

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202112001



# 供需关系下长三角城市群 生态系统服务空间流转

陈燕<sup>1,2</sup>, 谭堰琴<sup>1</sup>, 邱晓敏<sup>3</sup>, 宋新山<sup>1</sup>, 周镇宇<sup>1</sup>, 万荣荣<sup>2</sup>

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620;  
2. 中国科学院 流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;  
3. 密苏里州立大学 地理地质规划系, 伊利诺伊 斯普林菲尔德 65897)

**摘要:** 基于价值量、热点分析、最小累计阻力(MCR)模型和距离衰减等多种方法和模型,量化分析长三角城市群 2010 年和 2018 年的生态系统服务供给和需求,揭示其供需盈亏关系;根据整体供需空间格局,确定生态源地到生态需求地的生态系统服务空间流转路径与价值流转量。结果表明:长三角城市群 2010 年和 2018 年生态系统服务供给变化微小,而生态系统服务需求显著增长;生态系统服务供给呈南高北低的分布形态,生态系统服务需求呈东高西低的分布形态;供需盈余区主要分布于皖南山地丘陵,供需赤字区主要分布于经济发达城市的主城区;研究年份内,供需平衡区面积减少,供需失衡区面积增加,经济发展与土地利用变化导致供需空间异质性增强;将生态源地与生态需求地之间的重要生态廊道作为生态系统服务空间流转路径,2010 年和 2018 年的生态系统服务价值流转总量分别为 127.1、272.6 亿元。

**关键词:** 长三角城市群; 生态系统服务; 供需平衡; 空间流转

**中图分类号:** X 171      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2022)03-0403-09

## Spatial Transfer of Ecosystem Services in Yangtze River Delta Urban Agglomeration Under Relationship of Supply and Demand

CHEN Yan<sup>1,2</sup>, TAN Yanqin<sup>1</sup>, QIU Xiaomin<sup>3</sup>,  
SONG Xinshan<sup>1</sup>, ZHOU Zhenyu<sup>1</sup>, WAN Rongrong<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;  
2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;  
3. Department of Geography, Geology, and Planning, Missouri State University, Springfield 65897, America)

**Abstract:** Based on various methods and models such as value quantity, hot spot analysis, minimum cumulative resistance (MCR) model and distance attenuation, quantitatively analyzes the supply and demand of ecosystem services in the Yangtze River Delta urban agglomeration in 2010 and 2018, reveals the profit and loss relationship between supply and demand, and determines the spatial transfer paths and value transfer volume of ecosystem services from ecological origins to ecological destinations according to the overall spatial pattern of

**收稿日期:** 2021-12-02

**通信作者:** 陈燕(1976-),女,副教授,博士,主要从事生态安全、环境遥感与地理信息系统的研究. E-mail: chenyan-hjxy@dhu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41471089);中国科学院流域地理学重点实验室开放基金资助项目(WSGS 2020006)

supply and demand. The results show that the supply of ecosystem services change slightly in the Yangtze River Delta urban agglomeration in 2010 and 2018, while the demand of ecosystem services increase significantly. The supply of ecosystem services presents a distribution pattern of high in the south and low in the north, and the demand of ecosystem services presents a distribution pattern of high in the east and low in the west. The surplus areas of supply and demand are mainly distributed in the mountains and hills of Southern Anhui, and the deficit areas of supply and demand are mainly distributed in the main urban areas of economically developed cities. During the study year, the areas of supply and demand balance area decrease, the areas of supply and demand imbalance area increase, and the spatial heterogeneity of supply and demand increase due to economic development and land use change. Taking the important ecological corridors between ecological origins and ecological destinations as the spatial transfer paths of ecosystem services, the total value transfer volume of ecosystem services in 2010 and 2018 is 127.1,272.6 billion yuan respectively.

**Keywords:** Yangtze River Delta urban agglomeration; ecosystem service; supply-demand balance; spatial transfer

随着人口剧增与快速城市化,城市群生态系统的结构和功能均受到人类活动的干扰<sup>[1]</sup>,区域生态系统服务供需失衡,威胁着生态安全与可持续发展.生态系统服务供需平衡是区域生态环境健康程度的重要衡量指标之一<sup>[2]</sup>,而生态系统服务空间流转是实现生态服务供给和人类需求耦合的重要桥梁<sup>[3]</sup>,对生态系统服务的传输、转化和消费具有重要的作用<sup>[4]</sup>.因此,基于供给和需求关系的生态系统服务空间流转研究能够明确生态系统服务的产生源头、耗散过程及受益区域,有助于优化生态系统服务管理,改善区域生态环境状况.

生态系统服务空间流转是指重要生态服务功能通过一定的流通介质流转到区域外的地区,并产生效应<sup>[5-6]</sup>,是生态系统服务供给与需求关联研究的深化<sup>[7]</sup>,关于这方面的研究尚处于起步阶段,并向空间制图与定量分析的方向发展<sup>[8-9]</sup>.目前,生态系统服务空间流转研究主要是对生态系统服务从产生到耗散过程中受益区接受的生态系统服务价值量进行评估<sup>[10-11]</sup>,且主要集中于单一区域供给服务的流转研究<sup>[12]</sup>,关于跨区域空间流转及综合考虑供需关系的研究仍然较少.

长江三角洲(长三角)城市群是我国人口最密集、经济最发达、城市化进程最快的地区之一.2019年,国家政府工作报告提出,将长三角区域一体化发展上升为国家战略,建设生态型城市群<sup>[13]</sup>.近年来,长三角地区在经济快速发展的同时,出现了生物多样性锐减、河流湖泊水质恶化、城市空气质量下降等一系列生态环境问题,城市生态空间遭受不同程度的破坏,其实是区域生态系统服务供需关系的空间差异或失衡<sup>[14]</sup>.基于此,本文对供需关系下长三角城市群生态系统服务空间流转进行研究.

# 1 研究区域及数据来源

## 1.1 研究区域

长三角城市群是由上海市及江苏省、浙江省、安徽省的 25 个地级市组成(图 1),面积为 21.17 万 km<sup>2</sup>,地形以平原和丘陵为主,气候类型主要为亚热带季风性湿润气候.

2018 年统计年鉴数据表明,长三角城市群城镇化率为 68%;2018 年土地利用分类数据中,长三角城市群建设用地比例约为 20%,城市用地类型及空间结构变化显著.快速的城市化在促进社会经济高速发展的同时,也削弱了生态系统为城市提供的重要生态服务功能<sup>[15]</sup>,城市群空间的高强度开发导致生态系统服务供需失衡等一系列环境问题愈演愈烈,协调生态环境保护与区域经济发展成为长三角城市群绿色一体化发展的重要任务.

## 1.2 数据来源

使用的 4 类数据来源如下.

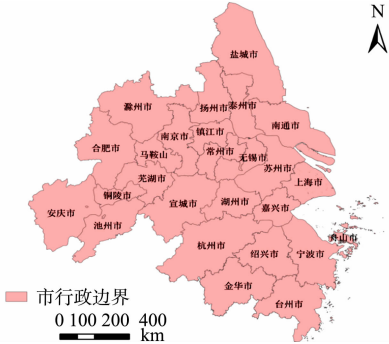


图 1 长三角城市群地理位置  
Fig.1 Geographical location of Yangtze River Delta urban agglomeration

- 1) 土地利用数据. 该数据包括长三角城市群 2010 年、2018 年的土地利用数据(30 m×30 m), 来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>). 2010 年的土地利用数据以当年 Landsat TM 遥感影像为主信息源, 通过人工目视解译生成; 2018 年的土地利用数据是在 2015 年土地利用遥感监测数据的基础上, 基于 Landsat 8 遥感影像, 通过人工目视解译生成. 两期遥感影像的获取时间均为云覆盖较少(云量小于 10%)的 5—9 月, 解译精度达 90% 以上.
- 2) 社会经济数据. 该数据包括 2010 年、2018 年全国与长三角城市群城乡居民人口、人均可支配收入、地区生产总值、粮食产值与产量等, 来源于国家统计局、长三角城市群各市统计局.
- 3) 植被净初级生产力(NPP)、年降水量数据. 该数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心.
- 4) 长三角城市群主要河流、主要道路、行政边界等矢量数据. 该数据来源于长江三角洲科学数据中 心(<http://nnu.geodata.cn:8008/#>).

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务供需核算

2.1.1 生态系统服务供给价值核算 以长三角城市群的区/县为供给计算单元, 主要依据文献[16-17] 的研究成果进行生态系统服务供给价值( $P_{es}$ )核算, 有

$$\left. \begin{aligned} P_{es} &= \sum EV_j, \\ EV_j &= \sum P_{no} \times e_{i,j}, \\ P_{no} &= \frac{1}{7} \times \frac{P_g}{A_g}. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中:  $EV_j$  为生态系统第  $j$  项服务功能的单位面积总价值, 元·km<sup>-2</sup>;  $P_{no}$  为无人力投入的自然生态系统的单位面积农田粮食产量的经济价值, 元·km<sup>-2</sup>, 通常认为无人力投入的自然生态系统的单位面积农田粮食产量的经济价值约为单位面积农田提供粮食作物生产服务经济价值的 1/7;  $e_{i,j}$  为第  $i$  类土地利用类型生态系统的第  $j$  项服务功能相对于农田生态系统提供生态服务价值的当量系数;  $P_g$  为研究区每年的粮食总价值, 元;  $A_g$  为粮食播种面积, km<sup>2</sup>.

由于采用全国参数表征长三角城市群生态系统服务供给价值具有一定的误差, 因此, 对研究区域生态系统服务价值当量系数进行调整: 采用社会经济调节因子修正粮食产量的经济价值<sup>[18]</sup>, 采用 NPP 时空调节因子和降水时空调节因子修正价值当量系数<sup>[17]</sup>.

经计算, 社会经济调节因子、NPP 时空调节因子和降水时空调节因子分别为 1.32, 1.73, 1.57. 修正的单位面积生态系统服务价值当量系数( $e_r$ ), 如表 1 所示. 通过修正的单位面积生态系统服务价值当量系数, 可得长三角城市群生态系统服务供给价值.

表 1 修正的单位面积生态系统服务价值当量系数  
Tab. 1 Revised equivalent coefficients of ecosystem services value per unit area

服务类型(一级)	服务类型(二级)	$e_r$					
		耕地	林地	草地	建设用地	水体	未利用地
供给服务	食物供给	1.00	0.23	0.21	0	0.33	0
	原料供给	0.23	0.52	0.31	0	0.10	0
	水资源供给	-1.18	0.27	0.17	0	4.28	0
调节服务	气体调节	0.80	1.72	1.09	0	0.39	0.02
	气候调节	0.42	5.14	2.87	0	1.16	0
	废物净化	0.13	1.50	0.95	0	2.34	0.10
支持服务	土壤维持	0.47	2.09	1.32	0	0.38	0.03
	水源涵养	1.47	3.52	2.21	0	44.54	0.01
	生物多样性维持	0.15	1.91	1.21	0	1.05	0.02
文化服务	景观美学	0.07	0.84	0.53	0	0.81	0

2.1.2 生态系统服务需求核算 在文献[19]的基础上, 将生态系统服务需求理解为人类消耗或偏好获取的生态系统服务数量, 考虑到长三角城市群生态系统服务变化的驱动因素主要为土地开发利用的强

度与人类活动的干扰程度<sup>[20]</sup>,选取生态系统服务需求指数表征研究区域的生态系统服务需求。

研究区域的生态系统服务需求指数( $I_{ed}$ )的计算公式为

$$I_{ed}=\delta\times\lg\rho\times\lg P. \tag{2}$$

式(2)中: $\delta$ 为建设用地比例, $\%;$  $\rho$ 为人口密度,人 $\cdot\text{km}^{-2};P$ 为地均国内生产总值(GDP),万元 $\cdot\text{km}^{-2}$ 。

2.2 生态系统服务供需空间格局

采用生态系统服务供需比率( $R_{ESD}$ )量化分析供需平衡度,揭示研究区域生态系统服务供给和需求在数量上的盈余或赤字关系<sup>[21]</sup>。当  $R_{ESD}$  为正时,表示生态系统服务供过于求;当  $R_{ESD}$  为 0 时,表示生态系统服务供需平衡;当  $R_{ESD}$  为负时,表示生态系统服务供不应求。

$R_{ESD}$ 的计算公式为

$$R_{ESD}=\frac{S-D}{(S_{\max}+D_{\max})/2}. \tag{3}$$

式(3)中:采用归一化方法对生态系统服务的供给数据和需求数据进行标准化计算; $S,D$ 分别为研究区域各区/县生态系统服务的供给值与需求值; $S_{\max}$ 为生态系统服务供给最大值; $D_{\max}$ 为生态系统服务需求最大值。

对于生态系统服务供需空间上的盈亏关系,运用 ArcGIS 平台的热点分析工具,对各区/县生态系统服务供需比率进行分析,可以得到生态系统服务供需比率的高值和低值要素在空间上发生局部聚类的位置及聚集程度( $G_i^*$ )<sup>[22-23]</sup>。当  $G_i^*$  为 0 时,表明  $R_{ESD}$  没有发生聚集,为供需失衡的不显著区(供需平衡区);当  $G_i^*$  的绝对值越大时,生态系统服务供需比率低值或高值聚集的程度越大,为供需失衡的关键区域(供需失衡区)。其中, $G_i^*$  为正的区,表示高值聚集的供需盈余区,该区域的供给远大于需求,而  $G_i^*$  为负的区域,表示低值聚集的供需赤字区,该区域的需求远小于供给。

2.3 基于供需关系的生态系统服务空间流转

2.3.1 生态系统服务空间流转路径的确定 生态源地具有高供给价值,是生态系统服务流动和传递的源头<sup>[1]</sup>;生态需求地具有高需求指数,是生态系统服务的主要受益区。生态廊道是由阻力较小的景观类型构成的条带状通道,是区域内物质交换及能量流动的载体<sup>[24]</sup>。

基于生态系统服务供需空间格局确定生态源地与生态需求地,采用最小累积阻力(MCR)模型提取生态廊道<sup>[25]</sup>。将热点分析结果识别出的供需盈余区判定为生态源地,供需赤字区判定为生态需求地,利用 ArcGIS 平台的成本路径工具,以所有生态源地地质心为源,以生态需求地质心为目标,生成阻力最小的成本路径(最小成本路径),作为两地之间的潜在生态廊道;通过重力模型计算生态源地与生态需求地之间的相互作用矩阵,提取最小成本路径作为生态系统服务空间流转的最优路径。

2.3.2 生态系统服务价值流转量的构建 生态系统服务具有一定的方向性和区域性,不同位置发生的效用不同,发生流转的价值量基本遵循距离衰减规律<sup>[12]</sup>。根据生态系统服务空间流转的特点,借鉴康维斯在引力模型基础上提出的断裂点公式,模拟生态系统服务从生态源地向生态需求地流动的边界,再根据场强理论计算单位面积内生态系统服务流转强度<sup>[6]</sup>,可得生态源地到生态需求地的生态系统服务价值流转量( $E_{s,d}$ )。

$E_{s,d}$ 的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} E_{s,d} &= I_{s,d}Ak_{s,d}, \\ I_{s,d} &= \frac{E_s}{D_{s,d}^2}, \\ A &= D_s^2\pi, \\ D_s &= \frac{D_{s,d}}{1+\sqrt{E_s/E_d}}. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式(4)中: $I_{s,d}$ 为生态系统服务从生态源地到生态需求地的流转强度; $A$ 为生态系统服务从生态源地流转到生态需求地的辐射面积, $\text{km}^2;$  $k_{s,d}$ 为影响生态源地到生态需求地的生态系统服务空间流转影响因子,取值为 $[0\sim1]$ ,受水流、风速及风向等流动因子的影响, $k_{s,d}$ 一般取 0.6<sup>[26]</sup>;  $D_s$  为生态源地地质心与断裂点的距离, $\text{km};D_{s,d}$ 为生态源地地质心与生态需求地质心的距离, $\text{km};E_s,E_d$  分别为生态源地与生态需求地

的生态系统服务价值,元.

### 3 研究结果与分析

#### 3.1 长三角城市群生态系统服务供需空间特征

3.1.1 生态系统服务供给空间特征 2010 年和 2018 年生态系统服务供给价值,如图 2 所示.由图 2 可知:2010 年和 2018 年长三角城市群生态系统服务供给价值分别为 65 694,67 312 元·km<sup>-2</sup>,盐城、绍兴、台州等个别区/县供给价值增加,常州和上海的部分区/县供给价值减少,研究年份内,生态系统服务供给价值变化微小;长三角城市群生态系统服务供给呈南高北低的分布形态,供给高值区主要分布于杭州市淳安县、安庆市宿松县及苏州市吴中区,该区域土地利用类型主要为林地、草地和水域,提供生态系统服务的能力较强,苏州市吴中区拥有超过 180 km 的亲水岸,占太湖水域的 3/5,水资源供给和水源涵养服务价值极高,供给价值达 1 326 元·km<sup>-2</sup>,是供给值最高的区/县单元;供给低值区主要分布于南京市秦淮区、杭州市下城区及上海市区,供给最低值区为上海市静安区(6.5 元·km<sup>-2</sup>),土地利用类型主要是生态服务功能极少的建设用地.

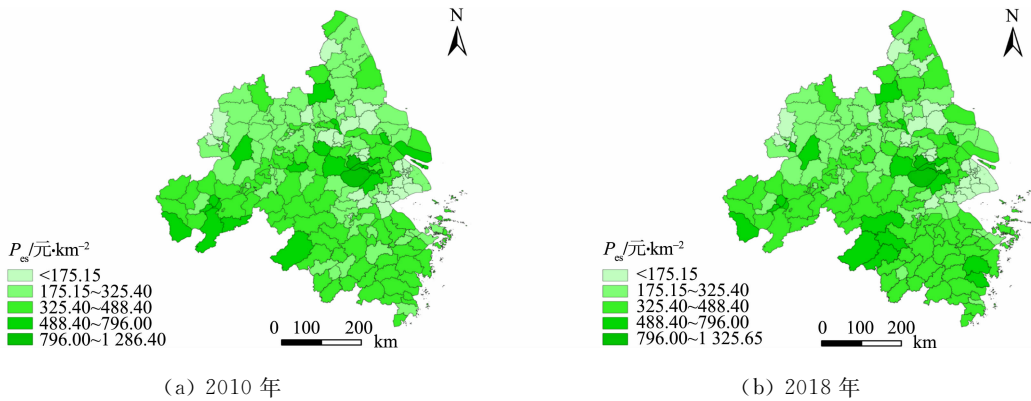


图 2 2010 年和 2018 年生态系统服务供给价值  
Fig. 2 Supply value of ecosystem services in 2010 and 2018

3.1.2 生态系统服务需求空间特征 2010 年和 2018 年生态系统服务需求指数,如图 3 所示.由图 3 可知:2010 年和 2018 年长三角城市群生态系统服务需求指数分别为 520.48,798.50,呈明显的增长趋势,南京、绍兴、金华、宁波等地区大部分区/县需求指数显著增加;生态系统服务需求与区域经济发展水平密切相关,各区/县差异显著,整体呈东高西低的分布形态;需求高值区主要分布于南京、杭州、合肥、上海等经济发达城市的中心城区,需求最高值区为上海市黄浦区(地均 GDP 高达 1 107 630.17 万元·km<sup>-2</sup>,人口密度为 31 955 人·km<sup>-2</sup>,建设用地比例为 91.70%);需求低值区主要分布于安庆、池州、宣城及杭州西南部的区/县,需求最低值区为安庆市岳西县(地均 GDP 为 171.98 万元·km<sup>-2</sup>,人口密度为 136 人·km<sup>-2</sup>,建设用地比例仅为 0.2%),土地的开发程度明显不足,各项指标均远低于平均值.

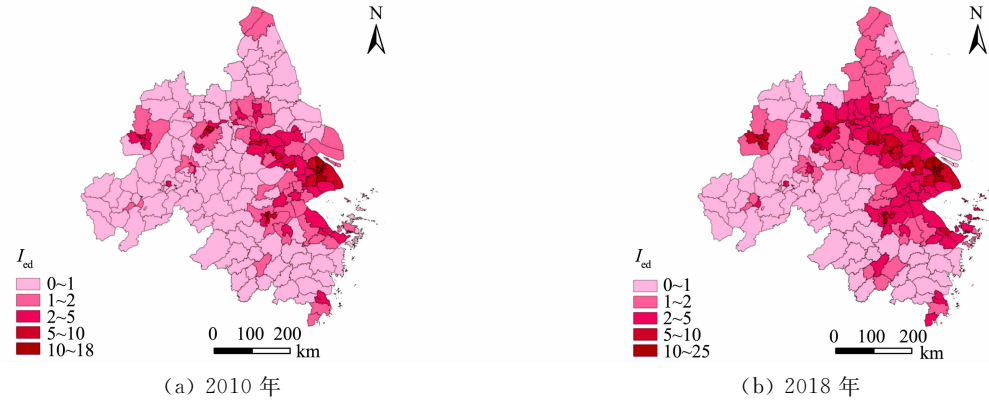


图 3 2010 年和 2018 年生态系统服务需求指数  
Fig. 3 Demand indexs of ecosystem services in 2010 and 2018



### 3.2 生态系统服务供需平衡分析

由热点分析结果可得  $G_i^*$  取值为 0,  $\pm 1, \pm 2$ , 2010 年和 2018 年  $G_i^*$  为 0 的供需平衡区占比分别为 84.60%, 79.54%, 供需平衡区面积下降. 根据  $G_i^*$  的取值, 供需失衡区可划分为以下 4 个区域:  $G_i^* = 2$  的区域为热点区(盈余充足区);  $G_i^* = 1$  的区域为次热点区(盈余一般区);  $G_i^* = -2$  的区域为冷点区(赤字严重区);  $G_i^* = -1$  的区域为次冷点区(赤字一般区). 盈余充足区和盈余一般区称为供需盈余区; 赤字严重区和赤字一般区称为供需赤字区.

2010 年和 2018 年生态系统服务热点分析结果, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 2010 年和 2018 年分别有 9 个和 11 个大斑块为供需失衡的关键区域; 2010 年有 4 个斑块为供需盈余区, 主要分布于池州、安庆、铜陵 3 市交界处的区/县, 总面积为 13 023.56 km<sup>2</sup>, 2010 年有 5 个斑块为供需赤字区, 分布于上海、南京、杭州等经济发达城市的主城区, 总面积为 20 082.03 km<sup>2</sup>; 2018 年有 5 个斑块为供需盈余区, 总面积为 19 921.69 km<sup>2</sup>, 比 2010 年增加 6 898.13 km<sup>2</sup>, 增加的斑块主要位于杭州市桐庐县、杭州市建德市和宁波市宁海县, 桐庐县 2018 年森林覆盖率达 75.31%, 林地面积显著增加, 总供给价值增加 48.15 元·km<sup>2</sup>, 建德市 2010 年至 2018 年城镇经济发展分散, 需求增长不显著, 生态服务供给富余, 宁海县近 8 年间生态治理成效显著, 生态系统服务供给充足, 2018 年有 6 个斑块为供需赤字区, 总面积为 24 079.65 km<sup>2</sup>, 比 2010 年增加 3 997.62 km<sup>2</sup>, 增加的斑块主要位于南京市江宁区、镇江市句容市、苏州市张家港市、无锡市江阴市, 自 2010 年后, 江宁区进入工业化后期阶段, 区域经济高质量发展, 生态需求显著提升, 句容市大力推进城镇化建设, 研究年份内建设用地比例增加 12.5%, 江阴市和张家港市位列 2018 年中国县域经济百强排行榜前三, 产业结构以第二产业为主导, 工业发达, 部分生态用地被占用, 区域生态系统服务供需失衡.

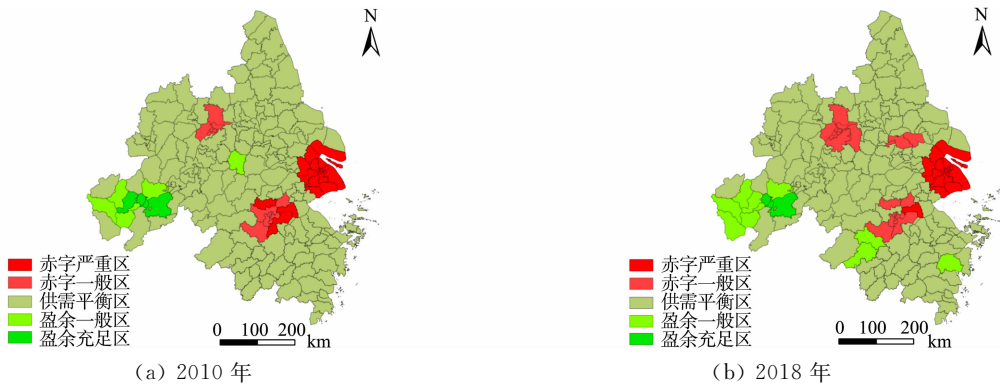


图 4 2010 年和 2018 年生态系统服务热点分析结果  
Fig. 4 Hotspots analysis results of ecosystem services in 2010 and 2018

### 3.3 生态系统服务空间流转路径与价值流转变量

3.3.1 生态系统服务空间流转路径 将生态系统服务供需盈余和供需赤字的斑块分别判定为生态源地和生态需求地, 考虑到部分斑块区/县数不止一个, 且少数相邻区/县集中连片, 文中生态源地和生态需求地的名称用其中面积最大且聚集程度最高的区/县名称表示. 2010 年, 有 4 个主要生态源地(安庆市太湖县、池州市贵池区、铜陵市枞阳县和常州市溧阳市), 5 个主要生态需求地(南京市六合区、湖州市德清县、嘉兴市桐乡市、杭州市萧山区和上海全区/县). 2018 年, 有 5 个主要生态源地(安庆市宿松县、池州市贵池区、铜陵市枞阳县、杭州市建德市和宁波市宁海县), 6 个主要生态需求地(杭州市萧山区、嘉兴市海宁市、嘉兴市桐乡市、无锡市江阴市、南京市江宁区及上海全区/县). 由 ArcGIS 平台的成本路径工具生成生态源地和生态需求地之间的多条潜在生态廊道. 2010 年和 2018 年生态廊道、生态源地和生态需求地的空间分布, 如图 5 所示.

根据重力矩阵可得 2010 年和 2018 年生态斑块的相互作用矩阵, 如表 2, 3 所示. 表 2, 3 中:  $F$  为各斑块之间的作用力, 无量纲. 由表 2 可知: 2010 年的 5 个生态需求地均与贵池区的相互作用力最强, 表明贵池区与各生态需求地进行生态系统服务流转的可能性最大, 进而提取出 5 条重要生态廊道. 由表 3 可知: 2018 年的 6 个生态需求地均与建德市的相互作用力最强, 由此提取出 6 条重要生态廊道作为生态系统服务从生态源地到生态需求地的流转路径. 重要生态廊道将生态需求地与生态源地进行了有效

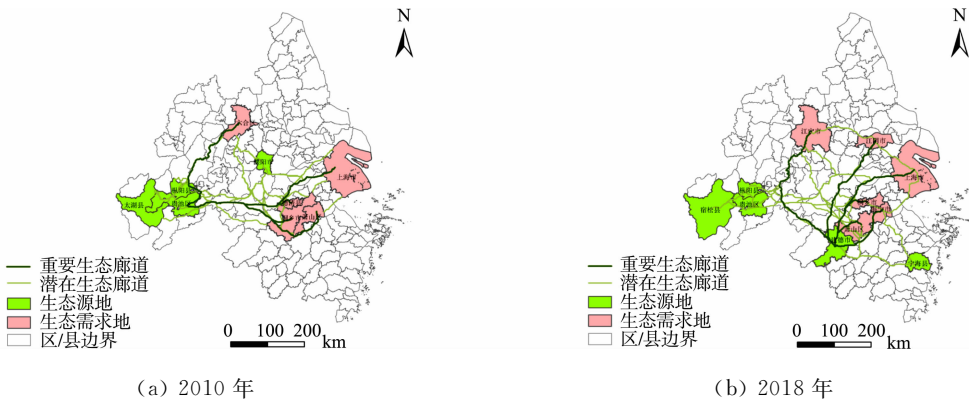


图 5 2010 年和 2018 年生态廊道、生态源地和生态需求地的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecological corridors, ecological origins and ecological destinations in 2010 and 2018  
连通, 以此作为生态系统服务流转的最佳路径, 建立起自然生态系统与城镇需求空间的联系纽带<sup>[1]</sup>.

表 2 2010 年生态斑块的相互作用矩阵  
Tab. 2 Interaction matrix of ecological patches in 2010

生态斑块	F				
	六合区	德清县	桐乡市	萧山区	上海全区/县
太湖县	0.066	0.259	0.294	0.049	0.022
贵池区	0.079	0.998	1.116	0.083	0.032
枞阳县	0.066	0.333	0.377	0.044	0.018
溧阳市	0.037	0.618	0.620	0.045	0.021

表 3 2018 年生态斑块的相互作用矩阵  
Tab. 3 Interaction matrix of ecological patches in 2018

生态斑块	F					
	萧山区	海宁市	桐乡市	上海全区/县	江阴市	江宁区
宿松县	0.394	0.045	0.158	0.016	0.030	0.099
贵池区	1.310	0.077	0.377	0.023	0.047	0.185
枞阳县	0.476	0.040	0.164	0.013	0.025	0.099
建德市	9.127	0.193	0.996	0.039	0.076	0.207
宁海县	1.474	0.120	0.270	0.020	0.035	0.082

3.3.2 生态系统服务价值流转量 根据断裂点公式和场强模型, 可得 2010 年和 2018 年生态源地向生态需求地流转的生态系统服务价值流转量及相关参数, 如表 4、5 所示。

表 4 2010 年生态系统服务价值流转量及相关参数  
Tab. 4 Value transfer volume of ecosystem services and related parameters in 2010

生态源地-生态需求地	A/km <sup>2</sup>	I <sub>s,d</sub>	E <sub>s,d</sub> /亿元
贵池区-六合区	2 978.23	0.003 77	6.74
贵池区-德清县	11 729.14	0.003 29	23.15
贵池区-桐乡市	37 738.38	0.003 26	73.82
贵池区-萧山区	7 992.21	0.002 14	10.26
贵池区-上海全区/县	14 212.57	0.001 54	13.13

表 5 2018 年生态系统服务价值流转量及相关参数  
Tab. 5 Value transfer volume of ecosystem services and related parameters in 2018

生态源地-生态需求地	A/km <sup>2</sup>	I <sub>s,d</sub>	E <sub>s,d</sub> /亿元
建德市-萧山区	3 927.00	0.031 66	74.60
建德市-海宁市	6 655.46	0.010 13	40.45
建德市-桐乡市	12 415.57	0.012 37	92.15
建德市-上海全区/县	8 230.97	0.003 06	15.11
建德市-江阴市	16 097.52	0.002 92	28.20
建德市-江宁区	13 634.51	0.002 70	22.09

由表 4 可知: 由于贵池区到桐乡市的距离最近, 流转强度最大, 两地之间的生态系统服务价值流转量最多(73.82 亿元); 贵池区到六合区辐射面积远小于其他需求地, 因而生态系统服务价值流转量最少(6.74 亿元); 贵池区到德清县、萧山区、上海全区/县的流转量分别为 23.15、10.26、13.13 亿元; 2010 年生态系统服务价值流转总量为 127.1 亿元。

由表 5 可知: 建德市到桐乡市具有较大的辐射面积及流转强度, 两地之间的生态系统服务价值流转量最多(92.15 亿元); 建德市到上海全区/县的两斑块质心之间的距离最长, 因而流转量最少(15.11 亿元), 建德县到萧山区、海宁市、江阴市和江宁区的流转量分别为 74.60、40.45、28.20、22.09 亿元; 2018 年生态系统服务价值流转总量为 272.6 亿元, 2018 年的流转量大约是 2010 年的两倍, 说明随着经济社会的发展, 城市生态需求日益增多, 不同区域间生态系统服务供需匹配的差异增大。

## 4 讨论与结论

2018 年供需失衡区面积的增加导致生态服务价值流转量的增多, 以及生态源地和生态需求地空间

分布格局的改变,其关键原因在于区域经济水平的提升使生态需求指数显著增长,第二、三产业是区/县经济发展的主要动力,为满足人们对更高生态质量的需求提供各种原材料和消费品,生态系统服务供不应求.此外,城镇化进程改变原有土地利用结构,建设用地扩张占用部分生态用地,自然生态系统受到人为活动干扰程度加深,导致生态系统服务功能下降,供需空间异质性增强.结合长三角城市群生态系统服务供需关系,通过构建生态源地和生态需求地之间的重要生态廊道确定生态系统服务流转路径,并计算生态系统服务价值流转量,可为相关部门制定生态补偿等跨区域环境协调治理政策提供一定的科学依据;根据生态源地流转到生态需求地的生态系统服务价值流转量比例,地方政府可以进行生态服务价值补偿出资比例的安排,从而保障地区公平的发展权.

基于价值量、热点分析、MCR 模型和距离衰减等多种模型和方法,量化分析长三角城市群 2010 年和 2018 年的生态系统服务供给和需求,揭示其供需空间格局特征,并确定生态系统服务空间流转路径和生态系统服务价值流转量,可得以下 3 个结论.

1) 长三角城市群 2010 年和 2018 年生态系统服务供给变化微小,而生态系统服务需求显著增长;在空间分布上,生态系统服务供给呈南高北低的分布形态;需求大致呈现东高西低的分布形态,沿海、沿江明显高于内陆地区.

2) 供需盈余区主要分布于皖南山地丘陵,供需赤字区主要分布于上海、南京、杭州等经济发达城市的主城区,研究年份内,供需平衡区面积下降,供需失衡区面积增加,经济发展水平与土地利用方式的变化导致供需空间异质性增强.

3) 将生态源地和生态需求地之间的重要生态廊道作为生态系统服务流转路径,可得 2010 年和 2018 年长三角城市群生态系统服务价值流转总量为 127.1,272.6 亿元.

生态系统服务空间流转是一个动态变化的过程,不同廊道间传递的服务流量各有差异.文中构建的生态系统服务空间流转模型有一定的不足:首先,评估模型中用于反映自然影响因素的修正因子的选取多为经验值,随着对生态系统服务流转规律认识的加深,需进一步提高其准确性;其次,在生态系统服务流转过程中仅考虑了自然因素,忽略了人为活动的影响.今后的研究还需借助多种技术手段与数据信息,对生态系统服务流转的路径方向、流量大小、衰减特征等进行具体、准确的描述.

参考文献:

[1] 张豆,渠丽萍,张桀漓.基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化:以长三角地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7525-7537. DOI:10.5846/stxb201808301854.

[2] 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. DOI:10.5846/stxb201803090469.

[3] 王嘉丽,周伟奇.生态系统服务流研究进展[J].生态学报,2019,39(12):4213-4222. DOI:10.5846/stxb201807271605.

[4] 刘慧敏,范玉龙,丁圣彦.生态系统服务流研究进展[J].应用生态学报,2016,27(7):2161-2171. DOI:10.13287/j.1001-9332.201607.005.

[5] 韩永伟,高馨婷,高吉喜,等.重要生态功能区典型生态系统服务及其评估指标体系的构建[J].生态环境学报,2010,19(12):2986-2992. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.12.025.

[6] 陈江龙,徐梦月,苏曦,等.南京市生态系统服务的空间流转[J].生态学报,2014,34(17):5087-5095. DOI:10.5846/stxb201308162095.

[7] 姚婧,何兴元,陈玮.生态系统服务流研究方法最新进展[J].应用生态学报,2018,29(1):335-342. DOI:10.13287/j.1001-9332.201801.018.

[8] CHEN Junyu,JIANG Bo,BAI Yang,*et al.* Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimization[J]. Science of the Total Environment,2019,650:1426-1439. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.09.126.

[9] ZHAI Tianlin,WANG Jing,JIN Zhifeng,*et al.* Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? [J]. Ecological Indicators,2020,111(22):1-11. DOI:10.1016/j.ecolind.2020.106068.

[10] TROY A,WILSON M A. Mapping ecosystem services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and



value transfer[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 435-449. DOI:10.1016/j.ecolecon.2006.04.007.

[11] WEN Wujun, XU Geng, WANG Xingjie. Spatial transferring of ecosystem services and property rights allocation of ecological compensation[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2011, 5(3): 280-287. DOI:10.1007/s11707-011-0186-x.

[12] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 等. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响[J]. *资源科学*, 2017, 39(3): 533-544. DOI:10.18402/resci.2017.03.15.

[13] 樊霞飞. 长三角一体化发展的战略意义、现实困境与路径选择[J]. *长春金融高等专科学校学报*, 2020(1): 74-81.

[14] 杜可心. 基于土地利用的生态系统服务供需空间格局研究[J]. *居舍*, 2019(33): 20.

[15] 虎陈霞, 郭旭东, 连纲, 等. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以嘉兴市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 333-340. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201703002.

[16] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260. DOI:10.1016/S0921-8009(98)00020-2.

[17] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254. DOI:10.11849/zrzyxb.2015.08.001.

[18] 汪东川, 孙志超, 孙然好, 等. 京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(7): 1285-1296. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.07.001.

[19] VILLAMAGNA A M, ANGERMERIER P L, BENNETT E M. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery[J]. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121. DOI:10.1016/j.ecocom.2013.07.004.

[20] 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. DOI:10.5846/stxb201601020007.

[21] 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. DOI:10.11821/dlxb201909016.

[22] 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. DOI:10.5846/stxb201804180886.

[23] 苗培培, 赵祖军, 赵筱青, 等. 云南典型石漠化区生态系统服务权衡与协同研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 366-374. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.039.

[24] 梁珍宝, 余敦. 基于供需视角的生态安全格局构建与优化研究: 以鄱阳湖生态经济区为例[J]. *中国国土资源经济*, 2021, 34(8): 79-89. DOI:10.19676/j.cnki.1672-6995.000602.

[25] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 等. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 224-233. DOI:10.13287/j.1001-9332.201808.017.

[26] REYNOLDS T W, FARLEY J, HUBER C. Investing in human and natural capital: An alternative paradigm for sustainable development in Awassa, Ethiopia[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(11): 2140-2150. DOI:10.1016/j.ecolecon.2009.03.007.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 吴逢铁)