

温室气体的源与汇^{*}

王明星 张仁健 郑循华

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 介绍了温室效应和温室气体的概念, 阐述了当前 6 种主要温室气体 (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs , PFCs , SF_6) 及其源和汇。尽管目前后 3 种气体特别是 PFCs 和 SF_6 在大气中的浓度很低, 但它们有很高的增温潜势, 在大气中寿命相当长, 来自人类活动的排放必将造成它们在大气中不可逆的增长, 需要引起足够的重视。

关键词: 温室效应; 温室气体; 源; 汇

1 温室效应、温室气体与温室效应增强

由于大气层中存在水汽, CO_2 等强烈吸收红外线的气体成分, 它们能使太阳光透过, 却能吸收地面向空间发射的辐射, 从而维持地球表面较高的温度。如果大气中没有温室气体来吸收热量, 地球表面的温度就要低于 -15°C , 地球上也就不可能有生命存在。我们把地球表面的这种增温效应称为温室效应, 把可以吸收红外线而产生温室效应的气体成分称为温室效应气体或温室气体。大气温室效应的强弱与温室气体的浓度关系密切。

工业化以来, 尤其 20 世纪 50 年代以来, 人为产生的温室气体排放量不断增加, 同时, 随着大量化石燃料被开采利用, 人工合成化学氮肥的产量和用量日益增加以及土地利用状况急剧变化, 打破了原来各种天然温室气体成分的源和汇自然平衡, 使大气中的温室气体浓度呈现不断增长趋势, 如 CO_2 , CH_4 和 N_2O 的大气浓度分别比工业化以前增加了大约 26%、148% 和 8%, 乡村地区的地面 O_3 浓度大约比上个世纪增加了 1 倍。大气温室气体浓度逐渐增加, 使得工业化以来的大气温室效应比工业化以前处于自然平衡态时更强, 这就是温室效应增强的概念。原来地球上的人类生存环境是在处于自然平衡态的温室效应条件下长期演变形成的, 一旦这种自然平衡态被破坏, 取代以更强温室效应条件下的新的平衡态, 地表生态环境也必然要发生相应变化, 以适应新的平衡态, 而这种变化有可能在一定程度上威胁人类及其他生物物种的生存。

2 什么是温室气体的源与汇

温室气体的源是指温室气体成分从地球表面进入大气 (如地面燃烧过程向大气中排放 CO_2) 或者在大气中由其他物种经化学过程转化为某种气体成分 (如大气中的 CO

被氧化成 CO_2 ，对于 CO_2 来说也叫源)。温室气体的汇则是指一种温室气体移出大气到达地面或逃逸到外部空间(如大气 CO_2 被地表植物光合作用吸收)或者是在大气中经化学过程不可逆转地转化为其他物种成分(如 N_2O 在大气中发生光化学反应，即只有在一定波长的光的照射下才能发生的化学反应，而转化 NO_x ，对 N_2O 就构成了汇)。大气温室气体的源有自然源和人为源之分，后者是人为活动引起的。人为源增加被认为是目前大气温室气体浓度逐渐上升的主要因素。

3 哪些温室气体最重要

大气中含量最高、温室效应最强的气体成分是水汽。水汽在大气中浓度介于千分之一到百分之几之间，因其变化无常，而且对于大气来说，存在一个巨大的自然源——占地表 70% 的海洋。所以，大气水汽的变化对人为影响很不敏感，所以人们在讨论温室效应增强时把水汽排除在外。

除水汽以外的温室气体成分包括二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4)、氧化亚氮 (N_2O)、臭氧 (O_3)、氟里昂或氯氟烃类化合物 (CFCs)、氢代氯氟烃类化合物 (HCFCs)、氢氟碳化物 (HFCs)、全氟碳化物 (PFCs)、六氟化硫 (SF_6)。其中， CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是自然界中本来就存在的成分，由于人类活动而增加，而 CFCs、HCFCs、HFCs、PFCs 和 SF_6 则完全是人类活动的产物。由于各种温室气体吸收的辐射波长不同，它们在大气中的浓度也各不相同，因此，它们的增加对温室效应的相对贡献也不同。通常用增温潜势 (GWP—Global Warming Potentials，以 CO_2 的 GWP 为 1) 来表示相同质量的不同温室气体对温室效应增强的相对辐射效应，一种气体的 GWP 值取决于它的红外辐射吸收带的强度和它在大气中的寿命。所以，同一种气体，对不同时间尺度的气候变化而言，GWP 是不同的。对于 100 年时间尺度的气候变化， CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 21 和 290，HFCs、PFCs 和 SF_6 的 GWP 值达到 $10^3 \sim 10^4$ ，就是说，对于 100 年时间尺度的气候变化，加到大气中的一个全氟碳化物分子所引起的温室效应比加上一个二氧化碳分子的大 6 000~9 000 倍。因此，尽管它们的浓度与其他温室气体(如 CO_2)相比，是很低的，但是却具有重要的温室效应，且它们在大气中寿命极长，必须引起足够的重视。

IPCC(1994)主要考虑了 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、HCFCs、HFCs 和 SF_6 六种温室气体。下面分别介绍它们源和汇。

4 温室气体的源和汇

4.1 CO_2

对于几年到几百年的时间尺度，全球碳循环主要是以 CO_2 的形式在生物圈、海洋和大气圈中进行。我们都熟悉的植物光合作用就是吸收大气中的 CO_2 ，把碳用于生长，从而完成将大气中的 CO_2 固定到陆地生物圈的过程；而植物的呼吸以及生物体的燃烧和腐烂等有机物的分解，则是以相反方式完成将碳返还到大气中的过程。海洋的透光层中也存在相似的光合和呼吸作用。海洋的非生物物理化学过程也在不断地吸收和释

放 CO_2 。大气中的总碳量每年约有十分之一是进进出出的, 其中一半是与陆地生物群落交换, 另一半则通过物理和化学过程穿过海洋表面。陆地、生物圈和海洋含碳量远大于大气中的含碳量。所以, 这些大的碳库的很小一点变化都可以对大气 CO_2 浓度有很大的影响。

工业革命以前的几千年的时间里, 大气中的 CO_2 体积分数平均值约为 280×10^{-6} , 变化幅度大约在 10×10^{-6} 以内。工业化革命之后, 碳循环的平衡开始被破坏, 造成大气中的 CO_2 浓度增加, 1995 年大气中的 CO_2 体积分数达到 360×10^{-6} 。这主要是由于森林遭到大规模的破坏, CO_2 的生物汇在不断减少, 加之煤炭、石油和天然气等化石燃料的消费一直在增加, 而海洋和陆地生物圈并不能完全吸收多排放到大气中的 CO_2 , 从而导致大气中的 CO_2 浓度不断增加。

目前, 全世界每年燃烧煤炭、石油和天然气等化石燃料排放到大气中的 CO_2 总量折合成碳大约是 6 Gt; 每年由于土地利用变化和森林被破坏释放约 1.5 Gt 碳。而每年大气中碳的净增加大约是 3.8 Gt, 其余的 3.7 Gt 碳则被海洋和陆地生物圈吸收, 其中海洋吸收约 2.0 Gt, 陆地生物圈吸收约 1.7 Gt。

可以看出, 每年排放到大气中的 CO_2 约有 50% 留在大气中。假如由于化石燃料燃烧所排放到大气中的 CO_2 以每年 2% 的速率 (上限) 增长, 到 2040 年前后 CO_2 的体积分数就将达到 550×10^{-6} ; 若以每年 1% 的速率 (下限) 增长, 则到 2085 年前后 CO_2 的体积分数将达到 550×10^{-6} 。

4.2 CH_4

CH_4 是大气中含量丰富的有机气体, 它主要来自于地表, 可分为人为源和自然源。人为源包括天然气泄漏、石油煤矿开采及其他生产活动, 热带生物质燃烧, 反刍动物、城市垃圾处理场、稻田等。自然源包括天然沼泽、湿地、河流湖泊、海洋、热带森林、苔原、白蚁等。

根据已确认的 CH_4 各排放源清单, 全球 CH_4 各排放源总量约为 535 Tg/a (范围为 410~660 Tg/a, 下同), 接近但略小于上述估算的 CH_4 年排放总量 552 Tg, 这是由于采用不同方法得到的不同结果。其中自然源为 160 Tg/a (110~210 Tg/a), 人为源为 375 Tg/a (300~450 Tg/a), 人为源约占 70%。自然源中, 天然沼泽、湿地排放源大约为 115 Tg/a (55~150 Tg/a), 白蚁排放源为 20 Tg/a (10~50 Tg/a), 海洋排放源为 10 Tg/a (5~50 Tg/a), 其他如森林、苔原等排放源为 15 Tg/a (10~40 Tg/a)。人类排放源可分为与化石燃料有关的排放源和生态排放源。化石燃料排放源中, 天然气排放源约为 40 Tg/a (25~50 Tg/a), 采煤排放源为 30 Tg/a (15~45 Tg/a), 石油工业排放源为 15 Tg/a (5~30 Tg/a)。另外, 煤的燃烧也会排放 CH_4 。生态排放源有: 反刍动物排放源为 85 Tg/a (65~100 Tg/a), 稻田排放源为 60 Tg/a (20~100 Tg/a), 生物质燃烧排放源是 40 Tg/a (20~80 Tg/a, 城市垃圾排放 CH_4 为 40 Tg/a (20~70 Tg/a), 动物废弃物排放 CH_4 为 25 Tg/a (20~30 Tg/a), 城市污水排放 CH_4 为 25 Tg/a (15~80 Tg/a)。应该指出, 以上数据都还存在很大的不确定性, 有待进一步深入研究。

全球 CH_4 的汇有: (1) 在对流层大气中与 OH 反应而被氧化掉, 约 445 Tg/a (360~530 Tg/a); (2) 一部分 CH_4 输送到平流层, 在那儿发生光解和被 OH、Cl 和

O(¹D)等氧化, 约 40 Tg/a (32~48 Tg/a); (3) 被土壤吸收, 约 30 Tg/a (15~45 Tg/a)。全球 CH₄ 汇约为 515 Tg/a (430~600 Tg/a)。

大气中 CH₄ 的年增加量约为 37 Tg (35~40 Tg)。根据 CH₄ 源 = CH₄ 汇 + 大气中增长量, 可以推断大气中 CH₄ 一年的总排放量约为 552 Tg (465~640 Tg)。

4.3 N₂O

N₂O 通常用作麻醉剂并被叫作笑气。在工业革命前, N₂O 在大气中的体积分数为 0.275×10^{-6} , 而目前的体积分数约是 0.312×10^{-6} , 每年增加 0.25% 左右。N₂O 在大气中的唯一的汇是在平流层被光解成 NO_x, 进而转化成硝酸或硝酸盐而通过干、湿沉降过程被清除出大气。由于 N₂O 的光解产物是平流层 NO_x 的主要源, 因而它对平流层 O₃ 的光化学过程极其重要。

大气 N₂O 均来源于地面排放, 但各种源的强度目前仍很不确定。根据 IPCC(1994), 全球每年 N₂O 源总量约为 14.7 Tg (折合成 N, 下同)。其中自然源 9 Tg, 主要包括海洋以及温带、热带的草原和森林生态系统; 人为源大约 5.7 Tg, 主要包括农田生态系统、生物质燃烧和化石燃烧、己二酸以及硝酸的生产过程。

根据大气中 N₂O 浓度的增长, 可以大致确定大气中 N₂O 的年增加量约为 3.9 Tg。

4.4 HFCs

CFCs 是人造化学物质。由于它们在室温下就可以汽化, 具有无毒和不可燃的特性, 所以被用于制冷设备和气溶胶喷雾罐。同时, 由于它们的化学性质不活泼, 在它们被破坏之前会在大气中滞留很长时间——100 年乃至 200 年。它们在大气中的含量虽然不大, 但却足以引起严重的气候环境问题。当氟里昂进入平流层后受到紫外线辐射发生光解, 产生氯原子。这些氯原子迅速与臭氧反应, 将其还原为氧, 从而加快臭氧的破坏速率。这一过程以催化循环的方式出现, 以致一个氯原子可以破坏许多臭氧分子。

由于使用氟里昂的这些严重后果, 引起了世界各国政府的高度重视并已采取了一系列行动。许多国家已经签署了 1987 年制定的蒙特利尔议定书, 它与后来的 1991 年的伦敦修正案和 1992 年的哥本哈根修正案一起, 要求工业化国家在 1996 年, 发展中国家在 2006 年完全停止氟里昂的生产。

当氟里昂被逐步淘汰时, 其他卤代烃——氢氯氟烃 (HCFCs) 和氢氟碳化物 (HFCs) 将部分取代它们。哥本哈根修正案规定, 将来 HCFCs 也应逐渐削减, 发达国家到 2004、2010、2015 年分别减少 35%、65%、90%, 到 2020 年, HCFCs 将停止生产, 发展中国家到 2040 年停止生产。尽管比起 CFCs 来, HCFCs 对臭氧的破坏性小, 但它们也是温室气体, 具有很强的温室效应。HFCs 不含有氯或氟, 所以它们不破坏臭氧, 不包括在蒙特利尔议定书中。但是, HFCs 本身具有很强的温室效应, 对辐射强迫产生显著影响。由于它们的寿命较短, 一般是几十年, 所以, HFCs 被用作替代物。在相同排放速率的条件下, 它们在大气中的浓度及其对全球增温的贡献都会小于 CFCs 和 HCFCs。

氢氟碳化物 (HFCs) 的排放源较为简单, 主要来自工业生产。1995 年的全球排放量约为 25 万 t。其汇则主要是在对流层与 OH 反应以及在平流层光化分解。

4.5 PFCs

PFCs 主要包括 CF₄、C₂F₆ 及 C₄F₁₀ 三种物质, 其中 CF₄ 占绝大部分, C₄F₁₀ 的量

很少。铝生产过程是最大的 CF_4 、 C_2F_6 排放源。这些排放主要是在冶炼过程中当炉中的铝土浓度减少时由阳极效应产生的, 排放出的主要产物是 CF_4 , 而 C_2F_6 排放占 CF_4 十分之一。其他过程中的排放量很小。1995 年全球排放总量约为 4 万 t。

4.6 SF_6

SF_6 全部是人为产物, SF_6 所具有的阻止高温熔化态的铝镁被氧化的特性使其大量应用于铝镁冶炼, SF_6 的另一用途是做气体绝缘体及高压转换器用于电力行业。据 IPCC 有关报告统计: 1994 年全球年排放 5 800 t, 其中 20% (1 200 t/a) 来自镁生产过程, 由于 SF_6 与铝发生反应, 故铝生产过程排放很少, 其他 80% (4 600 t/a) 排放来自绝缘器及高压转换器的消耗。1995 年, 全球 SF_6 排放量约 5 800 t。

PFCs 和 SF_6 在大气中非常稳定, 它们的寿命相当长, PFCs 寿命约为 3 200~50 000 a, SF_6 寿命约为 3 200 a, 它们的清除机制是缓慢光解, 人类活动的排放将造成它们在大气中不可逆的积累和增长, 必须引起足够的重视。

参 考 文 献

- 1 王明星, 大气化学 (第二版), 北京: 气象出版社, 1999, 467p.
- 2 Houghton, J. T. et al. (eds), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1994, 339p.
- 3 Houghton, J. T., 全球变暖, 戴晓苏, 石广玉, 董敏, 耿全震译, 北京: 气象出版社, 1998, 239p.

Sources and Sinks of Green House Gases

Wang Mingxing, Zhang Renjian and Zheng Xunhua

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The concepts of green house effect and green house gases are introduced. The sources and sinks of present main green house gases, which are CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFCs, SF_6 are explicated. Though the concentrations of HFCs, PFCs, SF_6 are very low presently, as they have high global warming potential value and long lifetime especially for PFCs, SF_6 , any emission from human activities will cause irreversible increase, so they should be paid much attention.

Key words: green house effect; green house gas; source; sink