

全球气候变化对海洋声吸收系数的影响研究

刘宗伟^{1,2,3}, 鲍颖^{1,2,3}, 吕连港^{1,2,3}, 乔方利^{1,2,3}, 宋振亚^{1,2,3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266071;

3. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于地球系统模式 FIO-ESM(The First Institute of Oceanography-Earth System Model), 研究了在最高排放 RCP8.5 情景下 1851—2100 年海水温度、盐度和酸度的变化规律, 综合考虑三者得到了声吸收系数的变化规律。FIO-ESM 模式输出结果表明, 1851—2100 年间大部分区域的海水温度出现不同程度地上升, 海洋酸化现象明显, 北极地区附近的海水盐度出现较大幅度的下降。利用 Francais-Garriso 经验公式计算海洋声吸收系数发现, 如果只考虑酸度对声吸收系数的影响, 声吸收系数的预报误差将达到 40% 以上。综合计算结果表明, 随着全球气候变化的演进, 全球海洋声吸收系数出现不同程度的下降, 最大可达 70%, 即未来的海洋对于声波更加“透明”。

关键词: 全球气候变化; 声吸收系数; 地球系统模式

中图分类号: P733.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)02-0210-11

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.02.006

除了几何扩展损失和底质吸收损失外, 海水中的声能衰减主要由海水介质的声吸收引起。声吸收系数大小对声纳的设计和应用具有重要的参考意义, 同时也会对海洋中依靠声波交流和捕食的哺乳动物的行为产生影响。

海水对声波的吸收主要由 2 个因素引起, 一是海水的切变黏滞效应, 另一个是海水中的硫酸镁和硼酸化学共振效应。这 2 种效应对声吸收的贡献由海水的温度、盐度和 pH 值决定。全球变化引起的海水温度升高、pH 值降低已被观测证实^[1-2]。全球变化导致的海水温度、盐度、pH 值变化都会影响海水对声波的吸收。Hester 等人首先从全球气候视角研究了海洋酸化对声吸收系数的影响^[3], 其研究表明由于 CO₂ 温室气体的排放导致的海洋酸化, 会使海水对 10 kHz 以下的声波吸收明显降低。通过计算工业革命前至 20 世纪 90 年代海洋酸度变化, 以及对应的海洋声吸收系数的变化, 发现部分海域低频声系数降低了大约 15%。随后, Ilyina 借助全球气候模式研究了 1800—2300 年全球海洋酸度的变化情况^[4], 并计算了对应的声吸收系数, 结果表明, 到 2100 年, 在某些高纬度地区和深海区域, pH 降低可达到 0.6 单位, 100 Hz~10 kHz 的声吸收系数降低达到 60%。Joseph 计算了海洋噪声级对海洋酸化的敏感度^[5], 计算结果表明由于海洋酸化的影响, 在特定的海域, 其噪声级变化不会超过 0.21 dB, 即认为环境噪声级对海洋酸化并不敏感。Rouseff 在随后的研究中指出, 由于内波的存在, 导致海洋酸化对环境噪声级的影响较预期的要大, 原因在于内波重新分配了声能在各条传播路径中的比例, 使得声波在水体中传播的分量增加^[6]。

上述的研究中只考虑了海洋酸度变化对声吸收系数的影响, 但是全球气候变化导致的海水升温和盐度变化同样会对声吸收系数产生影响。我们将综合考虑全球气候变化中海水温度、盐度和酸度对声吸收的影响, 研究未来一段时间内声吸收系数的变化规律。

收稿日期: 2016-05-10

资助项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目——海洋环境动力学和数值模拟(U1606405); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——区域海洋声学预报中不确定性的传递与度量(2015G03)

作者简介: 刘宗伟(1986-), 男, 山东单县人, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋声学方面研究。E-mail: liuzongwei@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

1 理论模型

1.1 声吸收系数计算方法

由于海水介质导致的声强衰减是比较复杂的物理、化学过程,因此直到目前仍然没有理论公式和实际测量结果吻合的较好。实际应用中常采用经验公式来计算声吸收系数。在 Francaais-Garriso 经验公式^[7]中,总吸收系数=硼酸贡献+硫酸镁贡献+纯水贡献,即

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2, \quad (1)$$

式中, α 为声吸收系数,单位为 dB/km; f 为声波频率,单位为 kHz。

硼酸贡献对应的系数为

$$\begin{cases} A_1 = \frac{8.86}{c} \times 10^{(0.78\text{pH}-5)} \\ P_1 = 1 \\ f_1 = 2.8(S/35)^{0.5} 10^{(4-1245/T)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, c 为声速(m/s),可由式 $c = 1412 + 3.21t + 1.19S + 0.0167D$ 近似给出,其中 t 表示温度($^{\circ}\text{C}$), $T = 273 + t$, S 表示盐度, D 表示深度(m)。

硫酸镁贡献对应的系数为

$$\begin{cases} A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.25t) \\ P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} D + 6.2 \times 10^{-9} D^2 \\ f_2 = \frac{8.17 \times 10^{(8-1990/T)}}{1 + 0.0018(S-35)} \end{cases} \quad (3)$$

纯水贡献对应的系数为

$$\begin{cases} t \leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 时, } A_3 = 4.937 \times 10^{-4} - 2.59 \times 10^{-5} t + 9.11 \times 10^{-7} t^2 - 1.50 \times 10^{-8} t^3 \\ t > 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 时, } A_3 = 3.964 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5} t + 1.45 \times 10^{-7} t^2 - 6.5 \times 10^{-10} t^3 \\ P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5} D + 4.9 \times 10^{-10} D^2 \end{cases} \quad (4)$$

该经验公式的适用范围为声波频率 200 Hz~1 MHz,海水深度 5 000 m 以内。在此范围内准确度可达到 5% 以内,范围外的准确度为 10% 以内。此准确度对实际的应用以及本工作的分析是足够的。

1.2 地球系统模式 FIO-ESM

国家海洋局第一海洋研究所地球系统模式 FIO-ESM(The First Institute of Oceanography-Earth System Model) v1.0^[8],是首个耦合海浪模式的地球系统模式,并参加了第 5 次全球气候模式比较计划 CMIP5(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5)。FIO-ESM 采用 NCAR 发展的耦合器 Coupler 6 将大气模式(CAM3)、陆面模式(CLM3.5)、海冰模式(CICE4)、海洋模式(POP2.0)以及海浪模式(MASNUM)封装起来;通过非破碎波致混理论^[9-10]实现海浪模式与气候系统的耦合。FIO-ESM 还耦合了全球碳循环过程,包括陆地碳循环(CASA)、海洋碳循环(OCMIP-2)以及 CO_2 在大气中输运过程;大气 CO_2 浓度受陆-气 CO_2 通量、海气 CO_2 通量以及人为 CO_2 排放的共同影响,实现完整的全球碳循环过程。气候物理过程与全球碳循环过程相互作用,共同影响全球气候变化。FIO-ESM 的大气模式水平分辨率为 T42,约为 2.875° ,垂向分为 26 层;陆面模式的水平分辨率与大气相同;海洋模式的水平分辨率经向为 1.1° ,纬向为 $0.3^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$,垂向分为 40 层;海冰模式的水平分辨率与海洋相同;海浪模式的水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,波向分辨率为 30° 。

本文采用的数据来自 FIO-ESM 历史(1851—2005 年)和未来(2006—2100 年)高排放情景 RCP8.5 的 CMIP5 全球碳循环实验模拟结果,实验设计见 Taylor 等^[11]。Qiao 等^[8]表明,FIO-ESM 全球碳循环模式能较好地再现历史时期的大气 CO₂ 浓度增长、气温升高等变化特征。本文采用的海水温度、盐度数据为 FIO-ESM 海洋模式输出结果;pH 值数据是由 FIO-ESM 海洋分量模式输出的温度、盐度、碱度、溶解无机碳、磷酸盐等变量利用海洋碳酸盐系统模块 mocsy2.0^[12]通过模拟海水的碳酸盐化学过程而计算得出。

2 仿真实验及结果

2.1 声吸收系数与水体参数之间的关系

利用 1.1 节给出的 Francaais-Garriso 经验公式,可以得到声吸收系数随海水温度、盐度和酸度变化情况。为了便于比较各个参数对声吸收系数的影响情况,设定参考海水的温度为 12 °C,盐度为 35,pH 值为 8.1,深度为 0 m。图 1a 给出了不同温度变化情况下声吸收系数变化百分比。其中,纵坐标为声吸收系数相对参考海水的差异百分比。4 条曲线分别代表升温 Δt 为 1,2,3 和 4 °C。从图中可以看出,在 80 kHz 以下,随着温度的升高,声吸收系数基本呈下降趋势。在 2.5 kHz 附近,声吸收系数对温度的变化不敏感。在 100 Hz 和 20 kHz 附近,声吸收系数随温度升高而减弱最显著;当温度升高 4 °C 时,声吸收系数降低了 12% 以上。80~700 kHz 声吸收系数随温度的升高而增大,最敏感的频点在 200 kHz 附近。

图 1b 给出了不同盐度变化情况下声吸收系数变化百分比。其中纵坐标的定义与图 1a 一致。由图可见,1 kHz 是一个明显的分界点。在 1 kHz 以下,盐度降低,声吸收系数增加;在 1 kHz 以上,声吸收系数随着盐度的降低而降低。在 20 kHz 附近,盐度降低 4 个单位,声吸收系数降低接近 12%。

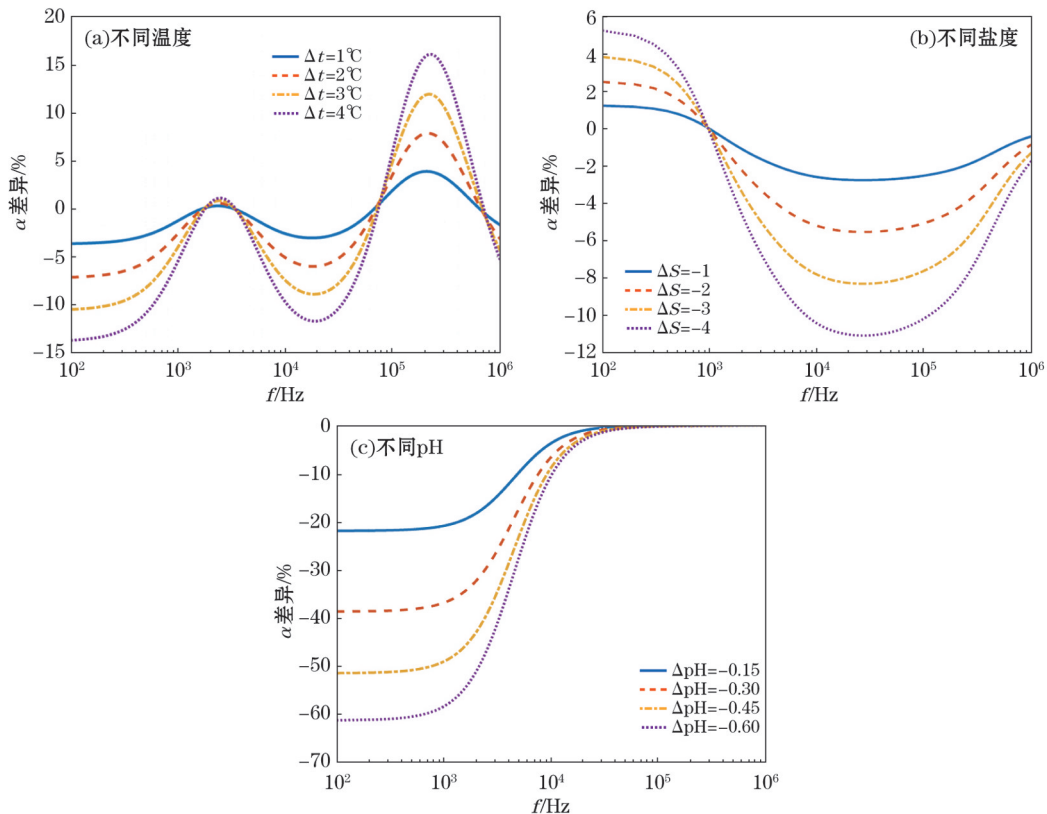


图 1 不同温度、盐度、pH 值变化情况下声吸收系数变化百分比

Fig.1 Variation of percentage in sound absorptivity in seawater under different temperatures, salinities and pHs

Hester 等^[1]已经研究了声吸收系数随 pH 值变化规律。为了便于对比,这里仍然给出其变化曲线,其变化曲线如图 1c 所示。其中纵坐标的定义与图 1a 一致。由图可以看出,在 30 kHz 以下,随着 pH 值的降低,声吸收系数也降低,特别是 1 kHz 以下,pH 值降低 0.6 个单位时,声吸收系数降低了 60%。30 kHz 以上声吸收系数对 pH 值变化不敏感。

2.2 全球气候变化中的温度、盐度和酸化变化情况

图 2 给出了 FIO-ESM 模拟的 1851 年和 2100 年全球海表面及 1 000 m 水深处的温度分布,以及温度变化分布。由图中可知,1851—2100 年表层海水存在一个明显的温升效应,在南北半球的中纬度 30°~60° 范围内大部分海区升温达到 5 °C 以上。1 000 m 水深处海水温度总体变化较小,北大西洋地区的海水升温最为明显,其原因为大洋翻转环流在此处下沉,将表层高温度的海水带到了深水区。

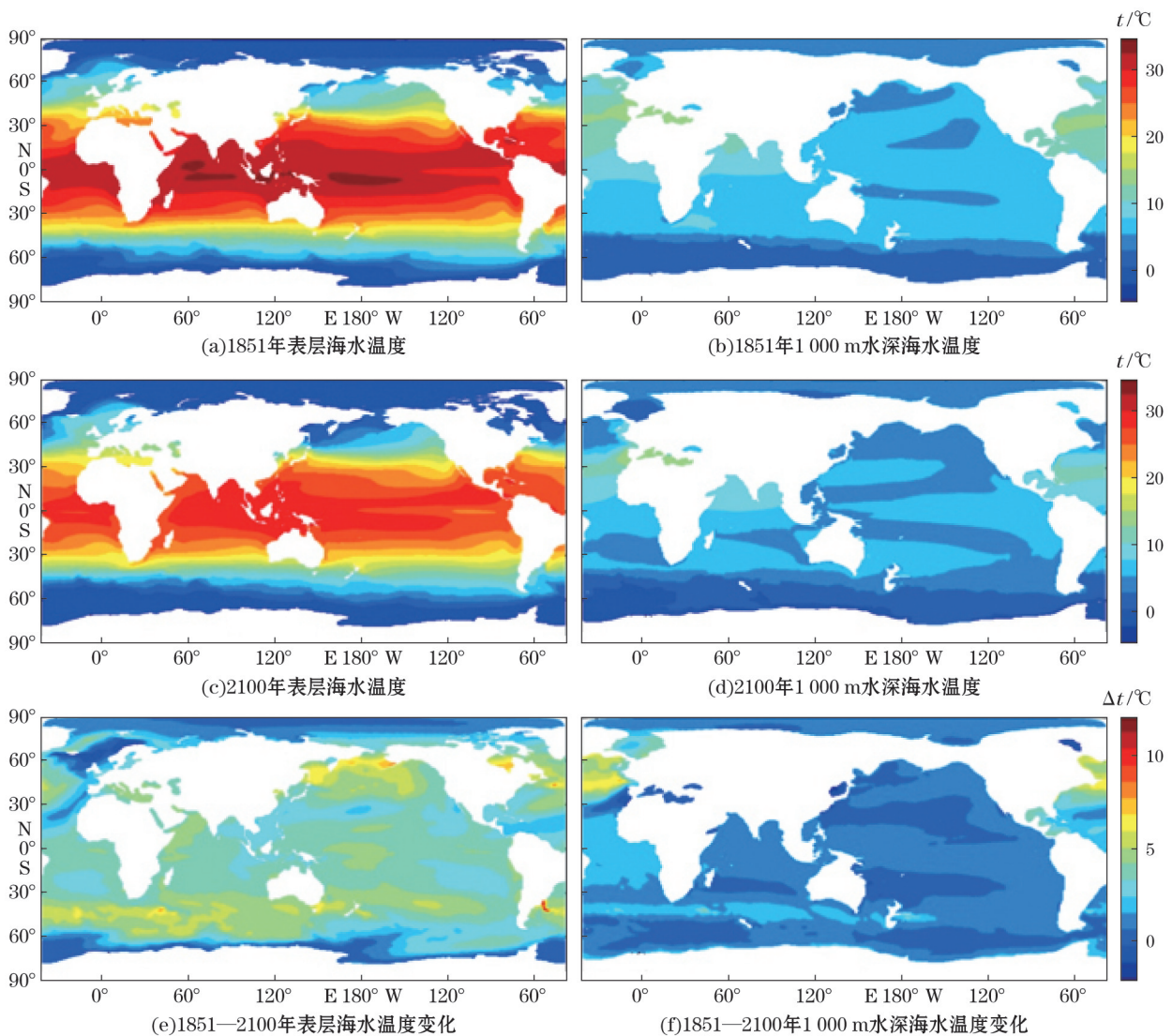


图 2 温度分布

Fig.2 Changes in the seawater temperature

图 3 给出了 1851 年和 2100 年全球海表面及 1 000 m 水深处的盐度分布,以及盐度变化分布。从图中可以看到,相较于 1851 年、2100 年的北极地区表层海水存在一个明显盐度降低现象。此变化主要由海冰融化所致。

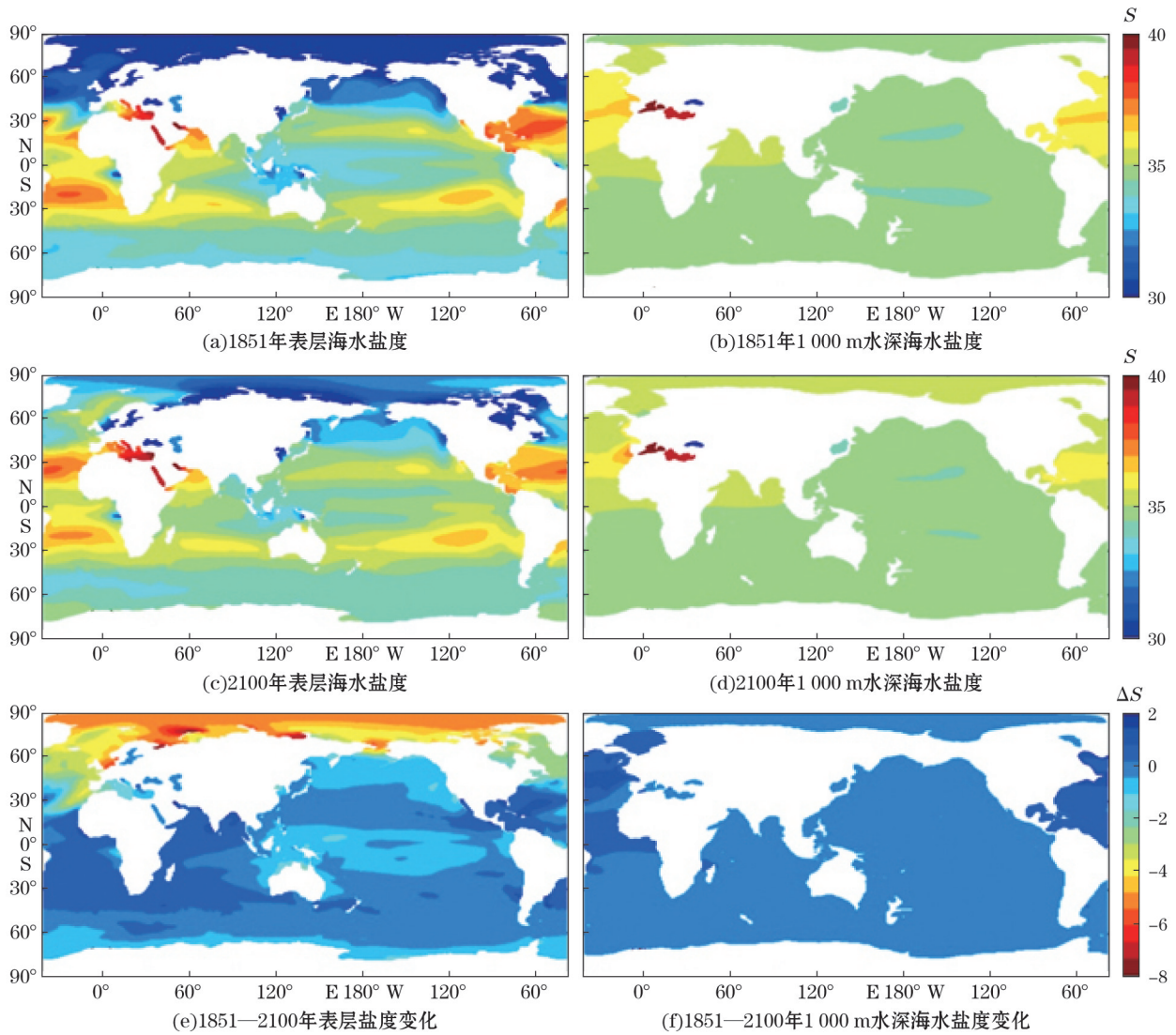


图 3 盐度分布

Fig.3 Changes in the seawater salinity

图 4 给出了 1851 年和 2100 年全球海表面及 1 000 m 水深处 pH 值分布,以及 pH 值变化的分布。从图中可以看到,相较于 1851 年,2100 年全球存在一个明显的酸化过程,部分海域表层海水的 pH 值最大可降低 0.6 个单位。1 000 m 水深处的 pH 值变化较小。

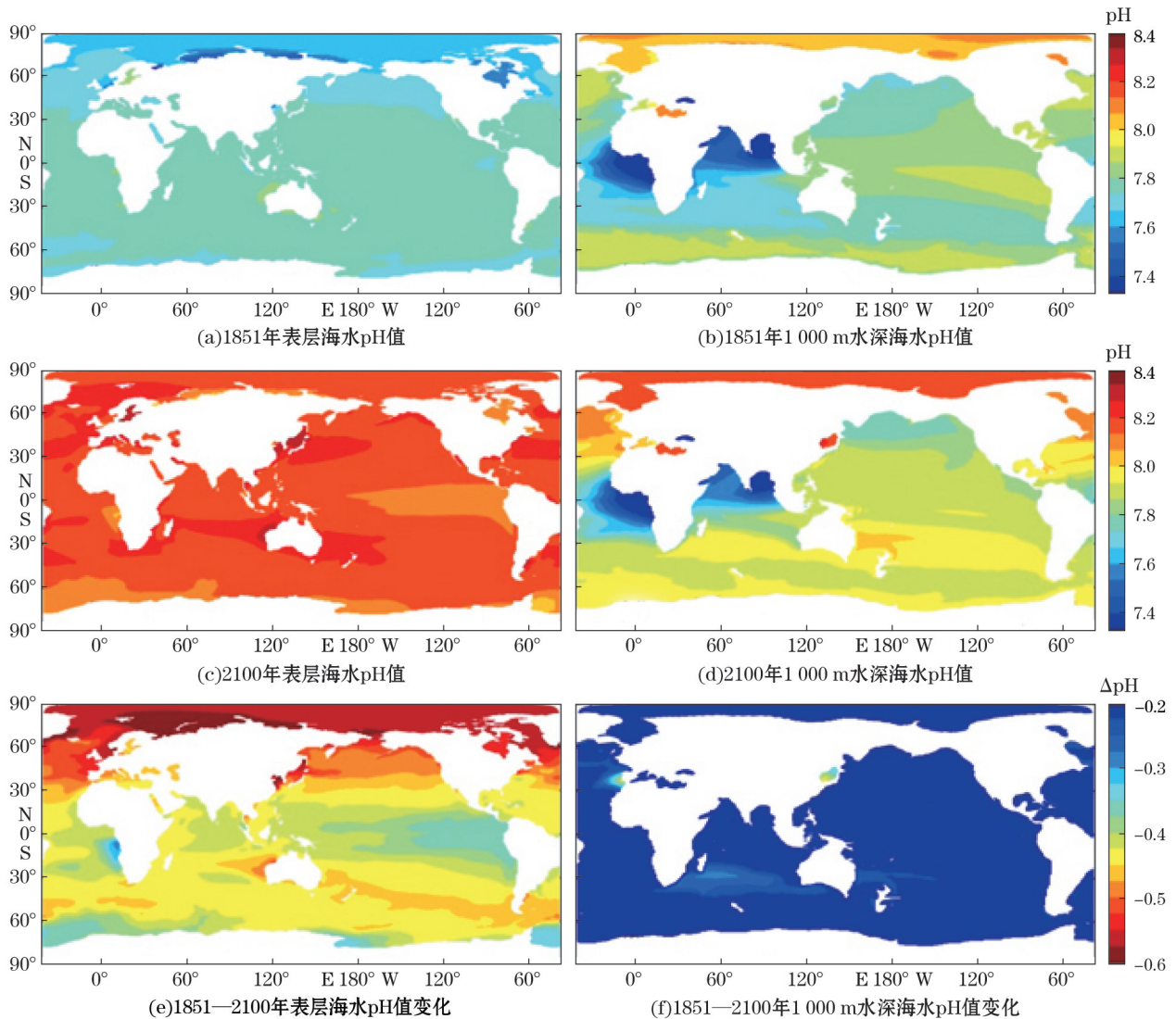


图4 pH 值分布

Fig.4 Changes in the seawater pH

2.3 全球气候变化中的声吸收系数变化情况

根据 FIO-ESM 地球系统模式的温度、盐度以及 pH 值结果,利用 Francaais-Garriso 经验公式,经过计算可以得到,1851—2100 年间海水声吸收系数变化情况。本文选取 200 Hz,3 kHz 和 30 kHz 作为典型频率计算海洋声吸收变化趋势。其中,200 Hz 属于主要的航运噪声分布频段,主动声呐和哺乳动物交流等声波频率在 3 kHz 附近,哺乳动物捕食信号则使用更高频率的 30 kHz 来代表。声波频率 200 Hz 时,表层海水声吸收系数变化百分比的分布见图 5a。从图中可以看到,相对 1851 年,2100 年由于表层海水温度升高、pH 值降低,全球范围内的表层海水声吸收系数均出现不同程度的降低,最大可达 70%。北半球的中高纬度海域和南半球的中纬度海域声吸收系数降低程度较大,南极大陆周围声吸收系数降低程度较小。通过对比 2.2 节中的图 2~图 4 可知,声波频率 200 Hz 时,声吸收系数降低程度分布特征主要由 pH 值变化控制。图 5b 给出了声波频率 3 kHz 时,表层海水声吸收系数变化取值分布。从图中可以看出,中低纬度海域的声吸收系数降低程度较大,这是由温度、盐度和 pH 值变化综合作用的结果。图 5c 给出了声波频率 30 kHz 时,表

层海水声吸收系数降低取值分布。由图可知,相较于 200 Hz 和 3 kHz,大部分海域声吸收系数降低得较小。

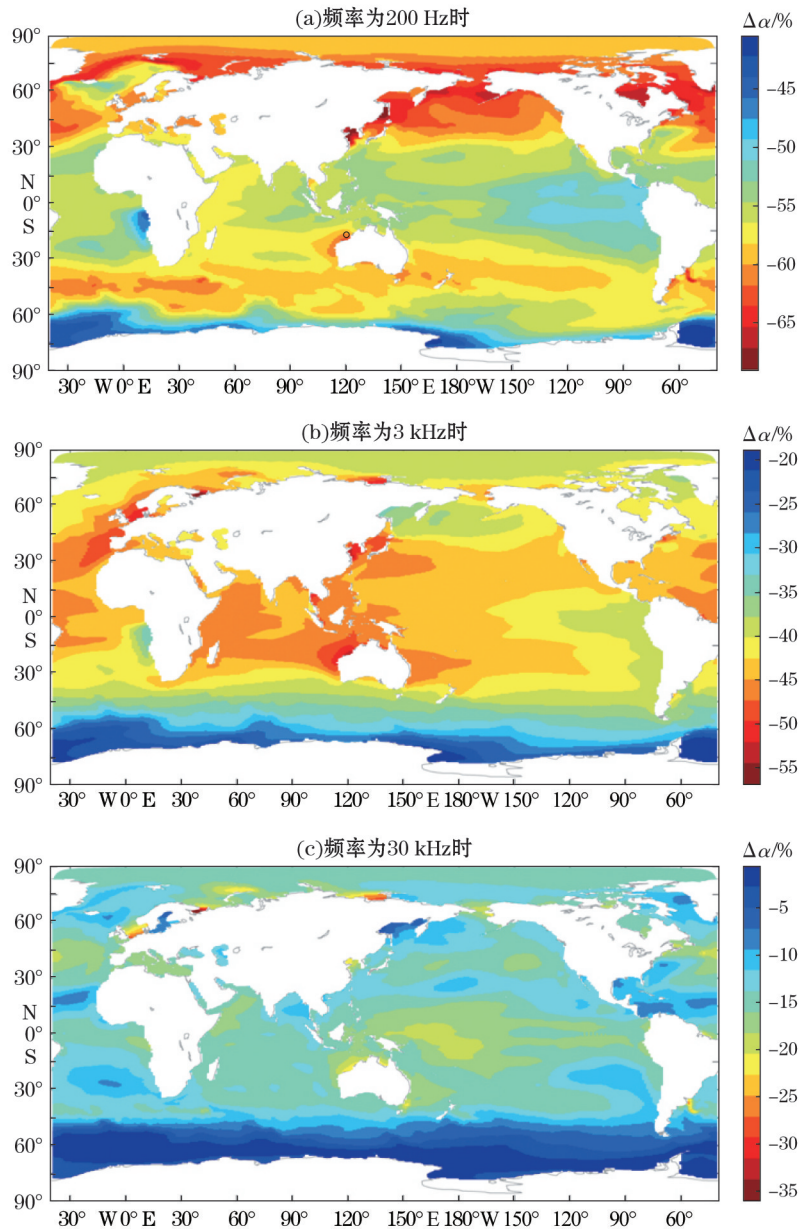


图5 频率为 200 Hz, 3 kHz 和 30 kHz 时表层海水声吸收系数变化百分比

Fig.5 The percentage of reduction in sound absorption at 200 Hz, 3 kHz and 30 kHz in the surface

如果不考虑全球变化导致的海水温度、盐度变化对声吸收系数的影响,而只考虑 pH 值变化导致的声吸收系数变化,将会带来计算误差,这里定量给出其误差分布。图 6 给出了频率为 200 Hz, 3 kHz 和 30 kHz 时表层海水只考虑 pH 值变化带来的计算误差。由图 6a 可以看出,频率为 200 Hz 时,最大计算误差可达到 50%,误差较大的区域分布在南北半球的中纬度。通过对比 2.2 节中的结果可知,导致误差的主要原因为没有考虑温度因素。频率为 3 kHz 和 30 kHz 时,误差较大的区域位于北极附近,该误差主要由没有考虑盐度的影响引起。

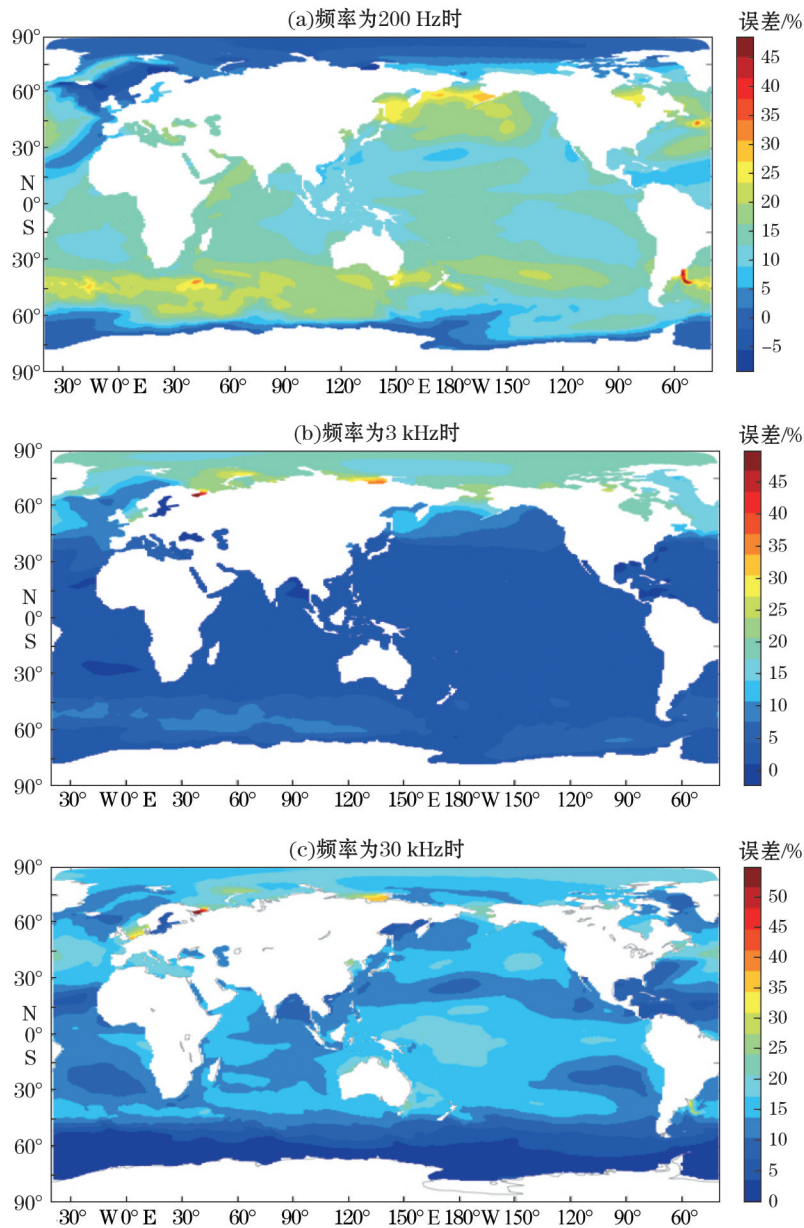


图6 频率为 200 Hz,3 kHz 和 30 kHz 时只考虑 pH 值变化导致的表层海水声吸收系数计算误差(%)
Fig.6 Computational error of the percentage of reduction in sound absorption at 200 Hz, 3 kHz and 30 kHz at the surface by the change in pH only

由 2.2 节分析可知,水深 1 000 m 处,温度、盐度和 pH 值变化较表层小,因此声吸收系数的变化也比表层小。图 7 给出了频率为 200 Hz,3 kHz 和 30 kHz 时 1 000 m 水深处海水的声吸收系数变化程度分布。由图可知,相比于表层海水,声吸收系数降低整体偏小;但是在某些具体海域,例如北大西洋区域和南半球中纬度海域等,声吸收系数降低仍然可以到 30%~40%。

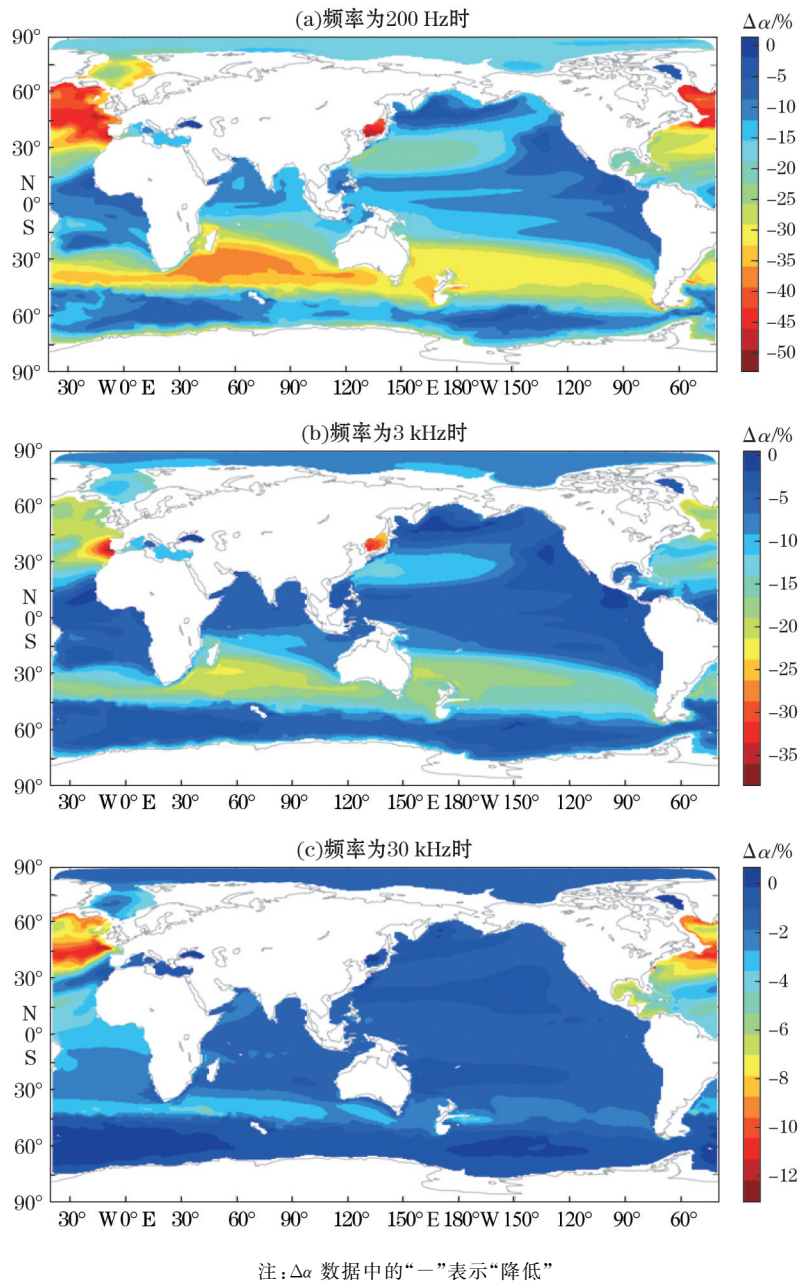


图7 频率为200 Hz, 3 kHz和30 kHz时1000 m深处海水声吸收系数变化百分比

Fig.7 Computational error of the percentage of reduction in sound absorption at 200 Hz, 3 kHz and 30 kHz at the depth of 1 000 m

选取6个具有代表性的位置点,计算1851—2100年表层海水声吸收系数的变化情况。这6个位置要么处在航道位置,要么处在全球气候变化影响较大的地方,是未来需要关注的重点声学区域。图8给出了其计算结果。由图可知,频率为200 Hz和30 kHz时,温度对声吸收系数起决定性作用;北极和北太平洋区域的声吸收系数明显比其他位置大。在3 kHz,温度对声吸收系数的影响不明显,声吸收系数主要由酸度和盐度决定。

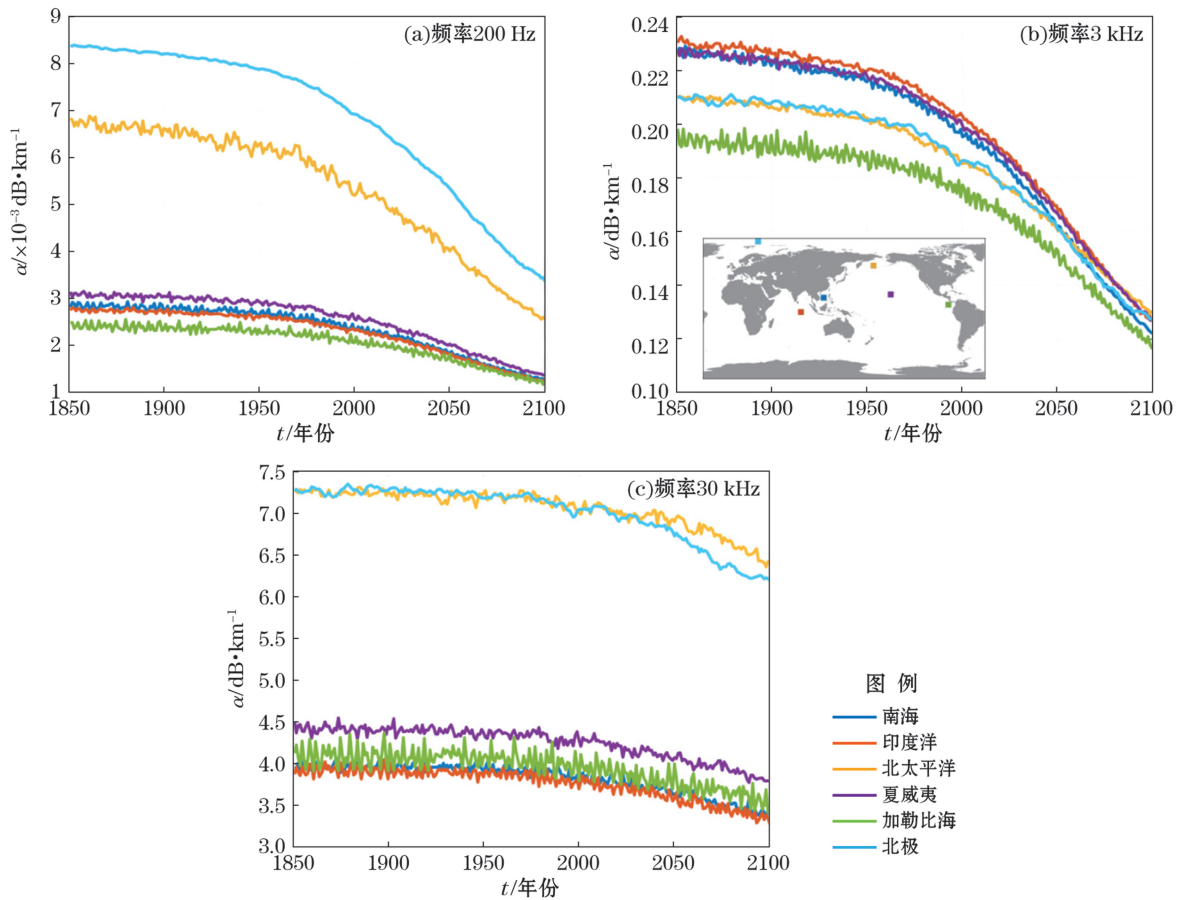


图 8 代表性区域声吸收系数变化情况

Fig.8 Temporal evolution of sound absorption coefficient in acoustic hotspots

3 结 语

本文首次综合考虑了全球气候变化中海水温度、盐度和酸度对声吸收系数的影响。计算结果表明,如果只考虑海水 pH 值变化对声吸收系数的影响,计算偏差将达到 40% 以上。利用 FIO-ESM 计算了 1851—2100 年间声吸收系数的变化情况。结果表明,在感兴趣的区域声吸收系数均出现不同程度的下降,最大可达 50% 以上。声吸收系数的降低将直接增加声传播距离,声呐的作用距离理论上可以得到提高;但是,行船等产生的噪声传播距离也更远,背景噪声级有可能升高,最终得到的声呐信噪比是提高还是降低,仍然需要进一步研究。此外,随着声吸收系数降低,海洋哺乳动物将更多地暴露在可能的人为噪声中,依靠声波来探测食物和交流的海洋哺乳动物有可能得到更大的捕食距离和活动范围。这些海洋生物的适应性也需要进一步的研究。

参考文献 (References):

[1] BINDOFF N L, WILLEBRAND J, ARTALE V, et al. Observations: oceanic climate change and sea level[C]// SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007; 386-432.

[2] MEREDITH M P, KING J C. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century

- ry[J].Geophysical Research Letters, 2005, 32(19): L19604,doi:10.1029/2005GL024042.
- [3] HESTER K C, PELTZER E T, KIRKWOOD W J, et al. Unanticipated consequences of ocean acidification: a noisier ocean at lower pH [J].Geophysical Research Letters, 2008, 35(19): L19601, doi: 10.1029/2008GL034913.
- [4] ILYINA T, ZEEBE R E, BREWER P G. Future ocean increasingly transparent to low-frequency sound owing to carbon dioxide emissions [J].Nature Geoscience, 2010, 3(1): 18-22.
- [5] JOSEPH J E, CHIU C S. A computational assessment of the sensitivity of ambient noise level to ocean acidification[J].The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 128(3): EL144-EL149.
- [6] ROUSEFF D, TANG D. Internal waves as a proposed mechanism for increasing ambient noise in an increasingly acidic ocean[J].The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(6): EL235-EL239.
- [7] FRANCOIS R E, GARRISON G R. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption[J].The Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(6): 1879-1890.
- [8] QIAO F L, SONG Z Y, BAO Y, et al. Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves[J].Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(9): 4514-4524.
- [9] QIAO F L, YUAN Y L, YANG Y Z, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: distribution and application to a global ocean circulation model[J].Geophysical Research Letters, 2004, 31(11): L11303, doi:10.1029/2004GL019824.
- [10] QIAO F L, YUAN Y L, EZER T, et al. A three-dimensional surface wave—ocean circulation coupled model and its initial testing[J]. Ocean Dynamics, 2010, 60(5): 1339-1355.
- [11] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J].Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498.
- [12] ORR J C, EPITALON J M. Improved routines to model the ocean carbonate system: mocsy 2.0[J].Geoscientific Model Development, 2015, 8(3): 485-499.

The Effect of Global Climate Change on Ocean Sound Absorption

LIU Zong-wei^{1,2,3}, BAO Ying^{1,2,3}, LÜ Lian-gang^{1,2,3}, QIAO Fang-li^{1,2,3}, SONG Zhen-ya^{1,2,3}

(1.*The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2.*Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;*

3.*Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The temperature, salinity and pH are the three key parameters that influence the sea water absorption of sound. The variations of these three parameters in the years 1851—2100 are studied based on the First Institute of Oceanography-Earth System Model (FIO-ESM) under the highest emission condition, RCP8.5. These three parameters are considered together to evaluate the evolvement of the oceanic sound absorption. The results from the FIO-ESM show that the temperatures undergo increases in various degrees for the most parts of the ocean from 1851 to 2100. Ocean acidification is significant. The salinity near the Arctic is reduced dramatically. The simulation results show that there will be a 40% relative error in the prediction if only the effect of the acidity is considered. The results also show that the sound absorption of the global ocean is reduced in various degrees, with some area decreasing as much as 70%, as the global climate change develops.

Key words: global climate change; oceanic sound absorption; Earth System Model

Received: May 10, 2016