

DOI: 10.20103/j.stxb.202209232716

张中浩, 张永瑶, 胡熠娜, 高峻. 基于“水-能源-粮食”纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9430-9445.

Zhang Z H, Zhang Y Y, Hu Y N, Gao J. Spatial and temporal distribution of supply-demand of ecosystem services in the demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta from the perspective of water-energy-food nexus. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9430-9445.

基于“水-能源-粮食”纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究

——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例

张中浩^{1,2}, 张永瑶¹, 胡熠娜^{1,2}, 高 峻^{1,2,*}

1 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234

2 上海长三角城市湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 上海 200234

摘要: 生态系统服务供需平衡是区域可持续发展的重要环节, 也是有效反映区域社会经济与自然是否能够协调发展的重要表征。以长三角生态绿色一体化发展示范区为例, 以“水-能源-粮食”纽带为切入点, 基于 InVEST 模型、CASA 模型和 Thornthwaite Memorial 模型, 测度了示范区 2000、2005、2010、2015 及 2020 年产水、固碳、粮食生产服务的供需量, 引入基尼系数、供需指数和相关系数, 刻画区域生态系统服务供给和需求的时空特征, 结果表明: (1) 2000—2020 年, 除粮食生产服务供给量波动下降以外, 产水和固碳的供给量均呈波动上升趋势。在需求量方面, 三种生态系统服务均呈上升趋势; (2) 空间上, 产水和粮食服务供给量主要呈“东南、西南高”的特征, 固碳供给量高值则集中于吴江区桃源镇, 各项生态系统服务需求高值区主要以人口密度较大乡镇为中心呈环状分布; (3) 示范区内各生态系统服务空间上呈均衡分布状态, 各类生态系统服务供需指数均呈下降趋势; (4) 在供给方面, 产水-粮食生产呈现显著的协同关系, 产水-固碳、固碳-粮食生产的权衡/协同关系不显著; 在需求方面, 三种生态系统服务呈现出两两协同关系。本研究探索示范区生态系统服务供需关系的时空分布, 有利于构建区域生态安全格局, 可为长三角地区生态系统服务供需研究提供借鉴。

关键词: 长三角生态绿色一体化发展示范区; 生态系统服务; 供需平衡; “水-能源-粮食”纽带; 时空格局

Spatial and temporal distribution of supply-demand of ecosystem services in the demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta from the perspective of water-energy-food nexus

ZHANG Zhonghao^{1,2}, ZHANG Yongyao¹, HU Yina^{1,2}, GAO Jun^{1,2,*}

1 School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

2 Yangtze River Delta Urban Wetland Ecosystem National Field Scientific Observation and Research Station, Shanghai 200234, China

Abstract: The balance of supply and demand of ecosystem services is an important part of regional sustainable development and an important indicator to measure whether regional socio-economic and natural development can be coordinated. Taking the demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta as an example, this paper used the InVEST, CASA and Thornthwaite Memorial models to measure the regional supply and demand of water yield, carbon storage, and food production services in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020 from the perspective of the water-energy-food nexus. The Gini coefficient, supply and demand index and correlation coefficient were introduced to explore the

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271307); 教育部人文社会科学规划项目(22YJCZH252); 上海浦江人才计划(22PJC090)

收稿日期: 2022-09-23; **采用日期:** 2023-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaojun@shnu.edu.cn

spatial characteristics of regional ecosystem service supply and demand. The results revealed that (1) from 2000 to 2020, except for the supply of food production service, which fluctuated down, the supply of other ecosystem services showed a fluctuating upward trend. In terms of demand, all the ecosystem services showed an upward trend, with the largest increase in water and carbon storage demand is Yaozhuang Township, Jiashan County, while food demand, showed an overall upward trend during the study period, except for Liantang Township, Qingpu District. (2) In terms of spatial distribution, the southeast and southwest regions had high values in the supply of water yield and food production services, while the high value area of carbon storage was concentrated in Taoyuan Township, Wujiang District, and the high value area of demand for various ecosystem services was mainly distributed in a circular pattern around towns with high population density. (3) The Gini coefficient of each ecosystem service in the demonstration area was less than 0.3, the spatial distribution of ecosystem services in the region was in equilibrium, the supply and demand indices of all kinds of ecosystem services were decreasing, and the water yield service of Jiaying had turned from an obvious surplus to a deficit state. In terms of spatial distribution, water yield service in Jiashan had been in surplus from 2000—2015, and the surplus area tended to spread. Three ecosystem services were in short supply in densely populated areas, and the difference between urban and rural supply and demand matching was very obvious. (4) On the supply side, water yield and food production showed a significantly synergistic relationship, and the trade-off/synergistic between water yield and carbon storage, as well as carbon storage and food production were insignificant. On the demand side, the three ecosystem services showed a two-by-two synergistic relationship. By exploring the spatial and temporal distribution of ecosystem services supply and demand in the demonstration area, this study is conducive to the construction of a regional ecological security pattern and can provide a reference for the realization of ecosystem service supply and demand in the Yangtze River Delta region.

Key Words: demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta; ecosystem services; supply and demand balance; water-energy-food nexus; spatial and temporal patterns

生态系统服务供给是指生态系统能够直接或间接向人类提供产品和服务^[1],需求则是人类从生态系统中获取产品和服务,并对其进行消费和使用^[2],两者对人类福祉的生态特征、功能或过程具有重大影响^[3]。继生物多样性公约和生态系统服务政府间科学政策平台后,联合国在《改变我们的世界:2030年可持续发展议程》中将“保护、恢复和促进可持续利用陆地生态系统,可持续地管理森林,防治荒漠化,制止和扭转土地退化,阻止生物多样性的丧失”作为全球可持续发展目标之一^[4],世界各国对生态系统服务的关注度再次上升。水资源、能源、粮食资源是人类社会可持续发展的重要物质保障^[5],也是生态系统服务的重要组成部分。“水-能-粮”纽带(Water-Energy-Food Nexus, WEF-Nexus)的概念于2011年德国波恩年会上首次提出,“水-能-粮”是一个复杂的耦合系统,三者相互影响,其系统安全问题已成为全球三大风险源之一^[6],受到学界重点关注。随着城镇化进程的加快,对水、能源、粮食的需求不断攀升,区域生态环境问题凸显,造成区域生态系统服务供需的空间分布极不均衡^[7],从而导致生态系统退化,影响生态系统服务的持续性供应^[8]。因此,基于“水-能-粮”的视角测度生态系统服务供需数量匹配并探究其时空特征有利于生态系统综合管理,对于自然资源的有效配置具有重要的理论和实践指导作用。

国外对生态系统服务供需的研究起始于生态承载力^[9-10],并对生态系统服务供需进行了基础研究,包括生态系统服务供需的概念及框架的构建,尤其注重生态系统服务供给的研究^[11-12]。2005年联合国发表《千年生态系统评估报告》(Millennium Ecosystem Assessment, MA),生态系统服务供需方面研究大量涌现。近年来生态系统服务供需量化^[13-15]、长时间序列下生态系统服务协同/权衡关系及时空演变特征^[16-17]等成为研究热点,推动我国的生态系统服务供需研究的高速发展。目前,生态系统服务供需测度主要运用价值当量法、模型模拟、土地利用估计、供需评价矩阵等方法^[18-21];在供需指标选取方面,根据研究区生态系统的不同特征形成了固碳、产水、粮食生产、土壤保持、维持生物多样性等多指标交叉的选取模式^[22-25];供需平衡的刻画主

要采用供需比、供需协调度等方法^[26-27],研究形成了城市群^[28]、省域^[29]、市域^[30]等多尺度成果。总体看来,当前生态系统服务研究大多侧重于供给层面,对于生态系统服务需求层面和供需关系层面的研究仍需加强。由于指标选取和研究数据的可获得性和方法的适用性方面的限制,已有研究主要集中于供给服务和调节服务两种服务类型,多关注生态系统服务供需关系的静态特征,较少关注生态系统服务供需匹配的时空格局及演变,且长三角地区的生态系统服务研究较少。因此,本研究定量测度长三角生态绿色一体化发展示范区(以下简称“示范区”)产水、固碳、粮食生产三种生态系统服务供需数量并探讨其供需时空格局,可以丰富长三角地区生态系统服务研究内容,对人与自然协调发展具有重要意义。

示范区位于上海、江苏、浙江三省市交界处,秉承生态优先、绿色发展的理念,示范区具有重要的生态系统服务供给保障功能。但随着社会经济迅速发展,城市化进程不断加快,该区域也面临着水资源短缺、能源消耗带来的空气污染、耕地急剧减少、粮食供不应求等问题。为保证生态系统服务的供应,厘清生态系统服务供需匹配关系至关重要。鉴于此,本文以示范区为例,开展县域尺度下的生态系统服务供需测度及时空分布研究:(1)以“水-能源-粮食”纽带为切入点,基于 InVEST、CASA 和 Thornthwaite Memorial 模型,测度区域产水、固碳、粮食生产服务的供需量,总结各项生态系统服务供需量随时间的变化情况。(2)建立基尼系数模型,构建供需指数、计算三种生态系统服务间两两相关系数以评价各类生态系统服务空间分布的均衡度、匹配度、相关性,揭示生态系统服务供需数量及其匹配程度,为长三角地区优化资源配置提供借鉴。

1 研究区概况

1.1 研究区概况

示范区位于 120°64'E—121°12'E、30°83'N—31°15'N,地处太湖流域,包括上海市青浦区、苏州市吴江区、嘉兴市嘉善县(图 1),总面积 2406.82km²。该区属于亚热带季风气候,雨热充沛、四季分明,年均气温 17.11℃,年均降水 1002mm,位于太湖冲积平原,地势低平,海拔多在 50m 以下,土地利用类型以农田、水域为主。截至 2020 年,示范区总人口 346.44 万人,是 2000 年的 2.15 倍,人均 GDP 由 2.43 万元(2000 年)升至 13.89 万元(2020 年)。人口剧增,建设用地扩张,生态用地减少,经济社会迅速发展,对生态环境造成巨大压力,水、能源、粮食等资源供需矛盾凸显。2019 年底国家发改委发布《长三角生态绿色一体化发展示范区总体方案》,方案明确,建设长三角生态绿色一体化发展示范区是实施长三角一体化发展战略的先手棋和突破口^[31]。因此,示范区作为一体化发展标杆,评价其生态系统服务供需均衡和匹配关系对长三角地区一体化发

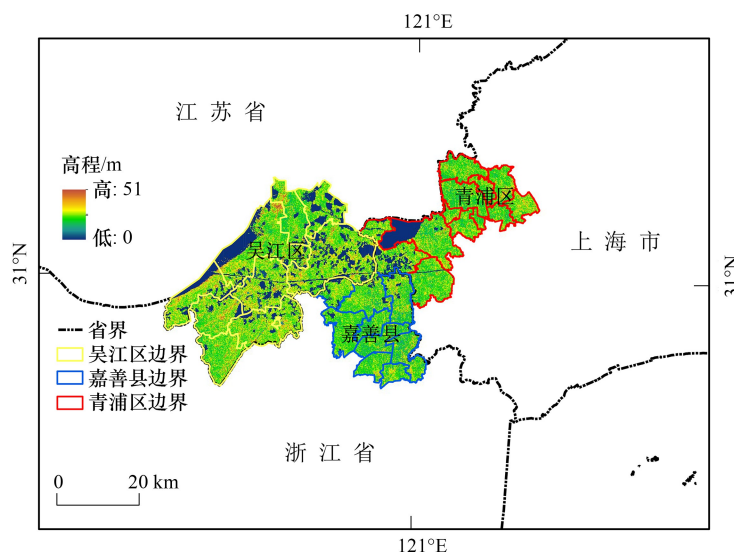


图 1 长三角生态绿色一体化发展示范区地理位置示意图

Fig.1 Location of the demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta

展起着至关重要的作用。

1.2 土地利用变化状况

土地覆被/土地利用变化会直接影响区域生态系统服务供给能力^[32],也影响着生态系统服务时空分布格局^[33],对区域生态系统服务功能发挥起着关键作用。利用 ArcGIS 10.2 计算不同时期示范区土地利用类型的面积变化,从图 2 可以看出,研究期内示范区城市化进程不断加快,农田大量减少,建设用地增长迅速,示范区东北部(青浦区华新镇、徐泾镇、香花桥街道、盈浦街道)、西北部(吴江经济技术开发区和太湖新城交界处)、西南部(吴江区盛泽镇)、东南部(嘉善县魏塘街道、罗星街道、惠民街道交界处)尤为明显。从表 1 可知,2000—2020 年示范区土地利用格局发生比较明显的变化,具体表现为:

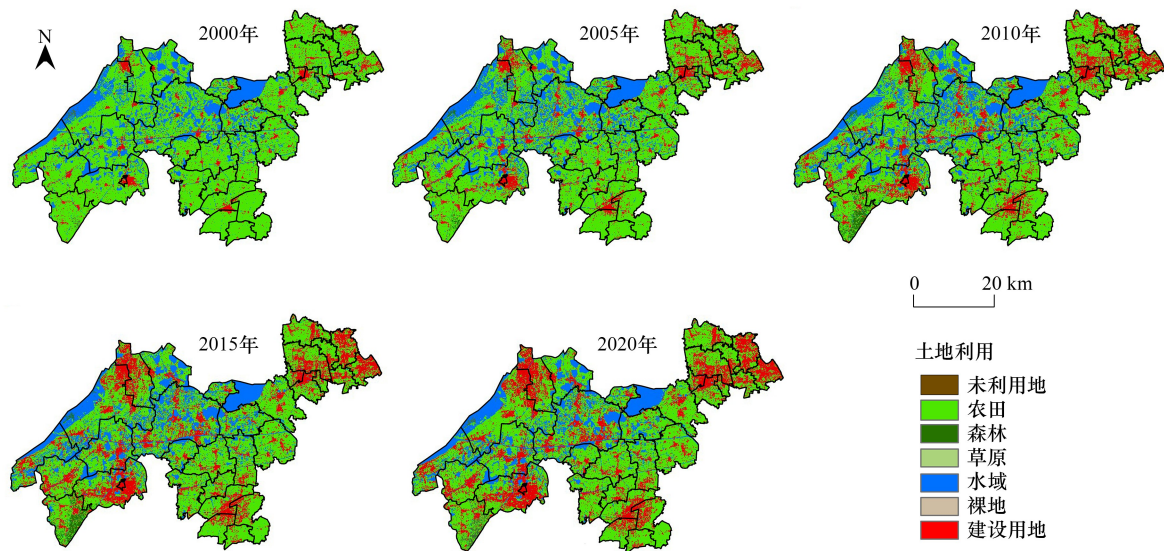


图 2 长三角生态绿色一体化发展示范区土地利用变化(2000—2020)

Fig.2 Land use changes in the demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta(2000—2020)

表 1 示范区 2000—2020 年土地利用面积变化/hm²

Table 1 Land use change in the demonstration area from 2000 to 2020

年份 Year	土地利用类型 Land use type						
	未利用地 Unused land	农田 Farmland	森林 Forest	草原 Grassland	水域 Water area	裸地 Bare ground	建设用地 Construction land
2000	85.80	177569.87	1015.41	0.077	44132.64	0	17519.02
2005	86.99	159806.24	1019.41	46.85	49473.40	0.46	29889.62
2010	87.02	148005.88	3582.17	131.50	47178.50	1.75	41335.07
2015	86.70	139738.22	2993.21	12.60	44651.58	4.23	52833.93
2020	107.82	140380.29	1908.45	0.81	39072.69	5.22	58856.31

(1)从土地利用类型来看,示范区主要的土地利用类型是农田和水域,二者面积之和逐渐下降,分别占 5 个时期总面积的 92.25%、87.08%、81.22%、76.73%、74.67%。其中,农田出现先减后增的趋势,2000—2015 年农田面积锐减,年均减少量为 12610.55hm²,2015—2020 年农田面积小幅上升。建设用地则从 2000 年的 17519.02hm²剧增到 2020 年的 58856.31hm²,增幅达到 235.96%;森林面积在 2005—2010 年间增长 3.51 倍,这与人们生态保护意识增强以及退耕还林政策的实施相关;水域面积则呈波动变化。

(2)从土地利用动态来看,农田面积呈下降趋势,2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年的减少速度分别为 2.00%、1.48%、1.12%,速度逐渐减小。森林面积呈“增加-增加-减少”的特征。森林增长最快的时间段为 2005—2010 年,增速高达 251.40%,面积变化为 2562.76hm²。水域面积表现为“增加-减少-减少”的特

征。增长速度在 2000—2005 年为 2.42%, 2005—2020 年则呈现负增长的趋势。建设用地面积呈上升趋势, 增长速度从 2000—2005 年的 14.12% 下降为 2010—2015 年的 5.56%。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

本文的数据主要包括: (1) 土地利用数据源自泽诺多数据库 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.5816591>), 空间分辨率 30m, 基于 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 Landsat TM 影像解译。结合研究区实际情况, 将土地利用划分为未利用地、农田、森林、草原、水域、建设用地、裸地共 7 种类型。(2) 人口密度数据源自中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率 1km; 潜在蒸散量数据源自美国地质调查局 (USGS) MODIS16 产品 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 空间分辨率 500m; 气象数据源自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>), 空间分辨率 1km。(3) 各县区人均用水量和人均能源需求量数据分别来自《上海市统计年鉴》、《苏州市统计年鉴》、《嘉兴市统计年鉴》, 人均粮食需求量数据来自《中国统计年鉴》, 缺失的数据进行赋值填补。将以上数据统一到 WGS_1984_UTM_Zone_51N 投影坐标系下, 并统一重采样为 1km 分辨率。

2.2 生态系统服务供需评估

不同的土地利用类型产生的生态系统服务有所差异^[34], 示范区土地利用类型以农田为主, 不仅能够为示范区供应粮食, 还有一定的碳汇功能。水-能源-粮食系统存在错综复杂的互动关系, 且与人类的生产生活息息相关, 本文基于此选择产水、固碳、粮食生产三种生态系统服务探讨区域生态系统服务供需时空特征。

2.2.1 产水服务

产水服务是指除去地表径流和蒸散作用, 生态系统从降雨中获得的可供人类利用水资源的能力。本文利用 InVEST 模型中的 Water Yield 模块估算区域产水量^[35], 计算公式如下:

$$Y_i = (1 - \frac{AET_i}{P_i}) \times P_i \quad (1)$$

式中, Y_i 为栅格上的年产水量 (mm), AET_i 为栅格上的年蒸发量 (mm), P_i 为栅格上的年降雨量 (mm), 利用栅格面积和 Y_i 的乘积再换算得到栅格上最终产水量 (m^3)。

根据各县区统计年鉴中各年份工业、农业、生活用水量和区域年常住人口数据得到区域年人均用水量, 再结合人口密度栅格数据得到区域年用水需求量:

$$D_{wi} = \rho_i \times y_{wi} \quad (2)$$

式中, D_{wi} 为栅格 i 上的水需求量 (m^3), ρ_i 为栅格 i 上的人口密度 (人/ km^2), y_{wi} 为栅格 i 上的人均用水量 (m^3 /人)。

2.2.2 固碳服务

植被净初级生产力 (NPP) 是光合作用积累作用于植物生长的有机物总量, 是生物圈碳循环的重要表征, 在全球碳循环中发挥着重要作用。NPP 数据是基于气象数据、NDVI、土地利用数据, 利用 CASA 模型计算得出。根据光合作用方程, 植被每储存 1 个单位的干物质, 可以固定 1.63 个单位的 CO_2 ^[36]。计算公式如下:

$$S_c = 1.63 \times NPP \quad (3)$$

式中, S_c 表示每个栅格的固碳服务的供给量 (kg); NPP 表示每个栅格的植被净初级生产力 (kg)。

本文基于人均能源需求量和栅格化的人口密度来计算固碳服务的需求量, 具体的公式如下:

$$D_{c,i} = C_{c,i} \times \rho_i \times C_{transfer} \quad (4)$$

式中, $D_{c,i}$ 为栅格 i 上的固碳服务需求量 (kg); $C_{c,i}$ 为栅格 i 上的人均能源消费量 (千克标准煤); ρ_i 为栅格 i 上的人口密度 (人/ km^2); $C_{transfer}$ 是能源消耗的碳排放转化率, 通过查询相关研究结果, 取值 0.67^[37]。

2.2.3 粮食生产服务

本研究采用潜在气候生产力法计算粮食生产总量:

$$F_{s,i} = P_{\text{potential},i} \times S_i \quad (5)$$

式中, $F_{s,i}$ 为栅格 i 上的粮食生产量(kg); $P_{\text{potential},i}$ 为栅格 i 上的潜在气候生产力, 采用 Thornthwaite Memorial 模型^[38] 计算:

$$P_{\text{potential},i} = 30000 \times (1 - e^{-0.000956(v_i - 20)}) \quad (6)$$

$$v_i = \frac{1.05R_i}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05R_i}{L_i}\right)^2}} \quad (7)$$

$$L_i = 300 + 25t_i + 0.05t_i^3 \quad (8)$$

式中, v_i 为栅格 i 上的年平均蒸散量(mm); R_i 为栅格 i 上的年降雨量(mm); L_i 为栅格 i 上的平均蒸发量(mm); t_i 为栅格 i 上的年均气温(℃)。

$$S_i = A_{f,i}/A_i \quad (9)$$

式中, S_i 为栅格 i 上的粮食作物播种适宜度^[39]; $A_{f,i}$ 为栅格 i 上的作物播种面积(km²); A_i 为栅格 i 的面积(km²)。

粮食需求量依据人均粮食需求量和人口密度来估算, 其中人均粮食需求量采用《中国统计年鉴》公布的上海市、江苏省、浙江省农村居民人均粮食需求量, 计算公式如下:

$$D_{f,i} = \rho_i \times f_i \quad (10)$$

式中, $D_{f,i}$ 为栅格 i 上的粮食需求量(kg); ρ_i 为栅格 i 上的人口密度(人/km²); f_i 为栅格 i 上的人均粮食需求量(kg/人)。

2.3 生态系统服务时空异质性评价

2.3.1 生态系统服务空间基尼系数

基尼系数可作为衡量生态系统服务空间分配均衡状态的量化工具, 其本质上是分析一个指标在另一个指标中分布的均衡情况^[40]。生态系统服务供需空间分配的非均衡性问题与收入分配状况具有相似性。鉴于此, 本文以示范区 29 个乡镇面积累计占比和不同乡镇生态系统服务供需量的累计占比构建生态系统服务基尼系数, 进而衡量示范区生态系统服务空间均衡程度。参照经济学的分类方法^[41], 本文将空间基尼系数分为 5 个等级, 如表 2 所示:

表 2 生态系统服务供需均衡程度划分

Table 2 Ecosystem service supply and demand equilibrium degree division

空间均衡程度	高度均衡	较均衡	一般	较不均衡	极不均衡
Degree of spatial balance	Highly balanced	More balanced	General	More uneven	Highly uneven
基尼系数 Gini coefficient	<0.2	0.2—0.3	0.3—0.4	0.4—0.5	>0.5

2.3.2 生态系统服务供需指数

本文在参考相关研究的基础上^[26,30], 通过构建生态系统服务供需指数(SDI)来揭示示范区生态系统服务供需匹配情况。具体计算公式如下:

$$SDI = \frac{ES_s - ES_d}{ES_s + ES_d} \quad (11)$$

式中, SDI 为生态系统服务供需指数; ES_s 和 ES_d 分别表示生态系统服务供给量和需求量。SDI>0 表明处于盈余状态, SDI=0 表明处于平衡状态, SDI<0 表示处于赤字状态。

3 结果与分析

3.1 示范区生态系统服务供需时空特征

(1) 产水服务

示范区内各项生态系统服务在不同的乡镇和不同的生态系统服务间存在差异。图 3 是示范区产水供需

在 2000—2020 年的变化情况。总体来说,示范区产水量在 2000 年—2020 年内呈现先增后减的趋势,单位面积产水供给量从 $7.40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 升至 $1.12 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$,增幅高达 51.35%,期间,不同乡镇产水供给量均呈上升趋势,增幅最大的是嘉善县魏塘街道,最小的是青浦区夏阳街道。2005 年产水量相较 2000 年下降 24.46%,仅有 $1.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,2015 年则反弹至 $3.74 \times 10^8 \text{ m}^3$,至 2020 年又下降至 $2.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水资源需求量在波动中增加,2000—2015 年处于平稳波动状态,2020 年上升至 $4.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。单位面积水资源需求量从 2000 年的 $1.36 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 升至 2020 年的 $1.97 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$,增幅达 44.51%。研究期内不同乡镇水资源需求量变幅最大的是嘉善县姚庄镇,大云镇次之。

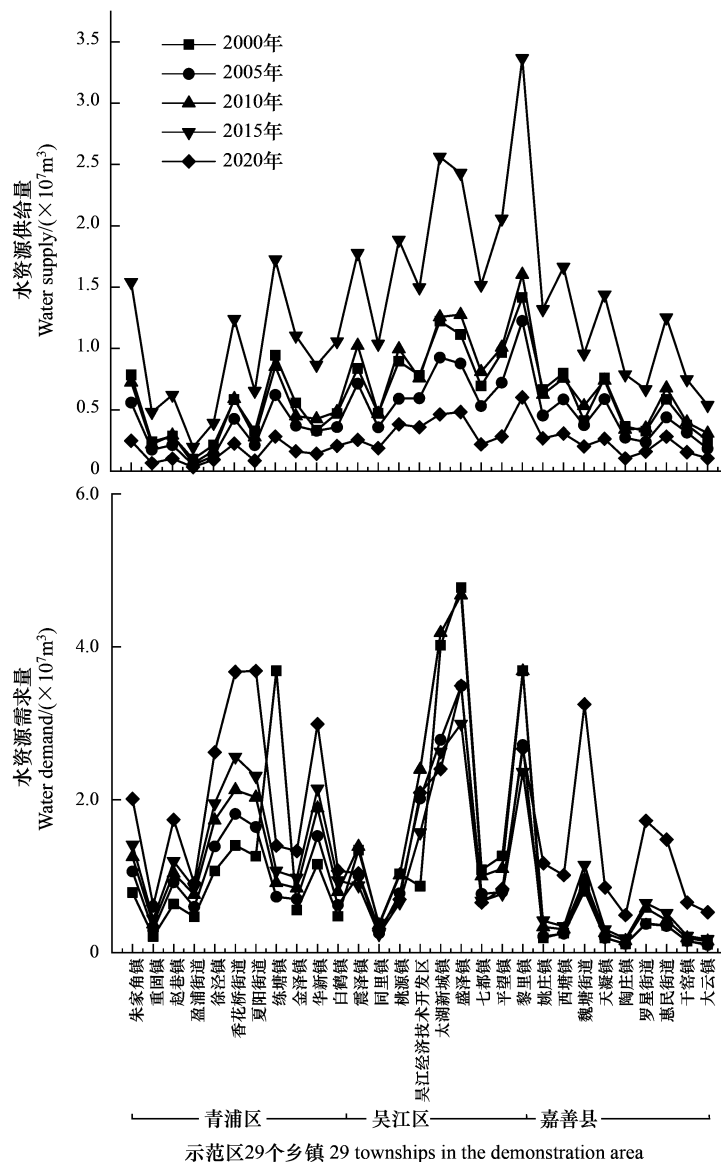


图 3 2000—2020 年示范区产水供给量与需求量变化趋势

Fig.3 Trend of water yield supply and demand in the demonstration area from 2000 to 2020

从空间分布上来看,2000—2020 年示范区西部由产水供给量高值区转化为低值区。具体来看,2000—2015 年产水供给量高值区主要位于示范区西南部吴江区(震泽镇、盛泽镇、桃源镇),中值区分布广泛,低值区对应建设用地扩张区域(图 6)。到 2020 年,示范区各区镇处于较为平均水平,这与区域降水量和蒸散量密切相关。随着吴江区桃源镇森林覆盖率的明显提高,到 2015 年桃源镇的年产水量涨幅较高,从 $5.91 \times 10^6 \text{ m}^3$

(2005 年),增长到 $1.88 \times 10^7 \text{ m}^3$ (2015 年)。吴江区产水服务需求最高,且呈递增趋势,到 2020 年高达 $1.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,其高值区分布与人口密集乡镇相吻合,且有向四周蔓延的趋势(图 7)。

(2) 固碳服务

图 4 展示了示范区 2000—2020 年各乡镇固碳服务供需量的变化情况,整体上,示范区固碳服务的年供给量呈现先升后降的趋势,从 2000 年的 $3.28 \times 10^8 \text{ kg}$ 上升到 2010 年的 $4.45 \times 10^8 \text{ kg}$,转而在 2020 年下降到 $3.75 \times 10^8 \text{ kg}$ 。期间,不同乡镇固碳量波动较小,其中,吴江区黎里镇固碳量最大,青浦区盈浦街道固碳量最低。单位面积固碳供给量从 $1.36 \times 10^5 \text{ kg/km}^2$ 上升到 $1.56 \times 10^6 \text{ kg/km}^2$,增幅为 14.33%。需求量在研究期内急剧增加,2020 年达到 $1.62 \times 10^7 \text{ kg}$,增长了 5 倍。其中,嘉善县姚庄镇增幅尤为明显,吴江区震泽镇次之。在不同土地利用类型中,森林和农田的固碳能力最强,由于示范区农田分布范围最广,提供了大部分固碳服务。

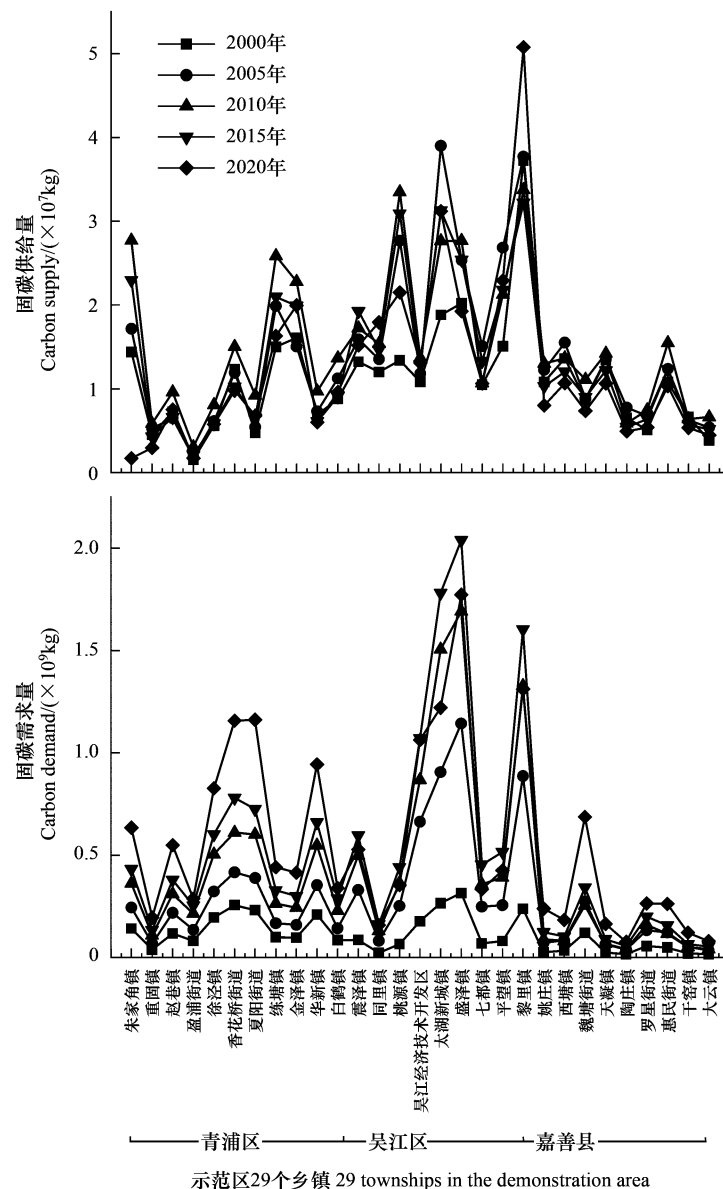


图 4 2000—2020 年示范区固碳供给量与需求量变化趋势

Fig.4 Trend of carbon storage supply and demand in the demonstration area from 2000 to 2020

固碳供给服务在空间分布上呈现西南、东北高,东南低的特点,吴江区(桃源镇、太湖新城)、青浦区(朱家角镇、金泽镇、练塘镇)具有较强的固碳能力,嘉善县(魏塘街道、罗星街道、惠民街道、大云镇)的固碳功能则

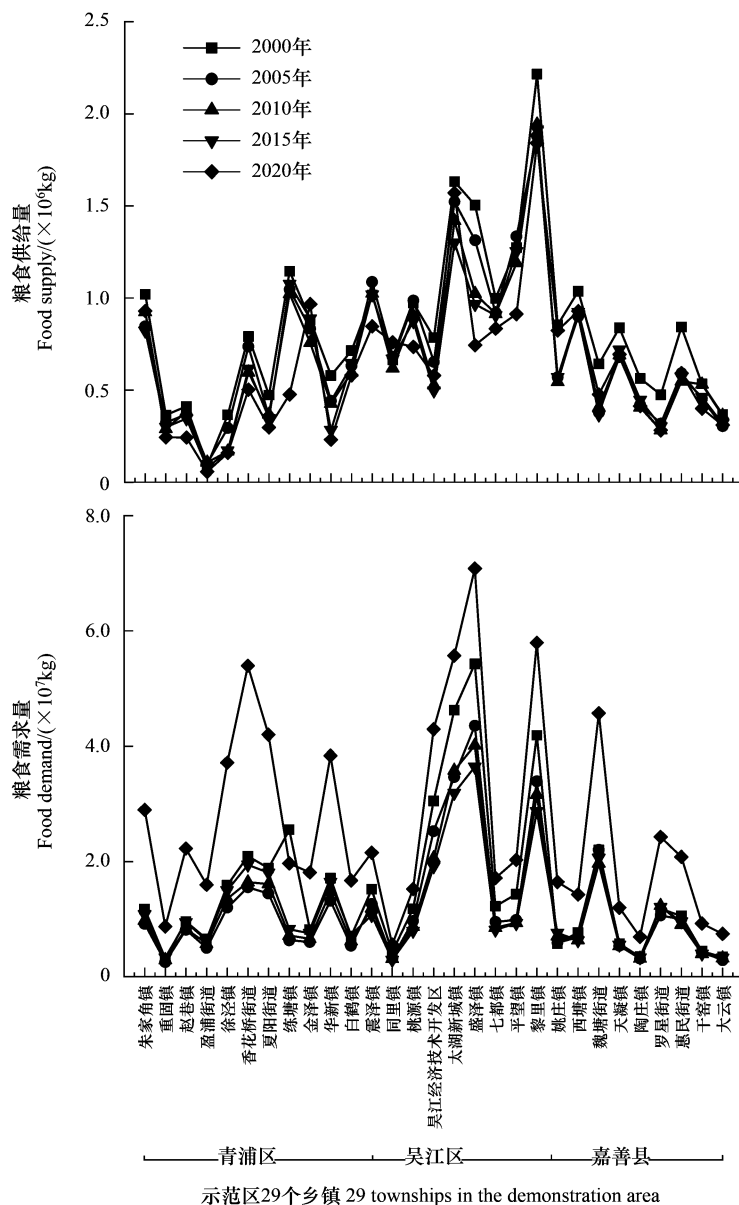


图5 2000—2020年示范区粮食供给量与需求量变化趋势

Fig.5 Trend in food supply and demand in the demonstration area from 2000 to 2020

较为薄弱(图6)。值得注意的是,固碳供给的高值区在吴江区桃源镇十分明显,在研究期内,桃源镇森林覆盖面积大幅增加,说明森林等自然用地的固碳能力高于农田和建设用地。研究期内固碳供给高值区由点状分布逐渐转变为以桃源镇为主的片状分布。与此同时,固碳需求服务高值区与建设用地分布相吻合,人口密度较高的区域能源需求较高,研究区内的金泽镇、盈浦街道和香花桥街道尤为突出(图7)。

(3) 粮食生产服务

粮食生产服务在研究期内呈下降趋势,粮食生产总量从 $2.41 \times 10^7 \text{ kg}$ (2000年)下降到 $1.97 \times 10^7 \text{ kg}$ (2020年),降幅 18.26%,除嘉善县一部分乡镇粮食生产呈上升趋势外,其余乡镇粮食生产都呈下降趋势(图5),其中增幅最大的是嘉善县姚庄镇,降幅最大的是青浦区华新镇。单位面积粮食生产量从 $1.00 \times 10^4 \text{ kg/km}^2$ 下降到 $8.19 \times 10^3 \text{ kg/km}^2$,降幅达 18.15%,农田面积锐减直接导致粮食产量减少。粮食需求量总体上呈上升趋势,从 $4.50 \times 10^8 \text{ kg}$ (2000年)下降到 $3.49 \times 10^8 \text{ kg}$ (2015年),转而上升到 $7.66 \times 10^8 \text{ kg}$ (2020年)。除青浦区练塘镇

外,其余各乡镇粮食需求在研究期内总体都呈上升趋势,其中增幅最大的是嘉善县姚庄镇。单位面积粮食需求量从 $1.87 \times 10^5 \text{ kg/km}^2$ 上升到 $3.18 \times 10^5 \text{ kg/km}^2$,增幅高达 70.22%,建设用地扩张,人口规模扩大是导致粮食需求量激增的主要原因。

粮食供给量与温度和降水等因素密切相关,在空间分布上,高值区由示范区东南部逐渐向西南部转移,到 2020 年高值区分布较广泛。供给量较高的区域主要集中在嘉善县(大云镇、惠民街道、罗星街道)、吴江区(震泽镇、桃源镇、平望镇)等农田连续分布的区域(图 6)。粮食需求量较高的区域集中在人口密集的城镇区域,且以人口密度高值区为中心向四周扩散,吴江区(盛泽镇)、青浦区(香花桥街道、盈浦街道、夏阳街道)、嘉善县(魏塘街道)较为显著(图 7)。

3.2 生态系统服务的时空异质性

(1) 空间均衡分析

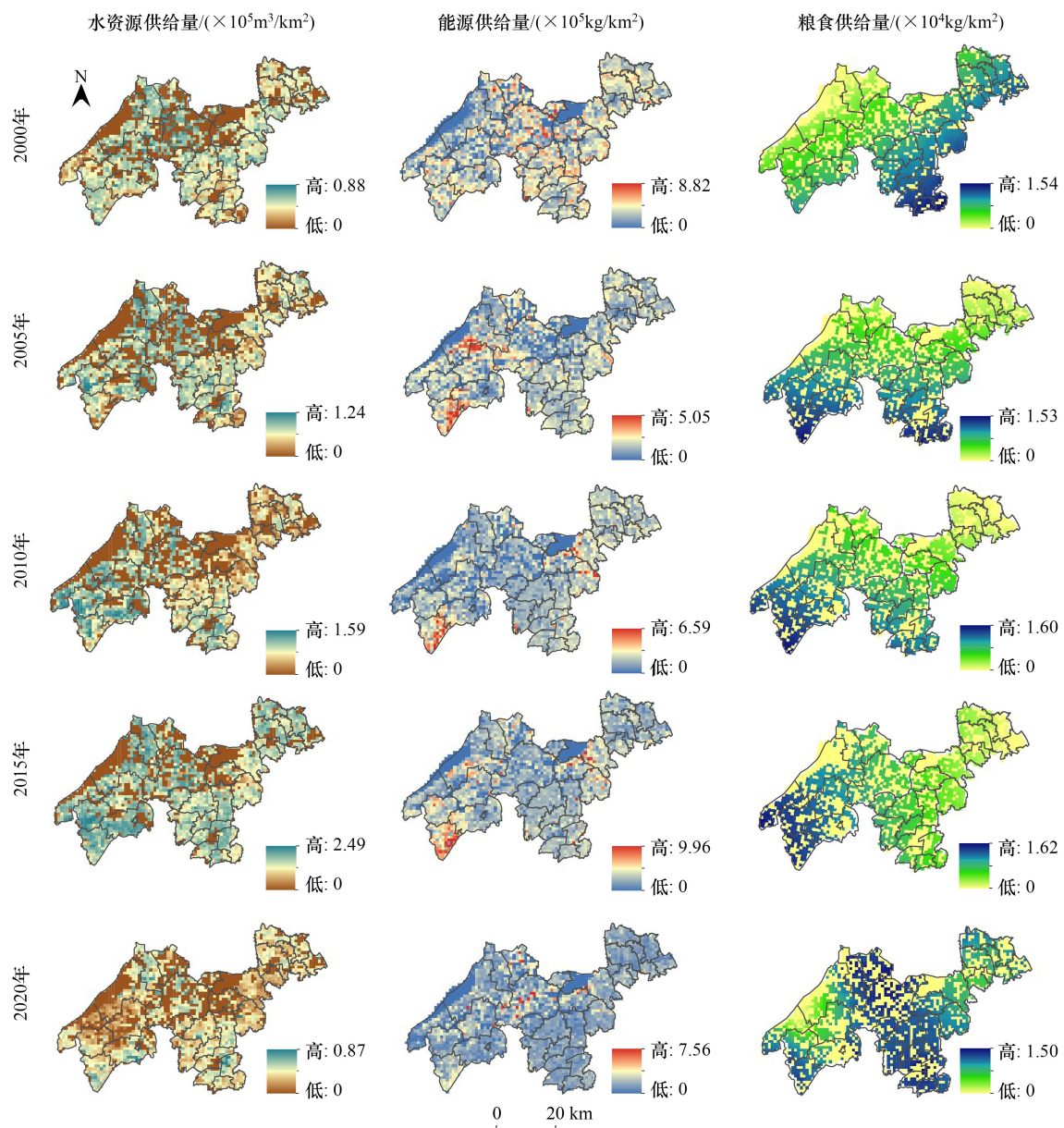


图 6 示范区 2000、2005、2010、2015 及 2020 年生态系统服务供给时空分布图

Fig.6 Spatial and temporal distribution of the supply of ecosystem services in the demonstration area in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

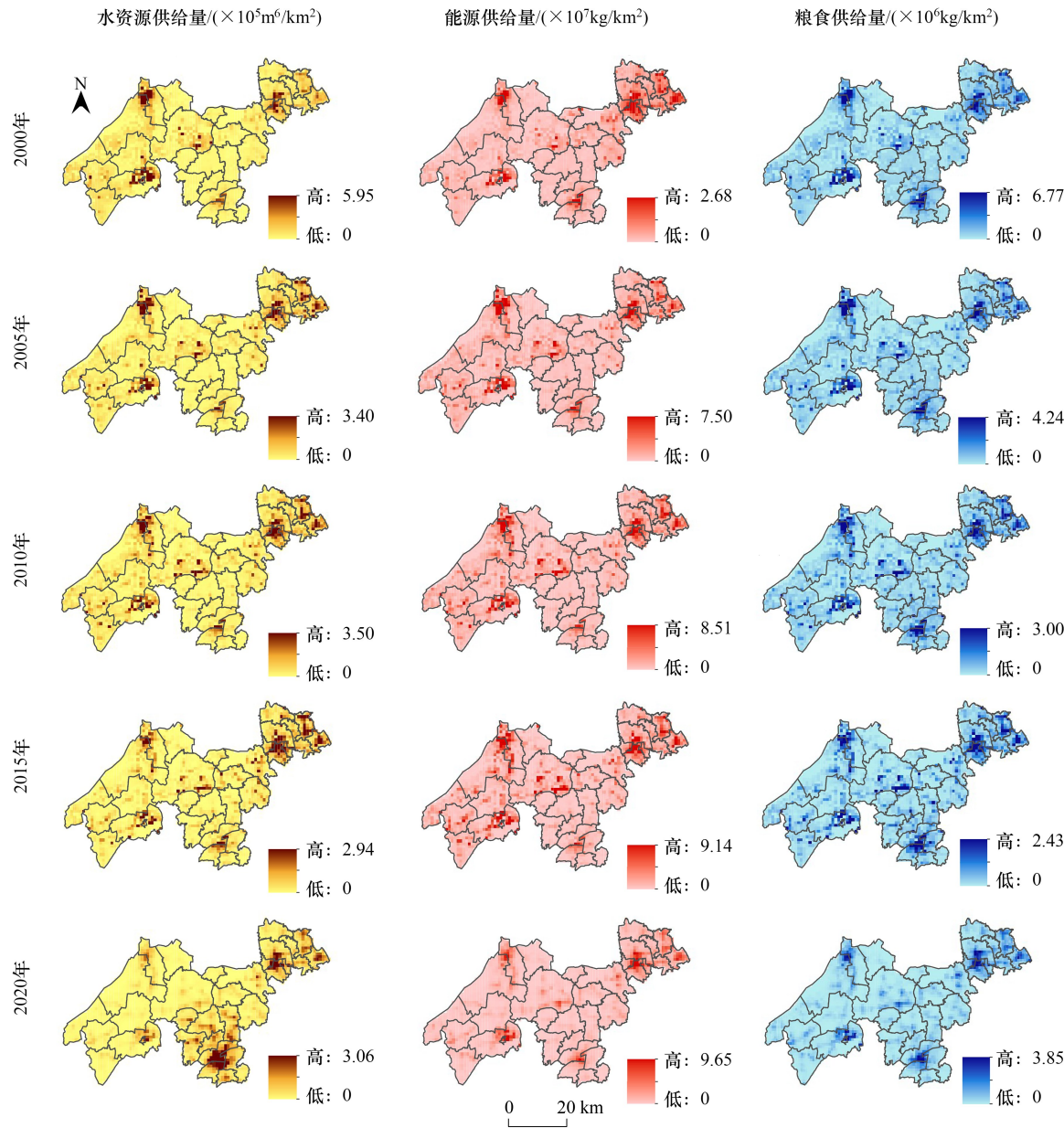


图7 示范区 2000、2005、2010、2015 及 2020 年生态系统服务需求时空分布图

Fig.7 Spatial and temporal distribution of the demand of ecosystem services in the demonstration area in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

表 3 是三类生态系统服务基尼系数的逐年变化,从计算结果可知,示范区的生态系统服务供需基尼系数均小于 0.3,其中,供给基尼系数均小于 0.2,生态系统服务供给在空间上处于高度均衡。产水服务供给基尼系数在 2000—2020 年之间呈现先增后减的趋势,且产水供给基尼系数小于固碳和粮食生产,表明产水供给的均衡性要优于其他两种生态系统服务。固碳服务供给基尼系数呈波动上升,粮食生产服务供给基尼系数在 20 年内小幅上升。三种生态系统服务的需求基尼系数总体均呈下降趋势,表明随着建设用地扩张及人口密度加大,生态系统服务需求均衡性逐渐增强。

(2) 供需匹配分析

2000—2020 年示范区各区县产水服务的供需指数存在一定差异(表 4)。吴江区和青浦区产水服务供需指数在波动中下降,其中 2015 年吴江区产水服务供需指数达到峰值,嘉善县产水在 2000—2015 年整体呈供大于求的趋势,到 2020 年处于赤字状态。同时,还存在空间不匹配,2000—2015 年示范区东南部嘉善县供给

过剩且供需分布与建设用地大致匹配,且嘉善县盈余区趋于扩大,而吴江区大部分地区由赤字转为盈余。到了 2020 年,除示范区东南部分区域外,示范区大部分地区都处于赤字状态(图 8),区域水安全面临巨大压力。

表 3 示范区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年及 2020 年生态系统服务供需空间基尼系数

Table 3 Spatial Gini coefficients for supply and demand of ecosystem services in the demonstration area in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

年份 Year	产水服务 Water yield service	固碳服务 Carbon storage service	粮食生产服务 Food production service
	(供给 Supply, 需求 Demand)	(供给 Supply, 需求 Demand)	(供给 Supply, 需求 Demand)
2000	(0.008, 0.263)	(0.016, 0.145)	(0.023, 0.152)
2005	(0.021, 0.187)	(0.066, 0.213)	(0.027, 0.148)
2010	(0.026, 0.197)	(0.022, 0.241)	(0.025, 0.126)
2015	(0.015, 0.122)	(0.065, 0.231)	(0.032, 0.097)
2020	(0.007, 0.066)	(0.108, 0.143)	(0.040, 0.047)

表 4 示范区各区县生态系统服务供需指数

Table 4 Ecosystem service supply and demand index for each district and county in the demonstration area

生态系统服务类型 Ecosystem service types	区县 District and county	年份 Year				
		2000	2005	2010	2015	2020
产水服务 Water yield service	吴江区	-0.374	-0.381	-0.365	0.173	-0.629
	嘉兴县	0.266	0.149	0.169	0.406	-0.716
	青浦区	-0.415	-0.533	-0.503	-0.232	-0.861
固碳服务 Carbon storage service	吴江区	-0.793	-0.914	-0.945	-0.954	-0.945
	嘉善县	-0.635	-0.815	-0.810	-0.875	-0.937
	青浦区	-0.882	-0.921	-0.927	-0.954	-0.975
粮食生产服务 Food production service	吴江区	-0.909	-0.892	-0.893	-0.886	-0.944
	嘉善县	-0.848	-0.878	-0.875	-0.879	-0.939
	青浦区	-0.910	-0.885	-0.900	-0.913	-0.969

2000—2020 年示范区各区县的固碳服务供需指数总体上都呈下降趋势(表 4),总体处于赤字状态。区域少部分农田、森林地带多为供需平衡区域,大部分区域都处于赤字状态,且赤字区域由城镇区域向四周扩散趋势明显,在 2000 至 2015 年间逐步扩大。盈余区在吴江区东北部呈点状分布。这是源于农田和森林的固碳能力较强且人口密度不高,对能源的需求量也相对较低,故而农田或森林单一且连续存在的土地类型供需相对平衡;城镇区域则相反(图 8)。

2000—2020 年示范区粮食生产供需指数平稳下降(表 4),总体处于赤字状态。区域内粮食生产服务大多都处于供不应求的状态,赤字区域主要在城镇地区,且有向外扩散的趋势。从空间分布来看,处于赤字的区域主要集中在青浦区东北部、吴江区西北和西南部、嘉善县东南部,这些地区由于农田少且人口集聚,粮食的需求多而供给少,因此供需指数较低,盈余区域主要位于吴江区同里镇、黎里镇和吴江经济技术开发区的交界处(图 8)。

(3) 相关性分析

运用 SPSS 软件对整个区域产水、固碳与粮食生产 3 种生态系统服务进行两两间的相关分析,结果如表 5、6 所示。供给方面,产水-粮食生产之间的相关系数显著为正,说明这两种生态系统服务之间存在显著的正相关,产水和粮食生产都与降水量密切相关,示范区丰沛的降水量使这两种生态系统服务产生正向的协同效应。固碳-粮食生产及产水-固碳的权衡/协同关系不明确。需求方面,三种生态系统服务两两间均呈现显著的正相关关系,产水-固碳、产水-粮食生产、固碳-粮食生产在时空上均呈现两两协同状态,这说明三种生态系统服务需求在空间分布上存在显著的一致性。

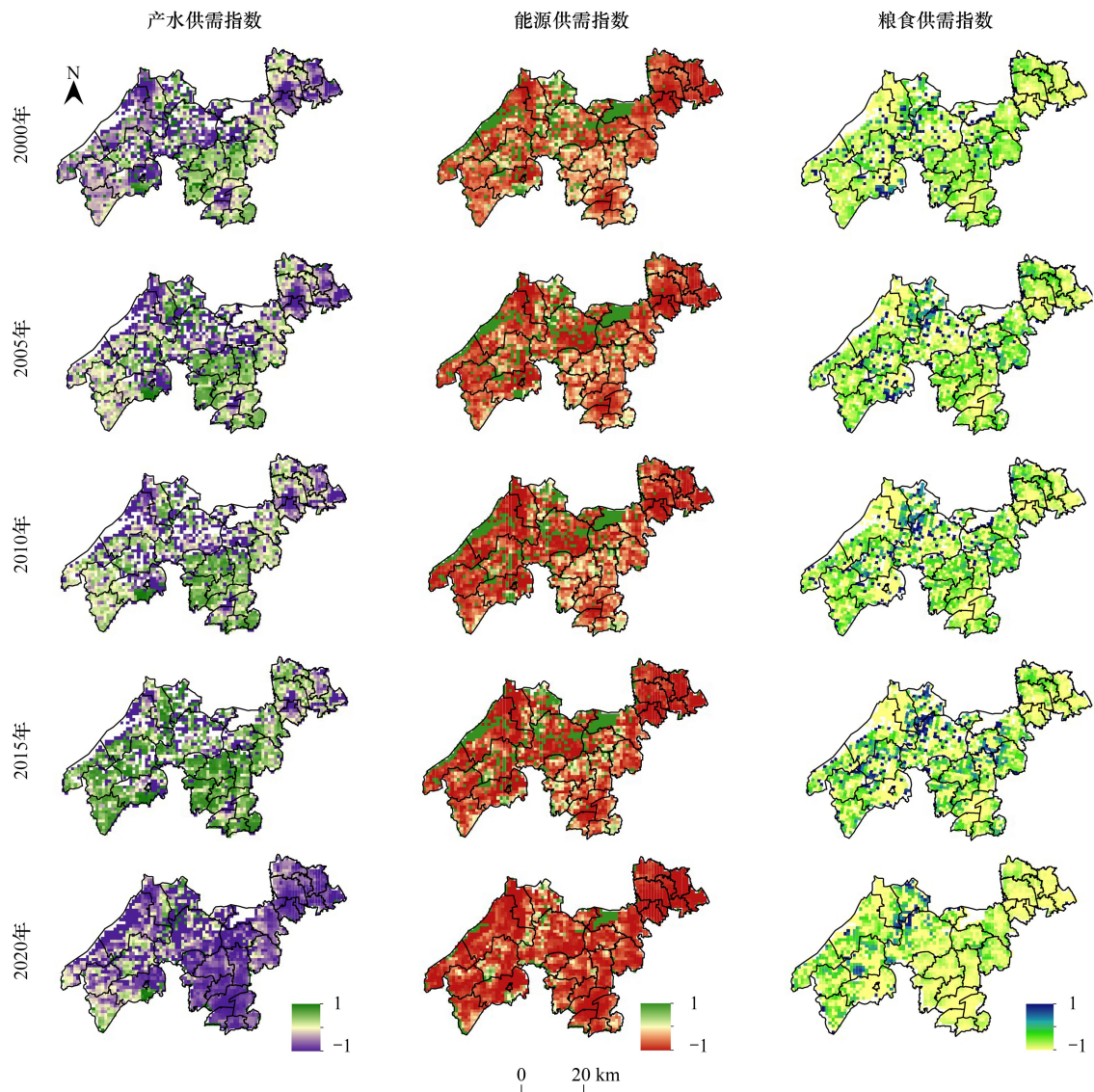


图 8 示范区生态系统服务供需指数时空分布图(2000,2005,2010,2015,2020)

Fig.8 Spatial and temporal distribution of supply and demand indices for ecosystem services in the demonstration area (2000, 2005, 2010, 2015,2020)

表 5 生态系统服务供给相关系数

Table 5 Ecosystem service supply related coefficients

年份 Year	产水-固碳 Water yield-carbon storage	固碳-粮食生产 Carbon storage-food production	产水-粮食生产 Water yield-food production
2000	-0.013	0.001	0.966 **
2005	-0.048	-0.013	0.959 **
2010	0.002	-0.071	0.936 **
2015	-0.03	-0.072	0.942 **
2020	-0.017	-0.04	0.824 **

** 表示在 0.01 水平上显著相关

表 6 生态系统服务需求相关系数
Table 6 Ecosystem service demand related coefficients

年份 Year	产水-固碳 Water yield-carbon storage	固碳-粮食生产 Carbon storage-food production	产水-粮食生产 Water yield-food production
2000	0.737 **	0.844 **	0.919 **
2005	0.980 **	0.970 **	0.929 **
2010	0.994 **	0.955 **	0.956 **
2015	0.867 **	0.937 **	0.898 **
2020	0.872 **	0.967 **	0.908 **

** 表示在 0.01 水平上显著相关

4 讨论和结论

4.1 讨论

人类干扰不断加剧,建设用地扩张,对区域生态环境基底造成破坏;人口剧增,社会经济水平不断提升,人地矛盾凸显,对生态系统服务供给和需求造成巨大压力。研究发现,除粮食生产服务供给量呈波动下降的趋势外,其他生态系统服务供给量均呈波动上升状态,这与示范区充沛的降水和森林面积增加有关。研究期内,三种生态系统服务需求均呈上升趋势,这与城市化进程加快,人口增加有关。示范区各供需指数均呈下降趋势,生态系统服务整体向供需赤字转变,这与欧维新、杨宜男^[42-43]等人的研究结果相契合,示范区森林覆盖率低、农田面积锐减是制约生态系统服务供给的主要因素。

生态系统供需量化已成为生态系统服务研究的重要内容,目前,生态系统服务供给量化大多数采用价值当量法和模型模拟法,价值当量法不能精准刻画小尺度生态系统服务供给空间格局,且这类半定量方法存在较大的主观性和不确定性,因此本文采用模型模拟量化生态系统服务供给。相关系数在一定程度上揭示了水、能源、粮食的相互影响过程,粮食需求增加,需要大量水资源投入,粮食生产加工过程同时伴随着能源消耗,即任何一种生态系统服务的生产依赖于另外两种生态系统服务,水、能源、粮食三者之间展现出相互依存的关联关系。与既有研究相比,本研究在生态系统服务供需空间特征的表达方面更加细致,水、碳、粮都是与人们生产生活息息相关的资源,通过本文能够使读者了解目前制约示范区可持续发展的核心资源,有利于政府管理者提出适用于示范区甚至长三角地区的生态管理政策。本研究存在一定的局限性,虽然从数量和空间上对各项生态系统服务的供需状况进行了评价,但无法充分反映生态系统服务供给和需求平衡的内部驱动机制。此外,本文仅从供给服务和调节服务入手,研究产水、固碳、粮食生产三种生态系统服务的供需关系,未来可考虑加入文化服务和支持服务,进行全面的生态系统服务供需探究。

示范区作为长三角的缩影,对于推进长三角一体化起着榜样示范作用,为长三角地区生态系统服务供需研究提供借鉴。在本文测算的三项生态系统服务中,固碳服务供需最为不平衡,其高值区集中在吴江区桃源镇森林覆盖度高的区域,这说明了森林对固碳服务供给的贡献最大^[44]。同时,固碳服务空间分布不平衡也将成为示范区实施生态建设的主要制约因素,因此可以从供需两侧缓解碳平衡的矛盾,供给侧应严格划定生态红线,增加森林和绿地面积,建设生态廊道,增强生态系统碳汇功能,需求侧可对高耗能、高污染的企业进行淘汰或转型升级,吸引国内绿色低碳技术研发企业,加快绿色低碳产业集聚。示范区产水服务 2000—2015 年赤字区主要集中在青浦区和吴江区,到 2020 年几乎全域都处于供需不平衡的状态,因此一方面要加快建设节水型社会,另一方面确保雨水的充分利用,不仅能够调节径流减缓示范区洪涝灾害,净化后的雨水还可用于补充城市水资源,以确保示范区水资源可持续利用。粮食赤字区以人口聚集区为中心向四周扩散,由于建设用地扩张,人口剧增,城镇区域粮食供需空间不平衡的现象一时难以扭转,因此加快粮食产业链建设,推进科学种田,提升农田的单产水平是实现示范区粮食可持续供应的有效途径。

4.2 结论

本文基于“水-能源-粮食”纽带视角,利用 2000、2005、2010、2015、2020 年五期土地利用遥感监测数据,结

合 InVEST 模型、CASA 模型和 Thornthwaite Memorial 模型计算产水、固碳、粮食生产三种生态系统服务供需量,采用空间基尼系数刻画生态系统服务供需的空间均衡度,利用供需指数展现生态系统服务供给与需求之间的匹配程度,计算 3 种生态系统服务两两间的相关系数揭示生态系统服务间的权衡协同关系。通过综合分析 2000—2020 年示范区产水、固碳、粮食生产 3 项生态系统服务供需关系的空间格局变化,研究发现:

(1) 2000—2020 年,除粮食生产服务供给量波动下降以外,其他生态系统服务供给量均呈波动上升趋势。在需求量方面,三种生态系统服务均呈上升趋势。产水和粮食服务供给高值区主要集中于示范区西南和东南部,固碳服务供给高值区集中于吴江区桃源镇。而示范区产水服务、固碳服务和粮食生产服务的需求高值区主要集中于人口密度较大乡镇,并且以这几个乡镇为中心呈环状分布。总体来说,示范区各项生态系统服务的供给与需求具有较为明显的空间异质性。

(2) 示范区三种生态系统服务供给和需求基尼系数均小于 0.3,在空间上处于均衡分布状态。

(3) 示范区生态系统服务供需匹配度存在下降趋势。除 2000—2015 年嘉善县产水处于供大于求的状态外,固碳供需指数和粮食生产供需指数在研究期内都为供小于求的状态且呈下降趋势。在空间分布上,嘉善县产水服务在 2000—2015 年一直处于盈余区,且盈余区趋于扩散,三种生态系统服务在人口密集区供不应求,城乡供需匹配差异十分明显。

(4) 在供给方面,产水-粮食生产呈现显著的协同关系,产水-固碳、固碳-粮食生产的协同/权衡关系表现均不显著。三种生态系统服务在需求方面呈现出两两协同关系。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Juha M. Alatalo. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [3] ASSESSMENT M E. Ecosystems and human well-being: synthesis. *Physics Teacher*, 2005, 34(9): 534-534.
- [4] DESA U N. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, 2016.
- [5] Chen H G, Zhang Y H P. New biorefineries and sustainable agriculture: increased food, biofuels, and ecosystem security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 117-132.
- [6] Hoff H. Understanding the Nexus. Background paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Bonn: SEI, 2011.
- [7] 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. *生态学报*, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [8] Wu X, Liu S L, Zhao S, Hou X Y, Xu J W, Dong S K, Liu G H. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [9] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [10] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, 1996, 17(3): 195-215.
- [11] Troy A, Wilson M A. Mapping ecosystem services: practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 435-449.
- [12] Petrosillo I, Zaccarelli N, Semeraro T, Zurlini G. The effectiveness of different conservation policies on the security of natural capital. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 89(1/2): 49-56.
- [13] Zhai T L, Wang J, Jin Z F, Qi Y, Fang Y, Liu J J. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106068.
- [14] Brunner S H, Huber R, Grêt-Regamey A. A backcasting approach for matching regional ecosystem services supply and demand. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 439-458.
- [15] Lorilla R S, Kalogirou S, Poirazidis K, Kefalas G. Identifying spatial mismatches between the supply and demand of ecosystem services to achieve a sustainable management regime in the Ionian Islands (Western Greece). *Land Use Policy*, 2019, 88: 104171.
- [16] Tao Y, Wang H N, Ou W X, Guo J. A land-cover-based approach to assessing ecosystem services supply and demand dynamics in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region. *Land Use Policy*, 2018, 72: 250-258.
- [17] Rocas-Díaz J V, Vayreda J, Banqu -Casanovas M, D -Varela E, Bonet J A, Brotons L, de-Miguel S, Herrando S, Martí-Vilalta J. The

- spatial level of analysis affects the patterns of forest ecosystem services supply and their relationships. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1270-1283.
- [18] Ala-Hulkko T, Kotavaara O, Alahuhta J, Hjort J. Mapping supply and demand of a provisioning ecosystem service across Europe. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 520-529.
- [19] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. *生态学报*, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [20] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [21] 李成, 赵洁. 长三角城市群生态系统服务供需格局与影响因素研究. *生态经济*, 2022, 38(9): 160-169, 187.
- [22] Talukdar S, Singha P, Shahfahad, Mahato S, Praveen B, Rahman A. Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic plain of India. *Ecological Indicators*, 2020, 112(C): 106121.
- [23] 孟士婷, 黄庆旭, 何春阳, 杨双妹玛. 区域碳固持服务供需关系动态分析——以北京为例. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1191-1203.
- [24] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. *地理研究*, 2021, 40(3): 821-838.
- [25] 聂名萱, 黄思华, 濮励杰, 朱明, 鄢璐. 快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析——以苏锡常地区为例. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1088-1099.
- [26] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, Wang B J, Dai L W. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: a case study in Hulunbuir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.
- [27] 谢余初, 张素欣, 林冰, 赵银军, 胡宝清. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 217-229.
- [28] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 刘春敬, 徐磊, 高星. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变. *生态学报*, 2021, 41(9): 3354-3367.
- [29] 杨冕, 张艺千, 王春晓. 湖北省关键生态系统服务供需状况的时空变化研究. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(9): 2080-2091.
- [30] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [31] 熊丽. 下好长三角一体化发展“先手棋”. *经济日报*, 2019-11-20(005).
- [32] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 798-808.
- [33] Zheng H, Wang L J, Wu T. Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes: a review of the approaches. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 82: 103-112.
- [34] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [35] Sharp R, Tallis H T, Richetts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N. The natural capital project, Stanford University, University of Minnesota, The nature conservancy and world wildlife fund, Stanford. InVEST 3.3.0 User's Guide. 2016.
- [36] 陶芹, 陶宇, 欧维新. 不同碳减排目标下长三角地区碳固持服务供需演变分析. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(1): 191-201.
- [37] 张肖, 向晓东, 刘汉杰, 吴高明. 钢铁行业碳排放量核算方法的实证性研究. *工业安全与环保*, 2012, 38(6): 86-88.
- [38] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world. *Indian Forest*, 1975, 14(1): 237-263.
- [39] 陈骏宇, 王慧敏, 刘钢, 白杨. “水-能-粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 542-553.
- [40] 洪兴建. 基尼系数理论研究. 北京: 经济科学出版社, 2008.
- [41] Jantzen R T, Volpert K. On the mathematics of income inequality: splitting the gini index in two. *The American Mathematical Monthly*, 2012, 119(10): 824-837.
- [42] 欧维新, 王宏宇, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化. *生态学报*, 2018, 38(17): 6337-6347.
- [43] 杨宜男, 李敬, 王立, 王子豪, 姚晨心, 王原. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1555-1571.
- [44] 刘华妍, 肖文发, 李奇, 田宇, 张倩如, 朱建华. 北京市生态系统服务时空变化与权衡分析. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 209-219.