

# 城市湖泊污染水体原位修复工程实践\*

## ——以重庆渝北双龙湖为例

郭祥<sup>1</sup>, 钟成华<sup>2</sup>, 王晓雪<sup>2</sup>, 陈龙<sup>2</sup>

(1. 西南大学 化学化工学院, 400715; 2. 重庆工商大学 环境与生物工程学院, 重庆 400067)

**摘要:**阐述了双龙湖治理前水体富营养化污染状况及原因,介绍了双龙湖原位修复综合治理措施(如环湖截污、湖底生态清淤、复氧措施、边坡护理、湖滨带生态重建与景观恢复、后期监管等措施)。对原位修复综合治理措施实施后湖水净化效果进行了研究,结果表明:原位修复综合治理措施是治理双龙湖水体富营养化的有效措施,能够为国内外城市湖泊富营养化治理提供方法和技术借鉴。

**关键词:**双龙湖;富营养化;原位修复综合治理

**中图分类号:**X524

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2012)03-0037-05

城市湖泊往往是当地市民以及外地游客休闲游玩的首选地,甚至成为闻名的风景名胜。同时城市湖泊具有重要的生态服务功能<sup>[1]</sup>。但是近年来,湖泊、水库等封闭式水体的水质恶化,水环境遭到破坏,极大地影响了人民生活和社会经济发展。城市湖泊水体富营养化已成为目前我国重大环境污染问题之一。

对于湖泊富营养化的治理,目前采用较多的湖泊修复技术主要包括控制营养物质来源技术、清除内源污染技术和生态修复技术等<sup>[2-3]</sup>。目前国内很多城市湖泊多采用上述几种方法中的一种。这些单一方法虽然具有一定的处理效果,但处理效果有限。张镇等<sup>[4]</sup>指出应将湖泊作为一个有机体来对待,避免用简单修复的方法来治理富营养化。因此为了达到理想和满意的处理效果,就需要组合各种方法综合治理。深圳荔枝湖实施综合治理措施后,明显地改善和控制了水体富营养化状况<sup>[5]</sup>。美国采取各种措施加强对北美五大湖及沼泽地进行治理,取得了非常理想的效果<sup>[6]</sup>。上个世纪80年代末,美国就采取了降低外源磷输入、建造人工湿地、生物操纵、种植水生植物和提高水位变动幅度等5项措施治理和恢复Apopka湖,明显地改善了湖水水质<sup>[7]</sup>。由此可见,综合治理措施是改善和控制湖泊水体富营养化

的最佳手段。

### 1 双龙湖基本情况

双龙湖原名半截沟水库,成库于1964年。1992年实施两路城南开发时,因它蜿蜒曲折,形如双龙戏水,更名双龙湖,主要功能是城区景观、游乐。双龙湖位于渝北区双龙街道城区(图1),集雨面积1.35 km<sup>2</sup>,设计总库容为96.0万 m<sup>3</sup>,有效库容74.0万 m<sup>3</sup>,库面17 hm<sup>2</sup>,平均水深4.4 m(最深处13 m,最浅处1 m),属浅水型城市湖泊,是两路城区环境和风貌的核心组成部分,具有极重要的生态服务功能。但双龙湖集雨面积小,汇水量小,交换水量少,环境容量小,调节能力弱,抗污染能力较低,容易发生富营养化,生态系统较脆弱。近年来,随着城市和经济建设的不断发展,环双龙湖大力开发,随之产生的大量生活污水、工业废水,还有建筑废水和游船废水大量排入,造成双龙湖严重污染,水体富营养化加剧,严重影响了双龙湖的城市景观以及沿湖居民的工作和生活。

根据渝北区环保局及重庆市环境监测中心提供的环境监测数据,双龙湖2008年2月、2009年3月及2010年1月部分水质监测结果及评价如表1所示。

监测结果表明,双龙湖水质长期处于V类或劣V类状态,主要超标指标为TN、TP、COD<sub>Cr</sub>,其中总氮、总磷的浓度已大大超出了湖泊发生富营养化的

\* 收稿日期:2011-11-16 修回日期:2012-03-21 网络出版时间:2012-5-26 12:13

资助项目:重庆市环保局重大科技攻关项目(环科字2008第18号);重庆市城乡建设委员会资助项目(城科字2009第119号)

作者简介:郭祥,男,硕士研究生,研究方向为水处理;通讯作者:钟成华,E-mail:zhong\_chenghua@163.com

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.37\\_008.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.37_008.html)

浓度。双龙湖已属较严重的富营养化水体。



图 1 双龙湖地理位置图

表 1 双龙湖水质监测结果

Tab. 1 Water quality monitoring results of Shuanglong Lake

| 断面       | 时间         | 水质类别 | 指标  | mg/L       |          |       |       |
|----------|------------|------|-----|------------|----------|-------|-------|
|          |            |      |     | $COD_{Cr}$ | $NH_3-N$ | TN    | TP    |
| 堤坝       | 2008<br>全年 | 劣 V  | 平均值 | 40.38      | 0.309    | 1.823 | 0.137 |
|          |            |      | 级别  | 劣 V        | II       | V     | V     |
|          | 2008.2     | 劣 V  | 数据  | 33.60      | 0.045    | 2.140 | 0.192 |
|          |            |      | 级别  | V          | I        | 劣 V   | V     |
|          | 2009.3     | 劣 V  | 数据  | 47.5       | 0.147    | 3.33  | 0.449 |
|          |            |      | 级别  | 劣 V        | I        | 劣 V   | 劣 V   |
| 景湖<br>花园 | 2008<br>全年 | 劣 V  | 数据  | 40.63      | 0.290    | 1.726 | 0.123 |
|          |            |      | 级别  | 劣 V        | II       | V     | V     |
|          | 2008.2     | 劣 V  | 数据  | 37.20      | 0.027    | 2.150 | 0.149 |
|          |            |      | 级别  | V          | I        | 劣 V   | V     |
|          | 2009.3     | 劣 V  | 数据  | 47.7       | 0.147    | 2.25  | 0.370 |
|          |            |      | 级别  | 劣 V        | I        | 劣 V   | 劣 V   |
| 湖心       | 2010.1     | 劣 V  | 数据  | 18.0       | 0.604    | 2.85  | 0.318 |
|          |            |      | 级别  | III        | III      | 劣 V   | 劣 V   |

## 2 双龙湖污染源调查分析

造成湖泊富营养化的污染源有多种形式,可以分为点污染源和面污染源两大类。双龙湖位于城市中心,环湖绝大多数地块均被开发成为住宅或公建,由于沿湖建筑物的化粪池、排污管年久失修,缺乏管护,渗漏问题突出,据治理前调查显示,有 14 个地方直接向双龙湖渗漏、排放污水,湖水水质受点污染源

的影响较大。双龙湖的主要污染源是库尾新老城区结合部的生产及生活污水,以及其他位置标高低于城市污水管网的生活污水。

调查表明,对于双龙湖,非点源仍然占有非常重要的位置。双龙湖湖周基本被开发建房,几乎不存在农业面源污染问题。双龙湖的面源污染主要来源于湖坡裸露地带的雨水径流、建筑工地地表径流、部分固体废弃物、降水及降尘污染以及由雨水口集中

排放的街区雨水径流,其中对双龙湖水质影响最大的是雨水口集中排放的雨水径流。

### 3 双龙湖综合治理措施

湖泊富营养化是多种因素、长期综合作用的结果,治理难度大,因此必须综合利用各种措施,发挥各种技术的优点,实施对湖泊富营养化的治理。针对双龙湖的实际情况,对它的具体治理措施主要从污染源控制和湖区治理两方面进行,本着治理措施与管理措施并重的原则,实行内源、外源治理相结合,水体修复与岸坡整治相结合,景观建设与环境保护相结合,休闲娱乐与生态建设相结合,工程建设和科学管理相结合,常规手段和生态治理手段灵活运用。受渝北区政府和双龙湖街道办事处委托,重庆工商大学联合重庆绿韵环保有限公司进行双龙湖修复方案设计,并由重庆市水务集团有限公司负责工程实施,时间段为2010年4~12月,整个整治工程包括污染源控制、工程性措施、生态治理措施、湖滨带生态重建与景观恢复和后期监管措施等5大部分。

#### 3.1 污染源控制

大量调查研究表明:外界营养性物质的输入是绝大多数水体富营养化的根本原因。对于外源污染,一般采取截污、对废水进行集中处理等措施<sup>[8]</sup>。从长远来看,要想从根本上控制双龙湖水体的富营养化,首先应着重减少或者截断外部营养物质的输入。针对双龙湖的实际情况,内部天然性的湖面降水中营养物量少而难于控制,控制外源性营养物质应从控制人为污染(生活污水的排放)和地面雨水径流着手。

**3.1.1 环湖截污** 根据对双龙湖的实地调查,实施了外围截污工程,主要包括:①截污。将多处流量较大且污染较明显的入湖点源污水进行了截留收集,然后将其就近接入城市污水主管网;②雨污分流。依靠当地行政手段纠正周边社会上污水接入雨水管的问题,防止未经处理过的污水直接渗、漏排入湖中;③对湖周边或单体楼盘明显损坏的化粪池、排污管及检查井进行维修、整治。

**3.1.2 生态拦截** 结合双龙湖现状,在双龙湖的治理中对入湖雨水径流、街道清洁后的污水等采用了截流与局部处理相结合的措施。环湖设置仿生滤沟,主要是对环湖现有的部分沟槽进行改建,设置滤网并分段栽种湿生型植物如香根草(*Vetiveria zizanioides*)、美人蕉(*Canna indica*)等。对入湖雨、污

水进行过滤,既减轻地表水特别是初期雨水对双龙湖的污染,又保证了湖泊的水源补给。

#### 3.2 工程性措施

改善双龙湖水质所采取的工程性措施主要包括底泥疏浚、水体曝气及底层排水等。

**3.2.1 湖底生态清淤** 底泥属于内源污染,是湖泊污染的二次污染源。对于底泥污染,一般采取底泥疏浚<sup>[9]</sup>。针对双龙湖实际情况,采用YFCS-60生态清淤船进行清淤,并配备了YFFL-100泥沙分离器,在枯水季节和雨季前进行底泥疏浚,将湖泊底质中富含氮、磷等营养物质的底泥吸出,运至郊区农田、林地作为肥料,既改良了土壤,增加农林产品的产量,又降低了湖水中营养物质的浓度,增加湖泊的蓄水量和环境容量,改善了湖泊水质和生态环境,提高湖泊的可利用效能,延缓湖泊的衰老。

**3.2.2 复氧措施** 利用游览观光船、充气曝氧设备和新型可移动充氧曝气设备对湖水进行曝气,增加了水体流动性和自净能力,避免水华产生。在充氧曝气机周围设立安全围隔措施,禁止游人接近,消除了安全隐患。

**3.2.3 底层排水措施** 一是在双龙湖中心位置,设置3根直径200 mm、长100 m的底层排水管道,以提高排水强度,增加适时排水能力和辐射范围;二是改善底层排水调度方式,根据季节变化与降雨规律,采取为雨水腾库的方式提前进行底层排水,以底层排水替代行洪,强化排水去污的效果。

#### 3.3 生态治理措施

Odum等<sup>[10]</sup>在20世纪60年代首先提出了用生态工程技术恢复退化的生态系统,后来在众多生态修复实践中得到广泛应用。在净化富营养化水体上,生态修复技术有着巨大的优势。首先是水生植物,可以人为地创造和构建适合水体特征的水生植物群落,为其它生物提供良好的生存环境,能够有效降低水中悬浮物浓度,增加水中溶解氧及水体透明度,改善水生生态系统的生物多样性<sup>[11]</sup>。依据食物链原理,可以通过水生动物如鲢鳙鱼等滤食性鱼类对蓝藻的捕食来控制蓝藻的生物量<sup>[12]</sup>,另外,还可以在浮床或围隔中投放和悬挂滤食性的蚌螺等软体动物,通过大量滤食水体中的微囊藻,从而达到减少水体中微囊藻生物量的目的<sup>[13]</sup>。生态治理措施就是通过建立生态净化系统,利用水生生物吸收氮、磷元素等营养物质并进行代谢活动,达到去除氮磷元素等营养物质的方法。该方法的优点是投资相对省

钱,有利于建立合理的水生生态循环。

3.3.1 边坡护理 双龙湖周围现有的临水植物以毛竹、阔叶落叶树木为主。季节更替,落叶漂浮到水面,遇风吹后,会在湖湾形成一层厚厚的膜,不仅破坏景观,而且大量落叶在水里腐烂后会成为二次污染源。考虑到强化水土保持功能,防止面源污染和美化景观,用固土强根的柳树逐步代替毛竹和阔叶落叶树。双龙湖周边护坡总面积达 5 000 m<sup>2</sup> 左右。

3.3.2 放养水生动物 鱼类和蚌、螺等生物具有遏制蓝藻、减轻水体富营养化和净化水质的目的。为了增加浮游生物种群和生物量,提高除藻能力,通过计算,在湖中放养了 80 000 尾左右的鲢鱼 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙鱼 (*Aristichthys nobilis*) 以及 50 000 只左右的贝壳类动物如河蚌 (*Anodonta globosula*)、螺蛳 (*Bellamyia quadrata*)。

3.3.3 一体化浮岛/简易浮床技术 根据双龙湖的形态及污染源现状,在双龙湖的湖中心、王家湾提污站、暨华中学内湖和 1、2、4、5 号污染源排污口处分别建设一个可移动一体化浮岛,总面积近 6 000 m<sup>2</sup>。浮岛上种植大漂 (*Pistia stratiotes*)、水蕹菜 (*Water spinach*) 等水生植物,可以定期进行打捞,底部挂生物膜和蚌、螺等水生动物,利用水生植物、水生动物、水生微生物 3 大类生物联合作用,可以更加有效地去除湖水中的营养盐,减少水体中的藻类数量,达到净化水体的作用。

在其余主要湖湾,沿湖边布设了简易浮床,总面积 4 000 m<sup>2</sup> 左右。湖水中的营养盐经过水生植物吸收得到去除,增加了营养盐去除的途径。

3.3.4 人工湿地技术 根据双龙湖主要集雨管道设置状况,将锦湖花园、暨华中学现有的人工湿地进行改建,使它们具有生态调节与净化作用,以接收周围湖岸雨、污水,强化入湖雨、污水的净化处理,去除营养盐。人工湿地以潜流型湿地为主,每个面积 1 000 ~ 1 500 m<sup>2</sup> 左右,种植一大批生物量大、景观效果好、治理效果明显的风车草 (*Cyperus alternifolius*),既为双龙湖筑起了一道保护屏障,又增添双龙湖景观功能的多样性。同时对 3、6 和 8 号污染源进行治理:①3、6 号污染源治理。对周边的雨污管道重新布设,更换损坏的管道,防止渗漏,保证全部污水进入人工湿地。并对现有的人工湿地进行改造升级,增加净化级数和植物种类,同时优化布局。在湿地旁设置泵从湖中抽水与排污口污水混合后进入人工湿地,经处理后再进入湖泊。一方面稀释污水,另一

方面实现湖泊内水体循环。②8 号污染源治理措施。充分利用现有排污管道边的护坡空地,设置小型阶梯型人工湿地,面积 50 m<sup>2</sup> 左右,将污水引入并经过两级人工湿地处理后入湖。

### 3.4 湖滨带生态重建与景观恢复

(1)根据 7 号污染源(水上白宫)现有地形,建成一座小型生态湿地公园,面积 950 m<sup>2</sup>。具体措施是:用泵将湖水提升到一定高度,用园林环境功能材料构筑假山,顶部为集水池,形成跌落水阶分 3 级依次流入乔木、灌木和水生植物共同组成的湖滨植物(沉水植物群落、浮叶植物群落、飘浮植物群落、挺水植物群落及湿生植物群落)+蚌螺等水生动物净化系统。通过建立过渡带结构,不仅实现地表基底稳定性、恢复湖滨带生态环境及动植物群落和保持湖滨带功能的多样性,而且增加了视觉和美学享受。

(2)对水上白宫附近的一处垮塌护坡重新种植植被,避免其长时间污染水体。

### 3.5 后期监管措施

湖库环境管理从某种意义上说比湖库的环境治理更为重要,再好的治理工程如果后期管理工作跟不上,湖库环境也会很快变差。双龙湖水环境保护工程措施实施后,为了保障工程措施的高效运行,采取了一些具体措施,加强管理,主要包括:①制定相关湖库保护条例;②严格执法,防止漏排;③定期清淤,消除隐患;④加强湿地和岸坡日常管护;⑤加强湖库水面及岸边的环境保洁;⑥严禁理发、洗车等废水直接入湖;⑦严禁湖边开垦农地;⑧适度开放湖库,加强水上娱乐项目的环境管理;⑨加强水质监测;⑩制定水华应急预案;⑪广泛宣传,全民参与。这些监管措施在工程措施实施后湖水水质的改善和修复上起到了巨大的促进作用。

## 4 治理效果分析

双龙湖作为渝北城区最大的水体,在治理前水体发臭,特别是夏天,水体气味更大,主要污染物为 TN 和 TP,属于 V 类或劣 V 类水质。自工程施工完成以来,水中 TN 和 TP 含量大幅度降低。如今,碧水蓝天重返市民身边,不仅环境优美,而且方便居民就近交流、游憩及锻炼。水质已由治理前的 V 类或劣 V 类转变为 III 类,具体监测数据结果见表 2。

由表 2 监测结果可知,堤坝化学需氧量值最高,为 15.37 mg/L,湖心处最低,为 13.25 mg/L,平均值

为 14.60 mg/L,总体达到地表水Ⅲ类标准;氨氮平均值为 0.106 mg/L,其中,锦湖花园处最低,为 0.079 mg/L,总体达到地表水Ⅱ类标准;总氮平均值为 0.875 mg/L,其中,堤坝处最低,为 0.818 mg/L 总体

达到地表水Ⅲ类标准;总磷平均值为 0.038 mg/L,其中,湖心处最低,为 0.022 mg/L,总体达到地表水Ⅲ类标准。

表2 工程实施后双龙湖水质监测结果

Tab.2 Water quality monitoring results of Shuanglong Lake after comprehensive control

| 断面   | 时间    | 水质类别 | 指标 | COD <sub>Cr</sub> | NH <sub>3</sub> -N | TN    | TP    |
|------|-------|------|----|-------------------|--------------------|-------|-------|
| 堤坝   | 2011  | Ⅲ    | 数据 | 15.37             | 0.085              | 0.818 | 0.043 |
|      | 10月8日 |      | 级别 | Ⅲ                 | I                  | Ⅲ     | Ⅲ     |
| 锦湖花园 | 2011  | Ⅲ    | 数据 | 15.18             | 0.079              | 0.83  | 0.049 |
|      | 10月8日 |      | 级别 | Ⅲ                 | I                  | Ⅲ     | Ⅲ     |
| 湖心   | 2011  | Ⅲ    | 数据 | 13.25             | 0.153              | 0.977 | 0.022 |
|      | 10月8日 |      | 级别 | Ⅱ                 | Ⅱ                  | Ⅲ     | Ⅱ     |

通过治理前后双龙湖水质监测结果对比和水质情况分析,工程实施后双龙湖水体水质得到显著改善,这与综合治理的各项污染控制措施的高效运作分不开。各项污染控制指标比治理前有显著降低:COD<sub>Cr</sub>消减约 61%,NH<sub>3</sub>-N 消减约 65%,TN 消减约 70%,TP 消减约 89%,双龙湖水体达到国家规定的《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水质标准,在较短时间内基本上实现了双龙湖水体的综合整治目标。目前,水质还在不断地改善。

## 5 结语

双龙湖原位修复综合治理工程是充分利用湖底生态清淤、水生动物放养、一体化浮岛、人工湿地等各种治理技术方法的优点,并加强了后期监管力度,优化组合,综合治理。实践证明,城市湖泊原位综合治理修复工程与传统物理、化学、生物和异位处理方法相比,既节约资源和能源,又能够实现湖泊长期、持续、高效的处理效果;既有利于生态城市的建设,又有利于城市环境清洁美化。为国内外城市湖泊的治理提供参考。

## 参考文献:

[1] 陈润. 城市湖泊污染治理方法发展趋势探讨[J]. 水资源保护,2009,25(1):52-54.  
 [2] 马井泉,周怀东,董哲仁. 我国应用生态技术修复富营养化湖泊的研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(3):209-215.  
 [3] 何淑英,徐亚同,胡宗泰,等. 湖泊富营养化的产生机理及治理技术研究进展[J]. 上海化工,2008,33(2):879-883.

[4] 张镇,刘桂民. 当前我国湖泊富营养化治理的进展及思考[J]. 工业安全与环保,2007,33(10):50-52.  
 [5] 陶益,毛献忠,段余杰,等. 深圳荔枝湖富营养化综合治理工程效果研究[J]. 环境科学,2008,29(4):879-883.  
 [6] 涂建锋,郑丰. 美国湖泊富营养化治理战略研究[J]. 水利水电快报,2007,28(14):5-11.  
 [7] Coveney M F, Stites D L, Lowe E F, et al. Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration[J]. Ecol Eng, 2002,19:141-159.  
 [8] Perrow M R, Davy A J. Handbook of ecological restoration[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2002.  
 [9] Meara J O, Murray J. Restoration of an urban lake: the newburgh lake project[J]. New Orleans: Wat Environ Federation WEFTEC'99,1999:1-10.  
 [10] Odum H T, Silver W L, Beyers R J, et al. Experiments with engineering of marine ecosystems, publications of the institute of Marine Science[J]. University of Texas,1963,9:374-403.  
 [11] Marcus S. The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower river spree(Germany)[J]. Water Research,2003,37:569-578.  
 [12] Liu J K, Xie P. Direct control of microcystis bloom through the use of planktivorous carp—closure experiments and lake fishery practice[J]. Ecologic Science,2003,22(3):193-196.  
 [13] Fei Z L, Wu J, Zhao Q, et al. Electrofiltration and digestion of Hyriopsis cumingii to Algae[J]. Freshwater Fisheries,2006,36(5):24-29.