

人为扰动下河流复氧激增现象及机制分析

张晨^{1*}, 王浩百¹, 胡华芬², 高学平¹, 于昊¹, 严琦¹ (1. 天津大学, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津市海河管理处, 天津 300141)

摘要: 为探究河流复氧规律及其机制, 研制出改变河道局部水流流速的深控型水平推流曝气装置, 并使用该装置在天津市外环河中进行原位试验, 探究人为扰动对河流复氧系数的影响。试验结果表明, 装置工作时纵向流速提高至 40cm/s, 最大增幅 22 倍; 水体溶解氧浓度提高 0.6~1.7mg/L, 约 10%。研究发现, 经典的 Owens 等 5 组河流复氧系数经验公式均低估了扰动下的复氧系数, 试验均值约为 49.5d⁻¹, 是理论值的 10~100 倍, 即河流复氧在人为扰动下发生激增现象。分析成因表明, 湍流动能与河流复氧系数显著正相关, 区别于自然流动, 人为扰动提升了水体纵向和垂向湍流动能, 加速了中下层水体溶解氧扩散, 提高了复氧率, 进而发生了复氧激增现象。研究成果为提升城市河流水质的水力学方法提供了科学依据。

关键词: 复氧激增现象; 复氧系数; 水平推流曝气装置; 人为扰动; 湍流动能; 河道原位试验

中图分类号: X522, TV143 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)05-2167-07

Reaeration surging phenomenon with artificial disturbance and the implication for the impact of turbulent kinetic energy in river. ZHANG Chen^{1*}, WANG Hao-bai¹, HU Hua-fen², GAO Xue-ping¹, YU Hao¹, YAN Qi¹ (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Haihe River Administrative Bureau of Tianjin, Tianjin 300141, China). *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2167~2173

Abstract: Nowadays, the disturbance aeration device widely used in the ecological restoration of rivers and lakes. However, it is still not clear how the artificial stir influences the reaeration in rivers. To address this issue, we developed a deep-controlled horizontal push-flow aeration device, which can change the flow velocity of the local water flow in the river channel. In order to investigate the effects of artificial disturbance on the reaeration coefficient of the river, the device was used to conduct an in-situ experiment in the Waihuan river of Tianjin. The results showed that the water velocity increased to 40cm/s and 22 times higher than the original velocity when the device operated. Similarly, the dissolved oxygen concentration increased by 0.6~1.7mg/L (10%). Moreover, five groups of classical rivers reaeration coefficient empirical formulae underestimated the reaeration coefficients. It can be called the river reaeration surging phenomenon under artificial disturbance. There was a significantly positive relationship between the turbulence kinetic energy and reaeration coefficient in the river. Compared with the natural flow, the artificial disturbance enhanced the vertical and longitudinal turbulence kinetic energy and accelerated the dissolved oxygen diffusion in the middle and bottom water, respectively. The increase of the turbulence kinetic energy increased reaeration rate and contributed to reaeration surge. This study provides a scientific basis for the hydraulic methods of improving water quality in urban rivers.

Key words: reaeration surging phenomenon; reaeration coefficient; horizontal push-flow aeration device; artificial disturbance; turbulence kinetic energy; in-situ experiment in river

溶解氧(DO)是评价水环境的重要指标之一^[1-2], 也一定程度上代表着水体自净能力^[3-4], 影响着底泥中微生物过程^[5], 并可作为是否出现水体污染甚至黑臭水体现象的判别标准^[6]。大气内氧分子是河流溶解氧的主要来源^[7], 大气-水体复氧过程影响着河流水体溶解氧浓度的高低。因此, 研究城市河道复氧规律, 对提高水体溶解氧浓度及河流水环境改善具有重要意义。

大气复氧是气液两相之间物质交换的复杂过程, 可分为静态水体复氧和紊动水体复氧。静态水体复氧过程可依据 Fick 定律表述^[8], 而紊动水体复氧理

论有分子扩散理论、双膜理论、渗透理论、薄膜更新理论等^[7,9]。基于上述复氧理论, 可利用复氧系数 k_2 和表面传质系数 k_L ^[7,9-11] 度量水体复氧速率。关于复氧系数 k_2 的研究和应用更为广泛, 早在 1925 年, Streeter 等^[12] 提出适用于河流的复氧系数经验公式。O'Connor 等^[13] 提出利用断面平均流速 U 和河道平均水深 H 计算河流复氧系数的经典公式, 后续学

收稿日期: 2019-10-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407203); 国家自然科学基金资助项目(51679160)

* 责任作者, 教授, email@tju.edu.cn

者在 O'Connor 等提出的经典公式上进一步考虑了其他水力要素,增加了河底坡度 $S^{[14-15]}$,弗劳德数 $Fr^{[16]}$,动力粘滞系数 $\mu^{[17]}$ 等;也有学者进一步考虑水体紊动影响,用表层水体垂向流速的均方根计算复氧系数^[18].但现有研究未针对水体紊动下复氧系数变化规律进行深入讨论,湍流动能对复氧系数的影响尚不清晰.以往河流复氧系数计算公式主要源于天然河道观测或水槽试验.但天然河道水力特性变化幅度较小且难以控制,水槽试验模拟条件有限,故复氧系数计算公式(Owens 公式^[12]、Ranjith 公式^[19]、Negulescu-Rojanski 公式^[12]等)适用范围有一定局限性.

目前,河湖生态修复和治理工程中广泛应用了扰流曝气装置,该类装置产生人为扰动改变了河流自然条件下的复氧规律,复氧速率发生改变.已有学者试验研究了人为扰动下溶解氧浓度提升幅度和装置能效比等^[20-21],但人为扰动对天然河道的复氧速率或复氧系数的影响、扰动过程中的复氧机制尚不清晰,现有复氧系数计算公式仍需进一步改进.基于此,本研究设计研制了一种用于河道的深控型水

平推流曝气装置,以改变河道局部水流流速,探究人为扰动下河流水体复氧规律.

1 材料与方法

1.1 试验河道和试验装置

选取天津市外环河张道口桥至腾达桥段作为试验河段,长约 600m,河面宽 30m,水深约 3m.河道断面为梯形断面,边坡修葺有竖直护坡,河道水体自然流速较缓(0.1m/s 以下).

发明制作一种改善城市二级河道连通性的深控型水平推流曝气装置^[22],装置示意图和实物照片如图 1 所示.装置使用清洁能源太阳能,正常日照条件下,2d 即可充满电池(容量为 100AH).装置持续运行时间与运行功率有关,满电条件可连续工作 2h,保证了原位试验量测数据所需时间.装置工作深度可控,有效工作范围可达水下 2.5m;推流功率可调,最大可达 10kw,显著加速距装置出口 40m 以内的纵向水流流速,增幅可达 20 倍以上;本装置通过改变局部水流流速弥补了以往原位试验中条件受限的不足,实现人为扰动的控制性原位试验条件.试验照片如图 1 所示.



图 1 试验装置示意和实物照片

Fig.1 Device schematic diagram and physical photos

1.2 测量仪器和试验方法

利用多普勒声学流速仪 Argonaut-SW 测量河段剖面流速,测量水深范围为 0.3~5.0m,流速测量范围为 ± 5 m/s,分辨率为 0.1cm/s,准确度为 $\pm 1\%$,采样层数设置为 10 层,每层采样距离 0.26~0.28m,采样时间间隔 10s.表底两层受到干扰较大、数据波动较大,故在分析中仅使用中间 8 层的流速数据.利用 YSI-6600 多参数水质分析仪测量水体溶解氧浓度,测量范围为 0~50mg/L,

分辨率为 0.01mg/L,准确度为 $\pm 1\%$.

调节装置工作深度改变河道断面流速分布.4 次试验中,装置均为顺流向工作,工作深度分别为 0.5,1,1.5,2m,具体工况条件如表 1 所示.装置对距离出口 40m 以内水体推流加速效果显著,顺流向选取距装置出口不同位置处横断面作为量测断面(表 1),量测断面和测点布置如图 2 所示.根据 Argonaut-SW 仪器采样层数在垂向上布设 10 个点位进行流

速测量.量测水体溶解氧浓度时,每个量测断面布设 5 个点位,即对水面下 0.5,1,1.5,2,2.5m 进行溶解氧浓度量测,代表水体表、中、底层溶解氧浓度.试验前,调整工作深度,测量河段初始流速、溶解氧浓度、水温等.试验开始时,启动试验装置,沿流程方向测量和记录断面流速、溶解氧浓度等变量.

表 1 原位试验工况条件
Table 1 Working condition table for in-situ test

工况	风况	天气	气温 (°C)	水温 (°C)	河深(m)	工作深度*(m)	量测断面(m)
一	东南风	晴	21	16.2	3.2	0.5	0.5,30,40
二	东南风	阴	19	15.5	3.1	1	0.5,30,40
三	西风	小雨	20	15.4	3.1	1.5	0.5,30
四	南风	晴	14	12.6	3	2	5,10,20,30

注:*所指装置工作深度均为装置动力部件距离水面深度.

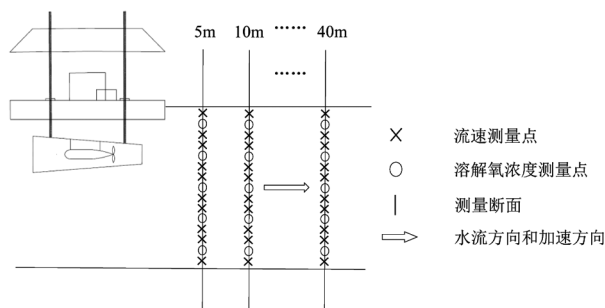


图 2 测量断面和测点位置示意

Fig.2 Diagram of measurement section and measurement point location

1.3 实测复氧系数与湍流动能计算公式

在探究河流复氧规律中,使用复氧方程计算复氧系数,复氧方程式形式上较为统一,均表示为复氧速率与氧亏成正比,如下式:

$$\frac{dO}{dt}=k_2(O_s-O) \tag{1}$$

积分形式为

$$O(t)=O_s+(O_1-O_s)\exp(-k_2t) \tag{2}$$

变形后可得

$$k_2=\frac{\ln(O_s-O_{t_1})-\ln(O_s-O_{t_2})}{t_2-t_1} \tag{3}$$

式中: k_2 表示水温为 20℃ 时水体复氧系数, d^{-1} ; O_1 表示复氧开始时水体溶解氧浓度,mg/L; O_s 表示水体饱和溶解氧浓度,mg/L,由实测法测得^[23-24]; O_{t_1} 和 O_{t_2} 表示复氧过程开始前后水体溶解氧浓度,mg/L; t_1 和 t_2 表示复氧过程开始和结束时间, t_2-t_1 为复

氧过程持续时间,以 d 计.

考虑到试验中的温度影响,以水温 20℃ 作为基准温度.依据温度修正公式,计算出温度为 20℃ 时复氧系数,其中 θ 取为 1.0241.下文所有 k_2 均指水温为 20℃ 时的标准复氧系数.

$$k_2^{20}=\frac{k_2^T}{\theta^{(T-20)}} \tag{4}$$

湍流动能表征着水体紊动的剧烈程度,是衡量湍流发展或衰退的指标.湍流动能的计算如式(5)和式(6)所示,用 k 代表湍流动能, m^2/s^2 .

$$k=\frac{1}{2}\overline{(u')^2} \tag{5}$$

$$\overline{(u')^2}=\frac{1}{T}\int_0^T(u(t)-\bar{u})^2dt \tag{6}$$

式中: $u(t)$ 为各布设点位的瞬时流速,m/s; $\bar{u}$ 为各布设点位的时均流速,m/s,计算时长为 2~5min; u' 为各布设点位的脉动流速,m/s.

2 结果与讨论

2.1 水体流速和溶解氧浓度变化情况

各工况下水体流速和溶解氧浓度变化如图 3 所示.装置对于工作深度附近水体加速效果明显,纵向流速最大可达 40cm/s,最大增幅 22 倍;河道水体流速随着与装置之间距离的增加而减小,顺流向距装置出口 30~40m 范围内水体流速小于 10cm/s,已接近河道原始流速,装置有效加速距离为 40m.由于每组工况试验时间不同,初始溶解氧浓度不一,故试验时关注溶解氧浓度变化量.装置工作时可有效提升水体溶解氧浓度,表层水体溶解氧浓度(0~1m 水深)最大增幅为 12%,由 9.2mg/L 提升至 10.3mg/L(工况二);对中层水体溶解氧浓度(1~2m)最大增幅为 10.3%,由 11.7mg/L 提升至 12.9mg/L(工况三);对底层水体溶解氧浓度(2~3m)最大增幅为 15.2%,由 11.2mg/L 提升至 12.9mg/L(工况三).试验过程中外界条件,如风速、气温等也会影响水体流速和溶解氧浓度.受外界情况(阵风)影响,工况二中距离装置 40m 处流速和溶解氧浓度相较于 30m 处测量断面的数值略高.受天气(小雨)影响,工况三表层溶解氧浓度呈波动变化,表层水体本底溶解氧浓度数值偏高.底泥上覆水体流速增加^[25-26]和水体溶解氧浓度增大^[27-28]均影响底泥污染物释放率.

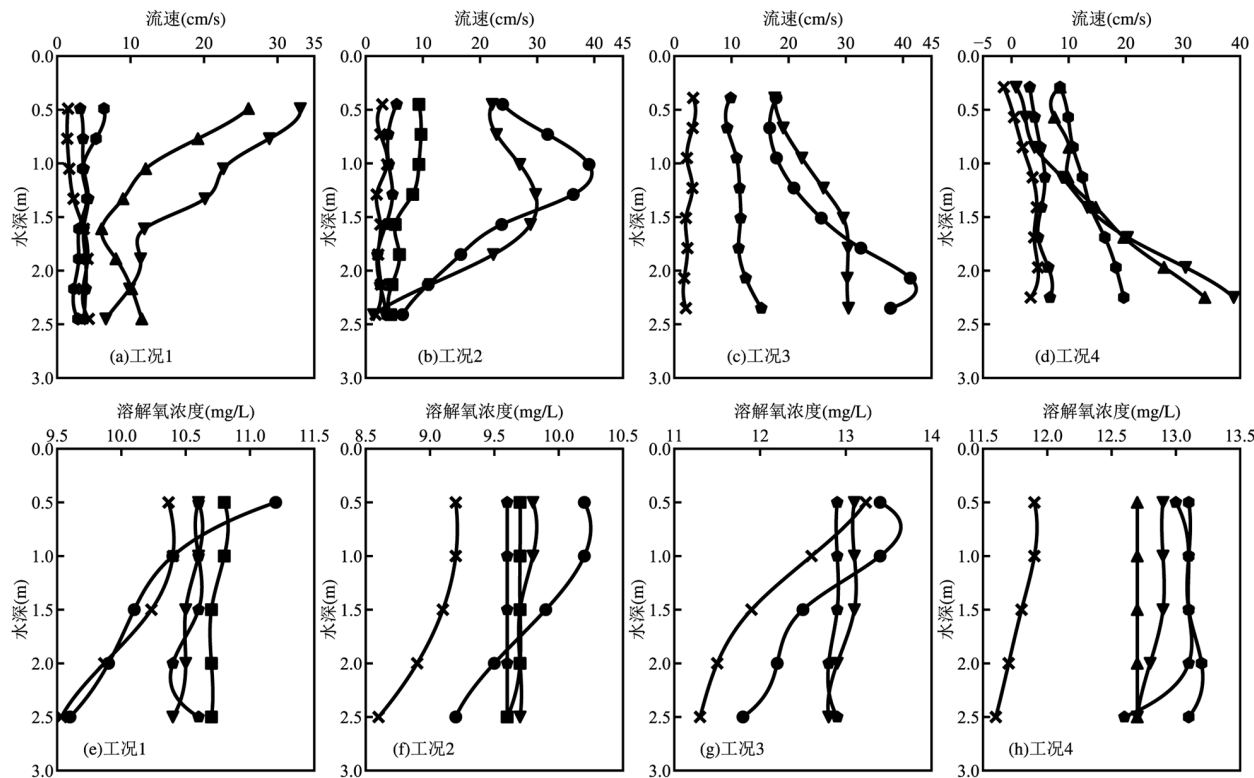


图 3 各工况下流速和溶解氧变化情况
Fig.3 Variation of flow velocity and dissolved oxygen under different conditions

× 试验前 ▼ 试验时距装置5m ● 试验时距装置20m ■ 试验时距装置40m
● 试验时装置出水口处 ▲ 试验时距装置10m

试验过程中表层溶解氧浓度变化速度较快,中底层溶解氧浓度变化速度较缓.在4个工况中,表层溶解氧浓度均在装置出水口附近达到最高值,沿流程距离增加,表层溶解氧浓度逐渐减小直至稳定.在工况一~工况三中,可以明显看到装置出水口处水体溶解氧浓度垂向分布出现显著性差异.与试验前相比,表层溶解氧数值明显增大,中底层溶解氧变化较小.沿流程距离增加,水体溶解氧浓度垂向梯度逐渐变小,直至垂向上溶解氧浓度分布均匀.原因是表层水体先于中底层水体进行复氧过程,故溶解氧浓度梯度变化存在垂向差异.且装置出水口附近水体紊动剧烈,水面旋滚明显,表层复氧速度明显增大,溶解氧浓度明显升高;此时表层水体溶解氧还未完全扩散至中底层,中底层溶解氧浓度提升幅度较小,溶解氧浓度垂向分布差异较大.随着复氧过程的进行,氧亏值逐渐降低,表层水体复氧速率逐渐减小,水体溶解氧逐渐扩散至中底层,溶解氧浓度垂向分布趋于均匀.

2.2 复氧激增现象

依据式(3)和(4)计算4种工况下各测量断面和垂向测点的复氧系数实测值,复氧系数理论值依据前人

复氧系数经验公式推算.复氧系数理论值均与断面平均流速和河道平均水深有关,且 Fr 等水力要素由平均流速和平均水深表示,选取表2中5组经验公式进行计算.复氧系数实测值和理论值对比如图4所示,图中采用对数坐标,实线代表复氧系数在经验公式适用范围内的计算值.复氧系数实测值均远大于经验公式理论值,实测值范围为 $(49.5\pm32.7)d^{-1}$ (均值 $\pm$ 标准差),是理论值的数十倍甚至百倍.说明河流受到人为扰动时,河流复氧规律发生变化,出现复氧激增现象.

表 2 复氧系数经验公式
Table 2 Empirical formulas for reaeration coefficient

公式名称	公式形式	适用范围
Churchill(1962) ^[12]	$k_2 = 5.026 \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$	$H: 0.64 \sim 3.5m$ $U: 0.56 \sim 1.52m/s$
Owens(1964) ^[12]	$k_2 = 10.90 \frac{U^{0.73}}{H^{1.75}}$	$H: 0.1 \sim 0.74m$ $U: 0.04 \sim 0.56m/s$
Negulescu(1969) ^[12]	$k_2 = 4.74 \left(\frac{U}{H} \right)^{0.85}$	$H: 0.049 \sim 0.15m$ $U: 0.2 \sim 0.58m/s$
Jha(2001) ^[29]	$k_2 = 5.792 \frac{U^{0.5}}{H^{0.25}}$	$H: 0.1 \sim 1m$ $U: 0.2 \sim 0.56m/s$
Ranjith(2019) ^[19]	$k_2 = 5.7126 \frac{U^{0.67691}}{H^{0.69889}}$	$H: 0.22 \sim 0.66m$ $U: 0.51 \sim 0.73m/s$

出现复氧激增现象的原因可能有以下两点,一是前人提出的复氧系数公式适用范围有限(表 2),当理论公式超出应用范围时误差较大,不能准确估计河流的复氧系数,如本试验中水深较深,而前人试验中的水深较浅或水槽试验推导的理论公式并不适用;二是人为扰动使得水流流态发生改变,水体紊动

加剧,复氧规律变化.相较于自然流动,河流表面翻滚剧烈并出现明显漩涡,中底层流速提升明显.依据大气复氧双膜理论^[7],水体紊动会使液膜厚度改变.人为扰动使得水体紊动剧烈,液膜厚度减小,氧气分子在液膜内扩散速度提高,导致大气-水体复氧速率提升,复氧系数随之增大.

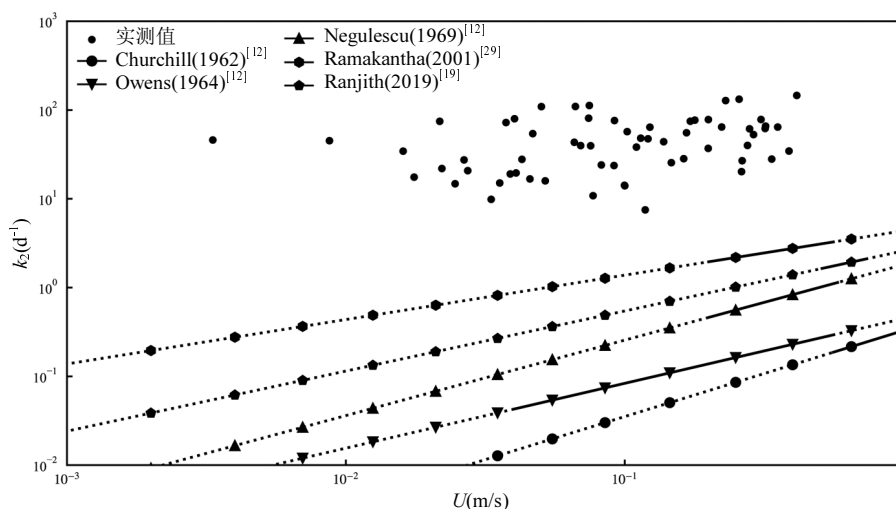


图 4 复氧系数实测值和理论值对比

Fig.4 Comparison of measured value and theoretical value of reaeration coefficient

2.3 复氧系数与湍流动能响应关系

利用 SPSS 软件对湍流动能与 k_2 实测值进行 Pearson 和 Spearman 相关性分析,利用 Pearson 相关系数检验湍流动能与复氧系数之间是否存在线性相关关系,利用 Spearman 秩相关系数检验湍流动能与复氧系数之间是否存在单调函数关系.试验中河流横向上水体紊动程度远小于河流纵向和垂

向方向,故主要考虑纵向和垂向湍流动能与复氧系数之间的关系.相关性分析如图 5 所示,Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数列于表 3. k_2 与河流纵向和垂向湍流动能均呈现出显著正相关关系,且与纵向湍流动能相关性较高.这说明增加河流纵向或者垂向上的紊动程度,均可加快复氧过程,提高复氧系数.

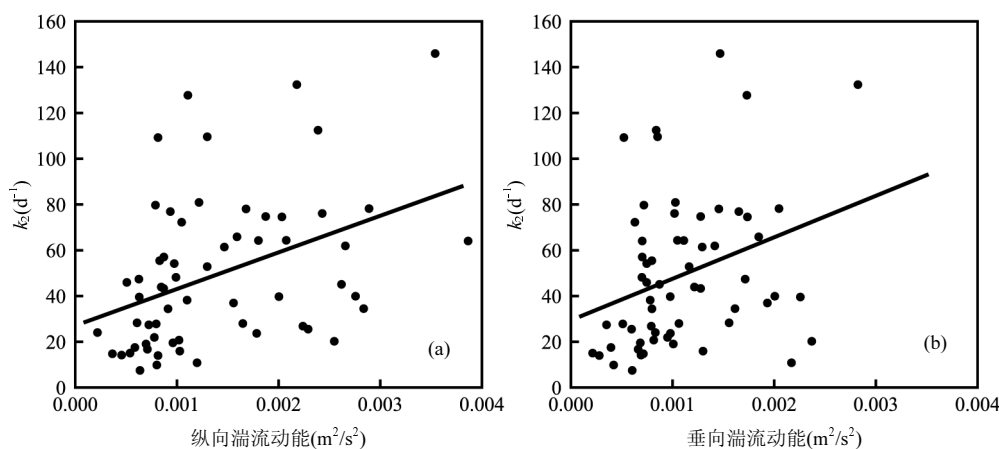


图 5 复氧系数与湍流动能相关关系

Fig.5 Correlation diagram between reaeration coefficient and turbulent kinetic energy

进一步探究不同水深位置的湍流动能与复氧

系数 k_2 之间相关关系,对表、中、底三层水体湍流

动能与复氧系数进行相关性分析,相关系数列于表3.表层水体湍流动能与复氧系数未表现出显著的线性相关性和单调相关性.这种现象是因为表层水体复氧速率受水体和大气两相界面共同影响,大气界面特性(如气压)也会影响复氧过程,湍流动能和复氧系数之间相关关系复杂.中层水体垂向湍流动能与复氧系数的 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数均达到显著水平,呈现显著单调正相关关系,表明河流垂向湍流动能对中层水体复氧系数起促进作用,提升垂向水体交换程度可有效提升河道中层溶解氧浓度.这是由于水体内部溶解氧转移主要依靠扩散作用,氧分子从高浓度扩散到低浓度.通常情况下,河流表层水体溶解氧浓度最高,氧分子由水体表层向下扩散,水体垂向紊动可加速氧分子从水体表层扩散至中层,加快中层水体复氧速率.底层水体纵向湍流动能与复氧系数相关性显著,表明提升纵向湍流动能可提高河流底层水体复氧系数.可通过提升底流流速来提升底层水体溶解氧浓度,底层水体在纵向上紊动程度越高,底层水体复氧系数越大,复氧速率越快.这由于底层水体受河底限制,垂向紊动受限,河流水体纵向上紊动对溶解氧扩散影响更大.

表 3 k_2 与湍流动能之间相关系数
Table 3 Correlation coefficient between k_2 and turbulent kinetic energy

	指 标	纵向湍流动能	垂向湍流动能
k_2	Pearson 相关系数	0.408**	0.314*
	Spearman 相关系数	0.473**	0.371**
表层水体 k_2	Pearson 相关系数	0.298	-0.060
	Spearman 相关系数	0.373	0.244
中层水体 k_2	Pearson 相关系数	0.329	0.666*
	Spearman 相关系数	0.549*	0.714**
底层水体 k_2	Pearson 相关系数	0.556**	0.240
	Spearman 相关系数	0.520*	0.385

注:*代表在0.05水平上显著相关;**代表在0.01水平上显著相关.

3 结论

3.1 研制了一种改善城市二级河道连通性的深控型水平推流曝气装置,利用该装置进行了原位试验.研究表明,河流在人为扰动下出现复氧激增现象,现有复氧系数经验公式低估了人为扰动下的复氧速率及复氧系数.

3.2 河流水体湍流动能和与复氧系数呈现显著正

相关关系.初步揭示了人为扰动下复氧激增机制,人为扰动提高了垂向湍流动能,促进垂向水体交换和溶解氧扩散,提升中层水体复氧;纵向湍流动能的增加亦有助于底部水体复氧.

参考文献:

[1] 王延明,李道季,方 涛,等.长江口及邻近海域底栖生物分布及与低氧区的关 系研究 [J]. 海洋环境科学, 2008,27(2):139-143.
Wang Y M, Li D J, Fang T, et al. Study on relation of distribution of benthos and hypoxia in Yangtze River Estuary and adjacent sea [J]. Marine Environmental Science, 2008,27(2):139-143.

[2] 赵海超,王圣瑞,赵 明,等.洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学, 2011,32(7):1952-1959.
Zhao H C, Wang S R, Zhao M, et al. Relationship Between the DO and the Environmental Factors of the Water Body in Lake Erhai [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2011,32(7):1952- 1959.

[3] 王宁宁,赵阳国,孙文丽,等.溶解氧含量对人工湿地去除污染物效果的影响 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018,48(6):24-30.
Wang NN, Zhao YG, Sun WL, et al. Effect of Dissolved Oxygen on the Removal of Pollutants in Artificial Wetland [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018,48(6):24-30.

[4] 王玉琳,汪 靓,华祖林.黑臭水体中不同浓度 Fe^{2+} 、 S^{2-} 与 DO 和水动力关系 [J]. 中国环境科学, 2018,38(2):627-633.
Wang Y L, Wang L, Hua Z L. The relationships of different concentration Fe^{2+} , S^{2-} with hydrodynamics, DO in black bloom water based on quantile regression method [J]. China Environmental Science, 2018,38(2):627-633.

[5] 李柏林,任晓玲,李 晔,等.溶解氧对单级颗粒污泥自养脱氮系统影响的模拟 [J]. 中国环境科学, 2019,39(12):5126-5133.
Li B L, Ren X L, Li Y, et al. Simulation study on the effect of dissolved oxygenon single-stage granular sludge autotrophic removal system [J]. China Environmental Science, 2019,39(12):5126-5133.

[6] 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 X, Wang Y G, Sun C H, et al. Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: A renew [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(4):1331-1340.

[7] 雒文生,李莉红,贺 涛.水体大气复氧理论和复氧系数研究进展与展望 [J]. 水利学报, 2003,34(11):64-70.
Luo W S, Li L H, He T. Advances and prospects in the research of water reaeration theory and reaeration coefficient [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(11):64-70.

[8] 李莉红,雒文生,贺 涛.静态水体大气复氧理论的实验研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2003,36(5):66-69.
Li L H, Luo W S, He T. Experimental research of reaeration theory in static water body [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(5):66-69.

[9] 李 然,李 嘉,李克锋.紊动水体大气复氧系数研究进展 [J]. 上海环境科学, 2000,19(4):176-179.
Li R, Li J, Li K L. Study Progress on Atmospheric Reaeration Coefficients of Turbulent Water Body [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2000,19(4):76-179.

- [10] 李 然,赵文谦,李 嘉,等.紊动水体表面传质系数的实验研究 [J]. 水利学报, 2000,31(2):60-65.
LI R, ZHAO W Q, LI J, et al. Experimental study on interfacial mass transfer coefficient of turbulent water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000,32(2):60-65.
- [11] 张宗才,张新申,代 红,等.紊动水体中气液传质过程分析(英文) [J]. 广西科学, 2004,11(4):327-331.
ZHANG Z C, ZHANG X S, DAI H, et al Studies on the Reaeration Process of Turbulent Water [J]. Guangxi Sciences, 2004,11(4):327-331.
- [12] Bennett J P, Rathbun R E. Reaeration in open-channel flow [M]. US: US Government Printing Office, 1972:17-21.
- [13] O'Connor D J, Dobbins W E. Mechanism of reaeration in natural streams [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1958,123(1):641-666.
- [14] Krenkel P A, Orlob G T. Turbulent diffusion and the reaeration coefficient [J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1962, 88(2):53-84.
- [15] Cadwallader T E, McDonnell A J. A multivariate analysis of reaeration data [J]. Water Research, 1969,3(10):731-742.
- [16] Thackston E L, Krenkel P A. Reaeration prediction in natural streams [J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1969,95(1):65-94.
- [17] Moog D B, Jirka G H. Stream reaeration in nonuniform flow: macroroughness enhancement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999,125(1):11-16.
- [18] Gonçalves J C S I, Silveira A, Júnior G B L, et al. Reaeration coefficient estimate: new parameter for predictive equations [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2017,228(8):307.
- [19] Ranjith S, Shivapur A V, Kumar P S K, et al. Assessment of reaeration equations for river tungabhadra, karnataka, India and generation of the refined equation [J]. Journal of Geography, Environment and Earth Science International, 2019,21(4):1-9.
- [20] Dong L, Wang Y, Dai C, et al. Prediction of aeration performance for inverted umbrella aerator based on dimensional analysis [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2019,52(4):369-376.
- [21] Sharma A, Devi T T, Kumar B. Turbulence in continuous flow surface aeration systems [J]. Water Science and Technology, 2017,75(5):1148-1157.
- [22] 张 晨,李 洁,高学平.一种用于城市景观河道的水体智能加速曝气装置 [P]. 天津:CN104150620A, 2014-11-19.
ZHANG C, LI J, GAO X P. Used in urban landscape water body of the river way acceleration intelligent aeration device [P]. Tianjin: CN104150620A, 2014-11-19.
- [23] 张朝能.水体中饱和和溶解氧的求算方法探讨 [J]. 环境科学研究, 1999,12(2):54-55.
ZHANG C N. Study on Calculation Method of Saturation Values of Dissolved Oxygen in Waters [J]. Research of Environmental Sciences, 1999,12(2):54-55.
- [24] 袁金华,王有乐.清水充氧实验中饱和和溶解氧值确定方法的探讨 [J]. 水资源保护, 2008,24(2):79-81.
YUAN J H, WANG Y L. Saturation values of dissolved oxygen in oxygenated clean water experiments [J]. Water Resources Protection, 2008,24(2):79-81.
- [25] 秦伯强,范成新.大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨 [J]. 中国环境科学, 2002,22(2):55-58.
QING B Q, FAN C X. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake [J]. China Environmental Science, 2002,22(2):55-58.
- [26] 李 彬,张 坤,钟宝昌,等.底泥污染物释放水动力特性实验研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008,23(2):126-133.
LI B, ZHANG K, ZHONG B C, et al. An experimental study on release of pollutants from sediment under hydrodynamic conditions [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008,23(2):126-133.
- [27] 王美丽,刘 春,白 璐,等.曝气对黑臭河道污染物释放的影响 [J]. 环境工程学报, 2015,9(11):5249-5254.
WANG M L, LIU C, BAI L, et al. Effect of aeration on pollutants release and removal in black-odor river [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015,9(11):5249-5254.
- [28] 周子振,黄廷林,李 扬,等.扬水曝气器对水源水库水质改善及沉积物控制 [J]. 中国环境科学, 2017,37(1):210-217.
ZHOU Z ZH, HUANG Y L, LI Y, et al. Improvement of water quality and sediment control by WLAs in a source water reservoir [J]. China Environmental Science, 2017,37(1):210-217.
- [29] Jha R, Ojha C S P, Bhatia K K S. Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river [J]. Hydrological Processes, 2001,15(6):1047-1060.

作者简介: 张 晨(1981-),男,天津人,教授,博士,主要从事水力调控及环境效应等研究.发表论文 40 篇.