

气候变化对海洋生物及生态系统的影响^{*}

韦兴平¹, 石 峰^{1,2}, 樊景凤^{1*}, 杨 青¹

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海洋大学 生命科学与技术学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要:工业革命以来,人类活动每年向大气中排放约 10 亿 t 的 CO₂,其直接影响是导致了全球温度升高、区域气候模式震荡、海平面上升、海水酸化等一系列变化。这些变化能够促使海洋生物从基因水平到生态系统水平发生改变,从而影响海洋生态系统的服务功能,不利于人类的可持续发展。海洋对调节气候变化和维持各生态系统的平衡具有重要意义,尽管一些海洋生物工程的方法和手段可能会减缓气候变化的影响,但最安全、最为有效的举措应是减少 CO₂的排放,这也正是海洋学家们和有关政府管理机构所大力倡导和共同努力的目标。本研究阐述了当前气候变化状况以及气候变化对海洋生物过程造成的影响,探讨了一些应对气候变化的相关对策。

关键词:全球气候变化;海洋生物;海洋生态系统

中图分类号:Q14

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2011)02-0241-12

全球气候正在发生改变,而人类活动是导致全球气候变化的主要原因,这一观点已经被广泛接受。化石燃料的燃烧、树木的砍伐等,致使大气 CO₂的质量浓度从工业革命前的 280 mg/m³ 上升到 2008 年的 385 mg/m³[¹];已有的研究显示目前大气 CO₂的年平均增量超过 2 mg/m³,比 IPCC 组织所预测的速率还要高[²]。全球气温和大气 CO₂的质量浓度存在着直接的联系,CO₂、甲烷等气体质量浓度的升高能够引发温室效应,从而对海洋生物和海洋环境产生了直接的物理影响。这些影响表现为:从 1979 年开始,全球海水表层温度以 0.13 °C/10 a 的速率上升[³],并且从 1961 年以来海洋内部的温度增量 > 0.1 °C/10 a[³];海表风速和风暴潮发生的频率增加;海洋环流、海水分层和营养盐输入发生改变;在过去的一个世纪里全球海平面上升超过 15 cm,并且目前以每年 3.3 mm 的速率继续上升[⁴];海洋中的 CO₂质量浓度的增加导致了海水酸化加剧,在过去的 200 a 里全球海水 pH 值下降了 0.1[⁵]。

这些物理过程的改变对海洋生物和生态系统的影响也是史无前例的,研究表明 450 mg/m³ 的 CO₂(也就是相比工业革命前全球平均气温上升 2 °C)是一个危险的阈值[⁶],超过质量浓度可能会给我们带来毁灭性的灾难;但是如果按照目前的发展速度,到 2040 年就可以达到这个阈值[⁷]。届时,一些敏感的海洋生态系统,例如珊瑚礁系统、海冰覆盖的极地海洋等,可能就会消失;而且生态系统的改变是非线性的,这意味着还将出现一系列意想不到的后果。

本研究首先探讨了气候变化所导致的一些海洋要素发生的改变,分析了气候变化、人为捕捞和污染等多种因素综合造成的影响;其次阐述了一些敏感的海洋生物和生态系统对气候变化的响应;最后,探讨了如何应对和减缓气候变化造成的影响。

* 收稿日期:2010-08-09

资助项目:海洋公益性行业科研专项经费项目——典型海湾生境与重要经济生物资源修复技术集成及示范(200805069)

作者简介:韦兴平(1956-),男,山东章丘人,高级工程师,主要从事海洋环境研究与管理方面研究。E-mail: xpwei@nmemc.gov.cn

* 通讯作者: E-mail: jffan@nmemc.gov.cn

(张 骞 编辑)

1 气候变化导致一些海洋要素发生改变

1.1 温度升高的影响

全球平均海水表层温度上升的速率约为陆地的 50%，从 1979 年开始，地表温度平均每 10 a 上升 0.27 °C，海水表层温度每 10 a 平均上升 0.13 °C^[3]。温度的改变能够影响一些海洋生物的生理学过程和海水流体物理过程：温度每上升 10 °C，生化反应速率提高 1 倍；海水的密度与温度之间具有非线性的关系，海水表层温度升高能够导致冷水的下沉和海冰漂浮。此外，温度还能够影响海洋生物的生理速率和物理耐受限度。一些海洋生物的物种分布会因温度的变化而改变^[8-9]；而对于一些定栖性生物和一些狭温性的地方种（例如珊瑚），温度升高对它们的影响可能是致命性的^[10]。虽然全球平均气温整体上呈上升趋势，同时还伴随着其他一些物理因子的改变，但是气候变化对世界各海区的影响不尽相同。20 世纪 50 年代以来，北冰洋一些地区的水温升高了 4 °C 以上，而南极洲一些地区呈变暖的趋势，另一些地区则变冷（威德尔海海水表面温度下降 2 °C，而南佐治亚州却上升了 2 °C^[11]）。在过去的 60 a 里，东澳大利亚流向南推移了约 360 km，这导致其周边区域平均气温上升了 2 °C 以上^[12]。这将导致海洋生物群落的分布格局发生变化。

大洋底部是地球上热量最为稳定的区域之一，那里的生物最不容易受到全球变暖的直接影响；但是，即使现在立即停止 CO₂ 的排放，由于热惯性，海洋内部也将持续升温数十年。另外，表层和深层水的温度变化也并非同步，在过去的 30 a 里，德雷克海峡 700 m 深处的海水温度上升了 0.6 °C，而表层海水的温度下降了 2.1 °C^[13]。潮间带是最容易受气候变化影响的区域^[14]，退潮后潮间带生物直接暴露于空气中，气温的升高可能会威胁到这些生物的生存。

1.2 海水酸化的影响

海水中 CO₂ 的分压与海水 pH 值直接相关：CO₂ 分压升高，pH 值下降；这对一些海洋生物和生态系统构成了严重的威胁。在过去的 200 a 里，人类活动排放的 CO₂ 导致海水 pH 下降了 0.1；据推测到 2100 年，pH 值将可能下降 0.3~0.5^[5]。海洋吸收大气 CO₂ 的速率，受到风强和温度的影响；越冷的水体，酸化越明显。在低纬度海区，海水中 CO₂ 的质量浓度可能已经达到饱和^[15]，这意味着低纬度区域更多的 CO₂ 将停留在空气中，温室效应更为显著。海洋变暖，可能会部分减轻海水酸化的程度，但并不能减缓 CO₂ 质量浓度长期升高带来的影响。一些海洋生物，如球石藻、部分软体动物、海星、海胆以及珊瑚等，碳酸钙是构成其骨骼的重要成分，海水酸化将影响这些生物结构的完整性、威胁其生存。近岸海域碳酸盐离子一般处于饱和状态，其溶解度随着深度的增加而增加，溶解面（碳酸盐开始溶解的深度）可能会因为海洋的酸化而变浅，这将导致这些具有钙质结构的海洋生物的栖息地缩小。对于近岸水域来说，CO₂ 质量浓度大于 490 mg/m³ 将会影响珊瑚骨骼的钙化，威胁其生存^[10]。

1.3 溶解氧质量浓度减少的影响

低溶解氧质量浓度将威胁海洋生物的生存，导致海洋荒漠化。从 20 世纪 50 年代开始，由于全球气候变暖，海洋的溶解氧质量浓度呈下降趋势^[16]。海水中溶解氧的含量与温度呈线性关系。温度每升高 1 °C，溶解氧质量浓度下降 6%；如果温度和 CO₂ 质量浓度继续上升，那么低氧区的范围将会扩大，到本世纪末低氧区的范围将会增加 50%^[17-18]，这将会对渔业生产等多方面造成消极影响。此外，陆源营养盐的输入导致的沿岸富营养化、海平面上升等都将致使颗粒有机物的进一步累积和微生物活动的增加，这将进一步消耗海水中的溶解氧。一些生物体可能会躲避低氧区，而那些定栖性种类则会因无法耐受低氧而死亡；不同种类生物耐受低氧的能力不同，这可能会导致海洋生物群落结构的改变。

1.4 海平面上升的影响

全球气温升高,将导致极地海冰的融化,进而引发海平面高度上升,威胁到沿海海洋生物栖息地和生态系统。与1990年相比,到2100年海平面将上升0.5~1.4 m^[19]。一方面,海平面的改变会影响海洋的栖息地,威胁海洋生物多样性并且改变局部的营养盐循环通量;另一方面,海平面的上升也意味着一些岛国的消失,这会导致渔业压力的下降,从而缓解珊瑚礁生态系统等所面临的环境压力。

1.5 气候变化和其他因子的综合影响

大多数海洋物种和生态系统同时面对着多种影响的威胁;除气候变化的影响外,还包括捕捞活动、紫外线辐射的增加、人为污染、外来种入侵和疾病等^[20]。在面对众多压力因子的综合作用时,物种对单一环境因子压力的抵抗力也会下降,生态系统因扰动而多样性下降,生态系统的功能以及抵御扰动的能力降低。例如,pH值的下降会影响离子的交换,干扰新陈代谢,使生物体的耐热范围变窄^[21]。持续的捕捞压力造成了黑海生态系统的演替,水母暴发、水体富营养化加剧^[22];一些珊瑚礁面临着水温上升、酸化、疾病、渔业压力、旅游压力、河口径流带来的泥沙淤积以及营养物过量的影响^[23]。对大西洋一些鱼类现存量的分析研究表明,仅仅捕捞压力并不能很好地解释渔业资源下降的原因,气候变化的影响也能够造成鱼类种群补充量的下降^[24]。目前,越来越多的人都意识到:采用生态系统的方法进行海洋渔业和环境管理的必要性,既要考虑人为因素的影响,也要考虑气候变化等自然因素对海洋生态系统的影响。

2 气候变化对一些敏感海洋生物和生态系统的影响

2.1 气候变化对海洋生物从基因水平到生态系统水平的影响

评价生物有机体和生态系统对气候变化的脆弱性,需要考虑生物组织所有水平的潜在影响,包括基因表达、细胞和整个有机体的生理学特征、骨骼结构、个体行为、种群动力学、群落和生态系统的结构和营养功能;从生态位理论的角度讲,物种耐受力的范围同时反映了其生理特征、环境因子、种间竞争和分布。不同物种对气候变化的敏感性有所不同,这可能会打破原有的竞争关系,引发生物群落对气候变化的响应。具有较高抵抗力(Resistant)的系统能够抵御外界的干扰;从生理学的角度来看,这些生物能够耐受一个较宽范围的温度和盐度变化;从生态学的角度来看,具有较高抵抗力的物种能够适应多变的栖息地环境。相比之下,具有较好弹性(Resilient)的系统,一旦外界压力消失之后,能够恢复到扰动前的状态^[25]。生物多样性能够影响生态系统的功能^[26],并且拥有复杂功能的生态系统(关键种不止一种的生态系统)具有较好的弹性。

温度是影响生物功能的重要因子之一,不同温度区系即便是同一物种,其基因表达也有所不同^[27]。环境压力下的基因选择,可能导致寿命较短的生物种群的等位基因频率发生快速的改变^[28]。例如,肌肉的发育随温度的改变而改变,温度升高对那些能运动的生物的肌肉发育产生不利影响,运动速度的减慢可能造成其被捕食的几率大大增加^[29]。同时,温度的改变,可能导致群落粒级结构和生物量的改变。繁殖的时间、产量和幼体的存活率容易受环境因素的影响,海洋生物的幼体尤其容易受到温度、盐度、pH改变的影响。即便是一些生物的成体能够成功应对温度变化的影响,但它们的幼虫却很可能因温度的改变而存活率大大降低。卵的孵化时间能够影响幼体的存活率;对于幼体而言,此时食物的可利用性是影响其存活率的重要因素。温度变化驱动浮游生物繁殖高峰的改变,可能导致浮游食物网的破坏,从而影响一些经济鱼类的产量^[30]。一些鱼类可以通过改变栖息地来应对气候变化,但这并不意味着鱼类群落的衰退:20世纪80年代以来,随着气候变暖,北海鱼类物种丰富度有所增加^[31]。这与“低纬度区域,物种的丰富度较高”这一基本规律是一致的;温度升高的影响等同于纬度降低的后果。

2.2 气候变化对浮游生物的影响

2.2.1 气候变化对浮游植物的影响

1) 表层海水升温的影响

全球变暖导致表层海水升温,浮游植物的种类会随之分布发生改变,一些暖水种向两极扩布,或者在海区中出现的时间提前。表层海水变暖、层化加剧,也可能导致一些赤潮藻类丰度异常增加,甚至发生藻华^[32]。相关研究表明,20世纪50年代以来,挪威沿岸海域有害藻华的增加与气候变化密切相关^[33-34]。

2) 降雨、沿岸径流和盐度改变的影响

降雨量的增加,会导致海水盐度变化和营养盐的补充,从而也可能导致沿岸水中浮游植物的群落结构和生产力发生改变。

径流量的增加,不仅能够改变沿岸水的盐度,还能改变水体层化程度,从而减少深层水营养盐向表层水的补充。随着含营养盐浓度较低的淡水大量进入沿岸水中,造成沿岸水营养盐浓度下降,硅藻等一些藻类的丰度会下降,而甲藻等藻类却会因层化加剧和腐殖质可利用度增加而呈增加的趋势^[34-36]。

3) UV 辐射增加的影响

因气候变化而导致的混合层深度变浅、水体扰动增加,使浮游植物暴露于 UV-R 的辐射程度增加,导致浮游植物的生理学和形态学的变化,使其细胞碳含量增加、叶绿素 a 含量降低、细胞分裂次数减少、细胞个体增大^[37]。最近的研究表明:UV-R 辐射能够影响浮游植物群落的粒径大小,因为小细胞更容易受 UV-R 的影响,它们应对 UV-R 损伤的代谢消耗更高^[38-39]。

4) 混合层深度变浅和层化加剧的影响

模型研究结果表明,气候变化会导致混合层深度变浅、海水层化加剧。这将造成深层水营养盐向表层水的输送减少,表层水中浮游蓝细菌、鞭毛藻和浮游甲藻的丰度增加,“微生物环”逐渐取代“经典食物链”。而春季甲藻藻华的时间提前,也是部分归因于海水层化加剧、时间提前^[40]。

5) 国内外的研究进展

目前,我们缺乏浮游植物长期动态变化的历史资料,为了便于研究气候变化对浮游植物产生的影响,我们需要建立长时间序列的海区调查和观测。在这方面,英国、法国等一些国家开展了大量的研究工作,它们积累了至少 20 a 的浮游植物的海区监测数据以及一些重要的、高质量的卫星数据^[41],这对于今后的研究有着极其重要的意义。我国在这一领域的研究相对比较落后,但也已对一些海域的浮游植物的生态现状进行了一系列的调查研究,评估了气候变化对这些海域的浮游植物的生物量、种群结构、时空分布等影响,这有利于我们今后的研究和未来的发展。

2.2.2 气候变化对浮游动物的影响

1) 表层海水升温的影响

表层海水温度升高,对不同种类浮游动物生长的影响有所不同,这包括促进和抑制作用,从而使浮游动物的种群数量和群落结构发生改变。海水温度的改变会导致浮游动物个体大小的变化,有些种类的体长会因为水温的升高而显著下降;也有些种类情况与之正好相反^[42]。

海水温度的改变还会导致浮游动物的空间分布发生改变。虽然浮游动物本身的运动能力较弱,但是借助海流的运动,它们可以进行大尺度的迁移。已有研究发现:在过去的 50 a 里,大西洋东北部的一种暖水种的桡足类种群向北迁移的距离已超过 1 000 km^[8,34]。

许多浮游生物都会对气候变暖产生响应,但是不同群落受到气候变暖的影响程度不同,这就会致使浮游生物群落、乃至整个浮游生态系统的结构和功能发生改变^[40]。

2) 海水层化加剧的影响

海水层化加剧,可能导致浮游动物丰度下降、水母暴发频率增加,对更高营养级的海洋生物和人类生产、生活产生影响^[34,44]。相关的模型研究结果表明:世界海洋海水层化加剧将导致海洋初级生产力和次级生产

力整体水平的下降^[34]。

3) 国内外的研究进展

到目前为止,英国已经累积了 40 a 多英国附近海域浮游动物的调查数据,建立了至少 4 个浮游生物数据系统,在浮游动物长时间序列的观测方面处于世界领先地位。此外,智利、爱沙尼亚、希腊、哈萨克斯坦、拉脱维亚、土耳其、乌克兰等 30 多个国家也积累了 20 a 多的浮游动物海区连续监测数据^[45]。

而我国在这方面与上述几个国家相比还有一定的距离,目前为止,尚未进行系统的浮游动物长时间序列观测。但我国在近 50 a 来主要开展了 3 次大规模的近海域范围的综合调查,这几次大规模的调查项目均包含浮游动物的调查,这为我们今后的研究提供了宝贵的历史参考资料。

2.3 气候变化对海鸟的影响

2.3.1 气候变化对鸟类分布的影响

近年来大量的研究发现,许多鸟类的分布区在向北扩展,而且这一趋势正逐年增强。其原因可能是因为气候变化导致了这些地区气候带的普遍北移,引起了鸟类分布区的北移,这一变化可能会对鸟类的的生活产生许多潜在的和负面的影响^[45]。鸟类能否及时适应原栖息地和新分布区生态环境和物种组成的变化,这一变化对入侵及土著鸟类的影响究竟有多大,这些问题都有待我们去进一步研究。另外,气候变化对于高纬度和高海拔地区的鸟类造成的影响可能会更大,因为鸟类向极地和山地顶部迁徙的距离是非常有限的。

2.3.2 气候变化对鸟类生存环境的影响

气候变化对鸟类生存环境的影响是多方面的。首先,它会影响植物群落的组成和结构。增温和 CO₂ 质量浓度的增加对不同植物影响的差异会导致各种植物因耐受性不同而引起其竞争平衡被打破,植物群落的组成和结构会因此而发生改变。这种变化进而会影响到以这些植物和昆虫为食的鸟类。另外,气候变化往往还会加剧极端天气出现得频率,雷雨、大风、森林大火,干旱引起的森林、草原、荒漠及湿地面积的变化都会影响到鸟类的生存环境。

2.3.3 气候变化对鸟类迁徙的影响

气候变化对鸟类越冬影响的一个方面就是改变鸟类迁徙的时间、路线以及迁徙距离。例如,灰鹤(*Grus*) 在俄罗斯及我国东北繁殖,历史上它的越冬地在我国华南地区,而现在它们不仅在从前只是旅鸟的黄河三角洲越冬,而且在辽宁省瓦房店地区也发现了灰鹤的越冬种群。气候变化不仅影响鸟类的大范围的水平运动,也同样影响山地居留鸟类的垂直运动,这种影响是气候变暖与其所引起的植物群落沿海拔变化共同作用的结果。

2.3.4 国内外的研究进展

因为海鸟在监测全球气候变化中的重要指示作用,目前,世界上许多国家已经对海鸟的种类、分布、多样性等方面都开展了大量的研究。澳大利亚的一些专家就海鸟的地理分布、数量、种群行为、发育繁殖等方面观测分析;美国的生物学家利用电子追踪标签(electronic tracking tags)测出了灰鹱(Sooty Shearwater)的潜水深度以及环境温度等数据,并了解了跨赤道迁徙的细节;德国的生物学家研究了海鸟与海洋生态系统之间的联系,并较为深入的检测和评估了在海洋的一些理化参数(如海面的温度,盐度,混合层深度等)发生改变的时候,海鸟对海洋生态系统中食物网的所产生的生物效应。

我国在海鸟研究方面也开展了许多研究。2002 年,我国南极考察队员们抵达南极乔治王岛,关于南极海鸟与全球变化的关系进行了相关研究并相应的提出一些保护性措施。国内的一些鸟类学家还对我国沿海,如丹东、天津、上海、广东、深圳等地区的鸟类资源、区系结构、珍稀种类、居留型、食性、生境及数量级做了深入研究,并提出了保护建议。此外,我国各沿海地区的鸟类志等书相继推出,为我国今后的海鸟研究提供了必要的基础资料。

2.4 气候变化对基岩海岸生态系统的影响

2.4.1 温度变化的影响

生活在基岩海岸潮间带的生物由于周期性的暴露于空气中和水环境中,因此,其生长发育等生命过程中必然受到气温和水温两种温度介质的影响,暴露在空气中的生物所处的环境通常比较恶劣,极端的高温或低温会对生活在该环境中的生物产生明显的筛选作用,对物种的存活率、生态分布起着决定作用,例如,澳大利亚海域夏季干出时间如果接近中午,将会导致潮间带生物大量死亡^[46-47]。与气温相比,水环境要温和的多,且其对生物个体的大小、以及物候期的长短和早晚起着重要作用,但近岸水域水深较浅,水温的波动主要受气候影响,因此,与近海以及大洋生态系统相比,气候变化对基岩海岸潮间带的环境以及生物的影响最直接,生物的响应幅度也更明显。

2.4.2 降雨、风力和水动力的影响

气候变化可能引起降雨量发生改变,通过陆源径流量的变化影响沿岸海水的盐度和浊度,进而对潮间带的植物和动物产生影响,导致沿岸生态系统的物流和能流发生改变。

而气候变化引起的风暴潮发生频率和强度的改变可能导致基岩海岸生物的丰度和群落结构发生重大变化,例如,喜欢平静条件的墨角藻目前在新西兰东北部大量分布,估计和这一地区由于气候变化引起的风暴潮发生频率和强度的减弱有直接的关系^[48]。

2.4.3 UV 辐射增加的影响

众所周知,紫外线辐射强度的增加会抑制光合作用,破坏 DNA。部分潮间带生物由于长期暴露于高强度的紫外线照射环境而建立了光保护机制,然而那些对 UV 抵抗能力较弱的种类在 UV 辐射强度增加的情况下可能会从潮间带消失,另外,藻类和动物的受精卵或幼体比较脆弱,对 UV 更敏感,因此,UV 强度增加,可能引起幼体大量死亡或导致个体发生变异^[49-51]。

2.4.4 国内外的研究进展

由于基岩海岸在气候变化研究中的优势,沿海国家纷纷开展了一系列研究。2001—2003 年英国开展了 MarClim 项目,该项目在全国 800 个采样点展开调查,通过历史数据分析和现场调查,证实了潮间带生物很好的反映了海洋生物对气候变化的响应趋势,通过相关模型的建立,对未来的变化趋势进行了预测,以分析海洋生物应对气候变化的响应,评估生态系统的脆弱性。

在我国,关于黄海西部底栖海藻群落的调查研究,始于 20 世纪 60 年代,中国科学院海洋研究所的科学家们研究了黄海西部沿岸海藻区系的温度性质、植物地理特点,确定了黄海西部有 185 种底栖海藻。从 20 世纪 80 年代开始,一些研究人员还分别对我国一些海区的潮间带底栖海藻群落进行了几次大规模详细的研究,以期更全面的反应底栖海藻对气候变化的响应。

2.5 气候变化对红树林生态系统的影响

2.5.1 海平面上升对红树林的影响

对红树林生态系统而言,一个重要的影响因素就是海平面上升。与陆地森林生态系统不同,所有红树林生态系统都出现在潮间带、泻湖或珊瑚礁上,它们受到海平面变化的巨大影响^[52-53]。红树林生态系统能积聚泥炭和淤泥,这使它们有可能适应海面的上升。如果沉积速度等于海平面上升速度,那么不同红树林种类适应淹没的特性可得以维持;如果海平面的上升速度高于沉积速度的话,将出现某些红树林植被的重新分布,当平均潮高超过基质上升速度,则红树林将减少。需要指出的是,随着海平面的上升,红树林分布区会朝向陆地方向迁移,但是这种迁移情况仅仅可能发生在海滩朝陆地一方没有障碍物阻挡的海滩上,那些红树林区筑有海堤的陆岸,必将阻挡红树林分布区的迁移。

2.5.2 气温上升对红树林生态系统的影响

红树林物种在温度敏感性上有相当大的差异,但是当平均气温上升到 25 °C 时大多数红树林植物都会出

现最大的出芽生长。平均气温上升,红树林的物种组成可能发生变化,但目前尚无极端高温对红树林产生影响的证据^[45]。专家认为气温高于 25 °C 时,某些红树林物种的叶形成速率可能下降。而气温超过 35 °C,红树林根的结构,苗的发育、光合作用将受到很大的负面影响^[54],这意味着如果温度上升过高,可能对位于赤道附近的红树林不利,它们可能会向高纬度迁移。

2.5.3 CO₂质量浓度增加对红树林生态系统的影响

CO₂质量浓度提高,会加强红树植物的光合作用。实验证明,CO₂质量浓度的升高会刺激红树林的生长,在 CO₂为双倍的环境中红树苗生长一年,结果显示它的生长速率和光合作用速率都有所增加。幼苗可能会提早一年生殖,所以提高 CO₂质量浓度可能会促进红树林的成熟和生长。但是,已成熟的红树林对提高 CO₂质量浓度的长期的响应还未知。

2.5.4 降水量变化对红树林生态系统的影响

盐度是决定海岸和河口的红树林物种分布的主要因子。降雨量直接影响潮间带水域和沉淀物的盐度,在有大量淡水流入且有一定盐度的环境中,红树植物在适宜的温度条件下能繁盛生长。全球变暖带来的一个效应是热带地区降水量可能变化,这将对红树植物的生长范围产生深刻影响。红树林对盐度的要求有一定的生态幅,一些红树植物会在较低的盐度下出现最大生长值。如果降水量减少,土壤的盐度就会增加,红树植物就会出现组织内盐水平增加和有效水量减少,从而导致单位叶面积的净同化速率的减小,最终使生长减慢。一般认为,如果红树林区域内的降水量的变化足以使土壤盐度或水环境的盐度变化时,则红树林在其盐度生态幅之外的生长将受到正的或负的影响。

2.5.5 气旋和风暴对红树林生态系统的影响

全球气候变暖以后,风暴和巨浪的频率和强度都会有所增加,而红树林位于海陆交错区,它们适合生长在静浪海岸,因此,会最先受到风暴和巨浪的影响。强大的风暴可以影响红树林的结构,尤其是对大树的影响更为严重,降低红树林的多样性指数。海平面上升后,海浪对红树林内沉积物的堆积影响很大,海浪强度和频度的增加会冲走红树林根系周围的有机质,降低红树林内及外来沉积物在红树林区的沉积,使其基质增加缓慢,甚至降低,导致红树林的生长速度无法跟上海平面的上升速度,因而风暴和巨浪的潜在影响会使红树林面积减少,甚至会使红树林在局部地区消亡。

2.5.6 紫外线辐射对红树林的影响

尽管红树林能也能适应强烈的光照环境,但是强光还是会损害红树林,强烈光照的负面影响可能与红树林收到的 UV-B 的剂量有关,增加紫外线的曝光将会改变红树林的光合有效性。此外,值得一提的是,即使对紫外线的曝光有很小的增强也会对红树林有很大的影响。Moorthy 等人在增加对 UV 的曝光的情况下种植红树幼苗,发现当对紫外线的曝光增加 10% 时,净光合作用增加了 45%;但是,当对 UV 的曝光增加 40% 时,净光合作用降低了 59%^[55]。

2.5.7 国内外的研究进展

气候变化对红树林生态系统的影响是全方位的、立体的。目前,国际和国内的一些专家主要研究了海平面上升、海水酸化、气旋和风暴以及海水变暖等理化因素对红树林生态系统造成的影响,而在红树林会对各种环境的改变产生何种应答以及红树林和生态系统功能之间的关系如何等一些方面的信息仍然是一项空白。目前,各国家都在进一步建立和完善监测评价体系,以红树林、浮游生物、底栖动物等指示性的物种作为监测气候变化的有效指标,同时,他们还努力建立地形学和流体力学模型,用以监测海岸线发生的一系列改变,以此深入理解气候变化对红树林生态系统造成的影响^[45]。

2.6 气候变化对珊瑚礁生态系统的影响

2.6.1 海水表面温度(SST)升高对珊瑚礁生态系统的影响

全球气候变化造成了 SST 升高,这一变化会使珊瑚更为接近其耐热极限。如果在这一进程中出现极端气候,气温升高超过均值(厄尔尼诺现象),那么珊瑚就会超过其耐热极限,产生白化。珊瑚的白化可以看作

是对外界胁迫的一种响应。在过去的 30 a 里,广泛的珊瑚白化事件,已经影响了世界上大部分地区,自 1979 年的科学文献记载以来,一些珊瑚白化事件及范围达几百甚至几千平方公里,这些事件是由比正常状态高的升温所引发的,并且可通过卫星监测海水表面温度的异常来预测^[45-46]。

2.6.2 海水酸化对珊瑚礁生态系统的影响

海洋每年吸收了人类活动产生的 33% 的 CO_2 ^[57],并且从工业革命时期开始,海洋表面海水 pH 值下降了 0.1^[58],海水中的 CO_2 质量浓度的急剧增加可能引起海洋环境的巨大改变,尤其是对那些具有碳酸钙骨骼的生物。已有的研究显示了海水酸化的增加明显地降低了珊瑚有效钙化的能力,从而影响珊瑚个体的生长,使珊瑚在面对侵蚀时更加脆弱^[59-60]。而一些河口研究的数据则显示了目前那里的 CO_2 质量浓度是前工业时期的 2~3 倍,这一质量浓度所导致的海洋酸化会使得珊瑚在面对疾病、白化和风暴等灾害时更加难以恢复^[61],而且酸化还可能会影响到珊瑚以及那些以珊瑚礁为主要栖息地的生物的生存能力^[62]。

2.6.3 海平面上升、风暴强度变化对珊瑚礁生态系统的影响

目前,海平面的升高率对于珊瑚的生长率的影响相对来说是较低的,因而对珊瑚种群的健康没有大的威胁。但是在因海水温度升高和酸化所导致的低生长率的作用下,如果珊瑚群落的增长一旦低于海平面上升的速率,那对珊瑚种群的状况则会发生质的变化。而风暴则可以通过直接的机械作用影响珊瑚礁,同时也通过影响河流来改变流向珊瑚的泥沙量。另外,较频繁的强风暴对珊瑚的影响也会加强,同时也会与其因素如海水温度升高和酸度一起作用,进一步减少珊瑚群落改变礁产物向净分解的平衡。

2.6.4 国内外研究进展

在过去的 20 a 里,大量的研究发现,珊瑚礁生态系统的威胁更多的来自沿海人类开发活动的影响,这一影响包括直接对珊瑚礁的开采和破坏以及通过排污造成的水质变化而影响珊瑚生长、甚至导致珊瑚死亡。随着人类对珊瑚礁保护意识的逐步增强以及沿岸开发活动的规范化合法化,人类活动对珊瑚礁生态系统的影响一定会逐渐得到控制;但近年来由于全球气候和环境变化,导致世界范围内珊瑚白化死亡事件的发生,严重威胁到了珊瑚礁生态系统和海洋经济鱼类的种群数量,如何确定气候变化对珊瑚礁生态系统的影响将成为新一阶段保证珊瑚礁生态系统健康的重要命题。

3 应对气候变化的生态管理对策

考虑到气候变化能够引发温度、酸度等多个因子的改变,以及海洋生物和生态系统对气候变化的敏感性,采用单一的策略来解决世界各海区受气候变化的影响是行不通的。政府指导下的区域响应计划的制定是非常有必要的^[63]。全世界范围内,减少 CO_2 的人为排放,使人为因素导致的气候变化降到最低限度,这是当前应对气候变化的有效方法之一。与工业革命前相比, CO_2 的排放已经使地球升温 2.4 °C,超过了“人为影响的危险极限”(2 °C)^[64];如果继续以这样的速率进行排放,到本世纪末大气中 CO_2 质量浓度将很快达到 1 000 mg/m³,全球气温将上升 5.5 °C,许多物种将灭绝^[65],届时即使我们建立了庞大的海洋保护网络,也将为时已晚。

采用生物的方法降低大气 CO_2 的质量浓度,尚需进一步的探索。大洋大多为铁限制,通过铁加富可以刺激浮游植物的生长;从理论上讲,通过生物泵的作用,可以将表层水体中固定的碳源源不断地输送至海底,从而降低大气 CO_2 的质量浓度。然而,对于这种方法还有许多的不确定性,并且国际上也限制大规模的加富实验。海上风力发电和潮汐发电是不排放 CO_2 的有效发电方法^[66],但是这两种方法都会潜在地影响海洋生态系统,间接地增加了气候变化的影响^[67-68]。但是相对于 CO_2 排放的影响,海上风力发电和潮汐发电也是无奈之中的有效举措,它所带来的益处远比栖息地丧失和生态退化造成的弊端要大得多。

为应对气候变化对海洋生物和生态系统的影响,一方面,我们需要加强模型研究,以提高对海洋物理过程变化导致的生态后果的预测水平^[69];另一方面,需要密切监测海洋生态系统的演替与退化,并采取有效的调控措施,以减缓气候变化的影响。此外,政府的管理和调控是应对气候变化影响的最有利保障。

参考文献(References):

- [1] MEURE C M, ETHERIDGE D, TRUDINGER C, et al. Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L14810.
- [2] NEBOJSA N, OGUNLADE D, GERALD D, et al. In special report on emission scenarios [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 570.
- [3] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [4] RAHMSTORF S. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise [J]. *Science*, 2007, 315: 368-370.
- [5] The Royal Society. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide [EB/OL]. [2005-06-30]. <http://royalsociety.org/ocean-acidification-due-to-increasing-atmospheric-carbon-dioxide/>.
- [6] HANSEN J, SATO M, RUEDY R, et al. Dangerous human-made interference with climate: A GISS model E study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 2287-2312.
- [7] LENTON T M, HELD H, KRIEGLER E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105: 1786-1793.
- [8] BEAUGRAND G, REID P C, IBANEZ F, et al. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate [J]. *Science*, 2002, 296: 1692-1694.
- [9] CRAME J A. Latitudinal range fluctuations in the marine realm through geological time [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1993, 8: 162-166.
- [10] HOEGH-GULDBERG H, MUMBY P J, HOOTEN A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification [J]. *Science*, 2007, 318: 1737-1742.
- [11] WHITEHOUSE M J, MEREDITH M P, ROTHERY P, et al. Rapid warming of the ocean around South Georgia, Southern Ocean, during the 20th century: forcings, characteristics and implications for lower trophic levels [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, 55: 1218-1228.
- [12] RIDGWAY K R. Long-term trend and decadal variability of the southward penetration of the East Australian Current [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: 22921-22936.
- [13] SPRINTALL J. Long-term trends and interannual variability of temperature in Drake Passage [J]. *Progress in Oceanography*, 2008, 77: 316-330.
- [14] HELMUTH B, HOFMANN G E. Defining thermal stress in the rocky intertidal: linking ecology and physiology through biophysics [J]. *American Zoologist*, 2000, 40: 1051.
- [15] LE QUERE C, RODENBECK C, BUITENHUIS E T, et al. Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to recent climate change [J]. *Science*, 2007, 316: 1735-1738.
- [16] GARCIA H E, BOYER T P, LEVITUS S, et al. On the variability of dissolved oxygen and apparent oxygen utilization content for the upper world ocean, 1955 to 1998 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L09604.
- [17] DIAZ R J, ROSENBERG R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems [J]. *Science*, 2008, 321: 926-929.
- [18] OSCHLIES A, SCHULZ K G, RIEBESELL U, et al. Simulated 21st century's increase in oceanic suboxia by CO₂-enhanced biotic carbon export [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22: GB4008.
- [19] PETERS S E. Environmental determinants of extinction selectivity in the fossil record [J]. *Nature*, 2008, 454: 626-638.
- [20] JACKSON J B C. Ecological extinction and evolution in the brave new ocean [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105: 11458-11465.
- [21] PORTNER H O, LANGENBUCH M, MICHAELIDIS B. Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases in CO₂ on marine animals: From Earth history to global change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: 15.
- [22] DASKALOV G M, GRISHIN A N, RODIONOV S, et al. Trophic cascades triggered by overfishing reveal possible mechanisms of ecosystem regime shifts [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104: 10518-10523.
- [23] CARPENTER K E, ABRAR M, AEBY G, et al. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts [J]. *Science*, 2008, 321: 560-563.
- [24] BRUNEL T, BOUCHER J. Long-term trends in fish recruitment in the north-east Atlantic related to climate change [J]. *Fisheries Oceanography*, 2007, 16: 336-349.

- [25] HARRISON G W. Stability under environmental stress-resistance, resilience, persistence and variability [J]. *The American Naturalist*, 1979, 113: 659-669.
- [26] DANOVARO R, GAMBI C, DELL'ANNO A, et al. Exponential decline of deep-sea ecosystem functioning linked to benthic biodiversity loss [J]. *Current Biology*, 2008, 18: 1-8.
- [27] PLACE S P, O'DONNELL M J, HOFMANN G E. Gene expression in the intertidal mussel *Mytilus californianus*; physiological response to environmental factors on a biogeographic scale [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 356: 1-14.
- [28] HOFFMAN A A, WILLI W. Detecting genetic responses to environmental change [J]. *Nature Reviews Genetics*, 2008, 9: 421-432.
- [29] ABRAHAMMS M V, MANGEL M, HEDGES K. Predator-prey interactions and changing environments; who benefits? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2007, 362: 2095-2104.
- [30] BEAUGRAND G, BRANDER K M, LINDLEY J A, et al. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea [J]. *Nature*, 2003, 426: 661-664.
- [31] HIDDINK J D, HOFSTEDE R T. Climate induced increases in species richness of marine fish [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 453-460.
- [32] BOYD P W, DONEY S C. Modelling regional responses by marine pelagic ecosystems to global climate change. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 1806.
- [33] SELLNER K J, DOUCETTE G J, KIRKPATRICK G J. Harmful algal blooms; causes, impacts and detection [J]. *Journal of Indian Microbiology and Biotechnology*, 2003, 30: 383-406.
- [34] EDWARDS M J, JOHNS D G, LETERME S C, et al. Regional climate change and harmful algal blooms in the northeast Atlantic [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51: 820-829.
- [35] CARLSSON P, GRANALI E, TESTER P, et al. Influences of riverine humic substances on bacteria, protozoa, phytoplankton, and copepods in a coastal plankton community [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 127: 213-221.
- [36] GOFFART A, HECQ J H, LEGENDRE L. Changes in the development of the winter spring phytoplankton bloom in the Bay of Calvi (NW Mediterranean) over the last two decades; a response to changing climate [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 236: 45-60.
- [37] HESSEN D, DE LANGE H J, VAN DONK E. UV-induced changes in phytoplankton cells and its effects on grazers [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 38: 513-524.
- [38] LORENZEN C. Ultraviolet radiation and phytoplankton photosynthesis [J]. *Limnology and Oceanography*, 1979, 24(6): 1117-1120.
- [39] SMITH R, BAKER K. Penetration of UV-B and biologically effective dose-rates in natural waters [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 1979, 50(4): 459-468.
- [40] EDWARDS M, RICHARDSON A J. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch [J]. *Nature*, 2004, 430: 881-884.
- [41] ELODIE M, DAVID A, FABRIZIO D, et al. Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton [J]. *Science*, 2009, 326: 1253-1256.
- [42] MCKINNON A D. Growth and development in the subtropical copepod *Acrocalanus gibber* [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41: 1438-1447.
- [43] BONNET D, RICHARDSON A, HARRIS R, et al. An overview of *Calanus helgolandicus* ecology in European waters [J]. *Progress in Oceanography*, 2005, 65: 1-53.
- [44] RICHARDSON A J, SCHOEMAN D S. Climate impact on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic [J]. *Science*, 2004, 305: 1609-1612.
- [45] ALISTAIR J H, THOMAS A O, ELVIRA S P, et al. Impact of climate change on Australian marine life [R]. Australia: CSIRO Marine and Atmospheric Research, 2006.
- [46] TSUCHIYA M. Mass mortality in a population of the mussel *Mytilus edulis* L. caused by high temperature on rocky shores [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1983, 66: 101-111.
- [47] PEREZ T, GARRABOU J, SARTORETTO S, et al. Mass mortality of marine invertebrates: an unprecedented event in the North-western Mediterranean [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie III-Sciences de la Vie*, 2000, 323: 853-865.
- [48] DE LANGE W P, GIBB J G. Seasonal, interannual and decadal variability of storm surges at Tauranga, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2000, 34: 419-434.
- [49] GRAHAM M H. Effect of high irradiance on recruitment of the giant kelp *Macrocystis* (Phaeophyta) in shallow water [J]. *Journal of Phycology*, 1996, 32: 903-906.
- [50] RIJSTENBIL J W, COELHO S M, EIJSACKERS M. A method for the assessment of light-induced oxidative stress in embryos of fuoid algae via confocal laserscan microscopy [J]. *Marine Biology*, 2000, 137: 763-774.

- [51] SWANSON A K, DRUEHL L D. Differential meiospore size and tolerance of ultraviolet light stress within and among kelp species along a depth gradient [J]. *Marine Biology*, 2000, 136: 657-664.
- [52] WOODROFFE C. Mangrove sediments and geomorphology in tropical mangrove ecosystems [J]. *Coastal and Estuarine Studies*, 1992, 41: 7-42.
- [53] ELLISON A M, FARNSWORTH E J. Seedling survivorship, growth and response to disturbance in Belizean mangal [J]. *American Journal of Botany*, 1993, 80: 1137-1145.
- [54] CHEESEMAN J M. Depressions of photosynthesis in mangrove canopies [M]// BAKER N R, BOWYER J R. *Photoinhibition of photosynthesis; from molecular mechanisms to the field*. Oxford: BIOS, 1994: 377-389.
- [55] MOORTHY P, KATHIRESAN K. Influence of ultraviolet-B radiation on photosynthetic and biochemical characteristics of a mangrove *Rhizophora apiculata* [J]. *Photosynthetica*, 1997, 34: 465-471.
- [56] ANDREW C B, PETER W G, BERNHARD R. Climate change and coral reef bleaching; An ecological assessment of long-term impacts, recovery and future outlook [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80: 435-471.
- [57] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂ [J]. *Science*, 2004, 305: 367-371.
- [58] FEELY R A, SABINE C L, LEE K, et al. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans [J]. *Science*, 2004, 305: 362-366.
- [59] LANGDON C, ATKINSON M J. Effect of elevated pCO₂ on photosynthesis and calcification of corals and interactions with seasonal change in temperature/irradiance and nutrient enrichment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: C09S07.
- [60] YATES K K, HALLEY R B. CO₃²⁻ concentration and pCO₂ thresholds for calcification and dissolution on the Molokai reef flat [J]. *Hawaii Biogeosciences*, 2006, 3: 357-369.
- [61] HOEGH-GULDBERG O, MUMBY P J, HOOTEN A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification [J]. *Science*, 2007, 318: 1737-1742.
- [62] MCLEOD E, SALM R, GREEN A, et al. Designing marine protected area networks to address the impacts of climate change [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7: 362-370.
- [63] BERKES F, HUGHES T P, STENECK R S, et al. Globalization, roving bandits, and marine resources [J]. *Science*, 2006, 311: 1557-1558.
- [64] RAMANATHAN V, FENG Y. On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system; Formidable challenges ahead [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105: 14245-14250.
- [65] ROMM J. Cleaning up on carbon [J]. *Nature Reports Climate Change*, 2008, 7: 85-87.
- [66] SCHIERMEIER Q, TOLLEFSON J, SCULLY T, et al. Electricity without carbon [J]. *Nature*, 2008, 454: 816-823.
- [67] KIRBY R. Environmental consequences of tidal power in a hypertidal muddy regime; the Severn estuary (UK) [J]. *La Houille Blanche*, 1997, 3: 66-78.
- [68] KOSCHINSKI S, CULIK B M, HENRIKSEN O D, et al. Behavioural reactions of free-ranging porpoises and seals to the noise of a simulated 2 MW windpower generator [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 265: 263-273.
- [69] KEENLYSIDE N S, LATIF M, JUNGCLAUS J, et al. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector [J]. *Nature*, 2008, 453: 84-88.

Climate Change Impacts on Marine Lives and Ecosystems

WEI Xing-ping¹, SHI Feng^{1,2}, FAN Jing-feng¹, YANG Qing¹

(1. *National Marine Environmental Monitoring Center*, Dalian 116023, China;

2. *College of Life Science and Technology, Dalian Ocean University*, Dalian 116023, China)

Abstract: Due to human activities, gigatonnes of CO₂ are released into the atmosphere every year after the Industrial Revolution has completed. As the direct result from the CO₂ release impacts on global changes, global warming, regional climate abnormalities, sea level rising, and ocean acidification, etc take place. Also the global changes may impact on marine lives so as to make the gene change and the ecosystem change, to effect the ecosystem service, and to be disadvantageous the human society development. As it is known, ocean plays an important role in regulating climatic variation and keeping ecosystem balance, and marine bioengineering method may help slow down the climate change impacts. However the safest and most effective ways responding to the climate changes are to reduce the CO₂ emission, which already becomes the proposed objective of oceanographers and the governments with their great efforts. In this paper, the present situation of climate changes and their impacts on marine biological processes are reviewed, and the countermeasures to climate changes are discussed.

Key words: global climate change; marine lives; marine ecosystems

Received: August 9, 2010