

综述

# 现场围隔及其在水域生态学研究中的应用

孙陆宇, 温晓蔓, 禹娜, 陈立侨

(华东师范大学生命科学学院, 上海 200062)

## In-situ Enclosures and Applications in Aquatic Ecology

SUN Lu-yu, WEN Xiao-man, YU Na, CHEN Li-qiao

(School of Life Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**摘要:**现场围隔通过围隔水体建立一个相对封闭的生态系,与周围水体没有交换。使用现场围隔始于20世纪60年代,经过几十年的发展,其结构和功能得到了不同程度的改进和完善,已成为研究水域生态的有效工具,主要用于污染生态学、养殖生态学方面的研究。现场围隔主体结构包括围隔幔、固定支架和围隔幔支架等,附属设备包括防雨罩、电动机、浮力装置和叶轮等,大型围隔容积 $>100\text{ m}^3$ ,中型围隔容积 $10\sim100\text{ m}^3$ ,小型围隔容积 $1\sim10\text{ m}^3$ 。通过在目的水域现场开展围隔试验,从而模拟自然水域生态环境,能够大大缩小试验条件和自然环境的差异,使试验结果更加科学,针对性更加明显。现场围隔发展方向是多样化、实用化。

**关键词:**现场围隔;水域生态学;人工模拟

**中图分类号:**X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)03-0120-07

现场围隔利用围隔将原地(现场)围圈一定体积的水体,通过人工设计生态结构或干预生态因子变化,从而模拟自然水域生态变化趋势,获得试验结果。由于围隔试验系统与周围水环境隔离开来,是一个相对独立的生态系统,所以能够基本维持围隔内的物质恒定,同时具有与自然状况相似的环境条件,可在此基础上进行自然变化和人为活动对生态系统影响的研究。围隔试验是一种简便、科学的试验方法,在水域生态学的研究中得到了广泛的应用。本文从围隔的结构、特点、分类及其在水域生态学中的应用等几个方面对围隔试验进行介绍。

## 1 现场围隔简介

### 1.1 现场围隔结构

现场围隔结构及附属设备组成见图1、图2。

固定支架是绑定围隔袋、桶等的支架,使围隔装置稳定牢固地安放在陆地、岸边、船甲板或者水中,保护围隔不被风浪破坏。该支架主要由钢材或毛竹

制成,有些也使用PVC管等塑质材料(Landers, 1979)。围隔如需固定在水中,则还要加以木(铁)桩打入底泥中,使其更加牢固。围隔幔支架是支撑帷幔的支架,一般由钢制材料牢固焊接而成,视围隔形状的不同分为圆柱形和方形。在一些研究中,有些学者在水泥池中设置围隔,这些水池一般设在岸边或潮间带(林昱等,1994;陈其焕等,1988),它们相比支架来说更为牢固些,更适用于陆地上的围隔试验。

围隔幔一般采用透明或半透明的弹性薄膜材料,如聚乙烯、PVC、玻璃纤维等,这些材料都具有韧性好、不透水、耐腐蚀等特性(Shapiro et al, 1975; Goldsborough et al, 1986; Fulton, 1984)。目前使用的围隔幔大多由聚乙烯布或帆布围绕支架一周热焊或缝合而成,与支架构成一个上方敞开、四周和底部封闭、不透水的半开放、半透明的系统。为保护围隔袋不被风浪破坏,有的学者也在围隔袋的外面另外套上一层保护袋(孙凌等,2007),使其更加安全牢固。有些学者在围隔幔的外侧设置一处拉链(李德尚等,1998),用于排水,同时也能防止采取抽水法排水时围隔内生物的逃逸。

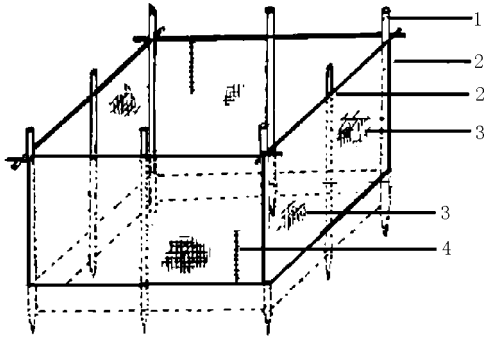
附属设备主要指根据不同围隔装置的需要添加到固定支架上的设备,使得围隔的设计更加完善、科学。比较常见的附属设备有:①浮力装置,一般为塑

收稿日期:2010-08-31 收修改稿日期:2011-04-03

基金项目:上海市科委重大项目(08DZ1203102, 08DZ1203101, 09DZ120010A),浙江省科委重点项目(2008C12009)部分资助。

通讯作者:陈立侨,男,教授。E-mail: lqchen@bio.ecnu.edu.cn

作者简介:孙陆宇,男,硕士研究生。E-mail: looyosun@163.com

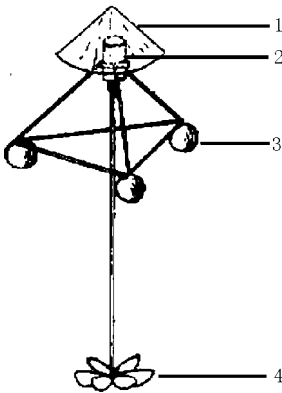


1:固定支架;2:围隔幔支架;3:围隔幔;4:拉链

图1 现场围隔结构示意(李德尚等,1998)

1:fastening frame;2:frame for fastening bordering cloth;3:bordering cloth;4:zipper

Fig.1 Schematic view of enclosure structure



1:防雨罩;2:电动机;3:浮力装置;4:叶轮

图2 现场围隔附属设备示意(李德尚等,1998)

1:rain cover;2:electric motor;3:float equipment;4:vane wheel

Fig.2 Schematic view of affiliation equipment

料材质的球形浮子,安放于围隔上口支架上,主要用于保持围隔上口露出水面,使整个围隔悬浮于水中;②搅水装置,主要由电动机、转动轴和叶轮等组成,用于充分搅拌水体,防止围隔内水分层;③防雨罩,由防雨材料制成的斗笠状或篷状的罩子,一般位于围隔的上方起到遮盖作用,能防止雨水打湿电力设备或滴入围隔内部,以保持试验水体的稳定。

## 1.2 现场围隔的分类

随着人类对自然生态系统关注程度的增加,现场围隔的应用也日趋广泛。在实际应用过程中,学者们根据不同的自然条件和研究需要对围隔的应用进行了拓展,经过半个世纪的发展,目前已设计出了许多不同形式和功能的现场围隔。

1.2.1 依大小划分 目前已见报道的围隔,按其体积或规模,可以分为大型围隔(macrocosm,  $>100\text{ m}^3$ )、中型围隔(mesocosm,  $10\sim 100\text{ m}^3$ )和小型围隔(microcosm,  $1\sim 10\text{ m}^3$ )3类(陈尚等,1999)。

大型围隔主要应用于大型水域的综合生态试验或生态环境的重建。由于大型围隔规模较大,生物多样性丰富,与自然水体的差异较小,因此研究所得的数据结果更为真实可靠,能更直观地反应和模拟实际水体的生态变化(Schindler, 1997)。Tzaras等(1999)在加拿大Lac Croche湖设置了2组大型围隔,容积分别为 $150\text{ m}^3$ 和 $600\text{ m}^3$ ,均由不透水的尼龙-聚乙烯材料制成,围隔顶部周围设有浮球并挂在木桩上,以保持水柱的垂直状态;该试验通过人为控制围隔系统内营养水平、滤食性鱼类种群密度以及水柱深度等条件,对影响微生物食物网组成的主要因素进行了研究分析,最终发现了水体营养水平的提高会直接导致异养型鞭毛虫数量的减少,而且微生物数量的增加也没有相应地引起该类鞭毛虫丰度相应的提高。Chen等(2009)在中国五里湖建造了一个面积 $10\text{ hm}^2$ 的大型围隔系统,围隔由不透水的材料围成,底部不接触湖底,试验利用鱼类转移、增加肉食性鱼类、重建湖岸、种植大型水生植物以及养殖鲢和大型底栖动物等一系列方法来控制水体富营养化,降低蓝藻的生物量;经过一定时期后,围隔内大型植物的覆盖率从0增长到45.7%,与围隔外相比总氮和总磷量分别减少了22.2%和26%,透明度由原来的0.4 m增加至0.75 m;同时还发现,浮游植物尤其是蓝藻数量的减少要滞后于水质的改善和大型水生植物的重现。

设置大型围隔一般要耗费大量的人力、物力,费用较高。

中小型围隔多用于一种或几种生态因子的人工模拟试验,以及水生生物基础性研究。Heiskanen等(1996)在Baltic海北部的近岸区设置了5个容积均为 $30\text{ m}^3$ 的围隔,研究限制性因素(上行途径,如营养条件、资源竞争等)和控制性因素(下行效应,如摄食压力等)对夏末浮游生物群落的影响;通过对营养物质(氮和磷元素)富集的调控和滤食性鱼类数量的交叉试验来观察围隔中有机态的碳氮磷元素含量、叶绿素a水平,以及生物量和基质组成等的变化;分析发现,在水体富营养化的过程中,食物网结构、外源营养物质输入和浮游动物摄食选择等因素对水柱中营养物质的变化都起着至关重要的作用。为了检验总氮总磷比(TN: TP)和磷元素削减对蓝藻水华暴发的影响,Xie等(2003)在中国东湖水深2.5 m的湖底泥层上设置了一系列 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的围隔,在其他条件不变的情况下,通过注入含磷量不同的湖水和底泥,从而改变了水柱和沉积物

中磷元素含量,结果发现蓝藻水华暴发的主要原因是底泥中磷元素的释放使得水柱中磷的含量过高,从而说明之前流行的“氮磷比”假说并非水华暴发的直接原因,而是因蓝藻促使底泥中结合态磷的释放到水柱中使氮磷比下降所致。Hernandez 等(1997)运用一种小型围隔建立了季节性富营养化模型,用以研究生态系统中浮游植物量的调控机制及水体营养动力学;所用围隔是直径1 m、深5 m的塑料管道,管道下方设一个活动阀门,目的是保证围隔内外水位相同;该围隔设计巧妙,能够较好地模拟自然状态下的水体生态环境,便于操控。Egge 和 Aksnes(1992)使用一种浮式的围隔袋,探讨了硅酸盐对浮游植物群落的影响;该围隔袋容积为11 m<sup>3</sup>,主要由透明度接近90%的塑料材料制成,透光性良好,基本不影响围隔内浮游植物的正常生长。

中小型围隔可控性较强,便于操作和管理,试验周期短,费用较低。

1.2.2 依设置地点划分 现场围隔按设置地点分为船基围隔、陆基围隔2类。

船基围隔是将围隔放置在船甲板上,可对远离岸基的水域生态系统进行模拟研究,是现代海洋生态系统现场研究的主要手段,在保持大部分海洋生态系统特征的前提下,有针对性地进行较长时间的生态控制试验,有助于深入了解生态系统的结构和功能。李瑞香等(2003)通过船基围隔(图3)探讨了赤潮中2种优势藻对富营养化的响应程度以及这2种藻的竞争机制;围隔由聚乙烯-聚酯纤维布制成,材料柔韧结实且半透明,容积为25 m<sup>3</sup>,适宜进行大规模的模拟试验;围隔呈桶状,放置在船甲板的钢架内,周围系上具出水孔的帆布袋,并用潜水泵不断地向帆布袋中泵入海水以保持围隔内水温与海水一致。宋国栋等(2008)使用的船基围隔(图4)与前者结构类似,但容积较小,通过在围隔中一次性添加营养盐和铁研究了铁对浮游植物吸收营养盐的关系。

陆基围隔(图1)指固定在岸边或放置于陆地上的围隔装置,占用空间小,结构简单,便于操控,主要应用于中小型水域的生态研究。Jacobsen 等(1997)在开展肉食性鱼类、滤食性鱼类、浮游动物和沉水植物间相互关系的研究时,将围隔设置在 Stigsholm 湖的西南岸边,围隔由塑料材料制成并用木桩固定,既使该生态系的环境条件与自然状态相同,也避免了湖水长期浸泡的损耗,提高了装置的使用效率。Heath 等(1993)则用抛锚固定的方式将4个围隔固

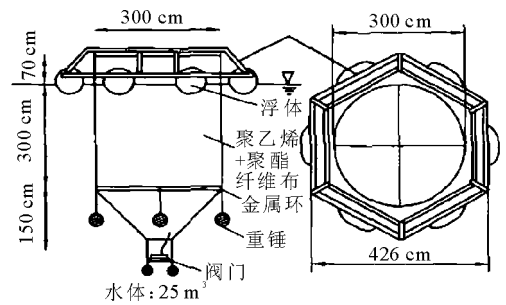


图3 船基围隔示意(李瑞香等,2003)

Fig. 3 Schematic view of enclosure, used by Li et al.

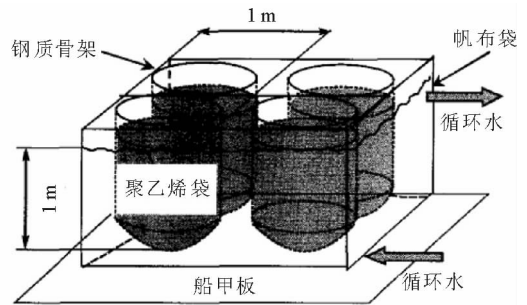


图4 船基围隔示意(宋国栋等,2008)

Fig. 4 Schematic view of enclosure, used by Song et al.

定在岸边,进行斑马贻贝(*Dreissena polymorpha*)的养殖生态学研究,对不同密度条件下斑马贻贝对水化、浮游植物群落、水体营养水平等的影响进行了讨论,证实了养殖斑马贻贝会使水质条件恶化;Fahnenstiel 等(1995)也通过3年(1990-1993)的取样观察得出了类似的结论。为了研究蓝藻暴发时水柱与沉积物之间磷元素的交换情况,Xie 等(2003)在湖边设置了由不透水的聚丙烯织布构成的8个封底的方形围隔,研究得出底泥中磷的释放可能是导致藻类光合速率骤然增强和pH值升高的主要原因。唐森铭等(1995)把容积约1.7 m<sup>3</sup>的玻璃钢桶作为围隔装置,并把它们放置在陆基水池中进行生态模拟试验,研究了水体扰动影响赤潮浮游植物种类演替的机制;该装置透光性强,材料坚固耐用,适合于海水等具腐蚀性水体的长期模拟试验。

### 1.3 现场围隔的特点

1.3.1 能较为真实地模拟自然水环境 首先,由于制作围隔的材料大多为半透明材质,而且上方开口,为半开放的试验系统,使其能够与外界(大气环境或循环水)有一定的物质和能量交换。李德尚等(1993)自行设计了一种适于内陆水域生态试验的新式浮式围隔,围隔袋由高密度涂塑聚乙烯编织布缝合而成,呈圆筒形,上端固定在浮架上,下端由底盘封闭,以增大围隔袋的抗拉力,围隔垂直悬浮在水中;该围隔透光性较好,在为期34 d的试验中,通过

测量试验开始和结束时围隔内照度,并与水库中水柱相比,结果表明试验开始时围隔中不同水层的最大遮光率为26.7%,结束时为33.3%;分析后得知试验结束时遮光率增大的主要原因是围隔壁上生长了附生生物;而该围隔中叶绿素浓度在试验期间能够基本保持稳定,表明现场围隔试验一般不会对其中栖息的生物的生长造成不良影响,因而可以更有效地模拟自然水体的环境条件。

其次,围隔一般设置在自然水体内部或附近,其内部环境条件和水体理化因子与自然条件更加接近。在一些研究中发现,设置在自然水体中的围隔其内外水体中的各种因素差异非常小,变化不明显。李德尚等(1998)设计了一种适用于池塘养殖和生态研究的方形陆基围隔,该围隔幔为涂塑高密度聚乙烯编织布材料,固定在由木桩和青竹组成的正方形支架上,围隔上端直接开口,下端深埋进泥层中,构成一个半封闭的生态系统;经过对比围隔内外水体中主要环境因子的昼夜变化后发现:围隔内外的水温、DO和pH等参数的变动规律基本一致,COD和铵态氮的平均值比较接近且差异不显著。兰智文等(1993)在巢湖水域利用围隔模拟了自然水环境,并在其中开展了磷的阈值浓度研究,为期20d的围隔试验,发现围隔内外水体中DO、pH、透明度等因素差异甚小,无显著的变化,再次印证了围隔系统能够较好地模拟自然水环境。

1.3.2 能够进行生态系统水平的研究,实用性强与自然生态系统相比,现有的各种围隔结构简单,规模小,制作代价小,试验投资较小,适合在同一批次的试验中设置较多的处理水平和重复,使得试验结果更为精确科学。Domaizon & Devaux(1999)在法国的一个富营养化水库中同批设置了28个围隔,均由透明的玻璃纤维制成,直径1.8m,高2.2m,容积为5500L,用来研究不同放养密度的鲢对浮游植物群落和水质的影响;试验设计了5个鲢密度梯度,并且每个梯度有3个重复试验,充分利用了围隔试验的特点,从而取得了完整可靠的试验数据。Schriver等(1995)在一个富营养化的浅水湖中设置了18个大小为 $100\text{ m}^3$ 的围隔,研究了沉水植物、浮游动物和浮游植物对水体营养物质的代谢能力,发现大型水生植物的有无并不影响围隔内的氮磷含量,而浮游动植物的代谢和吸收才是导致水体营养水平发生变化的要素。王嵩等(2009)在天津于桥水库建立了10个 $300\text{ m}^3$ 的大型围隔,分别放养不同密度的鲢或鳙,共5个处理组,每处理组设置2个重复,进

行生物控藻试验;通过分析各个处理组中浮游生物组成和生物量的变化,发现鲢鳙可以将围隔内的蓝藻比例控制在低位水平,而水体中的小型藻类却大量生长,使得藻类总生物量、叶绿素a等升高;由此得出结论:鲢鳙适用于控制蓝藻水华,但不适于抑制藻类数量的增长。

围隔一般形状规则,便于控制和管理,以及观察生态系统整体对人为活动(如营养盐输入、生物调控等)的反应,为开展在室内和自然水体中很难实现的试验提供了条件。Oviatt等(1995)利用围隔对影响浮游植物初级生产力的限制性营养元素进行了讨论,通过向围隔内分别添加氮、磷元素或同时添加二者的混合物观察浮游植物生物量的变化、初级生产力以及夜间呼吸强度;9周后经取样检测发现氮元素是影响初级生产力的最关键因素。为了印证“滤食性鱼类对于贫营养水体中浮游生物的作用比富营养水体明显”这一假说,Drenner等(1996)设计了2组围隔试验,其中水体所含有的营养状况不同,分别加入5种密度的滤食性鱼,观察整个围隔生态系统中总磷、初级生产力、叶绿素含量、结合态磷量和透明度等的变化,通过分析模拟自然状态下水体的变化规律,最终取得了支持这一假说的有力证据。

## 2 现场围隔研究进展

### 2.1 研究历史

试验用围隔最早出现于20世纪60年代初,Strickland等(1961)首次使用球形塑料围隔模拟自然水体生态系,并对浮游植物的初级生产力进行了研究。60年代中期,海洋污染问题日趋严重,科学家们想到利用围隔装置探究污染物对海洋生态系的影响机制(吴宝铃和李永祺,1983)。美国学者利用可控生态系污染试验(Controlled Ecosystem Pollution Experiment,简称CEPEX)探讨了污染物的加入对围隔生态系结构以及功能的影响(Harrison & Turpin, 1982)。此后,围隔试验又被用于探索浮游生物、鱼类、虾类、沉积物以及微生物(Lampert et al, 1986; Arumugam & Geddes, 1986; Maclean & Aug, 1994; Mazumder et al, 1989; Pace & Funke, 1991)等各种水体生态因子组成及其功能。在我国,围隔试验起初主要用于海洋生态学研究(陈其焕等,1988)。在淡水水域中,史洪芳等(1992)首次将陆基围隔运用到养殖生态学研究,李德尚等(1994)在水库中使用浮式围隔对投饵网箱养鱼的负荷力进行了研究。

最近20年,围隔试验在水域生态研究中得到了

更加广泛的应用,主要用于污染生态学、养殖生态学方面的研究;Mazumder等(1990)利用围隔试验探讨了鱼类和浮游生物与湖水温度、混合深度(湖面到变温层的深度)的相互关系,进行了水生动物活动对水化学指标影响的研究;Dejenie等(2009)、刘建康等(1999)分别利用围隔试验探讨了墨头鱼(*Garra*)、鲢鳙控制蓝藻水华暴发的机制;宋玉芝等(2009)探讨了围隔内的附着生物对富营养水体中氮磷元素的去除作用;陈开宁等(2006)使用大型围隔对五里湖南岸水域进行了生态重建。Meeren(1997)总结了围隔试验在海洋鱼类养殖生态学研究方面的应用情况,指出围隔系统具有成本低、稳定性高等特点,目前被广泛地应用于幼鱼饵料生产以及大西洋鲱、比目鱼等经济鱼类的养殖产业当中。

## 2.2 围隔的改进

在围隔试验法得到逐步推广的同时,国内外学者发现了试验装置的不足,并对围隔的设计进行了不断完善,以更大程度模拟原位生态环境,缩小围隔内外生态环境的差距。例如:李德尚等(1998)以及Drenner(1986)等在自行设计的围隔中添加了搅水机,实现了水体的流动,用于模拟自然水域中的涡动与混合,以防止在无风或者小风天气时围隔内水温垂直分布不均匀及底层水体溶氧不足的情况。在进行船基围隔试验时,由于围隔一般置放在甲板上,围隔内的水体难以模拟自然水体中的能量交换过程,为解决这一问题,李瑞香等(2003)将围隔放入钢架中,周围系上具有出水孔的帆布袋,用潜水泵将海水泵入帆布袋内使之循环,以保持围隔内水温与海里一致。由于岸基围隔需要放入自然水体中,且大多为聚乙烯、尼龙材料制成,遭遇风浪或长时间使用会导致围隔破损,为加强围隔袋的抗风浪能力,兰智文等(1993)将围隔袋套放在用尼龙缝制而成的圆柱形袋内,尼龙袋外面再套一层聚氯乙烯线织成的网袋,以缓冲风浪的冲击,减少水的腐蚀,同时使围隔内装入的水量不至超过容积的80%,防止了被风浪打破。还有一些学者在围隔的材料和灌水方式等方面进行了改进,提高了围隔的透明度和取水的均衡度(Fahnenstiel et al, 1995;李瑞香等, 2001),进一步提高了围隔的科学性、实用性。

## 3 展望

现场围隔试验作为一种实用有效的方法,目前在水域生态学的研究中得到了广泛的应用,其真实性、实用性、高效性得到了业内专家的认可。随着研

究内容的深入和科研手段的多样化,现场围隔试验也将得到进一步的发展,科学家们可以按照试验需求设计围隔装置,拓展该试验方法的使用范围,推进现场围隔试验朝着多样化、实用化方向发展。

### 3.1 围隔装置的多样化

在水域生态学研究,研究对象形式各异,水文特征、地理环境等外界条件也相差甚远,因此在设计围隔时,需要因地制宜,根据不同的实际情况设置围隔装置。目前使用的围隔由于自身设计或安放条件等原因,并不完全适用于所有水体。今后可就被试水体的流速、风浪、水深、岸基等因素进行研究,设计出适于多种试验条件的围隔装置。

由于研究手段的不断进步以及不同学科间的交互影响,围隔试验不仅在形式上会有所发展,其功能也将出现多元化,从而克服该试验方法现存的一些缺点,进一步提高工作效率。例如,围隔在长时间使用后,围隔幔内壁会粘附大量浮游藻类等污浊物,严重影响其透光性,只能通过人工清洗或更换的方法解决,耗费大量人力物力;在今后的围隔设计中,可以采用不易粘附的新型围隔幔材料,以及安装定时清洁装置等方法,减少类似情况对围隔试验的影响。另外,围隔系统内也可加设实时检测设备,及时获取试验水体内的动态信息,便于试验数据的采集和统计,同时也能对围隔内部出现的问题做出快速准确的反应,并加以解决。

### 3.2 围隔试验的实用化

围隔试验之所以得到广泛的应用,与其方便实用的特点分不开,但在实际操作中围隔装置还存在一些问题,需要在今后的实践中不断加以完善。首先,大多围隔试验装置造价过高,且多为薄膜、玻璃等制成,较易损坏,不便于运输储存,对围隔方法的推广普及带来了一定的困难。新型围隔幔制作材料的开发将是今后围隔发展的工作重点,如果在这方面取得实质性突破,将对围隔方法乃至水域生态学研究产生深远影响。其次,由于围隔装置需要放置在野外或开放式环境中,看管维护工作存在一定难度,实际运用中可能会出现意外破损、丢失、重复利用率不高等现象,因此在围隔的设计中应增加安全措施,并加强监管维护。另外,部分围隔的组装方法过于繁琐,零部件连接不牢固等,都需要在今后的研究中加以改善。可合理使用建筑废料、工厂弃材等制作围隔支架、浮力装置,以节约成本,达到节能和环保的良好效果。

## 参考文献

- 陈开宇,包先明,史龙新,等. 2006. 太湖五里湖生态重建示范工程——大型围隔试验[J]. 湖泊科学,18(2): 139-149.
- 陈其焕,吴省三,庄亮钟. 1988. 重金属对海洋围隔生态系中初级生产力的影响[J]. 海洋学报,10(2): 222-227.
- 陈尚,朱明远,马艳,等. 1999. 富营养化对海洋生态系统的影响及其围隔试验研究[J]. 地球科学进展,14(6): 571-576.
- 兰智文,赵鸣,尹澄清. 1993. 围隔模拟生态系统中藻类生长的磷酸盐浓度阈值研究[J]. 水生生物学报,17(1): 95-97.
- 李德尚,熊邦喜,李琪,等. 1993. 一种适于内陆水域生态试验用的浮式围隔[J]. 海洋与湖沼,24(5): 547-552.
- 李德尚,熊邦喜. 1994. 水库对投饵网箱养鱼的负荷力[J]. 水生生物学报,18(3): 223-229.
- 李德尚,杨红生,王吉桥,等. 1998. 一种池塘陆基试验围隔[J]. 青岛海洋大学学报,28(2): 199-204.
- 李瑞香,朱明远,陈尚,等. 2001. 围隔生态系内浮游植物对富磷的响应[J]. 生态学报,21(4): 603-607.
- 李瑞香,朱明远,王宗灵,等. 2003. 东海两种赤潮生物种间竞争的围隔试验[J]. 应用生态学报,14(7): 1049-1054.
- 林昱,庄栋法,陈孝麟,等. 1994. 初析赤潮成因研究的围隔试验结果——几个理化因子与硅藻赤潮的关系[J]. 海洋与湖沼,25(2): 139-145.
- 刘建康,谢平. 1999. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境,8(3): 312-319.
- 史洪芳. 1992. 池塘天然及施肥、投饵鱼产力的研究[J]. 淡水渔业,5(1): 1-10.
- 宋国栋,石小勇,侯继灵,等. 2008. 铁对浮游植物吸收营养盐的围隔试验初步研究[J]. 海洋与湖沼,39(3): 209-216.
- 宋玉芝,秦伯强,高光. 2009. 附着生物对富营养化水体氮磷的去除效果[J]. 长江流域资源与环境,18(2): 180-185.
- 孙凌,金相灿,扬威,等. 2007. 硅酸盐影响浮游藻类群落结构的围隔试验研究[J]. 环境科学,28(10): 2174-2179.
- 唐森铭,林昱,陈孝麟,等. 1995. 围隔体内赤潮对扰动的反应[J]. 海洋与湖沼,26(1): 7-12.
- 王嵩,王启山,张丽彬,等. 2009. 水库大型围隔放养鲢鱼、鳊鱼控藻的研究[J]. 中国环境科学,29(11): 1190-1195.
- 吴宝铃,李永祺. 1983. 围隔式海洋试验生态系研究近况[J]. 海洋科学,(2): 44-47.
- Arumugam P T, Geddes M C. 1986. An enclosure for experimental field studies with fish and zooplankton communities [J]. Hydrobiologia,135(3): 215-221.
- Chen K N, Bao C H, Zhou W P. 2009. Ecological restoration in eutrophic Lake Wuli: A large enclosure experiment [J]. Ecological Engineering, 35: 1646-1655.
- Dejenie T, Asmelash T, Rousseaux S, et al. 2009. Impact of the fish *Garra* on the ecology of reservoirs and the occurrence of *Microcystis* blooms in semi-arid tropical highlands: an experimental assessment using enclosures [J]. Freshwater Biology, 54(8): 1605-1615.
- Domaizon I, Devaux J. 1999. Experimental study of the impacts of silver carp on plankton communities of eutrophic Villerest reservoir (France) [J]. Aquatic Ecology, 33: 193-204.
- Drenner R W, Smith J D, Threlkeld S T. 1996. Lake trophic state and the limnological effects of omnivorous fish [J]. Hydrobiologia, 319: 213-223.
- Drenner R W, Threlkeld S T, Mccracken M D. 1986. Experimental Analysis of the direct and indirect effects of an Omnivorous filter-feeding clupeid on plankton community structure [J]. Canadian Journal of Fish Aquatic Sciences, 43(10): 1935-1945.
- EGGE J K, AKSNES D L. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition [J]. Marine ecology progress series, 83: 281-289.
- Fahnenstiel G L, Lang G A, Nalepa T F, et al. 1995. Effects of Zebra Mussels (*Dreissena polymorpha*) colonization on water quality parameters in Saginaw Bay, Lake Huron [J]. Journal of Great Lakes Research, 21(4): 435-448.
- Fulton R S. 1984. Predation, production and the organization of an estuarine copepod community [J]. Journal of Plankton Research, 6(3): 399-415.
- Goldsborough L G, Robinson G G C, Gurney S E. 1986. An enclosure/substratum system for in situ ecological studies of periphyton [J]. Archiv fur Hydrobiologie, 106(3): 373-393.
- Harrison P J, Turpin D H. 1982. The manipulation of physical, chemical and biological factors to select species from natural phytoplankton communities [C]//GRICE G D, REEVE M R. Marine Mesocosms: Biological and Chemical Research In Experimental Ecosystems. New York: Springer-Verlag: 275-289.
- Heath R T, Fahnenstiel G L, Gardner W S, et al. 1993. Ecosystem-level effects of Zebra Mussels (*Dreissena polymorpha*): an enclosure experiment in Saginaw Bay, Lake Huron [J]. Journal of Great Lakes Research, 21(4): 501-516.
- Heiskanen A, Tamminen T, Gundersen K. 1996. Impact of planktonic food web structure on nutrient retention and loss from a late summer pelagic system in the coastal northern Baltic Sea [J]. Marine Ecology Progress Series, 145: 195

-208.

- Hernandez P, Ambros R B, Prats D, et al. 1997. Modeling eutrophication kinetics in reservoir microcosms [J]. *Water Research*, 31(10): 2511-2519.
- Jacobsen L, Perrow M R, Landkildehus F, et al. 1997. Interactions between piscivores, zooplanktivores and zooplankton in submerged macrophytes: preliminary observations from enclosure and pond experiments [J]. *Hydrobiologia*, 342/343: 197-205.
- Lampert W, Fleckner W, Rai H, et al. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase [J]. *Limnology and Oceanography*, 31(3): 478-490.
- Landers D H. 1979. A durable, reusable enclosure system that compensates for changing water levels [J]. *Limnology and Oceanography*, 24(5): 991-994.
- Maclean M H, Aug K J. 1994. An enclosure design for feeding and fertilization trials with the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man) [J]. *Aquaculture*, 120: 71-80.
- Mazumder A, Taylor W D, Mcqueen D J, et al. 1990. Effects of fish and plankton on lake temperature and mixing depth [J]. *Science*, 247:312-315.
- Mazumder A, Taylor W D, Mcqueen D J, Lean D R S. 1989. Effects of fertilization and planktivorous fish on epilimnetic phosphorus and phosphorus sedimentation in large enclosures [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(10): 1735-1742.
- Oviatt C, Doering P, Nowicki B, et al. 1995. An ecosystem level experiment on nutrient limitation in temperate coastal marine environments [J]. *Marine ecology progress series*, 116:171-179.
- Pace M L, Funke E. 1991. Regulation of planktonic microbial communities by nutrients and herbivores [J]. *Ecology*, 72(3): 904-914.
- Schindler D W. 1997. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwaters [J]. *Limnology and Oceanography*, 23(3): 478-486.
- Schriver P, Bøgestrand J, Jeppesen E, et al. 1995. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton-phytoplankton interactions: large-scale enclosure experiments in a shallow eutrophic lake [J]. *Freshwater Biology*, 33:255-270.
- Shapiro J, Lammara V, Lynch M. 1975. Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration [C]//BREZONIK P L, FOX J L. *Proceedings of a Symposium on Water Quality Management through Biological Control*. University of Florida: Gainesville: 85-96.
- Strickland J D H, Terhune L D B. 1961. The study of in situ marine photosynthesis using a large plastic bag [J]. *Limnology and Oceanography*, 6: 93-96.
- Tzaras A, Pick F R, Mazumder A, et al. 1999. Effects of nutrients, planktivorous fish and water column depth on components of the microbial food web [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 19: 67-80.
- van der Meeren T, Naas K E. 1997. Development of rearing techniques using large enclosed ecosystems in the mass production of marine fish fry [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 5(4):367-390.
- Xie L Q, Xie P, Li S X, et al. 2003. The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? [J]. *Water Research*, 37: 2073-2080.
- Xie L Q, Xie P, Tang H J. 2003. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake [J]. *Environmental Pollution*, 122:391-399.

(责任编辑 张俊友)