

DOI: 10.20103/j.stxb.202402170341

张思九, 林育青, 陈求稳, 张建云. 长江下游宁镇段江豚物理生境评价. 生态学报, 2024, 44(19): 8884-8896.

Zhang S J, Lin Y Q, Chen Q W, Zhang J Y. Physical habitat assessment of the Yangtze finless porpoise in the lower Yangtze River, Nanjing to Zhenjiang Reach. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8884-8896.

长江下游宁镇段江豚物理生境评价

张思九^{1,2}, 林育青^{1,2,3,*}, 陈求稳^{1,2,3}, 张建云^{2,3}

1 南京水利科学研究院生态环境研究所, 南京 210029

2 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029

3 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098

摘要:长江江豚是中国长江中下游特有物种,近两次长江淡水豚生态考察中其种群数量出现止跌回升,但仍处于极度濒危状态。为进一步稳固江豚种群数量增长态势,维持优良生境成为开展后续相关保护措施的基础。然而,长江下游水文条件复杂,航道整治、岸线开发利用、十年禁渔等工程和管理措施可能对江豚生境造成影响。因此,开展长江下游江豚调查和生境评估具有重要意义。通过船只调查结合环境 DNA 监测,明晰了长江宁镇段江豚的种群分布、活动特征及主要活动区域的环境特征;综合水深、流速、岸线和饵料多种关键生境因子,构建了长江下游南京-镇江段江豚物理生境模型,模拟分析了江豚生境适宜度。结果表明,船只调查和环境 DNA 监测结果均显示出研究区域内江豚主要分布在南京保护区,非保护区次之,镇江保护区较少。其中江豚序列丰度在绿水湾公园点位最高,占比 7.77%;基因拷贝数在烈山点位最多,达 22.56 拷贝数/ μL 。观察到江豚出现频率和丰度较高的点位均在模型中显示出较适宜的生境,耦合多种关键生境因子的模型可以较好的模拟江豚生境适宜性。总体来说,南京江段生境适宜度较高,范围较大。最后,针对南京下游深水航道工程下江豚生境保护,建议在后续航道整治工程中充分采用生态措施,以支撑长江大保护和长江经济带国家战略协同发展。

关键词:长江大保护;生境评价;环境 DNA;长江江豚

Physical habitat assessment of the Yangtze finless porpoise in the lower Yangtze River, Nanjing to Zhenjiang Reach

ZHANG Sijiu^{1,2}, LIN Yuqing^{1,2,3,*}, CHEN Qiuwen^{1,2,3}, ZHANG Jianyun^{2,3}

1 Nanjing Hydraulic Research Institute, Center for Eco-Environmental Research, Nanjing 210029, China

2 The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

3 Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China

Abstract: The Yangtze finless porpoise, a distinct species inhabiting the middle and lower reaches of the Yangtze River in China, has displayed indications of population stabilization and recovery in two recently ecological surveys. However, it remains critically endangered. To further reinforce the positive trajectory of porpoise population growth, preserving an optimal habitat is indispensable for the conservation of this species. Nevertheless, the intricate hydrological conditions, channel regulation, shoreline development, and projects like a decade-long fishing ban may affect the porpoise habitats in the lower Yangtze River. Therefore, conducting surveys and habitat assessments for the Yangtze finless porpoise in the lower reaches is of significant importance. This study utilized boat surveys combined with environmental DNA monitoring to offer preliminary insights into the population distribution, activity patterns, and environmental characteristics of the Yangtze finless porpoise in the lower Yangtze River, Nanjing to Zhenjiang reach. By integrating variously critical habitat factors

基金项目:中国工程科技发展战略江苏研究院战略咨询研究项目(JS2022XZ06)

收稿日期:2024-02-17; **网络出版日期:**2024-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yqlin@nhri.cn

including water depth, flow velocity, shoreline, and prey availability, a physical habitat model for the Yangtze finless porpoise in the lower reaches was established, which was used to simulate and analyze the suitability of the porpoise habitat. The results show that both ship surveys and environmental DNA monitoring reveal that the finless porpoises are mainly distributed in the Nanjing protected area, followed by the non-protected area, and the Zhenjiang protected area has fewer occurrences. The sequence abundance of finless porpoises is the highest at the Green Water Bay Park site, accounting for 7.77%, and the gene copies number is the highest at the Lieshan site, reaching 22.56 copies/ μL . Observation points with high porpoise occurrence and abundance align with the model's prediction of suitable habitats, demonstrating the model's capability to simulate porpoise habitat suitability. The overall habitat suitability is higher in the Nanjing section, encompassing a significant area. Finally, to safeguard porpoise habitats in the Nanjing downstream deep-water channel project, it is advisable to thoroughly incorporate ecological measures in the subsequent channel regulation projects, supporting the Yangtze River Conservation and the coordinated development of the national strategy for the Yangtze Economic Belt.

Key Words: Yangtze River conservation; habitat assessment; environmental DNA; Yangtze finless porpoise

长江江豚(*Neophocaena asiaorientalis*)作为唯一且独立的一个江豚淡水种群,仅分布在长江中下游干流及洞庭湖和鄱阳湖中^[1],是中国水域3个江豚种群中最濒危的1个亚种^[2]。2013年,世界自然保护联盟物种生存委员会将长江江豚濒危等级定为“极度濒危”,受威胁程度仅次于野外灭绝。2017年11—12月开展的第三次全范围长江淡水豚生态考察结果显示,长江江豚自然种群数量约1012头^[3],自然种群快速衰退的趋势基本得到遏制。2022年下半年,长江江豚科学考察数据更新为自然种群数量约1249头,与2017年相比,增加了237头,增幅为23.42%,数量实现止跌回升,出现了恢复性增长的良好势头,但极度濒危的状况仍未改变。

长江下游是江豚的重要栖息地,2014年一项江豚调查显示华阳-上海段(694 km)分布有长江干流中下游宜昌-上海段(约1700 km)68%的江豚种群,其中南京和镇江附近分布密度较高^[4];2019年同样研究区域的调查显示华阳-上海段江豚丰度占比为53%,其中马鞍山和南京附近分布密度相对较高^[3]。同时,长江南京以下江段拥有优越的水深条件,是长江干线通航能力最大、运输最为繁忙的黄金内河的“钻石段”^[5],但下游的船舶交通^[6]和多期航道整治^[7-8]可能会对长江江豚生境造成威胁。一方面航道整治直接改变了原有河道的水深、流速、岸线等特征,还会改变原有水下泥质或沙质环境,对底栖生物的栖息条件造成不利影响,在一定程度上破坏了底栖生物群落和种群,导致部分以底栖生物为食的鱼类资源减少,进而影响了江豚饵料数量^[7];另一方面为了适应日益增长的水上运输需求,船舶通行量不断增加,挤压了江豚栖息空间,导致江豚栖息地片段化和质量下降^[9]。

维持优良生境是江豚保护的基础。针对长江江豚生境评价的研究主要集中在鄱阳湖^[10-12]。长江下游南京-镇江段分布有南京、镇江两个江豚保护区,承载着艰巨的江豚保护任务,且相比湖泊来说干流水文条件复杂,且深水航道整治工程、高强度岸线开发利用等均可能对江豚生境造成影响。越来越多的研究已经意识到航运对水生大型动物生境潜在威胁的重要性^[13],然而之前的研究多集中在海洋航运对哺乳动物的威胁^[14],如生物入侵^[15],释放污染物^[16],以及船只碰撞风险^[17]等方面对它们栖息地生境的影响,针对航运对江豚生境影响评价较为缺乏。

通过野外船只调查和环境DNA分析技术探究了长江下游宁镇段江豚种群的分布特征,考虑水文条件和人类活动影响(航运、岸线利用、饵料资源)筛选关键生境因子,建立了水深、流速、岸线和饵料与江豚生境适宜度的关系,最后耦合多因子对长江下游宁镇段江豚生境进行模拟和评价,最后探讨了下游航运可能对江豚生境造成的影响,提出了减缓不利影响的措施建议,为长江下游江豚保护提供了科学参考。

1 研究区域概况

宁镇段位于长江下游,西起南京市烈山,东至扬中市雷公岛。长江南京以下航段是长江干流航道中船舶

通过量最大、经济效益最为显著的航段,占长江全线货运总量 70%。长江南京以下 12.5 m 深水航道工程是《长江经济带发展规划纲要》确定的重大项目,是“十二五”和“十三五”期间全国内河水运投资规模最大、技术最复杂的工程,分两期实施。研究区域位于二期工程(南京-南通段)的起始江段,并覆盖了工程重点区域和畅洲,于 2018 年交工验收进入试运行,深水航道的贯通是长江黄金水道建设与发展的里程碑,为推动长江经济带发展和长三角一体化等国家战略发挥了重要作用^[18]。研究江段包括八卦洲、和畅洲和世业洲等江心洲,多汊道,人类活动影响强烈,江豚栖息地条件复杂;现还有南京长江江豚省级自然保护区、镇江长江豚类省级自然保护区(图 1),具有非常重要的地位,生态环境敏感、保护要求高。

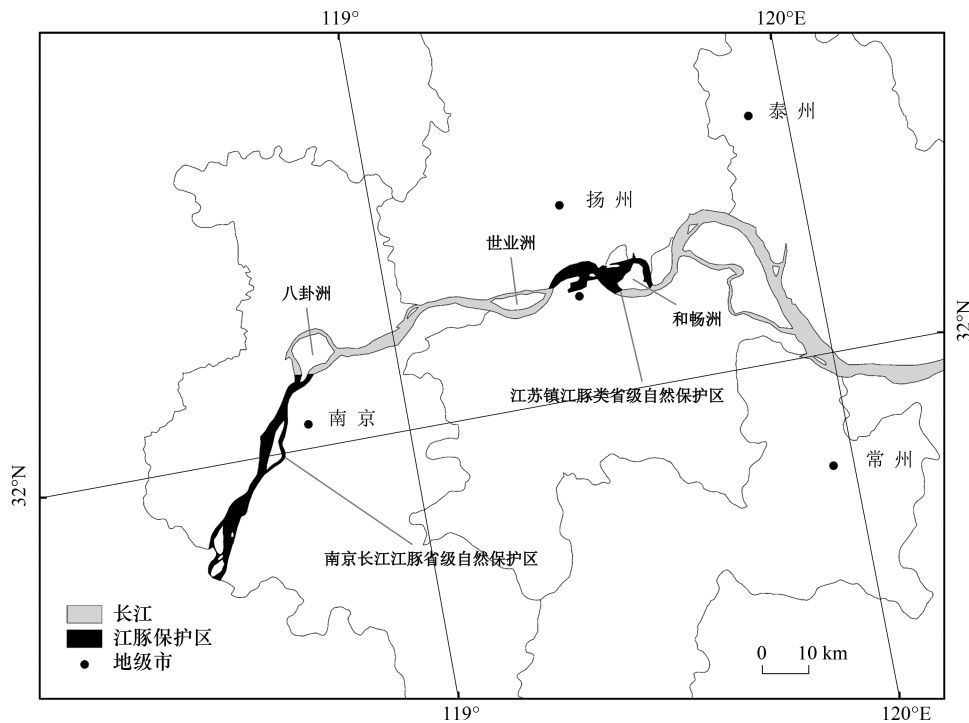


图 1 长江下游宁镇段及江豚保护区

Fig.1 The lower Yangtze River, Nanjing to Zhenjiang reach and Yangtze Finless Porpoise nature reserve

2 研究方法

2.1 江豚种群调查

通过野外观测和实验室方法得到研究江段江豚分布特征。分别于 2021 年 12 月、2022 年 11 月和 2023 年 10 月,采用船只调查方法与环境 DNA 技术(宏条形码与荧光定量 PCR)相结合的方式,开展长江宁镇段江豚种群调查监测。

2.1.1 船只调查

以一艘船开展长江南京—镇江段(起点新济洲、终点雷公岛)江豚种群监测与生境调查工作。由于长江干流中 80% 的江豚分布在离岸 300 m 水域内^[19–21],故考察时船沿右岸航行,返程时则换为沿左岸航行(面向河流下游,右边为右岸,左边为左岸),航行路线平行于江岸,离岸约 150 m,航速保持在 12–16 km/h,以保障航行时能够清楚获得视线范围内的情况并减少可得性偏差^[22]。船内 3 名观察者,使用双筒望远镜及肉眼进行观察;左边观察者负责 -90° — 10° 的水域,右边观察者负责 90° — 10° 的水域,中间的记录员负责记录工作,同时观察前方 180° 范围内的情况。观察天气选择在无风或微风的晴天、阴天或小雨天气,以保证观察覆盖范围及发现目标的效率。调查过程中,使用手持式 GPS 记录江豚目击位点,记录江豚群体大小和目击位

点处的离岸距离、干流形态、岸边类型和航道行船密度等环境特征。该方法曾被多次运用到研究江豚分布的考察中^[23-24],可以得到具有可信度的结果。

2.1.2 环境 DNA 监测

监测过程分为环境 DNA 样品采集、宏条形码技术实验室处理和荧光定量 PCR 实验处理。环境 DNA 采集过程中,于 2021 年 10 月的船只调查途中对长江南京-镇江段的 19 个采样点位(图 3)进行样品采集(含江豚出现位点)。每个点位采集水样样品(4 个重复样本,每个样本 500 mL),用于 eDNA 技术的水生生物分析。样品采集使用竖式采水器采集表层水,并将水样分装于 4 个无菌采样瓶中,使用真空过滤仪将 500 mL 水体样品富集到 0.45 μm 微孔滤膜上,后将微孔滤膜卷起置入 5 mL 灭菌离心管内,放置在装有干冰的泡沫箱中保存。样品需在 24 h 运输到实验室,并置于 -20°C 冰箱内保存。宏条形码技术实验室处理工作主要包括 DNA 提取、基因扩增(PCR)、高通量测序及数据处理实验室分析 4 部分,最终得到目的 DNA 片段序列。荧光定量 PCR 实验处理是根据阳性标准品 PCR 纯化浓度及 PCR 产物长度,计算产物拷贝数,计算公式如下:

$$\text{Copies} = \left[(6.02 \times 10^{23}) \times C \times 10^{-\frac{9}{L \times 660}} \right] \times V \quad (1)$$

式中,Copies 为拷贝数; C 为标准质粒 DNA 浓度,单位 $\text{ng}/\mu\text{L}$; L 为标准质粒 DNA 长度,单位 bp; V 为实时荧光 qPCR 体系中标准质粒 DNA 体积。

2.2 江豚生境模型建立

通过野外观测和实验室方法得到江豚分布特征后,构建江豚生境综合模型,两者互相验证,最终对长江下游宁镇段江豚物理生境进行评价。对于构建江豚生境综合模型。考虑长江下游水文特征、岸线类型和江豚饵料分布情况等生境因子,采用适宜度曲线法建立江豚生境模型;基于水动力模型、遥感数据和环境 DNA 数据对长江下游于江豚的水深、流速、岸线适宜度和饵料丰度分别进行单因子适宜度分析;最后,耦合以上多个生境因子,构建江豚生境综合评价模型,模拟分析研究江段的生境适宜度。

根据江豚习性,主要生境因子包括流速、水深、离岸距离、饵料、水质、岸线等。适宜范围为:①适宜流速:水流速度相对较缓,适宜区间 0.1—0.6 m/s,最适流速 0.3—0.5 m/s^[19];②离岸距离:100—300 m 内较为适宜,500 m 外不适宜^[25];③饵料:偏爱捕食中上层鱼类^[26-28],喜食顺序为中上层鱼类>中下层鱼类>底层鱼类>头足类>虾类>蟹类,平均贡献率分别为 43.9%、18.2%、13.1%、10.0%、8.8%、6.0%^[29];④水质:III 类、II 类或以上水质;⑤水深:4—20 m,其中 7—12 m 最适^[19];⑥岸线:自然岸线较为适宜^[25,30]。

由于江段水质较优,均为 III 类、II 类或以上水质,能够满足江豚对水环境的需求,因此,选取水深、流速、岸线类型、饵料丰度作为影响生境适宜度的关键因子(图 2)。

2.2.1 水深和流速适宜度因子

构建二维水动力模型,所用控制方程为二维雷诺平均的浅水方程组,包括连续方程和动量方程。连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (2)$$

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (3)$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (4)$$

式中, t 为时间维度; x 、 y 、 z 分别为笛卡尔坐标系下的三个空间维度; h 为总水深,其数值上由 η 和 d 两部分之和构成,其中 η 为水面高程,即自由水面到基准面的距离, d 为静止水深,即基准面到底床的距离; u 为 x 方向的速度分量; S 是动量源项; v 为 y 方向的速度分量; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为流体在 x 方向和 y 方向的平均速度。

x 方向上的动量方程:

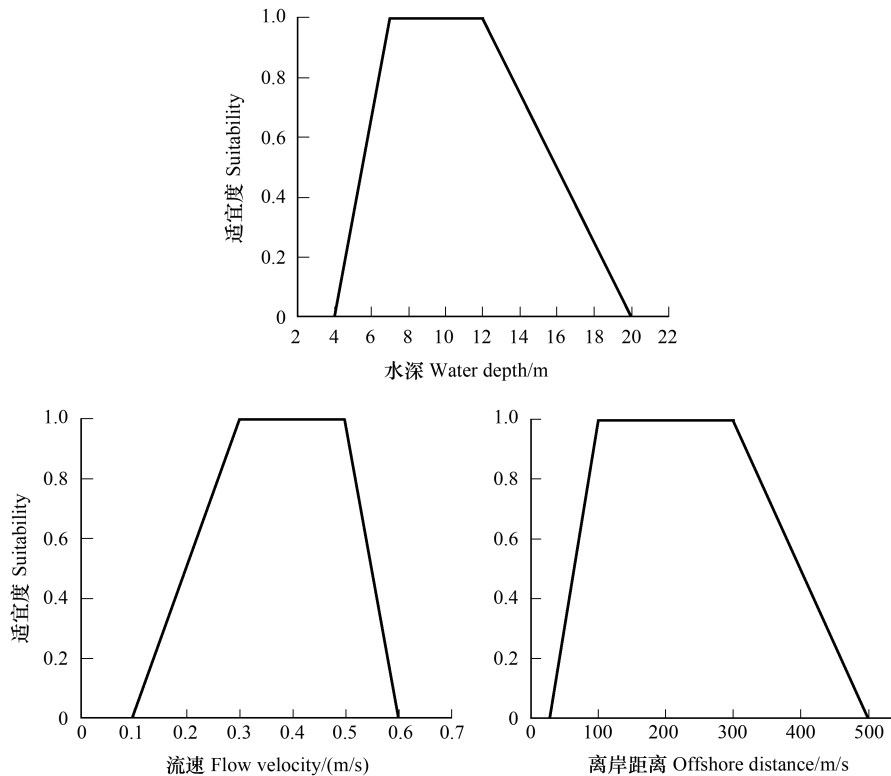


图 2 江豚生境因子适宜度曲线

Fig.2 The habitat factor suitability curves for Yangtze Finless Porpoises

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = hf\bar{v} - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{2\rho_0} \frac{h^2 \partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + h u_s S \quad (5)$$

y 方向上的动量方程:

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = hf\bar{u} - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{2\rho_0} \frac{h^2 \partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + h v_s S \quad (6)$$

式中, $f(2\Omega \sin \Theta)$ 为科氏力系数, Ω 为地球旋转的角频率, Θ 为当地的纬度; x, y, z 代表右手笛卡尔坐标系; t 表示时间; η 为水位; $h = \eta + d$ 代表总水深; u, v 分别为流速在 x, y 方向上的分量; $f\bar{v}, f\bar{u}$ 为由地球自转而产生的加速度; ρ 为水的密度; ρ_0 为参考水密度; p_a 为当地大气压; $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ 分别是应力张量沿三个方向的分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 代表各个水平粘滞应力项; (u_s, v_s) 为源汇项水流流速; τ_{bx}, τ_{by} 为底床摩擦力在 x, y 方向上的分量; τ_{sx}, τ_{sy} 为风场摩擦力在 x, y 方向上的分量。

后采用非结构进行研究区域长江南京至江阴段网格剖分, 在代入上游边界大通站流量、下游边界徐六泾水位过程的边界条件和给定初始水位的初始条件后, 对研究区域 2015 年 1 月、7 月的非恒定流过程进行数值计算, 并将 2015 年 4 月镇江和江阴的实测水位与模型计算得到的水位进行率定与验证。计算结果和实测结果的分布趋势若较一致, 则拟合度较高, 即可利用构建的二维水动力模型。对研究江段枯水期及丰水期流场变化进行数值模拟, 并将枯水期水动力模型计算结果作为生境模型的输入条件, 结合水深和流速适宜度曲线计算得到研究江段的水深和流速适宜度分布情况。

2.2.2 岸线适宜度因子

对于江豚而言, 其岸线生境适宜性表现为: 自然岸线最适, 半自然岸线其次, 城镇化岸线适宜性较低。本研究收集 2020 年精度 30 m 的高分遥感数据, 并筛选画面清晰, 云量较少, 图像质量总体较好的影像。后使用 ArcGIS 软件依据江苏省行政区边界进行裁剪; 选取 ENVI 4.7 软件平台进行影像融合、辐射定标和大气校正处

理。后选取 ENVI 4.7 软件中监督分类的最大似然方法,首先对影像的土地利用分类进行定义;在主页窗口中点击 Region Of Interest 选择 Roi Tool 工具栏定义分类名称和颜色绘制多边形选择训练样本;选择最大似然分类器在参数设置界面根据需要更改参数。通过对遥感数据的解译,提取岸线不同土地利用类型,后按自然、半自然和城镇岸线进行分类,结合江豚离岸距离适宜度曲线可分析研究江段针对土地利用类型的岸线及江面的适宜度分布情况。

2.2.3 饵料丰度及分布适宜度因子

根据相关研究和文献查阅^[29],长江江豚偏爱捕食中小型上层鱼类,如鲤鱼、鳊鱼、鳙鱼、草鱼、乌鳢等;从适口性角度,在对江豚胃内容物研究^[31]发现江豚偏好鲤形目(59.13%)、鲇形目(21.74%)和梭形目(13.91%)。采用环境 DNA 技术分析鱼类种群多样性及空间分布特征,探明江豚饵料资源分布情况。基于江豚饵料资源调查结果,采用最临近内插法,将采样点鱼类丰度内插到整个研究江段,得到江豚饵料丰度的空间分布。

2.2.4 耦合多因子的江豚生境综合评价模型

利用栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI),综合水深、流速、岸线、饵料生境因子,构建江豚生境综合模型,计算研究江段的生境适宜度。此方法在渔业资源开发、管理、评估及保护等领域中得到广泛应用,成为渔业科学研究的重要手段之一^[32],计算公式如下:

$$HSI = (I_w I_v I_s I_f)^{1/4} \quad (7)$$

式中,HSI 表示生境适宜度指数, I_w 、 I_v 、 I_s 和 I_f 分别水深、流速、岸线、饵料的生境适宜度,因子的适宜度指数在 0—1 之间,0 表示对应条件不适宜,1 表示最适宜。

2.2.5 江豚生境综合评价模型的验证

利用针对江豚得到的船只调查和环境 DNA 监测结果对已建立的江豚生境综合评价模型进行验证。具体为船只观测到江豚出现的点位是否在评价模型中表现为适宜;江豚序列相对丰度与江豚生境适宜度(HSI)的对应关系。

2.3 数据来源

遥感影像数据来源于地理空间数据云的公开 LANDSAT 8 卫星影像数据(<https://www.gscloud.cn/>)。上游边界大通站流量和下游边界徐六泾水位数据来自水文年鉴。

3 结果与分析

3.1 江豚分布特征

基于船只调查法野外观测结果显示(图 3),长江江苏段江豚在宁镇江段分布广泛,且重点分布于南京水域。连续 3 年观测到长江江豚出现次数逐年增加,2021 年观测江豚出现位点 6 处,2022 年观测江豚出现位点 8 处,2023 年江豚出现位点 12 处。从空间上看,宁镇段江豚出现位点共计 26 处,其中 14 处位于南京保护区,9 处位于镇江保护区,3 处位于宁镇交界区,南京段水域观测到江豚活动的位点多于镇江段。

环境 DNA 监测的江豚分布分为环境 DNA 宏条形码技术的江豚分布结果和荧光定量 PCR 技术的江豚分布结果。对于环境 DNA 宏条形码技术的江豚分布,测序注释出的江豚序列数为 37,557 条,共注释分类为 21 个 OTU,江豚序列在采样位点中被广泛检出。结果表明(表 1),世业洲洲头(S4)点位丰度最低,仅有 35 条序列和 0.0625% 的序列占比;在南京江豚保护区的点位所测得的序列占比最高;而镇江江豚保护区的四个点位与非保护区测得的序列占比差异并不显著;因此可认为长江南京至镇江段江豚的种群分布主要集中于南京江豚保护区范围内。荧光定量 PCR 技术的江豚分布以拷贝数计算结果的形式展现(表 2),江豚在 19 个位点中均有检出,其中拷贝数最多的位点是位于非保护区的烈山(S19),为 22.56 拷贝数/ μL ,拷贝数最低的位点是位于镇江江豚保护区的和畅洲洲尾(S9),为 6.33 拷贝数/ μL ;从三个区域划分来看,南京江豚保护区的拷贝数均值最高,为 16.33 拷贝数/ μL ,非保护区的拷贝数均值次之,为 13.43 拷贝数/ μL ,镇江江豚保护区的拷

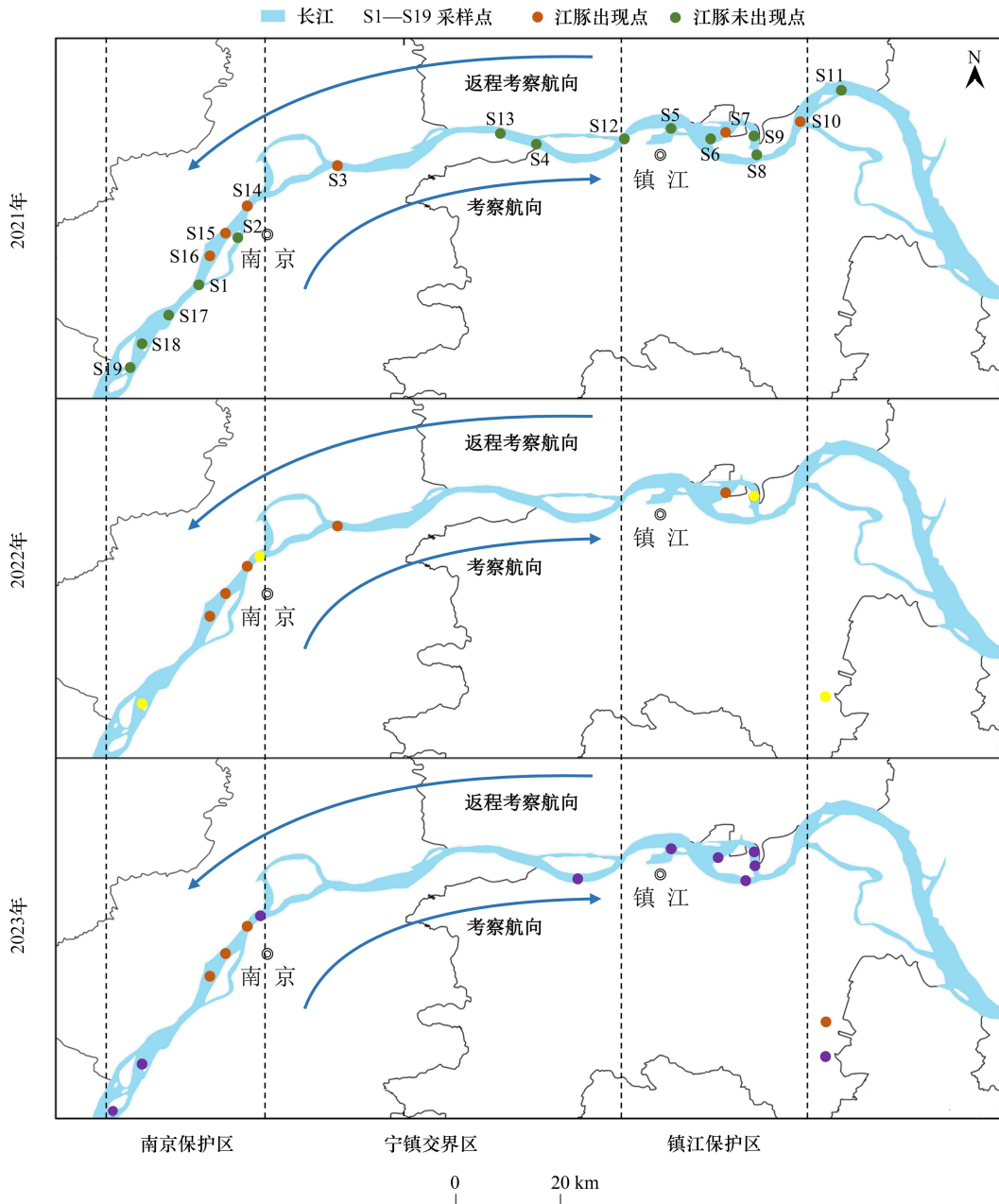


图3 采样及船只调查期间江豚出现点位

Fig.3 Locations of sampling sites and Yangtze Finless Porpoises sightings during the boat survey

贝数均值最低,为 10.90 拷贝数/μL。荧光定量 PCR 技术与宏条形码技术相比,两种方法所测得的结果在江豚总体分布上具有一致性,南京江豚保护区江豚基因丰度最高,非保护区的拷贝数均值次之,镇江江豚保护区的基因丰度最低。

此外,将基于船只调查法与环境 DNA(宏条形码技术、荧光定量 PCR 技术)调查分析结果进行对比。如图 4 所示,南京保护区内江豚平均相对丰度最高,江豚出现次数最多;镇江保护区内江豚平均相对丰度最低,江豚出现次数最少。船只调查法与环境 DNA 方法分析结果表明,两者具有较高的一致性,能够相互验证。

3.2 单因子生境适宜度分析

3.2.1 水深和流速适宜度分析

通过对研究区域 2015 年 1 月、7 月的非恒定流过程进行数值计算,并将 2015 年 4 月镇江和江阴的实测水

位与模型计算得到的水位进行率定与验证,结果显示镇江与江阴断面水位计算结果和实测结果的分布趋势较为一致,拟合度较高,表明模型能够较为精确地模拟研究江段水动力情况。

表 1 长江南京-镇江段江豚序列相对丰度(宏条形码技术)

Table 1 Relative abundance of Yangtze Finless Porpoise sequences in the Nanjing-Zhenjiang section of the Yangtze River (metabarcoding technology)

点位 Sites	抽平数据 Levelled data			点位 Sites	抽平数据 Levelled data		
	江豚序列数 YFP gene sequence count	总序列数 Total count	占比 Proportion		江豚序列数 YFP gene sequence count	总序列数 Total count	占比 Proportion
S1	103.6667	6000	0.017278	S11	117.75	6000	0.019625
S2	66.5	6000	0.011083	S12	201.25	6000	0.033542
S3	153	6000	0.0255	S13	47.75	6000	0.007958
S4	3.75	6000	0.000625	S14	322.75	6000	0.053792
S5	22.75	6000	0.003792	S15	412.25	6000	0.068708
S6	65.25	6000	0.010875	S16	466	6000	0.077667
S7	180.75	6000	0.030125	S17	282	6000	0.047
S8	29.75	6000	0.004958	S18	237	6000	0.0395
S9	47.25	6000	0.007875	S19	82.5	6000	0.01375
S10	98	6000	0.016333				

表 2 长江南京-镇江段江豚基因拷贝数(荧光定量 PCR)

Table 2 Gene copy numbers of Yangtze Finless Porpoise in the Nanjing-Zhenjiang section of the Yangtze River (fluorescent quantitative PCR)

点位 Sites	拷贝数 Gene copy numbers/ (拷贝数/μL)	点位 Sites	拷贝数 Gene copy numbers/ (拷贝数/μL)	点位 Sites	拷贝数 Gene copy numbers/ (拷贝数/μL)	点位 Sites	拷贝数 Gene copy numbers/ (拷贝数/μL)
S1	16.33666667	S6	9.626666667	S11	8.09	S16	18.14
S2	20.825	S7	13.02	S12	7.843333333	S17	11.5975
S3	19.62666667	S8	12.81333333	S13	8.2875	S18	12.48
S4	16.14333333	S9	5.82	S14	11.5125	S19	22.5625
S5	15.26666667	S10	12.4525	S15	20.11		

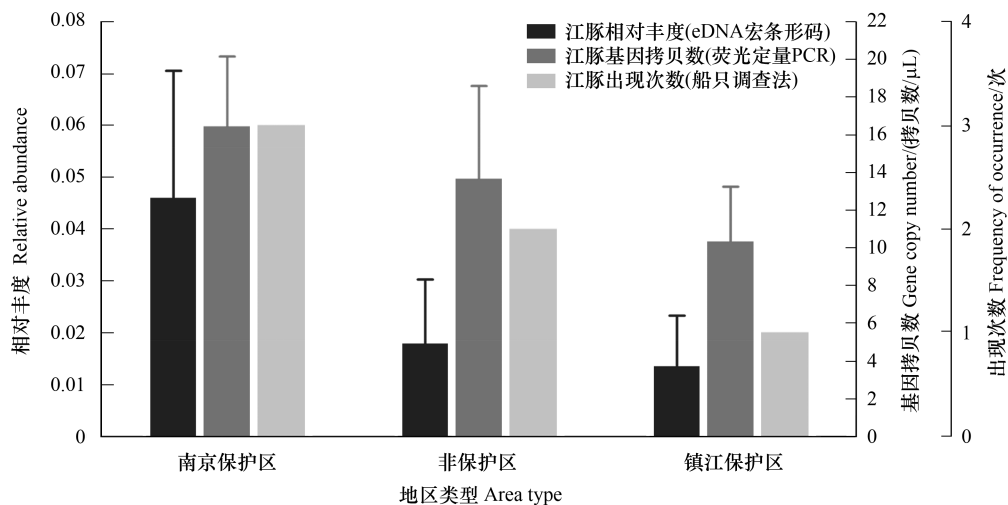


图 4 基于船只调查和环境 DNA 监测的长江南京-镇江段江豚种群分布

Fig.4 Population distribution of Yangtze Finless Porpoises in the Nanjing-Zhenjiang section based on boat survey and environmental DNA monitoring

水深结果通过二维模型地形展示,江豚的最适水深 7—12 m 多在江边;而靠近江中心位置,水深一般超过 24 m,不再适宜江豚生存。通过分析构建的二维水动力模型对研究江段枯水期及丰水期流场变化的数值模拟的结果,枯水期研究区域流速变化范围集中在 0.3—0.9 m/s,最大值 1.5 m/s;丰水期局部流速最大值可达 2.25 m/s。鉴于江豚偏好流速为 0.3—0.6 m/s,总体而言枯水期夹江流速偏小,主航道流速较为适宜;丰水期夹江、弯道处流速相对更符合江豚喜好。

由于江豚野外调查处于枯水期,将枯水期水动力模型计算结果输入生境模型,得到整个研究江段的水深和流速适宜度分布情况(图 7),显示结果与上述分析一致,在整个研究区域江豚对于水深因子显示出趋岸性,南京地区八卦洲江段整体都表现为适宜;对于流速因子,南京段整体适宜性优于镇江段。南京江豚保护区适宜区域覆盖面积广,尽管存在少数不适宜江段,但适宜区域面积占比显著高于非保护区和镇江保护区。

3.2.2 岸线适宜度分析

提取岸线不同土地利用类型,涵括林地、疏林、草地、滩地、田地、旱地、坑塘、城镇、农村、工业等类型。基于高分遥感图像解译的岸线分析结果表明,研究江段自然岸线(林地、疏林、草地和滩地)占比 51.18%,半自然岸线(田地、旱地和坑塘)占比 25.09%,城镇化岸线(城镇、农村和工业用地)占比 23.73%。将岸线类型识别的研究结果导入生境模型,分析江段岸线的适宜度。结果表明(图 7),长江南京-镇江江段,其中南京大胜关至下关段、镇江和畅洲段的岸线适宜度较高,世业洲洲头上游江段适宜性较差,主要因此处地处仪征,沿江有农村及小镇聚集,受人类活动影响程度较高。

3.2.3 饵料丰度空间分布

通过开展江豚饵料调查和饵料环境 DNA 分析,从鱼类种群多样性和空间分布特征两方面分析江豚的饵料适宜度。对于鱼类的种群多样性,本次环境 DNA 调查获得长江南京-镇江段鱼类共计 70 种/属,分属于 9 目 17 科 54 属,其中,包括定种鱼类 57 种(81.43%),定属鱼类 13 种(18.57%)。在种分类阶元,鲤形目最多,包括 32 种,占总数的 53.33%;其次为虾虎鱼目 11 种,占比为 18.33%;鲇形目与鲈形目分别有 7 种和 5 种,占比分别为 11.67%和 8.33%,其余 5 目分别只有 1 种,所占总种数比例较小。经过物种数据库注释发现,鲤形目的相对丰度(鲤形目 DNA 序列数/总 DNA 序列数)最高,占 65.96%;其次为鲇形目,虾虎鱼目,鲱形目和鲈形目。相对丰度占比最高的物种是鳊,其次为蒙古鲃、青鱼、高体鳊。对鱼类空间分布特征的分析,将各个位点的序列归一化为 6000 条 Reads, S13 位点鱼类的相对丰度最高(35.67%), S11 位点鱼类的相对丰度最低(10.62%)。选择鲤鱼、鳊鱼、草鱼、乌鳢、鲇鱼、黄颡等江豚喜食鱼类与江豚序列占比进行对比发现,江豚种群与其喜食鱼类在空间分布上具有较好的一致性(图 5),特别是南京江段的位点,其江豚的序列占比与其喜食鱼类的物种丰度呈显著正相关关系(图 6),表明饵料是影响江豚栖息地适宜度的重要生境因子,水域江豚偏好、适口鱼类丰度越高代表江豚栖息地饵料单因子的适宜度越高。

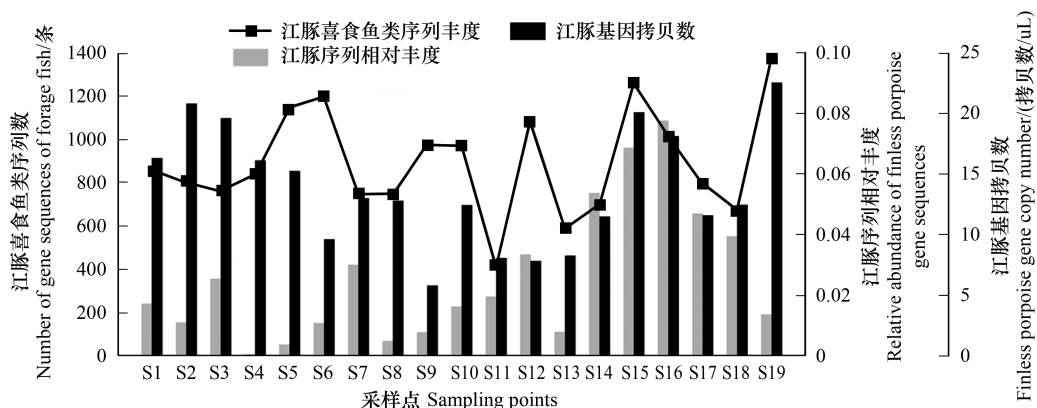


图 5 江豚种群分布与其所食鱼类空间分布对比

Fig. 5 Comparison between the distribution of the Yangtze Finless Porpoise population and the spatial distribution of its prey fish

基于以上结果,采用最临近内插法,将采样点鱼类丰度内插到整个研究江段,同时根据丰度高度划分为高中低三等级。空间分布结果显示(图 7),八卦洲至世业洲之间的江段、扬中江段的饵料资源较差,而南京大胜关至下关江段、镇江焦山段的饵料资源较为丰富。

3.3 江豚生境适宜度分析

耦合水深、流速、岸线、饵料多个生境因子,构建江豚生境综合评价模型(图 7),模拟分析研究江段的生境适宜度,模拟范围覆盖了南京长江江豚自然保护区的江心洲与长江左岸之间的核心区及镇江长江江豚保护区核心区。生境模型模拟结果与江豚种群观测、环境 DNA 江豚序列相对丰度的结果基本一致:观察到江豚出现的点位,生境模拟结果均显示较为适宜;空间上不同采样点位的江豚序列丰度与对应位置的适宜度指数具有对应关系,因此本研究构建的耦合多种关键生境因子的江豚生境综合评价模型可以较好的模拟江豚生境适宜性。对于模拟结果,图 7 显示南京段总体生境适宜度较高,其江豚保护区核心区适宜江段范围较大,呈现出较好的连续性;镇江江豚保护区核心区内中等适宜区域面积相对较大;南京保护区和镇江保护区范围内未

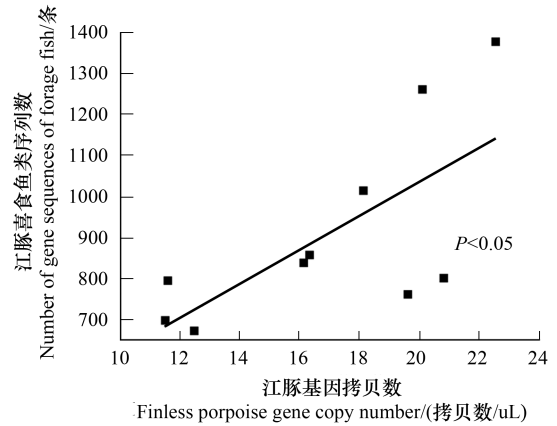


图 6 南京段江豚拷贝数与其喜食鱼类丰度相关性

Fig.6 Correlation between the copy numbers of porpoises in the Nanjing section and the abundance of their preferred prey fish species

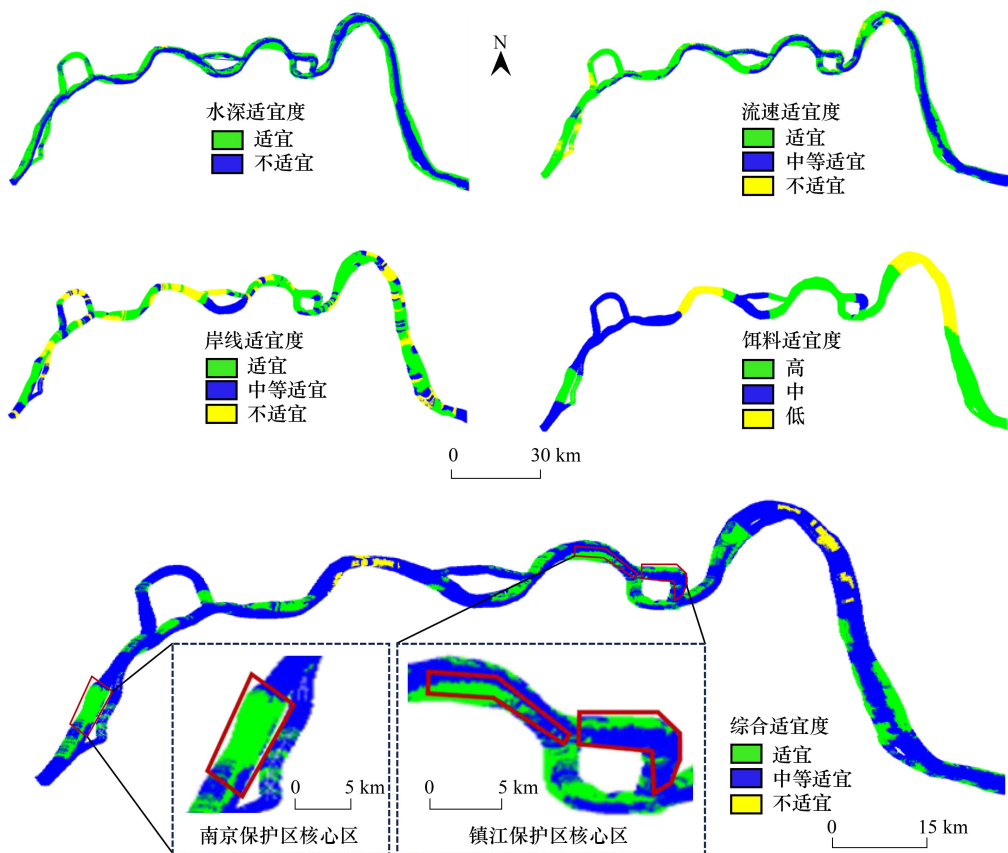


图 7 长江南京-镇江段江豚生境适宜度

Fig.7 Habitat suitability of Yangtze Finless Porpoises in the Nanjing-Zhenjiang section

出现不适宜区域,非保护区内中等适宜区占比最高。此外,由适宜区域连续性判断,镇江保护区和非保护区内江豚适宜生境破碎化较南京保护区严重,存在适宜性降低趋势的可能性。

4 讨论

4.1 生境因子的选择依据

江豚作为处于食物链顶端的哺乳动物物种,其生存在很大程度上取决于栖息地的稳定性和食物资源的可用性^[2,28]。而从总体上看,栖息地变化以及饵料鱼类资源减少等无一不与长江河道形态及水文条件变化密切相关^[7]。此外,对江豚自然分布与河岸类型关系的研究指出河岸固化不仅会导致江豚栖息地直接丧失和栖息地质量衰退,也导致各栖息地斑块间连通程度下降^[33]。因此在考量深水航道此类对长江河道及水文条件造成直接影响的水利工程时,为达到对江豚生境评价的全面,选取水质、水深和流速作为生境因子,同时考虑饵料鱼类的种群和空间分布特征以及受人类活动影响强烈的岸线情况。

在评价江豚生境时考虑自然岸线、半自然岸线和城镇岸线,因为在过去几十年里,人类活动的增强显著影响了江豚种群的规模^[2],这体现在河道及岸线整治所导致的土地利用类型的变化上;在对鄱阳湖的研究中也发现,与草地的距离对江豚分布存在较大影响^[12]。此外,相关研究发现小型鱼类的分布及资源量是江豚自然分布的重要驱动因子^[7],而且长江江豚头次与对应的鱼类密度呈显著正相关,甚至可能具有随鱼群迁徙的行为特征^[34],这在本研究中同样得到验证,发现江豚的主要食物中小型上层鱼类与江豚序列占比在空间上具有一定的对应关系,特别是南京江豚保护区的位点,其江豚的序列占比与其所食适口鱼类的物种丰度呈正相关关系。因此,强调了饵料鱼类的种群和空间分布特征,从两方面考虑饵料适宜度对于江豚生境的影响。但有研究指出江豚觅食存在个体差异,主要体现在不同长度江豚的食性^[35],这在后续研究中还需增加样本收集和更细致的分类。

4.2 长江下游宁镇段江豚生境特征形成机制

水深和流速适宜度或江豚生境综合评价模型都显示长江江豚更喜欢靠近河岸的栖息地,这与江豚较强的趋岸性和偏向于平缓的河床坡度有关,这一结论符合相关研究所得的大部分江豚集中在离河岸 300 m 的范围内^[4]。从饵料的角度,这些环境通常有泥泞的基质,藻类和水下维管植物为小型鱼类提供了重要的栖息地,而小型鱼类是江豚的主要食物来源,其分布对江豚的分布和移动至关重要。此外,靠近河岸的区域也是江豚繁殖和哺育的重要场所^[36],这些地区有适度的坡度和缓慢的水流速度,利于江豚的节能行为^[37]。但在江豚生境综合模型中可以看出,南京段江心洲区域,较宽的江段都显示出适宜的江豚生境,这是耦合岸线类型和饵料丰度后所呈现出的结果。在此可以解释为江心洲附近区域处于南京长江江豚保护区核心区,岸线类型受到严格管控,饵料鱼类以增殖放流等方式得到满足,体现出保护区的建立和控制人类活动影响对江豚保护的重要意义。

总体来说,南京段生境适宜度较高,适宜江段范围较大,这与江段自身水文条件有关,同样也是长江大保护和江苏南京长江江豚省级自然保护区建立的成果。南京江段针对江苏省长江绿色发展的切实需求,重点围绕深水航道建设运行对重要生物生境的影响,明晰了长江江苏段大保护内涵,综合考虑江豚保护和航运需求,从实际施工过程切实贯彻江豚保护策略。其中,优先设置保护区是目前长江江豚保护的主要集中工作^[38],以减少岸线土地利用、通航等人类活动带来的负面影响,提高江豚生境适宜度。此外,南京江豚保护区、镇江江豚保护区和世业洲区域较高的江豚适宜度可能与江心洲滩此类地形有关,提供分叉水流,呈现出弯曲河道及多股水流汇流的河道平面形态,这些都是江豚生境的偏好特征。从生境适宜度可以看出江豚栖息地的破碎化和片段化,即使在保护区,也有此类趋势。这与近些年江豚种群分布呈现碎片化^[9]相一致,并可能导致江豚数量的下降^[3]。可以说栖息地生境的破碎化和片段化导致了江豚种群的碎片化,而小数量群体和被限制的洄游活动对江豚的长期生存构成了持续的威胁。

4.3 深水航道工程下长江江豚保护建议

即使航道整治工程短期内不会对主要施工区内江豚数量产生明显影响,但工程施工和运行会改变江豚分

布局,江豚向未受水工建筑干扰的栖息地集中^[39],加剧江豚种群的分布破碎化。此外,长江下游深水航道已经历两期工程,情况变得更为复杂。一期工程已经削弱非通航支汊作为江豚庇护所的功能,导致江豚难以长期栖息于此;二期工程可能会进一步限制非通航支汊的水深和流量,导致江豚离开该江段^[7],出现新的江豚分布空白区^[9]。由于长江航运急剧增长,和畅洲右汊江段船舶通过能力已趋饱和,通航安全问题突出,成为制约黄金水道功能发挥的“瓶颈”,江豚自然保护区范围调整及功能分区优化需求迫切。通过野外考察、环境 DNA 技术和生境模拟分析,发现江豚广泛存在于研究江段,重要栖息地区域也显示出较高的生境适宜度。因此,针对南京下游深水航道工程下江豚保护,从生境角度提出相关建议。

长江十年禁渔计划实施前,由于船只撞击和噪声影响导致的江豚死亡率远高于渔获影响^[6],因此在船舶通航方面应加强执行现行航运规例,限制船只在已规定的航道航行,并在侧航道设置避难所,有助减少江豚活动与船只航行的范围重叠。江豚多活动于近岸区,那也是模型中显示的生境适宜区,尽管目前长江干流大部分路段的指定航线也远离了河岸,但相关研究表明,向上游航行的船只通常选择在靠近河岸的浅水区航行,以利用较低流速^[4]。因此,加强长江执法的有效性,严格限制上游船只只能在指定航道内航行是至关重要的。

宁镇江段水质达标,不对江豚生境造成负面影响,但在未来工程实施砂石料抛填作业中应注意砂质采用粉细砂,严格控制含泥量;石料要求质地坚硬、不呈片状,无严重风化和裂纹,砂石来源地环境质量良好,土壤未被污染^[40]。从饵料角度为改善适宜度处于中和低的区域,考虑工程后的增殖放流措施,如长江深水航道建设后曾根据施工影响区域渔业群落组成特点及工程对渔业资源的影响,对镇江、扬中、靖江、南通等河段开展为期 3 年约 2000 万尾的渔业增殖放流^[41]。针对未来可能存在的航道建设施工,更重要的是预判其对江豚生境的影响程度并制定相应的保护方案,如航道选择和江豚异地迁移保护等。此外,施工现场噪声会对周围生物造成一定影响,需开展现场噪声监测及分析,对部分水生生物进行驱赶,减少施工时水生生物的影响。通过对航道整治工程施工过程的观察以及水下噪声的测量和记录,了解不同施工工艺的水下声环境变化情况。充分运用声学驱赶、诱导等技术,将鱼类从一个水域引导到另一个安全水域,通过充足的饵料和适宜的栖息环境将其留在安全水域。

5 结论

船只调查和环境 DNA 监测均显示江豚在南京-镇江段分布广泛,且重点分布于南京保护区,非保护区次之,镇江保护区相对较少。根据本研究构建的江豚生境模型,其模拟结果与实际监测形成互相验证关系,可对研究区域江豚生境进行有效评价。南京段江豚生境适宜区域面积占比较高,且适宜生境斑块连通性较高;镇江保护区内,尤其和畅洲区域江豚适宜生境呈现破碎化,需在规范船舶通行、航道建设等方面重视生境保护及恢复。

参考文献 (References):

- [1] Wang D. Population status, threats and conservation of the Yangtze finless porpoise. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(19): 3473-3484.
- [2] 梅志刚, 郝玉江, 郑劲松, 王志陶, 王克雄, 王丁. 鄱阳湖长江江豚的现状和保护展望. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1289-1298.
- [3] Jie H, Mei Z G, Chen M, Han Y, Zhang X Q, Moore J, Zhao X J, Hao Y, Wang K X, Wang D. Population survey showing hope for population recovery of the critically endangered Yangtze finless porpoise. *Biological Conservation*, 2020, 241: 108315.
- [4] Mei Z G, Zhang X Q, Huang S L, Zhao X J, Hao Y J, Zhang L, Qian Z Y, Zheng J S, Wang K X, Wang D. The Yangtze finless porpoise: on an accelerating path to extinction? *Biological Conservation*, 2014, 172: 117-123.
- [5] Wang Y C, Chen X B, Borthwick A G L, Li T H, Liu H H, Yang S F, Zheng C M, Xu J H, Ni J R. Sustainability of global Golden Inland Waterways. *Nature Communications*, 2020, 11: 1553.
- [6] Turvey S T, Risley C L, Moore J E, Barrett L A, Hao Y J, Zhao X J, Zhou K Y, Wang D. Can local ecological knowledge be used to assess status and extinction drivers in a threatened freshwater cetacean? *Biological Conservation*, 2013, 157: 352-360.
- [7] 王克雄, 王丁. 航道整治工程对长江江豚影响及缓解措施分析. *环境影响评价*, 2015, 37(3): 13-17.
- [8] 潘庆燊. 长江中下游河道整治研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 27-41.

- [9] Mei Z G, Han Y, Turvey S T, Liu J J, Wang Z T, Nabi G, Chen M, Lei P Y, Hao Y J, Wang K X, Barlow J, Wang D. Mitigating the effect of shipping on freshwater cetaceans; the case study of the Yangtze finless porpoise. *Biological Conservation*, 2021, 257: 109132.
- [10] Han Y, Sun Z Y, Fang H W, Bai S, Huang L, He G J. Habitat succession of the Yangtze finless porpoise in Poyang Lake under the changing hydrodynamic and feeding environment. *Ecological Modelling*, 2020, 424: 109035.
- [11] Li Q Y, Lai G Y, Liu Y, Devlin A T, Zhan S P, Wang S. Identifying the seasonal characteristics of likely habitats for the Yangtze finless porpoise in Poyang Lake. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2022, 32(3): 523-536.
- [12] Li Q Y, Deng M M, Li W Y, Pan Y, Lai G Y, Liu Y, Devlin A T, Wang W P, Zhan S P. Habitat configuration of the Yangtze finless porpoise in Poyang Lake under a shifting hydrological regime. *The Science of the Total Environment*, 2022, 838(Pt 1): 155954.
- [13] Gomez C, Lawson J W, Wright A J, Buren A D, Tollit D, Lesage V. A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: the disparity between science and policy. *Canadian Journal of Zoology*, 2016, 94(12): 801-819.
- [14] Merchant N D, Pirotta E, Barton T R, Thompson P M. Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 78(1/2): 85-95.
- [15] Seebens H, Gastner M T, Blasius B. The risk of marine bioinvasion caused by global shipping. *Ecology Letters*, 2013, 16(6): 782-790.
- [16] Hassellöv I M, Turner D R, Lauer A, Corbett J J. Shipping contributes to ocean acidification. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(11): 2731-2736.
- [17] Pirotta V, Grech A, Jonsen I D, Laurance W F, Harcourt R G. Consequences of global shipping traffic for marine giants. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(1): 39-47.
- [18] 刘红, 杜梦, 车军. 长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程初通航道的建设. *水运工程*, 2017(11): 129-134.
- [19] 张先锋, 刘仁俊, 赵庆中, 张国成, 魏卓, 王小强, 杨健. 长江中下游江豚种群现状评价. *兽类学报*, 1993, 13(4): 260-270.
- [20] 赵修江. 河流系统鲸豚类种群数量调查方法探索及其应用研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009.
- [21] 魏卓, 张先锋, 王克雄, 赵庆中, 匡新安, 王小强, 王丁. 长江江豚对八里江江段的利用及其栖息地现状的初步评价. *动物学报*, 2003, 49(2): 163-170.
- [22] Zhao X J, Barlow J, Taylor B L, Pitman R L, Wang K X, Wei Z, Stewart B S, Turvey S T, Akamatsu T, Reeves R R, Wang D. Abundance and conservation status of the Yangtze finless porpoise in the Yangtze River, China. *Biological Conservation*, 2008, 141(12): 3006-3018.
- [23] Kimura S, Akamatsu T, Li S H, Dong L J, Wang K X, Wang D, Arai N. Seasonal changes in the local distribution of Yangtze finless porpoises related to fish presence. *Marine Mammal Science*, 2012, 28(2): 308-324.
- [24] Dong L J, Wang D, Wang K X, Li S H, Mei Z G, Wang S Y, Akamatsu T, Kimura S. Yangtze finless porpoises along the main channel of Poyang Lake, China; implications for conservation. *Marine Mammal Science*, 2015, 31: 612-628.
- [25] 章晋秀, 陈懋, 韩祎, 雷珮玉, 王克雄, 梅志刚, 王丁. 长江中下游干流江豚岸线栖息地质量评估. *水生生物学报*, 2019, 43(S1): 56-61.
- [26] 陈佩薰, 刘仁俊, 王丁, 张先锋. 白鱄豚生物学及饲养与保护. 北京: 科学出版社, 1997: 233.
- [27] 于道平, 王江, 杨光, 章贤. 长江湖口至荻港段江豚春季对生境选择的初步分析. *兽类学报*, 2005, 25(3): 302-306.
- [28] 张晓可, 于道平, 王慧丽, 万安, 蒋泽球, 陈寿文. 长江安庆段江豚主要栖息地鱼类群落结构. *生态学报*, 2016, 36(7): 1832-1839.
- [29] 鹿志创, 田甲申, 王召会, 马志强, 韩家波, 高天翔. 应用碳氮稳定同位素技术研究江豚(*Neophocaena asiaeorientalis* sunameri) 食性. *生态学报*, 2016, 36(1): 69-76.
- [30] Chen M M, Yu D P, Lian Y X, Liu Z G. Population abundance and habitat preference of the Yangtze finless porpoise in the highest density section of the Yangtze River. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2020, 30(6): 1088-1097.
- [31] Yang J W, Wan X L, Zeng X Y, Zheng J S, Han Y, Fan F, Hao Y J, Wang K X, Mei Z G, Wang D. A preliminary study on diet of the Yangtze finless porpoise using next-generation sequencing techniques. *Marine Mammal Science*, 2019, 35(4): 1579-1586.
- [32] 龚彩霞, 陈新军, 高峰, 官文江, 雷林. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(2): 260-269.
- [33] 陈敏敏, 刘志刚, 黄杰, 连玉喜, 杨晓鸽, 于道平. 固化河岸对长江江豚栖息活动的影响. *生态学报*, 2018, 38(3): 945-952.
- [34] 王崇瑞, 索纹纹, 蒋国民, 李昊旻, 梁志强, 杨鑫, 袁希平, 李鸿, 廖伏初, 葛虹孜, 张辉, 伍远安. 东洞庭湖长江江豚及其与鱼类资源相关性. *中国环境科学*, 2019, 39(10): 4424-4434.
- [35] Yang J W, Wang K, Mei Z G, Xu J, Zheng J S, Wan X L, Hao Y J, Wang K X, Wang D. Temporal variation in the diet of Yangtze finless porpoise calls for conservation of semi-migratory fish. *Freshwater Biology*, 2021, 66(5): 992-1001.
- [36] 于道平, 董明利, 王江, 章贤. 湖口至南京段长江江豚种群现状评估. *兽类学报*, 2001, 21(3): 174-179.
- [37] Kasuya T, Kureha K. The population of finless porpoise in the Inland Sea of Japan. *Scientific Reports of the Whales Research Institute*, 1979.
- [38] Zhao X, Wang D, Turvey S T, Taylor B, Akamatsu T. Distribution patterns of Yangtze finless porpoises in the Yangtze River; implications for reserve management. *Animal Conservation*, 2013, 16(5): 509-518.
- [39] 陈敏敏, 张康, 张平, 严燕, 张四刚, 王康伟, 于道平. 长江安庆段航道整治对长江江豚数量和分布的时空影响. *生态学报*, 2023, 43(10): 4242-4249.
- [40] 张建军. 长江南京以下 12.5m 深水航道二期工程施工中江豚保护措施. *中国港湾建设*, 2016, 36(2): 20-23.
- [41] 曹民雄, 申霞, 黄召彪, 罗宏伟, 应翰海, 林武. 长江南京以下深水航道生态建设与保护技术及措施. *水运工程*, 2018(7): 1-9.