基于生态足迹模型的中国渔业资源可持续性及影响因素研究

李宗恒，韦有周

（上海海洋大学经济管理学院 上海 201306）

摘要：我国水产品需求量日益增长，一味扩大产量势必会超出自然承载极限。为明确我国渔业资源可持续发展状况，构建渔业生态足迹模型，文章使用2003—2023年数据测度全国整体水域渔业生态足迹与渔业生态承载力，并建立包含人口、经济、渔业生产、技术4个维度的变量体系，使用岭回归进行影响因素分析，以偏最小二乘法进行稳健性检验，回归结果吻合度高且具有显著性。研究表明，我国人均渔业足迹有不断扩大趋势，人均渔业生态承载力处于低位且依然有下行压力，渔业资源压力严峻。经济因素、人口因素在不同程度上增加渔业生态足迹的同时负向影响渔业生态承载力；渔业生产因素对渔业生态足迹具有正向影响，对渔业生态承载力的影响可能为负向；技术因素显示生态保护技术与废水治理投资均有助于缓解渔业资源压力。建议转变渔业经济模式发展生态渔业、优化产业结构、大力推广生态保护技术、鼓励技术创新、倡导绿色消费理念、完善渔业资源管理相关法规，以促进我国渔业可持续发展。

关键词：生态足迹；渔业资源可持续性；渔业生态足迹；渔业生态承载力；岭回归；偏最小二乘

中图分类号：F326.4；F224；P7 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2025）09-0142-13

Research on the Sustainability of China’s Fishery Resources and Its Influencing Factors Based on the Ecological Footprint Model

LI Zongheng，WEI Youzhou

（College of Economics and Management，Shanghai Ocean University，Shanghai 201306，China）

Abstract：China’s demand for aquatic products is steadily increasing，however，unchecked expansion of production will inevitably exceed natural carrying capacity．This study constructs a fishery ecological footprint model and utilizes data from 2003 to 2023 to assess the sustainability of China’s fishery resources by re-evaluating the overall fishery ecological footprint and ecological carrying capacity of China’s waters．A variable framework encompassiong four dimensions—population，economy，fishery production，and technology，was established．Ridge regression was applied for factor analysis，with partial least squares（PLS）employed for robustness testing．The results show high goodness-of-fit and statistical significance．The study finds that China’s per capita fishery ecological footprint has

收稿日期：2025-01-14；**修订日期：**2025-08-06

基金项目：农业农村部2024年全球重要鱼种资源监测评估项目．

作者简介：李宗恒，硕士研究生，研究方向为海洋经济

通信作者：韦有周，副教授，博士，研究方向为海洋经济与国际经济

been continuously expanding，while per capita fishery ecological carrying capacity remains low and faces downward pressure，indicating severe fishery resource stress．Economic and population factors，to varying degrees，increase the fishery ecological footprint while negatively impacting fishery ecological carrying capacity．Fishery production factors have a positive effect on the fishery ecological footprint，and their impact on ecological carrying capacity appears to be negative．Conversely，technology factors indicate that ecological protection technologies and wastewater treatment investments help alleviate the pressure on fishery resources．The study suggests transitioning to an ecological fishery development model，optimizing the industrial structure，promoting ecological protection technologiesand innovation，advocating for green consumption，and improving fishery resource management regulations to achieve sustainable development in China’s fishery sector.

Keywords：Ecological footprint，Sustainability of fishery resources，Fishery ecological footprint，Fishery ecological carrying capacity，Ridge regression，Partial least squares

0　引言

目前我国水产品产量日益增长，近海渔业资源的开发利用远超其再生能力[1]，水产养殖中饲料残余物、化学农药、抗生素等对渔业水域环境造成了不同程度的污染和破坏[2]。这些不利因素已影响到我国渔业的可持续发展前景。渔业资源的可持续利用关乎民生和就业与国家粮食安全，所以对我国整体渔业资源可持续状况进行实证量化分析极具紧迫性与现实意义。

在此背景下，本文提出科学问题：我国渔业资源的整体可持续状况如何，以及哪些因素影响渔业资源的可持续性。为回答上述实际问题，本文构建渔业生态足迹模型，评估我国人均渔业资源需求与供给情况，并从人口、经济、渔业生产和技术 4 个方面进行影响因素分析，从而在结合实证结果与现实情况的基础上揭示缓解渔业资源紧张问题的可行政策方向。

1　文献综述

学术界关于自然资源可持续性的量化方法日益丰富完善，其中生态足迹法将人类对自然资源的需求和废物排放转换为统一的生物生产性土地面积单位，以此衡量人类活动对地球生态系统的压力，实现了对资源可持续性的测度[3]。生态足迹法由于具有直观性、多层次适用性、综合评价性等优势，现在被广泛使用且在不断完善[4-5]。也正因为该模型的优越性，国内外有大量学者将生态足迹模型应用到各种层次的分析中，从全球、地区、国家、城市、家庭甚至个人层面来进行生态评估，判断不同维度下资源的可持续状况[6-11]。简言之，生态足迹模型中的足迹部分反映的是人类对自然资源的需求情况，而生态足迹模型中的承载力部分是指一个特定区域内生态系统的承载能力，即在不危害生态系统的前提下，一个地区能为人类经济活动提供的最大资源消费量和废物吸纳率[12]。生态承载力会随着人类活动的变化、技术进步以及自然环境的变化而变化[13]，所以对区域内生态承载力进行动态量化，对推动经济社会的可持续发展具有重要意义[14]。

渔业资源具有共享性和波动性等特性，而资源的有限性与需求量增加的矛盾、资源的共享性、资源产权的虚置、资源的无偿使用以及资源的负外部性是渔业资源衰退的主要原因[15]。结合渔业资源管理理论，构建渔业生态足迹模型可更为准确地量化渔业可持续发展状况，渔业生态足迹模型不仅是资源可持续性的诊断工具，还可以作为治理框架的构建基础。通过量化资源特性与衰退机制，可引导政策从“末端管控”转向“系统治理”，推动渔业从“掠夺式开发”向“可持续利用”转型。

渔业生态足迹模型以渔业足迹部分度量区域内居民对渔业资源的需求，以渔业生态承载力部分衡量区域内环境可提供的渔业资源供给，二者差值也可确定渔业资源赤字。国外的相关研究开展较早，

Berg 等[16]首次使用生态足迹法对湖泊中不同养殖模式下生态足迹的差异进行分析。后续有学者发现在影响国家渔业足迹和海产品消费的社会结构性驱动因素中，人口和富裕程度是影响国家渔业足迹和海产品消费的核心驱动因素[17]。国内渔业生态足迹模型的相关文献不多，以渔业生态足迹的测度与评价为主。一些学者以渔业足迹为基础，构建可持续发展评价体系对渔业资源的可持续利用进行测度研究和综合评价[18-20]。还有学者利用渔业足迹模型对不同地区的实际状况展开分析，通过构建系统动力学模型分别对江苏近海海域与防城港的渔业生态足迹进行测度，为区域可持续发展决策提供参考与建议[21-22]。也有极少数学者研究了渔业足迹的时空演变并尝试探讨其影响因素，通过构建三维生态足迹模型，并通过偏最小二乘回归分析海洋渔业足迹变化的影响因素[23]。渔业生态足迹模型包括足迹与承载力两部分，即同时反映渔业资源需求与供给状况，对渔业生态承载力进行测算时，渔业生态承载力表征为海洋与内陆淡水生态系统的渔业资源生态容量，即区域内所提供的渔业生产性水域面积。但目前极少有研究针对渔业生态承载力进行影响因素分析。

上述文献以渔业生态足迹模型为基础，分析其研究区域内的渔业资源压力，但绝大多数止步于此，无法进一步明确渔业资源压力形成的原因。仅有极少量文献尝试探索海洋渔业足迹的影响因素，但仍存在 3 个突出问题：①只单独测算海洋渔业足迹，且渔业足迹相关文献分析范围多为小区域性，极少有国家维度数据，涵盖内陆水域与海洋渔业足迹的综合研究；②大多数研究只采用偏最小二乘回归，此类实证结论缺乏稳健性，且先前文献中缺乏回归系数显著性检验；③目前极少有对渔业生态承载力影响因素的实证分析，承载力分析是生态足迹模型中极为关键的一部分，不应顾此失彼。

本文可能的创新之处在于：①研究视角上更为宏观，以构建渔业生态足迹模型为基础，明晰我国海洋与内陆整体性渔业资源现状；②研究方法上更为稳健，对渔业生态足迹与承载力的影响因素同时使用岭回归与偏最小二乘回归进行实证分析，使结果交叉验证，提供更具稳健性的结果与显著性分析；③研究内容上更为全面，在相关文献的基础上更加准确地构建变量体系，系统分析渔业生态足迹与承载力的影响因素，进一步揭示渔业资源紧张的原因，并提出应对之策。

2 研究方法与数据来源

2.1 渔业生态足迹模型

构建渔业生态足迹模型时，应对生态足迹模型的基本假设进一步细化，以保证更加准确地核算三维渔业足迹与渔业生态承载力，需满足如下 6 项假设：①区域内渔业资源消费总量可获得；②生物生产能力不同的水域可折算为统一单位——全球公顷；③由相互之间排斥的渔业资源供应水域和废弃物消纳土地相加可以获得以全球公顷计的国家渔业资源总需求；④可以直接比较合计的渔业资源总量与自然的供应量；⑤渔业水域面积的供应可以被渔业水域面积的需求超过；⑥以国内标准计算进口水产品的生态足迹。

首先计算水产品消费所需要的渔业水域面积 S，进而折算为渔业生态足迹 EF_f。

公式如下：

$$S=\frac{C}{Y}=\frac{(P+I-E)}{Y} \tag{1}$$

$$\mathrm{EF}_f=S\times\frac{f}{N} \tag{2}$$

式中：C 为水产品消费总量；Y 为渔业水域初级生产力；P 为可用于消费的当地水产品生产总量；I 和 E 为水产品的进出口量；f 为渔业水域均衡因子；N 为人口数；渔业生态足迹的单位是人均全球公顷。

渔业生态承载力 BC_f 折算公式为：

$$\mathrm{BC}_f=S'\times f\times f'\frac{(1-12\%)}{N} \tag{3}$$

参考三维生态足迹的算法[24]，继续将式（2）和式（3）中 EF_f 与 BC_f 的计算结果代入下式中进行算法优化：

$$\mathrm{EF}_{f\mathrm{size},i}=\min\left\{\mathrm{EF}_{fi},\mathrm{BC}_{fi}\right\} \tag{4}$$

$$\mathrm{EF}_{f\mathrm{depth},i}=1+\max\{\mathrm{EF}_{fi}-\mathrm{BC}_{fi},0\}/\mathrm{BC}_{fi} \tag{5}$$

式中：S' 为渔业水域供给；f' 为渔业水域产量因子；减 12% 为生物多样性保留的面积；渔业生态承载力的单位是人均全球公顷。

最后将式（4）和式（5）中结果相乘，即为三维渔业足迹：

$$EF_{f3D} = EF_{fsize} \times EF_{fdepth} \quad (6)$$

EF_{fsize} 即渔业生态足迹广度，代表了人类对自然渔业资本流量的占用大小；EF_{fdepth} 即渔业生态足迹深度，反映了自然渔业资本存量消耗情况。当 EF_{fdepth} 等于 1 时，意味着当年的渔业资源可再生流量能够满足区域内人们的资源消耗；当 EF_{fsize} 大于 1 时，意味着需要更多的渔业资源流量才能满足区域内人们的资源消耗，且处于渔业生态赤字状态。对渔业生态赤字的国家而言，人均渔业足迹广度实际上还反映了渔业可再生资源的丰裕度，可以作为衡量该国可再生资源禀赋的重要指标，人均渔业足迹深度还能反映存量资本累积负债对代际公平性的负面影响。

2.2　岭回归与偏最小二乘法

岭回归（Ridge Regression）是对最小二乘法的改进，可处理多重共线性问题并且结果具有稳定性和一致性。偏最小二乘回归（Partial Least Squares Regression，PLS）是处理多元统计数据的分析方法。当各变量间存在多重共线性时，PLS 相较于普通最小二乘法（OLS）更为有效。此外，当样本个数少于变量个数时，OLS 无法进行，但 PLS 仍有效。

在以往的相关研究中，针对生态足迹的相关影响因素分析都会面临一个共同的难题，即变量间难以避免的多重共线性，这也是先前学者皆采用 PLS 的原因。相较而言，PLS 对异常数据敏感性较高，而岭回归在面对数据缺失与异常值问题时仍具有较强的模型稳定性，本文在稳健性检验中选用 PLS，回归结果中岭回归 R^2 水平均与 PLS 持平或略高，故在后续分析中本文以岭回归结果为主，参考 PLS 结果进行交叉验证，从而得到更为稳健的结论。

2.3　变量及数据说明

本文参考 STIRPAT 模型[25]，通过人口、财富、技术等因素来解释人类活动对环境的影响，其基本形式为：

$$I_i = a \cdot P_i^b \cdot A_i^b \cdot T_i^d \cdot e_i \quad (7)$$

式中：a 为模型系数，I、P、A、T 分别为环境压力、人口规模、富裕程度、技术水平，e 为模型误差项。故本文从人口、经济、技术和渔业生产因素 4 个方面选择变量，分析我国居民对渔业资源的需求如何影响自然资源状况，具体指标的选取依据如下。

人口的增长加之中国城镇化率的不断提高，使城市土地快速扩张，产生了巨大的生态环境压力[26]。渔业资源的消耗量随着人口与城市化率的提高而增长，故选取全国年末总人口与人口城镇化率为相关指标。

技术创新、产业结构升级对减少环境污染具有积极作用[27]。在我国，环境污染情况的变动受产业结构即第二产业比重变化的影响较大[28]；第一产业与农林牧渔业直接相关，这些农业相关领域极易受污染影响；第三产业发展对生态足迹的影响要小于第一、第二产业[29]。为避免不必要的多重共线性，本文在回归模型中不再添加第三产业产值，在产业结构指标中只选取第一、第二产业产值。

水产养殖技术的普及能够在有限自然资源的约束下尽可能多地生产满足人们需求的水产品，环境保护技术的发展对生态环境的恢复与治理具有重要意义，也是资源可持续利用的坚实保障。本文选取水产技术推广站数量、环境保护专利数量、废水治理完成投资额作为渔业生产技术与环保技术的对应变量。

交通基础设施对我国经济增长具有显著的促进作用，不同地理位置和交通基础设施条件是我国区域经济发展存在较大差异的重要原因[30]。交通运输对区域产业结构高级化和区域产业空间有序化有促进作用。交通路网的完善对于不同技术与要素的跨区域配置有重要作用[31]。交通路网的完善对渔业生产的要素运输与水产品消费的普及具有重要意义，故选取高速公路里程作为相关指标。

在我国经济发展与城镇化率不断提高的过程中，居民的食物消费与膳食营养状况也在不断变化。我国城镇居民和农村居民的营养级从 1995 年到 2012 年均呈现增长的态势，但城乡差异仍然很

大[32]。营养级的提高意味着我国居民消费了更多的肉蛋奶及水产品等高营养级食物，这会导致能量在食物链传递过程中被大量浪费掉。此外，城镇和农村居民的动物类食品中水产品均产生了较大的碳足迹[33]。由此，更应重视我国渔业水域的资源供给问题，GDP 与人均可支配收入的提高是我国居民普及水产品消费的基础。另外，参考环境库兹涅茨曲线的规律[34]，添加 GDP 的二次项以衡量经济增长后期经济与资源环境的关系。

综上所述，具体变量的选择如表 1 所示。

表 1　回归变量选择

Table 1　Selection of regression variables

指标	人口因素			经济因素					技术因素		渔业生产因素
渔业生态足迹	全国年末总人口	人口城镇化率	高速公路里程数	第一产业产值	第二产业产值	人均可支配收入	GDP		治理废水项目完成投资	水产品技术推广站数量	水产品总产量
渔业生态承载力	全国年末总人口	人口城镇化率	GDP	GDP 的二次项	高速公路里程	第一产业产值	第二产业产值			环境保护专利数	水产技术推广站数量
数据来源	国家统计局									incoPat 专利数据库	《中国渔业统计年鉴》

本文计算渔业足迹与渔业生态承载力所需的水产品消费量的方法为：水产品总产量减水产品进出口量净值。产量因子参考全球足迹网络的世界跨期产量因子中中国的有关数据选取，其中海洋捕捞与养殖渔业产量因子为 1.27，远洋渔业产量相对较小不作特殊处理，产量因子选取同上；淡水捕捞与养殖渔业产量因子为 1。均衡因子经查阅国内相关文献后发现各省市差别较大，综合考量后，为反映我国整体渔业状况，参考足迹网络中水域均衡因子取值 0.36，初级生产力每年 29kg/hm^2。内陆水产养殖面积来自《中国渔业统计年鉴》，在计算渔业生态承载力时所用水域面积为内陆水产养殖面积与中国管辖海域面积之和，取 300 万 km^2。环境保护专利数来自 incoPat 专利数据库。其余数据来自国家统计局。极个别缺失值采用临近年份均值替代。另外，在回归分析前，首先进行多重共线性检验。方差膨胀系数（VIF）显示足迹与承载力两部分变量间均存在严重多重共线性，足迹部分 MeanVIF 值为 1 189.88；承载力部分 MeanVIF 值为 2 458.05，此情况适合选用岭回归与 PLS。因考虑数据可获得性，本文所用研究数据不包含中国台湾、中国香港特别行政区与中国澳门特别行政区的渔业数据。

3　实证研究

本文使用 R 语言编程完成 PLS，岭回归通过 SPSSPRO 软件完成。回归前对数据进行 z-score 标准化处理，结果均为标准化系数，考虑到原始数据绝对值差异极大，对回归系数进行逆标准化还原反而不利于分析解读，故不做逆标准化处理。另外，一般认为 PLS 结果中的变量 VIP 值（累积投影重要性）接近于 1，则该变量在解释 y 时较为重要，从侧面印证本文变量选取的准确性与合理性。

3.1　实证分析

整理中国近 20 年整体水域的相关渔业数据，代入上述渔业生态足迹模型公式中计算得到中国人均三维渔业足迹与人均渔业生态承载力（扣除 12% 的生态保护容量），结果如图 1 所示。

我国人均渔业足迹在不断增长，人均渔业生态承载力虽相对稳定但仍面临下行压力。目前人均渔业资源消耗情况远大于人均渔业承载力水平，二者

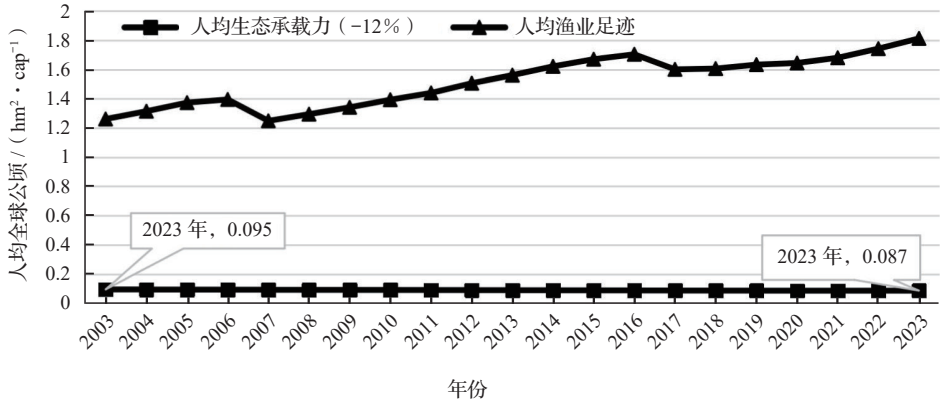

图 1　中国人均渔业承载力与人均三维渔业足迹

Fig.1　Per capita fishery carrying capacity and per capita three-dimensional fishery footprint in China

差值即渔业生态赤字在不断扩大。人均渔业生态承载力的下降意味着在不对环境造成不可逆影响的前提下，我国水域所能提供的渔业资源量在减少的，而伴随着经济发展与人口增长，我国的渔业资源需求在不断上升，且已经远远超出自然承载能力，这意味着目前我国渔业资源存在过度开发的问题，人均渔业资源匮乏。长此以往，不仅渔业可持续发展难以实现，还会对自然资源的自我恢复能力造成不可逆伤害。

3.1.1　人均渔业足迹影响因素

人均渔业足迹回归的具体变量如表 2 所示。

表 2　人均渔业生态足迹回归变量

Table 2　Regression variables for per capita fishery ecological footprint

*x*1	*x*2	*x*3	*x*4	*x*5	*x*6	*x*7	*x*8	*x*9	*x*10	*y*
高速公路里程 / 万 km	年末总人口 / 万人	城镇居民人均可支配收入 / 元	水产品总产量 / 万 t	第一产业增加值 / 亿元	第二产业增加值 / 亿元	人口城镇化率	国民总收入 / 亿元	水产技术推广站数量 / 个	治理废水项目完成投资 / 万元	人均渔业足迹 /（$hm^2 \cdot cap^{-1}$）

岭回归中岭参数 *K* 根据方差扩大因子法，并参考岭迹图综合考虑选取 *K* 值为 0.178。

人均渔业生态足迹岭回归结果如表 3 所示。

表 3　人均渔业生态足迹岭回归结果

Table 3　Ridge regression results of per capita fishery ecological footprint

K=0.178	非标准化系数		标准化系数	*t* 值	*P* 值	R^2	调整 R^2	*F* 值
	B	标准误	Beta					
常数	0	0.058	−	0	1.000			
*x*1	0.106	0.014	0.106	7.607	0.000***			
*x*2	0.049	0.042	0.049	1.171	0.269	0.964	0.928	26.879（0.000***）
*x*3	0.094	0.019	0.094	4.999	0.001***			
*x*4	0.356	0.052	0.356	6.89	0.000***			

续表 3

K=0.178	非标准化系数		标准化系数	*t* 值	*P* 值	R^2	调整 R^2	*F* 值
	B	标准误	Beta					
*x*5	0.1	0.03	0.1	3.356	0.007***	0.964	0.928	26.879（0.000***）
*x*6	0.072	0.029	0.072	2.519	0.030**			
*x*7	0.069	0.021	0.069	3.197	0.010***			
*x*8	0.082	0.018	0.082	4.682	0.001***			
*x*9	0.134	0.055	0.134	2.45	0.034**			
*x*10	−0.123	0.063	−0.123	−1.94	0.081*			
因变量：*y*								

注：***、**、* 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平。

3.1.2 人均渔业生态承载力影响因素

人均渔业生态承载力回归变量如表 4 所示。

表 4 人均渔业生态承载力回归变量

Table 4 Regression variables for per capita fishery carrying capacity

*x*1	*x*2	*x*3	*x*4	*x*5	*x*6	*x*7	*x*8	*x*9	*bc*−12%
国民总收入 / 亿元	GDP 的二次项	高速公路里程 / 万 km	年末总人口 / 万人	人口城镇化率	第一产业产值 / 亿元	第二产业产值 / 亿元	水产技术推广站数量 / 个	环境保护专利数 / 个	渔业生态承载力 /（$hm^2 \cdot cap^{-1}$）

其中岭参数 *K* 根据方差扩大因子法，并参考岭迹图综合考虑，选取 *K* 值为 0.114。人均渔业生态承载力岭回归结果如表 5 所示。

表 5 人均渔业生态承载力岭回归结果

Table 5 Ridge regression results of per capita fishery ecological carrying capacity

K=0.114	非标准化系数		标准化系数	*t* 值	*P* 值	R^2	调整 R^2	*F* 值
	B	标准误	Beta					
常数	0.96	0.033	−	28.86	0.000***	0.99	0.98	117.715（0.000***）
*x*1	−0.136	0.009	−0.128	−14.957	0.000***			
*x*2	0	0.026	0	0.01	0.992			
*x*3	−0.176	0.012	−0.166	−14.207	0.000***			
*x*4	−0.295	0.024	−0.3	−12.059	0.000***			
*x*5	−0.235	0.015	−0.225	−15.539	0.000***			
*x*6	−0.125	0.018	−0.115	−6.935	0.000***			
*x*7	−0.141	0.019	−0.13	−7.453	0.000***			
*x*8	−0.025	0.037	−0.022	−0.659	0.523			
*x*9	0.095	0.035	0.093	2.711	0.020**			
因变量：*y*								

注：***、**、* 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平。

3.2　稳健性检验

使用 PLS 再次回归，参考其结果进行稳健性分析。足迹部分为了平衡模型的解释能力与过拟合风险，最终限定最多选取两个主成分进行回归，所保留的主成分能够解释数据中的大部分方差。同理，承载力部分最大主成分数选择为 2。

足迹部分的结果如表 6 至表 8 所示，承载力部分的结果如表 9 至表 11 所示。

表 6　足迹部分最大主成分选择

Table 6　Selection of the principal component with the maximum variance for the footprint section

%

变量 / 最大主成分数	第一主成分	第二主成分
X	87.79	95.99
Y	88.62	95.13

表 7　足迹部分 PLS 结果

Table 7　Partial least squares regression results for the footprint section

变量	*B*	标准差	Df	*t* 值	Pr（|t|）	显著性标注
*x*1	0.122	0.010 063	20	12.109 4	0.000 0	***
*x*2	0.125	0.019 950	20	6.264 4	0.000 0	***
*x*3	0.103	0.012 176	20	8.473 8	0.000 0	***
*x*4	0.27	0.057 600	20	4.695 0	0.000 0	***
*x*5	0.114	0.012 660	20	8.969 9	0.000 0	***
*x*6	0.096	0.016 915	20	5.663 1	0.000 0	***
*x*7	0.115	0.013 105	20	8.752 6	0.000 0	***
*x*8	0.091	0.013 213	20	6.885 6	0.000 0	***
*x*9	0.207	0.052 566	20	3.937 2	0.000 0	***
*x*10	−0.066	0.066 681	20	−0.983 6	0.337	***

注：***、**、* 分别代表 1%、5%、10%的显著性水平。

表 8　足迹部分自变量 VIP（累积投影重要性）

Table 8　VIP (Cumulative variable importance) for independent variables in the footprint section

变量	因子 1	因子 2
*x*1	1.072	1.035
*x*2	1.054	1.018
*x*3	1.058	1.021
*x*4	1.131	1.167
*x*5	1.062	1.025
*x*6	1.048	1.013

续表 8

变量	因子 1	因子 2
*x*7	1.061	1.024
*x*8	1.048	1.014
*x*9	0.429	0.819
*x*10	0.841	0.815

表 9　承载力部分最大主成分选择

Table 9　Selection of the principal component with the maximum variance for carrying capacity

%

变量 / 最大主成分数	第一主成分	第二主成分
X	90.0	98.5
Y	92.1	98.1

表 10　承载力部分偏最小二乘回归结果

Table 10　Partial least squares regression results for the carrying capacity section

变量	*B*	标准差	Df	*t* 值	Pr（|t|）	显著性标注
*x*1	−0.137	0.006	20	−21.22	0.000	***
*x*2	−0.046	0.025	20	−1.82	0.083	
*x*3	−0.172	0.010	20	−16.98	0.000	***
*x*4	−0.239	0.034	20	−7.02	0.000	***
*x*5	−0.200	0.020	20	−10.07	0.000	***
*x*6	−0.150	0.007	20	−21.75	0.000	***
*x*7	−0.147	0.008	20	−17.54	0.000	***
*x*8	−0.136	0.025	20	−5.35	0.000	***
*x*9	0.028	0.042	20	0.65	0.522	***

注：***、**、* 分别代表 1%、5%、10%的显著性水平。

表 11　承载力部分自变量 VIP（累积投影重要性）

Table 11　VIP (Cumulative variable importance) for independent variables in the carrying capacity section

变量	因子 1	因子 2
*x*1	1.064	1.031
*x*2	0.978	0.966
*x*3	1.082	1.055
*x*4	1.101	1.102
*x*5	1.095	1.076
*x*6	1.067	1.036
*x*7	1.068	1.036
*x*8	0.533	0.733
*x*9	0.875	0.916

3.3 结果说明

3.3.1 足迹部分

结合岭回归与 PLS 的结果，两模型吻合度极高，回归系数正负号未出现偏差。人均渔业足迹回归中 $x1$、$x3$、$x4$、$x5$、$x6$、$x7$、$x8$、$x9$ 均对 y 产生正向影响且都在 1%的水平下显著。而岭回归 $x2$ 的正向结果并不显著，参考 PLS 的结果，认为变量 $x2$ 对渔业足迹可能有一定的正向影响，而岭回归结果显示 $x10$ 对人均渔业足迹有显著的负向作用。系数具体解读方式为，相应自变量每上升一个标准差，人均渔业生态足迹会有对应系数的标准差的上升或下降。例如，水产品产量每增加 1 个标准差，人均渔业足迹增加 0.356 个标准差，可见若只盲目追求水产品产量的增长对生态资源造成的压力是巨大的。

人口增长导致了人均渔业生态足迹增长，增长的人口意味着更大的资源消耗量。人口城镇化率的提高意味着城市居民数量的增加，相较于农村地区而言，其采购和消费水产品的便利程度也更高，同时也有更高的经济能力消费由水产品加工制成的高附加值产品，从而对人均渔业足迹产生正向作用。

经济因素导致了渔业足迹的增长。就回归结果而言，高速公路里程数、人均可支配收入、第一产业产值、第二产业产值、GDP 均对渔业足迹具有正向影响，目前第一产业对渔业足迹的正向影响可能略大于第二产业，本质上可能是由于其直接参与渔业资源消耗，而第二产业的作用更间接且分散，需通过产业链传导机制逐步显现。这一结论也为“从生产端源头治理”提供了实证依据。

渔业生产因素层面，水产品产量是模型中对渔业足迹影响最大的因素。我国居民对水产品日益增长的需求需要不断增长的水产品产量来满足，但也正是在这个过程中过度的需求与生产造成了巨大的环境资源压力。

技术因素结果显示，渔业生态足迹受治理废水项目完成投资额的负向影响，水产品技术推广站数量对渔业生态足迹具有正向作用。治理废水投资的增长对恢复水域生产力和促进渔业可持续发展具有极为重要的意义，这也印证了国家对于资源生态投资的积极意义。由于水产品技术推广站数量的普及，更为前沿的生产技术在全国范围内传播，使水产品产量不断增长，更大的产量又会引起更多的需求，从而对渔业足迹产生影响。目前该变量回归系数为正，可能表明技术推广伴随养殖规模扩大，短期内反而增加资源压力；技术推广中生态友好型技术的应用仍需进一步加强。

3.3.2 承载力部分

人均渔业生态承载力方面，$x1$、$x3$、$x4$、$x5$、$x6$、$x7$、$x8$ 均对 y 产生负向作用，除 $x8$ 外其余变量回归结果均在 1%的水平下显著，对于 $x2$ 参考 PLS 的结果，认为其对人均生态承载力有负向影响。变量 $x9$ 对人均生态承载力具有显著的正向作用，即环境保护专利数所代表的环境保护技术对人均渔业足迹有显著的正向影响。系数具体解读方式为，相应自变量每上升一个标准差，人均渔业生态承载力会有对应系数的标准差的上升或下降。例如，每增加 1 个标准差城镇化率，承载力下降 0.225 个标准差，该结果提示应推动生态型城市建设，减少对生产性水域的侵占。

人口因素中，总人口数与人口城镇化率对渔业生态承载力均具有负向影响。人口的不断增长意味着需要为新增人口匹配相应的生态面积，人口城镇化率的提高往往伴随着城区的扩张，这些都可能占据原本的渔业生态面积，从而使人均资源量更加紧张，对人均渔业生态承载力产生负向作用。

经济因素中，GDP、高速公路里程数、第一和第二产业产值均对渔业生态承载力产生负向影响，第二产业对渔业生态承载力的负向影响大于第一产业，并且差异显著。对于 GDP 的二次项，参考环境库兹涅茨曲线的规律，在经济发展的初期对环境的污染和影响会首先加剧，然后随着经济进一步的发展，最终减轻对环境的不利影响。在两种回归模型中，经济变量的系数估计值均未呈现统计显著性。这表明，经济增长与资源环境之间的交互作用可能较为复杂且非线性，长期经济发展对环境产生的净效应较难判定。

渔业生产因素中，水产技术推广站的数量所反映的是水产技术的普及程度对渔业生态承载力的影响。一方面，先进水产生产技术的普及提高了单位

面积的产量，使我国有限的渔业资源生态面积尽量满足不断扩大的渔业资源需求，进而提高了渔业生态承载力；另一方面，随着先进技术与药品的普及，过度捕捞、废弃物污染、病害传播、饲料需求加剧的资源消耗，最终使渔业生产技术对渔业生态承载力产生负向影响。

技术因素中，环境保护专利数对渔业生态承载力具有正向影响。环境保护技术的发展与运用可能适用于生态系统的修复与环境的预防性保护。未来在技术领域内随着技术研发、政策支持、科技推广与社会应用的不断深入，预计相关技术因素对渔业生态承载力的改善会有更加显著的促进作用。

4　结论

由我国人均渔业生态承载力与人均渔业生态足迹的差值可知，如今渔业生态赤字仍有不断扩大趋势。渔业足迹不断扩大，且渔业生态承载力处于相对低位且仍有下行趋势，故我国渔业生态资源问题较为严峻，长此以往我国渔业资源将不可持续。在渔业资源可持续性的影响因素层面，经济因素、人口因素在不同程度上增加渔业生态足迹的同时，也对渔业生态承载力产生负向影响；渔业生产因素对渔业生态足迹具有正向影响；而生态保护技术与治理废水的投资有助于缓解渔业资源压力。

人口增长、第一和第二产业的扩张，以及城镇化率的不断提高，共同加剧了对渔业资源的需求，同时也降低了渔业生态承载力，长此以往我国的渔业资源终将难以维系。提升渔业生态承载力的最有效方式可能是不断扩大水产品生产面积，但这几乎无法实现。从实证结果出发，污水治理的不断投入显示出了显著的资源环境改善作用，生态保护技术也对渔业生态承载力具有显著的正向影响，生态保护技术的发展可能对改善水质等环境基础性问题有较大帮助。另外，未来可能会有更加先进的生态修复技术出现，有助于进一步恢复生态系统功能。技术的产生、发展再到应用需要经历长期的过程，面对目前的资源压力情况，技术因素发挥立竿见影的作用或许较为困难，但重视环境保护技术，鼓励创新，扩大投入是有必要的，所以发展生态保护技术也是缓解渔业资源压力的一条较为可行的道路。只有协同发展环境保护技术与绿色渔业生产技术，才能在满足我国居民不断扩大的渔业资源需求的同时，兼顾生态资源保护。

5　政策建议

针对我国目前渔业资源的现状，相对可行的对策如下。

（1）优化渔业产业结构。要从传统的捕捞和加工型经济模式转变为综合开发利用的现代产业化模式，推动渔业向生态渔业、休闲渔业等方向多元化发展。在海洋经济高质量发展的背景下，大力发展海洋第二、第三产业的同时，重视其对海洋生态环境的影响。

（2）大力推广生态保护技术并鼓励技术创新。鼓励国家和地方水产科研机构与推广机构普及生态友好型的养殖模式与技术，减少对环境的污染与破坏。鼓励渔业科研，研发、推广环境友好型的渔药、生物饲料和环保材料。建设渔业科技示范基地，通过技术培训和示范推广，提升渔民的科技素质和生产水平。同时，保持或扩大废水治理等环境保护领域的资金投入。

（3）倡导绿色消费理念，摒弃“过度消费、铺张浪费”。政府和相关组织可以开展一系列宣传活动，如绿色消费周、环保讲座等，普及绿色消费知识，引导社会公众形成绿色消费习惯。

（4）完善渔业资源管理相关法规。建立健全渔业资源的监测、评估和管理体系。视情况制定严格且科学的捕捞配额和禁渔期制度，控制捕捞强度，保护渔业资源。加大渔业执法力度，打击非法捕捞和破坏生态的行为。鼓励公众监督，提升渔业管理的透明度和公众参与度。通过法律法规的完善和执行，保障渔业资源的可持续发展。

参考文献（References）：

[1] 韩杨. 1949 年以来中国海洋渔业资源治理与政策调整[J]. 中国农村经济，2018(9)：14-28.
HAN Yang. Governance and policy adjustments of China's marine fishery resources since 1949[J]. China Rural Economy，2018(9)：14-28.

[2] 王善武，王晓. 水产养殖对水域环境的影响及其解决措施[J]. 农业工程技术，2020，40(26)：83.
WANG Shanwu，WANG Xiao. The impact of aquaculture on water environment and its solutions[J]. Agricultural Engineering Technology，2020，40(26)：83.

[3] REES W E. Revisiting carrying capacity：area-based indicators of sustainability[J]. Population and Environment，1996，17(3)：195-215.

[4] 刘淼，胡远满，李月辉，等. 生态足迹方法及研究进展[J]. 生态学杂志，2006(3)：334-339.
LIU Miao，HU Yuanman，LI Yuehui，et al. Ecological footprint method and research progress[J]. Journal of Ecology，2006(3)：334-339.

[5] 周涛，王云鹏，龚健周，等. 生态足迹的模型修正与方法改进[J]. 生态学报，2015，35(14)：4592-4603.
ZHOU Tao，WANG Yunpeng，GONG Jianzhou，et al. Model modification and methodological improvements of ecological footprint[J]. Acta Ecologica Sinica，2015，35(14)：4592-4603.

[6] EMMANUEL O N B，FONCHAMNYO D C，THIERRY M A，et al. Ecological footprint in a global perspective：the role of domestic investment，FDI，democracy and institutional quality[J]. Journal of Global Responsibility，2023，14(4)：431-451.

[7] KOUTON J，TUO S T，GUILSOU E W. Thresholds to sustainability：globalization's impact on the institutional quality-ecological footprint nexus in Africa[J]. Science of the Total Environment，2024，954：176205.

[8] 吴锦顺，吴路遥. 金砖五国生态足迹随机收敛检验：基于长记忆分式单整模型的分析[J]. 数量经济研究，2023，14(2)：99-125.
WU Jinshun，WU Luyao. Stochastic convergence test of ecological footprint in BRICS countries：analysis based on long-memory fractional integration model[J]. Quantitative Economic Research，2023，14(2)：99-125.

[9] 彭贺，杨灵芝，陈义忠，等. 特大城市集群绿色发展与生态足迹关联特征[J]. 中国环境管理，2023，15(2)：73-85.
PENG He，YANG Lingzhi，CHEN Yizhong，et al. Green development and ecological footprint correlation characteristics of Mega City clusters[J]. China Environmental Management，2023，15(2)：73-85.

[10] 郝海广，李秀彬，张惠远，等. 农牧交错区农户生态足迹及其影响因素 [J]. 自然资源学报，2016，31(1)：52-63.
HAO Haiguang，LI Xiubin，ZHANG Huiyuan，et al. Farmers' ecological footprint and its influencing factors in the agro-pastoral ecotone [J]. Journal of Natural Resources，2016，31(1)：52-63.

[11] 史博，菊春燕. 基于问卷调查的新疆某地居民个人年生态足迹测算及分析 [J]. 环境生态学，2020，2(5)：72-78.
SHI Bo，JU Chunyan. Annual ecological footprint calculation and analysis of residents in a certain area of Xinjiang based on questionnaire survey [J]. Environmental Ecology，2020，2(5)：72-78.

[12] 何爱红，王亦龙，向党，等. 基于生态足迹的宁夏回族自治区可持续发展评价 [J]. 干旱区地理，2013，36(5)：906-912.
HE Aihong，WANG Yilong，XIANG Dang，et al. Sustainable development evaluation of Ningxia Hui Autonomous Region based on ecological footprint [J]. Arid Land Geography，2013，36(5)：906-912.

[13] 翁伯琦，王义祥，黄毅斌，等. 福建省生态足迹和生态承载力的动态变化 [J]. 应用生态学报，2006(11)：2153-2157.
WENG Boqi，WANG Yixiang，HUANG Yibin，et al. Dynamic changes of ecological footprint and ecological carrying capacity in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2006(11)：2153-2157.

[14] 战明松，王梦媛，刘冲，等. 城市生态承载力量化评价方法研究进展 [J]. 应用生态学报，2024，35(10)：2925-2932.
ZHAN Mingsong，WANG Mengyuan，LIU Chong，et al. Research progress on quantitative evaluation methods of urban ecological carrying capacity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2024，35(10)：2925-2932.

[15] 陈新军，周应祺. 论渔业资源的可持续利用 [J]. 资源科学，2001(2)：70-74.
CHEN Xinjun，ZHOU Yingqi. On the sustainable utilization of fishery resources[J]. Resources Science，2001(2)：70-74.

[16] BERG H，MICHéLSEN P，TROELL M，et al. Managing aquaculture for sustainability in tropical Lake Kariba，Zimbabwe [J]. Ecological Economics，1996，18(2)：141-159.

[17] CLARK T P，LONGO S B，CLARK B，et al. Socio-structural drivers，fisheries footprints，and seafood consumption：a

comparative international study，1961—2012［J］. Journal of Rural Studies，2018，57：140-146.

［18］ 吴隆杰. 基于渔业生态足迹指数的渔业资源可持续利用测度研究［D］. 青岛：中国海洋大学，2007.
WU Longjie. Research on the measurement of sustainable utilization of fishery resources based on fishery ecological footprint index［D］. Qingdao：Ocean University of China，2007.

［19］ 宋亚洲，韩宝平，朱国平，等. 基于生态足迹的江苏省渔业资源可持续利用评价［J］. 水生态学杂志，2010，31(2)：17-22.
SONG Yazhou，HAN Baoping，ZHU Guoping，et al. Evaluation of sustainable utilization of fishery resources in Jiangsu Province based on ecological footprint［J］. Journal of Water Ecology，2010，31(2)：17-22.

［20］ 董蓓. 湖北省渔业可持续发展指标体系构建及综合评价研究［D］. 武汉：华中农业大学，2016.
DONG Bei. Research on the construction of indicator system and comprehensive evaluation of sustainable development of fishery in Hubei Province［D］. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2016.

［21］ 王子超，晁敏. 基于 Stella 的江苏近海海域生态足迹模拟分析［J］. 中国水产科学，2017，24(3)：576-586.
WANG Zichao，ZHAO Min. Ecological footprint simulation analysis of Jiangsu offshore waters based on stella［J］. Chinese Fisheries Science，2017，24(3)：576-586.

［22］ 刘蔓婷，王良明，杨长平，等. 基于 Stella 的防城港珍珠湾及其邻近海域渔业生态承载力分析［J］. 安徽农业科学，2023，51(8)：58-62.
LIU Manting，WANG Liangming，YANG Changping，et al. Analysis of fishery ecological carrying capacity of Fangchenggang Pearl Bay and its adjacent waters based on stella［J］. Anhui Agricultural Sciences，2023，51(8)：58-62.

［23］ 孔凡振. 中国海洋渔业生态足迹时空演变及驱动因素研究［D］. 舟山：浙江海洋大学，2022.
KONG Fanzhen. Spatiotemporal evolution and driving factors of marine fisheries ecological footprint in China［D］. Zhoushan：Zhejiang Ocean University，2022.

［24］ 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析：选取 11 个国家为数据源［J］. 生态学报，2015，35(11)：3766-3777.
FANG Kai. Analysis of natural capital utilization characteristics based on improved ecological footprint 3D model：using data from 11 countries［J］. Acta Ecologica Sinica，2015，35(11)：3766-3777.

［25］ 何小钢，张耀辉. 中国工业碳排放影响因素与 CKC 重组效应：基于 STIRPAT 模型的分行业动态面板数据实证研究［J］. 中国工业经济，2012(1)：26-35.
HE Xiaogang，ZHANG Yaohui. Factors influencing industrial carbon emissions in China and the CKC restructuring effect：an empirical study based on STIRPAT model with sectoral dynamic panel data［J］. China Industrial Economics，2012(1)：26-35.

［26］ 郭娅琦. 城市化进程对城市生态环境的影响研究［D］. 长沙：湖南大学，2007.
GUO Yaqi. Study on the impact of urbanization process on urban ecological environment［D］. Changsha：Hunan University，2007.

［27］ 严太华，朱梦成. 技术创新、产业结构升级对环境污染的影响［J］. 重庆大学学报 (社会科学版)，2023，29(5)：70-84.
YAN Taihua，ZHU Mengcheng. Impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution［J］. Journal of Chongqing University(Social Sciences Edition)，2023，29(5)：70-84.

［28］ 韩楠，于维洋. 中国产业结构对环境污染影响的计量分析［J］. 统计与决策，2015(20)：133-136.
HAN Nan，YU Weiyang. Quantitative analysis of the impact of China’s industrial structure on environmental pollution［J］. Statistics and Decision，2015(20)：133-136.

［29］ 胡雪萍，李丹青. 城镇化进程中生态足迹的动态变化及影响因素分析：以安徽省为例［J］. 长江流域资源与环境，2016，25(2)：300-306.
HU Xueping，LI Danqing. Dynamic change and influencing factors of ecological footprint in the urbanization process：a case study of Anhui Province［J］. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2016，25(2)：300-306.

［30］ 刘生龙，胡鞍钢. 交通基础设施与经济增长：中国区域差距的视角［J］. 中国工业经济，2010(4)：14-23.
LIU Shenglong，HU Angang. Transport infrastructure and economic growth：a perspective on regional disparities in China［J］. China Industrial Economics，2010(4)：14-23.

［31］ 董大朋. 交通运输对区域经济发展作用与调控［D］. 长春：东北师范大学，2010.
DONG Dapeng. The role and regulation of transportation in regional economic development［D］. Changchun：Northeast Normal University，2010.

［32］ 刘晓磊，田青，阎东东，等．中国城乡居民饮食结构差异分析：基于营养级视角［J］．营养学报，2016，38(4)：332-336.
LIU Xiaolei，TIAN Qing，YAN Dongdong，et al．Analysis of dietary structure differences between urban and rural residents in China：a nutritional level perspective［J］．Acta Nutritional Sinica，2016，38(4)：332-336.

［33］ 苏冰涛．中国城乡居民食品消费碳足迹的变化趋势［J］．中国人口·资源与环境，2023，33(3)：13-22.
SU Bingtao．Trend of carbon footprint in food consumption of urban and rural residents in China［J］．China Population，Resources and Environment，2023，33(3)：13-22.

［34］ 许广月，宋德勇．中国碳排放环境库兹涅茨曲线的实证研究：基于省域面板数据［J］．中国工业经济，2010(5)：37-47.
XU Guangyue，SONG Deyong．Empirical study of the environmental kuznets curve for carbon emissions in China：based on provincial panel data［J］．China Industrial Economics，2010(5)：37-47.