

兰晨 陈敬安 曾艳 等. 深水湖泊增氧理论与技术研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(10): 1172-1181, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.10.1172. [Lan Chen, Chen Jing'an, Zeng Yan, et al. Advances in oxygenation theory and technology in deep lakes[J]. Advances in Earth Science 2015, 30(10): 1172-1181, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.10.1172.]

## 深水湖泊增氧理论与技术研究进展\*

兰晨<sup>1,2</sup> 陈敬安<sup>1\*</sup> 曾艳<sup>1</sup> 郭建阳<sup>1</sup> 张润宇<sup>1</sup>,  
王敬富<sup>1</sup> 杨海全<sup>1,2</sup> 计永雪<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 深水湖泊由于自身物理结构特性, 易形成垂直热分层。温跃层阻碍了上层水体中氧气向下转移, 使得深水层长期处于缺氧状态, 加速了沉积物内源污染物的释放, 并导致湖泊水质恶化。利用增氧技术提高深水湖泊水体氧含量是抑制内源污染物释放、改善湖泊水质的一项有效措施。系统论述了国内外深水湖泊增氧方法与原理, 深入剖析了人工去分层增氧技术、气体提升增氧技术、Speece 锥形增氧技术和气泡羽流扩散增氧技术等 4 种主要增氧技术的结构与优缺点, 介绍了典型深水湖泊增氧技术应用实例研究进展, 对比分析了主要深、浅水增氧系统的差异, 提出了目前增氧技术存在的主要问题, 并对未来研究方向进行了展望。

**关键词:** 深水湖泊; 沉积物; 增氧技术; 曝气; 水质

中图分类号: P343.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2015)10-1172-10

深水湖泊由于自身物理结构特性, 易于形成垂直热力学分层, 即在水下若干米的深度存在温跃层。温跃层把水体分为上部的混合层、中部的突变层及下部的静水层。上部混合层与下部静水层各项化学指标与生物构成截然不同。除季节性的上下交换外, 一般上、下层水体不发生大的交换。通常, 我们把水体存在明显温跃层的湖泊称为深水型湖泊, 其水深一般大于 10~15 m。

湖泊表层水体产生的藻类等有机质不断沉降至深层水体, 伴随着有机质降解等耗氧过程, 下层水体溶解氧含量逐步下降, 从而导致深层水体处于缺氧状态。在深水湖泊中, 温跃层的形成阻碍了上层水体中氧气向下转移, 下部静水层缺氧情况更为严重(溶解氧<2 mg/L)。深水湖泊一旦形成严重缺氧环境, 就会形成“下层水体缺氧→沉积物磷等内源污

染物释放增强→湖泊初级生产力提高→下层水体缺氧加剧”的正反馈效应, 湖泊水质将明显恶化, 主要表现为水体富营养化加剧、有毒气体硫化氢含量超标、有害重金属含量超标等<sup>[1,2]</sup>, 危害水生态系统, 危及饮用水安全。近年来, 因下层水体缺氧所导致的突发性水质恶化事件时有发生<sup>[3]</sup>。

深水湖泊底层水增氧对改善湖泊水质与生态系统具有重要意义, 主要体现在: ①抑制沉积物磷和重金属释放。沉积物正磷酸盐的释放过程主要包括还原条件下铁结合态磷的释放以及微生物新陈代谢释放磷等, 并同时伴随着沉积物中铁、锰、汞等重金属的释放。湖泊底层水及沉积物—水界面增氧可有效抑制沉积物磷和重金属释放, 改善湖泊水环境状况。②减少系统中氮含量。好氧条件不仅对硝化反硝化脱氮反应有刺激作用, 而且会刺激细菌生长, 增加氮

收稿日期: 2015-05-12; 修回日期: 2015-08-26.

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目“山区深水型湖泊沉积物内源磷释放的磷酸盐氧同位素示踪研究”(编号: 41173125) 资助。

作者简介: 兰晨(1988-), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事水环境科学研究, E-mail: lanchen12345@126.com

\* 通讯作者: 陈敬安(1973-), 男, 湖北麻城人, 研究员, 主要从事湖泊环境与全新世气候变化研究, E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn

同化率,减少系统中氮含量。③为水体生物提供良好的生存环境并增加生物多样性。冷水鱼类夏天较适宜生存在溶解氧充足的湖底,湖底增氧能减少缺氧环境对冷水鱼类和一些无脊椎动物分布和生长的影响,且随着水体中浮游动物生存环境的不断改善,水体生物多样性将会增加。④降低水处理成本。还原性化合物与硫化氢会使水质出现色、嗅、味方面的问题,增加水处理成本。因此,维持湖底好氧环境可降低水处理成本。⑤减少二次污染。缺氧条件下水体中含有大量还原性化合物,处理该类化合物将增加饮用水水处理设备中氧化剂(如液氯)的投加量,过度的氧化剂消耗会形成消毒副产物,造成二次污染,影响人体健康。一般认为,当深水层溶解氧浓度低于 3 mg/L 时就需实施深水层增氧。

自 20 世纪 40 年代起,国外已有学者开始对深水湖泊的增氧理论和技术进行研究。我国近些年才有学者陆续开展这方面研究,总体上尚处于起步阶段。本文阐述了深水湖泊增氧方法及原理,系统分析总结了国内外深水湖泊增氧理论与技术的研究进展,介绍了典型深水湖泊增氧技术应用实例,进行了主要深、浅水增氧系统的综合对比,分析了该领域存在的主要问题。

## 1 深水湖泊增氧原理

1949 年 Mercier 等<sup>[4]</sup>研发的增氧系统是世界上最早的增氧系统之一,其利用水泵将湖底缺氧水抽至湖面完成对湖泊水体增氧,原理类似机械搅拌。1973 年 Fast 等<sup>[5]</sup>利用侧流泵将深水层缺氧水吸至岸边的氧气输出管中进行增氧,富氧水被直接注射回原深水层(Side Stream Pumping Systems),这是世界上最早被报道的深水层增氧工程应用案例之一。随着后人对深水层增氧原理及技术的不断研究和改进,在增氧方式上又陆续出现了深水层注氧系统<sup>[6]</sup>(Deep Oxygen Injection Systems)以及淹没式接触室增氧系统<sup>[7]</sup>(Submerged Contact Chamber Systems)。

目前,世界上最常见的深水湖泊增氧原理主要有 3 种:①上下层水体混合增氧(Water mixing);②深水层直接注射空气增氧(Hypolimnetic aeration);③深水层直接注射氧气增氧(Hypolimnetic oxygenation)。Beutel 等<sup>[8]</sup>系统总结了不同增氧方法的优缺点(表 1)。

### 1.1 上下层水体混合增氧

上下层水体混合增氧是最简单也是最经济的增氧方法。这种方法的原理是当湖泊密度分层非常微

表 1 深水湖泊不同增氧方法的对比<sup>[8]</sup>

Table 1 Comparison of various deep lake/reservoir aeration approaches<sup>[8]</sup>

评价指标	上下层	利用空气	利用纯氧
	水体混合	湖底增氧	湖底增氧
气源	空气	空气	氧气
增氧效果	低	低	高
去分层潜力	高	中	低
技术前沿性	低	较低	高
操作便捷性	低	较低	高
湖底环境氧需求性	高	中	低
湖底温度	高	中	低
氮气过饱和度	低	中	低
湖底得到的溶解氧	中	低	高
对冷水鱼类的影响	高	低	无
对热水鱼类的影响	低	低	低

弱时,给湖泊增加额外的能量,使得上下层水体能够相互混合交换,从而改善湖泊下层水体的缺氧环境。

### 1.2 深水层直接注射空气增氧

以空气作为气源,在高压状态下将空气输送至放置在湖底的增氧装置中,被输送的空气经过增氧装置均匀分配,最终被喷射进入周围缺氧水体中。喷射空气中氧气的不断溶解直接补充了深水层缺氧水体的溶解氧。

### 1.3 深水层直接注射氧气增氧

以气氧或者液氧作为气源,在高压状态下将纯氧输送至放置在湖底的增氧装置中,被输送的氧气经过增氧装置均匀分配,最终被喷射进入周围缺氧水体中。此方法喷射的是纯氧,因而对深水层的增氧效果较好。

## 2 深水湖泊增氧技术研究进展

目前应用较多的深水湖泊增氧技术主要有 4 种(图 1):①人工去分层增氧技术(Artificial destratification);②气体提升增氧技术(Airlift aerators),分为全气体提升(Full-Lift aerators)和半气体提升(Partial-lift aerators) 2 种;③ Speece 锥形增氧技术(Speece cone);④气泡羽流扩散增氧技术(Bubble-plume diffusers),分为线型(Linear Diffusers)和环型(Circular Diffusers) 2 种。人工去分层增氧技术是根据上下层水体混合增氧原理研发出的一种单气源深水层增氧技术;气体提升增氧技术是根据深水层直接注射空气增氧原理研发出的一种单气源深水层增氧技术;Speece 锥形增氧技术是根据深水层直接注射空气增氧原理研发出的一种单气源深水层增氧技术;气泡羽流扩散增氧技术是结合深水层直接注



图 1 湖泊增氧技术分类

Fig. 1 Classification of primary lake/reservoir aeration techniques

射空气增氧原理和深水层直接注射氧气增氧原理研发出的一种双气源深水层增氧技术。

### 2.1 人工去分层增氧技术

人工去分层又分为间歇性人工去分层和持续性人工去分层。人工去分层系统一般由岸上气源、安置在湖底的打孔粗管或沿程安置在湖底的扩散器组成(图 2)。通过向打孔粗管或扩散器内注射压缩空气形成上升气泡,引起垂直方向气水混合,阻止热分层形成。热分层的去除将对水体中溶解氧进行重新分配。上下层水体混合、湖泊表面氧溶解以及湖底注射压缩空气共同完成对湖底溶解氧的补充。人工去分层简单且经济,但由于此技术氧传递效率较低,且会影响底部冷水鱼类及适应低温环境的水生生物生长,因而往往将其与其他增氧技术分季节联用<sup>[9]</sup>而不单独采用。Gafsi 等<sup>[9]</sup>认为间歇性去分层比永久性去分层的增氧效果更好。

### 2.2 气体提升增氧技术

气体提升增氧技术包括全提升增氧和半提升增

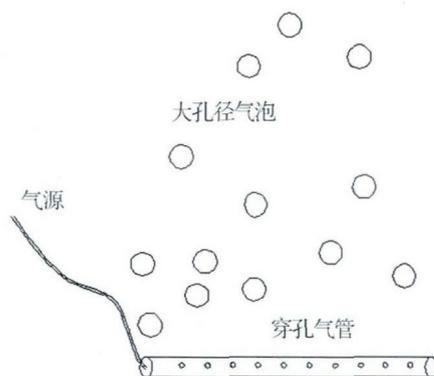


图 2 人工去分层增氧技术

Fig. 2 Artificial destratification

氧<sup>[10]</sup>。提升增氧系统典型结构如图 3 所示,主要包括:①竖直上升管;②上升管底部内侧扩散器;③气水分离室;④回流室(或 1~2 根下水导管);⑤排空管(半提升)。半提升增氧系统是往深水层增氧扩散器中注射压缩空气,扩散器中压缩空气释放并与水混合形成上浮气水混合物,这些气水混合物通过一根竖直管状物被提升至湖中指定深度,到达气水分离室后未溶解的气体通过管状物顶部一根连接至液面的排空管排出至大气中,富氧水体经过回流室(或下水导管)由上往下回流至深水层。全提升系统与半提升系统结构大部分相似,主要区别是全提升系统气水分离室设计在湖面附近,没有排空管,气水分离室直接与大气相通,当气水混合物上升至顶部的时候,混合物被直接提升至湖面,未溶解气泡将直接释放到大气中(部分气体或被夹带回水中),富氧水通过回流室(或下水导管)回到深水层。气泡初始尺寸直接决定初始传质系数及初始气泡上升流速,若初始气泡尺寸过大,气泡中气体不会快速溶解,将导致气体在上升管中积累,对应深度气含率上升,增氧效果降低。

### 2.3 Speece 锥形增氧技术

Speece 锥形增氧系统是由 Speece<sup>[6]</sup>最先研发的一种淹没下流式气泡混合器(图 4)。该系统主要包括:①氧气源;②潜水泵;③锥形接触室;④一根向深水层喷射氧气的扩散器。周围的水体和纯氧被一同注入锥形接触室顶部,当水体向下流进圆锥形接触室时,随着空间面积不断增大,水体流速将不断降低,接触室底部水流下降速度小于气泡上升速度保证了充足的气水质传质时间,水流量及锥形接触室空间面积共同限制了水流速度。由于该系统为下流式

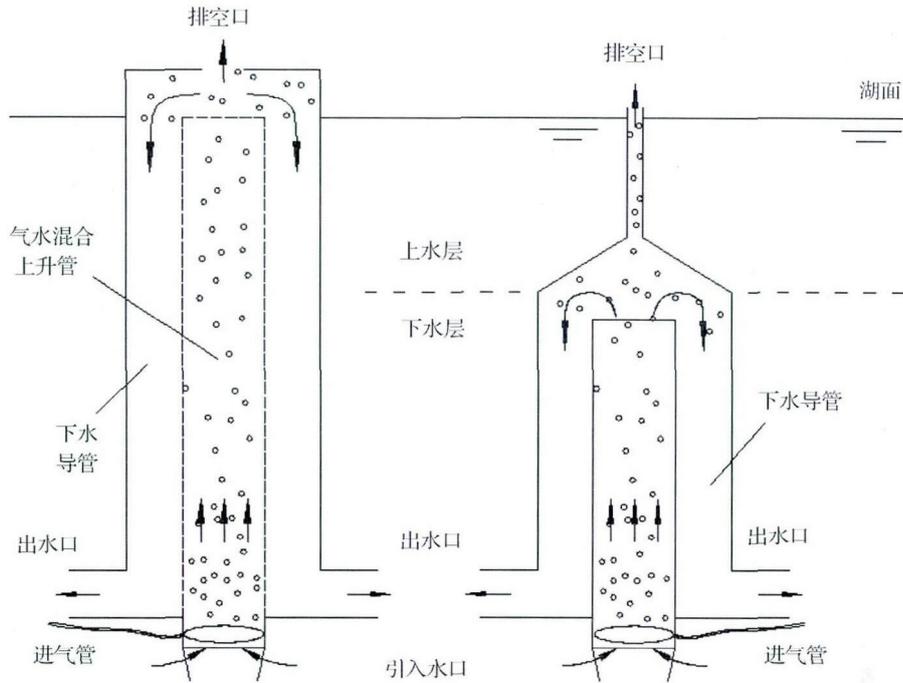


图 3 全气体提升增氧技术和半气体提升增氧技术  
 Fig. 3 Full-lift aerators and partial-lift aerators

增氧系统,为保证下流水体和下流气泡有充分、合理的接触时间,系统对氧流量和水流量的控制要求较高。水流量和氧流量会直接影响所预测气含率的准确性和有效性,水流量增加或氧流量降低,气含率都将降低<sup>[11]</sup>。

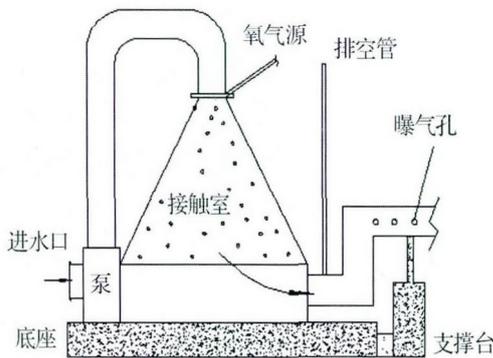


图 4 Speece 锥形增氧技术  
 Fig. 4 Speece Cone

### 2.4 气泡羽流扩散增氧技术

气泡羽流模型最早由 Wuest 等<sup>[12]</sup>于 1992 年提出,之后该模型逐渐被应用于扩散器增氧技术。气泡羽流扩散器系统一般由岸上气源(空气或氧气)和一根(或多根)放置在湖底并带有许多小孔的管状发射器组成(图 5)。管状发射器可根据待增氧湖

泊的地形结构排成环型或线型。气体从打满小孔的管状发射器中喷射出来,这种喷射形成的气水混合物被称作羽流。在上升气泡群的带动下,下层缺氧水在垂直方向上不断逆密度梯度上升,到达羽流上升最大高度时停止,此时羽流动量为零。此后富氧水下降回归至与自身密度几乎一致的平衡深度水体环境中,并向四周网状驱散流动至远处水体。此技术中足够小的气泡不但不会影响水体热分层,同时还能加快内部气体传质,加速气体溶解速度,提高氧转移效率。气泡半径决定羽流上升高度,气泡越小,表体比越大,气泡在水中溶解越快;气泡越小,上升速度越低,和水体接触时间越长,保证了上升气泡与水体的接触时间。单位流量下,气泡越小,速度越慢,引起的浮力越大且越持久,羽流越高。

McGinnis 等<sup>[13]</sup>将气体提升增氧、羽流扩散增氧、Speece 锥形增氧等 3 种主要增氧系统同时运用于 Standley 湖中,在同环境条件下进行对比增氧实验。研究表明,羽流扩散技术在这 3 种增氧技术中最经济且最简单;半提升增氧技术氧转移效率最低(16%),Speece 锥形增氧技术与羽流扩散技术氧转移效率分别为 94% 和 93%,但由于 Speece 增氧技术对水流要求较高,不易控制,因而性价比不及羽流扩散增氧技术。

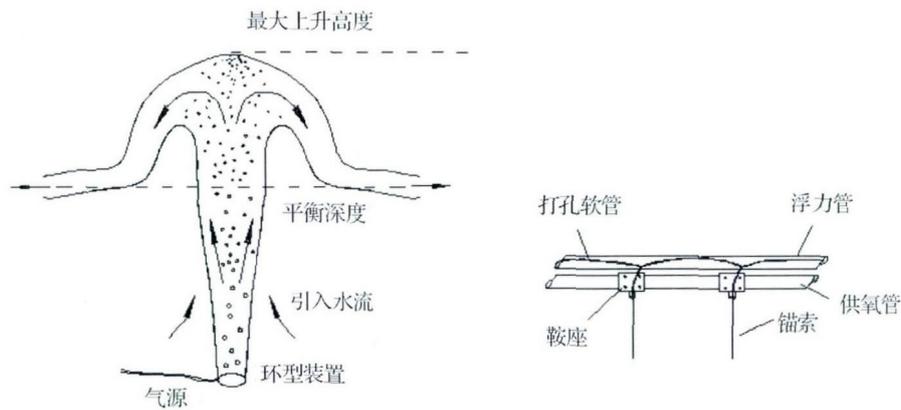


图 5 环型气泡羽流扩散增氧技术和线型气泡羽流扩散增氧技术  
Fig. 5 Circular bubble-plume diffusers and linear bubble-plume diffusers

### 3 湖泊增氧技术应用实例

我国湖泊科学最初的研究重点主要集中在湖泊综合调查和湖泊资源开发利用方面,进入 21 世纪之后,随着社会经济快速发展,湖泊生态环境不断恶化,尤其是湖泊富营养化问题日趋严重,湖泊科学关注的重点逐渐转移到湖泊生态环境退化和修复的理论与实践<sup>[14]</sup>。我国近些年才有学者陆续开展对深水湖泊增氧理论和技术方面的研究,比国外滞后近半个世纪。目前,在此研究领域国内仅有很少的几个研究团队在开展相关理论与技术的研究,总体尚处于起步阶段,已报道的国内深水湖泊增氧案例也很少。湖泊增氧技术应用案例仍然主要集中在国外。

在上述 4 种深水湖泊增氧技术中,目前国外实际应用较广的是气体提升增氧技术、Speece 锥形增氧技术和气泡羽流扩散增氧技术<sup>[15]</sup>,而国内应用的主要是人工去分层技术。人工去分层技术因简单和经济曾被大量使用,但低增氧效率、操作局限性以及对冷水鱼类生长的巨大影响严重制约了其在深水湖泊增氧领域的发展。

#### 3.1 人工去分层增氧技术应用实例

早在 20 世纪 60 年代,Teerink 等<sup>[16]</sup>就首先提出了人工去分层增氧技术的设想,随后 1973 年 Fast<sup>[17]</sup>在 Capitan 水库、1978 年 Tolland 等<sup>[18]</sup>在 Bingham 水库、1983 年 Steinberg<sup>[19]</sup>在 Iffeldorf 湖、1993 年 Hawkins 等<sup>[20]</sup>在 Solomon 水库先后将人工去分层增氧技术运用于实际湖泊治理工程中,系统开展了装置设计、装置安装和效果评价,对人工去分层增氧技术进行了机理研究和技术改进。

21 世纪初国内学者丛海兵等<sup>[21]</sup>在前人基础上

开发了扬水曝气技术。该技术能够混合上下水层,打破水体分层,将表层藻类向下层迁移,控制藻类数量,抑制藻类生长;该技术系统可以通过自身装置充氧和循环混合充氧改善湖下层水体缺氧状态和湖泊水质。2004 年丛海兵等<sup>[22]</sup>在国内北方某水源地对该技术进行应用研究,结果表明,该技术提水混合效率优良,较好地控制了表层藻类的生长;2010 年马越等<sup>[23]</sup>将扬水曝气技术运用于西安金盆水库中,结果表明,金盆水库季节性缺氧/厌氧状况得到了遏制,沉积物表层溶解氧浓度得到了提高,沉积物表层总磷、氨氮浓度有所削减。

#### 3.2 气体提升增氧技术应用实例

气体提升增氧系统早期是 3 种主要增氧系统(气体提升增氧、气泡羽流扩散增氧、Speece 锥形增氧)中使用最频繁的一种,但由于最初没有结合离散气泡法<sup>[24]</sup>使用,且主要以使用经验参数为主,许多关键性假设未被证实,许多学者对其进行了逐步完善。1977 年 Lorenzen 等<sup>[25]</sup>、1982 年 Taggart 等<sup>[26]</sup>、1985 年 Ashley<sup>[27]</sup>、1995 年 Little<sup>[10]</sup>先后将气体提升增氧技术应用于湖泊治理工程中,并进行了模型预测和实际治理效果验证监测,对气体提升增氧技术机理进行了剖析。1995 年 Del Vecchio 等<sup>[28]</sup>建立了第一个利用能量平衡预测气体提升技术水流量的模型,随后 Burris 等<sup>[29]</sup>拓展并证实了此模型。

此外,还有其他应用提升系统增氧技术给深水层水体增氧并取得良好或部分效果的工程实例,如 1983 年 Ashley<sup>[30]</sup>采用全提升系统对一个天然富营养化湖泊进行增氧,增加了沉积物表面溶解氧,减少了湖底的氮、磷含量,缓解了湖泊富营养化;1994 年 Soltero 等<sup>[31]</sup>在 Medical 湖分别安置了全提升和半提

升系统以改善水质,结果表明该技术增加了湖底溶解氧,降低了湖底氨氮和总磷浓度。

### 3.3 Speece 锥形增氧技术应用实例

早期增氧系统通常是采用空气作为气源,以氧气作为气源的 Speece 锥形增氧技术最早是由 Speece<sup>[32]</sup> 于 1969 年提出的,该技术增氧系统最初被定义为一种淹没式下流气泡接触反应室,当初其接触室为开放式。1971 年,Speece 等<sup>[33]</sup> 公布了设计系统的具体结构并开展了试验以验证其性能,之后 Speece 等<sup>[34]</sup> 对此技术进行了改进和优化,但一直未被应用于工程实践。1990 年,该技术再次被改进,由开放式接触室改为封闭式接触室,并在 Alabama 的 Logan Martin 大坝出口水域进行了区域性试验。1992 年在华盛顿 Newman 湖,首次正式运用 Speece 锥形增氧技术进行原位水质改善<sup>[35]</sup>。2007 年 Ashley 等<sup>[36]</sup> 在 Savannah 海湾安装了 2 台 6 800 kg O<sub>2</sub>/d 的大型锥形增氧系统,并于 2008 年搭建了一个实验室规模的 Speece 深水曝气装置对其增氧性能进行评估,结果证实了 Speece 锥形增氧技术更适合采用纯氧作为气源。Ashley 等<sup>[37]</sup> 在 2014 年搭建试点规模的 Speece 锥形增氧系统,对系统氧转移影响因素进行了分析,初步探索出了最佳氧转移效率的条件。到目前为止已有很多运用 Speece 锥形增氧技术给湖泊深水层增氧的案例,如 Camanche 水库<sup>[38]</sup>、Newman 湖<sup>[39]</sup>,但其充氧能力仍需大量工程实例验证。

### 3.4 气泡羽流扩散增氧技术应用实例

Rayyan 等<sup>[40]</sup> 是世界上最早预测分层湖泊深水层氧转移和气泡羽流动力学模型的学者之一。该羽流模型与之后提出的离散气泡模型至今仍被联合用于深水湖泊的治理与修复。

气泡羽流扩散增氧技术非常适用于深水湖泊,气源产生的细小气泡可以在深水层得到充分溶解而且羽流产生的动量非常小,能够防止温跃层被破坏,维持热分层不受影响。20 世纪 80 年代,Junco 和 Schaffner 设计了名为“Tanytarsus”的气泡羽流增氧系统,该系统能自行切换气源:在冬季湖泊混合期利用空气作为气源产生大气泡,进行水体上下层人工混合;在夏季运用氧气作为气源产生微气泡,直接给深水层增氧。该装置被利用于当地湖泊中并开展了示范工程<sup>[41-43]</sup>,1990 年在 Amisk 湖采用气泡羽流扩散器改善湖泊水质,1990—1993 年的 3 年监测数据表明,深水层平均溶解氧增加 2~3 倍,平均总磷浓度从 110 μg/L 减少到 50 μg/L,平均氨浓度从 120 μg/L 减少到 42 μg/L,治理效果良好。2005 年

Schierholz 等<sup>[44]</sup> 采用 Demoyer 提出的传质模型,通过 179 个独立实验,最终建立了气量、曝气深度、截面积和水体积等多参数氧传质系数特征方程,完善了深水湖泊扩散增氧系统设计计算方法。Wuest 等<sup>[12]</sup>、McGinnis 等<sup>[45]</sup>、Singleton 等<sup>[46]</sup> 和 Little 等<sup>[47,48]</sup> 分别对环型气泡羽流和线型气泡羽流的机理及装置设计进行了深入研究,分别开展了相应技术的湖泊示范工程并获得了较好处理效果。

## 4 深、浅水增氧系统对比

目前,我国许多浅水湖泊、河流的管理者用增氧技术来去除整个水层的氨氮和黑臭,这些增氧技术与深水湖泊增氧技术之间既存在相似之处又存在显著差异。浅水湖泊河流增氧与深水湖泊增氧目标是一致的,即通过增加水体溶解氧含量,改善水质不良状况,但深、浅水增氧系统在增氧方式、增氧主体、氧传递效率、实施难度和运行成本等方面存在显著差异(表 2)。

(1) 增氧方式不同。浅水湖泊河流由于混合较均匀,流动性较好,不用考虑垂直水深深度,因而采用较广泛的曝气方式是机械曝气;深水湖泊增氧方式则主要采用的是纯氧曝气。

(2) 增氧主体不同。浅水湖泊河流的水深较浅,混合相对较均匀,增氧主体一般是混合均匀的整个水体环境,以去除水体氨氮和黑臭;深水湖泊由于水深且存在温跃层,下层水体严重缺氧,增氧主体是湖泊下层滞水带水体和沉积物—水界面,以抑制沉积物内源污染物的释放。

(3) 氧传递效率差异。同条件下深水增氧系统的气泡比浅水增氧气泡的氧传递时间长,因而其氧转移效率远高于浅水系统。由于气源、成本、技术难度差异较大,浅水湖泊河流增氧绝大部分对氧传递效率考虑较简单,其曝气气泡半径通常大于 1 cm,氧传递效率较低;深水湖泊曝气技术装置曝气气泡半径通常小于 3 mm,气泡中 99% 的氧气都会溶解,部分技术氧传递效率大于 90%。

(4) 实施难度和运行成本差异。浅水湖泊河流由于水深较浅,增氧系统的安装和使用均较为简单,成本较低;深水湖泊水体深,水下施工、安装较难,一般需单独的氧气源,运行成本高。

## 5 存在问题与研究展望

深水湖泊增氧理论与技术已经研究和发展的近 50 年,并在实践中不断得到完善和优化,在改善深

表 2 深、浅水增氧系统(设备)对比<sup>[8,49,50]</sup>Table 2 Comparison of various oxygenation systems between deep and shallow lakes<sup>[8,49,50]</sup>

增氧方式	适用地点	曝气增氧系统	优点	缺点
纯氧曝气	深水湖泊、水库	气泡羽流扩散增氧系统	操作简单便捷 充氧效率高 抑制沉积物污染物释放和除黑臭效果好	氧源会产生一定的噪声 投资较大
		Speece 锥形增氧系统	充氧效率高 抑制沉积物污染物释放和除黑臭效果好	氧源会产生一定的噪声 装置施工安装复杂 操作难度较大 投资较大
	浅水湖泊、河流	纯氧—微孔管曝气系统	运行噪声较小 维护简单便捷 除黑臭效果好	氧源会产生一定的噪声 充氧效率一般 投资较大 占地较大
		纯氧—混流增氧系统(固定平台、移动平台)	机动灵活(移动) 维护简单便捷 除黑臭效果较好	工程较大 投资较大 氧源会产生一定的噪声
鼓风曝气	深水湖泊、水库	人工去分层增氧系统	成本低 操作简单便捷	安装复杂 气源会产生较大的噪声 充氧效率较低
		气体提升增氧系统	成本较低 操作简单便捷	安装复杂 气源会产生较大的噪声 充氧效率低
	浅水湖泊、河流	鼓风机—微孔布气管曝气系统	操作简单便捷	影响航运 维修较困难 占地较大 投资较大 气源会产生较大的噪声 充氧效率较低
机械增氧	浅水湖泊、河流	叶轮吸气推流式曝气器	安装方便 占地少 受水位影响较小 维修简单方便 除黑臭效果较好	影响航运 叶轮易被堵塞缠绕 影响环境美观 充氧效率低
	浅水湖泊、河流	叶轮吸气推流式曝气器	安装较方便 基本不占地 运行噪音较小	维修较麻烦 充氧效率低
	浅水湖泊、河流	叶轮式增氧机	安装方便 基本不占地 维修简单方便	运行会产生一定的噪声 外观不太美观 充氧效率低
	深水湖泊、水库 浅水湖泊、河流	太阳能曝气机	安装方便 基本不占地 深、浅水均可用 运行噪音较小 维修简单方便	受水位影响较大 充氧效率一般

水湖泊深水层缺氧环境和水质方面具有广阔的应用前景,但在理论研究和工程实践中仍存在一些薄弱环节,今后应着重加强以下研究:

(1) 研发新型沉积物—水界面增氧技术,提高对沉积物内源污染物释放的抑制效果。控制沉积物内源污染物释放的关键是沉积物—水界面的含氧性,但目前的深水湖泊增氧技术对沉积物—水界面

增氧效果有限,缺乏对沉积物—水界面的增氧针对性。未来应在深入研究深水湖泊增氧机理与过程的基础上,综合考虑沉积物—水界面增氧效果、实施便捷性、成本等因素,研发新型沉积物—水界面增氧技术,提高界面增氧效果,更好抑制沉积物内源污染物的释放。

(2) 加强羽流水平移动机理与控制因素的研究

究。目前对深水层增氧近地场研究较多,而对富氧羽流水平移动过程中的远地场观测与研究较少,尤其是在环型气泡羽流扩散增氧技术中,羽流从帽顶下沉后网状水平驱散较明显,对羽流下降过程中及到达平衡位置后的远地场观测与研究较少,在评估系统的复氧性能方面还有待完善。

(3) 将深水层自然耗氧过程与人工增氧研究相结合。在给湖底增氧的同时,底层水体的氧气随着有机质降解等过程也不断被消耗。虽然目前已有学者针对深水层氧消耗过程开展研究<sup>[51,52]</sup>,但未能将

深水层自然耗氧过程与人工增氧过程结合起来进行系统研究,未来可将湖底溶解氧的增加对有机质降解与耗氧速率的影响作为研究重点,为制定科学合理的增氧技术提供科学依据。

(4) 加强深水层曝气增氧技术与其他技术的联合应用研究与示范。不同深水湖泊曝气增氧技术具有不同的优缺点和适宜应用条件(图 6),应用单一增氧技术可能难以取得理想效果,应加强与底泥原位钝化<sup>[53]</sup>等其他技术联合应用的试验示范研究。

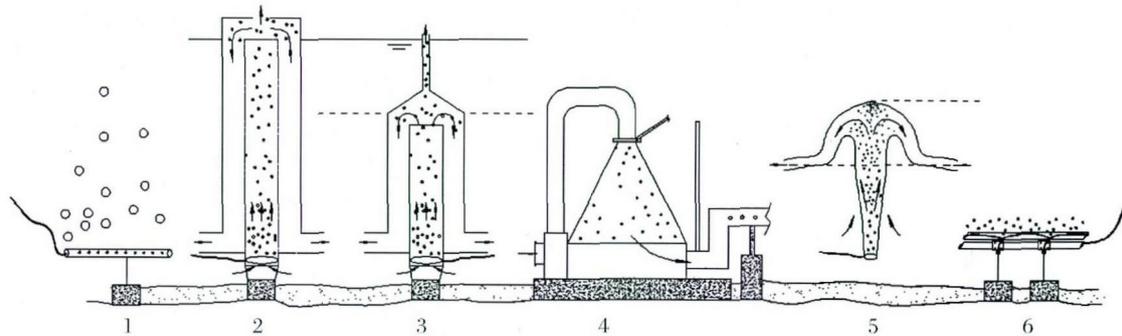


图 6 增氧技术示意图(无比例)<sup>[8,45]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of traditional aeration systems (no scale)<sup>[8,45]</sup>

1. 人工去分层增氧技术; 2. 全气体提升增氧技术; 3. 半气体提升增氧技术; 4. Speece 锥形增氧技术;  
5. 环型气泡羽流扩散增氧技术; 6. 线型气泡羽流扩散增氧技术
1. Artificial destratification; 2. Full-lift aerators; 3. Partial-lift aerators; 4. Speece cone; 5. Circular bubble-plume diffusers; 6. Linear bubble-plume diffusers

## 参考文献(References):

- [1] Zhang Zhiming. Study on occurrence mechanism of eutrophication in plateau lakes and counter measure [J]. *Environmental Science Survey* 2009, 28(3): 52-56. [张志明. 高原湖泊富营养化发生机制与防治对策初探[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(3): 52-56.]
- [2] Xu Yong. Lake eutrophication and its prevention and control strategies in Karst Plateau area [J]. *Hubei Agricultural Sciences* 2011, 50(4): 708-716. [徐勇. 喀斯特高原湖泊富营养化及防治对策[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(4): 708-716.]
- [3] Han Xiaogang, Huang Yanlin. Statistical analysis of sudden water pollution accidents [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(1): 84-90. [韩晓刚, 黄延林. 我国突发性水污染事件统计分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 84-90.]
- [4] Mercier P, Perret J. Aeration station of Lake Bret [J]. *Monatsbulletin der Schweizerischen Anstalt für das Wasser- und Luftschadstoffuntersuchen*, 1949, 29(1): 25.
- [5] Fast A W, Overholtz T. Hypolimnetic oxygenation using liquid-oxygen [J]. *Water Resources Research*, 1975, 11(2): 294-299.
- [6] Speece R E. Hypolimnetic aeration [J]. *Journal American Water Works Association*, 1971, 63(1): 6-9.
- [7] Whipple W, Tuffey T, Ervin E. Lake hypolimnetic oxygenation system [J]. *Reaeration Research*, 1975: 91-108.
- [8] Beutel M W, Horne A J. A review of the effects of hypolimnetic oxygenation on lake and reservoir water quality [J]. *Lake and Reservoir Management*, 1999, 15(4): 285-297.
- [9] Gafsi M, Kettab A, Benmamar S, et al. Comparative studies of the different mechanical oxygenation systems used in the restoration of lakes and reservoirs [J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 2009, 7(2): 815-822.
- [10] Little J C. Hypolimnetic aerators—Predicting oxygen—Transfer and hydrodynamics [J]. *Water Research*, 1995, 29(11): 2475-2482.
- [11] McGinnis D F, John C L. Bubble dynamics and oxygen transfer in a Speece Cone [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(2): 285-292.
- [12] Wuest A, Norman H B. Bubble plume modeling for restoration [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(12): 2353-2359.
- [13] McGinnis D F, Little J C, Cumbie W. Nutrient control in Stanley Lake: Evaluation of three oxygen transfer devices [C] // *Proceeding of the IAWQ/IWSA Joint Specialist Conference Reservoir Management and Water Supply—An Integrated System*. Prague: Czech Republic, 1997.
- [14] The Research of Development and Future Prospect in Limnology

- and Watershed Sciences, Secretariat. Advances in science research of lakes and river basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(4): 289-300. [《湖泊及流域学科发展战略研究》秘书组. 湖泊及流域科学研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 289-300.]
- [15] Singleton V L, John C L. Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems—A review [J]. *Environmental of Science and Technology*, 2006, 40(24): 7 512-7 520.
- [16] Teerink J, Martin C. Consideration of artificial destratification in reservoirs of California state water project [J]. *Journal American Water Works Association*, 1969, 61(9): 436-441.
- [17] Fast A W. Effects of artificial destratification on primary production and zoobenthos of captian reservoir, California [J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(3): 607-623.
- [18] Tolland H, Davies J, Johnson D, et al. Design, installation and assessment of a perforated pipe destratification system at Sutton Bingham Reservoir (Wessex Water Authority) [R]//Water Research Centre Enquiry Report. ER591, Medmenham, 1978.
- [19] Steinberg C. Effects of artificial destratification on the phytoplankton populations in a small lake [J]. *Journal of Plankton Research*, 1983, 5(6): 855-864.
- [20] Hawkins P R, Griffiths D J. Artificial destratification of a small tropical reservoir: Effects upon the phytoplankton [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 254(3): 169-181.
- [21] Cong Haibing, Huang Yanlin, Miao Jingguang, et al. Development of rehabilitation device for water body—Water lifting aerator [J]. *China Water & Wastewater* 2005 21(3): 41-45. [丛海兵, 黄延林, 缪晶广, 等. 水体修复装置——扬水曝气器的开发 [J]. 中国给水排水, 2005 21(3): 41-45.]
- [22] Cong Haibing, Huang Yanlin, Zhao Jianwei, et al. Application of the technology of lifting water and aeration for improving water quality [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, 28(3): 215-218. [丛海兵, 黄延林, 赵建伟, 等. 扬水曝气技术在水源水质改善中的应用 [J]. 环境污染与防治, 2006, 28(3): 215-218.]
- [23] Ma Yue, Huang Yanlin, Cong Haibing, et al. Application of the technology of water-lifting and aeration on water quality in-situ restoration in a deep channel reservoir [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(4): 7-13. [马越, 黄延林, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用 [J]. 城镇给排水, 2012, 38(4): 7-13.]
- [24] Delnoij E, Lammers F A, Kuipers J A, et al. Dynamic simulation of dispersed gas-liquid two-phase flow using a discrete bubble model [J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(9): 1 429-1 458.
- [25] Lorenzen M, Fast A W. A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management [M]. Washington: Environmental Protection Agency, 1977.
- [26] Taggart C, McQueen D. A model for the design of hypolimnetic aerators [J]. *Water Research*, 1982, 16(6): 949-956.
- [27] Ashley K I. Hypolimnetic aeration: Practical design and application [J]. *Water Research*, 1985, 19(6): 735-740.
- [28] Del Vecchio D C, Little J C. Predicting water flow rate in hypolimnetic aerators, poster presented at international association on water quality [C]//Biennial Conference. Singapore, 1995.
- [29] Burris V L, McGinnis D F, Little J C, et al. Predicting oxygen transfer and water flow rate in airlift aerators [J]. *Water Research*, 2002, 36(18): 4 605-4 615.
- [30] Ashley K I. Hypolimnetic aeration of a naturally eutrophic lake—physical and chemical effects [J]. *Physical and Chemical Effects*, 1983, 40(9): 1 343-1 359.
- [31] Soltero R A, Sexton L M, Ashley K I, et al. Partial and full lift hypolimnetic aeration of medical lake, Wa to improve water-quality [J]. *Water Research*, 1994, 28(11): 2 297-2 308.
- [32] Speece R E. The use of pure oxygen in river and impoundment aeration [C]//24th Annual Purdue Industrial Waste Conference. Purdue University, 1969.
- [33] Speece R E, Madrid M, Needham K. Downflow bubble contact aeration [J]. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 1971, 97(4): 433-441.
- [34] Speece R E, Rayyan F, Murfee G. Alternative considerations in the oxygenation of reservoir discharges and rivers [J]. *Applications of Commercial Oxygen to Water and Wastewater Systems*, 1973, 9(3): 342-361.
- [35] Doke J L, Funk W H, Juul S T, et al. Habitat availability and benthic invertebrate population changes following alum treatment and hypolimnetic oxygenation in Newman Lake, Washington [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1995, 10(2): 87-102.
- [36] Ashley K I, Mavinic D S, Hall K J. Oxygenation performance of a laboratory-scale Speece Cone hypolimnetic aerator: Preliminary assessment [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2008, 35(7): 663-675.
- [37] Ashley K, Fattah K, Mavinic D, et al. Analysis of design factors influencing the oxygen transfer of a pilot-scale speece cone hypolimnetic aerator [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 140(3): 04013011-1-04013011-9.
- [38] Horne A J. Limnology and Water Quality of Camanche Reservoir in the 1987-88 Drought as It Relates to the Fish Facility Problems [R]. Oakland California: East Bay Municipal Utility District, 1989: 5-2.
- [39] Moore B C, Cross B K, Beutel M, et al. Newman Lake restoration: A case study Part III. Hypolimnetic oxygenation [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2012, 28(4): 311-327.
- [40] Rayyan F, Speece R E. Hydrodynamics of bubble plumes and oxygen absorption in stratified impoundments [J]. *Progress in Water Technology*, 1977, 9: 129-142.
- [41] Imboden D. Restoration of a Swiss lake by internal measures: Can models explain reality [C]//EWPCA International Congress: Lakes Pollution and Recovery. Proceedings-preprints, 1980: 29-40.
- [42] Prepas E, Field K, Murphy T, et al. Introduction to the Amisk Lake Project: Oxygenation of a deep, eutrophic lake [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(9): 2 105-2 110.

- [43] Prepas E ,Burke J. Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality in Amisk Lake , Alberta , a deep , eutrophic lake with high internal phosphorus loading rates[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* ,1997 ,54( 9) : 2 111-2 120.
- [44] Schierholz E L , Gulliver J S , Wilhelms S C , *et al.* Gas transfer from air diffusers [J]. *Water Research* , 2006 , 40( 5) : 1 018-1 026.
- [45] McGinnis D F , Lorke A , Wuest A , *et al.* Interaction between a bubble plume and the near field in a stratified lake [J]. *Water Resources Research* 2004 , 40( 10) : 11.
- [46] Singleton V L , Gantzer P , Little J C. Linear bubble plume model for hypolimnetic oxygenation: Full-scale validation and sensitivity analysis [J]. *Water Resources Research* 2007 , 43( 2) : 12.
- [47] Little J C , McGinnis D F. Hypolimnetic oxygenation predicting performance using a discrete-bubble model [J]. *Water Science & Technology: Water Supply* 2001 , 1( 4) : 185-191.
- [48] Little J , McGinnis D. Hypolimnetic oxygenation: Predicting performance using a discrete-bubble model [J]. *Water Science & Technology: Water Supply* 2001 , 1( 4) : 185-191.
- [49] Sun Congjun , Zhang Mingxu. Application of aeration technique in river pollution control [J]. *Engineering and Technology* 2001 , ( 1) 4: 12-20. [孙从军 张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用 [J]. 工程与技术 , 2001 , 1( 4) : 12-20. ]
- [50] Liu Haihong , Li Xianning , Song Hailiang. Re-oxygenation technology for prevention and control of black water in shallow lakes [J]. *Journal of Southeast University* 2015 , 45( 3) : 526-530. [刘海洪 , 季先宁 , 宋海亮. 浅水湖泊防控黑臭水体复氧技术 [J]. 东南大学学报 , 2015 , 45( 3) : 526-530. ]
- [51] Rippey B , McSorley C. Oxygen depletion in lake hypolimnia [J]. *Limnology and Oceanography* 2009 , 54( 3) : 905-916.
- [52] Muller B , Bryant L D , Matzinger A , *et al.* Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes [J]. *Environmental Science & Technology* 2012 , 46( 18) : 9 964-9 971.
- [53] Yang Yongqiong , Chen Jing' an , Wang Jingfu , *et al.* Research progress of sediments phosphorus in-situ inactivation [J]. *Advances in Earth Science* 2013 28( 6) : 674-684. [杨永琼 , 陈敬安 , 王敬富 , 等. 沉积物磷原位钝化技术研究进展 [J]. 地球科学进展 , 2013 28( 6) : 674-684. ]

## Advances in Oxygenation Theory and Technology in Deep Lakes\*

Lan Chen<sup>1 2</sup> , Chen Jing' an<sup>1\*</sup> , Zeng Yan<sup>1</sup> , Guo Jianyang<sup>1</sup> , Zhang Runyu<sup>1</sup> ,  
Wang Jingfu<sup>1</sup> , Yang Haiquan<sup>1 2</sup> , Ji Yongxue<sup>1 2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry Institute of Geochemistry ,

Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China;

2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

**Abstract:** Deep lakes always maintain vertical thermal stratification due to their physical structure. The thermocline prevents the transfer of oxygen from epilimnion to hypolimnion , leading to the formation of anoxic conditions in deeper water , the enhanced release of endogenous pollutants and the deterioration of water quality. Oxygenation is an effective measure to improve the water quality of deep lakes and mitigate the release of endogenous pollutants via the increase of the oxygen level in water. This paper provided an overview of the method and theory of oxygenation in deep lakes. Advantages and limitations of different methods of oxygenation , including artificial destratification , airlift aerators , Speece cone and bubble plume diffusers , were discussed. In addition , challenges and prospects of oxygenation were assessed based on the analyzing of typical examples of oxygenation in deep lakes and the difference in oxygenation system used in deep lakes and shallow lakes.

**Key words:** Deep lakes; Sediment; Oxygenation technique; Aeration; Water quality.

\* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Using oxygen isotopes of phosphate to trace internal phosphorous release in mountain lake sediment" ( No. 41173125) .

**First author:** Lan Chen ( 1988- ) , male , Nanchang city , Jiangxi Province , Ph. D student. Research areas include water environment. **E-mail:** lanchen12345@ 126. com

**Corresponding author:** Chen Jing' an ( 1973- ) , male , Macheng city , Hubei Province , Professor. Research areas include specializing in the research of lake environment and holocene climate change. **E-mail:** chenjingan@ vip. skleg. cn