

斯思, 毕训强, 孔祥慧, 等. 2020. CMIP6 情景中主要温室气体和气溶胶排放强度的时空分布特征分析 [J]. 气候与环境研究, 25(4): 366–384. SI Si, BI Xunqiang, KONG Xianghui, et al. 2020. Spatial–Temporal Characteristics of the Emission Intensities of Several Major Greenhouse Gases and Aerosols under CMIP6 Scenarios [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (4): 366–384. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20005

CMIP6 情景中主要温室气体和气溶胶排放强度的时空分布特征分析

斯思^{1,2} 毕训强^{2,3} 孔祥慧⁴ 华维¹

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心, 北京 100029

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

4 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

摘要 基于不同共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 形成的 8 组最新的未来可能情景 (SSPx-y 情景), 被用于第六次耦合模式比较计划 (CMIP6), 以据此来预估未来气候变化的可能幅度和趋势。本文主要对比分析了 8 组 SSPx-y 新情景中主要温室气体和气溶胶排放数据的基准年排放强度分布、未来排放强度的时空变化、以及在 6 个典型区域排放强度的逐年变化等特征。结果表明: 二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、黑碳 (BC)、二氧化硫 (SO₂) 在基准年的排放强度高值区都位于东亚和南亚。相比于基准年, 2100 年 CO₂ 和 CH₄ 在高和低辐射强迫情景下表现出的排放强度变化有显著差异。此外, 所有情景下 2100 年的 BC 和 SO₂ 全球平均排放强度都弱于基准年的排放强度。在时间变化上, 随着生物质能碳捕获与封存技术的不断进步, 所有地区在 4 组不超过 3.4 W/m² 的低辐射强迫情景下, CO₂ 排放强度到 2100 年都呈现负值。其中, 南美洲的负排放最强, 2100 年在 SSP5-3.4 情景下该地区的排放强度为 -0.3 kg m⁻² a⁻¹。最后, 对比东亚和南亚排放强度的逐年变化可以发现, 在各情景所描述的未来发展过程中, 东亚的减排行动的成效都要好于南亚。

关键词 SSPx-y 情景 温室气体 气溶胶 排放强度

文章编号 1006-9585(2020)04-0366-19

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20005

Spatial–Temporal Characteristics of the Emission Intensities of Several Major Greenhouse Gases and Aerosols under CMIP6 Scenarios

SI Si^{1,2}, BI Xunqiang^{2,3}, KONG Xianghui⁴, and HUA Wei¹

1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Nansen–Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Eight latest scenarios (SSPx-y scenarios), which are based on different shared socioeconomic paths (SSPs)

收稿日期 2020-01-08; 网络预出版日期 2020-03-22

作者简介 斯思, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化与气候模拟研究。E-mail: sisi393@163.com

通讯作者 毕训强, E-mail: bixq@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划 2016YFB0200805

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFB0200805)

are adopted in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) to project the probable magnitude and trend of future climate changes. In this article, the emission datasets of various major greenhouse gases and aerosols under the eight SSPx-y scenarios are analyzed, including emission intensities in the reference year (i.e., 2015), spatial and temporal variations of future emission intensities, and yearly change in emission intensities for the six typical selected sub-regions. Results show that the strongest emission intensities of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), black carbon (BC), and sulfur dioxide (SO_2) are distributed mainly in East and South Asia in 2015. In comparison with the reference year, variations in the intensities of CO_2 and CH_4 emissions in 2100 show significant differences between the high and low radiative forcing scenarios. In addition, the average global emission intensities of BC and SO_2 in 2100 are weaker than those in the reference year under all scenarios. In terms of temporal variation, such as the development of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), the values of CO_2 emission intensities in all sub-regions become negative in 2100 for four low radiative forcing scenarios (i.e., radiative forcing values $\leq 3.4 \text{ W/m}^2$). On the other hand, the net intensity of negative emissions in South America is $-0.3 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ under the SSP5-3.4 scenario in 2100, which is lower than that in all other sub-regions. Finally, a comparison of the variations in emission intensities in East and South Asia reveals that emission reduction actions in East Asia play a more effective role than those in South Asia in the future development described in all scenarios.

Keywords SSPx-y scenario, Greenhouse gas, Aerosol, Emission intensity

1 引言

排放情景是对辐射有潜在作用的物质(如温室气体、气溶胶)的未来排放趋势的合理描述(IPCC, 2013)。设计不同的排放情景作为气候模式的输入项来计算气候预估的结果,并据此来评估未来气候变化的可能幅度和趋势,是气候变化研究的重要手段之一。为更好地衡量社会经济与未来潜在气候结果的关系,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)先后发展了一系列情景,主要包括:最早用于第一次评估报告的SA90情景(IPCC, 1990)、第三次评估报告的IS92情景(IPCC, 1992)、第四次评估报告的SRES情景(IPCC, 2000)、第五次评估报告的RCPs情景(van Vuuren et al., 2011),以及正在用于第六次耦合模式比较计划(CMIP6)的SSPx-y新情景(O'Neill et al., 2016)。

最新的SSPx-y情景,是基于不同的共享社会经济路径(SSPs)及最新的人为排放数据,并与到2100年时的辐射强迫幅度形成的矩形组合。具体而言,SSPx-y新情景中的x部分,是反映未来社会经济和技术发展的共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Paths, SSPs)。SSPs描述了在没有气候变化或者气候政策影响下,未来社会经济的可能发展。它包括了5种路径,其中SSP1是可持续发展(van Vuuren et al., 2017),SSP2是中度发展(Fricko et al., 2017),SSP3是各国之间或国内各

部门之间一定程度的不均衡的发展(Fujimori et al., 2017),SSP4是各国之间或国内各部门之间另一种程度的不均衡发展(Calvin et al., 2017),SSP5是化石燃料驱动的发展(Kriegler et al., 2017)。SSPx-y新情景中的y部分,是体现未来气候(到2100年)辐射强迫幅度的典型浓度路径(RCPs)。由未来社会经济发展状况类别与辐射强迫目标幅度进行适当组合,形成CMIP6的8组新情景(详见表1)。这8组情景不但保留了前一次RCPs情景中的4种辐射强迫路径(2.6 W/m^2 、 4.5 W/m^2 、 6.0 W/m^2 、 8.5 W/m^2),还增加了 1.9 W/m^2 、 3.4 W/m^2 和 7.0 W/m^2 这三种新的辐射强迫路径,以弥补第五次耦合模式比较计划(CMIP5)典型路径之间的空白和满足政策研究需要。

人为排放的温室气体和气溶胶产生的辐射强迫会对地球能量平衡产生直接或间接的影响,进而对自然生态环境和人类生存活动产生重要的影响。为衡量这些影响的大小,IPCC第五次评估报告(IPCC, 2013)对工业化时代(1750~2011年)温室气体、短寿命期气体以及气溶胶及其前体物等排放的气候变化辐射强迫进行了定量评估。结果表明,相对于1750年,2011年由混合充分的温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和卤代烃)排放产生的总辐射强迫为 3.00 W/m^2 ($2.22 \sim 3.78 \text{ W/m}^2$)。 CO_2 的辐射强迫贡献是 1.68 W/m^2 ($1.33 \sim 2.03 \text{ W/m}^2$), CH_4 的辐射强迫约为 0.97 W/m^2 ($0.74 \sim 1.20 \text{ W/m}^2$), CO_2 和 CH_4 辐射强迫贡献居温室气体的前两位。

表 1 8 组 SSPx-y 情景及其特点

Table 1 Eight SSPx-y scenarios and their characteristics

SSPx-y情景	共享社会经济路径x	辐射强迫路径y	情景特点
SSP1-1.9减缓情景	SSP1可持续发展	1.9 W/m ² 低辐射强迫	SSP1-1.9情景可支持把全球平均增暖控制在较工业化前水平1.5℃以内的目标研究, 该情景土地利用变化显著(特别是全球森林面积显著增加)
SSP1-2.6减缓情景	SSP1可持续发展	2.6 W/m ² 低辐射强迫	SSP1-2.6是更新后的RCP2.6情景, 可支持把全球平均增暖控制在较工业化前水平2℃以内的目标研究
SSP2-4.5减缓情景	SSP2中度发展	4.5 W/m ² 中等辐射强迫	SSP2-4.5是更新后的RCP4.5情景, 该情景土地利用和气溶胶路径处于中等水平
SSP3-7.0基线情景	SSP3各国之间或国内不同领域之间不均衡的发展, 弱约束限制	7.0 W/m ² 中高辐射强迫	SSP3-7.0情景的土地利用变化是可持续的, 该情景中的短寿命气候强迫物排放高
SSP4-3.4减缓情景	SSP4各国之间或国内不同领域之间不均衡的发展, 强约束限制	3.4 W/m ² 低辐射强迫	SSP4-3.4情景弥补了RCPs中2.6 W/m ² 和4.5 W/m ² 路径之间的空白
SSP4-6.0减缓情景	SSP4各国之间或国内不同领域之间不均衡的发展, 中等约束限制	6.0 W/m ² 中等强迫	SSP4-6.0是更新后的RCP6.0情景, 用于与SSP4-3.4进行比较, 以研究不同全球平均辐射强迫路径对气候的影响
SSP5-3.4减缓情景	SSP5化石燃料驱动的发展	3.4 W/m ² 低辐射强迫	SSP5-3.4情景在2040以前沿着SSP5-8.5情景的路径发展, 2040年以后强制减排, 人为排放迅速减少
SSP5-8.5基线情景	SSP5化石燃料驱动的发展	8.5 W/m ² 高辐射强迫	SSP5-8.5是更新后的RCP8.5情景, SSP5是唯一可以使2100年人为辐射强迫达到8.5 W/m ² 的共享社会经济路径

BC 的辐射强迫贡献约为 0.64 W/m² (0.25~1.09 W/m²), 由 SO₂ 氧化而成的硫酸盐气溶胶产生的辐射强迫约为-0.41 W/m² (-0.62~-0.21 W/m²)。CO₂、CH₄、BC 和 SO₂ 是 4 种具有显著辐射强迫贡献的物质。

现阶段已有的关于 SSPx-y 情景排放数据开发或分析的文章基本都基于全球尺度 (Rao et al., 2017; Riahi et al., 2017; Gidden et al., 2019), 在排放区域性差异方面的探讨还比较缺乏。本文对比分析了 CMIP6 核心计划及情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 里所用到的 8 组 SSPx-y 情景的排放数据, 主要对 CO₂、CH₄、BC 和 SO₂ 4 种物质的基准年排放强度分布、未来排放强度的时空变化进行了分析和研究, 并对 6 个典型区域的排放强度逐年变化进行了重点讨论。

2 数据与方法

表 1 给出了 8 组 SSPx-y 情景的具体细节和内容。表格的第一列中, 基线情景是指除了已制定的政策外不会再实施其他减缓政策或措施的情景; 减缓情景是指通过加大政策实施力度以实现温室气体排放, 大气浓度或温度变化不同目标的情景 (IPCC, 2013)。表格中第二、三列分别是共享社

会经济路径 (SSPx-y 的 x 部分) 和辐射强迫路径 (SSPx-y 的 y 部分), 第四列是各情景的细节介绍及其与 RCPs 情景的渊源和差别。

为后面结果分析中描述方便, 按第三列的辐射强迫路径将 8 组情景划分为 4 类 (见表 1): 低辐射强迫情景 (4 组)、中辐射强迫情景 (2 组)、中高辐射强迫和高辐射强迫情景 (各 1 组)。

基于这些情景, 地球系统网格联盟 (Earth System Grid Federation, ESGF) 网站 ([https://esgf-node.llnl.gov/search/input4mips/\[2019-12-31\]](https://esgf-node.llnl.gov/search/input4mips/[2019-12-31])) 提供了总共 3917 个 SSPx-y 情景的数据文件, 包括了温室气体和气溶胶的排放、干/湿沉降、各类物质浓度以及土地利用等。

本文主要分析了 8 组 SSPx-y 情景的温室气体和气溶胶的排放数据。对于每组 SSPx-y 情景, CO₂ 包含飞机排放和人为排放各 1 个数据文件。CH₄、BC 和 SO₂ 分别包含飞机排放、人为排放、分来源的露天焚烧排放和露天焚烧总排放各 1 个数据文件。排放数据的空间分辨率都是 0.5° (纬度) × 0.5° (经度), 有 2015 年 (基准年)、2020 年、2030 年、2040 年、2050 年、2060 年、2070 年、2080 年、2090 年、2100 年共十年的逐月数据。所有人为排放数据文件都考虑了农业、能源、工业、交通、住宅和商业相关部门、溶剂生产使用、

废弃物和国际海运 8 种来源的排放。露天焚烧数据均考虑了农业废料燃烧、森林火灾、草原火灾和泥炭火灾 4 种来源的排放。

在分析基准年排放特征和不同情景下 2100 年与 2015 年排放强度的差异时, 为更清楚地反映排放强度以及排放强度差异随纬度的变化, 我们对排放强度和排放强度差异的纬向平均值进行了五点滑动平均平滑。

由于经济社会发展以及生产生活方式的差异, 全球不同地区之间的主要温室气体和气溶胶的排放强度有明显的区域差异 (Heil and Wodon, 1997; 王戎, 2013; Saunio et al., 2016; 张芝娟等, 2019)。本文根据区域气候特征分布和基准年排放强度的空间分布特征划分了 6 个典型排放区 (图 1a 中蓝色框): 1) 南美洲 ($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{S}$, $30^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$), 主要是亚马逊河以南的区域; 2) 北美洲 ($30^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{W}\sim 130^{\circ}\text{W}$), 主要是美国; 3) 非洲 ($30^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\sim 50^{\circ}\text{E}$), 主要是非洲中南部区域; 4) 欧洲 ($35^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\sim 60^{\circ}\text{E}$), 主要是欧洲中南部区域; 5) 南亚 ($0^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$), 主要是印度; 6) 东亚 ($20^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$), 主要是中国东部。因人为排放活动主要发生在陆地上, 本文进行各物质区域排放强度计算时, 仅包含陆地部分。

因篇幅有限, 本文中不涉及情景数据中的土地利用的分析。

3 结果分析

3.1 基准年排放特征

截至 2015 年, 大气中的 CO_2 浓度已达到 400.0 ± 0.1 ppm (ppm 为 10^{-6}), 约是工业化前水平的 1.4 倍 (WMO, 2016)。人类活动的排放是导致大气中 CO_2 浓度增加的主要原因, 这也对气候变暖以及海洋酸化等都产生了重要的影响 (IPCC, 2013)。在 SSPx-y 情景中, 人为排放的 CO_2 主要来自于能源、工业和交通部门。在基准年里这三个部门所排放的 CO_2 量加起来占了所有部门排放总量 (35.6 Gt/a) 的 87%, CO_2 全球平均排放强度为 0.057 $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。图 1a 给出了基准年 CO_2 排放强度的空间分布。从图中可知, 中国东部、印度、中欧和美国东部的 CO_2 强排放使得北半球 $20^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 的 CO_2 排放强度高于其他纬度。南半

球的 CO_2 排放强度明显低于北半球, 但在南美洲东岸、南非、澳大利亚东南沿海人口聚集区的排放相对较强。海洋上的 CO_2 排放主要来自于海运和空运过程中的燃料使用。东、西太平洋和大西洋海运空运频繁的地区的 CO_2 排放较强。北半球高纬度地区是飞机航行的主要通道, 因而也有一定强度的 CO_2 排放。

截至 2015 年, 大气中的 CH_4 浓度为 1845 ± 2 ppb (ppb 为 10^{-9}) (WMO, 2016)。 CH_4 是重要性仅次于 CO_2 的一种长寿命温室气体。 CH_4 排放的增加会影响全球臭氧和平流层水汽等的含量 (Saunio et al., 2016)。在 SSPx-y 情景中, 能源、农业、废弃物部门是 CH_4 排放的主要来源。在基准年里这三个部门所排放的 CH_4 量加起来占了所有部门排放总量 (388.4 Mt/a) 的 83%, CH_4 全球平均排放强度为 6.1×10^{-4} $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。图 1b 给出了基准年 CH_4 排放强度的空间分布。从图中可知, 中国东部、印度、中欧、美国东部和俄罗斯拉斯诺亚尔斯克边疆区的 CH_4 强排放使得北半球 $20^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 的 CH_4 排放强度高于其他纬度。在 10°N 纬度附近的 CH_4 排放强度波峰, 是由中美洲、南美洲北部沿海、非洲中部热带草原气候区的 CH_4 强排放导致。在南半球, 南美洲东南岸、非洲南部、澳大利亚东部排放相对较强。与陆地相比, 海洋上的 CH_4 排放强度很弱。

BC 对太阳辐射具有强烈吸收作用, 是影响气候变化的一种重要气溶胶 (Jacobson, 2001)。BC 主要是由碳质燃料的不完全燃烧产生。在 SSPx-y 情景中, 住宅和商业相关部门、露天焚烧和交通部门是 BC 排放的 3 个主要来源。在基准年里这三个部门所排放的 BC 加起来占了所有部门排放总量 (9.7 Mt/a) 的 71%, BC 全球平均排放强度为 1.4×10^{-5} $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。图 1c 给出了基准年 BC 排放强度的空间分布。从图中可知, BC 排放强度随纬度的变化呈现出 3 条强排放带: $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 强排放带由中美洲、非洲中部热带草原气候区、印度南部和中南半岛的强排放导致; $20^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 强排放带由中国东部以及喜马拉雅山脉南侧的新德里到恒河平原一带的高排放导致 (美国 BC 排放的贡献相对较小); $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 强排放带主要由巴西中部、非洲中南部、印尼和澳大利亚北部沿岸的强排放导致。赤道附近的 BC 排放较弱。

硫酸盐气溶胶通过直接和间接辐射效应影响地

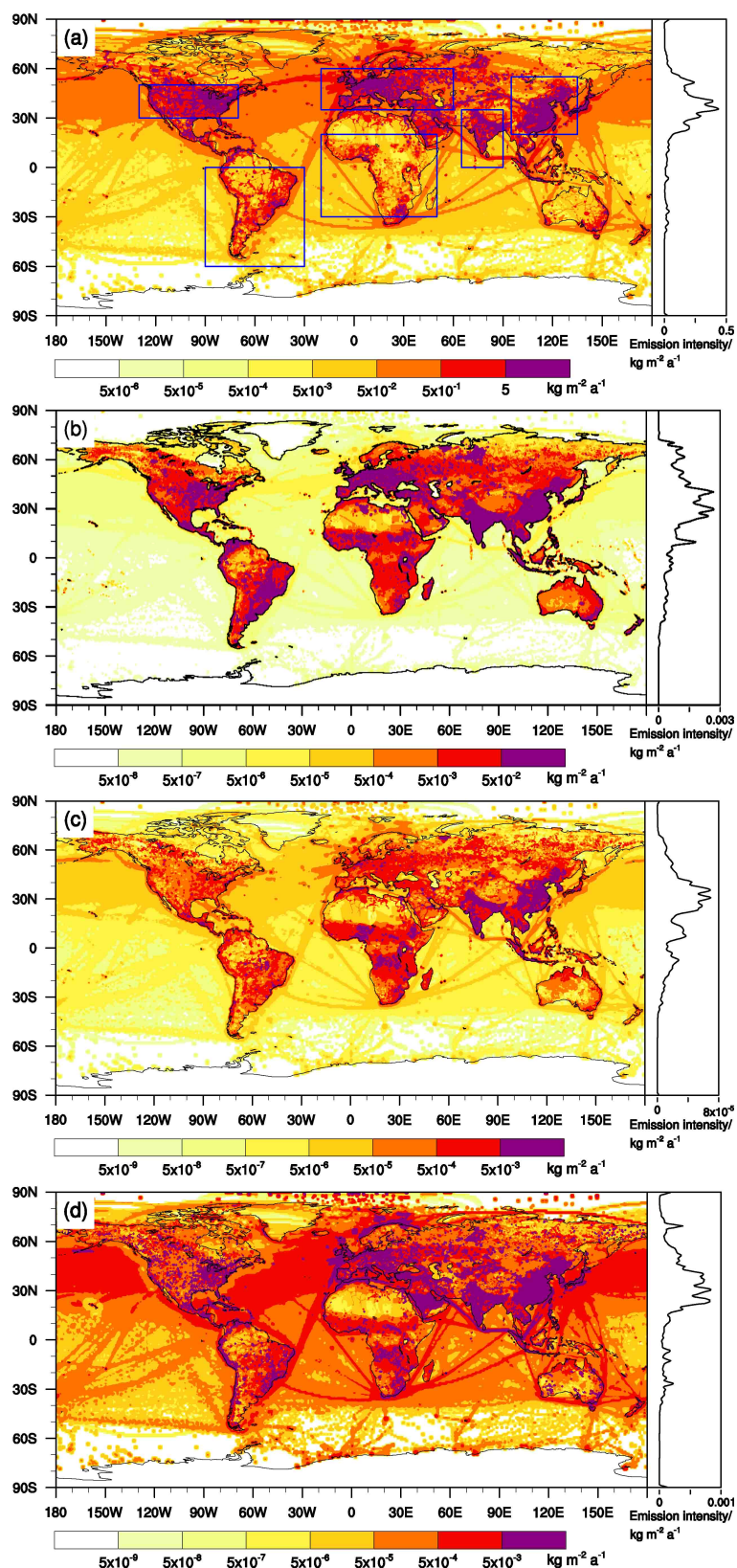


图1 基准年(2015年)(a) CO₂、(b) CH₄、(c) BC、(d) SO₂排放强度的空间分布。各图右侧的小图是排放强度随纬度的变化。图1a中6个蓝色方框标示在分析区域排放强度时使用的6个典型区

Fig. 1 Spatial distributions of (a) CO₂, (b) CH₄, (c) BC, and (d) SO₂ emission intensities in the reference year (i.e., 2015). The small graph attached to the right of each graph is the variation in emission intensity with latitude. Six rectangles in Fig. 1a indicate the typical regions analyzed in this study

气系统的辐射收支。 SO_2 在大气中容易氧化成硫酸盐气溶胶, 还能形成酸雨, 是大气中的常见污染物之一 (Kiehl and Briegleb, 1993)。在 SSPx-y 情景中, 能源和工业部门是 SO_2 排放的主要来源。在基准年里这两个部门所排放的 SO_2 量加起来占了所有部门排放总量 (100.9 Mt/a) 的 78%, SO_2 全球平均排放强度为 $1.6 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。图 1d 给出了基准年 SO_2 排放强度的空间分布。从图中可知, 美国东部、黑海西南岸、沙特阿拉伯、印度、中国东部等地的强 SO_2 排放使得北半球 $15^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 的 SO_2 排放强度高于其他纬度。

从图 1a-1d 我们也注意到, CO_2 、 CH_4 、BC 和 SO_2 的排放分布与人口密度有很好的对应关系。人口集中的地方, 排放较强。在北半球高纬度, 俄罗斯拉斯诺亚尔斯克边疆区的 CO_2 、 CH_4 、BC 和 SO_2 排放明显高于俄罗斯其他区域, 这是因为该处聚集了大量冶炼厂、火电厂、煤炭开采厂。

3.2 未来排放时空变化特征

3.2.1 CO_2 排放的时空变化

图 2 给出了 8 组 SSPx-y 情景中 2100 年与 2015 年 CO_2 排放强度差异的空间分布。8 组情景的 2100 年与 2015 年全球平均 CO_2 排放强度差值范围为 $-0.09 \sim 0.14 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与 2015 年相比, SSP5-8.5 和 SSP3-7.0 情景 2100 年的全球平均排放强度是增强的, 其余 6 组情景是减弱的。在低辐射强迫情景 (图 2a、2b、2e、2g) 中, 2100 年几乎全球的 CO_2 排放强度都比 2015 年弱。在中等辐射强迫情景 (图 2c、2f) 中, 陆地上印度境内存在大多数地区的排放强度增强, 海洋上的排放强度也未减弱。在高辐射强迫情景中 (图 2h), 全球范围内只有在中国的部分地区 CO_2 排放强度有减弱。相比 SSP2-4.5, 在 SSP4-6.0 这一中等辐射强迫情景中, 沙特阿拉伯、美国和南美洲的 CO_2 排放强度明显增强 (图 2c、2f)。对于 SSP3-7.0 情景而言 (图 2d), 在海洋上, 40°N 以北的 CO_2 排放强度在增强, 40°N 以南的排放强度在减弱; 在陆地上, 只有在中国、西欧、美国、南非、澳大利亚的部分地区, CO_2 排放强度有所减弱。

图 3 给出了 6 个典型区域在 8 组 SSPx-y 情景下的 CO_2 排放强度区域平均值的时间序列。总体来看, 6 个区域的 CO_2 排放有如下共同特征: 2015~2100 年, 基本都是 SSP5-8.5 情景的 CO_2 排放强度最强; SSP5-3.4 情景的 CO_2 排放强度在前

期跟 SSP5-8.5 情景排放强度一样上升, 至 2040 年后迅速减弱。SSP5-3.4 是一组发展路径较为极端的超调情景 (O'Neill et al., 2016), 该情景主要用于探索 21 世纪强迫从高到低的大幅变化对气候的影响。

此外, 6 个区域中 SSP1-1.9、SSP1-2.6 和 SSP4-3.4 这三组情景 2100 年的 CO_2 排放强度都比 2015 年有明显减弱, 并且呈现出负排放, 这种负的碳排放与未来能源部门 CO_2 移除技术的发展有关。当生物质能碳捕集与封存技术 (常世彦等, 2019) 移除的 CO_2 量超过煤、石油、天然气等化石燃料燃烧所产生的 CO_2 量时, CO_2 排放强度就会出现负值。6 个区域中最强的负排放出现在南美洲。2100 年在 SSP5-3.4 情景下南美洲的区域平均排放强度为 $-0.3 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

2015~2100 年, 南亚不同排放情景之间的 CO_2 排放强度差异最大, 北美洲、欧洲和东亚的 CO_2 排放强度差异居中, 南美洲和非洲的 CO_2 排放强度差异相对较小。对于情景之间排放强度差异最大的南亚 (图 3e), 在 SSP5-8.5 情景下, 南亚的 CO_2 排放强度从 2015 年的 $0.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 持续增加, 至 2090 年增加到 $4.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。而其余情景在整个 21 世纪排放强度都小于 $2.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。在 SSP3-7.0 情景中, 南亚的 CO_2 排放强度随时间不断增强, 到 2100 年接近 $2.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。SSP5-3.4、SSP2-4.5 和 SSP4-6.0 情景的 CO_2 排放强度随着时间呈现出先增强后减弱的变化, 峰值出现在 20 世纪中后期。SSP1-1.9、SSP1-2.6 和 SSP4-3.4 情景的 CO_2 排放强度随时间不断减弱。

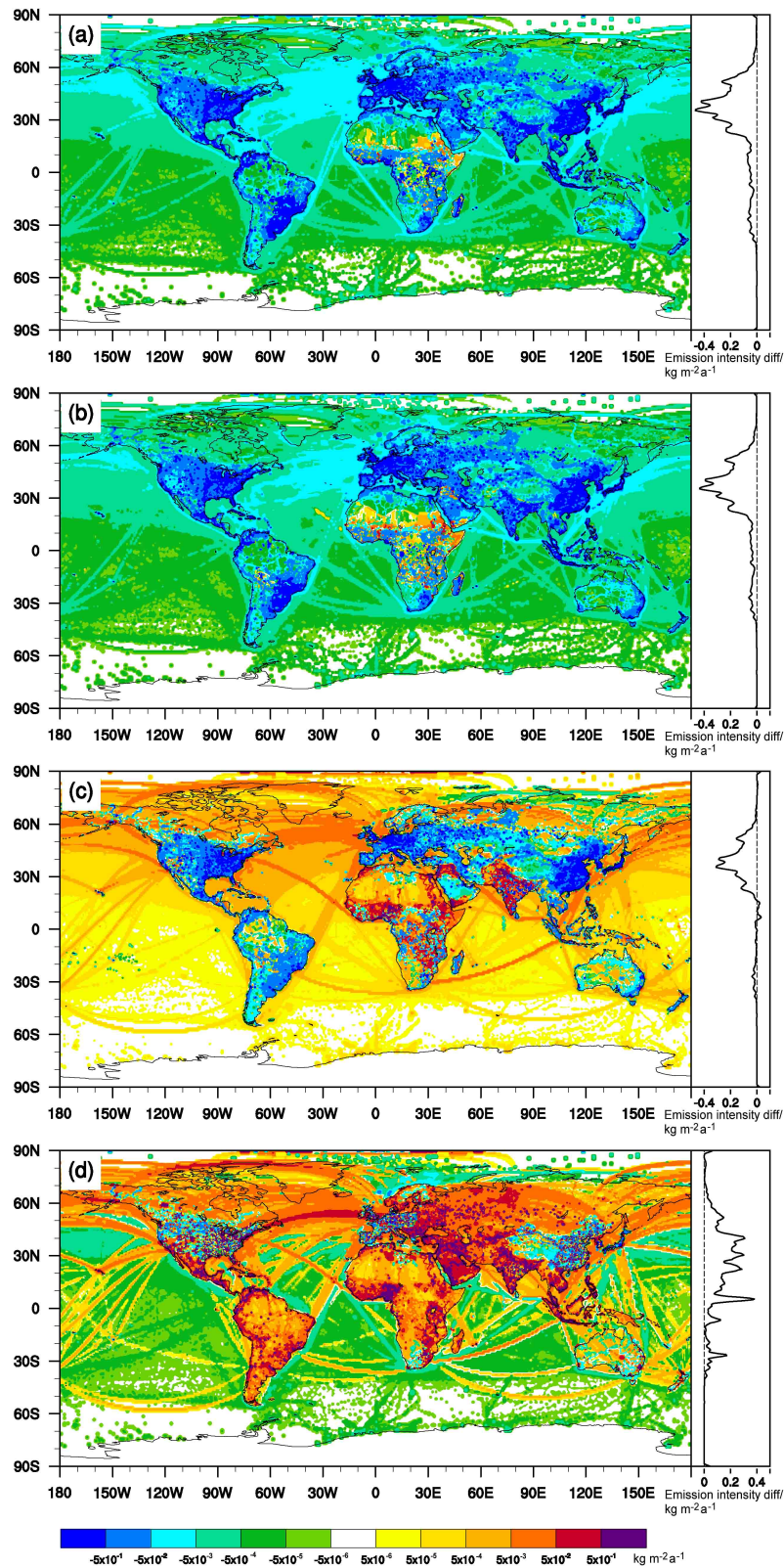
在东亚 (图 3f), SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 这两组情景分别在不同的时间段占据了 8 组情景中 CO_2 排放强度的最强位置: 2040 年以前, SSP3-7.0 情景 CO_2 排放强度增强较快; 2040 年以后, SSP5-8.5 情景 CO_2 排放强度增强较快。SSP5-8.5 情景的排放强度在增强至 2070 年后开始有所减弱。最终, 在 2100 年, SSP5-8.5 情景的 CO_2 排放强度与 SSP3-7.0 情景的 CO_2 排放强度基本相同。在除 SSP5-8.5 和 SSP3-7.0 情景外的其余 6 组低和中等辐射强迫情景下, 东亚的 CO_2 排放强度都是随时间不断减弱的。

在北美洲和欧洲 (图 3b、3d), SSP5-8.5 和 SSP3-7.0 情景的 CO_2 排放强度随时间不断增强, 并且 SSP5-8.5 情景的排放强度一直高于 SSP3-7.0 情景。

3.2.2 CH₄ 排放的时空变化

图 4 给出了 8 组 SSPx-y 情景中 2100 与 2015 年 CH₄ 排放强度差异的空间分布。8 组情景的

2100 年与 2015 年全球平均 CH₄ 排放强度差值范围为 $-4.4 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与 2015 年相比, SSP3-7.0、SSP5-8.5 和 SSP4-6.0 这三组情景



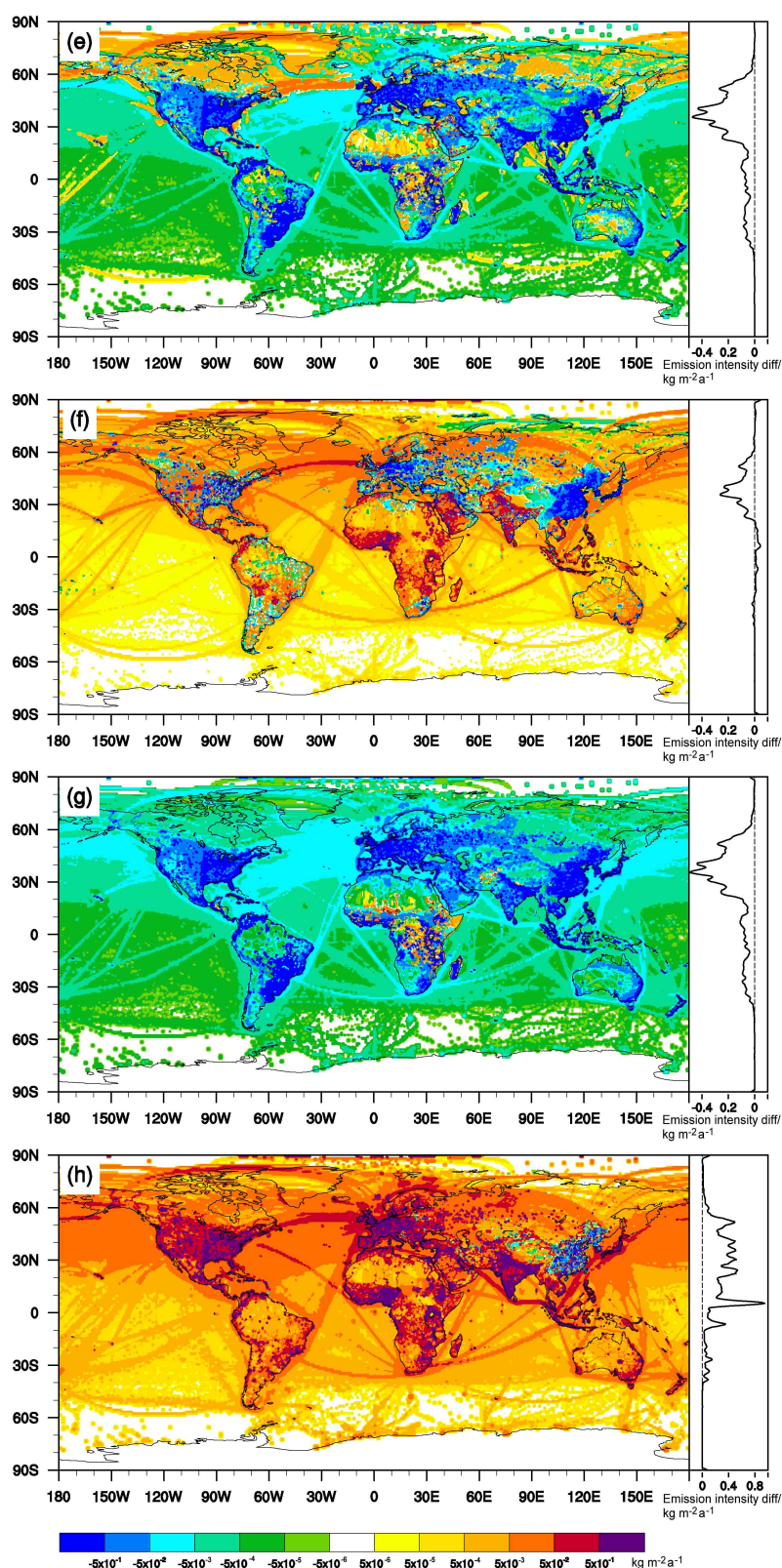


图2 8组 SSPx-y 情景中 2100 年与 2015 年 CO₂ 排放强度差异的空间分布: (a) SSP1-1.9; (b) SSP1-2.6; (c) SSP2-4.5; (d) SSP3-7.0; (e) SSP4-3.4; (f) SSP4-6.0; (g) SSP5-3.4; (h) SSP5-8.5。各图右侧的小图是 2100 与 2015 年 CO₂ 排放强度差异随纬度的变化

Fig. 2 Spatial distributions of the differences between CO₂ emission intensity in 2100 and 2015 under eight SSPx-y scenarios: (a) SSP1-1.9; (b) SSP1-2.6; (c) SSP2-4.5; (d) SSP3-7.0; (e) SSP4-3.4; (f) SSP4-6.0; (g) SSP5-3.4; (h) SSP5-8.5. The small graph attached to the right of each graph is the variation in the differences between 2100 and 2015 with latitude

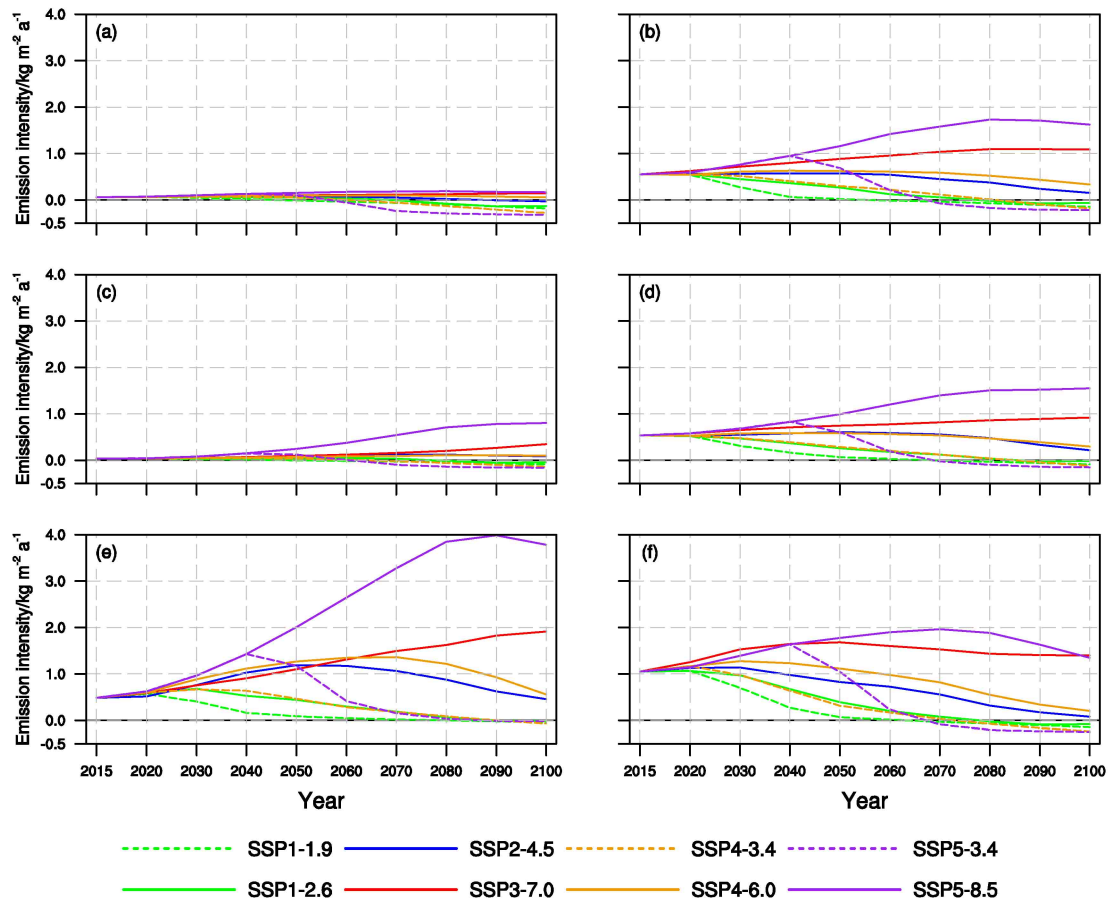


图3 6个典型区域在8组SSPx-y情景下的CO₂排放强度区域平均值的时间序列:(a)南美洲(SAM);(b)北美洲(NAM);(c)非洲(AFR);(d)欧洲(EUR);(e)南亚(SAS);(f)东亚(EAS)

Fig. 3 Time series of the regionally averaged annual CO₂ emission intensity under eight SSPx-y scenarios for six typical sub-regions: (a) South America (SAM); (b) North America (NAM); (c) Africa (AFR); (d) Europe (EUR); (e) South Asia (SAS); (f) East Asia (EAS)

在2100年的全球平均CH₄排放强度是增强的,其余5组情景是减弱的。在这三组CH₄排放强度增强的情景中,SSP3-7.0情景2100年的全球平均CH₄增强程度最大。在全球范围内,SSP3-7.0情景(图4d)只是在中国、俄罗斯拉斯诺亚尔斯克边疆区、欧洲西部和北美洲的CH₄排放强度有所减弱,其他地区都增强。SSP5-8.5情景(图4h)2100年的全球平均CH₄排放强度的增强程度次于SSP3-7.0情景,增强的地区主要位于非洲、欧洲以及美国。SSP4-6.0情景(图4f)2100年的全球平均CH₄排放强度增强程度比较弱。但SSP4-6.0情景(图4f)与SSP4-3.4情景(图4e)的CH₄排放强度差异的空间分布有相似的特征:两组情景都在印度以及非洲中部的大多数地区表现出了明显的CH₄排放强度增强。在除SSP4-3.4以外的其余4组排放强度减弱的情景中,SSP1-1.9、SSP1-2.6和SSP2-4.5这三组情景2100年在各个区域的CH₄排

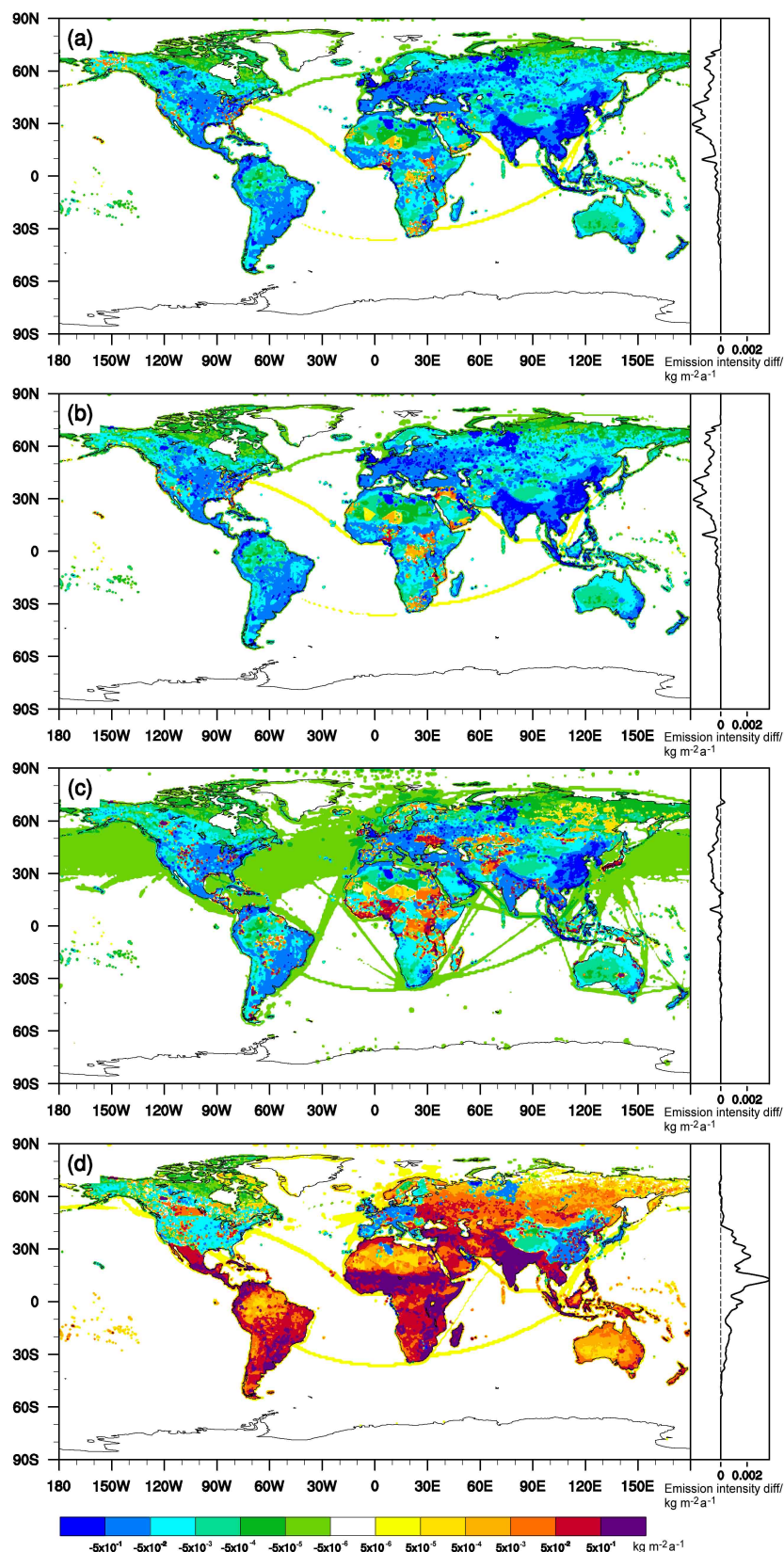
放强度都比2015年的弱(图4a-4c)。而在SSP5-3.4情景(图4g)中,南欧以及美国在2100年的CH₄排放强度仍比2015年强。

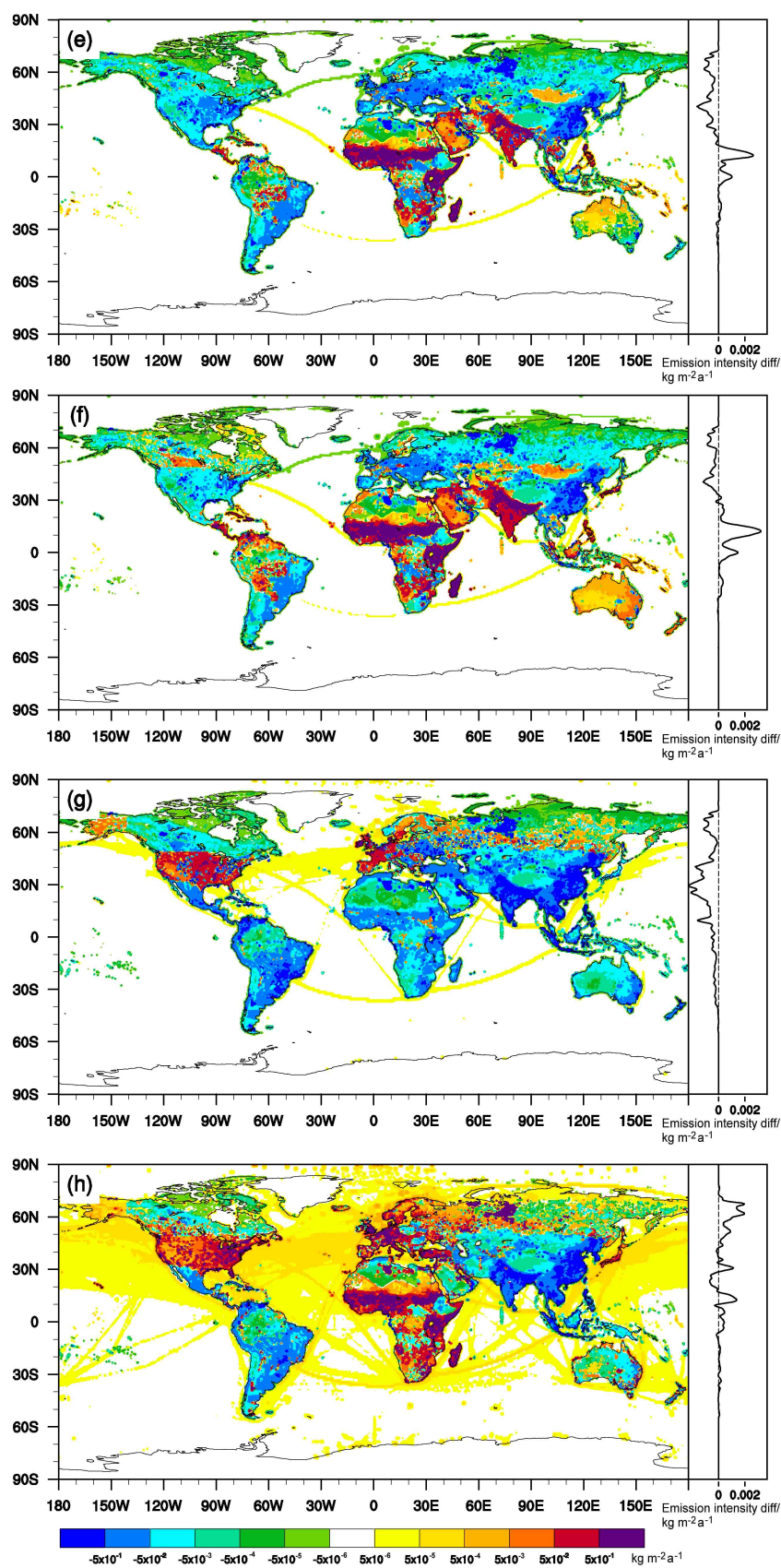
图5给出了6个典型区域在8组SSPx-y情景下的CH₄排放强度区域平均值的时间序列。总体来看,6个区域的CH₄排放有如下特征:在21世纪末期,北美洲和欧洲这两个区域CH₄排放最强的情景是SSP5-8.5,最弱的情景是SSP1-1.9。其余4个区域CH₄排放最强的情景是SSP3-7.0,最弱的情景是SSP5-3.4。与CO₂相似,6个区域SSP5-3.4情景的CH₄排放强度也都是在2040年以前与SSP5-8.5情景的排放强度相同,2040年以后排放强度迅速减弱。

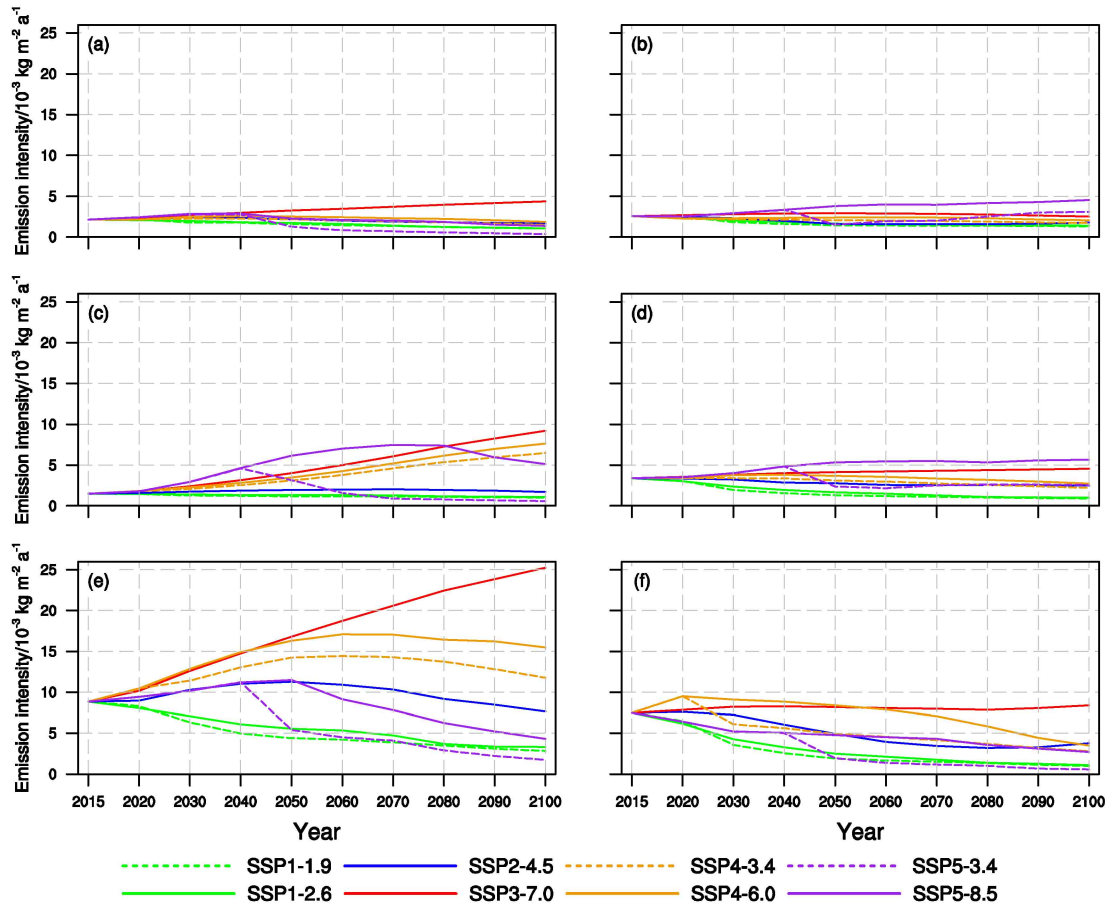
对不同区域而言,2015~2100年,南北美洲和欧洲不同排放情景之间CH₄的强度差异相对较小,非洲和东亚CH₄的强度差异稍大,南亚CH₄的强度差异最大。对于情景之间排放强度差异最大

的南亚 (图 5e), 在 SSP3-7.0 情景下, 南亚 CH_4 排放强度从 2015 年的 $0.009 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 不断增加, 至 2100 年高达 $0.025 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 排放强度增强了

近 2 倍。在 SSP4-6.0、SSP4-3.4、SSP2-4.5、SSP5-8.5 和 SSP5-3.4 情景中, 南亚的 CH_4 排放强度随时间先是增强后又减弱, 峰值出现在 20 世纪中期。



图4 同图2, 但为 CH_4 Fig. 4 Same as Fig. 2, but for CH_4

图5 同图3, 但为CH₄Fig. 5 Same as Fig. 3, but for CH₄

在 SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 情景中, 南亚的 CH₄ 排放强度随时间不断减弱。

在非洲 (图 5c), SSP3-7.0、SSP4-6.0 和 SSP4-3.4 这三组情景的 CH₄ 排放强度随时间不断增强。SSP5-8.5 情景的 CH₄ 排放强度随时间先是增强后又减弱。在 2080 年以前, SSP5-8.5 情景在 8 组情景中 CH₄ 排放强度最强, 在 2080 年以后强度减弱, 到 2100 年减弱至上述 3 组不断增强的情景之下。

在东亚 (图 5f), SSP3-7.0 情景的 CH₄ 排放强度基本不随时间改变, 而其余 7 组情景的 CH₄ 排放强度都随时间减弱。

3.2.3 BC 排放的时空变化

图 6 给出了 8 组 SSPx-y 情景中 2100 年与 2015 年 BC 排放强度差异的空间分布。8 组情景的 2100 年与 2015 年全球平均 BC 排放强度差值范围是 $-1.1 \times 10^{-5} \sim -0.13 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与 2015 年相比, 8 组情景在 2100 年的 BC 全球平均排放强度都是减弱的。其中 SSP3-7.0 情景的 BC 全球

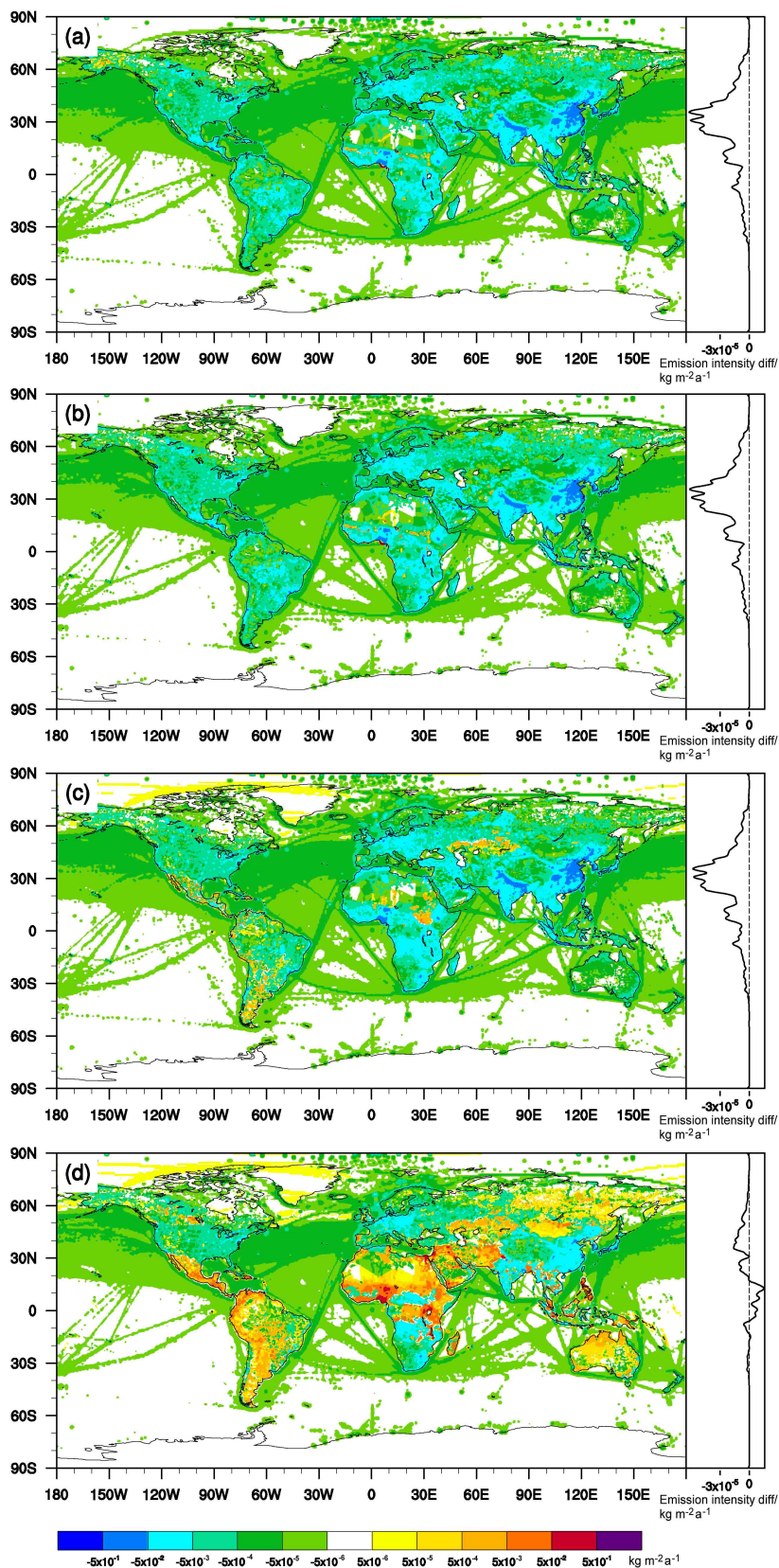
平均排放强度减弱程度最小, 其余 7 组情景的减弱程度相当并稍强于 SSP3-7.0。从减弱的区域来看, 不同情景的主要差别是: 与 2015 年相比, 只有 SSP3-7.0 情景 (图 6d) 2100 年在南美洲、沙特阿拉伯和蒙古的 BC 排放强度是增强的, 而其余 7 组情景都是减弱的。此外, 2100 年 SSP3-7.0 情景在非洲北部的排放强度也强于其余 7 组情景。

图 7 给出了 6 个典型区域在 8 组 SSPx-y 情景下的 BC 排放强度区域平均值的时间序列。由图可知, 2015~2100 年, 南亚和东亚不同排放情景之间 BC 的排放强度差异大, 南北美洲、欧洲以及非洲 BC 的排放强度差异都相对较小。

在南亚 (图 7e), SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP5-3.4 和 SSP5-8.5 这四组情景的 BC 排放强度随时间不断减弱。其余 SSP2-4.5、SSP4-3.4、SSP3-7.0 和 SSP4-6.0 这四组情景的 BC 排放强度都随时间先是增强后又减弱。SSP2-4.5 和 SSP4-3.4 情景的 BC 排放强度波峰出现在 2030 年, SSP3-7.0 和 SSP4-6.0 情景的 BC 排放强度波峰出现在 2040 年。在排

放强度增强的阶段, SSP4-6.0 是 4 组情景中 BC 强度增强最明显的情景, 2040 年接近 $0.035 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。在排放强度减弱的阶段, SSP2-4.5 是 4 组情景中

BC 强度减弱最明显的情景, 2100 年减弱至 $0.005 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下。SSP3-7.0 情景的 BC 排放强度减弱程度低, 以至于在 21 世纪末期该情景的 BC 排



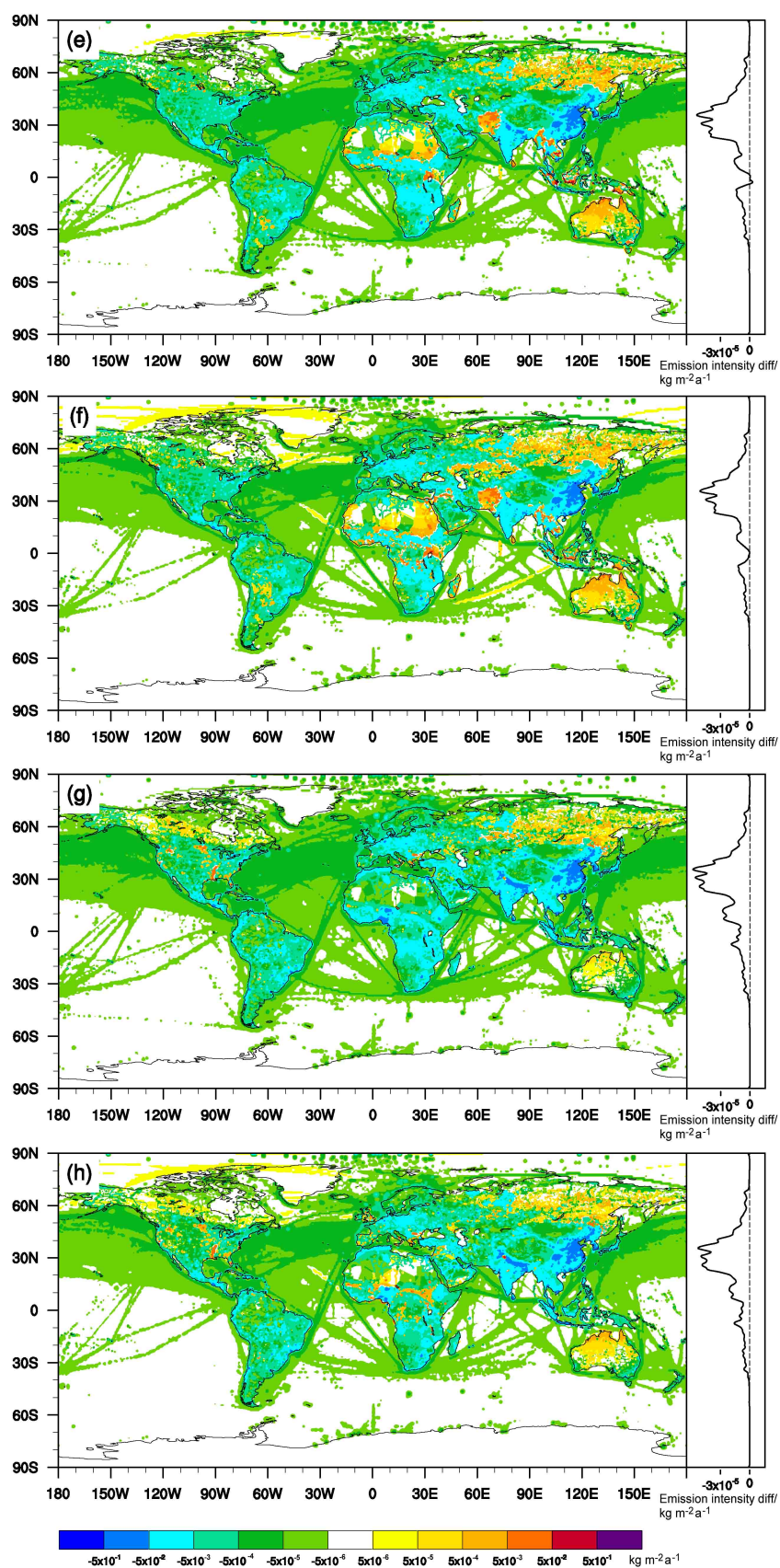


图6 同图2, 但为BC

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for BC

放强度高于其余 7 组情景。

与南亚不同,在东亚(图 7f),SSP3-7.0 情景在 21 世纪初的 BC 排放强度的增强程度高于 SSP4-6.0 情景,并且 SSP2-4.5 情景的 BC 排放强度随时间不断减弱。对比东亚、南亚在 SSP4-3.4 和 SSP4-6.0 情景下的 BC 排放强度,可以看到东亚的 BC 排放强度随时间的减弱程度大于南亚。

3.2.4 SO₂ 排放的时空变化

图 8 给出了 8 组 SSPx-y 情景中 2100 年与 2015 年 SO₂ 排放强度差异的空间分布。8 组情景的 2100 年与 2015 年全球平均 SO₂ 排放强度差值范围是 $-1.5 \times 10^{-4} \sim -0.43 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。SO₂ 排放强度变化与 BC 排放强度变化的相似之处是 8 组情景在 2100 年的 SO₂ 全球平均排放强度也都比 2015 年弱。2015~2100 年,全球平均排放强度减弱程度最小的情景也是 SSP3-7.0。与 2015 年相比,也只有 SSP3-7.0 情景(图 8d) 2100 年在南美洲和蒙古的 SO₂ 排放强度是增强的,而其余 7 组情景都是减弱的。与 BC 的变化不同之处则主要是:

与 2015 年相比,SSP3-7.0 情景 2100 年在印度的 SO₂ 排放强度也是增强的,而在沙特阿拉伯的排放强度是减弱的。

图 9 给出了 6 个典型区域 8 组 SSPx-y 情景下的 SO₂ 排放强度区域平均值的时间序列。由图可以看出,2015~2100 年,南亚不同排放情景之间的 SO₂ 排放强度差异较大,东亚的 SO₂ 排放强度差异次之。南北美洲、欧洲以及非洲的 SO₂ 排放强度差异都相对较小。

在南亚(图 9e),SSP1-1.9、SSP1-2.6 和 SSP4-3.4 这三组情景的 SO₂ 排放强度随时间不断减弱。而对于其余 5 组情景,南亚的 SO₂ 排放强度都是随时间先增强后减弱,5 组情景的排放强度波峰均出现在 21 世纪中前期。具体而言,2015~2040 年,南亚在 SSP5-8.5 和 SSP5-3.4 情景下 SO₂ 排放强度增强显著。在 2040 年,SSP5-8.5 和 SSP5-3.4 情景的 SO₂ 排放强度均高达 $5 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,强度明显高于其余 6 组情景。而 2040 年以后,SSP5-8.5 情景和 SSP5-3.4 情景的 SO₂ 排放强度均减弱,并

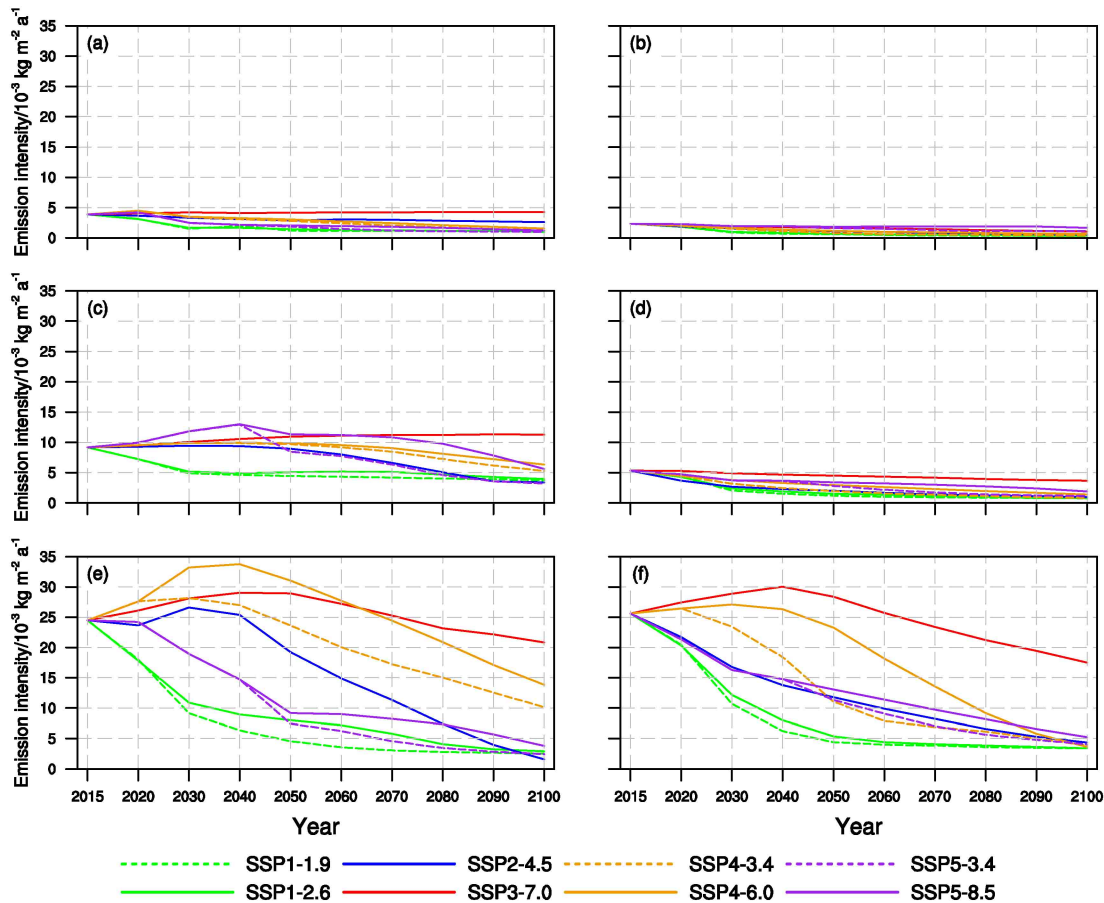


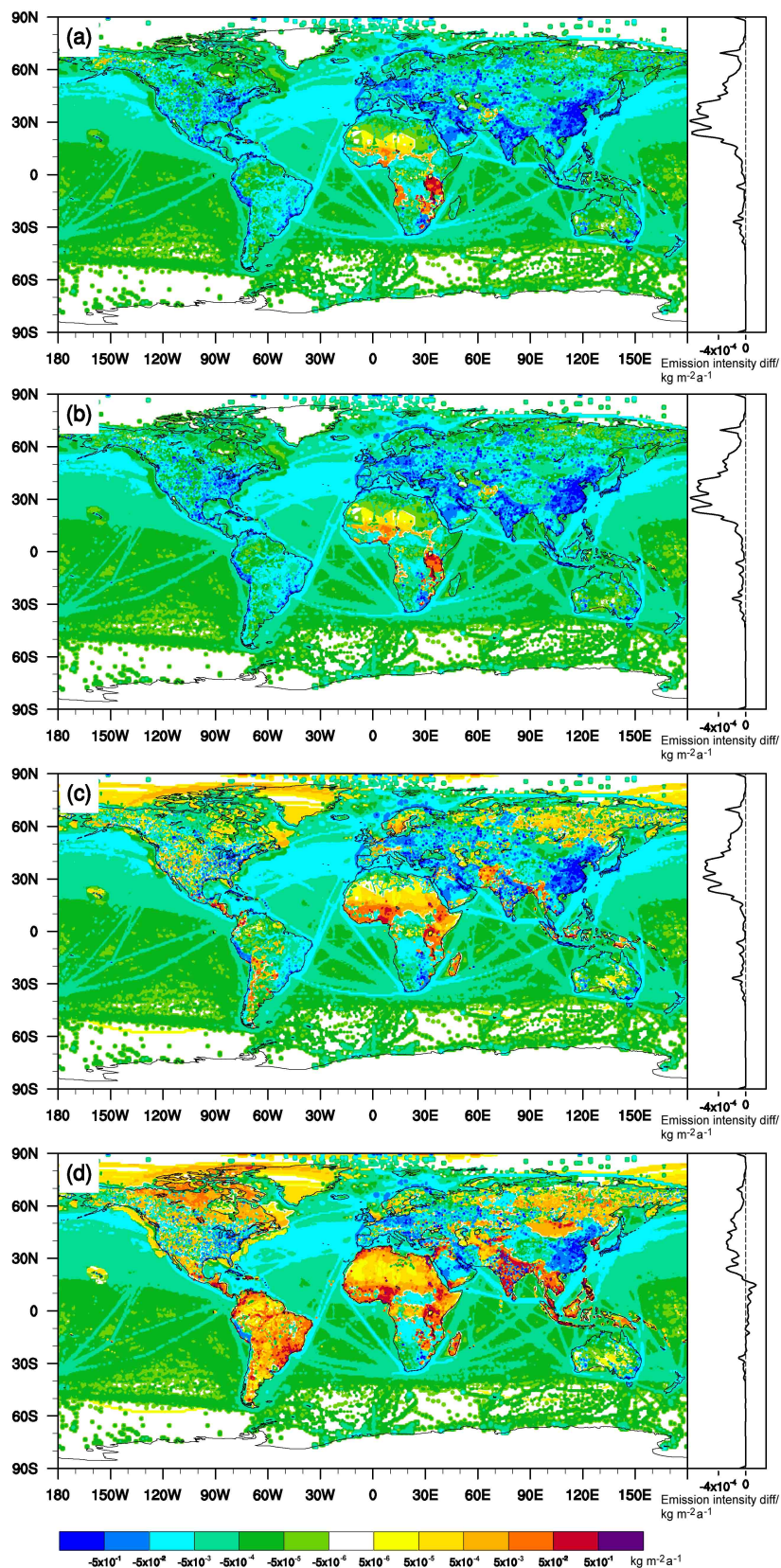
图 7 同图 3, 但为 BC

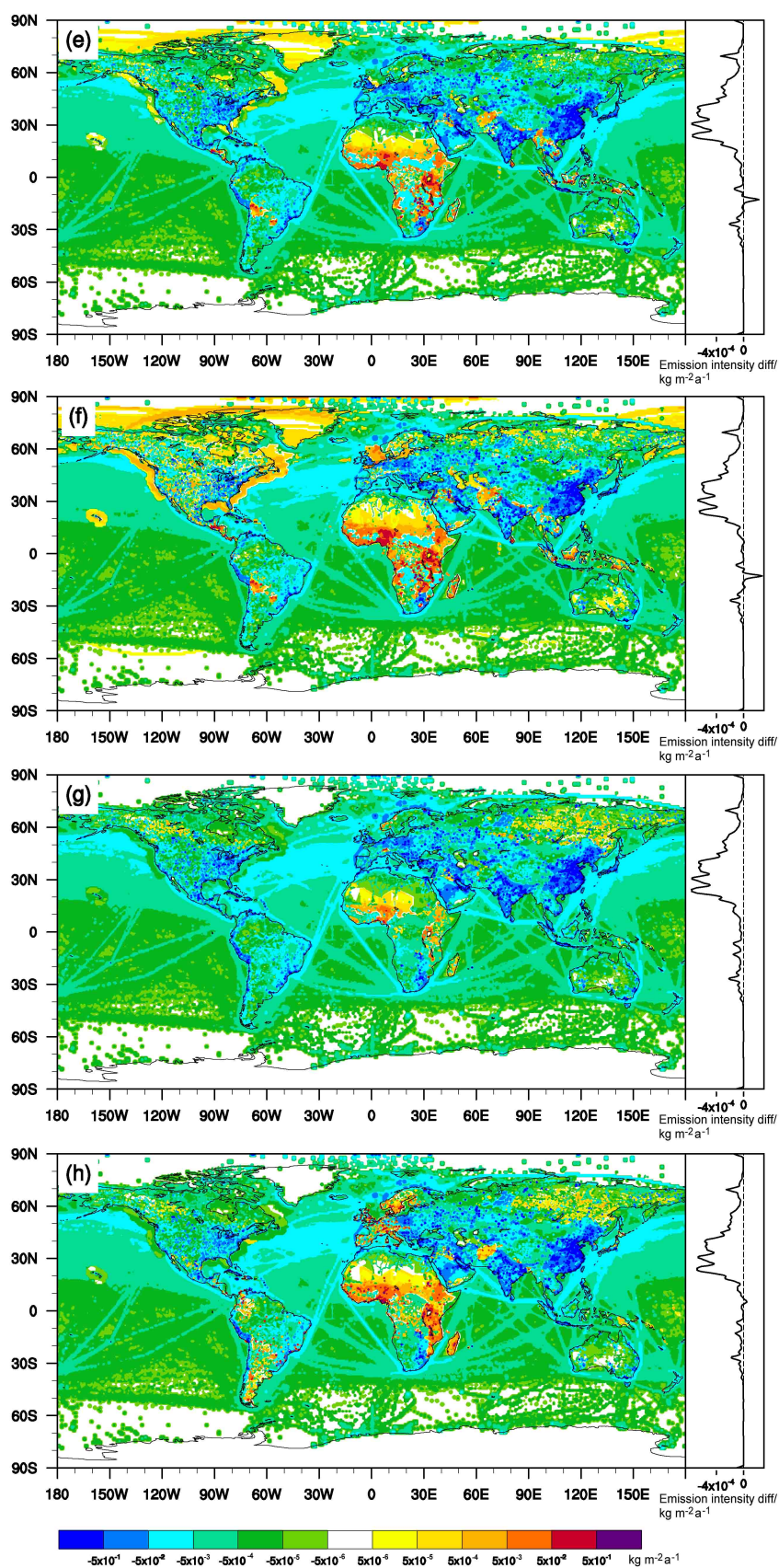
Fig. 7 Same as Fig. 3, but for BC

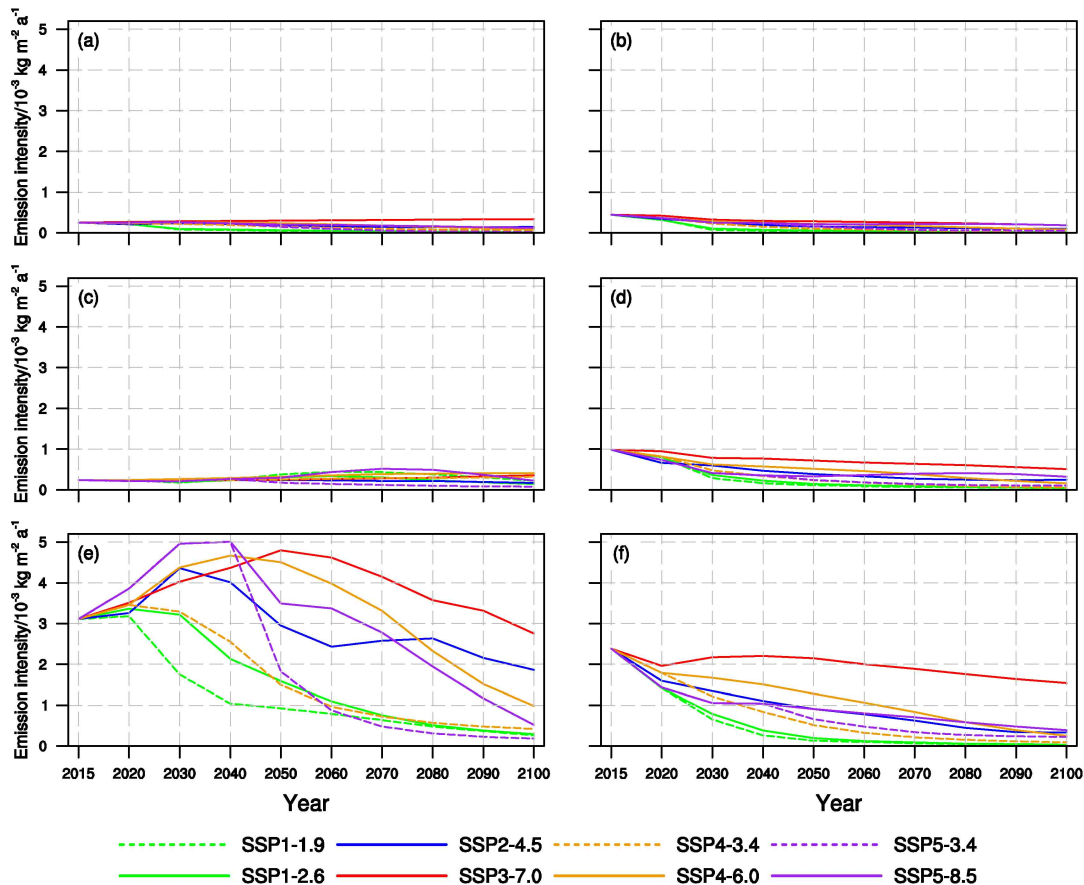
且 SSP5-3.4 情景的排放强度减弱比 SSP5-8.5 情景迅速。在 2050 年, SSP5-3.4 情景的 SO_2 排放强度已降至 $2 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下。2050~2100

年, 南亚 SO_2 排放强度最高的是 SSP3-7.0 情景。

在东亚 (图 9f), 2015~2100 年, SSP3-7.0 情景的 SO_2 排放强度随时间的变化不明显, 而其



图8 同图2, 但为 SO₂Fig. 8 Same as Fig. 2, but for SO₂

图9 同图3, 但为SO₂Fig. 9 Same as Fig. 3, but for SO₂

余7组情景的SO₂排放强度都随时间不断减弱。

4 总结与讨论

本文基于CMIP6使用的8组SSPx-y情景,利用空间分辨率为0.5°(纬度)×0.5°(经度)的排放数据,对全球CO₂、CH₄、BC和SO₂的基准年排放强度分布、未来排放强度的时空变化,以及南美洲、北美洲、非洲、欧洲、南亚、东亚6个典型排放强度的逐年变化进行了对比分析,得出以下主要结论:

(1) 在基准年,CO₂、CH₄、BC和SO₂的全球平均排放强度分别为0.057 kg m⁻² a⁻¹、6.1×10⁻⁴ kg m⁻² a⁻¹、1.4×10⁻⁵ kg m⁻² a⁻¹和1.6×10⁻⁴ kg m⁻² a⁻¹。从排放强度随纬度的变化来看,这4种物质在20°N~50°N的排放强度强于其他纬度。从6个区域来看,这四种物质排放较强的地区都是东亚和南亚。排放较弱的地区各物质之间有差异:CO₂排放较弱的地区是南美洲和非洲,CH₄和BC排放

较弱的地区是南北美洲和欧洲,而SO₂在南北美洲、非洲和欧洲的排放都很弱。

(2) 在2100年,CO₂在SSP3-7.0和SSP5-8.5这两组情景下的全球平均排放强度相比基准年有所增强,其余6组情景有所减弱。同时,随着生物质能碳捕获与封存技术的不断进步,6个典型区域在4组不超过3.4 W/m²的低辐射强迫情景下的CO₂排放强度到2100年都呈现负值。CH₄在SSP4-6.0、SSP3-7.0、SSP5-8.5这三组情景下的全球平均排放强度相比基准年有所增强,其余5组情景有所减弱。所有情景下2100年的BC和SO₂全球平均排放强度都弱于基准年的排放强度。

(3) 从东亚和南亚两个强排放区域看,虽然在基准年里东亚的CO₂排放强度高于南亚,但到2100年东亚在8组情景下的CO₂排放强度都已低于南亚。对于CH₄,2100年东亚在8组情景下的CH₄排放强度也都低于南亚。特别是在SSP3-7.0、SSP4-3.4和SSP4-6.0情景下东亚的CH₄排放强度显著低于南亚。对于BC,东亚在2100年的排放强度明显

低于南亚的情景是 SSP4-3.4 和 SSP4-6.0, 其余 6 组情景两个区域的 BC 排放强度相当。而对于 SO₂, 2100 年东亚在 8 组情景下的 SO₂ 排放强度也都低于南亚, 特别是在 SSP2-4.5、SSP3-7.0、和 SSP4-6.0 情景下东亚的 SO₂ 排放强度显著低于南亚。

(4) 2015~2100 年, 在不同情景之间 CO₂、CH₄ 和 SO₂ 的排放强度差异最大的区域均是南亚, 而 BC 的排放强度差异则在东亚和南亚都很大。

总体来看, 在情景所描述的未来发展过程中, 东亚在减排上的行动效果要好于南亚, 特别是对 CH₄ 和 SO₂ 的控制成效十分明显。

本文不仅从全球尺度分析了 8 组 SSPx-y 情景中主要的温室气体和气溶胶 (或前体物) 的基准年和未来排放的时空变化, 还从区域性方面对排放变化进行了进一步分析和研究。本文的研究结果有助于了解 8 组 SSPx-y 情景下的排放数据、也有助于后续气候变化研究和 CMIP6 情景预估结果的区域气候变化分析等。

参考文献 (References)

- Calvin K, Bond-Lamberty B, Clarke L, et al. 2017. The SSP4: A world of deepening inequality [J]. *Global Environ. Change*, 42: 284–296. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.010
- 常世彦, 郑丁乾, 付萌. 2019. 2°C/1.5°C 温控目标下生物质能结合碳捕集与封存技术 (BECCS) [J]. *全球能源互联网*, 2(3): 277–287.
- Chang Shiyang, Zheng Dingqian, Fu Meng. 2019. Bioenergy With Carbon Capture and Storage (BECCS) in the pursuit of the 2°C/1.5°C target [J]. *Journal of Global Energy Interconnection (in Chinese)*, 2(3): 277–287. doi:10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.03.009
- Fricko O, Havlik P, Rogelj J, et al. 2017. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century [J]. *Global Environ. Change*, 42: 251–267. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004
- Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, et al. 2017. SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways [J]. *Global Environ. Change*, 42: 268–283. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009
- Gidden M J, Riahi K, Smith S J, et al. 2019. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century [J]. *Geosci. Model Dev.*, 12(4): 1443–1475. doi:10.5194/gmd-12-1443-2019
- Heil M T, Wodon Q T. 1997. Inequality in CO₂ emissions between poor and rich countries [J]. *J. Environ. Dev.*, 6(4): 426–452. doi:10.1177/107049659700600404
- IPCC. 1990. Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 365.
- IPCC. 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 220.
- IPCC. 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 597.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers [C]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535.
- Jacobson M. 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 409(6821): 695–697. doi:10.1038/35055518
- Kiehl J T, Briegleb B P. 1993. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing [J]. *Science*, 260(5106): 311–314. doi:10.1126/science.260.5106.311
- Kriegler E, Bauer N, Popp A, et al. 2017. Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century [J]. *Global Environ. Change*, 42: 297–315. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015
- O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. *Geosci. Model Dev.*, 9(9): 3461–3482. doi:10.5194/gmd-9-3461-2016
- Rao S, Klimont Z, Smith S J, et al. 2017. Future air pollution in the shared socio-economic pathways [J]. *Global Environ. Change*, 42: 346–358. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.012
- Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, et al. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview [J]. *Global Environ. Change*, 42: 153–168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Saunio M, Bousquet P, Poulter B, et al. 2016. The global methane budget 2000–2012 [J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 8(2): 697–751. doi:10.5194/essd-8-697-2016
- van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. 2011. The representative concentration pathways: An overview [J]. *Climatic Change*, 109(1–2): 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- van Vuuren D P, Stehfest E, Gernaat D E H J, et al. 2017. Energy, land use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm [J]. *Global Environ. Change*, 42: 237–250. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008
- 王戎. 2013. 黑炭的全球排放和大气迁移及其暴露风险和辐射强迫评估 [D]. 北京大学博士学位论文, 184pp.
- Wang Rong. 2013. Global emission inventory and atmospheric transport of black carbon, and evaluation of the associated exposure risk and direct radiative forcing [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Peking University, 184pp.
- WMO. 2016. WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015 [M]. World Meteorological Organization, No. 12.
- 张芝娟, 陈斌, 贾瑞, 等. 2019. 全球不同类型气溶胶光学厚度的时空分布特征 [J]. *高原气象*, 38(3): 660–672.
- Zhang Zhijuan, Chen Bin, Jia Rui, et al. 2019. Global spatial and temporal distribution of aerosol optical depth for different kinds of aerosols (in Chinese) [J]. *Plateau Meteorology*, 38(3): 660–672. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00002