

矿物燃料的排放不一定导致全球增暖

T. M. L. Wigley

(英国东英格兰大学气候研究所)

摘要 矿物燃料燃烧同时向大气排放二氧化碳和二氧化硫。前者增强温室效应导致低层大气变暖, 而后者形成硫酸盐气溶胶, 可产生冷却效应。好多年前, 已有人提出这两种过程能够相互补偿的可能性^[1]。但是近年来, 更多的注意力集中在温室效应上。目前, 人们重新对于对流层的气溶胶发生兴趣, 意识到它们不仅通过晴空辐射效应^[2-5], 而且可以改变云的反照率, 从而对气候产生影响。控制矿物燃料的使用, 就可以同时改变CO₂和SO₂的排放量, 本文研究了气候系统对它们同时变化的敏感性。可以相信: 经过10~30年后, SO₂浓度变化引起的辐射效应的增加可能大于CO₂排放量减小所引起的辐射效应的减小。

矿物燃料燃烧所排放出的SO₂和CO₂的相对量与燃料种类和排放控制技术有关, SO₂和CO₂的相对量将来有可能发生变化。但是作为最基本的情况, 现假设这两种气体的排放量与矿物燃料总燃烧量是呈比例的, 并假定矿物燃料总燃烧量按固定增长率增长, 则未来SO₂和CO₂的排放量将由下式确定。

$$E = E_0 + (E_1 - E_0)e^{\alpha t} \quad (1)$$

其中 E_0 是自然背景排放率, E_1 是目前总的排放率($t=0$), 而 α 是增长率。为了确定矿物燃料燃烧量减少对气候的效应, 我比较了三种不同增长率(增长率为0和每年增长 $\pm 2\%$)下SO₂和CO₂引起的辐射效应。

首先考虑SO₂的直接效应。辐射效应的变化(dQ_{dir})与整个气柱内硫酸盐气溶胶含量的变化近似成正比, 进而与气柱内SO₂平均含量的变化近似成正比^[5]。由于SO₂的生命期大大地小于一年, 所以SO₂浓度的变化肯定等于排放量变化。因此直接辐射效应可以认为与排放量的变化呈线性关系:

$$dQ_{dir} = \alpha dE \quad (2)$$

至于改变云的反照率而引起的SO₂的间接效应 $dQ_{indir} \propto \frac{dC}{C}$, 其中C代表云凝结核(CCN)的浓度^[6,7]。如果C的变化与气溶胶浓度的变化呈线性关系, 而气溶胶浓度的变化与SO₂的排放量呈线性关系, 则我们可以得到:

$$dQ_{indir} \propto dE/E = b dE/E \quad (3)$$

虽然人们已经知道C-A(A表示气溶胶浓度)之间呈非线性关系^[10,11], 但假定这种关系可以表示成 $C \propto A^n$ 形式时, 公式(3)仍成立。

上述的排放量和辐射效应之间仅仅只是近似关系。其中常数 α , 特别是 b 是不确定量。这些不确定性可加以克服, 即用现在人为造成的SO₂的效应(ΔQ_0)来表示未来的效应变化。 ΔQ_0 是未知的, 但它的取值范围可以依照SO₂主要在北半球排放而应导致的南北半球温度的差异来估算。因为没有发现明显的南北半球温度差异, 因此我们可以给定 ΔQ_0 的上限值。北半球 ΔQ_0 最可能的取值范围为 $0 \geq \Delta Q_0 \geq -1.5 \text{ W m}^{-2}$ ^[8]。南半球 ΔQ_0 非常小, 可假定为零。如果 δQ 是未来的效

应变化，则由方程(1)和(2)可得出：

$$\delta Q_{\text{dir}} = \Delta Q_{0, \text{dir}} (e^{\alpha t} - 1) \quad (4)$$

方程(2)和(3)可得出：

$$\frac{\delta Q_{\text{indir}} = \Delta Q_{0, \text{indir}} \frac{\ln[E_0/E_1 + (1 - E_0/E_1)e^{\alpha t}]}{\ln[E_1/E_0]}}{\quad} \quad (5)$$

未知数 α 和 b 已含在 ΔQ_0 中。

这些结果表明，如果 α 为负值(即排放量减少，最终可回到自然背景排放量水平 E_0 上)，那么 δQ 将趋向于 $-\Delta Q_0$ 。图 1 显示了直接效应和间接效应的相对关系。图 1 上半部对应于排放量减少的情况。从中可以看出这两种效应是不相上下。对于排放量增加的情况(图下半部)，因为排放量和 CCN 的辐射效应之间呈非线性关系，以直接效应为主。

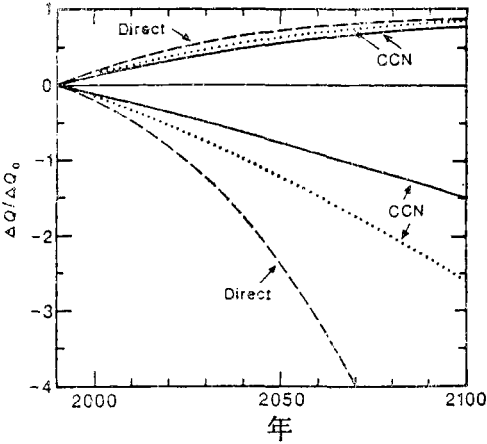


图 1 每年排放增长率为 +2% (下面三条曲线) 和 -2% (上面三条曲线) 时，北半球 SO_2 引起的辐射效应变化 (Wm^{-2})。虚线表示晴空硫酸盐气溶胶引起的直接效应，实线表示现在与产业革命前的 SO_2 排放量比值 $E_1/E_0 = 3.6$ 时的间接(CC-N)效应。点线表示 $E_1/E_0 = 1.8$ 时的间接(CC-N)效应

至于 CO_2 排放量变化引起的辐射效应，必须用方程(1)来估算上述三种排放方案中 CO_2 浓度的变化。我们采用 Maier-Reimer 和 Hasselmann 碳循环模式的卷积形式^[12,13]做了这个工作。应用这个模式来重现过去的浓度变化， CO_2 排放量从产业革命前的近似零值增长到 1990 年的 6.18 Gt C。因此未来的排放量可以假定具有下列形式：

$$E = 6.18 e^{\alpha t}$$

它与公式(1)相一致(严格地讲，矿物燃料和树木砍伐的排放源应分别考虑，但对最后的结果几乎没有影响)，计算的浓度变化见图(2)的上图。

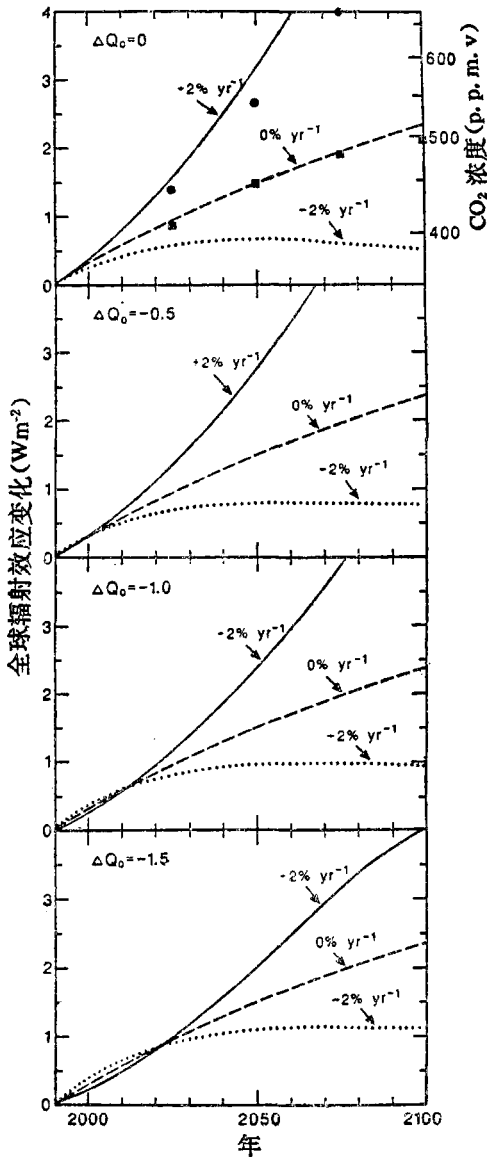


图 2 CO_2 和 SO_2 排放增长率引起的全球辐射效应变化。上图中的黑点给出的是 IPCC 正常排放方案和 C 方案(限制矿物燃料使用)的结果

当 $\alpha < 0$ 时， CO_2 和 SO_2 的辐射效应变化有显著的差异。由于碳循环的时间尺度较长， CO_2 浓度对于排放量减小的响应是十分慢的。事实上，当 $\alpha = -2\%$ 时，直到 2050 年

以后 CO₂ 的含量才开始减小, 这时候排放量已经减少到 1990 年的 30 %。但是 SO₂ 的响应则是迅速的。因此当 CO₂ 和 SO₂ 排放量的增长同时减小时, 气候系统的最初响应表现为由于 CO₂ 浓度增长放慢, 增暖率变小, 而同时由于硫酸盐气溶胶变化效应, 增暖率增大^[14]。这两种过程以哪一个为主呢?

为了回答这个问题, 我考虑 CO₂ 和 SO₂ 排放量同时变化引起的净的辐射效应变化。引用 上述的 CO₂ 浓度变化 方案 和被 IPCC (政府间气候变化专门委员会) 第 I 工作小组采纳的辐射效应和浓度变化之间的关系^[15], 可以计算出 CO₂ 的辐射效应变化, 也就是当浓度变化从 C₀ 变到 C 时,

$$\delta Q = 6.3 \ln(C/C_0)。$$

由于硫酸盐气溶胶的直接和间接效应的

相对重要性还不清楚, 我假定它们与 ΔQ₀ 同等重要(ΔQ_{0,dir}=ΔQ_{0,indir}), 它们之和在北半球位于 0 和 -1.5 Wm⁻² 之间, 而南半球为零。当未来 SO₂ 排放量的增长率为负值时, 这两种效应没有什么差异。当增长率为正时, 至少到 2050 年, 仅会产生很小的数量差别。因为硫酸盐气溶胶这两种效应的大小是不确定的, 计算北半球总的效应时我取了四个不同的未来效应变化值: ΔQ₀=0.0, -0.5, -1.0, -1.5 Wm⁻²。ΔQ₀=0 给出的是没有气溶胶效应的基本情况, 而 ΔQ₀=-1.5 Wm⁻² 对应于这样一种情况, 即北半球增强的温室效应中 60 % 被 SO₂ 相应的过程所抵消。硫酸盐气溶胶效应仅仅在北半球才有。北半球总效应变化(气溶胶加 CO₂) 列在表 1, 而全球效应变化如图 2 所示。

表 1 不同的排放增长率和不同的气溶胶效应强度(ΔQ₀)时北半球 CO₂ 与气溶胶的净效应变化

排放增长率(α)	ΔQ ₀ (Wm ⁻²)	年										
		2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
+2% yr ⁻¹	0.0	0.36	0.77	1.25	1.80	2.43	3.14	3.94	4.84	5.74	6.69	7.64
	-0.5	0.27	0.59	0.95	1.37	1.84	2.36	2.95	3.59	4.22	4.75	5.26
	-1.0	0.19	0.41	0.66	0.94	1.25	1.59	1.96	2.34	2.66	2.82	2.88
	-1.5	0.10	0.22	0.36	0.51	0.66	0.82	0.97	1.09	1.10	0.89	0.50
0% yr ⁻¹		0.30	0.58	0.83	1.06	1.27	1.47	1.67	1.85	2.03	2.20	2.37
-2% yr ⁻¹	0.0	0.26	0.43	0.53	0.59	0.63	0.64	0.63	0.61	0.58	0.55	0.51
	-0.5	0.33	0.56	0.72	0.83	0.90	0.95	0.97	0.98	0.97	0.96	0.94
	-1.0	0.40	0.70	0.91	1.07	1.18	1.26	1.31	1.35	1.36	1.37	1.36
	-1.5	0.48	0.83	1.10	1.30	1.46	1.57	1.65	1.71	1.75	1.77	1.78

当 α=0% yr⁻¹ 时, 气溶胶效应为零, 这些值只表示 CO₂ 的单独效应。类似地, 对任何 α 值, 当 ΔQ₀=0 Wm⁻² 时, 气溶胶效应为零。因此所有这些行给出的都是 CO₂ 的单独效应。

随着控制排放量政策的实施, 气溶胶的首要效应是减小总的辐射效应。它使得未来辐射效应的取值范围缩小。例如到 1990—2050 年, 在没有气溶胶效应的前提下, 从 α=-2% 到 α=+2%, 全球平均辐射效应增长范围从 0.64 到 3.14 Wm⁻²。但当考虑强气溶胶效应(ΔQ₀=-1.5 Wm⁻²) 时, 效应增长范围变为从 1.10 Wm⁻² 到 1.98 Wm⁻²。再过 10—30 年后, 只有气溶胶效应才是影响总效应变化的主要因子。由此可说, 排放量减

少引起的辐射效应增加大于排放量增加的效果, 从而增加了全球变暖的可能性。

图 2 表示的是未来排放方案的净效应。用这些方案之间的差异可以较好地阐明减少排放量政策的效果。α=+2% 代表的是未来增长率仍保持现有水平的情况。在这种情况下模拟的 CO₂ 浓度与 IPCC 正常排放方案^[15] 到 2020 年的浓度十分相似(图 2 的上图)。α=0% 给出的未来 CO₂ 浓度与 IPCC 中的 C 方案很相似。α=-2% 代表更加极端的控制

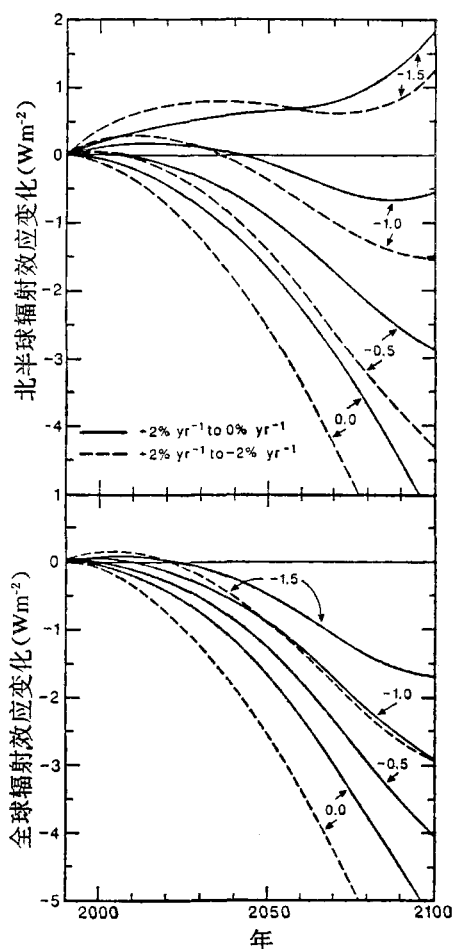


图3 CO_2 和 SO_2 排放量增长率从 $+2\% \text{ yr}^{-1}$ 到 $0\% \text{ yr}^{-1}$ (实线) 或从 $+2\% \text{ yr}^{-1}$ 到 $-2\% \text{ yr}^{-1}$ (虚线) 同时减少所引起的辐射效应的变化。上图表示北半球的结果, 下图表示全球的变化。参数 ΔQ_0 取 $0.0, -0.5, -1.0, -1.5 \text{ Wm}^{-2}$ 四个值的结果都被表示出来了

排放量方案。

图3给出了两种排放量控制情况($\alpha = 0\%$ 和 $\alpha = -2\%$) 相对于非控制即正常排放($\alpha = +2\%$) 情况下的辐射效应变化, 来表示 CO_2 和 SO_2 排放增长率同时减小的效应。即使没有气溶胶效应, 由于减小排放量政策实施,

辐射效应要有明显变化仍需要几十年时间, 这仅仅是由于碳循环需要很长的响应时间。气溶胶效应更进一步延迟了响应时间, 要30年时间才能完全抵消这种响应。排放量控制情况实际上是使辐射效应增长(即相对变暖), 它的持续时间和强度依赖于气溶胶效应的强度(本文用 ΔQ_0 表示)。对于强气溶胶效应($\Delta Q_0 = -1.5 \text{ Wm}^{-2}$), 直到2020年以后都是相对变暖。如果采用任意 SO_2 排放控制措施, 选用高硫燃料造成减少 CO_2 排放量, 或用非矿物燃料来减小 CO_2 排放量, 这三种情况都会使这种趋势更恶化。

硫酸盐气溶胶的效应有很大的不确定性^[4,16], 本文中 ΔQ_0 值取一个范围。如图3所示, 这些不确定性很严重, 甚至难于预报由于控制使用矿物燃料而引起的辐射效应变化的符号^[14]。但即使是较小的气溶胶效应, 就会延迟气候系统对未来控制或限制温室效应的响应。

当然, 孤立地将 SO_2 的冷却作用看成是有益的, 那将是完全错误的。就全球平均而言, CO_2 的效应明显地被硫酸盐气溶胶增长的效应所抵消, 但是继续增加排放量将会迅速加大南北半球效应的差异, 甚至可能破坏气候系统而不是均匀分布的“纯”温室效应。矿物燃料产生的硫酸盐气溶胶的可能效应, 与其看成是一种补救方法还不如看成是实施控制矿物燃料使用的更进一步的原因。

参 考 文 献(略)

仲爱红、张虎强译自《NATURE》Vol. 349, 1991年2月7日, p. 503—506.
朱福康校