

DOI: 10.20103/j.stxb.202505071093

肖长江, 石雨鑫, 李鑫, 欧维新, 刘涛, 张灏琳, 刘春英. 基于水-能源-生态框架的环鄱阳湖城市群生态系统服务多尺度供需格局及管理分区. 生态学报, 2025, 45(24): 12433-12452.

Xiao C J, Shi Y X, Li X, Ou W X, Liu T, Zhang H L, Liu C Y. Multi-scale supply-demand patterns and management zoning of ecosystem services in the Poyang Lake Urban agglomeration under the water-energy-ecology nexus framework. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12433-12452.

# 基于水-能源-生态框架的环鄱阳湖城市群生态系统服务多尺度供需格局及管理分区

肖长江<sup>1</sup>, 石雨鑫<sup>1</sup>, 李鑫<sup>2,\*</sup>, 欧维新<sup>3</sup>, 刘涛<sup>1</sup>, 张灏琳<sup>1</sup>, 刘春英<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 江西财经大学公共管理学院, 南昌 330013

<sup>2</sup> 中国矿业大学公共管理学院, 徐州 221116

<sup>3</sup> 南京农业大学公共管理学院, 南京 210014

**摘要:** 准确识别生态系统服务供需格局, 对优化生态空间格局与提升区域生态治理能力具有重要意义。以环鄱阳湖城市群为研究区域, 基于水-能源-生态框架构建多尺度生态系统服务供需分析体系, 选取产水、固碳、土壤保持和生境质量四类生态系统服务, 综合运用 RUSLE 与 InVEST 模型, 测度 2020 年生态系统服务的供需量和供需比; 在格网、县级和市级三个尺度上采用空间自相关、冷热点识别、斯皮尔曼相关分析, 揭示供需空间集聚特征; 基于供需关系和耦合协调模型构建市-县两级生态分区体系, 并结合 SOMF 方法识别分区主导功能。结果表明: (1) 2020 年环鄱阳湖城市群生态系统服务供给整体呈现东高西低、外围优于中部格局, 需求集中于中部核心城市区, 供需存在显著空间错配; (2) 多尺度供需格局呈现明显尺度效应与服务异质性, 市县尺度协同性较强, 格网尺度空间异质性更显著; (3) 在供需空间格局分析基础上构建市-县级生态分区体系, 市级识别出城镇扩张与生态修复区、生态重塑与产业转型区、生态屏障与功能保护区三类功能区, 县级进一步细化了提升生态系统服务功能的管理分区。从多尺度视角系统剖析环鄱阳湖城市群生态系统服务供需格局, 并构建多层次生态空间优化路径, 为区域生态管理、资源配置与空间规划提供理论支持与决策参考。

**关键词:** 生态系统服务; 供需格局; 多尺度分析; 管理分区; 环鄱阳湖城市群

## Multi-scale supply-demand patterns and management zoning of ecosystem services in the Poyang Lake Urban agglomeration under the water-energy-ecology nexus framework

XIAO Changjiang<sup>1</sup>, SHI Yuxin<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2,\*</sup>, OU Weixin<sup>3</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, ZHANG Haolin<sup>1</sup>, LIU Chunying<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China

<sup>2</sup> School of Public Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

<sup>3</sup> College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China

**Abstract:** Accurate identification of ecosystem service (ES) supply-demand patterns was critical for optimizing ecological spatial structures and enhancing regional ecological governance capacity. This study focused on the Poyang Lake Urban Agglomeration in China and developed a comprehensive multi-scale analytical framework under the water-energy-ecology (WEE) nexus to systematically assess ES supply and demand relationships. Four key ES types—water yield, carbon sequestration, soil retention, and habitat quality—were selected because they represent essential ecological processes and resource flows that underpin regional sustainability and environmental security. The ecological supply and demand volumes,

基金项目: 国家自然科学基金 (42261045)

收稿日期: 2025-05-07; 网络出版日期: 2025-09-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: topzcg@126.com

as well as supply-demand ratios, were quantified for the year 2020 using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) models. To characterize spatial heterogeneity and clustering patterns, spatial autocorrelation indices, hotspot and coldspot analyses, and Spearman correlation coefficients were applied at three nested scales: grid, county, and municipal levels. Based on the spatial matching of supply and demand, a coupling coordination model was employed to diagnose the degree of alignment between ecological capacity and socioeconomic needs across scales. Additionally, a Self-Organizing Map Feature (SOMF) clustering method was introduced to further classify dominant ES functions within each county, enabling a more refined understanding of functional differentiation and localized management priorities. The results showed that: (1) ES supply in 2020 exhibited a spatial pattern of higher values in the east and periphery and lower values in central areas, whereas demand was concentrated in urban cores, revealing a significant spatial mismatch; (2) Supply-demand patterns displayed strong scale effects and service-specific heterogeneity, with greater coordination at municipal/county levels and more pronounced spatial heterogeneity at the grid scale; (3) The zoning system identified three municipal-level functional zones—urban expansion and ecological restoration areas, ecological reshaping and industrial transformation areas, and ecological barrier and functional conservation areas—while county-level zones provided more detailed ES function management strategies. The integrated zoning framework delineated three municipal-level functional zones—urban expansion and ecological restoration areas, ecological reshaping and industrial transformation areas, and ecological barrier and functional conservation areas. County-level divisions provided more detailed management recommendations to enhance ES supply-demand balance and strengthen ecological resilience. This multi-scale approach advances the theoretical understanding of ES supply-demand dynamics within the WEE framework and provides robust, actionable insights for regional ecological management, resource allocation, and spatial planning. This study provided a comprehensive multi-scale analysis of ES supply-demand dynamics and proposed a multi-tiered ecological spatial optimization framework offering theoretical insights and practical guidance for regional ecological management, resource allocation, and spatial planning.

**Key Words:** ecosystem services; supply-demand patterns; multi-scale spatial analysis; management zoning; Poyang Lake urban agglomeration

水资源、能源以及生态本底条件作为区域可持续发展的核心资源<sup>[1-2]</sup>,其相互作用构成复杂的水-能源-生态关系网络(Water-Energy-Ecology Nexus, WEE Nexus);生态系统提供的多种直接与间接的生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)是构成人类福祉的重要基础<sup>[3]</sup>。虽然水-能源-生态关系直观上涉及水资源、能源和生态资源的开发以及三者之间的联系,但本质上与直接或间接从生态系统中获取的自然效用或产品相关<sup>[4]</sup>。一方面,相关生态系统服务是WEE框架内水资源、能源等的生产、开发、利用管理过程中的投入要素;另一方面与WEE框架相关的人类活动也在一定程度上作用于各类生态系统服务的产生、流动<sup>[5]</sup>与对各生态系统服务的需求<sup>[6]</sup>。随着资源-生态-发展矛盾加剧,水、能源、生态系统之间的耦合关系日益紧密,伴随人口增长、工业化和气候变化,生态系统结构失衡和功能退化,生态系统服务持续供给能力不断下降<sup>[7]</sup>,与此同时,人类对生态系统服务需求大幅增长,供需数量不平衡和空间不匹配问题日益突出<sup>[8]</sup>,并引发水资源短缺<sup>[9]</sup>、土地退化<sup>[10]</sup>等系列生态与社会问题,严重制约区域生态安全和城市群可持续发展。

为确保生态系统与社会系统的健康协调发展,《国家主体功能区规划》、《关于加强生态环境分区管控的意见》和《全国国土空间规划纲要(2021—2035年)》等相继发布,其中均明确提出要全面落实主体功能区战略,构建国家和区域生态环境分区管控制度。此外,十九大报告指出,社会主要矛盾已转变为人民日益增长的对美好生活的需要与不平衡和不足的发展之间的矛盾,本质上也反映了生态系统服务供需匹配问题<sup>[3]</sup>。近年来,关于生态服务供需关系的研究涉及概念框架<sup>[11]</sup>、供需格局识别<sup>[12]</sup>、空间模式分析<sup>[13]</sup>与服务流估算<sup>[14]</sup>等;研究方法包括空间自相关分析<sup>[15]</sup>、供需比和供需差分析<sup>[16-17]</sup>、四象限法<sup>[18]</sup>和耦合协调度<sup>[19]</sup>等;研究尺度从行政单元<sup>[20-23]</sup>扩展到流域<sup>[24]</sup>、城市群<sup>[25]</sup>等更为宏观的尺度。关于WEE框架的研究则主要聚焦于概念框

架<sup>[6]</sup>、内部安全与协同效率<sup>[6]</sup>与生态系统服务交互作用机制<sup>[3]</sup>等方面。但现有研究仍存在以下不足:其一,现有研究多集中于 WEE 框架与生态系统服务的相互作用研究,缺乏进一步的实际应用,如管理分区研究。其二,多以单一服务类型或整体服务为研究对象,未能有效揭示典型生态系统服务之间的交互作用及其与区域生态安全的耦合关系<sup>[26]</sup>。其三,多聚焦单一空间尺度下的供需格局,缺乏对多尺度供需关系变异机制的系统研究,难以支撑生态政策的精准化、多层次应用<sup>[14,27]</sup>。为此,亟需构建多尺度、多类型协同的供需分析框架,系统识别生态服务供需空间格局差异,以满足国家生态文明建设和区域可持续发展的治理需求。

在水-能源-生态框架下,参考《江西省生态功能区划》,基于区域自然条件、社会经济压力及数据可获取性,选取产水、固碳、土壤保持与生境质量四类服务开展供需分析。产水服务反映区域水资源的调控能力<sup>[26]</sup>,环鄱阳湖城市群水系密布,五大河流注入鄱阳湖,是长江中下游重要的生态调蓄区,近年来城市扩张与用水需求上升,区域供需矛盾凸显。固碳服务关联能源系统的碳汇功能<sup>[26]</sup>,该区为南方典型林区,森林碳储量丰富,但面临碳排放增长与能源转型的双重压力,碳中和任务艰巨。土壤保持服务衡量生态系统维持地表稳定与防止侵蚀的能力<sup>[28]</sup>,区域丘陵广布、降雨集中,水土流失问题长期存在,生态系统调节功能亟待提升。生境质量则体现生物多样性与生态系统完整性<sup>[28]</sup>,鄱阳湖是全球候鸟重要越冬地之一,湿地与栖息地保护压力大。基于此,本文从格网、县级与市级三个空间尺度出发,基于 WEE 框架选取产水、固碳、土壤保持与生境质量四类典型服务,综合生态模型与社会经济数据对环鄱阳湖城市群生态系统服务供需格局进行刻画,开展多尺度供需相互关系与空间集聚特征分析,并基于多尺度供需关系结果开展市-县两级生态管理分区,并利用自组织映射网络识别区域主导生态功能类型,以期为生态系统服务空间优化与区域分区管控提供科学依据和实践路径。

## 1 区域概况和数据来源

### 1.1 区域概况

环鄱阳湖城市群是长江中游城市群的重要组成部分,是江西省融入长江经济带、建设生态文明试验区的核心区域。区域内分布有 25 处省级及以上自然保护区,生态公益林面积达 475 万  $\text{hm}^2$ ,重要湿地与水源涵养区总面积超过 60 万  $\text{hm}^2$ ,是江西省生态屏障功能最为集中的区域之一<sup>[29]</sup>。近年来,区域发展迅速,频繁的人类活动给生态系统带来显著干扰,引发植被退化、水土流失、湿地退化、景观类型多样性减少、生物栖息地破碎化程度加剧、部分生态廊道被阻断和碳排放强度升高等诸多生态问题<sup>[30-32]</sup>,区域生态系统调节能力亟待提升。结合《江西省推进生态鄱阳湖流域建设行动计划》关于山水林田湖草系统保护治理目标以及《江西省国土空间规划(2021—2035 年)》生态空间管控要求,有必要在生态系统服务视角下开展多尺度供需关系分析与生态管理分区研究,为区域精细化生态治理与系统性空间管控提供支撑。

### 1.2 数据来源

研究数据主要涵盖 2020 年土地利用遥感解译数据、土壤数据、气候数据和各类社会经济统计数据等(表 1)。所有栅格数据投影坐标系统一转换为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50N 并利用 ArcGIS 10.8 统一为 100m×100m 分辨率。

## 2 技术路线和研究方法

### 2.1 技术路线

旨在从水-能源-生态关系与多尺度视角系统评估环鄱阳湖城市群生态系统服务的供需格局与协调关系,进而科学划分生态分区,为区域生态保护与差异化空间管理提供决策支撑。研究包括三个步骤(图 2)。首先,基于遥感数据与统计信息量化多尺度生态系统服务供需格局。其次,采用 LISA 空间聚类与相关性分析探究供需关系的空间异质性及其交互机制。最后,基于市级尺度供需匹配关系构建一级分区,从宏观层面识别区域各市级单元生态承载与发展需求间的空间矛盾,为县级层面精细化管理划定边界与分区框架;在一级分区基础上,引入县级供需耦合协调度细化分区类型,并考虑其在识别生态功能类型异质性方面存在局限,进一



步引入聚类分析精准识别县域生态功能主导类型与缺陷,从而构建宏观识别-协调诊断-功能归类的分区路径,形成覆盖市-县多尺度的生态系统服务管理分区体系,为实施分级分类、差异化的生态保护与调控策略提供科学依据。

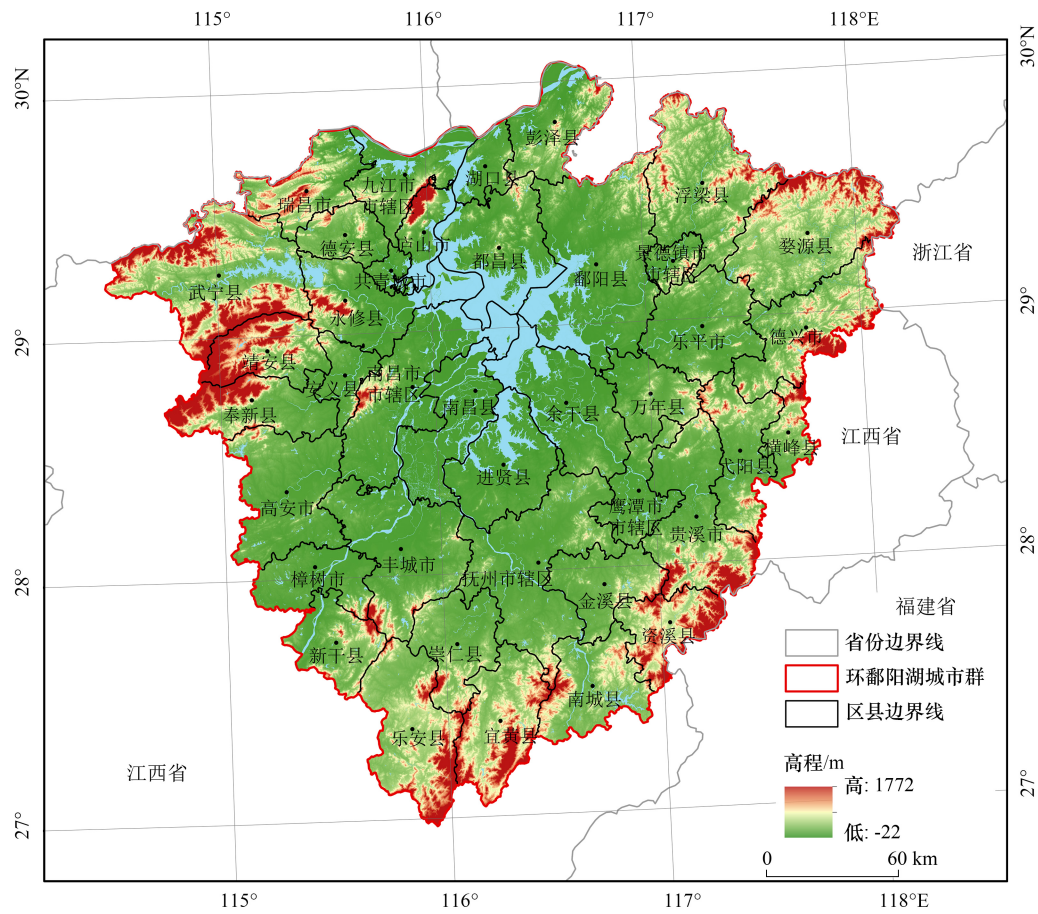


图 1 环鄱阳湖城市群区位示意图  
Fig.1 Location of the Poyang Lake Urban Agglomeration

表 1 数据来源与描述

数据 Data	数据精度 Spatial resolution	来源 Sources
土地利用数据、归一化植被指数 Land use data and normalized difference vegetation index	30m×30m	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
数字高程模型 digital elevation model	90m×90m	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
土壤深度、植物可利用含水量 Soil depth and plant-available water content	1km	世界土壤数据库 (HWSD)
降雨量、潜在蒸散发量 Precipitation and potential evapotranspiration	1km×1km	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn">https://data.tpdc.ac.cn</a> )
人口密度数据 Population density data	100m×100m	WorldPop 人口密度数据集 ( <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a> )
用水量数据 Water consumption data	—	《江西省水资源公报(2020)》
碳排放数据 Carbon emission data	—	中国碳核算数据库 ( <a href="http://www.ceads.net/">http://www.ceads.net/</a> )



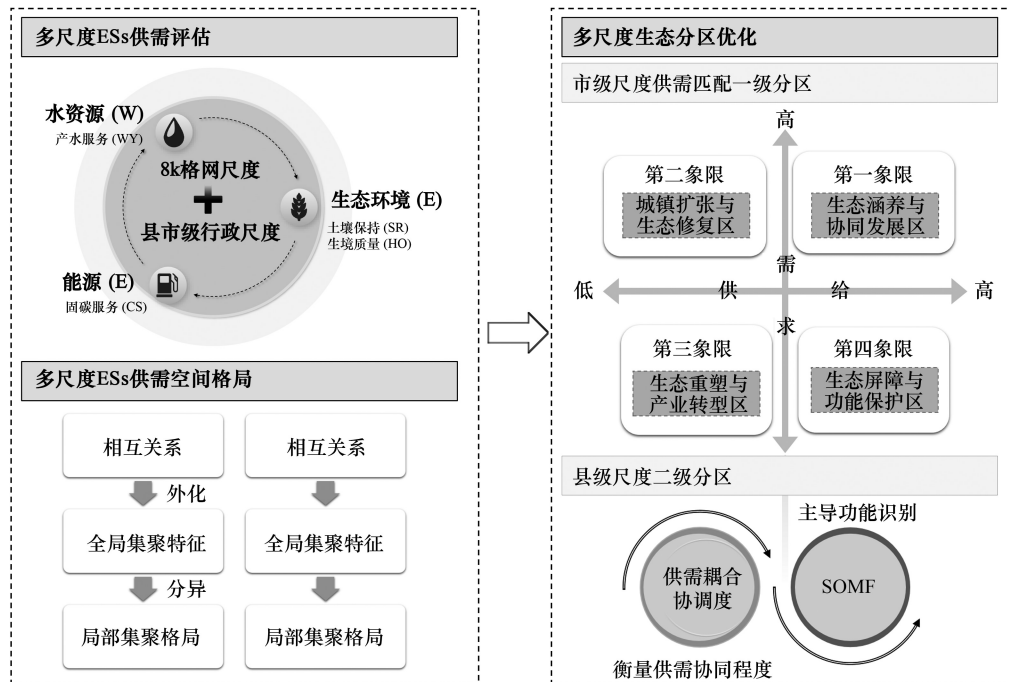


图2 技术路线

Fig.2 Technical approach

WY:产水服务;SR:土壤保持;CS:固碳服务;HQ:生境质量;SOMF:自组织映射网络

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 多尺度生态系统服务供需量化分析

为精细量化生态系统服务供需格局,综合考虑生态过程、人类决策尺度及数据可获取性,构建多尺度分析框架,选取网格尺度、县域尺度及市域尺度开展生态系统服务供需的分区统计。县域与市域作为社会组织尺度,可有效衔接宏观可持续管理实践,而网格尺度则能从精细化视角揭示生态系统服务供需的空间异质性<sup>[27]</sup>。环鄱阳湖城市群总面积约  $6.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,共辖约 1035 个乡镇,乡镇平均面积约  $67 \text{ km}^2$ 。为实现网格尺度与行政组织尺度的有效衔接,本文选取 8km 作为网格边长,以保证研究尺度与乡镇尺度的匹配性。

#### (1) 多尺度生态系统服务供需量化

产水服务、固碳服务和生境质量供给基于 InVEST 模型的 Annual Water Yield、Carbon Storage and Sequestration 和 Habitat Quality 模块进行评估;产水需求量通过人口密度与年人均用水量估算<sup>[33—34]</sup>,固碳需求则基于人均碳排放量与人口密度核算,生境质量以区域生境质量均值作为基准<sup>[35—36]</sup>,通过供需差额估算需求强度。土壤保持服务供给采用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)进行模拟,需求量以实际土壤侵蚀量衡量(表2、表3)。

#### (2) 多尺度生态系统服务供需关系分析

基于生态系统服务供需比(Ecosystem Service Demand Ratio, ESDR)从市域、县域和网格三个尺度揭示环鄱阳湖城市群多尺度各生态系统服务实际供需盈余和赤字的空间分布特征,计算公式如下<sup>[37]</sup>:

$$ESDR_i = \frac{S_i - D_i}{(S_{\max}^i + D_{\max}^i) \div 2}$$

式中,  $ESDR_i$  是各县(市、区)的第  $i$  项生态系统服务供需比率;  $S_i$  是第  $i$  项生态系统服务的供给量;  $D_i$  是第  $i$  项生态系统服务的需求量。当  $ESDR > 0$  时,表示处于供给盈余状态;当  $ESDR = 0$  时,表示供需平衡状态;当  $ESDR < 0$  时,表示处于供给赤字状态。

表 2 生态系统服务供给计算方法  
Table 2 Calculation method of ESs supply

生态系统服务供给 Ecosystem service supply	计算公式 Calculation formula	变量解释 Variable explanation
产水服务 Water yield, WY	$WY_j = \left(1 - \frac{AET_j}{P_j}\right) \times P_j$	$WY_j$ 为栅格单元 $j$ 的年产水量 (mm); $AET_j$ 为栅格单元 $j$ 的年实际蒸散量 (mm); $P_j$ 为栅格单元 $j$ 的年降水量 (mm)。
固碳服务 Carbon sequestration, CS	$C_{cx} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	$C_{cx}$ 为栅格 $x$ 的总碳固存量 ( $t/hm^2$ ); $C_{above}$ 为栅格 $x$ 的地上碳密度; $C_{below}$ 为栅格 $x$ 的地下碳密度; $C_{dead}$ 为栅格 $x$ 的死亡有机质碳密度; $C_{soil}$ 为栅格 $x$ 的土壤有机质碳密度。
土壤保持服务 Soil retention, SR	$PSE = R \times K \times LS$ $ASE = R \times K \times LS \times C \times P$ $SR = PSE - ASE = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$	$PSE$ , $ASE$ 和 $SR$ 分别代表潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量和土壤保持量 ( $t/hm^2$ ); $R$ 为降雨侵蚀性因子 ( $MJ\ mm\ h\ mm^{-2}\ h^{-1}$ ); $K$ 为土壤可侵蚀性因子 ( $t\ h\ mm^{-2}\ h\ mm^{-2}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ ); $LS$ 为坡长坡度因子 (无量纲); $C$ 为植被覆盖和作物管理因子 (无量纲); $P$ 为水土保持措施因子 (无量纲)。
生境质量 Habitat quality, HQ	$Q_{xj} = H_i \times (1 - (D_{xj}^z / (D_{xj}^z + k^z)))$ $D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (W_r / W_r) r_y i_{rxy} b_x S_{jr}$ $i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}}\right)$ (线性衰减) $i_{rxy} = \exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{rmax}}\right) d_{xy}\right]$ (指数衰减)	$Q_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中栅格 $x$ 的生境质量供给指数; $H_i$ 为土地利用类型 $j$ 的生境适宜度; $D_{xj}^z$ 为景观类型 $j$ 中栅格 $x$ 的生境退化度; $k$ 值为半饱和常数; $Z$ 值为归一化常量; $R$ 为威胁源个数; $i_{rxy}$ 为 $r_y$ 对生境栅格 $x$ 的威胁水平; $b_x$ 为栅格 $x$ 的可达性; $S_{jr}$ 为生境类型 $j$ 对胁迫因子的敏感性。

表 3 生态系统服务需求计算方法  
Table 3 Calculation method of ESs demand

生态系统服务需求 Ecosystem service demand	计算公式 Calculation formula	变量解释 Variable explanation
产水服务 Water yield, WY	$D_{wx} = D_{pwc} \times \rho_{pop}$	$D_{wx}$ 是栅格 $x$ 的水需求量 ( $m^3/hm^2$ ); $D_{pwc}$ 是年人均用水量 ( $m^3$ ); $\rho_{pop}$ 是栅格人口密度 (人/ $hm^2$ )。
固碳服务 Carbon sequestration, CS	$D_{cx} = D_{pc} \times \rho_{pop}$ $D_{pc} = D_{sum} \div \rho$	式中, $D_{cx}$ 为栅格 $x$ 的碳固存服务需求量 ( $t/hm^2$ ); $D_{pc}$ 为人均碳排放量; $\rho_{pop}$ 为栅格人口密度 (人/ $hm^2$ ); $D_{sum}$ 为碳排放总量; $\rho$ 为各县 (市、区) 常住人口。
土壤保持服务 Soil retention, SR	$ASE = R \times K \times LS \times C \times P$	$ASE$ 代表实际土壤侵蚀量 ( $t/hm^2$ )。
生境质量 Habitat quality, HQ	$HQ_{st} = \frac{\sum_{K=1}^M S_x^{HQ}}{S}$ $D_x^{HQ} = \begin{cases} HQ_{st} - S_x^{HQ}, & S_x^{HQ} < HQ_{st} \\ 0, & S_x^{HQ} \geq HQ_{st} \end{cases}$	$HQ_{st}$ 为生境质量需求标准; $S_x^{HQ}$ 为栅格 $x$ 生境质量供给指数; $S$ 为研究区面积; $D_x^{HQ}$ 为栅格 $x$ 生境质量需求指数。

2.2.2 多尺度生态系统服务供需空间格局分析

(1) 多尺度生态系统服务的相关关系

借助 R 语言 Spearman 相关系数法探究环鄱阳湖城市群市域、县域和格网尺度下生态系统服务供给侧之间和需求侧之间的相关关系<sup>[38]</sup>。当 Spearman 相关系数>0 且通过显著性检验时,表明具有显著的协同关系; Spearman 相关系数<0,表明具有显著的权衡关系,并且相关系数的绝对值越大,其协同或权衡的程度越高<sup>[38—39]</sup>。

(2) 多尺度生态系统服务供需的的全局空间自相关分析

首先采用全局空间自相关方法,评估相邻地理单元之间的整体空间关联特征以确定环鄱阳湖城市群生态系统服务供给、需求及其供需关系在不同尺度下是否呈现显著的空间集聚特征<sup>[36]</sup>。具体计算公式如下<sup>[40]</sup>:

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

$$Z = \frac{1-E(I)}{\sqrt{V(I)}}$$

式中,  $n$  为研究对象的数目;  $x_i$  与  $x_j$  分别为样本  $i$  和样本  $j$  的属性值;  $\bar{x}$  为属性值的平均值;  $w_{ij}$  为研究对象  $i$  和  $j$  之间的空间权重矩阵; 方差  $s^2(\sum_i \sum_j w_{ij})$ ;  $Z$  是莫兰指数的统计检验结果;  $E(I)$  为数学期望;  $V(I)$  为方差。

### (3) 多尺度生态系统服务供需的冷热点格局分析

为揭示生态系统服务供需的局部空间异质性, 采用冷热点分析 (Getis-Ord  $G_i^*$ ) 识别低值集聚区 (冷点) 和高值集聚区 (热点)<sup>[41]</sup>。热点分析公式为<sup>[42-43]</sup>:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_j^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_j^n w_{ij}^2 - (\sum_j^n w_{ij})^2}{n-1}}}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_j^n x_j^2}{n} - (\bar{x})^2}$$

式中,  $G_i^*$  为空间单元  $i$  的集聚指数;  $w_{ij}$  为空间单元  $i$  和  $j$  之间的空间权重;  $x_j$  是空间单元  $j$  的属性值;  $n$  是空间单元总数;  $\bar{x}$  为所有数据的平均值;  $s$  为所有数据的标准差。

### (4) 多尺度生态系统服务的空间集聚格局

生态系统服务供需关系的局部空间特征则通过双变量局部空间自相关指数 (Bivariate Local Indicators of Spatial Association, Bivariate LISA) 进行识别。相较于单一变量的局部冷热点分析, 双变量局部空间自相关模型能够有效识别两种地理要素间的空间关联特征及其集聚模式, 从而为生态系统服务供需空间匹配关系提供更精细的量化依据<sup>[15,44]</sup>。

$$LISA = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

式中,  $n$  是空间单元的总数量;  $y_i$  是空间单元  $i$  的属性值;  $y_j$  是空间单元  $j$  的属性值;  $\bar{y}$  是所有空间单元属性值的平均值;  $w_{ij}$  为空间单元  $i$  和  $j$  之间的空间权重矩阵。

## 2.2.3 不同尺度生态系统服务供需分区方法

### (1) 基于供需关系的市级尺度一级分区方法

基于供需匹配的四象限分区方法, 在市级尺度上首先对四种生态系统服务的供需量  $z$ -score 标准化以消除数据量纲差异<sup>[22]</sup>; 再以标准化后的供给为  $X$  轴、需求为  $Y$  轴进行四象限划分, 分别对应高供给-高需求、低供给-高需求、低供给-低需求及高供给-低需求, 从而构建供需二维评价体系, 在宏观上揭示资源供给与发展需求空间配置的异质性矛盾。根据市级尺度供需关系四象限划分结果, 结合区域生态本底与社会发展特征, 构建生态涵养、修复治理、转型发展与功能保护四类一级分区, 以满足不同类型区域治理需求。

### (2) 基于耦合协调关系的县级尺度二级分区方法

耦合协调度模型可有效量化生态系统服务供需关系, 揭示供需之间相互作用、相互影响的协调程度, 因此在市级尺度一级分区基础上, 引入供需耦合协调度, 进一步识别不同供需协调水平的功能区, 从而构建分层递进、因地制宜的二级分区体系和支撑生态-经济协同的差异化治理策略, 公式为<sup>[45]</sup>:

$$C = \sqrt{\frac{s_i \times d_i}{(\frac{s_i + d_i}{2})^2}}$$

$$D = \sqrt{C \times T}$$

$$T = \alpha \times s_i + \beta \times d_i$$



式中,  $C$  为耦合度, 反映供需相互作用;  $D$  为供需耦合协调度;  $T$  为协调度指数;  $s_i$  和  $d_i$  分别为空间单元  $i$  归一化后的供需;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为供给、需求所占权重, 二者之和为 1, 一般取  $\alpha = \beta = 0.5$  [20]。0—0.20 为严重失调; 0.21—0.40 为中度失调; 0.41—0.50 为基本协调; 0.51—0.80 为中度协调; 0.81—1.00 为高度协调 [46]。

### (3) 基于自组织映射的县级尺度分区主导功能识别方法

考虑到耦合协调度指标虽能反映供需关系整体状态, 但在揭示生态功能类型异质性方面存在局限, 因而引入自组织特征映射网络 (Self-Organizing Feature Map, SOFM) 聚类分析在二级分区基础上识别各分区缺失与主导生态功能。自组织特征映射网络是 Kohonen 提出的一种无监督学习神经网络方法 [47], 结合 SOFM 可根据供需分布空间相似性将各县 (市、区) 分配到相应生态系统服务簇 (ES bundles, ESBs), 以识别不同主导功能区。同时, 通过 Calinski-Harabasz 指数计算最佳簇类, 以验证聚类结果的合理性, 公式为:

$$C = \left[ \frac{\sum_{k=1}^K n_k \|c_k - c\|^2}{K-1} \right] / \left[ \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} \|d_i - c_k\|^2}{N-K} \right]$$

式中,  $d_i$  是数据点  $i$  的特征向量;  $n_k$  是第  $k$  个簇的大小;  $c_k$  是第  $k$  个簇中心的特征向量;  $c$  是整个数据集全局中心的特征向量;  $N$  是数据点的总数;  $(K-1)$  为类间离散度的自由度;  $(N-K)$  为类内离散度的自由度。

## 3 结果与分析

### 3.1 环鄱阳湖城市群生态系统服务供需量化分析

图 3 至图 5 展示了环鄱阳湖城市群 2020 年多尺度产水、固碳、土壤保持及生境质量四类生态系统服务供给、需求及供需比的空间格局。供给空间格局整体呈现“东高西低、外围高于中部”的分布特征, 8km 格网尺度上, 产水供给东北部平均产水量最高; 固碳格网供给量呈现由鄱阳湖核心区向四周递增的趋势; 土壤保持供给总量呈同心环状分布。生境质量高值区集中于西北、东北及东南部地区。县级尺度上, 上饶市鄱阳县产水供给总量最多, 共青城市产水供给总量最低; 九江市武宁县固碳供给总量最多, 共青城市总供给量最低; 土壤保持供给量在武宁县达  $1.96 \times 10^9$  t, 共青城市仅为  $1.05 \times 10^7$  t; 生境质量指数高值县域集中在抚州市资溪县、九江市武宁县等区域, 指数位于 0.756—0.849 之间, 低值则出现在鹰潭市市辖区、南昌县等地, 生境质量指数均低于 0.48。市级尺度上, 景德镇市和鹰潭市产水量平均值最高, 分别为  $9578.52 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  和  $9742.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ; 固碳供给以抚州市和上饶市为主; 生境质量指数最高的为抚州市, 南昌市最低。需求空间格局整体呈现“中部高于四周、城市核心区高于外围”的分布特征。8km 格网尺度上, 产水和固碳需求高值区集中于城市群核心地带; 土壤保持高需求区多位于耕地密集且地形破碎的区域; 生境质量需求指数在中部和西南部区域相对较高。县级尺度上, 南昌市市辖区产水和固碳需求最高; 上饶德兴市土壤保持需求最高, 为  $2.31 \times 10^7$  t; 生境质量需求指数较高的县区包括南昌市市辖区、抚州市市辖区等, 指数范围为 0.17—0.32。市级尺度上, 产水、固碳和生境质量高值区均位于南昌市。供需比空间格局整体呈现“外围盈余、中部赤字”的特征, 8km 格网尺度上, 产水与生境质量的供需比高值集中在东北、西南丘陵地区, 城市核心区普遍表现为供不应求; 固碳与土壤保持在丘陵山地区域供给充足。县级尺度上, 婺源县、武宁县、资溪县等生态优势区供需比均呈盈余状态, 南昌市市辖区、共青城市等区域均面临赤字风险或已处于赤字状态。市级尺度上, 抚州市、上饶市生态系统服务整体处于盈余状态, 南昌市市辖区生态赤字风险最为突出。整体而言, 生态系统服务供需矛盾呈现明显空间异质性, 需基于尺度差异优化空间配置。

### 3.2 环鄱阳湖城市群生态系统服务供需空间格局分析

#### 3.2.1 生态系统服务供需相关关系分析

多尺度下 ESs 供需相关性差异显著, 反映空间尺度对生态系统服务互动模式的影响 (图 6)。供给侧整体呈现出较强的协同关系, 市级与县级尺度固碳、生境质量和土壤保持之间相关性显著增强。市级尺度生境质量与土壤保持供给相关系数达 0.93, 固碳与生境质量、土壤保持供给相关性分别为 0.89 和 0.92; 产水供给在格网尺度供给相关性明显减弱, 尤其是与生境质量供给的相关系数仅为 0.11。需求侧产水与固碳需求在各尺

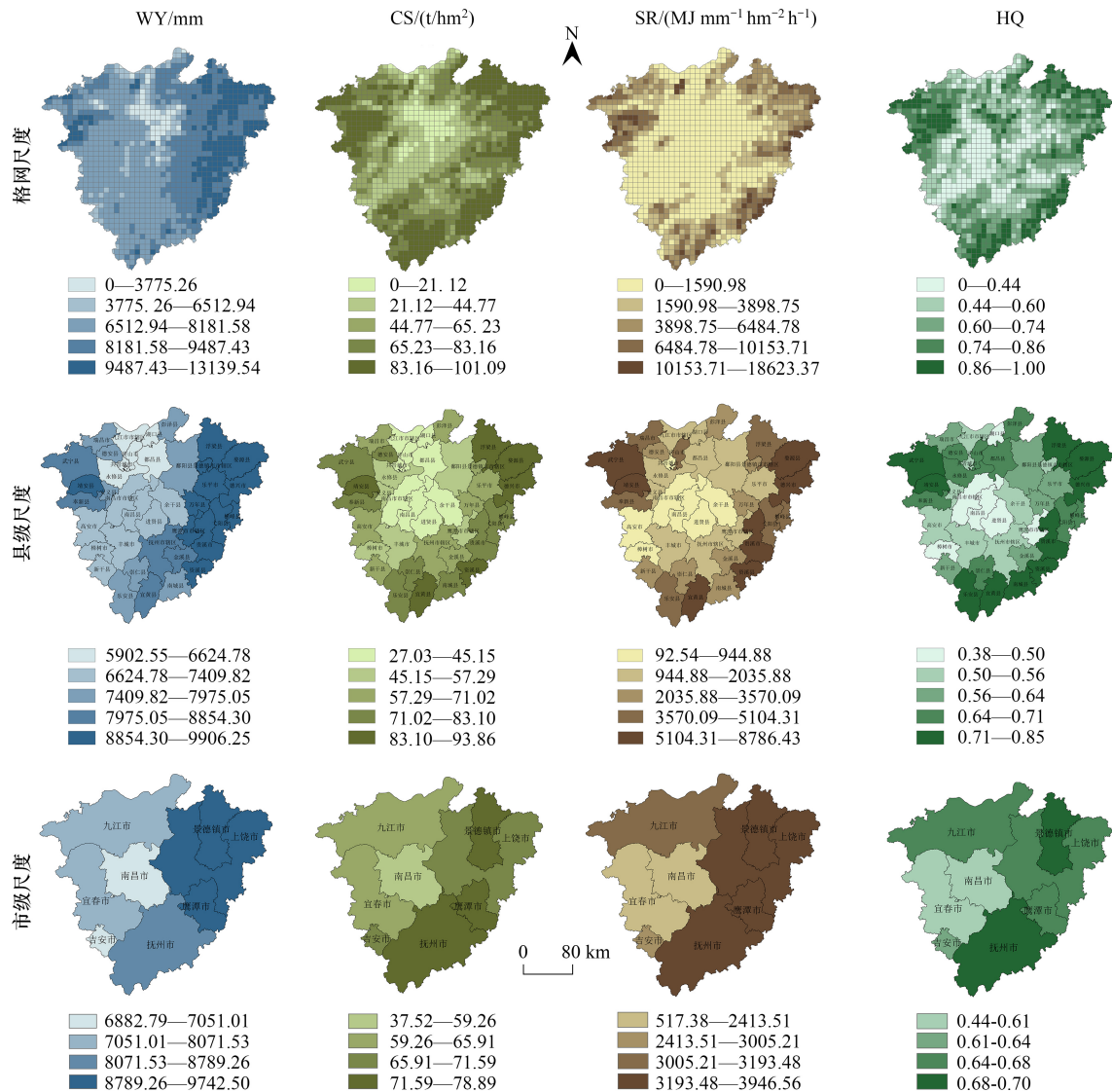


图3 不同尺度环鄱阳湖城市群生态系统服务供给空间分布

Fig.3 The spatial distribution of ecosystem services supply at multiple scales in the Poyang Lake Urban Agglomeration

度下保持高度相关,生境质量与产水、固碳需求在各尺度上亦呈正相关,相关系数分别为 0.92 和 0.72,土壤保持需求则表现出较大的尺度敏感性,其在市级尺度与其他服务呈负相关,最低达-0.28,而在县域尺度上转为正相关,最高为 0.4,至格网尺度相关性再度下降,表明其在微观尺度上受到地形坡度、土地扰动与水土流失敏感性等局部因素的复杂影响。总体看,市级和县级尺度上生态系统服务供需关系协同性更强,而在精细尺度上则表现出显著空间异质性。

### 3.2.2 生态系统服务供需的全局空间自相关分析

不同尺度下,生态系统服务供需表现出显著的空间自相关差异和尺度效应(图 7)。四类生态系统服务供给侧在格网尺度上均表现出较强的空间集聚性,全局莫兰指数均高于 0.6;随尺度增大,集聚性减弱;市级尺度下除产水外,其他服务趋于空间离散,生境质量表现为负相关,莫兰指数为-0.152。需求侧空间依赖性亦呈尺度依赖性,格网尺度上生境质量需求集聚最强,莫兰指数为 0.735;县级尺度上,产水与固碳需求的空间相关性由负转正,均为 0.179;市级尺度下需求整体空间离散,土壤保持需求呈强负相关,全局莫兰指数为-0.437。在供需双变量维度,各类服务普遍存在空间错配现象,格网尺度下生境质量供需莫兰指数为-0.732,匹配度最

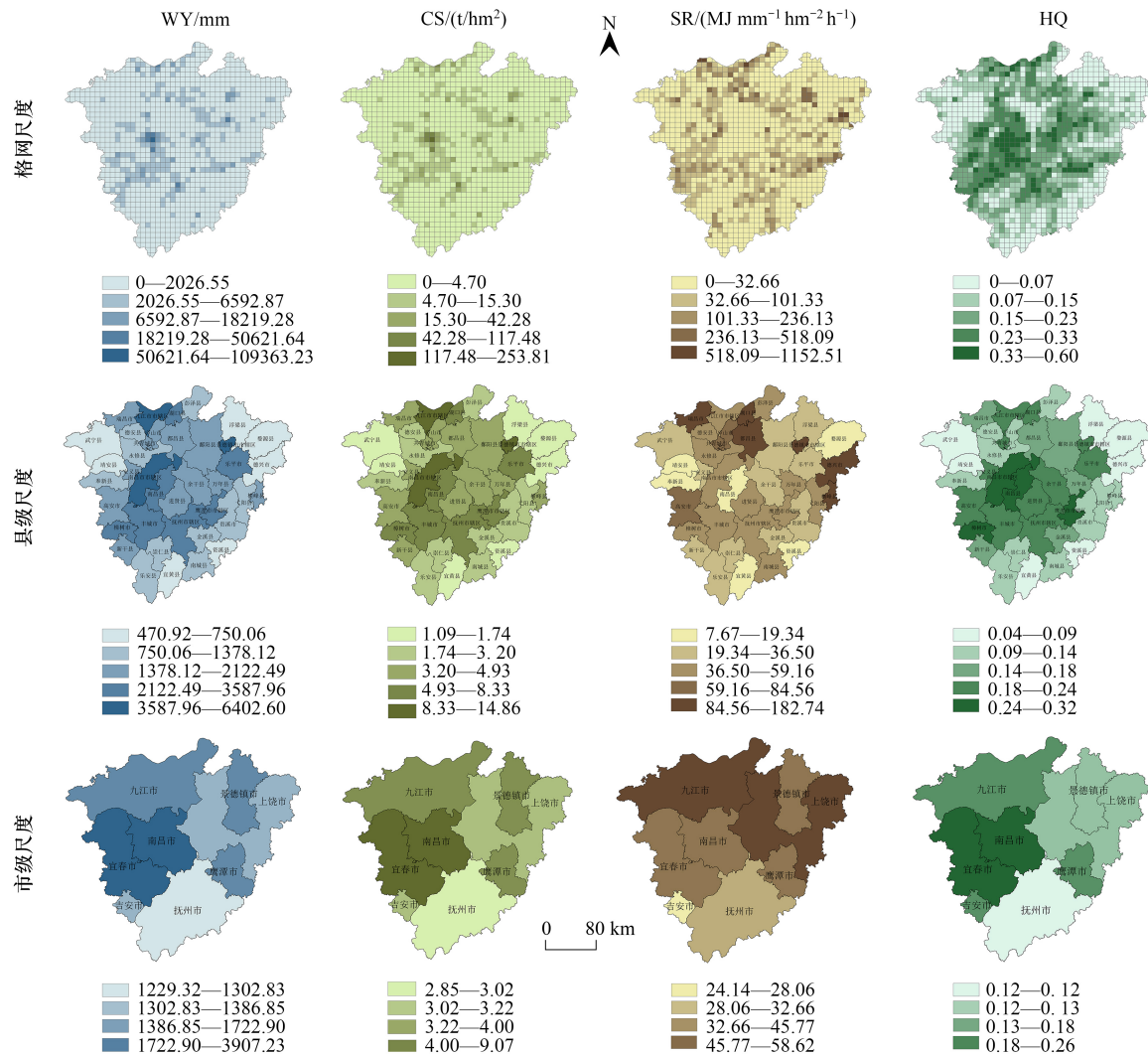


图 4 不同尺度环鄱阳湖城市群生态系统服务需求空间分布

Fig.4 The spatial distribution of ecosystem services demand at multiple scales in the Poyang Lake Urban Agglomeration

低;县级尺度错配有所缓解,但固碳与生境质量仍表现为负相关;市级尺度上供需空间脱钩特征更加显著,产水与土壤保持分别为-0.501与-0.256。整体看,生态系统服务供需关系在不同尺度和维度下呈现空间异质性,应在生态管理中重视尺度效应和供需错配风险。

### 3.2.3 生态系统服务供需的冷热点格局分析

多尺度四种生态系统服务供给侧和需求侧冷热点空间格局如图 8 所示。生态系统服务供给侧,网格尺度上,产水、固碳、土壤保持和生境质量热点集中于城市群外围林地密集区,冷点集中于鄱阳湖水域及南昌市周边,反映城市扩张对生态系统服务功能形成抑制。县级尺度上,产水和固碳供给热点主要集中于东部浮梁县、婺源县等低山丘陵地区;土壤保持与生境质量供给热点主要分布在城市群四周武宁县、浮梁县和婺源县等,供给冷点分布于南昌市及其周边。整体上,县域尺度产水与固碳供给空间集聚性较强,适宜进行分区管理与重点调控。生态系统服务需求侧,网格尺度上,产水与固碳需求热点集中于中部城市密集区,其形成与人口密集、经济活动活跃导致的资源高消耗密切相关;生境质量需求热点分布广泛且与冷点交错分布。县域尺度上,产水、固碳及生境质量需求热点高度集中于南昌县和南昌市辖区;土壤保持需求热点则广泛分布于鄱阳县、都昌县等水土流失风险突出的中北部县域,与网格尺度相比,需求冷热点空间分异性减弱,集聚特征更为显著。



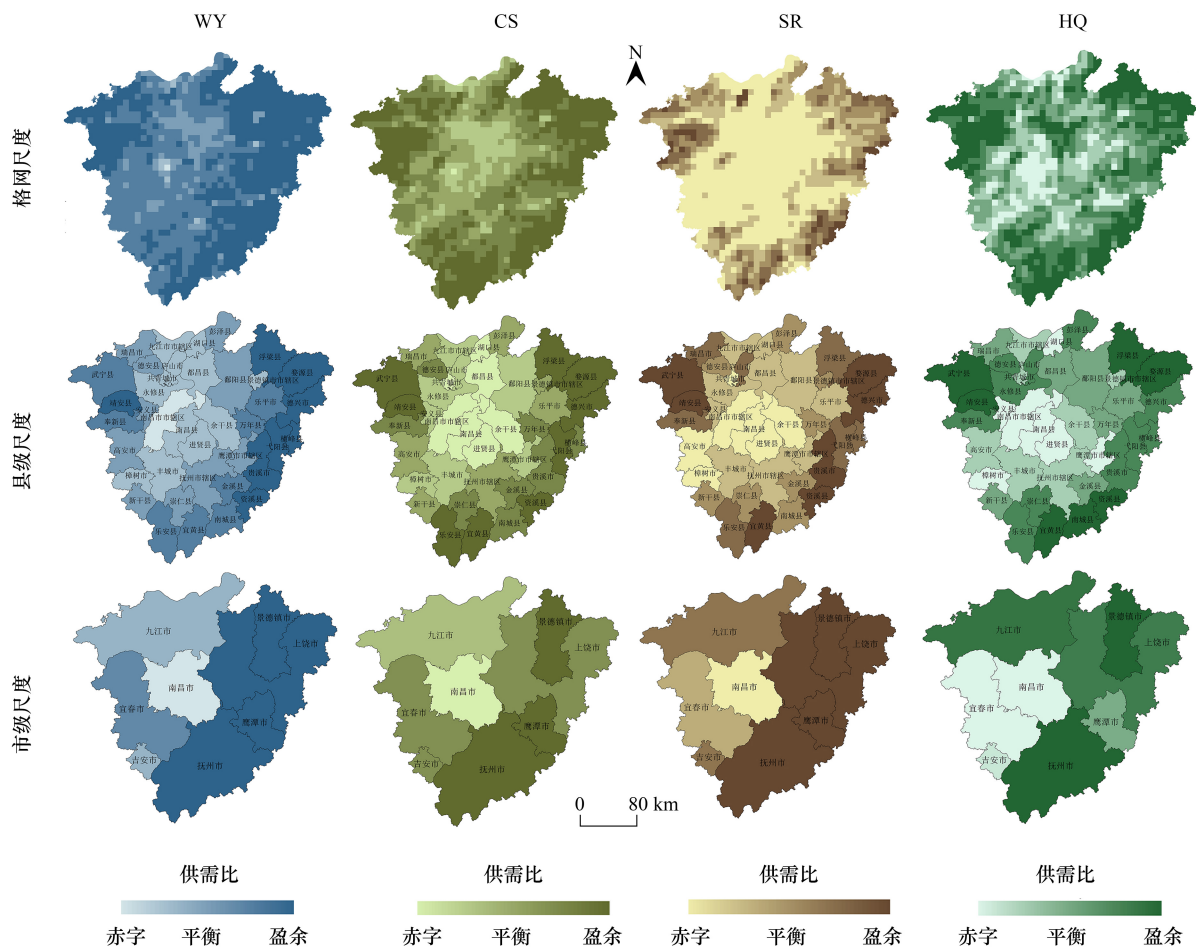


图 5 不同尺度环鄱阳湖城市群生态系统服务供需比空间分布

Fig.5 The spatial distribution of ecosystem service demand ratio at multiple scales in the Poyang Lake Urban Agglomeration

### 3.2.4 生态系统服务的空间集聚格局

多尺度生态系统服务供需关系的空间集聚格局呈现显著尺度异质性与服务类型差异性(图 9)。格网尺度上,LISA 聚类结果显示四类生态系统服务空间分布高度离散。产水和固碳服务高供给-低需求区域集中于城市群外围生态功能较强的丘陵山地区,低供给-高需求区域则广泛分布于城市群核心区域,反映出显著的供需错配格局;土壤保持供需关系呈现较强的空间非均质性,外围丘陵区普遍表现为高供给-低需求,而鄱阳湖上游与部分流域核心区则表现出低供给-高需求特征,反映水土流失风险与土地开发利用之间的矛盾;生境质量与土壤保持供需关系空间结构相似,其低供给-高需求区域集中于南昌及其周边地带等城镇快速扩张区域,表明生态保护需求的空间集中性。县级尺度上,供需格局趋于稳定,产水和固碳高供给-低需求区域集中于武宁县与南城县等生态环境良好地区;低供给-高需求区域多集中于南昌县与鄱阳县;土壤保持展现广泛的低供给-高需求特征,主要集中于鄱阳湖周边及部分农业开发强度大的县域;生境质量供需失衡在新干县、丰城市、南昌县等地表现尤为突出,生态系统压力显著。市域尺度上,供需关系的空间聚类特征减弱,空间集聚性降低,产水和固碳低供给-高需求区域集中于九江市;土壤保持高供给-低需求区域主要位于抚州市,显示出较强的生态调节能力;生境质量供需矛盾在宜春市较为突出。整体来看,生态系统服务供需关系在不同尺度下呈现不同集聚模式与服务异质性,尤其在精细尺度下空间分异性更为显著,需强化对核心供需矛盾区域的识别与差异化调控。

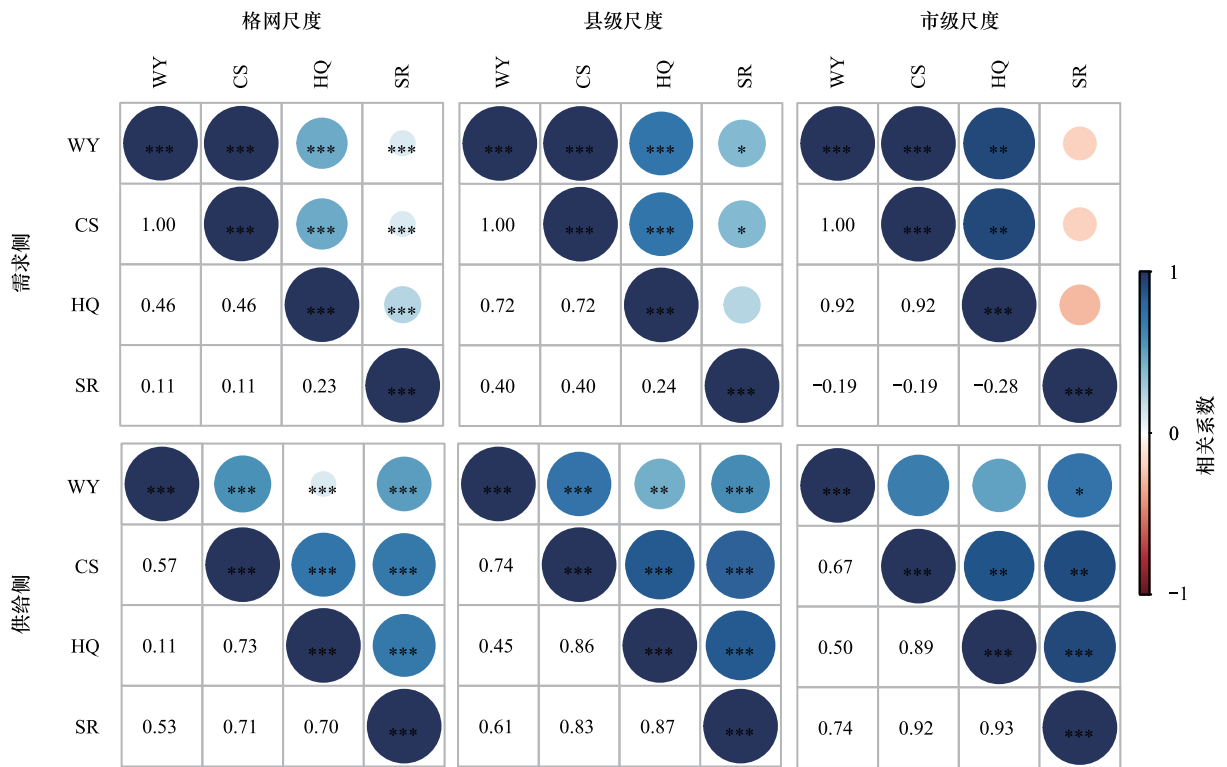


图 6 不同尺度四种生态系统服务供给侧和需求侧相关关系

Fig.6 The correlation between supply side and demand side of four types of ecosystem services at multiple scales

\*  $P \leq 0.1$ , \*\*  $P \leq 0.05$ , \*\*\*  $P \leq 0.001$

3.3 不同尺度生态系统服务供需分区结果分析

3.3.1 基于供需关系的市级尺度一级分区

根据市级生态系统服务供需关系的四象限分布,构建生态涵养与协同发展区、城镇扩张与生态修复区、生态重塑与产业转型区、生态屏障与功能保护区四类一级管理分区。其中,第一象限区域生态基础与发展需求并重,应注重生态资源高效利用与绿色转化;第二象限区域需求高于供给,建议强化生态修复与城市韧性建设;第三象限区域整体基础薄弱,宜通过生态功能重塑推动绿色转型;第四象限区域为生态高供低压区,应实施严格保护、维持生态稳定,并适度开展低干扰利用。

环鄱阳湖城市群市级尺度生态系统服务供需关系整体呈现“东高西低、南北差异显著”格局(图 10)。产水供需关系四象限占比情况为 0:2:2:4,城市群西部以低供给-高需求和低供给-低需求为主,集中于南昌市、宜春、九江等城市,表明水资源供需矛盾突出;东部地区则以高供给-低需求为主;固碳与产水空间分布特征类似,四象限占比情况为 0:2:1:5。吉安市由产水低供给-低需求转变为固碳高供给-低需求,表明其碳汇能力相对较强。土壤保持供需关系四象限占比情况为 2:1:2:3,在上饶市、景德镇市、鹰潭市等东部与北部山区表现出较高供给,西部城市则以低供给-高需求类型为主,土壤流失风险较高;生境质量供需关系四象限占比情况为 1:3:0:4,在上饶市、抚州市等东南部以高供给-低需求为主,生态状况良好,而中西部城镇密集区则呈现低供给-高需求。综合来看,综合生态系统服务供需关系呈现“东南优、西部劣”的特征,供需关系四象限占比情况为 0:3:1:4,其中高供给-低需求区集中于景德镇、上饶、抚州等东部市域,低供给-高需求区则集中于南昌、宜春、九江等城镇扩张压力较大的区域。根据综合供需四象限分布在市级尺度进行一级分区,分区结果如表 6 所示。

3.3.2 基于耦合协调关系的县级尺度二级分区

在市级四象限分区基础上,结合县域供需耦合协调度进一步细化二级分区。生态涵养与协同发展区内部根据协调水平划分为高效发展、协同优化、潜力提升、资源整合与失衡预警等类型,突出生态与经济双轮驱动。

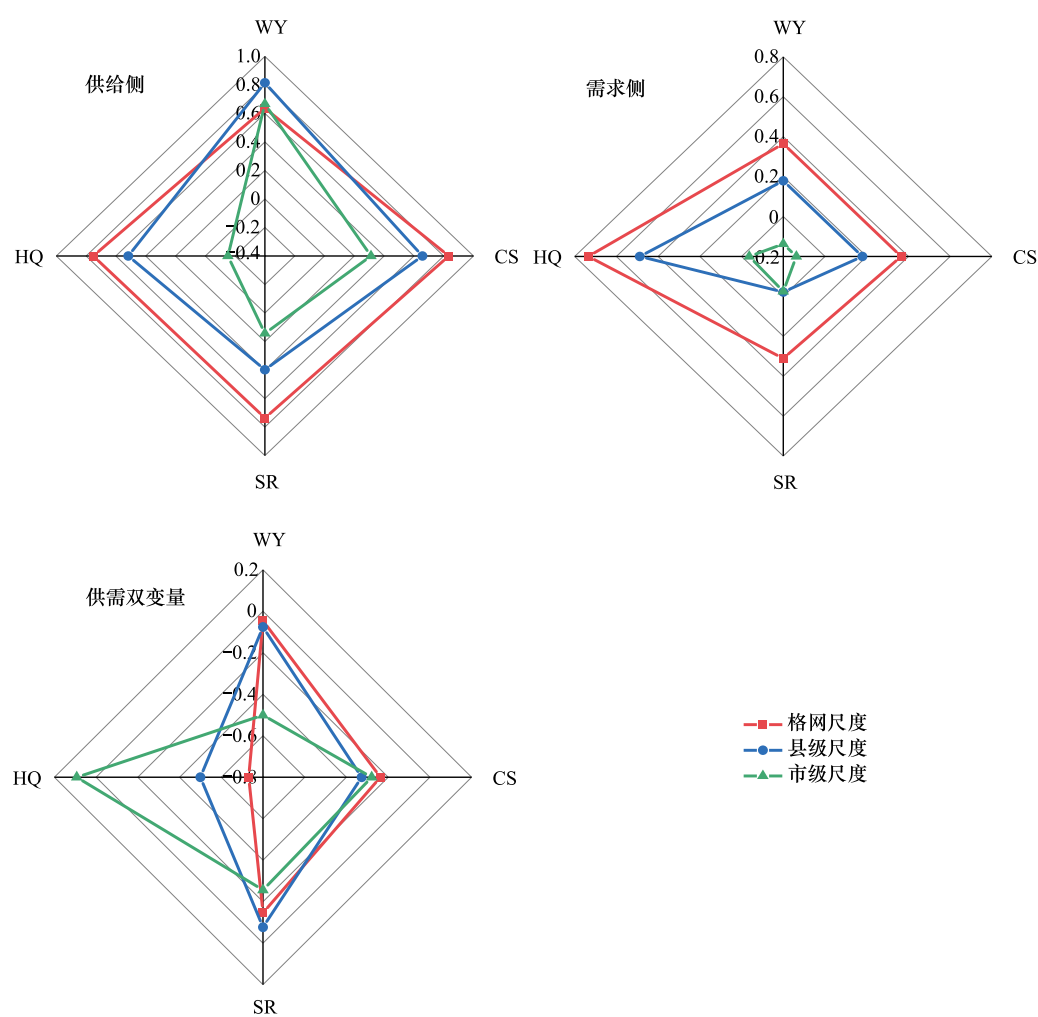


图 7 不同尺度四种生态系统服务供给侧、需求侧和供需双变量全局莫兰指数

Fig.7 Global Moran's I of the supply Side, demand Side, and bivariate supply-demand relationship of four types of ecosystem services at multiple scales

城镇扩张与生态修复区强调在供需矛盾区域提升韧性与承载力,构建绿色空间格局。生态重塑与产业转型区聚焦生态功能恢复与绿色产业布局,推进生态经济融合。生态屏障与功能保护区强化保护优先,依协调度划分为核心保护、生态缓冲、适应管理与退化治理等类型,实现生态稳定与合理利用协同。

利用耦合协调度模型计算四种生态系统服务供需的协调度并划分各县(市、区)供需耦合协调程度(图 11、表 4)。环鄱阳湖城市群地区四种生态生态系统服务供需关系为基本协调的区域数量最多,共有 17 个县

表 4 环鄱阳湖城市群县域尺度供需关系的耦合协调程度

Table 4 Coupling coordination degree of supply and demand relationships at the county level in the Poyang Lake Urban Agglomeration

耦合协调程度 Degree of coupling coordination	县(市、区)名称 Name of county (city, district)
严重失调 Severely uncoordinated	资溪县
中度失调 Moderately uncoordinated	靖安县、南昌县、武宁县、婺源县、宜黄县
基本协调 Basically coordinated	安义县、德安县、崇仁县、都昌县、奉新县、浮梁县、共青城市、湖口县、进贤县、乐安县、南城县、彭泽县、鄱阳县、新干县、永修县、余干县、樟树市
中度协调 Moderately coordinated	抚州市市辖区、景德镇市市辖区、鹰潭市市辖区、九江市市辖区、德兴市、丰城市、高安市、贵溪市、横峰县、乐平市、庐山市、瑞昌市、万年县、弋阳县、南昌市市辖区、金溪县



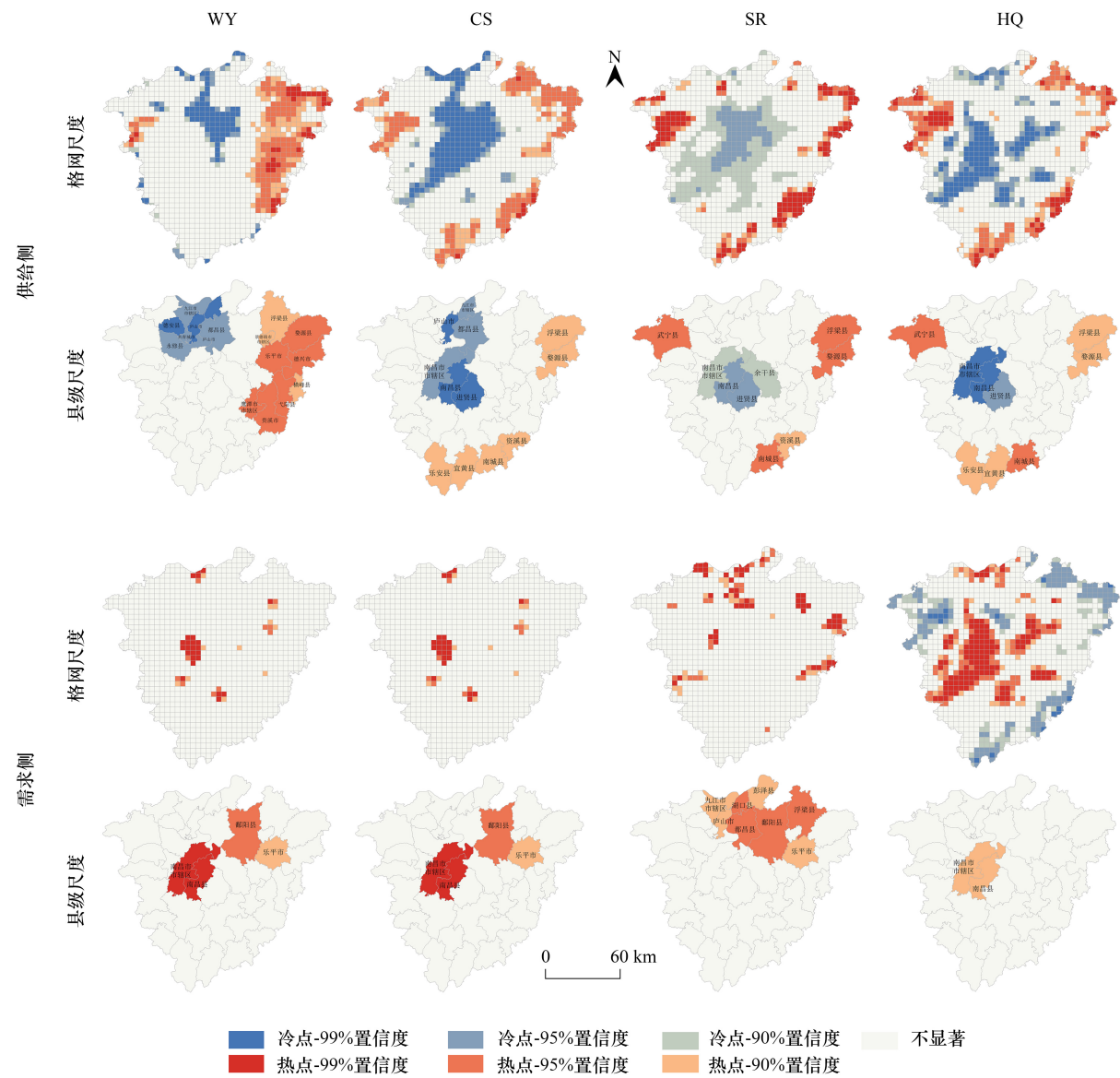


图 8 多尺度四种生态系统服务供给侧和需求侧冷热点空间格局

Fig.8 Spatial patterns of hot and cold spots for the supply side and demand side of four types of ecosystem services at multiple scales

(市、区),占城市群总城市数量的 43.59%,主要分布在城市群中部和北部;中度协调的区域有 16 个县(市、区),占比 41.03%,主要分布在中南部地区;中度失调的区域有 5 个,占比约为 12.82%;严重失调区域数量为 1 个,占比 2.56%。整体来看,环鄱阳湖城市群地区四种生态系统服务供需关系总体表现为北部基本协调,南部为中度协调,存在少数中度和严重失调的情况。根据耦合协调关系在县级尺度上进行二级分区,分区结果如表 6 所示。

3.3.3 基于自组织映射的县级尺度分区主导功能识别

基于 CH 指数判定,采用 SOMF 算法对县域尺度四类生态系统服务供给变量进行聚类分析,识别出环鄱阳湖城市群六类 ESBs,并划分为五类主导功能区(图 12、表 5)。各类簇四类生态服务存在显著功能分异。ESB1 四类服务供给均衡且较高,综合生态服务能力最强,是典型的高生态服务供给簇,主要分布在婺源县、浮梁县、武宁县等生态优势区及鄱阳湖湿地边缘,是区域生态安全的核心区,因此主导功能区划分为产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区。ESB2 生境相对占优,其他服务偏弱,为生境质量主导簇,常见于城乡过渡带,集中于永修县、庐山市等城乡交错带,反映人类干扰下的生态过渡带特征,因此定义为生境质量供给区。ESB3

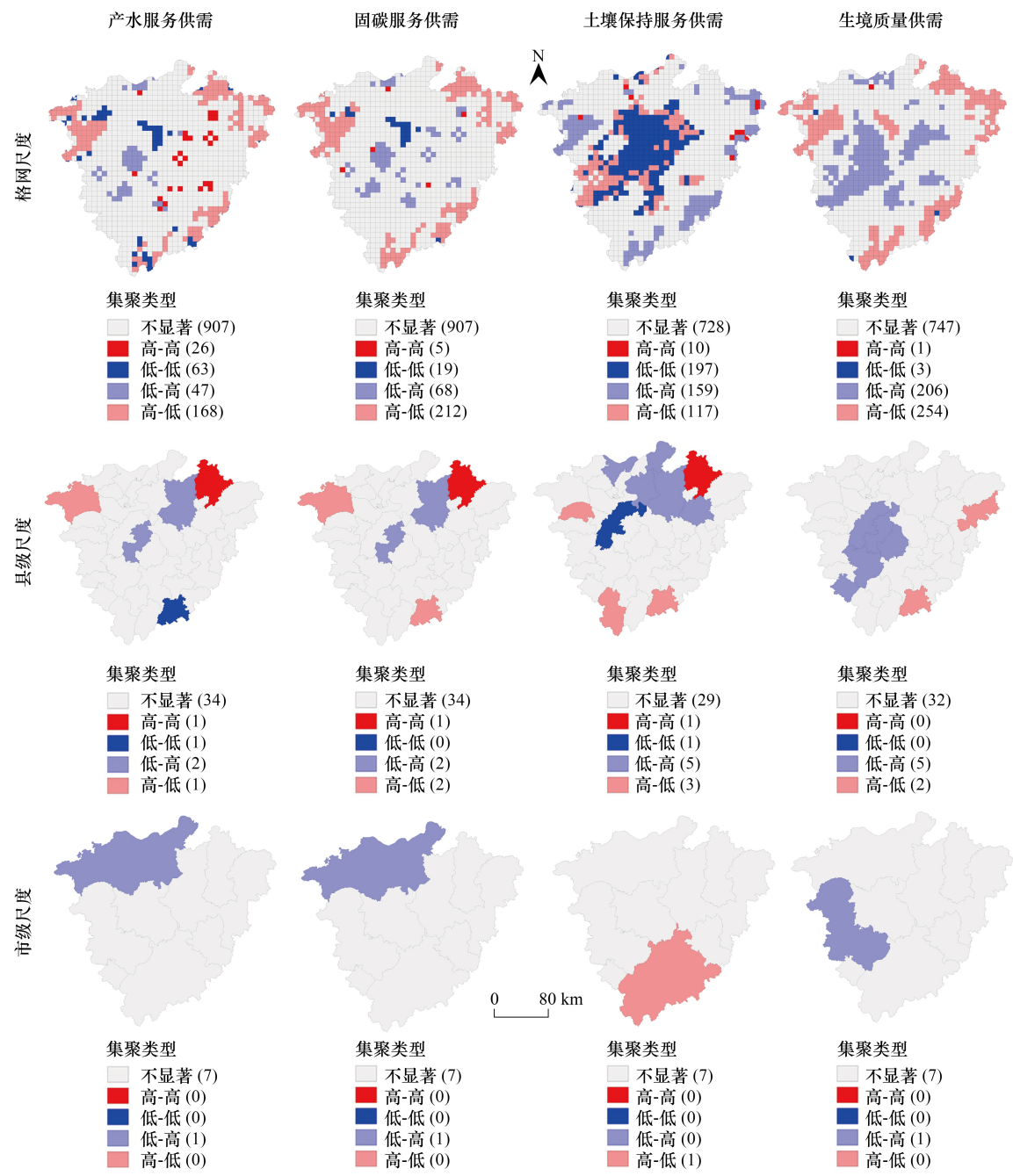


图 9 多尺度生态系统服务供需关系 LISA 聚类图

Fig.9 LISA cluster maps of ecosystem services supply-demand relationships at multiple scales

括号内数值代表各集聚类型数量

主要分布在乐平市、万年县等区域,表现为局部产水能力突出但生态协同性不强,为产水主导的水源涵养型簇,因此划为产水供给-土壤保持优化区。ESB4 各项服务供给均极低,是生态退化严重的簇,主要分布在南昌县、鄱阳县等城镇扩展与工业集聚区,对应高强度开发区;ESB6 服务供给整体偏低但略优于 ESB4,主要分布在分布于南昌市市辖区、安义县和樟树市等区域,服务能力低,但具有一定生态恢复潜力,归为轻度退化型服务簇,与 ESB6 合并划分为生态退化治理区;ESB5 各服务水平接近平均,主要分布在丰城市、高安市等区域,表现为服务能力中等、均衡性一般的农业-生态过渡簇,划为农业生产与生态平衡区。

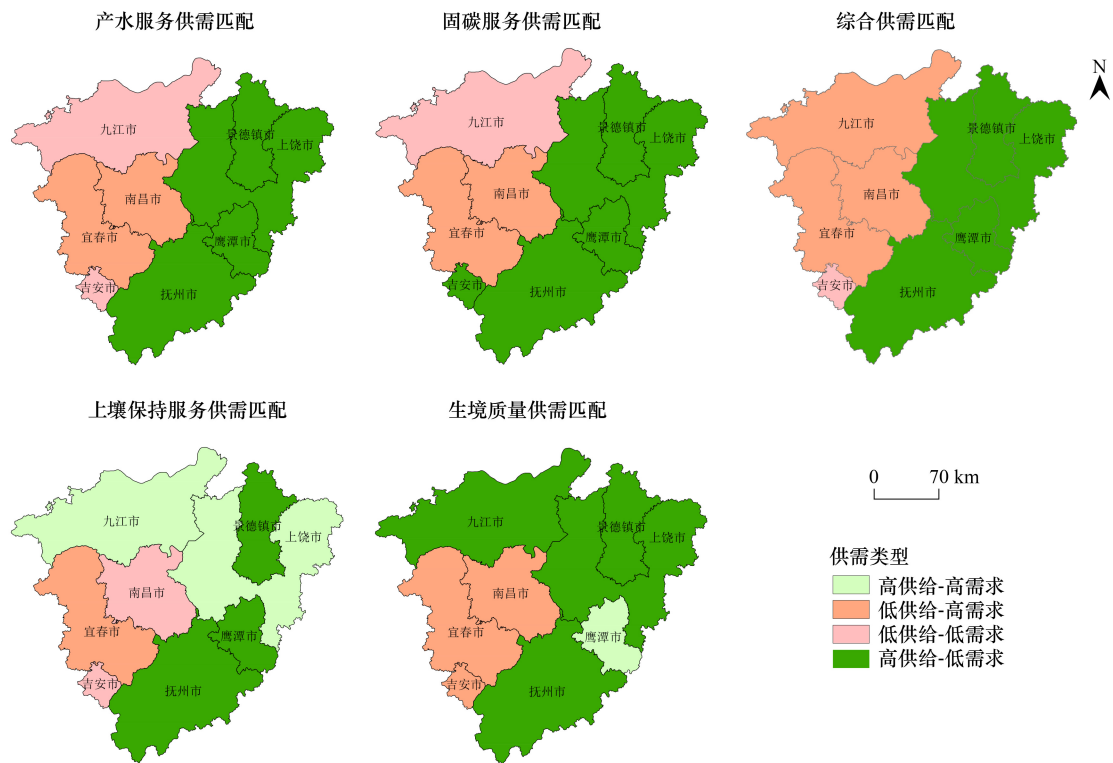


图 10 环鄱阳湖城市群市域尺度生态系统服务供需关系空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of the ecosystem services supply-demand matching relationship at the city scale in the Poyang Lake Urban Agglomeration

4 讨论

本研究基于 WEE 框架,从资源-服务-需求耦合视角出发,构建多尺度生态系统服务供需识别与空间分区框架。结果显示,生态系统服务供需关系在不同空间尺度下表现出显著异质性与尺度依赖性,对区域资源配置优化、生态功能维护和空间分区管理提出了更高要求。

生态系统服务的选取逻辑体现了 WEE 三元关系中核心资源要素与生态过程之间的内在联系。产水、固碳、土壤保持和生境质量四类服务分别代表了水资源调控、碳汇与能源循环、土壤保持与生物多样性维系,是环鄱阳湖城市群实现资源高效利用与生态安全保障的关键投入要素。这种服务选择不仅匹配 WEE 框架内对自然资源流动与服务生成机制的理论预设,也与研究区作为长江中游绿色生态走廊的资源特征相契合。然而,该选取方式仍存在一定局限,未涵盖粮食供给等直接反映社会系统需求的服务类型,尤其在鄱阳湖平原作为国家级商品粮主产区的背景下,这一缺失可能削弱了供需分析对土地利用冲突与农业政策的解释力。未来研究应从粮-水-碳-生多要素出发,扩展生态系统服务组合,增强服务层次对现实经济社会系统的解释能力。

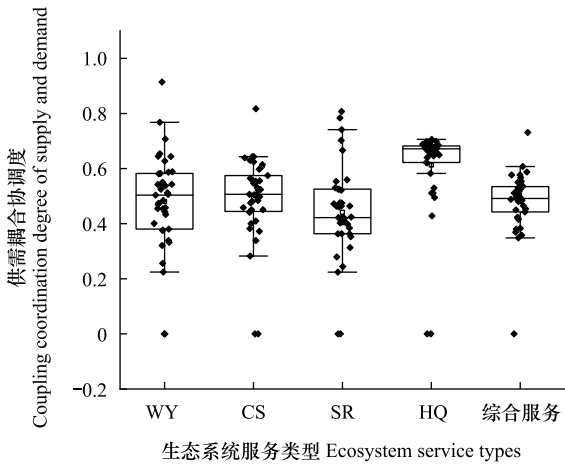


图 11 县级尺度生态系统服务耦合协调关系箱型图

Fig.11 Boxplot of the coupled and coordinated relationship of ecosystem services at the county level

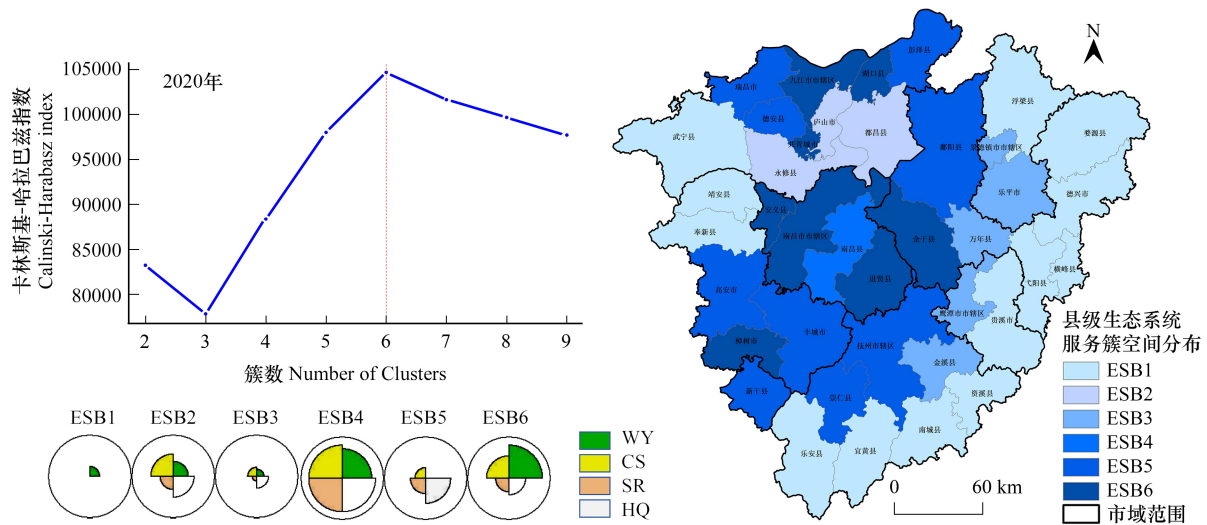


图 12 县级尺度综合生态系统服务簇最佳聚类数、组成和空间分布图

Fig.12 Optimal cluster numbe, composition, and spatial distribution map of comprehensive ecosystem services at the county level

ESB:生态系统服务簇

在多尺度下,生态系统服务供需关系呈现出强烈的级联特征。格网尺度可揭示微观单元内部生态系统服务供需的结构性失衡和空间错配风险,是识别局地生态脆弱性与调控单元的基础;县级尺度则处于宏观策略与微观治理的承接位置,不仅能反映社会经济系统对资源环境的压力特征,也能揭示生态系统对服务需求的响应能力,是实施生态管理措施的现实治理单元;市级尺度可作为区域发展战略下资源承载与发展压力的系统性矛盾的宏观识别单元。结果表明,市级尺度供需关系表现为空间聚合性弱、相关性较低,反映的是资源配置与发展需求在宏观治理单元中的制度干扰与行政割裂问题;县域尺度则呈现出较高的空间集聚性与类型分异性,能够较为准确地反映社会经济活动与生态承载能力之间的结构性矛盾;而在格网尺度上,供需错配特征更为显著,受地形、土地利用与生态系统微环境影响显著,突出表现为细颗粒度的空间异质性与局部生态风险。因此,这种尺度间特征的系统差异提示需构建多尺度联动机制,将宏观调控、功能诊断与微观干预有机衔接,以支撑生态系统服务的精细化管理。

本文提出的市-县多层次分区体系,能够从识别-诊断-归类的角度系统描绘区域供需格局。市级四象限分区提供了生态系统服务匹配关系的类型识别基础;县级尺度进一步引入耦合协调度指标,对服务供需之间的互动状态进行量化诊断,强化了空间分区的弹性识别能力;自组织映射聚类则聚焦主导生态功能识别,使空间分区不仅停留在供需关系层面,更延伸至功能导向—任务匹配的实践转化路径。本文识别出的“生态涵养与协同发展区”“城镇扩张与生态修复区”等,分别与《江西省国土空间规划(2021—2035年)》中提出的“两山理论”实施地、生态红线严控区、城市边界限制区等高度吻合,具备一定的现实政策对接价值。然而,该分区框架也存在不足。当前分区主要以县级行政单元为空间最小颗粒度,难以适应国土空间规划一张图中实景地块精细化识别与用途统筹的管控要求。此外,耦合协调度虽可衡量供需系统整体协调水平,但对生态功能类型的空间异质性揭示仍有限,主导功能识别亟需引入更多生态-社会-制度维度的综合指标。

本文采用 2020 年单期数据进行供需关系分析,尚未形成对生态系统服务动态演变过程的时序识别,未建立供需关系跨尺度流动与反馈机制的动态耦合模型。考虑到气候变化、政策干预及人类活动长期演进对服务供需关系的影响趋势,未来研究应结合情景模拟、地块级变化遥感监测与制度政策序列建模,构建格网-地块嵌套式的动态模拟框架,提升生态系统服务分区结果对国家三区三线落地实施的支持能力。



表 5 环鄱阳湖城市群各尺度生态分区结果

Table 5 Results of Ecological Zoning at Various Scales in the Poyang Lake Urban Agglomeration

市级功能分区 Municipal-level functional zoning	市 Municipality	县级分区 County-level zoning	县 County	主导功能分区 Dominant functional zone
城镇扩张与生态修复区 (低供给-高需求) Urban expansion and ecological restoration zone (Low supply-high demand)	九江市	城镇生态适应区(中度协调)	九江市市辖区	生态退化治理区
			庐山市	生境质量供给区
			瑞昌市	农业生产与生态平衡区
			德安县	农业生产与生态平衡区
			都昌县	生境质量供给区
			共青城市	生态退化治理区
			湖口县	生态退化治理区
			彭泽县	农业生产与生态平衡区
			永修县	生境质量供给区
	南昌市	生态承载受压区(中度失调)	武宁县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
		城镇生态适应区(中度协调)	南昌市市辖区	生态退化治理区
		生态承载提升区(基本协调)	安义县	生态退化治理区
	宜春市	生态承载受压区(中度失调)	进贤县	生态退化治理区
			南昌县	生态退化治理区
			丰城市	农业生产与生态平衡区
		生态承载提升区(基本协调)	高安市	农业生产与生态平衡区
			奉新县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
			樟树市	生态退化治理区
生态屏障与功能保护区 (高供给-低需求) Ecological barrier and function protection zone (High supply-low demand)	抚州市	生态承载受压区(中度失调)	靖安县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
		生态缓冲区(中度协调)	抚州市市辖区	农业生产与生态平衡区
			金溪县	产水供给-土壤保持优化区
			乐平市	产水供给-土壤保持优化区
		生态适应管理区(基本协调)	崇仁县	农业生产与生态平衡区
			乐安县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
			南城县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
	景德镇市	生态功能退化区(中度失调)	宜黄县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
		生态濒危区(严重失调)	资溪县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
		生态缓冲区(中度协调)	景德镇市辖区	产水供给-土壤保持优化区
	上饶市	生态适应管理区(基本协调)	浮梁县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
			德兴市	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
			横峰县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
		生态缓冲区(中度协调)	万年县	产水供给-土壤保持优化区
			弋阳县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
			鄱阳县	农业生产与生态平衡区
		生态适应管理区(基本协调)	余干县	生态退化治理区
			婺源县	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
			鹰潭市市辖区	产水供给-土壤保持优化区
生态重塑与产业转型区 (低供给-低需求) Ecological restructuring and industrial transformation zone (Low supply-low demand)	吉安市	生态供给增强区(基本协调)	贵溪市	产水-固碳-土壤保持-生境质量供给区
			新干县	农业生产与生态平衡区

## 5 结论

(1)2020 年,环鄱阳湖城市群多尺度生态系统服务呈现出“东高西低、外围高于中部”的供给格局与“中部高于四周、城市核心区高于外围”的需求格局;生态系统服务供需关系普遍存在“外围盈余、中部赤字”现象,生态压力与修复需求在城市核心区高度聚集。

(2)2020 年,环鄱阳湖城市群多尺度生态系统服务供需关系均呈现出显著的尺度效应与服务差异性。在市级与县级尺度上,生态系统服务供需协同性更强、空间集聚性更明显,而在格网尺度上则表现出更高的空间异质性与错配程度。冷热点与 LISA 聚类结果共同揭示,城市群中部地区普遍存在低供给-高需求的生态赤字格局,外围生态优势区域则相对供需协调。

(3)基于 2020 年环鄱阳湖城市群多尺度生态系统服务供需关系空间格局,构建“市域-县域”多尺度两级生态空间分区体系。市级尺度上识别出三类重点功能区,包括城镇扩张与生态修复区、生态重塑与产业转型区、生态屏障与功能保护区。县级尺度上结合耦合协调度与聚类结果,以提升生态系统服务功能为目标,进一步细分了生态功能管理分区。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Lin Y Y, Xu X B, Tan Y, Chen M K. Multi-scalar assessment of ecosystem-services supply and demand for establishing ecological management zoning. *Applied Geography*, 2024, 172: 103435.
- [ 2 ] 李炳坤, 张晓光, 骆占斌, 马静, 杨永均, 陈浮. 基于“水-能源-粮食”关系的生态系统服务供需匹配研究——以天山北坡城市群为例. *干旱区地理*, 2025, 48(4): 571-585.
- [ 3 ] Yin D Y, Yu H C, Shi Y Y, Zhao M Y, Zhang J, Li X S. Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: a perspective of the water-energy-food nexus. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135469.
- [ 4 ] Rasul G. Food, water, and energy security in south Asia: a nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan Region. *Environmental Science & Policy*, 2014, 39: 35-48.
- [ 5 ] Yang K, Han Q, de Vries B. Urbanization effects on the food-water-energy nexus within ecosystem services: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111845.
- [ 6 ] 丁童慧, 陈军飞, 嵇娟, 杨欣泽. 水-能源-粮食纽带关系与生态系统服务耦合研究进展. *生态学报*, 2025, 45(6): 3032-3045.
- [ 7 ] Shao Y J, Liu Y S, Li Y H, Yuan X F. Regional ecosystem services relationships and their potential driving factors in the Yellow River Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(4): 863-884.
- [ 8 ] Ding H H, Sun R H. Supply-demand analysis of ecosystem services based on socioeconomic and climate scenarios in North China. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109906.
- [ 9 ] 韩增林, 刘澄浩, 闫晓露, 李欣媛, 王学哲. 基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区——以大连市为例. *生态学报*, 2021, 41(22): 9064-9075.
- [ 10 ] Peng J, Wang A, Luo L W, Liu Y X, Li H L, Hu Y-N, Meersmans J, Wu J S. Spatial identification of conservation priority areas for urban ecological land: an approach based on water ecosystem services. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(6): 683-694.
- [ 11 ] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for Telemark, Norway. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [ 12 ] Du H Q, Zhao L, Zhang P T, Li J X, Yu S. Ecological compensation in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on ecosystem services flow. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331: 117230.
- [ 13 ] Larondelle N, Lauf S. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales. *Ecosystem Services*, 2016, 22: 18-31.
- [ 14 ] Chen Y, Lu Y N, Meng R L, Li S R, Zheng L Z, Song M. Multi-scale matching and simulating flows of ecosystem service supply and demand in the Wuhan metropolitan area, China. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 476: 143648.
- [ 15 ] Chen Y R, Qiao X N, Yang Y J, Zheng J C, Dai Y L, Zhang J. Identifying the spatial relationships and drivers of ecosystem service supply-demand matching: a case of Yiluo River Basin. *Ecological Indicators*, 2024, 163: 112122.
- [ 16 ] Yang M Y, Chen Y F, Yang Y Y, Yan Y X. Nonlinear relationship and threshold-based zones between ecosystem service supply-demand ratio and land use intensity: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 481: 144148.
- [ 17 ] 刘雨婷, 覃盟琳, 欧阳慧婷, 等. 基于生态系统服务供需平衡的国土空间资源配置优化. *自然资源学报*, 2024, 39(6): 1358-1383.
- [ 18 ] He W, Wang H M, Liu G, Bai Y, Xue S, Fang Z, Xiao Y, Wang Y X, Wang W Q. Can ecosystem services supply match local residents' perception: Linking macro-ESs and micro-individual perceptions in the Yellow River Basin. *Journal of Environmental Management*, 2025,

- 374; 124116.
- [19] 高妍, 冯起, 李宗省. 祁连山国家公园甘肃片区生态-经济-社会耦合协调发展评价. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1197-1204.
- [20] 李从治, 潘滢, 尹伟伦, 兰思仁. 微观尺度下乡村生态系统文化服务供需匹配特征——以宁德市廉村为例. 生态学报, 2025, 45(5): 2243-2254.
- [21] 耿甜伟, 陈海, 刘迪, 史琴琴, 张行. 县域尺度下生态系统服务供需匹配及生态建设——以陕西省为例. 地域研究与开发, 2021, 40(2): 140-144, 150.
- [22] 练雨晨, 刘迪, 崔立晗, 徐敏, 郑盛. 基于生态系统服务供需平衡的呼和浩特市生态管理分区. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1651-1660.
- [23] 杨远丽, 李瑞, 杨火木, 钟林生, 黄梅, 谢梦月. 山地旅游区生态系统文化服务供需匹配空间格局与影响因素——以贵州省为例. 生态学报, 2024, 44(17): 7445-7460.
- [24] 阳斌成, 张家其, 罗伟聪, 黄东蛟. 基于供需匹配的洞庭湖流域生态系统服务区际协调探究. 水生态学杂志, 2024, 45(6): 37-46.
- [25] 孙颖, 杨君, 袁淑君, 唐兴隆, 刘畅, 王义博, 孟媛媛. 环长株潭城市群生态系统服务供需变化分析. 西北林学院学报, 2024, 39(5): 202-209, 231.
- [26] Yang W T, Chen J F, Ding T H, Yan X D, Gong W J. Supply-demand security assessment of water-energy-food systems: a perspective on intra-city coupling and inter-city linkages of ecosystem services. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 117: 105964.
- [27] Zeng J, Cui X Y, Chen W X, Yao X W. Ecological management zoning based on the supply-demand relationship of ecosystem services in China. *Applied Geography*, 2023, 155: 102959.
- [28] Tan Z W, Li H, Song Q R, Wang Z C, Cao Y Q. Synergistic optimization and interaction evaluation of water-energy-food-ecology nexus under uncertainty from the perspective of urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 2025, 124: 106291.
- [29] 陈绎安, 胡宝群, 汤江龙, 王运. 生态系统服务供需权衡下南昌市生态安全格局演变及其影响因素分析. 环境科学, 2025, 46(7): 1-17.
- [30] 牛丽楠, 邵全琴, 陈美祺, 张雄一, 张廷靖. 2000—2020 年长江流域生态系统服务变化及其权衡协同关系. 资源科学, 2024, 46(5): 853-866.
- [31] 张海铃, 叶长盛, 胡梦姗. 基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略. 水土保持研究, 2023, 30(2): 393-402.
- [32] 黄媛婷, 钟业喜, 毕曼玉. 鄱阳湖流域土地利用变化对碳源/汇时空格局的影响. 长江流域资源与环境, 2025, 34(3): 546-557.
- [33] Zhang J X, He C Y, Huang Q X, Li L. Understanding ecosystem service flows through the metacoupling framework. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110303.
- [34] 赵奕博, 于洋, 孙保平. 山西省产水服务供需时空变化[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 126-133, 144.
- [35] 闫正龙, 高凡, 何兵, 王璐, 韩方红. 1990—2020 年渭河流域生境质量的时空变化及影响因素分析. 环境科学, 2025, 46(7): 1-15.
- [36] Li T N, Liu Y B, Ouyang X, Zhou Y J, Bi M, Wei G E. Sustainable development of urban agglomerations around lakes in China: Achieving SDGs by regulating Ecosystem Service Supply and Demand through New-type Urbanization. *Habitat International*, 2024, 153: 103206.
- [37] Deng H W, Zhou X F, Liao Z L. Ecological redline delineation based on the supply and demand of ecosystem services. *Land Use Policy*, 2024, 140: 107109.
- [38] Li T, Lü Y H, Fu B J, Hu W Y, Comber A J. Bundling ecosystem services for detecting their interactions driven by large-scale vegetation restoration: enhanced services while depressed synergies. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 332-342.
- [39] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 胡熠娜. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [40] 张学鹏, 张凤娇, 陈伟, 李广超, 毕朋帅, 王哲. 云贵高原地区生态系统服务价值时空变化特征. 测绘通报, 2022(8): 30-35.
- [41] Li W J, Kang J W, Wang Y. Integrating ecosystem services supply-demand balance into landscape ecological risk and its driving forces assessment in Southwest China. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 475: 143671.
- [42] 马元博, 翟天林, 毕庆生, 陈鹏, 李玲, 陈昱润. 基于调节服务流视角的黄河流域生态补偿优化研究. 生态学报, 2025, 45(8): 3763-3775.
- [43] Liu W X, Meng Q Y, Allam M, Zhang L L, Hu D, Menenti M. Driving factors of land surface temperature in urban agglomerations: a case study in the Pearl River Delta, China. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 2858.
- [44] Chen W X, Chi G Q. Urbanization and ecosystem services: The multi-scale spatial spillover effects and spatial variations. *Land Use Policy*, 2022, 114: 105964.
- [45] 施雯婷, 孙阳, 王佳韡, 林小标, 伍世代. 多功能指向下资源环境承载力与社会发展时空协调分析——以福建省县域为例. 生态学报, 2025, 45(10): 4803-4817.
- [46] 潘子纯, 马林燕, 朱玉春. 中国海外耕地投资规模与地缘经济的耦合协调研究. 地理学报, 2023, 78(9): 2338-2357.
- [47] Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 1982, 43(1): 59-69.