

Study on Application of “Live Water” in Eutrophic Sewage Purification

Rongfu Li^{1*}, Shouhong Wang², Longsheng Sun³, Xiangming Kou², Leiming Wu²

¹Yangzhou Society of Fisheries, Yangzhou Jiangsu

²Agricultural Science Institute of Jiangsu Lixiahe District, Yangzhou Jiangsu

³College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Email: 13615252160@163.com

Received: Jul. 18th, 2019; accepted: Aug. 2nd, 2019; published: Aug. 12th, 2019

Abstract

The application value of “living water” in eutrophic water treatment was analyzed, including the role of natural “living water” in urban and rural sewage purification, the application of artificial “living water” in aquaculture sewage purification, and the actual effect of urban “living water” in black and odorous water purification. A systematic scheme for treating eutrophic wastewater by using “living water” was proposed, including removing the silt at the bottom of the water body, consolidating the foundation of “living water”, providing oxygen quickly, establishing the premise of restoring “living water”; using energy-saving technology to produce cheap “living water”; and using aerobic probiotics to enhance the ecological “activity” of the water body. Practice has proved that “living water” is a sustainable way to treat urban and rural eutrophic sewage. That is, to establish or restore aquatic ecosystem with aerobic probiotics as the core, to create or maintain the multi-directional circulating flow state of “living water”, to provide enough dissolved oxygen for the whole water body through the combination of ecology and artificial, thus forming a “living water” ecosystem with strong vitality and purification capacity.

Keywords

Live Water, Eutrophication, Sewage Purification, Research

“活水”应用于富营养化污水净化的研究

李荣福^{1*}, 王守红², 孙龙生³, 寇祥明², 吴雷明²

¹扬州市水产学会, 江苏 扬州

²江苏省里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州

³扬州大学动物科学与技术学院, 江苏 扬州

Email: 13615252160@163.com

*通讯作者。

收稿日期：2019年7月18日；录用日期：2019年8月2日；发布日期：2019年8月12日

摘要

本文探讨了“活水”在治理富营养化水体中的应用价值，包括：天然“活水”在净化城乡污水中的作用，人工“活水”在净化水产养殖污水中的应用和城市“活水”净化黑臭水体的实际效用。提出了应用“活水”治理富营养化污水的设计方案，包括清除沉积污泥，为制造“活水”夯实基础；快速补充氧气，为恢复“活水”确立前提；采用节能技术，制造廉价“活水”净化污水；借助微生物运用，提升水体生态“活性”等。从而证明了建立或修复以好氧有益菌为核心的水体生态系统，打造或维持多向循环流动的“活水”状态和生态与人工结合全方位、全时段持续供给充足溶解氧，形成具有旺盛生命活力和强大净化能力的“活水”生态系统的方法，是治理城乡富营养化水体的可持续途径。

关键词

活水，富营养化，污水净化，研究

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人口的不断增加和城市化的持续推进，以及农业、畜牧业和水产养殖业集约化程度的不断提高，城乡大量生活垃圾和废水，农田化肥、农药使用后排放的尾水，畜禽养殖业粪便和废水，以及水产养殖业尾水的排放，直接增加了自然水体 N、P 等营养盐和有机物含量，造成了城乡水体的富营养化，带来蓝藻爆发，甚至成为黑臭水体，使城乡居民饮用水源和工农业生产用水面临直接威胁。预防和控制水体的富营养化，及时治理城乡黑臭水体，已成为当前生态文明建设最为迫切需要解决的问题。

“活水”能净化污水，具有复合性生态功能，在古代文献中早有反映。《吕氏春秋·尽数》有“流水不腐，户枢不蠹，动也”之说[1]。宋代理学家朱熹更有诗曰“问渠哪得清如许？为有源头活水来”[2]。认为“源头活水”能使“渠清如许”，发现了“活水”具有净化污水的作用，具有“自动清洁”的生态功能。古籍考证还发现，“活水周流”是一种维持水质与生态系统的水循环方式。五代时期太湖地区塘浦圩田系统，使太湖以东低地与高地的水流呈一体化的“活水周流”状态，形成全局式的活水周流循环，并认为该地区生物生长，作物灌溉，园林维持，污染治理，皆赖活水周流[3]。

“活水”是指保持运动状态或旺盛生命活力的水。“活水”的运动性体现水的流动性，尤其是水体垂直上下的交流状态，从而与外界环境发生相互作用和影响。在上方，则表现为水体与大气和阳光等环境的相互作用和影响；在下方及四周，则表现为水与土壤或岩石等周边环境的相互作用和影响。另一方面，是其内部的运动性，即水体内部的溶解物与溶解物之间、溶解物与生物之间、生物与生物之间的持续处于相互作用与转化的状态，持续进行着多样化的化学反应和生命代谢，使水体便成为多种溶解物和生物体相互作用、相互依存的载体。并且“活水”的物理、化学和生物学过程是相互作用、相互影响的，是理、化、生复合交叉的综合过程。在“活水”系统中，生产者、消费者和分解者相互作用、相互依赖的生命过程，带动了水中溶解物(含氧气)、水体颜色和透明度的物理变化和水体与周边环境的物质交换，

又影响了水体中化学反应的内容、过程、速度和酸碱平衡。同样在“活水”系统中，物理状态的水中溶解物(含氧气)浓度、水体颜色和透明度变化是水体化学反应过程和生物学过程的外在表现，其实质是水中化学反应所引发的化学物质组成与浓度的变化，以及微生物和浮游生物等生物品种构成、数量消长、沉浮和密度的变化。同时，在“活水”系统中，化学反应状态一方面是由“活水”物理过程所引起的化学物质构成和浓度的变化所决定，另一方面又由不同生物构成和生物的新陈代谢速度所影响。作为物理作用的水流，既可以是雨雪风暴、地形地貌等自然因素引发，也可以装备机械设备的人工因素推动，影响着“大气-水体”、“水体-土壤”双界面的物质交换，使气体、矿物质和微量元素等持续不断溶入水中，推动着化学反应进程。同时，流入的水不断接入新的生物，“活水”中多样性生物的综合作用，不断进行着化合与分解，产能与耗能或贮能，耗氧与增氧等理化反应，实现着水域生态系统物质循环和能量转换，使水域生态系统保持持续变化的稳定状态[4]。

现行城乡有机物污水(富营养化污水)处理主要借助于微生物参与的氧化还原反应过程。其化学方法主要是曝气法，生物方法主要是微生物法。曝气法主要是利用氧气(空气)对污水中的有机物氧化还原，可以较为彻底地降解污水中有机物，但速度较慢。微生物法是通过微生物分解的催化酶加速有机物分解，速度较快、效率较高。但如果该过程在氧气不足的情况下进行，该分解过程便难以彻底，主要以中间状态——还原态物质存在，这便是养殖水体中“即时氧债”[5]，一旦水体垂直对流，便呈现爆炸性的瞬时耗氧，这是水产养殖业最大的风险。借助于“活水”中及时运送的丰富溶氧，并通过人工加入微生态制剂，便能促进污水中有机物与溶解氧和有益微生物在水体中全方位相遇与相聚，这个“相遇与相聚”是实现生化反应过程，需要有机物、溶解氧和有益微生物三者之间充分、完全和频繁的接触，并非一蹴而就，而是一个相对缓慢的化学反应过程。即必须有一定的接触面积和接触时间来完成此类化学反应过程，并且当一次相遇没有能完成这个反应时，必须增加接触频率，再次或数次推动这三者的重新相逢，保证有机物完全彻底降解，又提高降解速度，避免水体中“氧债”累积，持续为养殖水体中浮游植物和水生植物提供肥源(N、P、K)和碳源(CO₂) [6]。因此，“活水”使养殖水体中水生生物的生命过程和化学过程更加活跃，新陈代谢更加旺盛。

笔者自 2009 年起积 10 年时间，将活水机应用于水产养殖的过程中，深入研究活水形成及其改善水质、增产增效的机理，初步完成了“活水基本理论”。水产养殖水体实质是达到中度以上富营养化程度的污染水体[4]。“活水”净化调控水产养殖水质的原理，与治理城乡富营养化水体的原理是一致的，其方法经合理改造完全可以应用于城乡大量被有机物污染的富营养化水体的治理。在现代城市污水治理中也有成功应用“活水”的范例。本文便是应用“活水”处理富营养化污水的初步研究和探索。

2. “活水”治理富营养化水体的应用价值

2.1. 天然“活水”在净化城乡污水中的作用

从“流水不腐”的成语和“问渠哪得清如许？为有源头活水来”的诗句证明古人早已发现了源源“活水(流水)”清洁水质的作用。长江和珠江流域均为我国经济发达地区，超大、特大城市多，城市污染物排放品种多，数量大，成分复杂。同时，上述两地区农业水平高，化肥、农药用量大，面源污染严重。但两大水系水量大，四季长流，保持了波涛汹涌的“活水”状态，加上多样化生物群落，造就了“活水”生态系统，使两大水系，虽有海量污染汇入，但因其恒久“活水”形成的强劲净化能力而“万古流芳”，直到入海仍为“一江春水”。国家环保总局检测结果证明，长江水系整体水质良好，I-III 类水质占水系总断面的 86.3%；珠江水系也保持了良好水质，I-III 类水质断面占水系总断面的 75.8%，上述两大水系成为“活水”有效净化城乡污水的“活化石”。而辽河、海河、淮河、松花江、黄河等水系或因流域内降

雨量小,或因闸坝阻断,而常断流,枯水期便处于“死水”状态,汇入这些江河的污水因不能及时净化而水质下降。国家环保总局检测表明,海河水系达重度污染,IV-V类水质河段占25.0%;劣V类水质河段占48.2%,两类污水河段相加,污染河段占河段总长的73.2%;淮河水系也达中度污染,IV-V类水质河段占43.5%,劣V类水质河段占31.8%,两类污水河段相加,污染河段占河段总长的75.3% [7]。两大水系沿岸居民失去了可靠的饮用水源。

2.2. 人工“活水”在净化水产养殖污水中的应用

高产养殖池塘本质是高度富营养化水体。未被利用的残饵、水产动物排泄物以及生物尸体转化为水体有机物,并沉积成淤泥。并且随着水产动物成长,投饵量增加,在生产后期(90天以后)逐步达到最大值,带来水体高度富营养化。采用“活水”养殖水产动物,一方面将氧气和有益微生物带到水底,将底层水或底泥中有机物氧化还原,另一方面,将底层水和底泥中有机物运送到水体上层或表层,加速降解(氧化还原)成无机养分供给植物吸收,实现物质循环。笔者联合扬州绿保生物科技有限公司和扬州大学,采取增氧活水机与枯草芽胞杆菌、乳酸菌等配合制造生态“活水”,应用于养殖罗氏沼虾、鳊鱼、黄颡鱼等名优水产品,对养殖水体化学耗氧、氨氮和亚硝酸盐等富营养化污染物取得了明显的净化效果(见表1),对化学需氧量(COD)降解率比使用叶轮增氧机高出25.7%,最多高出46.5%;对氨氮(NH_4^+)降解率比使用叶轮增氧机高出46.2%,最多高出69.3%;对亚硝酸盐(NO_2^-)降解率比使用叶轮增氧机高出48.8%,最多高出49.7%。

Table 1. Test results of aquaculture water quality by aerobic water machine and micro-ecological preparations
表 1. 增氧活水机与微生物制剂净化水产养殖水质的检测结果

主养品种	水质调控类型	COD (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	备注
罗氏沼虾	生态活水	50.25		0.1125	试验地点为高邮市三垛镇少游村
	一般增氧	64.75		0.3663	
	增减%	-22.4		-69.3	
鳊鱼	生态活水	13.25	0.2843	0.1523	扬州市江都区丁伙锦西村
	一般增氧	24.75	0.5655	0.2495	
	增减%	-46.5	-49.7	-39.0	
黄颡鱼	生态活水	33.5	0.1893	0.1483	仪征市清水湾水产合作社
	一般增氧	36.5	0.3623	0.2123	
	增减%	-8.2	-47.8	-30.2	

浙江省海洋水产研究所等单位“耕水机在日本囊对虾高位池养殖中的应用”表明,“活水”养殖塘无机磷含量波动在0.011~0.075 mg/L区间,水车式增氧机对照塘无机磷含量波动在0.006~0.238 mg/L区间,活水塘比对照塘低64.8%。试验塘和对照塘氨氮含量最高值分别为0.059和0.203 mg/L,活水塘比对照塘低64.8%。试验还发现,试验塘沉积淤泥(有机物积累层)厚度为10.6 cm,比对照塘15.2 cm减少4.6 cm。“活水”使有机物彻底氧化还原,淤泥颜色清淡无臭味;对照塘淤泥颜色深黑,腥臭味重[8]。海南省水产技术推广站“耕水机在花鳊池塘养殖中的应用试验”证明,利用“活水”养殖花鳊,水中COD(化学需氧量)下降到20 mg/L以下,BOD(生化需氧量)下降到6 mg/L以下,有效改善了水质[9]。该站“耕水机在罗非鱼精养池塘的应用”结果表明,“活水”养殖降低了水体悬浮物、氨氮和亚硝酸盐含量:试验

塘悬浮物含量 40.78 mg/L, 比对照下降了 24.30 g/L, 下降 37.3%; 试验塘氨氮含量 0.3722 mg/L, 比对照下降了 0.2418 mg/L, 下降 39.4%; 试验塘亚硝酸盐含量 0.0340 mg/L, 比对照下降了 0.0718 mg/L, 下降 67.9% [10]。另外, 辽宁、安徽、云南和江苏等地开展的“活水”养殖试验水质检测结果也得出了同样的结论[11][12][13][14]。

2.3. 城市“活水”净化黑臭水体的实践

城市污染物排放量大, 水体富营养化严重, 甚至严重黑臭, 直接影响周围居民生活。目前解决这个问题多是将污水集中到污水处理厂处理, 这种途径投资大、成本高、效果欠佳。北京市、广东中山市和广州市海珠区采用“活水”方法治理城市黑臭污水取得了成功的经验。北京市通过在北海-中南海-筒子河、奥运湖、龙潭公园、动物园等 9 处建成约 150 公里水循环工程, 使城市河道由“死水”变为“活水”, 辅以增氧措施治理城市污水, 实现了“流畅、水清、岸绿” [15]。又如, 广东省中山市以“雨污分流、补水循环”的“活水”治理城市污水, 通过建设循环泵站、压力连通管道、补充水源等方式, 建成六个水循环工程, 有效增加了城区主要内河涌的水体流动性, 让整个城市内河流动起来成为“活水”, 并通过补充水源置换与微生态制剂活化水体结合, 基本消除了长期困扰市民的河道黑臭现象[16]。再如, 广州市海珠区城市河道属感潮河网区。针对区内断头涌多及水质差的问题, 该区通过分析河涌水量水位、潮位、引排水等资料, 科学安排引水、排水调控时间, 新建 6 座闸站、6 座水闸、4 条补水管线, 打通 3 处河涌连接, 在满足排涝的同时, 利用河网潮汐动力、群闸联控、优化调度, 建成了调水补水工程, 形成了河涌“活水”环境。“活水”前后水质监测结果表明, BOD₅、COD_{Cr} 和 NH₃-N 等指标日均下降量分别达 0.11 mg/L、0.55 mg/L 和 0.08 mg/L, 并随调水补水的持续, 水质得到较大改善[17]。以上在城市(区)治理黑臭水体的成功实践, 证明了只要在城市水体中造就持续“活水”, 可以提高水体自我净化能力。如能适度“补水”、“增氧”和“加菌”, 则能进一步提升“活水”净化污水功能。

另外, 畜禽养殖企业排放的尾水和农作物种植田间排水, 本质上也是有机污水或富营养化的废水, 完全可以通过采用物理、化学和生物措施制造“活水”的方法进行治理, 改善水质环境, 实现清水、绿水、好水。

3. “活水”治理富营养化污水的应用设计

3.1. 清除沉积污泥, 为制造“活水”夯实基础

大量沉积在水底的污泥是水体黑臭的重要特征和主要原因。污泥中有机物降解需要大量耗氧, 成为水体积压的“氧债”而大量存在, 并使水体生态系统崩溃。据调查, 我国城市水体中普遍存在大量底泥, 而存在黑臭水体问题的城市水体底泥沉积更为严重。因此, 清淤也成为治理黑臭水体的重要前提和首要措施。对于水面较窄、淤泥较浅的水体, 可以在冬春旱季, 分区、分段排干河水, 通过人工、机械清挖的方式, 清除淤泥, 并经深层耕翻后再曝晒, 让其“风吹日晒夜冻”, 使底层淤泥中有机物充分氧化还原。对于水面较宽、淤泥较深的地区, 可以通过驳船, 利用超声等技术实施水下挖掘, 清除水底淤泥[18]。专用清淤设备有螺旋式挖泥设备和封闭旋转挖泥设备等。如环保绞吸式清淤船, 配备有专用环保绞刀头, 具有防止淤泥泄漏和扩散的功能, 可以疏浚稀烂污染底泥, 且对底泥扰动小, 底泥清除率可达到 95%以上; 清淤浓度高, 清淤泥浆质量分数达 70%以上, 一次可挖泥厚度为 20~110 cm [19]。还可以使用氧化消毒剂。如使用生石灰、漂白粉、强氯精、二氧化氯等具有强氧化作用的消毒剂, 使底泥中的有机物迅速氧化, 避免在养殖过程中耗氧, 而减少“总氧债” [5], 为制造“活水”, 治理污水, 恢复生态系统打下基础。

3.2. 快速补充氧气，为恢复“活水”确立前提

“活水”的本质是生态循环，是生态系统中相互联接的生物营养链(网)。“活水”的关键是溶解氧持续足量供应，这是有益菌及其他水生生物生存并充分发挥净化功能的关键因子，溶解氧在水体恢复自净能力并提高净化效率过程中发挥着极其关键的作用。溶解氧最廉价的来源是以浮游植物为主体的光合作用产氧。黑臭水体淤泥厚、“氧债”多，黑臭水体主要“氧债”积存在淤泥中[5]。缺氧既是黑臭水体主要特征，也是黑臭水体形成的主要原因。正是缺氧造成水体生态系统崩溃，失去了污染净化能力，致使水体黑臭。恢复产氧功能是实现水体自我净化、解决黑臭水体的根本途径。恢复产氧功能的前提是恢复水体生态系统，这必须在偿还了水体积压的大量“氧债”后才能实现。治理黑臭水体，除清淤外，通过人工快速增氧，带动有机物迁移、扩散、降解，是清理积压“氧债”的主要途径[20]。水体复氧后，激活了由微生物、水生植物(浮游植物)、浮游动物、底栖动物和鱼类等构成的水体生态系统，恢复系统生产(供氧)功能和净化(氧化还原)功能，带动富营养化水体向洁净好氧的生态系统转化，实现污染物资源化利用和生态系统良性循环[21]。研究还表明，复氧提高了水体好氧菌活性，加速氨氮(NH₃)、硫化氢(H₂S)等有毒有害物质转化，并抑制底泥中N、P释放，而控制藻类过度繁殖[22]。

人工辅助增氧早在污水处理中应用。20世纪50年代，发达国家通过曝气复氧解决了河道严重污染问题，如英国泰晤士河、韩国釜山港湾等[23]。在1990年亚运会期间，北京市在一段长约4 km的河道通过人工充氧，基本消除了河道黑臭，BOD₅去除率约50%，DO(溶解氧)浓度由0 mg/L上升至5~7 mg/L，邻近区域DO(溶解氧)浓度上升到4~5 mg/L [24]。水体增氧有深层曝气、水动力循环、机械增氧和施用化学增氧剂等方式。曝气复氧有固定式充氧站和移动式充氧平台两种。固定式充氧站有鼓风机曝气或纯氧曝气两种。如英国泰晤士河、澳洲帕斯港和我国清河、桃花溪治理都采用了固定式充氧站。在重污染或突发性污染水体常用液氧为氧源，如德国Etascher河、Teltow河、Fulda河治理采用了纯氧充氧站，有效治理了污染。移动式充氧平台适用于治理轻度污染且有航运功能的河道，主要是移动曝气船，如德国Saar河，澳洲Swan河等治理采用了曝气船[25]。科技发展带动了曝气设备更新，传统曝气出气端为砂头或塑料管打孔，气泡直径大，增氧效率差。如直径0.1 cm的气泡转换成100 nm气泡，其与水接触表面积扩大了10,000倍。而且气泡越小，与水接触时间越长，可提高氧气溶解率。微孔气泡直径约0.5~5 mm，在水中可维持几十秒或几分钟；微纳米气泡直径为数十到几个微米之间，在水中可存留数月。因此，曝气由微米气泡改为纳米气泡，水气接触面积增大，时间延长，增氧效率提高。据试验，纳米曝气增氧效率达60%~70%，是常规微孔增氧的4倍。而且纳米气泡表面由带负电荷的双极性分子构成，与带正电荷的水分子产生静电效应，具有高度稳定性，有利于氧气利用[26]。

常用增氧机械包括叶轮、水车、喷水、射流等类型。武汉大学等单位“黑臭河道生物修复中3种不同增氧方式比较研究”表明，叶轮、水车和射流式三种增氧机治理黑臭河道效果差异很大，在增氧效果、COD_{Cr}和NH₃-N去除、菌-藻生态系统建立和水体自净能力恢复等方面，以水车式增氧机为最好，明显好于叶轮和射流式增氧机，而且投资少、安装维护方便、运行费用低。结果表明，水车式增氧机使用第3天下游河段开始变绿，形成较长的洁净好氧绿色河段，第8天绿色河段长达最高值，为15.7 m；叶轮式增氧机比水车式稍差，第4天开始变绿，至第6天绿色河段达最高值，为6.3 m；射流式增氧机基本没有变绿河段。这说明，在黑臭水体中安装水车式增氧机，能迅速恢复水体菌-藻生态系统，形成污染物净化能力。值得注意的是，菌-藻生态系统建立，使水体复氧机制由单纯人工曝气复氧转变为藻类光合作用为主的内生型复氧机制，建立了洁净好氧的水体生态系统，形成了自净功能[27]。

3.3. 采用节能技术，制造廉价“活水”净化污水

实践证明，补水活水是治理城乡河道污水的有效途径。据研究，在维持河道流速0.4~1.0 m³/S的情

况下,可以打破溶氧跃变层形成的理化条件,使“水-土”界面溶氧维持在 3 mg/L 以上,改善了河道水生态条件,转变“水-土”界面缺氧状况,有效控制水体底质污染[17]。并且,这种流速必须持续维持,并有垂直方向的多向流动,最好是微速循环流动。补水活水根据水体规模大小、生态环境条件和工程难易等,分为水系连通、活水循环、清水补给三类措施。一是清水补给。即向水体中补充外来清洁水,提升河道流动性和水体容量,这是改善城市水体水质的常用方法[17]。在水利条件较差的水体,可采用人工引水方式改善水质,重点是保证河道生态基流量、维持河道水面线,借助清洁水源稀释污染物浓度,并增强水体流动性,加速污染物扩散、净化和输出,调节水体水力停留时间,提高水资源利用价值和环境承载力。并减缓水体藻类生长,补充河流中 DO 含量,从而改善水质,恢复水体自净能力。对于纳污负荷高、水动力不足、环境容量低的城市黑臭水体治理效果明显,补水活水可以快速缓解水体黑臭现象[23]。例如杭州引钱塘江水入西湖,每天引水量相当于西湖贮水量的 1/30 左右,一定程度上改善了西湖水质[28]。清水补给应开发利用清洁地表水,并尽量采用非常规水源,如利用再生水、雨水、洪涝等[20],避免水资源浪费。但是,清水补给只能暂时缓解污染,治标不治本,在水资源短缺地区不适宜采用。二是活水循环。活水循环就是通过人为措施改造原有水体,构建水体循环机制,使水“动起来”的一种措施。重点是改善水动力、增加水的流动性、维持一定流速。活水循环的核心是“循环”,关键是“水系连通”。水系连通是通过设置提升泵站、采取疏导、沟通、引排、调度等涵闸工程和非工程措施实现水系合理连通。一般是以原有河道为基础。添加连通工程、输水工程、配套工程为手段,建立或改善有关水体之间的水力联系,实现上下游水体流动与交换。在活水循环河道中还可以建设溢流坝,增加水流的紊动,带动了水体上下水层之间的交换。此法虽降低了水流速度,但延长了水体微生物和溶解氧净化污水的时间,有利于提升净化效果。为了实现水体上下游之间的持续循环,必须在河堤中埋设回流涵管或建设输水渠,并设置推流泵或建设泵站将下游水泵回上游继续循环,保证内河涌联动性,促进污染水体水质的改善,预防或抑制水体富营养化[29]。如苏州拙政园治理采用人工水循环措施,在中、西池塘之间设置水循环管线系统,并布置采样点测定水质,与东池塘对照。实验表明,试验塘浊度平均下降 4.5 NTU, DO (溶解氧)平均提高 39.1%, COD_{Mn} 平均下降 25%, 水质稳定性增强[30]。活水循环结合人工曝气能增添水体上下垂直交流动力,可取得更好的净化效果。实践证明,如果活水循环长期内循环,水质净化效果会逐渐降低,需要适时适量补给新鲜好水,促进水体微生物和浮游植物群落的品种更新和数量补充,增强水体自净能力。活水循环应尽量使用再生水,通过深度净化措施,使再生水满足补水水质要求,并铺设补水管将再生水输入黑臭水体中参加循环[17]。再生水还可用于城市园林绿化等领域,以提高水资源利用率[31]。许多研究显示,位于水域和陆地间的生态交错带(Ecotone) (即湿地生态系统),具有过滤、缓冲、净化功能。湿地不仅吸收或吸附转移水中营养物或污染物,改善水质;而且截留水中固体颗粒物,减少水体颗粒物沉积。同时,湿地还提供生物栖息地,对保护生物多样性、减轻洪涝灾害和保持水土等具有重要意义[32]。因此,在改造建设“活水”净水循环工程,应尽可能保留水域自然原始形态(包括纵横断面),减少截湾取直和截滩取土,保持或恢复水体形态多样性,包括河湾、急流和浅滩,积极恢复湿地,以水体形态多样化,促进生物多样性和生态多样性恢复,避免堤岸单一水泥石砌化和形态均一化[33]。

高投入、高成本治理污染不符合中国国情。人工“活水”治理污水只有在低耗能、低成本情况下,才能广泛应用。如何造就低耗能、低成本“活水”,是“活水”能否应用于治理富营养化水体的基本前提。这必须深入研究水的流体力学特征,选择合适的机械方法制造活水。水作为典型液体(流体),具有以下物理特征。一是惯性大。水的密度是空气密度的 772 倍,水一旦处于运动状态便蕴藏着丰富的动能,具有巨大的惯性,所以,洪水好似猛兽,海啸摧古拉朽。二是摩擦力小。运动中的水不会像固体那样因为摩擦而大量耗能。航行于大海中的巨轮,撤去动力仍可航行数公里或数十公里。三是可塑性强。流水遇到障碍物,并不会象固体那样立即静止,而在改变方向后继续流动。四是慢速流动的水能量不易

衰减。液体流动只有当超过一定速度时,才会产生“湍流”,造成额外能量损耗。所以,尽管当今世界科技日新月异,由于水的上述流体力学特征,决定了河运、海运等水上运输仍是当今最为经济的运输方式。新型活水机(也称耕水机)通过控制划水速度,加大划水量,以极低的能耗(100瓦以内),制造了全时段(24小时)持续“活水(微速循环流水)”,带动了水体中持续的其他物理和化学、生物过程,使其成为保持运动状态和旺盛生命力的“活水”。这种“活水”能充分利用原水体生物造氧能力及其对N、P等及有机污染物的净化能力[6]。因此,在宽敞性水体(宽度20m以上,水深1.5米以上)应用活水机(也称耕水机)能以极低的能耗解决一般富营养化水体污染治理问题。即便是污染严重的黑臭水体,也可以选用增氧活水机,在制造“活水”的同时,应用配备的微孔增氧设备在夜晚光合作用停止时或阴雨天光合作用较弱时补充水中溶解氧不足,以维持和提升污染水体持续净化能力。

3.4. 借助微生物运用,提升水体生态“活力”

尽管可以通过清淤、换水、增氧等措施快速解决水体黑臭问题。但上述方法或工程量大,实施难度大,或治理成本高,只能用于应急处置。如黑臭水体清淤前的排水会污染其他水体,污泥的转移和存放也需空间,还会造成二次污染。所以,富营养化水体治理的根本途径是应用现代微生物技术和生态修复技术,通过投放人工培育的土著微生物种群或其他高活力微生物种群,在富营养化水体中恢复或建立以微生物为核心、多样化生物组成的高效稳定生态系统,恢复和提高水体自我净化能力。由于高度富营养化水体污染物种类多、浓度高,对土著微生物可能存在抑制或毒害作用,或某些复杂污染物,难以被土著微生物所降解。此时应该向污染水体中投放具有特定功能的微生物;或改善水体生态条件,使特定微生物能够在其中生长繁衍,以达到降解特定污染物,并提高污染物降解效率,这便是微生物强化修复技术[34]。该技术是一种经济型环保技术,通过特定微生物建立微生态系统,加快水中物质循环和能量转换,提升其对污染物的高效吸收和降解作用,最终达到对水体富营养化的控制。

微生物强化修复通常有利用土著微生物、接种高活力微生物(外来微生物和基因工程菌等)及投放微生物促生剂等途径。该技术常用的有效微生物菌群(EM),是从自然界筛选出多种有益微生物,用特定方法混合培养所形成的微生物复合体系,即专用于富营养化水体修复的微生物,包括光合细菌、乳酸菌、酵母菌、放线菌和发酵型丝状菌等菌群的复合培养。也有种属相对单一的微生物修复菌群,如诺卡氏菌(*Nocardia*)、光合细菌(P_{SB})、Clear-Flo系列菌等。该技术与传统污水处理工艺对比,具有操作简便、处理费用低、处理效果好、二次污染小、综合效益高等优点[35]。采用微生物强化修复技术通常是水体中缺乏污染物降解菌或其数量很少,并且在原水体培养、富集降解菌存在困难的情况下采用。此时向污染水体投放经专门培养和筛选的好氧、兼氧和厌氧微生物菌群,利用其呼吸发酵,将有机污染物迅速分解转化成CO₂、H₂O或其他无害物质,使污染水体加速净化。中山大学研究表明:将一定量有益微生物群液体菌剂和有效微生物群固体泥球投入人工湖后,水体透明度、叶绿素a含量明显改善,且在一定时期抑制藻类生长,防止水华发生[29]。天津大学试验表明:向湖水中投入以光合细菌为主的复合细菌群,能强化水体自净能力,控制水体富营养化。并且光合细菌复合菌群可以在较长时间内降低湖水浊度、藻类生物量和氨氮及总磷含量,达到净化水体的目的[36]。李明慧等通过向水域喷洒Bio-HE复合微生物制剂,使水域总氮与总磷综合去除率达30%~40%。廖涛等研究微生物菌剂配合蔬菜浮床净化富营养化水体,其总磷去除率43.9%~73.4%,总氮和氨氮去除率分别达26.8%~51.2%和11.3%~23.3%,远好于单一蔬菜浮床的去除效果[34]。

解决城市黑臭水体污泥的根本途径也是“活水”方法。通过将微生物和溶解氧及时足量运送到水体底层,实现对底泥中有机物的彻底降解(氧化还原),便可以消除污泥有机污染物,减少淤泥量,并恢复底泥的生态净化功能。实验发现,污染水体中加入“科利尔”生物带后,水底污泥厚度由0.1m降至0.02m,

减少 80%；COD 去除率比空白组高出 22 个百分点，达 93%。曹阳等采用 CHE-1 菌种处理磁湖底泥，底泥中有机污染物含量由原来的 23.3 mg/L 下降至 12.3 mg/L，去除率达 51%，降解率提高了 0.5 倍[34]。1990 年代以来，微生物制剂使用方法逐步成熟并广泛应用，主要是通过选择使用芽胞杆菌、乳酸菌、光合细菌、酵母菌、放线菌、EM 菌等有益菌，使水体有益菌快速繁殖达到较高密度，完成富营养化水体中有机污染物降解，并防止其沉积成淤泥，造成“氧债”积压。值得注意的是，由于微生物没有运动能力，只能依靠水体运动实现位置转移。微生物制剂要提高使用效果，必须依赖多向循环流动状态的“活水”，一方面有益菌可以“守株待兔”，在原地就能源源不断获得“活水”运送来的“营养”(有机污染物)和溶解氧，另一方面在“活水”运送下，有益菌能“主动出击”获取“营养”(有机污染物)和溶解氧，提升其净化水质作用[1]，所以，微生物制剂要实现净化水质的最佳效能和最优效果，有赖于“活水”运送作用。同时，活水也能帮助水生植物(包括浮游植物)“守株待兔”获取营养和溶氧，还能帮助浮游动物“主动”获取饵料生物。另外，通过及时补充新鲜外源水、换水等措施，实现原有土著浮游植物和有益菌种群的品种更新和新老交替，及时补充衰减消亡的浮游植物和有益菌，以保持它们在污染水体中有较高密度和较强活力。还可以使用专用单细胞藻更新浮游植物品种，并补充数量与维持密度。

4. 结论

无论是古代发现，还是自然生态系统的现实反映，以及新型“活水”水产养殖技术和现代城市黑臭水体的治理试验，都证明了“活水”方法是治理城乡富营养化水体的有效途径和成功手段。这包括建立或修复以好氧有益菌为核心的水体生态系统，打造或维持多向循环流动的“活水”状态和生态与人工结合全方位、全时段持续供给充足溶解氧，以形成具有旺盛生命力和强大净化能力的“活水”生态系统[37]，从而成为治理城乡富营养化水体的可持续途径。

基金项目

本文受江苏省农业三新工程资助，项目编号为：渔业 Y2018-11。

参考文献

- [1] 时习之. 存利去害颐养天年——解读“吕氏春秋·尽数”的养生思想[J]. 现代养生, 2008(10): 18-21.
- [2] 陈琳. 半亩方塘考辨[J]. 艺苑, 2017(s1): 29-31.
- [3] 王建革. 江南“活水周流”的历史经验与现实对策[J]. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), 2018, 50(5): 71-81.
- [4] 李荣福. 活水基本理论与养殖水质调控[J]. 水产研究, 2018, 5(2): 21-29.
- [5] 李荣福. “氧债”基本理论与养殖水质调控[J]. 海洋科学前沿, 2018, 5(1): 1-8.
- [6] 李荣福, 王守红, 孙龙生, 寇祥明, 吴雷明. “活水”在水产养殖中应用研究[J]. 水产研究, 2019, 6(2): 42-52.
- [7] 我国七大水系总体水质稳定[J]. 治黄科技信息, 2005(4): 16-17.
- [8] 杨世平, 关仁磊, 李婷, 等. 耕水机在日本囊对虾高位池养殖中的应用效果[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(33): 86-91+210.
- [9] 郑冠雄, 陈贻仲, 陈光炬. 耕水机在花鳊池塘养殖中的应用试验[J]. 海洋与渔业, 2008(10): 53-54.
- [10] 程儒仿, 李丹萍. 耕水机在罗非鱼精养池塘的应用效果分析[J]. 淡水渔业, 2011, 41(5): 68-73.
- [11] 齐秀英, 刘红波, 裴晓峰. 耕水机在水产养殖中的应用[J]. 农业科技与装备, 2011(1): 38-40.
- [12] 林海, 张云贵, 李旭光, 等. 耕水机在池塘养殖中应用效果的比较研究[J]. 水产养殖, 2017, 38(3): 4-7.
- [13] 马淑, 黄凰. 耕水机在池塘养殖上的应用[J]. 云南农业, 2018(2): 72-73.
- [14] 柴继芳, 俞爱萍. 耕水机在南美白对虾养殖中的应用[J]. 现代农业科技, 2010(10): 227-228.
- [15] 叶晓彦. 北京打造水循环工程 150 公里“死水”变“活水”[N]. 北京晚报, 2013-08-29.

- [16] 李丹丹. 水循环让“死水”变“活水”[N]. 中山日报, 2015-10-20.
- [17] 杨玥, 陈洁. 补水活水在城市黑臭水体治理中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(3): 137-138.
- [18] 王晓玲, 王鸯鸯, 苗忠梅, 等. 我国城市黑臭水体成因分析及治理建议[J]. 中国环保产业, 2018(12): 52-53.
- [19] 王浩, 马志恒. 清淤技术方法在城市黑臭水体应用研究[J]. 智库时代, 2017(17).
- [20] 林长喜, 吴晓峰, 曲风臣, 等. 我国城市黑臭水体治理展望[J]. 化学工业, 2017, 35(5): 65-68.
- [21] 李光勇, 范丹丹, 吉林安. 纯氧纳米气泡水生态修复技术在黑臭水体治理中的应用[J]. 建设科技, 2018(1): 27-29+33.
- [22] 高洋, 郑艳, 宋歌, 等. 城市黑臭水体应急治理的技术[J]. 环境与发展, 2018, 30(5): 98-99.
- [23] 宁梓洁, 王鑫. 黑臭水体治理技术研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 31-34+78.
- [24] 王嘉学. 滇池及入湖河道富营养化治理的人工辅助增氧[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 183-187.
- [25] 孙从军, 张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J]. 环境保护, 2001(4): 12-14.
- [26] 贾紫永, 刘强, 伍灵, 等. 微纳米曝气技术在黑臭河道治理中的应用研究[J]. 化工管理, 2017(36): 106.
- [27] 李开明, 刘军, 刘斌, 等. 黑臭河道生物修复中3种不同增氧方式比较研究[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 816-821.
- [28] 蔡秀萍, 吴启堂. 湖泊富营养化治理[J]. 黑龙江水利, 2006(5): 25-27.
- [29] 哈欢, 金鹏飞. 河道生态修复技术及其在上海市的实践[J]. 节水灌溉, 2009(7): 46-49.
- [30] 柏茜, 徐冰峰. 城市黑臭水体治理技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(1): 156-157.
- [31] 王永辉. 城市黑臭水体治理技术探讨[J]. 山西建筑, 2017, 43(32): 174-175.
- [32] 张绍浩. 富营养化湖泊藻类控制技术比较及新方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [33] 董哲仁. 生态水工学——人与自然和谐的工程学[J]. 水利水电技术, 2003, 34(7): 80-85.
- [34] 张可. 微生物强化技术在黑臭水体生态修复中研究进展[J]. 现代商贸工业, 2019, 40(3): 191-193.
- [35] 李安峰, 潘涛, 杨冲, 等. 水体富营养化治理与控制技术综述[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(16): 9041-9044+9062.
- [36] 李佐荣. 微生物在湖泊富营养化治理中的应用[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(9): 63+194.
- [37] 李荣福, 王守红, 孙龙生, 寇祥明, 吴雷鸣. 水体富营养化生态分析与“活水”生态治理的研究[J]. 世界生态学, 2019, 8(2): 90-96.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-7967, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ije@hanspub.org