



# 海洋环境科学动向

## 受控海洋生态系统污染实验\*

曾呈奎 邹景忠

(中国科学院海洋研究所)

近年来,国际上海洋生态系统研究进展甚快。1976年在西德赫尔戈兰(Helgoland)召开的“国际生态系统研究”学术讨论会上,曾着重强调发展受控生态系统实验新技术及其在污染生态研究应用的重要性。

受控海洋生态系统实验是泛指以某一自然生态系统的结构和功能作为原型来考虑设计在室内或在现场用人工控制的方法进行实验的技术。它是迄今为止研究生态系统结构、各组分功能及其相互关系与动态平衡过程的最佳实验手段。其规模可从不同容量的室内水族箱,直到大容量的现场实验装置,甚至直接利用天然封闭性的内湾。本文着重介绍受控浮游(水层)生态系统污染现场实验研究的进展概况。

### (一)

与陆地水生生态系统一样,海洋生态系统的研究方法,目前也正经历着由自然生态调查,室内生态模拟实验,逐步发展到较大规模多学科的海上现场实验研究阶段。从英国植物生态学家A. G. Tansley(1935)提出生态一词直到六十年代生态系统研究普遍受到重视,并发展成为现代海洋生态学一项重要课题。由于缺乏行之有效的实验方法和手段,使其研究长期停留在描述性的自然生态调查研究阶段,调查中发现到的许多新现象和新问题,都不能给予恰如其分的解释。就室内生态系统模拟实验而言,尽管在某些具备实验条件的国家做了一些工作,但绝大多数是属于个体生态、种群生态或群落生态水平的实验研究。许多学者认为,小环境的实验有很大的局限性,不仅动物饲养有困难,更重要的是实验所获得的结果不能真实地反映自然条件下的变化情况。

到了七十年代,随着海洋污染生态研究的深入发展,海洋生态学家们才强烈地感到:为了揭示生态系统中能量和物质交换的基本规律,正确评价低浓度污染物对生态系统结构、功能的慢性影响和其在食物链上质量变化的规律,以及了解生态系统对污染的反作用和生物适应污染环境的能力,要求人们对生态系统有更加深入的了解,而单靠自然生态调查所获得的资料,已不能满足需要,到了非从根本改变不可的时候了。生态学家们的这种要求和期望,于1972年在美国国家科学基金会赞助下得到了实现,这就是被列入“国际海洋考察十年”(IDOE)研究规划中的“受控生态系统污染实验”(CEPEX)。这是一项国际性合作研究课题。其目的在于:(1)评价低浓度污染物(主要是石油烃、汞、铜、镉、重金属混合物和富营养水)对浮游生态系统的长期影响;(2)研究引进污染物在生态系统内的运动规律,特别是在食物链(网)中累积、迁移和代谢的规律。参加这项研究计划的国家有美、英、日、加和澳大利亚。近年西德、法国和意大利也相继开展实验研究。这项实验研究的开展,反映了七十年代污染生态研究的国际水平,并将成为八十年代海洋环境科学基础理论研究的主攻方向之一。

### (二)

“受控生态系统污染实验”是把几套受控生态系统实验装置(CEES)悬浮于海中进行的。

\* 本文曾在中国环境科学学会海洋环境专业委员会成立会上宣读,会后略有补充修改。

每套装置系由透明、柔软、无毒的聚乙烯制成的容量为 68—1,700 米<sup>3</sup> 的大型塑料袋及其浮动组件组成。塑料袋分内外两层,内层厚 4 密斤、外层厚 8 密斤,外层起保护内层的作用。袋下端为的确凉制成的锥形体。底部由一个 5 厘米的阀门装在塑料袋的 19 厘米直径的开口处,并接上 5 厘米直径的管子通到塑料袋的外面。浮动组件由环氧涂层的直径为 40 厘米的透明塑料管制成。为使袋口浮在水面,在其周围装上充满空气的浮性项圈。组件外围另有 6 个或更多的悬挂点,均用 6 股以上线绳悬挂 30 公斤沉锤固定。从侧面观,这种实验装置相当于海上一个立体实验室。见图 1、图 2。

污染物被引进实验装置的方法依实验目的和地点而定,一般可采用:(1) 间断时间注入一次以保持袋中浓度不变;(2) 连续定量注入和 (3) 一次注入所需要的测试浓度。

每次实验使用 3 个或 6 个实验装置,其中一个作为对照组。实验观察时间有半个月、一个月、三个月甚至达半年之久。实验基地分别设在:

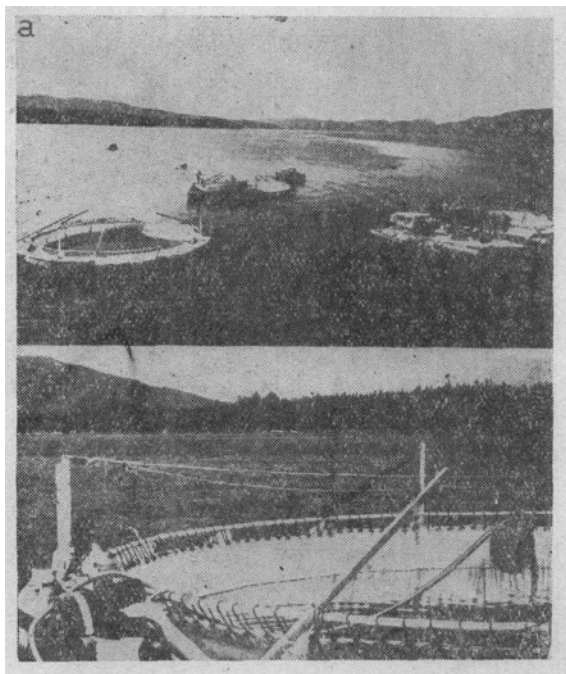


图 1 a. 悬浮于海中三个实验装置外观。  
b. 实验装置近观。用水泵进行大体  
积采样。

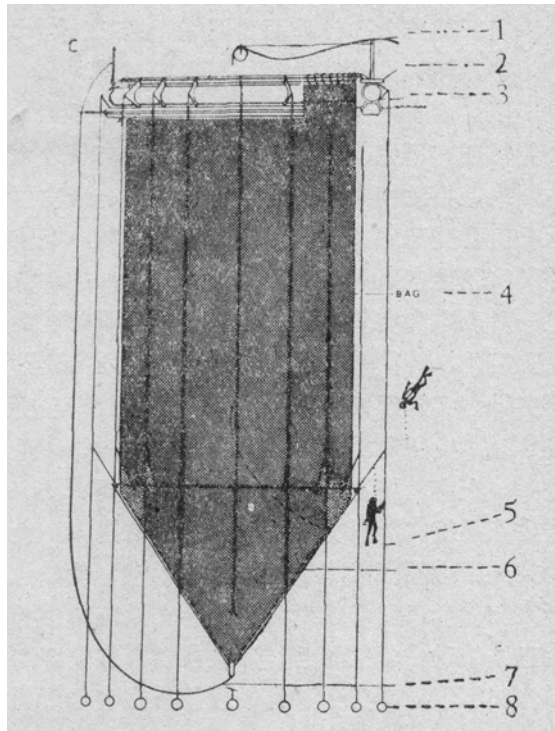


图 2 实验装置水下立体结构及安装示意图

1、取样皮管, 2、踏板, 3、浮性项圈,  
4、塑料袋, 5、支撑线绳, 6、圆锥体,  
7、通向袋口的皮管, 8、沉锤。

(1) 加拿大: 布列颠哥伦比亚靠近维多利亚海岸的 Saanich Inlet 内湾。

(2) 英国: 苏格兰西北岸的 Loch Ewe 沙质小湾。

选择这两个海湾作为基地, 主要是因该湾没有大的风浪且流速小, 水深, 食物链(网)清楚简单, 离污染源较远, 浮游生物种类组成清楚, 且其产量和现存量都较高。

另外, 适于研究浮游生态系统几种小型的实验装置, 除六十年代一些学者为研究某些生物种群问题, 曾用过类似装置外, 近年还有 Brockmann 等 (1974) 研制的容量为 3—400 米<sup>3</sup> 的小型塑料桶; Conover 等 (1977) 也设计了直径 3.66 米、长 10 米的 Dalhousie 大学型圆筒。据称, 这些装置比较适合于对浮游生物生态习性及其群落结构变化短期实验的观察。Gamble 和 Steele 等 (1974) 研制的 Loch Ewe 塑料袋为直径 3 米、长 17 米的封闭性装置系统。其袋的上下两端制成圆锥状, 末端直径为 45 厘

米，底部用几个50公斤沉锤固定。曾在 Loch Ewe 小湾做过几次实验获得了良好效果。

应该着重指出的是，尽管上述各类型实验装置都还有不完善之处，如塑料袋内与袋外水体隔绝，招致袋内水体混合搅动减弱，袋内海水盐度易受下雨或波浪影响，不易控制，以及控制实验生态系统有关其他技术问题，均有待进一步改进和完善。但就这些实验装置研制成功和应用，特别是“受控生态系统污染实验”研究计划实施以来所取得的一批实验数据和研究成果，发现和提出了浮游生态系统一些理论或实践上有重要意义的新现象和新问题，从海洋生态系统实验研究方法上来说，这是一个大的突破。这不仅能增进海洋生态学家、地球化学家和化学海洋学家对污染的生态效应和浮游生态系统动力学的了解，而且使解释和验证海洋自然环境质量变化过程的预报模式工作成为可能。

### (三)

“受控生态系统污染实验”所获得的基本资料和研究成果，许多已发表在《海洋科学通报》、《海洋科学通讯》等学报上。内容包括：

(1) 污染物对生态系统结构、功能的长期影响，其中包括引进污染物后，系统内生物种类组成、群落结构、现存量或生物量、初级生产力、异养微生物活力、海水理化特性的变化，以及污染物对浮游植物吸收硅酸、氮、磷和氮代谢，对浮游动物的摄食习性、产卵量、呼吸、代谢和鱼类生长等生理机能所造成的慢性影响；(2) 引进污染物（铜、萘类等）在系统内迁移转化和归宿，以及(3) 有关受控生态系统实验装置设计、实验方法和操作技术等。现将(1)、(2)部分概述如下：

#### 1. 污染的生态效应

(1) 对有机物生产者(浮游植物)的影响  
汞、铜和石油对浮游植物的影响，首先是引起种类组成和群落结构的变化。Thomas 等(1977)所作实验表明，在10—50ppb 铜和 5ppb 汞的浓度下，数天后对污染物反应比较敏感的

圆心目硅藻如柔弱角毛藻、双孢角毛藻、扁面角毛藻和根状角毛藻等优势种，逐渐为羽状目硅藻如柔弱菱形藻、远距舟形藻；小型鞭毛藻如棕鞭金藻(*Ochromonas* sp.)、黄鞭金藻(*Chrysochromulina* sp.) 和叉鞭金藻(*Dierateria* sp.) 等种类所取代，显示出这些种类对汞、铜污染有不同的耐受力，生态系统内浮游植物种类多样性明显降低，从根本上加剧系统结构的脆弱性。但在低浓度(铜5—10 ppb、汞1 ppb)下，种类更替的现象不明显，群落结构尚属正常。据此，有人认为，利用受控生态系统实验装置研究浮游植物种类更替和群落结构变化用以测定污染物的压迫，比之用生物指数(Biotic index)法更具优越性。

汞、铜对浮游植物现存量和初级生产力影响的实验表明，当实验装置内汞含量在1 ppb、铜含量在5—10ppb 时，对其不产生抑制作用。但在汞浓度为 5ppb、铜浓度为23—50ppb下，数天后，浮游植物现存量和初级生产力都有不同程度的降低；到了实验后期，它们又恢复到对照组的水平，反映出生态系统具有一定的可塑性。分析指出，实验第八天，光合作用率的降低与每单位叶绿素同化碳速率降低有密切的关系，到了第十二天则是随着叶绿素A和浮游植物总碳量的减少而变低(Thomas, 1977)。实验中也曾观察到在某些含汞量高(5ppb)的实验装置内的浮游植物现存量，比在含汞量低(1 ppb)的和对照组的都高的现象。一种看法是以浮游植物为摄食对象的桡足类因受汞害导致数量急剧变少，从而减低摄食压力；另一种看法是实验装置通过水泵把自然沉降于底部的浮游植物，随同沉积物抽至水的表面得到补充的结果。

另外，Goering 等(1977)应用稳定同位素技术观察不同浓度(2.5, 5.0, 10 和 25 ppb)铜对浮游植物吸收硅酸和溶出硅的结果指出，只有25 ppb的浓度才有抑制作用，在该浓度下吸收率仅有对照组的61%(平均值)，但对硅藻溶出硅的影响不明显，无论实验组或对照组硅藻溶出率都是低的。

## (2) 对消费者(浮游动物和鱼类)的影响

①浮游动物: 汞、铜对浮游动物种群影响的实验观察, 在很大程度上是试图通过这些污染物对浮游动物产卵量、摄食量、消化率、呼吸和代谢等亚致死效应, 来估价对浮游动物产量和群落结构的潜在影响。Reeve 等(1977)实验指出, 桡足类在5ppb 汞、1—10ppb 铜的浓度下, 其产卵量、摄食率、消化率均有明显的下降(Grice 等, 1978), 但对呼吸和代谢的影响不明显, 因而认为利用呼吸和代谢作为污染对浮游动物亚致死效应的指标是不适宜的, 而产卵量和摄食率是可取的。

有些学者对用汞、铜处理后的浮游动物种群动态变化的观察结果表明, 浮游动物种类组成、生物量和优势种的数量, 在实验组与对照组之间有明显的差别, 其要点如下: a. 桡足类无节幼虫的数量, 在汞含量5ppb、铜含量10—50ppb 的实验组比对照组明显减少, 直至34天后不见数量的回升, 但在1ppb 汞和5ppb 铜浓度下, 与对照组却无差别; b. 原生动物沙壳纤毛虫和寡毛虫(Oligotricha)的种类, 在铜含量50ppb 下几乎绝迹, 表明对铜反应敏感, 但在含有石油的实验装置中, 其数量反而有明显增多; c. 伪哲水蚤(Pseudocalanus sp.)、长肢纺锤水蚤(Acartia longiremis)在汞 5ppb、铜 50ppb 浓度下, 其数量可减少50%, 但在1ppb 汞、5—10ppb 铜的浓度下, 则与对照组酷似。汞浓度大于2ppb 时, 不仅能影响伪哲水蚤脱皮, 使之不能发育成成体, 且种类组成也随着浓度的加大而有变化。

另外, 在实验过程中也曾发现铜污染导致浮游动物直接死亡现象, 以及在汞含量高(5ppb)的某些实验装置中, 桡足类的数量反比含汞量低(1ppb)的和对照组的更多的现象(Beers 等, 1977), 认为后者乃是以桡足类为主要饵料的肉食性帽状栉水母(Pleurobrachia pileus)和蛾水母(Bolinopsis sp.)数量急剧减少从而降低摄食压力的结果。

值得着重指出的是, 当前在浮游生物种群动态实验研究中, 遇到的最大问题是水母的大

量出现。它的存在与否, 直接影响系统内浮游植物与浮游动物种群之间动态平衡, 造成系统结构的深刻变化, 使污染的生态效应有时变得模糊不清。但它从另一角度启示我们, 在探讨污染物对生态系统结构、功能的影响时, 必须充分注意系统结构的内在联系, 注意浮游植物→桡足类→水母种群之间的营养关系, 注意某些优势种在调节系统结构、功能的作用。这就是说, 要认识一个生态系统的基本规律, 就必须首先弄清组成系统各成份的基本特征及其复杂的密切联系的功能关系。

②鱼类: 尽管当前使用的受控生态系统实验装置尚未发展到足以容纳大型肉食性鱼类的地步, 但它已有可能测定污染物对某些鱼类的影响, 比现有室内实验有了更大的改进和提高。

Koeller 等(1977)实验表明, 2.5 ppb 浓度的无机铜对大麻哈鱼(Oncorhynchus Keta)生长和生存尚未造成威胁。但在5ppb 汞浓度下, 生长速率却有明显地减慢, 认为这种减慢与饵料生物供给量减少有关, 而不是汞的毒害。鱼体中汞含量测定结果也表明, 整个实验期间汞含量都较低, 说明鱼体汞的富集量尚未对鱼类生理造成明显的压力。

## (3) 对分解者(微生物)的影响

Vaccaro 等(1977)观察铜对微生物影响的结果指出, 在10—50ppb 浓度下, 其生物量和活力不仅没有降低, 反而有明显增加, 认为与受铜损害的浮游植物死亡而释放出大量有机质和可利用碳的分解有关。Hodson 等(1977)进行的石油对抑制微生物吸收 D-葡萄糖和矿化作用实验, 表明抑制率高低主要取决于油型及其浓度。两种成品油(2号柴油和煤油C)比科威特、Louisiana 原油的毒性为大, 低浓度(80微克/升)的煤油有促进微生物代谢的作用, 只有浓度大于300ppb 时对微生物活力才有明显抑制作用。汞的实验表明, 在5ppb 的浓度下, 微生物生物量在实验第一天、活力在第十一天均明显降低, 但在七天后, 生物量即又恢复到对照组水平(Azam 等, 1977)。这些结果表明, 微生物对汞、铜和石油均具有一定的

抗性。

## 2. 污染物在实验生态系统中的迁移和归宿

污染物在生态系统这一动力体系中的分布、迁移、转化和归宿,是受制于机械的、理化的和生物的作用。一般认为,在任何生态系统中,有机或无机颗粒性物质的吸附和沉淀作用,可以大大影响污染物的转移速率和积累状态。但 Topping 等(1977)、Takahashi 等(1977)和 Lee 等(1977)所作汞、铜和萘类的实验结果表明,其迁移方式可因污染物的种类而异。无机铜被引进实验装置后,大部分在水中消失,其消失率与初级生产力高低成正比关系,大约 3% 是通过颗粒物的吸附而一并沉降于水底,说明铜的迁移途径主要是通过浮游植物吸收而转移的。只有当浮游植物死亡沉降海底的量大于被浮游动物摄食量时,铜才大部分以碎屑形式积累于沉积物中(Topping 等, 1977)。

与铜相反,汞和石油等在生态系统的迁移,主要是通过颗粒物吸附、沉淀作用而一并沉降于沉积物中,其量约占总汞的 40%。在水中溶态和悬浮态的总汞,每天约减少 3%,可溶性汞通常低于总汞 50%(Takahashi 等, 1977)。萘类加进实验装置一天后,在水中含量即减少 50%,到了第二十天其浓度可恢复到接近本底值水平。认为实验初期大多数萘类含量的降低主要是由于浮游植物吸收和微生物的降解的原因。据测定,在 5—10 米水层微生物降解率从 0/天逐渐升高到 0.04ppb/天,三天后可达 3.3 ppb/天(Lee 等, 1977)。这些结果说明沉积物是汞和石油的主要归宿处,它们对底栖动物的潜在危害性要比浮游生物为大。同时还说明,受控生态系统实验装置完全适应于对影响海洋的某些过程进行的化学速率和机制的研究,并计划在八十年代进一步开展有关地球化学全过程的一些问题的研究。

从七十年代始,污染物对生态系统各种水平的毒性影响及其进入生物环境和变化过程的生态毒理学(Ecotoxicology)的研究,在我国也有很大进展,取得了一些成果,为海洋环境质

量评价和渔业水质标准的制定提供了基本资料。目前该项研究也正已由室内实验过渡到现场实验的规模。1975—1976年,我们使用内层由塑料薄膜和 25 号尼龙筛绢、外层由竹器制成的长 88 厘米、宽 50 厘米、高 36 厘米的实验框,悬挂在青岛中港实验浮筏上,进行了 9 种国内外原油或混合原油对实验框内浮游植物自然种群和群落结构影响的初步现场实验,继后国家海洋局东北海洋工作站,于 1978 年在大连港采用黑白瓶世代统计法,开展了在自然条件下国产原油对浮游植物种类和数量影响的现场实验。这些实验均取得了初步成果,从而为我国研讨污染物对受控浮游生态系统的影响,在实验研究方法上迈出了可喜的一步。然而同科学发达的国家相比,差距较大。今后,除了加强对现有的实验装置结构和功能进行比较研究,探索研制适应于我国近海特点的新型装置系统之外,建立生态系统模拟实验室和装备环境分析的先进仪器,进一步开展生态毒理学的基础研究,以提高我国海洋污染生态研究水平。

## 参 考 文 献

- [1] 曾呈奎, 1977. 海洋科学 1:1—3.
- [2] 曾呈奎、邹景忠, 1979. 环境科学 5:1—9.
- [3] Brockmann, U. H., et al., 1977. Helgol. Wiss. Meeresunters 30:201—216.
- [4] Conover, R. J. & M. A. Paranajpe, 1977. Ibid. 30: 105—117.
- [5] Gamble, J. C., et al., 1977. Loch Ewe bag Experiment, 1974. Bull. Mar. Sci. 27(1): 146—175.
- [6] Grice, G. D., et al., 1977. Helgol. Wiss. Meeresunters 30: 118—133.
- [7] Grice, G. D. & D. W. Menzel, 1978. Mar. Sci. Comm. 4(1): 23—31.
- [8] Lacaze, J. C., 1974. Mar. Pollut. Bull. 5 (10): 153—156.
- [9] Menzel, D. W., 1977. Bull. Mar. Sci. 27 (1): 142—145.
- [10] Menzel, D. W. & J. Case, 1977. Ibid. 27 (1): 1—7.
- [11] Parsons, T. R., 1978, Mar. Pollut. Bull. 9 (3): 203—205.
- [12] Reeve, M. R., 1976. In: Lockwood, A. P. M. (Ed.), Effects of Pollutants on Aquatic Organisms. p. 145—162. Cambridge University Press.
- [13] Seward, D., et al., 1975. Mar. Biol. 29 (4): 351—361.