

Study on Theory and Strategic Value of Sewage Treatment with “Ecological Live Water”

Longsheng Sun¹, Rongfu Li^{2*}, Xiangming Kou³, Lili Tian¹, Yang Yang¹, Haoyu Liu¹, Tao Wang¹, Shuguang Wang²

¹College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²Yangzhou Society of Fisheries, Yangzhou Jiangsu

³Agricultural Science Institute of Jiangsu Lixiahe District, Yangzhou Jiangsu

Email: *13615252160@163.com

Received: Sep. 26th, 2019; accepted: Nov. 12th, 2019; published: Nov. 19th, 2019

Abstract

Water pollution is a common phenomenon in urban and rural water bodies. Sewage treatment has become a major issue in the construction of ecological civilization. “Eco-living water” is a way to treat sewage by incorporating ecology into flowing water. By constructing a “micro-ecosystem” consisting of a series of highly active beneficial bacteria and original zooplankton and plants, and gradually restoring or rebuilding an ecosystem composed of diverse organisms, the sewage can be treated. By the function of water mixing machinery, micro-circulating water can be created to realize the whole time and space of sewage treatment. “Four-dimensional” means the treatment of sewage in the whole waters, 24 hours and various meteorological conditions. “Ecological living water” control is to establish an ecosystem with two kinds of microorganisms as the core in the original polluted waters for sewage treatment, to maintain the stability of the ecosystem and its strong pollution purification capacity as the core, and to carry out daily maintenance work. It is only necessary to adjust the intensity of oxygen enrichment, water diversion and bacteria replenishment timely and moderately according to the changes of weather conditions and surrounding pollution discharge, and to circulate water at a micro-speed. Under this condition, maintaining the stability of the aquatic ecosystem and its strong pollution purification capacity has obvious efficiency advantages and cost advantages, and is in the leading position in the world. Therefore, the “ecological living water” is a water control method with fewer resources, less investment in equipment, fast pollution control speed, low operating cost and strong sustainability.

Keywords

Ecological Living Water, Water Control, Theory, Strategy

“生态活水” 治水理论与战略价值的研究

孙龙生¹, 李荣福^{2*}, 寇祥明³, 田立立¹, 杨 阳¹, 刘昊宇¹, 汪 涛¹, 王曙光²

作者简介: 孙龙生(1964-), 男, 江苏泰兴市人, 博士, 副教授, 研究方向: 水产养殖与水环境治理技术。

*通讯作者。

文章引用: 孙龙生, 李荣福, 寇祥明, 田立立, 杨阳, 刘昊宇, 汪涛, 王曙光. “生态活水”治水理论与战略价值的研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(6): 592-602. DOI: 10.12677/jwrr.2019.86067

¹扬州大学动物科学与技术学院, 江苏 扬州

²扬州市水产学会, 江苏 扬州

³江苏省里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州

Email: *13615252160@163.com

收稿日期: 2019年9月26日; 录用日期: 2019年11月12日; 发布日期: 2019年11月19日

摘要

水污染是城乡水体普遍现象, 治理水污染已成为生态文明建设的重大课题。“生态活水”治水是寓生态于活水之中治理污水, 通过构建以系列高活力有益菌和原生态浮游动、植物组成的“微生态系统”, 并逐步修复或重建多样化生物构成的生态系统治理污水; 并通过活水机造就微速循环流水, 实现了“四维”全时空(即全水面、全水层、全时段、全天候组成)持续高效净化污水。“生态活水”治水是在原污染水体中建立以两类微生物为核心的生态系统治理污水, 并以保持生态系统的稳定性及其强劲污染净化能力为核心开展日常维护工作, 只须根据天气状况和周围污染排放情况, 适时适度调整增氧、引水、补菌强度, 持续保持微速循环流水, 保持生态系统稳定和强劲污染净化能力, 具有明显效率优势和成本优势, 处于国际领先地位。因此, “生态活水”治水是一种占用资源少、设备投资省、治污速度快、运行成本低、可持续性强的治水方式。

关键词

生态活水, 治水, 理论, 战略

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

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

“活水”是人们对于保持缓慢流速的开放性自然水体的习惯称谓。我国古代就已发现“活水”具有净化污染、改善水质的功能, 便有了“流水不腐”[1]和“问渠哪得清如许, 为有源头活水来”等对活水净化功能的精辟概括[2]。研究发现, 自然“活水”并非流动着的纯净水, 而是“绿水”, 是有多样化矿物质溶解和由多样化微生物生存的缓流水, 具有综合性自然净化能力, 故万里长江虽吸纳沿岸城市多样化海量污染, 直至奔流到海仍为“一江春水”。

“活水”的传统认识还是停留在其表象——水体的流动上。《现代汉语词典》对“活水”的解释是有源头而常流动的水[3]。在古代文献中, “活水”是指静流之水或有源头常流动的水。据汉朝王充《论衡·状留》注解: “活水, 沙石不转; 洋风, 毛芥不动”[4]。在古代“活水”与流水含义相近, 但又有一定区别, “活水”虽有一定流速, 但“沙石不转”, 流速缓慢, 是水质清澈的微速流水; 既不是静水, 也不是激流洪水。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”[5]。自上世纪末以来, 城市污水治理强调清淤和“活水工程”的作用[6][7][8][9]。以中等城市常州市清淤工程为例, 在2007~2016年十年间耗资40多亿元, 全城水质有所改善, 从严重污染下降为重污染, 但城市水体水质仍处于污染状态[8]。“活水工程”也称补水活水工程, 或清水活水工程, 是通过引入外源清水, 保持水体一定水位(水量), 保证一定流量

(流速),从而稀释或冲洗带走原有水体污水,消除水体黑臭现象,以改善水质的方法[9]。现行“活水工程”打造的大多是平直水流,而非垂直交流,水体只有垂直交流才能形成较强的污染净化能力,现行“活水工程”只是发挥了污染稀释作用,或将上游污染转移到下游水体。同时,“活水工程”需要占用大量水资源,这在北方缺水地区根本无法采用。

“活水”是指保持运动状态并具有旺盛生命活力的水。观察发现,水生动物喜欢在“活水”中生活,且不易生病;江河湖海等“活水”出产的水产品相比一般“呆塘”(封闭池塘)养殖的水产品具有更为鲜美的风味,因此,水产养殖十分强调“活水”的作用[10]。笔者从2009年起,开展活水机应用于水产养殖水质调控的试验[11][12],发现“活水”中进行的物理、化学和生物过程是相互作用、相互影响、复合交叉,具有交换、运送和净化功能[13]。进一步研究发现,养殖水体中污染物净化效果往往与水体中有益菌、浮游(动)植物等两类微生物构成的微生态系统和溶解氧含量与分布状况密切相关,通过将“微生态制剂”与“增氧活水机”配合使用,对净化富营养化养殖水质,抑制“蓝藻爆发”具有显著效果[14]。研究还发现,具有上述两类微生物组成的“微生态系统”的“绿水”,即“生态活水”。“生态活水”中两类微生物的综合作用,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,实现了水域生态系统物质循环和能量转换,构成了“生态活水”对污染物的自然净化作用[15]。同时,通过对水体富营养化生态分析,提出了“生态活水”净化富营养化水质的生态设想,进一步设计了“生态活水”治理黑臭水体技术方案,并在扬州官河黑臭水体组织实施,取得了理想的治理效果[16],从而为形成系统的“生态活水”治水理论的打下了基础。本文便是对10余年来活水机、增氧活水机和微生态制剂综合应用试验的实践总结和理论探索成果。

2. “生态活水”治理扬州官河黑臭水体取得极佳的治水效果

水体黑臭和富营养化是我国城乡河道的普遍现象[17]。河湖出现季节性或终年黑臭,是城乡水体的严重污染[18],不仅影响城市景观和生态环境,而且降低城乡居民生活质量,甚至直接威胁身体健康。据权威部门统计,截至2016年,全国295个地级以上城市中有216座城市排查出黑臭水体1811个,已严重影响了居民生活质量[19]。黑臭水体治理的难点是有机污染物底泥(氧债)的大量沉积,导致水体局部缺氧及甚至全水体无氧,使水体中除少数厌氧菌外,其他所有生物灭绝,导致生态系统崩溃[20]。扬州官河是扬州市区严重污染多年的典型黑臭水体,按照住房与城乡建设部制定的《城市黑臭水体整治工作指南》划定的城市黑臭水体污染程度分级标准,属重度黑臭水体[21]。虽经多年治理,并利用扬州天然水源丰富的优势,经常进行换水,但水质状况始终未能改观。治理前的官河水体长期浑浊,溶解氧近于零(0.12~0.13 mg/L),几乎一切生物都无法生存。每逢清晨或阴雨天气,河道两侧臭气熏人,群众意见极大,经常向当地政府和有关部门反映此类问题[16]。扬州市水产学会、扬州大学动物科学与技术学院与扬州市水利学会在扬州市水利局支持下,从8月13日起,在扬州官河开展了“生态活水”治理黑臭水体试验,该试验运用“活水”和“氧债”基本理论,利用活水的交换、运送和净化三大生态功能,通过科学安装使用活水机和增氧机,合理足量投放四大系列微生态制剂,并借用水生植物浮床,快速消除水底淤泥中有机污染物耗氧(氧债),迅速修复黑臭水体生态系统[22],形成“绿水”(即生态活水)快速彻底净化黑臭污水,达到了事半功倍、快速高效的治污效果。8月18日水利部太湖局至扬州检查城市黑臭河道整治工作,对“生态活水”治理黑臭污水效果充分认可;8月20日《扬州晚报》在A5版和网络版《扬州发布》分别以《官河采用“生态活水”技术治污,一周后——黑臭河的鱼儿又回来了》和《“生态活水”治污一周后,扬州这条河又“活”了》标题对“‘生态活水’治理黑臭污水”试验进行了报道[23][24]。8月27日,扬州市水利局(市水利学会)与扬州市邗江区竹西街道办事处联合对该试验进行了现场检查验收,对治污效果给予充分肯定。扬州大学9月8日官河水质检测结果表明,9月8日9:30官河水质检测结果远远超出了以往国内外所有黑臭污水治理的效果,水面碧波荡漾,水质清澈见底,水体透明度、溶氧、氨氮、总氮、总磷和有机物耗氧量等指标分别达60.7 cm、5.61 mg/L、0.59 mg/L、1.43 mg/L、0.09 mg/L和6.06 mg/L,均达到或超过了国家地表

水 III 类水水质标准,这在国内外尚属首次报道[16]。

3. “生态活水”治水的理论基础

3.1. 天然水体生态系统的自然净化理论

一般天然水体都具有多样性生物组成的完整生态系统,主要包括浮游植物(也是一类微生物)与水生维管束植物组成的生产者;由鱼虾鳖蛙等游泳和两栖等两类动物,螺蚌、水蚯蚓、摇蚊幼虫等组成的底栖动物,枝角类(红虫)、桡足类等浮游动物组成的消费者,以及由细菌、放线菌、真菌类等微生物分解者[25] [26]。我们把具有生产者、消费者和分解者组成的生态系统称之为“完整生态系统”。天然水体生态系统都是“完整生态系统”,具有丰富的生物多样性,系统稳定性好,其中消费者和部分生产者(水生经济植物)都是人类重要食物来源。

天然水体中各类生物新陈代谢都会产生废弃有机物沉积到水底而污染水体。这些污染物可以被细菌、放线菌、真菌类等微生物分解者作为必需的营养所分解利用[27];这些微生物分泌的催化酶,能加速对水体中废弃有机物氧化分解,转化为浮游植物与水生维管束植物生长需要的氮、磷等营养盐,如果没有这些微生物的参与,这个过程虽然也能进行,但进程非常缓慢[28];浮游植物与水生维管束植物借助太阳能,利用上述微生物氧化分解形成的营养盐进行光合作用而生长繁殖,同时产生大量溶解氧;既为各类水生动物生存与生长发育提供必要条件和食物,也为微生物氧化分解提供充足的氧气,使天然水体始终维持能量转换和物质循环的可持续状态,形成对污染物的自然净化能力[26]。天然水体的生态净化能力是在多样化生物参与下的能量转换和物质循环过程,而好氧有益菌在水体有机污染物氧化分解过程发挥着桥梁和加速作用。天然水体溶解氧供给充足,在底泥表层往往都有氧化还原层,形成有利于底栖好氧型有益菌附着的土壤环境,又增强了底泥对水体污染物的生物净化能力。因此,“生态活水”治水的核心就是恢复或健全以微生物为核心的水体生态系统,形成可持续的水体自然净化能力。而其中最为核心的部分是由细菌、放线菌、真菌类等有益菌和浮游植物等两类微生物组成的“微生态系统”,形成高效自然净化能力。在黑臭水体中足量供氧并形成微速循环流动的条件下,足量投放系列微生态制剂,一般3~5个晴日天气便能形成“微生态系统”,造就具有强大自然净化能力的“绿水(生态活水)”,快速完成对黑臭污水和黑臭淤泥的降解。

3.2. “生态活水”治水的哲学基础

水体生态系统实质是包括多样化矛盾的矛盾综合体。在水体错综复杂的多样化矛盾总是处于对立统一之中,矛盾的双方总是既相互对立又相互依赖,矛盾双方既是对立方存在的条件,也是对立方发展变化的推动因素。在水体生态系统中多样化生物与多样化非生物环境因子之间存在着极其复杂的矛盾[29]。这些多样化非生物环境因子包括当地气候、地形地貌和土壤、水文等等物理因素及其之间相互影响,由此带来系统中化学因子之间相互作用与化学因子的变化。而人类文明的发展又影响水体物理、化学和生物因素的变化。因此,在人类聚居的城乡周围水域生态系统已经打上了人类社会的烙印。由于人类活动,使水体生态系统本来缓慢的变化变得剧烈,水体中本来并不对抗的矛盾变得尖锐起来。如自然状况下的水体溶解氧对水体所有生物来说是充裕剩余的。在人类聚居密度较低情况下的城乡周围水域溶解氧也是总量平衡,稍有剩余。但在进入现代社会后,化肥农药过量使用后农业废水、食品工业污水和人类生活废水的直接排放,过量消耗了水体溶解氧,水生生物与溶解氧之间和有机污染物与溶解氧之间两对矛盾的性质由量变到质变,由非对抗性矛盾转变为对抗性矛盾,由次要矛盾上升为主要矛盾,并且将溶解氧从次要矛盾的次要方面上升为主要矛盾的主要方面[30],并因为缺氧可能造成生态系统净化功能减弱,甚至生态系统崩溃失去净化功能成为“黑臭水体”。因此,“生态活水”治水的关键就是保障溶解氧在水体中均衡充裕供给,缓和其与水生生物之间和其与水体污染物之间两对对抗性矛盾冲突,保持水体生态系统稳定,保障水体自然净化能力。

3.3. “生态活水”治水的“氧债”理论

水体一切生物的生存与生长发育都离不开溶解氧, 水体有机污染物(包括外来污染物、生物废弃物等)分解转化也离不开溶解氧。水体中大量有机污染物可能因溶解氧未能及时足量供应而处于待氧化分解状态, 便形成了水体“氧债”[22]。这些未及时氧化分解的有机污染物, 日积月累沉积在水体底部成为黑臭淤泥, 这些黑臭淤泥便是水体中主要的“氧债”源。黑臭水体的实质是水体“氧债”累积数量远远超出了水体供氧能力, 导致水体溶解氧供求平衡彻底“破产”, 使水生生物大量死亡, 而造成水体生态系统全面崩溃。同时, 由于“气”“水”比重的巨大差异, 溶解氧在水中通常是“水往低处流, 氧往高处走”。因此, 水生植物光合作用产氧和一般机械方式充氧、增氧主要增加的是水体中上层溶解氧, 无法将溶解氧输送到黑臭淤泥(氧债)集中的水体底层; 只有在夜晚或降温降雨降雪后, 表层水温降低导致表层水密度加大, 形成水体垂直交流, 才有可能将水体中上层溶解氧捎带到水体底层, 偿还长期积欠的“氧债”[13]。在自然状态下, 阴雨天气和夜晚都是水体垂直交流最为剧烈的时间, 同时又是光合作用停止, 溶解氧来源最少的时段[22]; 如果水底淤泥沉积过多, “氧债”积欠过大, 水体垂直交流可以在短时间内耗尽水体溶解氧, 造成水体生态系统崩溃而“黑臭”。一般性人工充氧(增氧), 溶解氧很难及时送达水体底层, 偿还黑臭水体积欠的“氧债”; 化学增氧也只是在短时间内偿还水中和底泥表层部分“氧债”, 一遇阴雨带动底泥泛起爆发性偿还“氧债”时, 便可能使水体溶解氧归零而使生态系统崩溃。“生态活水”治水焦点首先集中在水体生态系统修复上, 通过足量投放底泥强氧化型生化产品, 快速还清水中和淤泥表层积欠的“氧债”, 并在底泥表层形成氧化还原层, 阻断下层污染物释放, 使下层积欠“氧债”封账缓还。同时利用活水机将人工充氧(增氧)与光合作用产氧等增加的溶解氧源源不断送达水体底层, 及时偿还因天气状况剧烈变化或污水排放形成的突发性和爆发性“氧债”, 防止“氧债”累积造成水体溶解氧“亏空”[15], 而重返“黑臭”。

3.4. “生态活水”治水的“活水”理论

黑臭水体治理焦点在于, 即使用机械方法彻底清除黑臭淤泥后, 随着新的污染物不断沉积水底, 又会积淀成新的淤泥; 国内不少城市“黑臭水体往往在清淤不到一年甚至数月后, 溶解氧供求平衡便很快被打破, 水体“氧债”便累积到“资不抵债”, 而重返“黑臭”[31]。因此, 如何消除水体因雨水及其他地表水持续带入的有机污染物沉积造成的“氧债”累积, 便是黑臭水体的治本之策。“生态活水”是具有完整微生态系统的全水体微速循环流水, 在自然状态下, 直观为“绿水”。“生态活水”治水就是创建“微生态系统”造就水体强劲的自然净化能力, 并通过活水机形成全水体微速循环水流, 对水体污染物实现“四维”全时空(即全水面、全水层、全时段、全天候等组成)持续净化的治水方式。首先, 必须通过活水机将光合作用产氧(这是水体溶解氧来源的主渠道)及其他方式增加的溶解氧持续不断地输送到水体底层, 及时清除不断产生的“氧债”; 同时又将底层有机污染物及其氧化分解成的营养盐转运到水体上层[13][32]。其次, 有机污染物降解以好氧有益菌充分参与分泌多样化催化酶而加速, 而好氧有益菌降解有机污染物又以溶解氧供给为条件, 并以溶解氧及时足量供给而保证有机污染物降解过程变得更加彻底, 避免产生有毒有害的氨氮、硫化氢等中间还原产物, 为水生动植物提供更加优越的生态条件, 有利于水体多样化水生生物的回归[25]。另外, 还须通过适量引水或补水, 修复并健全多样化生物构成的水体生态系统, 进一步提升水体自然净化能力[33]。综上所述, “生态活水”治水就是通过活水机造就微速循环流水, 带动投放的有益菌、溶解氧和水体有机污染物向全水体输送, 以增加三者之间相互作用的机率 and 程度, 实现三者之间充分、深入、频繁地相互促进与相互作用, 达到对有机污染物快速、全面、彻底净化, 并及时将转化成的氮、磷等营养盐运送到水体上层供给植物光合作用利用, 从而加快了水体能量转换与物质循环过程, 以水体流动带动生态活动, 促进新陈代谢, 造就生态活力强劲的“生态活水(绿水)”, 形成可持续的水体高效自然净化能力。

4. 黑臭水体形成的症结与治理难点

大量城乡工农业生产和居民生活产生的有机污染物进入水体后,快速消耗水中溶解氧,如果超出水体产氧能力,便使水体处于缺氧和无氧状态,导致水体发黑致臭。其中水体发黑主要是在厌氧条件下,金属离子结合了硫离子产生致黑物质吸附在悬浮颗粒上而使水体呈现黑色[34]。化学分析得出水体致黑源有2种,一是吸附于悬浮颗粒上的不溶性物质,二是带色腐殖质类可溶性有机化合物。水体致臭主要是厌氧反应形成的有机硫化物挥发产生致臭气体,以及有机物厌氧分解产生的 NH_3 、 H_2S 等散发出臭味[20]。同时,水体中部分氨基酸的脱氨基作用、脱羧酸作用以及某些细菌如变形杆菌分解含硫氨基酸产生大量游离氨的同时,还产生有严重臭味的硫醚类化合物、乔司脞和2-二甲基异茨醇等物质,导致水体发臭[31]。黑臭水体形成的症结是有机污染物过量排放未能及时氧化分解,而大量沉积于水底成为黑臭淤泥,造成“氧债”超量累积,使整个水体长期处于无氧状态,水体中除厌氧菌外所有生物全部死亡,导致生态系统崩溃。即便对水体大量人工增氧,而一般增氧方式只是局部复氧,增加水体中上层溶解氧,并不能增加底层溶解氧,快速偿还底层黑臭淤泥中长期积欠的“氧债”。一旦气温下降或降雨,表层水体积冷缩后比重加大,造成水体垂直交流,导致“氧债”爆发性偿还,便可能在短时间内使水体溶解氧消耗殆尽。所以,许多黑臭水体治理经常出现反复,其主要原因便是因底泥累积的巨量“氧债”没有彻底去除或没有及时封存,又有新的有机污染物排放,形成旧的“氧债”未还,新的“氧债”又增,水生生物无法回归,水体生态系统难以恢复。这便是黑臭水体“久治不愈”的原因。

5. “生态活水”治理黑臭污水的机理与技术

氧债是黑臭之源,生态是治水之本,活水是治水之机。“生态活水”治水是根据水域生态学、活水和氧债的基本理论,借助活水运送、交换与净化作用,快速去除污染水体(特别是黑臭水体)底泥积存的“氧债”,实现水体全面复氧;通过投放足量系列微生态制剂,快速造就具有强劲净化功能的水体微生态系统,逐步恢复多样性生物构成的完整水域生态系统,并维持系统稳定性,达到稳步提升水体生态环境质量的目的。

5.1. 快速底层增氧,彻底清除底泥积欠“氧债”

黑臭水体主要耗氧源(氧债)是底泥耗氧,底泥约占黑臭水体总耗氧量的60%~90%以上。快速彻底清除水体底泥“氧债”,是恢复黑臭水体生态系统的前提。“生态活水”治水通过机械活水和生物化学制剂,快速增加水体下层及底泥表层溶解氧[16],清除水中和底泥表层累积的“氧债”,在底层表层形成一定厚度的氧化还原层,造就有利于底栖微生物、底栖动物及水生植物生长发育的土壤环境;同时,这个氧化还原层隔绝了底泥中下层有机污染物(氧债)继续向水中释放,赐除了这部分积欠“氧债”,减轻了水体偿还“氧债”的压力,避免了因天气剧烈变化爆发性偿还这部分“氧债”,为水体生态系统(核心是微生态系统)快速恢复并保持稳定,打下了坚实的基础。这是“生态活水”治理黑臭水体的首要措施。

5.2. 使用微生态制剂,快速恢复水体生态系统

天然水体多样化生物构成的生态系统具有可持续污染物净化能力。“生态活水”治水是恢复并利用水体生态系统净化污水,毋须设备投资并减少日常运行成本。因此,“生态活水”治水是投资省、成本低和可持续性强的污水治理方式。在自然状态下,黑臭水体在复氧后恢复生态系统与自然净化能力的过程是一个极其缓慢的过程,少则十天、半月,多则数月。“生态活水”治水是在溶解氧稳定供应和足量投放高活力系列微生态制剂的前提下,借助机械活水作用,形成包括好氧有益菌、兼性有益菌、喜光性有益菌,以及底泥附着型有益菌等系列有益菌和水体原生态浮游动、植物共同组成的、污染物净化功能强大的微生态系统[27]。“生态活水”治水可以在短时间内(3~5天)迅速造就“生态活水(绿水)”,形成强大持续生态净化能力,并抑制蓝藻的繁殖[13][35]。同时,适当引水补水,栽植水生维管束植物,还可投放定向培育的优良浮游藻种,健全多样化生物构成的水体

生态系统,提升水体整体活力与自净能力。

5.3. 适时适量补氧、补菌、补水,维持水体强大的自净能力

治理后的污染水体具有稳定的生态系统和水质净化能力。无论水体中各类生物产生的废弃有机物污染,还是一定量的外源有机污染物排放,都可以利用其自身净化能力予以降解。需要指出的是,当天气连续阴雨或有大量外源有机污染物排放时,一方面可能造成溶解氧来源大量减少,另一方面又会使耗氧量快速增加,从而造成水体溶解氧入不付出而缺氧,甚至无氧,导致水体生态系统崩溃,而重返黑臭水体。

恢复生物多样化水体生态系统不仅进程缓慢,而且成本昂贵,需要付出维持生态系统的数十倍甚至上百倍的代价,因此,必须做好治理后水体生态系统的维持工作。做到密切注意天气变化、周边水体水文波动和污水排放等情况,及时调整增氧强度,弥补因水体产氧减少或耗氧增加等造成的溶解氧缺口,保障水体溶解氧供求平衡并略有剩余。同时,及时适量补充衰竭消滅的有益菌,保持水体有益菌活力和适当密度(浓度),并定期引进外源好水,引入活力充沛的浮游动植物及其他水生动物品种[36],保持水体生态系统完整性和污染物净化能力。

5.4. 活水机械在“生态活水”治水中的关键作用

然而,建立水体生态系统(主要是微生态系统)只是造就了净化污水的生态主体,具备了污水净化的生态潜能。在自然水体中,这种污染净化潜能只是间隙性发挥作用。在占据一年中大多数的非降温降雨天气,水体上层温度总是高于底层,造成上层水密度(比重)总是小于底层水,这种因上下水层“温度差”形成的“密度差”成为阻碍水体垂直交流的“热阻力”,阻碍了生态系统(主要是微生态系统)对底层水和底部淤泥中污染物的净化。只是在少数降温降雨天气造就了垂直交流“密度流”后[36],水体才能发挥生态系统(主要是微生态系统)自然净化作用。所以,自然水体生态系统的污染净化功能只是局部空间和局部时间发挥作用,即在晴天白天在水体上层对水中污染物发挥净化作用,只有到夜间或降温降雨天气形成“密度流”后,好氧有益菌和溶解氧才能一起奔走水体底层,对下层水和底泥表层污染物发挥净化作用。而在此时,水体已失去或减少了溶解氧供给,生态系统的污染净化(氧化分解)功能必然受到水体溶解氧贮存量限制。鉴于水的热力学和光学特点,如何实现并持续保持水体上下水层之间垂直交流,是能否将水体生态系统(主要是微生态系统)污染净化潜能转化为治理污水现实效果的关键所在。据江苏省扬州水文局测定,活水机能造就全水体微速循环水流,表层流速为 0.008~0.117 m/s,底层流速为 0.005~0.061 m/s [16]。这个流速既保证了水体上下水层之间的持续频繁交流,又不会将水底淤泥冲刷泛起,造成水质浑浊。“生态活水”治水借助于活水机械形成的全水体微速循环水流,带来了有益菌、溶解氧和污染物之间亲密接触、充分接触和频繁接触,实现了三者之间的紧密结合,达成了水体生态系统(主要是微生态系统)“四维”全时空(即全水面、全水层、全时段、全天候等组成)持续循环净化污水,这便是“生态活水”治水效率高、效果好的关键所在。

6. “生态活水”治水的战略价值

城乡黑臭水体不仅影响城市景观和对外形象,带来极差的感官刺激,也严重影响当地居民生产生活。鉴于此,国务院“水十条”提出了“到 2020 年,地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在 10%以内,到 2030 年,城市建成区黑臭水体总体得到消除”的水污染控制性目标[37]。传统黑臭水体治理方法投资规模大、占用土地多、治理难度大,运行成本高、治理速度慢、治标不治本、返黑返臭周期短等弱点,给城乡社会经济发展和居民生活带来了严重困扰,给地方财政带来了沉重负担。“生态活水”治理黑臭水体是利用水体生态系统治理污水,是一种占用资源少、设备投资省、治污速度快、运行成本低、可持续性时间长的污水治理技术,为城乡污水治理开辟了节能降耗的有效途径。

6.1. 坚持生态修复，实现长效管理

一般物理或化学治理污水方式，短时间内在水体中上层能体现效果。但是，由于没有修复生态系统，没有形成水体自然净化能力，一遇天气变化或污水排放，便重返“黑臭”，难以长期维持水质稳定。“生态活水”治水是以迅速恢复水体生态系统为核心，造就“生态活水(绿水)”，并以水体生态系统所具有的能量转换和物质循环功能净化污水，只要采取辅助措施，就能维持生态系统稳定和较高污染物净化能力，是一种长效可持续的污水治理方式。

6.2. 减少资源占用，达到节能降耗

一般城乡污水治理方式，往往要建设污水处理厂，铺设污水输送管道，需要占用大片土地，投入少则数千万，多则数十、上百亿的巨额资金。“生态活水”治水在原有污染水体就地安装活水及增氧设备，毋须另外占用土地建厂和安装输送管道与设备，每公顷黑臭水体治理设备只须投资 5~8 万元；只是在治理初期须超量增氧和超量使用系列微生态制剂，迅速复氧和恢复水体微生态系统，投入成本较高，每公顷投入成本 1~2 万元；但日常维护运行成本很低，只须消耗少量电能维持活水和适度增氧，并适时少量投放微生态制剂，便能维持全水体“生态活水(绿水)” [16]，每年每公顷成本约 2~3 万元；而且不使用任何影响水体生态的化学药剂，有利保护和改善生态环境。

6.3. 坚持治本为先，力求标本兼治

污染水体形成的本质是污染物超量排放，并大量沉积水底形成黑臭淤泥，超出了水体自然净化能力，尤其是水体生态系统溶解氧自然供给能力，造成“氧债”大量累积和生态系统崩溃，使水体失去了自然净化能力。目前黑臭水体治理除污水处理厂外，就是水体增氧，或向水体泼洒沉淀剂、絮凝剂、氧化剂等化学产品，可以暂时性沉淀或氧化底泥。这些方式只能在水体中上层复氧或恢复生态系统，一遇阴雨或污水排放，水体生态系统便重新崩溃，而重返黑臭。“生态活水”治水方式在短时间内清除水底淤泥中累积的巨量“氧债”，迅速恢复水体微生态系统，形成“生态活水(绿水)”，恢复水体高效净化能力。由于安装了活水与增氧设备，投放了高活力有益菌，使其水体净化能力远高于一般自然水体，能够避免因为天气变化和污水排放造成的水体生态系统崩溃，从根本上解决污水的可持续治理问题。

6.4. 改善生态环境，促进美好生活

习近平同志指出：“良好生态环境是最公平的公共产品，是最普惠的民生福祉” [38]。一般黑臭水体治理首先是清淤，在清淤之前先要排放或抽出黑臭污水，还需找地方堆放黑臭淤泥，都会造成二次污染。另外，使用化学药剂治理污水还可能因药物残留造成二次污染[39]。采用“生态活水”治水是通过修复水体生态系统及其自然净化能力，特定微生态制剂的使用还能有效抑制蓝藻爆发，起到改善水面景观的作用；另外，在适宜的水体还可栽植苦草、轮叶黑藻、莲藕、茭白、菱角等沉水性、挺水性及浮叶性水生经济植物，既净化水质环境，又改善生态景观[40]，实现生态产业化，提高周围居民生活质量。

7. 结论

氧债是黑臭之源，生态是治水之本，活水是治水之机。只有将生态贯穿于活水之中，才能充分发挥生态系统自然净化的最大潜能，达到“氧债”瞬时产生便及时偿还，防止“氧债”积欠，达到对污水的可持续治理。“生态活水”治水针对的是严重污染水体(黑臭水体)的症结和治理难点——大量黑臭淤泥沉积，形成超量“氧债”累积，成为黑臭水体难治的根源。采取的是物理、生物与生物化学相结合的生态方法，即运用活水、增氧与微生态制剂相结合，实现全水体四维(全水面、全水层、全时段与全天候组成的全时空)快速复氧，并快速恢复包括

好氧有益菌、兼性有益菌、喜光有益菌与底栖有益菌等系列有益菌和原生态浮游动、植物等天然微生物构成的、具有完整能量转换与物质循环的微生物生态系统,并逐步充实健全多样性生物构成的水体生态系统,使水体“氧债”即生即还,使溶解氧始终处于充裕状态,保持超强污染物持续净化能力,这便是“生态活水”治理黑臭水体的核心所在。活水让本来没有运动能力、“守株待兔”的溶解氧、微生物制剂和原生态浮游动、植物等也处于全时空运动状态,相互间“高效紧密配合”,对水体污染物“主动出击”,加快了黑臭水体复氧和生态系统恢复,3~5天恢复微生物生态系统,形成“生态活水(绿水)”,15~20天将黑臭污水净化达到地表水Ⅲ类水标准。其后,只须根据天气及污水排量变化,适时适度补氧、补水、补菌,便能维持高效稳定的水体生态系统和净化能力。与当前国内外黑臭污水治理方式相比,具有明显的效率优势和成本优势,处于世界领先地位。

基金项目

江苏省渔业科技项目(Y2018-11);江苏省重点研发计划(社会发展)(BE2017688)。

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.
SHI Xizhi. Save profits to harm one's life and support one's life. Interpretation of the idea of keeping in good health in Lv's Spring and Autumn Period. Modern Health Preservation, 2008(10): 18-21. (in Chinese)
- [2] 陈琳. 半亩方塘考辨[J]. 艺苑, 2017(s1): 29-31.
CHEN Lin. A textual research on Half Mu Fangtang. Yiyuan, 2017(s1): 29-31. (in Chinese)
- [3] 中国社会科学院语言研究所词典编辑室. 现代汉语词典(第6版)[M]. 北京: 商务印书馆, 2012.
Dictionary Office of Language Research Institute, Chinese Academy of Social Sciences. Modern Chinese dictionary (6th Edition). Beijing: Commercial Press, 2012. (in Chinese)
- [4] 王充, 论衡. 诸子集成[M]. 长沙: 岳麓书社, 1996.
WANG Chong, LUN Heng. Zhuzi integration. Changsha: Yuelu Book Society, 1996. (in Chinese)
- [5] 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.
WANG Jiange. Historical experience and practical countermeasure of “Living Water Weekly Flow” in Jiangnan. Journal of Yunnan Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2018, 50(5): 71-81. (in Chinese)
- [6] 刘晓玲, 徐瑶瑶, 宋晨, 等. 城市黑臭水体治理技术及措施分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 519-529.
LIU Xiaoling, XU Yaoyao, SONG Chen, et al. Analysis of technology and measures for treatment of urban black and odorous water body. Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(3): 519-529. (in Chinese)
- [7] 王英才, 刘永定, 郝宗杰, 张兰, 沈银武, 李根保, 李敦海, 陈德辉, 马庆, 杨洪芳. 上海市几条黑臭河道治理效果的比较与分析[J]. 水生生物学报, 2009, 33(2): 355-359.
WANG Yingcai, LIU Yongding, HAO Zongjie, ZHANG Lan, SHEN Yinwu, LI Genbao, LI Dunhai, CHEN Dehui, MA Qing and YANG Hongfang. Comparison and analysis of the harnessing effects of several black and odorous rivers in Shanghai. Journal of Aquatic Biology, 2009, 33(2): 355-359. (in Chinese)
- [8] 陈阿萍, 李瑞金, 颜亚琴, 黄磊. 常州市城区河道清淤活水初探[J]. 长江技术经济, 2018, 2(4): 63-67.
CHEN A-ping, LI Ruijin, YAN Yaqin and HUANG Lei. Preliminary study on river dredging and live water in Changzhou City. Technology and Economy of the Yangtze River, 2018, 2(4): 63-67. (in Chinese)
- [9] 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.
YANG Yong, CHEN Jie. Application of recharge water in urban black and odorous water treatment. China Water Transport (Second Half Month), 2018, 18(3): 137-138. (in Chinese)
- [10] 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.
LI Rongfu. Basic theory of live water and regulation of aquaculture water quality. Aquaculture Research, 2018, 5(2): 21-29. (in Chinese)
- [11] 李荣福, 杨显祥, 孙龙生, 等. 耕水机在罗氏沼虾池塘养殖中的使用效果[J]. 渔业现代化, 2012, 39(5): 32-37.
LI Rongfu, YANG Xianxiang, SUN Longsheng, et al. The effect of water tiller in the pond culture of Macrobrachium rosenbergi. Fisheries Modernization, 2012, 39(5): 32-37. (in Chinese)
- [12] 李荣福, 杨显祥, 孙龙生, 等. 活水机对罗氏沼虾养殖增产增效机理的初步研究[C]//长三角科技论坛水产分论坛暨江苏省水产学术年会. 2012.
LI Rongfu, YANG Xianxiang, SUN Longsheng, et al. A preliminary study on the mechanism of increasing production and in-

- creasing efficiency of prawn culture by using agitating water machinery. Yangtze River Delta Science and Technology Forum Fisheries Sub-Forum and Jiangsu Fisheries Academic Annual Conference. 2012. (in Chinese)
- [13] 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.
LI Rongfu, WANG Shouhong, SUN Longsheng, KOU Xiangming and WU Leiming. Application of live water in aquaculture. Aquaculture Research, 2019, 6(2): 42-52. (in Chinese)
- [14] 李荣福, 郭正龙, 孙龙生, 等. 微生态制剂与增氧活水机配合应用于河豚养殖增产增效机理的研究[J]. 水污染及处理, 2018, 6(1): 24-37.
LI Rongfu, GUO Zhenglong, SUN Longsheng, et al. Study on the mechanism of increasing production and efficiency of puffer dolphin aquaculture by the combination of microecological agents and aeration water heater. Water Pollution and Treatment, 2018, 6(1): 24-37. (in Chinese)
- [15] 李荣福, 王守红, 孙龙生, 寇祥明, 吴雷明. “活水”应用于富营养化污水净化的研究[J]. 世界生态学, 2019, 8(3): 172-181.
LI Rongfu, WANG Shouhong, SUN Longsheng, KOU Xiangming, WU Leiming. Study on the application of live water to eutrophic sewage purification. World Ecology, 2019, 8(3): 172-181. (in Chinese)
- [16] 李荣福, 孙龙生, 李章林, 等. “生态活水”治理黑臭水体的研究[J]. 环境保护前沿, 2019, 9(5): 1-12.
LI Rongfu, SUN Longsheng, LI Zhanglin, et al. Research on the treatment of black and odorous water by “ecological living water”. Frontier of Environmental Protection, 2019, 9(5): 1-12. (in Chinese)
- [17] 罗刚, 胡和平, 刘军, 杨伟东, 段艳芳. 底泥生物氧化对黑臭河道上覆水体影响的研究[J]. 水利渔业, 2008(2): 71-74.
LUO Gang, HU Ping, LIU Jun, YANG Weidong and DUAN Yanfang. Study on the effect of bio-oxidation of sediment on the overlying water body of the Black Odor River. Water Conservancy and Fisheries, 2008(2): 71-74. (in Chinese)
- [18] 赵越, 姚瑞华, 徐敏, 等. 我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J]. 环境保护, 2015, 43(13): 27-29.
ZHAO Yue, YAO Ruihua, XU Min, et al. Practice and thinking of urban black and odorous water treatment in China. Environmental Protection, 2015, 43(13): 27-29. (in Chinese)
- [19] 林长喜, 吴晓峰, 曲凤臣, 陈庆俊. 我国城市黑臭水体治理展望[J]. 化学工业, 2017, 35(5): 65-68.
LIN Changxi, WU Xiaofeng, QU Fengchen and CHEN Qingjun. Prospects for urban black and odorous water treatment in China. Chemical Industry, 2017, 35(5): 65-68. (in Chinese)
- [20] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1331-1340.
WANG Xu, WANG Yonggang, SUN Changhong, et al. Research progress on formation mechanism and evaluation method of urban black odorous water. Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1331-1340. (in Chinese)
- [21] 姜青新. 构建城市水体整治长效机制, 切实改善水环境质量, 城市黑臭水整治新规解读[J]. WTO 经济导刊, 2015(11): 78-79.
JIANG Qingxin. Constructing a long-term mechanism for urban water body regulation and improving water environment quality. Interpretation of the new regulation for urban black and odorous water regulation. WTO Economic Guide, 2015(11): 78-79. (in Chinese)
- [22] 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.
LI Rongfu. Basic theory of oxygen debt and regulation of aquaculture water quality. Frontier of Marine Science, 2018, 5(1): 1-8. (in Chinese)
- [23] 向家富. 官河采用“生态活水”技术治污, 一周后——黑臭河的鱼儿又回来了[N]. 扬州晚报, 2019-08-20.
XIANG Jiafu. Guanhe used “ecological living water” technology to treat pollution. A week later, the fish of Heixie River came back. Yangzhou Evening News, 2019-08-20. (in Chinese)
- [24] 向家富. “生态活水”治污一周后, 扬州这条河又“活”了[N]. 扬州发布. <http://www.yznews.cn/p/916348.html>. XIANG Jiafu. One week after “ecological living water” pollution control, the Yangzhou River was “alive” again. Yangzhou Publication. <http://www.yznews.cn/p/916348.html> (in Chinese)
- [25] 何志辉. 淡水生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985.
HE Zhihui. Freshwater biology. Beijing: China Agricultural Press, 1985. (in Chinese)
- [26] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU Jiankang. Advanced aquatic biology. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [27] 董济军, 段登选. 浮动草床微生态制剂调控养殖池塘水环境技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
DONG Jijun, DUAN Dengxuan. Technology of regulating aquaculture pond water environment by floating grass bed microecological agents. Beijing: Ocean Press, 2017. (in Chinese)
- [28] 周德庆. 微生物学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
ZHOU Deqing. Microbiology course. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [29] 毛泽东. 矛盾论[M]. 北京: 人民出版社, 1975.
MAO Zedong. Contradictions. Beijing: People’s Publishing House, 1975. (in Chinese)

- [30] 李秀林, 王于, 李淮春. 辩证唯物主义和历史唯物主义原理[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1984.
LI Xiulin, WANG Yu and LI Huaichun. Principles of dialectical materialism and historical materialism. Beijing: Renmin University Press, 1984. (in Chinese)
- [31] 吴银彪, 郭建辉, 王晓玲. 河湖黑臭水体成因及治理思路[J]. 中国环保产业, 2018(8): 50-53.
WU Yinbiao, GUO Jianhui and WANG Xiaoling. Reasons for formation and treatment of black and odorous water bodies in Hehu. China Environmental Protection Industry, 2018(8): 50-53. (in Chinese)
- [32] 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.
LI Kaiming, LIU Jun, LIU Bin, et al. A comparative study of three different oxygen enrichment modes in bioremediation of the Black Odor River. Eco-Environment, 2005, 14(6): 816-821. (in Chinese)
- [33] 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.
LI Rongfu, WANG Shouhong, SUN Longsheng, KOU Xiangming and WU Leiming. Eco-analysis of eutrophication of water body and study on ecological management of “living water”. World Ecology, 2019, 8(2): 90-96. (in Chinese)
- [34] 廖伟伶, 黄健盛, 丁健刚, 等. 我国黑臭水体污染与修复技术研究现状[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(11): 153-158.
LIAO Weiling, HUANG Jiansheng, DING Jiangang, et al. Research status of pollution and remediation technology of black and odorous water body in China. Journal of Yangtze Academy of Sciences, 2017, 34(11): 153-158. (in Chinese)
- [35] 郑亚君, 王翠红, 陈红瑞, 侯美伊. 光合细菌处理富营养化水体的试验研究[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(13): 184-186.
ZHENG Yajun, WANG Cuihong, CHEN Hongrui and HOU Meiyi. Experimental study on treatment of eutrophic water by photosynthetic bacteria. Science and Technology Information Development and Economy, 2011, 21(13): 184-186. (in Chinese)
- [36] 王武. 鱼类增养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
WANG Wu. Fish aquaculture. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [37] 林培. 《城市黑臭水体整治工作指南》解读[J]. 建设科技, 2015(18): 14-15.
LIN Pei. Interpretation of the guidelines for urban black and stinky water treatment. Construction Science and Technology, 2015(18): 14-15. (in Chinese)
- [38] 李干杰. 推进生态文明, 建设美丽中国[M]. 北京: 人民出版社, 党建读物出版社, 2019.
LI Ganjie. Promoting ecological civilization and building a beautiful China. Beijing: People's Publishing House, Party Building Books Publishing House, 2019. (in Chinese)
- [39] 陈阿萍, 李瑞金, 颜亚琴, 等. 常州市城区河道清淤活水初探[J]. 长江技术经济, 2018, 2(4): 67-71.
CHEN Aping, LI Ruijin, YAN Yaqin, et al. Preliminary study on cleaning silt and active water in Changzhou urban area. Technology and Economy of the Yangtze River, 2018, 2(4): 67-71. (in Chinese)
- [40] 吴振斌, 等. 水生植物与水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
WU Zhenbin, et al. Aquatic plants and water ecological restoration. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)