

## 基于生态系统服务供需视角的安徽省生态安全格局构建

韩月侠<sup>1,2</sup>, 董斌<sup>1</sup>, 朱若晴<sup>1,2</sup>, 张维栋<sup>1</sup>, 朱培桢<sup>1,2</sup>, 屈建伸<sup>1</sup>, 王昊<sup>1</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学经济管理学院, 合肥 230036)

**摘要:** [目的] 在全球气候变化与人类社会经济活动强度持续增强的双重驱动下, 探索安徽省生态系统服务供需失衡问题, 为区域生态安全建设提供可靠依据。[方法] 选取安徽省作为研究区, 集成 InVEST 模型与热点分析方法, 系统评估安徽省 2003—2023 年产水、生境质量、碳储存及土壤保持 4 项关键服务的供需能力及其综合冷热点分布格局; 并借助电路理论, 构建安徽省生态供需格局。[结果] 1) 2003—2023 年, 产水量呈先减少后上升趋势, 在空间上呈“南多北少”分布; 碳储量呈现持续减少趋势; 生境质量呈“南高北低”且逐年下降的趋势; 土壤保持数量上呈先减少后增大趋势, 总体呈上升趋势。2) 2003—2023 年, 产水服务需求量、固碳服务需求量及生境需求总体呈上升趋势; 安徽省土壤保持服务需求(土壤侵蚀)量总体呈显著下降趋势。3) 安徽省生态系统服务综合供给热点呈“南部及西南部高, 北部低”的特点; 综合需求热点呈西北部高-东南部低的特征; 综合供需比整体呈“南高一北低”的特征。4) 对安徽省生态供需网络进行构建, 共识别供给源地 40 个, 需求源地 36 个; 供给廊道 93 条, 需求廊道 96 条。[结论] 研究从供需关系视角出发, 构建多目标协同的生态供需网络, 形成“南屏北联, 江河流域贯通”的生态供需格局, 以维持生态供需的平衡和生态网络的正常运行, 为区域资源优化配置与可持续生态系统管理提供科学依据, 形成兼具理论价值与实践指导意义的决策支撑体系。

**关键词:** 生态系统服务供需; InVEST 模型; 供需强度; 生态安全格局

中图分类号: X32

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0001-13

## Construction of Ecological Security Pattern in Anhui Province from the Perspective of Ecosystem Service Supply and Demand

HAN Yuexia<sup>1,2</sup>, DONG Bin<sup>1</sup>, ZHU Ruqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Weidong<sup>1</sup>,  
ZHU Peizhen<sup>1,2</sup>, QU Jianshen<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the imbalance in the supply and demand of ecosystem services in Anhui Province and provide a reliable basis for regional ecological security pattern construction under the dual drive of global climate change and the intensifying socio-economic activities. [Methods] Anhui Province was selected as the study area. By integrating the InVEST model with the hotspot analysis method, the supply and demand of four key ecosystem services, i.e., water yield, habitat quality, carbon storage, and soil conservation, in Anhui Province from 2003 to 2023 were systematically evaluated, along with the distribution patterns of comprehensive cold and hot spots. Circuit theory was employed to construct the ecological supply and demand pattern. [Results] 1) From 2003 to 2023, water yield initially decreased and then increased, with a spatial distribution pattern of more yield in the south and less yield in the north. The carbon storage showed a continuous decreasing trend. The habitat quality was higher in the south but lower in the north, showing an annual decline. Soil conservation initially decreased and

收稿日期: 2025-03-25

修回日期: 2025-05-05

录用日期: 2025-05-19

网络首发日期 (www.cnki.net): XXXX-XX-XX

资助项目: 国家自然科学基金项目(32071600, 41571101); 安徽省自然资源科技项目(2022-k-1)

第一作者: 韩月侠(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地资源管理与利用研究。E-mail: 145706994@qq.com

通信作者: 董斌(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事测绘地理信息技术及其生态环境应用研究。E-mail: 18656958075@stu.ahau

http://stbxb.alljournal.com.cn

then increased, with an overall upward trend. 2) From 2003 to 2023, the demand for water yield, carbon sequestration, and habitat services generally showed an upward trend. The demand for soil conservation services (soil erosion control) in Anhui Province demonstrated a significant downward trend overall. 3) The comprehensive supply hotspots of ecosystem services in Anhui Province showed a pattern of high in the south and southwest and low in the north. The comprehensive demand hotspots exhibited a pattern of being high in the northwest and lower in the southeast. The comprehensive supply and demand ratio was higher in the south and low in the north. 4) The ecological supply and demand network in Anhui Province was constructed, identifying 40 supply sources and 36 demand sources, as well as 93 supply corridors and 96 demand corridors. [Conclusion] From the perspective of supply and demand relationship, a multi-objective coordinated ecological supply and demand network is constructed. An ecological supply and demand pattern is formed by building an ecological security barrier in the south and establishing corridors that connect the north, integrated with rivers and basins. This pattern maintains the balance between ecological supply and demand and ensures the normal functioning of the ecological network, providing a scientific basis for the optimal allocation of regional resources and sustainable ecosystem management. These findings help establish a decision-support system with both theoretical value and practical guidance significance.

**Keywords:** supply and demand of ecosystem services; InVEST model; supply and demand intensity; ecological security pattern

**Received:** 2025-03-25

**Revised:** 2025-05-05

**Accepted:** 2025-05-19

**Online**(www.cnki.net): XXXX-XX-XX

生态系统服务是人类福祉和可持续发展的基础<sup>[1]</sup>,是指生态系统构成并维持着人类生存和发展所需的环境条件及其效用,是人类直接或间接从生态系统中所获取的各种惠益<sup>[2-3]</sup>。随着社会快速发展及人类对物质与精神文化需求的增加,强烈的人类活动及工业化进程,引发一系列诸如气候变暖、环境污染、生态系统退化、土地退化、水土流失加剧、生物多样性锐减等生态环境问题,致使生态系统一直供不应求,对生态系统健康维系和人类可持续发展构成重大威胁。生态系统服务供给能力衰减与需求强度扩张引发的供需错配,已成为驱动生态退化的核心机制。因此,对生态系统服务供需进行识别评估,构建生态供需网络,是解决这一问题的有效途径。

20 世纪 90 年代起,生态系统服务供需研究主要集中在概念释义、理论框架构建与完善等方面,较为重视自然资本对可持续发展的重要性研究<sup>[4-5]</sup>。生态系统服务供需研究案例最早出现在美国与欧洲,国内起步较晚<sup>[6]</sup>。20 世纪末,随着生态系统服务的相关研究进入多元化,越来越多的学者开始将其与供给和需求紧密联系起来,探讨它们之间的矛盾和关系。进入 21 世纪以来,学者们<sup>[7-8]</sup>开始对生态系统供需服务理论和实践进行探索,生态系统服务供需量化逐渐成为研究热点。在自然生态系统服务功能退化和人类生态需求激增的背景下,生态问题如供需失衡日益突出,生态网络是平衡区域经济发展和生态

保护的有效方法。以生态系统服务、供需关系之间的相互关系为基础进行的生态安全格局的构建研究,已逐渐引起学术界广泛关注。例如,寿云飞等<sup>[9]</sup>以长三角城市群的区县为研究单元,系统计算各区域的生态系统服务供给与需求并深入剖析其空间分布特征,据此设计生态模型并提出区域发展策略;顾康康等<sup>[10]</sup>基于土地利用和夜间灯光数据,识别安徽省生态系统服务供需关系的空间分异特征,划分各区县的管理类型,并提出各类型的空间发展策略;彭建等<sup>[11]</sup>以省为研究单元,量化供给、表征需求,并基于供需分析结果提出广东省绿色生态网络的分区体系建设。在现有的研究中,生态源的识别主要是通过直接选择大型自然保护区或使用形态空间模式分析和景观连通性分析等方法来进行的<sup>[12]</sup>,且构建的大多是片面的供应网络,缺乏对人类社会对生态系统服务需求的考虑<sup>[13-14]</sup>。因此,构建同时考虑生态环境供需的生态供需网络(ESDN)是生态过程与生态环境耦合,实现人与自然和谐共存的主要途径<sup>[15-17]</sup>。

本研究以安徽省为例,利用不同时期土地利用数据,使用 InVEST 模型,评估安徽省生态系统服务供给及需求能力,分析生态系统服务综合供给及需求冷热空间格局,并借助电路理论,从生态系统服务供需视角出发,构建安徽省生态供需网络,将生态环境的供给与需求同时纳入考量范畴,讨论其生态供需关系的协调性,以促进生态保护与经济社会发展

的协同共进,为快速城市化背景下的生态空间保护和可持续发展规划提供科学参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

安徽省(29°41′~34°38′N, 114°54′~119°37′E)位于中国华东腹地,地处长江与淮河中游交汇区,坐拥长江三角洲核心地带,省域总面积达14.01万km<sup>2</sup>。年平均气温14~17℃,平均日照时间1800~2500h,表现为亚热带季风气候向温带季风气候过渡的典型气候特征。这种独特的地理区位与气候禀赋,共同塑造安徽多样的生态系统与农业景观格局。研究区概况见图1。

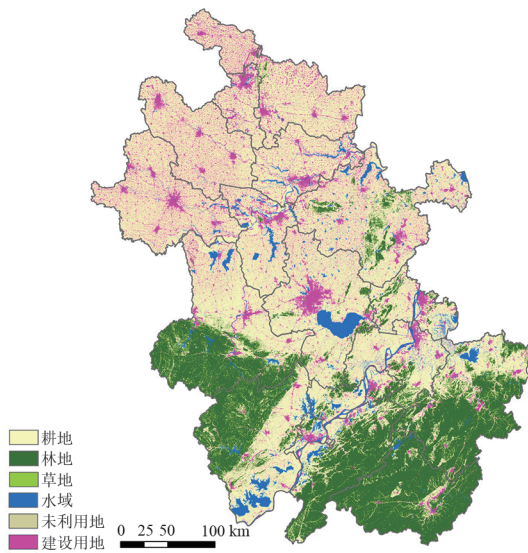


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

### 2.2 数据来源

研究所需数据及来源主要包括:1)2003年、2013年、2023年土地利用栅格数据、气象数据及NDVI数据均来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为1km×1km;2)高程数据及坡度数据来源于美国地质调查局(<https://www.usgs.gov/>)(全球30m空间分辨率)。

### 2.3 研究方法

2.3.1 生态系统服务供给评估 InVEST模型是用于评估生态系统服务功能及其经济价值、支持生态系统管理和决策的模型系统,该模型具有数据需求小、空间分析能力强等方面优势,在国内外生态系统服务评估中应用广泛<sup>[18]</sup>。

对于不同区域的研究,需适当调整模型参数,使得与研究区相适应。本文基于安徽省区域相关研究,参考相关学者所制定的本地化参数基础上进行优化,从而评估安徽省地区产水服务、固碳服务、生

境质量服务、土壤保持服务的供给能力。

#### 1) 产水供给服务

InVEST模型产水模块是通过水量平衡的原理进行计算,以降水量和蒸散发数据的比值作为基础,同时结合土壤最大根系深度、植物有效含水量等要素进行计算得出产水量。计算公式为:

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

式中:Y<sub>xj</sub>为栅格x中的土地类型j的年产水量(mm);AET<sub>xj</sub>为栅格x中土地类型j的年实际蒸散量(mm);P<sub>x</sub>为栅格x的年降水量。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \varpi_x R_{x,j}}{1 + \varpi_x R_{x,j} + \frac{1}{R_{x,j}}} \quad (2)$$

$$\varpi_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} + 1.25 \quad (3)$$

$$R_{x,j} = \frac{k_{x,j} \times ET_o}{P_x} \quad (4)$$

$$AWC_x = \min(\text{MaxSoilDepth}_x, \text{RootDepth}_x) \times \text{PAWC}_x \quad (5)$$

式中:R<sub>x,j</sub>为栅格x中的第j类土地利用类型的干燥度指数,是指潜在蒸散量(ET<sub>o</sub>)与降水量间的比值;k<sub>x,j</sub>为植被的蒸散系数;ϖ<sub>x</sub>为经验参数,表示自然气候下的土壤属性参数;Z为经验常数(季节常数),代表区域降水分布及其他水文地质特征;AWC<sub>x</sub>为土壤有效含水量,mm,由土壤质地和土壤有效深度决定;PAWC<sub>x</sub>为植物利用养分质量分数;SoilDepth<sub>x</sub>为土壤根系埋藏深度。

#### 2) 固碳供给服务

InVEST模型中的Carbon模块原理是基于土地利用类型及各类型土地利用的碳密度计算,包括地上生物量、地下生物量、土壤和死亡的有机物中有机碳质量分数4个部分<sup>[19]</sup>(表1)。计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (6)$$

式中:C<sub>total</sub>为固碳总量,t;C<sub>above</sub>为地上生物碳储量,t;C<sub>below</sub>为地下土壤碳储量,t;C<sub>soil</sub>为土壤有机质碳储量,t;C<sub>dead</sub>为死亡有机物碳储量,t。

#### 3) 生境质量供给服务

InVEST模型中的Habitat Quality模块通过量化生境适宜性指数来表征区域生物多样性维持能力,其核心价值在于揭示生物多样性对生态系统服务供给的支撑作用<sup>[11]</sup>。计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^2} \right) \right] \quad (7)$$



式中： $Q_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中栅格单元 $x$ 的生境质量指数； $D_{xj}$ 为土地利用类型中栅格单元 $x$ 所受胁迫水平； $H_j$ 为土地利用类型 $i$ 的适宜度； $K$ 为半饱和常数，通常取 $D_{xj}$ 的最大值的1/2； $z$ 为归一化常数，一般取模型的默认值。

表 1 不同碳库的平均碳密度

Table 1 Average carbon densities of different carbon pools				
土地利用类型	地上生物量/(t·hm <sup>-2</sup> )	地下生物量/(t·hm <sup>-2</sup> )	土壤有机质/(t·hm <sup>-2</sup> )	死亡有机物/(t·hm <sup>-2</sup> )
耕地	5.44	2.57	123.83	1.24
林地	37.36	15.60	300.70	3.05
草地	8.58	7.24	205.22	0.36
水域	0.93	0.66	82.20	1.23
建设用地	3.29	2.11	78.20	0
未利用地	0.75	0.98	56.50	0

根据 InVEST 模型用户手册和前人研究成果，确定不同威胁源的权重和最大影响距离(表 2、表 3)。

表 2 不同土地利用类型对每种威胁的敏感性

Table 2 Sensitivities of different land-use types to each threat				
土地利用类型	生境适宜度	耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.3	0	0.8	0.4
林地	1.0	0.6	0.4	0.2
草地	1.0	0.8	0.6	0.6
水域	0.7	0.5	0.4	0.2
建设用地	0	0	0	0.1
未利用地	0.6	0.6	0.4	0

表 3 威胁源的权重和最大影响距离

Table 3 Weights and maximum impact distances of threat sources			
威胁因子	最大距离	权重	衰退类型
耕地	0.5	0.5	线性
建设用地	10.0	1.0	指数
未利用地	1.0	0.5	线性

4) 水土保持服务

水土保持采用 InVEST 模型中 Sediment Delivery Ratio 模块评估，通过土地利用数据、高程数据、土壤属性数据、降水数据、植被覆盖因子和水土保持措施因子等数据，以栅格单元为尺度计算出潜在土壤侵蚀量(RKLS)和实际土壤侵蚀量(USLE)，最终得到一定区域的土壤保持量<sup>[20]</sup>。计算公式为：

$$RKLS = R \times K \times LS \tag{8}$$

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \tag{9}$$

$$SD = RKLS - USLE \tag{10}$$

式中：RKLS 为潜在土壤侵蚀量，t/hm<sup>2</sup>；USLE 为实际土壤侵蚀量，t/hm<sup>2</sup>；SD 为土壤保持量，t/hm<sup>2</sup>； $R$ 、 $K$ 、 $LS$ 分别为降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡

长坡度因子； $C$ 、 $P$ 分别为植被覆盖因子和水土保持措施因子(表 4)。

表 4 土壤保持生物物理信息

Table 4 Biophysical information for soil conservation		
土地利用类型	植被覆盖因子( $C$ )	水土保持因子( $P$ )
耕地	0.07	0.29
林地	0.04	1.00
草地	0.03	1.00
水域	0	0
建设用地	0	0
未利用地	1.00	1.00

2.3.2 生态系统服务需求评估 对于生态系统服务需求评估，本文基于相关统计年鉴、水资源公报及社会统计数据开展评估。

1) 产水需求服务

本研究采用人口空间分布数据作为代理变量，通过构建栅格赋值模型，将行政区统计尺度的需水量数据降尺度至景观栅格单元。具体计算方式为：

$$WD = D_{\text{water}} \times P_{\text{pop}} \tag{11}$$

式中：WD 为年需水量，m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>； $D_{\text{water}}$ 为人均用水量，m<sup>3</sup>/人； $P_{\text{pop}}$ 为人口密度，人/hm<sup>2</sup>。

2) 固碳需求服务

固碳服务需求核算体系涵盖化石燃料燃烧、工业制程、交通运输、农业生产、土地利用变化及建筑能耗 6 大碳源类型，本研究基于多源碳汇需求核算框架，采用人均碳排放量与人口空间分布密度的乘积，构建栅格级固碳需求模型。

$$CD = D_{\text{carbon}} \times P_{\text{pop}} \tag{12}$$

式中：CD 为固碳服务需求量，t/hm<sup>2</sup>； $D_{\text{carbon}}$ 为人均碳排放量，t/人； $P_{\text{pop}}$ 为人口密度，人/km<sup>2</sup>。

3) 生境质量服务

借鉴已有研究成果，基于人类活动的影响，结合人口密度和土地开发程度等指标进行计算，以评估生境质量需求服务。其计算公式为：

$$H = a_{i1} \times \lg(a_{i2}) \times \lg(a_{i3}) \tag{13}$$

式中： $H$ 为生境质量需求； $a_{i1}$ 为土地利用开发强度； $a_{i2}$ 为人口密度，体现人类对优质生境的需求程度； $a_{i3}$ 为地均 GDP 数值。

4) 水土保持服务

水土保持服务的需求以区域土壤实际侵蚀量表征，通过通用土壤流失方程计算，公式为：

$$TRX = R \times K \times LS \times C \times P \tag{14}$$

式中：TRX 为水土保持服务的需求量； $R$ 为降水侵蚀力因子； $K$ 为土壤可蚀性因子； $LS$ 为坡长坡度因子； $C$ 为植被覆盖因子； $P$ 为水土保持措施因子。

2.3.3 热点分析 空间冷热点分析是一种用于探测空间数据中显著高低值聚集区域的技术手段，其中



高值聚集区域被称为热点,而低值聚集区域则被称为冷点。空间统计中,常用Getis和Ord所提出的 $G_i^*$ 系数,以探查各类统计数据在空间上分布的高低值聚类位置<sup>[21]</sup>。计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n w_{ij} x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (15)$$

$G_i^*$ 的统计意义可以通过一个标准化的 $Z$ 值来检验,对 $G_i^*$ 进行标准化处理得到的 $Z(G_i^*)$ 为:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{VAR}(G_i^*)}} = \frac{\sum_j w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_j w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_j w_{ij}^2 - (\sum_j w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (16)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_j^n x_j}{n} \quad (17)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_j^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (18)$$

式中: $G_i^*$ 为第 $i$ 个斑块具有统计显著性的 $z$ 评分; $W_{ij}$ 为斑块 $i$ 与斑块 $j$ 的空间权重矩阵; $X_j$ 为斑块 $j$ 的属性值; $\bar{X}$ 为所有属性的平均值; $n$ 为斑块总数。

### 2.3.4 基于生态系统供需视角的生态安全格局构建

#### 1) 生态源地的识别

生态源地作为生态系统服务的重要提供者及生态过程的关键贡献者,是构建生态安全格局不可或缺的基石<sup>[22]</sup>。研究基于生境质量、产水量、土壤保持量及碳储量等多个数据指标,通过结合MSPA(多尺度斑块分析)、面积及生态系统服务重要性评估来识别生态供给及生态需求源地<sup>[23]</sup>。具体而言,将生境质量、产水量、土壤保持量及碳储量等进行归一化处理并借助加权求和,得出安徽省综合生态系统服务供需量,使用GuidosToolbox软件进行MSPA分析,得出其空间形态特征,并根据核心斑块数量及面积占比,选择并提取出面积 $>5 \text{ km}^2$ 的核心区域;在此基础上,使用Conefor2.6软件和Conefor for ArcGIS10.X插件计算dPC(连接重要性指数)值,以定量衡量核心区斑块的景观连通性情况,dPC值较高的区域表明生态连通度较好,能够为物种提供较好的物质与能量的交换。最终,分别选择dPC值 $>0.5$ 的斑块作为生态供给及需求源地。

#### 2) 生态阻力面的构建

生态阻力面被用来描述生物迁移或自然环境中能量和物质的流动所经历的阻碍的大小<sup>[24]</sup>。依据研究区的综合情况及所收集到的各类基础数据,参考前人<sup>[25-26]</sup>的研究成果,分别筛选出自然因子及社会经济因子以构成生态阻力面。其中自然因子包括高程、坡度、土地利用类型及植被覆盖度,社会经济因子主要为GDP。

#### 3) 生态廊道的识别

研究运用Linkage Mapper软件识别生态廊道,借助基于最小成本路径方法计算物种与能量在各个生态源地之间迁徙和扩散所遇到的累计阻力<sup>[27-29]</sup>。研究结合安徽省实际情况对加权成本距离阈值进行调整优化,经多次模拟测试后,最终选择设置成本加权距离阈值为20 km,分别识别生态供给与需求廊道。

**2.3.5 生态网络供需关系评价系统** 本研究基于生态网元素的循环关系和几何特征,运用一种新的生态供需关系协调评价指标体系,该方法考察生态供需强度、生态供需能力和生态供需均衡,以揭示研究区供需关系的动态时空变化<sup>[30-31]</sup>。

生态需求强度(SDI)定义为连接给定来源的生态供给廊道数量与生态需求廊道数量的比值,可以在一定程度上揭示该来源的生态供需匹配程度。计算结果范围为 $(0, 1]$ ,其中值越小,表示生态供需强度越低,与源的生态供需匹配较差。

$$\text{SDI} = \frac{N_s}{N_D} \quad (19)$$

式中:SDI为生态供需强度; $N_s$ 为生态供给廊道数; $N_D$ 为生态需求廊道数。

生态供需能力(SDC)是通过将供给源的面积除以与之相连的需求源的面积来计算的,被用于评价生态供给源的供需能力。计算结果为相对值,其中相对值越高,说明生态供给源的供给能力越强。

$$\text{SDC} = \frac{S_{\text{ESS}}}{S_{\text{EDS}}} \quad (20)$$

式中:SDC为生态供需能力; $S_{\text{ESS}}$ 为生态供给源的面积; $S_{\text{EDS}}$ 为与生态供给源相连的需求源的面积。

生态供需平衡(SDE)基于连接源的生态廊道长度计算,通过廊道长度标准差除以平均长度得出。该指标反映廊道长度的可变性,值越低,表明廊道长度越平衡,对所有连接源的可达性相当;值越高,则表明可达性可变性越大。

$$\text{SDE} = \frac{\sigma_{\text{EC}}}{\mu_{\text{EC}}} \quad (21)$$

式中:SDE为生态供需平衡; $\sigma_{\text{EC}}$ 为廊道长度的标准差; $\mu_{\text{EC}}$ 为廊道的平均长度。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统服务供需能力评估

**3.1.1 生态系统服务供给能力评估结果** 不同类型的生态系统服务的空间分布各异。基于InVEST模型计算得出2003年、2013年、2023年安徽省3期产水供给服务、固碳供给服务、生境质量供给服务及土壤保持供给服务结果见表5,并分别使用自然断裂法进行分级(图2)。

表 5 2003—2023 年安徽省各生态系统供给服务总量  
Table 5 Total amounts of ecosystem service supply in Anhui Province from 2003 to 2023

年份	产水量/(10 <sup>10</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	固碳量/(10 <sup>8</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	生境质量(10 <sup>6</sup> )	土壤保持/(10 <sup>11</sup> t·hm <sup>-2</sup> )
2003	8.08	2.31	5.46	2.88
2013	6.15	1.98	5.45	1.78
2023	8.44	1.96	5.24	1.92

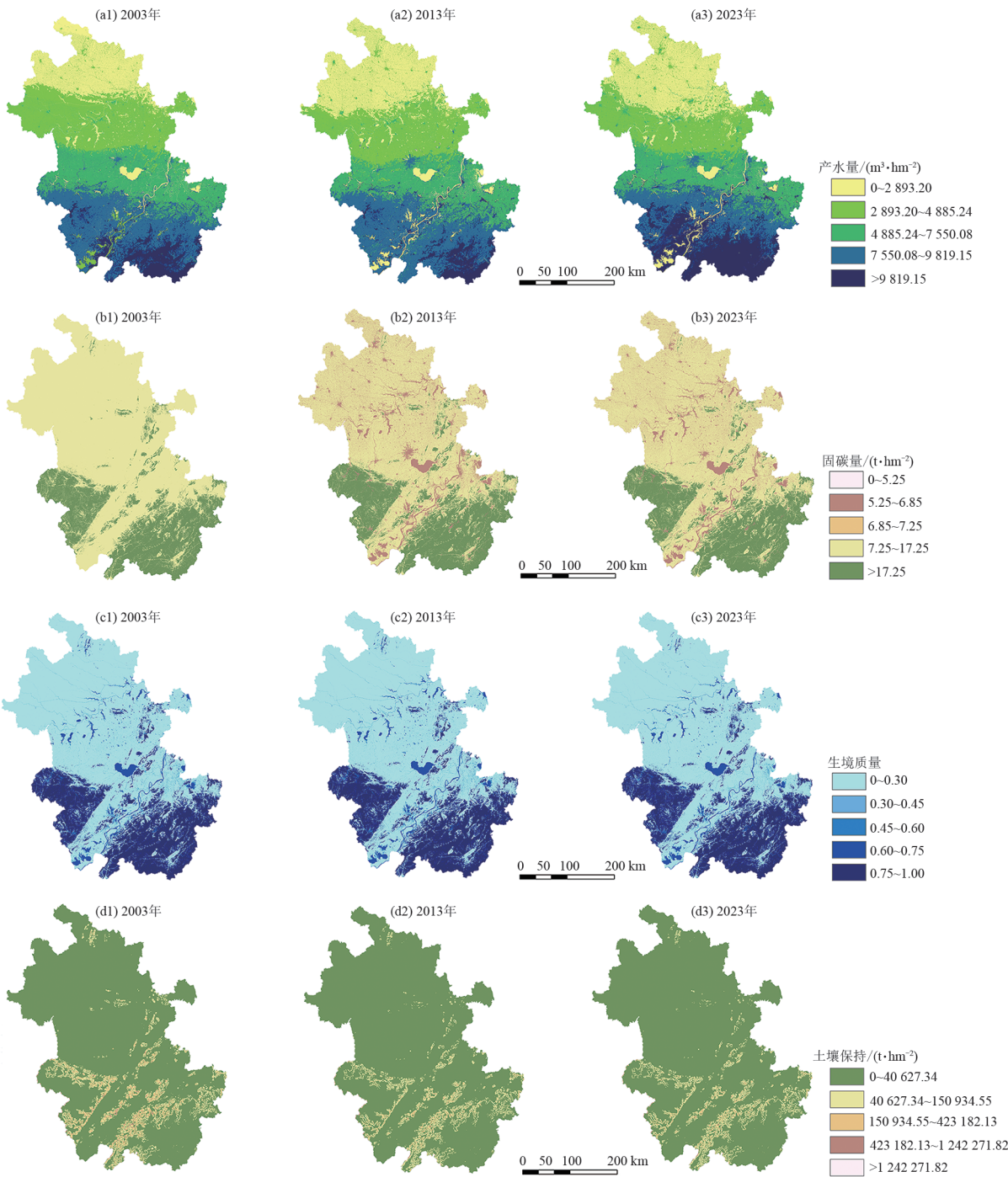


图 2 2003—2023 年安徽省生态系统服务供给空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of ecosystem service supply in Anhui Province from 2003 to 2023

由表 5 可知,2003—2023 年安徽省产水总量分别为  $8.08 \times 10^{10}$ 、 $6.15 \times 10^{10}$ 、 $8.44 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,2013 年安徽省产水量最低,2023 年最高。产水总量与《安徽省水资源公报》所公布的水资源总量相比,误差较小。

由图 2 可知,安徽省 2003—2023 年产水供给量呈先减少后上升的趋势,产水服务大致呈“南多北少”分布,产水量最高地区位于安徽省南部,主要集中于黄山市、池州市、安庆市及铜陵市地区;其次为宣城市,六安

市、合肥市、芜湖市及马鞍山市也有较大的产水供给。

2003—2023 年,安徽省固碳总量分别为  $2.31 \times 10^8$ 、 $1.98 \times 10^8$ 、 $1.96 \times 10^8$  t/hm<sup>2</sup>, 计算结果变化趋势与相关学者对安徽省地区固碳服务评估结果类似, 表明本文基于 InVEST 模型所得的结果具有一定的合理性。在空间分布上, 安徽省碳储量呈减少趋势。从土地利用类型来看, 碳储量较高地区主要集中在六安南部、安庆市西部及池州、黄山、宣城大部分地区, 林地及森林资源丰富; 2023 年, 安徽省建设用地及水域分布较集中的地区, 碳储量较少。2003—2023 年安徽省生境质量呈减少趋势, 生境质量总量分别为  $5.46 \times 10^6$ 、 $5.45 \times 10^6$ 、 $5.24 \times 10^6$ 。由图 2 可得, 2003—2023 年, 安徽省生境质量呈“南高北低”且逐年下降的趋势。安徽省南部地区植被类型丰富, 降水充沛, 温暖湿润, 有利于植被的生长和生物多样性的维持; 而北部地区土地利用类型多为耕地, 植被类型相对单一, 近年来随着工业化和城市化的加速推进, 可能对生态环境造成一定程度破坏和污染。

由表 5 可知, 安徽省土壤保持总量分别为  $2.88 \times 10^{11}$ 、 $1.78 \times 10^{11}$ 、 $1.92 \times 10^{11}$  t/hm<sup>2</sup>, 变化趋势与相关学者对安徽省土壤保持服务评估结果类似。由图 2 可知, 2003—2023 年安徽省土壤保持数量上呈先减少、后增大趋势, 总体呈上升趋势, 在空间分布上呈“南多北少”特征。安徽省南部多山地和丘陵, 由于地势起伏, 土壤侵蚀的风险相对较高, 但同时也为土壤保持提供了自然条件; 北部则以平原和低山丘陵为主, 地势平坦, 人类活动频繁, 如农业开发、城市建设等, 可能对土壤保持造成一定的破坏。

3.1.2 生态系统服务需求能力评估结果 本文基于 InVEST 模型计算得出 2003 年、2013 年、2023 年安徽省 3 期产水供给服务、固碳供给服务、生境质量供给

服务及土壤保持需求量结果(表 6), 并分别使用自然断裂法进行分级(图 3)。

由表 6 可知, 安徽省 3 期产水需求总量分别为  $2.02 \times 10^{10}$ 、 $2.27 \times 10^{10}$ 、 $2.07 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 2013 年产水量最高。由图 3 可知, 2003—2023 年, 安徽省各市产水服务需求量呈整体上升趋势, 其中产水服务需求量较高的地区主要呈分散状分布于合肥市, 其次为安徽省北部及东部各地区。安徽省人口的持续增长及城市化进程加快, 导致生活和工业用水的需求增加, 从而推动安徽省各地区产水服务需求量的上升。

2003—2023 年, 安徽省三期固碳服务需求总量分别为  $1.71 \times 10^8$ 、 $1.84 \times 10^8$ 、 $1.74 \times 10^8$  t/hm<sup>2</sup>, 总体呈上升趋势, 与 2003 年相比, 2013 年安徽省固碳服务需求量增长幅度较大。从空间分布来看, 固碳量较高的区域主要集中在合肥市、芜湖市及马鞍山市、阜阳市等部分区域, 其次为安庆市、滁州市等, 这些地区经济较为发达, 人口密集, 为固碳服务的提供创造有利条件。

2003—2023 年, 安徽省三期生境质量服务需求总量分别为  $1.48 \times 10^6$ 、 $2.25 \times 10^6$ 、 $2.73 \times 10^6$ , 说明随着经济的迅速增长和城市化的快速推进, 生境质量需求大幅增加。从空间分布上来看, 生境需求最高的区域主要集中在合肥市中部; 生境需求较高区域为阜阳市、亳州市、淮北市、宿州市、蚌埠市及淮南市等安徽省北部地区及马鞍山市、芜湖市、铜陵市、安庆市等中南部地区。

由表 6 可知, 安徽省土壤保持服务需求(土壤侵蚀)量从 2003 年的  $9.16 \times 10^9$  t/hm<sup>2</sup> 下降到 2023 年的  $5.20 \times 10^9$  t/hm<sup>2</sup>, 呈显著下降趋势。从空间分布来看, 2003—2023 年, 安徽省北部及中部地区土壤保持服务需求的低值区面积明显增加, 土壤保持服务需求高值区由安徽省中部及南部地区向南部聚集, 可能与南部地区的地形地貌、气候条件及人类活动模式有关。

表 6 2003—2023 年安徽省各生态系统需求服务总量

Table 6 Total amounts of ecosystem service demand in Anhui Province from 2003 to 2023

年份	产水量/(10 <sup>10</sup> m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	固碳量/(10 <sup>8</sup> t·hm <sup>-2</sup> )	生境质量(10 <sup>6</sup> )	土壤保持/(10 <sup>9</sup> t·hm <sup>-2</sup> )
2003	2.02	1.71	1.48	9.16
2013	2.27	1.84	2.25	4.84
2023	2.07	1.74	2.73	5.20

3.2 生态系统服务供需冷热点时空格局分析

利用 GIS 热点分析工具, 将产水量、碳储量、生境质量及土壤保持量等进行归一化处理, 并结合安徽省实际生态现状, 借助加权求和, 得出安徽省生态系统服务综合供需量, 计算得到不同时期安徽省生态系统服务综合供需冷热点分布图(图 4)。热点区域分布越广, 表明该区域生态系统服务供给能力越强, 反之, 则较弱。

由图 4 可知, 安徽省生态系统服务综合供给热点

分布格局呈“南部及西南部高、北部低”的特点。安徽省南部及西南部地区多山地丘陵, 地形起伏较大, 植被茂盛, 拥有丰富的生物多样性和较高的生态生产力, 能够提供多种生态系统服务, 如水源涵养、土壤保持、碳储存等。相比之下, 北部地区以平原和低山丘陵为主, 地形相对平坦, 气候较为干燥, 植被覆盖度较低, 且为安徽省农业主产区, 人类活动频繁, 土地利用强度大, 因此北部地区生态系统服务供给能力受限。



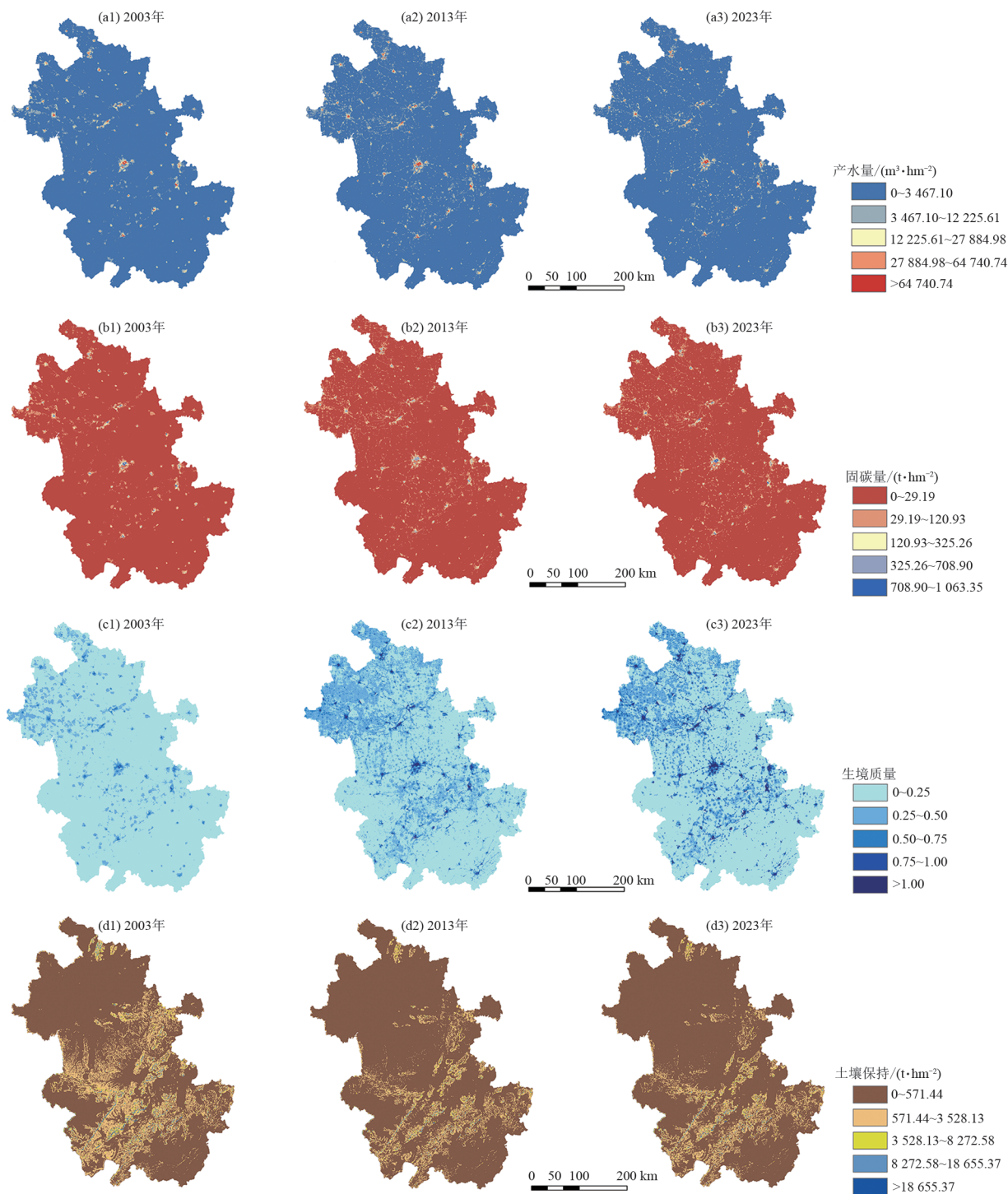


图 3 2003—2023 年安徽省生态系统服务需求空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of ecosystem service demand in Anhui Province from 2003 to 2023

需求热点呈“西北高一东南低”特征。西北部如阜阳、亳州、淮南等城市,因农业开发、工业化、城市扩张等因素,对自然资源需求大,生态系统干扰严重。而安徽省东南部地区,如黄山、宣城、池州等城市,拥有丰富的自然资源和良好的生态环境,这些地区可能更加注重生态保护和可持续发展,因此生态系统服务的需求较低。

安徽省生态系统服务综合供需比整体呈“南高

北低”特征。热点区域主要集中分布在池州市、黄山市及宣城市部分地区,这些地区通常植被覆盖率高,生物多样性丰富,且经济较发达但工业化程度低,因此供给能力强,需求低,供需比高;相比之下北部如亳州、蚌埠等,农业开发、工业化导致供给弱,人口密集、经济发展快,对生态系统服务的要求可能较高,因此导致北部地区生态系统服务供需比较低。

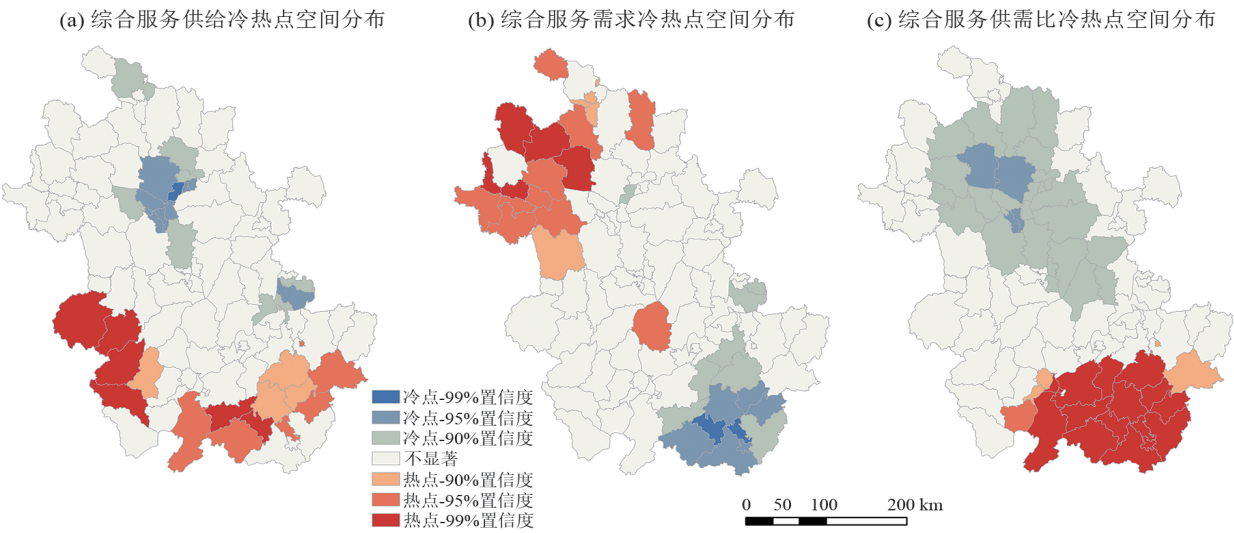


图 4 安徽省生态系统服务供需冷热点时空格局

Fig. 4 Spatiotemporal patterns of cold and hot spots for ecosystem service supply and demand in Anhui Province

3.3 基于生态系统服务供需视角的生态安全格局构建

3.3.1 生态源地的识别 选取产水量、生境质量、碳储量及土壤保持量 4 个要素并进行归一化处理,通过结合 MSPA、面积及生态系统服务重要性评估来识别生态供给及生态需求源地。研究共识别生态供给源地 40 个,生态需求源地 36 个,识别结果见图 5。

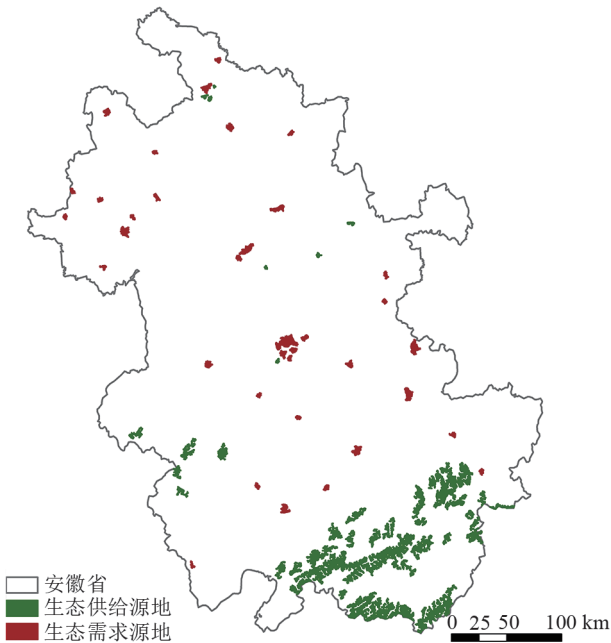


图 5 安徽省生态系统服务供需源地分布

Fig. 5 Distribution of ecosystem service supply and demand source areas in Anhui Province

由图 5 可知,安徽省生态系统服务供给源地主要集中于安徽省南部池州市、黄山市及宣城市,安庆市、六安市也有少数分布。这些地区是安徽省各项生态系统服务供给的重要源地,如池州市拥有大片

的森林和湿地,是安徽省重要的生态屏障;黄山市则以其独特的山水景观和丰富的物种多样而闻名;宣城市、安庆市与六安市也注重生态保护和绿色发展,积极推动生态文明发展。北部地区如淮北市、滁州市等供给源地分布数量较少。这些地区由于地形、气候和人类活动等因素的影响,生态系统服务的供给能力相对较弱。

安徽省生态系统服务需求源地的分布呈一定地域差异,但大部分地区均有少数分布。其中,分布较为集中的为合肥市,合肥市作为安徽省的省会城市,经济发达,人口密集,对生态系统服务的需求确实相对较高;其次为阜阳市、宿州市、亳州市、淮南市等北部地区,这些地区由于农业开发、工业化进程等因素,对自然资源的需求和生态系统的干扰可能较大,因此生态系统服务的需求也相对较高;南部地区如安庆市、芜湖市、马鞍山市也均有少量分布,这些地区由于经济发展及生态保护的需要,对生态系统服务也产生一定的需求。

3.3.2 阻力面的构建 生态系统服务从供给源地向需求源地流动时,受制于自然及社会经济因素的影响,从自然及社会经济因素作为阻力面构建安徽省生态系统服务综合阻力面。由图 6 可知,安徽省生态系统服务综合阻力面呈现南低-北高的特点,反映不同地区在生态系统服务方面的差异。高阻力值区域主要集中于人口密集的城市中心区,如合肥市、淮北市、阜阳市、蚌埠市、马鞍山市等,其次为淮南市、亳州市,芜湖市等市,南部其他地区也均有小范围分布,这些地区土地利用类型以耕地和建设用地为主,由于城市化进程快,人口密度高,对生态系统的干扰



和破坏较大,导致生态系统服务受到的阻力较大;低阻力值空间土地利用类型以林地为主,主要分布六安市、安庆市、池州市、黄山市及宣城市等安徽省南部,滁州市也有小范围分布,表明林地作为重要的生态系统类型,能够提供丰富的生态系统服务。总体来看,安徽省南部生态系统服务质量整体优于北部。

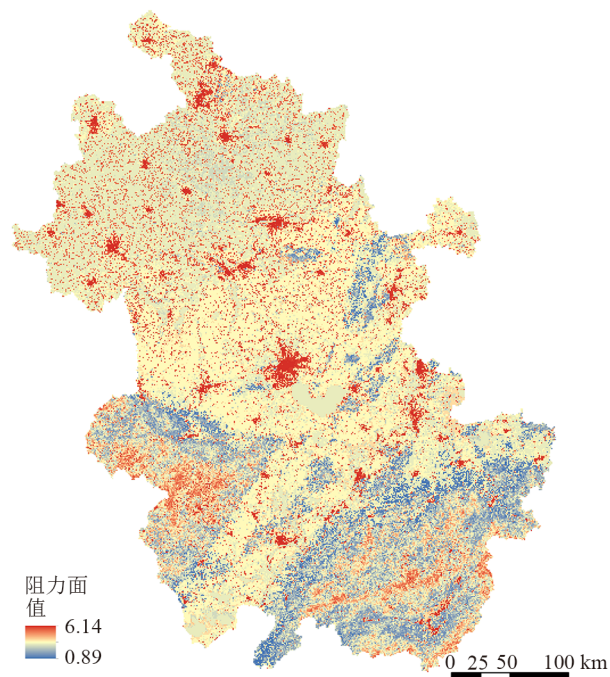


图 6 综合生态阻力面

Fig. 6 Comprehensive ecological resistance surface

3.3.3 生态廊道提取及生态安全格局的构建 生态廊道在生态系统中的作用体现为系统内物质和能量的流动、生物种迁移等方面,为源地斑块间的联系通道<sup>[32]</sup>。结合生态源地与综合生态阻力面,运用 Linkage Map 软件,对安徽省生态系统服务廊道进行识别。

由图 7 可知,共识别生态供给廊道 93 条,生态需求廊道 96 条。综合考虑生态环境特点,对安徽省基于生态系统服务供需视角的生态安全格局进行构建,形成“南屏北联,江河流域贯通”的生态安全格局。具体来说,安徽省生态供给廊道分布主要集中于南部,如池州市、黄山市宣城市等生态供给源地较集中区域,且数量较多,连通性较强。廊道总长度为 5 781.88 km,其中连接六安市及淮北市的廊道最长,长度为 325.63 km,各廊道将不同的生态斑块紧密相连,有助于促进生态系统服务的流动和传递。需求廊道在安徽省的北部和中部地区分布较为广泛,这些地区可能因经济发展、人口分布或生态需求等因素,成为廊道建设的重要区域。与北部和中部相比,南部地区的需求廊道分布较少,可能与该地区的自

然环境、生态资源或生态保护政策等因素有关。廊道总长度为 6 978.21 km,其中连接阜阳市及安庆市的廊道最长为 337.48 km,反映 2 个地区之间对生态资源和服务的强烈需求。

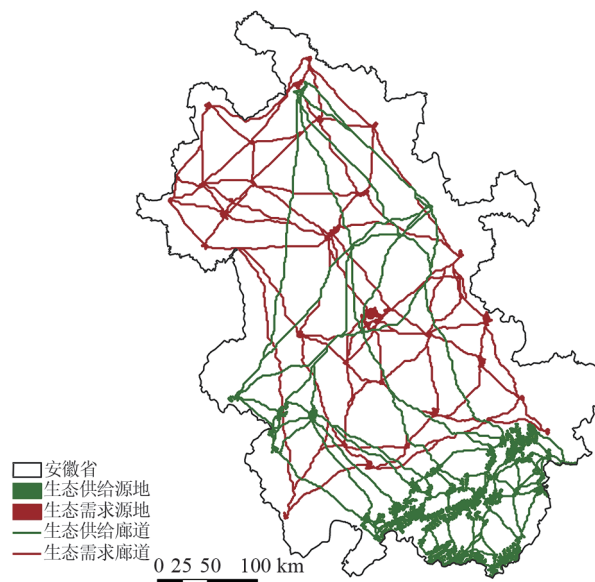


图 7 安徽省供需网络

Fig. 7 Supply and demand network in Anhui Province

生态安全格局的构建虽以“识别”为基础,但研究通过生态系统服务功能供需来确定生态保护核心区域为源地,能够增强生态源地连通性;通过阻力面的构建及电路理论模拟并优化生态廊道布局,提高抵御风险的能力,提升生态系统韧性,以此为基础形成连通性网络,构建生态安全格局。因此这一过程本质上是“识别-模拟-优化”的结合,是科学规划和动态适应的结果。

## 4 讨论

### 4.1 生态网络供需关系评价

为探究安徽省生态系统服务供需协调性,本研究采用生态系统服务供需指数(SDI)、供给能力(SDC)及供需平衡度(SDE)进行综合评估。结果显示,安徽省 SDI 值为 0.968,生态 SDC 值为 5.76,生态 SDE 值为 0.982,表明安徽省生态供需强度高,生态源地供给能力强,生态系统服务供需较为平衡,但仍存在区域差异和协调挑战。例如,皖北地区的需求强度相对较高,但由于自然条件和历史发展等因素,其生态系统服务的供给能力却相对较弱;相反,南部地区虽然拥有强大的供给能力,但需求强度却相对较低,导致南北之间的空间错配现象。

在安徽省南北供需不匹配的背景下,需通过差异化政策导向、跨区域协同机制与科技赋能构建动态优化生态网络体系提升生态安全水平。从差异化



政策导向来看,要精准定位南北生态治理核心。南部区域应以生态保护和价值实现为核心,强化生态补偿与绿色产业扶持,其政策重点应放在生态保护红线管控、生态产品价值实现机制建设以及生态旅游规范发展上;北部区域则以生态修复和农业绿色转型为核心,加大生态修复工程投入和农业绿色发展支持,政策重点应放在生态廊道建设、农业面源污染治理以及生态修复技术创新上。同时,应建立跨区域协同机制,打通南北生态资源流动通道,通过生态补偿、技术共享等方式,促进南北区域生态资源的合理流动和优化配置;完善生态补偿与转移支付;制定差异化补偿标准。也可强化科技支撑与监测评估,构建生态网络“智慧大脑”,推出全省生态网络监测平台,利用遥感、物联网等技术,实时监测生态廊道连通性、生物多样性等指标,动态调整生态安全保护策略,以形成“南北协同、动态优化”的生态网络体系。

## 4.2 研究不足与展望

在 Invest 模型参数选取中,仅采用土地利用数据及部分气象、水文及土壤因素数据作为基础数据,未整合社会经济(如产业结构调整、居民环保意识调查等)等数据,可能难以较全面反应生态系统服务供给和需求的影响因素。本文选取 2003 年、2013 年及 2023 年 3 个时间点,但间隔较长,中间年份数据可能存在缺失,可能无法精准捕捉生态系统服务供需能力的动态变化细节。因此,在未来研究中,可重点完善协调性评估指标体系,构建涵盖生态系统服务供给与需求数量平衡、质量匹配、生态过程完整性等多维度的协调性评估指标体系,全面、准确地评估生态供需关系的协调程度。后续可结合行政区划、生态功能区划、地形地貌等因素,对研究区域进行更精细的空间尺度划分,更加深入分析不同尺度下生态系统服务供需空间格局的特征和差异。

## 5 结论

1) 基于 InVEST 模型分别计算得出安徽省 2003—2023 各生态系统服务供给能力,可得出产水量呈先减少后上升趋势,2023 年产水量最高为  $8.44 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ;安徽省碳储量呈减少趋势,可能与土地利用类型分布有关,2023 年碳储量最少为  $1.96 \times 10^8 \text{ t}/\text{hm}^2$ ;生境质量呈“南高北低”且逐年下降的趋势;土壤保持数量上呈先减少、后增大趋势,总体呈上升趋势,在空间分布上呈“南多北少”的特征。

2) 2003—2023 年,产水服务需求量呈整体上升的趋势,其中 2013 年产水需求量最高为  $2.27 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ;固碳服务需求量总体呈上升趋势,2013 年固碳服务需求量最大为  $1.84 \times 10^8 \text{ t}/\text{hm}^2$ ;安徽省生境需求呈显

著增长趋势,说明随着经济的迅速增长和城市化的快速推进,生境质量需求大幅增加;安徽省土壤保持服务需求(土壤侵蚀)量总体呈显著下降趋势。由 2003 年的  $9.16 \times 10^9 \text{ t}/\text{hm}^2$  下降到 2023 年的  $5.20 \times 10^9 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。

3) 安徽省生态系统服务综合供给热点分布格局呈“南部及西南部高、北部低”的特点;从空间分布来看,安徽省生态系统服务综合需求热点分布格局呈“西北部高,东南部低”的特征;安徽省生态系统服务综合供需比整体呈“南高北低”的特征。热点区域主要集中在分布在池州市、黄山市及宣城市部分地区。

4) 从供需关系视角出发,对安徽省生态系统服务供需关系进行生态安全格局构建,共识别供给源地 40 个,需求源地 36 个;供给廊道 93 条,需求廊道 96 条;各廊道相交形成纵横交错的生态网络,将不同的生态斑块紧密相连,形成“南屏北联,江河流域贯通”的生态安全格局,实现从“破碎化”到“网络化”的生态治理范式的转型。

## 参考文献:

- [1] 肖玉,谢高地,鲁春霞,等.基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展[J].生态学报,2016,36(10):3096-3102.  
XIAO Y, XIE G D, LU C X, et al. Involvement of ecosystem service flows in human wellbeing based on the relationship between supply and demand [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [2] 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.
- [3] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems (1997) [M]//The Future of Nature: Yale University Press, 2017: 454-464.
- [4] REES W E. Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability [J]. Population and Environment, 1996, 17(3): 195-215.
- [5] LARONDELLE N, LAUF S. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales [J]. Ecosystem Services, 2016, 22: 18-31.
- [6] 严岩,朱捷缘,吴钢,等.生态系统服务需求、供给和消费研究进展[J].生态学报,2017,37(8):2489-2496.  
YAN Y, ZHU J Y, WU G, et al. Review and prospective applications of demand, supply, and consumption of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [7] 陈俊辰,贺淑钰,薛晶,等.多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置的响应:以湖北省为例[J].生态学报,2023,43(12):4835-4846.  
CHEN J C, HE S Y, XUE J, et al. Exploring ecosystem service trade-offs and their response to landscape configura-

- tion at multi-scales: A case study of Hubei Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4835-4846.
- [8] 邓楚雄, 刘俊宇, 李忠武, 等. 近 20 年国内外生态系统服务研究回顾与解析[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 2119-2128.
- DENG C X, LIU J Y, LI Z W, et al. Review and analysis of ecosystem services research between domestic and foreign in recent 20 years[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(10): 2119-2128.
- [9] 寿飞云, 李卓飞, 黄璐, 等. 基于生态系统服务供求评价的空间分异特征与生态格局划分: 以长三角城市群为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2813-2826.
- SHOU F Y, LI Z F, HUANG L, et al. Spatial differentiation and ecological patterns of urban agglomeration based on evaluations of supply and demand of ecosystem services: A case study on the Yangtze River delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2813-2826.
- [10] 顾康康, 杨倩倩, 程帆, 等. 基于生态系统服务供需关系的安徽省空间分异研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(7): 577-583.
- GU K K, YANG Q Q, CHENG F, et al. Spatial differentiation of Anhui Province based on the relationship between supply and demand of ecosystem services [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(7): 577-583.
- [11] 彭建, 杨畅, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4562-4572.
- PENG J, YANG Y, XIE P, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [12] LI J S, SUN W, LI M Y, et al. Coupling coordination degree of production, living and ecological spaces and its influencing factors in the Yellow River basin [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 298: e126803.
- [13] BUTLER E P, BLISS-KETCHUM L L, DE RIVERA C E, et al. Habitat, geophysical, and eco-social connectivity: Benefits of resilient socio-ecological landscapes [J]. *Landscape Ecology*, 2022, 37(1): 1-29.
- [14] JIANG H, PENG J, DONG J Q, et al. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China [J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2135-2150.
- [15] FIELD R D, PARROTT L. Multi-ecosystem services networks: A new perspective for assessing landscape connectivity and resilience [J]. *Ecological Complexity*, 2017, 32: 31-41.
- [16] SHEN J K, WANG Y C. Allocating and mapping ecosystem service demands with spatial flow from built-up areas to natural spaces [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 798: e149330.
- [17] WANG L J, ZHENG H, CHEN Y Z, et al. Systematic review of ecosystem services flow measurement: Main concepts, methods, applications and future directions [J]. *Ecosystem Services*, 2022, 58: e101479.
- [18] TALLIS H T, RICKETTS T, NELSON E, et al. InVEST 2.5.4 User's Guide [M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2013: 82-113.
- [19] 蒋林坪. 基于生态的北京长城文化带小流域特征识别和分类研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- JIANG L P. Characteristics identification and classification of small watershed in Beijing great wall cultural belt based on ecology [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.
- [20] 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 and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [21] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 等. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征 [J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 823-834.
- WANG Z Z, ZHANG L W, LI X P, et al. The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 823-834.
- [22] FU Y J, SHI X Y, HE J, et al. Identification and optimization strategy of county ecological security pattern: A case study in the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: e106030.
- [23] ZHANG Z, WANG Q, FENG Y G, et al. The spatio-temporal evolution of spatial structure and supply-demand relationships of the ecological network in the Yellow River delta region of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 471: e143388.
- [24] 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.
- [25] 陈梦圆. 基于 MCR 模型的环杭州湾生态安全格局研究 [D]. 浙江 舟山: 浙江海洋大学, 2023.
- CHEN M Y. Study on ecological security pattern around the Hangzhou Bay based on MCR model [D]. Zhoushan, Zhejiang: Zhejiang Ocean University, 2023.
- [26] HUANG K X, PENG L, WANG X H, et al. Incorporating circuit theory, complex networks, and carbon offsets into the multi-objective optimization of ecological networks: A case study on karst regions in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: e135512.

- [27] 魏家星,张昱镇,连紫璇,等.基于生态供需空间的区域生态安全格局构建研究:以苏南城市群为例[J].长江流域资源与环境,2022,31(2):387-397.  
WEI J X, ZHANG Y Z, LIAN Z X, et al. Research on regional ecological security pattern construction based on ecological supply and demand space: A case study of southern Jiangsu urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 387-397.
- [28] 景永才,陈利顶,孙然好.基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J].生态学报,2018,38(12):4121-4131.  
JING Y C, CHEN L D, SUN R H. A theoretical research framework for ecological security pattern construction based on ecosystem services supply and demand [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [29] 占湑,于洋,吴秀芹.湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J].生态学报,2021,41(18):7260-7272.  
ZHAN T, YU Y, WU X Q. Supply-demand spatial matching of ecosystem services in the Huangshui River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7260-7272.
- [30] 赵宇豪,罗宇航,易腾云,等.基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建[J].应用生态学报, 2022, 33(9): 2475-2484.  
ZHAO Y H, LUO Y H, YI T Y, et al. Constructing an ecological security pattern in Shenzhen, China, by matching the supply and demand of ecosystem services [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2475-2484.
- [31] 胡其玉,陈松林.基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化[J].自然资源学报,2021,36(2):342-355.  
HU Q Y, CHEN S L. Optimizing the ecological networks based on the supply and demand of ecosystem services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou region [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 342-355.
- [32] 王正伟,王宏卫,杨胜天,等.基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略:以拜城县为例[J].生态学报,2022,42(1):91-104.  
WANG Z W, WANG H W, YANG S T, et al. Identification and optimization strategy of ecological security pattern of Oasis in Xinjiang based on ecosystem service function: Taking Baicheng County as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 91-104.