

全球碳循环变化：生物界对大气圈中CO₂浓度变化反应的勒夏特利埃原理(报导II)*

В. Г. Горшков, К. Я. Кондратьев, С. Г. Шерман

大气中¹³C变化的界限 我们将认为, 方程(24)和(25)中的所有经验数据, 除 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 外, 都是已知的, 且精度较高。我们可把该式右部看做是 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 的函数——在从17世纪开始的整个人为扰动时期内大气中¹³C的相对含量变动量的变化。在方程(24)和(25)的实验数据中既有与时间无关的数值($\sigma, \zeta, K_{as}, \mu^*$), 又有随时间变化的数据($\delta^{13}\text{C}, \Delta\chi_a$)。从1958年起就开始有系统地测量随时间变化的数据。如早能对每年测量的现行变量值都计算出系数 μ^* , 就会相信, μ 与时间无关, 然后就像计算系数 μ^* (图2)一样来算出 μ 的平均值。然而, 文献中只列出 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 近20年的平均值。因此, 可把近25年(1958—1982)观测值的平均值当做与时间相关的值来利用。这样, 就可利用列入方程(24)和(25)的如下经验数据(ppm—百万分之几); $\delta^{13}\text{C}_a = -0.04\text{‰年}^{-1}$, $M_{a0} = (590 \pm 20)$ 千兆吨碳 (280 ± 10) ppm, $\Delta\chi_a = 0.0042\text{年}^{-1}$, $\Delta\chi_a = 0.21$, $\Delta\delta^{13}\text{C} = -(0.5 \pm 0.1)\text{‰}$, 这里的特点是取25年观测时间(1958—1982)内的平均值; $\mu^* = 0.70 \pm 0.01$, $^{13}\sigma_f = ^{13}\sigma_1 = (18 \pm 2)\text{‰}$, $C^+ = 0.9 \pm 0.1$, $C^- = -0.5 \pm 0.05$, $\zeta = 10 \pm 1$, $K = 0.075 \pm 0.006$ (22)。把这些值代入公式(24)

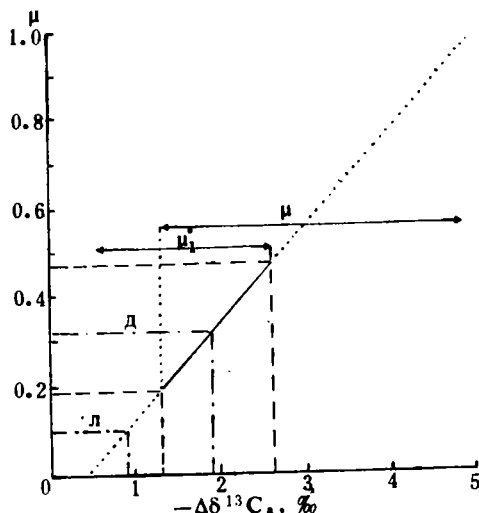


图4 大气圈中¹³C/¹²C比值变化的允许值的范围

实践——吸收系数 μ 随 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 及其在勒夏特利埃原理允许范围内的 μ 轴和 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 轴上投影变化的方程。点划线——经验数据; μ ——树木年轮, μ ——冰岩芯。虚带箭头的水平线—— μ 和 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 的极值。带箭头的水平线——勒夏特利埃原理对碳的大洋吸收[线 μ , 见方程(29)]和对稀有同位素的大陆生物界吸收[不太准确的线 μ^* , 见方程(28)]提出的限制条件。

包括：本地区内政府与科研机构间的合作关系、地区内外研究所（区办研究所及民办的研究所）间的合作关系、政府机构与私人基金会对研究计划的资助等。RRN的发展要尽可能包括以上合作伙伴。

5.RRN的建立应遵循“联合国关于IGBP的决议案”(the United Nations' Resolution on IGBP)中提出的有关原则, 以及遵循第二届世界气候会议关于建立“区域性多学科研究中心的网络”的建议和政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的关于限制全球气候变化应采取的科学步骤的建议。

6.RRN的财政资助应从政府和私人来源两个途径来筹措。短期的和初始的资助常由私人机构和个别政府组织提供, 应当看到, 来自研究区域内外政府的长期财政支持是非常重要的。(张志强编译)

参考文献

Draft Bellagio Report, "Global Change Systems for Analysis, Research and Training". The Report of a Meeting at Bellagio, December, 3—7, 1990

* 本文使用的公式和插图符号与报导I同, 见地理译报1991年第2期。

和(25)中,可求出作为大气中 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 变化函数形式的系数 μ^* 和 μ :

$$\mu_1^* = \frac{0.20 \pm 76\Delta\delta^{13}\text{C}_a}{-420\Delta\delta^{13}\text{C}_a - 0.20}, \quad (26)$$

$$\mu = -2.20\Delta\delta^{13}\text{C}_a - 0.093 \quad (27)$$

据勒夏特利埃条件 $\mu_1^* > 0$, $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 变化范围:

$$0.5\text{‰} < -\Delta\delta^{13}\text{C}_a < 2.6\text{‰} \quad (28)$$

勒夏特利埃条件用于 μ (16、21) 和方程 (27),

可得下列不等式:

$$1.3\text{‰} < -\Delta\delta^{13}\text{C}_a < 4.9\text{‰} \quad (29)$$

(29)中限制值比(28)更准确。联立不等式(28)和(29),如果 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 变化于:

$$1.3\text{‰} < -\Delta\delta^{13}\text{C}_a < 2.6\text{‰} \quad (30)$$

之间(图4),最终得出,勒夏特利埃原理对大陆和海洋生物界是能得到满足的。

在研究 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 变化的现有实验数据前,先求出大洋全吸收的无因次系数 μ (27)、稀有同位素的大陆生物界吸收系数 μ_1^* 和交换系数 R_{as} (17)的变化界限:

$$0.19 < \mu < 0.47, 0.29 > \mu_1^* > 0; \\ 0.076\text{年}^{-1} < K_{as} < 0.11\text{年}^{-1} \quad (31)$$

最小值 $\mu = \mu_{min}$ 相当于无大洋生物吸收碳,即 $\mu^+ = 0$,交换系数 K_{as} 的最小值与 μ_{min} 相符,但交换系数的最小值却与该系数的全部现有最小评价价值相矛盾。此外,处于大陆生物界模型所得评价范围内的 μ_1^* 的最大值与 μ_{min} 值相符。 μ 的最大值相应于与接近0的 μ_1^* 和与以前一些模型评价价值相符的交换系数 K_{as} 值。

在对碳储库的基本常数的变化范围作出说明后,就可以对碳的大洋吸收速度值和碳的大陆生物界排放速度值做出评价。为此,我们利用大气圈中碳增长的5年(1978—1982)平均值(为减少年度波动) $\Delta M_a = \Delta \chi_a M_{ao} = 140$ 千兆吨碳、埋藏碳排放速度5年平均 $\Delta M_r = -5.1$ 千兆吨碳/年和大气中碳积累速度的5年平均 $\Delta M_s = 3.4$ 千兆吨碳/年。碳的大洋吸收速度按公式 $\Delta M_o = R M_a$ 来确定,碳在大陆生物界中减少速度在算出 ΔM_s 后可由平衡方程 $\Delta M_s + \Delta M_a + \Delta M_r + \Delta M_o = 0$ 算出(储库 f 和 λ 排放碳相应为负的 ΔM_r 和 ΔM_o)。

于是在没有碳的大洋生物吸收时,即 $\mu = \mu_{min}$,我们有:

$$\mu = 0.19, \mu_1^* = 0.29, K_{as} = 0.076\text{年}^{-1}, \\ -\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.3\text{‰}, k = 0.014\text{年}^{-1} \\ \Delta M_s = \Delta M_r = 2.0\text{兆吨碳/年}, \Delta M_o = 0, \\ \Delta M_i = -0.3\text{兆吨碳/年} \quad (32)$$

在另一与勒夏特利埃条件相吻合的极站情况

下(31),我们有:

$$\mu = 0.47, \mu_1^* = 0, K_{as} = 0.11\text{年}^{-1}, \\ -\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 2.6\text{‰}, k = 0.05\text{年}^{-1}, \\ \Delta M_s = 7.1\text{兆吨碳/年}, \Delta M_r = 1.9\text{兆吨碳/年}, \\ \Delta M_o = 5.2\text{兆吨碳/年} \\ \Delta M_i = -5.4\text{兆吨碳/年} \quad (33)$$

式中大洋有机和无机吸收系数按比例 $\Delta M_o / \Delta M_s = \mu^+ / (\mu^- / \zeta)$ 来计算, μ^+ 和 μ^- 可按(11)式求出。式(33)值近似于文献[3、14]中所得值。

大气中 ^{13}C 变化的经验数据 评价值(32)和(33)是在不利用 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 的经验数据的情况下,由勒夏特利埃原理直接得出的。现在我们来讨论这些经验数据。文献中引用的在1958—1982年内 $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 平均数据为 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 0.5\text{‰}$ ——包括孤立(单枝)树木和森林树木在内的总计树木年轮, $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 0.9\text{‰}$ ——在冰岩芯和树木年轮内; $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.3\text{‰}$ ——从十九世纪中叶起按某种方式挑选出来的独立树木中,这时已开始燃烧矿物燃料,但并不能反映生物圈人为扰动的开始; $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.9\text{‰}$ ——从包括生物圈遭到人为扰动的整个时期的十六世纪起,独立树木的全世界统计。

$-\Delta\delta^{13}\text{C}_a < 0.5\text{‰}$ 的一些最小值与勒夏特利埃原理不符。这些最小值给出的是全系数 μ (27)近于零的值(或负值)。因此,大洋实际上不能从大气圈中吸收 CO_2 ,尽管可观察到大气圈中碳浓度有增长。这表示,大洋中 CO_2 浓度靠部分有机碳转变为无机碳与大气中 CO_2 以同速增长(或更高些),所以,大洋生物界对大气圈中 CO_2 浓度的增长的反应是向周围环境放出 CO_2 。这种生物破坏勒夏特利埃原理,是不稳定的。这种情况与生物界稳定存在了几百万年不符。当 $\mu = 0$ 时,大洋和大气圈中来自独立释放源的 CO_2 浓度都增长,这时没有通过界面的碳纯通量存在。当 $\mu < 0$ 时,大洋成为向大气圈放出 CO_2 的释放源。

在 $0.5\text{‰} < -\Delta\delta^{13}\text{C}_a < 1.3\text{‰}$ 的区域内的冰岩芯和树木年轮数据也与勒夏特利埃原理不符。当 $\mu^+ < 0$ 时,这些数据相应于 $\mu > 0$ 。这表示,大洋从大气圈中吸收 CO_2 ,然而,大洋碳积累比通过界面提供积累的吸收通量进行得快,因为吸收通量是靠大洋有机储备释放 CO_2 来维持的。

由勒夏特利埃原理得出的能破坏限制条件(30)的所有数据都被看做是对大气圈中的 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 的真正变化的不正确反映。冰岩芯内有大量的扩散过程,而树木年轮的有机质中实际上没有这些过程,因此,冰岩芯数据可能导致 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 值过低。随着过去的大气圈中 CO_2 浓度增长和 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值下降,与相

应时间内的大气圈中的 CO_2 和 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的真正值相比,扩散过程应导致 CO_2 浓度值过高 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值过低。在同一时期内冰岩芯数据大概正确地反映了工业化前大气中 CO_2 浓度值,因为,这一数值在最近1000年内一直保持不变。500多年前生成的冰岩芯气泡中的 CO_2 浓度变化与大气圈中工业化前的 CO_2 浓度值的另一些数据相符。现在形成的冰岩芯数据与大气中 CO_2 的现代直接测量数据相符。中间时域的冰岩芯中 CO_2 浓度值与这一时期的大气 CO_2 浓度相比是太高了。这是因为现在所观测到的1958年前 CO_2 呈指数增长,对这种增长采用外推法导致大气 CO_2 浓度比冰岩芯有较大减少。

如果继续测量年龄不断增长的冰岩芯中的比 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 一直到该比值停止减少和像 CO_2 浓度绝对值一样稳定在一定水平上时为止,就有可能求出正确的工业化前的比值 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。为此,必须利用年龄在500—1000年左右的冰岩芯。

树木年轮资料与 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.3\%$ 不完全相符,大概,或与对森林中树木的大气比值 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的反映不正确有关,或与这些被研究树木未得充分统计有关。在全世界统计的近60种可利用树木中,有一部分 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 达到式(30)中的最大值,这些最大值与勒夏特利埃原理并不矛盾。因此,被研究树木的统计值进一步增加可提高 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 值和相应提高碳的大洋全吸收系数和生物吸收系数,一直达到最大值(33)。

经验值 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.3\%$ 与无有大洋生物吸收的勒夏特利埃原理相符。与这一值相吻合的碳循环特性值列入方程(32)中。这些值相当于:1)过小的交换系数 k_a 值,这一过小值与直接测量和各种不同大洋模型所得交换系数的最小评价是矛盾的;2)碳的生物界过小排放速度,这一过小排放速度与按土地利用和森林面积缩小数据求出的速度评价是矛盾的;3)碳稀有同位素的大陆生物界过高的吸收系数值 μ_1^* ,这一过高的吸收系数值与各种模拟评价是矛盾的;4)值 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.3\%$ 是在选择大气中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值变化的计算起点时得到的,这一起点与矿物燃料的燃烧起点有关,但矿物燃料燃烧的起点并不反映生物圈人为扰动的起点和大气中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值人为减少的起点。

在 $-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.9\%$ 的最大观测值的情况下,所有这些数据都失去意义。我们将把这一最大值当作目前最准确的经验值来使用。对式(11、17、20、26和27)中的这一值,可得现代全球碳循环的以下特性值(图4):

$$\mu = 0.32, \mu^* = 0.10, k_{as} = 0.094 \text{年}^{-1}$$

$$-\Delta\delta^{13}\text{C}_a = 1.9\%,$$

$$k = 0.030 \text{年}^{-1}, \Delta M = 4.2 \text{兆吨碳/年},$$

$$\mu/\zeta = 0.23,$$

$$\mu^* = 0.24, \Delta M^* = 2.1 \text{兆吨碳/年},$$

$$\Delta M_s = 2.1 \text{兆吨碳/年},$$

$$\Delta M_1 = 2.5 \text{兆吨碳/年} \quad (34)$$

由式(34)可见,碳的大洋生物吸收和物理化学吸收是相符的,亦即大洋生物界可按勒夏特利埃原理有效地抵消大气中的碳的扰动。

我们看到,式(30)中的交换系数 k_a 原来是文献中引用的最低一级的值,大约比某些模型求出的最大值小30%。如果认为交换系数 k_a 是给定的,并 $k_a = 0.11 \text{年}^{-1}$ (这一值与各类早期模型所用的这些系数的平均值相一致),我们就可自行导出式(33)各值,在这些值的条件下, $\Delta\delta^{13}\text{C}_a$ 应等于2.6%。

大陆生物界向破坏勒夏特利埃原理的不稳定态过渡 如果大陆生物界还没有被人类开发,并保持其自然状态,那么它就应该服从勒夏特利埃原理。在这种情况下,大气中 CO_2 含量的增加会导致大陆生物界从大气中吸收 CO_2 。当 Δx_a 很小时,完全类似于大洋的情况,可写出[见平衡方程(1)]:

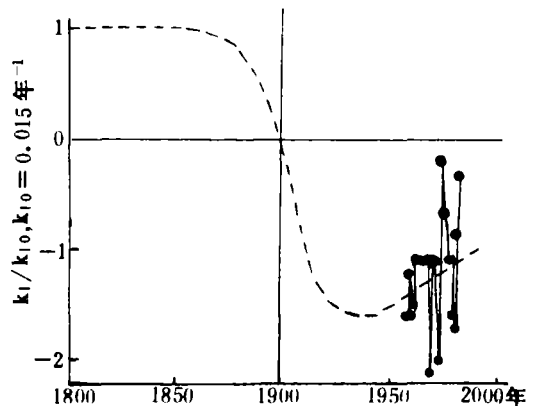


图5 大陆生物界对勒夏特利埃原理的破坏

当 $R = 0.03 \text{年}^{-1}$ 时(34)实线连接3 R_c (35)的所有经验数据。虚线是在1860年时 $\Delta M_a + \Delta N_1 = 0$, 1860年后 $\Delta M_a < -\Delta M_1$ 和1860年前 $\Delta M_a = 0$ 的条件下,按大气浓度增长的内推曲线求出的;工业化前的值 M_{a0} 是从与1958年后的观测值 M_a 相结合的条件中选出的,等于60兆吨碳(为大气体积的百万分之282)。据大陆和大洋的初产总量相等,取大陆生物界和大洋生物界对碳的吸收系数相等。[$R_c = R/2$; 大洋吸收碳的一半是由大洋生物界吸收的]。勒夏特利埃原理的破坏起于本世纪初,相应于 $R_c = 0$ 线的交点。

$$\Delta X_1 = k_1 \Delta X_0; k_1 = -k - (\Delta M_1 + \Delta M_0) / \Delta M_0 \quad (35)$$

对未受扰动的生物界, $k_1 = k_{10} > 0$

现在, 已知 $\Delta X_0 = +0.23$ 和已求出的 $\Delta M_1 = -0.0042 \text{ 年}^{-1}$, 可得: $k_1 = -0.018 \text{ 年}^{-1}$ (36)

因此, 生物界(包括人类)的现代吸收系数值为负。这表示, 现代陆地生物界是受剧烈扰动的, 正破坏着勒夏特利埃原理, 具有不稳定性。

由于陆地生产能力高, 未受扰动的系数值 k_{10} 可能大于大洋的相应系数。我们认为, 大洋生物界受扰动很差, 其现代吸收系数与未受扰动值相符。未受扰动的生物圈消除环境污染的能力会比现在要强得多。

上述讨论允许对能表征大陆生物界状态的吸收系数的时间变化做出评价。

从图 5 可见, 过去 100 年生物圈的陆地部分完成了有效吸收全部人类污染的职能。

结束语 本文采用小参数分解方法, 可以在现有经验数据基础上, 不利用大洋和大陆生物界结构模型来确定碳循环变化。利用勒夏特利埃原理允许选择与大气圈—大洋—生物界系统可观察到的稳定性不矛盾的实验数据。按勒夏特利埃原理选择的数据表明大洋生物界有一种正常反应能抵消环境变化。树木年轮和冰岩芯中同位素 ^{13}C 含量的进一步核实, 可得一结论: 碳的大洋生物吸收和全吸收有重大增加。

当有外部扰动时, 生物界能维持周围环境于稳态, 是靠环境中多余的无机物向低活性有机物转化而进行的(如转化为大洋中的可溶性有机物或土壤和树木中的有机碳)。相反, 当环境中的无机物不足时, 生物界可通过分解低活性有机物使环境中无机物得到补充。正是这些过程的结果, 方使大气圈和大洋中 CO_2 浓度在扰动后朝着工业化前的方向去恢复, 见文献 [15] 中 (4) 式。假如没有生物界把多余的大气 CO_2 转化为有机物形式的反应, 排放到大气中的全部碳就会在碳重新分布于大洋和大气之间后永远停留在周围环境中。

当其他生源物(氮、磷)的浓度不变时, 大洋生物界对 CO_2 浓度升高的反应是吸收碳, 这种吸收所以能进行是因为浮游植物能合成一种不含氮和磷的原始有机物。氮和磷然后由藻类排出, 用以增加大洋中可溶性有机质, 同时, 也增加可溶性有机质中 C/N 和 C/P 比例。我们看到, 能证明生物界对全

球范围的 CO_2 增长有上述反应的直接证据在目前是不存在的, 获得这类证据是项极复杂的实验任务。我们只能证明, 现有实验数据与这种可能并不矛盾。

所得结果表明, 地球生物界能充分调控环境状态, 使环境处于有益于生命的状态。大家都清楚, 因生物界分解和合成有机物, 环境(生物活性化合物的浓度)变化的可能速度比因地球物理和宇宙过程(火山活动覆盖层对物质的过滤、宇宙粒子流量等)而发生的环境变化速度高 4 个数量级。在正常条件下的天然生物界中, 合成与分解可完全相互补偿。由于合成和分解速度失调不大, 在 10^4 左右的相对水平上, 天然生物界(不受人为扰动的)有能力抵消任何无机因素对环境的作用。没有生物界, 任何地方都不会有环境稳定性的必要。在无有生命的地球上, 环境不具有稳定性, 不服从勒夏特利埃原理, 是完全可能的。在没有生命的地球上, 环境变化会使地球变成生命无法存在的火星和金星的状态。要建立只考虑稳定的碳循环而不考虑生物界的模型的企图是不能成功的。这些模型中的温度稳定性可用调控温室效应的非生物的 CO_2 浓度的稳定性来说明。为生命提供适应温度的现有 CO_2 浓度的原因是不清楚的。没有生命的地球上能影响温室效应的水情的不稳定性完全可以忽略。大家知道, 水情的影响比 CO_2 影响大 1 个数量级。在考虑地球物理过程的情况下, 忽略生物界对环境的影响意味着舍弃主要数量项, 而考虑为数极小(对于 10^{-4}) 的次要项, 亦即极大地失真。

扰动严重的生物界能失去稳定性, 并不再服从勒夏特利埃原理。大陆生物界在全球范围内现已发生的大概正是这种情况。大陆生物界不是抵消环境的变态, 而是开始成为环境的主要污染者之一, 见式 (34)。看来, 到本世纪前, 大陆生物界还保持了稳定性, 担负着比大洋更有效地净化环境、消除扰动的职能。现在消除环境中扰动的职能暂由受扰动不大的大洋来完成。

还应强调指出, 生物圈失去平衡态, 即人工生物综合体(改良农业技术、水产养殖、次生林等)取代生物圈的天然生物界, 对周围环境来说, 是个比生物界完全毁灭更为危险。在合成和分解间关系遭到破坏的第一种情况下, 毁坏环境的生物过程所起的作用比在没有生物界的第二种情况下物理过程的作用大 4 个数量级。

孙维杰译自《Изв. ВГО》, 1989, № 5