

河流底泥耗氧量测量方法及耗氧量影响因素

邓思思¹, David Z. Zhu(朱志伟)^{1,2}

(1. 浙江大学 建筑工程学院 土木工程系, 浙江 杭州 310058; 2. 加拿大阿尔伯特大学 土木与环境工程系, 埃德蒙顿 T6G 2W2)

摘要: 底泥耗氧量占据河流溶解氧消耗的一大部分,几十年来国内外学者对不同类型河流的底泥耗氧量展开大量试验研究. 对国内外非悬浮底泥试验和悬浮底泥试验的主要试验方法进行总结,并阐述了不同方法各自的优缺点及相应的适用范围. 底泥中生物系统的作用、水温、底泥的有机质含量影响河流底泥中生物和化学氧化过程,从而影响底泥耗氧量. 另外,底泥的组成情况、上覆水体的流动速度和水深,以及上覆水体的水质等因素与底泥耗氧量也有一定相关性. 最后,在总结前人研究工作的基础上,提出了对代表性的水域底泥耗氧量的试验方法、底泥耗氧量主导影响因素以及河流中的底泥耗氧量作进一步研究.

关 键 词: 底泥耗氧量; 测量方法; 影响因素

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)04-0060-07

随着社会发展和生活水平的提高,人们对河流的生态环境给予越来越多的重视. 水体中溶解氧含量是影响水环境的重要因素,是作为评价水质的重要指标,对水体中生物的生长繁殖产生极大作用. 但是受到严重污染的河流,很多污染物积累在底部,大量消耗氧气,底泥耗氧量(sediment oxygen demand,简称SOD)占了河流总耗氧的大部分,在特定的水体中,该比例可高达50%^[1]. 由于底泥耗氧带来的河流低氧现象会大幅增加底泥污染物向河流的释放,影响水体水质,同时也可能促进有机物的厌氧分解,使河水发黑发臭. 另外暴雨时,由于大量的雨水进入河道,径流增大会冲刷底部,造成底泥悬浮,在一定程度上也加快暴雨时的氧气下降,从而可能导致水体鱼类缺氧死亡. 因此多年来水体的底泥耗氧量是学者关注的重点. 不少研究资料中提到利用不同试验或者模型研究各种水体,如海洋、湖泊的底泥耗氧量,并已有一部分结果应用于水质模型中. 不同河流的水力和底泥情况各有特点,本文针对国内外文献中对河流底泥耗氧量的研究情况进行了总结.

1 底泥耗氧量的测量

1.1 非悬浮底泥试验

众多研究底泥耗氧量的试验都是针对底泥没有悬浮的情况. 到目前为止,仍无统一的底泥耗氧量测量标准,因此不同文献都有各自试验装置和测量方法,但大致上用来测量SOD的方法,可以分为试验室测量和现场测量.

试验室试验比较常见是柱状底泥试验,如上海苏州河^[2]和台湾新店溪^[3]的试验均使用了该方法. 柱状底泥试验采泥器管径5~15 cm不等,试验时柱体密封,根据情况运用采样点的原水或是纯水作为上覆水体,通常用电磁搅拌机搅拌或是用水泵进行柱内水循环使上覆水体均匀混合,再记录柱内溶解氧变化. 另外有一种在试验室进行的底泥耗氧量试验方法需要具备一个矩形水槽,试验时在水槽底部铺上一定厚度的底泥

收稿日期: 2012-12-24

基金项目: 水体污染控制与治理国家科技重大水专项课题—河网城市雨水径流与生态利用关键技术研究示范工程(2011ZX07301-004)

作者简介: 邓思思(1987-),女,广西贵港人,硕士研究生,主要从事河流水环境治理相关研究. E-mail: karce@zju.edu.cn

(约5 cm厚),上覆水与空气隔绝情况下从底泥上部流过,这种试验方法模拟了真实河道的水流与底泥的情况。

现场的底泥有连续流测量法和循环流测量法^[4]。现场的试验需要用一空仓覆盖部分底泥,不同的试验中使用的仓体设计各有特点,圆柱仓、矩形仓、三角仓,或圆顶仓均有应用^[4-5]。连续流测量法利用动力设备将河水注入测试仓内,水流经过底面,减少溶解氧,这样可根据进出水溶解氧变化利用SOD的定义进行计算。循环流测量法则是用测试仓密封一定面积的底泥和一定量的上覆水后,用动力设备进行仓内水体循环,然后记录仓体内溶解氧变化用于计算SOD,但必须设立空白样本,在计算时SOD值减去由水体消耗的溶解氧量(由空白样本计算),此方法在俄亥俄州环境保护总署(Ohio EPA)的指南中有较为详细的说明^[6]。另外比较新颖的一种现场方法是将ADV声学多普勒流速仪测量的水体紊动和氧气在水与泥界面的梯度变化联系起来^[7],从而通过用水体的紊动值计算底泥耗氧量。实验室测量的优点是测量条件比较容易控制,不受太多外力因素影响,而且装置相对现场测量简单方便,可行性高;缺点是在移动底泥时造成的不可逆扰动会影响试验结果,加上不能很好地模拟现场水体和底泥的真实情况。有学者认为现场试验得到的结果更为准确^[4]。非悬浮底泥耗氧量试验方法还可以按底泥样品是否经过扰动来分类,有非扰动样和扰动样(混合样)试验。进行扰动底泥样试验的部分原因是受采样仪器限制,使用的挖泥器不能很好地保持底泥原样,在将底泥转移到试验装置时会产生比较大的扰动,另一部分原因则是为了研究底泥的组成类型或是有机物含量的影响,人为加入外来物质或者进行人工配成底泥样。不过扰动的底泥或人工配比底泥因为没有反映底泥经过自然的沉淀过程,其反应过程与真实情况相差很大,并不能很好地表示实际底泥对氧气的消耗。按测量的结果分类,底泥耗氧量试验可以分为扩散底泥耗氧量试验和总底泥耗氧量试验^[8],这个分类主要是源自试验设置。扩散耗氧量一般是利用微电极描绘溶解氧在水/泥界面的分布,然后基于费克定理,利用如下公式^[9]计算SOD:

$$SOD = \varphi D_s \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (1)$$

式中: φ 为底泥孔隙率; D_s 为溶解氧扩散系数; $\left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0}$ 为底泥和水界面上的溶解氧梯度。

这个数值主要反映的是水泥界面上溶解氧从孔隙水扩散的通量。总底泥耗氧量则是根据底泥整体上覆水溶解氧含量变化计算出底泥耗氧量,反映的是底泥总体的耗氧量。总体上,扩散底泥耗氧量值偏小,总底泥耗氧量偏大,原因可能是总底泥耗氧量包含底栖生物作用和藻类或其他微生物群作用的影响,但有学者指出在浅水环境,扩散耗氧量和总耗氧量并不会有很大差别^[8]。在进行底泥耗氧量的测量时,因为这两种方法各有优势,可根据研究的内容进行选择。但利用微电极测量溶解氧时数值偏小,使用这个方法时要注意。

1.2 再悬浮底泥试验

虽然人们很早就认识到底泥在某种情况下的再悬浮可能使水质恶化,但并没有很多的数据来说明这一点。而且底泥的再悬浮情况研究多见于海洋和湖泊,对河流底泥没有太多的关注。河流底泥再悬浮的原因有疏浚时对底泥的扰动,更多的是暴雨时大径流对河床的冲刷。曾有学者用类似测量活性污泥体积耗氧量的方法,将底泥完全悬浮来模拟底泥对水体溶解氧的影响^[10]。在这种情况下,底泥的耗氧量会远远超过实际数值,因为在实际河流中,底泥未必完全悬浮。在肯尼特和埃文河的水质变化情况研究中^[11],用实验室水槽模拟流量增加时底泥再悬浮,结果表明悬浮底泥造成溶解氧量急剧下降。在不同的底泥组成中,悬浮的情况也不尽相同^[12]:砂状底泥悬浮时会有矿石分层;土壤细腻的底泥上覆水变得浑浊而且水体固体悬浮物很多。

2 底泥耗氧量的影响因素

文献中,底泥耗氧量通常指的是发生在底泥中生物和化学氧化过程中消耗水体溶解氧的量^[13]。这两个过程决定了大部分主要影响底泥耗氧量的因素,例如底泥中生物系统的作用、水温 and 底泥的有机质含量。另外底泥的组成情况、上覆水体的流动速度和水深及水体的水质等也与底泥耗氧量有不同程度的相关性。

2.1 底泥生物作用

底泥生物作用与底泥的氧气消耗量密切相关,不少文献通过测量底泥的耗氧量来表示底部生物群的呼吸作用.底泥生物作用对底泥中溶解氧影响主要表现为:底泥微生物利用氧气进行新陈代谢,分解有机物;同时,底泥是多种底栖生物生存活动的空间,底泥中生物活动对底泥的扰动会促使底泥中物质(如氧气、有机物,还有一些氨氮、硝酸盐等化学组分等)与水体交换量增加,加速了对水体溶解氧的消耗.底泥中生物数量、种群类型、生物活性等因素与底泥与生物作用密切相关,从而影响底泥耗氧量.试验中王敏等曾将底泥的微生物全部去除再进行试验,发现微生物对 SOD 有一定贡献^[2].Wendt-Potthoff 在阿根廷某火山河流中的研究里,用 HgCl_2 抑制底泥生物活性,结果减少了多达 80% 的氧气消耗^[14].可见底泥中生物作用的影响极大.底泥的生物扰动现象在湖泊和海洋中比较常见^[15],但在河流或水渠中也可能存在.蜉蝣对莱茵河底泥影响的研究中,P. Stief 发现底泥表面会形成洞穴,存在洞穴的底泥表面氧气通量比没有洞穴的大,氧气消耗增加^[16].

2.2 有机物的矿化

底泥中有机物的矿化作用与耗氧量密切相关,是底泥耗氧量的主要原因.一般而言,高有机物含量的底泥,耗氧量都比较高,表 1 总结了一部分河流中底泥有机质含量及相应的底泥耗氧量,从表中看出,有机质含量相类似的底泥,对氧气的消耗量比较相近.在不同的研究中,有机质与底泥耗氧量相关性不太相同:有研究表明,溶解氧的消耗量与有机碳的含量呈指数正相关的关系^[8];但 Todd 在美国东南部的平原河流研究中发现 SOD 与底泥总有机碳(TOC)含量有一定线性关系,相关系数为 0.36,他们认为 TOC 可以用于预测 SOD^[17],这个线性关系运用地球统计分析,预测 SOD 的分布^[18].虽然有研究将 TOC 和 SOD 联系起来,但也有部分文献提出总有机物含量与 SOD 关系不大,有机物的组成或质量才是影响底泥耗氧的关键^[19],颗粒中易分解(低 C/N)有机物提高,会相应增加底泥生物有氧呼吸,从而提高底泥耗氧量.

表 1 文献中有机质含量与底泥耗氧量相应数据

Tab. 1 Reported organic matter content and SOD values

有机质含量/%	底泥耗氧量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	底泥采样地点	文献来源
6.2 ~ 9.4	2.0 ~ 2.8	西班牙南部 Palmones River 河口	V. Clavero 等(2000) ^[20]
2.8 ~ 18.3	1.16 ~ 2.15	美国卡罗莱纳州的 5 条小河流	T. A. Macpherson 等(2007) ^[21]
6 ~ 11	1.7 ~ 5.2 *	中国香港城门河	G. H. Chen 等(1999) ^[22]
5.3 ~ 18.0	0.2 ~ 1.7	来自多条河流	W. A. House(2003) ^[9]

注: * 表示此数据与其他试验不同,是在不同温度下测得的数值.

2.3 水 温

水温对底泥耗氧量的影响极其明显.一方面因为在底泥生物过程中,温度的升高刺激微生物活性,使之新陈代谢加快,增加耗氧量;另外某些化学氧化过程也可能受温度上升影响.圣约翰斯河的研究中,L. M. Malecki 等学者将底泥耗氧量分成快速耗氧和缓慢耗氧部分考虑^[23],发现快速耗氧(他们认为是化学氧化耗氧)随季节变化不大,但缓慢耗氧(生物和化学作用同时消耗溶解氧)则在夏季时有明显的增加,原因可能是夏季的水体含有较多的可进行生物氧化物质.不少学者对底泥耗氧量的季节性变化进行了监测,监测结果普遍表明夏季的底泥耗氧量相对较大:如基隆河表现出夏季 SOD 高^[24],泰晤士河的淤泥状底泥的 SOD 有明显的季节性^[25].G. H. CHEN^[22],马晓磊^[26]等学者分别用不同的试验装置验证了 SOD 与温度的关系.S. C. Chaprar 研究给出了底泥耗氧量与温度的相关公式^[27]: $\text{SOD} = \text{SOD}_{20} \theta^{(T-20)}$,其中: SOD_{20} 为温度在 20℃ 时的底泥耗氧量; θ 为温度相关系数,通常取 1.065^[28];T 为水温(℃).但这个公式与之前提到的两个试验(G. H. CHEN^[22],马晓磊^[26])测定的结果相符情况不是特别好,因此温度对 SOD 的影响仍需进一步研究.

2.4 底泥的组成情况

底泥的组成情况根据底泥颗粒大小,一般可以分为砂砾、粉土、黏土.表 2 统计了不同底泥情况时河流的

SOD 变化情况. G. N. Rees 等^[19]研究发现高耗氧量的地点黏土质的含量比较多, B. C. Utley 等^[29]在阿拉普哈河的底泥耗氧量研究中提到 SOD 和砂子含量呈反相关(除去某些点), 若样本量更多的话, 反相关性更明显. 这些研究都指出细腻的底泥颗粒, 比如组成成分是黏土和粉土质土的淤泥状底泥(颗粒小于 63 μm)比砂砾状的底泥测出的底泥耗氧量更高. 耗氧量在砂粒状底泥中低的主要原因是: 细颗粒的底泥土更容易吸附水体中的有机颗粒^[24,30], 有机质在底泥中积累富集, 从而为底泥生物的生长繁殖营造了良好的环境, 生物作用引起底泥耗氧量的增加. 而砂砾状的底泥处于河中心, 水流较快, 有机物颗粒碎屑难沉淀, 不利于微生物种群生存^[30], 也不会有较大的底泥耗氧. 有学者提出河口底泥耗氧量空间分布情况的控制因子是底泥类型^[24], 不同地点底泥耗氧量的分布情况在某种程度上可以由底泥的类型推断.

表 2 部分河流的 SOD 值
Tab. 2 Reported SOD values in some rivers

河 流	底泥情况	SOD/(g ·m ⁻² ·d ⁻¹)	国家/地区
潮汐河流 ^[21]	砂质(平均粒径 114. 7 ~ 175 μm)	1. 31 ~ 1. 80	美国
	淤泥质(平均粒径 10. 0 ~ 10. 6 μm)	1. 16 ~ 2. 15	
香港城门河 ^[22]	砂质土(77% 砂)	1. 7 ~ 5. 2	中国香港
科罗拉多河 ^[10]	砂壤土	0. 36 ~ 1. 36	美国
	粉土	0. 88	
	砂土	0. 14 ~ 0. 44	
	砂质黏壤土	0. 44	
	粉砂质黏壤土	0. 42 ~ 0. 79	
	粉质砂土	0. 13 ~ 1. 20	
	粉黏土	0. 53 ~ 0. 87	
阿拉普哈河(农业) ^[29]	78% 砂	1. 7	美国
阿拉普哈河(森林) ^[29]	92% ~ 99% 砂	0. 1 ~ 0. 6	
利特尔河(农业) ^[29]	93% 砂	1. 0	
利特尔河(森林) ^[29]	89% 砂	1. 8	
苏望尼河流域上游(森林) ^[29]	91 ~ 94% 砂	2. 0 ~ 2. 3	
布罗肯河 ^[19]	<350 μm 颗粒占 20%	0. 27 ~ 0. 62	澳大利亚
奥文斯河 ^[19]	<350 μm 颗粒占 67%	0. 13 ~ 0. 48	
墨累河 ^[19]	<350 μm 颗粒占 85%	0. 18 ~ 1. 44	
泰晤士河口 ^[25]	极细砂	0. 11 ~ 4. 84	英国
	粉砂/黏土	0. 04 ~ 5. 74	
	细砂	0. 38 ~ 1. 65	
	细于极细砂	0. 41 ~ 1. 92	
苏州河 ^[2]		1. 38 ~ 4. 43	中国
宁波市内河 ^[26]		0. 33 ~ 2256. 00	中国

2.5 水 质

水质对底泥耗氧量有不同程度的影响. 水体可供底泥进行化学生物作用的氧气量是 SOD 的限制因素. 在部分试验室试验中, 上覆水体中氧气的补充减少, 引起 SOD 测量数值减小^[31]. 在美国的田纳西州的现场试验中, SOD 与起始溶解氧有显著的相关性, 起始溶解氧高的地点, SOD 确实偏高^[17]. M. B. Matlock 等指出溶解氧低于 2 mg/L 时耗氧量增加会受限制^[10]. 在美国大西洋地区研究中, 河流底部耗氧与溶解性有机碳(DOC)的浓度有显著相关性^[32], 这从侧面表现了耗氧量与生物活动息息相关: 最初溶解氧的浓度增加会刺激大部分生物活动, DOC 给底泥生物活动提供充足养分时, 同时生物大量地消耗氧气. 水体中含氮和含磷量在某种程度上也与 SOD 有一定相关性, 但是这些相关性并未在所有研究中都显示^[32].

2.6 流速与水深

上覆水体的水力情况在研究底泥耗氧量的时候是很多学者关注的重点, 水动力和水深都会对底泥消耗

氧气的速度有不同程度影响。水动力的影响比较明显,很多试验和理论模型都表明,底泥耗氧量随着水/泥界面上剪切流速的上升而增加,然后逐渐趋于一个最大值。有学者认为,这个现象的出现与氧气的扩散边界层相关,速度增加,边界层传输的氧气增多,然后被迅速消耗,直至最终底泥生物与氧气的反应限制溶解氧的消耗量进一步增加^[9,33]。另外有学者从边界层紊动的角度探讨氧气在水/泥界面的传输,这个同样可以用剪切流速表征^[34]。不过以上的理论和试验都是基于低流速的条件下,高流速引起底泥再悬浮的情况,目前还没有详尽的观点与理论,只有部分关于暴雨径流带动底泥悬浮进而对 SOD 的研究。在他们的研究中,悬浮固体(SS)是一个重要参数。在试验室水槽试验中,C. Neal^[11]等同时测量了悬浮固体量的增加和 DO 的下降。在芝加哥泡泡河(Bubbly Creek)的现场试验中,学者们建立了一个模型,此模型利用 SS 计算底泥悬浮条件下氧气下降速率,然后计算底泥耗氧量;该模型较好地模拟了测量结果。水深同样对 SOD 有一定影响,A. H. Ziadat 等^[35]在浅水河流中进行了现场试验,提出水深比流速更能影响 SOD,原因在于浅水通常会有较快的流速,这样有机物更容易扩散到水体内部影响水体耗氧,而深水中流速小,有机质易沉积,提高底泥耗氧。

3 结 语

底泥对水环境有显著影响,因此,研究人员对底泥的研究越来越重视,研究也越来越深入。根据目前国内外的一些研究成果,一般有机质含量高的底泥耗氧量都在 $1 \text{ g/m}^2/\text{d}$ 左右或者更高,这个数值在进行水质模拟时有一定的参考价值。虽然前人关于底泥耗氧量进行了大量研究,但还有一些方面有待进一步探索:

(1) 目前最常见试验室方法是圆柱底泥样试验,现场试验则多采用循环流试验。然而两种方法通常并不同时运用在同一流域内,因此数据的可比性较差。若对代表性的水域进行试验室以及现场试验,探讨两者结果的差异性,以及确定该水域合适的试验方法,将有利于今后该水域及具有类似底泥的水域的研究。

(2) 整个底泥消耗溶解氧过程非常复杂,涉及了化学生物反应,虽然不少文献已经表明了众多因素影响底泥耗氧量。但在何种条件下,在何种类型的河流中,什么样的影响因素占主导地位并没有相对充足的研究证据。因此,应针对主导因素开展更多研究。

(3) 国内学者虽然也对水体底泥进行了不少研究,但针对河流底泥耗氧量的不多,对悬浮底泥耗氧量的研究更不多见。在一些平原河网地带,由于水体流动性差,底泥沉积严重,底泥易出现再悬浮,因此对该地区进行底泥耗氧量的研究十分必要。

参 考 文 献:

- [1] HU W F, LO W, CHUA H, et al. Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong[J]. *Environment International*, 2001, 26(5): 369-375.
- [2] 王敏, 张明旭. 苏州河武宁路断面底泥需氧量的测定[J]. *上海环境科学*, 2003, 22(6): 418-422. (WANG Min, ZHANG Min-xu. Sediment oxygen demand at Wuning section of Suzhou creek[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2003, 22(6): 418-422. (in Chinese))
- [3] LIU W C, CHEN W B. Monitoring sediment oxygen demand for assessment of dissolved oxygen distribution in river[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(9): 5589-5599.
- [4] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 武汉东湖泥沙需氧量现场测试[J]. *水利学报*, 2007, 38(11): 1296-1300. (LIU Cheng, WANG Zhao-yin, HE Yun, et al. In situ measurement of sediment oxygen demand at the East Lake in Wuhan City[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(11): 1296-1300. (in Chinese))
- [5] YUNG K. Sediment oxygen demand in coastal waters[D]. Hong Kong: University of Hong Kong, 1994.
- [6] KASICH J, TAYLOR G M, GOVERNOR L. Sediment sampling guide and methodologies (3rd Edition) (March 2012)[S].
- [7] MISKEWITZ R J, FRANCISCO K L, UCHRIN C G. Comparison of a novel profile method to standard chamber methods for measurement of sediment oxygen demand[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2010, 45(7): 795-802.
- [8] LANSARD B, RABOUILLE C, DENIS L, et al. In situ oxygen uptake rates by coastal sediments under the influence of the Rhone River (NW Mediterranean Sea)[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1501-1510.

- [9] HOUSE W A. Factors influencing the extent and development of the oxic zone in sediments[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 63(3): 317-333.
- [10] MATLOCK M D, KASPRZAK K R, OSBORN G S. Sediment oxygen demand in the Arroyo Colorado river[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(2): 267-275.
- [11] NEAL C, HOUSE W A, JARVIE H P, et al. The water quality of the River Dun and the Kennet and Avon Canal[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(1-2): 155-170.
- [12] WATERMAN D M, WARATUKE A R, MOTTA D, et al. In situ characterization of resuspended-sediment oxygen demand in Bubbly Creek, Chicago, Illinois[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, 137(8): 717-730.
- [13] GARCIA M H. Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling and practice[M]. ASCE, 2008.
- [14] WENDT-POTTHOFF K, KOSCHORRECK M. Functional groups and activities of bacteria in a highly acidic volcanic mountain stream and lake in Patagonia, Argentina[J]. *Microbial Ecology*, 2002, 43(1): 92-106.
- [15] ZHANG L, SHEN Q S, HU H Y, et al. Impacts of corbicula fluminea on oxygen uptake and nutrient fluxes across the sediment-water interface[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2011, 220(1-4): 399-411.
- [16] STIEF P, NAZAROVA L, De BEER D. Chimney construction by Chironomus riparius larvae in response to hypoxia: microbial implications for freshwater sediments[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(4): 858-871.
- [17] TODD M J, VELLIDIS G, LOWRANCE R R, et al. High sediment oxygen demand within an instream swamp in southern Georgia: Implications for low dissolved oxygen levels in coastal blackwater streams[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(6): 1493-1507.
- [18] TODD M J, LOWRANCE R R, GOOVAERTS P, et al. Geostatistical modeling of the spatial distribution of sediment oxygen demand within a coastal plain blackwater watershed[J]. *Geoderma*, 2010, 159(1-2): 53-62.
- [19] REES G N, BOWEN P M, WATSON G O. Variability in benthic respiration in three southeastern Australian lowland rivers[J]. *River Research and Applications*, 2005, 21(10): 1147-1156.
- [20] CLAVERO V, IZQUIERDO J J, FERNANDEZ J A, et al. Seasonal fluxes of phosphate and ammonium across the sediment-water interface in a shallow small estuary (Palmones River, southern Spain)[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2000, 198: 51-60.
- [21] MACPHERSON T A, CAHOON L B, MALLIN M A. Water column oxygen demand and sediment oxygen flux: patterns of oxygen depletion in tidal creeks[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 586: 235-248.
- [22] CHEN G H, LEONG I M, LIU J, et al. Study of oxygen uptake by tidal river sediment[J]. *Water Research*, 1999, 33(13): 2905-2912.
- [23] MALECKI L M, WHITE J R, REDDY K R. Nitrogen and phosphorus flux rates from sediment in the Lower St. Johns River estuary[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(4): 1545-1555.
- [24] LIU W C. Measurement of sediment oxygen demand for modelling dissolved oxygen distribution in tidal Keelung River[J]. *Water and Environment Journal*, 2009, 23(2): 100-109.
- [25] TRIMMER M, NEDWELL D B, SIVYER D B, et al. Seasonal benthic organic matter mineralisation measured by oxygen uptake and denitrification along a transect of the inner and outer River Thames estuary, UK[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 197: 103-119.
- [26] 马晓磊, 徐继荣, 张德民, 等. 城市内河强还原性沉积物耗氧及相关因素研究[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(12): 1499-1505. (MA Xiao-lei, XU Ji-rong, ZHANG De-min, et al. Research on sediment oxygen demand and related factors for strong reductive sediments in urban rivers[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(12): 1499-1505. (in Chinese))
- [27] CHAPRA S C. Surface water-quality modeling[M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [28] THOMANN R V, MUELLER J A. Principles of surface water quality modeling and control[M]. New York: Harper & Row, 1987.
- [29] UTLEY B C, VELLIDIS G, LOWRANCE R, et al. Factors affecting sediment oxygen demand dynamics in blackwater streams of Georgia's coastal plain[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(3): 742-753.

- [30] PARR L B, MASON C F. Causes of low oxygen in a lowland, regulated eutrophic river in Eastern England[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 321(1-3): 273-286.
- [31] INOUE T, NAKAMURA Y. Effects of hydrodynamic conditions on sediment oxygen demand: experimental study based on three methods[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(11): 1161-1170.
- [32] HILL B H, HERLIHY T, KAUFMANN P R, et al. Sediment microbial respiration in a synoptic survey of mid-Atlantic region streams[J]. *Freshwater Biology*, 1998, 39(3): 493-501.
- [33] MACKENTHUN A A, STEFAN H G. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Experiments[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, 124(3): 222-230.
- [34] O'CONNOR B L, HONDZO M. Dissolved oxygen transfer to sediments by sweep and eject motions in aquatic environments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(2): 566-578.
- [35] ZIADAT A H, BERDANIER B W. Stream depth significance during in-situ sediment oxygen demand measurements in shallow streams[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 631-638.

A review of methods for sediment oxygen demand measurement and its influencing factors

DENG Si-si¹, David Z. ZHU^{1,2}

(1. *College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*; 2. *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB T6G 2W2, Canada*)

Abstract: Sediment oxygen demand (SOD) accounts for significant oxygen sink in rivers. A few studies of different streams around the world have been conducted. This review introduces the major experiment methods to measure the sediment oxygen demand in non-suspended sediments and suspended sediments. It also discusses the advantages and disadvantages of different methods and their applications. Microbial process, temperature and content of organic matter affect both biological and chemical oxidation, and consequently they influence the SOD. In addition, the particle size of sediment, flow velocity, water depth and water quality are related to SOD. Finally, on the basis of the previous works, further studies on experiment methods of typical waters, dominant influence factors and sediment oxygen demand in rivers are proposed in this study.

Key words: sediment oxygen demand (SOD); measurement techniques; influencing factors