

“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

陈骏宇^{1, 2} 王慧敏^{1, 2} 刘钢^{1, 2} 白杨³¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学管理科学研究所, 江苏 南京 211100;

3. 肯塔基大学林学系, 肯塔基州 列克星敦 405460073)

【摘要】: 生态系统保护与城镇化间的冲突已威胁人类福祉。基于“水-能-粮”纽带视角, 研究从供需双侧对太湖流域杭嘉湖区域 2000、2005 及 2010 年的产水、固碳以及粮食生产服务进行了测度, 并利用空间基尼系数模型、供需指数模型及相关系数模型对其空间异质性进行了评价。结果表明: (1) 产水总量先减后增, 固碳及粮食生产总量小幅递减, 水资源及粮食的需求总量小幅递增, 固碳需求则急剧增加; (2) 西南部山林地带产水及固碳服务供给显著, 粮食生产聚集在东部平原, 3 种服务的需求均集中于高人口密度区域; (3) 3 种服务的空间分布基本均衡, 但供需匹配度偏低, 绝大部分区域的产水服务处于赤字状态, 城镇区域固碳压力显著; (4) 产水服务与固碳服务呈权衡关系, 与粮食生产服务呈协同关系, 固碳服务与粮食生产服务之间具有权衡关系, 3 种服务的需求间呈两两协同关系。可见, “水-能-粮”纽带关系在杭嘉湖区域表现为相互支撑、相互影响的共同体。最后, 本研究提出适应性管理政策以改善区域生态系统。

【关键词】: “水-能-粮”纽带 产水 固碳 粮食生产 时空异质性

【中图分类号】: X171.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)03-0542-12

生态系统是地球生命生存和繁衍的根本, 其贡献的直接与间接服务均是人类福祉的来源^[1]。其中, 水资源、能源及粮食又是社会经济发展不可或缺的重要基础性资源, 三者构成“水-能-粮”纽带, 相互依存于脆弱的平衡关系, 呈现牵一发而动全身之势^[2,3]。生态系统功能与服务对水、能源及粮食的安全保障起着关键支撑作用^[4]。然而, 在人口剧增、城镇化发展及气候变化等多因素交叉影响下, 人类正陷入生物多样性丧失、生态系统服务退化及贫困的恶性循环^[5]。生态系统服务透支现象已在诸多国家和地区, 尤其是发展中国家迅速蔓延, 水、能源及粮食的安全问题突显, “水-能-粮风险群”成为全球三大重要风险群之一, 受到各国政府及学术界的高度关注^[6-10]。2011 年德国波恩会议上, “水-能-粮”纽带关系(Water-Energy-Food Nexus, WEF-Nexus)的正式提出为生态系统服务研究提供了全新的视角^[1]。从“水-能-粮”三要素出发, 系统辨识生态系统服务供给侧与需求侧时空分布特征, 剖析生态系统服务波动对利益相关者效用的动态影响, 有助于构建区域生态安全格局, 维持“水-能-粮”纽带的和谐共生, 为实

作者简介: 陈骏宇(1990-), 博士研究生, 主要从事生态系统服务评估与管理方面研究. E-mail: cjynjhhu@163.com; 王慧敏, E-mail: hmwang@hhu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404606); 国家自然科学基金重点项目(71433003); 国家自然科学基金项目(41501580); 国家社会科学基金青年项目(14CGL030)。

现社会经济的可持续发展提供科学的决策依据。

恩格斯指出：“我们不要过分陶醉于我们人类对自然界的胜利。对于每一次这样的胜利，自然界都对我们进行报复”。我国高度重视生态文明建设，追求人与自然和谐共生。2017年，党的“十九大”报告指出，要“实行最严格的生态环境保护制度”，“提升生态系统质量和稳定性”，“构建清洁低碳、安全高效的能源体系”，“确保国家粮食安全”。2018年的“两会”报告历史性地将生态文明写入宪法。国家层面先后出台的“健全自然资源资产产权制度和用途管制制度”、“干部自然资源资产离任审计制度”、“编制自然资源资产负债表”等政策，使得生态系统服务综合评估工作更为迫切。与此同时，绿色发展理念驱动下的生态保护与经济发展权衡思想敦促决策者探索最符合当地特征的生态系统管理模式。地处太湖流域南缘的杭嘉湖区域依靠得天独厚的水网、气候等条件成为“鱼米之乡，丝绸之府”，是以水稻、蚕茧生产为主，粮、油、丝、鱼、畜综合发展的地区。同时，突出的基础设施、人才等优势促使区域内电子、石化、机械、皮革等产业得到显著提升，区域生产总值、城镇化水平及人民生活水准稳步攀升。然而，经济的快速发展、城市规模的迅速扩张，导致生态环境承载力不断被削弱，水资源短缺、空气污染、水体污染、生物多样性减弱等现象严重。区域内各政府及相关部门逐渐认识到退化的生态系统对区域社会经济及人民生活造成的负面影响。目前，长江经济带把修复生态环境摆在压倒性位置，“绿水青山就是金山银山”理念深入贯彻，杭嘉湖区域内政府制定并落实了《钱塘江甬江杭嘉湖三大流域(区域)综合规划(2011-2020)》、《杭嘉湖区域水利综合规划》^[11]等政策规划，旨在维护区域内的生态系统服务功能，提升生态系统服务效用，保障民生福祉。

生态系统服务评估与管理的研究与实践活动在全球范围内已广泛开展^[12-15]。为顺应管理实践，利益相关者需求必须纳入考虑，因此生态系统服务的供需平衡及空间匹配则是领域的新方向^[21]。探讨生态系统服务与“水-能-粮”纽带关系也逐渐成为热点，但多局限于针对单一生态系统服务的研究^[16-20]。本研究在 WEF-Nexus 视角下综合测度太湖流域杭嘉湖区域产水、固碳及粮食生产三大基础性生态系统服务在 2000、2005 及 2010 年 3 个典型年份中的供需状况，剖析其时空异质性特征及其驱动机制，并提出了以生态系统服务为导向的区域生态系统适应性管理政策，以期能为决策实践提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 杭嘉湖区域概述

太湖流域杭嘉湖区域(30° 09' N~31° 02' N, 119° 52' E~121° 16' E, 以下简称杭嘉湖区域)范围包括杭州市、余杭市、临安市、富阳市的大部,以及嘉兴市和湖州市的全部(图 1),总面积约 12304km²,占太湖流域的 30%,总人口约 922 万,占太湖流域的 16%^[21,22]。以导流港东大堤为界,杭嘉湖区域分为西部山区与东部平原。西部山区以苕溪流域为主,地势较高,林地密覆,东部平原则是典型的平原河网地区,河网平均密度达 12.7km/km²,是浙江省粮、蚕、油、淡水鱼的主要生产与养殖基地。杭嘉湖区域地处亚热带季风气候区,四季分明,雨热充沛,多年平均气温 16℃,多年平均降水 1100~1500mm。区域定位为城镇密集的生态经济区,农业、制造业及信息技术业等多产业发展态势良好,已逐渐成为浙江省经济发达地区之一,在长江经济带中占据重要区位。然而,可喜的发展背后催生出严重的生态问题,危及区域可持续发展,主要包括:(1)自然资源短缺显现,而能源、资源消耗居高不下,其中,年水资源缺口逾 50 亿立方米,地下水超量开采致使地面沉降严重;(2)大量的能源消耗带来大量 CO₂、SO₂、NO_x、PM_{2.5} 等毒害气体排放,导致空气质量不容乐观;(3)工业废水、生活污水和农业面源污染导致水环境被持续破坏;(4)耕地面积减少且土壤质量下降,但粮食消费总量呈刚性增长,区域存在粮食安全隐患。综上所述,杭嘉湖区域人类与自然生态系统的分裂对立状态凸显。

1.2 杭嘉湖区域土地利用/土地覆盖演化

土地利用/土地覆盖(Land use/land cover, LULC)是影响生态系统服务功能发挥与空间分布的决定性因素^[23]。杭嘉湖区域土地利用/土地覆盖在 2000~2010 年间整体格局基本维持不变,但局部分布发生着显著变化,集中在林地、水域、耕地和建设用地上(图 2)。耕地和林地为主要土地利用/土地覆盖,2000~2010 年间,耕地锐减了 95117hm²,向建设用地的转变为其主要变迁,累计 6.65%的耕地转变成了建设用地。林地面积先增后减,10 年内总面积增幅 2.89%。建设用地从 2000 年的 129301hm² 剧增到

2010年的232985hm², 增比达80.19%, 主要由耕地(41.85%)转变而来, 表征为杭嘉湖三市城镇规模的扩张。因工农业生产活动加剧, 乡镇耕地和城市建设用地需求提升, 导致水域面积有所缩减, 草地被建设用地替代, 而配套的城市绿地增加1439hm²。对比2000~2005与2005~2010两个五年, 自然生态用地(林地、草地、水域)在2000~2005年间的变化强度大于2005~2010年间, 而人工生态用地(耕地、建设用地、城市绿地)则相反。

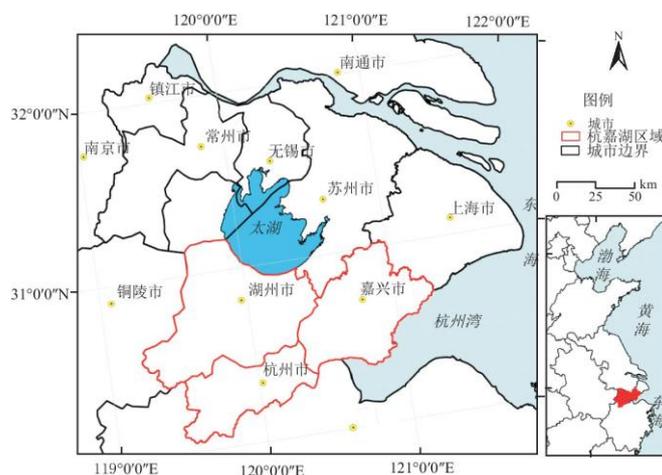


图1 杭嘉湖区域地理位置图

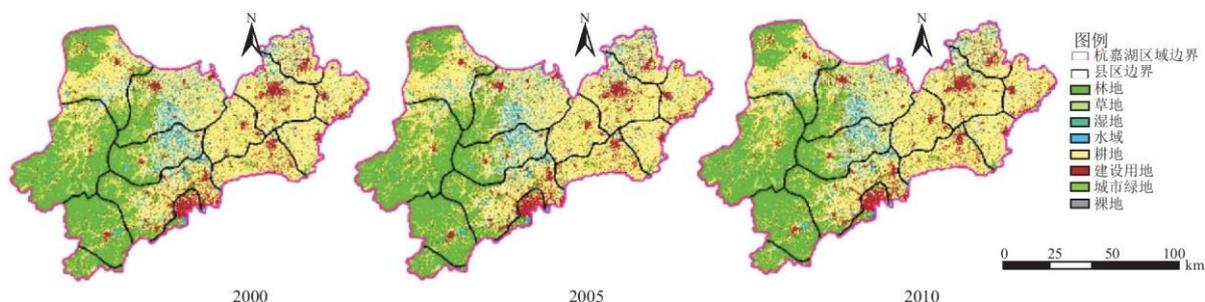


图2 杭嘉湖区域土地利用变化(2000~2010)

2 研究方法

2.1 生态系统服务供需测度指标遴选

基于不同体系和研究目的, 生态系统服务测度指标不尽相同^[24]。本研究遴选生态系统服务供需测度指标基于以下原则: ①全面涉及“水-能-粮”纽带3要素; ②符合区域政府及居民关注焦点; ③较好体现不同生态系统服务间耦合机制; ④具备测度数据可得性。进而, 综合文献研究与实地调研, 本研究选取产水服务、固碳服务及粮食生产服务作为杭嘉湖区域生态系统服务供需测度指标。

2.2 生态系统服务测度模型

2.2.1 产水服务测度模型

产水服务主要表现为植被冠层截留降水、枯枝落叶层含水和土壤储水 3 个方面。现有测度方法主要包括水量平衡核算法、降水存储法、多因子回归法。本研究利用生态系统服务和交易的综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, In VEST)中的产水模块(Water yield)计算区域产水服务量。Water yield 模块基于 Budyko 曲线与年均降雨量计算逐像元(单位栅格)的产水量^[25]:

$$Y_i = \left(1 - \frac{AET_i}{P_i}\right) \cdot P_i \quad (1)$$

式中: Y_i 为栅格 i 上的年产水量, mm; AET_i 为栅格 i 上的年实际蒸发散量, mm; P_i 为栅格 i 上年降雨量, mm。利用栅格面积与 Y_i 的乘积换算得最终产水量, 单位为 m^3 。

利用人口密度与人均用水量进行水资源需求量的空间展布:

$$Y_{d,i} = \rho_i \times \overline{y_{d,i}} \quad (2)$$

式中: $Y_{d,i}$ 为栅格 i 上的水资源需求量, m^3 ; ρ_i 为人口密度, 人/ hm^2 ; $y_{d,i}$ 为栅格 i 上的人均水资源需求量, m^3 /人。

2.2.2 固碳服务测度模型

固碳服务体现为植被固碳和土壤固碳两部分, 植被的光合作用吸收 CO_2 制造碳氢化合物, 以有机物的形式固定大气中的 CO_2 于植物体内, 同时释放出 O_2 , 而土壤则通过根系、微生物、土壤动物的呼吸作用以及含碳物质的化学氧化作用, 产生 CO_2 , 返回大气, 进而被植被吸收, 成为另一种重要碳汇方式。固碳服务供给由森林、草地、耕地及湿地的植被固碳效率及相应土壤固碳效率共同决定^[9], 固碳服务需求由人口密度、人均能源消耗量和能源碳转化率的乘积计算得来:

$$S_{cs,i} = 1.62 \times NPP_i \times A_i + SCS_i \times A_i \quad (3)$$

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

式中: $S_{cs,i}$ 为栅格 i 上的固碳服务供给量, kg; NPP_i 为栅格 i 上的初级生产力, $kg/hm^2 \cdot a$; A_i 为栅格 i 的面积, hm^2 ; SCS_i 为栅格 i 的土壤固碳效率, kg/hm^2 ; $D_{cs,i}$ 为栅格 i 上的固碳服务需求量, kg; C_e , $\overline{C_{e,i}}$ 为栅格 i 上的人均能源消费量, 万 t 标准煤; ρ_i 为栅格 i 上的人口密度, 人/ hm^2 ; $C_{transfer}$ 是能源消耗的碳排放转化率, 根据我国国家发改委能源研究所建议, 取值 0.67^[26]。

2.2.3 粮食生产服务测度模型

粮食生产服务以区域粮食生产总量进行表征, 本研究采用潜在气候生产力法计算粮食生产总量:

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

式中: $F_{s,i}$ 为栅格 i 上的粮食生产量, kg; $P_{potential,i}$ 为栅格 i 上的潜在气候生产力, $kg/hm^2 \cdot a$, 采用 Thornthwaite Memorial 模型^[27]计算:

$$\begin{aligned}
 P_{potential,i} &= 30\,000 \times (1 - e^{-0.0009\,56(v_i - 20)}) \\
 v_i &= \frac{1.05R_i}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05R_i}{L_i}\right)^2}} \\
 L_i &= 300 + 25t_i + 0.05t_i^3
 \end{aligned} \tag{6}$$

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， $^{\circ}\text{C}$ 。

$$S_i = A_{f,i} / A_i \tag{7}$$

式中： S_i 为栅格 i 上的粮食作物播种适宜度； $A_{f,i}$ 为栅格 i 上的作物播种面积， m^2 ； A_i 为栅格 i 的面积， m^2 ；

粮食需求量则根据人均粮食需求量与人口密度进行计算：

$$F_{d,i} = \rho_i \times f_i \tag{8}$$

式中： $F_{d,i}$ 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/ hm^2 ； f_i 为栅格 i 上的人均粮食需求量，kg/人。

2.3 生态系统系统服务时空异质性评价模型

2.3.1 生态系统服务空间均衡度模型

生态系统服务在空间分布上具有显著的非均衡性，洛伦茨曲线与基尼系数可作为分析区域生态系统服务空间均衡状态的量化工具^[28, 29]。根据基尼系数的内涵，本研究假设：一定比例的国土面积即有相同比例的生态系统服务相匹配，此时的生态系统服务在空间上视为均衡状态。因此，本研究绘制区域国土面积与生态系统服务间的空间洛伦茨曲线，进而计算相应的基尼系数。生态系统服务空间基尼系数计算步骤如下：

- (1) 将研究区域划分为 N 个子区域，以生态系统服务为基本匹配原象，以国土面积为匹配对象；
- (2) 以单位面积生态系统服务所对应的国土面积作为要素匹配水平分级指标，并将 N 个子区域按该指标从低到高排序；
- (3) 分别计算不同子区域参评生态系统服务占杭嘉湖区域生态系统服务总量的比例，并依照(2)中的排序，计算累计占比；
- (4) 定义 X 轴为国土面积累积比例， Y 轴为各子区域生态系统服务累积比例，由此构成生态系统服务空间洛伦兹曲线；

- (5) 分别计算各参评生态系统服务的基尼系数：基于生态系统服务空间洛伦兹曲线得到其拟合曲线方程，然后对 $0 \sim 1$ 间的曲线方程进行积分：

$S_b = \int_0^1 Y dx$ ，即可求得面积 S_b ，则 $S_a = \frac{1}{2} S_0$ ，进而求得基尼系数： $G = 1 - 2S_b / S_0$ 。

2.3.2 生态系统服务供需匹配度模型

生态系统服务的供给与需求具有显著的空间异质性,反映为空间不匹配^[30]。本研究通过供需指数(Supply-demand index, SDI)来刻画生态系统服务供需状态,SDI>0表示供给大于需求,即盈余状态,SDI=0表示供给等于需求,即供需平衡状态,SDI<0表示供给小于需求,即赤字状态。具体计算公式如下:

$$SDI_i = \frac{ES_{supply,i} - ES_{demand,i}}{ES_{supply,i} + ES_{demand,i}} \quad (9)$$

式中:SDI_i为栅格 i 上的生态系统服务供需指数;ES_{supply,i}为栅格 i 上的生态系统服务供给量;ES_{demand,i}为栅格 i 上的生态系统服务需求量。

2.3.3 生态系统服务相关度模型

生态系统管理与决策的关键依据之一就是不同生态系统服务间的相关性,包括协同与权衡^[31]。协同是指某一种生态系统服务的增加会对其他几种服务产生一定的增益作用,而权衡是指两两服务之间,或两组服务之间处于此消彼长的状态^[32]。本研究基于2.2中的逐像元生态系统服务供需测度结果,进行两两生态系统服务间的Pearson相关系数 $r_{1,2}$ 计算,以量化生态系统服务间的协同或权衡关系,具体计算公式如下:

$$\begin{aligned} r_{1,2} &= \frac{Cov(ES_1, ES_2)}{\sqrt{Var(ES_1) \times Var(ES_2)}} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (ES_1 - \overline{ES_1})(ES_2 - \overline{ES_2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ES_1 - \overline{ES_1})^2 \sum_{i=1}^n (ES_2 - \overline{ES_2})^2}} \quad (10) \end{aligned}$$

式中:ES₁, ES₂分别为参评的一对生态系统服务经标准化后的数值;Cov()和Var()分别为协方差和方差符号。

2.4 数据收集与整理

根据上述评估框架,本研究需要土地利用、降雨、固碳效率等地理空间数据,以及用水量、能源消耗、人口等社会经济数据,具体数据需求见表1。

表1 生态系统服务供需测度数据需求(产水服务=WY,固碳服务=CS,粮食生产服务=FP)

数据	类型	数据来源	数据描述	相关模型
土地利用	栅格地图	中科院资源环境科学数据中心	包括林地、草地、湿地、水域、耕地、建设用地、城市绿地和裸地共8类	WY, CS, FP
年降雨量	监测	中国气象数据共享网	研究区国家气象站点降雨监测数据	WY, FP

	数据			
潜在蒸散量	栅格地图	MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD 16)	从全球潜在蒸散分布图裁剪出研究期内研究区数据	WY
用水量	统计数据	研究区统计年鉴	提取研究期内研究区生活、农业、工业、服务业及生态年用水总量	WY
植被净初级生产力	栅格地图	中科院资源环境科学数据中心	从全国植被净初级生产力分布图中裁剪出研究区数据	CS
土壤固碳效率	经验数据	文献、著作	将文献参考数值赋值于相应土地利用/土地覆盖类型	CS
能源消耗量	统计数据	研究区统计年鉴	提取研究期内研究区生活、工业、农业及服务业能源消费总量	CS
人口	统计数据	研究区统计年鉴	提取研究期内研究区人口总量	FP
气温	监测数据	中国气象数据共享网	研究区国家气象站点气温监测数据	FP
粮食需求量	统计数据	研究区统计年鉴	提取研究期内研究区粮食消费总量	FP
能源消耗碳排放转换率	常数	国家发改委能源研究所	根据我国发改委能源研究所建议,取值 0.67	CS

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供需测度结果

(1) 产水服务

杭嘉湖区域 2005 年产水量相较 2000 年下降 20.54%, 仅有 $48.42 \times 10^8 \text{m}^3$, 2010 年则反弹至 $92.84 \times 10^8 \text{m}^3$ 。水资源年需求量先增后减, 10 年内总体仍然增加 4.97%, 表明杭嘉湖区域发展对水资源的依赖程度居高不下。在空间分布上, 林地覆盖率较大的余杭、湖州市区及安吉年产水总量较高, 而杭州市区、余杭及海宁的建筑物及不透水路面规模的扩大导致雨水蒸发及下渗的大量减少, 进而形成了以径流形式为主的水源供给, 导致该类地区单位面积年产水量较高。杭州市区单位面积年水资源需求量最高, 且逐年递增, 2010 年达到了 $27519.27 \text{m}^3/\text{hm}^2$, 余杭和海宁紧随其后, 而临安、安吉的水资源需求压力较低, 这体现出人口规模及城镇化对需水量增长产生的明显正向驱动效应^[33](图 3, 图 6)。

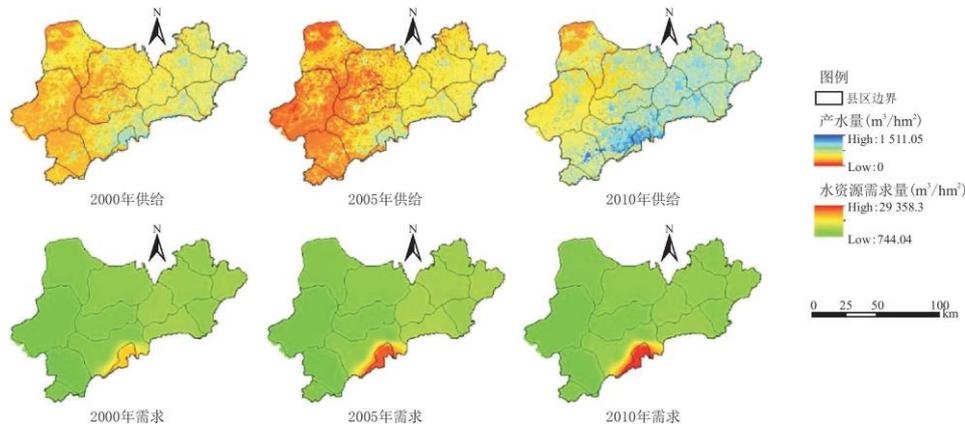


图3 杭嘉湖区域2000年、2005年及2010年产水服务供需时空分布图

(2) 固碳服务

固碳服务的年供给量,即年固碳总量,从2000年的 $137.94 \times 10^8 \text{kg}$ 上升到2005年的 $149.01 \times 10^8 \text{kg}$,转而在2010年下降到 $131.61 \times 10^8 \text{kg}$ 。固碳能力整体呈现出的下降趋势与2000~2010年内耕地的锐减密切相关,因为,农业生态系统中的碳库是全球碳库中最活跃、最重要的组成部分之一^[34]。需求量方面,即年碳排放总量,在研究期内急剧增加,增幅达到154.39%,2010年达到 $207.51 \times 10^8 \text{kg}$ 。固碳服务的空间分布特征在3个年度基本保持一致,富阳、临安及安吉三市县具有较强的固碳能力,杭州市区、余杭及嘉兴市大部的固碳功能则较为薄弱,这表明自然林地及草地的固碳水平高于半自然半人工的耕地。与此同时,城镇化水平较高的区域因高能耗往往具有较大的碳排放压力,研究区内的杭州市区尤为突出(图4,图6)。

(3) 粮食生产服务

粮食生产服务在研究期内总体波动较小,粮食生产总量从 $108.76 \times 10^8 \text{kg/a}$ (2000年)下降到 $96.47 \times 10^8 \text{kg/a}$ (2010年),耕地面积锐减是粮食产量减少的直接原因。而人口规模扩张幅度较小则使得区域粮食需求总水平也基本保持稳定,维持在 $32 \times 10^8 \text{kg/a}$ 左右。空间分布上,作为重要商品粮基地的嘉兴地区的粮食生产能力较强,而西南部的富阳、临安地区该服务功能比较薄弱。粮食需求量较高的区域集中在人口密集的城镇区域,杭州市区较为显著(图5,图6)。

3.2 生态系统服务时空异质性分析

(1) 空间均衡度

参评3种生态系统服务的供需空间基尼系数整体均处于0.1~0.4区间内,根据联合国标准^[35],属于“合理分配”状态。不同生态系统服务之间仍存在一定差异,粮食生产服务的供给空间基尼系数相较其余服务略大且稳定,这与粮食多集中生产的特征吻合,而三者的需求空间基尼系数则差距不大。不同年度间,水资源供需空间基尼系数波动较大,且均呈现先增后减的趋势,表明区域内水资源供给和耗用结构存在较大的时空差异,固碳服务供需空间基尼系数在10年内小幅度增长,这与人口的城乡迁徙以及产业的结构调整有关(图7,表2)。

(2) 供需匹配度

由图8可知,杭嘉湖区域产水服务的供需存在显著的空间不匹配,区域内绝大部分区域处于供不应求的“赤字”状态,仅在富阳范围内出现了小面积供大于求的“盈余”区域,表明区域水安全面临严峻形势。固碳服务方面,区域西南部山林地带多为“盈

余”区域,而“赤字”区域集中在区域内城镇范围内,且在2000至2010年间逐步扩大。人口和工业的集聚导致了城镇区域能源消耗、二氧化碳排放量异常高于周围地区,而这些区域恰恰自然植被覆盖率低,不足以封存碳排放。区域粮食生产服务的供需匹配度较好,除杭州市区由于产业结构限制处于严重的服务“赤字”状态外,其余区域的粮食供给均能很好的满足当地需求,嘉兴和长兴地区尤其富足。

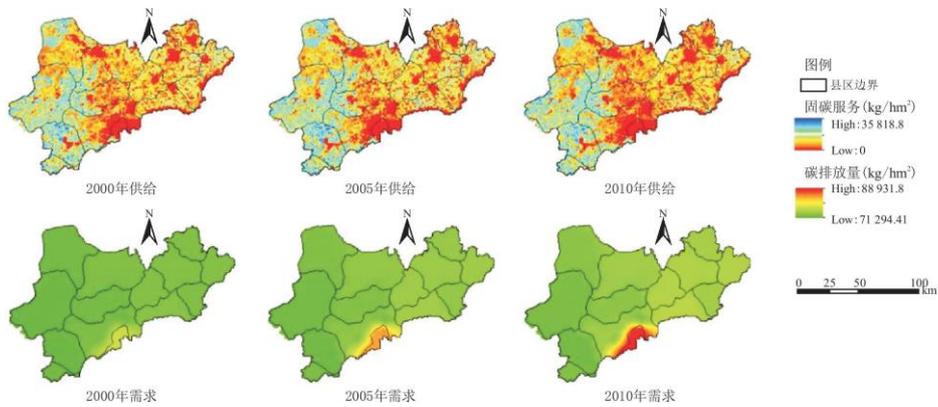


图4 杭嘉湖区域2000年、2005年及2010年固碳服务供需时空分布图

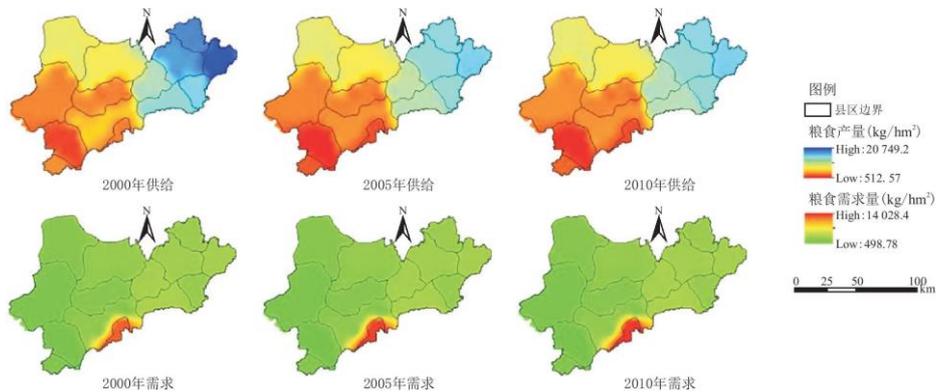


图5 杭嘉湖区域2000年、2005年及2010年粮食生产服务供需时空分布图

(3) 服务相关度

供给方面,固碳服务与产水服务、粮食生产服务均成此消彼长的权衡关系,产水服务与粮食生产服务间则是共向促进关系(表3、表4)。这是缘于自然植被是固碳服务的主要贡献者,区域西部的苕溪流域山林地带植被覆盖率较高,具备了较强的固碳能力,而充沛降雨对产水与粮食生产同时存在正向效应,具备较好雨热条件的东部平原同时展现出显著的产水与粮食生产服务。参评3种生态系统服务的需求量之间则呈现两两协同状态,这印证了3种服务的需求量在空间分布上存在的一致性。相关度分析揭示了杭嘉湖区域“水-能-粮”纽带的紧密关系表现为3要素之间的相互支撑、相互影响,这与李桂君等的研究契合^[36]。能源与水资源在开发利用活动中相辅相成,粮食生长期需要水资源作为输入,而其加工过程中又伴随能源消耗。进一步分析年际变化可知,碳排放随着水资源开发利用及粮食生产的能源需求的提升而递增,同时,能源、粮食消费的增长又使得水资源需求整体上依然不断上升。因此,杭嘉湖区域的“水-能-粮”纽带关系在整体上呈现为螺旋上升的共同体之势,在3要素个体之间则受不同自然生态、社会经济因素的演变而展现出不同的耦合关系。

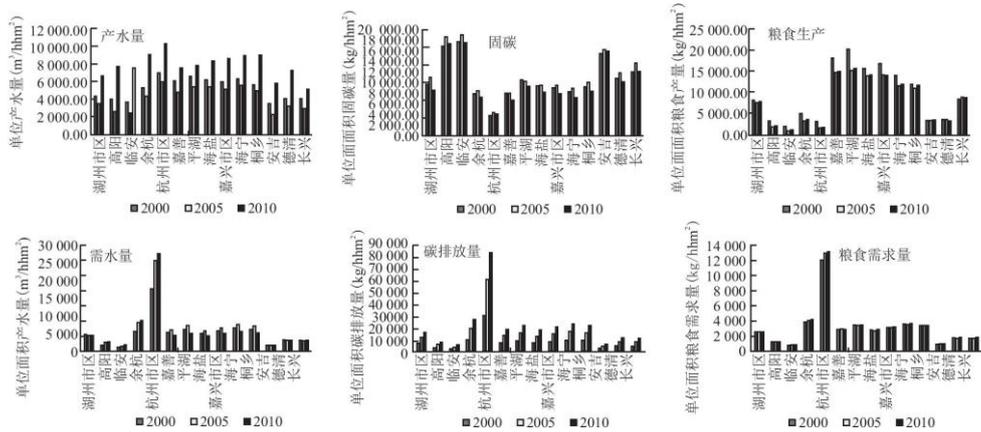


图 6 杭嘉湖区域 2000 年、2005 年及 2010 年各县区单位土地面积生态系统服务供需统计

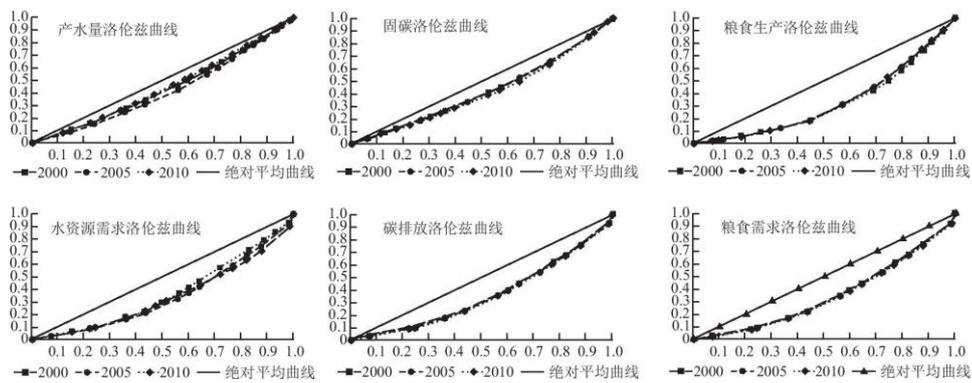


图 7 杭嘉湖区域 2000 年、2005 年及 2010 年生态系统服务供需洛伦兹曲线

表 2 杭嘉湖区域 2000 年、2005 年及 2010 年生态系统服务供需空间基尼系数

	2000	2005	2010
	(供给, 需求)	(供给, 需求)	(供给, 需求)
产水服务	(0.126, 0.268)	(0.173, 0.320)	(0.107, 0.314)
固碳服务	(0.160, 0.290)	(0.166, 0.299)	(0.192, 0.302)
粮食生产服务	(0.287, 0.290)	(0.272, 0.299)	(0.299, 0.302)

4 结论与政策建议

本研究着眼区域社会经济发展与生态保护间的突出矛盾, 集合生态系统服务测度、空间计量学、适应性管理理论与方法, 构建了生态系统服务供需测度体系和时空异质性分析框架, 对杭嘉湖区域 2000、2005 及 2010 年的产水服务、固碳服务以及粮食生产服务进行了实证研究。结果显示 3 种参评服务的供给与需求在研究期内存在不同程度的时空异质性, 城镇化、人口聚集和工业

聚集对生态系统服务“赤字”现象起主导作用。相关度分析表明杭嘉湖区域“水-能-粮”纽带间权衡与协同关系并存。值得注意的是,杭嘉湖区域生态系统动态演化的背后,隐藏着一定程度的潜在生态风险。对此,本研究提出生态系统服务导向下的区域适应性管理政策:

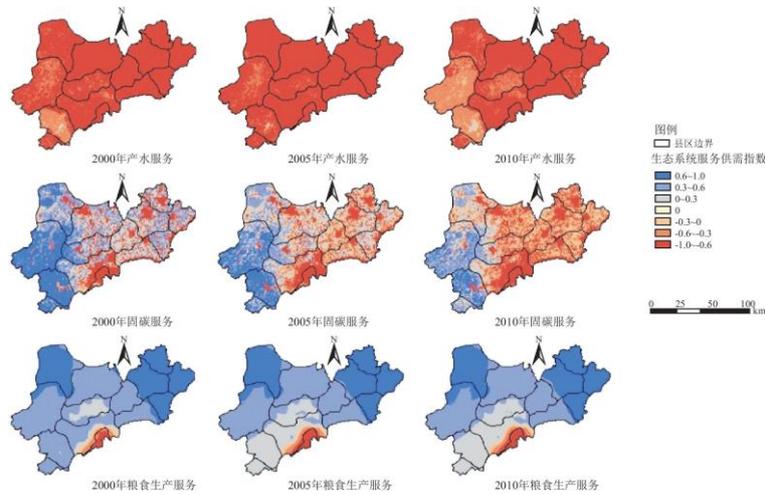


图 8 杭嘉湖区域生态系统服务供需指数时空分布图 (2000, 2005, 2010)

表 3 生态系统服务供给的协同权衡关系矩阵

	产水量	固碳	粮食生产
产水量	1		
固碳	-0.570** (权衡)	1	
粮食生产	0.260 (协同)	-0.423** (权衡)	1

表 4 生态系统服务需求的协同权衡关系矩阵

	水资源需求	固碳服务需求	粮食需求
水资源需求	1		
固碳服务需求	0.930** (协同)	1	
粮食需求	0.980** (协同)	0.893** (协同)	1

(1) 区域内沿杭州湾地区具备较强的单位面积产水能力,这与虎陈霞等^[37]、方明等^[38]的研究结论相符。但是,该地区产水多以径流形式呈现,由于区域雨水收集的低普及度以及不透水路面的高覆盖度带来的超负荷排水压力使得产水优势在区域东部与中南部反而时长造成内涝灾害^[39,40]。因此,产水服务的两面性要求区域相关部门重视城市化进程的合理性,严格控制建设用地扩张速率。此外,应大力推动海绵城市建设,以促进雨水和径流的再利用,同时提升城市防洪能力,实现“双赢”。

(2) 固碳服务的优势区域集中在区域西部和南部的山林地带,这印证了森林碳汇是区域内固碳的主导^[41]。因此,该地区应及时划定最严格生态保护红线,以起到维护固碳服务功能的作用。城镇范围内的人口密度大且在逐年递增,区域内电子、机械制造、皮革、建材等高能耗行业的快速发展,使得碳排放量急剧增加,远远超过了相应的固碳能力。应对固碳“赤字”现象,杭嘉湖区域内应严格行业准入管理,对高能耗行业企业应落实淘汰制度,并积极推进能源的清洁高效利用和结构的调整优化。

(3) 粮食环节中,优良的雨热条件和充足的耕地资源使得区域粮食生产保持在较高的水平,其中杭嘉湖东部平原尤为突出,这符合《杭嘉湖区域水利综合规划》中对于杭嘉湖东部平原嘉兴区部署国家级农产品区的定位^[11]。而粮食消费随着人口增加和城镇化率水平上升而稳步增加和聚集,粮食赤字现象显现于杭州及其周边地区。这种粮食供需的空间不匹配由于粮食种植条件和产业布局的特定要求而无法从根上转变。因此,配套的、高效的粮食供应链成为了弥补供需错位的有效途径。

(4) 生态补偿机制是实现自然生态资源人类代内和谐和代际公平的关键举措。杭嘉湖区域可充分利用生态补偿手段,由政府主导,鼓励市场与公众积极参与,以生态系统服务为监督主体,对创造外部经济效应的地区给予合理补偿,并明确权利与责任对等原则,使生态补偿制度切实发挥作用。

参考文献:

[1] CONSTANZA R, GROOT R D, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28:1-16.

[2] 常远,夏朋,王建平. 水-能源-粮食纽带关系概述及对我国的启示[J]. *水利发展研究*, 2016, 16(5):67-70.

[3] 贾绍凤,陈贵锋,姜文来,等. 对话贾绍凤研究员:寻求水、能源、粮食安全共赢解决方案——以内蒙古自治区鄂尔多斯市为例[J]. *中国水利*, 2017(11):59-62.

[4] RASUL G. Food, water, and energy security in South Asia: A nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan region [J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, 39(5):35-48.

[5] 傅伯杰,于丹丹,吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. *生态学报*, 2017, 37(2):341-348.

[6] 邓鹏,陈菁,陈丹,等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究——以江苏省为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2017(6):232-238.

[7] 詹贻琛,吴岚. 中美均面临水、能源、粮食三者冲突[J]. *中国经济报告*, 2014(1):109-111.

[8] 李东林,刘建华,郝林钢,等. “一带一路”非洲区水-粮-能安全分析[J]. *水资源保护*, 2018, 34(4):22-28.

[9] BASHEER M, WHEELER K G, RIBBE L, et al. Quantifying and evaluating the impacts of cooperation in transboundary river basins on the Water-Energy-Food nexus: The Blue Nile Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630:1309.

[10] SIDDIQI A, ANADON L D. The water-energy nexus in Middle East and North Africa[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(8):4529-4540.

[11] 浙江省发展和改革委员会,浙江省水利厅. 杭嘉湖区域水利综合规划[R], 2015.

-
- [12] BURKHARD B, FATH B D, JØRGENSEN S E, et al. Use of ecological indicators in models[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 295 (295) :1-4.
- [13] CONSTANZA R, GROOT R D, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26 (1) :152-158.
- [14] GROOT R D, BRANDER L, PLOEG S V D, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1 (1) :50-61.
- [15] 江波, Christina P. Wong, 欧阳志云. 湖泊生态服务受益者分析及生态生产函数构建[J]. *生态学报*, 2016, 36(8) : 2422-2430.
- [16] 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1) : 215-224.
- [17] 罗海平, 宋焱, 彭津琳. 基于 Costanza 模型的我国粮食主产区生态服务价值评估研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(4) :585-590.
- [18] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 等. 甘肃白龙江流域生态系统粮食生产服务价值时空分异[J]. *生态学报*, 2017, 37(5) :1719-1728.
- [19] KARABULUT A, EGOH B N, LANZANOVA D, et al. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17:278-292.
- [20] BELL A, MATTHEWS N, ZHANG W. Opportunities for improved promotion of ecosystem services in agriculture under the Water-Energy-Food Nexus[J]. *Journal of Environmental Studies & Sciences*, 2016, 6 (1) :1-9.
- [21] 水利部太湖流域管理局, 2016 年度太湖流域及东南诸河水资源公报[R], 2017.
- [22] 浙江省统计局, 浙江省统计年鉴 2017[R], 2017.
- [23] 吴后建, 王学雷, 宁龙梅, 等. 土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以武汉市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(2) :185-190.
- [24] 赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 2008~2016 年鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值的时空变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2) :198-208.
- [25] SHARP R, TALLIS H T, RICHELTS T, et al. The natural capital project, Stanford University, University of Minnesota, The nature conservancy and world wildlife fund, Stanford. InVEST 3.3.0 User's Guide [M]. 2016.
- [26] 张肖, 向晓东, 刘汉杰, 等. 钢铁行业碳排放量核算方法的实证性研究[J]. *工业安全与环保*, 2012, 38(6) :86-88.
- [27] LIETH H. Modeling the primary productivity of the world [J]. *Indian Forest*, 1975, 14 (1) : 237-263.

-
- [28] 鲍文, 陈国阶. 基于水资源的四川生态安全基尼系数分析[J]. 中国人口资源与环境, 2008, 18(4): 35-37.
- [29] 徐道炜, 刘金福, 洪伟. 中国城市资源环境基尼系数研究[J]. 统计与决策, 2013, (9): 27-30.
- [30] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 798-808.
- [31] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 868-879.
- [32] 白杨, 王敏, 李晖, 等. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [33] 马剑锋, 秦腾, 佟金萍, 等. 工业集聚、城市集聚与水资源消耗——基于省际动态面板数据的系统 GMM 分析[J]. 软科学, 2018, (1): 95-99.
- [34] 韩冰. 中国农田管理措施的固碳潜力评价[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [35] 吴旭, 王玉梅. 基于基尼系数的邯郸市水资源空间分配公平性分析[J]. 水科学与工程技术, 2015(3): 1-5.
- [36] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真[J]. 管理评论, 2016, 28(10): 11-26.
- [37] 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.
- [38] 方明, 吴次芳, 沈孝强, 等. 杭州市生态系统服务价值演变分析[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(2): 153-158.
- [39] 陈培竹, 戴琪悦, 张桂凤. 杭嘉湖地区洪水遭遇及对嘉兴洪涝灾害影响的风险评价[C]. 中国水利学会 2005 学术年会论文集—水旱灾害风险管理, 2005.
- [40] 马晓萍, 汪建江. 东苕溪流域 2010 年“03·06”洪水研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2011, 23(2): 42-46.
- [41] XU X, YANG G, TAN Y, et al. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020 [J]. Science of the Total Environment, 2016, s554-555: 7-16.