

综述

新生产力——一个新的海洋学研究领域*

焦念志 王荣

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

提要 新生产力的概念最初由 Dugdale 等(1967)提出,近年来由于全球变化研究的发展,赋予了新的含义。它不仅反映了海区的群落净生产能力,同时也是海洋真光层对于大气中 CO_2 的净吸收的一种度量。新生产力研究已经成为当今海洋研究的前沿领域,它涉及海洋生态学、生物海洋学、生物地球化学和物理海洋学的研究,具有重要的理论意义和实际意义。新生产力的基本研究方法是 ^{15}N 示踪法,此外,还可应用沉积物捕集器法、 f 比推算法、物理模型法、真光层净产氧量法、 ^{234}Th 滞留时间法、物质通量模型法以及遥感等方法进行观测或推算。新生产力的研究已被纳入一些国际重大联合研究计划,如 JGOFS, GLOBEC 等,在短短的几年时间里已取得了迅速的发展,90年代将在更大范围和深度上展开研究,并将对全球新生产力水平有一个较精确和全面的了解。

关键词 新生产力 同位素示踪 海洋生态系

新生产力是一个全新的概念,近年来,在生物海洋学、生物地球化学特别是在全球变化研究中引起极大重视(王荣,1992)。有关新生产力的研究已被纳入一些重大国际研究计划中,如“全球海洋通量联合研究”(JGOFS)。除在各重点海区进行了不同程度的实地观测外,为开展全球范围的新生产力研究,还组织了专门的预研究。其发展速度之快、规模之大,是海洋科学领域中少有的。之所以如此,是因为新生产力研究有着极其重要的理论意义和实际意义。一方面,这个概念把海洋初级生产力划分为新生、再生两大部分,从而使海洋水层生态系 (pelagic ecosystem) 的物质转移、能量传递、营养元素再循环的研究进入了一个更深的层次,也使估计海域高营养级生产力建立在更可靠的基础上。这无论对于生态系理论研究,还是对生物资源潜力的评估,都具有重要意义。

另一方面,新生产力是反映海洋真光层从大气中净吸收 CO_2 能力的估计值。近百年来,由于人类活动造成大量 CO_2 进入大气,“温室效应”不断加剧,导致全球气候逐渐变暖。这已成为全球性的重大环境问题。对此,有关国际组织和各国政府都表示极大关注。国际地圈与生物圈计划 (IGBP) 又称全球变化研究 (A Study of Global Change), 已成为 90 年代最大的国际合作研究。海洋是地球上最大的碳库,海洋中碳的生物地球化学过程在全球碳循环中有着举足轻重的作用,而气—海界面碳的净通量在很大程度上就是由新生产力决定的。JGOFS 计划的核心内容之一,就是在全球尺度上了解新生产力的规

* 国家自然科学基金资助项目, 39200022 号。

收稿日期: 1992年2月18日; 接受日期: 1992年10月6日。

模、时空变化和制约机制,并对全球变化中海洋的调节能力作出预测。

新生产力的研究在国内尚属空白,但在国际 JGOFS 计划的推动之下,已引起我国海洋学界的重视。作者参与了国际 JGOFS 委员会建议的并由国家自然科学基金委员会支持的“东海陆架边缘海洋通量研究”的准备工作,在总结文献和预研究的基础上对这一前沿领域做一较系统的介绍。

1 新生产力及有关概念

新生产力(量)(New production)一词,最初由 Dugdale 等,(1967)提出。这个概念是建立在N源划分基础上的。他们认为,进入初级生产者细胞内的任何一种元素都可划分为新结合的和再循环的两类,但并非每一种元素的这种划分都能够用实测来实现,而N是一种可供这种区分的较为理想的元素。N是构成细胞的主要元素,又相对稳定,且N/C比、N/P比也相当恒定,用N描述初级生产者的生长比其它元素(如C,P)更精确些。此外,N常常是海洋环境中的限制性营养元素,因而建立在N源基础上的生产力更具有实际意义。他们定义:在真光层中再循环的N为再生N,由真光层之外提供的N为新生N。由再生N源支持的那部分初级生产力叫再生生产力(Regenerated production),由新生N源支持的那部分初级生产力称之为新生产力。

1979年,Eppley等将新生产力与真光层底部的碳输出,即输出生产力(Export production)联系起来,赋予了新生产力以新的含义;并明确指出,新生N来自:①上升流或梯度扩散,②陆源供给(如径流等),③大气沉降或降水,④N₂固定。再生N来自真光层中生物的代谢产物(如氨态N、尿素N、氨基酸N等)。特别是他们提出了f比(新生产力与总初级生产力的比值)和r值[颗粒态营养元素下沉出真光层之前的循环次数, $r = (1 - f)/f$]的概念,发展和完善了新生产力的理论。

Platt等(1985)在更广泛的意义上定义新生产力为真光层群落净生产力,即真光层有机物质的积累率和输出率之和。这实际上阐明了新生产力与输出生产力的量值关系。通常二者并不相等。在季节尺度上,当真光层生物量变化为零时,这个季节的平均输出生产力等于平均新生产力。在一年或更长的时间尺度上,可认为二者是相等的。

此外,“New production”的中译词应当是新生产量,但鉴于它所反映的是一种生产性能和生态特征,具有“率”的概念,为此建议用“新生产力”作为它的中文对应词。

2 新生产力的研究方法

新生产力的表达方式与初级生产力相同。常见的观测和估算方法有以下几种。

2.1 ¹⁵N法 ¹⁵N法是经典的方法,也是唯一可进行现场直接观测的方法。目前已有的新生产力的资料绝大部分是用此法测得的。这一方法是由Dugdale等(1967)建立的。该法首先用¹⁵N示踪技术测定初级生产者对新生N源和再生N源的吸收率,以新生N吸收率与总可利用N吸收率之比求得f比,再由f比与初级生产力相乘即为新生产力。此外,还可以只测新生N之吸收率,然后按照Redfield比值求得以碳表示的新生产力。本法的前提条件是,假设真光层内无硝化作用和异养吸收可以忽略,但实际上是难以满足上述条件的。关于¹⁵N示踪技术的方法与问题,焦念志(1992)已给出了比较详尽的综述。该法可得到较精确的结果,是对短时间、小尺度上新生产力的良好估计。¹⁵N法为JGOFS计划的推荐方法。

2.2 沉积物捕捉器法 在真光层底部设置沉积物捕集器,收集沉降下来的颗粒有机物,实际上是测定输出生产力。在时间跨度足够大和平流较小的情况下,其结果可基本反映新生产力。这一方法是近几年来发展起来的(Knauer et al., 1990),它可以在较大的时间、空间范围上进行,也可与卫星遥感资料对比分析,对于大洋海区的观测具有重要意义。但该法易受上升流、环流、涡流等干扰,不宜用于近海。该法测不到 DOC, POC 的数量也直接与水深有关,所得结果通常是新生产力的偏低估计值。另外,游泳生物的干扰、收集物的保存等都是容易产生误差的环节。设备造价昂贵、操作困难和容易丢失,也限制了它的广泛使用。

2.3 f 比推算法 这是一种通过代表性海区 f 比与初级生产力的函数关系(实测求得),借助已有的 ^{14}C 初级生产力资料外延推算其他海区新生产力的间接方法。Eppley 等(1979)给出了这种方法的示范。在新生产力实测数据尚嫌太少的目前情况下,这是大致估计大尺度范围上新生产力水平的可行方法。但必须注意,不同海区、不同时间 f 比变化很大。如 Platt 等(1985)研究百慕大东南海区所得的 f 值为 0.03—0.84, Knauer 等人(1990)对东北太平洋 VERTEX 时间序列站连续 18 个月的观测发现, f 比的季节变化达 4 倍,平均为 0.11—0.16。Eppley 等(1979)指出, f 比随初级生产力按渐近线变化,从贫营养大洋海区的 0.05 到沿岸上升流区的 0.50;而在地区范围内, f 比随时间、深度、环境条件(如 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量比例)的变化都会发生变化。Harrison 等(1987)发现,在各地区 f 比与 $[\text{NO}_3^-]/([\text{NO}_3^-] + [\text{NH}_4^+])$ 的关系基本一致。因而可利用这种关系由已知的 N 源浓度资料来估计 f 比,进而再推算新生产力。

2.4 物理模型推算法 即利用海流模型和水团中营养物质含量,推出真光层中限制性营养元素的补足速度,从而推算出新生产力的上限。如 Chavez 等人(1987)运用上升流模型和上升流中 NO_3^- 的浓度推算了赤道太平洋海域的新生产力; Hamilton 等人(1989)讨论了盐舌对流模型和热能通量模型用于推算世界大洋 NO_3^- 垂直通量的可能性; Dugdale 等人(1988)运用地中海环流模型推出了该海区初级生产力和新生产力的规模; Minas 等(1986)结合 Broenkow 的营养盐、氧模型和 Bowden 的上升流滞留时间,计算了西非、秘鲁沿岸等上升流区的群落净生产力。物理推算法的优点是,可利用业已建立起来的海流模型在中尺度范围上推算新生产力。但该法没有考虑生物学因素和其它环境因素[如,还原态氮对 NO_3^- -N 吸收的抑制作用、El Niño 现象的影响等(Wilkson et al., 1987)],所得结果实际是新生产力的一个最大潜在值,与实际水平可能有较大差距。

2.5 真光层净产氧量法 Tenkins 等、Emerson、Chon 等都曾用过此法(SCOR, 1990)。真光层中溶解氧的净积累量是估计季节性新生产力的一个综合指数,但此法受到气体交换的限制,在低纬地区效果较好,而高纬地区误差很大。同时,它只适合于混合层浅和稳定度高的情况,像秋、冬季节则不宜。如,低氧含量的底层水上升到真光层破坏了超饱和的氧信号。

2.6 ^{234}Th 滞留时间法 由于 Th 是具有颗粒吸附活性的,因而在海水中的实际溶解度比由 ^{238}U 衰变推算出的结果要小。当颗粒越多时,它在真光层滞留时间越短。如果 Th 所吸附的所有颗粒都是本海区所产生的有机颗粒,则可用 Th 的滞留时间和颗粒有机物的含量来推算该海区的新生产力(Eppley, 1989)。水柱中总的物质通量与 ^{234}Th 的滞留

时间有着良好的相关关系,在有机颗粒中途分解时, Th 的滞留时间增长,这影响到新生产力估计的准确性。同时,该法也不适用于颗粒来源复杂的海区。但 ^{234}Th 法不仅测出了物质通量,还可测出过程速率,是一个很有希望的方法。

2.7 物质通量模型法 Toggweiler (1988) 和 Sarmiento 等(1988)提出了以 PO_4^{3-} 表一次表层通量为基础的,包括颗粒有机碳(POC)、溶解有机碳(DOC)在内的新生产力通量模型。Bacastow 等(1991)提出了包括 PO_4^{3-} , POC, DOC, CO_2 , O_2 , 碱度等指标在内的模型,并计算了东、西太平洋 PO_4^{3-} , CO_2 以及新生产力和输出生产力的一些估计值。这种方法代表了综合模拟的趋势,尽管目前尚难精确化。随着指标测定(如 DOC)的改进和通量模型的优化,这类方法对于新生产力的宏观预测具有潜在价值。

2.8 遥感法 迄今为止,尚没有利用卫星遥感直接测定新生产力的方法。对于某些特定海区,如果通过现场实验(如用 ^{15}N 法)求得有代表性的 f 比,即可通过卫星遥感叶绿素资料与初级生产力的关系实现对新生产力的估计。此外,利用已建立的水团温度与 NO_3^- 含量的关系(Kamykowski et al., 1986),可以从遥感水温图象估计 NO_3^- 供给量,进而推算新生产力。这一方法适用于 $40-60^\circ\text{S}$ 的大洋区,其优越性在于可以利用卫星遥感资料实现大洋乃至全球尺度上的大致估计。

除上述几种方法外,海洋新生产力还被用气体交换法、 $^3\text{He}/^3\text{H}$ 分布模型法, $^3\text{H}/^{223}\text{Ra}$ 分布模型法、DO 分布模型法,以及深水呼吸电子转运系统等方法估计或测定过。

3 研究现状与发展趋势

在 Dugdale 等(1967)将 ^{15}N 技术引入海洋并提出新生产力概念之后的 10 年时间里,海洋 ^{15}N 技术得到了广泛的应用,但这些研究主要是针对真光层中 N 代谢、N 循环以及与此有关的生态学问题而进行的,而真正新生产力的专门研究几乎没有。直到 1979 年, Eppley 等利用以往 ^{15}N 的实验数据(NO_3^- , NH_4^+ , 尿素 N, 氨基酸 N 等)和 ^{14}C 测得的初级生产力数据建立起新生产力和初级生产力的定量关系(f 比),并依据后者对全球性新生产力水平做出了大致的估计。同时,将初级生产力与输出生产力联系起来,赋予了新生产力以生物地球化学方面的含义。从此,新生产力的研究进入了一个新的阶段。1984 年,美国的海洋学家首先把大尺度物理海洋学与生物地球化学过程相联系,在此基础上提出了全球海洋通量研究(GOFS)的设想。随后,更多的国家相继提出了各自的研究计划,并在一些重点海区(如北大西洋、东北太平洋等)设立标准站位,开始了有计划的现场研究,新生产力即是其中的重点观测项目之一。这些研究为后来的全球海洋通量联合研究(JGOFS)计划的制订奠定了基础。1987 年,海洋研究科学委员会(SCOR)召开了一系列关于 JGOFS 的会议,并于 1988 年成立了国际 JGOFS 委员会。1989 年,由美、加、英、德、日、荷等 6 国联合进行了第一个过程研究(North Atlantic Bloom Experiment),目前(1991—1992)正在进行又一个更大的统一行动——赤道太平洋过程研究。所有这些研究中,新生产力都被列为重点内容之一。在短短的几年时间里,有关新生产力的研究报道已达上百篇。一些有代表性的数据列于表 1。

新生产力研究在我国尚属空白,但这项研究的重要性已引起有关组织和学者的高度重视。1992 年 1 月在青岛召开的中国 JGOFS 委员会第四次会议再次确认其为今后工作的重要内容之一。JGOFS 在中国的一项计划——东海陆架边缘海洋通量研究,即将新

表1 一些有代表性的新生产力估计值

Tab. 1 Some representative estimates of new production

海区	初级生产力		新生产力		f 比	作者
	[g/(m ² ·a ¹)]	(Gt)	[g/(m ² ·a ¹)]	(Gt)		
近岸区						
东北太平洋	250	9.00	42	1.50	0.17	Martin 等 (1987)
东热带太平洋	834	0.15	417	0.08—0.20	0.50	Chavez 等 (1987)
大洋区						
太平洋	55	9.14		1.26	0.14	Eppley 等 (1979)
大西洋	102	8.56		2.18	0.26	Eppley 等 (1979)
印度洋	84	5.96		1.25	0.21	Eppley 等 (1979)
上升流区						
东太平洋	420	0.15	85	0.03	0.20	Martin 等 (1987)
赤道太平洋	176	1.90	77	0.85—1.90	0.44	Chavez 等 (1987)
秘鲁	912		215		0.21	Minas 等 (1986)
西非	1277		839		0.64	Minas 等 (1986)
南极区						
海区	325				0.45	Eppley 等 (1979)
冰缘带	128—153				0.39—0.62	Smith 等 (1990)
全球海洋		19.00—24.00		3.40—4.70	0.18—0.20	Eppley 等 (1979)
		51.00		7.40	0.145	Martin 等 (1987)

生产力列为重点观测项目之一,预计将在 1993 年春季开始东海典型站位的现场研究。我们已于 1991 年秋季在胶州湾开始了预研究。经过多次室内模拟试验和样品分析试验,目前已建立起 ¹⁵N 离子质谱法测定新生产力的基本方法,并获得了一批季节性新生产力的第一手资料。

新生产力的研究方兴未艾,90 年代将有更大的发展。在研究海域上,将由过去的重点海区转向代表全球海洋的各大洋区(包括太平洋、大西洋、印度洋及南大洋等)。在研究策略上,采取典型海区的强化研究同大范围上的一般观测相结合的方式,以实现由点到面的外推预测。在研究方法上,以 ¹⁵N 法为基础,多种方法并举,并趋向于多学科综合研究和在大尺度宏观预测。在研究内容上,可分为两类:一类是重点海域或代表性海域的过程研究,目的是了解新生产力的形成过程和受控机制。这类研究特别注意新的观点与方法,如不同 N 源间的相互作用、水华(Bloom)过程中新生产力的变化(Dugdale et al., 1990)。环境因素(温、盐、流等)对生产过程的影响(Wilkson et al., 1987)、新 DOC 与新生产力的关系(Bacastow et al., 1991)等。另一类研究是大尺度观测和数值模拟,目的在于获取全球海洋新生产力的系统数据。这类研究特别强调资料的代表性和可比性。如各大洋区的站位设置、观测工作的协调统一等。这方面,卫星遥感将发挥特殊作用。如,美国已计划在 1994 年启用一种新的海色感受装置,它的时、空分辨率分别是 2d 和 4km,届时将给出全球海洋的植物色素和生产力的详尽资料(SCOR, 1990)。

可以相信,不久的将来,我们将对全球海洋新生产力有一个比较精确和全面的了解,

这种了解不是基于理论演绎,而是基于各种途径的观测结果。从而,新生产力的研究也将为海洋生态学、生物海洋学乃至全球变化预测作出贡献。

参 考 文 献

- 王 荣,1992,海洋生物泵与全球变化,海洋科学,1: 18—21。
- 焦念志,1992,生物海洋学中¹⁵N技术的方法与问题,海洋科学,6: 65—69。
- Bacastow, R. & Maier-Reimer, E., 1991, Dissolved organic carbon in modeling oceanic new production, *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 5(1): 71—85.
- Chavez, F. P. & Barber, R. T., 1987, An estimate of new production in the equatorial Pacific, *Deep-Sea Res.*, 34(7): 1 229—1 243.
- Dugdale, R. C. & Goering, J. J., 1967, Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity, *Limnol. Oceanogr.*, 12: 196—206.
- Dugdale, R. C., Wilkerson, F. P. & Morel, A., 1990, Realization of new production in coastal upwelling areas: A means to compare relative performance, *Limnol. Oceanogr.*, 35(4): 822—829.
- Dugdale, R. C., Wilkerson, F. P., 1988, Nutrient sources and primary production in the Eastern Mediterranean, *Oceanol. Acta.*, 9: 179—184.
- Eppley, R. W., 1989, New production: history, methods, problems, *In Productivity of the Ocean: Present and Past*, ed. by Berger, W. H. et al., John Wiley & Sons Limited (N. Y.), pp. 85—97.
- Eppley, R. W. & Peterson, B. J., 1979, Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean, *Nature*, 282(13): 677—680.
- Harrison, W. G. et al., 1987, *f*-Ratio and its relationship to ambient nitrate concentration in coastal waters, *J. Plankton Res.*, 9(1): 235—248.
- Hamilton, J. M. et al., 1989, Vertical fluxes of nitrate associated with salt fingers in the world's ocean, *J. Geophys. Res.*, 94(C2): 2137—2145.
- Kamykowski, D. & Zentara, S. J., 1986, Predicting plant nutrient concentrations from temperature and sigma- t in the upper kilometer of the world ocean, *Deep-Sea Res.*, 33: 89—105.
- Knauer, G. A. et al., 1990, New production at the VERTEX time-series site, *Deep-Sea Res.*, 37(7): 1 121—1 134.
- Martin, J. H. et al., 1987, VERTEX: Carbon Cycling in the Northeast Pacific, *Deep-Sea Res.* 34: 267—285.
- Minas, H. J. et al., 1986, Productivity in upwelling areas deduced from hydrographic and chemical fields *Limnol. Ocean.*, 31: 1 180—1 204.
- Platt, T. et al., 1985, Biogenic fluxes of carbon and oxygen in the ocean, *Nature*, 318: 55—58.
- Sarmiento, J. L. et al., 1988, Ocean carbon cycle dynamics and atmospheric $p\text{CO}_2$, *Philos. Trans. R. Soc. (London)*, Ser. A. 325: 3—21.
- SCOR, 1990, JGOFS science plan, *JGOFS Report*, 5: 1—51.
- Smith, W. O. Jr and Nelson, D. M., 1990, Phytoplankton growth and new production in the Weddell Sea marginal ice zone, *Limnol. Oceanogr.*, 35(4): 809—821.
- Toggweiler, J. R., 1988, Is the downward dissolved organic matter flux important in carbon transport? *In Productivity of the Ocean: Present and Past*, ed by Berger, W. H. et al., John Wiley & Sons Limited (N. Y.), pp. 65—83.
- Wilkson, F. P. et al., 1987, Effects of El Niño on new, regenerated, and total production in eastern boundary upwelling systems, *J. Geophys. Res.*, 92(C3): 14 347—14 353.

NEW PRODUCTION —A NEW RESEARCH AREA OF OCEANOGRAPHY

Jiao Nianzhi, Wang Rong

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071*)

ABSTRACT

Study of new production, as a new research area of marine biology and biological oceanography, including the concept, methods and related projects, is reviewed. ^{15}N technique as the basic method to estimate new production is introduced. Other approaches (by sediment traps, “*f*” ratio, remote sensing, net oxygen production in the euphotic zone, ^{234}Th residence time, current models, and flux models) are also reviewed.

The Chinese national program “Ocean Flux Study in the Shelf Margin of the East China Sea” proposed by the Chinese JGOFS Committee and supported by the NNSFC (National Natural Science Foundation of China) implemented in 1992 has new production study as one of the most important projects.

Key words New production Isotope tracer Marine ecosystem