

近期碳排放趋势对气候变化历史责任归因的影响

魏婷^①, 董文杰^{②③*}, 武炳义^①, 杨世莉^{②③}, 燕青^④

① 中国气象科学研究院, 气候系统研究所, 北京 100081;

② 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

③ 北京师范大学未来地球研究院, 珠海 519087;

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

* 联系人, E-mail: dongwj@bnu.edu.cn

2014-09-12 收稿, 2014-12-04 接受, 2015-01-21 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(41330527)、全球变化重大研究计划(2010CB950504)和中央高校基本科研业务费专项(2012YBXS27)资助

摘要 以减排为目的的国际谈判依赖于对气候变化历史责任的归因。近年来发展中国家快速的工业化使其工业碳排放量不断增加并超过了发达国家, 这对以往的不含近期碳排放影响的气候变化历史责任划分提出了新的挑战。本文利用耦合了碳循环过程的CESM (community earth system model) 模式, 模拟研究了发达国家和发展中国家近期的工业碳排放对气候变化历史责任归因的影响。结果表明: 将以往研究中的1850~2005年的历史责任归因延长到2011年, 模拟的工业革命初期以来大气CO₂浓度的升高、大气升温、海洋暖化以及北半球海冰的消融, 有55%~62%的责任来自于发达国家的工业碳排放, 其余38%~45%来自于发展中国家的碳排放。与不包含近期(2006~2011年)碳排放计算的结果相比, 发达(发展中)国家对气候变化的历史责任减小(增大)了1%~2%, 因此近期的碳排放趋势对长期的气候变化历史责任归因的影响很小。此外, 尽管统计的近年来发展中国家的碳排放量显著增长并超过了发达国家, 但忽略了国际贸易带来的发达国家向发展中国家转移碳排放量, 从而转嫁历史责任的问题, 未来需要进一步考虑排放转移对气候变化历史责任归因的影响。

关键词

近期碳排放
气候变化
地球系统模式
历史责任

为了减小气候变化的影响、风险和损害, 国际社会将21世纪末全球增温控制在2℃以内(相对于工业革命前的水平)作为限制全球变暖的指导原则^[1]。在这一目标下, 最新的IPCC减排方案提出, 需要在2100年之前将大气CO₂当量浓度控制在450 ppm (1 ppm = 1 μg g⁻¹)之内, 这就要求人类活动排放的温室气体在2050年相比2010年减少40%~70%, 到2100年实现零排放或负排放^[2]。因此, 围绕温室气体减排, 基于联合国气候变化框架公约(UNFCCC)提出的“共同但有区别的责任”原则, 国际上开展了一系列的协商和谈判。而当前国际减排方案的争议焦点仍然集中在气候变化历史责任区分的问题上^[3]。

已有的研究指出, 截至2000年, 发达国家是大气

中人为温室气体浓度增加和全球增暖的主要贡献者^[4~10]。然而, 近期的国际谈判(例如德班加强行动平台^[11])中提出, 在过去的10年中, 发展中国家快速的工业化已经使得发达国家和发展中国家集团的碳排放量格局发生了巨大的变化; 例如, 中国自2007年起CO₂排放量已经超过美国, 成为世界碳排放量第一大国。而目前已有的研究均依据2005年以前的碳排放来划分历史责任, 没有考虑到近期的碳排放趋势的影响, 可能低估了发展中国家的气候变化历史责任。这使得基础四国(巴西、南非、印度和中国)的气候谈判依据^[3]由于仅覆盖1900~2000年的碳排放量而备受质疑, 限制了我国在气候谈判中的话语权。

den Elzen等人^[12]统计了各国的碳排放量后指出,

引用格式: 魏婷, 董文杰, 武炳义, 等. 近期碳排放趋势对气候变化历史责任归因的影响. 科学通报, 2015, 60: 674~680

Wei T, Dong W J, Wu B Y, et al. Influence of recent carbon emissions on the attribution of responsibility for climate change (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 674~680, doi: 10.1360/N972014-00964

发展中国家1850~2000年碳排放的历史责任仅相当于1850~2010年碳排放责任的80%;即计入2000~2010年的碳排放量后发展中国家的历史责任将增加约5.2%。然而这一研究基于对排放量的简单统计计算,而气候系统的非线性和记忆性决定了气候变化历史责任的归因并不能简单依赖于外强迫(碳排放量)的线性统计结果^[13]。Wei等人^[10]指出地球系统模式可以克服统计方法在历史责任归因研究中存在的问题,并研究了发达国家和发展中国家1850~2005年碳排放对气候变化的历史责任。但是,这一研究中模拟归因的时段仅限于2005年之前,仍然没有包含近期的碳排放,影响了研究结果的可信度。

本文利用含有碳循环过程的地球系统模式,通过设计有特色的气候变化数值试验方案,从气候系统各圈层典型变化的角度,综合研究2006~2011年碳排放趋势对气候变化历史责任归因的影响。这将有助于解决最近的国际谈判中的争议焦点,进一步量

化发达国家和发展中国家在减缓气候变化中所应承担的责任,同时为我国参与气候变化外交谈判和制定应对气候变化的政策提供一定的科学依据。

1 试验和方法

(i) 数据。全球碳计划(GCP-1.5, <http://cdiac.ornl.gov/GCP/>)收集了2006~2011年12个主要排放国家(地区)的人为工业碳排放清单^[14]。其中2009年以前的排放量统计数据基于联合国报告和美国地理服务(http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html)。2010和2011年的数据基于英国石油公司的统计资料和美国地质调查局提供的水泥数据。GCP-1.5排放数据包括了来自于化石燃料燃烧和水泥生产中的碳排放量,但不包含国际航空和海上运输过程中的碳排放量。如图1(a)所示,GCP-1.5的碳排放量与Andres等人^[15]的1850~2005年碳排放数据量值相当,因此能够作为Andres数据^[15]的延长期碳排放量数据。为了构建地球

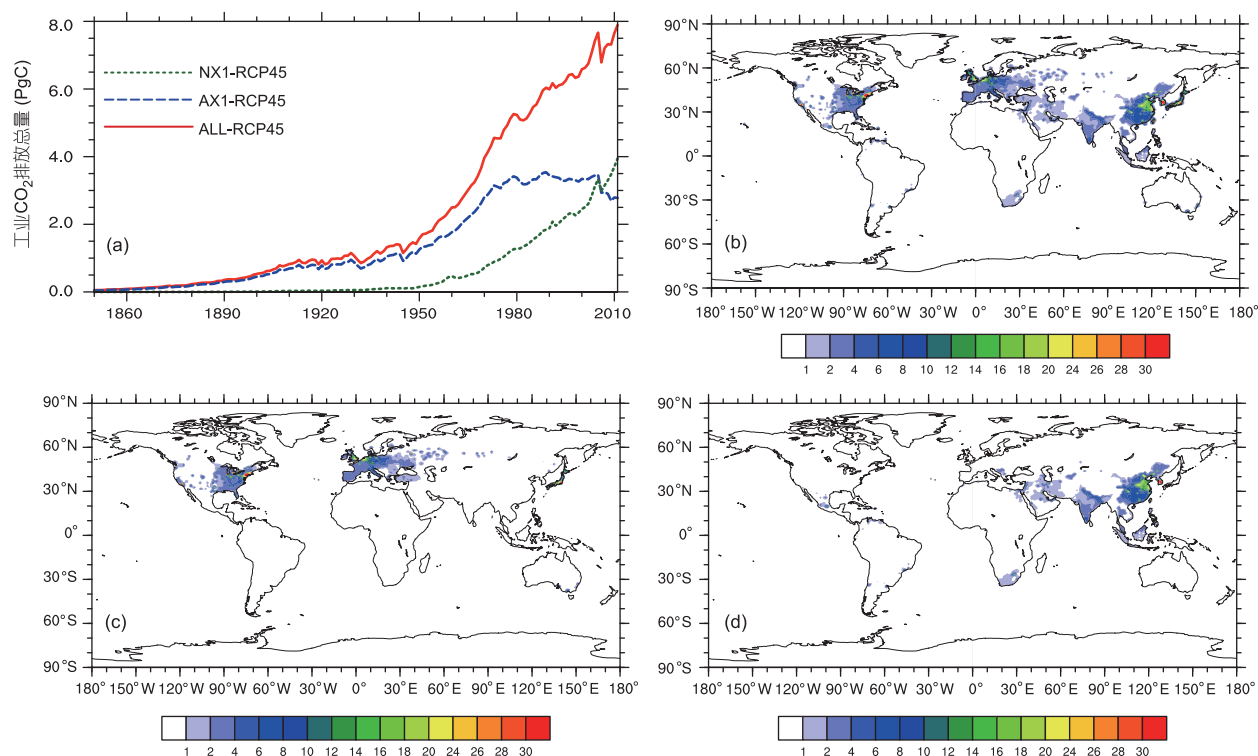


图 1 工业碳排放量。(a) 1850~2011 年全球 (ALL-RCP45), 仅发达国家(AX1-RCP45)和仅发展中国家(NX1-RCP45)的工业 CO_2 排放总量, 1850~2005 年的数据来自于 Andres 等人^[15], 2006~2011 年数据来自于 GCP1.5。(b) 全球, (c) 仅发达国家, (d) 仅发展中国家的 2006~2011 年累积碳排放通量($\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \text{ s})$)

Figure 1 Industrial CO_2 emissions. (a) Annual industrial CO_2 emissions of all countries (ALL-RCP45), only developed countries (AX1-RCP45) and only developing countries (NX1-RCP45). The data of 1850~2005 is from Andres et al. ^[15], and that of 2005~2011 is from GCP1.5. The pattern of cumulative carbon emissions from 2006 to 2011 of (b) all countries, (c) only developed countries and (d) only developing countries, unit: $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \text{ s})$

系统模式能够识别的碳排放数据,首先依据CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)的esmRCP4.5试验的碳排放空间分布(<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/forcing.html>),将延长期的国家碳排放清单按相同比例插值为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的格点数据.其次,由于原始数据时间分辨率为年,而模式默认的强迫资料为月排放量,因此将年排放量均等分配为12个月的月排放通量数据,单位为 $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2\text{ s})$ (图1(b)).根据UNFCC划分的附件I国家(主要是发达国家)和非附件I国家(主要是发展中国家)两大集团,将上面的格点碳排放量数据进行分解,得到延长期发达国家(图1(c))和发展中国家(图1(d))的格点碳排放通量数据.

(ii) 模式简介. CESM模式(1.0.2版本)是NCAR发展的新一代地球系统模式,建立在通用气候系统模式(CCSM4)的基础上,并被广泛运用于模拟过去、现在和未来的气候变化^[16-19]. CESM1.0.2由大气模式CAM4、陆面模式CLM4、海洋模式POP2、海冰模式CICE4和耦合器CPL7五大模块共同组成.其中大气和陆面模式水平分辨率取为 $0.9^{\circ}\times 1.25^{\circ}$,大气垂直方向共26层;海洋和海冰模式水平分辨率取为 1° 左右(384×320),海洋垂直方向共60层. CESM1.0.2包括了完整的碳循环过程,在陆面模式中耦合了陆地碳氮循环模块Biome-BGC(4.1.2版本)^[20,21],在海洋模式中耦合了一个生态系统/生物地球化学模式BEC^[22].模式的详细介绍参见Gent等人^[23].

(iii) 试验设计. 试验设计如表1所示,利用CESM模式模拟3种不同排放情景下的气候变化. (1) ALL-RCP45: 2006~2011年,所有国家排放 CO_2 ; (2) AX1-RCP45: 2006~2011年,仅有发达国家排放 CO_2 ,假定发展中国家零排放; (3) NX1-RCP45: 2006~2011年,仅有发展中国家排放 CO_2 ,假定发达国家零排放. 3组试验以图1所示的3组格点碳排放量资料分别作为3组外强迫. 由于CMIP5提供的统一的历史试验强迫数据仅涵盖1850~2005年,而2005年之后的模拟作为

气候预测试验,采用预估的典型排放路径(RCP)下各种强迫数据驱动. 其中RCP4.5是中等排放强度的典型路径,在此路径下,全球净辐射通量在2100年时达到 4.5 W/m^2 ,其等效的 CO_2 浓度为850 ppm^[24]. RCP4.5路径在较短时期内与目前的排放水平相当,因此在我们的模拟试验中,采用CMIP5提供的RCP4.5路径下预估的太阳辐射量、除 CO_2 之外的其他温室气体浓度、臭氧和气溶胶浓度作为模式的其他外强迫资料. 各试验采用的初始场是Wei等人^[10]相应各试验的2005年的模拟结果.

2 结果分析

统计结果显示,2005年以来全球的碳排放量依然呈显著增长趋势,并且发展中国家的 CO_2 排放总量已经超过了发达国家(图1(a)). 人为碳排放量不断增加的直接结果是大气中 CO_2 浓度的逐渐升高,这是导致全球气候变化的直接原因. 图2(a)展示了观测和模拟的不同排放情景下全球平均 CO_2 浓度的演变. 其中最显著的特点是,大气 CO_2 浓度随着碳排放量的不断增长而增加,并且2006~2011年间, CESM模拟的大气 CO_2 浓度上升了10 ppm,与观测揭示的11.8 ppm相近. 尽管由于模式系统误差^[25]的存在,使得CESM模拟的 CO_2 浓度较观测偏高,但其变化趋势相近,对于相对贡献率的评估影响不大. 由于气候系统的非线性,发达国家和发展中国家排放造成的大气 CO_2 浓度的变化量之和并不等于所有国家排放造成的大气 CO_2 浓度的变化量($C_{\text{AXI}}+C_{\text{NXI}}\neq C_{\text{ALL}}$). 因而我们利用归一化比例法(normalized proportional approach)^[10]计算相对贡献率,可以使得 $C_{\text{AXI}}/C_{\text{ALL}}+C_{\text{NXI}}/C_{\text{ALL}}=1$. 结果表明,包含2006~2011年的碳排放后,发达国家和发展中国家对工业革命以来大气中 CO_2 浓度升高的贡献率分别是62%和38%,与不包含近期排放趋势计算的历史责任(发达国家是63%,发展中国家是37%)差别很小. 由表2可见,对于直接影响气候

表1 试验设计
Table 1 Experimental design

试验名称	ALL-RCP45	AX1-RCP45	NX1-RCP45
化石燃料 CO_2 排放通量	2006~2011年全部国家的 CO_2 排放通量	2006~2011年仅发达国家的 CO_2 排放通量	2006~2011年仅发展中国家的 CO_2 排放通量
初始场	ALL试验2005年变量场	AX1试验2005年变量场	NX1试验2005年变量场
模拟时间	2006~2011年		
其他强迫数据	CMIP5提供的RCP4.5路径下的其他强迫数据		

系统变化的 CO_2 辐射强迫来说,加入了近期碳排放后,发达(发展中)国家的历史责任也仅仅减小(增加)了1%。这是因为,当前的气候状态受长期外强迫非线性作用的影响,工业革命以来累积的碳排放才是影响当前大气 CO_2 浓度及其辐射强迫的原因,因此近期的碳排放趋势对长期的气候变化历史责任归因的影响很小。

图2(c)展示了各排放情景下全球平均气温的演变,图中所示为相对于1850~1869年的异常值。与 CO_2 浓度及其辐射强迫的模拟误差有关,CESM模拟的1950年以后的温升趋势较观测偏高,处于灰色阴影

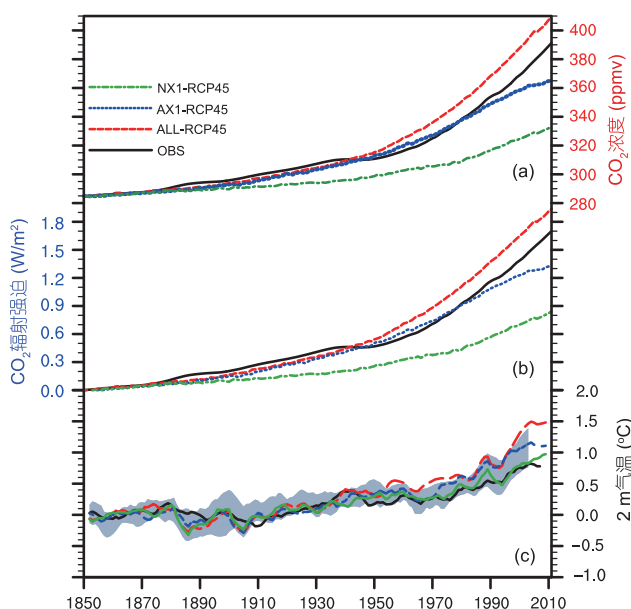


图2 CESM模拟的3种碳排放情景下全球平均 CO_2 浓度、 CO_2 辐射强迫和2 m气温的演变。其中1850~2005年的结果来自于Wei等人^[10],2005~2011的结果来自于本文的模拟试验。(a)观测和模拟(红色:全球排放情景;蓝色:仅发达国家排放情景;绿色:仅发展中国家排放情景)的 CO_2 浓度的时间序列;黑色实线是来自于CMIP5的观测资料。(b)3个试验模拟的 CO_2 辐射强迫。(c)5年滑动平均的全球平均2 m气温异常(相对于1850~1869年);灰色阴影是CMIP5的14个esm-Hist试验模拟的温度变化的范围;黑色实线代表HadCRUT3v^[26]观测的气温变化

Figure 2 CO_2 concentration, radiative forcing of CO_2 and 2-m air temperature in three scenarios simulated by CESM. The values of 1850~2005 is from Wei et al.^[10], and that of 2005~2011 is from this study. (a) Observed (black, supplied by CMIP5) and modeled time series of annual CO_2 concentration from ALL-RCP45 (red, global emissions), AX1-RCP45 (blue, only developed world emissions), and NX1-RCP45 (green, only developing world emissions) experiment. (b) Annual radiative forcing for the three experiments. (c) Five-year running averaged global mean air temperature anomaly relative to 1850~1869. The shading shows the range of values from 14 esm-historical experiments of CMIP5. The black line is the observed air temperature from HadCRUT3v^[26]

影所示的CMIP5多模式集合模拟结果的上边界,但模式系统误差对相对贡献的影响不大。由于气候变量有显著的年际波动特点,因此我们分别选取1992~2011年(不包含近期排放时选取1986~2005年)和1850~1869年的20年平均值表示现代的和工业革命前期的气候态,利用归一化比例法计算表明,考虑2006~2011年的碳排放量后,发达(发展中)国家对全球的变暖负有58%(42%)的责任,相比不考虑近期排放计算的历史责任差别很小(1%)。

除了大气圈之外,海洋和冰冻圈的变化也为观测到的气候变化提供了有力的证据。观测事实表明,1955年以来世界海洋的增暖占到同时段地球气候系统内能变化的80%以上,尤其较浅的0~700 m海洋层的变暖速率相对更高^[27]。图3(a)是模拟的0~700 m海洋热容量在不同排放情景下的变化。其显著的特点

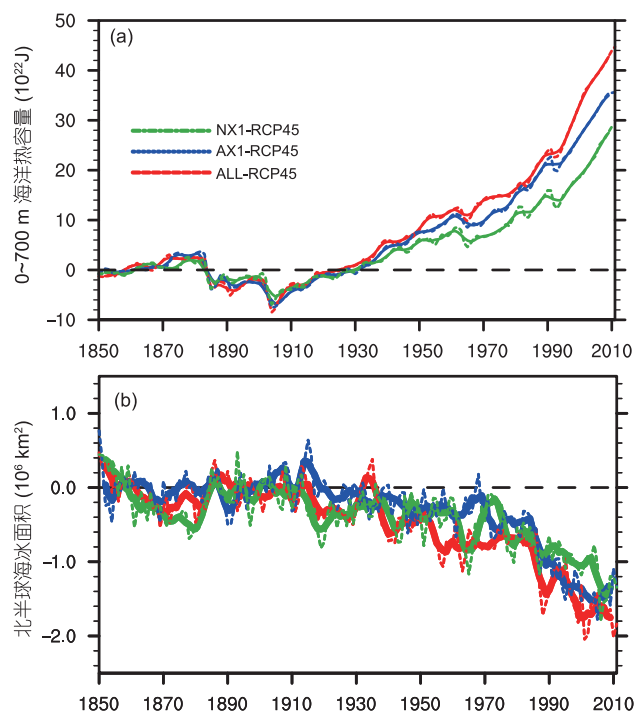


图3 CESM模拟的3种排放情景下全球平均的海洋热容量和海冰的变化。(a)上层(0~700 m)海洋热容量(10^{22} J), (b)北半球海冰面积(10^6 km²)。其中1850~2005年的结果来自于Wei等人^[10],2006~2011的结果来自于本文的模拟试验。图中粗实线表示5年滑动平均的结果,各颜色虚线所示年变化,均以相对于1850~1869年的异常值表示

Figure 3 The ocean heat content and sea-ice area in three scenarios simulated by CESM. (a) The upper (0~700 m) ocean heat content (unit: 10^{22} J), (b) Northern Hemisphere sea-ice area (unit: 10^6 km²). The values of 1850~2005 is from Wei et al.^[10], and that of 2005~2011 is from this study. The variables are shown as a global mean anomaly relative to 1850~1869. The solid lines are the five-year running averaged fields. The dashed lines are the annual mean

是海洋热容量随时间不断增加, 尤其1950年以后, 随着全球各国工业碳排放量的显著增长, 海洋热容量的上升趋势更为明显, 并且近期的碳排放并没有造成不同排放情景下海洋热容量趋势的显著改变. 类似于气温, 分别选取1992~2011年(不包含近期排放时选取1986~2005年)和1850~1869年各20年的平均值表示现代的和工业革命前期的气候态, 利用归一化比例法计算表明(表2), 2006~2011年的碳排放趋势影响下, 发达(发展中)国家对全球海洋暖化的历史责任将减小(增加)1%.

由于冰雪正反馈作用, 近100年来北极地区的升温速率约为全球平均值的2倍^[27], 北极海冰对变暖表现出很高的敏感性. 因此我们进一步分析了不同排放情景下北半球海冰面积的变化. 如图3(b)所示, 北半球海冰面积随时间显著减小, 尤其20世纪50年代以后, 海冰的消融速率显著增加, 这也与战后重建期碳排放量大幅增加有关. 值得注意的是, 近期碳排放趋势对北半球海冰面积的变化带来较为显著的影响, 在NX1-RCP45情景下, 北半球海冰加速消融, 但AX1-RCP45情景下, 海冰呈略微增加的趋势, 这使得两种不同排放情景下的北半球海冰面积逐渐接近. 利用归一化比例法计算表明(表2), 分别以2005和2011年为时间节点, 对北半球海冰的消融, 发达国家应分别承担57%和55%的历史责任, 而发展中国家应分别承担43%和45%的历史责任. 由此可见, 在2006~2011年的碳排放趋势影响下, 发达(发展中)国家对北半球海冰减少的历史责任将减小(增加)2%, 变化幅度大于气温和海洋热容量.

3 结论和讨论

以减排为目的的国际谈判的核心问题就是根据“共同而有区别的责任”原则为各国制定减排目标, 这首先依赖于对气候变化的历史责任进行归因. 而近年来发展中国家快速的工业化对以往的碳排放历史责任划分提出了新的挑战. 本文利用耦合了碳循环过程的CESM模式, 模拟研究了发达国家和发展中国家近期的工业碳排放对气候变化历史责任归因的影响. 结果表明: 将以往研究中的1850~2005年的历史责任归因延长到2011年, 即包含2006~2011年的碳排放趋势后, 模拟的工业革命初期以来大气CO₂浓度的增加、气温升高、海洋暖化以及北半球海冰的消融, 有55%~62%的责任来自于发达国家, 其余38%~45%来自于发展中国家. 与不包含近期碳排放计算的结果相比, 发达(发展中)国家对气候变化的历史责任减小(增大)了1%~2%, 因此近期的碳排放趋势对长期的气候变化历史责任归因的影响很小. 由于当前的气候状态受长期外强迫作用的影响, 发达国家更早、更大的排放历史决定了未来一定时期内, 发达国家仍然是工业革命以来全球增暖的主要原因.

从1990年到2008年, 全球工业碳排放量增长了39%, 最近10年增长速率尤为突出^[28]. 在区域水平上, 绝大多数发达国家的碳排放量保持稳定, 但发展中国家的碳排放量增长了一倍. 这一统计结果正是目前发达国家对气候变化历史责任归因是否包含近期碳排放趋势而提出质疑的依据. 通过本文的研究, 我们已经指出近期的碳排放趋势对长期的气候变化

表 2 试验统计结果
Table 2 Statistical results of experiments

气候变量	归因时间节点	相对于工业革命初期的变化量 ^{a)}		
		所有国家排放	发达国家排放	发展中国家排放
CO ₂ 浓度(ppm)	2005	114	77 (63)	44 (37)
	2011	125	80 (62)	49 (38)
CO ₂ 辐射强迫(W/m ²)	2005	1.81	1.28 (62)	0.77 (38)
	2011	1.94	1.33 (61)	0.84 (39)
全球平均2 m气温(℃)	2005	1.07	0.95 (58)	0.69 (42)
	2011	1.26	1.03 (57)	0.77 (43)
0~700 m海洋热容量(10 ²² J)	2005	28.18	23.93 (59)	16.65 (41)
	2011	34.11	28.14 (58)	20.45 (42)
北半球海冰面积(10 ⁶ km ²)	2005	-1.41	-1.24 (57)	-0.93 (43)
	2011	-1.55	-1.36 (55)	-1.09 (45)

a) 括号内数字为发达国家或发展中国家的相对责任, %

历史责任归因的影响仅有1%~2%。与此同时,更加值得注意的是,尽管近年来统计的发展中国家的碳排放量显著增长并超过发达国家,但忽略了国际贸易带来的发达国家和发展中国家之间碳排放的关联^[29~31]。随着国际贸易的发展,发达国家越来越多地将它们大量的高污染、高能耗的产业转移到发展中国家,通过进口成品减少了本土的排放量,却导致发展中国家的碳排放成倍增长。据统计,仅2004年,国际贸易商品在生产过程中所排放的CO₂就占全球工业CO₂排放总量的23%,其中大部分商品是从中国及

其他发展中国家出口到发达国家^[32]。另外,1990~2008年,从发达国家转移到发展中国家的碳排放量由0.4 Gt CO₂增长到1.6 Gt CO₂,远远超过了京都议定书中规定的发达国家应当承担的减排责任^[33]。这使得我们注意到,发达国家正在通过国际贸易转嫁他们对气候变暖的责任。因此,在研究近期碳排放趋势对气候变化历史责任归因影响的基础上,需要进一步定量研究近年的碳排放转移对气候变化历史责任归因的影响,从而为气候谈判的推进和国际减排协议的制定提供一定的参考依据。

参考文献

- 1 Council of the European Union. Presidency Conclusions—Brussels. 2005
- 2 IPCC. Summary for policymakers. In: Edenhofer O, ed. Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 10–18
- 3 BASIC Experts. Equitable access to sustainable development: Contribution to the body of scientific knowledge. BASIC expert group: Beijing, Brasilia, Cape Town and Mumbai, 2011, http://www.erc.uct.ac.za/Basic_Experts_Paper.pdf
- 4 Baumert K, Herzog T, Pershing J. Navigating the numbers: Greenhouse gases and international climate change agreements, World Resources Institute, 2005, <http://www.wri.org/publication/navigating-numbers>
- 5 Ren G Y, Xu Y, Luo Y. Historical and current status of CO₂ emissions in the world (in Chinese). Meteorol Sci Technol, 2002, 30: 129–134 [任国玉, 徐影, 罗勇. 世界各国 CO₂ 排放历史和现状. 气象科技, 2002, 30: 129–134]
- 6 He J K, Chen W Y, Teng F, et al. Long-term climate change mitigation target and carbon permit allocation (in Chinese). Adv Clim Change Res, 2009, 5: 362–368 [何建坤, 陈文颖, 滕飞, 等. 全球长期减排目标与碳排放权分配原则. 气候变化研究进展, 2009, 5: 362–368]
- 7 den Elzen M, Berk M, Schaeffer M, et al. The Brazilian proposal and other options for international burden sharing: An evaluation of methodological and policy aspects using the FAIR model, RIVM Rapport 728001011, 1999, Global Change NOP–NRP Report 410200029
- 8 Rosa L, Ribeiro S, Muylaert M, et al. Comments on the Brazilian proposal and contributions to global temperature increase with different climate responses—CO₂ emissions due to fossil fuels, CO₂ emissions due to land use change. Energy Policy, 2004, 32: 1499–1510
- 9 Hohne N, Blok K. Calculating historical contributions to climate change—Discussing the Brazilian Proposal. Clim Change, 2005, 71: 141–173
- 10 Wei T, Yang S, Moore J, et al. Developed and developing world responsibilities for historical climate change and CO₂ mitigation. Proc Natl Acad Sci USA, 2012, 109: 12911–12915
- 11 UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its seventeenth session. 2011, <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/eng/09a01.pdf#page=2>
- 12 den Elzen M, Olivier J, Hohne N, et al. Countries' contributions to climate change: Effect of accounting for all greenhouse gases, recent trends, basic needs and technological progress. Clim Change, 2013, 121: 397–412
- 13 Wei T, Dong W J, Yuan W P, et al. The Influence of carbon cycle on attribution of responsibility for climate change. Chin Sci Bull, 2014, 59: 2356–2362
- 14 Boden T, Marland G, Andres R. Global, regional, and national fossil–Fuel CO₂ emissions. CDIAC, 2013, doi: 10.3334/CDIAC/00001_V2013
- 15 Andres R, Gregg J, Losey L, et al. Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel consumption. Tellus B, 2011, 63: 309–327
- 16 Yan Q, Wang H J, Johannessen O M, et al. Greenland ice sheet contribution to future global sea level rise based on CMIP5 models. Adv Atmos Sci, 2014, 31: 8–16
- 17 Yan Q, Zhang Z S, Wang H J, et al. Simulation of greenland ice sheet during the mid-Pliocene warm period. Chin Sci Bull, 2014, 59: 201–211
- 18 Feng J M, Wei T, Dong W J, et al. CMIP5/AMIP GCM simulations of East Asian summer monsoon. Adv Atmos Sci, 2014, doi: 10.1007/s00376-013-3131-y
- 19 Tian Z, Jiang D. Mid-Holocene ocean and vegetation feedbacks over East Asia. Clim Past, 2013, 9: 2153–2171
- 20 Thornton P E, Rosenbloom N A. Ecosystem model spin-up: Estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model. Ecol Model, 2005, 189: 25–48

- 21 Thomas H, Prowe A E, Lima D, et al. Changes in the North Atlantic Oscillation influence CO₂ uptake in the North Atlantic over the past 2 decades. *Glob Biogeochem Cycles*, 2008, 224, doi: 10.1029/2007GB003167
- 22 Moore J, Doney S, Lindsay K. Upper ocean ecosystem dynamics and iron cycling in a global three-dimensional model. *Glob Biogeochem Cycles*, 2004, doi: 10.1029/2004GB002220
- 23 Gent P, Danabasoglu G, Donner L, et al. The community climate system model version 4. *Bull Am Meteorol Soc*, 2011, 24: 4973–4991
- 24 Meinshausen M, Smith S, Calvin K, et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extension from 1765 to 2500. *Clim Change*, 2011, 109: 213–241
- 25 Keppel-Aleks G, Randerson J T, Lindsay K, et al. Atmospheric carbon dioxide variability in the community earth system model: Evaluation and transient dynamic during the 20th and 21st centuries. *J Clim*, 2013, 26: 4447–4475
- 26 Brohan P, Kennedy J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *J Geophys Res*, 2006, doi: 10.1029/2005JD006548
- 27 IPCC. Summary for policymakers. In: Stocker T F, ed. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- 28 Peters G, Davis S, Andrew R. A synthesis of carbon in international trade. *Biogeosciences*, 2012, 9: 3247–3276
- 29 Peters G, Hertwich E. Post-Kyoto greenhouse gas inventories: Production versus consumption. *Clim Change*, 2008, 86: 51–66
- 30 Wiebe K, Bruckner M, Giljum S, et al. Calculating energy-related CO₂ emissions embodied in international trade using a global input–output model. *Econ Syst Res*, 2012, 24: 113–139
- 31 Nakano S, Okamura A, Sakurai N, et al. The measurement of CO₂ embodiments in international trade evidence from the harmonized input–output and bilateral trade database. *OECD*, 2009, doi: 10.1787/227026518048
- 32 Davis S, Caldeira K. Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 5687–5692
- 33 Peters G, Andrew R, Lennox J. Constructing a multiregional input-output table using the GTAP database. *Econ Syst Res*, 2011, 23: 131–152

Influence of recent carbon emissions on the attribution of responsibility for climate change

WEI Ting¹, DONG WenJie^{2,3}, WU BingYi¹, YANG ShiLi^{2,3} & YAN Qing⁴

¹Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

²State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

³Future Earth Research Institute, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China;

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

International negotiations on carbon emission reduction largely depend on the attribution of historical responsibility for climate change. In recent years, carbon emissions of developing countries have clearly increased because of rapid industrialization and now exceed those of developed countries. However, recent carbon emissions (2006–2011) have not been considered in previous attribution studies. In this study, we investigate the influence of recent carbon emissions on historical responsibilities of developed and developing countries, using a fully coupled global climate–carbon model CESM (Community Earth System Model). The simulations demonstrate that developed (developing) countries contributed about 55%–62% (38%–45%) to global CO₂ increase, temperature rise, upper ocean warming, and sea ice reduction by 2111. Compared with results excluding recent carbon emissions, the responsibility of developed (developing) countries is reduced (increased) by 1%–2%. These results indicate that carbon emissions in recent years have little influence on the long-term attribution of historical responsibility. Although recent carbon emissions in developing countries have grown significantly and now exceed those of developed countries, emissions and corresponding responsibility transferred from the developed to developing world through international trade have been ignored. This is a topic that requires further study.

recent carbon emissions, climate change, earth system model, historical responsibility

doi: 10.1360/N972014-00964