

CO₂ 的温室效应饱和度分析及其 大气体积分数预测模型

高凤玲¹, 崔国民², 黄晓璜²

(1. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 洛阳 471039; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 通过精确的 LBLRTM 逐线积分模式建立 CO₂ 体积分数变化模型, 分析了 CO₂ 的温室效应饱和度和, 并对未来地表温升的变化趋势进行了预测. 结果表明, 目前 CO₂ 的持续排放只能使其在 680 cm⁻¹ 强吸收带中心达到饱和, 而在未来相当长一段时间内, 其仍将通过该吸收带的翼区以及 1 000 cm⁻¹, 1 350 cm⁻¹ 与 1 900 cm⁻¹ 等弱吸收带对地表红外辐射表现出强烈的吸收, CO₂ 的温室效应还远未达到饱和; 如果按照当前 CO₂ 2.2 (mL/·m⁻³)/a 的年排放速率, CO₂ 的大气体积分数将会持续增加, 从而造成地表温度不断升高, 到 2056 年, 地表温升将会达到 2 K.

关键词: CO₂; 温室效应; 饱和; 大气体积分数

中图分类号: TK 121

文献标志码: A

Greenhouse Effect Saturation Analysis and the Atmospheric Concentration Prediction Model of CO₂

GAO Fengling¹, CUI Guomin², HUANG Xiaohuang²

(1. Vehicle and Transportation Institute, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471039, China;
2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the one dimensional line by line radiation transfer model (LBLRTM) and the concentration model of CO₂, the greenhouse effect saturation of CO₂ was analyzed and the coming surface temperature rise was predicted. The results show that so far as we know, the continuous emission of CO₂ has just brought about the absorption saturation at the center of the 680 cm⁻¹ strong absorption band, while the wing areas of the band and the weak absorption bands such as 1 000 cm⁻¹, 1 350 cm⁻¹ and 1 900 cm⁻¹ are far from saturation, therefore, CO₂ still has a strong greenhouse effect during quite a long time in the future. If the emission rate of CO₂ basically remains at the current level 2.2 (mL·m⁻³)/a, its atmospheric concentration would increase continuously, which would result in a surface temperature rise of 2 K by 2056.

Keywords: CO₂; greenhouse effect; saturation; atmospheric volume fraction

收稿日期: 2016-08-10

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(17B470001); 河南科技大学创新团队资助项目(2015XTD004)

第一作者: 高凤玲(1976-), 女, 讲师. 研究方向: 工程热物理. E-mail: gaoleng091106@163.com

CO_2 , CH_4 等温室气体的保温作用形成了地球适于生物生存的温暖环境,但是,自工业革命以来,由于人类对能源、食物等需求的快速增长,造成以 CO_2 为首的温室气体的排放显著增加,致使地球逐渐变暖.联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)2014年第5次报告指出,近百年来,地表温度已经大约升高了 0.85 K ^[1]. 地球作为一个巨大的生态系统,如果气温上升幅度超过 1.5 K ,全球便会有 $20\% \sim 30\%$ 的动植物面临灭绝;而如果气温上升超过了 3.5 K ,则将有 $40\% \sim 70\%$ 的物种因为环境恶化而濒临灭绝^[2]. 因此,如果将气候变化的极限值设定为 2 K ^[3],则今后温度的上升空间只有不到 1.5 K ,如今所面临的形势已经十分严峻.

CO_2 作为人类生产社会活动所排放的首要温室气体,其对温室效应的影响已引起了国内外科学界的广泛关注.李翠娜等^[4]对大气 CO_2 $15\text{ }\mu\text{m}$ 吸收带与温度之间的依赖关系进行了研究;徐娜等^[5]分析了温室气体吸收带重叠对 CO_2 红外辐射效应的影响;Shine 等^[6]提出了采用全球温变潜能值(global temperature potential, GTP)来衡量非 CO_2 温室气体与 CO_2 所造成的地表温升之比.但是,在当前的各种气候模式计算中,为了节省 CPU 时间,大多采用了带模式、 k 分布或者相关 k 分布模式,而所有这些方法的精度都必须有一个比较标准,以便对其进行验证,这就是逐线积分法,它被认为是大气红外吸收计算的最精确方法^[7]. 而且,当前 CO_2 的大气体积分数已经达到了 390 mL/m^3 ,与工业革命前 280 mL/m^3 的大气体积分数相比,增长了大约了 40% ,其对温室效应的贡献已经占到了长寿命温室气体的 63% ^[1],这是否意味着 CO_2 的温室效应已经或者即将要达到饱和,继续研究 CO_2 的温室效应是否仍有必要.鉴于此,采用美国大气与环境研究中心(Atmospheric and Environmental Research, AER)发展的 LBLRTM 一维逐线积分模式,利用最新版本的大气分子吸收光谱数据库 HITRAN 2012,对 CO_2 的红外吸收能力进行了精确计算,其长波辐射通量计算误差大约为 0.5% ^[8],并以近年来 CO_2 的体积分数变化数据为基础,建立了其体积分数变化模型,对未来的地表温升进行预测.

1 CO_2 温室效应饱和度分析

一般而言,当一种温室气体的体积分数足够大

时,其对辐射的吸收能力与体积分数之间将呈对数关系变化^[9]. 因此,随着 CO_2 大气体积分数的逐渐增加,其吸收带所捕获的红外辐射量的增加速度却会变得越来越慢,最终吸收带将会达到饱和,即无论 CO_2 体积分数如何增长,也不再会对辐射的吸收作出贡献^[10-11]. 为了考察 CO_2 的温室效应饱和度,图1和图2分别给出了 CO_2 在工业革命前的温室效应 G , 以及其体积分数相对于工业革命前分别增长2倍和4倍情况下其温室效应相对增量 $\Delta G\%$ 的光谱能量分布. 其中,温室效应 G 定义为地表与大气层顶部的向上长波通量之差^[12].

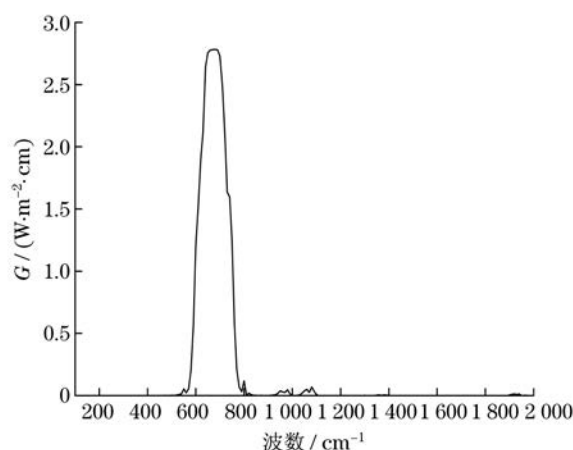


图1 工业革命前 CO_2 的温室效应

Fig.1 Greenhouse effect of CO_2 before Industrial Revolution

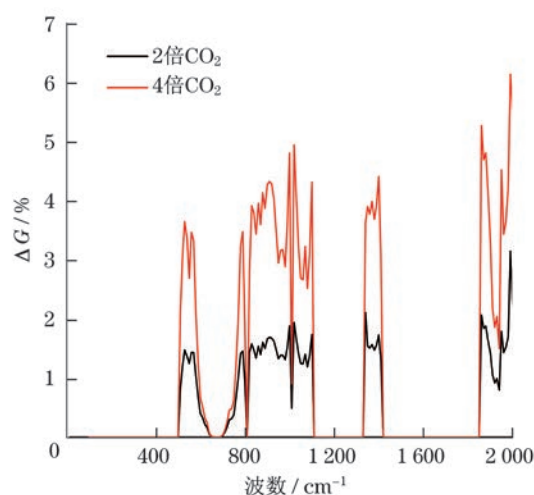


图2 CO_2 体积分数为工业革命前的2倍与4倍时的温室效应相对增量

Fig.2 Relative increment of CO_2 greenhouse effect with its concentration 2 times and 4 times as great as that before Industrial Revolution

图1表明,工业革命前,CO₂在以680 cm⁻¹带为中心的550~810 cm⁻¹的区间内存在着强烈的吸收,此外,在1 000 cm⁻¹波数两侧附近也表现出了一定的温室效应能力,而在1 350 cm⁻¹与1 900 cm⁻¹波数两侧的温室效应能力则非常微弱.但从图2可以看出,当CO₂体积分数相对于工业革命时期出现成倍增长时,其温室效应的增加却主要出现在弱吸收带,而在其强吸收带中心680 cm⁻¹处的温室效应增量几乎为零.这表明,随着CO₂体积分数的增加,其680 cm⁻¹强吸收带中心的确将会达到饱和,但在两翼区对地表的红外辐射仍然具有强烈的吸收能力,而对于原本吸收能力非常弱小的1 000 cm⁻¹,1 350 cm⁻¹与1 900 cm⁻¹等弱吸收带,因还远未达到饱和,当CO₂体积分数从2倍增长至4倍,温室效应则出现了成倍增长.图2说明,尽管目前CO₂的680 cm⁻¹带中心已经达到饱和,但在未来相当长一段时间里,仍将通过其吸收带的翼区对地表红外辐射表现出强烈的吸收,同时,其1 000 cm⁻¹,1 350 cm⁻¹与1 900 cm⁻¹等弱吸收带的温室效应作用将变得越来越重要.

2 CO₂ 体积分数变化模型

通过上述分析可知,随着以CO₂为首的温室气体排放的持续增加,温室效应将会愈发严重.为了对未来的地表温升进行预测,有必要对CO₂的体积分数变化规律进行分析.

通常,大气中某种温室气体的体积分数变化主要受排放与清除两个机制的影响.若气体的排放速率与衰变速率大致相等,该气体的大气体积分数就会保持在基本稳定的水平上^[13].而由于衰变作用存在着一定的时间周期,因此,在某一给定时间 t (单位为年,a),考虑这种作用的温室气体的大气体积分数 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = Q(t) - Q(t - \chi) + f(0) \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 为时间 t 时该气体的年排放量的累积,mL/m³; χ 为气体的大气寿命,即滞留时间,a; $Q(t - \chi)$ 则是由于超出了大气寿命,气体的自然衰变量,mL/m³; $f(0)$ 为气体的产出与消亡基本平衡时的大气体积分数,mL/m³.

式(1)表明,温室气体的即时体积分数等于年排放量的累积 $Q(t)$ 与滞留时间以前的年排放累积 $Q(t - \chi)$ 之差与自然平衡时的总含量的和.由于习

惯上用年均排放表示人为因素引起的温室气体变化,将式(1)两侧对时间取微分,则可改写为

$$\frac{df(t)}{dt} = q(t) - q(t - \chi) \quad (2)$$

式中: $q(t)$, $q(t - \chi)$ 分别为气体的年排放速率与清除速率,(mL · m⁻³)/a.

对式(2)进行拉氏变换,则可以得到大气中温室气体体积分数与年排放速率的传递函数

$$G(s) = \frac{F(s)}{Q(s)} = \frac{1 - e^{-\chi s}}{s} \quad (3)$$

式中: $F(s)$, $Q(s)$ 分别为 $f(t)$, $q(t)$ 的拉普拉斯变换; s 为复变量.

从式(3)可以清晰地看出,温室气体的大气体积分数对于年排放速率的积分变化规律

$$F(s) = \frac{1 - e^{-\chi s}}{s} Q(s) \quad (4)$$

式(4)表明,由于温室气体的自然衰变,输入与输出呈现为滞后的积分关系,虽然输出量与输入量的形式相同,但是,输出量相对输入量滞后一段时间.式(4)即为温室气体体积分数变化模型,对式(4)进行拉式反变换,能够得到 $f(t)$ 的表达式

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{1 - e^{-\chi s}}{s} Q(s) \right] + f(0) \quad (5)$$

式(5)说明,如果已知气体的大气寿命与年排放速率,便可以求得其在某一时间 t 下的大气体积分数 $f(t)$.因此,取CO₂的大气寿命 χ 为120 a^[14],如果将其排放速率 $q(t)$ 分为保持常数不变与按线性变化两种情况,有

$$q(t) = \begin{cases} m & t \geq 0 \\ nt & t \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: m 为CO₂的年排放率,(mL · m⁻³)/a; n 为其年排放加速率,(mL · m⁻³)/a².

对式(6)进行拉氏变换,可以得到

$$Q(s) = \begin{cases} m/s & \\ n/s^2 & \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),有

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{1 - e^{-\chi s}}{s} \frac{m}{s} \right] + f(0) \quad (8)$$

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{1 - e^{-\chi s}}{s} \frac{n}{s^2} \right] + f(0) \quad (9)$$

将式(8)与式(9)进行拉氏反变换,则在两种不同的排放情况下,CO₂的大气体积分数变化为

$$g_1(t) = \begin{cases} mt, & t \leq 120 \\ mt - m(t-120) = 120m, & t \geq 120 \end{cases} \quad (10)$$

$$g_2(t) = \begin{cases} \frac{nt^2}{2}, & t \leq 120 \\ 60n(2t-120), & t \geq 120 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $g_1(t)$, $g_2(t)$ 分别为排放速率为固定值与按线性变化时的 CO_2 体积分数变化函数.

取工业革命时期的时间节点为 1800 年^[1], 则 1800 年的 CO_2 体积分数为 280 mL/m^3 , 这样, 到 2015 年为止, CO_2 110 mL/m^3 的体积分数增量便发生在 $t = 215 \text{ a}$ 的时间之内. 由此, 根据式(10)和式(11)可以分别得到

$$m = 0.917 (\text{mL} \cdot \text{m}^{-3})/\text{a}, n = 0.006 (\text{mL} \cdot \text{m}^{-3})/\text{a}^2$$

因此, 在第 1 种排放情况下, 即当每年的排放速率取 $m = 0.917 (\text{mL} \cdot \text{m}^{-3})/\text{a}$ 时, 并取 CO_2 的初始体积分数为 280 mL/m^3 , 由式(10)可以得到 CO_2 的大气体积分数曲线方程 $f_1(t)$.

$$f_1(t) = \begin{cases} 280 + 0.917t, & t \leq 120 \\ 280 + 0.917t - 0.917(t - 120) = 390, & t \geq 120 \end{cases} \quad (12)$$

此外, 当仅考虑由年排放率 m 所引起的 CO_2 大气体积分数的增加, 不考虑 CO_2 的自然衰变时, 可以得到在此情况下的 CO_2 大气体积分数曲线方程 $f_2(t)$.

$$f_2(t) = 280 + 0.917t \quad (13)$$

当仅考虑由于 CO_2 的自然衰变所引起的体积分数变化时, 相应的体积分数曲线方程 $f_3(t)$ 应为

$$f_3(t) = \begin{cases} 280, & t \leq 120 \\ 280 + 0.917(t - 120), & t \geq 120 \end{cases} \quad (14)$$

图 3 给出了 $f_1(t)$, $f_2(t)$ 与 $f_3(t)$ 的具体形式. 从图 3 可以看出, 当 CO_2 的排放速率为定值时, 在排放初期, 即 CO_2 的大气寿命以内, 由于自然衰变速率还未受到排放的影响, $f_3(t)$ 为水平线, 因而实际的大气体积分数曲线 $f_1(t)$ 与排放引起大气体积分数增加的曲线 $f_2(t)$ 相重合, 两者均呈线性上升趋势. 但是, 当时间超过 CO_2 的大气寿命后, 衰变速率开始以 $0.917 (\text{mL} \cdot \text{m}^{-3})/\text{a}$ 的速率提高, 从而抵消了由于排放使 CO_2 体积分数增加的部分, 因此, CO_2 体积分数在后续时间内维持为定值 390 mL/m^3 , $f_1(t)$ 为水平线. 图 3 说明, 如果能够对温室气体的年排放量进行调控, 也能够将其体积分数维持在一个基本稳定的水平上.

在第 2 种排放情况下, 取 CO_2 的年排放率以 $n = 0.006 (\text{mL} \cdot \text{m}^{-3})/\text{a}^2$ 的加速率线性变化, 同

样, 可以得到 CO_2 实际的大气体积分数曲线方程 $f'_1(t)$ 、单纯考虑排放时的体积分数曲线方程 $f'_2(t)$, 以及单纯考虑衰变时的曲线方程 $f'_3(t)$.

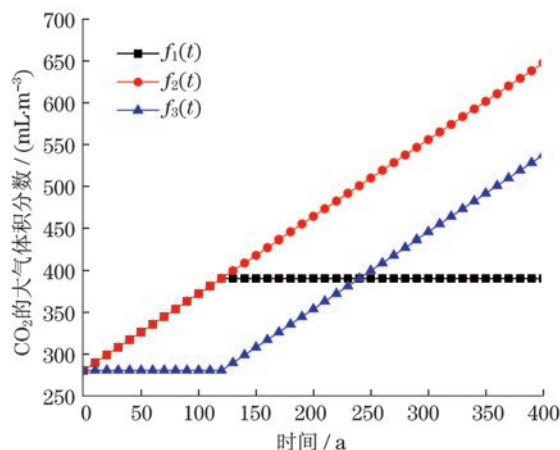


图 3 CO_2 的排放速率为定值时的体积分数变化

Fig.3 Concentration change of CO_2 at constant emission rate

$$f'_1(t) = \begin{cases} 280 + \frac{0.006t^2}{2}, & t \leq 120 \\ 280 + 60 \times 0.006 \times (2t - 120), & t \geq 120 \end{cases} \quad (15)$$

$$f'_2(t) = 280 + \frac{0.006t^2}{2} \quad (16)$$

$$f'_3(t) = \begin{cases} 280, & t \leq 120 \\ 280 + \frac{0.006 \times (t - 120)^2}{2}, & t \geq 120 \end{cases} \quad (17)$$

图 4 给出了 $f'_1(t)$, $f'_2(t)$ 与 $f'_3(t)$ 的曲线形式.

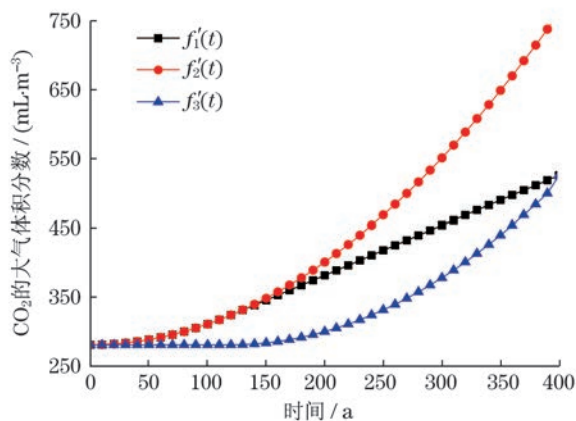


图 4 CO_2 的排放速率为线性变化时的体积分数变化

Fig.4 Concentration change of CO_2 at linear emission rate

与图3类似,在CO₂大气寿命以内的排放初期,由于衰变速率还未发生变化,CO₂的体积分数改变单纯是由排放所引起, $f'_1(t)$ 与 $f'_2(t)$ 重合,此时,CO₂体积分数以抛物线形式加速上升.但是,当时间大于CO₂的大气寿命后,衰变机制开始加速,造成 $f'_1(t)$ 逐渐偏离 $f'_2(t)$,CO₂的体积分数上升速度有所减缓,但尽管如此,仍然保持为上升态势.因此,图4说明,如果CO₂的排放速率以一定的加速度线性变化,将会造成大气中的CO₂体积分数持续增加.

3 地表温升预测

根据IPCC第5次报告^[1],全球平均的温室效应 G 与地表温升 ΔT_0 之间存在着关系式

$$\Delta T_0 = \lambda G \quad (18)$$

式中, λ 为温室气体气候敏感性参数,取 $0.27\text{ }^\circ\text{C}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ ^[15].

得到了CO₂的体积分数变化规律,利用LBLRTM逐线积分模型计算出温室效应 G 后,利用式(18)便可以对未来的地表温升进行预测.根据国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室所公布的全球CO₂的历年平均排放数据(ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_mlo.txt),图5给出了2005~2015年间CO₂的年排放速率随时间的变化情况.

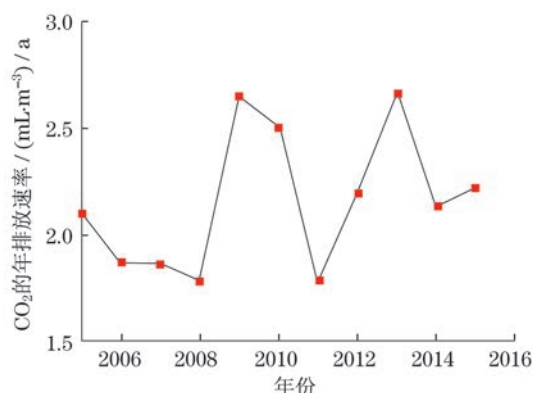


图5 2005~2015年CO₂的年排放速率

Fig.5 Yearly emission rate of CO₂ during 2005~2015

图5说明,在最近10a内,CO₂的年排放速率并没有发生明显的增长,而是在大约 $1.6\sim 2.7\text{ mL}/\text{m}^3$ 的范围内发生波动,其平均年排放速率为 $2.2\text{ (mL}\cdot\text{m}^{-3})/\text{a}$.因此,以2015年CO₂的大气体积分数 $390\text{ mL}/\text{m}^3$ 作为基准点,采取第1种排放

情况,即取 $m = 2.2\text{ (mL}\cdot\text{m}^{-3})/\text{a}$ 的固定排放速率,可以得到未来CO₂的大气体积分数计算公式

$$f_1(t) = \begin{cases} 390 + 2.2t, & t \leq 120 \\ 390 + 2.2t - 2.2(t - 120) = 654, & t \geq 120 \end{cases} \quad (19)$$

对于其他温室气体对地表温升的影响,考虑到2015年CO₂的当量体积分数为 $460\text{ mL}/\text{m}^3$,与其 $390\text{ mL}/\text{m}^3$ 的实际体积分数之间的比例系数为1.179.因此,利用式(19)计算得到某一年度下CO₂的大气体积分数后,再乘以1.179的比例系数,便为该年度下CO₂的当量体积分数,利用式(18)可以计算该年度下由于温室气体体积分数变化所造成的温室效应以及相应的地表温升,具体结果如图6所示.

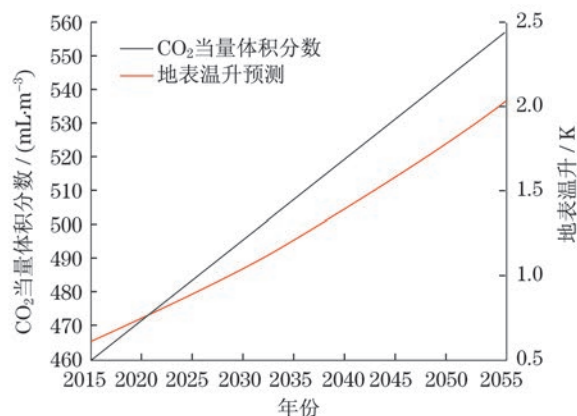


图6 地表温升预测

Fig.6 Surface temperature rise prediction

图6说明,若CO₂以当前 $2.2\text{ (mL}\cdot\text{m}^{-3})/\text{a}$ 的速率进行排放,则CO₂当量体积分数在未来几十年内将会持续增长,地表温度也将不断升高.为了避免全球变暖所造成的严重后果,《哥本哈根协议》提出了在本世纪内将温升控制在2K的目标^[3].根据本文的计算结果,如果CO₂的大气体积分数以当前的排放速率持续增长,那么,到2056年,CO₂当量体积分数将会达到 $556\text{ mL}/\text{m}^3$,地表温升达到2K.

4 结 论

通过比较不同体积分数下CO₂温室效应的光谱能量分布,对其温室效应的饱和度进行了分析,并以所建立的CO₂体积分数变化模型为依据,对未来的地表温升进行了预测,结果表明:

a. 目前,CO₂的 680 cm^{-1} 强吸收带中心已经

达到饱和,但在未来相当长一段时间内,其仍将通过该吸收带的翼区以及 $1\,000\text{ cm}^{-1}$, $1\,350\text{ cm}^{-1}$ 与 $1\,900\text{ cm}^{-1}$ 等弱吸收带对地表红外辐射表现出强烈的吸收, CO_2 的温室效应还远未饱和;

b. 当前, CO_2 的年排放速率基本维持在 $2.2\text{ (mL} \cdot \text{m}^{-3})/\text{a}$ 的平均水平上,如果按照这样的排放速率,根据本文所建立的 CO_2 体积分数变化模型,到 2056 年,地表温升将会达到 2 K .

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaption, and Vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 赵天涛,张丽杰,赵由才. 温室效应——沮丧? 彷徨? 希望? [M]. 北京:冶金工业出版社, 2012.
- [3] 王伟光,郑国光. 应对气候变化报告(2009):通向哥本哈根[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2009.
- [4] 李翠娜,郑有飞,石广玉. 大气 CO_2 $15\text{ }\mu\text{m}$ 吸收带对温度依赖关系的研究[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 1-6.
- [5] 徐娜,石广玉,戴铁,等. 温室气体吸收带重叠对 CO_2 红外辐射效应的影响[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(4): 441-451.
- [6] SHINE K P, FUGLESTVEDT J S, HAILEMARIAM K, et al. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases[J]. Climatic Change, 2005, 68(3): 281-302.
- [7] 廖国男. 大气辐射导论[M]. 2 版. 北京:气象出版社, 2004.
- [8] ALVARADO M J, PAYNE V H, MLAWER E J, et al. Performance of the Line-By-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) for temperature, water vapor, and trace gas retrievals: recent updates evaluated with IASI case studies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(14): 6687-6711.
- [9] 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [10] 谈和平,夏新林,刘林华,等. 红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [11] 高凤玲,崔国民,陶乐仁,等. 地表温度时空差异对温室效应影响的误差分析[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(2): 158-162.
- [12] ROGELJ J, MEINSHAUSEN M, KNUTTI R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(4): 248-253.
- [13] GILLET N P, ARORA V K, MATTHEWS D, et al. Constraining the ratio of global warming to cumulative CO_2 emissions using CMIP5 simulations[J]. Journal of Climate, 2013, 26(18): 6844-6858.
- [14] 丁仲礼,段晓男,葛全胜,等. 国际温室气体减排方案评估及中国长期排放权讨论[J]. 中国科学(D 辑):地球科学, 2009, 39(12): 1659-1671.
- [15] HANSEN J, SATO M, RUEDY R. Radiative forcing and climate response[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D6): 6831-6864.

(编辑:石 瑛)