基于 IPCC-CMIP5 的中国东部近海表层水温未来预估分析*

张翠翠[1] 魏 皓[1①] 宋贵生[1] 谢 川[2]

(1. 天津大学海洋科学与技术学院 天津 300072; 2. 上海交通大学海洋学院 上海 200240)

摘要 近海海表温度(sea surface temperature, SST)的变化对我国沿岸海洋生态环境和渔业资源具有重要影响, 研究其变化规律尤其是预估其未来变化一直是物理海洋学的重要研究课题。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告(The fifth Assessment Report, AR5)对全球及部分典型区域的未来气候变化进行了预估, 已成为全球公认的研究气候变化的科学依据。本文利用 IPCC 第五次评估报告的模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project phase 5, CMIP5)中五个具有代表性的模式(ACCESS1.3、BCC-CSM1.1、CCSM4、GFDL-ESM2G、MPI-ESM-MR), 对未来 80 年(2030、2060、2090 年)相对于 2010 年中国东部近海(渤海、黄海、东海)表层水温的年代际及季节性变化规律在 RCP4.5 气候情景下进行了预估分析。通过分析发现中国东部近海表层水温在未来 80 年内有明显升温趋势: 从年代际上看, 到 2090 年表层水温升温幅度达 1.18—1.71°C, 其中 2030—2060 年升温最快, 2060—2090 年升温速度减缓; 从季节上看, 不同海域不同季节表层水温升温幅度达 1.16—2.04°C, 中国东部近海各海区在夏季升温幅度较大, 冬季较小。

关键词 中国东部近海; 海表温度 SST; 未来海温预估分析; IPCC-CMIP5

中图分类号 P731.11 doi: 10.11693/hyhz20191200246

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告(The fifth Assessment Report, AR5)利用气候系统模式对全球及部分典型区域的未来一百年气候变化情况进行了详细预估, 已成为全球公认的研究未来气候变化的主要科学依据(Solomon, 2007)。为了使得模拟结果更加准确, IPCC 组织了第五阶段全球耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project phase 5, CMIP5), 该计划利用全球不同机构开发的模式数据对未来不同 CO_2 排放情景下(又称为典型浓度路径 RCP, 包括 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)的全球气候变化评价进行了比较。利用 CMIP5 不同模式数据对全球和典型区域未来气候变化预估已成为当前物理海洋学的研究热点之一(赵宗慈, 2009)。Giorgetta 等(2013)利用 CMIP5 中的 MPI-ESM 模式数据发现了海洋吸收热量的效率会降低大气变暖的程度, 从而使海水在未来加速升温。Heuzé 等(2015) 利用 CMIP5 中 24 个模式在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下研究了 2100 年前全球海洋底层温度、盐度和密度的变化, 发现了全球海洋底层变暖的趋势。Zhou 等(2017)利用 CMIP5 的 27 个模式结果, 对太平洋海表温度年际变化率进行了模拟, 并且预估了其在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下的未来海表温度变化。王卓越等(2019)利用 15 个 CMIP5 模式的数据对南太平洋副热带偶极子的时空变化分布进行了研究, 发现近 1/4 模式模拟的海表层水温(sea surface temperature, SST)的偶极异常大概

* 国家重点研发计划项目资助, 2017YFC1404403 号; 国家自然科学基金青年项目, 41806116 号。张翠翠, 讲师, 助理教授, E-mail: cuicui.zhang@tju.edu.cn

① 通信作者: 魏 皓, 博士生导师, 教授, E-mail: hao.wei@tju.edu.cn

收稿日期: 2019-12-03, 收修改稿日期: 2020-08-25

追溯到 6 个月之前, 且通过分析潜热通量与 SST 之间的时空分布关系, 发现影响偶极模态的主要因素是潜热通量的发展变化。Ying 等(2019)利用 32 个 CMIP5 模式的数据对冷舌现象与热带太平洋 SST 变暖之间的密切关系进行了详细分析, 对于正确理解热带太平洋 SST 变暖具有非常重要的意义。

中国东部近海气候变化对我国沿岸气候、海洋生态和渔业资源具有重要的影响。研究中国东部近海的海水温度变化对于研究中国东部近海环境和气候变化具有重要意义。利用 CMIP5 全球气候模式数据来预估未来 80 年中国东部近海的气候变化, 尤其是预估未来海温的变化, 对于做出正确的气候影响评价及决策具有非常着重要的科学意义。在现有研究中, 已有部分成果针对中国近海气候变化进行研究。王晴等(2011)利用 IPCC 中的 4 个模式(CGCM3.1(T47)、CGCM3.1(T63)、CSIRO-Mk3.0、GFDL-CM2.0)对海洋、气象要素的变化趋势进行了分析, 指出南海深水海盆近五十年持续增暖与南海海洋动力过程具有非常紧密的联系。张志华等(2012)指出中国近海海温的年代际振荡与太平洋海温变化有关, 属于海气相互作用的结果, 并非一种局地现象。黄传江等(2014)对南海二十世纪历史 SST 的变化规律进行了研究, 并且对未来的变化趋势进行了预估, 预计在未来 80 年 SST 在三种二氧化碳排放场景下(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)分别增温达到 0.42°C/(100a)、1.50°C/(100a)和 3.30°C/(100a)。Huang 等(2015)利用 24 个 CMIP5 模式的数据分别在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 场景下预估了 21 世纪末期(2081—2100 年)南中国海的海平面上升高度, 指出海平面在这三种场景下将分别上升 40.9、48.6 和 64.1cm, 为我国海防建设提供了重要的参考依据。孙侦等(2015)利用 CMIP5 模式数据对 1996—2005 年中国气温模拟精度进行了评价。谭红建等(2016)利用 CMIP5 模式数据预估了 21 世纪中国近海海表温度变化, 发现中国近海大部分海区相对于 1970—2005 年历史海温, 在 2030 年以后普遍升温接近或超过 1°C。宋春阳等(2016)利用 CMIP5 模式数据对中国近海海表温度的历史变化进行了分析, 指出 1901—2004 年中国近海海温呈现增温趋势, 且 20 世纪 80 年代以后升温趋势更加明显, 近 20 年以来, 中国近海 SST 和海平面分别上升 0.9°C 和 92mm。谭红建等(2018)利用 CMIP5 中的 IPSL-CM5A-MR 模式数据, 对未来一百年中国近海区域(渤海、黄海、东中国海和南海)的海洋环境要素包括(海温、盐度、pH 值、溶解氧和叶绿素 *a* 浓度)的空间分布及变化趋势进行了评估, 发现未来 80 年中国近海海区海温具有明显升温趋势、海水 pH 值会出现降低趋势、溶解氧(DO)含量和叶绿素 *a* 浓度会减少,其中东中国海海温在(RCP4.5 和 RCP8.5)两种情景下相对于历史时期(1980—2005 年)升温幅度可能分别会达到 2°C 和 4°C。

虽然现有研究对中国东部近海表层海温变化分析已取得一定进展, 但是主要针对中国东部近海某一海域进行的年代际变化研究。现有研究对不同海域之间年代际变化的对比分析研究尚不完整, 尤其是对不同海域的季节性变化研究不够彻底。另外, 部分研究缺乏对多个模式结果进行系统性对比分析。利用单一模式获得的预估结果有可能存在不同程度的偏差。本研究正是利用 CMIP5 的多种模式对未来中国东部近海的表层水温变化进行研究, 通过分析其未来 80 年(2030、2060、2090 年)相对于当前时期(2010 年)的年代际与季节性变化, 预估其未来变化规律。本研究首先利用高分辨率实际观测数据 WOA13 V2 对各模型进行验证, 然后利用所选择模型对中国东部近海表层水温的年代际和季节性变化进行详细分析并给出详细的空间分布, 对于研究不同海域的未来 SST 变化具有重要的意义。

由于 CMIP5 模式数据本身具有不同的偏差和不确定性, 本研究首先利用观测数据和再分析资料, 对所有 CMIP5 模式进行分析与评估, 并选出最具有代表性的模式。具体的评估标准为: (1)对于每个研究机构提供的所有模式只选择一个最新提出、分辨率高的模式; (2)所选模式需包含 2006—2099 年每年所有月份连续性模拟结果。通过评估, 我们最终选取了 5 个代表性的模式, 分别是 ACCESS1.3、BCC-CSM1.1、CCSM4、GFDL-ESM2G、和 MPI-ESM-MR。为了进一步提高预估的准确性, 我们还采用多模式集合平均的方法研究下中国东部近海表层水温的未来发展规律。

1　数据与方法

本研究利用在RCP4.5情景下选择了CMIP5中5个代表性模式的输出结果研究中国东部近海SST的变化。选择2010年作为当前气候状态, 2030年、2060年、2090年作为未来气候状态。为了减小各模式本身存在的模拟偏差, 我们利用2006—2015年的平均来替代2010年的模拟结果, 与之类似, 用2026—2035年、

2056—2065年、2086—2095年的平均来分别替代2030、2060、2090年的模拟结果。未来情景模拟试验是指在不同的CO_2等温室气体排放速度下(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5), 模拟由于人类活动导致温室气体增加而引起的全球变暖等气候变化。RCP4.5是指在中等排放浓度情景下产生的模拟结果, 也就是按照当前人类活动产生的温室气体的排放速度模拟的结果, 相比较RCP2.6(偏低)和RCP8.5(偏高), RCP4.5的模拟结果更加适中且接近于目前的情况(谭红建等, 2016)。模式详细信息见表1, 不同海域经纬度范围取值见表2。

表 1 CMIP5 数据模型信息
Tab.1 CMIP5 data model list

模型	区域	平均分辨率
ACCESS1.3(澳大利亚国立大学)	77.9°N—65.2°S, 0.5°E—359.5°E	0.3° (lat)×1.0° (lon)
BCC-CSM1.1(中国国家气候中心)	81.5N—89.5S, 295.5°W—79.5°E	1.0° (lat)×1.0° (lon)
CCSM4(美国国家大气研究中心)	79.2°N—89.7°S, 1.1°E—359.9°E	0.5° (lat)×0.9° (lon)
GFDL-ESM2G(美国普林斯顿大学)	76.8°N—89.8°S, 279.5°W—79.5°E	0.5° (lat)×1.0° (lon)
MPI-ESM-MR(德国马普研究所)	78.7°N—89.8°S, 0.0°E—360.0°E	0.1° (lat)×0.1° (lon)

表 2 各海区经纬度范围
Tab.2 Geographic coordination of each sea area

海域	纬度	经度
渤海	37°—41°N	117°—122°E
黄海	32°—39°N	119°—126°E
东海	23°—33°N	118°—130°E

2 模型验证

本研究利用 2010 年的实际观测数据 WOA13 V2 对所选模式进行验证。WOA13 数据是来自 NOAA 的国家海洋数据中心海洋气候实验室的数据产品。该数据集包含全球多种海洋要素数据, 分为年平均和月平均数据, 空间分辨率包括 0.5°、1°、0.25°。在本研究中, 我们利用 2005—2012 计算得到的月平均数据作为 2010 年数据。模型验证结果如表 3 所示。通过模型验证结果, 我们发现在五个模型相对于实测数据都有一定的误差, 但是误差范围都不大, 均可以用于后续的 SST 未来预估研究, 其中德国马普研究所的 MPI-ESM-MR 模型预测结果与 WOA13 V2 现场观测结果比较接近且分辨率最高, 在后面 SST 空间分布预估分析中, 我们将利用 MPI-ESM-MR 模型结果对未来中国东部陆架海的海温空间分布进行全面分析。

表 3 CMIP5 模式数据与实际观测数据 WOA13 V2 在 2010 年对表层水温模拟结果的差异(单位: °C)
Tab.3 Difference between CMIP5 mode data and actual observation data WOA13 V2 simulation results of SST in 2010 (unit: °C)

数据来源		全年平均	春季	夏季	秋季	冬季
WOA13 V2		18.08	16.79	25.79	18.54	11.19
CMIP5 模型误差	ACCESS1.3	–0.67	–1.49	–2.42	0.60	0.62
	BCC-CSM1.1	0.35	–0.68	–0.77	1.87	0.92
	CCSM4	0.33	–0.77	–0.14	1.49	0.72
	GFDL-ESM2G	0.47	–0.53	–0.25	1.53	0.73
	MPI-ESM-MR	0.15	–0.96	–0.80	1.65	0.72

注: WOA13 V2: 世界海洋数据集第 2 版; ACCESS1.3: 澳大利亚国立大学模式; BCC-CSM1.1: 中国国家气候中心模式; CCSM4: 美国国家大气研究中心模式; GFDL-ESM2G: 美国普林斯顿大学模式; MPI-ESM-MR: 德国马普研究所模式

3 试验及结果分析

试验内容主要为中国东部近海未来 SST 变化的预估, 主要研究其在未来 80 年(2030、2060、2090 年)相对于当前水温(2010 年)的年际与季节变化。我们首先对渤海、黄海、东海的年际变化进行研究, 然后对

每个海域的季节变化进行研究。

3.1 各模式对中国东部近海未来 SST 变化量及变化率的预估

表 4 和图 1 展示了各模式对中国东部近海(渤海、黄海、东海)在 2010、2030、2060、和 2090 年的年平均 SST(表 4 上半部分, 图 1a—c)和 2030、2060 和 2090 年相对于 2010 年的 SST 变化量以及年际变化率的值(表 4 下半部分, 图 1d—f)。其中, 变化率分别用 2030—2010、2060—2030、2090—2060 年的变化量除以相应的年份数。变化量是为了反映未来 SST 相对于当前年份的年代际变化, 变化率是为了更好的反映 SST 的年际变化率。在图 1 中, 红色的水平折线代表五个模型的平均值, 竖直的红线代表五个模型与平均值之间的最大、最小差异(error bar, 用右侧纵坐标表示)。通过表 4 和图 1 我们发现渤海、黄海和东海在未来 80 年 SST 均有明显升温趋势: 2010—2030 年, 各海区 SST 平均升温 0.39—0.44°C, 其中东海升温幅度最大、渤海最小; 2010—2060 年, 各海区 SST 平均升温 1.03—1.42°C, 其中黄海升温幅度最大、东海最小; 2010—2090 年, 中国东部近海各海区 SST 平均升温 1.18—1.71°C, 其中渤海升温幅度最大、东海最小。

从各年份变化率来看, 中国东部近海各海区 2030—2060 年 SST 年际变化率最高, 2060—2090 年升温速度减缓(部分模型甚至出现负增长的情况)。渤海和黄海 2030—2060 年期间温度年变化率最大, 升温最明显; 东海 2010—2030 年期间温度年变化率最大, 升温最明显。

为了更好地研究未来 SST 及其变化的空间分布, 我们利用空间分辨率最高的 MPI-ESM-MR 模拟结果绘制出中国东部陆架海在 2030、2060、2090 年及其相对于 2010 年的 SST 变化分布, 如图 2 所示。我们发现 2030 年相比 2010 年, 在东海海域, 尤其是江苏沿岸海域和济州岛西南部海域升温明显; 到 2060 年, 中国东部陆架海均出现不同程度的升温, 其中在长江入海口附近和东海东南部升温最为明显; 到 2090 年中国东部陆架海出现全面程度升温, 其中东海中部和东部海域升温幅度最大, 而在长江入海口附近海域升温幅度较低, 甚至出现降温。

表 4 各模式对中国东部近海(渤海、黄海、东海)未来 **SST(°C)**、**SST** 变化量**(°C)**及变化率**(°C/a)**的预估**(**分为年代际和平均**)**
Tab.4 Decadal projection of future SST (°C) and SST (°C) changes and the change rates (°C/a) in coastal seas east of China (Bohai, Yellow Sea, and East China Sea) in five models (including decadal and average)

模型	海区	2010 年 SST	2030 年 SST	2060 年 SST	2090 年 SST	2030—2010 年变化量	2030—2010 年变化率	2060—2010 年变化量	2060—2030 年变化率	2090—2010 年变化量	2090—2060 年变化率
	渤海	10.96	11.40	13.37	13.87	0.44	0.021	2.41	0.064	2.91	0.016
ACCESS1.3	黄海	12.47	12.94	14.76	15.29	0.47	0.022	2.29	0.059	2.82	0.017
	东海	22.46	23.18	24.08	24.60	0.71	0.034	1.61	0.029	2.13	0.017
	渤海	11.05	11.69	12.29	12.74	0.64	0.031	1.24	0.019	1.69	0.015
BCC-CSM1.1	黄海	12.20	12.89	13.48	13.91	0.69	0.033	1.28	0.019	1.71	0.014
	东海	22.15	22.45	23.05	23.04	0.30	0.014	0.90	0.020	0.89	–0.001
	渤海	12.72	12.79	14.05	14.00	0.07	0.003	1.33	0.041	1.28	–0.002
CCSM4	黄海	14.29	14.39	15.71	15.59	0.10	0.005	1.42	0.043	1.30	–0.004
	东海	23.65	23.93	24.62	24.70	0.27	0.013	0.96	0.022	1.05	0.003
	渤海	12.56	13.09	13.70	13.89	0.53	0.026	1.15	0.020	1.34	0.006
GFDL-ESM2G	黄海	13.55	14.06	14.72	14.80	0.51	0.024	1.17	0.021	1.25	0.003
	东海	22.18	22.60	22.99	22.93	0.41	0.020	0.80	0.013	0.75	–0.002
	渤海	13.62	13.89	14.49	14.93	0.27	0.013	0.87	0.019	1.32	0.015
MPI-ESM-MR	黄海	14.67	14.94	15.61	16.03	0.26	0.013	0.94	0.022	1.36	0.014
	东海	23.36	23.84	24.21	24.45	0.48	0.023	0.85	0.012	1.09	0.008
	渤海	12.18	12.57	13.58	13.89	0.39	0.019	1.40	0.033	1.71	0.010
模式平均	黄海	13.44	13.84	14.85	15.13	0.41	0.019	1.42	0.033	1.69	0.009
	东海	22.76	23.20	23.79	23.94	0.44	0.021	1.03	0.019	1.18	0.005

注: 表格中“–”表示变化量或变化率为负, 即随着时间递增, 温度下降

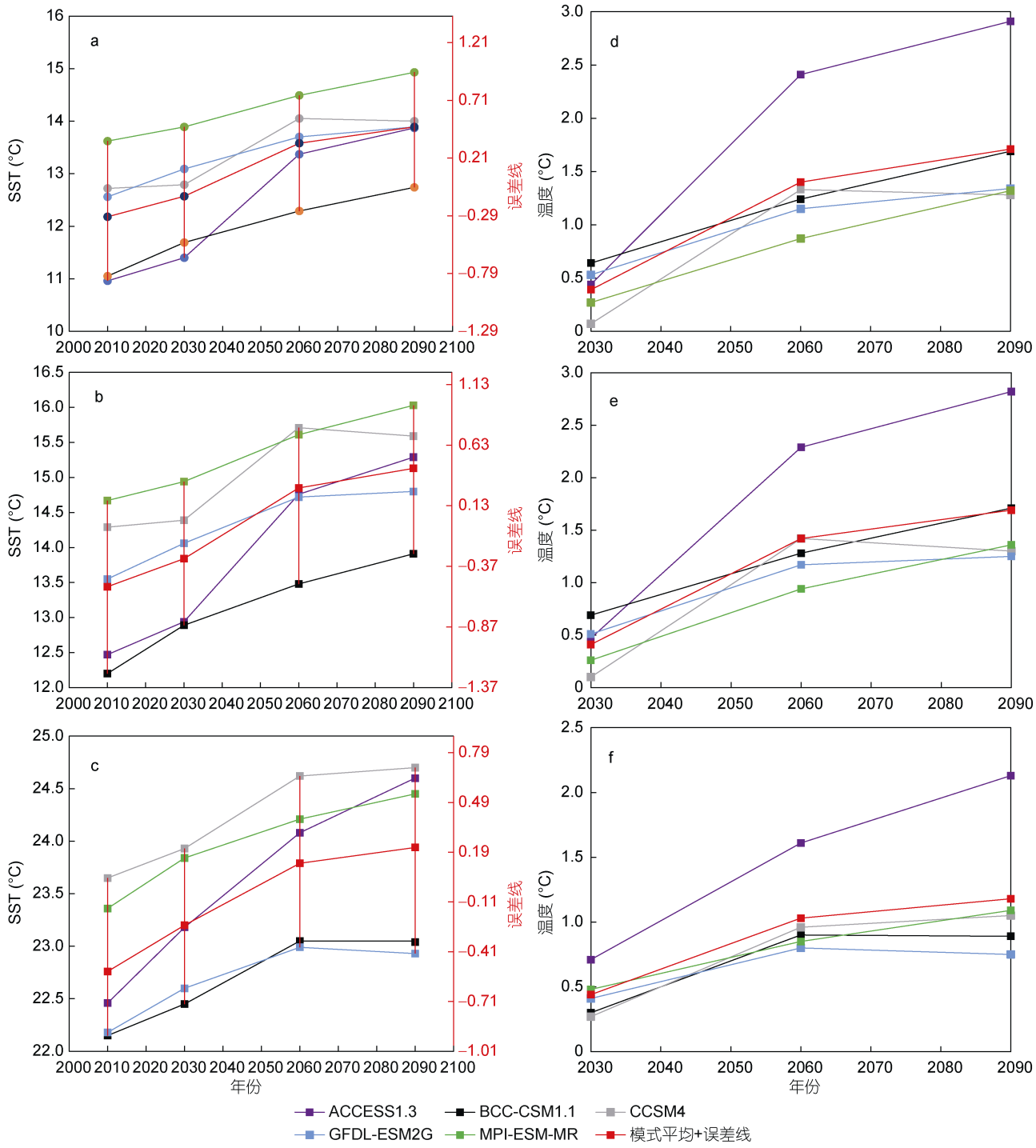


图 1 各模式对中国东部近海未来海表层水温(sea surface temperature, SST)及其变化量的年代际预估

Fig.1 Decadal projection of future SST and its changes in coastal seas east of China

注: a—c: 渤海、黄海、东海的 SST 预估; d—f: 渤海、黄海、东海在 2030、2060、2090 年相对于 2010 年的 SST 变化预估

3.2 各模式对未来渤海在不同季节 SST 变化量及变化率的预估

表 5 和图 3 分别展示了各模式对渤海在 2030、2060、2090 年四个季节 SST 的值(表 5 上半部分, 图 3a—d)和 2030、2060、2090 年相对于 2010 年四个季节 SST 的变化量及变化率的值(表 5 下半部分, 图 3e—h)。通过表 4 和图 2 我们发现未来渤海 SST 每个季节的变化趋势与年际变化保持一致, 在未来 80 年具有明显的升温趋势: 从 2010 年到 2030 年, 各季节渤海 SST 平均升温 0.33—0.43°C, 其中夏季升温幅

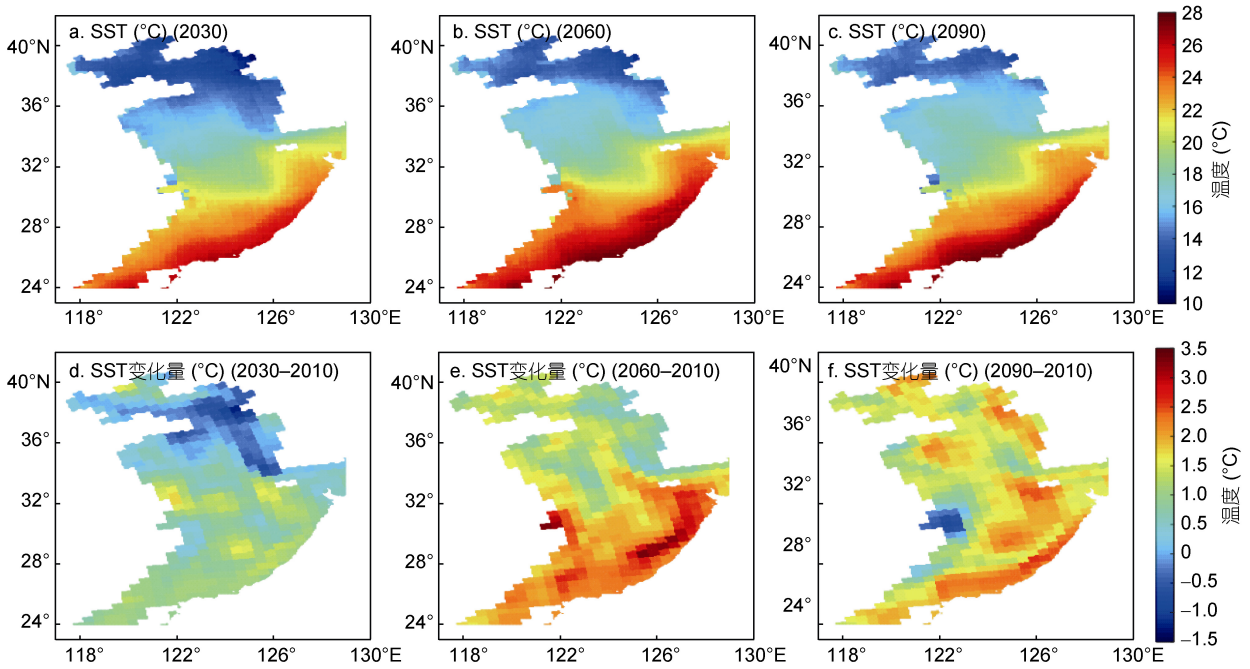


图 2　利用 MPI_ESM_MR 预估的 2030、2060、2090 年相对于 2010 年的中国东部近海 SST 变化图

Fig.2　Decadal projection of future SST in 2030, 2060, 2090 and its changes relative to that in 2010 in coastal seas east of China using MPI_ESM_MR

表 5　各模式对未来渤海在春、夏、秋、冬季 SST 变化量(°C)及变化率(°C/a)的预估

Tab.5　The projection of Bohai SST changes (°C) and change rate (°C/a) in the four seasons

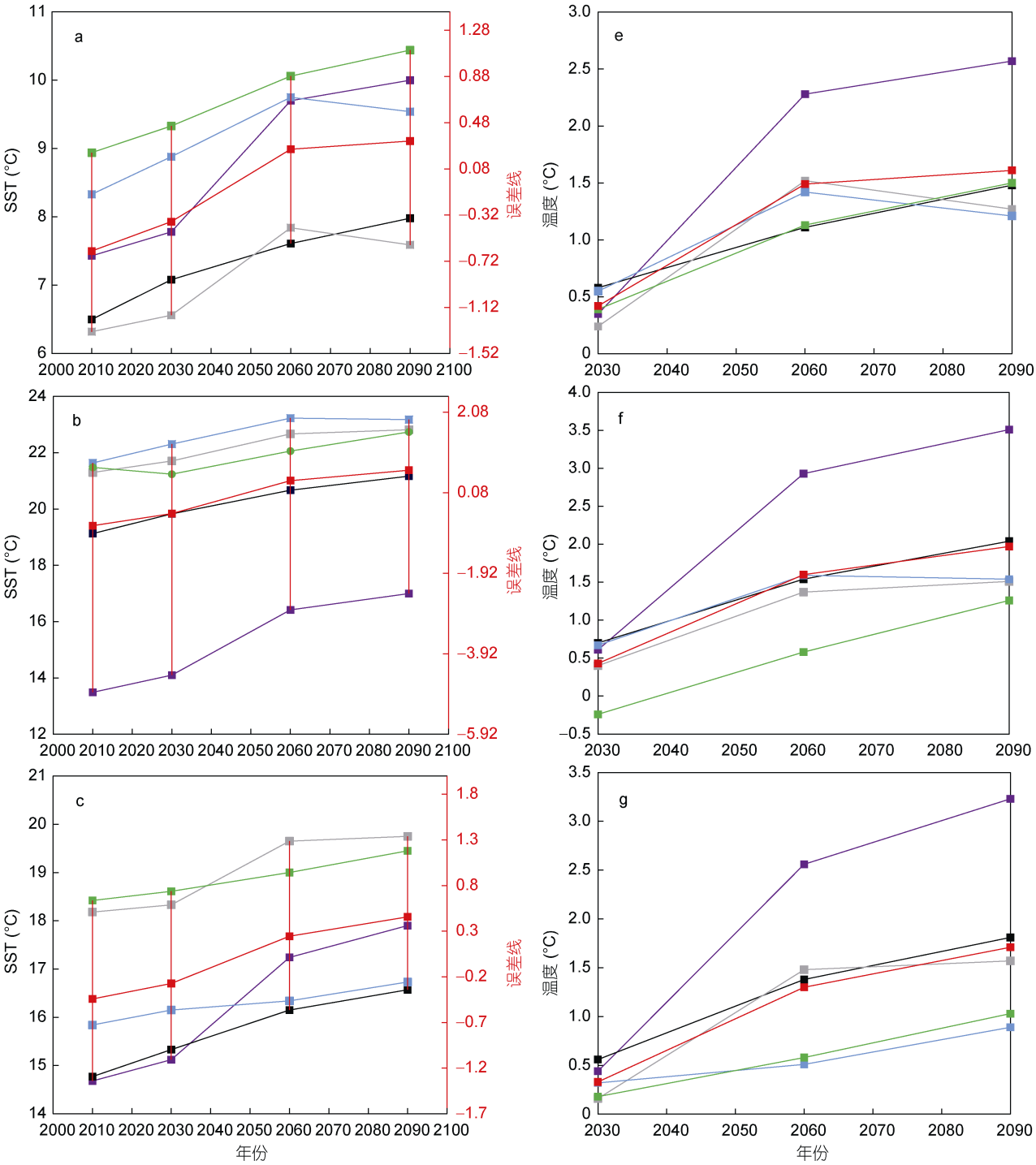
模型	季节	2030 年 SST	2060 年 SST	2090 年 SST	2030—2010 年变化量	2030—2010 年变化率	2060—2010 年变化量	2060—2030 年变化率	2090—2010 年变化量	2090—2060 年变化率
ACCESS1.3	春	7.78	9.70	10.00	0.35	0.017	2.28	0.062	2.57	0.010
	夏	14.10	16.42	17.00	0.61	0.029	2.93	0.075	3.51	0.019
	秋	15.12	17.24	17.90	0.44	0.021	2.56	0.068	3.23	0.021
	冬	8.59	10.11	10.58	0.34	0.016	1.86	0.049	2.34	0.015
BCC-CSM1.1	春	7.08	7.61	7.98	0.58	0.028	1.11	0.017	1.48	0.012
	夏	19.83	20.67	21.17	0.70	0.033	1.54	0.027	2.04	0.016
	秋	15.33	16.15	16.57	0.56	0.027	1.38	0.027	1.81	0.014
	冬	4.52	4.72	5.24	0.73	0.035	0.94	0.007	1.45	0.017
CCSM4	春	6.56	7.84	7.59	0.24	0.012	1.52	0.041	1.27	–0.008
	夏	21.71	22.67	22.82	0.40	0.019	1.37	0.031	1.51	0.005
	秋	18.33	19.65	19.75	0.16	0.007	1.48	0.043	1.57	0.003
	冬	4.56	6.04	5.82	–0.52	–0.025	0.96	0.048	0.74	–0.007
GFDL-ESM2G	春	8.88	9.75	9.54	0.55	0.026	1.42	0.028	1.21	–0.007
	夏	22.31	23.23	23.18	0.67	0.032	1.59	0.030	1.54	–0.002
	秋	16.15	16.34	16.73	0.32	0.015	0.51	0.006	0.89	0.013
	冬	5.03	5.49	6.13	0.61	0.029	1.07	0.015	1.71	0.021
MPI-ESM-MR	春	9.33	10.06	10.44	0.39	0.019	1.13	0.024	1.50	0.012
	夏	21.24	22.06	22.74	–0.24	–0.011	0.58	0.026	1.26	0.022
	秋	18.61	19.00	19.45	0.18	0.009	0.58	0.013	1.03	0.014
	冬	6.38	6.82	7.11	0.75	0.036	1.18	0.014	1.47	0.009
模式平均	春	7.93	8.99	9.11	0.42	0.020	1.49	0.034	1.61	0.004
	夏	19.84	21.01	21.38	0.43	0.020	1.60	0.038	1.97	0.012
	秋	16.70	17.68	18.08	0.33	0.016	1.30	0.031	1.71	0.013
	冬	5.82	6.63	6.98	0.38	0.018	1.20	0.027	1.54	0.011

注：表格中“–”表示变化量或变化率为负，即随着时间递增，温度下降

度最大、秋季最小；从 2010 年到 2060 年，各季节渤海 SST 平均升温 1.20—1.60°C,其中夏季升温幅度最大、冬季最小；从 2010 年到 2090 年，各季节渤海 SST 平均升温 1.54—1.97°C,其中夏季升温幅度最大、冬季最小。从各年份变化率来看，渤海各季节从 2030 年到 2060 年 SST 变化率最大，从 2060 年到 2090 年变化不明显，升温速度非常缓慢。

3.3 各模式对未来黄海在不同季节 SST 变化量及变化率的预估

表 6 和图 4 展示了各模式对黄海在 2030、2060、2090 年四个季节 SST 的值(表 6 上半部分，图 4a—d)和 2030、2060、2090 年相对于 2010 年四个季节变化量及变化率的预估(表 6 下半部分，图 4e—h)。通过表 6 和图 4 我们发现未来黄海 SST 季节性变化与年际变



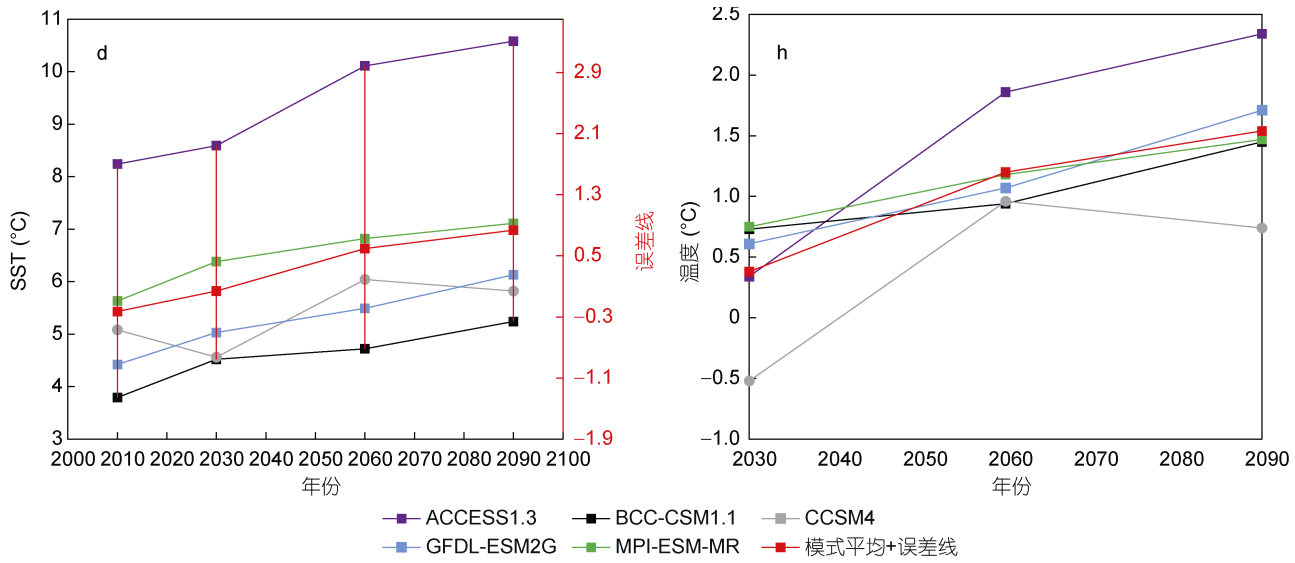


图 3　各模式对未来渤海在春、夏、秋、冬季 SST 及其变化量的预估

Fig.3　Projection of SST and its seasonal changes in the future of Bohai area

注: a—d: 各模式对渤海春、夏、秋、冬四个季节未来 SST 的预估; e—h: 各模式对渤海春、夏、秋、冬四个季节未来 SST 变化量的预估

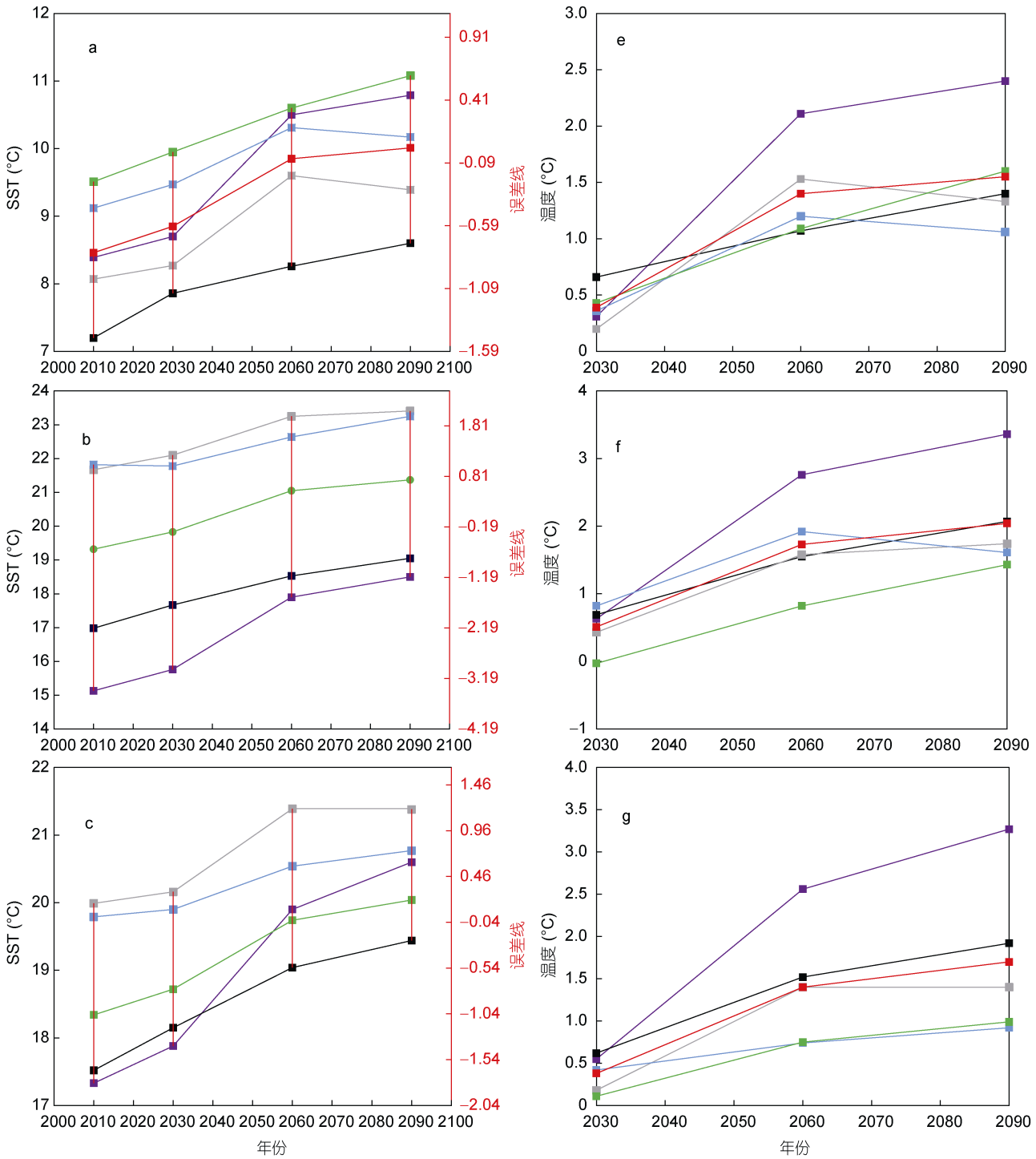
表 6　各模式对未来黄海在春、夏、秋、冬季 **SST** 变化量(°C)及变化率(°C/年)的预估

Tab.6　The projection of Yellow Sea SST changes (°C) and change rate (°C/a) in the four seasons

模型	季节	2030 年 SST	2060 年 SST	2090 年 SST	2030—2010 年变化量	2030—2010 年变化率	2060—2010 年变化量	2060—2030 年变化率	2090—2010 年变化量	2090—2060 年变化率
ACCESS1.3	春	8.70	10.50	10.79	0.31	0.015	2.11	0.058	2.40	0.009
	夏	15.76	17.90	18.50	0.63	0.03	2.76	0.069	3.36	0.019
	秋	17.88	19.90	20.60	0.55	0.026	2.56	0.065	3.27	0.023
	冬	9.41	10.74	11.28	0.39	0.018	1.71	0.043	2.26	0.018
BCC-CSM1.1	春	7.86	8.26	8.60	0.66	0.031	1.07	0.013	1.40	0.011
	夏	17.67	18.53	19.05	0.69	0.033	1.55	0.028	2.07	0.017
	秋	18.15	19.04	19.44	0.62	0.030	1.52	0.029	1.92	0.020
	冬	7.87	8.07	8.56	0.77	0.037	0.97	0.006	1.46	0.016
CCSM4	春	8.27	9.60	9.39	0.20	0.010	1.53	0.043	1.33	–0.007
	夏	22.10	23.25	23.41	0.43	0.02	1.58	0.037	1.74	0.005
	秋	20.16	21.39	21.38	0.18	0.008	1.40	0.04	1.40	–0.001
	冬	7.02	8.58	8.16	–0.42	–0.020	1.15	0.051	0.73	–0.014
GFDL-ESM2G	春	9.47	10.31	10.17	0.36	0.017	1.20	0.027	1.06	–0.004
	夏	21.84	22.93	22.62	0.82	0.039	1.92	0.035	1.61	–0.010
	秋	17.50	17.82	18.00	0.42	0.020	0.74	0.010	0.92	0.006
	冬	7.43	7.80	8.42	0.43	0.021	1.81	0.012	1.43	0.020
MPI-ESM-MR	春	9.95	10.60	11.08	0.43	0.021	1.09	0.021	1.60	0.016
	夏	21.78	22.64	23.25	–0.03	–0.002	0.82	0.028	1.43	0.020
	秋	19.90	20.54	20.77	0.11	0.005	0.75	0.021	0.99	0.008
	冬	8.13	8.67	9.01	0.55	0.026	1.09	0.018	1.44	0.011
模式平均	春	8.85	9.85	10.01	0.39	0.019	1.40	0.032	1.55	0.005
	夏	19.83	21.05	21.37	0.51	0.024	1.73	0.039	2.04	0.010
	秋	18.72	19.74	20.04	0.38	0.018	1.40	0.033	1.70	0.010
	冬	7.97	8.77	9.09	0.35	0.016	1.15	0.026	1.46	0.010

注: 表格中“–”表示变化量或变化率随着时间递增, 温度下降

化保持一致，在未来一百年每个季节均具有明显的升温趋势：从 2010 年到 2030 年，各季节黄海 SST 平均升温 0.35—0.51°C，其中夏季升温幅度最大、冬季最小；从 2010 到 2060 年，各季节平均升温 1.15—1.73°C,其中夏季升温幅度最大、冬季最小；从 2010 到 2090 年，各季节平均升温 1.46—2.04°C，其中夏季升温最大、冬季最小。从年际变化率来看，与渤海一样，黄海各季节从 2030 年到 2060 年 SST 变化率最大，2060 年到 2090 年升温减缓，变化不明显。



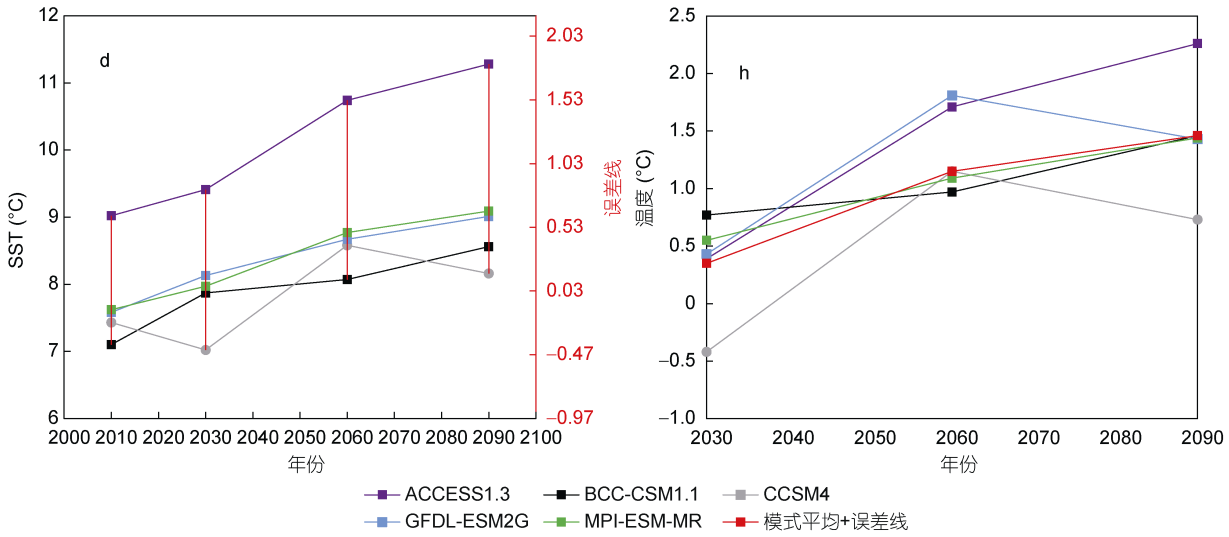


图 4　各模式对未来黄海在春、夏、秋、冬季 SST 及其变化量的预估

Fig.4　Projection of seasonal SST and its changes in the Yellow Sea

注: a—d: 黄海在春、夏、秋、冬季未来 SST 的预估; e—h: 黄海在春、夏、秋、冬季未来 SST 变化量的预估

3.4　各模式对未来东海在不同季节 SST 变化量及变化率的预估

表 7 和图 5 分别展示了各模式对东海在 2030、2060、2090 年四个季节 SST 的值(表 7 上半部分, 图 5a—d)和 2030、2060、2090 年相对于 2010 年四个季节变化量及变化率的预估(表 7 下半部分, 图 5e—h)。

表 7　各模式对未来东海在春、夏、秋、冬季 **SST** 变化量(**°C**)及变化率(**°C**/年)的预估

Tab.7　The projection of East China Sea SST changes (°C) and change rate (°C/a) in the four seasons

模型	季节	2030 年 SST	2060 年 SST	2090 年 SST	2030—2010 年变化量	2030—2010 年变化率	2060—2010 年变化量	2060—2030 年变化率	2090—2010 年变化量	2090—2060 年变化率
ACCESS1.3	春	20.69	21.70	22.07	0.65	0.031	1.67	0.033	2.03	0.012
	夏	25.65	26.96	27.37	0.56	0.027	1.87	0.042	2.28	0.013
	秋	25.72	26.59	27.11	0.83	0.040	1.70	0.028	2.22	0.017
	冬	20.64	21.07	21.84	0.80	0.038	1.22	0.014	1.99	0.025
BCC–CSM1.1	春	19.49	19.95	19.88	0.40	0.019	0.87	0.015	0.80	–0.002
	夏	25.76	26.63	26.62	0.03	0.002	0.91	0.028	0.90	–0.001
	秋	25.40	26.06	25.96	0.41	0.019	1.07	0.022	0.96	–0.003
	冬	19.15	19.56	19.70	0.35	0.017	0.76	0.013	0.89	0.004
CCSM4	春	21.29	22.00	22.18	0.23	0.011	0.94	0.023	1.13	0.006
	夏	28.02	28.45	28.74	0.27	0.013	0.69	0.014	0.98	0.010
	秋	26.68	27.24	27.39	0.50	0.024	1.06	0.018	1.21	0.005
	冬	19.72	20.78	20.50	0.09	0.005	1.16	0.034	0.88	–0.009
GFDL–ESM2G	春	19.40	19.83	19.68	0.57	0.027	1.00	0.014	0.85	–0.005
	夏	27.52	28.07	27.67	0.63	0.030	1.18	0.018	0.78	–0.013
	秋	24.90	25.33	25.33	0.07	0.003	0.50	0.014	0.50	0
	冬	18.57	18.71	19.03	0.39	0.019	0.53	0.005	0.86	0.01
MPI–ESM–MR	春	20.80	21.19	21.58	0.36	0.017	0.75	0.013	1.15	0.013
	夏	28.10	28.27	28.46	0.74	0.035	0.91	0.005	1.10	0.006
	秋	26.52	27.03	27.02	0.40	0.019	0.92	0.017	0.90	–0.001
	冬	19.95	20.34	20.73	0.43	0.020	0.81	0.013	1.20	0.013
模式平均	春	20.33	20.93	21.08	0.44	0.021	1.04	0.020	1.19	0.005
	夏	27.01	27.68	27.77	0.45	0.021	1.11	0.021	1.21	0.003
	秋	25.84	26.45	26.56	0.44	0.021	1.05	0.020	1.16	0.004
	冬	19.61	20.09	20.36	0.41	0.020	0.90	0.016	1.17	0.009

注: 表格中“–”表示变化量或变化率随着时间递增, 温度下降

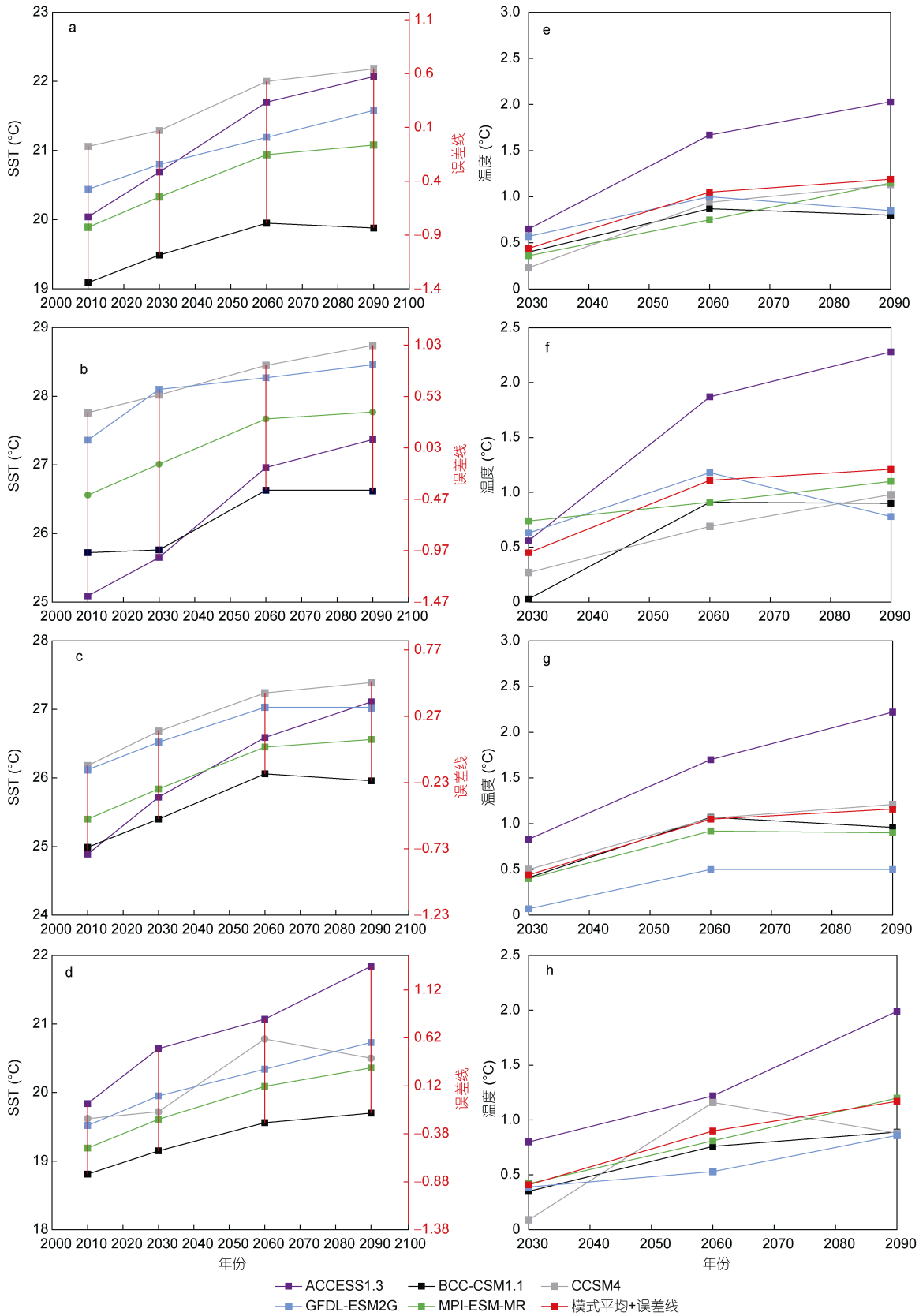


图 5 各模式对未来东海在春、夏、秋、冬季 SST 及其变化量的预估

Fig.5 Projection of seasonal SST and its changes in the East China Sea

注: a—d: 东海在春、夏、秋、冬季未来 SST 的预估; e—h: 东海在春、夏、秋、冬季未来 SST 变化量的预估

我们发现未来东海 SST 每个季节的变化与年际变化保持一致, 在未来 80 年具有明显升温趋势: 2010—2030 年, 各季节东海 SST 平均升温 0.41—0.45°C, 其中夏季升温幅度最大、冬季最小; 2010—2060 年, 各季节升温 0.9—1.11°C,其中夏季升温幅度最大、冬季最小; 2010—2090 年, 各季节升温 1.16—1.21°C,其中夏季升温幅度最大、秋季最小。从年际变化率来看, 东海各季节 2010—2030 年和 2030—2060 年的 SST 变化率均比较大, 两者未有明显差别, 2060—2090 年升温减缓, 变化不明显。

4　结论

本文主要对中国东部近海(渤海、黄海、东海)在未来 80 年(2030、2060、2090 年)相对于 2010 年表层水温的年代际及季节性变化进行了预估。通过分析, 我们发现, 中国东部近海表层水温在未来 80 年具有明显升温趋势。具体表现为:

(1) 从年际变化上看, 中国东部近海表层年均水温到 2090 年升温幅度可达 1.18—1.71°C, 其中 2030—2060 年升温幅度最为明显, 2060—2090 年升温比较缓慢。

(2) 从季节变化上看, 中国东部近海表层水温未来将呈现不同季节全面升温。到 2090 年不同海域不同季节表层水温升温幅度为 1.16—2.04°C, 其中渤海、黄海和东海均在夏季升温幅度较大, 秋冬季较小。季节变化 2030—2060 年升温最为明显, 这与年际变化规律一致。

(3) 不同海域之间, 2010—2030 年, 东海升温幅度比渤、黄海大, 然而到 2060、2090 年, 渤、黄海升温比东海升温更明显。

参　考　文　献

王　靖, 刘秦玉, 2011. 海气界面热通量交换对南海深水海盆 SST 持续增暖的可能贡献. 中国海洋大学学报, 41(6): 9—14

王卓越, 郑　建, 杨宇星等, 2019. 南太平洋副热带偶极子模式模拟评估. 海洋与湖沼, 50(2): 237—247

孙　侦, 贾绍凤, 吕爱锋等, 2015. IPCC AR5 全球气候模式对 1996-2005 年中国气温模拟精度评价. 地理科学进展, 34(10): 1229—1240

宋春阳, 张守文, 姜　华等, 2016. CMIP5 模式对中国近海海表温度的模拟及预估. 海洋学报, 38(10): 1—11

张志华, 陈幸荣, 蔡　怡, 2012. 中国近海海温年际年代际振荡关键海区分析研究. 海洋预报, 29(4): 1-6

赵宗慈, 2009. 为 IPCC 第五次评估报告提供的全球气候模式预估. 气候变化研究进展, 5(4): 241—243

黄传江, 乔方利, 宋亚娟等, 2014. CMIP5 模式对南海 SST 的模拟和预估. 海洋学报, 36(1): 38—47

谭红建, 蔡榕硕, 颜秀花, 2016. 基于 IPCC-CMIP5 预估 21 世纪中国近海海表温度变化. 应用海洋学学报, 35(4): 451—458

谭红建, 蔡榕硕, 颜秀花, 2018. 基于 CMIP5 预估 21 世纪中国近海海洋环境变化. 应用海洋学学报, 37(2): 151—160

Giorgetta M A, Jungclaus J, Reick C H *et al*, 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI‐ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 5(3): 572—597

Heuzé C, Heywood K J, Stevens D P *et al*, 2015. Changes in global ocean bottom properties and volume transports in CMIP5 models under climate change scenarios. Journal of Climate, 28(8): 2917—2944

Huang C J, Qiao F L, 2015. Sea level rise projection in the South China Sea from CMIP5 models. Acta Oceanologica Sinica, 34(3): 31—41

Solomon S, 2007. IPCC (2007): Climate change the physical science basis. In: American Geophysical Union, Fall Meeting 2007. Washington: AGU, 123—124

Ying J, Huang P, Lian T *et al*, 2019. Understanding the effect of an excessive cold tongue bias on projecting the tropical Pacific SST warming pattern in CMIP5 models. Climate Dynamics, 52(3—4): 1805—1818

Zhou B T, Xu Y, 2017. CMIP5 analysis of the interannual variability of the Pacific SST and its association with the Asian-Pacific oscillation. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 10(2): 138—145

IPCC-CMIP5 BASED PROJECTION AND ANALYSIS OF FUTURE SEA SURFACE TEMPERATURE CHANGES IN COASTAL SEAS EAST OF CHINA

ZHANG Cui-Cui[1], WEI Hao[1], SONG Gui-Sheng[1], XIE Chuan[2]

(1. *School of Marine Science and Technology*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*; 2. *School of Marine Science*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

Abstract The changes of sea surface temperature (SST) over coastal seas east of China have affect the local climate changes, marine ecology, and fishery resources in China. The study of SST changes, especially its future trends, has become a hot research topic in oceanography. The Fifth Assessment Report (AR5) given by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) provides a clear and up-to-date view of both global and local climate changes in the worldwide oceans. We used five representative models of CMIP5 (including ACCESS1.3, BCC-CSM1.1, CCSM4, GFDL-ESM2G, and MPI-ESM-MR) to project the SST changes over coastal seas east of China (including the Bohai Sea, the Yellow Sea, and the East China Sea) under RCP 4.5 scenario in the next 80 years (2030, 2060, 2090) compared to that in 2010. The experimental results demonstrate that SST over the coastal seas east of China would have a significant increase in the next 80 years. The decadal SST would rise by 1.18—1.71°C till 2090, where the highest increase rate would be achieved from 2030 to 2060. The seasonal SST would increase 1.16—2.04°C, where the increase rate in summer would be more obvious than those in other seasons.

Key words coastal seas East of China; sea surface temperature; future seawater temperature projection; IPCC-CMIP5