

文章编号: 1001-909X (2005) 03-0014-09

气候-海洋变动的生态响应研究进展

商少凌¹, 张彩云^{1,2}, 洪华生¹

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 海洋学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 以对太平洋与大西洋现象的观察和分析为主线, 论述了年际与年代际变动及其可能的机制, 综述了气候-海洋变动生态响应国际、国内的研究现状。在太平洋和大西洋都出现了类似的浮游动物、鱼类群落组成和丰度的年际及年代际变动的现象, 并发现了直接与某些强 E1N iño 事件对应的从营养盐到叶绿素含量变动的信号, 虽然目前尚缺乏物理-化学-生物过程上长期有力的观测证据, 但是海流的强弱变动很可能是导致这种生态响应的关键驱动力。国内在该领域的研究相对比较薄弱, 未来需要着力解决该领域中存在的生态响应机制、区域响应形态不清等关键的科学问题。

关键词: 气候-海洋变动; ENSO; NAO; 年际变动; 年代际变动; 海洋生态系统; 生态响应

中图分类号: P732.6; X171.1; Q178.534

文献标识码: A

0 引言

气候-海洋变动的生态响应是当今海洋学家、气象学家和生态学家们广泛关注的一个核心科学问题^[1]。气候-海洋变动主要表现在风场、海洋环流、上升流、水体层化结构、水体混合、温度场的长期低频变动上, 这些变动又影响到水体营养盐的分布, 从而引起作为水域基础生产者的浮游植物和次级生产者的浮游动物在时空分布和群落结构上发生长期趋势性的变动, 海洋食物网因之发生结构性的改变, 最终影响渔业生产^[2]。人们可以清楚地看到一些生态系统对气候-海洋因子的响应信号既体现在年际尺度上也体现在年代际变动上, 且常与 ENSO (E1N iño Southern Oscillation) 或NAO (North Atlantic Oscillation) 关联, 未来几十年的全球变化极有可能成为影响海洋生物资源的主要因子, 但其影响程度将会在很大范围内变动, 这主要取决于生物的种类和群落特征以及区域性海域的特定条件^[3]。本文就突出受 ENSO 与NAO 影响的太平洋与大西洋的年际与年代际变动生态响应方面的研究进展, 结合国内研究现状, 进行综述与讨论。

收稿日期: 2004-12-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (40331004)

作者简介: 商少凌 (1968-), 女, 福建泉州市人, 副教授, 主要从事海洋环境科学研究。

1 年际变动的生态响应

1.1 ENSO 与 NAO 简述

因厄尔尼诺 (EINiño, EN) 和南方涛动 (South Oscillation, SO) 之间紧密的联系, 两者被统称为 ENSO。一个 ENSO 暖事件意味着 EINiño 即热带太平洋的海水增温现象与负 SO 指数 (SO Index, SOI) 的同时出现。ENSO 是太平洋热带地区大尺度海气相互作用的典型反映, 其发生周期一般为 2~7a, 但每次的持续时间、强度及其后果不同。近百年发生的重大 EINiño 事件有 10 次, 其中以 1972~1973 年、1982~1983 年、1986~1987 年、1997~1998 年发生的 4 次最为严重。

NAO 即北大西洋涛动, 指亚速尔 (Azores) 高压和冰岛 (Iceland) 低压之间气压的南北交替变化, 调节着北大西洋 40~60°N 之间西风的强弱, 其最突出的主要是对北美及欧洲气候的影响, 正 NAO 态时西风增强且北移、温度升高, 而负 NAO 态时则相反。

1.2 太平洋年际变动现象

太平洋生态系统在过去 20 年发生了显著的变化, 对气候事件有明显的响应, 这一点已得到广泛共识^[4~7], 但多数的报道都是零星地针对某一时间段现象进行的描述。McGowan 等^[8]曾提及早在 1929 年, Hubbs 和 Shultz 就报道了 1926 年夏季加州沿岸很多鱼类和无脊椎动物异常北移的现象, 同时还注意到当时表层的水温增高, 但因缺乏时间连续的数据而无法求证。1998 年, McGowan 等终于在综合前人结果的基础上给出了一个较为系统的研究报告, 他们对 1916~1995 年共 80 年北美太平洋沿岸 17 个观测站的实测表层水温记录进行了分析, 发现海表温度距平 (SSTA) 存在着大幅的年际、年代际变动, 一些强的年际变动信号与 EINiño 暖事件、La Niña 冷事件密切相关。其中 1925~1926 年的暖事件正是吻合了 Hubbs 和 Shultz 的发现。1958~1960 年是 80 年里最强的 EINiño 事件之一, 浮游动物与仔鱼的丰度下降^[9~12], 渔获量降低了 30%, 很多南部的大洋生物种如热带红蟹 *Pleuroncodes planipes* 等都出现在它们的正常栖息地以北的海区^[13]; 1955~1957 年间生物种群都保持类似的结构, 但 1958~1959 年间, 种群结构却发生突然改变^[14, 15]。1983~1984 年的 EINiño, 同样导致强烈的生态响应, 浮游植物垂直分布结构发生了改变, 出现了深层叶绿素最大值; 浮游动物、大型海藻生物量下降, 多种鱼类和无脊椎动物栖息范围再度北移; 俄勒岗州鲑鱼渔业遭受重创, 产量为历史最低^[10, 16]。观察表明, 对于东北太平洋受到加利福尼亚海流影响的海域而言, 它的气候-海洋年际变动与赤道太平洋的 EINiño 相关联, 一般都会出现浮游生物结构的改变、次级生产量下降进而导致渔业产量的降低, 以及南部鱼种向北迁移的现象。McGowan 等^[8]认为, EINiño 是由北向南流动的富含营养盐的加利福尼亚海流强弱的变动的主导因素, 与当地的上升流指数无关。值得注意的是, Simpson^[17]对 1940~1941 年、1982~1983 年、1991~1992 年 ENSO 事件对加利福尼亚海流影响的研究表明, EINiño 加强了西北亚北极水向岸的输运, 增加了南部赤道太平洋水的

流量特别是加利福尼亚潜流并使上升流停止,因而可以认为,沿着加利福尼亚沿岸向南的海水体积减少可能是导致上述生态响应的主要机制,但M cGowan 等排除上升流的影响却似乎并不合理,因为上升流的停止无疑也会削减营养盐向上层水的垂直输送从而影响到初级乃至次级生产和渔业生产。

东赤道太平洋在 1997~ 1998 年的 Elniño 发展期,上层暖水区范围增加,叶绿素含量下降到正常年份的一半,仅为 $0.05 \mu\text{g}/\text{L}$,而后在 1998 年 4 月 Elniño 开始走向衰亡时,其海表温度降低,叶绿素含量突然回升,个别站位甚至达到了原来的 40 倍^[18]。Chavez 等^[18]认为其间的物理机制就是上升流的变动,他清楚地观察到海域冷水影响范围明显缩小,温跃层变深, CO_2 分压下降,营养盐浓度骤减,硝酸盐浓度最低仅为 $0.05 \mu\text{M}$ (正常年份一般为 $3 \mu\text{M}$),故而指出,一切皆由于 Elniño 发展期赤道太平洋中部温度异常的升高致使信风强度减弱,从而使东赤道太平洋上升流不能维持正常的强度,当 Elniño 消亡信风强度逐渐恢复时,上升流便得以发展,所提供的足够的营养盐滋养、繁茂了浮游植物,从而使叶绿素含量大增。

西太平洋暖池金枪鱼渔场,其中心位置的年际变动也被证实与西太暖池东界的辐聚区东西向的位移以及 ENSO 循环有密切的关系。可以看到渔场中心在 1988~ 1989 年、1995 年的 La Niña 年总是位于 160°E 以西,而 1992~ 1994 年的 Elniño 年则向东伸展到 160°E ,因而,渔场中心、暖池东界辐聚区位置与南方涛动指数有显著的相关关系,但时间上有 2 个月的滞后^[19]。

1.3 大西洋年际变动现象

最早将浮游动物与 NAO 联系起来的研究报道之一,是关于北大西洋东部和北海的两种主要桡足类浮游动物——飞马哲水蚤 *Calanus finmarchicus* 与海岛哲水蚤 *C. helgolandicus* 在 1962~ 1992 年之间的时空变动^[20,21]。两个种类对 NAO 有不同的响应模式, *C. finmarchicus* 与 NAO 之间呈现较强的负相关,在高 NAO 的秋季,其生物量降低 57%; 而 *C. helgolandicus* 与 NAO 之间随时间生物量仅呈增高的趋势,却没有显著相关关系,两者之间有 1 年的时间滞后。桡足类总生物量随 NAO 的增高而降低的幅度达 18.5%。人们试图解释其间的机制,但却并没有一个统一的说法,归结起来,与北太平洋东部对 ENSO 的响应机制的分析相类似,也主要是由于海流的变动和温度的影响^[8]。高 NAO 年,西风加强使北来进入该海域的海流(如挪威海深层水)输送量减少,带来的越冬的 *C. finmarchicus* 生物量则减少;同时,高 NAO 年西风加强使水温增高,水体层化迟,不适合冷温性的 *C. finmarchicus* 生长,但却适合暖温性的 *C. helgolandicus* 生长,再加上两者的竞争,主要居于南部海域的 *C. helgolandicus* 会侵入北部发展,最终造成高 NAO 年时 *C. finmarchicus* 低而 *C. helgolandicus* 高的格局^[21,22]。

在上述研究海域以北的巴伦支海, Ottersen 与 Stenseth^[22]通过统计分析,发现 NAO 和水温的变动可以解释 55% 的鳕鱼 *Gadus morhua* 丰度的变动。他们认为,高 NAO 年,强西风增加了从西南方向流来的大西洋以及挪威海海水,使得巴伦支海水水温升高,利于鳕鱼幼体的存活和生长,并且水温升高也提高了鳕鱼幼体的主要饵料即 *C. finmarchicus* 的无节幼体的生产;同时,流入巴伦支海的挪威海海水本身携带丰富的浮游动物饵料,其流量增

加, 也有利于鳕鱼幼体的生长繁衍。由此可知, 在北大西洋, 从北纬 45 至 75 的范围内, 每一区域对同样的气候变动呈现出不同甚至完全相反的反应。高 NAO 年, 北海的 *C. finm archicus* 生物量下降而其北的巴伦支海生物量则增加, 盖因 NAO 影响风场驱使海流的南北分支发生强弱变动, 加之区域环境条件各异而形成的结果。实际上拉布拉多与纽芬兰渔场也有类似的研究报道, 该渔场鳕鱼渔获量变动主要受到由 NAO 驱动的海温变动的影
响^[23]。

1.4 全球范围的年际变动现象

借助于水色遥感数据, 从全球的视角可对气候变动的海洋生态响应进行考察。Behrenfeld 等^[24]对 3 年间(1997 年 9 月~ 2000 年 8 月)积累的 SeaWiFS 全球海表遥感叶绿素 *a* 含量数据进行分析, 并采用 VGPM 模式估算净初级生产力(NPP)。在非常显著的叶绿素和净初级生产力的季节变动以及空间分布特征之外, 可以看到清晰的年际变动信号, 特别是 1997 年到 1998 年之间的强 El Niño 到强 La Niña 转换间相应的变动。从 1997 年 9 月到 1998 年 12 月, 全球平均遥感叶绿素含量增加了约 10%, 并且可以看出叶绿素含量的增加不仅局限在赤道海区, 而是全球尺度的一种趋势; 随后的 La Niña 时期叶绿素含量持续增长但增长的速率在降低, 反映的则主要是太平洋的年际变动信号。净初级生产力也呈现出类似的 ENSO 转换期的特征, 尤其强烈的信号有: 因上升流强度回升, 赤道太平洋 NPP 增大; 因印度洋环流改变, NPP 在印度洋东北部增大却在印尼以西的海域降低; 由于上升流锋导致西非近海 NPP 增大。气候变动的海洋生态响应研究不仅是给出了一个全球性的现象描述, 同时也验证了利用 SeaWiFS 水色遥感手段探测长期低频生态响应信号的能力。

2 年代际变动的生态响应

年代际变动的生态响应是在 20 世纪 90 年代早期开始提出的, 当时研究者们注意到北太平洋在 70 年代中期发生了一系列气候和生态上的切换, 这种切换最终被称为“体系转换”(regime shift)^[25]。一种体系代表着气候-海洋-生态系行为的一种特征, 可以持续一个世代(decade)或更长时间, 而转换则意味着突然的而非渐进的变化, 在 1 年左右的时间从一种特征的行为转变成另一种特征的行为。不过关于“体系转换”的确切定义目前尚未给出, 而对历史上究竟发生过多少体系转换事件这一科学问题, 还仅停留在科学假设的程度上。

目前, 基本达成共识的一个转换事件发生在 20 世纪 70 年代中后期东北太平洋受加利福尼亚海流影响的海域, 在转换发生之前的 20 年, 该海域的温度与盐度异常呈现正相关, 转换之后, 则变为负相关, 整个体系趋向于温度增高而盐度下降, 引起生态系种群结构的改变, 南方生物种类北移的频率增大, 次级生产与渔业生产持续下降, 形成一种大尺度的恒定的响应形态^[8]。转换之前的体系, 是一种东太平洋的冷状态和西太平洋的暖状态并存的体系, 小型的大洋鱼种中以鳀鱼为主; 转换之后的体系, 对应着东太平洋的暖状态与西太平洋的冷状态, 则多见沙丁鱼, 故研究者们称这种转换为鳀鱼、沙丁鱼转换(anchoovy-sardine

shift)。Mantua 等人^[26]定义了一个“太平洋年代涛动”(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的术语来表征太平洋的年代际气候变动现象,它描述了一种长寿命的类 ENSO (ENSO like) 太平洋气候变动形态。

对于北大西洋的东北部海域,可以发现 1960~1999 年间,每一类群的浮游动物种数及其空间分布发生了显著的变化^[27],暖温性种的分布向北扩展了约 10 个纬度,而冷温性种数愈向北则愈减少,暖水鱼种也有向北迁移的迹象,说明这一生态系统已向着一个更温暖的体系转换,这种转换发生在 20 世纪 80 年代初至中期,与北半球温度异常(NHTA)有较为密切的联系。但是在大西洋中脊以西,特别是拉布拉多海,显然是向着相反的偏冷的体系转换,并且更多地受到 NAO 变率的影响^[28, 29]。

3 中国的研究现状

中国近海处于东亚季风区,对于其气候变动的生态响应以及可能的控制机理的认识和研究目前还很薄弱的,已有的认识多集中在气候-海洋变动方面,目前,对南海 SST 的年际、年代际变动与季风、ENSO 的关系以及东海环流的变动与黑潮、ENSO 的关系已有相当丰富的研究报道^[30~41]。

南海在 Elniño 发生的当年和次年,赤潮发生的次数明显比非 Elniño 年多,而且赤潮生物的种类也与 Elniño 事件有关^[42]。各环境要素在 Elniño 年表现都比较特殊,如沿岸径流猛增,气温、水温、盐度、pH 值偏低,海水含氧量偏高,温、盐、密度跃层强度增大^[43, 44]。

东、黄海 1950 年以来渔业优势种交替现象明显,生物资源波动较大^[45]。浙江近海鲧鲞鱼、带鱼中心产卵场在时空分布上错位,并影响了渔获量的年际变动,这些错位和变动也可能是 Elniño 现象造成的^[46];黑潮流量的变动、东海黑潮锋的位置变化也皆与 Elniño 有关^[30, 38],也很可能是造成浙江近海渔场变动的原因。

东海与南海之间台湾海峡的生态系统对海洋环境年际变动的响应,经过洪华生教授主持的 3 个综合性课题的滚动研究,可以看到一些零星的粗线条的信号^[47],主要有以下三点:

(1) 强 Elniño 发生的 1997 年 8 月期间,观察到了沿岸上升流区表层低温高盐水的的影响范围小于往年同期,营养盐也达到最低水准;(2) 与往年同期相比, Elniño 达到高峰的 1998 年 2~3 月,自海峡南端北上的暖水影响范围高,叶绿素分布特征、浮游植物种群结构等都有所变化;(3) 1998 年 7~9 月(渔场夏汛)平均 SST 高于 1997 年,相对应的水温的也升高,北部和西南部的两个中心渔场向北退缩了 0.5~0.6 个纬度。

4 讨论与小结

在北太平洋和北大西洋都观察到十分类似的浮游动物和鱼类群落组成和丰度的年际及年代际变动的现象,显示出直接与某些 Elniño 强事件对应的从营养盐到叶绿素含量变动的信号。但浮游植物的变动,多以叶绿素为指标,较少论及群落结构, Karl 等人^[48]也只是

针对夏威夷海洋时间序列站 (ALOHA) 观测到的 30 年来叶绿素 *a* 与 *b* 的升高和营养盐降低的现象提出浮游植物群落结构发生改变的假设。不过, 在阿拉伯海和亚喀巴湾 (Aqaba), 人们观察到浮游植物的群落结构发生了从真核生物到原绿球藻的年际演替^[49, 50], 笔者认为浮游植物群落结构的变动作为生态响应的一个重要层面需要加强研究。

年代际变动相对于年际变动的研究而言还比较薄弱, 数据尤其是生物数据上积累的不足是限制之一, 迄今为止, 研究者们对此所获得的认识还是相对模糊、不确切的, 因此坚持海洋观测的时间连续性非常重要。

研究中可以注意到, 几乎所有气候-海洋变动生态响应的机制的解释都离不开海流这一要素, 因为流场本身是个载体, 仿佛传送带, 在区域之间分配热量、生物、营养盐、溶解气体等, 流场的变动自然会引起一系列的改变, 比如它可能改变营养盐和水温, 影响浮游植物的生长, 进而影响其摄食者浮游动物到鱼类的生长; 它也可能带来不同的浮游生物种类, 导致群落结构的改变, 很显然海流的强弱变动是生态响应的一个关键驱动力。但关于气候-海洋变动生态响应的机制, 大部分的推论仍然缺乏物理-化学-生物过程上长期有力的观测证据, 比如东太平洋的体系转换, 分析称加利福尼亚海流变强, 但其向南的输运量并未见对应于体系转换的增大^[8], 因而, 可以说迄今为止并不十分清楚究竟气候变动在海洋生态系统调控中扮演什么角色, 对与 El Niño 遥相关的观点也存在着争议^[51]。

由于不同海区所处的地理位置、大气-海洋以及生态条件的不同, 加之海洋生态系统的适应能力非常有限, 气候变化在不同海区的生态响应和反馈作用也不同。局部地区的气候-海洋及生态变动在某种程度上可能受到大洋尺度上扰动 (如南方涛动、北大西洋涛动扰动) 的控制, 也可能受到当地气候系统的作用, 抑或会受到两者共同的影响, 究其原因, 主要是气候因子通过两种途径作用于生态系统, 一种是对个体的直接作用, 另一种是通过生态系统食物链传递的间接作用, 两者的交互作用, 便形成了复杂的反应网络; 同时, 不同的海区有各自不相同的大气-海洋系统以及不同的生态系统结构, 故而气候变动的生态响应型态必然存在着空间分布上的多样性。因而, 很有必要对全球范围内的区域性气候-海洋变动生态响应进行研究, 尤其对目前仍十分缺乏认识的中国近海的研究, 只有这样才能全面认识区域生态环境对长期气候变动的响应方式、作用过程和动力机制。

总之, 在世界各大海区以及一些中尺度的上升流区, 对气候、海洋和生物上的变动信号的强弱和频度进行研究是非常有科学意义的, 可以认识到年际、年代际尺度上气候变动的生态响应。但是, 要真正认识气候变动的生态后果及其潜在的调控机制, 还绝非简单地进行比较分析就可以了, 实际上还需要多学科、多方面的交叉协作, 这也是摆在研究者面前的一个巨大的挑战性的课题。

致谢 厦门大学海洋学系李少菁教授在本文撰写时提出了许多宝贵意见, 谨致谢忱!

参考文献

- [1] Stenseth N C, Mysterud A, Ottersen G, et al. Ecological effects of climate fluctuations [J]. Science, 2002, 297: 1 292~ 1 296

- [2] Kennedy V S. Anticipated effects of climate change on estuarine and coastal fisheries [J]. *Fisheries*, 1990, **15** (6): 16~ 24
- [3] IPCC. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability* [M]. London: Cambridge University Press, 2001. 283~ 304
- [4] Francis R C, Hare S R, Hollowed A B, et al. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the Northeast Pacific Ocean [J]. *Fish. Oceanogr.*, 1998, **7**: 1~ 21.
- [5] Hayward T L, Cummings S L, Cayan D R, et al. The state of the California Current in 1995-1996: continuing declines in macrozooplankton biomass during a period of nearly normal circulation [J]. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.*, 1996, **37**: 22~ 37.
- [6] Hollowed A B, Wooster W S. Decadal-scale variations in the eastern subarctic Pacific: II Response of Northeast Pacific fish stocks [A]. Beamish R J. *Climate Change and Northern Fish Population* [C]. Ottawa: Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Science, 1995. 373~ 385
- [7] Francis R C, Hare S R. Decadal-scale regime shifts in the large marine ecosystems of the Northeast Pacific: a case for historical science [J]. *Fish. Oceanogr.*, 1994, **3**: 279~ 291.
- [8] McGowan J A, Cayan D R, Doman L M. Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific [J]. *Science*, 1998, **281**: 210~ 217.
- [9] McGowan J A, Chelton D B, Conversi A. Plankton patterns, climate and change in the California Current [J]. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.*, 1996, **37**: 45~ 68
- [10] Wooster W S, Fluharty D L. *EINiño North: Niño Effects in the Eastern Subarctic Pacific Ocean* [M]. Seattle: University of Washington Press, 1985.
- [11] Chelton D B, Bernal P A, McGowan J A. Large-scale interannual physical and biological interaction in the California Current [J]. *J. Mar. Res.*, 1982, **40**: 1 095 ~ 1 125
- [12] Sette O E, Isaacs J D. Symposium on the Changing Pacific Ocean in 1957 and 1958 [J]. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.*, 1960, **7**: 14
- [13] Radovich J. Redistribution of fishes in the eastern north Pacific Ocean in 1957 and 1958 [J]. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.*, 1960, **7**: 163~ 171.
- [14] Isaacs J D, Fleming A, Miller J K. Distributional atlas of zooplankton biomass in the California Current region: spring and fall 1955-1959 [J]. *Calif. Comp. Ocean. Fish. Inv., Atlas*, 1969, **10**: 1~ 122
- [15] Williamson M H. An ecological survey of a Scottish herring fishery, 4 Changes in the plankton during the period 1949 to 1959 [J]. *Bull. Mar. Ecol.*, 1961, **5**: 207~ 229.
- [16] Dayton P K, Tegner M J. Global Consequences of the 1982-1983 EINiño-Southern Oscillation [M]. Glynn P (ed), Amsterdam: Elsevier, 1990. 433~ 472
- [17] Simpson J J. Response of the Southern California current system to the mid-latitude North Pacific warming events of 1982-1983 and 1940-1941 [J]. *Fish. Oceanogr.* 1992, **1**: 57~ 79.
- [18] Chavez F P, Strutton P G, Friederich G E, et al. Biological and chemical response of the equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 EINiño [J]. *Science*, 1999, **286**: 2 126~ 2 131.
- [19] Lehodey P, Bertignac M, Hampton J, et al. EINiño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific [J]. *Nature*, 1997, **389**: 715~ 718
- [20] Planque B, Fromentin J M. Calanus and environment in the eastern North Atlantic I Spatial and temporal patterns of *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus* [J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1996, **134**: 101~ 109.
- [21] Fromentin J M, Planque B. Calanus and the environment in the eastern North Atlantic II Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus* [J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1996, **134**: 111~ 118
- [22] Ottersen G, Stenseth N C. Atlantic climate governs oceanographic and ecological variability in the Barents Sea [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2001, **46** (7): 1 774~ 1 780
- [23] Mann K H, Drinkwater K F. Environmental influences on fish and shellfish production in the Northwest Atlantic

- [J]. Environ. Rev., 1994, 2: 16~ 32
- [24] Behernfeld M J, Randerson J T, McClain C R, et al. Biospheric Primary Production During an ENSO Transition [J]. Science, 2001, 291: 2 594~ 2 597.
- [25] Hare S R M. Empirical evidence for North Pacific region shifts in 1977 and 1989 [J]. Prog. Oceanogr, 2000, 47: 103~ 145
- [26] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78: 1 069~ 1 079.
- [27] Beaugrand G, Reid P C, Ibanez F, et al. Reorganisation of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate [J]. Science, 2002, 296: 1 692~ 1 694
- [28] Stebbing A R D, Turk S M T, Wheeler A, et al. Immigration of southern fish species to southwest England linked to warming of the North Atlantic (1960-2001) [J]. Journal of the Marine Biological Association of the U K, 2002, 82: 177~ 180
- [29] Quero J C, Du Buit M H, Vayne J J. Les observations de poisons tropicaux et le réchauffement des eaux dans l'Atlantique européen [J]. Oceanologica Acta, 1998, 21: 345~ 351.
- [30] Liu Yonggang, Yuan Yaochu. Variability of the Kuroshio in the East China Sea in 1993 and 1994 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 18 (1): 17~ 36
- [31] Wang D X, Zhou Faxiu, Qiu Zengbao. Study on the air-sea interaction on the interannual time scale in the South China Sea [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1997, 11 (1): 45~ 56
- [32] Chao Shenn-Yu, Ping-Tung Shaw, Sunny YW. Enlino modulation of the South China Sea circulation [J]. Progress in Oceanography, 1996, 38 (1), 51~ 93
- [33] Yu Shenyu, Zhou Faxiu, Fu Gang, et al. Basic Features of the SST low Frequency Oscillation in the South China Sea [J]. Oceanol Lin nol Sin, 1994, 25 (5): 546~ 551.
- [34] 袁耀初, 刘勇刚, 苏纪兰. 1997—1998 年 EINO 至 LANI 期间东海黑潮的变异 [J]. 地球物理学报, 2001, 44 (2): 199~ 210
- [35] 王卫强, 王东晓, 齐义泉. 南海表层水温年际变化的大尺度特征 [J]. 海洋学报, 2000, 22 (4): 8~ 16
- [36] 周发琇, 王作台. 南海与其邻近西太平洋 SST 年际变化的位相不连续性 [J]. 海洋与湖沼, 1999, 30 (6): 679 ~ 686
- [37] 王东晓. 南海表层水温年循环的数值模拟 [J]. 海洋学报, 1998, 20 (4): 25~ 37.
- [38] 刘勇刚, 袁耀初. 1992 年东海黑潮的变异 [J]. 海洋学报, 1998, 20 (6): 1~ 11.
- [39] 何有海, 关翠华. 南海上层海洋热含量的年际和年代际变化 [J]. 热带海洋, 1997, 16 (1): 23~ 29
- [40] 潘家伟, 袁业立, 郑全安. 用 Geosat 高度计数据观测黑潮流系的低频变化 II. 季节及年际变化分析 [J]. 海洋学报, 1997, 19 (4): 51~ 62
- [41] 李薇, 刘秦玉, 徐启春. 黑潮弯曲时的北太平洋冬季海温异常对大气低频振荡的影响 [J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24 (4): 447~ 455.
- [42] 钱宏林, 梁松, 齐雨藻. 赤潮与埃尔尼诺关系的讨论 [J]. 济南大学学报, 1991, 12 (3): 112~ 116
- [43] 柯东胜. 南海溶解氧的年际变化与 EINO [J]. 海洋与湖沼, 1991, 22 (5): 443~ 450
- [44] 柯东胜. 南海环境要素的年际变化与 1982-1983 年 EINO [J]. 海洋与湖沼, 1992, 24 (4): 379~ 388
- [45] 唐启升, 苏纪兰. 中国海洋生态系统动力学研究 I 关键科学问题与研究发展战略 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 66~ 71.
- [46] 洪华生, 何发祥, 杨圣云. 厄尔尼诺现象和浙江近海鲷鱼渔获量变化关系——长江口 ENSO 渔场学问题之二 [J]. 海洋湖沼通报, 1997, (4): 8~ 16
- [47] 洪华生, 商少凌, 张彩云, 等. 台湾海峡上升流区生态系统对海洋环境年际变动的响应迹象 [J]. 海洋学报, 2005, 27 (2): 63~ 69.
- [48] Karl D M, Bidigare R R, Letelier R M. Long-term changes in plankton community structure and productivity in the North Pacific Subtropical Gyre: The domain shift hypothesis [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies

- in *Oceanography*, 2001, **48** (8-9): 1449-1470
- [49] Latasa M, Bidigare R R. A comparison of phytoplankton populations of the Arabian Sea during the Spring Intemonsoon and Southwest Monsoon of 1995 as described by HPLC-analyzed pigments [J]. *Deep Sea Research II*, 1998, **45** (10-11): 2133-2170
- [50] Lindell D, Post A F. Ultraphytoplankton succession is triggered by deep winter mixing in the Gulf of Aqaba (Eilat), Red Sea [J]. *Limnol Oceanogr*, 1995, **40**: 1130-1141.
- [51] Mysak L A. El Niño, interannual variability and fisheries in the northeast Pacific Ocean [J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1986, **43**: 464-497.

An overview of the marine ecosystem response to climate-ocean variability

SHANG Shao-ling¹, ZHANG Cai-yun^{1,2}, HONG Hua-sheng¹

(1. *State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen 361005, China;*
2. *Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

Abstract The impact of large-scale climate-ocean variability on marine ecosystem has been observed by comparing the sign, amplitude and frequency of climatic and biotic variations. Of particular interest are the responses to ENSO and NAO in the Pacific and Atlantic Ocean, respectively. Some of the well-documented effects involve the inter-annual and inter-decadal fluctuations of zooplankton distribution and fish stocks, as well as remarkable nutrient and chlorophyll concentration variation during the transition period from El Niño to La Niña. Of the mechanisms that have been proposed to explain these responses, the change of ocean current is most probably a key forcing, though it seems to have little supporting evidence. In fact, the pattern and mechanism of eco-response to climate-ocean variability vary with the domain. They are mostly kept unknown in China's marginal sea. To achieve better understanding of such a challenging field, interdisciplinary studies are required.

Key words: climate-ocean variability; marine ecosystem; response; ENSO; NAO; inter-annual fluctuation; inter-decadal fluctuation