

陈爽, 陈新军. 气候变化对东北大西洋渔获物组成、多样性和营养级的影响[J]. 海洋学报, 2020, 42(10): 100–109, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.10.010

Chen Shuang, Chen Xinjun. Effects of climate change on catch composition, diversity of catch and mean trophic level in the Northeast Atlantic Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(10): 100–109, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.10.010

气候变化对东北大西洋渔获物组成、多样性和营养级的影响

陈爽¹, 陈新军^{1,2,3,4,5*}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 农业农村部 大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 4. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 东北大西洋是世界上重要的捕捞海域, 气候变化对该海域捕捞产生了重要的影响。本文基于联合国粮农组织所提供的 1982–2016 年东北大西洋渔获产量数据, 对该海域渔获物组成、多样性、平均营养级及主成分变化特征进行时间序列上的分析, 并结合东北大西洋海域气候、环境因子, 应用广义可加模型探究渔获物组成与气候变化之间的关系。结果显示: 渔获物多样性的变化总体上呈下降趋势, 2002–2010 年间处于较低水平; 平均营养级在 2002 年之前呈平缓下降的趋势, 2002 年之后开始波动上升, 相关性分析表明这两个指标与海域环境因子的变化较为相关。对渔获物组成进行主成分分析显示, 第一主成份变化的方差解释率达到 35.3%, 且与海域气候、环境因素有较高的相关性, 第一主成分变化能够较好地表征气候影响下渔获物组成变化的情况。广义可加模型分析结果显示, 渔获物组成变化的影响因素按解释率由高到低分别为: 海表温度、海平面高度、盐度、海冰和北大西洋涛动指数。该研究有助于认识气候变化对海洋渔业资源及其结构组成的影响。

关键词: 东北大西洋; 气候变化; 渔获物组成; 渔获多样性; 营养级

中图分类号: P714^{+.5}; S932.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)10-0100-10

1 引言

气候变化对海洋渔业的影响是一个复杂的生态过程, 鱼类对海洋环境的改变有最直接的响应, 其中包括鱼类个体的生长、死亡、繁殖、洄游分布等^[1-3]。不仅如此, 海洋鱼类作为海洋生态系统中最重要组成部分, 其种群资源的波动和分布范围的变化也会间接影响生态系统的食物链构成、物种的多样性和生物营养级水平^[4-5]。在近年来的研究中, 更多时空尺度上的气候变化现象, 例如太平洋十年涛动(Pacific

Decadal Oscillation, PDO)、厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)等, 也给海洋渔业资源的可持续发展与科学管理带来了新的挑战^[6-7]。

东北大西洋海域连接北冰洋和赤道地区, 跨越了亚热带、温带和寒带, 包括大范围的深海区, 大陆架浅海和大量河口、海湾, 地理位置优越, 适合各种类型的鱼类生长, 形成了许多重要的渔场, 也是世界上渔业资源最丰富的地区。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告, 在全球变暖的背景下, 处于高纬度地区的东北大西洋气候变化速率将远远高于全球

收稿日期: 2018-10-20; 修订日期: 2019-01-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(NSFC41876141); 海洋二号卫星地面应用系统项目(HY2A-HT-YWY-006)。

作者简介: 陈爽(1993—), 男, 江苏省南通市人, 主要从事渔业资源研究。E-mail: 1076482889@qq.com

* 通信作者: 陈新军(1967—), 教授, 研究方向为渔业资源。E-mail: xjchen@shou.edu.cn

平均水平,其渔业生产将面临更大的挑战^[8]。对东北大西洋渔业资源,大部分学者集中于气候变化对鱼类资源量、洄游分布和群落结构等方面的研究,例如 Sirabella^[9]运用主成分分析和典范对应分析发现在北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)发生时,海水温度与当年大西洋鳕(*Gadus morhua*)的补充群体的生物量关系最为密切; Drinkwater^[10]通过预测模型发现水温与北海、爱尔兰海、凯尔特海的大西洋鳕鱼群体补充量呈负相关,与巴伦支海、冰岛的大西洋鳕鱼群体补充量呈正相关;在洄游分布方面, Perry等^[11]发现北海渔场多个鱼类种群都发生显著的向北移动, Rose^[12]发现了水温与毛鳞鱼(*Osmerus mordax*)移动的距离存在一个用对数函数描述的非线性关系,水温每上升1℃,毛鳞鱼分布范围在纬度方向上向北移动275 km;在群落变化上, Fossheim^[13]发现近年来随着气候变暖,巴伦支海原有的鱼类群落发生了显著变化,出现了许多来自低纬度海域的鱼类,海域的生产力也显著提高; Stenevik 和 Sundby^[14]发现北海的鱼类群落中小型中上层鱼类正在慢慢占据优势地位,主要包括大西洋鲱(*Clupea harengus*)和大西洋鲭(*Scomber scombrus*)等。近年来东北大西洋渔业资源变化受气候变化的影响较明显,故本研究基于联合国粮食与农业组织(FAO)提供的渔获物统计数据,从渔获物组成水平(多样性和营养级)探讨东北大西洋海域渔业生产结构演变,寻求它们与气候、海洋环境因素之间的相互联系,为进一步研究东北大西洋渔业资源与气候变化的关系提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 数据来源

2.1.1 渔业数据

东北大西洋渔业数据选取 FAO 每年统计的渔获生产数据,获取网址为 <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-capture-production/query/en>,生产捕捞区域为 FAO 划分的 27 渔区(36°N~90°N, 42°W~69°E),包括了东北大西洋海域和北冰洋部分海域,时间跨度为 1982–2016 年,渔获产量单位为 t。

2.1.2 环境数据和气候指数

本研究中环境数据选取海表面温度(SST)、海表面盐度(SSS)、海表面高度(SSH)、海冰密集度(Sea Ice Concentration, SIC),这些数据来源于亚太数据研究中心网站(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/index.php>),时间分辨率为月,空间分辨率为 1°×1°,时间跨度为 1982–2016 年。

东北大西洋地理环境特殊,存在有多重时间尺度的海洋气候变化。本研究选取了该海域最典型的气候变化特征 NAO、大西洋年代际涛动(Atlantic Multi-decadal Oscillation, AMO)和北极涛动(Arctic Oscillation, AO)作为气候变化指标。气候变化指数来源于美国国家海洋和大气管理局网站(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>),时间分辨率为月,选取时间跨度为 1982–2016 年。

2.2 研究方法

2.2.1 数据预处理

根据 1982–2016 年渔获产量统计数据共得到 399 种物种,其中有海洋鱼类 308 种,甲壳类生物 39 种,软体类生物 52 种。相关渔获物营养级参考世界 Fishbase 数据库(<http://www.fishbase.org/search.php>)和 Sealifebase 数据库(<http://www.sealifebase.org/search.php>)中所提供的营养级信息。

将得到的环境数据和气候指数按年进行平均,得到东北大西洋各年的环境数据和气候指数平均值。

2.2.2 生物多样性指数

生物多样性指数能够反映组成结构的均匀度和丰富度,本研究选用 Simpson 多样性指数(D)做为指标^[15],其计算公式为

$$D = 1 - \sum_i \frac{Y_i(Y_i - 1)}{Y(Y - 1)}, \quad (1)$$

式中, Y_i 为每年第 i 个物种的渔获产量, Y 为当年的总产量, D 的值介于 0~1 之间。

2.2.3 平均营养级

渔获物的平均营养级水平(MTL)可以作为渔业生态系统结构和功能变化的重要指标^[16]。本研究中渔获物平均营养级依据 Pauly 等^[17]的方法进行计算,其公式为

$$MTL = \sum_i \frac{TL_i Y_i}{Y}, \quad (2)$$

式中, TL_i 为第 i 个物种的营养级。

2.2.4 主成分变化分析

本研究中 1982–2016 年共出现有记录的商业性捕捞鱼种 308 种,对年平均产量 10 000 t 以上的鱼种进行筛选,共有包括甲壳类和软体类在内的渔获物种类 46 种(表 1)。由于考虑到渔获物产量的变化会受到人为捕捞的影响,与之相比,渔获物产量所占比例在捕捞干扰下相对稳定,因此选用主要的渔获物产量所占比例来进行渔获物组成变化分析。

主成分分析的方法能够对多维的变量进行降维处理,提取能够反映变量间相互关系的共同特征,在

表 1 渔获物组成第 1 和第 2 主成分载荷值

Table 1 Loadings on the first and second principal components from the analysis of catch composition

种类	拉丁学名	主成分载荷值	
		PC1	PC2
大西洋鲱	<i>Clupea harengus</i>	-0.733	-0.223
大西洋鳕	<i>Gadus morhua</i>	0.236	0.811
毛鳞鱼	<i>Mallotus villosus</i>	0.671	-0.123
蓝鳕	<i>Micromesistius poutassou</i>	-0.537	-0.422
大西洋鲭	<i>Scomber scombrus</i>	-0.508	0.757
玉筋鱼属	<i>Ammodytes spp</i>	0.713	-0.192
绿青鳕	<i>Pollachius virens</i>	0.085	0.121
黍鲱	<i>Sprattus sprattus</i>	-0.816	-0.370
黑线鳕	<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	-0.366	0.484
挪威长臀鳕	<i>Trisopterus esmarkii</i>	0.903	0.144
竹筴鱼	<i>Trachurus trachurus</i>	0.315	-0.110
平鲉属	<i>Sebastes spp</i>	0.932	-0.034
沙丁鱼	<i>Sardina pilchardus</i>	0.812	-0.138
欧洲鲽	<i>Pleuronectes platessa</i>	0.764	0.521
牙鳕	<i>Merlangius merlangus</i>	0.913	0.181
欧洲无须鳕	<i>Merluccius merluccius</i>	-0.173	0.943
竹筴鱼属	<i>Trachurus spp</i>	0.173	-0.164
鲱鳕	<i>Molva molva</i>	0.634	0.583
格陵兰大比目鱼	<i>Reinhardtius hippoglossoides</i>	0.316	0.624
欧洲鳕	<i>Engraulis encrasicolus</i>	-0.225	0.242
长鳍金枪鱼	<i>Thunnus alalunga</i>	0.607	0.188
单鳍鳕	<i>Brosme brosme</i>	0.759	0.333
鲷	<i>Solea solea</i>	0.425	0.020
鳕科	<i>Rajidae</i>	0.703	-0.593
北极鳕	<i>Boreogadus saida</i>	0.086	-0.433
白斑角鲨	<i>Squalus acanthias</i>	0.976	0.066
鮫鰈属	<i>Lophius spp</i>	0.084	0.627
尖吻平鲉	<i>Sebastes mentella</i>	-0.842	-0.066
金平鲉	<i>Sebastes marinus</i>	-0.881	0.099
鮫鰈	<i>Lophius piscatorius</i>	-0.698	0.063
大西洋狼鱼	<i>Anarhichas lupus</i>	0.054	-0.133
水珍鱼属	<i>Argentina spp</i>	-0.749	0.102
圆鲱	<i>Scomber colias</i>	-0.657	0.666
条长臀鳕	<i>Trisopterus luscus</i>	0.690	0.093

续表 1

种类	拉丁学名	主成分载荷值	
		PC1	PC2
欧洲黄盖鲽	<i>Limanda limanda</i>	0.301	-0.638
狼鱼属	<i>Anarhichas spp</i>	0.207	-0.780
欧洲川鲽	<i>Platichthys flesus</i>	-0.842	0.256
鲭科	<i>Scombridae</i>	-0.319	-0.586
蓝鲈鳕	<i>Molva dypterygia</i>	0.792	0.009
帆鳞鲆	<i>Lepidorhombus whiffiagonis</i>	0.014	0.798
欧洲康吉鳗	<i>Conger conger</i>	-0.354	0.066
小头油鲽	<i>Microstomus kitt</i>	0.126	-0.248
青鳕	<i>Pollachius pollachius</i>	0.808	0.227
甲壳类		-0.153	0.281
软体类		0.027	0.057
其他		-0.678	0.263

渔业生态领域有较广泛的应用^[18]。对渔获量占比、环境和气候因子分别进行主成分分析,提取渔获物组成和东北大西洋气候环境变化的主成分变化特征值(Principal Component Score, PCs),并检验它们是否存在相关性,具有较高相关性的主成分特征值视为环境和气候变化下渔获物组成变化特征。

2.2.5 渔获物组成和气候环境因素之间的关系

将 2.2.4 中与环境、气候因子主成分特征值具有较高相关性的渔获物组成变化主成分特征值作为指标,各环境因子和气候指数作为解释变量,并建立广义可加模型(Generalized Additive Models, GAM),分析渔获物组成变化与各环境因子和气候因子间的关系。GAM 模型的表达式为

$$g(y) = \alpha + s(X_1) + s(X_2) + \cdots + s(X_i) + \varepsilon, \quad (3)$$

式中, g 为连接函数, α 为模型的截距, s 为非线性的平滑函数, X_1 、 X_2 、 $\cdots$ 、 X_i 为解释变量, ε 为误差项。

采用基于赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)的逐步回归方法检验模型的拟合程度,一般 AIC 值越小,拟合程度越好。AIC 值计算公式为

$$AIC = 2k - 2\ln(L), \quad (4)$$

式中, k 表示模型独立参数个数; L 表示模型的极大似然函数。

3 结果

3.1 渔获物组成、多样性和营养级变化特征

由图 1 可知,东北大西洋渔获物多样性指数(Di-

versity Index, DI)在 1990 年之前呈持续上升的趋势,在 1990 年达到最大值 0.92,1990–2002 年间开始缓慢下降,2002 年之后急剧下降,并且在 2002–2010 年间都处于较低水平,2010 年之后趋于平稳(图 1)。平均营养级水平(Mean Trophic Level, MTL)则在 2002 年之前未出现较大波动,一直处于较低水平,平均值为 3.59,2002 年后开始急剧上升,2002–2010 年间出现了与同时期 DI 相反的变化,2010 年后平均营养级持续升高(图 1)。

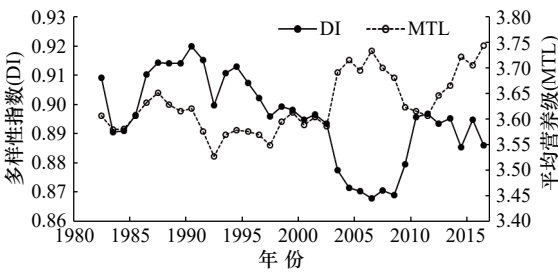


图 1 1982–2016 年多样性指数和平均营养级变化
Fig. 1 The variations of diversity index and mean trophic level during 1982 to 2016

对 46 种渔获物的产量占比进行主成分分析,得到前两位的主成分方差累积解释率达到 52.4%。其中第一位、第二位主成分的解釋率分别为 35.3%、17.1%(图 2)。通过主成分分析载荷值可知(表 1),以黍鲱、大西洋鲱为主的小型中上层鱼类和以挪威长臀鳕、牙鳕、青鳕为主的中下层鱼类是第一主成分变化的主要贡献者。而大西洋鳕、大西洋鲭等鱼类是第二主成分变化的主要贡献者。

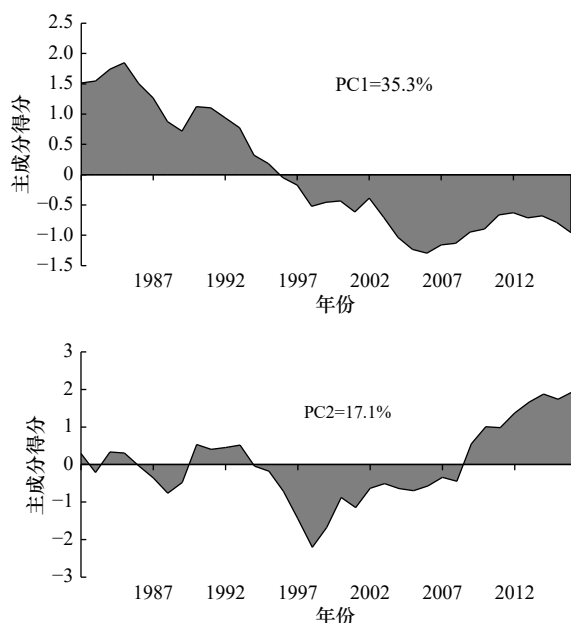


图2 1982–2016 年渔获物组成主成分得分年际变化
Fig. 2 The variations of the principal component scores for the catch composition during 1982 to 2016

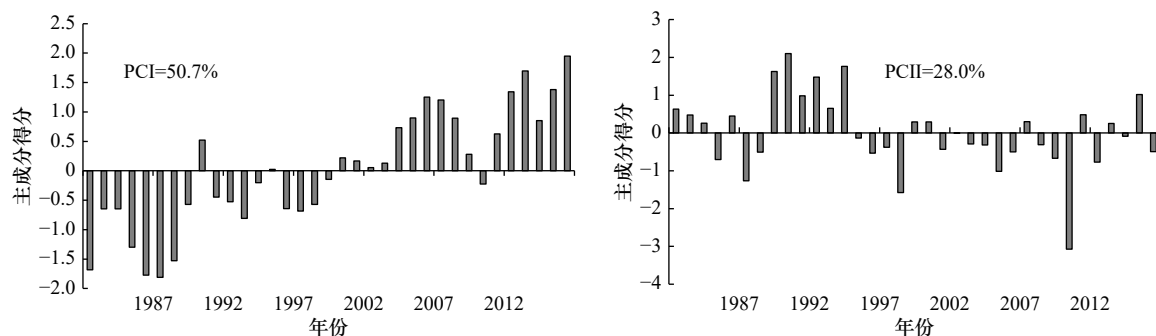


图3 1982–2016 年东北大西洋气候、环境因素主成分得分年际变化
Fig. 3 The variations of the principal component scores for the climatic and environmental factors during 1982 to 2016

表2 气候、环境因素第1和第2主成分载荷值

Table 2 Loadings on the first and second principal components from the analysis of the climatic and environmental factors

因素	主成分载荷值	
	PC I	PC II
温度	0.935	0.284
盐度	0.610	0.632
海面高度	0.820	-0.086
海冰	-0.660	-0.437
北大西洋涛动指数	-0.580	0.744
大西洋年代际涛动指数	0.863	-0.183
北极涛动指数	-0.335	0.833

通过 GAM 模型对渔获物组成变化 PC1 与海域气候、环境因子进行拟合, 结果如表 4 所示, 选择 AIC

3.2 渔获物组成与气候环境因素之间的关系

对东北大西洋 SST、SSS、SSH、SIC、NAO、AMO 和 AO 等气候、环境因子进行主成分分析, 其前两位的累计解释率为 78.7%, 其中第一主成分 PCI 解释率为 50.7%, SST、SSH 等环境因子的载荷值较高, 显示了区域环境因素的变化特征; 第二主成分 PCII 的解释率为 28.0%, 以 AO、NAO 为主的长时间尺度气候变化具有较高的载荷值, 与气候变化较为相关(图 3, 表 2)。将渔获物组成变化特征 DI、MTL、PC1、PC2 与该海域的气候环境主成分变化特征 PCI、PCII 进行相关性检验后发现, 渔获物组成变化 PC1 与气候环境变化 PCI、PCII 均呈显著相关 ($p < 0.05$), DI 和 MTL 都与 PCI 具有显著相关性, 而 PC2 与气候环境变化 PCI、PCII 相关性并不显著(表 3)。因此 DI 和 MTL 与海洋环境因素有较高的相关性, 与 NAO、AO 等气候因素并不相关。渔获物组成 PC1 则可以较好的解释气候、环境变化对其的影响。

表3 气候、环境因素主成分变化与各类渔获物组成指数相关性系数

Table 3 The correlation coefficients of climatic and environmental factors principal component scores and different kinds of catch composition indexes

	多样性指数	平均营养级	PC I	PC II
PCI	-0.609**	0.623**	-0.783**	0.396
PCII	0.370	-0.225	0.382*	0.148

注: *表示 $p < 0.05$ 下相关性显著, **表示 $p < 0.01$ 下相关性极显著。

值最小的模型为最优模型, 因此最终模型可表示为:

$$PC1 \sim s(SST) + s(SSS) + s(SSH) + s(SIC) + s(NAO).$$

该模型对渔获物组成 PC1 的累计解释率达到 94.3%, 其中贡献率最大的因子是 SST, 解释率为 74.8%, 其他有影响的环境因子包括 SSH、SSS、SIC, 气候因素中

表 4 渔获物组成 PC1 与各气候、环境因素的 GAM 模型拟合

Table 4 GAM models fitted to the first principal component scores of catch composition (PC1) and climatic and environmental factors

模型因子	P值	F值	累计解释偏差/%	可解释偏差/%	AIC值
+水温	2.12×10^{-2}	6.05	74.8	74.8	59.53
+盐度	1.46×10^{-4}	9.27	81.2	6.4	59.48
+海面高度	7.10×10^{-5}	22.08	89.2	8.0	42.65
+海冰	1.73×10^{-4}	19.15	92.3	3.1	24.20
+北大西洋涛动	3.82×10^{-1}	1.14	94.3	2.0	16.84
+大西洋年代际涛动	6.83×10^{-1}	0.17	94.4	0.1	18.82
+北极涛动	4.44×10^{-1}	0.60	94.6	0.2	19.31

NAO 也对 PC1 有影响。

由气候、环境因子与渔获物组成变化特征 PC1 之间的关系 (图 4) 可知, SST 与 PC1 呈现负相关, 海表水温在 5.8~6.2℃ 之间时, 渔获物组成变化幅度较明显; SSS 与 PC1 几乎呈线性负相关, SSS 为 33.55°时

置信区间最小; SSH 在 -0.73~-0.71 m 时对渔获物组成影响并不显著, 当 SSH 达到 -0.71 m 甚至更高时渔获物结构会受到较大影响; SIC 和 NAO 对 PC1 的影响趋势相似, 几乎都呈线性正相关。

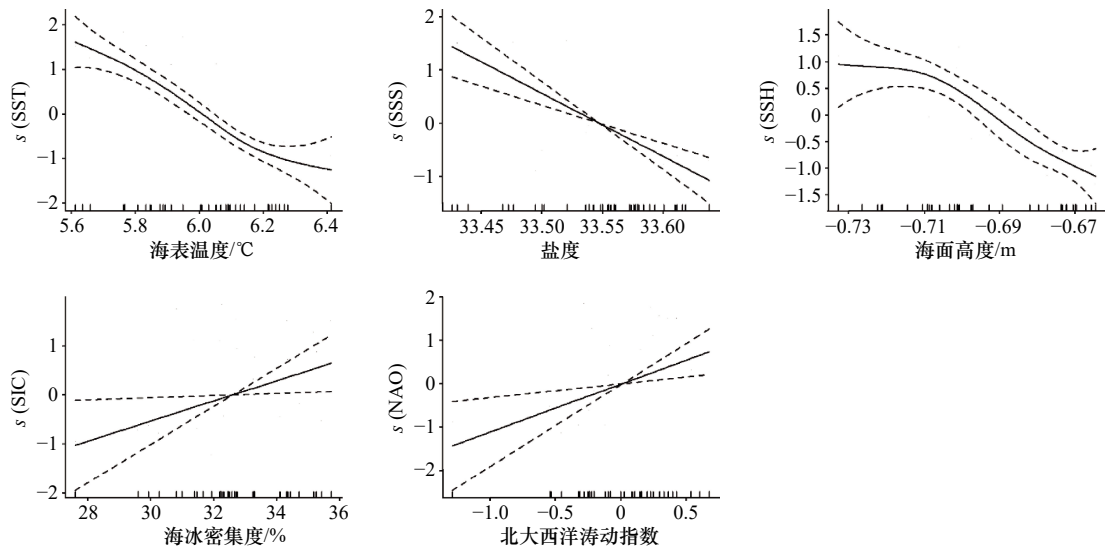


图 4 气候、环境因素对渔获物组成 PC1 的影响

Fig. 4 Effects of climatic and environmental factors on the first principal component scores of catch composition (PC1)

4 讨论与分析

4.1 渔获物多样性和平均营养级的变化

不同渔获物组成指标的变化能够反映东北大西洋 1982-2016 年间渔获物组成大致经历了 3 个时期的变化。第 1 时期为 1982-2002 年, DI 和 MTL 都在波动中呈现轻微的下降趋势; 第 2 时期为 2002-2010 年, DI 和 MTL 在该时期分别发生了急剧的下降和上升, 并在 2006 年后开始恢复; 第 3 个时期为 2010 年之后 DI 趋于平稳, MTL 在该时期不断升高。

MTL 的变化往往被认为是人为捕捞和环境变化共同影响之下的结果^[19], Pauly 等^[20]发现全球渔获物平均营养级从 20 世纪 70 年代以来呈现稳步的下降趋势, 这种变化遵循“捕捞对象沿着海洋食物网向下级移动 (Fishing Down Marine Food Webs)”的模式。东北大西洋渔获物 MTL 在 1982-2002 年间持续下降的现象则与这种模式相符, 根据 FAO 的统计报告, 东北大西洋是渔业资源过度开发最严重的海区, 自 20 世纪 50 年代以来, 大西洋鳕、黑线鳕、大西洋鲱等鱼种经历了高强度的捕捞, 导致资源衰退甚至多个种群面

临崩溃,同时玉筋鱼、毛鳞鱼等低营养级的渔业资源开始开发,渔获量不断增加^[21]。研究发现,2006 年之后的 MTL 出现了显著的增长,这一变化过程和该海域渔业资源恢复与新物种的开发有着必然的联系,严格的捕捞控制和气候变暖使东北大西洋鳕科鱼类逐渐出现资源恢复的迹象^[22-23],随着捕捞活动增加,传统的高营养级鱼类产量占比也开始回升。2003-2007 年间对蓝鳕的高强度捕捞也是 MTL 不断上升的主要因素之一^[24]。

东北大西洋渔获物组成多样性整体上呈不断下降的趋势,这一变化受多种因素影响。高强度的人为捕捞导致渔获物的产量和种类不断减少,往往会造成组成结构的多样性降低^[25-26]。尤其是上世纪对该海域主要经济鱼种鳕鱼、鲱鱼等资源的过度开发,导致这些鱼类难以再形成渔汛,这些主要捕捞对象在总渔获物中的占比不断下降,而失去天敌的中小型上层鱼类迅速成为优势鱼种并愈发突出,渔获物占比失衡严重,造成多样性不断降低的局面。除此以外气候变化也会在一定程度上影响群落的稳定性。

4.2 气候变化对渔获物组成的影响

主成分分析能够从多个变量中提取共同的变化特征,将变量间复杂多变的结构转化为几组特征值来表征,在群落变化的研究中有较广泛的应用^[18, 27]。在本研究中,渔获物结构 PC1 主要表征大西洋鲱、黍鲱等小型中上层鱼类和挪威长臀鳕、牙鳕、青鳕、平鲉等中下层高营养级鱼类的变化情况,PC2 则主要表征了大西洋鳕、大西洋鲑、欧洲无须鳕这三种经济鱼类的变化。东北大西洋海域气候、环境因子的主成分分析结果显示,PCI 主要表示环境因子的变化特征,PCII 主要表示 NAO、AO 为主的年际气候变化现象。结合各主成分分析结果的特征值发现,PC1 在 1995 年发生了由正值到负值的转变,而海域环境因子变化 PCI 和气候变化 PCII 也基本在同一时期内发生了由负转正和由正转负的特征变化,相关性检验表明,PC1 与二者均具有相关性,这一结果在某种程度上表明渔获物结构的主成分变化与气候变化有必然联系。而 PC2 的变化与气候环境之间并无直接联系,猜测 PC2 在 1994 年前后由正值转向负值的变化,主要是长期的过度捕捞导致的大西洋鳕鱼资源量下降造成,而 2008-2009 年前后由负转正的变化与北欧国家开始大力开发鲑鱼资源有关^[28]。

为探究不同气候、环境因子对渔获物组成结构产生的影响,选取 GAM 模型分析不同的因子的影响程度和影响机制,发现 SST 是渔获物组成结构变化最主

要的影响因子,而 SSH、SSS、SIC、NAO 也在一定程度上影响结构变化。组成结构变化与 SST 最为密切,SST 与 PC1 有显著的负效应,即当水温升高时大西洋鲱、黍鲱等小型中上层鱼类在渔获物组成中的占比上升,鳕鱼、鲱鲈类中下层鱼类在渔获物组成中的占比会显著下降,反之亦然。由于大多数的海洋鱼类是变温动物,它们对外界环境温度的变化有最直接的反应,适宜的升温可以提高鱼类的生长速度和食物转化率,当水温超过其适宜范围时,鱼类自身的生理机能将限制其耐热性,从而导致鱼类为寻求适宜的栖息地而改变原有的分布范围或者无法承受超过自身耐热的温度而死亡,甚至灭绝^[29-30]。温度的升高对北大西洋绝大多数冷水性鱼类的生活史^[31]、繁殖^[32]、补充^[10]都有着负面的影响,还会引起暖水性、温水性鱼类向北迁移,冷水性鱼类的栖息地面积缩减^[11],最终导致该海域渔获物组成结构发生变化。研究表明,SSH 与海洋表层水团运输有关,SSH 变动影响浮游生物和仔稚鱼运输^[33-34],而海冰是比目鱼、鳕鱼产卵和觅食的主要场所,海冰的消融会影响这些冷水性物种的产量^[35]。除了海洋环境因素对渔获产量有着直接影响,气候变化也是北大西洋生态系统中最关键的一环。气候的跃变往往伴随着生态系统的格局发生转换,这种变换的机制是通过食物链自上而下的传递造成的^[36-37]。在北大西洋,NAO 引发寒、暖流强弱交替决定了该海域的浮游生物组成与丰度,对鱼类补充量和资源变动影响深刻^[38-39]。因此,NAO 也可以作为东北大西洋渔获物组成结构变化的重要指标。

4.3 后续研究应考虑的问题

由于数据来源的局限性,本研究中选取东北大西洋渔获产量数据作为渔获物组成的指标,虽具有一定的参考价值但也有一些不足,原因如下:不同的鱼类对气候变化有着不同的响应模式,即使是在同一气候背景或捕捞强度下,暖水性物种势必在气候变暖的大趋势下遭受的捕捞强度要大于冷水性物种;其次,东北大西洋海域的渔业管理策略对许多经济型鱼种的开发起着决定性作用,其渔获产量往往与该海域历来实施的总允许可捕量有一定的关系。虽然在后期构建模型时,选择使用渔获产量占比变化来表征结构组成上的差异,能减少其因捕捞强度等其他因素的干扰,但无法完全消除。在本研究中,选取的研究区域是 FAO 划定的 27 渔区,这个区域既包含了北大西洋又包含了北冰洋的部分海域,由于跨越的纬度较大,因此不同区域的鱼类受到的环境因素的影响程度也有区别,同样是海冰,对于较寒冷海域的鳕和鲱鲈类

产生的影响更为明显,而对鲱、毛鳞鱼等中上层鱼类影响较显著的主要是海表温度,这也可能影响研究结果。除此以外,选取的遥感数据对海洋表层与底层

鱼类的影响程度存在差异,在本研究中默认具有相同程度的影响,在今后的研究中可以选择不同温跃层深度或海流的环境因子来更深入的进行研究。

参考文献:

- [1] Brander K M. Global fish production and climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19709–19714.
- [2] Pörtner H O, Knust R. Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance[J]. Science, 2007, 315(5808): 95–97.
- [3] Cheung W W L, Lam V W Y, Sarmiento J L, et al. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change[J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 24–35.
- [4] Beaugrand G. Marine Biodiversity, Climatic Variability and Global Change[M]. New York: Routledge, 2014: 486.
- [5] Pauly D, Watson R. Background and interpretation of the ‘Marine Trophic Index’ as a measure of biodiversity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2005, 360(1454): 415–423.
- [6] 余为, 陈新军, 易倩. 不同气候模态下西北太平洋柔鱼渔场环境特征分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 525–534.
Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian. Analysis of variations in the environmental conditions on the fishing ground of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwestern Pacific Ocean under different climate modes[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(4): 525–534.
- [7] 汪金涛, 陈新军. 中西太平洋鳀鱼渔场的重心变化及其预测模型建立[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(8): 44–48.
Wang Jingtao, Chen Xinjun. Changes and prediction of the fishing ground gravity of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in western-central Pacific[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(8): 44–48.
- [8] IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [9] Sirabella P, Giuliani A, Colosimo A, et al. Breaking down the climate effects on cod recruitment by principal component analysis and canonical correlation[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 216: 213–222.
- [10] Drinkwater K F. The response of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to future climate change[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(7): 1327–1337.
- [11] Perry A L, Low P J, Ellis J R, et al. Climate change and distribution shifts in marine fishes[J]. Science, 2005, 308(5730): 1912–1915.
- [12] Rose G A. Capelin (*Mallotus villosus*) distribution and climate: a sea “canary” for marine ecosystem change[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(7): 1524–1530.
- [13] Fosshem M, Johannesen E, Primicerio R, et al. Spatial variation and structural change of the Barents Sea fish community[R]. Torshavn, Faroe Island: International Council for the Exploration of the Sea, 2009, E: 21.
- [14] Stenevik E K, Sundby S. Impacts of climate change on commercial fish stocks in Norwegian waters[J]. Marine Policy, 2007, 31(1): 19–31.
- [15] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949, 163(4148): 688.
- [16] Pauly D, Christensen V, Guénette S, et al. Towards sustainability in world fisheries[J]. Nature, 2002, 418(6898): 689–695.
- [17] Pauly D, Palomares M L, Froese R, et al. Fishing down Canadian aquatic food webs[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, 58(1): 51–62.
- [18] Tian Y J, Kidokoro H, Watanabe T. Long-term changes in the fish community structure from the Tsushima warm current region of the Japan/East Sea with an emphasis on the impacts of fishing and climate regime shift over the last four decades[J]. Progress in Oceanography, 2006, 68(2/4): 217–237.
- [19] Caddy J F, Garibaldi L. Apparent changes in the trophic composition of world marine harvests: the perspective from the FAO capture database[J]. Ocean & Coastal Management, 2000, 43(8/9): 615–655.
- [20] Pauly D, Christensen V V, Dalsgaard J, et al. Fishing down marine food webs[J]. Science, 1998, 279(5352): 860–863.
- [21] United Nations Food and Agriculture Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture[R]. Rome: FAO, 2000.
- [22] Simmonds E J. Comparison of two periods of North Sea herring stock management: success, failure, and monetary value[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(4): 686–692.
- [23] Horwood J, O'Brien C, Darby C. North Sea cod recovery?[J]. ICES Journal of Marine Science, 2006, 63(6): 961–968.
- [24] 焦敏, 高郭平, 陈新军. 东北大西洋海洋捕捞渔获物营养级变化研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 48–63.
Jiao Min, Gao Guoping, Chen Xinjun. Changes in trophic level of marine catches in the northeast Atlantic[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(2): 48–63.
- [25] 林楠, 苗振清, 卢占晖. 东海中部夏季鱼类群落结构及其多样性分析[J]. 广东海洋大学学报, 2009, 29(3): 42–47.
Lin Nan, Miao Zhenqing, Lu Zhanhui. Structure and diversity of fish communities in summer in the middle of the East China Sea[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2009, 29(3): 42–47.
- [26] 宋普庆, 张静, 林龙山, 等. 台湾海峡游泳动物种类组成及其多样性[J]. 生物多样性, 2012, 20(1): 32–40.

- Song Puqing, Zhang Jing, Lin Longshan, et al. Nekton species composition and biodiversity in Taiwan Strait[J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(1): 32–40.
- [27] 刘尊雷, 袁兴伟, 杨林林, 等. 气候变化对东海北部外海越冬场渔业群落格局的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 901–911.
- Liu Zunlei, Yuan Xingwei, Yang Linlin, et al. Effect of climate change on the fisheries community pattern in the overwintering ground of open waters of northern East China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 901–911.
- [28] 李励年, 林龙山, 缪圣赐. 一场由气候变化引发的渔业资源争夺战——欧洲“鲭鱼战争”持续升温[J]. *渔业信息与战略*, 2013, 28(1): 75–80.
- Li Linian, Lin Longshan, Miao Shengci. The dispute on fishery resources caused by climate change—mackerel war intensified in Europe[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2013, 28(1): 75–80.
- [29] Pörtner H O. Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography: systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2002, 132(4): 739–761.
- [30] Pörtner H O. Climate change and temperature-dependent biogeography: oxygen limitation of thermal tolerance in animals[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(4): 137–146.
- [31] Hutchings J A, Myers R A. What can be learned from the collapse of a renewable resource? Atlantic Cod, *Gadus morhua*, of newfoundland and Labrador[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51(9): 2126–2146.
- [32] Pepin P, Orr D C, Anderson J T. Time to hatch and larval size in relation to temperature and egg size in Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(S1): 2–10.
- [33] Drinkwater K F, Beaugrand G, Kaeriyama M, et al. On the processes linking climate to ecosystem changes[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 79(3/4): 374–388.
- [34] Tian Y J, Kidokoro H, Fujino T. Interannual-decadal variability of demersal fish assemblages in the Tsushima Warm Current region of the Japan Sea: impacts of climate regime shifts and trawl fisheries with implications for ecosystem-based management[J]. *Fisheries Research*, 2011, 112(3): 140–153.
- [35] Overland J E, Spillane M C, Soreide N N. Integrated analysis of physical and biological pan-Arctic change[J]. *Climatic Change*, 2004, 63(3): 291–322.
- [36] Chavez F P, Ryan J, Lluch-Cota S E, et al. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean[J]. *Science*, 2003, 299(5604): 217–221.
- [37] Brunel T, Boucher J. Long-term trends in fish recruitment in the north-east Atlantic related to climate change[J]. *Fisheries Oceanography*, 2010, 16(4): 336–349.
- [38] Reid P C, Borges M D F, Svendsen E. A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse mackerel fishery[J]. *Fisheries Research*, 2001, 50(1/2): 163–171.
- [39] Ottersen G, Stenseth N C. Atlantic climate governs oceanographic and ecological variability in the Barents Sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(7): 1774–1780.

Effects of climate change on catch composition, diversity of catch and mean trophic level in the Northeast Atlantic Ocean

Chen Shuang¹, Chen Xinjun^{1,2,3,4,5}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: Global climate change has a profound impact on the world fisheries. Recently, the composition of catch in Northeast Atlantic Ocean has changed significantly. Based on the catch data in the Northeast Atlantic Ocean from 1982 to 2016 provided by the United Nations Food and Agriculture Organization, the diversity of catch, mean trophic level and the variation of principal component were analyzed in time series. Finally, combined with climate and environmental factors (sea surface temperature, SST; sea surface salinity, SSS; sea surface height, SSH; Sea Ice

Concentration, SIC; North Atlantic Oscillation, NAO; Arctic Oscillation, AO; Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO) in the Northeast Atlantic Ocean, the relationship between catches composition and climate change was explored by generalized additive model (GAM). The results showed that the diversity generally presented a declining trend, it was at a relatively low level during 2002 to 2010. The mean trophic level decreased slowly before 2002, then began to rise sharply. The correlation analysis showed that the changes of these two indicators were related to the environmental factors. The principal component analysis of catch composition showed that the variance of the first principal component was 35.3%, and it also has a close relationship with climatic and environmental factors, which could characterize the change of catch structure under the influence of climate. The results of GAM analysis showed that the orders of the contribution to structure change of catches were in sequence of SST, SSH, SSS, SIC and NAO.

Key words: Northeast Atlantic Ocean; climate change; catch composition; diversity of catch; mean trophic level