

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

陶德凯，张子建，周文莉，王智勇

【摘要】构建科学合理的生态安全格局是高水平保护区域生态系统、推进生态文明建设、保障国土空间安全的关键路径。借助生态系统服务供需理论，从自然生态基底和人类经济活动耦合协同的视角，指出生态系统服务供需水平核算及评估是构建生态安全格局的基础和关键。引入电路理论，提出基于生态系统服务供需协同的“源地识别—阻力面建立—廊道提取”生态安全格局构建思路及框架。以安徽省为实例，从食物供需服务、产水服务、固碳服务及游憩服务4个方面对安徽省生态系统服务供需情况进行评价，确定安徽省生态源地、提取生态廊道、识别生态夹点和障碍点，并划定生态保护区、生态修复区和生态建设区等3类生态功能分区，形成安徽省“两带、两轴、两屏、三区、多点”的生态安全格局，为安徽省国土空间生态修复和生态经济可持续发展提供科学依据。

【关键词】生态安全格局；生态系统服务供需；电路理论；安徽省

【文章编号】1006-0022(2024)10-0016-09 **【中图分类号】**TU981 **【文献标识码】**B

【引文格式】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(10): 16-24.

Construction of Ecological Security Pattern Based on Demand-Supply Coordination of Ecosystem Service: A Case Study of Anhui Province/TAO Dekai, ZHANG Zijian, ZHOU Wenli, WANG Zhiyong

【Abstract】 Construction of a rational ecological security pattern is a key path to protect regional ecosystem, promote ecological civilization development, and safeguard national space security. Based on the demand-supply theory in ecosystem service, it is argued that the calculation and assessment of demand-supply level of ecosystem service are the foundation and key points of establishing ecological security pattern from the perspective of integrating natural ecology and economic activity. With the introduction of circuit theory, the concept and framework of ecological security pattern through "source identification-resistance surface establishment-corridor extraction" are put forward. With Anhui province as an example, the demand-supply of the ecosystem service is assessed from four aspects: food demand-supply, water production, carbon sequestration, and recreation, then the provincial ecological sources, corridors, pinch points, and barrier points are identified, and three types of ecological zones are delineated: ecological protection zone, ecological restoration zone, and ecological construction zone. An ecological security pattern of "two belts, two axes, two screens, three zones, multiple points" is formulated, offering scientific guidance for territorial space ecological restoration and sustainable development of ecological economy in Anhui province.

【Keywords】 ecological security pattern; demand-supply of ecosystem service; circuit theory; Anhui province

党的二十大报告提出“推进国家安全体系和能力现代化，坚决维护国家安全和社会稳定”，强调“以新安全格局保障新发展格局”。国土空间是自然资源的基本载体和国民社会活动的环境场所，国土空间安全以生态安全为基础，以水安全、粮食安全、能源安全、生命线安全为支撑，保障社会、经济、生态有序协同发展^[1]，

是国家安全的重要内容。良好的生态系统对于保障国家水、粮食、能源等安全至关重要，因此提升生态系统质量、保障生态安全对于提升国土空间安全具有重要意义^[2]。

随着城镇化的快速发展，生态空间缩减、环境质量下降、自然资源浪费等威胁国土空间安全的现象凸显，亟须优化生态空间布局，管控自然资源利用，构

【基金项目】 国家自然科学基金项目(72274093)、江苏省高校哲学社会科学项目(2022SJYB0212)、南京市社会科学基金项目(2024YB-12)

【作者简介】 陶德凯，注册城乡规划师，博士，南京工业大学建筑学院副教授，大运河文化带建设研究院研究员。

张子建，南京工业大学建筑学院硕士研究生。

周文莉，博士，南京财经大学工商管理学院副教授。

王智勇，通信作者，博士，华中科技大学建筑与城市规划学院副教授。

建区域生态安全格局，保障国土空间安全。生态安全格局是由生态系统重要生态组分、斑块及廊道构成的空间格局，通过识别重要生物保护源地、健全生态廊道格局优化国土空间^[3-4]，应重点突出生态系统结构、功能和过程的完整性以及对人类社会发展的支撑作用。2023年12月《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》指出，要筑牢自然生态屏障，健全国家生态安全体系，推进国家重点生态功能区、重要生态廊道保护建设；2024年3月《中共中央办公厅 国务院办公厅关于加强生态环境分区管控的意见》强调维护生态安全格局，提升生态系统的稳定性和服务功能。一系列政策文件均明确了科学划定生态分区、保护修复生态源地、维护生态安全对于保障国土空间安全的重要性。生态安全格局构建通过精准识别生态关键点为生态空间的划定和管控提供依据，构建生态廊道以保障生态系统的循环流动，建立生态屏障以夯实区域整体生态基底，通过“点—线—面”、由小及大、由局部到整体，全面统筹规划、管控区域空间以保障和提升生态系统质量。可见，构建合理的生态安全格局有利于精准施策、整体把控区域生态质量和治理力度，保障国土空间安全。

生态系统服务是连接自然生态系统和社会经济系统的纽带，基于生态系统服务构建生态安全格局即是从“自然生态—社会经济”复合系统角度构建符合生态高水平保护和生态高质量发展要求的空间格局。安徽省地处长江中下游，在国家“四屏四带”国土生态安全格局中属于长江重点生态区，承担长江中下游生态带和长三角生态屏障功能。2010—2020年安徽省全省人均GDP由21923元增长至63426元，在经济快速增长的同时也带来污水排放量和能源消耗量急剧增加等诸多环境问题。进入高质量发展阶段，社会发展更加关注人们赖以生存

的国土空间，因此急需构建科学合理的省域生态安全格局以推动可持续发展、保障国土空间安全。本研究构建基于生态系统服务供需协同的生态安全格局框架，以安徽省为研究区域，融合“自然生态—社会经济”复合系统，结合电路理论通过“识别生态源地—建立阻力面—提取生态廊道”构建省域生态安全格局，以期推进安徽省生态文明建设。

1 相关概念研究

1.1 生态安全的概念内涵

“生态安全”概念源自1987年世界环境与发展委员会的报告——《我们共同的未来》提出的“环境安全”概念^[5]，1989年国际应用系统分析研究所在“环境安全”概念的基础上首次阐明了环境安全在全球生态安全监测系统的影响^[6]。此后“生态安全”概念内涵逐渐发展和完善，狭义的生态安全指生态系统的完整性，涵盖功能、结构、生态过程等自然和半自然层面^[7]；广义的生态安全则从人的视角出发，强调人类生存、生产、生活的权利不受威胁，涵盖自然、社会、经济多个关联系统^[8-9]。有学者将“生态安全”的内涵概括为以自然为中心、以人为中心和折中主义3个方面，其中专注于人类福祉的“以人为中心”内涵占主导^[10]；有学者认为生态安全应包括生态系统安全、生态系统修复和保护、生态风险管理^[11]。学术界广泛认同的“生态安全”是指“特定时空的生态系统的尺度、结构、功能、过程等不受自然、社会、经济的威胁，并持续提供生态系统服务功能满足人类生存—生产—生活需求”^[12]。当前生态安全研究的重点由生态安全评估逐渐转为生态安全格局构建，强调实践应用。

1.2 生态系统服务的内涵及供需研究

生态系统服务指生态系统为增进人

类福祉直接或间接提供的物质服务和精神享受，包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务，是自然生态系统和社会经济系统联系的纽带^[13]，其先后经历了“环境服务、自然服务、生态系统服务”等概念演变过程^[14]。生态系统服务强调过程性，即生态系统提供服务功能的过程和人类消费使用生态系统服务的过程，多从生态系统服务供给和需求两个维度分析某一区域生态系统服务分布及适应性情况，以综合评价某一地区生态系统质量及服务价值，这对于评估国土空间安全水平具有重要意义^[15]。生态系统服务供需存在供大于求、供不应求和供需均衡等几种关系，其中生态系统服务供给从生态系统和人类活动两个角度可分为潜在供给和实际供给，潜在供给指生态系统以可持续的方式提供服务及产品的能力，实际供给是人类实际消费或使用的服务和产品。根据人类需求类型可将生态系统服务及产品需求划分为实际需求与总量需求两种，实际需求指人类切实使用或消费的服务及产品，等于实际供给；总量需求指人类主观意愿下对生态系统服务的全部需求，包括实际需求^[16]。

2 基于生态系统服务供需协同的生态安全格局构建思路及框架

2.1 生态安全格局构建思路

生态安全格局最初是面向景观生态规划提出的，指以实际生物栖息地为源地，以某一具体物种的迁徙路径为廊道构建区域生态安全格局。这种以主观意向和现实情况为依据的构建方法，对于源地等潜在空间以及廊道保护修复的分析较少，特别是对生态关键点的识别缺乏客观性和关键性。随着“生态系统服务”概念的完善和融入，生态系统的重要生态组分、斑块及廊道等成为构建生态安全格局的要素，基于生态系统服务的“源

地识别—阻力面建立—廊道提取”生态安全格局构建思路逐渐成为基本范式^[4]。生态源地识别是构建生态安全格局的基础,常用方法包括直接采用面积较大的自然斑块、结合生态系统服务重要性和生态敏感性或脆弱性识别、通过评估生境质量识别等,源地识别主要从自然生态系统的视角切入,更多关注自然要素。生态廊道是连接生态源地的骨架,其提取方法包括最小累积阻力模型(MCR)、电路理论等,其中最小累积阻力模型将最小阻力或成本最佳的路径作为廊道,但此方法忽略了物种的随机游走特性,难以准确选定生态节点以及突出廊道的重要性等级。电路理论则完善了上述不足,将景观抽象成一系列由节点和电阻组成的导电表面,节点代表物种栖息地或自然保护区,电流大小反映物种沿某条路径扩散的概率,目前该方法应用较为广泛。

上述生态安全格局基于自然生态本底条件构建,易忽视人类活动影响以及生态安全格局服务于人类生活需求的目标要求。国土空间承载着自然资源和人类活动,既需要通过空间规划对自然资源进行合理配置,也需要实施科学的用途管制促进自然资源的保护和可持续利用,以实现自然与人类和谐共生。因此,生态文明视角下国土空间生态安全格局的构建应统筹考虑自然生态系统和社会经济系统,综合自然生态系统供给和社

会经济系统需求。生态系统服务供给表征生态系统提供增进人类福祉的服务的能力,反映了生态系统自然资源本底条件;生态系统服务需求是人类实际或潜在消费使用的服务总量,体现出社会需求程度和经济发展水平。结合生态系统服务供需构建国土空间生态安全格局,从人类需求和影响角度统筹协调生态—经济发展,凸显了生态安全格局的系统性特征,符合生态安全格局构建的发展方向,即从仅关注生物多样性保护转为构建自然生态系统和社会经济系统协同发展格局。

2.2 生态安全格局构建框架

结合上述分析以及“源地识别—阻力面建立—廊道提取”的方法,基于生态系统服务供需协同的生态安全格局框架主要包括2个部分(图1):一是生态系统服务供需评估。生态系统具有地域性和差异性特征,生态安全格局构建需结合区域特征和发展要求,针对性地选择生态系统服务及其评价因子,为区域生态系统修复和空间布局提供相应的指导。结合选定评估指标,引入InVEST模型等核算生态系统服务供需价值以反映区域生态资源本底条件和人类对资源使用消耗的情况,明确区域生态系统服务供需状况。二是生态安全格局构建。①生态源地识别。基于生态系统服务供需价值评估,将生态系统服务综合供给图层与供

需比图层相交识别生态源地,如此既可突出生态系统资源本底条件优越的地区,又可识别资源环境承载能力较好且能满足生态系统服务循环使用的可持续发展区域。同时,将生态系统服务供给和供需比进行分级处理,选取最重要区域进行相交分析,并剔除生态效益较低的小面积斑块,识别生态源地。②阻力面构建。阻力面反映了生态流在异质生态系统中迁移和能量流动的难度,体现出生物空间运动情况和选择趋势。相关研究显示,生境质量与生物多样性和物种移动速度成正比,因此可取其倒数来反映阻力值^[17],这弥补了基于专家经验法设置阻力值无法体现土地利用类型内部特征的不足。③生态廊道、夹点、障碍点识别。生态廊道是生态源地之间物质能量流动的重要通道,对于维系生态功能及其过程具有重要意义。生态夹点指生态源地之间物质流频繁的区域,结合电路理论,则是指生态廊道中电流密度大的区域。生态障碍点指阻碍生态流通的区域。结合生态源地和阻力面,可提取生态廊道,识别生态夹点和障碍点。④生态功能分区。良好的生态系统和优越的自然资源本底条件有助于推动经济社会发展,因此结合生态系统服务供给合理划分生态功能分区,有助于引导经济发展和生态修复。

3 安徽省生态安全格局构建实践

3.1 安徽省生态系统服务供需评估

3.1.1 生态系统服务供需核算

(1)生态系统服务供需评估指标选取
粮食安全是国家安全的基础,安徽省是全国重要的粮食主产区和粮食净调区,粮食产量已连续6年稳定在800亿斤以上,稳居全国第4位。因此,选取食物供需服务作为评估安徽省生态系统服务的指标之一。安徽省位于亚热带与暖温带过渡区,且横跨秦岭淮河一线,

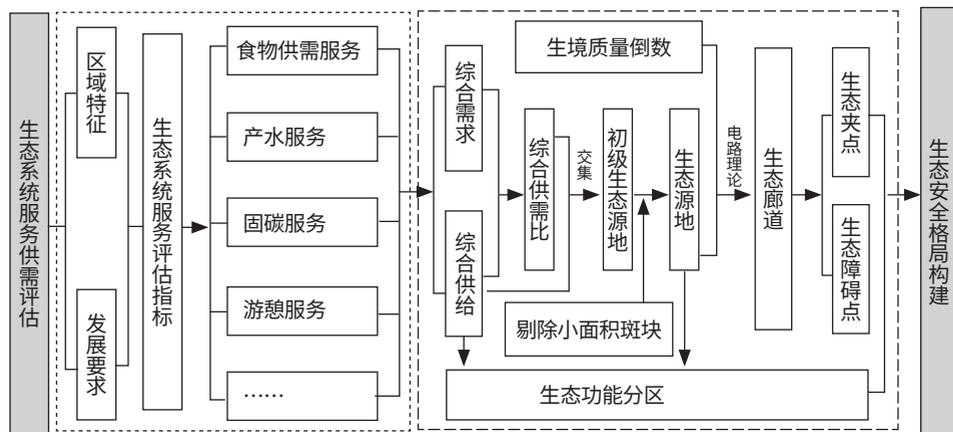


图1 基于生态系统服务供需协同的生态安全格局构建框架图

南北气候存在差异, 年降水量较大且呈现“南多北少”的特点, 因此选取产水服务作为生态系统服务评估指标。安徽省是南方集体林区的重要省份, 拥有皖南山区、皖西大别山区等全国重点生态功能区, 据第九次全国森林资源清查结果, 安徽省林业用地约占安徽省总面积的1/3, 达449.33万hm², 森林蓄积量为2.7亿m³, 森林覆盖率达30.22%, 因此选取固碳服务作为生态系统服务评估指标。安徽省有8个国家级自然保护区、41个风景名胜区、80个森林公园、67个湿地公园、16个地质公园, 其林业部门管理的自然保护区达313个。近年来, 安徽省积极发展生态旅游, 故选择游憩服务作为生态系统服务评估的指标。

综上所述, 选择食物供需服务、产水服务、固碳服务、游憩服务等4项因子综合评估安徽省生态系统服务供需水平。

(2) 生态系统服务供给与需求评估方法
结合相关文献研究, 对安徽省食物供需服务、产水服务、固碳服务、游憩服务进行供需水平核算, 具体核算方法见表1。

(3) 生态系统服务供需比核算

采用生态系统服务供需比反映各生态系统服务的供需均衡状况, 并计算所有种类生态系统服务供需比的平均值, 以此来表征区域整体供需情况, 具体公式如下所示。

$$E_i = \frac{S_i - D_i}{(S_{max} + D_{max})/2} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (2)$$

式中: E_i 为某一空间的生态系统服务供需比, S_i 和 D_i 分别为某一空间的供给值和需求值, C 为生态系统服务综合供需比, 反映区域整体供需状况, S_{max} 和 D_{max} 分别为区域生态系统服务供给最大值和需求最大值。生态系统服务供需比反映生态系统供给能力与人类消耗使用之间的关系, 供需比 < 0 表示“供不应求”, 供需比 > 0 表示“供大于求”, 供需比 = 0 表示“供需均衡”, 区域可持续发展。

表1 生态系统服务供需评估方法

生态系统服务		核算方法
食物供需服务	供给	将农业、畜牧业和林业产值按照栅格的NDVI值与耕地、草地和林地总NDVI值的比例进行分配 ^[18] ; 将单位面积内陆域、水域的水产品产值分配到相应的区域, 将栅格水域面积与总水域面积的比值乘以水产品总产值获得渔业产值
	需求	以居民人均消费支出乘以恩格尔系数表征人均食物消费支出, 并结合人口密度数据得到单位面积食物需求的空间分布情况
产水服务	供给	以InVEST模型中的Water Yield产水模块评估安徽省2020年产水量, 产水量主要指每个栅格单元降水量减去实际蒸发量后剩余的水量
	需求	将人均综合用水量与人口密度相乘获取
固碳服务	供给	以InVEST模型的Carbon固碳服务模块核算安徽省2020年固碳量
	需求	通过人均碳排放量与人口密度相乘获得碳排放量, 其中人均碳排放量由安徽省能源消耗总量乘以碳排放系数, 再除以常住人口计算得到
游憩服务	供给	参考陶芹等 ^[19] 的研究, 将林地、草地、水域、湿地等能够提供旅游空间的土地利用类型定义为生态用地, 用栅格内生态用地面积替代游憩服务供给量
	需求	采用生态用地的相关概念表征游憩服务需求量, 设置安徽省人均生态用地标准为60m ² /人 ^[19] , 因此其游憩服务需求量为人均生态用地标准与人口密度的乘积

3.1.2 生态系统服务供给评估结果

安徽省2020年食物供给量、产水量、固碳量及游憩供给量分别为5.356×10¹¹元、9.234×10¹⁰m³、1.309×10⁹t、4.352×10⁴km², 其中食物供给量低值区主要集中在各城市的中心区, 该区域为产品交易中心, 多为建设用地, 初级食物生产较少。产水量呈现出明显的“南高北低”特征, 高值区主要集中在安庆市南部、铜陵市、芜湖市西南部等, 低值区主要分布在宿州市、淮北市、亳州市、蚌埠市以及阜阳市东北部。由于安徽省南部和西部地区林木资源丰富, 固碳量高值区主要分布在六安市南部、安庆市西北部、池州市、宣城市南部及黄山市等, 低值区主要集中在巢湖、龙感湖、长江等河湖流域。结合安徽省内“林、草、水、湿”等生态用地分布情况, 安徽省游憩服务供给高值区主要分布在自然资源禀赋较好的地区, 主要包括皖西大别山区、皖南山区、巢湖、长江等; 从行政区划看, 黄山市、宣城市、六安市、安庆市等南部城市的游憩服务供给充足, 而处在淮北平原的亳州市、淮北市、宿州市及阜阳市等城市的游憩服务供给量低, 总体呈现出明显的“南高北低”的特征。

生态系统服务综合供给呈现“南高北低”特征, 综合供给高值区主要集中在皖西大别山区和皖南山区, 以及巢湖、长江等水系, 低值区主要集中在安徽省北部及各城市市区等。

3.1.3 生态系统服务需求评估结果

安徽省2020年食物需求量、产水需求量、固碳需求量及游憩需求量分别为3.838×10¹¹元、2.628×10¹⁰m³、1.014×10⁸t、3.663×10³km², 省域生态系统服务需求呈现出较为明显的空间异质性特征, 各生态系统服务需求的高值区主要集中在各城市的中心区, 原因在于这些地区人口密度高, 需求旺盛。在安徽省16个地级市中, 合肥市对生态系统服务的需求最高, 黄山市对生态系统服务的需求最低。结合区域自然、社会特征, 黄山市等资源禀赋区的生态系统服务在满足自身需求的前提下, 可将其生态系统服务输送至高需求区, 以实现生态系统服务一体化协同。

3.1.4 生态系统服务供需协调分析

结合生态安全强调生态系统保护修复和可持续发展等, 根据分位数法将安徽省生态系统服务供需比划分为最重要、非常重要、重要、一般和不重要5个等

级，其中：最重要等级表示区域生态资源禀赋最好，生态要素最充裕，生态绿色发展潜力最高；不重要等级指区域需求超过生态系统供给能力，区域生境质量较差，本地生态要素的生产价值较低。由分析结果可知，2020年安徽省食物供需服务供需比中重要区域主要集中在巢湖、长江等河湖水系，不重要区域则分布在各城市市区，食物供需服务的供需类型以“供大于求”为主，占安徽省总面积的82.46%。产水服务供需比在分布上呈现明显的分层特征，其重要性分区由南至北整体上逐层降低。其中：

最重要区域主要分布在安徽省南部及中部，包括合肥市南部、六安市南部、马鞍山市、芜湖市、铜陵市、安庆市、池州市、宣城市和黄山市；不重要区域主要集中在各城市中心区以及宿州市砀山县、萧县等地区。产水服务供需类型以“供大于求”为主，占安徽省总面积的91.85%。固碳服务供需比存在空间异质性特征，其高值区主要集中在林地、湿地集中的区域，包括皖西大别山区、皖南山区，以及马鞍山市、芜湖市等的湿地区域。在固碳服务供需类型中，“供大于求”类型占比最大，占安徽省总面

积的95.03%。游憩服务供需比最重要区域分布在林业资源丰富的安徽省南部和西部地区以及巢湖、长江等河湖流域，不重要区域主要集中在各大城市市区，以合肥市市区最为显著。在游憩服务供需类型中，“供不应求”类型占主导，占安徽省总面积的68.93%，“供大于求”类型主要集中在林地、水域等生态功能用地。见图2、图3。

安徽省生态系统服务综合供需比整体呈现“南高北低”特征，最重要区域主要分布在皖西大别山区、皖南山区等。在综合供需类型中，以“供大于求”为主，

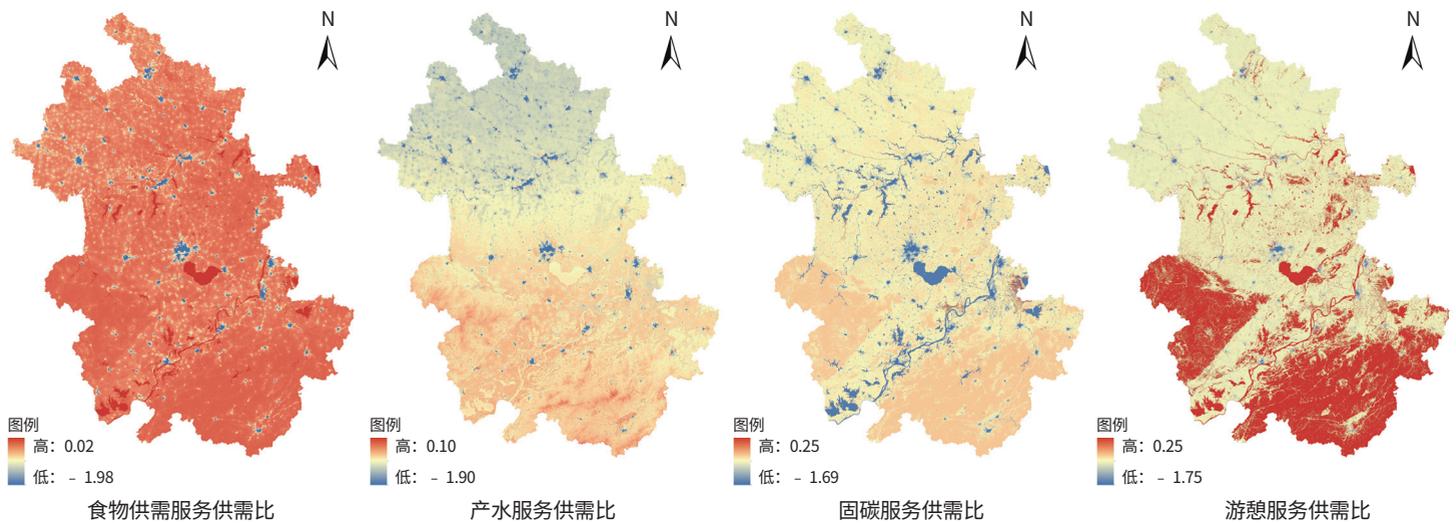


图2 安徽省生态系统服务4个要素的供需比空间分布图

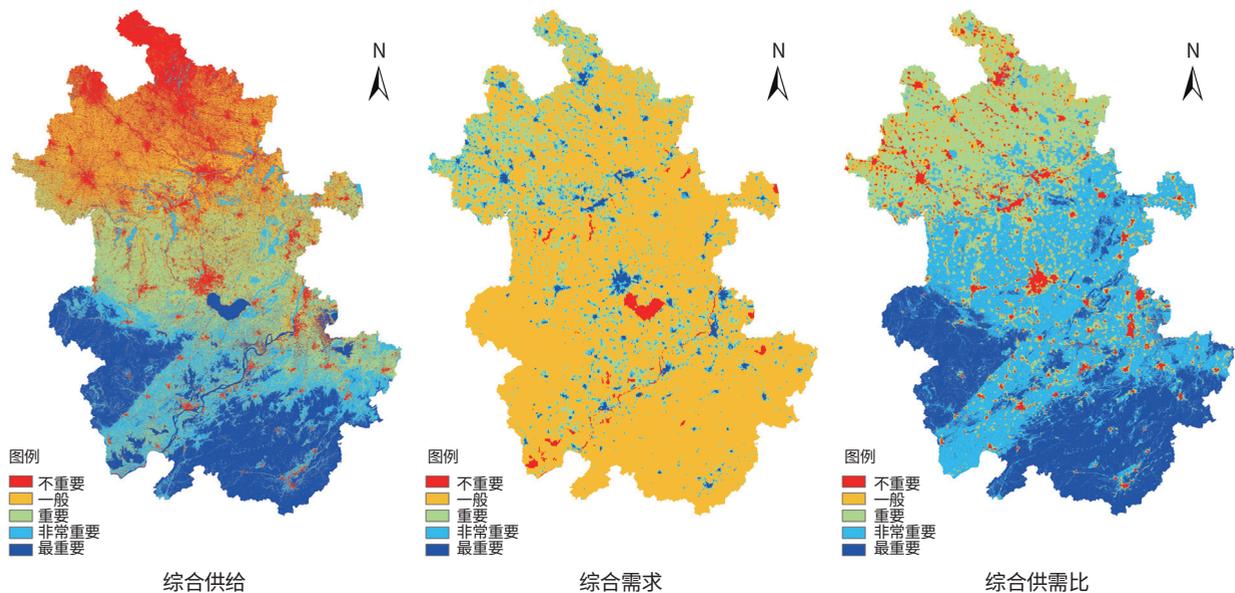


图3 安徽省生态系统服务供需情况

占安徽省总面积的 97.56%，“供不应求”类型主要集中在人口密集区域。

3.2 安徽省生态安全格局构建

3.2.1 生态安全格局构成要素分析

(1) 生态源地识别及阻力面构建

研究将生态系统服务综合供给图层与供需比图层叠加，识别生态源地。首先，结合分位数法，将生态系统服务供给划分为最重要、非常重要、重要、一般和不重要 5 个等级，并将其与供需比分级图层叠加，选取最重要区域进行相交分析。其次，考虑安徽省是农业大省，水资源对生物发展及农业耕作具有重要作用，因此修正、整合安徽省河湖水域及湿地，将二者进行叠加并剔除面积小于 8 km² 的生态功能不完整斑块，整合形成初级生态源地。由于大面积的生态源地可以发挥改善生态系统服务的作用，利用自然断点法将识别出的初级生态源地划分为 5 级 (图 4)，其中小于等于 57.33 km² 的生态源地仅占初级源地总面积的 7.05%。根据分级特征及相关研究，最终筛选出面积大于 50 km² 的初级生态源地作为最终生态源地，其占初级生态源地总面积的 93.95%。

研究共识别出 119 个初级生态源地，筛选面积大于 50 km² 的生态源地，共得到 35 个生态源地，总面积为 25 619.44 km²，占安徽省国土总面积的 18.29%，其中林地生态源地面积最大，为 21 893.26 km²，占生态源地总面积的 85.46%，其次为水域 (3615.97 km²)、湿地 (64.84 km²)、草地 (45.34 km²)、耕地 (0.01 km²)。安徽省生态源地空间分布呈现出“南密北疏”的特征，南部主要集中在皖西大别山区、皖南山区、长江流域等，北部主要集中在淮河周边。其中，29.51% 的生态源地分布在黄山市，占比最高，其次为安庆市，占比为 18.67%，分布的生态源地占比较高的前 5 个城市均位于安徽省南部 (图 5)，这些地区林

业资源禀赋优，具有良好的生态环境，且存在大量食物供需服务、产水服务、固碳服务及游憩服务最重要和非常重要区域，对于生物流通、生物多样性保护具有积极作用。安徽省北部的宿州市、淮北市、亳州市、阜阳市的生态源地占比共 0.18%，这些地区位于淮北平原，土地利用类型以耕地为主，生态资源分布较少，生态源地占比较小，因此需进一步加大生态修复力度，提升生境质量。

生态阻力面表征生物在研究区内移动时所受阻力的的大小。研究结果表明：安徽省生态高阻力值空间主要集中在人口密集的城市中心区；低阻力值空间以林地、水域、湿地等用地为主，主要分布在安徽省南部，集中在皖西大别山区、皖南山区、长江流域及其周边区域等，表明这些用地类型对于生物多样性保护、生物迁徙、生态系统服务流动等具有积

极作用，亦体现出安徽省南部生态系统质量整体优于北部。

(2) 生态廊道提取

结合电路理论，利用 Linkage Mapper 工具，可识别出活跃与非活跃两种生态廊道，研究将活跃廊道作为最优生态廊道，共提取得到 68 条安徽省生态廊道，总长度为 1 754.04 km，其中长度最短的为 0.042 km，最长的为 207.25 km，长度在 100 km 以上的共 3 条，在 1 km 以下的共 25 条。安徽省生态廊道主要集中在中部及南部，淮河以北地区由于没有生态源地分布，无生态廊道贯穿其中。其中：南部生态源地主要集中在皖西大别山区、皖南山区以及长江流域周边，分布较为集中且面积较大，因此其生态廊道长度较短；中部生态源地较为分散，且生态廊道主要连接南部源地与淮河等，因此廊道长度较长。研究将非活跃廊道作为潜在生

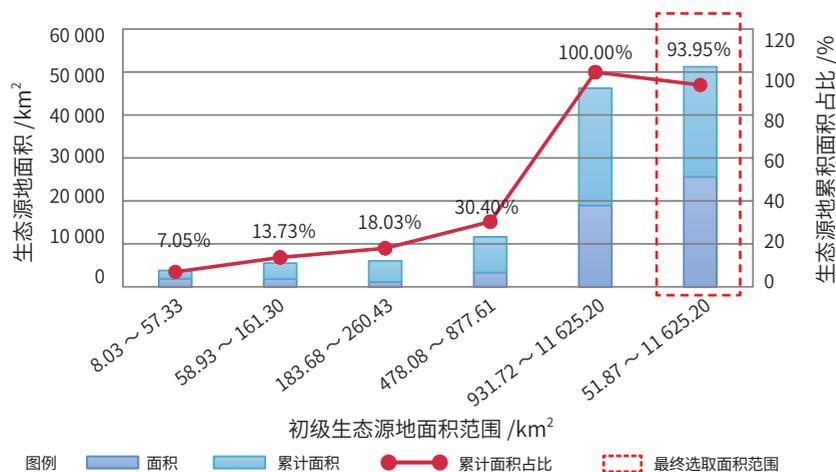


图4 初级生态源地自然断点分级情况

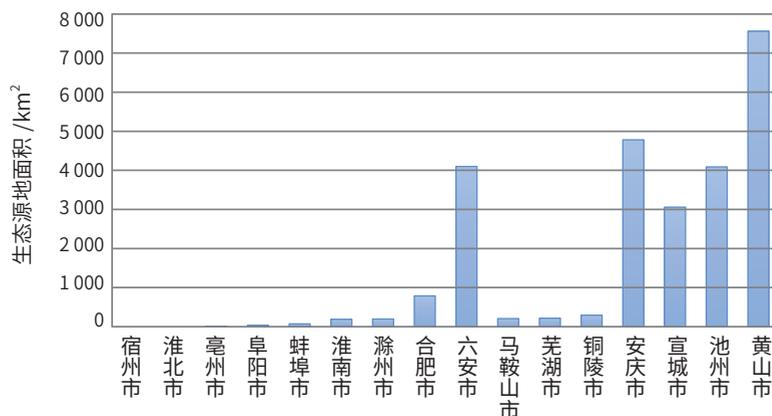


图5 安徽省各地级市生态源地分布情况

态廊道，共识别出 17 条潜在生态廊道，总长度为 1 048.50 km，其中长度最短的为 4.36 km，最长的为 163.41 km。

(3) 生态夹点及生态障碍点提取

生态夹点是生态源地间生物迁徙概率较高的区域。结合电路理论，研究运用 Pinchpoint Mapper 工具获取电流密度分布，提取高值区作为初始生态夹点，再根据自然断点法，选取前 4 级作为最终生态夹点，即剔除面积小于 0.8 km² 的斑块，共获得 49 处生态夹点，总面积为 259.88 km²，其中面积最大的为 25.07 km²，面积最小的为 0.99 km²。生态夹点主要分布在六安市、滁州市等 8 个城市，其中滁州市的明光市生态夹点分布最多，面积为 32.55 km²。见图 6。

通过 Barrier Mapper 模块识别生态障碍点，分别以 500 m、1 000 m、1 500 m、2 000 m 为搜索半径，选择“Maximum”模式，通过自然断点法将结果分为 5 级，选择最高级作为生态障碍点。由于搜索半径为 1 000 m、1 500 m、2 000 m 获取的生态障碍点分布情况基本相似，没有明显变化，本研究最终选择 1 000 m 搜索半径的结果提取生态障碍点，共获得

66 处，面积为 1 646.991 km²，主要集中在生态廊道及其周边。生态障碍点中面积最大的为 160.77 km²，面积最小的为 3.89 km²，修复这些生态障碍点可极大增强区域之间的连通性，提升生态系统质量。生态障碍点空间分布情况显示，六安市的生态障碍点分布面积最大，为 565.66 km²，在六安市的各区县中，裕安区的生态障碍点面积最大，为 171.37 km²。见图 7。

3.2.2 生态功能分区划分

结合安徽省生态系统服务供给空间分布特征，根据区域生态资源体量特征将其划分为最重要、非常重要、重要、一般和不重要 5 个等级，以表征区域生态资源禀赋情况，同时基于不同供给水平等级可将安徽省划分为生态保护区、生态修复区和生态建设区 3 种类型(图 8)，3 种类型所占面积之比为 1.25 : 2.30 : 1，生态修复区所占面积最大，为 57 890.02 km²。生态保护区为除去生态源地的生态系统服务供给最重要、非常重要 2 个等级的空间的并集空间，主要分布在安庆市、池州市、黄山市、宣城市以及六安市金寨县、霍山县

和舒城县等地区，其中安庆市生态保护区面积最大(6 336.64 km²)，其次为宣城市。生态保护区在安徽省北部有零星分布，整体呈现“南密北疏”特征。生态修复区包括生态系统服务供给重要、一般区域，主要集中在安徽中部及中北部，其中滁州市的生态修复区面积占比最大，为 16.25%，其次为阜阳市。该类地区生态资源本底条件较差，土地利用类型以耕地为主，需进一步加强生态修复，提升生态系统供应能力。生态建设区由生态系统服务供给不重要区域组成，主要集中在具有不透水面的城市中心以及宿州市砀山县、萧县等安徽省北部生态资源不足的地区，其中宿州市生态建设区面积占比最大，为 25.78%，其次为亳州市。该类地区生态基底差，要严格限制建设用地对生态空间的侵占，积极建设城市公园，并与生态保护区、生态修复区进行过渡衔接，推动城市生态质量提升。

3.2.3 生态安全格局构建

结合《安徽省国土空间生态修复规划(2021—2035 年)》，研究提出安徽省“两带、两轴、两屏、三区、多点”的生态安全格局方案(图 9)。

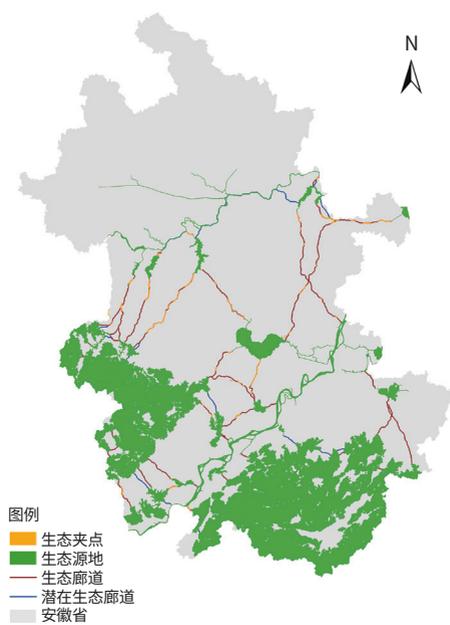


图 6 安徽省生态夹点分布图

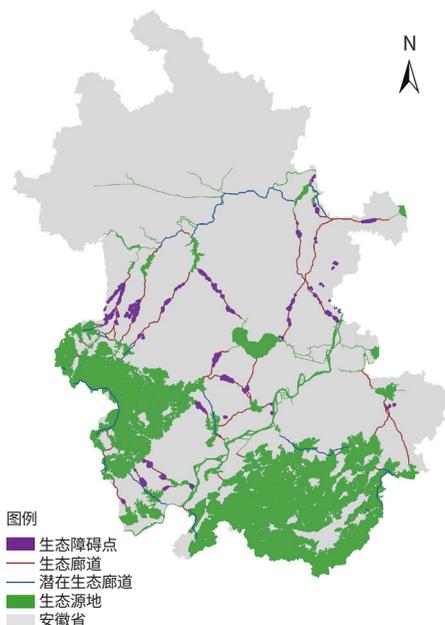


图 7 安徽省生态障碍点分布图

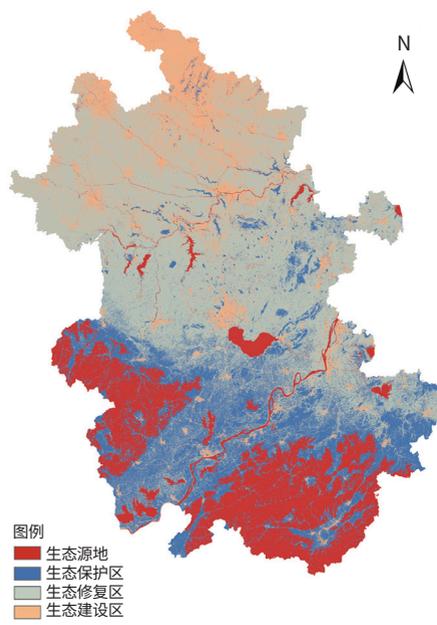


图 8 安徽省生态功能分区示意图

“两带”分别为长江生态保护修复带和淮河生态保护修复带。其中：长江生态保护修复带以长江流域为中心，贯穿安徽省东部和西部，衔接皖西大别山区、皖南山区、巢湖等生态禀赋区，在该区域应推动“江—河—湖”“江—山—林”等系统修复，强化安徽省南部生态系统的协同发展；在淮河生态保护修复带，围绕淮河流域，修复沿淮河湖湿地，提升安徽省北部生境质量并提高生物多样性水平。

“两轴”分别为贯穿安徽省南部和北部的生态廊道轴，连接多处生态源地，并与多处生态廊道相交。其中：东部生态廊道轴涉及生态源地面积 14 206.91 km²，联系生态廊道 8 条，廊道总长度为 517.02 km；西部生态廊道轴涉及生态源地面积 20 491.96 km²，联系廊道 9 条，廊道总长度为 512.56 km。安徽省“两轴”与“两带”形成“井”字结构，应基于该格局框架统筹推动安徽省全域国土空

间生态修复。

“两屏”分别为皖西大别山区生态屏障和皖南山区生态屏障，这两个区域集中分布了安徽省大部分的生态源地，其中皖西大别山区涉及生态源地面积 7 727.75 km²，占总生态源地面积的 30.16%，皖南山区涉及生态源地面积 14 311.20 km²，占比达 55.86%，同时长江流经皖南山区，故选择这两处作为安徽省生态屏障。皖西大别山区生态屏障森林资源丰富，但林业生产效率较低，需充分利用生态资源发展生态旅游、林下种植业等，推动生态价值高效转化为经济价值，为大别山革命老区振兴发展提供“两山”转化新路径；皖南山区生态屏障自然资源与人文资源俱佳，生物多样性丰富，该区域可以黄山国家公园建设为核心，加强黄山、九华山等区域的生态安全建设，为皖南国际文化旅游示范区建设提供生态支撑。

“三区”分别为生态保护区、生态

修复区及生态建设区。其中：生态保护区主要集中在安徽省南部，是全省生态源地和生态廊道集中分布的区域，生态系统供应能力较强，可在满足自身需求的前提下，促进过剩的生态产品向安徽省中部需求旺盛区及北部资源稀缺区转移，以推动安徽省生态产品的区域合作，同时推动安徽省南部和西部等地方经济的可持续发展；生态修复区主要分布在安徽省中北部，该区域用地类型以耕地为主，生态资源不足，应以保护修复为主，提升区域生态水平；生态建设区主要集中在城市中心区及安徽省北部区域，具有生态需求旺盛和生态资源缺乏的矛盾特征，因此一方面应借助旺盛需求健全生态产品市场交易机制，通过引进高供给区的生态产品推动建立安徽省全域生态市场，另一方面应加强生态资源营造，保护并扩大生态功能用地，推动城市绿地绿化建设，以衔接生态保护区和生态修复区。

“多点”为生态夹点和障碍点，是生态安全格局的重要组成部分，需重点保护生态夹点和修复生态障碍点，以保证生物流动顺畅、网络构建完整。

相较于《安徽省国土空间生态修复规划(2021—2035年)》，本研究构建的安徽省生态安全格局保留了长江、淮河生态廊道和皖西大别山区、皖南山区生态屏障等内容，同时依据电路理论提取生态廊道及生态源地，补充了东部、西部生态廊道轴，完善了安徽省全域生态安全格局的“井”字形结构，强化了全域统筹保护修复。结合安徽省生态系统服务供给价值和生态资源分布特征，划定全省生态功能分区，把控生态产品的源头治理，并从生物、自然本身出发，考虑生态系统演替规律和生物迁徙习性，将依据电路理论识别出的生态夹点和障碍点作为生态修复点，补充完善“多点”治理。基于生态系统服务供需构建的安徽省省域生态安全格局，从生态系统供

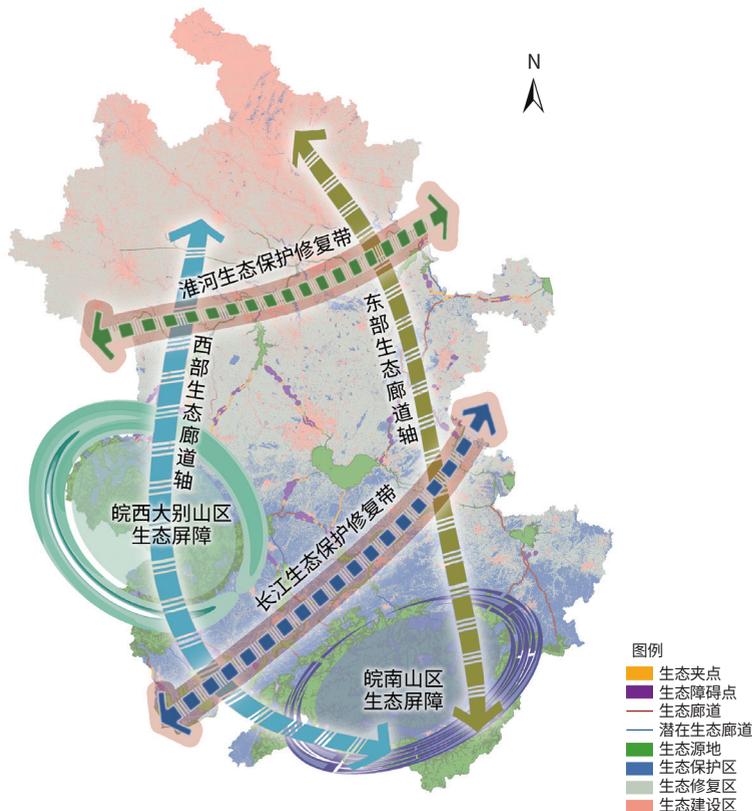


图9 安徽省生态安全格局图

给和人类需求出发,综合考虑了自然生态系统和社会经济系统,在继承并完善《安徽省国土空间生态修复规划(2021—2035年)》相关内容的基础上,更加突出了“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念。

4 结束语

研究基于生态系统服务供需协同构建区域生态安全格局,综合考虑自然生态因素和人类经济活动,对于“生态—经济—社会”复合系统的经济高质量发展和生态高水平保护具有重要意义,可有效推动区域国土空间安全建设。研究在探究生态安全、生态系统服务及供需等相关概念的基础上,从生态系统服务供需均衡视角强调区域生态安全格局的构建应注重自然生态系统和社会经济系统的协同,而生态服务供需评估是构建生态安全格局的基础,据此完善生态安全格局的构建思路,并借助电路理论,提出基于生态系统服务供需协同的“源地识别—阻力面建立—廊道提取”生态安全格局框架;以安徽省为实例,从食物供需服务、产水服务、固碳服务及游憩服务4个方面对安徽省生态系统服务供需情况进行评估,依据全省水域、湿地等自然资源分布特征,确定省域生态源地、提取生态廊道、识别生态夹点和障碍点、划分生态功能区等,形成安徽省“两带、两轴、两屏、三区、多点”的生态安全格局,为省域国土空间生态修复和经济高质量发展提供依据,为有效保障省域国土空间生态安全提供支撑。

限于知识结构及能力,本研究尚有需要进一步深入和完善的内容:一是在生态系统服务供需核算方面,可基于现有的食物供需服务、产水服务、固碳服务和游憩服务4个要素,结合地区政策导向和现实发展需求进一步完善核算要素,提升地区生态系统服务供需量化的

精准性和综合性;二是在生态源地选取方面,可进一步增设相关限定条件,以确保生态源地的选择更加科学,包括考虑土地开发程度的梯度效应、融合景观连通性及区域重点生态功能区等。

[参考文献]

- [1] 席广亮,甄峰,钱欣彤.流动性视角下的国土空间安全及规划应对策略[J].自然资源学报,2022(8):1935-1945.
- [2] 周燕,曹贝,熊媛,等.流域生态空间保护规划方法与实践:以梁子湖流域生态空间保护与利用规划为例[J].规划师,2023(8):125-131.
- [3] 柯钦华,周俏薇,庄宝怡,等.基于生态系统服务供需平衡的粤港澳大湾区生态安全格局构建研究[J].生态学报,2024(5):1-15.
- [4] 汤燕良,刘文凤.生态安全格局的国土空间用途管制思路与惠州实践[J].规划师,2022(8):75-81.
- [5] BURTON I. Report on reports: our common future: the world commission on environment and development[J]. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 1987(5): 25-29.
- [6] EZEONU I C, EZEONU F C. The environment and global security[J]. Environmentalist, 2000, 20: 41-48.
- [7] LIU C, LI W, XU J, et al. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: a literature review and bibliometric analysis[J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108734.
- [8] LI Z T, YUAN M J, HU M M, et al. Evaluation of ecological security and influencing factors analysis based on robustness analysis and the BP-DEMALTE model: a case study of the Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 595-602.
- [9] 曹祺文,赵丹,王君,等.基于系统耦合的首都生态安全格局构建与管控[J].规划师,2022(9):61-65.
- [10] ZHU B, HASHIMOTO S, CUSHMAN S A. Navigating ecological security research over the last 30 years: a scoping

review[J]. Sustainability Science, 2023(5): 2485-2498.

- [11] 吴柏海,余琦殷,林浩然.生态安全的基本概念和理论体系[J].林业经济,2016(7):19-26.
- [12] FAN Y, FANG C. Evolution process and obstacle factors of ecological security in western China, a case study of Qinghai province[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106659.
- [13] 彭保发,刘宇.河流景观生态服务供给与需求/消费的互馈机制[J].生态学报,2022(19):7707-7716.
- [14] 陶德凯,张子建,周文莉,等.基于外部效益内部化的生态产品价值实现理论框架[J].生态学报,2024(16):1-14.
- [15] 陶德凯,张子建,夏季.生态产品价值实现的供需逻辑及国土空间规划实现路径[J].规划师,2023(8):1-9.
- [16] 白杨,王敏,李晖,等.生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J].生态学报,2017(17):5846-5852.
- [17] 朱琪,袁泉,于大炮,等.基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建[J].生态学杂志,2021(11):3463-3473.
- [18] 武文欢,彭建,刘焱序,等.鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J].地理科学进展,2017(12):1571-1581.
- [19] 陶芹,陶宇,欧维新.长三角地区休闲游憩服务供需关系研究[J].生态学报,2021(5):1777-1785.

[收稿日期]2024-07-19;

[修回日期]2024-08-23