

# 中美俄加陆域碳汇对人为增温的消减贡献

崔耀平<sup>1,2</sup>, 李楠<sup>1,2</sup>, 付一鸣<sup>2</sup>, 陈良雨<sup>2</sup>

(1. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004;

2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

**摘要:** 作为主要的气候强迫因子,  $\text{CO}_2$  与人类活动密切相关, 但很多研究往往忽视了陆地生态系统碳汇对人为排放  $\text{CO}_2$  增温的消减作用。俄罗斯、加拿大、中国和美国是世界上地域面积最大、且社会经济处于不同发展阶段的4个国家, 将短时期内  $\text{CO}_2$  排放所引起的辐射强迫进行量化分析, 对于评估人为和自然因素对气候的影响非常重要。本文基于  $\text{CO}_2$  同化数据, 利用“碳—气候”参数化方案, 在分析人为碳排放及其气候效应的同时, 考虑陆地生态系统碳汇的气候效应, 进而得到4个国家的全球辐射强迫。结果显示: ① 2000—2016年, 4个国家人为排放的  $\text{CO}_2$  均呈明显增加趋势 ( $0.125 \text{ Pg C a}^{-1}$ ), 但陆地生态系统的碳汇作用也不断增强 ( $0.003 \text{ Pg C a}^{-1}$ ); 其中, 中美两国总的人为碳排放占了4个国家的87.19%, 而俄罗斯陆地生态系统的吸收碳能力最强, 总量达  $14.69 \text{ Pg C}$ 。② 截至2016年, 陆地生态系统的降温效应达  $-0.013 \text{ W m}^{-2}$ , 可消减人为碳排放增温效应的45.06%。充分说明若不考虑陆地生态系统, 将会明显高估人为碳排放的增温效应。③ 整体上, 相对于2000年和工业革命前的  $\text{CO}_2$  浓度水平, 4个国家总的人为碳排放分别贡献了  $0.32 \text{ W m}^{-2}$  和  $0.42 \text{ W m}^{-2}$  的全球辐射强迫。本文还进一步探讨了温度与辐射强迫的线性关系, 相对于单一的人为或者自然因素而言, 综合两者的辐射强迫, 与相应时段的气温变化可解释度最高, 达30.3%。

**关键词:** 温室气体; 辐射强迫; 人为碳排放; 陆地生态系统; 消减作用

DOI: 10.11821/dlxb202101013

## 1 引言

由于人类活动和自然变化的共同影响, 气候变暖已成为全球不得不面对的事实。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的评估报告指出, 自20世纪50年代以来, 人为活动所引发的温室气体 (GHGs) 排放在全球气温变暖过程中发挥着重要作用, 其可信度超过了95%<sup>[1]</sup>。 $\text{CO}_2$  作为一种最重要的温室气体, 其引起的辐射强迫约占长寿命 GHGs 所引发辐射强迫的65%<sup>[2]</sup>。研究人为和自然因素引起的大气  $\text{CO}_2$  变化对气温的影响, 一方面可以评估人为和自然因素在调节气候中的重要作用, 另一方面可以为分析国别间的“碳中和”、建立公平合理的碳减排分配方案提供科学依据。

人为温室气体排放和陆地生态系统碳循环均受到人类社会经济活动和自然因素的共同影响。人类活动导致 GHG 的异常升高将导致全球变暖持续数千年<sup>[3-4]</sup>。陆地生态系统的碳源汇功能对人为活动释放的  $\text{CO}_2$  具有重要的调节功能<sup>[5]</sup>。在21世纪初, 全球范围内化石燃料排放的  $\text{CO}_2$  约  $9.0 \text{ Pg C a}^{-1}$ <sup>[6]</sup>, 而陆地生态系统年均碳汇达到  $1.5 \pm 0.9 \text{ Pg C a}^{-1}$ , 高于20世

收稿日期: 2019-04-02; 修订日期: 2020-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071415, 41671425); 河南省自然科学基金优秀青年基金项目 (202300410049)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42071415, No.41671425; Outstanding Youth Foundation of Henan Natural Science, No.202300410049]

作者简介: 崔耀平 (1984-), 男, 河南周口人, 教授, 博导, 研究方向为自然资源学。E-mail: cuiyp@lreis.ac.cn

纪90年代的 $1.1 \pm 0.9 \text{ Pg C a}^{-1}$ <sup>[1, 7]</sup>。但是, 不同国家或地区、不同的发展阶段、不同的人类活动强度和陆地生态系统, 对全球变化的影响也会存在很大差异。

辐射强迫 (Radiative Forcing, RF) 是对某气候强迫因子改变“地球—大气”系统能量收支平衡影响程度的度量, 同时其也是反映强迫因子作用于气温变化的一个指标<sup>[8]</sup>。IPCC也采用RF来定量评估不同自然和人为强迫因子在引起气候变化方面的强度<sup>[9]</sup>。无论是解释过去的气候变化, 还是预测未来的气候变化, 都有必要研究大气CO<sub>2</sub>变化引起的辐射强迫。因此, 很多研究在长时间尺度下进行了RF的模拟研究<sup>[10-13]</sup>。但是Joos等研究证实, CO<sub>2</sub>在排放到大气中的头20 a对气温的扰动最为明显, 随后进入稳定阶段<sup>[14]</sup>。一些研究还显示, 工业革命以来CO<sub>2</sub>的辐射强迫为 $1.82 \pm 0.19 \text{ W m}^{-2}$ , 但在21世纪前10年, 辐射强迫就提升了 $0.2 \text{ W m}^{-2}$ <sup>[11, 15]</sup>。因此, 开展短时间尺度的对应分析亟待加强, 尤其是21世纪以来, 可以利用更为详实的数据来开展对应时间段的研究。

中国、美国、俄罗斯和加拿大4个国家的人为CO<sub>2</sub>排放在全球具有重要占比。2014年, 4个国家化石燃料燃烧排放的CO<sub>2</sub>全球占比接近一半<sup>[16]</sup>。从历史上看, 美国长期以来一直是世界上最大的人为CO<sub>2</sub>排放国<sup>[16]</sup>, 2006年中国的CO<sub>2</sub>排放量首次超过美国<sup>[17]</sup>。2001—2006年间, 全球54%的CO<sub>2</sub>排放来自中国<sup>[18]</sup>, 但是作为全球主要的CO<sub>2</sub>排放国, 美国、俄罗斯和加拿大的人均CO<sub>2</sub>排放量均高于中国<sup>[19]</sup>。因此, 研究世界主要排放国的CO<sub>2</sub>排放的变化及其对气温的影响, 对促进各国加大减排力度和实现全球应对气候变化的长期目标均具有重要意义。

本文使用CO<sub>2</sub>同化数据集研究中国、美国、俄罗斯和加拿大4个国家的人为碳排放时空分布及其对应的RF; 并进一步分析陆域生物圈对人为碳排放增温的消减作用。本文关注的核心是4个国家2000—2016年间, 人为和自然因素共同作用下的CO<sub>2</sub>浓度变化对全球变化的贡献。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区域

本文选取全球面积最大的4个国家: 俄罗斯、加拿大、中国及美国为研究区, 总面积占全球陆地面积的31.2%。4个国家经济发展程度和发展阶段各有不同, 根据世界银行的《全球经济展望》报告, 北美的美国和加拿大国家为发达经济体, 而亚洲的俄罗斯和中国为新兴市场和发展中经济体<sup>[20]</sup>。2000年以来, 各国经济发展速率依次为: 中国>俄罗斯>加拿大>美国<sup>[21]</sup>, 且这个次序在本文研究时段内基本保持不变。

### 2.2 研究数据

本文CO<sub>2</sub>数据来自美国国家海洋与大气管理局地球系统研究实验室提供的2017年版本的碳源追踪同化数据集 (CT2017), “碳追踪”是一个全球大气CO<sub>2</sub>模型, 旨在跟踪地球表面CO<sub>2</sub>的吸收和释放情况, 其原数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ , 时间分辨率为月, 本文处理成年进行计算和分析。本文所用的CO<sub>2</sub>通量数据包括: 陆域生物圈的净生态系统碳交换量 (NEE) (不包括野火)、野火燃烧以及化石燃料排放的CO<sub>2</sub>。其中, 人为碳通量 (AF) 主要是化石燃料燃烧释放的CO<sub>2</sub>, 可以反映人类普遍的社会经济活动, 而自然碳通量 (NF) 包括了陆地生态系统和野火燃烧的CO<sub>2</sub>通量。本文联立人为和自然CO<sub>2</sub>通量分析其对应的RF。

本文所用全球月平均气温数据来自美国国家航空航天局戈达德航天研究所GISS分析的表面气温。时间跨度为2000—2016年, 数据被处理成年平均温度进行计算和分析。

### 2.3 研究方法

单一的气候模式得到的结果具有一定的不确定性, 而多模式模拟结果间往往也存在着很大的差异性。并且复杂的气候模式参数众多和各因素影响交织, 不利于直接探讨碳量变化对应的气候敏感性。本文为了量化2000—2016年自然和人为因素对气候的影响, 分别计算了研究区陆地生态系统、野火及化石燃料燃烧产生的 $\text{CO}_2$ 各自的RF; 同时也计算了净RF, 并将陆地生态系统和野火的RF一同归属于自然RF, 而化石燃料的RF归为人为RF。设置了2种计算RF的情景: ① 当年吸收或释放的 $\text{CO}_2$ 造成的RF (ARF), 用来研究自然因素对人为碳排放增温效应的消减作用; ②  $\text{CO}_2$ 释放到大气中不断衰减累积造成的RF (CRF), 即时间积分累积的RF, 用来研究人为碳排放的增温贡献。

(1) 年辐射强迫。本文使用Myhre等<sup>[22]</sup>提出的一种参数化方法来计算人为或自然 $\text{CO}_2$ 的RF:

$$\Delta ARF(t) = 5.35 \ln \left( 1 + \frac{\Delta C(t)}{C_0} \right) \quad (1)$$

式中:  $\Delta ARF(t)$ 为时间 $t$ 时的RF;  $\Delta C(t)$ 为大气 $\text{CO}_2$ 当年的浓度变化;  $C_0$ 为背景 $\text{CO}_2$ 浓度, 5.35是关联摩尔 $\text{CO}_2$ 变化与辐射强迫的一个常数<sup>[23]</sup>。

需要注意的是, 当陆地生态系统的NEE小于零即表现为碳汇起到降温效果时:

$$\Delta ARF(t) = -5.35 \ln \left( 1 + \frac{\text{abs}(\Delta C(t))}{C_0} \right) \quad (2)$$

式中:  $\text{abs}$ 为绝对值函数。

(2) 累积辐射强迫。与大多数其他物质不同,  $\text{CO}_2$ 不会被大气中的化学反应破坏或沉积在地球表面, 而是在主要的碳库如大气、海洋、陆地生态系统重新分布, 涉及多个时间尺度, 释放的 $\text{CO}_2$ 引起的初始扰动有相当一部分在大气和海洋中存在了数千年<sup>[12, 23]</sup>。大气中 $\text{CO}_2$ 的长期性和累积性意味着它与气候反应是耦合的, 因此即使排放停止, 以前排放的 $\text{CO}_2$ 也会继续影响气候<sup>[23-24]</sup>。

考虑到每个向大气中释放的 $\text{CO}_2$ 脉冲在全球碳循环的碳汇中部分消失, 脉冲响应函数 (IRF) 可以用来描述这种变化<sup>[25]</sup>:

$$IRF_{\text{CO}_2}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \exp \left( \frac{-t}{\tau_i} \right), \quad t \geq 0 \quad (3)$$

式中:  $\tau_i$ 为某个时间尺度;  $a_0$ 和 $\alpha_i$ 为系数,  $a_0$ 是排放的 $\text{CO}_2$ 在大气中永久保留的部分,  $\alpha_i$ 表示与 $\tau_i$ 相关联的分数,  $a_0$ 和 $\alpha_i$ 之和等于1。对 $\text{CO}_2$ 来说,  $IRF_{\text{CO}_2}(t)$ 在任何特定时间的值都是初始添加的碳在大气中仍然存在的部分。

如果考虑气候系统关于平衡参考状态的微小扰动, 可以用线性响应模型来描述气候系统对扰动强迫的响应<sup>[23, 26]</sup>。在本文中, 强迫为陆地生态系统碳源、化石燃料燃烧或野火的 $\text{CO}_2$ 排放量, 相应的气候变量是 $\text{CO}_2$ 浓度, 因此, 时间 $t$ 时的大气 $\text{CO}_2$ 浓度可以表示为:

$$\Delta C(t) = \int_0^t IRF_{\text{CO}_2}(t-t') E(t') dt' \quad (4)$$

考虑到全球变化模式必须能够计算主要碳库大气、陆地生物圈和海洋之间人为碳的重新分布, 且能模拟气候变化对 $\text{CO}_2$ 辐射强迫的响应, 同时还应包括相关的碳—气候循环, 本文采用Joos等<sup>[14]</sup>利用包括3个综合地球系统模式 (HADGEM2-ES、MPI-ESM和NCAR CSM1.4)、8个中等复杂程度地球系统模式和4个箱式模式 (ACC2、Bern-SAR、MAGICC和TOTEM) 等集合模拟后的结果来拟合脉冲响应函数 $IRF_{\text{CO}_2}(t)$ 的系数。由于各模式的模拟参数差异性较大<sup>[14, 23]</sup>, 本文采用的参数为多模式模拟结果的均值 (表1)。

具体计算过程中，CRF 可用公式（1）表示。式（1）分别以 1750 年的全球 CO<sub>2</sub> 参考浓度 278.00 ppm 和 2000 年的 369.18 ppm 为背景浓度进行计算。1750 年的 CO<sub>2</sub> 浓度可以更好地与其他学者的研究进行衔接和对比；而 2000 年的背景浓度则可以分析在 21 世纪初的 CO<sub>2</sub> 浓度水准下，新 CO<sub>2</sub> 排放带来的增温作用。需要说明的是，当陆地生态系统的 NEE 小于零即表现为碳汇时，则不考虑衰减过程，只计算第一个年度的浓度值<sup>[23]</sup>。

最后，本文分析了自然因素对人为升温效应的消减贡献率（D）：

$$D = |RF_{\text{自然}}|/RF_{\text{人为}} \times 100\%$$

(5)

3 结果

3.1 2000—2016 年 CO<sub>2</sub> 通量的时空变化

CO<sub>2</sub> 通量由自然和人为的通量值共同决定，4 个国家在 2000—2016 年间碳源汇及 CO<sub>2</sub> 浓度趋势的空间分布如图 1~图 3 所示。4 个国家研究时段内总的 CO<sub>2</sub> 排放量为 34.98 Pg C，陆地生态系统共吸收了 28.51 Pg C。由于各国人为碳排放和生态系统均存在不同，其陆域总的碳源汇在空间上也存在较大差异。其中，中国和美国的人为碳排放量要高于加拿大、俄罗斯，分别为 33.01 Pg C 和 22.34 Pg C，陆地生态系统分别能消减人为排放量的 22.92% 和 20.19%。加拿大和俄罗斯人为碳排放量分别为 1.55 Pg C 和 6.59 Pg C，而陆地生态系统所吸收的碳量要超过人为排放量，达到了 3.20 Pg C 和 13.23 Pg C，陆域整体表现为碳汇。

就变化趋势而言，2000 年 4 个国家总 CO<sub>2</sub> 排放量为 0.78 Pg C，2016 年达 2.58 Pg C。俄罗斯和中国的 AF 年均增速分别为 0.003 Pg C a<sup>-1</sup> 和 0.131 Pg C a<sup>-1</sup>，增加最显著的地方出现在中国东南沿海及中部地区，最高排放量达 33.81 mol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>，而美国大部分地区呈显著下降趋势)。空间上，在加拿大北部、俄罗斯东部、中国东部及西藏等区域，虽然人为排放量不断增加，但是由于陆地生

表 1 脉冲响应函数的拟合系数

Tab. 1 Fitting coefficients of impulse response function

<i>i</i>	0	1	2	3
<i>a<sub>i</sub></i>	0.2173	0.2240	0.2824	0.2763
<i>τ<sub>i</sub></i>	∞	394.4	36.54	4.304

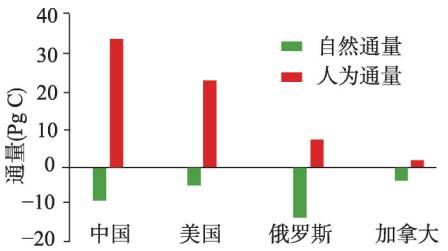


图 1 2000—2016 年中美俄加 CO<sub>2</sub> 总排放量  
Fig.1 Total CO<sub>2</sub> emissions in China, the United States, Russia, and Canada from 2000 to 2016

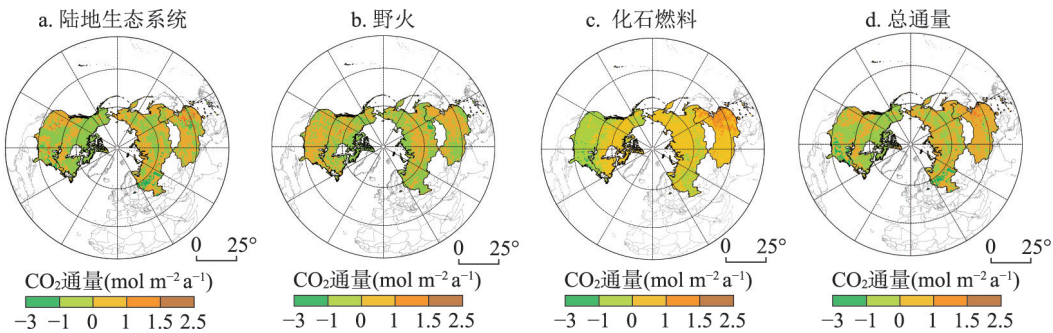


图 2 2000—2016 年中美俄加 CO<sub>2</sub> 通量的变化趋势  
Fig. 2 Trends of CO<sub>2</sub> flux in China, the United States, Russia, and Canada from 2000 to 2016



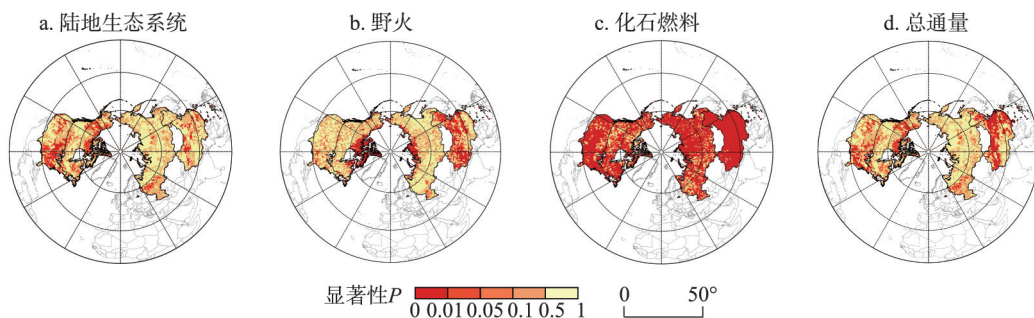


图3 2000—2016年中美俄加CO<sub>2</sub>通量变化趋势的显著性检验

Fig. 3 Significance of the trends for CO<sub>2</sub> flux in China, the United States, Russia, and Canada from 2000 to 2016

态系统吸收CO<sub>2</sub>能力在不断增强,使得该区域总排放量的增加趋势有所减缓。其中,人为化石燃料燃烧的排放具有显著的增加趋势,速率为0.125 Pg C a<sup>-1</sup>,和总的排放速率接近(0.124 Pg C a<sup>-1</sup>)(图4)。AF在研究时间段内均为负值,说明陆地生态系统总体为碳汇。其中,陆地生态系统的NEE多年平均值为-1.67 Pg C,虽有波动但仍呈现下降趋势,下降均值为0.003 Pg C a<sup>-1</sup>,说明其吸收CO<sub>2</sub>的能力在不断增强,吸收能力最强的年份为2009年,达到-2.10 Pg C。自然野火产生的CO<sub>2</sub>年际波动相对较小,但以0.002 Pg C a<sup>-1</sup>的趋势增加。

### 3.2 年辐射强迫的变化

考虑到CO<sub>2</sub>的气体特性及其研究区CO<sub>2</sub>的分布和CO<sub>2</sub>产生的区位分布无法对应,因此本文用浓度均值计算其辐射强迫,图5给出了辐射强迫对当年CO<sub>2</sub>通量变化的响应结果。2000—2016年间,研究区的陆地生态系统以 $(12.72 \pm 1.18) \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速率减缓了增温效应,同为自然因素的野火和人为因素化石燃料燃烧则分别以 $(1.25 \pm 0.37) \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $(25.50 \pm 4.27) \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速率正向作用于变暖趋势。2000—2016年,4个国家ARF的平均值为 $(14.17 \pm 4.38) \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ (图5a)。

俄罗斯和加拿大NF的ARF多年平均值分别为 $(-5.32 \pm 1.72) \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ 和 $(-1.19 \pm 1.07) \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ ,NF最小值(即陆地生态系统对CO<sub>2</sub>吸收最强)分别出现在2002年( $-9.11 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ )和2011年( $-3.54 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ )。两国在研究时段内NF的ARF总量高于AF,说明自然因素降温作用超过了人为碳排放的增温作用。2000年美国AF的ARF为 $9.28 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ ,高于中国的 $6.21 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ 。2016年,美国下降至 $8.32 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ ,而中国增加到 $18.36 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ 。2002—2016年,美国AF的ARF以 $-0.068 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速率减少,而中国则快速增加至2014年,达到峰值 $18.53 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ 后下降。中国和美国的NF虽然表现为负强迫,但考虑到化石燃料燃烧,中美两国的净ARF仍以增温作用为主(图5d~5e)。而且,相较于美国净ARF较为平缓的变化速率( $-0.130 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ),2000—2011年中国净ARF增加迅速达 $1.14 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,之后速度减缓,2013年达到最大值。

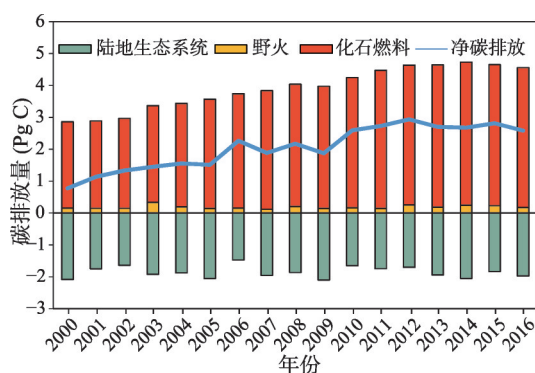


图4 2000—2016年中美俄加碳排放年总量

Fig. 4 Annual carbon emissions in China, the United States, Russia, and Canada from 2000 to 2016

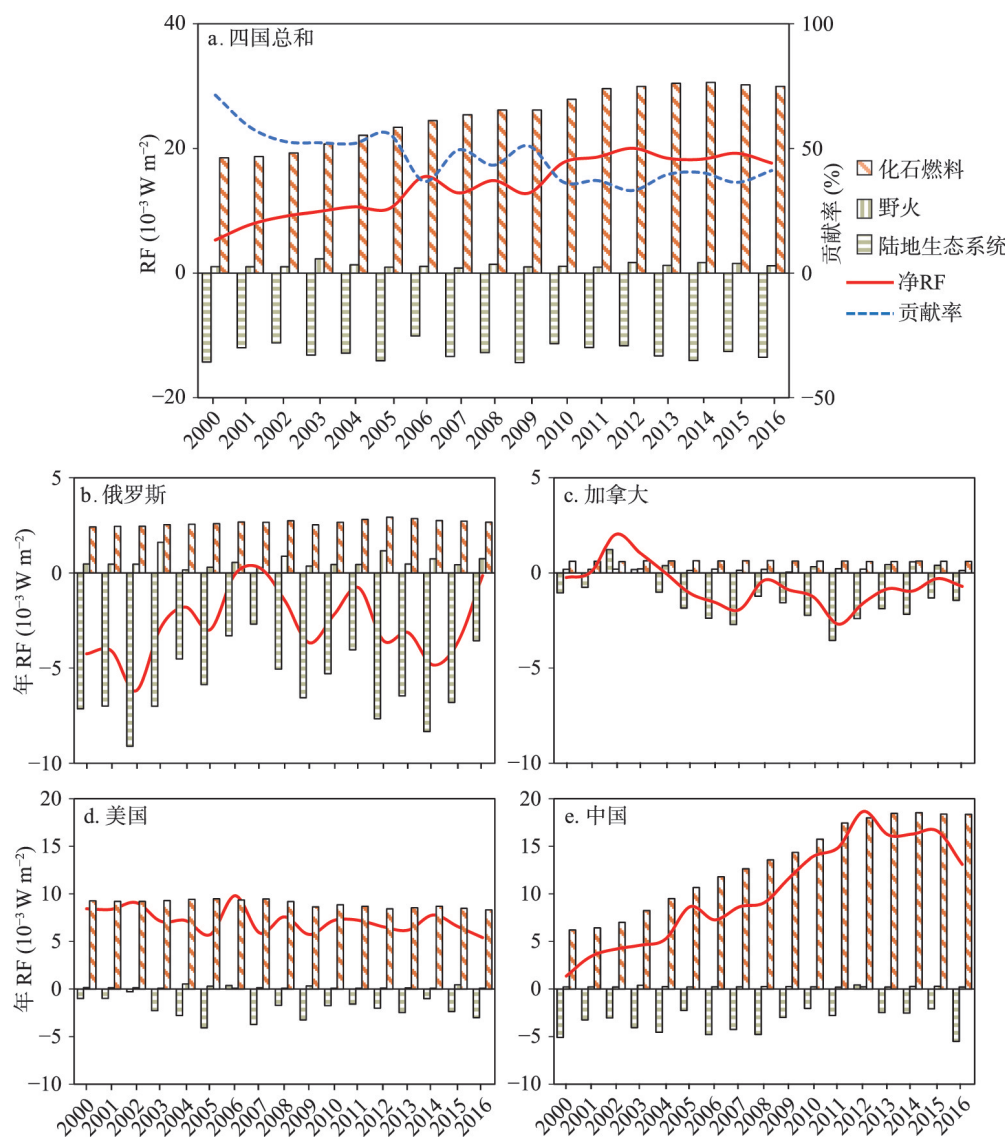


图5 2000—2016年四国总和及各国年辐射强迫

Fig. 5 Annual dynamics of total and national radiation forcing China, the United States, Russia, and Canada, 2000-2016

计算结果还表明，如果仅考虑人为的化石燃料燃烧排放的 $\text{CO}_2$ ，则对应的辐射强迫值在2016年达到 $0.030 \text{ W m}^{-2}$ ，由于陆地生态系统的碳汇功能，致使其净辐射强迫响应值为 $0.018 \text{ W m}^{-2}$ ，即自然因素对大气中 $\text{CO}_2$ 的吸收起到了 $-0.012 \text{ W m}^{-2}$ 的降温作用，消减了化石燃料燃烧41.13%。其中，陆地生态系统的RF为 $-0.013 \text{ W m}^{-2}$ ，贡献率45.06%，自然野火为正强迫起增温作用，贡献率为3.93%（图5a）。

3.3 累积辐射强迫变化

依据不同的 $\text{CO}_2$ 大气背景浓度计算得到的CRF差异是很大的。在2000—2016年间，以2000年为本底的人为CRF和净CRF均小于以1750年为本底值，2016年，不同本底之间的人为和净CRF差值分别为 $0.10 \text{ W m}^{-2}$ 和 $0.06 \text{ W m}^{-2}$ 。在不考虑额外的 $\text{CO}_2$ 加入的情况下，2016—2036年以2000为本底的人为CRF和净CRF分别为 $0.24 \text{ W m}^{-2}$ 和 $0.13 \text{ W m}^{-2}$ ，较

2016年分别减少了25.27%和26.32%，而以1750年为本底则分别减少了25.09%和26.22%；到2100年不同本底下的人为CRF和净CRF仍有54%~56%左右存留在大气中。但是，如果单纯考虑人为的排放，则会明显高估CO<sub>2</sub>的增温效应。如以1750年为本底时，2000—2016年间的净CRF均小于人为因素造成的CRF，2016年净CRF比人为CRF少0.18 W m<sup>-2</sup>，2036年少0.13 W m<sup>-2</sup>，2100年少0.11 W m<sup>-2</sup>（图6）。

2000—2016年间，俄罗斯和加拿大的净CRF波动较大，俄罗斯人为CRF一直高于加拿大，但俄罗斯自然因素造成的降温效应要强于加拿大，到2016年，以2000年和1750年为本底的俄罗斯净CRF分别为 $0.04 \times 10^{-3}$  W m<sup>-2</sup>和 $0.05 \times 10^{-3}$  W m<sup>-2</sup>，均小于加拿大的 $1.28 \times 10^{-3}$  W m<sup>-2</sup>和 $1.71 \times 10^{-3}$  W m<sup>-2</sup>（图6b和图6c）；而中国和美国在此研究时段内的人为CRF和净CRF均保持持续增加的趋势（图6d和图6e）。2016—2036年，在不考虑额外的CO<sub>2</sub>排放的情况下，各国在研究时段累积的辐射强迫开始呈现快速减少，然后继续缓慢下降，到2100年，还存在超过一半的辐射强迫留在大气中。

## 4 讨论

本文探讨全球年平均温度与CO<sub>2</sub>的净CRF、人为CRF，及自然CRF的对应关系。结果表明，人为因素即化石燃料燃烧与自然因素相比，其CRF与气温的对应关系更为密切（ $R = 0.54$ ,  $P = 0.02$ ）（图7b），

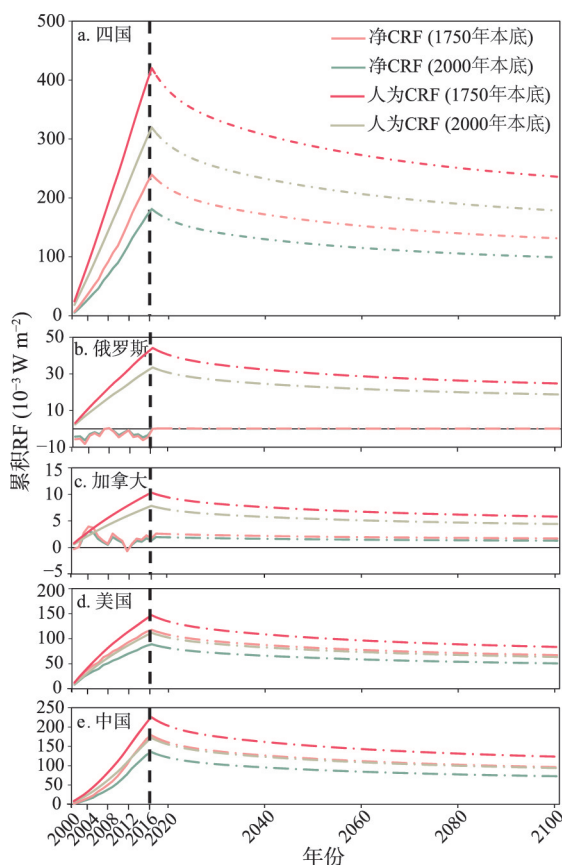


图6 四国陆域的累积辐射强迫(CRF)

Fig. 6 CRF of land area for China, the United States, Russia, and Canada

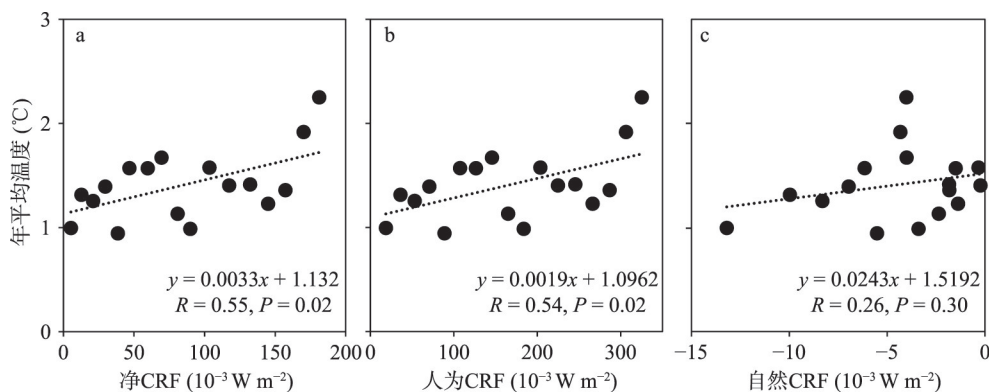


图7 全球年平均温度与累计辐射强迫(CRF)的相关性

Fig. 7 Relationship between global average temperature and CRF

但是, 如果仅考虑陆域生态系统碳循环则无法解释对应温度 ( $R = 0.26$ ,  $P = 0.30$ ) (图 7c), 而综合考虑人为和自然因素, 温度和净 CRF 则有更大的正相关性 ( $R = 0.55$ ,  $P = 0.02$ ) (图 7a)。虽然  $\text{CO}_2$  为增温的主要因子之一, 但只考虑  $\text{CO}_2$  的辐射强迫并不够, 其他诸如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体<sup>[27-29]</sup>和生物地球物理因子如反照率、蒸散率、粗糙度长度<sup>[10, 30-33]</sup>等影响也需要一并纳入。此外, 还有气溶胶、ENSO 等的气候效应<sup>[34-35]</sup>也未在本文的研究范畴。尽管如此, 本文得到的  $\text{CO}_2$  净 CRF 年际波动还是与温度变化本身存在很强的相关性, 对同时段气温变化的直接可解释度达到了 30.3%。

在温室效应的研究中, 大气  $\text{CO}_2$  浓度加倍所产生的辐射强迫是一个十分重要的方面, 其产生的辐射强迫是研究人类活动对气候影响的一个最基本的数据<sup>[36-38]</sup>。IPCC 第二次评估报告 (SAR) 使用简化的表达式算得的  $\text{CO}_2$  加倍产生的辐射强迫为  $4.37 \text{ W m}^{-2}$ , 而 IPCC 第五次评估报告推荐的参数化方案考虑了不同温室气体吸收带之间的重叠效应、平流层温度的调节, 以及  $\text{CO}_2$  的短波辐射强迫<sup>[22, 39]</sup>, 最终算得  $\text{CO}_2$  加倍产生的辐射强迫与 SAR 的结果相比减小了 15%。因此, 关于  $\text{CO}_2$  浓度加倍产生的辐射强迫敏感性, 可能会在整个气候变化研究中造成很大的不确定性。

陆地生态系统是人类社会赖以生存和发展的基础, 可在各种尺度上对气候产生作用, 是影响气候变化的重要因素。陆地生态系统具有碳源汇特征, 例如在中国, 稻田、自然湿地和旱地是造成全球变暖的重要因素; 而森林、林地和草地在缓解气候变暖方面则发挥了重要作用<sup>[40]</sup>。有研究表明, 中国和北美的森林面积在不断扩张<sup>[41]</sup>, 俄罗斯森林则是世界上最大的毗连林带, 占全球森林覆盖面积的 17%, 在控制全球碳循环方面发挥了关键作用<sup>[42]</sup>。尽管如此, 气候变暖有可能转变其碳源汇功能<sup>[43-44]</sup>。就本文的结果来看, 纵然有野火的燃烧排放, 陆地生态系统仍然为一个  $\text{CO}_2$  的汇, 且这种汇的作用还有一定的增加趋势, 这可能与近年来的植被作用增强<sup>[45-47]</sup>, 及  $\text{CO}_2$  浓度升高对生态系统光合作用的施肥效应有关<sup>[48]</sup>。同时, 各国  $\text{CO}_2$  的排放时间不同带来的气候效应不同, 美国在历史上的碳排放总量一直高居榜首, 中国则在近十余年才开始超过美国<sup>[17-19]</sup>。本文分析了 4 个国家陆域  $\text{CO}_2$  通量的时空变化及其辐射强迫, 但仅含 2000—2016 年, 2000 年以前的  $\text{CO}_2$  遗留影响尚未纳入本文, 可能会影响到长期积累  $\text{CO}_2$  通量的增温效应<sup>[27]</sup>。

此外, 本文是以各国陆域为分析单元开展的人为和自然  $\text{CO}_2$  的 RF 效应研究, 并未考虑国与国之间的碳流动及各国之间的  $\text{CO}_2$  进出口贸易; 也未包括大气—海洋的碳交换过程, 而海洋具有很强的“汇”的功能<sup>[23, 49-50]</sup>, 这也是后续研究所需关注的方向。

## 5 结论

利用  $\text{CO}_2$  同化数据集, 本文分析了中国、美国、俄罗斯和加拿大在 2000—2016 年的自然和人为  $\text{CO}_2$  通量的时空变化, 分别模拟其辐射强迫, 并探讨了研究时段内 4 个国家  $\text{CO}_2$  排放总量对未来 (2100 年) 的累积增温效应。

本文有助于进一步了解人为和自然因素对气候的影响, 特别是量化了陆地生态系统碳汇对人为碳排放增温的消减作用。本文结果证实了, 单纯考虑人为碳排放而不考虑陆地生态系统的碳汇作用, 将会明显高估人为  $\text{CO}_2$  排放的增温效应。同时, 考虑了人为和自然因素的净累计辐射强迫与对应时段的温度变化具有显著的相关性。并且到本世纪末, 研究时段内  $\text{CO}_2$  排放的辐射强迫仍有超过一半存留在大气中。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.



- [2] National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory. NOAA's Annual Greenhouse Gas Index. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>.
- [3] Eby M, Weaver A J, Alexander K, et al. Historical and idealized climate model experiments: An intercomparison of Earth system models of intermediate complexity. *Climate of the Past*, 2013, 9(3): 1111-1140.
- [4] Clark P U, Shakun J D, Marcott S A, et al. Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 360-369.
- [5] Fang Jingyun, et al. Carbon Emissions from China and the World: Some Views on Relationship between Carbon Emissions and Socio-economic Development. Beijing: Science Press, 2018. [方精云, 等. 中国及全球碳排放—兼论碳排放与社会发展的关系. 北京: 科学出版社. 2018.]
- [6] Quéré C L, Moriarty R, Andrew R M, et al. Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data*, 2015, 7(2): 349-396.
- [7] Martin H, Markus R. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [8] Pachauri R K, Reisinger A. Climate Change 2007: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2007.
- [9] Tang X Y, Cui Y P, Li N, et al. Human activities enhance radiation forcing through surface albedo associated with vegetation in Beijing. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 837. DOI: 10.3390/rs12050837.
- [10] Kirschbaum M U, Sagar S, Tate K R, et al. Quantifying the climate-change consequences of shifting land use between forest and agriculture. *Science of the Total Environment*, 2013, 465(6): 314-324.
- [11] Anderson-Teixeira K J, Snyder P K, Twine T E, et al. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the American. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 177-181.
- [12] Archer D, Eby M, Brovkin V, et al. Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2009, 37(1): 117-134.
- [13] Landry J S, Matthews H D. Non-deforestation fire vs. fossil fuel combustion: The source of CO<sub>2</sub> emissions affects the global carbon cycle and climate responses. *Biogeosciences*, 2016, 13(7): 2137-2149.
- [14] Joos F, Roth R, Fuglestad J S, et al. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: A multi-model analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(5): 2793-2825.
- [15] Feldman D R, Collins W D, Gero P J, et al. Observational determination of surface radiative forcing by CO<sub>2</sub> from 2000 to 2010. *Nature*, 2015, 519(7543): 339-343.
- [16] Boden T A, Marland G, Andres R G. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, 2017. DOI: 10.3334/CDIAC/00001\_V2017.
- [17] Jidefor A. China's efforts in sustainable development: A test case for nigeria's environmental sustainability goal. *Modern Economy*, 2017, 8(5): 770-790.
- [18] Gregg J S, Andres R J, Marland G. China: Emissions pattern of the world leader in CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel consumption and cement production. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8): 135-157.
- [19] Rüstemğlu H, Andrés A R. Determinants of CO<sub>2</sub> emissions in Brazil and Russia between 1992 and 2011: A decomposition analysis. *Environmental Science & Policy*, 2016, 58: 95-106.
- [20] World Bank. Global Economic Prospects, June 2018: The Turning of the Tide? Washington D C: World bank, 2018.
- [21] World Bank. World Development Indicators. <https://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&series=NY.GDP.MKTP.KD.ZG&country=#>, 2017-01.
- [22] Myhre G, Highwood E J, Shine K P, et al. New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(14): 2715-2718.
- [23] Li Nan. Changes of major greenhouse gases in China and their contributions to global radiative forcing [D]. Kaifeng: Henan University, 2020. [李楠. 中国主要温室气体变化及其对全球辐射强迫的贡献研究[D]. 开封: 河南大学, 2020.]
- [24] Lee D S, Pitari G, Grewe V, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(37): 4678-4734.
- [25] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [26] Sausen R, Schumann U. Estimates of the climate response to aircraft CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions scenarios. *Climatic Change*, 2000, 44(1/2): 27-58.
- [27] Tian H Q, Xu X F, Lu C Q, et al. Net exchanges of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G02011). DOI: 10.1029/2010JG001393.

- [28] Xu X F, Tian H Q, Zhang C, et al. Attribution of spatial and temporal variations in terrestrial methane flux over North America. *Biogeosciences*, 2010, 7(11): 3637-3655.
- [29] Mendoza V M, Garduno R, Villanueva E E. Mendoza Blanca, Mexico's contribution to global radiative forcing by major anthropogenic greenhouse gases: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O. *Atmosfera*, 2015, 28(3): 219-227.
- [30] Montenegro A, Eby M, Mu Q, et al. The net carbon drawdown of small scale afforestation from satellite observations. *Global & Planetary Change*, 2009, 69(4): 195-204.
- [31] Schwaab J, Bavay M, Davin E, et al. Carbon storage versus albedo change: Radiative forcing of forest expansion in temperate mountainous regions of Switzerland. *Biogeosciences*, 2015, 12(2): 467-487.
- [32] Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, et al. The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science*, 2005, 310(5754): 1674-1678.
- [33] Davin E L, de Noblet-ducoudré N. Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate*, 2010, 23(1): 97-112.
- [34] Kondo Y, Matsui H, Moteki N, et al. Emissions of black carbon, organic, and inorganic aerosols from biomass burning in North America and Asia in 2008. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D08204). DOI: 10.1029/2010JG001393.
- [35] Clarke D W, Boyle J F, Plater A J. Particle-size evidence of barrier estuary regime as a new proxy for ENSO climate variability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(10): 1520-1534.
- [36] Roe G H, Baker M B. Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science*, 2007, 318(5850): 629-632.
- [37] Rohling E J, Marino G, Foster G L, et al. Comparing climate sensitivity, past and present. *Annual Review of Marine Science*, 2018, 10(1): 261-288.
- [38] Loehle C. A minimal model for estimating climate sensitivity. *Ecological Modelling*, 2014, 276: 80-84.
- [39] Li N, Cui Y P, Fu Y M, et al. Contribution of anthropogenic CO<sub>2</sub> in China to global radiative forcing and its offset by the ecosystem during 2000-2015. *Annals of the New York Academy of Sciences*. DOI: 10.1111/nyas.14505.
- [40] Cui Y P, Meadows M E, Li N, et al. Land cover change intensifies actual and potential radiative forcing through CO<sub>2</sub> in south and southeast Asia from 1992 to 2015. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(14): 2460-2472.
- [41] Houghton R A, House J I, Pongratz J, et al. Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 2012, 9(12): 5125-5142.
- [42] Loboda T V, Chen D. Spatial distribution of young forests and carbon fluxes within recent disturbances in Russia. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 138-153.
- [43] Cao Mingkui, Li Kerang. perspective on terrestrial ecosystem-climate interaction. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15 (4): 446-452. [曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展. *地球科学进展*, 2000, 15(4): 446-452.]
- [44] Fang Jingyun, Zhu Jiangling, Shi Yue. The responses of ecosystems to global warming. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(2): 136-140. [方精云, 朱江玲, 石岳. 生态系统对全球变暖的响应. *科学通报*, 2018, 63(2): 136-140.]
- [45] Cui Y P, Xiao X M, Zhang Y, et al. Temporal consistency between gross primary production and solar-induced chlorophyll fluorescence in the ten most populous megacity areas over years. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 14963. DOI: 10.1038/s41598-017-13783-5.
- [46] Dass P, Rawlins M A, Kimball J S, et al. Environmental controls on the increasing GPP of terrestrial vegetation across northern Eurasia. *Biogeosciences*, 2016, 13(1): 45-62.
- [47] Zhang Y, Xiao X M, Wu X C, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000-2016. *Scientific Data*, 2017, 4: 170165. DOI: 10.1038/sdata.2017.165.
- [48] Lim C, Kafatos M, Megonigal P. Correlation between atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and vegetation greenness in North America: CO<sub>2</sub> fertilization effect. *Climate Research*, 2004, 28(1): 11-22.
- [49] Lovenduski N S, Gruber N, Doney S C. Toward a mechanistic understanding of the decadal trends in the Southern Ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(3): GB3016. DOI: 10.1029/2007GB003139.
- [50] Landschützer P, Gruber N, Bakker D C E, et al. Recent variability of the global ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(9): 927-949.

## Contribution of terrestrial carbon sink to future warming in China, the United States, Russia and Canada

CUI Yaoping<sup>1,2</sup>, LI Nan<sup>1,2</sup>, FU Yiming<sup>2</sup>, CHEN Liangyu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions,

Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** As a major climate forcing factor, CO<sub>2</sub> is closely related to human activities, but many studies have overlooked the carbon absorption of terrestrial ecosystem to anthropogenic carbon emissions. China, the United States, Russia and Canada are the four countries with the largest area in the world at different socio-economic development stages. Quantifying the global radiative forcing contribution of CO<sub>2</sub> emissions is important for assessing the climate effects of human and natural factors. Based on CO<sub>2</sub> assimilation data, this study used a "carbon-climate" parameterization scheme to analyze the anthropogenic carbon emissions and its climatic effects while considering the climate effects of carbon sinks of terrestrial ecosystem. Then we obtained the net global radiative forcing contributions of the four countries. The results showed that the anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub> in all the four countries showed a significant increase (0.125 Pg C a<sup>-1</sup>). Meanwhile the carbon uptake of terrestrial ecosystems increased at a growth rate of 0.003 Pg C a<sup>-1</sup>. During the study period, the total anthropogenic carbon emissions of China and the United States accounted for 87.19% of the four countries while Russian terrestrial ecosystems had the strongest carbon absorption capacity, 14.69 Pg C. Correspondingly, as of 2016, the cooling effect of terrestrial ecosystems is -0.013 W m<sup>-2</sup>, which can offset 45.06% of the whole warming effects of anthropogenic carbon emissions, indicating that if the terrestrial ecosystems are not considered, the warming effect of anthropogenic carbon emissions will be significantly overestimated. Overall, the total anthropogenic carbon emissions of the four countries contributed 0.32 and 0.42 W m<sup>-2</sup> of global radiative forcing, respectively, relative to the CO<sub>2</sub> concentration levels before 2000 (initial year of this study) and before the Industrial Revolution. This study further explored the linear relationship between air temperature and radiative forcing. Compared with a single climate effect of anthropogenic or natural carbon emissions, the combined radiation forcing and the temperature change in the corresponding period had the highest consistency (30.3%).

**Keywords:** greenhouse gases; radiative forcing; anthropogenic carbon emissions; terrestrial ecosystems; offset effect