



ENSO对中西太平洋延绳钓黄鳍和大眼金枪鱼CPUE影响的滞后效应

摘要：
黄鳍金枪鱼（*Thunnus albacares*）和大眼金枪鱼（*Thunnus obesus*）是大洋性高度洄游物种，也是全球远洋渔业的主要捕捞对象，其种群分布和资源密度容易受到气候变化引起的海洋环境变化影响，且存在响应滞后。为探索气候变化对中西太平洋海域（WCPO）成体黄鳍和大眼金枪鱼群体影响及滞后效应，本研究基于Transformer分析了海洋尼诺指数（ONI）对1978-2021年间WCPO延绳钓黄鳍和大眼金枪鱼单位捕捞努力量渔获量（CPUE）的影响，通过设置不同的滞后时间模拟不同滞后期（0-60个月）下CPUE对ONI的响应。结果表明：Transformer适用于对黄鳍和大眼金枪鱼等大洋性种群资源密度与ONI等环境因素间滞后效应的分析；WCPO海域延绳钓黄鳍和大眼金枪鱼CPUE对ONI的响应存在滞后，且滞后期与其生命史有关；随着滞后期的进一步增大（>40个月），CPUE对ONI的响应逐渐变弱。研究方法

与结果为后续开展WCPO关键物种群体资源研究提供了资源变动机制上的新思路。

关键词：
黄鳍金枪鱼；大眼金枪鱼；海洋尼诺指数；滞后效应；Transformer；中西太平洋

宋厚成
上海海洋大学
海洋生物资源与管理学院
上海市浦东新区沪城环路999号
邮箱：allroadsleadto@163.com
电话：18916369175

研究背景

气候变化通过调节自然干扰的频率、幅度和空间尺度间接影响海洋、陆地等生态系统。由于生物群落的储存效应和气候变化造成的物候不匹配，气候变化对多个尺度的生物群落（从个体到种群和群落）的不同生物进程（从生命周期到物种进化）的动态影响会在时间上呈现滞后效应。在海洋生态系统中，气候变化通过引起海洋理化环境变化或直接或通过自下而上的生态过程改变捕食者的行为和分布；海洋动物在应对环境变化时所作出的迁徙、捕食和生殖等行为调整与气候及环境变化并不同步，表现为对海洋环境变动的滞后响应。金枪鱼和类金枪鱼作为高度洄游性顶级捕食者，在全球各大洋生态系统中扮演者不可或缺的角色，也是全球海洋渔业中最具经济价值的物种。黄鳍金枪鱼（*Thunnus albacares*）和大眼金枪鱼（*T. obesus*）等具有生长快、分布空间广、对温度和溶解氧耐受能力强等生物学特性，ENSO等气候变化导致的海洋环境变化通过影响太平洋海域黄鳍和大眼金枪鱼的摄食、生长、发育和繁殖等生理与行为，进而影响种群栖息地的水平和垂直分布。渔业数据获取的相对便利性使得金枪鱼几乎成为次表层和中层顶级捕食者种群应对气候振荡响应机制研究的首选生物，掌握并了解大眼和黄鳍金枪鱼资源丰度和种群分布变动机制是探索全球海洋生态系统对气候环境变动响应的重要途径和方式。

材料与方法

渔业数据：
WCPO黄鳍金枪鱼和大眼延绳钓的捕捞渔业数据取自中西太平洋渔业委员会（Western & Central Pacific Fisheries Commission, WCPFC）渔获量和努力量的综合数据（<https://www.wcpfc.int/public-domain>）。选取的数据的时间跨度为1978年至2021年，分辨率为月；空间范围为纬度45°N至55°S和经度105°E至135°W海域。

气候数据：
ONI是表述ENSO事件的常用指数之一，数据来源于美国国家海洋和气象管理局官方网站（<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/>）。ONI小于-0.5表示该海域正经历拉尼娜现象，ONI大于0.5表示该海域正经历厄尔尼诺现象；ONI在-0.5和0.5之间则表示该海域为中性现象。

CPUE计算：
以每千钩渔获尾数(ind·103hook⁻¹)作为延绳钓CPUE单位，不同时间下中西太平洋海域延绳钓黄鳍金枪鱼和大眼CPUE为：

$$CPUE_t = \frac{\sum C_t}{\sum E_t}$$

式中， $\sum C_t$ 为t时间内中西太平洋海域的总渔获产量（单位：尾）； $\sum E_t$ 为对应t时间内在中西太平洋海域部署的金枪鱼延绳钓总钩数（单位：千钩）。

Transformer建模：
Transformer与大多数具有解码器-编码器结构的竞争性神经序列转导模型相同，使用多个相同的块构成编码器和解码器，其中每个编码器块由一个多头自注意力模块和一个位置前馈网络组成，每个解码器块在多头自注意力模块和位置前馈网络之间插入交叉注意力模型。

结论

2种金枪鱼CPUE对ONI的响应滞后表现出了相近的模式，即整体上存在以年为单位的响应周期变化，但在这种年度响应规律同时存在1~3个月滞后偏离。此外ONI滞后40个月，随着滞后期的增大，模型的预测误差逐渐增大，相关性相应降低，表明CPUE对更大滞后期（>3年）的ONI响应逐渐变弱。上述结果表明黄鳍和大眼金枪鱼成鱼群体丰度对气候变化的滞后响应存在相近的机制，即群体既能在短期内（约3个月）通过改变栖息等行为应对气候变化所引起的海洋理化和生物环境变化，也可能受到因气候变化所引起的群体补充变化的长期影响，且这一影响出现了以年为单位（4年）的周期性变化。此外结果表现出模型预测质量随着滞后期的变大（>40个月）而下降（误差增大、相关性降低）的趋势，即2种金枪鱼CPUE对滞后1~3年内的ONI响应更为密切，随后逐渐变弱。然而在本研究中仅考虑了ONI对WCPO延绳钓黄鳍和大眼金枪鱼CPUE的滞后效应，并没有量化ENSO的不同阶段对WCPO黄鳍和大眼金枪鱼的影响性质和程度，之后的研究可以纳入如PDO和大西洋多年代际振荡（Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO）等更多的气候指数和环境因子以及使用沙普解释（Shapley Additive exPlanations, SHAP）来进一步量化探讨环境气候变化对黄鳍和大眼金枪鱼影响的滞后效应以及不同气候变化事件之间的遥相关关系。

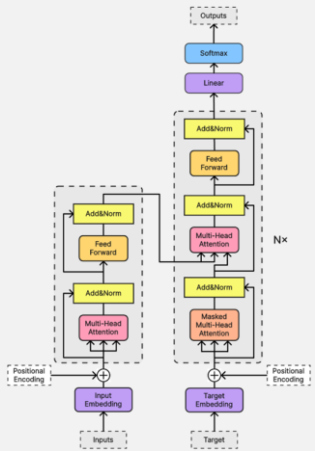


图1 Transformer模型结构

结果

训练集和测试集数据在Transformer训练过程中随迭代数增加的误差变化如图2所示。可以看出，在Transformer训练过程中并没有出现明显的欠拟合和过拟合情况，训练集和测试集误差变化相对稳定。

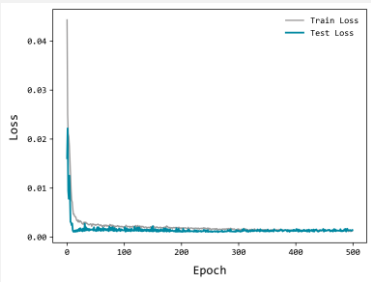


图2 Transformer模型的迭代次数和损失值

选取2020-2021年WCPO延绳钓黄鳍和大眼金枪鱼CPUE作为验证集，基于Transformer的延绳钓黄鳍和大眼金枪鱼CPUE对不同滞后期数ONI的响应预测质量结果如图3所示。

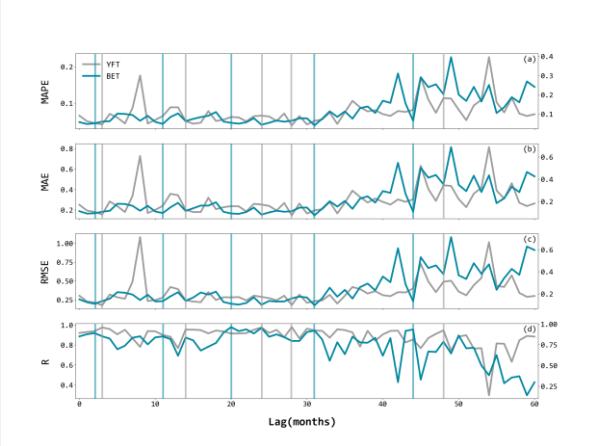


图3 不同滞后期数下模型预测误差和Pearson相关系数

不同ONI滞后期的模型预测误差和Pearson相关系数（图3）表明，WCPO延绳钓渔业中黄鳍金枪鱼CPUE对分别滞后3、14、24、28和48个月的ONI的响应较为密切，而大眼金枪鱼CPUE则分别对滞后2、11、20、31和44个月的ONI的响应较为密切。