

文章编号: 2095—0411 (2012) 02—0040—05

平原地区城市内河调水增氧与曝气增氧的比较^{*}

翁平¹, 宁大亮², 王慧², 王发园², 蒋丹妮¹

(1. 常州环保科技开发推广中心, 江苏 常州, 213022; 2. 清华大学 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 为了解决平原地区城市内河溶解氧过低问题, 在数学模型推演的基础上, 以常州市典型内河为例进行计算, 比较调水增氧与曝气增氧的效果和成本差异, 为投资与管理决策提供技术支撑。分析结果表明, 在平原地区城市内河, 调水增氧与曝气增氧的效果与成本主要受上游可调入河水溶解氧水平、河道自由流量、调水水泵动力效率、曝气设备增氧动力效率等因素影响。当上游河道溶解氧水平较高、河道自由流量较小时, 调水增氧较为适宜, 否则应考虑采取曝气增氧。在常州市内河河道, 曝气增氧的溶解氧达标率、运行电耗和总体成本等指标均优于调水增氧, 是更为适宜的河道增氧方式。

关键词: 城市河道; 溶解氧; 调水增氧; 曝气; 成本比较

中图分类号: X 501

文献标识码: A

Comparison of Urban River Oxygenation by Water Transfer and Aeration in Plain Area

WENG Ping¹, NING Da-liang², WANG Hui², WANG Fa-yuan², JIANG Dan-ni¹

(1. Changzhou Environmental Protection Technology Exploitation and Development Center, Changzhou 213022, China; 2. State Key Joint Laboratory on Environment Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The low concentration of dissolved oxygen was a problem for most urban rivers in plain area. The effect and cost of oxygenation by water transfer and aeration were compared based on mathematical models and data of a typical urban river in Changzhou city. The result will support the decisions of relevant investment and management. The effect and cost of urban river oxygenation in plain area were mainly influenced by the concentration of dissolved oxygen in upstream water, natural flow rate, power efficiency of water transfer and aeration. Water transfer was appropriate if dissolved oxygen was high in upstream water and the natural flow rate was low, otherwise aeration should be considered. Because of higher effect and lower cost of power and investment, aeration should be more appropriate for river oxygenation in this case study of a urban river in Changzhou city.

Key words: urban rivers; dissolved oxygen; water transfer; aeration; cost comparison

较高的溶解氧水平能保障河流自净能力, 是维系水生生态系统健康的关键因素, 对消除河道黑

臭、遏制底质污染物释放有着重要作用。然而, 溶解氧过低却一直是困扰平原地区城市内河环境质量

^{*} 收稿日期: 2012—03—11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题资助 (2008ZX07313—001)

作者简介: 翁平 (1970—), 男, 江苏镇江人, 本科; 通讯联系人: 王慧。

改善的痼疾。以常州市为例,溶解氧过低是河流水质多年来严重超标的指标之一^[1,2]。这一方面是河水中较高浓度耗氧类污染物造成的,可以通过截污控源(逐步杜绝直接排放、控制入河污染源)及生态修复措施,能够有效控制。另一方面是因为平原城市内河水流原本流动缓慢甚至明显滞流,即便河水还清后,溶解氧仍低于健康水平,在许多情况下必须专门采取增氧措施。目前城市内河常见的增氧方式包括调水^[3](利用闸泵从溶解氧较高的骨干河道调水)和曝气(在河道中布置曝气设施)。本文在数学模型推演的基础上,以常州市典型内河(北市河)为例进行计算,比较调水增氧与曝气增氧对溶解氧达标的保障效果和成本差异,为相关投资与管理决策提供技术依据。

1 材料方法

1.1 北市河河道概况

选择常州市典型的城区内河北市河为研究对象,该河道总长 2 117m,河宽 6.8—30.0m,平均宽度 15m,水面面积 32 000m²;冬季为枯水期,中泓线水深 0.5—2.5m,夏季为丰水期,中泓线水深 1.4—3.4m;河水流动缓慢,上游城区骨干河道为关河,河水源自长江及京杭大运河。

1.2 河道水文水质检测

北市河水文水质数据自 2009 年 2 月至 2010 年 2 月(该河道充氧工程实施前)。水质监测方法依据《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》相关规定执行,溶解氧采用 YSI 550A 型溶氧仪检测。

河水流量采用美国 TRDI 公司 StreamPro 流量测定仪(走航式多普勒流量计)测定。水位依据吴淞基面水尺读数。北市河河水总体积依据北市河河底测量结果(每 50m 设 1 个测量断面),结合水位计算。水文数据一般取检测日平均值,由于本文侧重情景模拟分析,其他时刻水文水质数据以插值法推算。

1.3 设备基本指标

北市河河水流量受常州市东市河泵站的闸泵控制,相应调水泵机的功率及流量依据相应潜水泵仪表示数及水泵工作曲线获得。在探讨调水动力效率时,其他类型水泵数据参考《给水排水设计手

册》^[4]。曝气机增氧动力效率采用北市河充氧示范工程中曝气设备充氧能力实测值 0.5kg/(kW·h)为计。

2 结果与讨论

2.1 增氧动力效率及单位增氧量成本比较

2.1.1 成本差异的计算

增氧成本主要包括投资成本和运行维护成本。投资成本差异主要在于设备费用,基建成本暂不比较,因为调水增氧往往采用已有的水利设施,而曝气增氧的基建投入也可以在较长时间内发挥作用。运行成本差异主要在于电耗,而维护及相应人工成本视情况而定,在本案例中两种方式相近,不作比较。据此分析单位增氧量成本计算关系如下:

$$\text{单位增氧量电耗成本差异 } \Delta\lambda_e = \frac{p_e}{r_p} - \frac{p_e}{r_a} \quad (\text{元/kg})$$

$$\text{单位增氧量设备投资成本差异 } \Delta\lambda = \frac{p_{sp}}{P_{sp} \cdot t_{lp} \cdot r_p} -$$

$$\frac{p_{sa}}{P_{sa} \cdot t_{la} \cdot r_a} \quad (\text{元/kg})$$

其中, p_e 为电价(取 0.8 元/(kW·h)), r_p 、 r_a 分别为调水设备和曝气设备增氧动力效率(kg/(kW·h)), p_{sp} 、 p_{sa} 为相应设备单价(元/台), P_{sp} 、 P_{sa} 为相应设备单机功率(kW/台), t_{lp} 、 t_{la} 为相应设备寿命(h)。

依据调研,适用于城市内河曝气增氧的设备,价格功率比一般在 2 000—5 000 元/kW 之间,质量较好的机型运行寿命 t_{la} 能达到 15 000—30 000h,故取:

$$\frac{p_{sa}}{P_{sa} \cdot t_{la}} = 0.3 \text{ 元/(kW·h)}$$

调水往往采用大功率水泵,相应数值明显小于曝气增氧设备,一般不超过曝气增氧设备的 10%,故取:

$$\frac{p_{sp}}{P_{sp} \cdot t_{lp}} = 0.03 \text{ 元/(kW·h)}$$

则单位充氧量成本差异(元/kg):

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_e + \Delta\lambda_s = \frac{0.83}{r_p} - \frac{1.1}{r_a}$$

其中, r_a 为曝气增氧动力效率(kg/(kW·h))。依据设备手册,适用于河道的曝气增氧设备在标准条件下的动力效率一般不低于 1—2kg/(kW·h),在北市河充氧工程实际情况下定测定的增氧动力效率能达到 0.5kg/(kW·h),因此取 $r_a = 0.5\text{kg/}$

(kW·h)。 r_p 为调水增氧动力效率 (kg/(kW·h))。

2.1.2 调水增氧动力效率计算

调水增加河道溶解氧的能力 R_p (kg/h) 包括两个方面: 一方面是表观直接增氧能力 P_{pd} (kg/h), 调入河水中高于目标值的那部分溶解氧就是调水直接增加的, 但由于城市内河在不调水情况下自由流动也能流入一定量上游河水, 因此计算调水增氧能力时要扣减这一部分; 另一方面是水质改善间接增氧能力 R_{pi} (kg/h), 将水质优于目标河段的河水大量调入, 将使河水耗氧能力有所降低, 降低的这部分就是调水的间接增氧量。

$$R_{pd} = (Q_p - Q_f) \cdot (C_u - C_t) \leq Q_p \cdot (C_u - C_t)$$

$$R_{pi} = \int_0^{V_a} k \cdot \Delta C_b \cdot dV = k \cdot \Delta C_{ba} \cdot V_a$$

$$r_p = \frac{R_p}{P} = \frac{R_{pd} + R_{pi}}{P} \leq \eta \cdot (C_u - C_t) +$$

$$\eta \cdot k \cdot \Delta C_{ba} \cdot t_{HR}$$

其中, Q_p 为所需调水流量 (m^3/s); Q_f 为未调水时自由流动流量 (m^3/s), 北市河取值 $0-2 m^3/s$; C_u 为上游调入河水的溶解氧质量浓度 (mg/L), 北市河上游均值 $3.8 mg/L$; C_t 为目标溶解氧质量浓度, 取 $2 mg/L$; V_a 为目标河段河水总体积 (m^3), 北市河取值 $32\ 300-73\ 000 m^3$; k 为耗氧速率常数 (1/d), 北市河取值 $0.1-0.2/d$; ΔC_b 为河道某一断面在调水和未调水情况下耗氧污染物质量浓度差异 (mg/L); ΔC_{ba} 为相应的等效平均质量浓度差异 (mg/L), 北市河取值 $0-8 mg/L$; P 为总功率 (kW); t_{HR} 为调水时的水力停留时间, 可行的取值范围 $2-8 h$, 一般不会超出 $1-12 h$ 的范围; η 为水泵调水动力效率 ($m^3/(kW \cdot h)$), 目前控制北市河调水的潜水泵单机功率 $155 kW$, 单机调水能力约 $2 m^3/s$, 调水动力效率为 $46.4 m^3/(kW \cdot h)$; 统计市售 16 类流量超过 $1\ 000 m^3/h$ 水泵的单机泵水动力效率如图 1, 可见最高可达 $124 m^3/(kW \cdot h)$ (对应单机流量 $1 m^3/s$, 包括 150—800S 型单级双吸离心泵、800—1200S 型单级双吸离心泵、DS—VV 型立式污水泵、HD 型立式单级单吸导叶式混流泵、HQB 型混流潜水泵、KWP 型无堵塞离心泵、LC 型立式长轴泵、QW 型潜水排污泵、QXG 型潜水给水泵、SA 型单级双吸中开离心泵、TLW 立式污水泵、TSW 型立式污水泵、WLZ 型立式污水泵、WL 型立式污水泵、WL 型立式污水污物泵、ZQB 型轴流潜水泵等 16

种水泵)。

2.1.3 增氧动力效率及成本差异初步比较

曝气设备在标准状态下增氧动力效率一般能达到 $1-2 kg/(kW \cdot h)$ 。北市河曝气充氧工程实测增氧动力效率不低于 $0.5 kg/(kW \cdot h)$ 。

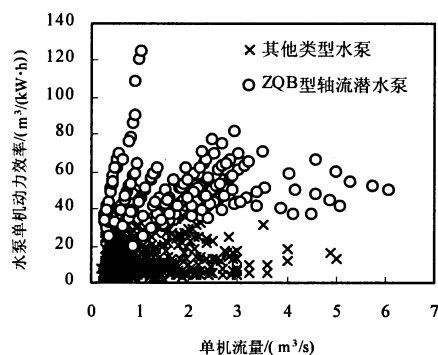


图 1 各类水泵调水动力效率

Fig. 1 Power efficiency of water transfer by different pumps

若采用目前的水泵调水 ($\eta = 46.4 m^3/(kW \cdot h)$), 依据调水增氧动力效率公式和相关参数取值范围, 即使北市河上游骨干河道溶解氧能达到 II 类水标准 ($6 mg/L$), 调水增氧动力效率 r_p 也不超过 $0.28 kg/(kW \cdot h)$, 相应 $\Delta\lambda \geq 0.71$ 元/kg, 即每增加 $1 kg$ 氧气调水增氧的成本至少比曝气增氧高 0.71 元, 可见绝大多数情况下调水增氧的能耗和成本均要高于曝气增氧, 不适合纯粹为了增氧而调水的河道。

若采用最高效率的水泵调水 ($\eta = 124 m^3/(kW \cdot h)$), 当上游骨干河道溶解氧能维持在平均水平 ($3.8 mg/L$), r_p 一般不超过 $0.32 kg/(kW \cdot h)$, 相应增氧成本差异 $\Delta\lambda \geq 0.39$ 元/kg, 因此, 与曝气增氧相比, 调水增氧的能耗与成本没有优势。当上游骨干河道溶解氧能达到 II 类水标准 ($6 mg/L$), r_p 一般不超过 $0.59 kg/(kW \cdot h)$, 与曝气增氧相近, 在部分情况下还能优于曝气增氧; 相应 $\Delta\lambda \geq -0.8$ 元/kg, 即调水的单位增氧量成本在部分情况下能够低于曝气增氧, 最多能低 0.8 元/kg, 此类情况下可考虑进一步依据实测数据模拟估算调水增氧与曝气增氧的年运行效果与成本, 以辅助决策。

由以上分析可见, 若曝气设备选型不当、质量不可靠或维护不当, 导致曝气增氧动力效率低于 $0.3 kg/(kW \cdot h)$ (依据北市河充氧工程的实际经验, 很有可能发生), 将使其在许多情况下丧失其相对于调水增氧的能耗及成本优势。

2.2 调水与曝气增氧运行效果及成本比较

2.2.1 主要指标及基本计算公式

增氧效果用溶解氧达标保障率 ζ (%) 来评价, 本文中溶解氧标准采用地表水 V 类水质标准, 2 mg/L。

$$\zeta = \frac{1}{t_a} \int \frac{V_e}{V_a} dt \approx \frac{1}{t_a} \sum_i \frac{L_{e(i)}}{L_a} \cdot t_{(i)}$$

其中, V_e 为溶解氧达标的河水体积 (m^3), V_a 为目标河段河水总体积 (m^3), t 为时间 (d), t_a 为评估总时间 (d, 本案例中为 365d), $L_{e(i)}$ 为第 i 个时间段溶解氧达标的河段长度 (m), L_a 为目标河段总长度 (m), $t_{(i)}$ 为第 i 个时间段的时间 (d)。

增氧成本差异 ΔC 主要包括电耗成本差异 ΔC_e (元/a) 和设备成本差异 ΔC_s (元/a)。

$$\Delta C_e = p_e \cdot (E_p - E_a) = 0.8 (E_p - E_a)$$

$$\Delta C_s = \frac{p_{sp} \cdot E_p}{P_{sp} \cdot t_{Lp}} - \frac{p_{sa} \cdot E_a}{P_{sa} \cdot t_{La}} = 0.03 E_p - 0.3 E_a$$

$$\Delta C = \Delta C_e + \Delta C_s = 0.83 E_p - 1.1 E_a$$

其中, E_p 、 E_a 分别为调水增氧和曝气增氧的年度电耗 ($kW \cdot h/a$)。

电耗计算中, 假设设备为“优化运行”(即需要多少使用多少), 以方便比较分析, 而实际情况能耗会更高一些。

$$\text{调水增氧电耗 } E_p = \frac{1}{t_a} \sum_i \frac{Q_{p(i)}}{\eta} \cdot t_{(i)} \quad (kW \cdot h/a)$$

$$\text{曝气增氧电耗 } E_a = \frac{1}{t_a} \sum_i \frac{q_{2(i)}}{r_a} \cdot t_{(i)} \quad (kW \cdot h/a)$$

其中, $Q_{p(i)}$ 为第 i 时段增氧调水流量 (m^3/s); η 为水泵调水动力效率 ($m^3/(kW \cdot h)$); $t_{(i)}$ 为第 i 段时间 (d); t_a 为评估总时间 (1a), 公式中略去了单位转换系数 (下文同)。 $q_{2(i)}$ 为第 i 时段曝气增氧需求 (kg/h), r_a 为曝气机增氧动力效率 ($kg/(kW \cdot h)$)。

2.2.2 增氧运行方式与边界限制

调水运行方式: 当所需调水量不超过自由流量时, 说明仅靠自由流动即可满足北市河充氧需求, 不调水; 当所需调水量超过最大流量限制 (调水量过大将显著影响骨干河道环境容量, 北市河流量限制为 $8m^3/s$) 时, 按最大流量调水, 计算溶解氧达标比例; 其他情况下按照所需流量调水, 可保障目标河道全段溶解氧达标。调水流量的数学表达为:

$$Q_{p(i)} = \begin{cases} 0 & \text{if } Q_{rp(i)} \leq Q_{f(i)} \\ Q_{rp(i)} & \text{if } Q_{f(i)} < Q_{rp(i)} \leq Q_L \\ Q_L & \text{if } Q_{rp(i)} > Q_L \end{cases}$$

$$Q_{rp(i)} = \frac{q_{1(i)}}{C_{u(i)} - C_t}$$

其中, $Q_{rp(i)}$ 为第 i 时段所需调水流量 (m^3/s); Q_L 为调水流量上限 ($8m^3/s$); $Q_{f(i)}$ 为未调水条件下河道自由流量 (m^3/s); $C_{u(i)}$ 为第 i 时段上游骨干河道河水溶解氧 (mg/L), C_t 为目标溶解氧 (取 $2mg/L$); $q_{1(i)}$ 为第 i 时段河道平均耗氧能力 (kg/h , 依据模拟调水后河段溶解氧校正耗氧能力)。

曝气运行方式: 当自由流动引入的溶解氧不低于河道耗氧能力时, 说明仅靠自由流动即可满足北市河充氧需求, 不曝气; 当所需增氧速率超过最大限值时, 按最大限值曝气, 计算溶解氧达标比例; 其他情况下按照所需增氧速率曝气。数学表达式为:

$$q_{a(i)} = \begin{cases} 0 & \text{if } q_{ra(i)} \leq 0 \\ q_{ra(i)} & \text{if } 0 < q_{ra(i)} \leq q_L \\ q_L & \text{if } q_{ra(i)} > q_L \end{cases}$$

$$q_{ra(i)} = q_{2(i)} + (C_t - C_{u(i)}) \cdot Q_{f(i)}$$

其中, $q_{ra(i)}$ 为第 i 时段所需曝气增氧速率 (kg/h); $q_{2(i)}$ 为第 i 时段河道平均耗氧能力 (kg/h , 依据模拟曝气后河段平均溶解氧校正耗氧能力); q_L 为曝气增氧速率上限 (kg/h)。

为便于与调水增氧比较, 设 $q_L = r_a \cdot \frac{Q_L}{\eta}$ 。若 $\eta = 124m^3/(kW \cdot h)$ 、 $Q_L = 8m^3/s$ 、 $r_a = 0.5kg/(kW \cdot h)$, q_L 为 $116kg/h$ 。

2.2.3 实际水文水质条件下增氧效果及成本比较

北市河自由流量年度变化如图 2。依据实测水质及耗氧速率常数测算的河道耗氧能力年度变化如图 3。

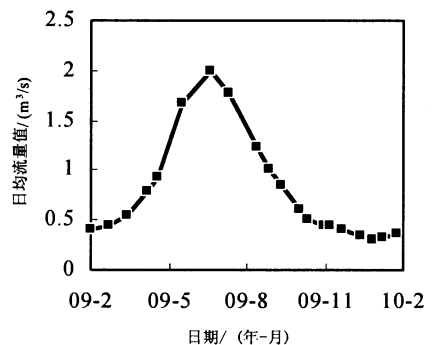


图 2 北市河河道自由流量年变化

Fig. 2 Variation of natural flow rate of Beishi River in a year

按照上述运行方式, 并采用动力效率最高的水泵调水 (即 $\eta = 124m^3/(kW \cdot h)$), 计算调水增氧及曝气增氧的溶解氧达标保障率、年度电耗及年

度成本差异(表1)。由表1可见,曝气增氧的溶解氧达标率更高,电耗及装机功率更低,年度成本约减少10.9万元,是更为适宜的增氧方式。

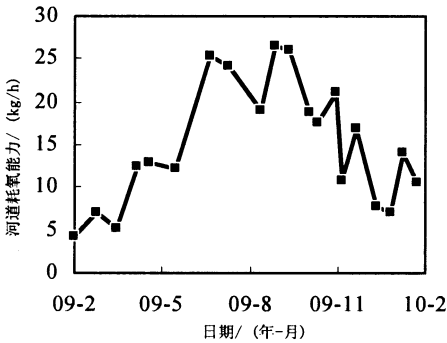


图3 北市河河道耗氧能力年变化

Fig. 3 Variation of oxygen-consuming capacity of Beishi River in a year

表1 调水增氧与曝气增氧的测算效果及成本比较

Table 1 Effect and cost of oxygenation by water transfer and aeration in Beishi River

指标	调水增氧	曝气增氧
溶解氧达标保障率/%	35.5	100
年度电耗/(10 ⁴ kW·h/a)	57.6	33.5
所需最大功率/kW	232	67
年度成本差异/(万元/a)	10.9	

2.2.4 自由流量及溶解氧水平对增氧方式的影响

随着常州市水环境综合治理的不断推进,北市河的自由流量、水质及上游骨干河道溶解氧将发生变化。着眼于未来的水质水文条件,假设自由流量、上游溶解氧在全年为恒定值,分析其取值变化对不同方式增氧成本差异的影响,得成本差异等值线图(图4,曲线中的数字代表调水年度成本高于曝气增氧的数额,单位万元/a)。可见,上游河水溶解氧与河道自由流量对增氧成本有显著影响;多数情况下,曝气增氧成本明显低于调水增氧;当上游调入河水的溶解氧超过5.1mg/L、自由流量较低时,调水增氧成本低于曝气增氧。

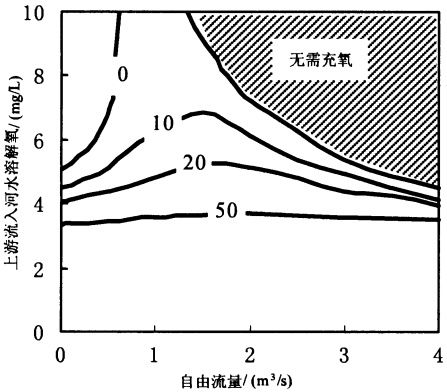


图4 北市河河道调水增氧与曝气增氧年度成本差异等值线

Fig. 4 Isogram of cost difference between oxygenation by water trans-

fer and aeration in Beishi River

此外,在实际增氧工程中,曝气增氧的设备台套数较多,并在部分河道容易由于垃圾缠绕而发生故障,维护成本很可能高于调水设备,如果按照上文中测算出的成本差异不足以应对类似的运行成本,则应慎重考虑是否采用曝气增氧。调水设备一般还具有蓄洪、行洪、排涝等功能,而且单机功率较大,其优化运行比曝气设备受到的限制更大,将导致增氧效果无法保障或运行成本明显高于测算值,需要依据实际情况作更为细致的测算评估。

3 结 论

在平原地区城市内河,调水增氧与曝气增氧在效果与成本上的优劣视情况而定,主要受上游可调入河水溶解氧水平、河道自由流量、调水水泵动力效率、曝气设备增氧动力效率的影响。当上游河道溶解氧水平较高(例如北市河河道上游河水溶解氧高于5.1mg/L)、河道自由流量较小(缓流或滞流)时,调水增氧较为适宜,否则应考虑采取曝气增氧。在比选这两种增氧方式时,可以先依据目标河段水文水质参数取值范围,初步比较增氧动力效率及单位增氧量成本,若较为接近,则进一步依据历史数据模拟测算增氧的年度成本及效果,选择较为适宜的方式。

在本文所述的北市河河道,不论是分析增氧动力效率和单位增氧量成本,还是比较年度运行电耗及成本的测算值,曝气增氧均优于调水增氧,曝气增氧是效果更有保障、相对节能、成本更低、所需装机功率更小的增氧方式。尽管在多数情况下,调水并不是适宜的增氧方式,但是当内河污染严重时,调水能够较好地综合调配城市河道的水环境容量^[3],若与清淤、截污、生态修复等各项措施相互配合,能够有效扭转城市内河的重污染现状。

致谢:本文中部分水质数据由常州市环境监测中心站检测,深表感谢。

参考文献:

[1] 张文艺,孙玲玲,滕加泉,等.加工工业城市—常州市水环境污染分析[J].中国农村水利水电,2010(5):14-17.
[2] 巢亚萍.常州运河支流水体黑臭监测调查及防治对策[J].内蒙古环境保护,2001,13(2):30-34.
[3] 杨宇栋,李书建.引清活水改善常州城市水环境的研究[J].常州工学院学报,2009,22(4):20-25.