

# 人类影响引起全球变暖的证据

赵宗慈<sup>1,2</sup>, 罗勇<sup>1</sup>, 黄建斌<sup>1</sup>

1. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084

2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

**摘要** 按照归因分析的研究方法和工具, 综述了近些年有关人类影响引起全球变暖证据的科学研究成果。利用全球气候模式考虑人类影响, 采用指纹法检测和归因证实, 发现人类影响几乎肯定是引起近百年特别是近50年全球变暖的主因。地球系统5个圈层(大气、海洋、陆地、冰雪、生物)与全球变暖有关的证据, 如热浪增加、寒潮减弱、低层大气变暖、陆地和海洋变暖、受海水热膨胀和冰融化引起全球海平面上升、冰雪和永冻土融化加速、海洋酸度增加、植物生长季延长等, 都与人类影响有密切联系。

**关键词** 人类影响; 全球变暖; 5个圈层

根据世界气象组织(WMO)2020年出版的《2019年全球气候状况》报告<sup>[1]</sup>指出: 全球正在继续变暖, 2015—2019年是自工业革命以来最热的5年, 2010—2019年则是自工业革命以来最热的10年, 其全球增暖的速度和幅度以及持续的长时间都是历史少见的。与此同时, 全球大气中温室气体排放浓度继续增加, 2018年全球CO<sub>2</sub>排放破记录达到407.8±0.1 mg/L, 而2019年还在继续上升。研究证实, 人类影响主要是人类排放温室气体增加是引起全球变暖趋势的主因<sup>[2-3]</sup>。大量工作指出, 全球变暖已经和继续影响人类社会与经济发展、健康、人口迁徙、粮食安全、水资源及陆地和海洋生态系统

等方面<sup>[1-2]</sup>。本文综述近年来的科学研究成果, 涉及到人类影响引起全球变暖的证据, 通过介绍研究方法和工具, 给出人类影响引起全球表面气温变暖的证据, 进而分析人类影响可能引起全球5个圈层变暖的证据。

## 1 研究方法和工具

人类影响引起全球变暖的证据的研究方法很多, 本文着重综述传统的研究方法, 即采用检测和归因分析, 主要研究方法是指纹法, 主要工具是全球气候模式, 同时在分析中需要全球观测资料作对比。

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(20191310678); 国家重点研发计划项目(2017YFA0603700)

作者简介: 赵宗慈, 研究员, 研究方向为全球气候变化, 电子信箱: zhaozc@cma.gov.cn; 罗勇, 教授, 研究方向为全球气候变化, 电子信箱: yongluo@tsinghua.edu.cn

引用格式: 赵宗慈, 罗勇, 黄健斌. 人类影响引起全球变暖的证据[J]. 科技导报, 2021, 39(19): 18-23; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.19.002

### 1.1 指纹法

人类影响引起全球变暖的检测和归因分析主要采用的方法是指纹法,即衡量和对比多种指纹的相似度。在做归因分析时,以观测结果作为衡量的标准(基准)指纹,用全球气候模式在各种强迫下所做的模拟结果作为各种需要对比的指纹,与观测结果作对比,其模拟结果最接近观测结果的,相对应的强迫即是主要归因。近些年发展为最优指纹法,增加了用统计模型处理一些不确定性源(如观测偏差、模式偏差和地球系统内部变率)<sup>[3]</sup>。

### 1.2 全球气候模式

用指纹法做归因分析中一个主要工具是全球气候模式,现阶段的主要手段为全球气候模式是模式比较计划第5和第6阶段的地球系统模式(CMIP5和CMIP6),模式包含了地球系统5个圈层主要物理、化学、地理和生物等过程,特别对云与辐射、水循环、碳循环、气溶胶、陆地和海洋地球化学生物过程等做了更合理的参数化处理,模式中考虑了自然强迫如太阳活动与火山活动,考虑了人类影响如温室气体排放、气溶胶排放和土地利用与人口变化,此外还有考虑城市化的影响等。与观测对比检测表明,现在使用的全球气候模式具有较好的模拟全球多种变量的平均值、距平和趋势等的模拟能力,对于极端事件的模拟效果也有明显的进步<sup>[1-3]</sup>。表1<sup>[4]</sup>给出全球气候模式CMIP5(大约40个模式)与CMIP6(大约20个模式)模拟1980—1999年全球表面气温、降水量和海平面气压场的分布与观测的相关系数,注意到气温的模拟效果最好,其次是海平

表1 CMIP5与CMIP6模拟全球气温、降水量和海平面气压场分布与观测在1980—1999年期间的相关系数

变量	CMIP5	CMIP6
表面气温	0.982~0.995 (0.993)	0.990~0.998 (0.995)
降水量	0.790~0.880 (0.840)	0.800~0.920 (0.860)
海平面气压	0.750~0.982 (0.850)	0.808~0.985 (0.880)

注:括号内是多模式的集合平均,括号外是多模式的范围,相关系数全部达到显著性水平0.01检验。

面气压场,而降水量的误差相对较大,但是都通过相关系数显著性水平0.01检验。

### 1.3 全球观测资料

做归因分析所用的指纹法中,标准(基准)指纹是观测资料,包括:一是实际的全球观测资料,如一般采用全球台站观测资料、浮标、飞机、船舶、雷达与卫星等观测资料;二是经过全球气候模式加工的全球多层细网格的含有大量变量的再分析资料;三是代用资料,主要是古气候和历史时期气候,缺乏观测资料,用史料、冰芯、树轮、珊瑚礁和沉积物等资料代替<sup>[1-3]</sup>。观测资料的空间尺度涉及到全球范围,应用几万个观测台站;时间尺度长短不一,全球台站观测资料长度一般在50~75年,少数达到100年或更长。限于资料,近些年各国政府间气候变化专门委员会(IPCC)采用气候基准时段为1850—1900年,即称工业革命前。再分析资料覆盖全球网格点资料,大约50~75年。需要指出的是,不同来源的全球观测资料给出的观测结果存在一定的差异,因此需要判断多种观测结果的一致性,即给出观测资料的可信程度。

### 1.4 归因分析基本思路

考虑地球系统5个圈层中的某一个变量的总变化可以分解为:自然强迫(主要有太阳活动和火山活动)引起的变化+人类影响(主要有温室气体、气溶胶、土地利用和人口等)引起的变化+地球系统内部(各圈层相互作用和多时间和空间尺度)的变化。归因分析是找出人类影响引起的变化占总变化的比例,如果占比例很大,则认为总变化的主因是人类影响。在分析全球变暖的原因,就是利用归因分析的基本思路。需要说明的是,人类影响考虑2个时段:一个是历史时期(近百余年)人类影响,如在近百余年各种温室气体实际排放量和气溶胶排放量等;另一个是未来百年人类影响,需要设计各种可能的排放情景。本文涉及到前者即近百年(19世纪后半期到21世纪前期)人类影响,例如归因分析全球年平均气温的变化,根据人类影响在总变化中所占的比例,用全球气候模式运行近百余年(如1850—2018年),可分别输入只有自然强迫(自然强迫指纹),或只有人类影响(人类影响指

纹),或总变化,与观测(标准指纹)对比,由此可以判断人类影响在总变化中的作用。人类影响归因分析的时间尺度一般是年到百年。经过归因分析得到人类影响的作用,其可信度需要作信度检验。

### 1.5 信度判断标准

在归因分析中需要给出可信度,在IPCC报告中一般采用归因分析的可能性(likelihood)分级标准,是统计分析定量标准,即分级为:几乎确定(99%~100%)、极可能(95%~100%)、很可能(90%~100%)、可能(66%~100%)、有可能(50%~100%)、也许可能(33%~66%)、不可能(0~33%)、很不可能(0~10%)、极不可能(0~5%)、几乎否定(0~1%)<sup>[3]</sup>。可能性检验主要用在多种观测资料的结果的可靠性的判断(多种观测结果的一致性)以及对人类影响的可能性归因判断上(多个全球气候模式模拟结果的一致性)。在判断人类影响的可能性时,大量全球气候模式的一致性程度是重要的判断标准。在IPCC报告中还采用定性判断标准,即可信度,根据一致性程度和专家评定进行定性分级判断,即分级为:很低信度、低信度、中信度、高信度、很高信度<sup>[3]</sup>。本文中的信度判断大部分采用前者。

综上所述,可以对人类影响引起全球变暖作检测与归因分析,主要做2方面分析,一是人类影响引起全球表面温度变暖的证据,另一个是人类影响引起地球系统5个圈层变暖的更多的证据。

## 2 人类影响引起全球表面气温变暖的证据

长期以来,研究全球变暖主要采用全球年平均表面气温作为衡量标准,在各种强迫中检验其中人类影响的作用。近10年来,逐渐发展到检验更广泛的与气温相关的指标,如极端最高温度、极端最低温度、热浪和暖期、寒潮和冷期、暖日和暖夜、冷日和冷夜等。大量研究根据指纹法考虑许多全球气候模式模拟检验证实<sup>[1-7]</sup>。

1) 人类影响几乎肯定是引起近百年全球气温变暖的主因,特别是近50年。观测2019年全球气温变暖( $1.1\pm 0.1$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,而全球气候模式考虑人类影响

引起变暖 $1.0^{\circ}\text{C}$ (范围 $0.8\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ ),即观测全球变暖的90%是人类影响引起的,这是绝大多数模式的一致检验结果。观测2010—2019年全球气温,相对于1850—1900年极可能变暖 $1.0\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ ,绝大多数全球气候模式考虑人类影响造成全球气温可能变暖 $0.8\sim 1.4^{\circ}\text{C}$ ,再次证实人类影响是全球变暖的主因<sup>[1-2]</sup>。

2) 观测到的暖日/暖夜出现的频率增加且强度更暖,冷日/冷夜出现的频率减小且趋缓(冷度减弱),而大多数模式考虑人类影响得到与观测一致的特征,证实人类影响极可能是主因<sup>[3,5]</sup>。

3) 观测到的热浪/暖期频率增加且强度增强和持续的时间加长,而多数气候模式考虑人类影响证实极可能造成全球尺度热浪和暖期的增强和增多。观测出现破记录的高温增加,从全球气候模式考虑人类影响也检测出破记录的高温增加,由此表明人类影响的重要作用<sup>[3,5-6]</sup>。

4) 观测到的寒潮/冷期频率减小且强度减弱和持续的时间缩短,而多数模式考虑人类影响得到与观测一致的特征,证实人类影响极可能是主因。观测到严寒强度减弱,而全球模式考虑人类影响也证实了其主导作用<sup>[3,5,7]</sup>。

5) 以20年一遇的全球陆地日极端最高温为例,20世纪90年代相对于60年代,观测计算20年一遇的周期有减少的趋势,即更容易遇到极端高温。全球气候模式考虑所有强迫(自然和人类)减少到17年(5%~95%范围15~20年)一遇,而人类影响引起16年(5%~95%范围14~20年)一遇,由此证实人类影响是造成提前的主因<sup>[3,8]</sup>。表2给出了人类影响引起近百年全球表面气温变暖的证据<sup>[1-8]</sup>。

综上所述,研究证实,几乎确定人类影响引起全球表面气温变暖,尤其近50年变暖更明显,极可能人类影响引起暖日和暖夜增加、冷日和冷夜减少、热浪增加和寒潮减弱。

## 3 人类影响引起全球5个圈层的变暖的更多证据

人类影响引起全球表面气温的变暖是全球变

表2 人类影响引起近百年全球表面气温变暖的证据

温度变量	自然强迫	人类影响	观测
全球年平均气温增暖	0附近振动	全球尺度几乎肯定	全球尺度几乎肯定
热浪/暖期频率增加强度增强时间加长	不明显或略增减	全球尺度极可能	全球尺度几乎肯定
寒潮/冷期频率减小强度减弱时间缩短	不明显或略增减	全球尺度极可能	全球尺度几乎肯定
暖日/暖夜频率增加更暖	不明显或略增减	全球尺度极可能	全球尺度几乎肯定
冷日/冷夜频率减少趋缓	不明显或略增减	全球尺度极可能	全球尺度几乎肯定
20年一遇全球陆地日极端最高温缩短周期	不明显	全球陆地很可能	全球陆地极可能

暖的最确凿证据,近些年的研究,从全球5个圈层的更多变量和现象的变化特征,进一步证实人类影响引起更多层面与全球变暖有关的证据。由于5个圈层涉及到广泛的领域,而一般用全球气候模式

考虑人类影响做检测与归因分析只限于模式可计算的变量范围,因此这里给出的只是模式可计算的且与公众密切相关的可靠性较高的变量和现象的证据(表3)<sup>[1-12]</sup>。

表3 人类影响引起全球变暖在5个圈层的更多证据<sup>[1-12]</sup>

圈层	变量和现象	自然强迫	人类影响	观测
大气	低层几公里变暖	0附近振动	全球尺度很可能	全球尺度几乎肯定
	高纬度和热带降水量增加	不明显	可能	很可能
	强降水事件频率和强度增加	不明显	可能全球陆地强度加强	多数区域可能
	较强热带气旋降水增加,频率增多,强度增强	不明显	低信度	中信度
	表面湿度增加	不明显	低信度	中信度
海洋	海水变暖	不明显	全球尺度可能	全球尺度很可能
	海平面上升(海水热膨胀,冰融化)	不明显	全球海洋很可能	全球海洋极可能
	海洋酸度增加	不明显	全球海洋很可能	全球海洋极可能
	海冰融化增加	不明显	全球海洋很可能	全球海洋极可能
陆地生物冰雪	陆地变暖	不明显	全球尺度很可能	全球尺度很可能
	陆冰与冰川融化增加	不明显	全球尺度很可能	全球尺度很可能
	积雪融化加速	不明显	全球尺度很可能	全球尺度很可能
	永冻土融化	不明显	全球尺度很可能	全球尺度很可能
	霜冻期缩短(开始晚结束早)	不明显	全球尺度很可能	全球尺度很可能
	生长季延长	不明显	全球尺度很可能	全球尺度很可能
	开花期提前	不明显	陆地很可能	陆地很可能
	干旱事件频率和强度与持续期增加	不明显	陆地很可能	陆地很可能
洪涝强度和频率增加	不明显	低信度	一些地区可能	

表3的数据可以基本证实以下结论。

1) 人类影响引起全球变暖不仅是表面气温变暖,而且是全球大气低层几公里都变暖(自1979年以来),同时陆地表层温度到下层温度以及海洋表面水温到下层温度都变暖。以海洋热容量为例,观测计算1850—2017年海洋0~700 m热容量明显增

加,多模式模拟表明其中人类影响约占65%,人类影响极可能引起海洋热容量增加<sup>[1,3,9]</sup>。

2) 人类影响引起海水变暖,海水热膨胀,造成海平面上升。观测1900—2018年全球海平面平均上升0.19 m(范围0.15~0.22 m),多模式模拟证实很可能是人类影响引起的<sup>[1]</sup>。多气候模式模拟表明

1950—2005 年全球 0~700 m 热膨胀海平面上升的 87% 是人类影响引起的<sup>[1,10]</sup>。海冰和陆冰融化也引起海平面上升。多气候模式给出 1970—2005 年冰融化和热膨胀引起海平面上升的 70% 是人类影响造成<sup>[3,11]</sup>。

3) 人类影响引起海冰特别是北冰洋海冰融化加速,陆冰如格陵兰冰盖以及冰川融化加速。9 月北冰洋海冰明显减少,多气候模式模拟其中自然强迫和气候系统内部变率联合只占不足 42%,而人类影响约占 58%,表明人类影响起主要作用。格陵兰冰盖融化加速与气候系统内部变率如晴朗无云日数和降雪量有关,但主因是人类影响<sup>[1,3,12]</sup>。

4) 人类影响引起陆地积雪融化加速和永冻土融化。多模式模拟表明,自 1950 年以来北半球春季雪盖减少人类影响很可能起主要作用<sup>[1]</sup>。

5) 人类排放 CO<sub>2</sub> 增加,引起海洋吸收更多的 CO<sub>2</sub>, 从而造成海洋酸化增加<sup>[1,3]</sup>。

6) 人类影响引起表面湿度增加,自 1950 年以来高纬度和热带降水量增加,全球陆地强降水事件强度增强<sup>[1,3]</sup>。

7) 人类影响引起全球陆地霜冻期缩短,生长季延长,开花期提前<sup>[2,5]</sup>。

8) 有些与公众密切相关的变量如观测到一些区域干旱强度与频率的增加,洪涝强度与频率的增加,以及一些海域较强热带气旋的强度和频率增加,是否是人类影响引起的,目前尚未有充足的证据,因此可信度是低的。观测可检测到全球海域较强热带气旋近 40 年有增加的趋势,具有中等信度,但其中人类影响的作用的信度是低的<sup>[1-3,5]</sup>。

9) 观测到有些区域性多种灾害联合发生,如有些区域热浪与干旱同时出现有增加的趋势,有些区域洪涝与低温同时出现有增加的趋势等,其与人类影响的关系目前尚在研究中,表内未给出。

综上所述,在地球系统 5 个圈层,研究证据显示,很可能人类影响引起全球低层大气变暖、陆地和海洋变暖、受海水热膨胀和冰融化引起全球海平面上升、冰雪和永冻土融化加速、海洋酸化增加、陆地植物生长季延长。此外,可能高纬度和热带降水量增加。人类影响是否引起洪涝和干旱的变化以

及强热带气旋的变化,尚未有可靠证据给出一致的结论,需要进一步研究和关注。

## 4 结论

利用全球气候模式考虑人类影响,采用指纹法检测和归因证实,人类影响几乎肯定是引起近百年特别是近 50 年全球变暖的主因。地球系统 5 个圈层与全球变暖有关的证据,如全球低层大气变暖、陆地和海洋变暖、受海水热膨胀和冰融化引起全球海平面上升、冰雪和永冻土融化加速、海洋酸化增加、陆地植物生长季延长等,都与人类影响有密切联系。由于全球变暖与全球环境与生态系统以及人类社会与经济等诸方面有紧密关系,相应受到极大影响,因此需要采取各种对策与策略,减缓或减少不利影响,而控制人类排放和形成有序的人类活动是需要极其关注的问题。

需要强调的是,在归因分析中离不开全球气候模式的应用,尽管近些年全球气候模式已经研究发展成地球系统模式,更加接近地球系统 5 个圈层的特征。但是限于对地球系统的科学认知不够,因此地球系统模式尚存在许多不确定性,特别是对区域尺度的模拟以及气候系统内部变率的模拟。现在有几十个地球系统模式,由于采用的水平和垂直分辨率不同,对许多物理、化学、生物等过程的各种参数化方案很不同,如云和气溶胶等,因此造成多模式对有些变量的模拟结果的不一致或发散,使得一些证据的可靠性降低。此外,地球系统 5 个圈层有些变量缺少足够的观测资料,也影响了全球气候模式的发展。

随着科学家对地球系统的科学认知的加深,随着计算技术的发展,人工智能的应用,地球系统模式和更先进的工具的发展,会获得更多的人类影响引起全球变暖的证据。21 世纪 20 年代及其以后,如果人类排放温室气体继续增加,由于人类影响引起全球继续变暖和与之相应的其他现象,值得科学界和政策制定者与公众的注意,需要进一步研究相应的对策。

## 参考文献 (References)

- [1] WMO Statement on the state of the global climate in 2019 [R]. WMO, 2020.
- [2] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C (SR15) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 785.
- [3] Climate change 2013: The physical science basis by IPCC WG1[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535
- [4] Bock L, Lauer A, Eyring V, et al. Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, doi: org/10.1029/2019JD032321.
- [5] Fields C B, Barros T F, Stocker D, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 582.
- [6] Winter, H C, Brown S J, Tawn J A. Characterising the changing behaviour of heatwaves with climate change[J]. Dynamics and Statistics of the Climate System, 2017, doi: 10.1093/climsys/dzw006.
- [7] van Oldenborgh G J, Mitchell-Larson E, Vecchi G A, et al. Cold waves are getting milder in the northern midlatitudes[J]. Environmental Research Letter, 2019, 14(5): 114004.
- [8] Kim Y H, Min S K, Zhang X, et al. Attribution of extreme temperature changes during 1951–2010[J]. Climate Dynamics, 2016, 46(10): 1769–1782.
- [9] Durack P, Gleckler P, Purkey S, et al. Ocean warming: From the surface to the deep in observations and models [J]. Oceanography, 2018, 31(1): 41–51.
- [10] Marcos M, Amores A. Quantifying anthropogenic and natural contributions to thermosteric sea level rise[J]. Geophysical Research Letter, 2014, 41(22): 2502–2507.
- [11] Slangen A B A, Church J A, Agosta C, et al. Anthropogenic forcing dominates global mean sea-level rise since 1970[J]. Nature Climate Change, 2016, 6: 701–705.
- [12] Song M, Wei L, Wang Z. Quantifying the contribution of natural variability to September Arctic sea ice decline [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(5): 49–53.

## Evidences of human influence on global warming

ZHAO Zongci<sup>1,2</sup>, LUO Yong<sup>1</sup>, HUANG Jianbin<sup>1</sup>

1. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China

**Abstract** This paper is a summary and review of studies on attribution of global warming, an issue getting more and more attention from policy makers and public. After a brief introduction to the global warming research in terms of methods and tools of attribution analysis, this paper summarizes the achievements of scientific research on evidences of human influence on global warming in recent years. Using the global climate models with human influence and using fingerprint detection and attribution, it is found that human influence was virtually certain to be the main cause of global warming in the past century, especially the last 50 years. The evidences of global warming in five spheres (atmosphere, hydrosphere, lithosphere, biosphere and cryosphere) of the earth system, such as increased heat waves, weakened cold wave, lower atmosphere warming, land and ocean warming, global sea level rising caused by both thermostatic expansion of sea water and ice melting, the accelerated melting of ice, snow and permafrost, the increased acidity of ocean, and extended plant growth season, are all closely related to the human influence.

**Keywords** human influence; global warming; five spheres ●



(责任编辑 祝叶华)