

【综述】

## 地球生态系统的碳补充机制

杨东方<sup>1,2,3</sup>, 殷月芬<sup>2</sup>, 孙静亚<sup>1</sup>, 金卫红<sup>1</sup>, 高峰<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋学院 海洋科技学院, 浙江 舟山 316000; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛现代分析技术及中药标准化重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 首次提出地球生态系统的C补充机制,并且用框图模型说明了补充机制在运行过程中的每个流程,阐明了无论Si的充足与缺乏,地球生态系统都要将C从大气中移动的海底,储藏起来,完成C的迁移过程。研究结果表明,人类排放CO<sub>2</sub>引起气温和水温上升,地球生态系统不惜损害陆地生态系统和海洋生态系统,也要启动C补充机制,完成C的迁移,导致气温和水温恢复到动态的平衡。启动C补充机制期间,在输送Si的过程中,地球生态系统给陆地带来三大类型灾害:沙漠化、洪涝和风暴潮;在阻断Si的过程中,地球生态系统给海洋带来一大类型灾害:赤潮。在这些过程中,人类引起大气C的增加与地球生态系统导致大气C的减少充分展现了人类与自然界的相互撞击,这会强烈地产生一系列自然灾害发生,如干旱、沙漠化、沙尘暴、暴雨、洪水、泥石流、山体滑坡、风暴潮和赤潮。人类尽可能减少这些撞击,为地球生态系统的可持续发展,也为人类生存创造良好的环境。

**关键词:** C;浮游植物;Si;补充机制;地球生态系统

**中图分类号:** X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2009)01-0100-08

## Complementary mechanism of carbon in earth ecosystem

YANG Dong-fang<sup>1,2,3</sup>, YIN Yue-fen<sup>1</sup>, Sun Jing-ya<sup>2</sup>, JING Wei-hong<sup>1</sup>, GAO Feng<sup>1</sup>

(1. Marine Science College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China; 2 Qingdao Key Lab on Analytical Technology Development and Standardization of Chinese Medicines, First Institute Oceanography of SOA, Qingdao 26606, China; 3. State Key of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The complementary mechanism of carbon in the earth ecosystem was put forward firstly, and each procedure in the complementary mechanism running process is illustrated by the block diagram, which showed that no matter what silicon was enough or lack, and the earth ecosystem would make the carbon in atmosphere into the sea bottom and stored so as to complete the process of carbon transference. It is shown from the study results that CO<sub>2</sub> discharged by human caused its rise in air and water temperature, and in spite of the impairment of land ecosystem and marine ecosystem, the earth ecosystem started the complementary mechanism of carbon to complete the carbon transference, resulting in returning the air and water temperature to the normal dynamic balance. During the running process of the complementary mechanism of carbon, in the transportation of silicon, the earth ecosystem brought the three types of catastrophes: desertification, flood and storm tide, and in interdicting the transportation of silicon, the earth ecosystem brought the one type of catastrophe, and red tide. In these processes, the increase of carbon in atmosphere caused by human and decrease caused by the earth ecosystem, this fully represented the impact with each other between human and nature. So a series of natural catastrophes intensively occurred, such as drought, desertification, sandstorm, storm, flood, mudslide, hill-slide, storm tide and red tide. Human would try to decrease the impact for the sustainable development of the earth ecosystem and the nice environment of human life.

**Key words:** carbon; phytoplankton; silicon; complementary mechanism; earth ecosystem

收稿日期:2008-03-20; 修订日期:2008-08-06

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX 2-207);国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估技术重点实验室基金资助;国家海洋局北海监测中心主任科研基金资助(05EMC16)

作者简介:杨东方(1962-),男,陕西省延安市人,教授,研究方向:海洋环境学、生态学、生物地球化学, E-mail: dfyang@shfu.edu.cn

人类向大气排放  $\text{CO}_2$  引起了地球的气温上升,继而海洋的水温也在上升。 $\text{CO}_2$  的浓度提高,气温和水温提高等,引起地球上一系列自然灾害发生,如干旱、沙漠化、沙尘暴、暴雨、洪水、泥石流、山体滑坡、风暴潮和赤潮。这些自然灾害发生的频率加快,强度加大。那么,这些自然灾害发生的起因和作用是什么?其之间有何关联?这是人类面临的严重问题,本文试图阐述这些问题。

在海洋中,浮游植物生长具有双重作用<sup>[1]</sup>:一是浮游植物是海洋食物链的基础,海洋食物链是生态系统的核心;二是植物通过光合作用更多的结合  $\text{CO}_2$  进入有机物质,有效地从大气的接触中,长期地除去大气  $\text{CO}_2$ 。因此,浮游植物生长对海洋生态系统和大气生态系统都有举足轻重的作用,有效的遏制人类对环境的影响。

在海洋生态系统中,本文剖析全球浮游植物生长特征和其集群结构,阐明光照、水温和营养盐对浮游植物生长影响的机理和过程,通过海洋中硅藻的特性和迁移过程,阐述了 C 沉积过程。研究发现,无论是 Si 的补充,还是 Si 的阻断,地球生态系统都要将 C 从大气迁移到海底,以便气温和水温保持动态平衡。这样,通过地球生态系统的 C 补充机制,了解地球上这些自然灾害发生的起因。借助地球生态系统的 C 补充机制,减少人类活动向大气排放的  $\text{CO}_2$ 。

## 1 C 沉降

### 1.1 C 的大气源和海洋汇

随着全球气候变暖的趋势不断加强,温室效应的影响进一步扩大,在全球最为关注的温室气体中, $\text{CO}_2$  的增温效应最大,占到 70%。IPCC(政府间气候变化专门委员会)发布的第三次评估报告称<sup>[2]</sup>:在过去的 42 万年中,大气  $\text{CO}_2$  浓度从未超过目前的大气  $\text{CO}_2$  浓度,估计到 21 世纪中叶,大气中  $\text{CO}_2$  将比工业革命前增加 1 倍,而工业革命以来的全球气温已增加了约 0.6℃。

C 循环是 C 元素在地球各圈层的流动过程,是一个“ $\text{CO}_2$ —有机碳—碳酸盐”系统<sup>[3]</sup>,以  $\text{CO}_2$  为中心,在大气圈,陆地圈和海洋中进行。在工业革命前,全球碳循环在短时间尺度上是处于相对动态平衡的状态,但是工业革命后,人为 C 的大量释放破坏了这种平衡,使大气中  $\text{CO}_2$  的浓度不断上升,引发了全球气候的变化。海洋被看作是大气  $\text{CO}_2$  最大的汇。而且海洋有一定 C 储存的能力,其中 C 的储存形式有三种,包括可溶性无机碳( $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ ),可溶性有机碳(各种大小不一的有机分子)和有机分子碳(存在于活的生物体或死亡动植物的碎片中)<sup>[4]</sup>。生物圈中循环的 C 有 95% 存在于海洋,海洋是地球系统中最大的 C 库,它不仅是大气  $\text{CO}_2$  的主要汇,还可以通过河流汇集等形式吸收大量的人为 C,从而缓解气候变化。所以,C 的大气源和海洋汇对生态环境及人类生存都有重大的意义。

### 1.2 浮游植物产生 C 沉降

$\text{CO}_2$  被海水吸收时,在  $\text{CO}_2$  进入海水-大气界面后,立即水化,按照 Henry 定律和 Fick 定律进行了扩散,在海水表层,浮游植物进行光合作用,使海水中溶解的无机 C 转变为有机 C,这部分有机 C 再通过直接沉降或经食物链转化后再沉降到海底形成沉积物,由海水表面到达深海,从而改变了海—气界面  $\text{CO}_2$  通量和海水中的有机 C 的垂直通量。海洋生物泵的净效应是减少海洋表层水的含 C 量,从而使海洋从大气中吸收更多的  $\text{CO}_2$ <sup>[5]</sup>。

通过三维全球海洋 C 循环模式,认为在浮游植物的作用下,海洋吸收大气中的  $\text{CO}_2$  为 42%<sup>[6]</sup>。由美国能源部资助(DOE)、美国能源部联合基因组研究所(JGI)主持的硅藻 DNA 测序计划揭开了硅藻的一种假矮海链藻(*Thalassiosira pseudonana*)可以吸收大量的  $\text{CO}_2$ ,其总量相当于地球上所有的热带雨林吸收的量。由此可见,浮游植物的作用是全球 C 循环的主要途径,它使海洋 C 的储量大大增加。

浮游生物死后形成沉降颗粒物,在重力的作用下向海洋深部转移。由于海洋深水的密度大于表层海水,因此除了在有上升流的海区(如东赤道太平洋)之外,进入海洋深水的 C 不再参与与表层水中的交换<sup>[4]</sup>。

海洋沉积物处于水圈、生物圈和岩石圈的交汇地带,是有机质沉积和埋藏保存的重要环节,并在全球 C 循环过程中扮演着重要的角色<sup>[7]</sup>。沉积物中的有机 C 含量受两个因素的控制:(1)表层海水中的生物生产力;(2)海洋底部水团中的溶解氧含量及氧化还原状态<sup>[4]</sup>。当海洋生物的生产力提高时,通过食物链及残体沉降等因素到达沉积物的 C 通量也会相应的增加,因此也造成深层水中溶解氧的大量消耗,深层水处于亚氧化状态,局部地区甚至处于缺氧状态,从而进一步有利于沉积物中的有机 C 保存<sup>[8]</sup>。C 从大气输入海洋,经溶解—沉淀—生物作用—动力运移使碳发生系列反应,海水中的无机 C 经过光合作用、造礁作用等生命过程转化为有机 C 和无机 C 颗粒(如动、植物的遗体和骨骼),这些颗粒经过一系列生物地球化学过程沉积到海底。例如,东侧黑潮持续的涌升及长江、黄河的径流输入为东海陆架带来充分的营养盐,通过最近十几年来调查的结果认为东海是大气  $\text{CO}_2$  的净汇区<sup>[9,10]</sup>。

浮游植物对海洋吸收大气  $\text{CO}_2$  的能力产生巨大的影响。那么,浮游植物生长的变化过程;光照、温度、营养盐对浮游植物生长的影响顺序<sup>[1]</sup>;以及营养盐 Si、N、P 和元素 Fe 对浮游植物生长的影响<sup>[11,12]</sup>,这些都作了细致、综合的研究分析,例如,杨东方等通过建立初级生产力-硅酸盐-水温模型研究显示, Si 是我国胶州湾的初级生产力的限制因子<sup>[13-19]</sup>。

因此,展开研究浮游植物和影响浮游植物生长的环境因子,以便提高初级生产力,海洋作为地球最大的 C 库,增加海洋的 C 汇。C 的大气源和海洋汇与气候变化的关系越发受到关注。

## 2 浮游植物与环境因子

### 2.1 浮游植物的组成和特征

浮游植物主要由硅藻组成,硅藻生理特征所决定。硅藻是海洋浮游植物的主要成分,是具有硅细胞壁的单细胞藻类,大约有一千多种。其中最大的藻种的形状是平的圆盘、扁的圆柱体或者细长的棒状体,这些大型的硅藻种的直径或长度能够达到 $2\sim 5\text{ mm}$ <sup>[20]</sup>。而小型的硅藻具有小的细胞和长的链,他们的直径或长度能够达到 $5\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 。海洋中硅藻是浮游植物的优势种。

对于全球的Si循环<sup>[21~25]</sup>,Si化的浮游植物对世界的海洋的初级生产力有着极为重要的贡献。Nelson等1995年的估计,显示了整个初级生产力的40%多都归因于硅藻<sup>[25]</sup>。在海洋的浮游植物水花中硅藻占优势<sup>[26]</sup>。大型硅藻在任何系统的春季水华的形成起着关键作用<sup>[27]</sup>。以全球尺度,硅藻维持海洋初级生产力的40%,其中50%是输送到深海<sup>[24,25]</sup>。

通过中国海湾的生态了解近海的浮游植物的组成<sup>[28]</sup>,发现浮游植物种群结构以硅藻和甲藻两大类为主,硅藻在种类上占绝对优势。在胶州湾海域浮游植物种群以硅藻为优势种,在种类和数量上远远超过甲藻<sup>[29]</sup>。莱州湾硅藻门的种类和数量最多<sup>[30]</sup>。拓林湾<sup>[31]</sup>,共鉴定浮游植物183种(含变种、变型)。其中硅藻门51属143种,占总种数的77.8%。北部湾的硅藻是浮游植物的主体,占总生物量的97.49%<sup>[32]</sup>。后屿湾红树林区水体浮游植物的种类和密度,共鉴定到浮游植物32属77种(包括变种),其中硅藻门29属74种<sup>[33]</sup>。三沙湾2004年8月浮游植物中硅藻类85种,占90.4%,2005年8月浮游植物共出现83种,其中硅藻类72种,占86.7%<sup>[34]</sup>。

全球海域浮游植物的结构进行分析,发现<sup>[35]</sup>硅藻在浮游植物中大约占80%~99%,甲藻在浮游植物中大约占1%~20%,其它藻类仅仅占1%~5%,因此,浮游植物种群结构以硅藻和甲藻两大类为主,而硅藻是浮游植物的主体。通过硅藻和甲藻的生理和生态行为机制以适应不同水环境的综合研究<sup>[35]</sup>,发现硅藻的生理特征很大的优越于甲藻等其它非硅藻,这样,硅藻在营养盐供给充足的条件下,硅藻理所应当成为浮游植物的优势种。

### 2.2 影响浮游植物生长的环境因子

N、P营养盐丰富下硅限制硅藻生长,改变结构,探讨影响浮游植物生长的光照、水温、营养盐环境因子和营养盐N、P、Si的生物地球过程,

根据光照、水温、营养盐对浮游植物生长影响的研究结果<sup>[1]</sup>,考虑影响浮游植物生长、生存和生产力的一系列物理和化学因子时,则决定性的重要因子是光照、水温、营养盐。由于浮游植物的光合作用具有光反应和暗反应,无论在有无光照的情况下,都有初级生产力的产生,相应的光照限制浮游植物生长就不如水温 and 营养盐那么重要。在海洋环境中,水温变化幅度就相当窄,这个变化

范围对海洋生物而言从来都未达到致死的极限,再加上水的固有物理特性的变化总是缓慢的,这样,与营养盐相比,水温对海洋初级生产力的影响就不是那么重要。因此,影响浮游植物生长的光照、水温、营养盐因子中,依次重要限定因子的顺序为光照、水温、营养盐。在研究水域浮游植物的生长时,先研究营养盐对浮游植物生长的限制。当营养盐满足浮游植物生长时,再研究水温对浮游植物的生长。最后,当水温、营养盐都满足浮游植物生长时,再考虑光照对浮游植物生长。而且营养盐、水温、光照影响的生物量也依次逐渐变小。这样,清楚地理解光照、水温和营养盐对浮游植物生长的顺序和影响的大小<sup>[1]</sup>。

营养盐N、P、Si<sup>[36]</sup>,Si的生物地球过程<sup>[13]</sup>,N、P再循环过程,Si的亏损过程<sup>[14]</sup>。海洋初级生产力变化过程研究结果展示了在初级生产力的时间和空间的变化过程中,营养盐Si和水温控制初级生产力的不同时间阶段,尤其用增殖能力展示了水温对浮游植物生长的控制时间阶段;营养盐Si控制初级生产力的不同空间区域。从而确定了营养盐Si和水温控制初级生产力的变化过程。从陆地到海洋界面的Si输送量决定了初级生产力的时间变化过程;Si的生物地球化学过程决定了初级生产力的空间变化过程。由此可知,营养盐Si和水温是浮游植物生长的发动机<sup>[37]</sup>。

海洋初级生产力变化的机制,浮游植物生长的变化和其集群结构的改变,主要受营养盐Si和水温的影响。营养盐Si是主要控制因子,水温是次要控制因子。营养盐Si和水温控制浮游植物生长的变化和其集群结构的改变的不同时间阶段和不同空间区域。由于输送向海的Si量在周期变化下趋势减少,在海洋中营养盐Si量在下降;由于温室效应,在海洋中水温在上升。营养盐Si的缺乏和水温的上升就会引起海洋生态系统食物链的基础改变,进而引起海洋生态系统的正常运行改变<sup>[38]</sup>。

海洋初级生产力变化过程和机制,发现营养盐Si决定浮游植物生长的生理特征和其集群结构的改变过程,揭示了硅藻与甲藻相互交替的变化过程。

海水中可溶性无机Si是海洋浮游植物所必需的营养盐之一,尤其是对硅藻类浮游植物,Si更是构成机体不可缺少的组分。在海洋浮游植物中硅藻占很大部分,硅藻繁殖时摄取Si使海水中Si的含量下降<sup>[39,40]</sup>。相对于硅藻的吸收率,溶解硅(DSi)是低供给,这能够限制硅藻的生物量或生长率的生长。也可以导致硅藻生物量的下降。这由于缺Si的种群的高沉降率<sup>[41]</sup>。

大型的硅藻( $2\sim 5\text{ mm}$ )遍布海洋,在海底的沉积物中尤其显著。Kemp等指出了大型硅藻对颗粒雨做出了巨大的贡献,这些颗粒雨离开了海洋表层沉降,在海洋的生物地球化学过程中,起着重要的角色<sup>[42]</sup>。这些大尺寸、生长迅速的浮游植物的自养生物<sup>[43]</sup>是沉淀颗粒物质的主要生产者<sup>[44]</sup>。大型硅藻是向深海的输送者<sup>[20]</sup>。

小型的硅藻(5~50  $\mu\text{m}$ )沿着海洋边缘或者横跨北大西洋形成稠密的水华。他们经常发生在春季,在冬季,深海混合把新的营养盐带到表层或者在新的上升流带着丰富的营养盐。如果这些小的硅藻有高的生长率,它们迅速地聚集生物量在浅的营养丰富的表层。当营养盐耗尽时,它们趋向于聚集成絮状物,然后迅速沉降<sup>[26]</sup>。

硅藻死亡以后,细胞内含物分解腐败,但硅藻壳仍保留着,它们下沉到湖底或海底,堆积成硅藻黏土,在从前的地壳历史期中,沉淀有巨大的硅藻黏土层,其中有有机物完全矿化,即今天人们发现的硅质沉积层(称为“Diatomite”),它们或者是以柔软的含沙的硅藻土(kieselgur, kieselerde)出现,或是以坚硬的片岩出现,根据其出现的种类,可以判定它是海产硅藻或者是淡水硅藻所产生的。硅藻土发亮或全为白色,轻,脆,并且普通为疏松或容易碎裂。由淡水硅藻所沉积的硅藻土层可达好几米厚,而海产硅藻的沉积层如在加利福尼亚的圣玛利亚石油田其深度达几百米<sup>[45]</sup>。

在硅藻春季繁殖的高潮以后,由于水层的趋向稳定以及养料消耗而转入低潮时,甲藻(特别是角藻这一属)的产量大增,取硅藻的地位而代之;但其数量却不及硅藻为多。这类甲藻,由于它们所需的养料较少,而且生产率亦较慢——在夏季,甲藻每天的增加量,仅为30%~50%,而硅藻中的刺角藻,则每天能增加360%。这样,甲藻仍能在养料较低的海水中繁殖,直到养料几乎完全被用光为止,这种藻类,甚至可以将海水中所含的最后一滴养料都用光<sup>[46]</sup>。因此,硅藻消失后留下的空间,由甲藻填充<sup>[1]</sup>。甲藻会迅速生长和繁殖旺盛,会利用每一点营养盐N、P,容易形成甲藻等非硅藻赤潮。当硅突然提供,又会有硅藻赤潮。如胶州湾<sup>[1,47]</sup>。

目前,在人类活动的影响下,大海中营养盐N、P在迅速增长,水域呈现富营养化,浮游植物受到营养盐Si限制。在海洋中大部分水域,N、P丰富,在近岸水域,水体富营养化。N、P与Si的浮游植物吸收比例相比,高出许多量级,远远超过藻类的阈值。这样,Si的补充造成浮游植物生长旺盛,Si的缺乏造成浮游植物大量沉降。于是,Si的变化决定海洋中碳的沉降变化。

### 3 C 补充机制

#### 3.1 C 的补充起因

工业迅速发展,加大了向大气排放 $\text{CO}_2$ ,提高了大气中的 $\text{CO}_2$ 的含量。在温室效应的作用下,使大气温度升高。由于大气环绕着地球的陆地和海洋,海洋占全球面积的70%,因此,海洋就出现了升温。

由于浮游植物生长要吸收大量海水中 $\text{CO}_2$ ,并将C随着浮游植物的沉降带到海底。这样,海水中的 $\text{CO}_2$ 下降,大气的 $\text{CO}_2$ 溶于大海进行补充,使得大气的 $\text{CO}_2$ 也下降。于是,气温下降,这又导致了水温下降,使地球生态恢复健康平衡<sup>[48]</sup>。在海洋中浮游植物生长旺盛决定了大

气中 $\text{CO}_2$ 的平衡,消除或放慢了由于人类活动给大气带来的 $\text{CO}_2$ 的增长。换句话说,浮游植物生长决定着未来地球的气温或海水水温的升降变化。而浮游植物的生长主要由营养盐N、P与Si来控制。

在海洋中,由于人类的污染,N、P过剩。同时,由于人类为本身利益考虑,陆源输送被破坏,如河流筑坝、改道、灌溉等原因,输入到海洋的Si急剧减小,严重限制浮游植物生长。这样,营养盐Si成为海洋中浮游植物生长的限制因子。当缺Si时,海洋浮游植物减少,C沉降在减少,C沉降率在降低。那么,为了保持大气C的动态平衡,如何向海底补充C的沉降,如何使硅藻会迅速生长和繁殖旺盛。于是,作者提出了地球生态系统启动碳补充机制。

#### 3.2 C 的补充机制

地球生态系统的C补充机制:借助浮游植物的迅速生长和繁殖旺盛,将大量C从大气迁移到海底,来消除大气C的增多,导致大气温度和水温下降,恢复到动态平衡状态。这样,地球生态系统提高了C的沉降率,增加了向海底C的沉降量,保持了大气C的动态平衡,避免水温和气温的提高给整个地球生态系统带来的灾难。

当Si限制硅藻时,大气C无法大量沉降就启动了地球生态系统的C补充机制。启动地球生态系统的C补充机制,分为两种情况:1 当海洋Si限制时,Si补充。2 当海洋Si限制时,Si阻断。

##### 3.2.1 Si 补充

当Si限制硅藻时,需要Si的补充,启动Si的补充机制。通过近岸的洪水、大气的沙尘暴和海底的沉积物向缺Si的水体输入大量的Si。这样,由陆地、大气、海底的三种途径将陆地的Si输入大海中,满足浮游植物的生长(图1)<sup>[49]</sup>。陆地的输送:在近岸地区和流域盆地,长时间的暴雨形成了洪水,向大海的水体输入大量的Si。大气的输送:在内陆地区,长期的干旱经过大风形成了沙尘暴,向大海的水体输入大量的Si。海底的输送:在海面上,水温的提高形成了风暴潮,通过海底的沉积物,向大

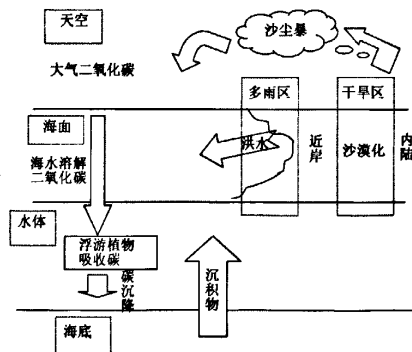


图1 地球生态系统的营养盐C补充机制

Fig. 1 Complementary mechanism of nutrient silicon in earth ecosystem

海的水体输入大量的 Si。启动气温和水温的补充机制<sup>[48]</sup>,大气的  $\text{CO}_2$  溶于大海,浮游植物生长要吸收大量海水中  $\text{CO}_2$ ,并将 C 随着浮游植物的沉降带到海底,气温和水温恢复动态平衡(图2)。这样,地球生态系统向海洋输送大量的 Si,使浮游植物生长旺盛,甚至产生硅藻赤潮,将大量 C 沉降到海底(图3)<sup>[48]</sup>,于是造成气温和水温下降。

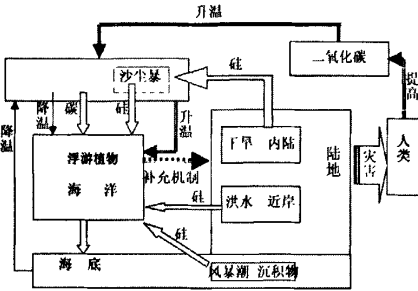


图2 地球生态系统的气温和水温补充机制

Fig. 2 Complementary mechanism of air and water temperatures in earth ecosystem

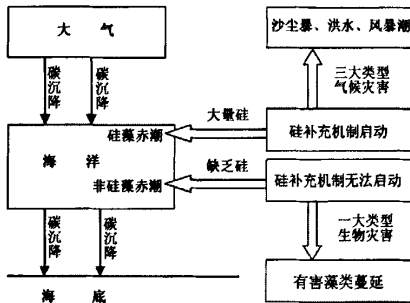


图3 地球系统的C补充机制

Fig. 3 Complementary mechanism of carbon in earth system

### 3.2.2 Si 阻断

当Si限制硅藻时,需要Si的补充。可是,出现Si阻断,无法启动地球生态系统Si补充机制与气温和水温补充机制。然而,在地球生态系统中,由于水库、水坝及河流改道削弱了流域盆地和近岸的洪水排泄;在沙漠治理加强,同时风暴潮由于人类以及其他因素的干扰而无法形成,这样沙漠化、洪涝和风暴潮无法产生,或者产生的几率很低。这样, Si 向海洋水体的输送被阻断或减少,无法启动 Si 补充机制、气温和水温补充机制。可是地球的气温和水温又要恢复正常的动态平衡,大气 C 也要恢复正常的动态平衡。这样,地球生态系统的 C 补充机制使得海洋生态系统中浮游植物藻类的非硅藻产生赤潮,强行使海洋中的 C 沉降到海底。于是使气温下降、水温下降(图3)。

地球生态系统为了保持海洋中浮游植物生存空间和大气中的  $\text{CO}_2$  动态平衡,避免气温和水温给整个地球生态系统带来毁灭性灾难,启动了 C 补充机制。在 Si 充足时,

海洋水体空间中填充了大量的硅藻,在 Si 缺乏时,海洋水体空间中填充了大量的非硅藻,如甲藻。这样,地球生态系统保持了足够的浮游植物将大气中的 C 带到海底。当大气 C 浓度增长加快时,海洋浮游植物生长也在加快,出现了硅藻和非硅藻赤潮。而且随着大气 C 的快速增长,赤潮的面积和频率也在显著上升,使得大气的  $\text{CO}_2$  保持动态平衡。于是,水温和气温也恢复动态平衡,使地球生态系统恢复可持续发展。

### 3.3 C 的补充框图

作者提出了地球生态系统的 C 补充框图模型(图3),并对 C 的补充框图模型的运行过程进行详细说明(1)人类活动不断增强,水域营养盐 N、P 逐年增长在海洋中,由于人类的污染, N、P 过剩。而由于陆源被破坏,如河流筑坝、改道、灌溉等为人类本身利益考虑,输入到海洋的 Si 急剧减小,严重限制浮游植物生长。这样,营养盐 Si 成为海洋中浮游植物生长的限制因子。那么,如何给海洋补充 Si 使浮游植物生长迅速、旺盛,地球生态系统启动了 Si 的补充机制。(2)地球生态系统对海洋 Si 的补充采用了三种途径,从内陆、近岸和海底向海洋水体输送大量的 Si。这样,由陆地、大气、海底的三种途径将陆地的硅输入大海中,满足浮游植物的生长。引起洪水、沙尘暴、风暴潮,形成了三大类型的气候灾害(3)在长时间极度缺乏 Si 的水域,硅藻得到了 Si 的大量繁殖,产生了硅藻赤潮(4)海洋是大气中  $\text{CO}_2$  的最大吸附器。由于  $\text{CO}_2$  能够溶解在海水中,大气中的大量 C 进入海水。(5)浮游植物吸收溶解在海水中的 C,沉降到海底,并贮存。这样,在海水中大量的浮游植物,使海水中的 C 源源不断的转移到海底。完成了 C 从大气经过海洋到海底的贮存过程。在这个过程中浮游植物起的泵一样的作用,将 C 从大气源源不断的转移到海底。(6)在人类活动和一些自然因素的干扰下,地球生态系统无法启动 Si 补充机制、气温和水温补充机制,这样 Si 就无法输送到需要 Si 的水域。(7)在 Si 缺乏的条件下,营养盐 N、P 过剩,水域富营养化,非硅藻如甲藻大量繁殖产生了非硅藻赤潮。(8)非硅藻如甲藻改变了生态食物链的基础,形成了有害藻类的蔓延,成为一大类型的生物灾害。(9)海洋是大气中  $\text{CO}_2$  的最大吸附器。由于  $\text{CO}_2$  能够溶解在海水中,大气中的大量 C 进入海水。(10)浮游植物吸收溶解在海水中的 C,沉降到海底,并贮存。这样,在海水中大量的浮游植物,使海水中的 C 源源不断的转移到海底。完成了 C 从大气经过海洋到海底的贮存过程。在这个过程中浮游植物起的泵一样的作用,将 C 从大气源源不断的转移到海底。

## 4 赤潮的作用

### 4.1 赤潮重要性

浮游植物,如果有充足的营养盐和适宜的水温,就会迅速生长,繁殖旺盛。短时间内就铺满了广阔的水面。海洋是大气中  $\text{CO}_2$  的最大吸附器。由于  $\text{CO}_2$  能够溶解在

海水中,大气中的大量C进入海水。浮游植物吸收溶解在海水中的C,沉降到底底,并贮存。这样,在海水中大量的浮游植物,使海水中的C源源不断的转移到海底。完成了C从大气经过海洋到海底的贮存过程。在这个过程中浮游植物起的泵一样的作用,将C从大气源源不断的转移到海底。因此,近年来,在全球范围内,浮游植物藻类引起暴发性增殖产生水华,并且引起水体变色的赤潮不断发生,其频度和强度在不断扩大,地理分布、面积都在增加。

在我国,20世纪80年代前很少发生赤潮。据记载<sup>[50]</sup>,1933~1979年46a间我国仅发生赤潮29次,至80年代,1980~1989年间发生11次。到1990年,仅1a内即发生34次赤潮,以后一直呈逐年增加,1991~1999年9a间竟发生赤潮236次之多<sup>[50]</sup>。其中我国东海海区的赤潮发生日趋频繁<sup>[51]</sup>。上世纪90年代前,东海区每年发生赤潮20起左右。近年来,年均发生40起左右。2003年,东海区赤潮发生了70多起,创下了历史新高。2004年,东海区已发生赤潮53起,总面积近4000km<sup>2</sup>。所以,地球生态系统通过赤潮将大气中的大量C沉降到海底,以消除人类不断对大气的C排放,恢复大气温度和水温到动态平衡状态。

#### 4.2 赤潮的灾难性

东南沿海每年赤潮造成的直接经济损失均超过亿元。频繁发生的赤潮严重破坏了渔业资源和海产养殖业,赤潮毒素也严重威胁着人类的生命安全。在赤潮灾害中,鱼类的大量死亡带来的危害和损失占相当大的比重<sup>[52]</sup>,在我国,1998年春季南海的一次特大赤潮造成了大规模的养殖鱼死亡,直接经济损失超过3亿元。在这类赤潮灾害中不仅渔业资源和鱼类养殖业遭受了极大的破坏,海洋生物的种群结构乃至整个海洋生态系统也受到了影响,毒素在鱼类体内的累积威胁着食用者的生命安全。

根据赤潮的危害情况,大致可以分为无毒赤潮和有毒赤潮:

这类赤潮一般是无害的,不会引起海产养殖的大问题。有些赤潮生物如凸角角毛藻能向体外分泌粘液或者在死亡分解后产生粘液。在鱼类等海洋动物的滤食或呼吸过程中,这些带粘液的赤潮生物可以附着在海洋动物的鳃上,妨碍它们的呼吸,使之窒息死亡。由于大量赤潮生物死亡后,在分解过程中不断消耗水体中的溶解氧,使水体溶解氧含量急剧下降,引起鱼、虾、贝类等因缺氧大量死亡。另一方面,由于赤潮生物一般密集于表层几十厘米以内,使阳光难于透过表层,水下其他生物因得不到充足的阳光而难以生存和繁殖。在赤潮持续时间长、密度高时经常发生底层海洋生物死亡<sup>[53]</sup>。

有的赤潮通过食物链,造成人类肠胃消化系统或神经系统中毒。某些裸甲藻,如短裸甲藻可产生危害严重的神经性毒素,威胁人类健康;有的赤潮生物能分泌有害

物质(如氨、硫化氢等),危害水体生态环境并使其生物中毒。如夜光藻在正常情况下可调节其体内多量的氨,大量繁殖时会造成水体氨浓度剧增,使生物中毒。还有些赤潮生物虽然含有毒素,但其毒素对贝类、鱼类无害或者不足以毒死贝类、鱼类,而是积累在它们体内。如果人们食用了这些有毒素的贝类、鱼类,毒素随食物链传递,导致人体中毒或死亡。在世界沿海地区每年都有发生因误食含有赤潮毒素的贝类或鱼类而引起的人体中毒和人员死亡事件。如1986年12月,福建省东山县磁窑村发生了一起因采食菲律宾哈仔而引起的集体中毒事件,所有吃过蛤仔的人无一幸免,中毒人数达136人,死亡1人<sup>[54]</sup>。

已知我国沿岸海域中能引起赤潮的生物有260余种,其中能产生赤潮毒素的就有78种<sup>[50]</sup>。

无毒和有毒赤潮,造成海洋环境一次污染。由于赤潮面积广、密度大、有害毒素强,使得赤潮所覆盖的水域的其它生物缺氧、中毒。造成整个水域的其它生物的全部死亡和消失,产生了海洋环境的第二次污染。

联合国环境规划署(UNEP)一份新报告说,自1960年以来,全世界近海水域中缺氧的死亡区域数在过去10a间翻了一番,达到将近150处,这将对海洋生态系统的最大威胁。大量营养物质排入海中,使藻类疯长,死亡后消耗氧气。UNEP的报告说缺氧区域已增加到约70000km<sup>2</sup>,海洋生物学家Bob Diaz说,当水中的溶解氧低于2mL/L时,成年鱼会窒息,孵卵生境会遭到破坏。UNEP报告预测到,大气中CO<sub>2</sub>浓度增加到一倍,会使进入墨西哥湾的密西西比河水增加20%,使藻类增加50%,氧减少30%~60%,使墨西哥湾死亡区域扩大。

由此可见,赤潮虽然对海洋生态系统带来了危害。但是,对于全球来说,赤潮在降低大气的C量方面有着重要的作用。而且,赤潮是局部的、短期的灾难,而气温和水温的升高却是全球的、长期的灾难。因此,在地球生态系统的C补充机制下,赤潮的存在对人类具有重要的意义。

#### 5 结 语

随着人类活动的加剧,在大气中CO<sub>2</sub>的增多,气温呈上升趋势,水温呈上升趋势;在海洋中N、P升高,Si降低。地球生态系统为了保持海洋中浮游植物生长的平衡和海洋的生态系统的可持续发展以及大气CO<sub>2</sub>的增长放慢,开始启动C补充机制使大气C迅速迁移沉降到海底。那么,这就分为两种情况:(1)地球生态系统启动Si补充机制,Si使浮游植物生长迅速、旺盛,形成硅藻为优势种,易产生硅藻赤潮。(2)地球生态系统无法启动Si补充机制,大量的N、P使浮游植物集群结构改变:从硅藻改变为甲藻等非硅藻。于是,甲藻等非硅藻生长迅速、旺盛,成为优势种,易产生甲藻等非硅藻赤潮。通过这两种情况、气温和水温补充机制,大气C被迅速迁移沉降到海底,气温和水温恢复到动态平衡。因此,地球生态系统的C补

充机制目的为保持大气C的动态平衡。然而,C补充机制带来陆地上的三大类型气候灾害:洪水、沙尘暴、风暴潮和水体中的一大类型生物灾害:赤潮。

通过地球生态系统的C补充机制,未来气候变化的趋势是这样的:近岸和盆地流域地区成为多雨区,内陆成为干旱区,海上成为多风暴潮区。从全球生态系统和变异气候的变化趋势的角度来看,作者发现<sup>[55]</sup>,在全球气候的变化趋势有两大显著特点:气温趋向于升高,风暴趋向于增强。那么,在未来气候变化的趋势下,在陆地上,首先,未来生长的整个农作物在全球都趋向于耐高温和抗倒伏。其次,未来生长的农作物在内陆,具有抗干旱;在近岸和盆地流域,具有抗洪涝。在水体中,水产品能够适应水上风暴潮的搅动,也能够适应甲藻等非硅藻赤潮以及赤潮带来环境变化,使人类的水产资源能够可持续发展。

因此,人类需要适应陆地和海洋上的气候变化。同时,提高生物技术来进行精选、培养、改良陆地的农作物物种和水产品物种,分别适合未来的高温、强风和持续干旱的内陆气候以及洪涝灾害的近岸和盆地流域气候与风暴潮的搅动、赤潮和赤潮带来环境变化。以便人类的食物资源可持续利用。

## 参考文献:

- [1] 杨东方,陈生涛,胡均,等. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小顺序[J]. 海洋环境科学,2007,26(3): 201-207.
- [2] HOUGHTON J T, DING Y, GRIGGS D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] 袁道先. 岩溶作用与碳循环研究进展 [A]. 朱光亚. 中国科学技术文库 [C]. 北京: 科技出版社, 1998. 2702-2706.
- [4] 郑淑颖, 管东生. 人类活动对全球碳循环的影响 [J]. 热带地理, 2001, 21(4): 369-373.
- [5] 李绚丽, 谈哲敏. 大气圈碳循环的模拟研究进展 [J]. 气象科学, 2000, 20(3): 400-412.
- [6] 邢如楠. 带生物泵三维全球海洋碳循环模式 [J]. 大气科学, 2000, 24(3): 333-340.
- [7] 卢龙飞, 蔡进功, 包于进, 等. 粘土矿物保存海洋沉积有机质研究进展及其碳循环意义 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 931-937.
- [8] YANG Y L, ELDERFIELD H, IVANOVICH M, et al. Geochemical record of the Panama basin during the last glacial maximum carbon event shows that the glacial ocean was not suboxic [J]. Geology, 1995, 23(12): 1115-1118.
- [9] 胡敦欣. 我国海洋通量研究 [J]. 地球科学进展, 1996, 11(2): 227-229.
- [10] 张远辉, 黄自强, 马黎明, 等. 东海表层水二氧化碳及其海气通量 [J]. 台湾海峡, 1997, 16(1): 37-42.
- [11] 杨东方, 谭雪静. 铁对浮游植物生长影响的研究与进展 [J]. 海洋科学, 1999, 23(3): 48-49.
- [12] 杨东方, 李宏, 张越美, 等. 浅析浮游植物生长的营养盐限制及其判断方法 [J]. 海洋科学, 2000, 24(12): 47-50.
- [13] YANG D F, GAO Z H, CHEN Y, et al. Examination of silicate limitation of primary production in the Jiaozhou Bay, North China III. Judgment method, rules and uniqueness of nutrient limitation among N, P, and Si [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2003b, 21(2): 114-133.
- [14] YANG D F, ZHANG J, LU J B, et al. Examination of silicate limitation of primary production in the Jiaozhou Bay, north China I. Silicate being a limiting factor of phytoplankton primary production [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2002, 20(3): 208-225.
- [15] YANG D F, ZHANG J, GAO Z H, et al. Examination of silicate limitation of primary production in the Jiaozhou Bay, North China II. Critical value and time of silicate limitation and satisfaction of the phytoplankton growth [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2003a, 21(1): 46-63.
- [16] YANG D F, CHEN Y, GAO Z H, et al. Silicon limitation on primary production and its destiny in Jiaozhou Bay, China IV. Transect offshore the coast with estuaries [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2005a, 23(1): 72-90.
- [17] YANG D F, GAO Z H, SUN P Y, et al. Silicon limitation on primary production and its destiny in Jiaozhou Bay, China VI. The ecological variation process of the phytoplankton [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2006b, 24(2): 186-203.
- [18] YANG D F, GAO Z H, WANG P G, et al. Silicon limitation on primary production and its destiny in Jiaozhou Bay, China V. Silicon deficit process [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2005b, 23(2): 169-175.
- [19] YANG D F, GAO Z H, YANG Y B, et al. Silicon limitation on primary production and its destiny in Jiaozhou Bay, China VII. The Complementary mechanism of the earth ecosystem [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2006c, 24(4): 401-412.
- [20] SMETACEK V. The giant diatom dump [J]. Nature, 2000, 406: 574-575.
- [21] DE MASTER D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, 45: 1715-1732.
- [22] VAN BENNEKOM A J, BERGER G W, VAN DER GAAST S J, et al. Primary productivity and the silica cycle in the Southern Ocean [J]. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 1988, 67: 19-30.
- [23] TREGUER P, VAN BENNEKOM A J. The annual production of biogenic silica in the Antarctic Ocean [J]. Marine Chemistry, 1991, 35: 477-487.
- [24] TREGUER P, NELSON D M, VAN BENNEKOM A J, et al. The silica balance in the world ocean: A reestimate [J]. Science, 1995, 268: 375-379.
- [25] NELSON D M, TREGUER P, BRZEZINSKI M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation [J]. Global Biogeochemistry Cycle,

- 1995, 9: 359-372.
- [26] SMETACEK V. Bacteria and silica cycling[J]. *Nature*, 1999, 397: 475-476.
- [27] CHISOLM S W. Phytoplankton size [A]. FALKOWSKI P G, WOODHEAD A D. Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea [C]. New York: Plenum Press, 1992: 213-233.
- [28] 杨东方,高振会.海湾生态学[M].北京:中国教育文化出版社,2006: 1-291.
- [29] 李艳,李瑞香,王宗灵,等.胶州湾浮游植物群落结构及其变化的初步研究[J].海洋科学进展,2005,23(3):328-334.
- [30] 李广楼,陈碧鹃,崔毅,等.莱州湾浮游植物的生态特征[J].中国水产科学,2006,13(2):292-299.
- [31] 杜虹,黄长江,陈善文,等.2001—2002年粤东柘林湾浮游植物的生态学研究[J].海洋与湖沼,2003,34(6):604-617.
- [32] 高东阳,李纯厚,刘广锋,等.北部湾海域浮游植物的种类组成与数量分布[J].湛江海洋大学学报,2001,21(3):23-28.
- [33] 陈长平,高亚辉,林鹏.福建省福鼎市后屿湾红树林区水体浮游植物群落动态研究[J].厦门大学学报(自然科学版)2005,44(1):118-122.
- [34] 王兴春.三沙湾夏季浮游植物(phytoplankton)分布状况初步研究[J].现代渔业信息,2006,21(7):20-22.
- [35] 杨东方,于子江,张柯,等.营养盐硅在全球海域中限制浮游植物的生长[J].海洋环境科学,2008,27(2):11-16.
- [36] 杨东方,高振会,孙培艳,等.浮游植物的增殖能力的研究探讨[J].海洋科学,2003,27(5):26-28.
- [37] 杨东方,高振会,孙培艳,等.胶州湾水温和营养盐硅限制初级生产力的时空变化[J].海洋科学进展,2006,24(2):203-212.
- [38] 杨东方,高振会,王培刚,等.营养盐硅和水温影响浮游植物的机制[J].海洋环境科学,2006,25(1):1-6.
- [39] ARMSTRONG F A J. Silicon [A]. RILEY J P, SKIRROW G. Chemical Oceanography [C]. London: Academic Press, 1965, 1:132-154.
- [40] SPENCER C P. The micronutrient elements [A]. RILEY J P, SKIRROW G. Chemical Oceanography [C]. London: Academic Press, 1975, 2:245-300.
- [41] BIENFANG P K, HARRISON P J, QUARMBY L M. Sinking rate response to depletion of nitrate, phosphate and silicate in fourine diatoms [J]. *Mar Biol*, 1982, 67:295-302.
- [42] KEMP A E S, PIKE J R B P, LANGE C B. The "fall dump" - a new perspective on the role of a "shade flora" in the annual cycle of diatom production and export flux [J]. *Deep-Sea Res II*, 2000, 47: 2129-2154.
- [43] FARNAS M J. In situ growth rates of marine phytoplankton: approaches to measurement, community and species growth rate [J]. *Journal of Plankton Research*, 1990,12: 1117-1151.
- [44] MICHAELS A F, SILVER M W. Primary production, sinking fluxes and the microbial food web [J]. *Deep-sea Research*, 1988, 35:473-490.
- [45] 福迪(罗迪安译).藻类学[M].上海:上海科学技术出版社,1980.107-135.
- [46] H. U. 斯菲德鲁普, M. W. 约翰逊, R. H. 佛莱明(毛汉礼译).海洋[M].北京:科学出版社,1959.665-676.
- [47] 杨东方,高振会,陈豫,等.硅的生物地球化学过程的研究动态[J].海洋科学,2002,26(3):35-36.
- [48] 杨东方,吴建平,曲延峰,等.地球生态系统的气温和水温补充机制[J].海洋科学进展,2007,25(1):117-122.
- [49] 杨东方,高振会,秦洁,等.地球生态系统的营养盐硅补充机制[J].海洋科学进展,2006,24(4):407-412.
- [50] 孙冷,黄朝迎.赤潮及其影响[J].灾害学,1999,14(2):51-54.
- [51] 吴佩林.我国东海区赤潮发生趋于频繁[J].中国人口·资源与环境,2004,3:117.
- [52] 华泽爱.西加鱼毒的毒素研究概况[J].海洋环境科学,1994,13(1)57-63.
- [53] 梁松.发展海水养殖与减轻赤潮灾害[J].海洋开发与管,1997,(1):33-37.
- [54] 王初升.一起严重食用贝类中毒事件[J].海洋信息,1987,2:3.
- [55] 杨东方,高振会.胶州湾和长江口的生态[M].北京:海洋出版社出版,2007.1-366.