

年际和年代际冷暖变化是人类活动碳排放量增减的诱因

钱维宏, 陆波, 梁浩原

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

E-mail: qianwh@pku.edu.cn

2010-09-16 收稿, 2010-11-01 接受

中国科学院战略性先导科技专项资助

摘要 工业化以来的近百年全球平均气温、大气 CO_2 浓度和欧美发达国家(美国、英国、法国和德国)化石燃烧年和月的碳排放量等数据用于分析它们之间在年际和年代际时间尺度上的变化关系. 在年际尺度上, 美国冬季气温偏低(高)年的碳排放量显著增加(减少); 夏季与之相反, 化石燃烧的碳排放量与气温存在显著的正相关. 在年代际尺度上, 美国和全球的气温偏冷(暖)期对应碳排放量的高(低)值期, 而且气温冷暖变化超前 5~7 年与碳排放量增减有显著的相关. 这种年代际的超前相关关系以及年际的季节不对称性都显示出, 气温冷暖变化是人类活动碳排放量增减的诱因.

关键词

全球气温
美国气温
碳排放量
年际
年代际
诱因

2001 年联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的评估报告 (TAR) 指出, “最近 50 年观测到的大部分变暖可能是由于温室气体浓度的增加”^[1]. 2007 年 IPCC 评估报告 (FAR) 进一步指出, “观测到的 20 世纪中叶以来大部分的全球平均温度的升高, 很可能是由于观测到的人为温室气体浓度增加所致”^[2]. 在一系列人类活动排放情景下, 2007 年 IPCC 报告模式预估的未来 20 年增暖速率为每 10 年 0.2°C . 然而, Knight 等人^[3]首次披露 1999~2008 年全球平均温度仅上升了 0.07°C , 显著低于 1979~2008 年的趋势值 $0.18^\circ\text{C}/10\text{ a}$. 如果剔除赤道太平洋 El Niño 增温的影响, 这 10 年的增暖趋势实际为零. 然而, 大气中二氧化碳 (CO_2) 浓度最近 10 年仍继续在增加, 甚至比 20 世纪最后 10 年的增长还快. 于是, 有评论提出“全球变暖中发生了什么^[4]”、“近 10 年全球变暖停止了^[5]”.

正如 2007 年 IPCC 报告指出的, CO_2 是最重要的 人为温室气体, 并且自工业化以来它的增加主要源于化石燃料的使用. 因此, 认识化石燃烧碳排放与全球平均气温之间的因果关系是很有意义的. 针对这个问题, 本文试图用工业化以来的近百年全球气

温和欧美主要发达国家的化石燃烧碳排放量等数据, 分年际和年代际时间尺度定量检测和分析它们之间的因果关系. 全球气温采用了 HadCRUT3^[6] 1850~2006 年的器测温度. 1981~2003 年美国月气温资料取自 <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cirs/>. 美国 1850 年以来的气温资料取自 <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/cag3/na.html>. 欧美主要发达国家 (美国、英国、法国、德国) 化石燃烧逐年 (1850~2006 年) 和美国逐月 (1981~2003 年) 的碳排放数据取自美国橡树岭国家实验室 CO_2 信息分析中心 (CDIAC)^[7]. 年分辨率 (1850~1978 年) 的大气 CO_2 浓度序列取自 3 条冰芯的分析^[8]. Keeling 序列^[9]是器测 1958~2006 年的年平均大气 CO_2 浓度. 在 1958~1978 年的 21 年期间, 冰芯分析的大气 CO_2 浓度序列与器测 CO_2 浓度序列有一个可比较的时段. 这样, 对接的 1850~2006 年大气 CO_2 浓度序列可用于与化石燃烧碳排放年代尺度的趋势比较.

在资料序列的分析中, 我们采用了时间序列转折点的检测方法. 对近 157 年长度的各种序列, 以连续 5 年的序列计算滑动趋势斜率. 对斜率序列做时间窗口 10~20 年的扫描式 t -检验^[10], 确定和比较 t -

英文版见: Qian W H, Lu B, Liang H Y. Changes in fossil-fuel carbon emissions in response to interannual and interdecadal temperature variability. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-010-4279-9

检验达到显著性标准的那些尺度及其变化达极值的时间点. 这些时间点确定为原序列的转折点. 我们把这两步法称为“斜率 t -检验”.

为了获得变量中的年际和年代际信息, 原始序列需要去除长期趋势. 去除单变量长期趋势有不同的方法, 如经验模态分解(EMD)^[11]和奇异谱分析(SSA)^[12]. 这些方法的优越性在于能用较少的分量快速地拟合原序列, 但不足在于这些分量, 特别是前两个趋势分量的物理意义不明确. 本文不是单变量分析, 而是气温与碳排放量之间的关系分析, 采用哪种去长期趋势方法对距平序列的误差影响都是均等的. 所以, 本文对比较的两个变量序列只做简单的线性去趋势.

1 美国年际碳排放量与气温的关系

20 世纪, 美国是世界上化石燃烧碳排放量的第一大国. 美国化石燃烧碳排放量具有长期增加的趋势, 也有年际和年代际变化. 我们先分析美国年际碳排放量与美国年际气温之间的关系. 为了突出反映年际和季节变化, 采用 CDIAC^[7]提供的美国 1981 年 1 月~2003 年 12 月的逐月碳排放量数据计算了美国冬(夏)季碳排放量与美国冬(夏)季气温的关系.

在 1981~2002 年的 22 年中, 美国冬季碳排放量稳定增加, 趋势值为每 10 年 45×10^6 t. 相同时期美国冬季平均气温也是增加的, 趋势值是每 10 年 0.78°C . 为了突出分析它们之间的年际变化关系, 我们分别去除了它们的 22 年长期趋势. 图 1(a)给出了去趋势后的逐年美国冬季气温和美国冬季碳排放量的曲线. 它们之间的相关系数是 -0.58 , 达到 99% 的信度水平. 1981 年和 2000 年是 22 年中冬季碳排放量最多的 2 年, 也是冬季气温低的 2 年. 1982, 1986, 1991, 1994, 1997~1998 和 2001 年是美国冬季气温偏高的 7 年, 也是美国冬季碳排放量相对偏少的 7 年. 这个关系可以初步解释为, 美国冬季的气温低与高, 决定了美国碳排放量的多与少. 当气温偏低时, 人们需要增加化石燃烧采暖, 结果碳排放增加. 当气温偏高时, 人们不需要额外地增加化石燃烧来采暖, 碳排放下降. 另一种可能的解释是, 美国在排放多的冬季释放了更多的气溶胶, 散射太阳辐射, 导致气温降低.

类似地, 分析 1981~2003 年美国夏季碳排放量与美国夏季温度的年际变化关系. 去除美国夏季碳

排放量与夏季温度的 23 年趋势(分别为每 10 年 18×10^6 t 和每 10 年 0.28°C), 得到图 1(b)所示的年际变化曲线. 有趣的现象是: 美国夏季的化石燃烧碳排放量与夏季温度有显著的年际正相关, 二者相关系数为 0.56 , 通过 99% 信度检验. 这可以解释为, 夏季气温高时, 人们需要增加化石燃烧发电降温, 以满足人们舒适生活的需要. 而气溶胶的冷却作用在这里解释不通. 冬季气温和化石燃烧碳排放量的年际方差是夏季的 2~3 倍, 因此全年的年际气温与碳排放量关系将由它们在冬季的变幅决定.

为了揭示碳排放量与气温之间的长时间变化关系, 我们用 1900~2006 年美国逐年碳排放量序列和美国同期气温序列(图 2(a),(b))进行了两步处理. 第一步是去除它们的长期趋势, 得到图 2(c)中的气温偏差和碳排放量偏差序列. 美国气温和美国碳排放量的长期(1900~2006 年)线性趋势分别是每 100 年增暖 0.68°C 和每 100 年增加 13.7 亿吨. 它们长期趋势之间的因果关系留待有几百年的序列资料后去考证. 第二步是去除它们的 9 年滑动平均值, 即去除年代际变化, 得到年际变化序列(图 2(d)). 从图 2(c)和(d)中看出, 20 世纪初和 1960 年前后在年代际和年际变化上, 它们的变化幅度都比前后时段小. 这反映出气温与碳排放量之间确实有内在的联系. 计算图 2(c)中两条 9 年滑动平均序列之间的最大滞后相关系

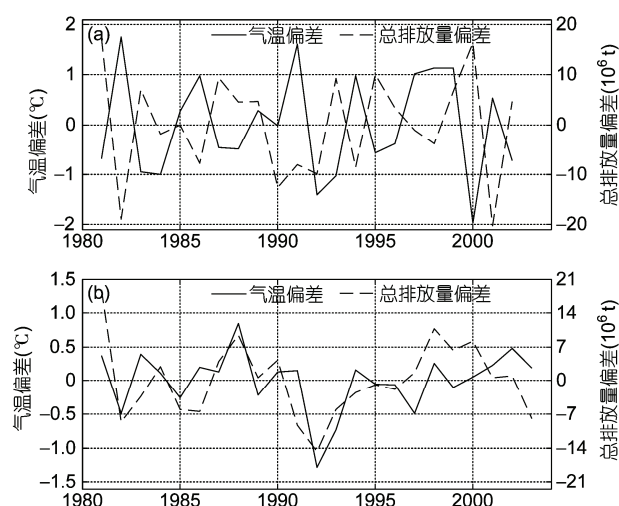


图 1 美国冬季和夏季平均气温偏差(实线)与美国同期燃烧季节总排放量偏差(虚线)序列

(a) 1981~2002 年美国冬季(12 月至次年 1~2 月); (b) 1981~2003 年美国夏季(6~8 月)

数为-0.45(温度超前碳排放量7年), 达到99%的信度水平, 而滞后7年的相关系数仅为-0.05. 图2(d)中两条序列年际之间的同期相关系数最大, 为-0.36, 也达到了99%的信度水平, 超前1年和2年的相关系数

为-0.23(达到99%信度水平)和0.15(未达到99%的信度), 而滞后1年的相关系数为0.03. 这些超前和滞后相关系数反映出, 美国的年际冷暖变化在先, 而碳排放量增减在后.

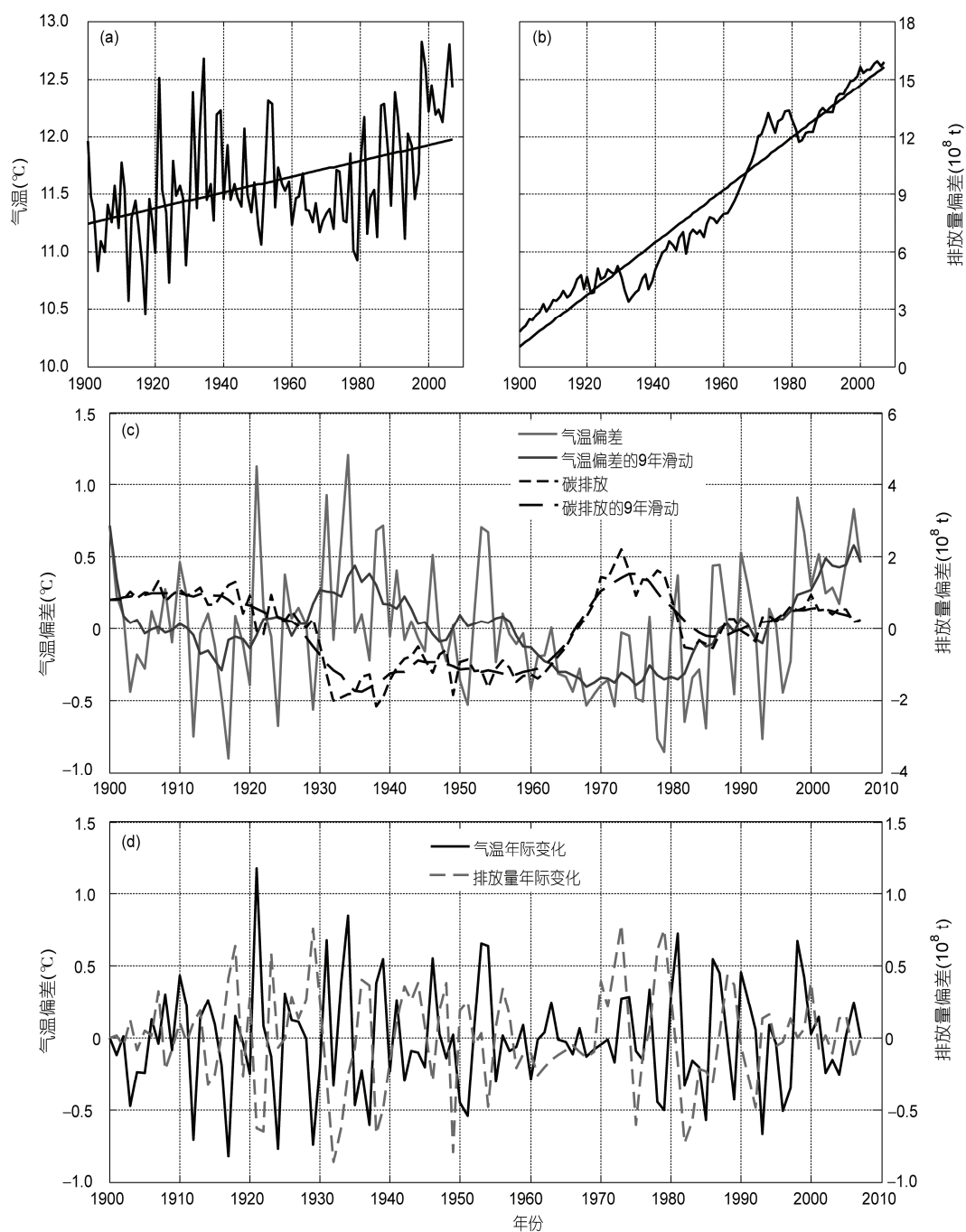


图2 公元1900~2006年美国逐年气温与美国逐年碳排放量

(a) 年平均气温及其长期线性趋势线; (b) 年碳排放量及其长期线性趋势线; (c) 去长期趋势后的气温偏差序列(细实线)及其9年滑动平均线(粗实线), 去长期趋势后的碳排放量(细虚线)及其9年滑动平均线(粗虚线); (d) 气温中的年际变化(黑色实线)与碳排放量年际变化(灰色虚线)

2 欧美年代际碳排放量与气温的关系

在年代际尺度上,北半球平均气温与全球平均气温的变化趋势基本一致.1850~2008年全球气温以每100年 0.44°C 的速率增加并具有多时间尺度的振荡^[13].为了进一步认识人类活动与全球气温变化的关系,图3给出了1850~2005年欧美4个主要发达国家逐年碳排放量和总排放量的序列.工业化以来,总排放量与美国碳排放量都有长期增加的趋势.工业化以前,全球气温就有年代际和世纪尺度 0.5°C 的变幅^[14].不同的是,碳排放量从无到有只是在近100多年才发生的事.工业化以来的全球增暖和碳排放量长期增加的因果关系有待将来积累了更长资料才能确定.这里,我们集中于它们之间年代际关系的分析.

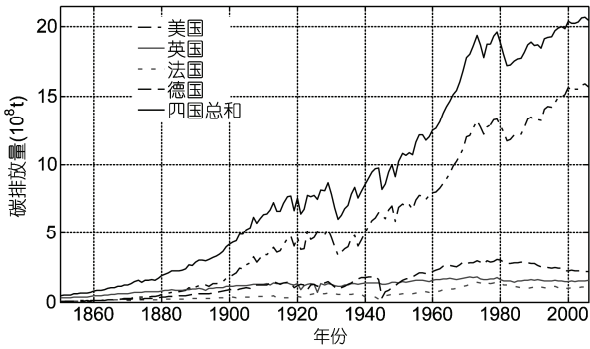


图3 公元1850~2006年欧美四国化石燃烧碳排放量和四国排放总和的逐年序列

从1850年到1918年前后,四国的化石燃烧碳排放量都是增加的.20世纪10年代是4个国家碳排放量总和的第一个峰值期,而那时正经历着20世纪的第一个气温冷期.20世纪30年代,碳排放量总和处于长期增加过程中的低值期,全球气温在1940年前后达到了一个暖期.20世纪70年代,碳排放量总和经历了第二次的显著增加,而同期全球气温出现了持续的下降.日本和加拿大也在1970年代碳排放量到达了峰值期(图略)^[15].1980~2006年的碳排放量又经历了一次降低的波动,对应为20世纪以来全球气温最暖的时期.

从图3中可以看出,前50年(1850~1899年),碳排放量随着工业化的进程呈直线上升,并不像全球平均气温那样有明显的年际和年代际振荡.其原因正好反映出,早期碳燃烧并不依赖于气温的振荡,而是工业发展的驱动.或者说明,那时的碳燃烧并不服务于人们的生活.诚然,后来碳排放量中的长期增长趋势仍然由工业发展驱动,而碳排放量的波动式增减是气温变化影响人类活动造成的.

我们取1900年以来有波动式增减的欧美4个国家碳排放量序列和全球气温序列做分析.图4反映的是年代际时间尺度上气温与碳排放总量变化之间的关系.在这一时间尺度上,碳排放量多对应的是全球气温偏低,反之碳排放量少对应的是全球气温偏高.它们之间,未经平滑的最大超前相关系数是 -0.48 (气温超前碳排放量5年),同期相关为 -0.40 ,都达到99%的信度水平;而滞后5年相关为 -0.32 .9

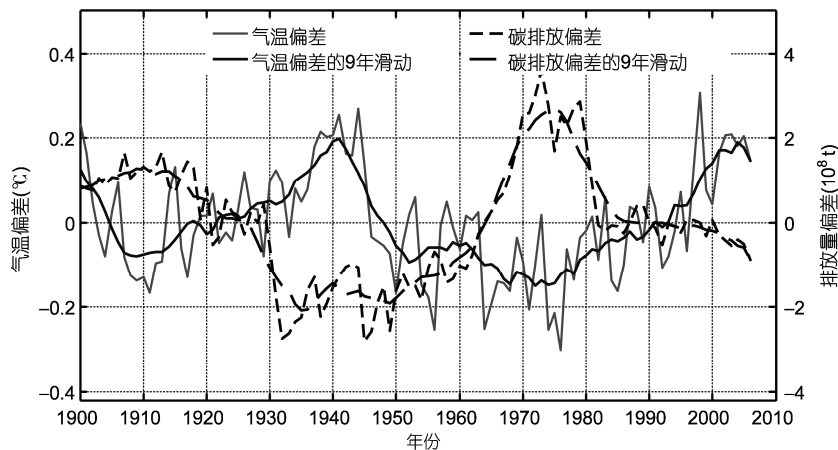


图4 去长期趋势后的公元1900~2006年全球气温偏差序列和西方4个国家碳排放总量偏差序列
细实线和细虚线分别是它们去长期趋势后的偏差序列;粗实线和粗虚线为9年滑动平均

年滑动平均后的气温超前碳排放量 6 年的相关系数最大, 为-0.68, 达到 99% 的信度水平, 而滞后 6 年的相关系数为-0.35. 从图 4 清楚地看出, 1910 年前后的全球低温期, 碳排放量达到了峰值, 而 1940 年前后的暖期对应的是 20 世纪 30 年代和 40 年代碳排放量的低谷期. 20 世纪 70 年代的气温低谷, 恰恰是碳排放量的高峰. 20~21 世纪之交的年代尺度气温增暖, 又正好是碳排放量的下降期. 这样的位相差关系说明, 气温的冷暖变化是人类活动碳排放增减的诱因.

3 人类活动反映的大气 CO₂ 浓度变化

根据 Marland 等人的研究结果^[16], 全球化石燃烧 CO₂ 排放量增加的速率可分为 4 个时期, 1850~1907 年, 1907~1949 年, 1949~1972 年和 1972~2005 年, 它们的年增长速率分别是 4.4%, 1.3%, 4.3% 和 1.2%. 第一个时期以煤炭的燃烧为主, 增加迅速. 第二个时期石油和天然气的使用量增多. 这段时期总体燃烧量增加的速率比第一时段下降了 70%. 第三个时期, 由于石油和天然气的大量使用, 全球总燃烧量又恢复到之前的增长速率. 第四个时期可能是核能等新能源的开发利用, 使得化石燃烧的增长速率下降.

我们给出欧美四国碳排放总量序列、全球气温序列和大气 CO₂ 浓度序列用“斜率 *t*-检验”法检测得到的转折点. 1912 年以前, 欧美四国碳排放总量以每年 9.3×10^6 t 的速率上升; 1912~1947 年碳排放总量的增速有所减缓, 以每年 6.2×10^6 t 的速率上升; 1947~1972 年碳排放总量迅速增加, 达到每年增排 35.0×10^6 t; 1972~2005 年碳排放总量的增速放缓至每年 6.6×10^6 t. 英国、德国和法国在两次世界大战期间的碳排放都经历了波动式的下降. 20 世纪欧美发达国

家的总排放量增减与全球化石燃烧总排放量的增减具有同期性.

工业化以来, 大气 CO₂ 浓度在总体增加的过程中, 在各个时段有不同的增加速率. 1850~1900 年大气 CO₂ 浓度以每 10 年 2.9 ppmv (1 ppmv=1 μL/L, 下同) 的速率增加, 1900~1952 年以每 10 年 3.2 ppmv 的速率增加, 1952~1976 年以每 10 年 8.4 ppmv 的速率增加, 1976~2005 年以每 10 年 15.8 ppmv 的速率增加. 这 4 个时段的大气 CO₂ 浓度增加正好反映了全球化石燃烧积累量的时段变化和四国碳排放总量的时段变化(表 1). 在表 1 中, 全球气温变化是波动式的, 并且在年代变化位相上与人类活动碳排放量变化相反.

Keeling 曲线反映出自 1958 年以来大气 CO₂ 浓度呈增加的趋势^[9]. 大气 CO₂ 浓度的增加被认为主要是化石燃烧的结果. 最近 10 年(2000~2009 年)中, 大气 CO₂ 浓度以每年 2.04 ppmv 的速率增长, 而过去 50 年平均每年仅增加 1.46 ppmv. 最近 10 年的大气 CO₂ 浓度快速增加趋势与这 10 年的气温趋势并不一致.

4 结论与讨论

从年际和年代际时间尺度上, 我们认识了人类活动碳排放和大气 CO₂ 浓度变化与全球气温变化之间的关系.

(1) 大气 CO₂ 浓度增加反映的是化石燃料燃烧排放总量的累加. 第二次工业革命以来的一个半世纪, 人类碳排放速率经历了“高-低-高-低”的 4 个振荡时段, 而大气 CO₂ 浓度经历了“4 次提速”的过程. 1850 年以来人类活动碳排放量的长期增加趋势反映了工业化的快速发展, 其中 1900 年以来的碳排放波动式增减受到气温年际和年代变化的影响. 百年尺

表 1 四个时段全球化石燃烧 CO₂ 排放总量增长速率^[16]、欧美四国碳排放总量变化速率、大气 CO₂ 浓度增加速率和全球气温趋势

时段		1	2	3	4
全球化石燃烧 CO ₂ 排放总量	年份	1850~1907	1907~1949	1949~1972	1972~2005
	速率	4.4%(高)	1.3%(低)	4.3%(高)	1.2%(低)
欧美四国碳排放总量	年份	1850~1912	1912~1947	1947~1972	1972~2005
	10 ⁶ tC/a	9.3(高)	6.2(低)	35.0(高)	6.6(低)
大气 CO ₂ 浓度增加速率	年份	1850~1900	1900~1952	1952~1976	1976~2005
	ppmv/10 a	2.9	3.2	8.4	15.8
全球气温趋势	年份	1878~1911	1911~1944	1944~1976	1976~1998
	℃/10 a	-0.088	0.160	0.003	0.175

度的气温变化与人类活动碳排放量长期增加的关系有待以后更长资料的分析。

(2) 在年际时间尺度上, 气温冷暖波动是驱使碳排放量增减的关键因素。美国气温与碳排放量之间的变化数据显示, 冬季气温偏高 1.5°C , 碳排放量可减少 $10\times 10^6\sim 20\times 10^6\text{ t}$, 而冬季气温偏低 2°C , 碳排放量会增加 $16.4\times 10^6\text{ t}$ 。夏季的情况刚好相反, 气温与碳排放量之间有显著的正相关。在美国气温年际波

动比较大的 1912~1954 年和 1973~2000 年, 美国年碳排放总量也有大的波动, 而且两者之间有显著的同期和超前 1 年的反相关。

(3) 在年代际时间尺度上, 欧美发达国家碳排放总量的高(低)值期对应着全球气温的冷(暖)期。碳排放量变化滞后气温变化 5 年可能反映出人类活动对气候变化的响应有一个时间滞后。因此, 年代际气温变化可能是碳排放量增减的诱因。

致谢 王绍武教授提出了增加季节和年际气温与燃烧排放量关系分析的建议, 在美国(Georgia Institute of Technology)任教的邓毅博士提出了增加美国气温与燃烧排放量关系分析的建议, 审稿专家提出了分时间尺度做分析和强化碳排放量与气温波动之间的关系分析的建议, 在此表示感谢。

参考文献

- 1 IPCC (TAR). Summary for policymakers. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2001
- 2 IPCC (FAR). Summary for policymakers. In: Solomon S D, Qin D, Manning M, et al, eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007
- 3 Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? Bull Amer Meteor Soc, 2009, 90: S22-S23
- 4 Kerr R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit. Science, 2009, 326: 28-29
- 5 王绍武, 罗勇, 唐国利, 等. 近 10 年全球变暖停止了么? 气候变化研究进展, 2010, 6: 95-99
- 6 Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. J Geophys Res, 2006, 111: D12106, doi: 10.1029/2005JD006548
- 7 Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Global, regional, and national fossil fuel CO_2 emissions. <http://cdiac.ornl.gov>
- 8 Etheridge D M, Steele L P, Langenfelds R L, et al. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO_2 over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. J Geophys Res, 1996, 101: 4115-4128
- 9 Keeling C D, Bacastow R B, Bainbridge A E, et al. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus, 1976, 28: 538-551
- 10 江剑民, Fraedrich K, 邹耀仁. 多尺度突变现象的扫描式 t 检验方法及其相干性分析. 地球物理学报, 2001, 44: 32-40
- 11 Wu Z H, Huang N E, Long S R, et al. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 14889-14894
- 12 Schlesinger M E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. Nature, 1994, 367: 723-726
- 13 钱维宏, 陆波, 祝从文. 全球平均温度在 21 世纪将怎样变化? 科学通报, 2010, 55: 1532-1537
- 14 钱维宏, 陆波. 千年全球气温中的周期性变化及其成因. 科学通报, 2010, 55: 3116-3121
- 15 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2050 年大气 CO_2 浓度控制: 各国排放权计算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1009-1027
- 16 Marland G, Boden T A, Andres R J. Global, regional, and national CO_2 emissions. In: A compendium of data on global change. Tennessee: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge. 2008