

# Study on Purification of Black and Odor Sewage by “Ecological Live Water”

Rongfu Li<sup>1</sup>, Longsheng Sun<sup>2</sup>, Zhanglin Li<sup>3</sup>, Xiangming Kou<sup>4</sup>, Tao Wang<sup>2</sup>, Yang Yang<sup>2</sup>, Haoyu Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yangzhou Society of Fisheries, Yangzhou Jiangsu

<sup>2</sup>College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

<sup>3</sup>Yangzhou Water Conservancy Society, Yangzhou Jiangsu

<sup>4</sup>Agricultural Science Institute of Jiangsu Lixiahe District, Yangzhou Jiangsu

Email: 13615252160@163.com

Received: Sep. 15<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 1<sup>st</sup>, 2019; published: Oct. 8<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

In order to explore the sustainable treatment of black and odorous water, Yangzhou Yanghuan Equipment Co., Ltd. and Yangzhou Water Conservancy Society jointly carried out the “ecological living water” treatment experiment of black and odorous water. In this experiment, the theory of “living water” and “oxygen debt” was used to prepare all-round flowing water through mixer and aerator. Using aerobic, light-loving and facultative micro-ecological agents and adding strong oxidation biochemical agents, the black and odorous water body is rapidly reoxygenated, the ecosystem is restored, and the self-purification ability of sewage is rapidly formed. It takes only three days to establish the “green water” (ecological living water) ecosystem, and quickly degrade ammonia nitrogen and other pollutants, and maintain the “green water” ecosystem for a long time to maintain a strong sewage purification capacity. The “ecological living water” technology is to treat black and odorous water *in situ* (raw water), reduce investment in sewage pipelines and sewage treatment plant equipment, and utilize the self-purification capacity of water ecosystem to treat sewage. It has the characteristics of low equipment investment, fast pollution control, low operation cost and strong sustainability. It opens up a feasible way to save energy and reduce consumption for urban and rural domestic sewage purification.

## Keywords

Ecological Living Water, Ecosystem, Control, Black and Odorous Water Body

# “生态活水”治理黑臭水体的研究

李荣福<sup>1</sup>, 孙龙生<sup>2</sup>, 李章林<sup>3</sup>, 寇祥明<sup>4</sup>, 汪涛<sup>2</sup>, 杨阳<sup>2</sup>, 刘昊宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>扬州市水产学会, 江苏 扬州

<sup>2</sup>扬州大学动物科学与技术学院, 江苏 扬州

<sup>3</sup>扬州市水利学会, 江苏 扬州

<sup>4</sup>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15日; 录用日期: 2019年10月1日; 发布日期: 2019年10月8日

## 摘要

为探索黑臭水体可持续治理途径, 江苏农环生态环境工程有限公司联合扬州市水利学会, 在扬州官河进行了“生态活水”治理黑臭水体试验。该试验运用“活水”和“氧债”理论, 通过活水机与增氧机制造全方位流水, 使用好氧、喜光和兼性等三类微生态制剂, 加量使用强氧化性生化制剂, 使黑臭水体快速复氧并迅速恢复生态系统, 快速形成污水自我净化能力。仅用3天便造就“绿水”(生态活水)生态系统, 氨氮等污染物被快速降解, 并长久维持“绿水”生态系统, 保持强大的污水净化能力。“‘生态活水’治理黑臭水体”技术是在原位(原有水体)就地处理黑臭水体, 减少污水输送管道和污水处理厂设备投资, 利用水体生态系统自净能力处理污水, 具有设备投资省、治污速度快、运行成本低、可持续性强等特点, 为城乡生活污水治理开辟了节能降耗的可行途径。

## 关键词

生态活水, 生态系统, 治理, 黑臭水体

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

水体黑臭和富营养化是我国城市河道普遍现象[1]。使城市水环境质量受到严重威胁, 导致水体中化学需氧量(COD)、氮(N)、磷(P)等污染物严重超标, 出现季节性或终年黑臭[2]。有机污染物进入水体后大量消耗水中溶氧, 使水体处于缺氧和无氧状态, 而发黑致臭。发黑是由于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[3]; 水体致黑源主要有2种, 即吸附于悬浮颗粒上的不溶性物质和带色腐殖质类可溶性有机化合物。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, 以及有机物分解产生的  $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等散发出臭味[4]。黑臭水体治理的难点是有机污染物底泥(氧债)的持续沉积与水体底层缺氧及缺少好氧有益菌的矛盾冲突[5], 导致生态系统崩溃。

官河是位于扬州城区北部的一条局部水面较宽、总体水面狭长的城市河道。周围居民区和商业、服务业密集, 生活污水排放大, 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[6]。虽经多年治理, 并利用扬州天然水源丰富的优势经常换水, 但水质状况始终未能改观。治理前官河水体长期浑浊, 溶解氧近于零, 在此条件下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。其症结是水底黑臭淤泥多, 且排污持续不断, 水中有机污染物含量高, 水体长期严重缺氧, 有毒有害物质含量大, 生态系统完全崩溃, 水体失去了自我

净化能力。在采用“生态活水”治理前,官河已有一家公司采用微纳米增氧和水生植物浮床技术进行治疗,因增氧范围小且增氧量少,水体溶解氧一直未能恢复(0.12~0.13),故生态系统处于崩溃状态,并且因水体有毒有害物质含量高,其浮床水生植物根系中毒发黑,生长状况极差,未能发挥净化功能。“生态活水调节养殖水质技术开发与应用”课题组与江苏农环生态环境工程有限公司紧密合作,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。课题组运用“活水”和“氧债”理论,利用活水的交换、运送和净化三大生态功能修复黑臭水体生态系统[7][8],造就“生态活水”(绿水)对黑臭水体治理达到了事半功倍、快速高效的效果。“生态活水”治理黑臭水体试验得到了扬州市水利局城水处、扬州市水利学会的大力支持,扬州大学动物科学与技术学院负责对治理中的扬州官河水体状况进行跟踪检测。数据表明,“生态活水”治理扬州官河黑臭(严重富营养化)水体试验取得了成功。8月18日水利部太湖局来扬州检查城市黑臭河道整治工作,亲临“生态活水”治理扬州官河黑臭水体试验现场检查指导,对治理效果充分认可;8月20日《扬州晚报》在A5版以《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》标题对此做了专题报道[9];网络版《扬州发布》也于8月20日以《“生态活水”治污一周后,扬州这条河又“活”了》标题对“‘生态活水’治理黑臭水体”试验进行了报道[10]。8月27日,市水利局(市水利学会)与邗江区竹西街道办事处联合对本试验进行了现场检查验收,对试验效果给予充分肯定。扬州大学9月8日检测结果表明,经“生态活水”治理近20天,水体透明度、溶氧、氨氮、总氮、总磷和有机物耗氧量等水质指标均达到国家地表水III水的标准,即饮用水水源标准。该试验水质净化的效果国内外均未见报道,开世界之先河。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 水体概况、排污及被引水情况

官河位于扬州邗江区黄金坝路西侧,为邗江区竹西街道办事处责任河道。全长940米,水面宽6-50米,平均约15米左右,水面面积约14,000米<sup>2</sup>;水深1.5~2.0米,总水量约21,000~28,000米<sup>3</sup>。南接邗沟河,有涵闸控制进水;北接冷却河,有新建进排水涵闸与泵站控制进水或排水。官河全长940米水面中共有5座桥梁连接两岸,以方便居民生活。水面最宽处为南一桥至南二桥之间,长约250米左右,宽度为8~50米,是官河水面面积最大的部分。水面次宽处为北一桥至北二桥之间,长约100米左右,宽为8~20米,是官河水面面积第二大的部分。其余水面均较狭窄,宽度为6~15米。

官河沿岸有数个雨水排入口,并有2个生活污水排污口,1处位于南一桥桥下,在“‘生态活水’治理黑臭水体”试验期间的8月18日至8月20日连续向官河排放黑臭水体;另1处位于南二桥桥下,治理期间连续排放少量生活污水,其中以两场暴雨后的8月26~27日该处排污口排放了大量浑水和黑臭污水。

试验前(直至试验安装设备的次日——8月13日晚)官河水体南首涵闸和北首涵闸均为开启状态,8月14日起南北涵闸全面关闭。由于竹西街道办事处另一处责任河道——冷却河蓝藻暴发,8月18日下午我们治理的官河水位被加高到护堤顶端,8月18日晚间被引水30厘米左右,约4500米<sup>3</sup>的水量被引入冷却河抑制蓝藻。8月20日又有水深约20厘米左右、近3000米<sup>3</sup>治理后水质良好的水被引入冷却河,有效改善了冷却河蓝藻暴发的状况。

### 2.2. 安装、启用治水机械与设备情况

#### 2.2.1. 安装活水池

8月13日在官河水面三处较为宽敞的位置安装了扬州发扬农环设备有机公司无偿提供的3台活水池。其中南一桥至南二桥之间为官河水面最宽处,最宽处约50米左右,安装了2台活水池;北一桥至北二桥之间宽度20米左右,安装了1台活水池。

### 2.2.2. 安装水车增氧机

针对官河水面属狭窄型河道，我们在其余水面安装了 6 台水车增氧机。分别位于南一桥桥下、南二桥桥下、南二桥至南三桥中间、南三桥桥北、北二桥桥下和北一桥桥下。

### 2.2.3. 机械设备启用情况

8 月 13 日下午，位于北一桥下、北二桥下及其两桥之间共 2 台水车增氧机和 1 台活水机开始启用，并在污水治理期间连续运转；8 月 14 日下午，其余 4 台水车增氧机和 2 台活水机全部接电启用，并在污水治理期间连续运转。

## 2.3. 使用微生物制剂

### 2.3.1. 使用具有复合功能的生物改底

8 月 14 日采用扬州绿保生物科技有限公司提供的具有增氧与氧化功能的生物改底，初次须加量数倍使用，在淤泥较深处和主要排污口也须加量使用，以后按常量使用。

### 2.3.2. 使用好气性微生物制剂情况

采用扬州绿保生物科技有限公司提供的具有快速降解有机污染物功能的好气性微生物制剂，在溶氧较高的情况下能分解有机物大分子，快速降低氨氮和 COD，初次加倍使用，在污水大量排放时，在周边水体加量使用，以后按常量使用。

### 2.3.3. 使用兼性微生物制剂

采用由扬州绿保生物科技有限公司提供的在有氧和缺氧条件下都能稳定繁殖的兼性有益菌制剂，该微生物制剂具有较快降解含糖类有机污染物功能，能调节过高的 pH 值。初次须加量使用，以后按常量使用。

### 2.3.4. 使用喜光性微生物制剂

在晴好天气施用由扬州绿保生物科技有限公司无偿提供的具有快速降解小分子有机污染物功能的好光性有益菌制剂，初次使用须加量使用，以后按常量使用。

## 2.4. 采样地点选定

本次试验的水样采集与检测由扬州大学动物科学与技术学院负责。采样点沿官河河道自南向北选择 3 个采样断面采集水样。其中，1 号采样点位于南一桥桥下，属官河水体的上游河道，有一处为偶尔排放大量污水的排污口，为水车增氧机污水治理点。2 号采样点位于南二桥桥下，有一处少量污水持续排放的排污口，为水车增氧机污水治理点。1 号采样点与 2 号采样点之间宽阔水面安装的 2 台活水机对两个采样点水质治理具有一定作用。3 号采样点位于北一桥到北二桥之间，为活水机与水车增氧机结合的污水治理点。

## 2.5. 采集方法与测定指标

### 2.5.1. 水样采集时间与方法

分别于 2019 年 8 月 14 日上午 16:00、17 日下午 16:00、22 日下午 16:00 和 24 日 11:00，自采样断面水面下 50cm 处采集水样，采样工具为有机玻璃采水器。

### 2.5.2. 测定指标与方法

测定指标包括：水温、pH、溶解氧、透明度、氨氮、亚硝、总氮、总磷、COD<sub>Mn</sub>、悬浮物

测定方法参照国标。水温、pH、溶解氧、透明度采用仪器现场测定；氨氮采用纳氏试剂法；亚硝酸盐

采用盐酸  $\alpha$ -萘胺分光光度法；总氮、总磷采用加压联合消化结合紫外分光光度法；COD<sub>Mn</sub> 采用酸性高锰酸钾法；悬浮物的测定采用重量法。

### 3. 试验结果分析

扬州大学动物科学与技术学院 5 次采集水样的检测结果见表 1~5。

#### 3.1. 试验前检测结果分析

此次检测的三个采样点的水质差距较大的指标为溶氧、COD 和悬浮物。1、2 号为未治理前的水质状况，1 号点靠近水体上游涵闸入口，原有新鲜活水流入，溶氧量较高，为 1.84 mg/L，水质明显好于 2 号点，由于 2 号点为一处经常性排污口附近，持续不断有少量污水注入，故水质最差：总氮 18.96 mg/L，氨氮 15.17 mg/L，COD 14.98 mg/L，悬浮物 24.00 mg/L。3 号点水面较开阔，设有 2 台水车增氧机和 1 台活水机从 13 日下午开始启用，已有约 20 小时，COD 为 9.82 mg/L，悬浮物最低，为 12.00 mg/L，水质状况已有所好转。

**Table 1.** Testing results of water samples at the beginning of the experiment (16:00 on August 14, 2019)

**表 1.** 试验开始时(2019 年 8 月 14 日 16: 00)水样检测结果

采样点	水温 (°C)	溶氧 (mg/L)	透明度 (cm)	氨氮 (mg/L)	亚硝 (mg/L)	pH	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	COD (mg/L)	悬浮物 (mg/L)
1	29.10	1.84		13.46	0.26	7.52	16.82	0.11	9.82	19.50
2	28.80	0.13	36	15.17	0.01	6.96	18.96	0.32	14.98	24.00
3	28.90	0.12	34	12.75	0.26	7.12	15.93	0.26	12.66	12.00

#### 3.2. 试验后第一次检测结果分析

此次试验得到了扬州市水利局和扬州市水利学会的大力支持，从 8 月 14 日官河南首涵闸全面关闸直到 8 月 27 日均未开闸，28 日正式开闸。北首涵闸和泵站由竹西街道办事处管控，至 8 月 18 日下午北首涵闸和泵站均未启用，整个官河水体仅仅 2 号点持续有少量污水排放，其他各处均没有污水排放。故 8 月 17 日氨氮和总氮的检测结果显示最能真实反映“生态活水”治理污水的效果，从 8 月 14 日至 17 日的仅仅 3 天时间，污染最严重的 2 号点氨氮和总氮分别由 15.17 mg/L 和 18.96 mg/L 下降到 4.86 mg/L 和 8.23 mg/L，分别下降 68.0% 和 56.6%；无排污口的 3 号点氨氮和总氮分别由 13.46 mg/L 和 16.82 mg/L 下降到 1.89 mg/L 和 3.28 mg/L，分别下降 86.0% 和 80.5%，充分证明了“生态活水”治理污水快速有效。8 月 18 日水利部太湖局城市黑臭河道整治检查组莅临“生态活水”治理扬州官河黑臭水体试验现场考察检查，对治理效果给予肯定。8 月 20 日《扬州晚报》和网络版《扬州发布》同日对此进行了报道。

**Table 2.** Test results of water samples during the test period (16:00 on 17 August 2019)

**表 2.** 试验期间水样检测结果(2019 年 8 月 17 日 16: 00)

采样点	水温 (°C)	溶氧 (mg/L)	透明度 (cm)	氨氮 (mg/L)	亚硝 (mg/L)	pH	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	COD (mg/L)	悬浮物 (mg/L)
1				6.43			8.84			
2				4.86			8.23			
3				1.89			3.28			

注：总氮和氨氮为富营养化水质的主要指标，第 2 次采样主要检测了上述两项指标。

### 3.3. 试验后第二次(重污染排放后)检测结果分析

在此次检测期间,因官河所在竹西街道办事处包干负责的冷却河水体蓝藻暴发并出现死鱼,于8月18日至20日北首泵站将官河部分已治理改善了水质的大量清洁水抽入冷却河,及时改善了冷却河水质状况。出乎意料的是,20~22日因官河南侧邗沟排污管道改造而截断,1号点附近、邗沟路桥下排污口排放了大量污染严重的黑臭污水,周围空气中都散发着恶臭;北首闸站的抽水又使官河南部污染水体流至官河北部,从而使整个水体因1号采样点桥下排放的大量黑臭污水北移进入2、3号点所在区域,同时2号点仍有少量污水排放;使三个点氨氮、总氮回升1.07~1.72 mg/L和1.95~2.35 mg/L;总磷比治理前还分别高出0.46 mg/L、0.24 mg/L和0.24 mg/L,高出176.9%、75%和218.2%;COD和悬浮物亦高于治理前水质,导致官河水体陷入更加严重的污染。在此情况下,官河水体大部分水面仍然维持碧绿色或暗绿色,溶氧均在1.4 mg/L以上,其中水体下游3号点溶氧达3.84 mg/L,表明水体虽处于严重污染状态,但官河水体已全面复氧,生态活水已发挥作用,水体已具有较高的自净能力,从而维持了水质状况的稳定。

Table 3. Test results at 16:00 on 22 August 2019

表 3. 2019年8月22日16:00采样检测结果

采样点	水温 (°C)	溶氧 (mg/L)	透明度 (cm)	氨氮 (mg/L)	亚硝 (mg/L)	pH	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	COD (mg/L)	悬浮物 (mg/L)
1	29.20	1.45	40	8.15	0.13	7.55	11.19	0.72	15.54	32.50
2	29.20	1.73	32	6.12	0.04	7.84	8.67	0.56	15.51	19.00
3	29.10	3.84	43	2.96	0.17	8.03	5.23	0.35	12.75	8.00

### 3.4. 试验结束前检测结果分析

从表4检测结果和图1和图2可以看出,在扬州官河水体连续排放污水情况下,水体状况持续改善,维持了水质的基本稳定。此次检测前1天,1号点附近排污口已停止排放黑臭污水,2号点仍有极少量的污水排放,课题组又重新高浓度使用了一遍系列微生态制剂,加上在此期间天气晴好,污染水质又迅速改善。8月24日所有检测点溶氧均在2 mg/L以上,其中水体下游的3号点溶氧达5.61 mg/L,达到了一般水生生物生存良好的溶氧要求。同时,总氮、总磷和COD均比8月22日显著下降,其中COD下降都在30%以上。尤其是与试验前水质相比,溶解氧平均提高了3.87倍,氨氮降低了50.11%,总氮降低了51.80%。而水体悬浮物均呈现出高水平,除了水体中悬浮有机物外,主要是水体中浮游动、植物快速繁殖。在两处安装活水机的区域沿岸水边,大量红虫(枝角类)繁殖,局部地区出现了少量蓝藻,这是自净能力提高的重要生物表征。

Table 4. Test results at 11:00 on 24 August 2019

表 4. 2019年8月24日11:00采样检测结果

采样点	水温 (°C)	溶氧 (mg/L)	透明度 (cm)	氨氮 (mg/L)	亚硝 (mg/L)	pH	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	COD (mg/L)	悬浮物 (mg/L)
1	28.00	2.78	31	7.98	0.01	7.68	9.61	0.56	11.68	33.50
2	28.70	3.05	36	6.93	0.03	8.04	8.06	0.51	11.58	23.50
3	28.80	5.61	45	4.34	0.15	8.21	5.93	0.41	10.70	16.50

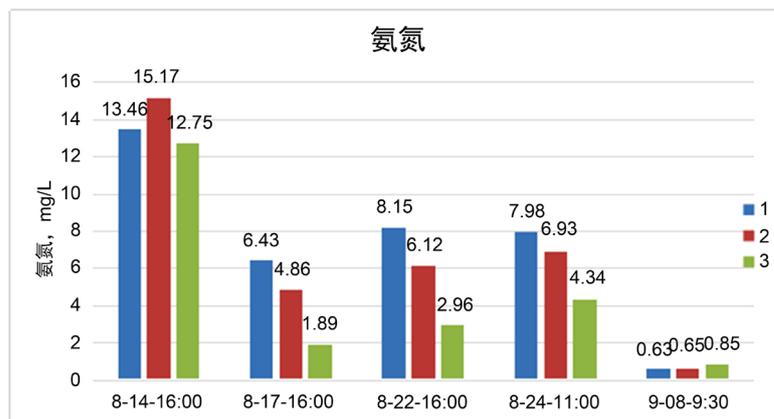


Figure 1. Tracking test results of ammonia nitrogen in Guanhe black and odorous water treated by “ecological living water”  
图 1. “生态活水”治理扬州官河黑臭水体氨氮跟踪检测结果

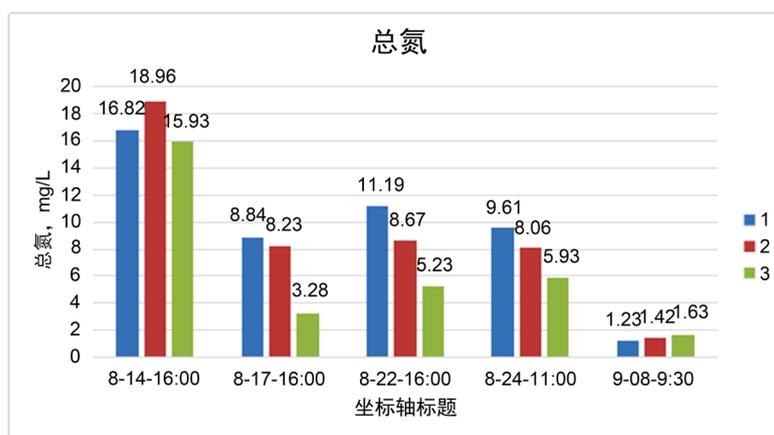


Figure 2. Tracking and testing results of total nitrogen in Guanhe black and odorous water body of Yangzhou treated by “ecological living water”  
图 2. “生态活水”治理扬州官河黑臭水体总氮跟踪检测结果

### 3.5. 试验结束后检测结果分析

扬州官河“生态活水”治水于8月29日撤去活水机和水车增氧机后,水质状况继续快速提升,水面保持“碧波荡漾”,河边水质清澈见底。进入9月后,大量游鱼进入了官河水体,官河两岸每天都有5~10名钓鱼爱好者在河边垂钓。从表5检测结果可以充分证明,官河水质极大改善。至9月8日9:30透明度平均为60.7 cm,氨氮平均为0.71 mg/L,总磷平均为0.09 mg/L,化学耗氧量(COD<sub>Mn</sub>)平均为6.06 mg/L,均达到或超过国家地表水Ⅲ类水标准,即达到了国家饮用水水源水质标准。

Table 5. Test results at 9:30 on 8 September 2019

表 5. 2019年9月8日9:30 采样检测结果

采样点	水温 (°C)	溶氧 (mg/L)	透明度 (cm)	氨氮 (mg/L)	亚硝 (mg/L)	pH	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	COD (mg/L)	悬浮物 (mg/L)
1	26.00	2.85	58	0.63	0.13	7.63	1.23	0.09	5.14	19.50
2	26.20	4.96	66	0.65	0.05	7.88	1.42	0.08	5.98	15.00
3	26.10	3.65	58	0.85	0.05	7.62	1.63	0.10	7.05	35.50

## 4. 讨论

### 4.1. 治理前官河生态系统处于崩溃状态，水体失去了自净能力

治理前官河水体虽然处于开放流动状态，但由于有机污染物极度污染，使水体溶解氧消耗殆尽，且全水体水质状况基本一致，均处于黑臭状态。检测结果(表 1)表明，治理前扬州官河极度缺氧，基本处于无氧状态。8 月 14 日 2 号与 3 号两个抽样检测点溶氧量只有 0.12 mg/L 和 0.13 mg/L，即表明 8 月 14 日前官河水体基本无溶解氧。在此溶氧水平下，该水体中除厌氧菌外的一切生物都无法生存。据观察，治理前河道中间地段基本没有发现鱼类、虾类、蛙类等各类水产动物，也未发现水蚯蚓、螺类、蚌类等底栖型水生动物，连红虫(枝角类)和水生昆虫等其他水生动物也未发现，也未发现水生植物和浮游生物。仅水体南部与北部涵闸闸门附近偶有少数鱼类出现。即使之前负责该河段污染治理的单位种植的浮床植物(茭草)，在高浓度  $H_2S$  等有毒有害物质作用下，根部发黑腐烂，虽勉强生存，但已停止生长。因此，官河黑臭水体治理前生态系统已经崩溃，几乎没有任何生物能够生存，水体完全失去了水质自我净化能力。

### 4.2. “生态活水”能全方位迅速恢复黑臭水体溶解氧，为生物回归打牢基础

溶解氧是水生生物生存的基本前提，无论是水生动物，还是水生植物，都离不开溶解氧。即便微生物，除了少数厌氧菌，在无氧情况下也无法生存。因此，恢复水体溶解氧是恢复水体生态系统的关键。黑臭水体缺氧的根源是水体底部沉积了大量有机污染物(黑臭淤泥)，成为水体亟待偿还的“氧债”。即便更换新水带入少量溶解氧，在夜晚和阴雨后水体实现了上下交流，导致水体仅存的少量溶解氧在短时间内消耗殆尽。而且，一般化学增氧和机械增氧仅能恢复水体中上层溶解氧，难以恢复底层溶解氧。因此，黑臭水体生态系统恢复的关键在于偿还水体和水底淤泥中长期累积的“氧债”[5]。“生态活水”主要通过机械增氧与机械活水相结合的方法，并适当配合生物和化学改底，全面偿还水体“氧债”，全方位恢复水体溶解氧，尤其是恢复水体底部溶解氧。官河水体 3 号抽样检测点通过活水机和水车增氧机结合治水，后期溶解氧高达 5.61 mg/L。说明活水机和增氧机配合使用能加速恢复水体溶解氧[11]。

黑臭水体最大的污染源是黑臭底泥，黑臭底泥中含有大量有机污染物，是水体主要耗氧源。夏季暴雨和夜晚凉风会使表层水迅猛降温冷缩，带动底层沉积的黑臭底泥泛起，使底泥中有机污染物向水体的二次释放，已成了河湖水体黑臭持续的重要因素[12]，并使黑臭水体中本以匮乏的溶解氧在短时间内消耗殆尽。因此，恢复黑臭水体溶解氧的关键在于尽快消除黑臭底泥中大量累积的“氧债”。由于“气”、“水”比重的巨大差距，因此决定了“水往低处流，气往高处走”，一般机械增氧和生物增氧方法只能增加水体上层的溶解氧[13]，无法解决黑臭水体底层缺氧问题，更无法去除大量沉积在黑臭底泥中的“氧债”。“生态活水”方法通过活水机持续不断地将一般增氧机或生物光合作用产生的溶解氧运送到水体底层和底泥表层，加速消减底泥表层积蓄的大量“氧债”[5]。同时，还结合具有强烈氧化作用的生化改底，迅速恢复水底溶解氧并使底泥表面的有机污染物加速氧化还原，形成一定厚度的氧化还原层，阻止表层淤泥之下污染物向水中扩散，这是水体恢复溶解氧的关键措施。建立了表层氧化还原层的淤泥才能附生好氧有益菌，从而提高底泥净化有机污染物的能力。经“生态活水”技术治理后的水体溶解氧迅速恢复，并维持在较高水平。扬州大学跟踪检测结果表明，“生态活水”治理后的黑臭水体溶氧均能维持在 2 mg/L 以上，其中水体下游活水机与水车增氧机联合治理点——3 号点，8 月 24 日溶解氧高达 5.61mg/L。9 月 8 日上午 9:30 检测的溶氧量平均达 3.82 mg/L，如下午 16:00 前后检测，溶氧量应在 6~8 mg/L 以上。

### 4.3. “生态活水”治水的核心是恢复和提高好氧有益菌等微生物组成的水体生态系统，并维持稳定

以水生生物为载体的水体能量转换和物质循环，是水域生态系统的主要功能和本质特征。在水域生

态系统中, 水是水生生物群落的载体, 为水生动物、植物、微生物提供了生存环境。多样化的水生生物与水域中多因子的非生物环境一起, 构成了持续进行能量转换和物质循环的水域生态系统。水体多样化生物之间及其与水体中有机、无机环境因子之间既相互对抗、相互冲突, 又相互利用、相互依赖, 构成了运动发展中的水域生态系统。多样化水生生物的新陈代谢推动了水域生态系统中能量转换和物质转化, 带动了投入到水体中各类有机物或由“食物→污染物→营养物”等生物化学过程, 或由“污染物→营养物→食物”等生物化学过程, 实现循环转化利用, 使生态系统或由“自我污染”到“自我净化”, 或由“自我净化”到“自我污染”的循环往复中, 维持了水体生态系统的稳定与提升, 形成了水体相对稳定的自然净化机制[14]。因此, 维持水体生物多样性, 保持水体营养(食物)链完整性, 才能保障水体自我净化能力的稳定性。

黑臭水体因缺氧使以  $H_2S$  为代表的有毒有害物质大量增加, 让各类水生生物失去了生存条件, 恢复溶解氧是促进各类水生生物回归的基本前提。同时, 必须快速完善水域生态系统的主要生物组成, 包括水生动物、植物、微生物等三类水生生物。而好氧有益菌是水体生态系统实现物质循环和能量转换的核心。以好氧有益菌为代表的微生物既是物质循环的终点: 在水体中各类水生生物都会产生排泄物并伴随死亡, 成为水体中废弃污染物, 为好氧有益菌生活提供原(食)料; 同时, 又是物质循环的起点: 好氧有益菌带动水体中氧化还原反应时, 将有机污染物降解为无机营养盐, 又为水生植物(主要是浮游植物)光合作用形成初级生产力提供原料。在溶解氧充足的条件下, 好氧有益菌通过分泌产生多种催化酶, 加速生物大分子的氧化分解, 没有好氧有益菌的参与, 生物大分子的氧化分解效率将大幅度降低。因此, 在水域生态系统中, 好氧有益菌发挥着“既承前启后, 又继往开来”的关键核心作用[15]。这里必须指出的是, 好氧有益菌必须达到较高密度(浓度)才能发挥作用, 因此, 只能利用人工培育的高浓度、高活力好氧有益菌, 才能形成黑臭水体有机污染物快速降解能力, 从而消除黑臭现象。至于组成生态系统的浮游植物、浮游动物、底栖动物和鱼类等水生生物, 在水质良好的前提下, 通过适当引水便能建立完整的水体生态系统, 形成持久高效的污染水体净化能力。

#### 4.4. “生态活水”具有稳定完整的生态系统, 形成了高效率的污染净化能力

天然水体生态系统都具有较好的自然净化能力。但是, 在春、夏、秋三季晴日, 由于阳光增温作用和水的热胀冷缩特点, 形成“温跃层”和“热阻力”, 水体上下层之间缺少垂直交流。所以, 上述三个季节的晴日白天, 天然水体仅在中上层水体对污染物有净化能力。而在污染严重的水体, 夜晚和阴雨天气形成的上下层垂直交流, 往往会因为长期积累在水底的有机污染物(“氧债”)爆发性耗氧(偿还), 使水体溶解氧归零, 造成所有生物死亡, 原有生态系统崩溃, 使水体失去了污染净化的能力。“生态活水”一方面持续稳定进行水体全方位交流, 尤其是垂直交流, 使水体全方位维持一定溶解氧含量, 保证了全水体中各类生物的生存, 尤其是好氧有益菌和浮游植物等微生物的生存, 进而促进了水体中其他水生生物新陈代谢, 带动了水体中能量转换和物质循环, 具有稳定高效生态系统。水体中形成的稳定高效生态系统, 又能保障水体溶解氧的稳定供给, 促进了水体中好氧有益菌对有机污染物的快速降解, 加速水中  $H_2S$ 、 $CH_4$  和  $NO_2^-$  等有毒有害物质的转化和消除, 避免“氧债”累积。据在试验初期(8月13日到8月17日官河两头闸站完全关闭)观察, “‘生态活水’官河黑臭水体试验”的次日(8月15日), 官河水体颜色便由浑浊黑黄色转变为浅绿色, 第三天便转变为碧绿色, 而成为“绿水”, 即具有丰富有益菌和浮游植物等水生生物组成的“生态活水”; 官河水体生态系统恢复后, 展现了极强的污染物净化能力(可惜仅检测了氨氮)。表明水体已经基本建立了由有益菌、浮游植物和浮游动物组成的完整生态系统。在本试验中期(8月20~22日), 1号点和2号点附近虽然连续大量排放黑臭污水, 且在排污口附近呈现黑色或黑黄色。但官河大部分水面仍然“碧波荡漾”, 维持了生态系统的稳定性, 保持了“绿水”(生态活水)所具有的强大

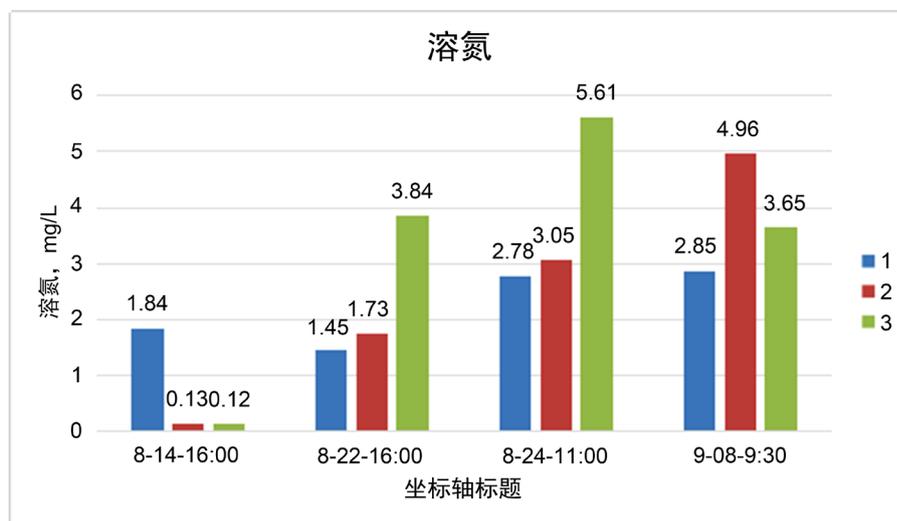
大污染净化能力。1号采样点(主要排污口),仅两天时间不到(8月22日下午到8月24日上午)水中总氮便由11.19 mg/L下降到9.61 mg/L,降低1.58 mg/L,下降14.12%;总磷由0.72 mg/L降低到0.56 mg/L,下降了22.2%;COD由15.54 mg/L降低到11.68 mg/L,下降24.84%。在试验结束后的9月8日,氨氮含量平均为0.71 mg/L,比8月14日降低了94.9%;化学耗氧量(COD<sub>Mn</sub>)平均为6.06 mg/L,比8月22日的58.5%,并且全部水质全面达到了国家地表水Ⅲ类水的标准,即国家饮用水水源水质标准,这在国内黑臭水体治理中尚未见报道。

上述检测结果与我们在水产养殖中应用“活水”技术调控水质的结果高度一致,在短时间内迅速降低了COD、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>等水质污染指标[16]。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[16]。海南省水产技术推广站“耕水机在花鳗池塘养殖中的应用试验”证明,利用“活水”养殖花鳗,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[17]。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% [18]。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[19] [20] [21] [22]。

黑臭水体持续净化的最重要前提是水中稳定的溶解氧供给。“绿水”即生态活水,具有稳定的生态系统,形成了稳定的供氧能力。扬州官河转化为“生态活水”后,溶氧迅速恢复,从初期接近于0(0.12 mg/L、0.13 mg/L和1.84 mg/L)稳步提升,尤其是3号采样点,8月22日为3.84 mg/L,8月24日上午即达到5.61 mg/L(见图3),全面恢复了水体光合作用供氧能力,保障了水体生态系统的稳定和对污染物的高效降解。尽管8月26日最后一期使用了微生态制剂,8月29日全部拆除所有活水机和水车增氧机。但直到9月8日,由于在此期间官河没有新的大量污水排放,整个官河水体始终保维持“一池碧水”,河边浅水区清澈见底,透明度高达透明度平均为60.7 cm。由于周围水体水质差、溶氧量低,大量周围水体的活鱼游到了官河水面,从进入9月开始,每天都有6~8名钓鱼爱好者在官河两岸钓鱼,钓到了鲤鱼、鲫鱼等常见鱼类,仅水体南首和南二桥局部水面附近漂浮少量蓝藻。

据观察,试验期间官河水体曾出现数次红虫(枝角类)繁殖高峰,呈现云片状漂浮在沿岸浅水区。一次出现在8月17日,一次出现在8月27日。出现的区域为安装活水机的沿岸水域,主要是活水机使大量沉积在水底的有机物运送到上层,为有益菌和枝角类提供了重要的营养源。出现高峰的时间都是在施用微生态制剂后2~3天时间,有益菌大量繁殖为红虫提供了丰富的适口优质饵料。均衡的溶氧和丰富的营养为红虫和其他浮游动植物大量繁殖创造了有利条件,带动其他水生生物的恢复,也为鱼类准备了大量饵料。在试验的第四天,便在水体中出现了鱼类;9月8日已有钓鱼爱好者在官河钓到了鲤鱼。黑臭水体已由初步形成的生态系统,逐步向生物多样性生态系统发展。本次试验中,通过在黑臭水体中以超高浓度施用好气性有益菌、(好气厌气)兼性有益菌、喜光性有益菌等多种有益菌,在活水机和水车增氧机的带动下,使黑臭水体中有机污染物全面快速降解。兼性有益菌在水中溶解氧欠丰条件下都能发挥降解作用,并且在晴天溶解氧丰富的条件下释放CO<sub>2</sub>,改善水中碳氮比,为植物光合作用补充提供原料,提高水体生态效率[23]。喜光性有益菌分布于水体表层,与蓝藻形成竞争关系,能有效抑制蓝藻暴发[24] [25]。另外,水生植物能吸收水体中的氮、磷等营养元素,而减少水体中总氮、总磷含量,并且水生植物的化

感作用对抑制蓝藻暴发也有重要作用[26],其技术关键是如何选择能高效吸收水体营养盐和快速吸附水体悬浮物的水生植物品种。



**Figure 3.** Tracking test results of dissolved oxygen in Guanhe black and odorous water treated by “ecological living water”  
**图 3.** “生态活水”治理扬州官河黑臭水体溶氧跟踪检测结果

## 5. 结论

“生态活水”是保持微速循环流动和以生物带动生态系统能量转换与物质循环的水，是运动之水和生命之水。“生态活水”治水的实质是以物理和生物过程，带动水体生态系统的生物化学过程氧化分解有机污染物，为植物提供营养；植物利用太阳能进行光合作用合成有机物并增加溶解氧释放，为水生动物提供良好环境和食物；水生动物的各类废弃物通过好氧有益菌参与的氧化分解，再转化为植物营养，在达成能量转换的同时，完成了水体生态系统的物质循环过程。必须关注的是，有机污染物必须在微生物参与催化下才能加速氧化分解，达到快速高效降解，消除有毒有害物质，形成良性循环的高效稳定生态系统。“生态活水”治理黑臭水体是利用生态系统的自我净化能力治理黑臭水体，通过水体持续微速垂直交流带动溶解氧和好氧有益菌到达主要污染物所在水体底部，达到对水底黑臭淤泥的氧化分解，恢复底泥生态系统和对污染物的净化能力，从根本上进行可持续治理。针对的是水体恢复生态系统的主要障碍——底泥沉积的有机物(“氧债”)；扩张的是黑臭水体恢复生态系统的瓶颈——缺氧，尤其是底层缺氧；补充的是黑臭水体最为重要又最为稀缺的生物——高活力好氧有益菌，达到快速高效治理黑臭水体。尽管治理前须购置安装配备一定机械设备，增量投放多样化微生态制剂，投入较大。但是，在完成黑臭水体生态系统修复后，仅需保持活水、适量充氧和定期(10~20天)少量补充逐步衰老的微生态制剂，便能维持稳定的生态系统和水体自我净化能力，因此维持成本低。因此，“生态活水”治理黑臭水体是一种设备投资省、治污速度快、运行成本低、可持续性强的黑臭水体治理技术。

“生态活水”治理黑臭水体最好是在相对稳定(适度封闭)的环境中进行，至少应控制水流速度。开放水体的水流会带走大量投放的有益菌和浮游植物，这便使“生态活水”失去了生物基础。同时，应控制治理水体的污染物排放量，以防过量污染物耗竭水体溶氧，造成生态系统崩溃，使水体失去自我净化能力。本次试验水体带有一定的开放性，带动了下游污染水体治理和水质改善，真实检验了“生态活水”治理黑臭水体的强大能力。所以，在水流缓慢的开放水体，可在黑臭水体的上游河道利用“生态活水”技术进行治理，以带动下游河道的污水治理和水质改善。

## 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] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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>
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李荣福, 郭正龙, 等. 微生态制剂与增氧活水机配合应用于河豚养殖增产机理的研究[J]. 水污染及处理, 2018, 1(6): 24-37.
- [14] 李荣福, 王守红, 孙龙生, 寇祥明, 吴雷明. 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.
- [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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] 周鑫军. 水产养殖水质改良常用微生物制剂之光合细菌[J]. 当代水产, 2015, 40(11): 94.
- [25] 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.
- [26] 吴振斌, 等. 水生植物与水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.