格局。

碳储量需求量呈现山地林区较低、平原农耕区较高、城镇及工矿区最高的空间分异特征。其中，大小兴安岭及长白山林区因植被固碳能力强、碳储量充足，需求量较低；松嫩平原、三江平原及城镇工矿集中区则因碳排放源密集、碳汇缺口显著，需求量较高。在时间变化上，碳储量高需求区域随耕地扩张与城镇发展持续扩大，尤其是松嫩平原西部和三江平原腹地，碳汇赤字不断加深，流域碳供需失衡趋势不断增强。

土壤保持需求量受地形坡度与土地利用方式的共同控制，空间上表现为东部低山丘陵区、农林交错带及坡耕地区较高，以上区域土壤侵蚀风险大、保持需求迫切；而松嫩平原腹地地势平坦、以水田为主，土壤保持需求量较低。在变化过程中，平原农耕区因水土保持措施（如等高耕作、退耕还林还草）的持续实施，其需求量相对平稳；而东部丘陵区因坡耕地开垦和降雨侵蚀力增强，需求有所上升；西部半干旱区因植被退化，需求亦呈上升趋势。总体形成了东部与西部抬升、中部平稳的演变态势。

产水量需求量呈现上游山区低、中下游平原与城镇区高、西部半干旱区偏低的空间格局。上游水源涵养区，如长白山西麓与张广才岭地区，供给充足、需求较低，是流域重要的产水量输出区；中下游农业灌溉与城镇用水集中区，如哈尔滨、长春与齐齐哈尔周边需求压力显著，供需错位突出。随社会经济发展和人口集聚，中下游高需求区持续扩张，上下游供需错位不断强化，区域性与季节性供需失衡问题更加突出，尤其是在春灌期和枯水期，水资源调配压力日益增大。

粮食生产需求量的空间格局以人口密度和人均粮食消费水平为核心驱动，高需求区呈现出“城市群高度集聚、农区面状分布”的双重特征。哈尔滨、长春、吉林和大庆等主要城市是粮食需求的绝对高值中心，与其人口规模和消费水平相匹配；松嫩平原农区则呈现面状中等需求分布，与该区域较高的人口密度和农业人口比重有关。时间维度上，2000~2020 年间粮食需求的空间演变体现为两个趋势，一是主要城市的需求高值区持续强化，城市人口规模增长使城市群成为粮食需求增长的核心引擎；二是平原农区的粮食需求呈缓慢收缩态势，与农村人口迁移流失相协调。

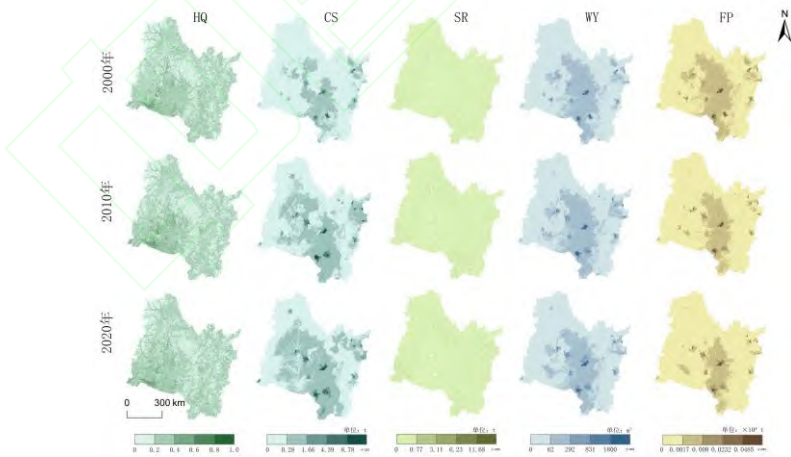


图3 松花江流域生态系统服务需求量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service demand in the Songhua River Basin

2.2 生态系统服务供需匹配时空特征

2.2.1 生态系统服务供需匹配时间演变

松花江流域生态系统服务供需比如表 3 所示。2000~2020 年，松花江流域生境质量供需比整体呈缓慢下降趋势，始终维持在低盈余水平。2000 年供需比为 0.378，2010 年微升至 0.379，2020 年降至 0.358，20 a 间累计降幅达 5.58%。该结果表明，流域生境质量服务供需

比虽始终为正，但盈余空间持续收窄，供需协调度呈弱化态势。结合同期土地利用变化，该趋势可能与城镇扩张、耕地开垦等人类活动导致自然生境萎缩有关，具体驱动因素有待进一步探索。

2000~2020 年，碳储量供需比呈持续小幅下降趋势，始终处于高盈余状态。2000 年供需比为 0.971，2010 年降至 0.943，2020 年进一步降至 0.939，20 年间累计降幅为 3.29%。该特征表明，流域碳汇供给能力远高于碳排放需求，具有充足的盈余空间，但盈余水平呈缓慢下降趋势。供需比的下降主要源于需求端的快速增长，可能与区域经济发展和能源消耗增加有关，其背后的驱动机制尚需深入探究。

2000~2020 年，土壤保持量供需比呈持续小幅下降趋势，始终维持在高盈余状态。2000 年供需比为 0.956，2010 年微降至 0.954，2020 年降至 0.952，20 a 间累计降幅仅为 0.42%，为五项服务中下降幅度最小的类型。该结果表明，流域土壤保持服务的供需协调度整体高度稳定，未出现显著恶化。供需比的微弱下降可能与供给增速略低于需求增速有关，相关驱动因子仍需进一步识别。

2000~2020 年，产水量供需比呈显著持续上升趋势，始终处于低盈余水平。2000 年供需比为 0.333，2010 年升至 0.454，2020 年进一步升至 0.517，20 a 间累计增幅达 55.26%，为五项服务中增幅最显著的类型。该特征反映出，流域产水量服务的供需协调度持续提升，盈余空间不断扩大。供需比的上升主要源于供给增速远高于需求增速，可能与降水等自然因素增加及水资源管理优化有关，具体驱动路径有待明确。

2000~2020 年，粮食生产供需比呈先急升后缓增的显著上升趋势，盈余水平从中等跃升至高位。2000 年供需比为 0.557，2010 年跃升至 0.820，2020 年进一步增至 0.856，20 a 间累计增幅达 53.68%。2000~2010 年为供需比的快速提升期，增幅达 47.2%，主要源于粮食供给的成倍增长与需求小幅下降的双向叠加；2010~2020 年供需比进入高位缓增阶段，增幅仅 4.4%，供给与需求变化均趋于平稳。该结果表明，松花江流域作为东北黑土区核心粮食产区，粮食生产供需匹配持续优化，盈余空间充沛，是国家粮食安全的重要保障区域。粮食供需比的持续提升主要归因于单产提升与耕地规模化经营带来的供给端强劲增长，而需求端受人口外流与膳食结构变化影响呈稳中有降态势。

表 3 2000~2020 年松花江流域生态系统服务供需比

Table 3 Supply-demand ratio of ecosystem services in the Songhua River Basin from 2000 to 2020					
年份	供需比				
	HQ	CS	SR	WY	FP
2000	0.378	0.971	0.956	0.333	0.557
2010	0.379	0.943	0.954	0.454	0.820
2020	0.358	0.939	0.952	0.517	0.856

2.2.2 多尺度下生态系统服务供需匹配空间格局

生态系统服务供需匹配具有显著的尺度依赖性，不同空间尺度下呈现的格局特征与主导驱动因素各不相同。为全面揭示松花江流域五项生态系统服务的多尺度分异规律，并确定后续驱动机制分析与综合分区的最佳空间单元，本研究从省域、市域、流域、县域及格网这 5 个尺度分别刻画其供需匹配格局（图 4）。

省域尺度下，五项生态系统服务供需比呈现显著的地带性分异。生境质量表现为西高东低、北高南低的空间特征；西北部内蒙古大兴安岭区域处于盈余状态，黑龙江省为中低值区，吉林省则以低值区为主。碳储量呈西北高、东南低的单调递减格局，西北部寒温带针叶林区为中高值区，向南随植被类型过渡为农田而逐渐降低。土壤保持量分布与生境质量相似，表现为内蒙古最高、黑龙江省次之、吉林省最低。产水量格局与碳储量一致，西北部大兴安岭区域为高盈余区，吉林省与黑龙江省为中低盈余区。粮食生产量呈现出，黑龙江省为低盈余

区,吉林省供需近平衡,辽宁省与内蒙古自治区东部呈显著赤字,空间上由北向南盈余递减,与黑土带纬向分布及耕地占比梯度一致。

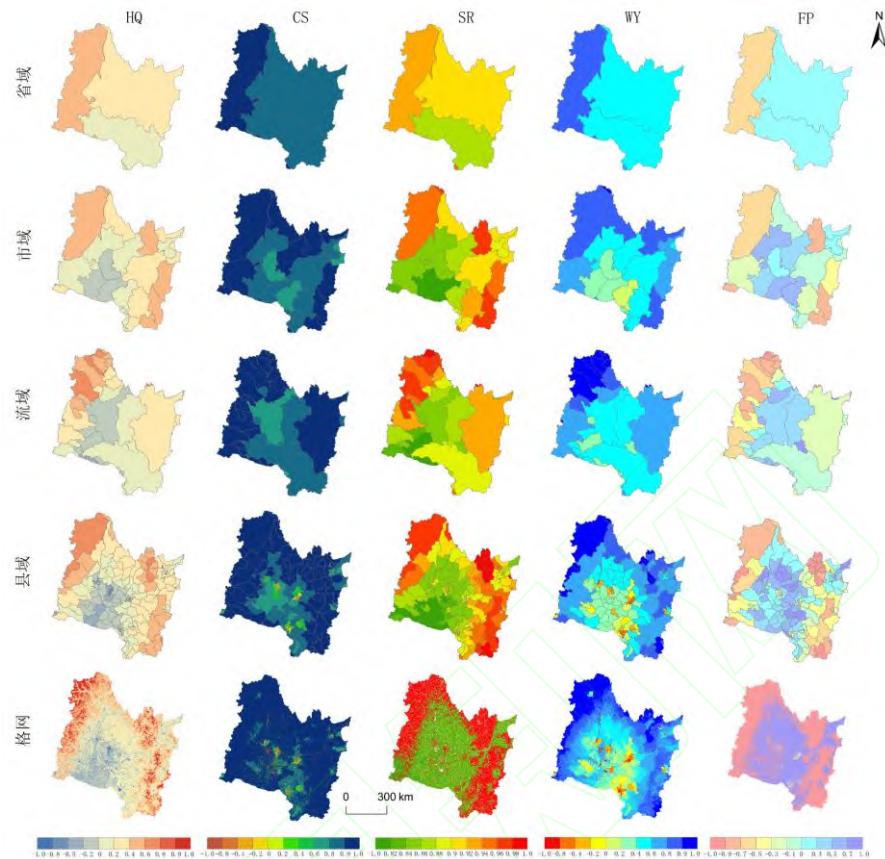
市域尺度下,行政边界对供需格局的调控效应显著增强。生境质量呈斑块状分异格局:西北部林业城市维持中高值,低值区分布于兴安盟、齐齐哈尔市、长春市与佳木斯市,而大庆市、白城市与松原市出现显著赤字。碳储量市域差异明显,高值区集中于林业城市,如呼伦贝尔市、黑河市和牡丹江市,中部平原城市,如哈尔滨市、齐齐哈尔市与白城市为中等水平,中低值区主要分布在大庆市、长春市与七台河市。土壤保持量的高值区与中高值区主要分布于海拔较高的城市,而平原地区市域则表现为中等水平。产水量格局与碳储量相似,高盈余区主要位于山地城市;大庆市、白城市与松原市为低盈余区,而长春市产水供需出现显著赤字。粮食生产量高盈余区集中于松嫩平原腹地城市,如齐齐哈尔市、长春市、松原市、绥化市和白城市,均为东北粮食主产区核心城市;山地林区城市则呈深度赤字,如伊春市、延边朝鲜族自治州、大兴安岭地区和呼伦贝尔市,供需比均低于-0.65;哈尔滨市和黑河市处于供需平衡临界点,城市扩张对周边粮食供需格局的挤压效应初显。

流域尺度基于水文单元划分,更能体现自然地理过程的完整性。生境质量供需比的空间格局与自然植被分布存在一定程度的相似性,黑龙江上游流域保持高值,中高值区分布于研究区东部的松花江干流中下游与牡丹江区域,赤字区主要集中在研究区中部,如大庆市、齐齐哈尔市、绥化市与白城市。碳储量高值区主要分布在大兴安岭、小兴安岭、松花江干流中下游及牡丹江区域,中低值区集中在齐齐哈尔市与大庆市。土壤保持量与产水量的高值、中高值区与生境质量空间分布大体相似;值得注意的是,生境质量赤字区域与土壤保持量低值区域重叠,暗示不同生态系统服务间存在协同性。产水量低值区主要分布于松嫩平原,如白城市、松原市南部与长春市北部。粮食生产量高盈余区集中分布于嫩江中下游及松花江干流中游平原地带,低值与赤字子流域与上游山地林区及下游沼泽湿地空间叠合。

县域尺度进一步细化了供需匹配的空间异质性,土地利用管控效应明显。生境质量呈高度破碎化格局,中高值区与市域尺度基本一致,但在大兴安岭鄂伦春自治旗与小兴安岭伊春市中部出现高值区域;赤字区较市域尺度扩展至齐齐哈尔市、哈尔滨市与长春市等地,且在大庆市与白城市出现极度赤字。碳储量呈典型山地高、平原低的空间格局,高值区较市域尺度明显扩散,研究区中部的松嫩平原建设用地高覆盖区域出现显著赤字,县域边界效应体现了行政单元对碳库的管理调控作用。土壤保持量在县域尺度未出现赤字,但与市域尺度相比高值区增多,低值区向西扩散,主要集中于研究区南部。产水量在县域尺度空间分异明显:中高值区扩散,集中体现在研究区东南部林地高覆盖区域;低值区范围扩大且出现严重赤字,集中分布于研究区中部平原地带的城镇与人口聚集地,如吉林市、长春市与哈尔滨市。粮食生产量供需格局呈现高度异质化:松嫩平原黑土区县域供需比普遍高于0.50,拜泉县、望奎县、绥滨县位居前三,为流域粮食生产核心输出区;大小兴安岭及长白山林区县域供需比多低于-0.70,汪清县、长白朝鲜族自治县、根河市和鄂温克族自治旗等县域供需比趋近-1.00,粮食供给完全依赖外部调入。

格网尺度揭示了生态系统服务供需的微观空间格局与精细异质性。生境质量呈现极端斑块化特征:高值像元对应原始森林与湿地核心区,低值像元对应城市建设用地与集约化农田,中等值像元构成生态廊道,且高值斑块表现出明显的破碎化与边缘分布趋势。碳储量清晰展示土地利用的碳功能差异:高植被覆盖区像元表现为高碳储量,农田与建设用地像元碳储量较低,城镇区域呈现明显的碳储量赤字。土壤保持量表现为山区林地高值像元,平原农田为低值像元,部分耕作区因水土保持措施可能出现异常高值;值得注意的是,格网尺度下白城市和松原市出现少量土壤保持赤字。产水量供需比呈现对土地利用与人类活动的综合响应,森林覆盖区为高产水像元,城市建设区与灌溉农业区为低产水像元,城市建成区普遍存在产水赤字。粮食生产量清晰呈现耕地与林地、建设用地像元间的供需比陡变边界,松嫩平原及

三江平原垦区灌溉农田像元呈连片高盈余，雨养旱作区盈余显著降低，城镇建设用地像元普遍为赤字。



底部色柱为 SDI 系数，值域为-1.0~1.0，反映供需由赤字向盈余的匹配程度

图 4 松花江流域多尺度生态系统服务供需匹配

Fig.4 Multi-scale supply-demand matching of ecosystem services in the Songhua River Basin

2.3 生态系统服务供需关系与尺度优选

2.3.1 多尺度下生态系统服务供需相关性分析

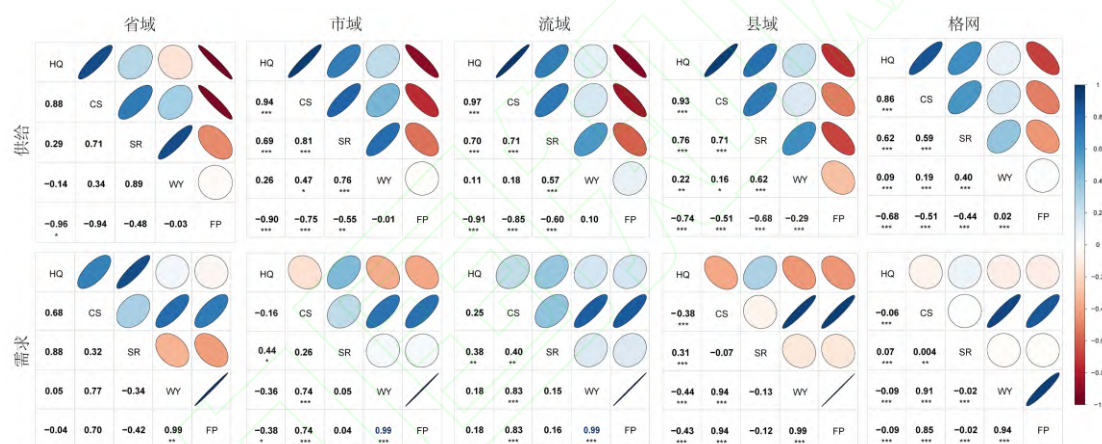
基于松花江流域五项生态系统服务五级尺度的 Pearson 相关系数分析，生态系统服务间的关联具有显著的尺度依赖性（图 5）。在省域尺度，除生境质量与粮食生产供给端、产水量与粮食生产需求端外，其余服务对均未呈现显著相关，表明省级行政单元内部的空间均质化过程掩盖了大部分生态系统服务之间的内在联系。

供给端方面，随着空间尺度细化，服务间涌现出清晰的协同与权衡格局。生境质量与碳储量的相关系数在市域尺度为 0.94，流域尺度升至 0.97，县域尺度为 0.93，格网尺度为 0.86，均通过 P 值小于 0.001 的显著性检验，在流域尺度达到峰值。碳储量与土壤保持量亦呈显著正相关，市域为 0.81，流域和县域均为 0.71，格网为 0.59， P 值均小于 0.001，随尺度细化呈递减趋势。土壤保持与产水量在市域尺度上呈强正相关，为 0.76，但随尺度细化持续衰减，流域为 0.57，县域为 0.62，格网仅 0.40，均通过 P 值小于 0.001 显著性检验。生境质量与产水量、碳储量与产水量的相关性整体偏弱。生境质量与产水量在市域和流域尺度均不显著；碳储量与产水量在市域为 0.47，县域为 0.16，格网为 0.19，流域尺度不显著。粮食生产在供给端与生境质量、碳储量和土壤保持量呈稳定的负相关，构成供给端最突出的权衡维度。生境质量与粮食生产在各尺度均呈强至极强负相关，省域为-0.96，市域为-0.90，流域为-0.91，县域为-0.74，格网为-0.68。碳储量与粮食生产的负相关性同样显著，市域为-0.75，流域为-0.85，县域和格网均为-0.51， P 值均小于 0.001。土壤保持与粮食生产在各尺度呈中等负相

关，市域为-0.55，流域为-0.60，县域为-0.68，格网为-0.44。产水量与粮食生产仅在县域和格网尺度呈现弱相关，县域为-0.29，格网为 0.02。综合来看，供给端形成生态供给与粮食供给的空间分异格局，而生境质量、碳储量、土壤保持三者紧密协同，产水量相对独立。

需求端则呈现与供给端截然不同的尺度涌现特征。产水量需求与粮食生产需求在各尺度均呈极强正相关，省域高达 0.99， P 值小于 0.01，市域、流域、县域均为 0.99， P 值小于 0.001，格网为 0.94， P 值小于 0.001，为全部服务对中跨尺度一致性最强的关联，反映了人口集聚对水资源与粮食消费的双重拉动。碳储量需求与产水量需求、碳储量需求与粮食生产需求自市域起呈跨尺度强协同：市域均为 0.74，流域均升至 0.83，县域均达 0.94，格网分别为 0.91 和 0.85，均通过 P 值小于 0.001 显著性检验。生境质量需求与其他服务的关系呈尺度反转，生境质量需求与碳储量需求在县域尺度表现为显著负相关，相关系数为-0.38，生境质量需求与产水量需求在县域尺度为-0.44，生境质量需求与粮食生产需求在县域尺度为-0.43，均通过 P 值小于 0.001 显著性检验，表明县域尺度上生境保护需求与资源开发需求存在明确的空间冲突。

松花江流域生态系统服务供给端与需求端呈现明显的倒置格局。供给端以生态保育型服务与粮食供给服务的权衡为基本结构，协同关系在多尺度稳定涌现；需求端以资源消费型需求簇的强协同与生境保护需求的冲突为核心特征，高度集中于县域尺度。因此，流域生态系统服务管理应采取尺度适配策略，其中人类需求的协调与冲突缓解应重点聚焦于县域尺度。



数字为 Pearson 相关系数，*、**和***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平显著；圆的大小表示相关系数绝对值高低，圆的方向表示相关性的正负，颜色表示相关关系正负与强弱（蓝正红负，色越深相关性越强）

图 5 松花江流域多尺度生态系统服务供需相关性

Fig.5 Multi-scale supply-demand correlation of ecosystem services in the Songhua River Basin

2.3.2 最优管理尺度定量验证

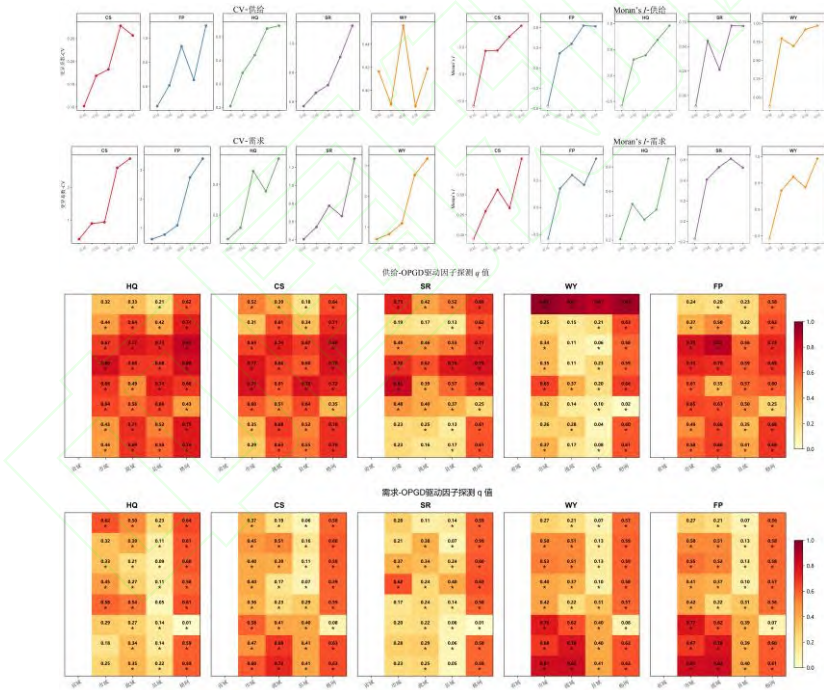
为进一步从空间异质性强、空间集聚特征及驱动因子解释力这 3 个维度定量识别最优管理尺度，本研究计算了五项生态系统服务供给量与需求量在省、市、流域、县和格网这 5 个尺度下的变异系数与全局莫兰指数，并比较了各尺度下 OPGD 模型的全因子平均 q 值（图 6）。

变异系数反映不同尺度捕获供需空间异质性的能力。供给端五项服务的 CV 均随尺度细化呈持续上升趋势，以土壤保持和粮食生产最为突出。土壤保持 CV 从省域的 0.569 升至县域的 0.907，粮食生产 CV 从省域的 0.437 升至县域的 0.655，表明县域尺度较粗尺度能更充分地揭示供需匹配的内部差异。整体而言，省域和市域尺度 CV 偏低，空间均质化掩盖了大量县域间差异；格网尺度 CV 虽最高，如土壤保持达 1.122，粮食生产达 1.103，但主要反映像元级随机扰动，对管理分区的信息增量有限。需求端 CV 的尺度递增趋势更为剧烈，碳储

量、产水量和粮食生产在县域尺度 CV 分别跃升至 2.594、2.695 和 2.746，表明需求的空间异质性远强于供给，县级行政单元已能有效捕捉需求差异的核心信息。

空间自相关分析显示，省域尺度下所有服务的 Moran's I 均不显著或为负值，不具备空间集聚辨识能力。市域尺度起，供给端各项服务开始呈现显著空间正相关，至县域尺度全部服务的 Moran's I 均达到 P 值小于 0.001 的高度显著水平，生境质量为 0.687，碳储量为 0.698，土壤保持为 0.714，产水量高达 0.918，粮食生产为 0.628。县域尺度下各服务均形成可明确辨识的供需匹配热点与冷点区，为空间靶向管控提供了清晰的边界信息。需求端 Moran's I 在县域尺度也均达显著水平，值在 0.334~0.613 之间，空间集聚特征稳定。格网尺度 Moran's I 虽最高，达 0.902~0.970，但受空间邻接效应与海量像元数影响，显著性水平过度膨胀，可比性有限。

驱动因子解释力方面，OPGD 全因子平均 q 值在县域尺度达到管理可操作单元内的最优水平。供给端平均 q 值在市域为 0.514，流域为 0.485，县域为 0.430，格网因样本量优势升至 0.636。县域尺度 q 值虽略低于市域，但其对因子空间分异的刻画精度远优于市域，市域仅 28 个单元，因子离散化后层内方差估计不稳定；县域 175 个单元在统计可靠性与空间精细化之间取得最优平衡。需求端结果与此一致，县域尺度 q 值在行政单元中表现最优。综合三项验证结果，结合 2.3.1 节相关性分析中需求端冲突与协同高度集中于县域尺度的发现，县域尺度在空间异质性强度、空间集聚特征、驱动机制解析力及行政可操作性这 4 个维度均表现最优，确定为本研究供需协调的关键层级与最优管理尺度。



OPGD 驱动因子探测中，省域尺度因样本量不足，故以留白处理，*表示 $P < 0.05$

图 6 最优尺度空间验证

Fig.6 Optimal scale spatial validation

2.3.3 生态系统服务供给与需求空间匹配关系

松花江流域 175 个县域单元的生境质量、碳储量、土壤保持量、产水量与粮食生产量这五项生态系统服务供给与需求空间匹配格局整体呈现非均衡主导、协同匹配不足、服务分异显著的总体特征（图 7）。低-低双低均衡型与高-低供给盈余型县域占比均处于主导地位，高-高协同匹配型县域数量普遍偏少，不同服务类型在空间分布与匹配模式上呈现明显差异，流域生态系统服务供需空间匹配程度整体偏低。

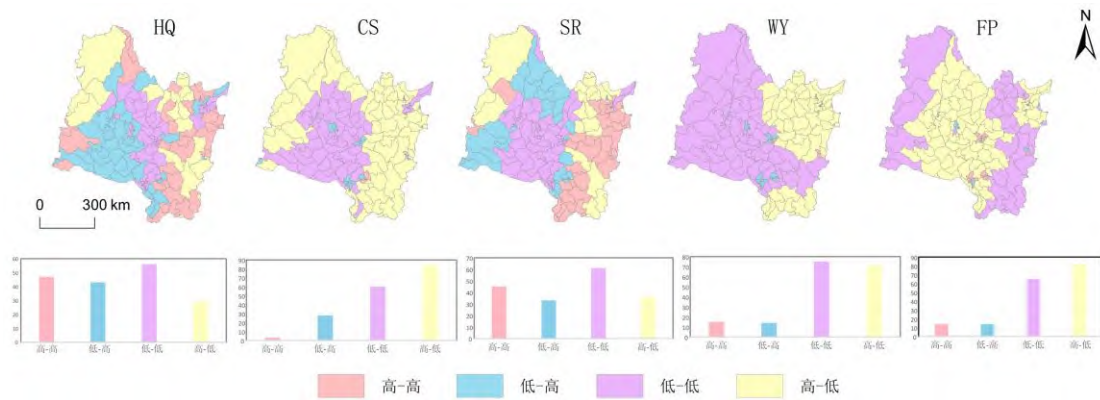
生境质量呈现均衡分散格局。高-高型县域共 47 个，占比为 26.9%，主要集聚于研究区黑河市北部、兴安盟西部及长白山余脉，生境优质但人类活动密集。低-高型县域共 43 个，占比为 24.6%，集中于哈大齐工业走廊及松嫩平原农业核心区，生境退化与高强度人类需求形成显著生态赤字。低-低型县域共 56 个，占比为 32.0%，广泛分布于松嫩平原东部，如齐齐哈尔市、绥化市与长春市一带，自然本底薄弱。高-低型县域共 29 个，占比为 16.6%，分布于研究区西北部大兴安岭及小兴安岭、张广才岭等边缘山地林区，生境供给充裕但人类利用强度低。

碳储量呈现全域盈余、城市点状赤字格局，碳汇功能突出。高-高型县域仅 3 个，占比为 1.7%，极为罕见，位于吉林市与牡丹江市森林与城市交界带，碳代谢强烈。低-高型县域共 28 个，占比为 16.0%，呈点状镶嵌于哈尔滨市、大庆市与长春市等城市群核心区，工业与城镇碳排放需求高而周边碳汇供给不足。低-低型县域共 60 个，占比为 34.3%，集中于松嫩平原耕地核心区，植被覆盖差且碳排放需求低。高-低型县域共 84 个，占比为 48.0%，呈全域性主导，覆盖中上游山区林区，森林湿地碳汇供给充裕而人类碳排放需求低，构成东北重要碳汇输出功能区。

土壤保持量呈现平原主导、山地分散格局，侵蚀风险与保持能力空间错位显著。高-高型县域共 45 个，占比为 25.7%，主要分布于东部长白山山地丘陵区及流域边缘低山丘陵带，地形起伏较大且降水集中，土壤侵蚀风险与保持能力双高。低-高型县域共 33 个，占比为 18.9%，散布于山地向平原过渡的丘陵岗地区，地形有一定起伏但植被覆盖较差或人类扰动强烈，侵蚀风险较高而保持能力不足。低-低型县域共 61 个，占比为 34.9%，大面积主导分布于松嫩平原核心区 and 三江平原西部，地势平坦，自然侵蚀风险低且保持需求弱。高-低型县域共 36 个，占比为 20.6%，散布于哈尔滨市南部、延边朝鲜族自治州、大兴安岭与小兴安岭等中上游山地林区，地形起伏但植被覆盖良好，侵蚀风险低且自然保持能力强。

产水量呈现气候控制、东西两极格局，水资源盈余与贫乏并存。高-高型县域共 15 个，占比为 8.6%，呈点状分布于主要城市节点及周边，如哈尔滨市与牡丹江市，产水能力强但城镇需水量高。低-高型县域共 14 个，占比为 8.0%，零星散布于主要城市人口聚集区，如哈尔滨市、长春市与吉林市等，水资源短缺风险显著。低-低型县域共 75 个，占比为 42.9%，大面积主导分布于研究区西北部、松嫩平原西部、长春、吉林与延边等中部丘陵岗地区，产水与需水双低。高-低型县域共 71 个，占比为 40.6%，集中于长白山脉东麓，如延边朝鲜族自治州与白山市、小兴安岭与三江平原区域，降水丰沛蒸散发低，水资源盈余特征明显。

粮食生产供需匹配呈现平原供给主导、供需空间错位显著的格局。高-高型县域共 14 个，占比为 8.0%，零散分布于省会城市主城区，如哈尔滨市松北区、平房区，长春市绿园区、二道区，吉林市昌邑区、船营区，以及佳木斯市东风区、前进区和牡丹江市西安区。低-高型县域共 14 个，占比为 8.0%，集中镶嵌于城市核心城区与资源型城镇，如哈尔滨市南岗区，齐齐哈尔市龙沙区、建华区，大庆市萨尔图区、龙凤区，鹤岗市兴山区、工农区、南山区，双鸭山市尖山区及七台河市桃山区等，人口密度高但农地资源稀缺，粮食供需矛盾突出。低-低型县域共 65 个，占比为 37.1%，连片分布于大小兴安岭林区、长白山林区、呼伦贝尔草原及科尔沁沙地边缘，耕地匮乏且人口稀疏，粮食产消双低。高-低型县域共 82 个，占比为 46.9%，呈全域性主导，连片覆盖松嫩平原黑土农业核心区，如五常市、榆树市、肇东市等，和三江平原商品粮基地，如富锦市、同江市和桦川县等，粮食供给充裕而本地消费有限，构成流域粮食输出的核心功能区。



柱状图的纵坐标表示对应类型所包含的县域数量

图 7 松花江流域生态系统服务四象限空间匹配

Fig.7 Four-quadrant spatial matching of ecosystem services in the Songhua River Basin

2.4 生态系统服务簇时空演变

为揭示松花江流域生态系统服务的空间组合特征及其时间稳定性,本研究采用自组织映射神经网络对 2000 年、2010 年和 2020 年生境质量、碳储量、土壤保持量、产水量和粮食生产这五项服务的供给量进行进行三期分别聚类,并通过跨期匹配统一服务簇类型。服务簇分析能够有效识别不同服务在空间上的协同或权衡模式,弥补单一服务分析的不足。同时,三期结果的对比可反映服务组合格局的演变趋势与稳定程度,为后续驱动机制识别与综合分区提供时间维度上的背景信息。

基于五项生态系统服务的供给量组合,将松花江流域划分为五大供给服务簇(图 8)。服务枯竭簇(C1)四项调节服务均明显偏低,仅 WY 有一定占比,呈紧缩型结构,生态系统服务功能整体处于低水平,是亟需生态修复的区域。粮食生产簇(C2)以 FP 占比突出为显著特征,FP 在聚类结构中占据主导,但 HQ、CS、SR 和 WY 四项服务均明显偏低,呈粮食供给功能突出而生态调节功能全面滞后的格局,连片覆盖松嫩平原和三江平原农业核心区,是流域规模最大的服务簇。生态均衡簇(C3)表现为 HQ、CS、SR 和 WY 这四项调节服务均处于流域最高水平且高度协同,在聚类结构中占比突出且均衡,仅 FP 较低,代表生态系统调节功能全面且协调的核心生态区域。退化风险区(C4)五项服务占比均在流域均值附近徘徊,无突出优势亦无明显短板,呈均质化结构,散布于山地向平原过渡的丘陵岗地区及部分城镇化区域,生态系统服务功能处于中等水平但缺乏稳定支撑,存在向服务枯竭区滑移的退化风险。固碳保育区(C5)以 HQ、CS 和 SR 这三高为显著特征,三者协同增强且占比突出, WY 相对适中, FP 较低,体现生境质量、碳汇与土壤保持功能的紧密耦合关系,主要覆盖大小兴安岭及长白山外围林区,构成流域生态屏障的主体。值得注意的是,生态均衡区 FP 在五簇中最低,同时,粮食生产簇中 HQ、CS、SR 和 WY 这四项服务均低于流域均值,表明流域粮食生产功能与生态支持和调节功能在空间上呈互补分异格局,两者高值区互不重叠。

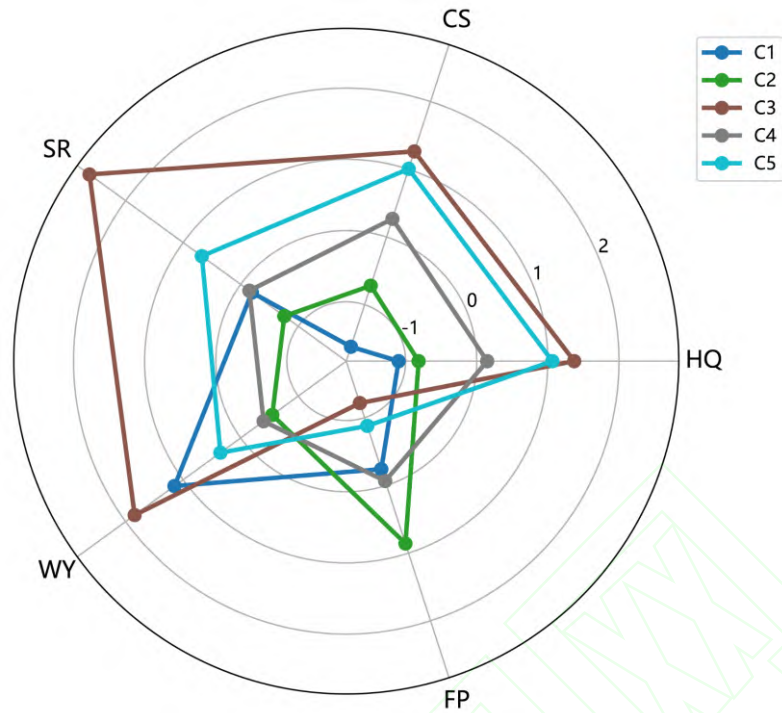


图 8 生态系统服务簇聚类

Fig.8 Clustering of ecosystem service bundles

从 2000~2020 年的时空演变来看（图 9），松花江流域生态系统服务簇格局整体保持稳定，未发生剧烈的空间重构，但呈现局部优化与功能分化特征。2000 年流域以粮食生产区和固碳保育区为主导，生态均衡区集中分布于长白山林区，退化风险区呈带状穿插于山地向平原过渡的丘陵岗地区及农牧交错带，服务枯竭区集中镶嵌于鹤岗市、双鸭山市与七台河市等煤矿城市及哈尔滨市部分核心城区，整体呈现外围山区保育、中部丘陵过渡、平原粮食生产主导和矿城核心枯竭的空间分异格局。2010~2020 年间，生态均衡区在长白山林区缩减，服务枯竭区呈渐进增长态势，退化风险区先升后降，粮食生产区和固碳保育区空间范围保持高度延续性。整体而言，各服务簇的空间分布格局具有较强延续性，流域外围山区持续发挥固碳保育与生态均衡功能，中南部平原长期维持粮食生产主导地位，煤矿城市与部分都市核心区的服务枯竭状态未见根本改善，空间边界未发生显著迁移。生态均衡区规模最小，空间位置三期漂移显著，2000 年集中于延边及长白山西麓，2010 年向西南收缩，2020 年北移至小兴安岭林区，生态均衡状态缺乏长期空间锚定性。服务枯竭区的渐进增长暗示资源型城市的生态衰退具有持续性，功能恢复面临结构性障碍。退化风险区虽先升后降，但 2010 年的阶段性扩张表明丘陵岗地过渡带及农牧交错区的生态功能具有不稳定性，在外部扰动下存在整体下滑风险。综合来看，整体生态安全格局的稳定性仍面临挑战，需通过长期生态建设逐步改善核心区的生态服务功能。

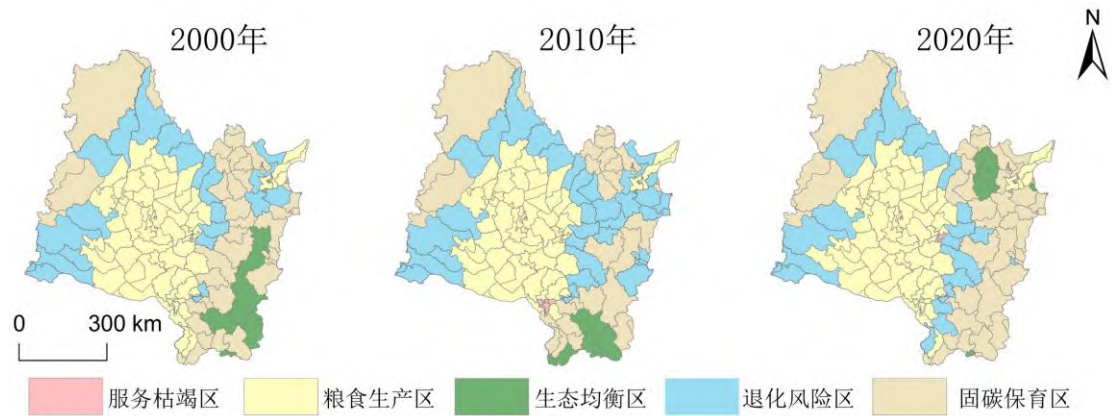


图 9 松花江流域生态系统服务簇空间分布

Fig.9 Spatial distribution of ecosystem service bundles in the Songhua River Basin

2.5 OPGD 主导因子识别与交互探测

本研究采用最优参数地理探测器（OPGD）方法，识别影响松花江流域生态系统服务供需匹配的关键驱动因子。以 2020 年县域尺度的生境质量、碳储量、土壤保持量、产水量和粮食生产量供需比（SDI）、为因变量，选取自然环境与人类活动两类共 8 个潜在驱动因子作为自变量（表 4），分别计算各因子对 SDI 空间分异的解释力（ q 值），并自动优化离散参数以降低主观分类偏差。

表 4 影响因素
Table 4 Influencing factors

影响因素	具体指标	指标名称
自然因素	年均降水量	PRE
	年平均气温	TMP
	高程	DEM
	坡度	SLOPE
	植被归一化指数	NDVI
人类活动因素	人均生产总值	GDP
	人口密度	POP
	夜间灯光指数	NLI

基于 OPGD 方法的因子探测结果显示（图 10），不同服务类型的主导驱动因子及其排序存在显著差异。生境质量供需匹配主要受自然与人类活动因子共同控制，前三因子依次为 NDVI、NLI 和 POP， q 值分别为 0.804、0.649 和 0.585，植被覆盖占据绝对主导。碳储量供需匹配呈强烈的人类活动主导特征，前三因子 POP、NLI 和 GDP 的 q 值分别高达 0.899、0.833 和 0.808，自然因子中仅 NDVI 有中等贡献， q 值为 0.664，其余均在 0.26 以下。土壤保持量呈自然因素主导模式，前三因子为 PRE、SLOPE 和 DEM， q 值分别为 0.532、0.498 和 0.397，降水与地形的耦合作用构成土壤侵蚀与保持空间分异的基础格局。产水量供需匹配的人类活动依赖性最为突出，前三因子 POP、NLI 和 GDP， q 值分别为 0.880、0.840 和 0.835，高度集中且解释力远超自然因子。粮食生产供需匹配的驱动结构异于前四项服务，前三因子 SLOPE、NLI 和 NDVI 的 q 值分别为 0.508、0.500 和 0.497，解释力较为均衡，无单一因子形成绝对优势，自然地形条件与人类活动强度共同塑造粮食供需的空间格局。

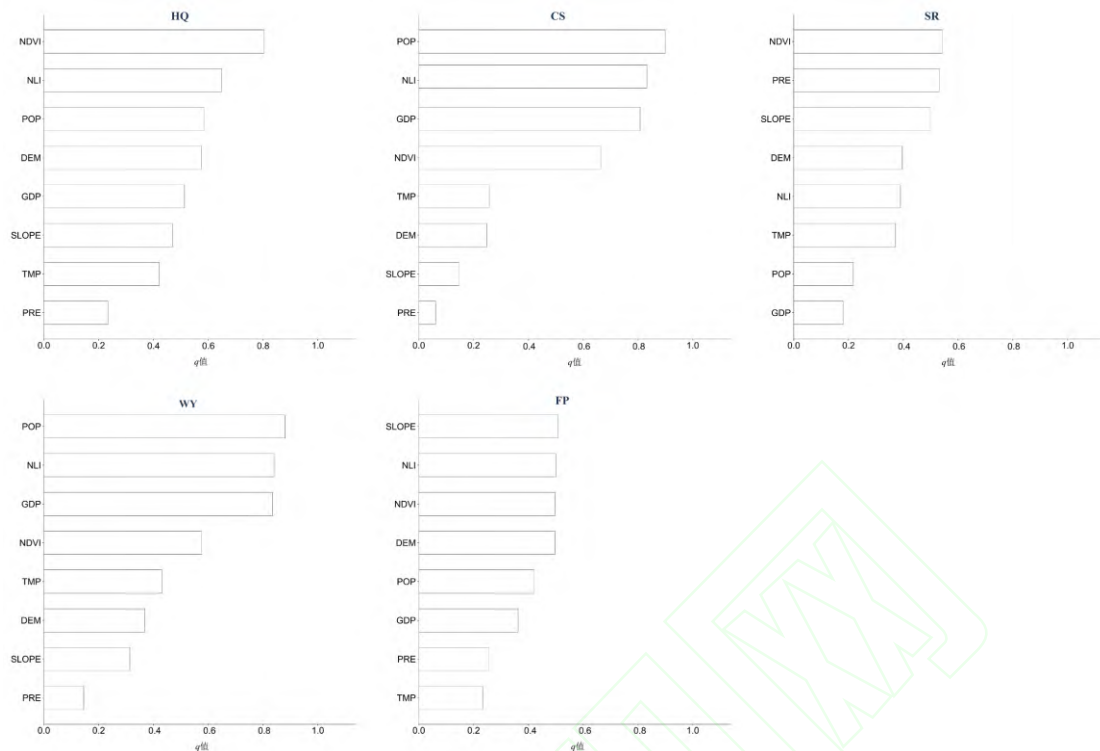


图 10 驱动因子的解释力 (q)

Fig.10 Explanatory power (q) of driving factors

为进一步识别驱动因子之间的协同或拮抗效应,对 8 个因子两两交互后的 q 值进行探测 (图 11)。结果表明,绝大多数因子交互呈增强效应,交互后 q 值均大于任一单因子,类型以双因子增强为主。生境质量方面,DEM 与 NDVI 交互后 q 值升至 0.898, NDVI 与 POP 交互后达 0.896, NDVI 与 GDP、NDVI 与 SLOPE 交互亦均在 0.84 以上,植被覆盖与地形、人口、经济的叠加显著放大了对生境质量供需分异的解释力。碳储量方面,NDVI 与 POP 的交互 q 值高达 0.941,为五服务交互之最,POP 与 NLI 交互亦达 0.926,植被覆盖与人口压力的空间叠合构成碳供需失衡的最强驱动力;但值得注意的是,SLOPE 与 NDVI、SLOPE 与 POP、GDP 与 POP 三对交互呈单因子非线性减弱型,表明其交互后信息增量有限。土壤保持方面,PRE 与 POP 交互后 q 值升至 0.828, NDVI 与 POP 交互后达 0.821, TMP 与 NDVI 交互后亦达 0.790,均呈非线性增强,降水、植被与人口密度的跨类型耦合效应超越简单加和关系,是五服务中非线性增强占比最高的服务。产水量方面,PRE 与 POP 交互后 q 值达 0.945, NDVI 与 POP 交互后达 0.937, PRE 与 GDP 交互后亦达 0.926,降水与人口、植被与人口的空间共现对产水供需分异具有最强联合解释力。粮食生产方面,SLOPE 与 NDVI 交互后 q 值跃升至 0.855,远超 SLOPE 和 NDVI 各自单独的解释力,SLOPE 与 POP 交互后达 0.821,地形坡度与植被、人口的协同构成粮食生产供需分异的核心空间驱动力;PRE 与 TMP、PRE 与 GDP、PRE 与 POP 三对交互均呈非线性增强,气候因子与地形、经济、人口的耦合效应对粮食供需格局亦具不可忽视的作用。

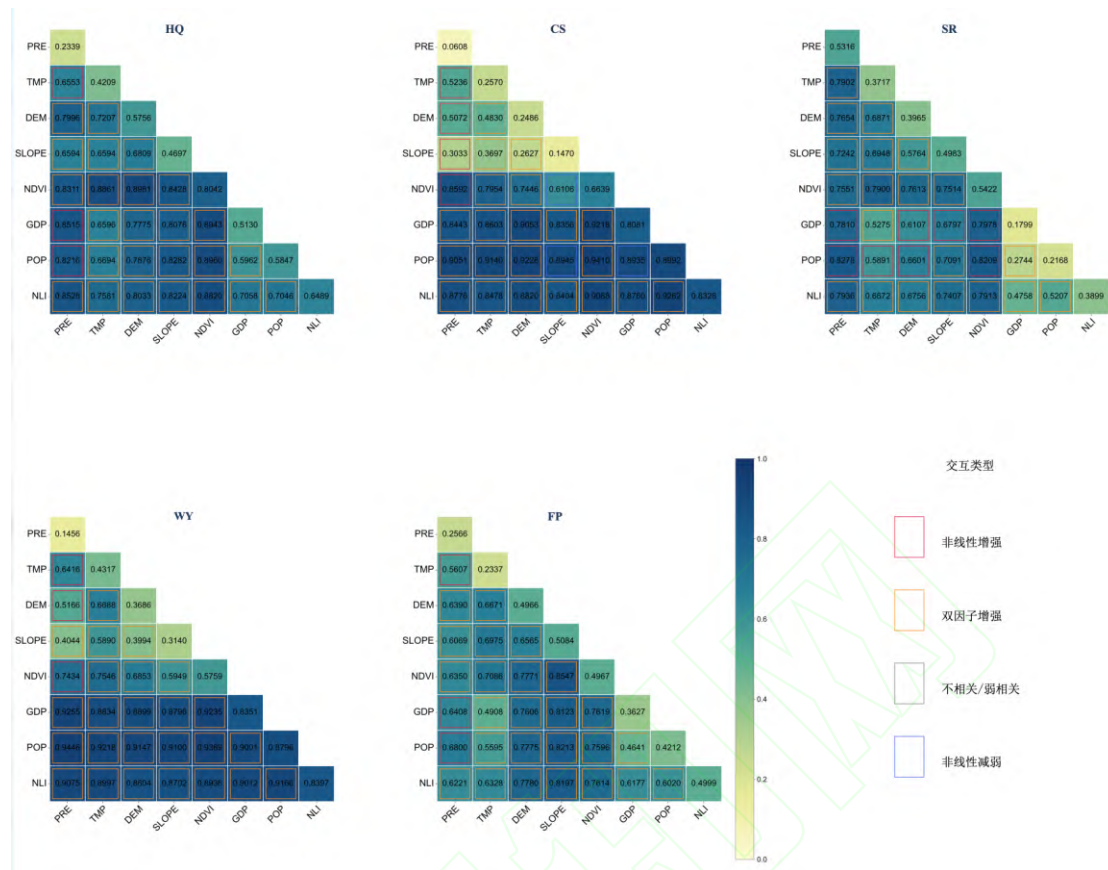


图 11 交互因子探测

Fig.11 Interaction detection of driving factors

2.6 关键驱动因子的非线性响应与阈值识别

基于 OPGD 因子探测与交互探测结果，各生态系统服务前三主导因子已能解释供需匹配空间分异的主要信息。本研究采用广义加性模型逐一检验各服务前三主导因子与供需比之间的非线性关系，进而通过分段回归识别各因子响应曲线的结构断点并量化其生态阈值，GAM 拟合曲线与分段回归结果整合呈现于（图 12）。相较于仅聚焦单一主导因子的做法，纳入前三因子可更全面地刻画自然与人文要素对生态系统服务供需匹配的分段驱动特征，为多目标协同管控提供更丰富的定量依据。

生境质量供需匹配的前三主导因子为 NDVI、NLI 与 POP，三者均通过非线性显著性检验。NDVI 的 GAM 决定系数 R^2 达 0.823，较线性模型的 0.758 显著提升， ΔAIC 为 -47.2，非线性改善幅度居三项因子之首；NLI 的 GAM R^2 为 0.651，线性模型仅 0.327， ΔAIC 达 -105.3，非线性转换带来的解释力翻倍最为突出；POP 的 GAM R^2 为 0.591，线性模型仅 0.312， ΔAIC 为 -82.5。分段回归共识别 3 个量化阈值。NDVI 阈值约为 0.87，低于该值时供需匹配随植被覆盖增加而缓慢改善，跨越阈值后增益效应显著放大，表明高覆盖植被是生境质量供需由赤字转为盈余的关键临界条件。NLI 阈值约为 0.50，阈前供需比随夜间灯光强度增加而急剧下降，阈后退化速率大幅趋缓，反映出低强度城镇化阶段生境质量即已遭受显著损害。POP 阈值约为 68 人·km⁻²，阈前供需比随人口增加快速下降，均值由盈余跌落至近均衡水平；阈后退化速率大幅趋缓且趋于平稳，表明生境质量供需关系的损害在人口集聚初期即已集中释放，此后维持在微弱赤字状态难有反弹。

碳储量供需匹配的前三主导因子为 POP、NLI 与 GDP，均为人类活动强度指标，非线性驱动特征极为突出。POP 的 GAM R^2 高达 0.924，在全部 15 对因子-服务组合中居首，线性模型仅 0.708， ΔAIC 为 -229.0；GDP 的 GAM R^2 为 0.853，线性模型 0.553， ΔAIC 为 -189.8；

NLI 的 GAM R^2 为 0.849, 线性模型 0.739, ΔAIC 为 -91.3。三项人文因子的 GAM 解释力均超过 0.84, 说明碳储量供需匹配的空间分异高度依赖于社会经济要素的非线性约束。分段回归揭示了三者阈值两侧供需状态的剧烈转折。POP 阈值约为 920 人·km², 阈前供需比维持高位, 碳储量呈显著盈余; 跨越阈值后陡降, 供需关系由盈余转为赤字, 单位人口增量的边际损害在阈前尤为突出, 跨越阈值后供需关系由盈余转为赤字。GDP 阈值约为 2125 万元·km², 阈前碳储量供需比维持高位盈余, 阈后转入微弱赤字; NLI 阈值约为 3.25, 响应模式与 GDP 一致。流域内越过该 GDP 临界值的县域仅 27 个, 碳储量供需关系对经济密度的响应阈值较高, 但跨越该临界后供需状态由盈余翻转为赤字。

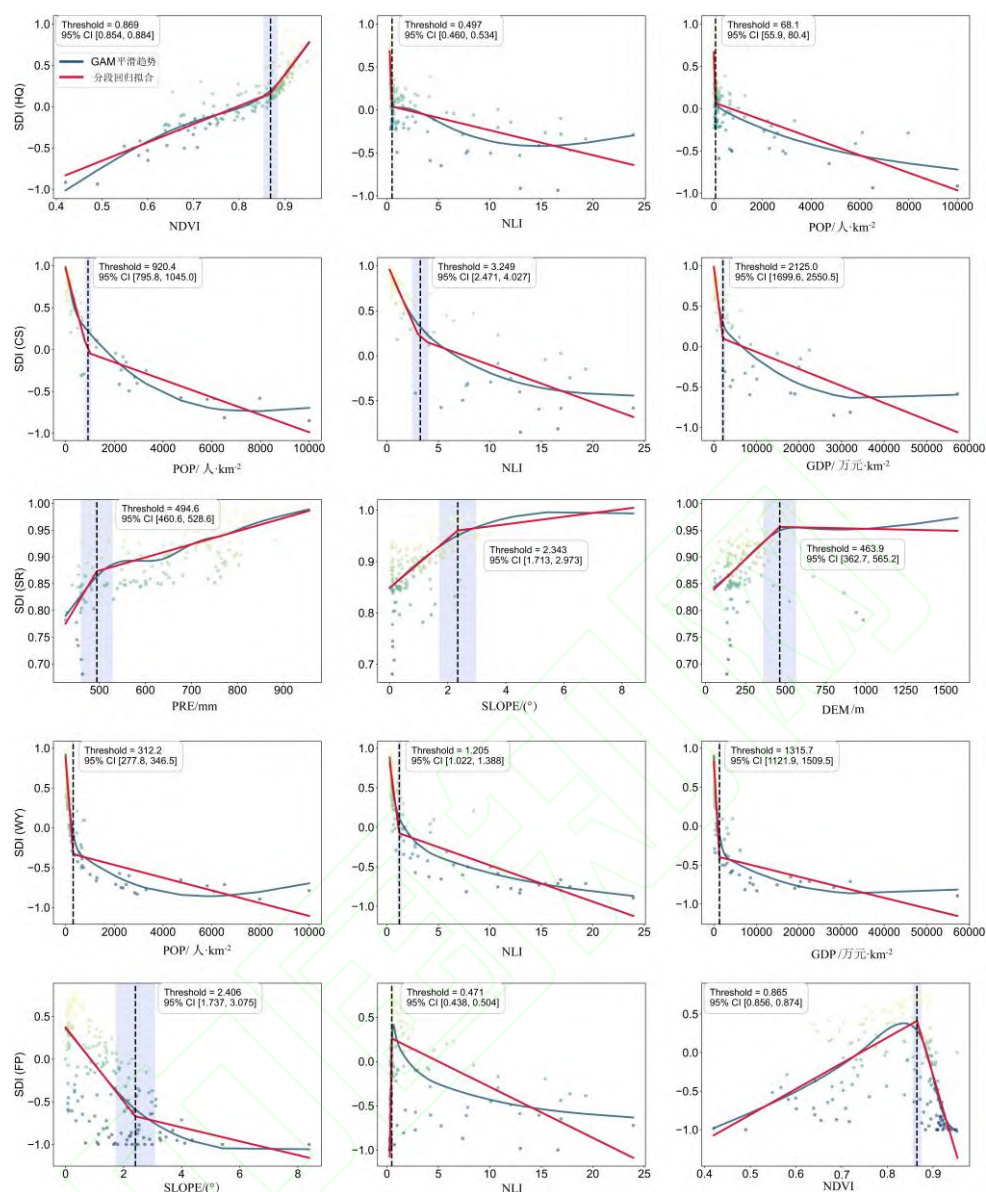
土壤保持量供需匹配的前三主导因子为 PRE、SLOPE 与 DEM, 均属自然地理要素, 非线性特征相对温和。PRE 的 GAM R^2 为 0.524, 较线性模型 0.466 提升有限, ΔAIC 仅 -10.2, 为全部因子中最小; SLOPE 的 GAM R^2 为 0.493, 线性模型 0.426, ΔAIC 为 -18.0; DEM 的 GAM R^2 为 0.375, 线性模型 0.250, ΔAIC 为 -26.1。分段回归显示三者均呈阈前正向改善、阈后趋于饱和的渐近模式。PRE 阈值约为 495 mm, 阈前供需比随降水增加快速提升, 阈后进入效应饱和平台, 阈值两侧均值均为正值, 表明降水对土壤保持的增益在约 495 mm 处基本释放完毕。SLOPE 阈值约为 2.34°, 阈前供需比对坡度变化响应灵敏, 阈后边际效应大幅收窄, 说明微坡地带即已实现土壤保持功能的主体增益。DEM 阈值约为 464 m, 阈前 SDI 随高程缓升, 阈后趋于平稳, 在三项因子中对 SR 供需匹配的独立解释份额最小, 但其断点在垂直梯度上仍具统计显著的结构切换意义。

产水量供需匹配的前三主导因子为 POP、NLI 与 GDP, 非线性驱动之剧烈为五类服务之最。POP 的 GAM R^2 高达 0.911, 线性模型仅 0.441, ΔAIC 达 -315.1, 绝对值在所有因子中居首, 非线性跃迁特征极为突出; GDP 的 GAM R^2 为 0.849, 线性模型仅 0.384, ΔAIC 为 -239.6; NLI 的 GAM R^2 为 0.855, 线性模型 0.592, ΔAIC 为 -173.0。三项人文因子的 GAM 解释力均在 0.85 附近, 且线性模型与 GAM 模型之间的悬殊差距反映出产水量供需匹配对人类活动强度的强非线性响应。分段回归表明三项阈值均对应供需状态的翻转式变化, 且人口密度的敏感性远高于碳储量。POP 阈值约为 312 人·km², 阈前供需比随人口密度增加快速下降, 阈后供需状态由盈余转入赤字。GDP 阈值约为 1316 万元·km², 阈前阈后供需状态方向与 POP 一致。NLI 阈值约为 1.21, 阈前供需比随城镇化快速衰减, 阈后退化速率大幅趋缓, 与碳储量的 NLI 阈值模式相似。综合来看, 产水量的三项人文因子阈值均对应供需状态由正转负的结构翻转。

粮食生产供需匹配的前三主导因子为 SLOPE、NLI 与 NDVI, 驱动模式与其他服务差异显著。SLOPE 的 GAM R^2 为 0.496, 较线性模型 0.439 小幅提升, ΔAIC 为 -15.3; NLI 的 GAM R^2 为 0.524, 线性模型仅 0.036, ΔAIC 达 -113.6; NDVI 的 GAM R^2 为 0.526, 线性模型仅 0.001, ΔAIC 达 -119.2。NDVI 与 NLI 的线性 R^2 均低于 0.04, 其与粮食生产供需匹配的关联完全以非线性形式存在。分段回归揭示了三种差异化的阈值响应模式。SLOPE 阈值约为 2.41°, SLOPE 阈值约为 2.41°, 阈前供需比已随坡度增加快速衰减, 阈后降幅趋缓但供需比已处于深度赤字, 表明地形对粮食生产的约束在平缓坡面阶段即已高度显现, 越过该临界后恶化空间收窄。NLI 阈值约为 0.47, 阈前供需比快速上升, 越过阈值后转为缓慢下行, 呈先升后降的倒 V 型态势。NDVI 阈值约为 0.865, 阈前供需比随植被覆盖增加缓慢上升, 跨越阈值后供需比转负且持续下行, 植被覆盖超过该临界后粮食生产供需关系趋于恶化。

综合五类服务的阈值分析, 生态系统服务供需匹配的驱动-响应模式可归纳为三种类型: 一是阈值后增益放大型, 以 HQ-NDVI 为典型, 跨越阈值后生态效益加速释放, 为生态修复的目标设定提供了量化锚点; 二是低强度即损型, 以 CS 与 WY 的人文因子及 HQ-NLI 为代表, 生态损害在低水平人类活动阶段即已集中发生, 凸显前置管控的紧迫性; 三是饱和平台型, 以土壤保持的自然因子为主, 阈值后边际效益递减, 指示生态投入的合理边界。3 种类

型的差异化阈值共同构成了松花江流域生态系统服务供需调控的多目标量化基准。



深蓝色线条表示 GAM 平滑趋势，红色线条表示分段回归拟合，Threshold 表示分段回归模型中的结构性断点，黑色虚线表示识别出的突变阈值，浅蓝色阴影表示该阈值的 95% 置信区间，纵坐标为生态系统服务供需匹配系数

图 12 GAM 非线性检验与阈值识别

Fig.12 GAM nonlinearity test and threshold identification

2.7 综合生态管理分区

基于上述阈值探测与驱动机制分析，本研究进一步融合五项生态系统服务的供需比、四象限供需匹配类型以及各服务是否突破安全阈值的约束状态，构建多维输入指标体系。采用自组织映射神经网络对松花江流域 175 个县域单元进行无监督聚类，经层次聚类与轮廓系数验证，最终划分为 4 类综合生态管理分区。

图 13 呈现了 SOM 神经网络对生态系统服务供需关系的多维聚类结果。该模型以阈值约束状态、四象限供需匹配类型及 SDI 供需比率为独立输入变量，通过自组织学习算法挖掘高维数据内在的拓扑结构，最终收敛形成具有明确生态语义的空间聚类中心。以生态盈余输出区为例，HQ、CS、SR 与 WY 四项服务均未突破安全阈值，处于无约束或弱约束状态，

四象限分类以高供给-低需求类型为主导，SDI 值均为正值且处于较高水平，量化印证了显著的生态盈余特征，仅 FP 的 SDI 为负值且阈值约束相对集中，反映出林区粮食供给功能的固有短板。3 类指标的协同耦合，共同指向生态本底优良、供需关系协调的盈余输出模式。反观生态冲突调控区，HQ、CS、WY 与 FP 阈值约束多呈突破状态，四象限落入低供给区间，SDI 值转负或深度为负，揭示人地矛盾尖锐、供需严重错配的冲突格局。生态脆弱修复区与生态功能平衡区则居于上述两极之间，构成从赤字到盈余的过渡梯度。

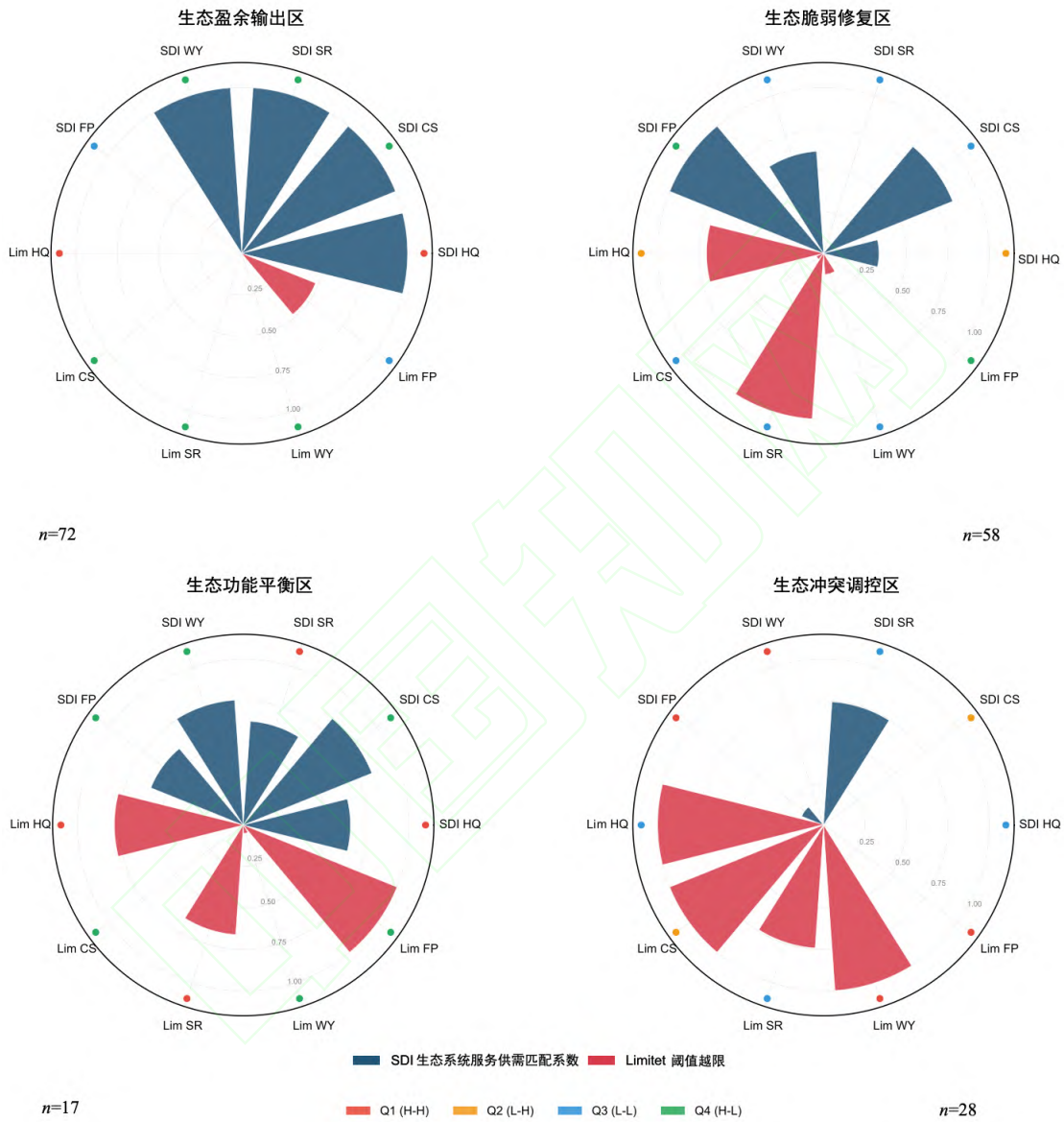


图 13 综合分区聚类特征

Fig.13 Cluster characteristics of comprehensive zoning

图 14 映射了聚类结果的空间表达，流域呈现外围盈余、渐进过渡、内核冲突的圈层梯度格局。生态盈余输出区涵盖 72 个县域，盘踞流域外围的大兴安岭、小兴安岭及长白山脉林区，是维系流域生态安全的核心源地。生态脆弱修复区涵盖 58 个县域，广布于松嫩平原腹地及流域中部农业耕作区，SR 阈值约束平均突破次数居四区之首，HQ 阈值亦已大面积突破，系统抗扰动能力薄弱，属退化预防与生态修复优先域。生态功能平衡区涵盖 17 个县域，呈环状镶嵌于山地与平原的过渡地带，五项服务 SDI 均为正值且分布相对均衡，CS 阈值约束几近零突破，发挥生态缓冲与功能衔接作用。生态冲突调控区涵盖 28 个县域，高度

集聚于哈尔滨、长春、大庆等都市核心区及鹤岗、双鸭山、七台河等煤矿城市建成区，HQ、CS、SR 与 WY 阈值约束突破，为全流域供需矛盾最为尖锐的区域，属建设用地管控与城市生态修复协同干预的关键靶区。4 类分区综合响应了供需比、四象限匹配类型与阈值约束这 3 类指标的叠加效应，为差异化国土空间治理提供了明确的空间靶向。

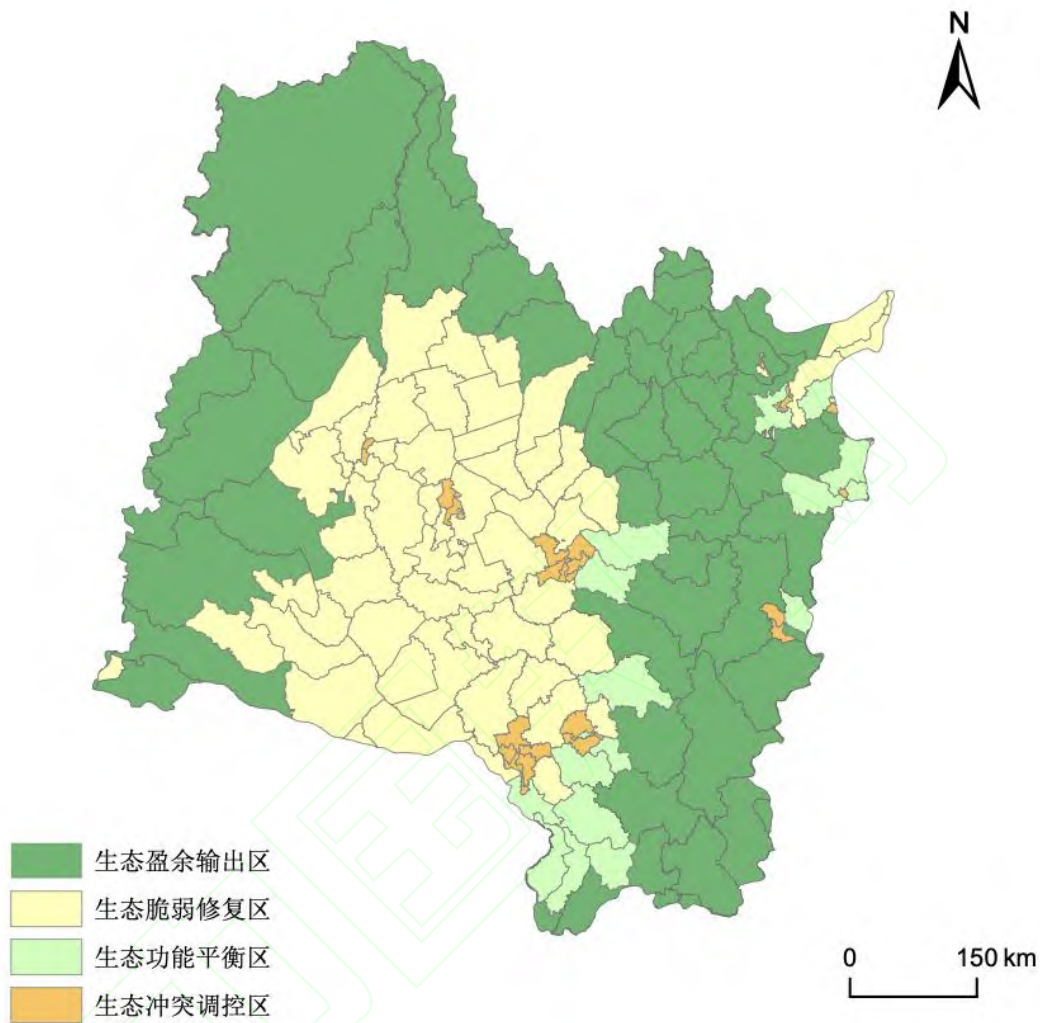


图 14 松花江流域综合生态管理分区

Fig.14 Comprehensive ecological management zoning map of the Songhua River Basin

3 讨论

3.1 最优管理尺度的选择依据

生态系统服务供需匹配具有显著的尺度依赖性，不同空间尺度下呈现的格局与主导因素各不相同。本研究发现，省域尺度下绝大部分服务对未呈现显著相关，空间均质化效应掩盖了服务间的内在关联；随着尺度细化至县域，供给端生境质量、碳储量与土壤保持三者间的协同格局清晰涌现，需求端以人口集聚为核心的资源消费型需求簇亦高度集中于县域尺度。为进一步验证县域尺度的最优性，本文从空间异质性强度、空间集聚特征及驱动因子解释力这 3 个维度进行了定量比较。空间异质性方面，供给端与需求端的变异系数均随尺度细化持续上升，且需求端的递增趋势远强于供给，县域尺度已能有效捕获供需空间差异的核心信息。空间集聚方面，省域尺度不具备集聚辨识能力，自市域起供给端开始呈现显著空间正相关，至县域尺度全部服务均达到高度显著水平，供给端与需求端均形成可明确辨识的热点与冷点

区。驱动因子解释力方面,县域尺度在行政单元中达到最优平衡,市域单元过少导致方差估计不稳定,格网尺度受像元级随机扰动影响而对管理分区的实际信息增量有限。综合相关性涌现特征与三项定量验证,县域兼具空间异质性辨识能力、统计可靠性与行政可操作性,是松花江流域生态系统服务供需协调的关键管理层级。这一结论与对黄河流域研究的结果一致^[50,51],即县域是供需关系涌现与差异化管控的最适空间单元。

3.2 供需匹配的驱动分异与非线性阈值效应

松花江流域生态系统服务供需匹配呈现明显的自然与人文二元驱动格局,但不同服务的驱动结构差异显著。生境质量与土壤保持由自然因子主导,碳储量与产水量则呈强烈的人类活动主导特征,人文因子的解释力远超自然因子。这一分异与流域的自然地理格局和社会经济空间组织密切相关,大小兴安岭及长白山林区植被覆盖度高、降水丰沛,自然条件主导了生境与土壤保持功能;而松嫩平原及城市群人口密集,碳排放与用水需求激增,使得人类活动成为碳储量和产水量供需矛盾的核心驱动力。粮食生产的驱动结构异于前4类服务,前三因子解释力高度均衡,无单一因子形成绝对优势,表明粮食供需匹配受地形约束、城镇化挤压与植被生产力的联合调控。

阈值分析揭示了3类差异化的非线性响应模式。阈后增益放大型以生境质量对NDVI的响应为典型,高植被覆盖区的生态修复边际效益最高,为植被恢复工程的优先级排序提供了量化锚点。低强度即损型以碳储量与产水量的人文因子及生境质量对夜间灯光强度的响应为代表,生态损害在城镇化初期即已集中释放,凸显前置管控的紧迫性。饱和平台型以土壤保持的三项自然因子为主,阈值后边际效应递减,指示了生态投入的合理边界。3类差异化阈值共同构成了流域多目标生态管控的量化基准,也为后续综合分区中阈值约束指标的构建提供了依据。

3.3 综合分区的合理性、创新性与应用价值

研究融合五项服务的供需比、四象限匹配类型及阈值约束状态,采用SOM神经网络将松花江流域划分为4类综合生态管理分区,包括生态盈余输出区、生态功能平衡区、生态脆弱修复区和生态冲突调控区。4类分区在空间上呈现外围输出、中部缓冲与内核管控的梯度格局,各分区在SDI数值、四象限类型及阈值突破状态上均表现出显著差异性与内部一致性,验证了聚类结果的生态学合理性。与东江流域^[52]、浙江^[11]及瓯江山水工程^[53]等SOM分区研究相比,本研究的创新在于将阈值二值变量作为独立输入指标,使分区结果直接承载了生态红线的量化信息。4类分区的划定系统回应了供需格局、服务关系及驱动机制的核心发现,为差异化国土空间治理提供了明确的空间靶向。例如,生态盈余输出区应作为流域生态屏障严格保护,生态冲突调控区需重点实施人口密度调控与城市生态修复。

3.4 研究局限性与未来展望

第一,模型参数与需求核算存在不确定性。InVEST模型参数及需求核算基于文献与统计数据间接估算,缺乏大范围实地采样验证。生境质量需求以生境退化度替代,二者概念内涵存在差异,退化度表征生境所受压力,其与修复需求之间的等价性尚需进一步论证。该简化方法在河北与京津冀区域已有应用,如田文涛^[15]等直接采用生境退化度评估河北省生境质量需求量;王雅琳^[54]等以生境质量下降表征京津冀区域生境质量需求量。产水量与碳储量需求核算采用“人均单位指标×人口密度”的空间化方法,这是生态系统服务供需研究中的常见做法。例如,安志英^[9]等针对东北地区的研究、Yin^[12]等对黄河流域水-能源-粮食纽带带的研究、邱鹏^[13]等对黄河流域河南段的研究均采用相同逻辑。该方法在揭示宏观供需格局上具有合理性,但对农业与工业需求的刻画仍存在简化。未来研究可引入高分辨率分部门碳排放网格数据及耕地面积、夜间灯光等多源权重,以进一步提升需求核算精度。

第二,未考虑生态系统服务的空间流动效应。碳汇功能具有全球受益属性,产水量服务通过河网向下游输送,县域尺度SDI仅反映行政单元内的供需账面平衡,可能低估上游供

给对下游的惠益或高估本地盈余的可用性。未来研究可引入生态系统服务流模型,将县域供需匹配拓展至供给区与受益区的空间流动框架;此外,可探索将管理单元进一步对接至乡镇级行政尺度,提升生态补偿与修复政策的落地精度。

第三,阈值识别的时间稳定性不足。上述阈值是基于2020年单一截面数据识别得出的,反映的是当前土地利用、气候条件与社会经济格局下的供需响应临界点。然而,流域在过去二十年间经历了显著的降水年际波动、城镇化加速与农业种植结构调整,同一因子在不同时期的阈值位置可能存在漂移。因此,单一年份识别的阈值能否直接作为长期生态管控红线,尚需多期数据的交叉验证。未来研究可从以下方面深化,一是基于2000年、2010年、2020年三期截面数据分别识别阈值,检验阈值位置的时间稳定性;二是耦合SSP-RCP气候与土地利用情景,开展多情景下供需匹配与阈值响应的预测模拟,为生态红线的动态调整提供科学依据。

第四,碳储量与产水量人口密度阈值差异的解释。两者阈值相差近三倍,与两类服务对人类活动的响应路径差异有关。受限于分部门碳排放与分行业用水空间化数据的可获得性,上述解释尚需独立验证。未来研究应结合多源部门级环境统计资料予以进一步证实。

第五,多因子交互阈值效应的探讨尚不充分。本研究虽将阈值识别对象扩展至前三主导因子,获取了15组单因子阈值,但未能进一步揭示双因子或多因子协同作用下的交互阈值效应。生态系统服务供需匹配往往受多因子联合驱动,单因子阈值难以完全反映因子间非线性耦合引发的突变点。未来研究可引入机器学习方法(如随机森林、XGBoost-SHAP)或约束线法,系统挖掘驱动因子之间的交互阈值区间,以更全面地揭示复杂生态系统的临界响应机制。

4 结论

(1) 松花江流域生态系统服务供需呈非均衡匹配格局。粮食生产供需改善最显著,盈余空间充沛;碳储量与产水量供需失衡突出,生境质量与土壤保持盈余收窄。经空间异质性、空间集聚及驱动因子解释力三维定量验证,县域是供需协调的关键管理层级。

(2) 供需匹配以低-低均衡型与高-低盈余型县域为主导,高-高协同型县域稀少。生境质量均衡分散,碳储量全域盈余、城市点状赤字,土壤保持平原主导、山地分散,产水量呈东西双极格局,粮食生产平原供给主导、空间错位显著,整体空间匹配程度偏低。

(3) 五项服务供需匹配均存在显著的非线性阈值效应,但驱动结构与响应模式差异显著。生境质量与土壤保持由自然因子主导,碳储量与产水量由人文因子主导,粮食生产受地形与人类活动联合调控。跨越阈值后供需匹配呈增益放大、持续恶化或趋于饱和等差异化响应。

(4) 综合生态分区呈外围输出、中部缓冲、内核管控的梯度格局,划分为生态盈余输出区、生态功能平衡区、生态脆弱修复区与生态冲突调控区,分别对应生态源地、缓冲带、退化修复及人地矛盾靶区。

参考文献:

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, **25**(1): 3-15.
- [2] Diaz S, Pascual U, Stenseke M, *et al.* Assessing nature's contributions to people[J]. *Science*, 2018, **359**(6373): 270-272.
- [3] 申嘉澍,李双成,梁泽,等.生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(8): 1909-1922.
Shen J S, Li S C, Liang Z, *et al.* Research progress and prospect of ecosystem services supply-demand relationship[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(8): 1909-1922.

- [4] Wu W, Tian S Q, Chen S F, *et al.* Global study maps where nature's services fall short—and why[EB/OL]. EurekaAlert, 2025-05-19.
- [5] Tian S Q, Wu W, Chen S F, *et al.* Global mismatch between ecosystem service supply and demand driven by climate change and human activity[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2025, **6**(6), doi: 10.1016/j.es.2025.100573
- [6] 甘子琪,石淞,傅婷,等.基于 XGBoost-SHAP 的松花江流域三生空间生态风险耦合协调及驱动机制分析[J]. 环境科学, 2026, **47**(8), doi:10.13227/j.hjcx.202506281.
- Gan Z Q, Shi S, Fu T, *et al.* Coupling coordination and driving mechanism analysis of ecological risk in production-living-ecological space of Songhua River Basin based on XGBoost-SHAP[J]. Environmental Science, 2026, **47**(8), doi:10.13227/j.hjcx.202506281.
- [7] 田新民,刘小慧,张超宇,等.黑龙江省老爷岭南部黄喉貂栖息地适宜性评价与廊道构建[J].生态学报,2023,**43**(23):9621-9629.
- Tian X M, Liu X H, Zhang C Y, *et al.* Habitat suitability assessment and corridor construction of yellow-throated marten in southern Laoyeling, Heilongjiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(23): 9621-9629.
- [8] 甘子琪,石淞,陈朝阳,等.基于可解释性机器学习的松花江流域碳储量多情景模拟及驱动因素分析[J].环境科学,环境科学, 2026, **47**(8),doi: 10.13227/j.hjcx.202511214.
- Gan Z Q, Shi S, Chen Z Y, *et al.* Multi-scenario simulation and driving factor analysis of carbon storage in Songhua River Basin based on interpretable machine learning[J]. Environmental Science, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202511214.
- [9] 安志英,孙才志,郝帅.我国东北生态系统服务供需匹配关系——基于水-能源-粮食纽带视角[J].生态学报,2024,**44**(10):4170-4186.
- An Z Y, Sun C Z, Hao S. Supply-demand matching of ecosystem services in Northeast China: from the perspective of water-energy-food nexus[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(10): 4170-4186.
- [10] 康乐乐,阿布都热合曼·哈力克,罗健梅,等.天山北坡城市群生态系统服务供需匹配及其驱动因素[J].环境科学, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202505119.
- Kang L L, Abdirahman·Halik, Luo J M, *et al.* Supply-demand matching and driving factors of ecosystem services in the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains[J]. Environmental Science, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202505119.
- [11] 姚松,李咏华,许吉仁.基于静态与动态生态系统服务供需匹配的生态管理分区——以浙江省为例[J].生态学报,2025,**45**(22):10910-10928.
- Yao S, Li Y H, Xu J R. Ecological management zoning based on static and dynamic ecosystem service supply-demand matching: a case study of Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, **45**(22): 10910-10928.
- [12] Yin D Y, Yu H C, Shi Y Y, *et al.* Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: a perspective of the water-energy-food nexus[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, **384**,doi:10.1016/j.jclepro.2022.135469.
- [13] 邱鹏,翟天林,陈鹏,等.基于供需匹配与关系协调的黄河流域河南段生态系统服务空间管控[J/OL].环境科学, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202510209.
- Qiu P, Zhai T L, Chen P, *et al.* Spatial management of ecosystem services in the Henan section of the Yellow River Basin based on supply-demand matching and relationship coordination[J]. Environmental Science, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202510209.
- [14] 刘艳,林伊琳,赵俊三,等.基于生态系统服务供需比与土地利用强度阈值识别的生态管理分区[J].环境科学, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202504050.

- Liu Y, Lin Y L, Zhao J S, *et al.* Ecological management zoning based on ecosystem service supply-demand ratio and land use intensity threshold identification[J]. *Environmental Science*, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202504050.
- [15] 田文涛,都沁军.河北省生态系统服务供需时空演变与 SSP-RCP 情景预测[J].*环境科学*, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202507256.
- Tian W T, Du Q J. Spatiotemporal evolution and SSP-RCP scenario prediction of ecosystem service supply and demand in Hebei Province[J]. *Environmental Science*, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202507256.
- [16] Lin Y, Xu X, Tan Y, *et al.* Multi-scalar assessment of ecosystem-services supply and demand for establishing ecological management zoning[J]. *Applied Geography*, 2024, **172**: doi:10.1016/j.apgeog.2024.103435.
- [17] 孙才志,于涵,郝帅.辽河流域生态系统服务权衡-协同效应及其驱动因素[J].*生态学报*,2025,**45**(6):2952-2967.
- Sun C Z, Yu H, Hao S. Trade-offs and synergies of ecosystem services and their driving factors in Liaoh River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(6): 2952-2967.
- [18] 万路通,刘小丹,郭汉清,等.首都西部生态涵养区生态系统服务功能权衡/协同的多尺度特征及驱动因素[J].*中国沙漠*,2025,**45**(6):206-219.
- Wan L T, Liu X D, Guo H Q, *et al.* Multi-scale characteristics and driving factors of ecosystem service trade-offs/synergies in the western ecological conservation area of the capital[J]. *Journal of Desert Research*, 2025, **45**(6): 206-219.
- [19] 冀正欣,许月卿,宋佳璇,等.基于最优空间尺度的生态退耕区关键生态系统服务权衡与协同关系[J].*农业工程学报*,2026,**42**(4):369-377.
- Ji Z X, Xu Y Q, Song J X, *et al.* Trade-offs and synergies of key ecosystem services in ecological fallow regions based on optimal spatial scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2026,**42**(4):369-377.
- [20] 祁玉馨,闫逸晨,肖晓民,等.哈尔滨市生态系统服务的相互关系及其潜在影响因素[J].*环境科学*, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202509136.
- Qi Y X, Yan Y C, Xiao X M, *et al.* Interrelationships and potential influencing factors of ecosystem services in Harbin[J/OL]. *Environmental Science*, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202509136.
- [21] Yang M, Wang M, Cao L, *et al.* Land-cover-based approach for exploring ecosystem services supply-demand and spatial non-stationary responses to determinants: case study of the Loess Plateau, China[J]. *Land*, 2025, **14**(9): 1795.
- [22] 王凯平,冯悦,邱陈澜,等.环京津城市群生态系统服务的时空演变与驱动因素[J].*生态学报*,2022,**42**(19):7871-7883.
- Wang K P, Feng Y, Qiu C L, *et al.* Spatiotemporal evolution and driving factors of ecosystem services in the city cluster around Beijing and Tianjin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(19): 7871-7883.
- [23] Wang X, Zhao X, He C, *et al.* An integrated multi-model approach reveals the nonlinear driving mechanisms of the ecosystem services supply-demand balance: towards sustainable ecological management[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2026, **29**, doi:10.1016/j.indic.2025.101058.
- [24] 周昌焰,黄艳春,马月伟,等.滇中城市群生态系统服务对影响因子的非线性响应及生态治理分区[J].*环境科学*, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202509212.
- Zhou C Y, Huang Y C, Ma Y W, *et al.* Nonlinear response of ecosystem services to influencing factors and ecological governance zoning in central Yunnan urban agglomeration[J]. *Environmental Science*, 2026, **47**(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202509212.
- [25] Bai J, Wang X, Tu Y, *et al.* Integration of ecosystem service composite index and driving thresholds for ecological zoning management: a case study of Qinling-Daba Mountain, China[J]. *Journal of Environmental*

- Management, 2025, **384**, doi:10.1016/j.jenvman.2025.125309.
- [26] 温婉琴,王强,陈田田.整合生态系统服务与驱动因素阈值效应的生态安全分区研究——以西南地区为例[J].生态学报,2024,**44**(8):3142-3156.
- Wen W Q, Wang Q, Chen T T. Ecological security zoning based on integrating ecosystem services and threshold effects of driving factors: a case study of Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(8): 3142-3156.
- [27] 张紫怡,全照民,张立亭,等.景观格局对生态系统服务的非线性影响和阈值调控——以福建省生态高效协同区为例[J].生态学报,2024,**44**(21):9535-9551.
- Zhang Z Y, Tong Z M, Zhang L T, *et al.* Nonlinear effects and threshold regulation of landscape pattern on ecosystem services: a case study of ecologically efficient synergy area in Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(21): 9535-9551.
- [28] Wang L J, Gong J W, Ma S, *et al.* Ecosystem service supply-demand and socioecological drivers at different spatial scales in Zhejiang Province, China[J]. Ecological Indicators, 2022, **140**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109058.
- [29] 王悦,于福东,张月,等.基于 PLUS-InVEST 模型的东北黑土区景观格局与碳储量变化多情景模拟[J].生态环境学报,2026,**35**(2):178-189.
- Wang Y, Yu F D, Zhang Y, *et al.* Multi-scenario simulation of landscape pattern and carbon storage changes in the black soil region of Northeast China based on PLUS-InVEST model[J]. Ecology and Environmental Sciences,2026,**35**(2):178-189.
- [30] 张智洋,赵颖慧,甄贞.基于 LUCC 的 1986–2022 年松花江流域陆地生态系统碳储量动态监测[J].植物生态学报,2024,**48**(10):1274-1290.
- Zhang Z Y, Zhao Y H, Zhen Z. Dynamic monitoring of terrestrial ecosystem carbon storage in Songhua River Basin from 1986 to 2022 based on LUCC[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, **48**(10): 1274-1290.
- [31] Renard K G. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation[M]. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, 1997.
- [32] Wu J Y, Huang Y T, Jiang W K. Spatial matching and value transfer assessment of ecosystem services supply and demand in urban agglomerations: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **375**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134081.
- [33] Daneshi A, Brouwer R, Najafinejad A, *et al.* Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST[J]. Journal of Hydrology, 2021, **593**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125621.
- [34] Deng C X, Zhu D M, Nie X Q, *et al.* Precipitation and urban expansion caused jointly the spatiotemporal dislocation between supply and demand of water provision service[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **299**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113660.
- [35] 贾雨凡,王国庆.基于 InVEST 模型的伊洛河流域水源涵养能力评估[J].水土保持学报,2023,**37**(3):101-108.
- Jia Y F, Wang G Q. Assessment of water conservation capacity in Yiluo River Basin based on InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, **37**(3): 101-108.
- [36] 张中浩,张永瑶,胡熠娜,等.基于"水-能源-粮食"纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J].生态学报,2023,**43**(22):9430-9445.
- Zhang Z H, Zhang Y Y, Hu Y N, *et al.* Spatiotemporal distribution of ecosystem service supply-demand relationship based on water-energy-food nexus: a case study of the Yangtze River Delta ecological green integration demonstration area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(22): 9430-9445.

- [37] 刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例[J].地理学报,2019,74(9):1921-1937.
- Liu L C, Liu C F, Wang C, *et al.* Supply-demand matching of ecosystem services in loess hilly region: a case study of Lanzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [38] 田春燕,郑润佳,李舟宇,等.黄河流域陕西段生态系统服务的权衡协同关系及驱动机制分析[J].环境科学, 2026, 47(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202501096.
- Tian C Y, Zheng R J, Li Z Y, *et al.* Trade-offs and synergies of ecosystem services and driving mechanism analysis in Shaanxi section of the Yellow River Basin[J]. *Environmental Science*, 2026, 47(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202501096.
- [39] 覃昭勋,谢润峰,肖玉坤,等.三北地区气候与植被时空变化及相关性分析[J].水土保持通报, 2026, 47(8), doi: 10.13961/j.cnki.stbctb.202603012.
- Qin Z X, Xie S F, Xiao Y K, *et al.* Spatiotemporal changes and correlation analysis of climate and vegetation in the Three-North region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2026, 47(8), doi: 10.13961/j.cnki.stbctb.202603012.
- [40] 王婧煜,赵媛媛,耿君,等.京津风沙源治理工程区生态系统服务供需匹配关系[J].农业工程学报,2025,41(4):279-287.
- Wang J Y, Zhao Y Y, Geng J, *et al.* Supply-demand matching of ecosystem services in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(4): 279-287.
- [41] 赵雪雁,马平易,李文青,等.黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J].地理学报,2021,76(11):2780-2796.
- Zhao X Y, Ma P Y, Li W Q, *et al.* Spatiotemporal changes of supply-demand relationship of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [42] 张慧源,李鹏,龚倪冰,等.黄河"几字弯"生态系统服务簇区划及其影响因素[J].环境科学, 2026, 47(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202510221.
- Zhang H Y, Li P, Gong N B, *et al.* Ecosystem service bundles zoning and influencing factors in the Jiziwan of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2026, 47(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202510221.
- [43] 常耀文,吴迪,李欢,等.基于自组织映射神经网络的淮河流域生态系统服务簇时空变化特征[J].生态学报,2024,44(11):4544-4557.
- Chang Y W, Wu D, Li H, *et al.* Spatiotemporal variation characteristics of ecosystem service bundles in Huaihe River Basin based on self-organizing map neural network[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4544-4557.
- [44] 胡邦红,徐莉莉,焦树林,等.基于 PLUS-InVEST-OPGD 模型的铜仁市土地利用变化及碳储量经济价值估算[J].环境科学, 2026, 47(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202510258.
- Hu B H, Xu L L, Jiao S L, *et al.* Land use change and economic value estimation of carbon storage in Tongren City based on PLUS-InVEST-OPGD model[J]. *Environmental Science*, 2026, 47(8), doi: 10.13227/j.hjcx.202510258.
- [45] 王浚沅,刘玉亭,刘于琪.基于 OPGD 和 MGWR 的建成环境对城市活力的影响及其空间异质性研究——以广州市域为例[J].地理研究,2025,44(12):3304-3321.
- Wang J F, Liu Y T, Liu Y Q. Impact of built environment on urban vitality and its spatial heterogeneity based on OPGD and MGWR: a case study of Guangzhou[J]. *Geographical Research*, 2025, 44(12): 3304-3321.
- [46] Qi H, Li P, He K X, *et al.* Generalized additive model reveals nonlinear trade-offs/synergies between relationships of ecosystem services for mountainous areas of Southwest China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12), doi:10.3390/rs.2022.22733.

- [47] Detmer R A, Ward J E, Hunsicker E M, *et al.* Evaluating the robustness of generalized additive models as a tool for threshold detection in variable environments[J]. *Ecosphere*, 2025, **16**(3), doi:10.1002/ecs.2025.70117.
- [48] Peng J, Tian L, Liu Y, *et al.* Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**,doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.218.
- [49] Yang H, Zou J, Wang C, *et al.* Thresholds for rural public and ecosystem services: integration into rural green space spatial planning for sustainable development[J]. *Land*, 2025, **14**(1),doi:10.3390/land.2025.10113.
- [50] Wang B, Gong J, Kan G B, *et al.* Pathways of driving mechanisms for ecosystem services in the Yellow River Basin: insights from scale prioritization and implications for differentiated ecological management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2026, **402**,doi:10.1016/j.jenvman.2026.129035.
- [51] 刘晶晶,王静,戴建旺,等.黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异[J].*自然资源学报*,2021,**36**(1):148-161.
Liu J J, Wang J, Dai J W, *et al.* Accounting and spatiotemporal variation of ecosystem service supply and demand at county scale in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(1): 148-161.
- [52] 韩念龙,张镇林,高浩嘉,等.基于自组织映射神经网络的东江流域生态服务簇识别与功能分区[J].*生态环境学报*,2026,**35**(2):289-297.
Han N L, Zhang Z L, Gao H J, *et al.* Identification and functional zoning of ecosystem service bundles in Dongjiang River Basin based on self-organizing map neural network[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2026, **35**(2): 289-297.
- [53] 徐彩瑶,许文静,任燕,等.瓯江“山水工程”生态系统服务权衡/协同关系的驱动因素及分区管控[J].*环境科学*, 2026, **47**(8),doi:10.13227/j.hjks.202509086.
Xu C Y, Xu W J, Ren Y, *et al.* Driving factors and zoning management of ecosystem service trade-offs/synergies in the Oujiang "Mountain-Water Project"[J]. *Environmental Science*, 2026, **47**(8),doi:10.13227/j.hjks.202509086.
- [54] 王雅琳,牛明爽,宋波.生境维持服务供给量与需求量研究——以京津冀地区为例[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2021,**57**(2):381-389.
Wang Y L, Niu M S, Song B. Supply and demand of habitat maintenance service: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, **57**(2): 381-389.