

海洋生物泵与全球变化

王 荣*

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

由于大量化石燃料的燃烧和土地的不合理使用等, 大气中 CO_2 的含量正以空前的速度增长, 这一趋势几乎是不可逆转的。估计到下个世纪中期, 大气中的 CO_2 含量将达到 600×10^{-6} , 这刚好是工业化前的一倍。由于温室效应, 预测到那时全球气温将普遍升高。中、低纬度约升高 $2 \sim 4^\circ\text{C}$, 极区温度可能升高 $4 \sim 8^\circ\text{C}$ 。由于极区冰雪的融化, 海平面将升高 $0.24 \sim 1.17\text{m}$, 这对全球气候、全球的生态系统和人类生活将产生重大影响。

真的有那么严重吗? 应当说忧虑是有根据的, 但又是不能确定的。上述预测是建立在现有知识基础上的, 而就目前的知识而论, 尚有许多未知因素。最大的不确定性就在于占地球表面积 71% 的海洋。人们仅知道, 海洋是地球上最大的碳库, 海水中的碳是大气中的 50 倍。据信, 由于人为原因释放到大气中的 CO_2 有 1/2 为海洋吸收。但海洋是怎样从大气吸收 CO_2 的呢? 什么海区吸收, 什么海区释放; 吸收多少, 释放多少; 有多少是在短时间周期循环的, 有多少是在更长的时间周期上循环的; 海洋生态系统对大气中 CO_2 增加的响应是什么, 又如何反馈于大气等等。这些问题还很不清楚, 或者说只有皮毛的了解。正是由于这方面知识的空缺, 在国际地圈与生物圈计划 (International Geosphere-Biosphere Programme, 简称 IGBP), 亦即全球变化研究 (A Study of Global Change) 中, 直接与海洋有关的大国际计划就有 3 个: 1. 全球海洋通量联合研究 (Joint Global Ocean Flux Study, 简称 JGOFS), 2. 沿岸带陆海相互作用研究 (Land-Ocean Interactions in the

Coastal Zone, 简称 LOICZ), 3. 全球海洋真光层研究 (Global Ocean Euphotic Zone Study, 简称 GOEZO)。JGOFS 计划已经启动, 后两个计划将分别在 1993 年和 1998 年启动。这些计划目标的实现将会使我们对海洋的认识产生一个飞跃。

海洋中的碳循环是一个极其复杂的生物地球化学过程。从海洋对大气中 CO_2 增加的调节作用着眼, 我们最关心的是碳的垂直转移过程。天气中的 CO_2 进入表层海水的前提是大气中 CO_2 的分压必须大于表层海水中 CO_2 的分压, 既使在这种条件下, 进入海水表层的 CO_2 必须迅速离开气海界面实现垂直转移才能使 CO_2 持续不断地进入海洋。不然, 气海界面间将很快建立平衡, CO_2 不再进入海洋。

物理过程, 比如高纬度低温海水的下沉, 可以携带大量从大气中吸收的 CO_2 进入深层。但大洋水循环是一个完整的系统, 有下沉必然有上升。事实也是, 在赤道上升流区海水是向大气释放 CO_2 的。高纬度由气到海, 低纬度由海到气, 只是实现了经向转移。从长时间尺度和全球尺度讲收支是平衡的。从海洋对大气的调节作用着眼, 人们更关心的是气-海界面 CO_2 的净通量 (Net flux), 对此做出贡献的主要是生物学过程。

在海水处于垂直稳定状态下, 碳要实现从表层向深层的垂直转移需完成两个步骤: 1. 从溶解态转化为颗粒态; 2. 沉降。正是一系列的生物学过程完成了这两个步骤。首先是生活在

* 王荣研究员为本刊编委。

真光层(也叫有光层)内的大量的浮游植物进行光合作用吸收 CO_2 将其转化为颗粒态,即有生命的颗粒有机碳(Living POC),大多为单细胞藻类,粒径几个到几十微米。然后,通过食物链(网),逐级转化为更大的颗粒(浮游动物、鱼等)。未被利用的各级产品将死亡、沉降和分解。转化过程中产生的粪便、蜕皮等也构成大颗粒沉降,即非生命颗粒有机碳(Non-living POC)的沉降。生活在不同水层中浮游动物的垂直洄游也构成了有机物由表层向深层的接力传递。由于沉降速度低,小颗粒有机物,如单细胞藻类在离开真光层不远即死亡分解,只有大颗粒有机物才能抵御微生物的分解活动得以到达深层,乃至沉积物中,进入长周期循环或“永世不得翻身”。光合作用产品中有相当一部分是以溶解有机碳的形式释放到海水中,动植物的代谢活动也产生大量溶解有机碳。它们的一部分将无机化进入再循环,也有相当一部分被异养微生物利用再次转化为颗粒态(微生物自身生物量),并通过微型食物网(Microbial food web)再进入主食物网。

上述由有机物生产、消费、传递、沉降和分解等一系列生物学过程构成的碳从表层向深层的转移称之为生物泵(Biological pump)它是海洋在垂直方向上三个碳泵中最重要的一个。另外两个是碳酸盐泵(Carbonate pump)和溶解度泵(Solubility pump)。碳酸盐泵实际上也是生物泵,它是指某些浮游动物(有孔虫、放射虫和浮游贝类等)的碳酸盐外壳和骨针等在动物死亡后沉降所构成的碳酸盐的垂直转移。

举一个例子说明生物泵的作用和规模。南极磷虾、即大磷虾(*Euphausia superba*)是南大洋的主要草食性浮游动物。夏季它们摄食大量的浮游植物,同时也产生大量粪便,粪便颗粒大而密实,沉降速度很快,约每天100~500m。据现场实验,每1g体重的磷虾每天排便0.044g(干重),其中含碳9.35%。假定磷虾只在夏半年摄食,总资源量按 $20 \times 10^8 \text{t}$ 计,仅大磷虾粪便在南大洋构成的碳的垂直通量为 $15.06 \times 10^8 \text{t/a}$ 。

$$0.044 \times 0.0935 \times 183 \times 2 \times 10^{15} = 1.506 \times 10^{15} \text{g 碳} \\ = 15.06 \times 10^8 \text{t 碳}$$

↑ 每 1 g 磷虾每天排便 (g · 干重)
 ↑ 粪便(干重)中碳的比例
 ↑ 假定磷虾只在夏半年摄食
 ↑ 磷虾总资源量以 $20 \times 10^8 \text{t}$ 计

另外,大磷虾约每20d蜕一次皮,蜕下的皮占体重的7.5%(干重比),蜕皮(干重)中含碳20%。蜕皮的沉降速度很快,50~1000m/d(取决于完整程度)。这样,由大磷虾蜕皮在南大洋构成的垂直碳通量为 $1.08 \times 10^9 \text{t/a}$ 。

$$2 \times 10^{15} \times 0.20 \times 0.075 \times 18 \times 0.20 = 0.108 \times 10^{15} \text{g 碳} \\ = 1.08 \times 10^9 \text{t 碳}$$

↑ 磷虾总资源量,以 $20 \times 10^8 \text{t}$ 计
 ↑ 磷虾的干重比
 ↑ 蜕皮占体重的比例(干重比)
 ↑ 全年蜕皮次数
 ↑ 蜕皮(干重)中碳的比例

仅大磷虾粪便和蜕皮构成的碳通量就是 $16.14 \times 10^8 \text{t/a}$ 。对比当前由于化石燃料燃烧等人为因素进入大气的 CO_2 (以碳计)为 $50 \times 10^8 \text{t/a}$, $15.06 \times 10^8 \text{t/a}$ 就是相当有意义的了。而这只是生物泵的一个侧面,只涉及了一个物种。

全球海洋的固碳能力,即初级生产力,约为 $400 \times 10^8 \text{t}$ 。这个数字比人类活动释放到大气中的($50 \times 10^8 \text{t/a}$)差不多高了一个数量级。但可惜的是,浮游植物进行光合作用所利用的碳绝大部分是在真光层内周而复始循环的。比如动植物的呼吸作用就使生物生产的有机碳很快以 CO_2 形式再次释放到海水中。光合作用利用的碳只有很小一部分是由大气补充的,这样,从碳的来源看,在总生产(指初级生产)中包括了

再生产 (Regenerated production) 和新生产 (New production) 两部分:

$$P_T = P_R + P_N$$

利用新从大气补充的碳所进行的初级生产谓之新生产。无疑,从全球变化研究讲,人们最关心的是新生产。

再循环的碳与大气补充的碳在存在形式上是没有区分的,因此直接用碳去区分和测定再生产和新生产是不可能的。目前采用的方法是用浮游植物对新生氮(硝酸氮)和再生氮(氨氮)的利用(用稳定同位素 ^{15}N 标记)去推算新生碳和再生碳的比例。浮游植物对氮和碳的吸收大体有一个稳定的比例(1:7)。

新生产在总生产中所占的比例叫做“ f ”比:

$$“f” \text{ ratio} = \frac{P_N}{P_T}$$

新生产力的测定远较总初级生产力的测定困难得多,不可能进行大规模的时空监测。通过典型海域“ f ”比的研究,掌握其规律,就可以利用总初级生产力去推算新生产力。全球海洋已积累了大量总初级生产力的资料。通过卫星遥感技术可以比较方便地实现对全球海洋叶绿素含量的观测,从叶绿素含量又可以估计总初级生产力,并掌握其时空变化。新生产力和“ f ”比的研究只是近十年的事。在全球范围掌握新生产的规律正是 JGOFS 计划的核心内容之一。

从长时间尺度和大空间尺度看,由气-海界面进入真光层的碳和由真光层沉降到底层的碳应当是相等的。因为,要维持上层生态系统 (Epi-pelagic ecosystem) 的稳定和平衡,碳的收支必须是平衡的。测定新生产力的另一方法是,在真光层之下设置沉积物捕捉器 (Sediment trap), 收集沉降的颗粒物质并测定其中的碳。这又产生了一个新的术语——输出生产 (Export production)。

$$P_E \approx P_N$$

从已经取得的资料看,“ f ”比的变化是有规律的。对于一定的海区“ f ”比是总生产力的函数,一般总生产力高,“ f ”比也高。对某些资料多的海区已经建立了根据总生产力确定“ f ”比

的经验公式。对于多数海区,“ f ”比可能变动在 0.05~0.15 之间。对于特别贫瘠的海区,如亚热带涡旋的中央区,可能低于 0.05;而南大洋的夏季可能超过 0.30,在发生水华(Bloom)时甚至可能达到 0.80,也就是说 80% 的初级生产属于新生产。

海洋的潜力是巨大的,从古环境的资料看,现代海洋的生物泵远没有满负荷运转。对南大洋施铁肥提高初级生产力,从而加速生物泵运转的设想正是基于这种考虑提出的。南大洋的营养盐(氮、磷、硅)补充相当充足,但初级生产力不是想象的那么高。分析认为,限制因子可能是铁,光合作用的物质基础——叶绿素的合成需要铁。

地球表面并不缺铁(约占 5.63%),但大洋上缺铁,这主要原因是在高含氧量的海水中铁的溶解度非常之低。近海可以从江河径流和垂直混合得到补充,而大洋上铁的唯一补充来源是大陆飘尘。据估计,大洋上浮游植物所需铁的 95% 来自陆源飘尘。南大洋的情况更不同于其它大洋,南极大陆 95% 的面积为冰雪覆盖,再加上西风带的阻隔,铁的补充就更成了问题。从苏联“东方”站所取的冰芯样品中可以发现,历史上冰期尘埃量多,气泡中 CO_2 含量低;反之,间冰期尘埃量小,气泡中 CO_2 含量高。据分析,这是由于冰期热带干旱区面积扩大(5倍),平均风速提高(1.3~1.6倍),空气中尘埃量增加(10~20倍)所致。最后一个冰期的尘埃量增加了 50 倍,而这个时期空气中 CO_2 浓度降为 190×10^{-6} 。由此,人们认为铁是启动南大洋生物泵的润滑剂。

有人计算过,如果南大洋上升流区(南极辐散带)由深层带到真光层的硝酸氮全部被利用的话,可以使气-海界面的碳通量(净通量)再增加 $20 \sim 30 \times 10^8 \text{t/a}$ 。按碳:铁=7 000:1 计算,每年需要铁 260 000t。这不是一个很大的数字,耗费也不会太大,但在如何施肥上,可能有不少技术难题。当然,当前的任务首先是通过现场实验去证实铁在南大洋的确是初级生产力的限制因子。在“八·五”期间,我国在南大洋将开

展铁的地球化学和铁对初级生产限制作用的研究。

我国的 JGOFS 委员会建议的“东海陆架边缘海洋通量的研究”已为国家自然科学基金委员会接受为“八·五”期间的重点项目，并将在 1991 年底启动。碳的垂直过程，特别是生物泵的研究将是重点内容之一。这项研究不仅仅是关系到全球碳循环和未来的环境预测，它对了解海洋生态系统的功能、能流和物流，以及指导和规划海洋生物资源的开发利用同样有重大意义。

参 考 文 献

- [1] Eppley, R. W., 1989. New production: history, method, problems. In: "Productivity of the Ocean: Present and Past" (W. H. Berger et al. ed.), pp. 85—97.
- [2] Knauer, G. A. et al., 1990. New production at the VERTEX time-series site. *Deep-Sea Res.* **37**(7A): 1121—1134.
- [3] Longhurst, A. R. and W. G. Harrison, 1989. The biological pump: Profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Prog. Oceanogr.* **22**: 47—123.
- [4] SCOR, 1990. JGOFS science plan. JGOFS Report No. 5, pp. 1—61.