

收稿日期:2022-11-17

# 长三角城市群水生态绿色网络的空间分布与演化

朱少杰,施卫东

(东南大学 经济管理学院,江苏 南京 211189)

**摘要:**长三角一体化已进入高质量发展阶段,水生态绿色发展是长三角一体化高质量发展的重要组成部分。结合生态承载力的内涵,通过灰色关联分析衡量长三角地区水生态绿色发展水平。在此基础上,运用社会网络分析法,对长三角城市群2006、2012、2018和2021年的水生态绿色网络的空间分布及其演化规律进行了研究,结果表明:长三角城市群水生态环境绿色发展水平存在区域内的差异;长三角城市群水生态绿色网络使各城市的绿色发展联系日益紧密;长三角城市群水生态绿色发展水平整体在不断提升。

**关键词:**长三角城市群;生态承载力;社会网络分析;灰色关联分析;水生态绿色网络

**中图分类号:** F124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-6873(2023)02-0029-10

**作者简介:**朱少杰(1998—),男,江苏泰州人,东南大学经济管理学院硕士研究生,主要从事生态经济研究;施卫东(1954—),男,江苏苏州人,东南大学经济管理学院副教授,博士,主要从事生态经济等研究。

**DOI:** 10.16401/j.cnki.ysxb.1003-6873.2023.02.019

2020年,沪、苏、浙根据《长三角生态绿色一体化发展示范区总体方案》联合提出22条具体措施,涵盖长三角一体化战略的八个方面,长三角一体化发展就此全面展开,生态绿色成为高质量发展的核心,长三角一体化自此进入高质量发展新阶段。

长三角城市网络研究一直是区域经济研究的重点,戴靓等<sup>[1]</sup>基于多重空间流研究长三角城市网络的空间特征;刘和东等<sup>[2]</sup>通过改进引力模型对长三角城市间的经济联系进行测度。随着区域高质量发展的持续推进,国内外的生态研究也在不断深入。Rees等<sup>[3]</sup>从地球自然资源承载的角度,认为生态承载力是可以供给内部人口日常生产、生活所需的各类生态生产性土地空间之和;David J. Rapport<sup>[4]</sup>率先建立压力-状态-响应模型(PSR)用于评价生态环境质量;Dietz等<sup>[5]</sup>建立了生态质量影响随机模型——IPAT模型,该模型为后续生态网络研究提供了框架;J. Andreoni等<sup>[6]</sup>首次将社会因素纳入生态研究;Christie L. Parris<sup>[7]</sup>从经济增长角度,探究了生态环境质量的影响因素。徐卫华等<sup>[8]</sup>首次辨析了广义和狭义的生态承载力,认为狭义的生态承载力是指生态系统提供关键的生态服务、预防生态问题、保障区域生态安全的能力,将资源提供相关的功能(如水资源提供等)归为资源承载力,污染物净化功能(如空气质量调节与水质净化等)归到环境承载力。而近年来,生态承载力主要采用系统动力学模型、投入产出分析、综合指标分

析等方法,通过人口数量、生态足迹及相对承载力来衡量。李翔等<sup>[9]</sup>以经济可持续性为目标,从资源消费、能源消费、水资源消费、环境负荷等方面对珠海市生态足迹进行了预测;徐琳瑜等<sup>[10]</sup>借鉴生物免疫学理论构建了城市生态系统复合承载力“蛋体模型”,利用灰色关联度和熵值法构建了广州市生态承载力计量模型。此外,还有学者对城市群生态承载力进行了研究。燕守广等<sup>[11]</sup>以资源占用和环境污染为准则层,从自然环境、社会经济、系统开放和管理政策四个方面构建了长三角城市群生态承载力的综合评估模型。

然而,国内外对生态承载力的研究大多是从经济学或生物学单学科的角度入手,很少从多学科交叉的层面进一步探究,生态承载力规律的揭示还不够全面。当前,对生态承载力相关指数的计算多采用熵值法和TOPSIS法来确定权重系数,通过指标体系直接计算生态承载力指数。在“生态-社会”系统中,生态环境是通过影响人类生产生活从而间接影响人类经济社会发展的,因此,这种从生态承载力内涵出发,通过选定的指标体系直接计算相关指数的方法,看似合理却没有考虑到自然环境对人类生产生活的直接作用,所选取指标的内生性问题也无法解决,由此得到的生态承载力指数并不是对生态承载力的客观反映。本文选取的二级指标——人口自然增长率,正是生态环境对人类生产生活的直接作用(不考虑西方国家因文化差异导致生育观念的改变),生态承载力越高,表明人类所居住环境的资源越充足、条件越舒适,在生物学意义上,越有利于区域内生物的自然增长,生态承载力与人口自然增长率呈正相关。但这种正相关具体达到何种程度却很难进行模拟,因此,生态承载力对人口自然增长率的影响是一个灰色模型,适用灰色关联分析。

综合考虑以上问题,本文结合生态学中的生态承载力内涵、经济学常用的灰色关联分析和社会学常用的社会网络分析,对长三角城市群水生态绿色网络进行多学科交叉研究。从生态承载力内涵的三个层面选取六个二级指标,采用灰色关联分析研究各指标与人口自然增长率的关联度差异,从而探究其与生态承载力的关系;再以各关联度指数为系数进行加权计算得到各城市的水生态环境指数,并以此衡量各城市的水生态绿色发展程度;最后结合社会网络分析法中的网络密度、节点的中心性分析、凝聚子群分析来研究长三角城市群的水生态绿色网络的空间分布和演化规律。

## 一、研究方法和数据来源

### (一)研究方法

#### 1. 灰色关联分析

灰色关联分析是通过联立各项指标变动与参考指标,得到指标之间的关联度,并通过比较关联度大小,得到影响参考指标的主要因素。首先通过对所选取的指标进行均值化处理和求差数列计算,得到参考数列(人口自然增长率)与比较数列(各项指标)的灰色关联度及排序结果;然后对各项指标数据进行无量纲化处理(消除数据间的量纲差异);最后结合得到的灰色关联度对无量纲化的指标数据进行加权运算,得到2006、2012、2018和2021年四个年份的水生态环境指数。

#### 2. 社会网络分析

社会网络分析法是从整体网络特征、小世界、结构洞等方面对现有网络进行分析。由于对个体间的网络关系进行定量分析,该方法被广泛应用于管理学、区域经济学和地理学等领域。运用Ucinet软件,结合长三角城市群中心城市的水生态环境指数,采用网络密度、节点的中心性分

析、凝聚子群分析来研究长三角城市群的水生态绿色网络结构和演化。(1)网络密度就是网络的密集程度,本文以水生态绿色网络的网络实际关联数与网络理论关联数的比值来衡量其网络密度。(2)“中心性”是社会网络分析的研究重点之一,它能够反映城市在生态绿色网络中所具有的能力和地位,包括度数中心度、中间中心度和接近中心度三类。度数中心度体现了某个城市与其他城市直接联系的情况。由于本文所涉研究区域的城市数量始终保持不变,故度数中心度的值为与该城市有直接联系的城市个数。城市的中间中心度体现了一个城市对发展资源的控制能力。如果一个城市处于许多关系路径上,那么它就处于网络的重要地位。本文以与各城市直接相连和间接相连城市数目表示中间中心度,其中每一个直接相连城市记为 1,间接相连(若已直接相连,则不再考虑间接相连路径)城市记为 0.5。接近中心度指一个城市与整体网络中其他城市的距离之和,其值越小,表明该城市的整体中心度越高。本文以与各城市直接或间接相连(若已直接相连,则不再考虑间接相连路径)的线段数目来表示接近中心性,每条线段都记为 1。(3)凝聚子群是由具有相对较强关系的城市所构成的子集合。由于三类中心度中,只有中间中心度是用来衡量个体与整体网络之间关系强度的,距离整体网络越近,关系越强,反之则越弱,因此,本文以中间中心度为参考,对长三角城市群水生态绿色网络中的城市进行子群划分。

## (二)数据来源

根据 2007、2013、2019 和 2022 年《中国城市统计年鉴》和各省市区统计局报告整理。本文选取包括上海、南京、无锡等 27 个城市在内的中心区为研究区域,由于数据获取问题,所研究的城市不包括舟山、宣城和温州。

## 二、水生态环境评价指标体系构建

借鉴张璟珏<sup>[12]</sup>对长三角绿色发展示范区的生态承载力评价方法,以长三角城市人口自然增长率为参照,从资源供给、社会影响、环境容纳三个维度选取水资源总量、GDP、人口密度、政府一般公共预算支出、建成区绿化覆盖率和污水处理厂集中处理率作为指标,建立长三角城市群水生态环境评价指标体系(如表 1),以此评价长三角城市群水生态绿色发展水平。

表 1 长三角城市群水生态环境评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位
水生态环境评价指标体系	资源供给	$X_1$ :水资源总量	万立方米
		$X_2$ :GDP	万亿元
	社会影响	$X_3$ :人口密度	人/平方公里
		$X_4$ :政府一般公共预算支出	亿元
	环境容纳	$X_5$ :建成区绿化覆盖率	%
		$X_6$ :污水处理厂集中处理率	%

## 三、灰色关联分析

### (一)灰色关联度计算

生态承载力与人口自然增长率呈正相关,但这种正相关具体达到何种程度却难以进行模拟,生态承载力对人口自然增长率的影响是一个灰色模型,适用灰色关联分析。本文从 2006、2012、2018 和 2021 年这四个年份对长三角城市的生态承载力的相关指标与人口自然增长率进行灰色

关联分析。在对数据进行均值化处理和求差数列计算后,参考数列(人口自然增长率)与比较数列的灰色关联度及排序结果见表2。

表2 2006、2012、2018、2021年各指标灰色关联度系数及排序结果

项目	2006		2012		2018		2021	
	关联度	排序	关联度	排序	关联度	排序	关联度	排序
X <sub>1</sub>	0.888	1	0.768	4	0.868	1	0.874	1
X <sub>2</sub>	0.818	6	0.765	5	0.820	6	0.830	5
X <sub>3</sub>	0.844	3	0.755	6	0.831	4	0.816	6
X <sub>4</sub>	0.826	5	0.775	3	0.829	5	0.858	3
X <sub>5</sub>	0.865	2	0.790	1	0.860	3	0.861	2
X <sub>6</sub>	0.843	4	0.786	2	0.861	2	0.850	4

## (二)结果分析

在考察的六个二级指标中,水资源总量、建成区绿化覆盖率和污水处理厂集中处理率排名靠前,水资源总量、建成区绿化覆盖率、污水处理厂集中处理率三项指标与人口自然增长率呈强正相关。人口密度、GDP和政府一般公共预算支出关联度排名靠后,人口密度、GDP和政府一般公共预算支出对人口自然增长率影响一般。所选取的六个指标的关联度虽有排名差异,但整体上差距不大,表明长三角城市群水生态环境绿色发展需要协调好自然与经济社会两个层面。

## 四、水生态环境分析

通过前文的分析,已得到了影响长三角城市群人口自然增长率的各项指标的灰色关联度系数;接下来利用所得到的关联度系数,结合所构建的水生态环境评价指标体系,对长三角城市群24个城市的水生态环境绿色发展水平进行评价。

表3 长三角城市群各城市水生态环境指数

城市	$\epsilon(2006)$	$\epsilon(2012)$	$\epsilon(2018)$	$\epsilon(2021)$	城市	$\epsilon(2006)$	$\epsilon(2012)$	$\epsilon(2018)$	$\epsilon(2021)$
上海	17.493	13.691	15.279	17.632	嘉兴	4.047	3.904	4.332	4.478
南京	6.113	5.206	6.106	6.345	湖州	3.467	3.455	3.950	4.126
无锡	6.006	5.369	5.658	6.125	绍兴	4.613	4.411	4.528	4.769
常州	4.525	4.075	4.371	4.689	金华	4.862	4.591	4.213	4.983
苏州	7.406	6.309	6.943	7.665	台州	4.996	4.765	4.968	5.124
南通	5.067	4.713	4.940	5.264	合肥	4.224	4.140	5.183	5.332
盐城	5.206	4.000	4.489	5.369	芜湖	2.476	3.479	3.837	3.967
扬州	4.325	3.725	3.982	4.432	马鞍山	3.356	2.907	3.013	3.479
镇江	3.795	3.321	3.547	4.015	铜陵	3.202	2.903	2.991	3.336
泰州	4.390	3.548	4.028	4.602	安庆	3.394	3.867	4.371	4.497
杭州	7.673	7.219	7.753	7.953	滁州	2.504	2.760	3.788	4.356
宁波	6.332	5.924	6.001	6.528	池州	2.531	3.036	3.406	3.549

### (一)水生态环境指数的计算

先对原始数据进行无量纲化处理(消除数据间的量纲差异),再结合得到的灰色关联度对无

量纲化的指标数据进行加权运算,得出 2006、2012、2018 和 2021 年四个年份各城市的水生态环境指数(表 3),以此衡量各年份城市水生态环境绿色发展水平。

## (二)结果分析

2006、2018、2021 年三个年份的水生态环境指数基本在 0.8—0.9,2012 年出现波动,水生态环境指数在 0.7—0.8。通过详查《2012 年中国环境质量公报》得知,2012 年我国水环境治理不容乐观,地下水监测点位中,较差至极差水质监测点占 57.3%,相较于 2011 年上升 2.4%。2012 年,全国共发生 542 起突发环境事件,环境保护部直接调度处理了 33 起突发环境事件,其中 30 起为水污染,水污染中,4 起为海洋污染,其他 26 起均不同程度影响到饮用水源地。2012 年水生态环境指数的下降,一方面表明我国当时的水污染防治还不到位,另一方面也证实本文指标选取和研究方法的合理性。长三角城市群水生态环境指数整体上处于上升的趋势,但区域间存在差异,上海的水生态环境指数远高于其他城市,江苏和浙江的城市的生态环境指数整体上也高于安徽。表明长三角城市群水生态绿色发展水平虽然整体在不断改善,但水生态环境发展水平存在区域内差异,生态治理需要因地制宜,避免差距扩大。

## 五、长三角城市群水生态绿色网络结构演化分析

前文已对长三角城市群 2006、2012、2018 和 2021 年的生态环境发展水平进行了评价,并从中发现其水生态环境绿色发展水平存在区域差异。为此,本文试图通过分析长三角城市群水生态绿色网络的发展与演化规律对该问题进行深入探究。本文对研究区域内的 24 个城市水生态环境指数进行排序,发现这四个年份的中位数在 3.547—3.549 之间,故以  $\epsilon=3.548$  为阈值,大于阈值为相关记为 1,小于阈值则不相关记为 0,从而得到 4 个  $24 \times 24$  的无向生态绿色矩阵。利用 Ucinet 软件对获得的矩阵进行分析。

### (一)整体网络分析

从整体网络规模来看,这四个年份长三角城市群的网络规模均为 24,从网络密度来看,24 个城市的水生态绿色网络结构愈发紧密。四个年份的网络密度分别为 0.616、0.641、0.826 和 0.835,2012 年网络密度比 2006 年扩大了 4.12%,2018 年比 2012 年扩大了 28.82%,而 2021 年比 2018 年扩大了 1.05%。2012—2021 网络密度的增幅有所上升,生态绿色联系不断加强。

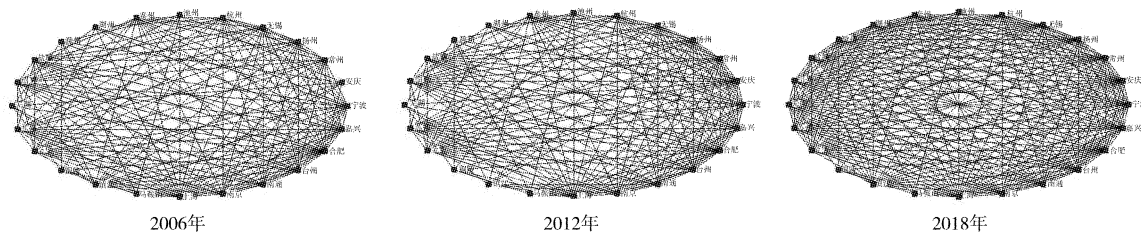


图 1 长三角城市群网络结构变化

图 1 为各年份 24 个城市的生态绿色合作情况。由图 1 可见,长三角城市群 24 个城市之间的生态联系不断加强,每个城市与其他城市建立联系的数量持续增长。处于中心位置的城市数量不断增加,逐渐建立起以上海、合肥、芜湖、安庆、滁州为核心,南京、无锡、杭州、宁波等为次中

心的生态绿色合作网络。

## (二)网络中心性分析

表4 长三角城市群2006、2012、2018和2021年网络中心性分析

城市	度数中心度				中间中心度				接近中心度			
	2006	2012	2018	2021	2006	2012	2018	2021	2006	2012	2018	2021
上海	23	23	23	23	24	24	24	24	23	23	23	23
南京	16	17	20	23	20.5	21	22.5	23	30	29	26	23
无锡	16	17	20	23	20.5	21	22.5	23	30	29	26	23
常州	16	17	20	23	20.5	21	22.5	23	30	29	26	23
苏州	16	17	20	23	20.5	21	22.5	23	30	29	26	23
南通	16	17	20	22	20.5	21	22.5	23	30	29	26	26
盐城	16	17	20	22	20.5	21	22.5	23	30	29	26	26
扬州	16	17	20	22	20.5	21	22.5	23	30	29	26	26
镇江	16	9	20	22	20.5	17	22.5	23	30	37	26	26
泰州	16	17	20	22	20.5	21	22.5	23	30	29	26	26
杭州	17	17	20	23	21	21	22.5	23	29	29	26	23
宁波	17	17	20	23	21	21	22.5	23	29	29	26	23
嘉兴	17	17	20	23	21	21	22.5	23	29	29	26	23
湖州	7	7	20	22	16	21	22.5	23	39	39	26	26
绍兴	17	17	20	23	21	21	22.5	23	29	29	26	23
金华	17	17	20	22	21	21	22.5	23	29	29	26	26
台州	17	17	20	22	21	21	22.5	23	29	29	26	26
合肥	22	21	23	23	23.5	23	24	24	24	25	23	23
芜湖	7	7	23	23	16	16	24	24	39	39	23	23
马鞍山	7	7	7	20	16	16	16	20	39	39	39	26
铜陵	7	7	7	20	16	16	16	20	39	39	39	26
安庆	7	21	23	23	16	23	24	24	39	25	23	23
滁州	7	7	23	23	16	16	24	24	39	39	23	23
池州	7	7	7	20	16	16	16	20	39	39	39	26

### 1. 度数中心度

长三角城市群2006、2012、2018和2021年度数中心度见表4。由数据可见,城市之间的水生态绿色联系在不断加强。上海、合肥等增长较慢,主要是由于其起始阶段与其他城市的联系已经很紧密,后期的增长空间有限。从2012年到2018年,镇江、湖州、芜湖、滁州增长较快,其他城市由于2012年与其他城市联系较多,后期的增长并不明显。其中,除马鞍山、铜陵、池州外,其他城市的度数中心度已达到20以上(由于本文共参考24个城市,度数中心度达到20以上意即区域内与之直接相连的城市超过80%,表明该城市已充分参与到区域水生态绿色网络中)。图2显示了长三角城市群度数中心度的变化。而到2021年,长三角城市群24个城市的度数中心度均已达到20及以上。上海、合肥的度数中心度一直处于长三角城市群的前列。其中,上海4个年份的度数中心度均为23,是城市群里第一个与其他城市均建立联系的城市,表明上海在长三角城市群水生态绿色网络中占据较为核心的位置。江苏的南京、无锡、常州、苏州,浙江的杭州、宁

波、嘉兴、绍兴以及安徽的合肥、芜湖、安庆、滁州,在 2021 年度数中心度也均达到了 23,而江浙城市的度数中心度均已达到 22 以上。整个长三角城市群水生态绿色网络中的核心城市地位在不断弱化,所有城市在整个网络中与其他城市的联系都在增强,城市间的水生态绿色发展水平差异在减小。

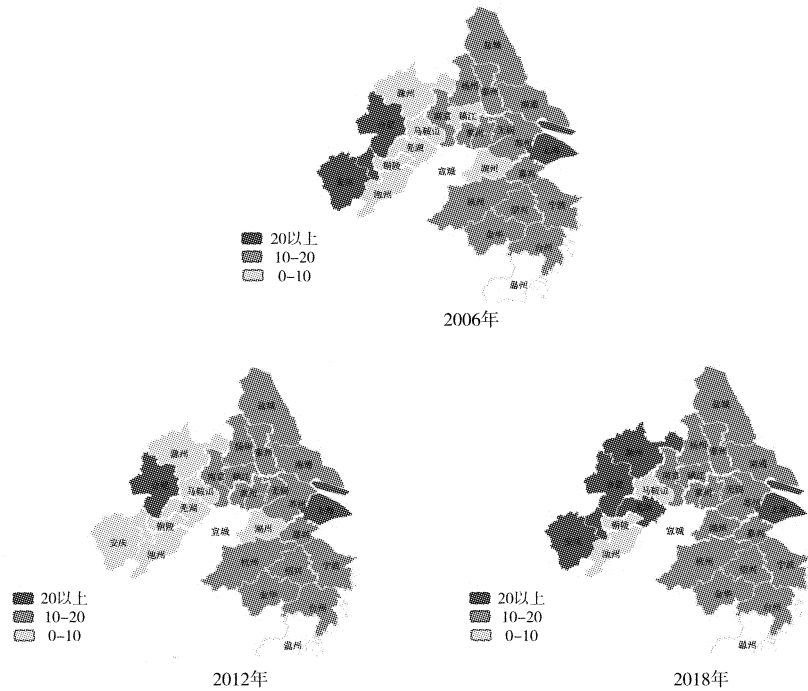


图 2 长三角城市群度数中心度分布变化

## 2. 中间中心度

长三角城市群 2006、2012、2018 和 2021 年 24 个城市的中间中心度见表 4。上海的中间中心度一直位于长三角城市群的最前列,表明这个城市对水生态绿色网络中其他城市的控制能力较强,一直以来起到水生态绿色网络的“中介”作用。然而,在整个网络中,有部分城市并未起到“中介”作用,处于整个网络的边缘位置,但这些城市的比例在不断下降。中间中心度为 7 的城市从 2006 年的 7 个下降到 2021 年的 0 个。直到 2021 年,长三角城市群 24 个城市的中间中心度均已达到 20 以上,表明长三角城市群 24 个城市在水生态绿色网络中已能够互为“中介”,从而提高了整个网络的资源利用效率。

## 3. 接近中心度

长三角城市群 2006、2012、2018 和 2021 年 24 个城市的接近中心度见表 4。大多数城市的接近中心度都有不同程度的下降,绝大多数城市 2012 年比 2006 年下降了近 3%,2018 年比 2012 年下降了近 10%,2021 年比 2018 年下降了近 2%。表明这些城市的水生态绿色水平在不断提高,对其他城市的依赖在减弱。其中,芜湖、安庆、滁州的接近中心度下降最快。马鞍山、铜陵、池州接近中心度一直位于长三角城市群的前列,2006、2012、2018 年排名均为第一,表明其水生态发展比较依赖其他城市,直到 2021 年才降到 26,和长三角城市群中的大多数城市持平。

### (三)凝聚子群分析

本文运用 Ucinet 软件对长三角城市群水生态绿色网络进行凝聚子群分析,主要采用 CONCOR(迭代相关收敛法)。根据表 4 中的数据,表 5 为凝聚子群内部成员的演化结果。图 3 为长三角城市群凝聚子群分布。

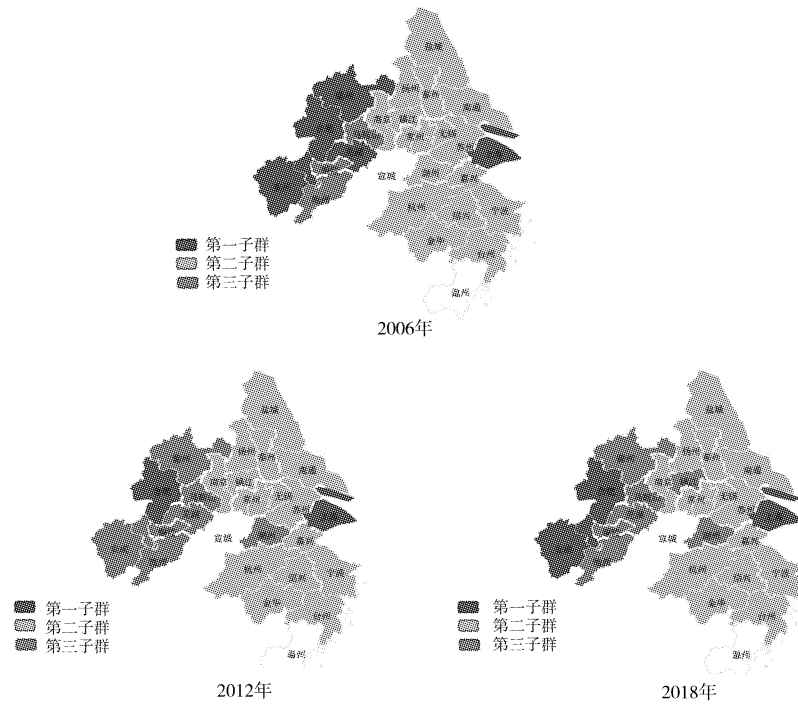


图 3 长三角城市群凝聚子群分布

表 5 长三角城市群凝聚子群演化

年份	第一子群	第二子群	第三子群
2006	上海、合肥	南京、无锡、苏州、常州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州、杭州、宁波、嘉兴、绍兴、金华、台州	湖州、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州
2012	上海、合肥、安庆	南京、无锡、苏州、常州、南通、盐城、扬州、泰州、杭州、宁波、嘉兴、绍兴、金华、台州	镇江、湖州、芜湖、马鞍山、铜陵、滁州、池州
2018	上海、合肥、芜湖、安庆、滁州	南京、无锡、苏州、常州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州、杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、金华、台州	马鞍山、铜陵、池州
2021	上海、南京、无锡、苏州、常州、杭州、宁波、嘉兴、绍兴、合肥、芜湖、安庆、滁州	南通、盐城、扬州、镇江、泰州、湖州、金华、台州、马鞍山、铜陵、池州	

长三角城市群水生态绿色网络已趋于稳定,且存在一定的演化趋势:以上海、合肥为核心的第一子群不断纳入新的城市,江苏和浙江的绝大多数城市处于第二子群,而安徽的大多数城市处于第三子群。2012年安庆加入第一子群,镇江落入第三子群,而湖州进入第二子群。2018年,第



三子群的芜湖、滁州加入了第一子群;第三子群的镇江跨越到第二子群;第三子群只剩下马鞍山、铜陵和池州。皖南和上海处于第一子群,浙江和江苏的城市处于第二子群,而皖北则位于第三子群。可见地理上邻近的城市更易在水生态绿色网络中形成小团体。2021年,第二子群的南京、无锡、苏州、常州、杭州、宁波、嘉兴、绍兴加入了第一子群,而第三子群的马鞍山、铜陵、池州加入了第二子群,已没有城市处在第三子群。可见长三角城市群水生态绿色网络已经显著改善了区域水生态绿色发展水平。

## 六、结论与建议

水生态绿色合作网络有助于促进环境友好型、资源集约型经济的发展。本文基于生态承载力内涵,通过构建长三角城市群水生态环境评价指标,结合灰色关联分析,得到的2006、2012、2018和2021年长三角城市群24座城市的水生态环境指数。在此基础上,使用社会网络分析得到长三角城市群水生态绿色网络的空间分布和演变规律。

### (一)研究结论

在参考的六个二级指标中,水资源总量、建成区绿化覆盖率和污水处理厂集中处理率排名靠前,表明水和植被对水生态环境的净化作用立竿见影。人口密度、GDP和政府一般公共预算支出关联度排名靠后,表明经济社会指标对人口自然增长率的影响弱于自然环境指标。所选取的六个指标的关联度虽有排名差异,但整体上差距不大,表明长三角城市群水生态环境绿色发展需要协调好自然与经济社会两个层面。长三角城市群水生态环境指数存在区域性差异,上海的水生态环境指数远高于其他城市,江苏和浙江的城市的水生态环境指数整体上也高于安徽,亟需采取相应措施避免差异进一步扩大。长三角城市群水生态绿色网络密度不断增加,2012—2018年增长率有明显上升,但仍有部分城市之间未建立合作关系,直到2021年长三角城市群所有城市才较好地融入到水生态绿色网络中。

### (二)建议

(1)区域生态治理要结合考虑社会经济和自然资源因素,两者的协调发展才是经济持续高质量发展的长久之计。

(2)积极推进区域生态联防联控,尤其应关注处于水生态绿色网络边缘的城市,通过与之合作带动水生态绿色发展。而处于水生态绿色网络核心位置的城市应当主动发挥自身优势,扩大合作和辐射范围,促进区域内的绿色发展。

(3)长三角城市群内各城市应积极推动环境友好型、资源集约型经济发展,例如通过财政、金融等手段促进水生态绿色发展投入。

## 参考文献

- [1] 戴靓,曹湛,张维阳,等.多重空间流视角下长三角城市网络特征分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(6):1280-1289.
- [2] 刘和东,杨丽萍.长三角城市经济一体化演变的社会网络分析[J].科学与管理,2020,40(3):68-74.
- [3] REES W, WACKERNAGEL M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability[J]. Environmental Impact Assessment Review, 1996,16(4):223-224.
- [4] LEE B J, REGIER H A, RAPPORT D J. Ten ecosystem approaches to the planning and management of the Great Lakes[J]. Journal of Great Lakes Research,1982,8(3):505-519.

- [5] DIETZ T, ROSA E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology[J]. *Human Ecology Review*, 1994, (1): 277 - 300.
- [6] ANDREONI J, LEVINSON A. The simple analytics of the environmental Kuznets curve[J]. *Journal of Public Economics*, 2000, 80(2): 269 - 286.
- [7] PARRIS C L, HEGTVEDT K A, WATSON L A, et al. Justice for all Factors affecting perceptions of environmental and ecological injustice[J]. *Social Justice Research*, 2014, 27(1): 67 - 98.
- [8] 徐卫华, 欧阳志云, 黄璜, 等. 中国陆地优先保护生态系统分析[J]. *生态学报*, 2006(1): 271 - 280.
- [9] 李翔, 许兆义, 孟伟. 城市生态承载力研究[J]. *中国安全科学学报*, 2005(2): 6 - 10.
- [10] 徐琳瑜, 杨志峰, 李巍. 城市生态系统承载力理论与评价方法[J]. *生态学报*, 2005(4): 771 - 777.
- [11] 燕守广, 沈渭寿, 邹长新, 等. 长江三角洲地区复合生态系统生态承载力研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(6): 529 - 533.
- [12] 张璟垚. 生态绿色目标下长三角一体化示范区资源环境承载力评价[J]. *低碳世界*, 2020, 10(8): 1 - 3.

## Research on the Distribution and Evolution of the Green Network of Water Ecology in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration

ZHU Shao-jie, SHI Wei-dong

(School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, 211189, China)

**Abstract:** The integration of the Yangtze River Delta has entered a stage of high-quality development, and the green development of water ecology is an important component of the integrated high-quality development of the Yangtze River Delta. Based on the connotation of ecological carrying capacity, the green development level of water ecology in the Yangtze River Delta region was measured by gray correlation analysis. On this basis, the social network analysis method is used to study the spatial distribution and evolution of the water ecological green network in the Yangtze River Delta urban agglomeration in 2006, 2012, 2018 and 2021. The results show that: there are regional differences in the green development level of water ecological environment in the Yangtze River Delta urban agglomeration; The water ecological green network of the Yangtze River Delta urban agglomeration has made the green development of various cities increasingly linked; The overall level of water ecological green development of the Yangtze River Delta urban agglomeration is constantly improving.

**Key words:** Yangtze River Delta urban agglomeration; ecological carrying capacity; social network analysis; gray correlation analysis; water ecological green network

〔责任编辑:陈济平〕