编号：Ares(2024)1736118 - 2024年3月6日

HABITABLE

塞内加尔手工渔业迁徙建模

Alassane Bah，UCAD
Timothée Brochier，IRD

D3.5

该**HABITABLE** 项目——连接气候变化、宜居性与社会临界点：气候移民情景——旨在大幅增进我们对**气候变化影响与迁移** 及流离失所模式之间当前相互联系的理解，并**更好地预判其未来演变**。

为期 **4年** （2020年—2024年），HABITABLE汇集了**21个合作伙伴：**列日大学、维也纳大学、波茨坦气候影响研究所、埃克塞特大学、IDMC、隆德大学、罗马智慧大学、adelphi、纳沙泰尔大学、发展研究院、科学与工业研究理事会、联合国教科文组织、加纳大学、CARE法国分会、特温特大学、谢赫·安塔·迪奥普大学、斯德哥尔摩环境研究所亚洲中心、Raks Thai基金会、亚的斯亚贝巴大学、马里国家统计局和Samuel Hall。

HABITABLE是**有史以来规模最大的气候变化与迁移研究项目**，由欧盟委员会地平线2020计划资助。

请访问www.habitableproject.org，了解有关该项目的更多信息。

标题：塞内加尔手工渔业迁徙建模

作者：
Bah, Alassane，UCAD；
Brochier, Timothée，IRD

审稿人：

Jacob Schewe，PIK，波茨坦，德国
Diana Reckien，特温特大学，荷兰

可在以下位置获取出版物：
本文件经欧盟委员会批准后，将发布在项目网站上。

版本历史

版本号	Date	信息
1	2024年3月	提交给欧盟委员会的初始版本，作为交付成果成果

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No. 869395. The content reflects only the author's views. The European Union is not responsible for any use that may be made of the information it contains therein.

致谢

本项工作若没有众多合作伙伴和同事的贡献，将无法完成。特别是，我们谨向来自塞内加尔研究机构的同事表示感谢。UCAD 的研究人员和教师研究人员，尤其是来自 ESEA 和 ESP 的人员，以及优秀的 LPAO-SF，为本项目作出了关键贡献。来自 UGB、IRD、CIRAD、索邦大学、UAM，以及 LOCEAN、UMMISCO、SENS、ESPACE-DEV、LEMAR、LOPS 研究团队和 ECLAIRS 混合国际实验室的同事也作出了贡献。塞内加尔的渔民通过分享他们的知识作出了贡献。我们还感谢隶属于 ISRA 的 CRODT。

缩略语

人工智能：人工智能 CIRAD：国际农业发展研究中心 COPACE：中东部大西洋渔业委员会 CRODT：达喀尔海洋学研究中心 ECLAIR2：西非气候与海洋综合研究及塞内加尔气候变化响应 ECMWF：欧洲中期天气预报中心 ERA：ECMWF再分析 ESEA：高等应用经济学院 ESP：高等理工学院 ESPACE-DEV：空间观测、模型与参与式科学 FAO：粮食及农业组织 Fish-MIP：渔业与海洋生态系统模型比较计划 FU：渔业单位 GAMA：地理信息系统基于主体的建模架构 GIS：地理信息系统 IPCC：政府间气候变化专门委员会 IRD：发展研究所 ISRA：塞内加尔农业研究所 ITCZ：热带辐合带 INN：非法、未报告及不受监管的（渔业活动）
LEMAR：海洋环境研究实验室 LOCEAN：数值海洋学实验室 LOPS：物理与空间观测实验室–Simeon Fongang LPAO-SF：大气与海洋物理实验室 OFT：一次一因子法 SENS：知识、环境与社会 SSP：共享社会经济路径 SST：海表温度
UAM：Amadou Mahtar Mbow大学 UCAD：Cheikh Anta Diop大学
UMMISCO：复杂系统数学与计算机建模部门

xes

图索引

图*1*：大型独木舟抵达塞内加尔*Kayar*登陆点，其中可能载有迁徙者。照片：*UMMISCO* *11*
图*2*：影响西北非渔民迁徙的社会经济与生态临界点。只有两个事件导致捕捞迁徙距离暂时缩短。根据*Chauveau*等人（*2000*）的信息构建的概念图.*12*
图*3*：跨学科研究策略示意图。待识别的过程和参数用圆圈表示，研究方法用方框表示.*14* 图*4*：手工渔业主要迁徙路线（改编自*Binet*等，*2013*）.*15*

图*5*：基于卫星图像在登陆点检测并计数塞内加尔捕捞单元的示例（*Olaluwoye*等，即将发表）.*15*

图*6*：对捕捞单元数量进行每年两次监测的小规模渔业登陆点，涵盖捕捞单元总数的*80%*（*CRODT*）.*16* 图*7*：渔业社会生态系统总体模型.*19* 图*8*：“渔业”子系统类图.*20*

图*9*：捕捞航次中行为者逻辑的总体示意图。每个方框对应一种方法，用于处理所有特定情况。详情见算法*1*。如果在本地登陆点附近无法识别渔场，则捕捞单元会迁移至另一个登陆点.*21*

图 *10*：可捕性校正因子随鱼类生物量变化，类似霍林第三型，自模拟 *7*起应用。*Qcor = B/(B+100).28*

图*11*：*“lolly”*模拟器图形界面介绍。*1*-模拟参数，*2*-时间可视化，*3*-空间可视化，*4*-实时交互，*5*-监测变量.*29* 图*12*：*Saltelli*分析模型参数对累计总捕捞量的影响.*31* 图*13*：模拟*8.1*的结果，采用实际捕捞效率，参考气候情景.*35* 图*14* 模拟*10.1*的结果，采用实际捕捞效率，海表温度*+3℃*气候情景.*35*

图*15*：模拟*8*的结果，渔获量比实际慢*100*倍，参考气候情景.*36*

图*16*：模拟*10*的结果，渔获量比实际慢*100*倍，海表温度*+3℃*气候情景.*36*

图*15*：塞内加尔的渔获量。红色= 底层鱼类，蓝色= 远洋鱼类。图中粗体数字为申报渔业单位数量。根据联合国粮食及农业组织数据和政府报告编制.*39*
图*18*：鱼粉厂的位置（*2018*年，左）以及由*Evol-Deb* 模型估算的圆腹鲱生物量季节性分布（*Brochier* 等，*2018*）.*40*

附录图

附录图*1*：*Saltelli*分析模型参数对塞内加尔累积渔获量的影响 ..... *49* 附录图*2*：*Saltelli*分析模型参数对毛里塔尼亚累积渔获量的影响 ..... *50* 附录图*3*：*Saltelli*分析模型参数对几内亚比绍渔获量的影响 ..... *50* 附录图 *4*：当前气候（上）、温和气候变化（ *+1*，*5C*，中）和极端气候变化（ *+3℃*，下）条件下撒哈拉远洋鱼类模型的月度分布。对于每个月份（*M1-12*），模型网格中所示部分对应鱼类栖息地，颜色对应海表温度.*51* 附录图*5*：与图*22*相同，但针对撒哈拉底层鱼类.*52* 附录图*6*：与图*22*相同，但针对几内亚远洋鱼类.*53* 附录图*7*：与图*22*相同，但针对几内亚底层鱼类.*54*

附录图*8*：捕捞单元短期（上）和长期（下）迁徙数量的变化（模拟*1*）.*55*

附录图*9*：模拟*1*中各模型物种鱼类生物量的变化。上：底栖鱼类，下：中上层鱼类.*56* 附录图*10*：模拟*1*中登陆点独木舟数量的变化.*56*

附录图*11*：模拟*1*中的渔获量变化。左：各登陆点的渔获量。右：各国总渔获量的分布.*57* 附录图*12*：模拟*1*、*2*和*3*中塞内加尔渔获量的变化.*57* 附录图*13*：模拟*4*中的渔获量变化.*58* 附录图*14*：模拟*4*中的生物量变化.*58* 附录图*15*：模拟*5*中的鱼类生物量变化.*59* 附录图*16*：模拟*6*中的鱼类生物量变化.*59*

附录图17：模拟6中捕捞单元分布的变化.60 附录图18：模拟7中渔获量的变化。左：各登陆点的捕捞量分布；右：各国总渔获量的分布.61 附录图19：模拟7中鱼类生物量的变化。上：底栖鱼类。下：中上层鱼类61 附录图20：模拟8中鱼类渔获量的变化。左：各登陆点的捕捞量分布；右：各国总渔获量的分布.62 附录图21：模拟9中鱼类渔获量的变化。左：各登陆点的捕捞量分布；右：各国总渔获量的分布.63

附录图22：模拟10中渔获量的演变。左：各登陆点之间的捕捞量分布；右：按国家分散的总渔获量.64 附录图23：模拟8.1中渔获量的演变。左：各登陆点之间的捕捞量分布；右：按国家分散的总渔获量.64 附录图24：模拟8.1中鱼类生物量的演变.65

附录图25：模拟 9.1中渔获量的演变。左：各登陆点之间的捕捞量分布；右：按国家分散的总渔获量.65 附录图26：模拟 9.1中鱼类生物量的演变.66

附录图27：模拟10.1中渔获量的演变。左：各登陆点之间的捕捞量分布；右：按国家分散的总渔获量.67 附录图28：模拟10.1中鱼类生物量的演变.67

表格索引

表1：所用气候情景列表.25 表2：每个网格点定义的海洋环境变量.25 表3：模型中纳入的西北非手工渔业登陆点列表。每日估算加工能力汇总了其他邻近地点的基础设施情况，并依据2020年的报告得出.25 表4："鱼"智能体的属性（估算值）.26 表5：塞内加尔手工渔业单位三大类别的技术特征（改编自Chavance和Morand，2020年）.27 表6：三类渔业单位的属性.27 表7：用于模型Saltelli分析的参数及其取值范围列表.30 表8：一次一因子法敏感性研究的情景及相应配置文件列表 32

表9：用于校准可捕性参数的初步模拟，以及"一次一因子法"敏感性测试对应的配置文件.32

目录

摘要.*9*

前言.*10*

1 – 引言.*11*

1.1 北部渔业　　方　　东非.11
1 11 111 1 13 . . 塞内加尔手工渔民迁徙.2 气候变化的影响.

1.2 跨学科研究策略.1 **3**
1 14 121 2. . 社会与政治参数.2 15 12 17 自然、生态与经济参数.3 模型构建.

2 – 描述 模型描述.*1* ***8***

2.1. 目∪的.1 **8**

2.2 环 境、状态变量和尺度.1 **8**
2 19 221 2. . 捕捞单元.2 20 22 目标物种.3 20 22 21 环境.4 登陆点.

2.3 过程概览与调度.21
2 21 231 3 22 . . 渔业单位.2 鱼类种群.

2.4 设计概念.23
2 23 241 4. . 基本原则、涌现与适应.2 23 24 24 实体目标、感知、交互与随机性.3 观测.

2.5 初始化 化. **24**
2 24 251 5. . 捕捞单元初始分布.2 24 25 鱼类生物量初始分布.3 24 25 24 环境初始化.4 登陆点初始化.

2.6 输入数据.25
2 25 261 6. . 气候情景（海洋环境）.2 25 26 登陆点参数.3 26 26 26 目标物种参数.4 渔船队特征.

2.7 子模型.27
2 27 271 7 28 . . 捕捞.2 鱼类种群动态.

3 Simulations.2 ***9***

3.1 “Lolli”模拟器介绍.29

3.2 敏感性分析.30

4 **-** 讨论***.37***

4.1 概念模型.37

4.2 “Lolly”模拟器初步结果.38

4.3 研究局限.40

4.4 结论与展望.41

5 **-** 参考文献***.42***

6 **–** 附录***.49***

附录 A：配置文件和参数.49

附录B：Saltelli敏感性分析结果.49

气候情景中的鱼类栖息地分布.51

附录D：输出图.55

摘要

西北非海岸受到加那利洋流的滋养，形成了生产力极高的海洋生态系统。塞内加尔手工渔船队是西非规模最大的渔船队，受益于这一生产力特别高的生态系统。它历经岁月，凭借出色的适应能力得以延续，并具有很强的灵活性，能够迅速应对变化，尤其是通过更换渔具和迁徙来应对。然而，自1980年代以来，捕捞努力量不断增加，导致鱼类资源逐渐枯竭，渔民为寻找新的渔场而迁徙的距离也越来越远。2007年起，许多渔民甚至开始驶往加那利群岛寻找在欧洲更有利可图的工作，并乘独木舟载着有意移民者前往。2022年后，这一现象因渔业产量再次下降而加剧；此次下降是海岸沿线鱼粉厂的发展所致，这些工厂加剧了过度捕捞。气候变化也可能影响鱼类栖息地，进而影响渔场的分布。本研究探讨的问题是：气候变化、捕捞努力量和社会经济参数如何相互作用并决定手工渔业动态。我们采用跨学科方法，收集了有关气候、捕捞努力量和社会经济参数的数据及定性信息。这些资料为构建塞内加尔手工捕捞流动性的多智能体模型奠定了基础。我们实现了模型的第一个版本，并展示了在不同捕捞努力量和气候情景下的一些初步模拟结果。结果表明，首先，即使在所考虑的最极端气候情景下，气候变化对手工捕捞的影响也可能很小。其次，如果捕捞努力量维持在当前水平，无论气候情景如何，渔业都会崩溃，并伴随渔民大规模迁徙。第三，在降低捕捞努力量的情况下，将形成可持续的渔业平衡；在这种平衡下，塞内加尔手工渔业每年捕获~250,000吨鱼，捕获地点主要在塞内加尔，接近2000年代的渔获量纪录。在测试的两种气候变化情景下，这种可持续平衡都能维持。渔民迁徙能够揭示鱼类种群的状况，并影响渔业资源的可持续开发。塞内加尔手工渔民的迁徙会影响捕捞努力量的区域分布，因此必须在该行业的区域发展和规划政策中予以考虑，尤其是在基础设施不断增加、空间管理措施（例如海洋保护区）日益增多的背景下。本研究为开发用于决策支持的计算机模拟工具奠定了基础。

关键词

塞内加尔手工渔业；迁徙；气候变化；渔业崩溃；基于主体的建模；深度学习；可持续发展

前言

UMMISCO是一个国际研究单位，汇聚了来自包括法国和塞内加尔在内五个国家的研究人员和研究型教授。UMMISCO的塞内加尔团队汇聚了来自IRD（发展研究所，法国）和UCAD（谢赫·安塔·迪奥普大学，达喀尔，塞内加尔）的研究人员。UMMISCO对塞内加尔小规模渔业的研究始于2014年，重点是构建社会经济模型，以研究人工鱼礁、海洋保护区和关于渔民流动性的国际协定等管理措施如何影响沿海渔业。该研究方向后来因纳入Habitable项目而得到进一步推动。

要对手工渔民迁徙这样复杂的现象进行建模是一项挑战，需要运用不同类型的知识。我们围绕 UMMISCO 的建模人员组建了一个跨学科研究团队，以支持物理海洋学、海洋生物学和社会经济学领域的相关研究。团队成员包括来自 ESP-UCAD、UGB、索邦大学和 IRD 的 2 名海洋学家、3 名气候变化科学家、2 名渔业科学家、1 名社会经济学家、1 名数学家和 1 名计算机科学家。该跨学科团队共同建立了概念框架和路线图，并在 2020年 和 2021年 于塞内加尔举行的会议期间，随着研究的推进不断完善。会议期间，团队确定了关键参数，并以此作为硕士生研究的基础；这些研究由建模团队和各学科教授共同指导。5 篇有关渔民迁徙的硕士论文在计算机科学、社会经济学和海洋生物学领域完成答辩。除了硕士生外，项目还聘用了 2 名数学建模和气候变化方向的博士后，任期数月。塞内加尔渔业研究中心 CRODT-ISRA 作为第三方合作伙伴参与了该项目。

1 – 引言

1.1 西北非渔业

西北非海岸是世界上鱼类资源最丰富的区域之一。这是因为在信风作用下，从摩洛哥到（季节性延伸至）几内亚比绍的近岸海域，深层海水上涌，使表层海水富含营养物质。富含营养物质的海水抵达表层后，会形成浮游植物水华，支撑起庞大的营养网，其中包括许多鱼类种群。尽管来自欧洲和亚洲的远洋渔业长期以来一直在该区域作业，但从摩洛哥到几内亚一带的手工渔业主要发展于塞内加尔。

1.1.1 塞内加尔手工渔民迁徙

手工渔业是塞内加尔一个重要的经济部门，提供超过 60 000 个直接就业岗位，拥有 14 000 艘独木舟，并为区域粮食安全作出贡献。该部门被认为非常适应且能够抵御生态系统变化，包括采用围网等现代渔具。然而，随着手工渔业船队规模扩大、效率提高，合法和非法工业捕捞也随之增加，这个生产力极高的海洋生态系统逐渐遭受过度捕捞（Belhabib 等，2014年）。鱼类目标物种的体型和数量都在减少，其总体数量自 1980 年以来逐渐降至原来的 50%。

塞内加尔手工渔业在性别分工方面界限分明。捕捞航次的船员全由男性组成，而潮间带的贝类采集和手工鱼类加工则完全由女性承担。塞内加尔通常将捕捞单元定义为作业独木舟、船员及渔具，但更全面的定义应包括主要由女性组成的“岸上团队”。从历史上看，两者不可分割；然而，工业鱼类加工的发展逐渐压缩了女性的空间，而鱼类匮乏则迫使男性在海上花费越来越多的时间。下文所说的“渔民迁移”，是指渔业单位沿海岸更换登陆点，迁移时间可从数周到数年不等。迁移时间较长时，整个家庭通常会一起迁往新的登陆点并在那里居住；也有些渔民在每个登陆点都拥有一个家庭（Deme 等，2021年）。下文采用中性术语“渔民”，指与手工捕捞单元相关的人员，包括男性和女性（Branch 与 Kleiber，2017年）。

Failler 等人（2020年）和 Deme 等人（2021年）指出，塞内加尔移民手工渔业对其所在地区记录的上岸渔获总量作出了重大贡献

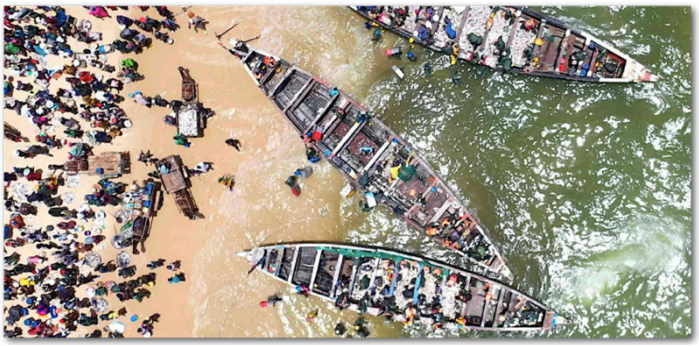


图 *1*：大型独木舟（可能来自移民）抵达塞内加尔 *Kayar* 登陆点。照片：*UMMISCO*

驻扎于塞内加尔，并遍及次区域，其上岸渔获量每年最多可占小型中上层鱼类总量的70%。大型独木舟使用长达数公里的围网捕捞，并不断迁徙以追随鱼群，随后在有需求的登陆点卸鱼（图1）。可以看出，迁徙渔民对鱼粉厂的供应贡献很大，他们会选择自己的

登陆点，依据的是这些工厂是否存在。作者指出，在管理该行业时，必须考虑这种流动性；尤其是在鱼粉厂不断涌现、导致需求激增的背景下（Deme 等，2023）。为此，有必要详细了解手工渔民的流动过程。

塞内加尔手工渔民迁移是一种文化、经济和社会现象。Chauveau等人（2000）对这些迁徙进行了历史与现代描述，社会科学和渔业领域的大量研究也记录了这一现象（图 2）。这一历史视角表明，在20th 世纪初，迁徙的动因是寻找新市场，这些市场随着新兴城市中心和出口地的发展而形成。随着城市周边的捕捞压力不断增加，渔民沿海岸迁徙，前往开发程度较低的渔场。20世纪60年代，独木舟实现机动化，起初导致沿岸迁徙减少，因为渔民能够捕捞近海鱼类。随后，非殖民化进程和捕捞许可证制度的建立，减少了远距离工业捕捞压力；随着鱼类丰度增加，手工渔民迁移也随之减少。然而，自20世纪80年代以来，鱼类资源逐渐枯竭，导致迁徙距离持续增加，渔业部门收入不断下降。农业危机和区域地缘政治局势不稳加剧了这一情况，促使更多人考虑迁往欧洲，以寻求安全和收入更高的工作。自2007年起，许多经验丰富的渔民开始出租自己的服务，充当移民运送者；他们有的返回塞内加尔再次从事这项活动，有的则留在欧洲。自2019年以来，渔获量再次下降，而沿岸鱼粉厂的发展进一步加剧了过度捕捞，这使这一现象近来愈演愈烈（Brochier 等人，2023；Enríquez-de-Salamanca，2023）。

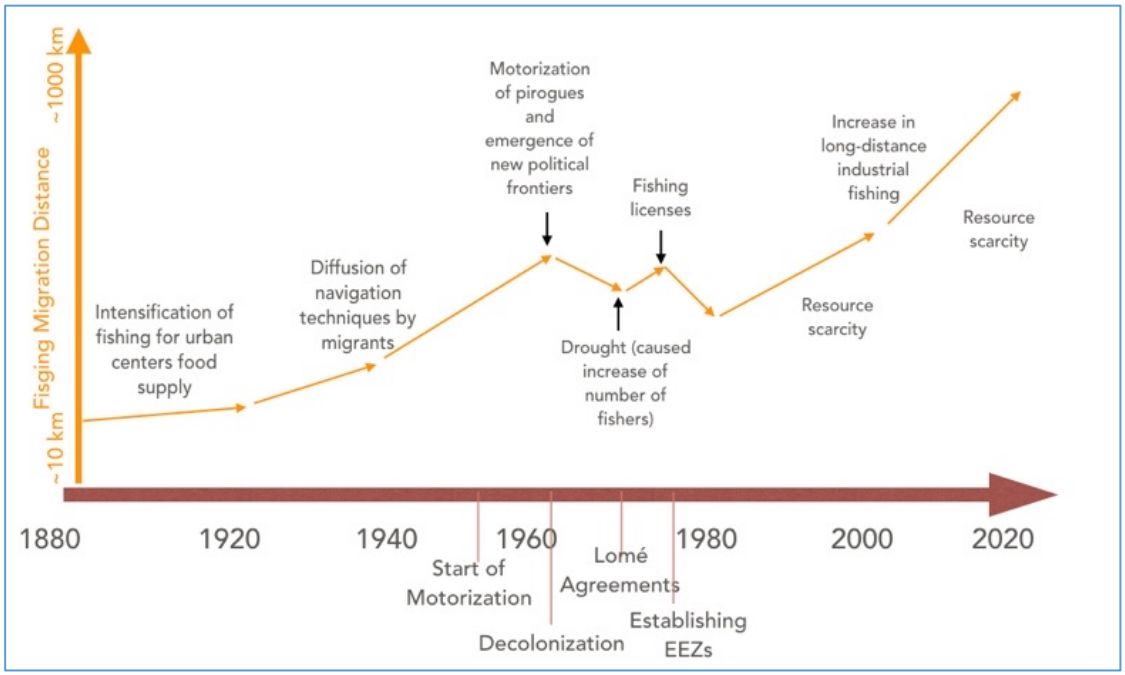


图*2*：影响西北非渔民迁徙的社会经济与生态临界点。只有两个事件导致捕捞迁徙距离暂时缩短。根据 *Chauveau*等人（*2000*）提供的信息构建的概念示意图。

1.1.2 气候变化的影响

气候变化已经对西北非产生影响，未来预测表明降水将发生变化，可能对农业造成负面影响（Sultan 等，2013）。然而，气候变化可能如何影响海洋上升流生态系统，仍不确定（Sylla 等，2019）。20世纪70年代，严重干旱对农业造成了负面影响，但并未影响海洋生态系统。事实上，干旱时期信风可能更频繁，从而促进海洋生态系统的上升流富集，进而提高鱼类生产力。气候对农业和渔业影响的这种反差，促使人口从内陆迁往海岸，手工渔业则发挥了避难行业的作用。如今，类似机制也可能正在发挥作用：在包括降雨量减少在内的多重气候变化因素影响下，塞内加尔的农业生产正在下降（Faye，2022）。然而，在海洋生态系统目前已遭过度开发的情况下，气候难民或许无法在手工渔业中找到立足之地。

在季节尺度上，气候会强烈影响西北非鱼类栖息地分布，进而影响鱼类迁徙。可通过生物物理模型模拟鱼类迁徙（例如 Brochier 等，2018年），其主要由热带辐合带（ITCZ）的季节性波动决定。在塞内加尔，这种季节性波动使生态系统在12月至次年6月呈现上升流生态系统特征，在7月至11月则呈现温暖沿岸水域生态系统特征。事实上，有利于上升流的风的季节变化会导致海表温度和浮游生物大幅波动，最终影响鱼类栖息地。因此，许多鱼类物种会随这些季节性波动迁徙，而气候变化可能会调节这种波动。此外，随着鱼类丰度下降，季节性鱼类迁徙模式变得愈发重要，对小型中上层鱼类渔业尤为如此。例如，在塞内加尔，一些过去全年都有的鱼类物种如今只有在一年中的部分时段才能捕获。因此，气候变化可能通过调节鱼类栖息地的这些模式影响渔业。

政府间气候变化专门委员会强调，气候变化与迁徙模式之间的联系十分复杂，这是社会、经济和环境因素相互作用的结果。HABITABLE 项目的总体目标是在“宜居性”这一概念框架下阐明这种复杂性。在此，我们将“宜居性”理解为非洲西北海岸在气候变化情景下维持塞内加尔手工渔民生计的潜力。然而，气候变化可能造成的影响之一是渔民人数增加，因此问题就变成：在气候变化背景下，海洋生态系统能够承受多大的捕捞努力量？我们通过构建一种工具来预测气候变化对塞内加尔手工渔业的影响，以探讨这一问题。这项工作需要开展跨学科研究，以整合气候变化的影响，以及影响手工渔业动态的社会经济和生物驱动因素。

1.2 跨学科研究策略

手工渔民迁移是社会生态系统动态所产生的一种复杂现象。有关渔民迁移的描述来自文献研究、专家咨询和渔民焦点小组，这些研究揭示了这些迁徙的社会与政治背景。另一方面，遥感传感器、原位传感器和政府行业报告提供了有关渔民所处物理、生态和经济环境的信息。这些信息揭示了其中发挥作用的过程和参数：一方面，这些过程和参数在社会学、经济学和地理学研究框架下得到描述；另一方面，则在海洋生物学和渔业科学研究框架下得到描述。这些信息被汇集到塞内加尔手工

渔业的本体中，并据此构建了概念模型，该模型可以是基于方程的模型，也可以是多主体信息学模型。在这一研究过程中，多项活动同时开展，或以迭代方式进行（图3）。

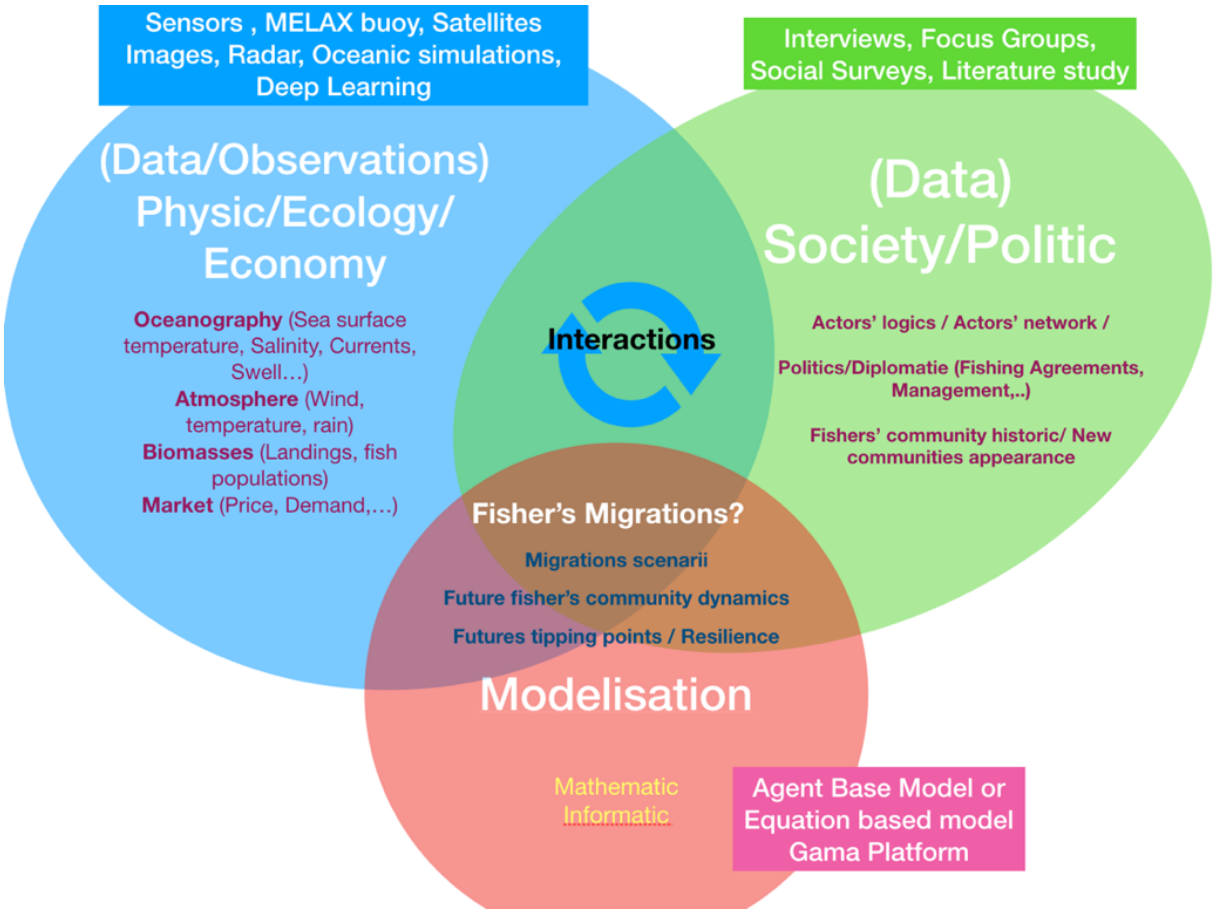


图 *3*：跨学科研究策略示意图。待识别的过程和参数列于圆圈中，用于研究这些过程和参数的方法列于方框中

1.2.1 社会与政治参数

文献中包含大量关于塞内加尔手工渔民迁移的信息，尤其根据不同渔民社群描述了主要迁徙路线（图4）。通过专家咨询和渔民焦点小组，我们得以补充这些信息，详细了解渔民决定迁徙的原因、迁徙的准备工作、迁徙期间的时间安排，以及迁徙归来后的作业情况。这些信息来自专家和利益相关者参与的11场专题焦点小组，参与者来自不同渔民社群。此外，我们还沿塞内加尔海岸开展了多次访谈，相关访谈由UCAD学生在三篇论文中进行分析（Fall，2021年；Diallo，2022年；Ndiaye，2023年）。这些方法提供了关于行动者逻辑和网络的定性数据，并揭示了鱼类过度开发、鱼类迁徙模式、市场需求，以及政治和外交通过管理系统与国际渔业协定发挥作用之间复杂的相互影响。渔民一年中的任何时候都可能迁徙，动因是鱼类匮乏，而鱼类匮乏是鱼类季节性迁徙与过度开发共同造成的。同一季节中，一些渔民可能向北迁徙，另一些则向南迁徙，具体取决于目标物种。

鱼类贸易商是这些迁徙中的关键行动者。他们的工作是向渔民收购鱼，并在市场上出售。鱼类贸易商在沿海各地都有联系人，这些联系人会告知他们目标物种何时出现；如果此时该物种有市场，鱼类贸易商便会资助渔民迁往该地，必要时也会依托国际协定开展。

1.2.2 自然、生态与经济参数

上升流系统的一个显著特征是，物理参数所引起的生物生产力具有强烈变异性，尤其是风力与风向的变化。理解驱动这种变异性的机制，对于预判气候变化的影响至关重要。以往物理与渔业海洋学研究通过结合鱼类生物学知识与海表温度等物理海洋学数据，详细阐述了风和上升流变异如何影响鱼类物种的分布与迁徙（例如Binet等，1988年；Brochier 等，2018及文中参考文献）。

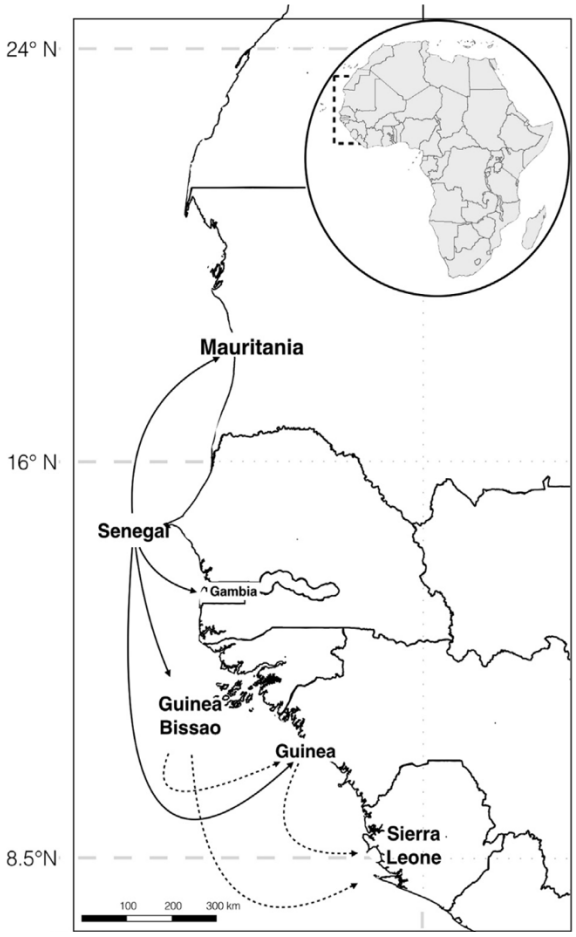


图*4*：主要手工渔业迁徙路线（改编自*Binet*等，*2013*）。

手工渔业的生态背景与经济状况，通过年度鱼类上岸量、渔业单位的数量与分布以及登陆点基础设施加以描述。塞内加尔各登陆点的年度渔获量，部分可从已发表的时间序列、年度内部报告以及针对塞内加尔的FAO汇总数据集中获得。FAO/COPACE报告还提供了次区域尺度上被开发鱼类种群的参数。CRODT对手工渔业船队进行了监测



图5：基于卫星图像在登陆点对塞内加尔的捕捞单元进行检测与计数的示例（Olaluwoye等，已接收）。

自1980年起，通过每半年对主要登陆点的渔业单位进行一次普查，了解其分布（图6）。2005年，普查范围扩大至大多数登陆点；但直到2014年，由于政治不稳定，塞内加尔南部（卡萨芒斯）仍无法开展普查。当时，登陆点的基础设施十分匮乏，因此该地区的上岸渔获量很可能主要用于当地消费和手工鱼类加工。

自2015年起，卡萨芒斯的登陆点也纳入普查范围。随着当地基础设施不断发展，观察到的捕捞单元数量也日益增加。普查在两个特点鲜明的季节（暖季和冷季）进行，以了解季节性迁徙的影响。这些数据属于手工渔业鱼类登陆监测方案的一部分，但事实证明，每半年一次的普查不足以准确反映某一时点捕捞单元的分布情况，因为许多捕捞单元实际上每年会在不同登陆点之间迁移数次。然而，受后勤和资金条件限制，无法按适当的时间尺度统计捕捞单元；理想情况下，统计频率应为每周。为帮助克服这一限制，我们支持开展相关研究，利用无人机和/或卫星获取的航空影像，并借助经专家训练的人工智能（AI），开发自动化渔业单元普查方法，以识别塞内加尔手工渔业单位的不同类别（图5）。

除鱼粉厂外，各登陆点渔业基础设施和加工能力的详细报告均不可获得，而非政府组织也有关于鱼粉厂的报告。事实上，鱼粉厂的日加工能力似乎构成其所在登陆点加工能力的主要部分。专家咨询得出了手工转化、出口和本地鲜货市场加工能力的（低得多的）估计。

为研究气候变化的影响，我们需要重建适用于我们具体问题（即对渔业的影响）的气候变化情景。参考气候状况为“ERA5”再分析（历史情景），最接近真实气候。为构建未来情景，我们分析了13个政府间气候变化专门委员会模型，这些模型以大气二氧化碳浓度进行参数化，分别对应于政府间气候变化专门委员会SSP2-4.5和SSP5-8.5情景对2064—2099年期间的预估。SSP2-4.5模拟了一种温室气体排放轨迹，其社会经济假设与当前社会经济趋势的延续相一致。这一排放轨迹

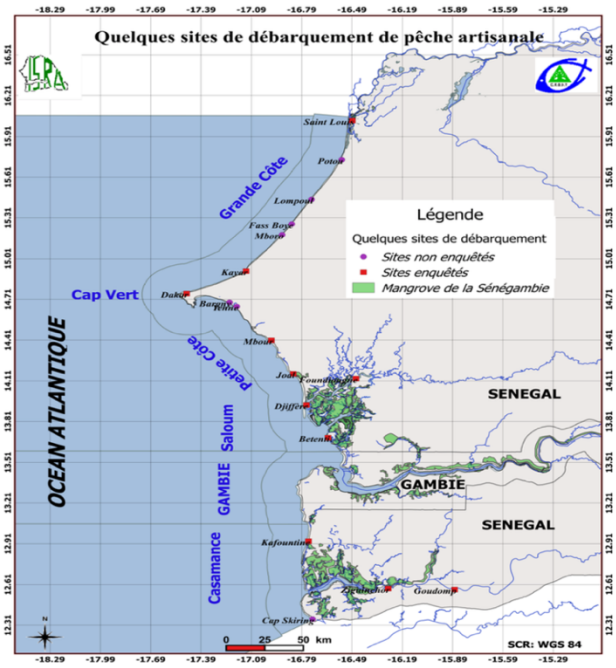


图*6*：对捕捞单元数量进行半年监测的小规模渔业登陆点，占捕捞单元总数的*80%*（*CRODT*）。

到2100年产生4.5W/m2的辐射强迫，即 y
升温幅度约为 y
与前工业化时期相比为2.7°C l
时期。SSP5-8.5 情景对应较高的气候漂移，其危害演变最为不利，因此风险水平也最高。通过分析未来气候模型，我们发现，在最极端的情景下，该区域的海表温度上升了 3 度。然而，在这些全球气候变化模型中，塞内加尔近海的季节性沿岸上升流等小尺度特征并未得到很好的呈现。因此，为了保留沿海地区特有的海表温度结构（这种结构可能会持续存在），

我们构建了“乐观未来情景”和“悲观未来情景”：以参考情景（ERA5）为基础，分别统一修正海表温度 + 1.5°C 和 + 3°C（表 *1*）。未来气候情景下海表温度的升高使鱼类栖息地向北移动（见附录 C 中的图）。

1.2.3 模型构建

文献中的手工渔民迁移模型由UCAD的一名博士后研究人员进行了综述与综合。这项（未发表的）研究表明，已存在数学方法和捕捞成本优化模型，但指出缺乏用于推断气候变化影响的探索性模型。渔业科学通常要么考虑渔业对鱼类种群的影响，要么考虑气候对鱼的影响。试图将这两种相互作用整合到单一模型中，产生了有助于研究但难以为决策解读的复杂模型（Travers等人，2007年）。渔业与海洋生态系统模型比较计划（Fish-MIP）通过研究多个复杂模型来应对这些局限，但仍得出结论：不确定性水平仍然阻碍其用于支持国家层面的适应政策（Tittensor等人，2021年）。因此，我们并未改编既有模型，而是基于塞内加尔手工渔业的特殊性，启动了一个复杂度较低的新模型。跨学科研究识别出的参数和过程被用于构建概念模型。

多智能体方法使我们能够轻松地将空间数据与不同性质、由不同学科描述的过程整合到一个模型中，随后便可对该模型进行数值探索。为避免与鱼类种群闭合相关的技术困难，即密度制约问题，鱼类种群动态采用了嵌入多智能体信息模型中的简单数学模型。模型的实现采用迭代方式，逐步纳入气候、鱼类迁徙、基础设施和捕捞单元参数（参见 Brochier 和 Bah，2020年；Deugue，2020年提出的低复杂度模型）。模型的目标是识别塞内加尔手工渔业社区未来面临的气候和社会经济临界点。在这种方法中，临界点对应于模型参数的阈值，这些阈值将可持续渔业与崩溃渔业区分开来。模型的迭代实现揭示了信息缺失的问题，由此促成了新的实地研究，而研究结果又推动了模型的演进。

“ODD”协议（Grimm，2010年）旨在提供基于主体的模型的描述，以便重写代码。我们在第2节介绍概念模型，并在第3节介绍其在 Gama（一个以 Java 编写的基于主体的模拟平台，https://gama-platform.org/）中的实现和运行。第4节讨论了一些初步的模拟结果，并提出了未来的研究方向。

2 – 模型描述

模型描述遵循 ODD（概述、设计概念、细节）协议，用于描述个体模型和基于主体的模型（Grimm等人2010）。该协议旨在先简要介绍模型的高层结构，再在各小节中逐步展开其复杂性。

2.1. 目的

此处提出的模型旨在为手工渔业管理决策支持奠定基础，开发一种计算机模拟工具，并纳入可能影响渔业的气候和社会经济参数。气候变化对渔业的影响并非显而易见，因此本模型旨在呈现空间明确的气候变化情景对鱼类栖息地分布的影响。进而，鱼类栖息地的分布会影响手工捕捞航次的距离和持续时间。在发展中国家等治理水平较低的地区，手工渔业受监管的影响较小，因此本模型旨在将捕捞努力量与市场需求联系起来，而市场需求本身受加工能力和基础设施的制约。社会行为和金融机制制约着捕捞作业和迁徙的启动；模型旨在通过迁徙概率和持续时间参数，评估这些过程所产生的影响。

在此处展示的配置中，模型明确体现了塞内加尔手工渔船队的特点，包括不同规模的独木舟、渔具和目标物种。本模型旨在评估西北非的气候变化和捕捞压力对塞内加尔手工渔业可持续性及相应迁徙率的影响。它有助于厘清气候参数和渔业参数各自的影响，从而确定应在何处以及如何采取管理措施，以恢复手工渔业的可持续性。该模型设计为可演进，并能适应其他地理和社会经济配置。

2.2 实体、状态变量和尺度

手工捕捞的社会生态系统由三个子系统构成：渔业本身、气候以及经济和社会背景（图7）。在本模型中，我们重点关注渔业子系统，而“气候”和“社会经济”系统则以简化方式呈现。模型中的实体包括渔业单位、登陆点、渔场环境和目标物种（图8）。这四类实体的定义范围涵盖从摩洛哥到几内亚的地理区域，即塞内加尔手工渔业的活动区域（Binet等人1998）。研究的时间跨度为数年，以描述季节性移动，同时考虑可能影响次年情况的连锁效应。资源的空间动态对捕捞航次有显著影响，因此模型对其进行了明确建模。10公里的空间分辨率和1小时的时间步，与独木舟的平均速度（10公里/小时）相符。

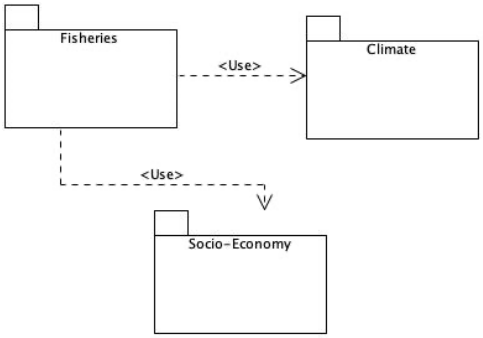


图7：渔业社会生态系统的一般模型

2.2.1 捕捞单元

在模型中，捕捞单元被视为个体或智能体。按照Charles-Dominique和Mbaye（2000）的定义，这些单元是为每次捕捞航次组建的。它们属于家族企业。在模型中，捕捞单元分为不同类型，每种类型会根据其预定的捕捞方式配备不同的“装备”。根据Chavance和Morand（2020）的分类，我们考虑了三种捕捞单元类型，分别对应不同的船只大小和捕捞方式。小型船只采用钓线或延绳钓；中型船只采用刺网；大型船只采用围网。中型和大型独木舟可配备冷藏箱，从而能够进行为期数日、在模型中最长达10天的捕捞航次，同时确保渔获得到保鲜。

每类捕捞单元都对应着目标物种，这些物种或为底栖鱼类，或为中上层鱼类。底栖鱼类生活在靠近海底的区域，是小型捕捞单元的主要目标；大型捕捞单元则优先捕捞生活在近海面区域的中上层鱼类，但也会将底栖鱼类作为次要目标。中型捕捞单元随机捕捞底栖鱼类和中上层鱼类。不同类别捕捞单元的发动机功率和渔具尺寸存在差异，模型通过不同的可捕性体现这一点，即捕捞时每小时捕获渔场（模型中的生物量斑块）中现有鱼类生物量的比例（表6）。

捕捞航次的持续时间可以不同，所针对的捕捞地点远近也不一。在模型中，每一类捕捞单元都与一种流动性类型相关联。小型渔业单位只能进行每日出海，目标为半径50公里以内的捕捞地点。中型渔业单位还可以进行“潮汐航次”，即在半径500公里范围内、出海天数最长可达10天的出海（表6）。最后，更大型的渔业单位还可以进行“作业季”，即更换登陆点（可能前往国外），持续时间最长可达10个月。当一个捕捞单元找不到任何鱼时，便存在一定概率开始作业季，也就是说，它将更换其登陆点。

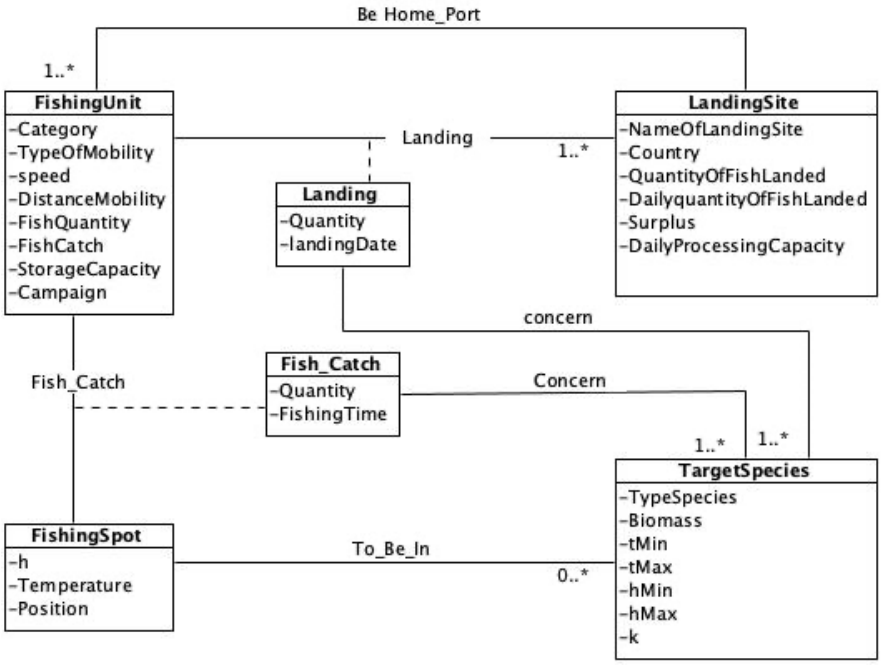


图 *8*：“渔业”子系统的类图。

2.2.2 目标物种

手工捕捞的目标物种是那些可在大陆架上获取的物种，以17种主要物种为主，它们通常占上岸渔获量的~80%（Ndiaye等人，撰写中）。我们根据其属于中上层还是底栖栖息地、分布的水深分布界限以及温度偏好，将它们归为4个模型物种。这些模型物种各自代表若干物种之和，这些物种构成与暖水相关的中上层鱼类和底层鱼类（称为“几内亚鱼类亲缘性”），以及与冷水相关的鱼类（称为“撒哈拉鱼类亲缘性”）。根据文献，我们假设这4个模型物种的种群在次区域尺度上具有唯一性，即繁殖率取决于总生物量。

2.2.3 环境

空间以逼真的方式表示为地理参考网格，分辨率为 10 公里，覆盖塞内加尔手工捕捞从几内亚到摩洛哥南部的整个活动区域。每个包含海域的网格单元均包含当地水深和月度海表温度。鱼类生物量斑块分布在该网格中，因此，拥有鱼类斑块的每个网格单元都可能成为捕捞地点。水深和水表温度决定了每种模型物种的栖息地。水深（即海底地形）随空间变化，但不随时间变化；海表温度（SST）则随时间变化，时间分辨率为 1 个月。SST 是模型中每个网格单元的气候参数，可根据气候情景进行调整，并对鱼类分布形成限制。目标物种的温度和水深范围使我们能够模拟不同气候情景下栖息地的月度变化（见附录 C 中的图）。

2.2.4 登陆点

手工渔业登陆点是沿海的地点，渔民可以在那里将独木舟停靠上岸，并直接出售渔获量。这些地点靠近道路连接处，并可能设有专用于鱼类加工的基础设施。登陆点沿海岸分布，其每日加工能力因基础设施而异。在模型中，如果某个登陆点一天接收的鱼超过其每日加工能力，就不再是渔民前往销售渔获量的理想地点。每日加工能力这一参数代表相关基础设施的有无，例如渔港、制冰厂、加工单元、鱼粉厂和道路连接，以及可接纳的独木舟数量。

2.3 过程概览与调度

2.3.1 捕捞单元

鱼类和渔业单位的分布初始化后，模拟以年内天数递增的方式开始，日期随之推进，因此对应的物理环境（即海表温度分布）也根据所采用的气候情景发生变化。每天，关于渔民与目标物种空间动态的过程每小时计算一次。对于捕捞单元，模拟日包括4个过程：识别一个捕捞单元以及目标物种的空间动态相关过程每小时计算一次。对于捕捞单元，模拟日包括4个过程：识别一个捕捞

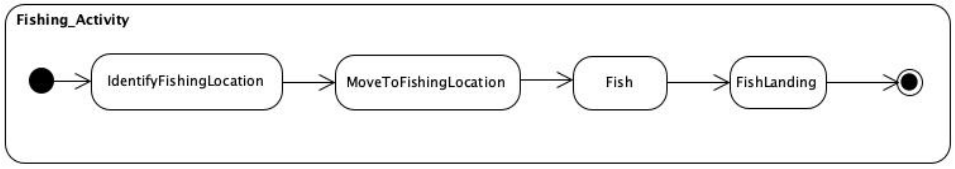


图*9*：捕捞航次的模型主体逻辑概览。每个框对应一种已实现的方法，用于处理所有特殊情况。详情请参见算法*1*。如果在本地登陆点附近无法确定渔场，则捕捞单元会迁移到另一个登陆点。

地点、向该地点移动、捕鱼活动和鱼类上岸（图9）。然而，捕捞航次的持续时间可能各不相同，因此在每个时间步，捕捞单元都可能处于这一逻辑的不同阶段，这由算法1（如下）处理：

Algorithm 1: Fishing Unit Outings

```
begin
    for each fishing unit do
        if Fishing unit is at sea then
            if There is still time to fish then
                Continue fishing
            if It is time to come back then
                Move back to the landing site
            else
        if Fishing unit is at land then
            if Daily Outing then
                List potential fishing grounds in a 50km radius Move toward one of
                 potential (random) fishing ground Fish for a time such that total time
                 of the outing does not exceed 12 hours Move back to landing site
            if Tide Outing then
                List potential fishing grounds in a 500km radius Move toward one of
                 potential (random) fishing ground Fish for a time such that total time
                 of the outing does not exceed 10 days Move back to landing site
            if Campaign then
                Move the fishing unit to an other landing site nearer to the fishing area.
        else
```

2.3.2 鱼类种群

鱼类种群动态包括3个过程：栖息地搜索、繁殖和移动。每个物种的栖息地在模拟的每个新月份计算一次，但种群增长每个模拟年度仅计算两次，如算法2所述：

Algorithm 2: Fish Species population dynamics

```
Data: Tmin, Tmax, bathymin, bathymax, K, k, r
begin
    for each fish species do
        1 - Search for habitats: cells with depth and temperature in the range of the
         species preferences
        2 - Compute total population biomass growth using (B, K,r, t)
        for each fish species individual do
            Fish move algorithm
```

最后，按照算法3，对中上层物种在每个模拟日、对底栖鱼类在每个模拟月计算各鱼类生物量斑块的流动性：

Algorithm 3: Fish move algorithm

```
Data: Tmin, Tmax, bathymin, bathymax, K, k, r
if fish species is demersal then
    if a new month started then
        /*move each month */ for each super individual do
            New random position within the habitat
if fish species is pelagic then
    if A new day started then
        /*move each 24h... */ for each super individual do
            Move toward an adjacent cell where habitat is ok
```

2.4 设计概念

2.4.1 基本原则、涌现与适应

该模型的主要假设是，手工渔业船队的迁徙会持续适应鱼类生物量分布以及登陆点的加工能力。鱼类生物量源于生长与捕捞死亡率之间的平衡，其分布受气候通过其对鱼类栖息地的影响所制约。相比之下，登陆点的加工能力则直接源于渔业管理决策。

沿海渔业单位的分布，是气候、生物、社会和经济因素相互作用的结果。每年的鱼类渔获总生物量及其在各卸鱼地点的上岸量，取决于卸鱼地点的加工能力与鱼类生物量分布之间的匹配程度。鱼类渔获量的稳定取决于捕捞死亡率与鱼类生长之间的平衡。捕捞死亡率由渔业单位的数量、渔场与卸鱼地点之间的距离以及卸鱼地点的加工能力共同决定。

鱼类智能体会根据海水温度的变化调整位置，以留在海表温度和水深条件与其栖息地相符的网格单元中。这些规则旨在再现观测到的鱼类随温度变化而发生的迁徙，不同物种的迁徙模式各不相同。渔业单位具有多种适应性特征，以体现塞内加尔手工捕捞的适应能力。根据 Pech 等人（2001）模型的简化版本，捕捞“战术”和“策略”旨在实现活动盈利能力最大化。捕捞策略包括根据环境数据和社会经济背景调整渔业单位的准备工作。捕捞战术则包括根据遇到的鱼类数量调整捕捞行动，例如更换捕捞地点或渔具，以及根据距离和价格选择卸鱼地点。

2.4.2 实体目标、感知、交互与随机性

渔业单位的战略与战术由经济标准决定，即鱼类销售。每个渔业单位的目标是找到捕捞地点并找到合适的登陆点。这相当于通过降低旅行成本并最大化渔获和销售价格来最大化渔民的收入。请注意，社会标准也决定了渔业单位的返迁，而这取决于其母港。

渔民持续交换信息，即使在海上靠近海岸时也通过电话了解渔场以及不同登陆点的价格。在模型中，价格并非显式给出，但渔民会在登陆点每日加工能力饱和时调整其卸鱼地点。隐含地，渔民也被视为会交流有关鱼类斑块的信息，因此在其半径范围内没有可用的鱼类斑块时，他们不会去捕捞，或者会迁移到另一个登陆点。

以小型中上层鱼类为目标的渔业单位会一直扫描周围海域以探测鱼群。因此，在模型中，这些渔业单位会探测到其航线上遇到的鱼类斑块。相比之下，以底栖鱼类为目标的渔业单位总是前往其预定目的地，并在那里渔获量较低时调整位置。

鱼类斑块实体除了留在其偏好栖息地内，没有其他目标。在模型中，鱼会感知海表温度和水深，并随着海表温度依季节变化而移动，以留在其栖息地内。

模型的随机性体现在两个层面：鱼类生物量分布和渔业单位的选择。对于鱼类生物量分布，随机性来自初始鱼类斑块分布的随机性，以及它们在栖息地内的随机游动。对于渔业单位，在作业半径内选择渔场，以及在发生作业迁移时选择新的登陆点，也都具有随机性。

2.4.3 观测

这里的“观测”指每次模拟期间存档并用于绘制结果讨论图表的变量。每个模拟日结束后存档的变量包括各登陆点的独木舟分布、各登陆点的上岸渔获量，以及四种鱼类模型物种的生物量。借此可以针对每个测试场景，讨论总渔获量及其在各登陆点之间的分布变化，并进一步探讨渔民在登陆点之间的迁徙。

2.5 初始化

2.5.1 捕捞单元初始分布

在模型的第一个时间步，捕捞单元按照模拟配置文件中的设定分布在各登陆点。初始登陆点是捕捞单元的一项属性，也是它们迁移后返回的地点。此外，每个捕捞单元（FU）的初始渔获量和出海天数均设为零。

2.5.2 鱼类生物量初始分布

在第一个时间步计算四种模型物种的栖息地。作为模拟参数之一，每种模型物种的初始生物量以随机方式分布在栖息地内的各个斑块中，每个斑块的最大生物量为“k”。每种模型物种总生物量的数量级基于联合国粮食及农业组织对渔业资源状况的评估报告（联合国粮食及农业组织，2015年）确定。

2.5.3 环境初始化

在第一个时间步，读取包含各网格单元水深和海表温度的物理网格，其数据对应于所选气候情景模拟第一年的一月第一天。

2.5.4 上岸点初始化

每个登陆点都根据其地理位置设置在模型的地图中，其每日登陆数量设为 0。请注意，该数量每经过 24 小时的模拟时间便会重新初始化，即设为 0。

2.6 输入数据

输入数据决定了每次模拟所探索的情景。这些数据收集自附录表 *8*所列的配置文件。

2.6.1 气候情景（海洋环境）。

从过去气候的全球再分析数据（“ERA5”）中提取海表温度（SST），并将其插值到一个分辨率为 10 km 的网格上，覆盖南纬 10°至北纬 25°、西经 10°至西经 19°的区域，时间分辨率为每月。因此，每个海洋网格点代表 100 km^2，并具有平均水深和月度海表温度。网格单元的平均水深或水深数据提取自“Etopo”全球数据库。专门构建为输入数据的气候情景列于表 *1*中，海洋环境属性列于表 *2*中。

表*1*：所用气候情景列表。

气候情景	涵盖时期/情景	配置文件名称
历史再分析	1979—2014年	Climat _era_1979_ Lolli
乐观未来情景	1979 – 2014 + 1.5°C	Climat_era_1v5deg_Lolli
悲观未来情景	1979 – 2014 + 3°C	Climat_era_3deg_Lolli

表*2*：定义于各网格点的海洋环境变量。

变量	数值
表层温度（°C）	18–30°C，视季节而定
深度（米）	0-3000 米
ZEE*	国家名称
海洋保护区*	是 否
*：未用于此处所呈现的模拟	

2.6.2 上岸点参数

我们考虑了15个主要手工渔业登陆点，这些登陆点代表了分布在毛里塔尼亚、塞内加尔、冈比亚、几内亚比绍和几内亚境内的小型登陆点的总和（表*3*）。我们考虑了登陆点之间加工能力分布的3种对比情景：(1) 2020年估算的加工能力分布（尤其包括毛里塔尼亚的众多鱼粉厂）；(2) 加工能力总量相同，但在各登陆点之间均匀分布；以及 (3) 均匀分布但规模小10倍的加工能力（表 *8*）。

表*3*：模型中纳入的西北非手工渔业登陆点列表。估算的每日加工能力汇总了其他邻近鱼类上岸点的基础设施信息，并依据*2020*年的报告得出。

登陆点	纬度	经度	国家	加工能力
努瓦迪布	21.00	-17.00	毛里塔尼亚	每天15400吨
Tiouilit	18.82	-16.16	毛里塔尼亚	每天700吨
努瓦克肖特	18.10	-16.02	毛里塔尼亚	9400吨/天

圣路易	16.02	-16.51	塞内加尔	450吨/天
Fass Boye	15.25	-16.85	塞内加尔	100吨/天
Kayar	14.92	-17.12	塞内加尔	450吨/天
达喀尔	14.76	-17.48	塞内加尔	750吨/天
姆布尔	14.41	-16.97	塞内加尔	750吨/天
Joal	14.17	-16.85	塞内加尔	每天400吨
坦吉	13.36	-16.8	冈比亚	每天350吨
贡朱尔	13.15	-16.78	冈比亚	每天650吨
卡丰狂	12.92	-16.75	塞内加尔	每天350吨
卡普斯基灵	12.38	-16.74	塞内加尔	每天30吨
比绍	11.80	-15.58	几内亚比绍	10 吨/天
科纳克里	9.510	-13.71	几内亚	10 吨/天

2.6.3 目标物种参数

逻辑斯蒂种群增长参数（承载能力“K”和年繁殖率“r”）以及最大局部生物量密度“k”均根据灰色文献估算（表4）。每个模型物种的4个栖息地限制参数界定了温度和水深范围。水深范围体现了所代表物种近海分布的变化。

表 *4*：“鱼”智能体的属性（估算值）。

模型物种	**所代表物种**	**温度范围**	**水深范围**	**K（吨）**	***K*** （吨/平方公里）	**r（-1年）**
沿海底栖“几内亚亲缘性”	海鲶属、普通乌贼，朱贝林石鲈、大眼牙鲷巨眼	24-29°C	0-100米	300 000	30	0.5
沿海底栖“撒哈拉亲缘性”	普通章鱼、真鲷属，贝洛蒂真鲷、十指石鲈，石斑鱼属 *aenus, Cynoglossus* 属，*Pseudotholitus* 属	18-25°C	0-100米	500 000	50	0.5
沿海中上层“几内亚亲缘性”	*Sardinella maderensis*、*Eth-malosa fimbriata*、*Caranx rhonchus*、*Trachurus trecae*	24-29°C	0-100米	1M	100	1.5
沿海中上层“撒哈拉亲和性”	圆腹鲱，地中海鲭属	18-25°C	0-300米	3M	100	1.5

2.6.4 渔船队特征

模型中的三类渔业单位对应表 *5*中的技术特征。在模型中，这三类渔业单位的储存能力、可捕性和迁徙行为各不相同，但母港可能相似（表 *6*）。我们考虑了三种对比鲜明的渔船队情景，分别对应于：（1）2014年普查中的独木舟数量；（2）独木舟数量比

2014年的情况少一半；（3）独木舟数量比2014年的情况多一倍。我们设定了每个渔业单位的作业季概率和最长持续时间，使较大的渔业单位进行更长时间的迁徙（作业季）。

表*5*：塞内加尔手工渔业单位三大类别的技术特征（改编自 *Chavance* 和 *Morand，2020* 年）。

	I类渔业单位（钓线或延绳钓）	**II类渔业单位（刺网）**	**III类渔业单位（旋转围网）**
船只尺寸（米）	9.5	12,6	21.5
平均船员人数	3,7	4,3	11,3
出航率（%>2j）	57.4	55.7	96
适宜捕鱼期	1->12	11->07	10->07
发动机功率	>=15马力	>=15马力	>=40ch
购买成本（独木舟）	952,000 西非法郎	1 443 000 西非法郎	1,907,000 – 11,274
日间捕鱼平均成本**	100,000 西非法郎	100,000 西非法郎	200,000 西非法郎 *
潮汐捕鱼平均成本**	150,000 西非法郎	150,000 西非法郎	300,000 西非法郎 *
平均营业额	190,000 西非法郎	220,000 西非法郎	800,000 西非法郎
塞内加尔代表队（2020年）	4888	4955	758
*2艘独木舟必须结伴出海，一艘载渔网，另一艘载鱼 **不包括工资和折旧			

表*6*：三类渔业单位的属性。

	第一类	**第二类**	**第三类**
储存能力	500 千克	5000 千克	30 000 千克
捕捞半径	50 千米	100 公里	1000 公里
海上最长时间	1 天	15 天	15 天
可捕性	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
捕捞活动概率	0.1	0.2	0.3
行动最长持续时间	4个月	8个月	12个月
母港	初始登陆区		

2.7 子模型

2.7.1 捕捞

到达渔场的捕捞单元在每个时间步捕获的生物量（渔获量），由一个模拟低生物量水平下 Holling III 功能反应的关系式给出（式 1）：

$$C_t = \frac{q b_t^2}{b_t + b_{crit}} \qquad \text{(eq. 1)}$$

其中，C_t = 为时间步 t 的捕获生物量；q = 为可捕性（每个时间步）；b_t = 为时间步 t 被捕捞鱼类斑块的生物量，b_{crit} = 为局部生物量阈值，当达到该阈值时，渔获量比例减半（图 10）。在每个时间步，捕获生物量都会计入当前捕捞航次中捕捞单元的总渔获量，并从鱼类斑块的生物量中扣除。捕捞会在允许的出海时间结束时停止，或在捕获的生物量达到或超过独木舟的储存能力时停止。如果当地斑块的资源已耗尽，仍可继续在邻近斑块捕捞。

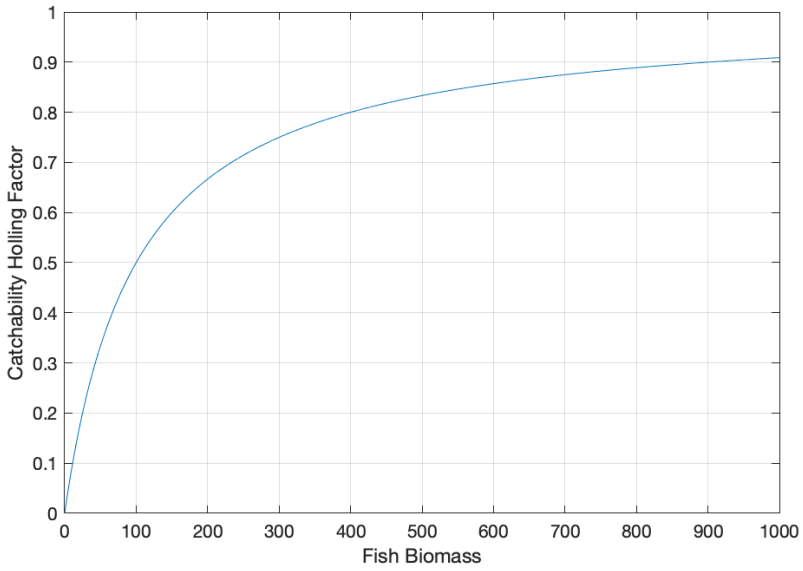


图 *10*：可捕性校正因子随鱼类生物量变化，呈霍林第三型形式，应用于模拟 *7*。
Qcor = B/(B+100)

2.7.2 鱼类种群动态

每个模型物种的生物量动态采用逻辑斯蒂增长模型表示，并划分为生物量斑块；每个斑块的大小与网格单元相同（10 km²），分布于可用栖息地内。斑块最大生物量是每个模型物种的一个参数。

鱼类种群的增长以逻辑斯蒂定律表示，在一年中的特定时段作用于种群层面；而捕捞死亡率则持续作用于发生捕捞的斑块。捕获生物量的数量已在前一节中描述。每年对每个模型物种执行“s”次种群增长过程（式 2）：

$$\begin{cases} B = \sum_{i=1}^{n} b_i \\ G = \frac{r}{s} B \left(1 - \frac{B}{K}\right) \\ N = \frac{G}{k} \end{cases} \quad \text{(eq. 2)}$$

其中，B 为模型物种的总生物量，计算方法是将各斑块中的剩余生物量相加；b_i 为斑块 i 中的生物量，n 为斑块数量。“s”为每年的繁殖事件次数。因此，每隔 12/s 个月发生一次繁殖事件。G 为生物量增长量，N 为将在物种栖息地内随机分布的新斑块数量。

每种模型物种的总生物量等于各个斑块生物量之和。当捕捞单元在某个斑块捕捞鱼时，该斑块的生物量会减少；当生物量斑块低于 100 吨（每平方公里 1 吨）时，就会被删除。这代表了模型中未明确体现的鱼类斑块衰老。由于中上层鱼类具有很强的移动性，因此在模型中，它们会在栖息地内进行连续随机游走，每天更新一次位置。相比之下，底栖鱼类通常活动范围较小，因此在模型中，它们也会在栖息地内随机游走，但每月仅移动一次。

3 模拟

该模型通过 Gama 实现。我们将得到的模拟器称为“Lolli”，并用它进行模型的敏感性分析。使用该模拟器，我们首先考察了所有模型参数，以了解模型对各个参数的敏感程度。其次，我们探索了初步的气候和鱼类参数情景，以厘清这些因素的影响。在这一阶段，我们尚未进行历史模拟，但初步模拟使我们得以了解模型假设所产生的动态。

3.1 “Lolli”模拟器介绍

该模型在“*Gama*”平台上实现。代码已上传至在线版本管理平台“github”。在完成全面验证并发表首批结果后，代码将公开发布。

模拟界面（图 11）包含一组输入参数，建模者可以通过一次改变一个因素来测试模型的各种配置，这种方法通常称为“一次改变一个因素”（OFT）方法。这些参数对于了解不同的初始条件和输入变量如何影响模拟结果至关重要。例如，参数可能包括鱼类种群参数、独木舟数量、迁徙行为，或其他影响智能体行为的特征

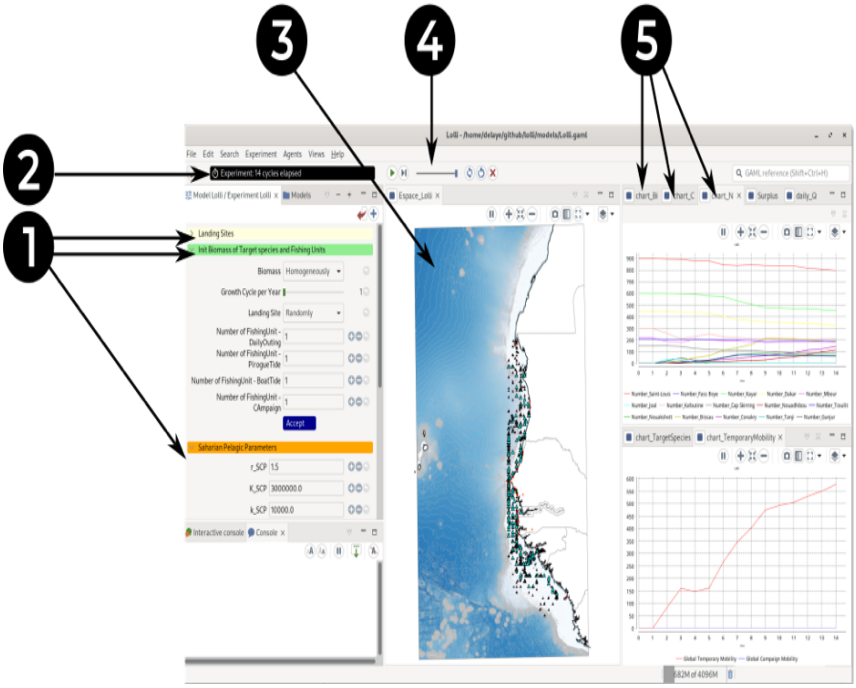


图 *11*：*“lolly”*模拟器图形界面介绍。*1*-模拟参数，*2*-时间可视化，*3*-空间可视化，*4*-实时交互，*5*-监测变量

模型。**时间可视化**是 GAMA 默认向所有模型提供的功能。它允许用户跟踪智能体之间交互的时间演变，并了解动态过程如何随时间展开。例如，可以包括显示鱼类种群如何随捕鱼季节变化的图表。**空间可视化**让观察者能够发现并识别不同的元素，例如以彩色三角形表示的独木舟类型。借助这种空间可视化，用户可以跟踪、验证并识别智能体的空间行为。例如，它可以显示独木舟如何在湖面上移动、在哪里聚集，或它们如何在湖中特定区域与鱼群进行交互。**实时交互**GAMA 提供了一种实时交互工具，用于与模拟进程进行交互。该默认

功能允许用户在模拟过程中的特定时间点做出决策并采取行动。例如，用户可能会决定在模拟进行到某个阶段时引入新的捕捞规定，以观察其如何影响渔民的行为和鱼类种群。**监测变量**。观察者可以跟踪一组个体变量或聚合变量。例如，这可能包括根据渔民的位置跟踪渔民生产力，或观察鱼类生物量如何响应捕捞活动而变化。

3.2 敏感性分析

使用 Saltelli（2010年）敏感性分析方法确定对输出影响最大的参数。具体做法是对表 7 所列的 13 个参数的每种组合运行模型，并计算模拟 6 个月后的累计渔获生物量方差。6 个月的时间足以让各个过程参与渔获量的累积求和，但鱼类种群增长除外，因为计算这一过程需要耗费大量时间。随后，将该输出的方差分解为各输入参数的独立贡献。请注意，此次敏感性分析未纳入加工能力参数，因为这些参数是在之后才引入模型的。

对鱼类总捕捞量影响最大的参数是第3类捕捞单元（FU）的可捕性参数，即所考虑的最大型捕捞单元（图12）。然而，情况可能有所不同：几内亚比绍的底层鱼类生物量对第2类捕捞单元的可捕性参数更为敏感，这可能是因为敏感性测试期间，几内亚比绍尚未开始第3类FU的作业季。总体而言，敏感性分析结果不太容易解读，但仍显示出算法具有稳定性，这或许有助于研究特定情景下不同参数的影响。各国渔获量的影响参数结果汇总于附录B所列图表中。

表 7：用于模型 *Saltelli* 分析的参数列表及其取值范围。

输入名称	**范围**	**说明**	**来源**
气候变异	-2°C 至 + 2°C	此参数模拟海表温度的均匀升高或降 海表温度升高	IPCC
捕捞活动概率： **第1、2、3类捕捞单元** **（3个参数）**	0 - 1	每次捕捞航次结束后，如果渔获为空，那么 渔民就有一定概率迁移到另一个登陆点 地点。为各类捕捞单元（1、2、3）分别定义	渔民访 谈
捕捞活动时长 **第1、2、3类捕捞单元** **（3个参数）**	1–10个月	作业季的最长持续时间。每当一个捕捞单元 开始新的作业季时，持续时间会预先确定， 在1个月与此处设定的最长持续时间之间随机取值。 。	渔民互相 视图
捕捞可捕性（q） **第1、2、3类渔业单位** **（3个参数）**	10-6 至 10-5（第1类） 10-5 至 10-4（第2类） 10-4 至 10-3（第3类）	每小时捕捞的本地鱼类生物量占比。适用于 各捕捞单元类别（1、2、3）。	渔民访谈 内容
用于捕捞的独木舟储存空间 **装置的第1、2、3类** **（3个参数）**	250 – 750 kg（第1类） 500 - 1500 kg，（第2类） 1 – 100吨（第3类）	船上储存容量。	渔民访 谈

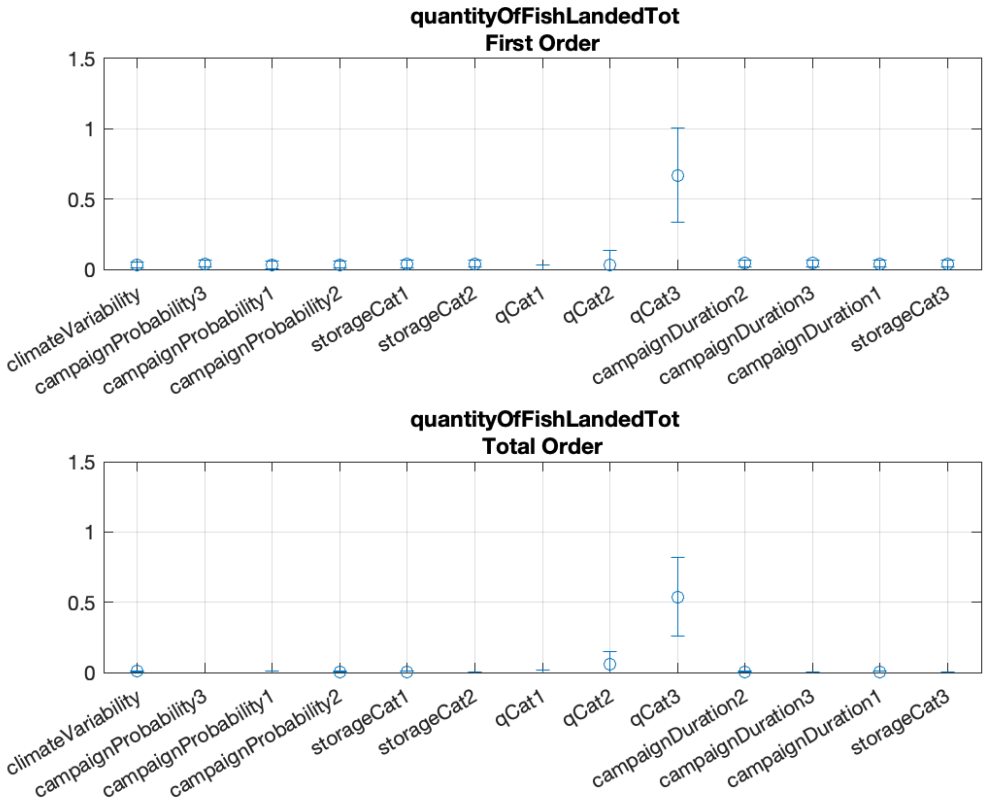


图*12*：*Saltelli*分析模型参数对累计总捕捞量的影响。

3.3 初步模拟与第一轮情景探索

本节旨在探讨手工捕捞的不同气候和社会经济情景（表 *8*）。不过，在实现这一目标之前，需要先进行初步模拟，以校准可捕性参数。事实上，可捕性是模型中最具任意性的参数，因为它定义了渔民捕获鱼类的速率，而这一过程非常复杂，涉及渔民的经验、每艘独木舟上的渔民人数、渔具的类型和大小、鱼类生物量密度、鱼类行为、海况、深度以及其他许多因素。因此，在渔业模型中，该参数通常用作校准参数，即估算其数值，使模型对平均状态下渔获量的预测与可用数据相符。此外，可捕性可能并非线性，因为当鱼类密度极低时，渔民寻找鱼类所花的时间可能会增加，这一点由 Holling III 功能反应描述。在模型的编码中，可捕性参数表示每个时间步（小时）内，每个捕捞单元从捕捞斑块中捕获的鱼类生物量比例。捕捞单元的储存容量始终限制着

每个捕捞航次的渔获量上限，但结果似乎表明，由于捕捞单元数量众多，这一限制并不能防止过度开发。

表*8*：单因素敏感性研究的情景及其对应配置文件列表

模型参数	情景 Name	文件名	描述
气候情景	海表温度 +0°C（参考-ence）	Climat_时期_1979_Lolli.tif	参考气候文件。区域海表温度来自气候再分析时代 1979-2005
	海表温度 +1.5°C	Climat_时代_1v5deg_Lolli.tif	参考海表温度 + 1.5 °C
	海表温度 +3°	Climat_era_3deg_Lolli.tif	参考海表温度 + 3 °C
沿海基础设施	2020年运力（参考）	DailyProc-Cap_2020s_Lolli.csv	登陆点的参考加工能力．基于2020年数据（主要由鱼粉厂贡献．位于毛里塔尼亚）。
	同质加工能力	DailyProcCap_HOMOGE-NEOUS.csv	参考加工的均匀分布所有登陆点之间的加工能力
	降低均匀能力	DailyProcCap_均匀分布-布_x01.csv	参考处理的均匀分布能力在所有登陆点之间均分为十分之一
手工渔船队	2014年船队	Fis-ging单位 2014s 10p_Lolli.csv	渔业单位的参考分布．依据2014年西非经济货币联盟调查（13000个渔业单位），其中1模型捕鱼单位对应于10个真实捕捞单元。
	双倍船队	渔业单位_2014s_x2_Lolli.csv	参考渔业单位分布 x2
	半数船队	渔业单位_2014s_x05_Lolli.csv	参考渔业单位分布 /2

因此，在初步模拟中，我们探讨了可捕性参数的影响，以及该参数如何与气候变化情景相互作用（表9）。这些模拟还用于测试模型算法、执行时间、参数校准以及结果的稳定性。本节引用的大多数图表可见于附录D；本节末尾仅列出了一些对比结果图。

表*9*：用于校准可捕性参数的初步模拟，以及“单因素法”敏感性测试所对应的配置文件。

Sim #	气候情景	基础设施情景	渔船队情景	可捕性参数
1	海表温度 +0 °C	2020年运力	2014年船队	Qcat1 = 0.0005；Qcat2 = 0.005；Qcat3 = 0.05 b_{crit} =0 （即无 Holling III型行为）
2	海表温度 +0°C	2020年运力	2014年船队	同上（重复模拟#1）
3	海表温度 +0°C	2020年运力	2014年船队	同上（重复模拟#1）
4	海表温度 +0°C	2020年运力	2014年船队	代码更改：类别3可捕获30%的底栖鱼类
5	海表温度 +0 °C	2020年运力	2014年船队	与模拟4相同．但可捕性降低（除以5 com-与模拟1、2、3、4相比）
6	海表温度 +0 °C	2020年运力	2014年船队	与模拟4相同．但可捕性进一步降低（除以50、与模拟1、2、3、4相比） Qcat1 = 0.00001；Qcat2 = 0.0001；Qcat3 = 0.001
7	海表温度 +0 °C	2020年运力	2014年船队	与模拟 4 相同．但可捕性进一步降低 Qcat1 = 0.000001；Qcat2 = 0.00001；Qcat3 = 0.0001；Hol-ling III型，带 b_{crit} =100
8	海表温度 +0°C	2020年运力	2014年船队	同上（重复模拟 #7）
9	海表温度 + 1.5 °C	2020年运力	2014年船队	与模拟 #7 的可捕性相同．采用乐观的气候情景——景
10	海表温度 + 3 °C	2020年运力	2014年船队	与模拟 #7 相同的可捕性．气候情景较为悲观——景
8.1	海表温度 +0 °C	2020年运力	2014年船队	可捕性增至 Ocat1 = 0.0001；Ocat2 = 0.001；Qcat3 = 0.01
9.1	海表温度 + 1.5 °C	2020年运力	2014年船队	可捕性与模拟 #8.1相同
10.1	海表温度 + 3 °C	2020年运力	2014年船队	与模拟 #8.1 的可捕性相同

模拟1开始时，发生了大量短期迁徙（附录图8），对应的是因最初登陆点缺乏基础设施（加工能力）而必须更换登陆点的捕捞单元。这是因为可捕性参数过高，导致渔业单位在捕捞时能够有规律地装满其储存能力，继而使登陆点饱和；模拟第一年的渔获量约为2 000 000吨，主要来自塞内加尔和毛里塔尼亚，但随后迅速下降（附录图11）。模拟开始时渔获量较高，可解释为模型的“预热期”，即模型从一种“冻结”的初始状态开始达到平衡所需的模拟时间；在该初始状态中，所有捕捞单元都在陆地上，鱼类生物量则处于任意水平。模拟第一年后，短期迁徙被几乎所有捕捞单元的长期迁徙所取代。当渔民在其搜索半径内找不到鱼时，就会发生长期迁徙（第1、2和3类的搜索半径分别为50、100和1000公里）。这与远洋鱼类生物量迅速下降并最终灭绝的情况一致（附录图9），因为这些物种是第3类捕捞单元的目标。然而，底栖鱼类的生物量有所增加，并稳定在其最大值——承载能力；几内亚底栖鱼类和撒哈拉底栖鱼类的承载能力分别设为300 000吨和500 000吨（附录图9）。这是因为渔民耗尽了登陆点周边渔场的资源，而在演化过程中，鱼类生物量增长分布到了渔民活动范围之外，不过偶尔仍会进入渔场，从而维持一定的渔获量（附录图11）。在此版本的模型中，这种情况之所以可能，是因为只有第1类和第2类捕捞单元能够捕捞底栖鱼类。模拟第一年，大多数塞内加尔捕捞单元迁往国外（附录图10）；此后，其迁移与鱼类繁殖的时间相对应（在此配置中，每年一次）。五年后，分布趋于稳定，塞内加尔境内有~750 个捕捞单元，境外有550个捕捞单元。从第2年至第4年，所有登陆点的渔获量再次增加（附录图11），但到第5年开始下降。重复进行模拟1后，结果显示出很强的趋同性，尽管模型的随机性造成了一定变异（附录图12）。

在模拟4中，可捕性参数的值没有改变，但修改了代码，使第3类渔业单位能够捕捞部分底栖鱼类。事实上，尽管第3类渔业单位通常以中上层鱼类为目标，但在鱼类匮乏时，它们可能会决定捕捞底栖鱼类；焦点小组中曾提到这种行为。因此，在模拟4中，所有渔获量和鱼类生物量都迅速降至0，其中也包括底栖鱼类。各捕捞单元类别的累积渔获量迅速趋于稳定，表明渔业崩溃，其中第3类的渔获量最高（附录图13和附录图14）。在模拟5中，尽管降低了所有类别渔业单位的可捕性，所有鱼类生物量仍迅速下降（附录图15）。在模拟6中，我们进一步降低了所有类别渔业单位的可捕性，但鱼类生物量仍迅速下降（附录图16）。在所有这些鱼类生物量迅速下降的模拟中，我们看到大多数渔业单位在渔业崩溃之前迁往毛里塔尼亚（附录图17）。渔业崩溃后，渔业单位返回塞内加尔，并继续零星迁往其他国家，寻找（已不复存在的）鱼类。

在模拟 7 中，我们加入了 Holling III 功能反应，当鱼类斑块的生物量降至每个斑块 100 吨以下时，可显著降低可捕性（图 10）；此外，我们进一步降低了最大可捕性，使总捕捞压力可能比预期低 ~100 倍。因此，鱼类生物量趋于稳定，渔获量也保持稳定，

塞内加尔境内每年约 350 000 吨，另有 ~50 000 吨来自塞内加尔境外，主要来自毛里塔尼亚（附录图18和附录图19）。重复模拟 7 得到了差异明显的结果，渔获量高出 ~10%（附录图20），这凸显了与模拟 1–3 相比，随机性具有显著影响。采用相同配置，但使用气候变化情景下的海表温度 + 1,5°C（模拟 9，附录图21）和海表温度 + 3 °C（模拟 10，附录图22），得到的结果相似，渔获量的变异幅度低于模拟 7 和 8 之间观察到的随机性影响。这意味着，在捕捞压力如此低的情况下，模型中的气候变化情景并未对渔业产生影响。

在模拟8.1、9.1和10.1中，我们采用了更高的可捕性（与模拟8、9和10相比提高了100倍）。尽管这一可捕性数值较高，但也更为现实：在鱼类生物量密度极高的情况下，渔民可在几小时内装满独木舟，这与早期的渔民访谈记录相符。因此，尽管Holling III函数会在鱼类生物量密度较低时降低可捕性，模拟8.1中的鱼类生物量仍在5年后耗竭（附录图23和附录图24），模拟9.1中在6年后耗竭，模拟10.1中则在7年后耗竭（附录图25、附录图26、附录图27、附录图28）。模拟8.1（当前气候）第一年的渔获量达到 ~1,8 M 吨，模拟9.1（海表温度 + 1,5°C）达到 ~1,65 M 吨，模拟10.1（海表温度 + 3°C）达到 ~1,7 M 吨；但同样，这些差异可能并不显著，而是随机性造成的。不过，在海表温度为+3°C的气候情景下，渔业表现出较强的恢复力，这或许是因为几内亚远洋鱼类的栖息地受限于近海以外区域，因此手工渔业较难到达，从而减缓了过度开发的影响。

综上这些初步模拟，“实际捕捞压力情景”（模拟 8.1、9.1、10.1）在所测试的三种气候情景下均导致了渔业崩溃和多次长期迁徙，其中包括参考气候情景（当前情景）（见汇总图13和图14）。这一“实际捕捞压力情景”所考虑的捕捞努力量基于以下假设：鱼民数量固定，且对捕捞努力量持续进行固定投资；也就是说，在鱼类资源枯竭的情况下，渔民会通过增加迁移距离，持续寻找新的渔场。 这并不符合现实，因为如果渔获量不再足以抵偿捕捞航次的成本，渔民实际上会退出渔业或减少捕捞努力量；然而，这一预测仍然表明，渔民必须在短期内退出渔业。另一方面，“低于实际捕捞强度”的捕捞情景（模拟 8、9、10）显示，在任何气候情景下，渔业都将仅在塞内加尔附近稳定在每年约 250,000 吨的水平（见汇总图15和图16）。该情景表明，根据模型，单凭气候变化并不会导致渔业崩溃，因此，导致渔业崩溃的唯一临界点必须从捕捞努力量中加以识别。

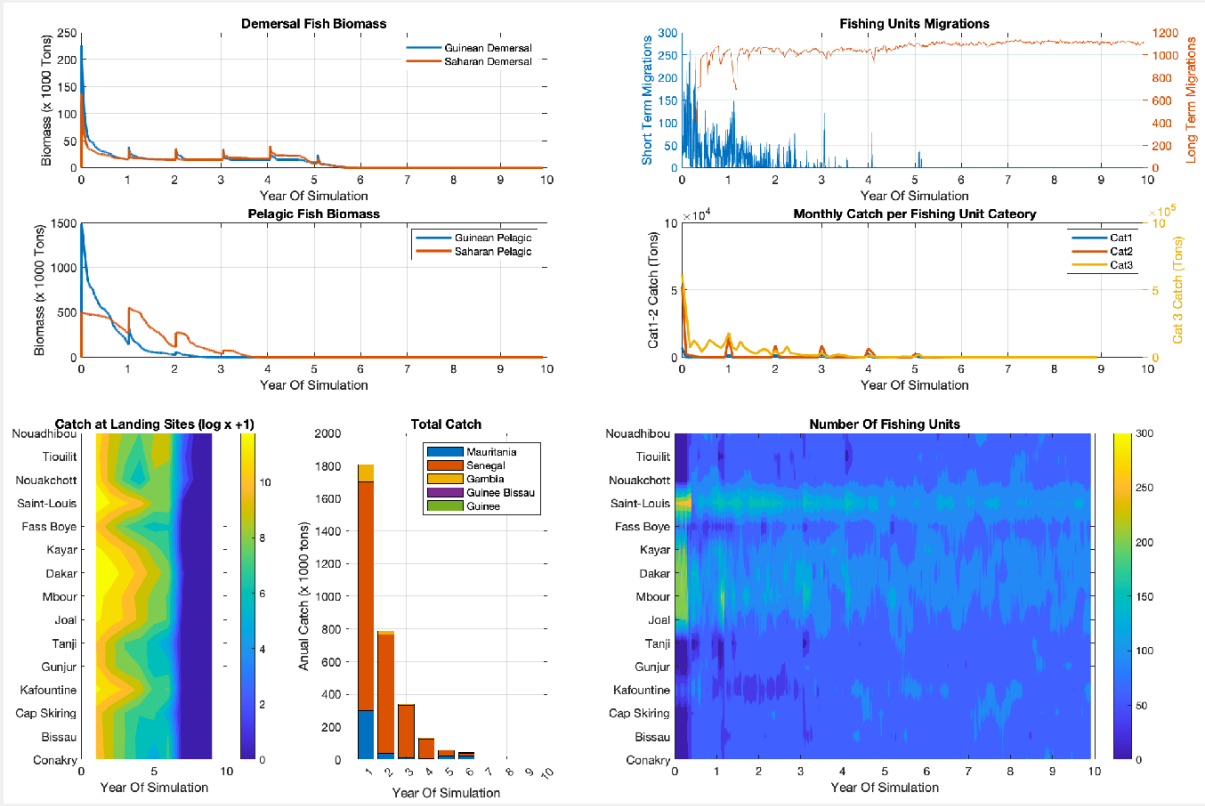


图*13*：模拟*8.1*的结果，采用实际捕捞效率和参考气候情景。

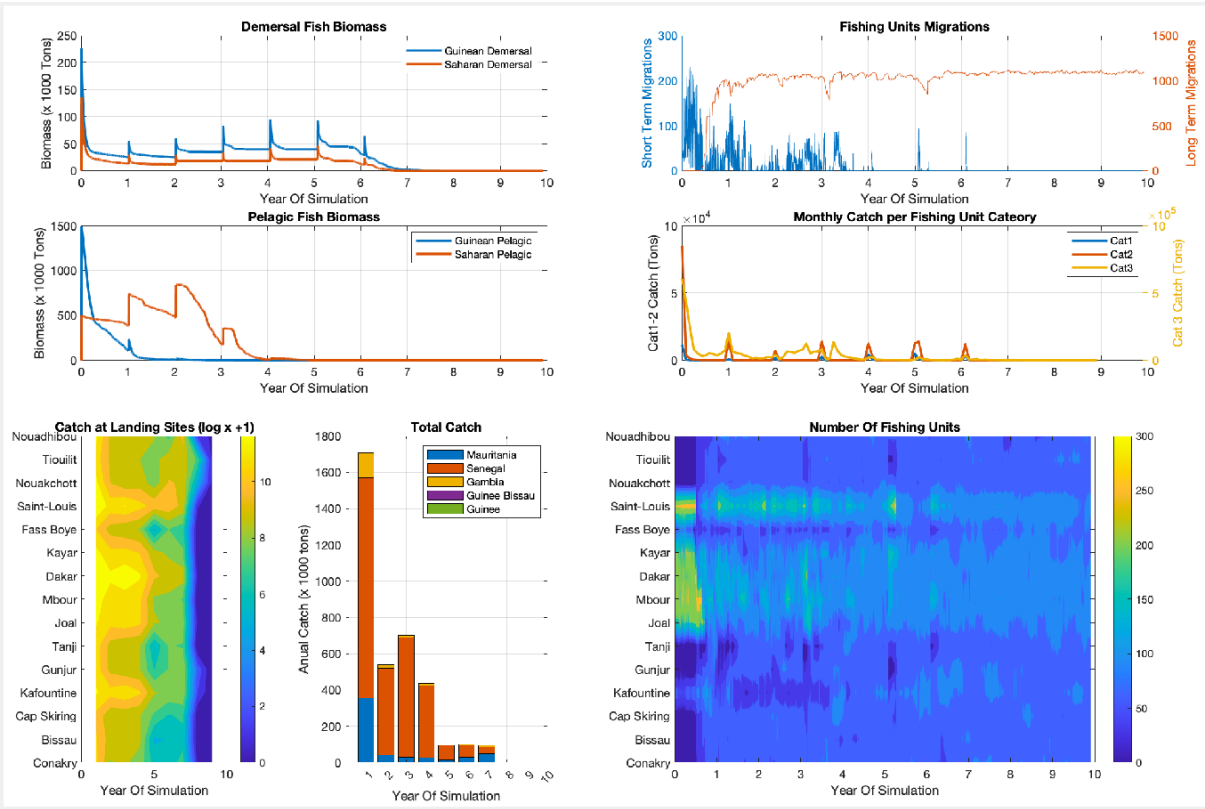


图*14* 模拟*10.1*的结果，采用实际捕捞效率和海表温度*+3℃*气候情景。

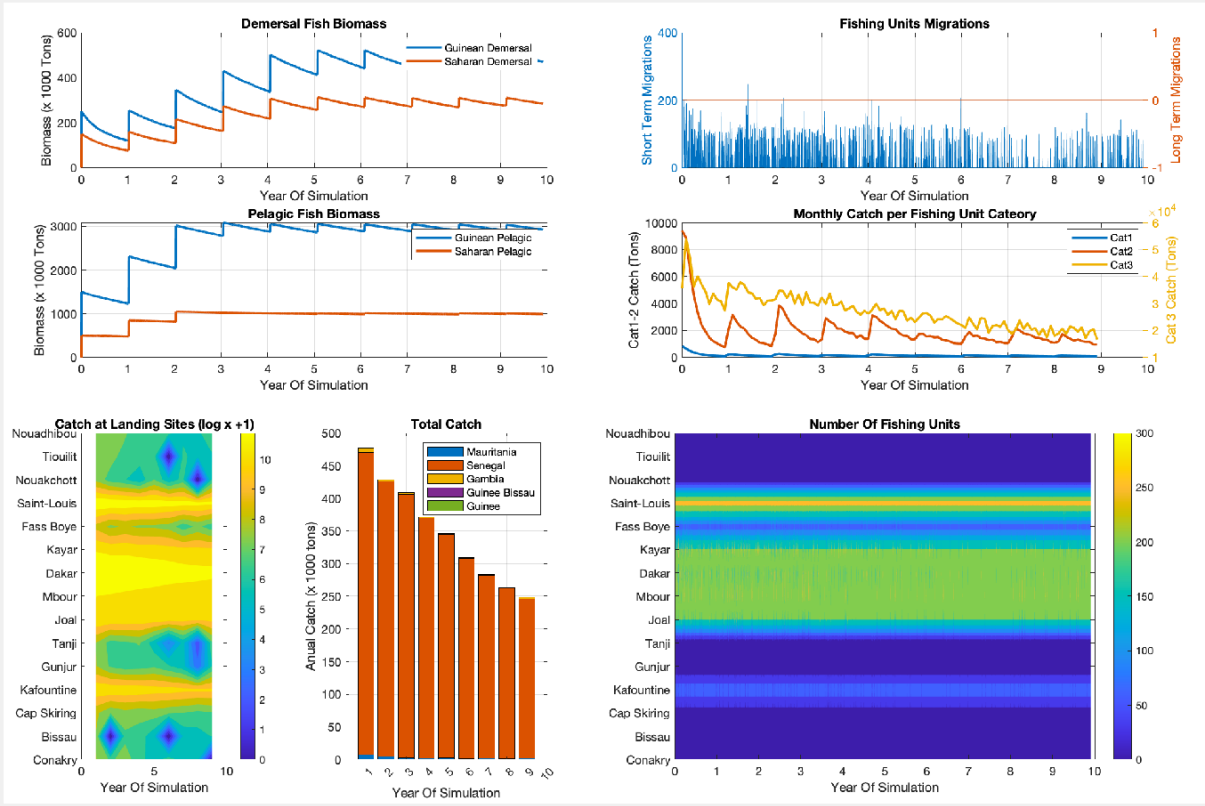


图*15*：模拟*8*的结果，渔获量比实际慢*100*倍，参考气候情景。

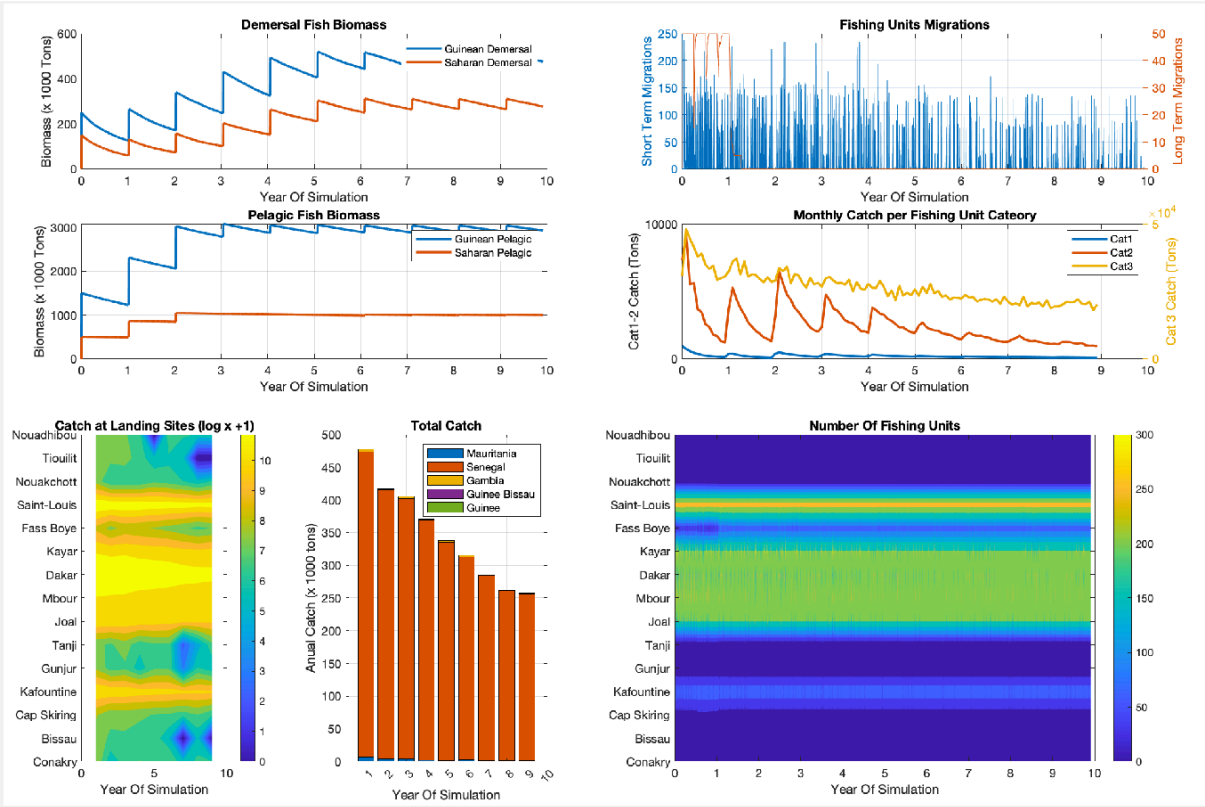


图*16*：模拟*10*的结果，渔获量比实际慢*100*倍，海表温度*+3℃*气候情景。

4 - 讨论

首先，我们讨论了概念模型所采用的选择；其次，我们评述了初步模拟，随后指出了这种方法的局限性，最后以一些展望作结。

4.1 概念模型

我们根据收集到的气候、海洋学、鱼类栖息地、鱼类行为、渔民行为、渔业单位特征、登陆点分布及基础设施数据，构建了一个描述手工渔业时空动态的概念模型。该模型阐述了气候变化如何影响四种典型鱼类的不同栖息地；这些鱼类依据其温度和水深偏好以及逻辑斯蒂生物量增长的种群参数加以界定。模型考虑了三类捕捞单元，依据其捕捞能力、渔获储存能力和迁移倾向进行界定。模型还描述了三种迁移类型，分别对应不同的捕捞距离以及迁往其他登陆点所需的时间。登陆点根据其沿海岸的位置和渔获加工能力加以界定。一旦达到饱和，这些登陆点便不再吸引渔民。数据中描述了许多过程和参数，但实际纳入这一概念模型的只有少数几项。事实上，初步跨学科研究所获得的现有信息表明，这是一个极其复杂的社会系统。为使模型保持在最佳复杂度水平（“梅达沃区域”，Grimm 等人，2005），我们尽可能减少对低层级或次要过程的显式建模，同时明确呈现那些被认定为决定渔民迁移的关键过程。这种方法也可能有助于理解模型假设，从而提高相关参与者对结果的接受度，并提升模型作为管理者决策辅助工具的实用性。采用“ODD”协议（Grimm 等人，2010）介绍概念模型，也有助于使其成为一种通用工具，可适用于世界其他地区的手工渔业，并为纳入特定扩展内容留出空间，例如更详尽的经济过程或鱼类种群动态。

有趣的是，参与概念模型特定方面构建的专家，对模型探索所得预期结果的看法各不相同。这表明，尽管模型对相关过程的呈现极为简化，但仍会涌现出复杂的动态。具体而言，模型揭示了渔业产能过剩的三个方面：以可捕性参数表征的捕鱼活动效率、捕捞航次的数量和时长，以及登陆点的加工能力。我们提出的概念模型还可以探索这些方面之间的相互作用。不过，该概念模型未考虑工业渔业的影响，而工业渔业可能包括在国际协定框架内作业或未受其约束的本国船舶和远洋船舶（非法、不报告和不管制捕捞）。例如，可以将手工渔业的部分渔获量视为实际上由工业渔业捕获。塞内加尔可归因于工业渔业（包括非法、不报告和不管制捕捞）的总渔获量比例可能高达50%（Belhabib 等人，2014年）。

4.2 “Lolly”模拟器初步结果

该模型使用 Gama 实现。Gama 是由 UMMISCO 开发的个体建模平台，使我们能够整合概念模型中列出的所有过程。我们将得到的计算机模拟工具称为“lolly”；这是达喀尔历史悠久的主要渔民社区 勒布人的一个捕鱼季节的名称。我们利用 UMMISCO 在达喀尔的计算能力探索该模型，尤其是渔业单位效率和气候情景的影响。

初步模拟凸显了捕捞单元的作业半径与底栖鱼类过度开发区域的涌现之间的关系。在这些初步模拟中，旋转围网渔业单位（第3类）是唯一因体型较大而能够抵达所有潜在捕捞地点的单位，但它们只以中上层鱼类为目标。在所采用的捕捞能力下，这导致中上层鱼类消失，而底栖鱼类仍处于以它们为目标的第2类和第3类渔业单位的作业范围之外。因此，在这些模拟中，底栖鱼类仿佛学会了与登陆点保持距离。这种情况得以稳定，是由于逻辑斯蒂增长模型的效应：当种群达到最大水平，且生物量斑块超出手工捕捞的可达范围时，增长变为零，并且如所采用的增长算法所述，栖息地中不再随机分布新的斑块。这一人为假象尽管反映了一种切实存在的现象，但在后续模拟中得到了缓解——从模拟4起，我们考虑到旋转围网渔业单位（第3类）可能会兼捕底栖鱼类。因此，第3类渔业单位能够在整个大陆架区域捕捞所有目标物种。事实上，这些第3类渔业单位与大型工业化远洋渔船具有这一共同特征，不同之处在于，手工渔业单位一旦储存能力满载，就必须在具备必要基础设施的登陆点卸下其渔获。模拟4、5和6表明，即使捕捞效率被低估，用于界定渔获的线性关系也会导致鱼类资源迅速崩溃。

为了促使过度开发均衡涌现——正如数学模型中的理论描述（例如 Auger等人，2010年）——我们采用 Holling III型功能反应，将渔获量定义为生物量的函数。这反映了这样一个事实：当鱼类丰度降低时，由于鱼越来越难以定位，捕获它们也会变得愈发困难。假设可捕性（或捕捞效率）也远低于最初估计（低两个数量级），那么我们就得到一个开发与资源补充之间的均衡：塞内加尔每年捕获 ~250,000 吨鱼（模拟8）。此时，模型校准似乎令人满意，手工渔业上岸量的平均值与2000年代观测到的渔获量相当（图17）。然而，根据手工渔业当前的结构，即渔业单位的数量（根据2014年数据估算）、其捕捞能力以及当前的岸上加工能力（根据2020年数据估算），我们发现该渔业可能会在几年内崩溃（模拟8.1）。

将模型的动态与历史数据进行比较很有意思。虽然目前尚未进行历史模拟，但历史数据提供了不同数量手工渔业渔民所取得的渔获量，可与模型敏感性实验中测试的不同捕捞压力水平进行比较。数据显示，塞内加尔的鱼类产量（所有渔业合计）在1980年代大幅增长后，自2000年代以来一直稳定在每年~370,000吨（其中远洋鱼类为~300,000吨，底栖鱼类为~70,000吨；图17），尽管同期渔民人数从10 000人增至22 000人。这些上岸渔获量主要来自手工捕捞，但总渔获量

实际还包括非法、未报告和无管制捕捞量，据 Belhabib 等人（2014年）估计，这部分可能占50%。若将这些未申报渔获计入，塞内加尔2010年的总渔获量将接近~700,000吨。然而，在我们的配置中，当渔获量接近每年100万吨时，鱼类生物量会在不到5年内迅速崩溃。观测显示，主要目标远洋鱼种圆腹鲱（圆腹鲱）的渔业自2020年以来已显现崩溃迹象（Brochier 等人，2023年）。实际上，塞内加尔手工渔业仍然存在，是因为其转而捕捞其他价值较低的目标物种。因此，如果 Belhabib 等人（2014年）的估算是准确的，那么鱼类种群的生物量更新能力——由环境承载能力以及不同物种种群的繁殖率决定——必定高于我们配置中设定的参数。今后的模型版本可依据这些结果重新审视这些参数。不过，手工渔业得以维持的另一种解释可能是捕捞努力量有所下降：自2022年以来，越来越多的渔民乘独木舟经由加那利群岛迁往欧洲。

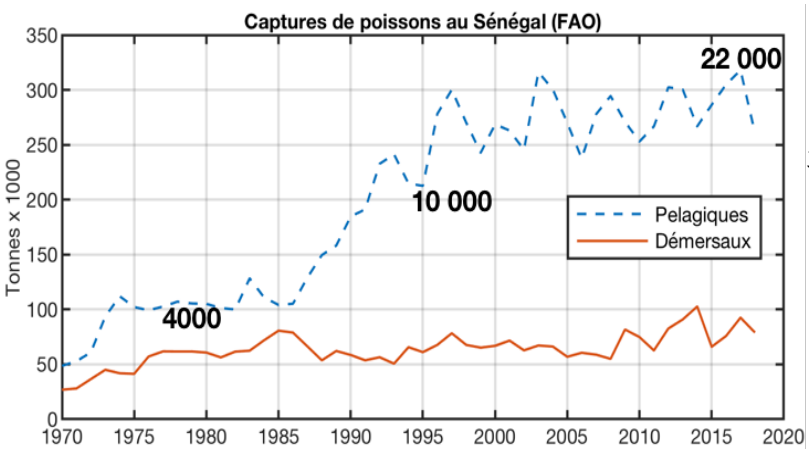


图*17*：渔获量于塞内加尔。红色= 底层鱼类，蓝色= 远洋鱼类。加粗数字在图中表示的是申报渔业单位的数量。根据联合国粮食及农业组织的数据编制以及政府报告。

所探讨的气候情景依据该地区政府间气候变化专门委员会各项气候预测中海表温度（海表温度）的升幅范围制定，到2100年最高升温+3°C（参见附件中的报告《西北非海表温度气候情景分析》）。为尽可能准确地呈现沿海动态，我们采用了过去气候的再分析数据（ERA5，参考模拟，时段为1979—2015年），并在海表温度中统一增加1.5°C（情景1）或3°C（情景2）。这些情景对目标物种的分布产生了重大影响（附录图4、附录图5、附录图6、附录图7）。“撒哈拉亲和性”物种的栖息地在参考模拟中一年有6个月仅限于该系统北部；在+3°C情景下，其栖息地进一步收缩，一年有9个月仅限于北部。类似地，在基准模拟中全年出现在系统南部的几内亚亲和性物种，有6个月的时间仅分布于毛里塔尼亚，甚至摩洛哥。因此，总体而言，在海表温度均匀升高的影响下，鱼类种群向系统北部迁移，并实际上集中在毛里塔尼亚近海。这提高了系统北部鱼类生物量的可获取性，而该区域的渔业基础设施也更为发达。

尽管气候情景对鱼类栖息地分布有显著影响，但我们发现，气候变化的影响程度仅次于捕捞压力的影响。事实上，应用 +1.5°C 和 + 3°C 气候情景，对塞内加尔手工捕捞的发展轨迹影响甚微

此外，若考虑渔业处于可持续均衡的对照情形，气候变化情景对这种均衡几乎没有影响（模拟 8.1、9.1、10.1）。这些结果看似令人意外，却与我们在实地调查中感受到的利益相关者态度一致。焦点小组中很少提及气候变化，而过度开发则一直受到谴责。

初步模拟中未探讨登陆点加工能力的分布和规模，以及捕捞单元的数量所产生的影响。然——
而，这些参数很可能对过度开发的动态过程起决定性作用。将圆腹鲱的预测分布与鱼粉厂的分布进行比较后，便可看出这一点（图18）。

模型所呈现的过度开发动态过程如下：（1）捕捞单元迅速耗尽塞内加尔登陆点附近的资源；（2）大多数捕捞单元会开展捕捞行动，即迁往周边国家的登陆点，持续数月（例如图13）。

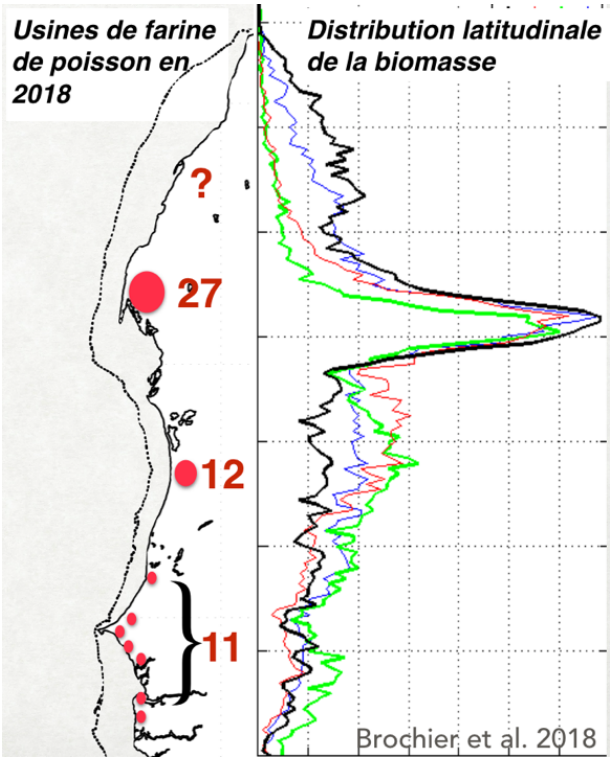


图*18*：鱼粉厂的位置（*2018*年，左）以及由 *Evol-Deb* 模型估算的圆腹鲱生物量季节性分布（*Brochier* 等，*2018*）。

4.3 研究局限

本研究仅考虑了气候变化导致的海表温度升高，并将其作为鱼类栖息地的替代指标，未考虑气候变化的其他影响。然而，其他过程可能也会发挥重要作用，例如上升流减弱导致表层水域的营养富集减少，以及温度和二氧化碳分压升高导致水体酸化和脱氧。这些过程会因鱼类栖息地退化而降低环境承载能力，进而使平衡状态下的鱼类生物量和渔获量减少。

当前模型无法用于解释某一特定物种的渔获量变化。事实上，模型中用于表示鱼类生物量的四种模型物种，代表的是多个目标物种的集合。因此，这些模型物种种群参数的估算非常不确定，可能会影响对导致过度开发的捕捞努力阈值的预测。此外，登陆点的加工能力没有区分不同物种的加工情况，这可能会高估底栖鱼类的加工能力。实际上，各物种的经济价值可能大不相同，对应的市场也各不相同。

最后，现实中渔民的行为可能比模型中实施的设定更加灵活。具体而言，我们考虑了固定数量的渔民，但这一数量可能会根据该活动的盈利能力而发生变化。

方框：“本工作的后续跟进”

“人工智能快速监测手工渔业”

本项目中的信息学研究还为基于无人机或卫星获取的航空影像，在登陆点自动统计捕捞单元的系统提供了有趣的见解。研究促成了一个大型标注图像数据库的建立，其中包含来自卫星和无人机的图像，并完成了深度学习算法的训练（Olaluwoye等，已接收）。该系统有助于以更低的成本收集数据，并可供负责监测手工渔业的塞内加尔机构使用。尤其是，利用卫星影像进行统计，有望重建过去的迁徙模式。

“通过角色扮演游戏向利益相关者传达模型”

一种有效传达模型结果的方式，是基于该模型构建角色扮演游戏。UMMISCO团队在此类参与式方法方面拥有丰富经验，历史上主要用于畜牧业模型。这种方法也使研究者能够观察玩家的逻辑。在模型中，没有任何实体能够修改社会经济参数，但模型使用者可以扮演这一实体的角色。可持续发展管理者的目标是在均衡状态下最大化捕获的鱼的数量，而短期发展管理者的目标则是例如最大化来年的渔获量。这些目标将决定管理措施，例如登陆点基础设施、捕捞许可证和国际渔业协定。也就是说，角色扮演游戏可以帮助行动者理解此类管理措施的长期和短期后果。作为本工作的延续，一款由塞内加尔艺术家绘制插图的渔业角色扮演游戏正在UMMISCO开发中，面向国家和国际层面的渔民、鱼类贸易商和管理者。

4.4 结论与展望

本项目将建模工作与实地研究相结合，跨越社会学、生态学、海洋学和经济学的界限，使我们得以运用数学和信息学框架提出一个概念模型。项目得益于有效且富有建设性的国际科研合作，并培养了多名学生，使其掌握塞内加尔手工渔业的跨学科研究方法。在 UMMISCO 开展这一主题研究所产生的科研活动，在 UCAD 和 IRD 的 HABITABLE 资助推动下，并延伸至 ISRA 合作伙伴（CRODT），也促成了不同学科研究人员和教师兼研究人员的参与。访谈和焦点小组提供了大量有关塞内加尔渔民迁徙的信息，其中一部分被用于构建当前模型，但这些信息仍可用于未来的研究。

初步结果表明，过度开发是手工渔业面临的主要威胁。尽管这些结果尚属初步，但具有稳健性，主要说明手工渔业渔民凭借迁移能力，能够适应未来气候情景所预测的目标鱼类栖息地分布变化。尽管捕捞效率难以估算，但基于手工渔业船队和鱼类种群生物量的现实数据，模型显示，无论是否发生气候变化，按当前配置，塞内加尔手工渔业都可能迅速崩溃。模型预测会发生彻底而迅速的崩溃，是因为渔民人数被设定为固定不变；但现实中不太可能出现这种情况，因为渔民离开渔业后，捕捞努力量会随之减少。事实上，当鱼类丰度降至某一阈值，无法再通过增加捕捞努力量来维持最低渔获量时，渔民便会离开渔业。自2021年以来，对一种主要小型中上层鱼类渔业的观测也印证了这一点（Brochier 等人，2023）。因此，如果不采取管理措施，短期内渔民迁移可能会继续增加，不论气候变化与否。这向管理者传递了一个

强烈的信息：人们常将当前危机归咎于气候，但问题可能出在管理不善。通过在该地区以鱼类迁徙范围为尺度管理渔业，并纳入从摩洛哥到几内亚的利益相关者，便可减少捕捞努力量，并适应气候变化对鱼类分布造成的影响。此类管理应包括监测工业捕捞和手工捕捞的努力量、登陆点的加工能力，以及鱼粉厂和出口地的情况。进一步探索模型或有助于更好地了解沿海基础设施沿海岸的分布所产生的影响。无论如何，次区域管理应确保不同渔业之间不存在竞争，因为竞争必然会导致过度开发（Hieu 等人，2018）。

本文通过鱼类物种分布的变化来考察气候变化情景的影响。结果表明，在区域尺度上对渔业进行良好管理，可以增强手工渔业应对气候变化的韧性。这一结果与先前基于宏观生态学理论的定性研究相矛盾；那些研究基于初级生产力下降的假设，预测气候变化会导致西非渔获量下降（Belhabib 等人，2016；Cheung 等人，2008）。然而，目前尚未观察到初级生产力下降，而且在西北非的气候情景中，这种下降仍不确定。不过，在不久的将来，气候变化可能会通过改变初级生产力影响鱼类物种的承载能力，因为届时将可获得气候变化强迫条件下的耦合水动力与生物地球化学模拟（例如 ROMS-PISCES）。

塞内加尔手工渔业曾是气候难民的避难行业，但由于过度开发而走向衰败，迫使许多渔民转行。在当前背景下，西北非许多人有意移居欧洲，而经验丰富的渔民可以利用其航海知识，运送前往加那利群岛（西班牙）的非法移民。塞内加尔渔民专门从事此类活动，可能会提高塞内加尔作为移民出发地的吸引力。通过次区域管理限制捕捞能力和加工能力，和／或通过国际协定减少全球对加那利群岛南部生态系统所产鱼类的消费（尤其是鱼粉，无论其来自工业捕捞还是手工渔业），即可减少这一现象。

5 - 参考文献

Abernethy, K. E., Allison, E. H., Molloy, P. P., & Côté, I. M.（2007）。渔民为什么在他们捕鱼的地方捕鱼？运用理想自由分布理解手工珊瑚礁渔民的行为。《加拿大渔业与水生科学杂志》，*64*(11)，1595–1604。https://doi.org/10.1139/f07-125 Agnew, D. J., Pearce, J., Pramod, G., Peatman, T., Watson, R., Beddington, J. R., & Pitcher, T. J.（2009）。估算全球非法捕捞的范围。*PLOS ONE*，*4*(2)，e4570。https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004570《西非渔业与手工渔民图集：西非经济货币联盟成员国：贝宁、布基纳法索、科特迪瓦、几内亚比绍、马里、尼日尔、塞内加尔、多哥》（2022）。载于 P. Chavance & P. Morand（编），《西非渔业与手工渔民图集：西非经济货币联盟成员国》

贝宁、布基纳法索、科特迪瓦、几内亚比绍、马里、尼日尔、塞内加尔、多哥。IRD出版社。https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.43778 Auger, P., Mchich, R., Raïssi, N., & Kooi, B. W.（2010）。市场价格对空间渔业模型动态的影响：过度开发渔业／传统渔业。《生态复杂性》，7(1)，13–20。Ba, A., Chaboud, C., Brehmer, P., & Schmidt, J. O.（2022）。补贴对西非小规模小型远洋渔业是否仍然重要？长期生物经济情景的启示。《海洋政策》，146，105294。https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105294 Ba, A., Schmidt, J., Dème, M., Lancker, K., Chaboud, C., Cury, P., Thiao, D., Diouf, M., & Brehmer, P.（2017）。西非小型远洋渔业的盈利能力与经济驱动因素：二十年视角。《海洋政策》，76，152–158。https://doi.org/10.1016/j.mar-pol.2016.11.008 Ba, K., Thiaw, M., Fall, M., Thiam, N., Meissa, B., Jouffre, D., Thiaw, O. T., & Gascuel, D.（2018）。长期捕捞对塞内加尔沿海底层资源的影响：基于种群评估模型的诊断。《水生生物资源》，31，8。https://doi.org/10.1051/alr/2017046 Barry-Gérard, M.（无日期）。塞内加尔海岸带鱼类迁徙。20。Bars, F. L., & Jaulin, L.（2013）。2013年机器人帆船：第六届国际机器人帆船会议论文集。Springer Science & Business Media。Belhabib, D., Koutob, V., Sall, A., Lam, V. W. Y., & Pauly, D.（2014）。渔获量瞒报及其影响：以塞内加尔为例。《渔业研究》，151，1–11。https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.12.006 Binet, T., Failler, P., & Thorpe, A.（2012）。塞内加尔渔民迁徙：采取区域管理方法的理由。《海事研究》，11(1)，1–14。https://doi.org/10.1186/2212-9790-11-1 Boely, T., Chabanne, J., Fréon, P., & Stéquert, B.（1982）。圆腹鲱在西非大陆架（从比绍群岛至毛里塔尼亚）的性周期与迁徙。《国际海洋考察理事会会议记录》，180，350355–。Boely, T., Chabanne, T., & Fréon, P.（1978）。塞内加尔—毛里塔尼亚海域沿岸主要远洋鱼类的迁徙模式、聚集区域与繁殖期[西非沿岸远洋鱼类特设工作组报告：从毛里塔尼亚至利比里亚（北纬26°至北纬5°）]。CRODT。Boelyl, T., Chabanne, J., Fréon, P., & Stéquert, B.（1982）。圆腹鲱在西非大陆架（从比绍群岛至毛里塔尼亚）的性周期与迁徙。http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_14-15/17549.pdf Bourdieu, P.（1979）。文化资本的三种形态。《社会科学研究纪事》，30(1)，3–6。https://doi.org/10.3406/arss.1979.2654 Branch, T. A., Hilborn, R., Haynie, A. C., Fay, G., Flynn, L., Griffiths, J., Marshall, K. N., Randall, J. K., Scheuerell, J. M., Ward, E. J., & Young, M.（2006）。船队动态与渔民行为：对渔业管理者的启示。《加拿大渔业与水生科学杂志》，63(7)，1647–1668。https://doi.org/10.1139/f06-072 Brochier, T., Auger, P. A., Pecquerie, L., Machu, E., Capet, X., Thiaw, M., Mbaye, B. C., Braham, C. B., Ettahiri, O., Charouki, N., Sene, O. N., Werner, F., & Brehmer, P.（2018）。个体对环境的行为反应所形成的复杂小型远洋鱼类种群模式。《海洋学进展》，164，12–27。https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.03.011

Brochier, T., Auger, P., Thiam, N., Sow, M., Diouf, S., Sloterdijk, H., & Brehmer, P.（2015）。人工生境的实施：应位于海洋保护区内还是外？基于数学方法的见解。《生态建模》，297，98–106。https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.10.034 Brochier, T., Auger, P., Thiao, D., Bah, A., Ly, S., Nguyen-Huu, T., & Brehmer, P.（2018）。过度开发的渔业能否通过自组织实现恢复？捕捞努力量的重新分配作为一种涌现式治理形式。《海洋政策》，95，46–56。https://doi.org/10.1016/j.mar-pol.2018.06.009 Brochier, T., & Bah, A.（2021）。FisherMob：渔民流动性的生物经济学模型。https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03183811 Brochier, T., Brehmer, P., Mbaye, A., Diop, M., Watanuki, N., Terashima, H., Kaplan, D., & Auger, P.（2021）。成功的人工鱼礁取决于是否具备适宜的情境，因为其中存在复杂的社会—生物—经济相互作用。《科学报告》，11(1)，16698。https://doi.org/10.1038/s41598-021-95454-0 Brochier, T., Colas, F., Lett, C., Echevin, V., Cubillos, L. A., Tam, J., Chlaida, M., Mullon, C., & Fréon, P.（2009）。上升流系统中小型中上层鱼类的繁殖策略：用于研究环境约束的出生地归巢进化模型。《海洋学进展》，83(1–4)，261–269。Brochier, T., Echevin, V., Tam, J., Chaigneau, A., Goubanova, K., & Bertrand, A.（2013）。气候变化情景实验预测洪堡洋流系统中小型中上层鱼类补充量未来将减少。《全球变化生物学》，19(6)，1841–1853。https://doi.org/10.1111/gcb.12184 Brochier, T., Ecoutin, J. M., de Morais, L. T., Kaplan, D. M., & Lae, R.（2013）。用于研究海洋保护区内热带河口鱼类群落变化的多主体生态系统模型。《水生生物资源》，26(02)，147–158。https://doi.org/10.1051/alr/2012028 Brochier, T., Mason, E., Moyano, M., Berraho, A., Colas, F., Sangrà, P., Hernández-León, S., Ettahiri, O., & Lett, C.（2011）。从非洲海岸到加那利群岛的鱼类浮游生物输运。《海洋系统杂志》，87(2)，109–122。https://doi.org/16/j.jmarsys.2011.02.025 Brochier, T., Ramzi, A., Lett, C., Machu, E., Berraho, A., Fréon, P., & Hernández-León, S.（2008）。加那利洋流系统中沙丁鱼和鲣鱼鱼类浮游生物输运的建模。《浮游生物研究杂志》，30(10)，1133–1146。Castillo-Jordán, C., Cubillos, L. A., & Paramo, J.（2007）。2005年智利中南部近海两种共存小型中上层鱼类的产卵空间结构。《水生生物资源》，20(1)，77–84。https://doi.org/10.1051/alr:2007018 Charles, A. T., Mazany, R. L., & Cross, M. L.（1999）。非法捕捞的经济学：一个行为模型。《海洋资源经济学》，14(2)，95–110。Chauveau, J.-P.（1989）。塞内加尔工业捕捞史与工业化政策：第一部分：五个世纪的欧洲捕捞（15世纪至20世纪50年代中期）。《人文科学笔记》，25(1–2)，237–258。Chauveau, J.-P., Jul-Larsen, E., & Chaboud, Christian.（2000）。西非独木舟捕捞——权力、流动性与市场（IRD出版社/Karthala）。
https://www.editions.ird.fr/produit/157/9782845860711/les-peches-piroguieres-en-afrique-de-l-ouest Chérel, G., Cottineau, C., & Reuillon, R.（2015）。超越佐证：通过寻找意外模式加强模型验证。《PLOS ONE》，10(9)，e0138212。https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138212 Cormier Salem, M.-C., & Dahou, T.（编）。（2009）。治理海洋：国家、海盗与社会。《非洲政治》，116。http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010048588

Corten, A., Braham, C.-B., & Sadegh, A. S.（2017）。毛里塔尼亚鱼粉产业的发展及其对西北非圆腹鲱及其他小型中上层鱼类区域种群的影响。《渔业研究》，186，第1部分，328–336。https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.10.009 Corten, A., & Sadegh, A. S.（2014）。毛里塔尼亚鱼粉产业的发展及其对圆腹鲱及其他小型中上层鱼类区域种群的影响（第10页） [粮农组织西非小型中上层鱼类工作组]。Cury, P., & Roy, C.（1988年）。塞内加尔石斑鱼属（白姑鱼）的季节性迁移：上升流的影响。《海洋学学报》，11(1)，25–36。Dahou, T.（2009）。非洲海洋空间政策：在地方与全球之间周旋。《非洲政治》，116，5–22。Dahou, T.（2010）。管理空间而不治理人民：海洋保护区的困境（萨卢姆，塞内加尔）。《人类学与社会》，34(1)，75–93。https://doi.org/10.7202/044197ar Deme, E. H. B., Failler, P., & Deme, M.（2021）。塞内加尔手工渔民在西非的迁移：模式与影响。《非洲身份认同》，19(3)，253–265。https://doi.org/10.1080/14725843.2021.1937049 Deme, E. hadj B., Deme, M., & Failler, P.（2022）。塞内加尔的小型中上层鱼类：一种多用途资源。《海洋政策》，141，105083。https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105083 Deme, E. hadj B., Failler, P., & Touron-Gardic, G.（2021）。塞内加尔海洋保护区的治理：参与式管理的困难与管理委员会的停滞不前。《VertigO：环境科学电子期刊》，第21卷第1期，文章：第21卷第1期。https://doi.org/10.4000/vertigo.30880 Deme, E. J. B., Brehmer, P. P., Bâ, A., & Failler, P.（2021）。塞内加尔手工渔民的韧性与应变能力：生态危机作为创新动力。《发展中的世界》，49(193)，109–127。https://doi.org/10.3917/med.193.0113 Diankha, O., Ba, A., Brehmer, P., Brochier, T., Sow, B. A., Thiaw, M., Gaye, A. T., Ngom, F., & Demarcq, H.（2018）。塞内加尔海域两种圆腹鲱的对比性最佳环境窗口。《渔业海洋学》，27(4)，351–365。https://doi.org/10.1111/fog.12257 Diankha, O., Thiaw, M., Sow, B. A., Brochier, T., Gaye, A. T., & Brehmer, P.（2015）。塞内加尔海域圆腹鲱（圆腹鲱）和鲣鱼（欧洲鲣）的丰度与温度的关系。《海洋》，31(2)，9–17。Diallo, M.（2021）。从建模视角分析塞内加尔手工渔民的流动实践：以乔阿尔、姆布尔、圣路易和松贝迪乌纳的渔民为例（第120页） [毕业论文]。渔业与水产养殖大学学院（IUPA）。Essington, T. E., Moriarty, P. E., Froehlich, H. E., Hodgson, E. E., Koehn, L. E., Oken, K. L., Siple, M. C., & Stawitz, C. C.（2015）。捕捞会加剧饵料鱼种群崩溃。《美国国家科学院院刊》，112(21)，6648–6652。https://doi.org/10.1073/pnas.1422020112 Fadiaba, O., Ndao, S., Seck, S., Signate, M., & Guitton, J.（2022）。塞内加尔。载于P. Chavance与P. Morand（编），《西非渔业与手工渔民图集：西非经济货币联盟成员国：贝宁、布基纳法索、科特迪瓦、几内亚比绍、马里、尼日尔、塞内加尔、多哥》（第131–136页）。IRD出版社。https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.44091 Failler, P.（2014）。非洲的气候变异与粮食安全：西非小型中上层鱼类案例。《渔业与畜牧业生产杂志》，2014。
http://www.escienceentral.org/journals/climate-variability-and-food-security-in-africa-the-case-of-small-pelagic-fish-in-west-africa-2332-2608.1000122.php?aid=32593

Failler, P., & Binet, T. (2010年). 塞内加尔。迁徙渔民：气候与生态难民。《人与移民》。法国移民动态权威评论，1284, 98–111. https://doi.org/10.4000/hommesmigrations.1250 Failler, P., Binet, T., Dème, E. hadj B., & Deme, M. (2020年). 21世纪初西非迁徙渔业的重要性。《非洲国际移民评论》，1(1), Article 1. https://revues.imist.ma/index.php/RAMI/article/view/21436 Fall, T. (2020年). 手工渔民流动性的决定因素：圣路易、Yarakh和乔阿尔渔民案例 (p. 137) [毕业论文]. 渔业与水产养殖大学研究所 (IUPA). 联合国粮食及农业组织. (2007年). 2006年世界渔业和水产养殖状况，渔业和水产养殖部，联合国粮食及农业组织. Garcia, S., Atlantic, P. for the D. of F. in the E. C., Food, Atlantic, A. O. of the U. N. F. C. for the E. C., Food, Nations, A. O. of the U., & Programme, U. N. D. (1982). 中东部大西洋渔业委员会北部区域主要鱼类资源的分布、迁移与产卵. 联合国粮食及农业组织. Garcia, S. M. (2010年). 治理、科学与社会：渔业生态系统方法. 《海洋渔业保护与管理手册》，87–98. Garcia, S. M., & Cochrane, K. L. (2005年). 渔业生态系统方法：实施指南综述. 《ICES海洋科学杂志》：Journal Du Conseil, 62(3), 311–318. Gillis, D. M. (2003年). 船队动态中的理想自由分布：渔业分析中船舶移动的行为视角. 《加拿大动物学杂志》，81(2), 177–187. https://doi.org/10.1139/z02-240 Gillis, D. M., van der Lee, A., & Walters, C. (2012年). 推进理想自由分布在捕捞努力量空间模型中的应用：isodar方法. 《加拿大渔业与水生科学杂志》，69(10), 1610–1620. https://doi.org/10.1139/f2012-091 Gorgues, T., Ménage, O., Terre, T., & Gaillard, F. (2011年). 表层采样的创新方法. 《渔业与水产科学杂志》，4, 105–109. Goudiaby, M., Seye, M., & Mbaye, M. D. L. (无日期). 2018年海洋渔业总体结果——统计局 (p. 98). 渔业与海洋经济部——海洋渔业局. Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., & Railsback, S. F. (2010年). ODD协议：综述与首次更新. 《生态建模》，221(23), 2760–2768. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019 Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W. M., Railsback, S. F., Thulke, H. H., Weiner, J., Wiegand, T., & DeAngelis, D. L. (2005年). 基于智能体的复杂系统的格局导向建模：来自生态学的启示. 《科学》，310(5750), 987–991. Guénette, S., Meissa, B., & Gascuel, D. (2014年). 评估海洋保护区对生态系统营养功能的贡献：阿尔金浅滩与毛里塔尼亚陆架模型. PloS One, 9(4), e94742. Holland, D. S. (2000年). 乔治斯浅滩海洋庇护区的生物经济模型. 《加拿大渔业与水生科学杂志》，57(6), 1307–1319. https://doi.org/10.1139/f00-061 Holland, D. S., & Sutinen, J. G. (1999年). 新英格兰拖网渔业船队动态的实证模型. 《加拿大渔业与水生科学杂志》，56(2), 253–264. https://doi.org/10.1139/f98-169 Jaulin, L., & Bars, F. L. (2013年). 用于稳定性分析的区间方法：在帆船机器人中的应用. 《IEEE机器人学汇刊》，29(1), 282–287. https://doi.org/10.1109/TRO.2012.2217794

Laurans, M., Gascuel, D., Chassot, E., & Thiam, D. (2004年). 近三十年来西非鱼类底栖群落营养结构的变化. 《水生生物资源》, 17(2), 163–174. Machu, É., Brochier, T., Capet, X., Ndoya, S., Sidiki Ba, I., & Descroix, L. (2023年). 第2章. 液态世界中的污染. IRD出版社. https://books.openedition.org/irdeditions/ https://books.openedition.org/irdeditions/44554 Machu, E., Capet, X., Estrade, P. A., Ndoye, S., Brajard, J., Baurand, F., Auger, P.-A., Lazar, A., & Brehmer, P. (2019年). 南加那利上升流系统缺氧与氮损失的首个证据. 《地球物理研究通讯》, 46(5), 2619–2627. https://doi.org/10.1029/2018GL079622 Mazé, C., Dahou, T., Ragueneau, O., Danto, A., Mariat-Roy, E., Raimonet, M., & Weisbein, J. (2017年). 综合海岸带管理中的知识与权力：面向与海洋环境科学相结合的海洋政治人类学. 《地球科学报告》, 349(6), 359–368. https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.09.008 MAZEAUD, A., Barbier, R., Blondiaux, L., Chateauraynaud, F., Fourniau, J.-M., Lefebvre, R., Neveu, C., & Salles, D. (2013年). 参与的批判性跨学科词典. http://www.dicopart.fr/fr/dico/citoyenelutechnicien Mbaye, A., Cormier-Salem, M.-C., Schmidt, J. O., & Brehmer, P. (2021年). 塞内加尔手工渔民对海洋环境变化的认知：一种普遍知识？《社会科学与人文开放获取》, 4(1), 100231. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2021.100231 Mbaye, A., Thiam, N., & Fall, M. (2018年). 塞内加尔的受保护捕捞区：在渔民的乡土与鱼类的游程之间。何种管理尺度？《可持续发展与领土》。经济、地理、政治、法律、社会学，第9卷，第1期. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11999 Mbaye, B. C., Brochier, T., Echevin, V., Lazar, A., Lévy, M., Mason, E., Gaye, A. T., & Machu, E. (2015年). 圆腹鲱的产卵季节是否与塞内加尔—毛里塔尼亚上升流区的局地滞留模式相匹配？《渔业海洋学》, 24(1), 69–89. https://doi.org/10.1111/fog.12094 Mchich, R., Brochier, T., Auger, P., & Brehmer, P. (2016年). 小型中上层鱼类种群的跨岸结构与近海工业渔业及近岸手工渔业之间的交互：一种数学方法. Acta Biotheoretica, 64(4), 479–493. https://doi.org/10.1007/s10441-016-9299-7 Mcowen, C. J., Cheung, W. W. L., Rykaczewski, R. R., Watson, R. A., & Wood, L. J. (2015年). 大型海洋生态系统内的渔业产量是由自下而上还是自上而下的驱动决定的？《鱼类与渔业》, 16(4), 623–632. https://doi.org/10.1111/faf.12082 Mellado, T., Brochier, T., Timor, J., & Vitancurt, J. (2014年). 地方知识在海洋保护区管理中的应用. 《海洋政策》, 44, 390–396. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.10.004 Menerault, P. (1999年). 这些治理我们的网络？（由Michel Marié与Michel Gariépy主编）. 《FLUX国际科学期刊：网络与领土》, 15(36), 69–73. Ndiaye, M. (2023年). 塞内加尔手工渔业主要目标物种空间与季节分布的参与式制图 (p. 76) [毕业论文]. 渔业与水产养殖大学研究所 (IUPA). Ndoye, S., Capet, X., Estrade, P., Sow, B., Machu, E., Brochier, T., Döring, J., & Brehmer, P. (2017年). 塞内加尔南部陆架“低富集高滞留”上升流中心的动力学. 《地球物理研究通讯》, 44(10), 5034–5043.

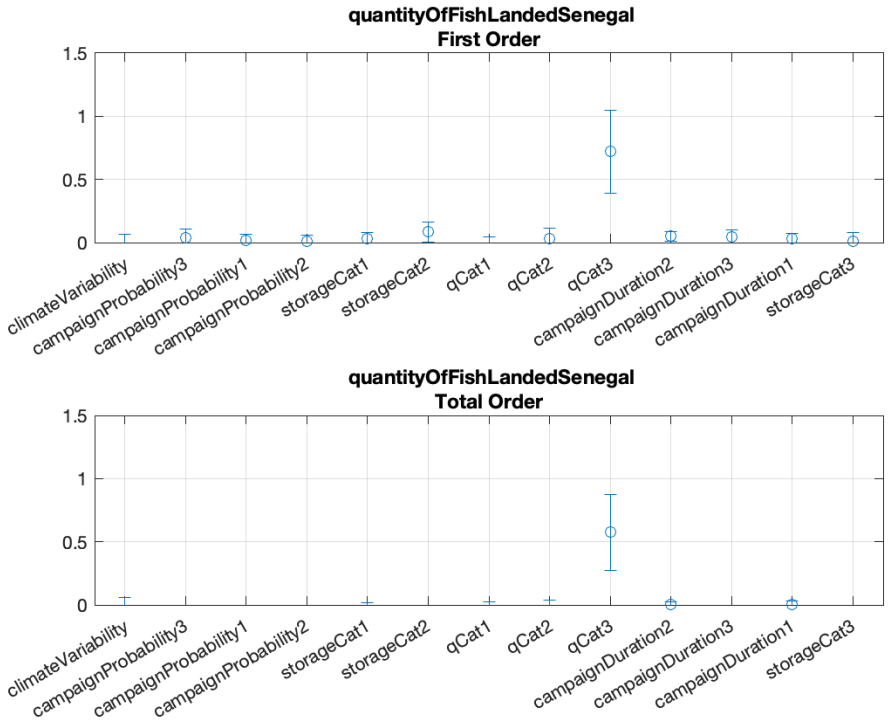
Nguyen, T. H., Brochier, T., Auger, P., Trinh, V. D., & Brehmer, P. (2018年). 跨界鱼类种群管理中的竞争还是合作：来自动力学模型的见解。《理论生物学杂志》, 447, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.03.017 Olaluwoye, O. (2024). 利用谷歌地球图像统计独木舟数量（第 47 页）[数学科学硕士学位实习报告]。ESP-UCAD / AIMS. Pala, C. (2013). 调查揭露未充分报告的过度捕捞。《自然》, 496(7443), 18–18. Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R., & Torres Jr, F. (1998). 海洋食物网中的捕捞层级下移。《科学》, 279(5352), 860. Song, A. M., Scholtens, J., Stephen, J., Bavinck, M., & Chuenpagdee, R. (2017年). 渔业领域的跨界研究。《海洋政策》, 76, 8–18. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.10.023 Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, P., Guimber- teau, M., Traore, S., & Baron, C. (2013). 评估气候变化对西非苏丹草原和萨赫勒草原高粱与小米产量的影响。《环境研究快报》, 8(1), 014040. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014040 Sumaila, U. R., Alder, J., & Keith, H. (2006). 非法捕捞的全球范围与经济学。《海洋政策》, 30(6), 696–703. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2005.11.001 Sylla, A., Mignot, J., Capet, X., & Gaye, A. T. (2019年). 气候变化背景下塞内加尔—毛里塔尼亚上升流系统的减弱。《气候动力学》, 53(7), 4447–4473. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04797-y Tacon, A. G. J. (2004). 水产养殖中鱼粉和鱼油的使用：全球视角。《水生资源、文化与发展》, 1(1), 3–14. Thiao, D., & Bunting, S. W. (2022年). 撒哈拉以南非洲鱼类饲料产业的社会经济与生物学影响（1236；渔业和水产养殖通告）。联合国粮食及农业组织、Worldfish 和格林威治大学自然资源研究所。https://doi.org/10.4060/cb7990en Thiao, D., Chaboud, C., Samba, A., Laloë, F., & Cury, P. (2012). 在塞内加尔小规模渔业管理失效的背景下，白姑鱼资源崩溃的经济层面。《非洲海洋科学杂志》, 34(3), 305–311. https://doi.org/10.2989/1814232X.2012.725278 Thiaw, M., Auger, P.-A., Ngom, F., Brochier, T., Faye, S., Diankha, O., & Brehmer, P. (2017年). 环境条件对西北非沿岸小型中上层鱼类丰度季节变化和年际变化的影响：以塞内加尔圆腹鲱为例。《渔业海洋学》, 26(5), 583–601. Touron-Gardic, G., Hermansen, Ø., Failler, P., Dia, A. D., Tarbia, M. O. L., Brahim, K., Thorpe, A., Bara Dème, E. H., Beibou, E., Kane, E. A., Bouzouma, M., & Arias-Hansen, J. (2022年). 毛里塔尼亚小型中上层鱼类价值链——近期变化及其对粮食安全的影响。《海洋政策》, 143, 105190. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105190 Travers, M., Shin, Y.-J., Jennings, S., & Cury, P. (2007年). 构建端到端模型，以研究气候和捕捞对海洋生态系统的影响。《海洋学进展》, 75(4), 751–770. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.08.001 Weigel, J.-Y., Montbrison, D. de, Giron, Y., Fossi, A., & Diop, H. (2014年). 渔业共同管理现状综述：全球综合、经验与启示。30页，复印件。https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01425953 Zickgraf, C. (2018年). “鱼会迁徙，我们也必须如此”：国际与国内环境迁移同塞内加尔渔业社区之间的关系。《国际关系杂志》, 16(1), 5–21。

6 – 附录

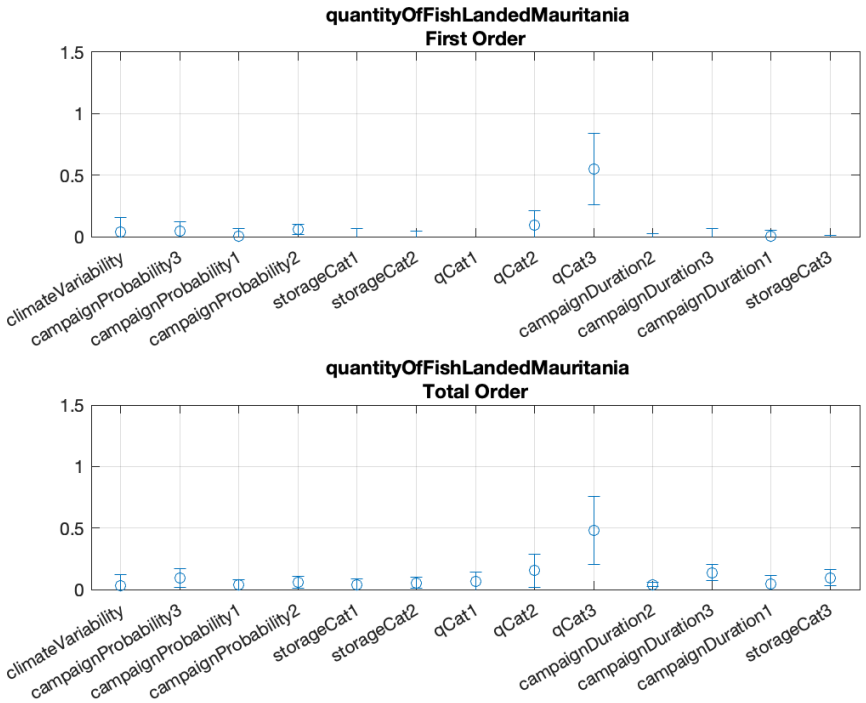
附录A：配置文件和参数

配置文件位于此处：https://dropsu.sorbonne-universite.fr/s/ij7FRyork6sBqJ k

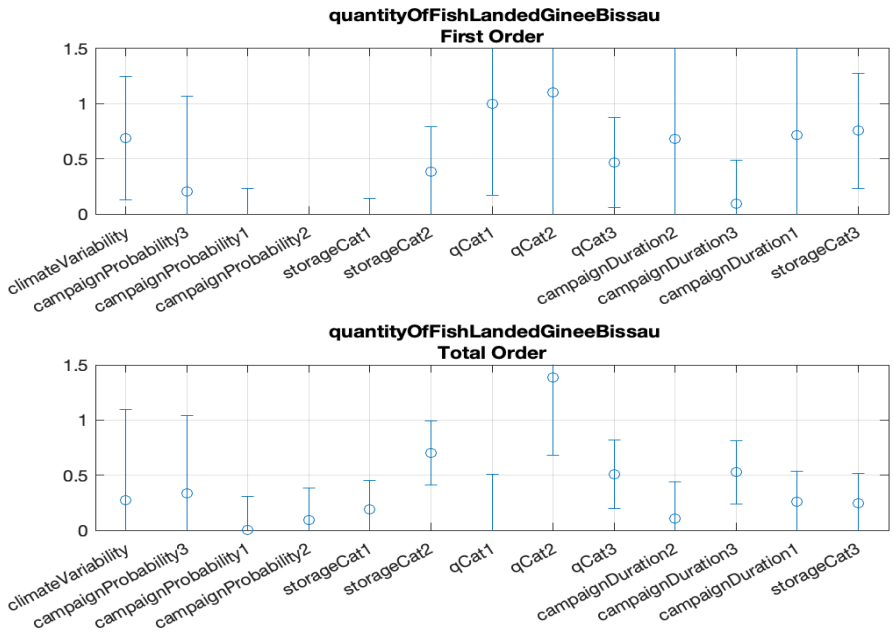
附录B：Saltelli敏感性分析结果



附录图*1*：*Saltelli*分析中模型参数对塞内加尔累积渔获量的影响

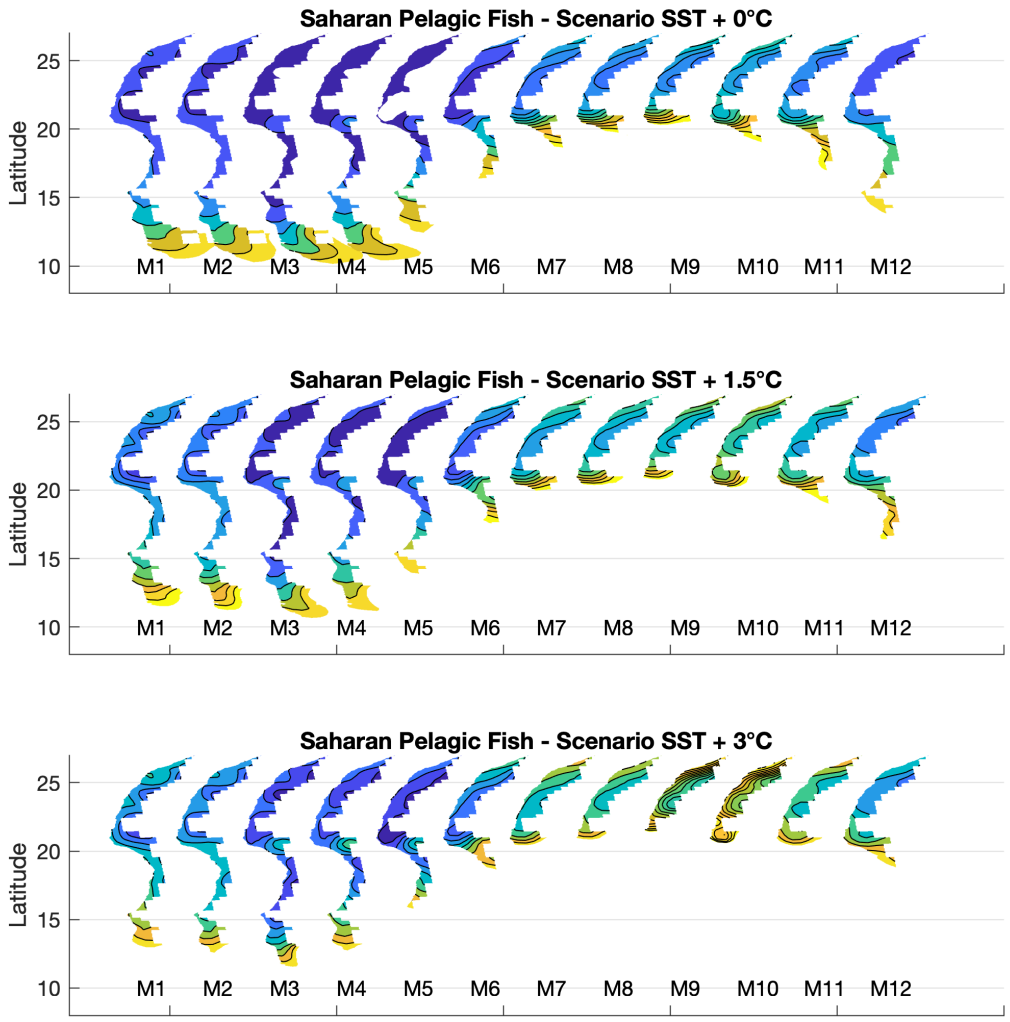


附录图*2*：*Saltelli*分析模型参数对毛里塔尼亚累积渔获量的影响

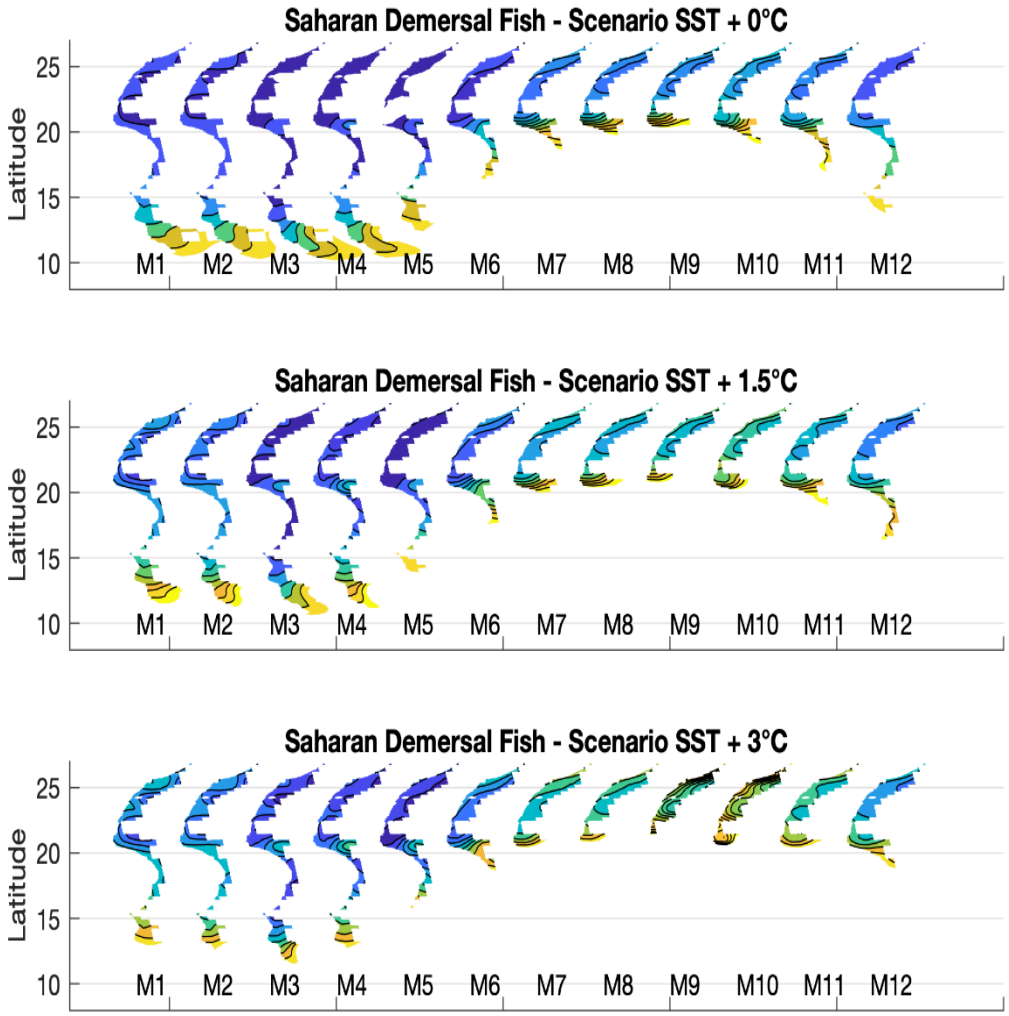


附录图*3*：*Saltelli*分析模型参数对几内亚比绍渔获量的影响

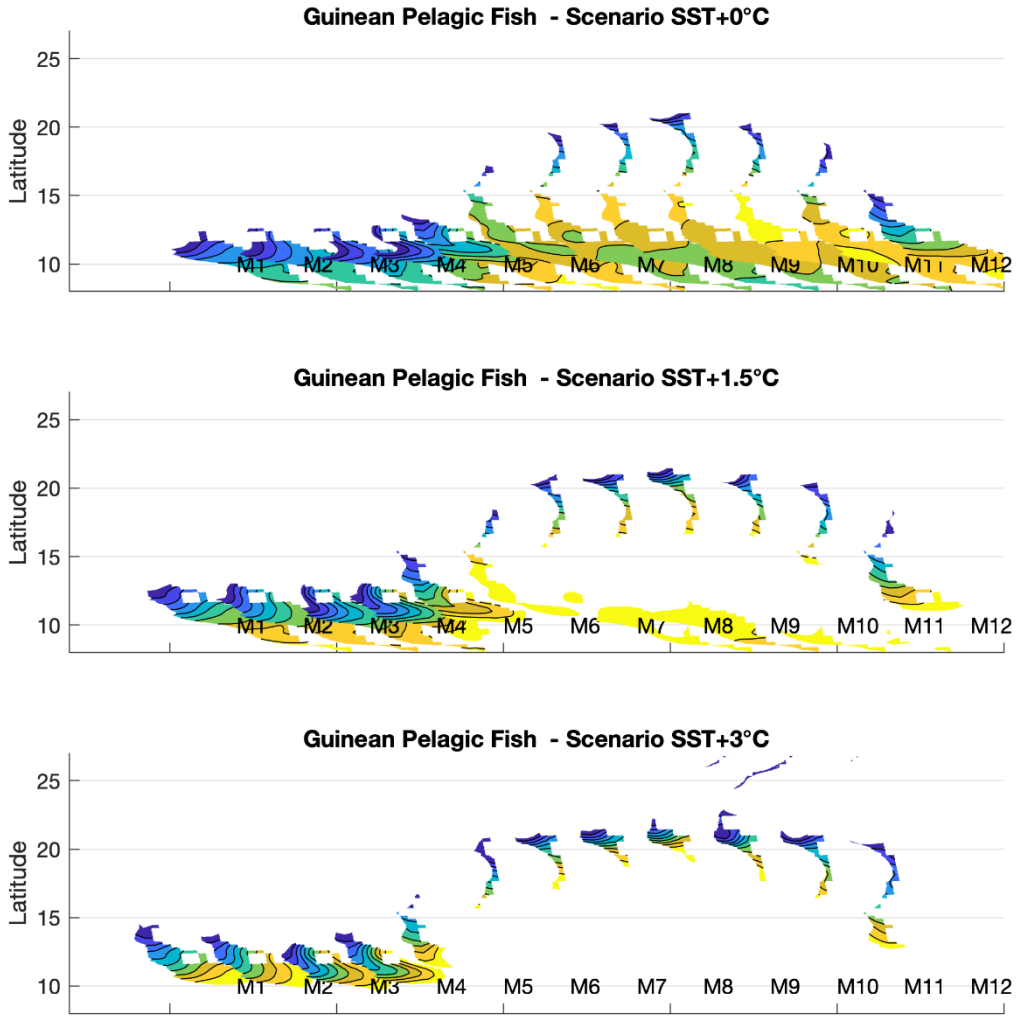
附录 C：气候情景下的鱼类栖息地分布



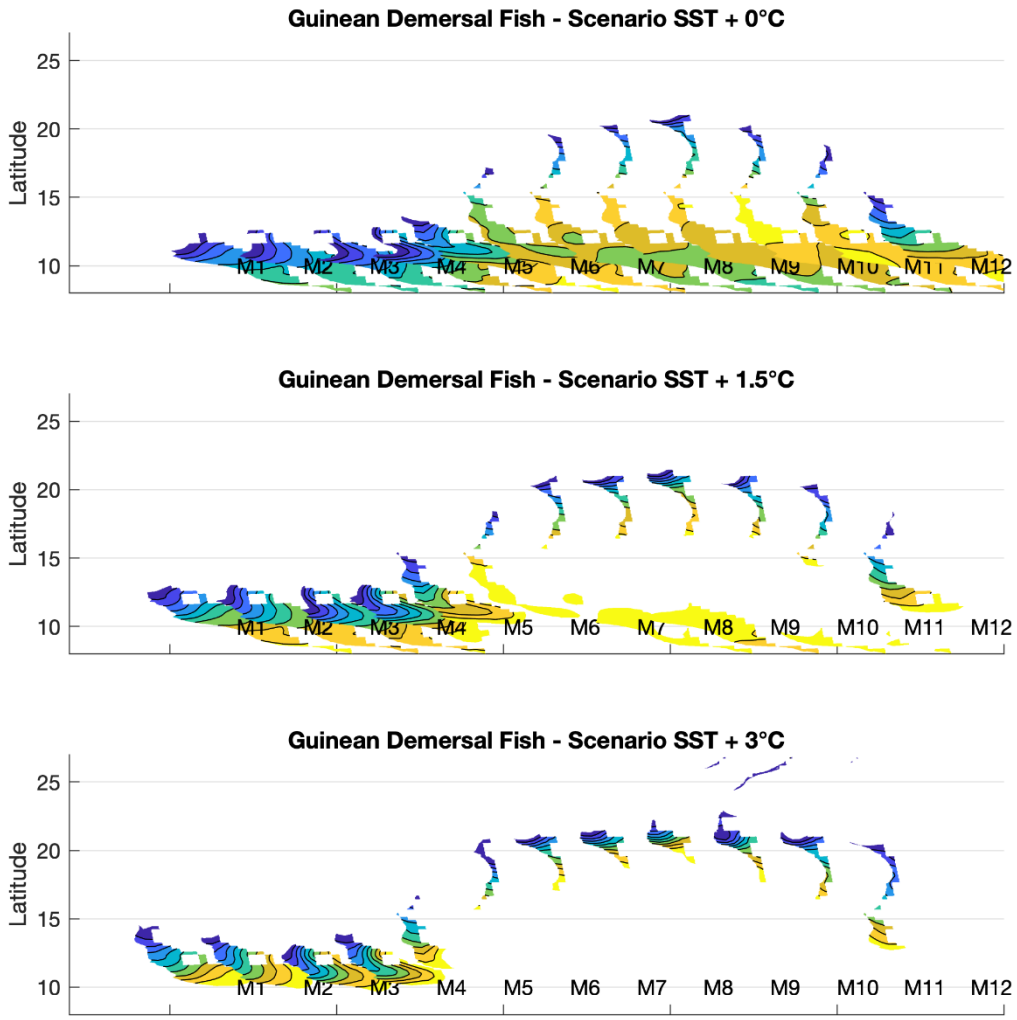
附录图 *4*：当前气候（上）、温和气候变化（*+1，5C*，中）和极端气候变化（*+3°C*，下）条件下撒哈拉远洋鱼类模型的月分布。对于每个月（*M1-12*），模型网格中所示区域代表鱼类栖息地，颜色代表海表温度。



附录图*5*：与图*22*相同，但针对撒哈拉底层鱼类。

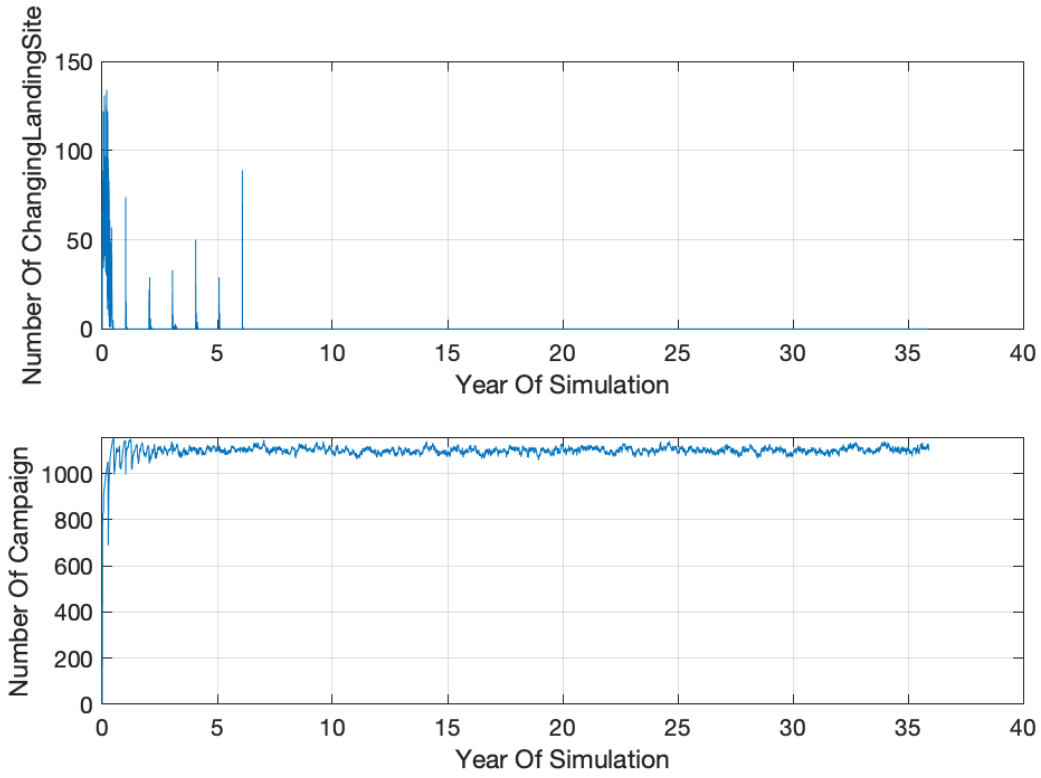


附录图*6*：与图*22*相同，但针对几内亚远洋鱼类。

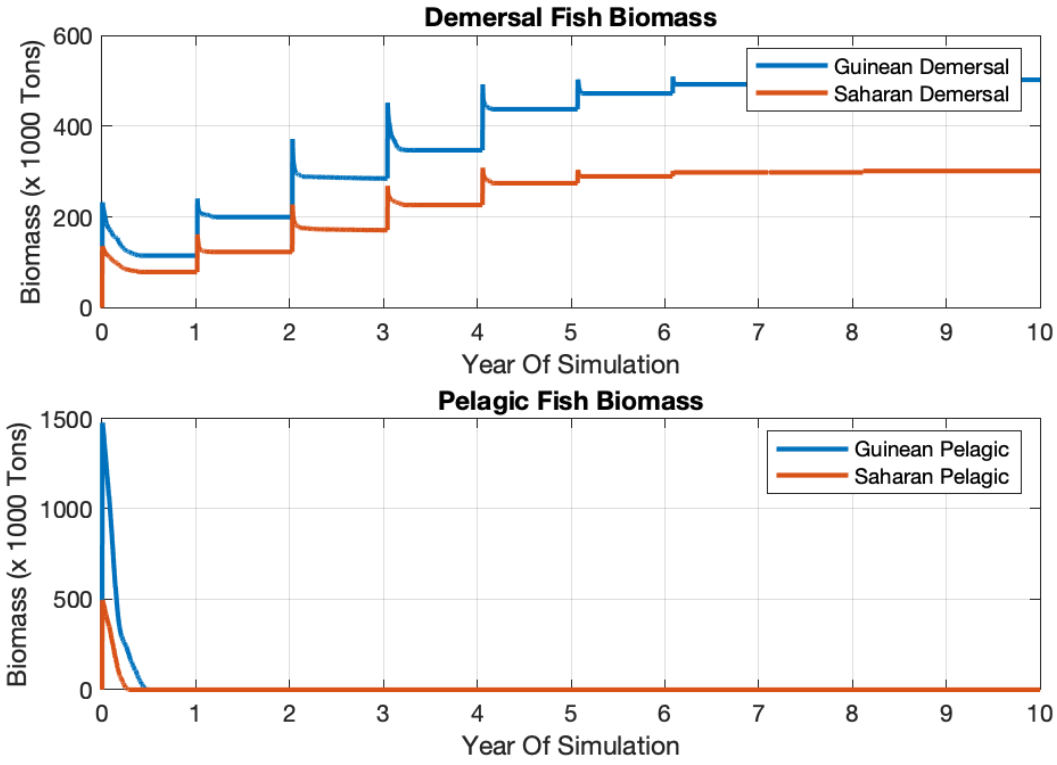


附录图7：与图22相同，但针对几内亚底层鱼类。

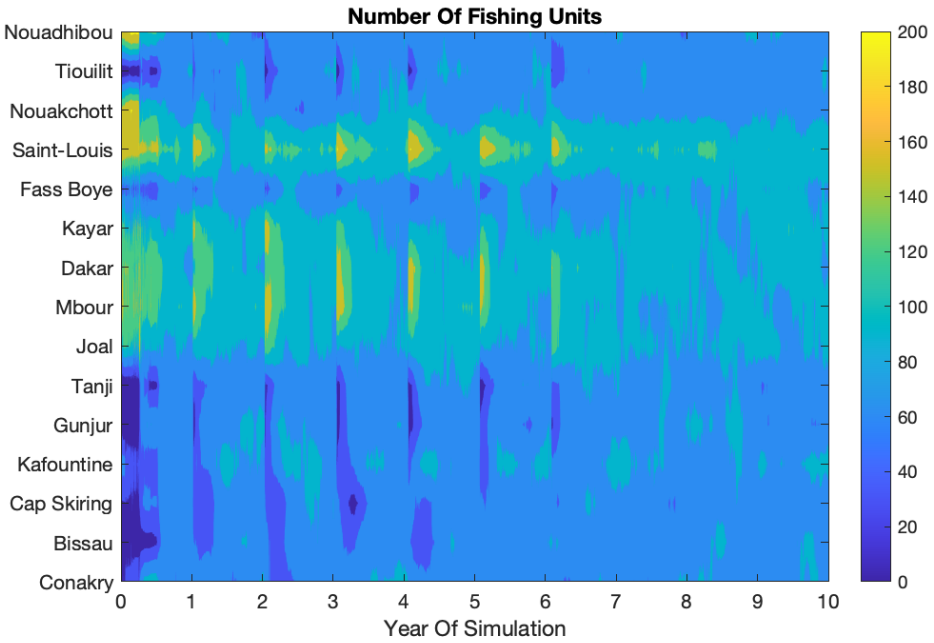
附录D：输出图



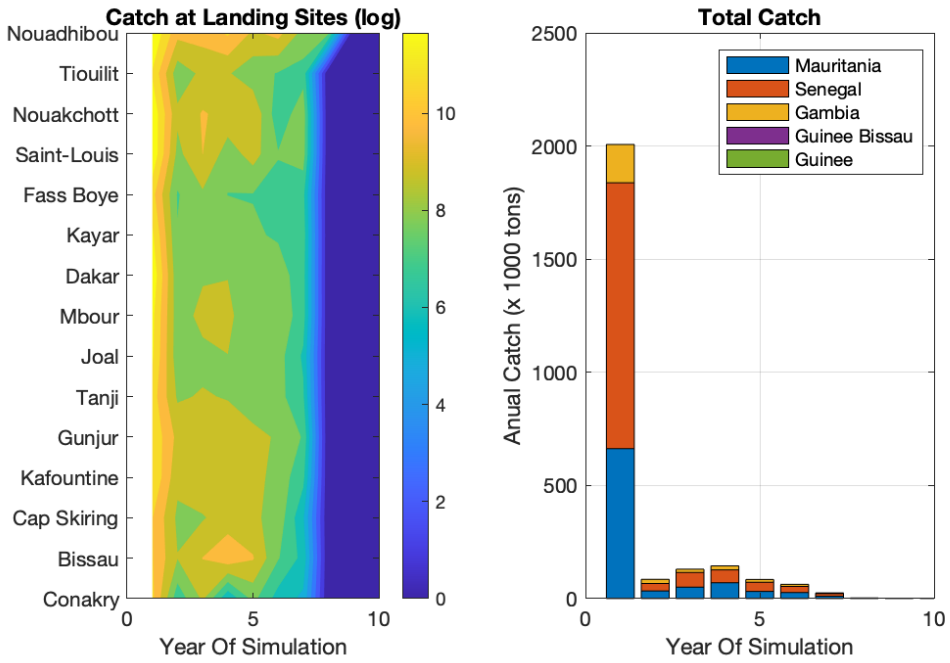
附录图*8*：捕捞单元短期（上）和长期（下）迁徙次数的变化（模拟*1*）



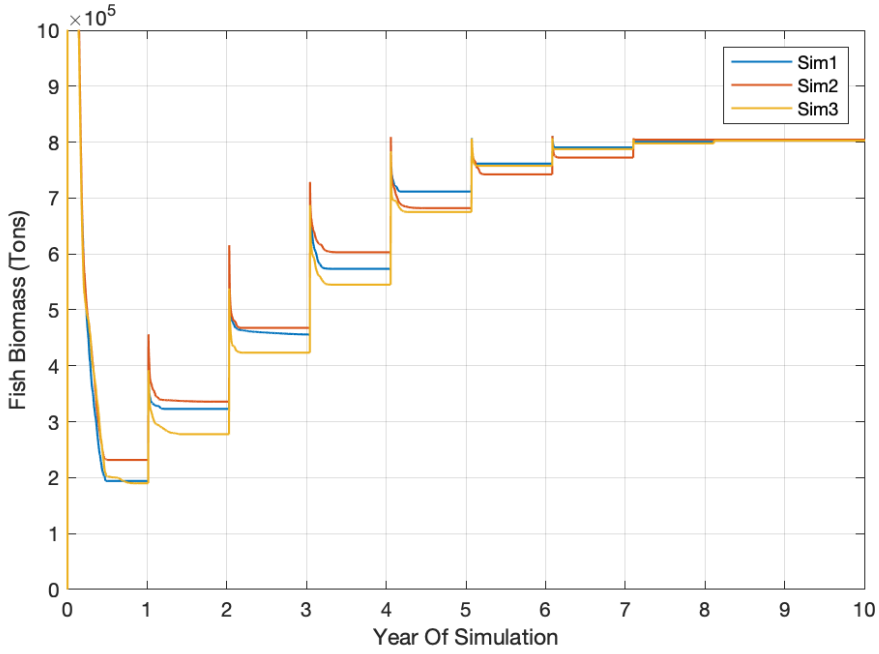
附录图*9*：模拟*1*中每种模型物种的鱼类生物量变化。上：底栖鱼类；下：中上层鱼类



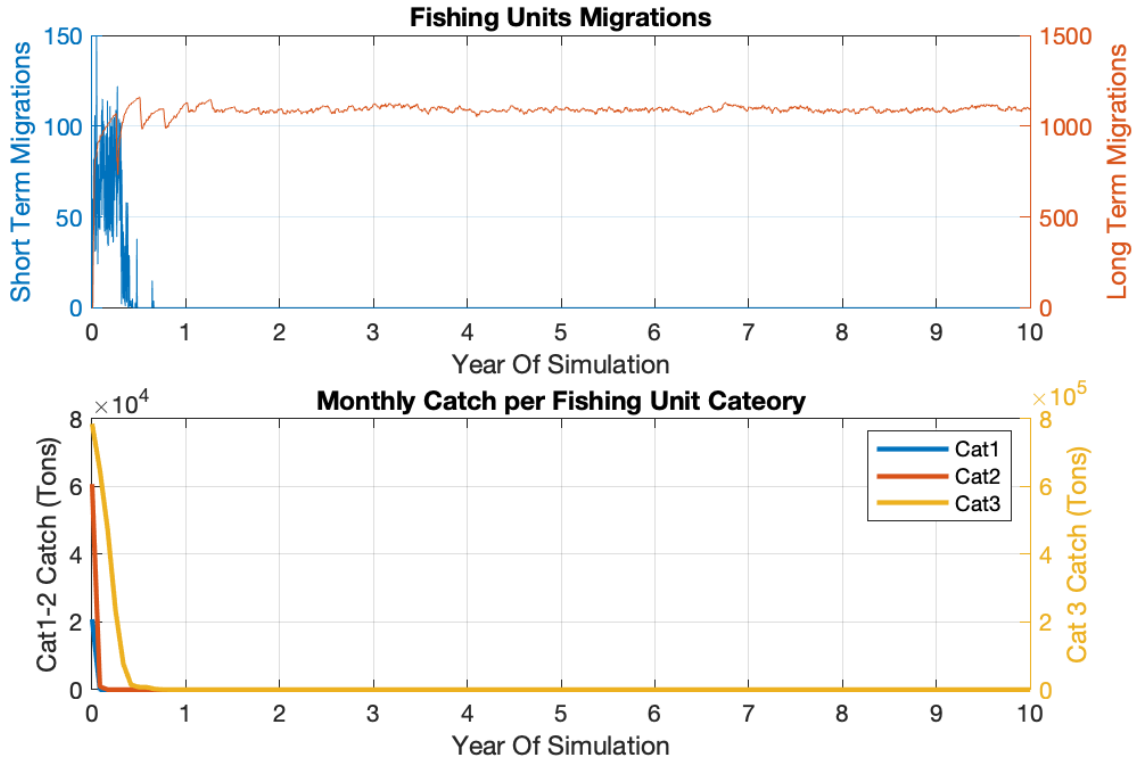
附录图*10*：模拟*1*中登陆点独木舟数量的变化。



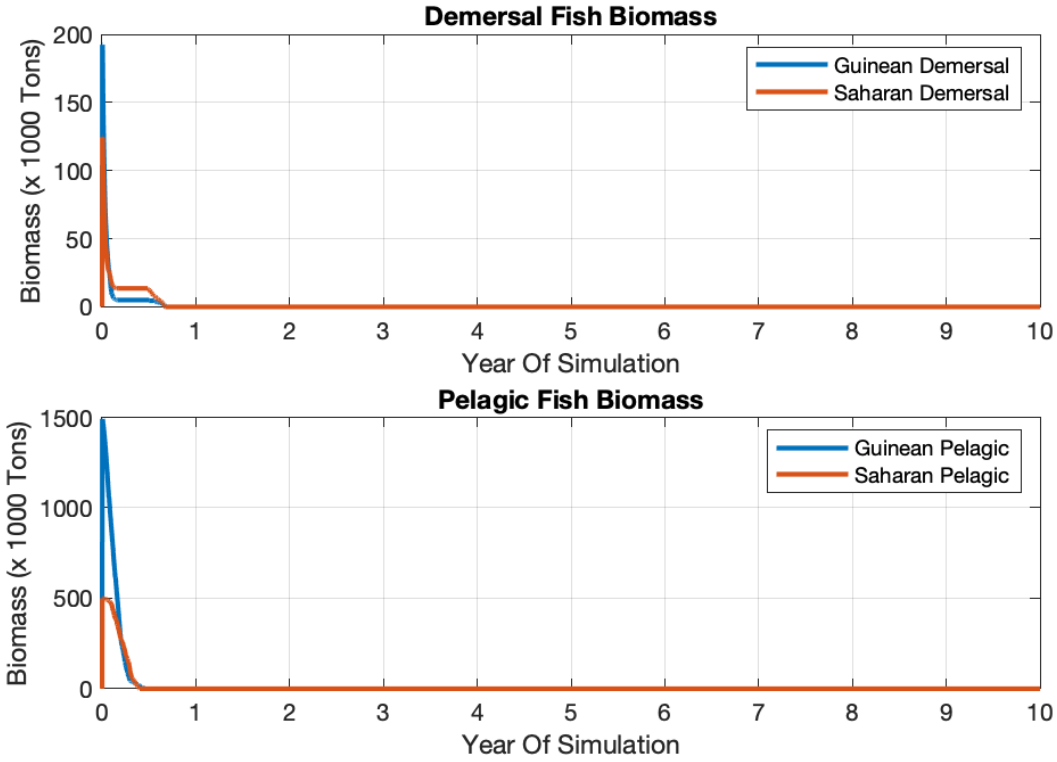
附录图*11*：模拟*1*中的渔获量变化。左：各登陆点的渔获量。右：各国的渔获总量。



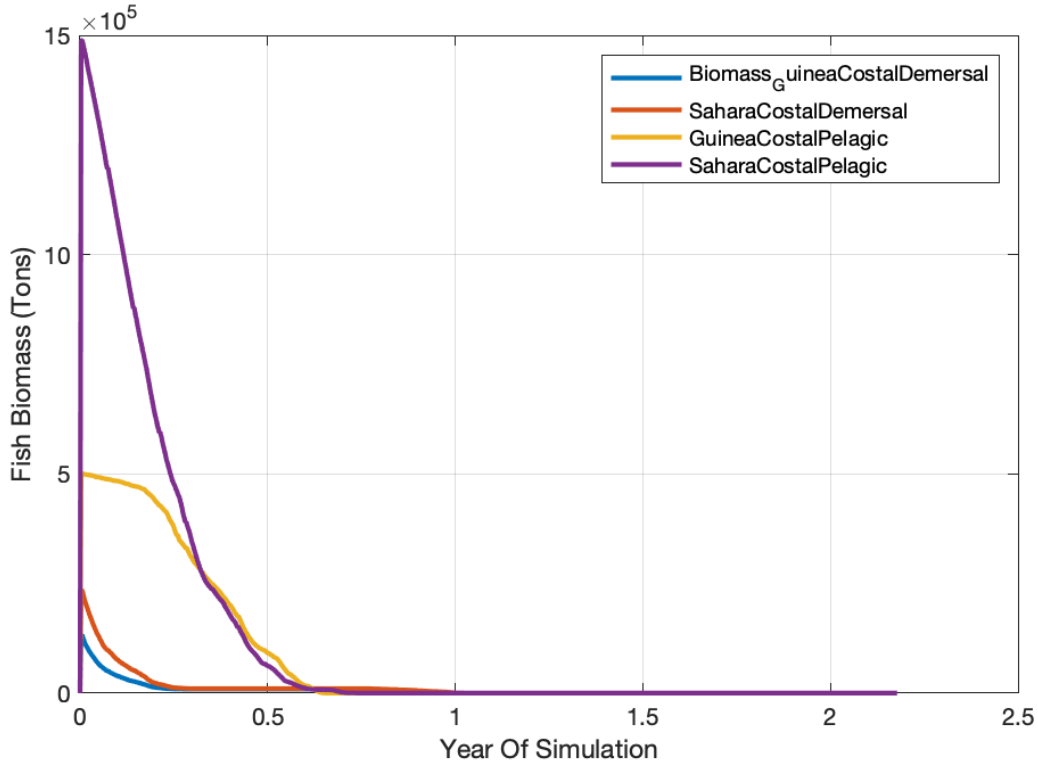
附录图*12*：模拟*1*、*2*和*3*中塞内加尔的渔获量变化



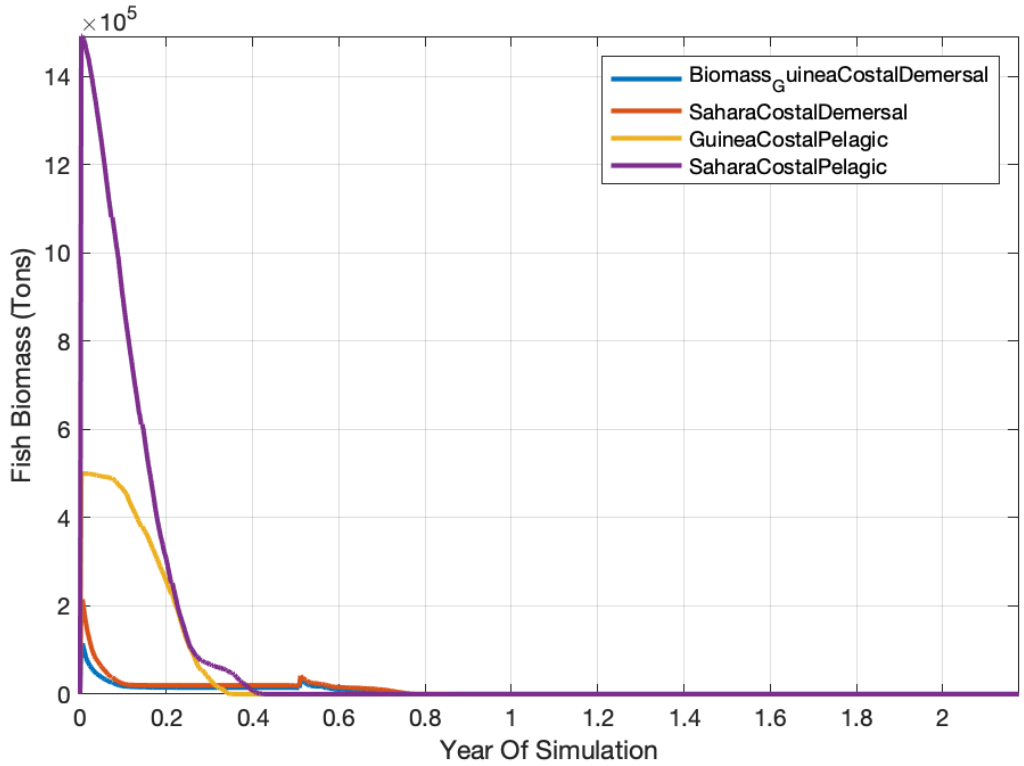
附录图*13*：模拟*4*中的渔获量变化



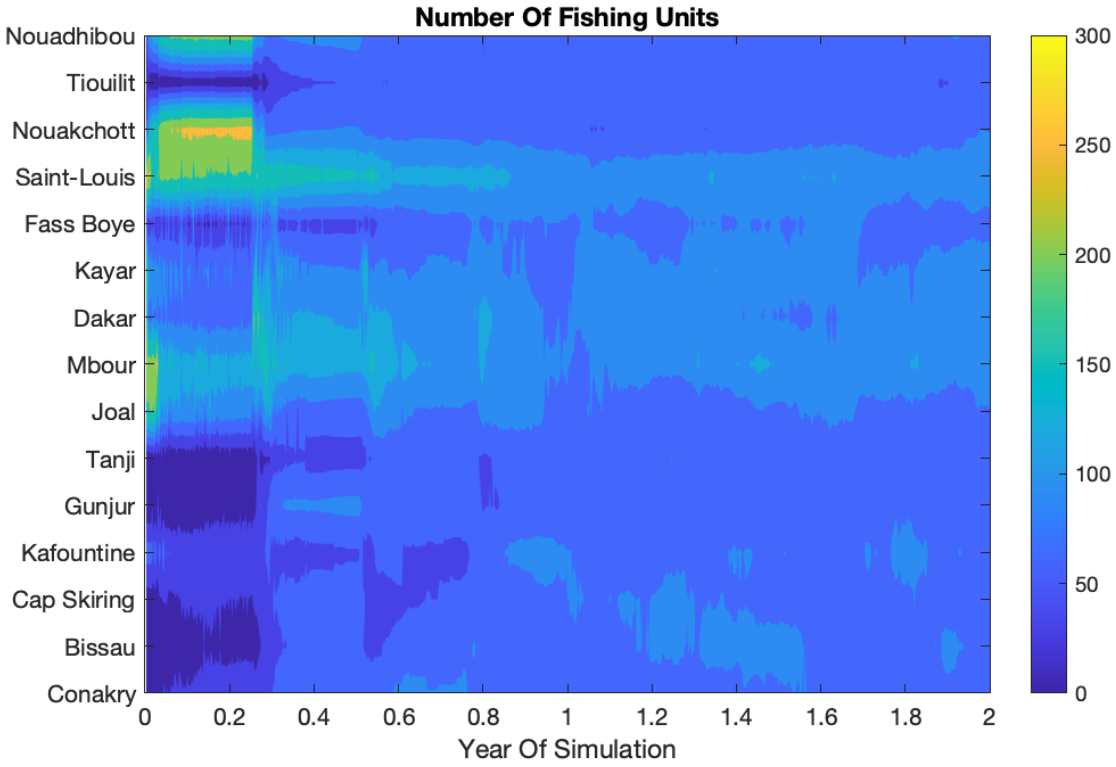
附录图*14*：模拟*4*中的生物量变化



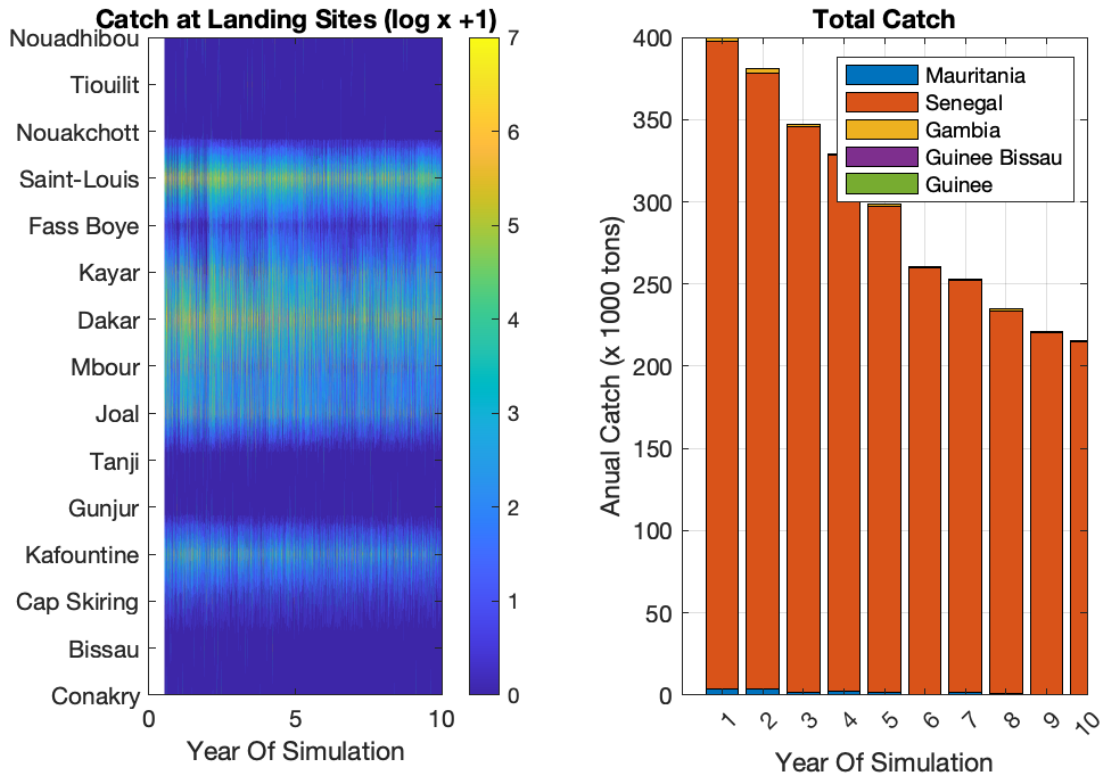
附录图*15*：模拟*5*中鱼类生物量的变化



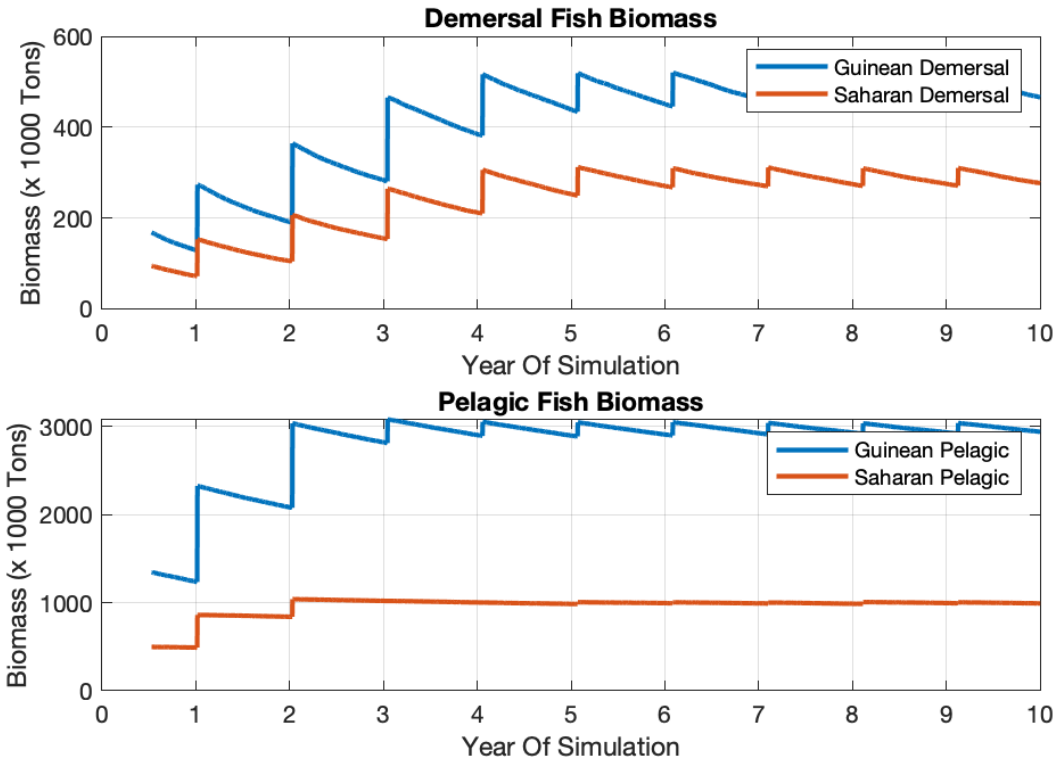
附录图*16*：模拟*6*中鱼类生物量的变化



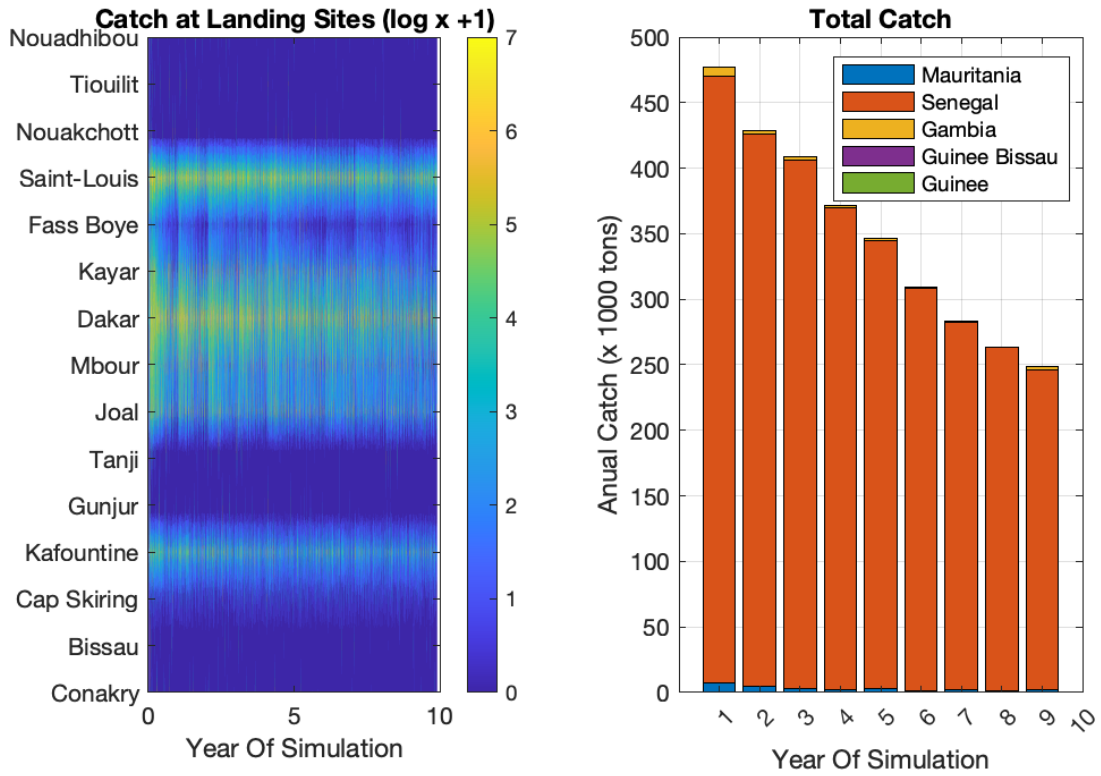
附录图*17*：模拟*6*中渔业单位分布的演变。



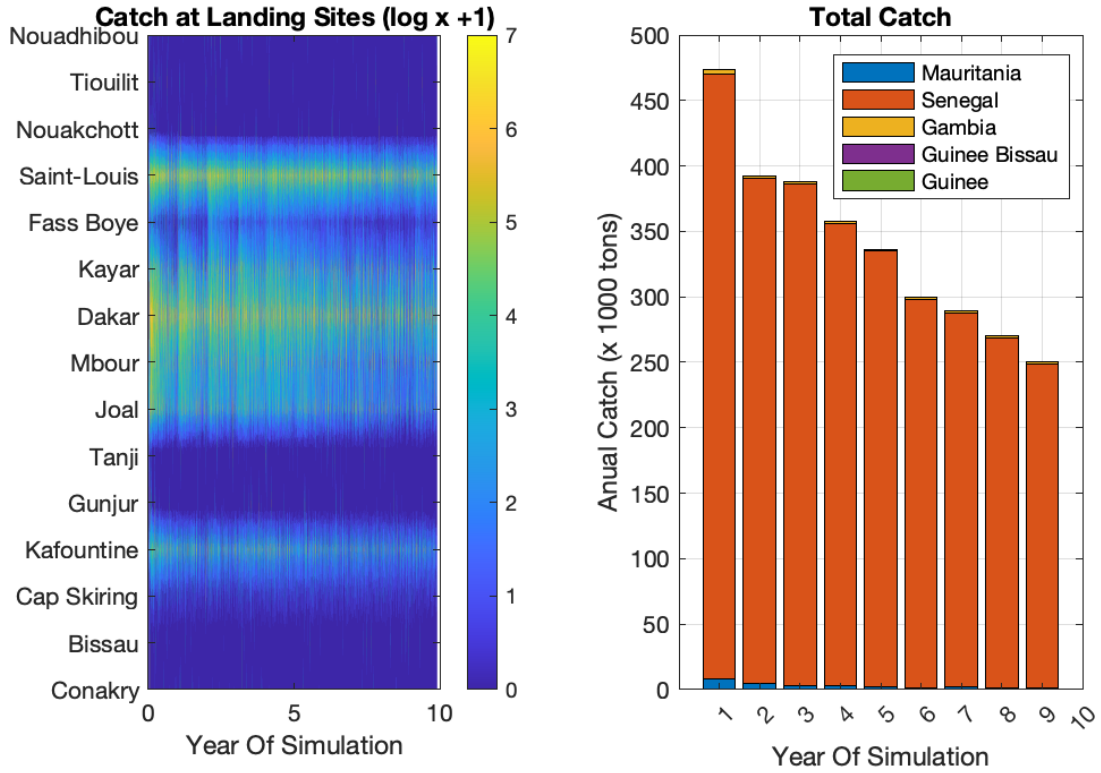
附录图*18*：模拟 *7* 中渔获的演变。左：各登陆点的捕捞量分布；右：按国家分散的总渔获量。



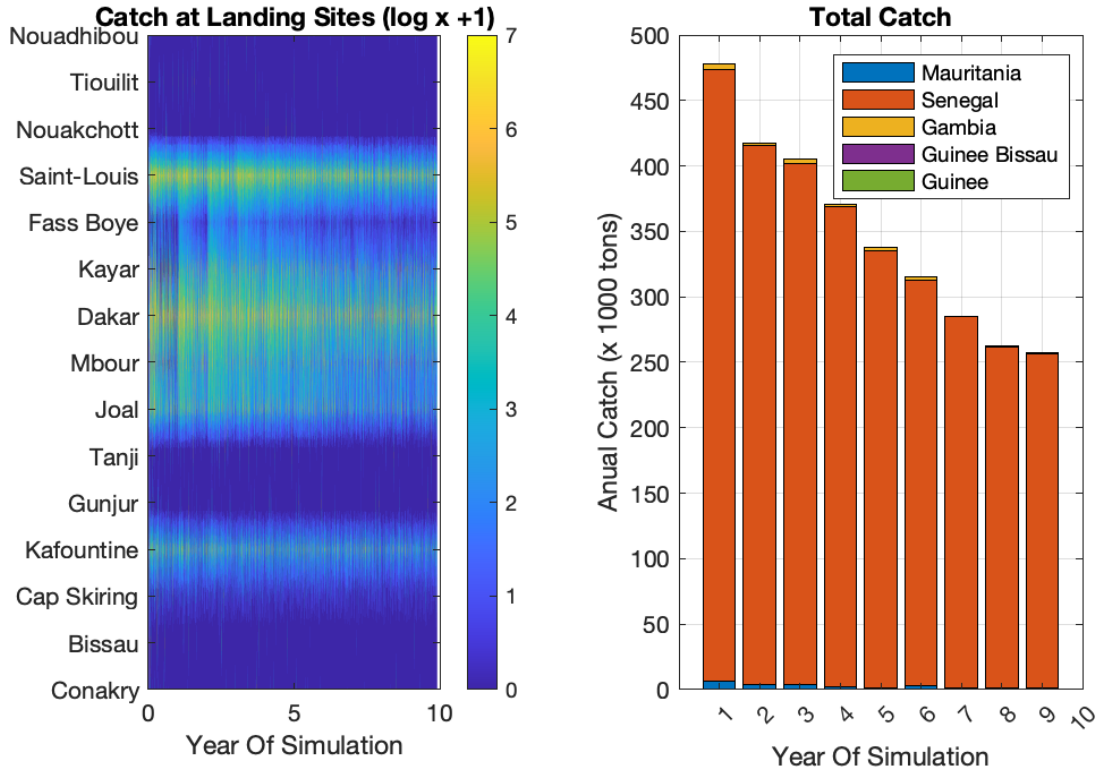
附录图*19*：模拟 *7* 中鱼类生物量的演变。上：底栖鱼类。下：中上层鱼类



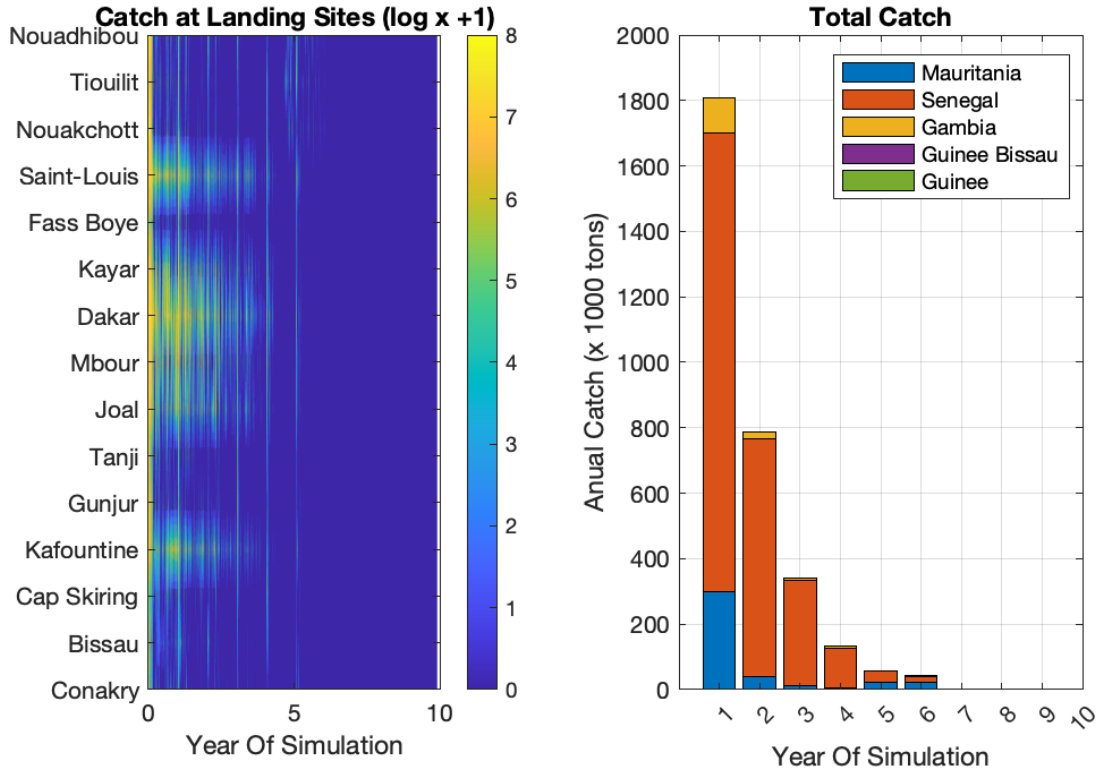
附录图*20*：模拟*8*中的鱼类渔获量变化。左：各登陆点的捕捞量分布；右：按国家散点表示的总渔获量。



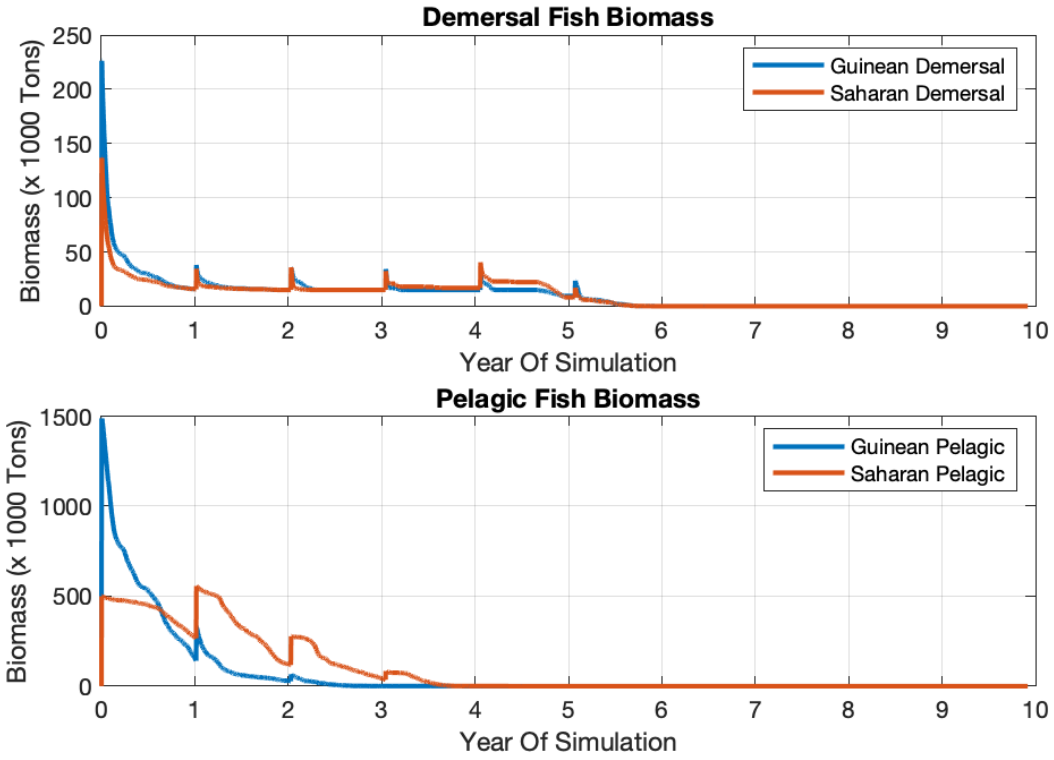
附录图*21*：模拟*9*中的渔获量变化。左：各登陆点的捕捞量分布；右：按国家分散显示的总渔获量。



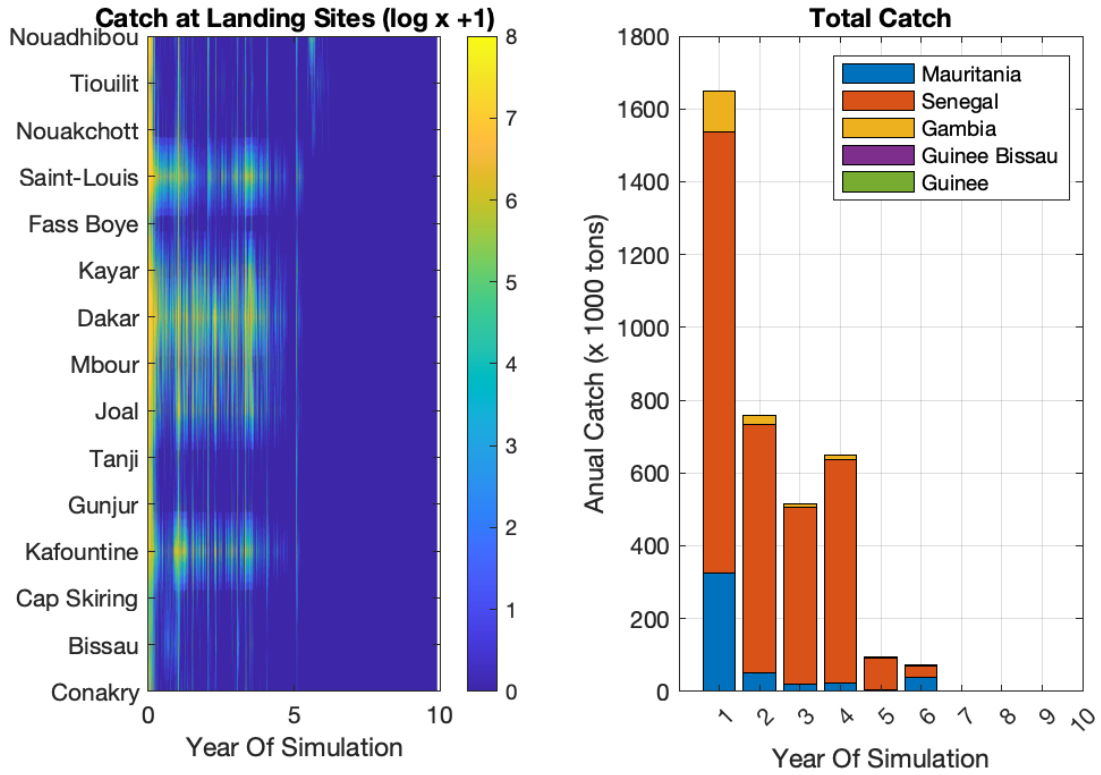
附录图*22*：模拟*10*中鱼类渔获量的变化。左：各登陆点的捕捞量分布；右：按国家分散显示的总渔获量。



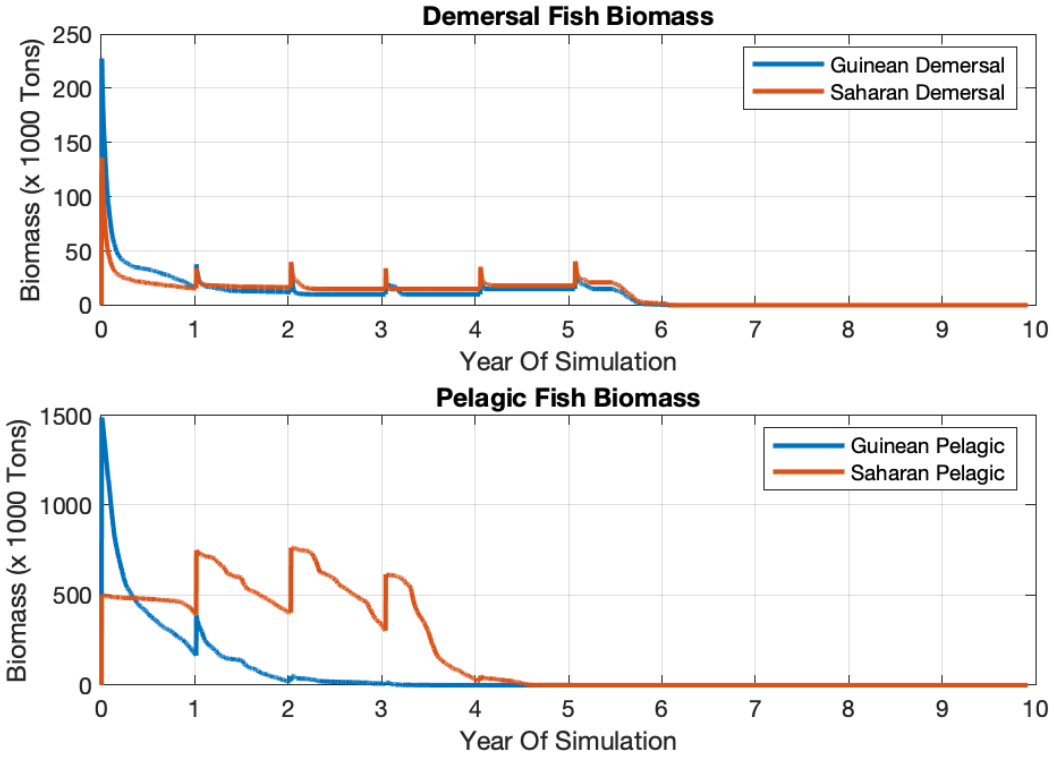
附录图*23*：模拟*8.1*中鱼类渔获量的变化。左：各登陆点的捕捞量分布；右：按国家分散显示的总渔获量。



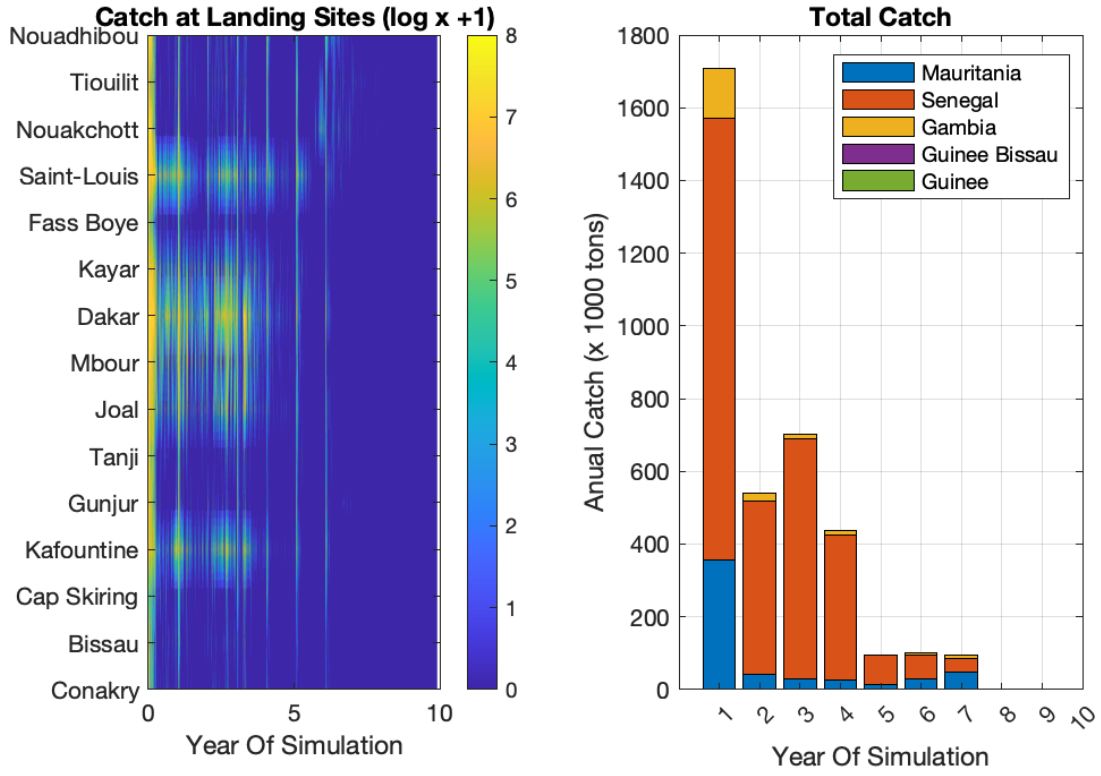
附录图*24*：模拟*8.1*中鱼类生物量的演变。



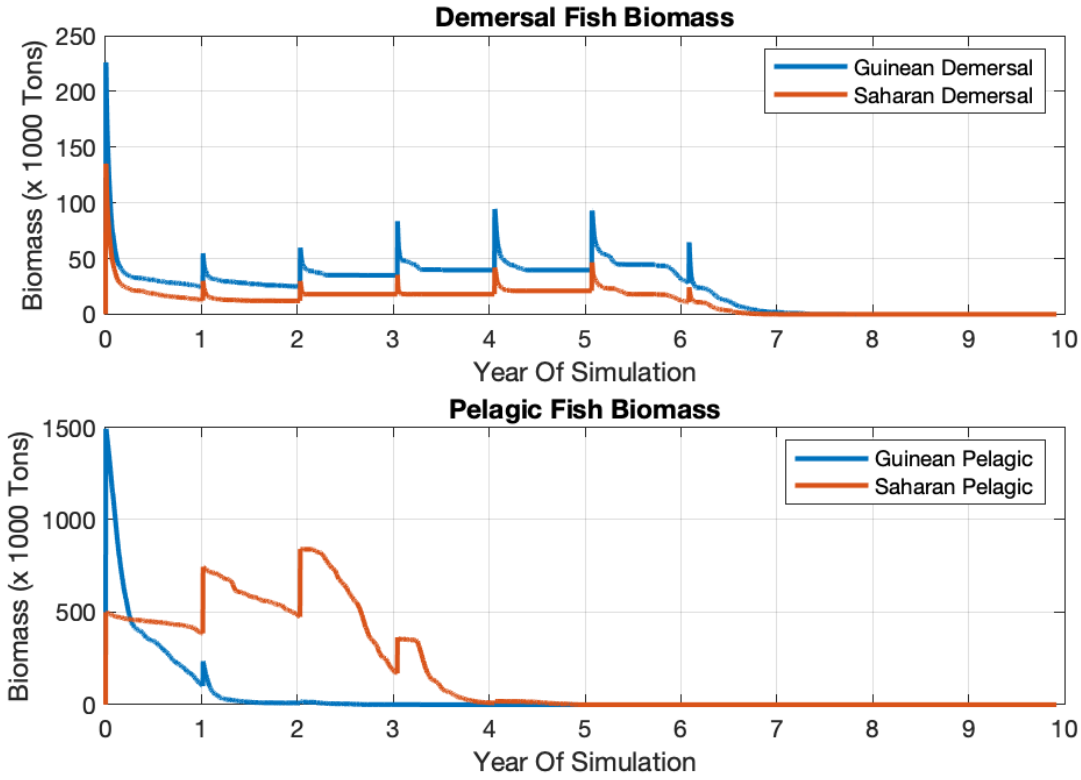
附录图*25*：模拟 *9.1*中渔获量的演变。左：各登陆点之间的捕捞量分布；右：按国家分散的总渔获量。



附录图*26*：模拟 *9.1*中鱼类生物量的演变



附录图*27*：模拟*10.1*中渔获量的演变。左：各登陆点的捕捞量分布；右：按国家分散的总渔获量。



附录图*28*：模拟*10.1*中鱼类生物量的演变。